



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2015-0043594

(43) 공개일자 2015년04월23일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G01B 17/04 (2006.01) G01M 7/08 (2006.01)

G01N 29/14 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2013-0121289

(22) 출원일자 2013년10월11일

심사청구일자 2013년10월11일

(71) 출원인

세종대학교산학협력단

서울특별시 광진구 능동로 209 (군자동, 세종대학교)

(72) 발명자

이현중

서울특별시 용산구 한남동 21 대림아르빌 아파트 101동 301호

로살레스 크리스티나 아모르

서울 광진구 능동로 209, 409호 (군자동, 세종대학교 충무관)

(74) 대리인

유병욱, 한승범, 홍성욱, 심경식

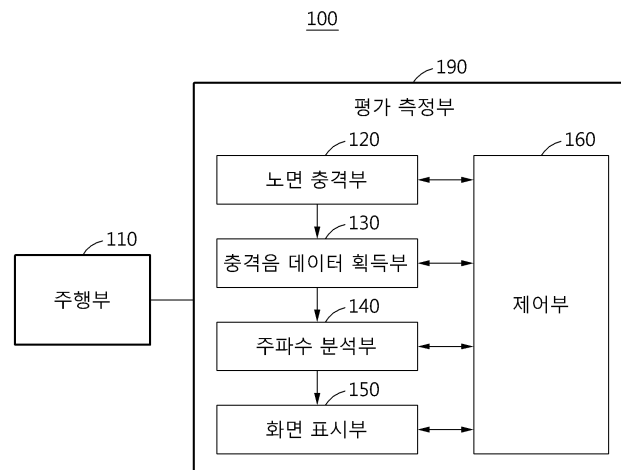
전체 청구항 수 : 총 16 항

(54) 발명의 명칭 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 시스템 및 방법과, 그 방법을 수행하기 위한 프로그램이 기록된 기록매체

(57) 요약

본 발명에 따른 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 시스템은, 탐지 대상 노면 위를 주행하는 주행부; 및 상기 주행부에 의해 건인되어 상기 노면의 손상 여부를 측정하는 평가측정부;를 포함하며, 상기 평가측정부는, 상기 노면을 타격하는 노면충격부; 상기 노면충격부에 의해서 상기 노면에서 발생하는 충격음을 획득하는 충격음 데이터 획득부; 및 상기 충격음을 시간 영역에서 주파수 영역으로 변환하는 주파수 분석부;를 포함할 수 있다. 상기와 같이 구성함으로써, 교통흐름을 방해하지 않으면서 노면의 열화와 노면포장의 충분리 상태를 신속하게 평가할 수 있고, 신뢰성을 확보할 수 있다.

대표도 - 도1



## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

탐지 대상 노면 위를 주행하는 주행부; 및  
상기 주행부에 의해 견인되어 상기 노면의 손상 여부를 측정하는 평가측정부;를 포함하며,  
상기 평가측정부는,  
상기 노면을 타격하는 노면충격부;  
상기 노면충격부에 의해서 상기 노면에서 발생하는 충격음을 획득하는 충격음 데이터 획득부; 및  
상기 충격음을 시간 영역에서 주파수 영역으로 변환하는 주파수 분석부;  
를 포함하는, 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 시스템.

#### 청구항 2

제1항에 있어서,  
상기 노면충격부는 상기 충격음이 가청주파수를 가지도록 상기 노면을 타격하는 것을 특징으로 하는 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 시스템.

#### 청구항 3

제2항에 있어서,  
상기 주파수 분석부는 상기 노면의 손상 여부에 따른 주파수 스펙트럼의 진폭 거칠기를 비교하여 손상 여부를 판단하는 것을 특징으로 하는 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 시스템.

#### 청구항 4

제3항에 있어서,  
상기 주파수 분석부는 상기 노면의 손상 여부에 따른 주파수 스펙트럼의 진폭 거칠기 차이를 정량화하기 위해 주파수 스펙트럼 진폭의 높이 변화를 계산하는 것을 특징으로 하는 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 시스템.

#### 청구항 5

제4항에 있어서,  
상기 높이 변화는 상기 노면이 손상된 경우가 손상되지 않은 경우 보다 작은 것을 특징으로 하는 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 시스템.

#### 청구항 6

제1항 내지 제5항 중 어느 한 항에 따른 시스템을 이용한 노면 손상 탐지 방법에 있어서,  
상기 노면의 충격음 데이터 획득부를 획득하는 단계;

상기 충격음 데이터로부터 충격신호를 추출하는 단계;  
상기 충격신호에 고속 푸리에 변환을 적용하는 단계;  
변환된 상기 충격신호의 주파수 응답 특성을 분석하는 단계; 및  
상기 주파수 응답 특성으로부터 상기 노면의 손상 여부를 판단하는 단계;  
를 포함하는, 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 방법.

#### 청구항 7

제6항에 있어서,  
상기 주파수 응답 특성을 분석하는 단계는,  
주파수 영역으로 변환된 충격신호의 주파수 스펙트럼의 거칠기를 분석하는 것을 특징으로 하는 충격음을 이용한  
노면 손상 탐지 방법.

#### 청구항 8

제7항에 있어서,  
상기 주파수 응답 특성을 분석하는 단계는,  
상기 주파수 스펙트럼의 진폭 거칠기 차이를 정량화하기 위해 주파수 스펙트럼 진폭의 높이 변화를 구하는 것을  
특징으로 하는 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 방법.

#### 청구항 9

제1항 내지 제5항 중 어느 한 항에 따른 시스템을 이용한 노면 손상 탐지 방법에 있어서,  
상기 노면에 충격음을 가하는 단계;  
상기 노면에서 발생하는 충격음의 충격음 데이터를 획득하는 단계;  
상기 충격음 데이터의 샘플링 주파수를 결정하는 단계;  
상기 충격음 데이터를 시간 영역에서 주파수 영역으로 변환하는 단계;  
주파수 영역에서 상기 충격음 데이터의 주파수 스펙트럼을 분석하는 단계;  
상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화를 구하는 단계; 및  
상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화 크기를 분석하는 단계;  
를 포함하는, 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 방법.

#### 청구항 10

제9항에 있어서,  
상기 주파수 스펙트럼을 분석하는 단계는 주파수에 대한 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 변화 정도를 분석하는 것  
을 특징으로 하는 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 방법.

#### 청구항 11

제10항에 있어서,

상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화를 구하는 단계는 주파수에 대한 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 변화 정도를 정량화하기 위해 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화를 구하는 것을 특징으로 하는 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 방법.

#### 청구항 12

제11항에 있어서,

상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화를 구하는 단계는 상기 높이 변화가 주파수에 대한 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 변화 정도 보다 주파수 스펙트럼의 진폭 거칠기가 노면의 손상 여부를 잘 표현하는지 여부를 판단하는 것을 특징으로 하는 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 방법.

#### 청구항 13

제12항에 있어서,

상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화를 구하는 단계는 적용 샘플링 주파수를 변경하여 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화를 구하거나, 상기 샘플링 주파수에 대해 반복적으로 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화를 구하는 것을 특징으로 하는 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 방법.

#### 청구항 14

제11항에 있어서,

상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화 크기를 분석하는 단계는 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화의 평균 및 표준편차를 이용하는 것을 특징으로 하는 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 방법.

#### 청구항 15

제11항에 있어서,

상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화 크기를 분석하는 단계는 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화 크기를 비교하여 상기 노면의 손상 여부를 판단하는 것을 특징으로 하는 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 방법.

#### 청구항 16

제9항에 기재된 방법을 수행하기 위한 프로그램이 기록된 기록매체.

### 발명의 설명

#### 기술 분야

[0001] 본 발명은 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 시스템 및 방법과, 그 방법을 수행하기 위한 프로그램이 기록된 기록매체에 관한 것이다.

#### 배경 기술

[0002] 콘크리트 노면 또는 콘크리트 교량 바닥판의 열화로 인한 손상을 조사하기 위하여 육안조사를 포함하여 다양한 파괴 및 비파괴 평가 방법이 사용되고 있다.

[0003] 이러한 종래의 방법들에는 도면 또는 콘크리트 바닥판의 일부 구간에서 코어 샘플(core sample)을 채취하여 열

화된 깊이 및 열화상태 등을 조사하는 파괴시험 방법과 다양한 물리, 역학적 원리를 이용하여 교량 바닥판을 파손하지 않고 조사하는 비파괴시험 방법이 있다.

[0004] 대표적인 비파괴시험 방법인 망치 타격법(hammer hitting)과 체인 드래그법(chain dragging)은 망치로 바닥판을 타격하거나 체인을 끄는 동안 노면 또는 바닥판에서 발생하는 소리(음향)로부터 열화 또는 층분리 상태를 평가하는 것이다.

[0005] 그 외에, 전자기파의 원리를 이용한 지표투과레이더(Ground Penetrating Radar, GPR) 측정법, 타격시 전파속도를 이용한 임팩트 에코법(Impact Eco, IE), 온도차를 이용한 열화상 카메라(Infrared Thermography, IR) 측정법, 전위차를 이용한 하프셀 포텐셜(Half-Cell Potential) 측정법 등 다양한 종류의 비파괴 검사 방법이 최근 들어서 해외에서 연구개발 및 적용되고 있다.

[0006] 해외 연구결과에 따르면, 종래의 비파괴시험 방법들 중 체인 드래그법이 지표투과레이더와 같은 첨단 장비를 사용한 방법보다 신뢰성이 더 높은 것으로 알려져 있으며, 체인 드래그법에 데이터 획득 시스템(Data Acquisition System, DAQ)을 추가하여 보다 간편하고 객관적으로 시험을 수행할 수 있는 자동 체인드래그 시스템도 개발되었다.

[0007] 하지만, 이러한 기존의 체인 드래그법도 점검자가 수동으로 카트를 밀면서 시험을 수행하기 때문에 넓은 범위를 조사하기에는 비효율적일 뿐만 아니라 교통 흐름에 방해가 되고 점검자 및 이용자의 안전성도 떨어지는 실정이다.

[0008] 또한, 기존의 망치 타격법도 점검자의 청각에 의존하기 때문에 점검자에 따라 측정 결과가 다르다는 문제가 있다. 뿐만 아니라, 망치 타격에 의해 발생하는 소리(음향) 또는 충격음은 발생한 후 얼마되지 않으면 없어지는 한계가 있다.

[0009] 기존의 망치 타격법은 아스팔트 콘크리트와 강화 콘크리트의 층으로 형성된 노면 또는 교면에 적용하는 경우에 아스팔트 콘크리트와 강화 콘크리트 사이의 상태를 판단하거나 측정할 수 없는 한계도 있다.

[0010] 한편, 한국공개특허 제10-2006-0102581호에 "교량 및 노반의 상태평가를 위한 하중제하/측정 자동화시스템"이 개시되어 있으나, 이 시스템은 노면을 주행하면서 노면에 충격을 가한 후 얻은 소리를 주파수 분석하는 것은 아니다.

[0011] 따라서, 종래의 망치 타격법과 같은 원리를 이용하면서도 소리를 주파수의 관점에서 분석할 수 있는 노면 손상 탐지 기술에 대한 필요성이 커지고 있다.

## 발명의 내용

### 해결하려는 과제

[0012] 본 발명은 주파수 응답특성에 기반하여 교통 차단 없이 신속하게 노면 또는 교량 바닥판의 건전도를 평가할 수 있는 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 시스템 및 방법과, 그 방법을 수행하기 위한 프로그램이 기록된 기록매체를 제공한다.

[0013] 본 발명은 아스팔트 콘크리트와 강화 콘크리트 사이의 경계면에서의 손상 여부도 판단할 수 있는 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 시스템 및 방법과, 그 방법을 수행하기 위한 프로그램이 기록된 기록매체를 제공한다.

[0014] 본 발명은 사람이 인지할 수 있는 가청대역의 주파수 또는 저주파수대역의 신호를 이용하여 노면의 손상 여부를 판단할 수 있는 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 시스템 및 방법과, 그 방법을 수행하기 위한 프로그램이 기록된 기록매체를 제공한다.

### 과제의 해결 수단

[0015] 상기한 과제를 달성하기 위한 본 발명에 따른 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 시스템은, 탐지 대상 노면 위를 주행하는 주행부; 및 상기 주행부에 의해 견인되어 상기 노면의 손상 여부를 측정하는 평가측정부;를 포함하며, 상기 평가측정부는, 상기 노면을 타격하는 노면충격부; 상기 노면충격부에 의해서 상기 노면에서 발생하는 충격음을 획득하는 충격음 데이터 획득부; 및 상기 충격음을 시간 영역에서 주파수 영역으로 변환하는 주파수 분석부;를 포함할 수 있다.

[0016] 상기와 같이 구성함으로써, 교통흐름을 방해하지 않으면서 노면의 열화와 노면포장의 층분리 상태를 신속하게

평가할 수 있고, 신뢰성을 확보할 수 있다.

- [0017] 상기 노면충격부는 상기 충격음이 가청주파수를 가지도록 상기 노면을 타격할 수 있다.
- [0018] 상기 주파수 분석부는 상기 노면의 손상 여부에 따른 주파수 스펙트럼의 진폭 거칠기를 비교하여 손상 여부를 판단할 수 있다.
- [0019] 상기 주파수 분석부는 상기 노면의 손상 여부에 따른 주파수 스펙트럼의 진폭 거칠기 차이를 정량화하기 위해 주파수 스펙트럼 진폭의 높이 변화(height variance)를 계산할 수 있다.
- [0020] 상기 높이 변화는 상기 노면이 손상된 경우가 손상되지 않은 경우 보다 작다.
- [0021] 한편, 발명의 다른 분야에 따르면 본 발명은 상기한 과제를 해결하기 위해, 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 시스템을 이용한 노면 손상 탐지 방법에 있어서, 상기 노면의 충격음 충격음 데이터를 획득하는 단계; 상기 충격음 데이터로부터 충격신호를 추출하는 단계; 상기 충격신호에 고속 푸리에 변환을 적용하는 단계; 변환된 상기 충격신호의 주파수 응답 특성을 분석하는 단계; 및 상기 주파수 응답 특성으로부터 상기 노면의 손상 여부를 판단하는 단계;를 포함하는, 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 방법을 제공할 수 있다.
- [0022] 상기 주파수 응답 특성을 분석하는 단계는, 주파수 영역으로 변환된 충격신호의 주파수 스펙트럼의 거칠기를 분석할 수 있다.
- [0023] 상기 주파수 응답 특성을 분석하는 단계는, 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 거칠기 차이를 정량화하기 위해 주파수 스펙트럼 진폭의 높이 변화(height variance)를 구할 수 있다.
- [0024] 또한, 본 발명은 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 시스템을 이용한 노면 손상 탐지 방법에 있어서, 상기 노면에 충격음 가하는 단계; 상기 노면에서 발생하는 충격음의 충격음 데이터를 획득하는 단계; 상기 충격음 데이터의 샘플링 주파수를 결정하는 단계; 상기 충격음 데이터를 시간 영역에서 주파수 영역으로 변환하는 단계; 주파수 영역에서 상기 충격음 데이터의 주파수 스펙트럼을 분석하는 단계; 상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화를 구하는 단계; 및 상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화 크기를 분석하는 단계;를 포함하는, 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 방법을 제공할 수 있다.
- [0025] 상기 주파수 스펙트럼을 분석하는 단계는 주파수에 대한 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 변화 정도를 분석할 수 있다.
- [0026] 상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화를 구하는 단계는 주파수에 대한 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 변화 정도를 정량화하기 위해 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화를 구할 수 있다.
- [0027] 상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화를 구하는 단계는 상기 높이 변화가 주파수에 대한 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 변화 정도 보다 주파수 스펙트럼의 진폭 거칠기가 노면의 손상 여부를 잘 표현하는지 여부를 판단할 수 있다.
- [0028] 상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화를 구하는 단계는 적용 샘플링 주파수를 변경하여 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화를 구하거나, 상기 샘플링 주파수에 대해 반복적으로 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화를 구할 수 있다.
- [0029] 상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화 크기를 분석하는 단계는 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화의 평균 및 표준편차를 이용할 수 있다.
- [0030] 상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화 크기를 분석하는 단계는 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화 크기를 비교하여 상기 노면의 손상 여부를 판단할 수 있다.
- [0031] 본 발명은 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 방법을 수행하기 위한 프로그램이 기록된 기록매체를 제공할 수 있다.

### 발명의 효과

- [0032] 본 발명은 본 발명은 주파수 응답특성에 기반하여 교통 차단 없이 신속하게 노면 또는 교량 바닥판의 건전도를 평가할 수 있다.
- [0033] 본 발명은 아스팔트 콘크리트와 강화 콘크리트 사이에서 손상이 발생하는 경우에도 손상 여부, 손상 정도 등을 측정하고 평가할 수 있다.

[0034] 본 발명은 사람이 인지할 수 있는 가청대역의 주파수 또는 저주파수대역의 신호를 이용하여 노면의 손상 여부를 판단하기 때문에 노이즈의 영향을 배제할 수 있다.

### 도면의 간단한 설명

[0035] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 노면 손상 탐지 시스템의 구성을 개략적으로 나타낸 도면이다.  
 도 2는 도 1에 따른 시스템을 이용한 노면 손상 탐지 방법을 설명하는 제1 순서도이다.  
 도 3은 도 1에 따른 시스템을 이용한 노면 손상 탐지 방법을 설명하는 제2 순서도이다.  
 도 4는 본 발명에 따른 노면 손상 탐지 시스템 및 방법을 적용한 노면을 보여주는 사진이다.  
 도 5는 도 4의 노면에서 채취한 코어 샘플을 보여 주는 사진이다.  
 도 6은 도 4의 노면에서 획득한 충격음 충격음 데이터를 분석한 그래프이다.  
 도 7 및 도 8은 도 6의 충격음 데이터로부터 계산한 주파수 스펙트럼의 높이 변화를 보여주는 표다.  
 도 9 및 도 10은 도 7 및 도 8에 따른 높이 변화를 보여주는 그래프이다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0036] 이하에서, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 따른 실시예들을 상세하게 설명한다. 그러나, 본 발명이 실시예들에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다. 각 도면에 제시된 동일한 참조 부호는 동일한 부재를 나타낸다.

[0037] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 노면 손상 탐지 시스템의 구성을 개략적으로 나타낸 도면, 도 2는 도 1에 따른 시스템을 이용한 노면 손상 탐지 방법을 설명하는 제1 순서도, 도 3은 도 1에 따른 시스템을 이용한 노면 손상 탐지 방법을 설명하는 제2 순서도, 도 4는 본 발명에 따른 노면 손상 탐지 시스템 및 방법을 적용한 노면을 보여주는 사진, 도 5는 도 4의 노면에서 채취한 코어 샘플을 보여 주는 사진, 도 6은 도 4의 노면에서 획득한 충격음 충격음 데이터를 분석한 그래프, 도 7 및 도 8은 도 6의 충격음 데이터로부터 계산한 주파수 스펙트럼의 높이 변화를 보여주는 표, 도 9 및 도 10은 도 7 및 도 8에 따른 높이 변화를 보여주는 그래프이다.

[0038] 본 발명에 따른 노면 손상 탐지 시스템은 일반적인 도로의 노면, 교량의 교면 등에 적용될 수 있으며, 이하에서는 설명의 편의를 위해 교량의 교면에 적용하는 경우를 예시로서 설명한다.

[0039] 도 1을 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 시스템(100)은, 탐지 대상 노면 위를 주행하는 주행부(110); 및 주행부(110)에 의해 견인되어 상기 노면의 손상 여부를 측정하는 평가측정부(190);를 포함할 수 있다.

[0040] 주행부(110)는 자체적으로 동력을 가지는 차량의 형태로 제공되거나 비동력 이동수단으로 형성될 수 있다. 평가측정부(190)는 주행부(110)에 의해서 견인되는 형태를 가지며, 자체 동력을 가지지 않도록 형성되는 것이 바람직하다. 본 발명에 따른 시스템(100)은 교량 교면 위를 주행하는 주행부(110)에 의해서 견인되는 평가측정부(190)가 교면을 타격하여 발생하는 충격음(impact sound)을 분석하여 교면의 손상여부, 콘크리트 교량 바닥판의 열화도, 교면포장의 층분리/박리 등을 평가할 수 있다.

[0041] 이를 위해, 평가측정부(190)는, 상기 노면을 타격하는 노면충격부(120), 노면충격부(120)에 의해서 상기 노면에서 발생하는 충격음을 획득하는 충격음 데이터 획득부(130) 및 상기 충격음을 시간 영역에서 주파수 영역으로 변환하는 주파수 분석부(140)를 포함할 수 있다.

[0042] 상기와 같이 구성함으로써, 교통흐름을 방해하지 않으면서 노면의 열화와 노면포장의 층분리 상태를 신속하게 평가할 수 있고, 신뢰성을 확보할 수 있다.

[0043] 평가측정부(190)는 노면충격부(120), 충격음 데이터 획득부(130), 주파수 분석부(140)와 연동하며 이들을 제어하는 제어부(160)를 포함할 수 있다. 또한, 획득된 충격음 데이터 및 주파수를 점검자에게 시각적으로 제시하는 화면표시부(150)를 더 포함할 수도 있다.

[0044] 노면충격부(120)는 해머 또는 이와 유사한 형태의 노면 타격 부재(미도시)를 구비할 수 있다. 제어부(160)는 노면충격부(120)가 노면을 이동하면서 타격하게 하거나, 정지하여 특정한 노면을 반복적으로 또는 주기적으로 타격하도록 제어할 수 있다. 노면충격부(120)에 의해서 노면을 타격하게 되면, 그 결과로서 충격음(impact sound)가 발생한다.

- [0045] 노면충격부(120)는 상기 충격음이 가청주파수를 가지도록 상기 노면을 타격할 수 있다. 여기서, 가청주파수는 사람(즉, 점검자)가 들을 수 있는 소리의 주파수를 의미한다. 본 발명의 노면충격부(120)는 20~20,000 Hz의 주파수를 가지는 충격음이 발생하도록 노면을 타격할 수 있다. 주파수가 20~20,000 Hz인 경우는 저주파수라고 할 수 있다. 본 발명에 따른 노면 손상 탐지 시스템(100)은 저주파수 대역의 충격음을 이용하기 때문에 노이즈의 영향을 줄일 수 있다.
- [0046] 여기서, 충격음은 소리 내지 음향 데이터를 포함하거나 의미할 수 있으며, 충격음은 가청 주파수 및 그 외의 주파수를 포함할 수 있다. 소리는 시간이 경과함에 따라 사라져 버리는 한계가 있다. 따라서, 본 발명에 따른 시스템(100)은 소리 즉, 충격음 데이터를 분석하여 노면의 손상 여부를 탐지하지 않고, 충격음 데이터를 획득한 후 이를 주파수로 변환하여 주파수를 분석하는 것에 특징이 있다. 이를 위해 본 발명에 따른 시스템은 충격음을 획득 내지 포집하기 위한 충격음 데이터 획득부(130)를 구비할 수 있다.
- [0047] 충격음 데이터 획득부(130)는 적어도 하나의 마이크로폰(microphone, 미도시)을 포함할 수 있다. 상기 마이크로폰은 노면과 근접하도록 배치되는 것이 바람직하다. 복수개의 마이크로폰을 사용하는 것이 충격음 데이터 획득에 유리하며, 복수개의 마이크로폰을 사용하는 경우에는 동일한 간격 또는 방사상으로 배치되는 것이 바람직하다.
- [0048] 주파수 분석부(140)는 시간 영역의 충격음 데이터 즉, 충격음을 주파수 영역으로 변환할 수 있다. 이와 같이, 충격음을 주파수 영역의 데이터 또는 신호로 변환함으로써 충격신호의 변화 정도를 시각적으로 잘 확인할 수 있다. 주파수 영역으로 신호를 변환하는 경우에 신호의 크기는 데시벨(dB)로 나타낸다.
- [0049] 주파수 분석부(140)는 시간 영역의 충격음 즉, 충격음 데이터에 고속 푸리에 변환(FFT: Fast Fourier Transform)을 적용할 수 있다.
- [0050] 주파수 영역으로 변환된 충격음은 주파수에 대한 진폭 크기 변화를 나타내는 그래프로 표현될 수 있다. 이러한 그래프는 노면의 손상 여부에 따른 주파수 스펙트럼의 진폭 거칠기(roughness)를 보여 준다. 이하에서, 거칠기(roughness)는 신호 크기의 변화 정도를 의미한다.
- [0051] 주파수 분석부는 상기 노면의 손상 여부에 따른 주파수 스펙트럼의 진폭 거칠기를 비교하여 노면의 손상 여부를 판단할 수 있다. 만약, 주파수가 변화함에 따라 주파수 진폭의 크기 변동이 급격하게 일어나는 경우에는 주파수 스펙트럼 진폭이 거칠다고 표현할 수 있고, 변동이 급격하지 않은 경우에는 주파수 스펙트럼 진폭이 부드럽다고 표현할 수 있다. 주파수 스펙트럼의 진폭이 거친 경우가 부드러운 경우 보다 노면의 손상이 없거나 적다고 평가할 수 있다. 즉, 노면 또는 교면포장의 내부에 박리(delamination) 또는 층분리(layer debonding)와 같은 손상(damage)이 있는 경우에는 주파수 스펙트럼의 진폭이 주파수에 대해 급격하지 않게 변하거나 부드럽게 변한다. 반면, 손상이 없는 경우에는 급격하게 변하게 된다.
- [0052] 여기서, 주파수 스펙트럼의 진폭 거칠기만으로도 노면의 손상 여부를 판단할 수 있지만, 주파수 스펙트럼의 진폭 크기(거칠기) 차이를 정량화하여 손상 여부를 보다 정확하게 판단할 수도 있다. 이를 위해, 주파수 분석부(140)는 상기 노면의 손상 여부에 따른 주파수 스펙트럼의 진폭 거칠기 차이를 정량화하기 위해 주파수 스펙트럼 진폭의 높이 변화(height variance)를 계산할 수 있다.
- [0053] 계산된 주파수 스펙트럼 진폭의 높이 변화가 상대적으로 큰지 아니면 작은지를 판단하여 노면의 손상 여부를 판단할 수 있다. 즉, 상기 높이 변화는 상기 노면이 손상된 경우가 손상되지 않은 경우 보다 작다.
- [0054] 이하에서는 본 발명에 따른 노면 손상 탐지 시스템(100)의 주파수 분석부(140)를 중심으로 한 노면 손상 탐지 방법에 대해서 설명한다.
- [0055] 도 2를 참조하면, 본 발명에 따른 충격음을 이용한 노면 탐지 방법은, 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 시스템(100)을 이용한 노면 손상 탐지 방법에 있어서, 상기 노면의 충격음 충격음 데이터를 획득하는 단계(1000), 상기 충격음 데이터로부터 충격신호를 추출하는 단계(2000), 상기 충격신호에 고속 푸리에 변환을 적용하는 단계(3000), 변환된 상기 충격신호의 주파수 응답 특성을 분석하는 단계(4000) 및 상기 주파수 응답 특성으로부터 상기 노면의 손상 여부를 판단하는 단계(5000)를 포함할 수 있다.
- [0056] 충격음 데이터로부터 충격신호를 추출하는 과정은 주파수 분석부(140)에서 수행될 수 있다. 또한, 고속 푸리에 변환 단계(3000)도 주파수 분석부(140)에서 일어날 수 있다.
- [0057] 주파수 응답 특성을 분석하는 단계(4000)에서는, 주파수 영역으로 변환된 충격신호의 주파수 스펙트럼의 거칠기를 분석할 수 있다. 이와 더불어, 주파수 응답 특성을 분석하는 단계(4000)에서는, 상기 주파수 스펙트럼의 진

폭 거칠기 차이를 정량화하기 위해 주파수 스펙트럼 진폭의 높이 변화(height variance)를 구할 수 있다.

- [0058] 이하에서는 노면 손상 탐지 방법에 대해서 보다 자세하게 설명한다. 도 3을 참조하면, 본 발명에 따른 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 시스템을 이용한 노면 손상 탐지 방법은, 상기 노면에 충격음을 가하는 단계(1100), 상기 노면에서 발생하는 충격음의 충격음 데이터를 획득하는 단계(1200), 상기 충격음 데이터의 샘플링 주파수를 결정하는 단계(1300), 상기 충격음 데이터를 시간 영역에서 주파수 영역으로 변환하는 단계(1400), 주파수 영역에서 상기 충격음 데이터의 주파수 스펙트럼을 분석하는 단계(1500), 상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화를 구하는 단계(1600) 및 상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화 크기를 분석하는 단계(1800)를 포함할 수 있다.
- [0059] 도 4는 본 발명에 따른 노면 손상 탐지 시스템(100)을 사용하여 노면의 손상 여부를 탐지한 대상 교량의 표면 모습 사진이다. 본 발명에서는 대상 교량의 교면 중 2개의 영역에 대해서 시험을 수행하였다. 도 4(a)에 보이는 영역은 교량 표면에서 중앙차선의 좌측이고, 도 4(b)는 중앙차선의 우측이다. 우선, 각각의 영역에 대해서 코어 샘플(core sample)을 채취한다. 도 5는 채취된 코어 샘플을 보여 주는 사진이다. 도 5(a)는 도 4(a)의 영역에서 채취한 코어 샘플을 보여주며, 도 5(b)는 도 4(b)의 영역에서 채취한 코어 샘플을 보여준다.
- [0060] 채취된 코어 샘플을 분석하여 손상 여부를 평가하는데, 코어 샘플의 분석에는 충격음을 이용하지 않는다. 이와 같이, 충격음을 이용하지 않고 분석된 코어 샘플의 손상 여부 정보와 본 발명에 따른 시스템(100) 및 방법을 사용하여 노면의 손상 여부 정보를 비교함으로써, 본 발명의 신뢰성을 검증하였다.
- [0061] 탐지 대상 노면에 대한 코어 샘플 채취는 필수적인 과정은 아니다. 즉, 실제 대상 노면에서 손상 여부를 탐지하는 경우에는 코어 샘플을 채취하지 않고, 노면 타격시 발생하는 충격음만을 이용하여 노면의 손상 여부를 판단하고 측정할 수 있다.
- [0062] 충격음 데이터의 샘플링 주파수(sampling frequency)를 결정하는 단계(1300)에서는 샘플링 주파수를 2,000~5,000 Hz의 범위로 결정할 수 있다.
- [0063] 상기 주파수 스펙트럼을 분석하는 단계(1500)는 주파수에 대한 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 변화 정도를 분석할 수 있다. 주파수 스펙트럼을 분석하는 단계(1500)는 시간 영역의 충격음을 주파수 영역으로 변환하여 도 6에 도시된 바와 같은 주파수 스펙트럼을 그래프로 표현할 수 있다. 도 6을 참조하면, 주파수 스펙트럼은 주파수(가로축, Hz)에 대한 충격음의 주파수 진폭 크기(세로축, dB)로 표현될 수 있다.
- [0064] 도 6(a), (b), (c), (d)는 각각 손상 정도가 다른 노면에서 얻은 충격음을 주파수 영역으로 변화시킨 데이터이다. 도 6(a)와 도 6(b)에 표현된 주파수 스펙트럼은 도 4(a) 영역에서 얻은 충격음에 대한 것이고, 도 6(c)와 도 6(d)는 도 4(b) 영역에서 얻은 충격음에 대한 주파수 스펙트럼이다. 각각 도시된 주파수 스펙트럼의 진폭이 주파수에 대해서 변화하는 정도를 보면 차이를 알 수 있다. 예를 들면, 도 6(a) 및 도 6(c)의 경우는 주파수 스펙트럼의 진폭 크기가 심하게 변함을 알 수 있다. 반면 도 6(b) 및 도 6(d)의 경우는 주파수 스펙트럼의 진폭 크기 변화가 심하지 않음을 알 수 있다. 다시 말하면, 도 6(a) 및 도 6(c)의 경우는 주파수 스펙트럼의 진폭 크기 변화 정도가 거칠다고 할 수 있고, 도 6(b) 및 도 6(d)의 경우는 주파수 스펙트럼의 진폭 크기 변화 정도가 부드럽다고 할 수 있다.
- [0065] 상기 주파수 스펙트럼을 분석하는 단계(1500)에서는 주파수에 대한 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 변화 정도를 분석하여, 노면의 손상 여부를 판단하거나 분석할 수 있다. 주파수 스펙트럼의 진폭 크기 변화 정도가 거친 경우에는 노면에 손상이 없거나 작다고 할 수 있다. 반면, 주파수 스펙트럼의 진폭 크기 변화 정도가 부드러운 경우에는 노면에 손상이 있다고 할 수 있다.
- [0066] 한편, 상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화를 구하는 단계(1600)에서는 주파수에 대한 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 변화 정도를 정량화하기 위해 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화(height variance)를 구할 수 있다. 주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화는 상기 노면의 손상 여부에 따른 주파수 스펙트럼의 진폭 거칠기 차이로부터 계산될 수 있다. 높이 변화는 하기 [수학식 1]로부터 계산될 수 있다.

## 수학식 1

$$HV = \frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 - (1/n)(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n-1}$$

[0067]

[0068]

[수학식 1]에서 HV는 높이 변화(height variance),  $X_i$ 는  $i$ 번째의 높이 변화 측정,  $n$ 은 총 측정횟수이다.

[0069]

주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화(height variance)는 2000~5000 Hz 주파수로부터 매 3개, 5개, 7개 및 10개의 샘플링 주파수 포인트(sampling frequency point)에서 계산될 수 있다. 모든 샘플링 포인트 또는 모든 주파수 샘플링 간격에 있어서 기울기 차이(slope difference)가 중요한 차이를 보이지 않기 때문에 높이 변화가 사용된다.

[0070]

상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화 크기를 분석하는 단계(1800)에서는 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화의 평균(average) 및 표준편차(standard deviation)를 이용할 수 있다. 이와 같이, 평균 및 표준편차를 이용하기 때문에 극심한 높이 변화를 제거할 수 있다.

[0071]

본 발명에 의하면, 상기 5개의 샘플링 주파수 포인트에서 계산된 높이 변화가 10개의 샘플링 주파수 포인트에서 계산된 높이 변화 보다 주파수 스펙트럼 진폭 변화 정도의 거칠기를 잘 표현한다. 도 7은 도 4(a)의 영역에서 얻은 충격음에 대한 주파수 스펙트럼에 대해서 5개 및 10개의 샘플링 주파수 포인트에서 높이 변화를 계산한 결과를 보여주는 표이고, 도 8은 도 4(b)의 영역에서 얻은 충격음에 대한 주파수 스펙트럼에 대해서 5개 및 10개의 샘플링 주파수 포인트에서 높이 변화를 계산한 결과를 보여주는 표이다. 도 7의 결과가 도 8의 결과 보다 작은 높이 변화를 보이고 있다.

[0072]

도 7 및 도 8의 결과를 그래프로 나타내면 각각 도 9 및 도 10의 그래프가 된다. 도 9의 그래프는 노면에 손상이 있는 경우 충격음에 대한 주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화를 나타내며, 도 10의 그래프는 노면에 손상이 없는 경우 충격음에 대한 주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화를 나타낸다. 도 9 및 도 10을 참조하면, 노면에 손상이 있는 경우에 주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화가 작음을 알 수 있다. 노면에 손상이 있는 경우에 주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화가 상대적으로 작은 이유는 충격음의 소리 에너지가 손상 부위에서 흡수되었기 때문이다.

[0073]

상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화를 구하는 단계(1600)는 상기 높이 변화가 주파수에 대한 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 변화 정도 보다 주파수 스펙트럼의 진폭 거칠기가 노면의 손상 여부를 잘 표현하는지 여부를 판단할 수 있다(1700). 그 판단 결과 높이 변화가 주파수 스펙트럼의 진폭 거칠기 보다 노면의 손상여부를 잘 표현하지 못하는 경우에는 적용 샘플링 주파수 포인트를 바꿔서 다시 주파수 분석을 수행하게 된다.

[0074]

이처럼 상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화를 구하는 단계(1600)는 적용 샘플링 주파수를 변경하여 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화를 구하거나, 상기 샘플링 주파수에 대해 반복적으로 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화를 구할 수 있다.

[0075]

단계 1700에서의 판단 결과 높이 변화가 주파수 스펙트럼의 거칠기 보다 노면의 손상여부를 표현하는 경우에는 주파수 스펙트럼의 높이 변화를 분석하는 단계(1800)가 수행되고, 주파수 스펙트럼의 높이 변화 분석 결과에 따라 노면의 손상 여부를 판단하게 된다(1900).

[0076]

상기 주파수 스펙트럼의 높이 변화 크기를 분석하는 단계(1800)는 상기 주파수 스펙트럼의 진폭 높이 변화 크기를 비교하여 상기 노면의 손상 여부를 판단할 수 있다.

[0077]

한편, 본 발명은 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 방법을 수행하기 위한 프로그램이 기록된 기록매체를 제공할 수 있다.

[0078]

본 발명의 실시예들은 다양한 컴퓨터로 구현되는 동작을 수행하기 위한 프로그램 명령을 포함하는 컴퓨터 판독 가능 매체를 포함한다. 상기 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 로컬 데이터 파일, 로컬 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체는 본 발명을 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체, CD-ROM, DVD와 같은 광기록 매체, 플롭티컬

디스크와 같은 자기-광 매체, 및 롬, 램, 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다.

[0079]

상기에서 설명한 바와 같이 본 발명에 따른 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 시스템 및 방법에 의하면, 노면 또는 교량의 포장면, 교량의 바닥판의 손상 여부를 실시간으로 판단할 수 있으며, 아스팔트 콘크리트와 강화 콘크리트의 층으로 형성된 노면 또는 교면의 손상 뿐만 아니라 아스팔트 콘크리트와 강화 콘크리트 사이의 경계면의 손상 여부도 판단할 수 있다.

[0080]

이상과 같이 본 발명의 일 실시예에서는 구체적인 구성 요소 등과 같은 특정 사항들과 한정된 실시예 및 도면에 의해 설명되었으나 이는 본 발명의 보다 전반적인 이해를 돕기 위해서 제공된 것일 뿐, 본 발명은 상기의 실시예에 한정되는 것은 아니며, 본 발명이 속하는 분야에서 통상적인 지식을 가진 자라면 이러한 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 따라서, 본 발명의 사상은 설명된 실시예에 국한되어 정해져서는 아니 되며, 후술하는 특허청구범위뿐 아니라 이 특허청구범위와 균등하거나 등가적 변형이 있는 모든 것들은 본 발명 사상의 범주에 속한다고 할 것이다.

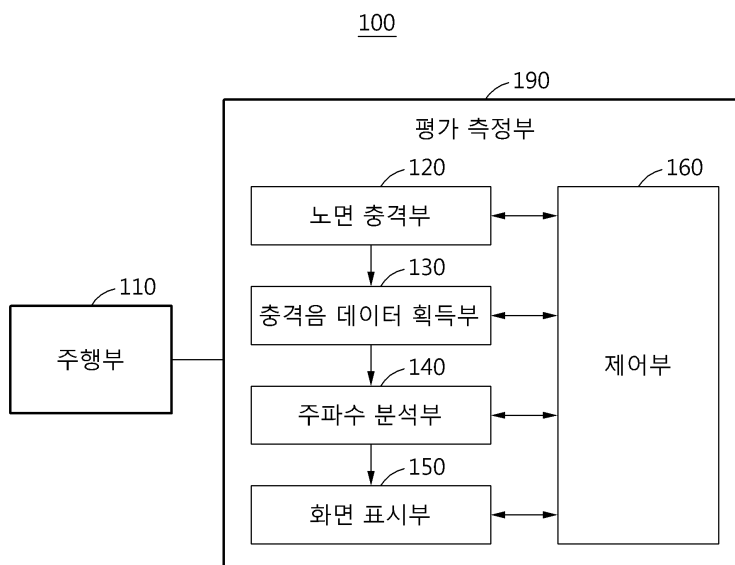
### 부호의 설명

[0081]

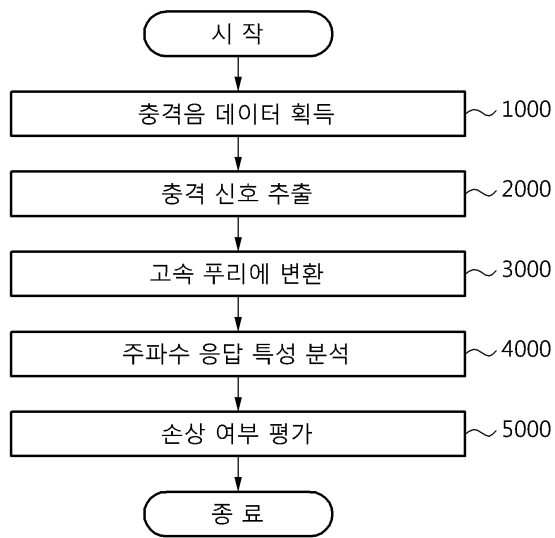
- 100 : 충격음을 이용한 노면 손상 탐지 시스템
- 110 : 주행부
- 120 : 노면 충격부
- 130 : 충격음 데이터 획득부
- 140 : 주파수 분석부
- 150 : 화면 표시부
- 160 : 제어부
- 170 : 평가측정부

### 도면

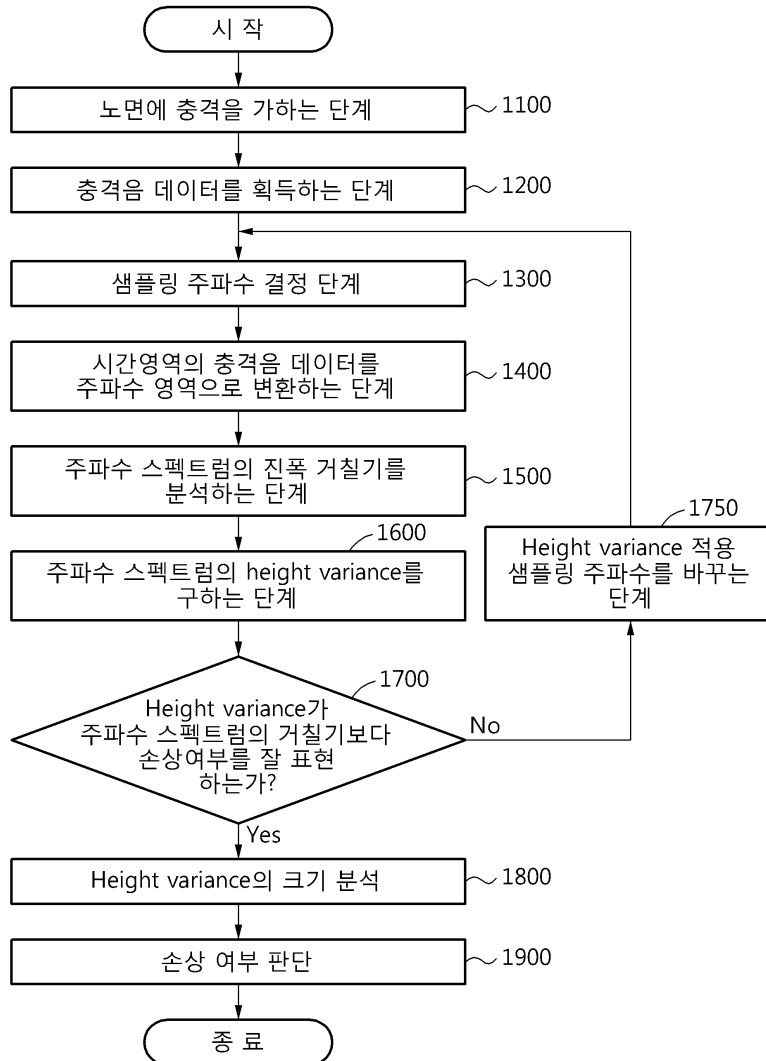
#### 도면1



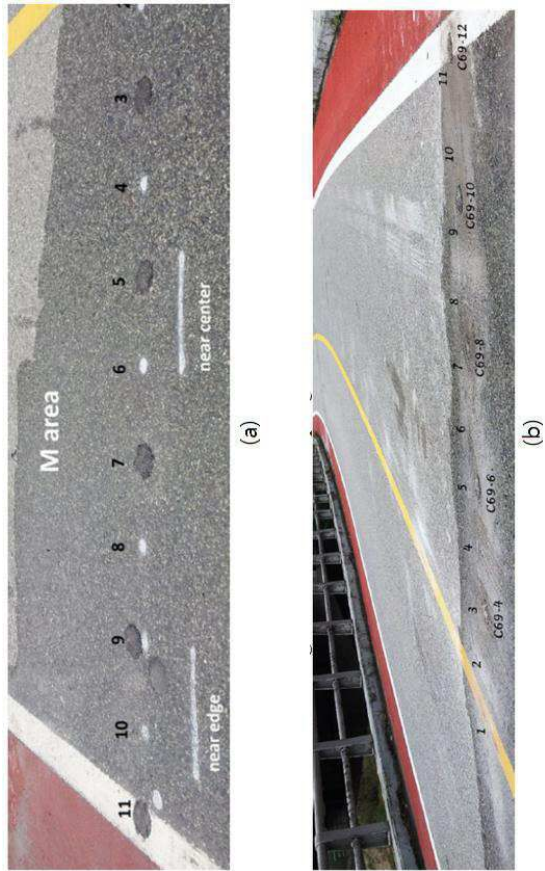
도면2



도면3



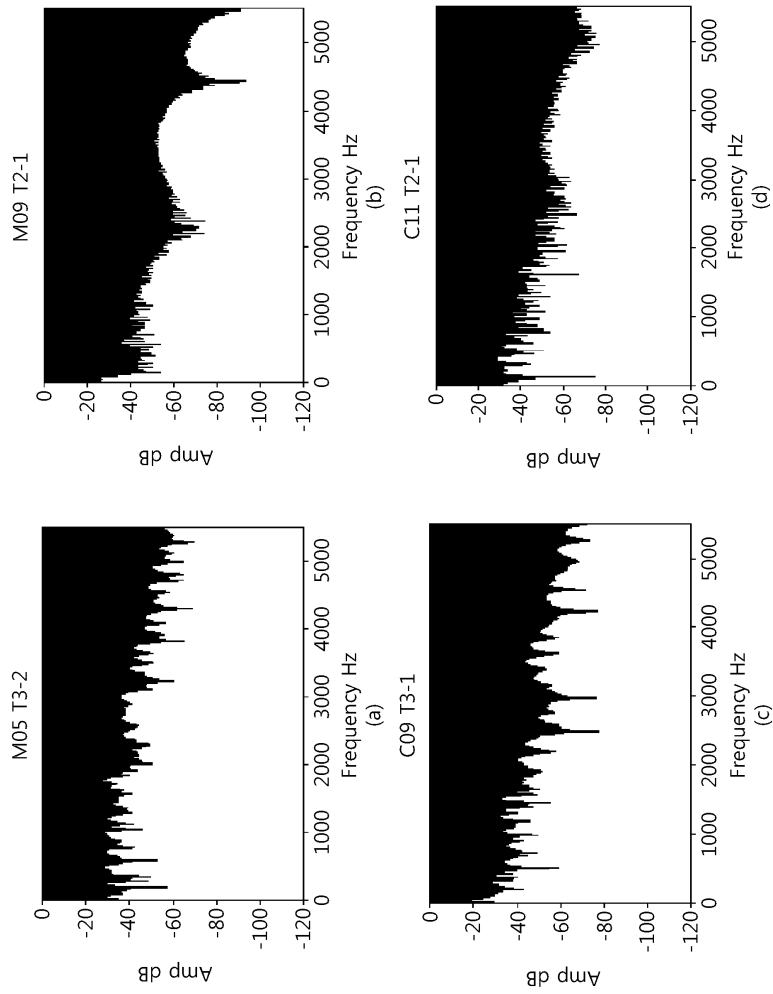
도면4



도면5



도면6



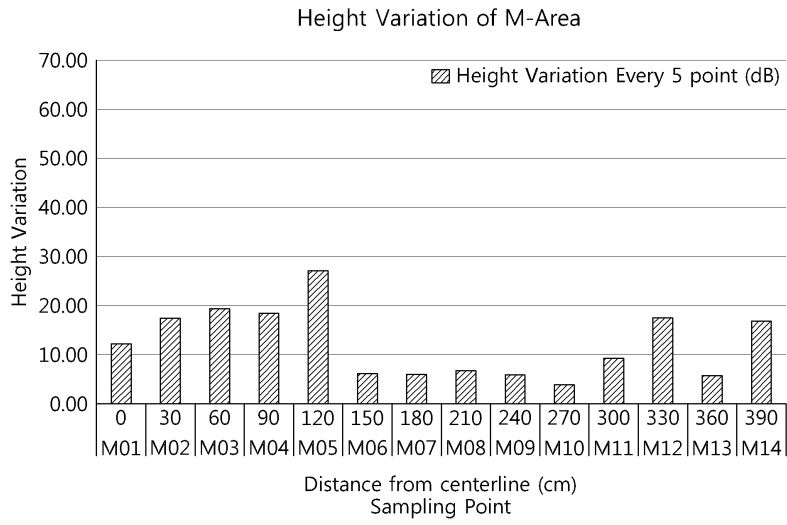
도면7

| Point<br>(distance<br>from CL) | Distance<br>from CL<br>(cm) | Height Variance Every 10 points (dB) |                       |                                 | Height Variance Every 5 points (dB) |                                 |                                  |        |
|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------|
|                                |                             | Average                              | Standard<br>deviation | Average<br>(outlier<br>removed) | Std. dev<br>(outlier<br>removed)    | Average<br>(outlier<br>removed) | Std. dev<br>(outlier<br>removed) |        |
| M01                            | 0                           | 39.199848                            | 17.57792              | 31.7777                         | 11.0426                             | 15.9147                         | 12.6514                          | 6.2498 |
| M02                            | 30                          | 38.420293                            | 16.51987              | 41.8817                         | 10.1707                             | 17.4435                         | 7.3901                           | 5.6888 |
| M03                            | 60                          | 58.815974                            | 14.78969              | 58.1955                         | 8.9792                              | 20.0480                         | 7.1176                           | 4.3377 |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |        |

도면8

| Point<br>(distance<br>from CL) | Distance<br>from CL<br>(cm) | Height Variance Every 10 points (dB) |                       |                                 | Height Variance Every 5 points (dB) |                                 |                                  |      |
|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|------|
|                                |                             | Height<br>Variance                   | Standard<br>deviation | Average<br>(outlier<br>removed) | Std. dev<br>(outlier<br>removed)    | Average<br>(outlier<br>removed) | Std. dev<br>(outlier<br>removed) |      |
| C01                            | 0                           | 12.14                                | 7.93                  | 11.28                           | 4.81                                | 9.21                            | 7.26                             | 3.87 |
| C02                            | 30                          | 33.24                                | 36.34                 | 16.22                           | 12.19                               | 14.11                           | 12.04                            | 7.47 |
| C03                            | 60                          | 37.55                                | 24.36                 | 32.17                           | 13.35                               | 25.99                           | 16.18                            | 4.10 |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |
|                                |                             |                                      |                       |                                 |                                     |                                 |                                  |      |

도면9



도면10

