(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2009-0082613
(43) 공개일자 2009년07월31일

(51) Int. Cl.
E01D 22/00 (2006.01) *G01B 21/32* (2006.01)
(21) 출원번호 10-2008-0008477
(22) 출원일자 2008년01월28일
심사청구일자 2008년01월28일

(71) 출원인
부경대학교 산학협력단
부산 남구 용당동 산 100번지 부경대학교내
(72) 발명자
김정태
부산 남구 용호2동 동일아파트 1동 703호
박재형
부산 북구 만덕3동 그린코아아파트 203동 501호
홍동수
부산 남구 대연동 605-14번지 등록빌딩 204호

전체 청구항 수 : 총 3 항

(54) 프리스트레스트 콘크리트 거더 교량을 위한 하이브리드 손상 모니터링 체계

(57) 요 약

본 발명은 프리스트레스트 콘크리트 (prestressed concrete; PSC) 거더 교량의 구조안전진단을 위한 손상 모니터링 체계에 관한 것이다.

PSC 거더 교량의 대표적인 두 가지 손상유형은 콘크리트 거더부의 균열발생에 기인한 손상과 긴장재 텐던의 긴장력 감소에 기인한 손상이다. 기존의 손상모니터링 및 비파괴진단 기법들은 이들 중 어느 특정 손상유형에 맞추어 선택적으로 적용할 수 있으나, 실제 현장에서는 두 손상유형 중 어느것이 발생하였는지를 감지하는 것이 어렵다.

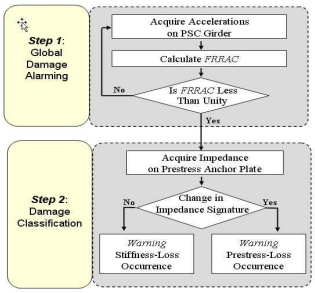
본 발명에서는 PSC 거더 교량에 발생된 손상을 경보하고, 손상 유형을 분류하기 위하여 진동기반 모니터링 기법과 임피던스기반 모니터링 기법을 순차적으로 이용하는 체계를 개발하였다.

가속도계로부터 계측하는 구조물의 진동신호는 구조물에 발생되는 모든 손상에 대하여 변화하기 때문에 소수의 센서를 이용하여 손쉽게 손상여부를 판별할 수 있으며, 압전센서로부터 계측하는 전기-기계적 임피던스신호는 센서 주변의 매우 국부적인 영역에 발생된 손상에 민감하게 대응한다.

이와 같은 두 기법의 특징을 이용하여 다음과 같은 모니터링 체계를 구성하면 PSC 거더 교량의 대표적인 두 가지 손상유형에 대한 손상 발생 및 손상 유형을 경보할 수 있다. 1) PSC 거더 교량의 진동신호를 측정하기 위해 임의의 두 위치에 가속도계를 설치하고, 임피던스 측정을 위해 텐던의 정착구에 압전센서를 설치한다. 2) 손상 전 두 위치에서 계측된 가속도신호의 주파수응답비 및 임피던스신호의 변화 계측이 용이한 주파수영역을 선정한다. 3) 가속도 신호의 주파수응답비의 변화를 주기적으로 계측하여 손상의 발생 여부를 경보한다. 4) 손상의 경보가 발생하면, 선정된 주파수영역내에서의 임피던스신호의 변화를 모니터링한다. 5) 임피던스신호의 변화 여부에 따라 텐던의 긴장력 감소에 의한 것인지, 균열과 같은 휨강성 저하에 의한 것인지 판별할 수 있게 된다.

(라) 효과 등(50자 내외) : 상기와 같이 구성된 모니터링 체계를 통해 첫째, 기존의 PSC 교량에 대한 손상평가 기법의 적용이 가능해지고, 둘째, 교량의 사용성 및 안전성을 확보할 수 있으며, 셋째, 구조물 안전진단의 효율성을 높일 수 있는 효과가 있다.

대 표 도 - 도1



특허청구의 범위

청구항 1

도 1과 같은 가속도 및 임피던스 신호 특성을 이용한 하이브리드 손상경보 및 손상분류체계

청구항 2

청구항 1에 있어서 주파수응답보증지수를 이용한 손상경보 기법

청구항 3

도 4에서와 같이 MFC 센서를 붙인 쐐기

명 세 서

발명의 상세한 설명

기 술 분 야

<1> 본 발명은 PSC 거더 교량의 안전진단을 위한 손상 모니터링 체계에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 PSC 거더 교량의 전형적인 손상유형인 PC 텐던의 긴장력 감소와 콘크리트의 균열과 같은 휨 강성 저하의 발생을 경보하고 두 손상유형 중 어느 것에 의한 것인지를 분류하기 위하여, 진동기반 손상 모니터링 기법과 임피던스 기반 손상 모니터링 기법을 혼용하는 하이브리드 손상 모니터링 체계에 관한 것이다.

배 경 기 술

<2> 일반적으로 프리스트레스트 콘크리트는 외력에 의하여 일어나는 응력을 소정의 한도까지 상쇄할 수 있도록 미리 인공적으로 그 응력의 분포와 크기를 정하여 내력을 준 콘크리트로 정의된다. 이와 같이 초기에 도입된 긴장력으로 인해 콘크리트 보의 하면에 인장응력이 작용하더라도, 그 인장응력이 콘크리트의 휨 인장 강도를 넘지 않도록 조절하여 균열 발생을 방지한다.

<3> PSC 교량의 안전성을 위협하는 전형적인 손상유형 중에서 콘크리트의 휨 균열은 극한 인장면에서의 응력이 콘크리트 파괴계수보다 클 때 형성되며, 콘크리트 성분의 내부팽창이나 수축, 부식 혹은 사하중이나 부재의 자중으로 인하여 생기는 작은 후미 응력에 의해 발생하는 미소균열로 인해 균열이 발생한 단면에서 철근과 콘크리트의 응력차이로 주 균열이 발생한다. 균열의 폭이 커지면 철근과 PC 텐던을 부식시킬 수 있으며, 이는 2차적인 휨 강성의 저하를 통해 균열촉진 효과로 이어지고, 부재의 휨 파괴를 유발한다. PC 텐던의 긴장력 감소 역시, 프리스트레스 도입 시에 콘크리트 탄성변형, 마찰 및 정착단의 활동과 도입 후에는 콘크리트의 건조수축 및 크리프, PC 강재의 릴렉세이션, PC 정착구의 부식 및 PC 강재의 응력부식 및 피로균열 등의 원인에 의해 유발된다. 이 같은 프리스트레스량의 감소는 콘크리트 부재의 휨 저항 능력의 감소와 콘크리트 인장균열 발생 및 균열 닫힘 효과의 저하를 가져온다.

<4> 1990년대 이래로 많은 연구자들에 의해 PSC 교량의 특정 손상 유형들에 대한 모니터링 방법으로 동적 특성의 변화를 적용하고자 하는 연구가 수행되고 있다. 1994년 Saiidi[문헌 1] 등은 긴장력의 변화를 고유진동수의 변화로부터 모니터링하고자 하였으며, 2000년 Miyamoto[문헌 2] 등은 프리스트레스트 복합 거더교의 동적 거동에 대한 연구를 수행하여 모니터링을 위한 기초 정보를 제공하고자 하였다. 또한 2003년 Kim 등[문헌 3]과 2005년 Law와 Lu[문헌 4]에 의해 프리스트레스트보에서 측정된 동적 응답으로부터 긴장력의 변화를 식별하기 위한 연구가 수행되었다. 또한, 1999년 Abdel Wahab와 De Roeck[문헌 5]은 모드곡률 변화를 이용하여 PSC 교량의 실제 손상을 모니터링하였고, 2003년 Kim[문헌 6] 등은 모드변형에너지를 이용한 손상검색 기법을 제안하였으며, 2005년 Huth[문헌 7] 등은 PSC 고속도로교의 진행되는 균열을 모니터링하는데 있어 진동기반의 손상 검색 방법의 민감도를 분석하였다.

<5> 그러나, 이러한 연구에서 사용된 기법들은 손상유형이 알려져 있을 시 사용이 가능하다는 한계가 있다. 이는 긴장력 감소와 휨강성 저하에 의한 손상 모두 모드특성의 변화를 가져오기 때문이다. 따라서, 두 손상유형을 상기의 기법들을 이용하여 직접적으로 모니터링 하기엔 어려움이 있으며, 새로운 접근 방법이 요구된다.

<6> 최근, 스마트 재료의 개발과 더불어 스마트 압전재료를 이용한 임피던스기반의 모니터링 기법이 새로운 손상

검색기법으로 널리 사용되고 있다. 이 방법의 기본 개념은 구조물의 국부적인 영역을 모니터링하기 위해 고주파수의 구조 자극을 주는 것으로, 고주파수 영역에서는 구조물의 무결성에 미치는 영향이 작은 초기 변화에 민감하다. 진동기반 기법과 비교하여, 임피던스기반 기법은 작은 크기의 균열과 같은 더 정밀한 측정이 요구되는 손상의 위치를 찾는데 효과적인 방법이다. 그러나, 임피던스 기법을 이용한 국부적인 모니터링은 구조물의 전반적인 특성 변화를 모니터링하기에는 어려움이 있다.

<7> 이런 임피던스기반 기법을 토목공학 구조물의 건전성 평가를 위해 적용한 연구들을 살펴보면, 전체 구조물의 사용성에 영향을 미치는 국부적인 위험 부재를 모니터링하기 위한 연구로서, 2000년 Park[문헌 8] 등에 의해 1/4 축소모형된 교량부재에 임피던스 기법을 적용하여 부재의 손상을 모니터링하였으며 온도에 의한 영향들을 검증하였다. 2003년에 Bhalla와 Soh[문헌 9]는 모형 보강 콘크리트 프레임의 손상을 모니터링하기 위한 연구를 수행하였다. 또한, 2006년에 Kim등[문헌 10]은 모형 판형교 실험을 통해 지점조건의 변화를 모니터링하기 위한 연구를 수행하였다.

<8> [문헌 1] Saiidi, M., Douglas, B., and Feng, S., Prestress force effect on vibration frequency of concrete bridges, Journal of Structure Engineering, 1994, Vol. 120, ISBN 0733-9445, 223-2241쪽

<9> [문헌 2] Miyamoto, A., Tei, K., Nakamura, H., and Bull, J.W., Behavior of prestressed beam strengthened with external tendons, Journal of Structural Engineering, 2000, Vol. 126, ISBN 0733-9445, 1033-1044쪽

<10> [문헌 3] Kim, J.T., Yun, C.B., Ryu, Y.S., and Cho, H.M., Identification of prestress-loss in PSC beams using modal information, Structural Engineering and Mechanics, 2003, Vol. 17, ISBN 1225-4568, 467-482쪽

<11> [문헌 4] Law, S.S, and Lu, J.R., Time domain response of a prestressed beam and prestress identification, Journal of Sound and Vibration, 2005, Vol. 288, ISBN 0022-460X, 1011-1025쪽

<12> [문헌 5] Abdel Wahab, M.M., De Roeck, G., Damage detection in bridges using modal curvatures: Application to a real damage scenario, Journal of Sound and Vibration, 1999, Vol. 226, ISBN 0022-460X, 217-235쪽

<13> [문헌 6] Kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, M.H., Stubbs, N., Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method, Engineering structures, 2003, Vol.25, ISBN 0141-0296, 57-67쪽

<14> [문헌 7] Huth, O., Feltrin, G., Masck, J., Kilic, N., Motavalli, M., Damage identification using modal data: Experiences on a prestressed concrete bridge, Journal of Structural Engineering, 2005, Vol. 131, ISBN 0733-9445, 1898-1910쪽

<15> [문헌 8] Park, G., Gudney, H., and Inman, D.J., Impedance-based health monitoring of civil structural components, Journal of Infrastructure Systems, ASCE, 2000, Vol. 6, ISBN 1076-0342, 153-160쪽

<16> [문헌 9] Bhalla, S., and Soh, C.K., Structural impedance based damage diagnosis by piezo-transducers, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, Vol. 32, ISBN 0098-8847, 1897-1916쪽

<17> [문헌 10] Kim, J.T., Na, W.B., Park, J.H., and Hong, D.S., Hybrid health monitoring of structural joints using modal parameters and EMI signatures, proceeding of SPIE - the international Society for Optical Engineering, 2005, Vol. 288, ISBN 0277-786X, no. 617420

발명의 내용

해결 하고자하는 과제

<18> PSC 거더 교량의 대표적인 두가지 손상유형은 콘크리트 거더부의 균열발생에 기인한 손상과 긴장재 텐던의 긴장력 감소에 기인한 손상이다. 기존의 손상모니터링 및 비파괴진단 기법들은 이들 중 어느 특정 손상유형에 맞추어 선택적으로 적용할 수 있으나, 실제 현장에서는 두 손상유형 중 어느것이 발생하였는지를 감지하는 것이 어렵다. 따라서, PSC 교량의 정확한 구조진단을 위해서는 발생된 손상을 경보하고, 손상의 유형을 분류할 수 있는 체계가 필요하다.

과제 해결수단

<19> 본 발명에서는 PSC 거더 교량에 발생된 손상을 경보하고, 손상 유형을 분류하기 위하여 진동기반 모니터링 기법과 임피던스기반 모니터링 기법을 순차적으로 이용하는 체계를 개발하였다.

<20> 가속도계로부터 계측하는 구조물의 진동신호는 구조물에 발생되는 모든 손상에 대하여 변화하기 때문에 소수의 센서를 이용하여 손쉽게 손상여부를 판별할 수 있으며, 압전세서로부터 계측하는 전기-기계적 임피던스신호는 센서 주변의 매우 국부적인 영역에 발생된 손상에 민감하게 대응한다.

<21> 이와 같은 두 기법의 특징을 이용하여 다음과 같은 모니터링 체계를 구성하면 PSC 거더 교량의 대표적인 두 가지 손상유형에 대한 손상 발생 및 손상 유형을 경보할 수 있다. 1) PSC 거더 교량의 진동신호를 측정하기 위해 임의의 두 위치에 가속도계를 설치하고, 임피던스 측정을 위해 텐던의 정착구에 압전센서를 설치한다. 2) 손상 전 두 위치에서 계측된 가속도신호의 주파수응답비 및 임피던스신호의 변화 계측이 용이한 주파수영역을 선정한다. 3) 가속도 신호의 주파수응답비의 변화를 주기적으로 계측하여 손상의 발생 여부를 경보한다. 4) 손상의 경보가 발생하면, 선정된 주파수영역내에서의 임피던스신호의 변화를 모니터링한다. 5) 임피던스신호의 변화 여부에 따라 텐던의 긴장력 감소에 의한 것인지, 균열과 같은 휨강성 저하에 의한 것인지 판별할 수 있게 된다.

효 과

<22> 상기와 같이 구성된 모니터링 체계를 통해 첫째, 손상의 분류가 가능하기 때문에 기존의 PSC 거더 교량에 대한 손상 모니터링 기법들을 각각의 손상에 따라서 적용이 가능해지고, 둘째, 개발된 체계를 이용한 상시모니터링 시스템이 구축된다면, 교량의 사용성 및 안전성을 확보할 수 있으며, 셋째, 모니터링 시스템의 자동화를 통해 구조물 안전진단의 효율성을 높일 수 있는 효과가 있다.

발명의 실시를 위한 구체적인 내용

<23> 본 발명은 도 1과 같이 PSC 거더 교량의 안전성을 위협하는 전형적인 손상유형인 PC 텐던의 긴장력 감소와 콘크리트의 균열과 같은 휨 강성 저하에 대해 손상경보 및 손상분류를 할 수 있는 하이브리드 손상 모니터링 체계를 개발하는 것으로서, 대상 구조물의 전역적인 영역에서의 이상 상태를 모니터링하기에 용이한 진동기반 기법과 국부적인 영역에서의 이상 상태만을 초기손상의 모니터링하기에 용이한 임피던스 기법을 이용하여 2단계로 구성하였다.

<24> 첫 번째 단계(도 1의 Step 1)에서는 PSC 거더 교량으로부터 취득된 가속도 신호 특성의 변화를 모니터링하여 전역적인 손상의 발생을 경보하고, 두 번째 단계(도 1의 Step 2)는 텐던 정착부에서 취득된 임피던스 신호 특성의 변화로부터 손상의 유형을 판별한다.

<25> 첫 번째 단계와 두 번째 단계에서 사용된 알고리즘을 살펴보면, 다음과 같다.

<26> 먼저, 첫 번째 단계에서는 가속도 신호의 주파수 응답함수 변화를 이용하여 전역적인 손상의 발생을 알리기 위해 주파수응답비보증지수(frequency ratio assurance criterion, FRRAC)를 새롭게 제안하였다. 기존의 가속도 신호의 주파수응답함수를 구하기 위해서는 하중의 시간에 따른 정보를 필요로 하게 된다. 하지만, 대부분의 토목구조물의 경우 하중의 시간이력 정보를 측정하기에는 어려운 점이 있다. 따라서, 하중과는 무관한 정보를 추출하기 위하여 주파수응답함수비를 이용하였다. 이에 대해 설명하면 다음과 같다.

<27> 시간영역의 진동응답을 주파수영역으로 변환하여 얻어지는 주파수응답 함수로부터 주파수응답비보증지수를 유도할 수 있다. 주파수응답함수는 입력과 응답의 측정기록으로부터 스펙트럼을 구하고, 그 스펙트럼 사이의 관계식으로부터 산정할 수 있다. 구조물에 입력하중 $u(t)$ 와 구조물응답 $v(t)$ 사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

<28> $$m\ddot{v}(t)+c\dot{v}(t)+kv(t)=u(t) \quad (1)$$

<29> 여기서, m , c , k 는 각각 구조물의 질량, 감쇠, 강성계수를 나타내며, 위의 식을 푸리에 변환하여 다음과 같이 주파수 영역에서의 입력하중과 구조물응답 사이의 관계로 나타낼 수 있다.

$$(-m(2\pi f)^2 + ic(2\pi f) + k)V(f) = U(f)$$

<30> (2)

<31> 이 때, 구조물의 주파수응답함수($H(f)$)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H(f) = \frac{V(f)}{U(f)} = \frac{1}{-m(2\pi f)^2 + ic(2\pi f) + k}$$

<32> (3)

<33> 여기서, $U(f)$ 와 $V(f)$ 는 각각 주파수영역에서의 하중과 변위 응답을 나타낸다.

<34> 비례감쇠를 가지는 구조물의 절점 j 위치에 가진주파수 ω_k 의 동적 하중이 가해진다면, 구조물과의 공진에 의하여 i 번째 절점과 $i+1$ 번재 절점에서의 응답은 k 번째 모드형상에 따라 진동한다. 따라서, i 번째 절점과 $i+1$ 번째 절점의 주파수응답함수비는 다음과 같으며,

$$\frac{V_i(\omega_k)}{V_{i+1}(\omega_k)} = \frac{\sum_{j=1}^{m} H_{i,j}(\omega_k)U_j(\omega_k)}{\sum_{j=1}^{m} H_{i+1,j}(\omega_k)U_j(\omega_k)} = \frac{H_i(\omega_k)}{H_{i+1}(\omega_k)}$$

<35> (4)

<36> 주파수응답비(frequency response ratio, FRR) 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$FRR_{i,i+1} = \frac{S_{i,j}(\omega_k)}{S_{i,i+1}(\omega_k)} = \frac{E[V_i(\omega_k)V_i(\omega_k)]}{E[V_i(\omega_k)V_{i+1}(\omega_k)]} = \frac{H_i(\omega_k)}{H_{i+1}(\omega_k)}$$

<37> (5)

<38> 여기서, $S_{i,i+1}(\omega_k)$, $S_{i,j}(\omega_k)$ 는 각각 상호 스펙트럼 밀도 함수(cross-spectral density function), 자기 스펙트럼 밀도 함수(auto-spectral density function)를 나타내고, $E[\bullet]$ 는 평균을 의미한다.

<39> 비손상 상태의 주파수응답비와 손상 상태의 주파수응답비를 비교함으로써, 다음과 같은 주파수응답비보증지수를 정의한다.

$$FRRAC(b,d) = \frac{\{FRR_b^T FRR_b\}^2}{\{FRR_b^T FRR_b\}\{FRR_d^T FRR_d\}}$$

<40> (6)

<41> 여기서, 하첨자 b , d 는 각각 비손상과 손상 상태를 표시한다. 식 (6)은 비손상 상태의 주파수응답비 FRR_b 과 손상 상태의 주파수응답비 FRR_d 의 선형 관계식이다. 만약, $FRRAC$ 값이 1에 가까운 값이라면 비손상상태로, 1보다 작은 값을 가진다면 손상발생 상태로 판별하게 된다.

<42> 다음으로, 두 번째 단계에서는 임피던스의 변화를 모니터링하여 손상경보의 원인이 무엇인지를 살펴보았다. 이

기법은 텐던의 정착부에 PZT (piezoelectric zirconate-titanate) 패치를 부착한 뒤 임피던스 측정하고, 측정된 임피던스의 특성 변화로부터 긴장력 감소를 직접적으로 모니터링하고자 한다.

<43> 구조물-센서 시스템의 임피던스는 다음과 같은 어드미턴스의 역수로 정의된다.

$$Y(\omega)=i\omega\frac{wl}{t_c}\left(\varepsilon_{33}^{T}(1-i\delta)-d_{31}^{2}Y_P^{E}+\frac{Z_a(\omega)}{Z_a(\omega)+Z_s(\omega)}d_{31}^{2}\hat{Y}_P^{E}\left(\frac{\tan kl}{kl}\right)\right)$$

<44> (7)여기서, w, l, t_c 는 각각 PZT 패치의 폭, 길이, 두께를 나타내며, ε_{33}^{T}, d_{31}^{2}, δ 는 각각 PZT 패치의 전기적 성질을 나타내는 것으로, 유전율, 유전체 손상 탄젠트 및 압전결합상수이다. Y_p^{E} 는 PZT 패치의 역학적 성질을 나타내는 것으로, 복소탄성계수이다. 또한, $Z_a(\omega)$, $Z_s(\omega)$ 는 각각 PZT 패치와 구조물의 역학적 임피던스를 나타낸다.

<45> 따라서, 센서 주위에 손상이 발생하면, 구조물의 역학적 임피던스 $Z_s(\omega)$ 가 변화하게 되고, 이는 곧 전체 임피던스의 변화를 의미한다.

<46> 이처럼, 구조물과 PZT 패치 사이의 상호작용으로 인한 발생한 전기적 임피던스를 측정하고, 임피던스의 변화를 모니터링하면, 구조물의 국부영역에 대한 이상상태를 판정할 수 있다. 임피던스의 정량적인 변화를 나타내는 지표로서는 식 (8)과 같은 RMSD(root-mean-square deviation)를 이용하거나, 식 (9)와 같은 상관계수를 이용하게 된다.

$$RMSD(\%)=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(Z_i^{d}-Z_i^{0}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(Z_i^{0}\right)^2}}\times 100$$

<47> (8)

$$\rho_{Z^0Z^d}=\frac{E\left[Z^0Z^d\right]-\mu_{Z^0}\mu_{Z^d}}{\sigma_{Z^0}\sigma_{Z^d}}$$

<48> (9)

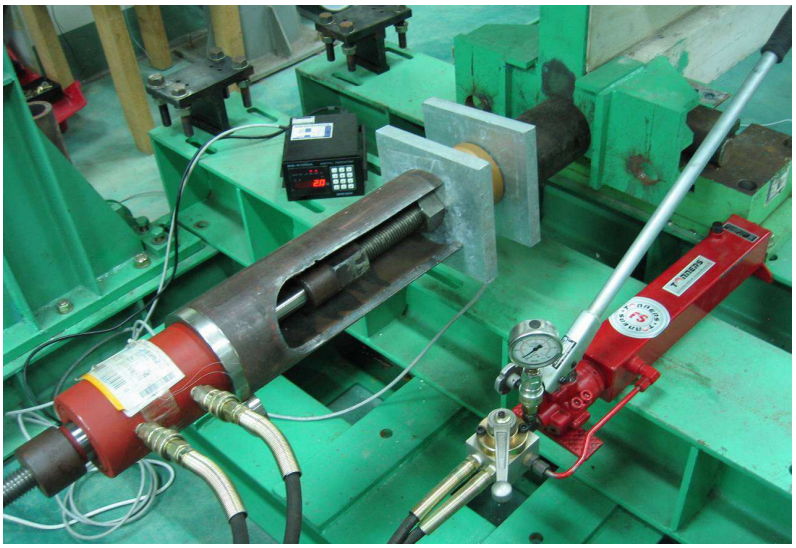
<49> 여기서, Z^0 와 Z^d 는 각각 손상 전후의 임피던스 응답을 나타내며, σ 와 μ 는 각 임피던스 응답의 평균과 표준편차를 나타낸다. 또한, $E[\bullet]$ 는 괄호 내에 주어진 값의 평균을 나타낸다. RMSD나 상관계수값이 각각 100%나 1 보다 작아지면 손상 발생을 의미한다.

실 시 예

<50> 실제 PSC 거더 교량에 대한 하이브리드 모니터링 체계의 적용성을 검증해 보기 위해 모형 PSC 거더교를 제작하여 손상모니터링을 수행하였다.

<51> 도 2는 검증을 위해 제작된 모형 PSC 거더의 형상 및 철근 배근도를 보여준다. 도 2와 같이 T형 단면을 가지는 총 연장 6.4m인 모형 PSC 거더를 제작하였으며, 철근은 공칭직경이 9.53mm인 D10인 이형철근 이용하여 배근하

였다. 또한, 지름 15.2mm의 7 연선(Grade 250)을 텐던으로 사용하여 하부플랜지의 중앙에 직선으로 배치하였다. 텐던은 직경 25mm의 덕트내에 설치되었으며 그라우팅되지 않았다. 콘크리트의 28일 압축강도는 23.6MPa 이며 단위중량은 2400kgf/m^3 이다. 초기 긴장력의 도입은 유압잭을 이용하여 도입하였다(표 1 참조). 또한 유압잭이 설치되지 않는 반대편에는 긴장력의 도입 시 텐던을 고정시키기 위한 쐐기를 설치하였다.

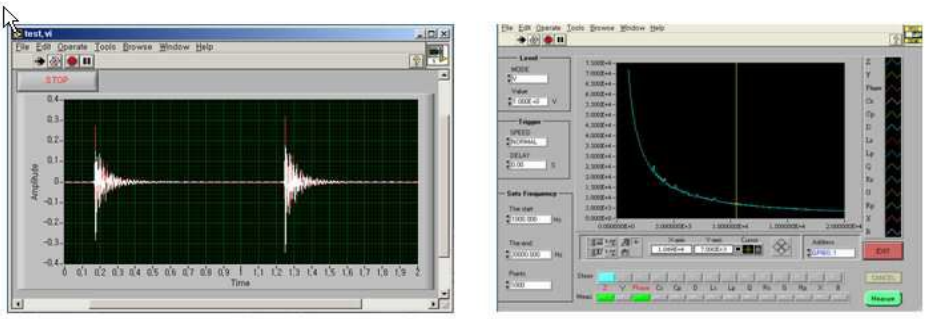


<52>

<53> < 표 1 : 유압잭을 이용한 긴장력 도입 모습>

<54> 도 3과 도 4는 모형 PSC 거더에 설치된 가속도 센서와 PZT 센서의 위치를 보여준다. 가속도 신호는 압전형 가속도계(PCB 393B04)를 총 2개(거더 상부에 2개)를 사용하였으며, 거더 상부의 2개의 가속도 센서의 위치 선정은 단순지지된 보에서 동적특성 분석시 모드형상 분석 시에 여러 개의 모드 민감도가 높은 위치를 선정하여 부착하였다. 또한, 가진력은 충격해머를 이용하여 거더의 오른쪽 끝에서 0.95m 위치에 가하였다. 임피던스 신호 측정을 위한 PZT 센서의 경우 기존의 PZT 패치 가지는 단점을 보완하고 곡면을 가지는 쐐기의 표면이 부착이 용이하도록 제작된 MFC 패치 (25.4x12.7x0.254mm)를 사용하였다.

<55> 가속도 측정을 위하여 National Instrument 사의 PXI 4472 DAQ, PXI-8186 controller가 설치되었으며, LabVIEW를 이용하여 1kHz의 샘플링 주파수로 가속도 신호를 계측하였다. 임피던스 측정을 위해서는 임피던스 분석기인 HIOKI 3532를 설치하였으며, LabVIEW를 이용하여 1V의 전압을 가하여 신호를 계측하였다. 표 3은 LabVIEW를 이용하여 계측된 가속도 및 임피던스 신호이다.



(a) 가속도 신호 (b) 임피던스 신호

<56>

<57> < 표 3 : LabVIEW를 이용하여 계측된 가속도 및 임피던스 신호>

<58> 상기와 같은 실험 구성을 바탕으로 본 발명의 PSC 거더 교량의 전형적인 손상유형인 PC 텐던의 긴장력 감소와 콘크리트의 휨 강성저하를 모니터링한 결과를 살펴보았다.

<59> **PC 텐던의 긴장력 감소에 대한 하이브리드 손상 모니터링**

<60> PC 텐던의 긴장력 감소에 대한 실험을 수행하기 위해서 유압잭을 이용하여 긴장력을 도입하였으며, 도입된 긴장력의 크기는 로드셀을 이용하여 계측하였다. 유압잭이 거취되는 부분은 긴장력의 도입이 용이하도록 하기 위해 텐던의 끝에 나사선이 있는 강봉을 부착한 뒤, 너트를 이용하여 정착하였으며, 반대 측은 쐐기를 이용하여

정착하였다. 유압잭의 하중에 인해 발생하는 구조물의 동특성변화를 최소화하기 위해 긴장력 도입 후에 유압잭을 구조물로 분리하여 신호를 취득하였다. 초기 긴장력을 117.6kN (PS 1)으로부터 최소 39.2kN (PS 5)까지 각 동적 실험 단계별로 19.6kN 씩의 긴장력을 감소시키면서 실험이 수행되었다(표 3 참조). 또한, 각각의 긴장력 감소 단계에서 8회의 실험을 수행하였다.

<61> < 표 3 : PC 텐던의 긴장력 감소 실험을 위해 선정된 손상 시나리오>

<62>

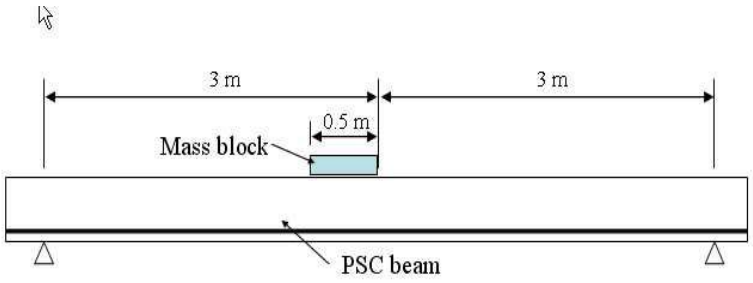
Prestress Level	PS 1	PS 2	PS 3	PS 4	PS 5
Prestress Force (kN)	117.6	98.0	78.4	58.8	39.2

<63> 도 1의 하이브리드 모니터링 체계의 Step 1은 PSC 교량의 전역적인 손상의 발생을 알리기 위한 손상 경보단계이다. 서로 다른 두 위치의 가속도계(Sensor 1, Sensor 2)로부터 측정된 가속도 신호의 주파수응답함수를 이용하여 손상의 발생을 경보하기 위해 주파수응답비보증지수를 사용하였다. 도 5는 각각의 긴장력 감소 단계별로 Sensor 1와 Sensor 2의 주파수응답함수와 두 위치에서 산정된 주파수응답함수로 산정된 주파수응답비를 보여준다. 도 6은 PS 1이 도입된 상태의 주파수응답비를 기준으로 나머지 긴장력 감소 단계(PS 2 - PS 5)의 주파수응답비를 비교함으로써 주파수응답비보증지수를 산정한 결과를 보여준다. 또한, 각각의 단계를 8회의 실험 중에서, PS 1의 첫번 째 실험을 기준으로 모든 실험 데이터를 비교하였다. 도 6에서 볼수 있듯이, PS 1의 경우 주파수응답비보증지수의 변화가 거의 발생하지 않는 것을 볼 수 있으며, PS 2가 발생한 단계에서 주파수응답보증지수의 감소를 볼 수 있으며, PS 3이 발생하기 전까지 일정하게 유지된다. 이는 PS 4와 PS 5에서도 동일한 경향을 보인다. 이런 결과로부터 주파수응답비보증지수를 이용하여 모든 긴장력 감소 단계에 대한 손상경보가 이루어짐을 알 수 있다.

<64> 다음으로, 도 1의 하이브리드 모니터링 체계의 Step 2는 손상 경보의 원인이 PC 텐던의 긴장력 감소와 휨 강성 저하 중 어느 것에 의한 것인지를 규명한다. 도 7은 PC 텐던의 쐐기에 부착된 MFC 패치로부터 계측된 임피던스 신호를 보여준다. 임피던스 신호의 변화가 발생한다는 것은 MFC 패치의 부근에서 구조 손상이나 구조물의 다른 물리적 변화가 발생하였음을 말하며, 임피던스 신호가 우측으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이로부터, 손상경보의 원인이 긴장력 감소에 의한 것임을 분류할 수 있다.

<65> **콘크리트 휨 강성 저하에 대한 하이브리드 손상 모니터링**

<66> PSC 거더에 인위적인 균열을 모사하지 않고 콘크리트의 휨 강성 저하에 대한 실험을 수행하기 위해서 부가질량(added mass) 실험을 수행하였다. 부가질량 실험은 휨 균열에 대한 콘크리트의 휨 강성 저하를 부가질량을 통해 간접적으로 모사하는 방법이다. 이를 위해, 1.2kN의 콘크리트 블록(0.5x0.5x0.25m)을 이용하였다 (표 4 참조). 부가질량 실험을 토해 휨 강성 저하를 모사하기 위한 관계는 $(k-\Delta k)/k = m/(m+\Delta m)$ 와 같다. 여기서, Δm 은 부가질량, m 은 부가질량이 재하된 위치에서 거더단면의 질량, k 는 거더의 휨 강성, Δk 는 부가질량에 대응하는 휨 강성의 변화를 나타낸다. 실험은 초기 긴장력 117.6kN (PS 1)이 작용한 상태에서 부가질량을 재하하였으며, 콘크리트 블록 1개(Loading 1)와 2개(Loading 2)를 재하한 조건을 고려하였다. 각각의 재하조건에 대해 8회의 실험을 수행하였다.





<67>

<68> < 표 4 : 콘크리트 휨 강성 저하 실험을 위해 선정된 손상 시나리오>

<69> 먼저, 도 1의 Step 1의 손상 경보를 수행하기 위해, 긴장력 감소와 동일한 과정으로 Sensor 1와 Sensor 2에서 도 8과 같이 주파수응답함수와 주파수응답비를 산정하였다. 이로 부터, 도 9와 같이 주파수응답보증지수를 산정하였다. 역시, 콘크리트 블록을 재하하지 않은 상태의 주파수응답비를 기준으로 나머지 휨 강성 저하 단계의 주파수응답비를 비교하여 주파수응답비보증지수를 구하였으며, 재하하지 않은 상태에서 첫 번째 실험을 기준으로 모든 실험 데이터를 비교하였다. 그 결과, 재하하지 않은 상태에서는 주파수응답비보증지수의 변화가 거의 발생하지 않았으며, Loading 1이 발생한 단계에서 주파수응답비보증지수의 감소를 볼 수 있었다. 이는 Loading 2에서도 동일한 경향을 보인다. 이로 부터, 주파수응답비보증지수를 이용하여 모든 휨 강성 저하 단계에 대한 손상경보가 이루어짐을 알 수 있다.

<70> 다음으로, 도 1의 Step 2로 쐐기에 부착된 MFC 패치로부터 임피던스 신호를 계측하였다. 도 10에서 볼 수 있듯이, 임피던스 신호가 거의 변화없음을 알 수 있으며, 손상경보의 원인이 콘크리트의 휨 강성 저하에 의한 것임을 분류할 수 있다.

<71> 이상과 같은 실험 검증을 통해 본 발명에서 PSC 교량의 전형적인 손상유형인 PC 텐던의 긴장력 감소와 콘크리트의 휨 강성 저하를 모니터링하기 위해 제안된 하이브리드 모니터링 체계가 유용함을 볼 수 있었으며, 실제 PSC 교량의 실시간 모니터링 체계의 구축에 매우 실용성이 있는 것을 볼 수 있다.

도면의 간단한 설명

<72> 도 1은 본 발명을 통해 개발하고자 하는 PSC 거더 교량의 긴장력 감소 및 휨 강성저하는 모니터링하여 손상발생 및 손상분류를 수행하기 위한 하이브리드 모니터링 체계에 관한 모식도이다.

<73> 도 2는 본 발명을 통해 개발하고자 하는 하이브리드 모니터링 체계를 검증하기 위해 제작된 모형 PSC 거더의 형상 및 철근배근도이다.

<74> 도 3은 하이브리드 모니터링 체계를 검증하기 위해 제작된 모형 PSC 거더위에 부착할 센서들의 위치와 가속도 신호의 취득을 위한 가진위치를 보여준다.

<75> 도 4는 가속도 및 임피던스 신호를 취득하기 위해 PSC 거더 상부와 쐐기위에 부착된 가속도계와 MFC 센서를 보여준다.

<76> 도 5는 PC 텐던의 긴장력 감소의 발생을 경보하기 위해 서로 다른 위치의 가속도계에서 취득된 가속도 신호를 이용해 산정된 주파수응답함수와 주파수응답비를 보여준다.

<77> 도 6은 PC 텐던의 간장력 감소의 발생을 경보하기 위해 산정된 주파수응답비를 이용하여 주파수응답비보증지수를 구한 결과를 보여준다.

<78> 도 7은 Step 1에서 경보된 손상의 원인이 긴장력 저하에 의한 것임을 규명하기 위해 측정된 임피던스 신호의 변화를 보여준다.

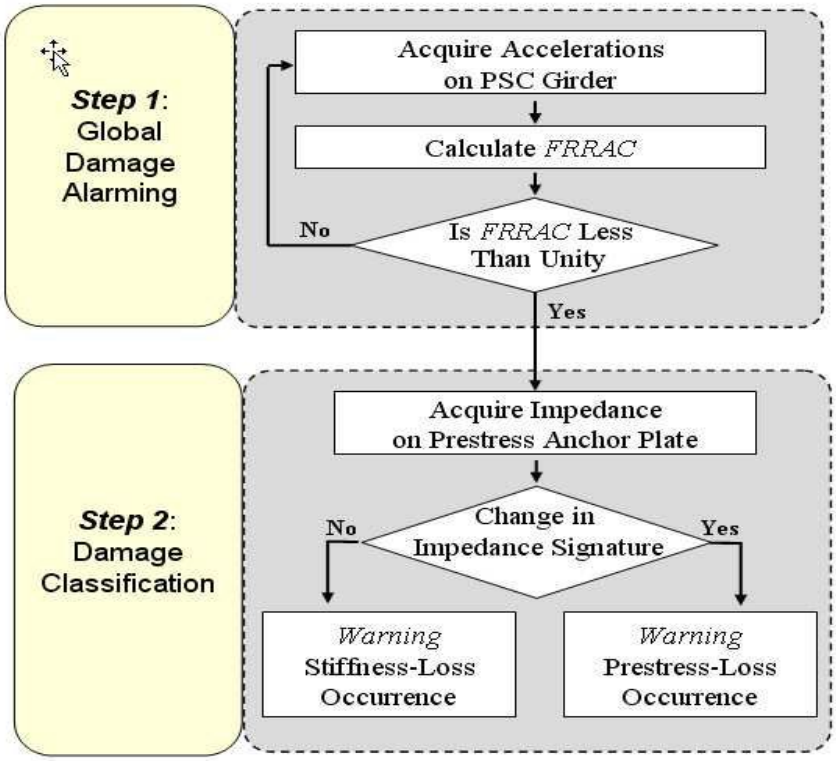
<79> 도 8는 콘크리트 휨 강성 저하의 발생을 경보하기 위해 서로 다른 위치의 가속도계에서 취득된 가속도 신호를 이용해 산정된 주파수응답함수와 주파수응답비를 보여준다.

<80> 도 9은 콘크리트 휨 강성 저하의 발생을 경보하기 위해 산정된 주파수응답비를 이용하여 주파수응답비보증지수를 구한 결과를 보여준다.

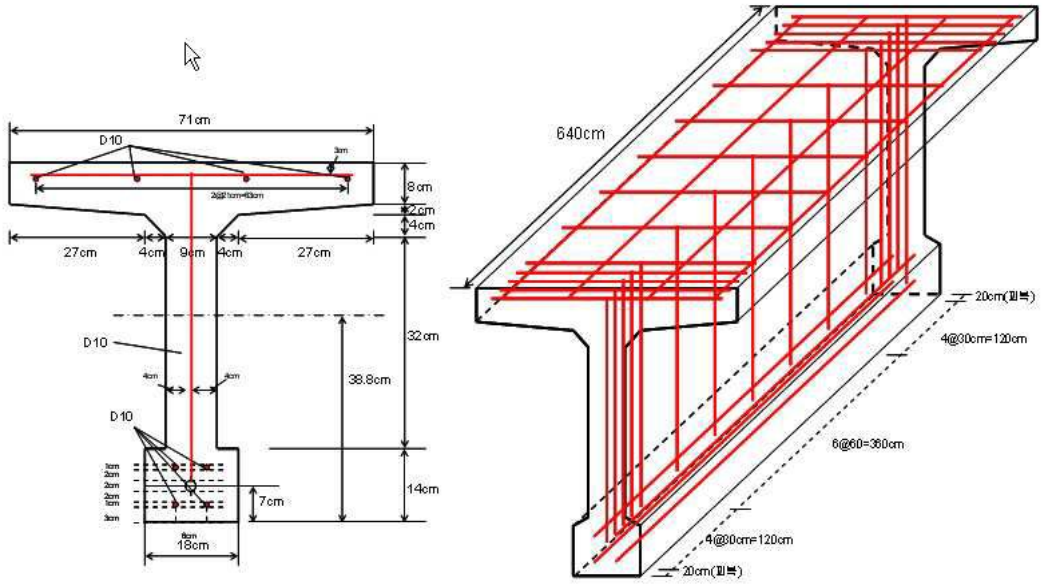
<81> 도 10은 Step 1에서 경보된 손상의 원인이 휨 강성 저하에 의한 것임을 규명하기 위해 측정된 임피던스 신호의 변화를 보여준다.

도면

도면1



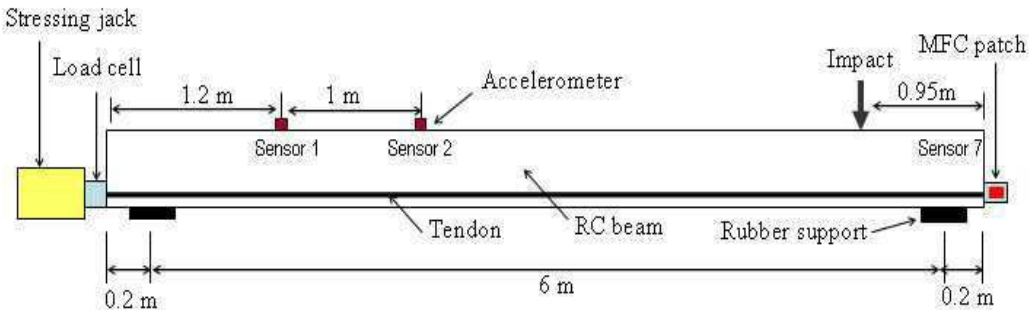
도면2



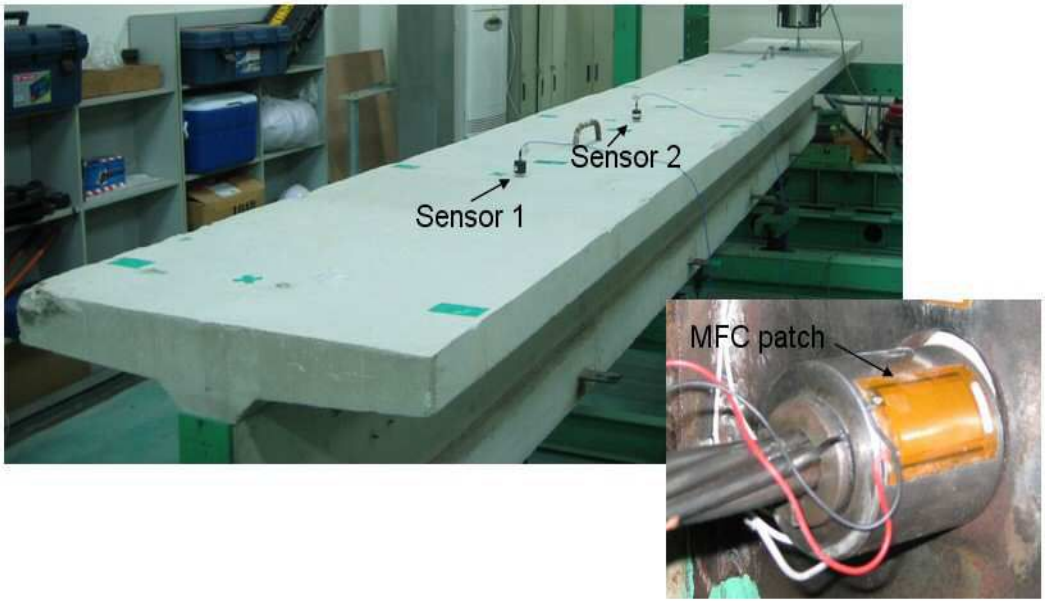
(a) 모형 거더 단면

(b) 모형 거더 형상 및 철근 배근도

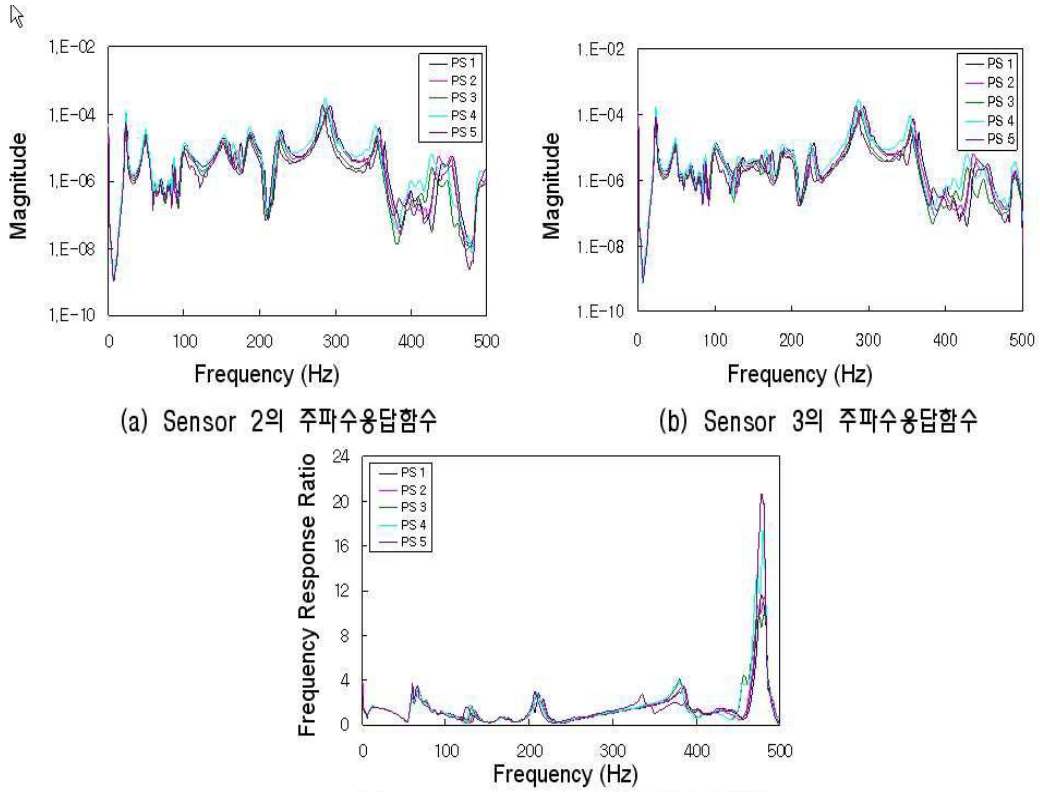
도면3


Stressing jack
Load cell
1.2 m
1 m
Accelerometer
Impact
MFC patch
0.95m
Sensor 1
Sensor 2
Sensor 7
Tendon
RC beam
Rubber support
0.2 m
6 m
0.2 m

도면4


Sensor 2
Sensor 1
MFC patch

도면5

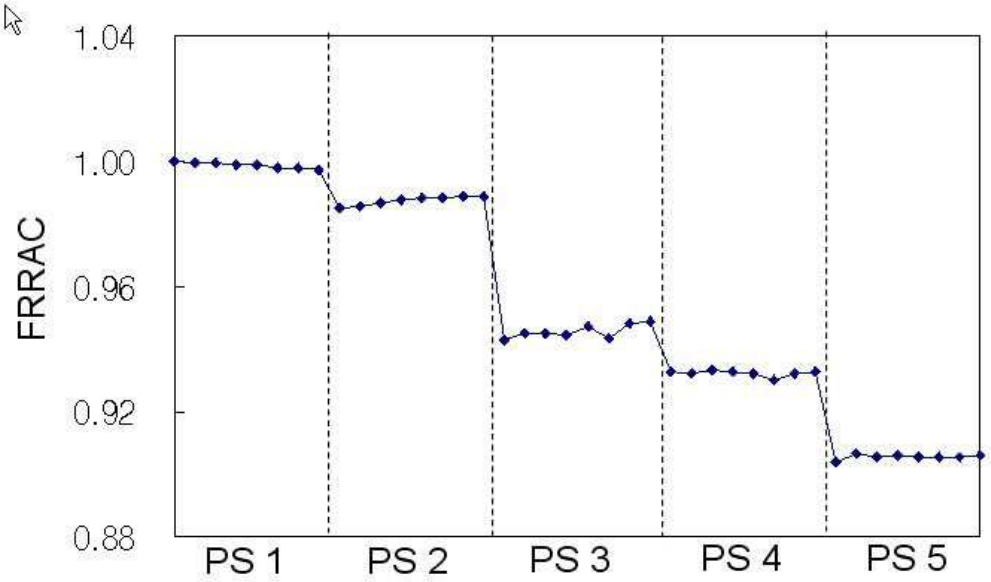


(a) Sensor 2의 주파수응답함수

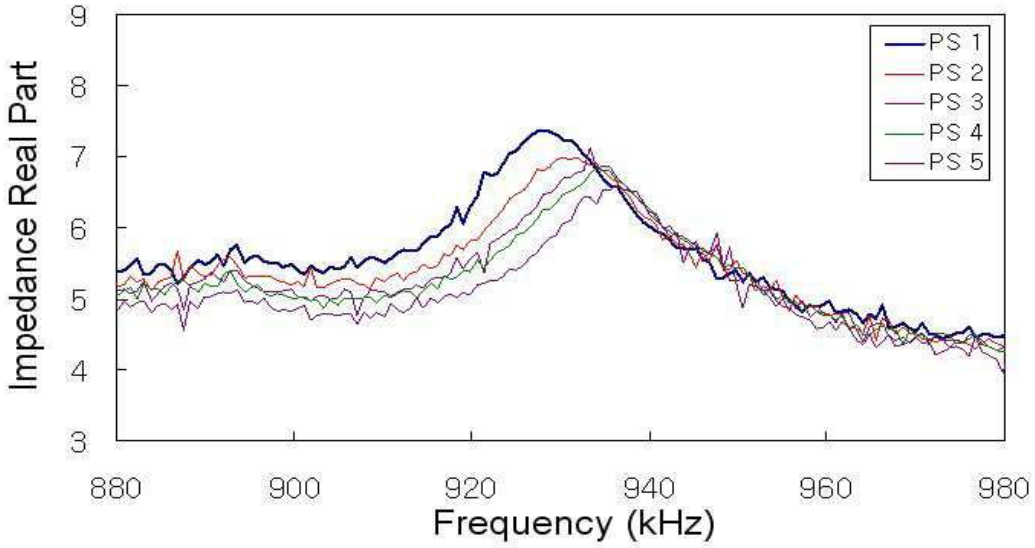
(b) Sensor 3의 주파수응답함수

(c) Sensor 2/Sensor 3의 주파수응답비

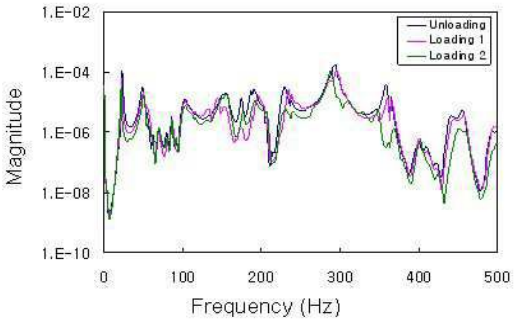
도면6



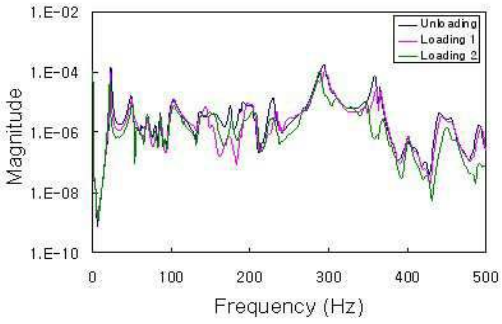
도면7



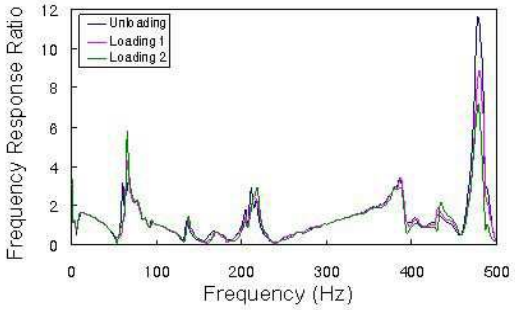
도면8



(a) Sensor 2의 주파수응답함수

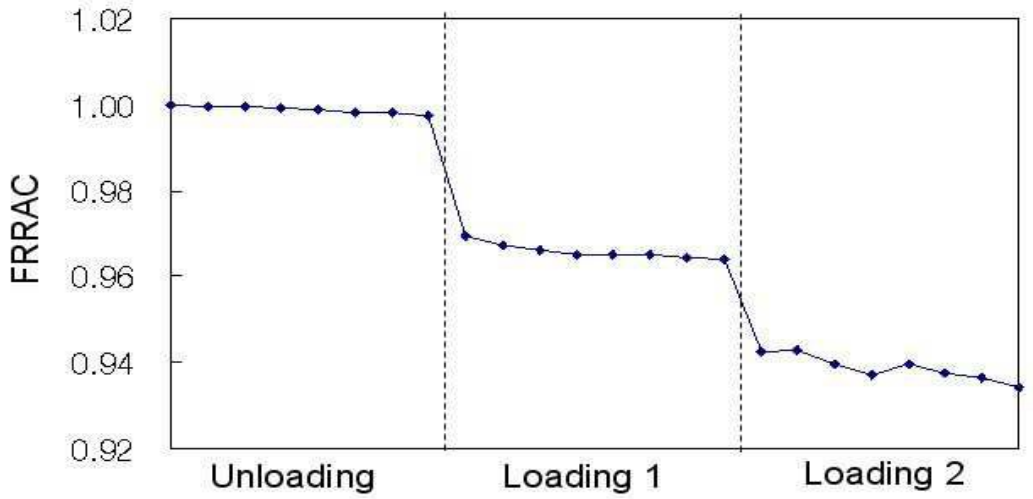


(b) Sensor 3의 주파수응답함수

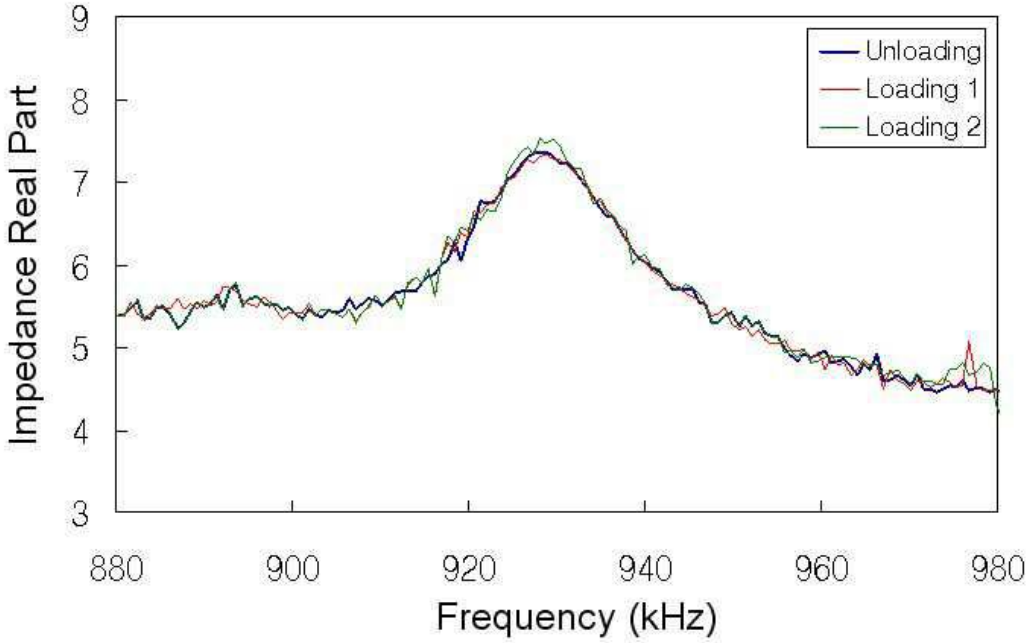


(c) Sensor 2/Sensor 3의 주파수응답비

도면9


1.02
1.00
0.98
0.96
0.94
0.92
FRRAC
Unloading
Loading 1
Loading 2

도면10


9
8
7
6
5
4
3
Impedance Real Part
880
900
920
940
960
980
Frequency (kHz)
Unloading
Loading 1
Loading 2