



등록특허 10-2248203



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년05월04일  
(11) 등록번호 10-2248203  
(24) 등록일자 2021년04월28일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
*G01F 1/32* (2006.01) *G06F 30/00* (2020.01)  
*G10K 11/16* (2006.01)
- (52) CPC특허분류  
*G01F 1/3209* (2013.01)  
*G06F 30/15* (2020.01)
- (21) 출원번호 10-2019-7002159
- (22) 출원일자(국제) 2017년06월19일  
심사청구일자 2020년06월02일
- (85) 번역문제출일자 2019년01월22일
- (65) 공개번호 10-2019-0088963
- (43) 공개일자 2019년07월29일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2017/038143
- (87) 국제공개번호 WO 2017/222991  
국제공개일자 2017년12월28일
- (30) 우선권주장  
15/189,609 2016년06월22일 미국(US)
- (56) 선행기술조사문현  
US20140257772 A1

- (73) 특허권자  
다솔 시스템즈 시플리아 코포레이션  
미국 02919 로드 아일랜드주 존스턴 엣우드 애비뉴 1301 스위트 101더블유
- (72) 발명자  
만 아드리안  
미국 캘리포니아 94306 팔로 알토 스탠포드 애비뉴 447
- 페롯 프랭크 레온  
미국 메사추세츠 02474 알링تون 오리엔트 애비뉴 94
- (74) 대리인  
박장원

전체 청구항 수 : 총 39 항

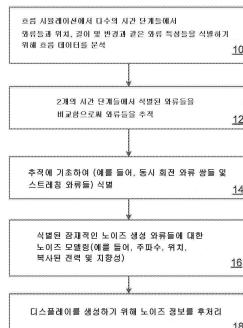
심사관 : 김윤선

## (54) 발명의 명칭 흐름으로 유발된 노이즈의 소스 식별을 위한 시스템 및 방법

## (57) 요 약

물리적 공간을 나타내는 체적내의 유체의 활동을 시뮬레이션하는 시스템 및 방법이 개시되고, 상기 체적 내의 유체의 활동은 상기 체적 내의 요소들의 움직임을 모델링하도록 시뮬레이트된다. 상기 방법은, 제1 시간에서, 과도 흐름 및 난류 흐름에서 와류들의 제1 세트를 식별하는 단계를 포함한다. 상기 방법은, 제2 시간의 후속하는 제2 시간에서, 와류들의 제2 세트를 식별하는 단계를 포함한다. 상기 방법은, 개별적인 와류들의 제1 세트와 제2 세트를 비교함으로써 상기 와류들의 변화를 추적하는 단계를 포함한다. 상기 방법은, 추적에 기초하여 하나 이상의 노이즈 소스들을 식별하는 단계를 포함한다. 상기 방법은, 수신기에서 하나 이상의 노이즈 소스들의 기여를 결정하는 단계를 포함한다. 상기 방법은 또한 하나 이상의 변형들을 나타내는 데이터를 디바이스 또는 엔티티의 하나 이상의 기하학적 피처들에 출력하는 단계를 포함한다.

## 대 표 도



(52) CPC특허분류

*G06F 30/23* (2020.01)

*G10K 11/16* (2018.01)

*Y02T 90/00* (2020.08)

---

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

흐름으로 유발된 노이즈의 소스 식별(flow-induced noise source identification)을 위한 시스템으로서, 물리적 공간을 나타내는 체적(volume)이 작은 유체(fluid)를 나타내는 데이터를 처리하는, 노이즈 소스 식별을 위한 데이터 프로세싱 시스템을 포함하고,

상기 데이터 프로세싱 시스템은:

하나 이상의 프로세싱 디바이스들, 및 상기 하나 이상의 프로세싱 디바이스들에 의해 실행될 때, 상기 하나 이상의 프로세싱 디바이스들로 하여금 동작들을 수행하도록 하는 동작 가능한 명령어들을 저장하는 하나 이상의 하드웨어 저장 디바이스들을 포함하고, 상기 동작들은:

물리적 공간을 나타내는 체적 내의 유체의 활동을 시뮬레이트하는 단계 - 상기 체적 내의 유체의 활동은 체적 내의 요소들의 움직임을 모델링하도록 시뮬레이트되고 - 와;

유체 흐름 시뮬레이션의 제1 시간에서 발생하는 유체 흐름에 의해 모델링된 과도 흐름(transient flow) 및 난류 흐름(turbulent flow)에서 와류(vortice)들의 제1 세트를 식별하는 단계와;

상기 유체 흐름 시뮬레이션의 제2 후속 시간에서 발생하는 과도 흐름 및 난류 흐름에서 와류들의 제2 세트를 식별하는 단계와;

개별적인 상기 와류들의 제1 세트와 개별적인 상기 와류들의 제2 세트를 비교함으로써 상기 와류들의 변화를 추적하는 단계와;

상기 추적에 기초하여 복수의 노이즈 소스들을 식별하는 단계와;

상기 체적 내의 미리 결정된 위치에 있는 수신기 위치에서 노이즈를 발생시킴에 있어서, 상기 수신기 위치에서 발생하는 상기 복수의 노이즈 소스들의 기여(contribution)를 결정하는 단계와; 그리고

상기 체적을 통해 그리고 상기 수신기 위치로 상기 노이즈 소스들의 분포를 나타내는 디스플레이 디바이스 상에 렌더링되는 데이터를 출력하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는

흐름으로 유발된 노이즈의 소스 식별을 위한 시스템.

#### 청구항 2

제1항에 있어서,

상기 기여를 결정하는 단계는, 상기 복수의 노이즈 소스들 각각에 전달 함수를 적용하는 단계를 포함하고,

상기 전달 함수는 각 노이즈 소스의 위치와 상기 수신기의 미리결정된 위치 사이의 관계에 기초하여 상기 기여를 결정하는 것을 특징으로 하는

흐름으로 유발된 노이즈의 소스 식별을 위한 시스템.

#### 청구항 3

제2항에 있어서,

상기 복수의 노이즈 소스들 각각에 적용되는 전달 함수는 주파수 의존 전달 함수인 것을 특징으로 하는

흐름으로 유발된 노이즈의 소스 식별을 위한 시스템.

#### 청구항 4

제1항에 있어서,

상기 복수의 노이즈 소스들의 적어도 일부를, 상기 노이즈 소스들 각각의 기여에 적어도 부분적으로 기초하여

클러스터된 하나 이상의 노이즈 소스들의 클러스터들로 결합하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는  
흐름으로 유발된 노이즈의 소스 식별을 위한 시스템.

#### 청구항 5

제4항에 있어서,

상기 복수의 노이즈 소스들의 기여들 각각의 강도(strength)를 상기 클러스터에 포함시키기 위한 임계값과 비교  
하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는  
흐름으로 유발된 노이즈의 소스 식별을 위한 시스템.

#### 청구항 6

제1항에 있어서,

상기 수신기는 오디오 기록 디바이스 또는 사람의 귀에 대응하는 위치에 배치되는 것을 특징으로 하는  
흐름으로 유발된 노이즈의 소스 식별을 위한 시스템.

#### 청구항 7

제4항에 있어서,

상기 결합 이후에 하나 이상의 사운드 생성 흐름 영역들에 전달 함수를 적용하는 단계를 더 포함하는 것을 특징  
으로 하는  
흐름으로 유발된 노이즈의 소스 식별을 위한 시스템.

#### 청구항 8

제4항에 있어서,

상기 복수의 노이즈 소스들 각각의 강도를 임계값과 비교하는 단계 및 상기 임계값 아래의 강도를 갖는 적어도  
하나의 노이즈 소스를 제외하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는  
흐름으로 유발된 노이즈의 소스 식별을 위한 시스템.

#### 청구항 9

제1항에 있어서,

상기 복수의 노이즈 소스들은 노이즈 소스들의 제1 세트이며,

상기 시스템은, 상기 물리적 공간 내의 또는 상기 물리적 공간 주위의 상이한 물리적 조건들에 대응하는 제2 시  
뮬레이션에 기초하여 복수의 노이즈 소스들의 제2 세트를 결정하는 것을 더 포함하는 것을 특징으로 하는  
흐름으로 유발된 노이즈의 소스 식별을 위한 시스템.

#### 청구항 10

제4항에 있어서,

상기 복수의 노이즈 소스들을 상기 하나 이상의 클러스터들로 결합하는 단계는, 상기 시스템의 처리 성능을 향  
상시키는 것을 특징으로 하는

흐름으로 유발된 노이즈의 소스 식별을 위한 시스템.

#### 청구항 11

제1항에 있어서,

설계 변경을 위해 상기 식별된 영역에 기초하여 하나 이상의 물리적 객체들에 대한 물리적 수정을 초래하는 단  
계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는

흐름으로 유발된 노이즈의 소스 식별을 위한 시스템.

### 청구항 12

제11항에 있어서,

상기 물리적 수정을 사용하여 물리적 객체를 만들어가는(build) 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 흐름으로 유발된 노이즈의 소스 식별을 위한 시스템.

### 청구항 13

제11항에 있어서,

복수의 노이즈 소스들의 기여를 최소화하도록 설계 변경을 최적화하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 흐름으로 유발된 노이즈의 소스 식별을 위한 시스템.

### 청구항 14

물리적 공간을 나타내는 체적내의 유체의 활동을 시뮬레이션하는 컴퓨터로 구현되는 방법으로서,

상기 체적 내의 유체의 활동은 상기 체적 내의 요소들의 움직임을 모델링하도록 시뮬레이트되고, 상기 방법은:

유체 흐름 시뮬레이션의 제1 시간에서 발생하는 유체 흐름에 의해 모델링된 과도 흐름 및 난류 흐름에서 와류들의 제1 세트를 식별하는 단계와;

상기 유체 흐름 시뮬레이션의 제2 후속 시간에서 발생하는 과도 흐름 및 난류 흐름에서 와류들의 제2 세트를 식별하는 단계와;

개별적인 상기 와류들의 제1 세트와 개별적인 상기 와류들의 제2 세트를 비교함으로써 상기 와류들의 변화를 추적하는 단계와;

상기 추적에 기초하여 복수의 노이즈 소스들을 식별하는 단계와;

상기 체적 내의 미리 결정된 위치에 있는 수신기 위치에서 노이즈를 발생시킴에 있어서, 상기 수신기 위치에서 발생하는 상기 복수의 노이즈 소스들의 기여를 결정하는 단계와; 그리고

상기 체적을 통해 그리고 상기 수신기 위치로 상기 노이즈 소스들의 분포를 나타내는 디스플레이 디바이스 상에 렌더링되는 데이터를 출력하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 컴퓨터로 구현되는 방법.

### 청구항 15

제14항에 있어서,

상기 기여를 결정하는 단계는, 적어도 하나의 노이즈 소스에 전달 함수를 적용하는 단계를 포함하고,

상기 전달 함수는 상기 노이즈 소스의 위치와 상기 수신기의 위치 사이의 관계에 기초하여 상기 기여를 결정하는 것을 특징으로 하는

컴퓨터로 구현되는 방법.

### 청구항 16

제15항에 있어서,

상기 복수의 노이즈 소스들 각각에 적용되는 전달 함수는 주파수 의존 전달 함수인 것을 특징으로 하는 컴퓨터로 구현되는 방법.

### 청구항 17

제14항에 있어서,

상기 복수의 노이즈 소스들의 적어도 일부를, 상기 노이즈 소스들 각각의 기여에 적어도 부분적으로 기초하여 클러스터된 하나 이상의 노이즈 소스들의 클러스터들로 결합하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 컴퓨터로 구현되는 방법.

### 청구항 18

제17항에 있어서,

상기 복수의 노이즈 소스들의 기여를 각각의 강도를 상기 클러스터에 포함시키기 위한 임계값과 비교하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는

컴퓨터로 구현되는 방법.

### 청구항 19

제14항에 있어서,

상기 수신기는 오디오 기록 디바이스 또는 사람의 귀에 대응하는 위치에 배치되는 것을 특징으로 하는

컴퓨터로 구현되는 방법.

### 청구항 20

제17항에 있어서,

상기 결합 이후에 하나 이상의 사운드 생성 흐름 영역들에 전달 함수를 적용하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는

컴퓨터로 구현되는 방법.

### 청구항 21

제17항에 있어서,

상기 복수의 노이즈 소스들 각각의 강도를 임계값과 비교하는 단계 및 상기 임계값 아래의 강도를 갖는 적어도 하나의 노이즈 소스를 제외하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는

컴퓨터로 구현되는 방법.

### 청구항 22

제14항에 있어서,

상기 복수의 노이즈 소스들은 노이즈 소스들의 제1 세트이며,

상기 방법은, 상기 물리적 공간 내의 또는 상기 물리적 공간 주위의 상이한 물리적 조건들에 대응하는 제2 시뮬레이션에 기초하여 복수의 노이즈 소스들의 제2 세트를 결정하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는

컴퓨터로 구현되는 방법.

### 청구항 23

제18항에 있어서,

상기 복수의 노이즈 소스들을 상기 하나 이상의 클러스터들로 결합하는 단계는, 상기 컴퓨터로 구현되는 방법의 처리 성능을 향상시키는 것을 특징으로 하는

컴퓨터로 구현되는 방법.

### 청구항 24

제14항에 있어서,

설계 변경을 위해 상기 식별된 영역에 기초하여 하나 이상의 물리적 객체들에 대한 물리적 수정을 초래하는 단

계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는  
컴퓨터로 구현되는 방법.

### 청구항 25

제24항에 있어서,  
상기 물리적 수정을 사용하여 물리적 객체를 만들어가는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는  
컴퓨터로 구현되는 방법.

### 청구항 26

제25항에 있어서,  
복수의 노이즈 소스들의 기여를 최소화하도록 설계 변경을 최적화하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는  
컴퓨터로 구현되는 방법.

### 청구항 27

컴퓨터 판독 가능 비 일시적 저장 매체 상에 저장된 컴퓨터 프로그램 제품으로서,  
상기 컴퓨터 프로그램 제품은 흐름-유도 노이즈 소스 식별을 위한 것으로 명령어들을 포함하고, 상기 명령어들은 시스템으로 하여금:  
물리적 공간을 나타내는 체적 내의 유체의 활동을 시뮬레이트하고, 상기 체적 내의 유체의 활동은 상기 체적 내의 요소들의 움직임을 모델링하도록 시뮬레이트되며,  
유체 흐름 시뮬레이션의 제1 시간에서 발생하는 유체 흐름에 의해 모델링된 과도 흐름 및 난류 흐름에서 와류들의 제1 세트를 식별하고,  
상기 유체 흐름 시뮬레이션의 제2 후속 시간에서 발생하는 과도 흐름 및 난류 흐름에서 와류들의 제2 세트를 식별하고,  
개별적인 상기 와류들의 제1 세트와 개별적인 상기 와류들의 제2 세트를 비교함으로써 상기 와류들의 변화를 추적하고,

상기 추적에 기초하여 복수의 노이즈 소스들을 식별하고,  
상기 체적 내의 미리 결정된 위치에 있는 수신기 위치에서 노이즈를 발생시킴에 있어서, 상기 수신기 위치에서 발생하는 상기 복수의 노이즈 소스들의 기여를 결정하며; 그리고  
상기 체적을 통해 그리고 상기 수신기 위치로 상기 노이즈 소스들의 분포를 나타내는 디스플레이 디바이스 상에 렌더링되는 데이터를 출력하도록 하는 것을 특징으로 하는  
컴퓨터 프로그램 제품.

### 청구항 28

제27항에 있어서,  
상기 기여를 결정하도록 하는 명령어들은, 상기 복수의 노이즈 소스들 각각에 전달 함수를 적용하도록 하는 명령어들을 포함하고,  
상기 전달 함수는 각 노이즈 소스의 위치와 상기 수신기의 미리결정된 위치 사이의 관계에 기초하여 상기 기여를 결정하는 것을 특징으로 하는  
컴퓨터 프로그램 제품.

### 청구항 29

제28항에 있어서,  
상기 전달 함수를 적용하도록 하는 명령어들은, 주파수 의존 전달 함수인 상기 복수의 노이즈 소스들 각각에 상

기 전달 함수를 적용하는 것을 특징으로 하는  
컴퓨터 프로그램 제품.

### 청구항 30

제27항에 있어서,

상기 복수의 노이즈 소스들의 적어도 일부를, 상기 노이즈 소스들 각각의 기여에 적어도 부분적으로 기초하여 클러스터된 하나 이상의 노이즈 소스들의 클러스터들로 결합하도록 하는 명령어들을 더 포함하는 것을 특징으로 하는

컴퓨터 프로그램 제품.

### 청구항 31

제30항에 있어서,

상기 복수의 노이즈 소스들의 기여들 각각의 강도를 상기 클러스터에 포함시키기 위한 임계값과 비교하도록 하는 명령어들을 더 포함하는 것을 특징으로 하는

컴퓨터 프로그램 제품.

### 청구항 32

제30항에 있어서,

상기 결합 이후에 하나 이상의 사운드 생성 흐름 영역들에 전달 함수를 적용하도록 하는 명령어들을 더 포함하는 것을 특징으로 하는

컴퓨터 프로그램 제품.

### 청구항 33

제31항에 있어서,

상기 복수의 노이즈 소스들 각각의 강도를 임계값과 비교하고 그리고 상기 임계값 아래의 강도를 갖는 적어도 하나의 노이즈 소스를 제외하도록 하는 명령어들을 더 포함하는 것을 특징으로 하는

컴퓨터 프로그램 제품.

### 청구항 34

제27항에 있어서,

상기 복수의 노이즈 소스들은 노이즈 소스들의 제1 세트이며,

상기 컴퓨터 프로그램 제품은, 상기 물리적 공간 내의 또는 상기 물리적 공간 주위의 상이한 물리적 조건들에 대응하는 제2 시뮬레이션에 기초하여 복수의 노이즈 소스들의 제2 세트를 결정하도록 하는 명령어들을 더 포함하는 것을 특징으로 하는

컴퓨터 프로그램 제품.

### 청구항 35

시스템으로서,

데이터 프로세싱 시스템을 포함하고,

상기 데이터 프로세싱 시스템은:

하나 이상의 프로세싱 디바이스들, 및 상기 하나 이상의 프로세싱 디바이스들에 의해 실행될 때, 상기 하나 이상의 프로세싱 디바이스들로 하여금 동작들을 수행하도록 하는 동작 가능한 명령어들을 저장하는 하나 이상의 하드웨어 저장 디바이스들을 포함하고, 상기 동작들은:

물리적 공간을 나타내는 체적 내의 유체의 활동을 시뮬레이트하고, 상기 체적 내의 유체의 활동은 체적 내의 요소들의 움직임을 모델링하도록 시뮬레이트되고,

상기 체적에서 균일하지 않은 속도로 스트레칭 중인 하나 이상의 잠재적인 사운드 발생 와류 구조들을 식별하고,

상기 와류 구조들을 변화를 추적하고,

상기 추적에 기초하여 하나 이상의 노이즈 소스들을 식별하고,

상기 체적 내의 미리 결정된 위치에 있는 수신기 위치에서 노이즈를 발생시킴에 있어서, 상기 식별된 복수의 노이즈 소스들의 기여를 상기 수신기 위치에서 결정하고, 그리고

상기 체적을 통해 상기 노이즈 소스들의 분포를 나타내는 디스플레이 디바이스 상에 렌더링되는 데이터를 출력하는 것을 포함하는 것을 특징으로 하는

시스템.

### 청구항 36

제35항에 있어서,

상기 시스템은,

상기 복수의 노이즈 소스들 각각에 전달 함수를 적용하도록 하는 명령어들에 의해 상기 기여를 결정하고,

상기 전달 함수는 각 노이즈 소스의 위치와 상기 수신기의 미리결정된 위치 사이의 관계에 기초하여 상기 기여를 결정하는 것을 특징으로 하는

시스템.

### 청구항 37

제36항에 있어서,

상기 복수의 노이즈 소스들 각각에 적용되는 전달 함수는 주파수 의존 전달 함수인 것을 특징으로 하는

시스템.

### 청구항 38

제35항에 있어서,

상기 복수의 노이즈 소스들의 적어도 일부를, 상기 노이즈 소스들 각각의 기여에 적어도 부분적으로 기초하여 클러스터된 하나 이상의 노이즈 소스들의 클러스터들로 결합되도록 하는 명령어들을 더 포함하는 것을 특징으로 하는

시스템.

### 청구항 39

제38항에 있어서,

상기 복수의 노이즈 소스들의 기여를 각각의 강도를 상기 클러스터에 포함시키기 위한 임계값과 비교하도록 하는 명령어들을 더 포함하는 것을 특징으로 하는

시스템.

## 발명의 설명

### 기술 분야

우선권 주장

[0001] 본 출원은 2016년 6월 22일자로 출원된 미국 특허 출원 번호 제15/189,609호의 우선권을 주장하며, 그 전체 내

용은 본 명세서에 참조로서 포함된다.

[0003] 노이즈를 생성하는 흐름(flow) 구조들을 위치 및 특성화하기 위해 그리고 상용하는 음향 방사 특성들을 정량화하기 위해 흐름 구조들의 시간 및 공간 변화들을 자동으로 검출하고 추적하기 위한 시스템 및 방법이 여기에 서술된다. 본 시스템은 여기에서 서술된 것처럼, 노이즈 소스들을 식별하는데 필요한 메모리를 줄임으로써, 그리고 소스들을 식별하는데 필요한 처리 동작들을 줄임으로써, 시뮬레이션 프로세스를 실행하는 컴퓨터의 계산 효율을 향상시킨다.

## 배경기술

[0004] 우리 사회에서는 청각적 편안함이 점점 더 중요해지고 노이즈 감소 해결책들을 찾고 개발하는데 상당한 작업 시간이 소요된다. 불편함의 주요 원인은 제트기들, 기체, 기차들, 회전하는 구조들 및 덱트 시스템 소음과 같은 흐름으로 유발된 노이즈 메커니즘들과 관련된다. 종종 전문 기술, 직관 및 시행착오 접근법은 시스템의 어느 부분들이 노이즈 발생을 줄이기 위해 작업되고 최적화되어야 하는지를 식별하는데 사용된다. 일부 추가적인 예들에서, 빔 형성, 청각 홀로그래피(acoustic holography) 및 2점 상관법들과 같은 일부 실험 방법들은 생산적으로 사용되지만 물리적 프로토 타입과 풍동 테스트가 필요하며 이는 시간과 비용이 많이 든다. 다른 예로, CAA(Computational AeroAcoustics) 시뮬레이션들은 흐름의 체계적인 분류에 대한 중요한 통찰력을 제공하기 위해 흐름 필드 정보를 제공한다.

## 발명의 내용

[0005] 와류들을 추적하는 시스템 및 방법과 원거리 필드에 노이즈를 방사할 수 있는 와류들의 시스템들이 여기에서 서술된다. 여기에서 서술된 방법들은 또한 난류 간섭 구조들의 일시적 및 통계적 특성들을 캡처하는데 사용될 수 있다.

[0006] 일반적으로, 본 명세서에서 서술되는 주제의 일 양태는 체적내의 유체의 활동을 시뮬레이션하는 동작들을 포함하는 방법들에서 구현될 수 있고, 상기 체적 내의 유체의 활동은 상기 체적 내의 요소들의 움직임을 모델링하도록 시뮬레이트된다. 상기 방법은, 또한, 유체 흐름 시뮬레이션의 제1 시간에서, 유체 흐름에 의해 모델링된 과도 흐름 및 난류 흐름에서 와류들의 제1 세트를 식별하는 단계를 포함한다. 상기 방법은, 또한, 상기 제1 시간에 후속하는 유체 흐름 시뮬레이션의 제2 시간에서, 과도 흐름 및 난류 흐름에서 와류들의 제2 세트를 식별하는 단계를 포함한다. 상기 방법은 개별적인 상기 와류들의 제1 세트와 개별적인 상기 와류들의 제2 세트를 비교함으로써 상기 와류들의 변화를 추적하는 단계를 포함한다. 상기 방법은 상기 추적에 기초하여 하나 이상의 노이즈 소스들을 식별하는 단계를 포함한다. 상기 방법은 수신기에서 하나 이상의 노이즈 소스들의 기여를 결정하는 단계를 포함한다. 상기 방법은 상기 수신기에서의 상기 하나 이상의 노이즈 소스들의 기여에 기초하여, 하나 이상의 변형들을 나타내는 데이터를 디바이스 또는 엔티티의 하나 이상의 기하학적 피처들에 출력하는 단계를 포함한다.

[0007] 이 양태의 다른 실시예들은 대응하는 컴퓨터 시스템들, 장치, 및 각각이 방법들의 동작들을 수행하도록 구성된 하나 이상의 컴퓨터 저장 장치들에 기록된 컴퓨터 프로그램들을 포함한다. 하나 이상의 컴퓨터들로 이루어진 시스템은 소프트웨어, 펌웨어, 하드웨어 또는 이들의 조합이 동작 중에 있는 시스템상에 설치되어 시스템이 동작을 수행하게 함으로써 특정 동작들 또는 액션들을 수행하도록 구성될 수 있다. 하나 이상의 컴퓨터 프로그램들은 데이터 처리 장치에 의해 실행될 때 장치로 하여금 동작들을 수행하게 하는 명령어를 포함함으로써 특정 동작들 또는 액션들을 수행하도록 구성될 수 있다.

[0008] 일반적으로, 본 명세서에서 서술되는 주제의 일 양태는 체적내의 유체의 활동을 시뮬레이션하는 동작들을 포함하는 방법들에서 구현될 수 있고, 상기 체적 내의 유체의 활동은 상기 체적 내의 요소들의 움직임을 모델링하도록 시뮬레이트된다. 상기 방법은, 또한, 유체 흐름 시뮬레이션의 제1 시간과 유체 흐름 시뮬레이션의 제2 시간 사이의 와류들의 변화에 기초하여 하나 이상의 잠재적인 사운드 생성 와류 구조들을 식별하는 단계, 및 상기 식별된 하나 이상의 잠재적인 사운드 생성 와류 구조들 및 상기 생성된 흐름 데이터에 적어도 부분적으로 기초하여 상기 사운드 생성 와류 구조들을 생성하는 표면상의 하나 이상의 영역들을 식별하는 단계를 포함한다.

[0009] 전술한 실시예 및 다른 실시예는 각각 단독으로 또는 조합하여 하기의 특징들 중 하나 이상을 선택적으로 포함할 수 있다.

[0010] 상기 수신기에서 하나 이상의 노이즈 소스들의 기여를 결정하는 단계는, 적어도 하나의 노이즈 소스에 전달 함수를 적용하는 단계를 포함하고, 상기 전달 함수는 상기 노이즈 소스의 위치와 상기 수신기의 위치 사이의 관계

에 기초하여 상기 기여를 결정한다. 상기 전달 함수는 주파수 종속적일 수 있다. 상기 방법은 복수의 상기 하나 이상의 노이즈 소스들을 하나 이상의 클러스터들(cluster)로 결합하는 단계를 포함할 수 있고, 상기 하나 이상의 노이즈 소스들은 상기 하나 이상의 노이즈 소스들의 기여에 적어도 부분적으로 기초하여 클러스터링된다. 상기 방법은 상기 하나 이상의 노이즈 소스 기여들 각각의 강도를 임계값과 비교하는 단계 및 상기 임계값 아래의 강도를 갖는 적어도 하나의 노이즈 소스를 제외하는 단계를 포함할 수 있다. 상기 수신기는 오디오 기록 디바이스 또는 사람의 귀에 대응하는 위치에 배치된다. 상기 방법은 상기 결합 이후에 하나 이상의 사운드 생성 흐름 영역들에 전달 함수를 적용하는 단계를 포함할 수 있다. 상기 방법은 상기 하나 이상의 노이즈 소스 각각의 강도를 임계값과 비교하는 단계 및 상기 임계값 아래의 강도를 갖는 적어도 하나의 노이즈 소스를 제외하는 단계를 포함할 수 있다. 상기 방법은 상기 디바이스 또는 엔티티 내의 또는 주위의 상이한 물리적 조건들에 대응하는 제2 시뮬레이션에 기초하여 하나 이상의 노이즈 소스들의 제2 세트를 결정하는 단계를 포함할 수 있다. 복수의 상기 하나 이상의 노이즈 소스들을 상기 하나 이상의 클러스터들로 결합하는 단계는, 상기 시스템의 처리 성능을 향상시킬 수 있다. 상기 방법은 설계 변경을 위해 상기 식별된 영역에 기초하여 하나 이상의 물리적 객체들에 대한 물리적 수정을 초래하는 단계를 포함할 수 있다. 상기 방법은 상기 물리적 수정을 사용하여 물리적 객체를 만들어가는 단계를 포함할 수 있다. 상기 방법은 하나 이상의 노이즈 소스들의 기여를 최소화하도록 설계 변경을 최적화하는 단계를 포함할 수 있다.

[0011] 하나 이상의 잠재적인 사운드 생성 와류 구조들 식별하는 단계는, 유체 흐름 시뮬레이션의 제1 시간에서, 유체 흐름에 의해 모델링된 과도 흐름 및 난류 흐름에서 와류들의 제1 세트를 식별하는 단계와; 상기 제1 시간에 후속하는 유체 흐름 시뮬레이션의 제2 시간에서, 과도 흐름 및 난류 흐름에서 와류들의 제2 세트를 식별하는 단계와; 개별적인 상기 와류들의 제1 세트와 개별적인 상기 와류들의 제2 세트를 비교함으로써 상기 와류들의 변화를 추적하는 단계와; 그리고 상기 추적에 기초하여 하나 이상의 잠재적인 사운드 생성 와류 구조들을 식별하는 단계를 포함할 수 있다.

### 도면의 간단한 설명

[0012] 도 1a는 흐름으로 유발된 노이즈의 식별을 위한 프로세스의 흐름도를 도시한다.

도 1b는 흐름으로 유발된 노이즈의 식별을 위한 프로세스의 흐름도를 도시한다.

도 1c는 흐름으로 유발된 노이즈의 식별을 위한 프로세스의 흐름도를 도시한다.

도 2a는 CRV(co-rotating vortices) 시스템의 개략도이다.

도 2b는 상이한 강도 순환들(strength circulations)을 갖는 CRV 시스템을 도시한다.

도 3은 CRV 시스템에 대한 병합 프로세스의 개략도이다.

도 4는 CRV 시뮬레이션 도메인을 도시한다.

도 5a 및 5b는 2개의 와류들의 시간-진전에 대한 유체면 dB-맵들을 도시한다.

도 5c 및 도 5d는 도 5a 및 5b에 도시된 와도 필드들에 의해 방사되는 노이즈의 순간 주파수 및 세기를 도시한다.

도 6은 예시적인 재구성된 방사된 음향 필드를 도시한다.

도 7은 4개의 시점들에 대응하는 흐름 및 음향 필드의 예시적인 시뮬레이션을 도시한다.

도 8a 및 도 8b는 분사 축을 따른 평균 유선 속도 컴포넌트 및 노즐 출구의 3mm 업스트림에서의 유선 속도 프로파일을 각각 도시한다.

도 9는 다양한 위치들 및 평면들에서 순간적인 와도 필드를 도시한다.

도 10a 및 도 10b는 순간 압력 변동들 및 OASPL 지향성 플롯의 그래프를 각각 도시한다.

도 11 및 도 12는 재구성된 중심선들 및 오차 구체들의 플롯을 각각 도시한다.

도 13 및 도 14는 (x, y) 평면상에 투영된 와류들의 분포 및 x-축을 따른 와류 길이의 분포를 각각 도시한다.

도 15는 재구성된 중심선들의 예를 도시한다.

도 16은 x-축을 따른 평균 대류 속도의 예시적인 그래프를 도시한다.

도 17은 스트레칭에 의해 착색된 재구성된 중심선들의 예를 도시한다.

도 18은 x-축을 따른 프레임 당 평균 스트레칭의 예시적인 그래프를 도시한다.

도 19a 내지 도 19d는 노이즈 소스들의 밀도를 포함하는 예시적인 시뮬레이션 결과들을 도시한다.

도 20은 예시적인 시뮬레이션 결과들을 도시한다.

도 21a 및 도 21b는 2개의 예시적인 2개의 분사 노즐 설계들을 도시한다.

도 22a 및 도 22b는 도 21a 및 도 21b의 노즐 설계들에 대한 와류들의 시뮬레이션된 공간 분포들을 도시한다.

도 23은 상이한 대역폭들에서 도 21a 및 도 21b의 노즐 설계들에 대한 노이즈 소스들의 시뮬레이트된 분포를 도시한다.

도 24는 도 21a 및 도 21b의 노즐 설계들에 대해 검출된 노이즈 소스들의 시뮬레이션된 총량을 도시한다.

도 25a 및 도 25b는 2개의 예시적인 자동차 미러 설계들을 도시한다.

도 26 내지 도 32는 도 25a 및 도 25b의 미러 설계들에 대한 시뮬레이션 결과들을 도시한다.

도 33a 및 도 33b는 예시적인 베이스 라인 미러 및 트레일링 에지(TE) 확장 미러를 도시한다.

도 34 내지 도 36은 도 33a 및 도 33b의 미러 설계들에 대한 시뮬레이션 결과들을 도시한다.

도 37a 및 도 37b는 덕트들, 벤트들 및 계기판을 갖는 HVAC 시스템의 예시적인 기하 구조를 도시한다.

도 38a 및 도 38b는 덕트 기하구조의 변형들을 도시한다.

도 39a 및 도 39b는 덕트 기하구조의 변형들을 도시한다.

도 40 내지 도 42b는 시뮬레이션 결과들을 도시한다.

도 43은 클러스터링을 나타내는 그래프이다.

도 44는 HVAC 시스템에서 식별된 음향 노이즈 소스들의 클러스터링의 예를 도시한다.

도 45는 그것들의 음향 파워에 기초하여 노이즈 클러스터들의 랭킹을 도시하는 차트이다.

도 46a는 노이즈 소스들이 식별되었지만 클러스터링 되지 않은 HVAC 시스템을 도시한다.

도 46b는 노이즈 소스가 식별되고 클러스터링된 HVAC 시스템을 도시한다.

도 47은 자동차의 내부 탑승자를 도시한다.

도 48a 및 도 48b는 각각 저속 송풍 조건 및 고속 송풍 조건하에서 노이즈 소스들로부터 운전자의 좌측 귀로의 계산된 전달 함수의 예를 도시한다.

도 49a 내지 도 49d는 HVAC 시스템의 노이즈 소스들 및 운전자에 대한 HVAC 시스템의 노이즈 소스 기여들에 대한 예들을 도시한다.

도 50a 및 도 50b는 각각 노이즈 소스들 및 외부 관찰자에 대한 노이즈 소스 기여를 도시한다.

도 51은 노이즈 소스를 식별하기 위한 예시적인 프로세스의 흐름도이다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0013] FINSIM(Flow-Induced Noise Identification Method)은 여기에 서술된다. 흐름(flow)에서의 일관된 와류 구조들은 흐름에 의해 유발된 노이즈 생성 메커니즘과 밀접하게 관련되어 있으며, 관련 와류들의 시간 및 공간 전개를 특성화함으로써 노이즈를 발생시키는 원인이 되는 물리적 원인들을 식별할 수 있다고 가정한다. 보다 상세하게는, 원거리에 노이즈를 방사할 수 있는 와류들 및 와류들의 시스템들을 식별 및 추적하기 위한 방법 및 시스템이 여기에 서술된다. 열 구성들(thermal configurations)의 경우 FIN SIM을 사용하여 엔트로피 소스들의 음향 방사를 추정하기 위해 온도 필드(또는 관련 패시브 또는 액티브 스칼라 필드)의 공간 및 시간 변화들을 분석할 수도 있다.

[0014] 여기에서 서술된 시스템들 및 방법들은 와류 모션들(예를 들어, Co-Rotating Vortex systems-CRV) 및 와류 스트

레칭에 의해 생성된 노이즈를 식별한다. 예를 들어, 상기 시스템은,

[0015] 1. 각각의 관련 와류 쌍을 이산 CRV 시스템으로 구성하고 등가의 사중극자형 소스 및 해당 음향 복사를 결정(예를 들어, 과도 유동장(flow-field)는 CRV 모션을 추적하고 파웰의 이론에 따라 복사된 필드를 재구성하는데 사용된다).

[0016] 2. 흐름에서 검출된 각각의 와류의 스트레칭 속도 및 상응하는 쌍극자형 음향 복사; 및/또는

[0017] 3. 엔트로피 소스들 및 해당 모노폴(monopole)형 음향 복사를 식별한다.

[0018] 와류들의 전체 유동장의 모션을 분석함으로써, 전체 원거리 필드 노이즈를 추정하고 물리적 노이즈 소스들의 특성을 분석할 수 있다.

[0019] 수신기에 대한 각 노이즈 발생 와류들의 기여는 전달 함수를 사용하여 결정될 수 있다. 그러나 다른 방식으로, 각각의 노이즈 와류들을 분석하여 소음 발생 와류가 생성한 노이즈들이 수신기(예를 들어, 운전자 및/또는 승객이 디바이스를 의도된 방식(예를 들어, 운전 또는 차안에서)으로 이용하는 동안 운전자 및/또는 승객의 귀)에서 얼마나 많이 들릴지 판단할 수 있다.

[0020] 노이즈 와류들이 그룹들로 클러스터링될 수 있다. 클러스터들은 노이즈의 소스를 식별하는데 도움이 될 수도 있고 노이즈를 줄이기 위해 수정할 설계 영역일 수도 있다. 동시에, 시스템은 설계 공간 내에 배치된 개인이 들을 수 있는 노이즈 레벨에 따라 노이즈 와류들 또는 클러스터들을 조정할 수 있다.

## 개요

[0022] 도 1a는 흐름으로 유발된 노이즈 식별을 위한 프로세스의 흐름도를 도시한다. 시스템은, 예를 들어, 내비어-스톡스 및 래티스-보이즈만에 기초한 전산 유체 역학 솔버들의 유체 흐름 시뮬레이션으로부터 과도 흐름 데이터를 수신한다. 이러한 시뮬레이션 데이터는 와류들을 식별하는 데 사용되는 시간 및 공간에 따른 체적 정보를 제공한다.

[0023] 상기 방법은 흐름 시뮬레이션에서 다수의 시간 단계들에서 와류들과 위치, 길이, 반경 및 순환과 같은 와류 특성을 식별하기 위해 흐름 데이터를 분석하는 단계를 포함한다(10). 아래에서보다 상세히 설명하는 바와 같이, 각 시간 프레임에 대해, 시스템은 다수의 와류를 식별하고, 각각의 와류는 본 명세서에서 와류의 중심선으로 지칭되는 연결점들의 세트로 표시된다. 각 와류의 중심선들 및 와류들의 위치는 다양한 기술들을 사용하여 생성될 수 있다. 예를 들어, 3차원 시뮬레이션에서,  $\lambda_2$  기준(예를 들어, 와류 영역을 대칭 텐서  $(Q_2 + S_2)$ 의 제2 고유치  $\lambda_2$  ( $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ )가 와류 코어 내부의 모든 점에서 네거티브인 영역으로 식별하기 위해 사용된 영역)은 와류를 포함할 가능성이 있는 시뮬레이션된 시스템 내의 영역들을 식별하기 위해 사용될 수 있다. 와류를 집합적으로 포함할 가능성이 있는 것으로 식별된 영역들은 수동으로 부과되거나 이 방법에 의해 자동으로 결정되는 임계치 이하로 떨어지는  $\lambda_2$  값들을 갖는 영역들을 포함하는 등가면(isosurface)으로 표현될 수 있다. 따라서, 식별된 등가면은 시뮬레이션 공간 내에 다수의 영역들을 포함할 것이고, 임계 조건을 만족시키는 모든 와류들을 포함할 것이다. 등가면의 추가 계산은 별개의 와류들과 관련된 등가면의 자체 포함된 부분들을 식별하기 위해 완료될 수 있다. 예를 들어, 범람 알고리즘은 복셀들의 비접촉 덩어리들(각 덩어리가 하나의 와류/하나의 접촉하는 와류들의 그룹에 해당)을 분리할 수 있고 그리고 후속으로 알고리즘은 복셀들의 큰 덩어리들을 작은 덩어리들로 나눌 수 있어 각 덩어리는 단일 와류를 나타낸다(세분 과정은 두 번 이상 반복될 수 있음). 일부 예들에서, 임계수보다 적은 복셀들을 포함하거나 또는 임계수보다 적은 최대 순환을 갖는 복셀들의 덩어리들은, 제거될 수 있다(예를 들어, 무시할 수 있는 와류들은 고려 대상으로부터 제외할 수 있다). 이러한 자체 포함된 등가면이 식별되면 알고리즘을 사용하여 식별된 와류들 각각에 대한 중심선을 삼각형화하거나 다른 방법으로 결정할 수 있다. 아래에서 더 상세히 기술된 바와 같이, 와류 및/또는 Q-기준과 같은 다른 양들이 와류들을 식별하는데 사용될 수 있다.

[0024] 유체 흐름 시뮬레이션에서 적어도 두 개의 시간 프레임들 동안 시스템의 와류 세트가 식별되면, 이 방법은 2개의 상이한 시간 단계들에서 식별된 와류들을 비교함으로써 와류들의 공간 추적을 포함한다(12). 보다 구체적으로, 알고리즘은, 가능하다면, 제1 타임 스텝의 와류들 각각과 제2 타임 스텝의 관련 와류를 그들의 중심선 표현들에 기초하여 매칭시킨다. 추가로, 알고리즘은, 제2 시간 프레임의 특정 와류가 이전에 식별된 와류, 새로운 와류, 와류들을 여러 개의 새로운 와류들로 분할, 또는 다수의 와류들을 새로운 단일 와류로 병합의 예시인지를 결정한다. 와류들 각각의 모션을 추적함으로써 크기, 속도, 강도, 스트레칭, 이동 방향 및 각 와류에 관한 모든

동적 정보에 대한 정보가 생성된다.

[0025]

추적 정보를 사용하여, 상기 시스템은 노이즈 생성 와류들에 대한 후보가 될 수 있는 단순하거나 복잡한 와류들의 시스템을 식별한다(14). 특히, 높은 스트레칭 레이트를 갖는 공동 회전 시스템들 또는 와류들은 다른 와류들 보다 노이즈를 생성할 가능성이 크다. 이와 같이, 추적 정보에 기초하여, 이러한 특성들을 만족하는 와류들 또는 와류들의 시스템들(예를 들어, 공동-회전 와류들 또는 길어지거나 짧아지거나 뒤틀려서 스트레칭을 받는 와류들)은, 이동 정보의 크기, 속도 및 방향에 기초하여 식별될 수 있다.

[0026]

와류들 및 와류들의 시스템들이 식별된 후에, 시스템은 와류들에 의해 생성된 노이즈를 모델링한다(16). 노이즈 모델링은 각 소스 및 모든 개별 소스로 구성된 전체 시스템에 대한 주파수, 진폭, 위치, 지향성 및 복사 전력의 재구성을 포함한다. 공동 회전 와류들의 경우, 이전의 모든 정보는 파웰 이론의 일반화에서 파생된 와류 사운드의 이론에 기초하여 재구성된다. 이 이론은 와류 동역학(예를 들어, 회전 속도, 성장을 및/또는 상대 운동)과 노이즈 발생 사이의 연결을 만든다. 스트레칭 와류들의 경우, 파웰의 이론에서 도출된 쌍극자와 같은 노이즈 모델링과 결합된 추적 알고리즘은 스트레칭 노이즈 기여에 대한 액세스를 제공한다. 이러한 기여는 와류 구조들의 형상, 길이, 강도, 순환 및 변형 속도의 진화와 관련된다.

[0027]

시스템은 또한 결정된 노이즈 정보에 대한 후처리 동작들을 수행하여 정보의 유용한 특징들을 추출하여 시스템의 조작자에게 디스플레이한다(18). 예를 들어, 데이터의 후처리는 노이즈 생성 구조들의 밀도 맵을 생성하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 다수의 상이한 시간 프레임들로부터의 노이즈 데이터는 공동 회전 와류들 및 스트레칭 와류들에 의해 생성된 노이즈에 기초하여 노이즈 생성 구조의 주파수를 나타내는 밀도 맵을 생성하도록 합산될 수 있다. 다른 예에서, 후처리는 노이즈 생성 구조가 많은 장소를 식별하는 데 사용될 수 있다. 다른 예에서, 다수의 상이한 시간 프레임들로부터의 노이즈 데이터는 공동 회전 와류들 및 스트레칭 와류들에 의해 생성된 노이즈에 기초하여 시간 평균 방사된 음향 전력 맵을 생성하도록 합산될 수 있다. 다른 예에서, 사후-프로세싱은 노이즈 생성 구조들의 밀도 및 카운트를 보는 방향에 의해, 그러나 특정 방향으로 지향된 노이즈에 대해서만 노이즈 생성 구조들을 필터링하는데 사용될 수 있다. 다른 예에서, 특정 주파수의 노이즈들 만이 사용자에게 디스플레이되도록 주파수에 기초하여 데이터를 사후-프로세싱할 수 있다. 다른 예에서, 소스들에 관한 정보는 플로우 데이터에 결합되어, 노이즈의 발생의 원인이 되는 주변 기하구조(예를 들어, 계단들, 캡들 및/또는 날카로운 에지들)의 영역들을 식별 및 위치시킬 수 있다.

[0028]

### 파웰의 와류 이론의 개요

[0029]

위에서 언급했듯이, 시스템에서 생성된 사운드를 결정하는 한 가지 방법은 파웰의 와류 사운드 이론(Theory of Vortex Sound)의 적용에 기초할 수 있다. 자유로운 흐름들에서, 흐름으로 유발된 사운드는 와류들의 모션에 의해 생성된 것으로 간주된다. 어떤 고체 표면들도 존재하지 않기 때문에 운동량의 변화는 없으며, 이는 와류의 변화가 흐름의 어딘가에서 발생하면 반대의 변화가 다른 곳에서 발생한다는 것을 의미한다. 각각의 와류는 강도와 형상의 변화를 경험하며, 두 경우 모두 쌍극자와 같은 방사를 생성한다. 와류들의 모션으로 인한 원거리 음향 밀도의 변동들에 대한 다음의 일반식이 도출될 수 있다.

[0030]

[수학식 1a]

$$\rho'(\vec{x}, t) \approx -\frac{\rho_\infty}{4\pi c^4 x} \frac{(x_i x_j)}{x} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \int_V y_j (\vec{\omega} \times \vec{u})_i dV(\vec{y})$$

[0031]

[0032] 여기서,  $y_j$  는  $\vec{e}_j$  상의 적분 벡터  $\vec{y}$ 의 투영이고,  $\vec{x}$ 는 관측자 위치 벡터이고,  $\vec{\omega}$ 는 와류 벡터이며 그리고  $\vec{u}$ 는 속도 벡터이다.  $dV(\vec{y})$ 는 유체의 기본적인 부피이다.  $\rho_\infty$ 는 평균 밀도이고 그리고  $c$ 는 사운드의 속도이다. 와류 심선 요소들의 관점에서 적분 V의 이산화(discretization)가 사용되고, 원거리 밀도 변동들에 대한 새로운 표현이 수학식 1a로부터 도출된다.

[0033]

[수학식 1b]

$$\rho'(\vec{x}, t) \approx -\frac{\rho_\infty}{4\pi c^4 x} \frac{(x_i x_j)}{x^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \sum_{k=vortex} (y_k)_j (\vec{\Gamma}_k \times \vec{u}_k)_i \Delta l_k$$

[0034]

[0035] 여기서,  $k$ 는 하나의 고유한 이산화된 와류 심선의 하나의 하위 요소를 나타낸다. 도 2a에 도시된 바와 같이 동일한 순환  $\Gamma$ (각각 화살표 34 및 36에 의해 표시됨)로 2y만큼 떨어진 2개의 공동 회전 와류들(30, 32)의 시스템이 이제 고려된다. 이러한 시스템은  $\Gamma$ 와 y가 상수인 각속도  $\Omega_s = \Gamma/(4\pi y^2)$ 로 축 O(38) 둘레에서 와류들의 회전을 유도한다. 수학식 1b에서의 각속도를 사용함으로써, 밀도 변동들은 이제 다음의 식으로부터 얻어진다.

## 수학식 2

$$\rho'(\vec{x}, t) \approx -\rho_\infty 4\sqrt{\pi} \sqrt{\frac{\Delta l}{R}} \cos\left(2(\vec{x}, \vec{e}_1) - 2\Omega_s t^* + \frac{\pi}{4}\right) \left(\frac{\Omega_s y}{2c}\right)^{\frac{7}{2}}$$

[0036] [0037] 여기서,  $\Delta l$ 는 와류 심선 요소의 길이이다. 음향 파들의 시간 지연이, 음향 파장  $\lambda$ 과 함께 무시되도록  $\Delta l \ll \lambda$ 로 가정한다. 수학식 2에서 사용된 단위 벡터들은, 예를 들어, CRV(co-rotating vortices) 시스템의 개략도를 제공하는 도 2a에서 서술된다. 결과적으로, 이 CRV 시스템에 해당하는 방사 음향 파워는 다음과 같다.

## 수학식 3

$$P_{tot} = \iint \frac{\langle \rho'^2(\vec{x}, t) \rangle c^3}{\rho_\infty} d^2S = \frac{\rho_\infty \Delta l \pi^2 \Omega_s^7 y^7}{8c^4}$$

[0038] [0039] 파웰의 이론은 점성 효과(아래에서 설명함)를 무시하고 결과적으로 CRV의 영구적인 모션을 발생시킨다. 등가 음향 시스템은 축을 중심으로 회전하는 4개의 일정한 압력 풀들로 구성된 회전하는 사중극자이다.

[0040] 사운드는 또한 흐름의 와류들의 강도 변화에 의해 생성된다. 예를 들어, 에올리언 톤들(Aeolian tones)은 와류 텅들의 스트레칭에 의해 생성되고 그리고 방사된 노이즈는 쌍극자 방사와 동일하다. 그러나, 이러한 강도의 변화들은 흐름에서 분리되지 않으며, 반대의 스트레칭은 지연된 시간에 발견되어 발산을 초래한다. 결과적으로, 진동하는 사중극자형 노이즈 소스가 발견될 수 있다. 파웰은 또한 쌍극자형 방사능에 대한 이론을 개발했다. 변동 속도에 해당하는 방정식은 다음과 같다.

## 수학식 4

$$\vec{u}(\vec{x}) = -\frac{\vec{x}}{4\pi x^2 c^2} \int \mathcal{L}'_x dV(\vec{y})$$

[0041] [0042] 여기서,  $\vec{\mathcal{L}} = \vec{\omega} \times \vec{u}$  이는 램 벡터(Lamb vector)이고 그리고  $\mathcal{L}'_x = \frac{\partial(\vec{\mathcal{L}}|\vec{e}_x)}{\partial t}$ 이다. 와류 스트레칭에서, 음향 방사는, 그 축에 수직인 방향에서 와류 요소의 가속이 국부적으로 변동하는 쌍극자형 흐름(램 벡터의 시간 미분의 공간 적분을 통해 얻어짐)을 유발하기 때문에 발생한다.

## 파웰 이론의 확장

[0043] [0044] 파월의 이론에서, 와류들은 회전축을 중심으로 순환들 및 위치들을 통해 표현된다. 와류들의 크기 및 순환 모두의 변화를 고려하기 위해, 스컬리 와류 모델이 회전 속도에 사용된다.

## 수학식 5

$$[0045] V_\theta(r) = -\frac{\Gamma r}{2\pi(r_c^2 + r^2)}$$

[0046] 2개의 와류들의 강도 차이는 회전 시스템에 영향을 미친다. 도 2에 정의된 파라미터들에 따라 상이한 순환들을 갖는 2개의 와류들(예를 들어, 도 2b의 와류들 (50, 52))을 고려하면, 시스템의 각속도는 다음과 같다:

## 수학식 6

$$[0047] \Omega = \frac{\Gamma_1 + \Gamma_2}{2\pi b^2}$$

[0048] 회전 중심의 위치는 다음과 같다:

## 수학식 7

$$[0049] x_o = \frac{\Gamma_1 x_1 + \Gamma_2 x_2}{\Gamma_1 + \Gamma_2}$$

## 수학식 8

$$[0050] y_o = \frac{\Gamma_1 y_1 + \Gamma_2 y_2}{\Gamma_1 + \Gamma_2}$$

[0051] 도 1b에서 시작하고, 시스템의 기하학적 파라미터들(도 2b)를 사용하면, 밀도 섭동들 및 음향 파워는 다음과 같다:

## 수학식 9

$$[0052] \rho'_{12}(\vec{x}, t) \approx -\frac{\rho_\infty}{8\pi^2 c^4} \frac{1}{(R^2 + Z^2)^{\frac{3}{2}}} R (2R \cos(2\theta - 2\Omega_s t^*) + Z \cos(\theta - \Omega_s t^*)) \Delta l \Omega_s^2 \Gamma_1 \Gamma_2$$

## 수학식 10

$$[0053] P_{tot} = \frac{17 \rho_\infty \Gamma_1^2 \Gamma_2^2 \Delta l^2 \Omega_s^4}{240 \pi^3 c^5}$$

[0054] 여기서, R, Θ 및 Z는 CRV 시스템의 기준 프레임에서  $\vec{x}$ 의 원통형 좌표이다.

[0055] 이것은 와류들의 형상이 일관성을 유지한다고 가정한다(즉, 점 모델에 의해 잘 근사된다). 순환들의 비율이 특정 임계 값보다 높으면, 저 순환 와류의 크기 변화를 통해 노이즈 발생을 유도하는 보다 복잡한 점성 효과가 발

생한다. 도 2a는 CRV(co-rotating vortices) 시스템의 예시적인 개략도를 도시하고, 도 2b는 상이한 강도 순환들을 갖는 동시 회전 와류 시스템의 개략도를 도시한다.

[0056] 점성 효과들이 고려될 때, 보다 복잡한 매커니즘들이 수반되고, 결국 CRV 와류 쌍이 합병된다. 병합 프로세스는 4 단계로 구성된다.

• 제1 확산 단계,

• 대류 단계,

• 제2 확산 단계,

• 최종 확산 단계.

[0061] 제1 확산 단계는 회전 및 유체의 점성으로 인한 각 와류의 확산에 해당하며, 이는 제곱근 법칙  $r_c(t) = r_c(0) + c\sqrt{v(t - t_0)}$ 에 따라 코어 반경을 증가시킨다. 이 단계동안, 파웰의 사중극자는 성공적으로 적용될 수 있다. 대류 단계는 코어 반경이 두 개의 와류들 사이의 초기 거리  $b_0 = 2y_0$ 를 갖는  $r_{c\text{ critical}} = 0.290b_0$ 와 같은 임계값에 도달할 때 시작된다.  $b_0$  앞에 있는 계수는 정확한 설정 조건에 따라 다르다. 충류 와류들의 경우 대류 단계의 지속 시간  $t_c$ 는 실험으로부터 알려진다:  $t_c = 8.1 * (b_0^2 / \Gamma_0)$ . 이 단계에서 와류들 사이의 거리가 줄어들고 확산은 작은 역할을 한다. 또한, 이 단계에서 회전 속도가 증가하여 비대칭 와류 필드가 생성되어 와류성 필라멘트들이 생성된다. 제2 확산 단계는 와류들이 병합되는데 필요한 기간 ( $b = 0$ )에 해당하며, 최종 확산 단계는 발생된 단일 병합후 와류의 확산이다. 4개의 단계들은, 여기에 서술된 CRV 시스템의 LBM 시뮬레이션으로부터 얻어지고, 이는 도 3에서 나타난다. 도 3은 (a) 제1 확산 단계, (b) 대류 단계, (c) 제2 확산 단계, (d) 최종 확산 단계에서의 LBM CRV 시뮬레이션으로부터 얻어진 순서 와류 필드  $\Omega [s^{-1}]$ 를 도시한다.

### 노이즈 소스 식별

[0063] 여기에 서술된 흐름으로 유발된 노이즈 식별 방법(FINSIM)은 실제 산업 사례들의 임의의 복잡한 흐름에서 사운드 생성을 담당하는 와류 구조를 식별하고 추적한다. 관심가는 와류 구조들은 CRV(Co-Rotating Vortex) 쌍들 및 (예를 들어, 비 균일 속도로) 스트레칭을 받는 와류들이다. CRV 소스의 경우, FINSIM은 각 관련 와류 쌍을 개별 CRV 시스템으로 식별하고 그리고 동등한 사중극자 소스 및 해당 음향 방사를 결정한다. 와류들의 전체적인 유동장의 모션을 연구함으로써, 완전한 사중극자 기반 원거리 노이즈를 추정할 수 있으며 그리고 물리적인 노이즈 소스들의 특성들을 분석할 수 있다. 제안된 추적 기법은 노이즈 생성에 대한 가장 중요한 메커니즘들로 여겨지는 CRV 모션들의 제1 확산 단계와 대류 단계의 시작에서 유효하다.

[0064] 도 1b를 참조하면, 흐름 유발된 노이즈 식별 방법(FINSIM) 접근법에 대한 흐름도가 도시되어 있다. 높은 레벨에서, FINSIM 접근법은 노이즈 특성들(132)을 생성하기 위해 와류 검출(102), 와류 추적(114) 및 노이즈 모델링 (128/130)을 포함한다.

[0065] FINSIM 접근법의 와류 검출(102) 부분은 와류들 식별에 사용된다. 와류들의 식별은 순간적인 압력, 와도, Q-기준,  $\lambda_2$ -기준 또는 일시적인 난류의 불연속적인 와류를 식별할 수 있는 다른 방법들에 기반으로 할 수 있다. 2 차원들에서, 와류들은 와도에 기초하여 추출될 수 있다. 3D 경우들에서,  $\lambda_2$ -기준의 사용은 더 적합할 수 있다.

[0066] 보다 상세하게는, 도 1c에서, 와류 검출 프로세스(102)는 흐름-시뮬레이션으로부터 측정 파일(100)을 수신한다 (150). 측정 파일은, 압력 및 속도 벡터 최소값을 포함하여 시스템의 각 복셀(또는 식별된 영역의 복셀의 하위 집합)에 있는 입자들의 흐름에 대한 정보를 포함한다. 측정 파일은, 흐름 데이터의 하나 이상의 프레임들(예를 들어, 시뮬레이션에서 개별 시간 단계들)을 포함한다. 흐름 데이터에 기초하여, 시스템은 각 프레임에 대한 각 복셀에 대한  $\lambda_2$  및 와도 벡터를 계산한다(152). 이러한 값들은 와류를 찾는 데 사용될 수 있다. 예를 들어,  $\lambda_2$ 의 낮은 값은 와류의 중심선에 가까울 가능성이 크다.  $\lambda_2$  및 와도 벡터를 사용하여 하나의 와류/접촉하는 와류들의 그룹에 대응하는 각 뎅어리로 복셀들의 와류 뎅어리들(예를 들어, 등가면)을 생성한다(154). 복셀들의 뎅어리를 생성하기 위해, 시스템은,  $\lambda_2$ 에 대한 값들 및 와도 벡터들을 미리 결정된 임계치들 비교하여  $\lambda_2$ 를 갖

는 복셀들의 서브세트 및 미리결정된 범위 내의 값들을 갖는 와도 벡터들을 선택한다. 복셀의 초기 둉어리들은 중첩되는 와류들을 포함할 수 있으므로 시스템은 접촉하는 와류들의 각 그룹을 단일 와류들로 분리하기 위해 와류 둉어리들을 정제한다(156). 작은 와류들(예를 들어, 임계 크기보다 작은 와류들)을 제거하기 위해, 시스템은 크기에 기초하여 둉어리를 필터링한다(158). 복셀들의 나머지 둉어리들에 대해, 시스템은 복셀들의 각 둉어리에 대한 중심선을 생성한다(160). 중심선 정보는 위치(106) 및 길이 및 반경(108)과 같은 다양한 와류 특성들(104)을 포함한다.

[0067] FINSIM 접근법의 와류 추적 부분(114)은 각각의 와류의 변위를 식별한다. 이 부분에서, 이산 시간  $t_i$  및  $t_{i+1}$ 에서 모든 와류들의 파라미터들(위치, 반경, 순환 등)이 계산되고 추적 알고리즘은  $t_i$ 와  $t_{i+1}$  사이의 각 와류의 변위를 식별한다. 특히, 추적 알고리즘은 시뮬레이션(110)의 현재 프레임으로부터 중심선 데이터를 수신하고 시뮬레이션(112)의 이전 프레임으로부터 중심선 데이터를 수신한다. 이들 2세트의 중심선 데이터에 기초하여, 추적 알고리즘은 와류 동적 정보(116)를 생성한다. 이는 궤도 정보(118), 대류 속도(120) 및 와류들의 스트레칭/변형에 관한 정보(122)를 포함한다. 와류 동적 정보(116)에 기초하여, 추적 알고리즘은 동시 회전하는 와류 쌍들(124)과 연계되는 추적 데이터 및 스트레칭을 받는 와류들과 관련된 스트레칭 데이터(130)를 출력할 수 있다. 동시 회전하는 와류 쌍들을 식별하는 것은, 예를 들어, 와류 시스템의 모션을 분석하는 것을 포함할 수 있다. 각 CRV 시스템의 식별은 각 와류의 위치와 변위 계산 및 가장 가까운 이웃들을 결정하는 것에 기반한다. 이후, 와류와 그 이웃들은 별개의 CRV 시스템들로 간주된다. 후보 CRV 시스템들의 수는, 와류 간 거리가 거리 임계값 이상인 시스템들을 폐기함으로써 감소된다. CRV 시스템의 자체 회전 정보는 동적 특성에서 추출되어 모델링에 사용된다.

[0068] 스트레칭 와류들을 식별하는 것은, 예를 들어, 개별 구조물의 길이 또는 순환의 성장을 계산(구조 식별 절차에서 알려진 정보)을 포함할 수 있다. 와류들의 길이 또는 강도 변화로부터 스트레칭 와류들이 감지된다.

[0069] FINSIM 접근법의 노이즈 모델링 부분(128, 130)은 식별된 와류들에 의해 생성된 노이즈를 도출한다. 특히, CRV의 동적 특성에 따라 각 CRV에 대해, 생성된 노이즈는 확장된 파웰의 이론에 따라 도출된다. 와류 스트레칭으로 인한 노이즈 생성도 도출된다. 노이즈 모델링은 시스템에 대한 노이즈 특성들의 세트(예를 들어, 시스템에서 와류를 생성하는 각각의 노이즈에 대한 노이즈 특성들의 합산 또는 편집)를 생성한다. 노이즈 특성들은 시스템 내의 와류들에 대한 주파수(134), 위치(136), 지향성(138) 및 방사 전력(140)을 포함할 수 있다. 노이즈 특성들은 시뮬레이팅된 시스템의 위치들로 식별되고 그리고 시스템의 위치들과 연관될 수 있다. 예를 들어, 시스템의 각 복셀에 대한 노이즈 특성들이 결정될 수 있다. 주파수 정보(134)는 중요한데, 이는 사운드의 일부 주파수들이 외란을 야기하기 쉬운 반면, 다른 주파수들은 사람의 귀들이 감지할 수 있는 스펙트럼의 외부에 있을 수 있기 때문이다. 위치 정보(136)는 노이즈를 생성하는 시스템 내의 장소들을 식별하는데 유용할 수 있다. 이 정보는 시뮬레이트되는 객체의 물리적 설계에서 노이즈 생성 구조들을 추적하는 데 사용될 수 있다. 노이즈 와류들을 유도하는 설계상의 물리적 위치는 예를 들어 반대 문제를 구현함으로써 결정될 수 있다. 흐름에서의 노이즈 소스의 위치를 안다면, 예를 들어, 평균 흐름 스트림들, 와류 궤도 또는 역 입자 추적 알고리즘을 사용하여 사운드를 담당하는 와류들이 원래 생성된 곳을 식별할 수 있다. 위치 정보는 그래프 상에서 식별된 노이즈 생성 와류들을 갖는 복셀들과 함께 그래프로 표시될 수 있다. 와류들에 대한 지향성 정보(138)는 또한 중요할 수 있다. 예를 들어, 자동차의 사이드 미러가 노이즈를 생성하고 있지만 노이즈가 창을 향하지 않고 자동차에서 멀리 떨어진 방향으로 향하는 경우, 차에 있는 개인들의 안락함에 대한 소음의 영향이 감소될 수 있고 따라서 소음에 대한 우려는 적어질 수 있다. 마지막으로, 특정 레벨들의 노이즈에 대한 허용 오차로 인해 노이즈의 레벨이 임계값 아래로 떨어지면 시스템을 불필요하게 변경할 수 있기 때문에 노이즈(140)의 복사 전력 또는 진폭이 중요하다.

[0070] 도 1에는 도시되지 않았지만, 노이즈 데이터의 후처리는 이해 가능하고 유용한 정보를 사용자에게 제공하는데 유익할 수 있다. 예를 들어, 예측된 흐름 및 방사된 노이즈에 대해 생성된 결과들에 기초하여 유용한 메트릭들, 디스플레이들 및 정보가 사용자에게 제공될 수 있다. 여기에는, 와류 위치들 및 대류 속도, 특성 와류 수명, 와동 스트레칭 거동, 순간 방사 주파수, 노이즈 소스 위치들 및 강도, 주파수 의존 강도 맵들 등에 대한 정보 및 통계들이 포함될 수 있다.

[0071] 일 예시에서, 후처리는 와류 위치들 및 대류 속도들의 그래프를 생성하는데 사용될 수 있다. 이 맵은 각 복셀에 대한 대류 속도의 시각적인 표시기를 제공하거나 색칠하여 대류 속도를 나타낸다. 와류들이 존재하지 않는 위치들은 와류들이 없음을 나타내기 위해 유사하게 착색될 것이다(이는, 예를 들어, 관련된 대류 속도가 없거나 대류 속도가 임계 값 이하이기 때문이다). 일부 예들에서, 와류 위치 대류 속도의 맵은 단일 시점에 대해 표시되

는 반면, 다른 예들에서, 다수 시간 프레임들의 시간 전개가 제공된다.

[0072] 다른 예에서, 후처리는 중심선 위치들의 시작적 표현을 제공함으로써 와류 위치들의 그래프를 생성하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 중심선들은 복셀 내의 적절한 시각 표시기에 의해 시스템의 표현으로 디스플레이될 수 있다. 중심선이 여러 복셀들에 걸쳐 있기 때문에, 복셀들 각각에 적절한 표시기를 제공함으로써 복셀들의 중심선을 디스플레이될 것이다. 또한, 중심선에 의해 방사되는 노이즈의 강도 또는 진폭이 시각적으로 표시될 수 있다. 예를 들어, 중심선이 적절한 위치(들)에 선으로 표시되는 경우, 선의 폭 또는 색상은 와류에서 생성된 사운드의 진폭에 대한 정보를 제공할 수 있다. 이러한 정보는 시뮬레이션에서 단일 시간 단계로 표시되거나 여러 시간 단계들에서 시간 기반 전개로 디스플레이될 수 있다.

[0073] 다른 예에서, 후처리는 시스템 내에서 생성된 사운드들의 주파수의 그래프를 생성하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 와류에 의해 생성된 사운드의 주파수 대 노이즈 소스 밀도(예를 들어, 시스템 내의 와류들의 수)의 그래프가 생성될 수 있다. 다른 예에서, 와류에 의해 생성된 사운드의 주파수 대 방사된 음향 파워(예를 들어, 다양한 와류들의 시스템에 의해 생성된 시간-평균 음향 파워)의 그래프가 생성될 수 있다. 일부 예들에서, 다수의 상이한 설계들이 시뮬레이션되고 그리고 생성된 사운드 주파수들의 비교(예를 들어, 2개의 설계들 모두에 대한 정보를 포함하는 그래프)가 제공될 수 있다.

[0074] 다른 예에서, 후처리는 와류 위치들 및 강도의 그래프를 생성하는데 사용될 수 있다. 이 맵은 착색 또는 각 복셀에 대한 대류 속도의 시작적인 표시기를 제공함으로써 복셀 강도의 표시를 제공한다. 와류들이 존재하지 않는 위치들은 와류들이 없음을 나타내기 위해 유사하게 착색될 것이다(이는, 예를 들어, 강도가 임계 값 이하이기 때문이다).

[0075] 다른 예에서, 후처리는 특성 와류 수명의 그래프를 생성하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 총 주행 거리에 따른 와류들의 분포 그래프가 생성될 수 있다. 기계적 파로 또는 물체 간접 상호 작용들을 피하기 위해 많은 설계에서 난기류가 문제가 될 수 있으며 응집 구조들의 수명을 단축되어야 한다. 적절한 설계는 와류의 이동 거리를 최소화하여 선택될 수 있다.

[0076] 다른 예에서, 후처리는 와류 스트레칭 동작의 그래프를 생성하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 시뮬레이션된 객체의 특정 방향을 따른 와류들의 스트레칭 속도의 플롯을 생성할 수 있다. 일부 설계들에서, 흐름의 난류, 즉 와류들은 가능한 한 빨리 세기 또는 크기가 감소되어야 하고, 효율적인 설계는 스트레칭 레이트 분포를 관찰함으로써 결정될 수 있다.

[0077] 다른 예에서, 후처리는 순시 방사 주파수 그래프를 생성하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 주파수로 채색된 노이즈 소스들의 공간 맵을 생성하여 시간 애니메이션으로 표시될 수 있다. 일부 설계들에서는, 흐름에서 발생된 노이즈가 원거리 필드 프로브의 SPL 그래프의 피크들에 해당하는 권한없는 레벨에 도달할 수 있다. 주파수로 채색된 소스 맵은 이 특정 톤을 담당하는 흐름의 영역들을 식별하는 데 도움이 되며 소스 모션의 애니메이션을 통해 그러한 레벨들을 담당하는 와류들을 유발하는 노이즈의 수명 주기에 대한 통찰력을 제공할 것이다.

[0078] 또 다른 예에서, 후처리는 주파수-의존 강도 맵을 생성하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 착색하거나 또는 각 복셀에 대한 대류 속도의 시작적 표시기를 제공함으로써, 와류 세기의 표시를 제공하기 위해 그래프가 생성될 수 있다. 이 그래프의 정보는 필터링하여 사용자가 선택한 주파수 범위를 표시 할 수 있다. 예를 들어, 사용자는 인간의 귀가 감지할 수 있는 주파수들만을 디스플레이하거나 개인의 쾌적성에 더 큰 혼란을 줄 수 있는 고주파수들만을 디스플레이하고자 할 수 있다. 관련 복셀 기반 그래프에서 주파수 별로 필터링하면 사용자가 관심있는 주파수 범위 내에서 가장 많은 양의 노이즈를 생성하는 시스템 내의 위치들에 집중할 수 있다.

[0079] 다른 예에서, 후처리는 관심 주파수의 범위에 대한 전력 그래프를 생성하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 정의된 영역 내의 모든 소스들의 시뮬레이션 시간 동안 평균 전력의 SPL 그래프를 생성될 수 있다. 일부 물체들의 경우, 흐름으로 유발된 노이즈는 공간의 여러 위치들에서 비롯될 수 있다. 원거리 필드에서, 어떤 양의 음향 파워가 어느 지역에서 왔는지 정확하게 지적하기가 어려우며, 이 정보를 계산하면 노이즈 감소를 위해 수정이 필요한 대상의 부분들을 우선 순위 지정하여 보다 나은 설계 프로세스를 가능하게 한다.

[0080] 다른 예에서, 후처리는 특정 영역에 대한 전력의 지향성을 생성하는 데 사용될 수 있다. 예를 들어, 특정 관심 영역을 중심으로 하나의 구에 대한 시간 평균 음향 파워의 분포가 생성될 수 있다. 설계들을 비교할 때, 방사되는 총 전력량뿐만 아니라 지향성도 중요하다. 방향에 따라, 방사된 음향 출력은, 관심 대상, 즉, 노이즈가 감소되어야 하는 방향 또는 무시할 수 있는 방향, 즉, 노이즈가 중요하지 않은 방향일 수 있다.

[0081] 다른 예에서, 후처리는 공간의 다양한 지점들에서 음향 신호들의 재구성을 생성하는데 사용될 수 있다. 예를 들

어, 모든 표면의 압력 음향 필드는 시각화될 수 있거나 전송된 음향 파워의 양을 정량화하는 데 사용될 수 있다. 흐름 영역에서, 음향 압력 필드는 유체 역학적 압력 필드 변동들에 숨겨질 수 있기 때문에 직접 이용 가능하지 않다. 필터링은 어렵고 수치적 노이즈로 방해받을 수 있다. 노이즈 소스들의 모델링을 사용하여, 노이즈 소스들의 모델링을 사용하여, 음향 필터링은 흐름 영역 내의 임의의 관심 지점에서의 음향 압력 필드의 재구성으로 수행될 수 있다.

[0082] 다른 예에서, 후처리는 노이즈 소스 원점의 표면 맵을 생성하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 객체의 표면은 관심 위치에서 비롯된 흐름으로 유발된 노이즈 소스의 수에 의해 국부적으로 착색될 수 있다. 일부 설계들에서, 노이즈 생성을 담당하는 표면의 특정 영역들은 수정하기 전에 강조 표시되어야 한다. 표면의 강조표시된 부분을 수정하여 노이즈 소스들은 강도에서 감소될 수 있고 그리고 디자인을 향상시킬 수 있다.

### 격자 볼츠만 방법(Lattice Boltzmann Method)

[0084] 여기에서 언급된 바와 같이, 다양한 유형들의 흐름 시뮬레이션들이 와류드을 식별하고 추적하는데 사용되는 흐름 정보를 생성하는데 사용될 수 있다. 이러한 흐름 시뮬레이션 중 하나는 격자 볼츠만 방법(Lattice Boltzmann Method)을 기반으로 한다. CFD/CAA 코드는 불안정한 흐름 물리들은 계산하는 데 사용된다. 코드는 격자 볼츠만 방법(LBM)을 기반으로 한다. 격자 기반 방법은 전통적인 전산 유체 역학 (CFD)에 대한 대안적인 수치 방법으로 제안되었다. 거시적인 연속체 방정식들을 이산화하는 것에 기초한 종래의 방법과는 달리, LBM은 거시적 유체 역학들을 예측하기 위해 "메소스코픽(mesoscopic)" 운동 방정식, 즉 볼츠만 방정식(Boltzmann equation)으로부터 출발한다. 격자 볼츠만 방정식은 다음과 같은 형태를 갖는다:

### 수학식 11

$$f_i(\vec{x} + \vec{c}_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(\vec{x}, t) \\ = C_i(\vec{x}, t)$$

[0085] [0086] 여기서,  $f_i$ 는 이산 속도 벡터들  $\{c_i: i=0,..,b\}$ 의 유한 집합에 따라  $i$ 번째 방향으로 움직이는 입자 분포 함수이고,  $c_i \Delta t$  및  $\Delta t$ 는 각각 공간 증분 및 시간 증분이다. 편의상, 다음 논의에서 협약  $\Delta t=1$ 을 선택한다. 수학식 (11)의 오른쪽에 있는 충돌항의 경우 가장 단순하고 가장 일반적인 구현은 BGK(Bhatnagar–Gross–Krook) 형식이다.

### 수학식 12

$$C_i(\vec{x}, t) = -\frac{1}{\tau} [f_i(\vec{x}, t) \\ - f_i^{eq}(\vec{x}, t)]$$

[0087] [0088] 여기에서,  $\tau$ 는 이완 시간 파라미터이고,  $f_i^{eq}$ 는 맥스웰-볼츠만(Maxwell–Boltzmann) 형식을 따르는 로컬 평형 분포 함수이다. 유체 밀도  $p$  및 속도  $u$ 와 같은 기본 유체 역학량들은 순간 합산을 통해 얻어진다.

### 수학식 13

$$\rho(\vec{x}, t) = \sum_i f_i(\vec{x}, t)$$

## 수학식 14

$$[0090] \rho \vec{u}(\vec{x}, t) = \sum_i \vec{c}_i f_i(\vec{x}, t)$$

[0091] 저주파수 및 장파장 제한에서, 이산 속도 벡터들의 집합의 적절한 선택을 위해, 채프먼-엔스코그(Chapman-Enskog) 확장에 의해 보여지는 것처럼 과도 압축성 나비에-스토크스(Navier-Stokes) 방정식이 복구된다. 결과 상태 방정식은 이상 기체 법칙에 따르며, 유체의 동점 점성도  $\eta$ 는 완화 시간 매개 변수  $\tau$  및 온도  $T$ 와 관련이 있다.

## 수학식 15

$$[0092] \nu = \left( \tau - \frac{1}{2} \right) T$$

[0093] 수학식 11 내지 15의 조합은 유체 역학을 위한 일반적인 LBM 체계를 형성한다. 복셀들로 불리는 3차 체적 요소로 구성된 그리드에서 해결되고, 그리고 인접 해상도 영역들에 대해 격자 크기가 2배만큼 변하는 가변 해상도 (VR) 전략이 허용된다.

### CRV(Co-Rotating Vortices)

#### A. 수치 설정

[0096] LBM 다이렉트 수치 시뮬레이션(DNS)은 CRV 시스템을 시뮬레이션하는데 사용되며 그리고 2개의 초기 와류들은 코어 반경  $r_c = 8 \times 10^{-4} \text{ m}$  및  $v_{\max} = 0.3 \text{ m/s}$ 를 갖는 순환  $\Gamma = 4\pi r_c v_{\max}$ 를 갖는 스컬리의 모델을 사용하여 초기 조건으로 정의된다. 와류들 사이의 초기 거리는  $b_0 = 1.6 \times 10^{-4} \text{ m}$  이고,  $v_{\max}$  및  $r_c$ 에 기초한 레이놀즈 수  $Re$ 는 159이다. 시뮬레이션 도메인은  $2048r_c$  정사각형(60)(도 4)이다. 시뮬레이션 도메인(60)은 경계에서의 음향 반사를 피하기 위해 점도 및 해상도가 증가하는 유체의 수개의 층들로 이루어진 스판지 영역(62)에 의해 둘러싸여 있다. 스팬지 영역의 바깥쪽 가장자리들의 경계 조건들은 비반사 조건들의 압력 배출구들이며 특성 압력은  $p_0 = 101325 \text{ Pa}$ 이다. 가장 작은 복셀 크기는  $\Delta x = r_c/30$ 이다. CRV 방사의 선형적으로 추정된 파장은  $\lambda = 1000r_c$  이고, 시뮬레이션 도메인 및 측정 영역은 방사된 음향 필드를 캡처하기에 충분히 크다. 시뮬레이션은 병합 프로세스가 끝날 때까지, 즉 300,000 시간-단계들에 대응하는  $T = 13.3 \times 10^{-3}$ 에 대해 수행된다.

#### B. CRV 시뮬레이션 결과들 및 분석

[0098] 도 3은 동시 회전 와류 시스템에 대한 병합 프로세스의 개략도이다. 도 3에서, 순간적인 와도 필드가 표현되고 CRV의 4단계들이 복원된다. 운동학적 분석에서 예측된 각속도는  $\omega_0 = 208.3 \text{ Hz}$ 이다. 시뮬레이션의 짧은 초기 과도 상태 ( $t = 0.3 \text{ ms}$ ) 후에 얻은 수렴 값은 이론 값과 매우 잘 일치하여  $\omega_{0-\text{sim}} = 208 \text{ Hz} \pm 3 \text{ Hz}$ 이다. 시뮬레이션 와류 코어 반경은 시간의 함수로서 팽창 계수  $\alpha = 2.3$ 를 갖는 제곱 법칙 의존성을 보여준다. 셀레텔리 및 월리엄슨으로부터, 값은 램 오세인 와류들에 대해  $\alpha = 2.24$ 인 반면, 실험적으로는  $\alpha = 1.9$ 으로 발견되는데, 이는 예측된 값과 합리적으로 비교된다.

[0099] 2개의 와류들의 완전한 시간 전개를 분석하여 원하는 사중극자 모델링, 특히 사중극자 노이즈 소스들의 시간 종속적인 특성화를 가능하게 했다. 도 5a 내지 도 5d는  $Re = 159$ 이고 그리고 a) 및 b)가  $t = 0.91 \text{ ms}$ 에서 계산되는 공통 회전 와도들에 대한 등가면들( $\text{s}^{-1}$ ) 및 dB 공간맵(dB)을 보여준다. c) 및 d)는  $t = 6.38 \text{ ms}$ 이다. 도 5b 및 도 5d에서, 유체 평면 dB-맵들(즉, 변동하는 압력 레벨에 의해 채색된 복셀들/ 영역들을 갖는 이미지들)은 도 5a 및

도 5c에 도시된 와도 필드들에 의해 방사된 노이즈의 순간 주파수 및 강도를 강조하는 것을 보여준다. 이러한 표현은 지향성의 개념이 없는 물리적인 노이즈 소스들을 보여준다. 2개의 와류들이 가까워지고 가속화됨에 따라 방사선의 주파수가 시간에 따라 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 음향 파워는 병합 프로세스로 인해 시스템이 붕괴 될 때까지 증가하고 있다.

[0100] 재구성된 전체 방사된 음향 필드는 도 6에 도시된다. LBM 시뮬레이션들(그레이 스케일)로 직접적으로 얻어진 음향 필드와 FINSIM으로 계산된 압력 파형 극한치 (라인 72, 74로 표시) 간의 비교는 만족스러운 일치에 있으며, 이는 노이즈 모델링 단계를 위한 알고리즘의 유효성을 제공한다. 이것은 2D 예제일 뿐이지만 CRV 추적을 통한 사운드 생성을 예측하는 개념이 작동함을 보여준다. 보다 상세하게는, 도 6에서 흑백은 LBM으로부터 예측된 200Hz와 1500Hz 사이의 [-0.5Pa, 0.5Pa] 범위의 필터링된 음향 압력 필드를 나타내고, 라인 72, 74는 FINSIM으로 계산된 최소 및 최대 압력 파값들에 대응한다.

### [0101] 2D 전단층 흐름(shear layer flow)

#### [0102] A. 전단층 흐름

[0103] 이전 연구들에서, 전단층의 주요 구조들에 의해 생성된 노이즈는 사중극자 특성을 가지며 고립된 CRV 시스템과 매우 유사한 와류 쌍 형성 메커니즘과 관련이 있음을 보여준다. 여기서 1차 고조파  $f_0=40\text{ KHz}$ 에서 2차원 강제 전단층은 중요한 노이즈 소스 역학들 및 결과적인 사운드 소소 필드가 알려진 비교적 간단한 경우 FINSIM을 시연하기 위해 시뮬레이션된다.

[0104] 전단층(SL) 문제는 두께  $\delta_w(0)$ , 최대 속도  $U_1$  및 최저 속도  $U_2$ 의 세 가지 파라미터로 특징 지어진다. 입구 속도 프로파일은 다음과 같이 주어진다.

#### 수학식 16

$$u(y) = \frac{U_1 + U_2}{2} + \frac{U_1 - U_2}{2} \tanh\left(\frac{2y}{\theta}\right)$$

[0105] [0106] 여기서,  $\theta = \delta_w(0)$  이다. 강제 전단층의 경우에서, 정현파 강제 성분이  $\theta = \delta_w(0)(1 + 0.8 \sin(2\pi f_0 t))$  와 같은  $\theta$ 에 더해진다. 상용하는 레이놀즈 수는  $\delta_w(0) = 4.34 \times 10^{-5}\text{m}$  를 갖는  $Re=250$ 이다.

[0107] 시뮬레이션 도메인은 y 방향으로  $9600\delta_w(0)$  이상 그리고 x 방향으로는  $8800\delta_w(0)$  이상 확장된다. 스폰지 영역들은 무반향 조건을 제공하기 위해 다시 사용되며, 2차원 DNS 시뮬레이션들은 80 사이클들, 즉, 80차 쌍으로 수행된다. 강제된 SL에 대해 도 7에서 도시된 것처럼, 흐름은 주기적이며, 검출 방법은 SL에서 생성된 2개의 연속적인 와류들의 한 쌍의 기간 동안 4개의 순간들에 적용된다. 시간 의존적인 흐름 결과들은 FINSIM으로 처리되고 사중극자 노이즈 소스들은 복구되며 페어링 메커니즘에 명백하게 연관될 수 있다(도 7). 페어링 주파수에 대응하는 주 방사 주파수 또한 복구되어 시간 및 공간에 대한 의존성을 나타낸다. 보다 구체적으로, 도 7은 강제 전단층 흐름의 한 쌍의 주기 내에서 4개의 시점에 대응하는 르름 및 음향 필드를 도시한다. 위에서 아래로,  $t = 0$ 초;  $t = 0.146$ 초;  $t = 0.151$ 초;  $t = 0.161$ 초이다. 왼쪽 그래프는 s-1에서 와도의 등온선을 보여주고, 가운데의 그래프는 노이즈 소스의 순간 공간 dB-맵들을 보여주며, 그리고 오른쪽 그래프는 재구성 된 음향 필드를 보여주며, 여기서 라인 72는 최소 압력파이고 그리고 라인 70은 최대 압력파이다.

### [0108] 3D 제트 흐름

## A. 수치 설정

[0109] 제트 흐름은 우주 항공에서 중장비까지 다양한 분야들에서 중요한 노이즈 소스이다. 노이즈 발생 메커니즘(난류 생성 및 와류 대 와류 상호 작용)은 많은 연구자들에 의해 광범위하게 분석되었지만, 노이즈가 정확히 어디에서 어떻게 생성되는지에 대한 기하학적 설계 세부사항들의 영향이 명확하게 이해되지 않는다. 그러므로, 제트들은 노이즈 소스 식별을 위한 강력한 예를 제공한다.

[0110] 등근 제트의 시뮬레이션은 CMS000 구성에서 수행된다(도 11 참조). 3D로의 확장을 포함하여 FINSIM의 개발 및 검증을 돋기 위해 대형 3D 과도 흐름 데이터 세트가 생성된다. 특성 길이는 노즐 지름에 해당하는  $D=50.8\text{mm}$ 이다.

[0111] 제트 마하 수는  $M=0.35$ 이고 그리고 레이놀즈 수  $Re=410,000$ 이다. 해상도는  $\Delta x=1\text{ mm}$ 이고, 그리고 시뮬레이션의 물리적 시간  $t = 0.1$ 초가 수행된다. 이전의 2D 경우와 유사하게, 노즐 및 제트를 둘러싸는 스폰지 영역 기법이 도메인의 경계로부터의 가짜 반사들을 피하기 위해 사용된다.

## B. 흐름 및 노이즈 결과들

[0112] 도 8a 및 도 8b는 각각 노즐 출구의 3mm 업스트림에서의 분사 축을 따른 평균 유선 속도 성분 및 유선 속도 프로파일을 도시한다. 도 8a 및 도 8b에서, 평균 유속 성분은 분사 축을 따른 실험들 및 출구의 3mm 업스트림에서의 노즐 프로파일에 대한 실험과 비교된다. 예측된 결과들은 실험들과 잘 일치한다. 특히, 노즐 내부의 경계층은 정확하게 예측되고 잠재적인 코어 길이와 함께 제트 팽창이 잘 회복된다. 와도 필드의 순간 스냅샷들은 제트 내의 다수의 와류들의 존재를 보여주고(도 9는 다양한 위치들 및 평면들에서의 순간적인 와도 필드를 보여준다), 이는 전단층들에서 존재하고 그리고 잠재적인 코어의 끝에서 젠트의 난류 혼합에 의해 유발된 구조들을 포함한다.

[0113] 음향 복사는 동일한 과도 시뮬레이션 내에서 캡쳐되고 그리고 순간 압력 변동을 나타내는 스냅샷은 x-정렬 평면에서의 순간 압력 변동들을 보여주는 도 10a 및 도 10b에서 도시된다. 이 도면에서는 잠재적인 코어의 끝에서 오는 주요 노이즈 소스를 볼 수 있다. 노즐 출구로부터 100D에 위치된 마이크로폰들에서 측정된 전체 사운드 레벨의 지향성은 OASPL 지향성 플롯을 보여주는 도 10b에 도시된다. 노이즈 레벨 및 지향성 의존도는 잘 예측되며, 특히, 관찰 각도가 증가함에 따라 노이즈 레벨들이 증가된다.

## C. FINSIM 결과들

[0114] 이전에 제시된 소스 식별 방법은 3D 과도 입력들에 적용되고 3D 제트 시뮬레이션의 노이즈의 소스를 분석하는데 사용된다. 먼저, 시뮬레이션 측정 파일들은 와류 검출 방법에 입력되고, 이는 와류 코어 중심선들, 및 반경, 위치, 길이 등과 같은 각 와류에 대한 기타 기하학적 정보를 리턴한다. 와류 중심선들 및 반경(즉,  $\lambda-2$  등가면의 평균 반경)으로부터 볼 때, 와류 구조들은 도 11에 도시된 바와 같이 단순화된 형태로 재구성된다(예를 들어, 재구성된 중심선들을 나타냄). 와류들이 생성되는 잠재적인 코어에 가까운 전단 층에서 높은 밀도의 와류들이 관찰된다. 이후, 와류들이 다운스트림으로 전환되고 병합 및 소산으로 인해 와류 밀도가 감소한다. 와류 재구성 프로세스(각각의 와류의 "골격(skeleton)" 버전 생성)의 정확성을 평가하기 위해, 초기 등가면 영역선도와 와류의 재구성 메시의 평균 거리를 기반으로 오차가 계산된다. 이후, 평균 거리는 개별 골격의 등가 반경으로 정규화된다. 도 12는 이 계산의 결과를 보여주는데, 각 와류는 오차의 크기에 해당하는 반경을 가진 구로 표현된다. 이 오차 척도의 수치는 일반적으로 1.0 이하로 유지되며 그리고 최고 3.0까지의 최대값이 관찰되지만 오차 레벨들은 재구성 프로세스에서 허용 가능한 정확도를 나타내는 것으로 간주된다. 피크 값들은 실제로 프로세스의 제1 단계에서 개별적으로 캡쳐되지 않은 복잡하게 얹힌 구조에 해당한다. 하나의 등가면이 동시에 여러 개의 혼합된 와류들을 나타내는 경우, FINSIM은 하나의 튜브를 복잡한 와류 시스템들에 맞추려는 것으로 간주한다.

[0115] 모든 프레임들에 대해 얻은 와류 튜브 정보를 사용하여 흐름의 난기류들에 대한 통계를 수행할 수 있다. 도 13은 (x, y) 평면상에 투영된 와류들의 분포를 나타낸다. 도 13에서, 각 프레임으로부터의 각각의 와류 위치는 분사 축을 중심으로하는 100셀들 x 100셀들의 격자 상에 직각으로 투영되며, 이는 3D의 전체 폭을 나타낸다. 각 개별 그리드 셀 내부에 투영되는 와류들의 구획은 해당 셀의 색상으로 표시된다. 결과적인 와류들의 분포는 잠재적인 코어의 경계에서 전단 층의 와류의 강한 집중뿐만 아니라 예측된 축 대칭을 보여준다. 각 와류의 길이는 또한 재구성 프로세스에서 계산되며, x축을 따른 와류 길이의 분포가 도 14에 도시되어 있으며, 이는 와류 길이를 0에서 0.04m 범위의 100개의 값들과 0에서 15D 사이의 100개의 값들로 나누어서 구성된다. 도 14에 제시된 분포는 x=3D 이전의 난류의 낮은 존재뿐만 아니라 길이가 0.006m 미만인 와류의 부재를 나타낸다. 와류의 밀도

는 3D(잠재적인 코어의 끝)와 10D 사이에서 가장 높다. 와류 길이는 다운스트림으로 변환될 때 증가한다.

[0119] 와류 추적 단계 후, 와류들의 기하학적 속성들의 시간 변화가 계산된다. 예를 들어, 도 15의 스냅 샷 이미지에 도시된 바와 같이, 와류들의 대류 속도가 계산된다. 도 15에서, 30 내지 130m/s의 대류 속도에 의해 착색되어 재구성된 중심선들이 도시되어 있다. 여기서, 대류 속도는 제트 전단 층의 외층에서 거의 제로이고 잠재적인 코어 경계들에 근접한 최대에 도달한다는 것을 알 수 있다. 스트림 방향을 따른 대류 속도의 분포 또한 계산된다. 도 16은 x축을 따른 평균 대류 속도의 예시적인 그래프를 도시한다. 도 16은 대류 속도의 초기 증가를 나타내며, 이후 ~ 0.3m에서 시작하는 잠재적인 코어의 단부로부터 다운스트림으로 이동하는 느린 감소가 나타낸다. 대류 속도의 경우 99% 신뢰 구간은 평균값인 약 5%에 비해 상대적으로 작다. 와류들의 스트레칭은 또한 프레임마다 와류 중심선들의 길이 변화를 기반으로 계산된다. 개별 와류들의 스트레칭의 스냅 샷이 도 17에 제시되어 있고(예를 들어, 0 내지 10000 %/s로 스트레칭하여 재구성된 중심선들) 그리고 분사 축을 따른 스트레칭의 분포는 도 18에 나타나 있다. 스트레칭 분포는 전단 층이 잠재적인 코어의 외부 경계에서 와류들을 생성하기 시작하는 프레임 당 3.5%의 피크 값을 나타낸다. 스트레칭은 프레임 당 약 0.7 %로 일정하다. 그것은 와류가 제트에서 다운스트림으로 이동할 때 길이가 계속 증가함을 보여준다; 이것은 주로 와류 코어의 소산의 3차원 효과들로 인한 것이다.

[0120] 마지막으로, 와류 시스템 검출 방법은 동시 회전에서 와류 쌍에 대한 정보를 제공한다. 각 시간 프레임에서, CRV에 의해 방출되는 사운드의 주파수는 회전 속도로부터 계산된다. 노이즈 소스 분포에 해당하는 주파수 의존 CRV 공간 분포를 연구하기 위해, 주파수가 사전 결정된 200Hz 대역 내에 있는 CRV들의 수는 0kHz에서 5kHz 사이의 주파수 대역에 대한 흐름에서 계산된다. 이 숫자는 그리드 셀의 단위 체적으로 표준화된다. 얻어진 스칼라는 노이즈 소스 밀도이다. 결과들은, 주파수 대역 (a) 200 ~ 400Hz, (b) 800 ~ 1000Hz, (c) 2000 ~ 2200Hz 및 (d) 3000 ~ 3200Hz에 대한 노이즈 소스들의 밀도를 보여주는 도 19a 내지 도 19d에서 표시된다. 최대 밀도는 800Hz 내지 1000Hz 대역 범위의 셀에서 얻어진다. 이는, x = 0.2m에서 분사 축으로부터 90°에 위치한 프로브에서 1/3 번째 옥타브 SPL에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주는 도 20에 제시된 바와 같이 원거리 SPL의 최대가 관찰되는 대역에 대응한다. 와류 쌍들의 존재는 낮은 주파수들(<200Hz)에서 0에 가까우며 고주파수 대역의 와류 쌍들의 수는 800Hz 내지 1000Hz 범위보다 낮다. 전반적으로, CRV 소음원은 잠재적인 코어 근처에 집중되어 있으며, 여기서 수직 맴돌이(즉, 난기류)가 전단 층에서 생성된다.

#### FINSIM 적용

[0122] 흐름으로 유발된 노이즈 소스들을 식별하기 위한 본 접근법들의 성능들을 설명하기 위해, 노이즈 발생의 차이가 관측된 두 가지 경우에들에 적용된다. 첫 번째 경우는 2개의 제트 노즐 설계들인 SMC000(이전 섹션에서 제시된 원형 노즐)과 SMC006 (갈매기 형 노즐)의 비교로서, 이들의 기하학적 구조들은 도 21a 및 도 21b에서 각각 도시된다. 두 번째 경우는, 서로 다른 레벨들의 방사 음향들을 생성하는 것으로 알려진 완전히 세부적인 생산 차에 대한 2개의 서로 다른 사이드 미러 설계들의 비교이다.

#### A. 제트 노즐 형상 비교 : SMC000 대 SMC 006

[0124] FINSIM을 사용한 SMC000 시뮬레이션 및 분석은 섹션 IV에 서술되어 있다. SMC006 시뮬레이션은 노즐 형상의 변경을 제외하고는 동일했다. FINSIM은 두가지 경우들 모두에 적용되며, 도 22a 및 도 22b에서 도시된 와류들의 결과적인 공간 분포들은 흥미로운 차이들을 나타낸다. 갈매기 형상이 잠재적인 코어를 봉괴시키는 경향이 있기 때문에 SMC006 와류 분포(도 22a)는 보다 국소화되어 있다. SMC000의 경우(도 22b), 와류들은 제트를 따라, 다운스트림 및 잠재적인 코어 주변에 위치된다. 하지만, SMC006의 경우, 와류들은 주로 잠재적인 코어의 끝 부분에 위치되며, 이는 SMC000에 비해 유선 방향으로 약 절반의 거리로 확장된다. 잠재적인 코어는 SMC006의 경우에 더 넓으며, 와류들은 SMC000에 비해 방사상 방향으로 더 많이 분포된다.

[0125] 추가의 다운스트림에서, 와류들의 집단에 의해 나타나는 난기류는 SMC006에 대해 빠르게 소멸된다. 와류 분포에서 차이점들이 주어지면, SMC006 노이즈 소스 위치가 더 국부화되고 특정 주파수 대역들에서 더 강렬할 수 있다.

[0126] 도 23은 상이한 대역폭들에서 도 21a 및 도 21b의 노즐 설계들에 대한 노이즈 소스들의 시뮬레이션된 분포를 나타낸다. 도 23에서, SMC000 및 SMC006에 대한 노이즈 소스들의 분포(이전에 CRV 밀도로 나타냄)가 제시되어 있다. 두 설계들을 비교하기 위해, 각 대역폭에서의 분포는 두 경우 모두를 고려한 최대 CRV 밀도 값에 의해 표준화 된다. 이 그래프는 낮은 주파수들에서 CRV 노이즈 소스들의 양이 SMC006 설계에서 더 크고 노즐의 출입구 근처에 국한됨을 보여준다. 제트에서 갈매기형 노즐 침투는 난기류를 유발하고 잠재적인 코어 길이를 감소시키며

그리고 관찰된 노이즈 소스를 생성한다. 와류 분포들과 유사하게, CRV 노이즈 소스의 양은 SMC000 설계에서 상대적으로 적으며 플룸(plume)을 따라 더 균등하게 분배된다. 최대 1200Hz까지, 가장 높은 노이즈 소스 농도는 SMC006 설계를 따른다. 그러나 더 높은 주파수들에서 트렌드는 반전되고 SMC000는 높은 노이즈 소스 농도들을 가지지만, 반면에 SMC006 소스들은 주파수가 증가함에 따라 그 수가 감소하는 동안보다 더 국부적이 될 것이다. 도 24에서, 노이즈 소스들의 총 수는 주파수 대 플롯되어 있으며, 이는 SMC000에 비해 SMC006 노이즈 소스들이 낮은 주파수들에 더 집중되고 고주파수에서 떨어지는 이러한 2개의 노즐 설계들에 대한 노이즈 소스들의 주파수 분포 차이를 명확하게 보여준다.

[0127] 현재, 방사된 음향 파워의 비교는 소스의 세기 및 파워의 계산을 요구하기 때문에 제공되지 않는다. 지금까지 와류들의 세기에 대한 묘사는 보여지지 않았다. 지금까지 중심선들의 계산은 이러한 양들을 얻을만큼 정확하지 않았다. 센터 라인 알고리즘 및 회전 검출의 새로운 개발은 이러한 문제를 극복하고 그리고 CRV 소스들의 강도를 고려하여 방사된 음향 파워를 예측할 수 있게 한다.

#### B. 자동차 사이드 미러 디자인 비교:

[0129] 현재의 접근 방식은 완전히 세부적인 실제 생산 차량에서 2개의 서로 다른 사이드 미러 설계들을 위한 바람 노이즈 소스(wind noise source)들을 비교하는 데 사용된다. 2개의 조사된 기하 구조들이 도 25a(미러 1) 및 도 25b(미러 2)에 제시되어 있다. 이전의 실험 및 시뮬레이션 조사들에 따르면, 미러 1은 측면 유리에 높은 난류 벽 압력 변동을 일으키지만, 미러 2는 측면 유리에 높은 음향 레벨들을 생성한다. 이 가정에 대한 증거는 부분적으로는 도 26에 도시된 바와 같이 Ok 방법을 사용하여 계산된 측면 유리상의 음향 벽 압력 하중들로부터 유래하고, 이는 100Hz를 제외한 모든 주파수들에서 미러 2에 대한 높은 레벨을 보여준다. 2개의 미러 설계들 모두에 대해, FINSIM은 파워플로우 결과들에 적용되고 그리고 시뮬레이트된 물리적 시간에 걸친 주파수의 합수로서 시뮬레이션 체적에 대한 CRV 노이즈 소스들의 총 개수가 도 27 내지 도 29에 도시되어 있다. 각 주파수에서, 미러 1의 노이즈 소스들의 수가 더 높다. 와류 크기들 및 강도들을 가정하면, 그 결과 CRV 강도들 및 CRV 당 발생한 음향 파워는 2개의 경우들에서 비교가능하고, 이후 노이즈 소스들의 전체 수가 전체 음향 파워에 잘 부합하므로, FINSIMDP 의해 여기에서 예측된 트랜드는, 미러 2가 높은 음향 레벨들을 발생시키는 예상 결과 및 결과들을 제공한다.

[0130] 노이즈 소스들의 분포는 제트 예와 동일한 방식으로 계산되고 도 5에 제시된다. 축소된 관점에서 전체 노이즈 소스 분포는 2개의 설계들 간에 매우 유사하게 나타난다. 고주파수에서, 두 디자인들의 A 필러 근처에 더 많은 노이즈 소스들이 있으며, 이는 A 필러 와류의 알려진 동작과 잘 일치한다. 확대된 관점에서, 미러 (2)에 대한 추가적인 노이즈 소스의 주요 위치들은 미러 하우징의 후면의 둘레 근처에 있는 것으로 보여진다. 도 31 및 도 32에서, 수평면상의 측면 미러들의 부근의 속도 크기는 미러 1과 비교하여 미러 2의 다운스트림에서 더 강한 재순환을 나타낸다. 고속 크기에 대응하는 미러 2의 끝의 다운스트림 영역은 미러 1과 비교하여 더 먼 거리를 연장한다. 흐름이 미러 1에서 더 일찍 분리되면, 결과적으로 재순환이 일어나는 미러의 끝에서 더 느려진다. 운동 에너지가 적기 때문에, 결과적으로 발생하는 음향 에너지는 운동 에너지가 높을수록 미러의 팁에서 더 강한 난류 구조를 유도하므로 소음이 적다. 강렬한 난류 전단 충은 에너지가 강한 와류 쌍 상호 작용들의 높은 밀도와 관련이 있고, 이는 CRV 시스템들을 발생시키는 노이즈의 밀도가 더 높아지며, 따라서, 미러에 대한 도 26에서 관측된 바와 같이 더 강한 노이즈 발생이 야기된다.

#### C. 추가 자동차 사이드 미러 설계 비교:

[0132] 다음 사례들은 FINSIM이 두 가지 유사한 설계들 간의 노이즈 생산 불일치들을 찾아내는 능력을 나타낸다. 베이스 라인 미러는 실제 자동차의 기하학적 구조에 대응하고 그리고 트레일링 에지 익스텐션(TEE) 미러는 베이스 라인에 단계를 추가함으로써 베이스 라인 미러로부터 구성된다(도 33a 및 도 33Bb의 그레이 풀롬). 미러 기하학적 구조들이 매우 유사하기 때문에, 선행 에지 흐름은 기하학적 수정으로 변경되지 않을 것으로 예상된다. 실험 결과에 따르면 자동차의 내부 소음 수준이 TEE 미러보다 높다. 흐름은 창에서 변경되지 않기 때문에, 그 차이는 미러에 따라 생성될 수 있는 흐름의 음향 기여 때문이다. 여기서 FINSIM 분석은 미러에 따라 수행된다. CRV의 총수의 차이는 도 34에서 관찰된다. 그 차이는 약 25%(~ 2dB)에서 전체 주파수 범위에서 일정하다. FINSIM은 음향 생성의 차이를 감지했다. 이러한 차이는, x 방향에 따른 노이즈 소스들의 분포는 TEE 설계의 두 주파수 범위들, 특히 다운스트림의 선단 에지에서 더 높은 것을 나타내는 도 35a 및 도 35b에서 또한 관측된다.

[0133] 결론적으로, TEE 설계는 기본 형상에 추가된 단계로 인해 더 많은 소음을 발생시킨다. 이것은, 노이즈 소스 밀도가 이러한 추가 체적에 가까운 TEEE 설계에 대해 가장 높은 도 36에서 도시된다. 그러나, 노이즈 소스 밀도 레벨들은 기본 설계에서 더 낮다.

## [0134] D. HVAC 덕트 설계 비교:

다음 사례는 노이즈 소스들(CRV들이라고 함)의 위치를 정확히 파악하기 위해 HVAC 장치 시스템에 FINSIM을 적용한 것을 보여준다. 실제 덕트+벤트 형상(도 37a 내지 도 37b) 및 이 베이스라인으로부터 도출된 새로운 설계가 FINSIM을 사용하여 비교된다. 새로운 설계는 난류 영역들의 변동들을 줄이기 위해 덕트 형상을 수정하여 얻을 수 있다. SPL 레벨들의 눈에 띄는 차이가 관찰되고 결과적으로 실내 소음이 감소한다. 변형 예들이 도 38a 내지 도 38b 그리고 도 39a 내지 도 39b에 제시되어 있다.

FINSIM은 도 40에 도시된 바와 같이 노이즈 소스들 위치 및 양의 차이를 성공적으로 캡처한다. CRV들의 총 수는 모든 주파수들에서 3 ~ 4의 팩터 만큼 새로운 설계와 다르다. 새로운 설계는 베이스라인보다 조용하다. 또한, 도 41a 내지 도 41b 및 도 42a 내지 도 42b에 도시된 CRV 밀도 맵들은, 노이즈의 감소에서 기하학적 변형의 효율을 도시한다. FINSIM은 베이스라인에 대한 소스들의 위치를 찾아 내고 있지만 향후 설계 개선 우선 순위에 따라 중요도를 매길 수도 있다. 도시된 벤트에 가까운 부분에는 덕트들 내의 CRV들의 수가 더 많은 것이 대부분이다.

와류들의 모션과 공동-회전하는 와류 쌍들을 추적함으로써, FINSIM(Flow-Induced Noise Source Identification Method)은 와류 역할들과 그 결과로 발생하는 사중극자와 같은 노이즈 방사 사이를 명확하게 연결한다. 와류 쌍들의 시간 및 공간 전개를 분석함으로써 이러한 노이즈 소스들의 위치, 주파수, 방향성 및 강도가 복구된다. 표준 2D 격리된 공동 회전 와류들(CRV) 문제 및 강제 2D 전단 충 흐름 사례의 시뮬레이션 및 분석은 기본 개념의 실행 가능성을 검증한다. 노이즈 소스들은 정확하게 위치가 정해져 있고 강도가 시간에 따라 변화하여 흐름으로 유발된 노이즈 생성이 합리적으로 예측된다. 전단 충 흐름 결과는 또한 평균 흐름에 의한 노이즈 소스들의 대류를 캡처할 수 있는 능력을 보여준다. 3차원 흐름들에 대한 방법의 확장은 먼저 난류 제트 구성에 적용된다. 3D 와류 검출 및 추적 방법은 CRV 식별을 가능하게 하고 와류 밀도 및 노이즈 소스들(CRV 밀도로 표시)의 통계적 분포에 대해 합리적인 결과들을 제공하는 것으로 보인다. 설계 비교를 위한 FINSIM의 적용은 2개의 다른 노즐 형상들을 가진 제트 및 2개의 다른 측면 미러들이 있는 자동차에 대해 입증되었다. 두 연구 모두들에서, 예상되는 전체 노이즈 트렌드들이 정확하게 캡처되었다. 사이드 미러 비교에서, FINSIM은 지배적인 공명 음향 소스들의 특정 위치들을 성공적으로 제공하여 왜 하나의 미러가 다른 미러보다 음향적으로 더 나은지 명확하게 이해할 수 있다.

일부 구현들에서, 노이즈 소스들은 클러스터링 프로세스를 사용하여 식별되고 함께 그룹화될 수 있다. 위에서 설명한 것처럼, 노이즈 소스들은 주어진 x, y 및 z 좌표를 가진 유한한 점들의 세트와 주어진 위치(x, y, z)에서 노이즈 생성을 나타내는 주어진 음향 "강도(strength)" 또는 연속/이산 변수 중 하나일 수 있다. 공간의 x, y, z 도메인이 이산화되고 관련 강도가 변수 (x, y, z)인 경우, 변수는 유한한 점들의 집합으로 감소될 수 있다. "강도" 임계 값이 있거나 없는 경우, 음향 노이즈 소스들을 나타내는 유한한 점들의 집합이 감소될 수 있다. 유한한 점들의 집합이 주어지면, 노이즈 생성 영역들은 높은 노이즈 소스들의 밀도를 갖는 영역들로 식별될 수 있다. 즉, 해당 영역의 각 소스에 대한 의미로, 미리 정의된 거리 내에서 이 영역 내에 또 다른 소스가 있다. 이 방법으로 노이즈 생성 클러스터들이 식별될 수 있다. 각 클러스터의 노이즈 소스들의 특성을 결합하여 (예를 들어, 평균, 합계 및/또는 체적 통합) 클러스터의 총량을 생성할 수 있다.

도 43은 클러스터링을 도시하는 그래프(4300)이다. 그래프(4300)상의 점들은 상이한 음향 강도들의 음향 파워를 나타낸다. 각각의 음향 전원은, 예를 들어 테카르트 좌표계의 x, y 및 z 좌표로 나타낼 수 있는 공간 위치를 갖는다. 음향 전원들은 그룹화되어 클러스터링된 소스들(4302 및 4304)을 형성할 수 있다. 음향 전원들의 그룹화는 음향 전원들의 강도 및 밀도 분포에 의존할 수 있다. 예를 들어, 임계 강도가 미리 정의될 수 있으며 사전 정의된 임계 값을 초과하는 강도들을 갖는 음향 전원들은 하나 이상의 클러스터들에 함께 그룹화될 수 있다. 사전 정의된 임계 강도는 클러스터링 프로세스에서 하나 이상의 음향 전원들을 포함 또는 제외하도록 변경될 수 있다.

음향 전원들은 여러 가지 클러스터링 기술들(예를 들어, 다목적 최적화를 기반으로 하는 알고리즘들)을 사용하여 함께 그룹화될 수 있다. 알고리즘은 원하는 결과가 달성될 때까지 최적화와 관련된 파라미터들이 수정되는 반복 프로세스일 수 있다. 활용할 수 있는 일부 클러스터링 기법들은 연결 기반 클러스터링, 중심 기반 클러스터링, 분산 기반 클러스터링 및 밀도 기반 클러스터링이 포함되나 이에 국한되지는 않는다. 일 구현에서, 음향 전원들은 클러스터링된 소스(예를 들어, 4302, 4304 등)에서 음향 전원들의 근접성을 결정하는 임계 거리(L)에 기초하여 함께 그룹화될 수 있다. 임계 거리(L)는 클러스터링 프로세스 이전에 미리 정의될 수 있고 그리고/또는 다양한 음향 노이즈 소스들의 위치를 비교함으로써 동적으로 계산될 수 있다. 기준 음향 노이즈 소스가 식별

될 수 있고 기준 노이즈 소스로부터의 거리 L에 있는 모든 노이즈 소스들은 클러스터링된 소스로 그룹화된다.

[0141] 노이즈 소스 식별 기술은 차량의 HVAC 시스템을 통과하는 공기 흐름을 결정하고 설명하는데 적용할 수 있다. 예를 들어, 일단 공기 흐름이 결정되면 공기의 난류 영역들이 식별될 수 있다. 난류의 공기 흐름을 기반으로 음향 전원들의 위치와 강도를 식별할 수 있다.

[0142] 도 44는 HVAC 시스템(4400)에서 식별된 음향 노이즈 소스들을 클러스터링하는 예를 도시한다. 노이즈 소스들은 비슷한 위치에 있는 다른 노이즈 소스들과 클러스터링된다. 예를 들어, 노이즈 클러스터(4402)는 하부 우측 송풍기에 위치한다. 노이즈 클러스터(4408)는 노이즈 소스(4402)의 좌측 및 후면에 위치한다. 노이즈 클러스터(4404)는 노이즈 클러스터(4402)의 좌측에 위치한다. 노이즈 클러스터(4406)는 노이즈 클러스터(4404)의 좌측에 위치한다. 노이즈 클러스터(4410)는 노이즈 클러스터(4406)의 좌측 및 상부에 위치한다. 클러스터링 프로세스는 공간적으로 근접한 높은 음향 전력 측정 볼륨 셀들을 그룹화하고, 결과적으로 강한 노이즈 소스들이 있는 공간의 영역들을 식별한다. 이 클러스터링은 음향 분석을 단순화하고 여러 개별 음향 노이즈 소스들의 처리를 단일 클러스터 처리로 줄임으로써 시뮬레이션 및 분석을 수행하는 컴퓨터 시스템의 성능을 향상시킨다.

[0143] 클러스터당 방출되는 전체 음향 파워의 평가, 통합된 레벨들 및/또는 스펙트럼 특성에 대한 평가가 도입될 수 있다. 예를 들어, 도 45는 노이즈 클러스터들의 랭킹을 나타내는 차트(4500)이다. 막대(4502)는 도 44의 노이즈 클러스터(4402)에 의해 생성된 노이즈에 대응한다. 막대(4504)는 도 44의 노이즈 클러스터(4404)에 의해 생성된 노이즈에 대응한다. 막대(4506)는 도 44의 노이즈 클러스터(4406)에 의해 생성된 노이즈에 대응한다. 막대(4508)는 도 44의 노이즈 클러스터(4408)에 의해 생성된 노이즈에 대응한다. 막대(4510)는 도 44의 노이즈 클러스터(4410)에 의해 생성된 노이즈에 대응한다. 시스템은 주위 노이즈에 가장 많이 기여하는 영역들, 예를 들어, 노이즈 클러스터(4402)를 강조 표시할 수 있다.

[0144] 일부 구현들에서, 노이즈는 시스템의 동작 조건에 따라 다양한 상이한 환경들하에서 결정되고 클러스터링될 수 있다. 예를 들어, HVAC의 노이즈는 높은 송풍기 회전 속도 및 낮은 송풍기 회전 속도 조건하에서 별도로 결정될 수 있다. 두 동작점들의 클러스터들은 함께 그리고 개별적으로 (순차적으로 또는 병렬로) 분석될 수 있다.

[0145] 도 46a는 노이즈 소스들이 식별되었지만 클러스터링되지 않은 HVAC 시스템(4616)을 도시한다. 일반적인 HVAC 시스템(4616)은 이상화된 캐빈 내부(4600)와 함께 모델링된다. 현 단계에서는 캐빈의 음향 특성이 캐비티의 기하학적 형상 이외에 고려되지 않았다. 도 46b는 노이즈 소스들이 식별되고 (예를 들어, 클러스터(4604)로) 클러스터링되는 HVAC 시스템(4616)을 도시한다.

[0146] 일부 구현들에서, 모든 음향 노이즈 소스들 및 노이즈 클러스터가 동일한 영향 또는 중요성을 갖는 것은 아니다. 예를 들어, 아무도 듣지 못하거나 청취자가 듣지 못하는 노이즈들은 디자인 결정에 덜 관련될 수 있다. 소음 공해는 사람이나 동물의 생활이나 활동에 해를 끼칠 수 있는 혼란 스럽거나 과도한 소음이다. 원치 않는 노이즈는 심리적인 건강을 해칠 수 있다. 노이즈는 고혈압, 높은 스트레스 수준, 이명, 청력 상실, 수면 장애 및 기타 유해한 효과들을 유발할 수 있다. 따라서 침묵이나 노이즈 감소가 호화스러움 및 고급스러움과 관련된 바람직한 성질이라는 것은 놀랄 일이 아니다. 소음 감소를 품질의 신호로 받아들인 업계의 한 예가 자동차 산업이다. 많은 고급 자동차는 내부의 상대적인 정숙성을 광고한다.

[0147] 상기에서 언급된 것처럼, 자동차 내부의 노이즈는 자동차의 엔진, 도로위에서의 타이어들의 움직임, 자동차의 난방 환기 공조(HVAC) 시스템으로부터의 공기의 흐름을 발생시킨다. 외부의 노이즈 소스들, 엔진 및 타이어들로 인한 자동차 내부의 노이즈는, 예를 들어, 감소/감소 재료들을 적용하여 자동차 내부를 방음 처리하여 줄일 수 있다. 반면에, 자동차 내부의 디자인을 변경하면 자동차 내부의 기류로 인한 노이즈(예를 들어, HVAC 시스템을 통한 공기의 난류로 인한 노이즈)를 줄일 수 있다.

[0148] 각각의 노이즈 발생 영역에 대해, 시스템에서 주입된 강도(음향 파워)는 상기에서 서술된 바와 같이 결정될 수 있다. 그러나, 시스템의 음향 특성(흡수, 회절 등)에 관계없이, 강도가 시스템에 주입되는 것이므로 주어진 위치(운전자의 귀들과 같은)에 대한 이러한 각 영역의 실제 기여는 아직 고려되지 않았다.

[0149] 수치 분석을 사용하여 각 영역 또는 노이즈 소스와 위치 사이의 음향 전달 함수를 계산함으로써, 시스템은 각각의 영역 또는 노이즈 소스의 강도를 보정하여 위치에 대한 각각의 노이즈 생성 영역 또는 소스의 기여를 직접 얻고 각각의 주파수에 대한 원하는 위치로의 각 측정 셀의 사운드 파워 레벨 기여를 직접 획득할 수 있다.

[0150] 이러한 방법은 수신기 위치에 기반한 시스템의 노이즈 생성 영역들의 고유한 랭킹을 허용하고 그리고 가장 큰 영향을 미치기 위해 가장 먼저 작업할 설계 영역을 효율적으로 선택할 수 있게 한다.

- [0151] 도 47은 자동차(4700)의 내부(4704)의 탑승자(4702)를 도시한다. 탑승자(4702)는 다양한 소스들, 예를 들어, 외부 노이즈 소스들(47470), 타이어(4712), 엔진(4714) 및 HVAC 시스템(4716)으로부터의 노이즈를 들을 수 있다. 전술 한마와 같이, 외부 노이즈 소스(47470), 타이어(4712) 및 엔진(4714)으로부터의 노이즈는 자동차의 내부를 방음 처리함으로써 감소될 수 있다. 탑승자(4702)의 귀(4706)에 도달하는 HVAC 시스템으로부터의 노이즈는 HVAC 시스템의 설계를 개선함으로써 감소될 수 있다(예컨대, 최소화 된다). HVAC 시스템(또는 시스템 내의 공기 또는 다른 유체의 흐름과 관련된 임의의 다른 노이즈 소스)을 개선하는 방법을 결정하기 위해, HVAC 시스템에 존재하는 흐름으로 유발된 노이즈 소스들의 분석이 수행될 수 있다. 아래의 예는 자동차 HVAC 시스템과 관련하여 서술되었지만, 여기에 서술된 시스템은 차량 주위의 공기 흐름(윈드 노이즈), 연소 기관을 통한 공기 흐름(공기 흡입구, 배기 시스템), 주변의 공기 흐름 냉각 팬들, 운송수단(예를 들어, 비행기들, 보트들 및 기차들), 영화관들, 흄 시어터들, 주택들, 사무실들 등을 포함하지만, 이에 제한되지는 않는다.
- [0152] 일부 구현들에서, 음향 노이즈 소스들 및/또는 노이즈 클러스터들의 강도는 특정 위치 또는 위치들에 의해 수신되는 노이즈의 양에 기초하여 조정될 수 있다. 개별 노이즈 소스 및 소음 클러스터의 음향 파워는 운전자의 귀 위치에 있는 센서 지점을 기준으로 조정할 수 있다. 예를 들어, 마이크가 전략적으로 배치되고 압력 신호들이 그 지점에 기록된다. 음향 파워는 노이즈 소스 또는 노이즈 클러스터에서 센서 지점으로의 전달 함수를 기반으로 조정할 수 있다. 일반적으로, 전달 함수는 소스의 강도(예를 들어, 노이즈 소스 또는 노이즈 클러스터의 음향 파워)와 수신기(예를 들어, 운전자의 귀)의 알려진 어떤 원격 지점의 강도 간의 관계이다. 각각의 음향 소스 또는 클러스터들과 타겟 위치(예를 들어, 운전자의 왼쪽 귀) 사이의 음향 전달 함수들은, 전달 경로를 따른 흡음재들의 존재뿐만 아니라 기하학적 경계 조건에 의존할 수 있다.
- [0153] 도 48a 및 도 48b는 각각 저속 및 고속 송풍 조건하에서 운전자의 왼쪽 귀에 대한 노이즈 소스에 대한 계산된 전달 함수의 예를 도시한다. 이는 전달 함수가 크게 다른 것을 보여준다. 낮은 송풍기 속도에서 계산된 전달 함수(4802)는 높은 송풍기 속도에서 계산된 전달 함수와 시각적으로 상이하다. 이를 도면들에서, 각각의 선은 차량의 상이한 노이즈 소스들에 대한 결정된 전달 함수를 나타낸다. 예를 들어, 소스 # 1(4806 및 4816)은 도 44의 클러스터(4402)에 대한 계산된 전달 함수이고, 소스 # 2(4808 및 4818)는 도 44의 클러스터(4404)에 대한 계산된 전달 함수이고, 소스 # 3(4810 및 4820)은 도 44의 클러스터(4406)에 대한 계산된 전달 함수이고, 소스 # 4(4812 및 4822)는 도 44의 클러스터(4408)에 대한 계산된 전달 함수이며 그리고 소스 # 5(4814 및 4824)는 도 44의 클러스터(4410)에 대한 계산된 전달 함수이다.
- [0154] 전달 함수는 일반적으로 두 수량의 비율로 정의된다. 음향학에서, 전달 함수는 2개의 음향 압력(수신기에서의 압력과 소스의 압력)의 비율, 또는 수신기에서의 음압과 소스에서의 체적 흐름의 비율로 정의될 수 있다. 시스템의 음향 시뮬레이션으로 얻은 데이터(음향 유한 요소법(FEM) 솔버, LBM 솔버 또는 다른 음향 솔버로 계산됨)를 사용하여 각 노이즈 소스 또는 결합된 복수의 소스들 사이의 음향 전달 함수를 계산하기 위해 사용될 수 있다. 음향 전달 함수는, 시스템의 각 위치에서의 압력을 기록하기 위해 체적 측정 소스와 마이크를 사용하여 실험에서 측정할 수 있다.
- [0155] LBM에서, 노이즈 소스와 수신기 사이의 음향 전달 함수는 각각의 노이즈 소스에 대해 계산될 수 있지만, 노이즈 소스당 하나의 시뮬레이션(각 노이즈 소스에서 부과된 체적 흐름 변동)이 필요할 수 있다. 제1 지점에서 제2 지점으로의 음향 전달 함수가 제2 지점에서 제1 지점으로의 전달 함수와 동일하다는 특성을 사용하면, 전달 함수는 수신기가 소스(부과된 체적 변동 경계 조건)로 설정되고 그리고 소스들이 수신기들(각 노이즈 소스에서 측정된 압력)로 설정된 단일 시뮬레이션에서 계산될 수 있다. 이러한 프로세스는 노이즈 소스들과 같은 많은 시뮬레이션에서 하나의 시뮬레이션으로 음향 전달 함수의 계산을 가속화한다.
- [0156] 도 49a 내지 도 49d는 HVAC 시스템의 노이즈 소스들 및 HVAC 시스템의 드라이버로의 기여의 예들을 도시한다. 도 49a는 500Hz에서의 노이즈 소스를 도시한다. 이 예에서, 각각의 검은 점은 노이즈 소스를 나타낸다. 도 49b는 운전자의 귀에 500Hz에서의 각 노이즈 소스의 기여들의 예를 도시한다. 2개의 도면들에 표시된 것처럼, 일부 노이즈 소스는 물질적 기여를 하지 않는다. 예를 들어, 송풍기(4902)로부터의 공기는 그렇지 않은 경우보다 훨씬 작은 기여(4904)를 가지며, 모든 노이즈 소스는 운전자가 듣는 소음에 물질적 기여를 하는 것은 아니다.
- [0157] 도 49c 및 도 49d는 200Hz에서의 노이즈 소스 및 200Hz에서의 노이즈 소스 기여를 각각 나타낸다.
- [0158] 일부 구현들에서, 노이즈 소스 기여들은 최적화 프로젝트에서 목적 함수로서 사용될 수 있다. 예를 들어, 최적화 프로젝트의 목표는 노이즈 소스 원인을 최소화하는 것일 수 있다.
- [0159] 도 50a 및 도 50b는 각각 외부 관측기에 대한 노이즈 소스들 및 노이즈 소스 기여를 도시한다. 도 50a에서, 노

이즈 소스들(5002)은 백색 점들로 표시된다. 도 50b에서, 노이즈 소스 기여는 백색 점들(5004)로 표시된다.

[0160] 일부 구현들에서, 음향 압력은 좌측 귀와 우측 귀에 대해 독립적으로 측정될 수 있다. 유사하게, 여러 상이한 위치들(예를 들어, 차량의 승객들, 극장의 관객들 등)의 압력을 측정할 수 있다.

[0161] 일부 구현들에서, 전달 함수는 음향 전원들을 노이즈 클러스터들로 클러스터링하기 전에 각각의 음향 전원에 적용될 수 있다. 일부 구현들에서, 전달 함수는 각각의 노이즈 클러스터에 적용될 수 있다. 각 방법은 데이터를 처리하는 컴퓨터 시스템에 대해 상이한 성능 향상들을 제공할 수 있다. 클러스터링에 앞서 각 소스의 음향 파워를 조정하고 각 소스의 조정된 파워를 (전술한 바와 같이) 임계값과 비교함으로써, 클러스터링 할 때 노이즈 소스들을 고려할 필요가 없다. 이는, 노이즈 소스들 중 일부는 임계값 아래로 떨어질 수 있기 때문이다. 고려해야 할 각 노이즈 소스는 프로세싱 사이클들 및 메모리를 요구하기 때문에, 고려중인 소스들의 수를 줄이면 컴퓨터에서 필요한 프로세서 사이클 및 메모리 사용량을 줄일 수 있다. 한편, 전달 함수들을 적용하기 전에 노이즈 소스들을 노이즈 클러스터들로 클러스터링함으로써, 하나의 전달 함수가 전체 클러스터에 적용될 수 있기 때문에 보다 적은 함수가 적용될 필요가 있다. 따라서, 결정에 도달하는 데 필요한 처리 단계들의 수를 최소화하여 처리 사이클들을 절약할 수 있다.

[0162] 도 51은 노이즈 소스들을 식별하기 위한 예시적인 프로세스(5100)의 흐름도이다.

[0163] 프로세스(5100)는 체적 내의 유체의 활동을 시뮬레이트한다(5102). 체적은 물리적 공간을 나타낸다. 체적내의 유체의 활동을 시뮬레이트되어 체적 내의 요소의 움직임을 모델링한다.

[0164] 프로세스(5100)는 제1 시간 및 제2 시간에서 와류들을 식별한다(5104). 유체 흐름 시뮬레이션의 제1 시간에서, 프로세스는 유체 흐름에 의해 모델링된 과도 및 난류 흐름에서 제1 세트의 와류들을 식별할 수 있다. 유체 흐름 시뮬레이션의 제2 시간은 제1 시간의 후속으로, 과도 및 난류 흐름에서 제2 세트의 와류들을 식별할 수 있다.

[0165] 프로세스(5100) 와류들의 변화들을 추적한다(5106). 프로세스(5100)는 불연속한 와류들의 제1 세트와 불연속한 와류들의 제2 세트를 비교할 수 있다.

[0166] 프로세스(5100)는 추적에 기초하여 하나 이상의 잠재적인 노이즈 소스들을 식별한다(5108). 노이즈 소스들은 개별 이산 와류들에 대응할 수 있거나 또는 노이즈 와류들의 클러스터링된 집합에 해당할 수 있다.

[0167] 프로세스(5100)는 하나 이상의 노이즈 소스들의 수신기로의 기여를 결정한다(5110). 기여는 각 노이즈 소스에 전달 함수를 적용함으로써 결정될 수 있다.

[0168] 프로세스(5100)는 수신기에서의 하나 이상의 노이즈 소스들의 기여에 기초하여, 하나 이상의 변형을 나타내는 출력 데이터를 디바이스 또는 엔티티의 하나 이상의 기하학적 피쳐들로 출력한다(5112).

[0169] 본 명세서에서 서술된 주제 및 동작들의 실시예들은, 디지털 전자 회로에서 또는 본 명세서 및 그의 등가물에 개시된 구조들을 포함하는 컴퓨터 소프트웨어, 펌웨어 또는 하드웨어에서, 또는 이들 중 하나 이상을 조합하여 구현될 수 있다. 본 명세서에서 서술된 주제의 실시예들은 하나 이상의 컴퓨터 프로그램들(즉, 데이터 처리 장치에 의한 실행을 위해 또는 데이터 처리 장치의 동작을 제어하기 위해 컴퓨터 저장 매체들 상에 인코딩된 컴퓨터 프로그램 명령어들의 하나 이상의 모듈들)로서 구현될 수 있다. 컴퓨터 저장 매체는 컴퓨터 판독 가능 저장 장치, 컴퓨터 판독 가능 저장 기판, 랜덤 또는 직렬 액세스 메모리 어레이 또는 디바이스, 또는 이들 중 하나 이상의 조합들일 수 있거나 포함될 수 있다. 또한, 컴퓨터 저장 매체는 하나 이상의 개별 물리적 컴포넌트들 또는 매체(예를 들어, 다수의 CD들, 디스크들 또는 다른 저장 디바이스들)일 수 있거나 포함될 수 있다. 주제는 비 일시적인 컴퓨터 저장 매체상에 저장된 컴퓨터 프로그램 명령어들 상에서 구현될 수 있다.

[0170] 본 명세서에서 서술된 동작들은 하나 이상의 컴퓨터 판독 가능 저장 장치에 저장된 데이터 또는 다른 소스로부터 수신된 데이터에 대해 데이터 처리 장치에 의해 수행되는 동작들로서 구현될 수 있다.

[0171] "데이터 처리 장치"라는 용어는 데이터 처리를 위한 모든 종류의 장치, 디바이스들 및 기계들을 포함하며, 예를 들어, 프로그램 가능 프로세서, 컴퓨터, 칩상의 시스템, 또는 복수의 것들 또는 이들의 조합을 포함한다. 상기 장치는 특수 목적 논리 회로(예를 들어, FPGA(field programmable gate array) 또는 ASIC(application specific integrated circuit))를 포함할 수 있다. 상기 장치는, 또한, 하드웨어에 부가하여, 문제의 컴퓨터 프로그램에 대한 실행 환경을 생성하는 코드(예를 들어, 프로세서 펌웨어, 프로토콜 스택, 데이터베이스 관리 시스템, 운영 체제, 크로스-플랫폼 런타임 환경, 가상 머신, 또는 이들 중 하나 이상의 조합을 구성하는 코드)를 포함할 수 있다. 장치 및 실행 환경은 웹 서비스들, 분산 컴퓨팅 및 그리드 컴퓨팅 인프라들과 같은 다양한 컴

퓨팅 모델 인프라들을 실현할 수 있다.

[0172] 컴퓨터 프로그램(프로그램, 소프트웨어, 어플리케이션, 스크립트 또는 코드라고도 함)은 컴파일링된 언어 또는 해석된 언어, 선언적 또는 절차적 또는 개체 지향적 또는 기능적 언어를 비롯한 임의의 형태의 프로그래밍 언어로 작성될 수 있고, 그리고 독립 실행형 프로그램이나 모듈, 컴포넌트, 서브루틴, 서비스, 객체 또는 컴퓨팅 환경에서 사용하기에 적합한 다른 유닛을 포함한 임의의 형태로 배포될 수 있다. 컴퓨터 프로그램은 파일 시스템의 파일에 해당할 수 있지만 반드시 그런 것은 아니다. 프로그램은 다른 프로그램들 또는 데이터(예를 들어, 마크업 언어 문서에 저장된 하나 이상의 스크립트들)를 보유하는 파일의 일부에, 해당 프로그램 전용의 단일 파일 또는 복수의 조정 파일들(예를 들어, 하나 이상의 모듈들, 서브 프로그램들 또는 코드의 일부들을 저장하는 파일들)에 저장될 수 있다. 하나의 컴퓨터 또는 한 사이트에 있거나 여러 사이트들에 분산되어 있으며 통신 네트워크로 상호 연결되는 다수의 컴퓨터들에서 실행되도록 컴퓨터 프로그램을 배포할 수 있다.

[0173] 본 명세서에서 서술된 프로세스들 및 논리 흐름들은 입력 데이터를 조작하고 출력을 생성함으로써 동작들을 수행하기 위해 하나 이상의 컴퓨터 프로그램들을 실행하는 하나 이상의 프로그램 가능 프로세서들에 의해 수행될 수 있다. 프로세스들 및 논리 흐름들은 또한 특수 목적 논리 회로(예를 들어, FPGA(field programmable gate array) 또는 ASIC(application specific integrated circuit))에 의해 수행될 수 있고, 장치는 또한 특수 목적 논리 회로로서 구현될 수 있다.

[0174] 컴퓨터 프로그램의 실행에 적합한 프로세서들은, 예를 들어, 범용 및 특수 목적의 마이크로 프로세서들과 임의의 종류의 디지털, 아날로그 또는 양자 컴퓨터의 임의의 하나 이상의 프로세서들을 포함한다. 일반적으로, 프로세서는 판독 전용 메모리 또는 랜덤 액세스 메모리 또는 둘 모두로부터 명령어들 및 데이터를 수신할 것이다. 컴퓨터의 필수 요소들은 명령어들 및 데이터를 저장하기 위한 하나 이상의 메모리 디바이스들에 따라 작업들을 수행하기 위한 프로세서이다. 일반적으로, 컴퓨터는 또한 데이터를 저장하기 위한 하나 이상의 대용량 저장 장치(예를 들어, 전자, 자기, 광 자기 디스크 또는 광 디스크드)들을 포함하거나, 대용량 저장 장치들로부터 데이터를 수신하거나, 대용량 저장 장치들에 데이터를 전송하거나, 둘 모두로 동작되도록 결합될 수도 있지만, 컴퓨터가 그러한 디바이스들을 가질 필요가 없을 수도 있다. 또한, 컴퓨터는 다른 디바이스(예를 들어, 이동 전화기, PDA, 모바일 오디오 또는 비디오 플레이어, 게임 콘솔, GPS 수신기, 또는 휴대용 저장 장치(예를 들어, 범용 직렬 버스(USB) 플래시 드라이브))에 장착될 수 있다. 컴퓨터 프로그램 명령어들 및 데이터를 저장하기에 적합한 디바이스들은, 예를 들어, 반도체 메모리 디바이스들(예를 들어, EPROM, EEPROM 및 플래시 메모리 디바이스들), 자기 디스크들(예를 들어, 내부 하드 디스크들 또는 이동식 디스크들), 광 자기 디스크들 및 CD-ROM 및 DVD-ROM 디스크들을 포함하는, 모든 형태들의 비 휘발성 메모리, 매체 및 메모리 디바이스들을 포함한다. 프로세서 및 메모리는 특수 목적 논리 회로에 의해 보충되거나 그 안에 포함될 수 있다.

[0175] 사용자와의 상호 작용을 제공하기 위해, 본 명세서에서 서술된 주제의 실시예들은 사용자에게 정보를 디스플레이하기 위한 디스플레이 디바이스(예를 들어, CRT(cathode ray tube) 또는 LCD(liquid crystal display) 모니터), 키보드 및 사용자가 컴퓨터에 입력을 제공할 수 있는 포인팅 디바이스(예를 들어, 마우스 또는 트랙볼)를 갖는 컴퓨터상에서 구현될 수 있다. 다른 종류의 디바이스들이 사용자와의 상호 작용을 제공하는 데 사용될 수 있다; 예를 들어, 사용자에게 제공된 피드백은 임의의 형태의 감각 피드백(예를 들어, 시각 피드백, 청각 피드백 또는 촉각 피드백)일 수 있고, 사용자로부터의 입력은 음향, 음성 또는 촉각 입력을 포함하는 임의의 형태로 수신될 수 있다. 또한, 컴퓨터는 사용자가 사용하는 장치로 문서들을 보내고 문서들을 수신함으로써(예를 들어, 웹 브라우저로부터 수신된 요청에 대한 응답으로 사용자의 사용자 디바이스상의 웹 브라우저에 웹 페이지를 전송함으로써) 사용자와 상호 작용할 수 있다.

[0176] 본 명세서에서 서술된 주제의 실시예들은, 백 엔드 컴포넌트(예를 들어, 데이터 서버)를 포함하거나, 또는 미들웨어 컴포넌트(예를 들어, 애플리케이션 서버)를 포함하거나, 또는 프론트 엔드 컴포넌트(예를 들어, 사용자가 본 명세서에서 서술된 주제의 구현과 상호 작용할 수 있는 그래픽 사용자 인터페이스 또는 웹 브라우저를 갖는 사용자 컴퓨터) 또는 하나 이상의 백 엔드, 미들웨어 또는 프론트 엔드 컴포넌트의 임의의 조합을 포함하는 컴퓨팅 시스템에서 구현될 수 있다. 시스템의 컴포넌트들은 임의의 형태 또는 매체의 디지털 데이터 통신(예를 들어, 통신 네트워크)에 의해 상호 접속될 수 있다. 통신 네트워크의 예들은, 근거리 통신망("LAN") 및 광역 통신망("WAN"), 인터 네트워크(예를 들어, 인터넷) 및 피어 투 피어 네트워크(예를 들어, 애드 흑 피어 투 피어 네트워크)를 포함한다.

[0177] 컴퓨팅 시스템은 사용자들 및 서버들을 포함할 수 있다. 사용자 및 서버는 일반적으로 서로 멀리 떨어져 있으며 통상적으로 통신 네트워크를 통해 상호 작용한다. 사용자와 서버의 관계는 각각의 컴퓨터들 상에서 실행되고 서

로 사용자-서버 관계를 갖는 컴퓨터 프로그램들로 인해 발생한다. 일부 실시예들에서, 서버는 (예를 들어, 사용자 디바이스와 상호 작용하는 사용자에게 데이터를 디스플레이하고 그리고 사용자로부터 사용자 입력을 수신하기 위해) 사용자 디바이스에 데이터(예를 들어, HTML 페이지)를 전송한다. 사용자 디바이스에서 생성된 데이터(예를 들어, 사용자 상호 작용의 결과)는 서버에서 사용자 디바이스로부터 수신될 수 있다.

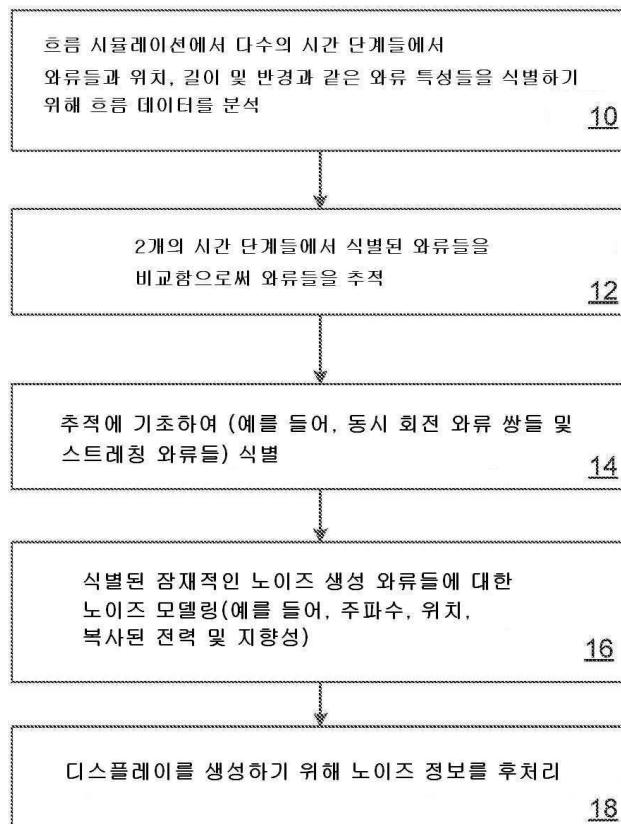
[0178] 본 명세서는 많은 특정 구현 세부 사항들을 포함하지만, 이들은 어떤 발명 또는 청구될 수 있는 범위에 대한 제한으로 해석되어서는 안되며, 오히려 특정 발명들의 특정 실시예들에 대한 특정한 피처들에 대한 설명으로 해석되어야 한다. 별도의 실시예들의 문맥으로 본 명세서에서 설명되는 특정 피처들은 또한 단일 실시 예에서 조합하여 구현될 수 있다. 반대로, 단일 실시예의 문맥으로 서술된 다양한 피처들은 또한 다수의 실시예들에서 개별적으로 또는 임의의 적합한 서브 조합으로 구현될 수 있다. 더욱이, 피처들은 특정 조합들로 작용하고 상술한 바와 같이 초기에 청구된 것으로서 서술될 수 있지만, 청구된 조합으로부터의 하나 이상의 피처들이, 어떤 경우들에서, 조합으로부터 제거될 수 있고, 그리고 청구된 조합은 하위 조합 또는 하위 조합의 변형을 지향할 수 있다.

[0179] 유사하게, 동작들이 특정 순서로 도면들에 도시되어 있지만, 이는 바람직한 동작들을 달성하기 위해, 그러한 동작들이 도시된 순서 또는 순차적인 순서로 수행되거나, 도시된 모든 동작들이 수행될 것을 요구하는 것으로 이해되어서는 안된다. 특정 상황들에서 멀티태스킹 및 병렬 처리가 유리할 수 있다. 또한, 상술한 실시 예들에서, 다양한 시스템 컴포넌트들의 분리는 모든 실시예들에서 이러한 분리를 요구하는 것으로 이해되어서는 안되며, 서술된 프로그램 컴포넌트들 및 시스템들은 일반적으로 단일 소프트웨어 제품에 함께 통합되거나 다중 소프트웨어 제품들로 패키징될 수 있음을 이해해야 한다.

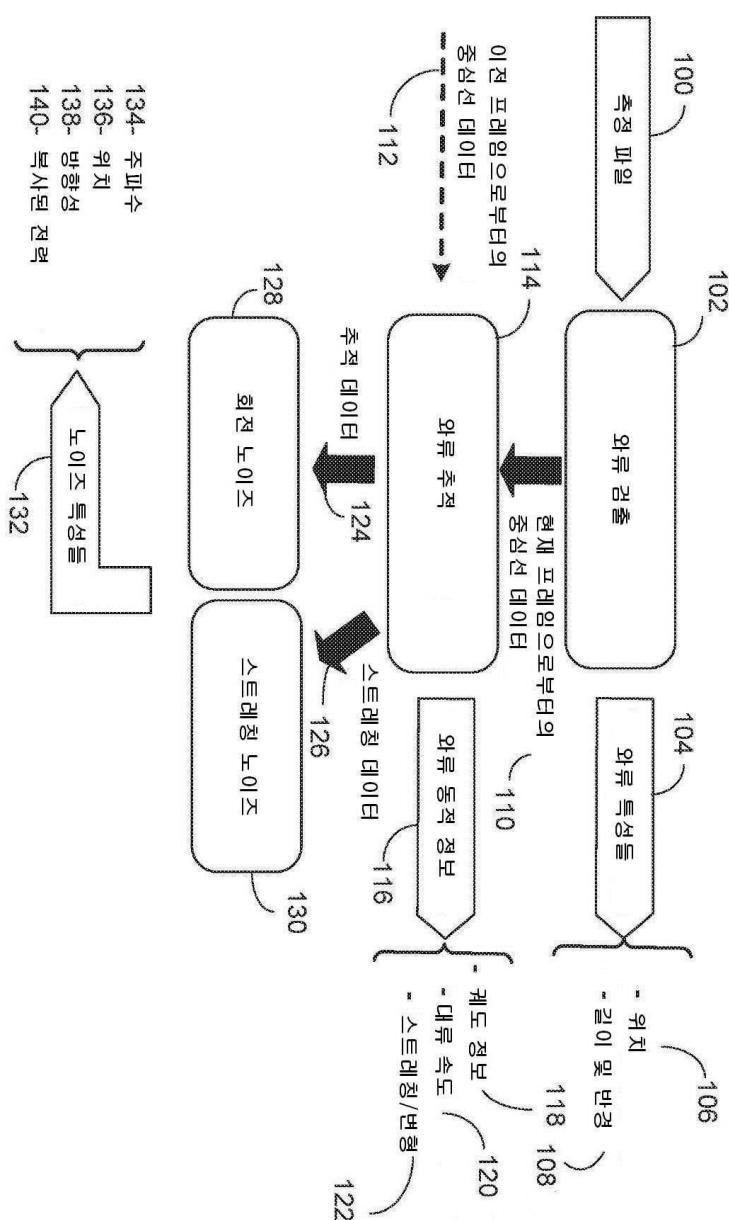
[0180] 따라서, 주제의 특정 실시예들이 서술되었다. 다른 실시예들은 다음의 청구항들의 범위 내에 있다. 경우에 따라, 청구 범위에 서술된 동작들을 다른 순서로 수행할 수 있으며 여전히 바람직한 결과들을 얻을 수 있다. 또한, 첨부된 도면에 도시된 공정들은 바람직한 결과들을 얻기 위해 도시된 특정 순서 또는 순차적 순서를 반드시 필요로 하지는 않는다. 특정 구현들에서, 멀티태스킹 및 병렬 처리가 유리할 수 있다.

## 도면

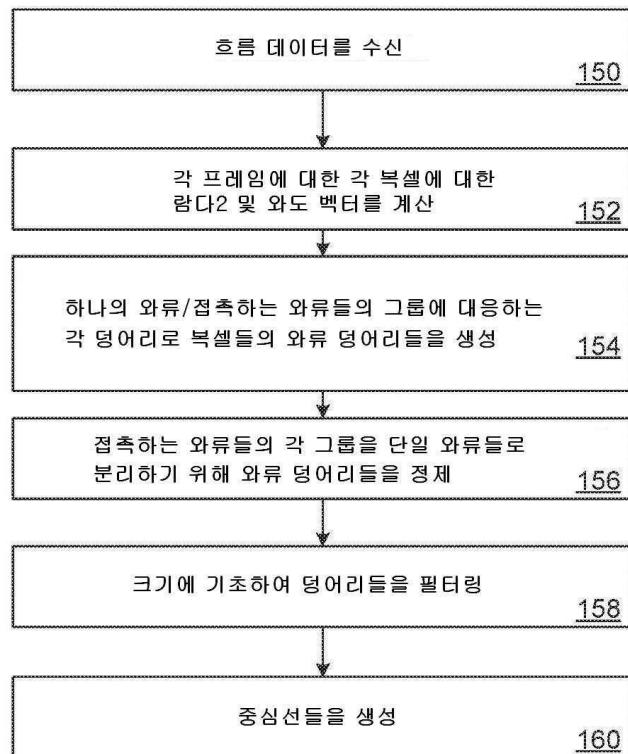
### 도면 1a



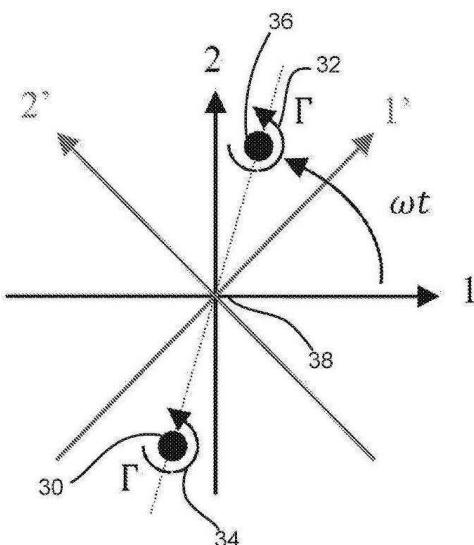
## 도면 1b



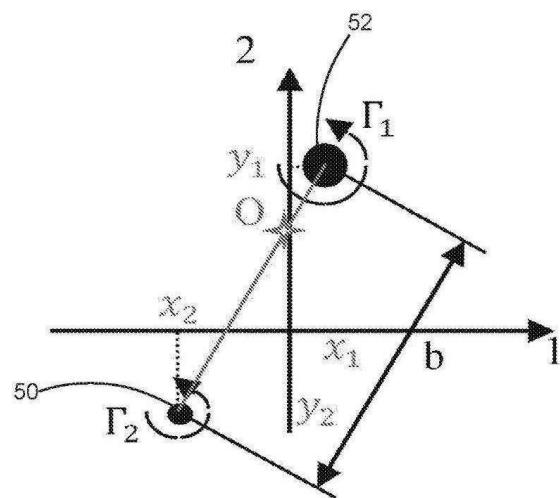
## 도면1c



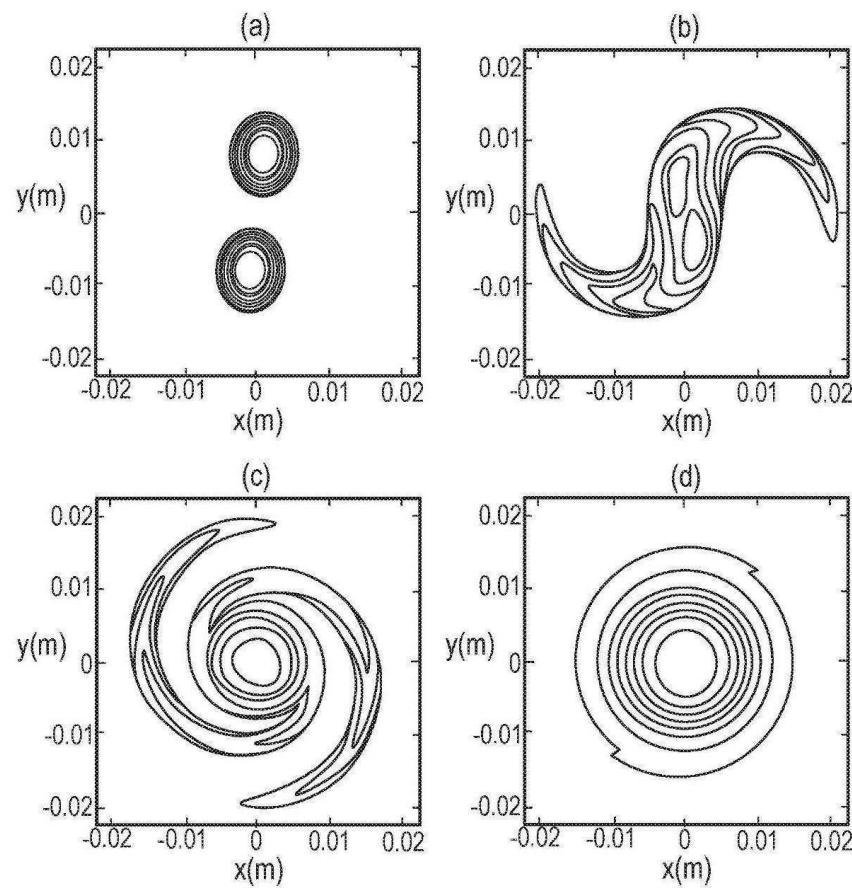
## 도면2a



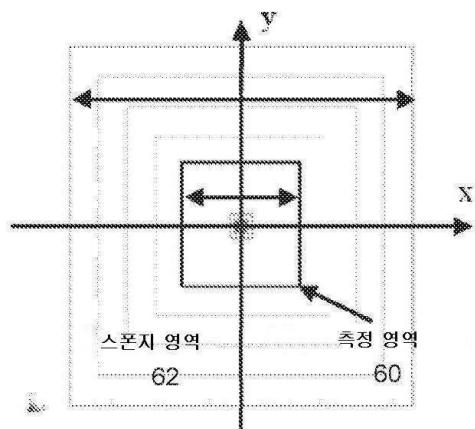
## 도면2b



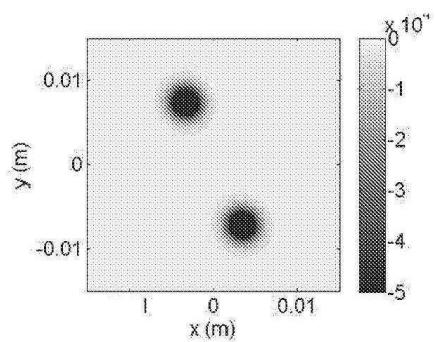
## 도면3



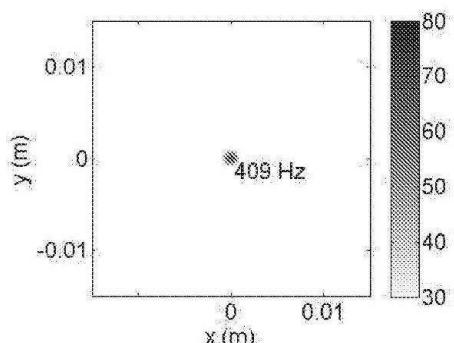
도면4



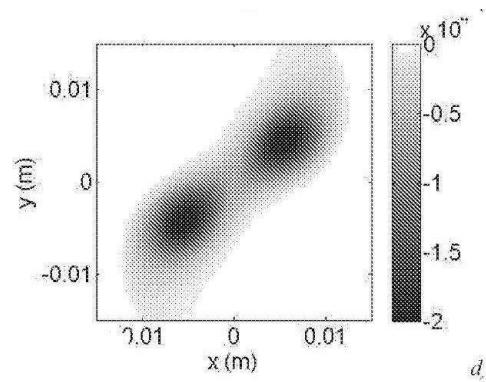
도면5a



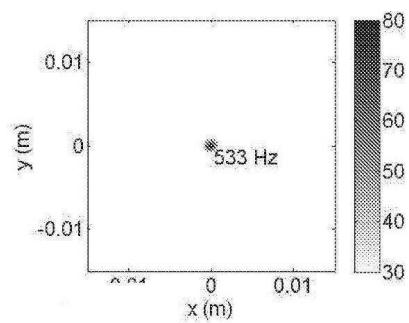
도면5b



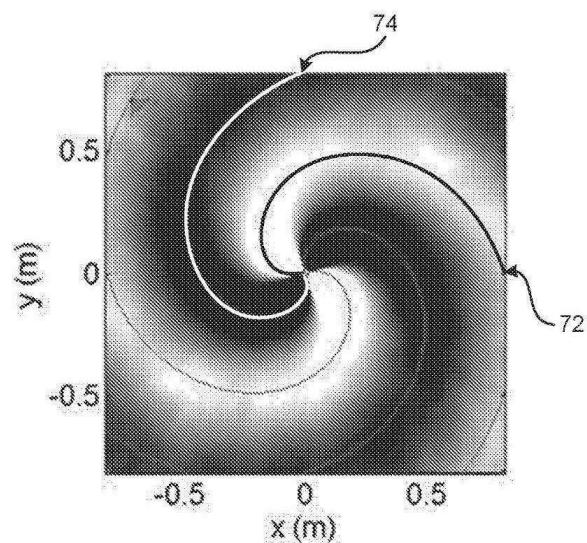
도면5c



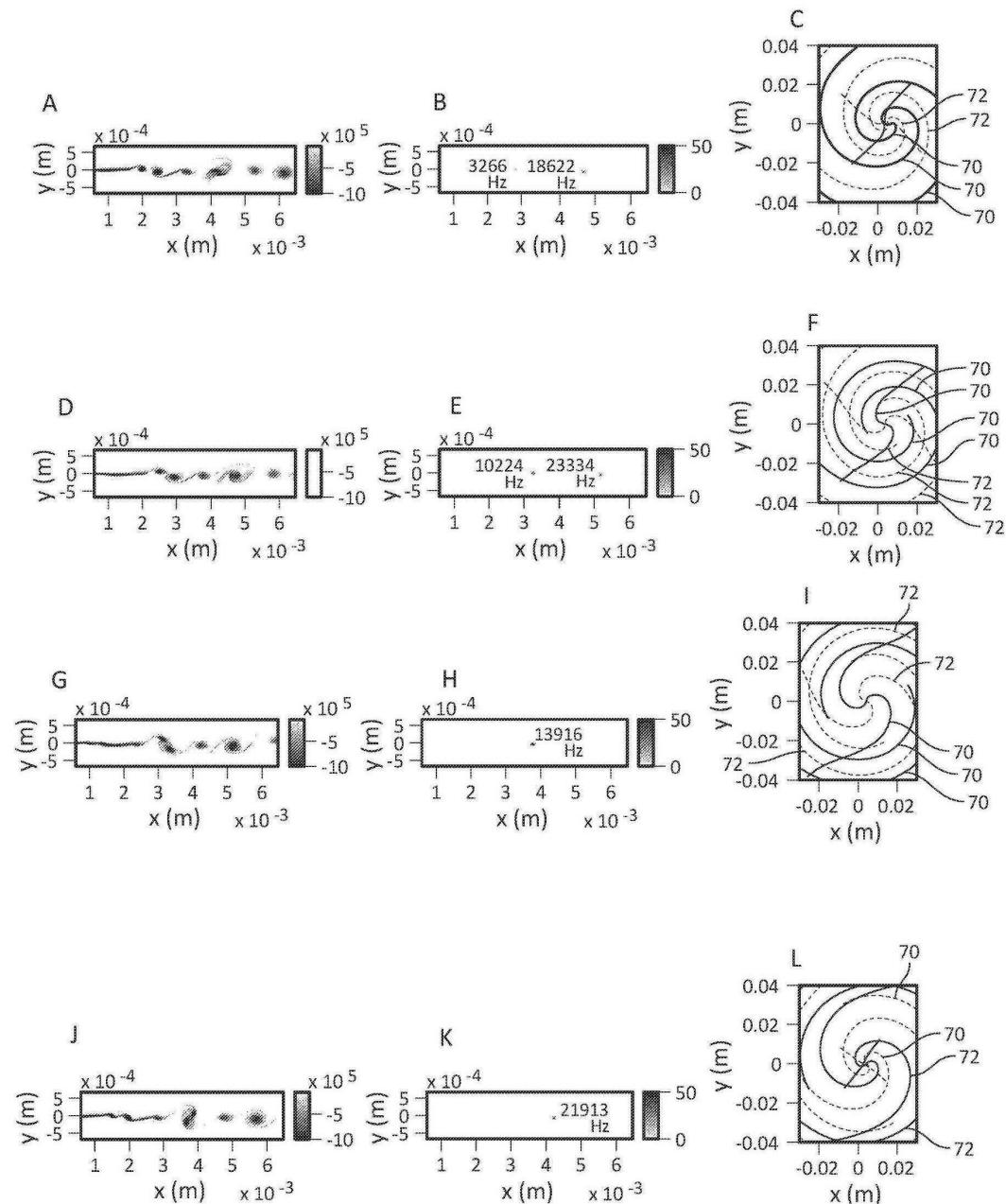
도면5d



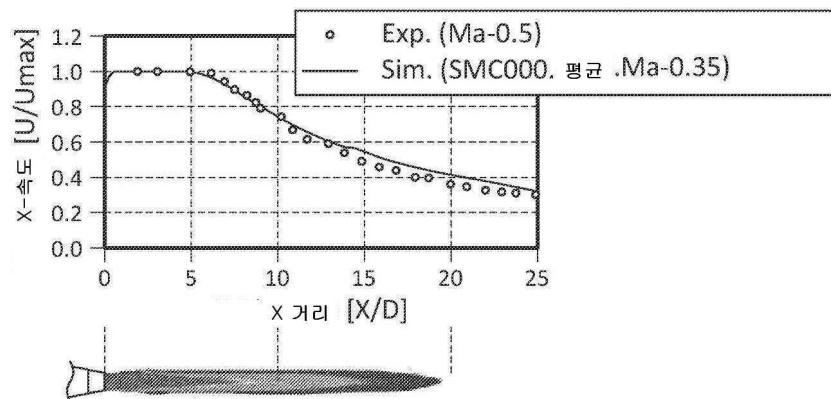
도면6



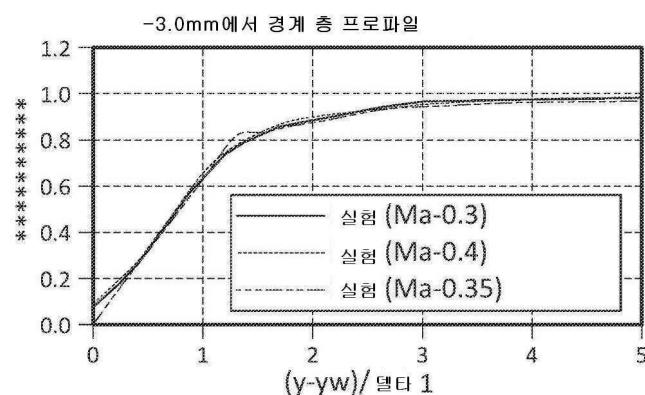
## 도면7



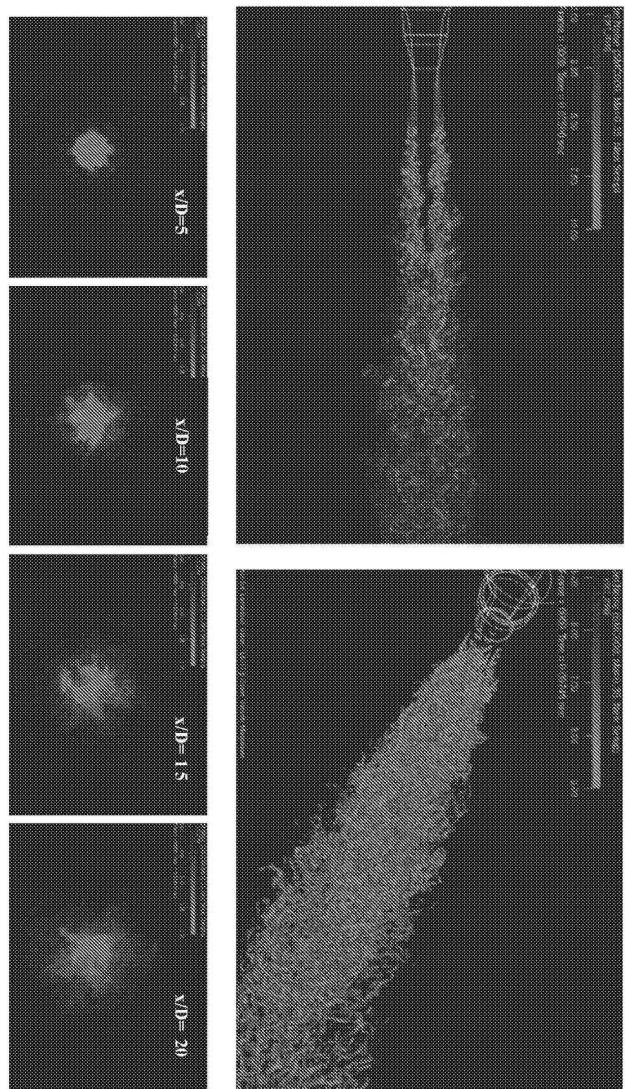
도면8a



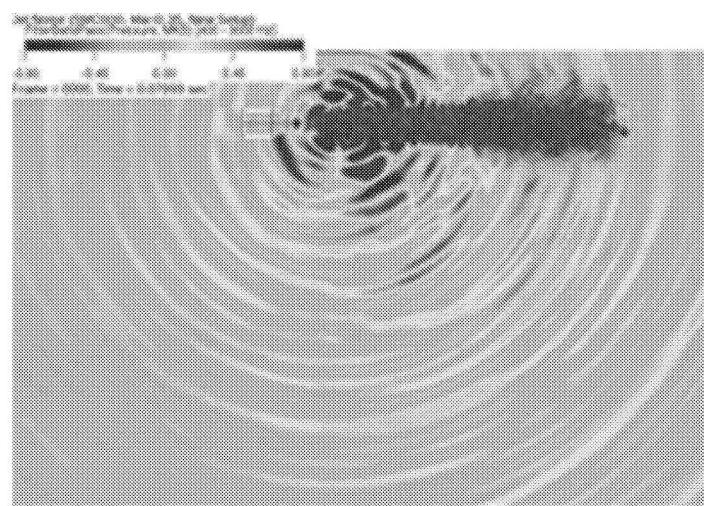
도면8b



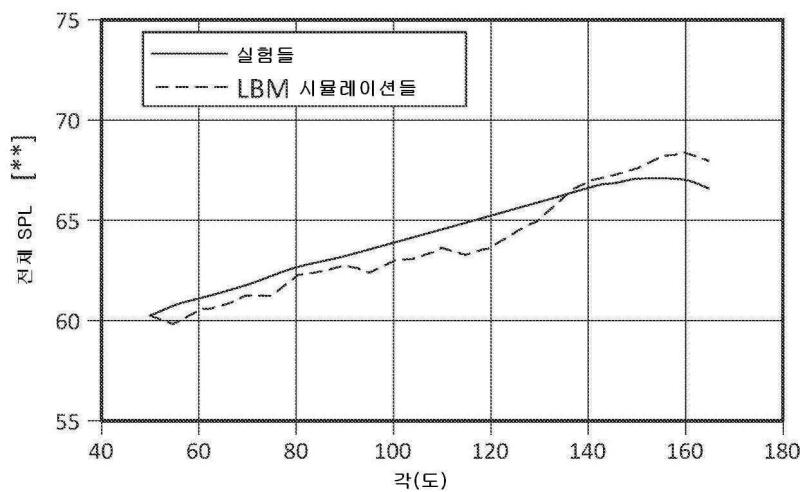
도면9



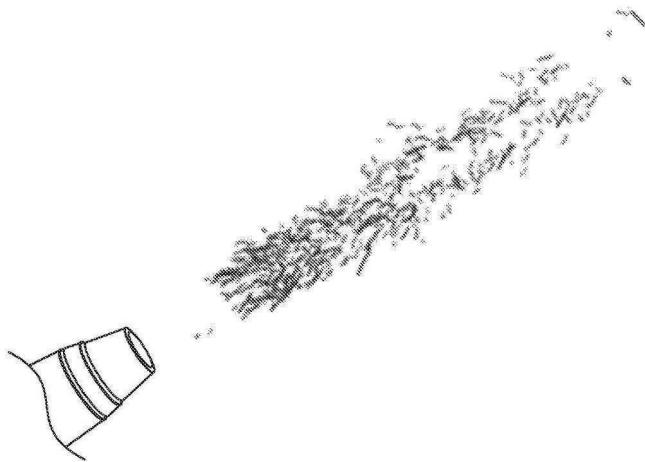
도면10a



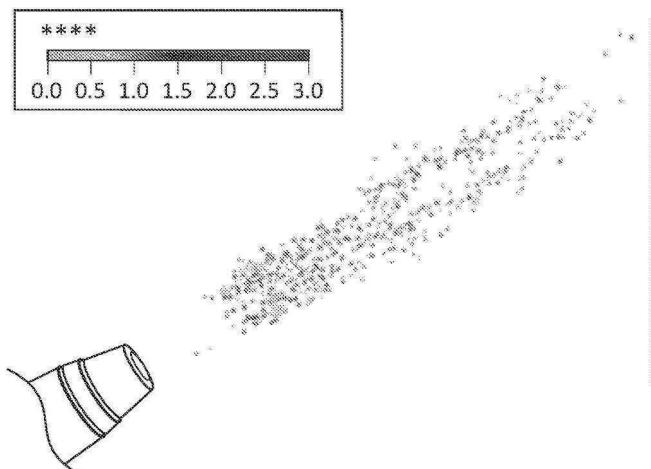
도면10b



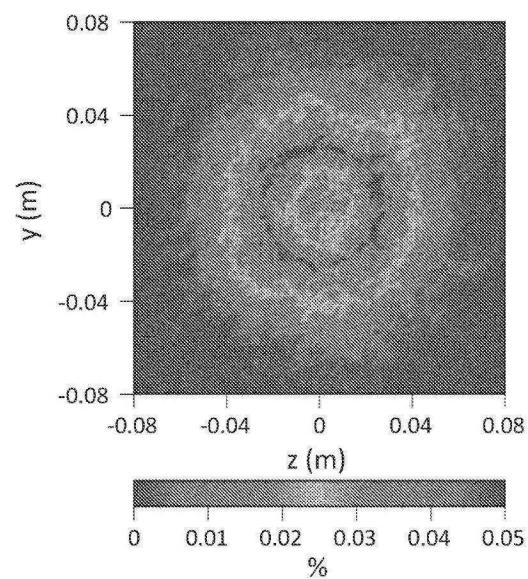
도면11



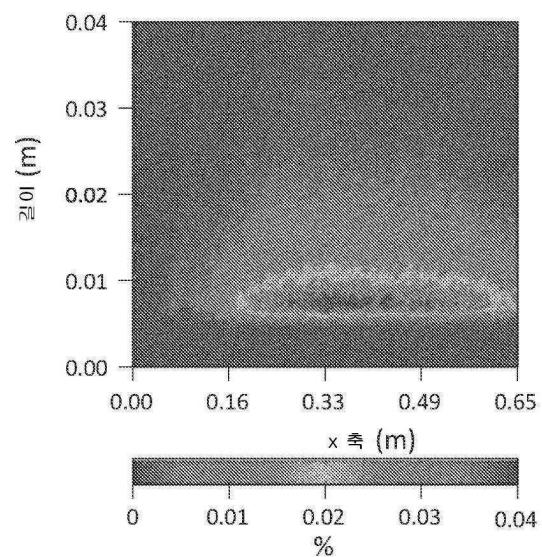
도면12



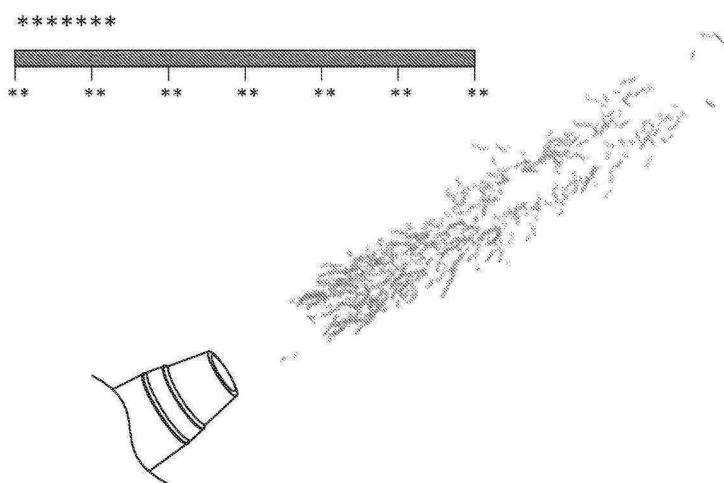
도면13



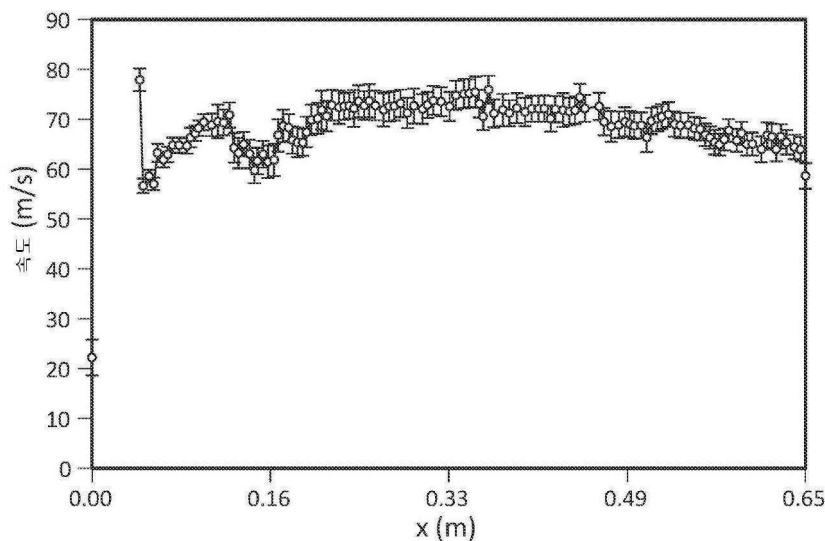
도면14



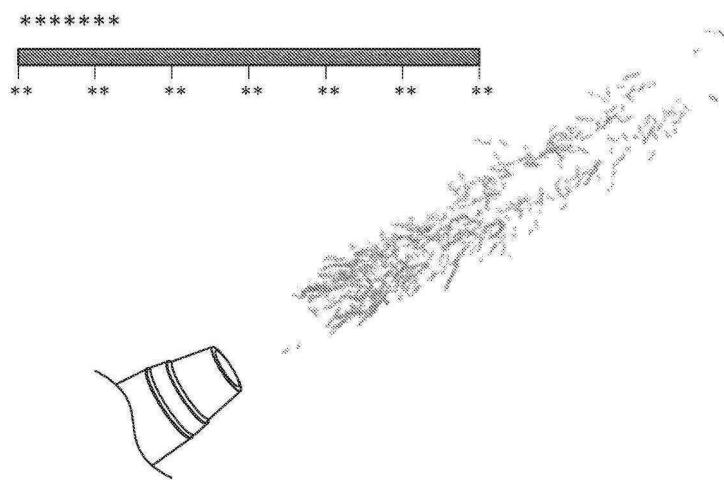
도면15



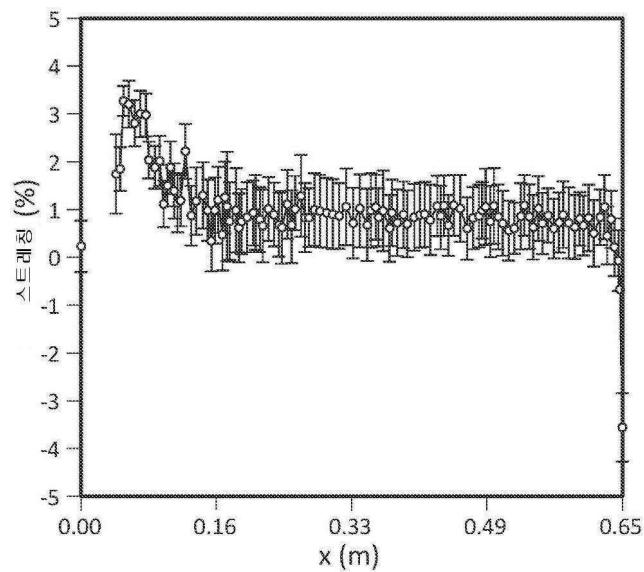
도면16



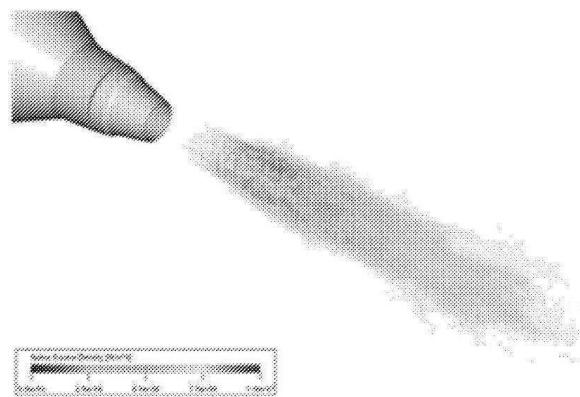
도면17



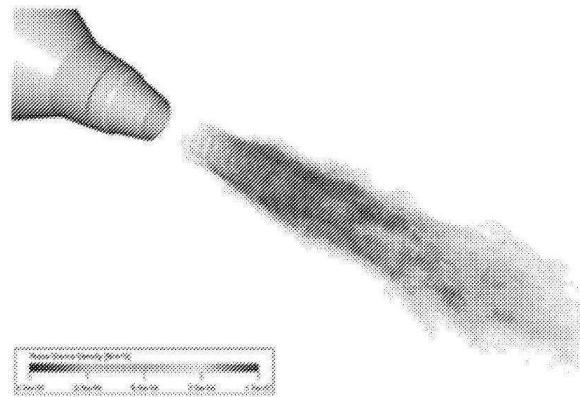
도면18



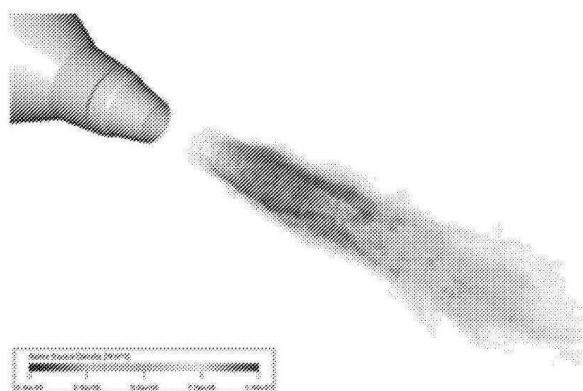
도면19a



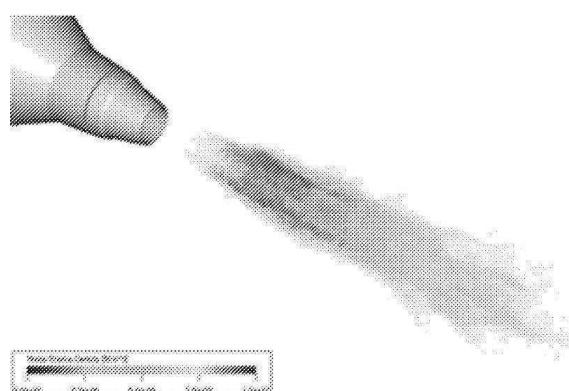
도면19b



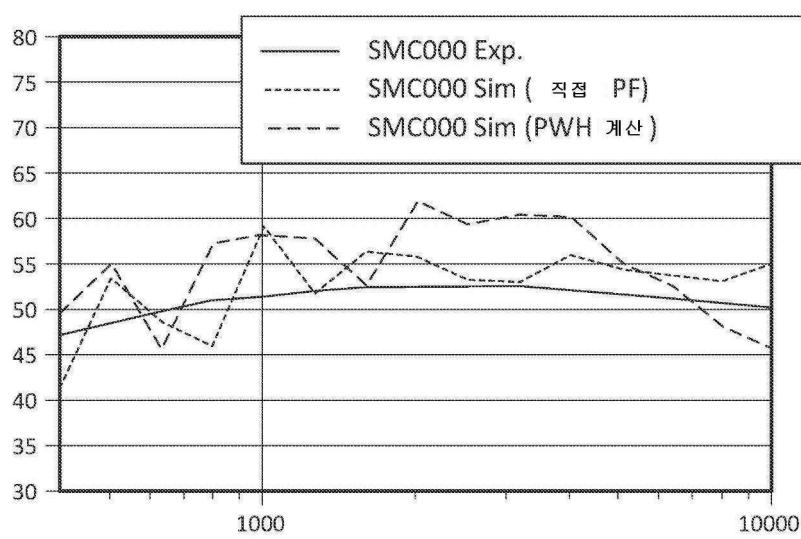
도면19c



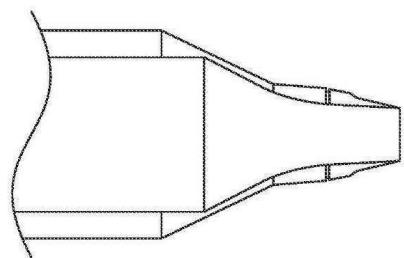
도면19d



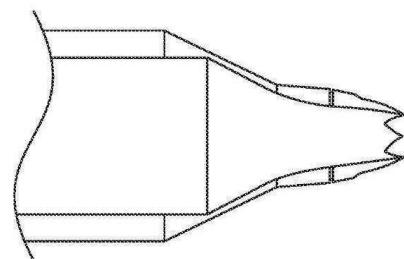
도면20



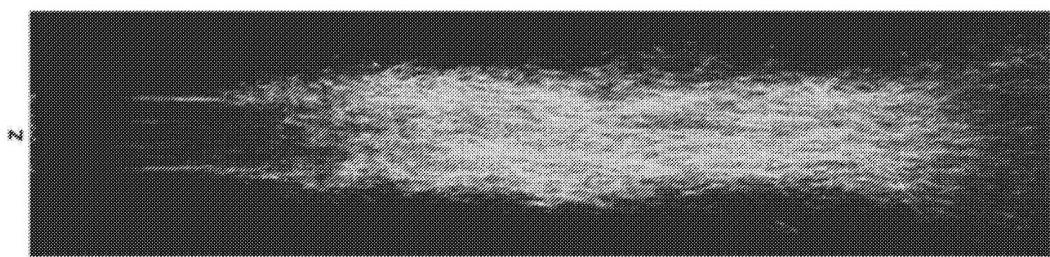
도면21a



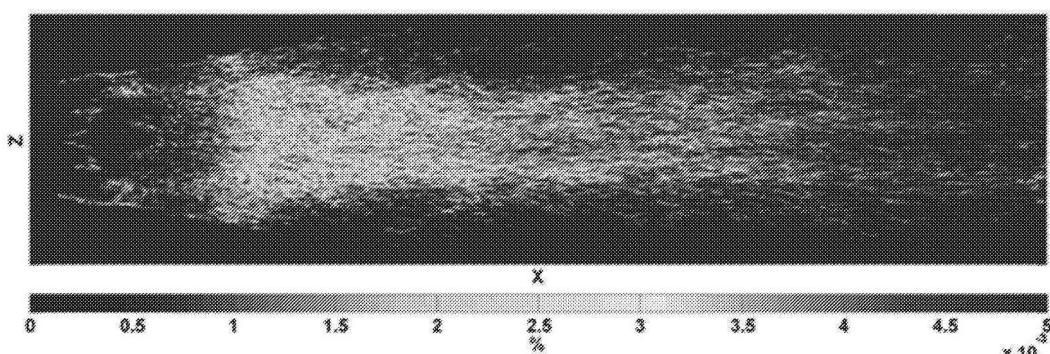
도면21b



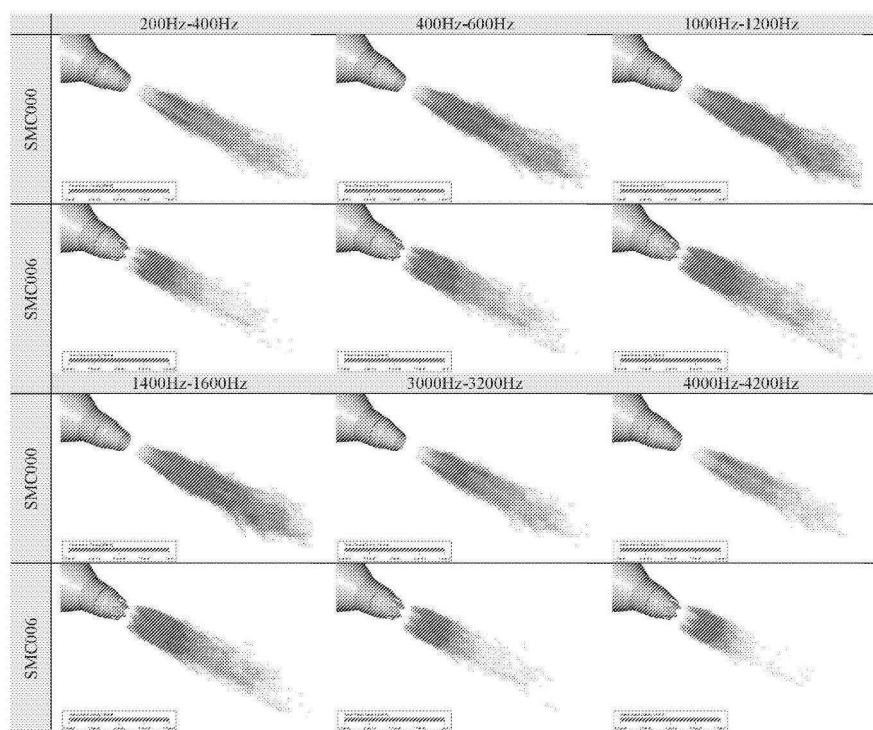
도면22a



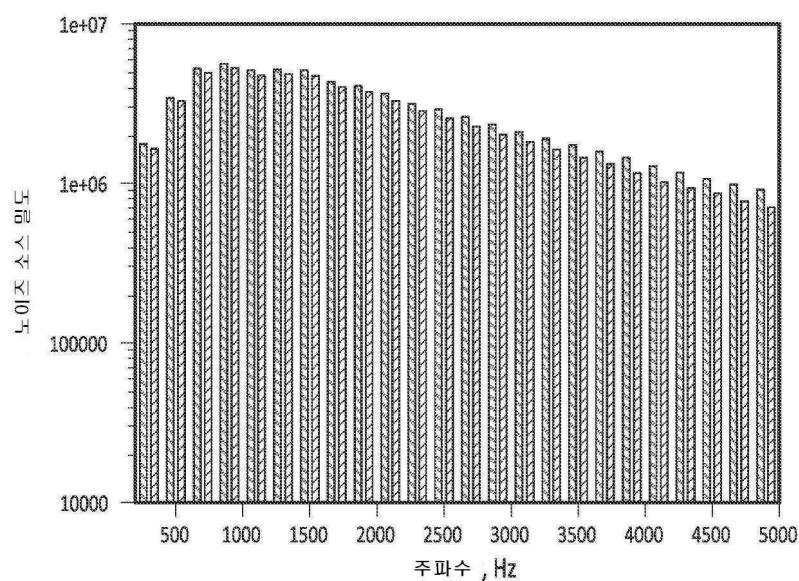
도면22b



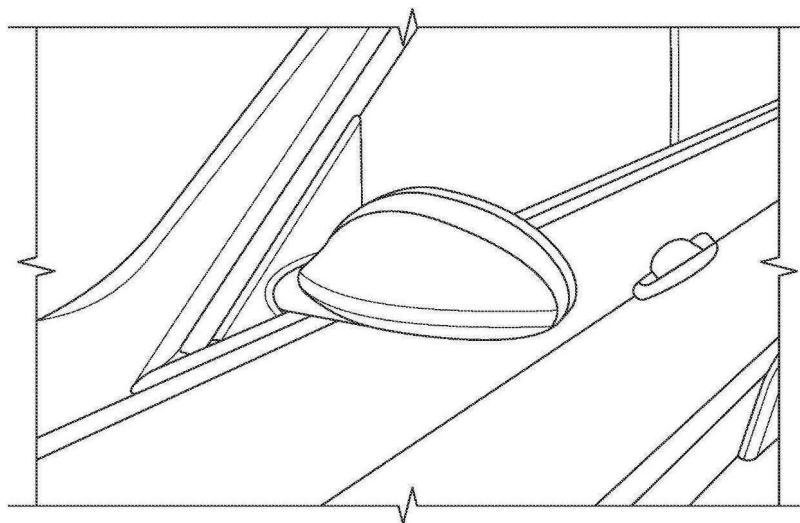
도면23



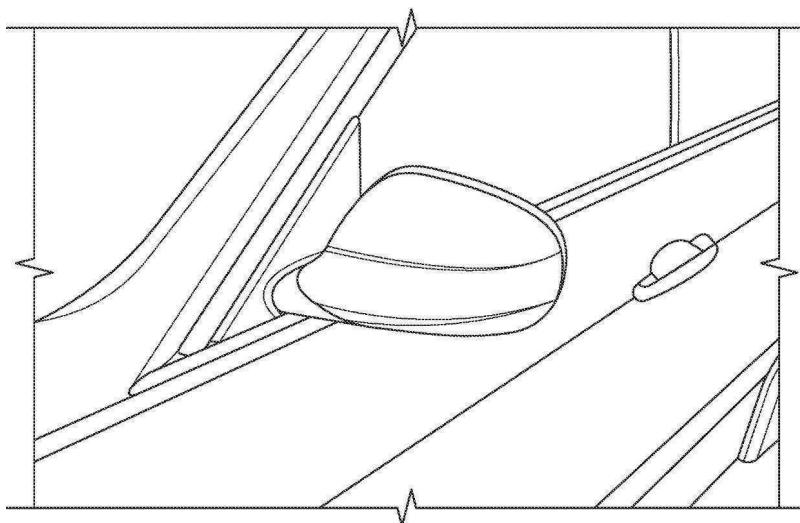
도면24



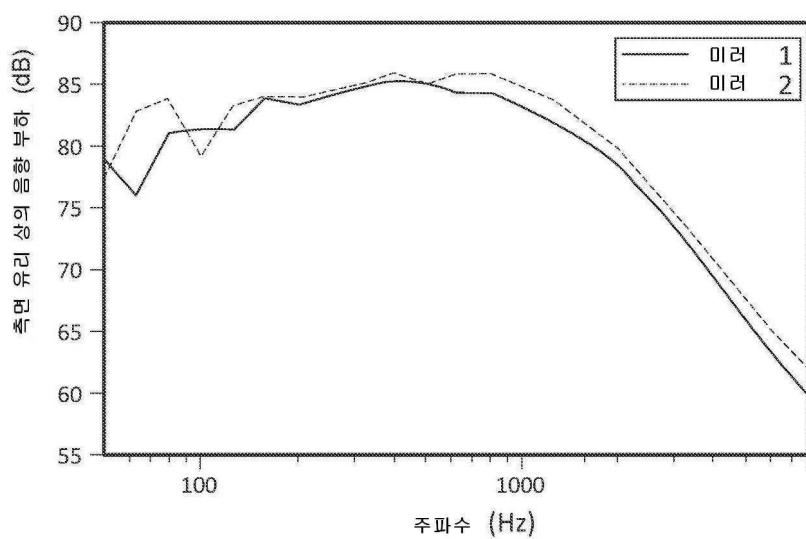
도면25a



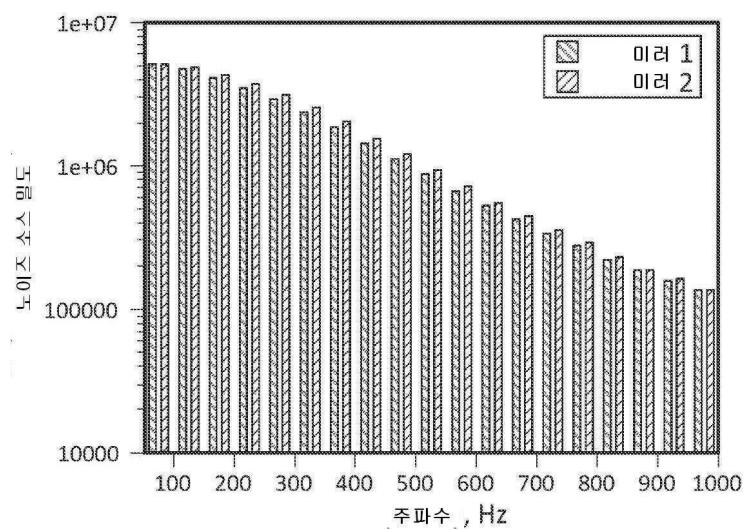
도면25b



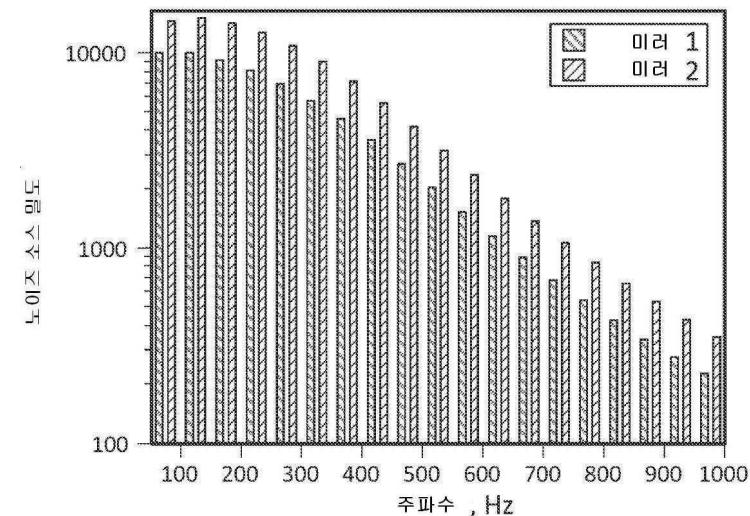
도면26



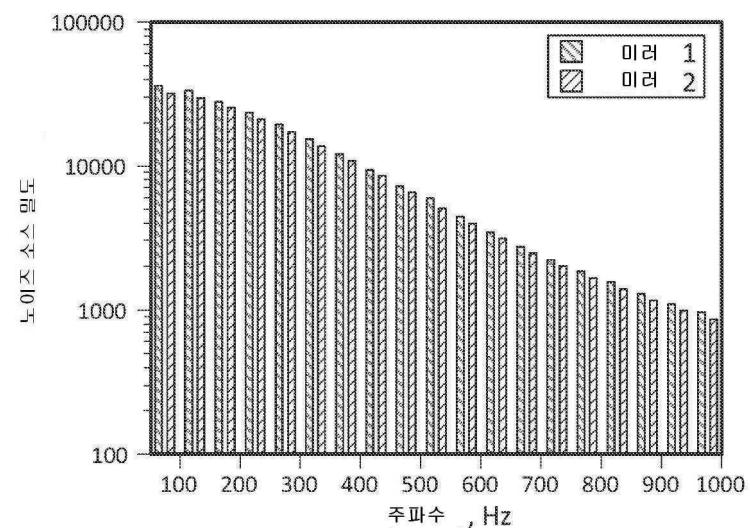
도면27



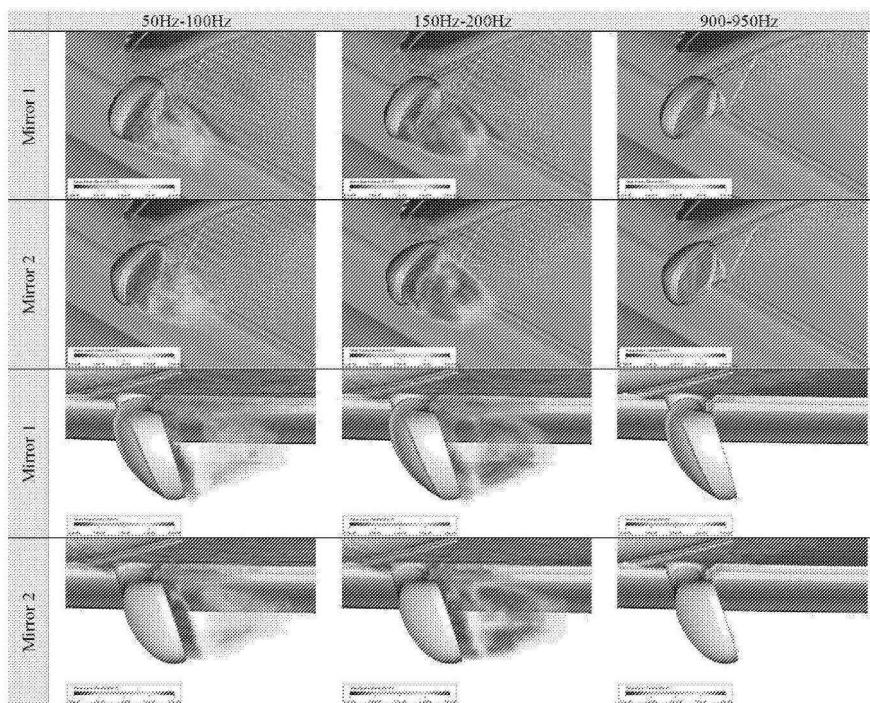
도면28



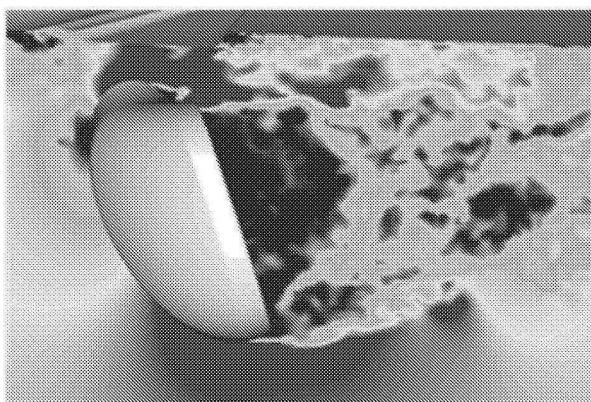
도면29



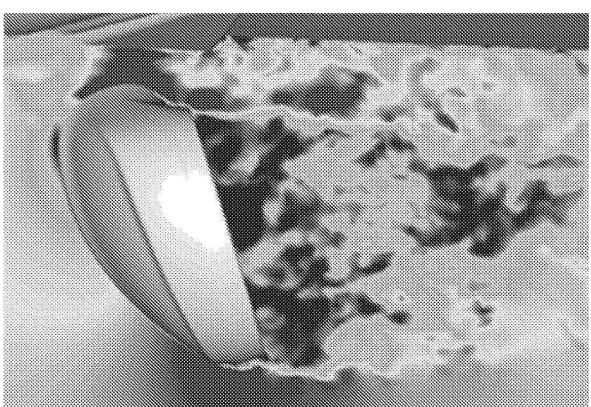
도면30



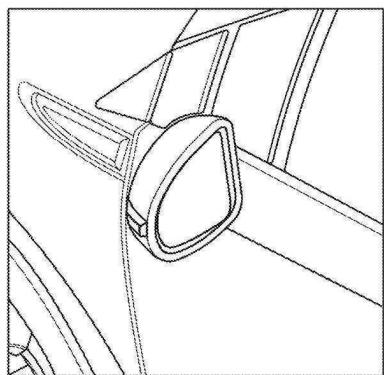
도면31



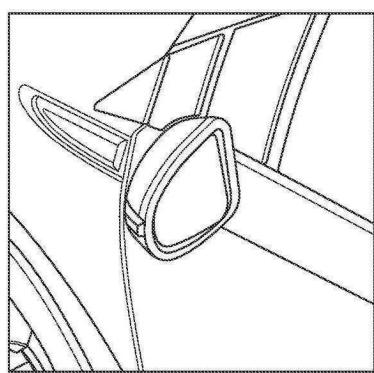
도면32



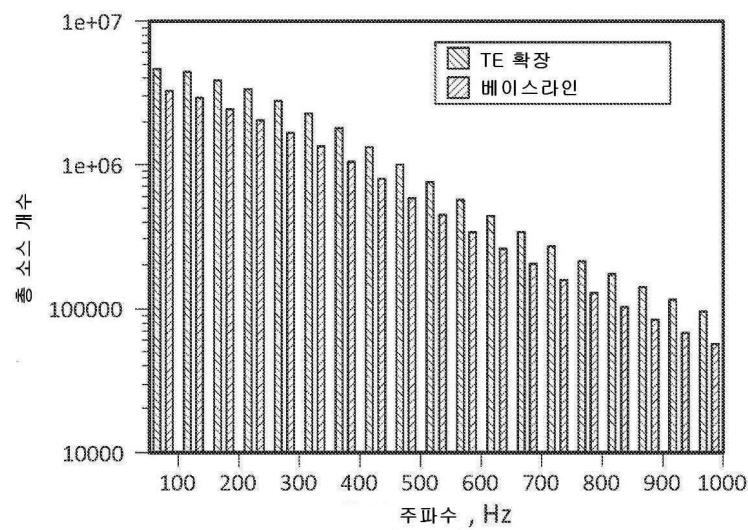
도면33a



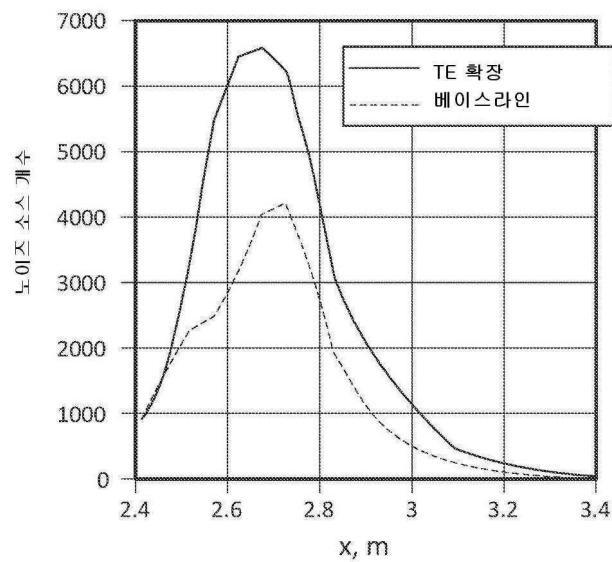
도면33b



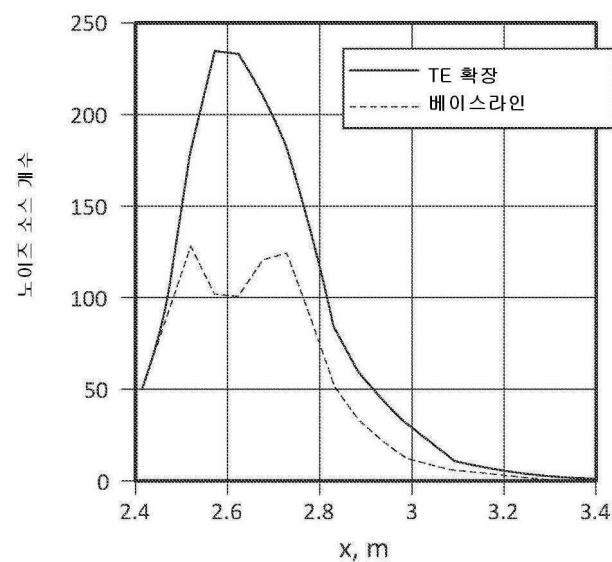
도면34



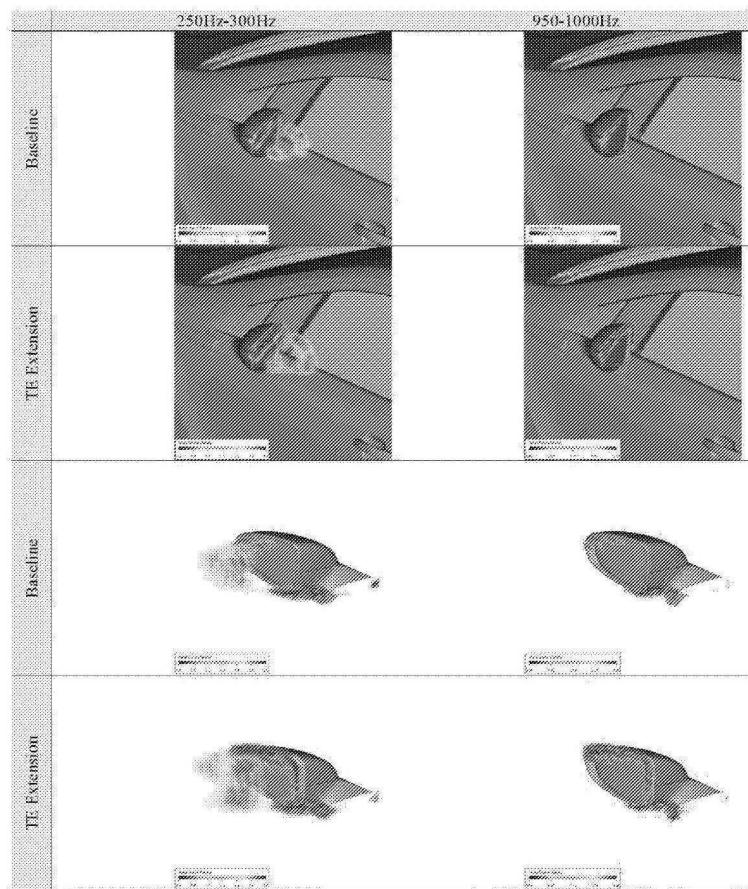
도면35a



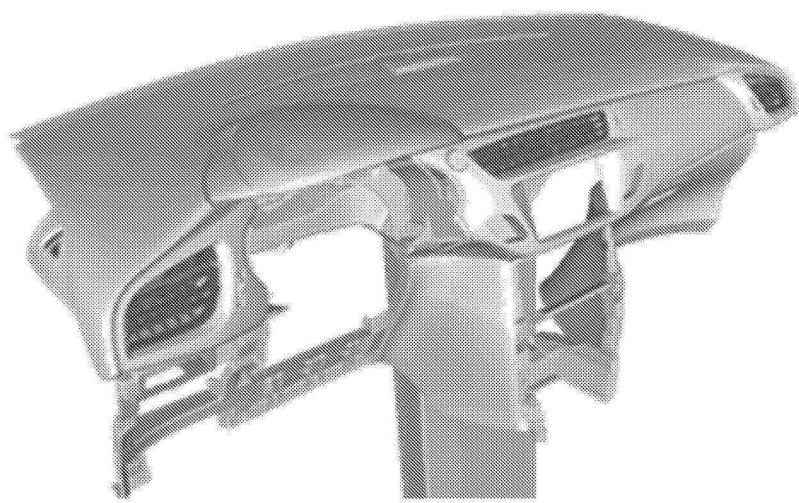
도면35b



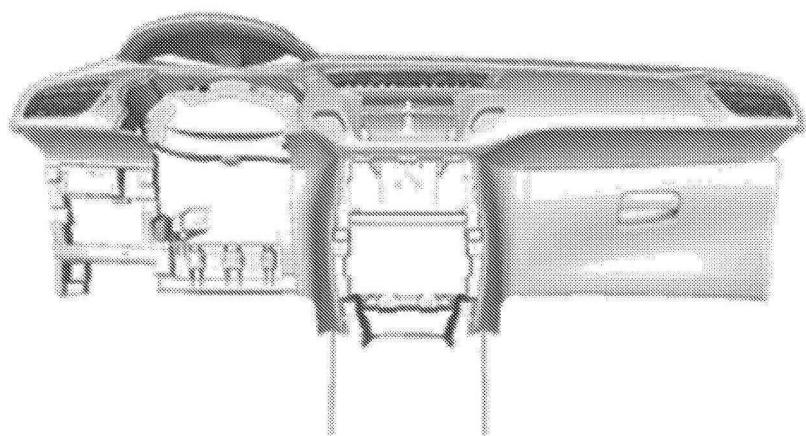
도면36



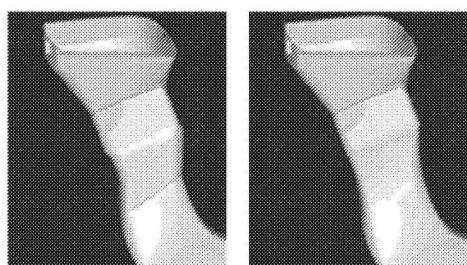
도면37a



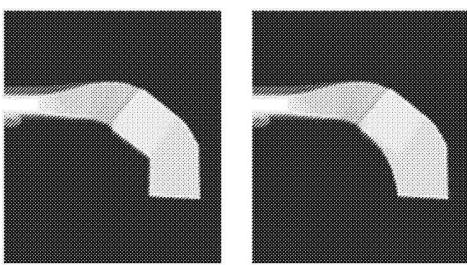
도면37b



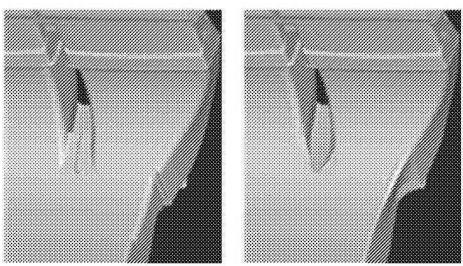
도면38a



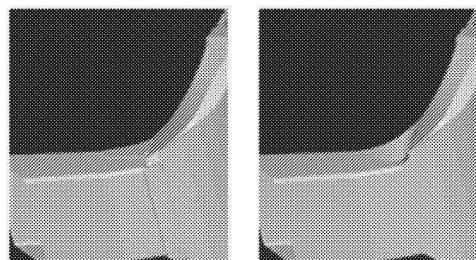
도면38b



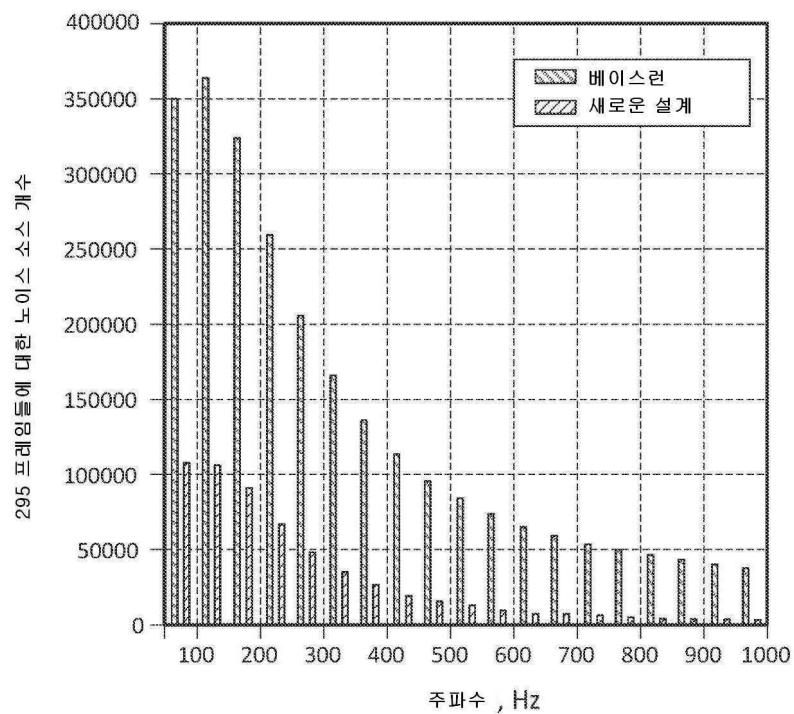
도면39a



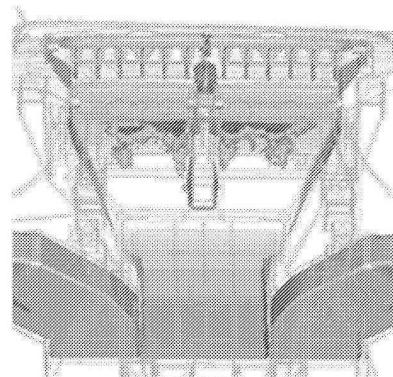
도면39b



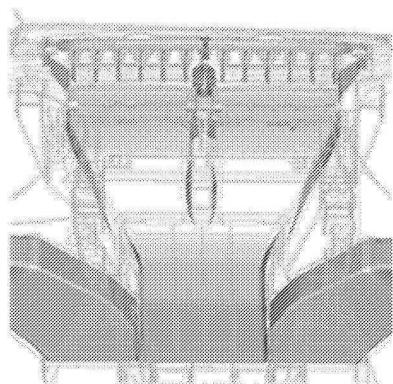
도면40



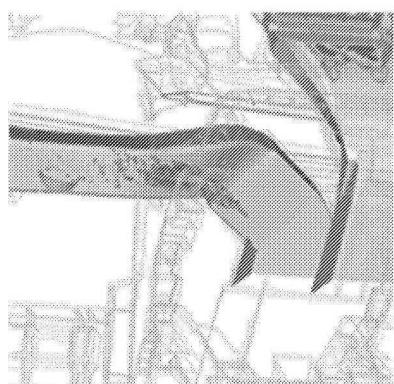
도면41a



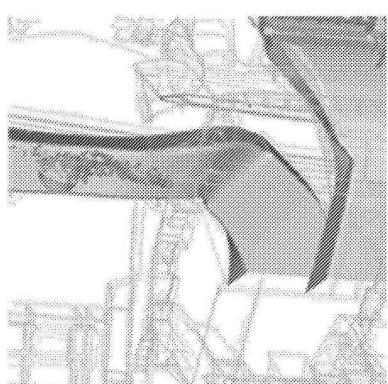
도면41b



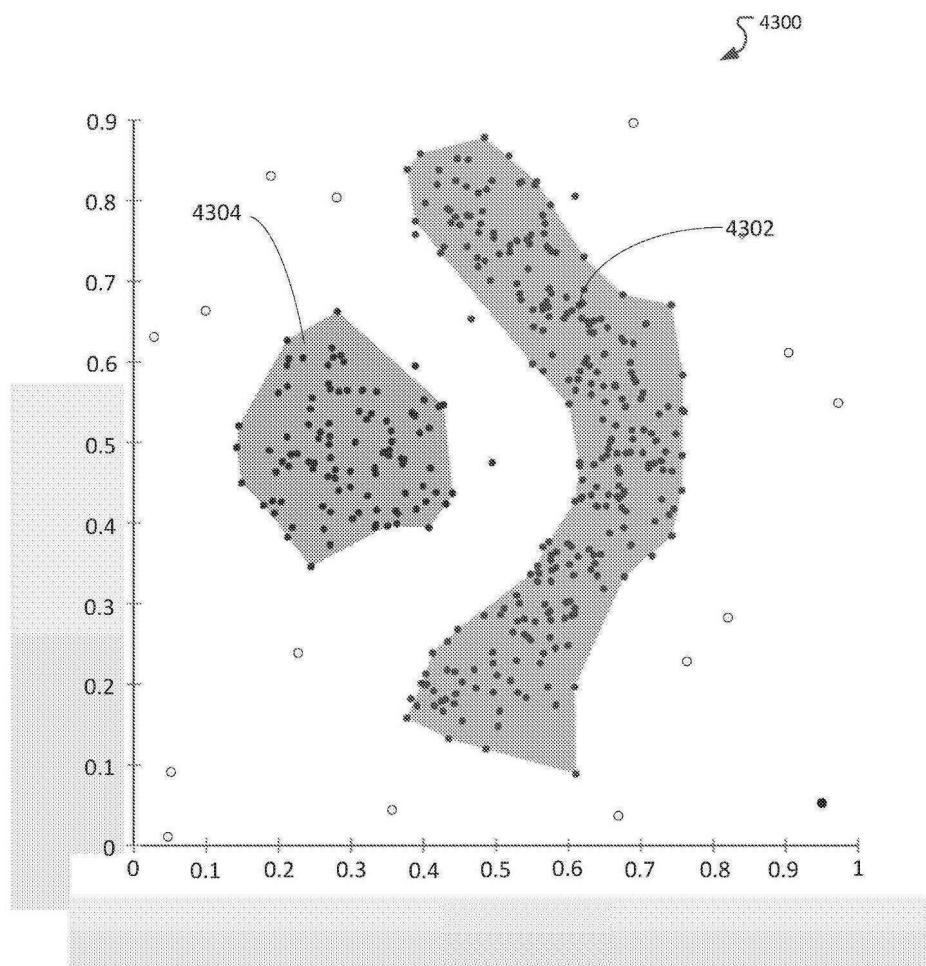
도면42a



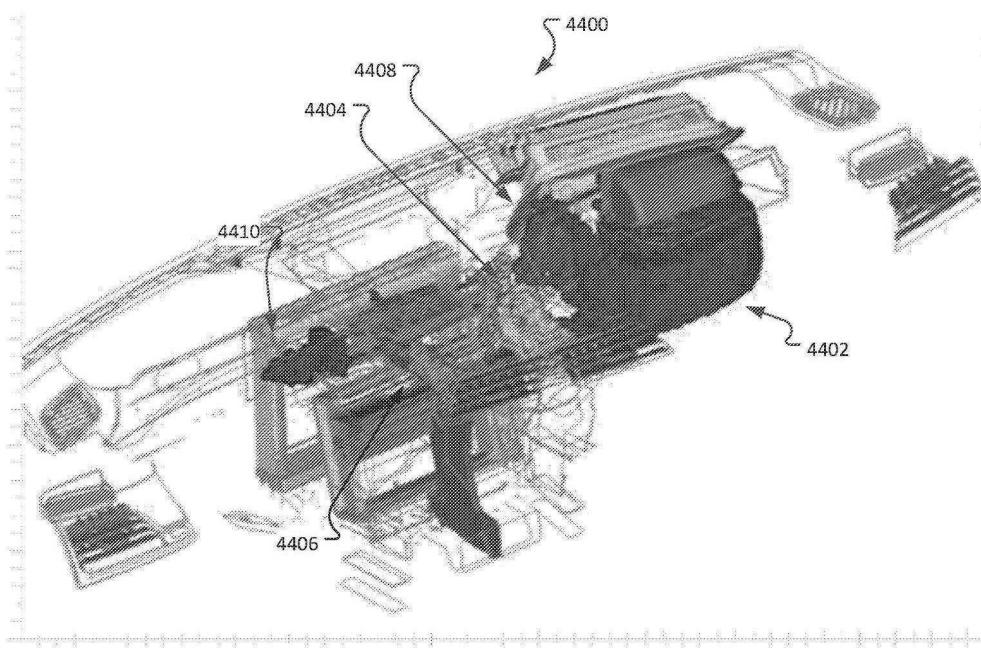
도면42b



도면43

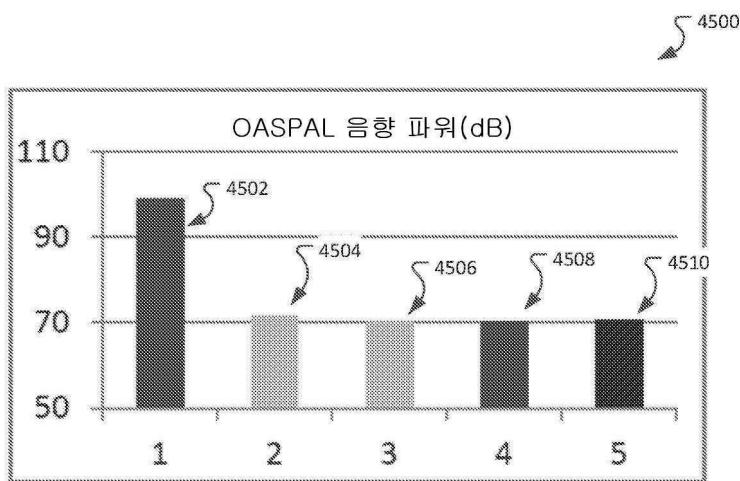


도면44

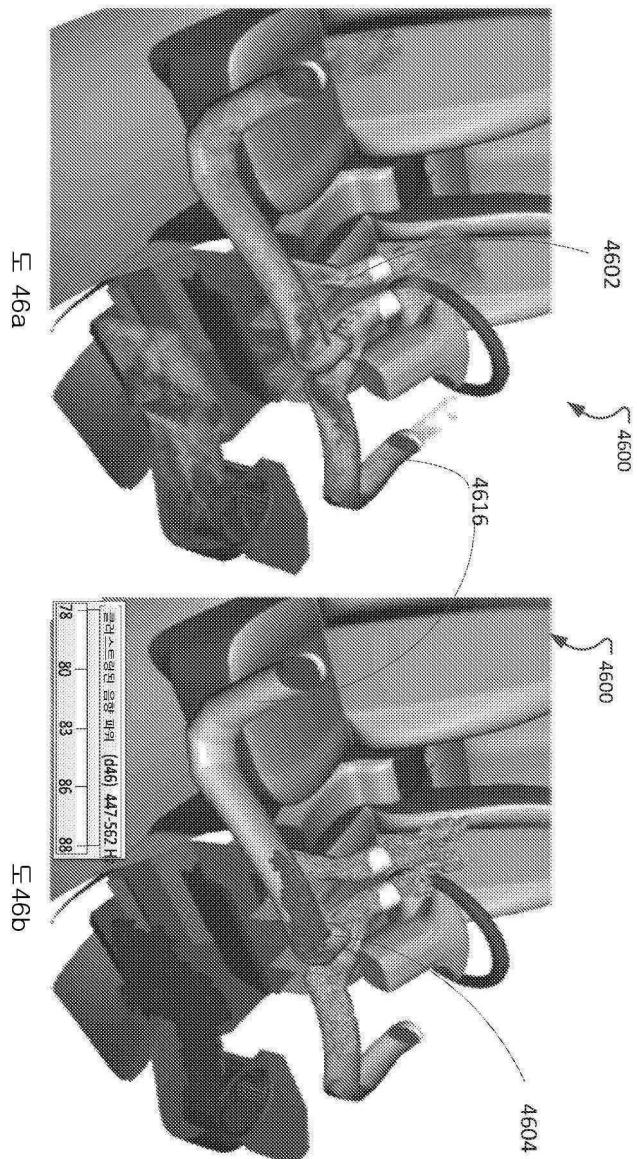


높은 팬 속도에 대한 노이스 소스들의 클러스터링

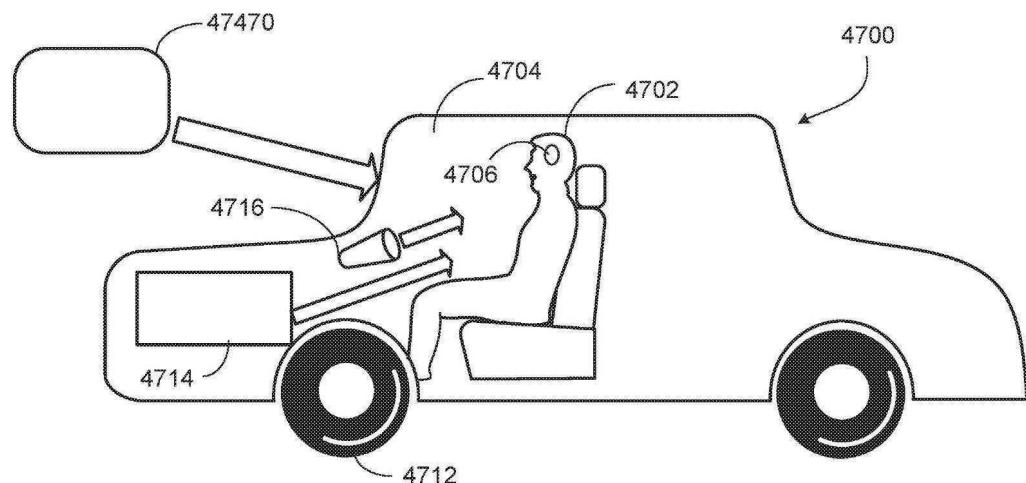
도면45



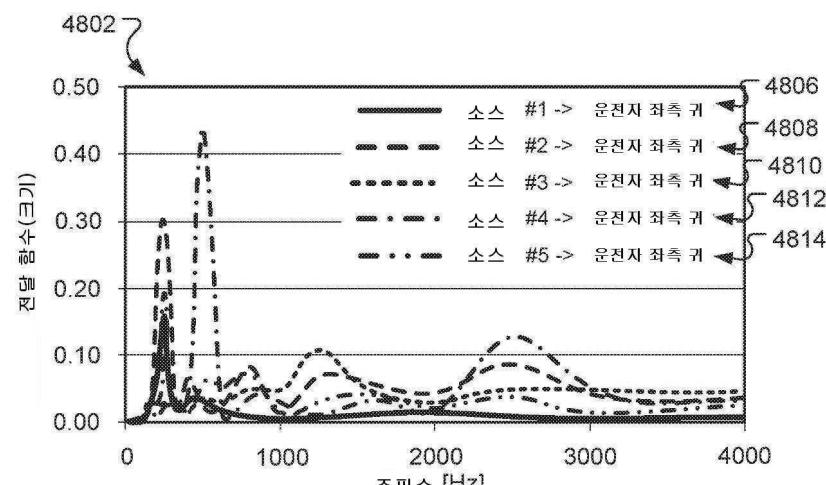
도면46



도면47

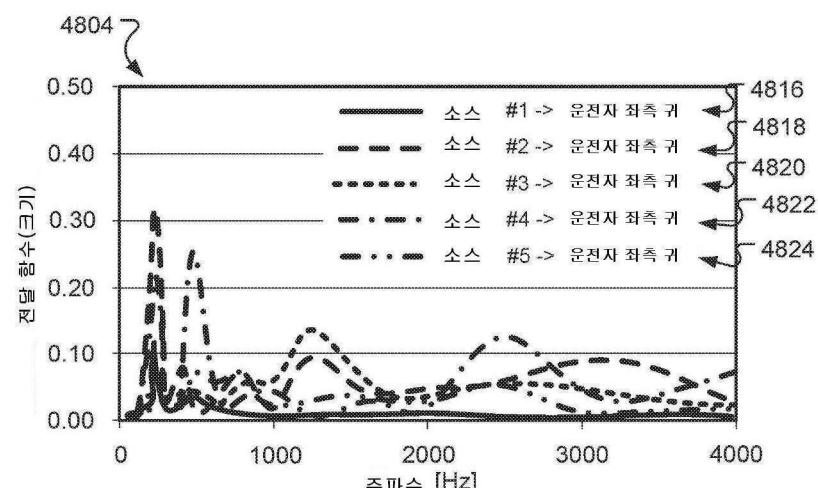


도면48a



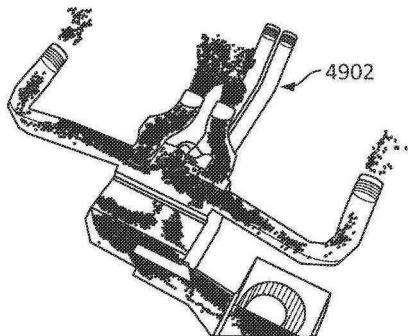
낮은 송풍기 속도에서 상이한 클러스터들에 대한 전달 함수

도면48b



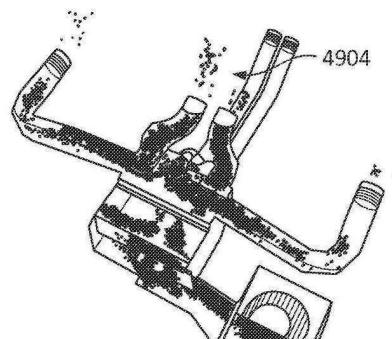
높은 송풍기 속도에서 상이한 클러스터들에 대한 전달 함수

도면49a



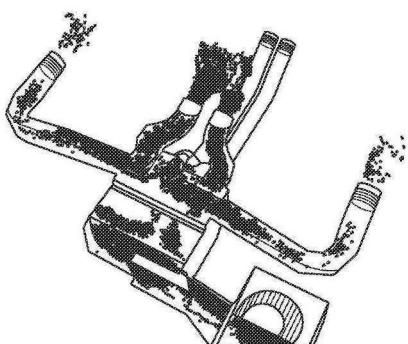
500Hz에서 노이즈 소스들 분산

도면49b



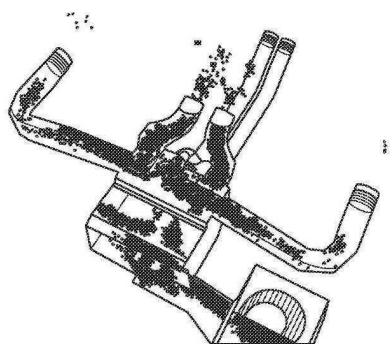
500Hz에서 노이즈 소스들 기여 분산  
(음향 전달 함수 수정)

도면49c



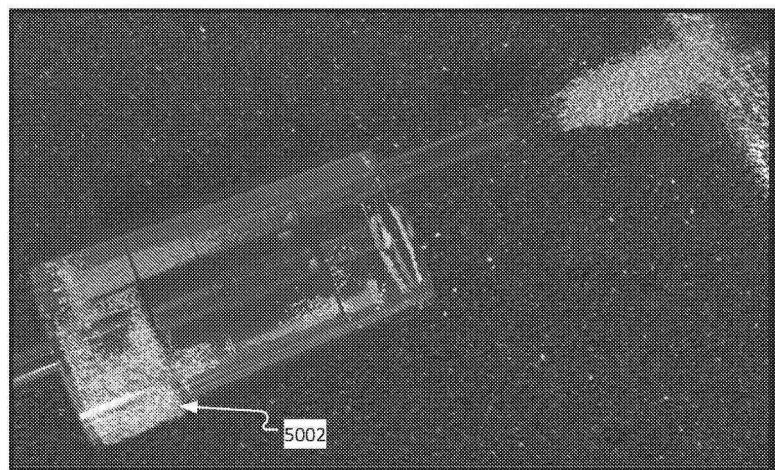
200Hz에서 노이즈 소스들 분산

도면49d

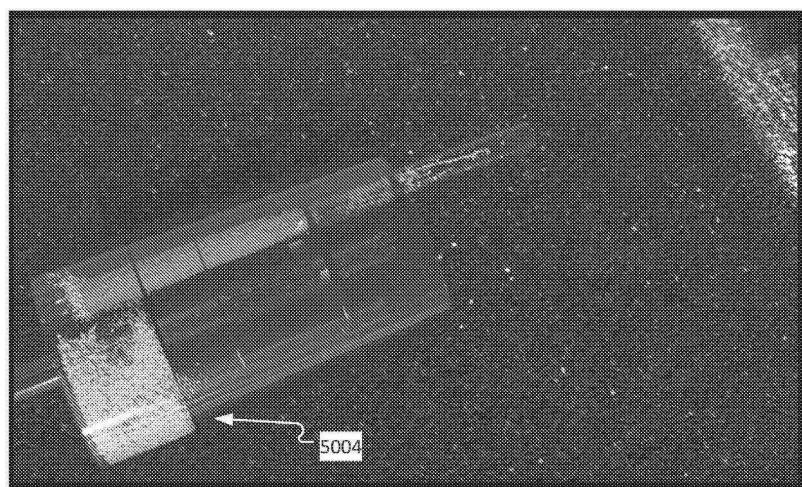


200Hz에서 노이즈 소스들 기여 분산  
(음향 전달 함수 수정)

도면50a



도면50b



도면51

