

**(19) 대한민국특허청(KR)**  
**(12) 등록특허공보(B1)**

(51) . Int. Cl.<sup>6</sup>  
 G10K 11/162

(45) 공고일자 2005년10월31일  
 (11) 등록번호 10-0524508  
 (24) 등록일자 2005년10월21일

(21) 출원번호	10-1999-7010720	(65) 공개번호	10-2001-0012759
(22) 출원일자	1999년11월19일	(43) 공개일자	2001년02월26일
번역문 제출일자	1999년11월19일		
(86) 국제출원번호	PCT/US1998/009953	(87) 국제공개번호	WO 1998/53444
국제출원일자	1998년05월15일	국제공개일자	1998년11월26일

## (81) 지정국

국내특허 : 알바니아, 아르메니아, 오스트리아, 오스트레일리아, 아제르바이잔, 보스니아 헤르체고비나, 바르바도스, 불가리아, 브라질, 벨라루스, 캐나다, 스위스, 중국, 쿠바, 체코, 독일, 덴마크, 에스토니아, 스페인, 핀란드, 영국, 그루지야, 헝가리, 이스라엘, 아이슬랜드, 일본, 케냐, 키르키즈스탄, 북한, 대한민국, 카자흐스탄, 세인트루시아, 스리랑카, 리베이라, 레소토, 리투아니아, 룩셈부르크, 라트비아, 몰도바, 마다가스카르, 마케도니아공화국, 몽고, 말라위, 멕시코, 노르웨이, 뉴질랜드, 슬로베니아, 슬로바키아, 타지키스탄, 투르크멘, 터키, 트리니다드토바고, 우크라이나, 우간다, 우즈베키스탄, 베트남, 폴란드, 포르투칼, 루마니아, 러시아, 수단, 스웨덴, 싱가포르, 인도네시아, 세르비아 앤 몬테네그로, 짐바브웨, 시에라리온, 가나, 감비아, 기니 비사우,

AP ARIPO특허 : 케냐, 레소토, 말라위, 수단, 스와질랜드, 우간다, 가나, 감비아, 짐바브웨,

EA 유라시아특허 : 아르메니아, 아제르바이잔, 벨라루스, 키르키즈스탄, 카자흐스탄, 몰도바, 러시아, 타지키스탄, 투르크멘,

EP 유럽특허 : 오스트리아, 벨기에, 스위스, 독일, 덴마크, 스페인, 프랑스, 영국, 그리스, 아일랜드, 이탈리아, 룩셈부르크, 모나코, 네덜란드, 포르투칼, 스웨덴, 핀란드, 사이프러스,

OA OAPI특허 : 부르키나파소, 베닌, 중앙아프리카, 콩고, 코트디브와르, 카메룬, 가봉, 기니, 말리, 모리타니, 니제르, 세네갈, 차드, 토고,

(30) 우선권주장 08/858,514 1997년05월19일 미국(US)

(73) 특허권자 미네소타 마이닝 앤드 매뉴팩춰링 캄파니  
 미합중국 55133-3427 미네소타주 세인트 폴 피.오. 박스 33427 3эм 센터

퍼듀 리서치 파운데이션  
 미국 47906 인디아나주 웨스트 라파예트 컴버랜드 아베뉴 1291

(72) 발명자 볼톤존에스  
 미국미네소타주55133-3427세인트폴피.오.박스33427

레이행-이  
 미국미네소타주55133-3427세인트폴피.오.박스33427

알렉산더조나단에이치

미국미네소타주55133-3427세인트폴피.오.박스33427

카트라가다스리니バス  
미국미네소타주55133-3427세인트폴피.오.박스33427

(74) 대리인

김진환  
나영환

심사관 : 강녕

#### (54) 균질한 다공질 재료의 음향 특성을 예측하는 동시에 최적화하기 위한 방법

##### 요약

대체로 균질한 다공질 재료에 대한 음향 특성을 예측하기 위한 방법으로서 컴퓨터에 의해 제어되는 방법은 균질한 다공질 재료의 하나 이상의 음향 특성을 결정하기 위한 적어도 하나의 예측 모델을 제공하는 단계와, 상기 대체로 균질한 다공질 재료에 대한 음향 특성을 예측하는 데 이용하기 위한 선택된 예측 모델을 제공하는 단계 및 상기 선택 모델에 대응하는 최소의 미세 구조 파라미터의 입력 세트를 제공하는 단계를 포함한다. 상기 균질한 다공질 재료에 대한 하나 이상의 거시적 성질은 상기 미세 구조 파라미터의 입력 세트에 기초하여 결정되고, 상기 균질한 다공질 재료에 대한 음향 특성은 하나 이상의 거시적 성질 및 상기 선택된 예측 모델을 함수로 하여 생성된다. 이러한 예측 방법은 미세 구조 파라미터의 입력 세트에 기초한 균질한 연한 섬유질 재료의 유동 저항율을 예측하기 위한 유동 저항율 모델을 이용하여 대체로 균질한 연한 섬유질 재료에 대한 음향 특성을 예측하는 데 이용될 수 있다. 상기 음향 시스템의 하나 이상의 구성 요소에 대해 제공된 미세 구조 입력에 적어도 일부에 기초한 상기 시스템의 음향 특성을 결정하기 위한 전달 행렬 프로세스를 이용하는 다수 구성 요소 음향 시스템의 음향 특성을 예측하기 위한 방법으로서 다른 컴퓨터에 의해 제어되는 방법이 제공된다.

##### 내용

도 1

##### 명세서

##### 기술분야

본 발명은 균질한 다공질 재료와 음향 시스템의 설계에 관한 것으로서, 특히 균질한 다공질 재료 및 다수 구성 요소의 구성 요소 음향 시스템의 음향 특성의 예측과 최적화에 관한 것이다.

##### 배경기술

다른 형식의 재료가 잡음 저감, 단열, 여과 등의 많은 용도로 사용된다. 예를 들면, 섬유질 재료는 음파의 전파를 감쇄할 목적으로 잡음 제어 문제에서 자주 사용된다. 섬유질 재료는 천연 섬유, 예를 들면 무명과 미네랄 울(mineral wool)과, 인조 섬유, 예를 들면 유리 섬유 및 폴리프로필렌, 폴리에스테르, 폴리에틸렌 섬유와 같은 중합체 섬유를 포함하는 다양한 형식의 섬유로 만들어질 수 있다. 많은 형식의 재료의 음향 특성은 유동 저항율, 비틀림, 다공율, 벌크 밀도, 체적 탄성을 등과 같은 벌크 재료의 거시적 성질에 근거하고 있다. 그 다음에, 이러한 거시적인 성질은 재료의 밀도, 방향성 및 구조와 같은 제어 가능한 파라미터에 의해 제어된다. 예를 들면, 섬유질 재료의 거시적 성질은 섬유질 재료 내의 섬유의 형상, 직경, 밀도, 방향성 및 구조에 의해 제어된다. 이러한 섬유질 재료는 단일 섬유 구성 요소만을 포함거나 또는 다른 물리적 성질을 갖는 여러 섬유 구성 요소의 혼합물을 포함할 수 있다. 또, 섬유질 재료의 고체 상태의 섬유 구성 요소 외에, 섬유질 재료의 체적은 유체, 예를 들면 공기에 충전된다. 따라서, 섬유질 재료는 다공질 재료의 형식이라는데 특징이 있다.

다공질 재료의 설계로 사용하기 위한 음향 모델을 포함하고, 다양한 음향 모델은 다양한 재료 때문에 이용 가능하다. 다공질 재료의 기준의 음향 모델은 대체로 2개의 카테고리, 즉 강성 프레임 모델과 탄성 프레임 모델로 분할할 수 있다. 강성 모델은 다공질의 락(lock) 및 스틸 울과 같은 강성 프레임을 갖는 다공질 재료에 적용할 수 있다. 강성의 다공질 재료에서는

고상 재료는 액상으로 변하지 않고, 오직 1개뿐인 세로 방향의 파가 다공질 재료 내의 액상을 통해 전파할 수 있다. 강성의 다공질 재료는, 전형적으로 합성 밸크 밀도와 합성 체적 탄성율을 갖는 등가의 유체로서 모델링된다. 한편, 탄성 모델은 다공질 재료 프레임의 체적 탄성을 이, 다공질 재료, 예를 들면 폴리우레탄 발포제, 폴리이미드 발포제 등의 유체 탄성율에 상당하는 가공질 재료에 적용할 수 있다. 탄성의 다공질 재료에 전파될 수 있는 파에는 3가지 형식, 즉 2개의 압축파와 1개의 회전파가 있다. 고상은 재료의 표면에 기울게 입사해서 부딪치는 입사 음파에 의해 유발되는 전단 응력을 경험하게 된다.

그러나, 아래에 설명하는 이러한 강성 및 탄성의 재료 모델은 연한 섬유질 재료, 예를 들면 폴리프로필렌 섬유와 폴리에스테르계 섬유로 이루어지는 재료, 예를 들면 연한 중합체의 섬유질 재료의 적절한 모델링을 제공하지 못한다. 본원에 사용되는 용어 "연한(imp)"은 진공중에서 다공질 재료의 체적 탄성이 공기의 체적 탄성보다 작은 다공질 재료를 가르킨다.

다공질 재료의 음향 연구는 Rayleigh Lord의 논문[*Theory of Sound*, Vol. II, Article 351, 2<sup>nd</sup> Edition, Dover Publications, NY(1986)]에 기술되어 있는 바와 같이, 평행한 원통 모세관 구멍을 갖는 단단한 벽을 통한 소리 전파를 Lord Rayleigh의 연구에서 일찍이 확인할 수 있다. 다공질 재료의 프레임이 액상과 함께 움직이지 않는다는 전제에 근거하는 모델은 강성 프레임 다공질 모델로서 분류된다. 다양한 강성 다공질 재료 모델은 Monna, A. F의 ["다공질의 벽부에 의한 소리 흡수" *Phylica* 5, pp.129-142(1938)]와, Morse, P. M 및 Bolt, R. H의 ["실내의 음파" *Review of Modern Physics* 16, pp.169-150(1944)]와, Zwicker, C. 및 Kosten, C. W.의 ["흡음 재료" Elsevier, NY(1949)]를 포함하여, 다양한 강성의 다공질 재료 모델이 제안되어 있다.

이들 모델은 Rayleigh의 연구와 같이, 강성의 다공질 재료 내의 음파 전파가 간질성 유체의 운동과 연속 방정식을 이용하는 것에 의해 설명할 수 있다고 가정했다.

또한, 강성의 다공질 재료는 Crandall, I. B의 ["진동계와 소리 이론" Appendix A, Van Nostr 및 Company, NY(1972)]에 기술되어 있는 것과 같은 합성 밀도를 갖고, 점성과 열효과를 고려했을 경우에 합성 전파 정수를 갖는 등가의 유체로서 모델링되어 있다. Delany, M. E. 및 Bazely, E. N.의 ["섬유질의 흡수 재료의 음향 특성", National Physical Laboratories, Aerodynamics Division Report, AC 37(1969)]에서는 강성의 섬유질 재료의 음향 특성은 다르게 연구되었다. 이들 모델에 기술되어 있는 것 같이, 유동 저항에 의해 나눈 주파수의 함수로서 특성 임피던스와 전파 계수로 이루어지는 반 경험적인 모델이 확립되었다. 이 모델은 광범위한 유동 저항을 갖는 섬유질 재료의 측정된 특성 임피던스에 근거하고 있었다. Smith, P. G. 및 Greenkorn, R. A.의 ["다공질 매체 중의 음향파 전파의 이론", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.52, pp.247-253(1972)]에서는, 강성의 다공질 매체내의 음향파의 전파에 대한 다공율, 투과율(유동 저항률의 반대), 형상 계수 및 다른 거시적 구조의 파라미터의 효과가 조사되었다. 또, 다른 강성의 다공질 재료 이론이 합성 밀도의 개념을 응용한 반면에, 다른 이론은 유동 저항을 이용했다. 이들 2개의 방법의 비교가 Attenborough, K.의 ["다공질 재료의 음향 특성", *Physics Reports*, 82(3), pp.179-227(1982)]에 기술되어 있다. 요약하면, 강성의 다공질 재료의 모델은 단지 하나의 종파가 강성 매체를 통해 전파하는 것을 허용하고, 또 강성 프레임은 다공질 재료 내의 액상에 의해 여기되지 않는다. 이러한 강성의 다공질 재료 모델에 따른 연한 다공질 재료의 음향 특성은 충분히 예측되지 않는다.

강성의 다공질 모델에 대하여, 다공질 재료의 탄성 모델도 기술되어 있다. 그 제한된 강성에 의한 다공질 재료의 고상 진동을 고찰 함으로써, Zwicker 및 Kosten은 Zwicker, C. 및 Kosten, C. W의 ["흡음 재료", Elsevier, NY(1949)]에 기술되어 있는 바와 같이 고상과 액상 간의 결합 효과를 고려하는 탄성 모델에 도달하였다. 이 연구는 Kosten, C. W. 및 Janssen, J.H의 ["가소성 다공질 재료의 음향 특성" *Acoustica* 7, pp.372-378(1957)Crandall(1927)]에 기술되어 있는 바와 같이 Kosten과 Janssen에 의해 발전되어, 이 연구에서는 Grandall(1927)에 의해 주어진 합성 밀도 및 Zwicker와 Kosten(1949)에 의해 주어진 가는 구멍 내의 공기의 합성 밀도의 식이 수정되었다. 또한, Zwicker 및 Kosten(1949)의 연구에서 유압 효과의 어려움을 보정하고, 법선 입사 소리에 의해 여기되는 고상의 진동을 고찰한 모델도 설명되어 있다. 이 모델에서는, 4차 과동 방정식에 의해, 2개의 종파가 강성 재료 내의 단일파와 대조적으로 탄성의 다공질 재료내에 전파할 수 있는 것이 가르쳐져 있다. Shiau, N.M.의 ["흡음, 투과 및 임피던스 측정에 적용된 탄성의 다공질 재료내의 다차원 과동 전파" *Transmission 및 Impedance Measurement* Ph.D.Thesis, School of Mechanical Engineering, Purdue University(1991), Bolton, J.S., Shiau, N.M]와, Kang, Y.J.의 ["탄성의 다공질 재료에 의해 뒷바침되는 다수 판넬 구조를 통한 소리 전달" *Journal of Sound 및 Vibration* 191, pp.317-347(1996)]과, Allard, J.F의 ["다공질 매체층의 소리의 전파"에서는 "흡음 재료의 모델화", Elsevier Science Publisherw Ltd, NY(1993)]과, Biot의 "다공질 재료의 탄성 및 친밀성의 일반화" *Journal of Applied Mechanics* 78 ,pp.91-96(1956A)에 기술되어 있는 Biot의 이론]과, Biot, M.A.의 "유체 충전된 다공성 고체의 탄성파의 전파 이론I, 저주파수 범위 II, 고주파 범위" *Journal of the Acoustical Society of America* 28, pp.168-191(1956B)]와, 지구 물리학 분야에서 Biot, M.A.의 "The Elastic Coefficients of the Theory of Consolidation" *Journal of the Applied Mechanics* 24, pp.594-601(1957)는 비스듬히 입사 소리에 의해 유발되는 탄성

프레임을 통한 전단 파동 전파의 고찰을 가능하게 하는 탄성의 다공질 재료 모델을 개발하는 것이 적합하게 되었다. 이 탄성 모델에서는 고상 및 액상의 압력-변형 관계와 운동 방정식에 의해, 2개의 압축파를 제어하는 1개의 4차 방정식과 1개의 회전파를 제어하는 1개의 2차 방정식을 얻을 수 있다.

그러나, 음향파가 연한 다공질 재료에 전파될 때 고상의 진동은 액상과의 결합을 통해 점성 및 관성력에 의해 여기된다. 이러한 연한 다공질 재료에서 프레임 강성의 결여때문에, 무관계의 파는 연한 매체의 고상을 통해 전파될 수 없다. 이 사실은 연한 다공질 재료를 모델링하는 시도에 있어서 탄성 모델의 벌크 강성이 작은지 또는 제로와 동일하게 설정될 경우에 수치적인 특이점을 이끌어낸다. 따라서, 연한 재료내의 파의 형식은 1개의 압축파에 대해서만 감소되고, 또한 연한 다공질 재료의 탄성 모델은 연한 다공질 재료의 설계시 사용하기에는 부적절하다.

연한 다공질 재료은 분명히 상당히 소수의 연구자에 의해 연구되어 왔다, 예를 들면, Beranek, L.L.의 잡지["Acoustical Properties of Homogeneous,Isotropic Rigid Tiles 및 Flexible Blankets" Journal of the Acoustical Society of America 19,pp.556-568(1997)]와, Ingard, K.U.의 잡지["Locally 및 Nonlocally Reacting Flexible Porous Layers: A Comparison of Acoustical Properties" Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Engineering for Industry 103, pp.302-313(1981)]와, Goransson, P의 잡지["A Weighted Residual formulation of the Acoustic Wave Propagation Through Flexible Porous Material 및 a Comparison with a Limp Material Model" Journal of Sound 및 Vibration 182, pp.479-494(1995)]이다.

또한, 섬유질 재료의 음향 모델을 개발하는 시도도 있었다. 예를 들면, Kawasima, Y.의 "복합 매체로서의 섬유 블록 내의 소리 전파" Acustica, 10, pp.208-217(1960)의 평행에 탄성 지지된 섬유 및 Sides, D.J, Attenborough,K와, Mulholland, K.A.의 "일반화된 음향 전파 이론의 섬유질 흡수 재료의 적용" Journal of Sound 및 Vibration 19, pp.49-64(1971)]이다. Kawasima(1960)의 모델은 Zwikker 및 Kosten(1949)의 모델로 한 세트의 방정식을 발생하고, 이것에 의해 탄성 다공질 매체 내의 1차원 파동 전달을 설명한다. 이 방법에 따라, 탄성 상수의 제로 설정에 의해 연한 재료를 특별한 케이스로서 취급할 수 있고, 이것은 수치적인 특이점을 이끌어낼 가능성이 있다. Sides, Attenborough 및 Mulholland의 모델은 Biot(1956B)의 모델을 통합하지만, 1차원 형태이며, 또 벌크 고상은 한정된 경성을 갖는다고 가정한다. 따라서, 다공질 재료 내의 2개의 종파의 모델 특성은 4차 방정식에 의해 제어된다. 재료 벌크 강성이 제로로 설정되면, 즉 재료가 연하다고 가정되면, 다시 수치적인 특이점이 생길것이다.

전술한 많은 모델에서 사용된 거시적 성질, 유동 저항은 모델의 음향 특성 반응을 결정할 때 섬유성 다공질 재료보다 중요한 하나의 특성이다. 따라서, 유동 저항의 결정이 특히 중요하다. Nichols, R.H.Jr.의 ["섬유질의 음향 재료의 유동 저항 특성" Journal of the Acoustical Society of America, Vol.19, No.5, pp.866-871(1974)]에서는, 섬유 반경의 역학 법칙에서의 유동 저항, 재료 두께 및 표면 밀도의 식이 표현된다. 출력은 실험적으로 결정되고, 또 값은 재료가 다른 형식의 구조에 의해 변화되었다. Delany 및 Bazley, E.N.의 ["섬유질의 흡수 재료의 음향 특성" National Physical Laboratories, Aerodynamics Division Report,AC 37(1969)] 및 Delany, M.E 및 Bazley, E.N.의 "섬유질의 흡수 재료의 음향 특성" Applied Acoustics, Vol.3, pp.105-116(1970)]로, Delany와 Bazley는 섬유질 재료의 특성 임피던스를 예측하기 위한 반 경험적인 모델을 확립하기 위해서 측정한 유동 저항을 이용하였다. Bies,A. 및 Handen, C.H.의 [음향 설계를 위한 유동 저항 정보, applied Acoustics, Vol.13, pp.357-391(1980)]와, Dunn, P.I 및 Davern,W.A.의 ["다중 흡수 재료의 음향 임피던스의 계산" Applied Acoustics, Vol.19, pp.321-334(1986)]와, Voronia, N.의 "섬유질 재료의 음향 특성" Applied Acoustics, Vol.42, pp.165-174(1994)]에 기술되어 있는 바와 같이, 다른 사람들은 유동 저항에 관해서 순수하게 표현된 경험식에 의해 다공질 재료의 음향 임피던스를 예측하고 시험해 보았다. Ingard, K.U 및 Dear, T.a.의 ["음향 유동 저항의 측정" Journal of Sound 및 Vibration, Vol.103 No.4, pp.567-572(1985)]에서, 재료의 역학적인 유동 저항을 측정하기 위한 방법이 제안되었다. 이 방법으로 확인된 것은 측정된 다이나믹 유동 저항이 충분히 낮은 주파수에서 안정한 유동 저항에 매우 근접한다는 것이다. Woodcock 및 Hodgson은, Woodcock, R 및 Hodgson, M.의 ["섬유질 재료의 실효 유동 저항율을 측정하기 위한 음향적 방법" Journal of Sound 및 Vibration, Vol.153 No.1, Feb 22, pp.186-191(1992)]로 음향 임피던스를 측정함으로써 유동 저항을 예측했다. 음향학의 문헌에서 유동 저항과 그 모델링의 연구 이외에, 지구 물리학, 에어러졸(aerosol) 학문 및 여과 분야에서 다른 유동 저항의 연구가 있다.

공지된 덜(dull) 법칙은 수학식 1에 도시된 바와 같이, 섬유성 다공질 재료의 유동 저항( $W$ )을 규정하는 유량( $Q$ )과 압력차( $\Delta p$ ) 사이의 관계를 나타내고 있다. 바꾸어 말하면, 섬유성 다공질 재료층의 유동 저항은 층 양단의 압력차( $\Delta p$ )와 평균 속도, 즉 층을 통한 안정 유량( $Q$ )과의 비율이라고 정의된다.

### 수학식 1

$$W = \frac{\Delta p}{Q}$$

따라서, 유동 저항율( $\sigma$ )은 아래의 수학식 2로 정의될 수 있다.

### 수학식 2

$$\sigma = \frac{WA}{h} = \frac{\Delta p A}{Qh} = \frac{\Delta p}{vh}$$

이 수학식에서, 변수 및 유동 저항율의 이하의 식에 포함되는 변수는 다음과 같다.

$\Delta p$  : 재료층 양단의 압력차

$Q$  : 유량

$A$  : 재료층 면적

$h$  : 재료층 두께

$\eta$ : 기체의 점성

$\rho$  : 재료 밀도

$\lambda$  : 재료 분자의 평균 자유 행로

$r$  : 재료의 섬유의 평균 반경

$c$  : 재료의 충전 밀도 또는 고형성

Darcy의 법칙에 근거하고 있고, Davies는 Davies, C.N.의 ["부유 진액과 입자의 분리" Proc.Inst.Mech.Eng.1B(5), pp.185-213(1952)]에 기술되어 있는 바와 같이, 수학식 3을 전개했다.

### 수학식 3

$$\left\{ \frac{\Delta p A r^2}{\eta Q h}, \frac{Q r \rho}{A \eta}, c, \frac{\lambda}{r} \right\}$$

함수의 제1항은 Darcy의 법칙을 의미하고, 제2항은 Reynold의 수를 나타내며, 제3항은 충전 밀도 또는 고형성을 나타내고, 제4항은 Knudsen의 수를 나타낸다. 섬유질 재료에 대해Knudsen의 수 및 Reynold의 수는 통상적으로 무시된다. 따라서, 수학식 4가 도출된다.

### 수학식 4

$$\frac{\Delta p A r^2}{\eta Q h} = f(c)$$

수학식 4로부터, 유동 저항율은 아래의 수학식 5로 정의된다.

### 수학식 5

$$\sigma = \frac{\Delta p A}{Qh} = \frac{\eta}{r^2} f(c)$$

수학식 5에 근거하고, Davies(1952)에 설명된 바와 같이 유동 저항율의 경험식은 아래의 수학식 6에 기재된 바와 같다.

### 수학식 6

$$\sigma = \frac{\eta 16 c^{1.5} (1 + 56 c^3)}{r^2}$$

다양한 다른 경험식이 유동 저항율을 표현하였다. 예를 들면, Bies 및 Hanson에서, 유동 저항율은 아래의 수학식 7로 정의되었다.

### 수학식 7

$$\sigma = \frac{27.3\eta}{4r^2} \left( \frac{\rho_b}{\rho_f} \right)^{1.53} = \frac{27.3\eta}{4r^2} (c)^{1.53}$$

또, 유동 저항율에 대한 다양한 다른 이론식이 기술되어 있다. 예를 들면, Langmuir, I.의 ["연기와 필터에 관한 연구 보고" Section 1.U.S office of Scirntific Research 및 Development No.865, Part IV(1942)]에서 아래의 수학식 8에 이론식이 기술되어 있다.

### 수학식 8

$$\sigma = \frac{1.4 \times 4c\eta}{r^2 (-\ln c + 2c - c^2/2 - 3/2)}$$

Happel, j.의 ["원통 배열에 관한 층류" American Institute of Chemical Engineering Journal, 5, pp.174-177(1959)]에서는, 수학식 9에 이론식이 기술되어 있다.

### 수학식 9

$$\sigma = \frac{8c\eta}{r^2 [(-\ln c - (1 - c^2)/(1 + c^2))]}$$

Kuwabana,S.의 ["수로 층류내에 랜덤하게 분포되어진 원통 또는 구면에 의해 경험되는 힘" Journal of Physical Society of Japen, 14, pp.527-532(1959)]에서는 수학식 10의 이론식이 기술되어 있다.

### 수학식 10

$$\sigma = \frac{8c\eta}{r^2 (-\ln c + 2c - c^2/2 - 3/2)}$$

또, 예를 들면 Pich, J, ["섬유질 및 막 필터에 의한 에어로졸 여과의 이론"ltration by Fibrous 및 Membrane Filters, Academic Press, London 및 New York(1966)]에서는, 수학식 11에 표시된 이론식이 기술되어 있다.

### 수학식 11

$$\sigma = \frac{8c\eta(1+1.996Kn)}{r^2[-\ln c + 2c - c^2/2 - 3/2 + 1.996Kn(-\ln c + c^2/2 - 1/2)]}$$

전술한 바와 같이 유동 저항율은 다공질 재료의 설계에 중요한 거시적인 성질이며, 특히 섬유질 재료의 유동 저항율은 그 음향 반응에 큰 영향을 미친다. 따라서, 다양한 유동 저항율 모델이 사용 가능하지만, 다공질 재료, 특히 섬유질 재료의 음향 특성 예측을 개선하기 위해서, 유동 저항율 모델의 개량이 필요하다.

예를 들면, 섬유질 재료를 포함하는 대체로 전술한 바와 같이 모델링한 다양한 재료를, 다수 구성 요소를 포함하는 음향 시스템에 이용하는 것이 가능하다. 예를 들면, 음향 시스템은 섬유질 재료 및 저항성 스크립트를 포함할 수 있기 때문에, 그들 사이에 공동을 갖는다. 재료, 예를 들면 다공질 재료의 다양한 음향 특성 및 음향 시스템의 음향 특성(예를 들면, 흡음율, 임피던스 등과 같은 음향 특성)이라고 결정하는 시스템 및 방법이 이용 가능하다. 예를 들면, 공기층에 의해 지지되는 강성의 저항성 좌석에서 이루어지는 흡수체의 두께에 대한 흡수 특성을 나타내는 그래프를 만들기 위한 시스템이 개시되었다. 이 시스템 및 다른 복수의 유사한 프로그램이 Ingard, K.U.의 ["흡음 기술에 관한 노트" Version 94-02, published 및 distributed by Noise Control Foundation, Poughkeepsie, NY(1994)]에 기술되어 있다.

그러나, 음향 특성은 이러한 방법으로 결정되어 왔지만, 이러한 결정은 재료의 거시적인 성질을 이용하여 수행되었다. 예를 들면, 이러한 특성은 미리 지정된 출력을 발생하기 위해 미리 정한 음향 시스템 때문에 특히 규정된 프로그램의 거시적 성질의 압력을 이용하여 생성되었다. 시스템의 입력으로서 이용되는 이러한 거시적 성질은 유동 저항율, 벌크 밀도 등을 포함한다. 이러한 시스템 또는 프로그램에 의해, 사용자는 예를 들면 섬유질 재료의 제조 공정에서 직접 제어 가능한 섬유질 재료의 섬유의 섬유 치수, 섬유 형상 등과 같은 재료의 파라미터를 이용하여 음향 특성을 예측하고, 또 최적화 할 수 없다.

전술한 바와 같이, 수많은 모델에 의한 다양한 방법이 음향 특성을 예측하는 데 이용될 수 있다. 그러나, 이러한 방법은 연질 섬유질 재료의 프레임이 강성이 아니고, 탄성도 아니므로, 연한 섬유질 재료의 음향 특성을 예측하기 위해서는 적절하지 않다. 강성의 다공질 재료 모델은 탄성 다공질 재료 모델보다 간단하고, 또 수치적으로 더 확고하다. 그러나, 이러한 강성 모델은 연한 프레임에 대한 외력에 의해 유발되는 프레임 운동을 예측할 수 없다. 탄성의 다공질 재료 방법에서는, 체적 탄성율을 제로에 설정해서 연한 프레임 특성을 밝힐 수 있지만, 제로의 체적 탄성율은, 예를 들면 4차 방정식의 특성에 의한 불안정성과 같이 연한 재료의 음향 특성의 계산시 수치적인 불안정성을 발생한다. 따라서, 기존의 다공질 재료 예측 프로세스는 연한 섬유질 재료의 음향 반응을 예측하는데도 부적합하며, 또한 연한 재료 예측 방법의 필요성이 있다. 또, 균질한 다공질 재료 및/또는 재료의 제조 프로세스에서 직접 제어 가능한 파라미터를 적용하는 다수 구성 요소로 음향 시스템을 설계하기 위해서, 음향 특성을 예측하고, 또 최적화하기 이한 방법이 필요하다.

#### 발명의 상세한 설명

대체로 균질한 다공질 재료의 음향 특성을 예측하기 위해, 본 발명에 의한 컴퓨터 제어 방법에 대해서 설명한다. 본 방법은 대체로 균질한 다공질 재료의 하나 이상의 음향 특성을 결정할 때에 사용하기 위한 예측 모델을 제공하는 단계와, 대체로 균질한 다공질 재료의 음향 특성을 예측할 때에 사용하기 위한 예측 모델을 선택하기 위해 선택 명령을 제공하는 단계와, 선택 명령에 대응하는 적어도 미세구조 파라미터의 입력 세트를 제공하는 단계를 포함한다. 균질한 다공질 재료의 하나 이상의 거시적 성질은 적어도 미세구조 파라미터의 입력 세트에 근거해 결정된다. 균질한 다공질 재료의 1개 이상의 음향 특성은 1개 이상의 거시적 성질 및 선택된 예측 모델의 함수로서 생성된다.

본 방법의 일 실시예에서, 예측 모델은 연한 재료 모델, 강성 재료 모델 또는 탄성 재료 모델일 수 있다.

본 방법의 다른 실시예에서, 균질한 다공질 재료는 균질한 섬유질 재료이다. 이러한 방법에서는, 입력 세트에 근거하는 하나 이상의 거시적 성질은 균질한 섬유질 재료의 유동 저항율을 포함하고, 또한 균질한 섬유질 재료의 음향 특성은 적어도 유동 저항율을 함수로서 생성된다.

본 방법의 또 다른 실시예에서, 방법은 입력 세트의 적어도 하나의 미세구조파라미터의 규정 범위에 걸쳐 균질한 다공질 재료의 적어도 하나의 음향 특성을 반복적으로 예측하는 단계를 포함한다. 또, 본 방법은 규정 범위를 갖는 미세구조 파라미터에 대해 예측되는 음향 특성에 대한 2차원 플롯 또는 3차원 플롯 중 하나를 생성하는 단계를 포함할 수 있다.

본 발명에 따른 다른 컴퓨터 제어 방법은 대체로 균질한 연한 섬유질 재료에 대한 음향 특성을 예측하기 위해 설명한다. 이 방법은 균질한 연한 섬유질 재료의 유동 저항율을 예측하기 위한 유동 저항 모델을 제공하는 단계와, 균질한 연한 섬유질 재료의 하나 이상의 음향 특성을 예측하기 위한 재료 모델을 제공하는 단계와, 미세구조 파라미터의 입력 세트를 제공하는 단계를 포함한다. 유동 저항율 모델은 미세구조 파라미터에 근거해 정의된다. 또, 본 방법은 유동 저항율 모델과 입력 세트에 근거한 균질한 연한 섬유질 재료의 유동 저항율을 결정하는 단계를 포함한다. 균질한 섬유질 연한 재료의 하나 이상의 음향 특성은 균질한 섬유질의 연한 재료의 유동 저항율의 함수로서 재료 모델을 이용하여 생성된다.

본 방법의 일 실시예에서, 균질한 섬유질 연한 재료는 하나 이상의 섬유 형식으로 형성되고, 또한 균질한 섬유질 연한 재료의 유동 저항율은 하나 이상의 섬유 형식의 각각에 의해 제공되는 유동 저항율을 함수로서 결정된다. 또, 하나 이상의 섬유질 형식의 각각의 유동 저항율은  $n^{th}$  승으로 취해진 섬유의 평균 반경의 역함수로 결정되며,  $n$ 은 2보다 크거나 작다.

다수 구성 요소 음향 시스템의 음향 특성을 예측하기 위해서, 본 발명에 의한 또 하나의 컴퓨터 제어 방법이 설명된다. 이 방법은 다수 구성 요소 음향 시스템의 다수의 구성 요소를 선택하기 위해 하나 이상의 선택 명령을 제공하는 단계와, 각 선택 명령이 다수 구성 요소의 음향 시스템의 다른 구성 요소 중 1개에 결합되는 단계를 포함한다. 이 다수의 구성 요소의 음향 시스템의 각 구성 요소는 다수 구성 요소의 음향 시스템의 다른 구성 요소로 형성되는 적어도 한 방향의 경계와 경계를 이룬다. 또, 본 방법은 선택 명령에 결합되는 각 구성 요소에 대응하는 미세구조 파라미터 또는 거시적 성질의 입력 세트를 제공하는 단계를 포함한다. 적어도 하나의 구성 요소의 미세구조 파라미터를 포함하는 적어도 1개의 입력 세트가 제공된다. 전달 행렬은 다수의 구성 요소에 대응하는 입력 세트에 근거하고, 구성 요소의 경계에서 음향 상태 간의 관계를 규정하는 다수 구성 요소 음향 시스템의 각 구성 요소에 의해 생성된다. 구성 요소에 대한 전달 행렬은 다수 구성 요소 음향 시스템의 합계 전달 행렬을 얻기 위해서 함께 승산되고, 또 다수 구성 요소의 음향 시스템의 하나 이상의 음향 특성에 관한 값이 합 전달 행렬의 함수로서 생성된다.

본 방법의 일 실시예에서, 다수의 구성 요소는 적어도 하나의 섬유 형식으로부터 형성된 하나의 균질한 섬유질 재료를 포함한다. 균질한 섬유질 재료의 전달 행렬은, 섬유질 재료의 유동 저항율에 근거하고, 유동 저항율은 대응하는 입력 세트의 미세구조 파라미터를 이용하여 형성됩니다.

본 방법의 다른 실시예에서, 입력 세트는 다수 구성 요소의 음향 시스템의 하나 이상의 시스템 구성 파라미터, 다수 구성 요소의 음향 시스템의 구성 요소의 하나 이상의 미세구조 파라미터 또는 다수 구성 요소의 음향 시스템의 구성 요소의 하나 이상의 거시적 성질에 관한 다양한 값의 세트를 포함한다. 그 다음에, 본 방법은 다양한 값의 세트에 의해 하나 이상의 음향 특성에 관한 값을 생성하는 단계를 더 포함한다.

본 방법은 하나 이상의 이러한 방법에 의해 제공되는 함수를 실행할 수 있는 프로그램을 감지가능하게 구체화하는 컴퓨터 판독 가능한 매체를 사용하여 실시할 수 있다. 본 방법은 균질한 다공질 재료의 설계 및 이러한 균질한 다공질 재료의 하나 이상의 층을 포함하는 음향 시스템의 설계시 이점을 갖는다.

### 도면의 간단한 설명

도 1은 본 발명에 따른 메인 음향 예측 및 최적 프로그램의 블록도이다.

도 2는 도 1은 메인 프로그램에 의해 동작 가능한 컴퓨터 시스템의 실시예를 설명하기 위한 도면이다.

도 3은 균질한 다공질 재료를 이용하기 위한 도 1의 메인 프로그램의 예측 및 최적 프로그램의 실시예를 설명하기 위한 도면이다.

도 4는 도 3의 예측 루틴의 상세 블록도이다.

도 5는 도 4의 예측 루틴 실시예의 상세 블록도이다.

도 6은 도 3의 최적화 루틴의 보다 상세한 블록도이다.

도 7은 도 6의 최적화 루틴의 실시예의 상세 블록도이다.

도 8a, 8b 및 도 9a, 9b는 연한 섬유질 재료의 연한 다공질 모델의 전개를 설명하기 위한 도면이다.

도 10은 음향 시스템으로 사용하기 위한 도 1의 메인 프로그램의 예측 및 최적 프로그램의 실시예를 설명하기 위한 도면이다.

도 11은 음향 시스템을 나타내는 도면이다.

도 12는 도 10의 예측 루틴의 보다 상세 블록도이다.

도 13 및 도 14는 도 12의 예측 루틴의 실시예의 상세 블록도이다.

도 15는 도 10의 최적화 루틴의 보다 상세 블록도이다.

도 16 내지 도 21은 본 발명에 따라 수행된 최적화 결과를 2차원 및 3차원에서 나타낸 도면이다.

### 실시예

본 발명에 의해 사용자는 제1의 원리를 이용해서(즉, 이러한 다공질 재료의 직접 제어 가능한 제조 파라미터를 이용하여), 재료의 기본적인 미세구조 파라미터로부터 균질한 다공질 재료(예를 들면, 균질한 섬유질 재료) 및 다수 구성 요소를 갖는 음향 시스템의 다양한 음향 특성을 예측할 수 있다. 또, 본 발명은 사용자로 하여금 소정의 음향 성능 특성을 갖는 균질한 다공질 재료의 최적의 미세구조 파라미터 세트를 결정하고, 또한 다수 구성 요소를 갖는 음향 시스템의 최적 시스템 구조를 결정할 수 있다.

이하 설명된 바와 같이, 미세구조 파라미터는 예를 들면 섬유질 재료로 사용되는 섬유의 직경, 이러한 재료의 두께 및 직접 제어되는 다른 어떤 물리적 파라미터와 같은 물리적 파라미터를 포함하는 제조 공정에서 직접 제어 할 수 있는 재료의 물리적 파라미터를 가르킨다.

또, 이하 설명된 바와 같이, 음향 특성은 주파수 또는 입사각의 함수로서 결정되는 음향 성능 특성일 수 있다(예를 들면, 다공질 재료의 고상과 액상 내에서 파동 전달 속도, 재료내에 전파하는 파동의 봉괴 속도, 재료내에 전파하는 파동의 음향 임피던스, 또는 재료내에 전파할 수 있는 파를 나타내는 다른 어떤 특성). 예를 들면, 음향 성능 특성은 주파수의 함수로서 결정되는 흡음율일 수 있다. 또, 음향 특성은 음향 성능 특성에 근거하는 공간 또는 주파수 적분된 음향 성능 측정값일 수 있다[예를 들면, 어떤 주파수 범위에 걸쳐 평균한 법선 또는 랜덤한 입사 흡음을, 잡음 저감 계수(NRC), 어떤 주파수 범위에 걸쳐 평균된 법선 또는 랜덤한 입사 투과 손실 또는 회화 방해 수준(SIL)].

또한, 본원의 "균질"이라는 용어는 재료 전체에 걸쳐 대체로 균등한 음향 특성을 갖는 일관된 성질, 즉, 상기 재료의 미세구조 파라미터에 관해서, 또한 재료의 거시적 성질에 관해서도 재료 전체에 걸쳐 일관성을 갖는 재료를 가르킨다.

도 2에는 본 발명에 따른 음향 특성 예측 및 최적화 시스템(10)이 도시되어 있다. 상기 음향 특성 예측 및 최적화 시스템(10)은 프로세서(12) 및 이와 연관된 메모리(13)를 구비하는 컴퓨터 시스템(11)을 포함한다. 본 발명은 어떠한 처리 시스템, 예를 들면 PC를 이용하여 조작 가능한 것과, 더욱 본 발명이 특정한 처리 시스템에 한정되지 않는다는 것을 용이하게 이해할 수 있다. 메모리(13)의 일부는 메인 음향 특성 예측 및 최적화 메인 프로그램(20)을 기억하기 위해서 사용된다. 시스템(10)의 메모리(13) 양은 사용자가 메인 프로그램(20)의 동작을 가능하게 하고, 또한 이러한 동작의 결과로 생기는 테이터의 기억을 행할 수 있을 만큼 충분해야 한다. 이러한 메모리는 시스템(10)의 동작 결과로 생기는 상당히 큰 데이터/이미지 파일을 보존하는 주변 장치 메모리 장치에 의해 제공될 수 있다. 시스템(10)은 예를 들면, 디스플레이(18), 키보드(14) 및 마우스(16)와 같이, 시스템(10)의 동작에 필요한 다른 주변 장치를 일정 수만큼 포함할 수 있다. 그러나, 시스템은 이러한 장치의 사용에 한정되거나 이러한 장치가 시스템(10) 동작에 반드시 필요한 것이 아니라는 것을 명백히 이해할 것이다. 본 발명의 바람직한 실시예에서, 이하에 제공된 프로그램은 Mathworks, Inc로부터 입수 가능한 MATLAB를 이용하여 만들어진다.

도 1에 도시된 바와 같이, 메인 프로그램(20)은 균질한 다공질 재료의 음향 특성을 예측 및/또는 이러한 균질한 다공질 재료의 음향 특성에 대한 미세 구조 파라미터의 최적의 세트를 결정하기 위한 음향 예측 및 최적화 프로그램(30)을 포함한

다. 상기 메인 프로그램(20)은 다수 구성 요소, 예를 들면 저항율 스크립, 다공질 재료, 판넬, 공동 등을 포함하는 음향 시스템의 음향 특성을 예측 및/또는 음향 시스템의 다수 구성 요소의 최적인 구조, 예를 들면 구성 요소의 두께와 위치 등을 결정하기 위한 음향 예측 및 최적화 프로그램(80)을 포함한다.

일반적으로, 메인 프로그램(20)의 균질한 다공질 재료(30)에 대한 음향 예측 및 최적화 프로그램은 잡음 저감, 흡음, 열절연, 필터, 장벽 용도 등과 같은 음향 재료의 설계시 이용하기 위함이다. 균질한 재료 프로그램(30)은 재료의 미세 구조 파라미터(즉, 제조 공정시 직접 제어할 수 있는 재료의 물리적 파라미터)를 재료의 음향 성능에 결합함으로써 균질한 다공질 재료의 음향 특성을 예측하는데, 상기 음향 특성은 고립 상태의 전기 재료의 주파수의 함수로서 결정되거나 고립 상태의 전기 재료의 주파수 범위에 걸쳐 적분된다.

이러한 방법으로, 소정의 또 특정한 음향 특성을 갖는 재료를 제조하기 위해서, 예측가능한 방법으로 제조 공정을 조정하는 것이 가능하다. 균질한 다공질 재료의 미세구조 파라미터와 최종 음향 특성 간의 결합은 음향 특성을 결정하는 연속식을 채용한 프로그램(30)에 의해 행하여지며, 어떤 식은 순수히 이론에 근거하여 도출될 수 있으며, 어떤 식은 경험적인 식(즉, 곡선을 측정된 데이터에 일치시킴으로써 얻어지는 식), 또 반 경험적인 식(즉, 그 일반식은 이론에 의해 규정되지만, 그 계수는 식을 측정된 데이터에 식을 합치는 것에 의해 결정되는 식)이 가능하다. 이러한 정의식 및 미세 구조 파라미터의 입력에 의해 균질한 다공질 재료의 음향 특성이 예측된다.

균질한 다공질 재료의 미세 구조 파라미터와 음향 특성 간의 결합은 재료의 거시적 성질의 결정에 의해 실시된다. 균질한 다공질 재료의 미세 구조 파라미터(예를 들면, 섬유질 재료의 섬유 치수, 섬유 치수 분포, 섬유 형상, 재료 1단위당 섬유량, 총의 두께 등)는 대부분의 음향 모델이 기초하는 재료의 거시적 성질에 수학적으로 관계시킬 수 있다. 이하에 사용된 바와 같이, 거시적 성질(예를 들면, 벌크 밀도, 유동 저항율, 다공율, 비틀림, 체적 탄성율, 체적 전단 탄성 계수 등)이라는 용어는 대량 형태의 재료를 설명하는 동시에 미세구조 파라미터에 의해 정의 한 균질한 다공질 재료의 특성을 포함한다. 균질한 다공질 재료의 음향 특성은 거시적 성질에 기초하여 결정된다. 그러나, 거시적 성질에 수학적으로 관계시킬 수 있는 미세 구조 파라미터를 입력할 일이 없고, 거시적 성질에 의해 음향 특성의 예측이 가능하지만, 음향 특성의 제어부의 제조 수준은 이용할 수 없다.

미세 구조 파라미터의 특정 세트가 일반적으로 상기한 바와 같이 프로그램(30)의 음향 특성 예측 부분을 이용하여 예측하고 요구한, 즉 목표로 정한 음향 특성으로 종결되지 않으면, 프로그램(30)에 의해 사용자는 최적화 루틴을 실행하여 요구된 음향 특성으로 종결될 미세 구조 파라미터 세트를 결정할 수 있다. 프로그램(30)의 최적화 루틴에 의해, 최상으로 설계된 재료에 대한 음향 특성의 출력과 이러한 예측을 결정하는 데 이용된 재료의 미세 구조 파라미터 사이에서, 루프를 닫을 수 있다. 최적화에서, 소정의 특성을 달성하기 위해서 한 세트의 미세 구조 파라미터를 결정할 수 있다. 다시 말하면, 재료에 대한 음향 특성을 예측하기 위한 예측 루틴은 하나 이상의 특정한 음향 특성에 대해서 하나 이상의 미세 구조 파라미터를 위해 정의된 특정한 범위에서 실행되어, 예측된 음향 특성 값을 특정하게 정의된 범위에 걸쳐 생성될 수 있도록 한다. 그 다음에, 사용자는 이러한 값의 디스플레이를 최적의 파라미터를 얻기 위해 이용될 수 있고, 최적값을 결정하기 위해 결과값을 검색함으로써 최적값을 생성할 수 있고, 또 최적값을 얻을 수 있을 때에, 위의 범위를 통해서 실행되는 폐루프의 그 이후의 수치 계산을 정지하는 것이 가능하다.

최적화 프로세스의 동작 동안에, 음향 특성은 최초에 사용자가 정의하지 않으면 안된다. 소정의 음향 특성을 달성할 목적으로 균질한 다공질 재료를 최적화하기 위해, 소정의 음향 특성(예를 들면, 성능 측정값)을 달성하는 것 같이, 사용자가 최적인 제조상의 미세구조 파라미터를 결정할 수 있게, 수치 최적화 프로세스는 1개 이상의 재료 제조상의 미세구조 파라미터의 정의된 범위에서 음향 특성을 예측하기 위해 사용된다. 예상되는 바와 같이, 최적화 프로세스는 제조 프로세스에 있어서 실제의 한계를 예상하는 것 같이 강제로 제한해야 한다. 예를 들면, 균질한 섬유질 재료를 처리할 때, 제조 프로세스의 한계를 나타내는 재료의 벌크 밀도에 제약을 부과할 필요가 있을지도 모른다. 최적화 프로세스에 의해 제조 프로세스의 실제의 제약을 충족시키면서 균질한 재료의 최적화 설계는 가능해진다.

또한, 전술한 메인 프로그램(20)은 음향 시스템의 음향 특성의 예측 및/또는 음향 시스템의 다수 구성 요소의 구성을 최적화하기 위해서, 음향 예측 및 최적화 프로그램(80)을 포함한다. 예를 들면, 최상으로 설계될 수 있는 균질한 다공질 재료는 다른 재료를 부과할 때 또는 충상 처리와 같은 구조, 즉 음향 시스템 내에 적용시 일반적으로 이용된다. 대체로, 음향 시스템은 음향 목적으로 당업자가 사용하는 임의의 재료(예를 들면, 저항성 스크립, 불투과성 막, 단단한 판넬 등)을 포함할 수 있고, 또 정의된 공간(예를 들면, 틈)을 포함하는 것이 가능하다. 다공질 재료, 투과성 또는 불투과성의 장벽 및 공간을 포함하지만 그것들에 한정되지 않는 음향 시스템으로, 임의의 수의 재료 및 정의 공간의 층을 쉽게 이용할 수 있다. 또, 음향 시스템을 위하여 구성 요소의 임의의 형상 예를 들면, 만곡 및/또는 구조가 본 발명에 따라 고려되고, 또 음향 시스템의 하나 이상의 구성 요소는 큰 음향 시스템, 예를 들면 방, 차량 등의 안에 위치한 음향 시스템의 구성 요소일 수 있다. 임의의 다수 구성 요소의 음향 시스템의 설계가 본 발명에 따라 고려될 수 있다. 예를 들면, 다공질 재료가 충전된 자동차 도어는 2

중 판넬 음향 시스템으로 처리될 수 있고, 자동차 헤드 라이너의 뒤에 부착된 흡음 재료는 다층 구성 요소의 음향 시스템의 다른 용도이다. 또, 예를 들면 이러한 음향 시스템은 자동차, 비행기 동체, 주택, 공장 등의 잡음 저감에 이용될 수 있고, 다른 위치에 설치될 때 이미 설치된 음향 시스템의 음향 특성은 변화될 수 있다.

음향 시스템의 음향 특성은 음향 시스템의 균질한 다공질의 구성 요소 및 음향 시스템 내에서 음향 시스템(예를 들면, 하나 이상의 다공질 재료층, 하나 이상의 투과성 또는 불투과성 장벽, 하나 이상의 공간 또는 다른 구성 요소로 이루어지는 시스템 및 추가적으로 한정된 크기, 깊이 및 만곡을 갖는 음향 시스템)을 규정하는 경계 조건과 기하학상의 제약과 함께 사용되는 다른 구성 요소(예를 들면, 공간)를 조합하는 것에 의해 예측된다. 고려 중인 음향 시스템의 형상, 예를 들면 층상 시스템의 형상에 따르고, 음향 시스템의 음향 특성은 예를 들면, 유한 또는 경계 요소법과 같은 종래의 파동 전파 기술 또는 수치 기술을 이용하여 예측될 수 있다.

일반적으로, 1개의 매체의 경계면에서, 1개의 매체의 압력 영역이 알려지면, 경계에 교차한 힘의 평형과 속도 연속성에 근거하여 제1 매체의 압력과 입자 속도를 얻을 수 있다 인식에 기초해서, 본 발명에 따른 음향 시스템의 음향 특성이 결정된다. 음향 시스템의 구성 요소는 2개의 경계를 갖고 있고, 적어도 한 방향의 경계는 음향 시스템의 다른 구성 요소와 계면에 형성된다. 2개의 압력 영역 사이의 관계 및 경계에 교차하는 속도는 행렬 형식으로 쓸 수 있다. 매체에 교차하는 압력과 입자 속도에 관해서도 전달 행렬을 얻을 수 있다. 각 구성 요소, 예를 들면 구성 요소의 경계에서의 음향 상태(즉 경계의 압력 영역과 속도에 근거하는 음향 상태)사이의 관계를 규정하는 층의 전달 행렬을 얻은 후에, 다층의 구성 요소의 음향 시스템의 모든 전달 행렬을 승산함으로써 함께 전달 행렬을 얻을 수 있다. 이후에, 이 함께 전달 행렬은 예를 들면, 다층 구성 요소의 음향 시스템의 표면 임피던스, 흡음율 및 투과 계수와 같은 음향 특성을 결정하는 데 이용된다.

더욱, 상기 음향 시스템 예측 및 최적화 프로그램(80)의 최적 루틴에 의해 사용자는 예를 들면, 상기 음향 시스템에 사용되는 섬유질 재료의 섬유 직경, 재료층의 두께 등과 같은 음향 시스템의 하나 이상의 구성 요소의 미세구조 파라미터의 최적값을 찾을 수 있다. 또, 음향 시스템의 하나 이상의 구성 요소의 거시적 성질, 예를 들면 저항 요소의 저항율, 장벽 요소의 단위 면적당 질량, 저항 요소의 단위 면적당 질량, 층의 두께 등과 같은 거시적 성질에 대해 결정될 수 있다. 또, 음향 시스템의 시스템 구성 파라미터 즉, 상기 음향 시스템의 층의 위치, 층의 수, 층의 순서 등과 같은 제조 프로세스에서 제어할 수 있는 음향 시스템(시스템의 구성 요소와 반대로)의 물리적 파라미터에 대해서 결정될 수 있다. 일반적으로, 최적화는 균질한 재료 최적화 프로그램(30)에 대해서 상술한 음향 특성(예를 들면, 음향 성능 측정값)과 같은 최적화가 실행되어야 할 음향 특성을 규정하는 단계를 포함한다. 이후, 루프는 상기 음향 시스템의 음향 특성의 결정과 음향 시스템 구성 요소의 하나 이상의 미세 구조 파라미터, 상기 음향 시스템의 구성 요소의 하나 이상의 거시적 성질 또는 상기 음향 시스템의 하나 이상의 시스템 구성 파라미터에 대해 정의된 입력 범위 또는 세트 값 사이로 근접된다. 루프는 정의된 범위 또는 세트 값에 대해 상기 음향 시스템의 결정을 제공한다. 균질한 다공질 재료의 최적화로 설명된 바와 같이, 이후 음향 특성의 디스플레이는 사용자에 의해 최상의 파라미터를 얻는 데 이용될 수 있고, 최상의 값은 최상의 값을 결정하기 위해 결과치를 검색함으로써 생성되거나 또는, 최상의 값이 얻어질 때 범위 또는 세트 값을 통해 실행되는 폐쇄 루프의 그 이상의 수치 계산을 멈추는 것이 가능하다.

당업자에 공지된 바와 같이, 설계 프로세스는 균질한 재료 및/또는 음향 시스템 설계의 최종 단계에서 물리적 실험을 통해, 즉 최적 재료의 원형 또는 시스템이 제조된 후에 확인할 수 있다. 또, 개량 이론 모델 및 보다 정확하고 포괄적인 실험 데이터를 이용할 수 있기 때문에, 미세 구조 파라미터를 재료 및/또는 음향 시스템의 음향 특성에 관계시키는 방법을 제공하는 다양한 이론적인 수식, 경험/반경험적인 수식이 끊임없이 개선되는 것을 인식할 것이다. 여기에 설명한 바와 같이 이러한 결합을 형성하는 다양한 기본식이 전개가능하지만, 본원에 기술된 전체적인 프로세스는 고정되고, 근원적인 관계식의 이러한 장래의 변화를 고려하고 있는 것이 용이하게 이해할 수 있다.

메인 프로그램(20)의 일 실시에에서, 균질한 다공질 재료의 설계시 이용되는 음향 예측 및 최적화 프로그램(30)은 도 3에 도시된 바와 같은 균질한 재료 예측 및 최적화 프로그램(31)에 의해 제공된다. 균질한 다공질 재료 예측 및 최적화 프로그램(31)은 재료의 미세구조 파라미터를 그 재료의 격리시 음향 특성과 결함으로써 균질한 다공질 재료에 대한 음향 특성을 예측하기 위한 예측 루틴(32)을 포함한다. 명백히 설명된 바와 같이, 이러한 방법으로 상술한 음향 특성을 갖는 균질한 다공질 재료를 생성하는 예측 가능한 방법으로 제조 프로세스를 조정하는 것이 가능하다.

도 4는 균질한 다공질 재료의 음향 특성을 예측하기 위한 예측 루틴(32)을 상세히 도시한 블록도이다. 예측 루틴(32)은 균질한 다공질 재료의 거시적 성질을 결정하기 위한 거시적 성질 결정 루틴(23)을 포함하고, 이 거시적 성질은 미세구조 파라미터 입력(22)의 함수로서, 즉 균질한 다공질 재료의 제어 가능한 제조 파라미터 사이의 프로세스와 재료의 거시적 성질의 결합을 포함한다. 또, 상기 예측 루틴(32)은 균질한 다공질 재료의 음향 특성(25) 결정을 위한 재료 모델(24)을 포함한다. 여기서, 미세 구조 입력(22), 거시적 성질 결정 루틴(23), 재료 모델(24) 및 음향 특성(25)의 세부가 설계될 재료의 형식에 따라서 변화되는 것이 당업자에게는 명확하다.

예측 프로세스(32)의 일반적인 실시예는 사용자가 음향 특성 예측 및 메인 프로그램(20)을 포함하는 최적화 시스템(10 : 2)을 인터페이스하는 방법으로 설명될 것이다. 메인 프로그램(20)을 초기화 하자마자 초기 화면에 의해 사용자는 특정한 균질한 다공질 재료 또는 음향 시스템의 설계를 선택할 수 있다. 사용자가 음향 시스템의 작업을 선택하면, 사용자에게는 이하에 추가로 설명되는 프로그램(81)과 같은 음향 시스템 예측 및 최적화 프로그램(80)의 이용에 대한 옵션이 제공된다. 사용자가 특정한 균질한 다공질 재료로 작업할 것을 선택하면, 이후 제2 화면에 의해 사용자는 균질한 다공질 재료의 미세 구조 파라미터 제조를 가지고 작업할 것을 원하는지, 사용자가 특정한 균질한 다공질 재료의 요구된 음향 특성, 즉 균질한 재료의 최적화에 대한 미세 구조 파라미터 세트를 결정하기를 원하는지 또는 사용자가 균질한 다공질 재료의 사용자 지정 거시적 성질 세트에 대한 어떤 음향 특성을 계산하기를 원하는지를 선택할 수 있다.

사용자가 균질한 다공질 재료의 사용자 지정 거시적 성질 세트에 대한 어떤 음향 특성을 계산하기를 선택하면, 사용자는 이러한 거시적 성질을 입력한 후 상기 음향 특성(25)을 초래하는 재료 모델(24)의 하나를 이용하여 지정된 재료의 음향 특성을 계산한다. 예를 들면, 이하에 설명된 바와 같이, 재료 모델(24)은 강성, 탄성 또는 연한 프레임 다공질 재료 모델일 수 있다. 추가로 또는 거시적 성질의 입력 외에 사용자는 결정될 음향 특성의 선택을 시도할 수 있다. 그 다음에, 이러한 계산된 정보 또는 데이터는 어떤 형태, 예를 들면 당업자에게 명확한 표 또는 그래프 형태로 사용자에게 제공된다.

사용자가 특정한 균질한 다공질 재료의 요구된 음향 특성에 대해서 한 세트의 미세구조 파라미터의 결정, 재료의 최적화를 선택하면, 이하 상세히 설명되는 루틴(34)과 같은 균질한 재료 예측 및 최적화 프로그램(31)의 최적화 루틴의 사용 옵션이 사용자에게 제공된다.

사용자가 균질한 다공질 재료의 제조상의 미세 구조 파라미터의 작업을 선택하면, 균질한 재료 예측 및 최적화 프로그램(31)의 예측 루틴(32)에 의해, 제조상의 미세 구조 파라미터 제조에 근거하는 균질한 다공질 재료의 음향 특성의 예측에 관해서 더욱 다른 선택이 사용자에게 주어진다. 재료의 제조상의 미세 구조 파라미터 제조의 작업을 선택하면, 시스템(10)에 의해 사용자는 음향 특성을 계산하기 위해서 다양한 다공질 재료 모델(24) 중의 하나를 선택한다. 도 4에 도시된 바와 같이, 재료 모델(24)은 거시적 성질 결정 루틴(23)을 따라 생성된 거시적 성질에 기초하여 음향 특성을 예측하기 위해서, 임의의 다공질 재료 모델을 포함할 수 있다. 이러한 재료 모델(24)은 이하 상세히 설명되는 도 5의 실시예의 모델과 같이, 연한 다공질 모델, 강성 프레임 모델 및 다공질 재료와 함께 사용하는 탄성 프레임 모델을 포함할 수 있다. 사용될 다공질 재료 모델(24)을 선택하면, 시스템(10)은 사용자가 선택하는 재료 모델(24)을 이용하여 음향 특성(25)을 계산하는 데 필요한 거시적 성질을 결정하기 위해서 거시적 결정 루틴(23)에 필요한 미세 구조 파라미터 제조를 제공하도록 한다.

다공질 재료의 음향 특성(25)은 다른 용도에 관한 것이고, 많은 방법으로 정량화될 수 있으며, 당업자에게 알려진 모든 음향 특성은 본 발명에 따라 결정할 수 있다. 잡음 관련 용도에서, 특히 음향 특성(25)은 일반적으로 2개의 카테고리로 나뉘어 진다. 즉, 흡음 재료의 능력에 관한 음향 특성 및 음파 전달을 차단하는 재료의 능력에 관한 음향 특성이다. 보통, 음파 흡수 처리는 음파 원인이 존재하는 내부 음향 조건을 개선시키기 위해 이용되고, 음파 차단 처리는 대부분 음성이 1개의 공간에서 다른 공간으로의 음파 전달을 방지하기 위해서 대부분 사용된다. 예를 들면, 도 5에 도시된 바와 같은 재료 모델(24 : 즉, 강성, 탄성 및 연성)은 도 5에 도시된 최소한의 음향 특성[50 : 즉, 특정 음향 임피던스(Z), 반사 계수(R), 흡음율(a), 랜덤 입사 음향 투과 손실(TL)]을 결정할 수 있다.

일반적으로, 흡음율(a)에 관해서, 음향파가 두 개의 다른 매질을 부딪칠 때, 입사파의 일부는 반사해서 입사 매질에 되돌아오고, 그 나머지의 파는 제2 매질로 전달된다. 상기 제2 매질의 흡음율(a)는 제2 매질에 의해 흡수되는 입사하는 음향 전력의 분수로서 정의된다. 특정 주파수에서 상기 흡음율 및 입사각은  $1 - |R|^2$ 으로 계산될 수 있다. 상기 압력 반사 계수(R)는 복잡한 양으로서 입사 음향 압력에 대한 반사 음향 압력의 비로 정의된다. 상기 재료의 표준화된 정상 표면 임피던스(Zn)은 공지되어 있고, 상기 흡음율(a)는 반사 계수(R)에 대한 다음의 수학식 12를 적용함으로써 결정될 수 있다.

### 수학식 12

$$R = \frac{Z_n \cos \theta - 1}{Z_n \cos \theta + 1}$$

여기서, Zn은 표준화된 정상의 특수 음향 임피던스, 즉  $Zn/\rho_0 c_0$ 이며,  $c_0$ 는 공기에서 음성의 속도이다.

수학식 12에서, 상기 반사 계수( $R$ )는 입사각의 함수이다. 따라서, 상기 흡음율( $\alpha$ )도 입사각의 함수이며, 양쪽 양은 주파수의 함수이다.

투과 손실(TL)에 대해, 상기 재료의 양측의 매질이 동일한 일반적인 경우일 때, 상기 투과 손실(TL)은  $10\log(1/\bar{\tau})$ 이다. 상기 전력 전달 계수( $\tau$ )는 한 매질로부터 다른 매질로 전달되는 음향 전력으로 정의되고, 입사각 및 주파수의 함수이고,  $|T|^2$ 과 동일하며,  $T$ 는 평면파 압력 전달 계수이다. 랜덤한 입사 음성 전달을 추정하기 위해 상기 전력 전달 계수( $\tau$ )는 모든 가능한 입사각에 대한 평균할 필요가 있다. Pierce, A.D., Acoustics, An Introduction to its Physical Principle 및 Applications의 흡수 관계에 설명된 바와 같이. Paris formula에 따라 New York: McGrae-Hill(1981), Shiu in Shiu(1991)은 평균 출력 투과 계수를 수학식 13에 의해 추정될 수 있음을 보여주었다.

### 수학식 13

$$\bar{\tau} = \int_0^{\Theta_{lim}} \tau(\theta) \sin\theta \cos\theta d\theta$$

여기서,  $\Theta_{lim}$ 은 Mulholl 및 K.A, Parbrook, H.D 및 cummings, A.의 "The Transmission Loss of Double Panels," Journal of Sound 및 Vibration, 6, pp.324-334(1967)에 정의된 한계각이다.

음향 특성(25)을 결정하도록 재료 모델(24)을 적용하기 위해, 거시적 결정 루틴(23)에 의해 결정된 재료의 거시적 성질은 이하 추가로 설명되는 바와 같이 알려질 필요가 있다. 예를 들면, 균질한 다공질 재료에 대해서, 연성 모델, 강성 모델 또는 탄성 모델과 같은 재료 모델(24)을 이용할 경우, 음향 특성을 결정하기 위해서, 벌크 밀도, 손실 계수, 비틀림, 다공율 및 유동 저항율을 포함하는 하나 이상의 특성을 알 필요가 있다. 특히, 유동 저항율은 섬유질 재료의 음향 특성 결정시 중요하며, 미세 구조 파라미터와 음향 특성 사이의 관계를 제공한다.

재료 모델(24)은 강성 프레임 모델을 포함할 수 있다. 이러한 강성 프레임 모델은 거시적 성질 결정 루틴(23)에 의해 결정되는 거시적 성질과 같은 거시적 성질에 의해 정의된 재료의 음향 특성(25)을 결정하는 데 이용 가능한 어떤 강성 프레임 모델을 포함할 수 있다. 다양한 강성 모델에 대해서는 본 출원의 발명의 배경 부분에 설명하고 있어, 이를 강성 모델 및 다른 어떤 이용 가능한 강성 모델을 본 발명에 따라 이용하는 것이 가능하다. 프레임의 체적 탄성율이 공기보다 약 10배 이상 크면, 또 상기 프레임이 전동 표면에 부착됨으로써 직접 여기되지 않는다면 강성로서 처리될 수 있다. 규화 금속 또는 공기가 채워진 다공질 암석과 같은 강성 프레임 다공질 재료에서는, 오직 하나의 압축파만 다공질 재료 내의 액상을 통해 전달될 수 있고, 재료가 풍매 여기되기 쉬울 때, 어떠한 구조 원형파도 프레임을 통해 전파할 수 없다. 강성 다공질 재료의 음향 거동을 제어하는 거시적 성질에는 뒤틀림, 유동 저항율, 다공율 및 성형 요인이 포함된다.

하나의 강성 프레임은 Zwikker 및 Kosten(1949)의 연구에 근거하고 있다. 강성 모델의 전개는 다공질 재료의 원통 구멍 내의 음향 압력 및 공기 속도를 고려함으로써 개시된다. 통상적인 고다공질 음향 재료에 대해, 0.98의 값은 다공율( $\beta$ )에 대해 가정될 수 있고, 1.2는 비틀림( $\alpha_{\infty}$ )에 대해 취해질 수 있고(주파수로서 다이나믹 비틀림은 무한대에 근접한다),  $1.4 \times 10^5$ 를 공기 체적 탄성율( $\gamma P_0$ )에 대해서, 0.71을 Prandtl에 가정할 수 있다. 다공질 재료의 구멍은 완전한 원통으로 단순화되고, 따라서 형상 계수( $c$ )는 1과 동일하다. 다른 값이 고려되는 특정 재료에 대해 적합하게 목록된 파라미터를 이용할 수 있고, 본 발명은 어떤 특정한 값으로 한정되지 않는다.

모든 가정된 파라미터 및 유동 저항율( $\rho$ )과 함께 강성 모델은 등가 유체로서의 강성 다공질 재료에 대해서, 수학식 15로 도시된 합성 체적 탄성율( $K$ )과 수학식 14에 도시된 합성 실효 밀도( $\rho$ )로 설명된다(양쪽의 수량은 주파수의 함수이다). [이 모델에 대한 추가적인 설명은 Allard(1993)에서 발견된다.]

### 수학식 14

$$\rho = \alpha_{\infty} \rho_0 \left[ 1 + \frac{\sigma \phi}{j \omega \rho_0 \alpha_{\infty}} G_c(s) \right]$$

### 수학식 15

$$K = \rho P_0 / \left[ \gamma - (\gamma - 1) \left[ 1 + \frac{\sigma \phi}{jB^2 \omega \rho_0 c_\infty} G(Bs) \right]^{-1} \right]$$

여기서,  $G_c(s) = -\frac{s\sqrt{-j}J_1(s\sqrt{-j})}{4J_0(s\sqrt{-j})} / \left[ 1 - \frac{2J_1(s\sqrt{-j})}{s\sqrt{-j}J_0(s\sqrt{-j})} \right]$

$$s = \left( \frac{8\omega \alpha_\infty \rho_0}{\phi \sigma} \right)^{1/2}$$

그리고, 또  $\rho_o$ 은 포화 유체의 주위 밀도이다.

대단히 딱딱한 이판 표면 상에 장착된 강성 다공질 재료의 표면 임피던스( $Z$ )는 법선 입사파를 나타냈고, 재료내에서 이동하는 음향파의 파동수는 아래의 수학식 16에 도시된 벌크 밀도 및 실효 밀도에서 얻어질 수 있다.

### 수학식 16

$$Z = -J \frac{Z_c}{\phi} \cot(kd)$$

여기서,  $k = \omega(\rho/K)^{1/2}$

$Z_c = (K\rho)^{1/2}$  는 상기 강성 다공질 재료의 특성 임피던스이고,  $d$ 는 다공질 재료층의 두께이다.

당업자는 이 식을 쉽게 비법선 입사의 경우로 일반화할 수 있다.

상기 강성 다공질 재료의 법선 입사 반사 계수( $R$ ), 흡음율( $a$ ) 및 전달 계수( $T$ )는 아래의 수학식 17, 18 및 19를 이용하여 얻어질 수 있다.

### 수학식 17

$$R = \frac{Z_n - \rho_0 c_0}{Z_n + \rho_0 c_0}$$

### 수학식 18

$$a = 1 - |R|^2$$

### 수학식 19

$$T = \frac{2e^{j\frac{\omega}{c_o} d}}{2\cos(kd) + j\sin(kd) \left( \frac{c_o}{k} \frac{\rho}{\rho_o} + \frac{k}{\omega} \frac{\rho_o}{\rho} \right)}$$

이들 식들은 법선 입사의 경우에 적용 가능하지만, 비법선 입사에 대해서도 당업자에 의해 동등한 식이 도출될 수 있다. 또, 본 발명은 강성 모델에 의해 한정되지 않는다.

상기 다공질 재료 모델(24)은 탄성 프레임 모델을 포함할 수 있다. 상기 탄성 프레임 모델은 거시적 성질 결정 루틴(23)에 의해 결정되는 것과 같은 거시적 성질에 의해 정의되는 재료에 대한 음향 특성(25)을 결정하기 위해서 이용 가능한 임의의 탄성 프레임 모델을 포함할 수 있다. 다양한 탄성 모델에 대해서는 본원의 발명의 배경 부분에 설명되었거나 또는 발명 부분의 배경에서 언급되었고, 이들 각 탄성 모델 및 다른 이용 가능한 탄성 모델은 본 발명에 따라 이용될 수 있다.

다공질 재료의 프레임은 프레임 체적 탄성을이 공기 체적 탄성을과 비교 가능하다면 탄성으로서 고려될 수 있다. 폴리우레탄 발포제와 같은 균질한 등방성 탄성 다공질 재료에서는, 액상과 고상 모두를 통해 전파될 수 있는 파동에는 총 3가지 타입, 즉 2개의 소밀파(구조 전송파와 공기 전송파) 및 하나의 회전파(구조 전송만)가 있다. 탄성 다공질 재료의 음향 거동을 제어하는 거시적 성질은 진공내에서 벌크 영율, 체적 전단 탄성 계수, 포이슨(Poisson)의 비, 다공율, 비틀림, 순실 계수 및 유동 저항율을 포함한다. 또한, 이방성 탄성 다공질 재료 모델도 개발할 수 있고, 이 경우, 그 수치를 모르면 안되는 거시적 구조의 성질의 목록은, Kang,Y.J.의 "Studies of Sound Absorption by 및 Transmission Through Layers of Elastic Noise Control Foams: Finite Element Modeling 및 Effects of Anisotropy" Ph.D.Thesis, School of Mechanical Engineering, Purdue university(1974)에 기재되어 있는 것 같이, 보다 광범위하다.

균질한 다공질 재료의 음향 특성을 결정하기 위한 탄성 모델의 일실시예는 Shau(1991), Bolton, Shau 및 Kang(1996) 및 Allard(1993)의 연구에 근거하고 있다. 이러한 탄성 모델의 전개는 Biot의 이론(1956B)을 이용하는 다공질 재료의 고상 및 액상의 압력-변형 관계로 개시되고, 또 이러한 전개는 Shau(1991), Bolton, Shau 및 Kang(1996) 및 Allard(1993)에 의한 연구와 통합되며, 이것이 반사 계수 및 전달 계수를 결정하기 위한 계산 결과를 초래하고, 이들 계수로부터 다른 음향 특성을 결정할 수 있다. 이러한 전개에서, 다공질 재료의 고상내에 2개의 소밀파의 파동수를 얻기 위해서 4차 방정식을 풀어야 하며, 또한 회전파의 수도 얻어진다. 모든 파동수를 얻은 후, 경계 조건을 적용해서 음향 압력 영역 파라미터를 푸는 것에 의해, 반사 계수와 투과 계수를 결정할 수 있다. 전술한 연구에 개시된 탄성 모델의 전개 부분은 이하에서 보여지고 연한 모델에서 이용된다.

참고적으로 개시되고 포함된 강성 및 탄성 모델은 많은 다공질 재료에 대한 음향 특성 결정시 이용하는 데도 적합하지만, 이 강성 및 탄성 다공질 모델은 연한 섬유질 재료(예를 들면, 그 프레임이 구조 전송파를 지지하지 않고, 그 벌크 프레임이 외력에 의해 또는 틈유체와의 관성 또는 점성 결합에 의해 이동될 수 있는 섬유질 재료)의 음향 특성을 적절히 예측하지 못하는 데, 그 이유는 상기 연한 섬유질 재료의 프레임이 강성나 탄성이 아니기 때문이다. 강성 다공질 재료 모델은 탄성 다공질 재료 모델보다 간단하고 더 수치적으로 견고하지만, 외부 인가력 또는 내부 결합력에 의해 유발되는 프레임 운동을 예측할 수 없다. 어떤 탄성 다공질 재료 모델에서, 체적 탄성을에는 연한 프레임 특성을 고려하기 위해 제로로 설정될 수 있지만, 상기 탄성의 제로 체적 탄성을 4차 방정식의 특이점 때문에 수치상의 불안정성을 일으킨다. 따라서, 재료 모델의 연한 프레임 모델은 연한 섬유질 재료의 음향 거동을 예측하는 데 이용된다.

이하 설명되는 재료 모델(24) 중의 하나인 연한 프레임 모델은 연한 섬유질 재료의 특수한 특성을 고려한 탄성 다공질 재료 이론의 변형이다. 연한 프레임 모델[예를 들면, 모델(42)]에 도달했을 때, Biot(1956B)에 의해 개발된 바와 같이 탄성 다공질 재료내 파동 전달을 예측하기 위해서 가장 일반적 모델이 이용된다. 이 모델의 전개는 다공질 탄성 고체의 압력-변형 관계 및 격리된 유체로부터 출발한다. 이러한 관계는 수학식 20, 21, 22 및 23에 나타난다.

### 수학식 20

$$\sigma_i = 2Ne_i + Ae_s + Q\varepsilon, \quad i = x, y, z$$

### 수학식 21

$$\tau_{ij} = \tau_{ji} = N\eta_{ij}, \quad i, j = x, y, z$$

**수학식 22**  
 $s = Qe_s + R\varepsilon$

**수학식 23**  
 $e_s = e_x + e_y + e_z$

또,  $s$  및  $\tau$ 는 각각 고상의 법선 응력과 전단 응력이며,  $\varepsilon$ 은 유체 압력에 반비례하는 액상의 법선 응력이다. 부호 규약은 도 8a 및 도 8b에 정의된다. 상기  $e_s$  및  $e_i$ 는 각각 고상과 액상의 변형이다. 계수(A)는 Lame 상수 [ $vK_s/(1+v)(1-2v)$ ]와 동일]이고,  $v$ 는 포이스ون의 비이고  $K_s$ 는 다공질 재료에서 탄성 고체의 영 퍼플을이며, 상기 계수( $N : K_s/2(1+v)$ 로 정의)는 탄성 다공질 재료의 전단 탄성 계수를 나타낸다. 상기 계수(Q)는 고체의 체적 변화와 유체의 체적 변화 사이의 결합 계수이다. 이 계수(R)는 총 체적을 일정하게 하면서 일정한 체적에서 액상을 머무르게 하는데 필요한 압력값이다.

구멍 내의 고상과 액상에 관한 운동식이 각각 다음의 수학식 24 및 25로 주어진다.

**수학식 24**  

$$\frac{\partial \sigma_{x_i}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{y_i}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{z_i}}{\partial z} = \rho_1 \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} + \rho_2 (q^2 - 1) \frac{\partial^2}{\partial t^2} (u_i - U_i) + b \frac{\partial}{\partial t} (u_i - U_i), \quad i = x, y, z$$

**수학식 25**  

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \rho_2 \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} + \rho_2 (q^2 - 1) \frac{\partial^2}{\partial t^2} (U_i - u_i) + b \frac{\partial}{\partial t} (U_i - u_i), \quad i = x, y, z$$

여기서,  $\sigma_{ii} = \sigma_i$ ,  $\sigma_{ij} = \tau_{ij}$ ,  $q^2$ 는 비틀림,  $u_i$  및  $U_i$ 는  $i$ 방향에서 고상 및 액상의 변위,  $\rho_1$ 은 고상의 밸크 밀도,  $\rho_2$ 는 액상(이하에 정의)의 밀도이다. 2개의 수학식의 우측 마지막 부분은 고상 및 액상의 상대 속도에 비례하는 점성 결합력이고,  $b$ 는 점성 결합 계수이다.

압력-변형 관계 및 역학적인 수학식으로부터 파동 전달을 제어하는 2개의 세트의 다른 식이 얻어질 수 있다. Biot의 다공질 탄성 모델은 탄성 다공질 재료에서 이동하는 2개의 소밀파 및 1개의 회전파를 예측하였다. 탄성 다공질 재료의 탄성 계수는 프레임 체적 탄성을, 고상과 액상의 체적 탄성을 및 다공질에 의해 표현된다. 상기 A, N, Q는 Biot의 Gassmann 계수라 지칭된다. Biot의 이론에서, 상기 탄성 다공질 재료은 이들 4가지 계수 및 특성 주파수에 의해 설명된다. P를 A+2와 동일하게 정의하여 P, Q 및 R로 탄성 다공질 재료의 물리적 특성을 설명할 수 있다. 이들 3가지 탄성 계수는 이하의 수학식 26, 27 및 28에 의해 주어진 다공질 및 측정가능한 계수  $\gamma$ ,  $\mu$ ,  $\delta$  및  $k$ (Biot, 1957)에 의해 표현된다.

**수학식 26**  

$$P = \frac{\frac{\gamma}{k} + f^2 + (1-2f)\left(1 - \frac{\delta}{k}\right)}{\gamma + \delta - \frac{\delta^2}{k}} + \frac{4}{3} \mu$$

## 수학식 27

$$\mathcal{Q} = \frac{\left(1 - f - \frac{\delta}{k}\right)}{\gamma + \delta - \frac{\delta^2}{k}}$$

## 수학식 28

$$R = \frac{f^2}{\gamma + \delta - \frac{\delta^2}{k}}$$

여기서,  $f$ 는 다공율(이 연구에서  $\emptyset$ 로 정의),  $k$ 는 일정한 유압에서 재킷(jacket) 압축률,  $\delta$ 는 유체 압력이 완전히 가는 구멍에 관통하고 있는 덮여져 있지 않은 압축률이며,  $\gamma$ 은 구멍내의 유체가 덮여져 있지 않은 압축률,  $\mu$ 는 다공질 재료의 전단탄성 계수이다.

Allard(1993)에 기술되어 있는 미세 균질성의 전제에 근거하여, 아래의 수학식 29, 30 및 31에 나타낸 바와 같이, 3개의 계수 및 다공율, 즉  $K_f$ ,  $K_s$ ,  $K_b$  및  $\emptyset$ 에 관해서도 탄성 계수를 나타낼 수 있다.

## 수학식 29

$$P = \frac{(1-\phi)\left[1 - \phi - \frac{K_b}{K_s}\right]K_s + \phi \frac{K_s}{K_f} K_b}{1 - \phi - \frac{K_b}{K_s} + \phi \frac{K_s}{K_f}} + \frac{4}{3} N$$

## 수학식 30

$$\mathcal{Q} = \frac{\left[1 - \phi - \frac{K_b}{K_s}\right]\phi K_s}{1 - \phi - \frac{K_b}{K_s} + \phi \frac{K_s}{K_f}}$$

## 수학식 31

$$R = \frac{\phi^2 K_s}{1 - \phi - \frac{K_b}{K_s} + \phi \frac{K_s}{K_f}}$$

여기서,  $\emptyset$ 는 재료의 다공율,  $K_b$ 는 유체내 일정한 압력에서 다공질 재료 프레임의 체적 탄성율 [ $2N(v+1)/3(1-2v)$ 로 정의],  $K_f$ 는 다공질 재료의 구멍 내의 유체의 탄성 체적 탄성율이다.

연한 프레임을 갖는 다공질 재료에 대해, 프레임 체적 탄성율은 공기 압축률과 비교하여 중요하지는 않다. 따라서, 상기 체적 탄성율( $K_b$ )과 전단 탄성 계수( $N$ )는 제로와 동일하고, 탄성 계수는 아래의 수학식 32, 33 및 34에 나타낸 바와 같이 정의된다.

## 수학식 32

$$P = \frac{(1-\phi)^2 K_s}{1-\phi + \phi \frac{K_s}{K_f}}$$

## 수학식 33

$$Q = \frac{(1-\phi)\phi K_s}{1-\phi + \phi \frac{K_s}{K_f}}$$

## 수학식 34

$$R = \frac{\phi^2 K_s}{1-\phi + \phi \frac{K_s}{K_f}}$$

연한 섬유질 재료에 관한 이들 탄성 계수의 식을 더욱 수정하기 위해서, 고상( $K_s$ )을 포함하는 재료의 강성은 유체상( $K_f$ )의 강성보다 크며 거의 무한대에 가깝다. 즉 섬유의 구성 요소는 다공질 재료내의 틈유체와 비교하여 비압축성이라고 가정한다. 이 가정은 아래의 수학식 35, 36 및 37과 같은 P, Q, R의 최종 식을 산출한다.

## 수학식 35

$$P = \frac{(1-\phi)^2}{\phi} K_f$$

## 수학식 36

$$Q = (1-\phi)K_f$$

## 수학식 37

$$R = \phi K_f$$

상기 탄성 계수가 결정되면, 상기 연한 섬유질 재료의 파동 방정식은 결정될 수 있다.

Biot의 이론에 기초하면, 2개의 소밀파 및 회전파의 파동 수가 아래의 수학식 38 및 39로 각각 표현된다.

## 수학식 38

$$k_{1,2}^2 = \frac{A_1 \pm \sqrt{A_1^2 - 4A_2}}{2}$$

## 수학식 39

$$k_t^2 = (\omega^2/N)(\rho_{11}^{**} - \rho_{12}^{**2} / \rho_{22}^{**})$$

$$\text{여기서, } A_1 = \omega^2 (\rho_{11}^* R - 2\rho_{12}^* Q + \rho_{22}^* P) / (PR - Q^2)$$

$$A_2 = \omega^4 (\rho_{11}^* \rho_{12}^* - \rho_{12}^{*2}) / (PR - Q^2)$$

$$\text{여기서, } \rho_{11}^* = \rho_1 + \rho_a + b/j\omega$$

$$\rho_{12}^* = -\rho_a - b/j\omega$$

$$\rho_{22}^* = \rho_2 + \rho_a + b/j\omega$$

$$\rho_a = \rho_2 (q^2 - 1)$$

이미 지적한 바와 같이,  $\rho_1, \rho_2$ 는 각각 고상 및 액상의 밀도로서,  $\rho_1$ 는 측정값을 나타내는 섬유질의 고상의 벌크 밀도이고,  $\rho_2$ 는 수학식 15로 나타낸 바와 같이 유동 저항율을 함수로서 결정되는 유체상의 합성 밀도이며,  $\rho_a$ 는 고상과 액상 간의 결합을 나타낸다. 연한 다공질 재료에 대해 유도된 탄성 계수로부터  $PR - Q^2 = 0$ 의 조건하에 풀 필요가 있고, 상기 압력-변형 관계는 수학식 38의 특이점에 이른다. 따라서, Biot의 이론의 압력-변형 관계는  $PR - Q^2 = 0$ 의 조건하에 풀 필요가 있고, 상기 압력-변형 관계는 수학식 40에 나타낸 바와 같이 얻어진다.

#### 수학식 40

$$(2\rho_{12}^* Q - \rho_{22}^* P - \rho_{11}^* R) \nabla^2 \varepsilon + \omega^2 (\rho_{12}^{*2} - \rho_{11}^* \rho_{22}^*) \varepsilon = 0$$

수학식 40은 수학식 41로 나타낸 과동수를 갖는 단일 압축파의 존재를 포함하는 Helmholtz식이다.

#### 수학식 41

$$k_p^2 = \frac{\omega^2 (\rho_{12}^* - \rho_{11}^* \rho_{22}^*)}{(2\rho_{12}^* Q - \rho_{22}^* P - \rho_{11}^* R)}$$

또, 상기 과동 방정식을 해결함으로써 고체 체적 측정 변형과 유체 체적 측정 변형 간의 관계가 수학식 42와 같이 얻어졌다.

#### 수학식 42

$$\epsilon_s = \frac{(\rho_{12}^* Q - \rho_{22}^* P)}{(\rho_{12}^* P - \rho_{11}^* Q)} \varepsilon = \frac{(\rho_{12}^* R - \rho_{22}^* Q)}{(\rho_{12}^* Q - \rho_{11}^* R)} \varepsilon \stackrel{\Delta}{=} \frac{1}{\alpha} \varepsilon$$

여기서,  $\stackrel{\Delta}{=}$ 는 정의된 것을 나타낸다.

$K_b$  및  $N$ 이 제로와 동일하다는 가정하에, Biot의 다공질 탄성 모델에 근거해 예측하여 연한 다공질 재료를 이동하는 과동이 2개의 압축파 및 1개의 회전파로부터 단일 압축파로 감소된다.

상기 연한 섬유질 재료의 치수가 파장보다 클 때, 그 층은 무한히 큰 것으로 추정될 수 있고, 또 문제를 2차원 형식에 의해, 즉, 단단히 받쳐진 다공질 재료의 층을 때리는 비스듬한 입사파를 나타내는 도 9a의 x-y평면으로 표현될 수 있다. 또, 고조파 시간 종속( $e^{j\omega t}$ )은 모든 영역 변수에 대해 가정되었고, 또 전개 전체에 걸쳐 생략되었다. 연한 섬유질 재료의 유한한 깊이에서, 고상 및 액상의 변형파는 아래의 수학식 43 및 44에 의해 각각 표현될 수 있다.

### 수학식 43

$$e_s = (C_1 e^{-jk_{px} x - jk_y y} + C_2 e^{jk_{px} x - jk_y y})$$

### 수학식 44

$$\varepsilon = \alpha (C_1 e^{-ik_{px} x - ik_y y} + C_2 e^{ik_{px} x - ik_y y})$$

여기서,  $c$ 는 음성의 주위 속도,  $k=\omega/c_0$ ,  $k_y=ksin\Theta$ ,  $k_{px}=(k_p^2-k_y^2)^{1/2}$ ,  $\omega$ 는 라디안 주파수이며,  $\Theta$ 는 입사각이다.  $\varepsilon = \nabla \cdot \bar{U}$ ,  $e_s = \nabla \cdot \bar{u}$  및  $\nabla \times \bar{U} = \nabla \times \bar{u} = 0$ 의 관계를 적용함으로써, x 및 y 방향에서 고상 및 액상의 치환이 아래의 수학식 45, 46, 47, 48로 나타내어진다.

### 수학식 45

$$u_x = \frac{jk_{px}}{k_p^2} (C_1 e^{-jk_{px} x - jk_y y} - C_2 e^{jk_{px} x - jk_y y})$$

### 수학식 46

$$u_y = \frac{jk_y}{k_p^2} (C_1 e^{-jk_{px} x - jk_y y} + C_2 e^{jk_{px} x - jk_y y})$$

### 수학식 47

$$U_x = \alpha \frac{jk_{px}}{k_p^2} (C_1 e^{-jk_{px} x - jk_y y} - C_2 e^{jk_{px} x - jk_y y})$$

### 수학식 48

$$U_y = \alpha \frac{jk_y}{k_p^2} (C_1 e^{-jk_{px} x - jk_y y} + C_2 e^{jk_{px} x - jk_y y})$$

상기 고상 및 액상의 체적 측정 변형을 수학식 20 및 22로 대입함으로써, 상기 고상 및 액상의 압력은 아래의 수학식 49 및 50으로 표현될 있다.

### 수학식 49

$$\sigma_y = Pe_s + Q\varepsilon = (P + aQ)(C_1 e^{-jk_{px} x - jk_y y} + C_2 e^{jk_{px} x - jk_y y})$$

### 수학식 50

$$S = R\varepsilon + Qe_s = (Ra+Q)(C_1 e^{-jk_p x-jk_y y} + C_2 e^{jk_p x-jk_y y})$$

음향 임피던스, 흡음율 및 투과 손실같은 연한 섬유질 재료의 음향 특성은 각 경계에 적당한 경계 조건을 적용함으로써 도출된 연한 모델에 근거하여 예측될 수 있다.

예를 들면, 단단한 벽에 의한 깊이  $d$  및 뒷판을 갖는 연한 섬유질 재료층의 표면 임피던스는 평면 음성파가 입사각  $\theta_1$ (도 9a)를 갖는 재료의 표면을 향하여 이동하는 중에 표면 음향 압력 및 법선 입자 속도의 비를 계산함으로써 얻어질 수 있다. 섬유질 재료의 표면( $x=0$ )의 경계 조건은  $-\partial P_i / \partial n = s$  및  $-(1 - \phi)P_i = \sigma_x$ 이며, 재료의 끝( $x=d$ )의 경계 조건은  $u_x = 0$  및  $U_x = 0$ 이다.

고상 및 액상의 응력과 장력을 전술한 바와 같이 나타내고, 단위 진폭을 갖는 입사파는 수학식 51과 같이 표현된다.

### 수학식 51

$$P_i = e^{j(\omega t - k_x x - k_y y)} + R e^{j(\omega t - k_x x + k_y y)}$$

상기 입자 속도는 수학식 52와 같이 표현될 수 있다.

### 수학식 52

$$V_i = \frac{\cos \theta_1}{\rho_0 c_0} C e^{j(\omega t - k_x x - k_y y)} - R e^{j(\omega t - k_x x + k_y y)}$$

상기 섬유질 재료의 법선의 특성 임피던스는 수학식 53과 같은 정의될 수 있다.

### 수학식 53

$$Z_n = \frac{1}{\rho_0 c_0} \left( \frac{P_i}{V_i} \right)_{x=0}$$

$P_i = -s/\phi$  및  $V_i = j\omega(1-\phi)u_x + j\omega\phi U_x$ 를 푸는 것에 의해, 연한 다공질 재료의 표면 임피던스는 이전의 연한 모델식과 같은 유동 저항율을 함수로서 아래의 수학식 54와 같이 표현된다.

### 수학식 54

$$Z_n = -j \frac{(Ra+Q)k_p \cot(k_p d)}{\rho_0 c_0 \phi (1 - \phi + \phi \alpha)}$$

단단한 벽에 의해 지지된 상기 연한 다공질 재료의 반사 계수( $R$ )는 표면 임피던스에 대해 전술한 바와 같이 경계 조건에 가정된 해를 대입함으로써 얻어질 수 있으며, 아래의 수학식 55와 같이  $Z_n$ 에 의해 표현될 수 있다.

**수학식 55**

$$R = \frac{Z \cos\theta_1 - \rho_0 c_0}{Z \cos\theta_1 + \rho_0 c_0}, or = \frac{Z_n \cos\theta_1 - 1}{Z_n \cos\theta_1 + 1}$$

상기 흡음율(a)는 수학식 56에 의해 얻어질 수 있다.

**수학식 56**

$$\alpha = 1 - |R|^2$$

전달측의 압력 영역  $P_t$  및  $x$  구성 요소의 입자 속도인  $U_{tx}$ 는 비스듬한 입사파가 다공질 재료의 한 층에 부딪치면서 그에너지의 일부는 반사되고 나머지는 재료를 통해 전달된다. 이것은 도 9b를 참조하여 아래의 수학식 57 및 58로 표현될 수 있다.

**수학식 57**

$$P_t = T e^{j(\omega t - k_x x - k_y y)}$$

**수학식 58**

$$U_x = \frac{\cos\theta_1}{\rho_0 c_0} T e^{j(\omega t - k_x x - k_y y)}$$

이 추정되는 해는  $x=0$ 에서 동일한 경계 조건 및  $x=d$ 에서 새로운 경계 조건 즉,  $P_p=P_t$  및  $U_{px}=U_{tx}$ 를 만족할 필요가 있다. 이 추정된 해를 4개의 경계 조건에 대입하고 이들을 행렬 형태로 다시 고침으로서 수학식 59가 산출된다.

**수학식 59**

$$\begin{bmatrix} 1+R \\ \frac{\cos\theta_1}{\rho_0 c_0} (1-R) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T e^{-jk_x d} \\ \frac{\cos\theta_1}{\rho_0 c_0} T e^{-jk_x d} \end{bmatrix}$$

전달 행렬의 요소에 의한 압력 전달 계수( $T$ )는 수학식 60과 같이 표현된다.

**수학식 60**

$$T = \frac{2e^{-jk_x d}}{T_{11} + \frac{\cos\theta_1}{\rho_0 c_0} T_{12} + \frac{\rho_0 c_0}{\cos\theta_1} T_{12} + T_{22}}$$

최종적으로, 랜덤한 투과 손실은 이미 설명한 Paris 공식(수학식 13)에 근거하는 모든 입사각에 대해 출력 투과 계수인  $|T(\Theta)|^2$ 를 평균함으로써 얻어질 수 있다. 상기 투과 손실(TL)은  $10\log(1/\tau)$ 이다.

일반적으로, 전술한 연한 섬유질 모델에 관해서, 프레임 탄성율을 무시할 수 있다고 하는 전제로, 연한 모델에 의해 탄성 모델의 2개의 역학 방정식(4차 방정식 및 2차 방정식)은 1개 뿐인 압축파를 제공하는 단일 2차 방정식을 감소시킨다. 유동 저항율의 입력에 의해, 음향 특성은 전술한 바와 같은 연한 모델을 이용하여 계산할 수 있다. 그러나, 본 발명에 따라 미세 구조 입력에 접속되는 유동 저항율을 이용한 어떤 연한 모델도 본 발명의 이용이 고려된다.

도 4에 도시된 바와 같이, 음향 특성(250을 계산하기 위해 재료 모델(24)을 이용하기 전에, 거시적 성질이 거시적 결정 루틴(27)을 이용하여 결정되어야 한다. 재료 즉, 연한 중합체의 섬유질 재료의 음향 특성을 제어하는 거시적 성질을 식별 함으로써, 다공질 재료의 음향 특성보다 나은 예측을 제공하는 모델을 적용하 할 수 있다.

전술한 바와 같이, 다공질 재료 이론에서 음향 거동은 일반적으로 유동 저항율, 다공율, 비틀림 및 형상 계수에 의해 결정된다. 예를 들면, 섬유질 재료에 대해서는, 비틀림과 형상 계수의 편차는 밸포제 재료의 편차와 같이 크다. 또, 근접 셀 밸포제 또는 부분적으로 망상의 밸포제와 다르고, 섬유질 재료의 다공율은 섬유질 재료의 벌크 밀도와 섬유 밀도에 의해 직접 얻어질 수 있다. 따라서, 일단 섬유질 재료의 유동 저항율이 결정되면, 전술한 바와 같은 연한 다공질 재료는 재료의 음향 특성을 예측하는 데 이용될 수 있다.

다공질 재료의 제조는 미세 구조 파라미터, 예를 들면 섬유질 재료의 파라미터에 의해 제어되는 데, 이러한 파라미터는 섬유 치수, 섬유 밀도, 중량비 및 섬유 구조의 형식 등을 포함하는 것이 가능하다. 따라서, 거시적 결정 루틴(23)을 사용해서 유동 저항율을 결정하는 프로세스는 상기 음향 특성(25)을 제조 프로세스에서 제어될 수 있도록 미세 구조 파라미터에 의해 표현된 유동 저항율 모델이 바람직하다. 특히, 유동 저항율이 섬유질 재료의 음향 거동을 조절하기 때문에, 미세 구조 파라미터에 의해 표현되는 유동 저항율 모델이 특히 섬유질 재료, 예를 들면 연한 섬유질 재료의 음향 특성(25) 결정 시 중요하다. 여기서, 특정한 유동 저항율 모델이 이하에 표현되지만, 다공질 재료의 유동 저항율을 결정하는 데 이용할 수 있는 임의의 유동 저항율 모델도 이용될 수 있다. 다양한 유동 저항율 모델을 본 출원의 발명의 배경 부분으로 설명했지만, 이들 유동 저항율 모델 및 다른 유동 저항율 모델이 본 발명에 따라 이용 가능하며, 이 미세 구조 파라미터를 예측해야 할 음향 특성에 관계시키는 것이 가능하다.

1개의 특정한 유동 저항율 모델은 섬유질 재료의 음향 특성에 대한 미세 구조 파라미터의 영향으로부터 유도된 반경험적 모델을 포함한다. 본 발명의 배경에 설명된 바와 같이, Darcy의 법칙은 유량과 압력차 사이의 유동 저항율 관계를 제시한다.

본 출원에 기술한 유동 저항율 모델은 제조 프로세스로 제어될 수 있는 미세 구조 파라미터에 근거하고, 특히 섬유질 재료에 관한 유동 저항율( $\phi$ )을 예측한다. 섬유질 재료에 대해서, 유동 저항율은 도 5를 참조하여 설명된 바와 같이, 다양한 미세 구조 파라미터, 예를 들면 섬유 직경에 의해 결정된다. 이하 추가적으로 설명된 유동 저항율 모델이 유동 저항율 모델은 특히 연한 다공질의 섬유질 재료에 관계하고, 이 경우 연한 섬유질 재료는 2개의 섬유 구성 요소로부터 구성되지만, 다른 섬유질 재료에 관한 유동 저항율 모델 또는 그 파생 모델이 임의의 수의 섬유 구성 요소를 갖는 재료를 포함하여 본원의 설명으로부터 명백해질 것이다.

2개의 섬유 구성 요소의 연한 섬유질 재료에 대해서, 상기 연한 재료는 폴리프로필렌 같은 제1 중합체로부터 만들어진 주요 섬유 구성 요소 및 폴리에스테르 같은 제2 중합체로부터 만들어진 제2 섬유 구성 요소를 포함할 수 있다. 다양한 섬유 형태가 이용될 수 있고, 본 발명은 어떤 특정한 섬유에 한정되지 않는다. 각 섬유 샘플은 다음의 파라미터, 즉 상기 제1 섬유 구성 요소의 반경  $r_1$  및 밀도  $P_1$ , 상기 제2 섬유 구성 요소의 반경  $r_2$  및 밀도  $P_2$ , 제2 구성 요소 x의 중량비, 기초 무게  $W_b$  및 상기 섬유질 재료의 두께 d에 의해 특정될 수 있다. 그러나, 양쪽 섬유질 구성 요소의 직경은 모든 재료에 걸쳐 균일하지 않고, 섬유 치수의 범위는 분산될 가능성성이 높다. 정확한 직경의 섬유질을 사용하는 대신, 유효 섬유 직경(EFD)이 사용된다. 아래의 유동 저항율 모델은 이들 재료 파라미터에 기초하여 확립된다.

Darcy의 법칙을 고려하면, 상기 섬유 재료의 유동 저항율은 단위 체적당 섬유 표면적과 재료의 섬유 반경에 의해 결정된다. 또, 하나 이상의 섬유 구성 요소를 포함하는 낮은 고체성의 섬유질 재료의 유동 저항율은 각 구성 요소에 의해 기여된 개별적인 유동 저항율의 합이다. i번째 구성 요소의 단위 체적당 표면적은 아래의 수학식 61로 표현될 수 있다.

### 수학식 61

$$S_{vi} = P_i 2\pi r_i l_i$$

여기서,  $P_i$ 는 단위 체적당 섬유질의 수,  $l_i$ 는 단위 체적당 섬유질의 길이 및  $r_i$ 는  $i$ 번째 섬유질 형태의 반경이다. 각 구성 요소의 별크 밀도인  $\rho_{bi}$ 는 수학식 62와 같이 표현될 수 있다.

### 수학식 62

$$\rho_{bi} = P_i l_i \rho_i \pi r_i^2$$

여기서,  $\rho_i$ 은  $i$ 번째 섬유질 재료의 밀도이다. 상기 별크 밀도가 공지된다면, 수학식 62가 수학식 63과 같이  $P_i l_i$ 를 결정하는 데 이용될 수 있다.

### 수학식 63

$$P_i l_i = \frac{1}{\pi r_i^2} \frac{\rho_{bi}}{\rho_i}$$

수학식 63을  $S_{vi}$ 에 대해 수학식 61에 대입하면 수학식 64가 얻어진다.

### 수학식 64

$$S_{vi} = \frac{2}{r_i} \frac{\rho_{bi}}{\rho_i}$$

$n$  섬유질 구성을 포함하는 상기 섬유질 재료의 단위 체적당 총 섬유질 표면적은 수학식 65로 표현될 수 있다.

### 수학식 65

$$S_v = \sum_{i=1}^n S_{vi} = \sum_{i=1}^n p_i 2\pi r_i l_i = \sum_{i=1}^n \frac{2\rho_{bi}}{r_i \rho_i}$$

따라서, 각 구성 요소의 공현을 의미하는 이 파라미터는 다수의 섬유질 구성을 재료의 유동 저항율을 특징화하는 데 이용될 수 있다.

각 구성 요소의 유동 저항율을 단위 재료 체적당 섬유질 표면적과, 각 구성 요소 섬유질의 섬유질 반경에 의해 표현될 수 있다는 가정에 근거하여,  $i$ 번째 섬유질 구성을 요소으로부터 얻을 수 있는 유동 저항율을 수학식 66과 같이 정의할 수 있다.

### 수학식 66

$$\sigma_i = A \frac{S_{vi}''}{r_i'''}$$

여기서,  $A$ 는 상수,  $n$  및  $m$ 은 경험적으로 결정될 수 있다. 수학식 64를 수학식 66에 대입하고, 변수들을 재배열하면, 단일 구성 요소으로 이루어지는 섬유질 재료의 유동 저항율은 수학식 67과 같이 표현될 수 있다.

### 수학식 67

$$\sigma_i = A \left( \frac{2}{r_i} \frac{\rho_{bi}}{\rho_i} \right)^n \frac{1}{r_i^m} = A 2^n \left( \frac{\rho_{bi}}{\rho_i} \right)^n \frac{1}{r_i^{m+n}} = \frac{B}{r_i^{m+n}} \left( \frac{\rho_{bi}}{\rho_i} \right)^n$$

여기서,  $B=2^n A$ 이며, 실험 데이터로부터 결정될 상수로 처리될 수 있다. 섬유질 재료가 2개의 구성 요소으로 구성될 때, 2개의 구성 요소 혼합에 대한 총 유동 저항율은 수학식 68과 같이 표현될 수 있다.

### 수학식 68

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = B \left[ \frac{1}{r_1^{n+m}} \left( \frac{\rho_{b1}}{\rho_1} \right)^n + \frac{1}{r_2^{n+m}} \left( \frac{\rho_{b2}}{\rho_2} \right)^n \right]$$

이후, 수학식 68은 재료 제조 프로세스에서 제어 가능한 미세 구조 파라미터에 의해 표현될 수 있다. 제2 재료가 총 밀도에 기여하는 비율은 수학식 69와 같이 정의된다.

### 수학식 69

$$\chi = \frac{\rho_{b2}}{\rho_b}$$

실제적인 관점으로부터,  $\rho_b$  및  $\chi$ 에 의한  $(\rho_{b1}/\rho_1)$  및  $(\rho_{b2}/\rho_2)$ 를 아는 것이 유용하며, 이들 2개의 양은 수학식 70 및 71과 같이 정의된다.

### 수학식 70

$$\frac{\rho_{bi}}{\rho_i} = (1-\chi) \frac{\rho_b}{\rho_i}$$

### 수학식 71

$$\frac{\rho_{b2}}{\rho_2} = \chi \frac{\rho_b}{\rho_2}$$

따라서, 상기 2개의 구성 요소 혼합체의 유동 저항율은 수학식 72와 같이 표현될 수 있다.

### 수학식 72

$$\sigma = B \rho_b^n \left[ \frac{(1-\chi)^n}{\rho_1^n r_1^{n+m}} + \frac{\chi^n}{\rho_2^n r_2^{n+m}} \right]$$

수학식 72는 측정 데이터와 가장 잘 맞는 값을 찾는 것에 의해 결정할 수 있는 3개의 파라미터  $B$ ,  $m$  및  $n$ 을 포함한다. 예를 들면, 3개의 섬유질 재료는 이들 3개의 상수를 인식하기 위해서 측정 중에 이용될 수 있다. 다른 반경  $r_1$ 을 갖는 단 한 가지 형태의 섬유질을 포함하는 3개의 섬유질 재료에 대해, 제2 섬유질의 중량은 3개의 섬유질 샘플 각각에 대해 제로이다. 단일 섬유질 구성 요소를 이용함으로서, 수학식 72는 수학식 73으로 단순화되어 표현될 수 있다.

### 수학식 73

$$mlogr_1 = \log\left[\frac{B}{\sigma}\left(\frac{\rho_b}{\rho_1 r_1}\right)^n\right]$$

여기서, m의 값은 3개의 섬유질에 대해서 3개의 데이터 세트의 최적인 생략을 달성하고, 또 0.64인 것이 발견된다. 한편, 상수 n은 수학식 74에 표현된 바와 같이 수학식 72의 대수 형태의 기울기로부터 결정될 수 있다.

### 수학식 74

$$\log\sigma = \log B + n \log \rho_b + \log\left[\frac{1}{\rho_1 r_1^{n+m}}\right]$$

m이 0.64와 동일하게 설정되어 n은 1.61로 결정되었고, 또 절편 B는 3개의 섬유의 모든 데이터 세트에 적합한 선의 기울기와 절편으로부터  $10^{-5.7}$ 로 결정되었다. 2개의 섬유 구성 요소의 섬유질 재료의 유동 저항율을 계산하는 데 이용될 수 있는 최종 식은 수학식 75와 같이 표현된다.

### 수학식 75

$$\sigma = 10^{-5.7} \rho_b^{1.61} \left[ \frac{(1-\gamma)^{1.61}}{\rho_1^{1.61} r_1^{2.25}} + \frac{\gamma^{1.61}}{\rho_2^{1.61} r_2^{2.25}} \right]$$

상기 최종적인 반경형식은 섬유질 재료의 유동 저항율이 제조 프로세스에서 제어 가능한 파라미터에 의해 표현될 수 있도록 한다.

유동 저항율을 결정하기 위한 루틴을 포함하는 거시적 성질 결정 루틴(23)외에, 다른 거시적 성질은 당업자에 공지된 이러한 성질의 값을 계산하기 위한 루틴을 갖고 있다. 예를 들면, 다공질( $\emptyset$ )은 확장된 다공질 재료의 벌크 밀도( $\rho_o$ )에 의해 표현될 수 있고, 확장된 재료로부터 재료의 밀도( $\rho_i$ )가 형성된다(즉,  $\phi = 1 - \rho_b / \rho_o$ ). 예를 들면, 섬유질 재료의 다공율은 통상적으로 1보다 조금 작고(예를 들면, 0.98), 비틀림은 대략 1보다 조금 크다(예를 들면, 1.2).

이 설례는 전술한 다공질 모델(42)이 적용한 균질한 다공질의 2개의 섬유질 구성 요소의 섬유질 재료의 음향 특성을 예측하기 위해서, 본 발명의 실시예가 실증적으로 이용되는 것을 제공한다. 이 설례는 도 1 및 도 5를 참조하여 설명될 것이며, 도 5는 2개의 섬유 구성 요소의 균질한 다공질 섬유 재료의 음향 특성을 예측하기 위한 메인 프로그램(20)의 예측 루틴의 실시예이다. 이후의 루틴은 2가지 형식의 섬유 구성 요소의 섬유질 재료의 설계에 관해서 설명하지만, 첨부된 청구 범위에 의해 정의된 일반적인 개념은 다른 재료뿐만 아니라, 상세한 설명으로부터 당업자에게 명백한 바와 같이 다양한 다른 단일 재료 및 다수 섬유질 재료에 적용할 수 있게, 다른 재료의 설계에 대한 프로그램 루틴의 일반적은 흐름은 거의 유사하다.

메인 프로그램을 시작할 때, 사용자는 균질한 재료의 설계를 선택하는 명령을 선택하고, 다음에 2개의 섬유 구성 요소의 섬유질 재료의 제조 제어 작업을 선택한다. 여기서, 고려되는 연한 중합체 섬유질 재료는 2개의 다른 섬유질로 구성되고, 하나는 폴리프로필렌으로 만들어지고, 다른 다양한 재료를 사용할 수 있다. 전자의 섬유질 구성 요소는 재료의 주요 구성 요소가 되는 Blown Micro 섬유질이고, 후자의 섬유질 구성 요소는 매우 큰 섬유질 직경을 갖는 스테이플(staple) 섬유질이며 큰 두께를 제공한다. 섬유질 재료의 음향 특성은 이들 2개의 섬유 구성 요소의 파라미터 세트 및 이들의 무게비에 의해 결정된다. 연한 섬유질 재료의 두께는 변동할 가능성이 있기 때문에, 재료의 기초 무게(즉, 단위 면적당 질량)는 벌크 밀도보다 매우 자주 이용된다.

또, 실제 재료에 포함되는 섬유질이 균질한 직경을 갖지 않기 때문에, 유효 섬유질 직경(EFD, 유동 저항율 측정을 통해 계산되는 평균값)이 음향 모델에 이용된다. 미국 특허 제 5,298,694 호에 개시된 바와 같이, ASTM F 778.88 테스트 방법에 개설된 바와 같이 웹의 주요 면을 관통하고, 또 재료의 웹의 양단의 압력 저하를 측정함으로써, EFD를 추정할 수 있다. 또, EFD는 섬유질 직경이 Davies, C.N.의 "The Separation of Airborne Dust 및 Particles" Institution of Mechanical Engineers, London, Proceedings 1B(1952)에 따라서 계산되는 것을 의미한다. 공기 유동 저항율은 샘플을 통과하는 공기 유동율에 대해 테스트 샘플 양단의 압력차의 비로 정의되며, 상기 공기 유동 저항율은 샘플 두께에 의해 표준화된 유동

저항율이다. 재료의 총 체적에 대한 비율이라고 규정되는 섬유질 재료이 다공율은, 샘플의 측정 가능한 섬유 밀도와 벌크 밀도로부터 계산할 수 있다, 비틀림은 다공질 재료를 통과하는 공기 입자의 노정의 직선 거리에 대한 비율이라고 규정된다. 섬유질 재료에 대해서, 비틀림은 전형적으로 1보다 조금 크고, 예를 들면 통상적인 섬유질 재료에서는 1.2이다.

재료의 미세구조 파라미터의 작업을 선택한 후, 사용자는 음향 특성(50)을 예측하는 데 이용되는 재료 모델(42), 즉 강성 재료 모델(44), 탄성 재료 모델(46) 및 연한 재료 모델(42)을 선택하게 된다. 이러한 섬유질 재료와 함께 사용하기 위해서 연한 모델이 명확히 결정되는 것을 사용자는 인식함으로, 사용자는 연한 모델을 선택한다.

연한 모델(42)을 선택하게 되면, 시스템(10)에 의해 사용자는 거시적 결정 루틴(37)이 거시적 성질, 즉 유동 저항율( $\sigma$ ), 벌크 밀도( $\rho$ ) 및 다공율( $\phi$ )을 결정하는 데 필요한 중요한 미세 구조 파라미터를 입력한다. 이러한 미세 구조 파라미터는 BMF 섬유 EFD( $\mu$ ), 스테이플 섬유 직경(데니어 : denier), 스테이플 섬유의 중량비(%), 재료의 두께(cm), 기초 무게(gm/m<sup>2</sup>), BMF 섬유의 밀도(kg/m<sup>3</sup>) 및 스테이플 섬유질의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)를 포함한다. 정확한 정보가 입력되는지를 확인한 후, 시스템(10)은 사용자에게 성능 측정을 포함하는 다양한 음향 특성(50) 중의 하나를 선택하도록 한다. 이러한 음향 특성(50)은 범선 흡음율( $a$ ), 반사 계수( $R$ ), 블록(48)에 도시된 바와 같은 특정 음향 임피던스( $Z$ ), 블록(51)에 도시된 바와 같은 범선 투과 손실(TL)의 그룹을 포함하거나 또는 랜덤 투과 손실, 랜덤 흡음율, 임의 입사 흡수 및 임의 입사 전달과 같은 다른 음향 특성을 포함할 수 있다. 또, 상기 음향 특성은 블록(52)에 도시된 바와 같은 잡음 저감 계수(NRC) 같은 성능 기준에 의해 정의되거나 또는 회화 방행 수준(SIL)과 같은 다른 성능 기준을 포함할 수 있다.

사용자가 탄성 모델(46)을 선택한 경우, 미세 구조 파라미터 세트가 입력될 수 있고, 또한 블록(39)에 도시된 바와 같은 프레임 체적 탄성( $E_1$ )의 거시적 성질이 입력될 수 있다는 것은 도 5로부터 알 수 있다. 이 탄성 입력(39)(이것은 프로그램으로 계산한 거시적 성질과 대조적인 입력에 반대되는 거시적 성질이다)은 다른 미세 구조 입력(36)과 함께 탄성 모델을 이용하여 음향 특성(50)을 계산하는 것이 요구된다.

$BMF\text{ }섬유질\text{ }EFD = x1(\mu)$  및 예를 들면, 스테이플 섬유질 직경=6데니어, 스테이플 섬유의 중량비=35%, 재료의 두께=3.5cm, 기초 무게=400gm/m<sup>2</sup>, BMF 섬유 밀도=910kg/m<sup>3</sup>, 스테이플 섬유의 밀도=1380kg/m<sup>3</sup>를 포함하는 미세구조 파라미터와, 결정해야 할 음향 특성으로서 선택된 범선 흡음율에 의해, 음향 시스템은 사용자에게 유동 저항율= 6.1785e+003, 다공율= 0.9893, 벌크 밀도= 11.4286 및 100.00Hz에서 6300.00Hz의 주파수 범위에 걸쳐 범선 흡음율이 0.01에서 0.93 까지 변동하는 응답을 제공한다. 도 16에는 이러한 흡음율 결정을 나타내는 그래프가 도시된다. 잡음 저감 계수(NRC)는 주파수 범위에 걸쳐 결정되는 범선 흡음율에 기초하여 결정될 수 있으며, NRC=0.4143이다. 이를 값은 위에서 전개한 연한 모델 및 위로 전개한 유동 저항율 모델의 식을 이용한 계산을 통해 결정된다.

전술한 바와 같이, 사용자가 소정의 특정 재료의 음향 특성, 즉 특정 재료의 최적화에 대한 미세 구조 파라미터 세트 결정을 선택하면(예를 들면, 상기 예측 루틴을 이용해서 예측되는 재료의 음향 특성이 사용자가 바라는 특성을 만족시키지 못하는 경우), 사용자에게는 이하에 설명되는 프로그램(34)같은 균질한 재료 예측 및 최적화 프로그램(30)의 최적화 루틴을 사용하는 선택이 주어진다.

도 6에는 균질한 다공질 재료의 소정의 음향 특성을 위한 미세 구조 파라미터의 최적의 세트를 결정하기 위해 최적화 루틴(34 : 도 3)이 상세한 블록도로 도시된다.

최적화 루틴(34)은 일반적으로 미세 구조 파라미터 입력(26)을 함수로 하여 설계된 균질한 다공질 재료의 거시적 성질 결정 및 상기 균질한 다공질 재료에 대한 음향 특성(28) 결정을 위한 거시적 성질 결정 루틴 및 재료 모델 루틴(27)을 포함한다. 예를 들면, 루틴(27)은 도 5의 거시적 결정 루틴(37) 및 재료 모델(40)을 포함할 수 있다. 루틴(27)은 음향 특성에 대해 재료의 미세 구조 파라미터의 접속을 제공한다. 미세 구조 파라미터를 제조하는 특정 입력 재료에 근거한 음향 특성 값, 예를 들면 어떤 주파수 범위에 대하여 평균화된 음향 특성 같은 성능 기준이 계산될 수 있다.

최적화 루틴(34)은 최적으로 설계된 재료에 대한 음향 특성의 생성 및 재료의 미세 구조 파라미터(26) 간의 폐쇄 루프(21)를 포함하여, 미세 구조 파라미터의 최적 세트가 특정 음향 특성(28), 예를 들면 어떤 주파수 범위에 걸쳐 평균화된 흡음율(NRC) 또는 어떤 주파수 범위에 걸쳐 평균화된 랜덤 입사 투과 손실(SIL)을 결정할 수 있도록 한다. 폐쇄 루프는 하나 이상의 미세 구조 파라미터에 대해 특정된 범위를 넘어 음향 특성값의 반복적인 프로세스를 제공한다. 전술한 바와 같이, 소정 음향 특성을 얻도록 재료를 최적화하기 위해서, 수치적인 최적화 프로세스는 소정 음향 특성값이 얻어지는 방법으로 파라미터를 제조하는 재료를 조정하는 데 이용된다.

예상되는 것 같이, 최적화 프로세스는 제조 프로세스에서 실제의 한계를 억제해야 한다. 최적화 프로세스에 의해 제조 프로세스의 실제의 제약을 충족시키면서 균질한 재료의 최적의 설계가 달성된다. 최적 루틴의 결과, 예를 들면, 하나 이상의 미세구조 파라미터의 하나 이상의 범위에 대한 음향 특성값은 다음에 디스플레이, 예를 들면 2차원 플롯 또는 3차원 플롯 또는 표 형태로, 이하에 나타낸 바와 같이, 디스플레이 요소(29)에 의해 사용자에게 제공된다.

상기 미세 구조 입력(26), 상기 거시적 성질 결정 루틴 및 재료 모델(27), 음향 특성(28) 및 디스플레이 요소(29)의 상세는 설계될 재료의 형태에 따라서 바뀌는 것이 당업자에게는 명백하다. 이하, 최적화 루틴은 2개의 섬유질 구성 요소의 섬유질 재료의 설계에 대해 설명되겠지만, 다른 재료의 설계를 위한 프로그램 루틴의 일반적인 흐름이 거의 유사하여 첨부된 청구범위에 의해 정의되는 바와 같이 일반적인 개념은 상세한 설명으로부터 당업자에게는 명백하듯이, 다른 다공질 재료뿐만 아니라 다른 다양한 단일 및 다스의 섬유질 재료에 적용 가능하다.

상기 미세 구조 입력(26), 상기 거시적 성질 결정 루틴 및 재료 모델(27), 음향 특성(28) 및 디스플레이 요소(29)를 포함하는 최적화 루틴(34)에 관한 세부 사항은, 도 7을 참조하여 본 실시예에 설명될 것이다. 최적화 프로세스(34)의 실시예는 사용자가 메인 프로그램(20)을 포함하는 음향 특성 예측 및 최적화 시스템(10 : 도 2)와 인터페이스하는 방법으로 설명될 것이다.

사용자가 소정의 재료 음향 특성에 대한 미세 구조 파라미터 세트, 즉 특정 재료의 최적화를 결정하는 것을 선택하면, 도 7의 블록도에 도시된 프로그램 같은 균질한 재료 예측 및 최적화 프로그램(30)의 최적화 루틴의 이용에 대한 선택이 사용자에게 주어진다. 재료의 미세 구조 파라미터를 제조하는 최적화된 세트를 결정하는 것이 선택되면, 시스템(10)에 의해 사용자는 루틴(56)의 다양한 재료 모델 중의 하나를 이용할 것인지를 선택하도록 한다. 이 루틴(56)의 재료 모델은 예측 루틴(도 5 참조)의 예를 참조하여 설명된 것과 같은 재료를 이용하기 위하여 연한 프레임 모델(42), 강성 프레임 모델(44) 및 탄성 프레임 모델(46)을 포함할 수 있다.

이용될 재료 모델이 선택되면, 시스템(10)에 의해 사용자는 루틴(56)의 선택된 재료 모델을 이용하여 음향 성능 기준(60)을 계산하는 데 필요한 거시적 성질을 결정하기 위하여 거시적 결정 루틴에 필요한 미세 구조 특성 제조를 제공하도록 한다. 또한, 사용자에게는 특정된 증가 단계에 대한 음향 특성 계산을 통하여 루틴을 진행시키는 데 이용하기 위해서 최소 및 최대 범위내의 증가 단계를 따라 최소 및 최대값을 입력하도록 한다. 루프(58)는 예를 들면, 흡음율, 잡음 저감 계수 등과 같이 최적으로 설계되는 재료에 대한 음향 특성(60)과 재료의 미세 구조 파라미터(54) 사이의 폐쇄에 의해 미세 구조 파라미터(54)가 계산된 음향 특성값을 이용하여 최적화될 수 있도록 한다.

섬유질 재료는 많은 잡음 저감 용도로 유용하며, 많은 경우, 이러한 섬유 재료에는 중량 제한, 공간 제약 등과 같은 사용상의 제한이 있다. 경제적인 관점에서, 각 특정 용도의 필요 조건에 근거해서 섬유질 재료의 최적인 음향 특성을 달성하는 것이 중요하다. 일반적으로, 섬유질 재료의 음향 특성은 각 구성 요소의 섬유 밀도, 직경, 형상, 중량비 및 섬유 구조와 같은 섬유질 파라미터에 의해 결정된다.

그러나, 상기 섬유 밀도, 섬유 형상 및 섬유 구조는 재료의 어떤 형식으로 만들어진 섬유질 재료에 대해 고정될 것이며, 특정한 제조 프로세스에 의해 생성될 것이다. 따라서, 전술한 바와 같이, 섬유질 재료의 음향 성능 최적화는 예를 들면, 섬유질 직경, 각 구성 요소의 중량비 등과 같은 미세 구조 파라미터를 제어함으로써 처리될 수 있다.

도 7을 참조하여 설명된 실시예는 예를 들면, 폴리프로필렌 및 폴리에스테르로 만들어진 섬유질 재료와 같은 2개의 섬유질 구성 요소로 구성된 섬유질 재료의 명확한 실례가 된다. 거기에는 최적 음향 특성을 갖는 섬유질 재료를 검색하기 위해 변화될 수 있고, 어떤 제조상의 제약 사양이 되기 쉬운 5개의 변수(즉, EFD 및 데니어로 표현된 2개의 섬유질 반경, 제2 구성 요소의 중량비  $\chi$ , 재료 두께  $d$  및 재료 기초 무게  $W_b$ )가 있다.

최적화 프로세스는 연한 다공질 재료, 특히 전개한 분출원에 기술된 것과 같은 연한 다공질 재료 모델 및 반경험적인 유동 저항을 수학식에 근거하여 음향 특성, 즉 흡음율 및 투과 손실을 이용하는 균질한 중합체 섬유질 재료의 단일층의 5개의 파라미터에 대해서 설명된다. 다시 말하면, 도 7에 도시된 바와 같이, 최적화 루틴(34)의 거시적 결정 루틴 및 재료 모델 루틴은 수학식 75의 유동 저항을 및 이미 유도된 연한 다공질 재료 모델의 이용을 포함한다.

이 실례가 2개의 섬유질 구성 요소의 섬유질 재료와 특정한 유동 저항율 및 재료 모델에 대해 설명되었지만, 다른 유동 저항율 및 재료 모델을 본 발명에 따라 사용하는 것이 가능해서, 본 발명이 실례가 되는 식 및 모델, 또는 특정한 재료, 예를 들면 2개의 섬유질 구성 요소의 섬유질 재료의 설계에 국한되지 않는다는 것은 명백하게 이해할 수 있을 것이다.

이 예에 대해 일반적으로 설명된 바와 같이, 사용자는 2개의 섬유질 구성 요소의 섬유질 재료의 제조 제어 가능한 미세구조 파라미터의 설계의 최적화를 선택한다. 본 실례에서 전술한 바와 같이, 메인 프로그램(20)을 시작할 때, 사용자는 균질한 재료의 설계의 명령을 선택하고, 다음에 2개의 섬유 구성 요소의 섬유질 재료의 제조 제어 가능한 미세구조 파라미터의 설계의 최적화를 선택한다.

이 예에 이용된 2개의 섬유질 구성 요소의 섬유질 재료는 예측 루틴의 표본, 즉 2개의 다른 섬유질 구성 요소으로 설명된 바와 같은 데, 그 구성 요소는 폴리프로필렌에서 만들어진 주요한 섬유질(BMF) 및 폴리에스테르에서 만들어진 다른 섬유질(스테이플 섬유질)이다. BMF의 EFD는  $\mu$ 으로 측정되고, 스테이플 섬유질의 직경은 데니어(섬유질 9000m의 그램의 질량)로 측정된다.

섬유질 재료의 음향 특성에 대해서 5개의 미세 구조 파라미터를 분석하고 최적화할 목적으로, 파라미터의 최적값을 찾아서 최선의 흡음을 제공하는 섬유질 재료를 형성하기 위해서, 값의 범위에 걸쳐 변동하는 재료 파라미터를 갖는 섬유질 재료에 대하여 법선의 흡음율이 계산된다. 최적화를 위한 재료의 음향 특성은 그 별크 밀도로 나누어진 평균 흡음율(예를 들면, 500Hz에서 4kHz의 범위에 걸쳐 평균화된 법선 입사 흡음율)의 성능 기준으로 정의된다. 다시 말하면, 상기 최적화 프로세스는 설계된 섬유질 재료의 단위 밀도당 최고의 흡음을 얻기 위한 것이다. 상기 최적화 프로세스의 제약이 적용되어 평균 흡음율은 항상 0.9 이상이다.

이 최적화 프로세스에 이용된 EFD 범위는 현재의 제조 능력에 기초하고, 값은 x1, x2, x3 및 x4 마이크론으로 각각 설정된다. 스테이플 섬유질 직경은 2 내지 16 데니어까지의 변할 수 있고, 스테이플 섬유의 중량비는 10%에서 70%까지 변화되었다. 상기 두께 및 기초 무게는 각각 2cm에서 6cm까지, 50g/m<sup>2</sup>에서 2000g/m<sup>2</sup>까지 변화되었다. 당연히, 미세한 간격이 각 파라미터에 이용되었고, 최적의 탐색이 5차원적인 파라미터 공간 내의에서 최고의 단위 밀도당 흡음을 갖는 재료를 발견하기 위해 실행되었다.

5가지 파라미터의 모든 가능한 결합내에서 섬유질의 최적 직경이 발견되었다. 도 17a 및 도 17b에는 그것과 연관된 범위를 정의하는 거시적 성질에 대한 재료의 몇 개의 최종 음향 특성에 대해서 2개의 표 리스트를 도시하며, 여기서 단위 밀도당 흡음율은 제1 컬럼내에 도시된다.

흡음율은 주파수와 음성 입사각의 함수이며, 예를 들면 주파수에 대해 흡음율을 평균화하는 흡음 효율에 대하여 다양한 정의가 있다. 최적화의 관점에서, 재료의 음성 흡수 성능을 나타내는 단일 수를 이용하는 것이 바람직하다. 따라서, 주파수에 대해 흡음율을 평균하거나 또는 이에 뒤이은 최적화 실례에 이용될 수 있는 흡음 성능의 다른 어떤 정의를 이용하는 대신에, NRC(Noise Reduction Coefficient)는 다음 최적화 설명의 성능 기준으로 이용된다. NRC는 수학식 76을 정의된다.

### 수학식 76

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4}$$

여기서,  $\alpha$ 는 nHz에 집중된 옥타브 밴드에 대해 평균되는 법선의 흡음율이다. NRC는 선형적으로 평균되는 흡수보다 저주파수 흡수에 더 큰 중점을 두며, 동일한 NRC를 갖는 재료는 주파수 범위에 대해 다른 흡음율을 나타낸다는 점에 주목해야 한다. 이 실례에서, 밴드  $\alpha_{250}$ 은 이하 추가적을 설명되는 바와 같이, 투과 손실에 대한 SIL의 동일한 주파수 평균을 갖도록  $\alpha_{4000}$ 으로 대체된다.

연한 다공질 재료 모델 및 그로부터 유도된 반경험적 유동 저항율 수학식을 이용할 때, EFD의 x1, x2, x3 및 x4 마이크론을 갖는 섬유질 재료의 최적 두께 및 최적 기초 무게는 각각 폐쇄 루프(58)을 이용하여 탐색되었다. 이 특정 최적화에서, 사용자는 두께를 0에서 6cm로 변화시킬 것을 선택하여 섬유질 재료의 기초 무게는 0에서 2kg/m<sup>2</sup>까지 변화되었으며, 스테이플 섬유질 직경 및 무게의 백분율은 각각 6 데니어 및 10%이었다. 이 결과는 두께 및 기초 무게 대 각 재료의 NRC를 그래프적으로 나타냄으로써 예증된다. 도 18a 및 18B에는 x1 마이크론 EFD를 갖는 재료의 3차원 표면 플롯 및 2차원 일정한 NRC 구분선 플롯이 도시된다. 또, 다른 EFDs에 대해 0.7과 동일한 NRC의 4개의 구분선은 도 18c에 도시된 바와 같이 플롯화될 수 있다.

스테이플 섬유질의 두께 및 구성이 동일함을 유지할 때, 최고의 NRC를 제공하는 섬유질 재료의 최적 EFD 및 기초 무게는 최적화 프로세스를 통해 결정될 수 있다. 예를 들면, 사용자가 EFD를 x1에서 x6 마이크론까지, 기초 무게를 0에서 800g/m<sup>2</sup>까지 변화시키고, 상기 섬유질 재료가 3.0cm의 두께 및 6레이어 스테이플 섬유질의 무게 35%를 가질 때, NRC는 상기 루틴(56) 및 NRC에 대한 계산을 이용하여 기초 무게 대 EFD의 범위에 대해 계산된다. 이 결과는 도 19a의 3차원 플롯(64) 및 도 19b에 도시된 2차원 플롯(62)에 도시된다. 도 19b에 도시된 바와 같이, 점선은 최적의 섬유질 EFD를 나타낸다.

투과 손실에 대한 섬유질 재료를 최적화하기 위해서, 단일 수(SIL)가 성능 기준으로 이용된다. 1977년 American National Standard에 의해 표준화된 상기 스피치 간섭 레벨(SIL)이 500Hz, 1000Hz, 2000Hz 및 4000Hz에 집중된 4개의 옥타브 밴드에서 잡음 레벨의 비가중 평균으로 수학식 77로 나타내어진다.

### 수학식 77

$$SIL = \frac{TL_{500} + TL_{1000} + TL_{2000} + TL_{4000}}{4}$$

입사 소리장이 4개의 옥타브 밴드의 각각에서 동일한 에너지를 갖는다는 것을 나타낼 때, 여기에 정의되는 SIL은 회화 방해 수준의 표시를 나타낸다.

x1 마이크론 EFD 및 데이너 스테이플 섬유질 35%를 갖고 사용자에 의해 정의된 섬유질 재료에 기초한 SIL을 최적화하는 실례는 재료의 기초 무게 대 두께의 변수 파라미터에 대해 수행된다. 도 20a 및 20B에는 루틴(56)을 이용한 계산으로부터 귀결되는 3차원 표면 SIL 플롯 및 2차원 일정한 SIL 구분선 플롯이 도시된다. 유사한 최적화가 추가적인 표면 및 이후 이용 가능한 구분선 플롯을 가는 다른 EFDs를 갖는 섬유질 재료에 대해 수행될 수 있다.

마찬가지로, 스테이플 섬유질의 두께 및 구성이 동일함을 유지할 때, EFD 및 기초 무게는 최상의 SIL을 제공하는 섬유질 재료에 대해 변화 및 최적화될 수 있다. 유사한 3차원 및 구분선 플롯이 이러한 최적화에 제공될 수 있다.

메인 프로그램(20)의 일 실시예에서, 음향 시스템의 설계시 이용되는 음향 예측 및 최적화 프로그램(80)이 도 10에 도시된 음향 시스템 예측 및 최적화 프로그램(81)에 의해 제공된다. 음향 시스템 예측 및 최적화 프로그램(81)은 음향 시스템의 다수의 구성 요소를 최적화하기 위한 다수의 구성 요소 및 최적화 루틴(84)을 갖는 음향 시스템의 음향 특성을 예측하기 위한 예측 루틴(82)을 포함한다. 일반적으로, 음향 시스템은 음향 목적을 위하여 당업자가 사용하는 재료총과 같은 임의 형식의 구성 요소, 예를 들면 섬유질 재료와 같은 다공질 재료, 저항성 스크립 또는 단단한 판넬과 같은 투과성 또는 비투과성 장벽, 및 확정된 공간, 예컨대 틈을 포함할 수 있다. 임의 수의 재료총 및 정의된 공간이 도 11에 도시된 일반적인 음향 시스템에 의해 도시된 바와 같은 음향 시스템에 이용될 수 있다. 임의의 다수 구성 요소 음향 시스템의 설계가 본 발명에 따라 고려된다.

일반적으로, 음향 시스템 예측 루틴(82)은 다층의 구성 요소의 음향 시스템의 음향 특성을 예측하는 데 이용된다. 음향 시스템 예측 루틴(82)은 전달 행렬 프로세스를 이용하여 다층의 구성 요소의 음향 시스템의 음향 특성을 예측하기 위해서 사용된다.

일반적으로, 2개의 매체의 인터페이스에서 한 매체의 소리장이 알려지면, 우리는 경계 양단의 힘 균형 및 속도 연속성에 기초하여 제2 매체의 압력 및 입자 속도를 얻을 있다. 2개의 압력 영역 사이의 관계 및 경계 양단의 속도는 2x2 행렬 형식으로 쓸 수 있다. 유사하게, 매체를 가로지르는 압력 및 입자 속도에 대해 전달 행렬을 얻을 수 있다. 구성 요소에 대해서 마련되어지는 마라미터 및/또는 특성의 압력 세트에 근거하고, 구성 요소의 경계의 음향 상태 사이의 관계를 규정하는 각 구성 요소의 전달 행렬을 획득한 후에, 음향 시스템의 전체의 전달 행렬은 아래의 수학식 78에 도시된 바와 같이 모든 구성 요소 전달 행렬을 곱함으로써 얻어진다.

### 수학식 78

$$[T] = [T_1][T_2] \cdot \cdot \cdot [T_n]$$

또한, 총 전달 행렬(T)가  $2 \times 2$  행렬이기 때문에, 2개의 압력 영역 및 다층 구조를 가로지르는 입자 속도의 법선 구성 요소 간의 관계는 수학식 79로 표현될 수 있다.

### 수학식 79

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ v_{1x} \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_2 \\ v_{2x} \end{bmatrix}_{x=d}$$

여기서,  $P_1, P_2$ 는 양 표면의 압력이고,  $v_{1x}$  및  $v_{2x}$ 는 x구성 요소의 공기 속도(구조 표면에 대해 법선)이며,  $d$ 는 도 11에 도시된 다층 음향 시스템의 총 두께이다. 전달 행렬을 이용함으로써, 음향 시스템의 음향 특성 예를 들면, 표면 임피던스, 흡음율 및 전달 계수가 결정될 수 있다.

단단한 벽에 의해 지지되는 다공질 재료층을 고려할 때, 재료의 법선 임피던스는 전달 행렬을 이용하여 얻어질 수 있다. 그 재료 정면의 음향 압력 영역은 도 80에 도시된 단위 크기를 갖는 입자 평면파 및 반사파에 의해 기재될 수 있다.

### 수학식 80

$$P_1 = e^{-j(k_x x + k_y y)} + R e^{j(k_x x - k_y y)}$$

작은 진폭에 근거할 때, 입자 속도는 수학식 81로 귀결되는  $P_1$ 에 대해 선형 비접성력을 적용함으로써 얻어진다.

### 수학식 81

$$v_{1x} = \frac{\cos\theta}{\rho_0 c_0} [e^{-j(k_x x + k_y y)} - R e^{j(k_x x - k_y y)}]$$

하모닉 시간 종속항  $e^{j\omega t}$ 는 각 영역 변수에 대해 추정되고, 유도 과정을 통해 생략된다. 또, 항  $e^{-jk_y y}$ 은 파장(1)이 구조의 형상보다 훨씬 작을 경우에 유효한 무한 구조의 추정하에 사라지게 된다. 단단한 벽부 지지 때문에, 유체 속도의 법선 구성 요소는 제로, 즉  $v_{2x}=0$ 이고, 표면 압력과 법선 속도는 수학식 82 및 83과 같이 표현된다.

### 수학식 82

$$P_1|_{x=0} = T_{11} P_2|_{x=d}$$

### 수학식 83

$$v_{1x}|_{x=0} = T_{21} P_2|_{x=d}$$

음향 압력과 법선 입자 속도의 비를 취함으로써, 재료의 법선 임피던스는 수학식 84로 표현된다.

### 수학식 84

$$z_n = \frac{1}{\rho_0 c_0} \left. \frac{P_1}{v_{1x}} \right|_{x=0} = \frac{1}{\rho_0 c_0} \frac{T_{11}}{T_{21}}$$

이 범선 입사 반사 계수(R) 및 흡음율(a)은 각각 수학식 85 및 86으로 주어진다.

### 수학식 85

$$R = \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1}$$

### 수학식 86

$$a = 1 - |R|^2$$

당업자는 이들 식을 비법선 입사의 경우에 대해 일반화할 수 있다.

유사하게, 상기 다층 구성 요소의 음향 시스템의 음성 전달은 전달 행렬 방법을 적용하여 얻어질 수 있다. 그 재료의 다른 측면상의 압력 영역과 범선 입자 속도는 수학식 87 및 88로 표현된다.

### 수학식 87

$$P_2 = T e^{-j(k_x x + k_y y)}$$

### 수학식 88

$$v_{2y} = \frac{\cos\theta}{\rho_0 c_0} T e^{-j(k_x x + k_y y)}$$

동일한 매체가 재료의 양측에 있다면, 과동수는 양측에서 동일할 것이며, 전달각은 반사각과 동일할 것이다. 수학식 80, 81, 87 및 88을 수학식 79에 대입하여 아래의 수학식 89의 행렬식을 얻을 수 있다.

### 수학식 89

$$\begin{bmatrix} 1+R \\ \frac{\cos\theta}{\rho_0 c_0} (1-R) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T e^{-jk_x d} \\ \frac{\cos\theta}{\rho_0 c_0} T e^{-jk_x d} \end{bmatrix}$$

그리고, 압력 전달 계수(T)는 투과 손실이 전술한 바와 같이 결정될 수 있는 수학식 90으로 얻어질 수 있다.

### 수학식 90

$$T = \frac{2e^{jk_x d}}{T_{11} + \frac{\cos\theta}{\rho_0 c_0} T_{12} + \frac{\rho_0 c_0}{\cos\theta} T_{21} + T_{22}}$$

다양한 구성 요소를 다층 구성 요소의 음향 시스템에 이용될 수 있다. 예를 들면, 이러한 구성 요소는 저항율 스크립, 연한 불투과성 막, 연한 다공질 재료, 틈 및 단단한 판넬을 포함하지만, 이에 한정되지는 않는다. 위에 목록된 각 구성 요소에 대한 전달 행렬이 아래에 제공된다. 그러나, 다른 구성 요소에 대한 전달 행렬은 당업자에게 공지된 바와 같이 유사하게 유도

될 수 있고, 본 발명은 이러한 행렬 또는 목록되거나 전개된 특정 구성 요소의 이용에 한정되지는 않는다. 무시할 수 있는 두께를 갖는 층상 재료에 대해, 재료층 내부의 파동 전파는 무시될 수 있으며, 재료 임피던스만이 고려될 필요가 있다. 섬유질 재료 및 틈에 대해, 매체내 및 경계 양단의 파동 전파도 고려될 필요가 있다.

저항율 스크립은 면적 밀도( $m_s$ , kg/m<sup>2</sup>), 유동 저항율( $\sigma_s$ , Rayls), 무시할 수 있는 두께 및 강성이 아닌 재료의 박층이다. 힘의 평형 방정식 및 속도 연속 방정식이 수학식 91 및 92로 표현된다.

### 수학식 91

$$P_1 - P_2 = Z_r v_{1x}$$

### 수학식 92

$$v_{1x} = v_{2x}$$

이들 2개의 수학식은 행렬 수학식 93으로 기재될 수 있다.

### 수학식 93

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ v_{1x} \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ v_{2x} \end{bmatrix}_{x=d}$$

이후, 저항율 스크립에 대한 전달 행렬은 기계적인 임피던스를 이용하여 수학식 94 및 95로 표현된다.

### 수학식 94

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & Z_r \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 수학식 95

$$Z_r = \frac{1}{\frac{1}{j\omega m_s} + \frac{1}{\sigma_s}}$$

여기서,  $Z_r$ 은 저항율 스크립의 기계적 임피던스이고,  $[T]$ 는 전달 행렬이다. 이용된 막의 한 형태는 무시할 수 있는 두께 및 면적 밀도(m)를 갖고 있고, 그 프레임은 연한이며 불투과성이다(어떤 유체 입자도 막을 통해 관통할 수 없다). 이러한 막의 전달 행렬은 그 힘의 평형 방정식 및 속도 연속 방정식을 선형 시스템에 기입함으로써 수학식 96과 같이 얻어질 수 있다.

### 수학식 96

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & Z_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서,  $Z_m$ 은 막의 기계적 임피던스로서  $Z_m = j\omega m_s$ 로 주어진다.

단단한 판넬은  $m_s$ 로 표시된 면적 밀도를 갖고 있고, 단위 폭 대 만곡 밴딩 단단함은 D로 표시된다. 상기 판넬의 두께는 전달 행렬의 유도에서 무시되지만, 밴딩 단단함(D)은 그 두께의 함수이며 수학식 97로 정의된다.

### 수학식 97

$$D = \frac{Eh^3(1+j\eta)}{12(1-v^2)}$$

여기서, h는 두께이고, E는 영의 계수이고, v는 포이스ون의 비이고,  $\eta$ 는 상기 판넬의 손실 계수가다. 단단한 판넬의 이동식은 수학식 98로 표현된다.

### 수학식 98

$$(P_1 - P_2)_{x=0} = D \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m_s \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$$

상기 판넬의 진동은 조화 진동일 것으로 추정되며,  $w(y, t) = We^{j(\omega t - k_y y)}$ 로 표현된다. 이 추정 해식을 수학식 98로 대체하고 경계 조건에 대해 푸는 것에 의해, 단단한 판넬의 기계적 임피던스( $Z_p$ ) 및 전달 행렬은 각각 수학식 99 및 100으로 표현된다.

### 수학식 99

$$Z_p = j[\omega m_s - \frac{D}{\omega} k_y^4]$$

### 수학식 100

$$T = \begin{bmatrix} 1 & Z_p \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

다층 구성 요소의 음향 시스템내의 틈이 위치  $x_1$ 에서 시작하여 시스템의 위치  $x_2$ 에서 끝나서 d가 될 때, 틈 내의 음향 압력 및 공기 속도는 수학식 101 및 102로 표현된다.

### 수학식 101

$$P_a = Ae^{-j(k_x x + k_y y)} + Be^{j(k_x x - k_y y)}$$

### 수학식 102

$$v_{ax} = \frac{\cos\theta}{\rho_0 c_0} [Ae^{j(k_x x + k_y y)} - Be^{j(k_x x - k_y y)}]$$

여기서,  $k_x = \omega \cos\Theta / c_0$ ,  $k_y = \omega \sin\Theta / c_0$ 이다. 음향 압력 및 공기 속도를 경계 조건으로 대체함으로써, 상기 힘의 평형 방정식 및 속도 연속 방정식은 행렬 수학식 103 및 104의 형태로 표현될 수 있다.

$x=x_1$ 에서,

## 수학식 103

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ v_{1x} \end{bmatrix}_{x=x_1} = \begin{bmatrix} e^{-jk_s x_1} \\ \left(\frac{\cos\theta}{\rho_o c_o}\right) e^{-jk_s x_1} - \left(\frac{\cos\theta}{\rho_o c_o}\right) e^{jk_s x_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}$$

$x=x_2$ 에 서,

## 수학식 104

$$\begin{bmatrix} P_2 \\ v_{2x} \end{bmatrix}_{x=x_2} = \begin{bmatrix} e^{-jk_s x_2} \\ \left(\frac{\cos\theta}{\rho_o c_o}\right) e^{-jk_s x_2} - \left(\frac{\cos\theta}{\rho_o c_o}\right) e^{jk_s x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}$$

각 측면상의 압력 및 공기 속도는 수학식 105로 나타낼 수 있다.

## 수학식 105

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ v_{1x} \end{bmatrix}_{x_1} = \begin{bmatrix} e^{-jk_s x_1} \\ \left(\frac{\cos\theta}{\rho_o c_o}\right) e^{-jk_s x_1} - \left(\frac{\cos\theta}{\rho_o c_o}\right) e^{jk_s x_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-jk_s x_2} & e^{jk_s x_2} \\ \left(\frac{\cos\theta}{\rho_o c_o}\right) e^{-jk_s x_2} & -\left(\frac{\cos\theta}{\rho_o c_o}\right) e^{jk_s x_2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_2 \\ v_{2x} \end{bmatrix}_{x_2}$$

이 2개의 행렬은 수학식 106으로 나타낸 바와 같이 하나의 전달 행렬로 단순화될 수 있다.

## 수학식 106

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos k_s(x_2-x_1) & j \frac{\rho_0 c_0}{\cos\theta} \sin k_s(x_2-x_1) \\ j \frac{\cos\theta}{\rho_0 c_0} \sin k_s(x_2-x_1) & \cos k_s(x_2-x_1) \end{bmatrix}$$

$x_2-x_1=d$ , 상기 틈의 거리 및 상기 전달 행렬식이 d를 이용하여 상기 음향 시스템내의 어떤 위치에서도 틈에 적용될 수 있다는 점을 주목해야 한다.

연한 다공질 재료에 대한 전달 행렬은 연한 프레임 모델에 기초한 영역 해석으로 유도된다. 일단에서 타단까지 상기 섬유질 재료 내측의 압력과 법선 유체 속도를 나타내는 행렬이 유도된다. 경계 양단의 압력 영역과 법선 유체 속도를 나타내는 2개의 행렬이 더 유도된다. 최종적으로, 상기 섬유질 재료의 총 전달 행렬은 상기 재료의 다른 경계에서의 음향 상태에 대한 상기 섬유질 재료의 한 경계에서의 음향 상태를 나타내는 3개의 행렬을 예를 들면, 연속적으로 곱함으로써 얻어진다. 상기 연한 프레임 모델에서 동일한 기수법을 이용하면, 상기 유체 압력(예를 들면, 음향 압력) 및 유체 입자 속도는 각각 수학식 107 및 108로 표현될 수 있다.

## 수학식 107

$$s = (Ra+Q)(C_1 e^{-jk_{px} x-jk_y y} + C_2 e^{jk_{px} x-jk_y y})$$

### 수학식 108

$$V_x = j\omega \left[ a \frac{jk_{px}}{k_p^2} (C_1 e^{-jk_{px}x - jk_y} - C_2 e^{jk_{px}x - jk_y}) \right]$$

여기서, R, Q 및 a는 이전에 정의된 바와 같고,  $V_x$ 는  $U_x$ 의 시간 미분이고,  $k_{px}$ 는 파동 수의 범선 구성 요소가다. 무한 구조의 추정에 기초하면, 상기 항  $e^{\pm jk_y}$ 은 유도 과정을 통해 상쇄된다. 이후, 2개의 수학식을 아래의 수학식 109 및 110에 도시된 바와 같이 삼각법의 함수로 재표현할 수 있다.

### 수학식 109

$$s = [(Ra+Q)\cos(k_{px}x)(C_1+C_2) - j(Ra+Q)\sin(k_{px}x)(C_1-C_2)]$$

### 수학식 110

$$V_x = j\omega [a \frac{jk_{px}}{k_p^2} \cos(k_{px}x)(C_1-C_2) + a \frac{k_{px}}{k_p^2} \sin(k_{px}x)(C_1+C_2)]$$

이들 2개의 수학식은 이후 수학식 111에 도시된 단일 행렬로 결합된다.

### 수학식 111

$$\begin{bmatrix} s \\ V_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Ra+Q)\cos(k_{px}x) & -j(Ra+Q)\sin(k_{px}x) \\ j\omega a \frac{k_{px}}{k_p^2} \sin(k_{px}x) & -\omega a \frac{k_{px}}{k_p^2} \cos(k_{px}x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1+C_2 \\ C_1-C_2 \end{bmatrix}$$

수학식 112에 도시된 바와 같이, 정의에 의해

### 수학식 112

$$[A(x)] \stackrel{\Delta}{=} \begin{bmatrix} (Ra+Q)\cos(k_{px}x) & -j(Ra+Q)\sin(k_{px}x) \\ j\omega a \frac{k_{px}}{k_p^2} \sin(k_{px}x) & -\omega a \frac{k_{px}}{k_p^2} \cos(k_{px}x) \end{bmatrix}$$

유체 압력에 대한 간단한 식 및 상기 섬유질층의 두 표면에서의 속도는 아래의 수학식 113 및 114로 표현된다.

$x=0+$ 에서,

### 수학식 113

$$\begin{bmatrix} s \\ V_x \end{bmatrix}_{x=0} = [A(0)] \begin{bmatrix} C_1+C_2 \\ C_1-C_2 \end{bmatrix}$$

$x=d-$ 에서,

### 수학식 114

$$\begin{bmatrix} s \\ V_x \end{bmatrix}_{x=d^-} = [A(d)] \begin{bmatrix} C_1 + C_2 \\ C_1 - C_2 \end{bmatrix}$$

여기서,  $0+$  및  $d-$ 는 상기 섬유질 재료 내측의 위치를 나타낸다. 힘의 평형 및 속도 연속성의 경계 조건은 상기 섬유질 재료의 각 결과 상에서 만족될 필요가 있는 데, 즉  $s = -\phi P_1$  및  $(1-\phi)u_{x+0}V_x = v_{x0}$ 이며,  $u_x$ 는 섬유질 재료의 법선 고상 입자 속도이다.  $V_x = \alpha u_x$ 임을 상기하면, 상기 재료의 2개의 결과에서 2세트의 수학식이 생겨 행렬 형태의 수학식 115 및 116으로 각각 다시 표현될 수 있다.

### 수학식 115

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ v_{x1} \end{bmatrix}_{x=0^-} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \phi & 0 \\ 0 & 1-\phi + \phi \\ \frac{1-\phi}{\alpha} + \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s \\ V_x \end{bmatrix}_{x=0^+}$$

### 수학식 116

$$\begin{bmatrix} p_2 \\ v_{x2} \end{bmatrix}_{x=d^-} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \phi & 0 \\ 0 & 1-\phi + \phi \\ \frac{1-\phi}{\alpha} + \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s \\ V_x \end{bmatrix}_{x=d^+}$$

수학식 113, 114, 115 및 116을 결합하면, 연한 섬유질 재료에 대한 전달 행렬의 최종 형태는 수학식 117로 표현되고, 여기서,  $[T]$ 는 유동 저항율 및 다공질 상의 적어도 일부에 근거한다.

### 수학식 117

$$[T] = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \phi & 0 \\ 0 & 1-\phi + \phi \\ \frac{1-\phi}{\alpha} + \phi \end{bmatrix} [A(0)] [A(d)]^{-1} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \phi & 0 \\ 0 & 1-\phi + \phi \\ \frac{1-\phi}{\alpha} + \phi \end{bmatrix}^{-1}$$

도 12에 도시된 바와 같이, 일반적으로 음향 시스템에 대한 음향 특성 예측을 위해 전달 행렬은 정의된 루틴(88)의 음향 시스템을 정의하는 단계를 포함한다. 그 정의된 루틴(88)에 의해 사용자는 구성 요소에 대응하는 시스템의 선택 명령을 초기화하는 인터페이스의 이용을 통해, 저항율 스크립, 불투과성 막, 단단한 판넬, 섬유질 재료 및 틈을 포함하지만 이에 한정되지 않는 다수 구성 요소가 충화된 음향 시스템에 공통적으로 이용된 구성 요소 목록에서 구성 요소를 선택하는 구성 요소 선택 루틴(92)을 포함한다.

이러한 구성 요소의 선택으로, 사용자는 정의 루틴(88)의 구성 요소 데이터 입력 루틴(94)을 통해 상기 구성 요소에 대한 제조 미세 구조 파라미터 또는 상기 구성 요소의 거시적 성질을 입력하게 된다. 또, 사용자는 구성 요소의 순서, 그 위치 등과 같은 시스템 구성 파라미터를 선택한다. 음향 시스템이 정의된 후, 상기 정의 루틴(88)은 상기한 바와 같이 유도된 구성 요소 전달 행렬 및 총 전달 행렬식을 이용하는 것처럼, 음향 시스템의 각 구성 요소에 대해 결정된 개별 전달 행렬을 곱함으로써 추가적으로 음향 시스템에 대한 총 전달 행렬을 결정한다.

총 전달 행렬이 상기 정의된 루틴(88)에 대해 정의된 후, 음향 특성 결정 루틴(90)에 의해 사용자는 음향 특성 선택 루틴(96)에 대해 계산될 음향 특성을 선택한다. 대응 경계 조건을 시스템의 각 결과에 적용함으로써, 상기 음향 시스템의 음향

특성, 예를 들면 특정 임피던스, 흡음율 및 전달 계수는 음향 특성 결정 루틴(90)의 계산 루틴(98)을 이용한 상기 총 전달 행렬에 근거하여 상기 유도된 식을 이용하는 것과 같이 결정될 수 있다. 다시 말하면, 상기 음향 시스템에 대한 음향 특성은 실제적인 음향 시스템(예를 들면, 하나 이상의 재료의 다층, 하나 이상의 투과성 또는 불투과성 장벽, 하나 이상의 틈 또는 다른 어떤 구성 요소를 갖고, 추가적으로 제한된 크기, 깊이 및 곡률을 갖는 시스템)을 형성하는 경계 조건 및 기하학적인 강제를 따라 상기 음향 시스템의 각 구성 요소의 음향 특성을 결합함으로써 예측된다. 고려 중인 상기 음향 시스템의 기하학에 좌우되기 때문에, 상기 음향 시스템에 대한 음향 특성 예측은 예를 들면, 유한 또는 경계 요소 방법같은 고전적 파동 전파 기술 또는 수치적인 기술을 이용하여 예측될 수 있다.

이 예는 도 13 및 14를 참조하여 추가적으로 설명될 도 12에 도시된 음향 시스템 예측 프로세스의 실증적인 예다. 예측 프로세스의 실증적 예는 사용자가 메인 프로그램(20)을 포함하는 음향 특성 예측 및 최적화 시스템(10 : 도 2)과 인터페이스하는 방법으로 설명될 것이다.

상기 시스템(10)은 사용자가 균질한 재료 또는 음향 시스템으로 작업할 것인지를 선택하도록 한다. 상기 사용자가 음향 시스템으로 작업할 것을 선택하면, 상기 사용자에게 도 13 및 14에 설명된 프로그램같은 음향 시스템 예측 및 최적화 프로그램, 즉 일반적인 프로그램(81)의 예의 이용에 대한 선택권이 주어진다. 이후, 상기 사용자에게 음향 시스템의 음향 특성을 예측하기 위한 선택권 또는 이하 추가적으로 설명되는 바와 같은 음향 시스템의 구성을 최적화하기 위한 시도가 주어진다. 사용자가 음향 시스템의 음향 특성을 예측할 것을 선택하면, 사용자는 시스템에 의해 음향 특성이 계산될 음향 시스템을 정의하도록 촉구된다. 사용자에게 이미 정의된 시스템의 구성 요소를 이용할 선택권, 이미 정의된 전체 음향 시스템을 이용할 선택권 또는 이미 정의된 시스템을 변형할 선택권이 주어질 수 있다 하더라도, 다음의 실례가 마치 사용자가 초기 정의 위치에서 시작하고 있는 것처럼 설명될 것이며, 엑세스하기 위해 이미 정의된 시스템을 갖지는 않을 것이다.

도 13에 도시된 바와 같이, 음향 시스템 정의 루틴(100)의 구성 요소 선택 루틴(101)에 의해 사용자는 6개의 다른 구성 요소, 즉 2개의 섬유질 구성 요소의 섬유질 재료(103), 일반적인 섬유질 재료(104), 저항율 스크립(106), 틈(108), 탄성 판넬(110) 또는 연한 불투과성 박막(112)에서 선택하도록 허여한다. 상기 사용자는 음향 시스템에서 포함될 구성 요소의 수를 특정하도록 촉구된다. 이후, 상기 사용자에게는 선택될 수 있고, 사용자로 하여금 시퀀스를 특정하도록 허여할 수 있는 구성 요소의 목록 및 음향 시스템에 대한 다른 어떤 시스템 구성 파라미터의 목록이 주어진다. 각 구성 요소가 선택된 후, 상기 정의 루틴(100)의 구성 요소 데이터 입력 루틴(122)은 사용자가 선택한 구성 요소, 예를 들면 미세 구조 파라미터 또는 거시적 성질에 대해 적절한 데이터를 입력하도록 한다.

2개의 섬유질 구성 요소의 섬유질 재료(103)에 대해, 상기 사용자는 BMF 섬유질 EFD(마이크론), 스테이플 섬유질 직경(데니어), 스테이플 섬유의 중량비( $\chi$ ), 재료의 두께(d, cm), 기초 무게(Wb, gm/m<sup>2</sup>), BMF 섬유질의 밀도(kg/m<sup>3</sup>) 및 스테이플 섬유질의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)를 포함하는 미세 구조 파라미터를 입력하게 된다. 상기 일반적인 섬유질 재료(104)에 대해, 상기 사용자는 재료의 유동 저항율( $\alpha$ : Rayls/m), 재료의 두께(d, cm), 벌크 밀도(kg/m<sup>3</sup>) 및 다공질( $\emptyset$ )을 입력하게 된다. 상기 저항율 스크립(106)에 대해, 상기 사용자는 상기 스크립의 유동 저항율( $\alpha$ , Rayls/m), 스크립의 두께(d, cm) 및 스크립의 단위 영역 당 질량(g/m<sup>2</sup>)을 입력하게 된다. 상기 틈(108)에 대해, 상기 사용자는 두께(d)를 입력하게 된다. 상기 탄성 판넬(110)에 대해, 사용자는 판넬의 두께(d, cm), 판넬의 밀도(kg/m<sup>3</sup>), 판넬의 영의 계수(Pa), 포이슨의 비 및 판넬의 손실 계수(n)를 입력하게 된다. 상기 연한 불투과성 막(112)에 대해, 상기 사용자는 막의 두께(d, cm) 및 막의 단위 영역당 질량(kg/m<sup>2</sup>)을 입력하게 된다.

모든 구성 요소가 음향 시스템에 대해 정의된 후, 상기 각 개별 구성 요소에 대한 전달 행렬이 개별 구성 요소에 대해 상기한 전달 행렬식을 이용하여 블록(113)에 도시된 바와 같이 결정된다. 이후, 상기 개별 전달 행렬은 블록(115)으로 표현된 바와 같이 총 전달 행렬을 얻기 위해 결합, 예를 들면 상기 개별 전달 행렬이 연속적으로 곱해진다.

또, 상기 음향 시스템이 정의된 후, 상기 사용자는 도 14에 도시된 바와 같은 음향 특성 결정 루틴(120)의 음향 특성 선택 루틴(124)에 대해 계산될 음향 특성의 수 중의 하나를 선택하게 된다. 이러한 음향 특성은 법선 특정 임피던스(124), 흡음율(126 : 예를 들면, 잡음 저감 계수가 계산될 수 있다), 투과 손실(128 : 예를 들면, 스피치 간섭 레벨이 계산될 수 있다) 및 랜덤 입사 투과 손실(130)을 포함할 수 있다. 상기 선택된 음향 특성의 계산은 총 전달 행렬을 이용하여 이미 설명된 식을 통해 음향 특성 계산 루틴(132)에 의해 수행된다. 그 결과는 이후 그래픽 또는 표 형태로 디스플레이될 수 있다.

상기 사용자가 음향 시스템에 대한 최적의 구성을 결정할 것을 선택하면, 상기 사용자에게 예측 및 최적화 프로그램(81 : 도 10)의 최적화 루틴(84)의 이용에 대한 옵션이 주어진다. 이러한 음향 시스템 예측 및 최적화 프로그램(81)의 최적화 루

틴(84)은 사용자로 하여금 상기 음향 시스템에 대한 최적값, 예를 들면 층의 위치, 상기 시스템의 섬유질층의 최적 섬유질 직경 등을 찾는 것을 허여한다. 다수 구성 요소가 충화된 음향 시스템이 많은 응용 분야에 이용되기 때문에, 상기 시스템에 이용된 다수 구성 요소에 대한 구성 최적화는 사용자에게 유익하다.

도 15에 도시된 바와 같이, 최적화 루틴(84)은 도 12의 루틴(88)을 참조하여 이미 설명한 바와 같은 음향 시스템을 정의하기 위한 정의 시스템 루틴(140)을 포함한다. 또, 상기 최적화 루틴(84)은 도 12의 음향 예측 루틴(90)을 참조하여 이미 설명한 바와 동일한 방법으로 사용자에 의해 선택된 음향 특성(144)을 계산하기 위한 계산 루틴(142)을 포함한다. 또, 상기 최적화 루틴은 음향 특성(144) 및 음향 시스템을 정의하는 하나 이상의 파라미터 및/또는 특성의 특정하게 정의된 범위(또는 세트 값)에 대해 수행될 반복적인 계산을 허여하는 상기 음향 시스템 정의 간의 폐쇄 루프를 포함한다. 예를 들면, 상기 범위는 저항율 스크립, 상기 음향 시스템의 섬유질층내 섬유질의 섬유질 직경, 틈의 두께 또는 상기 음향 시스템 구성 요소의 다른 어떤 미세 구조 파라미터, 구성 요소의 거시적 성질 또는 상기 음향 시스템의 시스템 구성 파라미터의 변화된 위치를 포함할 수 있다.

상기 최적화 루틴(84)의 실례를 위해, 예를 들면 불투과성 막 및 저항율 스크립이 습기 또는 먼지의 축적을 방지하기 위해 섬유질 재료에 대한 커버 시트로서 이용될 수 있다. 상기 연한 불투과성 막의 음향 특성은 그 면적 밀도에 의해서만 영향받고, 상기 연한 저항율 스크립의 음향 특성은 그 면적 밀도 및 그 유동 저항율에 의해 제어된다. 섬유질 재료가 저항율 스크립 또는 연한 불투과성 막과 결합될 때, 상기 복합 음향 시스템의 음향 특성은 상기 삽입 재료의 위치, 유동 저항율 및 면적 밀도에 의해 영향받는다. 따라서, 이러한 복합 재료에 대한 최적화의 목표는 상기 음향 시스템에 대한 위치, 면적 밀도 및 유동 저항율의 최적값을 찾아내는 것이다.

저항율 스크립층을 삽입하기 위한 최상의 위치(즉, 상기 음향 시스템의 시스템 구성 파라미터가 되는 위치)를 탐색하기 위해, 이 특정한 최적화의 실례에서는 상기 음향 시스템의 SIL이 중요한 음향 특성이 되도록 선택된다. 그 결과는 x1 마이크론 EFD 섬유질, 6 데니어 스테이플 섬유질의 35 무게 %, 400g/m<sup>2</sup>의 총 기초 무게 및 6.0cm의 두께를 포함하는 섬유질 재료 내 33g/m<sup>2</sup>의 면적 밀도를 갖는 저항율 스크립의 유동 저항율(즉, 상기 음향 시스템의 구성 요소의 거시적 성질) 대 상기 스크립의 위치에 기초한 SIL 최적화의 구분선 플롯을 나타내는 도 21a에 도시된 2-D 일정한 구분선 플롯에 의해 설명된다. 예를 들면, 상기 저항율 스크립은 복합 재료의 중심에서 최소의 음성 장벽 성능에 기여한다.

또, 다른 실례가 되는 최적화는 최상의 SIL을 얻기 위해 섬유질 재료의 중간에 위치한 저항율 스크립의 최적 유동 저항율을 결정하는 것이다. 상기 음향 시스템의 총 두께는 1인치로 유지된다. SIL의 최종 구분선 플롯이 33g/m<sup>2</sup>의 면적 밀도를 갖는 저항율 스크립의 유동 저항율에 기초한 SIL 최적화의 구분선 플롯인 도 21b에 도시되며, x1 마이크론 EFD 섬유질, 6 데니어 스테이플 섬유질의 35 무게 %, 400g/m<sup>2</sup>의 총 기초 무게를 포함하고, 1.0cm의 두께를 갖는 음향 시스템(기초 무게가 섬유질층의 섬유질 재료의 미세 구조 파라미터인)의 섬유질 재료의 기초 무게에 대해 상기 섬유질 재료의 중간에 삽입되었다.

어떤 음향 시스템도 이용될 수 있고, 상기 음향 시스템의 음향 거동이 균질한 재료의 음향 거동보다 훨씬 더 복잡하다는 것은 당업자에게 자명하다. 예를 들면, 상기 시스템내 다른 벌크 밀도 및 섬유질 구성 요소를 갖는 섬유질 재료의 다수층이에어 캡, 저항율 스크립, 불투과성 막 등에 의해 분리될 수 있다. 따라서, 사용자에 의해 정의된 음향 시스템을 최적화하기 위한 다양한 방법을 제공하는 각 구성 요소의 특성, 상기 구성 요소의 순서 및 용도 제약을 포함하지만, 이에 한정되지 않는 많은 변수의 결합이 있다.

본 명세서에 인용된 모든 특허 및 참조 문헌은 마치 개별적으로 적용되는 것처럼 그들 전체의 참조로 적용된다. 본 발명이 구체적인 실시예에 대해 특정한 참고용으로 설명되었지만, 당업자에게 자명한 바와 같이 본 발명의 변화 및 변형이 추가된 청구 범위의 사상을 벗어나지 않는 범위에서 채용될 수 있다.

## (57) 청구의 범위

### 청구항 1.

대체로 균질한 다공질 재료의 음향 특성을 예측하기 위한 컴퓨터 제어 방법에 있어서,

균질한 다공질 재료의 하나 이상의 음향 특성을 결정하기 위한 적어도 하나의 예측 모델을 제공하는 단계와;

상기 대체로 균질한 다공질 재료에 대한 음향 특성을 예측하는데 사용하는 예측 모델을 선택하기 위한 선택 명령을 제공하는 단계와;

상기 선택 명령에 대응하는 최소의 미세 구조 파라미터의 입력 세트를 제공하는 단계와;

상기 최소의 미세 구조 파라미터의 입력 세트에 기초하여 상기 균질한 다공질 재료의 하나 이상의 거시적 성질을 결정하는 단계와;

상기 하나 이상의 거시적 성질 및 상기 선택된 예측 모델의 함수로서 상기 균질한 다공질 재료의 하나 이상의 음향 특성을 생성하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 음향 특성 예측 방법.

## 청구항 2.

제1항에 있어서, 상기 적어도 하나의 예측 모델은 적어도 하나의 연한 재료 모델, 강성 재료 모델 및 탄성 재료 모델을 포함하는 것인 음향 특성 예측 방법.

## 청구항 3.

대체로 균질한 연한 섬유질 재료에 대한 음향 특성을 예측하기 위한 컴퓨터 제어 방법에 있어서,

균질한 연한 섬유질 재료의 유동 저항율을 예측하기 위한 유동 저항율 모델을 제공하는 단계와;

균질한 연한 섬유질 재료의 하나 이상의 음향 특성을 예측하기 위한 재료 모델을 제공하는 단계와;

미세 구조 파라미터의 입력 세트를 제공하고, 상기 유동 저항율 모델이 상기 미세 구조 파라미터에 기초하여 정의되도록 하는 단계와;

상기 유동 저항율 모델 및 입력 세트에 기초하여 상기 균질한 연한 섬유질 재료의 유동 저항율을 결정하는 단계와;

상기 균질한 연한 섬유질 재료의 유동 저항율의 함수로서 재료 모델을 이용하여 상기 균질한 연한 섬유질 재료의 하나 이상의 음향 특성을 생성하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 음향 특성 예측 방법.

## 청구항 4.

제3항에 있어서, 상기 균질한 연한 섬유질 재료는 하나 이상의 섬유 형식으로 형성되고, 상기 균질한 연한 섬유질 재료의 유동 저항율은 상기 하나 이상의 섬유 형식의 각각에 의해 제공되는 상기 유동 저항율의 함수로서 결정되어, 상기 하나 이상의 섬유 형식의 각각에 대한 유동 저항율은 섬유의 평균 반경의  $n$ 승의 역함수로서 결정되며, 여기서  $n$ 은 2보다 크거나 작은 것을 특징으로 하는 음향 특성 예측 방법.

## 청구항 5.

다수 구성 요소의 음향 시스템의 음향 특성을 예측하기 위한 컴퓨터 제어 방법에 있어서,

상기 다수 구성 요소의 음향 시스템의 복수의 구성 요소를 선택하기 위한 1개 이상의 선택 명령을 제공하고, 각 선택 명령이 다수 구성 요소의 음향 시스템의 복수의 구성 요소 중 1개와 결합되어, 다수 구성 요소의 음향 시스템의 각 구성 요소가 다수의 경계를 갖고, 그 경계의 적어도 1개가 다수 구성 요소의 음향 시스템의 각 구성 요소에 형성되는 단계와;

선택 명령과 관련된 각 구성 요소에 대응하는 미세구조 파라미터 또는 거시적 성질 중 적어도 하나의 입력 세트를 제공하고, 상기 적어도 하나의 입력 세트가 적어도 하나의 구성 요소에 대한 미세 구조 파라미터를 포함하는 단계와;

상기 다수의 구성 요소에 대응하는 상기 입력 세트에 기초하여 상기 구성 요소의 경계에서 음향 상태간의 관계를 정의하는 다수 구성 요소의 음향 시스템의 각 구성 요소에 대한 전달 행렬을 생성하는 단계와;

상기 다수 구성 요소 음향 시스템에 대한 총 전달 행렬을 구하기 위해 상기 구성 요소들에 대한 전달 행렬을 함께 곱하는 단계와;

상기 다수 구성 요소의 음향 시스템에 대하여 생성된 총 전달 행렬의 함수로서 상기 다수 구성 요소의 음향 시스템에 대한 하나 이상의 음향 특성의 값을 생성하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 음향 특성 예측 방법.

## 청구항 6.

제5항에 있어서, 상기 다수 구성 요소의 음향 시스템의 다수의 구성 요소 중의 하나 이상의 구성 요소에 대한 입력 세트는 하나 이상의 구성 요소에 대한 전달 행렬을 생성하기 위한 거시적 성질을 포함하는 것인 음향 특성 예측 방법.

## 청구항 7.

대체로 균질한 연한 섬유질 재료의 음향 특성을 예측하기 위해서 실행 가능한 프로그램을 명확히 구현하는 컴퓨터 판독 가능한 매체에 있어서,

상기 균질한 연한 섬유질 재료의 유동 저항율을 예측하기 위한 유동 저항율 모델과;

상기 균질한 연한 섬유질 재료의 하나 이상의 음향 특성을 예측하기 위한 재료 모델과;

사용자가 상기 유동 저항율 모델을 정의하는 데 기초가 되는 미세 구조 파라미터의 입력 세트를 제공하는 수단과;

상기 유동 저항율 모델 및 입력 세트에 기초하여 상기 균질한 연한 섬유질 재료의 유동 저항율을 결정하기 위한 수단과;

상기 균질한 연한 섬유질 재료의 유동 저항율의 함수로서 재료 모델을 이용하여 상기 균질한 연한 섬유질 재료에 대한 하나 이상의 음향 특성을 생성하기 위한 수단을 포함하는 것을 특징으로 하는 컴퓨터 판독 가능한 매체.

## 청구항 8.

제7항에 있어서, 상기 균질한 연한 섬유질 재료는 하나 이상의 섬유 형식으로 형성되고, 상기 균질한 연한 섬유질 재료의 유동 저항율을 결정하기 위한 수단은 하나 이상의 섬유질 형태 각각에 의해 제공되는 유동 저항율의 함수로서 유동 저항율을 결정하기 위한 수단을 포함하고, 상기 하나 이상의 섬유 형식의 각각의 유동 저항율은 섬유의 평균 반경의  $n$ 승의 역함수로서 결정되며, 여기서  $n$ 은 2보다 크거나 작은 것을 특징으로 하는 컴퓨터 판독 가능한 매체.

## 청구항 9.

다수 구성 요소의 음향 시스템의 음향 특성을 예측하기 위해서 실행 가능한 프로그램을 명확히 구현하는 컴퓨터 판독 가능한 매체에 있어서,

사용자가 다수 구성 요소의 음향 시스템의 다수의 구성 요소 중 하나 이상의 구성 요소를 선택하고, 상기 다수 구성 요소의 음향 시스템의 각각의 구성 요소가 다수의 경계를 갖으며, 이 경계의 적어도 하나가 다수 구성 요소의 시스템이 다른 구성 요소에 형성되는 수단과;

사용자가 각 구성 요소의 미세 구조 파라미터 또는 거시적 성질 중 적어도 하나의 입력 세트를 제공하고, 미세 구조 파라미터가 적어도 하나의 구성 요소에 필요한 수단과;

각각의 구성 요소의 입력 세트에 기초하여 구성 요소의 경계에서 음향 상태간의 관계를 정의하는 상기 다수 구성 요소의 음향 시스템의 각 구성 요소에 대하여 전달 행렬을 생성하는 수단과;

상기 다수 구성 요소의 음향 시스템에 대한 총 전달 행렬을 구하기 위해 상기 구성 요소에 대한 전달 행렬을 함께 곱하기 위한 수단과;

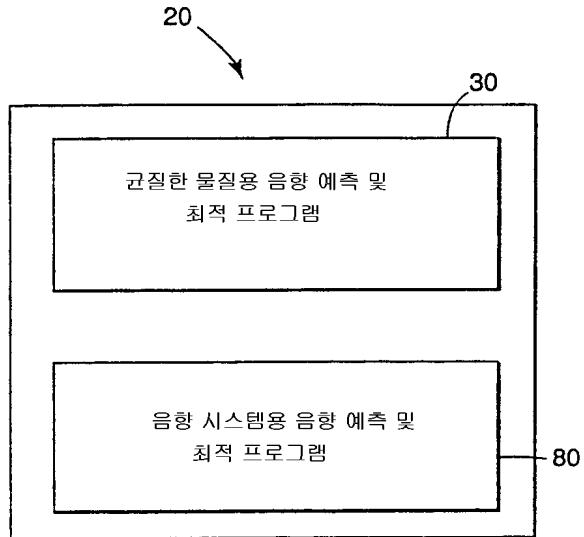
상기 다수 구성 요소 음향 시스템에 대하여 생성된 총 전달 행렬의 합수로서 상기 다수 구성 요소의 음향 시스템에 대한 하나 이상의 음향 특성의 값을 생성하기 위한 수단을 포함하는 것을 특징으로 하는 컴퓨터 판독 가능한 매체.

## 청구항 10.

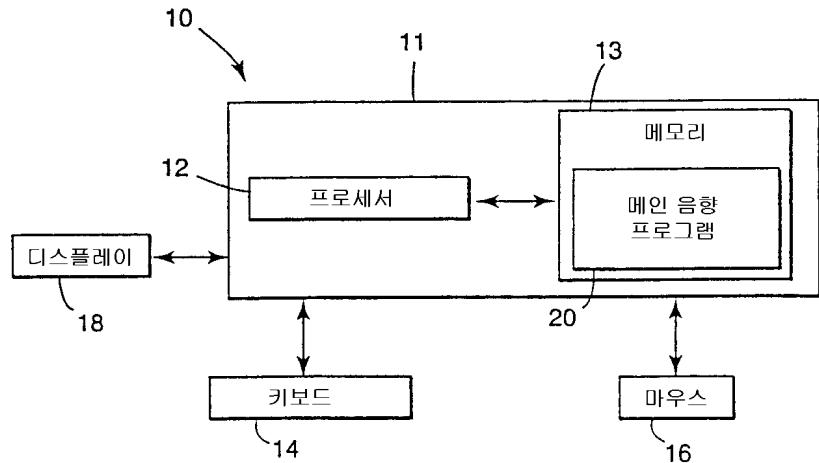
제9항에 있어서, 상기 다수의 구성 요소는 적어도 하나의 섬유 형식으로 형성된 적어도 하나의 균질한 섬유질 재료를 포함하고, 상기 균질한 섬유질 재료에 대한 전달 행렬을 생성하기 위한 수단은 상기 균질한 섬유질 재료의 유동 저항율에 기초하여 균질한 섬유질 재료에 대한 전달 행렬을 생성하기 위한 수단을 포함하며, 상기 유동 저항율은 이 유동 저항율에 대응하는 입력 세트의 미세 구조 파라미터를 이용하여 정의되는 것인 컴퓨터 판독 가능한 매체.

도면

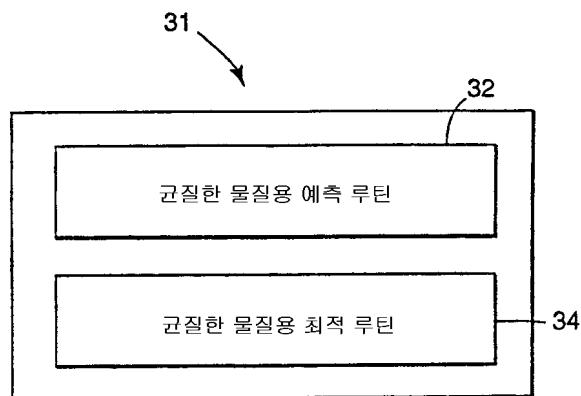
도면 1



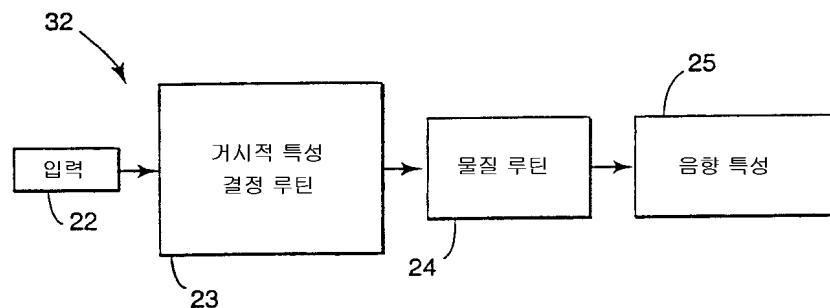
도면2



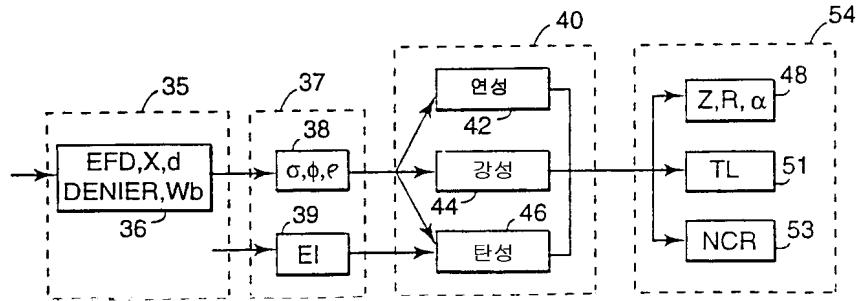
도면3



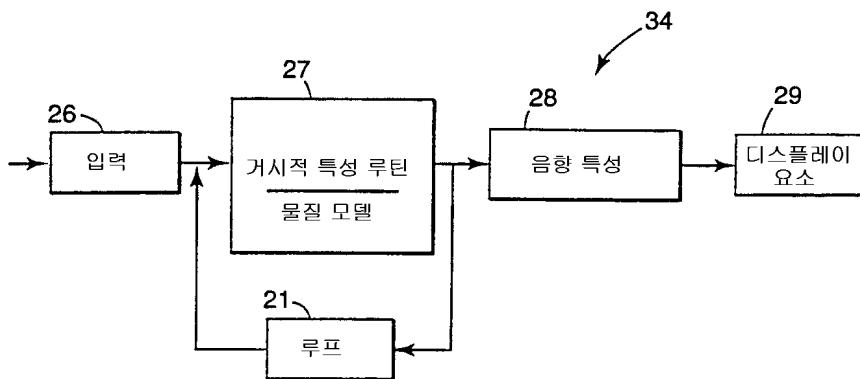
도면4



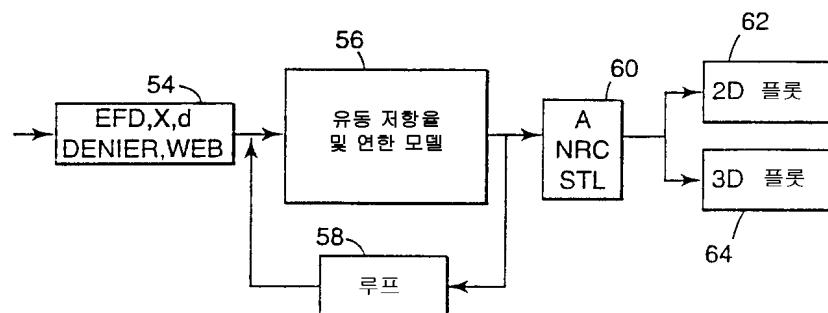
도면5



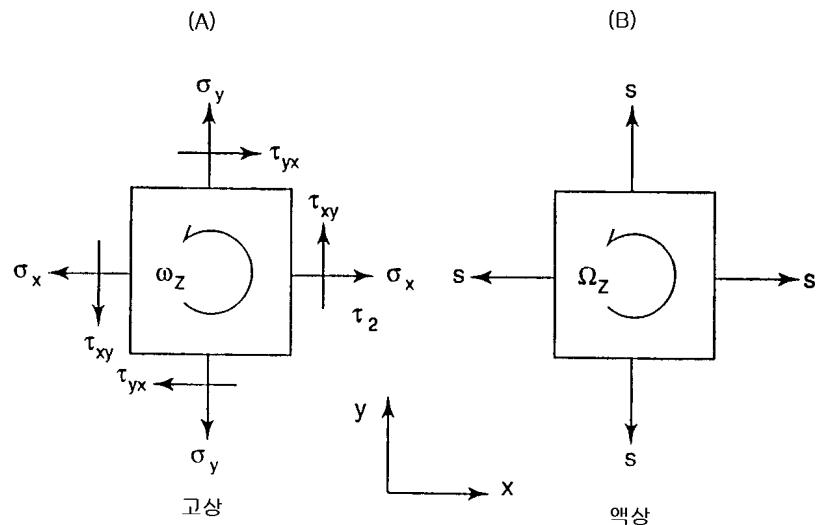
도면6



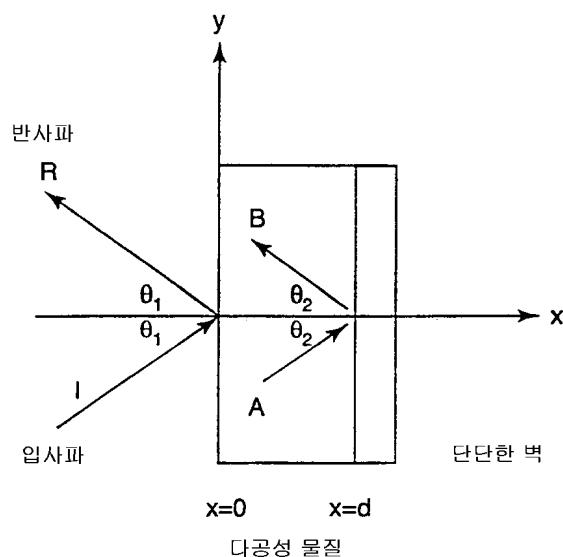
도면7



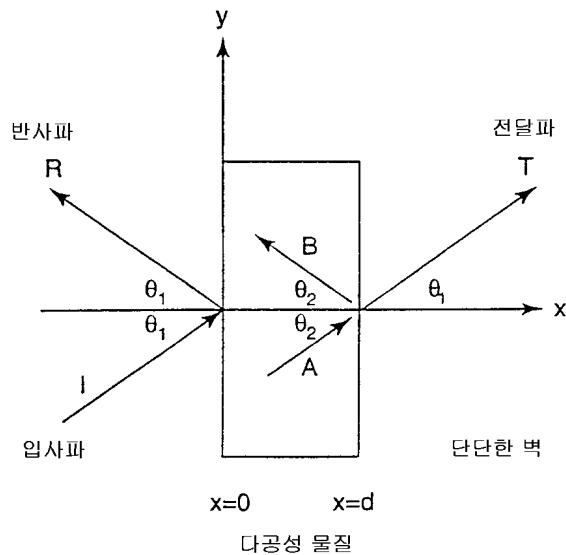
## 도면8



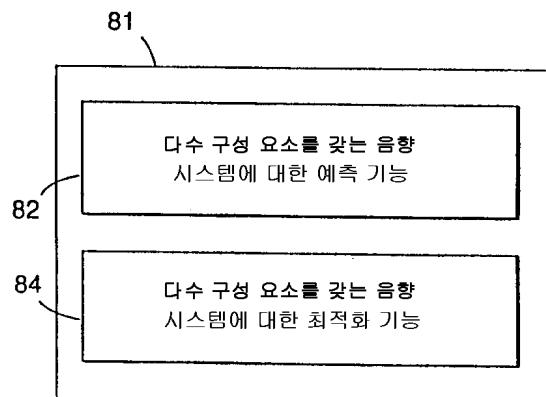
도면9a



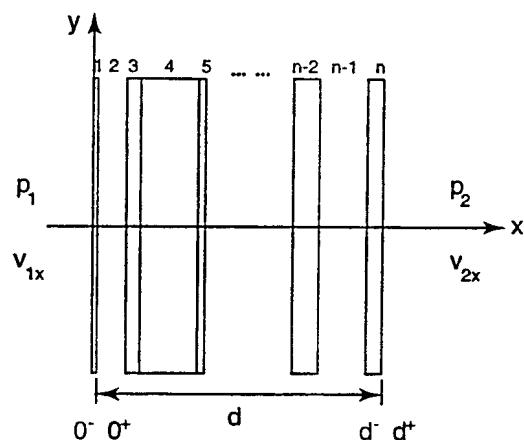
도면9b



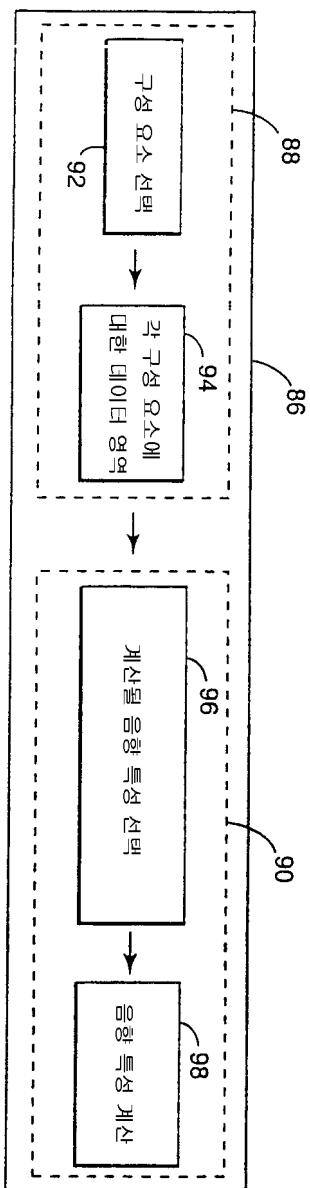
도면10



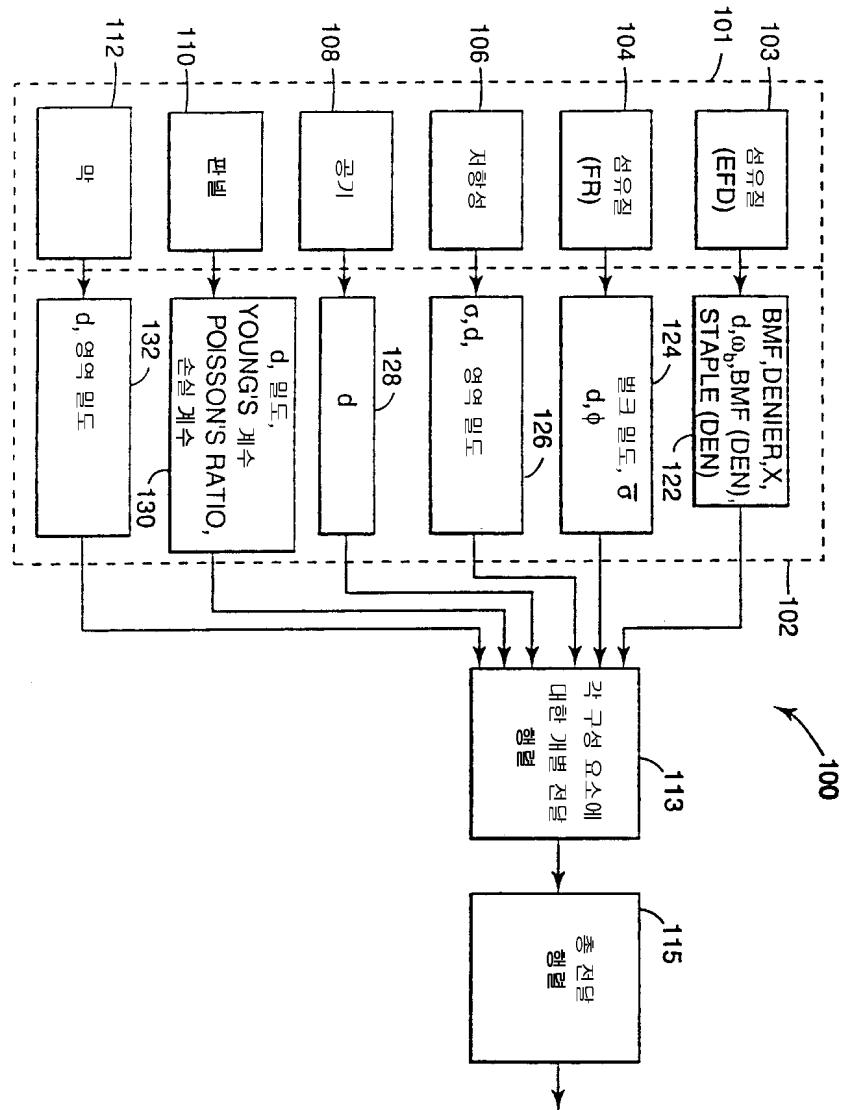
도면11



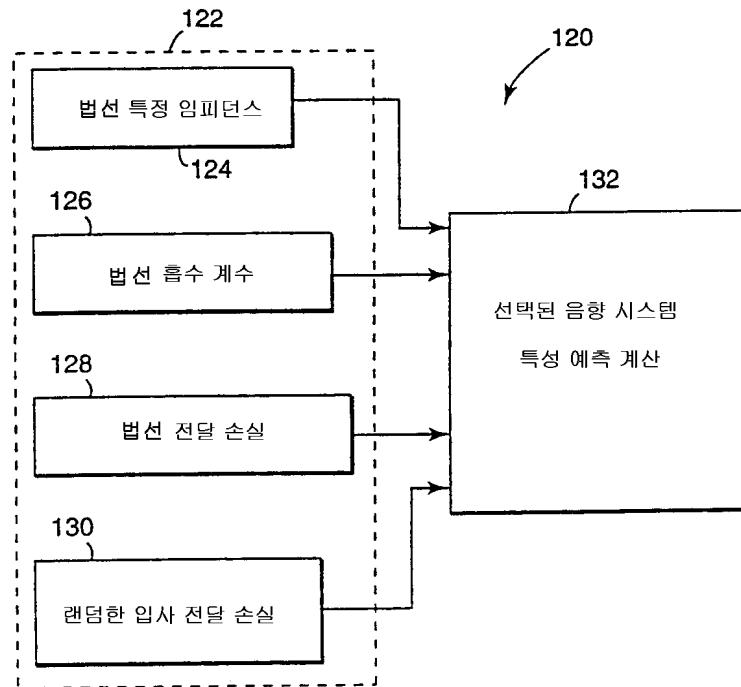
## 도면12



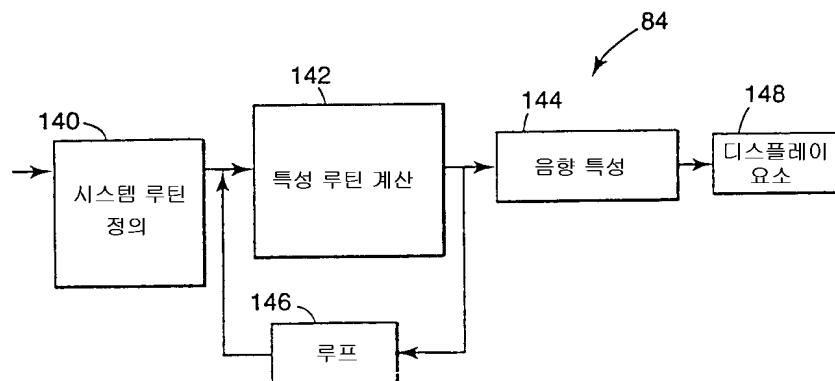
도면13



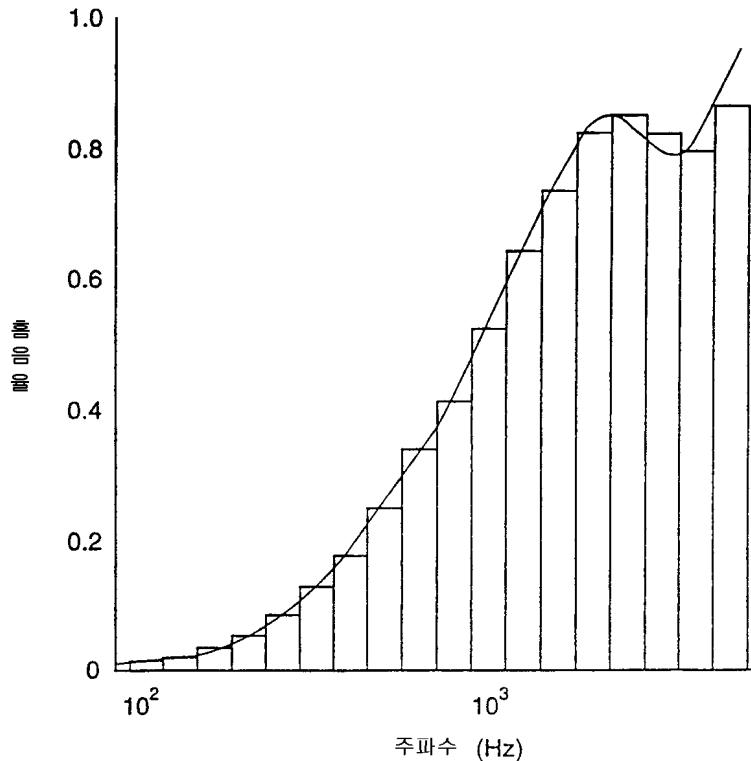
도면14



도면15



도면16



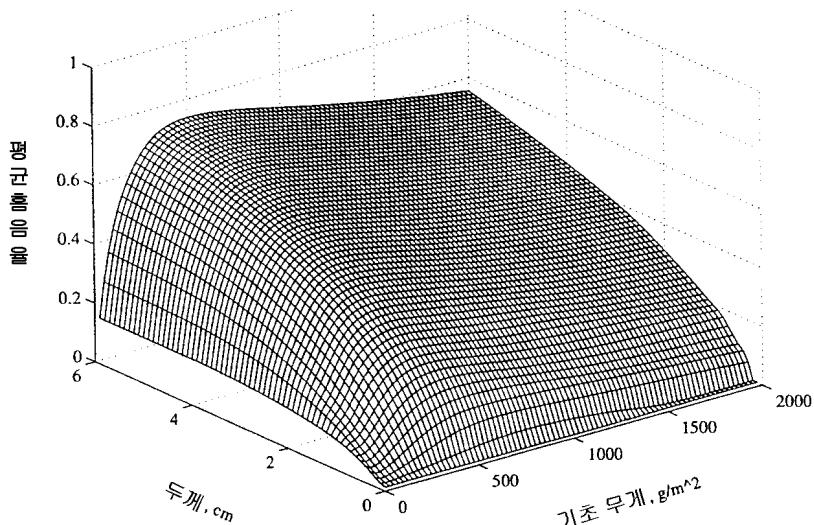
도면17a

$\bar{\alpha} / \rho_b$	$\bar{\alpha}$	$\rho_b$	EFD	Denier	%	d	Wb
0.226167740	0.942365583	4.1667	x1	2	0.1	0.06	0.25
0.226166680	0.942361168	4.1667		4	0.1	0.06	0.25
0.226166352	0.942359799	4.1667		6	0.1	0.06	0.25
0.226166195	0.942359145	4.1667		8	0.1	0.06	0.25
0.226166104	0.942358765	4.1667		10	0.1	0.06	0.25
0.226166044	0.942358519	4.1667		12	0.1	0.06	0.25
0.226166003	0.942358346	4.1667		14	0.1	0.06	0.25
0.226165973	0.942358219	4.1667		16	0.1	0.06	0.25
0.222688408	0.927868366	4.1667		2	0.2	0.06	0.25
0.222683002	0.927845841	4.1667		4	0.2	0.06	0.25
0.222681326	0.927838859	4.1667		6	0.2	0.06	0.25
0.222680525	0.927835520	4.1667	x1	8	0.2	0.06	0.25

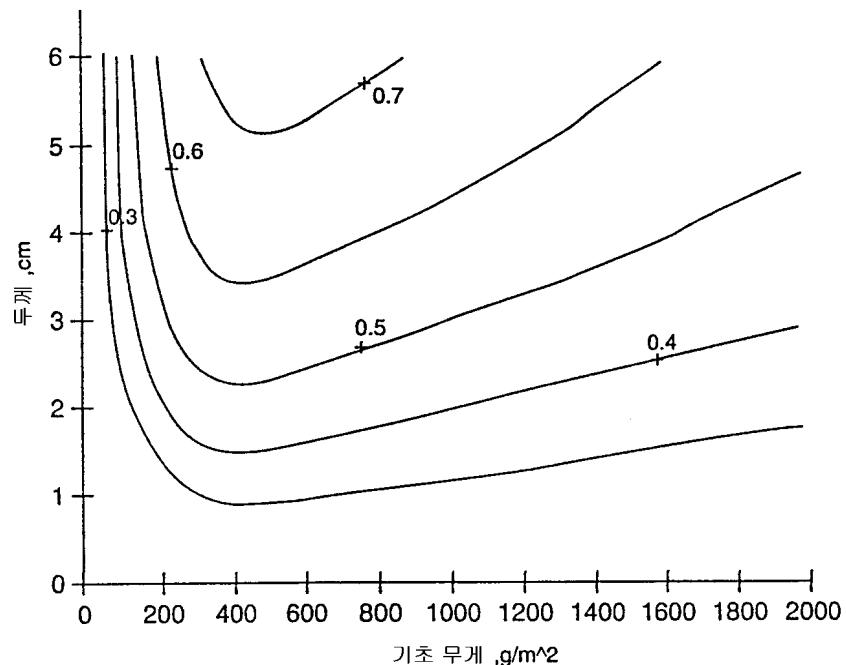
도면17b

$\bar{\alpha} / \rho_b$	$\bar{\alpha}$	$\rho_b$	EFD	Denier	%	d	Wb
0.158222594	0.922965132	5.83	x2	2	0.1	0.060	0.35
0.158219528	0.922947249	5.83		4	0.1	0.060	0.35
0.158218578	0.922941708	5.83		6	0.1	0.060	0.35
0.158218124	0.922939058	5.83		8	0.1	0.060	0.35
0.158217860	0.922937519	5.83		10	0.1	0.060	0.35
0.158217689	0.922936520	5.83		12	0.1	0.060	0.35
0.158217569	0.922935821	5.83		14	0.1	0.060	0.35
0.158217481	0.922935306	5.83		16	0.1	0.060	0.35
0.154556524	0.901579722	5.83		2	0.2	0.060	0.35
0.154543268	0.901502395	5.83		4	0.2	0.060	0.35
0.154539158	0.901478419	5.83		6	0.2	0.060	0.35 P
0.154537192	0.901466954	5.83		8	0.2	0.060	0.35
0.154536051	0.901460296	5.83	x2	10	0.2	0.060	0.35

도면18a



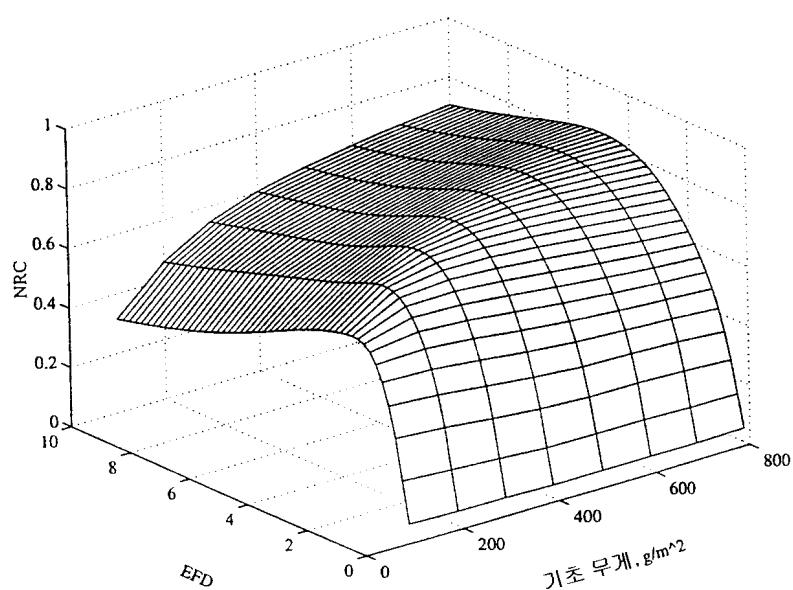
도면18b



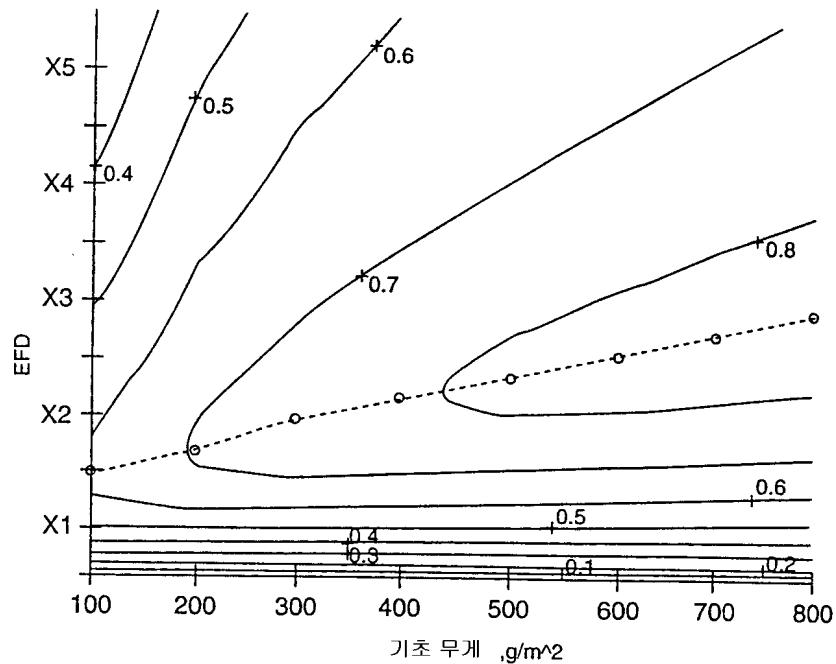
도면18c

삭제

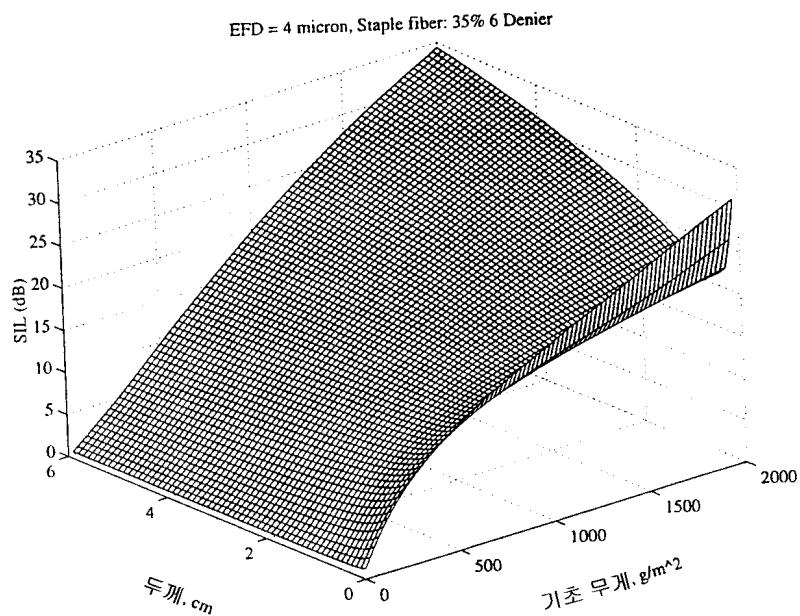
도면19a



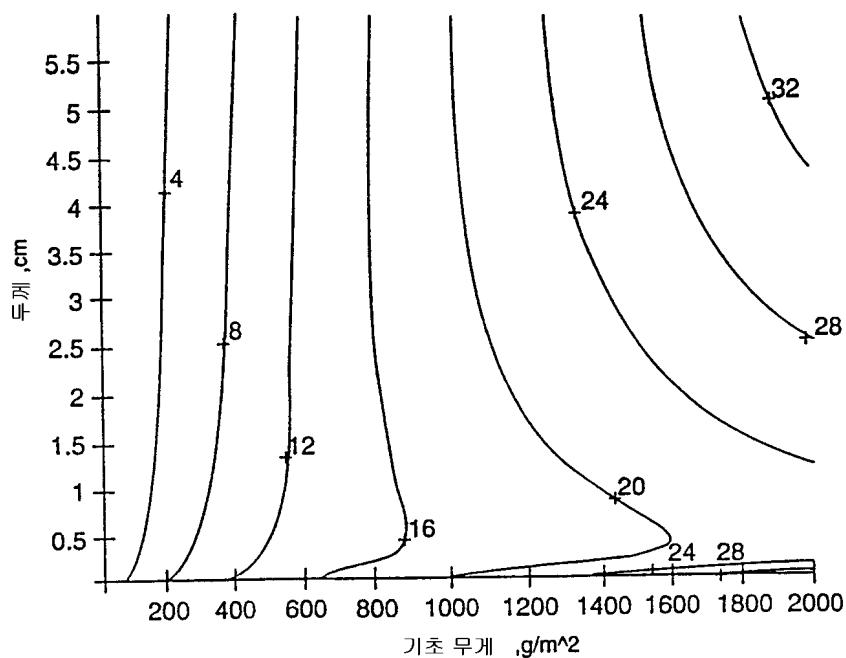
도면19b



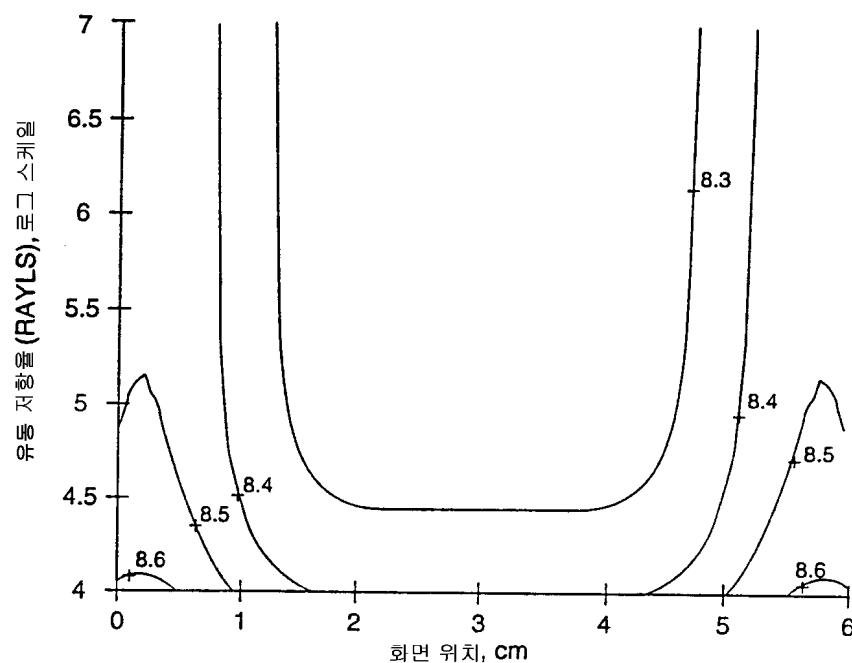
도면20a



도면20b



도면21a



도면21b

