



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0089937
(43) 공개일자 2025년06월19일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 11/16 (2006.01) G01N 11/00 (2020.01)
G06F 17/10 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01N 11/16 (2013.01)
G06F 17/10 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2023-0179805
(22) 출원일자 2023년12월12일
심사청구일자 2023년12월12일

(71) 출원인
경상국립대학교산학협력단
경상남도 진주시 진주대로 501 (가좌동)
(72) 발명자
황옥렬
경상남도 진주시 진주대로 501, 공과대학 기계공학부 403동 108호 (가좌동)
성민중
경상남도 진주시 개양로 120-41, 302호 (가좌동)
(74) 대리인
특허법인태백

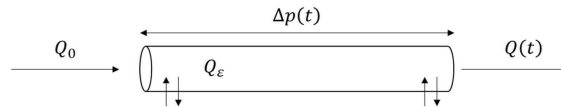
전체 청구항 수 : 총 16 항

(54) 발명의 명칭 배관유동 점탄성 측정방법

(57) 요약

본 발명은, 배관에 있는 측정대상 물질의 점탄성을 측정하는 배관유동 점탄성 측정방법에 있어서, 측정대상 물질의 유량에 대한 동적진동을 이용하여, 측정된 측정대상 물질의 유량의 진폭크기 Q_ε 와 압력강하의 진폭크기 Δp_ε 및 동적진동의 주파수 ω 를 통해 배관에 있는 측정대상 물질의 점탄성을 측정하는 배관유동 점탄성 측정방법을 제공한다.

대표도 - 도7



(52) CPC특허분류

G01N 2011/0026 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711186977
과제번호	2019R1A2C1003974
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	(과기부)한국연구재단
연구사업명	중견연구자지원사업
연구과제명	[통합EZ/5차년도] 에너지소산을 기반 유동정량화를 이용한 비뉴턴유체 유동모델링
및 공정모니터링 기법 개발	
기 여 율	1/1
과제수행기관명	경상국립대학교
연구기간	2023.03.01 ~ 2024.02.29

명세서

청구범위

청구항 1

배관에 있는 측정대상 물질의 점탄성을 측정하는 배관유동 점탄성 측정방법에 있어서,

상기 측정대상 물질의 유량에 대한 동적진동을 이용하여, 측정된 상기 측정대상 물질의 유량의 진폭크기 Q_ε 와 압력강하의 진폭크기 Δp_ε 및 동적진동의 주파수 ω 를 통해 상기 배관에 있는 측정대상 물질의 점탄성을 측정하는 배관유동 점탄성 측정방법.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 측정대상 물질의 점도가 η 이고, 상기 배관 내에서 유량 Q [m^3/s]로 흐를 때,

상기 배관의 압력강하 Δp 를 배관의 형상계수 α 에서 도출되고, 변동유량 $Q'(t)$ 를 통해 계산된 변동 압력강하 $\Delta p'(t)$ 을 이용하여 상기 측정대상 물질의 복소점도 η^* 를 도출하는 단계,

상기 복소점도 η^* 로부터 저장탄성을 G' 및 손실탄성을 G'' 을 도출하는 단계,

상기 배관의 유효전단응력 τ_{eff} , 유효전단율 속도 $\dot{\gamma}_{eff}$ 와 유효 전단율 γ_{eff} 을 도출하는 단계를 포함하는 배관유동 점탄성 측정방법.

청구항 3

청구항 2에 있어서,

상기 압력강하 Δp 는 수학적식 $\Delta p = \alpha \eta Q$ 를 통해 도출되고,

상기 변동유량 $Q'(t)$ 는 수학적식 $Q'(t) = Q_\varepsilon \sin(\omega t)$ 를 통해 도출되며,

상기 변동 압력강하 $\Delta p'(t)$ 는 수학적식 $\Delta p'(t) = \Delta p_\varepsilon \sin(\omega t + \delta) = \alpha \eta^* Q'(t)$ 를 통해 도출되는 배관유동 점탄성 측정방법.

청구항 4

청구항 2에 있어서,

상기 복소점도 η^* 는 수학적식 $\eta^* = \eta' - i\eta'' = \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta p_\varepsilon}{Q_\varepsilon} (\cos \delta - i \sin \delta)$ 을 통해 도출되며,

상기 저장탄성을 G' 및 손실탄성을 G'' 은 수학적식 $G'(\omega) = \eta'' \cdot \omega = \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta p_\varepsilon}{Q_\varepsilon} \cos \delta \cdot \omega$,

$G''(\omega) = \eta' \cdot \omega = \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta p_\varepsilon}{Q_\varepsilon} \sin \delta \cdot \omega$ 를 통해 도출되는 배관유동 점탄성 측정방법.

청구항 5

청구항 2에 있어서,

상기 배관의 유효전단응력 τ_{eff} 은 수학적식 $\tau_{eff} = \eta_{eff} \cdot \dot{\gamma}_{eff}$ 을 통해 도출되며,

상기 유효전단율 속도 $\dot{\gamma}_{eff}$ 는 수학적식 $\tau_{eff} = \eta_{eff} \cdot \dot{\gamma}_{eff}$ 을 통해 도출되고,

상기 유효 전단율 γ_{eff} 은 $\gamma_{eff,\varepsilon}(t) = K_s \cdot \frac{4}{\pi R^3} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot Q_\varepsilon(-\cos(\omega t))$ 을 통해 도출되는 배관유동 점탄성 측정방법.

청구항 6

청구항 2에 있어서,

상기 배관의 형상계수 α 와 압력강하 Δp 는 에너지소산을 기반 유동정량화를 통한 비례상수 K_p 를 이용하여 도출되는 배관유동 점탄성 측정방법.

청구항 7

청구항 6에 있어서,

상기 압력강하 Δp 는 수학적식 $\Delta p = \frac{2L}{\pi R^4} K_p \cdot \eta Q = \alpha \eta Q$ 을 통해 도출되고,

상기 배관의 형상계수 α 는 수학적식 $\alpha = \frac{2L}{\pi R^4} K_p$ 을 통해 도출되는 배관유동 점탄성 측정방법.

청구항 8

청구항 1에 있어서,

상기 배관은 원형 단면형태를 가지는 배관유동 점탄성 측정방법.

청구항 9

청구항 1에 있어서,

상기 배관은 사각형 단면형태를 가지는 배관유동 점탄성 측정방법.

청구항 10

청구항 1에 있어서,

상기 배관은 길이방향으로 직경이 확장되거나 축소되는 단면형태를 가지는 배관유동 점탄성 측정방법.

청구항 11

청구항 1에 있어서,

상기 배관은 원형 또는 사각형을 포함한 임의의 단면 형상을 가지는 배관유동 점탄성 측정방법.

청구항 12

청구항 1에 있어서,

상기 배관은 길이에 따라 단면 형상이 변화하거나 굴곡진 형상을 가지는 배관유동 점탄성 측정방법.

청구항 13

청구항 2에 있어서,

상기 배관에서 유량이 복수의 주파수가 합성된 다중모드에서는 유량 $Q(t)$ 와 압력강하 $\Delta p(t)$ 를 FFT(Fast Fourier Transform)을 이용한 주파수 분석을 수행하는 배관유동 점탄성 측정방법.

청구항 14

청구항 2에 있어서,

상기 배관에서 유량이 주기를 가지는 임의의 파형으로 표현되는 경우 푸리에 급수를 이용하는 배관유동 점탄성 측정방법.

청구항 15

청구항 14에 있어서,

상기 배관에서 입력과 출력이 임의의 파형으로 표현되는 경우 입력과 출력을 일정한 주파수 범위 내의 푸리에 급수를 이용하는 배관유동 점탄성 측정방법.

청구항 16

청구항 14에 있어서,

점탄성 모니터링 시스템을 구현할 때 저주파수 통과 필터(Low-pass filter)를 사용하여 특정한 차단 주파수 이상 주파수의 신호를 감쇠시켜 차단 주파수 이하의 주파수 신호만 통과시키는 배관유동 점탄성 측정방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 배관에 측정하고자 하는 물질(유체)이 있을 때, 유량에 대한 동적 진동(Dynamic oscillatory)을 이용하여 물질의 선형 점탄성 및 비선형 점탄성을 측정하는 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 제품을 생산하는 공정에서 물질이 겪는 유동(Flow)과 변형(Deformation)은 최종 제품의 품질 및 특성에 결정적인 영향을 미치며, 물질이 유동과 변형을 거치는 과정 속에서 나타내는 독특한 성질은 바로 그 물질의 대표 유변물성이다.

- [0003] 플라스틱, 필름, 접착제, 섬유, 화장품 등을 비롯하여 최근 산업적 관심이 고조되고 있는 이차전지 소재는 유기물과 무기물이 혼재된 매우 복잡한 구조를 가지는 복잡유체(Complex fluids) 중 하나로, 복잡한 형태의 유동과 변형 공정을 거쳐 제품으로 성형 가공되므로 물질 고유의 유변물성에 대한 이해는 가공 공정에서 있어 필수적이라 할 수 있다.
- [0004] 유변물성 측정 방법은 다양한 종류의 유동장을 구현하여 매우 정확도 높은 유변물성을 측정하는 장비인 레오미터(Rheometer)를 활용하여 물질에 변형 또는 응력을 가하고 이에 따라 나타나는 응력 또는 변형을 측정하여 고유의 물질함수(유변물성)를 얻어내는 것이다.
- [0005] 여러 유동 중에서도 물질의 고유 점탄성 특성을 측정하는데 가장 많이 사용되는 실험은 동적진동유동(Dynamic oscillatory shear)이다. 한쪽 방향으로 가해지는 정상상태 전단유동(Steady shear)과 달리 각주파수(Angular frequency) 또는 진폭(Strain amplitude)을 고정된 상태에서 양쪽방향으로 사인 형태의 주기성을 갖는 진동전단 변형을 가하여 그 결과로 나타나는 응력의 변화를 주파수(ω) 또는 진폭(γ_0)의 함수에 따른 유변물성으로 측정하는 방법이다.
- [0006] 진동전단변형이 가해지면 점탄성을 가지는 물질은 변형에너지가 응력으로써 물질 내부에 축적되어 그 물질의 탄성을 나타내는 저장탄성률(G')과 물질에 부여된 에너지가 에너지 소산에 의해 손실되어 그 물질의 점성을 나타내는 손실탄성률(G'')으로 나타나게 된다.
- [0007] 특히 이차전지를 비롯한 다양한 고분자 복합체를 사용하는 산업 분야에서는 믹싱 공정을 비롯한 코팅, 프린팅 등 다양한 공정이 존재하므로, 각 공정 조건에 따른 소재들의 물성 변화는 매우 민감한 사안이다. 이러한 관점에서 볼 때 복합유체의(선형 및 비선형) 점탄성 유변물성을 실시간으로 모니터링 할 수 있다면 실제 공정 해석 및 최적화에 큰 도움이 될 수 있다.
- [0008] 그러나 종래의 경우는 레오미터의 특정치구(Cone and Plate: CP, Parallel Plate: PP)를 이용해서만 측정이 가능하기 때문에 공정이 끝난 후 소재를 샘플링하여 측정할 수 밖에 없는 한계가 있다. 또한 레오미터는 모든 산업현장에 구비되기엔 매우 고가이며 장비 사이즈 및 설치 장소에 대한 제약이 상당히 커 다양한 공정 속에서 실시간으로 필요한 점탄성 모니터링을 하기엔 적합하지 않은 문제점이 있다.
- [0009] 이러한, 해당 유동장에서의 압력강하 또는 유량을 손쉽게 예측할 수 있는 방법에 대한 관련기술은 본 출원인은 대한민국공개특허 제10-2018-0115606호(2018.10.23)에 제시한 바 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0010] 본 발명은, 공정 제어를 위해 실제 산업공정 과정에 직접 설치가 가능하고 공정 중 유체의 점탄성 거동을 실시간 모니터링할 수 있게 하는 배관유동 점탄성 측정방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

- [0011] 본 발명은, 배관에 있는 측정대상 물질의 점탄성을 측정하는 배관유동 점탄성 측정방법에 있어서, 상기 측정대상 물질의 유량에 대한 동적진동을 이용하여, 측정된 상기 측정대상 물질의 유량의 진폭크기 Q_s 와 압력강하의 진폭크기 Δp_s 및 동적진동의 주파수 ω 를 통해 배관에 있는 측정대상 물질의 점탄성을 측정하는 배관유동 점탄성 측정방법을 제공한다.

발명의 효과

- [0012] 본 발명에 따른 배관유동 점탄성 측정방법은, 배관의 측정대상 물질 유동에서 측정된 유량 및 압력강하 정보(크기, 위상차)를 바탕으로 유효에너지소산율계수와 유효전단율계수를 구하고 이에 따른 측정대상 물질의 선형 및 비선형 저장탄성을 및 손실탄성율을 예측함으로써 측정대상 물질의 점탄성 거동을 실시간으로 모니터링할 수 있게 한다.

도면의 간단한 설명

- [0013] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 배관유동 점탄성 측정방법에 적용된 배관 형태를 나타낸 도면이다.
- 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 배관유동 점탄성 측정방법의 유량 및 압력강하의 단일모드 및 다중모드에 따른 주파수 분석 그래프이다.
- 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 배관유동 점탄성 측정방법의 임의 파형에 따른 전단율을 나타낸 도면이다.
- 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 배관유동 점탄성 측정방법의 배관 형상에 따라 각각 측정한 저장탄성률 G' 과 손실탄성률 G'' 결과와 선형영역 하에서 Single-mode Maxwell 유체 이론 값을 비교한 그래프이다.
- 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 배관유동 점탄성 측정방법의 각 배관 길이와 직경 비율의 각주파수에 따른 저장탄성률 G' 과 손실탄성률 G'' 측정 결과와 Single-mode Maxwell 유체 이론 값을 비교한 그래프이다.
- 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 배관유동 점탄성 측정방법에 따른 배관 유동의 전단율에 따른 저장탄성률 G' 과 손실탄성률 G'' 결과와 Giesekus model 이론 값을 비교한 시뮬레이션 결과이다.
- 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 배관유동 점탄성 측정방법을 나타낸 개략상태도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0014] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 따른 바람직한 실시 예를 상세히 설명하기로 한다. 이에 앞서, 본 명세서 및 청구범위에 사용된 용어나 단어는 통상적이거나 사전적인 의미로 한정해서 해석되어서는 아니 되며, 발명자는 그 자신의 발명을 가장 최선의 방법으로 설명하기 위해 용어의 개념을 적절하게 정의할 수 있다는 원칙에 입각하여 본 발명의 기술적 사상에 부합하는 의미와 개념으로 해석되어야만 한다.
- [0015] 본 발명의 일 실시예에 따른 배관유동 점탄성 측정방법은, 도 7과 같이 배관에 측정하고자 하는 물질(유체)이 있을 때, 유량에 대한 동적 진동(Dynamic oscillatory)을 이용하여, 배관 측정부에서의 유량의 진폭 크기 Q_0 과 압력강하의 진폭 크기 Δp_0 및 동적진동의 주파수 ω 를 이용하여 물질의 선형 점탄성 및 비선형 점탄성을 측정할 수 있다.
- [0016] 여기서, 동적진동유동은 측정치구에 사인 형태의 주기성을 갖는 변형을 가하고 그 결과로 나타나는 응력의 변화는 수학식1과 같이 주파수의 함수로 측정된다. 측정된 응력은 물질 고유의 점탄성 특성에 의해 위상차가 반영되고 이는 탄성체와 점성유체의 중간적 형태로 알려져 있다.

수학식 1

$$\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t) \quad , \quad \tau = \tau_0 \sin(\omega t + \delta)$$

[0017]

- [0018] 여기서 γ 는 변형율(strain), γ_0 는 변형율의 진폭, ω 는 각주파수, τ 는 전단응력, τ_0 는 전단응력의 진폭, t 는 시간, δ 는 위상차를 나타낸다.

- [0019] 측정된 응력은 점탄성 물질의 탄성을 나타내는 저장탄성률(Storage modulus) G' 과 점성을 나타내는 손실탄성률(Loss modulus) G'' 두 가지 물질함수로 나눌 수 있으며 수학식2와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 2

$$\tau = \tau_0 \cos \delta \sin(\omega t) + \tau_0 \sin \delta \cos(\omega t) = \gamma_0 G' \sin(\omega t) + \gamma_0 G'' \cos(\omega t)$$

$$G'(\omega) \equiv \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos \delta, \quad G''(\omega) \equiv \frac{\tau_0}{\gamma_0} \sin \delta$$

[0020]

[0022] [배관 유동에서 점탄성 측정기법: 선형점탄성 측정]

[0023] 배관 내의 유체에서 점탄성 측정기법에 대해 좀 더 상세하게 살펴보면, 점도가 η 인 유체가 배관 내에서 유량 Q [m^3/s]로 흐를 때, 배관의 압력강하 Δp 는 점도와 유량의 곱과 비례한다. 즉, $\Delta p \propto \eta Q$ 이며 수학식3과 같이 나타낼 수 있다. 이 상관관계의 비례상수를 α 라고 하면, α 는 배관의 형상에 의해 결정되는 값이다.

수학식 3

$$\Delta p = \alpha \eta Q$$

[0024]

[0025] 여기서 형상계수 α 를 구하는 방법은 다양하게 있을 수 있다. 예를 들어 실험적으로 점도를 알고 있는 뉴턴 유체에 대해 배관의 유량에 대해 압력강하를 측정하면 형상계수 α 를 쉽게 구할 수 있고, 같은 방식으로 수치해석적 방법을 이용하여도 쉽게 구할 수 있다.

[0026] 이때, 전단응력과 전단율은 배관에서 에너지소산을 기반의 유동정량화 기법을 사용하여 구할 수 있다.

[0027] 상기 형상계수 α 를 이용하여 점탄성 측정방법과 비선형 점탄성측정에 대해 설명하면 다음과 같다.

[0028] 배관에 있는 유체의 유량(Flow rate) $Q(t)$ 이 주기적으로 진동할 때 평균 유량(Mean flow rate) Q_0 이 충분히 작고, 변동유량(Fluctuation flow rate) Q_ε 이 평균유량 Q_0 보다 작은 경우 배관에서 측정되는 압력강하 $\Delta p(t)$ 는 위상차 δ 를 가지며, 수학식4와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 4

$$\Delta p(t) = \Delta p_0 + \Delta p'(t) = \Delta p_0 + \Delta p_\varepsilon \sin(\omega t + \delta)$$

[0029]

$$Q(t) = Q_0 + Q'(t) = Q_0 + Q_\varepsilon \sin(\omega t), \quad Q_0 > Q_\varepsilon: \text{No backflow}$$

[0030]

[0031] 여기서 변동유량 $Q'(t)$ 과 변동 압력강하 $\Delta p'(t)$ 의 상관관계는 수학식3의 식을 따른다. 즉, 이때 점도는 복소점도(Complex viscosity) η^* 로 표현이 가능하며 다음과 같이 수학식5로 나타낼 수 있다.

수학식 5

[0032]

$$\Delta p'(t) = \Delta p_{\varepsilon} \sin(\omega t + \delta) = \alpha \eta^* Q'(t) \quad , \quad Q'(t) = Q_{\varepsilon} \sin(\omega t)$$

[0033]

수학식5에서 유량의 진폭 Q_{ε} 이 충분히 작으면, 복소점도 η^* 는 압력강하 거동을 이용하여 나타낼 수 있고, 계산의 편의를 위해 수학식6와 같이 복소수 표현을 도입하여 수학식7과 같이 복소점도의 복소수 표현을 얻을 수 있다.

수학식 6

[0034]

$$Q'(t) = Q_{\varepsilon} \cdot \text{Re}\{-ie^{i\omega t}\} \quad , \quad \Delta p'(t) = \Delta p_{\varepsilon} \cdot \text{Re}\{-ie^{i(\omega t + \delta)}\}$$

수학식 7

[0035]

$$\eta^* = \eta' - i\eta'' = \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta p_{\varepsilon}}{Q_{\varepsilon}} (\cos \delta - i \sin \delta)$$

[0036]

수학식7에서 표현된 복소점도를 수학식8의 선형점탄성에서 복소점도와 복소탄성율(Complex moduli)의 일반적인 상관관계를 이용하면, 수학식9와 같이 저장탄성율 G' 및 손실탄성율 G'' 을 구할 수 있으며, 이 경우 G' 과 G'' 은 유량의 진폭 Q_{ε} 가 충분히 작기 때문에, 주파수 ω 만의 함수이다.

수학식 8

[0037]

$$G' = \eta'' \cdot \omega \quad \text{and} \quad G'' = \eta' \cdot \omega$$

수학식 9

[0038]

$$G'(\omega) = \eta'' \cdot \omega = \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta p_{\varepsilon}}{Q_{\varepsilon}} \cos \delta \cdot \omega \quad , \quad G''(\omega) = \eta' \cdot \omega = \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta p_{\varepsilon}}{Q_{\varepsilon}} \sin \delta \cdot \omega$$

[0039]

수학식9는 배관에 있는 유체의 유량진동을 이용하여, 유체의 선형점탄성을 구하는 식으로 사용될 수 있다.

[0040]

저장탄성율 G' 과 손실탄성율 G'' 을 결정하는 문제에서 유량의 진폭 Q_{ε} 이 큰 경우를 비선형 영역이라 하고, 이 때 저장탄성율 G' 과 손실탄성율 G'' 은 유량의 진폭 Q_{ε} 과 주파수 ω 모두의 함수가 되며, 이를 비선형 점탄성이라 한다.

[0042]

[배관유동에서 비선형 점탄성 측정]

[0043]

비선형 점탄성을 구하기 위해서는 배관 유동에서 측정한 압력강하와 시스템의 대표 전단응력(Representative

shear stress) 및 배관 유동의 유량과 시스템의 대표 전단율(Representative shear strain)의 상관관계를 구하고, 대표전단응력과 대표전단율을 상기 수학식2에 대입하여 저장탄성률과 손실탄성율을 구할 수 있다.

[0044] 배관 유동에서 대표전단응력과 대표전단율을 구하기 위하여, 다양한 방식이 있지만, 본 발명의 일 실시예에서는 일반적으로 배관 유동(Pipe flow)에서 일반적으로 사용하는 에너지소산을 기반 유동정량화를 도입하며, 이 경우 수학식3의 형상계수 α 를 좀더 구체적으로 표현할 수도 있다.

[0045] 에너지소산을 기반 유동정량화는 무차원수 Power number N_p 와 레이놀즈 수 Re로 배관 유동의 특성곡선을 구하는 방법으로, 배관 시스템 형상에 대해 특성곡선을 정할 수 있다.

[0046] 점도가 η 인 유체가 배관 내에서 유량 Q [m^3/s]로 흐르고, 배관의 압력강하 Δp 일 때 시스템에 가해지는 동력 P 는 $P = \Delta p \cdot Q$ 로 계산되고, 이 양은 층류영역에서 시스템 내의 에너지소산율의 총합과 같다. $P = \int_V \eta \dot{\gamma}^2 dV$. (이때 동력은 모터동력이 아니고, 모터 동력 중에 쉘이나 감속기에서의 마찰에 의한 동력손실을 제외한 순동력으로 총에너지소산율이라고 한다.)

[0047] Power number N_p 는 총에너지소산율을 난류영역에서의 특성에너지소산율로 나눈 값으로 배관에서는 평균속도 $\bar{u}$ [m/s] ($\bar{u} = Q/\pi R^2$), 배관의 겉보기 전단율 $\dot{\gamma}_{app}$ ($\dot{\gamma}_{app} = 4Q/\pi R^3$)을 이용하여 표현되고, 배관의 레이놀즈 수 Re도 유체의 밀도를 ρ 라 하면 위의 변수로 수학식10과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 10

$$N_p = \frac{\bar{\varepsilon}}{\rho \bar{u}^2 \dot{\gamma}_{app}} = \frac{\bar{\varepsilon} \cdot \pi^3 R^7}{4 \rho Q^3}, \quad Re = \frac{\rho \bar{u} D}{\eta} = \frac{2 \rho Q}{\eta \cdot \pi R}$$

[0049] 점도가 일정한 뉴턴유체의 층류영역에서는 Power number N_p 가 레이놀즈 수 Re의 역수에 비례하며, (즉 $N_p \sim Re^{-1}$) 비례상수를 K_p 라고 정의하면, 수학식11과 같이 Power number와 레이놀즈 수의 상관관계를 나타낼 수 있다.

수학식 11

$$N_p Re = K_p$$

[0051] 여기서, 비례상수 K_p 는 배관 시스템 형상에 의해서 결정된다.

[0052] 수학식10에서 정의된 Power number와 레이놀즈 수의 정의를 수학식11에 대입하면, 수학식12와 같이 배관 형상계수 α 가 K_p 를 이용해 나타낼 수 있으며, 이는 배관 형상계수를 구하는 또 다른 방법에 해당한다.

수학식 12

$$\Delta p = \frac{2L}{\pi R^4} K_p \cdot \eta Q = \alpha \eta Q, \quad \alpha = \frac{2L}{\pi R^4} K_p$$

[0054] 배관 시스템의 유효전단응력과 유효전단율을 구하는 방법에 대해 살펴보면, 배관의 유효전단응력 τ_{eff} 은 수학식13과 같이 나타되며, 유효전단율 $\dot{\gamma}_{eff}$ 은 유효전단율 속도 $\dot{\gamma}_{eff}$ 로부터 구할 수 있다.

수학식 13

[0055] $\tau_{eff} = \eta_{eff} \cdot \dot{\gamma}_{eff}$

[0056] 배관 시스템의 정상상태의 유동에 대해 유량 Q 과 유효전단율 속도(Effective shear rate) $\dot{\gamma}_{eff}$ 는 유효전단율 계수 K_s 를 통해 겔보기 전단율 속도(Apparent shear rate)에 비례하게 결정될 수 있다.

수학식 14

[0057] $\dot{\gamma}_{eff} = K_s \dot{\gamma}_{app} = K_s \cdot \frac{4Q}{\pi R^3}$

[0058] 수학식14의 상관관계는 순수하게 기하학적인 관계로 볼 수 있으며, 주파수 ω 로 진동하는 배관 유동에 대해서도 같은 방식으로 적용이 가능하다. 또한 전단율 속도를 시간에 따라 적분하면 전단율(Strain)이 나오기 때문에, 수학식15와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 15

[0059] $\gamma = \int_0^t \dot{\gamma} dt = \dot{\gamma} \cdot t = K_s \cdot \frac{4Q}{\pi R^3} \cdot t$

[0060] 배관 시스템의 정상상태의 유동에서는 점도 η 와 유효전단율 속도 $\dot{\gamma}_{eff}$ 가 유량의 함수로써 표현될 수 있다.

수학식 16

[0061] $\tau_{eff} = \eta(Q) \cdot \dot{\gamma}_{eff}(Q)$

[0062] 수학식12를 점도 η 에 대해 정리하면 $\eta = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{\pi R^4}{2L} \cdot \frac{\Delta p}{Q}$ 로 표현되며, 수학식16에 수학식14와 같이 대입하면 유효전단응력 τ_{eff} 를 수학식17과 같이 구할 수 있다.

수학식 17

[0063] $\tau_{eff} = \eta(Q) \cdot \dot{\gamma}_{eff}(Q) = \left(\frac{1}{K_p} \cdot \frac{\pi R^4}{2L} \cdot \frac{\Delta p}{Q} \right) \cdot \left(K_s \cdot \frac{4Q}{\pi R^3} \right) = \frac{2R}{L} \cdot \frac{K_s}{K_p} \cdot \Delta p$

[0064] 이제 진동 압력 구동 흐름(oscillatory pressure driven flow)에서 유량 $Q(t)$ 와 전단율 $\dot{\gamma}(t)$, 전단응력 $\tau(t)$ 와 압력강하 $\Delta p(t)$ 사이의 상관관계를 구하는 방법을 제시한다.

[0065] 여기서, 유효전단율 속도 $\dot{\gamma}_{eff}$ 는 유량 $Q(t) = Q_0 + Q_s \sin(\omega t)$ 과 같이 $\dot{\gamma}_{eff}(t) = \dot{\gamma}_{0,eff} + \dot{\gamma}_{s,eff} \sin(\omega t)$ 로 표현되며, 수학식18과 같이 유량의 함수로 표현할 수 있다.

수학식 18

[0066]
$$\dot{\gamma}_{eff}(t) = K_s \cdot \frac{4Q'(t)}{\pi R^3} = K_s \cdot \frac{4Q_\varepsilon}{\pi R^3} \sin(\omega t)$$

[0067] 전단율 속도를 시간에 따라 적분하면 전단율(Strain)이 나오기 때문에, 수학식19와 같이 표현할 수 있다.

수학식 19

[0068]
$$\gamma_{eff,\varepsilon}(t) = K_s \cdot \frac{4}{\pi R^3} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot Q_\varepsilon(-\cos(\omega t))$$

[0069]
$$\gamma_0 = K_s \cdot \frac{4}{\pi R^3} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot Q_\varepsilon$$

[0070] 수학식 19에서 전단변형율의 진폭(strain amplitude) γ_0 은 맥동유량 Q_ε 과 주파수 ω 의 함수로 표현이 가능함을 알 수 있다.

[0071] 압력강하 $\Delta p(t)$ 와 유효전단응력 $\tau_{eff}(t)$ 사이의 관계는 기본적으로 힘의 균형이며 수학식20과 수학식21로 표현될 수 있다.

수학식 20

[0072]
$$\Delta p(t) = \Delta p_0 + \Delta p'(t) = \Delta p_0 + \Delta p_\varepsilon \sin(\omega t + \delta)$$

수학식 21

[0073]
$$\tau_{eff}(t) = \tau_{eff,0} + \tau'_{eff}(t) = \tau_{eff,0} + \tau_{eff,\varepsilon} \sin(\omega t + \delta)$$

[0074] 따라서, 수학식17을 사용하여 아래와 같이 유효전단응력을 구할 수 있다.

수학식 22

[0075]
$$\tau_{eff,0} = \frac{2R}{L} \cdot \frac{K_s}{K_p} \cdot \Delta p_0, \quad \tau'_{eff}(t) = \frac{2R}{L} \cdot \frac{K_s}{K_p} \cdot \Delta p'(t), \quad \tau_{eff,\varepsilon} = \frac{2R}{L} \cdot \frac{K_s}{K_p} \cdot \Delta p_\varepsilon$$

[0076] 수학식22의 전단응력 τ'_{eff} 및 수학식19의 전단율 $\gamma_{eff,\varepsilon}$ 을 이용하여, 수학식1과 수학식2에서 사용한 방법을 이용하여 수학식23의 복소탄성계수 G^* 를 구할 수 있으며, 이 경우 선형 점탄성의 가정이 필요 없기 때문에 전단율이 큰 비선형 점탄성의 경우도 적용될 수 있는 일반적 관계식에 해당한다.

수학식 23

$$G^* = \frac{\tau'_{eff}}{\gamma_{eff,\varepsilon}} = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{\pi R^4}{2L} \cdot \frac{\Delta p_\varepsilon}{Q_\varepsilon} \cdot \omega \cdot \frac{\sin(\omega t + \delta)}{-\cos(\omega t)}$$

계산의 편의를 위해 식(24)와 같이 복소수 표현을 도입하여 정리할 수 있다.

수학식 24

$$G^* = \frac{\tau'_{eff}}{\gamma_{eff,\varepsilon}} = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{\pi R^4}{2L} \cdot \frac{\Delta p_\varepsilon}{Q_\varepsilon} \cdot \frac{Re\{-ie^{i(\omega t + \delta)}\}}{Re\{-e^{i\omega t}\}} = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{\pi R^4}{2L} \cdot \frac{\Delta p_\varepsilon}{Q_\varepsilon} \cdot \omega \cdot (-\sin \delta + i \cos \delta)$$

그러면, 다음과 같이 비선형 영역까지 적용이 가능한 저장탄성을 G' 과 손실탄성을 G'' 을 구할 수 있다.

수학식 25

$$G'(\omega, \gamma_0) = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{\pi R^4}{2L} \cdot \frac{\Delta p_\varepsilon}{Q_\varepsilon} \sin \delta \cdot \omega \quad G''(\omega, \gamma_0) = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{\pi R^4}{2L} \cdot \frac{\Delta p_\varepsilon}{Q_\varepsilon} \cos \delta \cdot \omega$$

$$\gamma_0 = K_s \cdot \frac{4}{\pi R^3} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot Q_\varepsilon$$

수학식25에서 제시된 저장탄성을 G' 과 손실탄성을 G'' 의 수식은 수학식9의 형상계수 α 를 K_p 를 이용해 표현한 선형 점탄성에서의 저장탄성을 G' 과 손실탄성을 G'' 에 대한 수식과 일치하고, 이때 변형률 γ_0 은 수학식19 또는 수학식25의 식과 같이 유량의 맥동의 진폭에 의해 결정된다.

즉, 수학식9는 선형 영역뿐 아니라 비선형 영역에서도 적용이 가능함을 알 수 있다.

[실시예, 일반적인 배관형상에 대한 적용]

이러한, 점탄성 측정방법을 도 1과 같은 일반적인 배관을 적용하여 측정하는 것에 대해 살펴보면 다음과 같다.

여기서, 적용된 배관은 도 1의 (a)와 같이 단면이 원형이며 길이 방향으로 형상 변화가 없는 형태와, 도 1의 (b)와 길이방향으로 배관이 확장되거나 축소되는 형태 및 도 1의 (c)와 같이 아니라 배관의 단면이 사각형인 형태에서 물질의 점탄성 측정이 가능할 수 있다. 또한, 배관은 원형, 사각형을 포함한 임의의 단면 형상을 가지거나, 길이에 따라 단면형상이 변화하거나 굴곡된 형태에서 물질의 점탄성 측정이 가능함은 물론이다.

이는 수학식3에서 사용된 형상계수 α 를 사용하거나, 수학식12와 같이 배관 형상계수 α 가 아닌 K_p 를 사용하여 수학식25와 같이 수식을 유도할 수 있으며, 이 경우 선형 점탄성에서의 저장탄성을 G' 과 손실탄성을 G'' 뿐만 아니라 비선형 영역에서도 적용이 가능하다.

우선 수학식3의 배관 형상계수 α 를 이용하여 배관의 단면이 사각형일 때 물질의 점탄성을 측정하는 방법에 대해 살펴보면 앞서 설명하였듯이 형상계수 α 의 경우 실험적으로 점도를 알고 있는 뉴턴 유체에 대해 배관의 유량에

대해 압력강하를 측정하면 쉽게 구할 수 있고, 같은 방식으로 수치해석적 방법을 이용하여도 쉽게 구할 수 있다.

[0090] 구한 형상계수 α 를 수학식9에 사용하면 유체의 점탄성을 측정할 수 있다

[0091] 그리고, 길이 방향으로 배관이 확장되었다 축소되었을 때 저장탄성을 G' 과 손실탄성을 G'' 을 구하는 방법에 대해 간략히 설명하면, 앞서 기술하였던 에너지소산율 기반의 유동정량화 기법을 동일하게 사용하며 복소점도 표현을 통해 부과한 변형에 대하여 상을 같이하는(In phase)와 상을 달리하는(Out of phase)를 나누어 구할 수 있다.

[0092] 확장/축소 배관의 경우 배관 입구 형상의 기반하여 Power number N_p 와 레이놀즈 수, 겉보기 전단율 속도 $\dot{\gamma}_{app}$ 이 수학식26과 같이 정의된다.

$$[0093] \quad \dot{\gamma}_{app} = \frac{4Q}{\pi R_1^3}, \quad N_p = \frac{\bar{\varepsilon}}{\rho \bar{u}^2 \dot{\gamma}_{app}} = \frac{\bar{\varepsilon} \cdot \pi^3 R_1^7}{4\rho Q^3}, \quad Re = \frac{\rho \bar{u} D}{\eta} = \frac{2\rho Q}{\eta \cdot \pi R_1}$$

[0094] 이 배관 시스템에서도 점도가 η 인 유체가 배관 내에서 유량 Q [m^3/s]로 흐르고, 배관의 압력강하 Δp 일 때 시스템에 가해지는 동력 P 는 $P = \Delta p \cdot Q$ 로 계산되고, 단위 부피당 동력 $\bar{\varepsilon}$ 는 수학식27 같이 나타낼 수 있다.

수학식 27

$$[0095] \quad \bar{\varepsilon} = \Delta p \cdot Q \cdot \frac{1}{\pi \{16R_1^3 + R_2^2(L - 16R_1)\}}$$

[0096] 수학식26을 Power number와 레이놀즈 수의 상관관계 수학식11에 대입하여 압력강하 Δp 에 대해 정리하면 수학식 28와 같이 쓸 수 있다.

수학식 28

$$[0097] \quad \Delta p = \frac{2\{16R_1^3 + R_2^2(L - 16R_1)\}}{\pi R_1^6} \cdot K_p \cdot \eta \cdot Q$$

[0098] 수학식28를 변동유량 $Q'(t)$ 와 변동 압력강하 $\Delta p'(t)$ 에 대해 쓸 수 있으며, 복소점도 η^* 를 압력강하 거동을 이용하여 표현할 수 있다. 계산의 편의를 위해 수학식 29와 같이 복소수 표현을 도입하여 수학식30와 같이 복소점도의 복소수 표현을 얻을 수 있다.

수학식 29

$$[0099] \quad Q'(t) = Q_\varepsilon \cdot Re\{-ie^{i\omega t}\}, \quad \Delta p'(t) = \Delta p_\varepsilon \cdot Re\{-ie^{i(\omega t + \delta)}\}$$

수학식 30

$$[0100] \quad \eta^* = \eta' - i\eta'' = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{\pi R_1^6}{2\{16R_1^3 + R_2^2(L - 16R_1)\}} \cdot \frac{\Delta p_\varepsilon}{Q_\varepsilon} (\cos \delta - i \sin \delta)$$

[0101] 수학식30에서 표현된 복소점도를 수학식31의 선형점탄성에서 복소점도와 복소탄성율(Complex moduli)의 일반적

인 상관관계를 이용하면, 수학식32와 같이 저장탄성율 G' 및 손실탄성율 G'' 을 구할 수 있으며, 이 경우 G' 과 G'' 은 유량의 진폭 Q_ε 가 충분히 작기 때문에, 주파수 ω 만의 함수이다.

수학식 31

$$G' = \eta'' \cdot \omega \quad \text{and} \quad G'' = \eta' \cdot \omega$$

수학식 32

$$G'(\omega) = \eta'' \cdot \omega = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{\pi R_1^6}{2\{16R_1^3 + R_2^2(L - 16R_1)\}} \cdot \frac{\Delta p_\varepsilon}{Q_\varepsilon} \cos \delta \cdot \omega$$

$$G''(\omega) = \eta' \cdot \omega = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{\pi R_1^6}{2\{16R_1^3 + R_2^2(L - 16R_1)\}} \cdot \frac{\Delta p_\varepsilon}{Q_\varepsilon} \sin \delta \cdot \omega$$

수학식32는 확장/축소 배관에 있는 유체의 유량진동을 이용하여, 유체의 점탄성을 구하는 식으로 사용될 수 있다.

그리고, 본 발명의 배관 유동에서 점탄성 측정기법은 도 2의 (a)와 같이 유량 $Q(t)$ 과 압력강하 $\Delta p(t)$ 가 단일 주파수이며 완전한 사인파일 경우(단일모드) 점탄성 측정이 가능함을 보였다. 도 2의 (b)와 같은 배관시스템에서 여러 주파수가 합성된 경우(다중모드) 점탄성 측정 방법에 대해 설명하면 다음과 같다.

도 2의 (a)는 단일 주파수이며 완전한 사인파인 단일모드를 나타낸 그림이며, 그림 2의 (b)는 여러 주파수가 합성된 다중모드를 나타낸 그림이다. 단일모드에 경우 위에서 제시한 배관에서의 점탄성 측정 기법을 이용하여 측정이 가능하며, 다중모드에 경우 여러 주파수가 합성되어 있으므로 FFT(Fast Fourier Transform)을 이용하여 주파수 분석을 수행하여야 한다.

유량 $Q(t)$ 와 압력강하 $\Delta p(t)$ 모두 FFT(Fast Fourier Transform)을 수행하여 합성되어 있는 주파수 ω_i , 주파수 성분의 크기 $Q_{\varepsilon,i}$, $\Delta p_{\varepsilon,i}$ 와 위상차 δ_i 를 구할 수 있으며, 유량 $Q(t)$ 와 압력강하 $\Delta p(t)$ 는 수학식33으로 구할 수 있다.

수학식 33

$$Q(t) = Q_0 + Q_{\varepsilon,1} \sin(\omega_1 t) + Q_{\varepsilon,2} \sin(\omega_2 t) + \dots$$

$$\Delta p(t) = \Delta p_0 + \Delta p_{\varepsilon,1} \sin(\omega_1 t + \delta_1) + \Delta p_{\varepsilon,2} \sin(\omega_2 t + \delta_2) + \dots$$

주파수 ω_i , 주파수 성분의 크기 $Q_{\varepsilon,i}$, $\Delta p_{\varepsilon,i}$ 와 위상차 δ_i 를 모두 구하였기 때문에 배관의 형상계수 α 를 이용한 수학식9를 사용하거나, 에너지소산율계수 K_p 를 이용한 식 (25a,b)를 사용하여 각 주파수에 해당하는 저장탄성율 G' 과 손실탄성율 G'' 을 동시에 계산할 수 있다.

그리고, 도 3과 같이 배관시스템에서 임의의 파형(Arbitrary wave)에서 점탄성 측정 방법에 대해 설명하면 다음과 같다.

도 3과 같은 주기를 가진 임의의 파형은 삼각함수의 가중치로 분해하여 푸리에 급수(Fourier series)로 표현할

수 있다. 도 3을 푸리에 급수를 사용하여 표현하면 수학식34와 같이 전단율 크기 $\gamma_{n,0}$, 주파수 $n \cdot \omega$ 로 표현된다.

수학식 34

$$\gamma(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_{n,0} \sin(n \cdot \omega t)$$

[0114]

수학식34와 같은 전단율에 의한 응력 변화는 수학식35와 같이 응력 크기 $\tau_{0,n}$, 주파수 $n \cdot \omega$, 위상차 δ_n 로 표현된다. 이론적으로는 푸리에 급수를 사용하여 표현하면 무한대까지 확장하여 표현할 수 있다. 하지만 계산의 편의와 실제로 점탄성 모니터링 시스템을 구현하기 위해서는 무한대가 아닌 범위를 정하여 사용하여야 한다.

수학식 35

$$\tau(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \tau_{0,n} \sin(n \cdot \omega t + \delta_n)$$

[0116]

주파수 $n \cdot \omega$, 주파수 성분의 크기 $\gamma_{n,0}, \tau_{n,0}$ 와 위상차 δ_n 를 모두 구하였기 때문에 수학식2를 사용하거나, 앞서 기술하였던 진동 압력 구동 흐름(Oscillatory pressure driven flow)에서 유량 $Q(t)$ 와 전단율 $\gamma(t)$, 전단응력 $\tau(t)$ 와 압력강하 $\Delta p(t)$ 사이의 상관관계를 구하여 형상계수 α 또는 에너지소산율계수 K_p 를 사용한 저장탄성률 G' 과 손실탄성률 G'' 을 구할 수 있다.

[0118]

앞서 설명하였듯이 점탄성 모니터링 시스템에서는 주기를 가지는 임의의 파형의 유량 입력으로 주어지면, 수학식35와 유사하게 출력으로 위상차 δ_n 를 지닌 압력 파형이 나타난다. 점탄성 모니터링 시스템에서 점탄성 특성을 구하기 위해서는 입력으로 주어진 임의의 파형을 푸리에 급수를 사용하여 일정 주파수 범위 내의 전단율 크기 $\gamma_{n,0}$, 주파수 $n \cdot \omega$ 를 알 수 있으며, 출력으로 나타난 임의의 파형 응답을 푸리에 급수를 사용하여 동일한 일정 주파수 범위 내의 응력 크기 $\tau_{0,n}$, 주파수 $n \cdot \omega$, 위상차 δ_n 를 얻을 수 있다. 이처럼 입력과 출력은 주기를 가지는 임의의 파형으로 표현되며 입력과 출력을 각각 푸리에 급수를 사용하여 일정한 주파수 범위 내의 정보를 얻어 점탄성 특성을 구할 수 있다. 점탄성 모니터링 시스템의 경우 저주파 통과 필터(Low-pass filter)를 사용하여 특정한 차단 주파수 이상 주파수의 신호를 감쇠시켜 차단 주파수 이하의 주파수 신호만 통과시켜 사용할 수 있다.

[0119]

이러한, 다양한 배관 형상(단면이 원형, 정사각형, 직사각형인 일자 배관, 길이 방향으로 확장/축소 배관)에서의 형상계수 α 또는 에너지소산율계수 K_p 를 구하여 점탄성 측정 시뮬레이션을 수행하였고, 각 형상에 따른 선형점탄성 시뮬레이션 결과와 이론 값을 비교하였다.

[0120]

사용된 배관의 α 와 K_p 값은 표1에 제시되었고, 이를 이용하여 측정한 선형점탄성 데이터는 도 4에 제시된다. 도 4에는 Single-mode Maxwell 유체를 이용한 선형점탄성 이론 값이 함께 제시된다. 여기서, 도 4는 Single-mode Maxwell 유체 이론 값과 각 배관 형상의 각주파수에 따른 저장탄성률 G' 과 손실탄성률 G'' 측정 결과 비교 데이터로써, 도 4의 (a)는 원형 단면 일자 배관, 도 4의 (b)는 길이 방향으로 확장/축소 배관, 도 4의 (c)는

정사각형 단면 일자 배관, 도 4의 (d)는 직사각형 단면 일자 배관을 나타낸다.

도 4는 선형영역(소진폭진동전단변형, small amplitude oscillatory shear, SAOS)하에서 Single-mode Maxwell 유체 이론 값과 배관 형상 4종(단면이 원형, 정사각형, 직사각형인 일자 배관, 길이 방향으로 확장/축소 배관)으로 각각 측정한 저장탄성률 G' 과 손실탄성률 G'' 결과를 비교하였으며 매우 높은 일치성을 보인다.

표 1

	원형	확장/축소	정사각형	직사각형
α	-	-	7.13×10^9	6.24×10^8
K_p	4	2.06	-	-
K_s	0.802	0.17	-	-

표 1은 시뮬레이션을 통해 측정한 각 배관의 형상(단면이 원형, 정사각형, 직사각형인 일자 배관, $R_2/R_1 = 2$ 인 확장 배관)에 따른 형상계수 α 와 유효에너지소산율계수 K_p , 유효전단율계수 K_s 값을 나타낸 표이다.

이때, 표 2는 시뮬레이션에 사용된 모델의 파라미터값이다.

표 2

	$\eta_s [Pa \cdot s]$	$\eta_p [Pa \cdot s]$	$\lambda [s]$	$\alpha [-]$
single-mode Maxwell	0.5	0.5	0.5	-
Giesekus	0.5	0.5	0.5	0.5

다양한 배관 형상에서의 선형점탄성 데이터의 경우 앞서 제시하였으며, 도 5의 경우 배관의 길이의 따른 점탄성 측정 시뮬레이션을 수행하여 선형점탄성 시뮬레이션 결과와 Single-mode Maxwell 유체 이론 값을 비교하였다.

도 5는 Single-mode Maxwell 유체 이론 값과 각 배관 길이와 직경 비율의 각주파수에 따른 저장탄성률 G' 과 손실탄성률 G'' 측정 결과 비교 데이터이다.

여기서, 도 5의 (a)는 완화시간 0.5[s] 일 때 저장탄성률 G' 이며, 도 5의 (b)는 완화시간 0.5[s] 일 때 손실탄성률 G'' 이다.

도 5는 각 배관 길이의 각주파수에 따른 선형점탄성 데이터로 길이가 증가하여도 각주파수 10^1 까지는 저장탄성률 G' 과 손실탄성률 G'' 이 이론 값과 높은 일치성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 그리고, 그림 5의 결과로 알 수 있듯이 배관의 길이는 선형점탄성 측정에 미치는 영향은 미미한 것을 확인할 수 있다.

위의 결과들은 고가의 최첨단 장비인 레오미터의 전유물로만 여겨졌던 진동전단유동 (oscillatory shear flow) 하에서의 측정되는 선형 및 비선형 점탄성 데이터가 레오미터가 없이도 본 발명의 일 실시예를 이용한다면 배관 유동에서도 사용 유체의 점탄성 유변물성을 매우 정확하게 예측할 수 있음을 뒷받침한다.

추가적으로 배관 형상 및 길이를 다양하게 선택함으로써, 끝단붕괴, 시료로딩의 어려움, 고전단영역의 문제점 등이 모두 해결이 가능하다.

배관유동의 비선형점탄성을 측정하기 위한 시뮬레이션으로 점탄성 유체 모델인 Giesekus 모델을 사용하였다. 도 6은 사용된 Giesekus 모델의 이론 값과 배관유동의 전단율에 따른 비선형 점탄성(LAOS) 데이터를 비교하였다.

도 6에 제시된 Giesekus model 이론 값에 경우 단순전단유동에서 Giesekus 모델의 구성방정식을 각 컴포넌트 별로 전개하여 상미분방정식을 연립하여 풀은 결과이다. 이후 앞서 기술하였던 수식2를 사용하여 저장탄성률 G' 과 손실탄성률 G'' 을 제시하였고, 단면이 원형인 배관유동의 전단율에 따른 저장탄성률 G' 과 손실탄성률

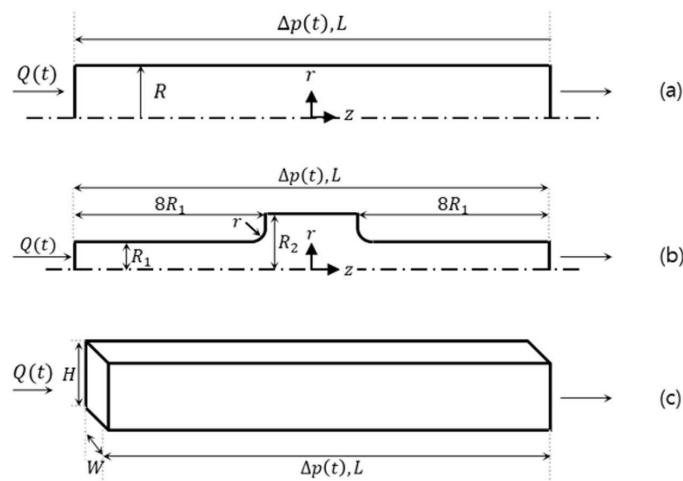
G'' 을 제시하였다.

[0134] 단면이 원형인 배관에서 저장탄성률 G' 과 손실탄성률 G'' 의 경우 앞서 기술하였던 비선형 점탄성 수학식19를 사용하였으며 이 수식은 수학식9의 선형점탄성에서의 저장탄성률 G' 과 손실탄성률 G'' 에 대한 수식과 일치한다. 즉, 도 6은 선형 영역뿐만 아니라 비선형 영역에서도 적용이 가능함을 보여준다.

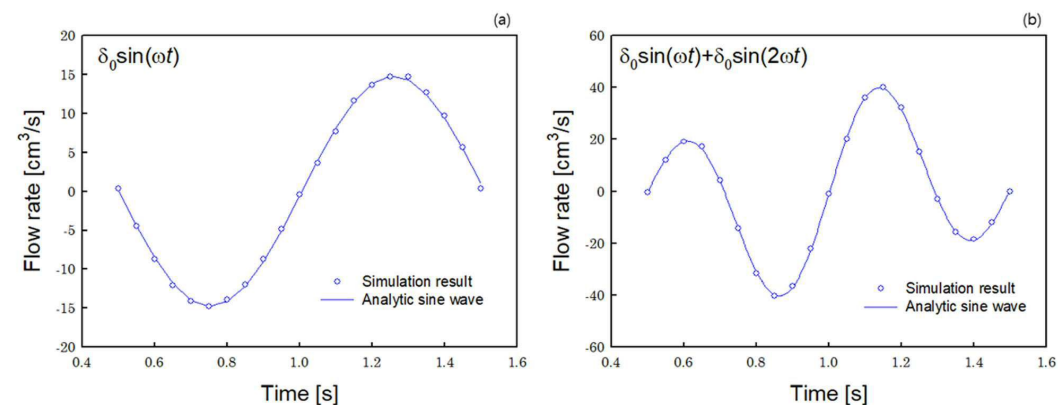
[0135] 본 발명은 도면에 도시된 실시 예를 참고로 설명되었으나 이는 예시적인 것에 불과하며, 본 기술 분야의 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 다른 실시 예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 따라서 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 청구범위의 기술적 사상에 의하여 정해져야 할 것이다.

도면

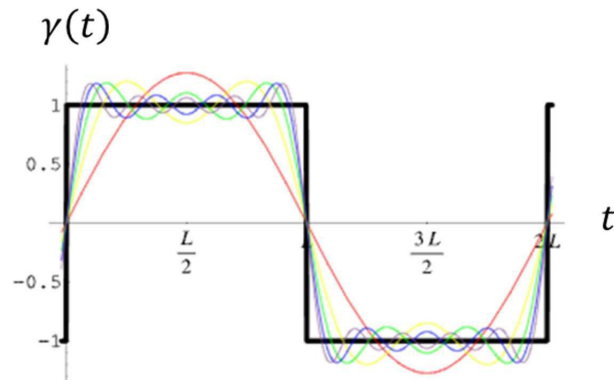
도면1



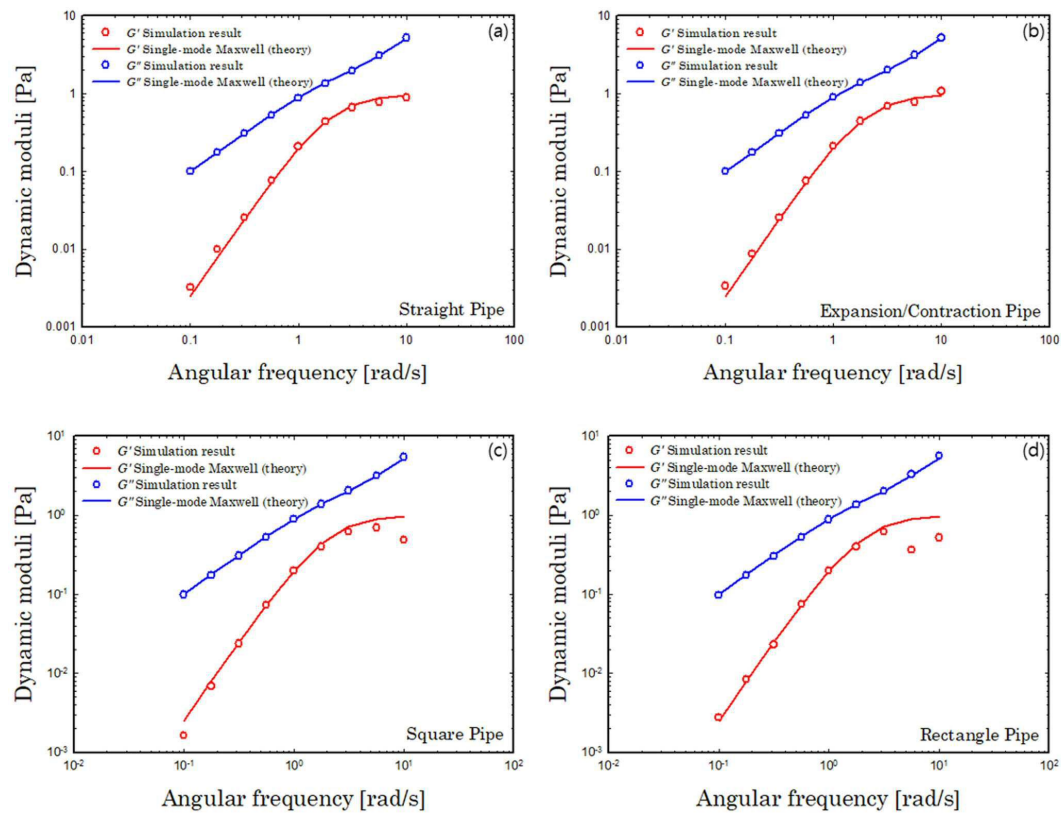
도면2



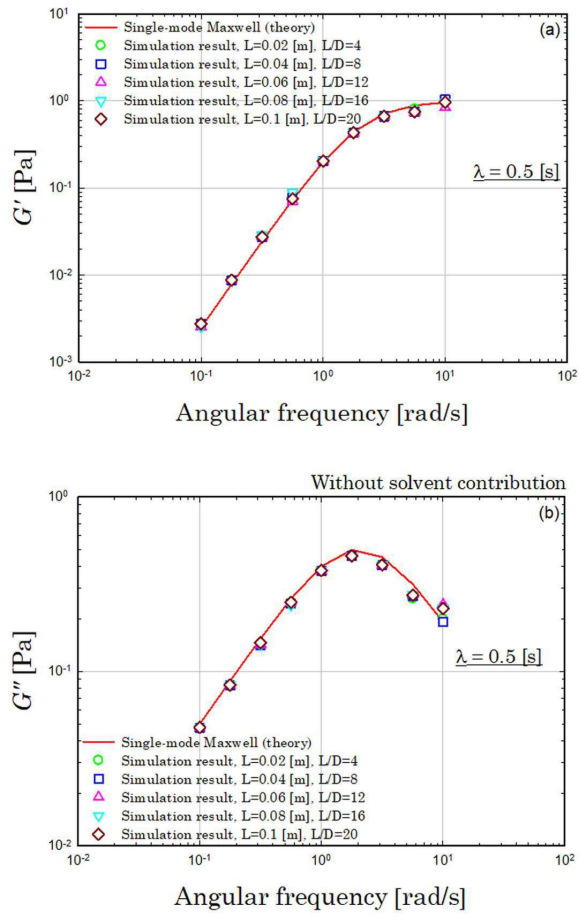
도면3



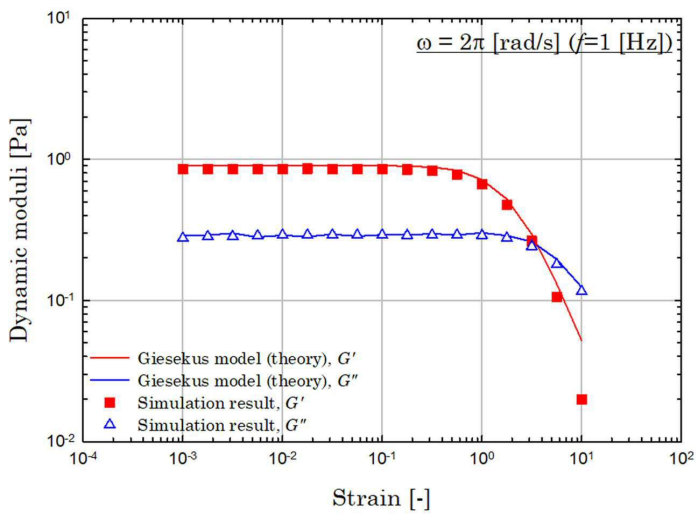
도면4



도면5



도면6



도면7

