

(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)(11) 공개번호 10-2025-0070988
(43) 공개일자 2025년05월21일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 11/14 (2006.01) G01N 11/00 (2020.01)
G06F 17/10 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01N 11/14 (2013.01)
G06F 17/10 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2023-0157487
(22) 출원일자 2023년11월14일
심사청구일자 2023년11월14일

(71) 출원인
경상국립대학교산학협력단
경상남도 진주시 진주대로 501 (가좌동)
(72) 발명자
황옥렬
경남 진주시 에나로175번길 12
최현우
경상남도 진주시 신안들말길 48
(74) 대리인
김종석

전체 청구항 수 : 총 7 항

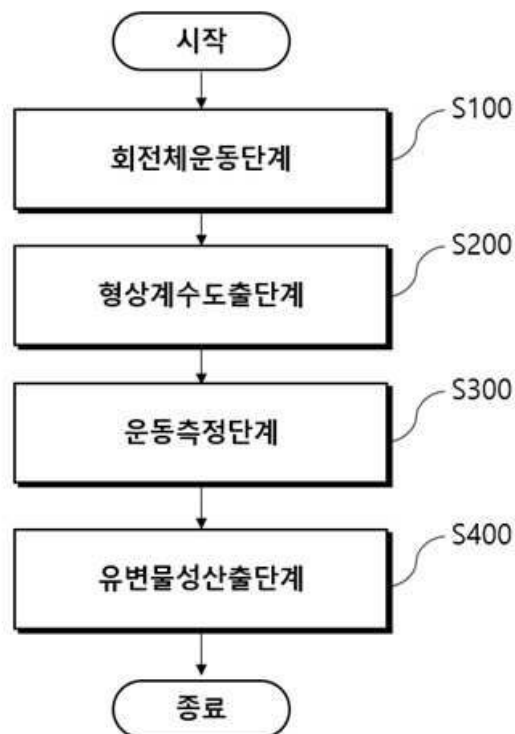
(54) 발명의 명칭 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 시스템 및 방법

(57) 요약

본 발명은 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 시스템 및 방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는, 유변물성이 알려진 유체에 대한 회전체의 운동특성에 기초하여 상기 회전체의 형상계수가 산출되는 형상계수도출단계, 측정부에 의해, 용기 내에서 유변물성정보 측정 대상 유체에 접촉된 상태에서 기설정된 조건으로 운동하는

(뒷면에 계속)

대표도 - 도3



상기 회전체의 운동정보가 측정되는 운동측정단계 및, 상기 회전체의 형상계수와 상기 회전체의 운동정보에 기초하여 상기 측정 대상 유체의 유변물성정보가 산출되는 유변물성산출단계를 포함하는 것을 특징으로 한다.

또한, 본 발명에 따르면, 고가의 최첨단 장비인 레오미터의 전유물로만 여겨졌던 진동전단유동(oscillatory shear flow)하에서의 측정되는 선형 및 비선형 점탄성 데이터가 레오미터가 없이도 측정될 수 있도록 하는 효과가 있다. 또한, 본 발명은, 복잡유체의 가공을 위한 공정 제어를 위해 산업현장에 직접 설치될 수 있고(on-site), in-situ에서 공정 중 복잡유체의 점탄성 거동을 포함한 유변물성이 실시간으로 모니터링 될 수 있도록 하는 효과가 있다. 또한, 본 발명은, 유체가 수용되는 용기의 형상이나, 유체의 부피와 무관한 측정법을 통해 유체의 유변물성이 측정될 수 있도록 한다.

(52) CPC특허분류

G01N 2011/0026 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711186977
과제번호	2019R1A2C1003974
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)
연구과제명	에너지소산율 기반 유동정량화를 이용한 비뉴턴유체 유동모델링 및 공정모니터링 기
법 개발	
기 여 율	1/1
과제수행기관명	경상국립대학교
연구기간	2023.03.01 ~ 2024.02.29

명세서

청구범위

청구항 1

점탄성 측정 대상 유체 내에서 운동할 수 있도록 구성되는 회전체;

상기 회전체의 상대 운동 정보를 측정하는 측정부; 및

상기 측정부에 의하여 측정된 회전체의 운동 정보에 기초하여, 상기 유체의 유변물성정보를 나타내는 모니터링 모듈;을 포함하고,

상기 모니터링모듈은, 상기 회전체의 형상에 관계없이, 상기 유체의 유변물성정보를 산출할 수 있는 것을 특징으로 하는 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 모니터링모듈은,

상기 측정부로부터 측정된 운동 정보를 하기 [수학식 9]에 대입하여 상기 유체의 유변물성정보가 나타날 수 있도록 하는 것을 특징으로 하는 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 시스템.

[수학식 9]

$$G'(\omega) = \omega \eta''(\omega) = \frac{1}{\alpha} \frac{M_0}{\theta_0} \cos \delta \quad , \quad G''(\omega) = \omega \eta'(\omega) = \frac{1}{\alpha} \frac{M_0}{\theta_0} \sin \delta$$

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 회전체는,

상기 회전체의 축 방향에 대한 횡단면을 기준으로 점대칭되도록 마련되어 정지 상태에서는 상기 회전체의 축에 굽힘모멘트가 작용되지 않고, 회전시에도 상기 유체에 의한 항력이 균등하게 작용될 수 있도록 하는 것을 특징으로 하는 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 시스템.

청구항 4

제1항의 점탄성 측정 시스템을 이용한 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 방법에 있어서,

유체 내에서 상기 회전체가 운동되도록 하는 회전체운동단계;

유변물성이 알려진 유체에 대한 회전체의 운동특성에 기초하여 상기 회전체의 형상계수가 산출되는 형상계수도출단계;

측정부에 의해, 상기 운동 정보가 측정되는 운동측정단계; 및

상기 회전체의 형상계수와 상기 운동 정보에 기초하여 상기 측정 대상 유체의 유변물성정보가 산출되는 유변물성산출단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 유변물성산출단계는,

상기 모니터링모듈에 의하여, 상기 상대 운동 정보가 하기 [수학식 9]에 대입되어 상기 측정 대상 유체의 유변 물성정보가 산출될 수 있도록 하는 것을 특징으로 하는 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 방법.

[수학식 9]

$$G'(\omega) = \omega \eta''(\omega) = \frac{1}{\alpha} \frac{M_0}{\theta_0} \cos \delta, \quad G''(\omega) = \omega \eta'(\omega) = \frac{1}{\alpha} \frac{M_0}{\theta_0} \sin \delta$$

청구항 6

제4항에 있어서,

상기 측정 대상 유체가 비뉴턴 유체인 경우에는,

상기 회전체의 형상계수는, 하기 [수학식 12]와 같이, 무차원수 토크수 Power number N_T 와 레이놀즈 수 Re의 비례상수 K_T 로부터 산출되는 것을 특징으로 하는 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 방법.

[수학식 12]

$$M = \frac{4R^3}{\pi} K_T \cdot \eta \Omega = \alpha \eta \Omega, \quad \alpha = \frac{4R^3}{\pi} K_T$$

청구항 7

제4항에 있어서,

상기 유변물성산출단계는,

하기 [수학식 14]를 통해 대표전단율 속도, [수학식 15]를 통해 대표전단율, [수학식 17]을 통해 대표전단응력을 산출하는 것을 특징으로 하는 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 방법.

[수학식 14]

$$\bar{\gamma} = K_s N = \frac{K_s}{2\pi} \Omega$$

[수학식 15]

$$\bar{\gamma}_0 = \frac{K_s}{2\pi} \theta_0 = \alpha_\gamma \theta_0, \quad \alpha_\gamma = \frac{K_s}{2\pi}$$

[수학식 17]

$$\bar{\tau} = \eta \bar{\gamma} = \frac{1}{8R^3} \frac{K_s}{K_T} \cdot M = \alpha_\tau M, \quad \alpha_\tau = \frac{1}{8R^3} \frac{K_s}{K_T}$$

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은, 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 시스템 및 방법에 관한 것으로, 토크기반의 유동정

량화 및 유체 풀 내 회전체에 대한 회전수와 토크 정보로부터 복잡유체의 유변물성정보를 측정하는 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 시스템 및 방법에 관한 것임.

배경 기술

- [0003] 일반적으로 고분자 컴파운드, 이차전지, 전자재료 등에 관련된 산업에서의 공정 중 물질이 겪는 유동과 변형은 최종 제품의 품질과 특성에 결정적인 영향을 미치게 된다. 예를들어, 이차전지 슬러리는 활물질, 도전제, 바인더, 용매가 혼재된 복잡유체 중 하나로, 복잡한 형태의 유동과 변형 공정을 거쳐 제품으로 성형 가공된다. 이외에도 플라스틱, 필름, 접착제, 섬유, 화장품 등 다양한 산업 분야에서 제품의 가공 공정을 보다 향상시키기 위해 복잡유체의 물질 고유 유변물성에 대한 이해는 필수적이다.
- [0004] 이러한 유변물성을 측정하는 방법으로 레오미터를 이용하여 물질에 변형이나 응력을 가하여 이에 따른 응력이나 변형을 측정하고, 고유의 유변물성을 예측할 수 있도록 하는 종래의 기술이 개시되어 있다. 다만, 종래 기술에 따르면, 레오미터의 특정치구를 이용해서만 측정이 가능하므로 공정 중에 소재를 샘플링하여 외부에서 측정해야 하기 때문에 공정 중 측정(in-situ measurement)이 안된다는 문제점이 있다.
- [0005] 이러한 문제점을 해결하기 위한 선행기술문헌으로, 대한민국등록특허공보 제10-2013036호를 살펴보면, 연속적 유동장에서의 점도 측정 방법 및 시스템, 연속적 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법 및 시스템에 대해 개시되어 있다.
- [0006] 다만, 이러한 선행 기술에서도 회전체와 여러 형태의 용기를 통해 물질의 유변물성정보를 측정하기에 어려움이 있다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0008] (특허문헌 0001) (선행문헌 1) 대한민국등록특허공보 제10-2013036호(2019.08.14.)

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0009] 본 발명은 상술한 바와 같은 선행기술의 문제점을 해결하기 위하여 안출된 것으로, 용기 형상의 효과가 배제될 수 있는 유체 풀 내에서 회전되는 회전체에 가해지는 토크와 회전수를 통해 물질의 유변물성정보가 예측될 수 있도록 하는 데 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

- [0011] 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따른 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 시스템 및 방법에 있어서, 점탄성 측정 대상 유체 내에서 운동할 수 있도록 구성되는 회전체, 상기 회전체의 상대 운동 정보를 측정하는 측정부, 및, 상기 측정부에 의하여 측정된 회전체의 운동 정보에 기초하여, 상기 유체의 유변물성정보를 나타내는 모니터링모듈을 포함한다. 그리고, 상기 유체는, 기설정된 크기 이상으로 형성되는 용기에 수용되어, 상기 회전체의 운동에 의한 벽면파괴현상이 발생되지 않도록 하고, 상기 모니터링모듈은, 상기 회전체의 형상에 관계없이, 상기 유체의 유변물성정보를 산출할 수 있는 것을 특징으로 한다.
- [0012] 또한, 기설정된 크기 이상으로 형성되는 용기에 수용된 유체 내에서 상기 회전체가 운동되도록 하는 회전체운동 단계, 유변물성이 알려진 유체에 대한 회전체의 운동특성에 기초하여 상기 회전체의 형상계수가 산출되는 형상계수도출단계, 측정부에 의해, 상기 운동 정보가 측정되는 운동측정단계 및, 상기 회전체의 형상계수와 상기 운동 정보에 기초하여 상기 측정 대상 유체의 유변물성정보가 산출되는 유변물성산출단계를 포함하는 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

- [0014] 상기 과제의 해결 수단에 의해, 본 발명은 고가의 최첨단 장비인 레오미터의 전유물로만 여겨졌던 진동전단유동(oscillatory shear flow)하에서의 측정되는 선형 및 비선형 점탄성 데이터, 크리프(creep), 응력완화 등의 유변물성이 레오미터가 없이도 측정될 수 있도록 하는 효과가 있다.
- [0015] 또한, 본 발명은, 복잡유체의 가공을 위한 공정 제어를 위해 산업현장에 직접 설치될 수 있고(on-site), in-situ에서 공정 중 복잡유체의 점탄성 거동을 포함한 유변물성이 실시간으로 모니터링 될 수 있도록 하는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

- [0017] 도 1은, 본 발명에 따른 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 시스템의 회전체가 임의 형상으로 마련될 수 있는 예를 나타낸 모식도이다.
- 도 2는, 본 발명에 따른 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 시스템의 측정부와 모니터링모듈의 구성도이다.
- 도 3은, 본 발명에 따른 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 방법의 흐름도이다.
- 도 4는, 레오미터 지오메트리 CP치구와 임의 형상의 회전체(Sphere#2, Brookfield62)으로 측정한 비뉴턴 유체의 선형점탄성 특성으로, (a)는 각주파수에 따른 위상각(phase angle) 측정값, (b)는 선형 저장탄성율(G')과 손실탄성율(G'') 측정 결과 비교 그래프이다.
- 도 5는, 도 4의 회전체 2종에 대한 K_T 및 K_S 값을 나타낸 표이다.
- 도 6은, 레오미터 표준치구인 CP치구와 임의 형상의 회전체(Sphere#2, Brookfield62)의 비선형 저장탄성율(G')과 손실탄성율(G'') 예측 결과 비교 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0018]
..... 본 명세서에서 사용되는 용어에 대해 간략히 설명하고, 본 발명에 대해 구체적으로 설명하기로 한다.
- [0019] 본 발명에서 사용되는 용어는 본 발명에서의 기능을 고려하면서 가능한 현재 널리 사용되는 일반적인 용어들을 선택하였으나, 이는 당 분야에 종사하는 기술자의 의도 또는 판례, 새로운 기술의 출현 등에 따라 달라질 수 있다. 따라서 본 발명에서 사용되는 용어는 단순한 용어의 명칭이 아닌, 그 용어가 가지는 의미와 본 발명의 전반에 걸친 내용을 토대로 정의되어야 한다.
- [0020] 명세서 전체에서 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성요소를 더 포함할 수 있음을 의미한다.
- [0021] 아래에서는 첨부한 도면을 참고하여 본 발명의 실시예에 대하여 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 상세히 설명한다. 그러나 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며 여기에서 설명하는 실시예에 한정되지 않는다.
- [0022] 본 발명에 대한 해결하고자 하는 과제, 과제의 해결 수단, 발명의 효과를 포함한 구체적인 사항들은 다음에 기재할 실시예 및 도면들에 포함되어 있다. 본 발명의 이점 및 특징, 그리고 그것들을 달성하는 방법은 첨부되는 도면과 함께 상세하게 후술되어 있는 실시예들을 참조하면 명확해질 것이다.
- [0023] 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 그 물질의 대표 유변물성이다. 이때, 플라스틱, 필름, 접착제, 섬유, 화장품 등을 비롯하여 최근 산업적 관심이 고조되고 있는 이차전지 슬러리는 활물질, 도전제, 바인더 및 용매가 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. 이러한 유변물성의 측정 방법은 다양한 종류의 유동장을 구현하여 유변물성 측정에 있어 정확도가 매우 높은 장비인 레오미터(rheometer)를 활용하여 물질에 변형 또는 응력을 가하고 이에 따라 나타나는 응력 또는 변형을 측정하여 고유의 물질함수(유변물성)를 얻어내는 것이다. 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. 그 외에도 여러 실험방법이 있으나, 후술하기로 한다. 또한, 진동전단변형이 가해지면 점탄성을 가지는 물질의 유변물성은 변형에너지가 물질 내부에 저장되어 그 물질의 탄성을 나타내는 저장탄성률(G')과 물질에 부여된 에너지가 에너지 소산에 의해 손실되어 그 물질의 점성을 나타내는 손실탄성률(G'')으로 나타나게 된다. 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. 하지만 종래의 이론에서는 레오미터의 특정치구(cone and Plate: CP, Parallel Plate: PP)를 이용해서만 측정이 가능하기 때문에 공정이 끝난 후 소재를 샘플링하여 측정할 수밖에 없었다. 또한 레오미터는 모든 산업현장에 구비되기엔 매우 고가이며 장비 사이즈 및 설치 장소에 대한 제약이 상당히 커서 공정 중 측정(in-situ측정)이 불가능하므로 다양한 공정 속에서 실시간으로 필요한 점탄성 모니터링을 하기엔 적합하지 않은 장비이다. 본 발명은, 유체 부피의 효과를 제거하기 위해 토크 기반의 유동정량화 기법을 이용하여 임의의 회전체 유동 내 회전수 및 토크 정보(크기, 위상차 등)를 바탕으로 유효토크계수와 유효전단율계수를 구하고 이에 따른 물질의 저장탄성률 및 손실탄성률을 매우 정확하게 예측하는 기법으로, 공정 제어를 위해 실제 산업공정 과정에 직접 설치(on-site)가 가능하고 공정 중 in-situ로 유체의 점탄성 거동을 실시간 모니터링하기 위해 창안된 것이다.

[0025] 이하에서는 본 발명에 따른, 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 시스템에 대해 설명하기로 한다.

[0026] 도 1 내지 도 2를 참조하여, 본 발명은, 점탄성 측정 대상 유체 내에서 운동할 수 있도록 구성되는 회전체(10), 상기 회전체(10)의 운동 정보를 측정하는 측정부(30) 및, 상기 측정부(30)에 의하여 측정된 회전체(10)의 운동 정보에 기초하여, 상기 유체의 유변물성정보를 나타내는 모니터링모듈(40)을 포함한다.

[0027] 그리고, 상기 회전체(10)는 지면으로부터 수직되도록 마련되며, 상기 유체 내에 인입되어 유체와 접촉된 상태에서 기설정된 조건으로 운동가능하다. 또한, 본 실시예에서 상기 유체는, 별도의 용기가 존재하지 않거나, 상기 유체가 수용되도록 하는 용기의 직경이 상기 회전체(10)의 직경 대비 5배 이상으로 마련되어, 물질의 점탄성 측정 과정에서 용기의 형상에 따른 효과가 배제될 수 있도록 한다.

[0028] 일례로, 상기 회전체(10)는, 본 발명에 따른 시스템 내에서 유체의 유변물성정보가 측정될 수 있도록 기설정된 회전각과 주파수로 동적진동운동을 한다. 특히, 상기 회전체(10)는, 상기 유체 내에 수직으로 삽입되며, 회전축(11)에 굽힘모멘트가 가해지지 않도록 회전축(11)을 기준으로 점대칭되도록 형성된다. 또한, 상기 회전체(10)는, 상기 회전체(10)의 단부에 마련되는 패들(12)을 포함하되, 상기 패들(12)은, 상기 회전체(10)의 축 방향에 대한 횡단면을 기준으로 점대칭되도록 마련되어 정지 상태에서는 상기 회전체(10)의 축에 질량관성모멘트의 비대칭에 의한 굽힘모멘트가 작용되지 않고, 회전에 있어도 상기 유체에 의한 항력이 균등하게 작용될 수 있도록 한다. 예를들면, 도 1과 같이, 상기 회전체(10)는 다양한 형태로 마련될 수 있으며, 그 중 하나가 선택적으로 마련될 수 있다. 도 1의 (a)에 도시된 상기 패들(12a)은, 4방향으로 돌출되어 십자 형태로 마련된다. 도 1의 (b)에 도시된 상기 패들(12b)은 피치가 마련되도록 형성된 것으로, 4방향으로 돌출된 패들(12b)의 각 일면이 서로 비틀림각이 마련되도록 형성된다. 도 1의 (c)에 도시된 상기 패들(12c)은, Rushton 터빈 형태로 원형판의 외주면에 패들(12c)이 복수개로 연장되도록 형성된다. 도 1의 (d)에 도시된 상기 패들(12d)은 앵커형태로 마련되도록 형성되어, '山' 형태로 형성된다. 도 1의 (e)에 도시된 상기 패들(12e)은 디스크 형태로, 회전축(11)과 수직되게 배치되는 원형판 형태로 마련된다. 도 1의 (f)에 도시된 상기 패들(12f)은 회전축(11)의 단부에 설치되는 구 형태로 마련된다. 도 1의 (g)에 도시된 상기 패들(12g)은, 니들 형태로 마련된다. 도 1의 (h)에 도시된 상기 패들(12h)은, 회전축(11)보다 직경이 큰 실린더 형태로 마련된다. 도 1의 (i)에 도시된 상기 패들(12i)은, 회전축(11)보다 직경이 큰 실린더의 외주면에 패들이 마련되도록 형성되어, 용기(20)의 내측 벽면에서 슬

립현상이 발생하는 것을 방지한다. 이와 같이 도 1에 도시된 여러 형태의 패들(12) 중 어느 하나가 선택될 수 있으며, 본 발명의 실시예를 벗어나지 않는 범위 내에서 회전체(10)는 토크측정에 대해 정확한 값을 얻을 수 있는 형상이면 모두 사용 가능하다. 즉, 상기 회전체(10)가 정적(static) 상태에서도 축에 굽힘힘(moment)가 가해 지지 않도록 질량이 대칭적으로 분포하며, 회전하는 상태에서도 축이 진동하지 않도록 회전체(10)의 질량관성모멘트와 회전체의 벽면(블레이드 등)에 가해지는 유체의 항력이 대칭적으로 분포하면 어떠한 형상의 회전체(10)라도 사용 가능하다. 물론, 정적상태의 굽힘힘이나 회전상태의 질량관성모멘트/항력의 크기가 작아서 회전체(10) 토크 측정에 정확도에 영향을 적게 미치는 경우에는 비대칭적인 회전체(10)도 사용이 가능하다.

[0029] 또한, 상기 측정부(30)는, 상기 회전체(10)의 운동 정보를 측정하는 역할을 한다. 그리고, 상기 측정부(30)는, 상기 회전체(10)의 회전각과 회전주기를 각주파수 형태로 측정한다. 또한, 상기 측정부(30), 상기 회전체(10)의 회전시 유체에 의한 항력으로 작용받는 토크가 측정될 수 있도록 한다.

[0030] 또한, 상기 모니터링모듈(40)은, 산업공정 과정에서 유체의 유변물성 거동이 실시간으로 모니터링 될 수 있도록 한다. 또한, 상기 모니터링모듈(40)은, 상기 회전체(10)의 형상에 관계없이, 상기 측정부(30)에 의하여 측정된 상기 상대 운동 정보에 기초하여 상기 유체의 유변물성정보를 산출할 수 있다. 또한, 상기 모니터링모듈(40)은, 상기 측정부(30)로부터 측정된 상대 운동 정보를 수신하는 수신부(41), 상기 수신부(41)에서 수신한 운동 정보를 이용하여 상기 유체의 유변물성정보를 산출하는 산출부(42) 및 상기 산출부(42)에서 산출된 결과값이 사용자에게 디스플레이될 수 있도록 하는 모니터부(43)를 포함한다.

[0031] 또한, 본 실시예에서는 앞서 설명한 바와 같이, 상기 유체 풀 내에서 유체의 고유 유변물성정보를 측정하기 위해 동적진동유동(dynamic oscillatory shear) 실험을 수행한다. 이때, 본 발명에 따른 시스템 내 유동장의 유변물성정보 측정을 위한 실험 방식은, 동적진동유동 외 여러 실험 방식으로 수행될 수 있다. 일례로, 상기 실험 방식은, 전단유동 점도측정 실험, 급개시 전단유동 실험, 응력완화 실험, 크립 실험, 선형 완화 실험, 선형 점탄성 및 비선형 점탄성 측정 실험을 포함한다. 단, 본 실시예에서는 동적진동유동에 따른 유동을 기준으로 설명하기로 한다.

[0032] 먼저, 선형 점탄성 측정에 대한 이론을 정리하면, 상기 회전체(10)에 의한 동적진동유동은 상기 회전체(10)에 사인 형태의 주기성을 갖는 변형을 가하고, 이에 따른 응력의 변화는 하기 수학식1과 같이 주파수의 함수로 나타낼 수 있다. 추가적으로 회전체를 고정하고, 용기에 사인형태의 주기성을 갖는 변형을 사용하여도 같은 결과식으로 유변물성을 측정할 수 있음을 밝힌다. 이때, 측정된 응력은 물질 고유의 점탄성 특성에 의해 위상차가 반영되고 이는 탄성체와 점성체의 중간적 형태로 알려져 있다.

[0033] [수학식1]

[0034]
$$\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t) \quad , \quad \tau = \tau_0 \sin(\omega t + \delta)$$

[0035] 이때, 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 의미한다.

[0036] 또한, 측정된 응력은 상기 유체의 탄성을 나타내는 저장탄성율 G' , 점성을 나타내는 손실탄성율 G'' 로 구분하며, 하기 수학식2a 및 수학식2b와 같이 나타낼 수 있다.

[0037] [수학식2a]

[0038]
$$\tau = \tau_0 \cos \delta \sin(\omega t) + \tau_0 \sin \delta \cos(\omega t) = \gamma_0 G' \sin(\omega t) + \gamma_0 G'' \cos(\omega t)$$

[0039] [수학식2b]

[0040]
$$G'(\omega) \equiv \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad , \quad G''(\omega) \equiv \frac{\tau_0}{\gamma_0} \sin \delta$$

[0041] 또한, 본 발명에서는, 상기 일반적 형상의 회전체(10)가 유변물성을 측정하고자 하는 유체와 접촉된 상태일 때, 회전축에 대한 동적진동(dynamic oscillatory)에 따른 회전축(11)에서의 토크 M 과 동적진동의 진폭 θ_0 및 동적진동의 주파수 ω 를 이용하여 물질의 선형 점탄성 및 비선형 점탄성을 측정하는 기법을 제시한다.

[0042] 점도가 η 인 유체 내에서 회전체가 회전각속도 Ω [rad/s]로 회전할 때, 회전축(11)의 토크 M은 점도와 회전각속도의 곱과 비례한다. 즉, $M \propto \eta\Omega$ 이며 하기 수학식 3과 같이 나타낼 수 있다. 이 상관관계의 비례상수를 α 라고 하면, α 는 회전체(10)의 형상, 유체를 담고 있는 용기의 형상 및 유체의 높이에 의해 결정되는 값이다.

[0043] [수학식 3]

[0044]
$$M = \alpha\eta\Omega$$

[0045] 여기서 상기 형상계수 α 를 구하는 방법은 다양하게 있을 수 있다. 실험적으로 점도를 알고 있는 뉴턴 유체에 있어서, 회전체(10)의 각속도에 대해 토크를 측정하면 형상계수 α 를 쉽게 구할 수 있고, 같은 방식으로 수치해석적 방법을 이용하여도 구할 수 있다. 이러한 형상계수를 구하는 방법은 일반적인 유체역학의 지식을 가진 연구자라면 특별한 기술적 문제가 없이 형상계수를 구할 수 있음은 자명하다.

[0046] 또한, 본 발명에 따른 측정 방법에서는, Metzner 와 Otto에 의해 개발된 에너지소산율 기반의 유동정량화 기법을 바탕으로 새롭게 도입한 토크 기반의 유동정량화 기법을 사용한다. 상기 유동정량화 기법은, 선형점탄성 뿐만 아니라 비선형 점탄성을 구하기 위해 필요한 특성값인 토크와 전단응력의 상관관계, 축의 회전각과 전단율의 상관관계를 명확하게 표현할 수 있다. 또한, 비선형 유체의 유변물성 측정방법에서의 이론적인 기반이 될 수 있다.

[0047] 먼저, 상기 수학식 3으로부터 산출한 형상계수 α 를 이용하여 유변물성 측정방법을 설명하고, 토크 기반의 유동정량화를 이용한 형상계수의 표현을 이용하여 비선형 유체의 유변물성 측정에 대해 기술하고자 한다. 상기 측정 대상 유체가 비뉴턴 유체인 경우에는, 상기 회전체(10)의 형상계수는, 무차원수 토크수 N_T 와 레이놀즈 수 Re의 비례상수로부터 산출될 수 있다.

[0048] 유체에 담겨있는 회전체(10)의 축에 회전각(deflection angle) $\theta(t) = \theta_0 \cos(\omega t)$ 를 주기적 진동으로 가하면, 각주파수는 $\omega(t) = -\theta_0 \omega \sin(\omega t)$ 이 된다. 이때, θ_0 가 충분히 작은 경우에는, 회전체(10)의 축에서 측정되는 토크가 위상차 δ 를 가지며, 하기 수학식 4와 같이 표현된다.

[0049] [수학식 4]

[0050]
$$M(t) = M_0 \cos(\omega t + \delta), \quad \theta(t) = \theta_0 \cos(\omega t), \quad \omega(t) = -\theta_0 \omega \sin(\omega t)$$

[0051] 이때, 상기 토크 M_0 와 주파수 $\omega_0 (= \theta_0 \omega)$ 의 상관관계는 상기 수학식 1을 따른다. 즉, 상기 점도는 복소점도(complex viscosity) η^* 로 표현이 가능하며, 하기 수학식 5와 같이 나타낼 수 있다.

[0052] [수학식 5]

[0053]
$$M(t) = M_0 \cos(\omega t + \delta) = -\theta_0 \omega \sin(\omega t) = \alpha \eta^* \omega(t)$$

[0054] 상기 수학식 5에서 축의 회전각의 진폭 θ_0 가 충분히 작으면, 상기 복소점도 η^* 는 주파수 ω 만의 함수가 되며, 상기 복소점도는 토크 거동을 이용하여 표현될 수 있다. 이때, 계산의 편의를 위해 하기 수학식 6와 같이 복소수 표현을 도입하여 하기 수학식 7과 같이 복소점도의 복소수 표현으로 나타낼 수 있다.

[0055] [수학식 6]

[0056]
$$\theta(t) = \text{Re}\{\theta_0 e^{i\omega t}\}, \quad \omega(t) = \text{Re}\{i\theta_0 \omega e^{i\omega t}\}, \quad M(t) = \text{Re}\{M_0 e^{i(\omega t + \delta)}\}$$

[0057] [수학식 7]

$$\eta^*(\omega) = \eta' - i\eta'' = \frac{1}{\alpha} \frac{M_0}{\theta_0 \omega} (\sin \delta - i \cos \delta)$$

[0058]

[0059] 상기 수학식 7에서 표현된 복소점도를 하기 수학식 8의 선형점탄성에서 복소점도와 복소탄성율(complex modulus)의 일반적인 상관관계를 이용하면, 하기 수학식 9와 같이 저장탄성율 G' 및 손실탄성율 G'' 을 산출할 수 있다. 이때, 상기 G' 과 G'' 은 축의 회전각의 진폭 θ_0 가 충분히 작기 때문에, 주파수 ω 만의 함수이다.

[0060] [수학식 8]

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

[0061]

[0062] [수학식 9]

$$G'(\omega) = \omega \eta''(\omega) = \frac{1}{\alpha} \frac{M_0}{\theta_0} \cos \delta \quad G''(\omega) = \omega \eta'(\omega) = \frac{1}{\alpha} \frac{M_0}{\theta_0} \sin \delta$$

[0063]

[0064] 상기 수학식 9는 유체 내에 담긴 회전축의 회전진동을 이용하여, 유체의 점탄성을 산출하는 식으로 사용될 수 있다. 또한, 상기 수학식 9를 통해, 상기 산출부(42)는, 상기 유체의 저장탄성율과 손실탄성율을 산출하여 선형 영역 및 비선형 영역에서 유체의 점탄성이 측정될 수 있도록 한다.

[0066] 이하에서는, 비선형 점탄성 측정에 대해 설명한다. 상기 저장탄성율 G' 과 손실탄성율 G'' 을 결정할 때, 회전각의 진폭 θ_0 이 큰 경우를 비선형 영역이라 한다. 이 때 저장탄성율 G' 과 손실탄성율 G'' 은 회전각의 진폭 θ_0 과 주파수 ω 모두의 함수가 되며, 이를 비선형 점탄성이라고 정의한다. 상기 비선형 점탄성을 구하기 위해서는 일반적인 회전체에서 측정된 토크와 시스템의 대표 전단응력(representative shear stress) 및 회전체 축의 회전각의 진폭과 시스템의 대표 전단율(representative shear strain)의 상관관계를 구하고, 대표전단응력과 대표전단율을 상기 수학식 2b에 대입하여 저장탄성율과 손실탄성율을 구할 수 있다. 이때, 상기 수학식 9의 선형점탄성 예측기법이 비선형 점탄성 예측기법에도 그대로 적용이 가능하다.

[0067] 본 발명에서는, 상기 회전체(10)에 의한 유동에서 대표전단응력과 대표전단율을 구하기 위하여, 유체의 부피에 따른 효과를 없애기 위한 토크 기반 유동정량화 기법을 도입하여, 상기 수학식 3을 통한 형상계수 α 가 보다 정확하게 산출될 수 있도록 한다. 그리고, 상기 토크 기반 유동정량화는, 무차원수 토크수 N_T 와 레이놀즈 수 Re 로 회전체(10) 유동의 특성곡선을 구하는 방법으로, 유변물성 측정 시스템의 형상(회전체(10) 형상, 용기의 형상, 유체 높이 등)에 대해 특성곡선을 정할 수 있도록 한다.

[0068] 상기 토크수 N_T 는, 토크를 난류영역에서의 토크로 나눈 값으로, 회전체(10)에서는 회전수 N [rps] ($\Omega = 2\pi N$), 회전체(10)의 직경 D ($D=2R$)를 이용하여 표현되고, 회전체(10)의 레이놀즈 수 Re 도 유체의 밀도를 ρ 라 하면 상기 변수로 인해 하기 수학식 10과 같이 표현될 수 있다.

[0069] [수학식 10]

$$N_T = \frac{M}{\rho N^2 D^5} = \frac{\pi^2 M}{8 \rho \Omega^2 R^5}, \quad Re = \frac{\rho N D^2}{\eta} = \frac{2 \rho \Omega R^2}{\pi \eta}$$

[0070]

[0071] 또한, 점도가 일정한 뉴턴유체의 층류영역에서는 무차원수 토크수 N_T 가 레이놀즈 수 Re 의 역수에 비례한다. 즉, $N_T \sim Re^{-1}$ 비례상수를 K_T 라고 정의하면, 하기 수학식 11과 같이 무차원수 토크수와 레이놀즈 수의 상관관계를 나타낼 수 있다.

[0072] [수학식 11]

$$N_T = \frac{K_T}{Re}$$

상기 수학식 11에서 비례상수 K_T 는 회전체(10) 시스템 형상에 의해 결정될 수 있으나, 용기의 크기나 모양과는 무관하다. 또한, 상기 수학식 10에서 정의된 무차원수 토크수와 레이놀즈 수의 정의를 상기 수학식 11에 대입하면, 하기 수학식 12와 같이 회전체(10) 형상계수 α 가 무차원수 토크수 K_T 를 이용한 식으로 표현될 수 있다. 이는 상기에서 기술한 회전체(10)의 형상계수를 구하는 또 다른 방법에 해당된다.

[수학식 12]

$$M = \frac{4R^3}{\pi} K_T \cdot \eta \Omega = \alpha \eta \Omega, \quad \alpha = \frac{4R^3}{\pi} K_T$$

하기에서는 회전체(10) 시스템의 대표전단응력과 대표전단율을 구하는 방법에 대해 설명하기로 한다. 보다 상세히, 상기 유변물성산출단계(S300)는, 하기 [수학식 14]를 통해 대표전단율 속도, [수학식 15]를 통해 대표전단율, [수학식 17]을 통해 대표전단응력을 산출한다.

먼저, 회전체(10)의 대표전단응력 $\bar{\tau}$ 은 토크 M 에 비례하며, 대표전단율 $\bar{\gamma}_0$ 는 축의 뒤틀림각 θ_0 에 비례하므로 각각 비례상수 α_τ 와 α_γ 를 도입하면 하기 수학식 13과 같이 나타낼 수 있다.

[수학식 13]

$$\bar{\tau} = \alpha_\tau M \quad \text{and} \quad \bar{\gamma}_0 = \alpha_\gamma \theta_0$$

Metzner와 Otto의 이론에 의하면, 회전체(10) 시스템의 정상상태의 회전에 대해 회전각속도 Ω 와 대표전단율 속도(representative shear rate) $\bar{\dot{\gamma}}$ 는 Metzner-Otto 상수(MO상수) K_s 를 통해 회전각속도에 비례하게 결정된다.

[수학식 14]

$$\bar{\dot{\gamma}} = K_s N = \frac{K_s}{2\pi} \Omega$$

상기 수학식 14에서 나타난 상관관계는 기하학적인 관계이며, 주파수 ω 로 진동하는 회전체(10)에 대해서도 같은 방식으로 적용될 수 있다. 또한, 전단율 속도를 시간에 따라 적분하면 전단율(strain)이 나오기 때문에, 하기 수학식 15와 같이 전단율의 크기가 축의 뒤틀림각의 함수로 사용될 수 있다. 그리고, 이를 통해 대표전단율의 비례상수 α_γ 가 산출될 수 있다.

[수학식 15]

$$\bar{\gamma}_0 = \frac{K_s}{2\pi} \theta_0 = \alpha_\gamma \theta_0, \quad \alpha_\gamma = \frac{K_s}{2\pi}$$

또한, 추가적으로 진동하는 축의 전단율 속도 $\dot{\gamma}_0$ 는 $\alpha_\gamma \theta_0 \omega$ 로 표현될 수 있다.

이하에서는, 대표전단응력 $\bar{\tau}$ 를 토크 M 으로부터 구하는 방법을 설명한다. 먼저, 상기 수학식 14로부터 결정된 대표 전단율속도에 Metzner-Otto 이론을 이용하여 구한 평균점도를 곱하면 물질에서의 대표전단응력이 산출된다. 여기서 상기 대표전단응력과 대표전단율속도의 상관관계는 물질의 전단응력과 전단율속도의 관계와 일치하는 것을 알 수 있다. 즉, 회전체(10) 시스템의 대표응력 $\bar{\tau}$ 는 대표전단율 속도 $\bar{\dot{\gamma}}$ 에 대표점도를 곱한 값이며, 이는 정상상태 회전각속도 Ω 에서 $\bar{\tau} = \eta(\Omega) \bar{\dot{\gamma}}(\Omega)$ 의 관계를 나타낸다. 여기서 상기 대표점도는 상기 수학식 11에 수학식 10에서 정의된 무차원수 토크수와 레이놀즈 수의 정의를 대입하면, 하기 수학식 16으로 나타낼 수

있다.

[수학식 16]

$$\eta(\Omega) = \frac{\pi}{4R^3} \frac{1}{K_T} \cdot \frac{M}{\Omega}$$

따라서, 상기 수학식 14에서 나타난 대표전단율과 상기 수학식 16의 대표점도의 식을 대입하면, 하기 수학식 17과 같이 대표전단응력을 토크의 함수로 나타낼 수 있다.

[수학식 17]

$$\bar{\tau} = \eta \bar{\dot{\gamma}} = \frac{1}{8R^3} \frac{K_s}{K_T} \cdot M = \alpha_\tau M, \quad \alpha_\tau = \frac{1}{8R^3} \frac{K_s}{K_T}$$

상기 수학식 17의 대표전단응력 $\bar{\tau}$ 과 수학식 15의 대표전단율 $\bar{\dot{\gamma}}_0$ 를 이용하여, 상기 수학식 1및 2에서 사용한 방법을 이용한 저장탄성을 G'과 손실탄성을 G''을 산출할 수 있다. 이때, 선형 점탄성으로의 가정이 필요 없으므로 회전각이 큰 비선형 점탄성에서도 적용될 수 있는 일반적 관계식에 해당될 수 있는 것이다. 그리고, 수식화를 위해 하기 수학식 18과 같이 복소전단율 $\bar{\dot{\gamma}}^*$, 복소전단응력 $\bar{\tau}^*$ 에 대한 관계식을 나타낼 수 있다.

[수학식 18]

$$\bar{\dot{\gamma}}^* = \bar{\dot{\gamma}}_0 Re\{e^{i\omega t}\} = \alpha_\gamma \theta_0 Re\{e^{i\omega t}\}, \quad \bar{\tau}^* = \bar{\tau}_0 Re\{e^{i(\omega t + \delta)}\} = \alpha_\tau M_0 Re\{e^{i(\omega t + \delta)}\}$$

그리고, 하기 수학식 19a, 19b를 통해, 선형 영역뿐만 아니라, 비선형 영역에서도 저장탄성을 G'과 손실탄성을 G''이 산출될 수 있도록 한다.

[수학식 19a]

$$G'(\omega, \bar{\dot{\gamma}}_0) = Re\left\{\frac{\bar{\tau}^*}{\bar{\dot{\gamma}}^*}\right\} = \frac{\alpha_\tau M_0}{\alpha_\gamma \theta_0} Re\{e^{i\delta}\} = \frac{\pi}{4K_T R^3} \frac{M_0}{\theta_0} \cos \delta$$

[수학식 19b]

$$G''(\omega, \bar{\dot{\gamma}}_0) = Im\left\{\frac{\bar{\tau}^*}{\bar{\dot{\gamma}}^*}\right\} = \frac{\alpha_\tau M_0}{\alpha_\gamma \theta_0} Im\{e^{i\delta}\} = \frac{\pi}{4K_T R^3} \frac{M_0}{\theta_0} \sin \delta$$

또한, 상기 수학식 19a, 19b에서 나타난 저장탄성을 G'과 손실탄성을 G''의 관계식은 상기 수학식 9의 선형점탄성에서의 저장탄성을 G'과 손실탄성을 G''에 대한 수식과 일치한다. 즉, 상기 수학식 9는 선형 영역뿐 아니라 비선형 영역에서도 점탄성이 산출될 수 있도록 한다.

이하에서는 본 발명에 따른, 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 방법에 대해 설명하기로 한다.

도 3을 참조하면, 본 발명에 따른 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 방법은, 기설정된 크기 이상으로 형성되는 용기에 수용된 유체 내에서 상기 회전체(10)가 운동되도록 하는 회전체운동단계(S100), 유변물성이 알려진 유체에 대한 회전체(10)의 운동특성에 기초하여 상기 회전체(10)의 형상계수가 산출되는 형상계수도출단계(S200), 측정부(30)에 의해, 상기 운동 정보가 측정되는 운동측정단계(S300) 및, 상기 회전체(10)의 형상계수와 상기 운동 정보에 기초하여 상기 측정 대상 유체의 유변물성정보가 산출되는 유변물성산출단계(S400)를 포함한다. 이때, 상기 회전체운동단계(S100)에서는, 회전체(10)의 운동에 의해 용기에 의한 효과가 발생되지 않도록 상기 회전체(10)에 비해 매우 큰 용기에 수용된 유체 내에서 회전체(10)가 회전되도록 한다.

그리고, 상기 유변물성산출단계(S400)는, 상기 모니터링모듈(40)에 의하여, 상기 상대 운동 정보가 하기 [수학식 9]에 대입되어 상기 측정 대상 유체의 유변물성정보가 산출될 수 있도록 한다.

[수학식 9]

$$G'(\omega) = \omega \eta''(\omega) = \frac{1}{\alpha} \frac{M_0}{\theta_0} \cos \delta, \quad G''(\omega) = \omega \eta'(\omega) = \frac{1}{\alpha} \frac{M_0}{\theta_0} \sin \delta$$

[0111] 또한, 상기 형상계수도출단계(S200)는, 상기 측정 대상 유체가 비뉴턴 유체인 경우, 상기 회전체(10)의 형상계수가, 하기 [수학식 12]와 같이, 무차원수 토크수 N_T 와 레이놀즈 수 Re 의 비례상수 K_T 로부터 산출되도록 한다.

[0112] [수학식 12]

$$M = \frac{4R^3}{\pi} K_T \cdot \eta \Omega = \alpha \eta \Omega, \quad \alpha = \frac{4R^3}{\pi} K_T$$

[0114] 또한, 상기 유변물성산출단계(S400)는, 하기 [수학식 14]를 통해 대표전단율 속도, [수학식 15]를 통해 대표전단율, [수학식 17]을 통해 대표전단응력을 산출한다.

[0115] [수학식 14]

$$\bar{\gamma} = K_s N = \frac{K_s}{2\pi} \Omega$$

[0117] [수학식 15]

$$\bar{\gamma}_0 = \frac{K_s}{2\pi} \theta_0 = \alpha_y \theta_0, \quad \alpha_y = \frac{K_s}{2\pi}$$

[0119] [수학식 17]

$$\bar{\tau} = \eta \bar{\gamma} = \frac{1}{8R^3} \frac{K_s}{K_T} \cdot M = \alpha_\tau M, \quad \alpha_\tau = \frac{1}{8R^3} \frac{K_s}{K_T}$$

[0121] 또한, 상기 유변물성산출단계(S400)는, 상기 [수학식 17]의 대표전단응력 및 [수학식 15]의 대표전단율과 하기 [수학식 19a], [수학식 19b]를 통해, 선형 영역뿐만 아니라, 비선형 영역에서도 저장탄성율 G' 과 손실탄성율 G'' 이 산출될 수 있도록 한다.

[0122] [수학식 19a]

$$G'(\omega, \bar{\gamma}_0) = Re \left\{ \frac{\bar{\tau}^*}{\bar{\gamma}^*} \right\} = \frac{\alpha_\tau M_0}{\alpha_y \theta_0} Re \{ e^{i\delta} \} = \frac{\pi}{4K_T R^3} \frac{M_0}{\theta_0} \cos \delta$$

[0124] [수학식 19b]

$$G''(\omega, \bar{\gamma}_0) = Im \left\{ \frac{\bar{\tau}^*}{\bar{\gamma}^*} \right\} = \frac{\alpha_\tau M_0}{\alpha_y \theta_0} Im \{ e^{i\delta} \} = \frac{\pi}{4K_T R^3} \frac{M_0}{\theta_0} \sin \delta$$

[0127] 이하에서는, 비뉴턴 유체의 선형점탄성, 비선형점탄성 측정에 있어서, 본 발명에 따른 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 시스템 및 방법을 통한 측정 결과와, 레오미터를 이용한 측정 결과를 비교한 측정데이터에 대해 설명하기로 한다.

[0128] 실험1. PEO (4M) 2wt% 비뉴턴유체 - 선형점탄성 데이터 비교

[0129] 이하, 물질의 가장 정확한 유변물성정보를 측정할 수 있는 장비인 레오미터의 CP(Cone and plate) 지오메트리의 선형점탄성 데이터와 본 발명에 따른 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 시스템 및 방법을 임의의 형상 회전체 2종(sphere impeller, Brookfield62 spindle)의 선형점탄성 데이터를 비교한 결과이다. 사용된 회전체 2종의 대한 K_T 및 K_s 값은 도 5에 제시되었고, 이를 이용하여 측정한 선형점탄성 데이터는 도 4에 제시하였다. 도 4에는 표준치구인 CP(cone-and-plate)를 이용한 점탄성 측정데이터가 함께 제시되었다. 도 4에서 구해진 선형점탄성 데이터는 회전각의 진폭 6.28×10^{-2} [rad]을 사용하여 측정된 값이다.

[0130] 도 4의 (a)는 선형영역(소진폭진동전단변형, small amplitude oscillatory shear, SAOS)하에서 레오미터 CP와 임의의 형상 회전체2종(sphere impeller, Brookfield62 spindle)으로 각각 측정한 비뉴턴 유체(PEO (4M) 2wt%)의 위상각을 비교한 그래프이다. 도 4의 (b)는 동적진동전단변형을 가하였을 때 토크 신호의 위상차와 크기가 반영한 임의의 형상 회전체 회전체2종(sphere impeller, Brookfield62 spindle)의 저장탄성율(G')과 손실탄성율(G'') 결과를 레오미터 CP와 비교한 그래프이다. 도 4의 두 그래프 모두 실험값과 본 발명에 따른 측정 방법을 이용한

예측값의 매우 높은 일치성을 나타내고 있다.

[0131] **실험2. PEO (4M) 2wt% 비뉴턴유체 - 비선형점탄성 데이터 비교**

[0132] 이하, 물질의 가장 정확한 유변물성정보를 측정할 수 있는 장비인 레오미터의 CP(Cone and plate) 치구의 비선형점탄성 데이터와 본 발명에 따른 유체 풀 내 회전체를 이용한 물질의 점탄성 측정 시스템 및 방법을 이용한 임의의 형상 회전체 2중(sphere impeller, Brookfield62 spindle)의 비선형점탄성 데이터를 비교한 결과이다. 본 실험에서는 물질의 내부 구조가 깨지지 않는 선형 영역을 비롯, 복잡한 형태의 유동 및 커다란 변형에 해당하는 비선형영역(대진폭진동전단변형, large amplitude oscillatory shear, LAOS)하에서 측정된 비뉴턴유체(PEO (4M) 2wt%)의 CP(Cone and plate)의 CP 지오메트리로 측정한 비선형점탄성 데이터(저장탄성율, 손실탄성율)와 임의의 형상 회전체 2중(sphere impeller, Brookfield62 spindle)에 대해 예측한 비선형점탄성 데이터 값을 비교한다.

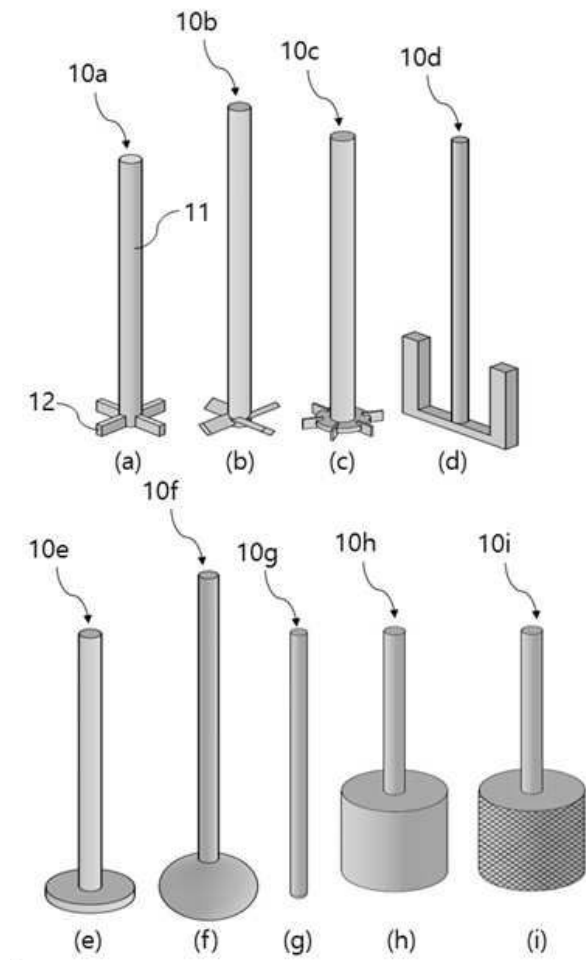
[0133] 도 6은, 레오미터 표준치구 CP와 임의의 형상의 회전체(sphere impeller, Brookfield62 spindle)의 선형 및 비선형 저장탄성율(G')과 손실탄성율(G'')을 예측한 결과를 나타낸 그래프이다. 도 6은, [수학식 15]에 따라 축의 회전각을 보정한 대표변형률 및 K_s 로 보정한 대표전단율에 대한 G' 및 G'' 거동 그래프이다. 도 6에서 나타난 바와 같이 [수학식15]를 이용하여 회전각을 보정한 대표변형률에 대해 G' 과 G'' 을 제시하였으며 그 결과 매우 높은 일치성을 보이는 것을 알 수 있다. 위의 결과들은 고가의 최첨단 장비인 레오미터의 전유물로만 여겨졌던 진동전단유동(oscillatory shear flow)하에서의 측정되는 선형 및 비선형 점탄성 데이터가 레오미터 없이도 본 발명에 따른 물질의 점탄성 측정 시스템 및 방법을 이용한다면 임의의 형상의 회전체를 이용하더라도 사용 유체의 점탄성 유변물성을 매우 정확하게 예측할 수 있음을 뒷받침한다. 즉, 임의의 형상의 회전체를 이용하더라도 측정 대상 유체의 점탄성 유변물성정보를 매우 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

부호의 설명

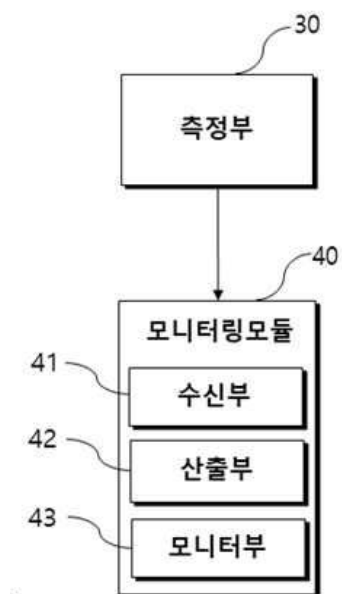
- [0135]
- 10 : 회전체
 - 11 : 회전축
 - 12 : 패들
 - 30 : 측정부
 - 40 : 모니터링모듈
 - 41 : 수신부
 - 42 : 산출부
 - 43 : 모니터부

도면

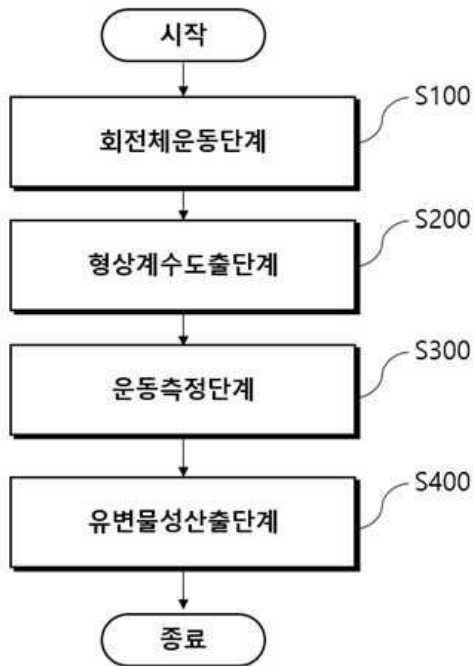
도면1



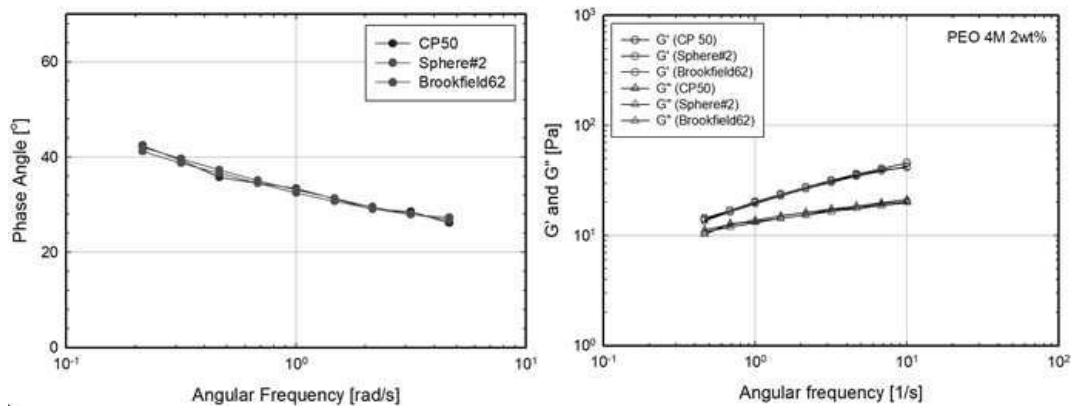
도면2



도면3



도면4



도면5

	Sphere#2	Brookfield62
K_T	24.07	19.13
K_g	10.52	13.13

도면6

