

(12) 특허협력조약에 의하여 공개된 국제출원

(19) 세계지식재산권기구  
국제사무국

(43) 국제공개일

2018년 10월 18일 (18.10.2018) WIPO | PCT



(10) 국제공개번호

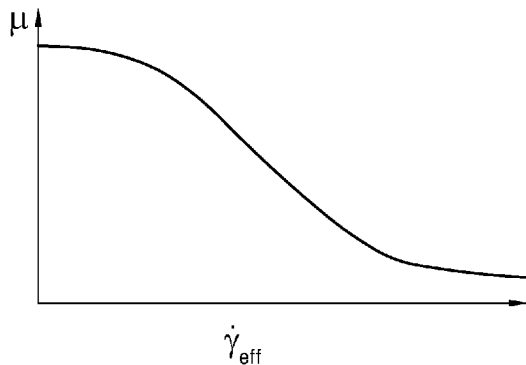
WO 2018/190585 A2

- (51) 국제특허분류: G01N 11/02 (2006.01) G01N 11/00 (2006.01) SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (21) 국제출원번호: PCT/KR2018/004117 (84) 지정국 (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 역내 권리의 보호를 위하여): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 유라시아 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 유럽 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- (22) 국제출원일: 2018년 4월 9일 (09.04.2018)
- (25) 출원언어: 한국어
- (26) 공개언어: 한국어
- (30) 우선권정보: 10-2017-0048086 2017년 4월 13일 (13.04.2017) KR  
10-2017-0154237 2017년 11월 17일 (17.11.2017) KR
- (71) 출원인: 경상대학교산학협력단 (INDUSTRY-ACADEMIC COOPERATION FOUNDATION GYEONGSANG NATIONAL UNIVERSITY) [KR/KR]; 52828 경상남도 진주시 진주대로 501, Gyeongsangnam-do (KR).
- (72) 발명자: 황옥렬 (HWANG, Wook Ryol); 52827 경상남도 진주시 가좌안골길21번길 5 103동 503호, Gyeongsangnam-do (KR). 장혜경 (JANG, Hye Gyeong); 52819 경상남도 진주시 호탄길13번길 15 502호, Gyeongsangnam-do (KR).
- (74) 대리인: 특허법인 피씨알 (PCR INTELLECTUAL PROPERTY LAW FIRM); 06194 서울시 강남구 선릉로90길 70 인텔빌딩 6층, Seoul (KR).
- (81) 지정국 (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 역내 권리의 보호를 위하여): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD,

공개:  
— 국제조사보고서 없이 공개하며 보고서 접수 후 이를 별도 공개함 (규칙 48.2(g))

(54) Title: METHOD AND SYSTEM FOR MEASURING VISCOSITY IN CONTINUOUS FLOW FIELD, AND METHOD AND SYSTEM FOR PREDICTING FLOW RATE OR PRESSURE DROP OF NON-NEWTONIAN FLUID IN CONTINUOUS FLOW FIELD

(54) 발명의 명칭: 연속적 유동장에서의 점도 측정 방법 및 시스템, 연속적 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법 및 시스템



(57) Abstract: One embodiment of the present invention can provide a method and/or a system which can easily measure viscosity behavior of a fluid by measuring only a flow rate and a pressure drop by preparing a flow number in an arbitrary continuous flow field. Another embodiment of the present invention can provide a method and/or a system which can easily measure a pressure drop or a flow rate in a flow field by only preparing a flow number in an arbitrary continuous flow field and viscosity behavior of a non-Newton fluid flowing in the flow field.

(57) 요약서: 본 발명의 일 실시예에 따르면, 임의의 연속적 유동장에 있어서 유동장의 유동수를 준비하면, 유량과 압력강하만을 측정함으로써 유체의 점도거동을 손쉽게 측정할 수 있는 방법 및/또는 시스템을 제공할 수 있다. 본 발명의 다른 실시예에 따르면, 임의의 연속적 유동장에 있어서 유동장의 유동수 및 유동장에서 유동하는 비뉴턴 유체의 점도 거동만을 준비하면, 해당 유동장에서의 압력강하 또는 유량을 손쉽게 예측할 수 있는 방법 및/또는 시스템을 제공할 수 있다.



WO 2018/190585 A2

## 명세서

### 발명의 명칭: 연속적 유동장에서의 점도 측정 방법 및 시스템, 연속적 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법 및 시스템

#### 기술분야

- [1] 본 발명의 일 실시예는 임의의 연속적 유동장에서의 점도 측정 방법 및 시스템에 관한 것이며, 본 발명의 다른 실시예는 연속적 유동장에서 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법 및 시스템에 관한 것이다

#### 배경기술

- [2] 고분자 용융체 및 솔루션, 입자현탁액, 슬러리, 액적계 등 유변학적 복잡유체(rheologically complex fluid)는 미세구조와 유체역학적 상호작용으로 전단담화(shear-thinning), 항복응력(yield stress) 등 복잡한 점도의 변화를 보이며, 화학공정, 고분자가공, 전자재료(디스플레이 및 이차전지), 식품, 화장품, 페인트, 수처리, 석유시추 등 다양한 공정에 적용되고 있다.
- [3] 이러한 복잡 유체의 점도를 측정하는 기존의 방법은 기본적으로 유체의 샘플을 취하여 다음 중 하나의 방법을 이용하고 있다. (i) 평판사이에 유체를 넣고 한쪽 평판에 전단력을 주어 전단율을 측정하여 이 둘 사이의 관계를 통해 점도를 측정할 수 있다. (ii) 간단한 원형단면 혹은 얇은 직사각형 미세관에 유체를 흘려 압력차와 유량의 관계를 이용하여 점도를 측정할 수 있다.
- [4] 그런데, 위의 두 방법 모두 운동량보존(힘 평형)의 원리로부터 유도되기 때문에, 매우 간단한 형상(원형평판, 원형단면 미세관, 직사각형 미세관)에 대해서만 적용이 가능할 수 있다.
- [5] 한편, 기존의 제한된 교반기 유동에서만 스케일링 개념과 경험적 접근으로 적용되고 있는 에너지소산율 기반의 유동정량화 기법인 Metzner-Otto 기법이 있다. Metzner-Otto는 교반시스템에서 전체 유동장을 대표하는 평균 전단율이 있다고 가정하였고, 이 평균 전단율은 임펠러의 속도와 비례한다는 상관 관계를 정의하였으며, 뉴턴유체와 비뉴턴유체의 에너지소산율의 동일성을 이용하여 비뉴턴유체 교반기 내 유동의 유효전단율과 유효점도를 정의하였다. 본 발명은 이와 유사한 에너지소산율 기반의 정량화 기법을 입구와 출구가 있는 모든 연속적 유동장에 대하여 적용하도록 개발한 기술이다.
- [6] 종래기술의 예로 미국 특허 6,412,337을 들 수 있다. 이 종래기술은 Metzner-Otto의 개념을 확장하여 정적교반기(static mixer)에서 점도측정을 구현하였다. 에너지소산율의 동일성을 이용한 개념은 같으나 유체의 점도모델을 멱급수(power-law) 유체로 가정하고 멱급수 유체의 두 가지 계수(consistency index 및 power-law index)를 찾고자 “두 개의 정적교반기(static mixer)를 연결”하여 각각 압력강하와 유량을 측정하였다. 반면, 본 발명은,

점도모형을 미리 정하지 않고, 임의의 유동장에서 단 한 번의 압력강하와 유량만을 측정하여 바로 점도를 측정할 수 있으므로 위 종래기술과 상이하며 적용범위가 훨씬 넓을 수 있다. 적용범위가 넓다는 것은 다룰 수 있는 유체의 점도모형이 다양하며, 정적교반기가 아닌 어떠한 형상의 일반적인 유동장에 대해서도 적용이 가능함을 의미할 수 있다.

[7] 한편, 연속적 유동장에 있어, 비뉴턴 유체의 물성에 대한 유량과 압력강하의 관계는 매우 상이하게 나타나는데, 종래에는 유동해석이나 실험을 통해 각 유체마다 유량과 압력강하의 관계를 개별적으로 구해야 했으므로 매우 번거로움이 있었다.

[8] 예를 들어, 고분자 가공에 사용되는 압출다이의 다이특성(die characteristics)이라고 불리는 유량과 압력강하 관계는 공정조건 등을 정하는데 있어 매우 중요한 정보인데, 유량과 압력강하의 관계는 사용하는 고분자의 종류 및 온도에 따라 모두 상이하게 나타났으므로, 이용하는 유체마다 별도의 실험 및 해석을 통해 구해야 하는 번거로움이 있었다.

### 발명의 상세한 설명

#### 기술적 과제

[9] 본 발명은 임의의 연속적 유동장에 있어서 유동장의 유동수(flow number)를 구하고 이를 이용하여, 유량과 압력강하만을 측정함으로써 유체의 점도거동을 손쉽게 측정할 수 있는 방법을 제공하기 위한 것이다.

[10] 또한, 입구와 출구가 있는 임의적 형태의 연속적 유동장 내에서 공정 중(in-situ) 실제 시스템에서 직접적으로(on-site) 유체의 점도를 측정할 수 있는 방법을 제공하기 위한 것이다.

[11] 아울러, 본 발명은 임의의 연속적 유동장에 있어서 유동장의 유동 특성 및 비뉴턴 유체의 점도거동만을 준비하면 비뉴턴 유체의 압력강하 또는 유량을 손쉽게 예측할 수 있는 방법 및 시스템을 제공하기 위한 것이다.

#### 과제 해결 수단

[12] 본 발명의 일 실시예 중 일측면에 따른 연속적 유동장에서의 점도 측정 방법은, 입구와 출구를 갖는 특정 형상의 연속적 유동장에서의 점도를 측정하는 방법으로서, 상기 유동장에서의 유동수를 준비하는 단계; 상기 유동장에서의 유체의 유량 및 압력강하를 측정하는 단계; 및 상기 유량 및 상기 압력강하를 이용하여 평균에너지소산율을 산출하고, 상기 유동장에서의 유동수 및 상기 평균에너지소산율을 기초로 유효전단율에 따른 유체의 점도를 도출하는 단계를 포함할 수 있다.

[13] 여기서, 상기 유체의 점도를 도출하는 단계는 하기 수학식1 및 수학식2를 이용하여 상기 유효전단율에 따른 유체의 점도를 도출할 수 있다.

[14] [수학식1]

$$[15] \quad \mu(\dot{\gamma}_{eff}) = \frac{\bar{\epsilon}}{K_p \cdot (\dot{\gamma}_{eff})^2}$$

[16] [수학식2]

$$[17] \quad \dot{\gamma}_{eff} = K_s \cdot \dot{\gamma}_{app}$$

[18] 여기서,  $\bar{\epsilon}$ 는 상기 유동장의 평균에너지소산율로서 상기 유량, 상기 압력강하 및 유동장의 부피에 대한 함수이고,  $\dot{\gamma}_{eff}$ 는 상기 유동장의 유효전단율,  $\mu(\dot{\gamma}_{eff})$ 는 상기 유체의 점도,  $\dot{\gamma}_{app}$ 는 상기 유동장의 겉보기 전단율,  $K_p$ 는 에너지소산율계수,  $K_s$ 는 유효전단율계수.

[19] 여기서, 상기 연속적 유동장은 복수개의 입구와 단일 출구를 구비하며, 상기 유체의 점도를 도출하는 단계는 하기 수학식 A을 이용하여 총에너지소산율을 산출하고, 상기 총에너지소산율 및 상기 유동장의 부피를 기초로 평균에너지소산율을 산출할 수 있다.

[20] [수학식 A]

$$[21] \quad \sum_{i=1}^n \Delta p_i Q_i^{inlet} = \text{총에너지소산율}$$

[22] 여기서, n은 입구의 수량,  $\Delta p_i$ 는 각 입구와 단일 출구 사이에서의 유체의 압력강하,  $Q_i^{inlet}$ 는 각 입구에서의 유체의 유량.

[23] 여기서, 상기 연속적 유동장은 단일 입구와 복수개의 출구를 구비하며, 상기 유체의 점도를 도출하는 단계는 하기 수학식 B을 이용하여 총에너지소산율을 산출하고, 상기 총에너지소산율 및 상기 유동장의 부피를 기초로 평균에너지소산율을 산출할 수 있다.

[24] [수학식 B]

$$[25] \quad \sum_{i=1}^n \Delta p_i Q_i^{outlet} = \text{총에너지소산율}$$

[26] 여기서, n은 출구의 수량,  $\Delta p_i$ 는 단일 입구와 각 출구 사이에서의 유체의 압력강하,  $Q_i^{outlet}$ 는 각 출구에서의 유체의 유량.

[27] 여기서, 상기 유동장에서의 유동수는 에너지소산율계수  $K_p$ 를 포함하며, 상기 유동장에서의 유동수를 준비하는 단계는 상기 에너지 에너지소산율계수  $K_p$ 를 사전에 획득하는 단계를 포함하고, 상기 에너지소산율계수  $K_p$ 를 사전에 획득하는 단계는, 점도를 알고 있는 뉴턴유체를 상기 유동장에 주입하는 단계; 상기 유동장에서의 상기 뉴턴유체의 유량 및 압력강하를 측정하는 단계; 상기

뉴턴유체의 유량 및 압력강하를 이용하여 상기 뉴턴유체의 평균에너지소산율을 구하는 단계; 상기 뉴턴유체의 밀도, 평균속도 및 점도, 상기 유동장의 특성길이, 상기 뉴턴유체의 겉보기 전단율, 상기 뉴턴유체의 평균에너지소산율을 이용하여 레이놀즈수 및 파워수를 구하는 단계; 및 상기 레이놀즈수, 상기 파워수 및 상기 에너지소산율계수  $K_p$  간의 관계를 이용하여 상기 에너지소산율계수  $K_p$  를 구하는 단계를 포함할 수 있다.

- [28] 여기서, 상기 유동장에서의 유동수는 에너지소산율계수  $K_p$  를 포함하며, 상기 유동장에서의 유동수를 준비하는 단계는 상기 에너지 에너지소산율계수  $K_p$  를 사전에 획득하는 단계를 포함하고, 상기 에너지소산율계수  $K_p$  를 사전에 획득하는 단계는, 뉴턴유체를 이용하여 상기 유동장의 속도장을 구하는 단계; 상기 뉴턴유체의 점도와 상기 유동장의 미소지점에서의 전단율의 제곱을 곱하여 국부 에너지소산율을 구하는 단계; 상기 국부 에너지소산율을 상기 유동장 전체에 대하여 적분하여 총 에너지소산율을 구하는 단계; 상기 총 에너지소산율을 상기 유동장의 부피로 나누어 상기 뉴턴유체의 평균에너지소산율을 구하는 단계; 상기 뉴턴유체의 밀도, 평균속도 및 점도, 상기 유동장의 특성길이, 상기 뉴턴유체의 겉보기 전단율, 상기 뉴턴유체의 평균에너지소산율을 이용하여 레이놀즈수 및 파워수를 구하는 단계; 및 상기 레이놀즈수, 상기 파워수 및 상기 에너지소산율계수  $K_p$  간의 관계를 이용하여 상기 에너지소산율계수  $K_p$  를 구하는 단계를 포함할 수 있다.
- [29] 여기서, 상기 유동장에서의 유동수는 유효전단율계수  $K_s$  를 포함하며, 상기 유동장에서의 유동수를 준비하는 단계는 상기 유효전단율계수  $K_s$  를 사전에 획득하는 단계를 포함하고, 상기 유효전단율계수  $K_s$  를 사전에 획득하는 단계는, 점도거동을 알고 있는 비뉴턴유체를 상기 유동장에 주입하는 단계; 상기 유동장에서의 상기 비뉴턴유체의 유량 및 압력강하를 측정하는 단계; 상기 비뉴턴유체의 유량 및 압력강하를 이용하여 상기 비뉴턴유체의 평균에너지소산율 및 파워수를 구하는 단계; 상기 비뉴턴유체의 파워수와 동일한 값을 가지는 뉴턴유체의 파워수에 대응되는 뉴턴유체의 레이놀즈수를 찾고, 상기 뉴턴유체의 레이놀즈수를 유효 레이놀즈수로 간주하는 단계; 상기 유효 레이놀즈수, 상기 비뉴턴유체의 밀도, 평균속도, 상기 유동장의 특성길이를 이용하여 상기 비뉴턴유체의 점도를 구하고, 상기 점도를 유효 점도로 간주하는 단계; 상기 유효 점도와 상기 점도거동을 이용하여 상기 유동장의 유효전단율을 구하는 단계; 및 상기 유효전단율과 겉보기 전단율 간의 관계를 이용하여 상기 유효전단율계수  $K_s$  를 구하는 단계를 포함할 수 있다.
- [30] 여기서, 상기 유동장에서의 유동수는 유효전단율계수  $K_s$  를 포함하며, 상기 유동장에서의 유동수를 준비하는 단계는 상기 유효전단율계수  $K_s$  를 사전에 획득하는 단계를 포함하고, 상기 유효전단율계수  $K_s$  를 사전에 획득하는 단계는, 점도거동을 알고 있는 비뉴턴유체를 이용하여 유동해석을 수행하는 단계; 상기 비뉴턴유체의 점도와 상기 유동장의 미소지점에서의 전단율의 제곱을 곱하여

국부 에너지소산율을 구하는 단계; 상기 국부 에너지소산율을 상기 유동장 전체에 대하여 적분하여 총 에너지소산율을 구하는 단계; 상기 총 에너지소산율을 상기 유동장의 부피로 나누어 상기 비뉴턴유체의 평균에너지소산율을 구하는 단계; 상기 비뉴턴유체의 밀도, 평균속도, 겉보기 전단율 및 평균에너지소산율을 이용하여 파워수를 구하는 단계; 상기 비뉴턴유체의 파워수와 동일한 값을 가지는 뉴턴유체의 파워수에 대응되는 뉴턴유체의 레이놀즈수를 찾고, 상기 뉴턴유체의 레이놀즈수를 유효 레이놀즈수로 간주하는 단계; 상기 유효 레이놀즈수, 상기 비뉴턴유체의 밀도, 평균속도, 상기 유동장의 특성길이를 이용하여 상기 비뉴턴유체의 점도를 구하고, 상기 점도를 유효 점도로 간주하는 단계; 상기 유효 점도와 상기 점도거동을 이용하여 상기 유동장의 유효전단율을 구하는 단계; 및 상기 유효전단율과 겉보기 전단율 간의 관계를 이용하여 상기 유효전단율계수  $K_s$  를 구하는 단계를 포함할 수 있다.

[31] 본 발명의 일 실시예 중 다른 측면에 따른 연속적 유동장에서의 점도 측정 시스템은, 입구와 출구를 갖는 특정 형상의 연속적 유동장에서의 점도를 측정하는 시스템으로서, 상기 유동장에서의 유동수를 저장하는 유동수저장부; 상기 유동장에서의 유체의 유량을 측정하는 유량측정부; 상기 유동장에서의 압력강하를 산출하기 위한 압력측정부; 및 상기 측정된 유량 및 압력강하를 이용하여 평균에너지소산율을 산출하고, 상기 유동장에서의 유동수 및 상기 평균에너지소산율을 기초로 유효전단율에 따른 유체의 점도를 도출하는 도출부;를 포함할 수 있다.

[32] 여기서, 상기 도출부는 하기 수학식1 및 수학식2를 이용하여 상기 유효전단율에 따른 유체의 점도를 도출할 수 있다.

[33] [수학식1]

$$[34] \quad \mu(\dot{\gamma}_{eff}) = \frac{\bar{\epsilon}}{K_p \cdot (\dot{\gamma}_{eff})^2}$$

[35] [수학식2]

$$[36] \quad \dot{\gamma}_{eff} = K_s \cdot \dot{\gamma}_{app}$$

[37] 여기서,  $\bar{\epsilon}$  는 상기 유동장의 평균에너지소산율로서 상기 유량, 상기 압력강하 및 유동장의 부피에 대한 함수이고,  $\dot{\gamma}_{eff}$  는 상기 유동장의 유효전단율,  $\mu(\dot{\gamma}_{eff})$  는 상기 유체의 점도,  $\dot{\gamma}_{app}$  는 상기 유동장의 겉보기 전단율,  $K_p$  는 에너지소산율계수,  $K_s$  는 유효전단율계수.

[38] 여기서, 상기 연속적 유동장은 복수개의 입구와 단일 출구를 구비하며, 상기 도출부는 하기 수학식 A을 이용하여 총에너지소산율을 산출하고, 상기

총에너지소산율 및 상기 유동장의 부피를 기초로 평균에너지소산율을 산출할 수 있다.

[39] [수학식 A]

[40]

$$[41] \quad \sum_{i=1}^n \Delta p_i Q_i^{inlet} = \text{총에너지소산율}$$

[42] 여기서, n은 입구의 수량,  $\Delta p_i$ 는 각 입구와 단일 출구 사이에서의 유체의 압력강하,  $Q_i^{inlet}$ 는 각 입구에서의 유체의 유량.

[43] 여기서, 상기 연속적 유동장은 단일 입구와 복수개의 출구를 구비하며, 상기 유체의 점도를 도출하는 단계는 하기 수학식 B을 이용하여 총에너지소산율을 산출하고, 상기 총에너지소산율 및 상기 유동장의 부피를 기초로 평균에너지소산율을 산출할 수 있다.

[44] [수학식 B]

$$[45] \quad \sum_{i=1}^n \Delta p_i Q_i^{outlet} = \text{총에너지소산율}$$

[46] 여기서, n은 출구의 수량,  $\Delta p_i$ 는 단일 입구와 각 출구 사이에서의 유체의 압력강하,  $Q_i^{outlet}$ 는 각 출구에서의 유체의 유량.

[47] 본 발명의 다른 실시예에 따른 일 측면에 따른 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법은, 입구와 출구를 갖는 특정 형상의 연속적 유동장에서 유동하는 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법으로서, 상기 유동장에서의 유동수를 준비하는 단계; 상기 비뉴턴 유체의 점도거동 정보를 준비하는 단계; 및 상기 유동장에서의 유동수 및 상기 점도거동 정보를 기초로 상기 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 및 압력강하 중 어느 하나의 정보로부터 다른 하나의 정보를 도출하는 단계를 포함할 수 있다.

[48] 여기서, 상기 다른 하나의 정보를 도출하는 단계는 하기 수학식6, 수학식7 및 수학식 8 중 적어도 하나를 이용할 수 있다.

[49] [수학식6]

$$[50] \quad N_p = \frac{P/V}{\rho \cdot (\bar{U})^2 \cdot \gamma_{app}}$$

[51] [수학식7]

$$[52] \quad N_p = \frac{K_p}{Re}$$

[53] [수학식8]

[54] 
$$\dot{\gamma}_{eff} = K_s \cdot \dot{\gamma}_{app}$$

[55] 여기서,  $N_p$ 는 파워수,  $P$ 는 응력에 따른 전체 파워로서 상기 유량과 상기 압력강하의 곱,  $\dot{\gamma}_{app}$ 는 상기 유동장의 겉보기 전단율,  $\dot{\gamma}_{eff}$ 는 상기 유동장의 유효전단율,  $Re$ 는 레이놀즈수,  $K_p$ 는 에너지소산율계수,  $K_s$ 는 유효전단율계수.

[56] 여기서, 상기 유동장에서의 유동수는 에너지소산율계수  $K_p$ 을 포함하며, 상기 다른 하나의 정보를 추출하는 단계는, 상기 유동장의 겉보기 전단율과 유효전단율계수  $K_s$  간의 관계를 이용하여 상기 유동장의 유효전단율을 구하는 단계; 상기 유동장의 유효전단율과 상기 점도거동을 이용하여 유효점도를 구하는 단계; 유체의 평균속도, 밀도 및 점도, 상기 유동장의 특성길이 간의 관계와 상기 유효점도를 이용하여 유효레이놀즈수를 구하는 단계; 상기 유효전단율계수  $K_s$ 와 상기 유효레이놀즈수를 이용하여 파워수를 구하는 단계; 및 유체의 평균속도, 밀도, 겉보기 전단율, 상기 유동장에서의 유체 부피 및 상기 파워수를 이용하여 응력에 따른 전체 파워를 구하는 단계;를 포함하며, 상기 응력에 따른 전체 파워를 구하는 단계를 통해 상기 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 및 압력강하 간의 관계를 구할 수 있다.

[57] 여기서, 상기 다른 하나의 정보를 도출하는 단계는, 상기 어느 하나의 정보가 상기 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 정보이며, 상기 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 정보를 통해 상기 겉보기 전단율 및 유체의 평균속도 중 적어도 하나를 구하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[58] 본 발명의 다른 실시예에 따른 다른 측면에 따른 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 예측시스템은, 입구와 출구를 갖는 특정 형상의 연속적 유동장에서 유동하는 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측할 수 있는 시스템으로서, 상기 유동장에서의 유동수를 저장하는 유동수저장부; 상기 비뉴턴 유체의 점도거동 정보를 저장하는 점도거동정보저장부; 및 상기 유동장에서의 유동수 및 상기 점도거동 정보를 기초로, 상기 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 및 압력강하 중 어느 하나의 정보로부터 다른 하나의 정보를 도출하는 도출부를 포함할 수 있다.

[59] 여기서, 상기 도출부는 하기 수학식6, 수학식7 및 수학식 8 중 적어도 하나를 이용할 수 있다.

[60] [수학식6]

[61] 
$$N_p = \frac{P/V}{\rho \cdot (\bar{U})^2 \cdot \dot{\gamma}_{app}}$$

[62] [수학식7]

[63] 
$$N_p = \frac{K_p}{Re}$$

[64] [수학식8]

$$[65] \quad \dot{\gamma}_{eff} = K_s \cdot \dot{\gamma}_{app}$$

[66] 여기서,  $N_p$ 는 파워수,  $P$ 는 응력에 따른 전체 파워로서 상기 유량과 상기 압력강하의 곱,  $\dot{\gamma}_{app}$ 는 겉보기 전단율,  $\dot{\gamma}_{eff}$ 는 유효전단율,  $Re$ 는 레이놀즈수,  $K_p$ 는 에너지소산율계수,  $K_s$ 는 유효전단율계수.

[67] 여기서, 상기 유동장에서의 유동수는 에너지소산율  $K_p$ , 유효전단율계수  $K_s$ 를 포함하며, 상기 도출부는, 겉보기 전단율과 유효전단율계수  $K_s$  간의 관계를 이용하여 유효전단율을 구하는 유효전단율 산출부; 상기 유효전단율과 상기 점도거동을 이용하여 유효점도를 구하는 유효점도 산출부; 유체의 평균속도, 밀도 및 점도, 상기 유동장의 특성길이 간의 관계와 상기 유효점도를 이용하여 유효레이놀즈수를 구하는 유효레이놀즈수 산출부; 상기 유효전단율계수  $K_s$ 와 상기 유효레이놀즈수를 이용하여 파워수를 구하는 파워수 산출부; 및 유체의 평균속도, 밀도, 겉보기 전단율, 상기 유동장에서의 유체 부피 및 상기 파워수를 이용하여 응력에 따른 전체 파워를 구하는 전체파워 산출부;를 포함하며, 상기 전체파워 산출부는, 상기 구해진 응력에 따른 전체 파워를 기초로 상기 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 및 압력강하 간의 관계를 구할 수 있다.

[68] 여기서, 상기 어느 하나의 정보가 상기 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 정보이며, 상기 도출부는 상기 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 정보를 통해 상기 겉보기 전단율 및 유체의 평균속도 중 적어도 하나를 구하는 유량정보이용부를 더 포함할 수 있다.

### 발명의 효과

[69] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 임의의 연속적 유동장에 있어서 유동장의 유동수(flow number)를 구하고 이를 이용하면, 유량과 압력강하만을 측정함으로써 유체의 점도거동을 손쉽게 측정할 수 있는 방법 및/또는 시스템을 제공할 수 있다.

[70] 또한, 입구와 출구가 있는 임의적 형태의 연속적 유동장 내에서 공정 중에(in-situ) 실제 시스템에서 직접적으로(on-site) 유체의 점도를 측정할 수 있는 방법 및/또는 시스템을 제공할 수 있다.

[71] 본 발명의 다른 실시예에 따르면, 임의의 연속장 유동장에 있어서 유동장의 유동수 및 유동장에서 흐르는 비뉴턴 유체의 전단율에 따른 점도거동 만을 알고 있으면, 해당 유동장에서의 압력강하 또는 유량을 손쉽게 예측할 수 있는 방법 및/또는 시스템을 제공할 수 있다.

### 도면의 간단한 설명

[72] 도 1은 유변학적 복잡유체의 전단율과 점도 사이의 관계를 그래프로 나타낸 도면이다.

[73] 도 2는 단일 입구와 단일 출구를 구비하는 유동장의 일 예를 개략적으로 도시한

개념도이다.

- [74] 도 3은 복수개의 입구와 단일 출구를 구비하는 유동장의 일 예를 개략적으로 도시한 개념도이다.
- [75] 도 4은 단일 입구와 복수개의 출구를 구비하는 유동장의 일 예를 개략적으로 도시한 개념도이다.
- [76] 도 5는 본 발명의 일 실시예 중 다른 측면에 따른 유체 점도 측정 시스템의 구성을 개략적으로 나타낸 개념도이다.
- [77] 도 6는 다양한 비율의 확대/축소 원형파이프에서의 주어진 Carbopol 981 수용액의 유동에 대하여 시뮬레이션을 통해 전단율에 따른 점도를 구한 결과와, 미리 구한 에너지소산율계수와 유효전단율계수를 기초로 유량과 압력강하 정보만을 이용하여 점도를 구한 결과가 모두 일치함을 보여주는 결과 그림이다.
- [78] 도 7a는 특정 형상의 다이(Die)의 모식도이다.
- [79] 도 7b는 도 7a에 도시된 다이에서의 비뉴턴유체 모델 두가지의 유동에 대하여 시뮬레이션을 통해 전단율에 따른 점도를 구한 결과와, 미리 구한 에너지소산율계수와 유효전단율계수를 기초로 유량과 압력강하 정보만을 이용하여 점도를 구한 결과가 모두 일치함을 보여주는 그림이다.
- [80] 도 8은 본 발명의 다른 실시예 중 다른 측면에 따른 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 시스템의 구성을 블록화한 개념도이다.
- [81] 도 9은 확대/축소 원형파이프 유동에 대하여 임의의 유량에 대해 대응되는 압력강하를 유동해석으로 시뮬레이션한 결과와, 본 발명의 다른 실시예 중 일 측면에 따른 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법 및/또는 시스템을 이용하여 임의의 유량에 대응되는 압력강하를 예측한 결과가 거의 일치함을 보여주는 그림이다.
- [82] 도 10은 "Kenics static mixer" 유동에 대하여 임의의 유량에 대해 대응되는 압력강하를 유동해석으로 시뮬레이션한 결과와, 본 발명의 다른 실시예 중 일 측면에 따른 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법 및/또는 시스템을 이용하여 임의의 유량에 대응되는 압력강하를 예측한 결과가 거의 일치함을 보여주는 그림이다.
- [83] 도 11은 "Body-centered cubic(BCC) 구조의 다공질매질"내 유동에 대하여 임의의 유량에 대해 대응되는 압력강하를 유동해석으로 시뮬레이션한 결과와, 본 발명의 다른 실시예 중 일 측면에 따른 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법 및/또는 시스템을 이용하여 임의의 유량에 대응되는 압력강하를 예측한 결과가 거의 일치함을 보여주는 그림이다.

### 발명의 실시를 위한 형태

- [84] 이하에서는 첨부된 도면을 참조하여 구체적인 실시예들을 상세히 설명하도록 한다. 아울러, 관련된 공지 구성 또는 공지 기능에 대한 구체적인 설명이 상기 실시예들의 요지를 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 구체적인 설명을

생략한다.

[85] 한편, 단수의 표현은 문맥상 명백하게 단수만을 가리키는 것이 아닌 한 복수의 표현을 포함한다. 그리고 특정 부분이 특정 구성을 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 상기 특정 부분은 상기 특정 구성 외의 다른 구성을 제외하는 것이 아니라 상기 다른 구성을 더 포함할 수 있음을 의미한다.

[86]

[87] 유체 점도 측정 방법

[88] 이하에서는 본 발명의 일 실시예 중 일 측면에 따른 유체 점도 측정 방법을 상세히 설명한다. 본 일 실시예 중 일 측면에 따른 유체 점도 측정 방법은 파이프와 같이 입구 및 출구가 있는 특정 형상의 연속적 유동장에서 유동하는 불특정다수 유체들의 유동 특성을 정량화한 유동수를 준비하면, 실제 그 유동장에서 유동하는 유체의 유량과 압력강하만을 측정하여 유체, 특히 비뉴턴 유체의 점도거동(점도, 유효전단율 및 이들의 관계)을 측정할 수 있는 방법에 관한 것이다.

[89]

[90] 이러한 유체 점도 측정 방법은, 유동장에서의 유동수를 준비하는 단계와, 유동장에서의 유체의 유량 및 압력강하를 측정하는 단계, 및 유량 및 압력강하를 이용하여 평균에너지소산율을 산출하고, 유동장에서의 유동수 및 상기 평균에너지소산율을 기초로 유효전단율에 따른 유체의 점도를 도출하는 단계를 포함할 수 있다.

[91] 한편, 특정 형상의 유동장에서 유동하는 불특정다수 복잡 유체들의 유동 특성은 유체들의 종류에 관계없이 정량화된 유동수, 즉 무차원화된 수일 수 있으며, 이러한 유동장에서의 유동수는 에너지소산율계수(coefficient of energy dissipation rate)  $K_p$  및/또는 유효전단율계수(coefficient of effective shear rate)  $K_s$  를 포함할 수 있다. 이러한 유동장에서의 유동수는 특정 형상의 유동장에 대해 에너지소산율 나타낼 수 있는 무차원화된 수  $N_p$  와 레이놀즈 수  $Re$  와의 관계를 이용하여 산출될 수 있는데, 유동장에서의 유동수를 준비하는 단계는 후술하기로 한다.

[92] 유동장에서의 유체의 유량 및 압력강하를 측정하는 단계에서는, 유량계를 이용하여 유량을 측정할 수 있고, 압력계를 이용하여 압력강하를 측정할 수 있다. 압력강하는 점도 측정 구간의 시작점과 종료점에서 각 압력을 비교함으로써 산출될 수 있다.

[93] 유체의 유효전단율에 따른 점도를 도출하는 단계는, 유효전단율  $\dot{\gamma}_{eff}$  과 이에

해당하는 점도  $\mu$ 를 아래의 수학식 1 및 수학식 2를 이용하여 도출할 수 있다.

유체의 유효전단율  $\dot{\gamma}_{eff}$  과 점도  $\mu$  사이의 관계는 도 1에 도시된 유변학적

복잡유체의 전단율과 점도 사이의 관계와 같을 수 있다.

[94] [수학식1]

$$[95] \quad \mu(\dot{\gamma}_{eff}) = \frac{\bar{\epsilon}}{K_p \cdot (\dot{\gamma}_{eff})^2}$$

[96] [수학식2]

$$[97] \quad \dot{\gamma}_{eff} = K_s \cdot \dot{\gamma}_{app}$$

[98]

[99] 여기서,  $\bar{\epsilon}$  는 유동장의 평균에너지소산율,  $\dot{\gamma}_{eff}$  는 유동장의 유효전단율,

$\mu(\dot{\gamma}_{eff})$  는 유체의 점도,  $\dot{\gamma}_{app}$  는 유동장의 겉보기 전단율,  $K_p$  는

에너지소산율계수(coefficient of energy dissipation rate),  $K_s$  는

유효전단율계수(coefficient of effective shear rate)을 의미할 수 있다.

[100] 평균에너지소산율  $\bar{\epsilon}$  은 총에너지소산율을 유동장의 부피로 나눈 것으로

나타낼 수 있으며, 총에너지소산율은 층류영역에서의 유체의 유량 및 압력강하를 기초로 산출될 수 있으므로, 평균에너지소산율  $\bar{\epsilon}$  는 유체의 유량, 압력강하 및 유동장의 부피에 대한 함수일 수 있다.

[101] 겉보기전단율  $\dot{\gamma}_{app}$  은 유동장마다 다르게 정의할 수 있으며 연구자가 선택할

수 있다. 예를 들어, 입구반지름이 R인 원형단면 파이프에서 겉보기 전단율은  $\dot{\gamma}_{app} = 4Q/\pi R^3$ 로 정의될 수 있다. 즉, 겉보기 전단율 또한 유체의 유량에 대한 함수일 수 있다.

[102] 유효전단율  $\dot{\gamma}_{eff}$  은 수학식 2에 따라 특정 유동장의 형상에 따라 결정되는

유동수 중 하나인  $K_p$  와 겉보기전단율  $\dot{\gamma}_{app}$  이므로, 유동장이 결정되면 유체의

유량에 대한 함수로 취급할 수 있다.

[103] 도 2는 단일 입구와 단일 출구를 구비하는 유동장의 일 예를 개략적으로 도시한 개념도이다.

[104] 도 2에 도시된 바와 같은 단일 입구와 단일 출구를 구비하는 유동장의 경우에는 입구 또는 출구 중 적어도 어느 하나의 위치에서 유량을 측정하여 그 측정된 값을 유체의 유량 값으로 획득하고, 입구에서 측정되는 압력과 출구에서 측정되는 압력을 비교하여 그 차를 유체의 압력강하 값으로 획득하며, 획득된 유체의 유량 값과 압력강하 값의 곱(총에너지소산율)을 유동장의 부피로 나누면 평균에너지소산율  $\bar{\epsilon}$  을 산출할 수 있다.

[105] 도 3은 복수개의 입구와 단일 출구를 구비하는 유동장의 일 예를 개략적으로 도시한 개념도이다.

[106] 도 3에 도시된 바와 같은 복수개의 입구와 단일 출구를 구비하는 유동장의 경우에는, 복수개의 입구에서 유량을 측정하여 그 측정된 값을 각 입구에서의 유체의 유량 값( $Q_i^{inlet}$ , 도 3의 유동장의 경우에는  $Q_1^{inlet}$ ,  $Q_2^{inlet}$ )으로 획득하고, 복수개의 입구에서 측정되는 압력 각각과 출구에서 측정되는 압력을 비교하여 그 차를 각 입구와 단일 출구 사이에서의 유체의 압력강하 값( $\Delta p_i$ , 도 3의 유동장의 경우에는  $\Delta p_1$ ,  $\Delta p_2$ )으로 획득하며, 획득된 각 입구에서의 유체의 유량 값( $Q_i^{inlet}$ )과 각 입구와 단일 출구 사이에서의 유체의 압력강하 값( $\Delta p_i$ )을 기초로 아래의 수학적식 A를 이용하여 총에너지소산율을 산출할 수 있다.

[107] [수학적식 A]

$$[108] \quad \sum_{i=1}^n \Delta p_i Q_i^{inlet} = \text{총에너지소산율}$$

[109] 여기서, n은 입구의 수량,  $\Delta p_i$ 는 각 입구와 단일 출구 사이에서의 유체의 압력강하,  $Q_i^{inlet}$ 는 각 입구에서의 유체의 유량을 의미할 수 있다.

[110] 그리고, 산출된 총에너지소산율을 유동장의 부피로 나누면 평균에너지소산율  $\epsilon$ 을 산출할 수 있다.

[111] 도 3에 도시된 바와 같은 유동장의 경우에는, 겉보기 전단율  $\dot{\gamma}_{app}$ 은 단일 출구에서의 유량( $Q_i^{outlet}$ )을 단일 출구에서의 단면적으로 나눈 값으로 정의할 수 있다.

[112] 도 4은 단일 입구와 복수개의 출구를 구비하는 유동장의 일 예를 개략적으로 도시한 개념도이다.

[113] 도 4에 도시된 바와 같은 복수개의 입구와 단일 출구를 구비하는 유동장의 경우에는, 복수개의 출구에서 유량을 측정하여 그 측정된 값을 각 출구에서의 유체의 유량 값( $Q_i^{outlet}$ , 도 4의 유동장의 경우에는  $Q_1^{outlet}$ ,  $Q_2^{outlet}$ )으로 획득하고, 단일 입구에서 측정되는 압력과 복수 개의 출구에서 측정되는 압력 각각을 비교하여 그 차를 단일 입구와 각 출구 사이에서의 유체의 압력강하 값( $\Delta p_i$ , 도 4의 유동장의 경우에는  $\Delta p_1$ ,  $\Delta p_2$ )으로 획득하며, 획득된 각 출구에서의 유체의 유량 값( $Q_i^{outlet}$ )과 단일 입구와 각 출구 사이에서의 유체의 압력강하 값( $\Delta p_i$ )을 기초로 아래의 수학적식 B를 이용하여 총에너지소산율을 산출할 수 있다.

[114] [수학적식 B]

$$[115] \quad \sum_{i=1}^n \Delta p_i Q_i^{outlet} = \text{총에너지소산율}$$

[116] 여기서, n은 출구의 수량,  $\Delta p_i$ 는 단일 입구와 각 출구 사이에서의 유체의

압력강하,  $Q_i^{outlet}$  는 각 출구에서의 유체의 유량.

[117] 그리고, 산출된 총에너지소산율을 유동장의 부피로 나누면 평균에너지소산율  $\bar{\epsilon}$  을 산출할 수 있다.

[118] 도 4에 도시된 바와 같은 유동장의 경우에는, 겉보기 전단율  $\dot{\gamma}_{app}$  은 단일 입구에서의 유량( $Q_i^{inlet}$ )을 단일 입구에서의 단면적으로 나눈 값으로 정의할 수 있다.

[119]

[120] 이하에서는 유동장에서의 유동수를 준비하는 단계를 설명하기로 한다.

[121] 유동장에서의 유동수를 준비하는 단계는 에너지소산율계수  $K_p$  를 사전에 획득하는 단계를 포함하여, 에너지소산율계수  $K_p$  는 해당 유동장에 대하여 사전에 얻어질 수 있다. 예를 들어, 에너지소산율계수  $K_p$  는 실험적 기법으로 구할 수 있다.

[122] 먼저, 해당 유동장 시스템, 즉 특정 형상을 갖는 유동장에 점도를 알고 있는 뉴턴유체를 주입하고 층류영역에서의 유량과 압력강하를 측정할 수 있다. 참고로, 유량은 유량계를 이용하여 측정이 가능하고, 압력강하는 압력계를 이용하여 측정이 가능하다. 압력강하는 특정 구간의 시작점과 종료점에서 각 압력을 비교함으로써 산출될 수 있다.

[123] 그리고 이러한 층류영역에서의 유량과 압력강하 값, 그리고 유동장의 부피로부터 평균에너지소산율을 계산할 수 있다. 예를 들어, 도 2에 도시된 바와 같은 단일 입구 및 단일 출구를 구비하는 유동장에서의 평균에너지소산율  $\bar{\epsilon}$  은 층류영역에서의 유량과 압력강하의 곱을 부피로 나눈 것으로 나타낼 수 있다.

[124] 이후, 에너지소산율 기반의 유동특성을 정량화하기 위한 두 개의 무차원 수(레이놀즈수  $Re$  및 파워수  $N_p$ )를 뉴턴유체의 밀도, 평균속도 및 점도, 해당 유동장의 특성길이, 겉보기 전단율, 뉴턴유체의 평균에너지소산율을 이용하여 구할 수 있다. 예를 들어, 다음의 수학적 식 3 및 수학적 식 4와 같이 구할 수 있다.

[125] [수학적 식 3]

$$[126] \quad Re = \frac{\rho \cdot \bar{U} \cdot L}{\mu}$$

[127] 여기서,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\bar{U}$  는 유체의 평균속도,  $L$ 은 유동장 시스템의 특성길이,  $\mu$ 는 유체의 점도를 의미할 수 있다.

[128] 구체적으로, 상기 수학적 식 3에서의 유체의 밀도  $\rho$ , 유체의 점도  $\mu$  는 해당 시스템에 주입되는 뉴턴유체의 물성이 이용될 수 있다. 상기 수학적 식 3에서의 평균속도  $\bar{U}$ 는 유량을 단면적으로 나눈 값일 수 있고, 시스템의 특성길이는 유동장의 형상에 따라 달라질 수 있다.

[129] [수학적 식 4]

[130] 
$$N_p = \frac{\bar{\epsilon}}{\rho \cdot (\bar{U})^2 \cdot \gamma_{app}}$$

[131] 여기서,  $\bar{\epsilon}$  는 유동장의 평균에너지소산율,  $\gamma_{eff}$  는 유동장의 겉보기 전단율을 의미할 수 있다.

[132] 구체적으로, 상기 수학식 4에서의 유동장의 평균에너지소산율  $\bar{\epsilon}$  은 해당 시스템에 주입된 뉴턴유체의 층류영역에서의 유량과 압력강하 값, 그리고 유동장의 부피를 기초로 산출된 값일 수 있고, 겉보기전단율은  $\gamma_{app}$  은 해당 시스템에 주입되는 뉴턴유체의 유량을 기초로 산출된 값일 수 있다.

[133] 상기 수학식 3 및 4에서, 우변의 값들은 이미 알고 있거나 속도센서 등 관련 장치를 이용해 측정할 수 있는 값이므로, 이를 이용하여 레이놀즈수 Re 및 파워수  $N_p$ 를 구할 수 있다.

[134] 그리고, 레이놀즈수 Re, 파워수  $N_p$  및 에너지소산율계수  $K_p$  간의 관계를 나타내는 아래의 수학식 5를 이용하면 에너지소산율계수  $K_p$  를 계산할 수 있다. 수학식5는 레이놀즈수가 작은 층류유동에서 성립하는 두 무차원수의 관계를 의미할 수 있다.

[135] [수학식5]

[136] 
$$N_p = \frac{K_p}{Re}$$

[137]

[138] 이상에서는 실험적 기법으로 에너지소산율계수  $K_p$ 를 구하는 것을 설명하였으나, 에너지소산율계수  $K_p$ 는 수치해석적 기법을 통하여도 구할 수 있다. 예를 들어, 실험적 기법에서 사용되었던 뉴턴유체를 이용하여 해당 유동장에서의 속도장을 구할 수 있다. 그리고 뉴턴유체의 점도와 유동장의 미소지점에서의 전단율의 제곱을 곱하여 국부 에너지소산율  $\mu\dot{\gamma}^2$ 을 구하고, 이를 유동장 전체에 대해 적분하여 총 에너지소산율을 구할 수 있다. 상기와 같이 구해진 총 에너지소산율을 유동장의 부피로 나누어 평균에너지소산율을 구한 후 이를 이용하여 구할 수도 있다. 평균에너지소산율을 구한 이후로는 앞서 설명한 실험적 기법과 동일한 방법이 이용될 수 있다. 즉, 구해진 평균에너지소산율을 비롯한 정보들을 이용하여 레이놀즈수 및 파워수를 구하고, 레이놀즈수, 파워수 및 에너지소산율계수  $K_p$  간의 관계를 이용하여 에너지소산율계수  $K_p$ 를 구할 수 있다.

[139]

[140] 유동장에서의 유동수를 준비하는 단계는 유효전단율계수  $K_s$  를 사전에 획득하는 단계를 포함하여, 유효전단율계수  $K_s$  역시 해당 유동장 시스템에 대하여 사전에 얻어질 수 있다. 예를 들어, 유효전단율계수  $K_s$  는 실험적

기법으로 구할 수 있다.

[141] 먼저, 해당 시스템, 즉 특정 형상을 갖는 유동장에 점도거동(점도-유효전단율 관계)을 알고 있는 비뉴턴유체(Xanthan gum 수용액 등)를 주입하고 유량과 압력강하를 측정할 수 있다. 비뉴턴유체의 점도거동(점도-유효전단율 관계)은 예를 들어, 도 1에 도시된 바와 같을 수 있다.

[142] 그리고 이러한 층류영역에서의 유량과 압력강하 값으로부터 비뉴턴유체의 평균에너지소산율  $\bar{\epsilon}$  및 파워수  $N_p$ 를 계산할 수 있다.

[143] 구체적으로 비뉴턴유체의 평균에너지소산율  $\bar{\epsilon}$ 은 해당 시스템에 주입된 비뉴턴유체의 층류영역에서의 유량과 압력강하 값, 그리고 유동장의 부피를 기초로 산출될 수 있다. 또한, 파워수  $N_p$ 는, 해당 시스템에 주입되는 비뉴턴유체의 밀도  $\rho$ , 비뉴턴유체의 층류영역에서의 유량을 기초로 산출된 비뉴턴유체의 평균에너지소산율  $\bar{\epsilon}$ , 겉보기전단율  $\dot{\gamma}_{app}$  및 평균속도  $\bar{U}$ 를 기초로 수학적 식 4를 이용함으로써, 산출될 수 있다.

[144] [수학적 식 4]

$$[145] \quad N_p = \frac{\bar{\epsilon}}{\rho \cdot (\bar{U})^2 \cdot \dot{\gamma}_{app}}$$

[146]

[147] 이후, 상기와 같이 계산된 파워수  $N_p$ 와 동일한 값을 가지는 뉴턴유체의 파워수  $N_p$ 에 대응되는 레이놀즈수를 찾을 수 있다. 이때의 레이놀즈수가 복잡유체의 유효 레이놀즈수  $Re_{eff}$ 일 수 있다. 여기서, 뉴턴유체의 파워수  $N_p$ 와 이에 대응되는 레이놀즈수  $Re$ 와의 관계는 앞서 계산된 에너지소산율  $K_p$ 과 수학적 식 5에 의해 정의될 수 있다.

[148] 그리고 상기 유효 레이놀즈수  $Re_{eff}$ 와 상기 비뉴턴유체의 밀도, 평균속도, 상기 유동장의 특성길이를 이용하여 점도를 계산할 수 있다. 예를 들어, 앞서 설명한 수학적 식 3이 이용될 수 있다. 이렇게 계산된 점도가 복잡유체의 유효점도  $\mu_{eff}$ 일 수 있다.

[149] [수학적 식 3]

$$[150] \quad Re = \frac{\rho \cdot \bar{U} \cdot L}{\mu}$$

[151] 여기서,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\bar{U}$ 는 유체의 평균속도,  $L$ 은 유동장 시스템의 특성길이,  $\mu$ 는 유체의 점도를 의미할 수 있다.

[152] 구체적으로 레이놀즈수  $Re$ 는 상기 유효레이놀즈수  $Re_{eff}$ 가 이용되며, 유체의 밀도  $\rho$ 는 해당 시스템에 주입되는 비뉴턴유체의 밀도가 이용될 수 있다. 평균속도  $\bar{U}$ 는 유량을 단면적으로 나눈 값일 수 있고, 시스템의 특성길이는 유동장의 형상에 따라 달라질 수 있다.

[153] 그리고 상기 유효점도로부터 복잡유체의 점도거동(점도-유효전단율 관계)을

통해 유효전단율  $\dot{\gamma}_{eff}$  을 찾을 수 있다.

[154] 최종적으로, 유효전단율과 겔보기 전단율 간의 관계, 즉 앞서 설명한 수학적식 2를 이용하여 유효전단율계수  $K_s$ 를 찾을 수 있다.

[155] [수학적식2]

$$[156] \quad \dot{\gamma}_{eff} = K_s \cdot \dot{\gamma}_{app}$$

[157] 여기서,  $\bar{\epsilon}$ 는 유동장의 평균에너지소산율,  $\dot{\gamma}_{eff}$ 는 유동장의 유효전단율,

$\mu(\dot{\gamma}_{eff})$ 는 유체의 점도,  $\dot{\gamma}_{app}$ 는 유동장의 겔보기 전단율,  $K_p$ 는

에너지소산율계수(coefficient of energy dissipation rate),  $K_s$ 는

유효전단율계수(coefficient of effective shear rate)을 의미할 수 있다.

[158]

[159] 한편, 유효전단율계수  $K_s$ 도 수치해석적 기법을 통해 얻어질 수 있다. 예를 들어, 우선 점도거동을 알고 있는 상기 비뉴턴유체를 이용하여 상기 유동장에서의 유동해석을 수행할 수 있다. 그리고, 비뉴턴유체의 점도와 유동장의 미소지점에서의 전단율의 제곱을 곱하여 국부 에너지소산율  $\mu\dot{\gamma}^2$ 을 구하고, 이를 유동장 전체에 대해 적분하여 총 에너지소산율을 구할 수 있다. 상기와 같이 구해진 총 에너지소산율을 유동장의 부피로 나누어 평균에너지소산율을 구하고, 파워수 역시 수학적식 4를 통해 구할 수 있다.

[160] [수학적식 4]

$$[161] \quad N_p = \frac{\bar{\epsilon}}{\rho \cdot (\bar{U})^2 \cdot \dot{\gamma}_{app}}$$

[162] 여기서,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\bar{U}$ 는 유체의 평균속도,  $\bar{\epsilon}$ 는 유동장의 평균에너지소산율,  $\dot{\gamma}_{app}$ 는 유동장의 겔보기 전단율을 의미할 수 있다.

구체적으로, 수학적식 4에서의 유체의 밀도  $\rho$ 는 비뉴턴유체의 밀도가 이용되며, 유체의 평균속도  $\bar{U}$  및 겔보기 전단율  $\dot{\gamma}_{app}$ 은 시뮬레이션을 이용한 유동해석을

통해 취득할 수 있는 유량, 압력강하 등의 정보를 이용하여 도출된 결과가 이용될 수 있다.

[163]

[164] 평균에너지소산율과 파워수를 구한 이후로는 앞서 설명한 실험적 기법과 동일한 방법이 이용될 수 있다. 즉, 구해진 파워수  $N_p$ 와 동일한 값을 가지는 뉴턴유체의 파워수  $N_p$ 에 대응되는 레이놀즈수를 찾을 수 있다. 이때의 레이놀즈수가 복잡유체의 유효 레이놀즈수  $Re_{eff}$ 일 수 있다. 그리고 상기 유효 레이놀즈수와 수학적식3을 이용하여 점도를 계산할 수 있다.

[165] [수학적식 3]

[166] 
$$Re = \frac{\rho \cdot \bar{U} \cdot L}{\mu}$$

[167] 여기서,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\bar{U}$ 는 유체의 평균속도,  $L$ 은 유동장 시스템의 특성길이,  $\mu$ 는 유체의 점도를 의미할 수 있다. 구체적으로, 수학식 3에서의 유체의 밀도  $\rho$ 는 비뉴턴유체의 밀도가 이용되며, 유체의 평균속도  $\bar{U}$ 는 시뮬레이션을 이용한 유동해석을 통해 취득할 수 있는 유량, 압력강하 등의 정보를 이용하여 도출된 결과가 이용될 수 있다.

[168] 이렇게 계산된 점도가 복잡유체의 유효점도  $\mu_{eff}$ 일 수 있다. 그리고 상기 유효점도로부터 복잡유체의 점도거동(점도-유효전단을 관계)을 통해 유효전단을  $\dot{\gamma}_{eff}$ 을 찾을 수 있다. 최종적으로, 상기 수학식2를 이용하여 유효전단율계수  $K_s$ 를 찾을 수 있다.

[169]

[170] 앞서 설명한 에너지소산율계수  $K_p$  및 유효전단율계수  $K_s$ 는 유체의 유변물성과는 큰 관계가 없고 시스템(유동장)의 형태에만 관계되는 일종의 유동수(flow number)일 수 있다. 따라서, 특정 형태의 유동장에 대하여 에너지소산율계수와 유효전단율계수를 사전에 한 번만 구해놓으면, 이후로는 여러 복잡유체에 대한 유동특성을 정량화할 수 있다.

[171]

[172] 유체 점도 측정 시스템

[173] 이하에서는 본 발명의 일 실시예 중 다른 측면에 따른 유체 점도 측정 시스템을 설명한다. 유체 점도 측정시스템(100)은 입구와 출구를 갖는 특정 형상의 연속적 유동장(F)에서 유동하는 불특정다수 유체들의 유동 특성을 정량화한 유동수를 준비하면, 실제 그 유동장(F)에서 유동하는 유체의 유량과 압력강하만을 측정하여 유체, 특히 비뉴턴 유체의 점도거동(점도, 유효전단율 및 이들의 관계)을 측정할 수 있다. 이러한 유체 점도 측정시스템(100)은 앞서 설명하였던 유체 점도 측정 방법이 이용될 수 있다.

[174]

[175] 도 5는 본 발명의 일 실시예 중 다른 측면에 따른 유체 점도 측정 시스템의 구성을 개략적으로 나타낸 개념도이다.

[176] 도 5를 참조하면 유체 점도 측정 시스템(100)은, 입구와 출구를 갖는 특정 형상의 연속적 유동장(F)에서의 점도를 측정하는 시스템으로서, 유동장(F)에서의 유동수를 저장하는 유동수저장부(110); 유동장(F)에서의 유체의 유량을 측정하는 유량측정부(120); 유동장(F)에서의 압력강하를 산출하기 위한 압력측정부(130); 및 측정된 유량 및 압력강하를 이용하여 평균에너지소산율을 산출하고, 유동장(F)에서의 유동수 및 평균에너지소산율을 기초로 유효전단율에 따른 유체의 점도를 도출하는 도출부(140);를 포함할 수 있다.

- [177] 도 5에서는 유체 점도 측정 시스템(100)을 도 2에 도시된 바와 같이 단일 입구 및 단일 출구를 가지는 연속적 유동장(F)에 대해서 적용하는 일례로 도시하였으나, 유체 점도 측정 시스템(100)이 적용될 수 있는 연속적 유동장의 형상은 이에 한정하지 않는다. 즉, 유체 점도 측정 시스템(100)은 도 3 및 도 4와 같이 복수의 입구 및 단일 출구를 가지는 연속적 유동장, 단일 입구 및 복수 출구를 가지는 연속적 유동장, 그리고 도면으로 도시하지는 않았지만 복수 입구 및 복수 출구를 가지는 연속적 유동장에 대해서도 적용될 수 있다. 아울러, 유체 점도 측정 시스템(100)은 원형 단면과 같이 단순한 단면 형상 이외에도 복잡한 단면 형상을 가지는 연속적 유동장에 대해서도 적용될 수 있다.
- [178] 이하에서는 설명의 편의상, 도 2에 도시된 바와 같은 단일 입구 및 단일 출구를 가지는 연속적 유동장(F)에 유체 점도 측정 시스템(100)을 적용하는 것을 중심으로 설명한다.
- [179] 유동수저장부(110)는 입구 및 출구가 있는 특정 형상의 유동장(예를 들어, 원형단면의 파이프)에서 유동하는 불특정다수 유체들의 유동 특성을 정량화한 유동수 정보를 저장할 수 있다. 유동수저장부(110)는 각종 데이터를 저장할 수 있는 비휘발성 메모리, 휘발성 메모리, 플래시메모리(flash-memory), 하드디스크 드라이브(HDD) 또는 솔리드 스테이트 드라이브(SSD) 등으로 구현될 수 있다. 여기서, 유동장의 유동수는 해당 유동장 시스템에 대한 에너지소산율  $K_p$  및/또는 유효전단율계수  $K_s$  를 포함할 수 있으며, 유체 점도 측정 방법에서의 유동수를 준비하는 단계를 통해 준비될 수 있다. 이러한 유체 점도 측정 방법에서의 유동수를 준비하는 단계는 전술한 바 있으므로, 자세한 설명은 생략하기로 한다.
- [180] 유량측정부(120)는 평균에너지소산율을 산출하기 위한 기초가 되는 정보인 유동장(F)에서의 유체의 유량을 측정할 수 있다. 이러한 유량측정부(120)는 입구 또는 출구 중 적어도 하나의 위치에 배치되는 유량계를 포함하여 유량계를 통해 유동장(F)에서의 유체의 유량을 측정할 수 있다.
- [181] 압력측정부(130)는 평균에너지소산율을 산출하기 위한 기초가 되는 정보인 유동장(F)에서의 압력강하를 산출하기 위해 유동장(F)의 입구 및/또는 출구에서의 압력을 측정할 수 있다. 유동장(F)의 압력강하는 압력측정부(130)를 통해 측정된 유동장(F)의 입구와 출구에서의 각 압력의 차를 구하여 산출될 수 있다.
- [182] 이러한 압력측정부(130)는 적어도 입구에 배치되는 제1압력센서(131)를 포함할 수 있다. 플라스틱과 같은 고분자 가공에 이용되는 압출기 또는 사출기에 설치되는 다이(Die)를 점도 측정의 대상인 연속적 유동장으로 하는 경우에는 다이(Die)의 출구가 대기압이므로, 이러한 유동장(F)의 압력강하는 제1압력센서(131)에서 측정하는 입구에서의 압력과, 미리 준비된 대기압 정보인 출구에서의 압력을 비교하여 산출될 수 있다.
- [183] 출구에서의 압력이 대기압이 아닌 경우, 압력측정부(130)는 출구에 배치되는

제2압력센서(132)를 더 포함할 수 있다. 이러한 유동장(F)의 압력강하는 제1압력센서(131)에서 측정하는 입구에서의 압력과, 제2압력센서(132)에서 측정하는 출구에서의 압력을 비교하여 산출될 수 있다.

- [184] 도출부(140)는 유량측정부(120)에서 측정된 유량과 압력측정부(130)를 통해 산출될 수 있는 압력강하 정보를 이용 및 가공하여 평균에너지소산율을 산출하고, 유동수저장부(110)에 저장된 유동장(F)에서의 유동수 정보를 이용 및 가공하여 유효전단율에 따른 유체의 점도를 도출할 수 있다. 이러한 도출부(140)는 유동수저장부(110)에 저장된 각종 정보와, 유량측정부(120) 및/또는 압력측정에 측정된 각종 정보를 이용 및 가공하여 새로운 데이터를 생성하는 연산알고리즘을 포함하는 프로그램 모듈 내지 소프트웨어일 수 있다.
- [185] 도출부(140)는 유체의 점도 측정 방법에서의 유체의 유효전단율에 따른 점도를 도출하는 단계를 통해 유체의 유효전단율에 따른 점도를 도출할 수 있다. 즉, 이러한 유체의 유효전단율에 따른 점도를 도출하는 단계는 수학식 1 및 수학식 2를 이용하여 도출할 수 있으며 전술한 바 있으므로, 자세한 설명은 생략하기로 한다.

[186]

- [187] 도 6은 다양한 비율의 확대/축소 원형파이프에서의 주어진 Carbopol 981 수용액의 유동에 대하여 시뮬레이션을 통해 전단율에 따른 점도를 구한 결과와, 미리 구한 에너지소산율계수와 유효전단율계수를 기초로 유량과 압력강하 정보만을 이용하여 점도를 구한 결과가 모두 일치함을 보여주는 결과 그림이다. 특히, 우측의 그래프는 실제 Carbopol 981 0.2wt% 수용액의 점도거동과 본 개시의 방법으로 예측한 점도를 표시한 것으로, 확대/축소의 비율이 달라도 각각의 에너지소산율계수를 계산하여 점도를 예측하면 실제 점도거동을 정확하게 예측할 수 있음을 확인하였다. 참고로, Carbopol 981 수용액은 항복응력과 전단담화를 동시에 갖는 대표적인 비뉴턴유체이다.

[188]

- [189] 도 7a는 특정 형상의 다이(Die)의 모식도이며, 도 7b는 도 7a에 도시된 다이에서의 비뉴턴유체 모델 두가지의 유동에 대하여 시뮬레이션을 통해 전단율에 따른 점도를 구한 결과와, 미리 구한 에너지소산율계수와 유효전단율계수를 기초로 유량과 압력강하 정보만을 이용하여 점도를 구한 결과가 모두 일치함을 보여주는 그림이다. 구체적으로, 도 7a는 단일 입구와 출구를 갖는 특정 형상의 다이(Die)를 도시한 도면이다. 아울러, 도 7b에는 비뉴턴유체 모델 두가지(power-law; Carreau)에 대해 유한요소법(finite element method, FEM)기반의 프로그램을 통해 시뮬레이션하여 전단율에 따른 점도를 구한 결과를 실선으로 표현하고, 해당 다이에 대해 미리 구한 에너지소산율계수와 유효전단율계수를 기초로 유량과 압력강하 정보만을 이용하여 전단율에 따른 점도를 구한 결과를 포인트로 표현하였다. 도 7B를 통해 시뮬레이션에 의해 도출된 전단율에 따른 점도를 구한 결과와 본 발명의 일

실시예에 따라 도출된 전단율에 따른 점도를 구한 결과가 일치함을 확인할 수 있다.

[190]

[191] 유체 유량 또는 압력강하 예측 방법

[192] 이하에서는 본 발명의 다른 실시예 중 일 측면에 따른 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법을 상세히 설명한다. 본 다른 실시예 중 다른 측면에 따른 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법은 파이프와 같이 입구 및 출구가 있는 특정 형상의 유동장에서 유동하는 불특정다수 유체들의 유동 특성을 정량화한 유동수와, 비뉴턴 유체의 점도거동(점도, 유효전단율 및 이들의 관계)를 미리 준비하면 실제 그 유동장에서 유동하는 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측할 수 있는 방법에 관한 것이다.

[193]

[194] 이러한 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법은, 유동장에서의 유동수를 준비하는 단계와, 비뉴턴 유체의 점도거동 정보를 준비하는 단계, 및 유동장에서의 유동수 및 비뉴턴 유체의 점도거동 정보를 기초로 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 및 압력강하 중 어느 하나의 정보로부터 다른 하나의 정보를 도출하는 단계(이하, '다른 하나의 정보를 도출하는 단계'로 칭하기도 함)를 포함할 수 있다. 상세히, 비뉴턴 유체의 유량이 정해지면 그 유량에 대응되는 압력강하를 예측할 수 있으며, 또는 비뉴턴 유체의 압력강하가 정해지면 그 압력강하에 대응되는 유량을 예측할 수 있다.

[195]

[196] 한편, 특정 형상의 유동장에서 유동하는 불특정다수 복잡 유체들의 유동 특성은 유체들의 종류에 관계없이 정량화된 유동수, 즉 무차원화된 수일 수 있으며, 이러한 유동장에서의 유동수는 에너지소산율계수(coefficient of energy dissipation rate)  $K_p$  및/또는 유효전단율계수(coefficient of effective shear rate)  $K_s$  를 포함할 수 있다. 이러한 유동장에서의 유동수는 특정 형상의 유동장에 대해 에너지소산을 나타낼 수 있는 무차원화된 수  $N_p$  와 레이놀즈 수  $Re$  와의 관계를 이용하여 산출될 수 있는데, 유동장에서의 유동수를 준비하는 단계는 전술한 유체의 점도 측정 방법에서 있어서 유동장에서의 유동수를 준비하는 단계와 실질적으로 동일하므로, 자세한 설명은 생략하기로 한다.

[197]

[198] 비뉴턴 유체의 점도거동 정보를 준비하는 단계는 점도-유효전단율 관계를 보여주는 도 1과 같은 점도거동커브를 준비하는 것일 수 있다. 이러한 점도거동커브는 점도측정기구를 통해 얻어질 수 있다.

[199]

[200] 다른 하나의 정보를 도출하는 단계는 다음의 수학식 6, 수학식 7 및 수학식 8 중 적어도 하나를 이용할 수 있다. 수학식 6 이후로 설명하는 수학식 들은 그 이전에 설명한 수학식 과 동일한 식도 있으나, 설명의 편의상 새로운 수학식

으로 표기하기로 한다.

[201] [수학식6]

$$[202] \quad N_p = \frac{P/V}{\rho \cdot (\bar{U})^2 \cdot \dot{\gamma}_{app}}$$

[203] [수학식7]

$$[204] \quad N_p = \frac{K_p}{Re}$$

[205] [수학식8]

$$[206] \quad \dot{\gamma}_{eff} = K_s \cdot \dot{\gamma}_{app}$$

[207] 여기서,  $N_p$ 는 파워수,  $P$ 는 응력에 따른 전체 파워로서 상기 유량과 상기 압력강하의 곱,  $\dot{\gamma}_{app}$ 는 상기 유동장의 겉보기 전단율,  $\dot{\gamma}_{eff}$ 는 상기 유동장의 유효전단율,  $Re$ 는 레이놀즈수,  $K_p$ 는 에너지소산율계수,  $K_s$ 는 유효전단율계수를 의미할 수 있다.

[208] 이러한 다른 하나의 정보를 추출하는 단계는 먼저 겉보기 전단율  $\dot{\gamma}$  과 유동장의 유동특성으로 도출된 유효전단율계수  $K_s$  간의 관계를 이용하여 유효전단율을 구할 수 있다. 여기서, 겉보기 전단율  $\dot{\gamma}_{app}$  은 유동장에서 유동하는 비뉴턴 유체의 유량에 대한 함수를 의미할 수 있다. 겉보기 전단율  $\dot{\gamma}_{app}$  과 유효전단율계수  $K_s$  간의 관계는 수학식 8로 정의될 수 있으며, 수학식 8을 통해 유효전단율  $\dot{\gamma}_{eff}$  을 도출할 수 있다. 여기서, 유효전단율  $\dot{\gamma}_{eff}$  은 겉보기 전단율  $\dot{\gamma}_{app}$  과 마찬가지로 비뉴턴 유체의 유량에 대한 함수로 도출될 수 있다.

[209] 그리고, 도출된 유효전단율과 미리 준비된 비뉴턴 유체의 점도거동(점도-유효전단율 관계, 점도거동커브)을 이용하여 유효점도를 구할 수 있다. 여기서, 유효점도는  $\mu_{eff}$ 로 나타낼 수 있다. 유효점도  $\mu_{eff}$ 도 유효전단율  $\dot{\gamma}_{eff}$  와 마찬가지로 비뉴턴 유체의 유량에 대한 함수를 의미할 수 있다.

[210] 이후에 유체의 평균속도, 밀도 및 점도, 상기 유동장의 특성길이 간의 관계와 상기 도출된 유효점도를 이용하여 유효레이놀즈수를 구할 수 있다. 여기서, 유체의 평균속도, 밀도 및 점도, 상기 유동장의 특성길이 간의 관계는 수학식 9로 정의될 수 있다.

[211] [수학식 9]

$$[212] \quad Re = \frac{\rho \cdot \bar{U} \cdot L}{\mu}$$

[213] 여기서,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\bar{U}$ 는 유체의 평균속도,  $L$ 은 유동장 시스템의 특성길이,  $\mu$ 는 유체의 점도를 의미할 수 있다. 유체의 평균속도  $\bar{U}$ 는 유체의

유량을 단면적으로 나눈 값일 수 있고, 유동장 시스템의 특성길이는 유동장의 형상에 따라 달라질 수 있다.

- [214] 수학식 9에서의 유체의 밀도  $\rho$ 는 비뉴턴 유체의 종류에 따라 결정되며, 유동장의 특성길이  $L$ 은 유동장의 형상에 따라 결정되고, 유체의 평균속도  $\bar{U}$ , 유체의 점도  $\mu$ 로서 유효점도  $\mu_{\text{eff}}$ 는 유체의 유량에 대한 함수를 의미할 수 있으므로, 레이놀즈수  $Re$ 로서 도출되는 유효레이놀즈수  $Re_{\text{eff}}$  또한 유체의 유량에 대한 함수를 의미할 수 있다.
- [215] 그리고 미리 준비된 상기 유동장에서의 유효전단율계수  $K_s$ 와 앞서 도출된 유효레이놀즈수  $Re_{\text{eff}}$ 를 이용하여 파워수를 구할 수 있다. 상세히, 수학식 7을 이용하여 파워수를 도출할 수 있다.
- [216] 수학식 7에서의 레이놀즈수  $Re$ 에는 앞서 도출된 유효레이놀즈수  $Re_{\text{eff}}$ 가 이용될 수 있으므로, 이를 이용하여 도출된 파워수  $N_p$  또한 유체의 유량에 대한 함수를 의미할 수 있다.
- [217] 이후에 유체의 평균속도, 밀도, 겉보기 전단율, 상기 유동장에서의 유체 부피 및 도출된 상기 파워수를 이용하여 응력에 따른 전체 파워를 구할 수 있다. 상세히, 수학식 6이 이용될 수 있다.
- [218] 수학식 6에서의 유체의 밀도  $\rho$ 는 비뉴턴 유체의 종류에 따라 결정되며, 유체의 부피는 유동장의 형상에 따라 결정될 수 있으며, 유체의 평균속도  $\bar{U}$ , 겉보기 전단율  $\dot{\gamma}_{\text{app}}$ , 파워수  $N_p$ 는 앞서 언급한 바와 같이 유체의 유량에 대한 함수일 수 있으므로, 수학식 6에 의해 도출되는 응력에 대한 전체 파워  $P$  또한 유체의 유량에 대한 함수를 의미할 수 있다.
- [219] 한편 응력에 대한 전체 파워  $P$ 는 수학식 10과 같이, 유체의 압력강하와 유량의 곱으로 나타낼 수 있다.
- [220] [수학식 10]
- [221] 
$$P = \Delta p \cdot Q$$
- [222] 여기서,  $P$ 는 응력에 따른 전체 파워,  $\Delta p$ 는 유체의 압력강하,  $Q$ 는 유체의 유량을 의미할 수 있다.
- [223] 따라서, 수학식 6에 의해 도출되는 응력에 대한 전체 파워  $P$ 와 수학식 10에 따른 응력에 대한 전체 파워  $P$ 를 같다고 하는 방정식을 세우게 되면, 해당 방정식은 유동장의 형상, 유동장에서의 유동특성, 비뉴턴유체의 점도거동 등에 의해 정해지는 상수(Constant Number)와, 유체의 압력강하 및 유량과 같은 변수(Variable Number)를 포함하는 형태로 정리될 수 있다. 즉, 해당 유동장에서의 특정 비뉴턴 유체의 압력강하와 유량 간의 관계를 도출할 수 있다.
- [224] 예를 들어, 특성길이  $L$ 과 전체 부피  $V$ 를 가지는 일반적인 유동장 시스템에서, 유동하는 비뉴턴 유체의 압력강하와 유량 간의 관계는 아래의 수학식 11과 같이 도출될 수 있다.

[225] [수학식 11]

$$[226] \quad \Delta p = \frac{K_p \bar{V} \dot{\gamma}_{app}}{QL} \mu_{eff}$$

[227] 여기서,  $\Delta p$  는 유체의 압력강하,  $Q$  는 유체의 유량,  $K_p$  는 에너지소산율계수,  $V$  는 유동장의 부피,  $L$  은 유동장의 특성길이,  $\bar{V}$  는 유체의 평균속도,  $\dot{\gamma}_{app}$  은 겉보기 전단율,  $\mu_{eff}$  는 유효 점도를 의미할 수 있다.

[228] 따라서, 해당 유동장 시스템에서 비뉴턴 유체의 유량이 결정되면 해당 유량에 대응되는 비뉴턴 유체의 압력강하를 도출할 수 있다.

[229] 역으로, 해당 유동장 시스템에서 비뉴턴 유체의 압력강하가 결정되면 해당 압력강하에 대응되는 비뉴턴 유체의 유량을 도출할 수 있다. 다만, 수학식 11은 비뉴턴 유체의 유량함수를 기초로 도출된 형태이며, 우변에 있는 변수들은 비뉴턴 유체의 유량함수와 관련된 변수들을 다수 포함하고 있으므로 각 변수들과 관계된 유량 해를 찾을 수 있는 알고리즘을 포함하는 컴퓨팅 장치, 소프트웨어, 수치해석 툴을 이용하는 것이 바람직하다. 이러한 툴을 이용하는 외에도 상기 수학식 11을 이용하여 비뉴턴 유체의 임의의 유량들과 그 유량들에 대응되는 압력강하들을 테이블 데이터로 정리하고 정리된 데이터를 기초로 비뉴턴 유체의 특정 압력강하 정보에 대응되는 유량 정보를 찾는 방식으로 비뉴턴 유체의 유량을 도출할 수도 있다.

[230] 한편, 수학식 11을 기초로, 반지름  $R$  과 전체 부피  $V$  를 가지는 단순 원형 파이프 유동장에서의 압력강하와 유량간의 관계는 수학식 12로 도출될 수 있다.

[231] [수학식 12]

$$[232] \quad \Delta p = (2K_p \mu_{eff} V / \pi^2 R^6) Q, \mu_{eff} = \mu(\dot{\gamma}_{eff}), \dot{\gamma}_{eff} = K_s \cdot \dot{\gamma}_{app}$$

[233]

[234] 유체 유량 또는 압력강하 예측 시스템

[235] 도 8은 본 발명의 다른 실시예 중 다른 측면에 따른 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 시스템의 구성을 블록화한 개념도이다.

[236] 본 발명의 다른 실시예 중 다른 측면에 따른 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 시스템(이하, '예측시스템'이라고 칭하기도 함)은, 파이프와 같이 입구 및 출구가 있는 특정 형상의 유동장에서 유동하는 불특정다수 유체들의 유동 특성을 정량화한 유동수와, 비뉴턴 유체의 점도거동(점도, 유효전단율 및 이들의 관계)를 미리 준비하면 상기 유동장에서 유동하는 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측할 수 있는 시스템에 관한 것이다.

[237] 이러한 예측시스템은 앞서 설명한 본 발명의 일 측면에 따른 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법을 이용하는 시스템일 수 있다. 설명의

편의상 예측시스템이 포함하고 있는 구성이 수행하는 역할은 본 발명의 다른 실시예 중 일측에 따른 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법이 포함하고 있는 여러 단계들의 기술적 내용에 대응될 수 있으므로, 자세한 설명은 생략하기로 한다.

- [238] 이러한 예측시스템(200)은, 유동장에서의 유동수를 저장하는 유동수저장부(210)와, 비뉴턴 유체의 점도거동 정보를 저장하는 점도거동정보저장부(220) 및, 상기 유동장에서의 유동수 및 상기 점도거동 정보를 기초로, 상기 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 및 압력강하 중 어느 하나의 정보로부터 다른 하나의 정보를 도출하는 도출부(230)를 포함할 수 있다. 여기서, 유동수저장부(210)와 점도거동정보저장부(220)는 각종 데이터를 저장할 수 있는 비휘발성 메모리, 휘발성 메모리, 플래시메모리(flash-memory), 하드디스크 드라이브(HDD) 또는 솔리드 스테이트 드라이브(SSD) 등으로 구현될 수 있다. 여기서, 도출부(230)는 유동수저장부(210) 및 점도거동정보저장부(220)에 저장된 각종 데이터를 이용 및 가공하여 새로운 데이터를 생성하는 연산알고리즘을 포함하는 프로그램 모듈 내지 소프트웨어일 수 있다.
- [239] 유동수저장부(210)는 해당 유동장 시스템에 대하여 사전에 얻어진 에너지소산율  $K_p$  와 유효전단율계수  $K_s$  를 저장할 수 있다. 에너지소산율  $K_p$  와 유효전단율계수  $K_s$  을 구하는 방법은 전술한 바 있으므로, 자세한 설명은 생략한다.
- [240] 점도거동정보저장부(220)는 예측하고자 하는 대상의 비뉴턴 유체의 점도-유효전단율 관계를 보여주는 도 1과 같은 점도거동커브 내지 점도거동커브의 점도-유효전단율 좌표정보를 저장할 수 있다.
- [241] 도출부(230)는 앞서 설명한 수학적 식 6, 수학적 식 7 및 수학적 식 8 중 적어도 하나를 이용하여 비뉴턴 유체의 유량에 대응되는 압력강하를 연산하거나, 비뉴턴 유체의 압력강하에 대응되는 유량을 연산할 수 있다.
- [242] 이러한 도출부(230)는 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량을 기초로 도출될 수 있는 변수들과 압력강하 변수를 포함하는 함수관계식 또는 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량정보-압력강하정보 관계를 나타내는 테이블데이터를 이용하여, 비뉴턴 유체의 유량 정보에 대응되는 압력강하 정보를 도출하거나, 비뉴턴 유체의 압력강하 정보에 대응되는 유량 정보를 도출할 수 있다.
- [243] 이러한 도출부(230)는 겉보기 전단율과 유효전단율계수  $K_s$  간의 관계를 이용하여 유효전단율을 구하는 유효전단율 산출부(231)와, 유효전단율과 상기 점도거동을 이용하여 유효점도를 구하는 유효점도 산출부(232)와, 유체의 평균속도, 밀도 및 점도, 상기 유동장의 특성길이 간의 관계와 상기 유효점도를 이용하여 유효레이놀즈수를 구하는 유효레이놀즈수 산출부(233); 상기 유효전단율계수  $K_s$  와 상기 유효레이놀즈수를 이용하여 파워수를 구하는 파워수 산출부(2134), 및 유체의 평균속도, 밀도, 겉보기 전단율, 상기 유동장에서의 유체

부피 및 상기 파워수를 이용하여 응력에 따른 전체 파워를 구하는 전체파워 산출부(235);를 포함할 수 있다.

[244] 전체파워 산출부(235)는 상기 구해진 응력에 따른 전체 파워를 기초로 상기 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 및 압력강하 간의 관계를 구할 수 있다.

[245] 도출부(230)는 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 정보를 통해 걸보기 전단율 및 유체의 평균속도 중 적어도 하나를 구하는 유량정보이용부(236)를 더 포함할 수 있다.

[246] 유효전단율 산출부(231)와, 유효레이놀즈수 산출부(233) 및 전체파워 산출부(235) 중 적어도 하나는 유량정보이용부(236)에서 도출된 정보를 이용할 수 있다.

[247]

[248] 앞서 설명한 에너지소산율계수  $K_p$  및 유효전단율계수  $K_s$ 는 유체의 유변물성과는 큰 관계가 없고 시스템(유동장)의 형태에만 관계되는 일종의 유동수(flow number)일 수 있다. 따라서, 특정 형태의 유동장에 대하여 에너지소산율계수와 유효전단율계수를 사전에 한 번만 구해놓으면, 이후로는 여러 복잡유체, 특히 비뉴턴 유체에 대한 압력강하와 유량 사이의 관계와 같은 유동특성을 정량화할 수 있다.

[249] 이로써, 특정 형태의 유동장에 대한 특정 비뉴턴 유체에 대한 압력강하와 유량 사이의 관계를 손쉽게 정량화할 수 있으므로, 고분자 가공에 사용되는 압출다이의 다이특성(die characteristics)으로 지칭되는 압력강하와 유량 사이의 정량화된 정보를 이용하여 최적 공정을 용이하게 도출할 수 있는 장점이 있다.

[250]

[251] 도 9은 확대/축소 원형파이프 유동에 대하여 임의의 유량에 대해 대응되는 압력강하를 유동해석으로 시뮬레이션한 결과와, 본 발명의 다른 실시예 중 일 측면에 따른 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법 및/또는 시스템을 이용하여 임의의 유량에 대응되는 압력강하를 예측한 결과가 거의 일치함을 보여주는 그림이다.

[252] 여기서, 이용된 비뉴턴유체 모델은 파워-로우 모델(Power-law model), Carreau 모델(Carreau model), 수정된 H-B 모델(Modified H-B model)과 같이 총 3가지이다.

[253] 도 9에 따른 확대/축소 원형파이프 유동의 유동수 정보는 다음과 같다.

[254] 에너지소산율계수  $K_p = 86$ , 유효전단율계수  $K_s = 0.71$

[255] 도 10은 "Kenics static mixer" 유동에 대하여 임의의 유량에 대해 대응되는 압력강하를 유동해석으로 시뮬레이션한 결과와, 본 발명의 다른 실시예 중 일 측면에 따른 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법 및/또는 시스템을 이용하여 임의의 유량에 대응되는 압력강하를 예측한 결과가 (어떤 것과) 거의 일치함을 보여주는 그림이다.

[256] 여기서, 이용된 비뉴턴유체 모델은 파워-로우 모델(Power-law model), Carreau 모델(Carreau model), 수정된 H-B 모델(Modified H-B model)과 같이 총 3가지이다.

- [257] 도 10에 따른 "Kenics static mixer" 유동의 유동수 정보는 다음과 같다.
- [258] 에너지소산율계수  $K_p = 16.13$ , 유효전단율계수  $K_p = 1.77$
- [259] 도 11은 "Body-centered cubic(BCC) 구조의 다공질매질"내 유동에 대하여 임의의 유량에 대해 대응되는 압력강하를 유동해석으로 시뮬레이션한 결과와, 본 발명의 다른 실시예 중 일 측면에 따른 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법 및/또는 시스템을 이용하여 임의의 유량에 대응되는 압력강하를 예측한 결과가 거의 일치함을 보여주는 그림이다.
- [260] 여기서, 이용된 비뉴턴유체 모델은 파워-로우 모델(Power-law model)이다.
- [261] 도 11에 따른 "Body-centered cubic(BCC) 구조의 다공질매질"내 각각의 부피분율( $v_f$ )에 대응하는 유동의 유동수 정보는 다음과 같다.
- [262]  $v_f=0.1$ : 에너지소산율계수  $K_p = 2.34$ , 유효전단율계수  $K_p = 1.29$
- [263]  $v_f=0.3$ : 에너지소산율계수  $K_p = 5.78$ , 유효전단율계수  $K_p = 1.05$
- [264]  $v_f=0.5$ : 에너지소산율계수  $K_p = 9.94$ , 유효전단율계수  $K_p = 0.9$
- [265]  $v_f=0.65$ : 에너지소산율계수  $K_p = 13.58$ , 유효전단율계수  $K_p = 0.83$
- [266]
- [267] 이상에서 설명된 실시예들은 본 발명의 일부 예를 설명한 것에 불과하고, 본 발명의 범위는 설명된 실시예들에 한정되는 것은 아니며, 이 분야의 통상의 기술자에 의하여 다양한 변경, 변형 또는 치환이 있을 수 있다. 예를 들어, 특정 실시예에서 함께 설명된 구성들 내지는 특징들은 서로 분산되어 실시될 수 있고, 서로 다른 실시예 각각에서 설명된 구성들 내지는 특징들은 서로 결합된 형태로 실시될 수 있다. 마찬가지로, 각 청구항에 기재된 구성들 내지는 특징들도 서로 분산되어 실시되거나 결합되어 실시될 수 있다. 그리고 위와 같은 실시는 모두 본 발명의 범위에 속하는 것으로 보아야 한다.

## 청구범위

[청구항 1] 입구와 출구를 갖는 특정 형상의 연속적 유동장에서의 점도를 측정하는 방법으로서,  
 상기 유동장에서의 유동수를 준비하는 단계;  
 상기 유동장에서의 유체의 유량 및 압력강하를 측정하는 단계; 및  
 상기 유량 및 상기 압력강하를 이용하여 평균에너지소산율을 산출하고,  
 상기 유동장에서의 유동수 및 상기 평균에너지소산율을 기초로  
 유효전단율에 따른 유체의 점도를 도출하는 단계를 포함하는, 연속적 유동장에서의 점도 측정 방법.

[청구항 2] 제1항에 있어서,  
 상기 유체의 점도를 도출하는 단계는 하기 수학식1 및 수학식2를 이용하여 상기 유효전단율에 따른 유체의 점도를 도출하는, 연속적 유동장에서의 점도 측정 방법:

[수학식1]

$$\mu(\dot{\gamma}_{eff}) = \frac{\bar{\epsilon}}{K_p \cdot (\dot{\gamma}_{eff})^2}$$

[수학식2]

$$\dot{\gamma}_{eff} = K_s \cdot \dot{\gamma}_{app}$$

여기서,  $\bar{\epsilon}$  는 상기 유동장의 평균에너지소산율로서 상기 유량, 상기 압력강하 및 유동장의 부피에 대한 함수이고,  $\dot{\gamma}_{eff}$  는 상기 유동장의 유효전단율,  $\mu(\dot{\gamma}_{eff})$  는 상기 유체의 점도,  $\dot{\gamma}_{app}$  는 상기 유동장의 겉보기 전단율,  $K_p$  는 에너지소산율계수,  $K_s$  는 유효전단율계수.

[청구항 3] 제1항에 있어서,  
 상기 연속적 유동장은 복수개의 입구와 단일 출구를 구비하며,  
 상기 유체의 점도를 도출하는 단계는 하기 수학식 A를 이용하여 총에너지소산율을 산출하고, 상기 총에너지소산율 및 상기 유동장의 부피를 기초로 평균에너지소산율을 산출하는, 연속적 유동장에서의 점도 측정 방법:

[수학식 A]

$$\sum_{i=1}^n \Delta p_i Q_i^{inlet} = \text{총에너지소산율}$$

여기서, n은 입구의 수량,  $\Delta p_i$  는 각 입구와 단일 출구 사이에서의 유체의 압력강하,  $Q_i^{inlet}$  는 각 입구에서의 유체의 유량.

[청구항 4] 제1항에 있어서,

상기 연속적 유동장은 단일 입구와 복수개의 출구를 구비하며, 상기 유체의 점도를 도출하는 단계는 하기 수학적 B를 이용하여 총에너지소산율을 산출하고, 상기 총에너지소산율 및 상기 유동장의 부피를 기초로 평균에너지소산율을 산출하는, 연속적 유동장에서의 점도 측정 방법:

[수학적 B]

$$\sum_{i=1}^n \Delta p_i Q_i^{outlet} = \text{총에너지소산율}$$

여기서, n은 출구의 수량,  $\Delta p_i$ 는 단일 입구와 각 출구 사이에서의 유체의 압력강하,  $Q_i^{outlet}$ 는 각 출구에서의 유체의 유량.

[청구항 5]

제1항에 있어서,

상기 유동장에서의 유동수는 에너지소산율계수  $K_p$ 를 포함하며,

상기 유동장에서의 유동수를 준비하는 단계는 상기 에너지소산율계수  $K_p$ 를 사전에 획득하는 단계를 포함하고,

상기 에너지소산율계수  $K_p$ 를 사전에 획득하는 단계는,

점도를 알고 있는 뉴턴유체를 상기 유동장에 주입하는 단계;

상기 유동장에서의 상기 뉴턴유체의 유량 및 압력강하를 측정하는 단계;

상기 뉴턴유체의 유량 및 압력강하를 이용하여 상기 뉴턴유체의

평균에너지소산율을 구하는 단계;

상기 뉴턴유체의 밀도, 평균속도 및 점도, 상기 유동장의 특성길이, 상기

뉴턴유체의 겉보기 전단율, 상기 뉴턴유체의 평균에너지소산율을

이용하여 레이놀즈수 및 파워수를 구하는 단계; 및

상기 레이놀즈수, 상기 파워수 및 상기 에너지소산율계수  $K_p$  간의 관계를

이용하여 상기 에너지소산율계수  $K_p$ 를 구하는 단계를 포함하는 연속적

유동장에서의 점도 측정 방법.

[청구항 6]

제1항에 있어서,

상기 유동장에서의 유동수는 에너지소산율계수  $K_p$ 를 포함하며,

상기 유동장에서의 유동수를 준비하는 단계는 상기 에너지소산율계수  $K_p$ 를 사전에 획득하는 단계를 포함하고,

상기 에너지소산율계수  $K_p$ 를 사전에 획득하는 단계는,

뉴턴유체를 이용하여 상기 유동장의 속도장을 구하는 단계;

상기 뉴턴유체의 점도와 상기 유동장의 미소지점에서의 전단율의 제곱을 곱하여 국부 에너지소산율을 구하는 단계;

상기 국부 에너지소산율을 상기 유동장 전체에 대하여 적분하여 총

에너지소산율을 구하는 단계;

상기 총 에너지소산율을 상기 유동장의 부피로 나누어 상기 뉴턴유체의

평균에너지소산율을 구하는 단계;  
 상기 뉴턴유체의 밀도, 평균속도 및 점도, 상기 유동장의 특성길이, 상기 뉴턴유체의 겔보기 전단율, 상기 뉴턴유체의 평균에너지소산율을 이용하여 레이놀즈수 및 파워수를 구하는 단계; 및  
 상기 레이놀즈수, 상기 파워수 및 상기 에너지소산율계수  $K_p$  간의 관계를 이용하여 상기 에너지소산율계수  $K_p$  를 구하는 단계를 포함하는 연속적 유동장에서의 점도 측정 방법.

[청구항 7]

제1항에 있어서,  
 상기 유동장에서의 유동수는 유효전단율계수  $K_s$  를 포함하며,  
 상기 유동장에서의 유동수를 준비하는 단계는 상기 유효전단율계수  $K_s$  를 사전에 획득하는 단계를 포함하고,  
 상기 유효전단율계수  $K_s$  를 사전에 획득하는 단계는,  
 점도거동을 알고 있는 비뉴턴유체를 상기 유동장에 주입하는 단계;  
 상기 유동장에서의 상기 비뉴턴유체의 유량 및 압력강하를 측정하는 단계;  
 상기 비뉴턴유체의 유량 및 압력강하를 이용하여 상기 비뉴턴유체의 평균에너지소산율 및 파워수를 구하는 단계;  
 상기 비뉴턴유체의 파워수와 동일한 값을 가지는 뉴턴유체의 파워수에 대응되는 뉴턴유체의 레이놀즈수를 찾고, 상기 뉴턴유체의 레이놀즈수를 유효 레이놀즈수로 간주하는 단계;  
 상기 유효 레이놀즈수, 상기 비뉴턴유체의 밀도, 평균속도, 상기 유동장의 특성길이를 이용하여 상기 비뉴턴유체의 점도를 구하고, 상기 점도를 유효 점도로 간주하는 단계;  
 상기 유효 점도와 상기 점도거동을 이용하여 상기 유동장의 유효전단율을 구하는 단계; 및  
 상기 유효전단율과 겔보기 전단율 간의 관계를 이용하여 상기 유효전단율계수  $K_s$  를 구하는 단계를 포함하는 연속적 유동장에서의 점도 측정 방법.

[청구항 8]

제1항에 있어서,  
 상기 유동장에서의 유동수는 유효전단율계수  $K_s$  를 포함하며,  
 상기 유동장에서의 유동수를 준비하는 단계는 상기 유효전단율계수  $K_s$  를 사전에 획득하는 단계를 포함하고,  
 상기 유효전단율계수  $K_s$  를 사전에 획득하는 단계는,  
 점도거동을 알고 있는 비뉴턴유체를 이용하여 유동해석을 수행하는 단계;  
 상기 비뉴턴유체의 점도와 상기 유동장의 미소지점에서의 전단율의 제곱을 곱하여 국부 에너지소산율을 구하는 단계;  
 상기 국부 에너지소산율을 상기 유동장 전체에 대하여 적분하여 총

에너지소산율을 구하는 단계;  
 상기 총 에너지소산율을 상기 유동장의 부피로 나누어 상기 비뉴턴유체의 평균에너지소산율을 구하는 단계;  
 상기 비뉴턴유체의 밀도, 평균속도, 겉보기 전단율 및 평균에너지소산율을 이용하여 파워수를 구하는 단계;  
 상기 비뉴턴유체의 파워수와 동일한 값을 가지는 뉴턴유체의 파워수에 대응되는 뉴턴유체의 레이놀즈수를 찾고, 상기 뉴턴유체의 레이놀즈수를 유효 레이놀즈수로 간주하는 단계;  
 상기 유효 레이놀즈수, 상기 비뉴턴유체의 밀도, 평균속도, 상기 유동장의 특성길이를 이용하여 상기 비뉴턴유체의 점도를 구하고, 상기 점도를 유효 점도로 간주하는 단계;  
 상기 유효 점도와 상기 점도거동을 이용하여 상기 유동장의 유효전단율을 구하는 단계; 및  
 상기 유효전단율과 겉보기 전단율 간의 관계를 이용하여 상기 유효전단율계수  $K_s$ 를 구하는 단계를 포함하는 연속적 유동장에서의 점도 측정 방법.

- [청구항 9] 입구와 출구를 갖는 특정 형상의 연속적 유동장에서의 점도를 측정하는 시스템으로서,  
 상기 유동장에서의 유동수를 저장하는 유동수저장부;  
 상기 유동장에서의 유체의 유량을 측정하는 유량측정부;  
 상기 유동장에서의 압력강하를 산출하기 위한 압력측정부; 및  
 상기 측정된 유량 및 압력강하를 이용하여 평균에너지소산율을 산출하고, 상기 유동장에서의 유동수 및 상기 평균에너지소산율을 기초로 유효전단율에 따른 유체의 점도를 도출하는 도출부;를 포함하는, 연속적 유동장에서의 점도 측정 시스템.

- [청구항 10] 제9항에 있어서,  
 상기 도출부는 하기 수학식1 및 수학식2를 이용하여 상기 유효전단율에 따른 유체의 점도를 도출하는, 연속적 유동장에서의 점도 측정 시스템:

[수학식1]

$$\mu(\dot{\gamma}_{eff}) = \frac{\bar{\epsilon}}{K_p \cdot (\dot{\gamma}_{eff})^2}$$

[수학식2]

$$\dot{\gamma}_{eff} = K_s \cdot \dot{\gamma}_{app}$$

여기서,  $\bar{\epsilon}$  는 상기 유동장의 평균에너지소산율로서 상기 유량, 상기 압력강하 및 유동장의 부피에 대한 함수이고,  $\dot{\gamma}_{eff}$  는 상기 유동장의 유효전단율,  $\mu(\dot{\gamma}_{eff})$  는 상기 유체의 점도,  $\dot{\gamma}_{app}$  는 상기 유동장의 겉보기

전단율,  $K_p$  는 에너지소산율계수,  $K_s$  는 유효전단율계수.

[청구항 11]

제9항에 있어서,

상기 연속적 유동장은 복수개의 입구와 단일 출구를 구비하며,  
 상기 도출부는 하기 수학식 A을 이용하여 총에너지소산율을 산출하고,  
 상기 총에너지소산율 및 상기 유동장의 부피를 기초로  
 평균에너지소산율을 산출하는, 연속적 유동장에서의 점도 측정 시스템:  
 [수학식 A]

$$\sum_{i=1}^n \Delta p_i Q_i^{inlet} = \text{총에너지소산율}$$

여기서,  $n$ 은 입구의 수량,  $\Delta p_i$  는 각 입구와 단일 출구 사이에서의 유체의  
 압력강하,  $Q_i^{inlet}$  는 각 입구에서의 유체의 유량.

[청구항 12]

제9항에 있어서,

상기 연속적 유동장은 단일 입구와 복수개의 출구를 구비하며,  
 상기 도출부는 하기 수학식 B을 이용하여 총에너지소산율을 산출하고,  
 상기 총에너지소산율 및 상기 유동장의 부피를 기초로  
 평균에너지소산율을 산출하는, 연속적 유동장에서의 점도 측정 시스템:  
 [수학식 B]

$$\sum_{i=1}^n \Delta p_i Q_i^{outlet} = \text{총에너지소산율}$$

여기서,  $n$ 은 출구의 수량,  $\Delta p_i$  는 단일 입구와 각 출구 사이에서의 유체의  
 압력강하,  $Q_i^{outlet}$  는 각 출구에서의 유체의 유량.

[청구항 13]

입구와 출구를 갖는 특정 형상의 연속적 유동장에서 유동하는 비뉴턴  
 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법으로서,  
 상기 유동장에서의 유동수를 준비하는 단계;  
 상기 비뉴턴 유체의 점도거동 정보를 준비하는 단계; 및  
 상기 유동장에서의 유동수 및 상기 점도거동 정보를 기초로 상기  
 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 및 압력강하 중 어느 하나의  
 정보로부터 다른 하나의 정보를 도출하는 단계를 포함하는, 비뉴턴  
 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법.

[청구항 14]

제13항에 있어서,

상기 다른 하나의 정보를 도출하는 단계는 하기 수학식6, 수학식7 및  
 수학식 8 중 적어도 하나를 이용하는, 연속적 유동장에서의 비뉴턴  
 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법:

[수학식6]

$$N_p = \frac{P/V}{\rho \cdot (\bar{U})^2 \cdot \dot{\gamma}_{app}}$$

[수학식7]

$$N_p = \frac{K_p}{Re}$$

[수학식8]

$$\dot{\gamma}_{eff} = K_s \cdot \dot{\gamma}_{app}$$

여기서,  $N_p$ 는 파워수,  $P$ 는 응력에 따른 전체 파워로서 상기 유량과 상기 압력강하의 곱,  $\dot{\gamma}_{app}$ 는 상기 유동장의 겉보기 전단율,  $\dot{\gamma}_{eff}$ 는 상기 유동장의 유효전단율,  $Re$ 는 레이놀즈수,  $K_p$ 는 에너지소산율계수,  $K_s$ 는 유효전단율계수.

[청구항 15]

제14항에 있어서,

상기 유동장에서의 유동수는 에너지소산율  $K_p$ , 유효전단율계수  $K_s$ 을 포함하며,

상기 다른 하나의 정보를 추출하는 단계는,

상기 유동장의 겉보기 전단율과 유효전단율계수  $K_s$ 간의 관계를 이용하여 상기 유동장의 유효전단율을 구하는 단계;

상기 유동장의 유효전단율과 상기 점도거동을 이용하여 유효점도를 구하는 단계;

유체의 평균속도, 밀도 및 점도, 상기 유동장의 특성길이 간의 관계와 상기 유효점도를 이용하여 유효레이놀즈수를 구하는 단계;

상기 유효전단율계수  $K_s$ 와 상기 유효레이놀즈수를 이용하여 파워수를 구하는 단계; 및

유체의 평균속도, 밀도, 겉보기 전단율, 상기 유동장에서의 유체 부피 및 상기 파워수를 이용하여 응력에 따른 전체 파워를 구하는 단계;를 포함하며,

상기 응력에 따른 전체 파워를 구하는 단계를 통해 상기 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 및 압력강하 간의 관계를 구할 수 있는, 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법.

[청구항 16]

제15항에 있어서,

상기 다른 하나의 정보를 도출하는 단계는,

상기 어느 하나의 정보가 상기 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 정보이며, 상기 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 정보를 통해 상기 겉보기 전단율 및 유체의 평균속도 중 적어도 하나를 구하는 단계를 더 포함하는, 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 방법.

[청구항 17] 입구와 출구를 갖는 특정 형상의 연속적 유동장에서 유동하는 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측할 수 있는 시스템으로서, 상기 유동장에서의 유동수를 저장하는 유동수저장부; 상기 비뉴턴 유체의 점도거동 정보를 저장하는 점도거동정보저장부; 및 상기 유동장에서의 유동수 및 상기 점도거동 정보를 기초로, 상기 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 및 압력강하 중 어느 하나의 정보로부터 다른 하나의 정보를 도출하는 도출부를 포함하는, 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 예측시스템.

[청구항 18] 제17항에 있어서, 상기 도출부는 하기 수학식6, 수학식7 및 수학식 8 중 적어도 하나를 이용하는, 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 예측시스템:  
[수학식6]

$$N_p = \frac{P/V}{\rho \cdot (\bar{U})^2 \cdot \dot{\gamma}_{app}}$$

[수학식7]

$$N_p = \frac{K_p}{Re}$$

[수학식8]

$$\dot{\gamma}_{eff} = K_s \cdot \dot{\gamma}_{app}$$

여기서,  $N_p$ 는 파워수,  $P$ 는 응력에 따른 전체 파워로서 상기 유량과 상기 압력강하의 곱,  $\dot{\gamma}_{app}$ 는 겉보기 전단율,  $\dot{\gamma}_{eff}$ 는 유효전단율,  $Re$ 는 레이놀즈수,  $K_p$ 는 에너지소산율계수,  $K_s$ 는 유효전단율계수.

[청구항 19] 제18항에 있어서, 상기 유동장에서의 유동수는 에너지소산율  $K_p$ , 유효전단율계수  $K_s$ 를 포함하며, 상기 도출부는, 겉보기 전단율과 유효전단율계수  $K_s$  간의 관계를 이용하여 유효전단율을 구하는 유효전단율 산출부; 상기 유효전단율과 상기 점도거동을 이용하여 유효점도를 구하는 유효점도 산출부; 유체의 평균속도, 밀도 및 점도, 상기 유동장의 특성길이 간의 관계와 상기 유효점도를 이용하여 유효레이놀즈수를 구하는 유효레이놀즈수 산출부; 상기 유효전단율계수  $K_s$ 와 상기 유효레이놀즈수를 이용하여 파워수를 구하는 파워수 산출부; 및

유체의 평균속도, 밀도, 걸보기 전단율, 상기 유동장에서의 유체 부피 및 상기 파워수를 이용하여 응력에 따른 전체 파워를 구하는 전체 파워 산출부;를 포함하며,

상기 전체 파워 산출부는, 상기 구해진 응력에 따른 전체 파워를 기초로 상기 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 및 압력강하 간의 관계를 구하는, 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 예측시스템.

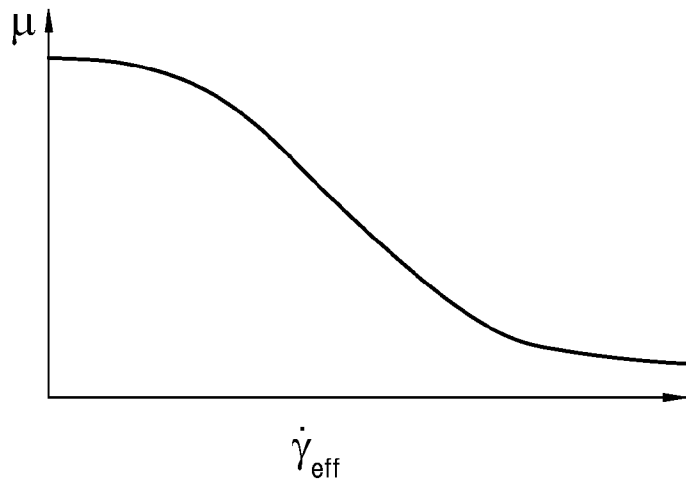
[청구항 20]

제19항에 있어서,

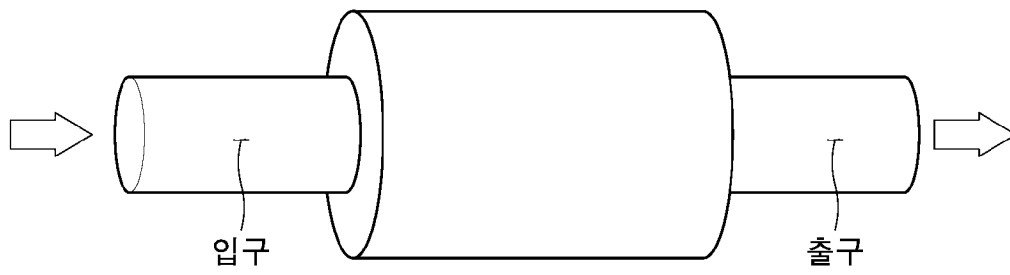
상기 어느 하나의 정보가 상기 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 정보이며,

상기 도출부는 상기 유동장에서의 비뉴턴 유체의 유량 정보를 통해 상기 걸보기 전단율 및 유체의 평균속도 중 적어도 하나를 구하는 유량정보이용부를 더 포함하는, 비뉴턴 유체의 유량 또는 압력강하를 예측하는 예측시스템.

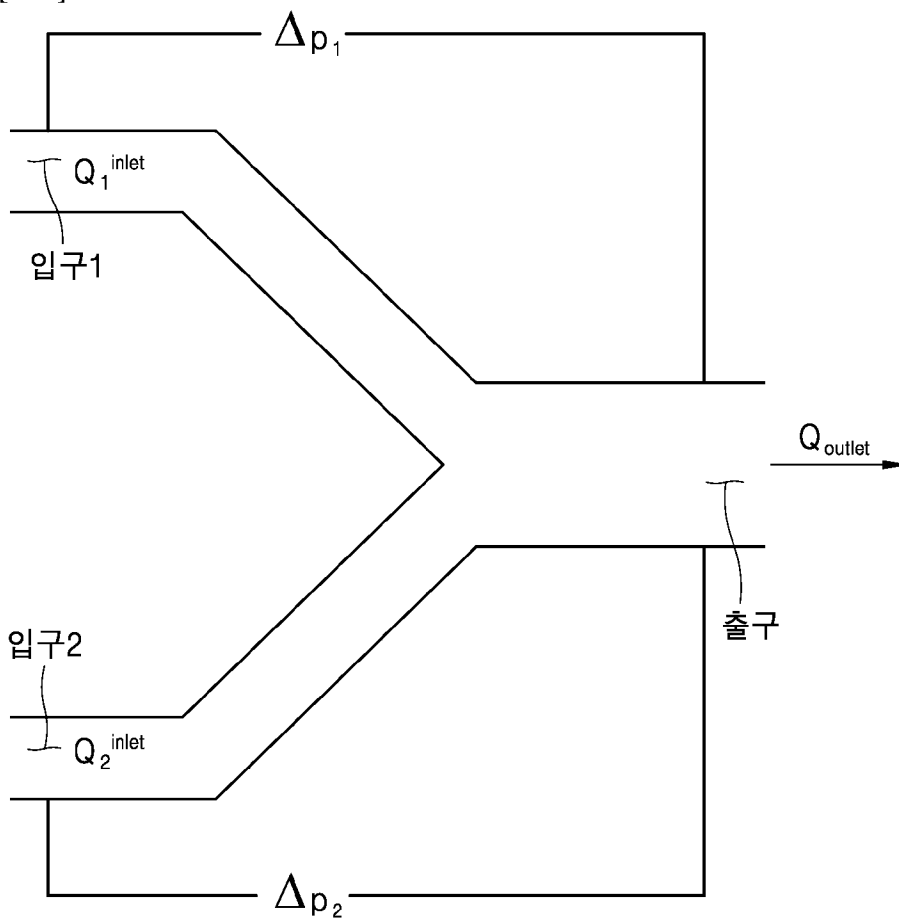
[도1]



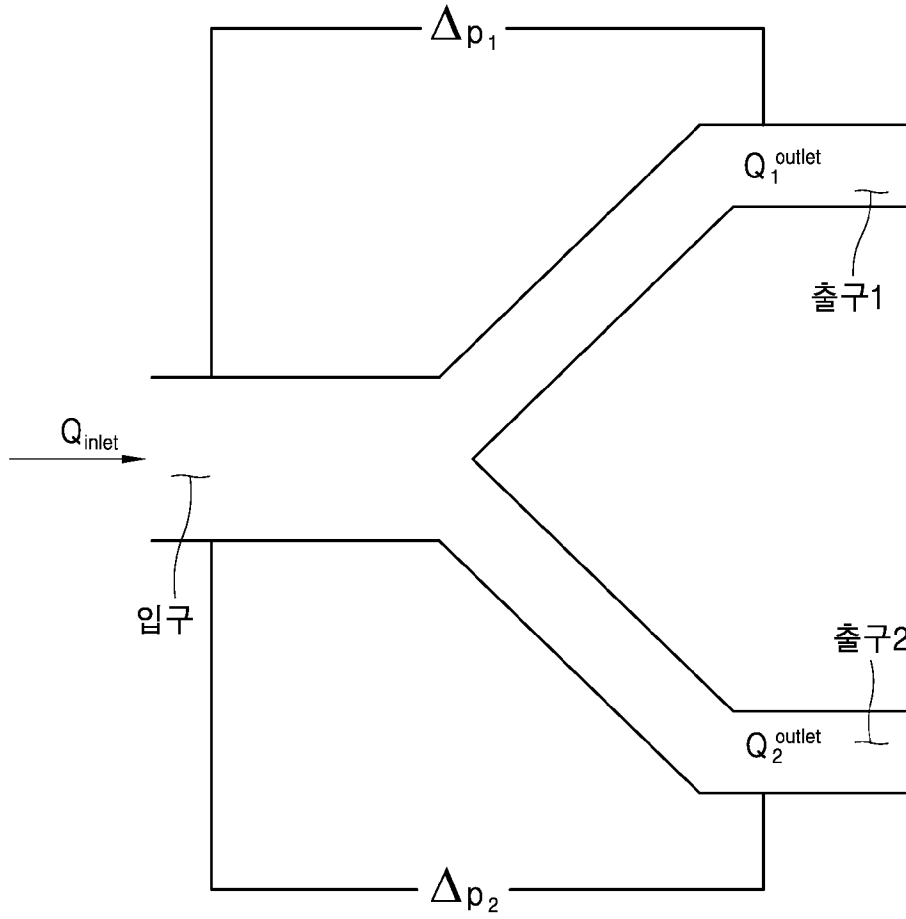
[도2]



[도3]

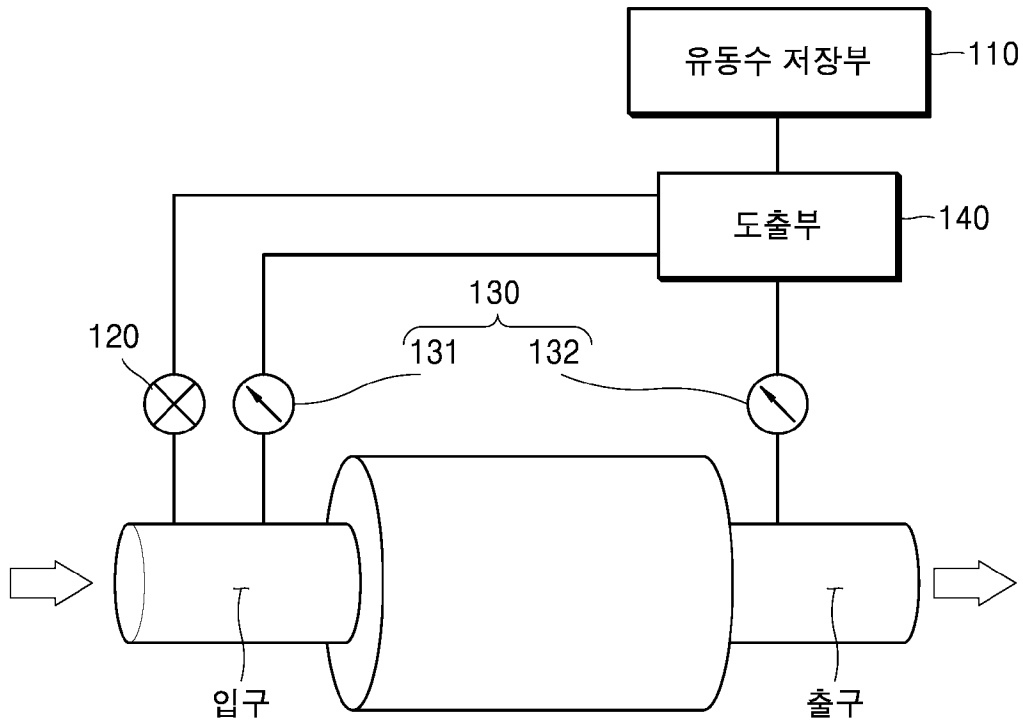


[도4]

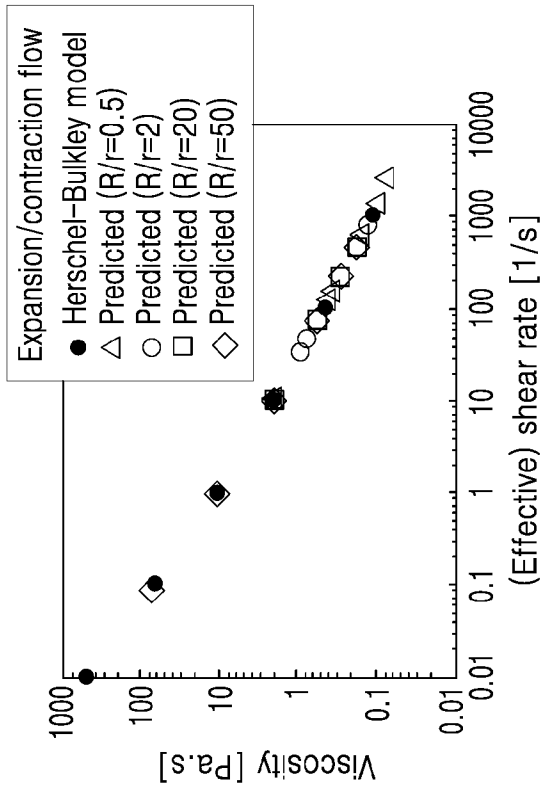


[도5]

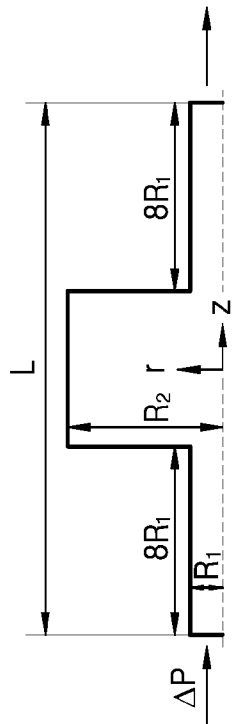
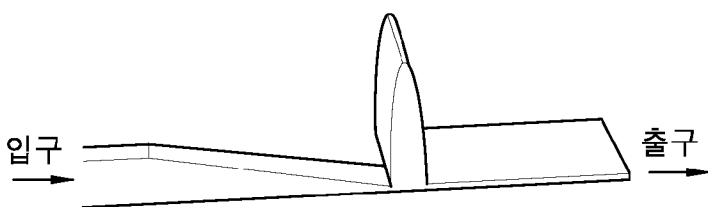
100



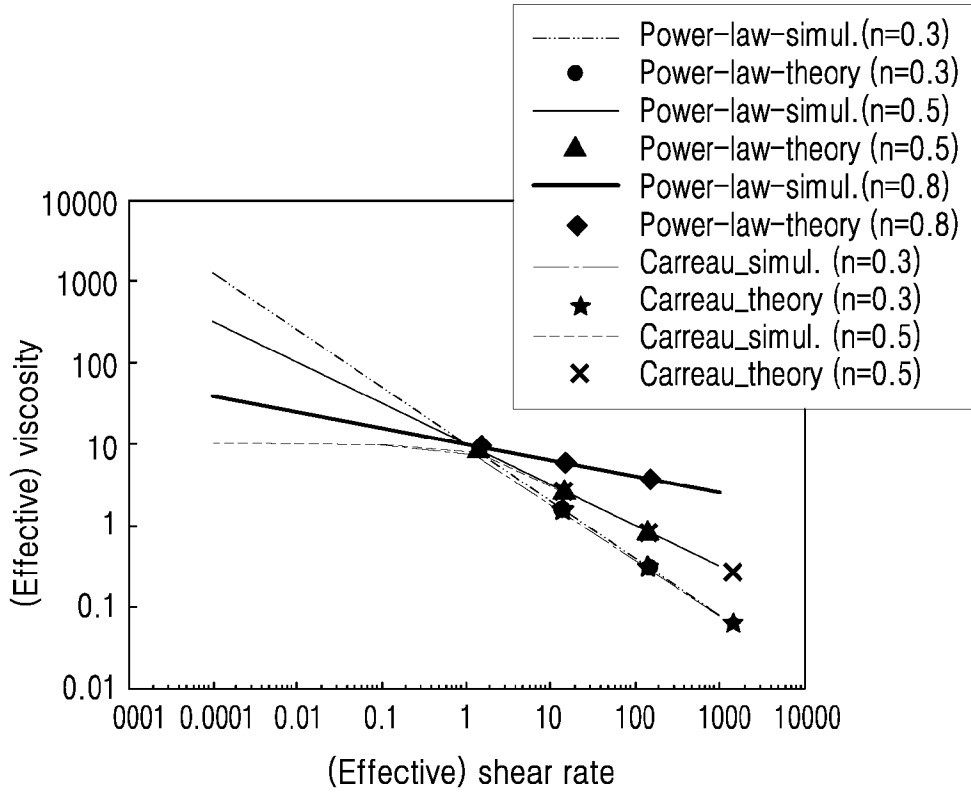
[도 6]



[도 7a]

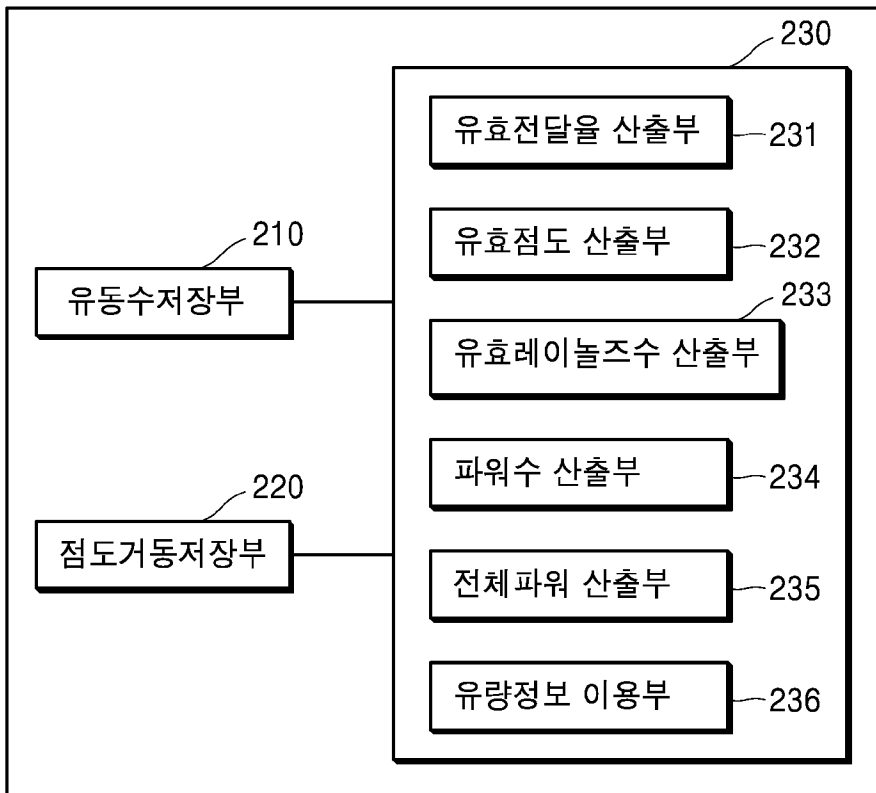


[도7b]

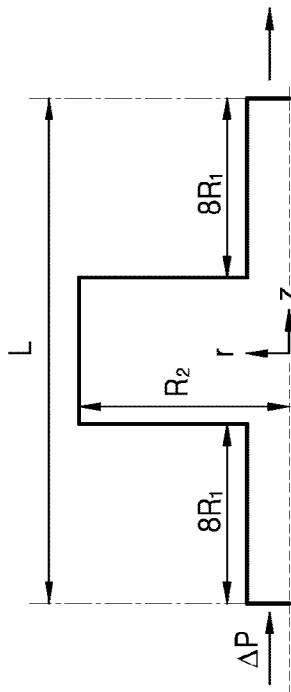
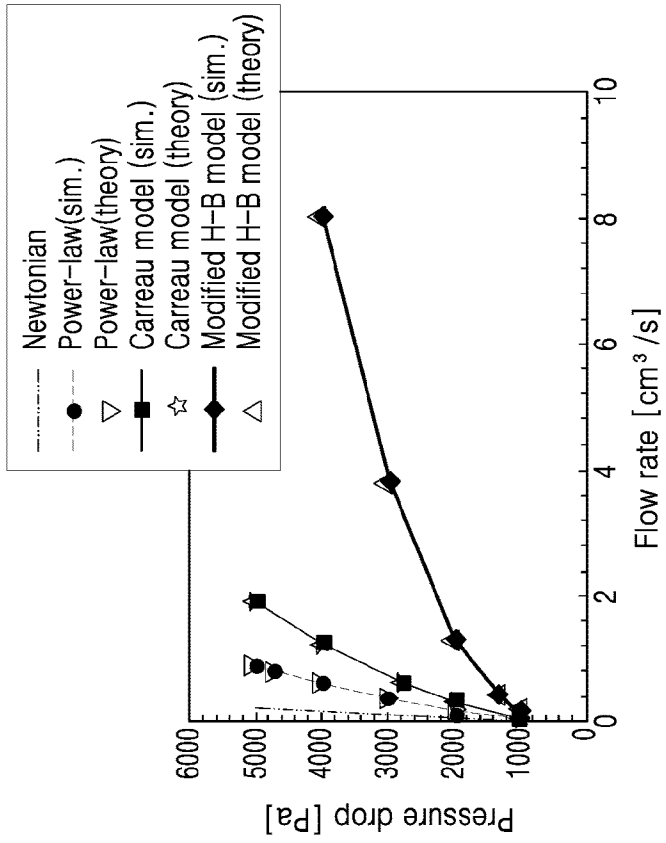


[도8]

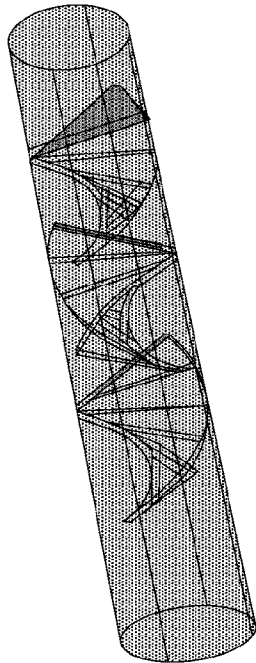
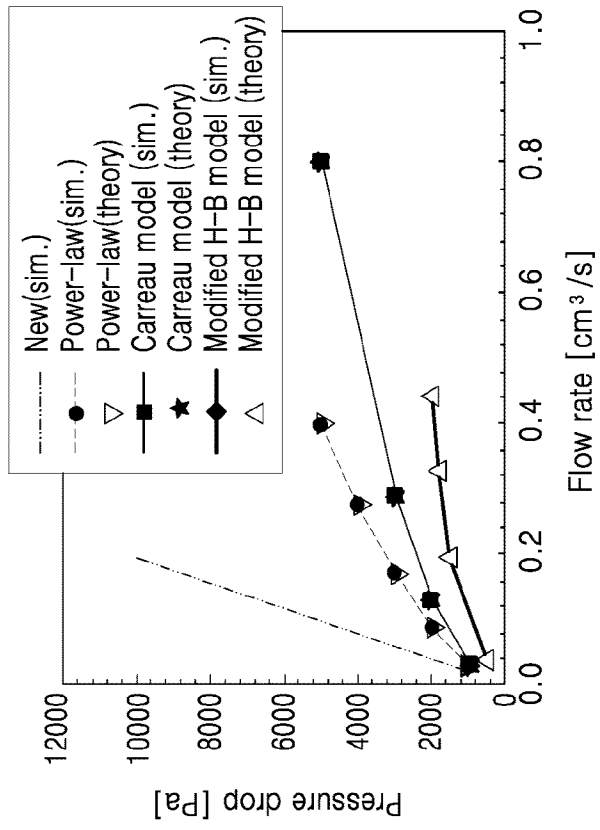
200



[도9]



[도10]



[도11]

