

(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)(11) 공개번호 10-2024-0132549
(43) 공개일자 2024년09월04일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
B01F 35/22 (2022.01) *B01F 101/59* (2022.01)
B01F 23/43 (2022.01) *B01F 23/50* (2022.01)
B01F 25/31 (2022.01) *B01F 27/1143* (2022.01)
B01F 35/21 (2022.01) *B01F 35/212* (2022.01)
G01N 11/02 (2006.01)
- (52) CPC특허분류
B01F 35/2203 (2022.01)
B01F 23/43 (2022.01)
- (21) 출원번호 10-2023-0025502
(22) 출원일자 2023년02월27일
심사청구일자 2023년02월27일
- (71) 출원인
경상국립대학교산학협력단
경상남도 진주시 진주대로 501 (가좌동)
- (72) 발명자
황옥렬
경남 진주시 에나로175번길 12
가오 세씨
경남 진주시 진주대로 620-10
이병민
경남 진주시 가좌길 44
- (74) 대리인
김중석

전체 청구항 수 : 총 6 항

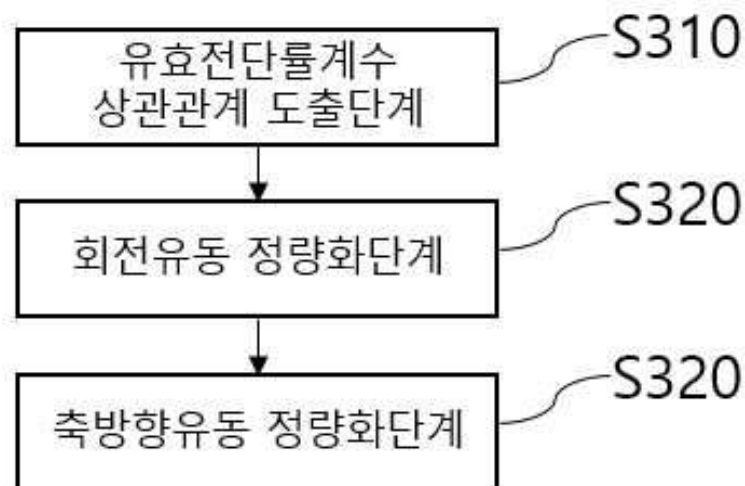
(54) 발명의 명칭 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법

(57) 요약

본 발명은 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법에 관한 것으로, 싱글스크류 내에서 스크류의 회전에 의한 회전유동과 축방향 유량에 의한 배압에 따른 축방향유동이 복합적으로 작용되어 형성되는 복합유동에서의 유동특성을 예측하는 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법에 있어서, 상기 싱글스크류 내 비뉴턴유체

(뒷면에 계속)

대표도 - 도4



의 복합유동에서의 유동정보를 측정하는 유동정보측정단계, 상기 싱글스크류 내 유동장에서의 에너지소산율을 기반으로, 상기 복합유동에서의 에너지소산율계수 K_p^t 와 유동정보의 상관관계를 나타내는 제1유동정량화단계, 상기 회전유동과 축방향유동 각각의 에너지소산율계수 K_p^{rot} , K_p^{ax} 와 상기 복합유동의 에너지소산율계수 K_p^t 의 상관관계를 나타내는 제2유동정량화단계 및, 상기 제1유동정량화단계와 제2유동정량화단계에서 나타난 상관관계로부터 상기 싱글스크류 내 유동특성이 예측될 수 있도록 하는 유동특성예측단계를 포함한다. 그리고, 상기 유동특성예측단계는, 상기 싱글스크류 내 토크, 축방향 배압 및 비뉴턴유체의 점도 중 적어도 하나 이상을 포함하는 유동특성이 예측될 수 있도록 하는 것을 특징으로 한다.

또한, 본 발명에 따르면, 싱글스크류 믹서 내부 비뉴턴유체의 복합유동의 유동특성을 정량화 할 수 있는 효과가 있다.

(52) CPC특허분류

B01F 23/54 (2022.01)
B01F 25/31113 (2022.01)
B01F 27/1143 (2022.01)
B01F 35/2111 (2022.01)
B01F 35/2113 (2022.01)
B01F 35/212 (2022.01)
B01F 35/2136 (2022.01)
B01F 35/2209 (2022.01)
G01N 11/02 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1711169645
 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 1/2
 과제수행기관명 경상국립대학교
 연구기간 2022.03.01 ~ 2023.02.28

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1415178663
 과제번호 20014404
 부처명 산업통상자원부
 과제관리(전문)기관명 한국산업기술평가관리원
 연구사업명 기계장비산업기술개발
 연구과제명 중대형 배터리 전극용 35 LPM급 연속식 슬러리 믹싱 시스템 및 in line 품질 측정

기술개발

기 여 율 1/2
 과제수행기관명 (주)윤성에프앤씨
 연구기간 2022.01.01 ~ 2022.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

싱글스크류 내에서 스크류의 회전에 의한 회전유동과 축방향 유량에 의한 압력상승에 따른 배압을 통해 축방향 유동이 복합적으로 작용되어 형성되는 복합유동에서의 유동특성을 예측하는 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동 특성 예측기법에 있어서,

상기 싱글스크류 내 비뉴턴유체의 복합유동에서의 유동정보를 측정하는 유동정보측정단계;

상기 싱글스크류 내 유동장에서의 에너지소산율을 기반으로, 상기 복합유동에서의 에너지소산율계수 K_p^t 와 유동정보의 상관관계를 나타내는 제1유동정량화단계;

상기 회전유동과 축방향유동 각각의 에너지소산율계수 K_p^{rot} , $K_p^{\Delta p}$ 와 상기 복합유동의 에너지소산율계수 K_p^t 의 상관관계를 나타내는 제2유동정량화단계; 및

상기 제1유동정량화단계와 제2유동정량화단계에서 나타난 상관관계로부터 상기 싱글스크류 내 유동특성이 예측될 수 있도록 하는 유동특성예측단계;를 포함하고,

상기 유동특성예측단계는, 상기 싱글스크류 내 토크, 축방향 배압 및 비뉴턴유체의 점도 중 적어도 하나 이상을 포함하는 유동특성이 예측될 수 있도록 하는 것을 특징으로 하는 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법.

청구항 2

제1항에 있어서,

제1유동정량화단계는,

상기 싱글스크류 내 비뉴턴유체의 유효전단률계수와 유동정보 간의 상관관계를 나타내는 유효전단률계수 정의단계; 및

상기 싱글스크류 내 비뉴턴유체의 복합유동에서 압력의 무차원수가 도출될 수 있도록 하는 압력 무차원수 도출단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법.

청구항 3

제1항에 있어서,

제2유동정량화단계는,

상기 복합유동, 회전유동, 축방향유동 각각의 유효전단률계수 K_s^t , K_s^{rot} , $K_s^{\Delta p}$ 간의 상관관계를 나타내는 유효전단률계수 상관관계 도출단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법.

청구항 4

제1항에 있어서,

제2유동정량화단계는,

상기 싱글스크류 내에서 회전유동만 존재하는 경우의 에너지소산율계수 K_p^{rot} 와 유효전단률계수 K_s^{rot} 를 도출하는 회전유동 정량화단계; 및

상기 싱글스크류 내에서 축방향유동만 존재하는 경우의 에너지소산율계수 $K_p^{\Delta p}$ 와 유효전단률계수 $K_s^{\Delta p}$ 를 도출하는 축방향유동 정량화단계;를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 유동특성예측단계는,

상기 싱글스크류 내 복합유동의 토크, 회전수, 압력 및 유량으로부터 비뉴턴유체의 점도를 예측하는 점도예측단계;

상기 제1유동정량화단계에서 나타난 상관관계로부터 상기 싱글스크류 내 토크를 예측하는 토크예측단계; 및

상기 제1유동정량화단계에서 나타난 상관관계로부터 상기 싱글스크류 내 축방향 배압을 예측하는 압력상승예측단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 유동특성예측단계는,

상기 싱글스크류 내 복합유동의 회전수, 유량, 배압, 유효전단률 계수 및 에너지소산율 계수를 통해 상기 비뉴턴유체의 유효전단률과 유효점도가 예측될 수 있도록 하는 것을 특징으로 하는 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은, 고점도 유체, 고분자 및 슬러리의 연속적 혼합에 사용되는 싱글스크류 믹서 모듈에서 각 모듈의 유량과 회전수 등의 유동정보를 통해 비뉴턴유체의 배압, 토크, 점도를 예측하는 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법에 관한 것임.

배경 기술

[0002] 일반적으로 고분자 컴파운딩, 이차전지, 전자재료에 관련된 산업에서 고점도 유체, 고분자 및 슬러리의 교반 및 이송을 위해 싱글스크류 믹서가 사용될 수 있다. 또한, 싱글스크류 믹서 내부에서는 출구측의 다이에 의한 압력상승과 스크류의 회전에 인한 회전유동이 복합적으로 적용된다. 그리고 최근 각광 받는 이차전지 산업에서 이차전지용 슬러리 제조에 사용되는 믹서 내의 유체는 이차전지 슬러리로 높은 항복응력과 강한 전단담화를 갖는 비뉴턴 유체이다. 이러한 싱글스크류 믹서 내 비뉴턴 유체 복합유동의 회전수, 유량, 배압, 토크 등은 예측하기 어렵다는 문제점이 있다.

[0003] 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.

[0004] 다만, 이러한 종래의 기술은, 싱글스크류 믹서 내 비뉴턴 유체 유동의 회전수, 유량, 배압, 토크 등을 정확하게 예측하기 어렵다는 문제점이 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0005] (특허문헌 0001) (선행문헌 1) 대한민국등록특허공보 제10-2013036호(2019.08.14.)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명은 상술한 바와 같은 선행기술의 문제점을 해결하기 위하여 안출된 것으로, 싱글스크류 믹서 내에서 발생하는 복합유동의 회전수, 유량, 배압, 점도 및 토크를 포함한 유동특성이 예측될 수 있도록 하는 데 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

[0007] 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따른 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법은, 싱글스크류 내에서 스크류의 회전에 의한 회전유동과 축방향 유량에 의한 배압에 따른 축방향유동이 복합적으로 작용되어 형성되는 복합유동에서의 유동특성을 예측하는 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법에 있어서, 상기 싱글스크류 내 비뉴턴유체의 복합유동에서의 유동정보를 측정하는 유동정보측정단계, 상기 싱글스크류 내 유동장에서의 에너지소산율을 기반으로, 상기 복합유동에서의 에너지소산율계수 K_p^d 와 유동정보의 상관관계를 나타내는 제1유동정량화단계, 상기 회전유동과 축방향유동 각각의 에너지소산율계수 K_p^{rot} , $K_p^{\Delta p}$ 와 상기 복합유동의 에너지소산율계수 K_p^d 의 상관관계를 나타내는 제2유동정량화단계 및, 상기 제1유동정량화단계와 제2유동정량화단계에서 나타난 상관관계로부터 상기 싱글스크류 내 유동특성이 예측될 수 있도록 하는 유동특성예측단계를 포함한다. 그리고, 상기 유동특성예측단계는, 상기 싱글스크류 내 토크, 축방향 배압 및 비뉴턴유체의 점도 중 적어도 하나 이상을 포함하는 유동특성이 예측될 수 있도록 하는 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

[0008] 상기 과제의 해결 수단에 의해, 본 발명의 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법은, 싱글스크류 내 유동장의 비뉴턴유체 유동을 정량화 할 수 있는 효과가 있다.

[0009] 또한, 본 발명은, 유량과 배압량이 주어진 믹싱 공정의 회전수와, 믹서 설계 시 모듈에 부하되는 토크가 예측될 수 있도록 하는 효과가 있다.

[0010] 또한, 본 발명은, 스크류 모듈의 양산을 위한 스케일업 설계 및 성능예측이 용이해질 수 있도록 하는 효과가 있다.

[0011] 또한, 본 발명은 유량, 배압, 회전수를 이용하여 믹서 내에서 유동되는 소재의 점도를 판단율을 기반으로 예측할 수 있도록 하는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0012] 도 1은, 본 발명에 따른 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법이 적용될 수 있는 싱글스크류 내 유동장의 모습을 나타낸 모식도이다.

도 2는, 본 발명에 따른 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법의 전체흐름도이다.

도 3은, 본 발명에 따른 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법의 제1유동정량화단계의 상세흐름도이다.

도 4는, 본 발명에 따른 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법의 제2유동정량화단계의 상세흐름도이다.

도 5는, 본 발명에 따른 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법의 유동특성예측단계의 상세흐름도이다.

도 6은, 싱글스크류 내 회전유동에 대해 먹급수 유체 모델에 대한 유효전단률계수의 변화를 나타낸 그래프이다.

도 7은, 싱글스크류 내 축방향유동에 대해 먹급수 유체 모델에 대한 유효전단률계수의 변화를 나타낸 그래프이다.

도 8은, 다양한 비뉴턴유체의 복합유동에서 시뮬레이션에 의한 점도값과 예측식에 따른 점도값을 비교한 그래프이다.

도 9는, 비뉴턴유체에서의 무차원수 관계에 대한 그래프이다.

도 10은, 다양한 비뉴턴유체의 복합유동에서 회전각속도에 따른 시뮬레이션에 의한 토크값과 예측식에 따른 토크

크값을 비교한 그래프이다.

도 11은, 다양한 비뉴턴유체의 복합유동에서 회전각속도에 따른 시뮬레이션에 의한 배압과 예측식에 따른 배압을 비교한 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0013] 본 명세서에서 사용되는 용어에 대해 간략히 설명하고, 본 발명에 대해 구체적으로 설명하기로 한다.
- [0014] 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.
- [0015] 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.
- [0016] 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.
- [0017] 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.
- [0018] 먼저, 본 발명의 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법을 설명하기에 앞서, 본 발명을 실시하기 위한 싱글스크류 믹서, 싱글스크류 유동 특성 및 비뉴턴유체의 에너지소산을 기반 유동정량화에 대한 이론적 배경을 설명하기로 한다.
- [0019] 도 1을 참조하여, 슬러리 믹싱 및 이송을 위해 마련되는 싱글스크류(100) 시스템 내 유동장에 대한 모식도가 도시되어 있다. 도 1에 도시된 것과 같이 상기 싱글스크류(100)는 단일축으로 마련되며 출구쪽 노즐이나 다이에 의한 압력상승에 따른 축방향유동과 회전에 의한 회전유동이 복합적으로 작용된다. 이때, 상기 싱글스크류(100)는, 내부 스크류의 일부분을 유동장으로 설정하여 도 1에 도시된 것으로 유동장의 입구측과 출구측을 설정하였고, 스크류 루트(screw root)와 배럴(barrel)면(barrel surface)의 간격이 특성길이를 설정될 수 있다. 이러한 특성길이를 통해 후술할 레이놀즈 수 및 겔보기전단률이 정의될 수 있다. 그리고, 상기 싱글스크류(100)의 회전수는 스크류 축의 회전수, 유량은 스크류의 날개를 통해 나선형으로 유동되며 이송되는 유체의 양, 배압은 출구측에서 토출을 위해 형성되는 압력, 토크는 상기 싱글스크류(100)에 가해지는 부하를 의미한다.
- [0020] 또한, 상기 싱글스크류(100) 내 유동의 배압토출 특성에 따라 스크류 회전에 의한 나선형의 복잡한 유동이 발생하여 입구에서 출구까지 압력이 상승하는 배압이 발생된다. 따라서, 본 발명에서는 상기 싱글스크류(100) 내 비뉴턴유체의 유동을 정량화하여 배압, 유량, 토크, 점도 등을 예측하고, 싱글스크류(100)에 가해지는 부하를 판단하여 싱글스크류(100) 모듈의 최적설계가 용이하게 이루어질 수 있도록 하는 것을 목표로 한다.
- [0021] 한편, 비뉴턴유체의 에너지소산을 기반 유동정량화에 대한 이론적 배경에 있어서, 상기 싱글스크류(100) 내 배압, 유량, 토크, 회전수 등 싱글스크류(100) 내 유동정보를 통해 상기 싱글스크류(100) 내에서 유동되는 유체의 에너지소산을 및 전단률에 따른 점도변화인 점도거동을 알 수 있다. 또한, 상기 싱글스크류(100) 내 유체의 점도거동을 알고 있을 때, 상기한 압력, 유량, 토크, 회전수 중 적어도 3개의 값이 산출된 경우에 나머지 하나의 값을 예측할 수 있다. 반대로 상기한 4개의 공정조건(압력, 유량, 토크, 회전수)을 알고 있으며, 점도를 도출할 수 있다.
- [0022] 먼저, 뉴턴유체의 유동정량화는 유체의 층류영역에서 유효한 하기 수학식1에 의해 나타낼 수 있다.

[0023] [수학식1]

$$N_p = \frac{(P/V)}{(\rho \bar{u}^2 \dot{\gamma}_{app})} = \frac{K_p}{Re}, \quad Re = \frac{\rho \bar{u} H}{\mu}$$

[0025] 여기서, N_p 는 무차원 에너지소산물, ρ 는 유체의 밀도, $\bar{u}$ 는 유동의 평균속도, $\dot{\gamma}_{app}$ 는 겔보기전단률, P 는 유동 내

의 총에너지소산율, V 는 유동장의 부피, Re 는 레이놀즈 수, H 는 스크류 루트(screw root)와 배럴(barrel surface)사이의 간격으로 특성길이에 해당하며, μ 는 유체의 점도, K_p 는 에너지소산율계수이다.

[0026] 그리고, 상기 수학식1에 유효전단율을 도입하여, 수학식1의 레이놀즈수를 유효레이놀즈수로 도입하면, 하기 수학식2와 같이 비뉴턴유체의 경우에도 식이 성립될 수 있다.

[0027] [수학식2]

$$\dot{\gamma}_{eff} = K_s \dot{\gamma}_{app}, \quad N_p = \frac{K_p}{Re_{eff}}, \quad Re_{eff} = \frac{(\rho \bar{u} H)}{\mu_{eff}}, \quad \mu_{eff} = \mu(\dot{\gamma}_{eff})$$

[0028]

[0029] 여기서, $\dot{\gamma}_{eff}$ 는 유효전단율, K_s 는 유효전단율계수, Re_{eff} 는 유효레이놀즈수, μ_{eff} 는 유효점도이다. 상기, 유효전단율, 유효전단율계수, 유효레이놀즈수, 유효점도는, 비뉴턴유체에서의 전단율, 전단율계수, 레이놀즈수, 점도를 의미한다.

[0030] 그리고, 상기 유효레이놀즈수는, 뉴턴유체의 레이놀즈수의 분모인 점도를 유효점도로 바꿔 나타낸 값이며, 상기 유효점도는, 비뉴턴유체의 유효전단율에서 나타나는 점도이다.

[0031] 또한, 상기 싱글스크류(100) 내의 유동에서는 하기 수학식3과 같이, 토크와 회전수의 곱에서 압력차와 유량의 곱을 뺀 나머지가 총에너지소산율이 된다.

[0032] [수학식3]

$$P = T \cdot N - \Delta p \cdot Q$$

[0033]

[0034] 즉, 상기 수학식1 내지 수학식3을 통해 에너지소산율을 기반으로 비뉴턴유체의 유동이 정량화될 수 있도록 한다.

[0035] 이러한, 에너지소산율 기반의 유동정량화에 대한 이론은 본 발명의 발명자에 의해 개발되어, 탄성이 무시될 수 있는 비뉴턴유체에 대해 일반적으로 적용이 가능하고, 하기 논문에 의해 관련 연구가 발표된 바 있다.

[0036] <HK Jang, WR Hwang, "A general approach on the quantification of effective quantities in a pressure-driven flow of inelastic non-Newtonian fluid in arbitrary geometries based on the energy balance," Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics 253, 7-15 (2018).>

[0037] 이하에서는, 도 1을 참조하여, 싱글스크류(100) 유동의 해를 구하는 방법에 대해 설명하기로 한다.

[0038] 먼저, 상기 싱글스크류(100) 내 유동은, 스크류의 회전에 의한 나선형의 복잡한 유동이 발생하며 축방향 유량에 의한 압력상승을 발생시킨다. 그리고, 하기에는 싱글스크류(100) 유동의 해를 구하기 위한 수학식에 대해 개시되어 있다. 이때, 배럴(110)의 직경은 D , 스크류의 안쪽 지름은 D_i , 배럴(110)과 스크류 사이 간격은 δ , 피치의 길이는 L , 회전각속도는 N (rad/s)으로 표기한다.

[0039] 상기 싱글스크류(100)에서 특정한 회전각속도 N 이 가해질 때, 유량 Q 및 배압 Δp 가 발생하게 된다. 이때, 뉴턴 유체의 유동에서 유량의 무차원화 된 수(토출량과 특성유량의 비인 Throughput number)가 하기 수학식4와 같이 표현된다.

[0040] [수학식4]

$$Q^* = \frac{Q}{ND^3}$$

[0041]

[0042] 그리고, 뉴턴유체의 유동에서 압력의 무차원화 된 수(압력과 점성응력의 비인 Pressure number)가 하기 수학식5와 같이 표현된다.

[0043] [수학식5]

$$\Delta p^* = \frac{\Delta p D}{\mu N L}$$

[0044]

[0045] 또한, 두 무차원화 된 수는 선형 반비례관계를 가지며 그 식은 하기 수학식6과 같다.

[0046] [수학식6]

$$\Delta p^* = \frac{A_2}{A_1} (A_1 - Q^*)$$

[0047]

[0048] 이와 같이, 수학식1 내지 수학식6을 통해 본 발명의 이론적 배경 및 타당성에 대해 개시하였으며, 이하에서는, 본 발명의 일실시예에 따른 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법에 대해 설명하기로 한다.

[0049] 도 1 내지 도 5를 참조하면, 싱글스크류 내에서 스크류의 회전에 의한 회전유동과 축방향 유량에 의한 압력상승에 따른 축방향유동이 복합적으로 작용되어 형성되는 복합유동에서의 유동특성을 예측하는 싱글스크류 믹서 내부 유동의 유동특성 예측기법에 있어서, 상기 싱글스크류(100) 내 비뉴턴유체의 복합유동에서의 유동정보를 측정하는 유동정보측정단계(S100), 상기 싱글스크류(100) 내 유동장에서의 에너지소산율을 기반으로, 상기 복합유동에서의 에너지소산율계수 K_p^t 와 유동정보의 상관관계를 나타내는 제1유동정량화단계(S200), 상기 회전유동과 축방향유동 각각의 에너지소산율계수 K_p^{rot} , $K_p^{\Delta p}$ 와 상기 복합유동의 에너지소산율계수 K_p^t 의 상관관계를 나타내는 제2유동정량화단계(S300) 및, 상기 제1유동정량화단계(S200)와 제2유동정량화단계(S300)에서 나타난 상관관계로부터 상기 싱글스크류(100) 내 유동특성이 예측될 수 있도록 하는 유동특성예측단계(S400)를 포함한다. 그리고, 상기 유동특성예측단계(S400)는, 상기 싱글스크류(100) 내 토크, 축방향 배압 및 비뉴턴유체의 점도 중 적어도 하나 이상을 포함하는 유동특성이 예측될 수 있다.

[0050] 보다 상세히, 상기 유동정보측정단계(S100)에서는, 도 1에 도시된 싱글스크류(100) 내 유동장을 기준으로, 싱글스크류(100) 내 유동에서의 유량과 스크류의 회전수를 측정하고, 배럴(110)의 직경D, 스크류의 안쪽 지름D_i, 배럴(110)과 스크류 사이 간격 δ , 피치의 길이L, 회전각속도N(rad/s)에 대한 값이 측정될 수 있도록 한다.

[0051] 다음으로, 상기 제1유동정량화단계(S200)에서는, 상기 싱글스크류(100)의 유동장에서 나타나는 유동의 에너지소산율을 기반으로 유동특성이 정량화되도록 한다. 이때, 본 발명에서는, 입구와 출구를 가지며 임의의 연속적인 유동에서 에너지소산을 대표하는 유효한 전단물이 있고, 평균 유속과 특성길이의 비로 나타내어지는 겔보기 전단물에 비례한다고 가정한다. 그리고, 이때의 비례상수를 유효전단물계수 K_s 라고 정의하며, 유효전단물을 비뉴턴 유체 점도 모델에 대입하여 유효점도를 도출하여 유효점도 μ_{eff} 를 도출한다. 또한, 뉴턴유체의 유동에서 평균 에너지소산율과 난류 에너지소산의 비로 산출되는 비례상수를 에너지소산율계수 K_p 로 정의한다. 그리고 에너지소산율계수는, 시스템의 유동 형상에 의해 결정되므로, 비뉴턴유체에서도 동일한 상관관계를 나타낸다. 그리고, 상기 제1유동정량화단계(S200)는, 상기 싱글스크류(100)에 가한 동력이 점성에 의한 에너지소산과 유체 토출에 필요한 동력의 합으로 이루어진 관계식으로 나타내어, 상기 싱글스크류(100) 내 유동장의 에너지소산율, 토크, 회전수, 배압 및 유량의 관계식이 도출될 수 있도록 한다.

[0052] 또한, 상기 복합유동에서의 평균속도, 특성길이, 겔보기전단물, 레이놀즈수는 하기 수학식7과 같이 나타낼 수 있다.

[0053] [수학식7]

$$\bar{u} = \frac{Q}{A \sin \theta}, H = \frac{(D - D_i)}{2}, \dot{\gamma}_{app} = \bar{u} / H, Re = \frac{(\rho \bar{u} H)}{\mu}$$

[0054]

[0055] 또한, 층류유동에서 무차원 에너지소산율 N_p 는 하기 수학식8과 같이 레이놀즈수Re에 역수로 나타낼 수 있고, 이때 비례상수를 총(total) 에너지소산율계수 K_p^t 라고 정의한다.

[0056] [수학식8]

$$N_p = \frac{(P/V)}{\rho \bar{u}^2 \dot{\gamma}}, N_p = \frac{K_p^t}{Re}$$

[0057]

[0058] 또한, 본 발명에서 싱글스크류(100) 내 유동의 총 에너지소산율은 수학식3과 같이 나타나며, V는 유체가 차지하는 공간의 부피이다,

[0059] 그리고, 상기 제1유동정량화단계(S200)는, 상기 싱글스크류(100) 내 비뉴턴유체의 유효전단률계수 K_s 와 유동정보 간의 상관관계를 나타내는 유효전단률계수 정의단계(S210) 및, 상기 싱글스크류(100) 내 비뉴턴유체의 복합유동에서 압력의 무차원수가 도출될 수 있도록 하는 압력 무차원수 도출단계(S220)를 포함한다.

[0060] 상기 유효전단률계수 정의단계(S210)에서는, 하기 수학식9와 같이, 비뉴턴유체의 유효전단률계수와 유동정보 간의 상관관계를 나타낸다.

[0061] [수학식9]

$$\dot{\gamma}_{eff} = K_s \dot{\gamma}_{app}, N_p = \frac{K_p^t}{Re_{eff}}, Re_{eff} = \frac{\rho \bar{u} H}{\mu_{eff}}, \mu_{eff} = \mu(\dot{\gamma}_{eff})$$

[0062]

[0063] 또한, 상기 압력 무차원수 도출단계(S220)에서는, 하기 수학식10과 같이, 상기 싱글스크류(100) 내 비뉴턴유체 유동의 배압 Δp 에 대한 무차원수가 도출될 수 있도록 한다.

[0064] [수학식10]

$$\Delta p = \frac{((T \cdot N - P))}{Q}, P = K_p^t \mu_{eff} \dot{\gamma}_{app}^2, \mu = \mu(\dot{\gamma}_{eff}), \dot{\gamma}_{eff} = K_s^t \dot{\gamma}_{app}$$

[0065]

$$\Delta p = \frac{(\Delta p^* \mu_{eff} NL)}{D}, \Delta p^* = \frac{A_2}{A_1} (A_1 - Q^*), \mu = \mu(\dot{\gamma}_{eff}), \dot{\gamma}_{eff} = K_s^t \dot{\gamma}_{app}$$

[0066]

[0067] 다음으로, 상기 제2유동정량화단계(S300)는, 싱글스크류(100)의 스크류가 회전할 때 복합유동에서 에너지소산율계수와, 회전유동 및 축방향유동에서의 에너지소산율계수의 관계를 통해 유동정량화가 이루어질 수 있도록 한다.

[0068] 보다 상세히, 상기 제2유동정량화단계(S300)는, 상기 복합유동, 회전유동, 축방향유동 각각의 유효전단률계수 K_s^t , $K_s^{\tau_{rot}}$, $K_s^{\Delta p}$ 간의 상관관계를 나타내는 유효전단률계수 상관관계 도출단계(S310), 상기 싱글스크류(100) 내에서 회전유동만 존재하는 경우의 에너지소산율계수 $K_p^{\tau_{rot}}$ 와 유효전단률계수 $K_s^{\tau_{rot}}$ 를 도출하는 회전유동 정량화단계(S320) 및, 상기 싱글스크류(100) 내에서 축방향유동만 존재하는 경우의 에너지소산율계수 $K_p^{\Delta p}$ 와 유효전단률계수 $K_s^{\Delta p}$ 를 도출하는 축방향유동 정량화단계(S330)를 포함한다.

[0069] 먼저, 상기 유효전단률계수 상관관계 도출단계(S310)에서는, 하기 수학식11과 같이, 상기 복합유동, 회전유동, 축방향유동 각각의 에너지소산율계수 K_p^t , $K_p^{\tau_{rot}}$, $K_p^{\Delta p}$ 간의 상관관계가 나타날 수 있도록 한다.

[0070] [수학식11]

$$K_p^t = \frac{\phi^2}{(1 - \alpha \phi \cos \theta)^2 + (\phi \sin \theta)^2} K_p^{\tau_{rot}} + \frac{1}{(1 - \alpha \phi \cos \theta)^2 + (\phi \sin \theta)^2} K_p^{\Delta p},$$

$$\phi = \frac{u_{rot}}{u_{\Delta p}} = \frac{NR}{\alpha NR \cos \theta - Q / (A \sin \theta)}$$

[0071]

[0072] 이때, ϕ 는 회전유동과 축방향유동에 의한 각 유동의 속도 비이며, α 는 회전유동에서 정의할 수 있는 스크류 형상에 따른 상수이다.

[0073] 그리고, 상기 유효전단률계수 상관관계 도출단계(S310)에서는, 하기 수학식12와 같이, 상기 복합유동, 회전유동, 축방향유동 각각의 유효전단률계수 K_s^t , $K_s^{\tau_{rot}}$, $K_s^{\Delta p}$ 간의 상관관계가 나타날 수 있도록 한다.

[0074] [수학식12]

$$K_s^t = \sqrt{\frac{\phi^2}{(1 - \alpha \phi \cos \theta)^2 + (\phi \sin \theta)^2} (K_s^{\tau_{rot}})^2 + \frac{1}{(1 - \alpha \phi \cos \theta)^2 + (\phi \sin \theta)^2} (K_s^{\Delta p})^2}$$

[0075]

[0076] 또한, 상기 회전유동 정량화단계(S320)에서는, 하기 수학식13과 같이, 상기 싱글스크류(100) 내 유동장에서 회전유동만 존재하는 경우의 에너지소산율계수 K_p^{rot} 와 유효전단률계수 K_s^{rot} 의 유동정보 간 상관관계가 나타날 수 있도록 한다.

[0077] [수학식13]

$$K_p^{rot} = N_p Re, \quad N_p = \frac{(P/V)}{(\bar{\rho} \bar{u}^2 \dot{\gamma}_{app})}, \quad Re = \frac{(\bar{\rho} \bar{u} H)}{\mu}, \quad H = \frac{D - D_i}{2}$$

[0078]

$$K_s^{rot} = \frac{\dot{\gamma}_{eff}}{\dot{\gamma}_{app}}, \quad N_p = \frac{\bar{\epsilon} H}{\rho (NR)^3} = \frac{K_p \mu_{eff}}{\rho NR H}, \quad \mu_{eff} = \mu(\dot{\gamma}_{eff})$$

[0079]

[0080] 이때의 평균속도 $\bar{u}$, 겉보기전단률 $\dot{\gamma}_{app}$, 동력 P 는 하기 수학식14와 같다.

[0081] [수학식14]

$$\bar{u} = N \cdot R, \quad \dot{\gamma}_{app} = NR/H, \quad P = T \cdot N$$

[0082]

[0083] 또한, 도 6을 참조하면, 상기 싱글스크류(100) 내 회전유동에 대해, 먹급수 유체 모델 $\mu(\dot{\gamma}) = m\dot{\gamma}^{(n-1)}$ 의 n 값에 따른 유효전단률계수 K_s 의 값을 알 수 있다. 이때, 상기 유효전단률계수 K_s 의 값이 거의 일정하므로, 모든 n 에서의 유효전단률계수 K_s 의 평균값을 상기 싱글스크류(100) 내 유동장의 K_s 값으로 설정한다.

[0084] 또한, 상기 축방향유동 정량화단계(S330)에서는, 하기 수학식15와 같이, 상기 싱글스크류(100) 내 유동장에서 배압에 따른 축방향유동만 존재하는 경우의 에너지소산율계수 $K_p^{\Delta p}$ 와 유효전단률계수 $K_s^{\Delta p}$ 의 유동정보 간 상관관계가 나타날 수 있도록 한다.

[0085] [수학식15]

$$K_p^{\Delta p} = N_p Re, \quad N_p = \frac{(P/V)}{(\bar{\rho} \bar{u}^2 \dot{\gamma}_{app})}, \quad Re = \frac{(\bar{\rho} \bar{u} H)}{\mu}, \quad H = \frac{D - D_i}{2}$$

[0086]

$$K_s^{\Delta p} = \frac{\dot{\gamma}_{eff}}{\dot{\gamma}_{app}}, \quad N_p = \frac{\bar{\epsilon} H (A \sin \theta)^3}{\rho Q^3} = \frac{\mu_{eff} (A \sin \theta) K_p^{\Delta p}}{\rho Q H}, \quad \mu_{eff} = \mu(\dot{\gamma}_{eff})$$

[0087]

[0088] 이때의 평균속도 $\bar{u}$, 겉보기전단률 $\dot{\gamma}_{app}$, 동력 P 는 하기 수학식16와 같다.

[0089] [수학식16]

$$\bar{u} = Q/(A \sin \theta), \quad \dot{\gamma}_{app} = \bar{u}/H, \quad P = \Delta p \cdot Q$$

[0090]

[0091] 또한, 도 7을 참조하면, 상기 싱글스크류(100) 내 축방향유동에 대해, 먹급수 유체 모델 $\mu(\dot{\gamma}) = m\dot{\gamma}^{(n-1)}$ 의 n 값에 따른 유효전단률계수 K_s 의 값을 알 수 있다. 이때, 상기 유효전단률계수 K_s 의 값이 거의 일정하므로, 모든 n 에서의 유효전단률계수 K_s 의 평균값을 상기 싱글스크류(100) 내 유동장의 K_s 값으로 설정한다.

[0092] 다음으로, 상기 유동특성예측단계(S400)는, 상기 싱글스크류(100) 내 복합유동의 회전수, 유량, 배압, 유효전단률 계수 및 에너지소산율 계수를 통해 상기 비뉴턴유체의 유효전단률과 유효점도가 예측될 수 있도록 하는 역할을 한다. 보다 상세히, 상기 유동특성예측단계(S400)는, 상기 싱글스크류(100) 내 복합유동의 토크, 회전수, 압력 및 유량으로부터 비뉴턴유체의 점도를 예측하는 점도예측단계(S410), 상기 제1유동정량화단계(S200)에서 나타난 상관관계로부터 상기 싱글스크류(100) 내 토크를 예측하는 토크예측단계(S420) 및, 상기 제1유동정량화단계(S200)에서 나타난 상관관계로부터 상기 싱글스크류(100) 내 축방향 배압 Δp 을 예측하는 압력상승예측단계(S430)를 포함한다.

[0093] 먼저, 상기 점도예측단계(S410)에서는, 상기 수학식11 내지 수학식13으로부터 하기 수학식17을 도출하여, 상기 복합유동의 토크, 회전수, 압력, 유량을 통해 상기 싱글스크류(100) 내 복합유동되는 비뉴턴유체의 유효점도가

예측될 수 있도록 한다.

[0094] [수학식17]

$$[0095] \quad \dot{\gamma}_{eff}^t = (K_s^t) \left(\frac{Q}{AH \sin \theta} \right) = \dot{\gamma}_{eff}(Q, N, K_s^{\tau \alpha}, K_s^{\Delta p})$$

$$[0096] \quad \mu_{eff} = \frac{(T \cdot N - \Delta p \cdot Q)(H)^2}{K_p^t \cdot \left(\frac{Q}{A \sin \theta} \right)^2 \cdot V} = \mu_{eff}(Q, N, T, \Delta p, K_p^{\tau \alpha}, K_p^{\Delta p})$$

[0097] 이때, 도 8을 참조하면, 전단력에 따른 점도값에 있어서, 상기 점도예측단계(S410)에서 도출된 수학식17을 통해 다양한 비뉴턴유체 모델의 점도를 예측한 결과와, 여러 비뉴턴유체 모델의 유변물성 값이 일치하는 것을 알 수 있다.

[0098] 이때, 도 8에 나타난 유체 모델은,

[0099] [먹급수 모델]

$$[0100] \quad \mu = m \dot{\gamma}^{(n-1)}, \quad \dot{\gamma}_{low} = 0.0001[1/s], \quad m = 1$$

[0101] [Carreau 모델]

$$[0102] \quad \mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty})(1 + (\lambda \dot{\gamma})^2)^{((n-1)/2)}, \quad \mu_0 = 10, \quad \mu_{\infty} = 0.001, \quad \lambda = 1[s], \quad n = 0.5$$

[0103] [Herschel-Bulkley 모델]

$$[0104] \quad \mu = \tau_y(1 - e^{-\alpha \dot{\gamma}}) / \dot{\gamma} + m \dot{\gamma}^{(n-1)}, \quad \tau_y = 3.9[Pa], \quad \alpha = 1000, \quad m = 6.7, \quad n = 0.4039$$

[0105] 이다.

[0106] 또한, 도 9를 참조하면, 상기 먹급수 모델, Carreau 모델, Herschel-Bulkley모델의 복합유동 시뮬레이션에서 두 무차원화 된 수의 결과와 뉴턴 유체에서의 결과를 알 수 있다.

[0107] 또한, 상기 토크예측단계(S420)에서는, 상기 수학식10의 에너지소산율로부터 하기 수학식18을 도출하여, 상기 싱글스크류(100) 내 비뉴턴유체의 복합유동의 유동정보인 유량, 배압, 회전각속도, 점도를 알 때, 상기 싱글스크류(100)에 가해지는 토크가 예측될 수 있도록 한다.

[0108] [수학식18]

$$[0109] \quad T = (\Delta p \cdot Q + P_t) / N, \quad P_t = K_p^t \cdot \mu_{eff} \cdot \dot{\gamma}_{app}^2 \cdot V$$

[0110] 또한, 도 10을 참조하면, 먹급수 모델에서 도출한 K_s 값을 통해, 항복응력 유체인 슬러리 유체 모델의 스크류 유동에서 회전각속도 N 에 따른 시뮬레이션 결과값과 상기 수학식18을 통해 예측한 결과값이 거의 일치함을 알 수 있음.

[0111] 또한, 상기 압력상승예측단계(S430)에서는, 상기 수학식10의 에너지소산율로부터 하기 수학식19를 도출하여, 상기 싱글스크류(100) 내 비뉴턴유체의 복합유동의 유동정보인 유량, 토크, 회전각속도, 점도를 알 때, 상기 싱글스크류(100)에 가해지는 축방향 배압 Δp 이 예측될 수 있도록 한다.

[0112] [수학식19]

$$[0113] \quad \Delta p = (T \cdot N - P_t) / Q, \quad P_t = K_p^t \cdot \mu_{eff} \cdot \dot{\gamma}_{app}^2 \cdot V$$

[0114] 또한, 도 11을 참조하면, 먹급수 모델에서 도출한 K_s 값을 통해, 항복응력 유체인 슬러리 유체 모델의 스크류 유동에서 회전각속도 N 에 따른 시뮬레이션 결과값과 상기 수학식19를 통해 예측한 결과값이 거의 일치함을 알 수 있음.

[0115] 따라서, 본 발명은 싱글스크류 시스템의 비뉴턴유체 유동을 정량화 할 수 있는 효과가 있다. 또한, 본 발명은, 유량과 배압량이 주어진 믹싱 공정의 회전수와, 믹서 설계 시 모듈에 부하되는 토크가 예측될 수 있도록 하는 효과가 있다. 이로써, 스크류 모듈의 양산을 위한 스케일업 설계 및 성능예측이 용이해질 수 있도록 하는 효과

가 있다.

[0116] 이와 같이, 상술한 본 발명의 기술적 구성은 본 발명이 속하는 기술 분야의 당업자가 본 발명의 그 기술적 사상이나 필수적 특징을 변경하지 않고서 다른 구체적인 형태로 실시될 수 있다는 것을 이해할 수 있을 것이다.

[0117] 그러므로 이상에서 기술한 실시예들은 모든 면에서 예시적인 것이며 한정적인 것이 아닌 것으로서 이해되어야 하고, 본 발명의 범위는 상기 상세한 설명보다는 후술하는 특허청구범위에 의하여 나타나며, 특허청구범위의 의미 및 범위 그리고 그 등가 개념으로부터 도출되는 모든 변경 또는 변형된 형태가 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 한다.

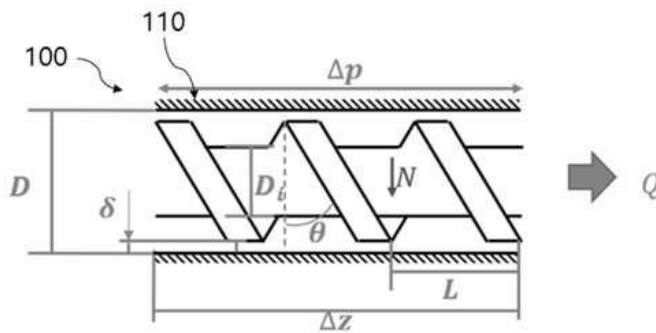
부호의 설명

[0118] 100 : 싱글스크류

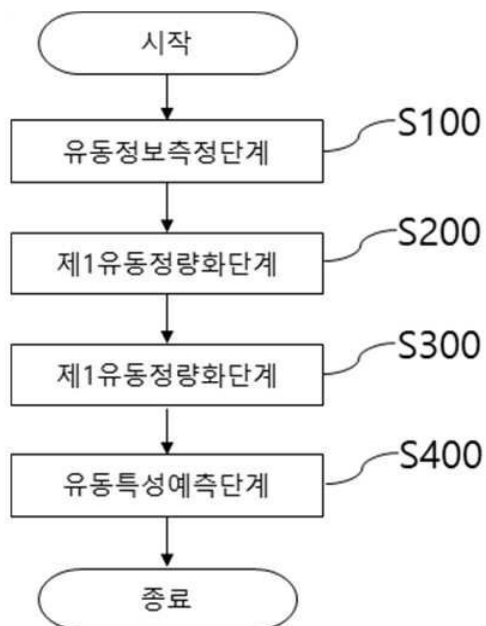
110 : 배럴

도면

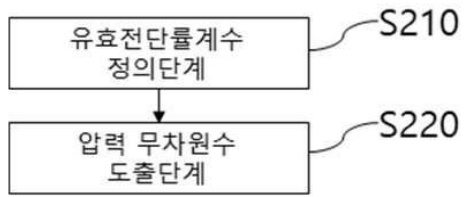
도면1



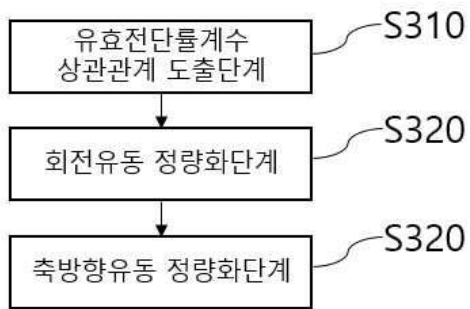
도면2



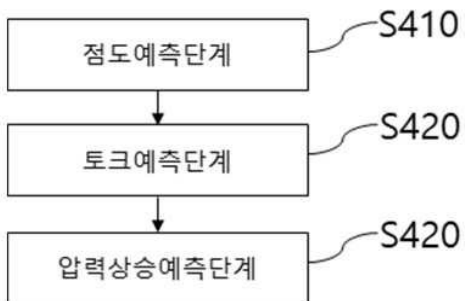
도면3



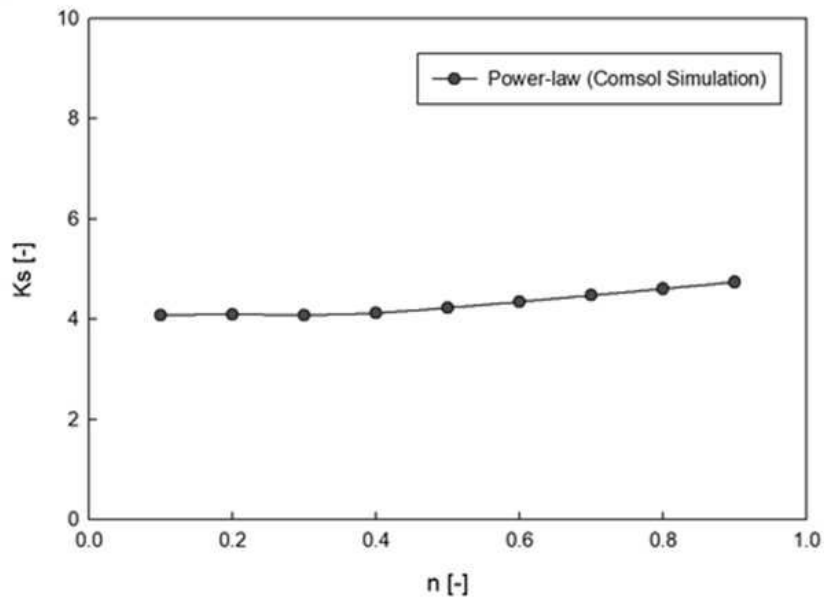
도면4



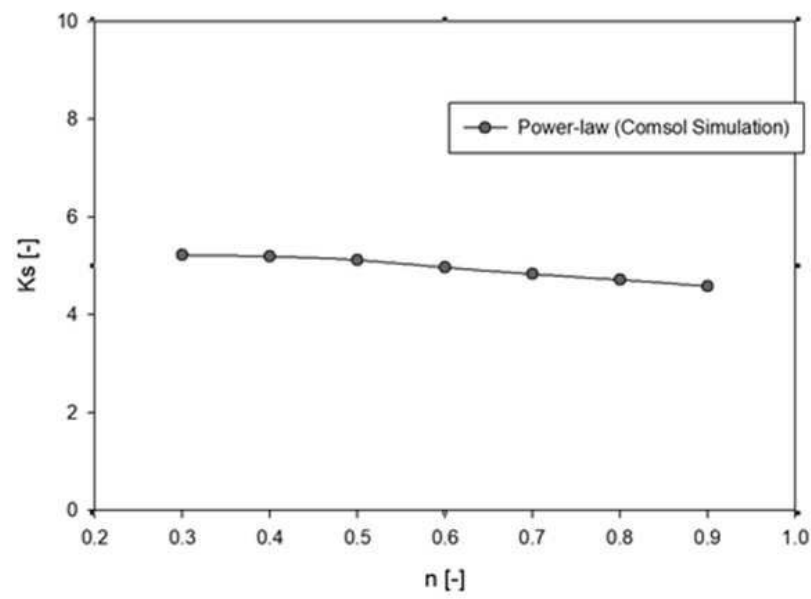
도면5



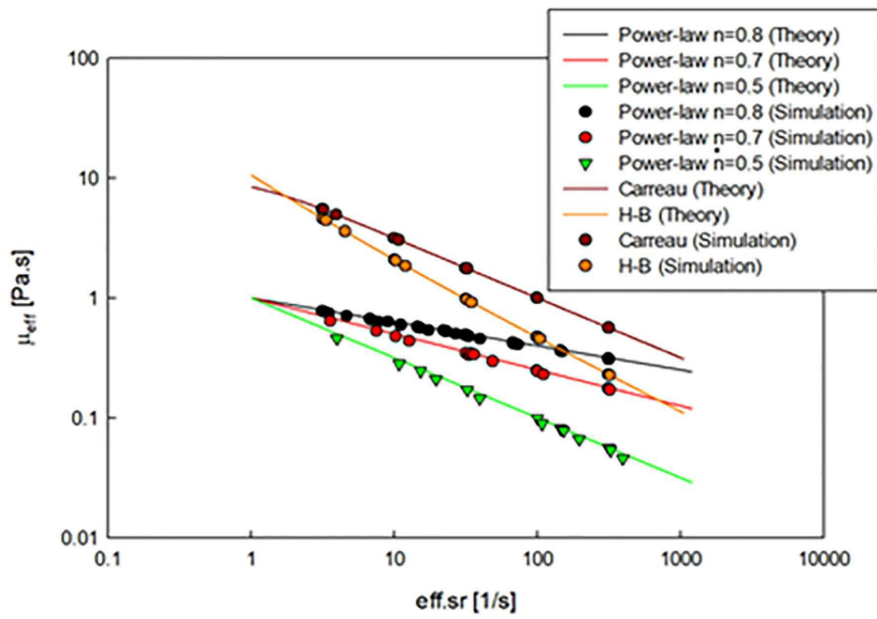
도면6



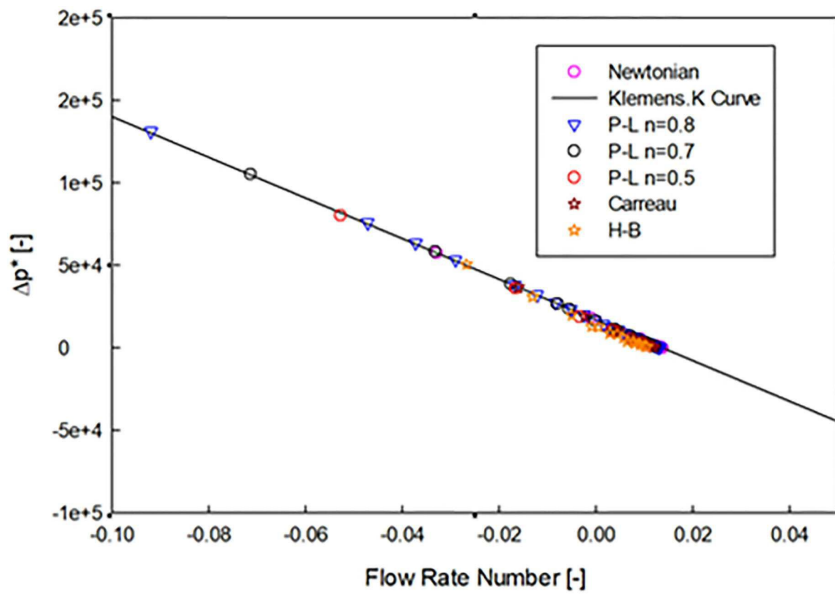
도면7



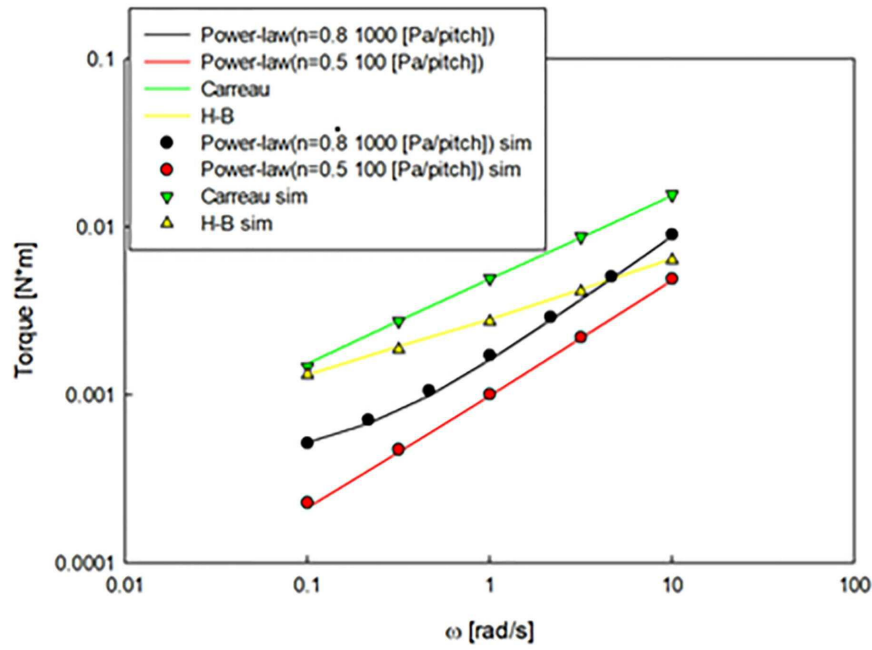
도면8



도면9



도면10



도면11

