



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2009-0040814
(43) 공개일자 2009년04월27일

(51) Int. Cl.

G06F 17/18 (2006.01) G06F 17/10 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2007-0106344

(22) 출원일자 2007년10월22일

심사청구일자 2007년10월22일

(71) 출원인

고려대학교 산학협력단

서울 성북구 안암동5가1 고려대학교 내

(72) 발명자

정현욱

고려대학교 공과대학 화공생명공학과 공학관 221호

현재천

고려대학교 공과대학 화공생명공학과 공학관 705호

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

민영준, 최관락, 송인호

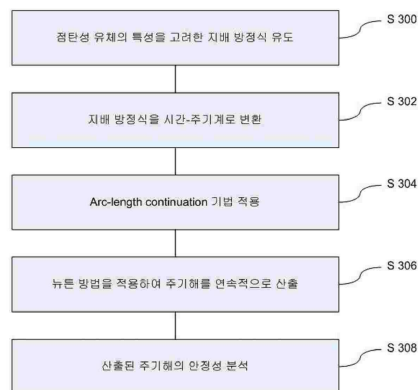
전체 청구항 수 : 총 15 항

(54) 고분자 공정에서 발생하는 연신공명 불안정성 분석 방법 및 이를 기록한 기록매체

(57) 요약

본 발명은 고분자 공정에서 발생하는 연신공명 불안정성에 대한 분석 방법 및 이의 기록매체를 개시한다. 본 발명은 고분자 공정에서 발생하는 연신공명을 분석하는 방법으로서, (a) 유체 특성을 고려하여 유도된 지배 방정식을 시간-주기계로 변환하는 단계-상기 시간-주기계는 다이출구와 권취점에서의 속도비인 연신비를 연신 공명이 발생하는 경우에 주기적 특성을 갖는 종속변수로 설정함- 및 미리 설정된 알고리즘에 따라 상기 연신비를 이용하여 극한 순환(limit cycle) 주기해를 직접적으로 산출하는 단계를 포함한다. 본 발명에 따르면 고분자 공정에서의 연신공명을 손쉽게 분석할 수 있는 장점이 있다.

대표도 - 도3



(72) 발명자

이주성

대전 유성구 문지동 104-1 LG화학 기술연구원

신동명

고려대학교 공과대학 화공생명공학과 유변공정동력
학 연구실공학관 739호

윤장호

고려대학교 공과대학 화공생명공학과 유변공정동력
학 연구실공학관 739호

특허청구의 범위

청구항 1

고분자 공정에서 발생하는 연신공명 불안정성 분석 방법

- (a) 유체 특성을 고려하여 유도된 지배 방정식을 시간-주기계로 변환하는 단계-상기 시간-주기계는 다이출구와 권취점에서의 속도비인 연신비를 연신 공명이 발생하는 경우에 주기적 특성을 갖는 종속변수로 설정함-; 및
- (b) 미리 설정된 알고리즘에 따라 상기 연신비를 이용하여 극한 순환(limit cycle) 주기해를 산출하는 단계를 포함하는 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

- (c) 상기 산출된 극한 순환 주기해가 안정한지 여부를 판단하는 단계를 더 포함하는 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

- 상기 유체는 점탄성 유체이며, 상기 지배 방정식은 연속식, 운동식, 구성 방정식을 중 적어도 하나를 포함하는 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법.

청구항 4

제3항에 있어서,

- 상기 운동식은 유변학적 힘 및 이차적인 힘이 반영되는 을 포함하여 이차적인 힘(여기서는 중력, 관성력, 에어 드래그(공기저항의개념) 등)이 반영되는 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

- 상기 (b) 단계는 호 길이 계속(arc-length continuation) 기법에 따른 뉴튼 방법을 통해 상기 연신비를 변화시켜가며 주기해를 연속적으로 산출하는 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

- 상기 (b) 단계는 산출되는 주기해 중 특정 주기해를 얻기 위해 상기 시간-주기계에서의 종속변수 중 하나를 미리 고정하는 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법.

청구항 7

제6항에 있어서,

- 상기 고정되는 종속변수는 상기 권취점에서의 방사면적 수치인 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법.

청구항 8

제5항에 있어서,

- 미리 설정된 예측 기법을 통해 상기 뉴튼 방법의 초기값을 결정하는 단계를 더 포함하는 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법.

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 주기해는 공정이 주기적인 불안정성이 발생할 때 얻어지는 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법.

청구항 10

제2항에 있어서,

상기 (c) 단계는,

(c1) 상기 (b) 단계를 통해 얻어지는 자코비(Jacobian) 행렬을 한 주기 동안 적분하여 모노드로미(Monodromy) 행렬을 산출하는 단계; 및

(c2) 상기 한 주기 동안 주기적으로 변하는 해들을 모두 누적하여 주기 전체의 주기해에 대한 안정성을 분석하는 단계를 포함하는 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 (c2) 단계는 상기 모노드로미 행렬의 고유값을 기반으로 고분자 공정에서 발생하는 연신공명 주기해의 안정성을 판별하는 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법.

청구항 12

고분자 공정에서의 연신공명 불안정성을 분석하기 위하여 디지털 처리 장치에 의해 실행될 수 있는 명령어들의 프로그램이 유형적으로 구현되어 있으며 디지털 처리 장치에 의해 판독될 수 있는 기록매체로서,

(a) 유체 특성을 고려하여 유도된 지배 방정식을 시간-주기계로 변환하는 단계-상기 시간-주기계는 다이출구와 권취점에서의 속도비인 연신비를 연신 공명이 발생하는 경우에 주기적 특성을 갖는 종속변수로 설정함-; 및

(b) 미리 설정된 알고리즘에 따라 상기 연신비를 이용하여 극한 순환(limit cycle) 주기해를 산출하는 단계를 수행하는 컴퓨터 판독 가능한 기록매체.

청구항 13

고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법으로서,

(a) 유체 특성을 고려하여 유도된 지배 방정식을 시간-주기계로 변환하는 단계; 및

(b) 연신 공명이 발생하는 경우에 주기적 특성을 갖는 종속변수를 이용하여 외란의 도입 없이 불안정한 영역에서의 극한 순환 주기해를 연속적으로 산출하는 단계를 포함하는 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법.

청구항 14

제13항에 있어서,

(c) 상기 (b) 단계에서 얻어진 제1 행렬을 한 주기 동안 적분하여 제2 행렬을 획득하는 단계; 및

(d) 상기 한 주기 동안 주기적으로 변하는 해들을 모두 누적하여 획득한 고유값을 상기 제2 행렬의 고유값으로 하여 안정성을 분석하는 단계를 더 포함하는 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법.

청구항 15

제14항에 있어서,

상기 (d) 단계는 상기 제2 행렬의 고유값을 바탕으로 상기 획득한 고유값의 절대값이 미리 설정된 값보다 작은 경우에는 상기 극한 순환 주기해가 안정한 것으로 판별하며, 상기 획득한 고유값이 미리 설정된 값보다 큰 경우 불안정하다고 판별하는 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법.

명세서

발명의 상세한 설명

기술 분야

- <1> 본 발명은 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법 및 이를 기록한 기록매체에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 방사 공정의 연신 공명 주기해를 직접 도출하고, 이를 통해 방사 공정의 안정성을 분석하는 방법에 관한 것이다.

배경 기술

- <2> 전형적인 일축 신장 변형 공정(uniaxial extensional deformation process)인 섬유 방사 공정은 도 1에 도시된 바와 같이, 다이(die, 100)로부터 연속적으로 배출되는 고분자 용융체(polymer melt)를 흐름 축방향으로 신장시킴으로써 섬유를 생산한다.
- <3> 권취점(take-up, 102)에서 잡아당기는 힘에 의해 섬유가 축방향으로 신장되고 그 결과 섬유 내의 분자 배향을 촉진시켜서 제품의 성질을 좋게 만들게 되는데, 이는 신장유동이 지배적인 필름 캐스팅(film casting), 필름 블로잉(film blowing)공정 등과 같은 다른 고분자 공정과 기본적으로 같은 동력학적 특성을 가지고 있다.
- <4> 다이 출구와 권취점에서의 속도 비인 연신비(drawdown ratio, r)를 조정함으로써 섬유 방사 공정과 제품 물성을 설계대로 제어할 수 있다.
- <5> 섬유의 단면과 방사사선내 힘이 주기적으로 변동하는 연신 공명(draw resonance)이 발견된 이래, 많은 연구 그룹에 의해 섬유 방사 공정의 연신 공명 불안정성에 대한 이론적, 실험적 연구가 진행되어 왔다.
- <6> 연신 공명은 임계점 이상에서 필름의 두께나 힘 등이 주기적으로 변하는 불안정성으로서, 엄밀한 bifurcation (분기) 이론을 적용하여 이러한 불안정성이 초임계 호프 분기(supercritical Hopf bifurcation)임이 밝혀졌다.
- <7> 연신 공명이 발생하는 물리적 원인은 유체 변형 영역을 지나가는 다양한 운동학적 파동(kinematic waves)의 특성들로부터 규명되었으며, 이를 바탕으로 연신 공명 지시자(indicator)가 개발되었다. 나아가 신장 변형 공정들의 불안정성을 분석하기 위한 선형/비선형 안정성, 주파수 응답(frequency response)에 의한 민감도 분석 등이 체계화되고 있는 실정이다.
- <8> 상기한 연신 공명 불안정성에 대한 선형 안정성 및 민감도 분석은 과도해(transition solution)를 통해 수행된다. 그러나 연신 공명 불안정성에 대한 선형 안정성 및 민감도 분석과 과도해 도출은 최근 결정화를 도입한 시스템을 해석할 정도로 진보되어 왔으나, 분기 이론(bifurcation theory)을 이용한 연신 공명의 limit cycle(이하 “극한 순환”이라 함) 그 자체에 대한 안정성 분석은 아직 해석의 어려움으로 해결되지 못한 상태이다.
- <9> 도 2에서 도시된 바와 같이, 연신 공명의 주기해는 임의의 불안정한 정상상태 조건에서 약간의 외란(disturbance)을 주어 시스템의 해가 시간에 따라 어떻게 변화하는지를 분석하는 과도 수치모사 방법으로 얻어질 수 있다.
- <10> 하지만 이러한 수치 방법은 궁극적으로 극한 순환의 해를 얻기까지 계산 시간이 많이 소요되고, 항상 안정한 극한 순환만을 얻을 수 있어 공정이 불안정한 극한 순환을 가질 가능성이 있는지 판단할 수 없다.
- <11> 즉, 엄밀한 분기 이론에 의해 연신 공명의 주기해에 대한 동특성을 분석하는데 있어서 기존 정상상태의 안정성을 분석할 수 있는 전형적인 방법을 적용할 수 없기에 새로운 주기해 확보 및 안정성 분석 방법이 개발될 필요성이 높아지게 되었다.

발명의 내용

해결 하고자하는 과제

- <12> 상기한 바와 같은 종래기술의 문제점을 해결하기 위해, 본 발명은 고분자 공정의 불안정한 영역에서의 비선형 안정성과 동특성을 용이하게 분석할 수 있는 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법 및 이를 기록한 기록매체를 제안하고자 한다.
- <13> 본 발명의 다른 목적은 공정 제어 및 설계에 유용하게 적용될 수 있으며 신장 거동이 중요한 요소가 되는 다른 공정의 분석에도 적용될 수 있는 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법 및 이를 기록한 기록매체를

제공하는 것이다.

과제 해결수단

- <14> 상기한 목적을 달성하기 위해 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따르면, 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법으로서, (a) 유체 특성을 고려하여 유도된 지배 방정식을 시간-주기계로 변환하는 단계-상기 시간-주기계는 다이출구와 권취점에서의 속도비인 연신비를 연신 공명이 발생하는 경우에 주기적 특성을 갖는 종속변수로 설정함-; 및 (b) 미리 설정된 알고리즘에 따라 상기 연신비를 이용하여 극한 순환(limit cycle) 주기해를 산출하는 단계를 포함하는 고분자 공정의 주기해 안정성 분석 방법이 제공된다.
- <15> 본 발명의 다른 측면에 따르면, 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성을 분석하기 위하여 디지털 처리 장치에 의해 실행될 수 있는 명령어들의 프로그램이 유형적으로 구현되어 있으며 디지털 처리 장치에 의해 관독될 수 있는 기록매체로서, (a) 유체 특성을 고려하여 유도된 지배 방정식을 시간-주기계로 변환하는 단계-상기 시간-주기계는 다이출구와 권취점에서의 속도비인 연신비를 연신 공명이 발생하는 경우에 주기적 특성을 갖는 종속변수로 설정함-; 및 (b) 미리 설정된 알고리즘에 따라 상기 연신비를 이용하여 극한 순환(limit cycle) 주기해를 산출하는 단계를 수행하는 컴퓨터 관독 가능한 기록매체가 제공된다.
- <16> 본 발명의 다른 측면에 따르면, 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법으로서, (a) 유체 특성을 고려하여 유도된 지배 방정식을 시간-주기계로 변환하는 단계; 및 (b) 연신 공명이 발생하는 경우에 주기적 특성을 갖는 종속변수를 이용하여 외란의 도입 없이 불안정한 영역에서의 극한 순환 주기해를 연속적으로 산출하는 단계를 포함하는 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법이 제공된다.

효 과

- <17> 본 발명에 따르면 고분자 공정에서의 연신공명 주기해를 용이하게 분석할 수 있는 장점이 있다.
- <18> 또한, 본 발명에 따르면 초기 외란 없이도 연신 공명 주기해의 안정성을 판별할 수 있는 장점이 있다.
- <19> 나아가 본 발명에 따르면 섬유 방사 공정뿐만 아니라 다른 고분자 공정에서 발생하는 주기 불안정성을 면밀히 분석할 수 있는 장점이 있다.

발명의 실시를 위한 구체적인 내용

- <20> 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 실시예를 가질 수 있는 바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 상세한 설명에서 자세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 각 도면을 설명하면서 유사한 참조부호를 유사한 구성요소에 대해 사용하였다.
- <21> 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "연결되어" 있다거나 "접속되어" 있다고 언급된 때에는, 그 다른 구성요소에 직접적으로 연결되어 있거나 또는 접속되어 있을 수도 있지만, 중간에 다른 구성요소가 존재할 수도 있다고 이해되어야 할 것이다. 반면에, 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "직접 연결되어" 있다거나 "직접 접속되어" 있다고 언급된 때에는, 중간에 다른 구성요소가 존재하지 않는 것으로 이해되어야 할 것이다.
- <22> 본 출원에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 출원에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.
- <23> 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥 상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.
- <24> 이하, 본 발명의 바람직한 실시예를 첨부한 도면들을 참조하여 상세히 설명하기로 한다. 본 발명을 설명함에 있어 전체적인 이해를 용이하게 하기 위하여 도면 번호에 상관없이 동일한 수단에 대해서는 동일한 참조 번호를 사용하기로 한다.

- <25> 본 발명은 고분자 공정에서 이용되는 유체의 특성을 고려하여 연신공명의 불안정성을 직접 분석하는 것이다. 하기에서는 고분자 공정 중 섬유 방사(fiber spinning) 공정에서의 점탄성(viscoelasticity) 유체를 이용하여 안정성을 분석하는 것으로 설명할 것이나, 본 발명은 이에 한정되지 않으며 다양한 고분자 공정에 적용될 수 있다는 점을 당업자는 이해하여야 할 것이다.
- <26> 도 3은 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따른 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 방법의 순서도이다.
- <27> 도 3은 점탄성 유체를 이용한 섬유 방사 공정에서 안정성 분석 어플리케이션을 통해 극한 순환 주기해를 산출하고 또한 이를 통해 안정성을 분석하는 과정을 도시한 것이다.
- <28> 도 3을 참조하면, 본 발명은 우선, 섬유 방사 공정에서 점탄성 유체 특성을 고려한 지배 방정식을 유도한다(단계 300).
- <29> 본 발명에 따른 지배 방정식은 등온 섬유 방사 공정의 지배 방정식이며, 하기의 수학식 1 내지 3과 같이 연속식, 운동식, 구성 방정식으로 구성될 수 있다.
- <30> 이때, 간편한 계산을 위해 운동식에 있어 유변학적 힘과 관성력(inertia)을 제외한 다른 이차적인 힘들은 운동식에 포함되지 않는다.
- <31> 이는 다른 이차적인 힘들이 본 발명에서 얻고자 하는 분석 방법론에 영향을 미치지 않기 때문이다.

수학식 1

$$\text{연속식: } \frac{\partial a}{\partial \tilde{t}} + \frac{\partial}{\partial z}(a v) = 0$$

<32>

수학식 2

$$\text{운동식: } C_{in} \left(\frac{\partial v}{\partial \tilde{t}} + v \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial z}(a v), \text{ 여기서, } C_{in} = \frac{\rho V_0 L}{2\eta}$$

<33>

수학식 3

$$\text{구성 방정식: } K\tau + De \left(\frac{\partial \tau}{\partial \tilde{t}} + v \frac{\partial \tau}{\partial z} - 2(1-\xi)\tau \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{\partial v}{\partial z}$$

$$\text{여기서, } K = \exp(2\varepsilon De \tau), \quad De = \frac{\lambda V_0}{L}$$

<34>

<35> 수학식 1 내지 3에 있어서 경계조건은 아래의 수학식 4와 같다.

수학식 4

$$\text{경계조건: } v=1, a=1, \tau=\tau_0 \quad \text{at } z=0$$

<36>

$$v=r \quad \text{at } z=1$$

<37>

상기 수학식 1 내지 4에 있어서, a 는 무차원 방사 단면적 ($a = A/A_0$), v 는 무차원 방사 속도 ($v = V/V_0$),

τ 는 무차원 응력 텐서 ($\tau = \frac{\sigma L}{2\eta V_0}$), $\tilde{t}$ 는 무차원 시간 ($\tilde{t} = \frac{t V_0}{L}$), z 는 무차원 거리 ($z = Z/L$), C_{in} 은 관성력

계수, De는 Deborah 수, λ 는 폴립시간, ε 과 ξ 는 PTT 모델 변수, r은 연신비 ($r=V_L/V_0$)를 각각 뜻함. 또한, 하첨자 0, L은 방사구위치와 권취점 위치를 각각 나타낸다.

<38> 한편, 연속식, 운동식, 구성방정식으로 구성되는 지배방정식은 수학적식 5와 같이, 다시 한번 무차원화 시킨 후 벡터 형식으로 간략화된다.

수학적식 5

$$\frac{\partial \underline{y}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} a \\ v \\ \tau \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} -\frac{\partial(a)}{\partial z} \\ \frac{1}{a} \frac{1}{C_{in}} \frac{\partial(a\tau)}{\partial z} - v \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{1}{De} \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{K\tau}{De} - v \frac{\partial \tau}{\partial z} + 2(1-\xi)\tau \frac{\partial v}{\partial z} \end{bmatrix} = T \underline{R}(\underline{y}, r)$$

<39>

<40> 여기서, $t=\tilde{t}/T$, T는 주기이고 $\underline{y}$ 는 종속변수 a, v, τ 를 간단하게 표현한 종속변수 벡터이다.

<41> 섬유 방사 공정이 불안정하여 연신 공명이 발생하는 경우, 종속변수 y는 최종적으로 주기적 특성을 가지기 때문에 수학적식 6과 같은 주기 관계를 만족하게 된다.

<42> 즉, 상기 단계 300 이후 본 발명은 지배방정식을 시간-주기계로 변환한다(단계 302).

수학적식 6

$$\underline{y}(t+1) = \underline{y}(t)$$

<43>

<44> 여기서, 시간-주기계로 변환한 식은 수학적식 5이며, 수학적식 6은 주기해를 만족시키기 위한 조건이다. 즉, 수학적식 6에 해당하는 내용은 극한 순환의 해가 구해질 때의 관계식이며, 이때, 극한 순환은 주기적으로 변하는 해가 구해지므로, 처음값(y(t))과 마지막값(y(t+1), 1은 무차원화된 1주기의 시간)이 같아야 한다는 것을 의미한다.

<45> 수학적식 6과 같은 간략한 관계식의 도입은 외란을 도입하여 진동이 계속 발전하여 주기와 진폭이 일정한 극한 순환(limit cycle)을 얻어내는 동적 과도 수치모사(dynamic transient simulation) 방법과 달리 바로 극한 순환 주기해를 얻기 위함이다.

<46> 또한, 상기한 시간-주기계에 있어 종속변수 또는 매개변수를 정하여 해당 변수가 변함에 따라 해당되는 주기해를 연속적으로 구할 수 있다. 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따르면 섬유 방사 공정과 제품의 물성을 제어하는 연신비를 주기해를 얻기 위해 변화시키는 종속변수로 설정한다.

<47> 이와 같이, 구성된 시간-주기계에서는 무차원 시간이 0과 1일때의 해가 같게 되므로 수학적식 6은 아래의 수학적식 7과 같이 정리될 수 있다.

수학적식 7

$$\underline{F}(\underline{y}_0, T, r) = \underline{y}(1) - \underline{y}(0) = \underline{y}_T - \underline{y}_0 = 0$$

<48>

<49> 수학적식 7을 통해 얻어지는 주기해 중 특정 주기해를 얻기 위해 종속변수 중 하나를 아래의 수학적식 8과 같은 앵커식(anchor) 또는 상조건(phase condition)으로 반드시 일정한 값으로 고정한다.

수학적식 8

$$\underline{N}(\underline{y}_{0,k}) = \underline{y}_{0,k} - n_k$$

<50>

<51> 여기서, n_k 는 권취점에서의 방사면적 수치로 본 발명은 이를 0.0402로 고정하였다.

<52> 본 발명은 상기한 지배방정식을 시간-주기계로 변환한 후에 불안정한 영역에서 종속변수의 주기해, 연신비 및 주기 등을 연속적으로 획득하기 위해 가상의 경로인 호 길이 계속(arc-length continuation) 기법을 적용한다(단계 304).

<53> 이 때, 모든 종속변수의 변화가 호 길이의 변화와 같다고 가정할 때, 아래의 수학적식 9가 유도될 수 있다.

수학적식 9

$$\alpha(\underline{y}_0, T, r) = \left(\frac{\partial y}{\partial s} \right)_{s_0} \cdot (\underline{y} - \underline{y}_0) + \left(\frac{\partial T}{\partial s} \right)_{s_0} (T - T_0) + \left(\frac{\partial r}{\partial s} \right)_{s_0} (r - r_0) - (s - s_0) = 0$$

<54>

<55> 여기서, $s - s_0$ 는 호의 길이 변화를 나타낸다.

<56> 이와 같은 방법은 종속변수의 변화에 따라 종속변수들이 중복해를 갖거나 급격하게 변화하는 등 해를 구하기 어려운 경우에 쉽게 해를 얻을 수 있도록 해준다.

<57> 이후, 본 발명은 뉴턴 방법을 통해 연신비(특정 분기 변수)를 변화시켜가며 주기해를 연속적으로 산출한다(단계 306).

<58> 상기한 수학적식 8 및 9를 뉴턴 방법(Newton's Method)을 사용하여 반복 계산함으로써 원하는 주기해를 용이하게 산출할 수 있다.

<59> 단계 306에서 아래의 수학적식 10이 이용될 수 있다.

수학적식 10

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial F}{\partial y_0} & \frac{\partial F}{\partial T} & \frac{\partial F}{\partial r} \\ \frac{\partial N}{\partial y_0} & \frac{\partial N}{\partial T} & \frac{\partial N}{\partial r} \\ \frac{\partial G}{\partial y_0} & \frac{\partial G}{\partial T} & \frac{\partial G}{\partial r} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta y_0 \\ \Delta T \\ \Delta r \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} F \\ N \\ G \end{pmatrix}$$

<60>

<61> 여기서, N과 G 수학적식 8과 수학적식 9의 함수식을 통칭하는 것이다.

<62> 수학적식 10의 각 종속변수들에 대한 초기치를 대입하여 수렴성이 보장될 때까지 종속변수들을 새롭게 갱신하는 방법으로 해를 구할 수 있다.

<63> 일반적으로 뉴턴 방법으로 계산을 성공적으로 수행하기 위해서는 적절한 초기값의 선택이 매우 중요하다.

<64> 그러나 적절한 초기값을 정확하게 얻어낼 수 없는 경우가 많기 때문에 뉴턴 방법으로 계산을 수행하기에 앞서, 본 발명은 예측 기법(predictor step)을 계산에 반영하여 입력 초기값을 계산에 반영한다.

<65> 상기한 뉴턴 방법을 통해 얻어진 주기해는 섬유 방사 공정이 안정적인지 불안정한지에 관계없이 얻어질 수 있어 초기 외란에 의존하여 과도해를 얻는 과도 수치모사에 비해 공정 해석 범위를 더욱 확대시켜준다.

<66> 상기와 같이 얻어진 주기해에 대해 본 발명은 이러한 주기해에 대한 안정성 분석을 포함한다(단계 308).

<67> 안정성의 분석 방법은 다음과 같다.

<68> 주기해를 계산하는 과정에서 다음의 수학적식 11과 같이, 자코비(Jacobian) 행렬이 얻어지는데, 자코비 행렬을 한 주기 동안 적분함에 따라 수학적식 12와 같이 모노드롬(Monodromy) 행렬을 얻을 수 있다.

수학적식 11

$$\frac{\partial F_i}{\partial y_{0j}} = \frac{\partial y_i}{\partial y_{0j}} - \delta_{ij} = A_{ij}(1) - \delta_{ij}$$

<69>

수학식 12

$$\frac{dA}{dt} = J_R A \text{ with } A(0) = I, \text{ 여기서, } J_{R\ddot{v}} = T \frac{\partial R_i}{\partial y_j}$$

<70>

<71> 여기서, A는 모노드로미(monodromy) 행렬, I 및 δ는 단위행렬, J는 자코비(jacobian) 행렬을 나타낸다.

<72> 일반적으로 고분자 공정의 선형 안정성 분석은 정상 상태에서 얻어진 해의 자코비 행렬로부터 고유값(eigenvalue, 또는 Floquet multipliers라 부름)을 얻어냄으로써 공정의 안정/불안정성한 영역을 구분할 수 있다.

<73> 본 발명에 따르면 한 주기 동안 주기적으로 변하는 해들을 모두 누적함으로써 그 주기 전체에 대한 안정성을 분석할 수 있다.

<74> 상기한 단계 308에서 본 발명에 따른 안정성 분석 어플리케이션은 모노드로미 행렬의 고유값을 바탕으로, 모든 고유값의 절대값이 1보다 작은 경우에는 극한 순환이 안정, 임의의 고유값이 1보다 큰 경우에는 불안정한 것으로 판단한다.

<75> 이때, 고유치들 중 하나는 기준값으로서 언제나 1의 값을 갖게 된다.

<76> 상기한 안정성 분석은 아래의 논문에 기재된 수학식 13을 통해 확인할 수 있다.

<77> M. Kub, Computational Methods in Bifurcation Theory and Dissipative Structures, Springer-Verlag New York Inc., 1983

수학식 13

Unstable: any $|\Omega_i| > 1 \text{ except } \Omega_1$

Stable: all $|\Omega_i| < 1 \text{ except } \Omega_1$

<78>

<79> 본 발명에 따른 방법을 적용한 안정성 분석의 실험 결과는 도 4 내지 도 8과 같이 나타난다.

<80> 본 발명에 따른 방법을 수행한 결과, 점탄성이 포함되지 않은 Newtonian 유체의 경우, 도 4 내지 도 5의 결과와 점탄성이 포함된 경우인 도 6 내지 도 7의 결과를 얻어낼 수 있었다.

<81> 연신비가 커짐에 따라 공정 자체의 불안정성은 커지면서 한 주기 동안에 더 급격한 진폭 변화를 갖는 해들을 직접적으로 얻어내게 되는데, 오히려 이러한 극한 순환 주기해들의 안정성은 Floquet multipliers(플로케 배합기)를 통해 더 안정해진다는 것을 새롭게 밝혔다.

<82> 또한 점탄성이 포함되지 않은 경우와 포함된 경우를 함께 비교해서 불안정한 공정 영역에서 한 주기 동안에 더 급격한 변화를 갖는 해들이 더 안정한 주기해를 갖는다는 것을 다시 한번 확인할 수 있다(도 8 참조).

<83> 본 발명에 따르면 첫째로 각 변수를 변화시킴에 따라 매번 주기해를 초기 외란부터 출발시켜 해를 얻는 과도해 도출 방법을 이용할 필요 없이 해당되는 주기해를 바로 얻어낼 수 있다는 장점이 있고, 둘째로 기존의 안정성 분석방법으로는 판별해 낼 수 없었던 주기해에 대한 안정성을 함께 판별할 수 있어 연신 공명 불안정성에 대한 깊은 이해가 가능하게 되었다는 것이다. 이러한 불안정한 영역에서의 주기해의 거동과 그 안정성을 예측함으로써 실제 공정의 해석에 있어서도 큰 도움을 줄 수 있다.

<84> 상기한 본 발명의 바람직한 실시예는 예시의 목적을 위해 개시된 것이고, 본 발명에 대해 통상의 지식을 가진 당업자라면 본 발명의 사상과 범위 안에서 다양한 수정, 변경, 부가가 가능할 것이며, 이러한 수정, 변경 및 부가는 하기의 특허청구범위에 속하는 것으로 보아야 할 것이다.

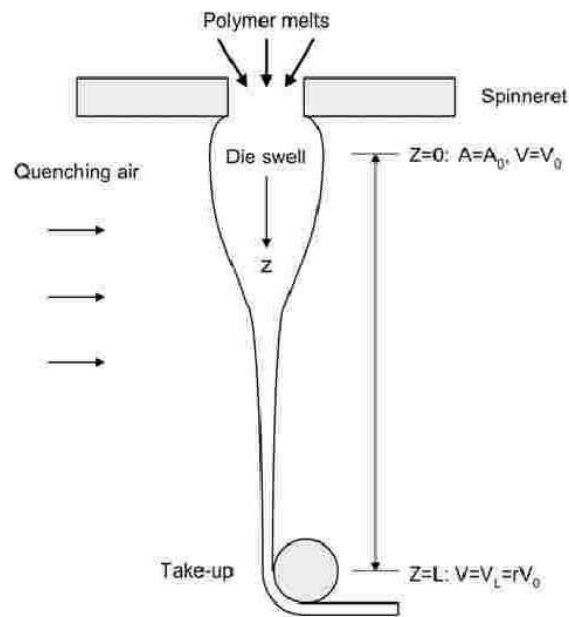
도면의 간단한 설명

<85> 도 1은 일반적인 섬유 방사 공정의 일예를 도시한 도면.

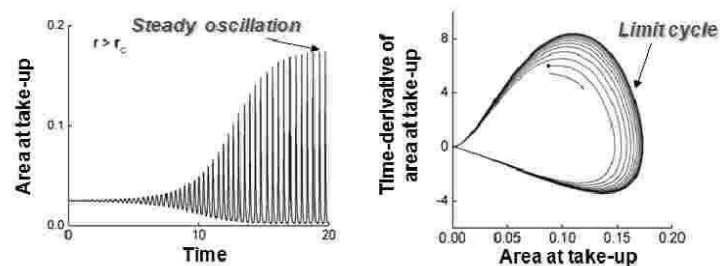
- <86> 도 2는 임의의 불안정한 정상상태 조건에서 약간의 외란(disturbance)을 주어 시스템의 해가 시간에 따라 어떻게 변화하는지를 분석하는 과도 수치모사 방법을 도시한 도면.
- <87> 도 3은 본 발명에 따른 고분자 공정에서의 연신공명 불안정성 분석 과정의 순서도.
- <88> 도 4 내지 도 5는 점탄성이 포함되지 않은 Newtonian 유체의 경우의 안정성 실험 결과를 도시한 도면.
- <89> 도 6 내지 도 7은 점탄성이 포함되는 경우의 안정성 실험 결과를 도시한 도면.
- <90> 도 8은 점탄성이 포함되지 않은 경우와 포함된 경우를 함께 비교하여 불안정한 공정 영역에서 한 주기 동안에 더 급격한 변화를 갖는 해들이 더 안정한 주기해를 갖는다는 것을 도시한 도면.

도면

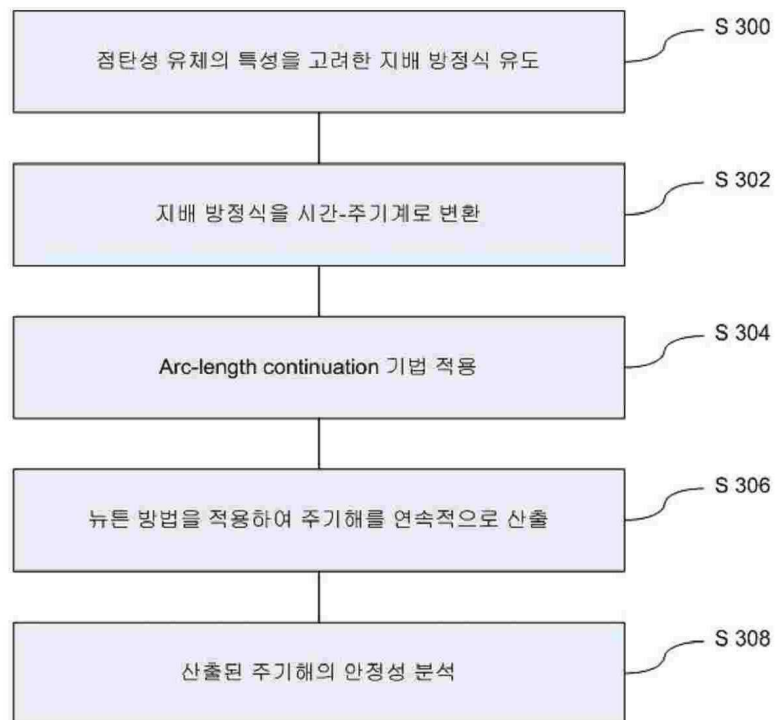
도면1



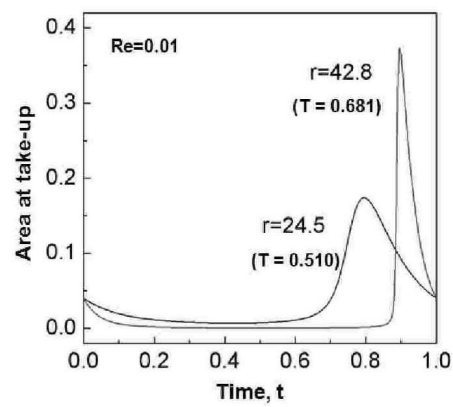
도면2



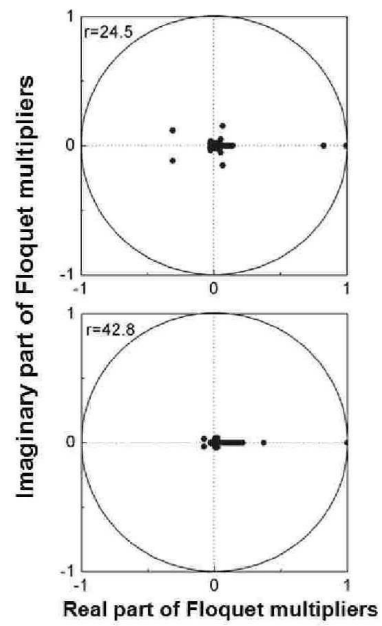
도면3



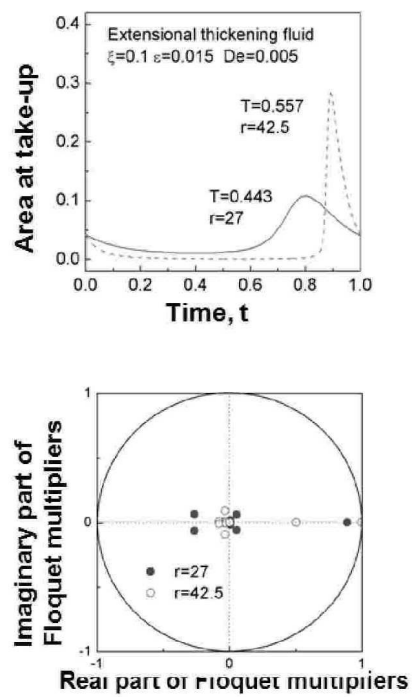
도면4



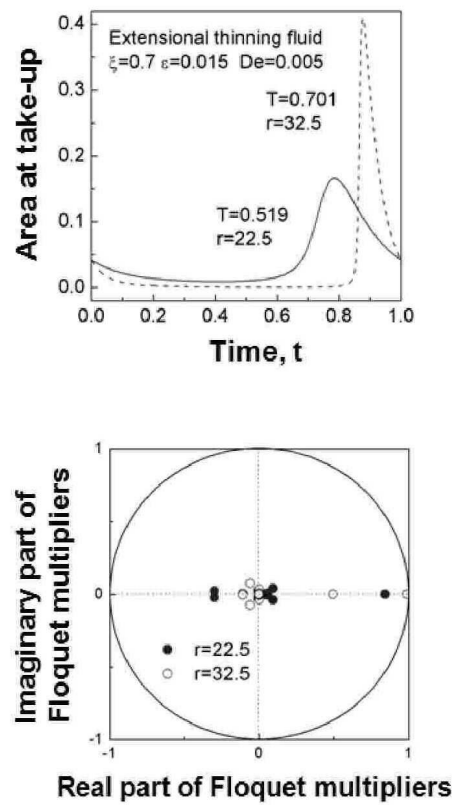
도면5



도면6



도면7



도면8

