



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0061003  
(43) 공개일자 2024년05월08일

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>(51) 국제특허분류(Int. Cl.)<br/> <i>G06F 30/20</i> (2020.01) <i>G01N 3/08</i> (2006.01)<br/> <i>G06F 111/10</i> (2020.01) <i>G06F 119/14</i> (2020.01)</p> <p>(52) CPC특허분류<br/> <i>G06F 30/20</i> (2020.01)<br/> <i>G01N 3/08</i> (2013.01)</p> <p>(21) 출원번호 10-2022-0142176<br/> (22) 출원일자 2022년10월31일<br/> 심사청구일자 2022년10월31일</p> | <p>(71) 출원인<br/> <b>경상국립대학교산학협력단</b><br/> 경상남도 진주시 진주대로 501 (가좌동)</p> <p>(72) 발명자<br/> <b>전만수</b><br/> 경상남도 진주시 예나로 100, 101동 2001호<br/> <b>지수민</b><br/> 경상남도 진주시 천수로 138번길 8-1<br/> (뒷면에 계속)</p> <p>(74) 대리인<br/> <b>특허법인 태웅</b></p> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

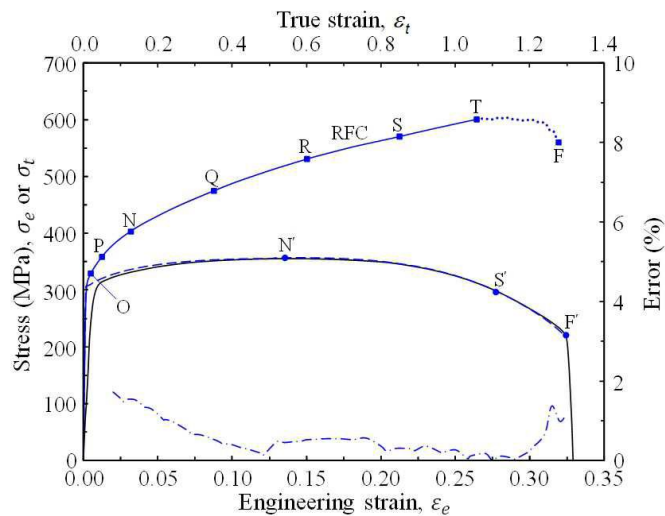
전체 청구항 수 : 총 13 항

(54) 발명의 명칭 **유동모델의 혼합접근을 이용한 금속성형 시뮬레이션**

**(57) 요약**

본 발명의 금속성형 시뮬레이션은, 시편에 대한 인장시험에 대한 정보가 입력되는 입력 단계, 인장시험의 정보에 기반하여 선택된 유동응력 모델에 적용하여 유동응력 곡선을 산출하는 피팅 단계, 피팅 단계의 유동응력곡선과 상기 인장시험을 비교하여 상기 피팅 단계의 유동응력 모델을 검증하는 검증 단계를 포함할 수 있고, 본 발명의 피팅 단계는, 혼합에 이용될 기본유동모델(FFMs, Fundamental Flow Models)을 선정하는 선택 단계, 및 선택된 기본유동모델을 혼합하여 혼합유동모델(BFM, Blended Flow Model)을 산출하고 상기 혼합유동모델을 피팅하는 단계인 혼합 단계를 포함할 수 있다.

**대표도** - 도1



(52) CPC특허분류

G01N 2203/0017 (2013.01)

G06F 2111/10 (2020.01)

G06F 2119/14 (2020.01)

(72) 발명자

**지창운**

전남 광양시 진동 6길 11 (금광블루빌아파트  
105-1102)

**변중복**

경상남도 진주시 개양로 9-5

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1415172260

과제번호 20003950

부처명 산업통상자원부

과제관리(전문)기관명 한국산업기술평가관리원

연구사업명 산업소재핵심기술개발(R&D)

연구과제명 정밀 냉간단조의 지능화 및 스마트화를 위한 금형수명 사전예지 시스템의 개발 및

응용

기 여 율 1/2

과제수행기관명 (주)풍강

연구기간 2021.01.01 ~ 2021.12.31

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1415176069

과제번호 20214000000520

부처명 산업통상자원부

과제관리(전문)기관명 한국에너지기술평가원

연구사업명 에너지인력양성(R&D)

연구과제명 자원순환(재제조)산업 고도화 인력양성

기 여 율 1/2

과제수행기관명 (사)한국건설기계재제조협회

연구기간 2021.04.01 ~ 2021.12.31

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

시편에 대한 인장시험에 대한 정보가 입력되는 입력 단계;

상기 인장시험의 정보에 기반하여 선택된 유동응력 모델에 적용하여 유동응력 곡선을 산출하는 피팅 단계;

상기 피팅 단계의 유동응력곡선과 상기 인장시험을 비교하여 상기 피팅 단계의 유동응력 모델을 검증하는 검증 단계; 를 포함하고,

상기 피팅 단계는, 혼합에 이용될 기본유동모델(FFMs, Fundamental Flow Models)을 선정하는 선택 단계, 및 선택된 기본유동모델을 혼합하여 혼합유동모델(BFM, Blended Flow Model)을 산출하고 상기 혼합유동모델을 피팅하는 단계인 혼합 단계를 포함하는 금속성형 시뮬레이션.

#### 청구항 2

제1 항에 있어서,

상기 혼합유동모델(BFMs)은, 네킹 조건(necking condition) 및 네킹점(necking point) 양측의 복수의 유동점(flow points)을 만족하도록 설정되는 금속성형 시뮬레이션.

#### 청구항 3

제2 항에 있어서,

상기 네킹 조건은 콘시데르 조건(Considere condition) 및 인장강도를 포함하고,

상기 네킹점 양측의 복수의 유동점은 프리 네킹 변형경화 영역(pre-necking strain hardening region), 및 포스트 네킹 변형경화 영역(post-necking strain hardening region) 모두에서 선택되는 금속성형 시뮬레이션.

#### 청구항 4

제1 항에 있어서,

상기 기본유동모델이 네킹 조건(necking condition)을 만족하면 자동적으로 상기 혼합유동모델도 네킹 조건을 만족하는 금속성형 시뮬레이션.

#### 청구항 5

제1 항에 있어서,

상기 기본유동모델(FFMs)은 Ludwik 모델, Hollomon 모델, Voce 모델, 및 Swift 모델 중 적어도 하나를 포함하고,

상기 혼합유동모델(BFMs)은 상기 Ludwik 모델, Hollomon 모델, Voce 모델, 및 Swift 모델 중 2개 이상의 동종 또는 이종 혼합에 의해 산출되는 금속성형 시뮬레이션.

#### 청구항 6

제1 항에 있어서,

상기 혼합유동모델(BFM)s는, 상기 기본유동모델(FFMs)의 내삽(interpolation)에 의해 산출되지 않고, 상기 기본유동모델(FFMs)의 외삽(extrapolation)에 의해 산출되는 금속성형 시뮬레이션.

#### 청구항 7

제1 항에 있어서,

상기 기본유동모델(FFMs)는 Ludwik 모델, Hollomon 모델, Voce 모델, 및 Swift 모델 중 적어도 하나를 포함하고,

상기 검증 단계에서, 상기 기본유동모델의 혼합으로 형성되는 조합 중 SSSS 혼합유동모델(BMFs)이 실제 실험 결과에 최적으로 검증되며,

상기 SSSS 혼합유동모델은 서로 다른 Swift 변형경화 지수를 가진 4개의 Swift 모델의 혼합인 금속성형 시뮬레이션.

#### 청구항 8

제1 항에 있어서,

상기 기본유동모델(FFMs)는 Ludwik 모델, Hollomon 모델, Voce 모델, 및 Swift 모델 중 적어도 하나를 포함하고,

상기 혼합유동모델(BFM)s은 상기 Hollomon 모델을 제외한 나머지 모델의 혼합으로 산출되는 금속성형 시뮬레이션.

#### 청구항 9

제1 항에 있어서,

상기 혼합유동모델(BFM)s은 상기 기본유동모델(FFMs)의 선형 조합으로 주어지고,

상기 혼합유동모델은 다음의 수학적 식 10에 의해 산출되며,

[수학적 식 10]

$$\sigma = \sum_{K=1}^N \alpha_K \sigma_K$$

여기서  $\alpha_K$  는 혼합유동모델의 혼합계수이고,  $\sigma$  은 혼합유동모델의 유동응력이며,  $\sigma_K$ 는 기본유동모델의 유동응력이고,

상기 혼합계수( $\alpha_K$ )는 다음의 수학적 식 11을 만족하는 금속성형 시뮬레이션.

[수학적 식 11]

$$\sum_{K=1}^N \alpha_K = 1$$

#### 청구항 10

제9 항에 있어서,

상기 혼합계수는 N 개의 미지수를 포함하고,

상기 혼합계수는 네킹 조건, 및 N-1 개의 응력-변형률 곡선의 점인 혼합점으로부터 결정되고,

상기 혼합점은 다음의 수학적 식 12와 같은 N-1 개의 선형 방정식을 생성하는 금속성형 시뮬레이션.

[수학적 식 12]

$$\sum_{K=1}^N \sigma_K(\varepsilon^i) \alpha_K = \sigma^i, \quad i=1,2,\dots,N-1$$

## 청구항 11

제1 항에 있어서,

상기 기본유동모델(FFMs)는 Ludwik 모델, Hollomon 모델, Voce 모델, 및 Swift 모델 중 적어도 하나를 포함하고,

상기 Ludwik, Hollomon, Voce, 및 Swift 모델의 기본유동모델(FFMs)은, 각각 다음의 수학적 식 1 내지 수학적 식 4에 의해 주어지는 금속성형 시뮬레이션.

[수학적 식 1]

$$\sigma = \sigma_L(\varepsilon) = Y_0 + L_1 \varepsilon^{n_L}$$

[수학적 식 2]

$$\sigma = \sigma_H(\varepsilon) = K \varepsilon^n$$

[수학적 식 3]

$$\sigma = \sigma_V(\varepsilon) = Y_0 + V_1 (1 - e^{-V_2 \varepsilon})$$

[수학적 식 4]

$$\sigma = \sigma_S(\varepsilon) = Y_0 (1 + S_1 \varepsilon)^{n_S}$$

(여기서, Y0는 재료의 항복 강도이고, L1 및 S1 은 각각 Ludwik 모델 상수 및 및 Swift 모델 상수이며, K 및 n 은 각각 강도 계수 및 변형경화지수이고, nL 및 nS 는 Ludwik 변형경화지수 및 Swift 변형경화지수이며, V1, V2 는 Hollomon 모델의 유동상수임)

## 청구항 12

제1 항에 있어서,

상기 기본유동모델(FFMs)는 Ludwik 모델, Hollomon 모델, Voce 모델, 및 Swift 모델 중 적어도 하나를 포함하고,

상기 검증 단계에서, 상기 기본유동모델의 혼합으로 형성되는 조합 중 LVS 혼합유동모델(BMFs)(Ludwik, Voce, 및 Swift 모델의 혼합)이 실제 실험 결과에 최적으로 검증되는 금속성형 시뮬레이션.

### 청구항 13

제12 항에 있어서,

상기 LVS 혼합유동모델의 유동응력은 다음의 수학식 13에 의해 주어지고,

[수학식 13]

$$\sigma_{LVS} = \alpha_L \sigma_L(\varepsilon) + \alpha_V \sigma_V(\varepsilon) + \alpha_S \sigma_S(\varepsilon)$$

여기서,  $\alpha_L$ ,  $\alpha_V$ , 및  $\alpha_S$  은 혼합계수(blending coefficients)이고,  $\sigma_L$ ,  $\sigma_V$ , 및  $\sigma_S$  는 Ludwik, Voce 및 Swift 유동함수이며,

상기 혼합계수( $\alpha_L$ ,  $\alpha_V$ , 및  $\alpha_S$ ) 간에는 수학식 14가 만족되는 금속성형 시뮬레이션.

[수학식 14]

$$\alpha_L + \alpha_V + \alpha_S = 1$$

### 발명의 설명

#### 기술 분야

- [0001] 본 발명은 인장시험 측면에서 거의 완전한 상온 유동모델(ACCFM)에 대한 유동모델의 혼합 접근을 이용한 금속성형 시뮬레이션에 대한 것이다.

#### 배경 기술

- [0002] 자동다단 냉간단조(automatic multi-stage cold forging)의 중요한 문제 중 하나는 큰 변형률에서의 유동응력이라 할 수 있다.
- [0003] 큰 변형률에서의 정확한 유동응력을 획득하기 위해, 성형 공정의 정밀 시뮬레이션, 균열 또는 충돌 시뮬레이션을 위한 전체 재료 정보, 및 디지털 이미지 콜리레이션 방법(DIC, Digital Image Correlation)을 포함한 측정 시스템 기술 개발 등의 연구가 이루어져왔다.
- [0004] 인장시험에서 네킹점(necking point)은 네킹 조건, 즉 콘시데르 조건(considere condition) 및 인장강도(tensile strength)를 만족해야 한다. 포스트 네킹 변형경화(post-necking strain hardening)를 이용한 큰 변형률에서의 유동 선도는, 네킹 포인트에 대한 인장시험의 의존성이 높기 때문에 쉽게 획득되기 어렵다.
- [0005] 중요한 두 개의 이슈인, 네킹 조건(necking condition), 및 네킹 전(pre-necking)과 네킹 후(post-necking) 변형경화 영역에서 선택된 대표적인 유동점(representative flow points)은, 거의 완전한 냉간 유동모델(ACCFM, Almost Complete Cold Flow Model)을 도출하는데 중요하다.
- [0006] 유동응력 획득을 위한 전통적인 기준의 Ludwik, Voce, Hollomon, 및 Swift 모델 등을 포함하는 기본 유동모델(FFMs, Fundamental Flow Models)은, 상기의 2개의 문제를 동시에 충족시키는 것이 어렵다.

### 발명의 내용

#### 해결하려는 과제

- [0007] 본 발명의 금속성형 시뮬레이션은 기존의 기본 유동모델(FFMs, Fundamental Flow Models)의 혼합 접근(blending approach)을 시도하는 것으로, 상온에서 금속 재료의 유동 거동을 실질적으로 특성화하는 거의 완전한 냉간 유동모델(ACCFM, Almost Complete Cold Flow Model)을 획득하고자 하는 것이다.

## 과제의 해결 수단

- [0008] 본 발명의 금속성형 시뮬레이션은, 시편에 대한 인장시험에 대한 정보가 입력되는 입력 단계, 인장시험의 정보에 기반하여 선택된 유동응력 모델에 적용하여 유동응력 곡선을 산출하는 피팅 단계, 피팅 단계의 유동응력곡선과 상기 인장시험을 비교하여 상기 피팅 단계의 유동응력 모델을 검증하는 검증 단계를 포함할 수 있다.
- [0009] 본 발명의 피팅 단계는, 혼합에 이용될 기본유동모델(FFMs, Fundamental Flow Models)을 선정하는 선택 단계, 및 선택된 기본유동모델을 혼합하여 혼합유동모델(BFM, Blended Flow Model)을 산출하고 상기 혼합유동모델을 피팅하는 단계인 혼합 단계를 포함할 수 있다.
- [0010] 본 발명의 혼합유동모델(BFMs)은, 네킹 조건(necking condition) 및 네킹점(necking point) 양측의 복수의 유동점(flow points)을 만족하도록 설정될 수 있다.
- [0011] 본 발명의 네킹 조건은 콘시테르 조건(Considere condition) 및 인장강도를 포함할 수 있고, 네킹점 양측의 복수의 유동점은 프리 네킹 변형경화 영역(pre-necking strain hardening region), 및 포스트 네킹 변형경화 영역(post-necking strain hardening region) 모두에서 선택될 수 있다.

## 발명의 효과

- [0012] 본 발명의 금속성형 시뮬레이션은 네킹 조건을 만족하는 기본 유동모델(FFMs) 간의 선형 조합인 일반적인 혼합 유동모델(BFM, Blended Flow Model)을 포함할 수 있다.
- [0013] 본 발명의 혼합유동모델은, 상온에서 네킹점(necking point)뿐만 아니라, 프리-네킹 영역(pre-necking region) 및 포스트-네킹 영역(post-necking region)을 포함하는 몇 개의 선택된 변형률에서의 유동응력을 만족하는 수용 가능한 거의 완전한 상온 유동모델(Almost Complete Cold Flow Model-acceptable)을 포함할 수 있다.

## 도면의 간단한 설명

- [0014] 도 1은 전형적인 변형경화 유동곡선 및 이들에 상응하는 실험 및 예측 공칭 응력변형 곡선에 대한 설명도이다.
- 도 2는 본 발명의 예측 공칭 응력-변형률 곡선의 예리 분석을 나타낸다.
- 도 3은 도 1의 O 점에서의 유동 응력을 만족시키도록 기본 유동 모델(FFMs)이 계산된 것을 나타낸다.
- 도 4는 도 1의 R 점에서의 유동 응력을 만족시키도록 기본 유동 모델(FFMs)이 계산된 것을 나타낸다.
- 도 5는 본 발명의 수용가능한 혼합 유동 모델(LVS(O-QR) BFMs) 및 수용불가능한 혼합 유동 모델(LVS(O-PQ) BFMs)에 대한 설명도이다.
- 도 6은 본 발명의 다양한 혼합 유동 모델(LVS(O) BFMs)에 대한 정보를 나타낸다.
- 도 7은 본 발명의 수용가능한 혼합 유동 모델(LVS(R-QS) BFMs) 및 수용불가능한 혼합 유동 모델(LVS(R-ST) BFMs)에 대한 설명도이다.
- 도 8은 본 발명의 기초 혼합 함수의 유동상수에 대한 하나의 실시 예이다.
- 도 9는 본 발명의 수용가능한 혼합 유동 모델(SSSS BFMs, Case A-OQT) 및 수용불가능한 혼합 유동 모델(SSSS BFMs, Case A-RST)에 대한 설명도이다.

## 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0015] 도 1 내지 도 9를 참조하여, 본 발명의 금속성형 시뮬레이션에 대해 설명한다.
- [0016] 본 발명의 금속성형 시뮬레이션은, 입력 단계, 피팅 단계, 및 검증 단계 중 적어도 하나를 포함할 수 있다.
- [0017] 입력 단계는 원통형 시편 등에 대한 인장시험에 대한 정보가 입력되는 단계일 수 있다. 입력되는 정보에는 유동 응력 곡선을 산출하는데 필요한 인장시험의 시편의 직경 및 게이지 길이 등에 대한 정보가 포함될 수 있다.
- [0018] 피팅 단계는 입력된 인장시험의 정보에 기반하여 선택된 유동응력 모델에 적용하여 유동응력 곡선을 산출하는 단계일 수 있다.
- [0019] 피팅 단계는 기존의 전통적이고 기본적인 유동모델(FFMs)를 혼합(blending)하여 산출된 혼합유동모델(BFMs)을

이용할 수 있다. 따라서, 피팅 단계는 먼저 혼합에 이용될 기본유동모델(FFMs)를 선정하는 선택 단계, 및 선정된 기본유동모델(FFMs)을 선형 조합에 의해 혼합하고 피팅하는 단계일 수 있다.

[0020] 검증 단계는 혼합 단계의 혼합유동모델의 유동곡선과 실제 인장시험의 결과를 비교하여 혼합유동모델의 정밀도 및 유효성을 검증하는 단계일 수 있다.

[0021] 체적소성가공 시뮬레이션에서 상온 유동특성과 관련된 주요 문제는, 고변형률에서의 유동응력을 획득하는 데 따르는 어려움, 유동응력의 수식적 표현 방법, 인장시험의 해석 가능 여부 등을 포함할 수 있다. 자동다단 냉간단조에 의해 단조되는 재료는 대부분 3.0 이상의 변형률을 보일 수 있다.

[0022] 큰 변형률에서의 유동곡선을 획득하고 특성화하기 위한 많은 시도가 있었다. 그러나, 상온에서 네킹점뿐만 아니라, 프리-네킹 영역 및 포스트-네킹 영역을 포함하는 몇 개의 선택된 변형률에서의 유동 응력을 동시에 만족하는 유동 모델을 구축하는 것은 어려운 문제이고, 이러한 상기 조건들을 동시에 만족하는 유동 모델을 거의 완전한 냉간 유동모델(ACCFM, Almost Complete Cold Flow Model)이라 할 수 있다.

[0023] 거의 완전한 냉간 유동모델(ACCFM, Almost Complete Cold Flow Model)은 네킹 조건뿐만 아니라 프리-네킹 영역 및 포스트-네킹 영역을 포함한 여러 선택된 변형률에서의 유동 응력을 만족시킬 수 있는 유동 모델을 의미할 수 있다.

[0024] 후술하듯, 기존의 전통적인 기본 유동모델은, 각 개별로는 네킹 조건 및 네킹의 양측면을 동시에 충족시키는 것이 어렵다는 것을 알 수 있고, 본 발명은 기존의 기본 유동모델들의 혼합을 통해 이러한 한계를 극복하고자 한다.

[0025] 본 발명의 금속성형 시뮬레이션은 네킹 조건을 만족하는 기본 유동모델(FFMs) 간의 선형 조합인 일반적인 혼합 유동모델(BFM, Blended Flow Model)을 포함할 수 있다.

[0026] 네킹 조건(necking condition), 및 프리 네킹 변형경화 영역(pre-necking strain hardening region)과 포스트 네킹 변형경화 영역(post-necking strain hardening region) 모두에서 선택된 몇 가지 대표적인 유동점(flow points)은, 거의 완전한 냉간 유동모델(ACCFM, Almost Complete Cold Flow Model)을 얻는 데 있어 두 가지 주요 문제이다. 여기서, 네킹 조건은 콘시데르 조건(Considere condition) 및 인장강도를 포함할 수 있다.

[0027] 강(예들어 AISI 1010 강) 등을 사용하여 자동다단 냉간단조(automatic multi-stage cold forging)를 수행시, 기본유동모델(FFMs, Fundamental Flow Models)은, 상기의 두 가지 주요 문제를 동시에 충족시키기 어려울 수 있다.

[0028] 본 발명은 일반적이고 범용적인 혼합유동모델(BFM, Blended Flow Model)을 제안하고, 이러한 혼합 유동모델은 네킹 조건을 만족하는 이미 알려진 기본 유동 함수들(FFMs)의 선형 조합일 수 있다.

[0029] 이때, 기초혼합함수(basis flow functions)의 수는 제한되지 않을 수 있고, 기초혼합함수의 수많은 조합이 시도될 수 있다. 기초혼합함수(basis blending functions) 및 기초유동함수(basis flow functions)는, 혼합모델을 구성한다는 관점에서 혼용되어 사용될 수 있다.

[0030] 혼합계수(blending coefficients)인 선형 조합 상수는 선택한 대표 유동점을 충족하는 선형 방정식에 의해 계산될 수 있다.

[0031] 기본유동모델은 Ludwik(1909) 모델, Hollomon(1945) 모델, Voce(1948) 모델, 및 Swift(1952) 모델 중 적어도 하나를 포함할 수 있다.

[0032] 각 기본유동모델(FFMs)의 출처는 다음과 같다.

[0033] (1) Ludwik, P., 1909. Elemente der technologischen mechanik. Verlag Von Julius Springer, Berlin.

[0034] (2) Hollomon, J.H., 1945. Tensile deformation. Aime Trans 162, 1-22.

[0035] (3) Voce, E., 1948. The relationship between stress and strain for homogeneous deformation. J. Inst. Met. 74, 537-562.

[0036] (4) Swift, H.W., 1952. Plastic instability under plane stresses. J. Mech. Phys. Solids 1 (1) 1-18, 1952.

[0037] 기본 유동모델(FFMs, Fundamental Flow Models)은 항복점(yield point) 근처의 작은 변형률에서 매우 급격하게

변화하는 고유한 유동 특징 때문에, 광범위한 변형률을 포괄하는 유동곡선을 설명하는 것에 있어 한계가 있을 수 있다.

- [0038] 이러한 기본 유동모델들(FFMs)은 다수의 합금강을 포함한 많은 재료에 적용할 수 없음에도 불구하고, 재료의 유동 문제를 해결하기 위해 혼합 모델링의 구성 재료로 사용될 수 있다.
- [0039] Ludwik 모델은 확장성이 좋으므로 변형률 속도 및 온도의 영향을 표현하기 위한 목적으로 활용될 수 있다. Hollomon 모델과 Swift 모델은 Ludwik 모델과 동일한 수학적 배경을 가지고 있으며, 상수항을 0으로 가정하고 변형을 탄성변형과 소성변형으로 나누면 Ludwik 모델을 각각 Hollomon 및 Swift 모델로 변환될 수 있다.
- [0040] Hollomon 모델은 과도한 변형률 연화를 보이는 것으로 알려져 있으므로 Joun 등[13]은 변형률의 함수로 유동상수, 즉 강도 계수를 수식화하여 이 문제를 보상하였다. Voce 모델은 점근 응력(Asymptotic Stress) 및 관련 피크 곡률점으로 인해 다른 기존 재료모델과 다를 수 있어, 네킹 이후에는 상당히 다른 패턴을 보여줄 수 있다. 즉, 과도한 포스트-네킹(Post-Necking) 변형 연화를 나타낼 수 있다.
- [0041] 기본유동모델(FFMs)는 Ludwik 모델, Hollomon 모델, Voce 모델, 및 Swift 모델 중 적어도 하나를 포함할 수 있다. 혼합유동모델(BFMs)는 Ludwik 모델, Hollomon 모델, Voce 모델, 및 Swift 모델 중 2개 이상의 동종 또는 이종 혼합에 의해 산출될 수 있다.
- [0042] 포스트-네킹 변형경화(post-necking strain hardening)에 중점을 둔 인장시험의 관점에서 유동곡선을 설명하는 가장 중요하고 어려운 조건은 혼합 유동 모델(BFM)이 사용될 때 콘시데르 조건(Considere condition)일 수 있다. 4개의 기본 유동 모델(FFM)은 콘시데르 조건을 만족시킬 때 고유한 특성을 가질 수 있다.
- [0043] Ludwik 모델은 전형적인 변형경화 재료의 경우 Swift 모델에 비해 더 큰 변형률에서 기틀기를 증가시킬 수 있고, Voce 모델은 더 큰 변형률에서 유동응력을 제한하는 역할을 할 수 있으며, Hollomon 모델은 작은 변형률에서 유동곡선의 급격한 증가를 나타내고 더 큰 변형률에서 변형경화를 원활하게 감소시키는 데 기여할 수 있다.
- [0044] 따라서, 기본 유동 모델들은, 기준 유동곡선(RFC, Reference Flow Curve) 또는 타겟 유동곡선이 비정상적이거나 매우 복잡할 때, 적절하지 않을 수 있음에도 불구하고 그들의 조합은 실험과 잘 피팅되는 혼합 유동 모델(BFM)이 될 수 있다.
- [0045] 기본 유동 모델(FFM)의 선형 조합인 일반화된 혼합 유동 모델(BFM)은, 각 기본 유동 모델(FFM)이 네킹 조건을 만족한다면, 자동으로 네킹 조건을 충족시킬 수 있다.
- [0046] 본 발명의 혼합 유동모델은, 상온에서 네킹점(necking point)뿐만 아니라, 프리-네킹 영역(pre-necking region) 및 포스트-네킹 영역(post-necking region)을 포함하는 몇 개의 선택된 변형률에서의 유동응력을 만족하는 수용가능한 거의 완전한 상온 유동모델(Almost Complete Cold Flow Model-acceptable)을 포함할 수 있다.
- [0047] 본 발명은, 혼합에 의해 산출된 혼합 유동모델(BFM) 중, 보간(내삽, interpolation)되는 경우는 거의 없는 것으로 보이고, 기초 혼합 함수의 외삽(extrapolation)을 기반으로하는 ACCFM-허용 사례가 몇 가지 있음을 보여준다.
- [0048] 복잡한 유동곡선은 단편적으로 설명될 수 있지만 외삽 시 중요한 문제가 발생할 수 있다.
- [0049] 자동다단 냉간단조에서 변형률이 너무 높게 증가하는 체적금속형성 시뮬레이션(bulk metal forming simulation)의 경우에, 유동 모델의 닫힌 풀 함수(closed-form function)는, 큰 변형률에서의 유동 거동을 근사화하는 경우 중요할 수 있다.
- [0050] 그러나, 네킹 조건 및, 프리 네킹과 포스트 네킹 영역 모두에서의 샘플 포인트에서 유동 응력을 동시에 만족시키는 닫힌 풀 함수로 수식화된 유동 모델을 찾는 것은 어려운 문제이다.
- [0051] 본 발명의 기본 유동 모델(FFMs)에 기초한 일반화된 혼합 유동 모델(BFM)은 네킹 조건뿐만 아니라, 프리-네킹 및 포스트-네킹 변형경화에 중점을 두고 제시될 수 있다.
- [0052] 도 1은 AISI 1010에 의해 표현되는 자동다단 냉간단조를 위한 S10C의 전형적인 변형경화 유동곡선을 나타낼 수 있다.
- [0053] 도 1을 참조하면, 상부 패널에서의 곡선은, 원통형 시편(예시: 직경 및 게이지 길이는 각각 6.25 mm 및 25 mm)의 실험 인장시험으로부터 Joun의 연구진의 방법(Joun et al., 2008 A new method for acquiring true stress-

strain curves over a large range of strains using a tensile test and finite element method. Mech. Mater. 40 (7), 586-596.)에 의해 획득된 기준 유동곡선(RFC, Reference Flow Curve)라고 불리는 유동곡선일 수 있고, 실험 인장시험은 하부 패널의 실선에 의해 기술될 수 있다.

[0054] 하부 패널의 점선 곡선은 상부 패널의 기준 유동곡선(RFC)을 사용하여 얻은 예측 인장시험을 나타내는 것일 수 있다.

[0055] 기준 유동곡선(RFC)은 넥킹 조건뿐만 아니라 충분히 수용 가능한 정확도로 프리 넥킹 및 포스트 넥킹 변형경화를 모두 만족시키기 때문에 공학적 의미에서 완전한 냉간 유동곡선이라 할 수 있다. 재료의 항복 강도는 육안 검사에 의해 약 280 MPa로 추측될 수 있고, 이 값은 대략적인 목표 항복 강도로 사용될 수 있다.

[0056] 도 1에서 도시된 여러 개의 샘플 포인트들은, 에러를 체크하고 본 발명의 접근 방식을 검증할 수 있도록 선택될 수 있다.

[0057] 도 2는, 실험 및 예측 공칭 변형률 - 공칭 응력 곡선을 비교한 것으로, 예측 공칭 응력-변형률 곡선의 에러 분석을 나타낸다.

[0058] 도 2를 참조하면, 포스트-넥킹 영역에서 AISI 1010의 예측된 공칭 응력의 최대 에러는 각각 1.37%와 1.32% 임을 보여주며, 기준 응력 곡선(RFC)이 수용가능한 정확도로 포스트-넥킹 유동 거동을 표현한다는 것을 암시한다.

[0059] 항복점 이전 또는 근처의 큰 에러는, 작은 변형률에서의 실험의 끝단 효과(end-effect), 및 강소성 가정(Joun et al., 2007)(Joun, M.S., Choi, I.S., Eom, J.E., Lee, M.C., 2007. Finite element analysis of tensile testing with emphasis on necking. Comput. Mater. Sci. 41 (1), 63-69.)에 기인하는 것일 수 있다.

[0060] Ludwik, Hollomon, Voce, 및 Swift 모델의 기본 유동 모델(FFMs)은, 각각 다음의 수학적 1 내지 수학적 4와 같이 공식화될 수 있다.

### 수학적 1

$$\sigma = \sigma_L(\epsilon) = Y_0 + L_1 \epsilon^{n_L}$$

[0061]

### 수학적 2

$$\sigma = \sigma_H(\epsilon) = K \epsilon^n$$

[0062]

### 수학적 3

$$\sigma = \sigma_V(\epsilon) = Y_0 + V_1(1 - e^{-V_2 \epsilon})$$

[0063]

### 수학적 4

$$\sigma = \sigma_S(\epsilon) = Y_0(1 + S_1 \epsilon)^{n_S}$$

[0064]

[0065] 여기서,  $Y_0$ 는 재료의 항복 강도로 소성변형을 발생시키지 않고 재료에 가해질 수 있는 최대 응력의 정도를 의미하며, 소성변형이 발생하지 않는 한계 응력일 수 있다.  $L_1$  및  $S_1$  은 각각 Ludwik 모델 상수 및 Swift 모델 상수라 할 수 있다.  $K$  및  $n$ 은 각각 강도 계수 및 변형경화지수일 수 있다.  $n_L$  및  $n_S$  는 Ludwik 변형경화지수 및

Swift 변형경화지수일 수 있으며, 변형경화지수로 통칭될 수 있다.  $V_1$ ,  $V_2$ 는 Hollomon 모델의 유동상수일 수 있다. 즉,  $Y_0$ ,  $L_1$ ,  $S_1$ ,  $K$ ,  $n$ ,  $n_L$ ,  $n_S$ ,  $V_1$ , 및  $V_2$  은 유동상수이다.

[0066] 원통형 시편의 인장시험을 통해, 유동곡선을 측정할 때, 실험에서 고려되어야 할 중요한 변형률은 네킹점에서의 진변형률일 수 있고,  $\epsilon_{tN}$ 으로 표기될 수 있다. 예를 들어, 진변형률은 도 1의 AISI 1010 실시 예에 대해 0.127이다.

[0067] 콘시테르 조건(Considere condition)(Considere, 1885)은, 수학식 5로 주어지고, 네킹점에서의 진변형률을 계산하기 위해 반드시 만족되어야 한다.

### 수학식 5

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma$$

[0068]

[0069] 콘시테르 조건은 네킹점에서의 공칭 응력 또는 인장력을 최대로 만들 수 있다.

[0070] 콘시테르 조건으로부터 네킹점에서의 진변형률 및 수학식 5로부터 4개의 기본유동모델(FEMs)에 대한 유동상수 간의 관계식이 각각 다음의 수학식 6 내지 수학식 9와 같이 유도될 수 있다.

[0071] 즉, 수학식 6 내지 수학식 9는 각 기본유동모델에 대한 콘시테르 조건이며, 진변형률 및 각 모델의 유동상수들 간의 관계를 나타낼 수 있다.

### 수학식 6

$$\epsilon_{tN} = (1 - Y_0 / \sigma_{tN}) n_L$$

[0072]

### 수학식 7

$$\epsilon_{tN} = n$$

[0073]

### 수학식 8

$$\epsilon_{tN} = \frac{\ln[(1 + V_2) / (1 + Y_0 / V_1)]}{V_2}$$

[0074]

### 수학식 9

$$\epsilon_{tN} = n_S - 1 / S_1$$

[0075]

[0076] 여기서,  $Y_0$ 는 재료의 항복 강도이고,  $S_1$  은 Swift 모델 상수이며,  $n_L$  및  $n_S$  는 Ludwik 변형경화지수 및 Swift

변형경화지수이고,  $\varepsilon_{tN}$ 은 진변형률이며,  $\sigma_{tN}$ 은 진응력일 수 있다. 즉,  $Y_0$ ,  $S_1$ ,  $n_L$ ,  $n_S$ ,  $V_1$ , 및  $V_2$  은 유동상수이다.

- [0077] 수학식 1 내지 수학식 4 중의 하나의 조건, 및 수학식 6 내지 수학식 9 중의 다른 하나의 조건인 두 개의 조건은, 네킹 조건을 만족하여야 하기에 Ludwik, Voce 및 Swift 모델의 경우 오직 하나의 자유도만 남겨질 수 있다. 이는 3개 유동상수에 의해 공식화되기 때문일 수 있다.
- [0078] 따라서 선택된 지점에서의 유동 응력은 유동 거동이 정상인 경우 세 가지 모델에 의해 정확하게 표현될 수 있고, Hollomon 모델은 네킹점만으로 정의될 수 있다.
- [0079] 도 3을 참조하면, 상부 패널은 프리-네킹 영역에서의 피팅 에러를 감소시키기 위해 계산된 AISI 1010의 기본유동모델(FFM)을 나타낼 수 있다.
- [0080] Ludwik, Voce, 및 Swift 모델은 0 점을 통과하나, Hollomon model 은 오직 네킹 조건에 의해서만 결정될 수 있다. 특히, Hollomon 모델을 제외한 네킹점 이전의 모든 피팅된 유동곡선은 상당히 정확할 수 있다. 따라서, 혼합유동모델(BFM)은 Hollomon 모델을 제외한 나머지 모델의 혼합으로부터 산출될 수 있다.
- [0081] 반면 그들은 네킹점 이후에는 RFC와는 상당히 차이가 난다. 네킹점 이후의 예측 및 실험 공칭 응력-변형률 곡선 간의 동일한 불일치가 도 3의 하부 패널에서도 관측될 수 있다.
- [0082] 한편, 도 4에서 AISI 1010의 기본유동모델(FFM)은 포스트-네킹 영역에서의 피팅 에러를 감소시키기 위해 계산된 결과를 보여준다.
- [0083] Ludwik, Voce, 및 Swift 모델은 R 점을 통과할 수 있다.
- [0084] 포스트-네킹 영역에서 정확할지라도, 프리-네킹 영역에서 피팅된 유동곡선 및 그에 대응하는 인장시험의 예측은 부정확할 수 있다. 이는 도 3의 경우와 비교하면 상당히 반대 현상을 보인다.
- [0085] 이는, 기본유동모델(FFM)이 네킹 조건뿐만 아니라 네킹 점 양측을 동시에 만족시키는 것이 매우 어렵다는 것을 암시한다.
- [0086] 이 문제를 해결하기 위해 추가적인 유동상수가 이용될 수 있고, 이는 유동상수의 획득의 복잡성을 필연적으로 증가시킨다.
- [0087] 변형률의 함수인  $N$ 개의 기초유동함수는,  $\sigma_K$ ,  $K=1,2,\dots,N$  으로 표시될 수 있고, 네킹 조건을 만족할 수 있다.
- [0088] 그러면, 일반화된 혼합유동모델(BFM, Blending Flow Model)은 수학식 10과 같이 기초유동함수의 선형 조합으로 공식화될 수 있다.

### 수학식 10

$$\sigma = \sum_{K=1}^N \alpha_K \sigma_K$$

[0089]

- [0090] 여기서  $\alpha_K$  는, 혼합 유동 모델의 혼합계수고, 수학식 11의 제약 조건을 만족할 수 있다.

### 수학식 11

$$\sum_{K=1}^N \alpha_K = 1$$

[0091]

- [0092] 수학식 11과 함께 수학식 10의 일반화된 유동 모델은, 자동적으로 네킹 조건을 만족할 수 있고,  $N$  개의 미지수를 가질 수 있다.

[0093] 미지수를 결정하는 가장 간단한 방법은, 일반화된 유동 모델이 N-1 개의 선택된 변형률 및 유동 응력 점들, 즉 유동곡선의 혼합점(blending points)이라 불리는  $(\epsilon_i, \sigma_i)$ 을 통과하도록 만드는 것이고, 혼합점들은 수학적 12와 같은 N-1 개의 선형 방정식을 생성할 수 있다.

### 수학적 12

[0094] 
$$\sum_{k=1}^N \sigma_k(\epsilon^i) \alpha_k = \sigma^i, \quad i=1,2,\dots,N-1$$

[0095] 네킹 조건을 만족하는 어떤 유동 함수도 기초유동함수가 될 수 있다. 다른 유동상수를 가진 동일한 유동 모델은, 유동곡선에 대한 독립적인 기초유동함수 집합에 속할 수 있다. 그러나, 동일한 기초유동함수(예: Voce 등)을 두 번이나 이용하는 경우에는 혼합형 모델로 간주될 수 없다. 이는 그 기초유동함수에 상응하는 혼합계수를 구하기 위한 선형방정식이 종속적이기 때문일 수 있다.

[0096] 본 발명의 혼합 유동 모델에서 유동 모델 혼합의 기초가 되는 기본유동모델은 Ludwik 모델, Hollomon 모델, Voce 모델, 및 Swift 모델 중 적어도 하나를 포함할 수 있고, 예를 들어, LV BFM(Ludwik 및 Voce 모델 이용), LS BFM(Ludwik 및 Swift 모델 이용), VS BFM(Voce 및 Swift 모델 이용), LVS BFM(Ludwik, Voce, 및 Swift 모델 이용), LVSH BFM(4종류의 기본유동모델(FFMs) 모두 이용), SSSS BFM(서로 다른 유동상수를 가진 4개의 Swift 유동 함수를 이용), 및 LLLL BFM(서로 다른 유동상수를 가지는 4개의 Ludwik 함수를 이용) 중 적어도 하나를 포함할 수 있다.

[0097] 4종류의 기본유동모델로부터 각각 선택되는 2종류 이상의 혼합이 가능할 수 있다. 예를 들어, 2종류의 혼합은 LH, LV, LS 등이 가능할 수 있고, 3종류의 혼합은 LHS, LVS 등이 가능할 수 있으며, 4종류의 혼합은 SSSS, LLLL 등이 가능할 수 있다. 이와 같이 유동 모델 혼합은 2종 이상의 다양한 조합이 가능할 수 있고, 이종간의 혼합외에 동종 유동 모델 간의 혼합도 가능하기에 혼합의 가능 가짓수는 더욱 다양해질 수 있다.

[0098] 혼합유동모델(BFM)의 명칭 또는 표기는 사용된 기본유동모델(FFMs)의 두문자와 혼합 함수 심볼로 구성되거나, 혼합 함수 심볼 및 괄호속 혼합점(blending point)의 조합으로도 구성될 수 있다.

[0099] 본 발명의 혼합유동모델(BFMs)에 따르면 기본유동모델(FFMs)의 수많은 다양한 혼합이 가능할 수 있고, 이러한 다양한 혼합된 혼합유동모델 중에서 실험 결과와 가장 잘 매칭되는 혼합유동모델을 위주로 설명한다.

[0100] [LVS BFM]

[0101] LVS BFM(LVS 혼합유동모델)은  $\sigma_{LVS}$  로 표기될 수 있고, AISI 1010의 유동곡선에 가장 최적으로 피팅될 수 있다. 따라서, 검증 단계에서, 기본유동모델의 혼합으로 형성되는 조합 중 LVS 혼합유동모델(BMFs)(Ludwik, Voce, 및 Swift 모델의 혼합)이 실제 실험 결과에 최적으로 검증될 수 있다.

[0102] LVS BFM은 수학적 13에 의해 주어질 수 있다.

### 수학적 13

[0103] 
$$\sigma_{LVS} = \alpha_L \sigma_L(\epsilon) + \alpha_V \sigma_V(\epsilon) + \alpha_S \sigma_S(\epsilon)$$

[0104] 여기서,  $\alpha_L$ ,  $\alpha_V$ , 및  $\alpha_S$  은 혼합계수(blending coefficients)일 수 있고,  $\alpha_L$ ,  $\alpha_V$ , 및  $\alpha_S$  간에는 수학적 14 가 만족될 수 있다.  $\sigma_L$ ,  $\sigma_V$ , 및  $\sigma_S$  는 각각 기본유동함수로 Ludwik 유동함수, Voce 유동함수, 및 Swift 유동함수일 수 있다.

## 수학식 14

$$\alpha_L + \alpha_V + \alpha_S = 1$$

[0105]

[0106]

먼저, 도 3에서, 두 개의 혼합점(blending point)의 두 쌍을 이용해, AISI 1010의 실험 유동곡선을 피팅하기 위해, Ludwik, Voce, 및 Swift 유동곡선을 기초혼합함수로 선택할 수 있다.

[0107]

이 경우 기초혼합함수는 0 점을 통과할 수 있고, 0 점은 네킹점 이전의 프리-네킹(pre-necking) 변형경화 영역에 포함될 수 있다. 피팅된 유동모델은 0 점을 통과하는 LVS BFM이라는 의미로 LVS(0) BFM로 표시될 수 있다.

[0108]

도 3에서, 두 혼합점의 다양한 혼합 조합이 시도될 수 있고, 혼합의 결과는 도 6에 요약될 수 있다.

[0109]

도 6를 참조하면, 혼합 조합의 30 % 내지 50 %는, 변형률이 0일 때의 유동응력과 ACCFM의 관점에서 수용할만하다.

[0110]

혼합점의 두 개 쌍, 즉 Q(0.35, 475 MPa)와 R(0.60, 531 MPa), 및 P(0.06, 366 MPa)와 Q는, 각각 LVS(0) BFM의 경우의 수용가능 및 수용불가능의 대표적 예일 수 있다. 이러한 혼합점은 도 5의 상위 패널에 있는 기준유동곡선(RFC)과 비교될 수 있다.

[0111]

도 6의 혼합계수는, 모든 혼합된 유동곡선이 필연적으로 외삽에 의해 만들어진다는 것을 보여준다. 왜냐하면, 모든 시도된 경우는 몇몇 마이너스 혼합계수를 포함하기 때문일 수 있다.

[0112]

도 5의 하부 패널에서의 혼합점 Q 및 R에 의해 획득되는 예측된 인장시험은 실험 결과와 비교될 수 있다.

[0113]

변형률 0.20 내지 0.30 사이의 범위에서, 예측 및 실험 인장시험 간의 최대 예러는 1.2 % 일 수 있다.

[0114]

그러나, 변형률 0에서의 유동 응력은 수용할 수 없는 예(혼합점 P 및 Q)에서 1544 MPa 이고, 그것의 유동곡선은 매우 급격히 변하여 유동곡선은 비현실적으로 될 수 있다.

[0115]

비슷한 방법으로, 두 혼합점의 다양한 조합을 가진 3개의 기초 블렌딩 함수에 대해, 도 4의 Ludwik, Voce, 및 Swift 유동곡선을 이용해 LVS(R) BFM으로 표시되는 AISI 1010의 수많은 혼합 유동 모델을 계산할 수 있다.

[0116]

LVS(R) BFM은, LVS 혼합유동모델이고, R 점을 통과할 수 있다. R 점은 포스트-네킹(post-necking) 변형경화 영역에 포함되는 지점일 수 있다.

[0117]

LVS(R) BFM의 수많은 혼합 결과는 ACCFM에 대해 0-변형률 및 3.0-변형률에서의 유동 응력의 관점에서 수용가능하다는 것을 보여준다.

[0118]

Q와 S(0.85, 570 MPa), 및 S와 T(1.06, 601 MPa)의 두 가지 대표적인 예들은, 각각 수용가능한 및 수용불가능한 LVS(R) BFM으로 선택될 수 있다.

[0119]

LVS(R) BFM의 결과는 도 7에 보여진다.

[0120]

[SSSS BFM]

[0121]

SSSS BFM은, 서로 다른 Swift 변형경화 지수를 가진 Swift 모델로만 기초혼합함수가 구성되는 경우일 수 있다.

[0122]

혼합에 이용되는 4개의 다른 혼합 함수들은, 고정된 Swift 변형경화 지수를 가질 수 있고, 네킹 조건을 만족하도록하여 획득될 수 있다.

[0123]

고정된 Swift 변형경화 지수의 집합, 예를 들어 0.15, 0.2, 0.3, 및 0.4 이, 조사될 수 있다. 도 8은 기초혼합함수에 대한 각각의 유동상수를 나열한다.

[0124]

SSSS BFM의 경우, ACCFM의 관점에서 받아들일 수 있는 다양한 혼합유동모델(BFM)이 존재할 수 있다. ACCFM 수용가능한 유동모델 및 수용불가능한 유동모델을 나타내는 두 개의 SSSS BFM가 각각 도 9에 도시될 수 있다.

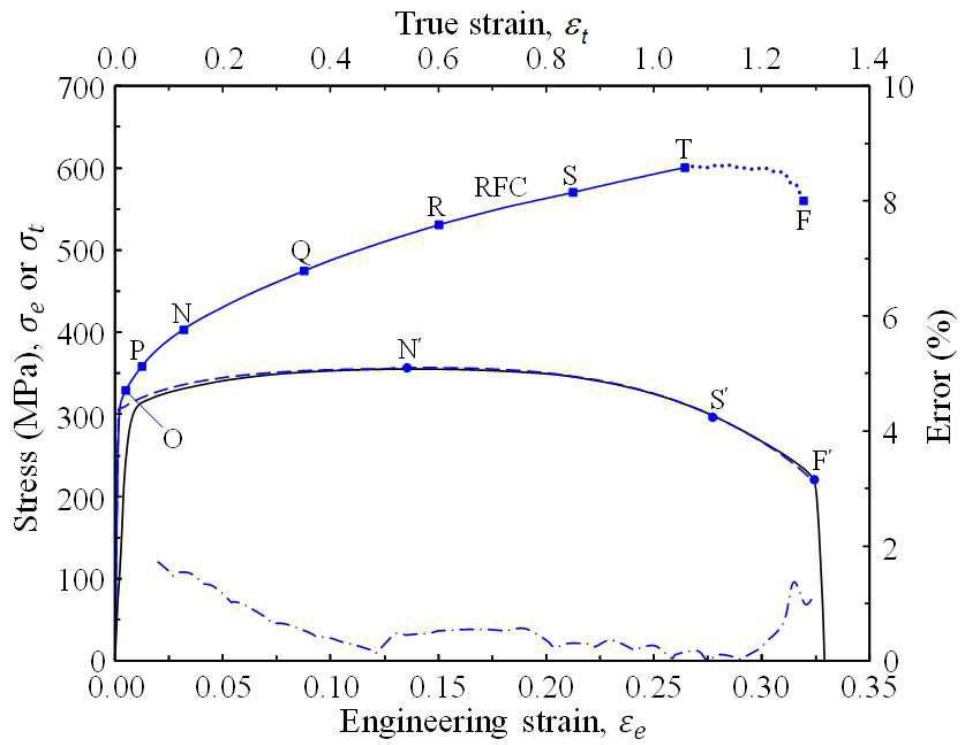
[0125]

정리하면, 상온에서 금속 재료의 유동 거동을 특성화할 때, 거의 완전한 상온 유동모델(ACCFMs)를 얻기 위해, 만족되어야 하는 두 개의 주요한 이슈가 있고, 두 이슈는 네킹 조건, 및 프리- 및 포스트- 네킹 변형경화 영역 모두를 대표하는 다수의 선택된 핵심 유동점일 수 있다.

- [0126] 동시적으로 두 개의 주요 이슈를 만족하는 것의 중요성은, 일종의 가장 근본적인 금속성형공정인 인장시험의 예측 관점에서 제일 먼저 강조될 수 있다.
- [0127] 한번에 두 개의 주요 이슈를 만족하는, AISI 1010의 전형적인 변형경화 거동의 유동 모델을 기술함에 있어, Ludwik, Voce, Hollomon, 및 Swift 모델을 포함하는 전통적인 기본유동모델(FFMs)의 뚜렷한 한계가 있다.
- [0128] 따라서, 재료의 거동 특성의 궁극적인 목적, 예를 들어, 인장시험에서 발생하는 파단에서의 임계손상도의 획득 문제는, 기본유동모델(FFMs)을 이용한 유한요소 예측에 의해 거의 해결되지 않는다. 물론, 기본유동모델(FFMs)의 유동곡선은 체적금속성형에서 두 개의 주요 이슈를 만족하는 유동곡선보다 더 큰 에러를 유발할 것이다.
- [0129] 본 발명은 상기의 문제를 해결하기 위해, 네킹 조건을 만족하는 기본유동모델(FFMs) 간의 알려진 혼합함수의 선형 조합인, 실용적이고 일반적인 혼합유동모델(BFM)을 제공할 수 있다. 본 발명의 혼합유동모델(BFM)은, ACCFM-수용성의 판정 방법과, 네킹 조건, 및 혼합계수를 만족하도록 기본유동모델(FFMs)의 유동상수를 계산하는 구체적인 체계적 과정과 함께 제공할 수 있다.
- [0130] AISI 1010의 LV, LS, VS, LVS, LVHS, 및 SSSS 혼합유동모델(BFM)을 포함하는 다양한 혼합유동모델(BFM)은, 서로 다른 기초유동함수를 이용해 획득될 수 있고, 그들의 특징을 알아내기 위해 조사될 수 있다.
- [0131] AISI 1010의 경우에 기초혼합함수의 내삽(보간)에 의해 결정되는 혼합유동모델(BGM)은 사실상 없다는 것에 주목할만하다. 또한, 기초유동모델의 외삽에 의해 산출됨에도 불구하고, 광범위한 변형률에 걸쳐 다양한 ACCFM-수용 가능한 혼합유동모델(BFM) 존재한다는 것에 주목할만하다.
- [0132] LVHS BFM이 LVS BFM 보다 더 나쁜 것으로 나타났으며, 이는 Holomon 모델이 오직 네킹 조건만을 만족시킬 수 있기 때문에 혼합유동모델의 적용을 해칠 수 있음을 암시하는 것일 수 있다.
- [0133] 기본유동함수가 독립적인 경우 혼합유동모델(BFM)을 형성하기 위해 모든 기본함수세트를 사용할 수 있기 때문에 다른 유동상수를 가진 기본유동모델(FFM)만 기본혼합함수에 활용될 수 있다.
- [0134] 예를 들어, SSSS BFM으로 표시된 네 개의 Swifts BFM이 AISI 1010의 유동 거동을 잘 표현하는 것으로 밝혀졌다.
- [0135] 혼합유동모델의 접근법은, 상온에서 금속 재료의 범용 유동 모델로써 실용적이라는 것을 증명할 수 있다.
- [0136] 허용 가능한 혼합유동모델(BFM)을 사용하면, 인장시험 중 파단 역학이 정확하게 밝혀질 수 있을 뿐만 아니라, 큰 변형률의 유동 응력에 대한 유동 데이터의 외삽도 과학적으로 유연하게 이루어질 수 있다.
- [0137] 본 발명의 검증 단계에서, 기본유동모델의 혼합으로 형성되는 조합 중 SSSS 혼합유동모델(BMFs)이 실제 실험 결과에 최적으로 검증될 수 있고, SSSS 혼합유동모델은 서로 다른 Swift 변형경화 지수를 가진 4개의 Swift 모델의 혼합에 의해 산출될 수 있다.

도면

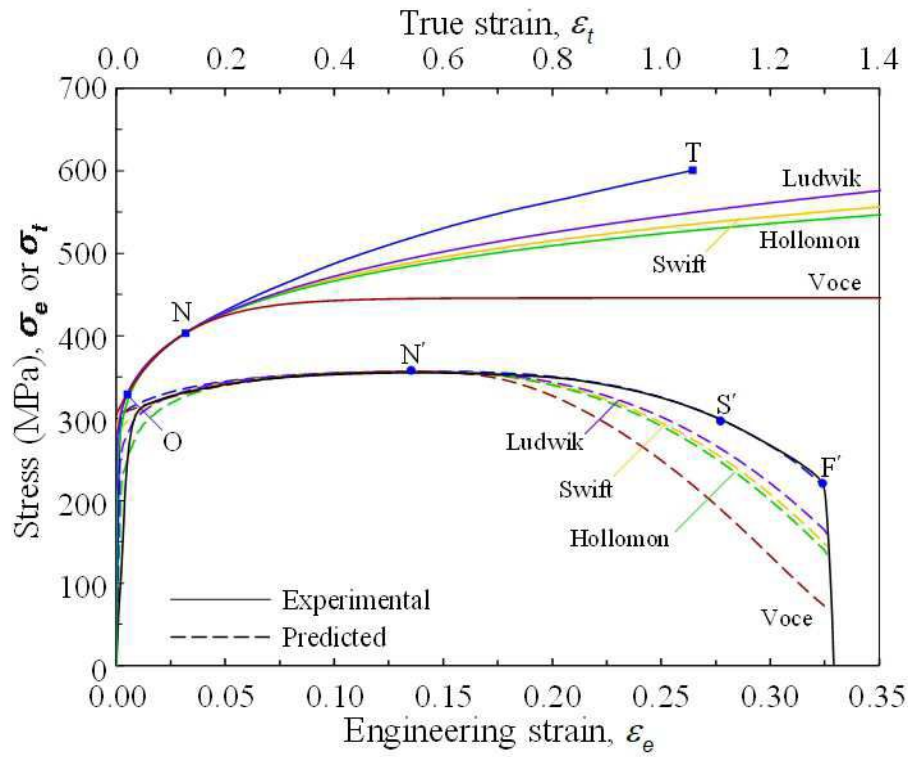
도면1



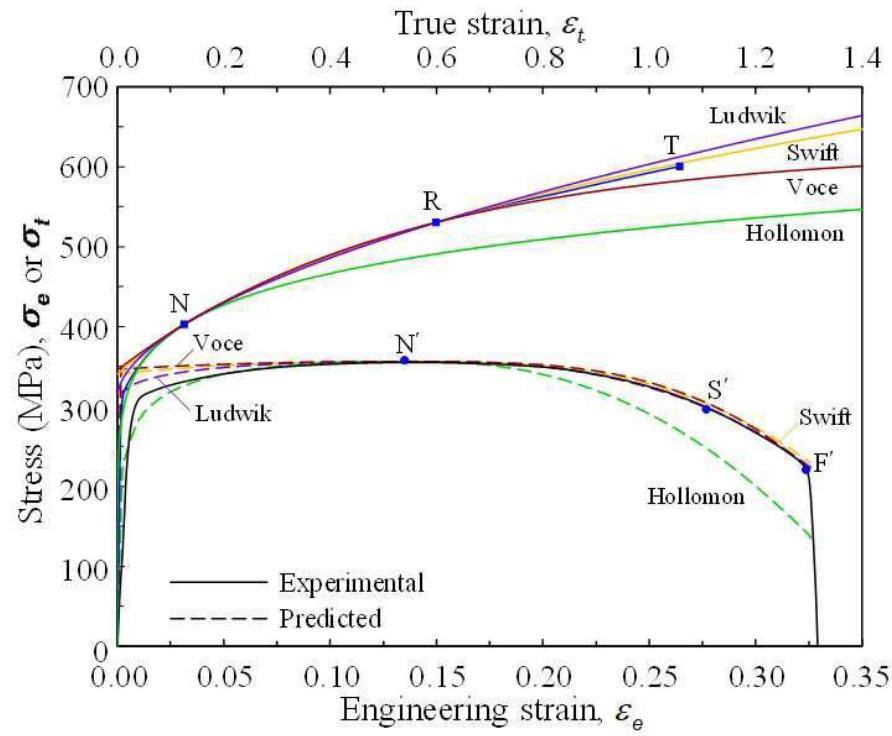
도면2

| Engineering strain | Experimental $\sigma_e$ | Predicted $\sigma_e$ | Error of predicted $\sigma_e$ (%) |
|--------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| 0.025              | 327                     | 332                  | 1.56                              |
| 0.05               | 341                     | 345                  | 1.17                              |
| 0.10               | 353                     | 354                  | 0.40                              |
| 0.15               | 355                     | 357                  | 0.52                              |
| 0.20               | 349                     | 351                  | 0.36                              |
| 0.25               | 325                     | 325                  | 0.27                              |
| 0.30               | 267                     | 267                  | 0.24                              |
| 0.324 (F')         | 221                     | 219                  | 1.10                              |

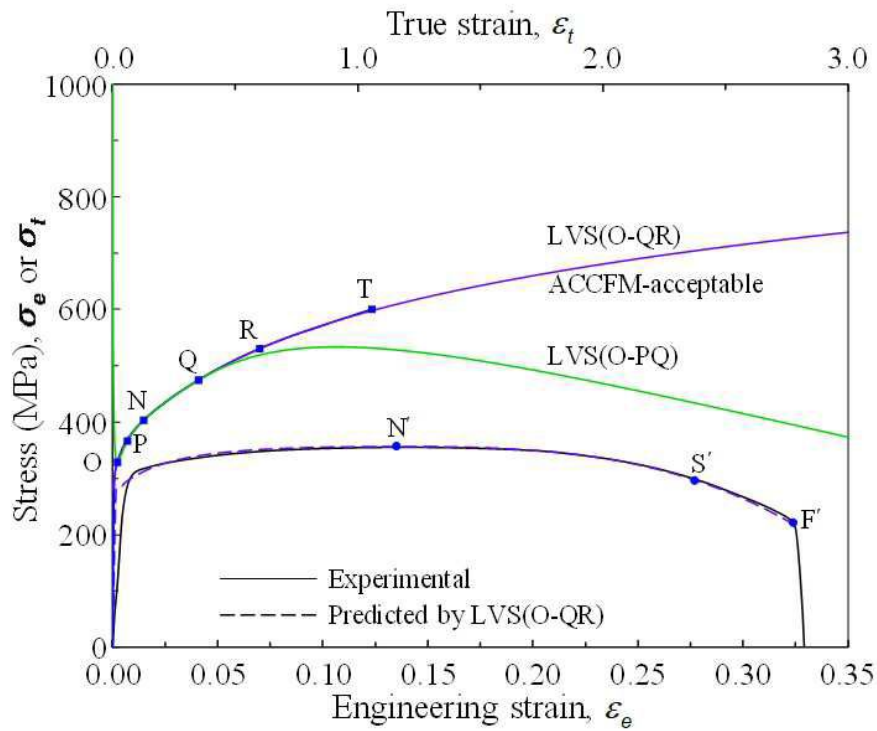
도면3



도면4



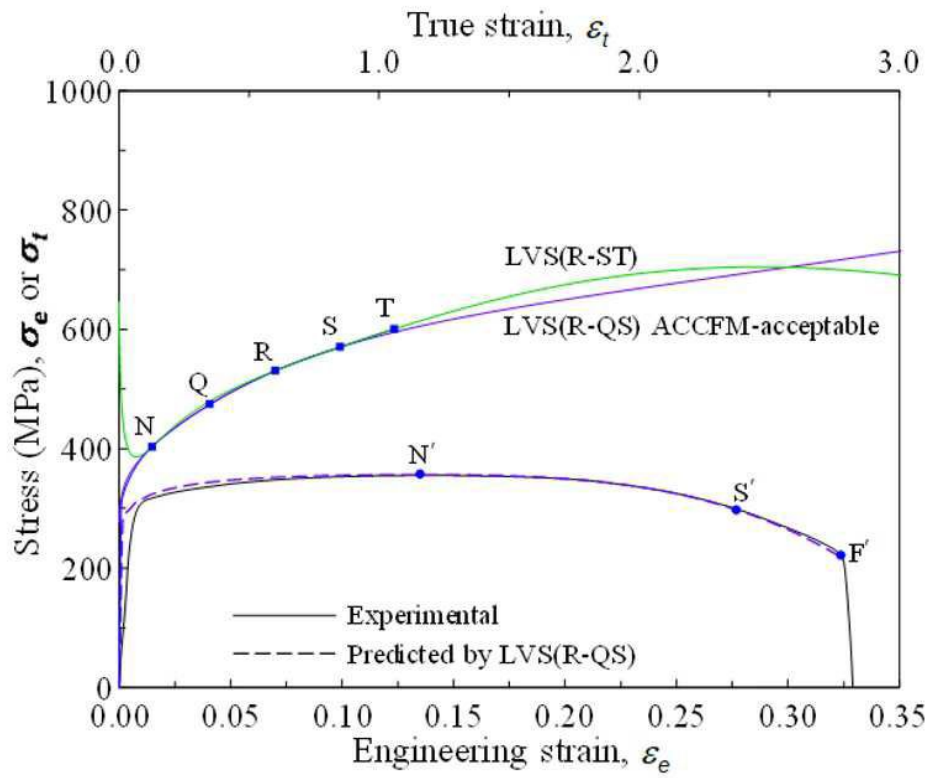
도면5



도면6

| Flow model | Blending points | Blending coefficients |            |            | Flow stress $\sigma(\epsilon)$ |     |     |     |     |
|------------|-----------------|-----------------------|------------|------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|            |                 | $\alpha_L$            | $\alpha_T$ | $\alpha_S$ | $\epsilon = 0.0$               | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 |
| LVS(O) -   | PQ              | -17.92                | -2.83      | 21.75      | 1544                           | 506 | 533 | 468 | 373 |
|            | PR              | -21.35                | -3.51      | 25.86      | 1782                           | 516 | 545 | 466 | 350 |
|            | PS              | -27.90                | -4.82      | 33.72      | 2238                           | 534 | 568 | 460 | 307 |
|            | PT              | -38.13                | -6.85      | 45.98      | 2948                           | 563 | 605 | 451 | 238 |
|            | QR              | -0.09                 | -0.71      | 1.80       | 281                            | 511 | 591 | 681 | 737 |
|            | QS              | -0.45                 | -0.76      | 2.20       | 306                            | 510 | 590 | 676 | 730 |
|            | QT              | 0.65                  | -0.63      | 0.97       | 228                            | 511 | 593 | 689 | 752 |
|            | RS              | -0.73                 | -0.80      | 2.53       | 326                            | 511 | 590 | 674 | 725 |
|            | RT              | 0.99                  | -0.57      | 0.59       | 205                            | 510 | 593 | 691 | 757 |
|            | ST              | 3.20                  | -0.22      | -1.98      | 50                             | 507 | 593 | 705 | 786 |

도면7



도면8

| Model | $n_s$ | $Y_0$ | $S_1$ |
|-------|-------|-------|-------|
| Swift | 0.15  | 305   | 42.79 |
|       | 0.20  | 330   | 13.63 |
|       | 0.30  | 342   | 5.77  |
|       | 0.40  | 346   | 3.66  |

도면9

