(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0123583
(43) 공개일자 2024년08월14일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 11/00 (2020.01) *B21J 5/00* (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01N 11/00 (2013.01)
B21J 5/00 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2023-0016108
(22) 출원일자 2023년02월07일
심사청구일자 2023년02월07일

(71) 출원인
경상국립대학교산학협력단
경상남도 진주시 진주대로 501 (가좌동)
(72) 발명자
전만수
경상남도 진주시 에나로 100, 휴엔인 엘리시움아파트 102동 1301호
김민철
경상남도 진주시 정촌면 삼일로 13, 진주 우방아이유쉘 105동 1901호
지수민
경상남도 진주시 천수로 138번길 8-1
(74) 대리인
특허법인 태웅

전체 청구항 수 : 총 3 항

(54) 발명의 명칭 **온도 보상을 통한 고온 재료의 고정도 유동 곡선의 획득 방법**

(57) 요 약

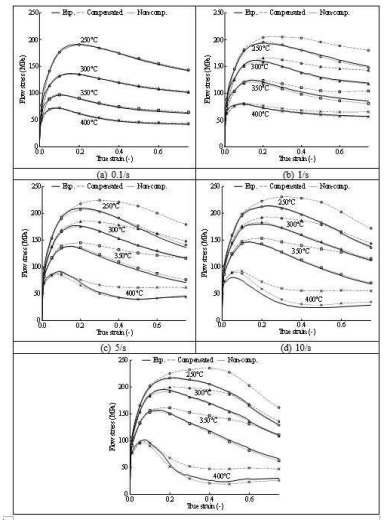
본 발명은 다음 수학식 1로 표현된 유동 곡선의 유동 상수 C와 m을 구간 함수로 표현하고, 샘플링된 변형률 및 온도에 의한 그리드(grid)의 복수의 위치에 형성되는 것을 메쉬라고 할 때, 구간 함수의 그리드를 압축 시험 중 발생한 온도 증분의 예측치만큼 온도 축으로 이동시킴으로써 재료 시험 중 발생한 온도의 영향을 보상하여 재료의 고정도 유동 곡선을 획득하는 것을 특징으로 하는 유동 곡선의 획득 방법이 제공될 수 있다.

[수학식 1]

$$\sigma = C(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)\,\dot{\varepsilon}^{m(\varepsilon,\dot{\varepsilon},T)}$$

여기서, σ는 유동 응력, C와 m은 유동 상수이며, ε는 변형률, $\dot{\varepsilon}$는 변형률 속도, T는 온도이다.

대 표 도 - 도4



(52) CPC특허분류
G01N 2011/0013 (2013.01)
G01N 2203/0075 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1415172998
과제번호 10081334
부처명 산업통상자원부
과제관리(전문)기관명 한국산업기술평가관리원
연구사업명 혁신성장동력프로젝트(R&D)(산업부)
연구과제명 700oC이하 온간성형공법 활용 1100MPa급 항공용 Ti합금 체결부품 상용화기술 개발
기 여 율 1/2
과제수행기관명 (주)진합
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

명 세 서

청구범위

청구항 1

다음 수학식 1로 표현된 유동 곡선의 유동 상수 C와 m을 구간 함수로 표현하고,

샘플링된 변형률 및 온도에 의한 그리드(grid)의 복수의 위치에 형성되는 것을 메쉬라고 할 때,

구간 함수의 그리드를 압축 시험 중 발생한 온도 증분의 예측치만큼 온도 축으로 이동시킴으로써 재료 시험 중 발생한 온도의 영향을 보상하여 재료의 고정도 유동 곡선을 획득하는 것을 특징으로 하는 유동 곡선의 획득 방법.

[수학식 1]

$$\sigma = C(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)\,\dot{\varepsilon}^{m(\varepsilon,\dot{\varepsilon},T)}$$

여기서, σ는 유동 응력, C와 m은 유동 상수이며, ε는 변형률, $\dot{\varepsilon}$는 변형률 속도, T는 온도이다.

청구항 2

제1 항에 있어서,

상기 유동 상수(C,m) 저장 그리드를 온도 축 방향을 따라 이동시킴으로써, 발생한 유동 상수 저장 메쉬의 변형을 제거하여 초기의 유동 상수 저장 메쉬로 복귀하는 것을 특징으로 하는 유동 곡선의 획득 방법.

청구항 3

제1 항에 있어서,

실험치와 예측치의 오차를 최소화기 위한 보상 온도는 다음의 수학식 2,3에 의거 계산되는 것을 특징으로 하는 유동 곡선의 획득 방법.

[수학식 2]

$$\Delta T_{ij} = \int_0^{\varepsilon_i} \frac{\xi\sigma}{\rho c}\, d\varepsilon \approx \xi \frac{\bar{\sigma}\varepsilon_i}{\bar{\rho}\bar{c}}$$

[수학식 3]

$$T_j^i = T_j + \Delta T_{ij}$$

여기서, $\triangle T_{ij}$는 i번째 샘플의 변형률과 j번째 샘플 온도에서의 온도 증가, ε_i는 각각 i번째 샘플 변형률, ρc는 열 용량, σ는 유동 응력, ξ는 온도 보정 변수이고, 상기 수학식의 변수 머리에 있는 바아는 평균값, Tj는 j번째 샘플 온도, T_j^i는 j번째 샘플 온도와 i번째 샘플 변형률에서 증가된 온도이다.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 온도 보상을 통한 고온 재료의 고정도 유동 곡선의 획득 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0003] 소성 가공 공정 해석 기술에 따라 금속 재료의 진응력-변형률 관계식 또는 유동 곡선은 공정 설계 기술자에게 필수적인 사항이 되었지만, 실험적으로 획득이 용이하지 않아 현장 기술자는 물론, 연구자들도 정확한 소재 정보를 모르는 경우가 많으며, 대부분의 기술자들이 관련 문헌으로부터 제한적인 정보를 활용하고 있는 실정이다.

[0004] 더욱이, 단조와 같은 체적 소성가공 공정 시뮬레이션에서 요구하는 고 변형률에서의 유동 응력을 얻기 위한 인장 시험을 기반으로 하는 유동 응력 획득 방법을 적용하기 어렵다.

[0005] 특히, 마그네슘 합금과 같은 소재는 성형이 어렵기 때문에, 유동 거동을 해석하는 것이 중요할 수 있다. 이러한 마그네슘 합금과 같은 소재의 유동 거동은 주요 상태 변수인 온도 및 변형률 속도에 큰 영향을 받을 수 있다.

[0006] 소재의 거동 해석을 위한 실험치와 예측치간의 오차는 온도가 높아짐에 따라 클 수 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0008] (특허문헌 0001) 일본 특허 제 4771338호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 본 발명은 재료의 유동 응력 곡선 또는 유동 곡선의 도출시 고온 압축시험의 실험치와 예측치간의 오차를 최소화하기 위해 온도 보상을 통한 재료의 고정도 고온 유동 곡선의 획득 방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0011] 본 발명의 해결 수단은, 다음 수학식 1로 표현된 유동 곡선의 유동 상수 C와 m을 구간 함수로 표현하고,

[0012] 샘플링된 변형률 및 온도에 의한 그리드(grid)의 복수의 위치에 형성되는 것을 메쉬라고 할 때,

[0013] 구간 함수의 그리드를 압축 시험 중 발생한 온도 증분의 예측치만큼 온도 축으로 이동시킴으로써 재료 시험 중 발생한 온도의 영향을 보상하여 재료의 고정도 유동 곡선을 획득하는 것을 특징으로 하는 유동 곡선의 획득 방법이 제공될 수 있다.

[0014] [수학식 1]

[0015] $$\sigma = C(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)\,\varepsilon^{m(\varepsilon,\dot{\varepsilon},T)}$$

[0016] 여기서, σ는 유동 응력, C와 m은 유동 상수이며, ε는 변형률, $\dot{\varepsilon}$는 변형률 속도, T는 온도이다.

[0017] 본 발명은 임의의 유동 수식에서 요구하는 유동 상수의 결정에 사용될 수 있으며, 상기 수학식 1에 의해 정의되는 유동 곡선을 획득하는 방법이 제공될 수 있다. 이 수학식 1은 기본적으로 고온 유동 곡선을 표현하기 위한 것이지만, 상온 유동 곡선의 표현에서 사용될 수 있다.

[0018] 수학식 1의 유동 상수 또는 유동 상수 C와 m은 본 발명에서 제공하는 방법으로 온도 등의 영향을 반영함으로써 고정도의 유동 응력을 제공할 수 있다.

발명의 효과

[0020] 소성 변형을 동반하는 재료시험 중에 소성열에 의하여 시편은 가열된다. 재료시험 결과로, 온도 보상이 매우 어렵기 때문에 일반적으로 실험 결과로 재료의 최초 온도 정보를 제공한다. 시험 중에 발생한 온도 영향을 고려하지 않을 경우, 실제의 재료 유동 특성을 반영하지 못하며, 이것은 실험치와 비온도 보상 유동 곡선으로 획득한 예측치 간의 차이를 필연적으로 발생시킨다.

[0021] 이와 같이, 본 발명은 마그네슘 합금과 같은 소재의 유동 곡선의 도출시 재료시험(예: 압축시험) 공정의 실험치와 예측치간의 오차를 최소화하기 위해 온도 보상을 통한 재료의 고정도 유동 곡선의 획득이 가능한 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0023] 도 1은 본 발명의 따른 획득방법을 구현하기 위한 샘플링된 변형률 및 온도의 그리드(i,j)에서 재료 상수를 저장하는 메쉬를 나타낸 것이며, (a)는 초기 유동 메쉬, (b)는 온도 보상으로 뒤틀어진 유동 메쉬, (c)는 온도 보상된 초기 유동 메쉬 상태의 도면이다. 도면에서 가로축(우측 방향이 변형률이 증가하는 방향)은 변형률을 세로축(상측 방향이 온도가 증가하는 방향)은 온도를 나타낸다.

도 2는 온도 보상전 상태의 온도와 변형률 속도에 대한 유동 곡선 그래프로서, 실선은 실험치 또는 기준치, 점선은 피팅된 것이다.

도 3은 압축 하중-스트로크 곡선 그래프로서, 실선은 실험치, 점선은 도 2에서 피팅된 온도 비보상 유동 곡선을 이용하여 예측한 것이다.

도 4는 기준치, 비보상 유동 곡선과 함께 본 발명에 따른 온도 보상된 유동 곡선의 비교 그래프이다.

도 5는 실험치와 예측치의 압축 하중-스트로크 곡선의 비교 그래프로서, 도 2에서의 온도 비보상 유동 곡선과 도 4의 온도 보상 유동 곡선의 예측용으로 채용된 것이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0024] 이하, 첨부 도면을 참조하여 본 발명의 실시 예를 상세히 설명한다. 다만, 본 발명의 기술 사상은 설명되는 일부 실시 예에 제한되지 않으며, 다양한 형태로 구현될 수 있고, 본 발명의 기술적 사상 범위 내에서 실시 예들 간 구성 요소 중 적어도 하나 이상은 선택적으로 결합 및/또는 치환될 수 있다.

[0025] 또한, 본 발명의 실시 예의 용어는 특별하게 정의하지 않는 한 통상의 지식을 가진 자에게 일반적으로 이해될 수 있는 의미로 해석될 수 있고, 일반적으로 사용하는 용어는 관련 기술의 문맥상의 의미를 고려하여 해석할 수 있다.

[0026] 또한, 본 발명의 실시 예의 용어는 실시 예의 설명을 위한 것으로 본 발명을 제한하는 것은 아니며, 단수는 문구에 언급하지 않는 한 복수를 포함하는 것으로 해석될 수 있다.

[0027] 본 발명의 실시 예에서 소재(재료)는 마그네슘 합금을 예로 들어 설명한다. 마그네슘 합금의 유동 거동은 변형률뿐만 아니라, 온도 및 변형률 속도에도 매우 민감하고, 이러한 특성을 확인하기 위해 중실형 원통부재(실린더)의 열간 압축 시험은 변형률, 변형률 속도 및 온도의 다양한 조건을 다룰 수 있기 때문에 널리 이용될 수 있다.

[0028] 그러나, 시험중 시편의 온도는 열전대를 사용하여 지정된 지점에서 의도적으로 측정할 수 있음에도 유동 곡선에 반영하기는 어렵다. 지정된 초기 테스트 온도(온도 보상전 기준 유동 곡선(reference flow curve before temperature compensation), 이하 'RFC-BTC'라 약칭함)에서 얻은 유동 곡선의 특정 지점 온도는 스트로크에 따라 변경될 수 있다.

[0029] 소성 변형시 시편의 소성일에 의한 가열은 시험중 필연적으로 동반되기 때문에 시험 보고서에 명시된 온도는 실제 온도를 의미하는 것이 아니고, 시편의 초기 온도만을 의미할 수 있다. 특히 시험중 변형 불균일성은 재료-도구(금형) 인터페이스의 마찰로 인해 상당히 증가할 수 있다.

[0030] 본 발명의 실시 예에 있어서, 소재로써 마그네슘 합금(AZ31B, AZ61A, AZ80A 및 AZ91E)의 유동 거동은 온도 및 마찰 효과를 고려한 중실형 원통부재의 압축 시험을 통해 이루어질 수 있다.

[0031] 도 1은 본 발명에 따른 유동 곡선의 획득 방법을 구현하기 위해 샘플링된 변형률 및 온도의 그리드(i,j)에서 재료 상수를 저장하는 메쉬를 나타낸 것이며, (a)는 초기 유동 메쉬, (b)는 온도 보상으로 뒤틀어진 유동 메쉬, (c)는 온도 보상된 초기 유동 상태의 도면이다. 도 1에서 가로축(우측 방향이 변형률이 증가하는 방향)은 변형률을 세로축(상측 방향이 온도가 증가하는 방향)은 온도를 나타낸다.

[0032] 도 1에서 메쉬는 샘플링된 변형률 및 온도에 의한 그리드(i,j)의 복수의 위치에 형성되는 것일 수 있다.

[0033] 도 1(a)에서 초기 메쉬의 그리드(grid) (i,j)에 샘플링된 변형률 ε_i와 온도 T_j에서 온도 비보상된 유동 상수 C_{ij}와 m_{ij}를 저장한다. 도 1(b)는 재료시험 중 시편의 온도 상승에 따라 그리드(i,j)의 위치 변화를 나타낸다. 도 1(c)는 모든 초기 그리드 점의 온도 변화량을 보상해 준 이후에 초기 메쉬의 그리드(i,j)에서 가져야 할 유동 상수 C'_{ij}와 m'_{ij}를 보간법을 이용하여 구한 상태를 나타낸다. 도 1(c)는 샘플링 점, 즉 그리드의 위치를 변경하지 않은 상태에서 온도 보상이 이루어진 유동 상수 정보를 나타낸다.

[0034] 도 1을 참조하면, 도 1에서의 가로축은 변형률, 세로축은 온도를 나타내며, (a)는 온도 및 변형률의 메쉬 그리드에서 유동 상수를 온도 효과를 고려하지 않고 계산하여 그리드(격자)에 나타낸 것이다.

[0035] C_{ij}와 m_{ij}는 일반적인 C-m 모델의 유동 상수를 의미할 수 있고, 이 경우 일반적으로 규칙적이고 기하학적 유동 그리드 메쉬 구조는 수학적 행렬의 형태를 유지할 수 있다. 그러나, 온도 보상이 이루어지면, 유동 그리드 메쉬 구조는 도 1의 (b)와 같이 변형될 수 있다.

[0036] 도 1의 (b)에 도시된 바와 같이, 온도 보상에 의해 변형된 유동 메쉬는 고정 변형률 ε_i에서 업데이트된 온도 T_j^i에 의해 정의되고, 초기 유동 메쉬의 그리드에서 계산된 동일한 유동 상수로 정의될 수 있다.

[0037] 변형된 유동 메쉬는 유동 정보를 계산하는데 사용될 수 있지만, 지정된 상태 변수점이 속하는 메쉬상의 위치 즉, 사변형을 찾는데 소요되는 시간이 커지기 때문에 비효율적일 수 있다.

[0038] 도 1의 (c)에서 C'와 m'으로 표시된 규칙적인 메쉬에서 온도 보상된 유동 상수는 도 1의 (b)에 도시된 대로 일정한 변형률 선을 따라 보간 또는 외삽 방식(extrapolation)으로 계산될 수 있다.

[0039] 도 1의 (a)에 도시된 바와 같이, 샘플링된 온도와 변형률을 선택하면, $\triangle T_{ij}$로 표시된 i번째 샘플의 변형률과 j번째 샘플 온도에서의 온도 증가는 다음의 수학식 1에 의해 시험 재료의 대략적인 에너지 손실 또는 소성일을 토대로 계산될 수 있다.

수학식 1

[0040] $$\Delta T_{ij} = \int_0^{\varepsilon_i} \frac{\xi\sigma}{\rho c} d\varepsilon \approx \xi \frac{\bar{\sigma}\varepsilon_i}{\bar{\rho}\bar{c}}$$

[0041] 여기서, ΔT_{ij}는 i번째 샘플 변형률과 j번째 샘플 온도에서의 증가된 온도, ε_i는 i번째 샘플 변형률, ρc는 열용량, σ는 유동 응력, ξ는 온도 보정 변수이다.

[0042] 수학식 1의 변수 머리에 있는 바아는 평균값을 나타낸 것일 수 있다.

수학식 2

[0043] $$T_j^i = T_j + \Delta T_{ij}$$

[0044] 여기서, Tj는 j번째 샘플 온도, T_j^i 는 j번째 샘플 온도와 i번째 샘플 변형률에서의 최종 온도이다.

[0045] 예를 들어, j번째 샘플 온도가 300도(℃)에서 350도로 증가된 경우, ΔT_{ij} 는 50도이고, T_j^i 는 350도이다.

[0046] 온도 보정 변수 ξ는 단위 시스템, 응력 파워(stress power)에 대한 에너지 소산 비율이며, 변형률 및 열전도율에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어, σ와 ρc의 단위가 각각 MPa과 Nm/℃이고, 변형률이 높고 열전도율이 낮아 열전달을 무시할 수 있는 경우, 0.9가 될 수 있다.

[0047] 온도 보정 변수 ξ=0.9 인 경우, 소재중 티타늄 합금(Ti-6Al-4V 함금)인 경우에 양호한 근사치를 제공할 수 있고, 이러한 양호한 근사값은 티타늄 합금의 열전도율이 매우 낮기 때문일 수 있다.

수학식 3

[0048] $$\sigma = C(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)\, \varepsilon^{m(\varepsilon,\dot{\varepsilon},T)}$$

[0049] 여기서, σ는 유동 응력, C와 m은 유동 상수, ε는 변형률, $\dot{\varepsilon}$ 는 변형률 속도, T는 온도이다. 유동 상수 C와 m은 일반성을 잃지 않으므로 변형률 ε, 변형률 속도 $\dot{\varepsilon}$, 온도 T의 함수로 간주한다. 유동 상수는 피팅된 유동 곡선과 실험한 RFC-BTC(온도 보상전 기준 유동 곡선) 사이의 오차를 최소화하는데 계산될 수 있다.

[0050] 또한, 상기 유동 상수는 온도 보상을 실시하지 않은 상태에서 채택된 수학식 1에 적합한 각종 수치적 기법을 사용하여 구해질 수 있다.

[0051] 도 2에서 실험한 RFC-BTC(온도 보상전 기준 유동 곡선)(실선)의 피팅된 RFC-BTC(점선)는 수학식 3에 의한 C-m 유동 모델을 이용하여 얻을 수 있다.

[0052] 수학식 3에서 C와 m은 상태 변수, 즉 변형률, 변형률 속도, 온도 등의 함수로 간주할 수 있으며, 이 함수에 포함된 상수를 유동 상수로 취급하여 최적화할 수 있다.

[0053] 실험치와 예측치간의 오차는 변형률 및 변형률 속도가 증가할 수록 커질 수 있다.

[0054] 유동 상수는 피팅된 것과 실험치 사이의 오차를 최소화함에 따라 계산된 것일 수 있다.

[0055] 도 2의 (a) 내지 (e)는 온도 보상전 상태의 여러 온도와 변형률 속도에 대한 유동 곡선 그래프로서, 가로축은 진변형률(True strain)을 나타낸 것이고, 세로축은 유동 응력(Flow stress)를 나타낸 것이다.

[0056] 도 2에서 실선 곡선은 균일한 원통부재 압축을 가정하여 계산된 다양한 샘플 온도 및 변형률 속도에 대한 변형률에 대한 해당 RFC-BTC(온도 보상전 기준 유동 곡선)를 나타낸 것이다. 피팅된 RFC-BTC(온도 보상전 기준 유동 곡선)에 의해 얻은 예측과 실험 간에 압축 하중-스트로크 곡선에 약간의 차이를 유발할 수 있다. 도 2의 점선 곡선은 일반 확장 C-m 유동 모델에 의해 피팅된 유동 곡선을 나타내는 것일 수 있다.

[0057] 또한, 도 2의 그래프는 피팅된 RFC-BTC(온도 보상전 기준 유동 곡선)가 매우 정확함을 보여주는 것일 수 있다. 그러나, 일반화된 유동 모델을 사용한 유한요소해석(Finite element analysis) 예측 결과는 실험의 압축 하중-스트로크 곡선과 뚜렷한 차이를 나타낼 수 있다. 변형률 속도가 낮을 때 차이가 상대적으로 작고, 그 차이가 변형률 또는 변형률 속도가 증가함에 따라 증가할 수 있다.

[0058] 시험 마그네슘 합금의 열전도율은 상당히 높기 때문에 0.1/s의 낮은 변형률 속도인 경우에는 무시할 수 있는 차

이가 관찰될 수 있다. 이러한 실험 및 수치 결과는 이러한 예측에 사용된 피팅된 RFC-BTC(온도 보상전 기준 유동 곡선)가 테스트 과정의 등온 가정하에서 계산되었기 때문에 온도 효과로 인한 차이를 강조할 수 있다.

[0059] 온도 보정 변수 ξ의 에너지 손실에 따라 달라질 수 있는데, 다시 말해서, 변형률 속도에 따라 달라질 수 있다. 압축 시험시 소재 온도가 상승하게 되며, 변형률 속도가 낮을 경우, 압축 시험하면서 외부로 열이 방출되는데, 이를 에너지 손실이라고 할 수 있고, 따라서, 변형률 속도가 낮으면 에너지 손실이 커지고, 변형률 속도가 빠르면 에너지 손실이 적어지기 때문에, 온도 보정 변수ξ는 변형률 속도에 따라 달라질 수 있다.

[0060] 가정된 온도 보정 변수와 함께 온도 보상 체계를 사용하여 비교를 위해 실험 및 피팅된 RFC-BTC(온도 보상전 기준 유동 곡선)와 함께 도 3에 도시된 바와 같이 온도 보상된 유동 곡선을 획득할 수 있다.

[0061] 도 3을 참조하면, 온도가 보상된 유동 응력은 보상되지 않은 유동 응력에 비해 현저하게 크며, 특히 큰 변형률 속도에서 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 차이의 크기는 재료간의 열용량의 차이의 크기에 의존적일 수 있다.

[0062] 도 3은 압축 하중-스트로크 곡선 그래프로서, 실선은 실험치, 점선은 도 2에서 피팅된 온도 비보상 유동 곡선을 이용하여 예측한 것으로, 실험 결과와 예측 결과는 큰 차이를 보이고 있다.

[0063] 도 4는 기준치, 비보상 유동 곡선과 함께 본 발명에 따른 온도 보상된 유동 곡선의 비교 그래프이다. 실선(——)은 기준치인 실험치 유동 곡선, 점선(·····)은 비보상 유동 곡선, 긴 점선(- - - -)은 온도 보상된 유동 곡선일 수 있다.

[0064] 도 5는 실험치와 예측치의 압축 하중-스트로크 곡선의 비교 그래프로써, 모든 원통 부재의 압축 시험의 압축 하중-스트로크 실험 결과를 보상 및 비보상 유동 곡선을 사용하여 얻은 상당 예측 결과와 비교한 것이다. 도 5의 그래프에서, 실선(——)은 기준치인 실험치 유동 곡선, 점선(·····)은 비보상 유동 곡선, 긴 점선(- - - -)은 온도 보상된 유동 곡선일 수 있다.

[0065] 또한, 도 5는 도 2에서의 온도 비보상 유동 곡선과 도 4의 온도 보상 유동 곡선의 예측용으로 채용된 것이다. 온도 보상 유동 곡선을 사용한 예측 결과는 실험 결과에 부합하는 반면, 온도 비보상 유동 곡선을 사용한 예측 결과는 실험 결과와 부합하지 않는다.

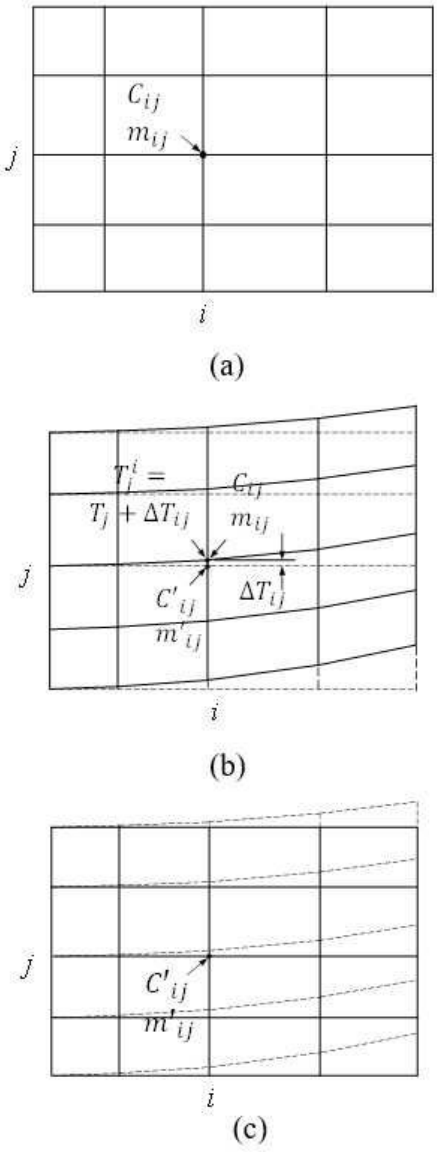
[0066] 전자인 소재(마그네슘 합금)의 온도 보상 유동 곡선은 크랙으로 인한 약간의 불확실성에 시험이 노출되는 더 큰 변형을 제외하고 허용될 수 있다. 보상된 유동 곡선도 비보상된 유동 곡선보다 현저하게 우수할 수 있다.

[0067] 이상에서 실시 예에 설명된 특징, 구조, 효과 등은 본 발명의 적어도 하나의 실시 예에 포함되며 반드시 하나의 실시 예에만 한정되는 것은 아니다. 또한, 각 실시 예의 특징, 구조, 효과 등은 실시 예들이 속하는 분야의 통상의 지식을 가지는 자에 의해 다른 실시 예들에 대해서도 조합 또는 변형되어 실시 가능하다. 따라서 이러한 조합과 변형에 관계된 내용들은 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

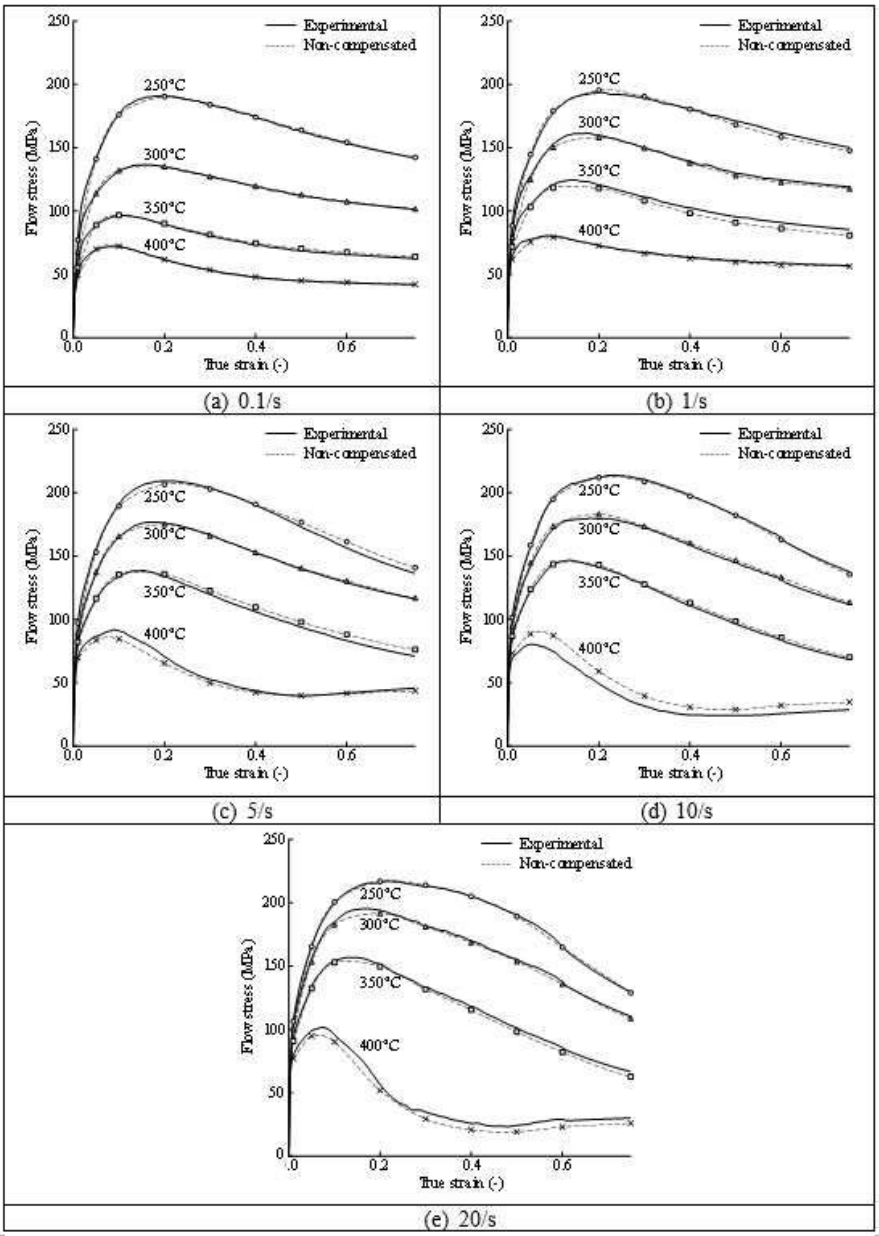
[0068] 또한, 이상에서 실시 예를 중심으로 설명하였으나 이는 예시일 뿐 본 발명을 한정하는 것이 아니며, 본 발명이 속하는 기술 분야의 통상의 지식을 가진 자라면 본 실시 예의 본질적인 특성을 벗어나지 않는 범위에서 이상에 예시되지 않은 여러 가지의 변형과 응용이 가능함을 알 수 있을 것이다. 예를 들어, 실시 예에 구체적으로 나타난 각 구성 요소는 변형하여 실시할 수 있는 것이다. 그리고 이러한 변형과 응용에 관계된 차이점들은 첨부된 청구 범위에서 규정하는 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

도면

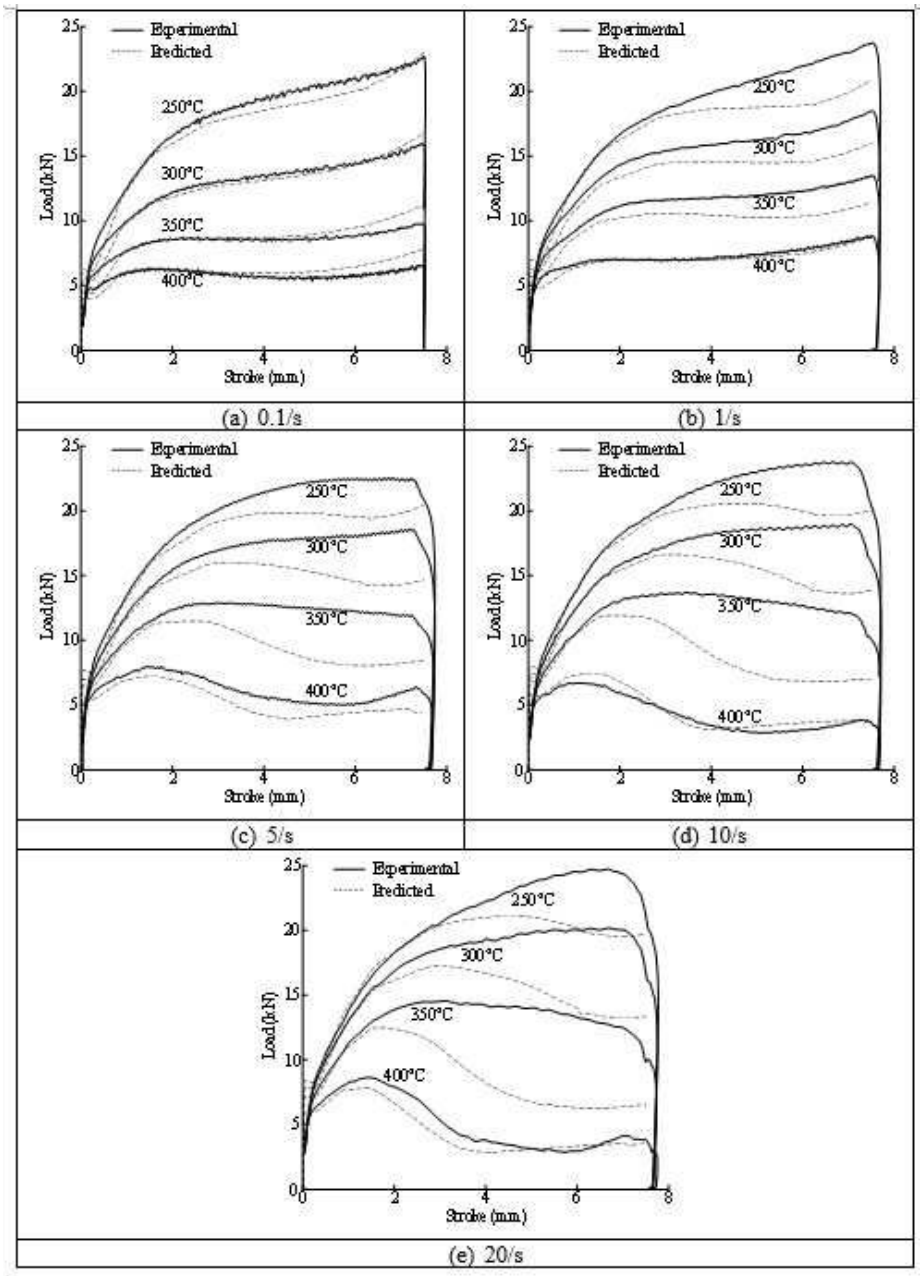
도면1


C_{ij}
m_{ij}
j
i
(a)
$T_j^i = T_j + \Delta T_{ij}$
C_{ij}
m_{ij}
C'_{ij}
m'_{ij}
ΔT_{ij}
j
i
(b)
C'_{ij}
m'_{ij}
j
i
(c)

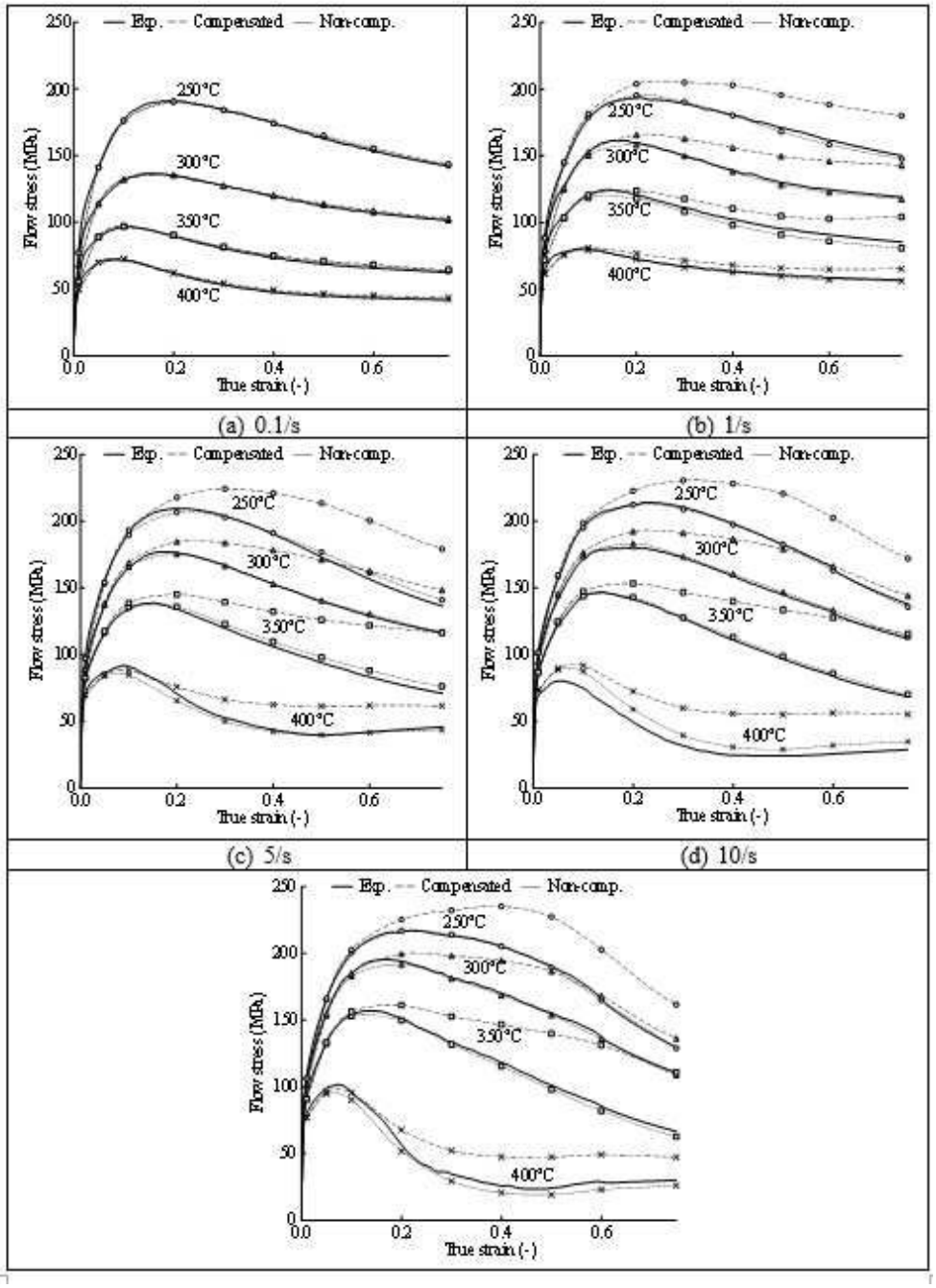
도면2


Experimental
Non-compensated
250°C
300°C
350°C
400°C
Flow stress (MPa)
True strain (-)
(a) 0.1/s
(b) 1/s
(c) 5/s
(d) 10/s
(e) 20/s

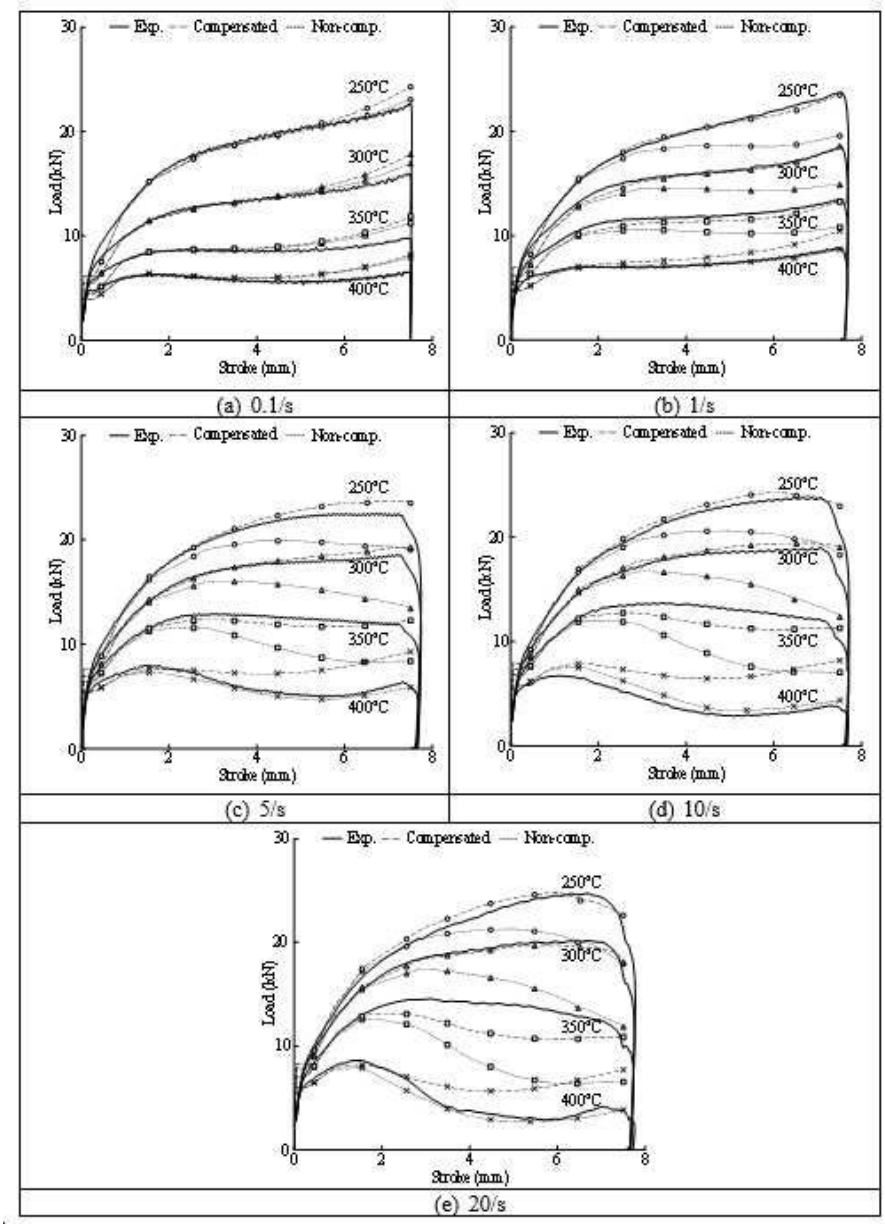
도면3


Experimental
Predicted
250°C
300°C
350°C
400°C
Load (kN)
Stroke (mm)
(a) 0.1/s
(b) 1/s
(c) 5/s
(d) 10/s
(e) 20/s

도면4


Exp.
Compensated
Non-comp.
Flow stress (MPa)
True strain (-)
250°C
300°C
350°C
400°C
(a) 0.1/s
(b) 1/s
(c) 5/s
(d) 10/s

도면5


Exp.
Compensated
Non-comp.
250°C
300°C
350°C
400°C
Load (kN)
Stroke (mm)
(a) 0.1/s
(b) 1/s
(c) 5/s
(d) 10/s
(e) 20/s