



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2021-0059601
(43) 공개일자 2021년05월25일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 11/02 (2006.01) G01N 3/20 (2006.01)
G01N 3/40 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01N 11/02 (2013.01)
G01N 3/20 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2020-0105376
(22) 출원일자 2020년08월21일
심사청구일자 2020년08월21일
(30) 우선권주장
1020190147104 2019년11월15일 대한민국(KR)

(71) 출원인
서강대학교산학협력단
서울특별시 마포구 백범로 35 (신수동, 서강대학교)
(72) 발명자
이형일
경기도 고양시 일산서구 대산로212번길 26, 1502동 304호(대화동, 성저마을15단지건영빌라)
한정무
서울특별시 관악구 문성로 74, 나동 109호(신림동)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인 천지

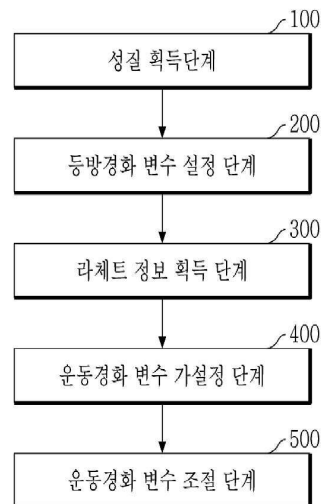
전체 청구항 수 : 총 8 항

(54) 발명의 명칭 Chaboche 모델의 변수를 결정하여 라체팅 거동을 모사하는 모사방법

(57) 요약

Chaboche 모델의 변수를 결정하여 라체팅 거동을 모사하는 모사방법에 있어서, 실험을 수행하여 재료의 성질을 획득하는 성질 획득단계, 재료의 성질을 입력하고, Chaboche 모델의 변수가 하나일 때, 상기 재료의 라체팅 시작값에 대응되는 운동경화변수를 획득하는 라체트 정보 획득 단계, 상기 재료의 성질에 대응되는 복수의 운동경화변수들을 가설정하는 운동경화변수 가설정단계, 상기 복수의 운동경화변수들의 차이를 연산하여 라체트 시작값과 라체트 증분률을 결정하는 운동경화변수조절단계를 포함하는 라체팅 거동을 모사하는 모사방법이 개시된다.

대표도 - 도5



(52) CPC특허분류

G01N 3/40 (2013.01)

(72) 발명자

구성용

서울특별시 송파구 동남로6길 29-4, 나동 302호(문정동, 현대모던빌라)

정의환

서울특별시 마포구 만리재로 39, 503호 (신공덕동)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1711049521

과제번호 2017R1A2B3009706

부처명 과학기술정보통신부

과제관리(전문)기관명 한국연구재단

연구사업명 개인기초연구(미래부)

연구과제명 코팅된 멀티스케일 소재에 대한 압입시험법 구축 : 변형-파손 특성 분석 및 내구평

가

기 여 율 1/1

과제수행기관명 서강대학교

연구기간 2017.03.01 ~ 2018.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

Chaboche 모델의 변수를 결정하여 라체팅 거동을 모사하는 모사방법에 있어서,

실험을 수행하여 재료의 성질을 획득하는 성질 획득단계;

재료의 성질을 입력하고, Chaboche 모델의 변수가 하나일 때, 상기 재료의 라체팅 시작값에 대응되는 운동경화 변수를 획득하는 라체트 정보 획득 단계;

상기 재료의 성질에 대응되는 복수의 운동경화변수들을 가설정하는 운동경화변수 가설정단계;

상기 복수의 운동경화변수들의 차이를 연산하여 라체트 시작값과 라체트 증분률을 결정하는 운동경화변수조절단계

를 포함하는 라체팅 거동을 모사하는 모사방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 운동경화변수들은 응력공간에서 항복곡면 중심 이동률인 $C1$, $C2$ 와, 상기 $C1$, $C2$ 에서의 중심 이동의 감소율인 $\gamma 1$, $\gamma 2$ 인 것

을 특징으로 하는 라체팅 거동을 모사하는 모사방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 운동경화변수 가설정단계에서는

상기 $C1$, $C2$ 는 상기 재료의 응력공간에서 항복곡면 중심 이동률의 절반값으로 설정하고,

상기 $\gamma 1$, $\gamma 2$ 는 상기 재료의 항복곡면 중심 이동률의 중심 이동의 감소율과 동일하게 설정하는 것

을 특징으로 하는 라체팅 거동을 모사하는 모사방법.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 운동경화변수조절단계에서는

상기 $\gamma 1 - \gamma 2$ 를 연산하여 라체트 증분률을 설정하는 제1운동경화변수 설정단계와

상기 $C1 - C2$ 를 연산하여 상기 제1운동경화변수 설정단계에서 변경되는 라체트 변형 시작 값을 설정하는 제2운동경화변수 설정단계

를 포함하는 라체팅 거동을 모사하는 모사방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

등방경화변수들을 설정하는 등방경화변수설정단계를 더 포함하는 것

을 특징으로 하는 라체팅 거동을 모사하는 모사방법.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 등방경화변수들은

항복곡면 크기의 최대변화량인 $Q_{\max}$ 와 소성변형의 진행에 따른 항복곡면 크기의 변화율인 b 인 것을 특징으로 하는 라체팅 거동을 모사하는 모사방법.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 등방경화변수설정단계는

상기 재료의 항복응력과 진폭응력을 비교하여, 항복응력이 진폭응력보다 크면, 상기 항복응력에 상기 진폭응력의 차를 연산한 값보다 작은 값을 가지도록 $Q_{\max}$ 를 설정하는 제1등방경화변수 설정단계

를 포함하는 라체팅 거동을 모사하는 모사방법.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 등방경화변수설정단계는

상기 $Q_{\max}$ 가 설정되고 난 후, 등방경화식을 이용하여 상기 b 를 설정하는 제2등방경화변수 설정단계

를 포함하는 라체팅 거동을 모사하는 모사방법.

$$R = Q_{\max} \left[1 - \exp(-b \varepsilon_{eq}^{pl}) \right]$$

등방경화식:

R : 등방경화에 의한 항복곡면 크기 변화량

$Q_{\max}$: 등방경화에 의한 항복곡면 크기 최대변화량

ε_{eq}^{pl} : 유효소성변형률

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 Chaboche 모델의 변수를 결정하여 라체팅 거동을 모사하는 모사방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 대부분의 기계부품들은 반복하중에 따라 피로수명에 큰 영향을 받는다. Xia 등은 반복인장으로 발생한 라체팅에 의한 누적된 소성 변형은 피로수명을 단축시키는 원인이라고 밝혀낸 바 있다.

[0003] 도 1은 반복 하중 조건 하에 재료에서 관찰되는 현상을 도시한 것이다.

[0004] 재료에 반복적으로 하중이 가해지면, 이 재료는 단조 하중시와는 다른 거동을 보이게 된다. 평균응력이 0보다 클 때, 가해지는 반복하중에 의한 최대응력이 항복강도보다 작을 때는 순수 탄성거동으로 모든 변형은 완전 회복된다. 반면, 최대응력이 항복강도보다 크면, 반복하중에 의하여 소성 변형이 재료에 쌓이게 된다.

[0005] 유한 반복수에서는 소성변형이 쌓이나, 무한 반복수에서는 소성 변형이 쌓이지 않고 정착되게 된다. 이에 '정착하다'는 뜻의 단어 셰이크다운(shakedown)으로 이 거동을 표현한다. 정착 시 거동이 완전 탄성인 경우를 '탄성 셰이크다운'이라 하며, 이 때 최대응력은 탄성셰이크 다운의 한계(σ_{el})보다 작다. 최대응력이 한계를 넘으면 무

한반복수에서 응답이 히스테리시스가 된다. 이런 경우 '소성셰이크다운'이라 하며 이 때 최대응력은 소성셰이크다운 한계(σ_{pl})보다 작다. 최대응력이 소성셰이크다운 한계(σ_{pl})를 넘으면 소성변형률이 지속적으로 축적되며, 이러한 거동을 라체팅이라고 한다.

[0006] 이러한 라체팅에 재료의 피로수명에 영향을 미치므로, 라체팅을 연구하기 위하여 다양한 모델이 활용되며, Prager와 ziegler의 선형이동경화 모델에 Frederick과 Armstrong이 제시한 완화항(relaxation term)을 추가함으로써 가능해졌다. (A-F 모델)

[0007] 또한, 여러 모델 중에서는 Chaboche에 의한 다중후방응력 비선형 등방 이동 경화 모델이 반복 하중 하에 재료의 소성거동을 나타내는데 많이 이용된다. (참고로 Chaboche 모델은 A-F모델에 다중후방응력 개념을 추가한 것임) 그러나 현재까지는 운동경화 초기이론에 입각하여 라체팅 현상을 모사함으로써 모사된 모델이 실제 현장 적용에 불가능한 문제점이 있다. 그리고 이를 개량해야 된다는 목소리가 높아지고 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0008] (특허문헌 0001) 논문 “표준 인장시험과 반복하중 C(T) 시험을 이용한 균열해석에서의 Chaboche 복합경화 모델 결정법” 2019.12. 공개(ISSN 1738-8333)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 본 발명은 전술한 문제점을 해결하기 위한 것으로 Chaboche 모델에서 2개의 후방응력 변수를 설정하여 라체팅 현상을 모사할 수 있는 모사방법을 제공하는데 목적이 있다.

과제의 해결 수단

[0010] Chaboche 모델의 변수를 결정하여 라체팅 거동을 모사하는 모사방법은 실험을 수행하여 재료의 성질을 획득하는 성질 획득단계, 재료의 성질을 입력하고, Chaboche 모델의 변수가 하나일 때, 상기 재료의 라체팅 시작값에 대응되는 운동경화변수를 획득하는 라체트 정보 획득 단계, 상기 재료의 성질에 대응되는 복수의 운동경화변수들을 가설정하는 운동경화변수 가설정단계, 상기 복수의 운동경화변수들의 차이를 연산하여 라체트 시작값과 라체트 증분률을 결정하는 운동경화변수조절단계를 포함한다.

[0011] 상기 운동경화변수들은 응력공간에서 항복곡면 중심 이동률인 C1, C2와, 상기 C1, C2에서의 중심 이동의 감소율인 γ_1 , γ_2 인 것을 특징으로 한다.

[0012] 상기 운동경화변수 가설정단계에서는 상기 C1, C2는 상기 재료의 응력공간에서 항복곡면 중심 이동률의 절반값으로 설정하고, 상기 γ_1 , γ_2 는 상기 재료의 항복곡면 중심 이동률의 중심 이동의 감소율과 동일하게 설정하는 것을 특징으로 한다.

[0013] 상기 운동경화변수조절단계에서는 상기 $\gamma_1 - \gamma_2$ 를 연산하여 라체트 증분률을 설정하는 제1운동경화변수 설정단계와 상기 C1 - C2를 연산하여 상기 제1운동경화변수 설정단계에서 변경되는 라체트 변형 시작 값을 설정하는 제2운동경화변수 설정단계를 포함한다.

[0014] 또한, 등방경화변수들을 설정하는 등방경화변수설정단계를 더 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0015] 상기 등방경화변수들은 항복곡면 크기의 최대변화량인 Qmax와 소성변형의 진행에 따른 항복곡면 크기의 변화율인 b인 것을 특징으로 한다.

[0016] 상기 등방경화변수설정단계는 상기 재료의 항복응력과 진폭응력을 비교하여, 항복응력이 진폭응력보다 크면, 상기 항복응력에 상기 진폭응력의 차를 연산한 값보다 작은 값을 가지도록 Qmax를 설정하는 제1등방경화변수 설정단계를 포함한다.

[0017] 상기 등방경화변수설정단계는 상기 Qmax가 설정되고 난 후, 등방경화식을 이용하여 상기 b를 설정하는 제2등방경화변수 설정단계를 포함한다.

$$R = Q_{\max} \left[1 - \exp(-b \varepsilon_{eq}^{pl}) \right]$$

[0018] 여기서, 등방경화식은 이다.

[0019] R : 등방경화에 의한 항복곡면 크기 변화량

[0020] $Q_{\max}$: 등방경화에 의한 항복곡면 크기 최대변화량

[0021] ε_{eq}^{pl} : 유효소성변형률

발명의 효과

[0022] 상기와 같은 본 발명인 라체팅 거동을 모사하는 모사방법은 Chaboche 모델에서 2개의 후방응력 변수를 결정하여, 라체팅 거동을 모사할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0023] 도 1은 반복 하중 조건 하에 재료에서 관찰되는 현상을 도시한 것이다.

도 2는 반복하중에 의한 재료의 거동을 모사하기 위하여 2차원 유한요소모델을 도시한 것이다.

도 3은 표 1의 변수를 이용하여 등방경화 미포함시 σ_m 과 σ_a 를 변형시켜 라체트 증분률의 발생 조건을 확인한 그래프이다.

도 4는 표 1의 변수를 이용하여 등방경화 포함 시, σ_m 과 σ_a 를 변형시켜 라체트 증분률의 발생 조건을 확인한 그래프이다.

도 5는 본 발명인 Chaboche 모델의 변수를 결정하여 라체팅 거동을 모사하는 모사방법의 순서도이다.

도 6은 본 발명의 등방경화 변수 설정 단계의 순서도이다.

도 7은 본 발명인 운동경화 변수 조절 단계의 순서도이다.

도 8은 표 2의 변수에 따른 라체트 시작값과 라체트 증분률의 변화를 도시한 그래프이다.

도 9a는 (σ_m , σ_a) = (300, 250) MPa의 시험조건에서 본 발명의 방법을 적용한 SUJ2 베어링강의 단조구간 거동과 라체팅 거동의 예측결과이다.

도 9b는 도 9a에서 획득한 운동 경화 변수를 (σ_m , σ_a) = (300, 240) MPa의 시험조건에 적용한 예측결과이다.

도 9c는 도 9a에서 획득한 운동 경화 변수를 (σ_m , σ_a) = (300, 260) MPa의 시험조건에 적용한 예측결과이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0024] 이하, 본 발명의 일실시예를 예시적인 도면을 통해 상세하게 설명한다. 그러나 이는 본 발명의 범위를 한정하려고 의도된 것은 아니다.

[0025] 각 도면의 구성요소들에 참조부호를 부가함에 있어서, 동일한 구성요소들에 대해서는 비록 다른 도면상에 표시되더라도 가능한 한 동일한 부호를 가지도록 하고 있음에 유의해야 한다. 또한, 본 발명을 설명함에 있어, 관련된 공지 구성 또는 기능에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명은 생략한다.

[0026] 또한, 도면에 도시된 구성요소의 크기나 형상 등은 설명의 명료성과 편의상 과장되게 도시될 수 있다. 또한, 본 발명의 구성 및 작용을 고려하여 특별히 정의된 용어들은 본 발명의 실시예를 설명하기 위한 것일 뿐이고, 본 발명의 범위를 한정하는 것이 아니다.

[0027] 본 발명인 Chaboche 모델의 변수를 결정하여 라체팅 거동을 모사하는 모사방법을 설명하기에 앞서서 Chaboche 모델이 선택된 이유에 대하여 설명을 할 필요가 있으므로, 이를 먼저 설명하도록 하겠다.

[0028] Chaboche 모델은 아래와 같은 비선형이동경화식으로 나타내 질 수 있다.

$$d\alpha_i = C_i \frac{1}{\sigma_f} (\sigma - \alpha_{total}) d\varepsilon_{eq}^{pl} - \gamma_i \alpha_i d\varepsilon_{eq}^{pl}$$

[0029] 비선형이동경화식:

[0030] (i : i 번째, α : 후방응력텐서, C : 응력공간에서 항복곡면 중심의 이동률, γ : 소성변형 누적에 따른 C 에 의한 중심이동 완화율, σ_f : 후속항복곡면의 크기, σ : 응력텐서, α_{total} : 후방응력텐서의 합, ε_{eq}^{pl} : 유효 소성변형률)

[0031] 또한, Chaboche 모델에서 활용 가능한 등방경화식은 아래와 같다.

$$R = Q_{max} \left[1 - \exp(-b\varepsilon_{eq}^{pl}) \right]$$

[0032] 등방경화식:

[0033] (R : 등방경화에 의한 항복곡면 크기 변화량, Q_{max} : 등방경화에 의한 항복곡면 크기 최대변화량, b : 소성변형 누적에 따른 항복곡면 크기 변화율, ε_{eq}^{pl} : 유효소성변형률)

[0034] 위 식들을 이용하여 유한 해석을 수행하는 소프트웨어(일례로 Abaqus 6.13)를 이용하여 반복 하중을 받는 재료의 거동을 모사하였다.

[0035] 도 2는 반복하중에 의한 재료의 거동을 모사하기 위하여 2차원 유한요소모델을 도시한 것이다.

[0036] 반복하중에 의한 재료의 거동을 모사하기 위하여 2차원 유한요소모델을 이용하였다. 하중은 가상화된 모델에 골고루 압력을 인가하여 구현했다. 단조하중 해석 시에는 도 2와 같은 요소망으로 진행하여도 문제되지 않으나, $\delta\varepsilon$ 라체트 증분률 ()이 발생되면 모델에 변형이 발생되고 그에 따라 단면적이 변경되어 일정한 응력을 인가하기 불가능하였다. 따라서 단조 하중은 도 2와 같은 가상화된 모델을 이용하였고, 반복하중은 요소망을 활용하였다.

[0037] 여기서, 재료의 조건과 입력된 파라미터는 아래의 표 1과 같다.

E (GPa)	ν	σ_0 (MPa)	C (GPa)	γ	Q_{max} (MPa)	b
200	0.3	300	12	40	30	50

[0038]

[0039] E : 영률, ν : 푸아송비, σ_0 : 항복강도, C : 이동경화변수, γ : 이동경화변수, Q_{max} : 등방경화변수, b : 등방경화변수

[0040] 도 3는 표 1의 변수를 이용하여 등방경화 미포함시 σ_m 과 σ_a 를 변형시켜 라체트 증분률의 발생 조건을 확인한 그래프이다.

[0041] 도 4은 표 1의 변수를 이용하여 등방경화 포함 시, σ_m 과 σ_a 를 변형시켜 라체트 증분률의 발생 조건을 확인한 그래프이다.

[0042] 일반적으로 인장시험을 통하여 획득한 유동강도와 소성변형률을 유한요소해석 틀에 입력하여 동일한 재료에 대한 구조해석을 수행하는 것은 등방경화모델이 이용된다.

[0043] 그러나 도 4에서 확인되는 바와 같이, 등방경화모델을 이용하면 히스테리루프가 형성되지 않아, 라체트 현상을

모사할 수 없게 된다. 그러나 Chaboche 모델을 이용하면, 히스테리시스 루프가 형성된다. 따라서 라체트 현상을 모사하기 위하여는 Chaboche 모델을 활용하여야 한다.

[0044] 또한, 왜 2개의 후방응력을 고려하여야 하는지 문제가 된다. 전술한 비선형이동경화식과 등방경화식의 변수인 C , γ , Q_{max} , b 를 확인하면 직관적으로 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

[0045] C 는 증가하고, γ 은 감소 시 후방응력텐서 증분이 증가함을 알 수 있다. 이동경화에서 후방응력텐서의 증가는 경화량의 증가를 의미하므로 (델타-시그마)곡선에서 기울기의 증가를 의미함을 알 수 있다.

[0046] 또한, Q_{max} 가 증가할수록 동일변형에 대한 경화량이 증가하고, b 가 증가할수록 경화속도가 증가함을 알 수 있다. Q_{max} 가 양수일 때는 경화거동을 모사할 수 있고, Q_{max} 가 음수일 때는 연화거동을 모사할 수 있다. 이를 이동경화와 함께 고려하여 보면, 이동경화에 대한 경화량이 등방경화에 대한 연화량보다 크다면 경화되는 것이므로, 이동경화와 함께 등방경화를 고려 시, 경화와 연화는 항복곡면 크기의 증가와 감소로 이해될 수 있다.

[0047] 그러나 라체팅을 고려해야 하는 공학구조물이 받는 응력 상태는 다양하며, 일례로 진폭응력이 항복강도보다 작은 경우도 많다. 단일 후방응력 Chaboche모델로는 이런 다양한 경우를 모사할 수 없으므로, 후방응력변수의 개수는 복수 개여야 한다.

[0048] 그러나 3개 이상의 후방응력변수를 고려한다면 (고려되어야 할 후방응력의 변수는 6개이며) 이들의 경화 형태는 서로에게 영향을 받기 때문에 재료의 해석에 매우 비효율적이게 된다.

[0049] 그러므로, 2개의 후방응력 변수가 고려되는 것이 효율성과 정확성을 만족할 수 있다.

[0050] 도 5는 본 발명인 Chaboche 모델의 변수를 결정하여 라체팅 거동을 모사하는 모사방법의 순서도이다.

[0051] 본 발명인 Chaboche 모델의 변수를 결정하여 라체팅 거동을 모사하는 모사방법은 성질 획득단계(100), 라체트 정보 획득단계(300), 등방경화변수설정단계(200), 운동경화변수 가설정단계(400), 운동경화변수조절단계(500)를 포함한다.

[0052] 성질 획득단계(100)는 재료의 성질을 획득하는 단계이다.

[0053] 일례로 재료의 성질은 반복인장 시험을 수행하여 획득된 데이터를 정리하여 획득될 수 있다. 이를 통하여 본 발명에서 변수 결정이 적합한지 아닌지에 대한 기준 데이터를 획득할 수 있으며, 설정이 되어야 하는 변수 이외에 다른 값들은 이 데이터를 통하여 획득된 값으로 대체될 수 있다.

[0054] 라체트 정보 획득단계(300)는 획득된 데이터에서 유한요소해석 소프트웨어에 입력하고, Chaboche 모델이 변수가 하나일 때, 획득된 실험 데이터의 라체트 시작값에 대응되는 C , γ 를 획득하는 단계이다.

[0055] 도 6은 본 발명의 등방경화 변수 설정 단계의 순서도이다.

$$\sigma_f = \sigma_o + R$$

[0056]

(σ_f : 후속항복곡면의 크기, σ_o : 초기항복곡면의 크기, R : 등방경화에 의한 항복곡면 크기 변화량)

[0058] 등방경화변수설정단계(200)는 등방경화변수들을 설정하는 단계이다.

[0059] 등방경화변수는 항복곡면 크기의 최대변화량인 Q_{max} 와 소성변형의 진행에 따른 항복곡면 크기의 변화율인 b 를 설정하는 단계이다.

[0060] 이를 위하여 Chaboche 모델을 이용하여 전술한 표 1의 변수를 설정하여, 라체트 증분률이 발생하는 조건을 확인하여 보았다. 여기서는 등방경화 변수를 포함할 때, 아닐 때로 나누어 평균응력(σ_m)과 진폭응력(σ_a)를 변화시키며 반복 해석을 해 보았다.

[0061] 등방경화 변수를 고려하지 않을 때에는 진폭응력(σ_a)이 평균응력(σ_m)의 크기보다 클 때, 라체트 증분률이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

[0062] 그러나 등방경화 변수를 고려하였을 때에는 진폭응력(σ_a)이 후속항복곡면의 크기(σ_f)보다 클 때, 라체트 증분률이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 진폭응력(σ_a)과 후속항복곡면의 크기(σ_f)의 차이가 0에 가까울수록 라체트 증분률은 0에 수렴하는 것을 확인할 수 있었다.

[0063] 이를 통하여 본 발명은 등방경화변수설정단계(200)는 제1등방경화변수 설정단계(210)와 제2등방경화변수 설정단계(220), 제3등방경화변수 설정단계(230)로 구성될 수 있다.

[0064] 제1등방경화변수 설정단계(210)는 전술한 성질 획득단계(100)를 통하여 획득된 물성의 변수와 각각의 값들을 획득한 후 항복응력과 진폭응력을 비교를 우선 수행한다. 그리고 항복응력이 진폭응력보다 크면, 항복곡면 크기의 최대변화량인 Q_{max} 와 항복응력을 합한 값이 진폭응력보다 작도록 Q_{max} 를 설정한다.

[0065] 제2등방경화변수 설정단계(220)는 설정된 Q_{max} 를 기반으로 등방경화식을 이용하여 b 를 설정한다. 전술한 바와

$$R = Q_{max} \left[1 - \exp(-b \varepsilon_{eq}^{pl}) \right]$$

같이 등방경화식은 ()과 같으므로, 실험을 통하여 획득된 등방경

화에 의한 항복곡면 크기 변화량(R)과 유효소성변형률 (ε_{eq}^{pl}) 및 설정된 Q_{max} 를 이용하여 b 값을 연산할 수 있다.

[0066] 제3등방경화변수 설정단계(230)는 전술한 성질 획득단계(100)를 통하여 획득된 물성의 변수와 각각의 값들을 획득한 후 항복응력과 진폭응력을 비교하는 단계를 우선 수행하고, 진폭응력이 항복응력보다 크면, 라체트 증분률이 등방경화변수와 상관없이 발생되므로, Q_{max} 를 0으로 설정한다. 여기서, b 값은 Q_{max} 가 0이므로, 어떠한 값이 입력되어도 문제되지 않는다.

[0067] 이 후 전술한 유한요소해석 틀에 설정된 변수를 입력한다.

[0068] 가설정 단계를 수행한다.

[0069] 여기서, 가설정 단계를 설명하기에 앞서서, 라체트 변형 시작 값과 라체트 증분률의 관계를 확인할 필요가 있다.

[0070] 아래는 표 2이다.

[0071] 도 7은 본 발명인 운동경화 변수 조절 단계의 순서도이다.

[0072] 도 8은 표 2의 변수에 따른 라체트 시작값과 라체트 증분률의 변화를 도시한 그래프이다.

set #	C_1 (GPa)	C_2 (GPa)	γ_1	γ_2
1	10	10	50	50
2	19	1	50	50
3	10	10	75	25
4	10	10	100	0
5	19	1	75	25
6	19	1	25	75

[0073]

[0074] 표 2는 운동경화변수들 응력공간에서 항복곡면 중심 이동률인 C_1 , C_2 와 C_1 , C_2 에서의 중심 이동의 감소율인 γ_1 , γ_2 를 다르게 설정한 값이며, 이에 따른 결과를 도시한 그래프는 도 8과 같다.

[0075] 우선 표 2의 세트 1, 2를 확인할 필요가 있다. 세트 1, 2의 결과를 도 8에서 확인하면, 확인되는 바와 같이, $\gamma_1 - \gamma_2 = 0$ 이면, C_1 , C_2 값이 변화되어도 라체트 증분률은 일정함을 알 수 있다.

[0076] 표 2의 세트 1, 3, 4를 도 8에서 확인하면, C_1 , C_2 가 일정하면 γ_1 , γ_2 의 차이가 증가됨에 따라 라체트 증분률이 작아지며, 라체트 시작값은 동일한 것을 확인할 수 있었다.

[0077] 표 2의 세트 3, 5를 도 8에서 확인하면, $\gamma_1 - \gamma_2$ 가 0이 아닌 상태에서 C_1 , C_2 값의 차이가 크면 클수록 라체트 증분률은 큰 것임을 알 수 있었다.

[0078] 표 2의 세트 3, 4를 도 8에서 확인하면, C_1 , C_2 가 일정하면, 라체트 시작값은 동일하지만, $\gamma_1 - \gamma_2$ 가 클수록

라쳇트 증분율은 급격히 감소하며, γ_1 , γ_2 중 어느 하나가 0이면, 라쳇트 증분율이 0임을 알 수 있었다.

[0079] 이러한 내용을 토대로 이중후방응력의 관계를 정리하면 다음과 같다.

$\gamma_1 = \gamma_2$	G_1, G_2 상관 γ		라쳇트 증분율 일정
$\gamma_1 \neq \gamma_2$	$\gamma_1 = 0$ 또는 $\gamma_2 = 0$		라쳇트 증분율 = 0
	$\gamma_1 \neq 0$ $\gamma_2 \neq 0$	$G_1 = G_2$ 일 때, $\gamma_1 - \gamma_2$ 증가	라쳇트 증분율 감소
	$G_1 \neq G_2$ $\gamma_1 > \gamma_2$ 일 때, $G_1 - G_2$ 증가		라쳇트 증분율 증가

[0080]

[0081] 이처럼 운동경화변수들을 설정 시, 재료의 라쳇트 현상을 모사하기 위하여는 두 가지를 크게 고려하여야 한다.

[0082] 첫 번째로 라쳇트 증분율을 모사하기 위하여 $\gamma_1 - \gamma_2$ 는 0이 아니며, 그 차이에 따라 라쳇트 증분율이 변화된다.

[0083] 두 번째로, $\gamma_1 - \gamma_2$ 를 변형하다 보면, 이에 따라 라쳇트 시작값이 변화되게 되므로 이는 $C_1 - C_2$ 를 통하여 조절될 수 있다.

[0084] 따라서 본 발명은 이와 같은 큰 두 가지를 이용하여 라쳇트 시작값과, 라쳇트 증분율을 체크하여 재료의 라쳇트 현상을 모사하도록 할 수 있다.

[0085] 운동경화변수 가설정단계(400)는 $C_1, C_2, \gamma_1, \gamma_2$ 를 설정하는 단계로, 진술한 성질 획득단계(100), 라쳇트 정보 획득단계(300)를 통하여 획득된 재료의 물성치를 확인한다. 여기서 재료의 물성치는 e, v , 항복응력 등일 수 있다. 또한, Q_{max}, b 는 진술한 제1등방경화변수 설정단계(210), 제2등방경화변수 설정단계(220), 제3등방경화변수 설정단계(230)에서 획득된 각각의 값일 수 있다.

[0086] 그리고 여기서 라쳇트 시작값에 대응되는 C, γ 를 설정할 수 있다. 여기서 숫자가 붙지 않은 C, γ 는 운동경화변수가 2개씩 4개가 아닌 한 개인 경우의 응력공간에서 항복곡면 중심 이동률과 C 에서 중심 이동의 감소율인 γ 일 수 있다.

[0087] 운동경화변수 가설정단계(400)에서는 $C_1 = C_2 = 0.5 C, \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$ 로 설정한다. 이와 같이 설정됨에 따라 유한요소해석을 수행하여 보면, 모사하고자 하는 재료와 오차가 클 것이다.

[0088] 그 후 제1이동경화변수 설정단계 및 제2이동경화변수 설정단계를 오차가 발생하기 전까지 수행한다.

[0089] 제1이동경화변수 설정단계는 $\gamma_1 - \gamma_2$ 를 변경하며, 라쳇트 증분율을 변경하는 단계이다. 여기서, $\gamma_1 - \gamma_2$ 는 γ 이므로, 당연히 그 값은 0에서 시작되므로, $\gamma_1 - \gamma_2$ 는 증가되는 방향으로 진행된다.

[0090] 제2이동경화변수 설정단계는 $\gamma_1 - \gamma_2$ 가 변경된 후, $C_1 - C_2$ 를 변경하며, 라쳇트 시작값을 변경하는 단계를 의미한다. 여기서, 라쳇트 시작값은 $\gamma_1 - \gamma_2$ 값이 증가됨에 따라 감소되므로, 이를 증가시키기 위하여, $C_1 - C_2$ 를 증가시키는 것이 바람직하다.

[0091] 본 발명은 제1이동경화변수 설정단계, 제2이동경화변수 설정단계를 수행한 후 모사하고자 하는 재료의 라쳇트 현상과 동일하지 않으면 다시 제1이동경화변수 설정단계, 제2이동경화변수 설정단계를 반복 수행한다.

[0092] 도 9a는 $(\sigma_m, \sigma_a) = (300, 250)$ MPa의 시험조건에서 본 발명의 방법을 적용한 SUJ2 베어링강의 단조구간 거동과 라쳇팅 거동의 예측결과이다.

[0093] SUJ2 베어링강에 대하여 반복응력조건($(\sigma_m, \sigma_a) = (300, 250)$ MPa)에서 시험을 수행한 결과는 검정색 실선으로 도시하고, 붉은색 점선은 본 발명인 Chaboche 모델의 변수를 결정하여 라쳇팅 거동을 모사하는 모사방법에 의하여 변수를 결정한 결과이다.

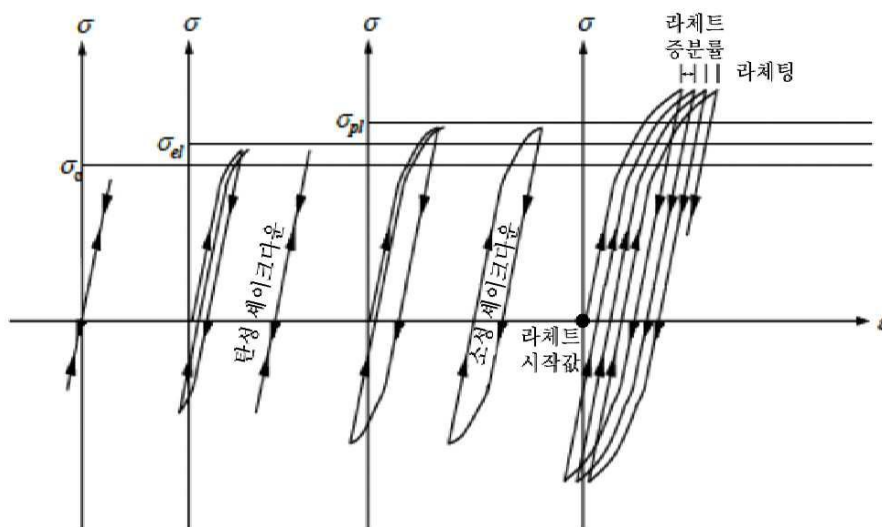
- [0094] 도 9b는 도 9a에서 획득한 운동 경화 변수를 (σ_m , σ_a) = (300, 240) MPa의 시험조건에 적용한 예측결과이다.
- [0095] 도 9c는 도 9a에서 획득한 운동 경화 변수를(σ_m , σ_a) = (300, 260) MPa의 시험조건에 적용한 예측결과이다.
- [0096] 도 9b, 9c는 도 9a에서 획득된 경화변수를 이용하여 다른 반복응력조건 도 9b는 ((σ_m , σ_a) = (300, 240) MPa), 도 9c는 ((σ_m , σ_a) = (300, 260) MPa)에서 반복인장시험을 수행하고, 라체팅 구간 거동을 예측한 결과와 실제 실험에 따른 라체팅 구간 거동을 비교 도시한 것이다. (실선 : 실제 시험, 붉은색 점선 : 예측)
- [0097] 도 9a, 9b, 9c에서 확인되는 바와 같이, 본 발명에 의하여 모사된 라체트 현상은 실제 라체트 현상과 약간의 오차는 있지만, 그 차이는 문제되지 않을 정도임을 확인할 수 있었다. 이처럼 본 발명은 종래의 기술 대비 라체팅 현상 뿐만 아니라 단조 구간의 거동에 대하여 간단하면서 효과적인 복합경화 변수를 결정할 수 있어서 신뢰성 높은 예측 결과를 획득할 수 있다.
- [0098] 본 발명은 특정한 실시 예에 관련하여 도시하고 설명하였지만, 이하의 특허청구범위에 의해 제공되는 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않는 한도 내에서, 본 발명이 다양하게 개량 및 변화될 수 있다는 것은 당 업계에서 통상의 지식을 가진 자에게 있어서 자명할 것이다.

부호의 설명

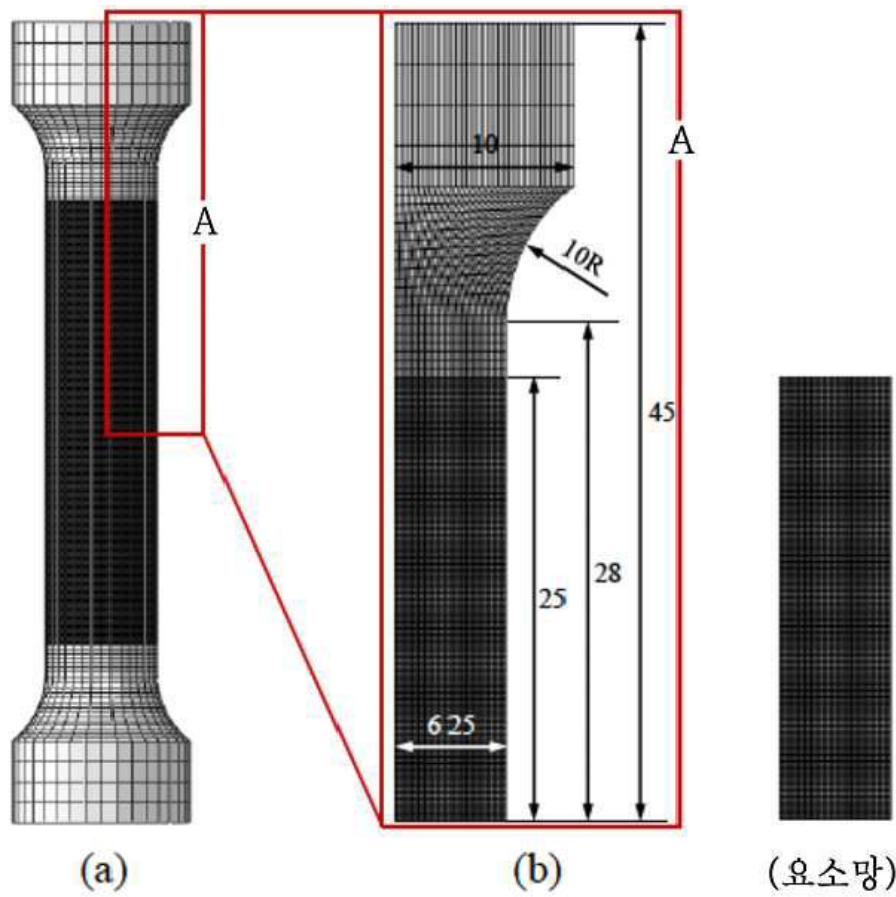
- [0099] 100 성질 획득단계
200 등방경화변수설정단계
210 제1등방경화변수 설정단계
220 제2등방경화변수 설정단계
230 제3등방경화변수 설정단계
300 라체트 정보 획득단계
400 운동경화변수 가설정단계
500 운동경화변수조절단계

도면

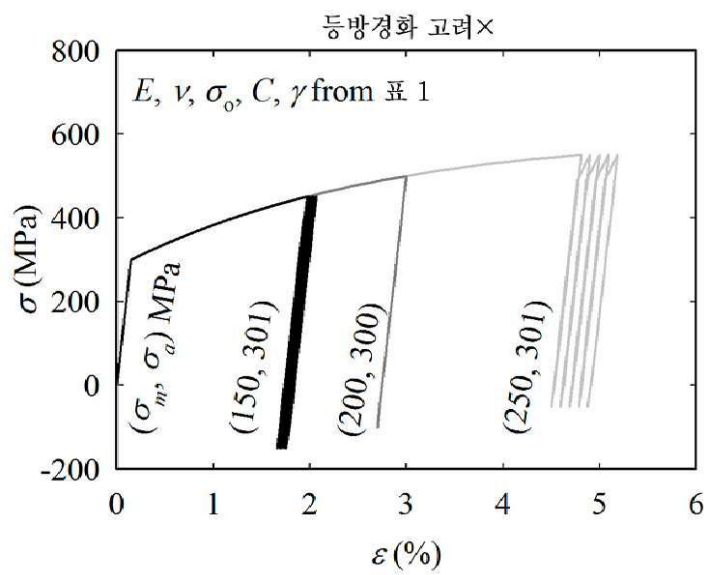
도면1



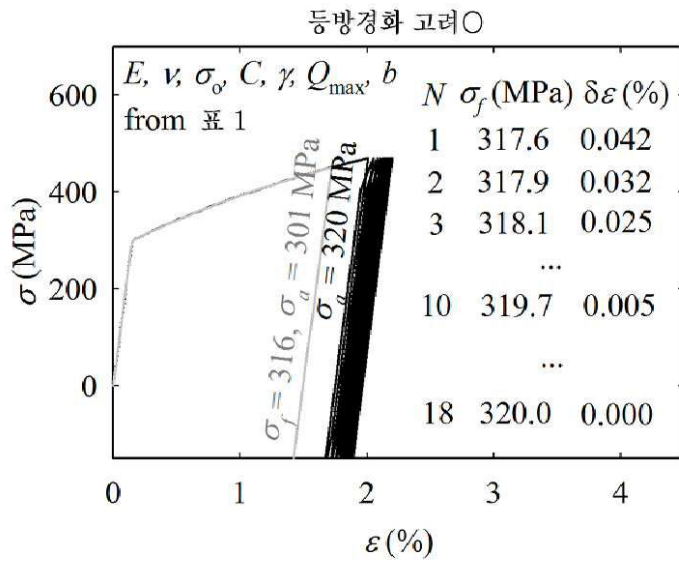
도면2



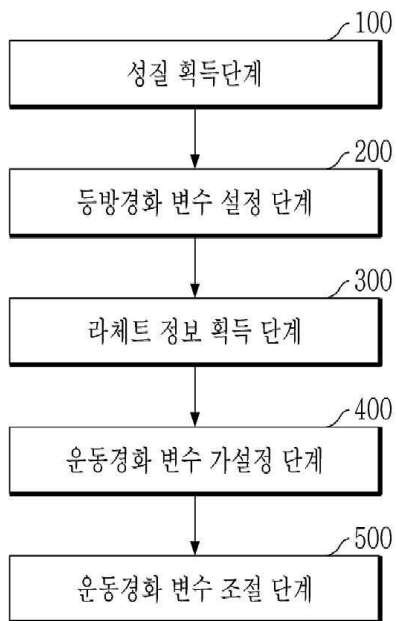
도면3



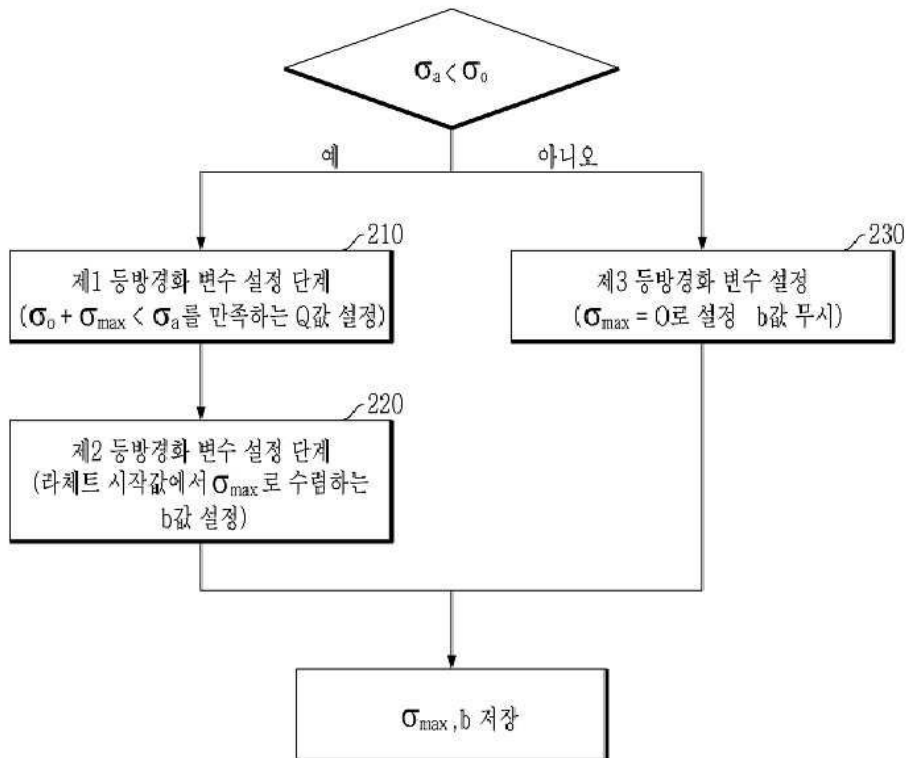
도면4



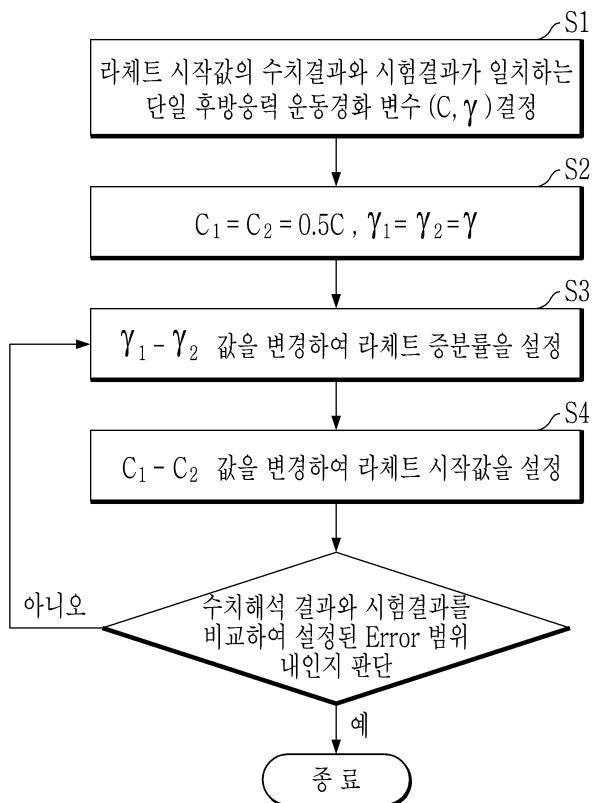
도면5



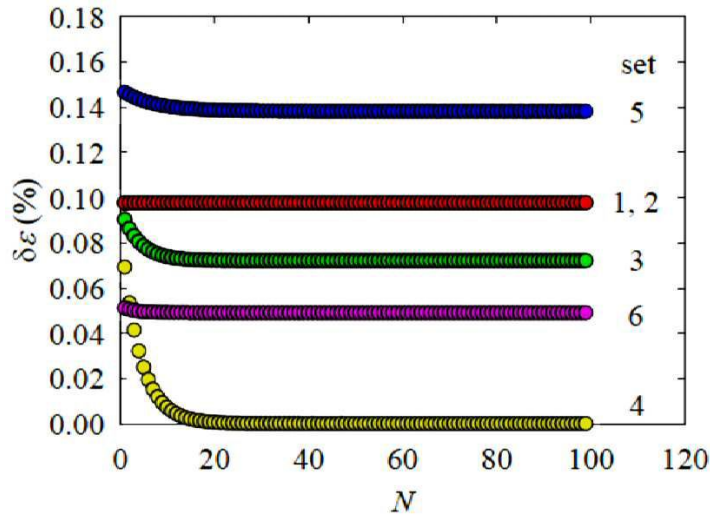
도면6



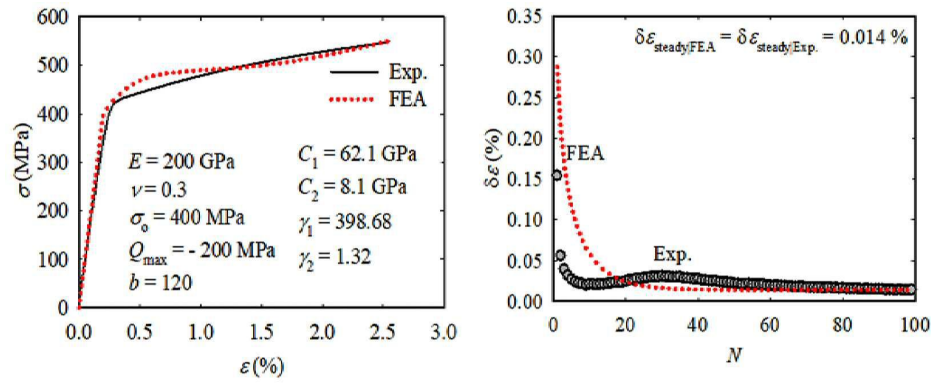
도면7



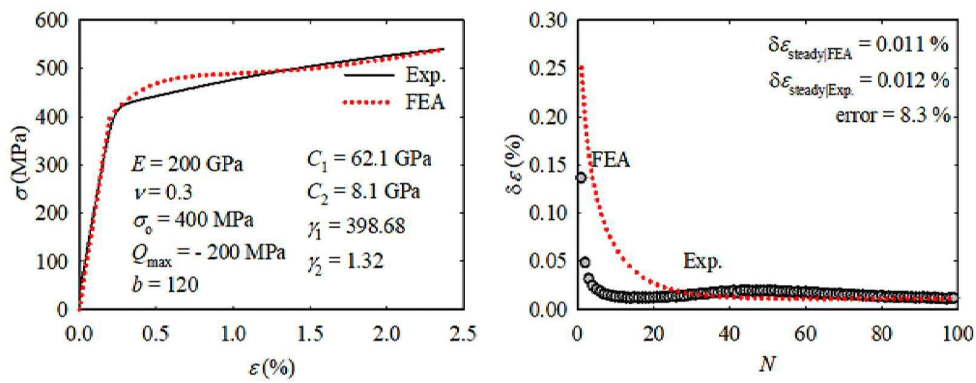
도면8



도면9a



도면9b



도면9c

