



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2015-0070725
(43) 공개일자 2015년06월25일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 3/24 (2006.01) G01B 11/16 (2006.01)
G01B 11/25 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2013-0157269
(22) 출원일자 2013년12월17일
심사청구일자 2013년12월17일

(71) 출원인
서강대학교산학협력단
서울특별시 마포구 백범로 35 (신수동, 서강대학교)
(72) 발명자
이형일
경기도 고양시 일산서구 대산로212번길 26 대화성
저건영1502-304
김동욱
서울특별시 마포구 서강로11길 5 (창전동) 205호
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인명인

전체 청구항 수 : 총 22 항

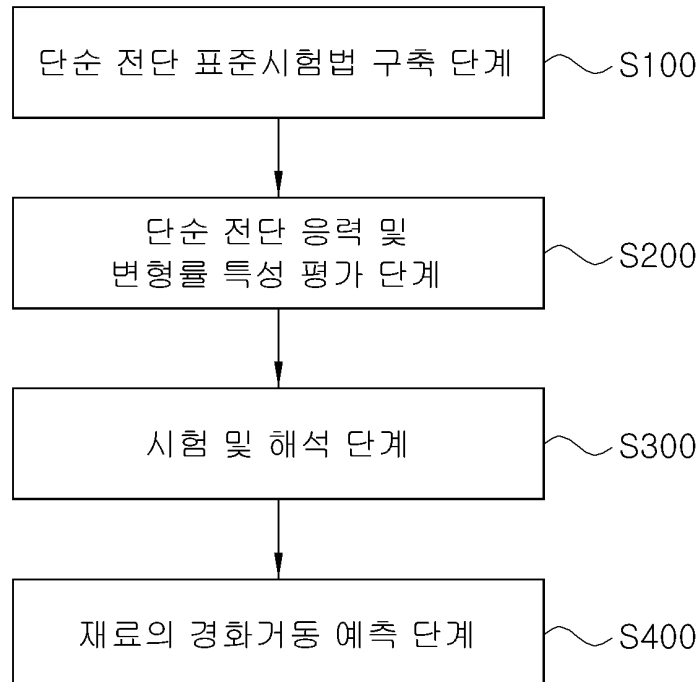
(54) 발명의 명칭 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측용 시험 장치

(57) 요약

본 발명의 한 실시예에 따른 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법은 단순 전단 표준시험법 구축 단계, 단순 전단 응력 및 변형률 특성 평가 단계, 시험 및 해석 단계, 그리고 재료의 경화거동 예측 단계를 포함한다. 한편, 본 발명의 한 실시예에 따른 시험 장치는 재료의 일측을 수용하여 고정시키는 이동지그 및 상기 재료의 타

(뒷면에 계속)

대표도 - 도1



측을 수용하여 고정시키는 고정지그를 포함하는 지그, 그리고 상기 지그에 연결되어 상기 이동지그를 상하 방향으로 이동시키는 구동부를 포함한다. 본 발명에 의하면, 재료의 크기 및 해당 재료에 대한 적정 조임 토크를 설정함으로써, 고정도 재료에 대한 시험을 용이하게 수행 할 수 있는 효과가 있다. 또한, 재료의 크기 및 해당 재료에 대한 적정 조임 토크를 설정함과 동시에, 재료의 격자변형에 따른 전단변위 측정방안을 제안함으로써, 바우싱거 효과를 고려한 고정도 재료의 경화거동을 예측할 수 있는 단순 전단 시험에 관한 새로운 표준모델을 구축할 수 있는 효과가 있다.

(72) 발명자

방성식

서울특별시 마포구 신수로 86 (신수동) 202호

김민수

인천광역시 부평구 안남로 269 (산곡동, 부평산곡 푸르지오아파트) 105동 201호

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 20138540040010

부처명 산업통상자원부

연구관리전문기관 한국에너지기술평가원

연구사업명 원자력융합원천기술개발사업

연구과제명 불량율 4%이내의 핵연료봉 지지격자 생산을 위한 최적성형 공정

기 여 율 1/1

주관기관 진영정기

연구기간 2013.12.01 ~ 2014.09.30

명세서

청구범위

청구항 1

단순 전단 표준시험법 구축 단계,
단순 전단 응력 및 변형률 특성 평가 단계,
시험 및 해석 단계, 그리고
재료의 경화거동 예측 단계
를 포함하는 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법.

청구항 2

제1항에서,
상기 단순 전단 표준시험법 구축 단계는
상기 재료의 크기를 결정하는 단계 및
상기 재료의 적정 조임 토크를 결정하는 단계를 포함하는 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법.

청구항 3

제2항에서,
상기 재료는 전단폭이 3mm이고,
전체 폭이 12.5mm, 전체 길이가 30mm인 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법.

청구항 4

제2항에서,
상기 재료는 복수개이고,
SS400, A15052, 연강, zircaloy-4, zirlo인 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법.

청구항 5

제4항에서,
상기 재료의 각 두께는 SS400 및 A15052는 1.0mm, 연강은 0.8mm, zircaloy-4 및 zirlo는 0.68mm인 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법.

청구항 6

제2항에서,
상기 재료의 적정 조임 토크를 결정하는 단계는
상기 재료를 고정시키는 부재의 조임 토크를 점진적으로 증가시켜 각 조임 토크에 관한 항복하중을 도출하고,
도출된 상기 조임 토크에 관한 항복하중을 인장시험을 통해 도출된 항복하중과 비교하여 상기 조임 토크에 관한
항복하중과 상기 인장시험을 통해 도출된 항복하중의 값이 동일한 경우의 상기 조임 토크를 적정 조임 토크로
결정하는 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법.

청구항 7

제4항에서,

상기 재료의 각 적정 조임 토크는 SS400 및 A15052는 $1.8\text{kg} \cdot \text{m}$, 연강은 $2.0\text{kg} \cdot \text{m}$, zircaloy-4 및 zirlo는 $2.5\text{kg} \cdot \text{m}$ 인 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법.

청구항 8

제2항에서,

상기 재료의 적정 조임 토크를 결정하는 단계는 경도를 이용하여 적정 조임 토크를 결정하는 단계를 더 포함하는 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법.

청구항 9

제4항에서,

상기 재료의 각 평균 경도는 SS400은 103HV, A15052는 77HV, 연강은 112HV, zircaloy-4는 212HV, zirlo는 202HV인 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법.

청구항 10

제1항에서,

상기 단순 전단 응력 및 변형률 특성 평가 단계는

유한요소해석을 수행하여 단일요소에 대한 유효 변형률을 계산하는 단계,

기하학적 형상변화에 의한 유효 변형률을 계산하는 단계, 그리고

상기 유한요소해석을 수행하여 단일요소에 대한 유효 변형률과 상기 기하학적 형상변화에 의한 유효 변형률을 비교하는 단계를 포함하는 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법.

청구항 11

제1항에서,

상기 시험 및 해석 단계는

상기 재료를 지그에 고정시키는 단계,

상기 재료에 격자무늬를 형성하는 단계,

상기 지그에 변위를 인가하는 단계,

상기 재료에 형성된 상기 격자무늬의 변형을 미리 설정된 시간 간격으로 측정하여 전단변위를 획득하는 단계,

단순전단 시험으로 획득한 하중 및 변위 데이터를 해석 데이터와 비교하는 단계, 그리고

단축인장과 단순 전단 응력 및 변형률을 비교하는 단계를 포함하는 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법.

청구항 12

제11항에서,

상기 지그에 인가되는 변위의 속도는 $1 \times 10^{-2} \text{mm/s}$ 인 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법.

청구항 13

제1항에서,

상기 재료의 경화거동 예측 단계는

등방/운동성 경화 조합모델을 이용한 단순전단 유한요소해석을 통하여 경화계수 변화에 따른 하중 및 변위 변화에 관한 데이터를 획득하는 단계, 그리고

상기 등방/운동성 경화 조합모델을 이용해 획득한 하중 및 변위 변화에 관한 데이터를 상기 재료의 실제 단순전

단 순/역방향 시험의 하중 및 변위 데이터와 비교하여 유사 거동을 보이는 데이터로부터 경화계수를 획득하여 상기 재료의 경화거동을 예측하는 단계를 포함하는 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법.

청구항 14

재료의 일측을 수용하여 고정시키는 이동지그 및 상기 재료의 타측을 수용하여 고정시키는 고정지그를 포함하는 지그, 그리고

상기 지그에 연결되어 상기 이동지그를 상하 방향으로 이동시키는 구동부를 포함하는 시험 장치.

청구항 15

제14항에서,

상기 지그는

상기 재료의 전방 및 후방에 서로 대향하도록 배치되어 상기 재료를 가압하여 고정시키는 복수의 클램핑 플레이트,

상기 재료와 상기 복수의 클램핑 플레이트 사이에 각각 삽입되는 복수의 시트부재, 그리고

상기 복수의 클램핑 플레이트 및 상기 복수의 시트부재를 관통하여 체결되며, 회전을 통해 상기 복수의 클램핑 플레이트를 상기 재료 측으로 이동시켜 상기 재료를 가압하는 복수의 체결부재를 포함하는 시험 장치.

청구항 16

제15항에서,

상기 복수의 클램핑 플레이트는 상기 재료의 고정 시 상기 복수의 클램핑 플레이트의 내면보다 상기 재료의 외면에 먼저 접촉되어 상기 재료를 몰아 고정시키는 돌기부를 포함하는 시험 장치.

청구항 17

제16항에서,

상기 돌기부는

상기 복수의 클램핑 플레이트의 내면에서 상기 이동지그의 이동방향으로 복수개 형성되어 있되,

상기 재료의 고정 시 상기 재료의 전단변형이 발생하는 위치로부터 인접한 상기 복수의 클램핑 플레이트의 내면에 형성되는 제1 돌기부 및 상기 제1 돌기부로부터 미리 정해진 간격만큼 수평으로 이격된 상기 복수의 클램핑 플레이트의 내면에 형성되는 제2 돌기부를 포함하는 시험 장치.

청구항 18

제17항에서,

상기 제1 돌기부는 상기 재료의 고정 시 상기 제2 돌기부에 비하여 단위면적 당 고정력을 더 많이 발생시킬 수 있는 구조로 형성되는 시험 장치.

청구항 19

제15항에서,

상기 복수의 시트부재는 테프론(teflon) 필름인 시험 장치.

청구항 20

제14항에서,

상기 이동지그 및 상기 고정지그는 상기 재료의 전단폭의 길이만큼 이격되어 배치되는 시험 장치.

청구항 21

제14항에서,

상기 재료에 전단 변위 인가 시 상기 재료의 전단구간을 측정하는 영상장치를 더 포함하는 시험 장치.

청구항 22

제14항에서,

상기 구동부는 유압장치이고, 상기 구동부로부터 동력을 전달받아 상하 방향으로 이동하는 상기 이동지그의 속도는 1×10^{-2} mm/s인 시험 장치.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법 및 시험 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 일반적으로 금속판재에 대한 단순 전단 시험은 재료 바우싱거 거동(舉動) 측정에 사용된다. 바우싱거 효과(the baushinger effect)란 단축 인장-압축시험에서 인장 항복응력 이상으로 하중을 가한 후, 하중을 제거하고 다시 압축하중을 가하면, 이전 보다 낮은 항복점에서 소성변형이 시작되는 현상이다. 이와 같은, 바우싱거 거동을 측정하기 위한 시험으로는 단축 인장/압축시험, 단순 전단 시험 등이 있다.

[0003] 상기한 단축 인장/압축시험을 살펴보면, 단축 인장/압축 시험은 강판을 시편(재료)면에 덧대고, 조임력을 측정하는 압력 게이지를 부착한 후, 유압장치를 통하여 평판에 조임력을 가하는 반복적 시행착오를 통해 최적 조임력을 구한다. 다음으로, 시편과 하중방향을 정확히 일치시킨 후 인장/압축 하중을 인가한다.

[0004] 그러나, 상기한 종래의 단축 인장/압축시험은 조임력에 의해 발생하는 마찰과 이축효과로 인하여 정확한 하중 측정이 어려운 문제점이 있었다.

[0005] 즉, 종래에는 시편에 대한 적정 조임토크 결정에 대한 명확한 기준이 제시되지 못하여 고경도 재료에 대한 시험이 어려운 문제점이 있었다.

선행기술문헌

특허문헌

[0006] (특허문헌 0001) 일본 공개특허공보 2006-242645

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 발명은 전술한 바와 같은 문제점들을 해결하기 위해 창출된 것으로서, 본 발명이 해결하고자 하는 과제는 적정 재료의 크기 및 재료에 대한 적정 조임 토크를 결정하고, 유한요소해석을 이용하여 재료의 단순 전단 응력 및 변형률 특성을 평가함과 동시에, 단순 전단과 순수 전단 사이의 유사점 및 차이점을 기초로 응력 및 변형률을 비교/분석하여 단순 전단 하중-변위 곡선으로부터 유효 응력-변형률 곡선으로의 변환 과정을 도출하여 고경도 재료의 단순 전단 시험으로부터 재료의 응력-변형률 및 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법 및 시험장치를 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0008] 상기한 과제를 달성하기 위한 본 발명의 한 실시예에 따른 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법은 단순 전단 표준시험법 구축 단계, 단순 전단 응력 및 변형률 특성 평가 단계, 시험 및 해석 단계, 그리고 재료의 경화거동 예측 단계를 포함한다.

[0009] 상기 단순 전단 표준시험법 구축 단계는 상기 재료의 크기를 결정하는 단계 및 상기 재료의 적정 조임 토크를

결정하는 단계를 포함할 수 있다.

- [0010] 상기 재료는 전단폭이 3mm이고, 전체 폭이 12.5mm, 전체 길이가 30mm일 수 있다.
- [0011] 상기 재료는 복수개이고, SS400, A15052, 연강, zircaloy-4, zirlo일 수 있다.
- [0012] 상기 재료의 각 두께는 SS400 및 A15052는 1.0mm, 연강은 0.8mm, zircaloy-4 및 zirlo는 0.68mm일 수 있다.
- [0013] 상기 재료의 적정 조임 토크를 결정하는 단계는 상기 재료를 고정시키는 부재의 조임 토크를 점진적으로 증가시켜 각 조임 토크에 관한 항복하중을 도출하고, 도출된 상기 조임 토크에 관한 항복하중을 인장시험을 통해 도출된 항복하중과 비교하여 상기 조임 토크에 관한 항복하중과 상기 인장시험을 통해 도출된 항복하중의 값이 동일한 경우의 상기 조임 토크를 적정 조임 토크로 결정할 수 있다.
- [0014] 상기 재료의 각 적정 조임 토크는 SS400 및 A15052는 $1.8\text{kg}\cdot\text{m}$, 연강은 $2.0\text{kg}\cdot\text{m}$, zircaloy-4 및 zirlo는 $2.5\text{kg}\cdot\text{m}$ 일 수 있다.
- [0015] 상기 재료의 적정 조임 토크를 결정하는 단계는 경도를 이용하여 적정 조임 토크를 결정하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0016] 상기 재료의 각 평균 경도는 SS400은 103HV, A15052는 77HV, 연강은 112HV, zircaloy-4는 212HV, zirlo는 202HV일 수 있다.
- [0017] 상기 단순 전단 응력 및 변형률 특성 평가 단계는 유한요소해석을 수행하여 단일요소에 대한 유효 변형률을 계산하는 단계, 기하학적 형상변화에 의한 유효 변형률을 계산하는 단계, 그리고 상기 유한요소해석을 수행하여 단일요소에 대한 유효 변형률과 상기 기하학적 형상변화에 의한 유효 변형률을 비교하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0018] 상기 시험 및 해석 단계는 상기 재료를 지그에 고정시키는 단계, 상기 재료에 격자무늬를 형성하는 단계, 상기 지그에 변위를 인가하는 단계, 상기 재료에 형성된 상기 격자무늬의 변형을 미리 설정된 시간 간격으로 측정하여 전단변위를 획득하는 단계, 단순전단 시험으로 획득한 하중 및 변위 데이터를 해석 데이터와 비교하는 단계, 그리고 단축인장과 단순 전단 응력 및 변형률을 비교하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0019] 상기 지그에 인가되는 변위의 속도는 $1\times 10^{-2}\text{mm/s}$ 일 수 있다.
- [0020] 상기 재료의 경화거동 예측 단계는 등방/운동성 경화 조합모델을 이용한 단순전단 유한요소해석을 통하여 경화계수 변화에 따른 하중 및 변위 변화에 관한 데이터를 획득하는 단계, 그리고 상기 등방/운동성 경화 조합모델을 이용해 획득한 하중 및 변위 변화에 관한 데이터를 상기 재료의 실제 단순전단 순/역방향 시험의 하중 및 변위 데이터와 비교하여 유사 거동을 보이는 데이터로부터 경화계수를 획득하여 상기 재료의 경화거동을 예측하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0021] 한편, 상기한 과제를 달성하기 위한 본 발명의 한 실시예에 따른 시험 장치는 재료의 일측을 수용하여 고정시키는 이동지그 및 상기 재료의 타측을 수용하여 고정시키는 고정지그를 포함하는 지그, 그리고 상기 지그에 연결되어 상기 이동지그를 상하 방향으로 이동시키는 구동부를 포함한다.
- [0022] 상기 지그는 상기 재료의 전방 및 후방에 서로 대향하도록 배치되어 상기 재료를 가압하여 고정시키는 복수의 클램핑 플레이트, 상기 재료와 상기 복수의 클램핑 플레이트 사이에 각각 삽입되는 복수의 시트부재, 그리고 상기 복수의 클램핑 플레이트 및 상기 복수의 시트부재를 관통하여 체결되며, 회전을 통해 상기 복수의 클램핑 플레이트를 상기 재료 측으로 이동시켜 상기 재료를 가압하는 복수의 체결부재를 포함할 수 있다.
- [0023] 상기 복수의 클램핑 플레이트는 상기 재료의 고정 시 상기 복수의 클램핑 플레이트의 내면보다 상기 재료의 외면에 먼저 접촉되어 상기 재료를 물어 고정시키는 돌기부를 포함할 수 있다.
- [0024] 상기 돌기부는 상기 복수의 클램핑 플레이트의 내면에서 상기 이동지그의 이동방향으로 복수개 형성되어 있되, 상기 재료의 고정 시 상기 재료의 전단변형이 발생하는 위치로부터 인접한 상기 복수의 클램핑 플레이트의 내면에 형성되는 제1 돌기부 및 상기 제1 돌기부로부터 미리 정해진 간격만큼 수평으로 이격된 상기 복수의 클램핑 플레이트의 내면에 형성되는 제2 돌기부를 포함할 수 있다.
- [0025] 상기 제1 돌기부는 상기 재료의 고정 시 상기 제2 돌기부에 비하여 단위면적 당 고정력을 더 많이 발생시킬 수 있는 구조로 형성될 수 있다.

- [0026] 상기 복수의 시트부재는 테프론(teflon) 필름일 수 있다.
- [0027] 상기 이동지그 및 상기 고정지그는 상기 재료의 전단폭의 길이만큼 이격되어 배치될 수 있다.
- [0028] 상기 재료에 전단 변위 인가 시 상기 재료의 전단구간을 측정하는 영상장치를 더 포함할 수 있다.
- [0029] 상기 구동부는 유압장치이고, 상기 구동부로부터 동력을 전달받아 상하 방향으로 이동하는 상기 이동지그의 속도는 1×10^{-2} mm/s일 수 있다.

발명의 효과

- [0030] 본 발명에 의하면, 재료의 크기 및 해당 재료에 대한 적정 조임 토크를 설정함으로써, 고경도 재료에 대한 시험을 용이하게 수행 할 수 있는 효과가 있다.
- [0031] 또한, 재료의 크기 및 해당 재료에 대한 적정 조임 토크를 설정함과 동시에, 재료의 격자변형에 따른 전단변위 측정방안을 제안함으로써, 바우싱거 효과를 고려한 고경도 재료의 경화거동을 예측할 수 있는 단순 전단 시험에 관한 새로운 표준모델을 구축할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

- [0032] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법을 나타내는 순서도이다.
- 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법 중 단순 전단 표준 시험법 구축 단계를 나타내는 순서도이다.
- 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법 중 단순 전단 응력 및 변형률 특성 평가 단계를 나타내는 순서도이다.
- 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법 중 시험 및 해석 단계를 나타내는 순서도이다.
- 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법 중 재료의 경화거동 예측 단계를 나타내는 순서도이다.
- 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 시험 장치를 나타낸 도면이다.
- 도 7은 본 발명의 실시예에 따른 재료를 나타낸 도면이다.
- 도 8은 전단폭 대 시편길이 비에 대한 재료의 중앙에서의 최대 및 평균전단응력 사이의 비와 전단변형률 간의 상관관계를 나타내는 그래프이다.
- 도 9는 연강 재료에 대한 하중과 변위 간의 상관관계를 나타내는 그래프이다.
- 도 10은 본 발명의 실시예에 따른 재료에 형성된 압흔을 나타내는 도면이다.
- 도 11은 각 재료에 대한 적정 조임 토크와 경도 간의 상관관계를 나타내는 그래프이다.
- 도 12는 SS400 및 연강 재료의 전단영역 중심 A에 대한 변형률과 변위 간의 상관관계를 나타내는 그래프이다.
- 도 13은 SS400, A15052, 연강 재료에 대한 파단 전까지의 변위에 따른 유효 대 전단변형률 비와 변위 간의 상관관계를 나타내는 그래프이다.
- 도 14는 본 발명의 실시예에 따른 재료의 기하학적 형상변화 과정을 개략적으로 나타낸 도면이다.
- 도 15는 유한요소해석을 통해 도출된 단일요소의 변화 및 기하학적 형상변화에 대한 변형률 및 변위 간의 상관관계를 나타내는 그래프이다.
- 도 16은 본 발명의 실시예에 따른 시험 장치의 변위측정 및 변위에 의해 변형된 재료의 전단구간을 나타내는 도면이다.
- 도 17은 각 재료의 단순전단 시험 및 해석 데이터에 대한 하중 및 변위 간의 상관관계를 나타내는 그래프이다.
- 도 18은 SS400, A15052, 연강의 인장 및 단순 전단에 대한 응력 및 변형률 간의 상관관계를 나타내는 그래프이다.

도 19는 등방성 경화계수 변화에 대한 하중 및 변위 간의 상관관계를 나타내는 그래프이다.

도 20은 운동성 경화계수 변화에 대한 하중 및 변위 간의 상관관계를 나타내는 그래프이다.

도 21은 본 발명의 실시예에 따른 등방/운동성 경화 조합 모델을 활용한 순/역방향 시험 및 가중조합법을 이용한 인장시험에 대한 유한요소해석과 zircaloy-4 재료의 순/역방향 시험을 서로 비교한 그래프이다.

도 22는 본 발명의 실시예에 따른 시험 장치의 지그를 개략적으로 나타낸 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0033] 이하에서 본 발명의 실시예를 첨부된 도면을 참조로 상세히 설명한다.
- [0034] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법을 나타내는 순서도이고, 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법 중 단순 전단 표준 시험법 구축 단계를 나타내는 순서도이다.
- [0035] 도 1 및 도 2를 참조하면, 본 발명의 한 실시예에 따른 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법(이하 '바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법'이라 함)은 단순 전단 표준시험법 구축 단계(S100)를 포함한다.
- [0036] 단순 전단 표준시험법 구축 단계(S100)는 재료의 크기를 결정하는 단계(S110) 및 재료의 적정 조임 토크를 결정하는 단계(S120)를 포함할 수 있다.
- [0037] 먼저, 재료의 크기를 결정하는 단계(S110)는 단순 전단 시험에서 적정 재료크기를 결정하여 정확한 전단물성을 측정하기 위한 단계로서, 일련의 시험을 통해 도출된 미리 설정된 크기로 형성될 수 있다.
- [0038] 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 시험 장치를 나타낸 도면이고, 도 7은 본 발명의 실시예에 따른 재료를 나타낸 도면이다.
- [0039] 도 6 및 도 7을 참조하면, 재료가 후술할 시험장치의 지그에 형성된 제1 돌기부 및 제2 돌기부에 모두 접촉하는 경우, 재료의 폭(w)을 25mm라 가정하고, 재료가 제1 돌기부에만 접촉하는 경우, 재료의 폭(w)을 12.5mm라 가정하여 복수의 재료에 대한 단순 전단 시험을 수행하였다. 그 결과, 동일한 조임 토크 적용 시 25mm의 폭을 가진 재료에 비하여 12.5mm의 폭을 가진 재료의 중심부에 제1 돌기부의 가압 자국이 더 선명하였고, 전단폭(h)이 3mm로 일정하게 나타났다.
- [0040] 더 자세하게는, 25mm의 폭을 가지는 재료에서는 조임력이 주로 제2 돌기부에서 작용하였고, 12.5mm의 폭을 가지는 재료에서는 조임력이 제1 돌기부에서만 작용하였다. 즉, 25mm의 폭을 가진 재료의 중앙에서는 단순 전단 변형이 제대로 나타나지 않는다. 이는, 제1 돌기부에서의 단위면적당 고정힘이 25mm의 폭보다 12.5mm의 폭에서 더 크게 작용하기 때문이다. 따라서, 본 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법에서는 고정도 재료에 단위면적당 고정힘을 크게 작용시킬 수 있도록 재료의 폭을 12.5mm로 결정한다.
- [0041] 또한, 본 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법에 적용되는 재료의 길이는 미리 설정된 길이로 형성될 수 있다.
- [0042] 도 8은 전단폭 대 시편길이 비에 대한 재료의 중앙에서의 최대 및 평균전단응력 사이의 비와 전단변형률 간의 상관관계를 나타내는 그래프로서, 도 8을 참조하면, K_S 는 재료 중앙에서의 최대와 평균전단 응력 사이의 비로 아래 식 (1)과 같이 정의될 수 있다. 즉, K_S 가 1에 가까울수록 전단 응력이 전체적으로 일정한 크기로 분포된다. 또한, l/h 가 커지면 K_S 도 커진다. 그러나, 재료의 길이가 커질수록 전단하중 및 적정 조임 토크도 함께 커지게 된다. 따라서, 재료 길이 대 전단폭 비는 $l/h = 10\text{mm}$ ($h = 3$, $l = 30$)로 결정될 수 있다.
- [0043]
$$K_S = \frac{\tau_{\text{avg}}}{\tau_{\text{cm}}} ; \tau_{\text{avg}} = \frac{P}{A} ; \tau_{\text{cm}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (1)$$
- [0044] 다음으로, 재료의 적정 조임 토크를 결정하는 단계(S120)를 설명하기에 앞서, 본 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법에 적용되는 재료에 대하여 먼저 설명한다.
- [0045] 본 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법에 적용되는 재료는 복수개일 수 있다.

- [0046] 더 자세하게는, 본 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법에 적용되는 재료는 SS400, A15052, 연강, zircaloy-4, 및 zirlo로 구비될 수 있고, 재료의 각 두께는 SS400 및 A15052는 1.0mm, 연강은 0.8mm, zircaloy-4 및 zirlo는 0.68mm일 수 있다.
- [0047] 이를 바탕으로, 다시 재료의 적정 조임 토크를 결정하는 단계(S120)를 설명한다.
- [0048] 재료의 적정 조임 토크를 결정하는 단계(S120)는 슬립(slip)을 최소화하기 위해 각 재료마다 실험을 통하여 적정 조임 토크를 결정할 수 있다.
- [0049] 도 9는 연강 재료에 대한 하중과 변위 간의 상관관계를 나타내는 그래프이다.
- [0050] 도 9를 참조하면, 단순 전단 시험에서 슬립을 최소화하기 위해 재료마다 실험을 통해 적정 조임 토크를 결정한다. 예시적으로, 재료의 크기가 $12.5 \times 30 \times 0.8$ mm 인 연강 재료에 대해 토크 2.0 - 4.5 kg·m 에서의 시험 하중 대 변형을 곡선을 비교한 결과, 토크 3.5 kg·m 와 4.5 kg·m에서는 2.0 kg·m에 비해 동일 변위하중이 크고, 토크 2.0 kg·m 재료와 달리 4.5 kg·m 재료에서는 전단구간의 재료가 한 평면상에 놓이지 않고 비틀림이 발생되며, 두께가 약 8 % 증가한다. 즉, 조임 토크 크기에 의해 전단구간 초기 응력상태가 크게 달라질 수 있다.
- [0051] 따라서, 적정 조임 토크를 결정하기 위해서는 재료를 고정시키는 부재의 조임 토크를 점진적으로 증가시켜 각 조임 토크에 관한 항복하중을 도출하고, 도출된 조임 토크에 관한 항복하중을 인장시험을 통해 도출된 항복하중과 비교하여 조임 토크에 관한 항복하중과 인장시험을 통해 도출된 항복하중의 값이 동일한 경우의 조임 토크를 적정 조임 토크로 결정할 수 있다.
- [0052] 더 자세하게는, 단순 전단 시험은 물성평가를 위해 인장 시험이 필수적으로 수행될 수 있다. 따라서, 적정 조임 토크를 결정하기 위해서는 먼저, 인장시험에서 얻은 항복강도를 이용하여 전단 항복하중($=\sqrt{3} \times \text{항복응력} \times \text{전단면적}$)을 계산한 후, 단순 전단 시험에서의 항복하중과 일치하도록 조임 토크를 결정(시험 후 두께 증가량은 0.01mm 미만)할 수 있다. 이와 같은, 기준을 적용한 상기 복수의 재료 SS400, A15052, 연강, zircaloy-4, zirlo 에 대한 적정 조임 토크는 아래 표 1과 같이 결정될 수 있다.

표 1

재료구분	SS400	A15052	mild steel	zircaloy-4	zirlo
최적토크 (kg·m)	1.8	1.8	2.0	2.5	2.5

- [0053]
- [0054] 한편, 본 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법의 재료의 적정 조임 토크를 결정하는 단계(S120)는 경도를 이용하여 적정 조임 토크를 결정하는 단계(S121)를 더 포함할 수 있다.
- [0055] 도 10은 본 발명의 실시예에 따른 재료에 형성된 압흔을 나타내는 도면이고, 도 11은 각 재료에 대한 적정 조임 토크와 경도 간의 상관관계를 나타내는 그래프이다.
- [0056] 도 10을 참조하면, 경도를 이용하여 적정 조임 토크를 결정하는 단계(S121)는 재료에 경도시험을 수행하여 각 재료의 평균 경도를 획득할 수 있다.
- [0057] 더 자세하게는, 경도는 아래 식 (2)과 같이 정의 될 수 있으며, 경도를 이용하여 적정 조임 토크를 결정하는 단계(S121)는 재료에 사각뿔 압자를 이용하여 압흔을 생성시킨 후, 현미경을 통해 압흔의 대각선 길이(d)를 측정하고, 각 재료에 적정 하중을 인가하여 도출할 수 있다.

[0058]
$$HV = \frac{2P}{d^2} \sin \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

- [0059] 예시적으로, zircaloy-4, zirlo, 연강에는 4.9 N의 하중(P)을 인가하고, SS400, A15052에는 2.9 N의 하중을 인가할 수 있다. 이때, 하중크기는 경도에 큰 영향을 주지 않으나, 각 재료에 따라 압흔 크기가 달라지므로 적당한 값을 설정하여 적용하는 것이 바람직하다. 또한, α 는 피라미드 형상의 대면각으로 136° 로 적용되는 것이 바람직하다. 상기 식 (2)를 적용한 복수의 재료 SS400, A15052, 연강, zircaloy-4, zirlo 에 대한 평균 경도

는 아래 표 2과 같이 적용될 수 있다.

표 2

재료구분		SS400	A15052	mild steel	zircaloy-4	zirlo
경도 (HV)	1	102	79	110	211	201
	2	102	75	109	210	206
	3	106	77	118	214	200
	Avg.	103	77	112	212	202

따라서, 재료의 적정 조임 토크를 결정하는 단계(S120)는 경도를 이용하여 적정 조임 토크를 결정하는 단계(S121)와 함께 고려되어 적정 조임 토크를 결정할 수 있다. 즉, 도 11에 도시된 바와 같이, 경도가 커지면 단순 전단 시험에서의 적정 조임 토크도 선형적으로 커지게 되고, 고경도 재료에 대한 단순 전단 시험에서는 슬립이 발생하기 쉬우므로 본 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법에 적용되는 각 재료에 대한 적정 조임토크는 표 2와 같이 설정될 수 있다.

다음으로, 본 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법은 단순 전단 응력 및 변형률 특성 평가 단계(S200)를 포함한다.

도 3은 본 발명의 실시예에 따른 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법 중 단순 전단 응력 및 변형률 특성 평가 단계를 나타내는 순서도이다.

도 1 및 도 3을 참조하면, 단순 전단 응력 및 변형률 특성 평가 단계(S200)는 유한요소해석을 수행하여 단일요소에 대한 유효 변형률을 계산하는 단계(S210), 기하학적 형상변화에 의한 유효 변형률을 계산하는 단계(S220), 그리고 유한요소해석을 수행하여 단일요소에 대한 유효 변형률과 기하학적 형상변화에 의한 유효 변형률을 비교하는 단계(S230)를 포함할 수 있다.

먼저, 유한요소해석을 수행하여 단일요소에 대한 유효 변형률을 계산하는 단계(S210)를 설명한다.

유한요소해석을 수행하여 단일요소에 대한 유효 변형률을 계산하는 단계(S210)는 각 재료에 미리 설정된 압연방향을 적용하여 인장시험을 수행하여, 각 재료의 인장물성을 획득할 수 있다. 더 자세하게는, 각 재료에는 항복조건을 적용하여 각 재료에 대한 항복강도, 탄성계수, 확산네킹변형률, 파단변형률, 이방성계수를 도출할 수 있다.

예시적으로, SS400, A15052, 연강 및 zircaloy-4, zirlo는 서로 다른 항복조건이 적용될 수 있다. 상세하게는 SS400, A15052, 연강은 Mises 항복조건이 적용될 수 있고, zircaloy-4, zirlo는 Hill 48 항복조건이 적용될 수 있다. 특히, Hill 48 항복조건은 아래 식 (3)과 같이 정의될 수 있으며, 재료가 평면응력상태에 놓이게 되는 단순 전단 시험 시에는 아래 식 (4)와 같이 단순화 되어 정의될 수 있다.

$$\sigma_e = \left[F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{zx}^2 + 2N\sigma_{xy}^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$\sigma_e = \left[(G+H)\sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (H+F)\sigma_y^2 + 2N\sigma_{xy}^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

이때, F, G, H, L, M, N 은 수직이방성계수 r 에 의해 결정되는 재료상수이고, F = G = H = L = M = N = 1일 경우, Mises 항복함수로 환원될 수 있다. 본 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법에 적용되는 5가지 재료에 대한 항복강도, 탄성계수, 확산네킹변형률, 파단변형률, 이방성계수는 아래 표 3과 같이 설정될 수 있다. 또한, zircaloy-4와 zirlo에 대한 F 부터 N은 아래 표 4와 같이 설정될 수 있다.

표 3

재료구분	E (GPa)	σ_0 (MPa)	w	ε_d	ε_f
SS400	225	230	0.85	0.22	0.9
Al5052	75	196	0.5	0.085	0.090
mild steel	232	184	0.5	0.31	1.0
zircaloy-4	99	310	0.54	0.14	1.2
zirlo	82	426	0.43	0.15	0.8

[0071]

표 4

재료구분	r	F	G	H	L	M	N
zircaloy-4	2.674	0.27	0.27	0.73	1.50	1.50	1.73
zirlo	3.823	0.21	0.21	0.79	1.50	1.50	1.79

[0072]

[0073]

예시적으로, 전단변위 1.2 mm(유효소성변형률 $\varepsilon_p = 0.22$)에 대한 단순 전단 유한요소해석 시, 재료 가중계수와 파단변형률은 하중 대 변위 곡선에 거의 영향을 주지 않으나, 유효 변형률이 재료 확산네킹변형률(ε_d)보다 커지면 가중계수와 파단 변형률이 하중 대 변위 곡선에 큰 영향을 줄 수 있다. 이는, 확산네킹변형률 이후 응력 대 변형률 곡선이 가중계수와 파단변형률에 의해 결정되기 때문이다. 따라서, 단순 전단에 의해 발생된 유효 변형률이 확산네킹변형률 보다 큰 경우, 물성획득 시 가중계수와 파단변형률을 정확히 결정할 수 있다.

[0074]

다음으로, 기하학적 형상변화에 의한 유효 변형률을 계산하는 단계(S220)를 설명한다.

[0075]

순수전단 응력상태와 달리, 단순 전단에서는 전단폭 유지를 위해 수직응력이 발생하고, 전단과 수직응력이 동시에 작용하여 재료의 응력상태가 아래 식 (5)와 같이 설정될 수 있다.

[0076]

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{avg} & 0 \\ \tau_{avg} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy}/2 & 0 \\ \gamma_{xy}/2 & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

[0077]

예시적으로, SS400, 연강 재료에 대해 전단영역 중심 A에 위치한 한 요소에서의 수직응력 σ_x , σ_y 는 전단 응력 τ_{xy} 에 비해 작다. 따라서, 유효 응력 σ_e 는 아래 식 (6)과 같이 τ_{xy} 의 $\sqrt{3}$ 배와 일치할 수 있다.

[0078]

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + 2(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]} \\ \doteq \sqrt{\frac{3}{2} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + 2\tau_{xy}^2)} \doteq \sqrt{3} \tau_{xy} \quad (6)$$

[0079]

도 12는 SS400 및 연강 재료의 전단영역 중심 A에 대한 변형률과 변위 간의 상관관계를 나타내는 그래프이고, 도 13은 SS400, Al5052, 연강 재료에 대한 파단 전까지의 변위에 따른 유효 대 전단변형률 비와 변위 간의 상관관계를 나타내는 그래프이다.

[0080]

도 12 및 도 13을 참조하면, SS400, 연강의 전단영역 중심 A에서의 변형률 $(\varepsilon_e, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy} - \delta)$ 들은 변위에 따라 동일하게 나타날 수 있다. 즉, 재료에 상관없이 파단 전까지 변위에 따른 유효 대 전단 변형률 비 $(= \gamma_{xy} / \varepsilon_e)$ 는 일치할 수 있다. 따라서, 단순 전단 시험에서는 재료에 상관없이 기하학적 형상변화, 즉 전단변위에 의해 전단 및 유효 변형률이 결정될 수 있다. 최대 전단 및 유효 변형률은 각각 아래의 식 (7) 및 (8)로 단순화될 수 있다.

[0081]

$$\gamma_{\max} = \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\gamma_{xy})^2} \quad (7)$$

[0082]

$$\varepsilon_e = \sqrt{\frac{2}{3} \left[(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2) + 2(\gamma_{xy}/2)^2 \right]} \quad (8)$$

[0083]

도 14는 본 발명의 실시예에 따른 재료의 기하학적 형상변화 과정을 개략적으로 나타낸 도면이다.

[0084]

도 14를 참조하면, 기하학적 형상변화에 주목해 단순 전단 변형이 순수전단, 단순회전, x-방향 인장, 그리고 y-방향 압축 순으로 나타난다고 가정할 경우, 단순 전단 초기에는 순수전단과 동일한 변형을 보이며, 변형 전과 후의 면적이 동일한 것을 확인할 수 있다. 이때, 순수전단 후, 한 변 길이 b는 아래 식 (9)와 같이 정의될 수 있다. 식 (9)에서 γ_p 는 순수전단 시 전단 변형률이다.

[0085]

$$b = \frac{a}{\sqrt{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_p\right)}} = \frac{a}{\sqrt{\cos\gamma_p}} \left[\because a^2 = b^2 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_p\right) \right] \quad (9)$$

[0086]

마지막으로, 단순 전단 응력 및 변형률 특성 평가 단계(S200)의 유효요소해석을 수행하여 단일요소에 대한 유효 변형률과 기하학적 형상변화에 의한 유효 변형률을 비교하는 단계(S230)를 설명한다.

[0087]

유효요소해석을 수행하여 단일요소에 대한 유효 변형률과 기하학적 형상변화에 의한 유효 변형률을 비교하는 단계(S230)는 $\tan\gamma_p$ 로부터 γ_p 와 γ 사이의 관계를 정리하여 유효 변형률 ε'_e 을 전단 변형률 γ 의 함수로 표현하고, 기하학적 형상변화를 근거로 계산한 변형률 및 변위 곡선을 단일요소와 비교하여 단순 전단 응력 및 변형률 특성을 평가하는 단계이다.

[0088]

더 자세하게는, $\tan\gamma_p$ 는 아래의 식 (10)과 같이 정의되고, γ_p 와 γ 사이의 관계식은 아래의 식 (11)과 같이 정의될 수 있다. 이를 바탕으로, 전단 변위에 따른 전단 변형률 γ_p 의 값을 구할 수 있다. 이 후, 전단폭 유지를 위하여 순수전단변형으로부터 x-방향 인장 및 y-방향 압축이 수행되고, 수직변형률 $\varepsilon'_x, \varepsilon'_y$ 에 비하여 상대적으로 작은 두께방향 변형률 ε'_z 을 0으로 설정하여 체적일정조건에 의한 수직변형률 $\varepsilon'_x, \varepsilon'_y$ 에 관한 식을 도출할 수 있다. 즉, 체적일정조건 $(\varepsilon'_x + \varepsilon'_y + \varepsilon'_z = 0)$ 에 의하여 $\varepsilon'_y = -\varepsilon'_x$ 로 정의될 수 있으며, 수직변형률 $\varepsilon'_x, \varepsilon'_y$ 는 아래의 식 (12)와 같이 정의될 수 있다.

[0089]

$$\tan\gamma_p = \frac{\delta}{b \cos\gamma_p} = \frac{\delta}{a \cos\gamma_p} \sqrt{\cos\gamma_p} \quad (10)$$

[0090]

$$\gamma = \arctan \frac{\sin\gamma_p}{\sqrt{\cos\gamma_p}} \left(\because \tan\gamma = \frac{\delta}{a} \right) \quad (11)$$

$$\varepsilon_x' = \frac{a - b \cos \gamma_p}{b \cos \gamma_p} = \frac{1 - \sqrt{\cos \gamma_p}}{\sqrt{\cos \gamma_p}}; \varepsilon_y' = \frac{\sqrt{\cos \gamma_p} - 1}{\sqrt{\cos \gamma_p}}; \varepsilon_z' = 0 \quad (12)$$

이때, 유효 변형률 ε_e' 은 전단 변형률 γ 의 함수로 표현될 수 있다.

더 자세하게는, 상기한 식 (8)로부터 식 (11) 및 (12)의 관계식을 적용하여 정리하면 유효 변형률 ε_e' 은 아래의 식 (13)과 같이 정의될 수 있다.

$$\varepsilon_e' = f(\gamma_p) = \sqrt{\frac{4}{3} \left[\left(\frac{1 - \sqrt{\cos \gamma_p}}{\sqrt{\cos \gamma_p}} \right)^2 + (\gamma_p / 2)^2 \right]} \quad (13)$$

도 15는 유효요소해석을 통해 도출된 단일요소의 변화 및 기하학적 형상변화에 대한 변형률 및 변위 간의 상관관계를 나타내는 그래프이다.

도 15를 참조하면, 기하학적 형상변화를 바탕으로 계산한 변형률 및 변위에 관한 곡선을 유효요소해석을 통한 단일요소를 해와 비교한 결과, 단일요소해석과 기하학적 형상변화로부터 도출한 전단 및 수직변형률은 거의 동일하고, 기하학적 형상변화로 도출한 전단 및 수직변형률은 단일요소해석보다 3% 크며, 유효 변형률은 서로 동일한 값을 가질 수 있다. 이때, 유효 변형률은 최대오차 3% 미만을 가지게 되며, 이는 기하형상변화에 의한 변형률 계산 시 탄성변형을 고려하지 않아 발생하는 것일 수 있다.

다음으로, 본 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법은 시험 및 해석 단계(S300)를 포함한다.

도 4는 본 발명의 실시예에 따른 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법 중 시험 및 해석 단계를 나타내는 순서도이고, 도 16은 본 발명의 실시예에 따른 시험 장치의 변위측정 및 변위에 의해 변형된 재료의 전단구간을 나타내는 도면이다.

도 1 및 도 4를 참조하면, 본 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법의 시험 및 해석 단계(S300)는 재료를 지그에 고정시키는 단계(S310), 재료에 격자무늬를 형성하는 단계(S320), 지그에 변위를 인가하는 단계(S330), 재료에 형성된 격자무늬의 변형을 미리 설정된 시간 간격으로 측정하여 전단변위를 획득하는 단계(S340), 단순 전단 시험으로 획득한 하중 및 변위 데이터를 해석 데이터와 비교하는 단계(S350), 그리고 단축인장과 단순 전단 응력 및 변형률을 비교하는 단계(S360)를 포함할 수 있다.

즉, 도 16에 도시된 바와 같이, 시험 및 해석 단계(S300)는 재료에 실크스크린 기법을 이용하여 격자무늬를 형성한 후, 지그에 변위를 인가하여 단순 전단 시험을 수행함과 동시에, 시험 진행 동안 디지털현미경 등과 같은 확대 관찰이 가능한 영상장치를 이용하여 격자무늬의 이동을 관찰하되 미리 설정된 시간 간격으로 격자 변형을 기록하여 전단변위를 측정하는 단계이다.

이때, 재료에 실크스크린 기법을 이용하여 격자무늬를 형성하는 이유는 시험 시 재료를 이동 및 고정시키는 시험장치의 탄성변형 및 지그와 재료 사이의 슬립 등으로 인한 추가변위의 발생을 배제하고, 오직 전단변위만 측정하기 위함이다.

또한, 재료의 일측을 고정하여 재료에 전단력을 부여하는 지그에 인가되는 변위의 속도는 1×10^{-2} mm/s일 수 있다. 그러나, 이는 필요에 따라 최적의 값으로 변경되어 적용될 수 있다.

한편, 단순전단 시험으로 획득한 하중 및 변위 데이터를 해석 데이터와 비교하는 단계(S350)는 재료에 형성된 격자무늬의 변형을 미리 설정된 시간 간격으로 측정하여 전단변위를 획득하는 단계(S340)로부터 획득한 전단변위를 이용하여 재료의 거동을 파악할 수 있다.

도 17은 각 재료의 단순전단 시험 및 해석 데이터에 대한 하중 및 변위 간의 상관관계를 나타내는 그래프이다.

도 17을 참조하면, 각 재료의 하중 및 변위 곡선(raw data)을 해석 데이터 곡선(adjusted data)과 비교하여 단순전단 시험에 관한 해석 및 각 재료의 거동을 파악할 수 있다.

- [0106] 더 자세하게는 각 곡선을 비교하면, 단순전단 시험을 통해 도출된 하중 및 변위 곡선은 전단 초기 해석과 거의 일치하나, 이 후 전단변위 증가에 따라 동일변위에서 시험 하중이 해석보다 작아지고, 모든 재료에 대하여 변위 보정된 시험 값(하중, 변위)은 해석과 유사한 거동을 보인다. 이때, 전단 변위가 커짐에 따라 시험 곡선(raw data)에서의 변위와 보정된 변위 차이가 점점 커지게 되는데, 이는 전단폭의 바깥에서 발생된 변위, 재료 및 지그 간 슬립변위에 기인한다.
- [0107] 상기한 하중 및 변위 데이터를 해석 데이터와 비교하는 단계(S350)의 수행을 마친 후, 최종적으로 단축인장과 단순 전단 응력 및 변형률을 비교하는 단계(S360)를 수행할 수 있다.
- [0108] 도 18은 SS400, A15052, 연강의 인장 및 단순 전단에 대한 응력 및 변형률 간의 상관관계를 나타내는 그래프이다.
- [0109] 도 18을 참조하면, 단축인장과 단순 전단 응력 및 변형률 관계 비교를 위하여 전단 응력은 유효 응력으로 변환하고, 전단 변형률은 유효 변형률로 변환할 수 있다. 더 자세하게는, SS400, A15052 및 연강 재료의 유효 대 변형률 비의 상관관계에 관한 도 13, 유효 변형률과 전단 변형률의 관계에 관한 식 (13) 및 유효 응력과 전단 응력의 관계에 관한 식 (6)을 활용하여 전단 변형률을 유효 변형률로 변환할 수 있다. 즉, 순수 전단 시 유효 응력은 전단 응력의 $\sqrt{3}$ 배이고, 변형률 변환 후, 동일 변형률에서의 인장 응력은 단순 전단의 1.78배와 일치될 수 있다. 이때, 인장 응력은 전단 응력 이외에도 수직 응력이 작용하여 $\sqrt{3}$ 배보다 큰 배수를 가질 수 있다. 이는 전단 영역의 상단부 및 하단부에서 수직 응력이 크게 나타나는 끝단효과 때문일 수 있다. 따라서, 단축인장과 단순 전단 사이의 관계를 통해 단순 전단 시험으로부터 얻은 하중 및 변위 곡선을 유효응력 및 변형률 곡선으로 변환할 수 있다.
- [0110] 마지막으로, 본 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법은 재료의 경화거동 예측 단계(S400)를 포함한다.
- [0111] 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법 중 재료의 경화거동 예측 단계를 나타내는 순서도이다.
- [0112] 도 1 및 도 5를 참조하면, 재료의 경화거동 예측 단계(S400)는 등방/운동성 경화 조합모델을 이용한 단순전단 유한요소해석을 통하여 경화계수 변화에 따른 하중 및 변위 변화에 관한 데이터를 획득하는 단계(S410)를 포함할 수 있다.
- [0113] 소성변형에서 실제 재료의 경화거동은 등방성(항복곡면의 확장/수축)과 운동성(이동) 경화 조합모델로 구분되어 설명될 수 있다. 등방성 경화 조합모델 및 운동성 경화 조합모델은 두 가지 요소로 구성될 수 있다. 먼저, 등방성 경화는 항복 곡면의 크기를, 운동성 경화는 후속응력 α 를 통한 응력공간에서의 항복곡면 이동을 나타낼 수 있다. 예시적으로, 본 등방성 경화 조합모델 및 운동성 경화 조합모델을 통하여 경화계수 변화에 따른 하중 및 변위 변화에 관한 데이터를 획득하는 단계(S410)의 운동성 경화 모델은 3 개의 후속응력 변수 $d\alpha_k$ ($k = 1,2,3$)가 적용된 아래의 식 (14)을 사용하는 Chaboche 비선형 경화 모델을 적용하여 활용할 수 있다. 본 발명에서는 식 (14)를 통해 도출된 아래의 식 (15)가 적용될 수 있다.
- [0114]
$$d\alpha_k = C_k \frac{1}{\sigma^0} (\sigma - \alpha) dp - \gamma_k \alpha_k dp ; \quad \alpha = \sum_{k=1}^N \alpha_k \quad (14)$$
- [0115]
$$d\alpha_1 = C_1 \frac{1}{\sigma^0} (\sigma - \alpha) d\bar{\epsilon}^p - \gamma_1 \alpha_1 d\bar{\epsilon}^p \quad (15)$$
- [0116] 여기서, N 은 후속응력 수, σ^0 는 초기항복응력, C_k 는 초기 운동성경화계수, γ_k 는 소성변형 증가에 따른 운동성 경화 감소비, d 는 등가소성변형률 증분, 그리고 $\bar{\epsilon}^p$ 는 등가소성 변형률을 나타낸다.
- [0117] 또한, 본 등방성 경화 조합모델 및 운동성 경화 조합모델을 통하여 경화계수 변화에 따른 하중 및 변위 변화에 관한 데이터를 획득하는 단계(S410)의 등방성 경화 모델은 아래의 식 (16)를 사용하는 Voce 모델을 적용하여 활용할 수 있다.

$$\sigma^0 = \sigma_0 + Q \left(1 - e^{-b \bar{\epsilon}^p} \right) \quad (16)$$

여기서, σ_0 는 경화전 초기항복응력, Q 는 항복곡면 최대 경화량, b 는 항복곡면 크기변화율을 나타내는 재료 상수를 나타낸다.

즉, 등방성 및 운동성 경화 조합모델은 경화계수 Q , b , C_1 , γ_1 로 등방성과 운동성 경화를 모두를 나타낼 수 있다.

도 19는 등방성 경화계수 변화에 대한 하중 및 변위 간의 상관관계를 나타내는 그래프이고, 도 20은 운동성 경화계수 변화에 대한 하중 및 변위 간의 상관관계를 나타내는 그래프이다.

도 19 및 도 20을 참조하면, 단순 전단 해석 시, 등방성 및 운동성 경화 조합모델을 적용하여 등방성 계수 Q , b 와 운동성 계수 C_1 , γ_1 에 따른 $P - \delta$ 곡선 변화를 확인할 수 있다. 이때, 기준재료 ($\sigma_0 = 350$ MPa, $Q = 150$ MPa, $b = 5$, $C_1 = 1700$ MPa, $\gamma_1 = 20$)에 대해 각 계수변화 (Q , b , C_1 , γ_1)에 따른 $P - \delta$ 곡선 변화는 아래의 표 5와 같을 수 있다.

더 자세하게는, 등방성 경화계수 Q , b 가 커지면 항복곡면도 커지므로 동일변위에서의 하중이 커지고, Q 가 커지면 동일변위에서의 하중과 순방향 및 역방향 하중차($P_{\text{for}} - P_{\text{rev}}$)가 선형적으로 증가한다. 또한, b 가 변형경화속도를 나타내므로, b 가 커지면 변위에 따른 하중이 빠르게 커진다. 그러나 최대 등방성 경화량 Q 가 일정하므로 b 가 일정 값 이상에 도달하면 하중은 더 이상 커지지 않는다.

한편, 운동성 경화계수 C_1 이 커질수록 순방향과 역방향에서 항복점 이후 기울기가 커지고, Q 가 일정하면 순방향 및 역방향 하중차($P_{\text{for}} - P_{\text{rev}}$)는 일정하게 유지되므로, C_1 이 커질수록 역방향 항복하중이 더 작게 나타난다. 이때, γ_1 이 증가함에 따라 순방향 항복 이후 기울기가 감소하되, Q 가 일정하면 순방향 및 역방향 하중차($P_{\text{for}} - P_{\text{rev}}$)는 일정하므로 γ_1 이 커질수록 역방향 항복하중은 커진다.

즉, 경화계수 Q , b , C_1 , γ_1 는 각각 물리적인 의미를 가지나, 이들 각 계수들이 서로 복합적으로 작용하여 재료거동에 영향을 주므로 각 계수들의 조합이 중요한 의미를 가질 수 있다. 예시적으로, 도 16 및 도 17에 도시된 바와 같이, 등방성 경화계수 Q 와 b , 운동성 경화계수 C_1 과 γ_1 에 따른 $P - \delta$ 곡선은 각각 유사한 변화를 보이므로, 어떤 재료의 거동을 따르는 계수의 조합은 유일하지 않다.

표 5

경화모델	σ_0 (MPa)	Q (MPa)	b	C_1 (MPa)	γ_1
Isotropic	350	200	20	0	0
Linear kinematic		0	0	1530	0
Nonlinear kinematic		0	0	3000	10
Combined		100	10	2500	20

또한 도 5를 참조하면, 재료의 경화거동 예측 단계(S400)는 등방/운동성 경화 조합모델을 이용해 획득한 하중 및 변위 변화에 관한 데이터를 재료의 실제 단순전단 순/역방향 시험의 하중 및 변위 데이터와 비교하여 유사

거동을 보이는 데이터로부터 경화계수를 획득하여 재료의 경화거동을 예측하는 단계(S420)를 포함할 수 있다.

[0128] 즉, 재료의 경화거동 예측 단계(S400)는 유한요소해석으로 등방/운동성경화 조합모델을 사용해 단순 전단 순/역방향 시험을 수행하고, 실제 순/역방향 시험과 유사 거동을 보이는 데이터로부터 경화계수를 획득하여 재료의 경화거동을 예측할 수 있다.

[0129] 더 자세하게는, 재료의 경화거동 예측 단계(S400)는 미리 선정된 재료에 순방향 및 역방향 변위를 순차적으로 인가하여 전단구간의 변형을 측정하여 재료의 거동을 예측할 수 있다. 즉, 미리 선정된 실제 재료에 순/역방향 변위를 순차적으로 인가하여 전단구간의 변형을 측정하여 하중 및 변위에 관한 시험 데이터를 도출하고, 이를 유한요소해석으로 획득한 단순전단 순/역방향 시험의 등방/운동성 경화계수 변화에 따른 하중 및 변위 데이터와 대조하여 유사 거동을 보이는 경화계수를 획득해 재료의 거동을 예측할 수 있다.

[0130] 도 21은 본 발명의 실시예에 따른 등방/운동성 경화 조합 모델을 활용한 순/역방향 시험 및 가중조합법을 이용한 인장시험에 대한 유한요소해석과 zircaloy-4 재료의 순/역방향 시험을 서로 비교한 그래프이다.

[0131] 도 21을 참조하면, zircaloy-4 재료($12.5 \times 30 \times 0.68$ mm)에 대하여 변위를 인가하여 순방향 및 역방향 시험을 수행(변위속도 $10\text{--}2$ mm/s, 조임토크는 2.5 kg·m)하여 전단구간 격자변형을 일정한 시간 간격으로 촬영해 전단변위를 측정하여 zircaloy-4 재료에 대한 거동을 측정하였다. 이를 통해, zircaloy-4 재료는 순방향 변형 후 역방향 변형 시 소성변형의 경로의존성 때문에 기존 거동과 달라질 것으로 예상된다. 구체적으로, 순방향 변위 $\delta = 0.87$ mm 인가 후 역방향으로 전환 시 $P - \delta$ 곡선은 도 21과 같이 나타나며, 순방향 변위 $\delta = 0.87$ mm에서의 하중은 약 5.8 kN, 역방향 항복하중은 약 -3.6 kN 으로, 순방향 및 역방향으로 전환 시 항복하중이 38% 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 등방성 및 운동성 경화계수 변화에 따른 하중 및 변위 곡선과 zircaloy-4 재료의 순방향 및 역방향 시험을 통해 도출된 하중 및 변위 곡선을 비교하여 zircaloy-4 재료와 유사 거동을 보이는 경화계수를 획득하고, zircaloy-4 재료의 거동을 예측할 수 있다.

[0132] 이하에서는 앞서 살핀 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법을 수행하기 위한 시험 장치(이하 '시험장치'라 함)를 살핀다. 다만, 앞서 살핀 바우싱거 효과를 고려한 경화거동 예측 방법을 설명하기 위한 각 구성에 대해서는 설명의 편의상 본 시험 장치를 설명하면서 사용되는 도면부호와 동일하게 사용하기로 하고, 동일하거나 유사한 구성에 대한 중복되는 설명은 간략히 하거나 생략하기로 한다.

[0133] 도 22는 본 발명의 실시예에 따른 시험 장치의 지그를 개략적으로 나타낸 도면이다.

[0134] 도 6 및 도 22를 참조하면, 본 시험 장치는 재료의 일측을 수용하여 고정시키는 이동지그 및 재료의 타측을 수용하여 고정시키는 고정지그를 포함하는 지그, 그리고 지그에 연결되어 이동지그를 상하 방향으로 이동시키는 구동부를 포함한다.

[0135] 여기서, 지그는 재료의 전단폭의 길이만큼 이격되어 배치되는 이동지그 및 고정지그를 포함하되, 이동지그 및 고정지그 각각은 재료의 전방 및 후방에 서로 대향하도록 배치되어 재료를 가압하여 고정시키는 복수의 클램핑 플레이트, 재료와 복수의 클램핑 플레이트 사이에 각각 삽입되는 복수의 시트부재, 그리고 복수의 클램핑 플레이트 및 복수의 시트부재를 관통하여 체결되며, 회전을 통해 복수의 클램핑 플레이트를 재료 측으로 이동시켜 재료를 가압하는 복수의 체결부재를 포함할 수 있다.

[0136] 예시적으로, 복수의 시트부재는 재료와의 고정력을 극대화시킴과 동시에 마찰과 이축효과에 의한 오차 발생을 예방할 수 있는 테프론(teflon) 필름일 수 있다. 그러나, 복수의 시트부재는 사용상 필요에 따라 변경되어 적용될 수 있다.

[0137] 여기서, 도 6의 확대된 부분을 살펴보면, 복수의 클램핑 플레이트는 재료의 고정 시 복수의 클램핑 플레이트의 내면보다 재료의 외면에 먼저 접촉되어 재료를 물어 고정시키는 돌기부를 포함할 수 있다.

[0138] 즉, 복수의 클램핑 플레이트는 복수의 체결부재의 회전 시, 재료를 사이에 두고 재료 측으로 이동하면서 내면으로부터 돌출된 돌기부를 통해 재료에 접하여 재료를 물어 고정시키는 구조로 형성될 수 있다.

[0139] 또한, 돌기부는 복수의 클램핑 플레이트의 내면에서 이동지그의 이동방향으로 복수개 형성되어 있되, 재료의 고정 시, 재료의 전단변형이 발생하는 위치로부터 인접한 복수의 클램핑 플레이트의 내면에 형성되는 제1 돌기부 및 제1 돌기부로부터 미리 정해진 간격만큼 수평으로 이격된 복수의 클램핑 플레이트의 내면에 형성되는 제2 돌기부를 포함할 수 있다.

[0140] 더 자세하게는, 도 6을 참조하면, 돌기부는 제1 돌기부 및 제2 돌기부를 포함할 수 있으며, 그 중 제1 돌기부는

복수의 클램핑 플레이트의 내면으로부터 돌출되어 형성되되, 이동지그가 이동하는 방향, 즉 상하방향으로 등간격으로 배치되어 복수개 형성되어 있으며, 형성된 위치는 재료의 전단구간과 최대한 인접된 복수의 클램핑 플레이트의 내면에 형성될 수 있다. 또한, 제2 돌기부는 제1 돌기부로부터 일정 간격 수평으로 이격된 위치에 형성될 수 있다.

[0141] 예시적으로, 도 7을 참조하면, 폭이 25mm인 재료는 전단구간을 기준으로 좌측 및 우측에 제1 돌기부에 의해 가압된 자국이 형성되어 있고, 그로부터 일정 간격 수평으로 이격된 위치에 제2 돌기부에 의해 가압된 자국이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이때, 제1 돌기부는 재료의 고정 시 제2 돌기부에 비하여 단위면적 당 고정력을 더 많이 발생시킬 수 있는 구조로 형성될 수 있다. 즉, 재료에 형성된 제1 돌기부 및 제2 돌기부에 의해 가압된 자국을 보면, 제2 돌기부는 제1 돌기부에 비하여 각 돌기 간 간격의 폭이 넓은 것을 확인할 수 있다. 따라서, 제1 돌기부는 제2 돌기부에 비하여 동일한 면적에서 재료에 접하여 재료를 고정시키는 돌기의 수가 더 많다는 것을 알 수 있으며, 이에 따라 재료에 전달되는 제1 돌기부의 고정력이 제2 돌기부의 고정력 보다 클 수 있다.

[0142] 한편, 본 시험 장치는 재료에 전단 변위 인가 시 상기 재료의 전단구간을 측정하는 영상장치를 더 포함할 수 있다.

[0143] 예시적으로, 영상장치는 미리 설정된 시간 간격으로 격자 변형을 기록하여 전단변위를 측정함과 동시에, 확대 관찰이 가능한 디지털현미경일 수 있다. 그러나, 영상장치는 사용상 필요에 따라 변경되어 적용될 수 있다.

[0144] 또한, 본 시험 장치의 구동부는 이동지그에 동력을 전달하는 유압장치일 수 있다. 예시적으로, 구동부로부터 동력을 전달받아 상하 방향으로 이동하는 상기 이동지그의 속도는 1×10^{-2} mm/s일 수 있다. 그러나, 구동부는 사용상 필요에 따라 변경되어 적용될 수 있다.

[0145] 이처럼 본 발명에 의하면, 재료의 크기 및 해당 재료에 대한 적정 조임 토크를 설정함으로써, 고정도 재료에 대한 시험을 용이하게 수행 할 수 있는 효과가 있다.

[0146] 또한, 재료의 크기 및 해당 재료에 대한 적정 조임 토크를 설정함과 동시에, 재료의 격자변형에 따른 전단변위 측정방안을 제안함으로써, 바우싱거 효과를 고려한 고정도 재료의 경화거동을 예측할 수 있는 단순 전단 시험에 관한 새로운 표준모델을 구축할 수 있는 효과가 있다.

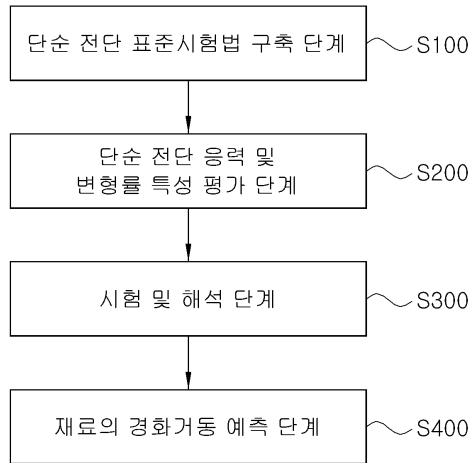
[0147] 이상에서 본 발명의 실시예를 설명하였으나, 본 발명의 권리범위는 이에 한정되지 아니하며 본 발명의 실시예로부터 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 용이하게 변경되어 균등한 것으로 인정되는 범위의 모든 변경 및 수정을 포함한다.

부호의 설명

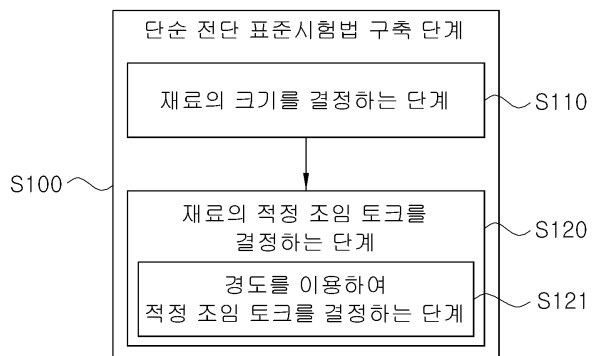
- [0148]
- 1. 시험장치
 - 10. 지그
 - 11. 이동지그 13. 고정지그
 - 101. 클램핑 플레이트
 - 1011. 돌기부
 - 1011a. 제1 돌기부 1011b. 제2 돌기부
 - 103. 시트부재
 - 105. 체결부재
 - 20. 구동부
 - 30. 영상장치
 - 2. 재료 21. 전단구간

도면

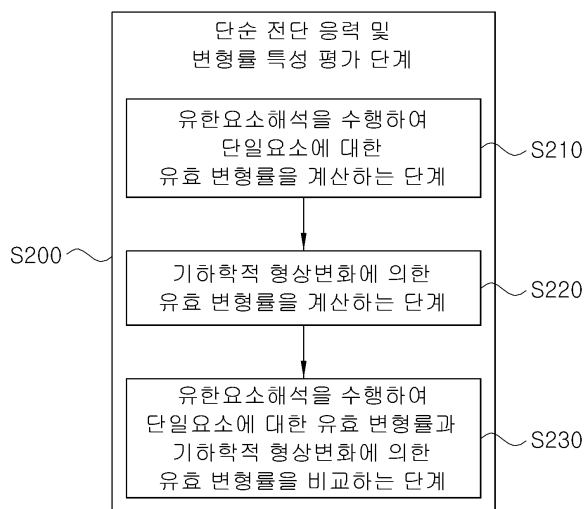
도면1



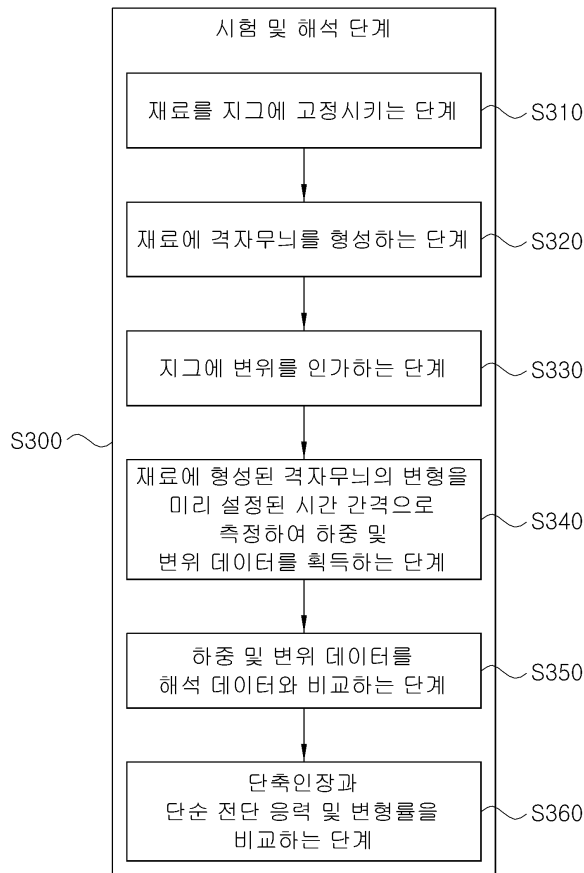
도면2



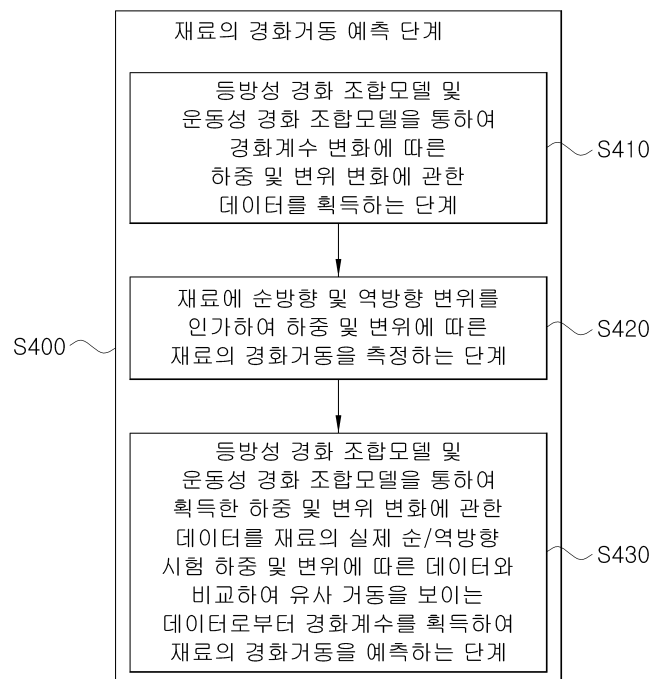
도면3



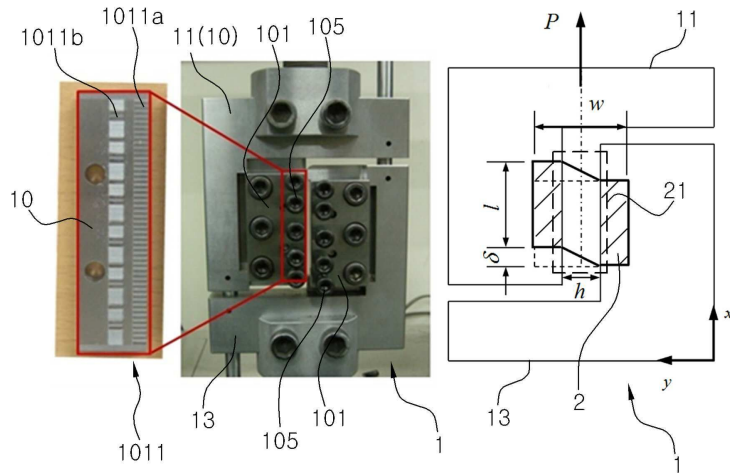
도면4



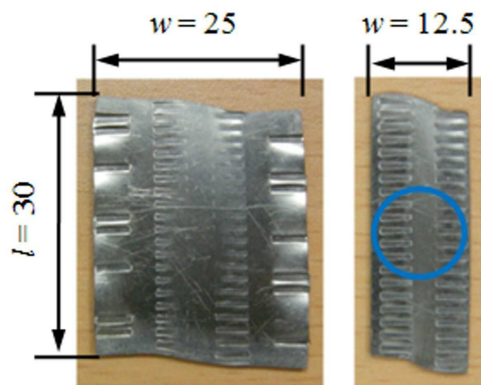
도면5



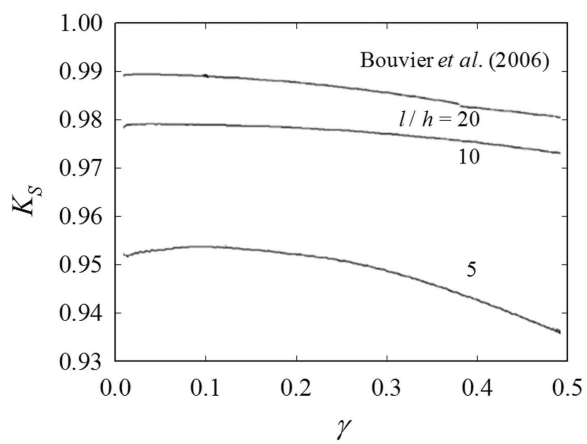
도면6



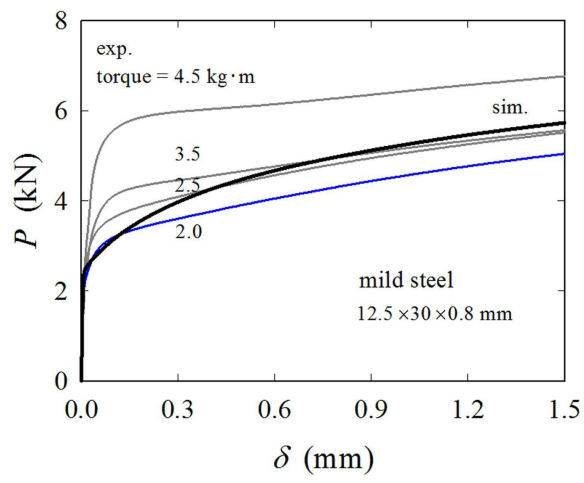
도면7



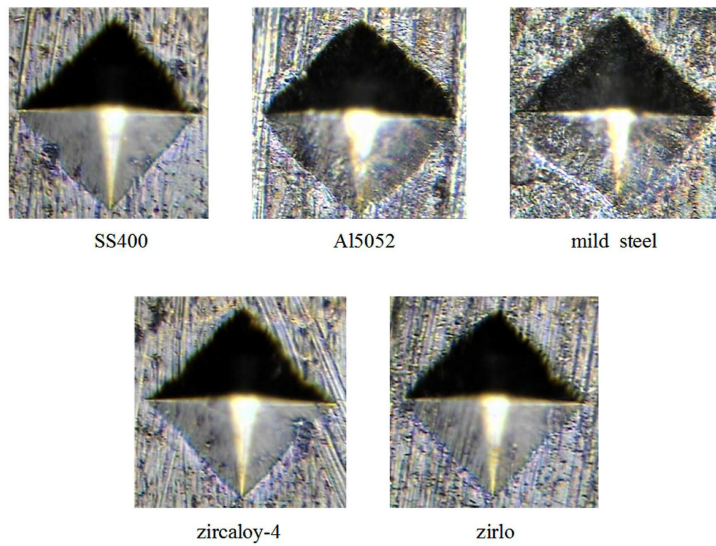
도면8



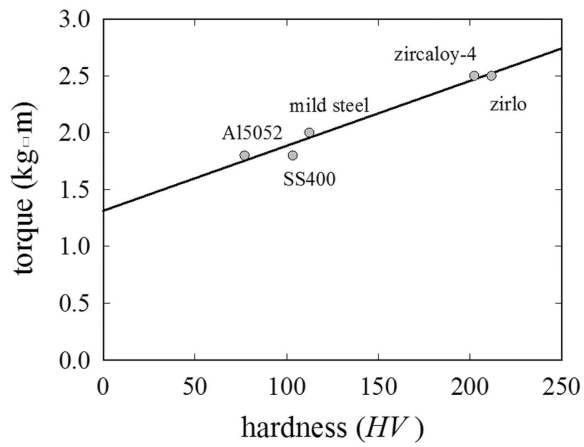
도면9



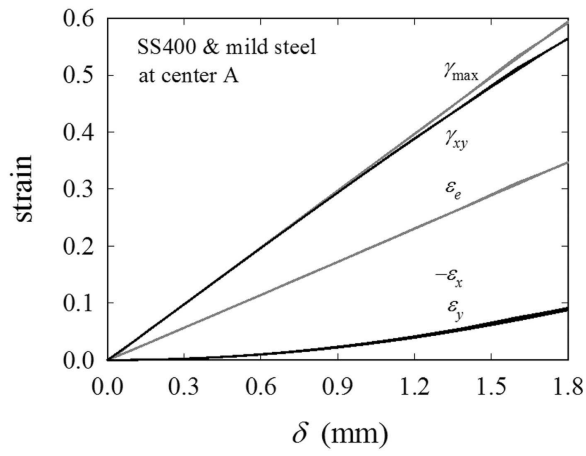
도면10



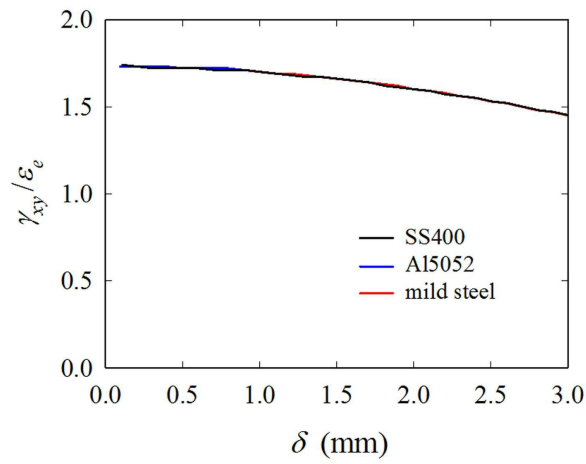
도면11



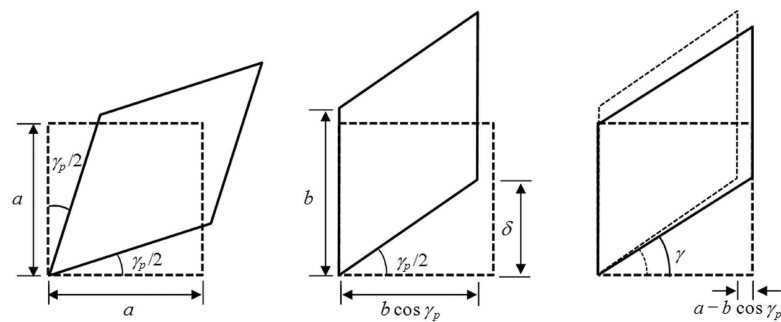
도면12



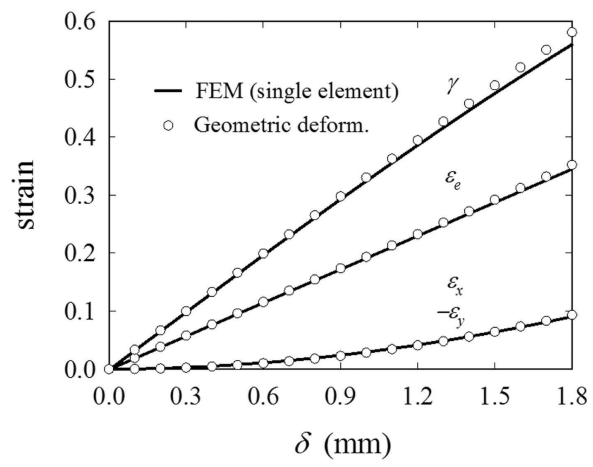
도면13



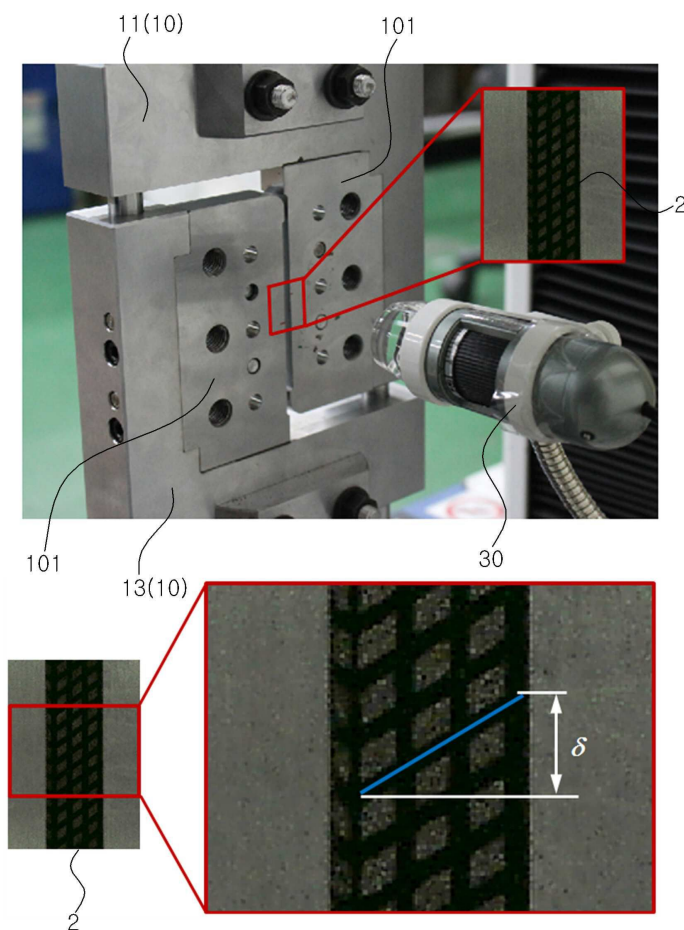
도면14



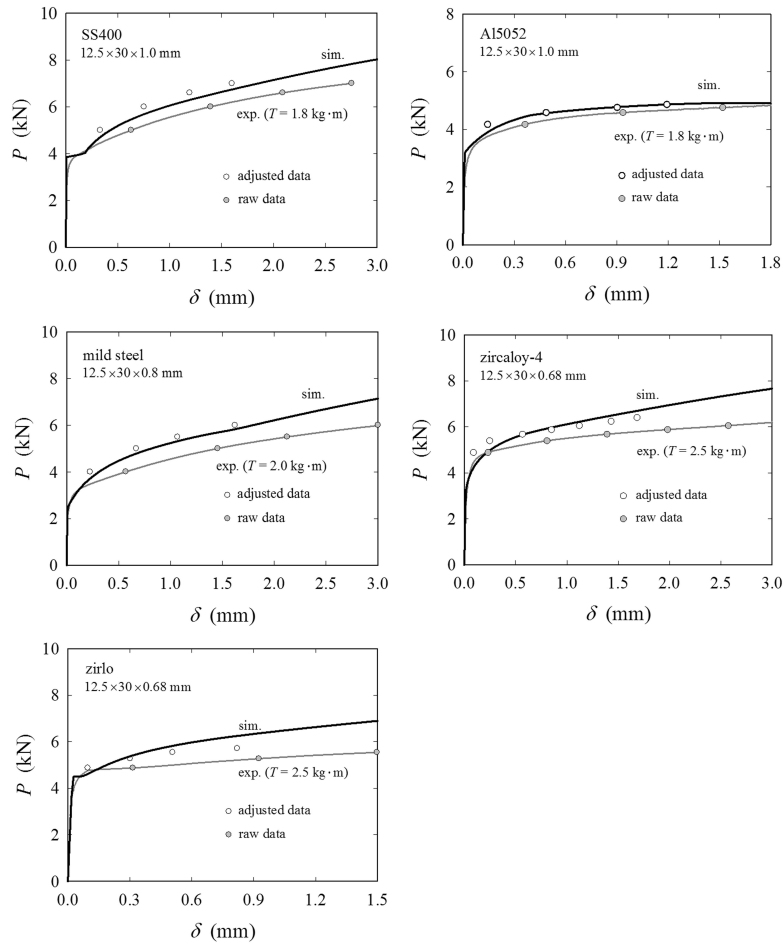
도면15



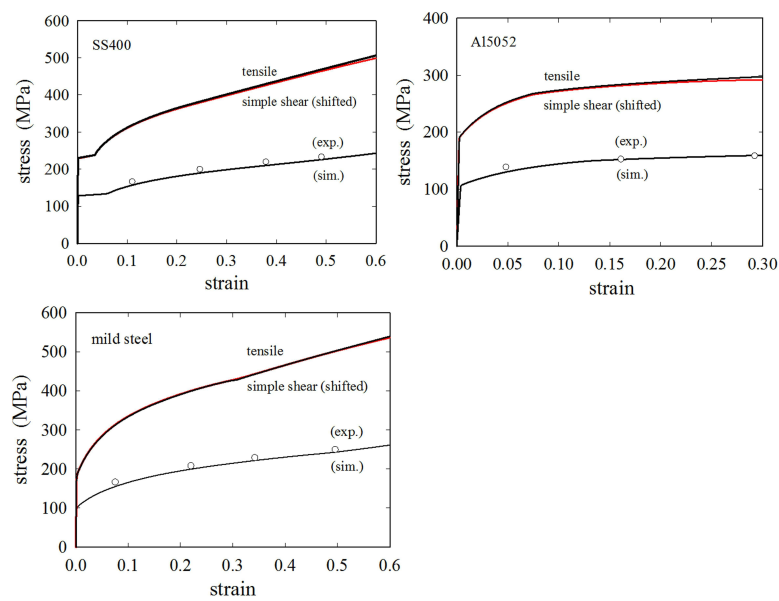
도면16



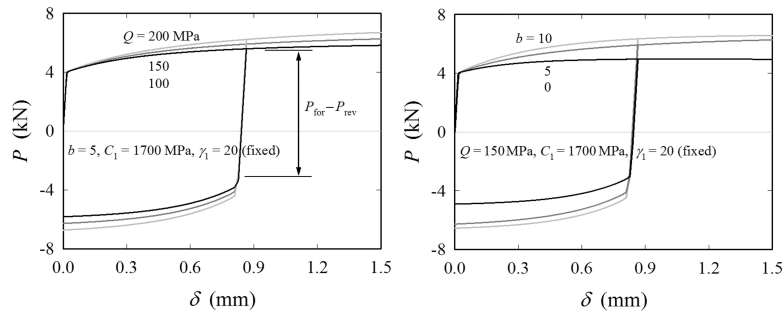
도면17



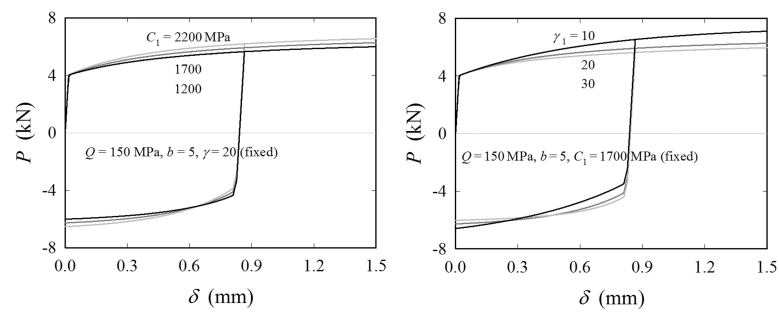
도면18



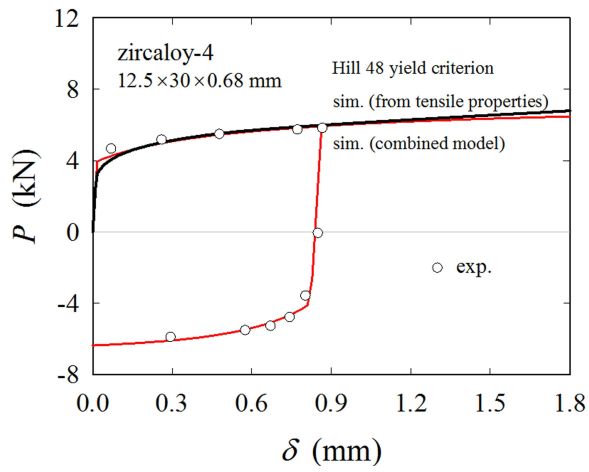
도면19



도면20



도면21



도면22

