



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2017-0104779
(43) 공개일자 2017년09월18일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 3/20 (2006.01) G01N 3/12 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01N 3/20 (2013.01)
G01N 3/12 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2016-0027608
(22) 출원일자 2016년03월08일
심사청구일자 2016년03월08일

(71) 출원인
포항공과대학교 산학협력단
경상북도 포항시 남구 청암로 77 (지곡동)
(72) 발명자
문종언
경상북도 포항시 남구 연일읍 유강길10번길 37 대
림한숲타운3단지 아파트 302동 1302호
김형섭
경상북도 포항시 남구 지곡로 155 9동 703호(지곡
동 교수아파트)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인아이엠

전체 청구항 수 : 총 6 항

(54) 발명의 명칭 강관의 기계적 물성 예측 방법

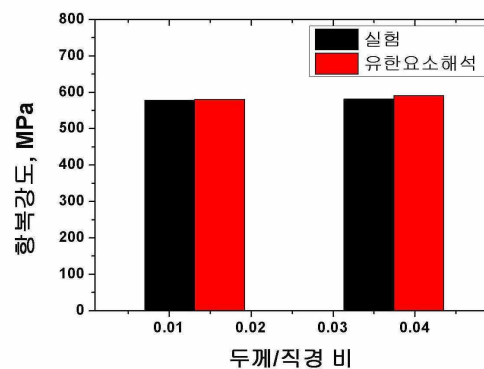
(57) 요약

본 발명은 두께/직경 비(t/D ratio)를 재현한 프레스 밴딩 시험을 통해 실제 UOE 강관의 변형이력을 모사하고 기계적 물성을 평가하는 방법에 관한 것으로, (a) 프레스 밴딩 시험을 통해 시편에 굽힘 변형을 가하여 조관 시 강관의 두께/직경 비를 모사하는 단계; (b) 프레스 밴딩 시편을 편평화하는 단계; (c) 프레스 밴딩-편평화 된 시편에서 인장 시편을 채취하는 단계; 및 (d) 채취된 인장 시편의 인장 시험을 통해 강관의 기계적 물성을 평가하는 단계;를 포함하여 구성된다.

본 발명에 의하면, 프레스 밴딩-편평화-인장 시험을 통해 UOE 조관 공정의 변형이력을 모사할 수 있으며 매우 정확한 항복강도의 예측이 가능하다.

대표도 - 도7

두께/직경 비	0.0131	0.0374
프레스 밴딩 항복강도, MPa	578	581
유한요소해석 항복강도, MPa	580	591
오 차, MPa(%)	+2(+0.3%)	+10(+1.7%)



(52) CPC특허분류

G01N 2203/0435 (2013.01)

(72) 발명자

주수현

서울특별시 광진구 자양번영로3길 65 102동 802호
(자양동 삼성아파트)

정혁재

울산광역시 남구 대암로 82 신정현대홈타운 205동
1002호(야음동 신정현대홈타운2단지아파트)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2015068482

부처명 미래창조과학부

연구관리전문기관 재단법인한국연구재단

연구사업명 창의소재디스커버리사업

연구과제명 MULTI-PHYSICS FULL-SCALE 통합형 모델링 기반 극한환경용 다기능 고엔트로피

기 여 율 1/1

주관기관 포항공과대학교 산학협력단

연구기간 2015.12.04 ~ 2016.04.03

명세서

청구범위

청구항 1

- (a) 프레스 밴딩 시험을 통해 시편에 굽힘 변형을 가하여 조관 시 강관의 두께/직경 비를 모사하는 단계;
- (b) 프레스 밴딩 시편을 편평화하는 단계;
- (c) 프레스 밴딩-편평화 된 시편에서 인장 시편을 채취하는 단계; 및
- (d) 채취된 인장 시편의 인장 시험을 통해 강관의 기계적 물성을 평가하는 단계;를 포함하는 강관의 기계적 물성 예측 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 (a)단계에서, 상기 프레스 밴딩 시험용 시편의 측면에 패턴을 형성하고 변형과정에 대한 시계열적인 영상 정보를 획득한 후, 디지털 영상보정기법을 이용하여 프레스 밴딩 시편의 두께별 유효 변형률 분포를 측정하고, 유한요소해석을 통한 시뮬레이션으로 그 신뢰성을 확인하는 단계를 추가로 수행하는 강관의 기계적 물성 예측 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 (a)단계 및 (b)단계에서, 시편의 두께별 비커스 경도를 측정하는 강관의 기계적 물성 예측 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 프레스 밴딩 시편의 재료는 강관 생산에 사용되는 모든 강종인 강관의 기계적 물성 예측 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 (a)단계에서, 프레스 밴딩 시편의 두께를 조절하여, 다양한 강관의 두께/직경 비를 모사하는 강관의 기계적 물성 예측 방법.

청구항 6

제1항 내지 제5항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 프레스 밴딩 시험과 편평화 공정에서의 금형의 치수는 원하는 두께/직경 비에 따라 조절하는 강관의 기계적 물성 예측 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001]

본 발명은 조관 공정 후 형성된 강관의 기계적 물성을 손쉽게 예측하기 위해 새롭게 고안된 물성 예측 방법에 관한 것이다. 보다 구체적으로 UOE 공정을 모사하기 위해 개발한 프레스 밴딩 금형을 이용하여 UOE 공정의 강관의 두께/직경 비(t/D ratio)를 재현하고 유한요소해석 시뮬레이션을 이용하여 UOE 조관 공정의 변형 이력 및 변형률을 모사하여 UOE 공정과의 유사성에 대한 신뢰성을 확보한 후, 최종적으로 프레스 밴딩 시편의 편평화 후 인장시험을 통하여, UOE 공정 후 강관의 기계적 물성을 쉽게 예측할 수 있는 방법에 관한 것이다.

배경 기술

- [0002] 최근 높아지는 에너지 소비로 인해 원유와 가스를 산지에서 소비지로 공급하는 수단이 중요해지고 있으며 원유와 가스를 운송하는 강관의 중요성이 부각되고 있다. 따라서 더욱 효과적인 원유와 가스 운송을 위한 고강도, 고인성 강관의 개발이 요구되고 있다.
- [0003] UOE 강관은 종래의 이음 없는 강관에서는 제도가 곤란한 대략 16인치 이상의 지름이 큰 강관의 제조를 위하여 소재 원판을 프레스에 의하여 U형 성형, O형 성형 후, 긴 심부를 내, 외면에서 서브머지드 아크 용접(submerged arc welding, SAW)하고, 최종 공정에서 치수 정밀도 향상과 내부 응력 제거를 위한 냉간 확관을 하여 대구경 용접관으로 한 것이다.
- [0004] 최근에는 장거리 고압가스 파이프 라인, 대형 고급 해양 구조물 부재, 대구경 고압화학용 등 대구경 강관의 요구가 높아지고 있어서 UOE 강관도 용접부를 포함하여 고장력화와 후속화의 필요가 있으며, 또 사용온도 영역의 확대나 부식환경 하에서의 사용을 위하여 저합금 강관이나 스테인리스 등의 고합금 강관이 요망되고 있다.
- [0005] 강관의 항복응력은 강관의 기계적 물성을 평가하는데 필수적인 역할을 하며, 강관이 외부의 압력을 버티는 역할을 나타낸다. 항복응력의 측정을 위한 UOE, ERW, Spiral, JCO 등의 조관 공정 후의 조관재의 일반적으로 조관 후 파이프 용접부의 180° 부근을 절단한 후, 편평화 과정을 거쳐 트랜스버스(transverse) 방향으로 인장함으로써 기계적 물성을 평가한다.
- [0006] 그러나 이러한 평가법은 두께와 직경이 큰 강관을 가공해야 하기 때문에 적지 않은 시간과 노력, 비용이 필요하며 이는 새로운 강종을 개발, 평가하는데 걸림돌이 되고 있다.
- [0007] 금속재료의 기계적 물성은 변형 이력에 의존적이며 재료가 소성변형을 받게 되면 가공경화에 의해 항복응력이 증가하며 반대 방향 변형을 받게 되면 항복응력이 감소하는 바우싱거(Bauschinger) 효과가 나타나게 된다.
- [0008] 조관 공정과 편평화 공정에서는 일반적으로 파이프 두께방향 중심을 기준으로 강관 내측과 외측에 가해지는 변형 이력이 다르다. 조관 공정에서 강관 내측은 압축 변형, 강관 외측은 인장 변형을 받으며, 편평화 공정 동안 반대방향으로 변형을 받아 강관 내측은 인장 변형, 강관 외측은 압축 변형을 받게 된다.
- [0009] 또한, 인장시험 시 다시 한번 인장변형을 받기 때문에 강관 내측은 압축-인장-인장 변형을 받게 되고, 파이프 외측은 인장-압축-인장 변형을 받게 된다. 따라서 반대방향 변형을 2번 받는 파이프 외측의 경우 바우싱거 효과의 영향을 크게 받으며, 반대 방향 변형을 1번 받는 파이프 내측의 경우 가공경화의 영향을 크게 받게 된다. 따라서 가공경화, 바우싱거 효과에 의해 조관 후 기계적 성질은 원판재와 다르므로 조관 후의 기계적 물성을 정확하게 평가하는 것은 매우 까다로운 과정이다.
- [0010] 한편, 하기 특허문헌에는 강관의 권취 후 시편 채취와 권취하고 냉각한 후 시편 채취시의 물성차이를 정정함으로써, 강관의 물성을 조기에 평가하는 방법이 개시되어 있으나, 조관 후 물성을 신속하게 평가하는 방법은 제공하고 있지 않다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0011] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허공보 제660202호

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0012] 이상과 같이, 강관의 기계적 물성을 평가하기 위해서는 두께와 직경이 큰 강관을 조관하여야 하고 조관-편평화-인장 시험 과정에서 가공경화와 바우싱거 효과의 영향을 동시에 받기 때문에 기계적 물성의 측정이 어려우며 많은 시간과 비용이 소모된다.
- [0013] 따라서 본 발명의 과제는 새롭게 개발된 프레스 밴딩 금형과 모사기법을 이용하여, 조관 공정 후 강관의 기계적 물성을 손쉽게 예측할 수 있는 강관의 물성 예측 방법을 제공하는 것을 과제로 한다.

과제의 해결 수단

- [0014] 상기 과제를 해결하기 위한 수단으로 본 발명은, (a) 프레스 밴딩 시험을 통해 시편에 굽힘 변형을 가하여 강관의 두께/직경 비를 재현하는 단계, (b) 프레스 밴딩 시편을 편평화하는 단계, (c) 프레스 밴딩-편평화 된 시편에서 인장 시편을 채취하는 단계 및 (d) 채취된 인장 시편의 인장 시험을 통해 강관의 기계적 물성을 평가하는 단계를 포함하는 강관의 기계적 물성 예측 방법을 제공한다.
- [0015] 이 구성에 의하면, 기존의 강관의 물성측정 샘플의 크기보다 훨씬 더 작은 크기와 하중, 적은 시간으로 기존의 측정법과 동일한 결과를 얻을 수 있다.
- [0016] 또한, 상기 (a)단계에서, 상기 프레스 밴딩 시험용 시편의 측면에 패턴을 형성하고 변형과정에 대한 시계열적인 영상정보를 획득한 후, 디지털 영상보정기법을 이용하여 프레스 밴딩 시편의 두께별 유효 변형률 분포를 측정할 수 있다.
- [0017] 이 구성에 의하면, 강관에 프레스 밴딩 공정을 수행함에 있어서, 디지털 영상보정기법과 유한요소해석을 병행하는 것을 특징으로 하는데, 디지털영상보정기법을 통해 프레스 밴딩 시편의 변형률 분포를 분석함으로써 강관의 변형이력을 그대로 모사할 수 있을 뿐만 아니라 유한요소해석을 통한 시뮬레이션으로 그 신뢰성을 확인할 수 있어 더욱 정확하게 UOE 조관 공정을 모사하고 기계적 물성을 예측할 수 있다.

발명의 효과

- [0018] 본 발명에 의한 프레스 밴딩 시편은, 실제 강관에 비해 소형 강관과 금형을 사용하기 때문에 적은 비용과 시간, 그리고 작은 하중으로 시험할 수 있다.
- [0019] 또한, 디지털 영상보정기법을 통한 변형률 분포 측정을 병행함으로써 실제 강관의 변형 이력을 추적하고 모사할 수 있다.
- [0020] 또한, 유한요소해석을 통해 프레스 밴딩 모사를 통해 프레스 밴딩 시험에 필요한 하중과 그에 따른 변위를 예측할 수 있으며 프레스 밴딩 시험의 잔류응력, 변형률 분포 분석을 병행할 수 있다.
- [0021] 또한, 프레스 밴딩 시편의 두께별 경도 측정을 통한 강관의 두께별 물성을 예측할 수 있다.
- [0022] 또한, 본 발명에 따른 프레스 밴딩 시편 제조법에 의하면, 프레스 밴딩 시편의 두께를 조절함으로써 하나의 금형으로 다양한 두께/직경 비에 대한 모사 시험을 진행할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0023] 도 1은 본 발명에 따라 제조된 프레스 밴딩 시편과 그에 따른 두께/직경 비를 나타낸 도면이다.
- 도 2는 본 발명에 따른 프레스 밴딩 및 편평화 장비를 나타낸 것으로, 상/하부 프레스 밴딩 금형의 치수가 고정된 상태에서 시편의 두께를 조절함으로써 원하는 두께/직경 비를 재현할 수 있다.
- 도 3은 본 발명에 따른 프레스 밴딩-편평화 시험을 통한 기계적 물성 측정의 순서를 개략적으로 나타낸 것이다.
- 도 4는 본 발명의 실시예에 따라 프레스 밴딩 시험과 유한요소해석을 통한 밴딩 시편의 형상을 시간별로 비교한 사진이다.
- 도 5a 및 5b는 본 발명의 실시예에 따라 디지털영상보정기법과 유한요소해석을 이용하여 추출한 유효 변형률 분포와 하중-밴딩 변위 곡선의 그래프이다.
- 도 6은 본 발명의 실시예에 따라 프레스 밴딩-편평화 시편의 두께별 경도 측정 결과 그래프이다.
- 도 7은 본 발명의 실시예에 따라 프레스 밴딩-편평화 후의 인장 시험 결과이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0024] 디지털 영상 보정기법은 최근 기계, 소재, 전자, 자동차 등 여러 분야에서 물체 표면의 변위 및 변형률을 측정하기 위한 시각적 분석용 측정법으로 널리 사용되고 있다. 그 기본 원리는 변형되지 않는 이미지와 변형 후 이미지 사이의 위치 변화로부터 국부적인 변위와 변형률을 구하는 것이다. 이 방법은 초기 이미지에 규칙적인 또는 임의의 명암 패턴을 가지는 사각형의 픽셀집합을 만들고, 변형이 발생한 이미지에서 그와 가장 유사한 패턴

을 가지는 픽셀 집합을 찾아서 위치의 변화를 결정한다.

- [0025] 본 발명자들은 종래의 강관의 기계적 물성 평가방법과 달리, 실제 조관 공정이 아닌 소형 프레스 밴딩 모사 시험법을 이용한 인장 시험과, 디지털 영상보정기법, 유한요소해석을 적용하여 신뢰성이 있으면서도 간소한 방법으로 강관의 기계적 물성을 평가할 수 있음을 확인하고 본 발명에 이르게 되었다.
- [0026] 본 발명에 따른 강관의 기계적 물성 평가방법은 크게, 프레스 밴딩 시험을 통해 시편에 굽힘 변형을 가하여 조관 시 강관의 두께/직경 비를 모사하는 단계(제1단계)와, 프레스 밴딩 시편을 편평화하고 프레스 밴딩-편평화된 시편에서 인장시편을 채취하여, 채취된 인장시편의 인장시험을 통해 강관의 기계적 물성을 평가하는 단계(제2단계)를 포함한다.
- [0027] 상기 제1단계에서는 제작된 프레스 밴딩 시편의 측면에 소정의 패턴을 형성한다. 패턴의 형성은 흰색이나 검은색과 같은 도료를 시편의 측면에 분무하여 무작위적인 패턴을 형성하는 스프레이법, 에칭액에 침지시키거나 분무하여 시편의 측면을 에칭하여 소정의 패턴을 형성하는 에칭법, 마이크로 그리드(Micro-grid)를 공지의 증착공정을 통해 형성하는 증착법, 스크래치(scratch)와 같은 패턴을 기계연마를 통해 형성하는 기계연마법 등이 이용될 수 있다.
- [0028] 이때 패턴 형성법은 사용되는 프레스 밴딩 시편의 크기나 분석하고자 하는 이미지의 배율에 맞추어 상기한 패턴 형성법이나 기타 다른 패턴 형성법 중에서 적당한 방법이 선택되어 사용될 수 있다.
- [0029] 상기 프레스 밴딩 시험을 통하여 패턴이 형성된 시편에 조관 시의 상태를 재현하기 위한 굽힘 변형을 가할 때, 디지털 영상보정기법을 병행하며 시편 두께의 조절을 통한 다양한 강관의 다양한 두께/직경 비를 재현할 수 있다. 디지털 이미지 획득은 인시투(In-situ) 혹은 엑스시투(Ex-situ) 방법이 모두 사용될 수 있으며, 이때 이미지는 디지털 이미지로 동일한 배율로 시계열적으로 연속하는 이미지를 얻는 것이 바람직하다. 이미지는 구체적으로, 디지털 카메라, 고속 카메라, 캠코더, 광학현미경, 주사전자현미경, 또는 원자현미경 등을 이용하여 획득할 수 있다.
- [0030] 상기 디지털 영상보정기법을 통해 얻은 이미지를 이용하여 디지털 이미지 분석을 할 경우, 프레스 밴딩 시편의 측면에 형성한 규칙 또는 불규칙한 소정의 패턴들이 프레스 밴딩 시편의 변형에 의해 발생하는 위치 변화를 측정하고 이를 통해 프레스 밴딩 시편의 변형률 분포를 분석한다.
- [0031] 이와 같이 분석된 결과는 유한요소해석을 통한 시뮬레이션 결과와 대비하여, 조관 공정의 모사를 보정할 수 있으며, 이를 통해 조관 공정의 모사의 신뢰성을 높일 수 있다.
- [0032] 상기 제2단계에서는, 제1단계의 프레스 밴딩 시험을 거친 프레스 밴딩 시편을 편평화하고 인장 시험과 경도를 측정함으로써 시편의 기계적 물성을 측정하는 단계이다. 이 단계에서는 프레스 밴딩-편평화 공정을 거친 시편에서 인장 시편을 채취하여 인장 시험을 진행하여 얻은 결과를 통해 강관의 기계적 물성을 예측하고 시편의 두께별 경도를 측정함으로써 강관의 두께별 기계적 물성을 예측한다.
- [0033] 강관의 기계적 물성은 프레스 밴딩-편평화-인장시험 혹은 경도 측정을 통해 모사할 수 있으며 평가될 수 있다.
- [0034] 구체적으로, 프레스 밴딩-편평화를 통해 강관의 기계적 물성을 평가하는 방법은 프레스 밴딩-편평화 후 인장 시편을 채취하여 인장 시험을 진행하거나 경도 측정을 통해 기계적 물성을 평가하는 것이 바람직하다.
- [0035] 일반적인 강관의 기계적 물성을 평가하는 방법은 두께와 직경이 큰 강관을 직접 생산해야 하기 때문에 시간적, 경제적으로 비효율적이며 가공경화와 바우징거 효과의 영향을 동시에 받기 때문에 예측이 어렵다. 프레스 밴딩을 통한 UOE 조관 공정을 모사하는 경우, 소형 금형과 시편을 이용하여 실험실에서 간단하고 경제적으로 기계적 물성을 평가할 수 있으며 정확하고 신뢰성 있는 강관의 기계적 물성을 얻을 수 있다.
- [0036] 또한, 디지털 영상보정기법과 유한요소해석을 통해 재료의 변형률 분포를 알 수 있으며 강관의 변형 이력을 정확히 추적, 모사가 가능하다.
- [0038] [실시 예]
- [0039] API X80 강을 도 1과 같은 두께와 치수로 가공하여 프레스 밴딩 시편을 제조하였다. 제조한 프레스 밴딩 시편 측면은 분무기를 이용하여 흰색 및 검은색 도료를 분무하여 인장시편의 측면에 랜덤한 형상의 패턴을 형성하였다.

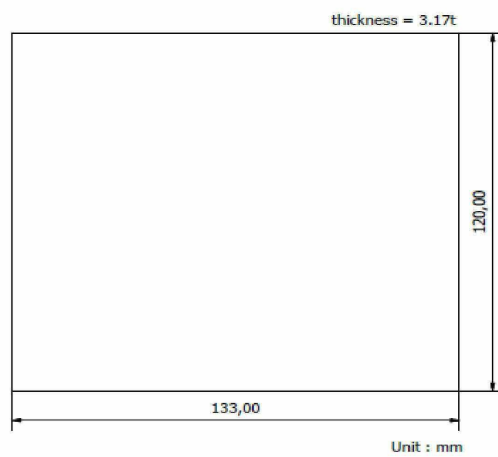
- [0040] 이어서, 제조한 프레스 밴딩 시편을 도 2의 (a), (b)와 같은 프레스 밴딩 금형에 장착하고 속도 0.1 mm/s^{-1} 로 프레스 밴딩 시험을 수행하였으며, 이때 프레스 밴딩 시험의 전 과정에 걸쳐 두 개의 카메라를 이용하여 패턴을 형성한 프레스 밴딩 시편의 측면에 대한 실시간으로 이미지를 얻었다.
- [0041] 이렇게 얻어진 이미지를 ARAMIS 소프트웨어를 이용하여 분석하였으며, 분석된 결과로부터 도 5와 같이 시편의 유효 변형률-변위(두께별) 곡선과 하중-밴딩 변위 곡선을 얻었다.
- [0042] 또한, 상기 프레스 밴딩 공정 중, 2~3분 시간 간격을 두고 사진을 촬영하여 도 4와 같이 시간별 프레스 밴딩 형상을 얻었다.
- [0043] 그리고 프레스 밴딩 공정을 마친 시편을 도 2의 (c)와 같은 편평화 금형으로 편평화시킨 후 도 6, 7에 도시된 바와 같이, 경도 측정과 인장 시험을 통해 기계적 물성을 평가하였다.
- [0044] 경도 측정은 비커스 경도 시험기를 이용하여 프레스 밴딩-편평화 시편의 중심에서 두께별로 안쪽 면에서 바깥쪽 면으로 100g_f 의 하중으로 측정되었으며, 인장 시험은 프레스 밴딩-편평화 시편의 중심, 트랜스버스 방향으로 인장 시편을 채취하여 변형률 속도 $0.001 / \text{s}^{-1}$ 로 진행하였고 이를 통해 경도-변위(두께별) 곡선과 응력-변형률 곡선을 얻었다.
- [0045] 또한, 상기의 전 단계와 동일하게 유한요소해석을 통한 분석을 병행하였다.
- [0046] 도 4에서 확인되는 바와 같이, 프레스 밴딩 과정에서의 시간별 형상은 실제 실험과 유한요소해석에서 매우 유사하게 변화하는 것을 알 수 있으며 프레스 밴딩 시험이 매우 신뢰성 있는 시험법이라는 것을 확인할 수 있다.
- [0047] 도 5는 디지털 영상보정기법과 유한요소해석을 통한 두께별 변형률 분포 분석 결과를 나타낸 것이다.
- [0048] 상기한 도 5의 분석을 통해 디지털 영상보정기법과 유한요소해석의 두께별 변형률 분포와 조관 공정에서의 이론적인 변형률 분포인 두께/직경 비를 대비해 보면 유한요소해석, 디지털 영상보정기법을 통해 얻은 변형률 분포와 두께/직경 비가 유사하게 분포하고 있는 것을 확인할 수 있었다.
- [0049] 즉, 본 발명의 실시예에 따른 방법에 의하면 UOE 조관 공정의 변형 이력을 신뢰성 있게 재현할 수 있다.
- [0050] 한편, 도 6의 결과와 같이, 프레스 밴딩-편평화 시편의 두께별 경도를 측정함으로써 두께별로 다른 변형 이력을 가지는 강관의 두께별 기계적 물성을 예측할 수 있다.
- [0051] 최종적으로 도 7의 결과와 같이, 프레스 밴딩-편평화 시편의 인장 시험을 진행함으로써 시편의 기계적 물성을 얻으며, 이로써 강관의 기계적 물성을 2% 오차 이내에서 정확하게 평가할 수 있다.
- [0052] 즉, 본 발명에 따른 강관의 기계적 물성 평가방법에 의하면, UOE 조관 공정의 변형 이력을 분석할 수 있을 뿐만 아니라 강관의 기계적 물성을 매우 정확하고 간단하게 평가할 수 있다.

도면

도면1



(a) 프레스 밴딩 시편 1

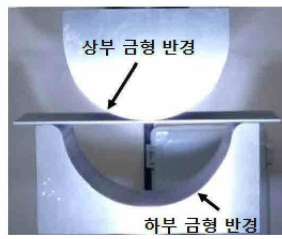


(b) 프레스 밴딩 시편 2

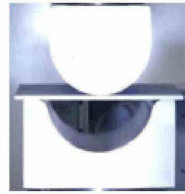
실험 조건	시편 길이, mm	시편 폭, mm	두께, mm	직경, mm	두께/직경 비
(a) 시편 1	240	120	2	152.67	0.0131
(b) 시편 2	133	120	3.17	84.74	0.0374

(c) 두께/직경 비

도면2



(a) 프레스 밴딩 시편 1 금형



(b) 프레스 밴딩 시편 2 금형

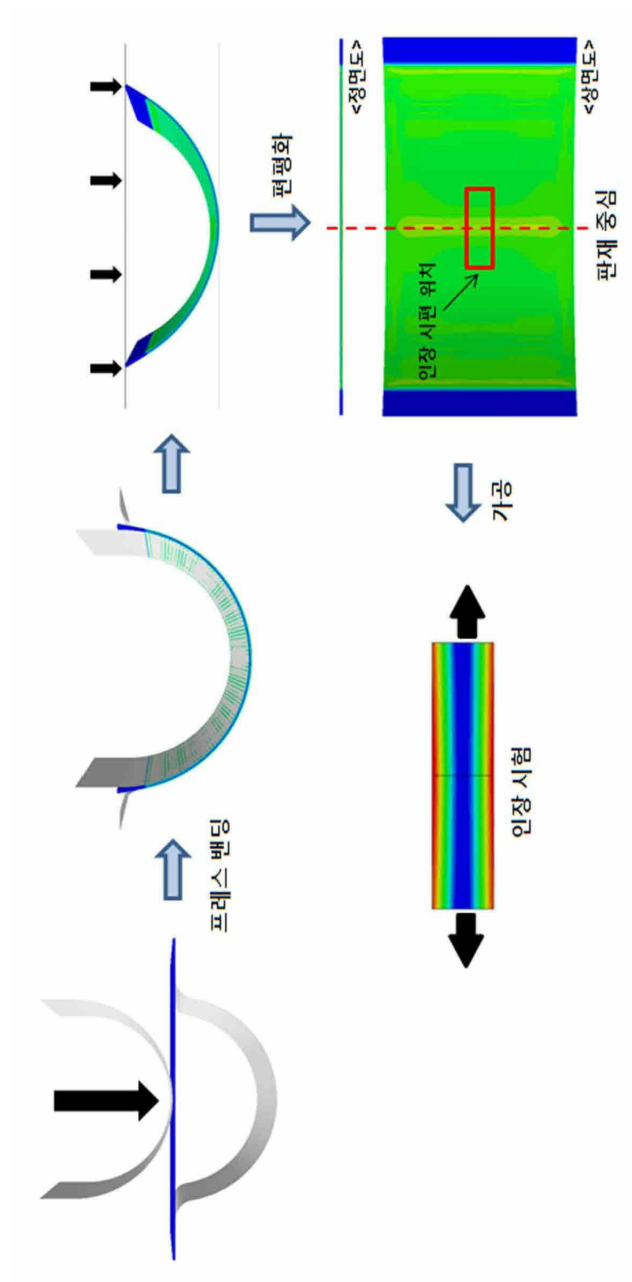


(c) 편평화 금형

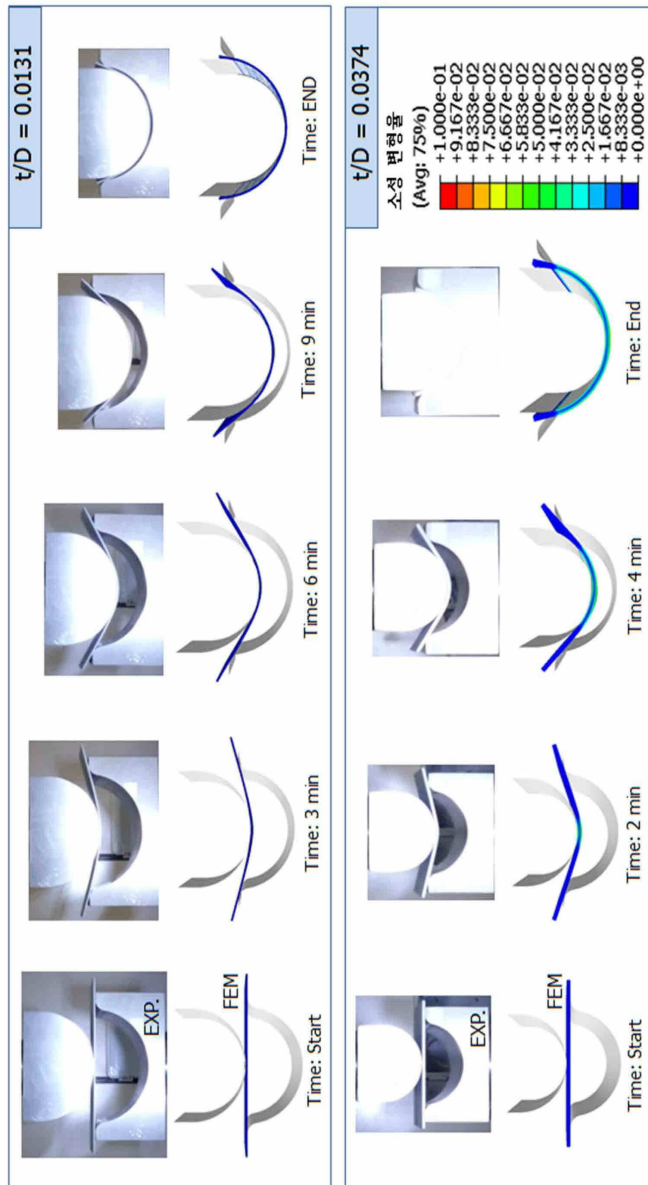
실험 조건	상부 금형 반경, mm	하부 금형 반경, mm	편평화 금형 길이, mm
(a) 시편 1	74.34	76.34	-
(b) 시편 2	39.2	42.37	-
(c) 편평화	-	-	250

(d) 금형 치수

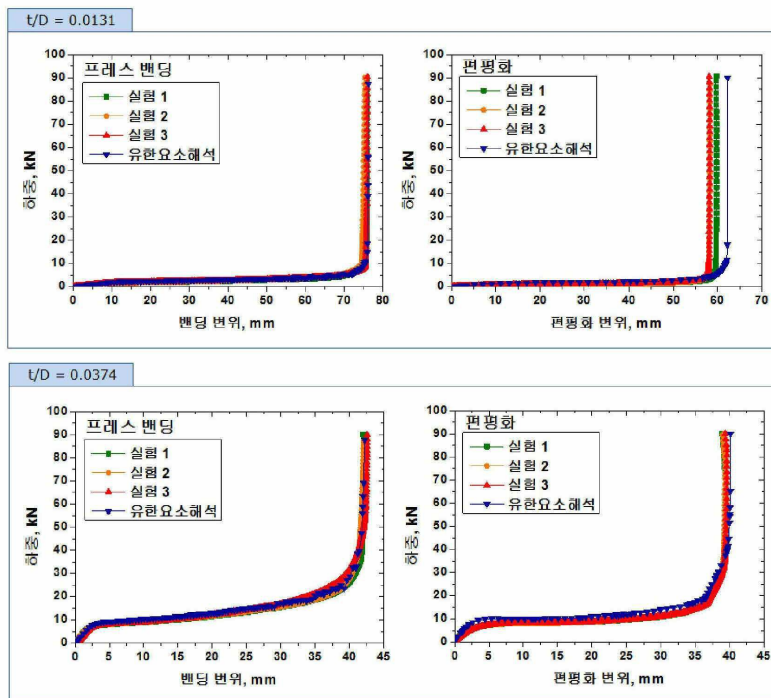
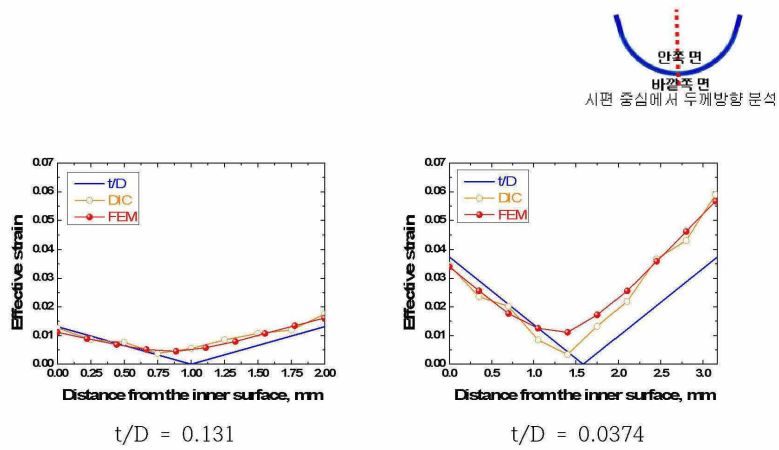
도면3



도면4

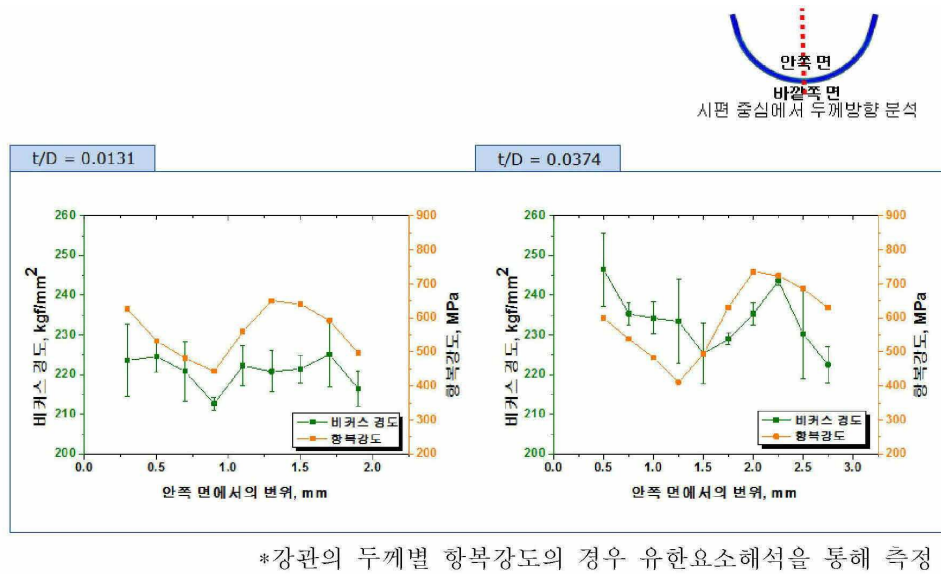


도면5



* 실험 1, 2, 3은 프레스 밴딩, 편평화 시험의 반복실험 결과

도면6



도면7

두께/직경 비	0.0131	0.0374
프레스 밴딩 항복강도, MPa	578	581
유한요소해석 항복강도, MPa	580	591
오 차, MPa(%)	+2(+0.3%)	+10(+1.7%)

