



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2017-0109666
(43) 공개일자 2017년09월29일

- | | |
|---|--|
| <p>(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01L 1/00 (2006.01) G01L 5/00 (2006.01)</p> <p>(52) CPC특허분류
G01L 1/00 (2013.01)
G01L 5/0047 (2013.01)</p> <p>(21) 출원번호 10-2017-7024629</p> <p>(22) 출원일자(국제) 2016년02월22일
심사청구일자 2017년09월01일</p> <p>(85) 번역문제출일자 2017년09월01일</p> <p>(86) 국제출원번호 PCT/JP2016/055065</p> <p>(87) 국제공개번호 WO 2016/140093
국제공개일자 2016년09월09일</p> <p>(30) 우선권주장
JP-P-2015-043083 2015년03월05일 일본(JP)</p> | <p>(71) 출원인
가부시킴가이사 고베 세이코쇼</p> <p>일본 효고켄 고베시 주오쿠 와키노하마 가이간도
오리 2초메 2방 4고</p> <p>(72) 발명자
오키타 게이스케</p> <p>일본 651-2271 효고켄 고베시 니시쿠 다카츄카다
이 1초메 5방 5고 가부시킴가이사 고베 세이코쇼
고베 소고 기쥬츠 켄큐쇼 내</p> <p>나카가와 토모카즈</p> <p>일본 141-8688 도쿄도 시나가와구 기타시나가와
5초메 9방 12고 가부시킴가이사 고베 세이코쇼 내</p> <p>야마다 마리코</p> <p>일본 676-8670 효고켄 다카사고시 아라이초 신하
마 2초메 3방 1고 가부시킴가이사 고베 세이코쇼
다카사고 세이사쿠쇼 내</p> <p>(74) 대리인
장수길, 김명곤, 이성훈</p> |
|---|--|

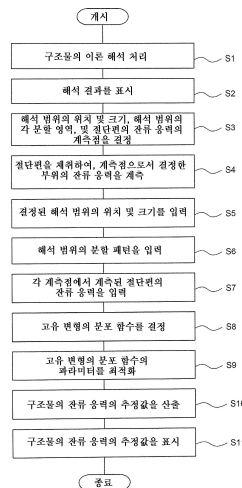
전체 청구항 수 : 총 9 항

(54) 발명의 명칭 잔류 응력 추정 방법 및 잔류 응력 추정 장치

(57) 요약

유저의 경험에 좌우되지 않고, 적절한 해석 범위를 설정하는 것이 가능한 잔류 응력 추정 방법 및 잔류 응력 추정 장치를 제공한다. 잔류 응력 추정 장치는, 구조물의 계측값을 사용하지 않고, 상기 구조물에 발생하는 변형을 해석한 해석 결과를 표시한다. 유저는, 해석 결과에 기초하여 해석 범위의 위치 및 크기를 결정하고, 결정된 해석 범위의 위치 및 크기, 구조물의 계측점에서의 절단면의 잔류 응력 계측값을 잔류 응력 추정 장치에 입력한다. 잔류 응력 추정 장치는, 입력된 절단면의 잔류 응력 계측값으로부터 얻어지는 고유 변형 분포를 근사하도록, 해석 범위에서의 고유 변형의 분포를 추정하고, 고유 변형에 기초하여, 구조물의 잔류 응력을 추정한다.

대표도 - 도4



명세서

청구범위

청구항 1

구조물의 계측값을 사용하지 않고, 상기 구조물에 발생하는 변형을 해석하여, 해석 결과를 표시하는 스텝과,
 상기 해석 결과에 기초하여 설정된, 잔류 응력을 추정하기 위한 해석 범위에 관한 조건을 취득하는 스텝과,
 상기 구조물의 잔류 응력에 관한 계측값을 취득하는 스텝과,
 상기 해석 범위에서의 상기 구조물의 고유 변형을 근사하도록, 취득된 상기 해석 범위에 관한 조건에 기초하여,
 상기 계측값을 사용해서 상기 해석 범위에서의 고유 변형의 분포를 추정하는 스텝,
 을 갖는,
 고유 변형에 기초하는 잔류 응력 추정 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,
 상기 해석 범위에 관한 조건을 취득하는 스텝에서는, 상기 해석 범위에 관한 조건으로서, 해석 범위의 위치 및 크기를 취득하고,
 상기 고유 변형의 분포를 추정하는 스텝에서는, 취득된 위치 및 크기에 의해 특정되는 상기 해석 범위에서의 고유 변형의 분포를 추정하는, 잔류 응력 추정 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,
 상기 계측값을 취득하는 스텝에서는, 취득된 위치 및 크기에 의해 특정되는 상기 해석 범위 내의 계측점에서 계측된 탄성 변형 또는 잔류 응력을, 상기 계측값으로서 취득하는, 잔류 응력 추정 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,
 상기 해석 범위에 관한 조건을 취득하는 스텝에서는, 상기 해석 범위에 관한 조건으로서, 해석 범위를 분할하는 복수의 분할 영역을 규정하는 정보를 취득하고,
 상기 고유 변형의 분포를 추정하는 스텝에서는, 취득된 정보에 의해 규정되는 상기 복수의 분할 영역 각각에 대해서 정의된 복수의 구분적 함수의 집합인 분포 함수를, 상기 계측값에 기초하는 상기 해석 범위의 고유 변형 분포에 근사시키도록, 상기 분포 함수의 파라미터를 결정하는, 잔류 응력 추정 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,
 상기 고유 변형의 분포를 추정하는 스텝에서는, 각 분할 영역의 경계에서 각 구분적 함수가 연속하도록, 상기 분포 함수의 파라미터를 결정하는, 잔류 응력 추정 방법.

청구항 6

제4항에 있어서,
 상기 고유 변형의 분포를 추정하는 스텝에서는, 각 분할 영역의 경계에서 각 구분적 함수의 구배가 연속하도록, 스플라인 보간에 기초하여 상기 분포 함수의 파라미터를 결정하는, 잔류 응력 추정 방법.

청구항 7

제1항 내지 제6항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 해석 결과를 표시하는 스텝에서는, 상기 구조물을 모의한 3차원 모델에 대하여 유한 요소법에 의한 탄소성 해석을 행하는, 잔류 응력 추정 방법.

청구항 8

제1항 내지 제6항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 해석 결과를 표시하는 스텝에서는, 상기 구조물의 가공에 의해 발생하는 응력을, 헤르츠 접촉 이론에 기초하여 해석하는, 잔류 응력 추정 방법.

청구항 9

구조물의 계측값을 사용하지 않고, 상기 구조물에 발생하는 변형을 해석하는 해석 수단과,

상기 해석 수단에 의한 해석 결과를 표시하는 표시부와,

상기 해석 결과에 기초하여 설정된, 잔류 응력을 추정하기 위한 해석 범위에 관한 조건과, 상기 구조물의 잔류 응력에 관한 계측값과의 입력을 접수하는 입력부와,

상기 해석 범위에서의 상기 구조물의 고유 변형을 근사하도록, 상기 입력부에 의해 접수된 상기 해석 범위에 관한 조건에 기초하여, 상기 계측값을 사용해서 상기 해석 범위에서의 고유 변형의 분포를 추정하는 추정 수단과,

상기 추정 수단에 의해 추정된 상기 고유 변형의 분포에 기초하는 잔류 응력의 추정 결과를 표시하는 표시부,

를 구비하는,

잔류 응력 추정 장치.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은, 고유 변형법에 기초하여 구조물의 잔류 응력을 추정하기 위한 잔류 응력 추정 방법 및 잔류 응력 추정 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 구조물에 발생한 잔류 응력은, 피로 균열 등의 손상의 원인이 되는 경우가 있어, 구조물에서의 잔류 응력의 분포를 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 구조물의 잔류 응력을 추정하는 방법으로서, 고유 변형법을 사용한 것이 알려져 있다(예를 들어, 특허문헌 1 및 2 참조).

[0003] 종래의 고유 변형법에 기초하는 잔류 응력의 추정 방법에서는, 구조물로부터 2종류의 절단편을 잘라내고, 각 절단편에 대해서 탄성 변형 또는 잔류 응력을 계측하고, 계측된 절단편의 탄성 변형 또는 잔류 응력의 계측값을 유한 요소법에 기초하는 역 해석 처리에 적용한다. 역 해석 처리를 실행하는 해석 장치에 대하여, 고유 변형이 발생하였다고 상정되는 범위를 해석 범위로서 유저가 입력한다. 해석 장치는, 고유 변형 분포를 해석 범위에서 정의된 분포 함수를 사용해서 최소 제곱법으로 근사하여, 해석 범위에서의 고유 변형의 분포를 결정하고, 얻어진 고유 변형 분포로부터 구조물의 잔류 응력을 계산한다.

선행기술문헌

특허문헌

[0004] (특허문헌 0001) 일본 특허 공개 2005-181172호 공보

(특허문헌 0002) 일본 특허 공개 2003-121273호 공보

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0005] 잔류 응력의 추정 정밀도는, 설정되는 해석 범위에 큰 영향을 받는다. 따라서, 해석 범위를 적절하게 설정하는 것이 중요하다. 그러나, 종래, 유저가 경험에 기초하여 시행 착오적으로 해석 범위를 설정하고 있어, 반드시 적절한 해석 범위가 설정된다고는 할 수 없다.
- [0006] 본 발명은 상술한 사정을 감안하여 이루어진 것이며, 그의 주된 목적은, 상기 과제를 해결할 수 있는 잔류 응력 추정 방법 및 잔류 응력 추정 장치를 제공하는 데 있다.

과제의 해결 수단

- [0007] 상술한 과제를 해결하기 위해서, 본 발명의 일 형태의 잔류 응력 추정 방법은, 구조물의 계측값을 사용하지 않고, 상기 구조물에 발생하는 변형을 해석하여, 해석 결과를 표시하는 스텝과, 상기 해석 결과에 기초하여 설정된, 잔류 응력을 추정하기 위한 해석 범위에 관한 조건을 취득하는 스텝과, 상기 구조물의 잔류 응력에 관한 계측값을 취득하는 스텝과, 상기 해석 범위에서의 상기 구조물의 고유 변형을 근사하도록, 취득된 상기 해석 범위에 관한 조건에 기초하여, 상기 계측값을 사용해서 상기 해석 범위에서의 고유 변형의 분포를 추정하는 스텝을 갖는다.
- [0008] 이 형태에서, 상기 해석 범위에 관한 조건을 취득하는 스텝에서는, 상기 해석 범위에 관한 조건으로서, 해석 범위의 위치 및 크기를 취득하고, 상기 고유 변형의 분포를 추정하는 스텝에서는, 취득된 위치 및 크기에 의해 특정되는 상기 해석 범위에서의 고유 변형의 분포를 추정하도록 해도 된다.
- [0009] 또한, 상기 형태에서, 상기 계측값을 취득하는 스텝에서는, 취득된 위치 및 크기에 의해 특정되는 상기 해석 범위 내의 계측점에서 계측된 탄성 변형 또는 잔류 응력을, 상기 계측값으로서 취득하도록 해도 된다.
- [0010] 또한, 상기 형태에서, 상기 해석 범위에 관한 조건을 취득하는 스텝에서는, 상기 해석 범위에 관한 조건으로서, 해석 범위를 분할하는 복수의 분할 영역을 규정하는 정보를 취득하고, 상기 고유 변형의 분포를 추정하는 스텝에서는, 취득된 정보에 의해 규정되는 상기 복수의 분할 영역 각각에 대해서 정의된 복수의 구분적 함수의 집합인 분포 함수를, 상기 계측값에 기초하는 상기 해석 범위의 고유 변형 분포에 근사시키도록, 상기 분포 함수의 파라미터를 결정하도록 해도 된다.
- [0011] 또한, 상기 형태에서, 상기 고유 변형의 분포를 추정하는 스텝에서는, 각 분할 영역의 경계에서 각 구분적 함수가 연속하도록, 상기 분포 함수의 파라미터를 결정하도록 해도 된다.
- [0012] 또한, 상기 형태에서, 상기 고유 변형의 분포를 추정하는 스텝에서는, 각 분할 영역의 경계에서 각 구분적 함수의 구배가 연속하도록, 스플라인 보간에 기초하여 상기 분포 함수의 파라미터를 결정하도록 해도 된다.
- [0013] 또한, 상기 형태에서, 상기 해석 결과를 표시하는 스텝에서는, 상기 구조물을 모의한 3차원 모델에 대하여 유한 요소법에 의한 탄소성 해석을 행하도록 해도 된다.
- [0014] 또한, 상기 형태에서, 상기 해석 결과를 표시하는 스텝에서는, 상기 구조물의 가공에 의해 발생하는 응력을, 헤르츠 접촉 이론에 기초하여 해석하도록 해도 된다.
- [0015] 또한, 본 발명의 일 형태의 잔류 응력 추정 장치는, 구조물의 계측값을 사용하지 않고, 상기 구조물에 발생하는 변형을 해석하는 해석 수단과, 상기 해석 수단에 의한 해석 결과를 표시하는 표시부와, 상기 해석 결과에 기초하여 설정된, 잔류 응력을 추정하기 위한 해석 범위에 관한 조건과, 상기 구조물의 잔류 응력에 관한 계측값과의 입력을 접수하는 입력부와, 상기 해석 범위에서의 상기 구조물의 고유 변형을 근사하도록, 상기 입력부에 의해 접수된 상기 해석 범위에 관한 조건에 기초하여, 상기 계측값을 사용해서 상기 해석 범위에서의 고유 변형의 분포를 추정하는 추정 수단과, 상기 추정 수단에 의해 추정된 상기 고유 변형의 분포에 기초하는 잔류 응력의 추정 결과를 표시하는 표시부를 구비한다.

발명의 효과

- [0016] 본 발명에 따르면, 유저의 경험에 좌우되지 않고, 적절한 해석 범위를 설정하는 것이 가능하게 된다.

도면의 간단한 설명

- [0017] 도 1은 본 발명에 따른 잔류 응력 추정 장치의 일 실시 형태의 구성을 도시하는 블록도이다.
- 도 2는 크랭크축의 구성을 도시하는 측면도이다.
- 도 3은 크랭크축에 대한 소성 가공을 설명하기 위한 확대 측면도이다.
- 도 4는 본 발명에 따른 잔류 응력 추정 방법의 일 실시 형태의 수순을 나타내는 흐름도이다.
- 도 5a는 해석 모델을 도시하는 사시도이다.
- 도 5b는 도 5a에 나타난 해석 모델에서의 변형의 분포 상황의 해석 결과를 도시하는 도면이다.
- 도 6은 해석 범위의 위치 및 크기의 결정을 설명하기 위한 도면이다.
- 도 7은 해석 범위에서의 분할 영역의 결정을 설명하기 위한 도면이다.
- 도 8은 구조물로부터 채취되는 절단편의 일례를 설명하기 위한 사시도이다.
- 도 9는 C편의 채취를 설명하기 위한 저널 축의 단면도이다.
- 도 10은 헤르츠 접촉 이론을 설명하기 위한 접촉 문제의 일례를 도시하는 도면이다.
- 도 11은 도 10에 도시하는 원기둥과 평판이 접촉한 경우에 상정되는 응력 분포를 도시하는 도면이다.
- 도 12a는 시험 1에서의 필렛 둘레 방향의 잔류 응력 추정 결과를 나타내는 그래프이다.
- 도 12b는 시험 1에서의 핀 둘레 방향의 잔류 응력 추정 결과를 나타내는 그래프이다.
- 도 12c는 시험 1에서의 필렛 반경 방향의 잔류 응력 추정 결과를 나타내는 그래프이다.
- 도 13a는 제안법에서의 계측점을 도시하는 도면이다.
- 도 13b는 비교법 3에서의 계측점을 도시하는 도면이다.
- 도 14a는 시험 2에서의 필렛 둘레 방향의 잔류 응력 추정 결과를 나타내는 그래프이다.
- 도 14b는 시험 2에서의 핀 둘레 방향의 잔류 응력 추정 결과를 나타내는 그래프이다.
- 도 14c는 시험 2에서의 필렛 반경 방향의 잔류 응력 추정 결과를 나타내는 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0018] 이하, 본 발명의 바람직한 실시 형태를, 도면을 참조하면서 설명한다.
- [0019] (실시 형태 1)
- [0020] 본 실시 형태에 관한 잔류 응력 추정 장치는, 구조물의 계측값을 사용하지 않고, 구조물에 발생하는 변형을 해석해서 얻어진 해석 해에 기초하여 유저가 설정한 해석 범위에 대해서, 고유 변형법에 기초하여 구조물의 잔류 응력을 추정하는 것이다.
- [0021] [잔류 응력 추정 장치의 구성]
- [0022] 잔류 응력 추정 장치(1)는, 컴퓨터(10)에 의해 실현된다. 도 1에 도시한 바와 같이, 컴퓨터(10)는, 본체(11)와, 입력부(12)와, 표시부(13)를 구비하고 있다. 본체(11)는, CPU(111), ROM(112), RAM(113), 하드 디스크(115), 판독 장치(114), 입출력 인터페이스(116) 및 화상 출력 인터페이스(117)를 구비하고 있고, CPU(111), ROM(112), RAM(113), 하드 디스크(115), 판독 장치(114), 입출력 인터페이스(116) 및 화상 출력 인터페이스(117)는, 버스에 의해 접속되어 있다.
- [0023] CPU(111)는, RAM(113)에 로드된 컴퓨터 프로그램을 실행하는 것이 가능하다. 그리고, 잔류 응력 추정용의 컴퓨터 프로그램인 잔류 응력 추정 프로그램(110)을 당해 CPU(111)가 실행함으로써, 컴퓨터(10)가 잔류 응력 추정 장치(1)로서 기능한다. 잔류 응력 추정 프로그램(110)은, 유한 요소법에 기초하는 역 해석 처리 프로그램이며, 구조물에서의 고유 변형의 분포 상황의 추정을 가능하게 한다.
- [0024] ROM(112)은, 마스크 ROM, PROM, EPROM, 또는 EEPROM 등에 의해 구성되어 있고, CPU(111)에 실행되는 컴퓨터 프로그램 및 이것에 사용하는 데이터 등이 기록되어 있다.

[0025] RAM(113)은, SRAM 또는 DRAM 등으로 구성되어 있다. RAM(113)은, 하드 디스크(115)에 기록되어 있는 잔류 응력 추정 프로그램(110)의 관독에 사용된다. 또한, CPU(111)가 컴퓨터 프로그램을 실행할 때, CPU(111)의 작업 영역으로서 이용된다.

[0026] 하드 디스크(115)에는, 오퍼레이팅 시스템 및 애플리케이션 프로그램 등, CPU(111)에 실행시키기 위한 다양한 컴퓨터 프로그램 및 당해 컴퓨터 프로그램의 실행에 사용되는 데이터가 인스톨되어 있다. 잔류 응력 추정 프로그램(110)도, 이 하드 디스크(115)에 인스톨되어 있다.

[0027] 하드 디스크(115)에는, 예를 들어 미국 마이크로소프트사가 제조 판매하는 Windows(등록 상표) 등의 오퍼레이팅 시스템이 인스톨되어 있다. 이하의 설명에서는, 본 실시 형태에 관한 잔류 응력 추정 프로그램(110)은, 당해 오퍼레이팅 시스템상에서 동작하는 것으로 하고 있다.

[0028] 관독 장치(114)는, 플렉시블 디스크 드라이브, CD-ROM 드라이브 또는 DVD-ROM 드라이브 등에 의해 구성되어 있고, 가반형 기록 매체(120)에 기록된 컴퓨터 프로그램 또는 데이터를 관독할 수 있다. 가반형 기록 매체(120)에는, 컴퓨터를 잔류 응력 추정 장치로서 기능시키기 위한 잔류 응력 추정 프로그램(110)이 저장되어 있고, 컴퓨터(10)가 당해 가반형 기록 매체(120)로부터 잔류 응력 추정 프로그램(110)을 관독하여, 당해 잔류 응력 추정 프로그램(110)을 하드 디스크(115)에 인스톨하는 것이 가능하다.

[0029] 입출력 인터페이스(116)는, 예를 들어 USB, IEEE1394, 또는 RS-232C 등의 시리얼 인터페이스, SCSI, IDE, 또는 IEEE1284 등의 패러렐 인터페이스 및 D/A 변환기, A/D 변환기 등을 포함하는 아날로그 인터페이스 등으로 구성되어 있다. 입출력 인터페이스(116)에는, 키보드 및 마우스를 포함하는 입력부(12)가 접속되어 있어, 사용자가 당해 입력부(12)를 사용함으로써, 컴퓨터(10)에 데이터를 입력하는 것이 가능하다.

[0030] 화상 출력 인터페이스(117)는, LCD 또는 CRT 등으로 구성된 표시부(13)에 접속되어 있어, CPU(111)로부터 부여된 화상 데이터에 따른 영상 신호를 표시부(13)에 출력하도록 되어 있다. 표시부(13)는, 입력된 영상 신호에 따라서, 화상(화면)을 표시한다.

[0031] [고유 변형법에 기초하는 잔류 응력 추정의 원리]

[0032] (1) 고유 변형을 사용한 잔류 응력의 산출

[0033] 고유 변형을 ε_0 으로 하면, 잔류 응력(σ)은 다음 식으로 표현된다.

[0034]
$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_0) \cdots (1)$$

[0035] 단, D는 탄성 계수 매트릭스이며, ε 은 다음 식의 관계를 충족하는 전체 변형이다.]

$$\int \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dV = \int \mathbf{B}^T \mathbf{D}(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_0) dV = \mathbf{0} \quad (2)$$

여기서, $\int dV$ 는 해석 영역에 걸친 체적 적분, \mathbf{B} 는 절점 변위 \mathbf{u} 와 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 을 관계지은 계수 매트릭스이다.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (3)$$

[0036]

[0037] 그런데, 고유 변형을 알고 있는 경우, 잔류 응력은 다음과 같이 구해진다.

[0038] 식 (2) 및 (3)으로부터, 다음 식이 주어진다.

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{P} \quad (4)$$

여기서,

$$\mathbf{K} = \int \mathbf{B}^T \mathbf{D}\mathbf{B} dV \quad (5)$$

$$\mathbf{P} = \int \mathbf{B}^T \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon}_0 dV \quad (6)$$

\mathbf{K} 는 강성 매트릭스, \mathbf{P} 는 고유 변형에 의해 생기는 하중 벡터이다.

[0039]

[0040] 식 (4)를 풀어서 u를 구하면, 식 (3) 및 (1)로부터 잔류 응력이 얻어진다.

[0041] (2) 계측 잔류 응력을 사용한 고유 변형의 산출

[0042] N개의 계측 잔류 응력을 σ_m 으로 나타낸다. 이것에 대응하여, 고유 변형으로부터 구한 N개의 계산 잔류 응력을 σ_c 로 하고, 계측 잔류 응력과 잔차(R)를 다음 식으로 정의한다.

$$R = (\sigma_m - \sigma_c)^T (\sigma_m - \sigma_c) \quad (7)$$

[0043]

[0044] 또한, 임의 점의 고유 변형을 M개의 분포 함수 파라미터(a)에 의해, 다음의 선형 함수로 나타낸다.

$$\varepsilon_0 = \mathbf{M}\mathbf{a} \quad (8)$$

[0045]

[0046] 여기서, M은 좌표의 함수이며, 좌표에 대해서 비선형이어도 된다.

[0047] 식 (8)에 의해 고유 변형이 결정되면, 계측 잔류 응력은 상기 (1)의 방법으로 구해지고, 그 결과 다음과 같은 선형의 관계식이 얻어진다.

$$\sigma_c = \mathbf{H}\mathbf{a} \quad (9)$$

여기서, H는 계수 매트릭스이고, 그 성분은 a의 각 성분에 단위 값을 부여해서 잔류 응력을 구함으로써 얻어진다.

[0048]

[0049] 그런데, 식 (7)에 식 (9)를 대입하여, R이 최소가 되도록 a를 결정하면, 계측 잔류 응력과, 계측점에서의 계산 잔류 응력의 오차가 최소가 되는 고유 변형 분포가 결정된다.

[0050] [잔류 응력 추정 장치의 동작]

[0051] 이하, 본 실시 형태에 관한 잔류 응력 추정 장치(1)의 동작에 대해서 설명한다.

[0052] 잔류 응력 추정 장치(1)는, 이하에 설명하는 바와 같은 잔류 응력 추정 처리를 실행하여, 구조물의 잔류 응력을 추정한다.

[0053] 여기에서는, 구조물의 일례로서, 크랭크축에 대해서 설명한다. 크랭크축(200)은, 도 2에 도시한 바와 같이, 저널 축(201)과, 핀 축(203)이 크랭크 아암(202)에 의해 접속되어 구성된다. 저널 축(201)과 크랭크 아암(202)의 접속 개소 및 핀 축(203)과 크랭크 아암(202)의 접속 개소는, 사용 시에 큰 응력이 발생하기 쉽다. 이들 접속 개소의 내부에 인장 잔류 응력이 발생하였으면, 피로 균열 등의 손상의 원인이 될 수 있다. 피로 수명을 향상시키기 위해서, 롤 가공 또는 샷 피닝 등의 소성 가공이 상기 접속 개소에 실시되어, 압축 잔류 응력이 도입된다.

[0054] 도 3은, 크랭크축에 대한 소성 가공을 설명하기 위한 도면이다. 도 3에서는, 롤 가공의 경우를 나타내고 있다. 롤 가공에서는, 저널 축(201)(또는 핀 축(203))과, 크랭크 아암(202)과의 접속 개소에, 롤(300)이 가압된 상태에서, 저널 축(201)이 회전된다. 이에 의해, 접속 개소에는, 필렛(204)이 형성되고, 저널 축(201)의 둘레 방향으로 분포하도록 압축 잔류 응력이 부여된다.

[0055] 상기와 같이 소성 가공이 실시된 구조물에 대해서, 잔류 응력 추정 장치(1)를 사용해서 잔류 응력을 추정한다. 도 4는, 본 실시 형태에 관한 잔류 응력 추정 방법의 수순을 나타내는 흐름도이다.

[0056] 먼저, CPU(111)는, 구조물의 이론 해석 처리를 실행한다(스텝 S1).

[0057] 이론 해석 처리는, 구조물의 계측값을 사용하지 않고, 구조물에서의 변형을 해석하는 처리이다. 더욱 구체적으로는, 유한 요소법에 의한 탄소성 해석을 이용한다. 이론 해석 처리에 있어서, CPU(111)는, 실제와 동일한 가공 조건에서, 구조물의 3차원 모델에 대하여 가공 시뮬레이션을 행하여, 구조물에서의 변형의 분포 상황을 해석한다.

[0058] 3차원 모델(해석 모델)의 일례를 설명한다. 실기의 롤 가공 조건을 모의하고, 필렛과의 접촉을 고려하면서 롤을 회전시킨 경우의 크랭크축의 필렛 부분에서의 잔류 응력을 해석하였다. 도 5a는, 해석 모델을 도시하는 사시도이다. 축 대칭 형상인 것을 고려하여, 해석 모델은 둘레 방향 30°의 모델로 하고, 둘레 방향 단부면에,

둘레 방향 대칭 조건을 적용하였다. 도 5b는, 도 5a에 나타난 해석 모델에서의 변형의 분포 상황의 해석 결과를 도시하는 도면이다. 도 5b에서는, 해석 모델의 둘레 방향 중앙면(15°의 위치의 단면)을 평가 단면으로 해서, 이 평가 단면 내의 변형의 해석 결과를 나타내고 있다.

- [0059] 다음으로 CPU(111)는, 이론 해석 처리의 해석 결과를 표시부(13)에 표시시킨다(스텝 S2). 스텝 S2의 처리에서는, CPU(111)는, 3차원 모델 내에서의 변형의 분포 상황을 유저가 이해할 수 있는 화면을 표시부(13)에 표시시킨다. 예를 들어, 3차원 모델의 단면에서의 변형의 분포 상황을, 변형의 강도 레벨에 따라서 구분한 그래픽 표시 등이다.
- [0060] 스텝 S2에서는, 변형을 강도 레벨마다 등고선 표시하는 것이 바람직하다. 이에 의해, 후술하는 해석 범위의 분할 영역을 유저가 결정하기 쉬워진다.
- [0061] 유저는, 이론 해석 처리의 해석 결과 화면을 참조하여, 잔류 응력을 추정하는 범위인 해석 범위에 관한 조건, 즉, 해석 범위의 위치 및 크기, 해석 범위의 각 분할 영역, 및 잔류 응력의 계측점을 결정한다(스텝 S3).
- [0062] 이론 해석 처리에서는, 변형을 정확하게 추정할 수는 없지만, 변형의 발생 영역은 대략 정확하게 추정하는 것이 가능하다. 이 때문에, 유저는, 이론 해석 처리의 해석 결과 화면에 의해, 변형의 분포 상황을 확인하고, 잔류 응력의 추정에 적합한 해석 범위의 위치 및 크기를 결정할 수 있다.
- [0063] 해석 범위의 위치 및 크기의 결정에 대해서, 도 6을 사용해서 상세하게 설명한다. 도 6에서는, 이론 해석 처리에 의해 얻어진 변형의 강도 레벨을, 회색의 농도에 의해 나타내고 있다. 유저는, 변형이 발생하고 있는 영역을 둘러싸도록 해석 범위의 위치 및 크기를 결정함으로써, 용이하게 적절한 해석 범위를 얻을 수 있다.
- [0064] 후술하는 바와 같이, 고유 변형의 분포는, 분포 함수를 사용해서 추정된다. 종래, 분포 함수에는 해석 범위 전체에서 급수 전개한 식이 사용되고 있었다. 즉, 1개의 해석 범위에 대하여 1개의 분포 함수가 정의되어 있었다. 따라서, 종래의 분포 함수는, 해석 범위 내에서의 고유 변형의 분포의 치우침에 대응할 수 없어, 실제의 고유 변형의 분포를 고정밀도로 재현할 수 없는 경우가 있었다. 그래서, 잔류 응력 추정 장치(1)는, 해석 범위를 복수의 분할 영역으로 분할하고, 분포 함수를 분할 영역에서 정의된 구분적 함수의 집합으로서 정의한다. 고유 변형의 변화가 급준한 부분에서는 작은 분할 영역을 설정하고, 고유 변형의 변화가 완만한 부분에서는 큰 분할 영역을 설정하면, 각 분할 영역에서 고유 변형의 분포 형상으로 분포 함수를 고정밀도로 맞추는 것이 가능하게 된다. 따라서, 유저는, 이론 해석 처리의 해석 결과 화면에 의해, 변형의 분포 상황을 확인하고, 해석 범위에서의 각 분할 영역을 적절하게 결정할 수 있다.
- [0065] 해석 범위에서의 분할 영역에 대해서, 도 7을 사용해서 상세하게 설명한다. 도 7에서는, 이론 해석 처리에 의해 얻어진 변형을 강도 레벨마다 등고선 표시하고 있다. 등고선의 간격이 좁은 부분에서는, 변형의 변화가 급준하고, 등고선의 간격이 넓은 부분에서는, 변형의 변화가 완만하다. 유저는, 등고선의 간격이 좁은 부분에서는 분할 영역이 작아지도록, 등고선의 간격이 넓은 부분에서는 분할 영역이 커지도록, 등고선의 간격에 따라서 영역을 분할함으로써, 용이하게 적절한 분할 영역을 얻을 수 있다.
- [0066] 여기서, 각 분할 영역에 대해서, 유저가 동일수의 계측점을 결정하는 것이 바람직하다. 이에 의해, 작은 분할 영역에서는 고유 변형이 급준한 변화에 대응시킬 수 있고, 큰 분할 영역에서는 고유 변형이 완만한 변화에 대응시킬 수 있다.
- [0067] 구조물의 잔류 응력은, 계측한 절단편의 잔류 응력(또는 탄성 변형)에 기초하여 추정된다. 따라서, 계측점을 어디로 할지는, 구조물의 잔류 응력의 추정 정밀도에 큰 영향을 미친다. 고유 변형의 값이 높은 부위, 고유 변형의 분포가 급준하게 변화하는 부위 등을 계측점으로 하면, 고정밀도로 잔류 응력을 추정할 수 있다. 이 때문에, 유저는, 이론 해석 처리의 해석 결과 화면에 의해, 고유 변형의 분포 상황을 확인하고, 절단편의 잔류 응력(또는 탄성 변형)의 계측에 적합한 부위를 계측점으로서 결정할 수 있다.
- [0068] 고유 변형의 값이 높은 부위, 고유 변형의 분포가 급준하게 변화하는 부위 등은, 잔류 응력의 추정에 적합한 부위이기도 하다. 즉, 잔류 응력의 추정에 적합한 해석 범위는, 절단편의 잔류 응력(또는 탄성 변형)의 계측에 적합한 부위를 포함하고 있다. 따라서, 유저는, 해석 범위 내에서 계측점을 결정한다.
- [0069] 유저는, 구조물을 절단 가공하여, 계측점으로서 결정한 부위로부터 절단편을 채취하고, 절단편으로부터 잔류 응력을 계측한다(스텝 S4). 일반적으로는, 구조물을 일방향으로 얇게 절단해서 절단편(T편)을 채취하고, 상기 일방향에 직교하는 방향으로 얇게 절단해서 절단편(L편)을 채취한다.
- [0070] 여기서, 잔류 응력은 탄성 변형에 영향을 곱해서 얻어지는 값이며, 탄성 변형을 계측하는 것과, 잔류 응력을 계

측하는 것은 등가이다. 따라서, 절단편으로부터는 탄성 변형 및 잔류 응력의 어느 것을 계속해도 된다. 본 실시 형태에서는, 잔류 응력을 계속하는 경우에 대해서 설명한다.

- [0071] 도 8에 도시한 바와 같이, 둘레 방향으로 균일하게 압축 잔류 응력이 부여된 저널 축 또는 핀 축과 같은 축 대칭의 구조물의 경우, T편은 반경 방향으로 절단함으로써 얻어진다. 고유 변형이 둘레 방향으로 균일하게 분포하고 있으면, 둘레 방향의 어느 부분에서 T편을 얻었든지, 고유 변형은 변함없다. 따라서, T편을 하나만 채취해도 된다. 이에 의해, T편의 채취수를 적게 할 수 있으므로, 절단 가공 및 절단편의 잔류 응력 계속의 작업 부담을 경감할 수 있다.
- [0072] 한편, 축길이 방향에 대해서는, 고유 변형의 분포는 복잡하다. 따라서, 축길이 방향의 복수 개소에서 L편을 채취할 필요가 있다.
- [0073] 또한, 크랭크축의 필렛부와 같이 곡면을 갖는 경우에는, L편이 아니라, 곡면의 법선 방향으로 절단한 원추 형상의 절단편(이하, 「C편」이라고 함)을 채취해도 된다. 또한, L편 및 C편을 채취하지 않고, T편만을 채취해도 된다. 도 9에서, 각 도면은 저널 축을 회전축 축길이 방향으로 절단했을 때의 단면도이다. C편(500)은, 필렛의 곡면 법선 방향, 즉, 단면에 있어서 원호 상의 필렛 반경 방향으로 구조물을 절단함으로써 얻어진다. 저널 축은 축 대칭 형상이기 때문에, C편(500)의 절단면(501)은, 저널 축의 회전 중심축 둘레로 원추 형상으로 연장된다. 이러한 C편은, 필렛의 중심각을 바꾸어서 몇 점(예를 들어, 20° 부터 110° 까지 10° 마다) 채취된다.
- [0074] 또한, 일방향으로 긴 막대 형상의 구조물에 대하여, 길이 방향으로 균일하게 압축 잔류 응력이 부여된 경우, 길이 방향의 1군데에서, T편을 하나만 채취할 수 있다.
- [0075] 유저는, 상기와 같이 해서 채취된 절단편에 대하여 X선 등에 의해 잔류 응력을 직접 계속한다. 탄성 변형을 계속하는 경우, 유저는, 절단편에 변형 게이지를 부착하고, 또한 복수의 소편으로 절단하여, 각 소편의 해방 변형(탄성 변형)을 계속한다. 잔류 응력 또는 해방 변형(탄성 변형)의 계속에 있어서는, 서로 다른 복수의 성분을 계속한다.
- [0076] 다시 도 4를 참조한다. 유저는, 결정된 해석 범위의 위치 및 크기를, 잔류 응력 추정 장치(1)에 입력한다. 잔류 응력 추정 장치(1)의 CPU(111)는, 입력부(12)로부터 입력된 해석 범위의 위치 및 크기를 접수한다(스텝 S5).
- [0077] 이어서, 유저는, 해석 범위의 분할 패턴(분할하는 위치 정보)을, 잔류 응력 추정 장치(1)에 입력한다. 잔류 응력 추정 장치(1)의 CPU(111)는, 입력부(12)로부터 입력된 해석 영역의 분할 패턴을 접수한다(스텝 S6).
- [0078] 이어서, 유저는, 잔류 응력의 계속값을, 잔류 응력 추정 장치(1)에 입력한다. 잔류 응력 추정 장치(1)의 CPU(111)는, 입력부(12)로부터 입력된 계속값을 접수한다(스텝 S7).
- [0079] 다음으로 CPU(111)는, 분포 함수를 결정한다(스텝 S8). 분포 함수는, 해석 범위의 각 분할 영역에 대해서 정의된 복수의 구분적 함수의 집합으로서 정의된다. 각 구분적 함수에는, 임의의 다차 다항식을 선택 가능하게 할 수 있다. 단, 고유 변형의 분포 상황을 정확하게 반영한 추정 결과를 얻기 위해서는, 각 구분적 함수의 차수를 공통되게 하는 것이 바람직하다. 이에 의해, 작은 분할 영역에서는, 급준한 고유 변형의 변화에 대응하면서, 큰 분할 영역에서는, 완만한 고유 변형의 변화에 대응할 수 있다. 또한, 후술하는 바와 같이, 스플라인 보간을 행하는 경우에도, 각 구분적 함수의 차수를 공통되게 한다.
- [0080] 상기와 같은 분포 함수는, CPU(111)가 자동으로 선택해도 되고, 유저가 입력부(12)를 사용해서 지정해도 된다. 또한, 잔류 응력 추정 장치(1)에 있어서 미리 분포 함수가 설정되어 있어도 된다.
- [0081] 다음으로 CPU(111)는, 분포 함수의 파라미터를 최적화한다(스텝 S9). 이하, 스텝 S9의 처리에 대해서 구체적으로 설명한다.
- [0082] CPU(111)는, 먼저 식 (9)의 H를 결정한다. 그 수순은 다음과 같다.
- [0083] (a) $a=[1, 0, 0, \dots, 0]^T$ 로서, $\varepsilon_0=Ma$ 를 구한다.
- [0084] (b) 식 (4)를 풀어, u를 구한다.
- [0085] (c) 식 (3)에 의해 ε 을 구한다.
- [0086] (d) 식 (1)에 의해 σ 를 구한다.
- [0087] (e) σ 의 성분 중에서 잔류 응력 측정점에 대응하는 N개의 값을 추출하고, 이것을 H의 제1열로 한다.

- [0088] (f) $a=[0, 1, 0, \dots, 0]^T$ 로서, H의 제2열도 마찬가지로 (b) 내지 (f)의 수순으로 구한다.
- [0089] 다음으로 CPU(111)는, 식 (7)의 R이 최소가 되도록 a를 결정한다. 이에 의해, 분포 함수의 파라미터가 최적화된다.
- [0090] 상기의 스텝 S9의 처리에 있어서, CPU(111)는, 스플라인 보간에 의해 각 구분적 함수의 구배가 연속하도록, 분포 함수의 파라미터를 결정하는 것이 바람직하다. 이에 의해, 분할 영역의 경계에 있어서 고유 변형을 원활하게 연속시킬 수 있고, 물리성이 손상되지 않은 고유 변형의 추정값을 얻을 수 있다.
- [0091] 또한 CPU(111)는, 잔류 응력의 추정값을 산출한다(스텝 S10).
- [0092] 스텝 S10의 처리에서는, 먼저 CPU(111)가, 식 (8)에 의해, 임의 점의 고유 변형을 구한다. 또한 CPU(111)가, 식 (4)를 풀어 u를 구하고, 얻어진 u를 식 (3)에 적용해서 ε 을 구하고, 얻어진 ε 을 식 (1)에 적용해서 σ 를 구한다.
- [0093] 다음으로 CPU(111)는, 얻어진 잔류 응력의 추정값을 표시부(13)에 표시시킨다(스텝 S11).
- [0094] 스텝 S11 후, CPU(111)는 처리를 종료한다.
- [0095] (실시 형태 2)
- [0096] 본 실시 형태에 관한 잔류 응력 추정 장치는, 이론 해석 처리(스텝 S1)에 있어서, 구조물의 가공에 의해 발생하는 응력을, 헤르츠 접촉 이론에 기초하여 해석한다.
- [0097] 본 실시 형태에 관한 잔류 응력 추정 장치의 기타 구성에 대해서는, 실시 형태 1에 관한 잔류 응력 추정 장치(1)의 구성과 마찬가지로, 그의 설명을 생략한다.
- [0098] 본 실시 형태에 관한 잔류 응력 추정 장치에서의 이론 해석 처리에 대해서 설명한다. 헤르츠 접촉 이론은, 2개의 탄성체에 의한 점접촉 또는 선접촉에 있어서의 응력의 해석에 사용된다. 여기에서는, 헤르츠 접촉 이론을 크랭크축의 롤 가공에 적용한 경우에 대해서 설명한다.
- [0099] 롤 가공은 소성 가공의 일종이다. 소성 변형이 발생한 경우의 응력을 헤르츠 접촉 이론으로 계산할 수는 없지만, 소성 변형, 즉 소성 변형이 발생하는 영역을 추정하는 것은 가능하다.
- [0100] 도 10과 같은 원기둥과 평판과의 접촉 문제를 생각한다. 도 11은, 도 10에 도시하는 원기둥과 평판이 접촉한 경우에 상정되는 응력 분포를 도시하는 도면이다.
- [0101] 접촉 바로 아래($x=0$)의 깊이 방향의 각 응력 성분의 분포는 도 11의 사선 부분과 같이 되어, 각각 식 (10) 내지 (14)로 표현된다.

$$(\sigma_x)_{x=0} = -p_0 \frac{b}{\sqrt{b^2+z^2}} \left[1 - \frac{2z}{b} \left(\sqrt{1+\frac{z^2}{b^2}} - \frac{z}{b} \right) \right] \quad (10)$$

$$(\sigma_y)_{x=0} = -p_0 \frac{2vb}{\sqrt{b^2+z^2}} \left[1 - \frac{z}{b} \left(\sqrt{1+\frac{z^2}{b^2}} - \frac{z}{b} \right) \right] \quad (11)$$

$$(\sigma_z)_{x=0} = -p_0 \frac{b}{\sqrt{b^2+z^2}} \quad (12)$$

$$\tau_1 = \frac{(\sigma_x - \sigma_z)_{x=0}}{2} \quad (13)$$

$$\tau_2 = \frac{1}{2} (\sigma_y - \sigma_z)_{x=0} \quad (14)$$

$$b^2 = \frac{4}{\pi} r_0 \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) q \quad (15)$$

$$p_0^2 = \frac{1}{\pi} \frac{q}{r_0} \frac{1}{\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}} \quad (16)$$

$$p = p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{b^2}} \quad (17)$$

[0102]

[0103]

여기서, E_1 , E_2 는 세로 탄성 계수, ν_1 , ν_2 는 포와송비, P 는 집중 하중, q 는 단위 길이당 선 하중, p 는 접촉면 상의 압력, p_0 는 접촉면 중심에 발생하는 최대 압력, r_0 은 원기둥의 반경, $2b$ 는 접촉면 직사각형의 폭이다. 또한, p , p_0 , b 는 각각 식 (15) 내지 (17)로부터 구할 수 있다.

[0104]

여기서, 트레스카의 항복 조건인 최대 전단 응력설에 의하면, 재료의 단축 인장의 항복 응력을 σ_y 로 하고, 재료에 작용하고 있는 전단 응력(τ)이 식 (18)로 되었을 때에 항복이 시작된다(소성 변형이 발생함).

$$\sigma_y = 2\tau \quad (18)$$

[0105]

[0106]

따라서, 평판에 대해서는, 식 (10), (12), (13) 및 (18)로부터 식 (19)가 구해지고, 식 (19)에서의 표면으로부터의 깊이(z)가 경화 깊이, 즉 소성 변형(고유 변형)이 발생하는 영역이 된다.

$$\sigma_y = \frac{2p_0}{b} \left(z - \frac{z^2}{\sqrt{b^2+z^2}} \right) \quad (19)$$

[0107]

[0108]

상기와 같은 헤르츠 접촉 이론을 사용한 이론 해석 처리에 의해 얻어진 해석 결과가, 스텝 S2에서 표시부(13)에 표시된다. 이때, 변형을 강도 레벨마다 등고선 표시해도 된다.

[0109]

이상과 같이 구성함으로써, 유저는, 이론 해석 처리의 해석 결과를 확인함으로써, 경험에 좌우되지 않고, 잔류 응력을 추정하는 범위인 해석 범위의 위치 및 크기, 해석 범위의 각 분할 영역, 및 절단편의 잔류 응력(또는 탄성 변형)의 계측점을 적절하게 결정할 수 있다.

[0110]

(기타 실시 형태)

[0111]

상기 실시 형태 1 및 2에서는, 이론 해석 처리의 해석 결과에 기초하여, 유저가 해석 범위의 위치 및 크기, 해석 범위의 각 분할 영역, 및 절단편의 잔류 응력의 계측점을 결정하고, 해석 범위의 위치 및 크기, 해석 범위의 각 분할 영역, 및 계측점에서의 잔류 응력의 계측값 각각을, 잔류 응력 추정 장치에 입력하는 구성에 대해서 설명했지만, 이것에 한정되는 것은 아니다. 이론 해석 처리의 해석 결과에 기초하여, 유저가, 해석 범위의 위치 및 크기, 해석 범위의 각 분할 영역, 및 절단편의 잔류 응력의 계측점 중 적어도 하나를 결정하도록 해도 된다.

유저가 해석 범위의 위치 및 크기를 결정하는 경우에는, 잔류 응력 추정 장치가, 해석 범위의 위치 및 크기의 입력을 접수하고, 이 해석 범위에서 고유 변형에 기초하여 잔류 응력을 추정한다. 유저가 해석 범위의 각 분할 영역을 결정하는 경우에는, 잔류 응력 추정 장치가, 해석 범위의 분할 패턴의 입력을 접수하고, 각 분할 영역에 대하여 정의된 구분적 함수의 집합인 분포 함수를 사용하여, 고유 변형에 기초하여 잔류 응력을 추정한다. 유저가 잔류 응력의 계측점을 결정하는 경우에는, 잔류 응력 추정 장치가, 결정된 계측점에 있어서의 잔류 응력의 계측값의 입력을 접수하고, 입력된 계측값에 기초하여 고유 변형을 근사하여, 구조물의 잔류 응력을 추정한다.

[0112] 또한, 상기의 실시 형태 1 및 2에서는, 분포 함수의 파라미터 결정에 있어서 스플라인 보간을 적용하는 구성에 대해서 설명했지만, 이것에 한정되는 것은 아니다. 스플라인 보간을 사용하지 않고, 각 구분적 함수의 파라미터를 결정하는 구성으로 해도 된다. 이 경우, 각 구분적 함수의 파라미터 결정에 있어서, 라그랑제 보간을 적용해도 된다. 이에 의해, 분할 영역의 경계에 있어서, 각 구분적 함수를 연속시킬 수 있다. 또한, 해석 영역의 전체에서 하나의 다차 다항식 또는 삼각 급수의 분석 함수를 정의하고, 이 분포 함수의 파라미터 최적화에, 라그랑제 보간을 적용할 수도 있다. 라그랑제 보간을 이용하는 경우도, 각 분할 영역에서의 계측점을 동일수로 하면, 고유 변형의 분포의 치우침에 대응할 수 있다.

[0113] 또한, 상기의 실시 형태 1 및 2에서는, 해석 범위에 관한 조건(해석 범위의 위치 및 크기, 해석 범위의 분할 영역, 절단면의 잔류 응력의 계측점)을 유저가 잔류 응력 추정 장치에 입력하는 구성에 대해서 설명했지만, 이것에 한정되는 것은 아니다. 잔류 응력 추정 장치가, 이론 해석 처리의 해석 결과에 기초하여, 해석 범위에 관한 조건을 자동 설정하는 구성으로 하는 것도 가능하다.

[0114] 또한, 상기의 실시 형태 1 및 2에서는, 구조물의 절단면으로부터 잔류 응력을 계측하고, 계측된 잔류 응력과, 분포 함수에 의해 계산되는 잔류 응력과의 차가 최소가 되도록, 분포 함수의 파라미터를 최적화하는 구성에 대해서 설명했지만, 이것에 한정되는 것은 아니다. 구조물의 절단면으로부터 해방 변형(탄력 변형)을 계측하고, 계측된 해방 변형과, 분포 함수에 의해 계산되는 탄성 변형과의 차가 최소가 되도록, 분포 함수의 파라미터를 최적화하는 구성으로 해도 된다. 또한, 이 경우, 탄성 변형의 계측점의 결정에 대해서는, 실시 형태 1 및 2에서의 잔류 응력의 계측점의 결정과 마찬가지로이다.

[0115] (평가 시험)

[0116] 본 발명자는, 상기의 실시 형태에서 설명한 잔류 응력 추정 방법의 성능 평가 시험을 행하였다. 본 평가 시험에서는, 잔류 응력의 정답 값이 기지의 FEM(유한 요소법) 해석의 결과를 이용하여, 이론 해석 처리에 의한 해석 결과에 기초하여 설정된 해석 범위를 사용한 잔류 응력 추정 방법(이하, 「제안법」이라고 함)에 의한 수치 실험을 행하고, 정답 값과 수치 실험 결과와의 비교를 행하였다.

[0117] 본 평가 시험에서는, 도 5a에 나타내는 해석 모델에 의해, 크랭크축의 핀 축에서의 잔류 응력을 추정하였다. 해석 모델의 둘레 방향 중앙면(15°의 위치의 단면)을 평가 단면으로 하고, 평가 단면 내의 결과를 정답 값으로서 사용하였다.

[0118] 수치 실험에서는, 실제로 계측하는 경우와 동일 조건(위치, 성분)에 의한 고유 변형 값을 사용하는 것을 생각하고, 롤 가공의 시뮬레이션을 행한 후에, FEM 해석에 있어서 T편과 C편을 채취해서 변형 해방 해석을 행하여, 실측에 상당하는 잔류 응력을 얻었다.

[0119] (1) 시험 1

[0120] 제안법에서는, 도 6에 나타내는 이론 해석 처리에 의한 해석 결과가 얻어진 경우(필렛 각=40°)에, 해석 결과에 나타나는 변형의 발생 영역을 둘러싸도록 해석 범위의 위치 및 크기를 설정했다(도 6에 나타내는 해석 범위). 제안법보다도 큰 해석 범위를 설정한 경우(이하, 「비교법 1」이라고 함) 및 제안법보다도 작은 해석 범위를 설정한 경우(이하, 「비교법 2」라고 함) 각각에 대해서도 잔류 응력을 추정하고, 제안법의 결과와 비교하였다. 하기 표에, 제안법, 비교법 1 및 비교법 2에서의 해석 범위의 설정 조건을 나타낸다.

표 1

	$\alpha_0 [^\circ]$	$\Delta \alpha [^\circ]$	R2[mm]
비교법 1	0	120	20
비교법 2	30	70	2
제안법	20	80	6

[0121]

[0122]

도 12a 내지 도 12c는, 시험 1의 결과를 나타내는 그래프이다. 도 12a는, 필렛 둘레 방향의 잔류 응력 추정 결과를 나타내고, 도 12b는, 핀 둘레 방향의 잔류 응력 추정 결과를 나타내고, 도 12c는, 필렛 반경 방향의 잔류 응력 추정 결과를 나타낸다. 도 12a 내지 도 12c에서, 종축은 잔류 응력의 크기를 나타내고, 횡축은 표면으로부터의 깊이를 나타내고 있다. 또한, 각 그래프 중의 회색의 실선은 정답 값을 나타내고, 흑색의 파선은 비교법 1에 의한 수치 실험 결과를 나타내고, 회색의 파선은 비교법 2에 의한 수치 실험 결과를 나타내고, 흑색의 실선은 제안법에 의한 수치 실험 결과를 나타내고 있다.

[0123]

제안법은, 정답 값에 매우 가까운 결과를 얻고 있다. 이에 반해 비교법 1 및 비교법 2에서는, 잔류 응력의 추정 정밀도가 제안법보다도 낮다. 이와 같이, 이론 해석 처리의 해석 결과를 이용해서 해석 범위의 위치 및 크기를 설정함으로써, 잔류 응력의 추정 정밀도를 향상시킬 수 있었다.

[0124]

(2) 시험 2

[0125]

제안법에서는, 이론 해석 처리에 의한 해석 결과에 나타나는 변형 발생 영역 내에서 계측점을 설정하였다. 제안법보다도 계측점이 많은 경우(이하, 「비교법 3」이라고 함)에 대해서도 잔류 응력을 추정하여, 제안법의 결과와 비교하였다. 도 13a는, 제안법에서의 계측점을 도시하는 도면이며, 도 13b는, 비교법 3에서의 계측점을 도시하는 도면이다. 도면에서, 계측점을 검은 사각형 표시로 나타낸다.

[0126]

도 14a 내지 도 14c는, 시험 2의 결과를 나타내는 그래프이다. 도 14a는, 필렛 둘레 방향의 잔류 응력의 추정 결과를 나타내고, 도 14b는, 핀 둘레 방향의 잔류 응력의 추정 결과를 나타내고, 도 14c는, 필렛 반경 방향의 잔류 응력의 추정 결과를 나타낸다. 도 14a 내지 도 14c에서, 종축은 잔류 응력의 크기를 나타내고, 횡축은 표면으로부터의 깊이를 나타내고 있다. 또한, 각 그래프 중의 회색의 실선은 정답 값을 나타내고, 파선은 비교법에 의한 수치 실험 결과를 나타내고, 흑색의 실선은 제안법에 의한 수치 실험 결과를 나타내고 있다.

[0127]

제안법 및 비교법 3의 양쪽에 있어서, 정답 값에 매우 가까운 결과를 얻었다. 고유 변형의 계측에는, 절단편을 채취할 필요가 있다. 이 때문에, 계측점이 많아질수록, 추정 정밀도에는 유효하지만, 작업 비용이 방대해진다. 제안법에서는, 계측점의 수를 저감하면서, 비교법 3과 동등한 추정 정밀도를 확보하고 있는 것을 알 수 있다.

산업상 이용가능성

[0128]

본 발명의 잔류 응력 추정 방법 및 잔류 응력 추정 장치는, 고유 변형법에 기초하여 구조물의 잔류 응력을 추정하기 위한 잔류 응력 추정 방법 및 잔류 응력 추정 장치로서 유용하다.

[0129]

본 출원은, 2015년 3월 5일 출원의 일본 특허 출원(일본 특허 출원 제2015-043083호)에 기초하는 것이며, 그의 내용은 여기에 참조로서 도입된다.

부호의 설명

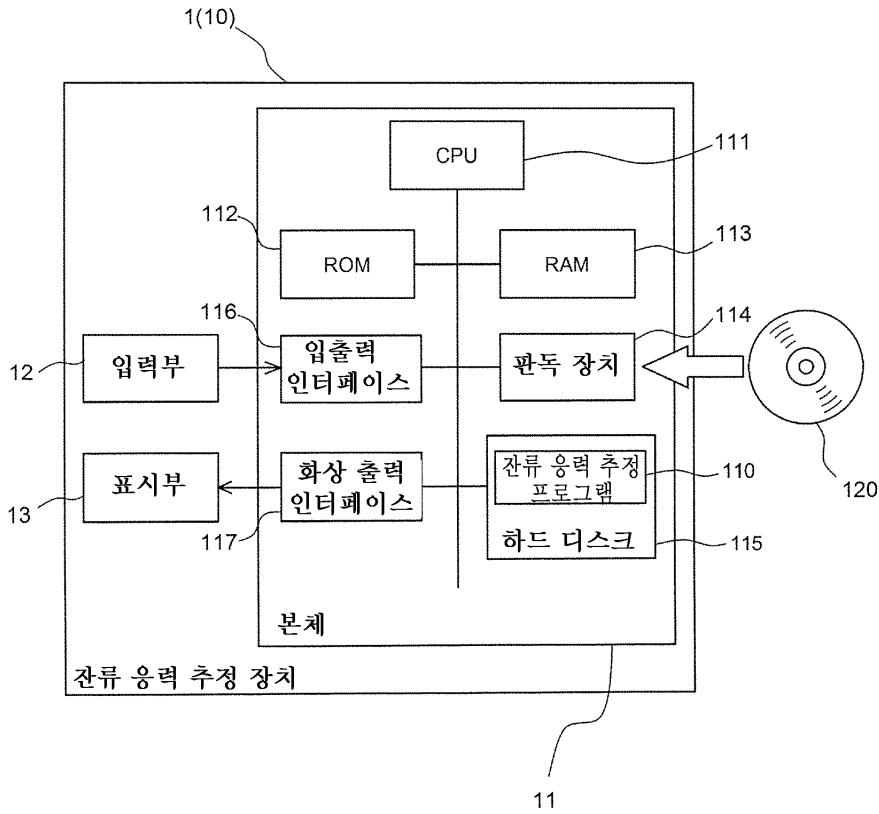
[0130]

- 1 : 잔류 응력 추정 장치
- 10 : 컴퓨터
- 12 : 입력부
- 13 : 표시부
- 110 : 잔류 응력 추정 프로그램
- 111 : CPU

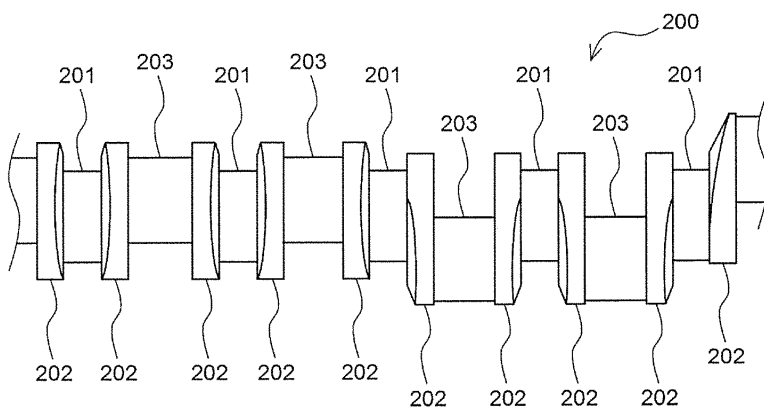
- 115 : 하드 디스크
- 116 : 입출력 인터페이스
- 117 : 화상 출력 인터페이스
- 200 : 크랭크축(구조물)

도면

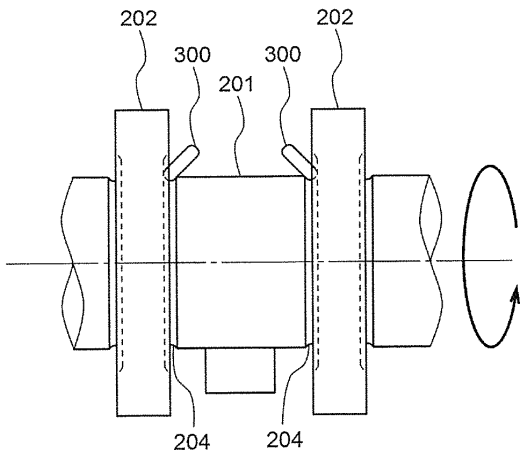
도면1



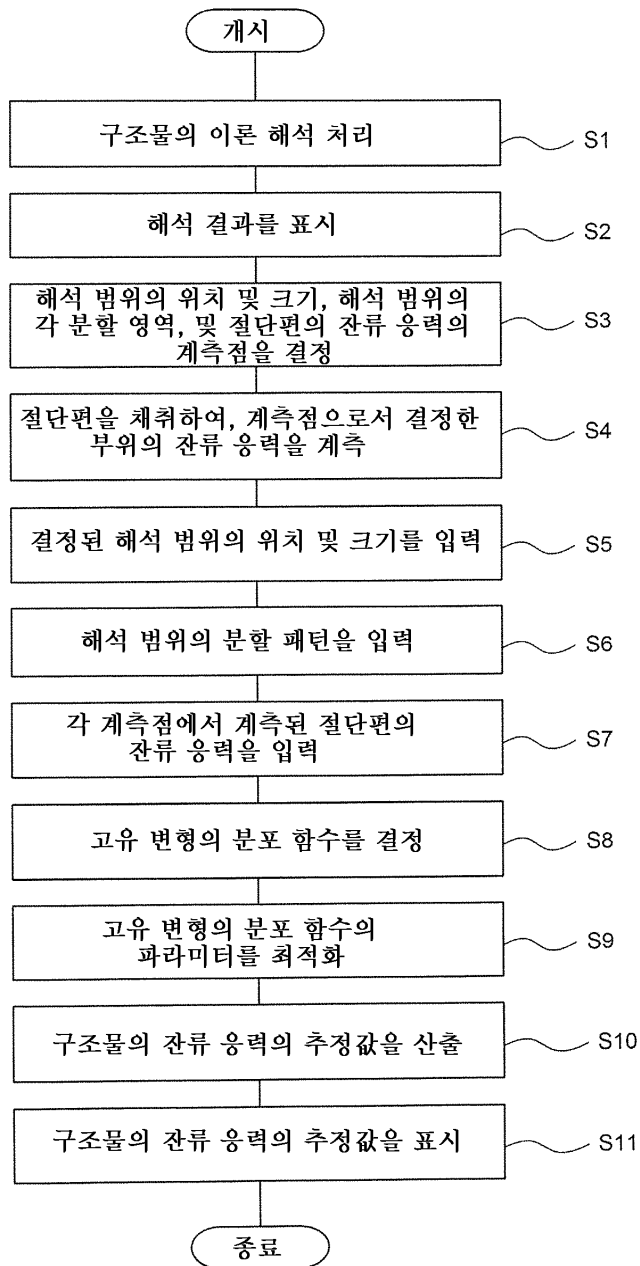
도면2



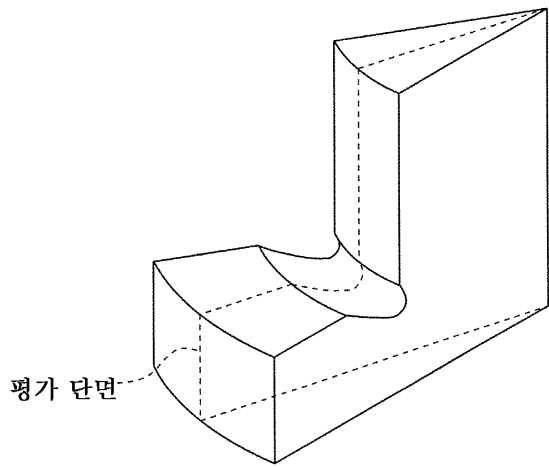
도면3



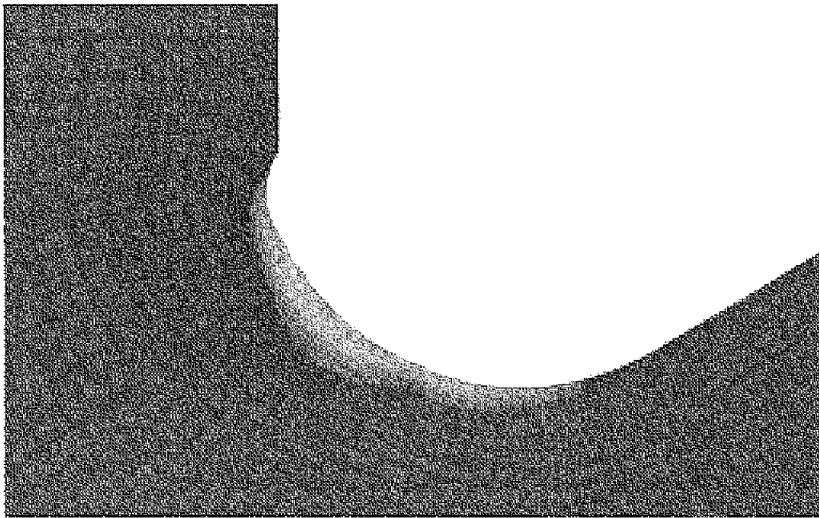
도면4



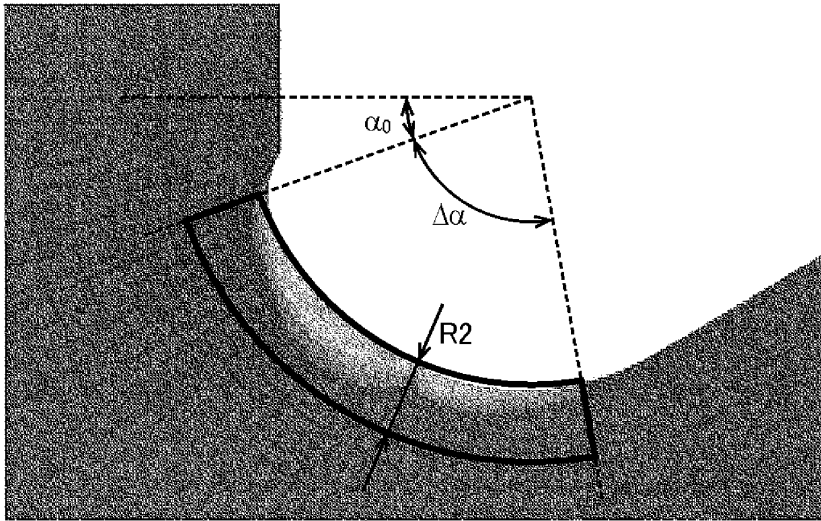
도면5a



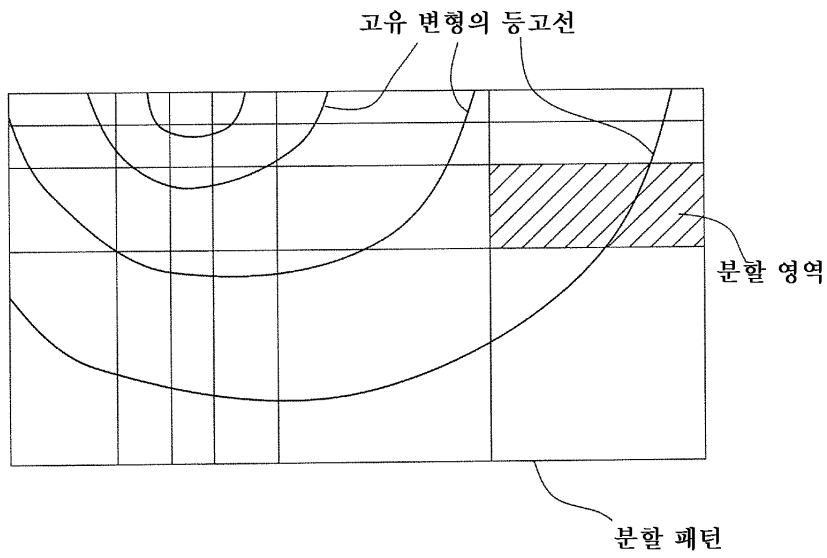
도면5b



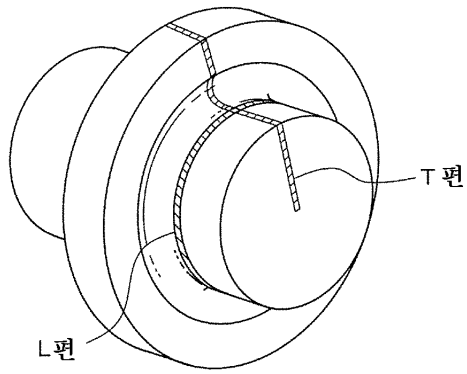
도면6



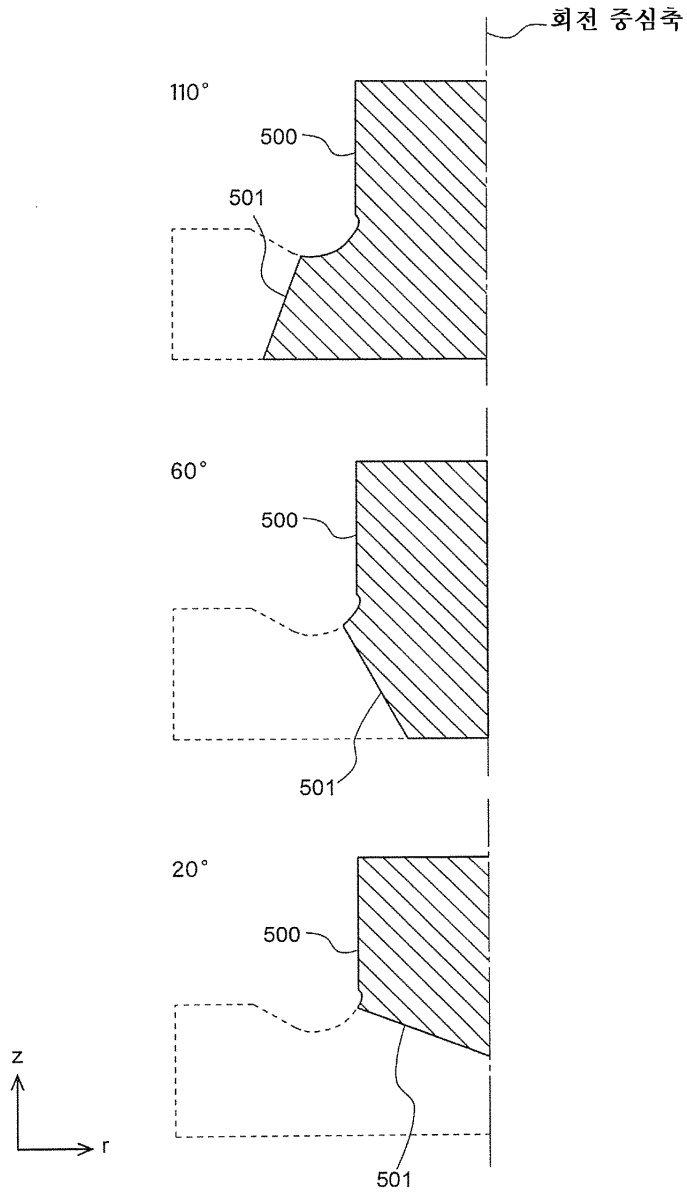
도면7



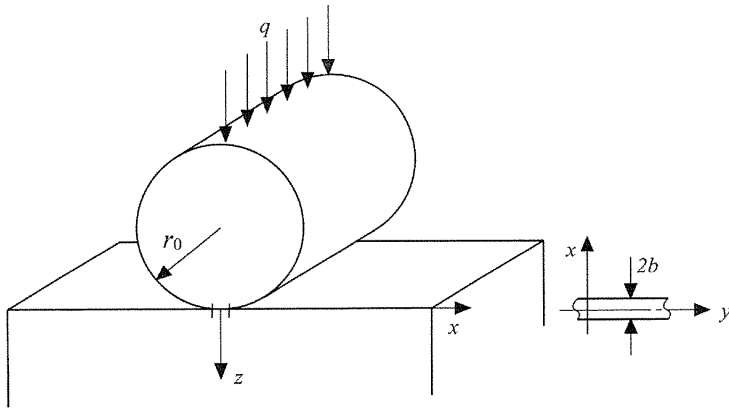
도면8



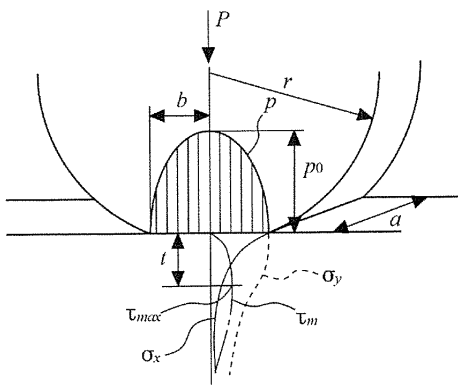
도면9



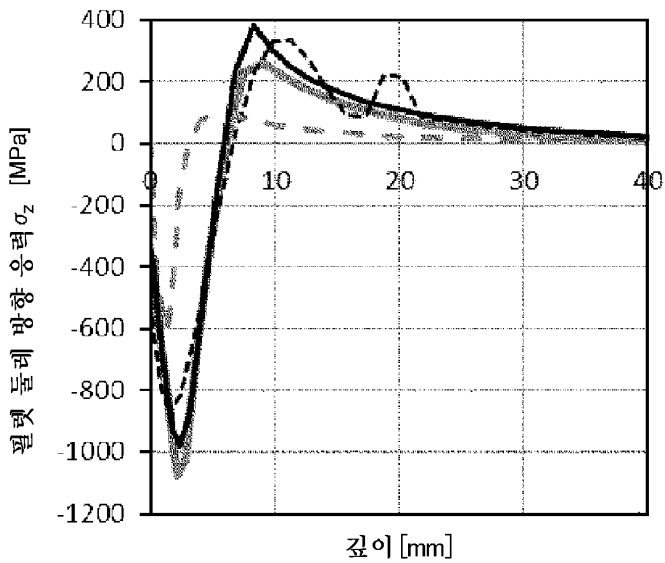
도면10



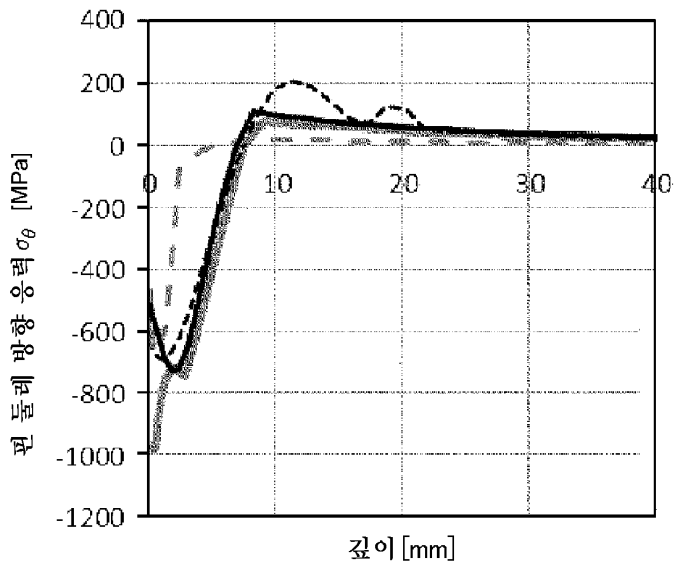
도면11



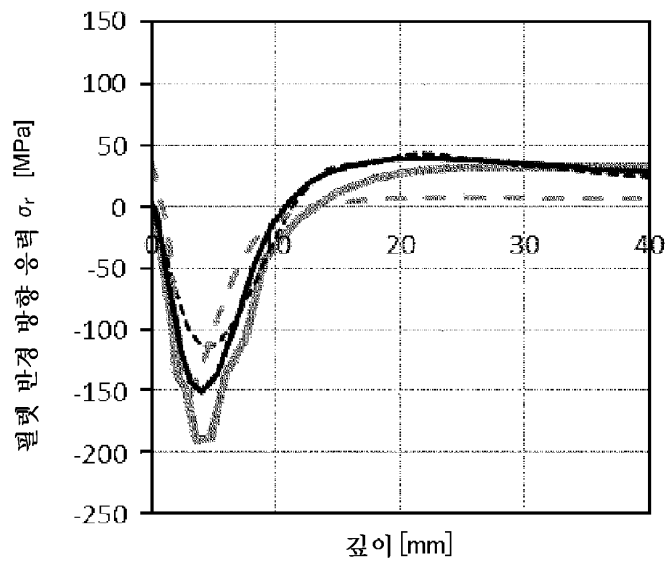
도면12a



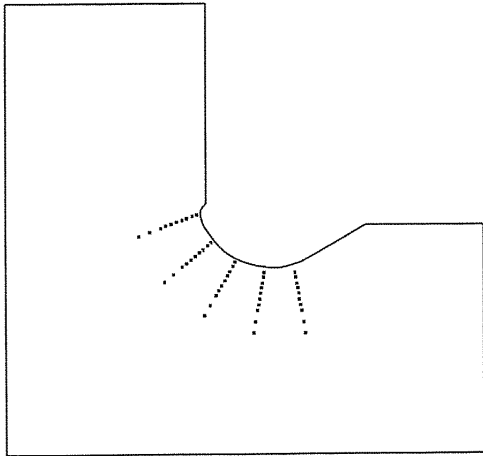
도면12b



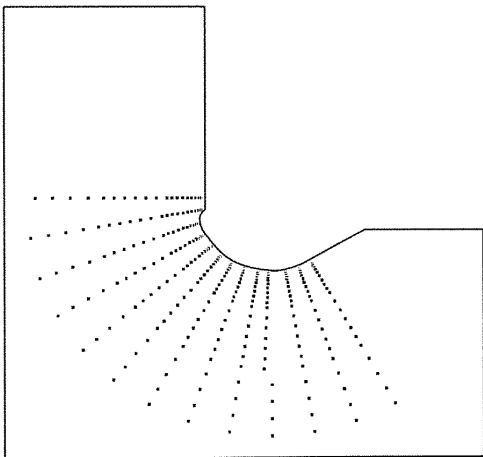
도면12c



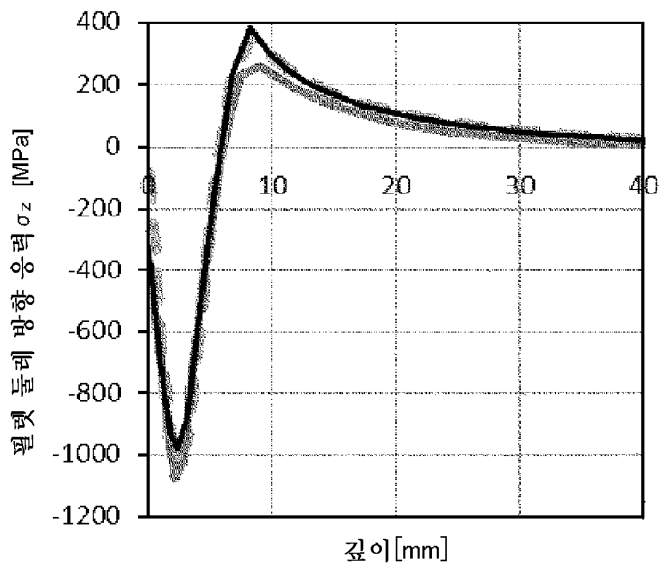
도면13a



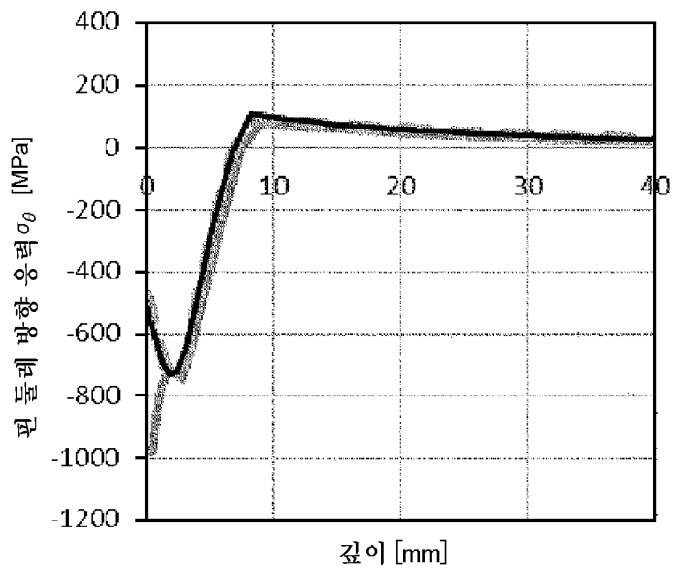
도면13b



도면14a



도면14b



도면14c

