



**(19) 대한민국특허청(KR)**  
**(12) 등록특허공보(B1)**

(45) 공고일자 2019년07월23일  
(11) 등록번호 10-2003145  
(24) 등록일자 2019년07월17일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
G01L 1/00 (2006.01) G01L 5/00 (2006.01)
- (52) CPC특허분류  
G01L 1/00 (2013.01)  
G01L 5/0047 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2017-7024530
- (22) 출원일자(국제) 2016년02월22일  
심사청구일자 2017년08월31일
- (85) 번역문제출일자 2017년08월31일
- (65) 공개번호 10-2017-0109657
- (43) 공개일자 2017년09월29일
- (86) 국제출원번호 PCT/JP2016/055059
- (87) 국제공개번호 WO 2016/140091  
국제공개일자 2016년09월09일
- (30) 우선권주장  
JP-P-2015-043082 2015년03월05일 일본(JP)
- (56) 선행기술조사문헌  
JP2010131629 A  
JP2013036902 A  
WO2006008554 A1  
JP05223661 A\*  
\*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

- (73) 특허권자  
가부시킴가이샤 고베 세이코쇼  
일본 효고켄 고베시 주오쿠 와키노하마 가이간도  
오리 2초메 2방 4고
- (72) 발명자  
오키타 게이스케  
일본 651-2271 효고켄 고베시 니시쿠 다카츄카다  
이 1초메 5방 5고 가부시킴가이샤 고베 세이코쇼  
고베 소고 기쥬츠 겐큐쵸 내  
나카가와 토모카즈  
일본 141-8688 도쿄도 시나가와구 기타시나가와  
5초메 9방 12고 가부시킴가이샤 고베 세이코쇼 내  
야마다 마리코  
일본 676-8670 효고켄 다카사고시 아라이초 신하  
마 2초메 3방 1고 가부시킴가이샤 고베 세이코쇼  
다카사고 세이사쿠쇼 내
- (74) 대리인  
장수길, 이성훈, 김명곤

전체 청구항 수 : 총 7 항

심사관 : 한상호

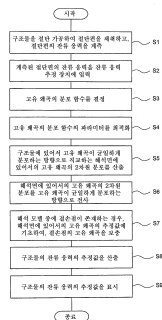
**(54) 발명의 명칭** 잔류 응력 추정 방법 및 잔류 응력 추정 장치

**(57) 요약**

잔류 응력의 추정 정밀도를 저하시키지 않고, 고유 왜곡을 계측하기 위한 절단편의 채취수를 억제하는 것이 가능한 잔류 응력 추정 방법 및 잔류 응력 추정 장치를 제공한다.

구조물에 고유 왜곡이 일방향으로 균일하게 분포하는 것이 상정되는 경우에, 상기 고유 왜곡이 균일하게 분포하는 영역 내에서 채취된 절단편으로부터, 유저가 잔류 응력을 계측하고, 계측값을 잔류 응력 추정 장치에 입력한다. 잔류 응력 추정 장치는, 주어진 잔류 응력의 계측값을 사용하여, 구조물에 있어서의 일방향에 직교하는 해석면에 있어서의 고유 왜곡의 2차원 분포를 추정하고, 추정된 고유 왜곡의 2차원 분포를 상기 일방향으로 전사하여, 구조물에 있어서의 고유 왜곡의 3차원 분포를 추정한다.

**대표도** - 도5



**명세서**

**청구범위**

**청구항 1**

구조물에 고유 왜곡이 일방향으로 균일하게 분포하는 것이 상정될 경우에, 상기 고유 왜곡이 균일하게 분포하는 영역 내에서 채취된 절단면으로부터 측정된 잔류 응력에 관한 측정값을 취득하는 스텝과,

취득된 상기 측정값에 기초하여, 상기 구조물에 있어서의 상기 일방향에 교차하는 방향에 있어서의 고유 왜곡의 2차원 분포를 추정하는 스텝과,

추정된 상기 고유 왜곡의 2차원 분포가 상기 일방향으로 연속되도록, 상기 구조물에 있어서의 고유 왜곡의 3차원 분포를 추정하는 스텝

을 갖는,

고유 왜곡에 기초하는 잔류 응력 추정 방법.

**청구항 2**

제1항에 있어서, 상기 측정값을 취득하는 스텝에서는, 상기 절단면에 있어서의 상기 일방향에 교차하는 방향으로 절단된 절단면에 있어서 측정된 탄성 왜곡 또는 잔류 응력을, 상기 측정값으로서 취득하는,

잔류 응력 추정 방법.

**청구항 3**

제1항 또는 제2항에 있어서, 상기 고유 왜곡의 3차원 분포를 추정하는 스텝에서는, 복수의 계산점이 3차원으로 배열하여 배치된 상기 구조물의 3차원 모델에 있어서, 상기 일방향에 교차하는 하나의 면에 있어서의 각 계산점의 상기 고유 왜곡의 추정값을, 상기 일방향에 교차하는 다른 면에 있어서의 각 계산점에 그리는,

잔류 응력 추정 방법.

**청구항 4**

제3항에 있어서, 상기 고유 왜곡의 3차원 분포를 추정하는 스텝에서는, 상기 다른 면에 있어서 고유 왜곡의 추정값이 전사되어 있지 않은 계산점이 존재할 때, 상기 다른 면에 상기 하나의 면을 겹쳤을 경우에 상기 고유 왜곡의 추정값이 전사되어 있지 않은 계산점의 주위에 있어서의 상기 하나의 면의 고유 왜곡에 기초하여, 상기 계산점의 고유 왜곡을 보전하는,

잔류 응력 추정 방법.

**청구항 5**

제4항에 있어서, 상기 고유 왜곡의 3차원 분포를 추정하는 스텝에서는, 상기 계산점의 주위에 탐색 영역을 설정하고, 상기 탐색 영역 내에 상기 다른 면에 겹쳐진 상기 하나의 면의 계산점이 존재하는 경우에, 상기 탐색 영역 내의 상기 하나의 면의 계산점에 있어서의 고유 왜곡의 추정값에 기초하여, 상기 고유 왜곡이 전사되지 않은 계산점의 고유 왜곡을 보전하는,

잔류 응력 추정 방법.

**청구항 6**

제5항에 있어서, 상기 고유 왜곡의 3차원 분포를 추정하는 스텝에서는, 상기 탐색 영역 내에 상기 다른 면에 겹쳐진 상기 하나의 면의 계산점이 존재하지 않는 경우에, 상기 탐색 영역보다 큰 탐색 영역을 새롭게 설정하는,

잔류 응력 추정 방법.

**청구항 7**

구조물에 고유 왜곡이 일방향으로 균일하게 분포하는 것이 상정될 경우에, 상기 고유 왜곡이 균일하게 분포하는 영역 내에서 채취된 절단편으로부터 계측된 잔류 응력에 관한 계측값의 입력을 접수하는 입력부와,

상기 입력부에 의해 접수된 상기 계측값에 기초하여, 상기 구조물에 있어서의 상기 일방향에 교차하는 방향에 있어서의 고유 왜곡의 2차원 분포를 추정하는 제1 추정 수단과,

상기 제1 추정 수단에 의해 추정된 상기 고유 왜곡의 2차원 분포가 상기 일방향으로 연속되도록, 상기 구조물에 있어서의 고유 왜곡의 3차원 분포를 추정하는 제2 추정 수단과,

상기 제2 추정 수단에 의해 추정된 고유 왜곡의 3차원 분포에 기초하는 잔류 응력의 추정 결과를 표시하는 표시부

를 구비하는,

잔류 응력 추정 장치.

### 발명의 설명

#### 기술 분야

[0001] 본 발명은, 고유 왜곡법에 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, 구조물에 있어서의 잔류 응력의 분포를 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 구조물의 잔류 응력을 추정하는 방법으로서, 고유 왜곡법을 사용한 것이 알려져 있다(예를 들어, 특허문헌 1 및 2 참조).

[0003] 종래의 고유 왜곡법에 기초하는 잔류 응력의 추정 방법에서는, 구조물로부터 2종류의 절단편을 잘라내고, 각 절단편에 대하여 탄성 왜곡 또는 잔류 응력을 계측하여, 계측된 절단편의 탄성 왜곡 또는 잔류 응력의 계측값을 유한 요소법에 기초하는 역 해석 처리에 적용한다. 역 해석 처리에서는, 고유 왜곡을 분포 함수를 사용하여 최소 제곱법으로 근사시키고, 구조물에 있어서의 고유 왜곡의 분포를 결정하고, 얻어진 고유 왜곡 분포로부터 절단 전의 구조물의 잔류 응력을 계산한다.

[0004] 특허문헌 1에는, 구조물의 시험편으로부터 T편 및 L편의 절단편을 잘라내고, T편 및 L편 각각을 추가로 절단하여 복수의 소편으로 분할하여, 탄성(해방) 왜곡을 계측하는 것이 기재되어 있다.

#### 선행기술문헌

##### 특허문헌

[0005] (특허문헌 0001) 일본 특허 공개 2005-181172호 공보

(특허문헌 0002) 일본 특허 공개 2003-121273호 공보

#### 발명의 내용

##### 해결하려는 과제

[0006] 구조물로부터 절단편을 채취하는 작업은 매우 번잡해서, 비용 및 작업 시간도 늘어난다. 또한, 계측 대상의 절단편이 많아지면, 형상의 오차, 가공 오차, 계측 오차를 포함하기 쉬워지고, 잔류 응력의 추정 정밀도의 저하를 초래한다. 한편, 절단편의 채취 수가 너무 적어도, 탄성 왜곡 또는 잔류 응력의 계측 수가 충분하지 않고, 고정밀도로 구조물의 잔류 응력을 추정할 수는 없다.

[0007] 본 발명은 상술한 사정을 감안하여 이루어진 것이고, 그 주된 목적은, 상기 과제를 해결할 수 있는 잔류 응력 추정 방법 및 잔류 응력 추정 장치를 제공하는 데 있다.

**과제의 해결 수단**

- [0008] 상술한 과제를 해결하기 위해서, 본 발명의 일 형태의 잔류 응력 추정 방법은, 구조물에 고유 왜곡이 일방향으로 균일하게 분포하는 것이 상정되는 경우에, 상기 고유 왜곡이 균일하게 분포하는 영역 내에서 채취된 절단면으로부터 계속된 잔류 응력에 관한 계측값을 취득하는 스텝과, 취득된 상기 계측값에 기초하여, 상기 구조물에 있어서의 상기 일방향에 교차하는 방향에 있어서의 고유 왜곡의 2차원 분포를 추정하는 스텝과, 추정된 상기 고유 왜곡의 2차원 분포가 상기 일방향으로 연속되도록, 상기 구조물에 있어서의 고유 왜곡의 3차원 분포를 추정하는 스텝을 갖는다.
- [0009] 이 형태에 있어서, 상기 계측값을 취득하는 스텝에서는, 상기 절단면에 있어서의 상기 일방향에 교차하는 방향으로 절단된 절단면에 있어서 계속된 탄성 왜곡 또는 잔류 응력을, 상기 계측값으로서 취득하도록 해도 된다.
- [0010] 또한, 상기 형태에 있어서, 상기 고유 왜곡의 3차원 분포를 추정하는 스텝에서는, 복수의 계산점이 3차원으로 배열하여 배치된 상기 구조물의 3차원 모델에 있어서, 상기 일방향에 교차하는 하나의 면에 있어서의 각 계산점의 상기 고유 왜곡의 추정값을, 상기 일방향에 교차하는 다른 면에 있어서의 각 계산점에 그리도록 해도 된다.
- [0011] 또한, 상기 형태에 있어서, 상기 고유 왜곡의 3차원 분포를 추정하는 스텝에서는, 상기 다른 면에 있어서 고유 왜곡의 추정값이 전사되어 있지 않은 계산점이 존재할 때, 상기 다른 면에 상기 하나의 면을 겹쳤을 경우에 상기 고유 왜곡의 추정값이 전사되어 있지 않은 계산점의 주위에 있어서의 상기 하나의 면의 고유 왜곡에 기초하여, 상기 계산점의 고유 왜곡을 보전하게 해도 된다.
- [0012] 또한, 상기 형태에 있어서, 상기 고유 왜곡의 3차원 분포를 추정하는 스텝에서는, 상기 계산점의 주위에 탐색 영역을 설정하고, 상기 탐색 영역 내에 상기 다른 면에 겹쳐진 상기 하나의 면의 계산점이 존재하는 경우에, 상기 탐색 영역 내의 상기 하나의 면의 계산점에 있어서의 고유 왜곡의 추정값에 기초하여, 상기 고유 왜곡이 전사되지 않은 계산점의 고유 왜곡을 보전하게 해도 된다.
- [0013] 또한, 상기 형태에 있어서, 상기 고유 왜곡의 3차원 분포를 추정하는 스텝에서는, 상기 탐색 영역 내에 상기 다른 면에 겹쳐진 상기 하나의 면의 계산점이 존재하지 않는 경우에, 상기 탐색 영역보다 큰 탐색 영역을 새롭게 설정하도록 해도 된다.
- [0014] 또한, 본 발명의 일 형태의 잔류 응력 추정 장치는, 구조물에 고유 왜곡이 일방향으로 균일하게 분포하는 것이 상정되는 경우에, 상기 고유 왜곡이 균일하게 분포하는 영역 내에서 채취된 절단면으로부터 계속된 잔류 응력에 관한 계측값의 입력을 접수하는 입력부와, 상기 입력부에 의해 접수된 상기 계측값에 기초하여, 상기 구조물에 있어서의 상기 일방향에 교차하는 방향에 있어서의 고유 왜곡의 2차원 분포를 추정하는 제1 추정 수단과, 상기 제1 추정 수단에 의해 추정된 상기 고유 왜곡의 2차원 분포가 상기 일방향으로 연속되도록, 상기 구조물에 있어서의 고유 왜곡의 3차원 분포를 추정하는 제2 추정 수단과, 상기 제2 추정 수단에 의해 추정된 고유 왜곡의 3차원 분포에 기초하는 잔류 응력의 추정 결과를 표시하는 표시부를 구비한다.

**발명의 효과**

- [0015] 본 발명에 따르면, 잔류 응력의 추정 정밀도를 저하시키지 않고, 탄성 왜곡, 또는 잔류 응력을 계속하기 위한 절단면의 채취수를 억제하는 것이 가능하게 된다.

**도면의 간단한 설명**

- [0016] 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 4a는, 저널축의 가공 범위를 도시하는 단면도이다.
- 도 4b는, 핀축의 가공 범위를 도시하는 단면도이다.
- 도 5는, 본 발명에 따른 잔류 응력 추정 방법의 일 실시 형태의 수순을 나타내는 흐름도이다.
- 도 6은, 구조물로부터 채취되는 절단면의 일례를 설명하기 위한 사시도이다.
- 도 7은, C편의 채취를 설명하기 위한 저널축의 단면도이다.

도 8은, 절단편의 잔류 응력 계측의 일례를 설명하기 위한 개략도이다.

도 9는, 해석면에 있어서의 고유 왜곡의 둘레 방향으로의 전사를 설명하기 위한 사시도이다.

도 10은, 어느 전사면에 있어서의 고유 왜곡의 보전을 설명하기 위한 개략도이다.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

- [0017] 이하, 본 발명의 바람직한 실시 형태를, 도면을 참조하면서 설명한다.
- [0018] 본 실시 형태에 따른 잔류 응력 추정 장치는, 일방향으로 균일하게 고유 왜곡이 분포한다고 상정될 경우에, 구조물의 일방향에 직교하는 면에 있어서의 고유 왜곡의 2차원 분포를 추정하고, 추정된 고유 왜곡의 2차원 분포를 일방향에 직교하는 다른 면에 전사하여, 구조물에 있어서의 고유 왜곡의 3차원 분포를 추정하고, 고유 왜곡의 3차원 분포에 기초하여, 구조물의 잔류 응력을 추정하는 것이다.
- [0019] [잔류 응력 추정 장치의 구성]
- [0020] 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.
- [0021] 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 프로그램이고, 구조물에 있어서의 고유 왜곡의 분포 상황의 추정을 가능하게 한다.
- [0022] 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.
- [0023] RAM(113)은 SRAM 또는 DRAM 등으로 구성되어 있다. RAM(113)은, 하드 디스크(115)에 기록되어 있는 잔류 응력 추정 프로그램(110)의 판독에 사용된다. 또한, CPU(111)가 컴퓨터 프로그램을 실행할 때에, CPU(111)의 작업 영역으로서 이용된다.
- [0024] 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 인스톨 되어 있다. 잔류 응력 추정 프로그램(110)도, 이 하드 디스크(115)에 인스톨 되어 있다.
- [0025] 하드 디스크(115)에는, 예를 들어 미국 마이크로소프트사가 제조 판매하는 Windows(등록 상표) 등의 오퍼레이팅 시스템이 인스톨 되어 있다. 이하의 설명에 있어서는, 본 실시 형태에 따른 잔류 응력 추정 프로그램(110)은 당해 오퍼레이팅 시스템 상에서 동작하는 것으로 하고 있다.
- [0026] 판독 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 판독할 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 판독하고, 당해 잔류 응력 추정 프로그램(110)을 하드 디스크(115)에 인스톨하는 것이 가능하다.
- [0027] 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 있고, 사용자가 당해 입력부(12)를 사용함으로써, 컴퓨터(10)에 데이터를 입력하는 것이 가능하다.
- [0028] 화상 출력 인터페이스(117)는 LCD 또는 CRT 등으로 구성된 표시부(13)에 접속되어 있고, 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.
- [0029] [고유 왜곡법에 기초하는 잔류 응력 추정의 원리]

[0030] (1) 고유 왜곡을 사용한 잔류 응력의 산출

[0031] 고유 왜곡을  $\epsilon_0$ 이라 하면, 잔류 응력  $\sigma$ 는 다음 식으로 표시된다.

[0032] 
$$\sigma = D (\epsilon - \epsilon_0) \quad \dots (1)$$

[0033] 단, D는 탄성계수 매트릭스이고,  $\epsilon$ 는 다음 식의 관계를 충족하는 전체 왜곡이다.

$$\int \mathbf{B}^T \sigma dV = \int \mathbf{B}^T D(\epsilon - \epsilon_0) dV = \mathbf{0} \quad (2)$$

[0034] 여기서,  $\int dV$ 는 해석 영역에 걸친 체적 적분,  $\mathbf{B}$ 는 절점 변위  $\mathbf{u}$ 와  $\epsilon$ 를 관계짓는 계수 매트릭스이다.

[0035] 
$$\epsilon = \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (3)$$

[0036] 그런데, 고유 왜곡을 알고 있는 경우, 잔류 응력은 다음과 같이 구해진다.

[0037] 식 (2) 및 (3)으로부터, 다음 식이 부여된다.

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

여기서,

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

$$\mathbf{P} = \int \mathbf{B}^T \mathbf{D} \epsilon_0 dV \quad (6)$$

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

[0038] 식 (4)를 풀어서  $\mathbf{u}$ 를 구하면, 식 (3) 및 (1)로부터 잔류 응력이 얻어진다.

[0040] (2) 계측 잔류 응력을 사용한 고유 왜곡의 산출

[0041] N개의 계측 잔류 응력을  $\sigma_m$ 으로 나타낸다. 이것에 대응하여, 고유 왜곡으로부터 구한 N개의 계산 잔류 응력을  $\sigma_c$ 로 하고, 계측 잔류 응력과 잔차 R을 다음 식으로 정의한다.

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

[0042] 또한, 임의 점의 고유 왜곡을 M개의 분포 함수 파라미터  $\mathbf{a}$ 에 의해, 다음 선형 함수로 나타낸다.

[0044] 
$$\epsilon_0 = \mathbf{M} \mathbf{a} \quad (8)$$

[0045] 여기서, M은 좌표의 함수이고, 좌표에 대하여 비선형이어도 된다.

[0046] 식 (8)에 의해 고유 왜곡이 결정되면, 계측 잔류 응력은 상기 (1)의 방법으로 구해지고, 그 결과 다음과 같은 선형의 관계식이 얻어진다.

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

[0047] 여기서,  $\mathbf{H}$ 는 계수 매트릭스이고, 그 성분은  $\mathbf{a}$ 의 각 성분에 단위값을 부여하여 잔류 응력을 구함으로써 얻어진다.

[0048] 그런데, 식 (7)에 식 (9)를 대입하고, R이 최소가 되도록  $\mathbf{a}$ 를 결정하면, 계측 잔류 응력과, 계측점에 있어서의 계산 잔류 응력의 오차가 최소가 되는 고유 왜곡 분포가 결정된다.

[0049] [잔류 응력 추정 장치의 동작]

- [0050] 이하, 본 실시 형태에 따른 잔류 응력 추정 장치(1)의 동작에 대하여 설명한다.
- [0051] 잔류 응력 추정 장치(1)는, 이하에 설명하는 것과 같은 잔류 응력 추정 처리를 실행하여, 구조물의 잔류 응력을 추정한다.
- [0052] 구조물은, 소성 가공에 의해 형성된 것이다. 여기에서는, 구조물의 일례로서, 크랭크축에 대하여 설명한다. 크랭크축(200)은 도 2에 도시한 바와 같이, 저널축(201)과, 핀축(203)이 크랭크 아암(202)에 의해 접속되어 구성된다. 저널축(201)과 크랭크 아암(202)의 접속 개소 및 핀축(203)과 크랭크 아암(202)의 접속 개소는, 사용시에 큰 응력이 발생하기 쉽다. 이들의 접속 개소의 내부에 인장 잔류 응력이 발생하고 있으면, 피로 균열 등의 손상의 원인이 될 수 있다. 피로 수명을 향상시키기 위해서, 롤 가공 또는 숏 피닝 등의 소성 가공이 상기의 접속 개소에 실시되어, 압축 잔류 응력이 도입된다.
- [0053] 도 3은, 크랭크축에 대한 소성 가공을 설명하기 위한 도면이다. 도 3에서는, 롤 가공의 경우를 나타내고 있다. 롤 가공에서는, 저널축(201)(또는 핀축(203))과, 크랭크 아암(202)의 접속 개소에, 롤(300)을 가압한 상태에서, 저널축(201)이 회전된다. 이에 의해, 접속 개소에는, 필렛(204)이 형성되고, 저널축(201)의 둘레 방향으로 균일하게 분포하도록 압축 잔류 응력이 부여된다.
- [0054] 저널축(201)에 대해서는, 전체 둘레에 걸쳐 롤 가공이 실시되고, 핀축(203)에 대해서는, 둘레 방향의 일부에 대하여 롤 가공이 실시된다. 도 4a에 도시한 바와 같이, 저널축(201)에는 전체 둘레에 걸치는 링 형상의 가공 범위(210)에 있어서, 롤 가공이 실시된다. 이로 인해, 저널 축(201)에는 전체 둘레에 걸쳐 필렛(204)이 형성된다. 한편, 도 4b에 도시한 바와 같이, 핀축(203)에는 180°의 가공 범위(220)에 있어서, 롤 가공이 실시된다. 이로 인해, 핀축(203)에는 180°의 범위에서 필렛(204)이 형성된다.
- [0055] 상기와 같이 압축 잔류 응력이 일방향으로 균일하게 부여된 구조물에 대해서, 잔류 응력 추정 장치(1)를 사용하여 잔류 응력을 추정한다. 도 5는, 본 실시 형태에 따른 잔류 응력 추정 방법의 수순을 나타내는 흐름도이다.
- [0056] 유저는, 구조물을 절단 가공하여 절단편을 채취하고, 절단편으로부터 잔류 응력을 계측한다(스텝 S1). 구체적으로는, 구조물을 일방향으로 얇게 절단하여 절단편(T편)을 채취하고, 상기 일방향에 직교하는 방향으로 절단하여 절단편(L편)을 채취한다.
- [0057] 여기서, 잔류 응력은 탄성 왜곡에 영률을 곱하여 얻어지는 값이고, 탄성 왜곡을 계측하는 것과, 잔류 응력을 계측하는 것은 등가이다. 따라서, 절단편으로부터는 탄성 왜곡 및 잔류 응력의 어느 것을 계측해도 된다. 본 실시 형태에서는, 잔류 응력을 계측하는 경우에 대하여 설명한다.
- [0058] 도 6에 도시한 바와 같이, 둘레 방향으로 균일하게 압축 잔류 응력이 부여된 저널축 또는 핀축과 같은 축 대칭의 구조물의 경우, T편은 반경 방향으로 절단함으로써 얻어진다. 고유 왜곡이 둘레 방향으로 균일하게 분포하고 있으면, 둘레 방향의 어느 부분에 있어서 T편을 얻었다고 해도, 고유 왜곡은 변함없다. 따라서, 채취하는 T편은 1개만이어도 된다. 이에 의해, T편의 채취수를 적게 할 수 있으므로, 절단 가공 및 절단편의 잔류 응력 계측의 작업 부담을 경감할 수 있다.
- [0059] 한편, 축 길이 방향에 대해서는, 고유 왜곡의 분포는 복잡하다. 따라서, 축 길이 방향의 복수 개소에 있어서 L편을 채취할 필요가 있다.
- [0060] 또한, 크랭크축의 필렛부와 같이 곡면을 갖는 경우에는, L편이 아닌, 곡면의 법선 방향으로 절단한 원추 형상의 절단편(이하, 「C편」이라고 함)을 채취해도 된다. 또한, L편 및 C편을 채취하지 않고, T편만을 채취해도 된다. 도 7에 있어서, 각 도면은 저널축을 회전축 축 길이 방향으로 절단했을 때의 단면도이다. C편(500)은 필렛의 곡면의 법선 방향, 즉, 단면에 있어서 원호 형상의 필렛의 반경 방향으로 구조물을 절단함으로써 얻어진다. 저널축은 축 대칭 형상이기 때문에, C편(500)의 절단면(501)은 저널축의 회전 중심축 주위에 원추형으로 연장된다. 이러한 C편은, 필렛의 중심각을 바꾸어서 몇점(예를 들어, 20° 내지 110° 까지 10° 마다) 채취된다.
- [0061] 또한, 일방향으로 긴 막대형 구조물에 대하여, 길이 방향으로 균일하게 압축 잔류 응력이 부여된 경우, 길이 방향의 1군데에서, T편을 1개만 채취할 수 있다.
- [0062] 유저는, 상기와 같이 하여 채취된 절단편에 대하여 X선 등에 의해 잔류 응력을 직접 계측한다. 탄성 왜곡을 계측하는 경우, 유저는, 절단편에 스트레인 게이지를 부착하고, 추가로 복수의 소편으로 절단하여, 각 소편의 해방 왜곡(탄성 왜곡)을 계측한다. 잔류 응력 또는 해방 왜곡(탄성 왜곡)의 계측에 있어서는, 서로 상이한 복수

의 성분을 계측한다.

- [0063] 도 8에서는, 저널 축(또는 핀 축)의 필렛부의 T편에 있어서 잔류 응력을 계측하는 예를 나타내고 있다. T편(400)은 저널축(또는 핀축)의 둘레 방향에 직교하는 절단면(401)을 갖고 있고, 유저는, 그 절단면(401)에 있어서 서로 직교하는 r 방향 및 z 방향의 각 성분  $\sigma_r$  및  $\sigma_z$ 를 계측한다. 일반적으로는, T편에 있어서 이들의 2성분을 계측하고, L편(또는 C편)에 있어서도 서로 직교하는 2개의 방향 성분을 계측한다.
- [0064] 다시 도 5를 참조한다. 유저는, 절단편의 잔류 응력을, 잔류 응력 추정 장치(1)에 입력한다. 잔류 응력 추정 장치(1)의 CPU(111)는, 입력부(12)로부터 입력된 절단편의 잔류 응력을 접수한다(스텝 S2).
- [0065] 다음으로 CPU(111)는, 고유 왜곡의 분포 함수를 결정한다(스텝 S3). 분포 함수로서는, 임의의 다차 다항식, 또는 삼각 급수를 선택 가능하게 할 수 있다. 이 경우, CPU(111)가 자동으로 분포 함수를 선택해도 되고, 유저가 입력부(12)를 사용하여 원하는 분포 함수를 지정해도 된다. 또한, 잔류 응력 추정 장치(1)에 있어서 미리 분포 함수가 설정되어 있어도 된다.
- [0066] 스텝 S3에서 결정되는 분포 함수는, 일방향으로 균일하게 고유 왜곡이 분포하는 구조물의 고유 왜곡을 추정하기 위한 것이다. 구체적으로는, 저널축(또는 핀축)의 둘레 방향에 직교하는 단면에 있어서의 고유 왜곡의 2차원 분포를 표현하기 위한 분포 함수이다. 따라서, 둘레 방향에 있어서의 고유 왜곡의 분포를 표현하기 위한 분포 함수는 사용되지 않는다.
- [0067] 다음으로 CPU(111)는, 분포 함수의 파라미터를 최적화한다(스텝 S4). 이하, 스텝 S4의 처리에 대하여 구체적으로 설명한다.
- [0068] CPU(111)는, 먼저 식 (9)의 H를 결정한다. 그 수순은 다음과 같다.
- [0069] (a)  $a=[1, 0, 0, \dots, 0]^T$ 로서,  $\varepsilon_0=Ma$ 를 구한다.
- [0070] (b) 식 (4)를 풀고, u를 구한다.
- [0071] (c) 식 (3)에 의해  $\varepsilon$ 를 구한다.
- [0072] (d) 식 (1)에 의해  $\sigma$ 를 구한다.
- [0073] (e)  $\sigma$ 의 성분 중에서 잔류 응력 측정점에 대응하는 N개의 값을 추출하고, 이것을 H의 제1열로 한다.
- [0074] (f)  $a=[0, 1, 0, \dots, 0]^T$ 로서, H의 제2열도 동일하게 (b) 내지 (f)의 수순으로 구한다.
- [0075] 다음으로 CPU(111)는, 식 (7)의 R이 최소가 되도록, a를 결정한다. 이에 의해, 분포 함수의 파라미터가 최적화된다.
- [0076] 또한 CPU(111)는, 구조물에 있어서 고유 왜곡이 균일하게 분포하는 방향에 직교하는 해석면에 있어서의 고유 왜곡의 2차원 분포를 산출한다(스텝 S5).
- [0077] 스텝 S5의 처리에서는, 크랭크축의 핀축과 크랭크 아암의 접속 부분을 해석 대상으로 하는 경우, 핀축의 둘레 방향에 직교하는 면이 해석면이 된다. CPU(111)는, 식 (8)에 의해, 해석면의 임의의 점에 있어서의 고유 왜곡을 구한다.
- [0078] 다음으로 CPU(111)는, 산출된 해석면에 있어서의 고유 왜곡의 2차원 분포를, 둘레 방향(고유 왜곡이 균일하게 분포하는 방향)으로 전사한다(스텝 S6). 이때, CPU(111)는, 해석 대상이 저널축인 경우에는, 360°의 범위에서 고유 왜곡을 전사하고, 핀축인 경우에는, 180°의 범위에서 고유 왜곡을 전사한다. 이에 의해, 실제의 가공 범위에 적합시켜 고유 왜곡을 전사할 수 있다.
- [0079] 스텝 S6의 처리는, 도 9에 도시한 바와 같이, 가상적인 3차원 공간에 구축된 구조물의 3차원 모델(해석 모델)에 있어서 실행된다. 해석 모델은, 복수의 입체 요소(4면체, 6면체 등)가 배열되어 구성된다. 여기에서는, 입체 요소의 무게 중심 점에 계산점을 둔다. 도 9에 있어서, 해석면(501) 상의 계산점 a 내지 e 각각에 있어서, 고유 왜곡의 추정값이 부여되어 있는 것으로 한다. 해석면(501)으로부터 회전 중심인 z축 주위에  $\theta$ 만큼 이격된 전사면(502)에 대하여, 고유 왜곡을 전사하는 경우를 생각한다. CPU(111)는 계산점 a 내지 e에 대응하는 전사면 상의 계산점 a' 내지 e'에, 계산점 a 내지 e의 각각의 고유 왜곡의 추정값을 전사한다. 즉, 계산점 a' 내지 e'의 고유 왜곡의 값을, 계산점 a 내지 e의 각각의 고유 왜곡의 값과 동일하게 한다. CPU(111)는 이러한

처리를, 전사 범위(저널축의 경우에는  $360^\circ$ , 핀축의 경우에는  $180^\circ$ )에 걸쳐 실행한다.

- [0080] 또한, 해석 대상이 직선 방향으로 균일하게 압축 응력이 부여된 구조물인 경우에는, CPU(111)는 상기 직선 방향에 직교하는 해석면에 있어서의 고유 왜곡의 2차원 분포를, 상기 직선 방향으로 전사한다.
- [0081] 다음으로 CPU(111)는 해석 모델 중에, 고유 왜곡이 전사되어 있지 않은 점(이하, 「결손점」이라고 함)이 존재하는 경우, 결손점의 고유 왜곡을 보전한다(스텝 S7).
- [0082] 스텝 S7의 처리를, 도 10을 사용하여 설명한다. 도 10에 있어서, 전사면(502) 상의 계산점 P가 결손점인 경우, CPU(111)는 결손점 P를 중심으로 한 원형의 탐색 영역(503)을 설정한다.
- [0083] CPU(111)는, 해석면(501)을 z축 둘레로  $\theta$ 만큼 이동시켜, 전사면(502)에 해석면(501)을 겹쳤을 때에, 탐색 영역(503)에, 해석면(501)의 계산점이 존재하는지의 여부를 판정한다. 탐색 영역(503)에, 해석면(501)의 계산점이 존재하는 경우, CPU(111)는 그 계산점에 있어서의 고유 왜곡의 추정값으로부터, 결손점에 있어서의 고유 왜곡을 보전한다. 고유 왜곡의 보전에는, 공지된 내부 삽입법, 외부 삽입법, 또는 다른 추정 방법을 이용할 수 있다. 예를 들어, 결손점의 최근방의 계산점의 고유 왜곡의 추정값을, 결손점의 고유 왜곡의 추정값으로 할 수 있다(최근방 보간). 또한, 계산점이 2 이상 탐색된 경우에는, 스플라인 보간, 다항식 보간, 선형 보간 등(외부 삽입법도 동일)을 사용해도 되고, 각 계산점의 고유 왜곡의 추정값을 평균해도 된다.
- [0084] 또한, 스텝 S7의 처리에서는, 계산점을 적어도 1점 탐색하게 해도 되고, 복수의 계산점을 탐색하게 해도 된다.
- [0085] 탐색 영역(503)에, 해석면(501)의 계산점이 존재하지 않는 경우, CPU(111)는 한결 큰 새로운 탐색 영역을 설정하고, 계산점을 탐색한다. 이후, CPU(111)는 계산점이 탐색될 때까지, 순차 큰 탐색 영역을 설정해 간다.
- [0086] 스텝 S7에 있어서 모든 결손점의 고유 왜곡이 보전되면, CPU(111)는 잔류 응력의 추정값을 산출한다(스텝 S8).
- [0087] 스텝 S8의 처리에서는, CPU(111)가 각 점에 있어서, 고유 왜곡으로부터 식 (4)를 풀어서  $u$ 를 구하고, 얻어진  $u$ 를 식 (3)에 적용하여  $\varepsilon$ 를 구하여, 얻어진  $\varepsilon$ 를 식 (1)에 적용하여  $\sigma$ 를 구한다.
- [0088] 다음으로 CPU(111)는, 얻어진 잔류 응력의 추정값을 표시부(13)에 표시시킨다(스텝 S9).
- [0089] 스텝 S9 후에, CPU(111)는 처리를 종료한다.
- [0090] 이상과 같이 구성함으로써, 일방향(축 주위의 둘레 방향, 또는 직선 방향 등)으로 균일하게 잔류 응력이 분포하는 구조물에 대해서, 잔류 응력의 추정 정밀도를 저하시키지 않고, 고유 왜곡을 계측하기 위한 절단편의 채취수를 저감하는 것이 가능하게 된다.
- [0091] (기타의 실시 형태)
- [0092] 또한, 상술한 실시 형태에 있어서는, 소성 가공된 구조물에 있어서의 잔류 응력을 추정하는 것에 대하여 설명했지만, 이것에 한정되는 것은 아니다. 용접 또는 열처리 등의 소성 가공 이외의 가공이 실시되어, 일방향으로 균일하게 고유 왜곡이 존재하는 구조물에 대해서도, 마찬가지로 하여 잔류 응력을 추정할 수 있다.
- [0093] 또한, 상기의 실시 형태에 있어서는, 구조물의 절단편으로부터 잔류 응력을 계측하고, 계측된 잔류 응력과, 분포 함수에 의해 계산되는 잔류 응력의 차가 최소가 되도록, 분포 함수의 파라미터를 최적화하는 구성에 대하여 설명했지만, 이것에 한정되는 것은 아니다. 구조물의 절단편으로부터 해방 왜곡(탄력 왜곡)을 계측하고, 계측된 해방 왜곡과, 분포 함수에 의해 계산되는 탄성 왜곡의 차가 최소가 되도록, 분포 함수의 파라미터를 최적화하는 구성으로 해도 된다.

**산업상 이용가능성**

- [0094] 본 발명의 잔류 응력 추정 방법 및 잔류 응력 추정 장치는, 고유 왜곡법에 기초하여 구조물의 잔류 응력을 추정하기 위한 잔류 응력 추정 방법 및 잔류 응력 추정 장치로서 유용하다.
- [0095] 본 출원은, 2015년 3월 5일 출원의 일본 특허 출원(일본 특허 출원 제2015-043082)에 기초하는 것이고, 그 내용은 여기에 참조로서 인용된다.

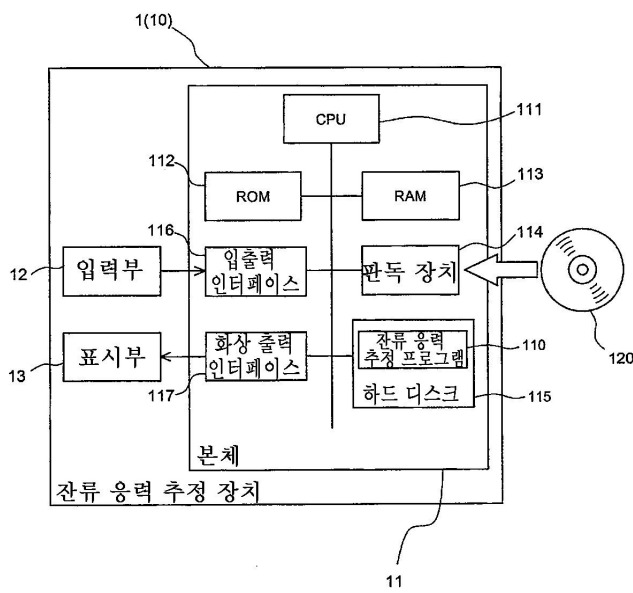
**부호의 설명**

- [0096] 1: 잔류 응력 추정 장치

- 10: 컴퓨터
- 12: 입력부
- 13: 표시부
- 110: 잔류 용력 추정 프로그램
- 111: CPU
- 115: 하드 디스크
- 116: 입출력 인터페이스
- 117: 화상 출력 인터페이스
- 200: 크랭크축(구조물)
- 400: T편(절단편)
- 401: 절단면
- 500: C편(절단편)
- 501: 절단면
- 503: 탐색 영역

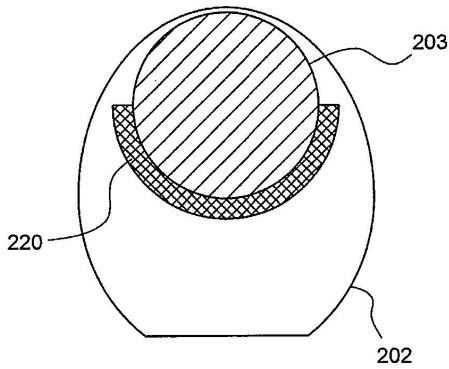
도면

도면1

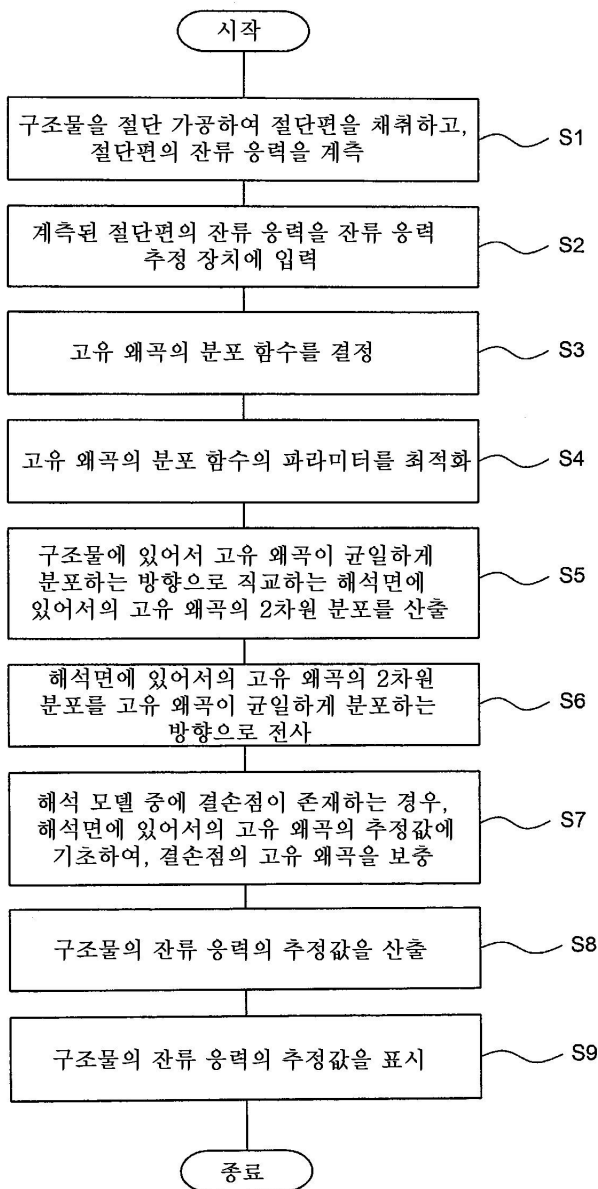




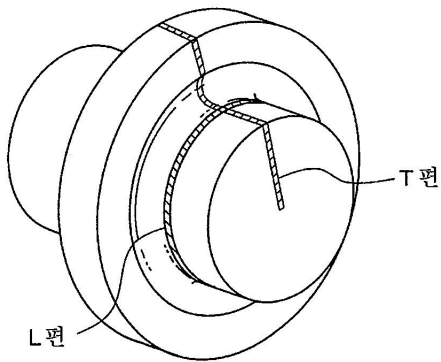
도면4b



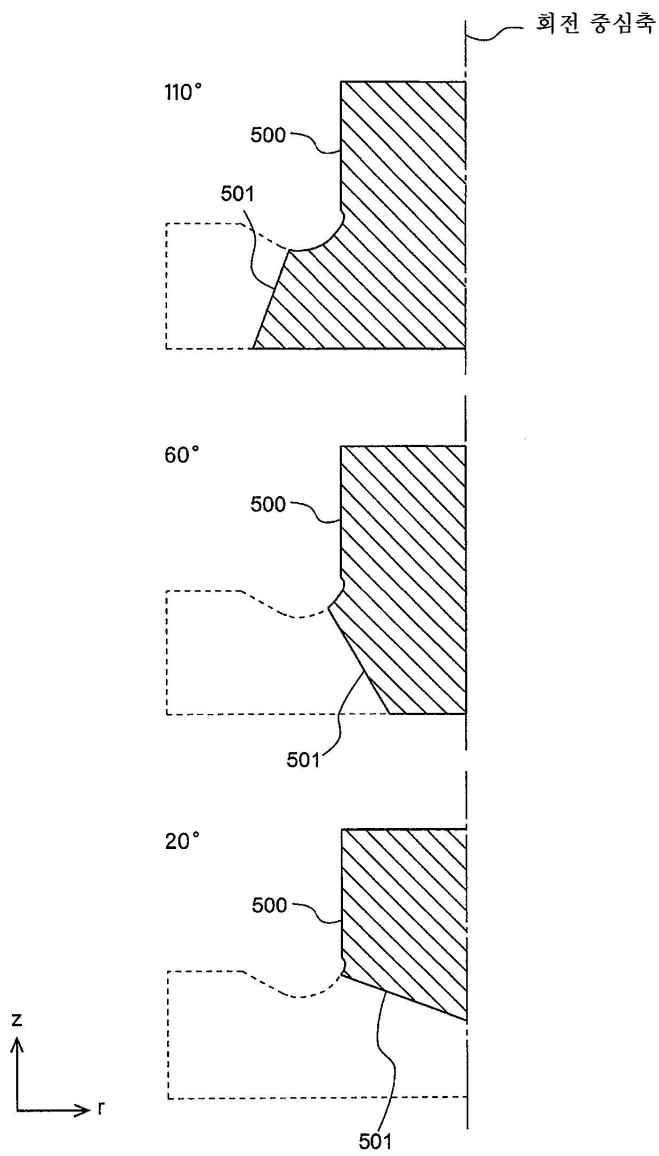
도면5



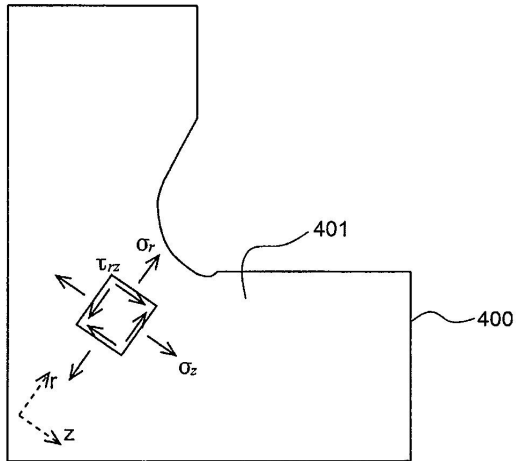
도면6



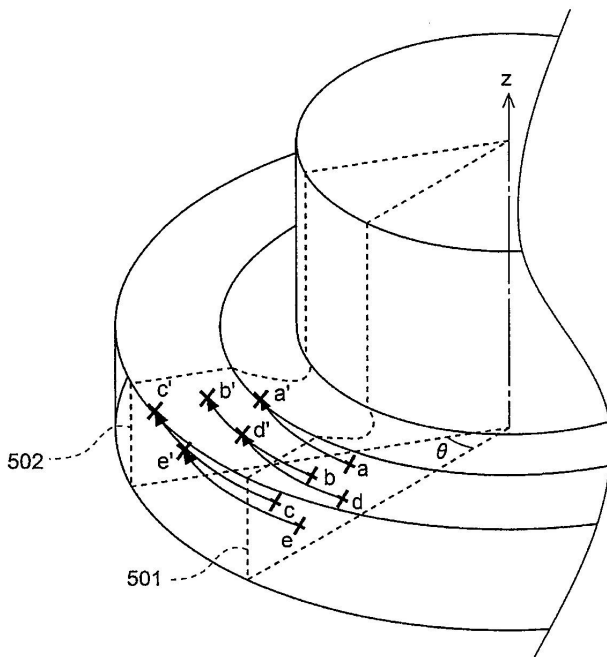
도면7



도면8



도면9



도면10

