



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2009-0042001
(43) 공개일자 2009년04월29일

(51) Int. Cl.

G01N 3/40 (2006.01) G01N 3/00 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2007-0107838

(22) 출원일자 2007년10월25일

심사청구일자 2007년10월25일

(71) 출원인

서강대학교산학협력단

서울 마포구 신수동 1-1 서강대학교

(72) 발명자

이형일

경기 고양시 대화동 2115번지 성저마을 건영빌라
1502-304

이진행

서울 마포구 신수동 서강대학교 복합관 616호

현홍철

서울 마포구 대흥동 62-35

(74) 대리인

이지연, 양부현

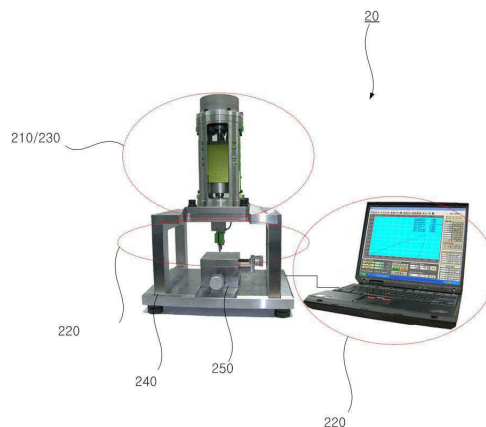
전체 청구항 수 : 총 6 항

(54) 유한요소해에 기초한 잔류응력 평가 압입시험기

(57) 요약

본 발명은 압입하중 P 를 작용하여 압흔의 이상적인 h_0 를 측정하여 재료의 잔류응력을 연산하는 잔류응력 평가 압입시험기에 관한 것이다. 상기 잔류응력 평가 압입 시험기는, 상하로 운동하는 구동 모터와, 압입자의 압입하중 P 및 압흔의 변위 h 에 대한 신호를 측정하여 제공하는 측정장치와, 상기 구동 모터와 상기 측정장치를 제어하도록 연결되어, 상기 측정장치로부터 측정 신호를 입력받으며, 상기 입력되는 측정 신호들을 이용하여 잔류응력을 산출하는 알고리즘이 탑재된 자료 검출부를 포함하여 구성된다. 상기 자료 검출부에 탑재된 잔류 응력 산출 알고리즘은, 항복강도, 영률 및 변형경화지수를 포함하는 재료의 물성치를 이용하여 잔류응력이 없을 때의 압입상수 C_0 를 계산하는 단계와, h_0 를 이용하여 잔류응력이 있을 때의 압입상수 C 를 구하는 단계와, 상기 계산된 압입상수 C_0 , C 및 상기 재료 물성치를 이용하여 양측 등가 잔류응력을 구하는 단계를 구비한다. 본 발명에 의하여 다양한 재료의 압입특성과 재료물성이 잔류응력평가에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있으며, 이를 바탕으로 향상된 잔류응력평가식을 제시할 수 있다.

대표도 - 도2



특허청구의 범위

청구항 1

압입하중 P 를 작용하여 압흔의 이상적인 h_i 를 측정하여 재료의 잔류응력을 연산하는 잔류응력 평가 압입시험기에 있어서;

상하로 운동하는 구동 모터와,

압입자의 압입하중 P 및 압흔의 변위 h_i 에 대한 신호를 측정하여 제공하는 측정장치와,

상기 구동 모터와 상기 측정장치를 제어하도록 연결되어, 상기 측정장치로부터 측정 신호를 입력받으며, 상기 입력되는 측정 신호들을 이용하여 잔류응력을 산출하는 알고리즘이 탑재된 자료 검출부를 포함하여 구성되며,

상기 자료 검출부에 탑재된 잔류 응력 산출 알고리즘은,

항복강도, 영률 및 변형경화지수를 포함하는 재료의 물성치를 이용하여 잔류응력이 없을 때의 압입상수 C_0 를 계산하는 단계와;

압입자 선단의 반경 R 에 의해 동일 압입깊이에서 발생하는 압입깊이의 차(h_d)를 이용하여 잔류응력이 있을 때의 압입상수 C 를 구하는 단계와;

상기 계산된 압입상수 C_0 , C 및 상기 재료 물성치를 이용하여 양축 등가 잔류응력을 구하는 단계

를 포함하는 것을 특징으로 하는 유한요소해에 기초한 잔류응력 평가 압입시험기.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 알고리즘은,

만약 재료에 일축 잔류응력이 작용하는 경우에는, 양축 등가 잔류응력이 존재하는 경우의 압입상수 C 및 잔류응력이 없을 때의 압입상수 C_0 로부터 C_{Equi} 를 구하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 유한요소해에 기초한 잔류응력 평가 압입시험기.

청구항 3

제1항에 있어서, 상기 알고리즘은,

만약 재료가 영이 아닌 서로 다른 크기의 잔류응력이 작용하는 경우에는, 잔류응력 비를 입력받아 각각의 양축의 잔류응력을 계산하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 유한요소해에 기초한 잔류응력 평가압입 시험기.

청구항 4

제1항에 있어서, 상기 잔류응력 평가 압입시험기는 상기 구동 모터의 동작을 제어하는 제어부를 더 구비하여 구동 모터의 이동속도 및 방향을 사용자가 임의로 제어할 수 있도록 하는 것을 특징으로 하는 유한요소해에 기초한 잔류응력 평가 압입시험기.

청구항 5

제1항에 있어서, 상기 잔류응력 평가 압입시험기는 X-Y 스테이지로 이루어지는 이동스테이지부를 더 구비하여, 시험 측정 위치를 정밀 조정하도록 하는 것을 특징으로 하는 유한요소해에 기초한 잔류응력 평가 압입시험기.

청구항 6

제1항에 있어서, 상기 자료 검출부는

상기 측정장치로부터 수신된 신호들을 증폭하는 신호 증폭부,

상기 신호 증폭부로부터 수신된 신호들을 필터링하는 필터,

상기 잔류 응력 평가 알고리즘이 탑재된 컴퓨터; 및
상기 필터의 출력신호를 상기 컴퓨터로 제공하는 통신인터페이스부
를 포함하는 것을 특징으로 하는 유한요소해에 기초한 잔류응력 평가 압입시험기.

명세서

발명의 상세한 설명

기술 분야

<1> 본 발명은 잔류응력 평가 압입시험기에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 유한요소해석을 통해 얻어지는 다양한 재료에 대한 최적의 잔류응력 평가식을 잔류응력 평가 프로그램으로 완성하고, 압입 시험시 발생하는 추가 변위를 동일 재료의 유한요소해석으로부터 얻어지는 변위를 이용하여 보정하며, 이를 압입시험기에 적용함에 따라 다양한 재질에 대한 잔류응력 평가가 편리하고 정밀하게 수행되도록 하는 유한요소해에 기초한 잔류응력 평가 압입시험기에 관한 것이다.

배경 기술

<2> 도 1은 종래의 기술에 따른 압입시험기를 도시한 것이다. 도 1에 도시된 압입시험기는 대한민국 특허등록번호 제 418700호에 개시되는 바, 기본적으로 하중과 변위를 측정하는 센서를 장착하여 압입시와 해중시 발생하는 압흔의 깊이와 그때의 하중을 측정하여 하중-변위 곡선을 얻는다.

<3> 압입시험법은 금속, 박막 및 고무 등의 물성평가에 이용되는 비파괴시험법으로, 작은 시험편으로도 시험이 가능하고 특히 현재 사용 중인 부위의 특성을 평가하는데 유용하며 시험방법이 비교적 간단하다 (Lee *et al.*, 2000; 2001; 2005). 이와 같은 특징은 다른 잔류응력평가 시험법에 비해 상당한 강점으로 작용하는 반면, 압입시험으로 잔류응력과 잔류변형률을 측정하려면 잔류응력과 변형률이 없는 순수한 재료에 대한 압입특성 비교가 필수적이며, 또한 이를 분석하는 과정이 상당히 까다롭다. 이에 초기 연구는 잔류응력의 방향과 크기에 따른 Vickers 경도 변화를 관측하는 것이었다. Tsui 등 (1996)과 Bolshakov 등 (1996)은 압입시험과 유한 요소해석을 통하여 경도, 접촉 면적, 영률에 미치는 잔류응력의 영향을 연구하였다. 이로부터 잔류응력은 재료의 경도 및 압입 영률평가에 큰 영향을 주지 않으며, 이 때 재료의 pile-up/sink-in에 따른 실제 접촉면적을 고려해야 함을 보였다. 이를 바탕으로 Suresh와 Giannakopoulos (1998)는 잔류응력에 대응하는 정수압 응력 (hydrostatic stress)이 재료의 변형에 영향을 주지 않음을 가정하여 비커스 압입 시험법으로 양축 등가 (equi-biaxial) 잔류응력 및 소성변형률을 예측하는 방법을 제시하였다. 이어 장재일 등 (2003) 과 이윤희 등 (2004)은 잔류응력을 평균응력과 편차응력으로 나누고, 이들 중 편차응력의 압입 방향 성분만이 압입소성변형에 영향을 미친다고 가정하여 Suresh와 Giannakopoulos의 방법을 수정한 평가식을 제시하였다.

<4> Suresh와 Giannakopoulos (1998)는 잔류응력 σ_R 의 크기와 방향에 관계없이 재료의 경도는 불변한다는 점을 가정하여 잔류응력 예측식을 제시하였다. 그들은 양축 등가 인장 및 압축 잔류응력에 따라 압입이론을 달리 전개하였다. 인장 잔류응력의 경우 관계식은 수학적식 1과 같다.

수학적식 1

$$P_0 = P + \sigma_R A$$

<5> 압축 잔류응력의 경우 관계식은 수학적식 2와 같다.

수학적식 2

$$P_0 = P + \sigma_R f_c A$$

<6> 여기서 P 와 P_0 는 각각 잔류응력이 있는 경우와 없는 경우의 최대압입하중이며, A 는 잔류응력이 존재할 때 해중 후의 투영압입접촉면적, f_c 는 압입자의 형상인자 (geometric factor)이다. Suresh와 Giannakopoulos (1998)는 인장 잔류응력의 경우 하중 방향과 잔류응력에 의한 가상 응력의 방향이 같기 때문에 압입형상의 영향을 고려치 않았으나, 압축 잔류응력의 경우는 하중 방향과 잔류 응력에 의한 가상 응력의 방향이 다르다는 이유로 형상인

자 $f_c (= \sin a)$ 를 도입하였다. Vickers 압입자의 경우 $a = 22^\circ$ 임을 고려할 때 Suresh와 Giannakopoulos의 형상 인자는 약 0.375 정도가 되며, 이윤희 등 (2004)이 사용한 수치는 0.667정도이다. 한편 Atar 등 (2003)은 X-ray 회절과 압입시험을 통해 얻은 세라믹 박막의 잔류응력 측정치로부터 이 형상인자가 1이 됨을 보였는데, 실제로도 인장과 압축잔류응력을 나누어 고려해야 할 특별한 물리적 이유가 없다. 이 경우 잔류응력의 방향과 관계없이 수학적 1을 사용하여야 한다.

<9> 한편 Xu와 Li (2005)는 유한요소해석을 바탕으로 나노압입시험에서 해중 거동에 미치는 양축 등가 잔류응력의 영향을 분석하였으며, 이로부터 잔류응력이 경도와 약간의 상관관계가 있음을 관찰하였다. Chen 등 (2006)도 유한요소해석을 바탕으로 잔류응력과 재료물성의 관계를 살펴 보았으며, 이로부터 잔류응력과 항복강도, 영률을 한 번의 실험으로 구할 수 있는 방법을 제시하였다. 이 방법은 잔류응력이 없는 상태의 데이터를 필요로 하지 않고 한 번의 실험으로 잔류 응력과 재료물성을 구할 수 있는 장점이 있다. 그러나 그들의 연구에서 변형경화지수의 영향에 대한 분석을 찾아볼 수 없으며, 이로 인해 이 방법의 유효성을 평가할 수 없다.

<10> 잔류응력 측정을 위한 위의 기존 압입 연구들은 재료물성치 변화가 측정된 잔류응력에 주는 영향에 대해서는 면밀하게 평가하지 않았다. 따라서 이러한 연구들이 제시한 방법들은 연구에 사용된 몇몇 특수 재료들을 넘는 적용이 어려운 문제점이 있다.

발명의 내용

해결 하고자하는 과제

<11> 본 발명은 상기한 종래 기술의 문제점을 해결하기 위하여 안출된 것으로서, 증분소성이론에 준한 대변형 압입시험 유한 요소해석에 기초하여, 탄/소성 양축 등가 잔류응력 및 잔류변형률이 존재할 때 재료물성과 분리된 범용의 잔류응력 평가기법과 탄성 양축 등가 잔류응력에 대하여 재료물성치를 이용한 평가 기법을 제공하는 유한요소해에 기초한 잔류응력 물성평가 압입시험기를 제공하는데 그 목적이 있다.

<12> 아울러 일축 잔류응력 (uni-axial)일 경우와 양축 잔류응력 상태의 비를 알고 있는 경우에 대해 양축 부 등가 잔류응력을 예측하는 기술을 제시하고자 한다. 이를 통해 유한요소해에 기초하여 다양한 재료에 대한 최적의 잔류 응력평가식을 물성평가 프로그램으로 완성하고 이를 압입시험기에 적용함에 따라 다양한 재질에 대한 잔류응력 평가가 편리하고 정밀하게 수행되도록 하는 유한요소해에 기초한 잔류응력 물성평가 압입시험기를 제공하는데 그 목적이 있다.

과제 해결수단

<13> 상기한 과제를 해결하기 위한 본 발명에 따른 유한요소해에 기초한 잔류응력 평가 압입시험기는, 압입하중 P 를 작용하여 압흔의 이상적인 h_f 를 측정하여 재료의 잔류응력을 연산하는 장치에 관한 것으로서,

<14> 상하로 운동하는 구동 모터와,

<15> 압입자의 압입하중 P 및 압흔의 변위 h_f 에 대한 신호를 측정하여 제공하는 측정장치와,

<16> 상기 구동 모터와 상기 측정장치를 제어하도록 연결되어, 상기 측정장치로부터 측정 신호를 입력받으며, 상기 입력되는 측정 신호들을 이용하여 잔류응력을 산출하는 알고리즘이 탑재된 자료 검출부를 포함하여 구성되며,

<17> 상기 자료 검출부에 탑재된 잔류 응력 산출 알고리즘은,

<18> 항복강도, 영률 및 변형경화지수를 포함하는 재료의 물성치를 이용하여 잔류응력이 없을 때의 압입상수 C_0 를 계산하는 단계와;

<19> h_f 를 이용하여 잔류응력이 있을 때의 압입상수 C 를 구하는 단계와;

<20> 상기 계산된 압입상수 C_0 , C 및 상기 재료 물성치를 이용하여 양축 등가 잔류응력을 구하는 단계와,

<21> 만약 재료가 일축 잔류응력이 작용하는 경우에는, 양축 등가 잔류응력이 존재하는 경우의 압입상수 C 및 잔류응력이 없을 때의 압입상수 C_0 로부터 C^{Equi} 를 구하는 단계와,

<22> 만약 재료가 영이 아닌 서로 다른 크기의 잔류응력이 작용하는 경우에는, 잔류응력 비를 입력받아 각각의 양축

의 잔류응력을 계산하는 단계를 포함한다.

- <23> 전술한 특징을 갖는 상기 잔류응력 평가 압입시험기는 상기 구동 모터의 동작을 제어하는 제어부를 더 구비하여 구동 모터의 이동속도 및 방향을 사용자가 임의로 제어할 수 있도록 하는 것이 바람직하다.
- <24> 전술한 특징을 갖는 상기 잔류응력 평가 압입시험기는 X-Y 스테이지로 이루어지는 이동스테이지부를 더 구비하여, 시평 측정 위치를 정밀 조정하도록 하는 것이 바람직하다.
- <25> 전술한 특징을 갖는 잔류응력 평가 압입시험기의 상기 자료 검출부는
- <26> 상기 측정장치로부터 수신된 신호들을 증폭하는 신호 증폭부,
- <27> 상기 신호 증폭부로부터 수신된 신호들을 필터링하는 필터,
- <28> 상기 잔류 응력 평가 알고리즘이 탑재된 컴퓨터, 및
- <29> 상기 필터의 출력신호를 상기 컴퓨터로 제공하는 통신인터페이스부를 포함하는 것이 바람직하다.

효 과

- <30> 상기와 같이 구성되는 본 발명의 유한요소해에 기초한 잔류응력 평가 압입시험기는 pile-up 및 sink-in의 영향과 재료의 탄성변형정도를 고려한 새로운 잔류응력 평가식을 제시하여, 이 식은 광범위한 재료에 대해 기존 방법보다 향상된 예측 탄성잔류응력을 제공하는 이점이 있다.
- <31> 또한, 실제 압입시험에서 정밀 압입직경을 평가하기 어려움을 고려하여 재료물성치를 알고 있는 경우 압흔의 크기를 측정하지 않고, Kick's law의 계수 C만으로 잔류응력을 평가할 수 있고, 이 식은 회귀구간 내의 모든 재료에서 정밀한 탄성잔류응력을 예측할 수 있는 이점이 있다.
- <32> 또한, 한 축의 잔류응력을 무시할 수 있는 경우, 즉 일축잔류응력 (uni-axial)일 경우와, 양축 잔류 응력 상태의 비를 알고 있는 경우에 대해서도 잔류응력을 예측하는 이점이 있다.
- <33> 또한, 이전의 압입시험을 이용한 잔류응력평가 연구에서는 제한된 재료를 이용한 압입분석이 이루어져 재료물성에 따른 특성을 고려하기 어려웠으나, 본 발명에서는 유한요소해석을 활용함으로써 다양한 재료의 압입특성과 재료물성이 잔류응력평가에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였으며, 이를 바탕으로 향상된 잔류응력평가식을 제시하는 유한요소해에 기초한 잔류응력 평가 압입시험기를 제공할 수 있는 이점이 있다.

발명의 실시를 위한 구체적인 내용

- <34> 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 압입 시험기에 대하여 구체적으로 설명한다.
- <35> 도 2는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 압입시험기를 전체적으로 도시한 구성도이며, 도 3은 도 2의 압입시험기의 수직 방향에 대한 단면도이다. 도 2 및 도 3을 참조하면, 본 발명에 따른 압입시험기(20)는 크게 측정장치(200), 구동 모터(210), 자료 검출부(220), 제어부(230), 고정 부재(240) 및 이동 스테이지부(250)을 구비한다.
- <36> (1) 측정장치
- <37> 상기 측정 장치(200)는 Head 부에서 하중을 가하는 압입자(indenter;202)와 가해진 하중을 측정하는 로드셀(load cell;203) 및 하중 부가시 또는 하중 제거시의 압입자의 변위 측정부(204)를 구비한다.
- <38> 상기 압입자(202)의 헤드 부분은 실제로 데이터를 생성하는 부분으로서 이로부터 재료의 각종 기계적인 물성치를 추정하므로 압입시험기에서 헤드부분의 설계는 무엇보다도 중요하고 가장 핵심적인 부분이라고 할 수 있다.
- <39> 상기 로드셀(203)의 용량은 일반 금속재료의 유한요소해석 데이터를 바탕으로 결정되며, 이에 상응하는 300 kgf를 로드셀의 최대용량으로 선정할 수 있으며, 로드셀의 분해능은 약 5.6gf인 것이 바람직하다.
- <40> 상기 변위 측정부(204)는 선형 엔코더(Linear Encoder)를 사용하며, 그 분해능은 0.05mm인 것이 바람직하다.
- <41> 상기 압입자(202)는 구형 및 Berkovich 압입자를 사용할 수 있으며, 원뿔형 압입자도 사용가능하다. 압입자의 변형으로 인한 시험의 오차를 최소화하기 위하여, 구형 압입자의 경우 탄성계수가 약 550GPa 정도인 텅스텐 카바이드 (WC) 재질을 사용하며, 직경은 1mm인 것이 바람직하다. 또한 압입자와 로드셀로부터 나오는 축 사이에 발생하는 변형 및 공차를 최소화하도록 설계하는 것이 바람직하다.

- <42> (2) 구동 모터
- <43> 상기 구동 모터(210)는 기계적인 이동량을 정밀하게 제어하는 것으로서, 서보 모터나 스텝 모터가 많이 사용되고 있으며, 본 발명에 따른 실시예에서는 AC 서보 모터를 사용한다. 상기 구동 모터의 최대 토오크는 6.5kgfm이, 최대 이송거리는 40mm, 하모닉 감속비 160:1로 설정하여, 압입속도를 0.01-100mm/min까지 광범위하게 조정할 수 있도록 하는 것이 바람직하다. 볼스크류는 축방향 클리어런스가 약 0.005 이하가 되도록 하며, 반복성 및 제어성이 높은 액츄에이터를 구현하는 것이 바람직하다.
- <44> (3) 자료검출부(220) 및 제어부(230)
- <45> 상기 자료 검출부(220)는 신호 증폭부(222), 필터(223) 및 통신인터페이스부(224)를 구비하며, 상기 신호 증폭부는 상기 로드셀과 상기 변위 측정부에서 발생한 신호들을 증폭시키고, 상기 필터는 상기 증폭된 신호들을 필터링한 후, 상기 통신 인터페이스부를 통해 연결된 컴퓨터로 전송한다. 컴퓨터로 전송된 상기 데이터들은 소정의 프로그램을 통하여 실시간 모니터링됨과 동시에 파일로 저장된다. 상기 신호 증폭부의 샘플링 률(sampling rate)은 사용자의 편의와 재료의 특성에 따라 조정이 가능하도록 한다.
- <46> 상기 제어부(230)는 상기 구동 모터(210)의 동작을 제어하는 것이다.
- <47> 한편, 휴대 가능한 소형의 압입시험기의 개발을 위하여 자료검출부(220)와 상기 제어부(230)를 통합해 물리적으로 하나의 Box와 Notebook PC로 구성하며, PC전원을 제외한 모든 전원을 일괄적으로 조절하여 공급함으로써 안정적인 전원의 공급이 가능하도록 하는 것이 바람직하다. 상기 제어부(230)는 상기 PC의 프로그램을 통해서 상기 구동 모터의 작동을 조절가능하지만, 사용자의 편의를 위해 상기 제어부(230)를 통해서도 이동속도 및 방향을 조절 가능하도록 하는 것이 바람직하다. 시험 결과는 시험에서 얻어지는 압입하중-변위 데이터로부터 PC를 이용하여 영률, 항복 강도, 변형 경화지수, 잔류응력 등의 각종 정보를 획득하고 처리한다.
- <48> (4) 고정 부재(240)
- <49> 상기 고정 부재(240)는 본 발명에 따른 압입시험기를 현장에서 사용가능하도록 자석/체인/지그를 포함하는 것이 바람직하다. 이들 부가장치는 실험실 설치용 압입시험기에서 쉽게 탈부착이 가능하도록 설계되는 것이 바람직하다.
- <50> (5) 이동 스테이지부(250)
- <51> 또한 측정시 시편측정 위치의 정밀 조정을 위하여 X-Y 스테이지를 장착하여 10mm 간격으로 미세조정이 가능하다.
- <52> 이하, 전술한 구성을 갖는 본 발명에 따른 잔류 응력 평가 압입시험기의 동작을 구체적으로 설명한다.
- <53> 도 4는 본 발명에 따른 잔류응력 평가 압입시험기의 제어 알고리즘을 나타내는 플로우차트이고, 도 5은 본 발명에 따른 작동 결과를 보여준다.
- <54> 본 발명은 기존 잔류응력 평가이론들의 상술된 문제점을 해결하기 위하여, 다양한 압입 변수들이 잔류응력 평가에 미치는 영향을 유한요소해석에 기초하여 분석, 이를 정량화한 잔류 응력평가 압입이론을 확립한다.
- <55> 도 6는 자기 유사성을 갖는 압입자에 대한 압입형상을 개략적으로 나타낸다. 도 6의 좌측은 압입 시, 도 6의 우측은 해중 후 탄성회복이 일어난 후의 압흔을 보여 준다. 모든 압입자는 제작의 한계와 사용 중 마모 등으로 인해 압입자 선단에 rounding R 이 존재하는데, 반경 R 에 따라 압입 하중-변위 곡선은 민감하게 변화한다. 따라서 선단 반경의 영향을 고려한 압입해석이 수반되어야 하며, 이의 영향을 최소화하는 압입이론을 전개할 필요가 있다.
- <56> 도 7는 Berkovich 압입자에 의한 재료 압입시험을 나타내는 유한요소모델이다. 유한요소해석에는 상용 프로그램 ABAQUS (2004)를 이용하였다. 본 발명에 사용된 모재의 유한요소 모델은 약 18000개의 4절점 축대칭요소들로 구성된다. 압입자는 강체로 가정하였으며, 축대칭 모델에서 Berkovich 압입자와 동일 압입깊이에서 동일한 압입면적이 얻어질 수 있도록 원뿔형 압입자의 각도를 70.32로 설정하였다. 또한 압입자 제작의 한계와 사용 중 blunting 현상에 의해 발생하는 압입자 선단의 rounding 반경 R 을 고려하여 모델링하였다.
- <57> 유한요소해석에서 잔류응력은 초기조건 (Initial Condition, ABAQUS Keyword Manual, 2004)이나 초기변위로 부가할 수 있다. 초기조건을 이용할 경우 초기 잔류응력 값들을 각 방향별로 부여한 후, 이 값들이 잔류응력으로 유지되도록 해당 면의 경계조건을 구속하는 것이 중요하다. 초기변위 이용 시 초기변위에 의한 변형상태에서 압

입이 이루어지는데, 이 때 설정 잔류응력에 상응하는 초기변위량을 사전에 계산해 두어야 한다. 설정된 탄성 및 탄소성 잔류응력을 부가에 필요한 초기변위량을 탄소성이론을 바탕으로 계산해 보았으며, 이 계산과정에서 전개된 식들의 유효성을 FEA를 통해 확인하였다.

<58> 도 8에는 각각 초기변위 (Disp.)와 초기조건 (I.C.)을 유한요소해석에 적용하여 얻은 하중-변위 곡선들이 비교되어 있다. 물성치 $e_0 = 0.002$, $n = 10$ 인 재료에 대하여 각각 재료의 항복강도와 동일한 400MPa의 초기잔류응력을 부가하였다. 도 8에서 볼 수 있듯이 두 방법이 동일한 하중-변위 곡선을 주며, 잔류응력의 크기를 변화시켜도 동일한 해석수치를 얻을 수 있다. 초기조건을 이용할 경우 앞서 전개한 계산과정이 불필요하기 때문에, 본 유한요소 해석에서는 초기 조건을 이용하여 잔류응력을 부가하였다. 도 8을 통해, 하중-변위 곡선의 기울기는 압축잔류응력이 커질수록 증가하며, 인장잔류응력이 커질수록 감소함을 볼 수 있는데, 이는 압축잔류응력이 커질수록 하중방향 응력과 결합된 3축 응력상태로 인한 재료변형 구속정도가 커지기 때문이다.

<59> Berkovich 압입자나 원뿔형 압입자는 압입자 선단에 rounding이 없을 경우(도 6의 가는 점선) 자체 형상에 대한 유사성 (self-similarity)으로 인해 하중 (P)과 변위 (h_i)가 Kick's law $P = Ch_i^2$ 를 따른다(Suresh, S. and Giannakopoulos, A. E.). 그러나 압입자 선단에 rounding이 존재하는 경우 (도 6의 실선) 이와 같은 유사성을 상실하기 때문에, 동일 rounding 선단을 이용한 압입에서 압입 깊이에 따른 잔류응력-압입접촉면적비의 관계를 살펴볼 필요가 있다. 도 9는 무차원화된 잔류 응력과 압입접촉면적비 사이의 관계를 보여 준다. 여기서 A_0 와 A 는 각각 초기 잔류응력이 없을 때와 초기 잔류응력이 있을 때, 해중 후 투영 압입접촉면적을 나타낸다. 도 9의 (a)에서 볼 수 있듯이 주어진 조건에서 압입자 rounding 반경 R (도2)을 이용한 무차원화 방법을 이용할 경우 잔류 응력과 압입접촉면적비 관계에 대한 압입깊이의 영향은 상당히 크다. 따라서 압입깊이에 무관한 무차원 변수를 얻기 위해서는 도 9의 (b)과 같이 압입자의 rounding 반경 R 을 변수에 포함시키지 않아야 한다. 이와 같은 방법을 이용하면 반경 R 에 대해 충분히 큰 압입깊이가 확보될 때 압입자의 rounding에 의한 영향은 무시된다.

<60> 도 10의 (a)는 압입깊이에 따른 압입 시 평균접촉압력 (혹은 경도) 변화를 나타낸 것이다. 여기서 A_{load} 는 하중을 가한 상태에서의 접촉면적을 의미한다. 그림으로부터 초기의 얇은 압입을 지나면서 압입깊이에 관계없이 일정한 평균접촉압력 (≒경도)을 갖게 됨을 확인할 수 있다. 도 10의 (b)에는 실제 잔류응력 계산에 사용되는 해중 후 접촉면적을 이용한 평균접촉압력과 압입 깊이 의 관계를 나타내었다. 도 10의 (a)와 비교해 볼 때 압입 시와 해중 후의 접촉면적은 큰 차이를 나타 내지 않는다. 또한 경도와 압입깊이의 무관성을 확인할 수 있는데, 이는 압입깊이가 증가할수록 압입자 선단의 rounding에 의한 영향이 감소되어 R 의 경도에 대한 영향이 일정 깊이 이상에서 무시되기 때문이다.

<61> 압입깊이의 200%에 해당하는 압입자 선단반경 R 을 갖는 Berkovich 압입자에서 영률 변화에 따른 잔류응력과 압입면적비 관계를 살펴보았다. 도 11은 동일 항복변형률과 변형경화지수를 갖는 재료에서 영률의 변화가 무차원 압입변수들 관계에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 영률의 크기와는 관계없이 항복변형률과 변형경화지수 값이 같다면 동일한 잔류응력-경도 [도 11의 (a)] 및 잔류응력-면적비 [도 11의 (b)] 관계를 나타낸다. 항복변형률 및 변형경화 지수가 같고 영률이 다른 두 재료는 다른 하중-변위 곡선을 갖게 되지만, 하중-변위 곡선의 하중 값을 각각의 영률 혹은 항복강도로 나누면 두 곡선은 완전히 일치함을 확인할 수 있다. 따라서 동일 항복변형률 및 변형경화지수를 갖지만 영률이 다른 두 재료가 있을 때 두 재료의 하중 증감 비와 잔류응력 증감비는 동일하며, 압입면적의 차이는 없다. 즉 동일 항복변형률 및 변형 경화지수 하에서의 영률 변화는 잔류응력-경도 및 잔류응력-면적비 관계에 영향을 주지 않는다. 만일 강체 압입자가 아닌 탄성 변형 압입자를 고려한다면 압입자와 재료의 영률비가 두 재료 대해 다르기 때문에 재료 영률의 영향을 고려해야 하지만, 압입자 영률이 재료 영률보다 상당히 크면 이 영향을 무시할 수 있다.

<62> Suresh, S. and Giannakopoulos, A. E.가 제시한 가정과 압입수식을 바탕으로 이들 관계를 조합하여 다양한 형태의 잔류응력평가 수식을 제시해 보고자 한다. 등축 잔류응력에 대해 Suresh, S. and Giannakopoulos, A. E.가 제시한 수학적 식 1에서 압축잔류응력에 대하여 형상인자 $f_c = 1$ 으로 가정할 경우 수학적 식 3과 같이 정리된다.

수학적 식 3

$$\sigma_R = \frac{P_0 - P}{A}$$

<63>

<64> Suresh, S. and Giannakopoulos, A. E.는 이 식을 그대로 이용하지 않고 접촉면적을 예측하여 잔류응력을 평가

할 수 있는 기법을 제시하였다. 이 때 수학식 4와 같이 재료의 경도가 잔류응력과 무관하다는 가정을 활용하였다.

수학식 4

$$\frac{P}{A} = \frac{P_0}{A_0}$$

<65>

<66> 이 식을 정리하여 수학식 3에 대입하면 수학식 5를 얻을 수 있다.

수학식 5

$$\sigma_R = \frac{P(A_0 - A)}{A^2}$$

<67>

<68> Suresh, S. and Giannakopoulos, A. E.는 수학식 5의 형태를 이용한 잔류응력 예측식을 제시하였다.

<69> 한편 압흔의 면적 A 는 압입깊이 h_t 의 제곱과 비례관계가 있다.

수학식 6

$$A = \alpha_c h_t^2$$

<70>

<71> 이를 수학식 5에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식들을 유도할 수 있다.

수학식 7

$$\sigma_R = \frac{P(A_0 - A)}{\alpha_c^2 h_t^4}$$

<72>

수학식 8

$$\sigma_R = \frac{P(A_0 - A)}{\alpha_c A h_t^2}$$

<73>

<74> 또한 수학식 3에 수학식 6을 대입하여 정리하면 다음과 같은 수학식 9를 얻게 된다.

수학식 9

$$\sigma_R = \frac{P_0 - P}{\alpha_c h_t^2}$$

<75>

<76> 이상과 같이 수학식 3과 경도 불변성, 접촉면적과 압입깊이의 관계를 이용하여 기초식과 동일한 가정 하에서 잔류응력과 다양한 형태의 압입변수의 관계를 유도하였다. 이들 각 수식의 유효성을 유한요소해석을 통해 검증, 최적의 함수형태를 찾아본다.

<77> 압입시험을 통한 잔류응력 예측에는 앞서 제시한 바와 같이 수학식 3, 5, 7 내지 9 등을 이용할 수 있다. 도 12는 Suresh, S. and Giannakopoulos, A. E.가 이용한 하중편차로부터 잔류응력을 예측할 경우, 즉 인장 및 압축 잔류응력에 관계없이 수학식 3을 사용할 때 잔류응력과 압입하중, 압입접촉면적의 관계를 보여 준다. 각 재료 항복강도의 0, 0.5, 1, 1.5배의 크기로 잔류응력을 가하였으며, 1.5배의 경우 초기조건에 잔류응력과 이에 대응하는 소성변형률도 함께 부가하였다. Suresh, S. and Giannakopoulos, A. E.는 수학식 3을 탄성잔류응력에 대해서만 사용하였으며, 그림에서도 볼 수 있듯이 예측치와 소성 잔류응력값은 상당한 차이를 나타낸다. 또한 그들은 압축잔류응력에 대하여 별도의 수학식 2를 사용하였으나, 이 경우를 가정하더라도 도 12의 압축잔류응력에 대한 분포를 줄일 수 없으며, $n = 3$ 인 재료의 형상함수는 $\sin \alpha$ 보다 1에 가깝다. 또한 도 12로부터 탄성잔류응력에 대해서도 물성치에 따라 예측 잔류응력 사이의 편차가 심하게 발생됨을 볼 수 있는데, 특히 변형경화지수가 큰 재료에서 그 차이가 크다.

<78> 도 13은 앞서 제시된 수학식 5와 수학식 7 내지 9를 이용한 잔류응력과 압입변수의 관계를 살펴본 것이다. 종축과 횡축 모두 항복강도를 이용하여 무차원화하였는데, 이를 통해 항복강도에 대한 잔류 응력의 상대 크기에 따른 특성을 명확히 분석할 수 있다. 또한 종축과 횡축의 관계를 선형으로 가정할 경우 잔류응력 예측식은 항복강도의 함수가 되지 않는 장점을 지닌다. 여기서 도 13의 (c)의 무차원 방법이 잔류응력 측정 시 물성치에 따른 편차가 가장 적다고 판단되어 이들 관계를 1차 회귀하여 도 13의 (c)에 나타내었다. 이 때의 함수식은 아래와 같으며, 이로부터 구한 예측 잔류 응력들을 표 1에 나타내었다.

수학식 10

$$\sigma_R = 0.0543 \frac{P(A_0 - A)}{A n^2}$$

<79>

<80> 이 식은 잔류응력의 크기 및 방향, 탄성/탄소성 잔류응력, 압입깊이, 재료물성치 등과 관계없이 범용으로 사용될 수 있는 장점이 있다. 주어진 물성에서 계산되는 잔류응력의 최대오차는 약 50%, 평균오차는 약 17%이다.

표 1

σ_R / σ_0 ($\sigma_0=200$ MPa)	$\sigma_0 = 0.001, n = 3$		$\sigma_0 = 0.001, n = 10$	
	Predicted σ_R / σ	Error (%)	Predicted σ_R / σ	Error (%)
-1.5	-1.83	22	-1.33	12
-1.0	-1.07	7.2	-0.52	48
-0.5	-0.71	42	-0.35	30
0.5	0.36	29	0.51	2.4
1.5	1.01	1.3	1.00	0.4
1.5	1.33	12	1.04	31

σ_R / σ_0 ($\sigma_0=400$ MPa)	$\sigma_0 = 0.002, n = 3$		$\sigma_0 = 0.002, n = 10$	
	Predicted σ_R / σ	Error (%)	Predicted σ_R / σ	Error (%)
-1.5	-1.51	0.5	-1.36	93
-1.0	-1.02	1.9	-0.75	25
-0.5	-0.51	2.3	-0.46	7.2
0.5	0.50	0.3	0.60	20
1.5	1.21	21	1.26	26
1.5	1.61	7.6	1.30	13

σ_R / σ_0 ($\sigma_0=800$ MPa)	$\sigma_0 = 0.004, n = 3$		$\sigma_0 = 0.004, n = 10$	
	Predicted σ_R / σ	Error (%)	Predicted σ_R / σ	Error (%)
-1.5	-1.20	20	-1.24	17
-1.0	0.77	23	-0.75	25
-0.5	-0.38	23	-0.39	21
0.5	0.38	24	0.60	20
1.5	1.29	29	1.24	24
1.5	1.62	8.1	1.43	4.5

<81>

<82> 한편 Suresh, S. and Giannakopoulos, A. E.는 소성잔류변형률 계산 시 압입접촉면적의 비를 이용하였다. 이때 압입접촉면적은 해중 기울기와 상관관계를 갖는다. 수학식 11은 이들이 사용한 압입접촉면적과 해중 기울기의 관계를 나타낸다.

수학식 11

$$A = \left(\frac{S}{C_w E_r} \right)^2$$

<83>

<84> 여기서 S는 해중 기울기, C_w 는 압입자 형상의 함수로 Berkovich 압입자의 경우 약 1.167이다. 본 발명의 유한요소 해석에서는 강체 압입자로 가정하였기 때문에 감쇄 영률 E_r 은 $E/(1-n^2)$ 이다. 따라서 수학식 11은 수학식 12와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 12

$$A = C_w^* \left(\frac{S}{E} \right)^2$$

<85>

<86> 수학식 12를 수학식 10에 대입하면 다음과 같은 수학식 12을 얻는다.

수학식 13

$$\sigma_R = 0.0543 \frac{P(S_0^2 - S^2)}{S^2 h^2}$$

<87>

<88> 수학식 13의 장점은 해중 후 압입접촉면적을 측정하지 않고도 압입 하중-변위 곡선만으로 잔류응력을 예측할 수 있다는 것이다. 그러나 도 13의 (c)에 비해 변수들이 물성치와 잔류응력 크기에 따라 불규칙적으로 분포함을 도 14에서 확인할 수 있다. 이는 수학식 12의 계수 C'' 가 재료물성 및 잔류응력 크기와 상관관계를 갖기 때문으로 분석된다.

<89> 앞서 살펴본 바와 같이 재료물성과 잔류응력에 따라 재료의 경도는 민감하게 변화하며, 이로부터 잔류응력과 경도의 무관성의 가정에 근본적인 문제점이 있음을 확인할 수 있다. 본 발명에서는 다양한 압입변수들이 잔류응력 평가에 미치는 영향을 유한요소해에 기초하여 분석, 이를 정량화한 잔류응력평가 압입수식을 제시해 보고자 한다.

<90> 먼저 재료의 탄성변형은 잔류응력의 영향을 받지 않기 때문에, 재료물성에 따른 탄성변형량은 잔류응력평가의 민감도에 상당한 영향을 줄 수 있다. Suresh, S. and Giannakopoulos, A. E.도 탄성 변형률이 소성변형률보다 매우 작을 경우를 가정하여 ($E/s_0 > 150$) 경도가 불변함을 설명했으나 이를 정량화하지는 못했다. 잔류응력 평가에 미치는 또 다른 요인으로 pile-up /sink-in 현상을 생각 해 볼 수 있다. 재료의 pile-up/sink-in 정도가 다른 두 재료를 동일한 압입깊이로 압입할 경우 변형 형상뿐만 아니라 압입하부 구속상태 등도 달라진다. 뿐만 아니라 잔류응력 크기에 따라서도 재료의 pile-up/sink-in 정도가 바뀌게 되며, 그 정도에 따라 하중 증가량과 면적 증가량은 변화한다.

<91> 도 16의 (a)는 탄성잔류응력이 존재할 때 해중 후 압입접촉면적 A 와 pile-up/sink-in 영향을 고려하지 않은 이상적 압입면적 A_i 의 비 A/A_i 가 잔류응력 평가식 3에 미치는 영향을 보여 준다. 잔류 소성 변형률과 잔류응력이 동시에 존재하는 경우, 즉 잔류응력에 의해 소성변형이 야기된 경우에는 데이터 분포 스펙트럼이 크게 증가하여 본 그림에서는 탄성잔류응력에 대한 분포만 나타내었다. 이는 소성변형에 의해 재료가 경화되어 재료물성치 자체가 변화한다고 볼 수 있기 때문이다. 이 경우에 대해 하중 편차로 잔류응력을 예측하기 위해서는 잔류응력은 존재하지 않고 잔류 소성 변형률만이 존재할 때를 무잔류응력 상태로 놓고 평가하여야 한다.

<92> 도 17의 (a)에서 $A/A_i \approx 0.9$ 근처를 제외하면 예측 잔류응력과 실제 잔류응력의 비가 1이 아님을 볼 수 있다. 또한 pile-up이 일어날수록 ($A/A_i > 1$) 실제 잔류응력보다 작은 잔류응력이 계산되며, sink-in이 일어나면 ($A/A_i < 1$) 실제보다 큰 잔류응력이 계산된다. 즉 pile-up이 일어나면 접촉면적은 증가하지만 압입으로 인한 부피감소량이 줄어들어 잔류응력의 영향도 감소하게 된다. 이러한 현상은 항복변형률 $e_0 = 0.01$, 변형경화지수 $n = 3$ 인 재료를 제외하면 대체로 일관되게 발생된다.

<93> 도 17의 (b)는 소성압입깊이를 이용한 잔류응력과 압입면적의 관계를 나타낸다. 여기서 h_p 는 해중 후 압흔의 압입깊이, 즉 총 압입깊이 h_t 에서 탄성회복량을 뺀 깊이로 압입시험의 하중-변위 곡선에서 얻을 수 있다. 항복변형률 $e_0 = 0.01$, $n = 3$ 인 경우 도 17의 (a)보다 (b)가 잔류응력과 면적의 관계를 일관성 있게 보여 준다. 도 17의 (a)에서 $e_0 = 0.01$, $n = 3$ 인 재료는 가장 많은 sink-in이 예상되기 때문에 다른 재료보다 큰 예측잔류응력을 계산하여야 하지만, 항복변형률이 클수록, 그리고 변형 경화지수가 감소할수록 재료의 탄성변형량은 증가하여 예상보다 작은 하중 증가량을 갖게 된다.

<94> 이와 같은 관계를 도 18에서와 같이, 압입접촉면적 뿐만 아니라 압입접촉직경에 대해서도 살펴보았다. 압입접촉 직경과 압입접촉면적은 제곱관계에 있으므로 역시 동일한 경향을 나타낸다. 이와 같이 압입변수들과 압입접촉직경 [도 18의 (a)], 압입접촉면적 [도 18의 (b)]의 관계를 회귀해 보았다. 압입 변수들과 압입접촉직경의 관계는 직선에 가까워 도 18의 (a)는 1차 다항함수로 회귀하였으며, (b)는 3차 다항함수로 회귀하였다. 따라서, 도 15의 관계로 얻은 잔류응력평가식은 수학식 14와 같다.

수학식 14

$$\sigma_{\text{R}} = \frac{(P_0 - P)h}{Ah_p f(d/d_p)}$$

<95>

수학식 15

$$\sigma_{\text{R}} = \frac{(P_0 - P)h}{Ah_p f(A/A_p)}$$

<96>

<97>

수학식 14와 15를 이용한 예측잔류응력과 실제 잔류응력의 관계를 도 19에 나타내었다. 이 식들로부터 평균 5%, 최대 25% 오차 이내에서 잔류응력을 예측할 수 있다. 그러나 이 방법을 이용하기 위해서는 이상적 접촉면적 A_c 를 예측하여야 하며, 이 때 압입자 팁의 반경 R 을 알아야 한다. 만약 이상적 접촉면적이 제대로 예측되지 않으면 도 18에서 볼 수 있는 바와 같이 접촉 면적의 비가 커질수록 종축의 값들이 1 이하로 감소하기 때문에, pile-up 현상이 지배적인 재료는 횡축 변화에 따라 예측 잔류응력의 오차는 상대적으로 크게 증가할 수 있다. 반면 sink-in 현상이 지배적인 재료는 횡축의 변화가 잔류응력 예측에 큰 영향을 미치지 않는다.

<98>

앞서서는, 압입시험으로 얻어지는 압입변수들인 하중, 압입깊이, 압입접촉면적, 기울기 등을 이용한 잔류응력 예측 방법을 제시하였다. 그러나 이러한 압입변수들 중 압입접촉면적은 측정이 매우 까다롭기 때문에 실제 많은 압입시험 연구에서 압입접촉면적을 직접 측정하지 않고 예측 수식을 이용하고 있다. 특히 나노 압입시험의 잔류응력 평가의 경우 접촉면적 및 이상적 압입면적을 측정 또는 예측하는 것은 매우 어렵다. 압입접촉면적을 이용하지 않는 대신, pile-up/sink-in, 탄성 변형 량에 영향을 미치는 재료물성치를 직접 이용한 압입수식을 제시해 봄으로써, 압입시험의 응용 범위를 다양화하고자 한다. 이 때 Berkovich 압입자 등과 같은 자기 유사형상 (self-similar geometry)을 갖는 압입자를 이용해서는 물성평가가 어렵기 때문에 구형 압입시험 등을 사용하여 재료물성을 미리 확보한 상태를 가정하고, 이들 물성치와 압입 변수, 잔류응력의 관계를 살펴보도록 한다.

<99>

자기 유사성을 갖는 압입자에서는 Kick's law가 성립한다. 그러나 압입자 선단의 rounding R 은 이러한 자기 유사성을 깨뜨리므로 R 의 영향을 배제시킨 상태에서 잔류응력 평가식을 나타내어야 한다. 압입자 선단의 반경 R 에 의해 동일 압입깊이에서 발생하는 압입깊이의 차를 h_d 라고 놓으면 [도 6], h_d 와 R 은 수학식 16과 같은 관계를 갖는다.

수학식 16

$$h_d = R \left(\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right)$$

<100>

<101>

여기서 θ 는 대칭축과 압입자 사이의 각도이다. 이 때 Kick's law를 이용한 하중과 압입깊이의 관계는 수학식 17과 같이 표현할 수 있다.

수학식 17

$$P = C(h_i + h_d)^2$$

<102>

<103>

압입초기에는 rounding R 영향이 지배적이어서 위 식이 성립되지 않지만, 압입이 진행되면서 R 영향이 감소하며 자기 유사성에 의한 수학식 17이 하중-변위 곡선의 특성을 지배하게 된다.

<104>

도 20은 원뿔형 압입자 선단 R 의 변화에 따른 C 와 하중-변위 곡선의 회귀 구간 h_i 의 관계를 보여 준다. 여기서 h_i 는 최초 회귀지점의 압입깊이를 의미하며, 회귀에는 h_i 부터 총 압입깊이 h_t 까지의 하중-변위 데이터를 이용하게 된다. 따라서 횡축의 h_i 가 증가할수록 회귀구간은 감소한다. 초기 회귀지점 h_i 가 총 압입깊이 h_t 의 40-50% 이상이면 C 는 특정값에 수렴함을 볼 수 있다. 즉 최종 압입깊이가 압입자 반경의 반 이상인 경우 최종 압입깊이의 40-50% 이상 구간을 회귀하면 압입자 반경의 영향을 완전히 무시할 수 있다. $h_i/R = 0.5$ 인 경우 pile-up/sink-in 영향을 무시한 상태에서 접촉직경을 압입깊이로 환산하면 h_i 는 약 25%라고 할 수 있다. 따라서, $h_i/h_t = 0.5$

로 설정하여 C 를 계산한다.

- <105> 이와 같이 잔류응력 예측에 있어 하중값을 이용하는 것보다 C 를 이용하는 것이 압입자 선단 반경 R 영향을 줄일 수 있으며, 재료물성치와 잔류응력 변화에 따른 C 의 변화량을 미리 알고 있다면 압입 접촉 면적을 측정하지 않고도 잔류응력 예측이 가능하다. 수학적 식 17의 C 가 응력과 동일한 차원을 갖게 되는 것에 착안하여 수학적 식 18과 같은 무차원함수를 제시하고자 한다.

수학적 식 18

$$\frac{\sigma_z}{\sigma_0} = f\left(\frac{C_0 - C}{\sigma_0}, \varepsilon_0, n\right)$$

<106>

- <107> Suresh, S. and Giannakopoulos, A. E.의 잔류응력 예측식은 하중편차를 변형 후 면적으로 나눈 것이며, 수학적 식 18의 압입변수 C_0 . C 는 R 이 0인 경우를 가정할 때, 수학적 식 19와 같이 하중편차를 압입깊이의 제곱으로 나눈 형태로 볼 수 있다.

수학적 식 19

$$C_0 - C = \frac{P_0 - P}{h^2}$$

<108>

- <109> 앞서서는 하중의 변화량과 압입면적의 변화량과의 관계는 재료물성에 따라 민감하게 변화함을 보았다. 따라서 두 변화량 중 하중편차만을 이용함으로써 상호 연관성에 의한 복잡성을 제거하는 대신 구형압입시험 등으로 평가가 가능한 재료물성치를 사용하는 것이 수학적 식 18의 특성이라 할 수 있다. 또한 이와 같은 압입변수를 이용하면 압입자 선단의 rounding의 영향을 무시할 수 있다는 장점이 있다.

- <110> 수학적 식 18에서 설정된 함수를 바탕으로 재료물성치와 Kick's law의 계수 C , 그리고 잔류응력의 관계를 살펴보았다. 도 21은 물성변화에 따른 잔류응력과 C 의 관계를 보여 준다. 여기서 C 는 압입깊이의 50 ~ 100% 사이에서 측정되는 하중-변위 데이터를 회귀한 것이다. 이들 관계를 살펴보기 위하여 잔류응력 5가지, 항복변형률 7가지, 변형경화지수 7가지 경우에 대한 해석 (총 해석 개수 $5 \times 7 \times 7 = 245$ 개)을 수행하였으며, 이들 물성치에 대하여 잔류응력과 C 의 관계를 회귀하였다. 회귀방법은 종래의 구형압입에서 사용한 압입변수의 회귀방법과 동일하다. 먼저 잔류 응력과 C 편차의 관계식은 반드시 원점을 지나야 하기 때문에 상수항이 0인 함수 형태로 회귀한다. 다시 각 항복변형률에서 변형경화지수에 따른 계수들의 변화를 변형경화지수의 함수로 회귀하고, 이들 계수와 항복변형률 관계를 회귀한다. 최종 통합함수는 수학적 식 20과 같다. 이 식에서 사용한 회계함수 계수를 표 2에, 회계함수 곡선은 도 22에 나타내었다.

수학적 식 20

$$\frac{\sigma_z}{\sigma_0} = f_i^{\varepsilon_0}(\varepsilon_0, n) \left(\frac{C_0 - C}{\sigma_0} \right)^j$$

<111>

- <112> $f_i^{\varepsilon_0}(\varepsilon_0, n) = \alpha_{ij}(\varepsilon_0) n^{-j}$; $i = 1, 2, j = 0, 1, 2, 3, 4$

<113>

$$\alpha_{ij}(\varepsilon_0) = \beta_{ijk} \varepsilon_0^k ; k = 0, 1, 2, 3$$

표 2

구 분	i = 0			
	k = 0	k = 1	k = 2	k = 3
j = 0	2.143e-1	-7.796e+1	1.182e+4	-5.679e+5
j = 1	-1.241e+0	5.776e+2	-8.732e+2	4.222e+6
j = 2	3.654e+0	-1.765e+3	2.722e+5	-1.332e+7
j = 3	-5.172e+0	2.538e+3	-3.978e+5	1.973e+7
j = 4	2.780e+0j=4	-1.359e+3	2.177e+5	-1.091e+7

구 분	i = 1			
	k = 0	k = 1	k = 2	k = 3
j = 0	-9.067e-3	4.348e+0	-6.879e+2	3.403e+4
j = 1	8.136e-2	-4.169e+1	6.677e+3	-3.339e+5
j = 2	-2.789e-1	1.485e+2	-2.425e+4	1.229e+6
j = 3	4.217e-1	-2.304e+2	3.826e+4	-1.961e+6
j = 4	-2.337e-1	1.300e+2	-2.190e+4	1.131e+6

<114>

<115> 도 23은 다양한 물성치에 대한 실제 잔류응력과 예측잔류응력의 관계를 나타낸 것이다. 수학식 20으로부터 계산되는 잔류응력은 모든 범위의 물성치에 대해 평균 약 5% 정도의 오차 범위를 갖는다. 이 방법은 앞서 언급한 바와 같이 해중 후 압흔의 직경을 측정하지 않아도 잔류응력평가가 가능하기 때문에, 물성치를 알고 있을 경우 상당히 유용하게 사용될 수 있다.

<116> 수학식 20으로부터 잔류응력을 계산하기 위해서는 잔류응력이 없는 상태의 C_0 를 알고 있어야 한다. 이와 같은 별도의 시험으로 인한 오차 누적 및 잔류응력이 없는 시편 확보의 어려움을 제거하기 위하여 재료물성치와 C_0 의 상관관계를 살펴보고, 이로부터 잔류응력이 없을 때의 C_0 예측 수식을 제시해 보고자 한다. 도 23은 유한요소해석으로부터 얻은 다양한 변형경화지수와 항복 변형률에 대한 C_0 와 재료물성치의 관계를 나타내고 있다. 이들 관계를 회귀하면 수학식 21과 같은 다항 식 형태로 나타낼 수 있으며, 이들로부터 계산되는 회귀곡선을 도 24에 나타내었다.

수학식 21

<117>
$$\frac{C_0}{E} = f_i^C(\epsilon_0) n^{-j}$$

<118>
$$f_i^C(\epsilon_0) = \gamma_{ij} \epsilon_0^{-j} ; \quad i = 0, 1, 2, 3 \quad j = 0, 1, 2, 3$$

<119> 수학식 21을 이용하면 재료물성치로부터 C_0 를 계산할 수 있으며, 따라서 재료물성치를 알고 있는 경우 잔류응력이 존재하지 않을 때의 C_0 를 얻기 위한 별도의 압입시험 없이 수학식 20을 이용한 잔류 응력 평가가 가능하다. 수학식 21에서 사용한 회계함수 계수를 표 3에, 회계함수 곡선은 도 25에 나타내었다.

표 3

구 분	j = 0	j = 1	j = 2	j = 3
i = 0	-4.300e-3	1.116e+2	-6.630e+3	2.275e+5
i = 1	3.590e-1	6.039e+1	-2.043e+3	-6.216e+4
i = 2	-6.629e-1	6.654e+2	-1.021e+5	4.843e+6
i = 3	2.339e+0	-8.162e+2	1.075e+5	-4.849e+6

<120>

<121> 하지만, 일반적으로 재료에 발생하는 잔류응력은 양측으로 동일한 크기의 잔류응력이 작용하지 않는 경우가 많다. 그러나 양측등가가 아닌 상태의 잔류응력은 원뿔형, Berkovich, Vickers 압입자로 평가가 매우 어렵다. 이에 한 축의 잔류응력을 무시할 수 있는 경우, 즉 일축잔류응력 (uni-axial)일 경우와 양축잔류응력 상태의 비율 알고 있는 경우에 대해 잔류응력을 예측하는 기술을 제시하고자 한다.

<122> 일축잔류응력이 작용하는 경우 이를 양축잔류응력으로부터 예측하는 방법은 다음과 같다. 먼저 잔류응력이 없는 상태의 계수 C_0 를 측정 혹은 앞서 제시한 방법으로부터 물성치들을 이용하여 예측하고, 일축잔류응력이 작용하는

상태에서 Kick's law의 계수 C^{Uni} 를 측정한다. 앞의 그림을 바탕으로 계수 C 사이에는 대략적으로 수학적 식 22와 같은 관계를 갖는다.

수학적 식 22

$$U_{\text{uni}}C = \frac{E_{\text{uni}}C + C_0}{2}$$

<123>

즉 일축잔류응력이 작용할 때 C^{Uni} 는 동일 크기의 양축잔류응력이 작용할 때 C^{Equi} 와 잔류 응력이 없을 때 C_0 의 중간값 (혹은 평균값)이다. 예를 들어 한 방향으로만 -200MPa의 잔류응력이 존재할 때의 Kick's law의 계수를 C^{Uni} 로 놓으면, 양방향으로 -200MPa이 작용하는 경우의 계수는 C^{Equi} 가 된다. 수학적 식 22로부터 C^{Equi} 는 수학적 식 23과 같이 계산된다.

수학적 식 23

$$E_{\text{uni}}C = 2 \cdot U_{\text{uni}}C - C_0$$

<125>

예측한 C^{Equi} 로부터 잔류응력을 예측시에는 앞서 양축등가 잔류응력평가방법에 사용한 수학적 식 24를 이용한다.

수학적 식 24

$$\frac{\sigma_{\text{R1}}}{\sigma_0} = f\left(\frac{C_0 - E_{\text{uni}}C}{\sigma_0}, \epsilon_0, n\right)$$

<127>

수학적 식 24로부터 계산되는 σ_{R1} 이 일축에 작용하는 잔류응력이 된다.

<128>

반면, 양축에 영이 아닌 서로 다른 크기의 잔류응력이 작용하고 양축 사이의 잔류응력의 비를 알고 있는 경우 잔류응력을 예측하는 방법은 다음과 같다. 먼저 양축에 작용하는 잔류응력을 각각 σ_{R1} , σ_{R2} 로, 이 두 잔류응력의 비 $\sigma_{\text{R1}}/\sigma_{\text{R2}}$ 를 a 로 설정한다. 잔류응력이 작용하는 경우 압입시험으로부터 하중-변위 곡선을 얻고 이로부터 Kick's law의 계수 C^{Bi} 를 얻는다. 이때 얻은 C^{Bi} 값은 양축등가 응력 일 때의 값이 아니므로 이를 각각 양축등가 응력값으로 변환한다. 이 변환을 위하여 수학적 식 25와 같은 가정을 사용한다.

수학적 식 25

$$C^{Bi} = \frac{E_{\text{uni}}C_1 + E_{\text{uni}}C_2}{2}$$

<130>

즉, 측정된 계수 C^{Bi} 로부터 두 개의 양축등가상태의 계수 C^{Equi}_1 , C^{Equi}_2 를 얻는다. 이 때 즉 각각의 C^{Equi}_1 , C^{Equi}_2 는 각축에 작용하는 일축잔류응력값이 양축등가잔류응력으로 작용할 때의 Kick's law 계수들이다. 예를 들어 각 방향으로 -200MPa과 -100MPa의 잔류응력이 작용하는 경우, C^{Equi}_1 와 C^{Equi}_2 는 양축등가잔류응력이 각각 -200MPa과 -100MPa이 작용하는 두 경우에 대해 예상되는 Kick's law의 계수들이다. 수학적 식 25의 C^{Equi}_2 가 C_0 , 다시 말해서 한 방향 잔류응력이 영이면 C^{Bi} 는 C^{Uni} 이 되며, 따라서 수학적 식 25는 수학적 식 22를 일반적인 잔류응력으로 확장한 형태로 볼 수 있다. 그러나 단축잔류응력이 작용하는 경우 C_0 를 알고 있기 때문에 한 번의 계산으로 잔류응력 예측이 가능하나, 일반적인 양축잔류응력상태에서는 반복 계산으로부터 잔류응력을 예측해야 한다. 따라서 미지수 C^{Equi}_1 , C^{Equi}_2 로부터 잔류응력 σ_{R1} , σ_{R2} 를 구하기 위하여 다음과 같은 과정을 거친다. 먼저 C^{Equi}_1 의 초기값 C^{Equi}_1 을 측정치인 C^{Bi} 로 가정한다. C^{Equi}_1 에 미소편차 ΔC 를 더하고, C^{Equi}_2 는 수학적 식 25를 이용하여 계산한다.

수학적 식 26

$$\begin{aligned} E_{11}^m C_1 &= E_{00}^m C_1 + \Delta C \\ E_{11}^m C_2 &= 2 B_i C - E_{11}^m C_1 \end{aligned}$$

<132>

<133> 수학식 26으로 계산된 $E_{11}^m C_1, E_{11}^m C_2$ 값을 수학식 24에 각각 대입하여 잔류응력 σ_{R1}, σ_{R2} 를 예측한다. 예측된 잔류응력의 비 σ_{R1}/σ_{R2} 와 a 의 오차를 비교하여 그 오차에 따라 $E_{11}^m C_1$ 값에 미소편차 ΔC 를 가감하며 반복 계산한다. 최종 목표한 오차 이내에 잔류응력비가 계산되면 각각의 잔류응력 값들을 최종 각 방향 잔류응력값으로 선정한다.

산업이용 가능성

<134> 본 발명에 따른 잔류응력 평가 압입시험기는 금속, 박막 및 고무 등의 물성 평가에 이용되는 시험기로서, 작은 시험편으로도 시험이 가능하고 특히 현재 사용중인 부위의 특성을 평가하는데도 유용하게 사용된다.

도면의 간단한 설명

<135> 도 1은 종래의 압입시험기의 일예를 나타내는 구성도이다.

<136> 도 2는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 압입시험기를 전체적으로 도시한 구성도이며, 도 3은 도 2의 압입시험기의 수직 방향에 대한 단면도이다.

<137> 도 4는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 압입시험기의 제어부에서 실행되는 제어 알고리즘을 순차적으로 나타내는 플로우차트이다.

<138> 도 5은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 압입시험기의 작동 결과를 나타내는 화면상태도이다.

<139> 도 6는 자기 유사성을 갖는 압입자에 대한 압입형상을 나타내는 도식도이다.

<140> 도 7는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 압입시험기에 사용한 Berkovich 압입자에 의한 재료 압입시험을 나타내는 유한요소모델이다.

<141> 도 8 내지 도 25는 본 발명에 따른 알고리즘을 정립하는 과정에서의 실험 결과를 나타내는 그래프이다.

<142> <도면의 주요부분에 대한 부호의 설명>

<143> 20 : 잔류응력 평가 압입시험기

<144> 200 : 측정 장치

<145> 210 : 구동 모터

<146> 220 : 자료 검출부

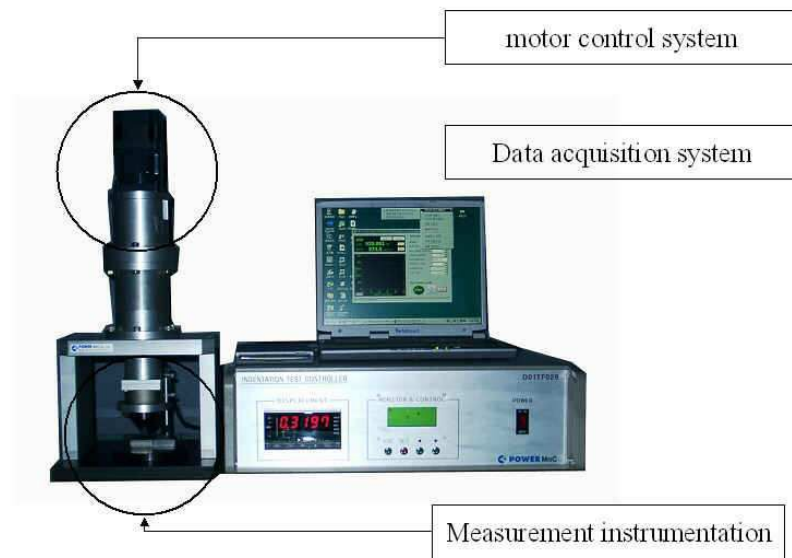
<147> 230 : 제어부

<148> 240 : 고정 부재

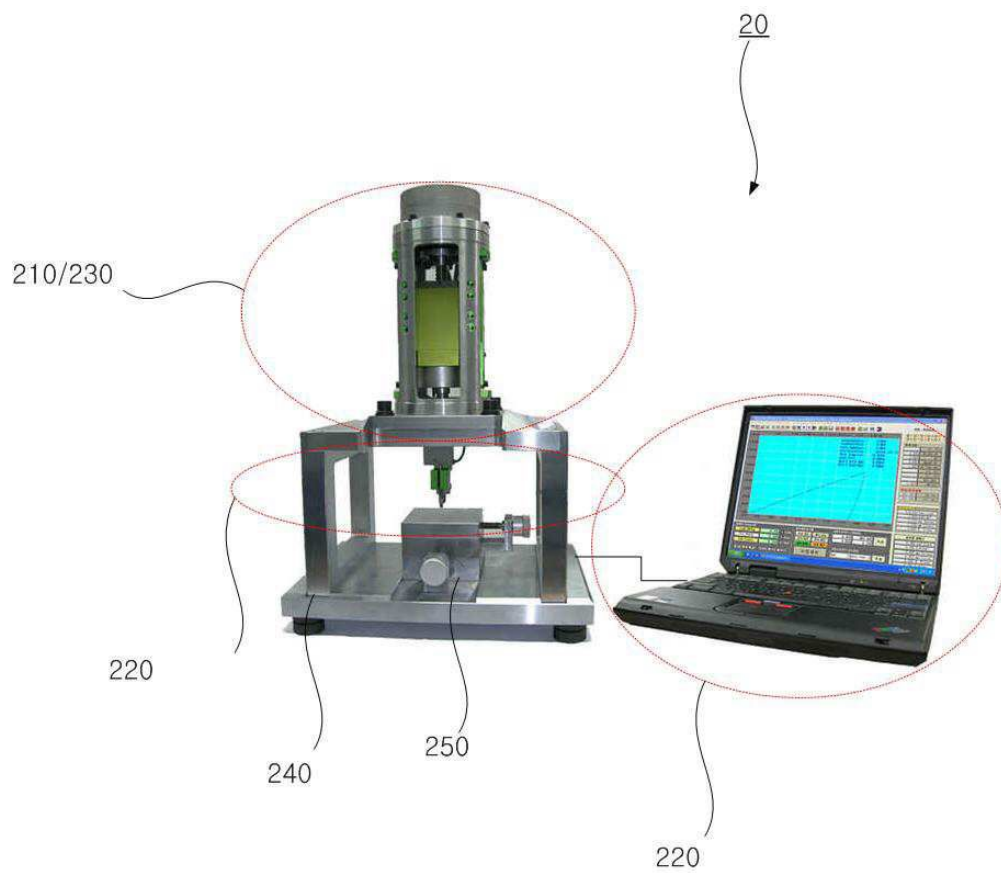
<149> 250 : 이동 스테이지부

도면

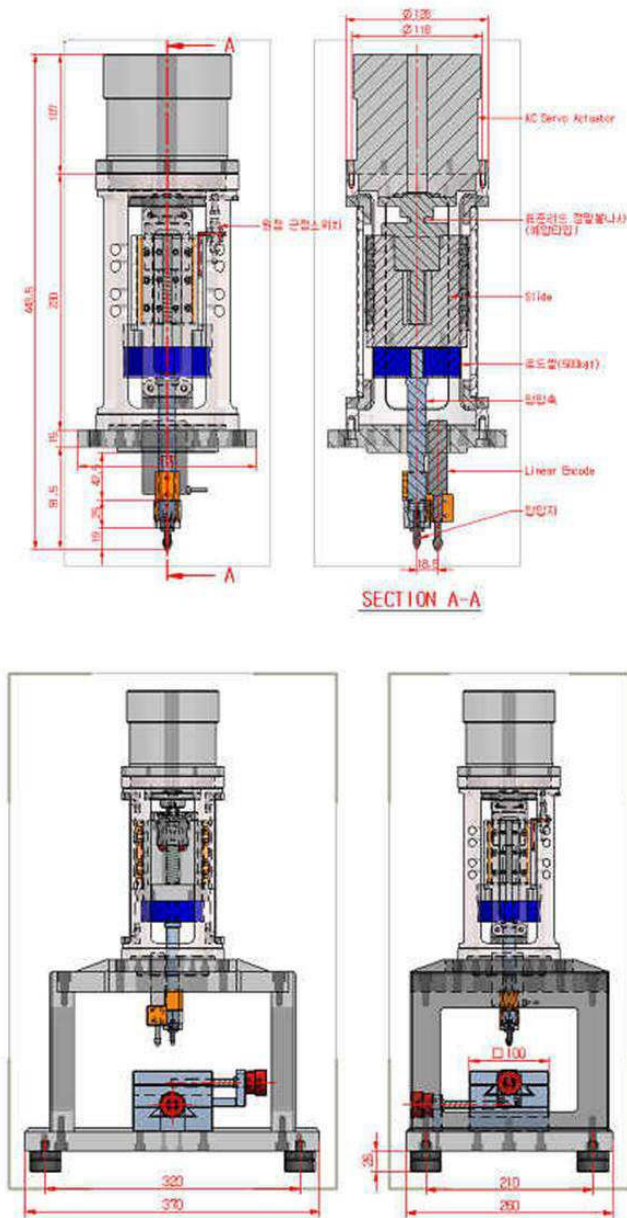
도면1



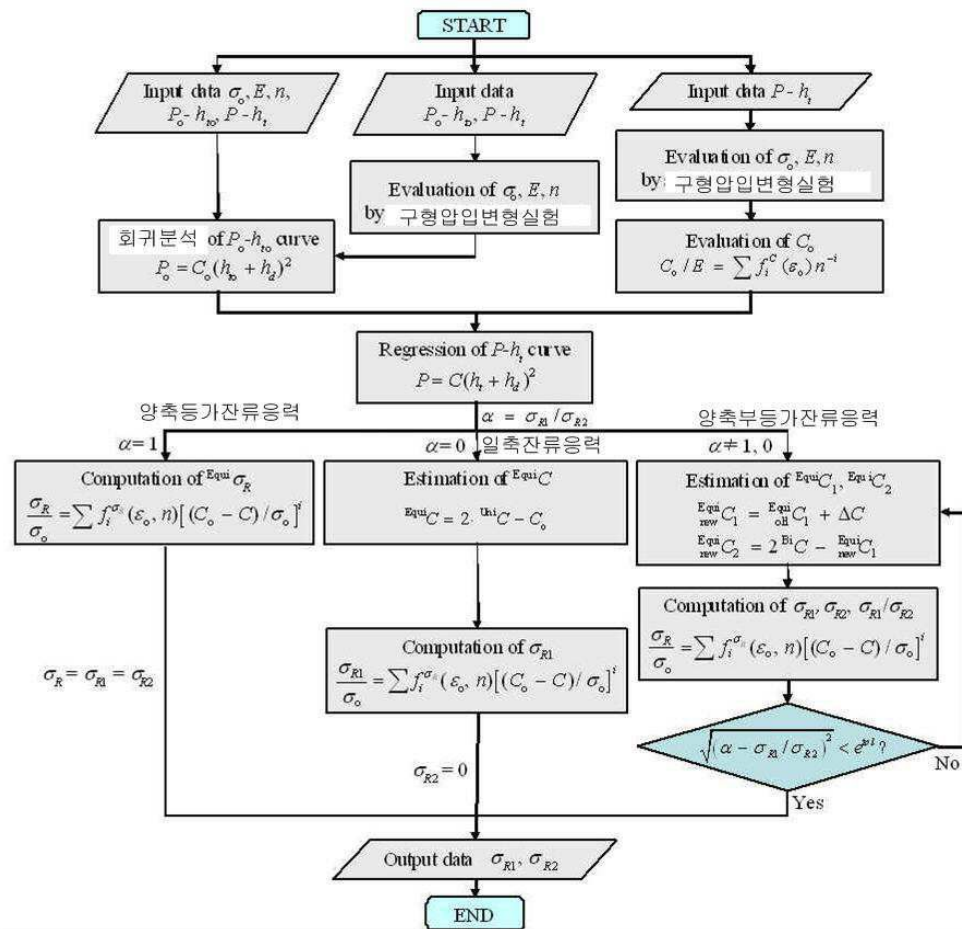
도면2



도면3



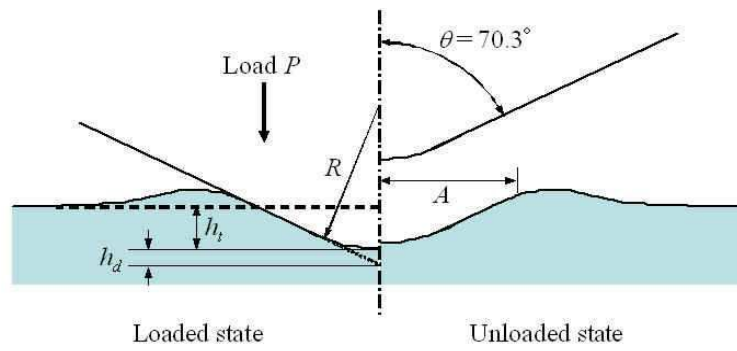
도면4



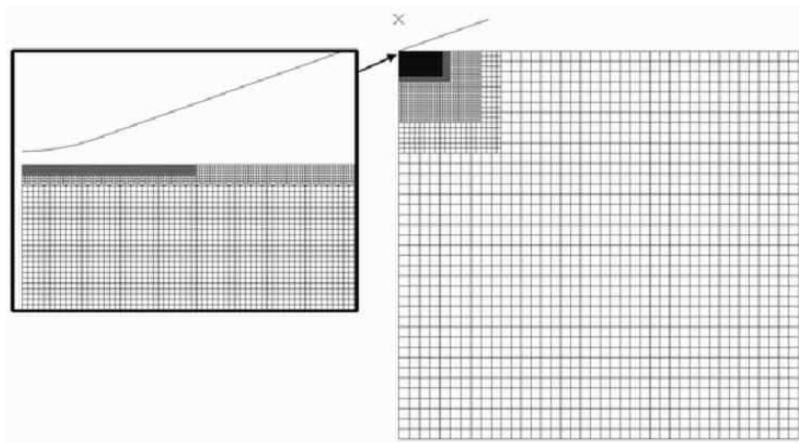
도면5



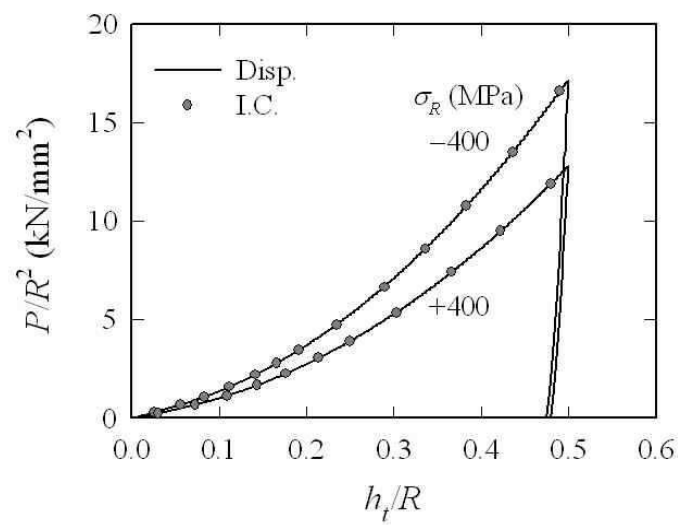
도면6



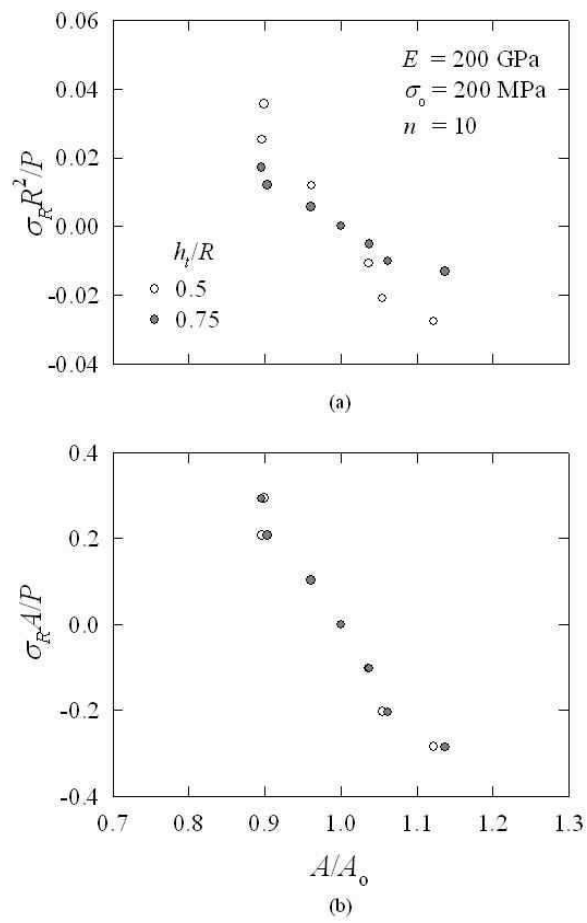
도면7



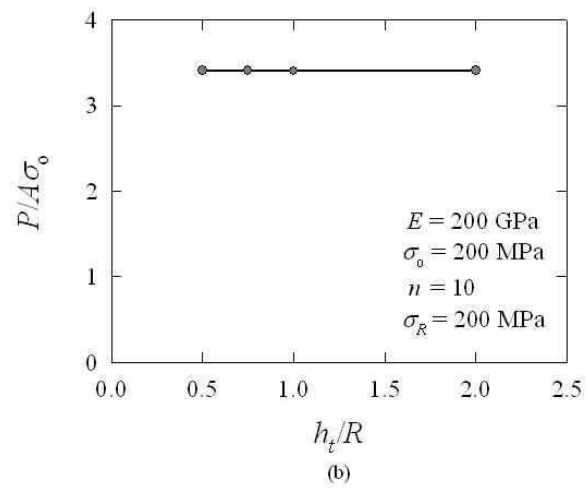
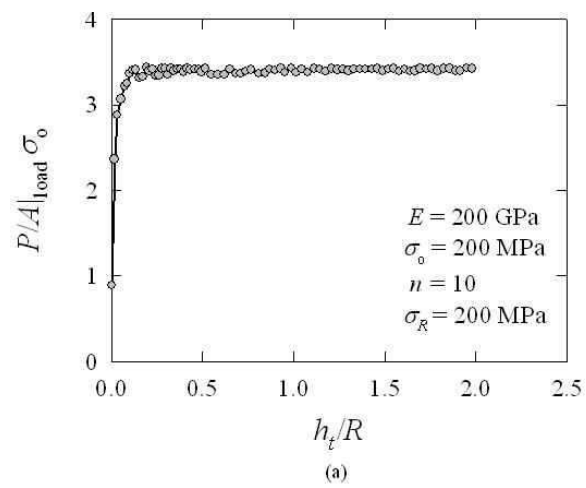
도면8



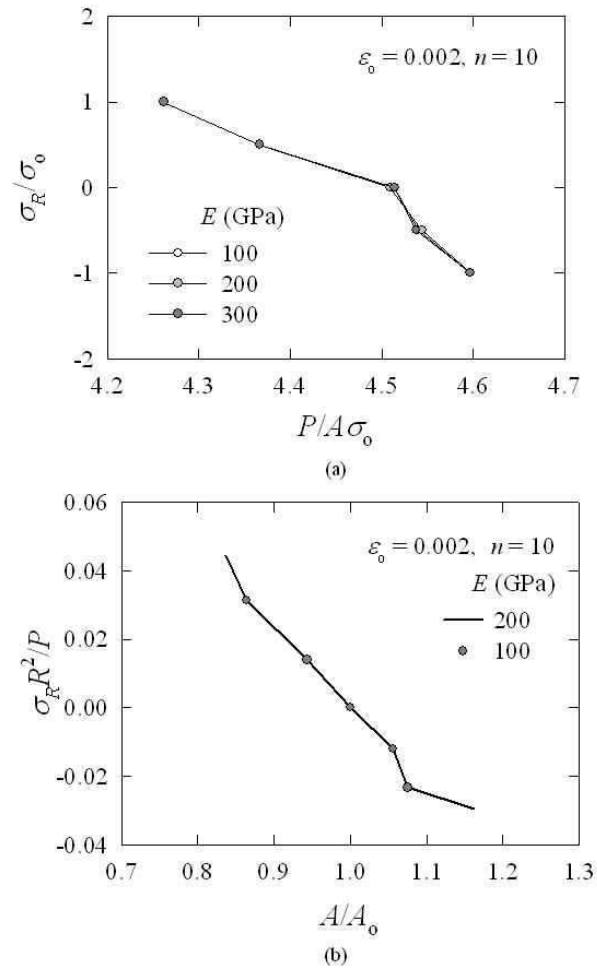
도면9



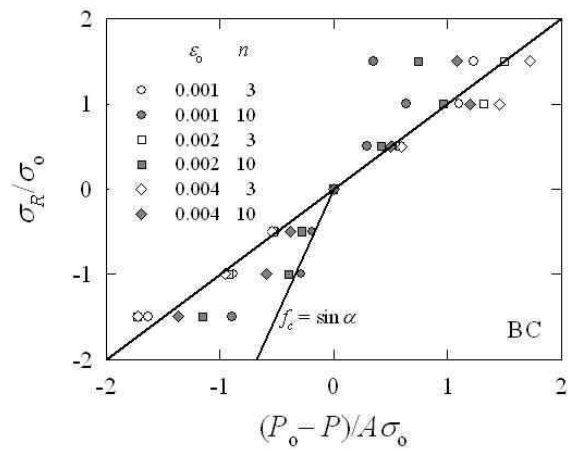
도면10



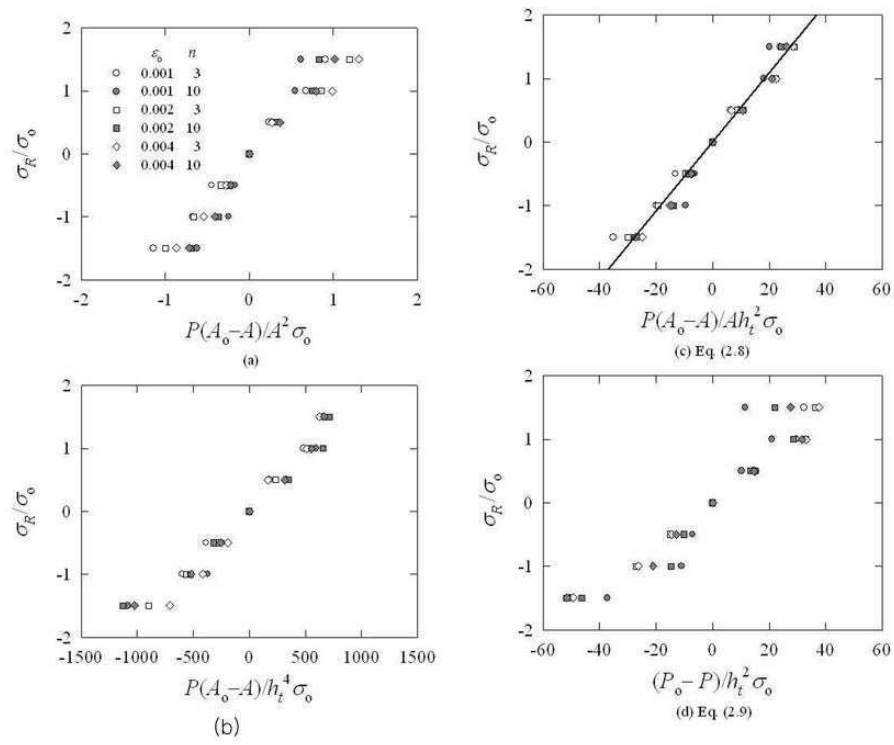
도면11



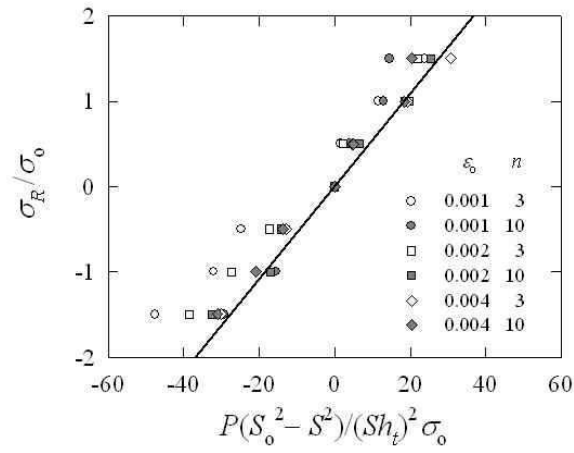
도면12



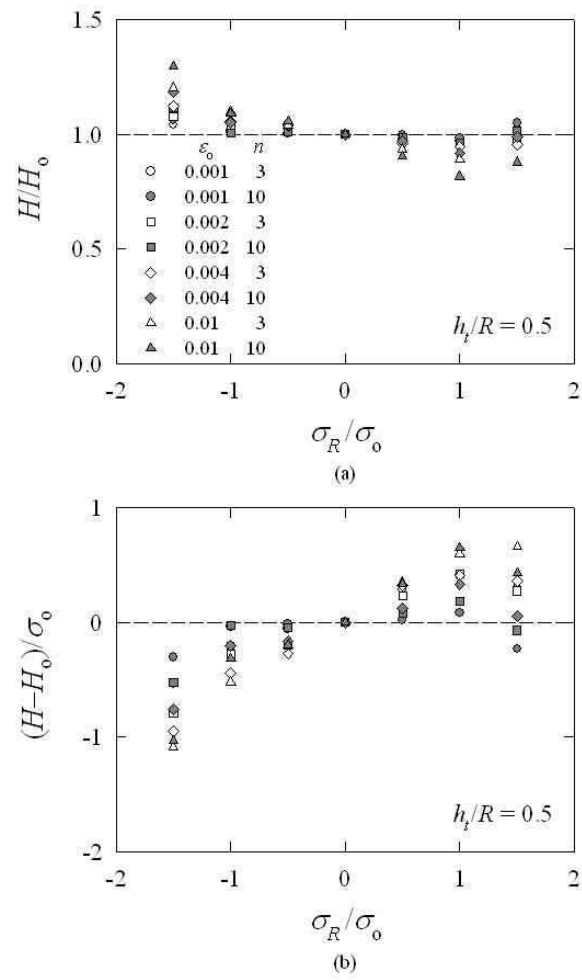
도면13



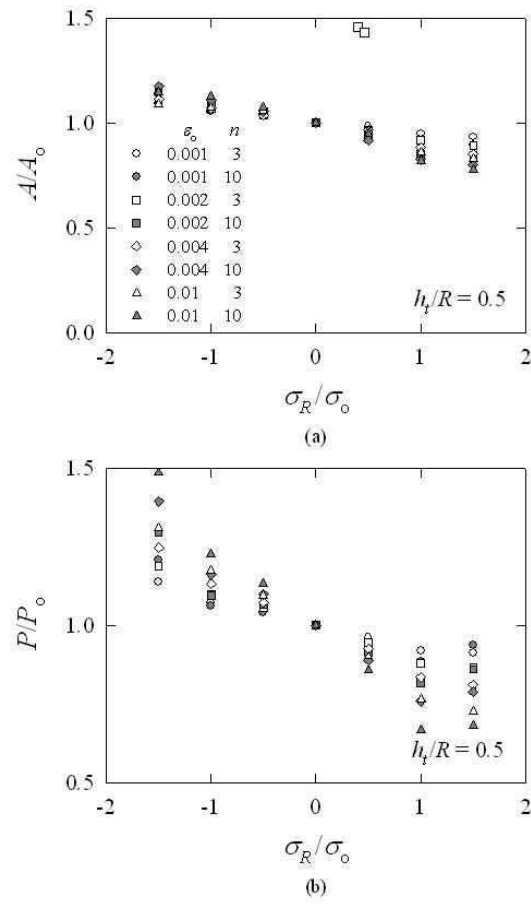
도면14



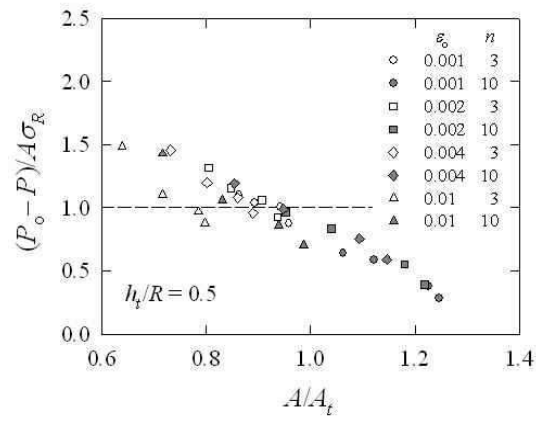
도면15



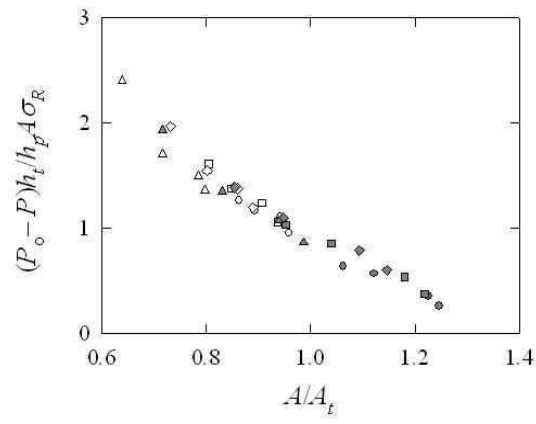
도면16



도면17

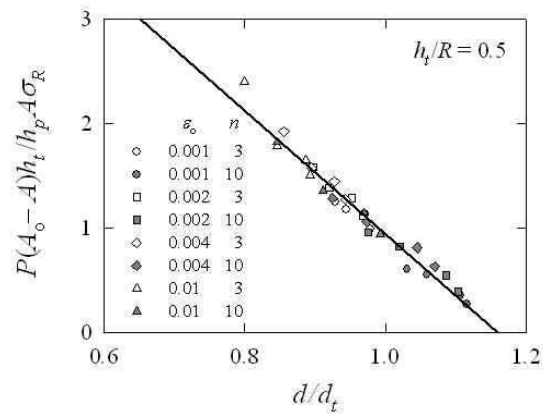


(a)

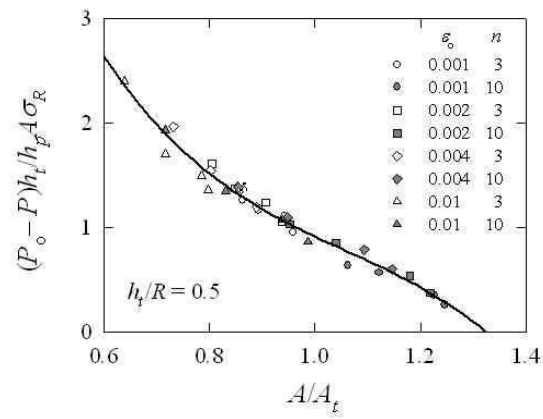


(b)

도면18

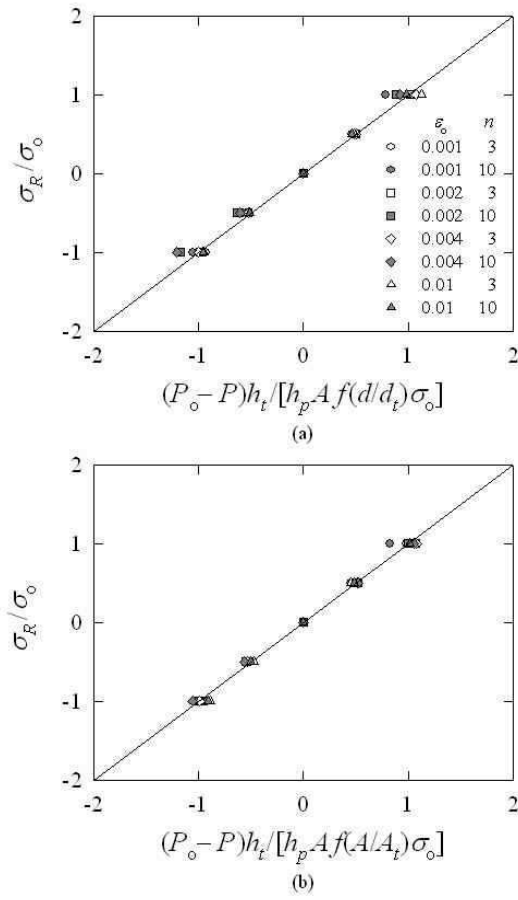


(a)

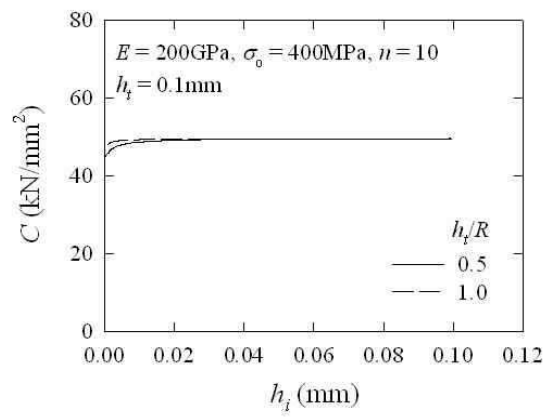


(b)

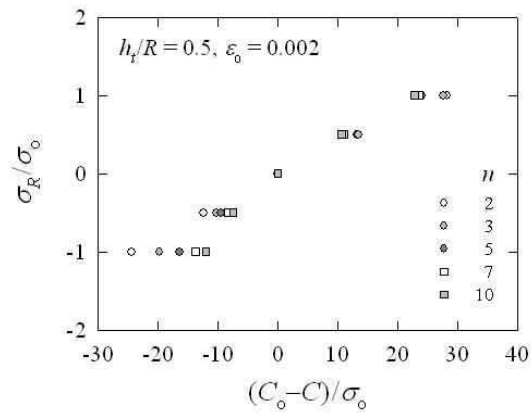
도면19



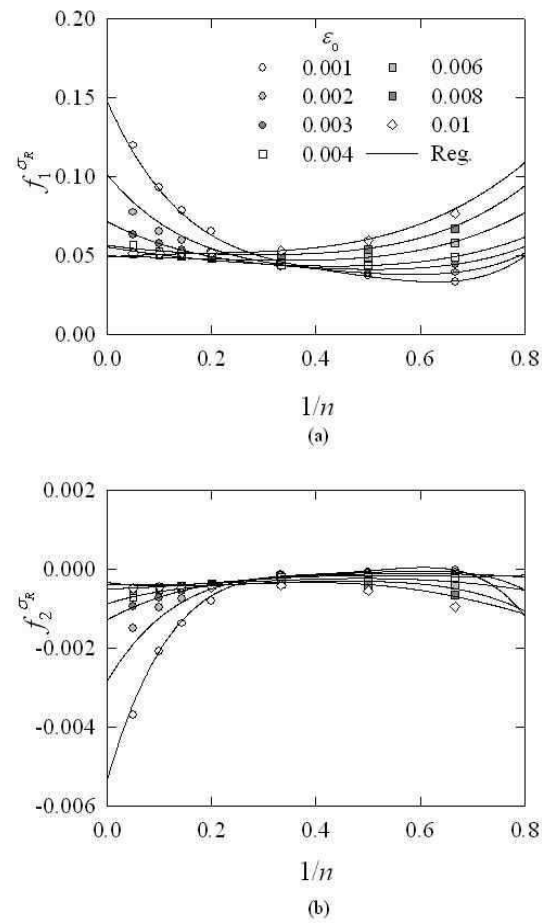
도면20



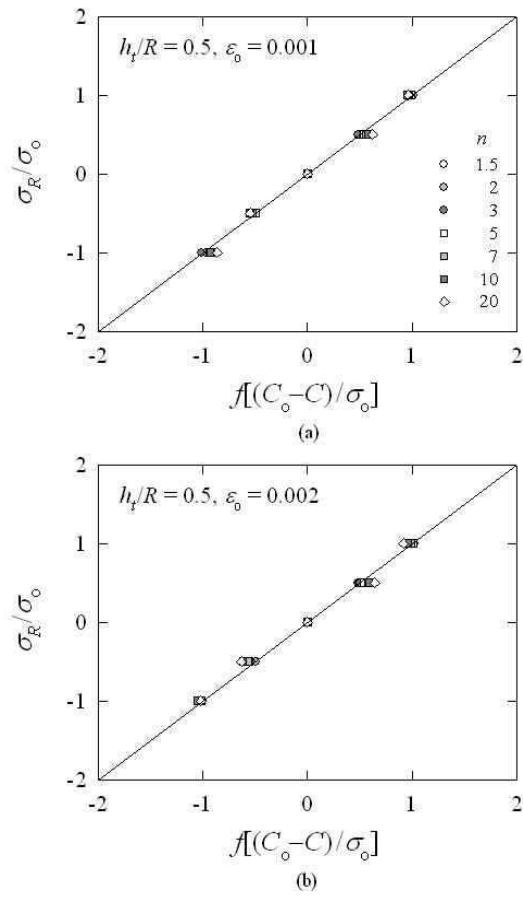
도면21



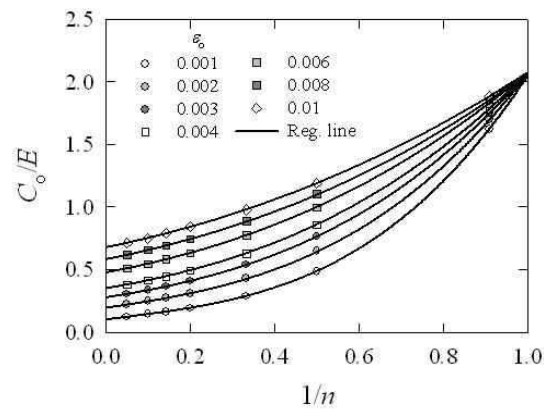
도면22



도면23



도면24



도면25

