



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2008-0002410
(43) 공개일자 2008년01월04일

(51) Int. Cl.

G01N 3/08 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2006-0061245

(22) 출원일자 2006년06월30일

심사청구일자 2007년07월11일

(71) 출원인

경상대학교산학협력단

경상남도 진주시 가좌동 900

(72) 발명자

전만수

경남 진주시 가좌동 900번지

(74) 대리인

특허법인 율촌

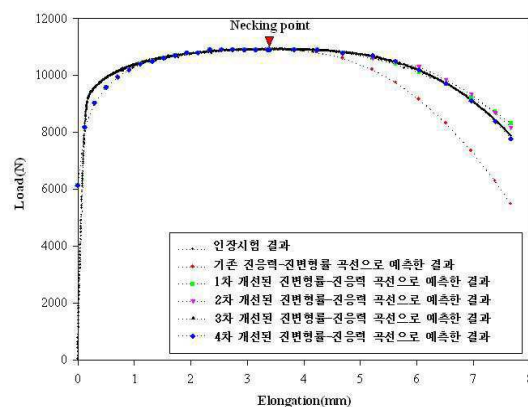
전체 청구항 수 : 총 1 항

(54) 인장시험과 유한요소법을 이용한 고 변형률에 대한 진변형률-진응력 곡선의 획득 방법 및 이를 이용한 인장 시험기

(57) 요약

본 발명에 따른 인장시험과 유한요소법을 이용한 고 변형률에 대한 진변형률-진응력 곡선의 획득 방법은, 인장시험으로 구한 연신량-인장하중 곡선 또는 공칭변형률-공칭응력 곡선을 이용하여 유한요소해석의 입력 정보인 재료의 진변형률-진응력 곡선을 획득할 수 있도록 구성됨으로써, 유한요소해석 프로그램과 함께 독자적인 모듈, 즉 인장시험 연계 전용 유한요소해석 프로그램(재료 물성치 획득 모듈 포함)과 상용 컴퓨터 이용공학(CAE) 프로그램의 재료 정보 획득 프로그램으로 개발이 가능하며, 또한 인장 시험기에 탑재가 가능하기 때문에 사용자에게 매우 신속하고 정확한 진변형률-진응력 곡선을 제공할 수 있으며, 아울러 파괴역학 등의 연구자에게 네킹에서 파단 직전까지의 보다 정확한 변형 거동 현상을 제공함으로써 관련 학문은 물론 관련 기술이 연관된 산업 발전에도 크게 기여할 수 있는 효과가 있다.

대표도 - 도8



특허청구의 범위

청구항 1

인장시험 결과로부터 기준 변형경화지수 n_N 과 기준 강도계수 K_N 을 구하고, 네킹 발생 이후의 연신량 중에서 시험 연신량 δ^i ($i=1,2,3,\dots,M$)를 결정하는 제1단계와;

기준 변형률-응력 곡선을 사용하여 인장시험을 해석한 후 시험 연신량 δ^i 에 대한 ε_K^i ($i=1,2,3,\dots,M$) 등을 구하는 제2단계와;

$j=0$, $\varepsilon_K^{i,j} = \varepsilon_K^i$, $\sigma_K^{i,j} = K_N \varepsilon_K^{i,j n_N}$ ($i=1,2,\dots,M$)으로 두는 제3단계와;

j 를 $j+1$ 로 두고, $\varepsilon_K^{i,j} = \varepsilon_K^{i,j-1}$, $\sigma_K^{i,j} = \sigma_K^{i,j-1}$ ($i=1,2,\dots,M$)로 두는 제4단계와;

n_N , K_N , $(\varepsilon_K^{i,j}, \sigma_K^{i,j})$ ($i=1,2,3,\dots,M$) 등에 의하여 정의된 재료의 유동응력 정보와 완전 인장시험 해석모델을 이용하여 인장시험을 해석하고, δ^i ($i=1,2,3,\dots,M$)에서 인장하중의 실험치와 예측치를 비교하여 수렴 여부를 확인하며, 수렴되지 않았을 경우 해석결과로부터 ε_K^i 을 구하여 $\varepsilon_K^{i,j+1} = \varepsilon_K^i$ 로 치환하고 F_e^i ($i=1,2,3,\dots,M$)를 계산하는 제5단계와;

$\varepsilon = \varepsilon_K^{i,j+1}$ ($i=1,2,3,\dots,M$)에서 $(\varepsilon_K^{i,j}, \sigma_K^{i,j})$ ($i=1,2,3,\dots,M$)을 선형보간하여 응력 $\sigma_K^{i,j}$ 을 구하고, $\varepsilon = \varepsilon_K^{i,j+1}$ 에서의 수정된 $\sigma_K^{i,j+1}$ 를 아래와 같이 계산하는 제6단계와;

$$\sigma_K^{i,j+1} = \sigma_K^{i,j} \frac{F_t^i}{F_e^i}$$

다시 상기 제4단계로 돌아가서 n 회 반복하여 진행하는 제7단계를 포함한 것을 특징으로 하는 인장시험과 유한요소법을 이용한 고 변형률에 대한 진변형률-진응력 곡선의 획득 방법.

명세서

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

- <11> 본 발명은 인장시험 결과로부터 얻은 연신량-인장하중 곡선만으로 금속재료의 진변형률-진응력 곡선을 획득하는 방법에 관한 것으로서, 유한요소법을 이용한 정확한 네킹 예측을 바탕으로 네킹 이후의 변형 거동을 고려함으로써, 고변형률에서의 진변형률-진응력 곡선을 획득하는 방법에 관한 것이다.
- <12> 소성가공 공정 해석 기술이 일반화됨으로써 금속 재료의 진변형률-진응력 관계식 또는 곡선은 공정설계 기술자에게 필수화되었지만, 실험적으로 획득이 용이하지 않아 현장 기술자는 물론 연구자들도 정확한 소재 정보를 모르는 경우가 허다하며, 대부분의 기술자들이 관련 문헌으로부터 제한적인 정보를 활용하고 있다.
- <13> 특히, 단조와 같이 고 변형률에서의 유동응력을 필요로 하는 경우는 더욱 그러하다. 현재까지 많은 연구자들에 의하여 연구는 되었으나, 인장시험에 바탕을 둔 고 변형률에서의 유동응력(진응력) 획득 시스템이 상품화된 것은 없으며 고 변형률에서의 진변형률-진응력 곡선 획득을 위하여 연구실 단위에서 압축시험 등이 실시되고 있다.
- <14> 재료의 시험에서 인장시험만큼 유용하고 손쉬운 방법은 없다. 진변형률-진응력 곡선의 획득은 인장시험의 주요 목적 중의 하나이다. 네킹(Necking) 지역의 최소단면에서의 변형률과 응력 정보를 활용할 수 있다면, 인장시험으로도 고 변형률에 대한 신뢰성이 높은 유동응력을 얻을 수 있게 된다. 이미 네킹 영역의 변형형상을 계측하여 진변형률-진응력 곡선을 유추하는 방법이 개발되어 있으나, 정확도가 떨어지고 계측 자체가 용이하지 않으므로 인장시험기와 연계하여 상품화된 실적이 전무하다.

- <15> 계측의 문제점을 피하는 방법은 유한요소법을 이용한 해석의 방법이 있다. 그러나 많은 연구자들이 네킹 현상의 해석을 위하여 노력하였으나, 완전 인장시험 해석모델(인위적인 결함이나 변위 구속조건을 부과하지 않은 단순 봉재(simple bar) 해석 모델)로 해를 얻은 연구 결과는 전무하다. 최근, 발명자 등은 표점간을 모델링한 단순 봉재의 완전 인장시험 해석모델을 이용하여 원형 단면 봉재의 인장시험에서 네킹 발생 시점을 공학적인 관점에서 정확하게 예측한 바 있다.
- <16> 흔히 진변형률-진응력 곡선은 다음의 강도계수-변형경화지수 모델, 즉 Hollomon의 구성방정식으로 수식화되고 있다.
- <17> (1)
- <18> 여기서 σ 와 ϵ 는 각각 진응력과 진변형률을 의미하며, K 와 n 은 강도계수와 변형경화지수이다. 그런데 일반적으로 관련 문헌에서 강도계수와 변형경화지수를 찾아 인장시험에 관하여 유한요소해석을 실시해 보면, 네킹 시점을 정확하게 예측하지 못한다. 그 이유는 시편의 형상비가 일정 이상일 경우 네킹의 발생 관점에서 볼 때, Considere 조건으로부터 변형경화지수는 최대공칭응력점에 대응하는 진변형률과 동일해야 하는데 대부분 이 값과 일치하지 않기 때문이다. 그리고 비록 네킹을 정확하게 예측하였더라도 네킹 발생 이후의 연신량-인장하중 곡선의 실험치와 유한요소해석 결과(예측치) 간에는 상당한 차이가 발생한다. 이것은 Hollomon의 구성방정식의 한계를 보여주는 결과이다.
- <19> 진변형률-진응력 곡선은 주로 인장시험, 압축시험, 압입시험, 편치시험, 비틀림시험, 노치 인장시험 등에 의하여 획득되고 있으며, 흔히 Hollomon의 구성방정식 등과 같은 수식 모델로 표현되고 있다.
- <20> 인장시험은 비교적 손쉽게 실시할 수 있으며, 기술자에게 재료의 물성치에 관한 많은 정보를 제공한다. 그런데 인장시험에서 발생하는 네킹(necking) 현상 때문에 소성유동해석에서 필수적인 변형률과 응력과의 상관관계를 획득하는 데는 한계가 있다. 네킹 이전까지는 비압축성의 가정하에서 인장시험 결과로부터 진변형률-진응력 곡선 또는 함수를 구할 수 있으나, 네킹이 발생하면 이 조건으로부터 더 이상의 정보를 획득하지 못한다. 강의 경우, 대개 변형률이 0.15 이하에서 네킹이 발생하는 반면, 단조 등 소성가공에서 변형률은 1.0을 넘는 경우가 허다하다. 특히 자동다단단조의 경우 공정중 풀림처리 등을 실시할 수 없으므로 주 변형 구간에서의 변형률이 2.0을 넘는 경우가 흔한 일이다. 따라서 네킹 발생 이전까지의 진변형률-진응력 곡선은 대변형을 수반하는 소성가공 관점에서는 주 관심사가 될 수 없으며, 네킹 이전의 변형률-응력 곡선을 외삽하여 네킹 발생 이후의 진변형률-진응력 곡선으로 사용하는 것은 상황에 따라서는 매우 부적절할 수 있다. 일부 연구자들에 의하여 인장시험 결과인 연신량-인장하중 곡선과 네킹 영역의 형상에 근거하여 10% 내외의 오차 범위에 들어오는 변형률-응력 곡선을 구하였으나, 네킹 영역의 변형 형상의 계측이 필요하거나 재료의 특징을 세부적으로 반영하지 못하는 단점이 있다.
- <21> 압축시험은 비교적 큰 변형률에 대한 유동응력(진응력)을 구할 수 있게 해 주지만 경계조건의 불확실성에 기인하는 낮은 해의 정확도가 문제가 된다. 이러한 이유로 압축시험에 전문적인 지식, 경험, 장치 등이 모두 갖추어지지 않으면 압축시험으로부터 진변형률-진응력 곡선의 획득이 용이하지 않다.
- <22> 압입시험은 시험 장소 및 시편 준비 측면에서 다소 유리한 면이 있으나, 이 방법은 0.3 이하의 진변형률에 대하여 적용이 가능하다.
- <23> 편치시험도 0.3 이하의 비교적 낮은 변형률에 대한 진응력을 구하는데 사용된다.
- <24> 비틀림시험은 비교적 높은 변형률속도에 대한 진응력을 얻게 해 주지만, 상온에서 고 변형률에 대한 유동응력을 얻을 수 없다.
- <25> 노치시험은 인장시험에 비하여 저 변형률의 결과를 얻을 수밖에 없으며, 재현성이 떨어지는 단점이 있다.
- <26> 최근에 연구되고 있는 금속 재료의 진변형률-진응력 곡선의 획득을 위한 대부분의 방법들이 해석 기술, 특히 유한요소해석 기술을 활용하고 있다. 인장시험의 경우, 네킹 지역의 최소단면에서 진변형률은 최대가 되며, 연강의 경우 진변형률이 1.5에 이른다. 따라서 유한요소법으로 예측한 네킹 지역의 변형 거동특성을 활용하면, 고 변형률에 대한 진응력 또는 유동응력을 얻을 수 있다. 이러한 시도가 일부 연구자들에 의하여 시도되었으나 그 활용이 극히 제한되어 있다. 그 이유는 다음과 같다.
- <27> 첫째, 단순 봉재를 해석영역으로 사용한 모든 연구에서 사용된 유한요소 해석모델은 인위적인 결함(형상결함 부여, 경계조건 가정, 변형률 조작 등)을 필요로 하거나, 인장시편 전체를 해석 대상 영역으로 선택하였다.

- <28> 둘째, 접근 방법이 체계화되어 있지 않아 일반화가 불가능하다.
- <29> 셋째, 일부의 방법에서는 시편의 변형형상 정보를 필요로 한다.
- <30> 넷째, 네킹의 예측이 정확하지 않아 결과의 정확도가 높지 않다.
- <31> 인장시험 결과로부터 고 변형률에 대한 유동응력을 획득하기 위해서는 수치적 또는 해석적 방법에 의한 네킹 현상의 정확한 예측이 전제되어야 한다. 네킹 현상의 수치 해석을 위한 다양한 연구가 진행되었으나, 인장시편의 표점 사이를 해석영역으로 간주한 모든 연구에서 네킹을 유도하기 위하여 인위적인 결함을 해석모델에 부가하였거나 한쪽 끝단에서 인장방향에 수직인 방향으로 변위를 구속하였다. 인장시편 전체를 해석영역으로 사용한 경우도 있으나 물성치 획득의 측면에서 보면 활용에 제약이 많이 따른다. 아직까지 원형 단면 봉재의 인장시편의 표점 사이를 무결합과 무전단력의 완전 인장시험 해석모델(perfect tensile test analysis model)로 모델링을 실시하여 유한요소해석을 실시한 결과로써 Considere 조건을 만족한다는 객관적 결과가 발표된 바가 없다.
- <32> 전술한 이유로 실제 공정 설계 및 해석 연구자와 기술자들이 찾고자 하는 진변형률-진응력 곡선을 관련 재료 핸드북이 제공하고 있지 않으며, 인장시험기의 기능으로 제공되지 않고 있다. 그리고 소성역학 관련 공학해석 S/W가 인장시험 정보를 활용한 재료 물성치 획득 모듈을 제공하고 있지 않다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

- <33> 본 발명은 상기한 문제점을 해결하기 위하여 안출된 것으로서, 인장시험에 대한 유한요소해석 결과로 얻은 네킹 발생 이후의 연신량-인장하중 곡선이 인장시험으로 구한 연신량-인장하중 곡선과 공학적으로 일치하도록 하는 고변형률에서의 진변형률-진응력 곡선을 획득할 수 있는 인장시험과 유한요소법을 이용한 고 변형률에 대한 진변형률-진응력 곡선의 획득 방법을 제공하는 데 목적이 있다.

발명의 구성 및 작용

- <34> 상기한 과제를 실현하기 위한 본 발명에 따른 인장시험과 유한요소법을 이용한 고 변형률에 대한 진변형률-진응력 곡선의 획득 방법은, 인장시험 결과로부터 기준 변형경화지수 n_N 과 기준 강도계수 K_N 을 구하고, 네킹 발생 이후의 연신량 중에서 시험 연신량 $\delta^i (i=1,2,3,\dots,M)$ 를 결정하는 제1단계와;
- <35> 기준 변형률-응력 곡선을 사용하여 인장시험을 해석한 후 $\sigma_k^i (i=1,2,3,\dots,M)$ 등을 구하는 제2단계와;
- <36> $j=0$, $\varepsilon_k^{ij} = \varepsilon_k^i$, $\sigma_k^{ij} = K_N \varepsilon_k^{in_N} (i=1,2,\dots,M)$ 으로 두는 제3단계와;
- <37> j 를 $j+1$ 로 두고, $\varepsilon_k^{ij} = \varepsilon_k^{ij-1}$, $\sigma_k^{ij} = \sigma_k^{ij-1} (i=1,2,\dots,M)$ 로 두는 제4단계와;
- <38> n_N , K_N , $(\varepsilon_k^i, \sigma_k^i) (i=1,2,3,\dots,M)$ 등에 의하여 정의된 재료의 유동응력 정보와 완전 인장시험 해석모델을 이용하여 인장시험을 해석하고 $\delta^i (i=1,2,3,\dots,M)$ 에서 인장하중의 실험치와 예측치를 비교하여 수렴 여부를 확인하며, 수렴되었을 때 종료하고, 수렴되지 않았을 경우 해석결과로부터 ε_k^i 을 구하여 $\varepsilon_k^{ij+1} = \varepsilon_k^i$ 로 치환하고 $F_e^i (i=1,2,3,\dots,M)$ 를 계산하는 제5단계와;
- <39> $\varepsilon = \varepsilon_k^{ij+1} (i=1,2,3,\dots,M)$ 에서 $(\varepsilon_k^i, \sigma_k^i) (i=1,2,3,\dots,M)$ 을 선형보간하여 응력 σ_k^{ij} 을 구하고, $\varepsilon = \varepsilon_k^{ij+1}$ 에서의 수정된 σ_k^{ij+1} 를 아래와 같이 계산하는 제6단계와;

$$\sigma_k^{ij+1} = \sigma_k^{ij} \frac{F_t^i}{F_e^i}$$

- <40>
- <41> 다시 상기 제4단계로 돌아가서 n회 반복하여 진행하는 제7단계를 포함한 것을 특징으로 한다.
- <42> 이와 같은 본 발명은 유한요소법을 이용한 네킹 발생 시점의 고정도 예측을 위한 일반적 접근방법에 근거하여 연신량-인장하중의 실험치와 예측치의 차이를 반복개선 알고리즘에 의하여 줄임으로써 재료의 진변형률-진응력 곡선을 획득하는 체계적이고 일반적인 방법과 이를 근간으로 하는 진변형률-진응력 획득 시스템을 구성할 수 있

다.

<43> 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시 예를 설명하면 다음과 같다.

<44> 인장시험 결과, 즉 도 1의 공칭응력(σ_e)-공칭변형률(ϵ_e) 곡선으로부터 소재의 물성치를 직접 얻을 수 있는 것은 탄성계수 E , 항복강도 Y , 인장강도 σ_U , 연신율 e_F 등이다.

<45> 소성변형중의 체적 변화를 무시하면, 진응력 σ_t 와 진변형률 ϵ_t 는 공칭응력 및 공칭변형률 와 다음의 관계에 있다.

$$\epsilon_t = \ln(1 + \epsilon_e) \quad (2)$$

$$\sigma_t = \sigma_e(1 + \epsilon_e) \quad (3)$$

<48> 식 (2)와 식 (3)은 네킹이 발생하기까지 적용이 가능하므로 네킹 발생 이전까지의 진응력-진변형률 곡선은 비압축성 조건을 전제로 식 (2)와 식 (3)으로부터 구한다.

<49> 네킹 발생 시점의 진변형률로부터 변형경화지수를 구한 것을 기준 변형경화지수(reference strain hardening exponent)라고 하고 n_N 으로 표현하면,

$$n_N = \ln(1 + \epsilon_e^N) \quad (4)$$

<51> 이다. 이 식에서 ϵ_e^N 은 네킹 발생 시점에서 공칭변형률이다. 그리고 식 (1)의 진변형률-진응력 곡선이 네킹 발생 때의 진변형률과 진응력을 정확하게 만족하게 함으로써 강도계수 K 를 구할 수 있다. 이 때의 강도계수를 기준 강도계수(reference strength coefficient)라고 칭하고 K_N 으로 표시하면,

$$K_N = \sigma_e^N (1 + \epsilon_e^N) / [\ln(1 + \epsilon_e^N)]^{1/(1+n)} \quad (5)$$

<52> 이다. 이 식에서 σ_e^N 는 네킹 발생 시점에서 공칭응력을 의미한다.

<54> 식 (1)의 Hollomon의 $K-n$ 모델(구성방정식)에서 $n=n_N$, $K=K_N$ 을 사용할 경우, 식 (1)의 진변형률-진응력 곡선을 기준 변형률-응력 곡선(reference stress-strain curve)이라 칭한다. 기준 변형률-응력 곡선을 사용하여 인장시험을 해석할 경우, 진변형률이 n_N 에 도달하면, 이론적으로 네킹이 발생하게 된다. 네킹 이후의 연신량-인장하중 정보로부터 진변형률-진응력 곡선을 획득하기 위한 목적으로 인장시험을 유한요소해석할 때 이 점을 만족시키는 것은 매우 중요하다. 본 발명에 사용될 유한요소해석 프로그램은 네킹 발생 시점을 공학적으로 정확하게 예측해야 한다. 실제 네킹 발생 시점의 예측 사례를 다음에 설명한다.

<55> 도 1에서 보는 바와 같이 예제로 선택한 인장시험에서 네킹시점의 인장강도가 357MPa이고 네킹이 공칭변형률 0.135에서 발생하였으므로 식 (4)와 식 (5)로부터 n_N 과 K_N 는 각각 0.127와 526.35로 계산되며, 도 2에서 진변형률-진응력 곡선을 나타내었다. 도 2에서 실선은 네킹 이전까지를 나타내며, 네킹 이전까지의 결과를 외삽하여 구한 네킹 발생 이후의 진변형률-진응력 곡선을 점선으로 나타내었다. 따라서 네킹 발생 이후의 정보는 추정치에 불과하다. 비록 네킹 이전까지의 결과는 맞지 않더라도 이에 관한 상세한 값은 인장시험 결과를 식 (2)와 식(3)에 대입하여 구할 수 있다. 앞에서 구한 n_N 과 K_N 를 식 (1)에 대입하여 인장시험을 유한요소해석하면, 네킹 발생 시점은 공학적 관점에서 정확하게 계산되어야 한다. 이러한 사실은 인장시험의 그림을 포함한 모델에서도 예측이 되며, 접근 방법의 체계화 관점에서는 해석 대상 영역을 표점과 상하대칭면 사이로 하는 것이 바람직하다. 후자의 경우, 양 끝은 무마찰 속도 지정 경계로 간주되어야 한다. 유한요소 해석모델에 인위적 결함을 부과하지 않았으며, 양 끝단에서 표면력의 반경방향 성분이 0인 도 3의 완전 인장시험 해석모

델을 사용하였다. 유한요소의 크기를 균일하게 하였다. 해석중 상태변수의 순화로 인한 영향을 배제시키기 위하여 요소망 재구성을 실시하지 않았다.

<56> 도 4에서 연신량에 따른 인장하중의 예측치를 실험치와 비교한 결과, 최대 인장하중의 실험치와 예측치는 각각 10,950 N과 10,951 N이며, 네킹 발생 시점에서 연신량의 실험치와 예측치는 각각 3.386 mm와 3.386 mm이다. 따라서 네킹 시점에 대한 실험과 해석 결과가 공학적인 관점에서 일치함을 알 수 있다.

<57> 위에서 설명한 바와 같이, 시편의 형상비가 일정 수준 이상일 때, 네킹의 시작은 기준 변형경화지수의 지배를 받는다. 도 2의 기준 진변형률-진응력 곡선은 네킹 발생을 강조하여 구한 것으로 전술한 바와 같이 네킹 발생 시점 및 최대하중을 정확하게 예측하게 한다. 여기서 강조해 두어야 할 점은 네킹의 발생과 파단에 이르는 과정, 특히 인장시편의 형상 변화를 예측하기 위해서는 도 2의 기준 변형률-응력 곡선을 사용하는 것이 바람직하다는 점이다. 문제는 도 4에서 보는 바와 같이 네킹 발생 시점 이후에 연신량의 증가에 따라 인장시험에 대한 실험치와 유한요소 예측치의 차이가 커지며, 단조중 소재의 변형률이 네킹 발생 시점의 변형률보다 대개 10 배 이상 크다는 데 있다. 따라서 도 2의 기준 변형률-응력 곡선을 네킹 발생 이후의 재료의 물성치로 직접 사용하는 데는 한계가 있으며, 유동응력의 적절한 보정이 필요하다.

<58> 네킹이 발생하면, 진변형률 분포의 비균질성이 급격히 증가하며, 특히 최소단면에서 진변형률은 최대가 된다. 최소단면에서는 상하 대칭성으로 인하여 전단력이 작용하지 않으며, 소성변형 영역이면서 변형률 분포의 균일도가 상대적으로 높다. 따라서 유한요소해석 결과로부터 최소단면을 대표할 수 있는 변형률을 쉽게 정의할 수 있다. 즉, 어떤 특정한 점 데이터의 연신량, 즉 시험 연신량 δ^i ($i=1,2,3,\dots,M$, M 은 점 데이터의 수)에 대하여 최소단면을 구할 수 있으며, 그 때의 변형률 대표값 ϵ_R^i 의 결정이 가능하다. 그러므로 시험 연신량 δ^i 에서 측정된 인장하중 F_t^i 와 해석으로 예측한 인장하중 F_e^i 의 차이를 ϵ_R^i 에서의 응력 σ_R^i 을 보정하여 최소화시킴으로써 네킹 이후에도 진변형률(ϵ_R^i)-진응력(σ_R^i)의 관계를 구할 수 있다.

<59> 본 발명에서는 면적평균법을 사용하여 ϵ_R^i 을 구하였다. 즉, 다음 식에 의하여 변형률 대표값 ϵ_R^i 을 계산하였다.

$$\epsilon_R^i = \frac{\int_A \bar{\epsilon} dA}{A} \quad (6)$$

<60> 여기서 A^i 는 시험 연신량 δ^i 에서의 인장시편의 최소단면 또는 최소단면적을 나타내며, $\bar{\epsilon}$ 는 진변형률에 해당하는 유효변형률이다.

<61> 본 발명에서는 시험 연신량 δ^i 에 대응하는 변형률 대표값이 ϵ_R^i 이고 인장하중에 관한 실험치와 해석치가 각각 F_t^i 와 F_e^i 일 때, ϵ_R^i 에서의 응력을 현재의 σ_R^i 에 틀 곱해 줌으로써 ϵ_R^i 에서의 유동 응력 σ_k^i 을 보정하였다.

<62> 진변형률-진응력 곡선의 획득 방법에 관하여 상술하기에 앞서, 먼저 진변형률-진응력 관계의 표현법에 관하여 설명한다. 기준 변형률-응력 곡선을 네킹 발생 이전까지의 진변형률-진응력 곡선으로 사용하고, 네킹 발생 이후에는 도 5에서 보는 바와 같이 시험 연신량 δ^i 에서 정의된 (ϵ_k^i , σ_k^i)를 선형보간하여 진변형률-진응력 곡선으로 사용하였다.

<63> 시험 연신량 δ^i 에서의 개선된 (ϵ_k^i , σ_k^i)를 구하는 구체적인 절차, 즉 반복개선 알고리즘은 다음과 같다. 다음에서 $\epsilon_k^{i,j}$ 와 $\sigma_k^{i,j}$ 는 j 번 수정된 변형률과 응력을 각각 의미한다.

<64> 1 단계: 인장시험 결과로부터 기준 변형경화지수 n 과 기준 강도계수 K_N 을 구하고, 네킹 발생 이후의 연신량 중에서 시험 연신량 δ^i ($i=1,2,3,\dots,M$)를 결정한다.

<65> 2 단계: 기준 변형률-응력 곡선을 사용하여 인장시험을 해석한 후 시험 연신량 δ^i 에 대한 대표 변형률

$\varepsilon_k^i (i=1,2,3,\dots,M)$ 등을 구한다.

<67> 3 단계: 반복개선 작업을 위하여 초기조건을 $j=0$, $\varepsilon_k^{i,j} = \varepsilon_k^i$, $\sigma_R^{i,j} = K_N \varepsilon_R^{i,j} n_N (i=1,2,\dots,M)$ 으로 설정한다.

<68> 4 단계: i 를 $i+1$ 로 두고, $\varepsilon_k^{i,j} = \varepsilon_k^{i,j-1}$, $\sigma_R^{i,j} = \sigma_R^{i,j-1} (i=1,2,\dots,M)$ 로 둔다. 반복개선 작업을 실시한다.

<69> 5 단계: n_N , K_N , $(\varepsilon_k^{i,j}, \sigma_R^{i,j}) (i=1,2,3,\dots,M)$ 등에 의하여 정의된 재료의 유동응력 정보와 완전 인장시험 해석모델을 이용하여 인장시험을 해석하고 $\delta^i (i=1,2,3,\dots,M)$ 에서 인장하중의 실험치와 예측치를 비교하여 수렴 여부를 확인하며, 수렴되지 않았을 경우 해석결과로부터 ε_k^i 을 구하여 $\varepsilon_k^{i,j+1} = \varepsilon_k^i$ 로 치환하고 $F_e^i (i=1,2,3,\dots,M)$ 를 계산한다. 수렴되었을 경우, 관련 정보를 출력하고 반복개선 작업을 중단한다.

<70> 6 단계: $\varepsilon = \varepsilon_k^{i,j+1} (i=1,2,3,\dots,M)$ 에서 $(\varepsilon_k^{i,j}, \sigma_R^{i,j}) (i=1,2,3,\dots,M)$ 을 선형보간하여 응력 σ_R^i 을 구하고, $\varepsilon = \varepsilon_k^{i,j+1}$ 에서의 수정된 $\sigma_R^{i,j+1}$ 를 다음 식에 의하여 같이 구한다.

<71>
$$\sigma_R^{i,j+1} = \sigma_R^{i,j} \frac{F_t^i}{F_e^i} \quad (7)$$

<72> 7 단계: 4 단계로 간다.

<73> 각 시험 연신량 δ^i 에서 전술한 방식으로 1차 보정된 진변형률-진응력 곡선을 기준 진변형률-진응력 곡선과 함께 도 5에 나타내었으며, 계산 과정을 아래의 표 1에 정리하였다.

<74> [표 1]

<75>

i	$\varepsilon_R^{i,0}$	$\sigma_R^{i,0}$	F_t^i (N)	F_e^i (N)	$\sigma_R^{i,1}$	$\frac{(F_t^i - F_e^i)}{F_t^i} \times 100\%$
1	0.128	405.34	10950	10951	405.34	0.00%
2	0.209	431.39	10867	10820	433.24	0.43%
3	0.279	447.48	10799	10611	455.4	1.74%
4	0.385	466.28	10646	10194	486.94	4.25%
5	0.486	480.29	10448	9741	515.16	6.77%
6	0.608	494.14	10170	9155	548.94	9.98%
7	0.779	509.96	9697	8308	595.23	14.32%
8	0.977	524.77	9119	7341	651.87	19.50%
9	1.203	538.86	8429	6282	723.04	25.47%
10	1.390	548.84	7850	5472	787.37	30.29%

<76> 도 5의 1차 수정된 진변형률-진응력 곡선의 타당성을 조사하기 위하여 인장시험에 대한 해석을 실시하였으며, 도 6에 해석 결과를 실험 결과 및 기준 변형률-응력 곡선을 이용하여 예측한 결과와 비교하였다. 도 6의 비교 결과, 인장하중의 예측 정확도가 1차 수정된 진변형률-진응력 곡선에 의하여 크게 개선되었음을 알 수 있다. 오차는 연신량이 증가하면서 증가하는 경향을 보이고 있으나, 그 최대치가 474N 이하(6.04%)에 머무르고 있다. 따라서 1차 개선 작업에 의하여 30.29%의 오차가 6.04%의 오차로 개선되었다.

<77> 본 발명에서 사용된 소재는 비교적 연신률이 큰 것임에도 불구하고 한 번의 보정 작업으로 약 94%의 정확도를 나타내었다. 물론 이미 접근 방법에서 서술한 바와 같이 보정된 진변형률-진응력 곡선을 새로운 기준으로 간주하여 보정 작업을 반복함으로써 보다 신뢰성이 높은 결과를 얻을 수 있다. 도 7과 도 8은 2차례, 3차례, 4차례의 반복 계산으로 수정된 변형률-응력 곡선과 이를 이용하여 예측한 연신량-인장하중 곡선을 각각 나타내고 있다.

<78> 표 2에 반복개선 작업의 수에 따른 연신량-인장하중 곡선의 실험치 대비 예측치의 최대 오차의 변화를 나타내었

다.

[표 2]

Number of iterations	Maximum error
0	30.29%
1	6.04%
2	3.96%
3	0.89%
4	0.38%

이 표에서 보는 바와 같이, 수렴 특성이 매우 양호함을 알 수 있으며, 4차례의 반복 계산으로 최대 오차가 0.38% 이하인 결과, 즉 공학적 정답을 구하였다.

이러한 결과를 바탕으로 도 9에서 보는 바와 같이 인장시험기와 연계한 진변형률-진응력 곡선 획득 기능 및 시스템의 개발이 가능하며, 도 10에서 보는 바와 같이 공학해석 소프트웨어의 소재 정보 획득 모듈로 활용될 수 있다.

그리고 획득된 진변형률-진응력 곡선을 이용한 인장시험의 정확한 해석 결과는 인장시험의 형상 변화를 대체할 수 있으며, 재료의 내부 변형 특성 및 파괴 현상의 파악 목적의 공학해석 S/W의 개발이 가능하다.

한편, 본 발명에서 적용한 예제를 바탕으로 획득된 진변형률-진응력 곡선을 피팅한 결과, 네킹발생 이후, 다음의 수식 모델이 가장 적합한 것으로 밝혀졌다.

$$\sigma_t = (K_o + K_1 \varepsilon_t) \varepsilon_t^n \quad (8)$$

발명의 효과

상기한 바와 같은 본 발명에 따른 인장시험과 유한요소법을 이용한 고 변형률에 대한 진변형률-진응력 곡선의 획득 방법은 다음과 같은 효과를 갖게 된다.

일반적으로 변형이 큰 소성가공 공정 중 재료의 변형률이 1.0을 상회하는 경우가 허다한 반면, 강의 경우 네킹은 대체로 0.15 이내의 변형률에서 발생하고 있다. 그러므로 인장시험에서 얻은 네킹 이전까지의 결과를 외삽하여 얻은 유동응력이 고 변형률의 단조 공정의 해석 목적으로 사용되는 데는 부적절하다.

하지만, 상기한 바와 같은 본 발명에서 사용한 방법을 이용하면 고 변형률에서 고 정도(정도는 개선 반복 작업수를 증가시킬수록 증가됨)의 진변형률-진응력 곡선을 구할 수 있다.

본 발명에서의 접근 방법은 매우 체계적이며 일반화되어 있으므로 유한요소해석 프로그램과 함께 독자적인 모듈, 즉 인장시험 연계 전용 유한요소해석 프로그램(재료 물성치 획득 모듈 포함)으로 개발이 가능하며, 인장시험기에 탑재가 가능하기 때문에 사용자에게 매우 신속하고 정확한 진변형률-진응력 곡선을 제공할 수 있다.

그리고 본 발명은 파괴역학 등의 연구자에게 네킹에서 파단 직전에서 보다 정확한 변형 거동 현상을 제공함으로써 관련 학문은 물론 관련 기술이 연관된 산업 발전에도 크게 기여할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

도 1은 인장시험으로 획득한 공칭변형률-공칭응력 곡선을 나타낸 그래프,

도 2는 공칭변형률-공칭응력 곡선으로부터 구한 기준 진변형률-진응력 곡선을 나타낸 그래프,

도 3은 완전 인장시험 해석모델을 나타낸 도면,

도 4는 인장시험 결과와 기준 진변형률-진응력 곡선으로 예측한 유한요소해석 결과와의 비교 그래프,

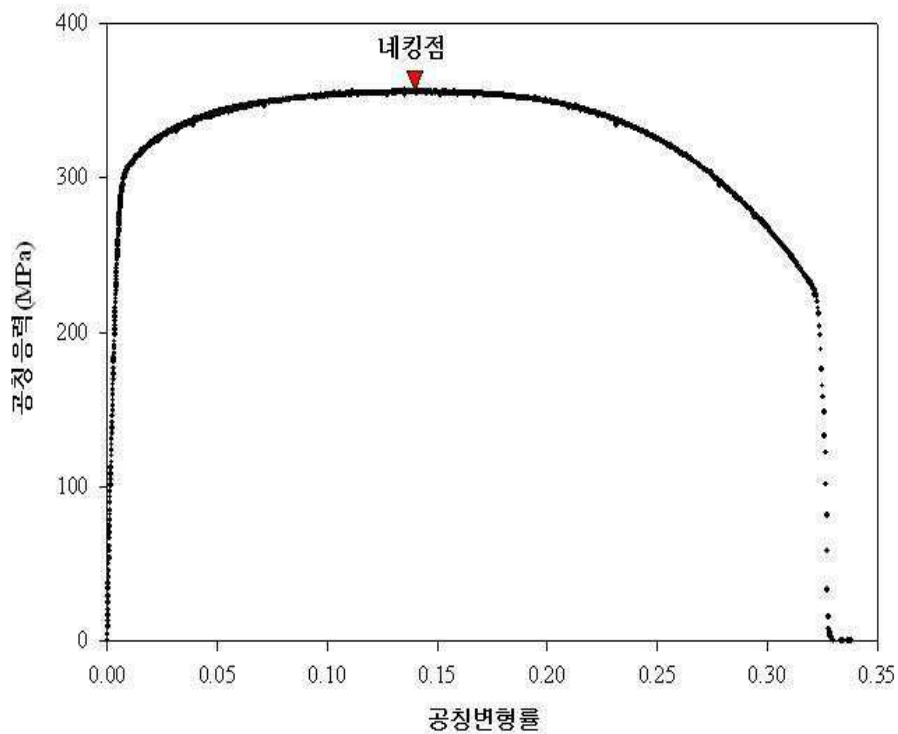
도 5는 1차 개선된 진변형률-진응력 곡선을 나타낸 그래프,

도 6은 1차 개선된 진변형률-진응력 곡선으로 구한 연신량-인장하중 곡선과 실험결과의 비교 그래프,

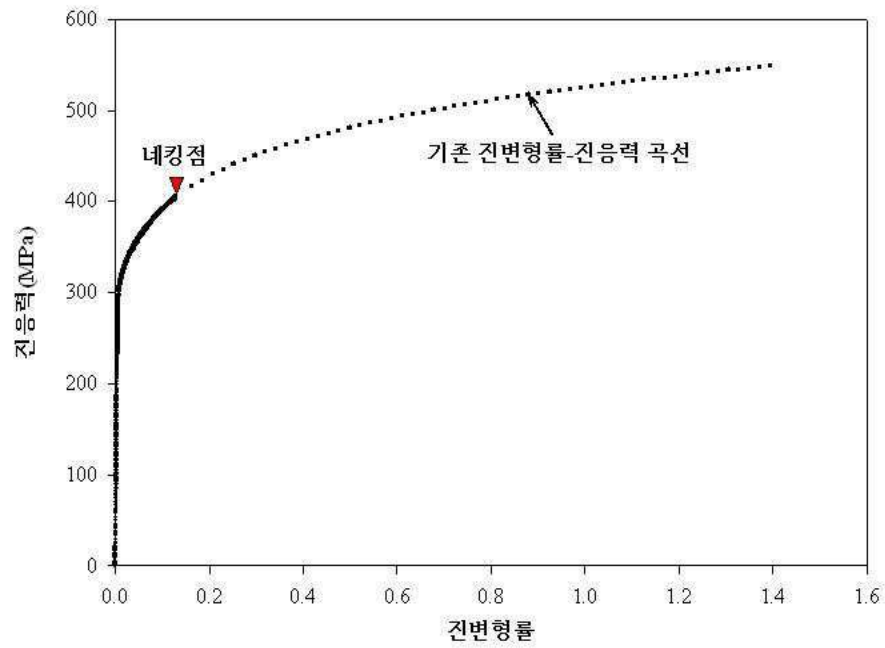
- <7> 도 7은 2차, 3차, 4차에 걸쳐 개선된 진변형률-진응력 곡선을 나타낸 그래프,
- <8> 도 8은 2차, 3차, 4차에 걸쳐 개선된 진변형률-진응력 곡선으로 구한 연신량-인장하중 곡선과 실험결과의 비교 그래프이다.
- <9> 도 9는 본 발명에 따른 변형률-진응력 곡선의 획득 방법을 인장시험기와 연계된 상태를 예시한 도면,
- <10> 도 10은 본 발명에 따른 변형률-진응력 곡선의 획득 방법이 공학해석 소프트웨어의 소재 물성치 획득 모듈로 활용된 경우를 예시한 도면이다.

도면

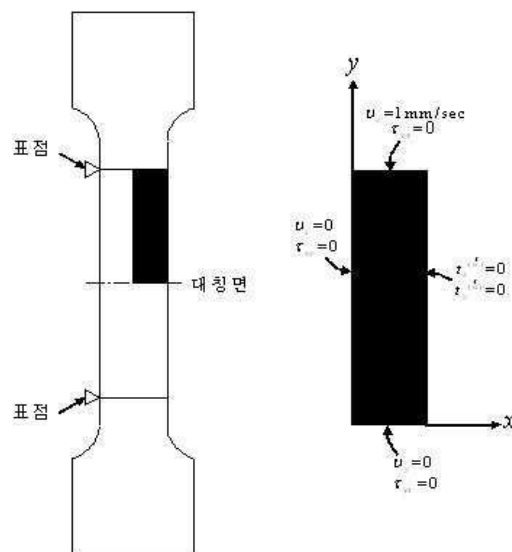
도면1



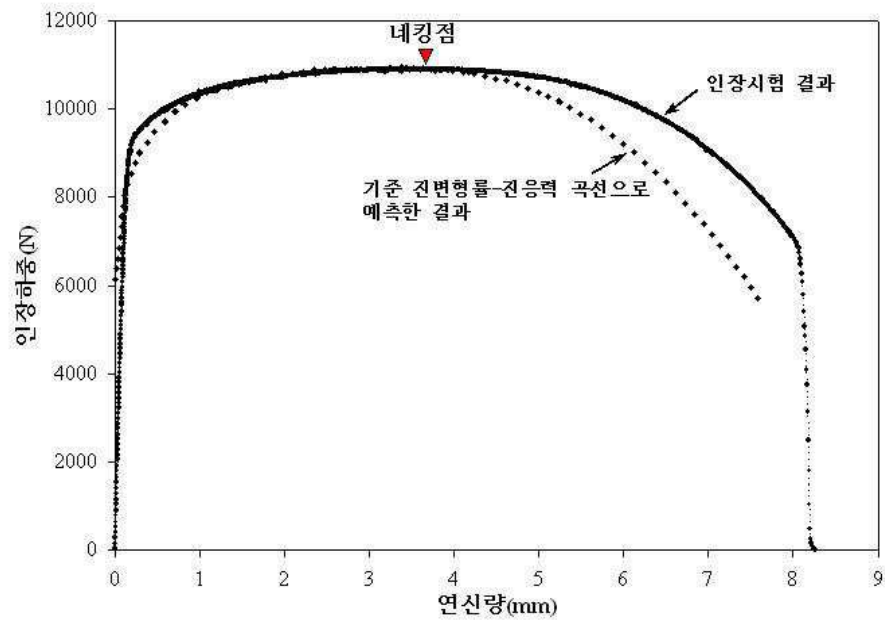
도면2



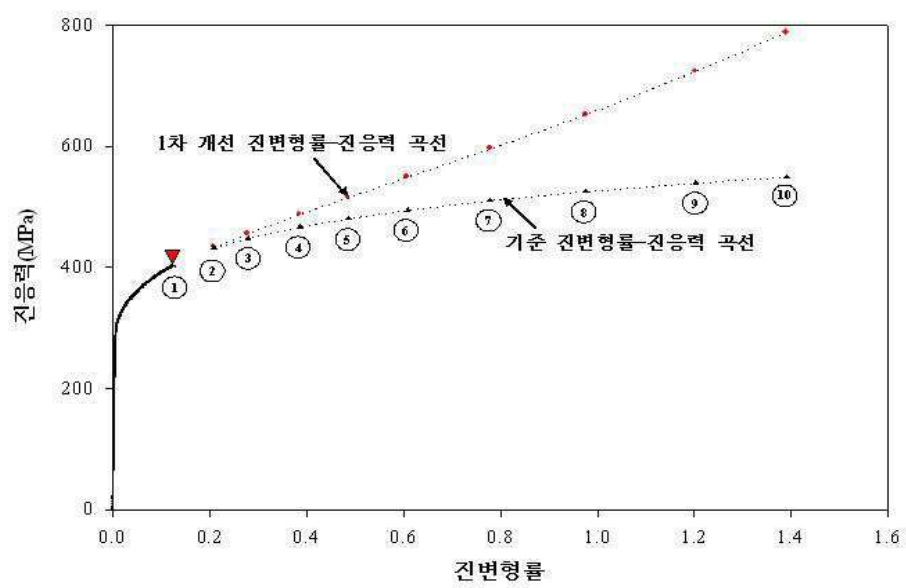
도면3



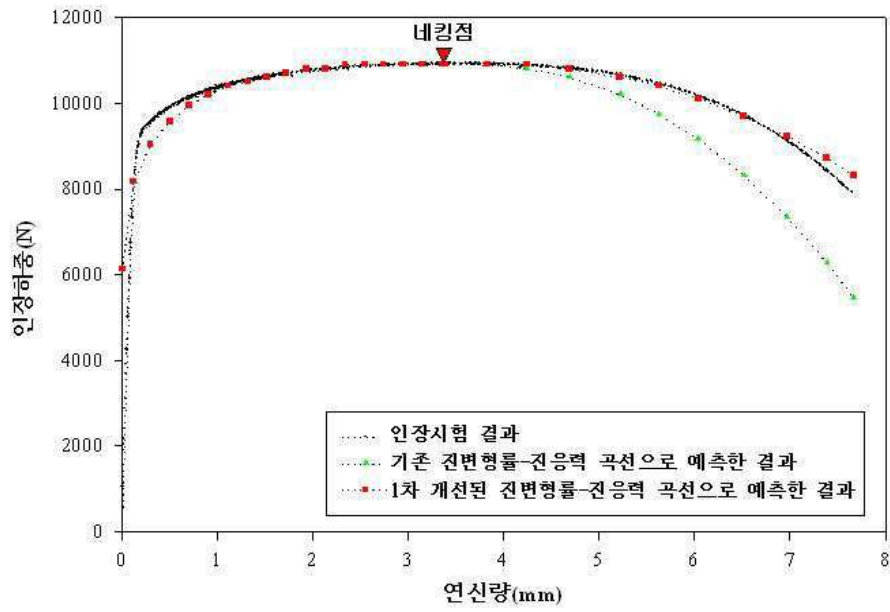
도면4



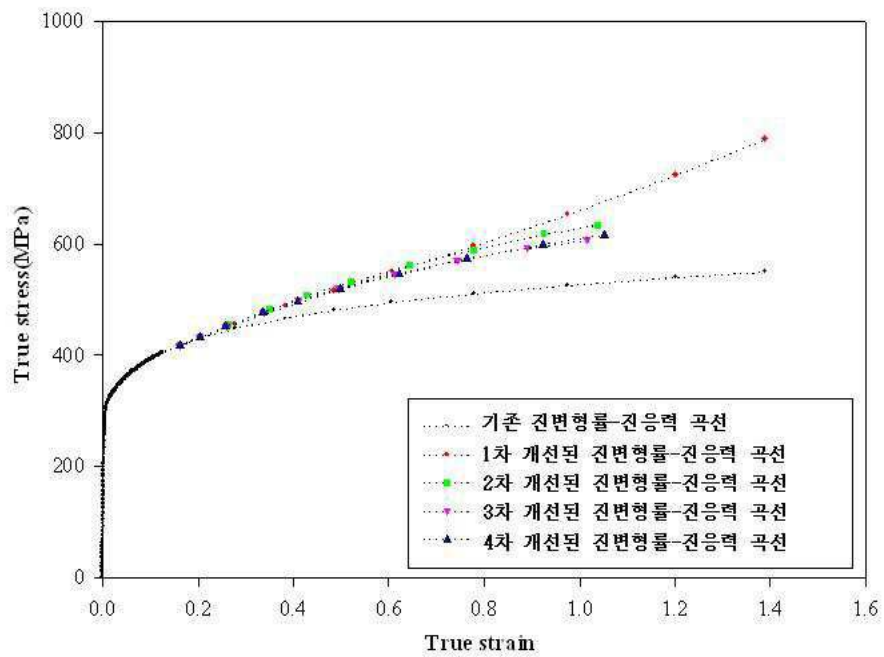
도면5



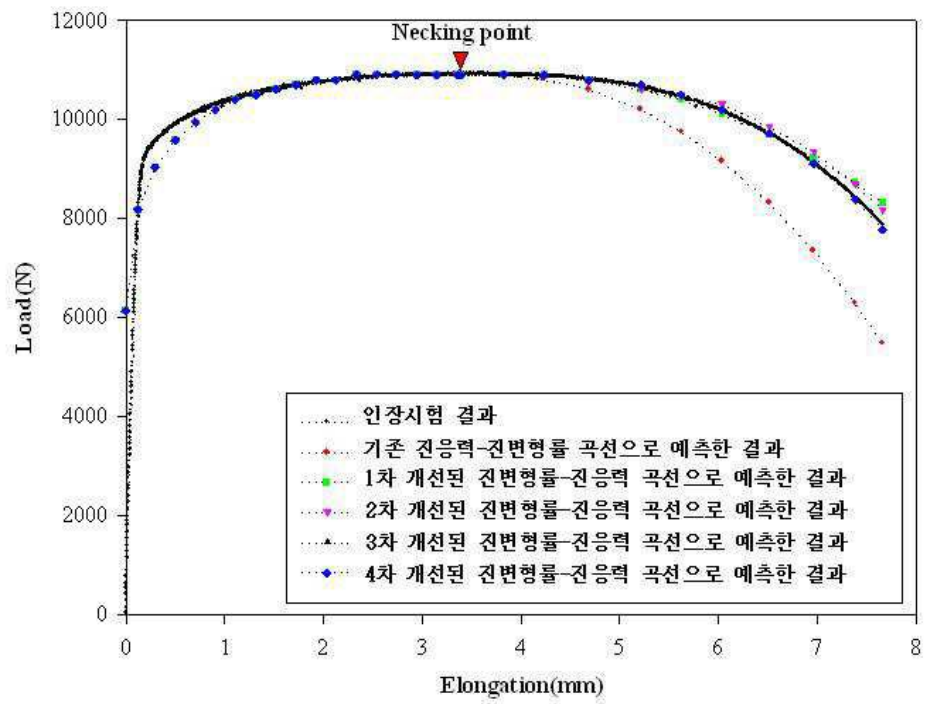
도면6



도면7

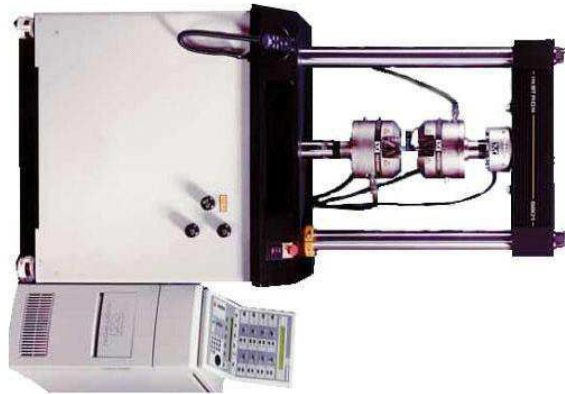


도면8



도면9

INSTRON에 가상 적용한 예



INSTRON Series IX Automated Materials Tester Version 7.50.00

File Method Choose Make a selection

TEST

REPORT

LABVIEW

INSTRON

HELP

EXIT

진행 중인 시험을 종료합니다

INSTRON Series IX Automated Materials Tester Version 7.50.00

File Method Choose Make a selection

TEST

REPORT

LABVIEW

INSTRON

HELP

EXIT

진행 중인 시험을 종료합니다

제안 시스템

도면10

