

(19)대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(51) Int. Cl.⁷
G01N 3/42

(45) 공고일자 2005년09월30일
(11) 등록번호 10-0517857
(24) 등록일자 2005년09월22일

(21) 출원번호 10-2004-0106759
(22) 출원일자 2004년12월16일

(65) 공개번호
(43) 공개일자

(73) 특허권자 (주)프론틱스
서울특별시 관악구 신림동 산56-1 서울대학교 신소재공동연구소 305호

(72) 발명자 김광호
서울시 관악구 봉천6동 66-21동 B01호

정원석
경남 마산시 회원구 회원1동 32-9

(74) 대리인 김은구

심사관 : 정호근

(54) 연속압입시험법을 이용한 잔류응력 측정방법

요약

본 발명은 잔류응력 측정방법에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 연속압입시험기를 이용한 잔류응력 측정방법에 있어서 재료의 쌓임(pile-up)과 함몰(sink-in), 압입자의 무더짐에 따른 실제접촉(압입)깊이의 오차 보정과 또한 기존의 용접부의 잔류응력 평가방법에서 직접 열적·기계적 방법으로 응력을 제거할 수 없기 때문에 무응력 기준곡선을 예측하기 어려웠으며, 이와 아울러 정량적인 잔류응력평가가 쉽지 않았다. 그렇지만, 본 발명에서의 잔류응력에 무관한 모재부와 용접부의 압입강도비(σ_{IT} ratio)를 통해 용접부의 무응력 곡선을 정확히 예측하고, 이를 바탕으로 용접부 내지는 비등방향 응력 구조를 가지는 재료에 대해 오차를 보정하여 보다 정확한 잔류응력을 측정할 수 있는 잔류응력 측정방법에 관한 것이다.

본 발명에 따르면 종래 기술에 따른 잔류응력 측정방법에 비하여 오차발생을 최소화하고 실제 모델에 맞는 측정방법을 적용할 수 있는 효과가 있다.

대표도

도 6

색인어

연속압입, 하중인가곡선, 무응력 곡선, 응력곡선, 압입강도비, 압입자보정상수(Δha), 접촉(압입)깊이 보정상수의 비(f), 용접부 잔류응력

명세서

도면의 간단한 설명

- 도1은 종래기술에 따른 잔류응력 측정장치 중 본체의 정단면도.
 도2는 잔류응력 측정장치를 통해 얻은 압입하중-변위곡선 그래프.
 도3은 하중인가와 하중제거의 전환시점에서 실제곡선의 형태를 나타낸 그래프.
 도4는 실제실험을 통하여 얻어진 접촉(압입)깊이 보정상수(f)값을 나타내는 표.
 도5a는 이상적인 압입자(ideally sharp tip)에 의하여, 도5b는 실제 무더진 압입자(blunted tip)에 의하여 변형된 재료의 각각 나타내는 단면도.
 도6은 무응력상태와 잔류응력상태의 압입하중-변위곡선을 나타낸 그래프.
 도7은 2차식으로 적합화된 압입하중-변위곡선을 나타낸 그래프.
 도8은 인장응력과 무응력 상태에서의 압입자/시편간의 접촉현상 차이를 나타내는 단면도.
 도9는 이상적인 압입자일 때 압입경도(H_{IT})를 측정하는 방법을 나타낸 개념도.
 도10은 재료와 압입자의 실제접촉상태를 나타낸 단면도.
 도11a는 API X65에 대해 열처리를 통한 무응력 곡선과 압입강도비로 유도된 무응력 곡선의 비교상태를 나타낸 그래프.
 도11b는 SS400에 대해 열처리를 통한 무응력 곡선과 압입강도비로 유도된 무응력 곡선 비교상태를 나타낸 그래프.
 도12는 잔류응력 유·무에 따른 압입강도 변화량을 나타낸 표.
 도13은 가공경화지수별 (소재별) 압입경도와 강도의 비.
 도14a는 실제 용접부를 절단법과 연속압입시험법을 이용하여 검증하는 방법을 나타낸 구조도.
 도14b는 실제 용접부를 홀-드릴링법과 연속압입시험법을 이용하여 검증하는 방법을 나타낸 구조도.
 도14c는 API X65에 대하여 연속압입시험과 홀-드릴링, 절단 시험을 통한 잔류 응력 비교 결과를 나타낸 그래프.
 도14d는 SS400에 대하여 연속압입시험과 홀-드릴링, 절단 시험을 통한 잔류 응력 비교 결과를 나타낸 그래프.

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

본 발명은 잔류응력 측정방법에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 연속압입시험기를 이용한 잔류응력 측정방법에 있어서 재료의 쌓임(pile-up)과 함몰(sink-in), 압입자의 무더짐에 따른 오차를 보정하여 보다 정확한 잔류응력을 측정할 수 있는 잔류응력 측정방법에 관한 것이다.

측정대상이 되는 재료에서 시편을 채취한 후, 재료에 하중을 가하면서 재료의 내부에 남아있는 응력을 측정하는 방법이 개시되고 있다. 특히 실제 사용되고 있는 건축물이나 산업설비의 잔류응력을 측정하기 위해서는 실제 시편을 채취하는 파괴적인 실험방법을 사용할 수 없으므로, 비파괴적인 측정방법이 도입될 필요가 있다.

이에 따라 재료의 표면에 연속적으로 하중의 인가와 제거를 반복함으로써 압입하중과 압입깊이를 측정하고, 이를 바탕으로 잔류응력을 계산하는 방법에 관한 기술이 개시되고 있다.

본 발명의 출원인과 동일인에 의하여 선출원되어 등록된 등록특허 제0416723호 "잔류응력 측정장치 및 이 장치를 이용한 잔류응력 데이터 측정방법, 잔류응력 측정방법 및 이 측정방법을 기록한 기록매체"가 개시되어 있다.

도1을 참조하여 종래기술에 따른 잔류응력 측정장치와 측정방법을 설명하면, 잔류응력을 측정하기 위해서는 reference 시편(stress free 상태)의 압입하중 - 변위곡선이 필요한데, 이는 측정하고자 하는 실제 시편의 압입하중 - 변위곡선과 비교하기 위함이다. 잔류응력을 구하기 위해서는 다음의 과정을 따라야 하는데 그 순서는 다음과 같다.

우선, reference 시편에 진술한 잔류응력 측정장치를 이용하여 다중 연속압입실험을 행하고 여기서 얻어진 곡선을 토대로 하여 loading 곡선의 fitting식, 하중제거곡선의 기울기, 그리고 실제 압입깊이 h_c 를 구한다.

얻어진 압입하중 - 변위곡선에서 기계적 이완, 감/가속효과, Creep 효과가 없는 loading 부분만 따로 잘라내어 fitting의 과정을 거치게 되는데 이는 실제 다중압입의 경우 하중제거시의 곡선형태가 왜곡되어 실제 적용된 하중과 차이를 보이기 때문에 보다 정확한 값의 측정을 위해 반드시 필요하다.

일정 경도값을 나타내는 Vickers 압입시험시 가해지는 하중은 압흔의 면적에 비례하나, 압입자 하부의 복잡한 탄성역/탄소성변형에 의해서 정확히 비례하는 관계라고 하기는 힘들므로 loading 시 주어진 압입깊이와의 관계를 [식 1]과 같이 5차식의 형태로 적합화시켜 실험식을 얻는다.

수학식 1

$$L = a_1 h^5 + a_2 h^4 + a_3 h^3 + a_4 h^2 + a_5 h + c$$

여기서, $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, c$ 는 상수이다.

다음으로 각각의 unloading 곡선의 분석을 시작하는데 있어서도 위의 loading 곡선분석과 같이 다음의 [식 2]와 같은 형태로 fitting 한다. [식 2]는 unloading 곡선의 모든 점에 가장 근사한 곡선을 계산하는 알고리즘이다.

수학식 2

$$L = k(h - h_f)^m$$

여기서 h_f 는 하중제거 후의 잔류 최종 깊이이다. 양변에 대수를 취하여 fitting을 거치면 k 및 m 을 알 수 있고 이것을 통해서 하중제거곡선의 기울기 S 를 구할 수 있는데 그 관계는 아래의 [식 3]으로 주어진다.

수학식 3

$$S = \left(\frac{dL}{dh} \right)_{h=h_m} = km(h - h_f)^{m-1}$$

탄성적인 압입하중 제거중에 압입자/시편이 일정한 접촉면적을 유지하면, 하중제거 곡선은 직선형태를 갖게 되고, 이로부터 접촉깊이 h_c 가 결정된다. 그러나, 하중 제거중에 실제 압입자 형상에 따라서 접촉면적은 점차 감소하며, 접촉부 주변의 탄성굽힘도 변화한다. 이러한 실제압입자의 접촉 관계식은 [식 4]와 같이 주어진다.

[식 3]에서 h_{\max} 의 값은 각 unloading curve 중 변위가 가장 큰 값을 취하여 S를 결정한다. 그 후에 loading curve를 fitting한 식과 S를 이용하여 얻을 수 있는 unloading curve의 접선과의 교점을 각 unloading 부분에서의 h_{\max} 로 재설정한다. 이는 장비에 따라서 curve가 이상적인 형태를 벗어날 수도 있는데 이 때 발생하는 오차를 최소화하기 위함이다.

수학식 4

$$h_c = h_{\max} - \omega(h_{\max} - h_1) = h_{\max} - \omega \frac{L_{\max}}{S}$$

여기서 h_1 는 하중 제거 곡선의 접선을 연장할 때의 절편 깊이이고 h_{\max} 는 앞서 기술한 loading curve와 S를 이용하여 얻을 수 있는 unloading curve의 접선과의 교점을 이용해 구한 각 부분 unloading 시의 최대 압입깊이이다.

ω 는 압입자의 geometrical factor이며 Vickers 압입자의 경우에는 그 값이 0.72로 주어진다. 이러한 접촉깊이 결정은 각각의 부분 unloading에서 모두 행해지게 된다.

reference 시편에서의 실험이 끝나면 잔류응력을 측정하고자 하는 시편에서 실험을 행하게 되는데, 이 때는 부분하중 제거의 단계를 거칠 필요가 없다. 이는 탄성한도 내의 잔류응력에 의한 고유경도의 변화가 없으므로, reference 시편에서 얻어진 접촉깊이 h_c 값을 이용하면 응력 상태의 압입하중에 대응하는 접촉깊이의 환산이 가능하기 때문이다.

잔류응력을 구하고자 하는 시편에서 연속압입실험을 행한 후 이전 단계와 마찬가지로 loading부분의 fitting을 거치게 되고 여기서 얻어진 식과 reference 시편에서 얻어진 fitting식과의 비교를 행하게 된다. 이 때, 측정된 압입하중 - 변위곡선의 형태를 통하여 존재하는 잔류응력의 부호를 결정할 수 있는데, 만일 reference 상태보다 곡선의 위치가 위라면 압축잔류응력이 존재하는 것이며 그 반대의 경우는 인장잔류응력이 존재한다고 할 수 있다.

각각의 loading 곡선식이 얻어진 후에는 다음의 관계에 의해 잔류응력을 측정하게 되는데 reference 시편과 실제 시편과의 같은 압입깊이에서 인가되는 압입하중의 차이는 잔류응력에 의한 영향이라고 할 수 있으므로 그 때의 하중차이를 실제 접촉면적으로 나누게 되면 잔류응력값을 얻을 수 있다. 본 예에서는 각 unloading curve에서 구한 h_{\max} 의 압입깊이에서 하중의 차이를 구하였다. 따라서 계산되는 잔류응력 값은 한번의 실험 시 reference 실험 시의 부분 unloading 회수만큼 얻을 수 있다.

상수 α 가 존재하는 이유는 시편상에 존재하는 응력의 분포 상태가 각각 다르기 때문으로 박막에서의 등방향이축응력상태($\sigma_x = \sigma_y$)나 용접부와 같이 한쪽방향으로의 응력만 중시되는 상황($\sigma_x \gg \sigma_y$)을 예로 들 수 있다.

잔류응력에 의한 영향은 동일한 압입깊이에 대한 적용하중의 차이로 나타나면 이 때 응력값은 가해진 하중을 단위면적으로 나눈 값이므로 다음의 [식 5]와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 5

$$L_{res} = L - L_0$$

$$\sigma_{res} = \alpha \frac{L_{res}}{A_c}$$

($L_{res} = L_0 - L = \Delta L$ 이다.)

여기서 L은 실제 시편에 인가되는 압입 하중, L_0 는 reference 시편에 인가되는 압입하중이며 A_C 는 실제 접촉면적이고 Vicker's 압입자의 기하학적 형태를 고려한다면 다음의 [식 6]과 같다.

$$\text{수학식 6}$$

$$A_C = 24.5h_C^2$$

Reference 시편에서 얻어진 각각의 h_C 값을 대입하여 나온 A_C 값을 대입하여 보면 실제 잔류응력값은 어느 정도 범위 내에서 변화하게 되는데 이는 압입하중이 증가함에 따라 압입자 하부의 소성 영역이 증가함에 따른 것이다.

이에 따라 해당 접촉면적에 따른 잔류응력값들의 평균을 이용하여 그 값을 잔류응력으로 정의한다.

그러나 종래기술에 따른 잔류응력 측정방법에 있어서는 이론상의 계산값과 실제 실험으로 얻어지는 측정치의 차이로 인하여 미세한 오차가 발생할 수 있다. 즉 이상적인 압입하중-변위곡선 그래프를 얻을 수 없는 경우에는 압입하중의 과소평가 또는 변위의 과대평가 현상이 발생하여 오차를 발생할 소지가 있다.

또한 종래기술에 있어서는 연속적인 압입하중-변위곡선에서 하중제거곡선의 기울기를 구하여 잔류응력을 측정하는 방법을 사용하였는데, 하중의 제거곡선은 실제 제거곡선과 많은 오차가 생길 수 있는 소지가 있어서 이를 해결하여야 할 필요가 있었다.

또한 하중인가(loading)시 주어지는 압입깊이와의 관계를 복잡한 5차식에서 간단하면서도 실제압입곡선과 잘 부합하는 곡선을 생성하기 위해 2차식 형태로 적합화시켰다. 그리고 반복되는 실험에 의하여 압입자의 팁(Tip)이 무더짐(blunting)으로써 발생하는 오차와, 재료의 쌓임(pile-up) 또는 함몰(sink-in)에 의한 오차를 반영할 수 없어서 측정결과에 오차가 발생할 수 있으므로 이를 보완할 필요가 있었다.

그리고 아울러 용접부에서 실제 용접부의 무잔류응력상태(stress-free state)에서 무응력 기준곡선(stress-free curve)을 예측하지 못하는 점도 측정결과에 오차의 원인이 되므로 이를 보완할 필요가 있었다.

그리고 종래기술은 reference 시편(stress free 상태)에서만 무응력 기준곡선을 측정할 수 있고, 용접부와 같이 각기 다른 방향 또는 크기의 응력을 가지는 영역에서는 적용이 불가능 하였다. 무응력 기준곡선을 얻기 위해 기계적·열적방법을 통해 무응력 상태를 만들어서 측정해야만 했다. 다시 말해, 용접부에서 실제 용접부의 무잔류응력상태(stress-free state)에서 무응력 기준곡선(stress-free curve)을 예측하지 못하기 때문에 용접부와 비등방성 응력상태를 가지는 재료로부터 무응력 기준곡선을 예측할 경우 측정결과에 오차의 원인이 되므로 이를 보완할 필요가 있었다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

본 발명은 전술한 문제점을 해결하기 위하여 안출된 것으로서, 압입자의 변형과 재료의 파일업, 싱크인에 따른 오차를 보정할 수 있는 잔류응력 측정방법을 제공하는 것을 목적으로 한다.

또한 본 발명은 하중과 압입깊이간의 곡선을 2차식으로 간략화하고, 실제 측정되는 곡선으로부터 발생하는 오차를 줄이기 위해 압입깊이 및 접촉면적을 하중인가곡선(loading curve)으로부터 구하고, 용접부의 무잔류응력상태에서의 무응력 기준곡선을 강도비를 이용하여 예측하여 보다 정확한 잔류응력을 측정할 수 있도록 하는 잔류응력 측정방법을 제공하는 것을 목적으로 한다.

발명의 구성 및 작용

전술한 문제점을 해결하기 위한 본 발명은 재료의 잔류응력을 측정하는 방법으로서, 상기 재료의 무응력 상태에서의 기준시편에 대하여 압입하중의 연속적인 인가 및 제거를 반복하여 무응력 상태에서의 압입하중-변위곡선을 생성하고, 상기 무응력 상태에서의 압입하중-변위곡선에서 최대하중과 최대압입깊이를 측정하고, 상기 최대압입깊이로부터 실제압입깊이(h_C)를 계산하고, 상기 실제압입깊이로부터 접촉면적(A_C)을 계산하고, 상기 접촉면적으로부터 상기 재료의 경도(H_{IT})를

측정하여 상기 기준시편에 대한 무응력곡선(응력기준곡선)을 생성하는 단계와; 상기 재료의 응력 상태에서의 실제시편에 대하여 압입하중을 연속적으로 인가 및 제거하여 상기 실제시편에 대한 응력곡선을 생성하는 단계와; 상기 응력기준곡선과 상기 응력곡선 사이의 비교를 통하여 얻어진 하중차이(ΔL)와, 하중인가 곡선으로부터 얻어진 응력상태에서의 접촉면적(A_c)으로부터 상기 재료의 잔류응력을 측정하는 단계;를 포함한다.

상기 압입하중-변위곡선을 분석하는 방법은 상기 재료가 용접부를 제외한 모재인 경우에 $L=k_0^b(h+\Delta h_a)^2$ 로 표현되는 2차식을 적용하며, 여기서, 아래첨자 0은 무응력 상태를, 윗첨자 b는 모재를 의미하며, k_0^b 는 모재부 무응력 곡선(응력기준곡선)에서의 하중인가곡선 기울기이며, 상기 최대하중과 최대압입깊이를 측정하는 단계는 상기 다중 하중인가곡선에서 각 하중인가 단계에서의 실제 최대하중(L_{max})과, 각 하중제거 단계에서의 실제 최대압입깊이(h_{max}) 점을 찾는 것을 특징으로 한다.

상기 다중 하중인가곡선을 분석하는 방법은 상기 재료가 용접부인 경우에 $L=k_0^w(h+\Delta h_a)^2$ 로 표현되는 2차식을 적용하며, 여기서, 아래첨자 0은 무응력 상태를, 윗첨자 w는 용접부를 의미하며, k_0^w 는 용접부 무응력곡선(응력기준곡선)에서의 하중인가곡선의 기울기이며, 상기 최대하중과 최대압입깊이를 측정하는 단계는 상기 다중 하중인가곡선에서 각 하중인가 단계에서의 실제 최대하중(L_{max})과, 각 하중제거 단계에서의 실제 최대압입깊이(h_{max}) 점을 찾는 것을 특징으로 한다.

상기 k_0^w 는 $k_0^w = \frac{H_{IT,0}^w}{H_{IT,0}^b} k_0^b = \frac{\sigma_{IT}^w}{\sigma_{IT}^b} k_0^b$ 의 식으로 표현되며, 여기서 k_0^b 는 모재의 응력기준곡선(무응력곡선)에서 하중인가곡선의 기울기이며, $H_{IT,0}^b$ 와 $H_{IT,0}^w$ 는 각각 모재와 용접부의 경도이며, σ_{IT}^b 와 σ_{IT}^w 는 각각 모재와 용접부의 강도인 것을 특징으로 한다.

상기 모재와 용접부의 강도는 항복강도($\sigma_{IT,YS}$), 인장강도($\sigma_{IT,UTS}$), 평균강도($\sigma_{IT,f}$), 압입강도($\sigma_{IT,r}$) 중의 어느 하나인 것을 특징으로 한다.

상기 평균강도($\sigma_{IT,f}$)는 상기 항복강도($\sigma_{IT,YS}$)와 인장강도($\sigma_{IT,UTS}$)의 산술평균값이며, 상기 압입강도($\sigma_{IT,r}$)는 KS B 0950을 통해 얻어진 압입 유동 곡선에서 변형률 0.08에 해당하는 강도값인 것을 특징으로 한다.

상기 Δh_a 는 이상적인 압입자(ideally sharp tip)가 아니거나, 압입자가 무더지는 것을 표현하기 위한 기하학적 인자인 압입자보정상수이며, 이상적인 압입자를 사용했을 때 압입깊이와 실제 압입자를 사용했을 때 압입깊이의 차이인 것을 특징으로 한다.

상기 최대압입깊이로부터 실제압입깊이(h_c)를 계산하는 단계는 $h_c=f(h_{max}+\Delta h_a)$ 의 식을 적용하며, 여기서 h_c 는 실제 접촉(압입)깊이, f는 실제접촉(압입)깊이와 센서로부터 측정된 최대압입깊이(h_{max})의 비의 보정상수인 것을 특징으로 한다.

상기 보정상수 f는 실제압입깊이(h_c)와 센서로부터 측정된 압입깊이(h_{max})의 비(ratio)로서, $f = \frac{h_c}{h_{max} + \Delta h_a}$ 로 표현되며, 실질적으로 재료의 쌓임(pile-up) 또는 함몰(sink-in)에 의하여 압입자와 재료의 표면이 접촉하는 부분이 상승 또는 하

강하게 되고, 따라서 실제압입깊이(h_c)가 변화하게 되므로 이를 보정하기 위한 상수로서, $f = 1.2445(1-0.6m)(1-7.2 \frac{\sigma_{IT,YS}}{E_r})$ 로 다르게 표현되며, 상기 보정상수 f는 0.94 내지 1.12의 범위를 갖는 것을 특징으로 한다.

상기 실제접촉(압입)깊이(h_c)로부터 실제접촉면적(A_c)을 계산하는 단계는 $A_c = 24.5h_c^2$ 의 식을 적용하며, 여기서 h_c 는 실제접촉(압입)깊이인 것을 특징으로 한다.

$$H_{IT} = \frac{L_{max}}{A_c}$$

상기 실제접촉면적(A_c)으로부터 압입경도(H_{IT})를 계산하는 단계는 $H_{IT} = \frac{L_{max}}{A_c}$ 의 식을 적용하며, 여기서 L_{max} 는 상기 각 하중인가 단계에서의 실제최대하중, A_c 는 실제접촉면적인 것을 특징으로 한다.

상기 재료의 응력 상태에서의 실제시편에 연속압입 실험을 통하여 응력곡선을 생성하는 단계는 상기 실제시편에 연속압입 실험을 통하여 각 하중인가 단계에서의 실제 최대하중(L_{max})과, 하중제거되는 구간 중 변위가 가장 큰 값인 최대압입깊이(h_{max})를 구하고, 하중인가곡선으로부터 응력상태에서의 하중인가곡선의 기울기(k_s^b, k_s^w)를 구하는 것을 특징으로 한다.

상기 하중차이는 상기 응력곡선(응력상태에서의 하중인가곡선 기울기)의 동일한 최대압입깊이에서 인가된 하중(L^T 또는 L^C)과, 상기 무응력곡선(무응력 상태에서의 하중인가곡선 기울기)의 동일한 최대압입깊이에서 인가된 하중(L_0)과의 차이

$$A_s^T = \frac{L_s^T}{H_{IT}} \quad \text{또는} \quad A_s^C = \frac{L_s^C}{H_{IT}}$$

인 것을 특징으로 하며, 상기 접촉면적은 $A_s^T = \frac{L_s^T}{H_{IT}}$ 또는 $A_s^C = \frac{L_s^C}{H_{IT}}$ 의 식을 적용하며, 여기서 A_s^T 와 A_s^C 는 응력상태(인장·압축응력상태)에서의 접촉면적, H_{IT} 는 압입경도인 것을 특징으로 한다.

$$\sigma_{res} = \eta_1 \frac{\Delta L}{A_s}$$

상기 모재의 잔류응력은 $\sigma_{res} = \eta_1 \frac{\Delta L}{A_s}$ 의 식으로 표현되며, 여기서 σ_{res} 는 잔류응력값, ΔL 은 무응력곡선과 응력곡선에서 유도된 수직하중차이, A_s 는 응력상태에서의 접촉면적, η_1 은 등방성 잔류 응력을 결정하기 위한 비례 상수인 것을 특징으로 한다.

$$\sigma_{res} = \eta_2 \frac{\Delta L}{A_s}$$

상기 용접부의 잔류응력은 $\sigma_{res} = \eta_2 \frac{\Delta L}{A_s}$ 의 식으로 표현되며, σ_{res} 는 잔류응력값, ΔL 은 무응력곡선과 응력곡선에서 유도된 수직하중차이, A_s 는 응력상태에서의 접촉면적, η_2 는 비등방성 잔류 응력을 결정하기 위한 비례 상수인 것을 특징으로 한다.

이하 도면을 참조하여 본 발명의 실시예를 설명한다.

도2는 잔류응력 측정장치를 통해 얻은 압입하중-변위곡선 그래프이다.

도2에서와 같이 재료에 대한 압입에 의하여 얻어진 그래프에서 하중제거(unloading curve)되는 구간 중 변위가 가장 큰 값인 최대압입깊이(h_{max}) 점을 찾아상기 실제압입깊이(h_c)를 계산한다. 실제 측정되는 압입깊이는 압입깊이를 보정하기 위한 factor인 압입자보정상수(Δh_a)와 압입깊이 보정상수의 비(f)로부터 정의된다.

그런데 실제 실험에서는 이론상의 곡선에서와 달리 하중의 인가와 최대 변위가 동시에 발생하지 않게 된다.

도3은 하중인가와 하중제거의 전환시점에서 실제곡선의 형태를 나타낸 그래프이다. 종래기술에 따른 측정방법에서는 최대변위(h_{max})지점과 최대하중(L_{max})을 각각 L_2, h_2 로 설정하였다. 즉 최대변위에서의 하중을 최대하중으로 설정하여 계산하는 것이다.

또한 하중제거곡선(unloading curve)으로부터 압입깊이를 계산하기 위해 기울기(S)를 계산하여야 하고, 상기 최대압입깊이(h_{max})와 하중제거곡선의 기울기(S)로 접촉면적(A_c)을 유도해야 하지만, 압입시험도중에 발생할 수 있는 곡선이상 유·무 또는 데이터 산란에 의한 영향을 민감하게 반영하므로 계산상의 오차가 발생할 수 있는 여지가 있다.

따라서 기울기 및 하중제거곡선을 별도 계산을 하지 않고 압입하중-변위곡선 그래프로부터 잔류응력을 측정하기 위하여 변수를 단순화할 필요가 있으며, 이를 위해 최대하중을 L_1 , 최대변위를 h_2 로 설정하여 연산을 수행한다. 즉 하중이 최대인 점과 변위가 최대인 점을 측정하고, 하중이 최대인 점에서의 하중을 최대하중으로, 변위가 최대인 점에서의 변위를 최대변위로 하여 계산하는 것이다.

이와 같이 종래기술에 따른 방법에서와 달리 최대하중의 값이 L_2 에서 L_1 으로 변경됨으로 인하여 경도(H_{IT})값이 상승되므로 해서 잔류응력값이 과대평가되지만, 실제하중의 적용으로 인하여 객관적 측면이 강조되었으며, 그 증가량은 미미하며 결국 보다 정확한 실제 잔류응력을 측정할 수 있게 되었다.

도5a는 이상적인 압입자(ideally sharp tip)에 의하여 변형된 재료의 단면도이며, 도 5b는 실제 무더진 압입자(blunted tip)에 의하여 변형된 재료의 단면도이다. 도 9에서와 같이 이상적인 상황에서의 실제압입깊이는 7d와 같다고 볼 수 있다. 그러나 실제 압입시험에서는 도 10과 같이 압입으로 인한 압입자 주변에 나타나는 탄성변형과 재료가 쌓이거나, 함몰되는 파일업(pile-up), 싱크인(sink-in)으로 인한 현상으로 이상적인 상황과는 괴리가 있을 수밖에 없으며, 일정한 오차가 발생하게 된다.

본 발명은 측정대상이 되는 재료에 연속적인 하중의 인가와 제거를 반복하여 잔류응력을 구하는 잔류응력측정시험기를 이용하였으며, 본 발명에서 사용되는 잔류응력측정시험기는 본 출원인에 의하여 선출원되어 등록된 "잔류응력 측정장치 및 이 장치를 이용한 잔류응력데이터측정방법, 잔류응력측정방법 및 이 측정방법을 기록한 기록매체"(대한민국특허 제 416723호)에서 개시된 측정장치이다.

어떤 재료의 인가하중과 압입깊이의 변화를 연속적으로 측정하여 상기 재료의 잔류응력을 측정하기 위해서는 잔류 응력이 인가된 상태에서의 압입하중 - 압입깊이 곡선과 무응력 상태에서의 압입하중 - 압입깊이 곡선이 필요하다. 이는 측정하고자 하는 실제 시편의 압입하중-변위곡선과 비교하기 위함이다. 무응력 상태에서의 압입하중 - 압입깊이 곡선을 유도하여 잔류 응력을 측정하는 과정은 다음과 같다.

잔류응력을 측정하고자 하는 용접부와 용접부를 제외한 시편에서 무응력 상태라 판단되는 모재부(단, 용접부의 경우 실시예2에서 설명한다.)에 대해 비커스 누르개와 구형 누르개를 사용하여 각각에 대한 연속압입시험을 수행하여 압입하중-압입깊이 곡선을 구한다.

비커스 누르개로 구해진 압입하중 - 압입깊이 곡선은 하중 변화량 및 접촉면적 결정에 사용되며, 구형 누르개로 구해진 압입하중 - 압입깊이 곡선은 KS B0950에 따라 압입 인장 물성을 결정하는데 사용된다.

구형 누르개로부터 얻어지는 압입하중-압입깊이 곡선은 용접부 시편에서 무잔류응력상태에서의 무응력 기준곡선을 유도하고자 함이며, 용접부를 제외한 시편의 잔류응력 평가에서는 필요하지 않다. 또한 용접부라 국한되어지는 시편은 이축 비등방성 잔류응력이라고 인식되고 있는 실제 접합에 의해 이루어진 시편 내지는 임의로 다르게 또는 편향적으로 주어진 응력 분포를 가지는 것을 말한다. 그러나 등방성 내지는 1축 응력의 분포를 가지는 경우는 상기 언급되어진 "잔류응력 측정장치 및 이 장치를 이용한 잔류응력데이터측정방법, 잔류응력측정방법 및 이 측정방법을 기록한 기록매체"에서와 같이 잔류응력을 평가한다.

상기 측정방법을 간단히 정리하면 다음과 같다. 시편 표면에 평행하게 등방향 인장 및 압축 잔류응력이 존재하면 도 6과 같이 압입하중 인가곡선의 기울기가 변화한다. 동일한 최대 압입깊이에 도달하기 위해서 인장 잔류응력을 갖는 시편은 무응력 상태에 비해 낮은 압입하중이 필요하고, 이와 반대로 압축 잔류응력을 갖는 시편은 높은 압입하중이 필요하다. 이러한 압입하중의 감소 및 증가분은 잔류응력의 영향으로 판단할 수 있다. 즉, 인장 잔류응력 상태의 시편에서는 표면과 평행한 잔류응력에 의해 유도된 수직하중이 외부 인가하중에 더해지므로 무응력 상태보다 낮은 인가하중에서 정해진 최대 압입깊이가 얻어진다.

반면에 압축 잔류응력을 갖는 재료에서는 잔류응력에 의해 유도된 수직하중이 외부 인가하중과 반대방향으로 작용하기 때문에 정해진 최대 압입깊이에 도달하는데 보다 높은 인가하중이 필요하게 된다. 그러므로 연속 압입시험을 통해 측정된 무응력 및 잔류응력 상태의 압입하중 인가곡선의 비교를 통해 측정되는 잔류응력 유도 수직하중(residual stress-induced normal load)의 분석을 통해 정량적으로 잔류응력을 평가할 수 있다.

다시 말해 reference 시편(무응력 상태)에 전술한 잔류응력 측정장치를 이용하여 다중 연속압입실험을 행하고 여기서 얻어진 곡선을 토대로 하여 하중인가 곡선의 fitting식, 실제압입깊이(h_c)를 구한다.

얻어진 압입하중-압입깊이 곡선에서 하중인가곡선(loading curve)부분만 따로 잘라내어 fitting의 과정을 거치게 되는데 이는 실제 다중압입의 경우 하중제거시의 곡선형태가 왜곡되어 실제 적용된 하중과 차이를 보이기 때문에 보다 정확한 값의 측정을 위해 반드시 필요하다.

모재(무응력 상태)에서 비커스 누르개로 얻어진 압입하중 - 압입깊이 곡선의 하중 인가 곡선은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

일정 경도값을 나타내는 비커스 압입시험시 가해지는 하중은 압흔의 면적에 비례하므로, loading 시 주어진 압입깊이와의 관계를 하중인가부 ($L=kh^2$)의 기울기 (k)에 비례하는 2차식의 형태로 나타낼 수 있으나, 이상적이지 못한 압입자로부터 얻은 곡선은 실제 압입곡선과 차이를 보인다. 그래서 압입자의 무더진 정도를 나타내는 Δh_a 를 적용하여 수정된 2차식의 형태로 적합화 시켜 [식 7]과 같은 실험식을 얻는다. 도 7에서 수정된 Δh_a 를 적용한 수정된 2차식의 형태는 상기 단순 2차식($L=kh^2$)과 비교할 때, 실제 압입곡선과 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

수학식 7

$$L=k(h+\Delta h_a)^2$$

여기서 k는 압입하중과 압입깊이의 관계식의 계수이며, Δh_a 는 하중 인가 곡선의 초기 부분을 보정하기 위한 압입깊이 항을 의미한다.

모재(무응력 상태), 용접부(무응력 상태)의 비커스 누르개의 압입하중 - 압입깊이 곡선의 하중 인가 곡선을 [식 7]을 이용하여 [식 8] 같이 나타낼 수 있으나, 실제 응력이 존재하는 용접부의 경우에는 무응력 상태를 압입하중 - 압입깊이 곡선으로부터 측정하기에는 기계적 또는 열적 방법을 동원하지 않고는 기술적으로 매우 어려우므로, 압입 인장 물성(KS B0950)을 이용한 강도비를 통해 무잔류응력상태에서의 무응력 기준곡선을 예측한다.

수학식 8

$$L=k_0^b(h+\Delta h_a)^2 \quad \text{a) ----- 모재(무응력 상태)}$$

$$L=k_0^w(h+\Delta h_a)^2 \quad \text{b) ----- 용접부(무응력 상태)}$$

여기서 아래첨자 0은 무응력 상태를, 윗첨자 b와 w는 각각 모재와 용접부를 의미한다. 또한 용접부는 용착 금속과 열영향부를 모두 의미하며, 무응력(stress-free) 상태는 잔류 응력이 존재하지 않는 상태를 의미한다.

이상의 하중인가-제거곡선에서 최대하중과 최대압입깊이를 측정하고 실제압입깊이와 접촉면적을 계산하고, 실제압입깊이에서 유도되는 수직하중차이를 측정하여 상기 재료의 잔류응력을 평가하게 되는 일련의 과정을 실시예1에서 설명한다.

실시예1 : 용접부를 제외한 재료의 잔류응력 측정

용접부를 제외한 재료의 잔류응력평가는 reference 시편(stress-free state)과 응력상태에서 구한 압입하중-변위곡선을 비교하여 실제압입깊이(h_c) 및 접촉면적(A_c), 압입경도(H_{IT})와 잔류응력 유무에 따라 생성되는 곡선의 기울기에서 유도되는 수직하중차이(ΔL)로부터 잔류응력을 측정하는 방법으로서, 무응력 상태에서의 응력기준곡선(stress-free) 확보 단계와, 응력상태에서의 응력곡선(stressed curve)확보 단계와, 상기 무응력 상태 및 응력 상태에서 확보된 곡선들을 상호 비교하는 단계와, 상기 비교로부터 얻어진 두 곡선의 하중차이(ΔL)와 하중인가 곡선으로부터 얻어진 접촉면적으로부터 잔류응력을 측정하는 단계를 포함한다.

상기 응력기준곡선(stress-free curve)과 응력곡선(stressed curve)을 얻기 위해서는 무응력 상태인 지점과 응력상태의 지점에서 각각의 압입하중-변위곡선을 확보해야 한다.

우선 무응력 상태(stress-free state)에서의 압입하중-변위곡선을 얻기 위해서 측정된 다중 하중인가곡선(multiple loading curve)을 분석하는 단계, 압입하중-변위곡선에서 최대하중과 최대압입깊이를 측정하는 단계, 상기 최대압입깊이로부터 실제압입깊이(h_c)를 계산하는 단계, 상기 실제압입깊이로부터 접촉면적(A_c)을 계산하는 단계, 상기 접촉면적으로부터 상기 재료의 경도(H_{IT})를 측정하는 단계를 수행해야만 한다.(계장화 압입 시험에 의해 측정된 압입 경도(ISO 14577-1 참조))

상기 무응력 상태(stress-free state)에서의 압입하중-변위곡선에서 측정된 하중인가곡선(loading curve)을 분석하는 단계는 [식 8]의 a로부터 가능하고, 최대하중과 최대압입깊이를 측정하는 단계에서는 실제 다중압입하중-변위곡선(하중인가-유지-하중제거-유지의 반복곡선)에서 얻는 각 하중인가 단계에서의 실제 최대하중과, 하중제거(unloading curve) 되는 구간 중 변위가 가장 큰 값인 최대압입깊이(h_{max}) 점을 찾아 읽음으로써 측정할 수 있다.

다음으로 상기 최대압입깊이로부터 실제압입깊이를 계산하는 단계는

수학식 9

$$h_c = f(h_{max} + \Delta h_a)$$

의 식을 적용하며, 여기서 h_c 는 실제압입깊이, f 는 실제접촉(압입)깊이와 센서로부터 측정된 최대압입깊이(h_{max}) 비의 보정상수, h_{max} 는 최대압입깊이, Δh_a 는 압입자보정상수이다.

Δh_a 는 실제적인 재료의 압입깊이가 아니며, 압입자가 무더짐에 대한 양을 표현하기 위한 기하학적 인자(geometrical factor)이며, 다른 변수와 혼동을 피하기 위해 아래 첨자는 a로 표기하였다. sharp tip의 기하적인 관계를 비추어 볼 경우 계장화압입시험법(ISO 14577-1 참조)에서 실제압입깊이를 계산하기 위해 필요한 변수이다. 그리고 Δh_a 는 도5a와 도5b에서와 같이 이상적인 압입자(ideally sharp tip)로 측정되는 접촉(압입)깊이(h_c)와, 압입자가 무더짐에 따른 압입깊이(h_b)와의 차이(a correction depth for tip blunt)를 말하며, 실제 측정되는 접촉(압입)깊이(h_c)를 보정하기 위한 factor이다.

f 보정상수(the ratio of contact depth to max. depth)는 실질적으로 재료의 쌓임(pile-in) 또는 함몰(sink-in)에 의하여 압입자와 재료의 표면이 접촉하는 부분이 상승 또는 하강하게 되고, 따라서 실제압입깊이(h_c)가 변화하게 되므로 이를 보정하기 위한 상수이다. f 보정상수는 실제압입깊이(h_c)와 센서로부터 측정된 압입깊이(h_{max})의 비(ratio)로서 0.94 내지 1.12의 범위를 갖는 것을 도 4에서 확인할 수 있다.

도 5에서와 같이 이상적인 압입자(ideally sharp tip)의 경우 f 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 10

$$f = \frac{h_c}{h_{\max}}$$

(ideally sharp tip일 때 실제압입깊이와 최대압입깊이의 비)

실제압입깊이(h_c)는 f 보정상수와 최대압입깊이(h_{\max})의 곱으로 나타낼 수 있으며, 여기에서의 보정상수 f 는 재료에 압입 시 압흔 모서리에 재료가 쌓이거나 함께 들어가는 pile-up과 sink-in 되는 현상을 고려한 보정상수라고 할 수 있다. 아래의 같이 [식 14]를 [식 15]에 대입하여 다중압입하중-변위곡선에서의 각 단계의 최대하중에 해당하는 압입깊이를 알 수 있다.

수학식 11

$$L_{\max} = 24.5Hf^2 h_{\max}^2 \text{ a) ideally sharp tip일 경우}$$

$$L_{\max} = 24.5Hf^2 (h_{\max} + \Delta h_a)^2 \text{ b) blunted tip일 경우}$$

하지만, blunted tip의 경우 센서로부터 측정된 최대압입깊이(h_{\max})에서 압입자가 무더짐에 따른 압입깊이와의 차이 (Δh_a)만큼 포함되어야 한다. 이를 [식 12]와 같이 나타낼 수 있다. (도 5b참조)

수학식 12

$$f = \frac{h_c}{h_{\max} + \Delta h_a} : \text{blunted tip을 고려한 실제압입깊이와 최대압입깊이의 비}$$

상기 f 보정상수는 각종 재료에 대한 실험을 거쳐 구하였으며, [식 13]과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 13

$$f = 1.2445(1 - 0.6n) \left(1 - 7.2 \frac{\sigma_{IT,YS}}{E_r} \right)$$

여기서 $\sigma_{IT,YS}$ 는 항복강도를 말하며, E_r 은 환산 탄성계수로서 본 출원인이 2004년 11월 9일자로 특허 출원한 "연속압입법을 이용한 파괴인성 측정방법"(제2004-91031호)에 나타난 환산 탄성계수와 동일한 개념이다.

각종 재료에 대한 연속압입시험을 통하여 보정상수를 [식 13]으로부터 구할 수 있으며, 실제실험을 통하여 얻어진 보정상수값을 도 4에 나타내었다.

도4에서와 같이 다수의 재료에 대하여 얻어진 보정상수는 0.94에서 1.12의 범위를 가지며, 이 값들의 평균값은 1.04이므로, 차후에는 보정상수(f)를 1.04로 설정하여 실제압입깊이를 구하는 것으로 한다. 그러나 재료의 성질이나 실험방법에 따라서 보정상수는 변화할 수 있을 것이다.

상기 실제압입깊이로부터 접촉면적을 계산하는 단계는

수학식 14

$$A_C = 24.5h_C^2$$

여기서는 [식 9]로부터 계산한 실제압입깊이(h_C)를 대입하여 접촉면적 A_C 을 계산하였으며, 상기 [식 14]는 Vickers's 압입자의 형태를 고려한 geometric number로 유도되었다.(계장화 압입 시험에 의해 측정된 압입 경도(ISO 14577-1 참조))

상기 접촉면적으로부터 압입경도를 계산하는 단계는

수학식 15

$$H_{IT} = \frac{L_{max}}{A_C}$$

H_{IT} 는 계장화 압입시험으로부터 얻어진 압입경도(ISO 14577-1)를 말하며, L_{max} 는 다중압입하중-변위곡선에서 얻어진 각 단계에서의 최고하중이다.

상기 무응력 상태에서 무응력 기준곡선을 구한 다음 응력상태에서 응력곡선을 구해야 한다. 일단 reference 시편(stress-free stage)에서의 실험이 끝나면 잔류응력을 측정하고자 하는 시편에서 실험을 행하게 되는데, 이 때는 부분하중제거의 단계를 거칠 필요가 없다. 이는 탄성한도 내의 잔류응력에 의한 고유경도의 변화가 없으므로, reference시편에서 얻어진 접촉깊이 h_C 값을 이용하면 응력 상태의 압입하중에 대응하는 접촉깊이의 환산이 가능하기 때문이다.

상기 응력상태에서의 응력곡선을 확보하기 위해 압입시험을 행한 후 무응력상태에서 무응력 기준곡선을 구한 이전 단계와 마찬가지로 하중인가곡선(loading curve)부분의 fitting을 수행하고, 최대하중과 최대압입깊이를 측정하는 단계에서는 실제 다중압입하중-변위(압입깊이)곡선(하중인가-유지-하중제거-유지의 반복곡선)에서 얻는 각 하중인가 단계에서의 실제 최대하중(L_{max})과, 하중제거(unloading curve)되는 구간 중 변위가 가장 큰 값인 최대압입깊이(h_{max}) 점을 찾는다. 상기 하중인가곡선(loading curve)부분을 [수학식 8a/8b]와 같이 분석을 통하여 응력상태에서의 하중인가곡선 기울기(k_s^b, k_s^w)를 유도한다.

다음으로 상기 무응력 상태 및 상기 응력 상태에서 확보된 곡선들을 상호 비교하는 단계를 수행한다. 도 6과 같이 무응력 상태의 기준곡선에서 측정한 실제접촉(압입)깊이(h_C)에서 무응력 상태 및 응력 상태에서 측정한 곡선들로부터 유도되는 수직하중차이(ΔL)를 측정한다. 또한 잔류응력(인장·압축잔류응력) 유·무에 상관없이 "고유경도는 일정"하다라는 [수학식 16]을 이용하여 응력상태(잔류응력 하)에서 접촉면적을 간접적으로 유도할 수 있게 된다.

수학식 16

$$H = \frac{L_s^T}{A_s^T} = \frac{L_0}{A_c} = \frac{L_s^C}{A_s^C}$$

여기서 고유경도(H)는 압입시험으로 구한 압입경도(H_{IT})와 동일하며, 아래 첨자 0(zero)과 S는 무응력과 응력 상태를 의미하며, 아래첨자 A_C 는 무응력상태에서의 접촉면적을 의미하며, A_S 는 응력상태에서의 실제접촉면적을 의미한다. 또한 윗첨자 T와 C는 각각 인장응력과 압축응력을 의미하며, L_0 는 무응력 상태에서의 최대하중(L_{max})을 의미한다.(참고자료 : T.Y. Tsui, W.C. Oliver and G.M. Pharr; J. Mater. Res., **11** (1996) 752)

도 8에서는 최대압입깊이가 일정하도록 압입(depth-controlled relaxation)시 잔류응력 유무에 따른 압입자/시편간의 접촉형상의 차이를 모델링 하였다. 최대압입깊이를 일정하도록 제어하면 인장응력에 의해 인가되는 압입하중은 무응력 상태에 대응하는 압입하중에 비해 감소한다. 또한 압입경도를 일정하게 유지하기 위해서 접촉면적은 압입하중에 선형적으로 비례하게 된다. 즉, 인장응력에서 무응력 상태로 변함에 따라 동일한 최대 압입깊이에 도달하기 위한 외부 인가하중은 L_S^T 에서 L_0 로 증가하고, 일정한 압입경도, H_{IT} 를 유지하기 위하여 인가하중의 증가와 동일하게 접촉깊이도 h_s^T 에서 h_C 로 증가하며, 이와 아울러 접촉깊이와 종속관계인 접촉면적도 A_S^T 에서 A_C 로 증가한다. 이로부터 무응력(stress-free)상태에서의 경도와 인장응력상태에서의 경도는 일정하다는 것을 알 수 있다.

상기 잔류응력 유·무에 상관없이 "고유경도는 일정"하다라는 [식 16]으로부터 응력곡선에서의 접촉면적을 [식 17]과 같이 간접적으로 유도할 수 있다.

수학식 17

$$A_s^{T,C} = \frac{L_s^{T,C}}{H}$$

여기서 아래 첨자 s는 응력 상태를, 윗첨자 T와 C는 각각 인장응력과 압축응력을 의미한다.

$L_s^{T,C}$ 는 응력(인장·압축응력) 상태에서의 응력곡선에서 최대압입깊이에서 유도되는 수직하중이며, H_{IT} 는 [식 15]에서와 같이 유도되는 압입경도를 말한다. 상기 유도수직하중과 무응력상태에서 측정된 압입경도로부터 응력곡선에서의 접촉면적을 유도한다.

마지막으로 상기 응력 상태의 응력곡선에서 계산한 접촉면적(A_S)과 측정된 실제접촉(압입)깊이에서 유도되는 무응력곡선(응력기준곡선)과 응력곡선 하중차이(ΔL)로부터 상기 재료의 잔류응력을 측정하는 단계는

수학식 18a

$$\sigma_{res} = \eta_1 \frac{\Delta L}{A_s}$$

의 식을 적용하며, 여기서 σ_{res} 는 잔류응력값, ΔL 은 무응력곡선과 응력곡선에서 유도된 수직하중차이, A_S 는 응력상태에서의 접촉면적, η_1 은 등방성 1축 또는 2축 잔류 응력을 결정하기 위한 비례 상수인 것을 특징으로 하며, 또한 η_1 는 다음과 같이 정의된다.

표면에 존재하는 1축 잔류응력 ($\sigma_{res,x} \neq 0, \sigma_{res,y} = \sigma_{res,z} = 0$) 및 등방향 2축 잔류응력 ($\sigma_{res,x} = \sigma_{res,y} \neq 0, \sigma_{res,z} = 0$)이 인가되어 있을 경우 상기 [식 18a]에서 나타낸 방법으로 평가가 가능하다.(상기 비례상수(η_1)는 선 출원된 “잔류응력 측정장치 및 이 장치를 이용한 잔류응력데이터측정방법, 잔류응력측정방법 및 이 측정방법을 기록한 기록매체”에서는 상수 α 로 정의되어 있다.)

소성변형과 직접 관련된 편차응력 성분만으로 잔류응력 유도 수직하중을 정의하기 위하여 압입 변형과 잔류응력 간의 상호작용을 재분석하였다. 강성 압입자(rigid indenter)에 의한 압입 변형은 셸(shell) 모양으로 확장한 소성역이 비압축성 코어(incompressible core)를 둘러싸고 있는 단면 형태로 모델링 되었다. 공동/탄성역 경계에 Tresca 항복조건을 도입함으로써 초기 항복을 유발하는 공동 내부의 정수압 응력(hydrostatic stress)이 $-2\sigma_y/3$ 로 결정되었다. 재료가 탄성-강소성 거동(elastic-rigid plastic behavior)을 가지면, 정수압의 증가에 대응해 공동 외각의 소성역이 점차 확장하게 된다. 이때 소성역 내부의 응력 분포도 구형 셸에 대한 응력해석과 항복조건을 결합하여 분석되었다. 또한 복잡한 압입변형 응력장에서 코어 내부의 응력($-2\sigma_y/3$)과 외부에서 인가되는 등방향 2축 잔류응력, $\sigma_{res} (= \sigma_{res,x} = \sigma_{res,y})$ 와의 상호중첩을 고려하였다.

등방향 2축 잔류응력을 코어에 인가하면 내부의 정수압은 변화되어 진단응력 성분이 부가적으로 발생하게 된다. [식 18b]의 코어 내부 정수압과 등방향 2축 잔류응력의 합, σ_{com} 은 정수압과 편차응력(deviator stress)으로 재분해될 수 있고, 정수압이 소재의 소성변형과 무관하므로 편차응력 성분에서 잔류응력의 압입변형에 대한 영향을 확인할 수 있다. [식 18b]의 편차응력 성분 중 박막 표면에 수직인 압입하중에 미치는 잔류응력의 영향은 σ_z 에 나타난 $-2\sigma_y/3$ 임을 확인할 수 있다.

또한 상기와 같이 구한 응력은 압입시험에서 압입하중을 접촉면적으로 나눈 평균 접촉압력(P_m)이 완전소성영역에서 진응력과 일정한 비가 성립하는 것으로부터 정의할 수 있다. 이를 이용하여 [수학식 18c]를 구할 수 있다. 상기 [수학식 18c]에서 구한 평균접촉압력(P_m)은 압입시험법으로부터 구하는 응력의 개념이 되며, 이를 일반적인 재료의 진응력 개념으로 환산하기 위하여 재료의 소속구속인자(Ψ)를 이용한다.

등방향 2축 인장 잔류응력이 걸린 시편에 압입하중을 인가하여 최대 압입깊이를 형성한 뒤, 인장 잔류응력을 완화시키면 압입하중은 증가하며, 다음으로 [수학식 18b/18c]로부터 [식 18d]로 표현된 인가하중의 증가분을 잔류응력 유도 수직하중으로 새롭게 정의하였다. 즉, 최대 압입깊이가 일정하도록 압입시험을 제어하면 잔류응력 유·무에 의해서 잔류응력 유도 수직하중 만큼의 압입하중 차이가 발생한다.

수학식 18b

$$\sigma_{com} = \begin{pmatrix} \frac{-2}{3} \sigma_y & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-2}{3} \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-2}{3} \sigma_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{res} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{res} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{-2}{3} (\sigma_y - \sigma_{res}) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-2}{3} (\sigma_y - \sigma_{res}) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-2}{3} (\sigma_y - \sigma_{res}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{3} \sigma_{res} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} \sigma_{res} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-2}{3} \sigma_{res} \end{pmatrix}$$

수학식 18c

$$\sigma = \frac{P_m}{\Psi} = \frac{1}{\Psi} \cdot \frac{L}{A}$$

수학식 18d

$$\frac{1}{\Psi} \frac{\Delta L}{A_s} = \frac{2}{3} \sigma_{res}$$

여기서 Ψ 는 소성구속인자이며, 완전 소성 영역에서의 평균 접촉 압력과 진응력 사이의 비를 말한다. 또한 금속 재료에서는 3.0으로 정의된다.(D. Tabor; "The Hardness of Metals" Clarendon Press, Oxford, UK (1951))

상기 [수학식 18d]를 [수학식 18a]와 같이 잔류응력변수인 σ_{res} 로 각 변을 정리하면 [수학식 18e]와 같이 등방성 2축 잔류 응력을 결정하기 위한 비례 상수(η_1)를 정의할 수 있다.

수학식 18e

$$\eta_1 = \frac{1}{\Psi} \frac{3}{2} = \frac{1}{2}$$

도8은 인장응력과 무응력상태에서의 압입자/시편간의 접촉현상 차이를 나타낸 단면도이며, 도9는 이상적인 압입자(ideally sharp tip)일 때 압입경도(HIT)를 측정하는 방법(ISO14577-1)을 나타낸 구조도, 그리고 도10은 재료와 압입자의 실제 접촉상태를 나타내는 단면도이다. 도9 내지 도10에서 알 수 있는 바와 같이, 압입자와 재료의 연속압입에 있어서, 재료표면의 파일업과 싱크인에 의하여 최대압입깊이가 육안으로 보이는 것과 약간의 차이가 발생할 수 있으며, 팁의 무더짐에 의해서도 오차가 발생한다.

여기서 Δh_a 는 팁의 선단이 반복적인 압입에 의하여 무더진 경우에 팁의 길이의 감소된 양을 의미한다.(도 5b참조)

상기 위와 같은 일련의 과정을 통해 연속 압입시험법을 통한 최종적인 잔류응력 평가가 가능하다.

실시예2 : 용접부의 잔류응력 측정

기존의 용접부의 잔류응력 평가방법에서 가장 큰 어려움을 겪는 것은 용접부의 무잔류응력 상태를 현장에서 알 수가 없다는 점이다. 현장에 쓰이고 있는 재료를 직접 열적, 기계적 방법으로 응력을 제거할 수가 없기 때문에 정량적 잔류응력의 평가가 쉽지 않았다. 응력을 제거하기 위해서는 상기 파괴적인 방법을 이용하여 응력을 제거해야만 했다. 그러므로 현장에서는 적용이 불가능하였고, 실험실에서만 적용이 가능하였다. 또한 위와 같이 현장에서 적용하기 위해 기존의 비파괴적인 잔류응력 실험방법들은 위의 무잔류응력상태를 예측하기 위해 물리적 의미를 사용하였으며, 이론적 배경 및 데이터의 비교로부터 산출되는 오차를 줄이지 못하여 정량적인 평가방법으로 평가받지 못하고 있다.

그러나 상기 연속압입시험법을 이용한 잔류응력 평가 방법에서는 기존의 비파괴적인 방법에서 사용하였던 물리적 의미의 방법을 사용하지 않고, 기계적 방법인 압입하중인가-제거를 반복하는 연속압입시험방법과 [도 11a, 11b]와 같이 용접부와 모재부의 강도비를 통해 무잔류응력상태의 기준곡선을 정확히 예측(열처리를 통한 무응력 곡선 비교 시)하여 파괴적인 방법으로 측정하는 종래기술의 방법들과 정량적인 평가가 가능하며, 또한 외부적 요인을 받지 않고 용접부의 무응력 곡선을 예측하여 소재의 직접적인 변형거동으로부터 잔류응력을 평가할 수 있는 장점이 있다.

그리고 용접부의 무잔류응력 상태를 미세구조가 다르며, 용접부위와 멀리 떨어진 모재로부터 유도하였다. 소재에 일정한 하중을 경질 압입자를 통하여 가하면 그에 대응하여 표면에 압흔(indentation mark)이 생기게 된다. 가해진 하중과 압흔의 크기로부터 강도 특성인 압입경도 (indentation hardness, H_{IT})를 평가 할 수 있다. 이는 앞에서 설명하는 실시예1과 동일

하며, 이 압입경도는 소재에 인가된 압입하중 (L)과 압입깊이 (h) 곡선(하중-변위곡선)의 하중인가부 ($L=kh^2$)의 기울기 (k)에 비례한다. 또한 압입자의 무더진 정도로 인해 얻은 이상적이지 못한 곡선과 차이를 보이는 양(Δh_a)을 하중인가부에 적용하여 상기 [식 8b]와 같이 나타낸다. 즉 압입경도가 큰 소재일수록 하중-변위곡선의 하중인가부의 기울기는 큰 값을 가지게 된다. 또한 이러한 원리와 압입 인장 물성은 잔류 응력 인가 여부에 무관하다는 개념을 이용하여 용접부와 모재의 압입경도(H_{IT}), 강도(σ_{IT})와 k의 값은 일정한 비를 가지며 아래의 [식 19]가 성립한다.

수학식 19

$$\frac{k_0^w}{k_0^b} = \frac{H_{IT,0}^w}{H_{IT,0}^b} = \frac{\sigma_{IT}^w}{\sigma_{IT}^b}$$

수학식 20

$$k_0^w = \frac{H_{IT,0}^w}{H_{IT,0}^b} k_0^b = \frac{\sigma_{IT}^w}{\sigma_{IT}^b} k_0^b$$

1. 상기 [수학식 17/18]에서의 위 첨자 w와 b는 용접부(weldment)와 모재(base)를 의미한다.
2. 상기 [수학식 17/18]에서의 아래첨자 0(zero)은 무응력 상태를 의미한다.
3. 상기 [수학식 17/18]에서의 아래첨자 IT는 압입으로 구한 값들을 의미한다.

여기서 k_0^b , k_0^w 는 각각 모재와 용접부의 무잔류응력상태의 기울기를 말하며, $H_{IT,0}^b$, $H_{IT,0}^w$, σ_{IT}^b , σ_{IT}^w 는 각각 모재와 용접부의 무잔류응력상태의 압입경도 및 강도를 말하고 있다.

그런데 용접부의 무잔류응력 상태의 압입경도는 잔류응력으로 인해 압흔주위에 생기는 재료의 거동(pile-up, sink-in)으로 인해 압입깊이에 영향을 줄 수 있기 때문에 현장에서 직접 구할 수 없는 한계를 가질 수 있다. 그래서 상기 언급된 문제의 한계를 극복하기 위하여 "잔류응력의 유무에 상관없이 극심한 소성영역에서 강도는 잔류응력의 영향을 받지 않는다.(Q1, Q2)"라는 가정을 세우고, 압입경도(H_{IT}), 강도(σ_{IT})는 일정한 비를 가진다는 정의를 이용하여 [식 20]과 같이 용접부에서의 무응력 기준곡선을 예측하였다. 또한 상기 정의된 내용은 아래의 논문에서 증명할 수 있으며, 도 12에서와 같이 항복강도($\sigma_{IT,YS}$)를 제외하고 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다.[도 12참조]

1. Bart Goes, Javier Gil-Sevillano, Urbain D'Haene, Int. J. Mech. Sci. 41 (1999)
2. J.G. Swadener, B. Taljat, G.M. Pharr; J. Mater. Res. Vol. 16, No. 7 (2001)

이에 근거하여 k_0^w 를 구하기 위하여 압입경도(H_{IT})에 비례하는 강도의 개념을 이용하였다. 기존의 $H_V=3*\sigma_{IT,UTS}$, $H_B=3*\sigma_{IT,YS}$ 의 식을 이용하여 압입경도에 일정한 강도를 연구, 검증을 수행하였다. 그러나 모든 재료에 대하여 비례상수(C)는 같은 값을 가지지 않으며 약간의 편차를 보였다. 이는 어느 한 압입경도(H_{IT})에 대하여 항복점 이후 최대인장강도에 이르기까지의 변형이 큰 경우 (가공경화구간이 큰 경우)에는 항복강도나 인장강도 중 어느 하나만으로 이를 모두 반영하기에는 부족한 이유라 판단하였다. 그래서 항복강도($\sigma_{IT,YS}$)나 인장강도($\sigma_{IT,UTS}$)의 값을 최대한 반영할 수 있는 두 값의 평균값($\sigma_{IT,f}$)의 개념을 도입하였다. 또한 비커스 압입 시험 시 압입자 주변에 일어나는 전단변형에 대응하는 변형률은 일정한 값 0.08을 가진다는 사실을 이용하여, 이 값에 대응하는 강도($\sigma_{IT,r}$)를 구하고, 이 강도와 경도는 일정한 비를 가질 것이라 예상하였으며 이에 대한 검증실험을 수행하였다. [도 13 참조] 즉, 여러 정의의 강도 중에서 압입경도와 비례상수에 가장 편차가 적은 강도를 적용하기 위하여 검증실험을 수행하였다.

이하에서는 강도의 명칭인 σ_{IT} 를 σ 로 간략히 표시하겠으며, 상기 강도를 세분화하면 σ_{YS} , σ_{UTS} , σ_f , σ_r 로 구분할 수 있다.

소재별 압입경도를 구하고 각 강도와 평균 비례상수로 나누면 1에 수렴하는 값을 보인다. 이때 1에 수렴하지 않는 이유는 모든 재료가 평균 비례상수에서 약간의 편차를 보이기 때문이며, 이 편차가 가장 적은 강도는 σ_f 와 σ_r 임을 도 13에서 알 수

있다. 이중에서도 현장에서 적용하기 쉬운 σ_f 를 우선 고려하였으며, σ_{YS} , σ_{UTS} 과 함께 실험을 수행하였다. 즉 k_0^W 를 구하기 위하여 용접부와 모재부의 항복강도, 인장강도를 압입시험으로 구하고, 이 두 값의 평균값인 σ_f 를 구하였다. 다음으로 용접부와 모재부의 강도비를 k_0^b 에 곱하여 k_0^W 를 [식 20]과 같이 구하였다. (σ_r 는 KS B 0950을 통해 얻어진 압입 유동 곡선에서 변형률 0.08에 해당하는 압입 강도를 의미한다.)

실험에는 API X65와 SS400 강재를 사용하였다. 시편을 절단 후 용접하여 용접부와 모재부의 강도와 압입경도를 각각 압입시험으로부터 구하였다. 용접부와 모재부의 σ_f , σ_{YS} , σ_{UTS} 의 비를 모재의 k_0^b 에 곱한 결과 얻어지는 k_0^W 를 검증하기 위하여 잔류응력제거 열처리(Annealing)를 실시하여 비교하였다. 열처리는 두 재료를 600°C까지 로에서 가열한 후 2시간 유지하고 로냉을 실시하였다.

실험결과 API X65의 경우는 도 11a에서 보는 바와 같이 σ_r , σ_f , σ_{YS} , σ_{UTS} 의 비가 모두 잘 일치하였다. 그리고 SS400의 경우에는 도 11b에서 보는 바와 같이 열처리 한 결과와 비교하여 약간의 편차를 보이기는 하지만 σ_r 과 σ_f 의 비가 가장 근접한 결과를 보였다. 강도정의에 따른 하중인가곡선의 계수의 변화는 표 1과 같다.

표 1.

	후열처리 (응력제거)	σ_r	σ_f	σ_{UTS}	σ_{YS}
k_0^W (API X65)	0.00697	0.00696	0.00697	0.00695	0.00700
k_0^W (SS400)	0.00510	0.00501	0.00497	0.00464	0.00553

위 실험을 통하여 현장에서 용접부의 잔류응력을 평가할 때 필요한 무잔류응력 상태가 용접부와 모재부의 강도비를 이용하면 열적, 기계적 방법을 통하지 않고도 유도 가능함이 증명되었다. 이를 바탕으로 잔류응력 상태에 있는 용접부의 하중인가곡선의 기울기와 비교하여 잔류응력에 의해 유도되는 하중의 차이 ΔL 을 구할 수 있다.

상기 용접부를 제외한 재료의 잔류응력 측정에서의 모재부에서의 강도측정방법과 동일하게 모재부에서의 압입경도(H_{IT})를 평가한다. 또한 상기와 같이 구한 압입경도와 위에서 설명한 강도비를 이용한 방법인 [수학식 20]을 [수학식 8b]에 대입하여 무잔류응력상태에서의 무응력 기준곡선을 예측하게 된다.

용접부의 잔류응력평가에서도 마찬가지로 상기 "용접부를 제외한 재료의 잔류응력 측정"에서와 같이 무응력 상태에서의 응력기준곡선(stress-free) 확보 단계와; 응력상태에서의 응력곡선(stressed curve)확보 단계와; 상기 무응력 상태 및 응력 상태에서 확보된 곡선들을 상호 비교하는 단계와; 상기 상호 비교로부터 얻어진 두곡선의 하중차이(ΔL)와 하중인가곡선으로부터 얻어진 접촉면적으로 잔류응력을 측정하는 단계(도 6 참조);를 포함한다.

그렇지만 “용접부를 제외한 재료의 잔류응력 측정”으로는 용접부와 같이 비등방성 응력 구조를 가지는 재료에는 적용이 불가능하였으며, 이는 용접부에 강제구속과 급열과 냉각에 의한 잔류응력이 존재하기 때문이다. 이로 인해 무잔류응력상태에서의 무응력 곡선(응력기준곡선)을 예측할 수 없다. 그래서 상기 위에서 말한 모재부 용접부의 강도를 측정하여 정의된 [수학식 20]을 [수학식 8b]에 대입하여 용접부에서의 무응력 기준곡선의 기울기(K_0^w)를 구하면 용접부에서의 무응력 곡선(응력기준곡선)을 유도할 수 있다.

상기와 같이 모재부와 용접부의 강도를 측정하기 위해서는 상기 잔류응력측정시험기에 압입자(비커스누르개→구형누르개)를 교체 삽입하여 측정된 압입하중-압입깊이 곡선을 KS B0950에 따라 압입 인장 물성을 결정한다.

상기와 같은 방법으로 무응력곡선을 구하고, 응력상태에서의 응력곡선의 구하면, 접촉(압입)깊이에서 유도되는 하중차이 ΔL 을 구할 수 있다. 다음으로 실제접촉(압입)깊이와 접촉면적을 구해 압입경도를 측정하기 위해서는 상기 실시예1에서와 동일한 방법인 무응력 상태(stress-free state)에서의 압입하중-변위곡선을 얻기 위해서 측정한 다중하중인가곡선

(multiple loading curve)을 분석하는 단계와; 압입하중-변위곡선에서 최대하중과 최대압입깊이를 측정하는 단계와; 상기 최대압입깊이로부터 실제접촉(압입)깊이(h_c)를 계산하는 단계와; 상기 실제접촉(압입)깊이로부터 접촉면적(A_c)을 계산하는 단계와; 상기 접촉면적으로부터 상기 재료의 경도(H_{IT})를 측정하는 단계;를 수행해야만 한다.

응력곡선 또한 상기 실시예1에서의 방법대로 수행한 후 압입하중-압입깊이 곡선을 측정한다.

다음으로 상기 무응력 상태 및 상기 응력 상태에서 확보된 곡선들을 상호 비교하는 단계를 수행한다.

다시 말해 [수학식 16]으로부터 응력상태에서의 접촉면적 [수학식 17]을 구하고, 실제접촉깊이에서 유도되는 무응력상태와 응력상태의 수직하중을 구하는 단계를 말한다.

상기 “용접부를 제외한 재료의 잔류응력 측정”에서와 같이 잔류응력(σ_{res})을 유도하되, 상기 “용접부를 제외한 재료의 잔류응력 측정”과는 다르게 용접부는 비등방성 잔류응력이 인가되므로 다른 비례상수 n_2 를 적용하여 용접부의 잔류응력을 측정한다.

수학식 21

$$\sigma_{res} = \eta_2 \frac{\Delta L}{A_s}$$

의 식을 적용하며, 여기서 σ_{res} 는 잔류응력값, ΔL 은 무응력곡선과 응력곡선에서 유도된 수직하중차이, A_s 는 응력상태에서의 접촉면적, n_2 은 비등방성 1축 또는 2축 잔류 응력을 결정하기 위한 비례 상수인 것을 특징으로 한다.

또한 상기 실시예1에서와는 다르게 철강 재료의 용접부에는 이축 비등방성 잔류응력이 인가되어 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다.

철강 용접부와 같이 이축 잔류응력 중 절대값으로 볼 때 최대 주응력 방향 성분이 $\sigma_{res,x}$ 이고 최소 주응력은 $\sigma_{res,y}$ 라고 할 때 응력비례인자 (stress-proportional factor)인 p 를 도입하여 $p\sigma_{res,x}$ 로 나타낼 수 있다. 이 때 p 는 -1.0에서 +1.0 사이의 값을 갖게 된다. 실시예1에서 사용한 가정 즉, 재료 표면에 수직한 방향(압입 시험 방향)으로의 잔류응력이 없다고 가정하면, 유사한 정수압 응력과 소성변형에 직접 영향을 미치는 [식 22]와 같은 편차 응력의 행렬식으로 표현할 수 있다.

수학식 22

$$\begin{pmatrix} \sigma_{res,x} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{res,y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{res} & 0 & 0 \\ 0 & k\sigma_{res} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{(1+k)\sigma_{res}}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(1+k)\sigma_{res}}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1+k)\sigma_{res}}{3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{(2-k)\sigma_{res}}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(2k-1)\sigma_{res}}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-(1+k)\sigma_{res}}{3} \end{pmatrix}$$

또한 압입 시험 방향의 소성변형을 일으키는 편차 응력은 상기 [수학식 22]의 σ_z 와 실시예1에서와 같이 소성구속인자 Ψ 를 도입하면 상기 [수학식 23]과 같이 나타나며 하중 변화량을 접촉 면적으로 나누어준 값과 일치한다.

수학식 23

$$\frac{1}{\Psi} \frac{\Delta L}{A_s} = \frac{1+p}{3} \sigma_{res}$$

Ψ는 소성구속인자라고 하며, 완전 소성 영역에서의 평균 접촉 압력과 진응력 사이의 비를 말한다. 또한 금속 재료에서 Ψ는 3.0으로 정의된다.(D. Tabor; "The Hardness of Metals" Clarendon Press, Oxford, UK (1951) 철강 용접부에서 p는 1/3로 가정하는 것을 권장한다.)

상기 [식 23]을 [식 21]과 같이 각 변을 정리하면 [수학식 24]와 같이 비등방성 2축 잔류 응력을 결정하기 위한 비례 상수(η₂)를 정의할 수 있다.

수학식 24

$$\eta_2 = \frac{1}{\Psi} \frac{3}{(1+p)}$$

측정된 잔류 응력의 수직된 방향의 잔류 응력은 [식 23]에 따라 $p\sigma_{res}$ 로 결정된다.

도14a와 도14b는 API X65와 SS400에 대하여 연속압입시험법, Hole-drilling법, Saw-cutting법의 모식도이며, 도14c와 도14d는 상기 측정방법에 의하여 각각 측정한 잔류응력을 비교한 그래프이다. 도14c와 도14d에서 알 수 있는 바와 같이, 비파괴적 방법인 연속압입법을 이용한 잔류응력 측정값과, 파괴적 방법인 Hole-drilling법이나 Saw-cutting법을 이용한 측정값이 거의 일치한다.

이상에서 본 발명의 실시예를 설명하였으나, 본 발명의 권리범위가 이러한 실시예에 제한되지 않으며 당업자가 용이하게 변형할 수 있는 범위에도 권리가 미친다.

발명의 효과

본 발명에 따르면 종래 기술에 따른 잔류응력 측정방법에 비하여 오차발생을 최소화하고 실제 모델에 맞는 측정방법을 적용할 수 있는 효과가 있다.

또한 본 발명에 따르면 기존의 복잡한 압입곡선을 분석 또는 분석에 오차 원인으로 작용한 종속부분을 독립부분인 하중인각곡선을 가지고 적용을 하였다. 그리고 압입자의 무더짐이나 재료의 쌓임(pile-up), 함몰(sink-in)로 인하여 발생하는 오차를 최소화할 수 있는 실제압입깊이를 측정함으로써 해서 정확한 접촉면적을 계산할 수 있었으며, 이를 바탕으로 전개되는 잔류응력 측정방법을 제공하고 있다.

기존에 기계적/열적 방법을 적용시키지 않고 용접부의 무응력 곡선 예측 및 용접부의 잔류응력을 측정하는 것이 불가능하였지만, 본 발명에서의 잔류응력에 무관한 모재부와 용접부의 압입강도비(σ_{IT} ratio)를 통해 용접부의 무응력 곡선을 정확히 예측하고, 이를 바탕으로 용접부 내지는 비등방성 응력 구조를 가지는 재료에 대해 정량적인 잔류응력을 측정할 수 있다.

(57) 청구의 범위

청구항 1.

재료의 잔류응력을 측정하는 방법으로서,

상기 재료의 무응력 상태에서의 기준시편에 대하여 압입하중의 연속적인 인가 및 제거를 반복하여 무응력 상태에서의 압입하중-변위곡선을 생성하고, 상기 무응력 상태에서의 압입하중-변위곡선에서 최대하중과 최대압입깊이를 측정하고, 상기 최대압입깊이로부터 실제압입깊이(h_C)를 계산하고, 상기 실제압입깊이로부터 접촉면적(A_C)을 계산하고, 상기 접촉면적으로부터 상기 재료의 경도(H_{IT})를 측정하여 상기 기준시편에 대한 무응력곡선(응력기준곡선)을 생성하는 단계와;

상기 재료의 응력 상태에서의 실제시편에 대하여 압입하중을 연속적으로 인가 및 제거하여 상기 실제시편에 대한 응력곡선을 생성하는 단계와;

상기 응력기준곡선과 상기 응력곡선 사이의 비교를 통하여 얻어진 하중차이(ΔL)와, 하중인가 곡선으로부터 얻어진 응력 상태에서의 접촉면적(A_S)으로부터 상기 재료의 잔류응력을 측정하는 단계;를 포함하는 연속압입시험법을 이용한 잔류응력 측정방법.

청구항 2.

제1항에 있어서,

상기 압입하중-변위곡선을 분석하는 방법은

상기 재료가 용접부를 제외한 모재인 경우에

$$L = k_0^b (h + \Delta h_a)^2$$

로 표현되는 2차식을 적용하며,

여기서, 아래첨자 0은 무응력 상태를, 윗첨자 b는 모재를 의미하며, k_0^b 는 모재부 무응력 곡선(응력기준곡선)에서의 하중인가곡선 기울기이며,

상기 Δh_a 는 이상적인 압입자(ideally sharp tip)가 아니거나, 압입자가 무더지는 것을 표현하기 위한 기하학적 인자인 압입자보정상수로서, 이상적인 압입자를 사용했을 때 압입깊이와 실제 압입자를 사용했을 때 압입깊이의 차이이며,

상기 최대하중과 최대압입깊이를 측정하는 단계는

상기 압입하중-변위곡선에서 각 하중인가 단계에서의 실제 최대하중(L_{max})과, 각 하중제거 단계에서의 실제 최대압입깊이(h_{max}) 점을 찾는 것을 특징으로 하는 연속압입시험법을 이용한 잔류응력 측정방법.

청구항 3.

제1항에 있어서,

상기 압입하중-변위곡선을 분석하는 방법은

상기 재료가 용접부인 경우에

$$L = k_0^w (h + \Delta h_a)^2$$

로 표현되는 2차식을 적용하며,

여기서, 아래첨자 0은 무응력 상태를, 윗첨자 w는 용접부를 의미하며, k_0^w 는 용접부 무응력곡선(응력기준곡선)에서의 하중인가곡선의 기울기이며,

상기 Δh_a 는 이상적인 압입자(ideally sharp tip)가 아니거나, 압입자가 무너지는 것을 표현하기 위한 기하학적 인자인 압입자보정상수로서, 이상적인 압입자를 사용했을 때 압입깊이와 실제 압입자를 사용했을 때 압입깊이의 차이이며,

상기 최대하중과 최대압입깊이를 측정하는 단계는

상기 압입하중-변위곡선에서 각 하중인가 단계에서의 실제 최대하중(L_{max})과, 각 하중제거 단계에서의 실제 최대압입깊이(h_{max}) 점을 찾는 것을 특징으로 하는 연속압입시험법을 이용한 잔류응력 측정방법.

청구항 4.

제3항에 있어서,

상기 k_0^w 는

$$k_0^w = \frac{H_{IT,0}^w}{H_{IT,0}^b} k_0^b = \frac{\sigma_{IT}^w}{\sigma_{IT}^b} k_0^b$$

의 식으로 표현되며, 여기서 k_0^b 는 모재의 응력기준곡선(무응력곡선)에서 하중인가곡선의 기울기이며, $H_{IT,0}^b$ 와 $H_{IT,0}^w$ 는 각각 모재와 용접부의 경도이며, σ_{IT}^b 와 σ_{IT}^w 는 각각 모재와 용접부의 강도인 것을 특징으로 하는 연속압입시험법을 이용한 잔류응력 측정방법.

청구항 5.

제4항에 있어서,

상기 모재와 용접부의 강도는

항복강도($\sigma_{IT,YS}$), 인장강도($\sigma_{IT,UTS}$), 평균강도($\sigma_{IT,f}$), 압입강도($\sigma_{IT,r}$) 중의 어느 하나인 것을 특징으로 하는 연속압입시험법을 이용한 잔류응력 측정방법.

청구항 6.

제5항에 있어서,

상기 평균강도($\sigma_{IT,f}$)는 상기 항복강도($\sigma_{IT,YS}$)와 인장강도($\sigma_{IT,UTS}$)의 산술평균값이며,

상기 압입강도($\sigma_{IT,r}$)는 KS B 0950을 통해 얻어진 압입 유도 곡선에서 변형률 0.08에 해당하는 강도값인 것을 특징으로 하는 연속압입시험법을 이용한 잔류응력 측정방법.

청구항 7.

삭제

청구항 8.

제2항 또는 제3항에 있어서,

상기 최대압입깊이로부터 실제압입깊이(h_c)를 계산하는 단계는

$$h_c = f(h_{\max} + \Delta h_a)$$

의 식을 적용하며, 여기서 h_c 는 실제접촉(압입)깊이, f 는 실제접촉(압입)깊이와 센서로부터 측정된 최대압입깊이(h_{\max})의 비의 보정상수인 것을 특징으로 하는 연속압입시험법을 이용한 잔류응력 측정방법.

청구항 9.

제8항에 있어서,

상기 보정상수 f 는

실제압입깊이(h_c)와 센서로부터 측정된 압입깊이(h_{\max})의 비(ratio)로서,

$$f = \frac{h_c}{h_{\max} + \Delta h_a} \text{로 표현되며,}$$

실질적으로 재료의 쌓임(pile-up) 또는 함몰(sink-in)에 의하여 압입자와 재료의 표면이 접촉하는 부분이 상승 또는 하강하게 되고, 따라서 실제압입깊이(h_c)가 변화하게 되므로 이를 보정하기 위한 상수로서,

$$f = 1.2445(1 - 0.6n) \left(1 - 7.2 \frac{\sigma_{\pi,YS}}{E_r} \right) \text{로 다르게 표현되며,}$$

여기서, E_r 은 환산 탄성계수, n 은 재료의 가공경화지수이며,

상기 보정상수 f 는 0.94 내지 1.12의 범위를 갖는 것을 특징으로 하는 연속압입시험법을 이용한 잔류응력 측정방법.

청구항 10.

제8항에 있어서,

상기 실제접촉(압입)깊이(h_c)로부터 실제접촉면적(A_c)을 계산하는 단계는

$$A_c = 24.5h_c^2$$

의 식을 적용하며, 여기서 h_c 는 실제접촉(압입)깊이인 것을 특징으로 하는 연속압입시험법을 이용한 잔류응력 측정방법.

청구항 11.

제10항에 있어서,

상기 실제접촉면적(A_C)으로부터 압입경도(H_{IT})를 계산하는 단계는

$$H_{IT} = \frac{L_{\max}}{A_C}$$

의 식을 적용하며, 여기서 L_{\max} 는 상기 각 하중인가 단계에서의 실제최대하중, A_C 는 실제접촉면적인 것을 특징으로 하는 연속압입시험법을 이용한 잔류응력 측정방법.

청구항 12.

제1항에 있어서,

상기 재료의 응력 상태에서의 실제시편에 연속압입 실험을 통하여 응력곡선을 생성하는 단계는

상기 실제시편에 연속압입 실험을 통하여 각 하중인가 단계에서의 실제 최대하중(L_{\max})과, 하중제거되는 구간 중 변위가 가장 큰 값인 최대압입깊이(h_{\max})를 구하고, 하중인가곡선으로부터 응력상태에서의 하중인가곡선의 기울기(k_S^b, k_S^w)를 구하는 것을 특징으로 하는 연속압입시험법을 이용한 잔류응력 측정방법.

청구항 13.

제1항에 있어서,

상기 하중차이는

상기 응력곡선(응력상태에서의 하중인가곡선 기울기)의 동일한 최대압입깊이에서 인가된 하중(L^T 또는 L^C)과, 상기 무응력곡선(무응력 상태에서의 하중인가곡선 기울기)의 동일한 최대압입깊이에서 인가된 하중(L_0)과의 차이인 것을 특징으로 하며,

상기 접촉면적은

$$A_s^T = \frac{L_s^T}{H_{IT}} \quad \text{또는} \quad A_s^C = \frac{L_s^C}{H_{IT}}$$

의 식을 적용하며, 여기서 A_s^T 와 A_s^C 는 응력상태(인장·압축응력상태)에서의 접촉면적, H_{IT} 는 압입경도인 것을 특징으로 하는 연속압입시험법을 이용한 잔류응력 측정방법.

청구항 14.

제2항에 있어서,

상기 모재의 잔류응력은

$$\sigma_{res} = \eta_1 \frac{\Delta L}{A_s}$$

의 식으로 표현되며, 여기서 σ_{res} 는 잔류응력값, ΔL 은 무응력곡선과 응력곡선에서 유도된 수직하중차이, A_s 는 응력상태에서의 접촉면적, η_1 은 등방성 잔류 응력을 결정하기 위한 비례 상수인 것을 특징으로 하는 연속압입시험법을 이용한 잔류 응력 측정방법.

청구항 15.

제3항에 있어서,

상기 용접부의 잔류응력은

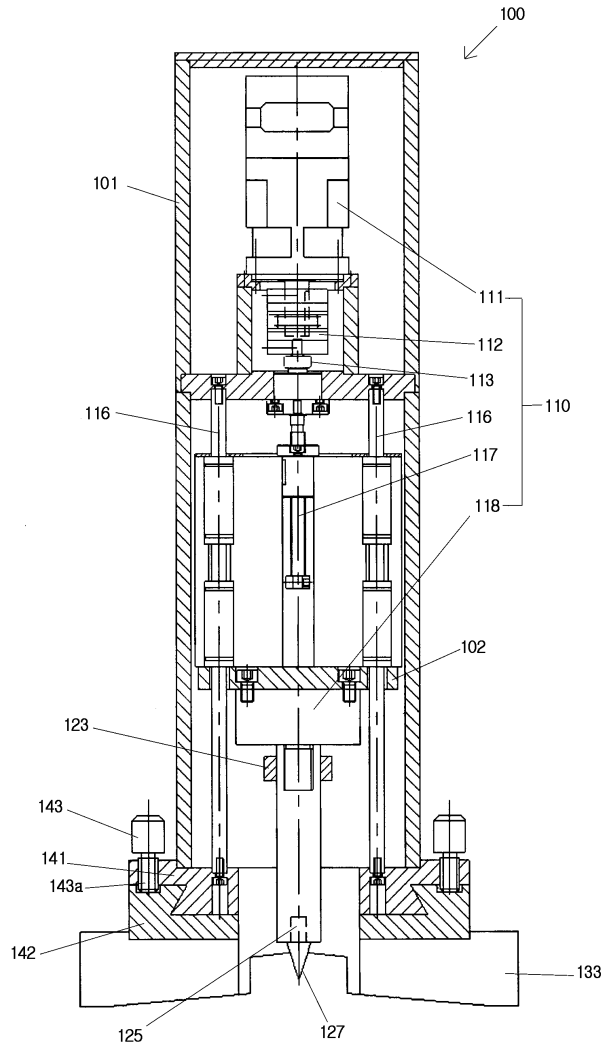
$$\sigma_{res} = \eta_2 \frac{\Delta L}{A_s}$$

의 식으로 표현되며,

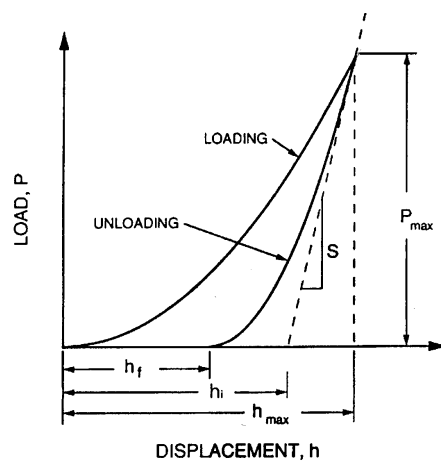
σ_{res} 는 잔류응력값, ΔL 은 무응력곡선과 응력곡선에서 유도된 수직하중차이, A_s 는 응력상태에서의 접촉면적, η_2 는 비등방성 잔류 응력을 결정하기 위한 비례 상수인 것을 특징으로 하는 연속압입시험법을 이용한 잔류응력 측정방법.

도면

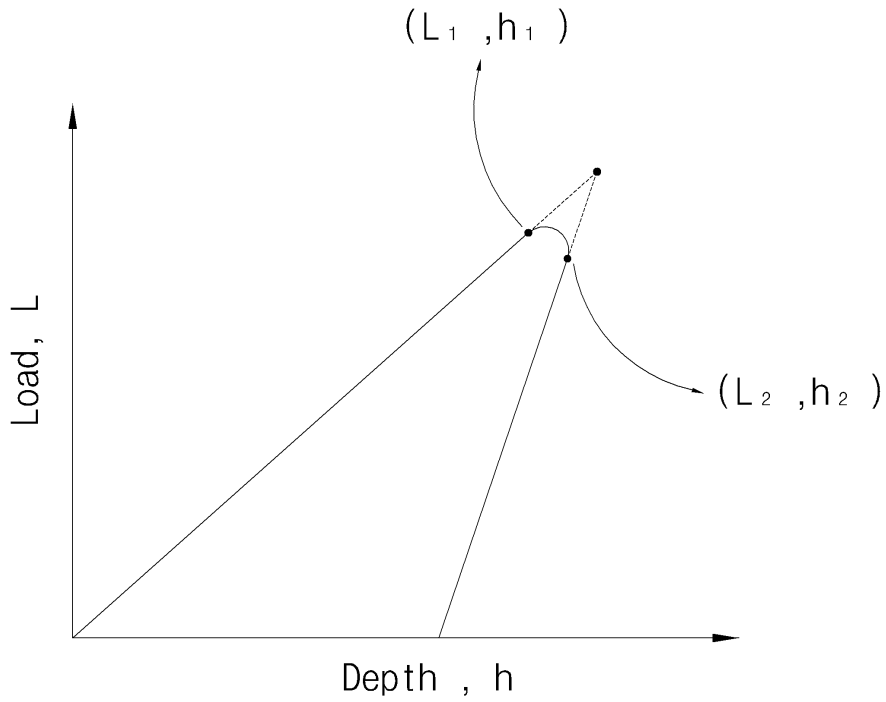
도면1



도면2



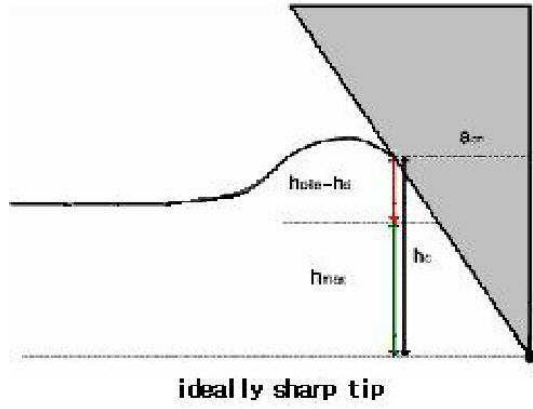
도면3



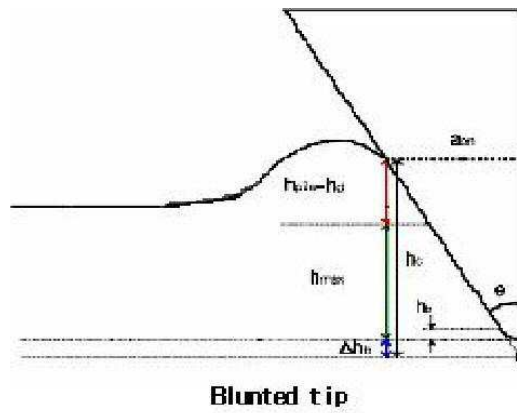
도면4

Materials	YS(MPa)	n	E (GPa)	Poisson' ratio	Er	f
			(Ultrasonic)			
SUJ2	306.8	0.268	214.9	0.286	194.4	1.03
X65	451.8	0.161	204.2	0.300	187.6	1.10
X70	592.9	0.129	195.9	0.296	180.9	1.12
SKD61	348.9	0.303	211.5	0.268	190.0	1.00
SCM21	290.2	0.221	199.4	0.300	184.0	1.07
SKH51	263	0.315	246.8	0.241	213.3	1.00
KP3	763.7	0.124	203.1	0.295	186.2	1.12
SKD11	243.4	0.338	215.7	0.294	195.8	0.98
SK3	244.1	0.264	198.2	0.303	183.4	1.04
SCM4	592.4	0.141	207.1	0.286	188.5	1.11
S45C	372.9	0.333	209.1	0.287	190.1	0.98
SK4	336.1	0.252	209.2	0.291	190.5	1.04
SUS304	398.8	0.3	198.7	0.283	181.7	1.00
SUS316	357.2	0.276	198.5	0.298	183.1	1.02
SUS303	264.4	0.39	188.1	0.301	175.3	0.94
A106	332.6	0.223	199.6	0.292	183.4	1.06
A120	206.5	0.243	65.0	0.352	69.7	1.04
A150	82.9	0.287	70.9	0.338	74.8	1.02
A170	526.2	0.089	66.0	0.343	70.2	1.11
Average :						1.04

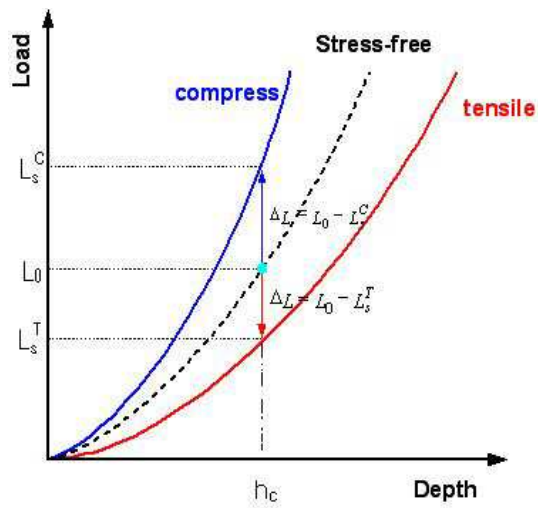
도면5a



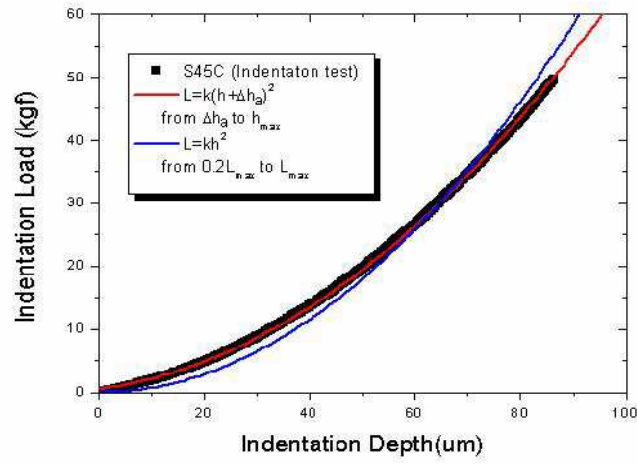
도면5b



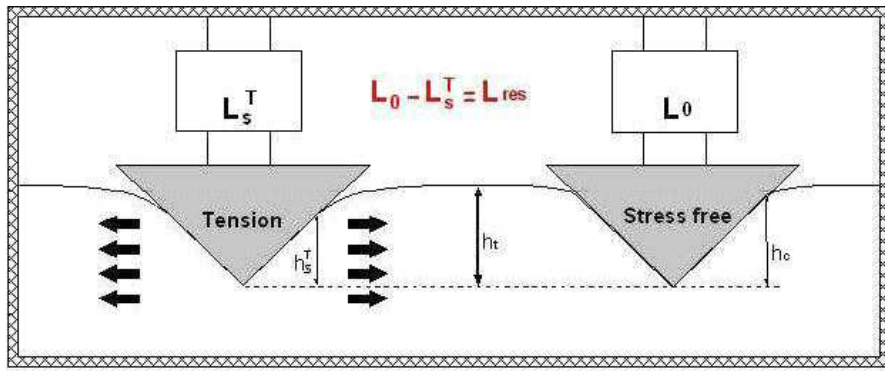
도면6



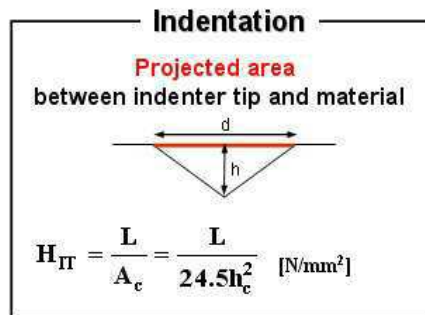
도면7



도면8

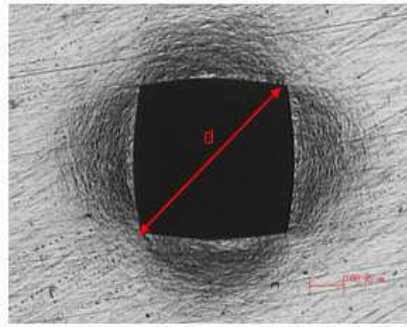


도면9



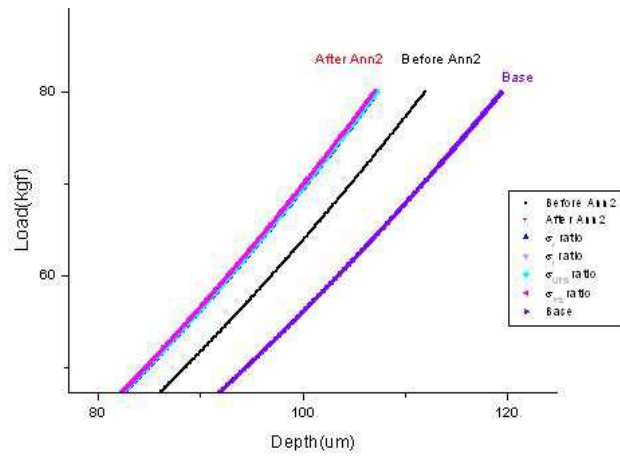
Ideal : $h_c = 7d$

도면10

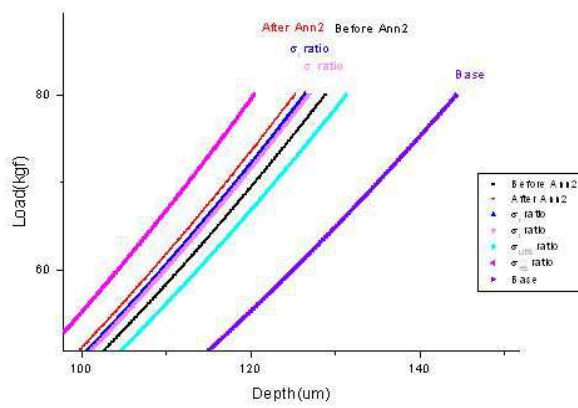


Real : $h_c \neq 7d$

도면11a



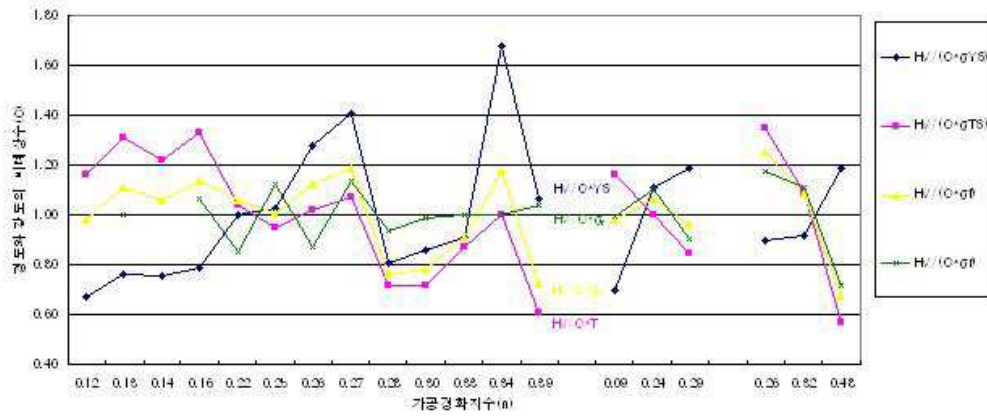
도면11b



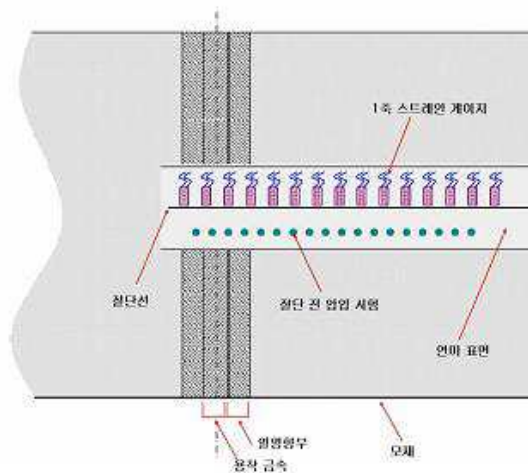
도면12

시편	잔류응력		σ_{YS}	σ_r	σ_f	σ_{UTS}	비고
A	무	AVERAGE	486.6	615.8	583.6	680.5	
	105MPa	AVERAGE	449.6	603.2	570.6	691.6	
	110MPa	AVERAGE	452.6	599.1	568.4	684.3	
	Error (%) [무응력 vs 105MPa]		8.2	2.1	2.3	-1.6	
	Error (%) [무응력 vs 110MPa]		7.5	2.8	2.7	-0.5	

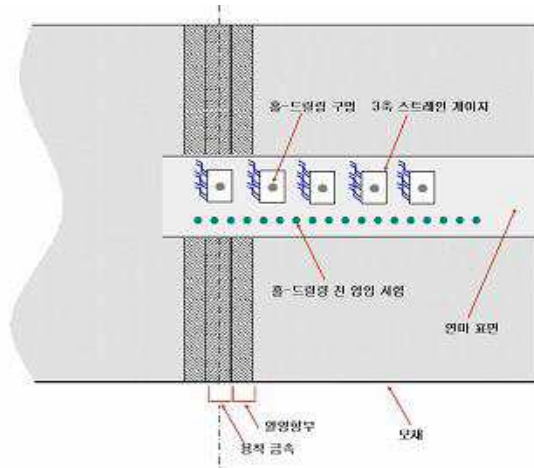
도면13



도면14a

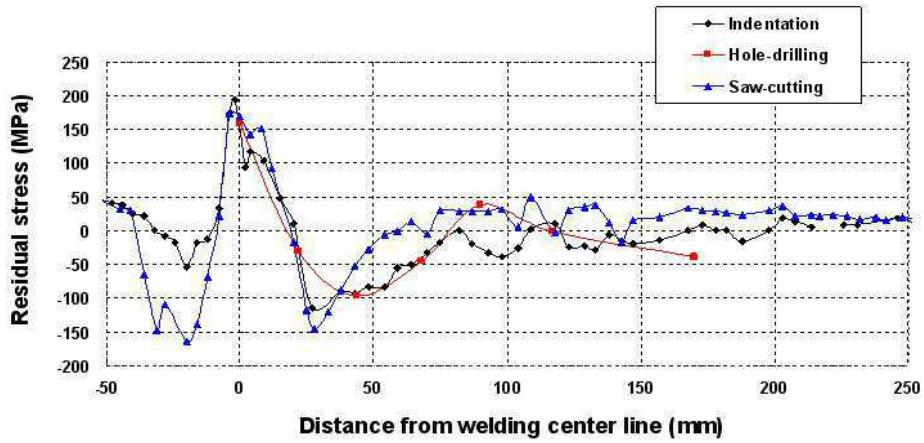


도면14b



도면14c

(API X65)



도면14d

(SS400)

