

계장화 압입곡선의 천이거동 모델링을 통한 비등방향 2축 표면 잔류응력 분석

이윤희 · 정증현 · 박주승* · 권동일

서울대학교 공과대학 재료공학부
*산업자원부 기술표준원 자본재기술표준부

Analysis of Non-equi-biaxial Surface Residual Stress through the Modeling of Shape Shifting in Instrumented Indentation Curve

Yun-Hee Lee, Jeong-hyun Jeong, Joo-Seung Park* and Dongil Kwon

School of Materials Science & Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

*Korea Agency for Technology & Standards, Ministry of Commerce, Industry & Energy, Gwacheon 427-716, Korea

Abstract : Non-destructive instrumented indentation is proposed as a promising alternative of the conventional stress-measuring methods based on already-reported its sensitivity to applied stresses. In this study, we tried to expand the current indentation model on equi-biaxial stress to the characterization of general surface stress in non-equi-biaxial state. A contribution of the surface stress on indentation plasticity was theoretically extracted from the non-equi-biaxial stress matrix. And, a newly derived stress equation was expressed as a multiple of stress non-equi-biaxiality and residual-stress-induced normal load. An experimental tests for confirming the model were also conducted on artificially strained API X65 steel plate, and produced the non-equi-biaxiality factor consistent with that from theoretical analysis.

(Received March 25, 2003)

Key words : Residual stress, Instrumented indentation, Curve shifting, Stress-proportional factor, Stress-directionality coefficient

1. 서 론

금속소재의 가공이나 접합에 의하여 발생하는 잔류응력은 구조물의 형상을 왜곡시킬 뿐만 아니라 외부에서 부가되는 화학적, 역학적인 환경인자들의 영향을 증가시켜 부식, 소성변형, 내피로 및 파괴 저항성을 저하시키고 궁극적으로 구조물의 수명을 단축시킨다¹⁾. 다양한 실험실 수준의 잔류응력 측정기법들이 연구되었으며²⁻³⁾, 현장에서 가동중인 구조물에 비파괴적으로 적용해 보고자하는 노력들이 전개되었다. 그러나 X-선 및 중성자 회절, Barkhausen noise 측정, 초음파 속도 측정과 같은 비파괴적인 기법들은 분진 및 진동과 같은 현장 영향인자들에 대한 민감도와 시편준비 및 측정기법의 복잡성으로 인해 적용의 한계를 나타내었고¹⁾, 따라서 현재 현장 구조물의 잔류응력 측정에는 비파괴적인 표면 압입경도 측정을 통한 정성적인 판단 수준에 머물러 있다.

최근들어 기존의 표면 압입경도 측정법을 개량한 계장화 압입 시험법이 새로운 잔류응력 측정법으로 부각되었으며⁴⁾, 이 기법은 튜브, 파이프 및 강판과 같은 현장 구조물에 직접 부착이 가능한 이동식 시험기를 이용하면 가동 중인 상태에서도 in-situ 적용이 가능하고, 또한 수백 μm 이내의 미소한 압흔 만을 남기기 때문에 비파괴적이라는 장점을 갖고 있다. 계장화 압입시험은 압입시험 중에 압입자에 인가되는 하중과 침투변위를 연속적으로 측정하여 압입하중-변위곡선을 형성하는 기법으로 단순한 경도 측정⁵⁾에서부터 구형 압입자 하부의 진응력과 변형률을 정의함으로써 금속의 소성 유동곡선 평가 단계^{6,7)}로 발전하였다. 이 시험

기법을 통해서 시편의 정확한 변형특성의 평가를 위해서는 압입 시험 중 시험기 및 압입자 축의 탄성변형과 관련된 강성도 (stiffness)를 보정해야 한다⁸⁾. 본 연구에서는 주요 실험 이전에 연구하고자 하는 시편에 계장화 압입시험과 압흔 크기측정을 병행함으로써 시험기의 강성과 압축변형시 발생하는 압흔 주변의 재료쌓임현상(pile-up phenomenon)⁴⁾을 한꺼번에 보정하였다. 계장화 압입곡선에서 가장 선행되어야 하는 분석절차는 시편과 압입자 간의 접촉깊이 및 접촉면적의 평가이다. 압입하중-변위곡선은 압입자를 통하여 시편에 하중을 인가하는 단계의 하중인가곡선 (loading curve)과 압입하중 인가 이후 시편에서 압입자를 제거하는 하중제거곡선(unloading curve)으로 구성된다. 압입하중 제거곡선은 압입깊이의 멱급수 식(power-law equation)으로 적합화 할 수 있으며, Oliver와 Pharr⁵⁾에 의해 제안된 식 (1)을 이용하면 압입자/시편 간의 접촉깊이 h_c 를 결정할 수 있다.

$$h_c = h - \omega(h - h_i) = h - \omega\left(\frac{L}{S}\right) \quad (1)$$

식 (1)에서 h_i 는 하중제거곡선의 접선을 외삽하여 압입깊이 축과 만나는 점인 절편깊이(intercept depth)를 나타내고, S는 하중제거곡선의 초기 기울기이다. 136도의 대면각을 갖는 사각 피라미드 형태를 고려하면 Vickers 압입자의 접촉면적 A_c 는 $24.5h_c^2$ 로 표현되며, 압입하중을 계산된 접촉면적으로 나누면 경도가 평가된다.

선행연구⁴⁾에서 본 연구자들은 나노 압입시험(nanoindentation test)을 통한 박막의 잔류응력 측정기법⁸⁾을 확장하여 계장화 압

입시험을 통해 구조물의 잔류응력을 정량적으로 평가할 수 있음을 확인하였다. 벌크상태의 SS 400 강 사각빔 시편에 탄성한도 내의 4점 굽힘하중을 인가하여 두께 방향을 따라서 다양한 1축 인가응력 상태를 형성하고, 계장화 압입시험을 수행하여 인가응력에 대응하는 압입곡선의 형상전이를 파악하였다. 수정된 1축 잔류응력 평가 모델을 이용하여 얻어진 압입곡선의 형상전이를 분석한 결과 인가응력과 호환적인 압입시험 결과를 나타내었다⁴⁾. 그러나 현장 구조물의 용접부나 금속 가공품의 표면에는 비교적 간단한 등방향 2축 및 1축 잔류응력이 존재한다기 보다는 비등방향 2축 잔류응력(non-equi-biaxial residual stress; $\sigma_{res,x} \neq \sigma_{res,y}, \sigma_{res,z} \neq 0$)이 존재하는 경우가 보편적이다. 용접부에서 얻어진 계장화 압입곡선을 등방향 2축 잔류응력 모델로 분석한 선행 연구결과⁹⁾에 따르면 비교시험법으로 사용한 절단법(saw-cutting)에서 측정된 결과와 응력부호는 동일했지만 절대적인 값에 있어서는 차이를 나타내었고, 이 결과는 용접부 주변에 복잡한 비등방향 2축 잔류응력이 존재하기 때문에 나타나는 현상으로 판단할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 비등방향 2축 잔류응력이 압입 곡선에 끼치는 영향을 이론적으로 모델링하고, 임의적인 표면 응력상태를 형성할 수 있는 굽힘 시험 장치를 고안함으로써 새롭게 수정된 모델의 타당성을 확인하고자 하였다. 또한 계장화 압입시험기와 이론적인 분석기법을 현장 구조물의 잔류응력 평가에 직접 적용할 때의 문제점과 해결책도 본 연구에서 살펴보고자 하였다.

2. 이론적 모델링

선행연구들^{4,8)}을 통하여 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 압입 소성변형(indentation plasticity)에 끼치는 영향을 이론적으로 모델링하였다. 1축 및 등방향 2축 잔류응력은 이론적인 행렬식 계산을 통하여 소성 변형에 무관한 정수압응력 부분(hydrostatic stress part)과 소성 변형에 민감한 편차응력 부분(deviator stress part)으로 분해할 수 있었으며, 본 연구에서는 선행 연구^{4,8)}에서 제안된 행렬 계산법을 확대 적용하여 현장 구조물의 표면에 빈번하게 발생하는 비등방향 2축 잔류응력이 계장화 압입시험에 끼치는 영향을 분석하고자 하였다. 비 등방향 2축 잔류응력 성분 중 절대값이 큰 $\sigma_{res,x}$ 를 σ_{res} 로 나타내면 $\sigma_{res,y}$ 는 응력비례인자(stress-proportional factor)인 k 를 도입하여 $k\sigma_{res}$ 로 일반화 할 수 있다. -1.0에서 +1.0 사이의 범위를 갖는 k 인자를 변화시키면 다양한 비등방향 2축 잔류응력을 표현할 수 있으며, k 값이 -1.0, 0 및 +1.0인 상태들은 순수전단, 1축 응력, 등방향 2축 응력상태로 달리 표현할 수 있다. 식 (2)의 비등방향 2축 표면 잔류응력 행렬에서 정수압 응력 부분을 제거하면 압입 소성변형에 민감한 편차응력 부분을 분석할 수 있다.

비등방향 2축 표면 잔류응력

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

정수압 응력 상태(σ^H)

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

소성변형 의존적 편차응력 상태(σ^D)

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

편차응력 성분 중 시편 표면에 수직이고, 압입하중에 직접 가감되는 것은 압입축 방향의 σ^D 이며, $-(1+k)\sigma_{res}/3$ 와 접촉면적 A_C 를 곱한 값을 비등방향 2축 잔류응력에 의해 발생하는 잔류응력 유도 수직하중 L_{res}^{bi} 로 정의하였다. 무응력 상태에서 주어진 압입깊이까지 압입자가 침투하기 위해서 필요한 압입하중인 L_0 는 인장 잔류응력 하에서는 식 (3)으로 나타낸 잔류응력 유도 수직하중 만큼 감소하여 L_T 값을 갖게 된다.

$$L_{res}^{bi} = -\frac{(1+k)}{3}\sigma_{res} \cdot A_C \quad (3)$$

압입깊이 제어 응력 완화모델(indentation depth-controlled stress-relaxation model)⁸⁾을 적용하여 비등방향 2축 잔류응력의 가역적인 완화거동을 살펴볼 수 있다. 등방향 2축 인장 잔류응력에 의해서 압입자 접촉부 주변에 sink-in 변형이 지배적인 것과 달리 비등방향 2축 잔류응력이 존재하면 접촉부 주변에 sink-in과 pile-up 변형이 복합적으로 나타난다. 인위적으로 인가된 응력상태에 구형 압입시험을 행한 Underwood¹⁰⁾의 연구결과에 따르면 그림 1과 같이 인장 잔류응력 방향과 수직인 압입자 접촉면에 sink-in이 강하게 발생하고, 압축 잔류응력 방향과 수직인 압입자 접촉면에서는 그림 1의 단면형상에서 확인할 수 있는 것처럼 pile-up이 발생하는 것으로 보고되었다. 그러나 잔류응력 완화 시 고유경도가 일정하게 유지^{4,8,11)}되도록 접촉형상이 가역적으로 변화한다면 인장 잔류응력 방향에 수직인 접촉부에서는 sink-in의 제거와 함께 접촉면적의 증가(고유경도의 유지를 위해 압입하중도 증가)가 발생하고, 반대로 압축 잔류응력 방향에 수직인 접촉부에서는 pile-up의 제거와 함께 접촉면적의 감소(고유경도의 유지를 위해 압입하중도 감소)가 발생하여 무응력 상태의 접촉형상(압입하중)으로 수렴한다. 비등방향 2축 잔류응력의 완화시 접촉부 주변의 복합적인 표면변형의 완화에도 불구하고 압입하중의 변화는 시편 표면에 수직인 압입축으로만 감지되기 때문에 인장응력과 압축응력의 영향이 서로 상쇄되고 남은 순 잔류응력(net residual stress)만이 검출된다. 순 잔류응력이 인장 응력 상태인 시편에 L_T 의 압입하중을 인가하여 압입깊이 h_i 를 형성한 이후 압입자 침투깊이를 일정하게 유지하면서 잔류응력을

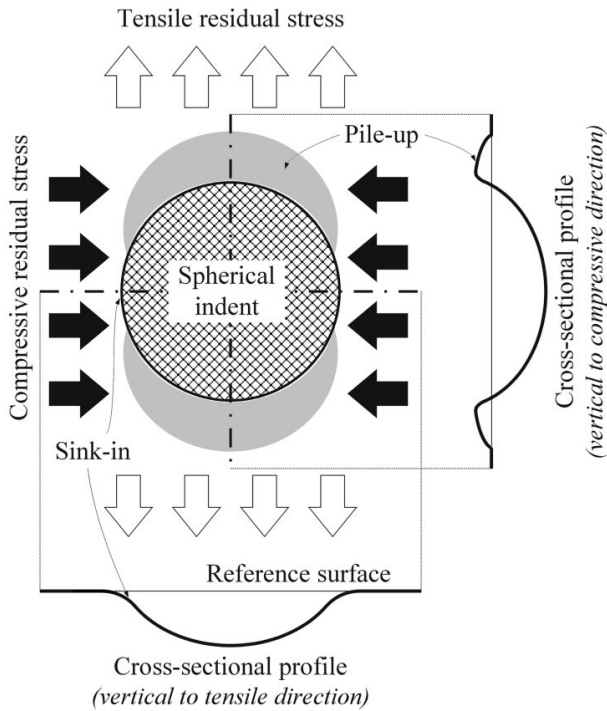


Fig. 1. Non-uniform deformation morphology around contact formed by spherical indentation on pre-existing non-equi-biaxial stress state.

완화시키면 압입하중은 무응력 상태의 값인 L_0 로 수렴하며, 연속적인 압입깊이 제어 잔류응력 완화과정은 적분식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$L_0 = L_T + L_{res}^{bi} = L_T + \int_{L_T}^{L_0} dL_{res}^{bi}$$

$$= L_T - \frac{1+k}{3} \int_{L_T}^{L_0} d(\sigma \cdot A_c) \quad (4)$$

식 (3)으로 제안된 비등방향 2축 표면 잔류응력 유도 수직하중을 식 (4)에 대입하고, 잔류응력 완화 과정에 나타나는 접촉면적 A_c 와 응력 σ 의 변화를 각각 압입하중의 2차식과 선형적인 1차식으로 나타냄으로써 식 (5)로 비등방향 2축 잔류응력 평가식이 유도되었다. Ω 는 $R_2 L_T^2 + (R_1 - R_2 L_0) L_T + (R_0 - R_1 L_0) L_T - R_0 L_0$ 이며 R_2, R_1 및 R_0 는 접촉면적을 압입하중의 2차식으로 표현할 때의 계수들이며, 본 연구에서는 식 (5)의 계수인 $3/(1+k)$ 를 응력방향성 계수(stress-directionality coefficient)로 정의하였다. 1축 및 등방향 2축 잔류응력에 대응하는 응력비례인자 값인 0과 1.0을 식 (5)에 대입하면 잔류응력 평가식은 선행 연구^{4,8)}에서 유도된 식들과 일치하며, 두 응력 상태에 대응하는 응력 방향성 계수는 각각 3과 1.5로 주어졌다.

$$\sigma_{res} = \frac{3}{(1+k)} \frac{L_{res}^{bi2}}{\Omega} \quad (5)$$

3. 실험 방법

십자형 시편(cruciform specimen)에 비등방향 2축 표면응력

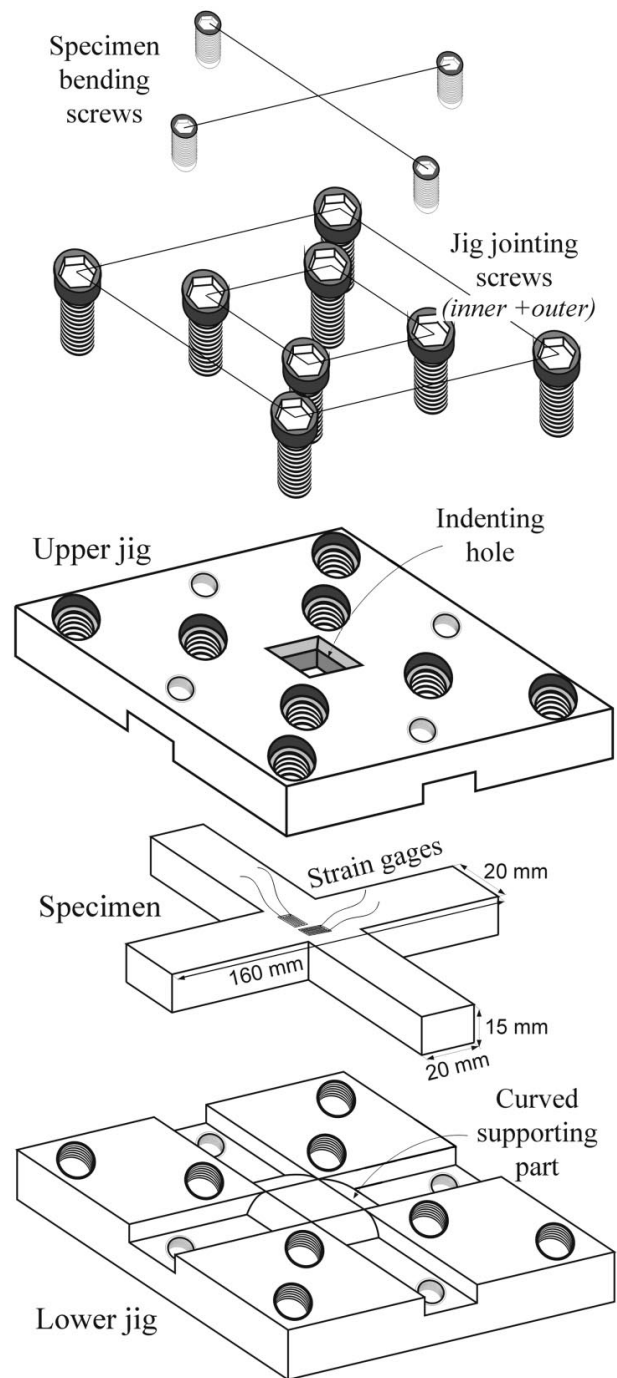


Fig. 2. Stress-generating jig for simulating the general surface stress on a cruciform specimen.

($\sigma_x \neq \sigma_y \neq 0, \sigma_z = 0$)을 인가하기 위한 굽힘장치를 그림 2와 같이 고안하였다. 십자형 시편을 지지할 수 있도록 홈(groove)을 형성한 상부 및 하부 지그 사이에 폭×두께×길이 각각 20×15×160 mm인 시편을 장착하고 지그결속나사(jig jointing screw)를 이용하여 고정하였다. 이후 시편의 양 끝단에 형성된 나사구멍으로 기계적 하중을 인가할 수 있는 나사(specimen bending screw)를 밀어넣음으로써 시편에 굽힘응력을 유발시켰다. 시편 굽힘용 나사를 상부 혹은 하부 지그에 도입함에 따라 시편 중앙부에는 각각 인장 및 압축 응력이 형성되며, 나사의 도

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of API X65 steel specimen

Sample	C	Mn	Si	P	S	Fe	Elastic modulus	Poisson ratio	Yield strength
API X65 wt(%)	0.08	1.45	0.31	0.019	0.003	Bal.	210 GPa	0.3	490 MPa

입깊이를 달리함에 따라 인가응력의 크기를 조절할 수 있다. 시편 중심부를 견고히 구속하여 면의 변형(out of plane deformation)을 최소화시키는 동시에 탄성 굽힘응력을 원활히 전달하기 위하여 그림 2의 곡형 지지부(curved supporting part)를 고안하였고, 굽힘 변형된 시편 중심에 압입하중을 인가할 때 발생하는 인가응력의 완화를 최소화하기 위하여 지그 결속나사를 내부와 외부에 각각 4개씩 배치하고 15 mm의 후판 시편을 이용하였다. 십자형 시편은 표 1의 조성 및 기계적 물성을 갖는 API X65 배관용 강재에서 채취하였고, 600°C에서 2시간 동안 어닐링한 뒤 노냉하여 내부에 존재하는 잔류응력을 제거하였다. 1000번 사포로 연마된 시편 표면에 2축 스트레인 게이지를 부착하여 그림 2의 굽힘지그에 장착한 뒤 시편 굽힘용 나사를 돌려 다양한 탄성 변형률을 얻었다. Tresca 항복조건 ($|\sigma_{\max} - \sigma_{\min}| < \sigma_y$)을 적용하여 탄성한도 내의 응력을 인가하였고, 목표 변형률에 도달할 때까지 비대칭적인 시편의 왜곡을 막기 위하여 시편 양단에 약 50 $\mu\epsilon$ 의 미소한 굽힘변형률 단계로 교번적으로 변형을 증가시켰다. 인가된 탄성 변형률은 시편 표면에 부착한 스트레인 게이지를 이용하여 측정하였고, 상부지그 중심에 위치한 압입구멍

(indenting hole)을 통해 계장화 압입시험을 수행함으로써 다양한 표면 응력 상태에 대응하는 압입곡선을 형성하였다.

그림 3과 같이 Vickers 압입자를 부착한 프론틱스사의 AIS 3000R을 이용하여 0.2 mm/min의 압입속도로 비등방향 2축 응력이 인가된 시편에 계장화 압입시험을 수행하였다. 잔류응력 측정용 계장화 압입시험기인 AIS 3000R은 최대 하중과 이동거리가 각각 980 N과 30 mm이며, 하중 및 변위 분해능은 0.98 N과 0.1 μm 를 갖고 있다. 인가응력의 유무에 관계없이 압입시험 조건이 동일하도록 무응력 시편도 굽힘지그에 올려놓고 계장화 압입시험을 진행하였다. 98 N부터 294 N까지 98 N씩 압입하중을 증가시키면서 하중인가-제거-재인가의 사이클을 갖는 다중 계장화 압입(multiple instrumented indentation) 방법으로 무응력 상태의 기준 압입곡선을 형성하였으며, 원하는 압입깊이에 대응하는 접촉면적은 각 하중단계에서 식 (1)을 이용하여 계산한 접촉물성을 내삽(interpolation)하여 예측하였다. 비등방향 2축 굽힘응력이 인가된 시편 중심부에도 294 N의 최대하중을 인가하여 3회 이상의 계장화 압입시험을 수행하여 각 응력상태에 대응하는 압입곡선들을 형성하였다. 계장화 압입시험으로 얻어진 압입곡선들을 중첩하였을 때 중심부에 위치하는 곡선을 각 응력 상태를 대표하는 곡선으로 선택하여 분석에 이용하였다. 무응력과 응력이 인가된 상태에서 얻어진 대표 압입하중 인가곡선들을 중첩하여 원하는 압입깊이에서 비등방향 2축 잔류응력 유도 수직하중으로 측정하고, 식 (1)을 이용하여 계산된 접촉면적의 압입하중 의존성을 실험적으로 적합화하여 식 (5)에 대입함으로써 응력값을 평가하였다.

4. 결과 및 고찰

다양한 인가응력 상태에 대응하는 압입곡선의 형상 변화

십자형 시편의 굽힘을 통하여 형성된 탄성 응력 상태는 표 2로 정리하였으며, 그림 4에는 무응력 상태의 API X65 강 시편에서 얻어진 다중 압입하중-변위곡선(기호 ●; stress-free)과 6가지의 다양한 응력 상태에서 얻어진 압입하중 인가곡선들을 중첩하여 나타내었다. 무응력 상태의 압입곡선들은 294 N의 최대하중에서 $68.79 \pm 0.23 \mu\text{m}$ 의 높은 재현성을 나타내었고, 응력 상태의 압입곡선들도 최대 압입하중에서 $\pm 0.47 \mu\text{m}$ 이하의 오차를 나타내었다. 또한 굽힘응력 상태의 시편 중심부에 최대 압입하중을 인가하더라도 변형률 변화는 10 $\mu\epsilon$ (약 2.1 MPa에 해당) 이내로 나타났으며, 최대 압입깊이도 시편 두께의 0.5% 이내에 존재하여 압입변형이 인가된 굽힘응력에 끼치는 영향은 미소한 것으로 확인되었다. 무응력 압입곡선과 비교하여 응력 상태의 압입하중 인가곡선들의 상대적인 위치를 살펴보면, 등방향 2축 압축/인장 응력에 대응하는 곡선(기호 <; #1, 기호 >; #6)이 1축 압축/인장 응력에 대응하는 곡선(기호 ⊕; #3, 기호 ⊞; #5)보다 천이(shifting)가 크게 나타났다. 식 (3)에 등방향 2축 및 1축 인가응력에 대응하는 k 값으로 1.0과 0을 대입해 보면

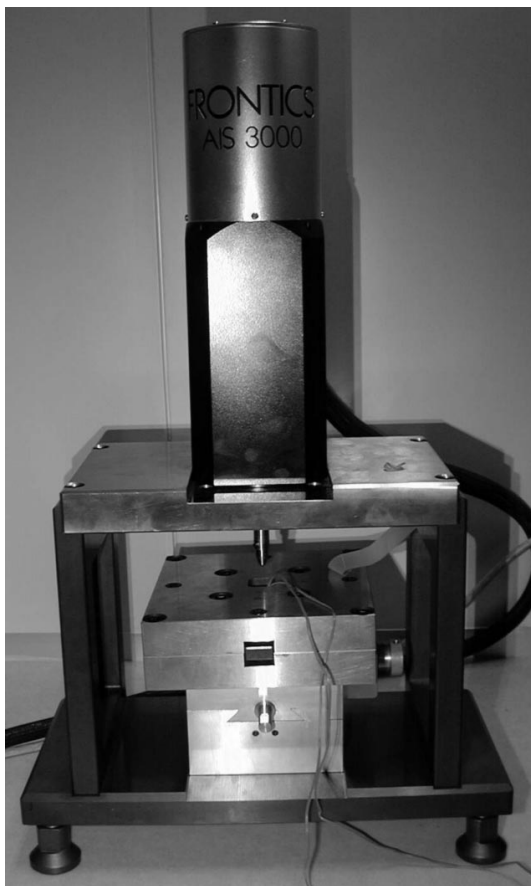


Fig. 3. Advanced Indentation System (AIS) 3000R coupled with the stress-generating jig.

Table 2. Stress-proportional factors, stress-directionality coefficients and power-law fitted loading curves of several stressed and unstressed states for API X65 steel specimen

Test No.	Applied stress (MPa)		k-value (σ_y/σ_x)	Stress-directionality coefficient	Fitted loading curve	Stress-induced load at 55 μm depth (N)
	$\sigma_x (= \sigma_{res})$	$\sigma_y (= k\sigma_{res})$				
#1	-415	-414	+1.0 (equi-biaxial)	1.5	$L = 0.116h^{1.83}$	-16.7
#2	-375	-248	+0.66 (biaxial)	1.81	$L = 0.162h^{1.79}$	-15.2
#3	-408	0	0 (uniaxial)	3.0	$L = 0.196h^{1.74}$	-8.9
#4	-239	+231	-0.97 (pure shear)	100	$L = 0.146h^{1.80}$	+0.2
#5	+414	0	0 (uniaxial)	3.0	$L = 0.132h^{1.81}$	+8.6
#6	+428	+427	+1.0 (equi-biaxial)	1.5	$L = 0.173h^{1.78}$	+20.9

Fitted loading curve of stress-free state: $L = 0.175h^{1.75}$

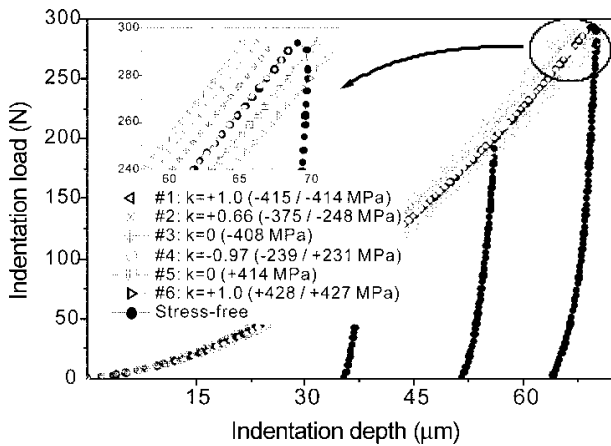


Fig. 4. Superposition of representative indentation loading curves for various applied stress states on the multiple indentation curve for stress-free state.

등방향 2축 잔류응력 유도 수직하중이 1축 잔류응력 유도 수직 하중의 2배임을 알 수 있으며, 등방향 2축 인가응력이 1축 인가응력에 비해 압입 소성변형에 미치는 영향이 큰 것으로 판단할 수 있다. 또한 인가된 응력 σ_x 와 σ_y 가 절대값이 같고, 부호만 반대인 순수전단 응력 상태(pure shear stress state)의 압입하중 인가곡선(기호 ○; #4)은 무응력 상태의 압입곡선과 완전히 중첩되어 표 2에서 확인할 수 있듯이 잔류응력 유도 수직하중이 0으로 접근하였다.

인가응력과 계장화 압입시험 분석치의 비교를 통한 응력 방향성 계수의 평가

무응력 상태에 대응하는 압입하중 제거곡선 부분들을 분석하여 여러 하중 단계에서 접촉물성을 평가하고 표 3에 나타내었다. 접촉면적을 압입하중의 2차식으로 나타내었을 때, 적합화 계수인 R_2 , R_1 , R_0 는 각각 1.15×10^{-1} , 3.50×10^2 및 -4.15×10^3 으로 결정되었다. 일정 압입깊이를 표 2의 응력 및 무응력 상태에 대응하는 압입하중 인가곡선 적합화 식에 대입하여 얻어진 압입하

Table 3. Contact properties evaluated from the unloading parts in the multiple indentation curve for API X65 specimen

Indentation load (N)	Fitted unloading curve	Contact depth (μm)
98	$L = 21.66(h-h_f)^{1.55}$	36.6
196	$L = 8.75(h-h_f)^{2.04}$	54.3
294	$L = 2.92(h-h_f)^{2.53}$	68.1

$A_C = 1.15 \times 10^{-1} L^2 + 3.50 \times 10^2 L - 4.15 \times 10^3$

Table 4. Experimental determination of stress-directionality coefficient by comparing analyzed stress without considering directionality and applied stress from strain gage

Test No.	Applied stress (MPa)	Stress without directionality L_{res}^{bi}/Ω (MPa)	Stress-directionality coefficient
#1	-415	-269.9 ± 1.9	1.54
#2	-375	-201.0 ± 10.7	1.87
#3	-408	-125.7 ± 15.8	3.25
#4	-239	$+3.1 \pm 24.4$	77.1
#5	+414	$+140.7 \pm 43.7$	2.94
#6	+428	$+282.8 \pm 65.9$	1.51

중 값의 차이로부터 잔류응력 유도 수직하중을 계산하고, 표 3에 나타낸 접촉면적의 2차식 계수들을 식 (5)에 대입하면 응력 방향성 계수를 고려하지 않았을 때의 잔류응력을 평가할 수 있다. 표 4에는 스트레인 게이지를 이용하여 측정 한 인가응력과 응력 방향성을 고려하지 않고 계장화 압입시험을 통하여 분석한 응력치를 직접 비교하였다. 표면에 존재하는 2축 응력의 상대적인 크기와 부호를 고려하지 않고, 압입축으로 전달되는 순 잔류응력 정보만을 이용하여 평가한 응력값은 인가응력의 부호는 비교적 정확히 평가하였지만, 정량적인 면에 있어서는 큰 차이를 나타내었다. 식 (5)를 살펴보면 인가응력 $\sigma_x (= \sigma_{res})$ 와 계장화 압입시험시 방향성을 고려하지 않고 평가한 응력치 L_{res}^{bi}/Ω 의 비로부터 응력방향성 계수를 실험적으로 결정할 수 있다. 그림

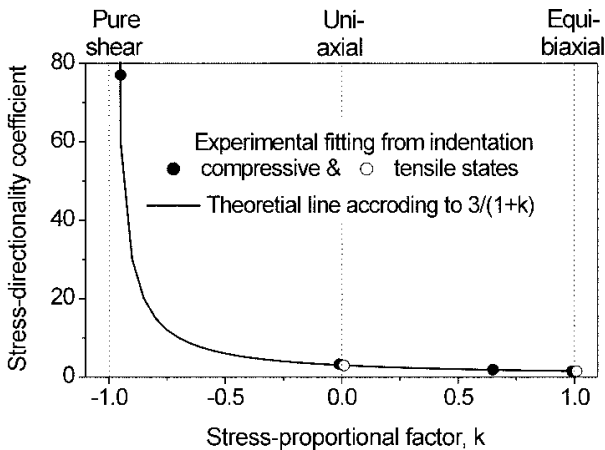


Fig. 5. Perfect agreement between experimentally determined stress-directionality coefficient and theoretically derived one (solid line).

5에는 -1.0과 1.0 사이의 범위에 존재하는 다양한 응력비례인자 k 에 대하여 이론적으로 전개하여 유도된 응력방향성 계수, $3/(1+k)$ 의 실선 위에 본 연구에서 실험적으로 결정한 응력방향성 계수를 중첩하여 직접 비교하였다. 순수 전단응력 상태에 근접한 시험 #4에 대응하는 응력 방향성 계수의 오차를 제외하고 전반적으로 일치하는 양상을 나타내어 비등방향 2축 잔류응력 평가식으로 새롭게 제시된 식 (5)의 타당성을 확인할 수 있었다. 순수 전단응력 상태의 경우 x 축과 y 축의 인장 및 압축 잔류응력이 서로 완전히 상쇄되어 순 잔류응력은 0이 되며, 따라서 잔류응력에 의한 압입하중 인가곡선의 전이거동도 전혀 나타나지 않는다. 또한 순수전단 응력 상태의 k 값인 -1.0을 식 (5)에 대입하면 응력 방향성 계수가 무한대(∞)로 나타나기 때문에 계장화 압입시험을 통하여 이 응력 상태를 정량적으로 평가하는 것은 불가능하다. 즉 순수 전단 응력상태 외의 비등방향 2축 잔류응력이 존재하는 국소영역의 응력비례인자 k 값을 알고, 계장화 압입시험을 통해 잔류응력 유도 수직하중과 접촉면적의 압입하중 의존성을 평가하면 식 (5)를 통해 정확한 잔류응력의 평가가 가능하다. 그러나 Vickers 압입자를 이용하여 시편 표면에 수직방향으로 압입하중을 인가하는 계장화 압입시험 만으로 응력의 방향성의 지표인 k 값을 결정하는 것은 불가능하다. 따라서 현재 Underwood의 연구¹⁰⁾와 유사하게 응력 방향성과 접촉부 주변의 sink-in 및 pile-up 변형형상과의 관련을 짓는 연구와 기존에 결정학적 방향성에 따른 변형거동의 차이를 평가하는 연구에 주로 사용되어 온 Knoop 압입시험을 통해 응력 방향성을 결정하는 연구를 진행하고 있다.

5. 결 론

보편적인 비등방향 2축 잔류응력 상태의 해석에 적용할 수

있는 잔류응력식을 제시하였고, 다양한 비등방향 2축 인가응력을 발생시킬 수 있는 십자형 시편과 굽힘지그를 고안하여 새로운 잔류응력 평가식의 검증 실험들을 수행하였으며 연구결과는 아래와 같이 정리하였다.

1. 전단 소성변형 이론에 기반한 행렬식 분석을 통하여 비등방향 2축 표면 잔류응력의 압입하중 기여분 L_{res}^{bi} 를 분석하고, 압입깊이 제어 잔류응력 완화과정을 적분식으로 풀이함으로써 최종적인 비등방향 2축 잔류응력 평가식을 아래와 같이 유도하였다.

$$\sigma_{res} = \frac{3}{(1+k)} \frac{L_{res}^{bi^2}}{\Omega}$$

2. API X65 강판에서 채취한 십자형 시편에 인위적인 1축, 등방향 2축, 비등방향 2축 및 순수 전단 응력상태를 형성하고, 계장화 압입시험을 수행하여 각 응력 상태에 대응하는 압입곡선을 얻었다. 얻어진 압입곡선의 형상천이를 제한한 모델을 이용하여 분석하여 $L_{res}^{bi^2}/\Omega$ 를 얻고, 스트레인이계이지로부터 측정된 인가응력과 비교하였다. 응력 절대값들은 서로 차이를 나타내었으며, 실험적으로 결정된 σ_{res} 와 $L_{res}^{bi^2}/\Omega$ 의 비는 이론적으로 유도된 응력 방향성 계수, $3/(1+k)$ 와 일치하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 기술표준원의 “계장화 압입시험법에 의한 철강 재료의 용접부 잔류응력 평가기법 표준화” 과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Society for Experimental Mechanics: *Handbook of Measurement of Residual Stresses*, Fairmont Press, Lilburn, GA, 1 (1996).
2. I. C. Noyan and J. B. Cohen, *Residual Stresses*, Springer-Verlag, New York, 75 (1987).
3. C. O. Ruud, P. S. DiMascio and J. J. Yavelak, *Experimental Mechanics*, **25**, 338 (1985).
4. Y.-H. Lee, W. Ji, D. Son, J.-i. Jang and D. Kwon, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, **40**, 1042 (2002).
5. W. C. Oliver and G. M. Pharr, *J. Mater. Res.*, **7**, 1564 (1992).
6. J.-H. Ahn, Y. Choi and D. Kwon, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, **38**, 1606 (2000).
7. KS B 0950: Metallic Materials - Instrumented Indentation Test for Indentation Tensile Properties.
8. Y.-H. Lee, W. Ji, J.-h. Jeong and D. Kwon, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, **40**, 744 (2002).
9. J.-i. Jang, D. Son, Y.-H. Lee, Y. Choi and D. Kwon, *Scripta Mater.*, **48**, 743 (2003).
10. J. H. Underwood, *Experimental Mechanics*, **13**, 373 (1973).
11. T. Y. Tsui, W. C. Oliver and G. M. Pharr, *J. Mater. Res.*, **11**, 752 (1996).