

철강 재료의 2축 비등방향 잔류응력 평가를 위한 연속압입시험의 최적조건 선정

유승종*(한국생산기술연구원), 김주현(국민대학교 기계자동차공학부),
박주승(산업자원부 기술표준원), 권동일(서울대학교 재료공학부)

Optimum Selection of the Advanced Indentation Technique for the Evaluation of Non-equi-biaxial Residual Stress in Steel Materials

S. J. Yu(Korea Institute of Industrial Technology), J. H. Kim(Kookmin University),
J. S. Park(Korea Agency for Technology and Standards) and D. I. Kwon(Seoul National University)

ABSTRACT

Most of materials receive force in using, therefore, the characteristics of materials must be considered in system design not to occur deformation or destruction. Mechanical properties about materials can be expressed as responsible level of material itself under the exterior operation. Main mechanical properties is strength, hardness, ductility and stiffness etc. Currently, among major measure facilities to measure such mechanical properties, advanced indentation technique has focused in industrial areas as reason of nondestructive and easy applications for mechanical tensile properties and evaluation of residual stress of materials. This study is to find the optimum experimental condition about residual stress advanced indentation technique for accurate analysis of the welded joint of steel materials through indentation load-depth curve obtained from cruciform specimen experiment. Optimum selection was applied to the welded joint of real steel materials to give non-equi-biaxial stress state and compared with general residual stress analyzing method for verification.

Key Words : Advanced indentation technique(연속압입시험), Cruciform specimen(십자형 시편), Residual stress(잔류응력), Welded joint(용접부)

1. 서론

기계적 분야에 사용되는 재료의 대부분은 사용 중에 힘(하중)을 받게 된다. 그러므로 우선적으로 재료의 특성을 이해하여 과도한 변형이나 파괴가 일어나지 않도록 설계에 주의를 기울여야 한다. 재료의 기계적 특성이란 외부 작용에 대한 재료의 반응 정도를 나타낸다. 즉, 외부의 힘(하중)과 이에 따른 재료의 변형 사이의 관계를 나타낸다. 중요한 기계적 성질로는 강도(strength), 경도(hardness), 연성(ductility) 및 강성도(stiffness) 등이 있다. 더불어 재료는 기계적 특성이 모재와는 다른 양상을 보이는 잔류응력이 존재하며, 파손의 일반적인 원인이 될 수 있다. 파손의 가능성을 없애고, 파손이 일어난 경우에는 파손의 원인을 분석하여 차후의 파손 방지를

위한 적절한 조치를 취하여야 한다. 따라서, 재료의 기계적 성질을 정확히 분석하는 것은 무엇보다 중요한 일이 아닐 수 없을 것이다.

소재의 정확한 분석을 위해서 다양한 시험조건을 바탕으로 최적의 시험조건을 도출하고 재현성과 신뢰성을 높여, 현장설비에 적용시 안전성을 확보할 수 있다. 재료의 기계적 성질을 정확하게 측정하기 위해서 보편적인 일축 인장시험법은 재현성이 높고 다양한 탄소성적 특성을 간단한 실험으로 알 수 있다는 장점으로 널리 사용되고 있으나, 시편수급의 어려움과 파괴적 시험방법이므로 나노 및 마이크로 첨단산업과 현장 설비 분야에의 신속한 적용에는 적합하지 못한 평가가 나오고 있다. 이러한 보완책으로 최근들어 Fig. 1 과 같은 연속 압입시험은 기존의 경도 시험법을 개선하여 압흔의 관찰 없이, 압입하

중의 변화에 따른 압입깊이를 연속적으로 측정하여 압입하중-변위곡선을 분석하여 다양한 기계적 특성을 평가하는 방법이다. 본 시험법은 인장물성 분야에서는 일축인장시험과 높은 결과 값의 일치성을 보이고 있으며¹¹⁾, 잔류응력분야에서도 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 연구는 하중의 인가 및 제거를 통하여 압입하중-변위곡선을 도출하고 다양한 시험상의 인자들을 구한 뒤 이론적 수식계산에 적용하여 소재의 물성을 평가한다. 간접적으로 평가하므로 압입시험상의 다양한 인자의 정확한 도출이 중요하며, 시험조건이 최적화가 필요하다.

본 연구에서는 기계적 특성이 다른 철강 재료의 상호구속에 의해 존재하는 용접부 잔류응력에 대한 정확한 분석을 위해 연속압입시험에 대한 다양한 시험조건을 제시하고 응력조건에 따른 2축 등방향 및 비등방향 표면응력을 인가 할 수 있는 십자형 시편 (cruciform specimen)으로 압입하중-변위곡선을 비교 및 분석을 통하여 최적의 시험조건을 규명하였다. 시험 최적조건을 도출을 위해 주어진 항복강도 분율에 대한 실험값의 오차를 분석하여 다구찌 실험계획법에 의한 망소특성에 대한 SN비를 분석하여 선정하였다.

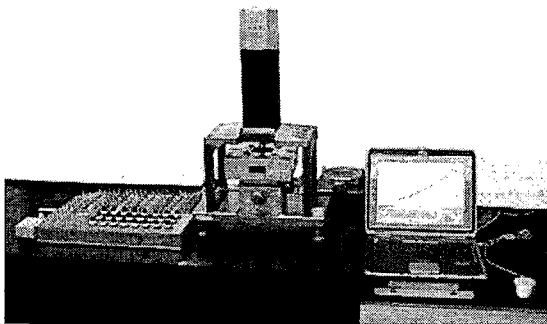


Fig. 1 AIS3000 and Interface Software for evaluating flow properties using continuous indentation technique

2. 이론적 배경

2.1 연속 압입시험의 비등방향 2축 잔류응력 완화 모델

소재에 존재하는 잔류응력에 대한 수축 및 팽창력에 따라 연속 압입시험에서 나타나는 압입하중-변위곡선의 형태는 다른 양상을 보인다. 동일한 접촉 깊이에 대한 인장 및 압축상태에서의 잔류응력을 나타내면 무응력 상태의 압입하중에 대한 접촉깊이가 존재하며, 잔류응력은 접촉면적의 비와 경도 값으로

무응력 상태와 잔류응력 상태에서의 대응 접촉면적에 대한 정확한 평가가 가능하면 소재의 잔류응력을 평가할 수 있다¹²⁾. 즉, 연속 압입시험에서 시험편에 인장 및 압축 잔류응력이 존재하면 Fig. 2 와 같이 잔류 응력이 존재하지 않는 상태인 무응력에서 얻어진 압입 하중-변위 곡선에 비해 기울기가 변화한다. 동일한 압입 깊이에 도달하기 위해서는 인장 잔류응력을 갖는 시험편은 무응력 상태에 비해 낮은 압입하중이 필요하고, 반대로 압축 잔류 응력을 갖는 시험편은 높은 압입 하중이 필요하다. 재료의 구조적인 변형과 기계적 물성에 큰 영향을 미치는 1축 및 등방향 2축 잔류응력은 이론적인 행렬식 계산을 통하여 소성 변형에 무관한 정수압응력 부분과 소성 변형에 민감한 편차응력 부분으로 분해할 수 있으며, 비등방향 2축 잔류응력이 연속압입시험에 미치는 영향은 선행연구들을 통하여 모델링되었으며¹³⁾, 본 연구에서는 선행연구에서 제안된 행렬 계산법 등을 적용하여 응력비례인자인 k를 도입하여 실제 현상설비의 표면 및 용접부에 적용 가능한 최적조건을 선정하고자 하였다.

측정하고자 하는 잔류 응력 성분을 σ_{res} 이라 정의하면 σ_{res} 는 잔류 응력에 의한 하중 변화 정도와 일정한 비례관계를 갖고 있음이 알려져 있다¹⁴⁾. 이때 인장 및 압축 잔류 응력은 식 (1)과 식 (2)로 측정될 수 있다.

$$\sigma_{res}^T = \eta \frac{(F_0 - F_T)}{A_s} \quad (1)$$

$$\sigma_{res}^C = \eta \frac{(F_0 - F_C)}{A_s} \quad (2)$$

비등방향 2축 잔류 응력이 인가될 때에는 한 축의 잔류응력을 σ_{res} 라 하면 이에 수직인 방향의 잔류응력은 응력방향성계수 k를 도입하여 $k\sigma_{res}$ 라 할 수 있다. 재료 표면에 수직인 방향(압입 시험 방향)으로의 잔류응력이 없다고 가정하면, 압입 시험 방향의 소성변형을 일으키는 편차 응력은 식 (3)과 같이 나타나며 하중 변화량을 접촉 면적으로 나누어준 값과 일치한다.

$$\sigma_{s,d} = \frac{(1+k)}{3} \sigma_{res} = \frac{1}{\psi} \frac{(F_0 - F_T)}{A_s} \quad \text{or} \quad = \frac{1}{\psi} \frac{(F_0 - F_C)}{A_s} \quad (3)$$

이때, 금속 재료에서 ψ 는 3.0이다.

따라서 식 (4)와 식 (5)로 나타낼 수 있으며, 최종적으로 측정방향으로의 잔류응력은 σ_{res} 로, 그 축에 수직된 축의 잔류응력은 $k\sigma_{res}$ 로 결정된다¹⁵⁾.

$$\sigma_{res} = \frac{1}{\Psi} \frac{3}{(1+k)} \frac{(F_0 - F_T)}{A_s} \quad (4)$$

$$\sigma_{res} = \frac{1}{\Psi} \frac{3}{(1+k)} \frac{(F_0 - F_C)}{A_s} \quad (5)$$

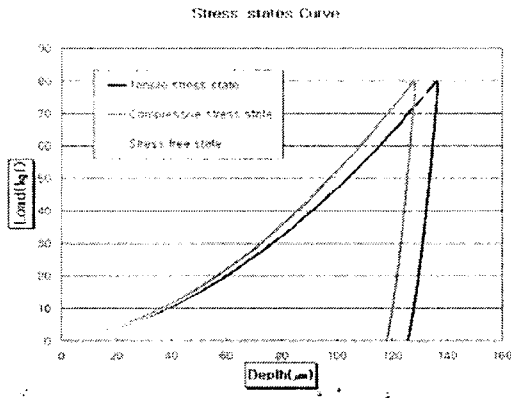


Fig. 2 Schematic diagram showing the variation of indentation loading curves by the change of stress states; applied load increase and decrease by the effect of compressive and tensile residual stresses

2.2 연속압입시험의 잔류응력 평가 실험변수

연속 압입시험에 의한 철강 재료의 잔류응력 측정을 위한 실험적 변수로는 실험 내적요인과 외적요인으로 크게 구분할 수 있다. 우선 내적요인으로는 실험에 있어서 분석에 영향을 주는 변수로써 최대 압입하중, 하중제거회수, 하중제거시작위치와 하중제거율을 들 수 있다. 최대 압입하중은 소재의 압입시험 시 압입 변형율에 큰 영향을 미치며, 그로 인하여 소재내의 구조적 변형과 압입자와 소재내의 접촉면적과도 관련이 있다. 하중제거회수는 압입하중에 대한 하중제거단계의 회수를 나타내며, 소재의 물성 분석 시 제거단계에서의 자료로 활용되는 주요변수이다. 하중제거시작위치는 초기 하중에 대한 자료의 신뢰성을 위하여 전체 하중에 대한 분율로 나타내며, 이후의 하중에 대하여 하중제거 단계가 성립한다. 하중제거율은 하중제거 시 초기하중에 대한 제거단계 시작에서의 하중의 비를 나타낸다. 다시 말해서, 하중제거가 시작되는 시점에서의 하중값과 최종 하중값에 대한 차이를 초기하중으로 나눈 값이다. 이러한 변수들은 잔류응력 분석에 있어서 이론적 모델링에 대한 직접적 수식변수로 적용되거나 다른 인자들의 유도과정에 포함되는 주요변수이다.

외적요인으로는 시편의 가공 및 표면상태, 최대 하중의 유지시간, 압입속도 등을 들 수 있다¹⁶⁾. 이러한 변수들은 재료의 물성에 따라 반복실험에 대한

압입하중-변위곡선의 실험의 재현성과 신뢰성에 큰 영향을 주는 변수로써 최대하중 유지시간은 시편에 적용된 하중에 대한 유지시간을 의미하며, 압입속도는 압입자가 소재에 대하여 하중인가 및 제거 시 움직임의 속도를 나타낸다. 또한, 시편의 가공 및 표면상태에 있어서 경도시험법에서 규격화된 수준을 따르는 것이 중요하다. 이러한 외적 변수들은 잔류응력 평가에 관련한 수식에 직접적인 연관성은 없으나 실험의 성공여부에 큰 영향을 주는 변수임에는 지나침이 없다.

본 연구에서는 외적 변수요인은 최적으로 설정하고, 주요 실험변수로써 네 가지 내적 변수를 선정하여 그 영향도와 최적의 조건을 결정하였다.

2.3 실험계획기법

실험계획법(Design of Experiments)은 제품의 특성에 영향을 미치는 여러 가지 인자를 선정하고 이들의 관계를 알아보기 위한 실험을 실시하여 제품의 최적 제조조건을 경제적으로 찾아내는 기법이다. 즉, 제품 품질특성에 영향을 미치는 요인들이 어떤 것들인지를 알아보기 위하여 실험의 배치와 실시를 어떻게 하고, 또 얻어진 데이터를 어떠한 통계적 방법으로 분석을 하면 최소의 노력과 비용으로 최대의 정보를 얻을 수 있는가 하는 최적 작업조건을 가장 경제적으로 찾아내기 위한 기법이다¹⁷⁾.

실험계획법에 사용되는 문제로는 어떠한 인자의 특성값에 가장 크게 미치는 영향을 찾기 위한 검정의 문제, 선정된 인자가 특성값에 영향을 미치는 정도를 찾기 위한 추정의 문제가 있으며, 특성값을 고려한 인자들의 최적 작업조건은 무엇인지를 찾는 것을 목적으로 실험계획법이 적용되어야 한다.

다구찌 실험계획법(Taguchi method)은 실험계획법의 일종으로 적은 수의 실험을 통하여 많은 수의 의사결정을 하기 위한 효과적인 방법이다¹⁸⁾. 이 기법은 직교배열표(orthogonal array)라고 하는 수학적 도구를 이용하며, SIGNAL-TO-NOISE(S/N) RATIO라고 하는 기법을 이용하여 실험결과에 유의한 영향을 미치는 인자를 파악하고, 최적조건을 구하는 기법이다. 표준화된 실험의 요건은 실험계획법에 의한 실험을 마치고, 결과 데이터를 SN비로 바꾸어 실험 최적조건을 도출한 후, 최적조건을 적용하여 실험을 실시하고 재현성을 검토하여 만족할 만한 신뢰도를 얻는 것을 목적으로 한다.

3. 실험 방법

본 연구에서 앞서 제안한 연속 압입시험을 통하여 철강 재료의 잔류응력을 측정하기 위해 압입시험 조건을 최적화하기 위한 일련의 실험들이 행해졌다.

다구찌 실험계획법을 적용하여 연속 압입시험의 주요 인자인 최대하중(kgf), 하중 제거회수(회), 하중 제거시작 위치(%), 하중 제거율(%)에 대하여 Table.1 과 같이 직교배열표로 작성 하였으며, 2축 표면 응력을 항복강도를 기준으로 Table. 2 와 같은 응력 조건표를 작성하였다. 실험에 사용된 재료는 일반 및 용접 구조용 강으로써 2축 등방향/비등방향 표면 응력을 가하기 위하여 Fig. 3 과 같이 설계된 일반 용접 구조용 강재인 SM490 십자형 시편과 지그형상을 준비 하였으며, 각 시편은 가공 중 잔류응력을 완전히 제거하기 위하여 어닐링 열처리를 실시하였다. 각 실험조건에 따라 FRONTICS 사에서 개발한 AIS3000 장비를 이용하여 무응력 상태의 Vickers 압입자로 하중제어 연속압입시험을 실시한 후 압입하중-압입변위곡선을 확보하고, 응력분석에 필요한 레퍼런스 곡선을 생성하였다.

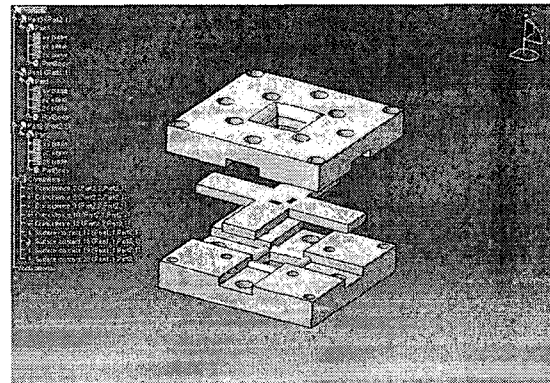


Fig. 3 Design of Stress-generating jig and cruciform specimen in CATIA V5

Table. 1 The experiment schedule built by design of experiment

No.	Max. load for indentation (kgf.)	Number of unloadings (th.)	Innitial unloading point (%)	Unloading ratio (%)
1	50	15	0	70
2	50	7	10	30
3	50	10	20	50
4	80	15	10	50
5	80	7	20	70
6	80	10	0	30
7	65	15	20	30
8	65	7	0	50
9	65	10	10	70

Table. 2 The stress condition schedule built design of experiment

Stress Condition	X-axis Stress (Yield Strength %)	Y-axis Stress (Yield Strength %)
tension +tension	1/4	1/4
	1/4	1/2
	1/2	0
tension +compression	1/4	-1/2
	1/2	-1/4
compression +compression	-1/4	-1/4
	-1/4	-1/2
	-1/2	0

2축 등방향/비등방향 표면 응력을 정확한 수치로 적용하기 위하여 각 시편에 대하여 별도의 보편적 시험법인 일축인장시험으로 항복강도를 얻었으며, 중재어 연속압입시험을 실시한 후 압입하중-압입변위곡선을 확보하고, 응력분석에 필요한 레퍼런스 곡선을 생성하였다. 초음파 시험법으로 탄성계수를 확보하였다. 십자형 시편에 스트레인 게이지를 2축에 부착하고 등방향/비등방향 응력인가를 목적으로 고안된 굽힘 응력 지그형상에 결속하여 각 응력조건에 준하여 정확한 응력을 인가하였다. 응력조건에서 응력값은 스트레인 게이지 변화율에 기인한다. 스트레인 게이지 변화율은 응력을 탄성계수로 나눈 값이며, 이때 주어진 응력값에 대한 변형률이 만족하는 값에 도달할 때까지 2축에 대하여 등방향/비등방향으로 응력을 가한다. 각 응력상태에서 연속 압입시험을 실시하여 모재부 압입하중-압입변위곡선을 확보할 수 있었다. 이러한 방법으로 생성된 잔류응력 평가모델을 바탕으로 무응력 상태에서 생성한 레퍼런스 곡선과 중첩을 시킴으로써 분석하여 잔류응력을 도출해 낼 수 있었다.

시험 최적조건은 실험적으로 얻어진 잔류응력값과 인가한 응력조건에서 주어진 항복강도 분율에 대한 이론값의 참 백분을 상대오차⁹⁾를 분석하여 다구찌 실험계획법에 의한 망소특성에 대한 SN비를 분석하여 선정하였으며, Fig. 4 에서 실험에 대한 기본 흐름도를 나타내었다.

4. 실험 결과

실험조건과 응력조건상에 나타난 곡선을 중첩하여 기준응력에 따른 실험적 굽힘 응력값을 평가할 수 있으며, 참 백분을 상대오차로 환산한 외측배열의 기준으로 이론치와 실험치의 오차값에 대하여 주변 잡음의 효과가 입력 신호에 어떠한 영향을 미치

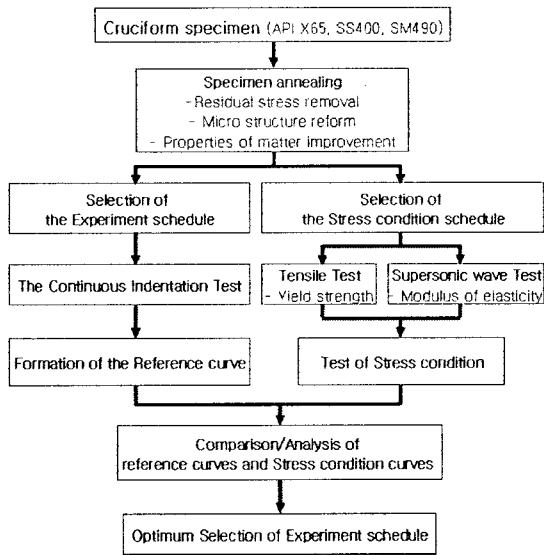


Fig. 4 Flowchart of experimental steps for optimum selection of residual stress analysis

는지를 알려주는 다구찌 실험계획법의 통계적인 방법으로 분석하기 위해 SN비로 분석하여 최적 실험조건을 도출하였다. 내측배열은 실험조건이 되며, SN비가 큰 값을 얻을수록 좋은 품질을 보장할 수 있는데 이러한 특성을 다구찌 실험계획법에서 망소특성 (smaller-the-better characteristics) 라고 한다.

Fig. 5 는 실험조건에 대하여 Minitab을 이용하여 실제 최적조건을 선정한 도표이며, 각 수준에 의한 실험에 미치는 영향은 기울기에 대응하는데, 그 영향도를 분석함으로써 가장 큰 값을 나타내는 것이 최적조건이 된다. 또한, 실험조건에 대한 각 수준별 기여도에 있어서는 하중제거율이 가장 높으며 하중제거 시작위치가 가장 실험적 영향력이 적은 것으로 나타났다.

네 가지 실험변수들은 실험 조건 값에 따른 SN비의 변화가 매우 미약한 편으로 나타났는데, 연속 압입시험을 통해 잔류응력을 평가할 때 실험변수 값의 영향이 압입 인장물성 평가¹⁰⁾에 비해 매우 작게 나타남을 의미한다. 결과적으로 Table. 3 에서 볼 수 있듯이 철강 재료의 2축 비등방향 잔류응력의 평가에 대하여 연속압입시험의 최적 실험조건을 선정하였다.

4.1 최대압입하중

최대하중이 50kgf에서 가장 큰 값을 갖고 있으며, 65kgf에서 최소값을 나타내다가 다시 약간의 증가를 보이나 3가지 조건 중 50kgf에서 최적의 실험조건을 나타냄을 알 수 있다. SN비에 비추어 볼 때, 델타값의 폭이 매우 작으므로 인자별 영향도는 상대적으로 낮다고 평가된다. 본 연구에 사용된 Vickers 압입자

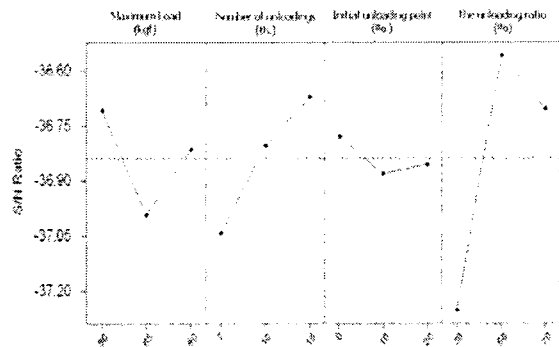


Fig. 5 Comparison of SN ratios

의 경우 재료의 진변형율은 압입자의 수직 최대하중에 의존도가 높음을 고려해 볼 때, 최대하중이 증가할수록 압입자와 소재와의 접촉면의 증가와 소재의 소성 및 탄성변형에 의해 실험적 오차를 높일 수 있다는 것으로 사료된다. 그러나 50kgf보다 하중이 작을 경우에는 진변형율에 의한 재료 내부적 거동을 완벽히 구현하지 못하므로 재료의 정확한 물성을 분석하는데 무리가 있다고 판단된다.

4.2 하중제거회수

하중제거회수의 변화는 15회의 압입하중 제거회수에서 최적의 조건을 나타냈다. 하중제거회수는 기존의 많은 연구를 통하여 연속압입시험으로 소재의 인장물성평가에 주요변수로 작용하며, 잔류응력 평가에 있어서도 각 하중제거지점을 이용하여 단일 응력곡선과 분석하여 잔류응력 값을 수치적으로 평가되어진다. 이 때, 하중제거회수가 많아질수록 높은 하중 단계별 잔류응력 분석에 대한 오차나 실험적 재현성이 높아지고 반면에, 하중 제거회수가 적으면 하중제거 단계별 자료가 부족하여 오차의 간격과 잘못된 실험결과로의 방향이 크게 작용할 수 있다. 또한, 하중제거회수가 지나치게 높으면 낮은 하중에 대한 자료가 증가하여 실험에 의한 효율이 떨어지고 측정기기의 성능과 초기 실험적 환경조건에 따라 정확성 및 정밀성에 큰 영향을 미치며 오차가 커지게 된다.

4.3 하중제거 시작위치

하중제거 시작위치는 세 경우에서 SN비의 차이가 매우 미소하며, 비교적 실험적 기여도가 낮은 것으로 평가되었다. 이러한 결과는 0%일 때 최적의 조건을 나타내긴 하지만 실험적 결과에 있어서 큰 영향을 미치지 않는 것을 의미한다. 실험초기의 진동 및 마찰 등 외부적 요인과 측정기기의 성능에 크게 의존하는 것을 고려하여 초기 자료에 대한 필요성을 부여한 것으로 잔류응력 평가에 대한 유효인자에 크

게 영향을 미치지 않으며 하중제거회수가 가장 높을 때 자료가 최적조건으로 평가된 것을 감안할 때 정확한 평가를 위하여 하중제거 시작위치에 대한 분율이 높을 때의 조밀한 하중제거보다는 0%지점인 하중제거 시작과 동시에 데이터가 유효한 것으로 사료된다. 그러나 정밀한 실험을 위해서는 초기 자료의 유동을 고려해야 할 것이다.

4.4 하중제거율

초기에는 하중제거율이 증가함에 따라 SN비도 증가하나 50%를 넘어서면 오히려 감소되는 경향을 볼 수 있다. 따라서 SN비가 최대인 50%일 때가 최적 조건임을 알 수 있다. 하중제거율은 하중을 제거함에 있어서 단계별 하중에 대한 제거비로 나타내는데 전혀 제거되지 않았을 때가 0%이며, 하중을 0kgf까지 제거했을 때가 100%가 된다. 또한 압입하중-변위 곡선을 살펴보면 하중제거 시 소재의 탄소성 거동을 잘 반영하며, 하중제거율이 높으면 재료의 탄성회복이 아닌 소성변형도 같이 평가에 반영하므로 작을 때가 정확한 접촉 깊이에 대한 분석을 쉽게 한다고 알려져 있지만, 지나치게 작으면 실험적 자료가 너무 적게 되어 재현성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 적절한 하중제거를 실시하여 재료의 하중에 의한 물성변화가 정확하게 압입하중-변위곡선에 적용될 수 있으므로 본 연구에서는 50%일 때가 Vickers 압입자에 대한 잔류응력 평가의 최적 조건으로 선정되었다고 판단된다.

Table. 3 Optimum condition of Advanced indentation Technique for experiment schedule

	Maximum load (kgf)	Number of unloadings (th.)	Initial unloading point (%)	Unloading ratio (%)
overall	50	15	0	50

5. 결론

1. 무응력 십자시편에 대하여 연속 압입시험을 실시하되, 적교배열법에 의한 9 가지 실험조건을 구성하여 압입하중- 변위곡선을 형성하고, 레퍼런스 곡선을 생성하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 일반 및 용접 구조용 강재에 대하여 인위적으로 잔류응력 인가할 수 있는 장치를 고안하여 2축 동방향 / 비동방향 응력조건을 스트레인 게이지 변화량을 기준으로 인가하여 표면 잔류응력 상에서의 단일 곡선을 형성하였으며, 무응력 상태에서의 곡선

과의 비교를 통하여 인장 및 압축에 대한 곡선의 개념을 정립하고, 관련한 응력조건 실험을 통하여 확인하였다.

3. 실험조건에 의한 압입하중-변위곡선과 응력상태에서의 곡선과의 중첩을 통하여 이론적 수식에 의한 잔류응력 값을 도출하였으며, 인가한 응력에 대하여 응력 방향성 계수를 고려한 이론적 수치와 정향성 및 비교를 통하여 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.

4. 다구찌 실험계획법을 도입하여 최종적으로 얻어진 잔류응력 값의 정확도가 가장 높을 때를 기준으로 하여 최적조건을 결정하였다. 그러나 SN비의 값 차이가 비교적 작은 것으로 나타나, 사용한 범위 내에서는 비교적 유사한 정확도를 나타내는 것으로 분석되었다.

후기

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

참고문헌

1. J. H. Ahn, Y. Choi and D. Kwon, Kor. nInst. Met & Mater. Res., 38, 1606 (2000)
2. Y. H. Lee, "Evaluation of the Residual Stress in MicroMaterials though the MicroMechanical Contact Analysis of the Continuous Indentation Technique"
3. Y. H. Lee, J. H. Jeong, J. S. Park and D. Kwon Kor. Inst. Met & Mater. Res., 41, 737 (2003)
4. Y. H. Lee, W. Ji, D. Son, J. Jang and D. Kwon, J. Kor. Inst. Met. & Mater. Res., 40, 1042 (2002)
5. KS B0951 (2004)
6. E. C. Jeon, J. S. Park and D. Kwon, J. Kor. Inst. Met. & Mater. Res., 41, 83 (2003)
7. S. H. Park, 變態대실험계획법, 민영사, 2001
8. S. B. Lee, 變 INITAB을 이용한 다구찌기법 활용? 이레테크, 2001
9. Steven C. Chapra, 變 umerial Analysis for Engineer? Mc Graw Hill, Third Edition
10. KS B0950 (2002)