한국정밀공학회지 제24권 제2호 (2007년 2월)
Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol.24, No.2, February 2007

연속압입시험의 최적조건 선정을 통한 철강재료의 용접부 잔류응력 평가

유승종*, 김주현#

The Evaluation of Residual Stresses in the Welded Joint of Steel Materials by the Optimum Selection of the Advanced Indentation Technique

Seung Jong Yu* and Joo Hyun Kim#

ABSTRACT

Most of materials receive forces in use so that the characteristics of materials must be considered in system design to prevent deformation or destruction. Mechanical properties of materials can be expressed as responsible level of material itself under the exterior operation. Main mechanical properties are strength, hardness, ductility and stiffness. Currently, among major measure facilities to measure the mechanical properties, advanced indentation technique has important use in industrial areas due to 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 find out non-equi-biaxial stress state and the results were 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), Optimum selection (최적조건)

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 보이

☞ 접수일: 2006년 5월 25일; 게재승인일: 2007년 1월 5일
* 일진경금속(주) 소재기술연구소
# 교신저자: 국민대학교 기계자동차공학부
E-mail kim@kookmin.ac.kr Tel. (02) 910-4830

는 잔류응력이 존재하며, 파손의 일반적인 원인이 될 수 있다. 파손의 가능성을 없애고, 파손이 일어난 경우에는 파손의 원인 및 재료의 기계적 성질을 정확히 분석하여 차후의 파손 방지를 위한 적절한 조치를 취하여야 한다.

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 연속 압입시험은 기존의 경도 시험법을 개선하여 압흔의 관찰 없이, 압입하중의 변화에 따른 압입깊이를 연속적으로 측정하여 압입하중-변위곡선을 분석하여 다양한 기계적 특성을 평가하는 방법이다. 본 시험법은 인장물성 분야에서는 일축인장시험과 높은 결과 값의 일치성을 보이고 있으며[1], 잔류응력분야에서도 많은 연구가 이루어지고 있다.[3] 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, 시험조건의 최적화가 필요하다.

본 연구에서는 기계적 특성이 다른 철강 재료의 상호구속에 의해 존재하는 용접부 잔류응력에 대한 정확한 분석을 위해 연속압입시험에 대한 다양한 시험조건을 제시하고 압입하중-변위곡선을 비교 및 분석을 통하여 최적의 시험조건을 규명하였다. 또한, 항복강도 분율에 대한 실험값의 오차를 이용하여, 다구찌 실험계획법에 의한 망소특성의 SN비를 통하여 시험 최적조건을 선정하였다.

또한, 본 연구에서 제시된 연속압입시험법에 의한 최적 시험조건의 검증을 위하여 실제 철강재료의 용접부에 적용하여 기존의 보편적 잔류응력 평가 방법인 홀 드릴링법 (Hole-drilling)과 비교 측정하였다.

2. 이론적 배경

2.1 연속 압입시험의 비등방향 2축 잔류응력 완화 모델

소재 내에 존재하는 수축 및 팽창에 의한 잔류응력은 연속 압입시험에서 다른 양상의 압입하중-변위곡선 형태를 보인다. 동일한 접촉깊이에 대하여 인장 및 압축상태에서의 잔류응력을 나타내면, 일정 압입하중에 대한 무응력 상태와 상대적인 접촉깊이가 존재한다. 이때, 소재의 잔류응력은 무응력 상태와 잔류응력 상태에서의 정확히 평가된 대응 접촉면적에 대한 비와 경도 값으로 평가할 수 있다.[2] 즉, 연속 압입시험에서 시험편에 인장 및 압축 잔류응력이 존재하면 Fig. 1과 같이 잔류 응력이 존재하지 않는 무응력 상태에서 얻어진 압입 하중-변위 곡선에 비해 일정 압입하중에 따라 압입깊이와 기울기가 변화한다. 동일한 압입 깊이에 도달하기 위해서는 인장 잔류 응력을 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 모델링 되었으며[3], 본 연구에서는 선행연구에서 제안된 행렬 계산법 등을 적용하여 응력비례인자인 k를 도입하여 실제 현장설비의 표면 및 용접부에 적용 가능한 최적조건을 선정하고자 하였다.

측정하고자 하는 잔류 응력 성분을 σ_{res} 이라

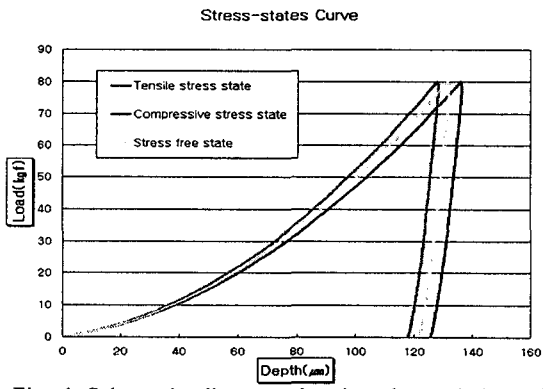

Fig. 1 Schematic diagram showing the variation of indentation loading curves by the change of stress states; applied load increase and decrease by the effect of compressive and tensile residual stresses

정의하면 σ_{res}는 잔류 응력에 의한 하중 변화 정도와 일정한 비례관계를 갖고 있음이 알려져 있다.[4] 이때 인장 잔류응력(σ_{res}^{T})및 압축 잔류응력(σ_{res}^{C})은 비등방향 응력상태 상수 η를 고려하여 식 (1)과 식 (2)로 측정될 수 있다.

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

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

이때, 잔류응력이 인가된 접촉면적, A_s에 대해 F_0, F_T과 F_C는 각각 무응력 상태와 인장, 압축 잔류응력이 인가될 때의 압입하중이며, 비등방향 2축 잔류 응력이 인가될 때에는 한 축의 잔류응력을 σ_{res}라 하면 이에 수직한 방향의 잔류응력은 응력방향 성계수 ρ(ρ는 실수)를 도입하여 $\rho\,\sigma_{res}$라 할 수 있다. 재료 표면에 수직한 방향(압입시험 방향)으로의 잔류응력이 없다고 가정하면, 압입시험 방향의 소성변형을 일으키는 편차 응력, $\sigma_{z,d}$은 식 (3)과 같이 나타나며 하중 변화량을 접촉 면적으로 나누어 준 값과 일치한다.

$$\sigma_{z,d} = \frac{(1+p)}{3}\sigma_{res} = \frac{1}{\Psi}\frac{(F_0 - F_T)}{A_s} \; or = \frac{1}{\Psi}\frac{(F_0 - F_C)}{A_s} \quad (3)$$

이때, 금속 재료에서 Ψ(Plastic binding factor, 완전 소성 영역에서의 평균 접촉 압력과 진응력 사이의 비)는 3.0이다.

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

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

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

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 주요변수 이다. 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 잔류응력 평가에 따른 이론적 모델링에 대한 직접적 수식변수로 적용되거나 다른 인자들의 유도과정에 포함되는 주요변수이다.[7]

외적요인으로는 시편의 가공 및 표면상태, 최대하중의 유지시간, 압입속도 등을 들 수 있다. 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 인장물성을 유도하는 수식적인 과정에서 변수로 포함되거나, 계산과정에서의 인자들에 영향을 미치지 못한다.

본 연구에서는 외적 변수요인은 최적으로 설정하고[6], 주요 실험변수로써 네 가지 내적 변수를 선정하여 그 영향도와 최적의 조건을 결정하였다.

2.3 보편적 잔류응력 측정기법

X-선이 금속에 입사되면 특정 결정면에 의해 회절피크가 발생하는데, 이때 잔류응력이 존재하면 격자상수의 변화에 따라 결정면의 이완 및 수축이 발생하여 회절피크의 폭과 발생 위치가 달라진다. 잔류응력 존재 시와 무응력 상태에 발생한 회절피크에서 면간거리를 결정하면 잔류응력에 의한 변형률을 계산할 수 있다.[7] 그러나, 측정을 위해서는 소재에 대한 각종 물성이 필요하며, 침투깊이가 50㎛ 정도로 작기 때문에 두께방향 및 위치별 측정이 불가능 하다는 점과 박막의 잔류응력 측정에 적용하

려면 결정성이 우수해야 하는 점이 있으며, 미세조직적 인자에 의해서도 영향을 받는다는 점이 있다. 외부 자장에 의해 소재의 자화가 일어날 때 개별 자구의 이동에 의한 미세한 톱니 형태의 Barkhausen noise가 잔류응력에 의해 변화하는 정도를 측정하는 방법이 있다. 그러나, 강자성 소재에만 적용이 되며 복잡한 용접부와 같은 미세조직상에서는 정확한 측정이 불가능하다.

초음파를 이용한 측정법은 초음파 신호를 입력하는 장치와 소재를 전파한 신호를 수신하는 센서의 부착 방법에 따라 시편의 두께 방향 및 표면 방향의 잔류응력을 간편하게 측정할 수 있으며, 국소영역의 잔류응력 분포를 확인하기 어렵고 초음파 속도가 미세조직적 영향이나 측정온도에도 민감하게 반응하는 문제점이 있다.[8]

소재의 구속으로 인하여 응력을 완화하기 위하여 절단 및 제거하여 응력을 측정하는 파괴적 기법으로 절단법은 응력을 측정하고자 하는 부분에 대하여 수직방향으로 2축 스트레인 게이지를 다수로 부착하고 절삭선을 따라 스트레인 게이지의 변형량을 측정하여 잔류응력에 대한 분포를 평가한다. 특히 용접부와 같이 잔류응력 분포가 불균일한 부분에 대하여 널리 적용된 측정기법이며, 정확한 자료를 얻기보다는 잔류응력장의 분포형태를 분석하는데 유용한 기법이다. 또한, 홀 드릴링 기법은 고속의 제트류나 기계적 드릴링을 이용하여 잔류 응력을 측정하기 위한 부분에 3축 스트레인 게이지를 부착하여 원형의 구멍을 형성하고 게이지의 각 축 방향에 대한 변형률을 측정하여 주 응력의 크기를 결정한다. 그러나 홀의 주변에 형성된 소성변형으로 인하여 스트레인 게이지의 변형을 유발할 수 있으며, 스트레인 게이지 내에 정확히 드릴링을 하여야 정밀성 있는 측정이 가능하다.[9]

3. 실험 방법

본 연구에서 앞서 제안한 연속 압입시험을 통하여[5] 철강 재료의 잔류응력을 측정하기 위해 압입시험 조건을 최적화하기 위한 Fig. 2와 같은 일련의 실험들이 행해졌다. 다구찌 실험계획법을 적용하여 연속 압입시험의 주요 인자인 최대하중(kgf), 하중제거회수(회), 하중제거시작 위치(%), 하중제거율(%)에 대하여 Table 1 과 같이 직교배열표로 작성하였으며, 2축 표면 응력을 항복강도를 기준으로

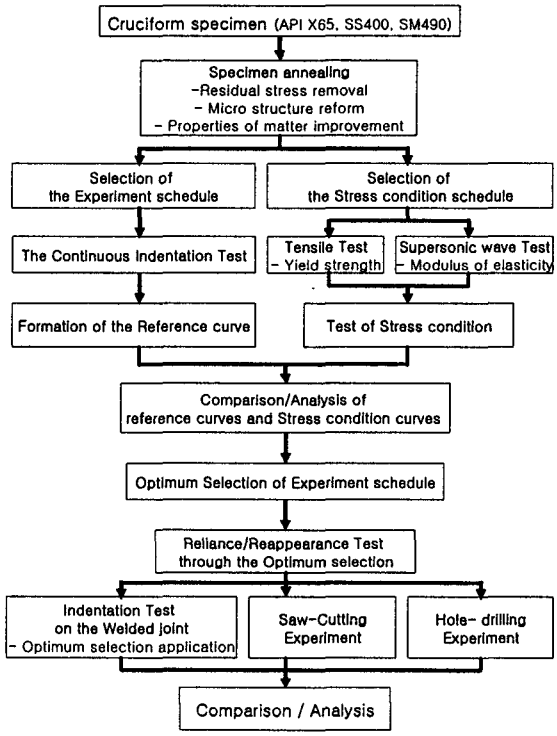

Fig. 2 Flowchart of experimental steps for optimum selection of residual stress analysis

Table 2 와 같은 응력 조건표를 작성하였다. 실험에 사용된 재료는 일반 및 용접구조용 강으로써 2축 등방향/비등방향 표면 응력을 가하기 위하여 Fig. 3 과 같이 설계된 일반 용접 구조용 강재인 SM490 십자형 시편과 지그형상을 준비하였으며, 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.

2축 등방향/비등방향 표면 응력을 정확한 수치로 적용하기 위하여 각 시편에 대하여 별도의 보편적 시험법인 일축인장시험으로 항복강도를 얻었으며, 하중제어 연속압입시험을 실시한 후 압입하중-압입변위곡선을 확보하고, 응력분석에 필요한 레퍼런스 곡선을 생성하였다. 초음파 시험법으로 탄성계수를 확보하였다. 십자형 시편에 스트레인 게이지를 2축

에 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-압입변위 곡선을 확보할 수 있었다. 이러한 방법으로 생성된

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

잔류응력 평가모델을 바탕으로 무응력 상태에서 생성한 레퍼런스 곡선과 중첩을 시킴으로서 분석하여 잔류응력을 도출해 낼 수 있었다.

시험 최적조건은 실험적으로 얻어진 잔류응력값과 인가한 응력조건에서 주어진 항복강도 분율에 대한 이론값의 참 백분율 상대오차[12]를 분석하여 다구찌 실험계획법에 의한 망소특성에 대한 SN비를 분석하여 선정하였다.

실험조건과 응력조건에 준하여 분석된 최적화 시험조건을 검증하기 위하여 연속 압입시험에 적용하여 일반 구조용 강재로 많이 사용되는 SS400에 대하여 모재부에서부터 용접부에 걸쳐 반대편 모재부로 수행하였다. 이때, 용접부 중심로부터 약 50㎜ 떨어진 모재부를 기준으로 반대편 모재부 방향으로 실험의 신뢰성 및 재현성을 위하여 3개의 기준선을 형성하고 기준선을 따라 0.3㎜/min의 압입속도로 5㎜의 압흔과의 간격을 유지하며 용접부를 가로질러 반대편 모재부의 150㎜지점까지 연속 압입시험을 반복하였다. 그 결과 용접부 잔류응력에 대한 압입하중- 변위곡선을 얻을 수 있었으며, 3개의 기준선을 따라 측정된 압입곡선의 중첩도를 비교하였다. 잔류응력의 수치는 용접시편의 모재부에서 무응력 상태로 예상되는 용접부와 가장 떨어진 가장자리 부분을 최적 시험조건을 적용하여 연속 압입시험을 실시함으로써 레퍼런스 곡선을 생성할 수 있으며, 선행된 잔류응력에 대한 압입하중-변위곡선과의 중첩을 통해 분석할 수 있다. 2축 잔류응력 완화 모델에 의하여 분석하며 용접선을 따라 얻어진 잔류 응력 상태에서의 압입하중- 변위곡선과 가상의 무응력

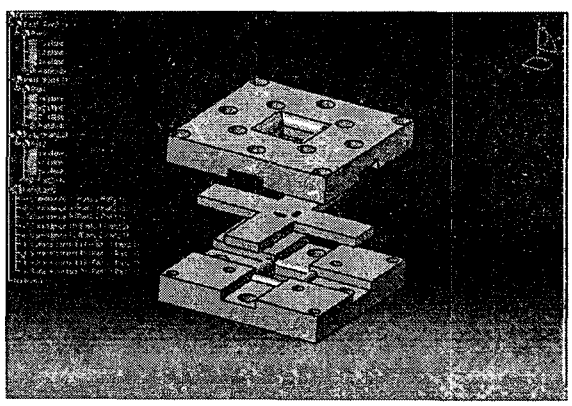

Fig. 3 Design of Stress-generating jig and cruciform specimen in CATIA V5

곡선을 상호 비교함으로써 용접부에 대한 잔류응력을 평가하였다.

4. 실험 결과

실험조건과 응력조건상에 나타난 곡선을 Fig. 4와 같이 무응력 상태에서 시편의 레퍼런스 곡선과 최적조건으로 선정된 최대하중 50kgf에 대한 각 응력상태에서 얻어진 압입하중-변위곡선을 중첩하여 나타내었다. 두 곡선간의 비교를 통하여 그 차이를 Fig. 5와 같이 레퍼런스 곡선과 응력곡선에서의 동

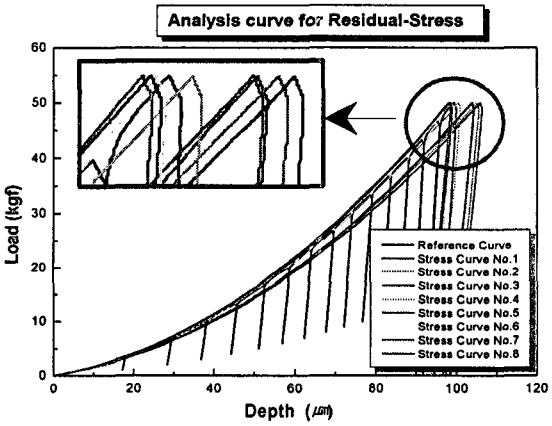

Fig. 4 Superposition of indentation loading curves for various applied stress states on reference curve for the experiment schedule No. 1

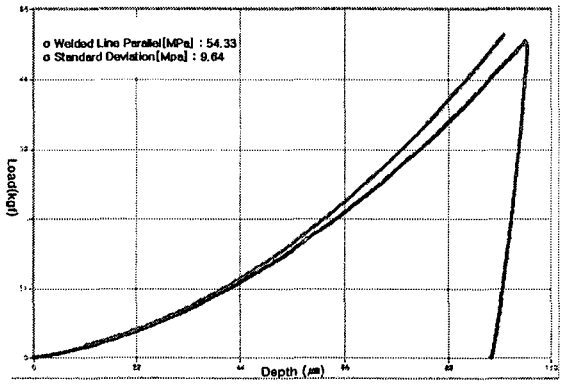

Fig. 5 Examples of analyzed residual-stress curve through the reference curve of experiment schedule No. 1 and applied stress curve of x-y 1/4 tensile states

일한 압입자 접촉 면적에서의 압입하중과 소성 구속인자, 응력 방향성 계수의 분석을 통하여 잔류응력을 평가할 수 있으며, 참 백분율 상대오차로 환산한 외측배열의 기준으로 이론치와 실험치의 오차값에 대하여 주변 잡음의 효과가 입력 신호에 어떠한 영향을 미치는지를 알려주는 다구찌 실험계획법의 통계적인 방법으로 분석하기 위해 SN비로 분석하여 최적 실험조건을 도출하였다. 내측배열은 실험조건이 되며, SN비가 큰 값을 얻을수록 좋은 품질을 보장할 수 있는데, Fig. 6 는 실험조건에 대하여 Minitab을 이용하여 실제 최적조건을 선정한 도표이다. 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 평가[13] 때에 비해 매우 작게 나타남을 의미한다. 결과적으로 Table 3 에서 볼 수 있듯이 철강 재료의 2축 비등방향 잔류응력의 평가에 대하여 연속압입시험의 최적 실험조건을 선정하였다.

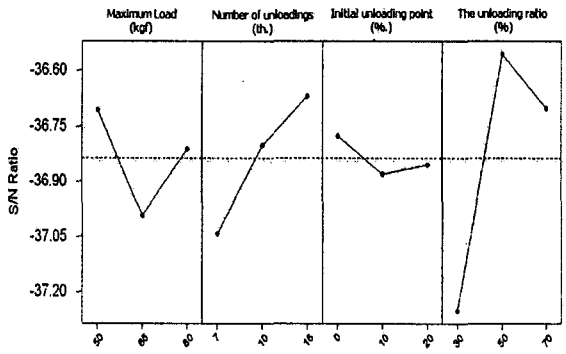

Fig. 6 Comparison of SN ratios

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 상

대적으로 낮다고 평가된다. 본 연구에 사용된 Vickers 압입자의 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 평가 되어진다. 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 크게 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 최적조건임을 알 수 있다. 하중제거율은 하중을 제거함에 있어서 단계별 하중에 대한 제거비로 나타내는데 전혀 제거되지 않았을 때가 0%이며, 하중을 0 kgf까지 제거했을 때가 100%가 된다. 또한 압입하중-변위곡선을 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%일때가 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

4.5 최적조건을 적용한 철강 용접부 잔류응력 측정

일반 구조용 압연 강재인 SS400 재료에 대하여 용접부로부터 50㎜ 떨어진 모재 부분으로부터 반대편 모재부로 150㎜까지 5㎜간격으로 단일 하중곡선을 생성하였다. 또한, 용접부를 연마하여 게이지를 부착한 홀-드릴링을 통하여 잔류응력 값을 Fig. 7 과 같이 비교하였다. 실험결과, 용접부 표면의 잔류응력에 대한 두 가지 실험법의 응력분포 경향은 매우 유사하였으며, 용접부에 대한 최대 인장잔류응력 값은 거의 같은 값을 나타냈으며, 용접부와 접하는 모재부분에 대하여 압축 잔류응력이 나

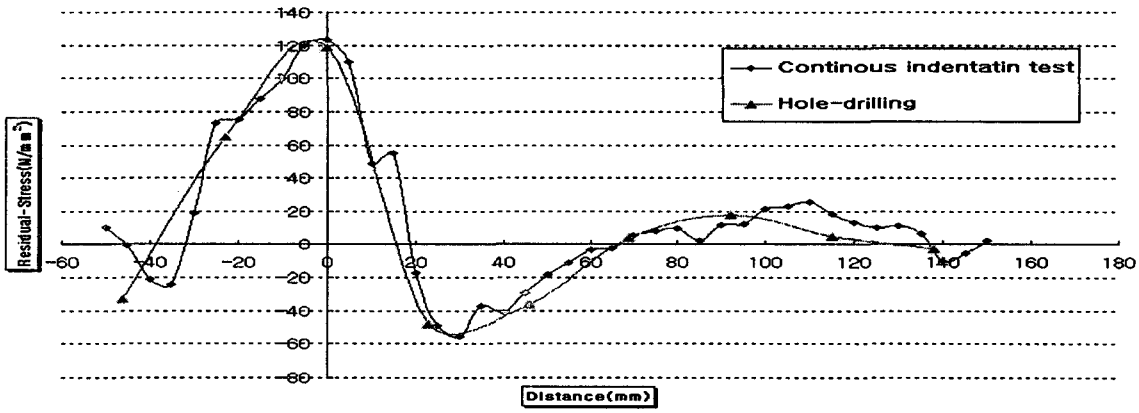

Fig. 7 Comparison of the residual-stress evaluated from the continuous indentation model, hole-drilling method in SS400

타남을 확인 할 수 있었다. 또한 API X65 재료에 대하여 절단법을 포함한 용접부 잔류응력 분포[14]와 비교할 때 연속 압입시험은 보편적인 잔류응력 측정 장비에 의한 평가와의 비교를 통하여 실제 용접부에 대하여 비파괴적인 측정 장비로써 현장 적용성에 대한 가능성이 높음을 시사한다.

5. 결론

1. 연속압입시험법을 적용하여 일반 및 용접 구조용 강재에 대하여 인위적으로 잔류응력 인가할 수 있는 장치를 고안하여 2축 등방향 / 비등방향 응력조건을 스트레인 게이지 변화량을 기준으로 인가하여 표면 잔류응력 상에서의 단일 곡선을 형성하였으며, 무응력 상태에서의 곡선과의 비교를 통하여 인장 및 압축에 대한 곡선의 개념을 정립하고, 관련한 응력조건 실험을 통하여 확인하였다.

2. 실험조건에 의한 압입하중-변위곡선과 응력상태에서의 곡선과의 중첩을 통하여 이론적 수식에 의한 잔류응력 값을 도출하였으며, 최종적으로 얻어진 잔류응력 값의 정확도가 가장 높을 때를 기준으로 하여 최적조건을 결정하였다.

3. 일반 구조용 압연강재에 대하여 맞대기 용접부에 최적조건을 적용하여 연속 압입시험 평가를 수행하였고, 홀 드릴링법에 의하여 구해진 결과와 비교하였다. 용접부에 대한 최대 인장 잔류응력에 대하여 높은 일치성을 나타내었으며, 최적 조건의 높은 효용성을 보여주었다.

참고문헌

1. Ahn, J. H., Choi, Y. and Kwon, D., "Evaluation of Plastic Flow Properties of Materials through the Analysis of Indentation Load-Depth Curve," J. Kor. Inst. Met. & Mater., Vol. 38, No. 12, pp.1606-1611, 2000.
2. Lee, Y. H., "Evaluation of the Residual Stress in MicroMaterials though the MicroMechanical Contact Analysis of the Continuous Indentation Technique,"A doctor's thesis, 2002.
3. Lee, Y. H., Jeong, J. H., Park, J. S. and Kwon, D., "Analysis of Non-equi-biaxial Surface Residual Stress through the Modeling of Shape Shifting in Instrumented Indentation Curve," J. Kor. Inst. Met & Mater., Vol. 41, No. 11, pp.737-742, 2003.
4. Lee, Y. H., Ji, W., Son, D., Jang, J. and Kwon, D., "Analysis of Bending Residual Stress in SS400 Steel Beam Using Continuous Indentation Technique and Stress Interaction Model," J. Kor. Inst. Met. & Mater., Vol. 40, No. 10, pp.1042-1047, 2002.
5. Korean Standard KS B 0951, Appendix A, 2005.
6. Jeon, E. C., Park, J. S. and Kwon, D., "The Optimization of Experimental Condition of Continuous Indentation Test for Tensile Properties

Evaluation," J. Kor. Inst. Met. & Mater., Vol. 41, No. 2, pp.83-89, 2003.
7. Noyan, I. C. and Cohen, J. B., "Residual Stresses," Springer-Verlag, 1987.
8. Lu, J., "Handbook of Measurement of Residual Stresses," Fairmont press, Lilburn, GA, 1996.
9. Rund, C. O, Dimascio, P. S. and Yavelak, J. J., "Comparison of three residual-stress measurement methods on a mild steel bar," J. of the Experimental Mechanics, Vol. 25, No. 4, pp.338-343, 1985.
10. Park, S. H., "Design of Experiments," Min Young Publishing, pp.9-612, 2001.
11. Lee, S. B., "The application of Taguchi method by using MINITAB," Iretech, pp.1-208, 2001.
12. Chapra, C. S., "Numerical Methods for Engineers," Mc Graw Hill, Third Edition, pp.58-81, 1998.
13. Korean Standard KS B 0950, 2002
14. Jung, W. S., "Continuous indentation technique in variant contact area Load-depth curve for residual stress free state,"A master's thesis, 2005.