

냉연 압연 강판의 레이저 용접 공정 시 발생하는 응력 평가

이 철 구* · 이 우 램**,†

*서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

**NID 융합기술 대학원 나노·IT 융합프로그램

Evaluation of the Stress Occurring Phenomenon for Cold-Rolled Carbon Steel During a Laser Welding Process

Chulku Lee* and Wooram Lee**,†

*Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology

**School of Nano IT Fusion Program, Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

†Corresponding author : wooramlee@seoultech.ac.kr

((Received November 28, 2012 ; Revised February 18, 2013 ; Accepted February 22, 2013))

Abstract

Residual stress caused in the weldments with high restraint force are often observed during welding in the weldments of Inner and outdoor materials or radial tanks. The reason is that quantitative analysis about thermal stresses during laser welding is lacking for this weldments. To verify Finite Elements Method (FEM) theory, the temperature was measured with thermocouple in a real time in this paper. Also analysis of the thermal stress for welding condition is performed by Comsol program package on various welding condition in SCP1-S butt welding. The principal stress in laser welding process is seen through the width direction. Also, it was confirmed that a change in base metal by thermal expansion made the stress in width direction stronger. Base metal close to the weld bead as the process progresses to the tensile stress in the compressive stress was varied. It was shown that the change of stress was quantitative from the bead at a certain distance.

Key Words : Thermal stress, Laser welding, Thin plate welding, Finite elements method, SCP1-S

1. 서 론

현대 산업현장에서 널리 사용되는 기술 중 하나인 용접은 용접 공정 시 모재에 가해지는 열원에 의해 발생하는 응력이 용접성에 많은 영향을 준다고 알려져 있다. 열의 전도에 따라 용접부에서는 비선형적인 변형이 발생하게 되고, 이러한 변형을 외력으로 구속하게 되면 용접부에 잔류응력이 남게 되어 결합으로 작용하게 된다^{1,2)}. 특히 SCP1-S 는 내열성, 내식성이 우수하여 자동차 내·외장재, 배관 등에 널리 이용되고 있으나, 고온에서 장시간 사용하면 내압에 따른 하중 외에도 열응력, 열적

피로 등에 의해 기계적 성질, 특히 인성이 점진적으로 저하되는 열시효취화(Thermal aging embrittlement) 현상이 발생하여 구조물의 기능손상 및 전체 설비의 안정성을 저하 시키게 된다. 또한, 자동차 내·외장재, 구형 탱크의 원주 또는 배관 용접부 등과 같이 자체 구속력이 높은 용접부에서는 모재의 조성이나 다양한 용접 조건을 제어하여 용접 공정을 진행하여도 균열은 빈번하게 관찰되어지고 있다^{3,4)}. 현재 잔류응력 측정 방법으로는 측정물을 부분적 또는 전체를 잘게 쪼개서 발생된 변형률의 변화량을 측정하고 계측된 변형률을 응력-변형률 관계식을 이용하여 잔류응력을 산정하는 법, 응력 측정 부위에 스트레인게이지를 부착 후 깊이 방향으로 구멍

을 뚫어가면서 발생하는 응력-변형을 관계식을 이용한 잔류응력 측정, X선 또는 자기적 성질을 이용하여 비파괴적인 회절 분석 방법, 부식액을 이용한 금속층 제거 방법으로 잔류응력을 측정한다^{5,6)}. 그러나 이러한 잔류응력의 측정은 일반 응력 해석과는 다르게 격자 간격, 초음파의 속도 변화 등 간접적인 변수를 측정하여 잔류응력을 산출하므로 잔류응력과의 관계를 명확하게 규명하기 어렵다^{4,8)}. 또한 기준이 되는 응력상태를 모르기 때문에 여러 가지 복잡한 과정을 거쳐야하며, 기존 평가 방법은 측정 중 또는 측정용 시편 제작 시 내부에 생성된 잔류응력의 변화를 줄 수 있는 가능성이 있다. 이는 용접 공정 시 발생하는 열응력과 잔류응력에 대한 정량적인 평가가 이루어지지 않고 있기 때문이다⁹⁻¹¹⁾. 이에 본 연구에서는 SCP1-S를 적용하여 레이저 용접 공정 시 발생하는 온도 및 열응력을 수치적과 실험적으로 분석하였다. 열응력을 예측하기 위해 레이저 용접 공정을 수행하여 가열 및 냉각 등의 대한 결과를 도출하였다. 또한 냉각 시간에 따른 응력의 변화를 파악하였고, 유한요소해석으로 예측된 응력 홀 드릴링 기법을 이용하여 측정 계산한 응력과 비교 검증하였다.

2. 유한요소해석 및 실험 조건

레이저 용접 공정에 있어서 열응력에 대한 효과를 예측하기 위해서 시편의 용접 공정 시 발생하는 온도분포를 수치적 방법으로 구하여 열에 의해 발생하는 열응력을 계산하였다. 또한 이 결과를 통해 기계적 홀 드릴링 기법을 이용한 내부 응력 측정에서의 결과와 비교 분석하여 실제 레이저 용접 공정 시 재료 내부에 분포하는 응력을 분석하였다.

2.1 수치적 응력해석

실제 용접 공정된 재료의 내부 응력은 재료가 원래 가지고 있는 응력과 가공에 의해 발생한 응력의 합으로 구해질 수 있다. 열을 수반한 레이저 용접 공정에 있어서는 입열량이 고려되어야 한다. 이와 같은 내용은 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다(ϵ : 변형률, σ : 응력, D : 구멍 지름). 본 해석에서는 시간증분 Δt 를 결정하는데 있어서 자동시간 추정 알고리즘을 사용하였다. 이것은 시간 증분에 있어서 허용되는 최대온도 변화량에 대하여 사용자가 정하는 간격에 기반을 두고 있으며, 비선형적 해석인 경우에는 수렴율에 따라서 변화된다.

$$\sigma = D\epsilon_e + \sigma_0 = D(\epsilon - \epsilon_{th} - \epsilon_0) + \sigma_0 \tag{1}$$

Table 1 Boundary condition in heat transfer analysis¹⁻²⁾

Initial temperature (°C)	20
Natural convection (W/m ² ·°C)	18
Density (kg/m ³)	7817
Specific heat (J/kg·°C)	460
Soldus	temperature (°C)
Liquidus	
Latent heat (kcal/kg)	250

Table 2 Thermal conductivity at various temperatures¹⁻²⁾

Temperature (°C)	20	200	400	600	800	1000
thermal conductivity (W/m·°C)	16.3	17	19	22	27	31

열전달 및 응력의 해석을 위하여 상용 유한요소 프로그램인 콤솔(Comsol)를 사용하였으며, 열전달 해석 시 필요한 경계조건으로서 초기의 조건은 Table 1 로 정리하였다.

비드에 평행한 면을 구속하였고, 열의 주된 손실은 전도, 대류, 복사에 의해서 이루어지는데 복사에 의한 영향은 대단히 작으므로 무시하였다. 대류에 의한 손실은 평판의 용접이기 때문에 윗면과 아랫면에 자연대류 계수를 설정하였고 열전도 계수는 본 열전달 해석에 가장 중요한 값이므로 온도에 따른 함수로 다음과 같은 값을 사용하였다(Table 2).

Fig. 1 과 같이 레이저 빔을 홈의 면에 조사시키면 홈의 면에서 부터 어블레이션이 발생하여 금속이 용융된다. Fig. 1 의 확대 형상은 해석 모델 및 시험편에 대한 모식도이다. 레이저 빔이 조사된 부분을 기준으로 왼쪽 부분을 해석 및 측정하였다.

응력해석을 위해 재료는 등방성(isotropic) 으로 가정하였고, 항복거동은 폰미세스(Von-Mises) 항복조건을 사용하였다⁹⁾. 또한, 외적구속은 일반적으로 레이저

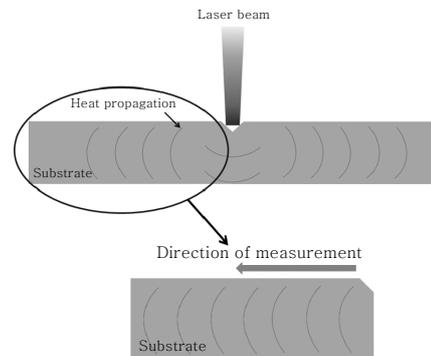


Fig. 1 Schematic of laser welding

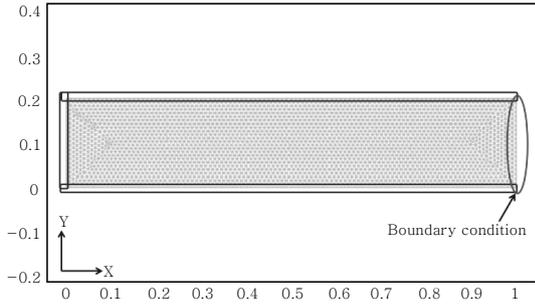


Fig. 2 Finite element model (Unit: cm)

용접에 사용되는 용융지에 평행한 면을 구속조건으로 하였다. 해석모델에서의 요소분할(mesh generation)은 국부적이며, 레이저 용접 공정 시 입열로 인해 온도 구배가 심한 주변은 깊이 (y) 방향 요소의 크기는 2 mm로 보다 세밀하게 mesh 하였고, 가공부와 열영향부에서 멀어질수록 온도 구배가 작기 때문에 요소의 크기를 감소시켰으며, 요소수는 2000 개이고, 절점수는 2610 개이다. 모델의 형상은 2 차원(2D)으로 Fig. 2에 나타내었다⁶⁻⁹⁾. 빨간색으로 표시된 부분은 실제 열이 인가되는 부분으로 경계조건(Boundary condition)을 설정하였고, 파랑색으로 표시된 부분은 이에 따른 구속조건(Constrained condition)을 설정하였다.

2.2 응력 측정에 따른 홀가공 기법 분석

응력 측정 기법 중 일반적으로 많이 사용되는 홀가공 방식에 사용되는 관계식은 식(2)이다. 이 관계식은 측정된 스트레인으로부터 두 주응력과 각 α를 얻기 위한 식으로 바뀌게 된다. 세 개의 미지수가 있기 때문에 세 개의 독립적인 스트레인의 측정이 이루어져야 하고, 식(3)와 같이 나타난다. Fig. 3에서 α₁은 게이지 ①과 가까운 쪽에 있는 주축이 이루는 각이고, α₂ = α₁ + 45°, α₃ = α₁ + 90°가 된다. 스트레인게이지의 각

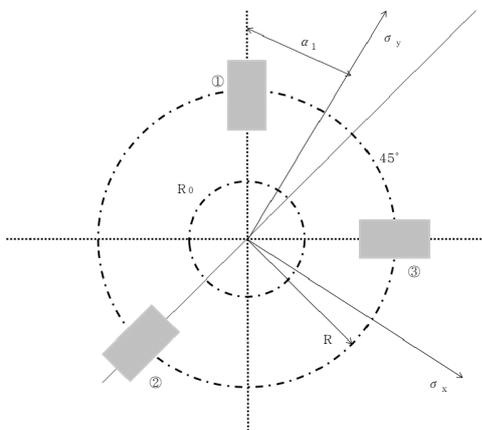


Fig. 3 Strain gage for determining residual stress

각 게이지 위치에 식(2)을 적용하여 정리하면, 식(3)와 같이 각 게이지 위치에서의 이완변형률(relieved strain)을 구할 수 있다.

$$\epsilon_r = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha \tag{2}$$

$$\epsilon_1 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha \tag{3a}$$

$$\epsilon_2 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha(\alpha + 45^\circ) \tag{3b}$$

$$\epsilon_3 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha(\alpha + 90^\circ) \tag{3c}$$

식(1)를 주응력 방향에 대해 정리하면 식(4), (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{\max} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} - \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \tag{4}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} + \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \tag{5}$$

단, α는 게이지 ①과 이루는 각을 말한다. 게이지 ①을 기준으로 주축과 이루는 각을 표현하면 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tan 2\alpha = \frac{\epsilon_1 - 2\epsilon_2 + \epsilon_3}{\epsilon_1 - \epsilon_3} \tag{6}$$

A와 B는 변형률 이완상수이며, 관통구멍 해석의 경우 반경 방향으로 이완되는 응력과 변형률 사이의 관계를 나타내는 값이다. 실제적인 문제에 있어서는 임의의 크기와 두께를 가진 기체나 구조물인 경우가 대부분이기 때문에 잔류응력의 측정은 주로 막힌 구멍(blind hole) 뚫기를 수행한다¹⁰⁾. 평면응력을 받고 있는 물체에 막힌 구멍의 도입은 매우 복잡한 국부 응력 상태를 만들어 내기 때문에 지금까지도 정확한 해석이 보고되고 있지 않다. 그러나 Rendler와 Vigness에 의해 이 경우도 응력 분포의 일반적인 경향이 관통 구멍과 유사하다고 입증되었다¹¹⁾.

2.3 온도 측정

금속의 용융 온도는 일반적으로 1000 °C 이상의 온도 분포를 보이기 때문에 열전대의 측정온도 범위를 벗어난다. 따라서 선행연구¹²⁾ 및 실험¹³⁾을 통하여 열전대의 부착위치를 설정하였다. 열전대는 0~1500 °C 범위의 온도를 측정할 수 있는 B-type을 사용하였고, 선행연구¹²⁾의 결과를 토대로 용융된 부분을 중심으로부터 0~10 mm까지 1 mm 간격으로 부착하였다. 또한, 레이저 조사 방향에 따라 전체의 온도를 측정하였다. 홀가공 공정 실시 전 온도 측정부의 열전대는 레이저 점용접 후 접착제를 이용하여 부착하였다. 수집된 온도

Table 3 Mechanical property and chemical compositions of SCP1-S specimens(wt%)

	C	Mn	S	P	Ti	Fe
SCP1-S	0.145	0.828	0.0108	030131	0.009	Bal
	Tensile strength (MPa)		Yield strength (MPa)		Elongation %	
	400		255		31	

는 데이터 수집 보드(National Instruments, DAQ-9174)를 이용하여 처리하였다.

2.4 실험 재료 및 냉각 조건

본 연구에서 사용된 금속은 냉간압연강판(cold rolled carbon steel sheet)의 한 종류인 SCP1-S를 사용하였다. 실험 시험편은 20 mm × 20 mm 사이즈로 두께는 2 mm이다. Table 3 은 SCP1-S 의 화학적 조성 및 기계적 특성을 나타낸다. 맞대기용접 실험 시 버(burr)의 영향을 최소화하기 위해 용접 이음면을 밀링 정삭가공을 하였다. 레이저 조사와 동시에 차폐 가스를 분사(20 ml/min) 하였고, 공정 진행 후 60~ 300 sec 까지 60 sec 간격으로 증가시켜 가며 진행 후 시간 변화에 따른 시편을 제작하였다. 실험에 사용된 레이저는 램프여기 방식의 CW파이버 레이저를 사용하였다. 본 장치의 최대 출력은 50 W를 가지고 있다. 발전기의 최대 효율을 사용하기 위해 출력인 7 MW/cm² 로 고정하여 실험하였다. 초점위치는 재료 상부표면에 일치하도록 하였다. 또한, 레이저 빔의 이송속도는 10 mm/s 고정하여 용접하였다. 용접의 위치를 제어한 후 프로그램을 이용하여 자동 용접하도록 구성하였으며, 이를 통해 맞대기용접을 실시하였다. 또한 차폐가스 분사를 위해 직경 4 mm의 구리 노즐을 장착하였으며, 포커싱 위치 바로 뒤에서 60°의 각도로 레이저빔을 따라가도록 공급하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 온도 분포

Fig. 4 는 레이저 용접 공정 시 단면의 온도분포를 깊이방향으로 해석한 수치적 결과이며, Fig. 5 는 수치 결과와 실험 결과를 비교한 그래프이다. 3 mm 부분을 시작으로 온도의 차이가 급격히 이루어졌다. 또한 실험에서 용융된 부분(10 mm)을 제외시키고, 9 mm에서 가장 큰 온도가 측정되었으며 최고 온도는 해석(2670 °C),

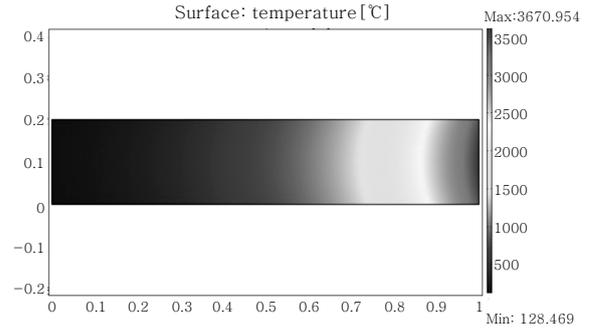


Fig. 4 Comparison on temperature distribution

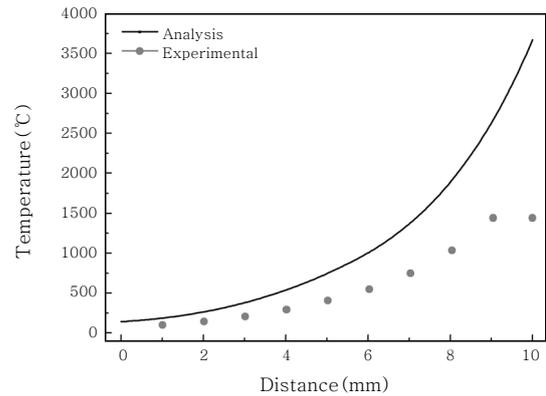


Fig. 5 Comparison on temperature distribution numerical and experiment value

실험(1441 °C)이며, 약 1231 °C 차이가 발생하였다. 실제 해석에 있어 2000 °C 이상에서는 상의 변화가 예상되며 이에 대한 물성치도 온도에 따라 매우 급격하게 변하므로 2000 °C 이상에서 수치적 해석의 결과는 큰 의미를 갖지 않는다. 레이저 용접 공정에 의한 온도 분포의 특징은 용융된 주위에서 상당히 급격한 온도의 변화를 나타내었으며, 용융된 주위에서 떨어진 곳(1~5 mm)보다 급격한 온도 변화를 갖는 것으로 분석되었다.

3.2 수치적 해석을 통한 응력 예측

Fig. 6 은 레이저 용접 공정 후 냉각 시간(60 sec)에 따른 온도 분포이며, Fig. 7 은 응력 분포를 나타낸 그래프이다. 냉각 시간에 따른 응력 분포의 변화는 매우 유사하나, 입열량의 차이로 인하여 최대 응력의 크기와 최소 응력의 크기가 다르게 나타났다. 용접 공정 후 폭방향(y 방향)으로 압축응력이 가장 크게 나타났는데, 이는 용융지 부근에서 폭 방향의 거리에 따라 불균일한 온도분포에 의한 모재의 열팽창이 달라지기 때문인 것으로 추정된다. 또한, 열이 인가된 후 응력 상태를 고려할 때 폭 방향의 응력에 비하여 진행 방향(x 방

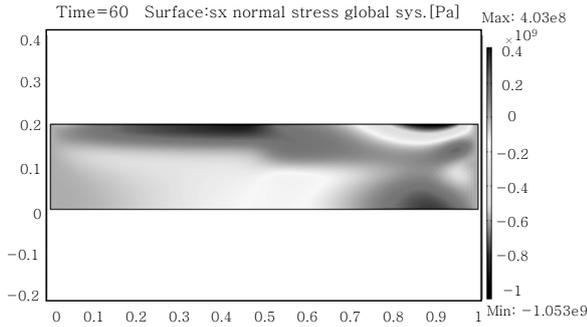


Fig. 6 Analysis result of the stress distribution of SCP1-S at 60 sec

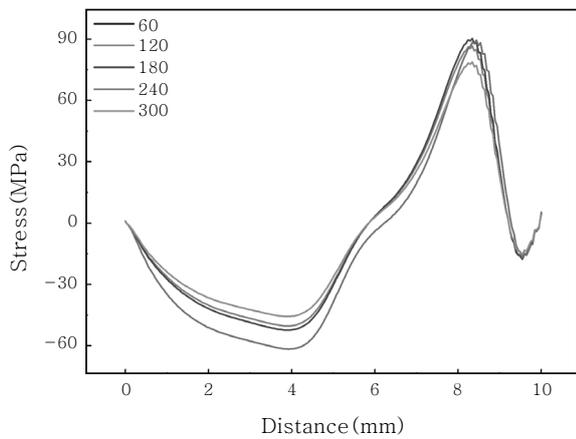


Fig. 7 Analysis result of the stress distribution of SCP1-S

향)의 응력이 커졌는데 이는 입열량에 의해 발생한 응력이 재료의 변형에 의한 응력으로 전화됐기 때문인 것으로 추정된다. 응력 평가 공정에 있어서 가장 영향을 많이 미치는 응력은 입열량에 따라 폭 과 진행 방향의 응력이고, 이것은 시편에 기계적, 물리적 성질에 가장 큰 영향을 미치는 인자임을 알 수 있다. 덧붙여, 대부분의 용접에서 주변부는 용접부를 상당히 강하게 구속하게 된다. 하지만 맞대기 용접과 같이 주변부 구속이 거의 없는 경우도 충분히 응력이 존재한다. 따라서 금속에 강성비는 가능한 정확히 반영되는 것이 적절하다. 이를 고유변형률 기반의 탄성해석으로 구현하려고 하면 용접부 요소별로 해야 한다. 그리고 하나의 요소에서도 이방성 요소를 사용하여 방향별로 다른 값을 적용하여야 한다. 이는 원칙적으로 열변형률만큼의 수축을 유도하는 탄소성 모드로 해석한다. 이를 적용하면 재료와 모델링이 이원화되어 자동적으로 해결될 것으로 추정된다.

3.3 응력 측정 및 수치해석 비교

응력을 실험적으로 측정하기 위해 홀드릴링(Hole-

drilling) 기법을 이용하였다. 응력 측정의 결과에 대한 정밀도를 높이기 위해 표면을 기준으로 깊이 방향으로 측정하였으며, 1 mm 간격으로 스트레인 게이지를 부착하여 측정하였다. 또한, 측정 위치 당 각각 10 개의 시편, 스트레인 게이지를 부착하여 평균을 낸 값을 그래프화 하였다. 시편에 측정된 응력에 대하여 홀드릴링 기법을 이용한 결과를 Fig. 8 로 나타내었다. 용융지 부근에서 멀리 떨어진 지점은 열응력을 발생 시킬 수 있는 온도차가 작아져서 열응력 또한 압축응력이 생성되었다. 또한, 진행 방향의 응력은 용융지 부근의 팽창에 의한 반작용으로 발생하는 응력뿐만 아니라 용접 공정에서 발생하는 좌굴에 의한 응력이 포함된 복합적인 응력인 것으로 추정된다. Fig. 9 는 시편에 측정된 응력에 대하여 수치적 해석을 통해 예측된 응력과 실험적 기법을 이용한 측정에 대한 그래프이다. 비교 결과, 시편 내부를 중심으로 하단부분(폭방향, y)에 압축응력이 가장 크게 발생하였다. 공정 후 자연냉각 되는 길어질

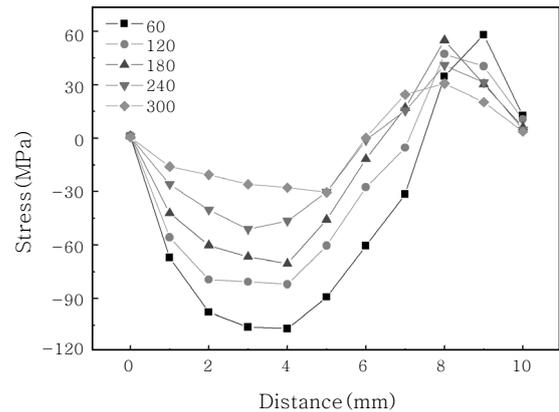


Fig. 8 Experiment result of the stress distribution of SCP1-S

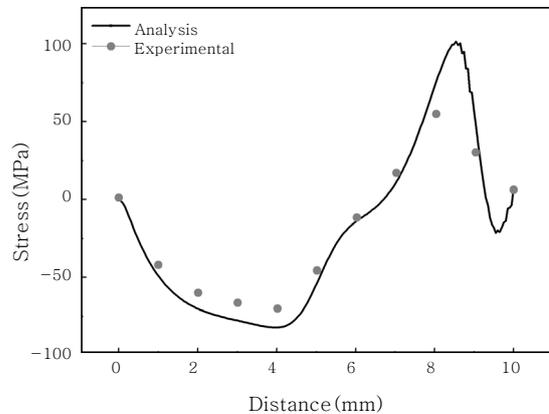


Fig. 9 Comparison of analysis and experimental stresses of SCP1-S at 180 sec

수록 압축응력은 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고 해석과 측정된 응력의 완화되는 경향이 매우 유사함을 확인 할 수 있었다. 용접 공정 시 열변형 및 잔류응력이 반드시 발생한다. 이러한 용접 열변형을 제어하기 위해서는 몇 가지 제약이 존재한다. 열에 기인한 잔류응력에 따른 변형은 해당 위치에 내재된 잔류응력과 꼭 비례하는 것은 아니라는 것이다. 고온의 열이력을 경험한 강재는 탄소성 이력 및 소재 변화를 겪었기 때문이다. 최종 상태의 잔류 변형을 강제로 없앤 경우에도 용접부에는 인장응력이 남아 있을 수 있다. 반대로 잔류응력을 해소 시킨 경우에는 역으로 변형이 남아있을 수 있는 것으로 추정된다.

4. 결 론

본 연구에서는 SCP1-S 레이저 용접 공정 시 발생되는 온도, 응력을 예측 및 평가하기 위한 목적으로 수치적 해석과 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용접 공정 시 모재의 온도 분포, 가열, 냉각 특성이 수치적 해석과 실험 결과가 유사함을 보임으로써, 해석 결과에 대한 신뢰성을 검증하였다.

2) 용접 공정 중 주응력의 방향은 폭 방향으로의 응력으로 작용하였으며, 용접 진행 방향의 응력이 크게 나타나는 것은 팽창에 의한 응력과 모재의 변형에 기인함을 확인할 수 있었다.

3) 용접 비드에서 가까운 모재 부분은 공정이 진행되면서 압축 응력에서 인장 응력으로의 변화가 크게 나타났으며, 비드에서 일정 길이 떨어진 부분은 응력의 변화가 완만하게 나타나는 것을 확인하였다.

덧붙여, 유동적으로 변하는 용접 환경에 최적의 공정 변수를 향상시키기 위하여 이종 재료의 레이저 용접에 따른 물리 및 기계적 특성 등에 대한 실험적 연구가 필요할 것으로 여겨진다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 20120007704)

참 고 문 헌

1. R. Poprawe, W. Schulz and R. Schmitt : Hydrodynamics of Material Removal by Melt Expulsion: Perspectives of Laser Cutting and Drilling, *Physics Procedia*, **5** (2010), 1-18

2. K. L. Choo, Y. Ogawa, G. Kanbargi, V. Otra, L. M. Raff and R. Komanduri : Micromachining of silicon by short-pulse laser ablation in air and under water, *Materials Science and Engineering*, **A-372** (2004), 145-162

3. G. Toker, V. Bulatov, T. Kovalchuk and I. Schechter : Underwater Interaction of 1064 nm Laser radiation with Metal Target, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, **55** (2009), 25-28

4. Jang, H. S : *The Handbook of Advanced Aluminum Technology*, 1997, Hanlimwon (in Korean)

5. Muammer, K., John, C. and Taylan, A : Prediction of Residual Stress in Quenched Aluminum Block and Their Reduction through Cold Working Processed, *Journal of Materials Processing Technology*, **174** (2006), 342-354

6. Hossain, S., Truman, C. E., Smith, D. J., Peng, R. L. and Stuhr, U : A Study of the Generation and Creep Relaxation of Triaxial Residual Stresses in Stainless Steel, *International Journal of Solid and Structure*, **44** (2007), 3004-3020

7. Juijerm, P. and Altenberger, I : Residual Stress Relaxation of Deep-Rolled Al-Mg-Si-Cu Alloy during Cyclic Loading at Elevated Temperature, *Scripta Materialia*, **55** (2006), 1111-1114

8. James M. Gere, Barry. Goodno : *Mechanics of Material* 7th Edition, Cengage Learning, Toronto, (2011), 116-127

9. Simsir, C. and Gur, C. H : 3D FEM Simulation of Steel Quenching and Investigation of the Effect of Asymmetric Geometry on Residual Stress Distribution, *Journal of Materials Processing Technology*, **207** (2008), 211-221

10. Sang-beom Shin, Dong-ju Lee and Joo-sung Lee : Evaluation of Buckling Distortion for the Thin Panel Welded Structure According to Welding Processes, *Journal of KWJS*, **26-3** (2008), 237-243 (in Korean)

11. Ki-bo Kwon, Jae-woong Kim and Cheol-Hee Kim : Analysis of Welding Distortion for Laser Welded Sheet Metal Structures of Aluminum Alloy, *Journal of KWJS*, **27-3** (2009), 276-283 (in Korean)

12. Sang-beom Shin and Joong-geun Youn : A Study on the Angular Distortion Prediction of Double Sided Multi-pass Butt Weldment, *Journal of KWJS*, **25-1** (2007), 37-41 (in Korean)

13. Ill-soo Kim, Hak-hyoung Kim, Han-kee Jang, Hee-jin Kim, Sung-kyu Kwak, Hoi-soo Ryoo and Ji-yeon Shim : A Study about Analysis of Weld Distortion using Genetic Algorithm, *Journal of KWJS*, **27-4** (2009), 398-403 (in Korean)

15. Yun-sok Ha : A Study on Weldment Boundary Condition for Elasto-Plastic Thermal Distortion Analysis of Large Welded Structures, *Journal of KWJS*, **29-4** (2011), 410-415 (in Korean)

16. Joo-sung Lee : Welding Deformation Analysis of Plates Using the Inherent Strain-based Equivalent Load Method, Journal of KWJS, **28-2** (2010), 159-166 (in Korean)
17. Yun-sok Ha, and Jin-hyuk Yang : Development of Distortion Analysis Method for Multi-pass Butt welding Based on Shell Element, Journal of KWJS, **28-1** (2010), 54-59 (in Korean)
18. Hwan-su Chu, and Sang-myung Cho : A Study on the Buckling in Fillet Welds of Sheets, Journal of KWJS, **27-3** (2009), 292-298 (in Korean)
19. Joo-sung Lee, and Cheul-ho Kim : A Study on the Fillet Weld-Induced Deformation Control by Applying the Tensioning Method, Journal of KWJS, **27-4** (2009), 382-387 (in Korean)