

레이저 용접된 자동차용 판재의 잔류응력분포

(Residual Stress Distribution of the Laser Welded Automotive Steel Sheets)

윤선진(인하대학교 기계공학과 대학원), 김재도(인하대학교 기계공학과)

S. J. Yoon(Inha univ.), J. D. Kim(Inha univ.)

ABSTRACT

Zinc coated steel sheets have been widely used in automotive industry. High power laser welding has been used as an excellent welding means for thin sheets. The welding residual stress, which was brought in laser welding, causes making weak the mechanical strength. The purpose of this study is to get the residual stress distribution in various laser welding condition by FEM and verify the results by X-Ray diffraction.

Welding residual stresses have been calculated by thermal elasto-plastic analysis using finite element method. From the results, it can be known that the laser welding condition affects to distribution of the residual stress.

1. 서론

레이저는 작은 면적에 대하여 대단히 큰 에너지 밀도를 만들어 낼 수 있기 때문에 여러 산업 현장에서 응용되어져 왔다. 이중에서 레이저 용접은 좁은 용접비드와 열영향부를 가지며 자동화가 용이하여, 로보토나 유연빔 안내 장치와 결합하여 항공, 자동차 산업 등에 사용되고 있다. 또 재료로서 아연도금 강판은 초기에 해안도로, 제설용 염화칼슘과 같은 특이 환경으로부터 차체를 보호하기 위하여 북미 등지에서 많이 사용되어졌다. 그러나 환경 오염으로 인한 부식 환경의 증가에 따라 도장 외에도 부식에 견디는 성질을 일정 기간 동안 보장받기 위하여 폭넓게 사용되어지고 있으며, 주택 내외장재 및 자동차의 머플러, 판넬 등에 사용되고 있다.^[1,2]

현재 자동차 차체 제조 공정에 있어서 강도 등을 고려하여 들 이상의 강판들을 용접 기술로서 일체화(one sheet type)하여 프레스 작업을 함으로서 생산성과 정밀도 향상을 기대할 수 있으며, 이를 위해 적당한 결합 소재로서 열변형이 적고 작업 생산성이 뛰어난 레이저 용접이 적당하다고 알려져 있다. 그러나 레이저에 의해 국부적으로 가열된 판재는 과도한 열응력에 의해 비선형적인 변형을하게 되며 상온으로 복귀한 후, 용접부에 남아 있는 잔류응

력은 후가공(stamping), 열처리 균열 및 변형, 좌굴강도, 피로강도, 응력부식 저항, 마모저항 및 크랙전파 등에 큰 영향을 미치게 된다. 특히 두께가 얇은 박판에 대하여 잔류응력은 여러 기계적 성질에 영향을 미치는 가장 중요한 인자이다. 이 불균일하며, 시간에 따라 변화하는 온도와 잔류응력 분포를 결정하는 해석 방법으로서 유한요소법이 적절하다. 그러나 시간, 온도를 고려한 탄소성응력해석을 함께 있어 큰 기억용량의 계산기와 긴 처리 시간이 필요함에 따라 보다 효율적, 경제적으로 잔류응력해석을 구하는 연구가 필요하다.^[3,4,5,6]

본 연구에서는 직교좌표계에 있어서 얇은 두께를 가진 박판에 대하여 레이저의 고밀도 에너지 용접특성에 대한 열유동 해석을 유한요소법을 사용하여 해석하였으며, 이에 따른 열탄소성 과정을 시간에 따라 추적하여 최종적인 잔류응력을 구하였다. 또 아연도금 강판의 레이저 용접부에 대한 X선 회절법에 의한 실험을 하여 이론치와 비교 검토했다.

2. 유한요소해석 과정

2.1 열유동해석(Heat flow analysis)

해석에 사용된 요소와 경계는 Fig. 1과 같으며 용접선을 중심으로 대칭면을 갖는 특성을 이용하였다. 또 이 비정

상 열전도 과정이 x방향의 열전달에 비해 주사속도가 충분히 빠르고, 각 단면들이 시간의 변화만을 제외한 경우, 온도이력의 분포가 동일하므로 3차원 비정상 문제를 고정좌표를 가진 단면에 대한 2차원 준정상 상태(Quasi-steady state)의 문제로 해석할 수 있다. 이때 이 열전달 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + (Q) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서,

T : 온도($^{\circ}$ C)

k : 열전도도($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)

Q : 단위 체적당 열발생량(W/m^3)

ρ : 밀도(kg/m^3)

C : 비열($\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)

t : 시간(sec)

이를 시간에 대한 온도분포를 구하기 위하여

$$[C] \left[\frac{\partial T}{\partial t} \right] + [K_c]T + [K_h]T = [R_q] + [R_h] \quad (2)$$

과 같이 정리될 수 있으며 여기서,

$[C]$: the element capacitance matrix

$[K_c]$: the element conductance matrices

$[K_h]$: the element convection matrix

$[R_q], [R_h]$: the heat load vectors arising from specified surface heating and surface convection

이다. 본 연구에서는 시간적분을 하기 위하여 Wilson의 방법 중 $\theta=1/2$ 인 Crank-Nikolson방법을 이용하였다.

입열량은 궁극적으로 재료의 온도분포를 결정하는 가장 큰 요인으로 이를 결정하는 작업이 매우 중요하다. 이것은 발진된 레이저 빔의 출력, 각 방향에 대한 빔 반경과 같은 빔 자체의 요인에서부터 재료의 흡수율과 속도와 같은 가공조건을 고루 만족시켜야 한다. 본 연구에서는 고밀도 에너지가 요구되는 공정에서 주로 쓰이는 TEM_{∞} 모드가 이용되었으며, 이용되어진 레이저 빔은 CW (continuous wave)이다. 사용된 입열량의 정식화는 참고문헌을 이용하였으며 보다 정확한 해석을 하기 위해 미소중분에 대하여 램프형태(ramp load)의 하중 부과 방식을 사용하였다. 해석에 쓰여진 가공조건은 실제 가공조건과 동일하며 키홀내의 다중 반사 효과를 고려하여 흡수율 65%로 하였다.^[7] 이외에 해석에 사용된 온도를 고려한 재료상수 역시 참고문헌을 이용하였다.^[2] 상온에서의 재료상수 및 해석 조건들이 Table 1에 제시되어 있다.

각 열손실은 자연대류연전달이 $y=W$, $z=D$ 인 면에서 일어나며 노출로부터 나오는 가스의 영향을 받는 윗면에 대

하여서는 강제대류 계수를 사용하였다. 즉 (1)식의 해를 구하기 위한 초기, 경계조건은 다음과 같다.

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \quad (3)$$

$$K \frac{\partial T}{\partial z} = h_f(T - T_0) \text{ at } z=0 \quad (4)$$

$$K \frac{\partial T}{\partial z} = h_n(T - T_0) \text{ at } z=D \quad (5)$$

$$K \frac{\partial T}{\partial y} = h_n(T - T_0) \text{ at } y=W \quad (6)$$

요소는 약 1000개의 절점과 800개의 요소가 사용되어 졌으며, 정확성이 요구되는 용접선 근처에서는 아주 세밀한 크기로 요소를 분할하였고, 이외 용접 중심선으로부터 멀어질수록 요소의 크기가 커지도록 만들어 시간적, 경제적인 절약이 가능하도록 하였다.

Table 1 Material properties of zinc coated steel

Thermal and mechanical properties	
Density	7844 kg/m^3
Specific heat	486 $\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$
Thermal conductivity	51.9 $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$
Young's modulus	204E3 MPa
Yield strength	264.6 MPa
Thermal expansion	1.49E-5 $\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$
Poisson ratio	0.27
Shear modulus	80E3 MPa

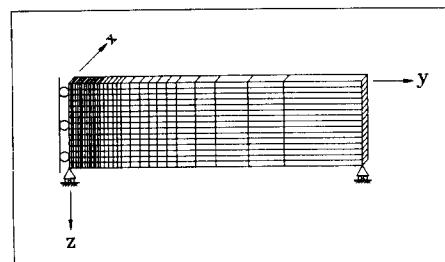


Fig. 1 Finite element mesh used in heat and residual stress analysis

2.2 탄소성용력해석(Elasto-Plastic stress analysis)

시간의 변화에 따른 탄소성용력해석을 하기 위하여, 열유동해석에서 사용된 요소가 이용되었다. 탄성한도를 넘어선 재료가 항복을 일으키는 항복기준(yield criterion)으로서 von Mises의 식이 사용되었다. 이 탄소성 용력해석은 열용력해석으로부터 구한 온도의 변화에 대한 열용력자료들을 이용하여 용력해석을 하였으며 이 때 미소 중분변형량을 고려한 경우, 가상일의 원리로부터 중분형의 평

형방정식이 이용되었다.

사용된 경계조건은 Fig. 1과 같으며 역시 온도해석과 마찬가지로 용접선에 따른 대칭성을 이용하였다. 해석에 사용된 물성치들은 역시 참고문헌들을 이용하였으며 탄소성 거동은 Bilinear를 가정하였다.^[2,8] 또 종방향(longitudinal direction)의 잔류응력해석을 위해 평면변형율(plain strain) 조건으로 해석을 하였다.

3. 실험

실험에 사용된 레이저는 2 kW CW CO₂레이저이며 사용된 출력은 1.2 kW, 주사속도는 1.4~2.2 m/min이다. 사용되어진 시편은 양면에 3.6 μm 아연도금이 된 0.8 mm 아연도금강판이다. 맞대기 용접은 Fig. 2와 같이 고속의 가스로부터 시편의 이동을 막기 위하여 양단이 고정되어 있는 상태 하에서 진행되었다. 또 공정용접공정중에 발생한 플라즈마로부터 광학기구를 보호하고, 적절한 용접품질을 얻기 위하여 보호가스로서 질소가스가 이용되었으며, 가스압은 0.5 kgf/cm²이 일정하게 배출되도록 선택되었다. 초점위치는 재료표면으로 부터 0.5 mm 아래로 맞추어 졌다. 이외에 용접에 관련된 실험변수들이 Table 2에 나와 있다.

Table 2 Parameters of laser beam welding

Laser power	1.2 kW
Welding speed	1.6~2.2 m/min
Beam mode	Gaussian mode
Focal length	127
Focal point	0.5mm below the material surface
Shielding gas	N ₂ (0.5 kgf/cm ²)
Nozzle diameter	1.8 mm

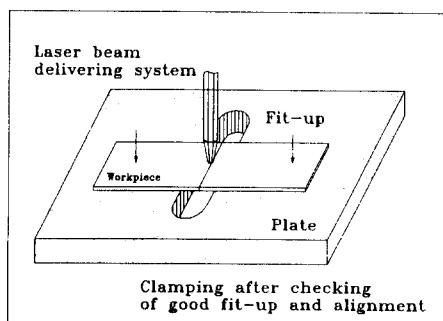


Fig. 2 Illustration of laser welding configuration with clamping for laser butt welding

용접부의 잔류응력측정을 위해 사용된 X선 회절기의 측정조건은 Table 3에 나와 있다. 잔류응력측정은 표준시료를 이용하여 회절선 최대 강도(peak intensity)를 찾아서 그 값을 기준으로 강도의 이동된 2θ 값을 반가폭 중점법(middle point method of half value width)에 의해 측정하였다. 면간거리 d_0 의 변화에 대한 $\sin^2 \psi$ 선도를 그려서 그 기울기로서 용력을 산출하였다. 측정방향은 빔 방향에 대하여 횡방향(transverse)에 대하여 실시하였다.^[9]

인장시험은 계장화(instrumented)를 시킨 만능재료시험기를 사용하였으며, 강도를 측정하기 위하여 시편을 인장시험기의 척에 장착하여 인장속도 2 mm/min으로 정하중 시험을 하였다. 모든 시편은 압연 방향에 대해 수직하게 절단, 가공하였다.

Table 3 Conditions of X-Ray diffraction

Voltage	25 kV
Current	5 mA
X ray target	Cr-K _α
Number of detector	3

4. 결과 및 검토

4.1 레이저 맞대기 용접(Laser butt welding)

Fig. 3은 출력 1.2 kW에 가스압 0.5 kgf/cm²일 때 주사속도 1.8 m/min에 따른 실제 시험에 의한 비드의 단면형상이다.

Fig. 4, 5는 용접부의 비드폭과 열영향부의 크기를 도시한 것으로서, 비드폭의 경우 가공조건, 즉 속도의 변화에 따른 비드폭에 선형성이 있음을 보여주고 있다.

4.2 유한요소해석(Finite element analysis)

Fig. 6은 실험에서 양호한 기계적 특성을 보여주는 출력 1.2 kW, 두 주사속도 1.6 m/min, 1.8 m/min를 선택하여 레이저 빔이 고정좌표(fixed coordinate)를 통과한 후 0.001초 후의 온도분포를 도시한 것이며 1.6 m/min이 1.8 m/min에 비교하여 더욱 많은 용접입열을 흡수함에 따라 더욱 넓은 범위의 비드폭을 나타내고 있음을 알 수 있다. 여기서 이 온도분포를 가공시의 용접부의 형상으로 판단하면 실제 실험에 의한 형상의 하단부가 유한요소법에 의한 형상보다 약간 넓은 폭을 가짐을 볼 수 있다. 이는 용융부의 윗면에 작용하는 보호가스와 용융부 내부의 온도차

등에 의하여 용융부의 유동이 일어나기 때문이다. 그러나 유동해석은 온도해석과 달리 그 해석과정이 복잡하고 레이저 용접부에서와 같이 작은 영역에서는 큰 문제가 아니기 때문에 이 온도해석만으로도 적당함을 알 수 있다.

Fig. 7는 출력 1.2 kW, 주사속도 1.8 m/min에 대하여 열탄소성 용력해석을 시간의 중분에 따라 추적한 것이다. (a)는 역시 평면 변형률을 가정으로 했을 때 상온으로 복귀한 후의 x방향에 대한 잔류용력분포이며 (b), (c)는 영역 내에서의 y, z방향에 대한 잔류용력분포이다. 용접 방향의 용력은 용접중심선으로 부터 약간 떨어진 곳으로부터 최대인장용력이 존재하고 있으며, 이후 점차 감소하게 된다. 여기서 종방향 잔류용력을 구하기 위하여 x방향으로 단위 두께를 갖는 고정좌표(x방향)를 사용하였기 때문에 힘의 평형 방정식을 만족시키지 못하는 분포를 가지게 되었다. 그러나 좌굴강도를 뺀 대부분의 피로강도, 균열전파와 같은 기계적 특성치에 결정적 영향을 미치는 영역이 인장잔류용력영역이고 Fig. 7를 바탕으로 분포를 고찰할 때 그 최고치가 인장잔류용력이 월등히 높기 때문에 사용하기에 충분하다고 생각된다. Fig. 8은 용접선과 용접선으로부터 1mm위치로부터 깊이 방향에 대한 잔류용력분포를 도시한 것이다. Fig. 9은 출력 1.2 kW, 주사속도 1.6 m/min와 출력 1.2 kW, 주사속도 1.8 m/min에 대하여 종 방향 잔류용력분포를 구한 것이며, 속도가 감소함에 따라 용접 입열이 증가하게 되고 인장 용력을 받고 있는 부분이 전체적으로 증가되었음을 볼 수 있다. 이는 높은 출력이나 낮은 주사 속도는 재료의 증발(evaporation)을 유발할 뿐 아니라, 잔류용력범위의 확산에도 기여하여 여러 기계적 강도들을 약화시킴을 보여주고 있다.

4.3 X선 회절법(X-Ray diffraction method)

실험적인 방법으로서 X선 회절법을 이용하여 재료에 잔류하고 있는 용력을 측정하였다. Fig. 9는 출력 1.2 kW, 주사속도 1.6 m/min, 1.8 m/min에 대한 유한요소법과 X선 회절법에 의한 잔류용력값을 비교하여 나타내었다. 도표 내부의 점이 X선 회절법에 의하여 구한 잔류용력이다. 도표 내의 분포의 경향은 대체로 일치하였으나 정량적인 면에서 약간의 차이를 보이고 있다. 이는 열처리 및 기계가공을 한 소재는 2θ 의 범위가 넓어지고 회절선의 강도가 비대칭적으로 되기 때문에 측정값의 차이가 생긴 것으로 사료된다. 또 시편의 잔류용력을 측정하기 위한 사전가공에 있어서 불균일성과 X선의 목표(target)를 조준하는 과정에서 발생하는 오차도 기여를 한 것으로 보인다. 그러

나 해석에 의한 결과값과 실험에 의한 결과값이 인장용력이 나타나는 부분에서 큰 차이가 없이 일치하므로 적절하다.



Fig. 3 The bead shapes of laser welds

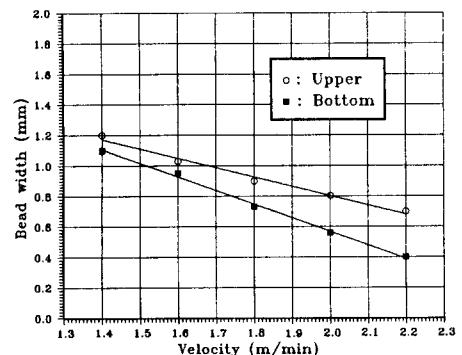


Fig. 4 Relation between welding velocity and bead width

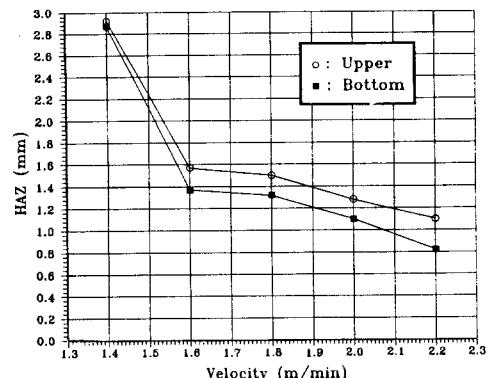


Fig. 5 Relation between welding velocity and HAZ

4.4 인장시험

본 논문에서는 아연도금강판의 가공조건에 따른 잔류용력해석을 함에 있어서 기준을 설정하기 위한 용접 품질 기준으로서 인장시험을 택하였다. Fig. 10은 레이저 출력이 1.2 kW로 일정할 때, 주사속도를 각기 1.4~2.2 m/min로서 각기 달리하여 인장시험을 한 결과이다. 여기서 속도가

1.8 m/min일 때 가장 높은 인장강도를 가지는 것을 볼 수 있으며, 이후 1.6 m/min, 2.0 m/min의 순으로 나타나고 있다. 그러나 실제로 더욱 정밀한 용접품질을 검사하기 위해서는 용접재료에 대한 성형성실험, 피로강도실험, U자굽힘실험, 그리고 비파괴검사 등을 통하여 평가하여야 한다.

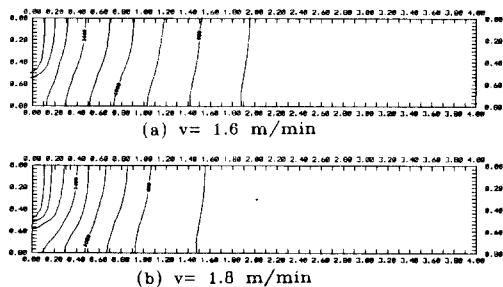


Fig. 6 Temperature distributions in $y-z$ plane

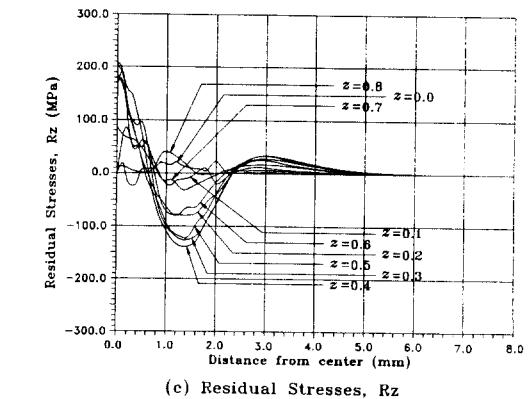
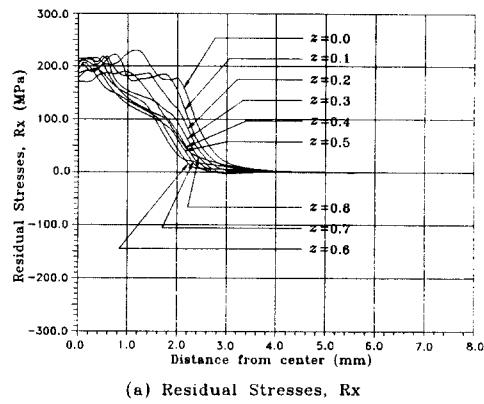


Fig. 7 Residual stress distributions in laser welds by FEM

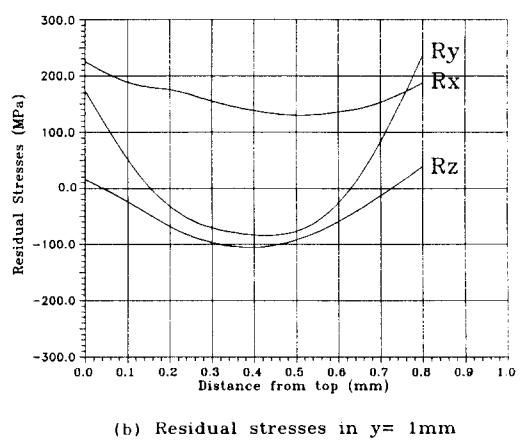
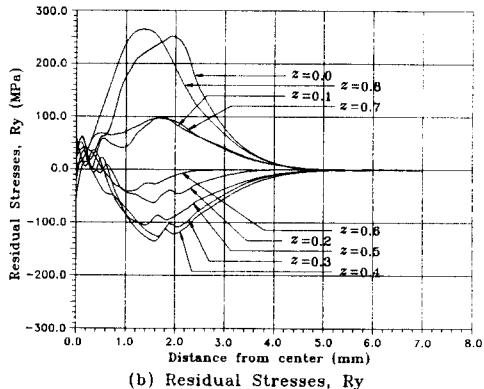


Fig. 8 Residual stress distributions in laser welds along depth

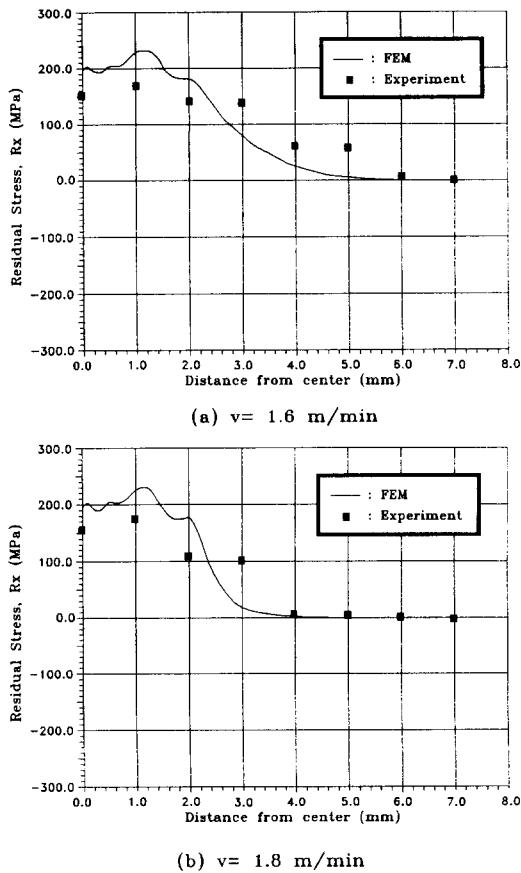


Fig. 9 Residual stress in welds by FEM and X-Ray diffraction method

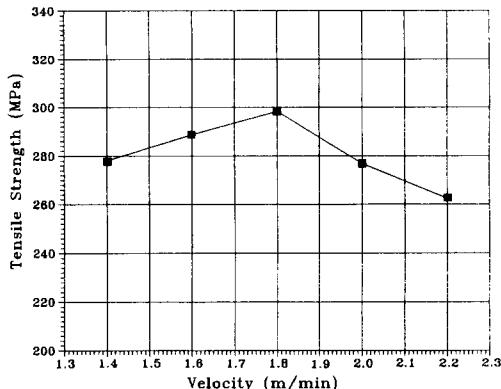


Fig. 10 Relation between welding velocity and tensile strength

5. 결론

본 연구는 자동차 사시 등으로 많이 쓰이는 아연도금강

판에 레이저 용접을 한 후 잔류응력을 계산하고, 실험한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

유한 요소법에 의하여 수치적으로 시간증분에 대하여 온도해석을 행한 후, 이 온도 의존성을 고려하여 열탄소성응력 해석에 적용하였으며, 또 이를 시간에 따라 상온으로 복귀하기까지 추적하여 용접부의 잔류응력을 해석하였다. 주사속도가 1.6 m/min인 경우와 1.8 m/min인 경우에 대하여, 종방향 잔류응력이 각각 약 +240 MPa, +230 MPa으로 나타났으며, 이를 X선 회절법의 결과와 비교함으로서 그 신뢰성을 확인할 수 있었다.

6. 참고문헌

1. R. Akhter, W. M. Steen and K. G. Watkins, "Welding Zinc-Coated Steel with a Laser and the Properties of the Weldment", Journal of Laser Applications, Vol. 3 No. 2, Spring 1991, pp. 9~21.
2. Metal Handbook, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, Vol. 1~9th edition, 1978
3. Robin Stevenson, "Formality of Galvanized Steels-Revisited", Society of Automotive Engineers, 1986, pp. 2.611~2.625.
4. P. Wang, K. Ewing, "A Comparison of Fatigue Strengths: Laser Beam vs. Resistance Spot Welds", Welding Journal, October 1991, pp. 43~47.
5. J. H. Argyris, J. Szimmat and K. J. Willam, "Computational Aspects of Welding Stress Analysis", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, North-Holland, 1982, pp. 635~500.
6. P. Tekriwal, J. Mazumder, "Transient and Residual Thermal Strain-Stress Analysis of GMAW", Transaction of the ASME, Vol. 113, July 1991, pp. 336~343.
7. J. D. Kim, "Prediction of the Penetration Depth in Laser Beam Welding", Proc. of international Conference of New Advances in Welding, 1991, May. 8~10, Beijing, pp. 216~221.
8. Y. Iwamura and E. F. Rybicki, "A Transient Elasto-Plastics Thermal Stress Analysis of Flame Forming", Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 1973, pp. 163~171.
9. R. Lin, A Study on Residual Stresses and Microstructures of Two Laser Hardened Steels, Institute of Technology, Sweden, 1988, pp. 10~14.