

< 논문 >

변동하중을 받는 Lower Control Arm의 잔류응력 변화

강우종* · 김기훈*

(2006년 2월 14일 접수, 2006년 3월 7일 심사완료)

Residual Stress of the Lower Control Arm Subjected to Cyclic Loading

Woojong Kang and Gihoon Kim

Key Words: Finite Element Analysis(유한요소해석), Thermal-Elasto-Plastic(열탄소성), Weld Residual Stress(용접잔류응력), Cycle Loading(반복하중)

Abstract

Vehicle components such as lower control arm are usually affected by heat during the welding process. As a result, residual stress is generated, which has much effect on mechanical performances such as crashworthiness and durability. In this study, the residual stress in lower control arm has been measured by the x-ray diffraction method and been analyzed by finite element methods. Heat transfer during seam weld process has been calculated and used in calculating thermal deformation with temperature dependent material properties. High residual stress has been found at vertical wall both by measurement and simulation. The simulation also showed the residual stress re-distribution when the component is subjected to cyclic loading condition.

1. 서론

자동차 현가계 부품인 LCA(lower control arm)은 인장강도 380MPa 또는 440MPa급의 자동차용 강판을 성형한 후 아크용접에 의하여 조립되며, Fig. 1과 같이 차량의 너클(knuckle)과 서브프레임(subframe)에 장착되어, 종 방향과 횡 방향의 운동을 구속하는 부품이다.

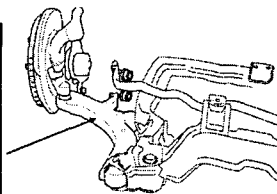


Fig. 1 Lower control arm

LCA에는 Fig. 2에 보이는 바와 같이 용접선이 형성되어 있으며, 따라서 부품에는 성형 및 용접으로 인한 잔류응력이 존재하게 될 가능성이 매우 높게 된다. 부품의 잔류응력은 충돌, 내구 등의 성능에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며 특히 인장 잔류응력은 피로수명을 저하시키는 원인이 되기도 한다.^(1,2) 따라서 소재 가공으로 인하여 발생하게 되는 잔류응력을 예측하여 부품 설계에 고려할 수 있는 방안이 요구되고 있으며, 유한요소해석을 이용한 잔류응력 분석기술이 많이 쓰이고 있다.

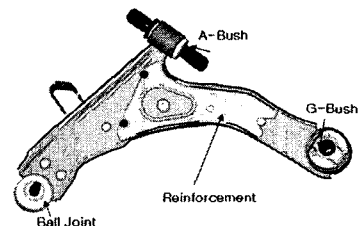


Fig. 2 Weld beads on the lower control arm

† 책임저자, 회원, 자동차부품연구원 구조특성
E-mail : wjkang@katech.re.kr
TEL : (041)559-3125 FAX : (041)559-3286
* 자동차부품연구원 구조특성

본 연구에서는 용접시 발생하는 높은 온도상승과 위치별 냉각속도의 차이에 의하여 일어나는 열변형을 유한요소법을 이용하여 계산하여 부품에 존재하는 잔류응력의 크기를 알아보려고 한다. 또한 실제 부품의 잔류응력을 비파괴검사장비인 X선 응력 측정기를 이용하여 측정된 후 해석 결과와 비교하여 상관성을 검토하고자 하며, 반복 하중 하에서의 잔류응력 변화를 분석하고자 한다.

2. LCA 잔류응력 측정

2.1 잔류응력 측정방법

용접부 부근은 용접 아크에 의해 국부적으로 가열되고 이로 인하여 불균일한 온도분포와 그에 따른 열응력이 발생한다. 따라서 용접 후에는 소성변형으로 인한 잔류응력이 존재하게 된다.⁽³⁾

구조물의 잔류응력을 측정하기 위한 방법으로 1930년에 Mathar⁽⁴⁾가 제안한 구멍뚫기법은 용접부에 스트레인게이지를 부착한 후 미세한 드릴을 이용하여 구멍을 뚫고 이때 소거되는 응력의 크기를 스트레인게이지에서 측정함으로써 용접부의 잔류응력을 역으로 추정하는 방법이다. 이 방법은 구멍의 가공으로 인하여 잔류응력이 추가적으로 발생하는 문제점이 있다. 현재는 비파괴 측정 장비의 발전으로 인하여 X선을 이용하는 방법, 자기적 성질을 이용하는 방법 및 초음파를 이용하는 방법 등이 사용되고 있다. 본 연구에서는 X선을 이용하는 비파괴 측정 장비인 3차원 잔류응력 측정기를 이용하여 시편의 잔류응력을 측정하였다.

본 연구에서 사용한 X선 잔류응력 측정기는 기계가공 후 구조물 내에 남아 있는 잔류오스테나이트의 크기를 측정하여 응력으로 계산하게 된다. 이는 Bragg의 법칙을 이용하여 일정한 각도로 입사하는 X선이 시편에 반사되어 나올 때 입력되는 X선의 파장과 출력되는 각을 측정하여 결정격자의 길이를 계산하는 방법이다. 이 때 측정하고자 하는 표면에 피막이 없고 표면 거칠기가 일정할수록 측정 신뢰도가 높아지게 된다. 따라서 용접선을 따라 응력을 측정하는 것은 신뢰성이 매우 낮으므로 용접선 주위의 열영향부에서의 잔류응력을 측정하였다.

2.2 잔류응력 측정결과

Fig. 4는 측정된 결과를 도시한 것으로 각각의 단면에 수직한 방향의 응력을 나타내고 있다. 측정 결과 용접 열영향부에서의 응력이 크게 존재하고 있음을 알 수 있다.

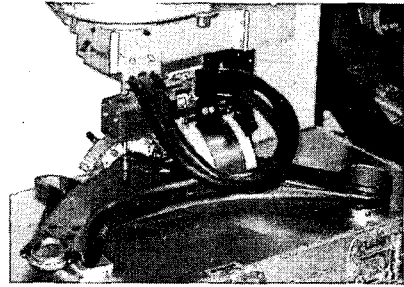


Fig. 3 Residual stress measurement by x-ray diffraction method

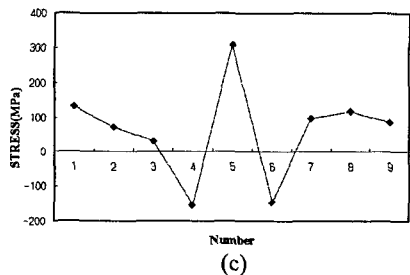
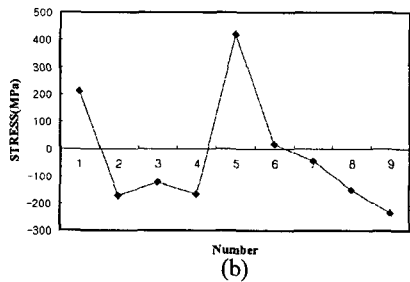
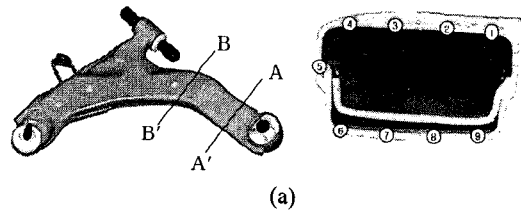


Fig. 4 Residual stress obtained from the measurement:(a) section and numbering; (b) section A-A'; (c) section B-B'

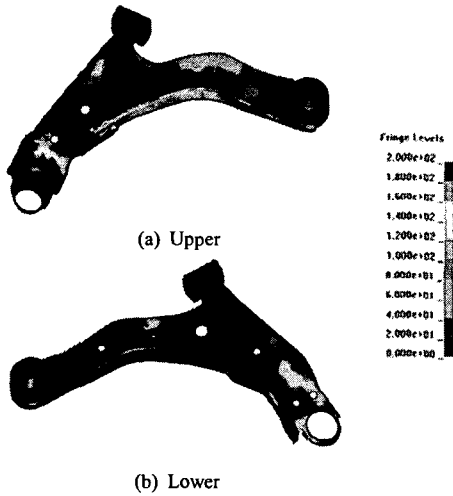


Fig. 5 Measured residual stress distribution in the LCA by the X-ray diffraction method

각 단면의 열영향부에 해당하는 5번 위치에서는 약 300 ~ 400MPa의 잔류응력이 존재하는 것으로 측정되었다. 반면 용접선에서 멀리 떨어진 면내에 위치한 측정 위치에서는 상대적으로 응력의 크기는 작았으며 단면 A-A'에서는 대부분 압축, 단면 B-B'에서는 대부분 인장 잔류응력이 존재하고 크기는 100 ~ 200MPa 정도의 범위에 있는 것으로 측정되었다. Fig. 5에는 측정된 응력을 해석을 위한 절점에 매핑(mapping)하여 전체적인 인장 잔류응력 분포를 도시한 것으로 벽면부에서 인장 잔류응력이 존재하고 있음을 볼 수 있다.

3. 해석을 통한 잔류응력 계산

3.1 열전달 해석

본 연구에서는 앞에서 설명한 바와 같이 용접부의 잔류응력을 비파괴검사 장비를 이용하여 측정하였다. 그러나 현실적으로 모든 위치에서의 응력텐서 측정이 불가능하므로 유한요소 해석을 이용하여 잔류응력 텐서를 구하는 것이 가장 일반적인 방법이다. 따라서 용접 잔류응력을 구하기 위하여 용접현상의 열전달 및 열탄소성 해석을 수행하여 그 결과를 충돌, 내구 등의 다른 해석에 초기응력으로 고려할 수 있도록 하고자 한다. 본 연구의 열전달 및 열탄소성 유한요소 해석을 위하여 LS-DYNA⁽⁶⁾를 이용하였다.

열탄소성 해석을 하기 위해서는 온도변화를 알아야 하므로 다음과 같이 열전달 해석을 수행하였다. 용접은 용접선을 따라서 용접봉이 일정 속도로 이동하면서 지그위에 고정되어 있는 각 부품을 용접하게 된다. 이때 용접선을 따라 이루어지는 단위면적당 입열량(heat flux)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = \eta \frac{VI}{bl} \quad (1)$$

여기서 η 는 용접효율, V 는 용접전압, I 는 용접전류를 나타내며 b 는 용접선의 폭, l 은 용접 길이를 나타낸다. 본 해석에서는 전류 180~190A, 전압 18V, 이송속도는 5mm/s를 적용하였으며, 열전달 해석을 위한 지배 방정식 및 경계조건은 다음과 같다.

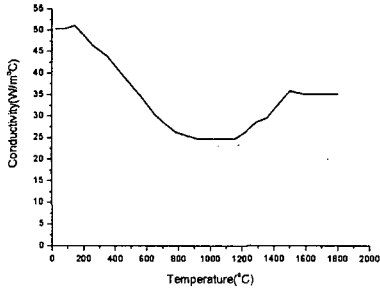
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + f \quad \text{in } D \quad (2.1)$$

$$k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} n_i = -k_o(T-g) + h \quad \text{on } \partial D \quad (2.2)$$

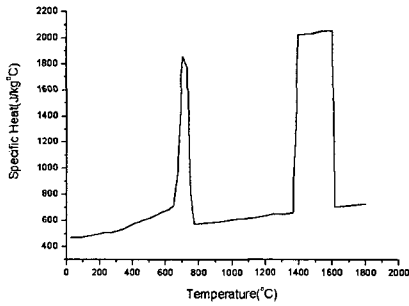
여기에서 ρ 는 밀도, C_p 는 비열 그리고 k_{ij} 는 열전도계수이다. g 는 온도경계조건을 위한 함수이며, h 는 단면에 수직인 입열량이고 k_o 는 경계조건을 구분하기 위한 상수이다. 용접시 용접물의 온도가 증가하여 상변태 온도에 이르면 잠열(latent heat)에 의해 온도의 증가가 정체되는 현상이 있다. 상변태를 넘어서기 위해서는 잠열에 해당되는 열을 소비시켜야 하는데 이를 위하여 상변태가 발생하는 시간 동안 다음과 같이 비열을 증가시키는 방법을 사용하였다.

$$C = \frac{H_L}{T_L - T_S} \quad (3)$$

여기서, H_L 은 용융잠열, T_L 은 용해온도 그리고 T_S 는 응고온도를 나타낸다. 해석에 사용된 열전도계수 및 비열은 Fig. 6에 나타난 바와 같다.⁽⁶⁾ 실제 LCA의 용접 공정과 같이 강판의 양쪽 면에서 자연 대류에 의한 냉각이 발생하도록 하였다.



(a)



(b)

Fig. 6 Material properties in heat transfer analysis: (a) thermal conductivity; (b) specific heat

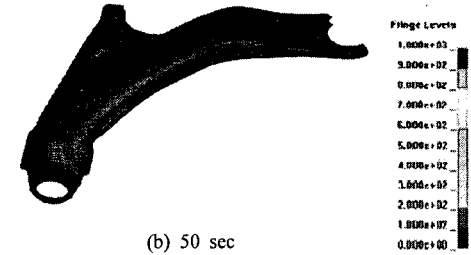
Fig. 7은 LCA의 온도변화를 나타낸 그림이다. 최대 약 1400°C의 온도상승이 발생하였으며 용접 선에서의 온도상승이 뚜렷하게 나타나는 것을 볼 수 있다. LCA의 용접 비드 P₁ 으로부터 위치에 따른 온도상승은 Fig. 7에 나타난 바와 같다. 용접비드에서 온도 증가가 가장 크지만 용접부에서 멀리 떨어진 부위에서도 수백도의 온도 상승이 발생하는 것을 알 수 있으며 약 10분 정도 후에 거의 모든 위치에서 50°C 이하로 냉각되는 것을 볼 수 있다. 따라서 용접부에서의 냉각속도가 다른 위치보다 훨씬 빠른 것을 알 수 있다. 이와 같이 용접부에서의 열팽창과 수축이 상대적으로 크기 때문에 용접 열영향부에서의 잔류응력이 크게 발생하게 될 가능성이 있다.

3.2 열탄소성 해석

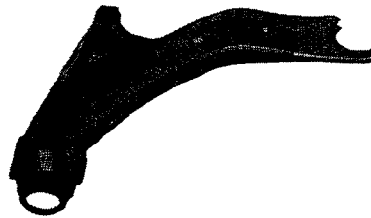
LCA의 열전달 해석으로부터 얻어진 온도분포 변화를 이용하여 열탄소성 해석을 수행하였다. 상변태로 인한 소성변형⁽⁷⁾은 고려하지 않았으며, 열응력 해석을 위한 가상일의 원리에 의한 운동 방정식의 약형은 식 (4)에 나타난 바와 같다.



(a) 10 sec



(b) 50 sec



(c) 150 sec

Fig. 7 Temperature distribution in the LCA with respect to elapsed welding time

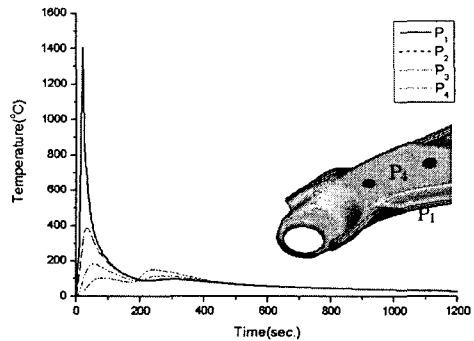


Fig. 8 Temperature history at the indicated points

$$\int_D \rho \bar{u}_i \bar{u}_i dD = \int_D \rho b_i \bar{u}_i dD + \int_{\partial D} t_i \bar{u}_i dD - \int_D \sigma_{ij} \bar{u}_{i,j} dD, \forall \bar{u}_i$$

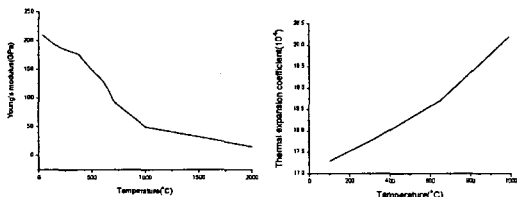
such that $\bar{u}_i = 0$ on ∂D_d (4)

응력증분 계산을 위한 구성방정식은 열변형률을 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

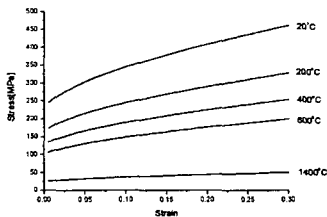
$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl} (\dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^T) \quad (5)$$

여기서, D_{ijkl} 은 4차의 탄성계수텐서이며 ϵ_{ij}^T 는 열변형률 텐서이다. 열팽창계수, 탄성계수, 응력변형률 선도 등을 온도의 함수로 고려하여 해석하였으며, Fig. 9에는 해석에 사용된 온도의존 물성치를 나타내었다.

탄성계수는 온도 증가에 따라 감소하며 열팽창계수는 증가하게 된다. 온도 증가에 따라 응력은 감소하며 경화효과도 작아진다. 열응력해석에서는 실제 용접 공정과 같은 구속조건을 적용하였다. LCA를 용접하기 위하여 하판의 구멍에 지그를 위치시키기 때문에 지그와 접촉하는 절점의 변위를 Z방향으로 구속하였으며 부쉬가 장착되는



(a) (b)



(c)

Fig. 9 Material properties in thermal elasto-plastic analysis: (a) Young's modulus; (b) Thermal expansion coefficient; (c) Stress-strain curves

부위와 볼조인트가 장착되는 위치는 6자유도를 구속하였다.

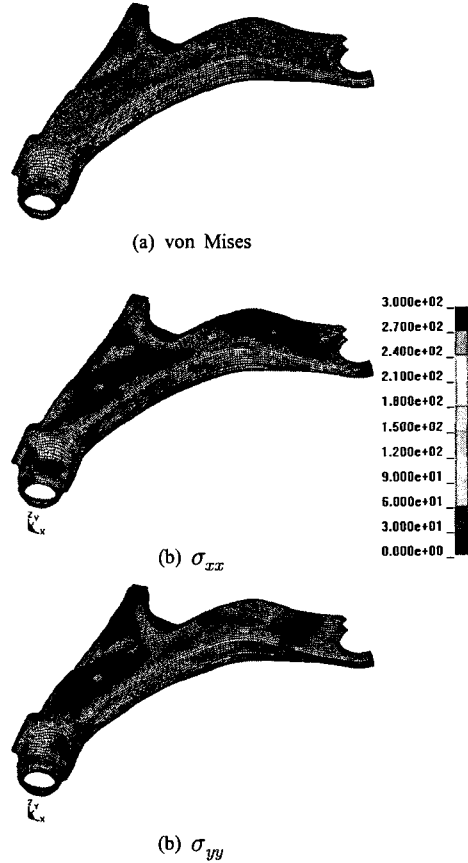


Fig. 10 Residual stress distribution in lower control arm

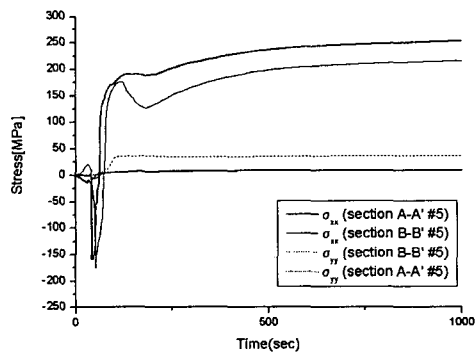


Fig. 11 Stress history at the location 5 in figure 4

Fig. 10은 열응력 해석으로 얻어진 셸 요소의 인장 응력 분포를 도시한 것이다. 인장 잔류응력이 부품의 내구수명을 저하시키기 때문에 인장 응력을 도시하였다. σ_{xx} 의 경우 단면 A-A', B-B'(Fig. 4 참조)에서 단면에 수직한 방향이 되므로 응력 비교가 가능하며, 측정값은 용접 열영향부에서 300 ~ 400MPa, 벽면부에 100 ~ 200MPa의 인장 잔류응력이 존재하는 것으로 나타났으며 해석 결과도 최대 약 300MPa의 인장 잔류응력이 벽면부에서 발생하는 것으로 나타났다. Fig. 5에 나타낸 측정된 인장응력 분포와 비교할 경우 벽면부에서의 인장응력 분포 경향이 비슷한 것을 볼 수 있다. Fig. 11은 단면 A-A', B-B'의 5번 위치에서의 응력의 변화를 도시한 것이다. 단면에 수직한 방향인 σ_{xx} 은 용접 초기에 압축이었으나 인장으로 바뀌는 것으로 나타났으며, σ_{yy} 는 이보다 작은 값으로 지속적인 인장 상태에 있는 것으로 나타났다. 열응력 해석 결과로 나타난 응력은 최대 약 300MPa로 측정 결과에 비하여 작았으며 이것은 측정 결과로 얻어진 응력 값에는 성형으로 인한 잔류응력이 함께 포함되어 있기 때문인 것으로 보인다.

3.3 변동하중하에서의 잔류응력 변화

변동하중을 받을 경우 잔류응력은 이완되는 것으로 알려져 있으며,⁽⁸⁻¹⁰⁾ 초기 몇 회의 반복 하중에서 큰 폭으로 완화된다. 따라서 LCA의 잔류응력이 변동하중 상태에 있을 때 어느 정도의 응력 이완 효과가 있는지 해석적 방법으로 알아보았다. 해석 모델은 Fig. 12에 나타난 바와 같이 부쉬부를 고정하였으며 x 방향으로 일정 하중을 가하였다.

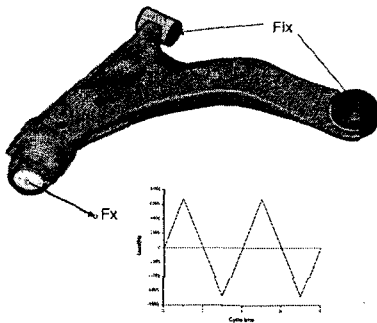


Fig. 12 Finite element model to find out residual stress re-distribution

Fig. 13에 보이는 바와 같이 2회의 반복하중 후 하중이 완전히 제거되었을 때 얻어진 응력 분포는 초기 응력 상태와는 다르게 되며 응력이 크게 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 14는 Fig. 13의 A점에서의 응력 변화를 도시한 것으로 초기에 약 250MPa의 응력을 갖고 있었지만 1회의 변동하중을 받은 후 응력은 150MPa로 크게 감소하였으며 그 다음 사이클에서는 응력 감소량이 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 용접으로 인한 잔류응력을 고려하여 부품의 내구수명을 예측하기 위해서는 이와 같이 잔류응력의 이완 및 재분포 특성을 고려하여야 할 것으로 보인다.

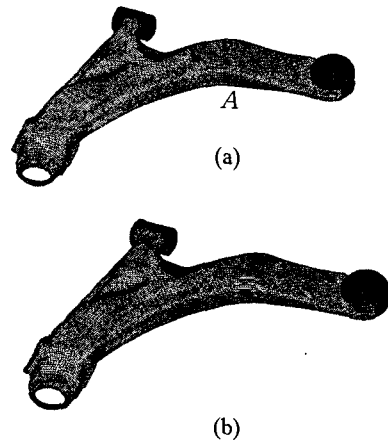


Fig. 13 Equivalent stress distribution after 2 load cycles: (a) initial state; (b) after 2 cycles

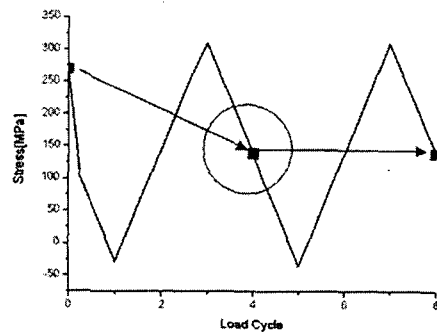


Fig. 14 Residual stress relaxation during a load cycle

해석으로 구해진 초기 잔류응력을 그대로 평균 응력(mean stress)으로 고려하여 내구해석을 수행하게 되면 예측되는 부품의 수명은 과도한 평균 응력효과로 인하여 매우 작아지게 된다. 이것은 시험결과와는 크게 다를 수 있으며 용접부의 과도한 보강 설계를 유도할 수 있기 때문에 설계시 많은 주의가 요구된다.^(11,12)

4. 결 론

본 연구에서는 자동차 현가계 부품 중 내구성 능이 중요한 부품의 하나인 LCA의 가공 공정 중 용접으로 인한 잔류응력의 발생을 유한요소해석을 통하여 분석하였다. 또한 비파괴 응력측정 장비를 이용하여 실제 부품의 잔류응력을 측정하였으며 해석결과와 비교하였다. 부품의 용접 열영향부에 약 300~400MPa의 인장 잔류응력이 측정되었으며, 열탄소성 해석을 통하여 얻어진 응력에 비하여 약간 큰 것으로 나타났다. 이것은 성형에 의한 잔류응력이 측정 결과에는 포함되었기 때문인 것으로 사료된다. 이와 같은 잔류응력은 부품의 성능에 영향을 미치게 되며 변동하중을 받을 경우 변화하게 되므로 반복하중을 받는 경우에 대하여 잔류응력의 이완 및 재분포 특성을 유한요소해석을 통하여 분석하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 자동차부품 핵심기반 기술개발 사업의 연구지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) James, M. N., 2005, "Design, Manufacture and Materials; Their Interaction and Role in Engineering Failures," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 12(5), pp. 662~678.
- (2) Steinwender, G., Gaier, C. and Unger, B., 1999, "Fatigue Simulation During the Design Process of Vehicle Structures," *ISTA '99 Conference*, Vienna, Paper 99SI011.
- (3) Han, M. S., Jeon, S. M., Suh, J. and Lee, J. H., 2003, "Fatigue Characteristics of SPFC590 Laser Welded Sheet Metal of Automobile Body Pannel," *Trans. of the KSAE*, Vol. 11, No. 1, pp.143~150.
- (4) Mathar, J., 1934, "Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes," *Trans. of ASME, Iron & Steel*, Vol. 56, pp. 245~249.
- (5) LS-DYNA, Version 970 User's Manual.
- (6) Huh, H. and Kang, W. J., 1997, "Electro-thermal Analysis of Electric Resistance Spot Welding Processes by a 3-D Finite Element Method," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol.63, pp.672~677.
- (7) Kim, J. W., Im, S. Y. and Kim, H. K., 2005, "Numerical Implementation of a Thermo-Elastic-Plastic Constitutive Equation in consideration of Transformation Plasticity in Welding," *Int. J. of Plasticity*, Vol 21(7), pp. 1383~1408.
- (8) Han, S. H., Lee, T. K. and Shin, B. C., 2002, "A Quantitative Estimation of Welding Residual Stress Relaxation for Fatigue Strength Analysis," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 26, No. 10, pp. 2018~2025.
- (9) Han, S. H., Han, J. W., Shin, B. C. and Kim, J. H., 2003, "Fatigue Life Estimation of Welded Components Considering Welding Residual Stress Relaxation and Its Mean Stress Effect," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 27, No. 1, pp. 175~182.
- (10) Goo, B. C. and Yang, S. Y., 2004, "Fatigue Life Evaluation Model of Welded Joints With Residual Stress," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 28, No. 9, pp. 1328~1336.
- (11) Radaj D., 1990, "Design and Analysis of Fatigue Resistant Welded Structures," Abington Publishing.
- (12) Chen, G., Liu, S.-D., Knoerr, L., Sato, K. and Liu, J., 2002, "Residual Forming Effects on Full Vehicle Frontal Impact and Body-in-White Durability Analysis," *SAE Technical Paper*, 2002-01-0640.