

HDM을 이용한 잔류응력측정과 압축·인장 잔류응력이 인가된 재료의 피로수명평가

백 승 엽^{*,†}

*영진전문대학 컴퓨터응용기계계열

Fatigue Life Evaluation on Compressive & Tensional Residual Stress Induced Materials and Residual Stress Measurement using Hole Drilling Method

Seung Yeb Baek^{*,†}

*Dept. of Mechanical Engineering, Yeungjin College, Daegu 702-721, Korea

†Corresponding author : sandos@hanmail.net

(Received November 7, 2012 ; Revised December 10, 2012 ; Accepted April 19, 2013)

Abstract

This paper Investigated the characteristics of residual stress in weld is composed of typical specimens, are investigated by using three dimensional thermal elasto-plastic FEM analysis. Numerically calculated residual stresses in the gas welds were then compared with experimental results obtained by the hole-drilling method. Using the stress amplitude $(\sigma_a)R$ at the hot spot point of gas weld, the relations obtained as the fatigue test results for typical specimens having various dimensions and shapes were systematically rearranged to obtain the $(\sigma_a)R-N_f$ relationship. It was found that more systematic and accurate evaluation of the fatigue strength of plug- and ring-type gas-welded joints can be achieved by using $(\sigma_a)R$.

Key Words : Residual stress, Fatigue design criterion, Thermal stress, Hole drilling method

1. 서 론

동적기계구조물인 자동차 및 철도차량들의 차체는 압연강판을 성형가공해서 외판과 보강재를 결합하여 제작 및 조립되며 이들을 일체화하는 수단으로 전기저항 점 용접(electric resistance spot welding)이나 가스용접(gas welding)이 이용되고 있다^{1,2)}. 따라서 용접 이음부에 대한 피로강도(fatigue strength)는 동적기계구조물의 전체적인 건전성과 내구성에 직접적인 영향을 미치므로 시스템의 장 수명 피로설계기준(fatigue design criterion)을 결정하기 위해서는 구조물의 가장 취약한 부분을 대상으로 정확한 응력해석과 체계적인 피로강도 평가(fatigue strength evaluation)가 필요하다. 그러나 용접구조물은 용접아크에 의해 발생하는 고온에 의해 판재내부에는 표면으로부터의 깊이에 따라 불균일

한 온도분포가 형성되고 용접 후에는 내부구속에 의해 팽창과 수축이 자유롭지 못함으로 인해 비탄성 소성변형의 잔류응력이 발생하게 된다. 이러한 잔류응력(residual stress)은 휨 강성과 접합부의 피로강도를 저하시키고 내구성 저하 및 피로균열 등으로 인한 구조적 파괴(fracture)의 원인이 된다. 또한 불가피하게 발생하는 잔류응력의 분포형태는 상당히 복잡하기 때문에 합리적이고 보편타당한 해석결과를 도출하기 어렵다.³⁾ 이러한 문제들 때문에 잔류응력을 고려한 피로강도평가에 관한 기존의 연구결과는 좀처럼 찾아보기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 대표적인 용접 이음재를 시험편을 대상으로 잔류응력평가 및 피로설계방법을 도출하기 위해 용접과정에서의 제 현상을 실제와 같이 구현하기 위해 열 사이클(heat cycle)에 의한 비선형 열 해석(non linear thermal analysis)과 열 응력(thermal

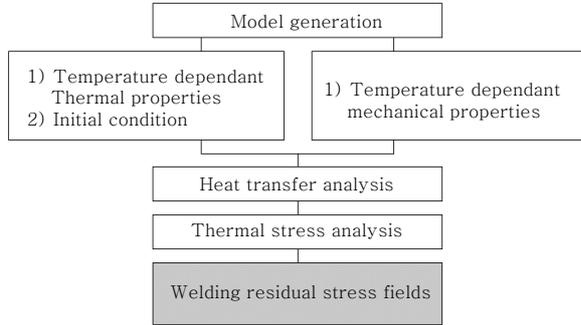


Fig. 1 Flow of residual stress analysis

stress) 해석을 수행하고 HDM 실험에 의한 잔류응력 값과 비교하여 잔류응력에 대한 정량적 분석을 하고자 하였다. 그리고 이러한 결과 값을 응력진폭-피로수명 $((\sigma_a)_R-N_f)$ 관계를 도출하여 전체적인 피로설계기준을 재정립하고자 하였다. Fig. 1은 본 연구의 잔류응력 해석과정(analysis process)을 나타낸 것이다.

2. 잔류응력분포해석

2.1 FEA 모델

대표적인 용접 이음형태인 플러그 용접(plug welding)과 링 용접(ring welding) 이음재에 대한 응력분포해석을 목적으로 Fig. 2와 같은 시뮬레이션 모델(simulation model)을 제작하였다. 또한 유한요소해석을 위한 모델의 재료는 철도차량차체 재료로 사용되고 있는 STS301L 판재를 적용하였고 재료에 대한 화학적 성분과 기계적 성질은 Tables 1, 2와 같다. 그리고 해석을 위한 용접금속에 대한 기계적 성질의 탄성계수는 모재의 탄성계수와 동일한 입력데이터(input data)로 사용하여 해석 하더라도 용접부 주위의 전체적인 응력

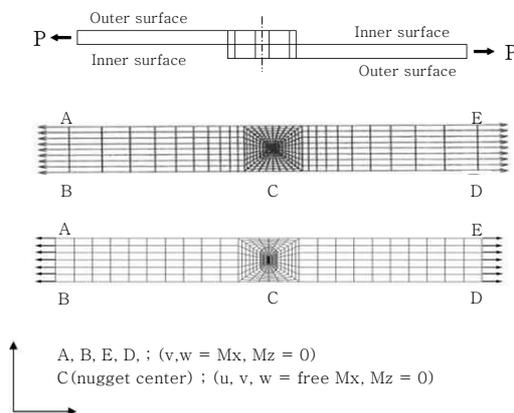


Fig. 2 3D FEA model of plug and ring type gas welded joint for stress analysis

Table 1 Chemical composition of the materials

| C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | N |
|------|------|------|------|-------|-----|-------|-----|
| 0.03 | 1.00 | 2.00 | 0.05 | 0.036 | 6~8 | 16~19 | 0.3 |

Table 2 Mechanical properties of materials

| Processing management | Symbol | Yield S. MPa (kgf/mm ²) | Tensile S. MPa (kgf/mm ²) | Elongation (%) |
|-----------------------|--------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------|
| Solution T. | LT | ≥ 215.6(22) | ≥ 548.8(56) | ≥ 44 |
| Skin pass Mill | DLT | ≥ 343.0(35) | ≥ 686.0(70) | ≥ 39 |
| | ST | ≥ 411.6(42) | ≥ 754.6(77) | ≥ 34 |
| | HT | ≥ 686.0(70) | ≥ 931.0 (95) | ≥ 19 |

Yield S. : Yield Strength / Tensile S. : Tensile Strength
Solution T. : Solution Treatment

분포에는 큰 영향이 없음을 밝힌 연구결과⁴⁾와 용접금속은 모재에 비해 경도(hardness)와 강도(strength) 등의 기계적 성질이 상대적으로 크다는 사실을 바탕으로 용접금속의 탄성계수를 모재보다 큰 HT 재료의 탄성계수를 용접부의 기계적 성질로 적용하였으며 해석에 사용된 요소는 3차원 육면체 요소로 모델링하였고, 요소수와 절점 수는 101,054, 72,145개 이고, 모델링과 탄소성해석은 상용프로그램인 IDEAS 11nx와 ABAQUS 6.7을 사용하였다.

2.2 수치해석 방법

잔류응력에 대한 수치해석은 열전달 해석과 열 응력 해석 두 가지 부분으로 수행하였다. 먼저 열전달 해석의 경계조건(boundary condition)은 열전달(heat transfer) 부분과 열전도(convection) 부분으로 나누어 설정하고 방열온도조건(convection temperature condition)을 20°C, 열전달 온도를 1,500°C로 설정하여 열전달 해석을 수행하였다. 그리고 열응력 해석의 경계조건은 시험편의 양끝단과 시험편의 중심 node의 X, Y, Z축을 고정(clamping)하여 D-flux 값을 이용하여 1단계는 가열(Heating), 2단계는 냉각(cooling)하여 해석을 수행하였다. 그러나 용융용접에 의한 재료의 상변화 및 성질변화, 대류(convection), 팽창, 수축 등의 현상을 실제와 같이 재현하는 것이 타당하겠지만 이렇게 데이터를 확보하는 것은 사실상 불가능하므로 본 연구에서는 온도에 의존적인 재료성질, 즉 탄성계수, 항복강도, 열팽창계수, 열전도도 등만을 고려하여 Table 3과 같은 온도조건을 적용하여 Fig. 3과 같은 경계조건으로 비선형 유한요소해석을 수행하였다.

Table 3 Temperature conditions for the welding residual stress analysis

| Young's modulus(MPa) | C.T.E | Density | T.C.(W/mk) |
|----------------------|-------|---------|------------|
| 19.35(Base metal) | 12.3 | 8012 | 16.7 |
| 21.91(Joint metal) | | | |

C.T.E : Coefficient of Linear thermal expansion
T.C. : Thermal Conductivity

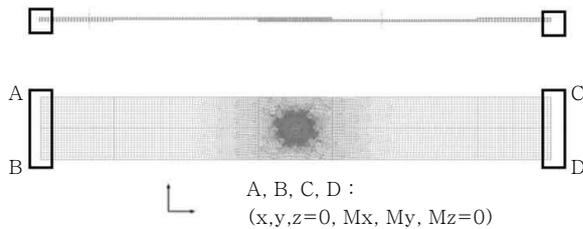


Fig. 3 Residual stress analysis of TS type gas welded lap joints

2.3 잔류응력측정(HDM)

잔류응력측정은 ASTM E837에서 제안하고 있는 천공법(HDM: Hole Drilling Method)을 기준으로 수행하였다. 시험편은 수치해석에 적용했던 STS301L 재료를 사용하였고 Fig. 4와 같은 조건으로 시험편을 제작하였다. 또한 잔류응력을 측정하기 위한 시험 장치는 Photo 1과 같이 밀링가이드(milling guide)를 사용하여 Fig. 5와 같이 용접시험편에 밀착된 스트레인 게이지(strain gauge) 중심에 정밀하게 천공하였고 06GRE-120 로제트 형(rossette type) 게이지를 사용하였다. 그리고 드릴작업 시 휨이나 진동에 의해 측정데이터가 영향을 받는 문제를 고려하기 위해 시험편을 완전 고정

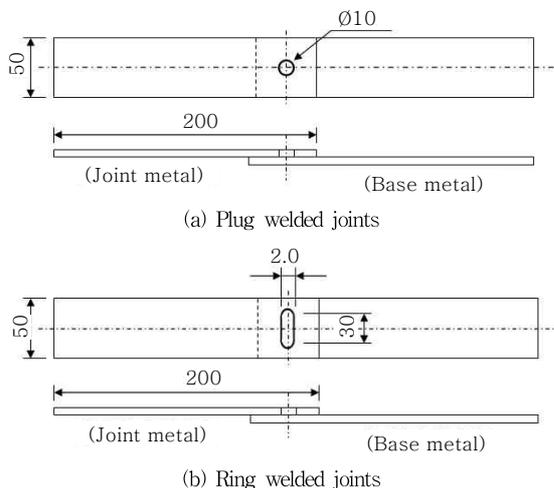


Fig. 4 TS-type welded Specimens subject to tensile- shear load

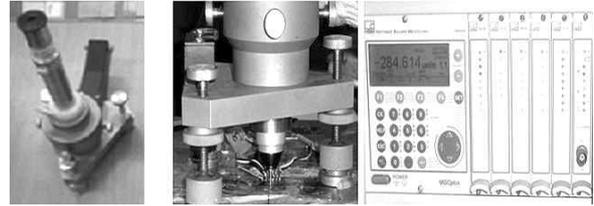


Photo 1 Equipment for Welding residual stress measurement

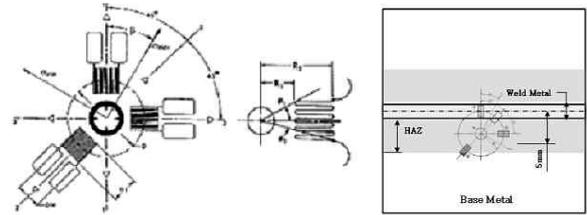


Fig. 5 Strain gauge location for the welding residual stress measurement

시킨 상태에서 120rpm의 저속 드릴링 작업으로 정밀하게 천공하였다. 잔류응력 측정은 게이지를 용접비드 중심에 1개, 5mm 떨어진 부근에 2개, 10mm 떨어진 곳에 2개를 부착하여 잔류 응력을 측정하였으며 게이지 위치는 Fig. 5와 같은 위치로 부착하였다. 측정방법은 잔류 응력을 측정할 위치의 표면을 샌드페이퍼(#1,000~1,500)로 경면 연마한 후 표면을 깨끗이 처리하여 홀드릴용 3축 스트레인 게이지를 부착하고, 드릴을 게이지 중앙에 고정된 후 약 2.0mm 깊이로 천공하면서 게이지의 변화량을 측정하였다. 그리고 측정한 잔류응력 값의 편차를 줄이기 위해 동일조건에서 3회 반복시험을 수행하여 평균값을 적용하였다.

2.3 해석결과

Fig. 6은 잔류응력에 대한 유한요소해석과 실험해석 결과를 비교한 것이다. 우선, 수치해석결과는 용접비드 중심에서 350MPa, 열 영향 부(HAZ)에서 300MPa (인장), 용접 비드중심에서 18 mm 떨어진 곳에서 220MPa(압축)로 나타났으며 실험해석결과는 용접비드(weld bead) 중심에서 35mm 위치한 부분에서 0MPa, 최대 인장력은 490MPa로 나타났다. 두 가지 해석 모두 용접비드와 열 영향 부에서 높은 인장 응력이 발생하였다. 그러나 용접비드 중심에서 18mm 떨어진 곳에서의 해석결과 값의 차이는 실험해석 시 표면을 경면 연마하는 과정에서 일부 잔류 응력 값이 소실되었고 수치해석의 경우 실제 용접과정에서 발생하는 열적·야금학적 제 현상들과 온도 의존적인 재료물성들이 일부 고려되지 않았기 때문에 나타난 현상으로 분석된다.

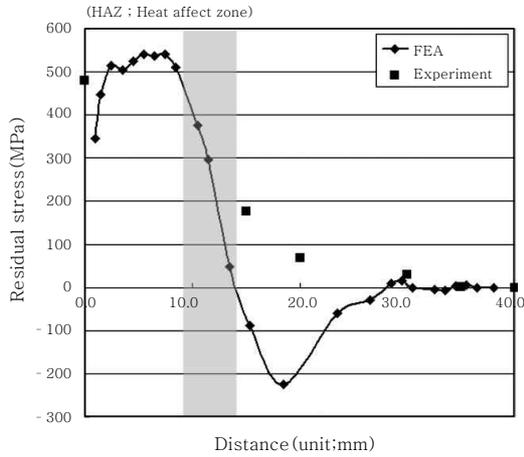


Fig. 6 Longitudinal welding residual stress distribution at the plug and ring welded joints

그러나 전체적인 정성적으로 실험해석과 수치해석 결과의 경향성은 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

3. 잔류응력을 고려한 피로강도평가

3.1 피로강도평가

피로강도평가를 하기위한 시험편 형상 및 종류와 용접조건은 Fig. 4, Tables 4, 5에 나타내었다. 시험 장치는 서보 유압식 피로 시험기(MTS, 용량 : 10Ton)에 자체 설계·제작한 면압식 지그를 사용하였다. 하중의 반복속도는 30Hz로 하고, 부하형태는 하중 비($R=P_{min}/P_{max}$)가 0 ($P_{min}=0$)인 정현파(sine wave)로 하였다. 무한수명의 피로한도(fatigue limit)는 각 시험편에 인가된 인장강도(tensile strength)의 70%에서부터 10%씩 하중을 감소시키면서 JIS Z 2273, JIS Z 3103에 의거 10^7 cycles까지 피로균열이 발생하지 않는 하중을 피로한도로 하였다. 그 결과 피로강도에 대한 기하학적 인자들의 영향을 비교·평가할 수는 있었지만, 가스용접과정에서 발생된 용접금속의 야금학

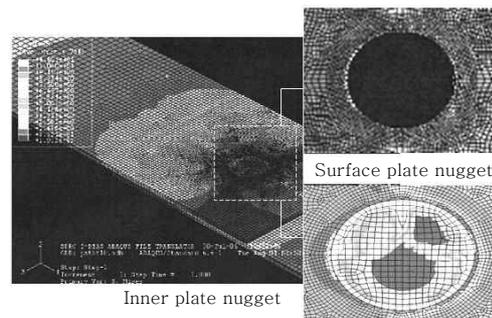
Table 4 Gas welding condition

| Welding | GMAW Semi-auto robot | |
|-------------------|----------------------|-------------|
| Welding Condition | Welding time(Cycles) | 85 |
| | Pass | 1 |
| | Current(A) | 100~200 |
| | Voltage range(V) | 12~14 |
| | Travel speed(cm/min) | 8~12 |
| | GAS(%) | AR 99% |
| | Flow rate(l/min) | 18~20 |
| | Filler metal | AWS ER 308L |

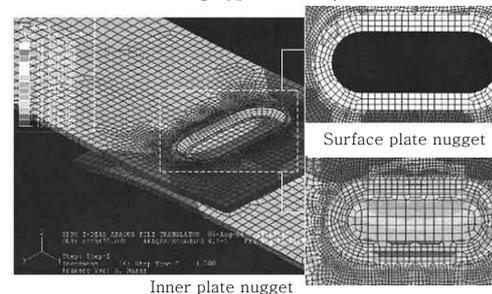
Table 5 Specimen types for evaluation of stress distribution

| Welding type (Lapped sheets) | type | Welded joint type (plate thickness) | Nugget diameter(mm) |
|------------------------------|------|-------------------------------------|---------------------|
| Plug type (2L) | 2P-1 | ST(1.0)+ST(1.5) | Ø10 |
| | 2P-2 | ST(1.5)+HT(2.5) | Ø10 |
| | 2P-3 | ST(2.0)+DLT(2.0) | Ø7 |
| | 2P-4 | HT(1.5)+HT(2.5) | Ø7 |
| | 2P-5 | DLT(1.5)+DLT(2.0) | Ø7 |
| Ring type (2L) | 2R-1 | ST(1.0)+ST(1.5) | 2.0X30 |
| | 2R-2 | ST(1.5)+HT(2.5) | 2.0X30 |
| | 2R-3 | ST(2.0)+DLT(2.0) | 2.0X30 |
| | 2R-4 | HT(1.5)+HT(2.5) | 2.0X30 |
| | 2R-5 | DLT(1.5)+DLT(2.0) | 2.0X30 |

적 변화와 용접잔류응력의 복합적인 영향으로 전체적인 데이터 분산 폭이 피로설계한도를 결정하는데 지장을 줄 만큼 매우 크기 때문에 종합적으로 고려한 피로설계 기준을 결정하기는 매우 어려웠다. 그래서 이러한 문제를 개선하기 위해 Fig. 7과 같이 최대 주응력(σ_{max})으로 응력분포해석을 재정리한 결과 용접지단(weld toe)부와 열 영향부에서 발생하고 있음을 확인 할 수 있었다. 그리고 이러한 응력분포해석 결과를 가지고 $\Delta\sigma-N_f$ 관계를 도출하여 피로데이터를 재정리한 결과 Fig. 8의 그래프를 산출 하였다. 전체적인 피로데이터의 분산이 $\Delta P-N_f$ 관계에 비해서 상당히 줄어들었음을 확인할 수 있었으며 종합적인 피로설계기준은 100~200MPa 정도로 평가되었다. 따라서 용접이음부에 대한 여러 가지



(a) Plug type welded joint



(b) Ring type welded joint

Fig. 7 Stress distribution of gas welded joints

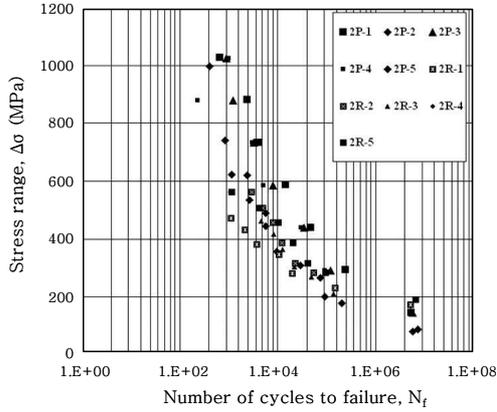


Fig. 8 $\Delta\sigma$ - N_f relation of the various type gas welded joints

기하학적 형상과 재질을 고려한 피로설계는 피로균열이 발생 및 성장하는 위치의 최대 주응력으로 피로강도를 평가하여 설계기준을 정하는 것이 보다 효과적이고 바람직할 것으로 판단된다.

3.2 잔류응력을 고려한 피로강도평가

용접잔류응력은 용접 이음부의 균열발생 기전력(driving force)으로 작용할 뿐 만 아니라 파단면의 인장력이 작용하는 방향과 수직으로 형성되고 파단면 부근에는 소성변형이 거의 일어나지 않는 취성파괴의 원인이 되는 것으로 분석되었다⁵⁾. 따라서 구조물에 대한 정확한 피로설계를 하기 위해서는 용접 시 발생하는 열응력에 의한 잔류응력발생은 반드시 고려해서 기하학적 형상과 재질의 영향이 고려된 종합적이고 체계적인 피로설계기준을 도출할 수 있는 방법이 필요하다. 그래서 본 연구에서는 응력 진폭($\Delta\sigma$)을 피로균열의 발단인 hot spot에서의 최대 응력으로 발생됨을 고려하여 용접 이음부의 체계적인 피로강도평가를 위한 파라미터로써 사용하였다. 한편 용접잔류응력은 가스용접과정에서 발생되므로 피로강도평가를 위해서는 이를 포함한 평가를 하기 위해 아래와 같이 용접잔류응력을 고려한 수정된 굿맨식(Goodman function)을 적용하였다.

$$(\sigma_a)_R = S_e \left(1 - \frac{\sigma_{mean} + \sigma_{res.}}{S_u} \right) \quad (1)$$

(1) 식에 $\sigma_{mean} = \sigma_a = \frac{\sigma_{max}}{2}$ 대입하면,

$$(\sigma_a)_R = S_e \left(1 - \frac{\sigma_{max} + 2\sigma_{res.}}{2S_u} \right)$$

$(\sigma_a)_R$; 용접잔류응력이 포함된 응력진폭($\sigma_{res.}$)

σ_{MAX} ; 용접잔류응력을 고려하지 않은 hot spot에서의 최대응력

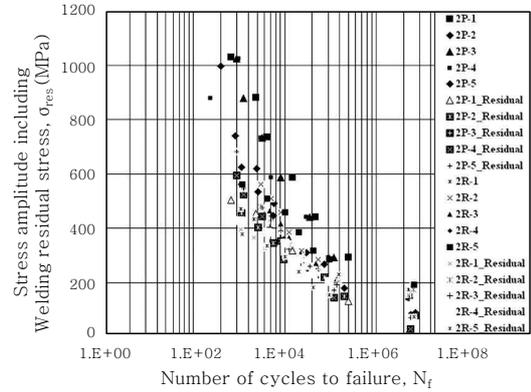


Fig. 9 $(\Delta\sigma_a)_R$ - N_f relation of the various type gas welded joints

Fig. 9는 Fig. 8의 $\Delta\sigma$ - N_f 관계를 $(\sigma_a)_R$ - N_f 관계로 재처리한 것으로 잔류 응력을 고려했을 때, 플러그 타입 용접 이음재의 피로한도는 약 150MPa이고, 링 타입은 약 180MPa로 평가되었다. 잔류 응력을 고려하지 않은 경우에는 플러그 용접은 약 220MPa, 링 용접은 250MPa로 평가되었다. 이 값은 잔류 응력을 고려하지 않았을 때와 고려했을 때 피로 한도 값을 백분율로 비교하면 플러그 용접은 약 32%, 링 용접은 약 28% 정도 낮게 평가된 것으로 설계자가 용접잔류응력을 고려하지 않았을 경우, 피로설계기준을 각각 32%, 28% 정도 과대평가할 수 있음을 의미하는 것이다.

4. 결 론

1) 플러그 용접 이음재 및 링 용접 이음부의 용접잔류응력은 실험값은 최대 490MPa(인장)이었다. 그리고 수치해석의 경우 HAZ부에서 300MPa(인장)이고 용접 비드 중심으로부터 18 mm 부근에서는 220MPa(압축)이 발생 하는 것으로 평가되었다.

2) 잔류 응력을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때의 피로한도를 비교했을 때 잔류 응력을 고려하지 않았을 경우의 값보다 플러그 용접은 32%, 링 용접은 28% 낮게 평가되었다. 이것은 설계자가 용접잔류응력을 고려하지 않았을 경우 피로설계기준을 과대평가할 수 있음을 확인하였다. 따라서 설계자는 설계 시 잔류응력을 반드시 고려해서 피로설계기준을 정해야 될 것이다.

참 고 문 헌

1. Lee, J. H. and Yoo, C. D. : Fatigue Damage Parameter of Spot Welded Joints Under Proportional Loading, International Journal Of Automotive Technology (2005) 285-291

2. Bae. D. H., Niisawa. J. E. and Tomioka. N. : Theoretical analysis of stress distribution of single spot welded lap joint under tension-shear load, Transection of JSAE, 39(1988), 610-643(in Korean)
3. Cho. S. Y., Kim. C. H. and Hong. J. K. : Numerical Analysis of Welding Residual Stress Using Heat Source Models for the Multi-pass Weldment, Journal of Mechanical Science and Technology, 16(2002), 20-41
4. Nam. T. H., Jung. W. S. and Shon. I. S. : Fatigue Design of SUS301L Spot Welded Multi-lap Joints subjected to Tensile Shear Load, The Korean Welding and Joining Society, 28(2002), 75-83 (in Korean)
5. Kim. C. H., Cho. S. Y. and Kim. B. K. : The effects of geometrical Shapes and Post Weld Heat Treatment on the Welding Residual Stress Distribution of Multi-welded Pipe Weld, Journal of KWS, 19, 49-57 (in Korean)