

잔류응력을 고려한 IB형 spot 용접이음재의 피로강도 평가

손 일선(쌍용자동차), 배 동호(성균관대학교 기계공학부)

Fatigue Strength Evaluation of IB-Type Spot Welded Lap Joint considered Residual Stress

I. S. Sohn(Ssangyong Motors), D. H. Bae(SungKyunKwan University)

Abstract

In systematic and orderly estimation of fatigue strength of the spot welded lap joints, because the influence of residual stress on fatigue crack initiation and growth is not negligible, there need to estimate fatigue strength considered residual stress at near spot weld part of the lap joints. Therefore, in this thesis, performed stress distribution and residual stress analysis at near the spot weld part by F.E.M and X-ray diffraction method, and obtained the maximum principal stress considered residual stress at nugget edge by superposing their results. From the results obtained above, we could find that fatigue strength of the IB-type spot welded lap joints was rearranged by the maximum principal stress considered residual stress at nugget edge and was entirely low about 13 percents compare with that neglected residual stress.

주요기술용어: Fatigue Strength(피로강도), Residual Stress(잔류응력), F.E.M(유한요소법), X-ray diffraction Method(X선 회절법), Maximum Principal Stress(최대주응력)

1. 서 론

Spot 용접이음재에 대한 응력분포 상황을 해석하고, 피로강도를 평가하는 것은 차체의 강성과 내구성 향상을 위한 설계의 필수적 사항이다. 이와 관련하여, 지금까지 많은 연구자들이 여러 가지 형태의 spot 용접이음재와 골조부재(Structural Member)들에 관한 응력해석과 피로강도를 이론과 수치해석 및 실험적으로 수행해왔고, 그 실적도 상당히 축척 되어 있기도 하다.^[1] 그런데, spot 용접부의 응력분포 상황을 이론과 유한요소법으로 해석함에 있어서는 용접시 입열량에 의한 spot 용접 너깃단의 잔류응력(Residual Stress)이 고려되어야 타당하나 해석상 어려움 때문에 지금까지 이를 고려하지 않은 탄성학적 입장에서만 해석이 수행되어 왔다. 그러나, spot 용접부의 피로강도를 통일적이고 체계적으로 평가함에 있어서, 피로균열의 발생과 성장기구(Mechanism)에 대한 용접 잔류응력의 영향은 무시될 수 없는 사항이므로 용접 잔류응력이 고려된 실제적인 피로해석이 이루어져야 할 것이다. 따라서, 본 연구에서는 IB형 일점 spot 용접이음재의 용접부 너깃주위에 대한 응력분포와 응력집중을 유한요소법과 X-ray 회절법으로 해석하고, 얻어진 결과를 중첩(Superposition)함으로써, 잔류응력이 고려된 너깃단 최대주응력으로 피로강도를 재평가하고자 하였다.

2. 유한요소법에 의한 응력해석

2.1 해석 Model

IB형 일점 spot 용접이음재에 인장-전단 하중에 의한 면내 굽힘력(In-plane bending force)이 가해지면 박판 특유의 복잡한 변형형태를 나타낼 뿐만 아니라, 피로균열은 부하측 내표면 너깃단에서 발생 및 성장하여 외표면으로 나타나는 것이 일반적이다. 이 때문에 내표면 너깃단 주위의 응력분포와 변형상태를 면밀히 해석하는 것은 피로균열 발생기구를 파악하는데 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 좌표계의 원점을 너깃 중앙에 설정하여 응력집중 범위를 쉽게 확인 할 수 있도록 하였다. 3차원모델의 기본형상은 판 폭(W)이 30.0mm, 겹침길이(2L)가 30.0mm, 두께(t)가 1.0mm이며 이음각(θ)의 크기를 2.5° 로 설정하였고, 이음각, 판 폭, 겹침길이 및 두께 등의 기하학적 영향을 조사하였다. 해석은 전 모델에 단위면적당 9.81MPa의 하중을 축방향으로 가하여 수행되었으며, 상·하평판의 요소분할은 공통적이다. 직경 6mm의 너깃원주의 각도확인을 쉽게 하기 위해서 원주를 각각 5도씩 분할하였고, 너깃내부는 사각형 요소를 적용하였으며, 두께는 상·하 평판 두께의 2배가 되도록 일체화하여 성형시키고, 종단성계수(Young's Modulus) E를 모재보다 80% 크게 설정하여 계산하였다. 사용된 해석프로그램은 MSC/Nastran, EMRC/Nisa 및 SDRC/Ideas를 각각 사용하였다. Fig.1은 인장-전단하중을 받는 일점 spot 용접이음재의 3차원 해석모델을 보여준다.

2.2 해석결과

Fig.2는 이음각 $\theta=2.5^\circ$ 에 대한 시편 내표면 spot 용접점 주위의 주응력분포를 나타낸 것이다. 시편에 인장-전단하중이 작용함으로써 응력분포에 실질적으로 관여하는 분담하중인 면내하중과 면내 굽힘모우멘트 및 면외 굽힘모우멘트의 조합에 의해 야기되는 최대주응력(σ_{1max})의 발생 범위는 시편 길이방향의 중심선으로부터 인장-전단력에 의한 회전변형 방향과 반대방향으로 $-20^\circ \sim +40^\circ$ 범위 내에서 발생하였으며, 너깃을 중심으로한 부하측 영역에서는 인장응력이 넓게

분포하고, 이음각도가 증가할수록 인장응력의 분포영역이 시편의 회전방향으로 이동하였다. 그리고, 이음각이 5° 이상인 경우에는 부하측과 부하측 반대쪽 너깃단에서도 인장응력이 발생함을 관찰 할 수 있었는데, 이것은 동일한 인장-전단 하중 하에서 시편의 이음각도가 클수록 굽힘과 면내 비틀림 변형이 커지기 때문인 것으로 간주된다. 또 spot용접 너깃내부에 있어서는 이음각이 클수록 면내 비틀림 변형이 커져 응력이 증가되는 경향을 보였다.

3. 잔류응력의 실험해석

3.1 X-ray 회절법의 원리

다결정 집합체인 금속재료 표면에 특정 파장($\lambda \text{ \AA}$)을 갖는 X-선을 투사하여 인장·압축 응력에 의해 변화된 격자 면간 거리($d \text{ \AA}$)의 차로 야기되는 입사 X-선의 회절각(2θ)을 측정함으로써 잔류응력을 구하는 방법이 X-선 회절에 의한 잔류응력 측정원리이다.^[2]

즉, 회절조건은 $n\lambda = 2d\sin\theta$ ----- 1)

여기서, n: 임의의 상수, θ : Bragg각

1)의 회절조건을 만족하는 X-선을 다결정 집합체인 재료표면에 조사하면, Fig. 3에서 입사각 ψ_0 와 ψ 의 관계는 다음과 같다.

$$\psi = \psi_0 \pm \eta \text{ ----- 2)}$$

$$\eta = 90^\circ - \theta \text{ ----- 3)}$$

X-선에 의한 잔류응력 측정방법중에서 $\sin^2\psi$ 법을 이용하여 회절각(2θ)과 $\sin^2\psi$ 에 의한 미분량을

$$\frac{\partial 2\theta}{\partial \sin^2\psi}$$

를 구하면, 다음 식에 의해 잔류응력을 얻을 수 있다. 즉,

$$\sigma = \frac{-E}{2(1+\nu)} \cot \theta_0 \frac{\pi}{180} \frac{\partial 2\theta}{\partial \sin^2(\psi_0 \pm \eta)} \text{ -- 4)}$$

$$K \equiv \frac{-E}{2(1+\nu)} \cot \theta_0 \frac{\pi}{180} \text{ ----- 5)}$$

여기서, σ : 잔류응력 (kg/mm²)

E: Young's Modulus (kg/mm²)

ν : Poisson Ratio, θ_0 : 무응력 Bragg각

2θ : 회절각, K: 응력정수 (kg/mm²)

단, ψ_0 는 3점 이상을 측정하여 구배를 결정해야

한다.^[3]

3.2 실험장치 및 방법

IB형 spot 용접이음재의 용접부에 대한 용접 잔류응력을 해석하기 위하여 X-선 응력 측정장치(RIGAKU사 model : MSF-2M)를 사용하였다. 측정방법은 시편표면에 X-선 입사각(ϕ_0)을 각각 0° , 15° , 30° 및 45° 로 설정하고, 전압은 30kV, 전류는 6mA 상태로 조사하였다. 용접 잔류응력의 측정은 용접부의 중심에서 너깃 방향으로 각각 3회씩 측정한 뒤, 용접부 너깃단에서 그 측정치의 평균값을 용접 잔류응력으로 취하였다.

3.3 해석결과

Fig. 4는 X-선 회절법을 이용하여 IB형 spot 용접이음재의 용접부에 대한 용접 잔류응력을 측정된 결과이다. 측정결과에 의하면, 용접부 너깃의 중심부에는 높은 인장 잔류응력이 존재하고, 너깃단으로 이동하면서 압축 잔류응력으로 변화되다가 너깃단으로부터 열영향부(Heat Affected Zone)에 이르러 최대 압축응력이 존재함을 알 수 있다. 너깃 중심부에서 인장상태의 잔류응력이 존재하는 것은 용접시 모재가 전기저항열(Joule 열)에 의한 반 용융상태에서 전극 가압력에 의해 외부로 압출됨과 동시에 용접 열 사이클(가열→냉각)동안의 팽창과 수축에 의한 것으로 간주되며, 너깃중심부로부터 너깃단 방향으로 측정위치의 변화에 따라 압축 잔류응력으로 변화되는 것은 모재가 너깃 외부로 이동하지 못하고 정지됨으로서 야기된 결과로 생각된다. 그리고, 열 영향부에서 용접 열 사이클동안의 팽창과 수축에 의해 압축 잔류응력이 발생하는 것은 용접부에서 발생될 수 있는 일반적 현상이며, 특히 용접부에서 비교적 떨어진 모재부의 외표면에 압축상태의 응력이 분포하는 것은 용접시 전극 가압력에 의해 야기된 용접부 주위의 굽힘변형의 영향 때문인 것으로 사료된다. Fig. 4에서 용접부 너깃단의 잔류응력은 압축 잔류응력이고, 그 크기는 40.5 MPa임을 알 수 있다.

4. 잔류응력을 고려한 피로강도 평가

Fig. 5의 하중-피로수명의 관계를 나타낸 $\Delta P-N$, 선도^[4]는 기하학적 영향에 대한 실험

치의 분산 폭이 커서 피로강도에 대한 시편의 기하학적 영향을 정확히 파악하기 어려울 뿐만 아니라, 실 구조물의 장수명 설계를 위한 통일적인 설계기준을 설정하기도 어렵다. 이러한 문제를 개선하기 위해서 배동호^[5]등은 spot용접부 너깃단의 최대응력으로 여러 가지 형상을 갖는 spot용접이음재의 피로강도를 Fig.6과 같이 통일적으로 평가하는 방법을 제시한 바 있다. 그런데, 이경우의 spot 용접부 너깃단 최대주응력(σ_{1max})

은 유한요소법 해석시 용접 잔류응력이 고려되지 않는 결과이며, 앞에서 언급한 바와 같이 spot 용접이음재의 내표면 너깃단에 있어서 피로균열의 발생 및 성장에 대한 용접 잔류응력의 영향은 무시할 수 없기 때문에 용접 잔류응력이 고려된 피로강도 평가가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 2, 3절에서 수행한 수치해석과 실험해석 결과를 중첩하여 얻어진 용접부 너깃단 최대주응력으로 용접 잔류응력을 고려한 피로강도를 평가하고자 하였다. Fig. 7은 Fig. 5의 IB형 일점 spot용접이음재에 대한 $\Delta P-N$, 관계를 잔류응력을 고려한

spot 용접이음재 내표면의 너깃단 최대주응력으로 재정리 한 것이다. 두 경우 모두 다 Fig. 5에 비하여 여러 가지 형상을 갖는 IB형 spot 용접이음재의 피로강도가 통일적으로 재정리됨을 알 수 있고, 용접 잔류응력을 고려한 경우는 고려하지 않는 것에 비해 용접이음재의 피로강도가 대체로 13%정도 낮은 결과를 나타내었다.

5. 결론

spot 용접구조물의 장수명 설계기준을 확립하기 위한 기초연구로서, spot 용접이음재의 피로수명에 영향을 미치는 용접부의 용접 잔류응력을 X선 회절법을 이용하여 측정하고, FEM 해석결과와 중첩함으로써, 잔류응력을 고려한 최대주응력을 구하였다. 이를 실 구조물 설계에 반영하고자 피로실험을 통하여 얻어진 $\Delta P-N$, 관계

를 잔류응력을 고려한 용접부 너깃단 최대주응력으로 재정리하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) X선 회절법을 이용하여 구한 spot 용접부 너깃단에서의 잔류응력은 압축 잔류응력이고, 그 크기는 40.5 MPa 정도이다.
- 2) Spot 용접부 너깃단에서의 잔류응력을 고려한 최대주응력은 잔류응력을 고려하지 않은 경우 보다 13.3%의 차이를 나타낸다.
- 3) Spot 용접구조물의 장수명 설계를 위해서는 용접부의 용접 잔류응력을 고려함이 타당하다고 사료된다.

6. 참고 문헌

1. 배 동호, "인장-전단하중을 받는 일점 spot 용접이음재의 파괴역학적 피로강도 평가", 한국자동차공학회지 제13권 5호, pp. 42 ~ 50, 1991.
2. 임 창현, "비파괴 검사공학", 기전연구소, pp. 140 ~ 141, 1987.
3. RIGAKU, X선 응력측정장치 MANUAL, pp. 1 ~ 16, 1990.
4. 정 원석, 구 재민, 손 일선, 배 동호, "인장-전단하중을 받는 IB형 일점 spot 용접이음재의 응력분포와 피로강도 평가", 한국자동차공학회 96년도 추계학술대회논문집, pp. 25 ~ 31, 1996.
5. D.H. Bae, et al, "Stress Distribution and Fatigue Strength Evaluation of a Single Elliptical Spot Welded Lap Joint under Tension-Shear Load", Transaction of JSAE, No. 39, pp. 98 ~ 104, 1988.

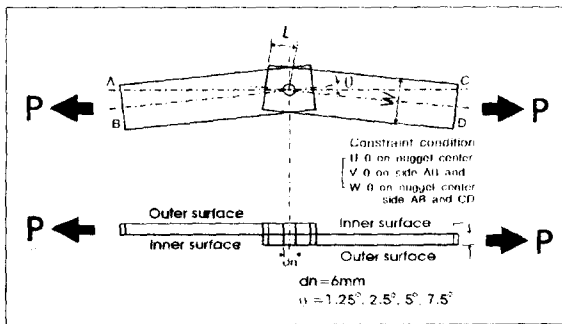


Fig. 1 인장-전단하중을 받는 일점 spot 용접이음재의 3차원 모델

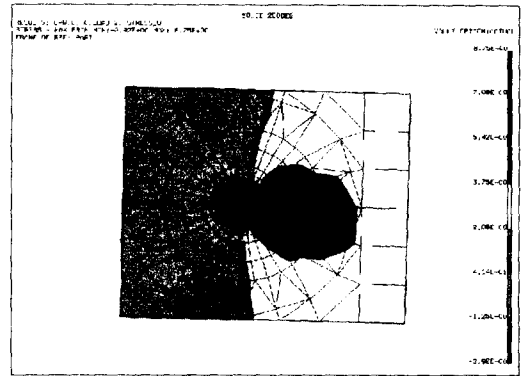


Fig. 2 인장-전단하중을 받는 일점 spot 용접이음재의 응력분포

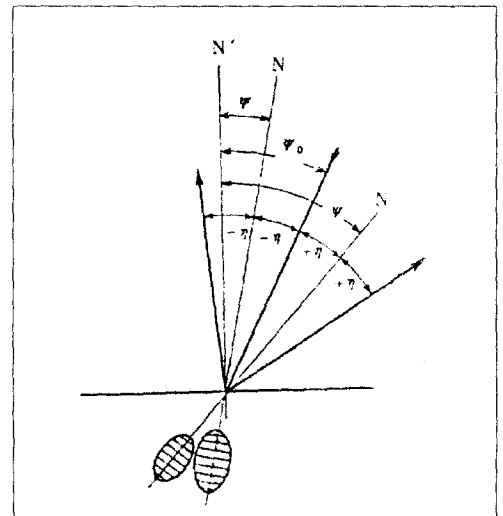


Fig. 3 Relation between input angle (ψ_0) and output angle (ψ)

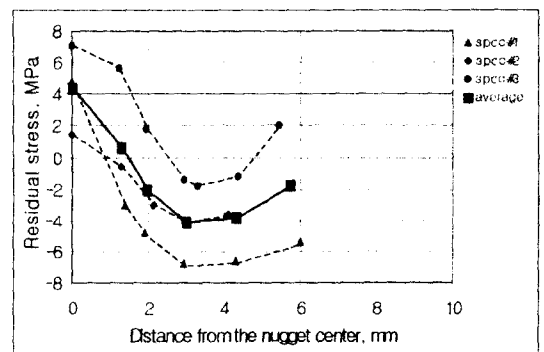


Fig. 5 X선 회절법을 이용한 너깃단에서 용접 잔류응력 해석결과

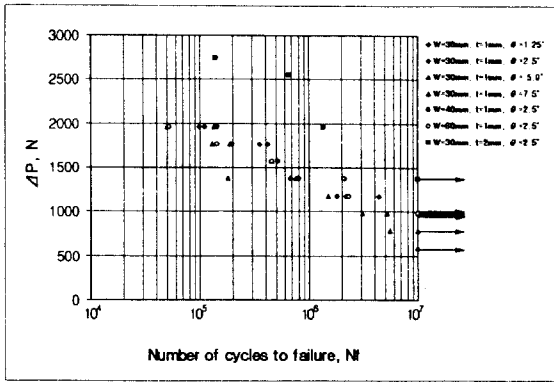


Fig. 6 Spot 용접이음재의 피로하중-수명 ($\Delta P - N_f$) 관계

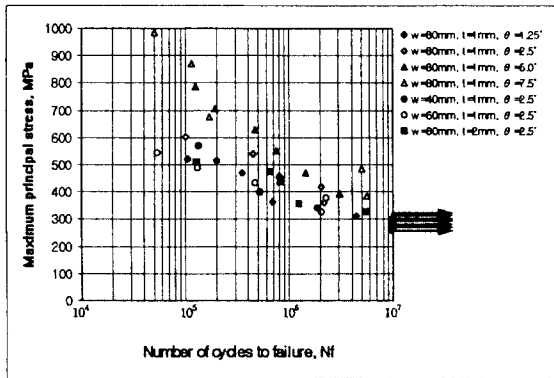


Fig. 7 Spot 용접이음재의 최대주응력-피로수명 ($\Delta \sigma_{1max} - N_f$) 관계

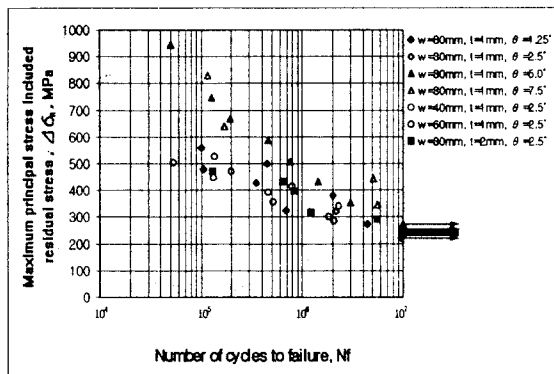


Fig. 8 잔류응력을 고려한 최대주응력-피로수명 ($\Delta \sigma_R - N_f$) 관계