

잔류응력을 고려한 압연강 용접구조물의 X-ray 회절법에 의한 파괴 역학적 고찰

백 승 엽*† · 배 동 호**

* 대림대학 기계설계과, ** 성균관대학교 기계공학과

Fracture Mechanics Approach to X-Ray Diffraction Method for Spot Welded Lap Joint Structure of Rolled Steel Considered Residual Stress

Seung yeb Baek*† and Dong Ho Bae**

* Dept. of Mechanical Design Daelim Univ.

** School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.

(Received May 9, 2011 ; Revised June 23, 2011 ; Accepted June 30, 2011)

Key Words: Spot Welded Joint(점용접 이음부), Residual Stress(잔류응력), Fatigue Strength(피로강도), X-Ray Diffraction Method (X선 회절법), Fatigue Design Criterion (피로설계기준)

초록: 용접이음부의 신뢰성 확보는 구조물의 건전성과 내구성에 직접적인 영향을 미치기 때문에 점용접 이음부의 피로설계기준(fatigue design criterion)을 정하기 위해서는 정확한 응력해석과 체계적인 피로강도평가가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 실제 진동차량 차체에 많이 적용되는 냉간 및 열간압연강판인 SPCC, SPCE, SPHE를 대상으로 기하학적 인자(geometrical factors)들을 선별해서 TS형과 CT형의 대표적인 점용접 이음부 시험편을 기본모델로 하여 인장전단하중을 가하여 피로강도 및 피로특성을 평가하고자 하였다. 그리고 피로균열의 발생과 성장 기구에 대한 영향을 분석하기 위해 용접 시 발생하는 여러 가지 주요인자들 중 입열량에 의해 발생할 수 있는 용접잔류응력을 X-ray 회절법에 의해 실험적으로 해석하였다. 그리고 이러한 해석을 통하여 얻어진 결과를 중첩(superposition)함으로써 잔류응력을 고려했을 경우 너깃 단 최대주응력으로 피로강도를 재평가하여 합리적인 피로설계기준(fatigue design criterion)을 재정립하고자 하였다.

Abstract: Cold and hot-rolled carbon steel sheets are commonly used in railroad cars or commercial vehicles such as the automobile. The sheets used in these applications are mainly fabricated by spot welding, which is a type of electric resistance welding. However, the fatigue strength of a spot-welded joint is lower than that of the base metal because of high stress concentration at the nugget edge of the spot-welded part. In particular, the fatigue strength of the joint is influenced by not only geometrical and mechanical factors but also the welding conditions for the spot-welded joint. Therefore, there is a need for establishing a reasonable criterion for a long-life design for spot-welded structures. In this thesis, $\Delta P-N_f$ relation curves have been used to determine a long-life fatigue-design criterion for thin-sheet structures. However, as these curves vary under the influence of welding conditions, mechanical conditions, geometrical factors, etc. It is very difficult to systematically determine a fatigue-design criterion on the basis of these curves. Therefore, in order to eliminate such problems, the welding residual stresses generated during welding and the stress distributions around the weld generated by external forces were numerically and experimentally analyzed on the basis of the results, reassessed fatigue strength of gas welded joints.

1. 서 론

각종 차량들을 구성하고 있는 진동차의 차체들은 다양한 박판 성형재를 조합해서 여러 가지 접합기술을 활용하여 조립되고 있다. 이러한 진동차들의 차체구조는 일반적으로 측면골조(side

frame), 천장골조(roof frame), 바닥골조(under frame) 및 단부골조(end frame)들로 구성되어 있으며, 각각의 골조는 외판(skin plate)과 결합되어 구조적 강성(structural rigidity)을 지닌 전체적인 구조체로 제작된다. 구조용 보강재와 골조(frame)류 등으로 구성되는 성형재료는 주로 두께가 1.0 ~ 4.5 mm 정도의 SPCC, SPCE, SPHE 등의 열간 및 냉간 판재를 압연 가공해서 외판과 보강재를 결

† Corresponding Author, sandos7@kornet.net

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

합하거나, 폐 단면(closed section) 부재에 조립되고 있으며, 이들을 일체화하는 수단으로 가장 경제적이고 손쉬운 점용접(spot welding) 방법이 널리 사용되고 있다.⁽¹⁾ 그러나 점용접부의 형상이 수 mm 직경의 점상이기 때문에 외력에 의한 응력 집중원(stress concentration source)이 되기 때문에 반복하중에 의한 피로강도(fatigue strength)가 모재(base metal)의 강도에 비해 훨씬 떨어져서 피로균열(fatigue crack)의 발단이 되고 있다. 이 때문에 점용접에 의해 제작되는 전동차량의 차체 강성과 내구성이 용접부의 피로강도에 의해 결정되는 경우가 일반적이다.⁽¹⁾ 점용접에 의해서 제작 또는 조립되는 박판 구조물 강도설계에 있어서, 지금까지의 연구결과들은 실 구조물의 합리적인 내구설계를 적용하기 위해서는 용접부의 응력분포 해석뿐만 아니라 강도 평가 시 용접 입열량에 의한 점용접 너깃 단에서 발생하는 잔류응력(residual stress)이 고려되어야 함이 타당하나 해석상의 어려움 때문에 지금까지 이를 고려하지 않고 탄성학적 입장에서만 해석 및 평가되어 왔다. 그러나 점용접부의 피로강도를 통일적이고 체계적으로 평가함에 있어서 피로균열의 발생과 성장기구(mechanism)에 대한 용접잔류응력의 영향은 무시될 수 없는 사항이기 때문에 잔류응력이 고려된 실제적인 피로해석이 이루어져야 할 것이다.^(2,3)

따라서 본 연구에서는 실제 전동차량 차체에 적용되는 기하학적 인자(geometrical factors)들을 선별해서 대표적인 이음형상별 점용접 이음재 시험편을 대상으로 인장-전단하중(tensile shear load)을 받는 경우의 FEM 응력해석과 용접 시 야금학적 과정으로 발생하는 용접 후 남은 잔류응력을 X-ray 회절법에 의해 실험적으로 해석하였다. 그리고 이러한 해석을 통하여 얻어진 결과를 중첩(superposition)해서 잔류응력을 고려한 용접부 너깃 단 최대주응력으로 피로강도를 재평가하여 합리적인 피로설계기준(fatigue design criterion)을 재정립하고자 하였다.

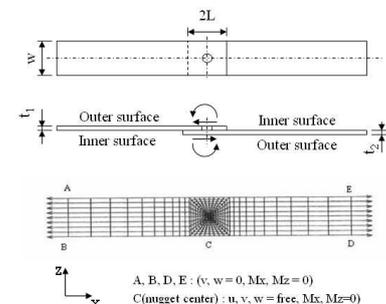
2. 응력분포 및 유한요소해석

2.1 해석모델

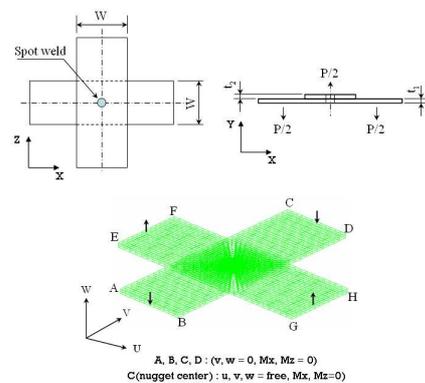
점용접 이음재에 인장-전단하중이 작용하면, 점용접 너깃(spot welded nugget)에는 면 내 전단력

(in plane shear force)과 면 외 굽힘 모멘트(out of plane bending moment)가 분담하중으로 작용하게 되어 박판 특유의 복잡한 변형을 나타낼 뿐만 아니라, 이로 인하여 피로균열은 일반적으로 부하측 내 표면 너깃 단(nugget edge)에서 발생 및 성장하여 외 표면으로 나타나는 것이 일반적이다. 따라서 내 표면 너깃 단 주위의 응력분포와 변형을 해석하는 것은 피로균열에 대한 발생 기구를 파악하는데 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 이러한 변형형태와 응력분포 상황을 해석하기 위해 Fig. 1의 (a), (b)와 같이 3차원 유한요소법 해석모델을 제안하였고 Table 1과 같이 기하학적 인자들의 변수를 다양화하여 모델링을 하였다. 특히 용접부 너깃에서는 상하 평판의 접합부를 위쪽과 아래쪽 너깃 부요소절점을 동일하게 설정함으로써 일체화 하였다. 또한 TS(Tensile Shear type) 형과 CT(Cross Tension type) 형 점용접 이음재의 기하학적 특성에 의해서 너깃 단 최대주응력 발생위치가 일정하지 않을 것으로 보고 응력집중 범위를 쉽게 확인하기 위해서 너깃 단 원주를 각각 10°씩 분할



(a) TS type spot welded joint



(b) CT type spot welded joint

Fig. 1 Simulated model of various spot welded lap joints

Table 1 Specimen types and geometrical factors for stress analysis and fatigue strength assessment

Joint Type	Material (plate thickness)		Nugget Diameter (mm)	Plate width W (mm)	Lapped Length 2L(mm)
	Name	Upper + Lower			
TS	1-1-TS	SPCC(0.8)+SPCC(0.8)	Ø5	40	30
	1-2-TS	SPCC(0.8)+SPCC(1.2)	Ø5	40	30
	1-3-TS	SPCC(1.0)+SPCC(1.0)	Ø5	40	30
	1-4-TS	SPCC(1.4)+SPCC(1.4)	Ø7	30	30
	1-5-TS	SPCC(1.6)+SPCC(1.6)	Ø7	30	20,40,50, 60,80
	1-6-TS	SPCC(1.6)+SPCC(1.6)	Ø7	50	30
	1-7-TS	SPCC(1.6)+SPCC(1.6)	Ø7	60	30
	2-1-TS	SPCE(0.8)+SPCE(0.8)	Ø5	50	30
	2-2-TS	SPCE(0.8)+SPCE(1.6)	Ø5	40	30
	2-3-TS	SPCE(1.2)+SPCC(1.2)	Ø5	40	30
CT	3-1-CT	SPCC(0.8)+SPCC(0.8)	Ø5	50	-
	3-2-CT	SPCE(1.4)+SPCE(1.4)	Ø5	50	-
	3-3-CT	SPCE(1.6)+SPCE(1.6)	Ø5	50	-
	3-4-CT	SPHE(2.6)+SPHE(2.6)	Ø5	50	-
	3-5-CT	SPCE(1.0)+SPCE(1.0)	Ø5	50	-

· TS, Tensile Shear type · CT, Cross Tension type

Table 2 Chemical composition of materials (wt %)

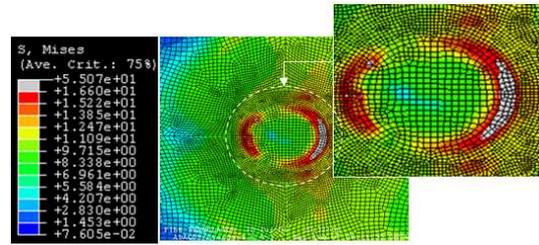
Material	C	Si	Mn	P	S	Al
SPCC	0.043	0.002	0.3	0.004	0.008	-
SPCE	0.04	-	0.21	0.017	0.021	0.05
SPHE	0.05	-	0.17	0.01	0.021	0.03

Table 3 Mechanical properties of materials

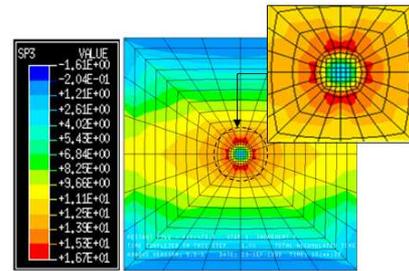
Material	Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	El. (%)
SPCC	165	341	48
SPCE	183	320	45
SPHE	233	347	36

2.2 해석결과

Fig. 2(a)는 TS형 점용접이음재의 3차원 기본모델에 대한 점용접 너깃부 주위의 주 응력분포를 나타낸 것이고 (b)는 CT형 점용접이음재의 응력분포를 나타낸 것이다. 점용접 이음재 시편에 인장-전단하중이 작용한 경우 Fig. 2(a)와 같이 실질적으로 관여하는 응력분포는 면내하중과 굽힘 모멘트(bending moment)의 조합에 의해 야기되는 최대주응력(σ_{max})은 시편 길이방향의 중심 부근에 발생하고 너깃을 중심으로 한 부하 측 영역에서는 인장응력이 넓게 분포함을 알 수 있었다. 그리고 CT형 점용접 이음재의 경우 너깃 단 주위로 매우 복잡한 형태의 변형을 보이고 있으며 이러한 영향으로 너깃 주위에는 응력집중현상이 나타나고 있음을 알 수 있다. 기하학적 인자와 너깃 단 최대주응력의 관계를 보면 TS 형은 판 두



(a) TS type [SPCC(1.6)+SPCC(1.6), Ø7, 40, 30]



(b) CT type [SPCE(1.4)+SPCE(1.4), Ø5]

Fig. 2 Stress distribution around the nugget of various spot welded lap joint types

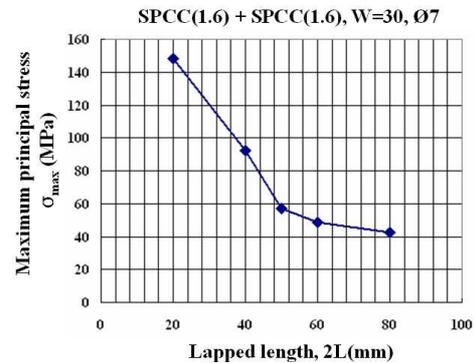


Fig. 3 Relationship between maximum principal stress and lapped length of TS type

께가 증가하면 너깃 단 최대주응력은 감소하는 경향을 나타내고 있는 데 이것은 판 두께가 두꺼워지면 굽힘 강성이 증가하여 굽힘 변형이 적어지기 때문인 것으로 판단된다. 겹침 길이에 있어서는 겹침 길이가 증가하면 인장-전단력에 의한 굽힘 변형이 억제되어 나타나지만 겹침 길이가 판 폭 이상일 때는 그 값이 감소됨을 알 수 있다. Fig. 3은 기하학적 인자와 너깃 단 최대주응력의 관계를 나타낸 결과이다. CT형 용접 부 너깃 단의 응력분포상황은 용접 이음재의 판 두께에 민감도에 큰 특성을 나타내었으나 동종재질과 이종 재질은 너깃 직경의 변화에 관계없이 응력 집중 발생위치는 동일하게 나타나며 두께가 상이

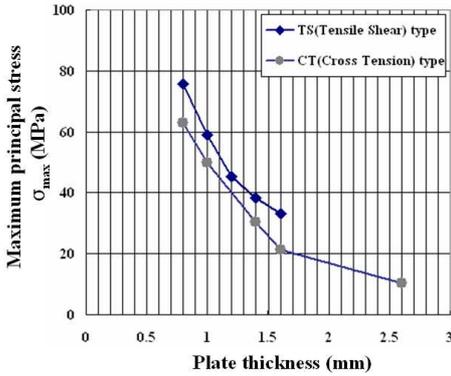


Fig. 4 Relationship between maximum principal stress and plate thickness for TS-type and CT-type

한 판재를 접합한 경우에는 판 두께가 얇은 쪽의 변형과 너깃 단 응력집중이 크게 발생하였다. Fig. 4는 굽힘 응력에 의한 최대응력 값과 판 두께의 관계를 나타낸 것이다.

3. 잔류응력 실험해석

3.1 X-ray 회절법의 원리

재료의 격자면 격자 변형률의 변화량에 기초를 두고 있는 것으로 Fig. 5(a)는 다결정 시험편에서 방위가 서로 다른 결정립에 일정한 인장·압축 응력이 부하되었을 때 격자면 간격 d 는 격자면의 법선이 인장 축에 가까운 결정립 일수록 넓게 되고 있다. X선 응력측정법은 ψ 의 변화에 따른 격자면 간격 d 의 변화를 측정해서 응력을 구하는 방법이나 격자면 간격 d 를 직접 측정하는 것은 불가능하다. 따라서 X선 응력은 특정 X선이 브래그 회절 조건을 만족시키는 회절면을 이용하여 그 회절각의 변화로서 측정된다.⁽⁵⁾

$$n\lambda = 2d\sin\theta \tag{1}$$

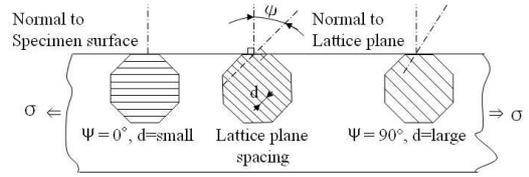
(n ; 임의의 상수, θ ; Bragg 각)

회절조건 (1)의 식을 만족하는 X선을 다결정 집합체인 재료표면에 조사하면 입사각 Ψ_0 와 Ψ 의 관계는 다음과 같다. Fig. 5(b)는 입사각(Ψ_0)과 반사각(Ψ)의 관계를 나타낸 것이다.

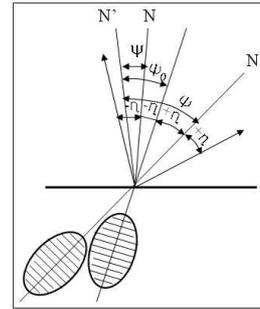
$$\psi = \psi_0 \pm \eta \tag{2}$$

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

X선에 의한 잔류응력 측정방법 중 $\sin^2\psi$ 법을 이용하여 회절각(2θ)과 $\sin^2\psi$ 에 의한 미분량



(a) The change of lattice plane spacing by stress



(b) Input angle(Ψ_0) and Output angle(Ψ)

Fig. 5 The change of lattice plane by stress and relation between input angle and output angle

$\frac{\partial 2\theta}{\partial \sin^2\psi}$ 를 구하면, 다음식에 의해 잔류응력을 얻을 수 있다.

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

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

$$M = \frac{\partial 2\theta}{\partial \sin^2\psi} (\text{deg}) \tag{6}$$

- σ : 잔류응력 (Kg/mm²)
- E : Young's Modulus (Kg/mm²)
- ν : Poisson Ratio
- θ_0 : 무 응력 Bragg 각
- 2θ : 회절 각
- K : 응력 정수(Kg/mm²)

여기서 K 는 X선 응력정수(x-ray stress constant)이고 M 은 $2\theta - \sin^2\psi$ 선도의 직선 기울기이며 θ 는 무 응력 상태에 있는 재료의 X선 회절 각 2θ 의 1/2이다.

3.2 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 재료는 전동차량 자체구조용

Table 4 Welding conditions of specimen (RWMA C-class)

Joint type	Welding time (cycles)	Electrode force (N)	Welding current (A)
TS	20 cycles	7.2kN	7kA
CT	15 cycles	9.3kN	9.2kA

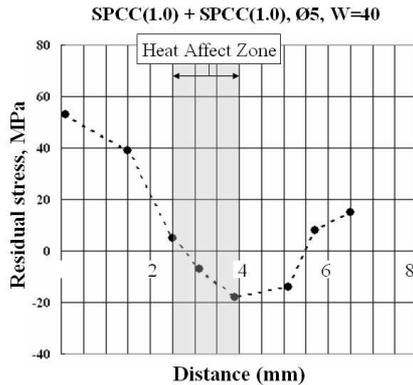


Fig. 6 Analysis result of residual stress at near the nugget edge by X-ray diffraction method

으로 많이 사용되고 있는 냉간 및 열간압연강판인 SPCC, SPCE, SPHE를 적용하였으며 시험편의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 2와 Table 3에 각각 나타내었다. 또한 용접조건은 Table 4의 RWMA CLASS C를 기준으로 하였다.

CT형과 TS형 점용접이음재의 용접부에 대한 용접 잔류응력을 해석하기 위한 실험 장치는 RIGACU사의 X선 응력 측정 장치(Model : XRD-Ultima IV)를 사용하였으며 실험방법은 시편 표면에 X선 입사각(ψ_0)을 각각 0°, 9°, 18°, 27°, 36°, 45°로 설정하고 전압은 30kV, 전류는 6mA 조건하에서 수행하였다. 그리고 잔류응력을 제거하기 위하여 용접부 너깃 상부를 습식 마모법으로 제거한 뒤, 용접부 중심방향과 45° 방향으로 각각 5회씩 측정된 뒤, 용접부 너깃 단에서 그 측정치의 평균값을 용접 잔류응력으로 취하였다.

3.3 실험결과

Fig. 6은 X선 회절법을 이용하여 점용접이음재의 용접부에서 잔류응력을 측정된 결과를 나타낸 것이다.

용접부 너깃 중심부에서 측정된 잔류응력의 분포 형태는 중심부에서 높은 인장 잔류응력이 발생하였고, 너깃 중심에서 너깃 단으로 이동하면서 점차적으로 압축잔류응력으로 변화되다가 열영향부

(heat affect zone)에서 최대 압축응력이 존재함을 알 수 있었다. 용접부 중심부에서의 최대 인장 잔류응력은 53MPa로 나타났고 최대 압축응력은 열영향부에서 18MPa이 나타났다.

너깃 중심부에서의 인장 응력이 존재하는 것은 용접 시 모재가 전기 저항 열에 의한 반 용융상태에서 전극의 가 압력에 의해서 외부로 압출됨과 동시에 용접 열 사이클 동안의 팽창과 수축에 의한 것으로 생각된다. 또한 너깃 중심부에서 너깃 단 방향으로 이동함에 따라 압축 잔류응력으로 발생하는 것은 모재와 너깃단의 경계부에서 냉각 속도 차이에 따라 모재가 너깃 외부로 이동하는 속도가 급격히 줄어들었기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 용접부에서 비교적 멀리 떨어진 모재부의 외 표면에 작은 압축상태의 응력 분포가 나타나는 것은 용접 시 전극 가압력에 의해 발생된 용접부 주위의 굽힘 변형의 영향 때문인 것으로 사료된다.

4. 잔류응력을 고려한 피로강도평가

용접 구조물 제작과정에서 용접에 의해 발생하는 용접잔류응력은 모재의 항복강도 이상의 크기를 가지는 것으로 평가되고 있다. 또한 용접잔류응력은 용접부 균열 발생의 기전력(driving force)으로 작용할 뿐 아니라 취성파괴의 원인이 되는 것으로도 확인되었다. 따라서 구조물의 피로 설계단계에서 용접잔류응력은 반드시 고려되어야 할 것이다. 이러한 필요성에 의해서 본 연구에서는 잔류응력을 고려한 점용접 너깃 단에서의 용접 잔류응력의 영향에 대하여 연구하였다.

본 연구에서는 TS형과 CT형 점용접 이음재를 대상으로 유한요소법에 의한 응력분포 해석결과로부터 얻어진 최대주응력(σ_{max})과 X-ray 회절법에 의한 실험해석 결과로부터 얻어진 잔류응력 값을 비교하여 피로강도를 재평가하고자 하였다. Fig. 7은 TS형 점용접이음재의 $\Delta P-N_f$ 선도이고, Fig. 8은 CT형 점용접이음재의 $\Delta P-N_f$ 선도를 나타낸 것이다. Fig. 7, Fig. 8 모두 기하학적 인자와 하중에 대한 상대적 비교평가는 가능하지만, 데이터 분산 폭이 너무 크기 때문에 TS형과 CT형 점용접이음재의 피로강도에 대한 기하학적 영향을 정확하게 파악하기 어렵다. 따라서 이러한 결과는 실 구조물 설계에 적용함에 있어서 종합적인 설

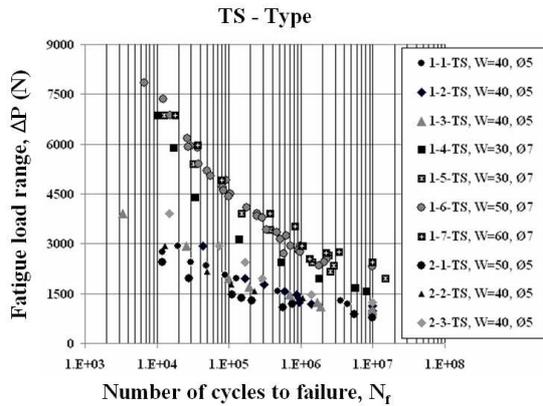


Fig. 7 $\Delta P-N_f$ relation of TS-type spot welded lap joints

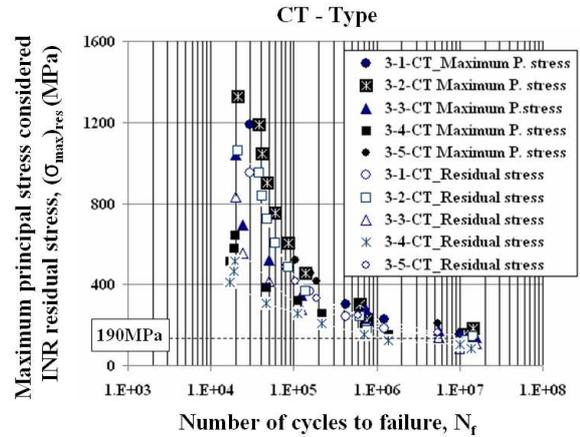


Fig. 10 Comparison of $(\Delta\sigma_{max})_{inr-res} - N_f$ and $\Delta\sigma_{max} - N_f$ relation for the CT-type spot welded lap joints

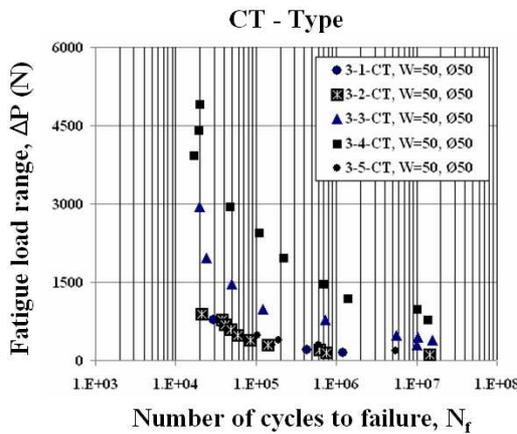


Fig. 8 $\Delta P-N_f$ relation of CT-type spot welded lap joints

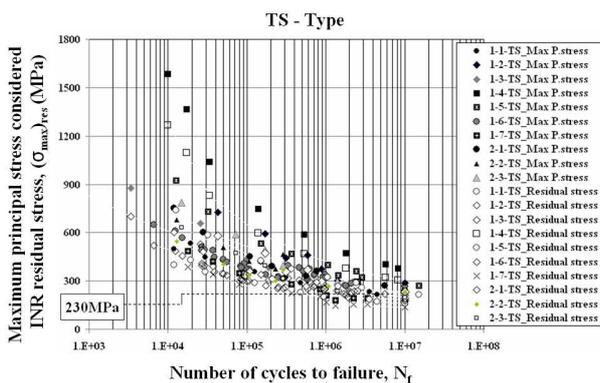


Fig. 9 Comparison of $(\Delta\sigma_{max})_{inr-res} - N_f$ and $\Delta\sigma_{max} - N_f$ relation for the TS-type spot welded lap joints

계기준이나 장 수명 설계를 위한 체계적인 설계 기준으로 활용하기 어렵다. 그래서 이러한 문제를 개선하기 위해 피로균열이 발생 및 성장하는 위치의 최대주응력으로 피로강도를 평가하는

것이 타당하다고 제시한 연구결과⁽⁶⁾를 바탕으로 최대주응력으로 재정리하여 잔류응력을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때를 비교하였다. 그 결과 Fig. 9, Fig. 10과 같은 결과를 얻었다. 고 하중-단 수명 영역에서는 데이터의 분산이 크게 줄어들지 않았지만 피로설계 기준이 되는 저 하중 - 장 수명 영역에서는 데이터의 분산 폭이 현저히 줄어드는 것을 알 수 있다. 따라서 $\Delta P-N_f$ 관계를 $\Delta\sigma_{max}-N_f$ 관계로 정리하는 것이 효과적인 설계가 가능할 것으로 판단한다. 또한 잔류응력을 고려하지 않았을 때의 피로한도는 TS형 점용접 이음재가 230MPa, CT형 점용접 이음재가 190MPa로 나타났고 잔류응력을 고려했을 때의 피로한도는 TS형 점용접 이음재가 200MPa, CT형 점용접 이음재가 160MPa로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 TS형과 CT형 점용접구조물의 체계적인 피로설계기준을 확립하기 위해 유한요소법 해석결과와 용접부의 잔류응력을 X-선 회절법을 이용한 실험해석 결과를 비교·평가함으로써 효과적이고 합리적인 피로설계기준을 결정하기 위한 방법으로 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) SPCC, SPHE, SPCE의 TS형 및 CT형 점용접 이음재에 인장하중이 작용하는 경우 용접부 최대주응력은 부하 측 용접부 너깃 단 내표면 과열 영향부 경계부에서 발생하였고 최대주응력은 이음재의 기하학적 인자들의 영향을 받는다.

(2) TS형 및 CT형 점용접 구조물에서 잔류응력을 고려하지 않았을 때의 피로한도는 TS형이 230MPa, CT형 190MPa이고, 잔류응력을 고려했을 때 피로한도는 TS형이 200MPa, CT형 160MPa 발생하는 것으로 평가되었다. 이것은 잔류응력을 고려하지 않았을 때 보다 약 14~16% 정도 낮게 평가된 값으로 잔류응력을 고려하지 않는다면 피로설계기준이 과대평가할 수 있다. 따라서 설계자는 설계 시 잔류응력을 반드시 고려함이 타당하다고 판단된다.

참고문헌

- (1) Baek, S. Y., 2010, "A Study on Fatigue Design of STS301L Fillet Welded Joint," *Trans of the KSME A*, Vol. 34, No. 5, pp.561~565.
- (2) Bae, D. H., 1991, " Fracture Mechanical Fatigue Strength Evaluation of a Single Spot Welded Lap Joint Subject to Tensile Shear Load," *Journal of KSAE*, 13-5, pp.42~50.
- (3) Kim. C. H., Cho. S. Y. and Kim. B. K., 2001, "The Effects of Geometrical Shapes and Post Weld Heat Treatment on the Welding Residual Stress Distribution of Multi-welded Pipe Weld," *Journal of KWS*, Vol.19, pp.49~57.
- (4) Niisawa, J. E. and Tomioka, N., 1988, "Theoretical Analysis of Stress Distribution of Single Spot Welded Lap Joint Under Tension-shear Load," *Transection of JSAE*, No.39, pp.627~630.
- (5) Materials Research Society of Japan, 1981, "Standard for Method of X-ray Stress Measurement," *Division for Strength of Materials*, pp.61~137.
- (6) Bae, D. H., 1988, " 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.