

인장-전단하중을 받는 IB형 일점 Spot 용접이음재의 파괴역학적 피로강도 평가

Fracture Mechanical Fatigue Strength Evaluation of IB-Type Spot Welded Lap Joint under Tension-Shear Load

손 일 선*, 정 원 석**, 이 휘 광***, 배 동 호****
I. S. Sohn, W. S. Jung, H. K. Lee, D. H. Bae

ABSTRACT

According as the member of the automobile body structure have been thinned their thickness and have become high strength, each part of the body structure has been put more severe stress condition. And, because fatigue strength of the spot welded lap joint is influenced by its geometrical and mechanical factors, welding condition and etc., there needs a quantitative and systematic evaluation method for them.

In this study, by considering nugget edge of the spot weld part of the IB-type spot welded lap joint under tension-shear load to the ligament crack, fatigue strength of various IB-type spot welded lap joints was estimated with the stress intensity factor (S.I.F.) K_{III} which is fracture mechanical parameter. We could find that fatigue strength evaluation of the IB-type spot welded lap joints by K_{III} is more effective than the maximum principal stress (σ_{1max}) at edge of the spot weld part obtained from FEM analysis.

주요기술용어 : IB-Type Spot Welded Lap Joint(IB형 spot 용접이음재), FEM(유한요소법), Inplane Bending(면내 굽힘(IB)), Tension-Shear Load(인장-전단 하중), Maximum Principal Stress(최대주응력), Ligament Crack(환상균열), Stress Intensity Factor(응력세기계수)

1. 서 론

최근 자동차의 연비절감과 성능향상을 위한 경

량화의 요구로 차체 내외의 강판은 점차 박판화, 고장력화 되고, 생산성의 요구로 용접점수도 점차 제한을 받게 됨에 따라, 차체 각부는 한층 가혹한 응력상태에 놓이는 경향이 높아지고 있다. 특히, 직경이 수 mm에 지나지 않는 spot용접점 주위에 있어서는 높은 응력집중으로 인해 피로강도가 모재의 그것에 비해 훨씬 떨어지기 때문에, 차체

* 정회원, 대우자동차

** 정회원, 성균관대학교 대학원

*** 현대자동차

**** 정회원, 성균관대학교

의 구조적 강성과 강도가 spot 용접점의 피로강도에 의해 결정된다고 해도 과언이 아니다. 따라서, spot 용접 이음재에 대한 응력분포 상황을 해석하고 피로강도를 평가하는 것은 시작차의 설계 단계와 평가단계에서 매우 중요하고 필요한 사항이다. 그런데, 실차의 spot 용접 이음재에 대한 응력분포와 피로강도를 직접 평가하는 것은 실차 차체구조의 단면형상이 매우 복잡하기 때문에 어려움이 있고, 대개 실차의 구조적 특성을 살린 단순 모의 시험편을 고안해서, 그것으로부터 spot 용접이음재의 피로강도를 평가하여 실차구조의 내구성 평가와 안전설계에 적용하고자 하는 것이 일반적인 추세이다.¹⁻³⁾ 그러나, 이상과 같은 경향은 주로 다종다양한 spot 용접 이음재에 대한 하중(ΔP)-피로수명(N_f) 관계를 기초로 한 것이 대부분이며, 이것은 시편형상에 따른 피로수명의 비교평가는 가능하나, 피로수명의 data 분산폭이 너무 크기 때문에 기하학적 인자(factor)와 역학적 인자를 동시에 고려한 설계기준을 설정하기에는 문제점이 있음을 지적되어 왔다.⁴⁾

그래서, 본 연구는 이러한 문제점을 개선하고, spot 용접구조의 장수명(long life) 설계기준을 확립하기 위한 기초연구로서, 자동차 차체의 spot 용접 이음재 중에서 임의의 각도로 spot 용접된 IB형 이음재에 인장-전단하중이 작용하는 경우, spot 용접 이음부의 피로파괴가 너깃단의 응력분포에 의존적임이 확실함을 이용하여, 너깃단부를 환상균열(ligament crack)로 보고 파괴역학 매개변수인 응력확대계수(stress intensity factor) K를 적용시켜 IB형 일점 spot 용접 이음재의 피로강도를 체계적이고 정량적으로 재정리하고자 하였다.

2. 유한요소법(FEM)에 의한 해석

2.1 응력분포 해석

IB형 일점 spot 용접 이음재에 인장-전단하중에 의한 면내 굽힘력(In plane bending force)이 가해지면 박판특유의 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 극좌표계(polar coordinate)의 원점을 너깃 중앙에 설정하여 너깃단에서의 최대응력 발생위치를 쉽게 확인 할 수 있도록 하였다. 해석모델의 기본형상은 판 폭(W)이 30.0mm, 두께(t)가 1.0mm이며, 이음각(θ)의 크기를 각각 1.25°, 2.5°, 5.0° 및 7.5°로 변화시켜 이음각의 영향에 대하여 조사함과 동시에, 그 밖에 판 폭, 겹침 길이 및 두께 등의 기하학적 영향도 조사하였다. 해석모델에 대한 부하조건은 탄성범위내에서 시편의 기하학적 인자들에 대한 영향을 비교·검토하기 위해 시편단면의 평균응력을 9.81MPa이 되도록 하고, 부하방향은 시편의 축방향으로 하여 수행하였으며, Solid요소에 의한 상·하 평판의 요소분할 상황은 공통적이다. 특히, 직경 6mm의 너깃부는 두께 2mm의 단일 사각형 요소로 분할하여 상·하 평판을 일체화하고, 종탄성계(Young's modulus) E를 모재보다 80% 크게 하였다. 해석에 사용된 프로그램은 MSC/NASTRAN이며, Fig.1은 인장-전단 하중을 받는 IB형 일점 spot 용접 이음재의 3차원 유한요소법 해석모델이다.

2.2 응력확대계수 K의 해석

IB형 일점 spot 용접 이음재에 인장-전단력이 작용하면, 용접 너깃부에는 Fig.2의 분담하중 성분들에 의해 복잡한 변형형태를 나타낸다. 따라서, 너깃주위를 날카로운 환상균열(ligament crack)로

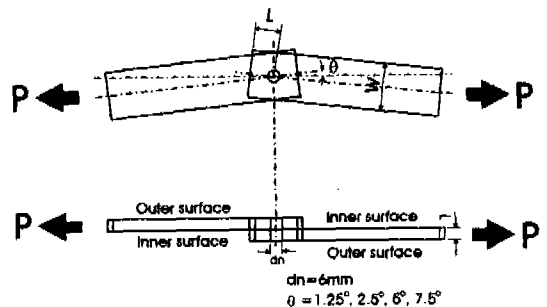


Fig.1 인장-전단 하중을 받는 IB형 일점 spot 용접 이음재

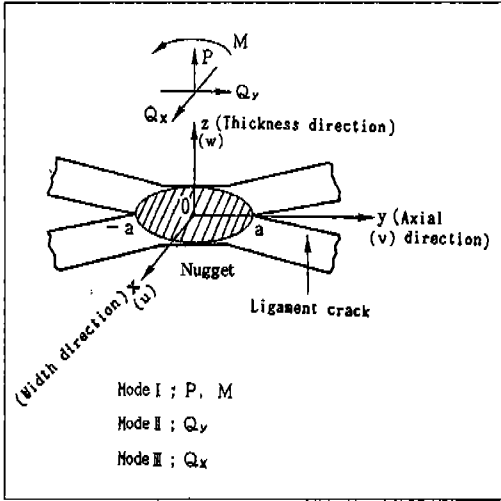


Fig.2 인장-전단하중을 받는 spot 용접 이음재의 역학적 모델

가정할 때 파괴역학적 관점에서 IB형 일엽 spot 용접 이음재는 mode I + mode II + mode III의 혼합형태가 된다. 그러나 3가지 mode를 동시에 고려하여 응력확대계수 K를 해석하는 것은 현실적으로 매우 어려운 문제이기 때문에, 본 연구에서는 인장-전단하중을 받는 IB형 spot 용접이음재의 변형형태를 면외굽힘변형(mode I), 면내전단변형(mode II) 및 면내굽힘변형(mode III)으로 구분하고, 각 변형형태별로 파괴역학적 해석을 수행하여 용접 너깃단에서의 주 지배적인 파괴역학 mode를 도출하고, 이것으로 피로강도에 대한 정량적 평가를 하기로 하였다. 파괴역학적 해석방법은 Fig.1의 3차원 모델에서 응력과 변형을 구한 다음 spot 용접점 주위를 2차원으로 확대하여 피로균열이 발생하는 용접 너깃단 근방의 상, 하 평판에 대한 상대변위를 다시 구하고, $r \rightarrow 0$ 로 외삽함으로써 각 모드별 응력확대계수 K를 해석하였다. Fig.3은 mode III에 대한 응력확대계수 K_{III} 를 구하기 위해 spot 용접 너깃과 너깃단 주위를 2차원으로 확대한 외삽모델(Extrapolation Model)을 예로써 나타낸 것이다. mode III의 경우, 균열단(crack tip)근방의 변위는 K_{III} 에 의해 다음식으로 정의될 수 있다.

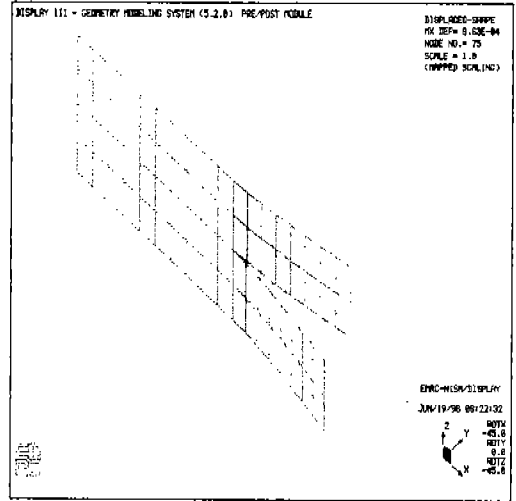


Fig.3 2차원으로 확대된 spot 용접점주위의 외삽법 모델(mode III)

$$w = \frac{2K_{III}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

여기서, $\theta = \pm \pi$ 즉, 너깃단 내표면상에서의 상하평판의 역대칭 상대변위(w)는

$$w = \frac{2K_{III}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \quad \text{이므로,}$$

$$\text{따라서, } K_{III} = G \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{w}{\sqrt{r}} \quad (2)$$

식(2)에서 너깃단으로부터 r인 위치에서의 면내 굽힘에 의한 상·하 평판의 역대칭 상대변위(w)를 구해서 $r \rightarrow 0$ 로 외삽하게 되면 너깃단에서의 응력확대계수 K_{III} 를 구할 수 있다.

3. 실험

3.1 시험편 및 시험장치

재료는 자동차 차체구조용으로 많이 사용되고 있는 냉간 압연강판이며, 화학적 성분과 기계적 성질은 Tables 1, 2와 같다. 시험형상은 Fig.1의 FEM 해석모델과 동일하며, 시험제작을 위한 spot

Table 1 Chemical composition of specimen (wt.%)

Mat'l	C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Fe
SPC-Zn	0.12	0.010	0.127	0.015	0.007	0.025	0.045	Rem.

Table 2 Mechanical properties of specimen

Mat'l	Thickness (mm)	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
SPC-Zn	1	307.0	168.4	47

Table 3 The welding condition of specimen

Weldign Condition	
Electrode Force (F)	1,962N
Welding Current (I)	8.3kA
Weld Time (Cycle)	15Cycle

용접조건은 미국 저항용접기 제조협회(RWMA)가 권장하고 있는 용접조건 중에서 Table 3의 A-class를 기준으로 하였다. 사용된 spot 용접기의 전극지름은 6mm이고, 두 판재 사이의 이음각도(θ°)는 1.25°, 2.5°, 5.0° 및 7.5°로 하여 제작하였다.

실험에 사용된 피로시험 장치는 서어보-유압식 피로시험기(Instron사 용량: 20 Ton)이며, 시편 내표면의 spot 용접 너깃단에서 발생 및 성장하여 외표면에 나타난 피로균열을 관찰하고, 측정하기 위하여는 이동식 현미경($\times 50$)을 사용하였다.

3.2 실험조건 및 방법

본 연구에서는 하중반복 속도를 25Hz로 하여 실험을 수행하였고, 피로하중의 형태는 하중비($R = P_{min}/P_{max}$) 0인 완전 편진 정현파이다. 피로수명(N_f)은 시편 내표면 부하측 너깃단에서 발생 및 성장된 균열이 시편 외표면에 나타나서 너깃지름($d=6mm$)과 동일한 길이만큼 진전될 때까지의 cycle수로 결정하였으며, 피로한도(fatigue limit)는 10^7 cycle까지 피로균열이 발생하지 않은 하중으로 하였다.

4. 해석 및 실험 결과

4.1 응력분포 해석결과

Fig.4는 IB형 spot 용접 이음재의 실제적인 3차원 유한요소법 모델 중에서 이음각이 2.5°인 경우, 용접 너깃단 주위의 응력 분포를 나타낸 것이다. IB형 일점 spot 용접 이음재에 인장-전단력이 작용했을 때의 응력분포 상황을 보면, 너깃을 중심으로 한 면내변형과 면내회전 및 면외굽힘변형에 의하여 용접부 너깃주위에는 높은 주응력이 분포하고, 너깃내부와 상·하 평판의 내표면 상에는 인장과 압축상태의 응력이 동시에 분포함을 확인할 수 있다. 최대주응력은 시편 중심선으로부터 인장-전단력에 의한 회전변형 방향과 반대방향으로 $+20^\circ \sim -40^\circ$ 범위 내에서 발생하였으며, 이음각도가 증가할수록 최대주응력의 분포영역이 시편의 회전방향으로 이동하는 경향을 보였다. 그리고, 부하 반대측의 자유단 영역에 있어서의 응력분포상황은 대체로 비교적 작은 압축응력이 분포하고 있으나, 이음각 5°와 7.5°의 경우에는 너깃단에서 인장응력이 발생하였다. 그 이유는 이음각이 5°이상이 되면, 동일한 인장-전단하중 하에서 시편의 이음각도가 클수록 굽힘과 면내비틀림 변형이 커지기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 응력확대계수 K_{II} 해석결과

Table 4는 Fig.4의 너깃단에 발생하는 응력집중에 대하여 Fig.2의 각 분담하중에 의한 파괴역

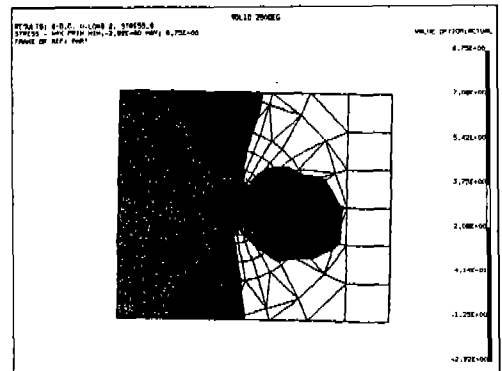


Fig.4 인장-전단하중을 받는 일점 spot 용접 이음재의 응력분포

Table 4 각 변형 mode에 대한 최대주응력 및 응력구성비

	Fracture Mode	Joint Angle (θ)			
		1.25°	2.50°	5.00°	7.50°
Max. Principle Stress (MPa)	Mode I	10.59	10.59	10.69	10.79
	Mode II	3.24	3.34	3.63	3.83
	Mode III	70.44	72.01	76.03	81.82
Ratio (%)	Mode I	12.6	12.3	11.9	11.2
	Mode II	3.8	3.9	4.0	4.0
	Mode III	83.6	83.8	84.1	84.8

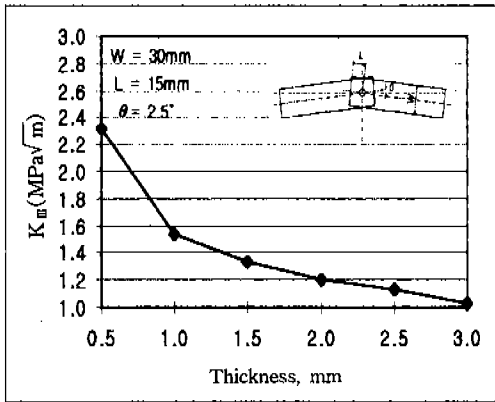


Fig. 5 시편 두께(t)와 SIF K_{III} 의 관계

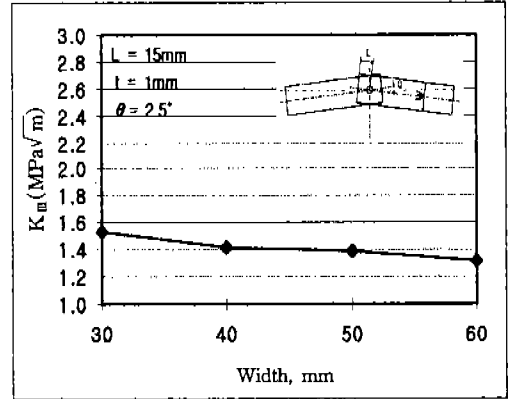


Fig. 6 시편 폭(W)과 SIF K_{III} 의 관계

각 mode들의 기여도를 정리한 것이다. 이들 결과로부터, 인장-전단하중을 받는 IB형 일점 spot 용접 이음재의 너깃단에 발생하는 응력집중에 대해 지배적으로 관여하는 분담하중 형태는 면내굽힘하중이고, 이에 해당하는 파괴역학적 변형형태는 mode III로 고려될 수 있다. Mode III의 경우 파괴역학적 매개변수인 응력확대계수 K_{III} 에 대한 시편의 기하학적 영향은 다음과 같다.

Fig.5는 판 두께의 영향을 나타낸 것이다. 판 두께가 얇아질수록 응력확대계수 K_{III} 의 두께에 대한 민감도가 커짐을 알 수 있다. 그 이유는 판 두께가 감소하면 면외굽힘모멘트에 의한 굽힘변형과 면내력에 의한 회전변형이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

Fig.6은 판 폭의 영향으로서, 판 폭이 증가하면 K_{III} 는 감소하나 전체적으로 감소폭이 적은 것

로 미루어 판 폭의 변화는 응력확대계수 K_{III} 에 영향이 매우 적음을 알 수 있다.

Fig.7은 겹침 길이의 영향을 나타내고 있다. K_{III} 에 대한 겹침 길이의 영향은 거의 없음을 알 수 있다.

Fig.8은 K_{III} 에 대한 이음각의 영향을 나타낸 것이다. K_{III} 와 이음각의 관계는 거의 선형적인 증가를 보여주고 있어 이음각에 대한 민감도가 다른 기하학적 인자들에 비해 매우 큼을 알 수 있다. 그 이유는 IB형 spot 용접 이음재에 작용하는 인장-전단력에 의한 회전 굽힘모우멘트가 회전각에 비례하기 때문인 것으로 사료된다.

4.3 피로실험 결과

Fig.9는 여러 가지 기하학적 형상을 갖는 IB형 일점 spot 용접 이음재의 피로실험 결과를 반복

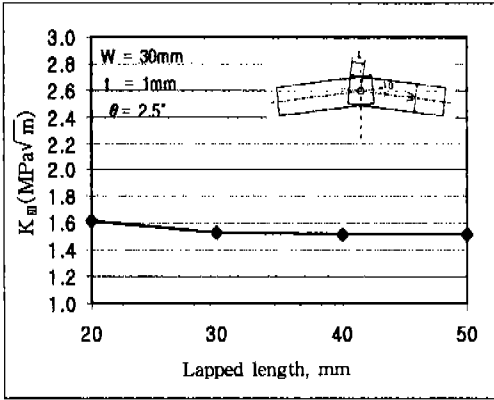


Fig.7 시편의 겹침길이(2L)와 SIF K_m 의 관계

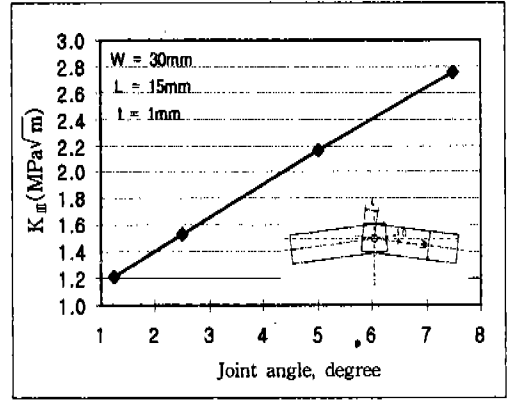


Fig.8 시편의 이음각(θ)과 SIF K_m 의 관계

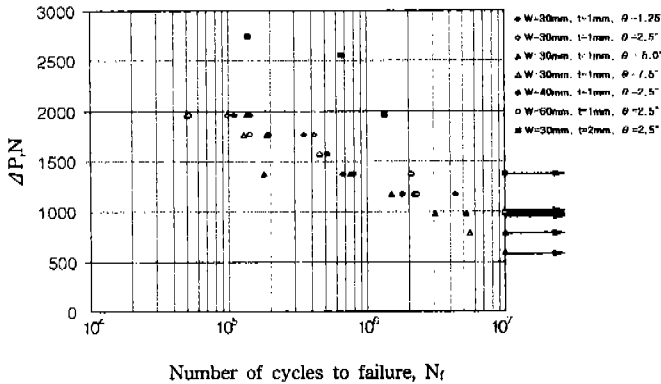


Fig.9 IB형 일점 spot 용접이음재의 $\Delta P - N_f$ 관계

하중범위로 나타난 것이다. IB형 일점 spot 용접 이음재의 피로강도에 대한 이음각의 영향을 보면, 고하중 범위에서는 박판의 대변형 현상 때문에 피로강도에 대한 이음각의 영향을 구분하기가 모호하나, 저하중 범위에서는 이음각의 영향이 잘 나타나고 있다. 즉, 이음각이 작을수록 동일하중 범위에서 피로수명과 피로한도가 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig.8에 나타내 바와 같이 인장-전단하중에 의한 용접부 너깃단에서의 응력 상황이 이음각에 의해 민감한 영향을 받기 때문인 것으로 간주된다. 또한, 판 두께의 영향을 보면, 두께 $t=2.0\text{mm}$ 인 경우가 $t=1.0\text{mm}$ 에 비해서 전체적으로 피로강도가 증가한다. 이것은 Fig. 5의 결과로부터 두께가 두꺼워질수록 면회굽힘변

형이 감소하여 너깃단의 응력분포 상황이 두께에 대해 민감하기 때문인 것으로 판단된다. 피로강도에 대한 시편 폭의 영향은 고하중 범위에서 어느 정도 나타나고 있으나, 저하중 범위에서는 그 정도를 평가할 수 없을 만큼 매우 작다. 이것 역시 Fig.6의 결과에 의한 영향으로 판단된다.

4.4 최대응력 σ_{1max} 을 이용한 피로강도 평가

반복하중 범위와 피로수명의 관계를 나타낸 $\Delta P - N_f$ 선도는 실험치의 분산폭이 너무 커서 피로강도에 대한 시편의 기하학적인 영향을 정확히 파악하기 어렵고, 실 구조물의 설계를 위한 정량적인 설계기준을 설정하기가 곤란하다. 따라서, FEM

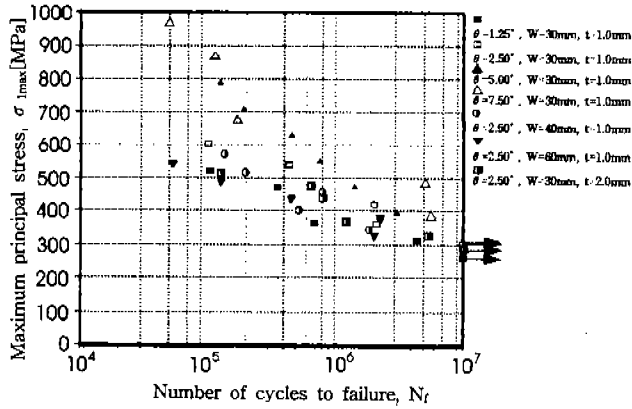


Fig.10 IB형 일점 spot 용접이음재의 $\Delta\sigma_{1max} - N_f$ 관계

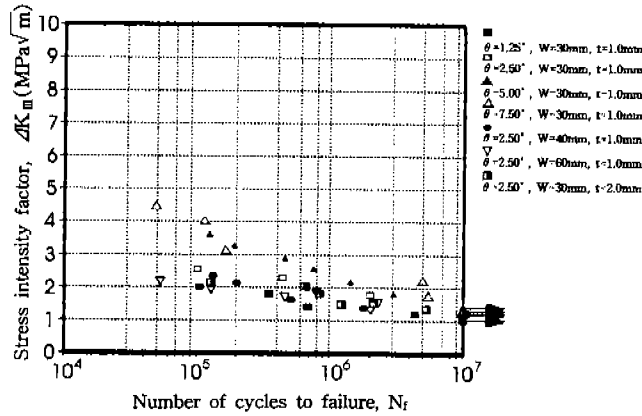


Fig.11 응력확대계수 K_{III} 으로 재정리한 spot 용접이음재의 $K_{III} - N_f$ 선도

으로 해석한 spot 용접부 너깃단의 최대주응력으로 피로강도를 정리하면 각종 크기를 갖는 시험편의 피로강도가 반복하중 범위(ΔP)로 나타낸 결과에 비해 데이터(data)의 분산폭이 작은 체계적인 정리가 가능하다는 배동호 등⁵⁾의 연구 결과를 토대로 spot 용접부 너깃단의 최대주응력으로 피로강도를 재정리하였다. Fig.10은 여러 가지 형상 및 크기를 갖는 IB형 일점 spot 용접 이음재의 $\Delta\sigma_{1max} - N_f$ 관계를 나타낸 것으로서, $\Delta P - N_f$ 관계에 비해서 피로강도 데이터의 분산이 적은 쪽으로 재정리됨을 알 수 있다.

4.5 응력확대계수 K_{III} 를 이용한 피로강도 평가

최대주응력을 이용하여 피로강도를 정리한 Fig.

10의 $\Delta\sigma_{1max} - N_f$ 관계는 Fig.9의 $\Delta P - N_f$ 관계보다 체계적으로 재정리되지만, 최대주응력은 유한요소법의 요소분할 상황에 다분히 영향을 받기 때문에 정량적인 물성치를 특정 지을 수가 없다는 문제점을 가지고 있다. 따라서, spot 용접 너깃단부를 날카로운 notch 또는 환상균열(ligament crack)로 가정하고, 그 부근의 응력의 세기를 나타내는 파괴역학적 매개변수인 응력확대계수 K_{III} 를 이용하여 피로강도를 재정리하였다. Fig. 11은 Fig.9를 응력확대계수 K_{III} 로 재정리한 결과이다.

방법은 각각의 시험편에 적용된 피로하중에 대한 spot 용접 너깃부 근방의 변위를 구하고, 식(2)로부터 K_{III} 를 계산한다. 평균두께, 판 폭, 이음각 등 기하학적 형상이 다른 시험편들의 피로강도를 최

대주응력을 이용한 방법⁶⁾보다 해석모델의 요소의 영향을 받지 않고 효과적으로 평가할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

spot 용접구조물의 장수명 설계기준을 확립하기 위한 기초연구로서, 자동차 차체부위에서 임의의 각도로 spot 용접된 이음재에 인장-전단하중이 작용하는 경우를 대상으로 spot 용접부의 너깃주위의 응력분포를 FEM을 이용하여 해석하였다. 피로실험을 통하여 얻어진 $\Delta P-N_f$ 관계를 FEM 해석으로 구한 최대주응력으로 재정리하였으나 이의 결점을 개선하기 위하여 spot 용접 너깃단부를 날카로운 notch 또는 환상균열로 가정하고, 그 부근의 응력분포세기를 나타내는 파괴역학적 파라미터(parameter)인 응력확대계수 K_{III} 를 이용하여 피로강도를 재 정리한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 인장-전단 하중을 받는 IB형 spot 용접 이음재 너깃단 주위에서의 주된 변형은 면내 굽힘하중에 의한 면내회전변형이고, 이에 해당하는 파괴역학적 변형형태는 mode III라 할 수 있다.
- 2) 응력확대계수 K_{III} 는 IB형 spot 용접 이음재의 기하학적 인자인 판 폭과 겹침길이에 대해 민감도가 낮으나, 판 두께 및 이음각에 대해서는 민감하다.
- 3) 기하학적 형상이 다른 IB형 일점 spot 용접이음재의 피로강도는 최대주응력 σ_{1max}

에 의하여 정량적으로 평가될 수 있다.

- 4) 기하학적 형상이 다른 IB형 spot 용접 이음재의 피로강도는 파괴역학적 매개변수인 응력확대계수 K_{III} 에 의하여 효과적인 평가가 가능하다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 산업설비 안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. '스폿 용접 기술 자료', 日本 熔接學會, pp. 12~89, 1983.
2. 'Automotive Handbook', Bosch, pp. 320~350, 1993.
3. '自動車技術ハンドブック-試験・評價編', 日本自動車技術會, pp. 81~105, 1991.
4. '스폿 용접 継手 疲勞強度 データ集', 日本自動車技術會, pp. 12~185, 1987.
5. 배동호, "인장-전단하중을 받는 일점 spot 용접이음재의 파괴역학적 피로강도평가", 한국자동차 공학회지 제13권 5호, pp. 42~50, 1991.
6. 정원석, 구재민, 손일선, 배동호, "인장-전단 하중을 받는 IB형 일점 spot 용접 이음재의 응력분포와 피로강도 평가", 한국자동차공학회 1996년도 추계학술대회논문, pp. 25~31, 1996.