

점용접 시편의 피로 수명 해석 Analysis of Fatigue Life of Spot-Welded Specimens

주영우*, 주석재**, 최병길***, 염영진*, 유희***
YoungWoo Chu, SeokJae Chu, ByungGil Choi, YoungJin Yun, Hee You

ABSTRACT

Failure of spot-weld joints in car body may cause noise, vibration, and safety problems. Systematic procedures for estimating fatigue strength of general spot-weld joints are developed in this paper. Fatigue test results for various spot-welded specimens are analysed using the finite element method. It is found that the maximum principal strain at the nugget boundary on the inner surface governs the fatigue failure of spot-welded joints.

주요기술용어 : Spot-Welded Specimen(점용접 시편), Fatigue Life(피로수명), Finite Element Method(유한요소법), Tensile-Shear(인장전단), Cross-Tension(십자인장)

1. 서론

박판이나 고장력강판을 사용한 자동차 차체의 경량화에 의해 주행성능 향상과 연비의 경감은 이루어졌지만 차체 각부는 한층 더 가혹한 상태에 놓이게 되었다. 점용접 구조의 내구성은 피로강도에 의해 결정되는 경우가 많으므로 점용접 이음에 대한 응력분포를 해석하고 피로강도를 평가하는 것은 매우 중요하다.

지금까지 점용접 이음의 피로강도에 대한 연구는 보통 인장전단(TS, Tensile-Shear)과 십자

인장(CT, Cross-Tension)의 양극단적인 형태에 한정되었다. 점용접부를 통하여 전달되는 하중은 인장전단의 경우 전단력이고 십자인장의 경우 인장력이다. 그리고 최대주응력(maximum principal stress)이나 응력확대계수(stress intensity factor)를 구해 피로강도를 정량적으로 평가하는 경향이였다.^(1~4) 그러나, 실제 차체의 점용접부는 인장전단과 십자인장이 복합된 형태이므로 본 연구에서는 인장전단과 십자인장에 대한 피로시험 결과 이외에도 여러 가지 각도이음에 대한 피로시험 결과를 유한요소해석을 통해 처리하여 보았다. 여기서 피로균열이 점용접부 내표면 너깃 가장자리에서 발생함에 주목하여 피로수명을 지배하는 인자로서 너깃 가장자리 내표면 스트레인(ϵ_m)을 이용하였다.

* 경희원, 울산대학교 기계자동차공학부
** 울산대학교 기계자동차공학부
*** 대학원생, 울산대학교 자동차공학부

2. 시험

2.1 인장시험

인장시험에는 하중장치로 MTS 819 전기 유압식 시험기(정격용량 10 ton)를 사용하였다. 시편은 ASTM(A370)에 따라 Fig. 1과 같이 제작하였다.

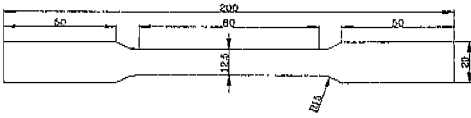


Fig. 1 Geometry of tensile specimen

자동차 차체 재료인 SPCC, SPRC35에 대한 인장시험 결과는 Table 1과 같다. SPRC35는 SPCC보다 항복강도는 높지만 연성은 낮은 재료이다.

2.2 점용접 피로시험

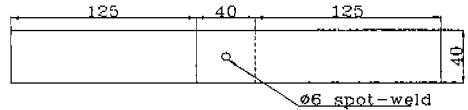
SPCC와 SPRC35에 대하여 인장전단, 십자인장 점용접 시편을 제작하여 피로시험을 수행하였다. 인장전단, 십자인장 점용접 시편은 Fig. 2와 같고 SPCC와 SPRC35 각각에 대하여 동일한 형태로 제작되었다. 인장전단 시편은 재료시험기 그림에 직접 붙렸고 십자인장 시편은 지그를 통하여 그림에 물렸다. 점용접 시편의 종류는 Table 2와 같다. 너깃 지름은 6.0 mm로 인장전단 시편과 십자인장 시편이 서로 같고 두께는 서로 다르다.

본 시험에서 모두 최소하중이 거의 0인 편진하중(10 Hz, Haver sine)을 작용하였다. 피로수명은 시험편이 완전히 파단될 때까지의 사이클수로 정하였으며, 10^7 사이클까지 파단되지 않았을 경우 피로한도(fatigue limit)에 도달한 것으로 취급하였다. 피로시험결과(편진최대하중-반복주

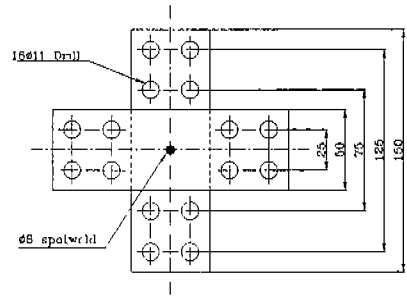
기수)는 Fig. 4(a)와 같다.

Table 1 Material properties of SPCC, SPRC35

	Mechanical properties			
	Young's Modulus (GN/m ²)	Yield Strength (MN/m ²)	Ultimate Strength (MN/m ²)	Elongation (%)
SPCC	192.9	164.6	276.4	53.6
SPRC35	204.2	233.2	335.2	40.1



(a) Tensile-Shear specimen



(b) Cross-Tension specimen

Fig. 2 Spot-welded fatigue specimens

Table 2 Material properties of fatigue test specimens(TS and CT)

Material (Specimen Type)	Plate Thickness
SPCC / SPCC (TS)	1.0 mm
SPCC / SPCC (CT)	1.4 mm
SPRC35 / SPRC35 (TS)	1.0 mm
SPRC35 / SPRC35 (CT)	1.4 mm

Nugget Diameter = 6.0 mm

인장전단인 경우 파단되었을 때 저하중인 경우는 균열길이가 길었고 고하중일수록 균열 길이가 짧아졌다. 낮은 수명에서는 SPCC의 파단 하중이 SPRC35보다 높았지만 수명이 길어질수록 파단하중의 차가 감소하여 피로한도에서는 거의 일치하였다.

십자인장인 경우 인장전단 피로시험에서와 마찬가지로 SPCC의 파단하중이 저수명구간에서는 SPRC35보다 높았다. 그러나, 역시 고수명구간으로 갈수록 피로하중의 차이는 거의 없어졌다.

3. 유한요소해석

3.1 피로시험편의 유한요소해석

인장전단(TS)과 십자인장(CT) 접합점 피로시험편의 피로시험 결과를 유한요소해석을 통하여 분석하여 보았다. 양쪽 강판은 shell 요소로 구성된 평판으로 표현하였고 양쪽 평판은 각각의 강판 중립면에 놓았다. 양쪽 강판의 두께가 같으므로 양쪽 평판의 간격은 강판의 두께와 같다. 접합점 너깃과 너깃 주위는 Fig. 6와 같이 유한요소망을 구성하였고 모든 시편에 대하여 너깃과 너깃 주위는 같은 유한요소망을 사용하여 서로 비교할 때 타당하도록 하였다.

접합점 피로시험편 재료의 두께와 너깃 지름은 Table 2와 같다. 인장전단과 십자인장 시편은 각각 재료와 두께가 같은 것을 접합하였다.

Fig. 3은 인장전단(TS)과 십자인장(CT) 접합점 피로시험편에 대하여 피로 균열이 처음 발생하는 내표면(inner surface) 너깃 가장자리에서 길이 방향 선상의 응력분포이다. 최대응력이 너깃 가장자리에서 발생하지 않고 너깃 가장자리에서 밖으로 0.5 mm(요소의 반경방향 길이임.) 떨어진 절점에서 발생하였다. 이것은 접합점 이음을 표현할 때 너깃 가장자리에 놓인 절점까지 양쪽 강판 해당 절점을 강체 요소로 연결하였기 때문이다.

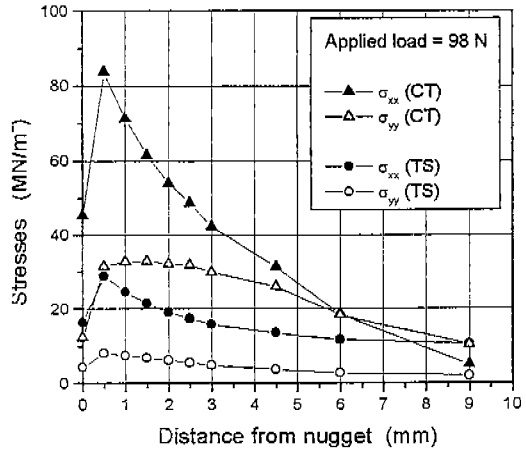


Fig. 3 Variation of normal stresses σ_{xx} , σ_{yy} at the inside surface with the distance from the nugget

이것을 피로시험과 비교해보면 파괴는 우선 너깃 가장자리 경계 바깥의 어떤 특정한 국부장소에서 원주방향으로 발생하고, 하중이 증가함에 따라 열영향부 둘레로 점차 전파된다⁽⁶⁾. 따라서, 열영향부인 너깃 가장자리 내표면 최대스트레인으로 접합점부 피로수명을 평가하려고 한다.

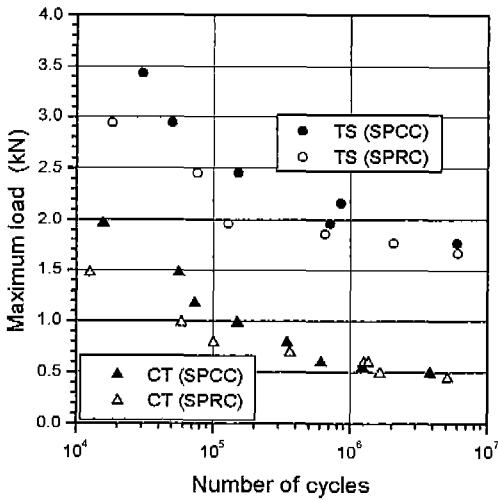
Table 3 Stresses and strains at the distance 0.5 mm from the nugget

Specimen	σ_{xx} (MN/m ²)	σ_{yy} (MN/m ²)	ϵ_{xx} ($\times 10^{-6}$)	Ratio R
TS(1.0t)	28.80	8.05	136.8	1.00
CT(1.4t)	83.75	31.41	386.2	2.82

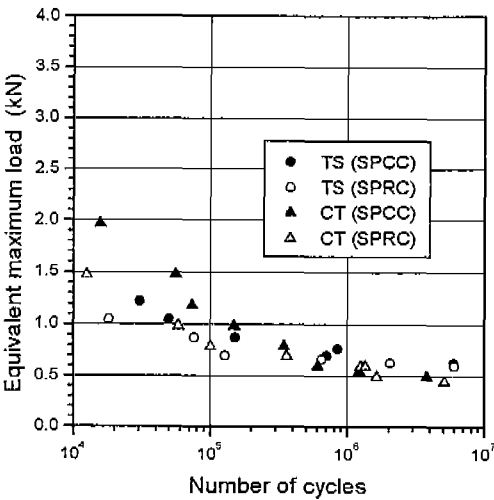
편의상 작용하중이 98 N일 때 너깃 내표면 가장자리 반경방향 스트레인(ϵ_{xx})을 구해 비교했다. 선형해석이므로 스트레인은 작용하중에 비례하기 때문이다. Table 3과 같이 TS와 CT에 대한 스트레인의 비는 1.00 : 2.82이다.

Fig. 4(b)는 너깃 가장자리 내표면 스트레인(ϵ_{in})의 비를 고려하여 Fig. 4(a)를 처리하여 본 결과이다. 같은 하중에 대하여 내표면 스트레인(ϵ_{in})은 인장전단 시편이 십자인장 시편보다

2.82배 낮으므로 인장전단 시편의 내표면 스트레인(ϵ_m)은 십자인장 시편에 작용한 하중보다 2.82배 낮은 하중이 작용한 십자인장 시편의 내표면 스트레인(ϵ_m)과 같다. 즉, Fig. 4(b)는 인장전단 시편에 작용한 하중진폭을 2.82배 낮춰본 것이다. 최대하중이 높아 비선형 효과가 생기는 단수명구간을 제외하면 하중진폭이 거의 일치한다.



(a) Original fatigue test results



(b) Transformed fatigue test results

Fig. 4 Fatigue test results for TS and CT specimens(SPCC, SPRC35)

3.2 여러 가지 형상에 대한 유한요소 해석

피로수명을 내표면의 최대 스트레인(ϵ_{in})값의 비를 이용하여 여러 가지 경우에 적용하여 보았다.

1986년도 일본 자동차 기술회 보고서 '자동차 차체 점 용접구조의 피로강도와 수명추정'⁽⁷⁾에 실린 점용접 피로시험 결과를 유한요소해석을 통하여 분석하여 보았다. 피로시험편은 Fig. 5와 같이 A-H 모두 8 종류이다. 참고로 A→G 순서는 정적강도가 감소하는 순서이다. 단, H는 C-D 사이에 위치한다.

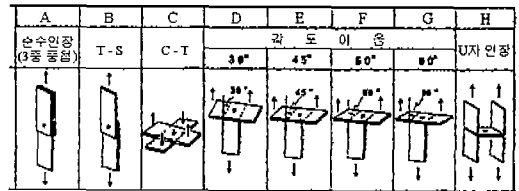


Fig. 5 Various fatigue test specimens

Table 4는 시편의 재료와 주요치수로 A-H 공통이다. 너깃 지름이 3.1 인장전단 시편이나 십자인장 시편과 같이 6.0 mm이다.

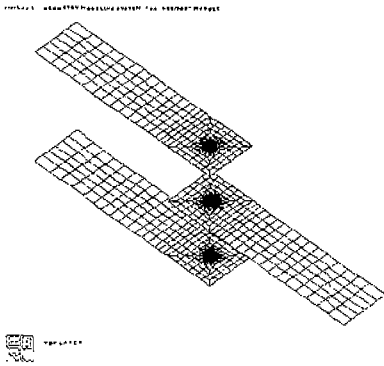
Table 4 Material and dimension

Young's Modulus (GN/m ²)	Poisson's Ratio	Plate Thickness (mm)
192.9	0.3	1.4

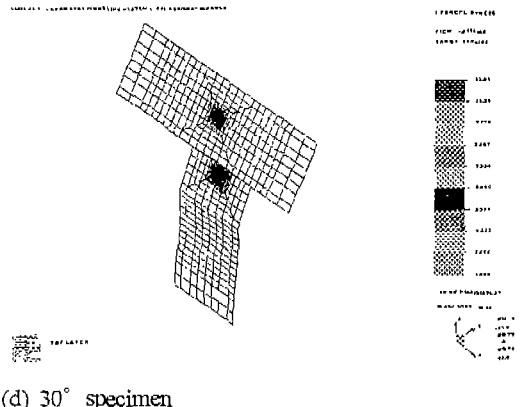
A 피로시험편은 굽힘 변형이 발생하지 않고 너깃 부근에서 두께방향으로 균일인장응력 분포를 보였다. A 피로시험편을 제외하고는 너깃 부근 강판에 굽힘 변형이 발생하였다. 그리하여, A 피로시험편은 나머지 시편과는 약간 다른 피로강도 특성을 보인다. A 피로시험편은 인장압축 피로시험, 나머지 시편은 회전굽힘 피로시험 결과에 해당하는 특성을 보인다.

Fig. 6는 A-H 피로시험편의 유한요소 결과이다. 편이상 변형형상을 20-100배 과장하였고 점용접부 내표면이 보이도록 의도적으로 떨어뜨려

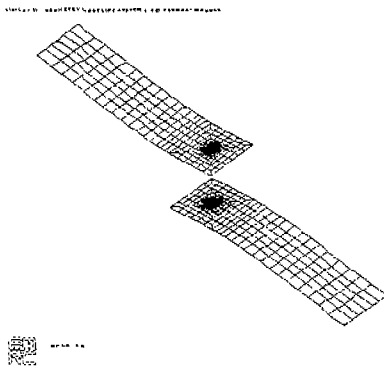
놓았다.



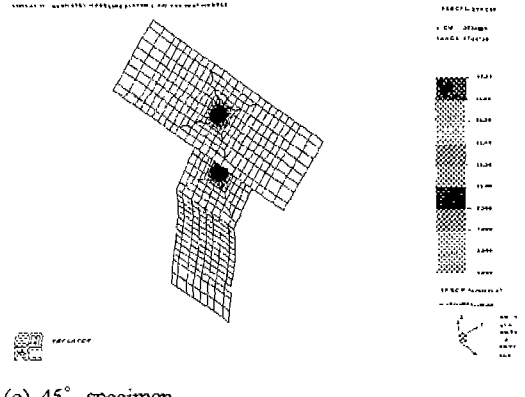
(a) Tensile Shear (TS double) specimen
 σ_1 range : 53.9~98.0 MN/m²



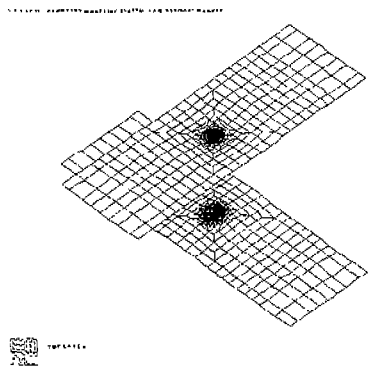
(d) 30° specimen
 σ_1 range : 19.6~117.6 MN/m²



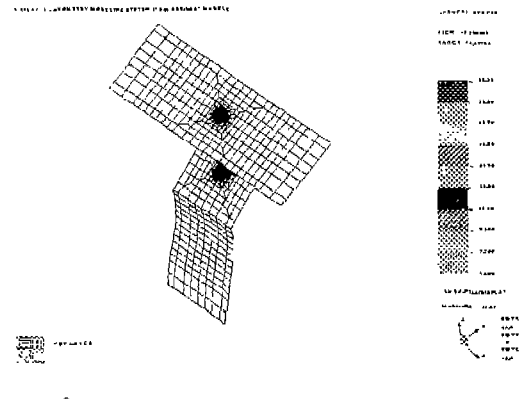
(b) Tensile Shear (TS single) specimen
 σ_1 range : 38.2~117.6 MN/m²



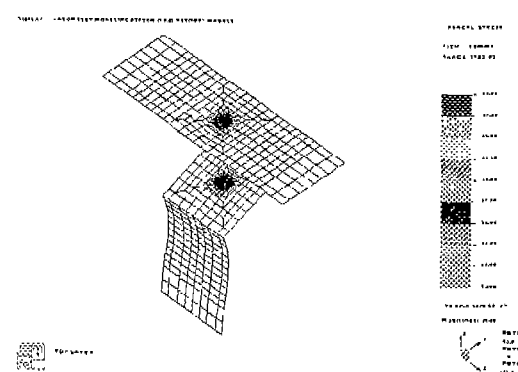
(e) 45° specimen
 σ_1 range : 39.2~171.5 MN/m²



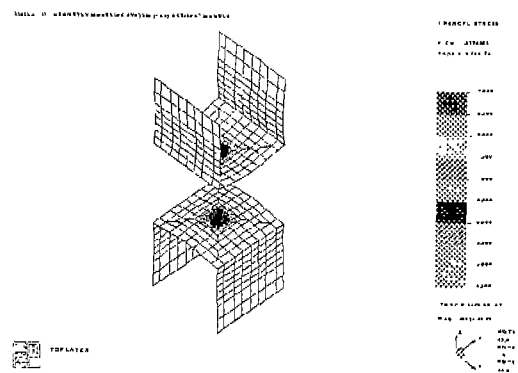
(c) Cross Tension Shear (CT) specimen
 σ_1 range : 31.4~84.3 MN/m²



(f) 60° specimen
 σ_1 range : 52.9~220.5 MN/m²



(g) 60° specimen
 σ_1 range : 73.5~294.0 MN/m²



(h) U-shaped specimen
 σ_1 range : 44.1~88.2 MN/m²

Fig. 6 Deformed shape and maximum tensile stress at the nugget boundary

다음으로 A-H에 대하여 내표면 최대 스트레인 값을 구해 보았다. Table 5는 작용하중이 98 N일 때 내표면 너깃 가장자리의 최대 스트레인 (ϵ_m)값이다. 스트레인의 비는 B(TS single) 피로시험편을 기준하였다. 스트레인의 비는 앞에서 언급한 정적 강도의 순서와 일치하였다.

Table 6과 Table 7은 각각 두께가 1.0 mm, 0.8 mm인 피로시험편에 대한 최대 스트레인이 다. 역시 스트레인의 비는 앞에서 언급한 정적 강도의 순서와 일치하였다.

Table 5 Strains(ϵ_m) at inner surface nugget boundary and their strain ratio(R)

Specimen (1.4 t)	Strain(ϵ_m) ($\times 10^{-6}$)	Strain Ratio, R
A(TS double)	24.4	0.25
B(TS single)	97.6	1.00
C(CT)	395.1	4.05
D(30°)	540.0	5.53
E(45°)	778.3	7.97
F(60°)	1004.3	10.29
G(90°)	1343.4	13.76
H(U type)	442.2	4.53

Applied load = 98 N

Table 6 Strains(ϵ_m) at inner surface nugget boundary and their strain ratio(R)

Specimen (1.0 t)	Strain(ϵ_m) ($\times 10^{-6}$)	Strain Ratio, R
A(TS double)	34.0	0.25
B(TS single)	136.8	1.00
C(CT)	781.3	5.71
D(30°)	1031.2	7.54
E(45°)	1501.5	10.98
F(60°)	1949.1	14.25
G(90°)	2624.9	19.19
H(U type)	864.7	6.32

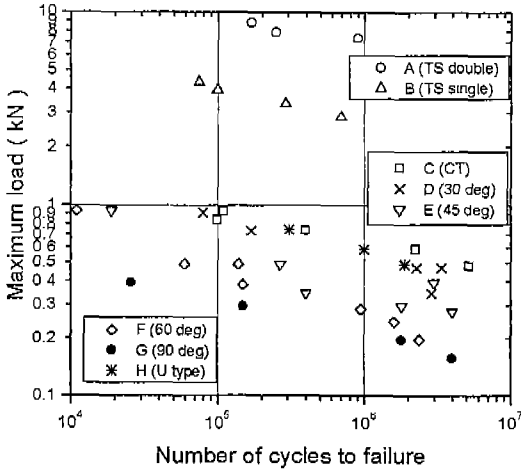
Applied load = 98 N

Table 7 Strains(ϵ_m) at inner surface nugget boundary and their strain ratio(R)

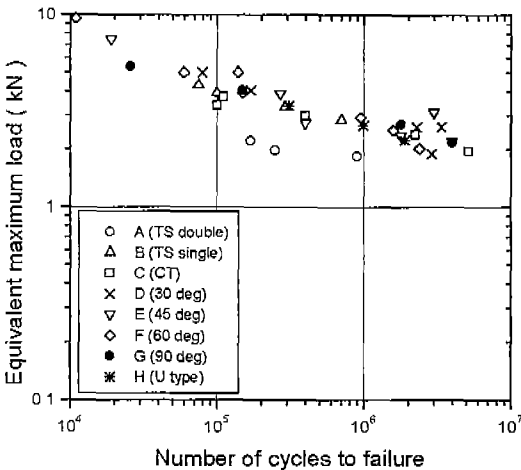
Specimen (0.8 t)	Strain(ϵ_m) ($\times 10^{-6}$)	Strain Ratio, R
A(TS double)	42.55	0.25
B(TS single)	170.7	1.00
C(CT)	1221.6	7.16
D(30°)	1588.8	9.31
E(45°)	2325.8	13.63
F(60°)	3028.5	17.74
G(90°)	4092.8	23.98
H(U type)	1348.9	7.90

Applied load = 98 N

Fig. 7(a)는 피로시험결과이며, Fig. 7(b)는 스트레인 비를 고려하여 처리하여 본 결과이다. 같은 스트레인이 발생하는 B(TS) 피로시험편에 대한 것으로 환산하여 준 것이다.



(a) Original fatigue test results



(b) Transformed fatigue test results

Fig. 7 Fatigue test results for various specimens and equivalent maximum loads

Fig. 7(a)를 보면 각각의 시험편에 대한 피로시험 결과가 흩어지지만 내표면 너깃 가장자리 스

트레인이 같도록 구한 상당하중을 그린 Fig. 7(b)를 보면 너깃 근처 강판에 굽힘이 발생하지 않는 A 피로시험편을 제외하고는 거의 일치한다. 이것으로 점용접 내구강도는 너깃 가장자리 내표면 스트레인(ϵ_{in})에 관계된다는 것을 확인하였다.

Table 8는 스트레인 비교 기준 시험편이었던 인장전단 시험편에 대하여 두께만 다른 경우의 스트레인을 모은 것이다.

Table 8 Effect of plate thickness on strain

Specimen	Plate Thickness (mm)	Strain (ϵ_{in}) ($\times 10^{-6}$)	Ratio (R)
B	1.4	97.6	1.00
(TS)	1.0	136.8	1.40
single)	0.8	170.7	1.75

두께 h 인 인장전단 시험편의 양단을 그림으로 놓고 인장하중 P 를 가할 때 점용접부를 통하여 전달되는 굽힘 모멘트 M_b 와 단면계수 Z 는 다음과 같다.

$$M_b = \frac{Ph}{2}, \quad Z = \frac{bh^2}{6} \quad (1)$$

따라서 표면에서의 굽힘응력 σ 는 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{3P}{bh} \quad (2)$$

두께만 변할 경우 $\sigma \times h = \text{const.}$ 이고 즉, $\epsilon_{in} \times h = \text{const.}$ 이다. 이것은 Table 8 유한요소 해석의 결과와 일치한다.

시험편의 종류와 두께가 모두 다르더라도 Table 5 - Table 7과 Table 8을 이용하면 쉽게 스트레인의 비가 비교된다.

4. 결 론

여러 가지 피로시험편에 대한 하중 진폭 - 수명(반복 주기수)의 관계는 시험편의 형태나 두께

가 바뀌면 변하지만, 점용접 대표면 너깃 가장자리 반경방향 스트레인(ϵ_{in})-수명의 관계는 시험편의 형태나 두께에 상관없이 일정하다. 즉, ϵ_{in} 이 같으면 피로수명이 같다.

어느 한 가지 형태와 두께 피로시험편에 대한 피로시험 결과만 얻으면 유한요소해석을 통하여 형태나 두께가 다른 나머지 피로시험편에 대한 수명 예측이 가능하다.

후 기

본 연구는 현대자동차와 한국과학재단 지정 울산대학교 지역협력연구센터의 부분적인 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

1. 정원석, 구재민, 손일선, 배동호, "인장-전단하중을 받는 IB형 일점 spot용접 이음재의 응력분포와 피로강도 평가", 한국자동차공학회 1996년도 추계학술대회논문, pp. 25~31, 1996.
2. 배동호, "인장-전단하중을 받는 일점 spot용접 이음재의 파괴역학적 피로강도 평가", 한국자동차공학회지 제13권 5호, pp.42~50, 1991.
3. Shicheng zhang, "Stress intensities at spot welds", International Journal of Fracture 88, pp. 167~185, 1997.
4. 김영동, "냉간압연강판 점용접부의 피로수명 예측에 관한 연구", 홍익대학교 석사학위논문, 1997.
5. 송삼홍, 김부동, "점용접재의 파괴거동과 응력분포", 대한기계학회논문집 제8권 제3호, pp. 224~231, 1984.
6. 송삼홍, 김부동, "점용접의 너깃지름과 판간접촉지름의 관련성", 대한기계학회논문집 제7권 제3호, pp. 313~318, 1983.
7. (社)自動車技術會, "自動車車体スポット溶接構造の疲勞強度と壽命推定", 1986.