

# 하중작용방식에 따른 차체용 점용접재의 피로특성에 관한 연구

## A Study on the Fatigue Characteristics of Spot Weld Specimen used in Vehicle Body as the Applied Load Pattern

송 삼 흥(고려대학교 기계공학과), 배 준 수(고려대 대학원), 장 성 재(고려대 대학원)

S. H. Song(Korea Univ. Dept. of Mechanical Engineering), J. S. Bae(Korea Univ. Graduate School),  
S. J. Jang(Korea Univ. Graduate School)

**Abstract :** In this study, the fatigue characteristics of spot weld specimen was studied experimentally by using the various specimen types. The specimen types were tensile shear(TS) specimen, cross tension(CT) specimen, and T type(TT) specimen. Tensile test and fatigue test were carried out and microstructure was investigated. Finite element method was used to investigate stress distribution near nugget edge. Finally fracture mechanics approach was tried to the various specimen types.

### 1. 서론

점용접은 작업이 용이하고 극히 짧은 시간에 용접이 이루어지며 또한 용접시 다른 첨가재가 없어므로 접합부의 경량화 및 경비 절감에 이바지 할 수 있다. 특히 자동차산업의 발달과 더불어 자동화 및 대량생산에 매우 큰 장점이 되므로 널리 사용되고 있다. 그러나 작은 접상의 점용접부가 하중을 지탱함으로 인해 응력집중원으로 작용하게 되고 이로인해 점용접부 주위에 피로크랙이 발생하게 되어 차체의 내구성을 떨어뜨리는 결과를 초래한다. 따라서 이러한 점용접부에 대한 피로강도향상과 그 특성을 파악하기 위해서 많은 연구가 진행되어 왔다<sup>(1)~(4)</sup>.

Pook<sup>(5)</sup>은 점용접 너깃단을 예리한 노치로 보고 혼합모드하에서의 응력확대계수를 유도하였으며 结城<sup>(6)</sup>은 FEM을 통하여 너깃주위를 환상의 균열로 가정하여 응력확대계수를 유도하였다.

자동차 차체와 같은 구조는 그 기하학적 형상이 매우 복잡하게 이루어져 있으므로 점용접부에 가해지는 하중이 차체 부위에 따라 각기 다른 양상을 나타낼 것이다. 따라서 본 연구에서는 시편의 기하학적 형상을 달리함으로써 하중작용방식에 따른 각 시편의 피로 특성을 조사하였다.

### 2. 실험방법

본 연구에서는 현재 자동차 차체에 사용되고 있는 SPCC를 사용하였으며 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, Table 2에 나타내었다. 실험은

전기 유압식 인장 압축 피로시험기를 사용하였으며 응력비는 R=0.1, 진동수는 5~10Hz로 하였다. 시험편에 사용된 시편형상은 너깃지름이 7mm, 6mm인 인장전단시편(TS7, TS6)과 너깃지름이 6mm인 십자형 인장시편(CT6) 및 T형 인장시편(TT6)을 사용하였다. 시편형상 및 점용접 조건은 Fig. 1과 Table 3에 나타내었다. 피로수명은 피로크랙이 표면으로 전파하여 너깃이 완전히 회전할 때까지로 하였으며 피로한도는  $10^6$  cycle까지 과단하지 않는 하중으로 하였다<sup>(7)</sup>. 조직조사 및 내부크랙의 형상 조사에는 부식액으로 나이탈용액(5% 질산+95% 증류수)이 사용되었다.

Table 1. Chemical composition (wt%)

C	Si	Mn	P	S
0.05	0.02	0.14	0.014	0.009

Table 2. Mechanical properties of material

Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation (%)
235	320	43.6

Table 3. Spot welding condition

Pressure time (cycle)	Welding current (kA)	Weld time (cycle)	Hold time (cycle)
45	8	1.3~1.6	2.0~2.3

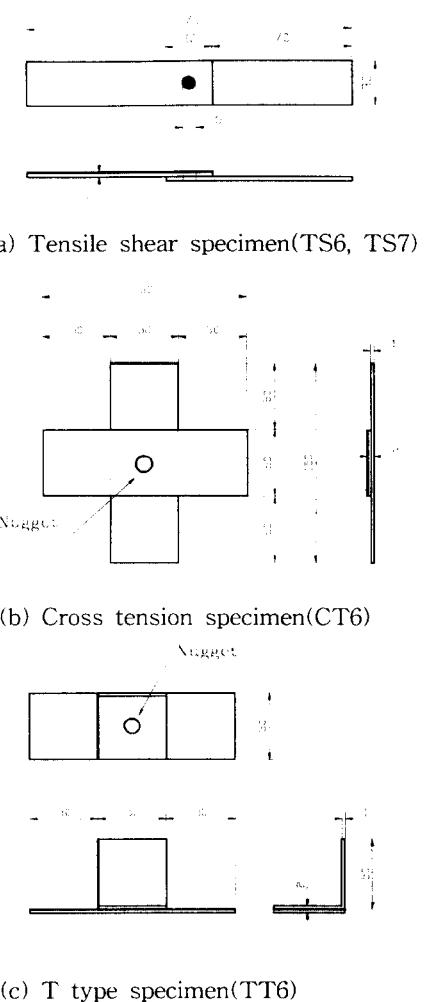


Fig. 1. Geometries of spot weld specimens

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 점용접부의 조직검사 및 경도분포

점용접부에 대한 조직조사 및 경도시험 결과는 Fig. 2, Fig. 3에 나타내었다. 조직사진에서 너깃부, 열영향부, 모재부가 선명히 들어나는 것을 볼 수 있으며 너깃부는 침상조직으로 매우 조직이 치밀하며 열영향부는 그 영역이 매우 작게 나타났으며 열의 전달과 냉각에 의한 재결정조직으로서 입자가 상당히 조밀화되어 있는 것을 볼 수 있다. 또한 경도분포에서 너깃부는 경도값이 전반적으로 높게 나타나며 열영향부의 경도값은 모재쪽으로 갈수록 급격히 감소함을 볼 수 있다. 너깃부는 접용접시 가열과 동

시에 가압이 이루어짐으로 조직이 치밀해짐으로 인해 그 경도값이 높게 나타나는 것으로 생각된다. 그러나 열영향부의 경도값은 용접시간에 따라 그 경향이 다르게 나타나며<sup>(8)</sup> 이러한 경도값의 급격한 변화는 피로강도를 떨어뜨리게 된다.



Fig. 2. Microstructure of welded joint

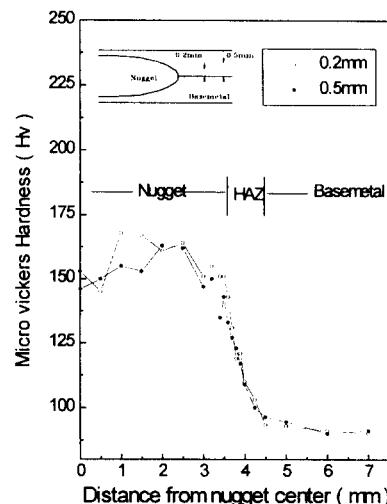


Fig. 3. Hardness distribution of weldmetal

#### 3.2 하중작용에 따른 피로한도 특성

피로시험에 앞서 각 시편의 정적강도를 평가하기 위하여 인장시험을 실시하였다. TS7과 TS6의 경우 인장강도의 뚜렷한 차이가 나타나지 않으므로 구별 없이 6번의 시험을 통한 평균값을 취하였다. 인장시험 결과 TS시편은 580kgf의 인장강도를 나타내었으며 CT6시편은 498.2kgf, TT6시편은 255kgf의 인장강도를 나타내었다. TS시편과 CT6시편은 그렇게 큰 차이를 보이지 않지만 TT6시편의 경우 두 시편에 비해 매우 낮은 정적강도를 나타내었다.

각 시편형상에 따른 작용하중범위(Load range)-파단수명( $N_f$ ) 선도는 Fig. 4와 같다. TS7의 경우 피로한도가 123.7kgf, TS6는 110.8kgf로서 너깃지름이 클수록 전반적으로 피로수명이 향상된다는 것을 알

수 있다.

CT6의 경우 피로한도는 23.4kgf, TT6의 경우 11.5kgf를 나타낸다. CT6시편은 TS6시편과 비교해 볼 때 정하중 시험에서는 비교적 높은 강도를 유지하는 반면에 피로강도는 현저히 낮게 평가되는 것을 볼 수 있다. 이는 점용접재에 대한 정하중 특성과 피로 특성이 서로 다르다는 것을 나타내는 것으로서 피로 특성이 하중의 작용방식에 매우 민감하다는 것을 나타낸다. TT6시편의 경우 정적강도 및 피로강도 모두 현저히 낮게 평가됨으로서 가장 취약한 구조를 나타내었다.

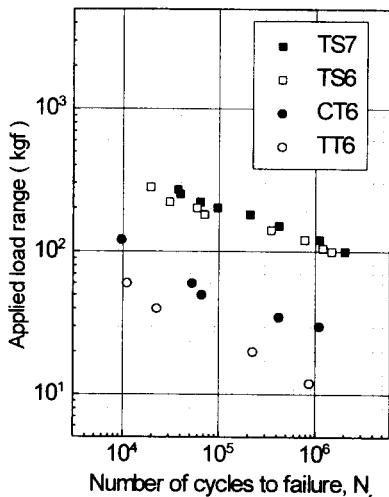


Fig. 4. Load range vs. fatigue life

### 3.3 내부크랙의 발생 및 하중에 따른 전파거동

시편의 기하학적 형상으로 인해 점용접부는 인장하중과 굽힘하중을 동시에 받게되고 그로인해 점용접부의 내표면과 외표면의 응력분포는 다르게 나타날 것이며 내표면에서 더 많은 인장응력이 작용할 것이다. 따라서 내부크랙의 발생위치 및 하중에 따른 전파거동의 파악이 필요하다고 보며 인장전단시편에 대해서 조사해 실증하였다. 내부크랙의 발생이 예상되는 시점에서 실험을 멈추어 너깃주위를 각도에 따라 절단하였으며 각도에 대한 크랙의 형상을 Fig. 5에 나타내었다. 또한 하중에 따른 내부크랙 중심부의 전파양상을 Fig. 6에 나타내었다. 위의 실험결과로부터 내부크랙의 발생위치는 너깃단의 열영향부이고 크랙발생방향은 하중에 관계없이 너깃쪽을 향해 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 전파거동은 하중에 따라 그 경향이 상당히 다름을 볼 수 있다. 즉 하중에 따라 3차원의 복잡한 형상을 띤다는 것을 알 수

있는데 저하중으로 갈수록 중심이 너깃으로 기울어진 타원형상을 나타내며 고하중으로 갈수록 중심이 모래쪽으로 기울어진 타원형상을 나타낸다.

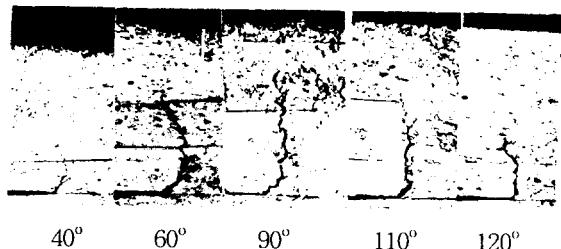


Fig. 5 Internal crack configuration as cutting angle ( $\Delta P=150\text{kgf}$ ,  $1.39 \times 10^5$  cycles)

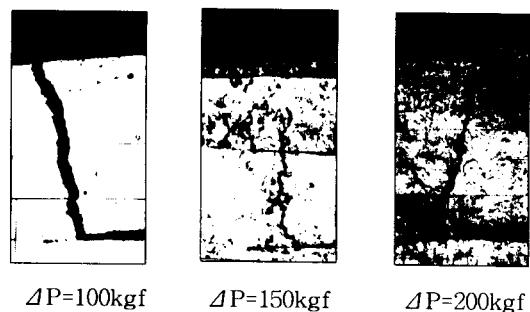


Fig. 6. Internal crack configuration as load range

### 3.4 시편형상에 따른 접용접부 주위의 응력해석

시편형상에 따른 점용접부 주위의 응력분포를 비교, 조사하기 위하여 유한요소해석을 실시하였다. 두께방향의 응력분포를 고려하여 3차원 solid 모델로 하였고 TS6시편은 1/2모델로 하였으며 CT6와 TT6는 전모델로 하였다. TS6시편의 요소수와 절점수는 각각 1320, 8058개이고 CT6시편은 2720, 14873개 TT6시편은 2700, 14723개로 하였다. 너깃부는 원형으로 하였고 두 원형부를 일체화 시킴으로서 너깃을 표현하였으며, 응력은 다축응력을 고려하여 Von Mises 상당응력을 나타내었다. 해석은 EMRC의 상용프로그램 NISA를 사용하였으며 작용하중은 각 시편의 비교를 위해서 같은 하중(5kgf)을 작용시켰다.

해석결과 두께 방향의 응력차가 뚜렷이 드러나는 것을 볼 수 있으며 내표면의 너깃단에 환상으로 응력이 집중하는 것을 볼 수 있다. 이는 크랙의 발생 위치와 매우 일치하는 구간이다. Fig. 7은 내표면의 중심축에 대한 응력분포를 나타낸 것이다. 너깃주위에서 응력이 급격히 상승하는 것을 볼 수 있는데 마

치 크랙선단의 응력분포와 매우 흡사한 경향을 나타낸다. Ueda<sup>(9)</sup>는 점용접 너깃주위의 잔류응력과 응력집중이 피로수명을 저하시키는 요인으로 보았는데, 점용접주위의 잔류응력보다 너깃단의 응력집중을 피로수명 저하의 더 큰 요인으로 보았다. 이와 같은 관점에서 너깃주위의 최대응력이 클수록 피로강도는 저하될 것으로 생각되며 또한 피로시험에서 이와 일치하는 결과를 볼 수 있었다.

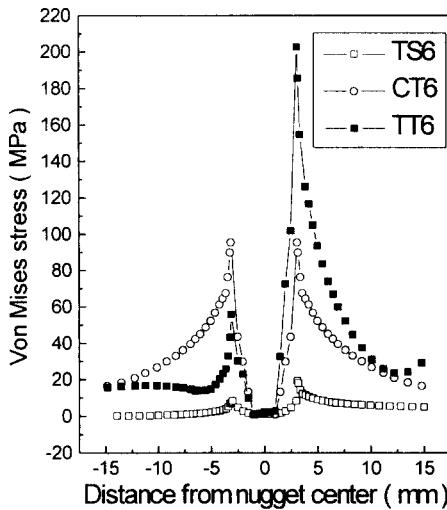


Fig. 7. Stress distribution near nugget

### 3.5 상당응력확대계수를 이용한 점용접부에 대한 피로강도 평가

Pook<sup>(5)</sup>과 結城<sup>(6)</sup>은 너깃선단을 예리한 노치로 보고 이에 대한 응력확대계수를 유도하였으며 Pook은 인장전단시편에 대해서 그리고 結城은 여러형상에 대하여 FEM을 통해 응력확대계수를 구하였다. 본 연구에서는 TS7과 TS6시편의 경우는 Pook의 유도식을 CT6시편과 TT6시편의 경우는 結城의 유도식을 이용하여 너깃선단에 대한 혼합모드하에서의 응력확대계수를 구했으며 Erdogan-Sih<sup>(10)</sup>의 최대인장응력조건을 이용하여 상당응력확대계수를 구하고 이것을 이용하여 각 시편형상에 대한 피로강도를 계적으로 재정리하였다.

최대인장응력조건을 이용하여 상당응력확대계수( $\Delta K_{\theta \max}$ )를 구하는 식은 다음과 같으며 여기서  $\theta$ 는 크랙의 발생방향을 나타낸다.

$$\Delta K_I \sin \theta + \Delta K_{II} (3 \cos \theta - 1) = 0 \quad \text{식 (1)}$$

$$\Delta K_{\theta \max} = \cos \frac{\theta}{2} (\Delta K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} \Delta K_{II} \sin \theta) \quad \text{식 (2)}$$

Fig. 8는 상당응력확대계수를 이용하여 피로강도를 재정리한 결과로서 각 시편에 대한 피로강도를 체계적으로 평가 할 수 있음을 볼 수 있다.

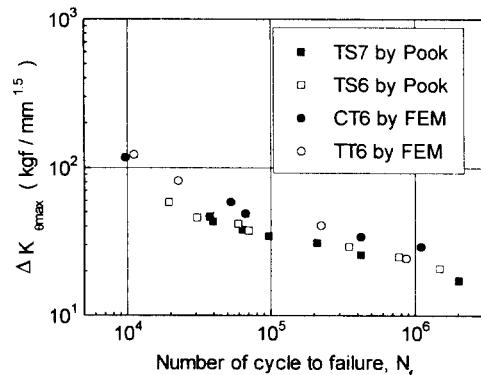


Fig. 8.  $\Delta K_{\theta \max}$  vs. Number of cycles to failure

### 4. 결론

하중작용방식에 따른 점용접부의 피로특성을 파악하기 위해 시편형상을 달리하였으며 이에대한 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) 인장전단시편의 경우 정적강도 및 피로강도가 다른 시편에 비해 전반적으로 높게 나타났으며 십자시편의 경우는 정적강도는 높은데 반해 피로강도는 매우 낮게 나타났다. T형 시편은 정적강도 및 피로강도 모두 취약한 양상을 나타냈다.
- (2) 인장전단시편에 대하여 각도에 따른 단면 절단을 통해 내부크래의 발생 및 형상 그리고 하중에 따른 전파거동을 파악할 수 있었다.
- (3) 유한요소해석을 통하여 각 시편의 응력분포와 크래의 발생위치 및 응력집중과 각 시편의 피로수명과의 관계를 파악할 수 있었다.
- (4) 점용접부 너깃단에 대한 상당응력확대계수를 구하여 각 시편의 피로강도를 재정리 할 수 있었다.

### 5. 참고문헌

(생략)