

고장력 강판의 점용접부에서 면내 굽힘 모멘트가 피로특성 및 균열 성장 거동에 미치는 영향에 관한 연구(I)

- 실험적 검토 -

성기찬* · 장경복** · 정진우* · 김기순*** · 강성수**

*부산대학교 대학원

**부산대학교 기계기술 연구소

***(주)현대자동차, 차체기술 설계팀

A Study on the Effect of Fatigue and Crack Propagation Behavior in Spot Weld of High Strength Steel(I) - Experimental Examination -

*Ki-Chan Sung, **Gyoung-Bok Jang, *Jin-Woo Jung, ***Ki-Soow Kim and **Sung-Soo Kang

*Dept. of Mechanical and Precision Engineering Graduate School, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

**Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

***Hyundai Motor Company, Body Manufacturing Engineering Planning Team, Ulsan 683-791, Korea

Abstract

The factor affecting on the fatigue strength of spot welded specimen have been studied. To analyze and predict crack initiation position and propagation directions on the spot welded area are very important for strength design of the automobile body structure. In fact, there are a various of loads in running automobile but, it is impossible to replay like an actual conditions in the laboratory. So, in this study tensile-shear type and in-plane bending type specimens were used in fatigue test and includes an analysis of fatigue crack initiation position and propagation directions about each specimens.

The results obtained in the present study are summarized as follows:

1. In tensile-shear type fatigue test, the region of fatigue crack initiation position was affected by out-of-plane bending deformation due to bending angle.
2. In in-plane bending type fatigue test, the behavior of fatigue crack initiation position and propagation directions due to angle between upper plate and lower plate was dominated by magnitude of in-plane bending moment.

(Received October 29, 2000)

Key Words : Crack initiation position, Crack propagation directions, Tensile-shear type specimens, In-plane bending type specimens

1. 서 론

자동차 메이커에서 개발한 새로운 차량은 고객에 인 도한 후 보통 여러 가지 도로조건에서 수년에서 수십년 까지 사용되며 그 주행거리도 수십만 킬로에 달한다. 그런데, 일반 운전자에 따른 차량의 사용조건은 자동차의

형상, 도로 주행 조건, 기후 조건 등에 따라 매우 다양 하며 이런 운전자의 사용조건에 부합되는 내구 신뢰성 을 갖도록 차량을 개발해야 한다. 고객이 만족할 만한 내구성을 지닌 차량을 개발하기 위해서 여러 가지 내구 시험을 수행하게 되고 이때 여러 불만족스러운 문제점 이 발생될 경우 가장 경제적이며 효과적인 보강방안의 마련이 필요하며 이 보강방안을 재확인하여 내구성에

문제가 없다는 판정이 내려지고 난 후 신차 개발 프로젝트는 완료되며 양산단계를 거쳐 고객에게 인도된다¹⁾.

승용차 한 대의 조립에는 차종에 따라 차이는 있지만 보통 3,500~4,000점 정도의 점용접이 적용되며 두께 1mm 전후의 얇은 철판을 점용접 하여 강도를 유지하기 때문에 안전성을 매우 중요시하는 자동차의 조립에서는 점용접부의 신뢰성 확보가 가장 큰 문제이다²⁾. 실질적으로, 실제 승용차 차체에서 발생하는 내구력상의 문제점 중 일반적으로 70% 이상이 점용접 주위에서 발생하고 있다. 이처럼 점용접 주위에서 문제점이 발생하는 것은 설계의 오류로서 발생하는 응력집중이나 용접불량에 의한 균열요인 제공 등에 주로 기인한다. 따라서, 내구성이 우수한 신뢰성 있는 승용차를 제작하기 위해서는 점용접부의 특성이해나 피로거동 연구 및 분석이 필요하다.

그런데, 여러 가지 재료에 대한 점용접부의 용접성³⁻⁵⁾ 및 피로특성에 대한 연구⁶⁻¹⁵⁾는 여러 연구자들에 의해서 그 자료가 축적되어 왔지만 자동차 차체나 철도차량 등과 같은 복합 하중을 동적으로 받는 점용접부의 피로균열 발생 및 균열성장 거동에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 그리고, 대부분의 연구가 점용접부에 단순 인장 전단 하중이 작용하는 경우에 대한 것이다. 즉, 인장 전단 외에 다른 하중이 복합적으로 작용하는 경우에 대한 연구 또한 미흡한 실정이다.

일반적으로 피로균열의 발생과 전파의 원인을 파악하기 위한 수단으로서 파단면에 나타나는 조개껍질 모양 혹은 비치마크(Beach mark)라고 불리는 피로 파면의 특유한 줄무늬모양을 이용한다^{16,17)}. 그러나, 승용차 차체의 경우 판의 두께가 약 0.8mm~1.4mm로 매우 얇기 때문에 이러한 방법으로 균열의 발생과 성장을 파악하기 어렵다. 이러한 경우에는 점용접된 판의 표면에 나타나는 균열(Crack)의 발생(Initiation)과 성장(Propagation)의 거동으로서 피로 파단(Fatigue failure)의 원인을 파악하는 것이 타당하다. 왜냐하면, 하중의 이력 균열 발생과 성장 거동의 관계를 데이터화하면, 현장에서 피로 균열의 발생시 이를 저지할 수 있는 내구 설계방안을 찾을 수 있기 때문이다.

이에 본 연구에서는 자동차 내구성능 테스트 시 발생하는 차체 구조물의 피로균열 발생 및 성장의 원인을 파악하기 위한 일환으로서 인장 전단형 시험편과 인장 전단 하중과 면내 굽힘 모멘트를 복합적으로 받는 시험편을 제작하여 동적 시험을 수행하고 작용하중과 점용접부의 균열 발생 및 성장거동의 상관관계를 데이터화하였다. 또한, 이러한 실험데이터를 바탕으로 피로

균열의 발생 및 성장거동을 예측할 수 있는 유한요소 모델을 정립하고자 하였다.

2. 시험방법

2.1 시험편의 종류

본 연구에서는 자동차 차체 및 각종 차량내부 판형 부품에 사용되는 고장력강판 SPRC35를 사용하였다. Table 1은 SPRC35의 화학성분을, Table 2는 기계적성분을 나타낸다.

Table 1 Chemical properties of base metal (wt%)

C	Mn	P	S	Al	Fe
0.004	0.43	0.072	0.007	0.029	Bal.

Table 2 Mechanical properties of base metal

Yield strength [kg/mm ²]	Tensile strength [kg/mm ²]	Young's modulus [kg/mm ²]	Elongation [%]	Strain hardening exponent
24.8	36.8	20,000	38.3	0.24

2.2 최적의 용접조건 및 피로수명

점용접에서 최적용접조건이라 함은 최대의 인장전단 강도를 가지면서 내부결합이 없는 용접부를 가지는 조건이라 할 수 있는데, 이를 결정하기 위한 인장전단시험을 수행하기 위해서 KS B 0851의 규격으로 인장전단 시험편(Tensile-shear specimen)을 제작하여 얻은 최적의 용접조건을 Table 3에 나타내었다. 또한, 적용하중의 크기가 피로균열의 발생 및 성장에 미치는 영향을 고찰하고 피로수명과 어떠한 관계를 가지는지 파악하기 위하여 인장전단형 시험편을 제작하여 피로시험을 수행하였으며 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 1와 같다.

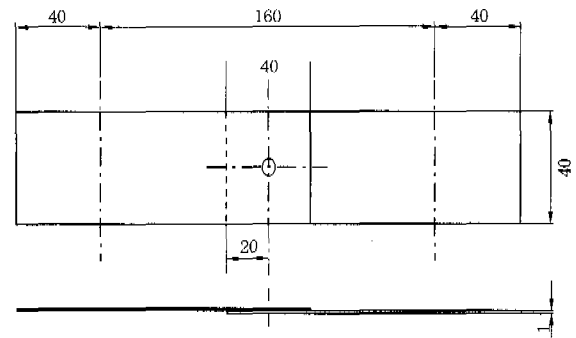


Fig. 1 Specimen geometry for TS type fatigue test

Table 3 Optimal welding condition

Welding current [A]	Applied force [kgf]	Squeeze time [cycle]	Weld time [cycle]	Hold time [cycle]
9,500	300	5cycle	10cycle	12cycle

2.3 면내굽힘형 시험편제작 및 시험방법

실 차체 구조물이 주행환경에 놓여 있는 경우 외부로부터 받는 하중은 매우 복잡하며 2방향 혹은 3방향으로 동시에 받는 경우도 있다. 그래서, 이러한 하중을 실제처럼 재연하여 시험하기는 매우 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 여러 가지 외부하중 가운데 인장전단하중과 면내굽힘 모우멘트가 적용접부에 작용하였을 때 피로균열의 발생과 균열성장에 대해서 시험하였다. 이를 위해서 인장전단형 시험편 (Tensile-shear type specimen)과 면내굽힘형 시험편(In-plane bending type specimen)을 제작하여 동적 피로시험을 수행하였다. 면내굽힘형 시험편은 면외인장하중과 면내굽힘 모우멘트의 비에 따라서 균열발생과 성장에 어떠한 영향을 미치는지 고려하기 위한 시험편으로서 이때 시험편 상판과 하판 사이의 각도는 각각 30°, 60°, 90°로 제작하였다. 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 2과 같다. 피로시험은 응력비 $R = P_{min}/P_{max} = 0$ 인 편진인장 조건으로 실시하였다. 변동 하중의 반복수는 20Hz로 하였으며, 피로균열의 발생수명은 피로균열이 적용접부에서 발생, 성장하여 외부에서 보았을 때 균열의 크기가 대체로 용접부 너깃직경의 크기와 거의 일치하는 5mm정도에 달하는 순간을 최종 피로파괴 시점으로 삼았다. 이러한 방법으로 인장전단형 시험편의 시험에서 하중별, 수명별로 피로균열 발생양상과 균열성장거동을 관찰하였다. 면내굽힘형 시험편은 우선, 면내 굽힘모우멘트의 크기가 피로수명에 미치는 영향을 파악하기 위하여 각 시험편에 동일한 하중을 부여하여 피 시험을 수행하였으며, 다음으로 피로균열의 발생 및 전진거동을 파악하기 위하여 반복하중이 약 $1 \sim 2 \times 10^6$ cycle의 장수명으로 진행하였을 때 피로균열이 발생하도록 하중조건을 설정하여 피로균열의 발생과 성

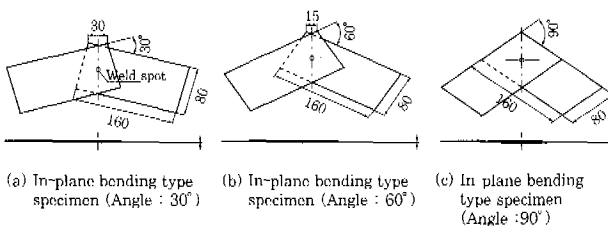


Fig. 2 Geometry and dimension on IB type specimens

장거동을 관찰하였다. 피로균열의 발생과 성장거동의 관찰을 위해서 광학현미경과 균열진전측정용 현미경을 이용하여 시험편 단면과 판의 표면을 촬영하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 인장 전단형(TS) 시험편

피로파괴(Fatigue failure)에 대한 접근에는 크게 3가지 방법이 사용되어지고 있는데 응력에 기초를 둔 방법(Stress-based approach)과 변형률에 기초를 둔 방법(Strain-based approach), 마지막으로 파괴역학을 이용한 접근법(Fracture mechanics approach)이 그것이다. 본 연구에서는 응력에 기초를 두어 인장전단형 표준 시험편을 이용하여 피로시험을 수행하였으며 피로한도의 기준은 1×10^6 cycle로 하였는데 이는 Sawhill5) 등이 적용접 구조물에서는 산업계의 실용상 1×10^6 cycle 정도의 강도가 적절하다고 보고하고 있으므로 이를 참조하였다.

Fig. 3에 시험편의 하중범위와 파단수명과의 관계를 반대수 좌표상에 나타내었는데, 본 연구에서 사용된 고장력 강판은 1.2×10^6 cycle의 피로수명에서 약 1.7kN의 피로강도를 지님을 알 수 있다. 인장전단형 표준 피로 시험편을 이용하여 하중별로 피로시험을 수행하고 피로수명과 피로균열의 길이와 굽힘각의 관계를 고찰하기 위하여 피로강도를 기준으로 고하중, 중하중, 저하중 영역에서 각각 피로균열의 길이와 굽힘각을 측정하였다.

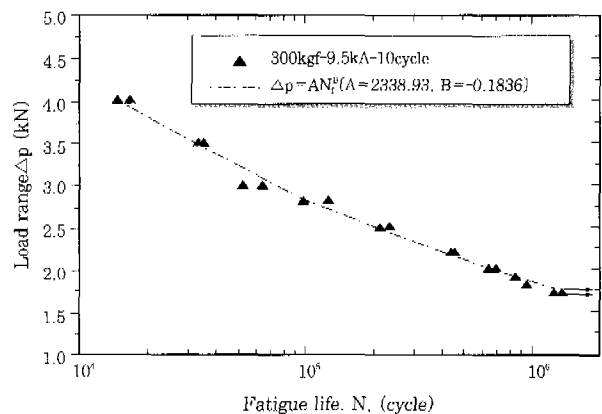


Fig. 3 Fatigue failure life on SPRC35

Fig. 4는 측정된 피로균열의 길이와 굽힘각의 정의를 나타내고, Fig. 5는 피로시험 시에 최종변위를 0.2mm로 고정하였을 때 하중범위와 파단수명에 따른 굽힘각과 표면균열의 길이변화를 나타낸다.

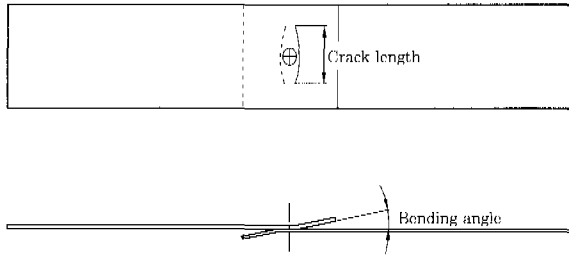


Fig. 4 Definition of fatigue crack length and fatigue bending angle (final displacement : 0.2mm)

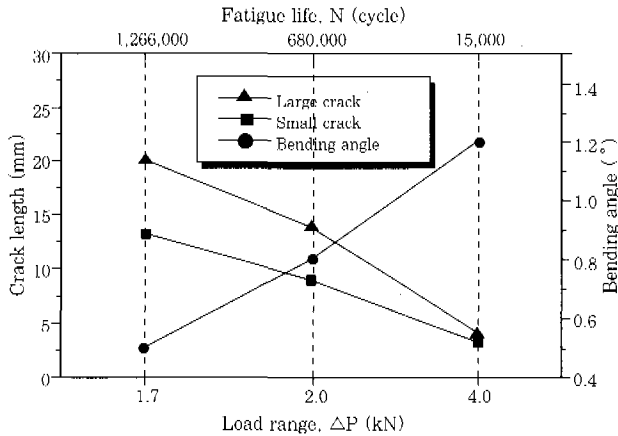


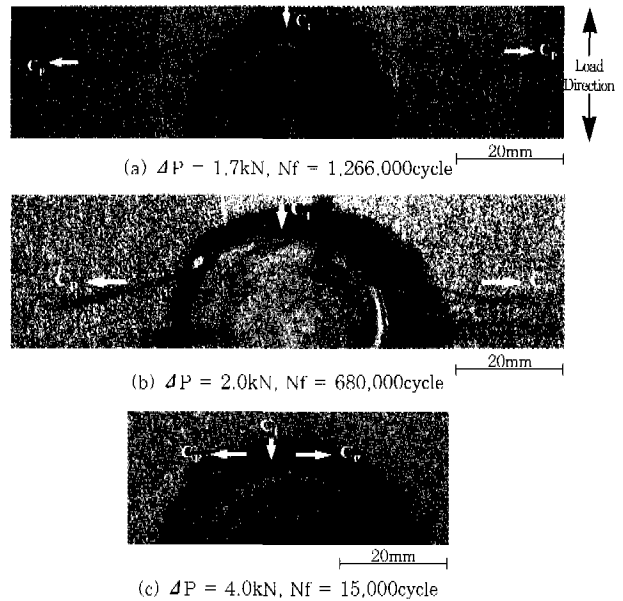
Fig. 5 Variation of bending angle and crack length for each load range in the fatigue test having 0.2mm final displacement

고하중 범위, 4.0kN의 경우 균열의 길이는 길게 나타나고 굽힘각은 작게 나타난다. 반대로 저하중 범위, 1.7kN의 경우 균열의 길이는 작고 굽힘각이 크게 나타남을 알 수 있다. 또한, 파단수명에 대해서는 피로균열의 길이와 굽힘각의 변화가 하중범위와 반대의 경향을 보인다. 이것은 고하중일수록 균열의 길이는 작아도 상대적으로 굽힘이 많이 발생함에 의해 두께 방향의 면외 굽힘변형이 커져 변위가 크게 되고 저하중일 경우에는 굽힘이 작은 대신 균열의 길이가 증가하여 변위가 커지게 됨을 의미한다.

Fig. 6은 판 외표면에서의 각 하중별, 수명별 균열의 발생과 진전양상을 거시적으로 나타내었다. 그림에서 (a), (b), (c) 모두 피로균열의 발생이 있는 후 하중이 작용하는 방향의 직각 방향으로 진전하는 것을 관찰할 수 있다.

균열의 형태를 보면 (a), (b)와 같이 저하중의 경우는 균열선단이 날카롭게 나타나며 균열길이 또한 길게 나타나고 있으나 (c)와 같이 고하중의 경우는 균열선단이 비교적 명확하게 구분되며 균열길이 또한 짧다. 이것은 고하중의 경우가 저하중에 비해 시험편에 두께 방향의 면외 굽힘 모우멘트가 크게 발생하여 굽힘각이 크게 나타나기 때문이다. 그리고, 비교적 저하중, 장수

명 조건인 (a)와 (b)에서는 균열이 발생한 이후 균열의 진전거동을 보면 너깃 원주방향으로 돌아서 진전하다가 하중방향과 직각방향으로 진전하는 것을 관찰할 수 있는데 이것 또한 두께방향의 면외 굽힘 모우멘트에 의해 발생한 굽힘에 의한 것이라 생각되며 굽힘 모우멘트가 비교적 덜 발생하는 (a)P=1.7kN의 경우 균열이 너깃의 원주에 접하는 정도가 더 작음을 관찰할 수 있다.



where, CI = Crack initiation region, CP - Crack propagation direction

Fig. 6 Behavior of surface crack for each load range (final displacement = 0.2mm)

3.2 면내굽힘형(IB) 시험편

면내굽힘형 시험편은 면내력에 의한 변형과 강도가 중요시되는 부재를 시험하기 위해 고안된 시험편으로서 인장전단력에 의해서 면내변형(In-plane deformation)이 발생하며, 상판과 하판 사이의 각도에 의해 발생하는 굽힘 모우멘트로 인해서 면내회전(In-plane rotation)이 발생하고 판두께에 의한 편심굽힘으로 인해 면외굽힘변형(Out of plane bending deformation)이 발생한다. 그리고, 시험편에 하중이 작용하였을 때 시험편의 너깃단은 이러한 복합하중을 동시에 받는다. 이때, 각 시험편의 너깃단에 적용되는 인장전단하중의 크기는 모든 시험편에 대해서 동일하게 작용한다. 그러나, 면내 굽힘 모우멘트의 크기는 상판과 하판 사이의 각도가 달라짐으로 인해서 시험기의 인장축과 너깃 중심 사이의 거리가 판사이의 각도가 커짐에 따라 점점 길어짐으로 인해서 차이를 나타낸다.

이때, 시험편에서의 면내굽힘모우멘트, M_{ib} 의 크기

는 다음과 같이 계산되어진다.

$$M_b = P \cdot l \tag{1}$$

여기서, P는 적용하중이며 l은 인장축과 너깃 중심 사이의 거리이다.

본 연구에서는 TS시험편의 피로 하중인 1.7kN의 하중을 각 시험편에 동일하게 적용하였다. 이때 각 시험편이 받는 인장하중과 면내 굽힘 모우멘트의 크기를 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Applied load for each specimen

Angle of specimen	30°	60°	90°
Tensile-shear load, P [kN]	1.7	1.7	1.7
Distance between nugget center and tensile axis, l [mm]	19.64	54.79	81.57
In-plane bending moment, Mib [kN · mm]	33.39	93.14	138.67

Table 4에서 나타난 바와 같이 상판과 하판 사이의 각도가 커짐에 따라서 인장축과 너깃중심 사이의 거리가 길어지고 이로 인해 면내 굽힘 모우멘트의 크기가 커지고 있다. 위의 계산에서 사용된 동일한 하중 1.7kN으로서 하중제어로 피로시험한 결과를 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Fatigue failure life as angle of specimen (applied load : 1.7kN)

Angle of specimen	30°	60°	90°
Fatigue failure life [cycle]	1,007,000	653,000	417,000

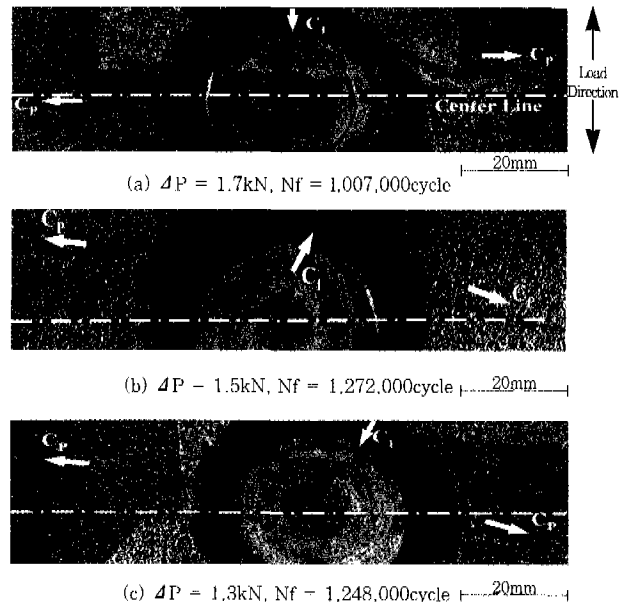
Table 5에서 피로수명은 판사이의 각도가 30°일 때 가장 길고 90°일 때 가장 짧게 나타나는데, 이것은 면내 굽힘 모멘트에 의한 면내회전의 크기가 시험편의 피로강도에 크게 영향을 미친다는 것을 나타내고 있다. 이러한 면내 굽힘 모멘트가 피로 특성에 미치는 영향을 정량적으로 고찰하기 위해 Table 6에 각 시험편에서의 면내 굽힘 모우멘트의 크기와 피로수명 사이의 관계를 30° 시험편을 기준으로 하여 비로 나타내었다.

Table 6 Relation of in-plane bending moment and fatigue failure life

Angle of specimen	30°	60°	90°
In-plane bending moment, Mib [kN · mm]	33.39	93.14	138.67
Ratio	1.00	2.79	4.15
Fatigue failure life [cycle]	1,007,000	653,000	417,000
Ratio	1.00	0.64	0.41

면내 굽힘 모우멘트의 크기는 각도 60°인 시험편이 30° 시험편의 2.79배 90° 시험편이 4.15배를 나타내며 피로수명은 각각 0.64배와 0.41배를 나타낸다. 이때, 상판과 하판 사이의 각도가 커짐에 따라 면내 굽힘 모우멘트가 커지는 비율에 비해서 피로수명이 줄어드는 비율이 다소 완만하게 나타나는데 이것은 굽힘 모우멘트의 크기가 커짐에 의해서 단수명 조건에 가까워지기 때문이라 생각된다.

Fig. 7는 각 형태의 시험편에서 대략 1~2×10⁶의 장수명 영역에서 피로균열이 발생하도록 하중을 설정하여 피로시험을 수행하여 판 표면에서의 피로 균열의 발생 및 성장 거동을 관찰한 것이다. 각 그림에 적용 하중과 피로 수명이 나타나 있는데, 모두다 1×10⁶ 이상의 장수명 영역에서 시험되었음을 알 수 있다. CI는 피로 균열의 발생위치를 나타내는데 Fig. 6에 나타난 인장전단형 시험편의 균열발생위치와 비교하면 균열의 발생위치가 너깃 중심에서 약간 오른쪽으로 치우쳐 있음을 확인할 수 있다. Fig. 7 (a)~(c)를 각각 비교하면 시험편 상판과 하판 사이의 각도가 커짐에 따라서 균열의 발생 위치가 다소 오른쪽으로 이동함을 확인할 수 있는데 이러한 현상은 면내 굽힘 모우멘트가 점용점부 위쪽에서 시계방향으로 작용함에 기인하며 각도가 커짐에 따라서 더욱 큰 모우멘트가 작용하기 때문이라 생각 된다. Fig. 8에 균열의 성장거동을 서로 비교하기 위하여 각 시험편의 균열 성장방향을 동시에 나타내었다.



where, CI = Crack initiation region, CP = Crack propagation direction

Fig. 7 Behavior of surface crack on each IB specimens (Angle between upper and lower plate : (a) 30°, (b) 60°, (c) 90°)

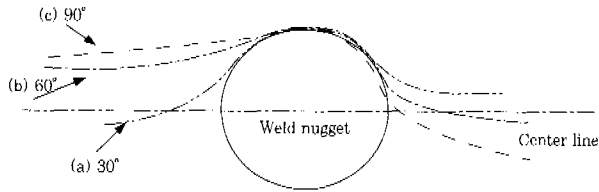


Fig. 8 Crack propagation direction on each IB specimens

너깃 좌측의 균열진전거동을 보면 상하판 사이의 각도가 30°인 경우는 너깃 원주를 따라서 내려오다가 거의 하중방향과 수직인 방향으로 균열이 진전하는데 이와는 반대로 90°인 경우는 너깃 원주를 따라서 내려오지 않고 곧바로 균열이 진전한다. 그리고 60°인 경우는 두 경우의 중간에 위치하고 있다. 이러한 현상은 균열의 발생위치와 무관하지 않으며 면내 굽힘 모우멘트가 너깃 위쪽에서 시계방향으로 작용하며 각도가 커질수록 면내 굽힘 모우멘트가 커지기 때문이라 생각된다. 너깃의 우측은 이와 반대로 90°인 경우가 균열의 성장 방향이 가장 아래로 향하고 있다.

결론적으로, 면내굽힘형 시험편에서의 균열발생과 진전거동은 각도가 커질수록 전체적으로 오른쪽으로 이동함을 관찰할 수 있는데 이것은 면내 굽힘 모우멘트가 너깃 위쪽에서 시계방향으로 작용하기 때문이라고 생각되며 현장에서 부재(Sub-structure)에 이러한 형태의 피로균열이 발생하였다면 균열의 발생원인으로서 인장하중 외에 면내 굽힘 모우멘트가 작용하였음을 파악할 수 있고 이러한 경우에 면내 굽힘 모우멘트에 견딜 수 있도록 차체를 재 설계하거나 보강방안을 마련하는 것이 필요할 것으로 여겨진다.

4. 결 론

면내 굽힘 모멘트가 점용접부의 피로특성 및 균열 성장거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 고장력 강관을 이용하여 인장 전단형 및 면내 굽힘형 점 용접 시험편을 제작하여 피로 시험을 수행하여 피로 수명과 균열 발생과 성장 거동을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 인장전단형 피로 시험편에서 고하중 범위에서는 큰 굽힘각으로 인한 면외 굽힘 변형이 커져 너깃단에 근접하여 균열이 발생하였고, 저하중 범위에서는 너깃단에서 약간 떨어진 곳에서 균열이 발생, 성장 하였다.

2) 면내 굽힘형 피로 시험편에서 이음각에 따른 균열의 발생과 성장거동은 너깃단에서 오른쪽 방향으로 발생하는 면내 굽힘 모우멘트의 크기에 의해 크게 지배

를 받았다. 즉, 상판과 하판사이의 각도가 커져 면내 굽힘 모우멘트가 커질수록 균열의 발생과 성장은 전체적으로 너깃을 중심으로 오른쪽으로 이동 하였다. 그러므로, 현장에서 이러한 균열 양상이 관찰될 경우 면내 굽힘 모우멘트에 견딜수 있는 설계 및 보강 방안이 요구된다.

3) 향후 이러한 실험 결과를 토대로 점용접 구조물의 균열 발생 및 성장 거동을 예측할 수 있는 수치적 모델을 정립하여 실 차체 구조물에 적용할 수 있는 방안이 요구되어진다.

참 고 문 헌

- 정원옥 : "차체 박판 구조물의 점용접부 내구력 보강 및 평가에 관한 연구", 부산대학교 박사학위논문, 1998
- 박황호 : "자동차 분야에서의 용접기술 응용현황", 대한용접학회지, 제10권, 제4호, (1992), pp. 107-116
- B. Pollard : "Spot Welding Characteristics of HSLA Steel for Automotive Applications", Welding Journal, 1974(8), pp. 343-350
- 山 正 : "超高强度冷延鋼板の スポット溶接継手の 強度特性", 溶接學會論文集, 第17卷, 第4, (1999), pp. 553-560
- 青山成恒, 藤本正男 : "スポット溶接し冷延鋼板の疲労強度", 材料, 第24卷, 第259, pp. 44-50
- 熊倉重典, 武田武信, 佐藤健夫 : "点溶接した低炭素鋼板の疲れ挙動", 溶接學會誌, 第48卷, 第7, (1979) pp. 482-488
- 日本自動車技術會 : "スポット溶接 手疲労強度データ集", 1987
- Tomioka, N. : "Joint stiffness identification of body structure using neural network", Journal of JSME A, Vol. 62, No. 595, (1996), pp. 219-225
- 서창민, 강성수 : "고장력강관과 아연도금강관의 피로특성 II", 대한기계학회논문집, 제13권, 제2호, (1989), pp. 229-235
- Okuno, S. : "Fatigue test of an actual car body structure investigation strength evaluation methods for spot welded joints", Journal of JSME A, Vol. 59, No. 562, (1993), pp. 1543-1549
- 송삼홍, 김부동 : "점용접부의 피로거동과 응력분포", 대한기계학회논문집, 제8권, 제3호, (1984), pp. 224-231
- 日本溶接學會 : "スポット溶接技術資料", 1983, pp. 12-89
- Bosch : "Automotive Handbook", 1993, pp. 320-350
- 日本自動車技術會 : "自動車技術ハンドブック-試験, 評價編", 1991, pp. 81-105
- Hideo Kitagawa : "Fatigue strength of single spot-welded joints of rephosphorized high-strength and low carbon steel sheets", SAE, 850371. (1985), pp. 1-13
- ASM E HANDBOOK, Volume 12 : "Fractography", 1987, pp. 111-143
- 溶接學會溶接冶金委員會編 : 鐵鋼溶接部の 波面寫眞集, 黒木出版社, (1982), pp. 379