

직류전위차법을 이용한 점용접부의 피로수명 평가

유효선* · 이송인* · 권일현* · 안병국**

* 전북대학교 기계공학부 자동차신기술연구소

** 전북대학교 국책지원사업단

Fatigue Life Evaluation of Spot Weldment Using DCPDM

Hyo-Sun Yu*, Song-In Lee*, Il-Hyun Kwon* and Byung-Guk Ahn**

* Mechanical Engineering School, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

** Nationally Accredited High-Tech Engineering Center, Chonju 561-756, Korea

Abstract

The initiation and propagation lives of fatigue crack were studied for spot weldments composed of cold rolled steel plates(SPC×SPC) and galvanized steel plates(GA×GA) using DC potential drop method(DCPDM). Through the various test results, it was known that the fatigue crack initiation and propagation behaviors in all specimens could be definitely detected by DCPDM. The fatigue crack initiation life(N_i) detected by DCPDM in SPC×SPC and GA×GA spot weldments increased as the welding current and the nugget diameter(N_d) increased. The fatigue crack propagation life($\Delta N_{f,i}$) defined as the difference of N_i and the fatigue fracture life(N_f) also increased according to the decrease of fatigue load, ΔP and the increase of nugget diameter. In the same spot weldments, the increase of nugget diameter came to increase fatigue crack propagation life owing to a decrease of stress concentration in front of nugget, especially the increasing extent for GA×GA spot weldment was very high. In the welding current 6kA, N_i for GA×GA spot weldment decreased more than that of SPC×SPC specimen due to zinc layer coated in steel plate and undersized nugget diameter. On the other hand, in 8kA and 10kA, the GA×GA spot weldment showed higher N_f in spite of lower N_i than that of SPC×SPC specimen except 3,000N fatigue load. (Received August 2, 2000)

Key Words : Spot welding, Fatigue crack initiation life, Fatigue crack propagation life, Fatigue fracture life, DC Potential drop method, Nugget diameter, Cold rolled steel plate, Galvanized steel plate

1. 서 론

점용접(spot welding)은 금속박판을 접촉시켜 압력을 가한 상태에서 대전류를 통전시킴으로써 얻는 접촉부분의 저항발열에 의해 용접이 이루어지는 고온 압접법의 일종으로 자동화나 생산성 향상의 측면에서 자동차, 항공기, 철도 등의 수많은 박판 부재의 강도를 유지하는데 매우 중요한 용접법이다^{1,2)}. 그러나 점용접부는 용접조건에 따라 발생되는 조직변화와 잔류응력(residual stress) 및 응력집중(stress concen-

tration), 너깃직경(nugget diameter)의 변화 등으로 인해 인장-전단강도(tensile-shear strength) 및 피로강도(fatigue strength)에 큰 영향을 받는다^{3,4)}. 특히 피로강도는 모재(base metal)에 비해 낮아 구조물의 내구성 측면에서 문제가 되고 있어 점용접부의 수명은 용접부의 피로강도에 의해 결정되는 경우가 많다^{5,6)}.

일반적으로 점용접부에서의 피로균열은 두장 이상의 박판이 중첩되어 압접된 부분의 선단인 내면의 모재부나 열영향부(HAZ)에서 발생하고, 반복 사이클의 수가 증가함에 따라 너깃 경계근처를 따라 3차원적인 복잡한 형태로 성장하여 시험편 두께를 관통한 후 표면

균열로 성장해 나간다. 따라서 이동현미경에 의한 내면상의 균열발생 및 성장의 검출이 곤란하여, 점용접 시험편에 대한 피로균열의 개시와 전파에 대한 정량적인 관찰에는 많은 어려움이 있다. 이러한 점으로 小野²⁾ 등은 스트레인게이지를 이용하여 내외면 변형률을 측정하고 변형률의 변화에 의해 피로수명 평가를 시도하였으나, 이 경우 피로반복수가 증가함에 따라 시험편 변형의 증가로 인해 스트레인 측정에 한계가 있어 새로운 피로수명의 평가방법이 요구된다.

본 연구에서는 자동차 차체 재료로 널리 사용되는 냉연강판과 아연도금강판을 대상으로 다양한 용접전류조건에 따라 인장-전단시험을 통해 얻은 적정 용접조건과 실기현장을 고려한 용접조건에 의해 용접된 시험편을 대상으로 하중제어 피로시험을 실시하여 피로수명을 평가하였다. 이때 피로시험과 동시에 직류전위차법(DC potential drop method : DCPDM)을 이용하여 피로균열의 개시 및 전파거동에 따른 피로수명을 평가하였으며, 그 결과는 종래 표면균열거동으로부터 얻어진 피로수명 평가결과와 비교·검토되었다.

2. 시험편과 실험방법

2.1 시험편

본 연구에서 사용된 재료는 두께 1mm인 냉연강판(cold rolled steel plates : SPC)과 아연도금강판(galvanized steel plates : GA45)이다. 이때 아연강판의 경우 아연 도금량은 45g/m²이다. 사용된 용접기는 용량이 75kVA인 단상교류식 단점 공압정치식 용접전류계로서 용접전류와 시간은 디지털식 프린터 부착 용접전류계를 사용하여 측정, 제어하였다. 가압력은 250kg으로 가압력 측정계를 사용하여 유지하였다.

인장-전단시험편은 JIS Z 3136³⁾에 의거하여 Fig. 1과 같은 형상으로 100×30×1mm의 강판을 30mm 겹친 후 1점용접을 실시하여 제작하였고, 이때 용접전류는 5~13kA, 용접시간은 15cycle로 하였다. 그리고 피로시험편은 인장-전단시험편과 같은 크기의 시험편을 이용하였으며, 시험편의 조합은 SPC×SPC와 GA×GA 조건으로 하였다. 피로시험편 제작시 용접전류는 적정 용접전류조건과 그 값의 약 ±25%의 용접전류 조건을 채택하였다. 용접시 사용된 전극은 산화알루미늄 분산강화동인 R형 돔(Dome)식 전극을 사용하였고, 이때 전극 선단경은 피용접물 두께 t에 대해 5√t에 해당하는 5mm로 하였다. Table 1에 사용된 재료의 화학적 조성과 기계적 성질 그리고 용접조건 등을 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of used steel and welding conditions

(A) Chemical compositions (wt. %)

| Element steel | C | Si | Mn | P | S | Ni | Al | Fe |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| SPC/GA45 | 0.043 | 0.019 | 0.424 | 0.079 | 0.007 | 0.026 | 0.047 | Bal. |

(B) Mechanical properties

| Property steel | Tensile Stress (kgf/mm ²) | Yield Stress (kgf/mm ²) | Elongation(%) |
|-------------------|--|--|---------------|
| SPC/GA45 | 32.7 | 17.6 | 45 |

(C) Welding conditions

| Condition steel | Welding Current (kA) | Electrode Force (kgf) | Squeeze Time (cycle) | Welding Time (cycle) | Holding Time (cycle) |
|--------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| SPC/GA45 | 5~13 | 250 | 30 | 15 | 10 |

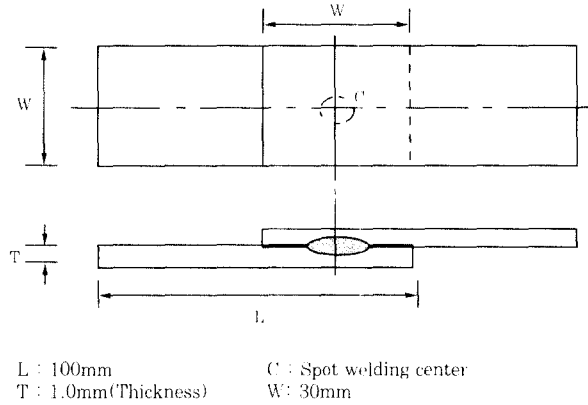


Fig. 1 Schematic diagram and dimensions of test specimen

2.2 실험방법

점용접부의 다양한 용접전류 변화에 따른 정적 용접강도를 평가하기 위하여 용량 15 ton의 인장시험기에 의해 시험속도 2mm/min.로 인장-전단시험을 수행하고 JIS-A Class⁴⁾에 준하여 적정 용접조건을 설정하였다. 그리고 용접조건별 너깃 관찰은 시험편의 용접부 중앙을 표면에 수직방향으로 절단한 후 측정하였다.

피로시험은 용량 10ton의 유압식 동적 피로시험기를 이용하여 주파수 10Hz, 응력비 R≒0에서 하중제어조건으로 실시하였다. 점용접 결합부의 내면에서 먼저 발생하는 피로균열의 발생과 전진거동을 평가하기 위해 도입된 직류전위차법의 시험장치와 시험편의 입·출력 단자 위치는 Fig. 2에 나타내었다. 피로시험중 전기적 연결부의 문제점들을 제거하기 위해 입·출력 단자는 너깃을 중심으로 각각 4cm, 2cm 떨어진 위치에 약 φ2mm을 갖는 홀(hole)을 가공한 뒤, 볼트와 너트를

이용하여 고정시켰다. 입력 값은 5A, 3.77V로 일정하게 하였으며, 시험편의 출력단자에서 얻은 전위차는 증폭기에 의해 300배 증폭되고, A/D 변환기를 거쳐 DAS(data acquisition system)를 이용하여 최종적으로 사이클(cycle) 수에 대해 기록되었다.

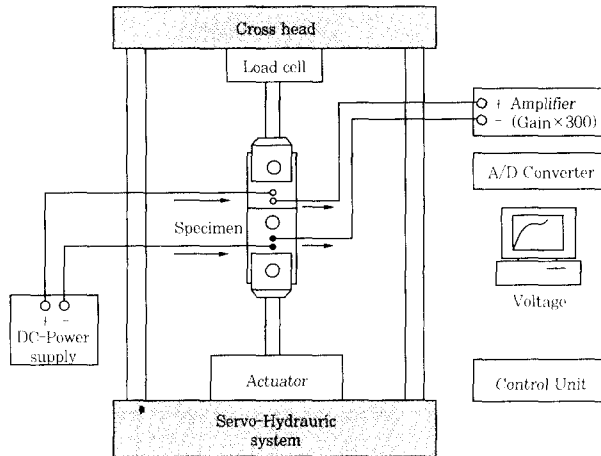


Fig. 2 Schematic diagram of fatigue test and DC potential drop method system

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접전류변화에 따른 용접강도 평가

Fig. 3은 용접전류 5~13kA의 범위에서 점용접을 실시한 시험편으로부터 얻은 인장-전단강도에 미치는 용접전류의 영향을 보여주고 있으며, 두 종류의 시험편에서 용접전류가 증가함에 따라 강도 값은 증가하고 있다. 이 그림에서 약 7.5kA 이하의 저 용접전류에서는 GA×GA 시험편의 경우가 SPC×SPC 경우보다 매우 낮은 인장-전단강도 특성을 보이고, 약 7.5~8.0kA의 용접전류 범위에서는 거의 같은 약 4,100~4,500N 정도의 강도를 나타내고 있다. 그러나 9kA 이상의 고용접전류영역에서는 GA×GA 시험편이 다른 시험편의 경우 보다 높은 인장-전단강도 특성을 보이고 있다. 이와 같이 저 전류측에서 GA×GA의 경우가 SPC×SPC 보다 낮은 용접강도를 보이는 것은 용접 시 용접이 낮은 아연도금층이 비접촉부에 흘러들어가 접촉면적이 커져 결국 전류밀도가 낮아진 결과로 판단된다.

반면, 고 전류측에서 GA×GA가 SPC×SPC 경우보다 높은 인장-전단강도를 보이는 것은 높은 용접전류로 인해 피용접물의 두께 1mm에 대한 적정 너깃크기 이상의 형성과 함께 도금층에 기인한 낮은 전류밀도로 인해 냉연강판보다 용접부 두께방향으로의 너깃두께가 크기 때문이라고 사료된다. 이러한 결과들을 JIS에서 권

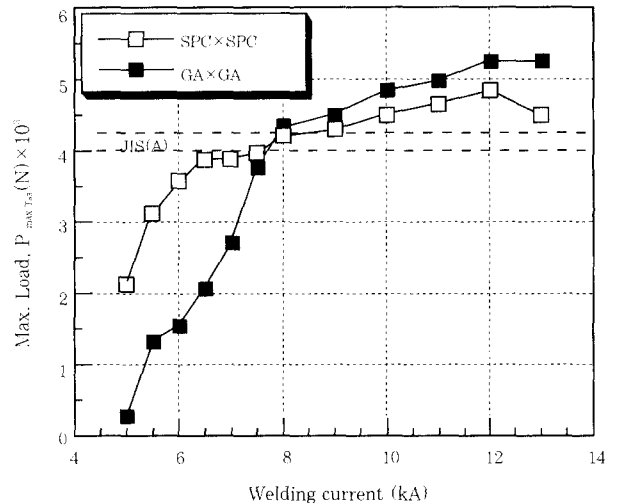


Fig. 3 The effects of welding current on tensile-shear strength

장하는 A-Class 값에 비교해 보면 적정 최저 용접전류는 두 종류의 시험편 모두가 약 8kA임을 알 수 있다.

3.2 직류전위차법에 의한 피로균열 개시와 전파 거동 평가

직류전위차법(DC potential drop method : DCPDM)은 시험편의 단면에 일정전류를 흐르게 함으로써 시험편에 균열이 발생할 때 균열길이의 증가에 의해 초래되는 저항의 변화를 전위차의 변화로 측정하여 시험재의 균열 개시시기 및 전파거동을 연속적으로 평가할 수 있는 방법으로 알려져 있다¹⁰⁻¹²⁾.

Fig. 4는 8kA의 용접전류조건에서 몇몇 하중조건하의 피로시험 중에 얻은 DCPDM의 결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 것과 같이 세가지 하중조건에서 초기전압 값이 각기 다르나, 전위곡선상의 변화에 있어 뚜렷한 변곡 거동을 관찰할 수 있다. 본 연구에서는 전위곡선상의 변곡점 거동과 초기 출력 값을 고려하여 피로균열 개시수명 (fatigue crack initiation life : N_i)을 결정하였다. 이때 N_i는 그림에서 관찰할 수 있듯이 작용 피로하중의 증가에 따라 감소되고 있다.

이와 같이 전위곡선상의 피로균열개시 거동을 직접 확인하기 위하여 용접전류 8kA, 피로하중 2,500N의 조건에서 전위곡선상의 N_i를 지나 뚜렷한 변곡이 발생될 때 시험을 중단한 후 점용접부의 횡단면을 관찰한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 사진에서 보는 바와 같이 가장 큰 응력이 발생될 것으로 예상되는 너깃부 상하 선단부위에서 피로균열이 개시되고 있음을 볼 수 있어 DCPDM에 의하여 점용접부의 내부 피로균열 개시거동을 유용하게 탐지할 수 있음을 알 수 있다.

용접전류 8kA의 조건에서 DCPDM에 의하여 평가된 피로균열 개시수명, N_i 와 피로균열이 개시, 전파되어 최종 파괴되었을 때의 수명 (fatigue fracture life : N_f)을 부하된 하중범위에 따라 Fig. 6에 나타내었다.

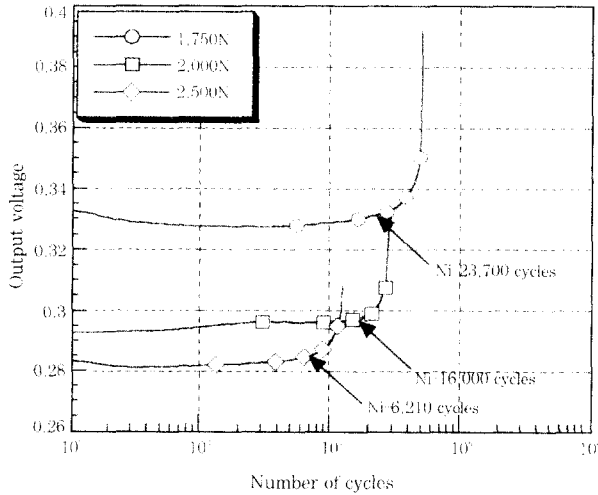


Fig. 4 DC potential drop curves with applied load for SPCxSPC spot weldment welded in 8kA



Fig. 5 Fatigue cracking behavior at $N=7,500$ cycles for SPCxSPC spot weldment welded in 8kA (applied load : 2,500N)

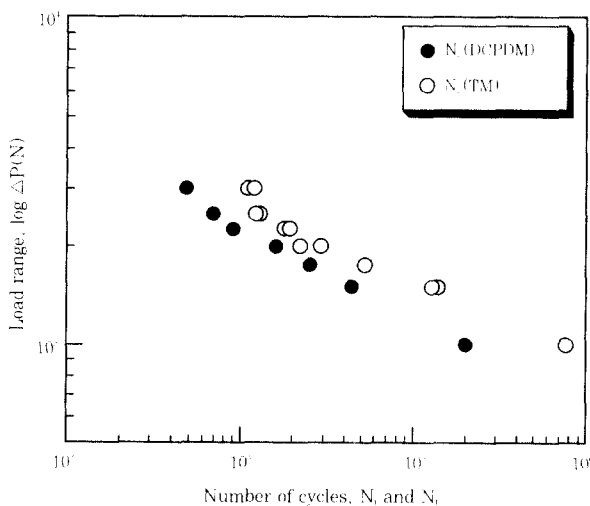


Fig. 6 The relationship between ΔP and No. of cycles to fatigue crack initiation (N_i) and final failure(N_f) for SPCxSPC spot weldment welded in 8kA

여기서 N_i 는 피로균열이 용접부의 두께방향을 따라 전파된 후 용접부 표면의 압흔둘레의 약 1/4 크기로 성장되었을 때를 이동현미경(TM)을 통하여 관찰한 후 이때의 피로반복수로서 결정하였다. 이 그림에서 DCPDM에 의하여 평가된 피로균열 개시수명, N_i 는 표면균열 거동에 의한 피로수명, N_f 보다 작음을 알 수 있어 점용접부에 대한 보다 보수적인 피로수명 평가가 가능함을 알 수 있다. 또한 작용하중범위, ΔP 가 감소함에 따라 N_i 와 N_f 사이의 차이는 점차 증가하고 있는데, 이는 작용하중이 감소됨에 따라 피로균열 개시 이후 최종 파단될 때까지 균열 전진속도가 낮아진 결과로 생각된다. 여기서 N_i 와 N_f 의 차, ΔN_i 는 피로균열 개시점에서 파단될 때까지의 피로균열의 전파수명 (fatigue crack propagation life)으로 생각할 수 있다. 이 같은 ΔN_i 는 각 시험편의 용접부 구성조직, 너짓직경 그리고 너짓을 포함한 용접부의 두께 등에 의존할 것으로 사료된다.

Fig. 7은 점 용접부의 너짓직경과 피로하중 2,000N에서 피로균열 개시수명 사이의 관계를 나타낸 그림이다. 보는 바와 같이 점 용접부의 너짓 직경이 증가함에 따라 피로균열의 개시수명은 크게 증가하고 있는데, 이는 동일 두께의 피 용접물에 대해 너짓직경이 증가할수록 너짓 선단부의 응력집중이 완화되기 때문이라고 사료된다. 또한 동일 용접전류 조건하에서 GAxGA의 경우가 SPCxSPC의 경우보다 모든 경우에 있어 피로균열이 먼저 개시되었음을 알 수 있다. 따라서 DCPDM에 의한 피로균열 개시 거동의 결과로부터 자동차 강판의 아연 도금층이 점용접부의 피로특성에 큰 영향을 주고 있음을 알 수가 있다.

Fig. 8은 너짓 직경에 따른 피로균열 전파수명인 ΔN_i 의 결과를 나타낸 그림이다. 동종 강판의 용접물에

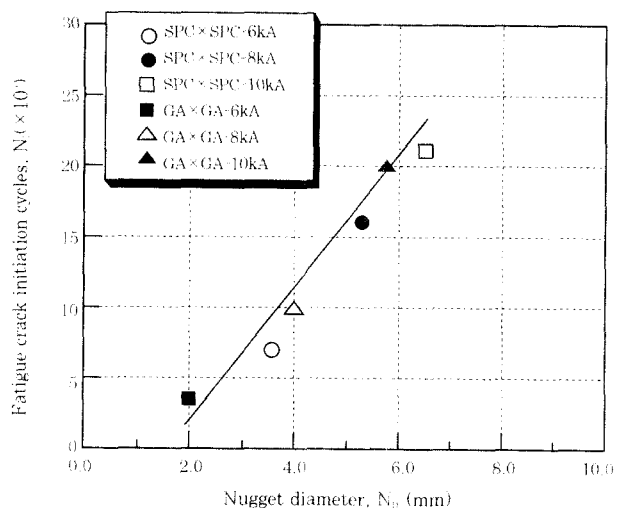


Fig. 7 The relationship between nugget diameter, N_i and fatigue crack initiation cycles, N_i

서 너깃직경이 증가함에 따라 피로균열 전파수명은 증가하고 있으며, 특히 GA×GA의 경우 그 증가정도가 매우 큼을 알 수 있다. 이 같은 이유는 너깃직경의 증가로 응력집중현상의 완화에 따른 낮은 피로균열 전파 속도에 의한 결과로 사료된다. 또한 6kA를 제외하고, 동일한 용접전류 조건에서 GA×GA경우보다 SPC×SPC의 경우에 너깃직경이 증가함에도 불구하고, GA×GA의 경우에 피로균열 전파수명이 매우 큰 이유는 너깃을 포함한 용접부의 두께가 크기 때문이라고 사료되며, 이는 용접부 두께에 따른 피로균열 전파수명을 나타낸 Fig. 9로부터 보다 명확하게 알 수 있다. 이때 점 용접부의 두께는 초음파 시험을 통해 얻은 결과이다.

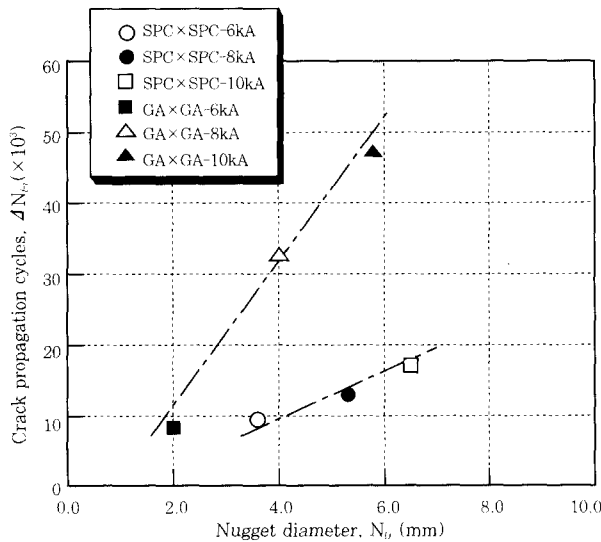


Fig. 8 The relationship between nugget diameter, N_D and crack propagation cycles, ΔN_{P1}

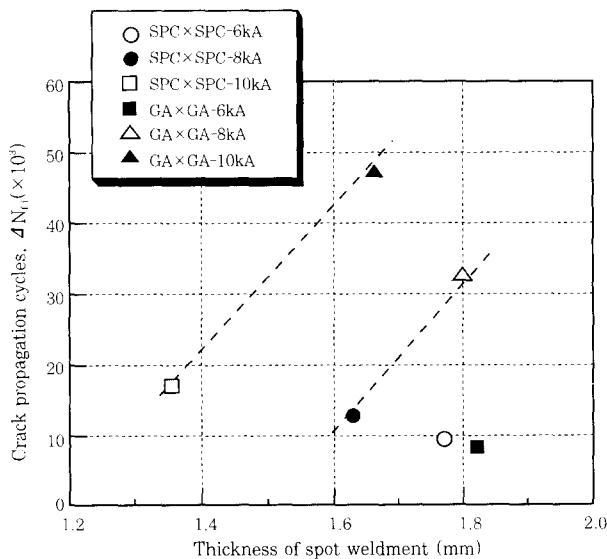


Fig. 9 The relationship between thickness of weldment and crack propagation cycles, ΔN_{P1}

따라서 이상과 같은 시험 결과들로부터 점용접부의 피로수명 평가시 DCPDM을 도입함으로써 피로균열의 개시 및 전파거동 그리고 그의 영향 인자들에 대한 평가가 가능함을 알 수 있으며, 이는 자동차 차체 구조물이 장수명 구조물이라는 사실을 고려할 때 직류전위차법은 점용접 구조물의 피로수명 평가시 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

3.3 용접전류 변화에 따른 피로수명 평가

본 절에서는 앞서 고찰한 정적 인장-전단 강도의 결과로부터 얻은 적정 용접전류 8kA와 실기 현장성을 고려하여 그의 약 $\pm 25\%$ 에 해당되는 6kA와 10kA의 용접전류조건으로 용접된 1점 용접부를 대상으로 다양한 하중범위에서 수행된 피로시험 결과에 대해 논하기로 한다.

먼저, SPC×SPC 점용접부를 대상으로 얻은 피로균열 개시거동의 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

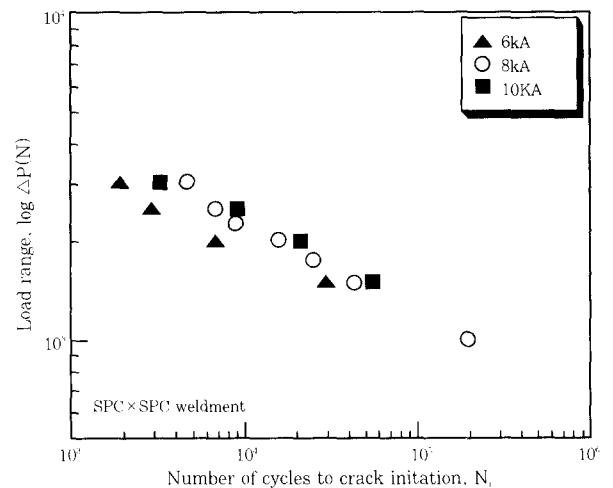


Fig. 10 The relationship between ΔP and No. of cycles to fatigue crack initiation(N_i) for SPC×SPC spot weldment according to welding currents

그림에서 높은 용접전류로 갈수록 동일한 ΔP 에서 피로균열 개시수명은 증가하고 있음을 알 수 있고, 상대적으로 적정 용접전류보다 낮은 6kA의 경우는 낮은 피로하중을 보이고 있는데, 이는 점용접 시 낮은 전류밀도로 인하여 불완전한 너깃부가 형성되고 너깃선단부에 응력집중인자가 증가된 결과로 사료된다. 이 같은 6kA의 피로균열 거동은 GA×GA 시험편의 경우인 Fig. 11에서도 유사한 결과가 얻어졌다.

Fig. 12, Fig. 13 그리고 Fig. 14는 다양한 전류조건에서 대해 SPC×SPC와 GA×GA 시험편을 대상으

로 직류전위차법을 이용하여 얻은 피로균열 개시수명 (N_i)과 이동현미경(TM)으로 관찰한 피로파단수명 (N_f)을 비교한 결과이다. Fig. 12의 6kA에서는 저전류 영역에서 아연도금층에 기인한 낮은 전류밀도로 인하여 GA×GA가 SPC×SPC의 시험편보다 낮은 피로강도를 보였다. 한편, 8kA에서는 고하중영역을 제외한 영역에서 GA×GA가 먼저 피로균열이 개시되어 전과하다가 SPC×SPC 보다 더 긴 피로파단 수명을 보이고 있다. 이 같은 GA의 피로파단수명 거동은 또한 Fig. 14의 용접전류 10kA에서도 관찰할 수가 있다.

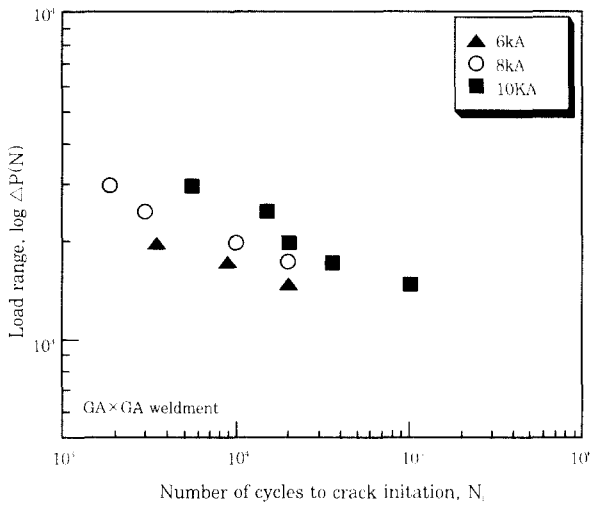


Fig. 11 The relationship between ΔP and No. of cycles to fatigue crack initiation(N_i) for GA × GA spot weldment according to welding currents

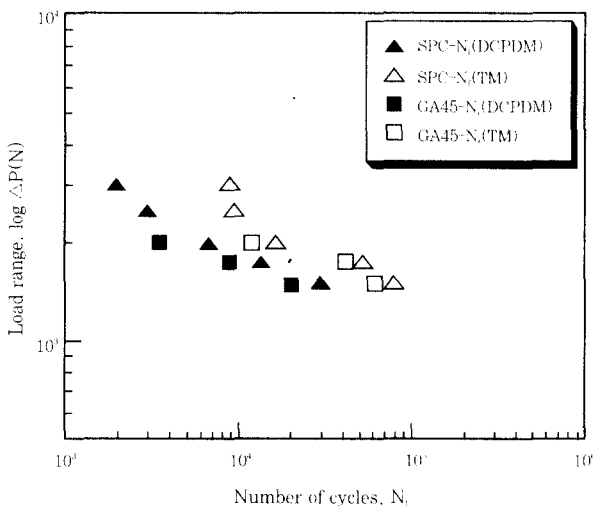


Fig. 12 Fatigue life(N_i , N_f) behaviors according to applied load for spot weldments welded in 6kA

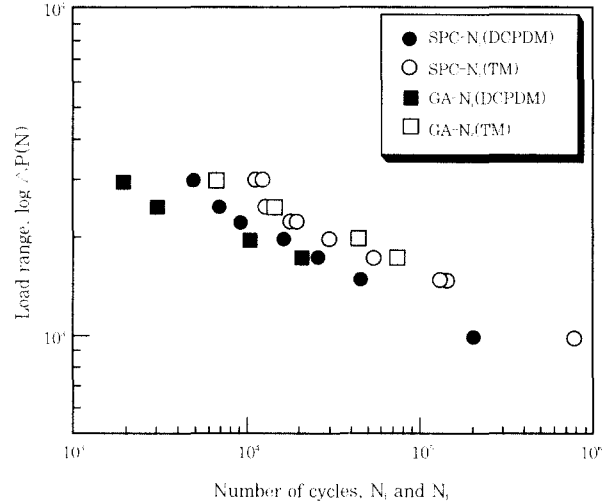


Fig. 13 Fatigue life(N_i , N_f) behaviors according to applied load for spot weldments welded in 8kA

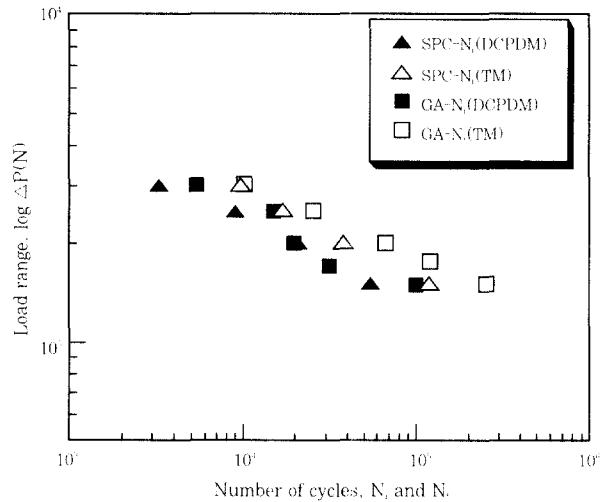


Fig. 14 Fatigue life(N_i , N_f) behaviors according to applied load for spot weldments welded in 10kA

Fig. 15는 피로하중 2,000N에서 용접전류 변화에 따른 피로균열 개시수명과 파단수명을 나타낸 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 용접전류가 증가함에 따라 피로수명은 모두 증가하고 있음을 알 수가 있다. 특히 주목할만한 사실은 모든 용접전류 조건에서 GA×GA의 경우가 SPC×SPC의 경우보다 피로균열이 먼저 개시되었음에도 불구하고, 용접전류 증가에 따라 피로 파단수명은 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 이 같은 거동은 점용접부의 너짓직경과 용접부 두께 등의 차이에 의한 피로균열 전과거동의 차이에 의해 나타나는 결과로 사료된다.

따라서 점용접부의 피로수명 평가시 피로균열 개시

및 전파거동은 피용접물의 종류 및 용접조건 그리고 용접부 두께 등에 크게 의존함을 알 수 있으며, 피로수명 관리측면에서 직류전위차법의 적용은 자동차 차체 점용접 구조물의 보다 정확한 피로수명 평가와 보다 우수한 적정 용접조건을 정립하는데 크게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

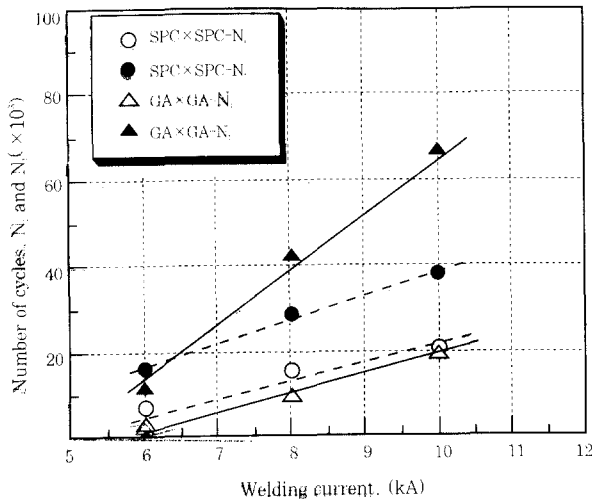


Fig. 15 The relationship between welding current (kA) and No. of Cycles, N_1 and N_2 in SPC × SPC and GA × GA spot weldments

4. 결 론

점용접된 SPC×SPC과 GA×GA 시험편을 대상으로 직류전위차법(DCPDM)을 적용하여 피로균열 개시 및 전파 수명을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 점용접부의 피로균열 개시수명(N_1)은 DCPDM에 의해 평가할 수 있었으며, 그의 거동은 피로하중에 따라 뚜렷하게 의존하였다. 또한 표면균열 거동에 의한 평가보다 보수적인 피로수명 평가가 가능함을 알 수 있었다.

(2) N_1 와 N_2 사이의 차로 정의되는 점용접물의 피로균열 전파수명(ΔN_{12})은 피로하중 ΔP 가 감소함에 따라 점차 증가하고 있는데, 이는 작용하중이 감소됨에 따라 피로균열 개시 이후 최종 파단될 때까지 균열 전속도가 낮아진 결과로 생각된다.

(3) 동일 강판의 용접물에서 너깃직경이 증가함에 따라 ΔN_{12} 는 증가하고 있으며, 특히 GA×GA 시험편의 경우 그 증가정도가 매우 크게 나타났다.

(4) 점 용접부의 너깃직경이 증가함에 따라 피로균열의 개시수명은 크게 증가하였다. 또한 동일 용접전류 조건하에서 GA×GA의 경우가 SPC×SPC의 경우보다 모든 경우에 있어 피로균열이 먼저 개시됨을 DCPDM에 의해 평가 가능하였다.

(5) 6kA의 저전류 영역에서는 아연도금층에 기인한

낮은 전류밀도로 인하여 GA×GA가 SPC×SPC의 시험편보다 낮은 피로파단 수명을 보였으나, 8kA와 10kA에서는 고하중을 제외한 영역에서 GA×GA 시험편의 경우가 먼저 피로균열이 개시되었음에도 불구하고 SPC×SPC 보다 더 긴 피로파단 수명을 보였다.

이상의 시험결과로부터 점용접부의 피로수명 평가시 직류전위차법(DCPDM)의 도입을 통해 피로균열 개시 및 전파거동에 대한 평가가 가능함을 알 수 있었으며, 자동차가 장수명 구조물이라는 사실을 고려할 때, 본 시험법은 차체 점용접부의 보다 정확한 피로수명 평가에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 1999년 전북대학교 자동차신기술연구소 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사합니다.

참 고 문 헌

1. 민준기, 오영근, 김광수 : 자동차용 도금강판의 점용접성에 관한 연구, 대한용접학회지, Vol. 14, No. 3, (1996), pp. 41~47.
2. 조상명 : 저항용접의 기초원리와 모니터링 결과의 분석, 대한용접학회지, Vol. 15, No. 2, (1997), pp. 1~10.
3. D. J. Vandebossche : Ultimate Strength and Failure Mode of Spot Welds in High Strength Steels, SAE 770214 (1977), pp.1~12.
4. Suzanne Mathieu : Zinc Coating Influence on Spot Weldability of Hot-Dip Galvanized Steels Sheets, SAE 850273 (1985), pp. 1~7.
5. H. Kitagawa, T. Satoh, and M. Fujimoto : Fatigue Strength of Single Spot-Welded Joints of Rephosphorized High-Strength and Low-Carbon Steel Sheets, SAE Paper 850371 (1985), pp. 114~126.
6. M. Mizui, T. Sekine, A. Tsujimura, T. Takishima and Y. Shimazaki : An Evaluation of Fatigue Strength for Various Kinds of Spot-Welded Test Specimen, SAE Paper 880375 (1988), pp. 382~391.
7. 小野宇章, 田中甚吉, 結城良治 : 自動車車體スポット疲労構造の疲労強度と壽命推定(共同研究成果資料), 自動車技術 (1986), pp. 18~23.
8. JIS Z 3136 : Tensile-Shear Test Method for Spot Weldment, (1978).
9. JIS Z 3140 : Weldability of Spot Welding, (1991).
10. H.H. Johnson : Materials Research and Standards, (1965), pp. 442~445.
11. Ashok saxena : Electrical Potential Technique for Monitoring Subcritical Crack Growth at Elevated Temperatures, Engineering Fracture, Vol. 15, (1980), pp. 741~750.
12. M. G. Vassilaros and E. M Hackett : J-Integral R-Curve Testing of High Strength Steel Utilizing the Direct-Current Potential Drop Method, ASTM STP 833, (1984), pp. 535~552.