냉간압연강판 점용접재의 너깃간의 거리에 따른 피로거동

송삼홍*· 양윤진**·전재욱***
(2000년 4월 28일 접수)

A Fatigue Behavior for Spot Welded Steel Plate Carbon C by the Variation of the Interval Between Two Spots

Sam-Hong Song, Yun-Jin Yang and Jae-Wook Jeon

Key Words: Fatigue Life(피로수명), Two Spot Welding(2점용접), Interval Between Two Spots(너깃간 거리), Von Mises Stress(상당응력), Crack Tip Opening Angle(CTOA : 균열단 열림각).

Abstract

When welding a car frame with one spot welding, there are same limitations because many parts of it cannot be simplified by one spot welding alone. It is presented two spot welding model for the description of the spot welding which is usually used in a car frame structure. This study primarily covers fatigue behavior taking spot welded SPCC(steel plate carbon C) with different nugget intervals as a tension shear specimen. It was prepared that intervals between two nuggets are varied as 9mm, 14mm, and 20mm respectively. The tensile tests and fatigue tests were executed to know the mechanical properties under static and fatigue load condition. In addition, the relationship between fatigue life and nugget intervals was illustrated by finite element method.

1. 서 론

점용접의 최근 연구동향을 보면 다음과 같은 연구가 수행되고 있다. 첫째, 서로 다른 용접조건에 따른 용접재료와 융착성과의 상호관계의 이해, 둘째, 너깃 주위에 형성된 용접 잔류 응력의 평가 및 정적 강도에 관한 해석, 세째, 잔류 응력의 영향을 고려한 피로수명예측 등이다.

Vanden Bossche[1]는 점용접부의 열영향부에서 파괴가 시작되며, 모재의 강도성질에 따라 그 파괴는 접합 효과에 영향을 준다고 하였으며 점용접시 고강도강 점용접재는 피로강도측면에서 일반 탄소강 점용접재보다도 나은 점이 없다고 하였다. 따라서 점용접의 피로수명은 모재보다 가공된 너깃의 특성에 의해 영향을 받는다고 보고하였다.

Davidson과 Imhof[2]는 점용접시편의 피로수명은 파괴역학적 개념에 관계된 강성파라미터에 의해 결정될 수 있다고 하였다.

또한 Davidson[3]는 모재의 항복강도는 피로수명에 영향을 주지 못하며, 점용접부의 근방에 존재하는 잔류응력은 Δ Kth를 낮추며 균열진전속도를 증가시킨다고 하였다. 또한 점용접부에서의 균열성장모드는 복합적임을 증명하고, COD파라미터는 두 판 사이의 최대회전변화량과 관계가 있음을 제시하여 응력확대계수의 한계를 COD로 극복할 수 있다고 보고하였다.

피로균열전파와 수명에 관한 연구로는 Pook[4]이 제안한 연구가 있다. 이는 점용접부를 노치로 간주하여 응력확대계수를 적용하고, 피로균열의 성장에 관한 실험식을 제안한 것이다.

* 회원, 고려대학교 기계공학과
E-mail : shsong@mail.korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3353 FAX : (02)921-8532
** 회원, 고려대학교 대학원
*** 현대자동차

Beemer[5]는 너깃의 피로수명을 저하시키는 원인을 파악하고 용접전에 후처리를 실시함으로써 피로수명향상을 꾀하였다.

송[6-8] 등은 시편의 형상변화에 따른 정적 강도 및 피로 강도를 전반적으로 파악하고, 내부균열 발생 거동 및 형상 그리고 하중에 따른 전파거동 등을 파악하였다. 또한 응력확대계수를 이용한 시편의 피로 강도를 재정리하였다. 또한 피로하중하에서 관찰된 파괴형태는 테어(tear)파괴와 버튼(button)파괴, 전단 파괴로 구분하였으며 탄성계산을 통해 너깃의 크기를 추정하는 간단한 식을 제안하였다.

Sawhill[9]은 점용접조건을 연구하였다. 너깃의 최적조건으로 점용접을 실시하고, 점용접 강도 추정식을 제안하였다.

Tanuma와 Hashimoto[10]는 점용접재의 너깃부의 특성에 관한 연구를 통해 점용접재의 강도는 강의 질과 통전시간에 의해 결정되어진다고 보고하였다.

Williams와 Jones[11]는 너깃 형상을 노치로 간주하여, 노치의 균열진전형태를 관찰하였다.

Kan[12]은 유한요소해석을 통한 점용접의 파괴모드 및 피로수명을 예측하고, 너깃부에서 소성변형하여 피로균열이 전파함을 보여주었다.

Sato[13] 등은 여러 가지 용접조건에 대한 굽힘피로시험을 실시하고 굽힘피로강도는 판재 표면과 모재와 HAZ(heat affected zone)사이의 경계가 이루는 각도에 의해 결정된다고 보고하였다.

Ogawa와 Sakurada[14]는 점용접부의 피로수명평가에 분단하중해석법을 이용하였다. 즉 너깃부에 생성되는 박리하중, 전단하중을 고려하고, 실차에서의 피로수명을 잘 재현하여 간편한 설계평가수법을 제안였으며, 그 유효성을 확인하였다.

이상과 같이 기존의 점용접에 관한 연구는 주로 형상변화시킨 1점용접재에 관한 연구였다. 또한 점용접부의 피로특성파악과 강도추정 및 금속적인 조직검사 등에 관한 연구가 되어 왔다. 또한 점용접이 주접합요소가 되는 실제 구조물이나 자동차의 경우에는 다용접점으로 구성되어 있으므로 기존의 연구처럼 1점용접으로 모델링을 한다는 것은 한계가 있음을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 실제 차체 구조에 사용되고 있는 점용접에 보다 접근하는 방법의 하나로서 2점용접의 모델을 제시하고, 용접부의 거리를 인접에서 원접으로 변화시켜 다음사항 등을 고찰하였다. (1) 경도분포를 통한 너깃의 크기 및 금속학적 특징을 알아본다. (2) 정하중시험 및 피로시험을 통해 기계적인 성질과 너깃간 거리에 따른 피로특성을 파악한다. (3) 정하중시 너깃단에서의 균열단 열림각을 측정한다. (4) 균열단 열림각을 이용하여 너깃간의 거리의 관계없이 피로한도를 통일적으로 정리하여본다. (5) 2점용접재의 유한요소해석을 통해 점용접부 주위의 응력분포 및 피로수명과의 연관성을 파악하고 너깃간 거리의 최적설계조건 등을 상세하게 관찰할려고 한다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 시험편 재료는 실제로 승용차 차체에 사용되고 있는 SPCC(Steel plate carbon C)이며 인장 전단 시편 형상 및 점용접 조건은 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 재료의 화학적 성질과 기계적 성질은 Table 2, 3에 나타내었다.

두 너깃은 같은 조건하에서 단일 전극봉을 사용한 점용접기로 제작하였으며, 세종류의 시편은 너깃간 거리를 인접에서 원접으로 변화시켜 제작하였다. 시편의 너깃은 KS B 0850의 기준에 따라 검사하였다. 용접부의 등급은 겉모양시험, 단면 시험, 및 인장전단시험을 통해 A 등급으로 평가하였다.

시험기는 전기 유압식 인장 압축 피로시험기(Instron 1331)를 사용하였으며, 응력비(R)는 0.1이며 진동수는 5~10Hz로 하였다. 피로수명은 피로크랙이 전파하여 완전히 파단될 때까지로 정의하였다. 피로한도는 1×10^6cycle에서 파단하지 않는 하중[9]으로 선택하였다.

또한 축방향의 균열단 열림각은 초기 0 kN부터 0.49 kN씩 정하중을 증가시켜 근접 촬영을 실시하고 사진판독을 통해 측정하였다. 이 방법은 Fig. 2에 개략적으로 나타내었다.

Table 1 Welding conditions

Welding force(kN)	Welding current(kA)	Current cycle	Class
2.21	8.8	10	A

Table 2 Chemical composition of material(wt%)

C	Mn	P	S
0.025	0.14	0.012	0.011

Table 3 Mechanical properties of test material

Yield strength(MPa)	Tensile strength(MPa)	Elongation(%)
221.5	331.2	45

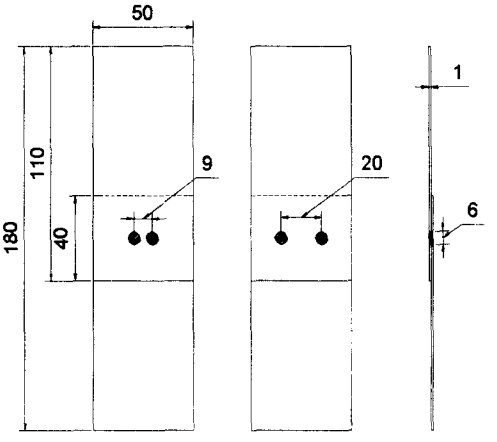

Fig. 1 Geometry of tensile shear specimen(unit:mm)

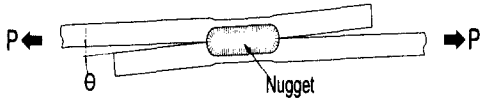

Fig. 2 Schematic diagram of spot welded tensile-shear specimen under tensile load

3. 실험결과 및 고찰

3.1 2점용접재의 경도분포와 너깃의 크기

Fig. 3은 너깃간 거리 9mm인 인접 상태의 경도분포와 너깃의 대략적인 형태를 나타낸 것이다. 모재부의 경도분포는 H_v 80~90으로 균일하게 나타났다. 너깃부의 경도값은 H_v 210~220로 모재부에 비해 높게 나타났다. 경도값이 급격히 변하는 열영향부(HAZ)부분을 제외하면 너깃의 크기

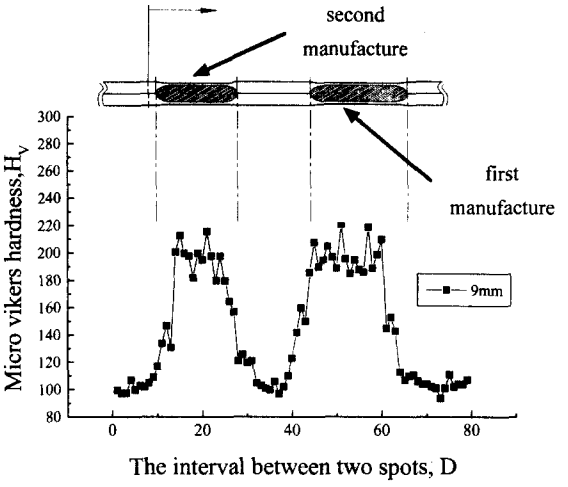

Fig. 3 The result of hardness test and nugget shape for 9mm specimen

는 현미경으로 측정한 크기보다 작게 나타난다. 이와 같은 양상은 다른 시험편에서도 나타난다.

Fig. 3에서 양쪽 너깃 형상은 세종류의 시편의 경도분포를 비교해 보았을 때 비대칭적인 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 동일 용접조건하에서 두 너깃이 제작되었기 때문이다. 용접시 주울열에 의해 접합된 첫 번째 너깃과 다음 접합되는 두 번째 너깃의 저항값은 차이가 생기게 된다. 실제로 측정된 양쪽 너깃의 크기는 약간 차이가 나는 것을 관찰할 수 있다. 크기 6mm인 너깃을 기준할 때, 인접한 너깃의 크기는 5.4 ~ 5.48mm정도로 측정되므로 크기의 차이를 보이는 것을 알 수 있었다. 따라서 차체와 같은 구조물은 연속적인 너깃으로 성형· 접합되어진다. 그러므로 너깃의 형태나 접합조건을 일정하게 제작하기가 어려울 것이라 생각된다. 실제와 같이 차체 점용접시 40mm이상의 간격을 유지하는 것이 보다 효과적인 점용접조건이며 할 수 있다.

3.2 점용접재의 정하중시험 및 피로시험

인장시험은 각 시편의 파단하중과 거시적 파괴거동을 살펴보기 위해 실시하였다. Table 4는 2점용접재 너깃간 인접 9mm, 14mm, 원접 20mm인 시편의 인장강도와 파단강도를 나타낸 것이다.

또한 2점용접재와 비교를 하기 위하여 1점용접재의 인장시험을 실시하였다. 너깃간 인접 9mm, 14mm, 원접 20mm인 2점용접재 시편의 파단하중

Table 4 Tensile force and fracture force of each specimens

Specimen \ Force	Tensile force (kN)	Fracture force (kN)	comparison with 1spot (fracture force)
1spot	5.896	6.328	1
2spot:9mm	6.469	8.450	1.34
2spot:14mm	7.041	9.031	1.43
2spot:20mm	7.195	9.078	1.48

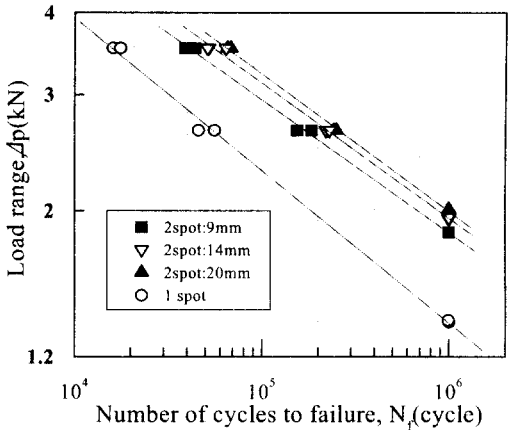

Fig. 4 The result of the fatigue test for each specimen

은 1.34배, 1.43배, 1.48배로 1점용접재보다 높다. 따라서 너깃수가 인강강도 및 파단하중에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 그리고 정적 강도가 너깃간 인접 9mm, 14mm, 원접 20mm으로 갈수록 높아짐을 알 수 있었다. 너깃간 간격이 다른 2점용접재의 파단형태는 테어(tear)방식(sheet type)[9]이었다.

일정진폭 피로시험은 피로한도 결정을 위해 실시하였다. 피로한도는 N_f=1× 10^6cycle로 하였다.[11] 피로수명결정은 너깃단을 고려할 경우 너깃단에 발생한 피로균열이 모재부로 진전하여 완전히 파단될 때로 하였다.

Fig. 4는 너깃의 거리에 따른 작용하중범위(ΔP)와 피로수명(N_f)과의 관계를 나타내는 선도이다.

1점용접재와 너깃간 인접 9mm, 14mm, 원접 20mm인 시편의 피로한도는 각각 ΔP_w=1.359, 1.854, 1.942, 2.001 kN로 나타났다. 1점용접보다 2점용접의 피로수명이 크고 전반적으로 피로수명은 너깃간 거리 인접 9mm에서 원접 20mm로 갈수록 향상됨을 알 수 있다. 그리고 정적 하중 특성과 피로 특성은 유사하게 나타났다. 또한 너깃의 인접으로 인해 너깃간 9mm 시편의 피로크랙 진전속도가 가장 빨라짐을 알 수 있었다. 이는 1점용접과 비슷한 경향으로 파단이 형성되므로 피로수명은 짧아지게 된다고 생각된다.

3.3 2점용접재의 정하중시 너깃간 거리 변화에 따른 균열단 열림각의 거동

각각 시편에 대해 P=0.491 kN단위로 정하중을 증가시키고 근접 촬영을 실시하였다. Fig. 5는 각 시편의 축방향의 균열단 열림각을 측정하여 나타낸 것이다. 너깃간 인접 9mm, 14mm, 원접 20mm인 시편의 축방향의 균열단 열림각은 초기부터 2.943 kN일 때까지는 거의 유사함을 보여주고 있다. 너깃간 인접 9mm, 14mm, 원접 20mm의 순서로 축방향의 균열단 열림각의 변화가 작아짐을 알 수 있었다. 파단강도가 가장 작은 너깃간 인접 9mm인 시편이 P=7.848 kN일 때 최대 30° 까지 벌어졌다.

Fig. 6은 정하중시험시 일어나는 시편의 변형을 측면에서의 근접촬영한 것이다. 너깃부를 중심으로 대칭적으로 벌어지면서 모재가 떨어지는 현상이 보인다. 인장전단시편은 축방향의 하중이 작용할 때 너깃 주위는 인장과 굽힘하중을 동시에 받게 된다. 너깃단은 내표면에서부터 인장력이 작용하고, 외표면으로 가면서 굽힘하중과 상쇄효과를 나타낸다.

그러므로 소성에 의한 영구변형이 먼저 내표면에서 발생하게 된다. 이러한 영구변형과 응력 집중이 너깃단에 가까워질수록 커지며, 너깃단으로 갈수록 축방향의 균열단 열림각이 크게 된다.

3.4 균열단 열림각의 변화와 피로강도 거동

Pook은 인장전단 점용접 시험편에서 점용접 너깃단을 예리한 노치로 간주하여 혼합 모드 하에서의 응력확대계수를 유도하였다.[4]

응력확대계수는 균열단에서의 응력 상태를 잘 기술할 수 있고, 점용접재의 피로수명을 평가하는데 사용하고 있다. 하지만 응력확대계수는 점용접재와 같은 형상에서는 수정하기가 어렵고 응용에 있어서도 제한이 있다. 그러한 점은 실험치와 유한요소해석을 이용하여 측정할 수 있는 균

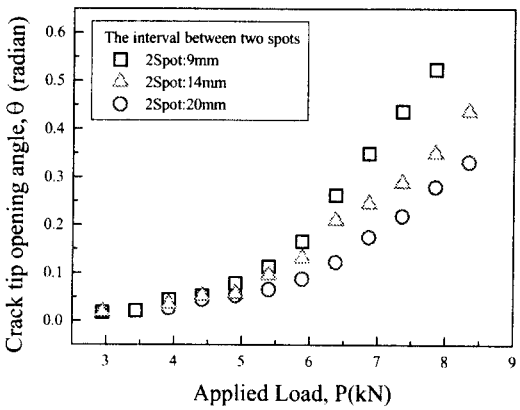

Fig. 5 Crack opening angle of each specimen

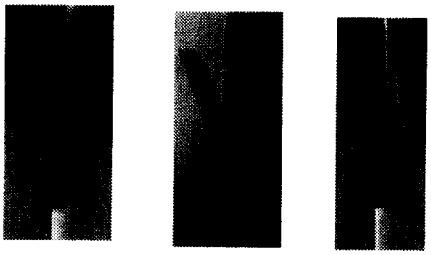

Fig. 6 Side configuration of each specimen with applied load

열선단개구변위(CTOD)를 이용하면 응력확대계수를 이용한 피로한도 예측의 어려움을 해결할 수 있다.

CTOD(Crack Tip Opening Displacement)는 $\delta=\frac{K^2(1-\nu^2)}{M\sigma_y E}$ 가 된다. 여기서 M, σ_y, ν, E 는 재료의 물성치이므로, $\delta \propto K^2$이고 $\Delta\delta \propto \Delta K^2$ 된다.

실제 시험으로 CTOD의 측정이 불가능하지만 CTOD는 너깃간 균열단 열림각과 관계하므로

$$\Delta\theta \propto \Delta K^2 \qquad (1)$$

$$\Delta K \propto \Delta\theta^{\frac{1}{2}} \qquad (2)$$

가 된다. Fig. 7는 측정된 두 판재간의 축방향의 균열단 열림각 $\sqrt{\theta}$와 피로수명 N_f과의 관계를

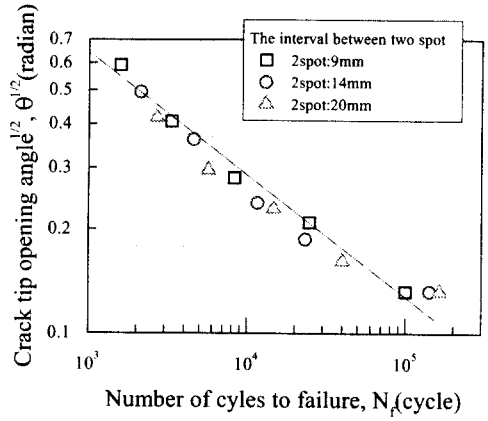

Fig. 7 Relationship between cycles to failure(N_f) and crack tip opening angle($\sqrt{\theta}$)

Table 5 Value of α and β

value	calibrated value
α	2.253
β	-3.1315

나타낸 것이다. 피로한도는 너깃간 거리와 관계없이 통일적으로 정리되며, 다음과 같다.

$$\log N_f = \alpha + \beta(\log\sqrt{\theta}) \qquad (3)$$

$\sqrt{\theta}$: Crack tip opening angle

N_f : Fatigue life

3.5 2점용접재의 작용하중의 변화에 따른 상당응력분포와 너깃간 최적거리조건예측

본장에서는 유한요소해석을 통하여 점용접부 주위의 응력해석을 하고 피로수명과의 연관성을 알아보았다. Fig. 8은 2점용접재의 모델링을 나타낸 것이다. 모델링은 3차원 강체로 하였고, 2점용접 인장전단시편의 전모델로 하였다. 너깃의 간격을 1mm씩 변화시켰다. 해석 패키지는 EMRC의 NISA Ⅱ를 사용하였으며 다축응력하에서 항복강도를 알기 위해 응력분포는 Von Mises 상당응력으로 나타내었으며 Von Mises 상당응력은 다음식과 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}=\sigma_{eq}$$

너깃부는 크기 6mm 원형으로 접합형상을 만들어 일체화시켜 원기둥 모양의 너깃을 형성하였다. 본 해석에서는 동일한 용접조건하에서의 연속적인 너깃의 형성으로 인한 크기의 차이는 무시하였다. 실제 인장시험을 통해 접합된 판재가 너깃을 중심으로 벌어짐으로써, 3차원 강체 모델에 의한 접촉은 고려하지 않았다. 그리고 포와송비v 는 0.33으로 하였다.

Fig. 9는 인장전단시편의 내표면에서의 응력분포을 나타낸 것이다. 응력 집중부가 양쪽 너깃단 주위로 형성되고 최대 Von Mises 응력은 내표면의 너깃단에서 떨어진 지점에서 나타났다. 이것은 내표면 열영향부로 균열의 발생위치와 일치하는 것이다. 인접된 너깃의 응력분포는 1점용접재의 응력분포형태처럼 나타난다.

최대 Von Mises 상당응력은 근접한 너깃의 시험편에서 각각 양쪽 너깃의 환상 형태의 응력분포영향으로 인해 커진다. 상당응력의 증가는 피로강도를 급속히 감소시킴을 알 수 있다. 실험적으로 너깃간 간격이 20mm에서 9mm로 근접할수록 피로 수명이 작음을 알 수 있었다.

Fig. 10은 너깃의 거리에 따른 최대 Von Mises 상당응력을 나타낸 것이다. Von Mises 상당응력은 너깃간 간격이 멀어질수록 작아짐을 알 수 있다. 너깃간 간격 10mm에서 40mm로 변화될 때 너깃주변의 상당응력의 감소는 피로강도와 피로수명의 향상을 의미하는 것이며, 실제 피로 시험과 일치하는 결과를 보여주고 있다. 그러나 실재 실험에 쓰이는 시편의 폭이 50mm로 한정되어 있으므로, 너깃간 간격이 30mm 이상이 되면 시험편의 폭의 제한에 따른 치수효과로 인해 너깃단의 상당응력이 떨어진다. 그런데 피로수명이 너깃간 거리가 멀어질수록 커진다면, 너깃의 거리가 실제 차체나 구조 접합시 무한히 커질 가능성이 있다. 이러한 가능성으로 인해 무한한 거리로

용접된 구조물의 너깃은 각각 1점용접재처럼 형성하게 되고, 피로수명 및 피로강도가 현저히 낮아지게 된다. 그러므로 시험편의 폭의 제한에 대한 치수효과를 억제하기 위해 2점용접 모델을 반무한평판으로 나타내고 상당응력변화를 보았다.

Fig. 11은 반무한평판상에서의 최대 Von Mises 상당응력의 변화를 나타내었다.

모델링된 시편의 폭은 100mm으로 하고 너깃간

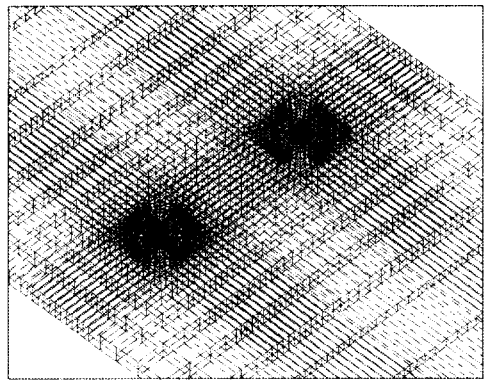

Fig. 8 The FEM 3D model
(Isometric view : part of nugget)

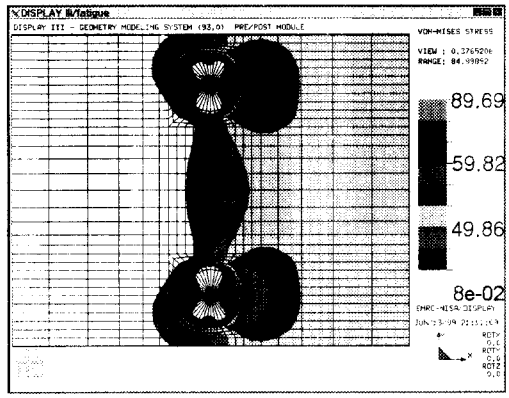

Fig. 9 Stress distribution of tensile shear specimen for 20mm at P=1.96 kN

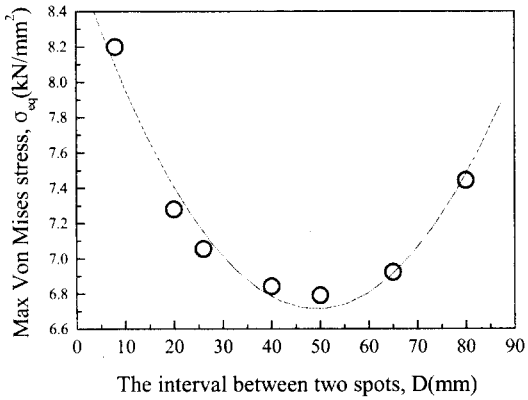

Fig. 10 Relationship maximum Von Mises stress and specimens at P=1.96kN

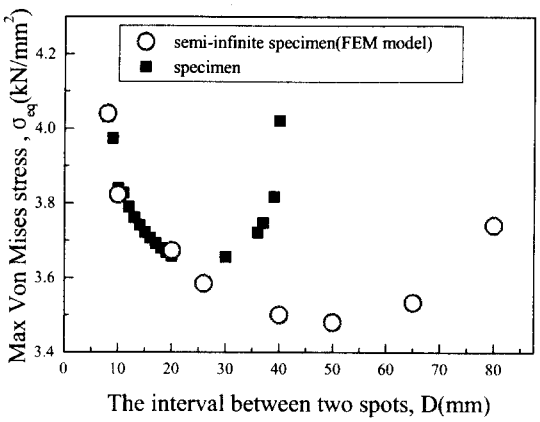

Fig. 11 Relationship max Von Mises stress and semi-infinite specimens at P=1.96kN

간격을 8, 20, 26, 40, 50, 65, 80mm으로 변화시켜 해석하였다. 반무한 평판인 시편은 하중은 1.96 kN,이고 절점수와 요소수는 6000개 내외, 4000내외로 하였다. 너깃간격이 넓어지면서 최대 Von Mises 상당응력이 작아지다가 45mm～50mm를 기점으로 상당응력이 다시 커졌다. 따라서 너깃간 거리의 최적 조건이 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 같은 용접조건으로 용접하여 너깃간의 거리가 다른 인접 9mm, 14mm, 원접 20mm 시험편을 제작하였다. 각각에 대해서 경도시험, 피로시험과 인장시험을 실시하였다. 또한 유한요소해석을 실시하여 실험결과와 비교하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 경도분포를 보면 너깃부의 경도값이 모재부에 비해 높고 열영향부의 경도값이 급격히 변한다. 양쪽 점용접부의 경도분포의 크기가 비대칭적인 것으로 보아 너깃간 거리는 점용접부의 크기에 영향을 주는 것을 알 수 있다.

(2) 일정한 폭 50mm인 시편에서 너깃간의 거리 인접 9mm, 14mm, 원접 20mm인 2점용접 시험편의 각각의 파단하중은 P_f=6.47 kN, 7.04 kN, 7.20 kN로 정적하중이 향상됨을 알 수 있었다. 일정한 폭 50mm인 시편에서 너깃간 거리 9, 14, 20mm 시편의 피로한도는 1점용접재와 비교했을 때 1.36, 1.43, 1.47배 향상됨을 알 수 있었다. 1점용접재에 비해 2점용접재의 피로한도가 우수하였다.

(3) 인접 9mm, 14mm, 원접 20mm인 2점용접 시험편의 너깃의 균열단 열림각이 인접 9mm에서 원접 20mm순으로 작아짐을 알 수 있었다.

(4) 피로강도는 판재 사이의 균열단 열림각 θ를 강성 파라미터로 삼아 정리하였다. 피로수명 N_f대 균열단 열림각 $\sqrt{\theta}$와의 관계를 통해 각 시편의 너깃간의 거리와 관계없이 피로한도를 통일적으로 정리 할 수 있었다.

$$\log N_f = -3.1315(\log\sqrt{\theta}) + 2.253 \qquad (4)$$

$\sqrt{\theta}$: Crack tip opening angle

N_f : Fatigue life

(5) 피로균열은 너깃단에서 어느 정도 떨어진 지점에서 발생하였고, 이는 유한요소해석에 의해 구한 응력분포해와 일치한다. 유한요소해석을 통해 너깃간 거리에 따른 정적 강도와 피로수명과의 연관성을 파악할 수 있었으며 너깃간 거리에 따른 최적 설계 조건이 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

(1) Vanden Bossche, D. J., 1978, "Ultimate Strength and Failure Mode of Spot Welds in high Strength Steels," Society of Automotive Engineers, 770214.

(2) Davidson, J. A. and Imhof, E. J. Jr. 1984, "The Effect of Tensile Strength on the Fatigue Life of Spot Welded Sheat Steels," SAE840110.

(3) Davidson, J. A. and Imhof, Edward J. Jr. 1983, "A Fracture-Mechanics and System-Stiffness Approach to Fatigue Performance of Spot-Welded Sheet Steels," SAE830034.

(4) Pook, L. P., 1975, "Fracture Mechanics Analysis of The Fatigue Behaviour of Spot Welds", International Journal of Fracture 11, pp. 173～176.

(5) Rogerd Beemer, 1970, "High Fatigue Life

Results from Titanium Spot Welding Innovations," Weld. J., Vol. 49～3, pp. 89-S～90-S.

(6) 송삼홍, 배준수, 장성재, 1997, "하중작용방식에 따른 차체용 점용접재의 피로특성에 관한 연구," 대한정밀공학회 97년도 추계학술대회논문집, pp. 668～671.

(7) 송삼홍, 김부동, 1984, ""점용접재의 파괴거동과 응력분포," 대한기계학회논문집, 제8권 제3호, pp. 224～231.

(8) 송삼홍, 김부동, 1983, ""점용접의 너깃지름과 판간접촉지름의 관계성," 대한기계학회 1983년도 대한기계학회논문집, 제7권 제3호, pp. 313～1983.

(9) Sawhill, J. M. and Jr., Baker, J. C., 1980, "Spot Weldability of High-Strength sheet Steels," Welding Journal January, pp. 19-s～30-s2.

(10) Tanuma, K. and Hashimoto, T., 1979, "Static Fracture Appearance of spot welded Joints of Cold Rolled Carbon Steel Sheets," Trans. of National Research for Metals, Vol. 21, No. 4 pp. 32～37.

(11) Williams, N. T. and Jones, T. B., 1979, "Spot weld size and fracture mode in low carbon mild steel," Metal Construction, pp. 541～546.

(12) Yih-Renn, Kan, "Fatigue Resistance of Spotwelds - An Analytical Study," Material Engineering Quarterly, pp. 26～36.

(13) Sato, Y., Ito, Y., Shida, T. and Minakawa, S, 1988, "The Fatigue Strength of Spot Welded Joints," Welding international, No. 2 pp. 140～145.

(14) Michio Ogawa and Mamoru Sakurada, 1996, "Design Evaluation of Fatigue Life Prediction of Spot Weldings Using CAE Analysis," 日野技術, No. 49, pp. 10～17.