

◎ 論 文

亞鉛鍍金 鋼板의 点熔接材의 疲勞舉動에 관한 研究

徐 昌 敏* · 姜 成 守** · 黃 南 性*** · 吳 相 燁****

(1992년 4월 24일 접수)

Fatigue Behavior of the Single Spot Welded Joint of Zinc Galvanized Steel Sheets

Chang-Min Suh, Sung-Soo Kang, Nam-Seong Hwang, and Sang-Yup Oh

Key words : 点熔接(Spot Welding), 疲勞龜裂(Fatigue Crack), 高張力鋼(High Strength Steel), 亞鉛鍍金鋼(Monogalvanized Steel), 너깃(Nugget), 應力擴大係數(Stress Intensity Factor)

Abstract

The behavior of fatigue crack growth in the single spot welded joint of zinc galvanized steel sheets was studied experimentally and analytically based on fracture mechanics. Axial tension fatigue tests were carried out with the BSxGAB specimen that the bare plane(GAB) of monogalvanized steel sheet was spot welded to the double thickness bare steel sheet(BS), and with the GAxGAB specimen that the galvanized plane (GA) was spot welded to the equal thickness bare plane (GAB).

1. The relation between maximum stress intensity factor, K_{max} and the number of cycles to failure, N_f has shown a linear relation on log-log plot in the spot weld of the zinc galvanized steel sheet.
2. The fatigue strength of BSxGAB specimens is about 23% higher than that of GAxGAB specimens at the fatigue strength of 1×10^6 cycles. And the fatigue life of BSxGAB specimens at the same load range increases 6~9 times higher than that of GAxGAB specimens.
3. The general tendency at the angle of bending(θ) in an applied load has changed rapidly at the initial 20% of its life. After then, it has changed slowly. The change at the angle of bending has increased linearly as the load range increases.
4. It has shown a linear relation between the location ratio of crack initiation γ and fatigue

* 慶北大學校 工科學 機械工學科

** 釜山大學校 工科學 機械工學科

*** 慶北大學校 大學院

**** 國防科學研究所

life N_f on the semi-log graph paper. Here γ means that the crack distance between main crack and sub-crack, $2L$ is divided by the nugget diameter, $2r$.

$$\gamma = a \cdot \log N_f + n \quad (\text{where } a \text{ and } n \text{ are material constant.})$$

I. 緒 論

各種 薄板構造物의 製作에 널리 응용되고 있는 点熔接은 최근 급속한 산업기술의 발달에 큰 기여를 해오고 있다. 点熔接法은 짧은 시간내에 생산성을 높일수 있고, 고도의 기술이 필요없이 용이하게 작업이 가능하고, 自動化가 용이하며 대량생산에도 적합하다. 이러한 장점을 가지는 반면 용접시 비산(expulsion)등에 의한 최적용접조건이 적용되지 못할 때에는 여러조건의 불량조건이 생기는 등 많은 문제점을 가지고 있다. 따라서 薄板構造物에 중요한 点熔接構造의 疲勞特性에 관한 연구가 많이 수행되고 있지만 국내에서는 체계적인 연구가 부족한것 같다.¹⁻⁸⁾

특히, 유럽, 캐나다 등에서는 鹽害에 대한 조치로 아연도금 강판의 사용이 증가하고 있지만 아연은 전극팁에 침입하여 전극팁을 손상시키고 그 수명을 단축시키므로 편면 아연도금 강판이 사용되기도 한다. 高張力鋼板과 아연도금 강판의 点熔接材에 관한 疲勞特性 研究는 이중재질간의 피로특성을 파악하는데 중요한 요소가 되고 있다.

薄板구조물의 안정성과 신뢰성을 높이기 위해서는 点熔接의 疲勞強度 및 疲勞壽命에 관한 연구가 수행되어 그 疲勞特性을 定量的으로 파악, 분석함이 필수적이다.

点熔接材의 疲勞強度는 그 자체의 材質에 따른 強度도 문제지만 상대편의 強度와 剛性的의 影響도 상당히 크다. 더우기 点熔接 薄板構造物에서는 異種材나 두께가 서로 다른 시험편과 点熔接 이음부를 形成하는 경우가 많기 때문에 본 연구에서는 点熔性 向上과, 材質의 剛性이 疲勞舉動에 미치는 影響을 檢討하기 위하여 同一 材質이지만 두께가 다른 点熔接材間의 연구를 행하였다.

즉 本 研究에서는 片面鍍金鋼板(monogalvanized steel sheet)의 非鍍金板(GAB)에 同質이지만

두께가 두배인 非鍍金鋼板(BS)을 点熔接시킨 BS × GAB 試驗片과 동일한 두께의 片面鍍金 鋼板의 鍍金板(GA)과 非鍍金板(GAB)을 点熔接시킨 GA × GAB 試驗片에 대해 軸引張 疲勞試驗을 實施하여 点熔斷面에서의 疲勞舉動과 破面樣相을 관찰하여 얻은 자료로부터 그 疲勞壽命을 定量化하였다.

II. 實 驗

2-1. 試驗片

本 實驗에 使用된 試驗片의 材料는 自動車의 車體에 널리 使用 되고 있는 판두께 0.7mm인 亞鉛鍍金 鋼板(galvanized steel sheet, GA)과, 비도금판(GAB) 및 GA의 두배의 두께인 BS(bare sheet)를 사용하여 2가지 종류의 시험편으로 제작하였다. Fig. 1은 BS×GAB재를 單点 点熔接 시킨 試驗片의 形狀을 나타내었다.

試驗片 材料의 化學的 成分 및 機械的 性質은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 두께의 差異에도 불구하고 試驗片의 機械的 性質은 거의 같았다.

Table 3은 本 實驗에 使用된 点熔接試驗片의 熔

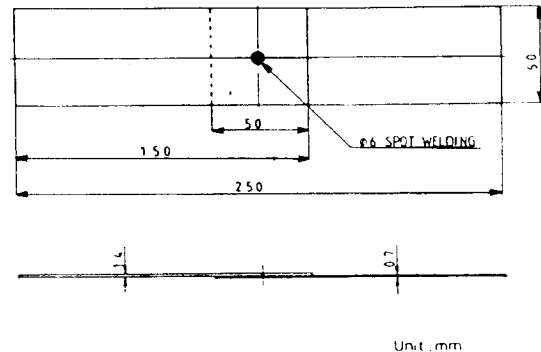


Fig. 1 Configuration of the BS×GAB specimen which was single spot welded

接條件으로써 필 시험(peel test)과 引張試驗에서 그 最適 條件을 구하였고 定置式 點熔接機(PA-150)로 試驗片을 製作 使用하였다.

Table 4에는 본 실험에 사용된 시험편의 명칭을 나타내며 片面 鍍金鋼板의 非鍍金面(GAB)을 판두께가 두꺼운 非鍍金板(BS)에 點熔接시킨 것을 "BS×GAB" 試驗片이라고 하였고 片面 鍍金鋼板의 鍍金面(GA)을 같은 두께의 片面 鍍金鋼板의 非鍍金面(GAB)에 點熔接시킨 것을 "GA×GAB" 試驗片이라 하였다.

Table 1 Chemical composition.(wt. %)

Materials	C	Mn	Si	P	S
GA	0.01	0.11	0.01	0.012	0.005
BS	0.01	0.11	0.01	0.01	0.005

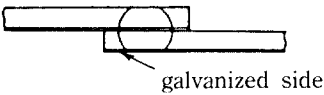

Table 2 Mechanical properties of specimens.


Materials	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
GA	186.3	299.1	49	177
BS	191.5	300.3	48.9	128


Table 3 Welding conditions

Specimen	Squeeze Force(N)	Squeeze Time (Cycle)	Welding Time (Cycle)	Hold Time (Cycle)	Current (A)
BS×GAB	2941	40	9	12	9100
GA×GAB	1961	40	9	12	9100

Table 4 Nomenclature of spot weld specimen

nomencla.	spot weld specimen
GA×GAB	
BS×GAB	

 : Monogalvanized steel sheet(G A)

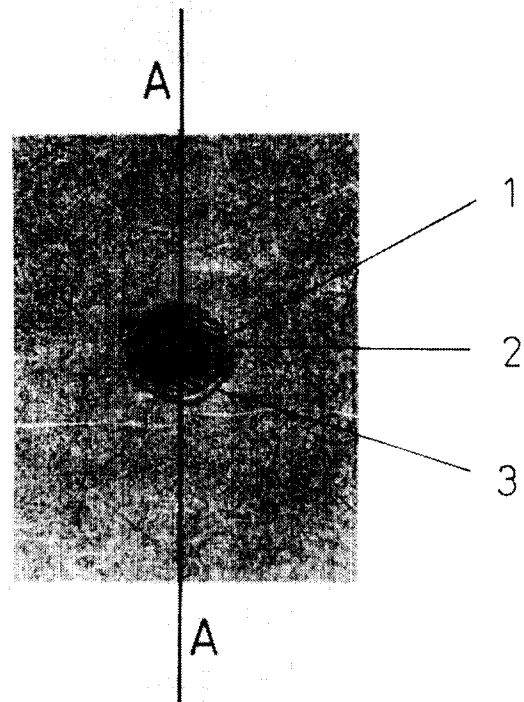
 : Steel sheet(none galvanized) (B S)

2-2. 實驗方法

本 연구는 電氣油壓式 疲勞試驗機(Instron 1342)를 사용하여 室溫에서 應力比 R=0의 하중제어 피로시험을 실시하고 일정하중하에서 25Hz의 정현파를 사용하였으며 유압적으로 試驗片을 固定하였다.

點熔接機로 製作되어 피로시험을 수행한 試驗片은 熔接部 주위의 疲勞균열의 관찰을 容易하게 하기 위해서 研磨紙 1200번까지 研磨한 後 산화크롬 분말로 버핑(buffing)하였다. 또 熔接部近傍의 組織을 觀察하기 위하여 4% 나이탈溶液으로 腐蝕하여 그 組織의 變化를 조사하고 사진을 撮影하였다.

Photo 1은 本 實驗에 사용된 試驗片의 壓接部를 포함한 前面部를 나타내고 있으며 1은 電氣抵抗에 의해 熔着된 너깃(nugget)部를, 2는 母材部를, 3은



1 : Part of spot-welded

2 : Base metal

3 : Fatigue crack

Photo 1 Single spot welded joint specimen

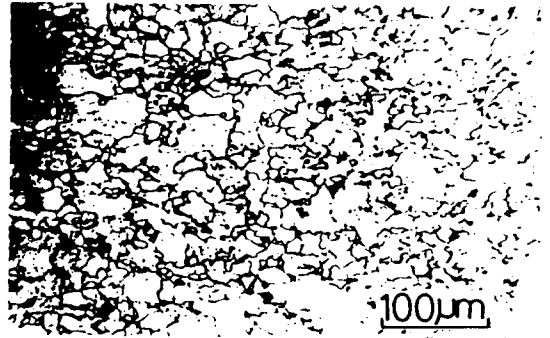
疲勞試驗 後 시험편의 표면까지 관통된 疲勞龜裂 (fatigue crack)의 형태를 보여주고 있다.

Photo 2a는 点熔接部の 組織으로서 너깃부의 顯微鏡 組織寫眞과 Photo 2b는 母材部の 顯微鏡 組織寫眞이다. Photo 2a의 너깃부의 平均結晶粒徑은 직선평균법에 의하여 약 6.6 μ m이었고 Photo 2b인 母材部에서는 약 9.12 μ m를 나타내었다.

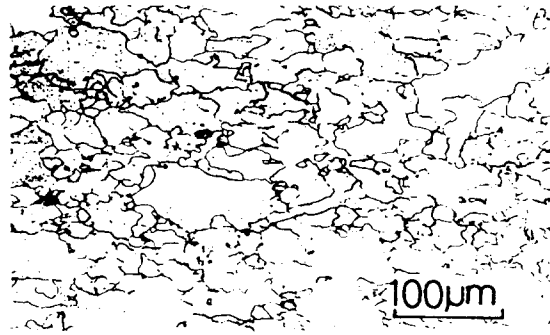
Fig. 2는 Photo 1에 표시된 AA 方向 즉 試驗片을 軸方向으로 垂直 切斷한 形狀을 나타낸 것으로서 電氣抵抗에 의해 熔着된 너깃부가 中央에 形成되었고 그 옆에 HAZ(heat affected zone, 熱影響部) 부가 있다. 그림상에서 内部에서 發生한 피로균열이 表面까지 貫通한 것을 主龜裂(main crack)이라고 하고 성장하다가 貫通하지 못한것을 補助균열(sub-crack)이라 하였다.

또한 피로시험 도중에 試驗片의 塑性變形에 의하여 생기는 굽힘각(angle of bending)을 θ 로 하였고 이 값을 측정하였다. 또한 너깃의 좌우 양끝 사이의 距離를 너깃直徑(nugget diameter, $2r$)이라 하였고, 주균열과 補助균열 사이를 균열距離(crack distance, $2L$)라고 稱하였다.

本 實驗에서 결정된 疲勞壽命(N_f)은 Photo 1상의 3과 같이 疲勞균열이 点熔接部の 内部에서 發生, 成長하여 表面을 貫通 그 表面 길이가 壓接部의 길이인 약 6mm가 될때를 基準으로 하였다. 즉 肉眼觀察이 容易할 정도의 疲勞균열이 内部에서 外部로 貫通되어 나왔을 때로 정하였으며 이때는 疲勞試驗機의 荷重값이 다소 減少하였다.



a) 1(Part of spot-welded area)



b) 2(Base metal)

Photo 2 Microstructure of galvanized steel sheet

疲勞試驗이 끝난 試驗片은 균열의 發生, 成長舉動을 把握하기 위하여 疲勞破斷된 試驗片의 壓接部直徑 $\phi 6$ mm를 Photo 1의 AA 方向인 試驗片의

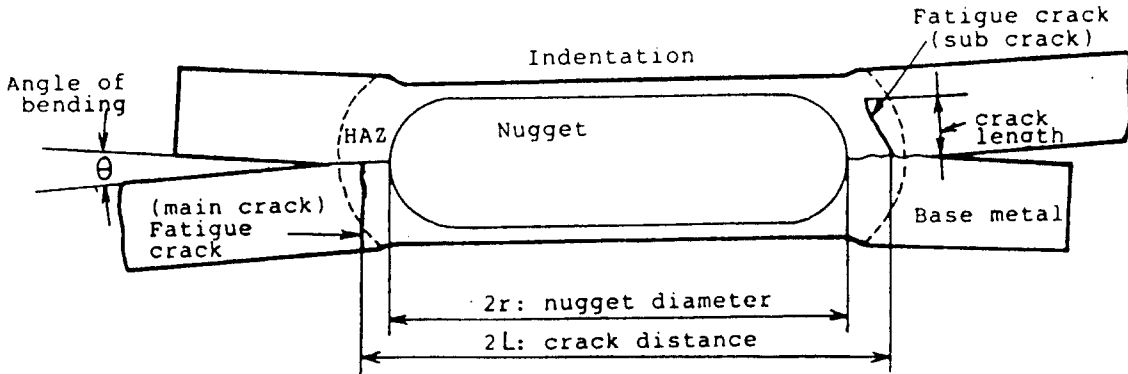


Fig. 2 Schematic diagram of fatigue crack observed on cross section in the center of spot weld

길이 방향으로 切斷하여 에포마이카(epomica)와 硬化劑를 사용하여 마운팅하였다. 이 마운팅된 試驗片은 에머리 케이퍼 1200번까지 研磨하고 산화 크롬분말로 버핑한 後 4% 나이트랄溶液으로 약간 腐蝕시킨 다음 金屬顯微鏡을 이용하여 50~200倍의 倍率로 너깃주위의 組織을 관찰 撮影하였다. 이와 같이 撮影된 組織寫眞을 통하여 反復荷重에 따른 疲勞균열의 發生 位置, 成長方向, 熔着部의 크기 및 熔接時 가장 늦게 凝固되는 코어밴드(core band) 등을 비교 관찰하여 研究하였다.

III. 實驗結果 및 考察

3-1. 疲勞特性

Fig. 3은 本 研究에서 실시된 疲勞試驗 결과인 荷重範圍와 疲勞壽命($\Delta P-N_f$)와의 關係를 나타내었다. 판두께가 서로 다른 板材間에 点熔接시킨 BS×GAB試驗片의 10⁶회 疲勞限度는 약 1493N이며 鍍金面과 非鍍金面을 点熔接시킨 GA×GAB試驗片의 것은 약 1155N이었다. 따라서 10⁶회 피로 한도로 보면 BS×GAB시험편의 것이 GA×GAB시험편보다 약 23% 큼을 알 수 있다. 또한 低荷重 長壽命 領域에서의 疲勞強度의 差가 高荷重 短壽命 領域일때 보다 그 差가 적음을 알 수 있다. 이렇게 同一材料로 제작되었지만 BS×GAB재의 경우에는 BS재쪽만 두께가 2배가 되어 강성이 증가되고 있다.

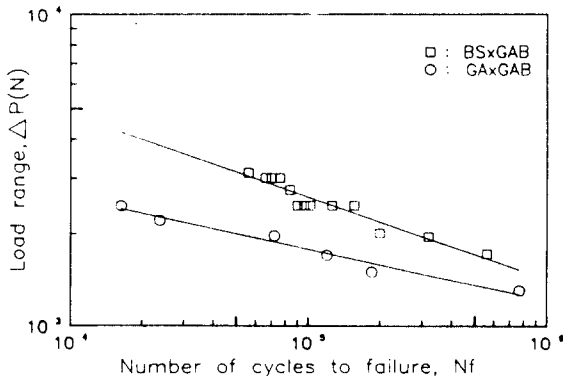


Fig. 3 A Relation between load range and number of cycles to failure

BS×GAB재의 시험편은 피로시험중에 강성이 큰 BS재의 영향에 의하여 소성변형인 굽힘각도가 GAB재쪽만 생기는 것이 관찰가능하였다. 그러나 GA×GAB재의 경우는 두 재료의 두께가 같으므로 서로 비슷하게 소성변형을 일으켜 굽힘각이 형성되었다.

그림상에서 동일한 하중레벨인 2450N의 疲勞壽命을 比較하면 BS×GAB재의 N_f 는 2.0×10^5 cycle 이고 GA×GAB재의 疲勞壽命은 0.23×10^5 cycle이므로, BS×GAB재가 GA×GAB재 보다 약 9배 증가하였다. 2000N의 하중레벨의 경우에 BS×GAB재는 2.996×10^5 cycle이고 GA×GAB재는 0.453×10^5 cycle이므로 BS×GAB재가 약 6.6배 정도 증가하였다.

이상과 같이 同一材料이지만 판두께가 서로 다른 판재를 点熔接시킨 BS×GAB재 쪽의 10⁶회 疲勞限度가 GA×GAB재의 그것보다 증가하였고 동일 하중레벨에서 疲勞壽命이 크게 증가하였다.

이와 같은 하중범위(ΔP)와 피로반복수(N_f)사이에는 다음과 같은 關係를 나타내었다.

$$\Delta P = a \cdot N_f^n \dots\dots\dots (1)$$

여기서 BS×GAB재의 경우는 $a = 54214$, $n = -0.26$ 이고, GA×GAB재의 경우는 $a = 16543$, $n = -0.19$ 이다.

3-2. 回轉角의 變化

Fig. 4는 壽命比, N_f/N_i 에 따른 시험편의 回轉角 θ 의 變化를 나타내었다. 이 回轉角은 피로시험중에 소성변형에 의하여 생기며 Fig. 2상에 나타난 바와 같이 두 板材의 사이각을 말한다. 이 그림상에는 3개의 BS×GAB試驗片을 사용하여 2450N 荷重레벨에서 回轉角의 壽命比에 따른 變化를 測定한 결과로서 좁은 밴드내로 그 결과가 모이고 있음을 알 수 있다. 즉 壽命비의 20%이전인 疲勞過程의 초기에는 θ 가 급격하게 變化하여 증가한 후에는 완만하게 증가, 變化하고 있음을 알 수 있다. 이와같은 θ 와 N_f/N_i 에 따른 급격한 變化는 材質의 가공경화와 피로균열의 발생과도 밀접한 關係가 있다.^{4,5)}

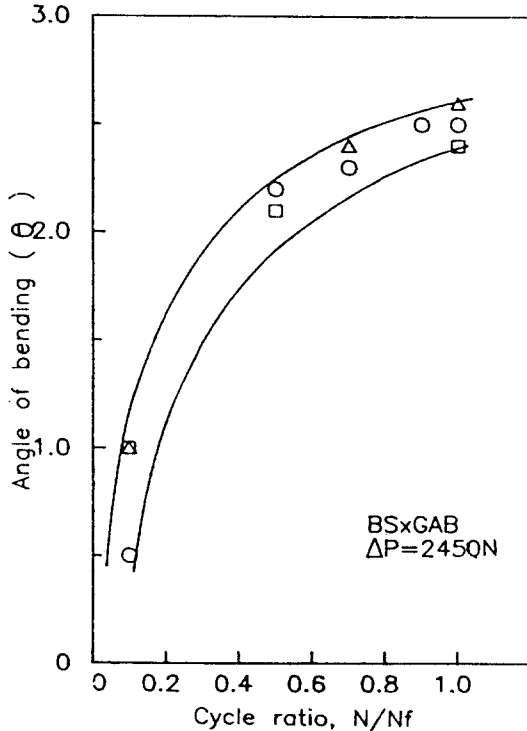


Fig. 4 The relation between angle of bending and cycle ratio

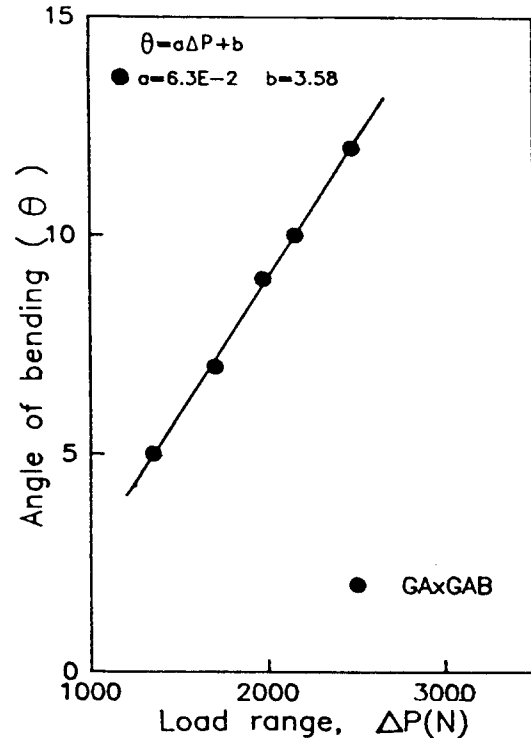


Fig. 5 The relation between angle of bending and load range

Fig. 5는 하중레벨(ΔP)에 따른 피로수명의 후기에서의 회轉角(θ)의 變化를 GA \times GAB試驗片에 대하여 측정하여 나타낸 것이다. 즉 荷重레벨이 증가할수록 회轉角이 線形的으로 增加함을 알 수 있고 다음과 같이 表現할 수 있다.

$$\theta = a \cdot \Delta P + b \dots\dots\dots (2)$$

단, a, b는 常數

GA \times GAB 시험편의 경우는 $a=6.3 \times 10^{-2}$, $b=3.58$ 이다.

이상과 같이 反復荷重下의 회轉角은 疲勞壽命의 초기에 급격한 變化를 한 후 서서히 포화하면서 증가하며, 하중레벨과 선형적인 관계가 됨을 알았다.

3-3. 疲勞龜裂의 發生 및 成長舉動

Photo 3a, 4a와 5a는 疲勞試驗이 끝난 시험편의

壓接部를 垂直으로 切斷하여 마운팅시킨 BS \times GAB 시험편을 撮影한 것으로서 균열의 發生 位置를 포함한 너깃의 斷面을 나타낸 것이다.

Photo 3a는 하중범위 $\Delta P=2000N$ 의 경우이며 Photo 4a는 2450N의 경우이며, Photo 5a는 3000N의 경우이다. 또 Photo 3b, 4b 및 5b에는 너깃, HAZ 및 모재부의 조직사진을 나타내고 있다.

板表面과 平행한 點熔接 接合面의 끝까지 성장한 주균열(main crack)은 너깃선단에서 발생한 후, 계속 成長하지만 이 初期段階에서는 판두께 방향으로 완전히 貫通하지 않았다. 그 이후 피로균열의 형태는 너깃 원주 가까이에 균열이 形成된 後 반원형태로 성장하면서 3次元 표면균열로서 進展하였다. 너깃의 원주 가까이에 發生, 成長하는 표면 균열은 처음은 극히 복잡한 形으로 進展하지만 板面에 平행하게 連續해서 前面을 形成하고 판두께 방향으로 향해서 점차 半橢圓上으로 되어 進展하였다. 이와 같은 결과는 다른 연구결과^{4,5)}와도 같

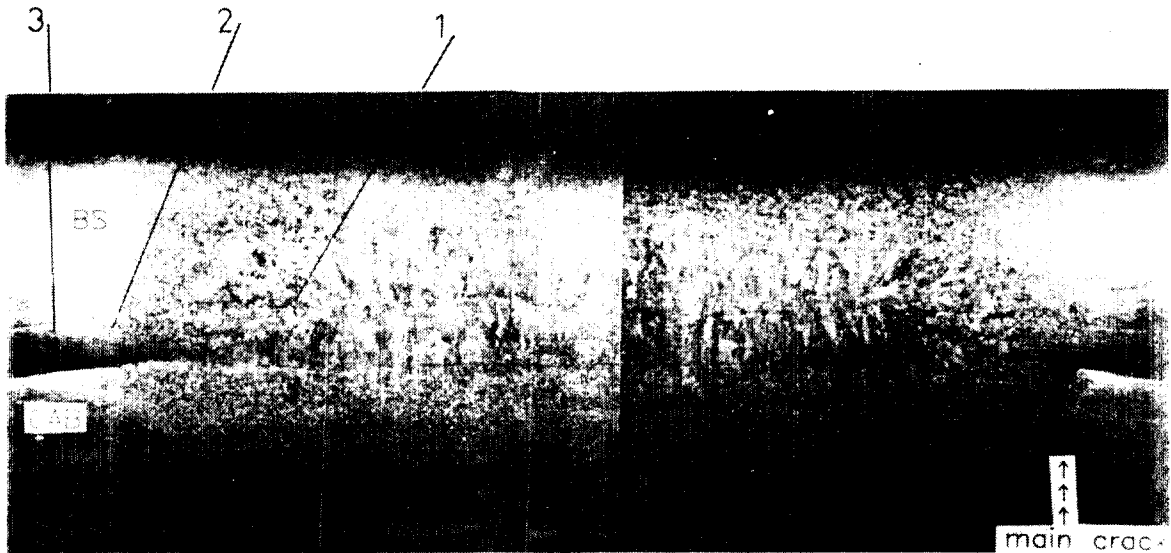
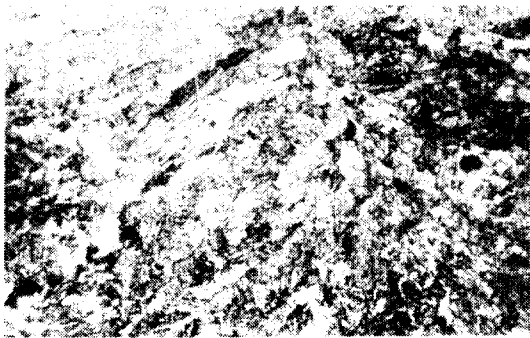


Photo 3a. Fractograph BS×GAB specimen($P=2000N$, $N_f=2.996 \times 10^6$)
1) nugget area, 2) near HAZ, 3) base metal



a) Area 1 (nugget)



c) Area 3 (base metal)



b) Area 2 (near HAZ)

Photo 3b Fractographs at three areas of BS×GAB specimen(2000N)

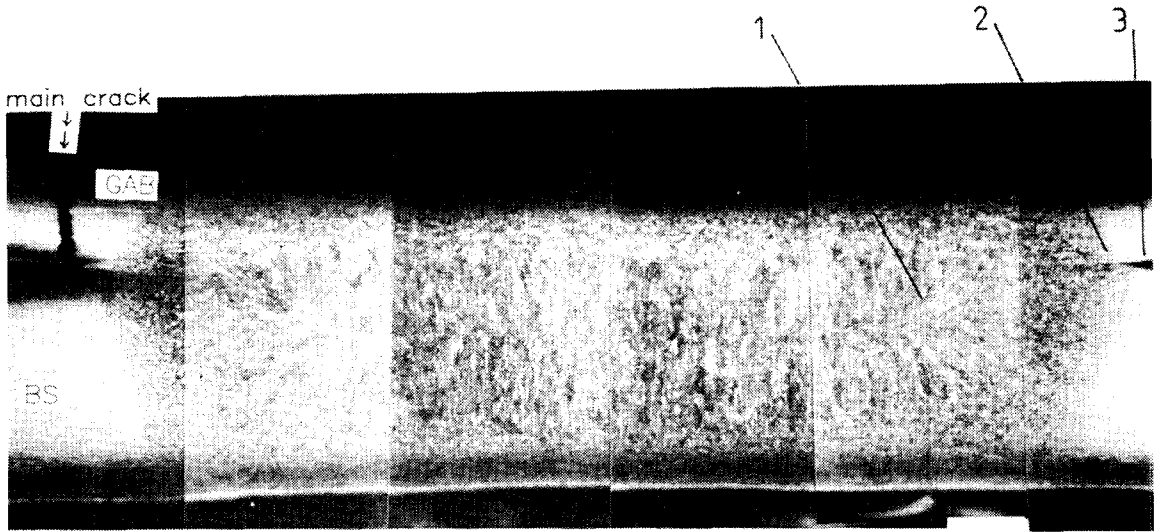
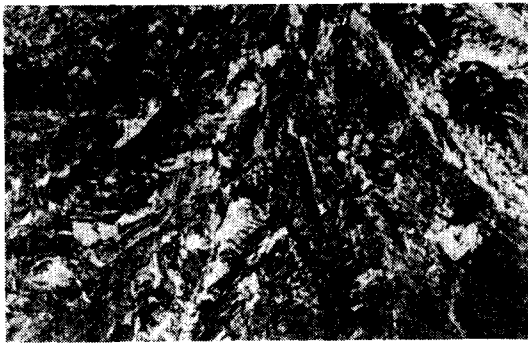
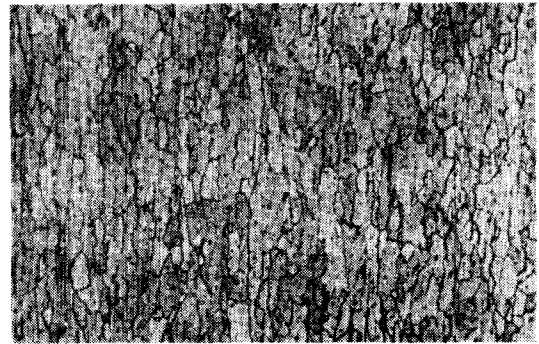


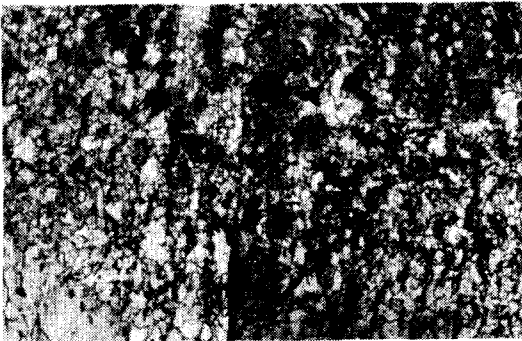
Photo 4a Fractograph BS×GAB specimen ($\Delta P=2450N$, $N_f=2.0 \times 10^5$)
1) nugget area, 2) near HAZ, 3) base metal



a) Area 1 (nugget)



c) Area 3 (base metal)



b) Area 2 (near HAZ)

Photo 4b Fractographs at three areas of BS×GAB specimen(2450N)

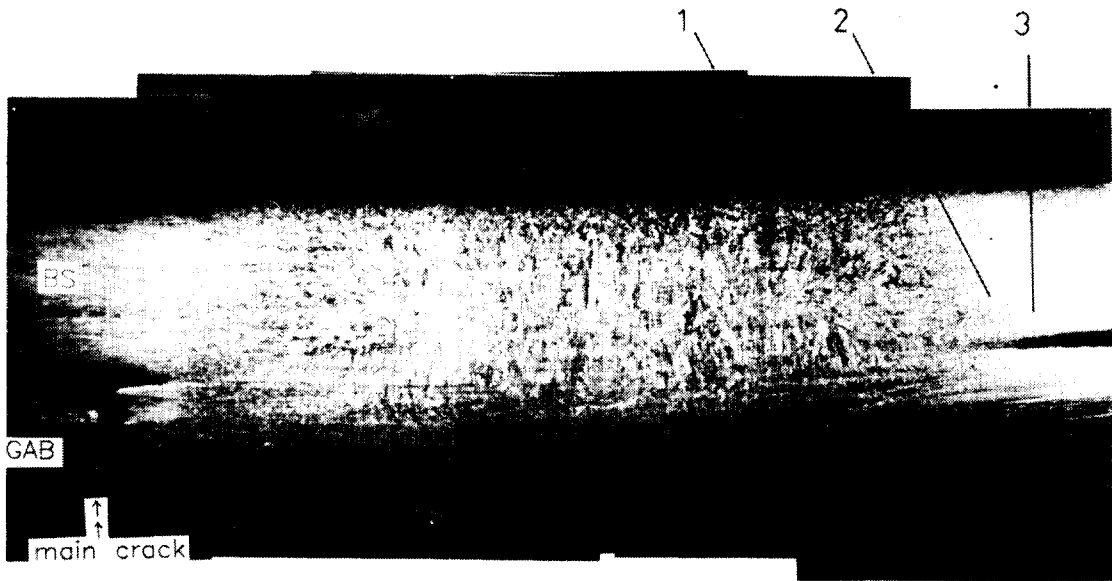
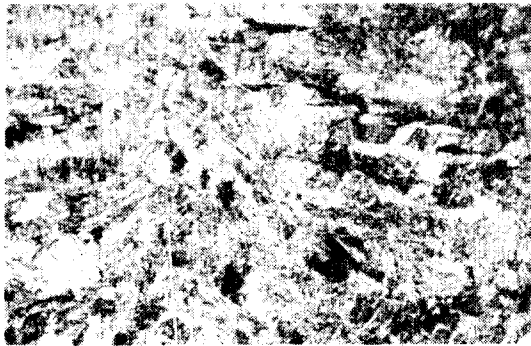


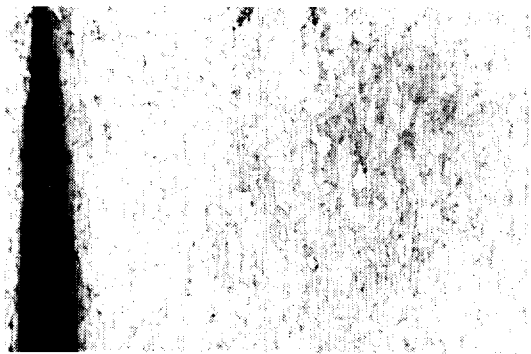
Photo 5a Fractograph of BS×GAB specimen ($\Delta P=3000N$, $N_f=7.6 \times 10^4$)
1) nugget area, 2) near HAZ, 3) base metal



a) Area 1 (nugget)



b) Area 2 (near HAZ)



c) Area 3 (base metal)

Photo 5b Fractographs at three areas of BS×GAB specimen(3000N)

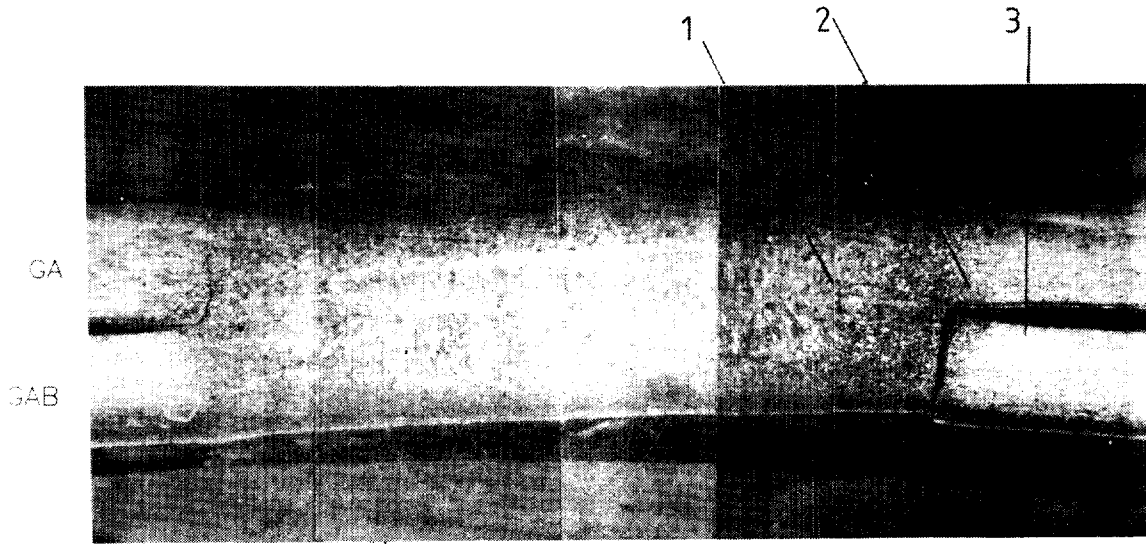
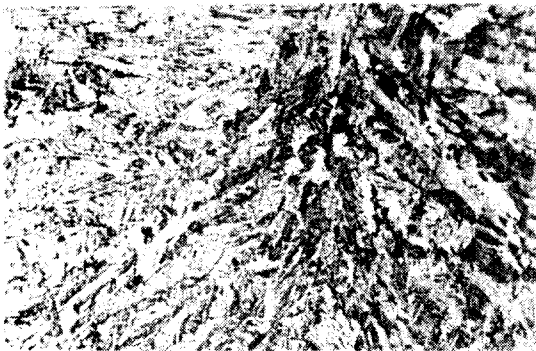
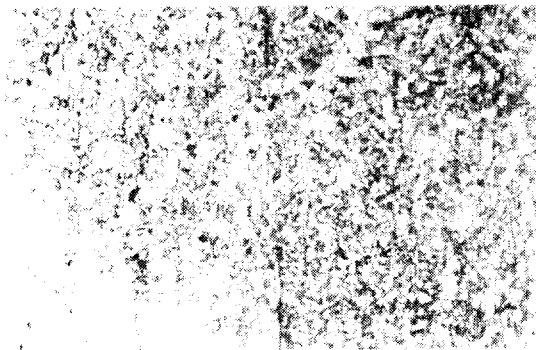


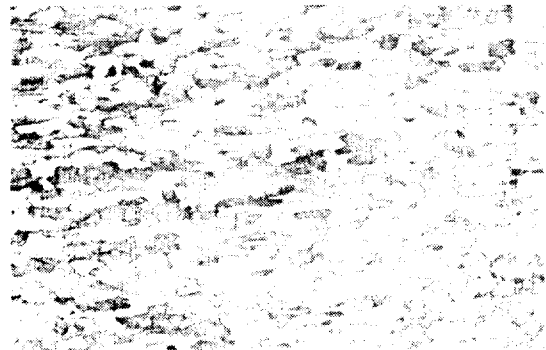
Photo 6a Fractograph GA×GAB specimen
1) nugget area, 2) near HAZ, 3) base metal



a) Area 1 (nugget)



b) Area 2 (near HAZ)



c) Area 3 (base metal)

Photo 6b Fractographs at three areas of GA×GAB specimen

았다.

이상과 같이 세 가지 하중레벨하의 너깃 단면에서 보면 어느 경우도 疲勞균열이 판의 외표면을貫通하기 전에 판의 내면에서는 이미 너깃보다 훨씬 크게 進展하였다. 또한 피로균열이 表面에 관통하기 전에 두 판재간에는 塑性變形을 同伴하여 回轉角이 생겼음을 알 수 있다. 이것은 剛성이 큰 BS재에 의해서 비교적 강성이 작은 GAB재의 반복 굽힘변형의 影響이라 생각되며 이 영향에 의하여 주균열은 모두 GAB재상에서 생겨 관통되었음을 사진상에서 관찰할 수 있다.

Photo 6a는 피로시험이 끝난 GA×GAB試驗片의 斷面을 나타내었다. Photo 6b에는 너깃, HAZ부 및 모재부의 조직사진을 나타내고 있다. 이 경우는 양쪽판재에서 거의 비슷하게 피로균열이 發生, 進展하였지만 주균열만이 표면까지 관통하였다. 그리고 두 판재사이 소성변형에 의한 회전각은 서로 비슷하게 변형되어서 생긴 것이 BS×GAB재와 다르다. 또한 이 사진상에도 Fig. 2에 도시한 주균열과 보조균열을 동시에 관찰할 수 있다.

이상과 같이 두 熔接材의 剛성이 커질수록 反復引張荷重에 의한 굽힘 塑性變形이 적게 생기므로 피로균열 發生位置는 應力集中이 最大인 너깃先端附近이 된다. 그러나 剛성이 약해질수록 회전각이 크지고 소성변형이 크게 생기면서 피로균열의 발생 위치는 너깃先端에서 母材部쪽으로 移動하게 되고, 또한 高荷重 短壽命領域일수록 너깃先端에서 먼 위치에 피로균열이 發生하였다.

3-4. 硬度分布

Fig. 6은 점용접 시험편의 너깃 부근의 마이크로 비커스 硬度(mHv)分布를 나타낸 것이다. 이 硬度測定方法은 Fig. 2와 같이 너깃부를 관찰하기 위하여 준비한 試驗片, 즉 마운팅시킨 시험편의 斷面上에서 너깃부의 경도를 軸方向으로 측정하였다.

GA×GAB시험편의 경우에는 두 판재의 硬度가 같기 때문에 GAB만 硬度를 測定하여 "□"로 표시하였다. 또 BS×GAB시험편의 경우에는 GAB재의 중간부분을 따라 측정된 경도치를 "◇"로, BS재의 중간부분을 축방향에 따라 경도를 측정하여 "○"로 표시하였다.

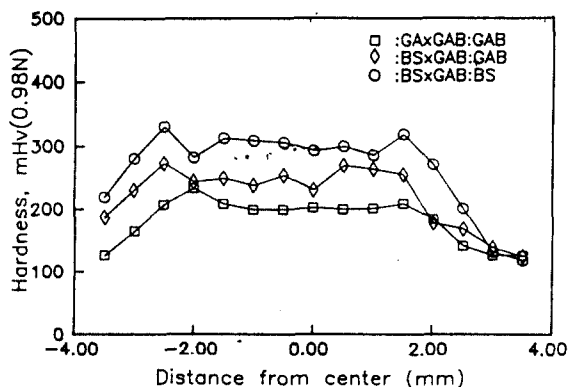


Fig. 6 Variation of hardness distribution which was measured from center along the cross section

이 그림에서 판두께가 1.4mm인 BS材의 硬度分布가 가장 크고 BS材와 點熔接된 GAB材의 硬度分布가 GA×GAB재의 경도치보다 다소 큼을 알 수 있다. 이것은 두께가 두꺼운 BS×GAB재는 GA×GAB재에 비하여 加壓力이 1.5배 더 크고 熔接後 가능 늦게 凝固되는 코어밴드(core band)가 Photo 3a, 4a 및 5a 처럼 BS×GAB재의 경우에는 BS재쪽에 생기기 때문이다. 그러나 GA×GAB재의 경우에는 Photo 6a 처럼 코어밴드가 두 재질의 中央部에 생기므로 모재와의 硬度差異에는 BS×GAB재 보다 큰 변화가 없었다.

또 BS×GAB재의 경우에는 두꺼운 판두께 때문에 冷却速度 변화에 의하여 結晶粒子가 미세해지고 너깃의 크기도 커졌기 때문에 硬化部의 넓이도 넓어졌다. 이와같은 결과는 徐, 姜⁷⁾의 연구 결과와도 一致하며 너깃부의 硬度에 가장 중요한 影響을 미친 것은 冷却速度에 의한 結晶粒子의 微細化라고 생각된다.

本 實驗에서는 두께가 1.4mm이하인 薄板이고 너깃에 發生하는 熱量의 상당부분은 銅의 電極棒으로 전달되므로 殘留應力의 影響은 적으므로 이것에 관한 연구는 除外시켰다.

3-5. 荷重레벨과 疲勞균열의 發生位置

Fig. 7은 疲勞균열 發生 位置比(crack initiation ratio, γ)와 負荷 荷重範圍(ΔP)와의 관계를 나타

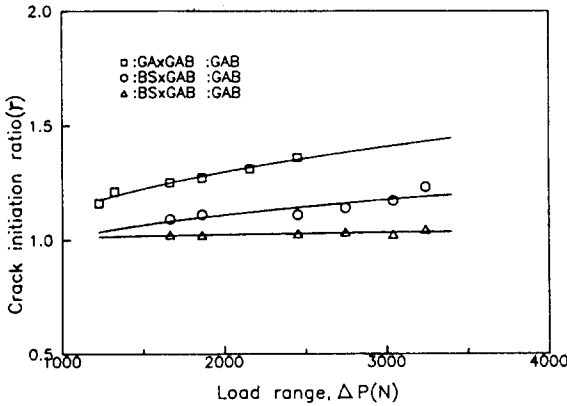


Fig. 7 A relation between crack initiation ratio and load range

내고 있다. 여기서 피로균열 발생 위치비 γ 는 피로균열의 발생 위치 즉 주균열과 보조균열 사이의 거리(2L)를 너깃 직徑(2r)으로 나눈 것이다.

荷重레벨에 따른 龜裂發生位置와 그 形狀을 관찰 比較해 보면 2000N과 같이 낮은 응력레벨에서는 너깃先端部에서 균열이 發生, 成長하였고 荷重레벨이 증가할수록 너깃先端에서 점점 멀어지면서 疲勞균열이 發生, 成長됨을 알 수 있고 이러한 관계는 Photo 3a, 4a, 5a 및 6a에서 직접 관찰 할 수 있다.

이와같이 하중레벨에 따른 γ 의 선형적인 변화는 荷重의 增加에 따라 생기는 점용접 시험편의 굽힘 변형과 反復塑性變形의 差에 起因한다고 생각된다. 그리고 이 결과는 Kan³⁾의 彈塑性 有限解析에 의한 결과와도 一致한다.

일반적으로 피로균열은 두장 이상의 薄板이 重疊되어 壓接된 부분의 先端近方인 내면의 母材部나 熱影響部(HAZ)에서 發生하여 Photo 3a, 4a, 5a, 6a와 같이 너깃경계 근처를 따라서 3次元적으로 복잡한 形態로 成長, 接合部의 母材表面을 貫通하여 나타나고, 이때 表面上에서 疲勞균열의 관찰이 가능하게 된다. 이 피로균열은 全壽命의 10% 정도의 時點에서 發生하며, 點熔接 壽命의 대부분은 이 균열의 成長에 消費될 것이다.^{4,5,7)}

그렇지만 내면상의 균열발생 및 성장이므로 이의 檢出이 곤란하고 疲勞균열의 定量的인 관찰과 豫測도 어렵다.

Fig. 7과 같이 γ 와 ΔP 는 線形座標上에서 거의 線形的인 관계를 나타내고 있다. 피로 균열은 너깃先端 밖에서 발생하기 때문에 피로균열 發生位置比는 대개 1보다 크다. GA×GAB試驗片의 경우는 BS×GAB재 보다 剛性이 큰 것과 點熔接된 경우에는 剛性이 약한 GA×GAB試驗片 보다 塑性變形을 저지시키므로 GA×GAB재의 경우보다 너깃先端 쪽에서 피로균열이 생김을 알 수 있다. 특히 BS×GAB試驗片 중의 剛性이 GAB재 보다 8배가 큰 BS材의 γ 의 변화가 다른 部材보다 거의 없음을 알 수 있다. 이와 같은 균열의 발생위치비 (γ)와 하중레벨(ΔP) 사이에는 式(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma = a \cdot (\Delta P) + b$$

(단 a, b는 材料常數) (3)

여기서 GA×GAB材의 경우는 $a = 1.6 \times 10^{-4}$, $b = 0.96$ 이고 BS×GAB材의 BS板材는 $a = 1.1 \times 10^{-5}$, $b = 1$ 이며 GAB板材의 경우는 $a = 8.1 \times 10^{-5}$, $b = 0.94$ 의 상수를 실험에서 얻었다.

Fig. 8은 피로균열발생위치비 γ 와 疲勞壽命 N_f 와의 관계를 片對數紙에 나타내었다. 이 그림과 같이 γ 와 N_f 사이에는 거의 線形的인 관계를 나타내고 있다. 低荷重 長壽命일수록 너깃先端쪽으로 피로균열의 發生位置가 近接하고 高荷重 短壽命일때는 너깃先端으로 부터 먼 곳에 피로균열이 發生함을 알 수 있다. 이와같은 관계를 式 (4)과 같이 나타

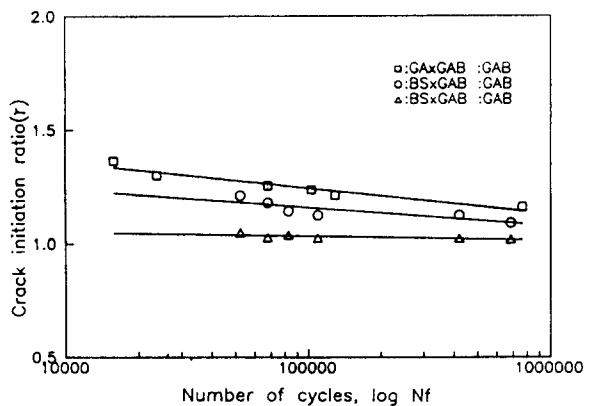


Fig. 8 A relation between crack initiation ratio and number of cycles to failure

낼 수 있다.

$$\gamma = a \cdot \log(N_f) + n$$

(단 a, n는 材料常數) (4)

여기서 GA×GAB재의 경우는 $a = -4.9 \times 10^{-2}$, $n = 1.81$ 이고, BS×GAB재의 경우는 BS板材는 $a = -7.6 \times 10^{-3}$, $n = 1.12$ 이며 GAB板材는 $a = -3.5 \times 10^{-2}$, $n = 1.56$ 이다.

이상의 결과와 같이 본 연구에서 실시된 点熔接에서의 피로균열의 發生 成長은 材質, 荷重레벨 및 剛性 등에 依存함을 알 수 있다.

3-6. 疲勞龜裂의 成長舉動에 관한 破壞力學的 考察

点熔接部 近傍에서 發生 成長하는 피로균열의 成長特性을 破壞力學的으로 考察하기 위하여 應力擴大係數 K를 이용하여 구하였다. 点熔接部の 應力擴大係數를 구하는 方法은 結城⁹⁾등이 提案한 式(5)가 널리 이용되고 있는 바, 본 研究에서도 이 式을 이용하여 應力擴大係數 K를 구하였다.

이 計算方法은 試驗片 두께(B), 너깃 半徑(R), 負荷 荷重(P)을 사용하여 有限要素法으로 구한 式으로서 여기서는 試驗片 두께는 0.7mm, 너깃 半徑은 본 實驗에서 사용한 試驗片의 너깃 半徑의 平均값인 3mm로 일정하게 하였고 負荷 荷重은 그때마다 負荷하는 荷重값을 代入하여 계산하였다.

$$K_I = [0.015 + 0.0953(R/B) - 0.0099(R/B)^2] PR^{-3/2}$$

..... (5)

단, B: 시험 片 두께, R: 너깃 반경, P: 하중

구해진 資料를 入力시켜 最大應力擴大係數 K_{max} 를 구하여 破斷壽命 N_f 와의 關係로 나타낸 것이 Fig. 9이다. 應력 확대계수 K_{max} 와 피로수명 N_f 은 거의 좁은 밴드내로 모였으며 이는 應력 확대계수 K로 적용점의 피로수명을 定량화할 수 있음을 보여 준다. 또한 이 關係는 式(6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{max} = a \cdot N_f^n$$

(단 a, n은 材料常數) (6)

여기서 BS×GAB재의 경우의 $a = 1908$, $n =$

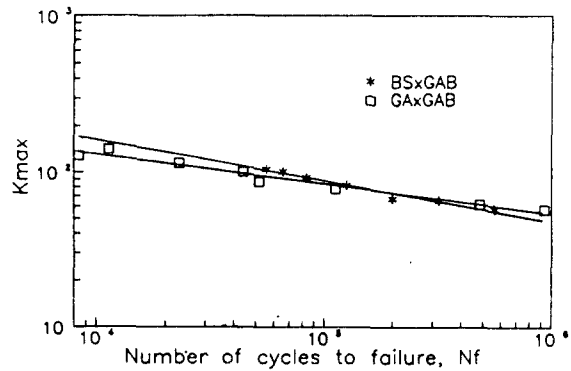


Fig. 9 A Relation between maximum stress intensity factor and number of cycles to failure

-0.27이며, GA×GAB재의 경우의 $a = 768$, $n = -0.19$ 이다. 그림과 같이 兩對數 座標상에서 두가지 강성이 다른 두 시험편은 각각 線形으로 나타낼 수 있고 합리적인 평가를 할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 結 論

두께가 1.4mm인 非鍍金 鋼板(BS)과 0.7mm인 片面鍍金 鋼板의 非鍍金面(GAB)을 点熔接시킨 BS×GAB시험편과, 片面鍍金 鋼板의 鍍金面(GA)과 非鍍金面(GAB)을 点熔接시킨 두께가 같은 GA×GAB시험편의 軸引張 疲勞試驗을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 亞鉛鍍金 鋼板의 点熔接部에서 最大應力擴大係數 K_{max} 와 破斷壽命 N_f 를 兩對數座標로 나타낸 결과 다음과 같이 線形的인 關係를 나타내었다.

$$K_{max} = a \cdot N_f^n$$

(단 a, n은 材料常數)

2) BS×GAB시험편의 疲勞強度가 GA×GAB시험편보다 10^6 회 疲勞強度에서 약 23% 增加하였다. 또 동일 하중레벨에서의 피로수명도 BS×GAB쪽이 GA×GAB쪽보다 약 6배에서 9배까지 增加하였다.

3) 疲勞荷重에 따른 回轉角을 測定한 결과 疲勞壽命의 初期 20% 내에서 急變化를 나타내었으며 그 以後로는 緩慢하게 增加하였다. 하중레벨에 따른 회전각의 변화는 하중레벨이 增加할 수록 선형적으로 增加함을 알 수 있다.

4) 주균열과 보조 균열사이의 거리 2L을 너깃

직경 $2r$ 로 나눈 피로균열의 발생위치비 γ 와 疲勞壽命 N_f 와의 관계를 片對數紙에 나타내면 다음과 같이 線形的으로 표시할 수 있었다. 즉 강성이 큰 재질은 변화가 거의 없었지만 강성이 약한 부재에는 큰 변화가 크며 피로반복수와 하중레벨에 선형적으로 증가하였다.

$$\gamma = a \cdot \log(N_f) + n \quad (\text{단 } a, n \text{는 材料常數})$$

參 考 文 獻

- 1) Pook L.P., "Fracture Mechanics Analysis of the Fatigue Behavior of Spot Welds", Int. J. of Fracture, No. 11, pp. 173-176, 1975
- 2) Orts D.H., "Fatigue Strength of Spot Welded Joints in a HSLA Steel", SAE paper 810355, pp. 1-12, 1981
- 3) Kan Y.R., "Fatigue Resistance of Spot Welds-An Analytical Study", Metal Engineering Quarterly, 11, pp. 26-36, 1976
- 4) 李春植, 王鞍功太郎, 原中建一郎, 條崎正利, 北川英夫, "스폿 용접부における疲勞き裂進展の 破壞力學的 研究", 日本機械學會 論文集 (A編), 第55卷 510號, pp. 231-237, 1989
- 5) 李春植, 王鞍功太郎, 原中建一郎, 條崎正利, 北川英夫 "스폿 용접부의 全疲勞 壽命と 疲勞き裂發生壽命의關係", 日本機械學會 論文集, 第54卷 505號, pp. 1716-1721, 1989
- 6) 徐昌敏, 姜成守, "高張力 鋼板과 亞鉛鍍金 鋼板間의 點熔接 疲勞特性", 大韓機械學會 論文集, 第12卷 第4號, pp. 747-754, 1988
- 7) 徐昌敏, 姜成守, "高張力 鋼板과 亞鉛鍍金 鋼板間의 疲勞特性(II)", 大韓機械學會 論文集, 第13卷 第2號, pp. 229-235, 1989
- 8) 酒井達雄, 菊地俊郎, 藤澤泰成, "十字形 引張 스폿트 용접 繼手の疲勞破壞に關する 統計的 研究", 日本材料學會誌, 第38卷 第426號, pp. 79-85, 1989.
- 9) 結城, 大平, 中務, 李, 岸, 森, "自動車 車體 스폿트 용접構造의 疲勞強度と 壽命推定(共同研究 成果 資料)", 自動車 技術會, 스폿트 용접 構造 信賴性 分科會, p. 183, 1986