論 文

大 韓 造 船 學 會 論 文 集
第 29 卷 第4號 1992 年 11 月
Transactions of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol. 29, No.4, November 1992

点熔接材의 疲勞 特性에 관한 實驗的 硏究

서창민*, 강성수**, 황남성***, 조용익****

Experimental Study on Fatigue Characteristics of the Single Spot Welded Joint

by

Suh, Chang-Min*, Kang, Sung-Soo**, Hwang, Nam-Seong***
and Cho, Yong-Ich****

요 약

현재 산업계 각 분야에서 점용접은 사용하지 않는 곳이 거의 없을 정도로 박판구조물의 소재 연결분야에 광범위하게 응용되고 있어 그 공학적 및 공업적 중요성은 증가하고 있지만 이에 대한 피로거동을 연구한 예가 거의 없어 그것에 대한 자료의 축적이 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 자동차업계에서 널리 사용되고 있는 복합조직인 고장력강판(High Strength Steel Sheet, HS)과 아연도금강판(Galvanized Steel Sheet, GA)을 선택하여 각 강판간의 点熔接 疲勞特性을 규명하였다. 즉 두 종류의 同種 点熔接材(HS×HS, GA×GAB)와 두 종류의 異種 点熔接材(HS×GA, HS×GAB)간의 單点 点熔接 試驗片을 제작하여 상온하에서 정적 인장시험과 편진(片振) 인장 축하중 피로시험을 실시하여 각 재질간의 정적 인장특성과 疲勞特性을 파괴역학적으로 규명하였다.

위의 실험을 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 동일 조건하에서 두 종류의 동종 및 이종 점용접재를 인장시험한 결과 강성의 차이에도 불구하고 비교적 그 차이가 적었다.

2. 저하중 장수명 영역에서는 피로균열이 너깃근처에서 생성되었지만 고하중 단수명 영역에서는 너깃에서 좀 더 멀리 떨어져 균열이 발생하였다.

3. 최대응력확대계수 Kmax와 각 용접재의 피로수명 N_f사이에는 거의 선형적인 관계를 나타내었고 log-log 좌표상에서 좁은 밴드내에 모였다.

접수일자 : 1992년 4월 2일, 재접수일자 : 1992년 7월 29일
* 정회원, 경북대학교 기계공학과
** 부산대학교 기계공학과
*** 경북대학교 기계공학과
**** 경산조폐창

이 관계는 다음과 같은 식으로 표현되었다.

$Kmax=H \cdot N_f^P$

여기서 H와 P는 재료상수이다.

Abstract

In this paper, the characteristics of fatigue crack growth in the spot welded joint of the same kinds of specimens(HS×HS, GA×GAB) and different kinds of specimens(HS×GA, HS×GAB) which consist of dual phase high strength steel(HS) and monogalvanized steel(GA) were examined with static tension tests and axial tension fatigue tests.

Some of the important results are as follows:

1. The divergence of tensile strengths among the same and different kinds of spot welds under the same conditions is comparatively low regardless of the difference of stiffness.

2. At the low load level and long life region, the fatigue crack is initiated near the nugget. However, in the high load level and short life region, it occurs a little far from the nugget.

3. It has shown a linear relation between maximum stress intensity factor, Kmax and fatigue life, N_f among each of the spot welds and has gathered in a narrow band on the log-log graph paper.

$Kmax=H \cdot N_f^P$

where H and P are a material constant.

1. 緖 論

最近의 輕量化 및 高強度를 要求하는 自動車를 비롯한 항공기, 선박 및 鐵道車輛등 各種 薄板 構造物의 製作, 建造에 있어서 点熔接이 많이 응용되고 있다. 점용접법은 짧은 시간내에 생산성을 높일 수 있고, 고도의 기술이 필요없이 용이하여 작업이 가능하며, 自動化가 용이하여 대량생산에도 적합하다. 이러한 특성 때문에 점용접법은 자동차 차체, 항공기 구조, 선박, 전자제품 및 각종 첨단장비등의 조립과 같이 내구성과 신뢰성이 요구되는 박판구조물에 널리 사용하게 되었다. 최근 점용접에 관한 공학적 및 공업적인 관심이 집중되고 있는 것은 상기와 같은 많은 장점과 더불어 구조의 경량화가 추진되고 있기 때문이다[1,2].

특히 北美지역등에서 鹽害對策을 위해 아연도금 강판의 사용이 증가하고 있어[1,2,7] 高張力鋼板과 아연도금 강판과의 점용접에 관한 피로특성 연구는 중요한 과제가 되고 있다. 또한 同種 용접재 뿐만 아니라 異種 용접재간의 疲勞強度에 관한 연구는 점용접의 많은 산업의 응용면에 의하여 信賴性 評價가 강조되지만 그 연구 예가 적고 자료의 축적이 절실히 요구되고 있다. 양면 아연도금강판의 경우는 아연이 전극팁에 침입하여 황동화시켜 전극팁의 수명을 단축시키며 또 접촉저항을 감소시키고 용접성을 감소시켜 용접성을 해치므로 용접성향상 및 용접전극의 수명향상을 위한 해결책으로 한쪽면만 도금된 편면 아연도금강판의 사용이 늘고 있다.

Pook[3]은 点熔接된 상대의 試驗片과 너깃(nugget)이 應力集中의 根源이 되기 때문에 이것을 노치(notch)로 간주하여 應力集中係數를 適用하였고, Orts[4]는 두 판재간에 생기는 開口角을 塑性變形과 관련지어 解析하였다. 또 結成[5] 등은 有限要素法을 이용하여 구한 결과를 이용하여 스트레인 게이지로 測定이 가능한 外側 변형률을 스트레인의 측정이 불가능하지만 피로균열이 발생하는 곳의 內側 변형률로 換算하여 피로수명을 豫測한 硏究 등이 있다.

편면 도금강판의 疲勞擧動에 관한 연구는 문헌상으로 거의 찾아볼 수 없었고 편면 아연도금 강판과 복합조직 고장력 강판의 이종 점용접재의 피로거동을 유한요소법을 이용한 응력해석을 행한 徐들[1, 2]의 연구를 제외하고는 복합조직인 고장력강판과 편면도금강판과의 点熔接材에 관한 疲勞擧動을 연구한 예가 없어서 이에 관한 자료의 축적이 요구되고

있다.

본 연구에서는 자동차업계에서 널리 사용되고 있는 복합조직인 고장력강판(High Strength Steel Sheet, HS)과 아연도금강판(Galvanized Steel Sheet, GA)을 선택하여 각 강판간의 点熔接 疲勞特性을 규명하였다. 즉 두 종류의 同種 点熔接材와 두 종류의 異種 点熔接재간의 단점 点熔接 試驗片을 제작하여 상온하에서 정적 인장시험과 편진(片振) 인장 축하중 피로시험을 실시하여 각 재질간의 정적 인장 특성과 疲勞特性을 파괴역학적으로 규명하였다.

2. 實 驗

2.1 試驗片

본 실험에서 사용한 試驗片의 材料는 自動車 車體에 널리 사용되고 있는 0.7mm 두께의 複合組織(dual phase)인 高張力 鋼板(HS)과 片面 亞鉛鍍金鋼板(GA)을 사용하였다[8,9,10].

Table 1과 Table 2는 본 실험에서 사용된 각 재료의 화학적 성분과 기계적 성질을 나타내었다. Fig. 1은 본 실험에 사용한 시험편의 形狀을 나타내며

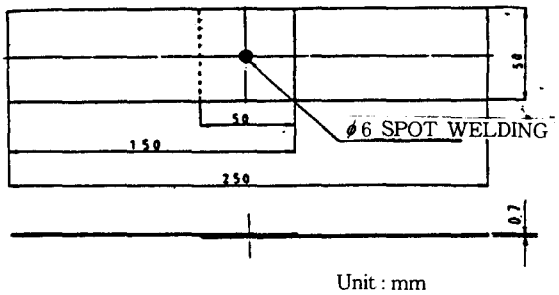
Table 1 Chemical composition of base metals (wt.%)

Materials	C	Mn	Si	P	S	Ceq
GA	0.01	0.11	0.01	0.012	0.005	0.004
HS	0.05	0.2	0.02	0.06	0.007	0.015

Ceq=C%+Mn 4%+Si 4%

Table 2 Mechanical properties of base metals

Materials	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
GA	186.3	299.1	49	147
HS	215.7	339.3	39	161



Unit : mm

Fig.1 Configuration of the single spot welded joint

Table 3 Welding conditions

Specimen	Squeeze Force (N)	Squeeze Time (Cycle)	Welding Time (Cycle)	Hold Time (Cycle)	Current (A)
HS×HS	2940	45	12	12	10500
GA×GAB	2940	45	12	12	10500
HS×GA	2940	45	12	12	10500
HS×GAB	2940	45	12	12	10500

Table 4 Nomenclature of spot welded specimens

nomencla.	spot weld specimen
HS×HS	
GA×GAB	galvanized side
HS×GA	
HS×GAB	

▨ : High strength steel sheet(HS)
▭ : Monogalvanized steel sheet(GA)

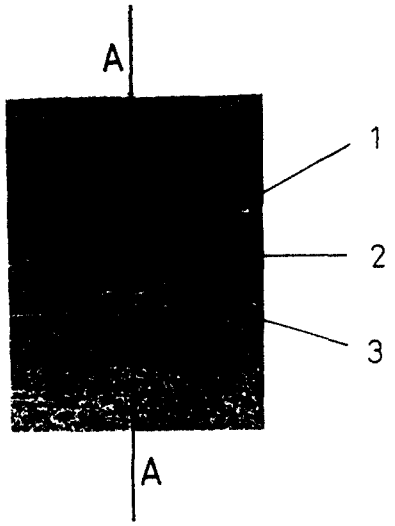
본 실험에서 사용한 시험편은 동일한 용접조건하에서 제작된 單点 点熔接 試驗片을 필시험(peel test)과 인장시험을 수행하여 Table 3과 같은 最適熔接條件을 구하여 사용하였으며 Table 4에는 각 시험편의 명칭을 나타내었다.

아연도금된 시험편은 편면도금상태이므로 실용적인 면을 고려하여 도금면을 상대의 시험편과 점용접시킨 것을 "GA"라 표기하고 비도금면(bare plane)을 상대의 시험편과 점용접시킨 것을 "GAB"로 표기하였다.

고장력강판(HS)과 편면아연도금강판(GA)의 도금면을 점용접한 HS×GA시험편과 편면도금강판의 비도금면을 점용접시킨 HS×GAB시험편의 異種 試驗片을 포함한 4가지 시험편을 각각 제작하여 사용하였다. JIS규격[11]에서는 전극지름이 5mm일 때 판폭이 40mm였지만 본 실험에서 사용된 전극지름은 6mmφ로 일정하게 유지하여 시험편의 폭을 50mm로 하였다. 용접기는 정치식 点熔接機(PA-150)를 사용하였으며 Cu-Cr-Zi합성으로 된 반구형(dome type) 용접전극의 크기는 외경 16mmφ와 용접 전극경 6mmφ로 하였다.

2.2 실험방법

본 실험에 사용한 시험기는 電氣油壓式 疲勞試驗



1 : Part of spot-welded
2 : Base metal
3 : Fatigue crack

Photo 1 Single spot welded joint specimen

機(Instron 1342)로서 피로시험은 상온에서 응력비 R=0의 하중제어 피로시험을 실시하고 일정 하중하에서 주파수 25Hz의 정현파를 사용하였다.

또 点熔接된 시험편은 피로시험을 수행한 후 용접부 주위에서 발생 성장하는 疲勞龜裂의 거동을 용이하게 관찰하기 위해서 파단된 시험편의 용접부 직경 6mm를 Photo 1의 A-A 방향인 축 방향으로 절단하여 에포마이카(epomica)와 경화제를 사용하여 마운팅(mounting) 시켰다. 이 마운팅된 試驗片을 연마지 1200번까지 연마하고 산화크롬분말로서 버핑한 후 입계 슬립밴드 및 미소조직의 관찰이 용이하도록 4% 질산용액(nital)에 가볍게 에칭한 후 光學顯微鏡을 사용하여 50－200배의 배율로 용접부 주위의 조직을 관찰 촬영하였다.

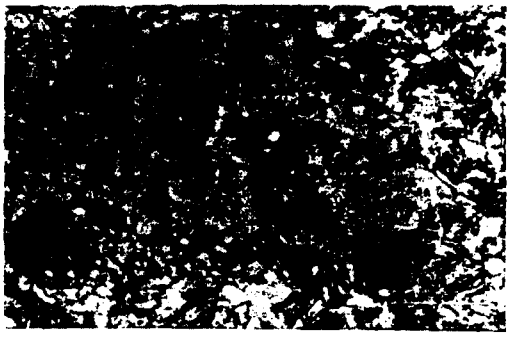
이와같이 촬영된 조직사진에 의하여 반복하중에 따른 疲勞龜裂의 발생위치 성장방향 용접부의 크기 및 용접시 가장 늦게 응고되는 코어밴드(Core Band)의 위치등을 비교 관찰하여 연구하였다. 또 경도시험은 마이크로 비커스 경도기(Micro Vickers Hardness Tester)로 가압시간 30초, 측정하중은 1.96N의 조건으로 Photo 1의 A-A축상으로 各各 0.5mm 간격으로 경도를 측정하였다.

본 실험에서 疲勞壽命(N_f)은 Photo 1상의 3과 같이 疲勞龜裂이 点熔接部의 내부에서 발생 성장하여 표면을 관통해서 부하하중이 떨어질 때 그 표면길이가 용접부의 길이와 거의 같은 약 6mm가 되는 시점을 기준으로 하였으며 내부 균열길이가 외부용접부 길이의 크기까지 성장하면 시험기의 하중값이 약간 감소하였다.

Photo 1은 点熔接된 試驗片의 前面部를 나타내었으며 사진상에서 1은 点熔接部를 2는 母材部를 3은 표면까지 관통한 疲勞龜裂의 형상을 各各 보여준다.

Photo 2a는 GA의 점용접부와 모재부의 현미경 조직사진을 약 400배로 확대 촬영하여 나타낸 것이다. Photo 2b와 Photo 2c는 各各 GAB재와 HS재의 점용접부와 모재부의 현미경조직을 나타낸다.

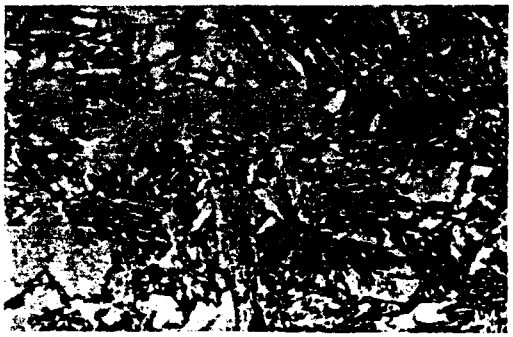
Photo 2a, 2b 및 2c의 모재부의 조직사진은 ASTM #9 정도로 압연으로 의한 조직이 부분적으로 재결정화된 것을 알 수 있다. GA재 및 GAB재의 용접부상의 조직은 순간적인 용착과 급냉에 따라 부분적으로 針狀組織을 포함하는 tempered martensite 조직임을 알 수 있다. 그러나 HS재의 용접부



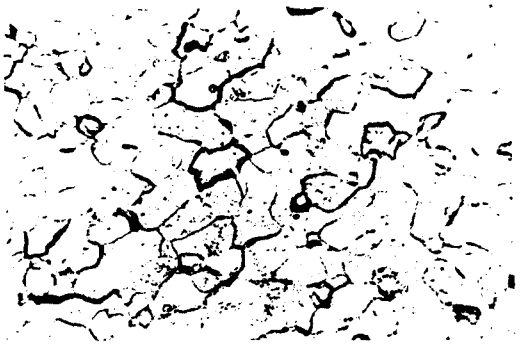
1. Part of spot welded area

2. Base metal

Photo 2a Microstructure of galvanized steel sheet (GA), ×400



1. Part of spot welded area



1. Part of spot welded area

2. Base metal

Photo 2b Microstructure of bare side mono-galvanized steel sheet(GAB), ×400

2. Base metal

Photo 2c Microstructure of high strength steel sheet (HS), ×400

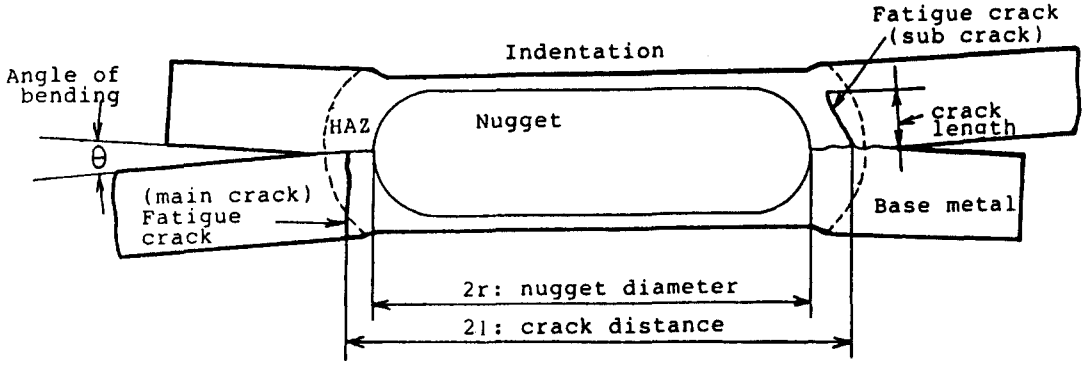


Fig.2 Schematic diagram of fatigue crack observed on cross section in the center of spot weld

는 GA 및 GAB재와는 달리 페라이트 기지에 미세한 퍼얼라이트 조직이 혼합된 것을 알 수 있다.

Fig.2는 Photo 1에서 A-A의 축 방향으로 절단한 試驗片의 단면과 명칭을 나타내었다. 여기서 主龜裂(main crack)은 내부에서 발생한 疲勞龜裂이 표면까지 관통한 것을 나타내고 補助龜裂(sub-crack)은 내부에서 성장하다가 외부까지 관통하지 못한 것을 나타내었다. 시험편의 굽힘각(angle of bending)은 피로하중에 의한 소성변형으로 생긴 모재와 모재사이의 角을 말하며 또 균열간 거리(2l)는 주균열과 보조균열이 발생된 점의 거리로 정하고 너깃의 크기를 2r로 정하였다.

2.3 靜的 引張特性

피로시험 시험편과 동일형상으로 제작한 인장시험편을 IS-10T 인장시험기에 장착하여 인장속도 3mm/min로 인장시켰을 때 얻은 하중－변형선도를 Fig.3에 나타내고 최대인장력을 Table 5에 나타내었다. 同種 点熔接材인 HS×HS강재와 GA×GAB강재의 인장강도는 강성의 차이에도 불구하고 거의 비슷하였으며 또한 용접부에서의 굽힘각도 비슷한 경향을 나타내었다.

이종 점용접재간의 굽힘각은 강성이 강한 HS재쪽은 굽힘각이 거의 일어나지 않고 강성이 약한 GA재와 GAB재쪽에만 굽힘각이 크게 나타났다. 이상과 같이 동일한 용접 조건에서 박판의 경우에 강성의 차이에도 불구하고 용접부가 냉각속도가 비슷하면 인장력에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 즉 Fig. 3과 같이 인장시험의 초기에는 하중의 증가에 비례하여 시험편의 변형량이 약 2154N까지 선형적으로 증가함을 알았다. 이 비례한도를 지나 계속 하중을 가해주면 점용접부위에 소성변형이 생기면서 최대인장력에 도달하였으며 그 이후 큰 소성변형이 수반되었다.

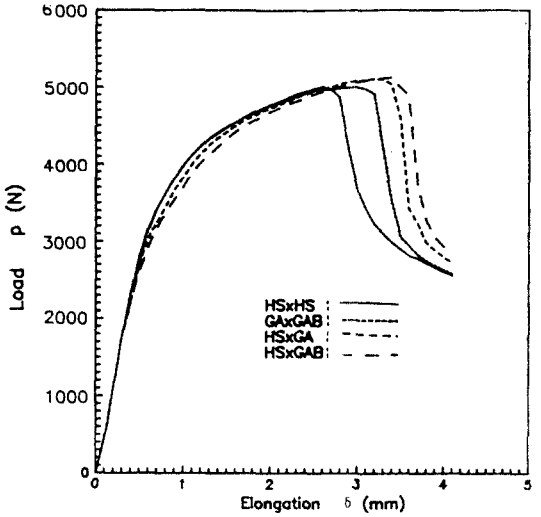


Fig.3 Load-elongation diagram

Table 5 Tensile force of various specimens

Specimens	Tensile force (N)
HS×HS	4920
GA×GAB	4910
HS×GA	4969
HS×GAB	5027

3. 實驗結果 및 考察

3.1 하중범위－피로수명(ΔP-N_f) 線圖

Fig.4a상에는 본 실험에서 사용된 동종 시험편으로 점용접된 HS×HS 試驗片과 GA×GAB재의 하중범위(ΔP)와 疲勞壽命(N_f) 선도를 서로 비교하여 나타내었다. 고하중 단수명 영역인 10^4회 근처의 疲勞壽命 초기에서는 点熔接部 근처에서 소성변형이 크게 생기고 굽힘각도 크게 생겼다. 이러한 소성변형과 굽힘각의 증가현상은 파단수명에 가까워질수록 두드러지게 나타났다.

동종재인 HS×HS시험편과 GA×GAB시험편의 경우에는 피로반복수 10^6회까지 견딜 수 있는 하중범위는 Table 6과 같이 각각 1275N과 1324N이었다. 이와같이 10^6회의 하중범위에서는 疲勞壽命에 가까워질수록 10^4회의 단수명 영역보다 굽힘각은 적었고 소성변형은 거의 발생하지 않았다. HS×HS 시험편의 고하중범위인 3390N에서 疲勞龜裂 발생위치는 너깃에서 먼 열영향부(HAZ)에서 주로 발생하였으며 저하중범위인 1275N에서는 너깃에 가까운 곳에서 疲勞龜裂이 발생함을 알 수 있었다.

Fig.4b는 고장력강판에 연면 아연도금강판을 서로 점용접시킨 HS×GA 試驗片과 HS×GAB 試驗片의 하중범위와 疲勞壽命($\Delta P-N_f$) 선도를 나타내며 10^6회의 피로하중범위는 Table 6과 같이 각각 1422N과 1294N이었다. 고하중 단수명 영역인 10^4회에서의 두 시험편의 하중범위는 각각 2900N과 2823N이었다. 동종시험편과 같이 이종시험편에서도 고하중범위에서는 굽힘각이 크게 발생했지만 고장력강판(HS)에서는 거의 굽힘현상이 일어나지 않았고 연면 아연도금강판 GA와 GAB재쪽에서 더욱 많은 굽힘현상이 일어났다.

Fig.4c는 본 실험에 사용된 4가지 시험편의 하중범위와 피로수명의 선도를 서로 비교하여 나타낸 것이다. 강성이 큰 고장력강판에 동일재를 점용접시킨 HS×HS 시험편은 短壽命領域에서는 ΔP가 가장 크지만 하중범위가 작아질수록 피로수명의 차가

Table 6 Load range for 10^6 cycles

Specimens	Load range (N)
HS×HS	1275
GA×GAB	1324
HS×GA	1422
HS×GAB	1294

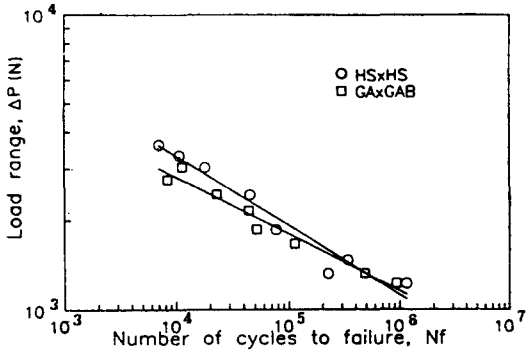


Fig.4a Comparison of fatigue characteristics between HS×HS and GA×GAB specimens

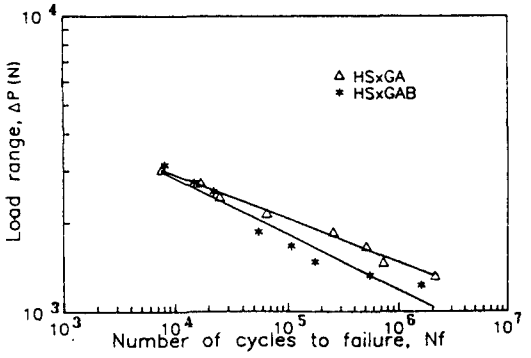


Fig.4b Comparison of fatigue characteristics between HS×GA and HS×GAB specimens

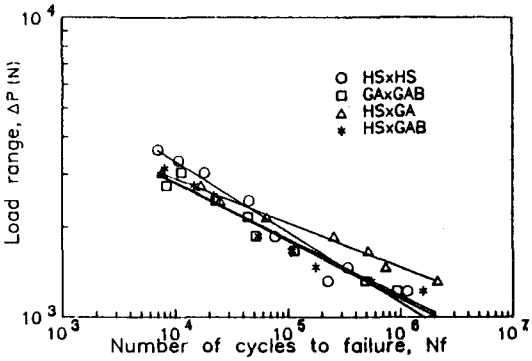


Fig.4c Relationship between load range ΔP and number of cycles, N_f for various specimens

GA×GAB와 HS×GAB 시험편과 거의 비슷하였고 HS×GA 시험편보다 低荷重 長壽命領域인 10^6회에서 하중범위가 11.5% 감소하였다. 또한 이종재를 접용접시킨 HS×GA시험편은 고하중 단수명영역인 10^4회 근처에서는 하중범위가 GA×GAB와 HS×GAB 시험편과 비슷하였으나 HS×HS시험편보다 19% 작았고 10^6회 근처에서는 하중범위가 증가하였다.

이와같이 동종 접용접재인 HS×HS시험편은 다른 시험편에 대하여 고하중 단수명인 3040N에서 피로수명인 139% 증가하였지만 저하중 장수명인 1471N에서 84% 감소하였다. 이러한 현상은 두 재료간의 강성에 관련하는 현상으로써 비교적 연성이 큰 강이 상대편쪽에 손상을 적게 끼친 결과로 추측되고 또한 강성이 강한 쪽 試驗片은 굽힘변형이 거의 없었고 연한쪽 試驗片은 소성변형에 의한 굽힘변형이 컸다.

이상과 같이 두 試驗片의 피로강도의 차는 低荷重 長壽命領域보다 高荷重 短壽命領域에서 그 차가 큼을 알 수 있다.

3.2 硬度 分布

Fig.5에는 각 試驗片의 너깃 중앙부에 따른 마이크로 비커스 경도치(1.96N)의 硬度分布를 나타낸다. 즉 Fig.5a는 GA×GAB재의 경우이고 Fig.5b는 HS× HS재의 경우를 나타낸다. 이 두 경우에는 동질재료간의 접용접재이므로 이 변화 양상이 각 그림상에서 비슷하였다. 그러나 Fig.5b의 HS×HS재보다 Fig.5a의 GA×GAB재쪽의 너깃 경도가 약 44%큼을 알 수 있다.

Fig.5c와 Fig.5d는 각각 HS×GA재와 HS×GAB재간의 경도분포를 나타낸다. 이 두 그림에서 보면 GA와 GAB재쪽의 경도차의 변화가 크며 HS재의 경도변화는 적음을 알 수 있다.

Fig.5e는 위에서 설명한 4가지 시험편에서 측정한 경도치를 동시에 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 4가지 시험편중에서 HS재의 너깃부의 경도치는 약 234정도이고 GA 및 GAB재의 경도치는 약 337정도이다. 그러나 본 실험에 사용된 각 재질의 모재부 경도치는 GA재 및 GAB재는 약 147정도이고 HS재는 약 161정도이다. 이와 같이 고강도인 HS재의 접용접부의 경도치는 약 45% 증가하는 반면 GA재 및 GAB재는 약 129% 증가하는 경향을 나타내고 있다.

이러한 경도치의 변화는 접용접에 의한 재질의 微視的인 組織變化와 밀접한 관계가 있었다. 즉 Photo 2a, 2b 및 2c에 나타낸 용접부의 조직 사진과 같이 GA재 및 GAB재의 용접부는 모재부와 달리 針狀組織을 同伴하는 tempered martensite 조직이

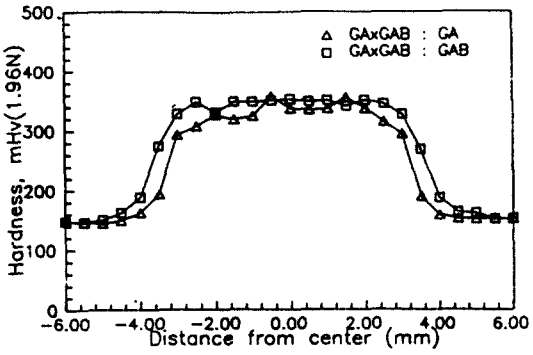


Fig.5a Comparison of hardness distribution

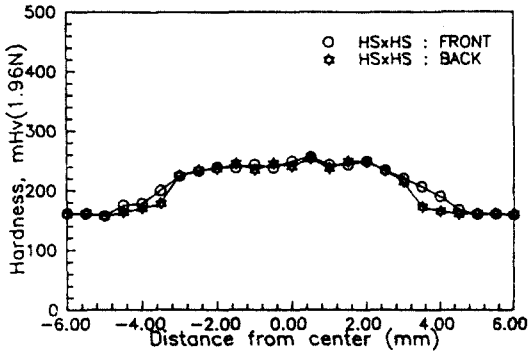


Fig.5b Comparison of hardness distribution

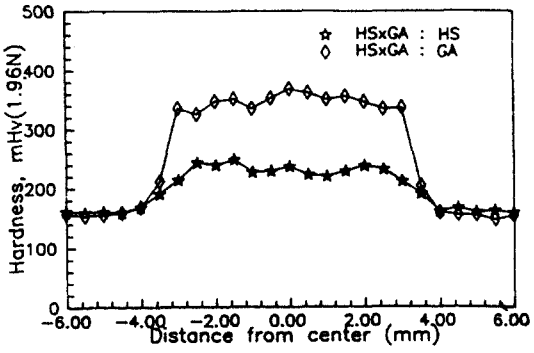


Fig.5c Comparison of hardness distribution

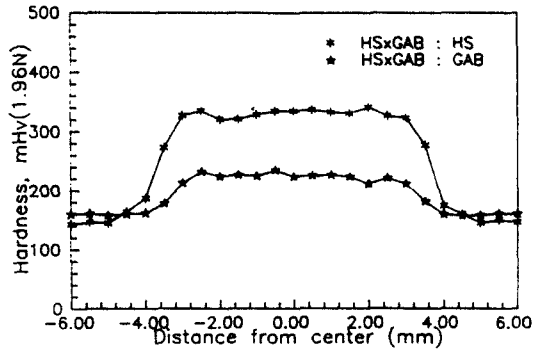


Fig.5d Comparison of hardness distribution

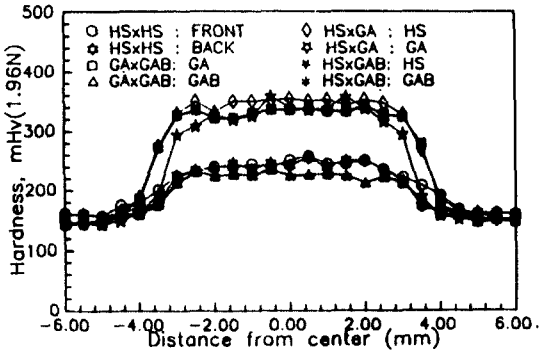


Fig.5e Hardness distribution for various specimens

되므로 모재부와의 경도치의 변화가 HS재의 그것보다 큼을 알 수 있다.

3.3 피로 반복수에 따른 疲勞龜裂의 발생위치 변화

통상적으로 점용접재의 疲勞龜裂은 박판이 중첩된 용접부선단 근방의 내면인 모재부나 열영향부(HAZ)에서 발생하여 접합부의 표면을 관통하여 나타나며 이때 시험편의 표면에서 관통된 疲勞龜裂을 관찰할 수 있었다. 이 피로 균열의 성장거동을 관측하기 위해 시험중 Photo 1과 같이 점용접부를 절단해본 결과 피로균열은 전 수명의 약 10% 정도의 시점에서 내면으로부터 발생하여 성장하며 点熔接 수명의 대부분이 이 피로균열에 의해 지배됨을 알 수 있었다. 이러한 균열은 내면에서 발생 성장하므로 이 균열의 檢出이 困難하며 觀察과 豫測도 어렵다.

Photo 3, 4, 5는 Fig.2와 같은 너깃의 단면을 광학현미경으로 확대 촬영한 것이다. Photo 3상의 1은 너깃의 선단을 나타내고 2는 HAZ부분을 3은 주균열이 발생하여 성장한 부분의 모재부를 나타내었다. Photo 4와 Photo 5는 각각 HS×GA시험편과 HS×GAB시험편상에서 너깃부의 단면의 사진의 예를 나타내었다. 이때 두 시험편의 하중범위는 1863N으로 동일하게 작용시킨 예이지만 파단수명에는 각각 2.58×10^5과 5.5×10^4의 차이가 있다. 따라서 장수명 영역인 Photo 4의 경우가 Photo 5의 경우보다 너깃 선단에서 먼 곳에서 피로균열이 발생 성장하였음을 알 수 있다. 또 Photo 4의 단면상에는 여러개의 피로균열이 발생 성장하였음을 알 수 있고 이러한 균열중 너깃 밖에서 발생된 한 개의 피로균열만이 시험편의 표면까지 관통되었다. 이와같은 단면사진의 관찰로부터 피로균열의 발생위치간의

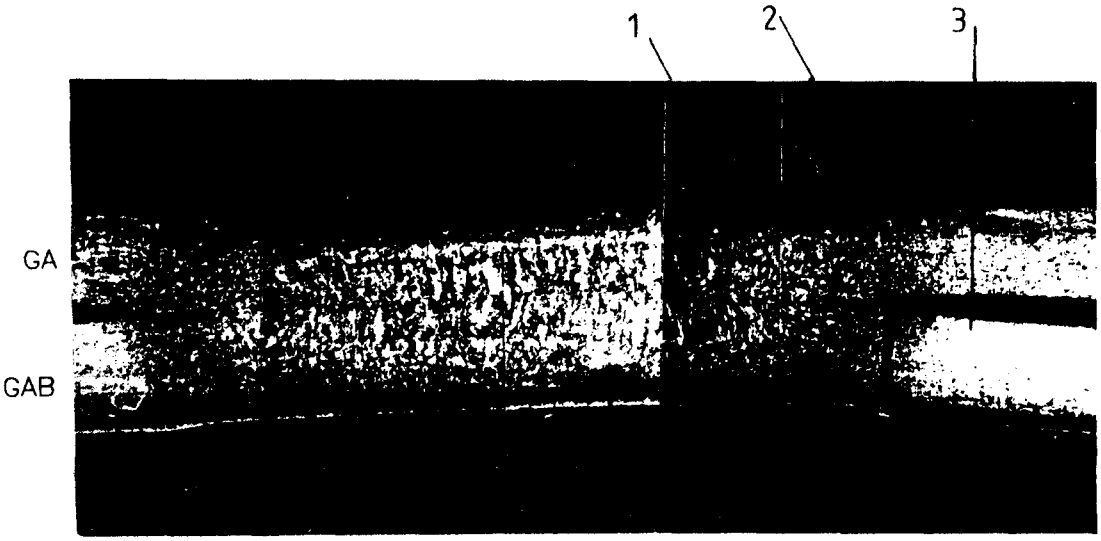


Photo 3 Section view of GA×GAB specimen
1 : nugget area, 2 : near HAZ, 3 : base metal

Photo 4 Pattern of crack initiation and growth of HS×GA specimens in case of $\Delta P=1863N$, $N_f=2.58\times10^5$ cycles

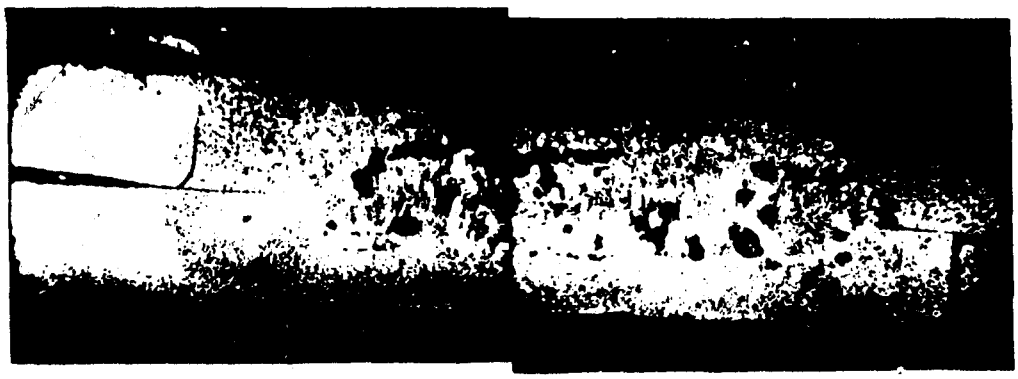


Photo 5 Pattern of crack initiation and growth of HS×GAB specimens in case of $\Delta P=1863N$, $N_f=5.5\times10^4$ cycles

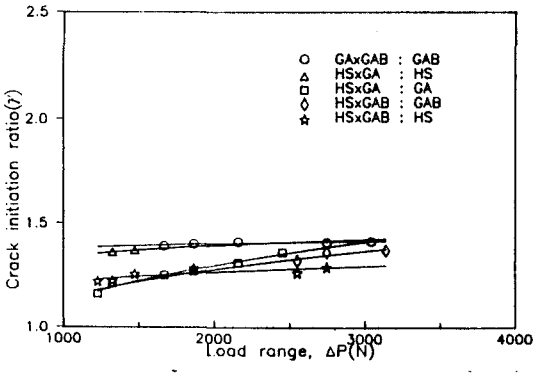


Fig.6 Relation between crack initiation ratio and load range

자료를 구하여 Fig.6에 나타내었다. 여기서 균열간 거리 $2l$은 Fig.2에서 설명한 바와 같이 표면까지 관통한 주균열과 성장이 중지된 보조 균열까지의 거리이다.

Fig.6은 HS×GA試驗片과 HS×GAB試驗片의 피로시험에서 얻은 疲勞壽命과 피로균열의 발생위치와의 관계를 나타내고 있다. 이 그림에서는 너깃 선단의 절반거리 r에 대한 피로균열간의 발생위치 $2l$의 절반거리 l에 대한 비율인 균열 발생위치비 $\gamma(=l/r)$와 피로수명 N_f와의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 고하중 단수명 영역일수록 균열발생위치가 너깃부에서 멀어짐을 알 수 있다. 또 피로수명이 단수명 영역일수록 균열발생위치가 너깃부에서 멀어짐을 알 수 있다. 또 피로수명이 단수명일수록 접합부나 인접한 모재는 계속하여 큰 반복 굽힘변형을 받으므로 접합부나 인접한 모재부의 근접한 표면에서 피로균열이 발생하게 됨을 알 수 있다. 이와같이 疲勞壽命이 장수명일수록 굽힘변형은 작아지고 疲勞龜裂의 발생위치는 너깃 방향에서 가까운 곳에서 균열이 발생되었다.

이 현상은 疲勞壽命 증가에 따라 생기는 굽힘변형과 반복 소성변형에 원인이 있다고 생각된다. 따라서 이 결과는 Rie Kan의 彈塑性 有限要素解析에 의한 결과와도 잘 一致한다[12]. 즉 피로균열의 발생위치는 압접부인 너깃과 모재부와의 경도 차이의 변화가 생기는 부분에서 피로균열이 발생 성장하게 되는 것으로 추측된다. 이와같이 균열 발생위치가 너깃선단에 가까워지면 응력집중이 용이해서 HS×GAB 試驗片의 수명을 HS×GA시험편보다 크게 감소시키는 것으로 생각된다.

고하중 단수명 영역에서의 굽힘변형은 인장응력보다는 굽힘모멘트의 영향을 많이 받으며 너깃의 경화역을 벗어난 모재부에서 소성힌지가 발생하였다. 그러나 저하중에서는 고하중에 비하여 굽힘변형은 크게 생기지 않았지만 너깃의 중심부 가까운 부분에 응력의 집중정도가 클 것이므로 장수명 영역의 저하중 레벨이 될수록 피로균열의 발생위치비 γ가 1보다 너깃 중심부 가까이로 접근하고 있는 것으로 생각된다. 또한 γ가 1보다 작은 값의 경우에는 HS재쪽에서 피로균열이 발생하여 관통되었음을 △표시로 나타내고 있다.

이상의 결과를 종합해보면 고하중 레벨의 단수명 영역에서는 소성힌지가 발생하고 이 점에서 반복소성변형에 의하여 疲勞龜裂이 발생 성장하는 것으로 보이고 저하중 레벨의 장수명 영역에서는 소성힌지가 발생하지 못하고 수명이 거의 다할 때까지 인장응력과 굽힘응력의 작용에 의하여 표면균열 또는 너깃 근방의 경도 급변화부 근방에 피로균열이 발생 성장하는 것으로 생각된다.

3.4 荷重레벨과 疲勞壽命에 따른 疲勞龜裂의 發生位置 變化

이와같이 하중범위와 수명에 따른 피로균열발생위치 변화를 조사하여 이 원인을 규명하고 또 이것을 정량화하는 것은 공학적 및 공업적으로 중요한 의의가 있다고 생각된다. 따라서 피로균열 발생위치비 (crack initiation ratio, γ)는 너깃선단으로 부터 균열이 발생한 위치까지의 거리를 너깃반경으로 무차원한 피로발생위치로 나타내기로 하였다. 이러한 개념을 도입하게 된 것은 하중범위 및 피로수명에 따라 피로발생위치가 수명차와 정량화된 균열발생위치를 비교 연구하여 점용접 박판 구조물의 저사이클 범위와 고사이클범위의 피로거동의 차를 규명하고 나아가서 상대편 시험편의 강성변화가 점용접 시험편의 거동에 미치는 영향을 규명하기 위함이다. 이러한 관계의 보고는 미흡한 실정이며 Table 7과 같은 균열의 발생위치에 관한 概略圖는 발표된 바 있다[6].

Fig.6은 피로균열 발생위치비 γ와 하중범위 ΔP와의 관계를 나타내고 있다. 이때 피로균열 발생위치비 γ는 피로균열의 발생위치 즉 주균열과 보조균열 사이의 거리 $2l$를 너깃반경 2r로 나눈 것이다. 그림에서 편대수 지수상의 γ는 HS×GA와 HS×GAB 시험편보다 커서 너깃선단으로부터 먼 곳에서 피로

Table 7 Example of fatigue cracks[9]

시험편(0.8t −1.2t 두께	박판(0.8t mm) 외표상의 균열형태	
	ΔP 대	ΔP 소
인장전단 (R=0)	crack ΔP=1960N $N_f=1.7\times10^5$	ΔP=1228N $N_f=9.6\times10^5$

균열이 발생함을 알 수 있다. 또한 GA×GAB시험편의 경우 하중범위 ΔP가 증가할수록 편대수지상에 나타낸 너깃반경에 대한 균열발생위치비는 큰 변화가 없었다.

Fig.6의 관계를 수식으로 나타내면 식(1)과 같다.

$$\text{Log } \gamma = A + B\Delta P \quad (\text{단, A, B는 비례상수}) \qquad (1)$$

단 GA×GAB시험편의 경우 GAB재 :
A=1.18, B=0.023
HS×GA시험편의 경우 HS재 :
A=0.91, B=0.056
HS×GA시험편의 경우 GA재 :
A=0.27, B=0.205
HS×GAB시험편의 경우 HS재 :
A=0.82, B=0.057
HS×GAB시험편의 경우 GAB재 :
A=0.37, B=0.164

Fig.7에는 피로균열발생위치비 γ와 피로수명 N_f과의 관계를 나타내고 있다. 고하중 단수명 영역이 될수록 피로균열 발생위치비는 너깃선단으로 접근함

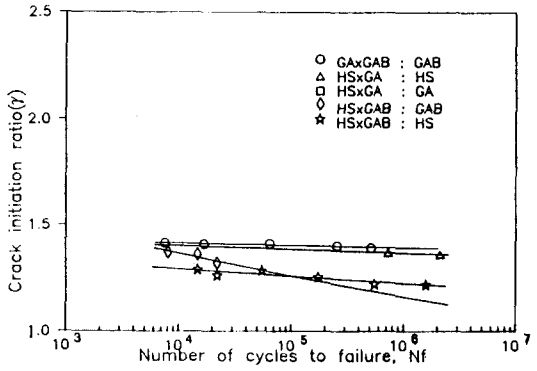


Fig.7 Relation between crack initiation ratio and number of cycles

을 알 수 있고 장수명 영역일수록 너깃에서 먼 곳에서 피로균열이 발생함을 알 수 있다. 따라서 이 결과는 Kan의 탄성 유한요소해석에 의한 결과와 일치한다[12]. Fig.7의 관계를 수식으로 나타내면 식(2)와 같이 표현된다.

$$\gamma = C \cdot N_f^D \qquad (2)$$

단 GA×GAB시험편의 경우 GAB재 :
$C=-3.3\times10^3$, D=1.45
HS×GA시험편의 경우 HS재 :
$C=-5.5\times10^3$, D=1.47
HS×GA시험편의 경우 GA재 :
$C=-3.8\times10^2$, D=1.95
HS×GAB시험편의 경우 HS재 :
$C=-1.2\times10^2$, D=1.44
HS×GAB시험편의 경우 GAB재 :
$C=-3.5\times10^2$, D=1.88

3.5 응력확대계수와 피로파단수명과의 관계

点熔接부 근처에서 발생 성장하는 疲勞龜裂의 발생위치의 특성을 파괴역학적으로 고찰하기 위하여 응력확대계수 K를 이용하여 구하였다. 点熔接부의 응력확대계수를 구하는 방법은 結城[6]등이 제안한 식(3)이 널리 이용되고 있으므로, 본 연구에서도 이 식을 이용하여 응력확대계수 K를 구하였다.

이 계산방법은 試驗片 두께 b, 너깃 반경 r, 부하하중 P을 사용하여 유한요소법으로 구한 식으로서 여기서는 試驗片 두께는 0.7mm, 너깃반경은 본 실험에서 사용한 試驗片의 너깃 반경의 평균값인 3mm로 일정하게 하였고 부하하중은 그때마다 부하하는 하중값을 대입하여 계산하였다.

$$K_I=[0.0150+0.953(r/b)-0.0099(r/b)^2)]Pr^{-2/3} \qquad (3)$$

단, b : 시편 두께
r : 너깃 반경
P : 하중

Fig.8a는 동종 용접재에 대하여 구해진 자료를 식(3)에 입력시켜 최대응력확계수 Kmax를 구하고 피로시험에서 구한 파단수명 N_f와의 관계를 나타낸 것이며, Fig.8c는 Fig.8a와 Fig.8b를 동시에 나타낸 것이다. 이 그림에서 보면 Fig.4c와 같이 하중범위, ΔP와 파단수명, N_f로 나타낼 때 생긴 재질간의 차이

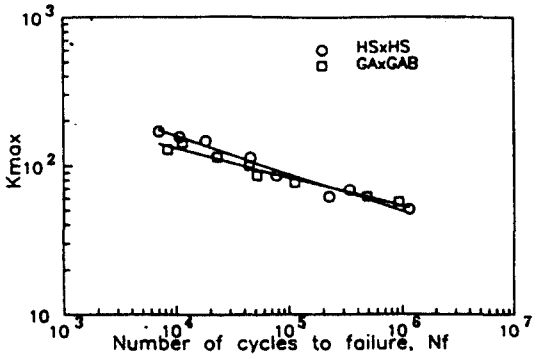


Fig.8a Relation between maximum stress intensity factor and number of cycles to failure

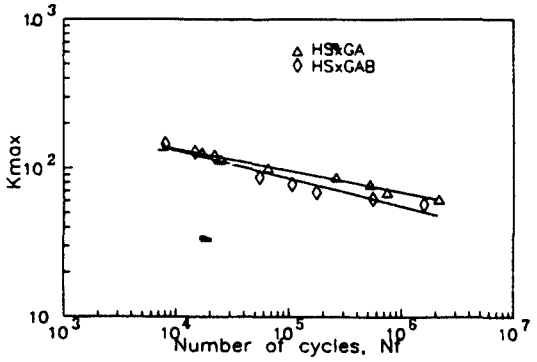


Fig.8b Relation between maximum stress intensity factor and number of cycles to failure

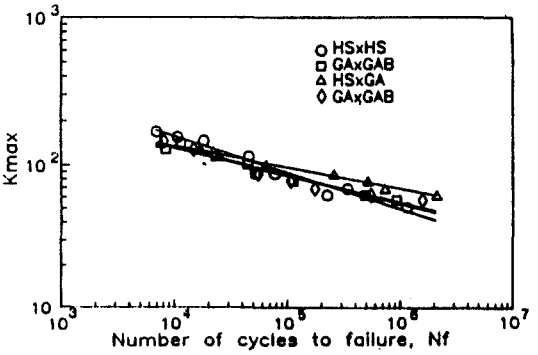


Fig.8c Relation between maximum stress intensity factor and number of cycles to failure

를 없애주고 Kmax를 이용하면 네가지 시험편의 자료가 일관성을 가지는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 관계를 식(4)와 같이 나타낼 수 있으며 점용접재의 평가에 유용한 파라메타가 됨을 알 수 있다.

$$K_{max}=H\cdot N_f^P \quad (단,\ H,\ P는\ 재료상수) \qquad (4)$$

즉 HS×HS시험편 : $H=2.2\times10^4$, $P=-0.24$
GA×GAB시험편: $H=1.2\times10^4$, $P=-0.19$
HS×GA시험편 : $H=8.5\times10^3$, $P=-0.15$
HS×GAB시험편: $H=1.2\times10^4$, $P=-0.19$

4. 結 論

두께가 0.7mm로 된 복합조직(Dual phase)인 고장력강판(HS)과 편면 아연도금강판(GAB)을 点熔接시킨 同種 용접재(HS×HS)과 異種 용접재(HS×GAB) 試驗片을 축인장 피로시험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 정적 인장강도는 동종 용접재(HS×HS, GA×GAB) 와 이종 용접재(HS×GA, HS×GAB) 사이에 강성의 차이에도 불구하고 동일한 용접조건에서 냉각속도가 비슷하면 인장력은 차이가 없었다.

2. 고하중 단수명인 10^4회에서 강성이 큰 동종 점용접재 HS×HS가 강성이 약한 이종용접재 HS×GAB보다 하중범위가 19% 疲勞壽命이 증가하였지만 저하중 장수명인 10^6회에서는 21%감소하였다.

3. 너깃부의 경도분포가 시험편중에서 가장 높았고 HS재는 약 45% 증가하였으며 GAB 및 GA재의 경우에는 약 129%증가하였다.

4. 저하중 장수명일때는 피로수명이 증가할수록 굽힘변형이 적었으므로 피로균열 발생위치는 너깃선단쪽에서 피로균열이 발생되었다. 그러나 고하중 단수명 영역에서는 굽힘변형이 크므로 너깃 선단에서 먼 곳으로 이동하여 피로균열이 발생되었다.

5. 각 点熔接材間의 최대응력확대계수, K_{max}와 疲勞壽命, N_f 사이에는 편대수지상에서 선형적인 관계를 나타내었고 하중범위, ΔP와 파단수명, N_f와의 관계에서 재질간의 특성이 없이 좁은 밴드내에 자료가 모이는 경향을 나타내었다.

$$K_{max}=H\cdot N_f^P \quad (단\ H,\ P:재료상수)$$

參 考 文 獻

[1] 徐昌敏, 姜成守 : 高張力 鋼板과 亞鉛 鍍金 鋼板間의 点熔接 疲勞特性, 大韓機械學會 論文集, 第12卷 第4號, pp.747－754, 1988.

[2] 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.
[3] Pook L.P.: Fracture Mechanics Analysis of the Fatigue Behavior of Spot Welds, Int. J. of Fracture, No.11, pp.173－176, 1975.
[4] Orts D.H.: Fatigue Strength of Spot Welded Joints in a HSLA Steel: SAE paper 810355, pp.1－12, 1981.
[5] 結城良治: 破壞力學的 評價による点熔接部の疲勞壽命推定, 自動車 技術會, Vol.41, No.1, pp. 113－140, 1987.
[6] 結城良治, 小野 et al.: 自動車 車輛 点熔接構造の疲勞強度と壽命推定(共同研究 成果 資料), 自動車 技術會, p.18, 1986.
[7] 近藤正桓, 齊藤亨: 最近の自動車用亞鉛鍍金鋼板及び高張力鋼板の抵抗點熔接, 日本熔接學會誌, Vol.55, No.2, pp.97－106, 1986.
[8] 김정규: 複合組織鋼과 自動車輕量化, 大韓機械學會誌, 第22卷, 第1號 2－8, 1982.
[9] 友田陽, 田村今男: 延性2相鋼板の強度, 延性と組織, 鐵と鋼, Vol.68, No.9, pp.1147－1158, 1982.
[10] 조용한: 自動車用 高張力鋼板(1), 大韓機械學會誌, 第23卷, 第2號, pp.102－110, 1983.
[11] JIS-Z3138－1983, 点熔接繼手の疲勞試驗方法
[12] Kan Y.R.: Fatigue Resistance of Spot Welds -An Analytical Study, Metal Engineering Quatery, 11, pp.26－36, 1976.