

미소인공결합의 위치에 따른 마찰용접부의 피로특성

이 상 열* · 정 재 강**

* 목포과학대학 자동차과

** 조선대학교 공과대학 기계공학부

Fatigue Properties of Friction Weld According to the Location of Small Artificial Defect

Sang-Ryoul Lee* and Jae-Kang Chung**

* Dept. of Car Engineering, Mokpo Science College, Mokpo City 530-730, Korea

** Dept. of Mechanical Engineering, Chosun University, Kwangju City 501-759, Korea

Abstract

In this study, the rotary bending fatigue test was carried out with two kinds of base metal, martensite stainless steel STR3 and austenite stainless steel STR35 and the dissimilar friction welded material with them. To compare the fatigue lives according to the notch positions, the small circular defect was worked on the bonded line, 1.0mm and 0.5mm distance from the bonded line. The fatigue limits of the STR3 and STR35 base metal were 429.0MPa and 409.4MPa respectively. In comparison with fatigue life at the same notch positions, the STR35 specimens showed about 190% for base metal, 82% for 1.0mm distance notched specimens higher than that of the STR3. But the fatigue life of the 0.5mm distance notched STR35 specimen showed about 35% lower than that of the STR3 specimen. And the bonded line notched specimen was much lower fatigue life than the other specimens because of separation of the bonded line.

(Received May 15, 2001)

Key Words : Small circular defect, Friction welding, Crack length, Fatigue limit, Bonded line, Number of cycles, Cycle ratio, Fatigue life

1. 서 론

마찰용접은 가압하에서 상대회전하는 모재의 접촉부에 발생하는 마찰열을 이용하여 재료를 접합하는 방법으로서, 접합하고자 하는 면과 그 근방에만 열이 발생하므로 전기저항 용접에 비해 접합에 필요한 에너지가 작고, 용접변수의 제어가 용이, 우수한 작업 능력 및 높은 용접 정밀도 등 장점이 있다.

이러한 마찰용접은 건설차량의 구동축, 굴착용 파이프, 자동차의 차축, 배기밸브류, 터보차축, 발전소의 증기 및 가스 터빈용 발전축 등 다양한 분야에 자주 사용되고 있으며^{1,2)}, 특히 내연기관의 배기 밸브는 기능상 고온 하에서 반복하중을 받는 부품으로서 내열성, 내마모성, 내식성 등이 요구되기 때문에 부위에 따라 적합한 특성을 갖는 두 가지 재료를 접합하여 사

용하는 부품으로서 마찰용접 방법이 주로 사용된다.

내연기관의 배기밸브류에 사용되는 스테인리스 내열강재로서 일반적으로 첨가되는 합금원소는 크롬(Cr)과 니켈(Ni)이 사용된다. 스테인리스강이 내식 특성을 갖기 위해서는 12% 이상의 Cr이 필요하며, Ni을 첨가하면 중성 또는 약산성 매체(媒體)에서의 내식성은 향상되는 반면 가격이 높아진다. 충분한 양의 Ni이 함유되면 오스테나이트 조직이 상온까지 잔류되게 할 수 있어 연성과 성형성을 향상시킬 수 있고, Mo을 첨가한 스테인리스강은 염소이온이 존재하는 곳에서의 내식성을 증가시키는 것으로 알려져 있다^{3,4)}.

본 연구에서는 최근 국내 자동차 업계에서 밸브용 재료로 주로 사용되고 있는 두 가지 스테인리스 내열강재인 오스테나이트 조직에서 퀴칭에 의해 마르텐사이트 조직을 갖는 STR3재와 높은 Ni에 의한 오스테

나이트 안정화 효과 때문에 고온 어닐링한 다음 상온에서도 오스테나이트 조직을 나타내는 STR35재를 중심으로 마찰용접부의 피로특성을 실험적으로 고찰하였다. 또한, 용접부는 모재, 열영향부 및 접합선(Bonded Line)으로 구분하였고, 각 영역에서의 피로 파괴 특성을 비교·고찰하기 위하여 미소 인공결합을 시험편 표면의 특정위치에 가공하여 크랙이 발생하도록 유도하는 방법을 사용하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 재료는 마르텐사이트계 내열강 STR35재와 오스테나이트계 내열강 STR35재로서 그 화학조성과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2와 같다.

표에 나타난 바와 같이 마르텐사이트계인 STR3은 강도를, 오스테나이트계인 STR35는 내식성 및 고온 강도를 향상시킨 재료로서 STR3의 기계적 성질이 STR35보다 우수하게 조사되었다.

시험편의 마찰용접에 사용한 용접기는 브레이크 타입(brake type)으로서 직경 20mm, 길이 150mm 환봉을 Table 3과 같은 용접조건으로 가압접하여 마찰용접을 실시하였다. 시험편 가공은 용접재를 CNC 선반에서 선삭가공시 접합선이 평활부의 중심에 위치하도록 가공하였다. 미소 인공결합은 직경과 깊이가

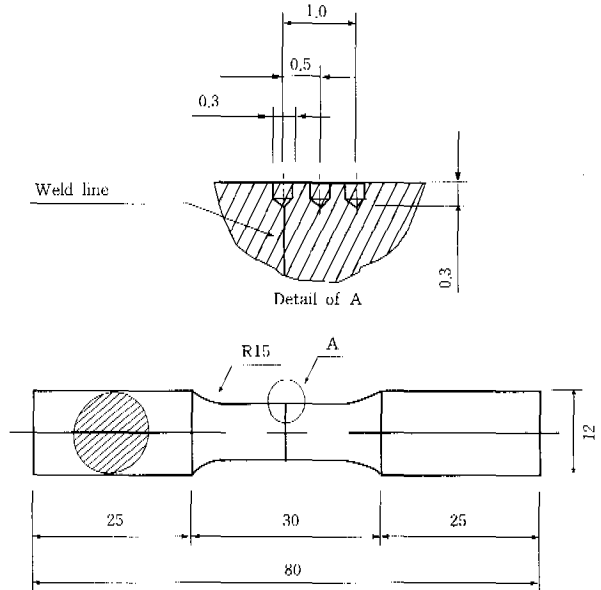


Fig. 1 Geometry of fatigue test specimen

각각 0.3mm인 원공으로서 시험편 평활부를 polishing 하여 부식을 한 다음 광학현미경 및 소형 드릴링머신이 조합된 장치를 이용하여 접합선(Bond Line) 및 접합선으로부터 각각 0.5mm 및 1.0mm 떨어진 곳에 정확히 가공한 후 원공의 크기 및 위치를 확인·선별하여 실험에 대한 정확도를 높이고자 하였으며, 가공된 시험편의 모양 및 치수는 Fig. 1과 같다. 사용된 시험기는 오노형 회전굽힘피로시험기(Ono's type rotary bending fatigue testing Machine, Shimadzu, Model H-7)로서 최대용량은 10kg·m, 3400rpm이다.

西谷⁵⁾은 표면에 존재하는 비관통 미소원공에 대한 연구에서 시험편의 지름에 대한 치수효과는 지름이 $5 \leq D \leq 10\text{mm}$ 인 범위에서는 거의 영향이 없다고 하였다. 따라서 본 실험에 사용된 시험편의 지름은 8mm 이므로 지름에 대한 치수효과는 없다고 볼 수 있다. 표면 피로크랙길이(fatigue crack length)는 레프리 카법 및 이동현미경을 설치한 후 접안이동측미계(OSM)을 부착하여 측정 관찰하였으며, 이 때 피로크랙길이는 크랙이 노치효과를 무시할 수 있을 정도로 전파한 후에는 노치부도 크랙의 일부로 간주되기 때문에 미소원공을 포함한 표면상의 전 크랙길이를 2a로 하였다.

Photo. 1의 (a)는 본 실험에 사용된 모재에 대한 금속조직사진이며, (b)는 마찰용접으로 인해 발생한 조직의 변화 및 미소인공결합이 가공될 위치를 나타내고 있다.

Table 1 Chemical compositions

Materials	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
STR3	0.43	2.15	0.60	11.0	1.0	0.60
STR35	0.53	0.31	9.00	21.0	-	3.55

Table 2 Mechanical properties

Materials	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%) (G.L:15mm)	Young's Modulus $\times 10^3$ (MPa)
STR3	516.29	1,151.66	17.91	30.88
STR35	480.93	1,084.94	37.02	29.87
Welded	444.87	1,022.89	12.50	30.74

Table 3 Friction welding conditions

Spindle revolution(rpm)	2,700
Pre-friction pressure(MPa)	2.03
Friction pressure(MPa)	4.90
Upset pressure(MPa)	6.18

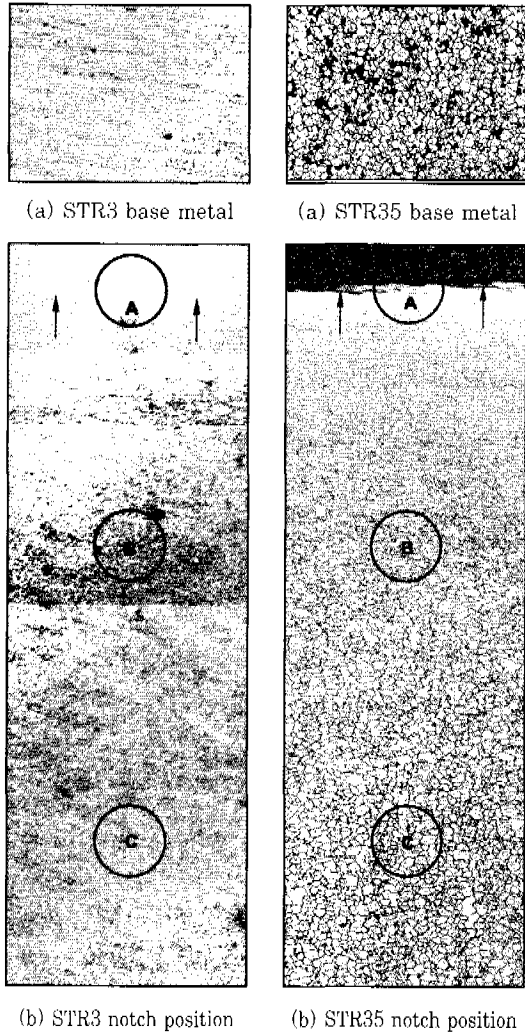


Photo. 1 Micro-Structure of materials(×200)

- ↑ : Bonded line mark
- A : Notched at bonded line
- B : Notched at 0.5mm distance from bonded line
- C : Notched at 1.0mm distance from bonded line

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로한도 및 경도분포

시험응력의 결정에 있어서 각각의 결합크기에 대하여 서로 다른 응력을 적용하면 결합간의 절대적인 비교평가를 할 수 없다. 따라서 본 실험에서는 동일한 응력하에서 피로크랙전파거동을 고찰하기 위해 STR3 및 STR35 모재의 피로시험을 먼저 수행하였다. Fig. 2는 피로한도 실험으로부터 얻어진 결과를 나타낸 S-N 선도로서 피로한도는 $N=1 \times 10^7$ Cycle까지 시험편이 파단되지 않을 때의 응력으로 하였다. 평활재의 피로한도시험 결과 경도증가 및 인성을 감소시키는 Si가 많이 첨가된 STR3의 피로한도는 429.0MPa이며, 취

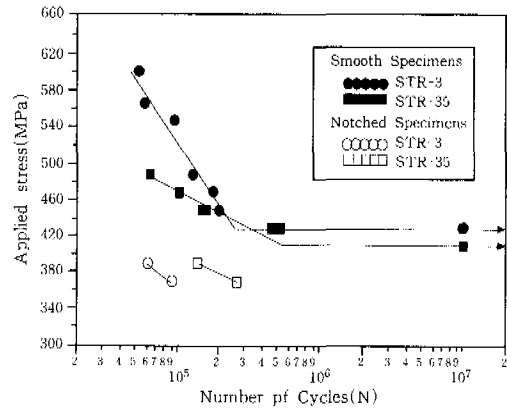


Fig. 2 S-N diagram

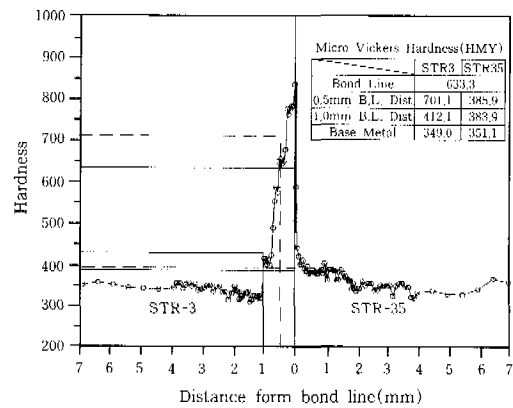


Fig. 3 The hardness gradient distribution

성을 방지하고 내마모성을 향상시키는 Mn과 고 Fe-Cr합금을 오스테나이트화 시키는 Ni이 많이 첨가되어 있는 STR35는 409.4MPa로서 STR3의 피로한도가 STR35보다 약 20MPa이 높게 조사되었다.

노치재의 피로시험응력 설정시 보다 안정적인 피로크랙을 얻기 위해 피로한도가 낮은 평활재 STR35 모재의 피로한도인 409.4MPa를 기준으로 결합이 모재 및 1.0mm에 위치한 시험편은 90%인 370.4MPa로, 0.5mm 및 접합선에 위치한 시험편은 110%인 448.4MPa로 설정하였다.

Fig. 3은 접합선을 기준으로 0.05mm 간격으로 측정된 마이크로비커스 경도값의 분포를 나타내고 있다.

3.2 피로크랙 발생 및 전파거동

피로크랙 유도를 위한 미소인공결합이 가공된 시험편에서 초기 미소크랙은 미소원공 가장자리의 축에 수직인 방향으로 발생하며, 평활재의 피로크랙은 슬립밴드로부터 미시크랙으로 발전, 성장하며 이들이 상호 간섭을 일으키면서 합체, 성장하여 주크랙이 되어 가속적으로 전파한다. 이렇게 슬립밴드가 미시크랙으로

성장하기까지는 전 피로수명의 약 10~20%를 차지하므로 이 부분에 대한 미소크랙의 전파거동을 검토하는 것은 중요하다⁶⁾.

Photo. 2는 용접선에 미소인공결합이 있는 노치재의 cycle 증가에 따른 피로크랙전파거동을 연속적으로 보여주는 사진이며, Photo. 3과 4는 각각 용접선으로부터 0.5mm, 1.0mm 떨어진 곳에 미소인공결합이 위치한 STR35재 시험편의 cycle 증가에 따른 피로크랙전파거동을 연속적으로 보여주는 사진의 예이다.

실험결과 초기 미소크랙은 미소원공 가장자리에서 축에 수직방향으로 수 개가 관찰되었으며, 이들이 서로 합쳐 전파하면서 주크랙으로 성장하였다.

3.3 피로수명 고찰

Figs. 4~9에서는 인공결합이 있는 시험편의 응력에 따른 피로크랙 2a와 반복수 N의 관계를 나타낸 것이다.

동일한 응력 및 미소 인공결합의 위치에서 피로수명을 각각 비교하여 보면, 미소 인공결합의 위치가 모재 및 접합선으로부터 1.0mm 떨어진 경우 STR35의 피로수명이 STR3 보다 약 190% 및 82%씩 각각 증가한 반면, 미소 인공결합이 접합선으로부터 0.5mm 떨어진 시험편의 경우는 오히려 약 35% 감소하였다. 또한 접합선에 미소인공결합이 위치한 시험편은 모재 및 접합선 근방에 결함이 위치한 시험편보다 훨씬 낮은 피로수명을 보였으며, 파단 직전에 관찰된 최종크랙

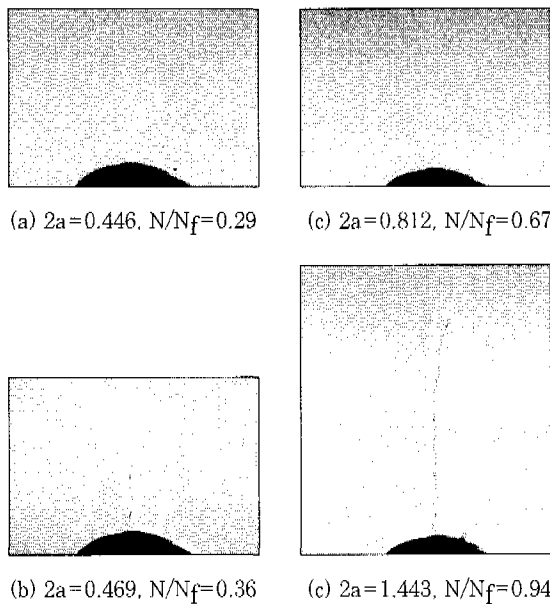


Photo. 2 Photographs of fatigue crack propagation in bond line notched specimen ($\sigma_a=448.4\text{MPa}$, $\times 100$)

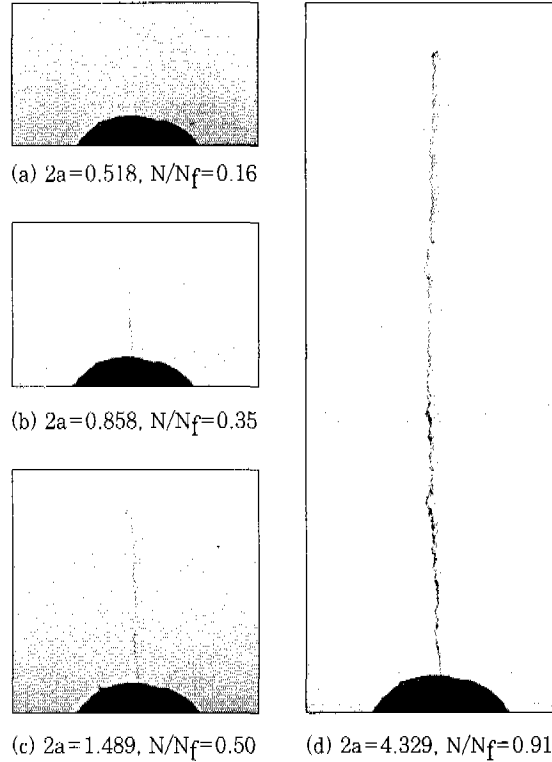


Photo. 3 Photographs of fatigue crack propagation on STR35 notched at 0.5mm distance from bonded line ($\sigma_a=448.4\text{MPa}$, $\times 100$)

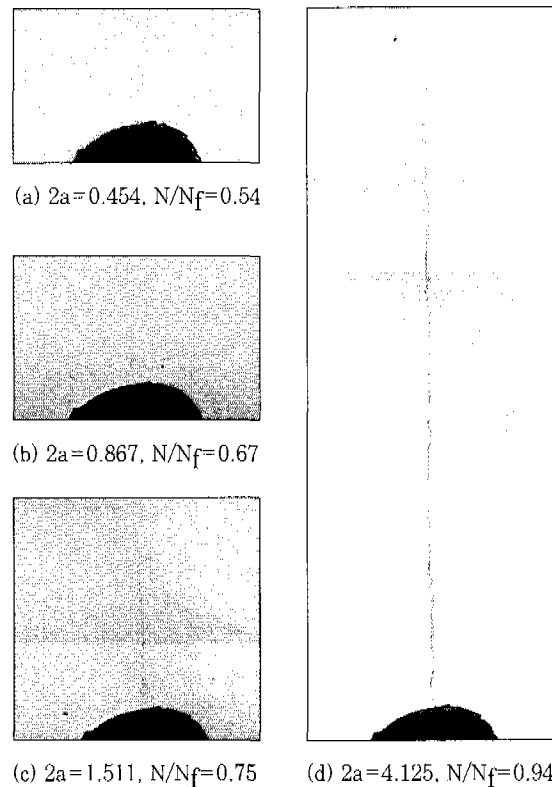


Photo. 4 Photographs of fatigue crack propagation on STR35 notched at 1.0mm distance from bonded line ($\sigma_a=370.4\text{MPa}$, $\times 100$)

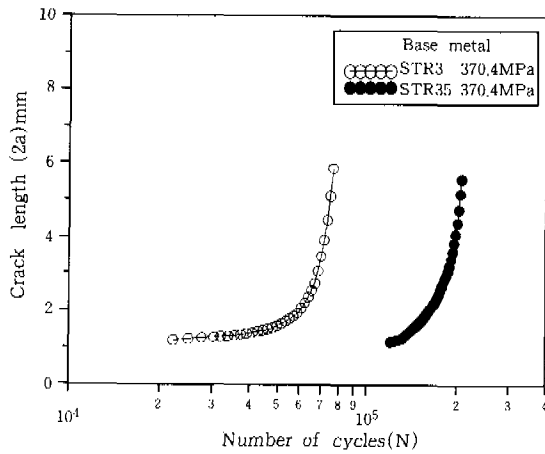


Fig. 4 Relation between crack length and number of cycles for base metal

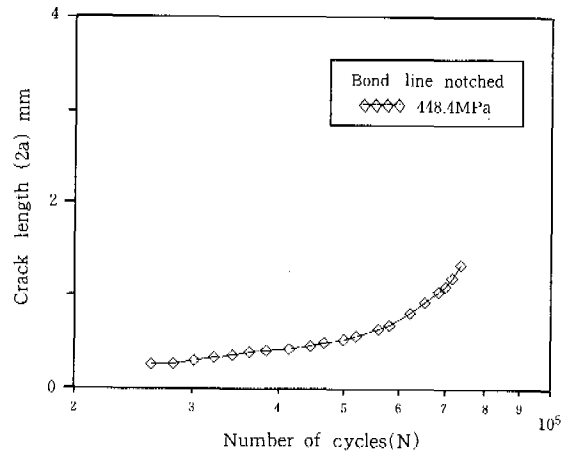


Fig. 7 Relation between crack length and number of cycles on notched at bonded line

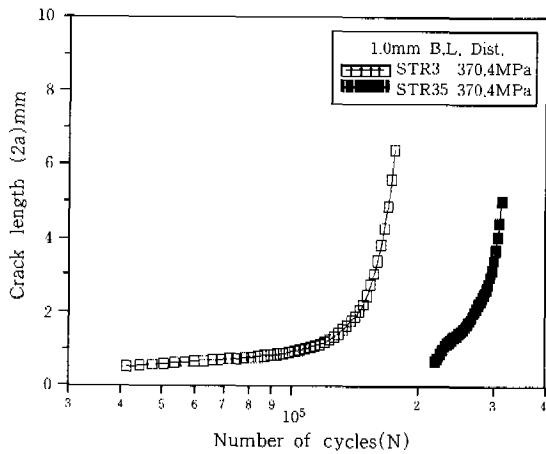


Fig. 5 Relation between crack length and number of cycles notched at 1.0mm distance from bonded line

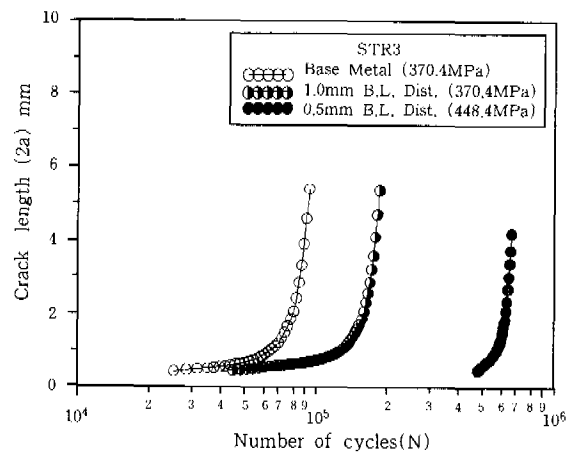


Fig. 8 Relation between crack length and number of cycles for STR3

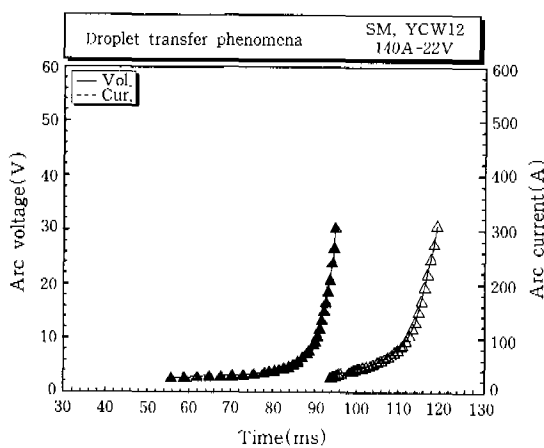


Fig. 6 Relation between crack length and number of cycles on notched at 0.5mm distance from bonded line

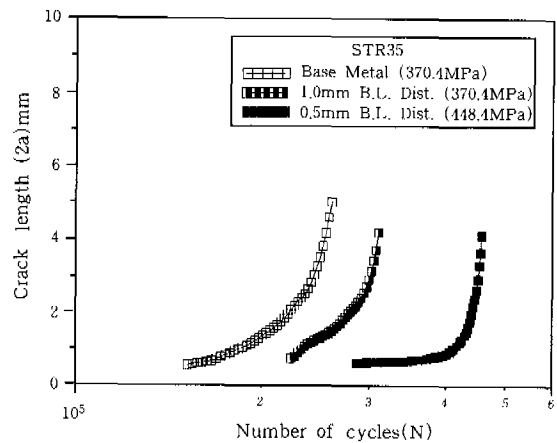


Fig. 9 Relation between crack length and number of cycles for STR35

길이도 크게 감소하였다. 이러한 원인은 부과된 응력에 의하여 용접 접합부의 분리 현상으로 사료된다. 이러

한 결과들로부터 두 재료 모두 피로수명은 미소인공결함이 모재로부터 열영향부를 거쳐 접합선에 가까워질수록 증가하다가 접합선에서는 크게 감소함을 알 수 있었으며, 또한 결함이 용접선에서 멀리 위치할수록

STR35의 피로수명이 STR3보다 크지만 용접선에 매우 근접한 부분에서는 반대의 현상이 나타남을 알 수 있다.

한편, Fig. 10에 나타난 바와 같이 미소인공결합이 모재로부터 HAZ부를 거쳐 접합선에 가까이 위치할수록 초기 크랙발생이 지연되었다. 이러한 원인은 Fig. 3의 경도분포 조사결과 용접선에 접근할수록 경도가 크게 조사되어 열영향부의 강도증가에 따라 나타난 현상이라고 사료되며, 초기크랙 발생의 지연정도는 열영향부의 경도가 STR35재보다 크게 증가한 STR3재에서 더욱 크게 조사되었다.

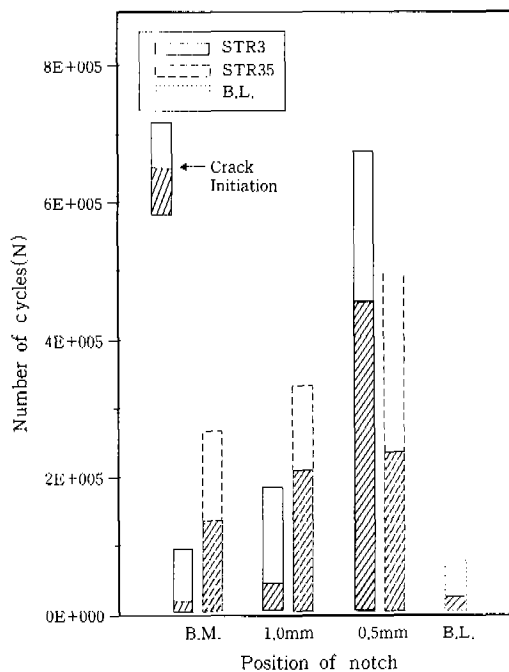


Fig. 10 Relation between notch position and number of cycles

4. 결 론

본 연구에서는 실제 업계에서 차량용 밸브에 사용되는 내열강 STR3과 STR35 재료를 대상으로 실제와 동일한 마찰용접조건으로 이중마찰용접한 후 모재에 대한 실험 및 용접재 HAZ부에 미소인공결합 가공위치를 달리하여 피로수명을 비교·고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 평활재의 피로한도시험 결과 STR3의 피로한도는 429.0MPa이며, STR35는 409.4MPa로서 항복

응력이 높은 STR3의 피로한도가 약 20MPa 높게 나타났다.

2) 미소인공결합이 모재 및 접합선으로부터 1.0mm떨어진 곳에 위치한 시험편의 경우 STR35의 피로수명이 STR3 보다 약 190% 및 82%씩 각각 증가한 반면, 미소인공결합이 접합선으로부터 0.5mm 떨어진 곳에 위치한 시험편의 경우 STR35의 피로수명이 STR3 보다 오히려 약 35% 감소하였다.

4) 두 재료 모두 미소 인공결합이 접합선에 가까이 위치할수록 피로수명은 증가하는 현상을 보였으나, 접합선에 결함이 가공된 시험편은 모재 및 접합선 근방보다 훨씬 낮은 피로수명을 보였으며, 파단 직전에 관찰된 최종크랙길이도 크게 감소하였다. 이러한 원인은 반복응력 부과에 의해 크랙진전에 따른 용접 접합선의 분리현상이 나타났기 때문으로 생각된다.

5) 최초의 피로크랙이 발생하기까지 소요된 수명은 모재로부터 열영향부를 거쳐 용접제면에 가까이 위치할수록 크게 조사되었는데 이는 열영향부의 경도분포가 용접선에 접근할수록 높아져 강도증가에 따른 현상으로 사료된다. 특히 STR3부 0.5mm에 미소인공결합이 위치한 시험편의 경도는 그 모재보다 100% 증가하였으며 초기크랙 발생의 지연 및 피로 수명이 가장 크게 나타난 것으로 분석된다.

후 기

본 논문은 2001년도 조선대학교 학술연구지원비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. D.E. Spindler, "What Industry Needs to Know about Friction Welding", Welding Journal, (1994), 37~42
2. 조현수, 서성재, "Inconel 713C와 SCM440의 마찰용접", 大韓熔接學會誌, 제 15卷, 제 6號, (1997), 564~565
3. 채왕석, 권용기, 김동현, "마르텐사이트계 내열강의 금속 및 기계적 특성에 관한 연구", 韓國精密工學會 春季學術大會論文集, (1997), 1073
4. 한봉희, "金屬材料", 喜重堂, (1993), 268~300
5. 西谷 鹿毛, "電解研磨した廣穴材の回轉曲げ", 日本機械學會論文, 제 39卷, 제 323號, (1966), 2005~2012
6. 李相烈, 鄭在康, "자동차전륜 구동축재의 피로크랙 전파특성에 관한 연구", 大韓機械學會論文集 A, (1997), 105~111