

차량 밸브용 내열강재 이종 마찰용접부의 피로특성 평가

An Evaluation of Fatigue Properties on Dissimilar Friction Weld of Heat-Resisting Steels Used in Vehicle Valves

이 동 길*, 이 상 열**, 정 재 강***
Donggil Lee, Sangyoul Lee, Jaekang Jung

ABSTRACT

The fatigue crack propagation characteristics were investigated on dissimilar friction weld of two kind of heat-resisting steels (STR3 and STR35) commonly used in valve materials for vehicles. A small circular artificial defect was machined to induce fatigue crack at bonded line, heat affected zone and base metal of the weld on the surface of the specimens. From the results of the experiment, the fatigue limits of the materials STR3 and STR35 were obtained to be 429.0MPa and 409.4MPa respectively. The STR35 base metal and 1.0mm HAZ specimens showed 190% and 82% higher fatigue life than STR3 base metal. And the fatigue life of 1.0mm HAZ specimen was shown 99% on STR3 and 29% on STR35 higher than that of their base metal. But the fatigue life of weld interface specimen was shown 18% on STR3 and 72% on STR35 lower than that of their base metal because of the weld interface separation.

주요기술용어 : Dissimilar friction welding(이종마찰용접), Weld interface(용접계면), Crack length(크랙 길이), Fatigue life(피로수명), Cycle ratio(피로파단수명비), Fatigue crack propagation rate(피로크랙전파속도)

1. 서 론

마찰용접은 두 재료를 가압하에서 상대회전시킬 때 접촉부의 마찰에 의해 발생하는 열을 이용하여 재료를 접합하는 고상접합법의 하나이다.¹⁾ 이러한 방법은 에너지 효율이 좋고, 구조조직을 만들지 않기 때문에 기계적 성질이 우수하고, 공정변수가 축하중, 회전속도, 압셋량 등으로 간단하기 때문에 관리 및 자동화가 비교적 용

이하다. 또한 아크용접에 비하여 금속 소모량이 상대적으로 적으며, 접합조건에 따른 재현성이 우수하여 품질의 신뢰도가 높다는 것 등의 많은 장점으로 자주 사용되고 있는 접합방법의 하나이다.^{2,3)}

한편 자동차 관련 부품 중 내연기관의 배기 밸브는 기능상 고온 하에서 반복하중을 받는 부품으로서 내열성, 내마모성, 내식성 등이 요구된다. 따라서 부위에 따라 적합한 특성을 갖는 두 가지 재료를 접합하여 사용하여야 하며 재료비의 절약 및 열처리 공정저감 등의 목적으로 이종

* 회원, 조선대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 목포과학대학 자동차과

** 회원, 조선대학교 기계공학부

마찰용접 방법이 주로 사용된다. 동종재료에 비하여 이종재료의 마찰용접은 용접부의 비대칭 열영향부 조직의 분포와 재료에 따른 기계적 성질의 차이 등으로 인하여 접합선과 열영향부에서 피로크랙의 전파와 노치 감수성이 달라지기 때문에 부품의 안정적 수명을 예측하고 개선하기 위해서는 재료의 변화에 따른 피로특성의 규명이 필요하다.

내열강(耐熱鋼)은 높은 온도에 산화와 부식이 되지 않으며 강도의 저하가 쉽게 일어나지 않는 특수강으로서 STR계와 STS계로 분류되며, 이들은 각각 페라이트계, 마르텐사이트계, 오스테나이트계 등으로 세분되어진다.^{4,5)}

본 연구에서는 최근 국내 자동차 업계에서 밸브용 재료로 사용되고 있는 마르텐사이트계 STR3재와 오스테나이트계 STR35재를 대상으로 실제 사용되고 있는 용접조건과 동일한 마찰용접을 실시하여 마찰용접부의 피로특성을 실험적으로 고찰하였으며, 시험편은 모재(BM), 열영향부(HAZ) 및 접합계면(weld interface)으로 구분하여 각 영역에서의 피로파괴 특성을 비교·고찰하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 재료는 마르텐사이트계 STR3재와 오스테나이트계 STR35재이며, 화학적 성분조성과 기계적 성질은 각각 Table 1 및 Table 2와 같다.

시험편의 제작에 사용한 마찰용접기는 브레이크 타입(brake type)으로서, 재료의 직경 20mm, 길이 150mm인 환봉을 회전수 2,700rpm, 예마찰 압력 2.03MPa, 마찰압력 4.9MPa, 업셋압력 6.18MPa의 조건으로 압접하여 용접을 실시하였다. 용접

Table 1 Chemical compositions(wt. %)

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 streng. (MPa)	Tensile streng. (MPa)	Elong. (%)	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

된 시험편은 CNC 선반에서 용접계면이 평활부의 중심에 정확히 위치하도록 가공하였다. 피로크랙 발생을 유도하기 위한 인공결함으로서의 미소원공은 직경과 깊이를 각각 0.3mm의 크기로 용접부에서 가장 민감한 부위라고 할 수 있는 모재, 용접계면 및 계면으로부터 1.0mm 떨어진 열영향부에 가공하였다. 이때 정확한 접합계면의 위치를 파악하기 위하여 평활부를 경면 연마한 후 에칭하여 가공하였다. 가공된 시험편의 모양 및 치수는 Fig. 1과 같다.

西谷⁶⁾는 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 8mm이므로 지름에 대한 치수효과는 없다고 볼 수 있다.

결함이 모재 및 HAZ부에 가공된 시험편의 피로시험응력은 두 모재 중 피로한도가 낮은 STR 35 피로한도의 약 90%인 370.4MPa로 설정하였다. 표면 피로크랙길이 측정은 레프리카법 및 이동현미경을 설치한 후 접안측미계(Micrometer eyepiece, Model ; OSM-4)를 부착하여 측정 관찰하였으며, 미소원공을 포함한 시험편 표면상의 전 크랙길이를 2a로 하였다.

Photo 1은 본 실험에 사용된 재료에 대한 금속조직사진으로서 용접계면과 계면으로부터 1.0mm 떨어진 용접 열영향부 및 모재의 사진을 나타내고 있다. 이 사진으로부터 STR3은 높은 밀도의 탄화물이 무질서하게 분산되어 있는 반면에 STR 35의 조직은 결정립계 사이에 탄화물이 관찰되고 있음을 알 수 있다.

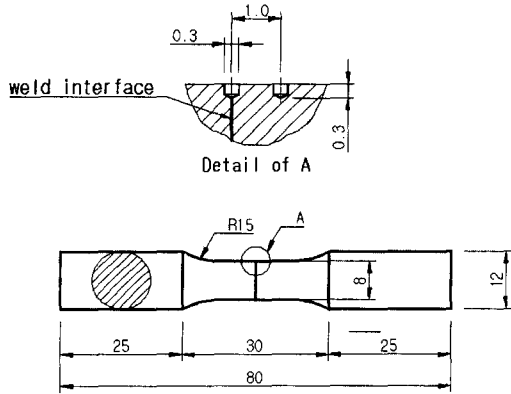
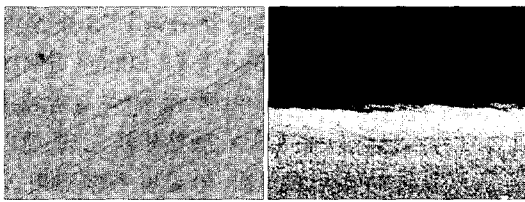
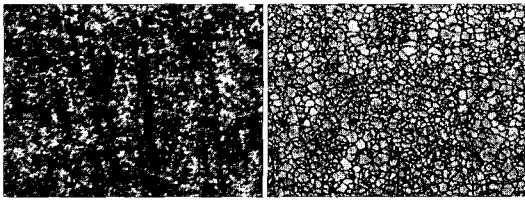


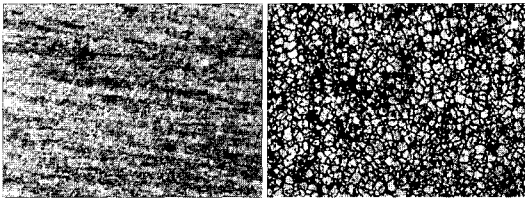
Fig. 1 Geometry of a fatigue test specimen



(a) Weld interface



(b) 1.0mm H.A.Z.



(c) Base metal

STR3

STR35

Photo. 1 Micro-structures of the materials ($\times 200$)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로한도 및 경도분포

Fig. 2는 피로한도 실험으로부터 얻어진 결과를 나타낸 S-N선도이다. 이때 피로한도는 $N=1 \times 10^7$ Cycle까지 시험편이 파단되지 않을 때의 응력으로 하였다. 평활재의 피로한도시험 결과 경도 증가 및 인성을 감소시키는 Si가 많이 첨가된 STR3의 피로한도는 429.0MPa이다. 반면에 취성을 방지하고 내마모성을 향상시키는 Mn과 고 Fe-Cr합금을 오스테나이트화시키는 Ni이 많이 첨가되어 있는 STR35는 409.4MPa로서 STR3의 피로한도가 STR35보다 약 20MPa이 높게 조사되었다.

Fig. 3은 용접계면을 기준으로 0.05mm 간격으로 측정된 마이크로 비커스경도 분포를 나타내

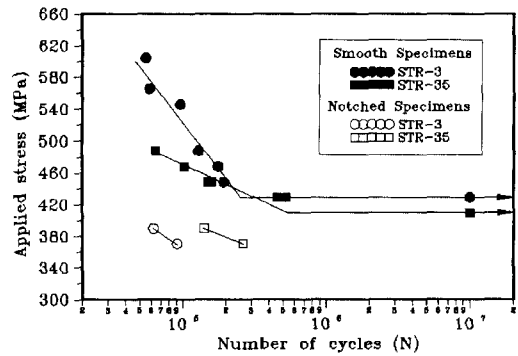


Fig. 2 S-N diagram

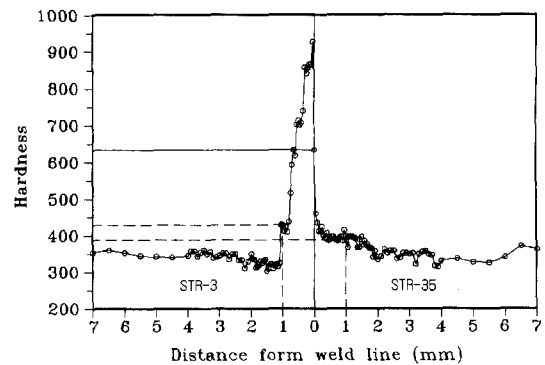


Fig. 3 The hardness gradient distribution

Table 3 The micro-vickers hardness(Hmv)

Materials	Notch positions		
	Base metal	1.0mm H.A.Z.	Weld interface
STR3	349.0	412.1	633.3
STR35	351.1	385.9	

고 있으며, Table 3은 미소원공결함이 가공될 위치의 경도를 나타내고 있다.

3.2 피로크랙 발생 및 전파거동

피로크랙 유도를 위한 미소원공결함이 가공된 시험편에서 초기 미소크랙은 미소원공 가장자리에서 축에 수직인 방향으로 발생한다. 그러나 평활재의 피로크랙은 슬립밴드로부터 미소크랙으로 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 미시크랙의 전파거동을 검토하는 것은 중요하다.

Photo 2~4는 용접계면 및 1.0mm HAZ부에 미소원공결함이 위치한 노치재의 cycle 증가에 따른 피로크랙 전파거동을 연속적으로 보여주는 사진이다. 실험결과 초기 미소크랙은 미소원공 가장자리에서 축에 수직방향으로 수 개가 관찰되었으며, 이들이 서로 합체 전파하면서 주크랙으로 성장하였다. 또한, 용접계면에 미소원공결

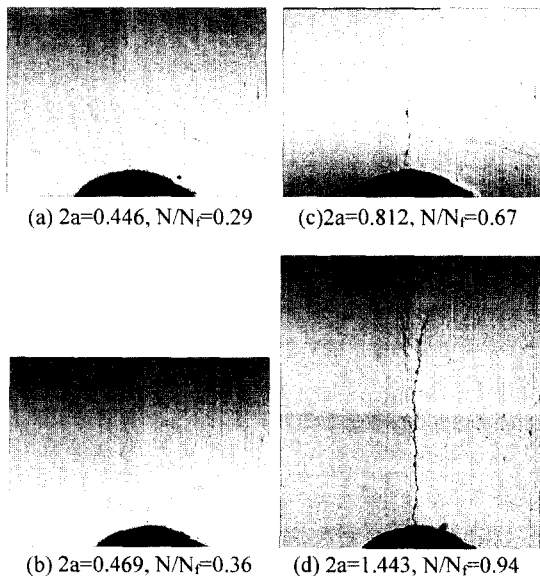


Photo. 2 Photographs of fatigue cracks on weld interface notched specimens ($\sigma_a=370.4\text{MPa} \times 100$)

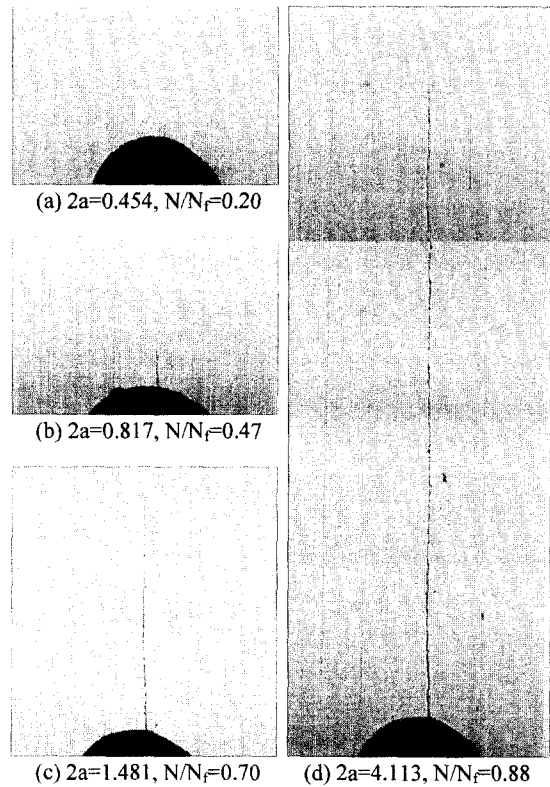


Photo. 3 Photographs of fatigue cracks on STR3 1.0mm HAZ notched specimens ($\sigma_a=370.4\text{MPa} \times 100$)

함이 가공된 시험편의 경우 cycle 증가에 따라 계면의 분리현상을 볼 수 있다.

3.3 a-N선도 고찰

Fig. 4, 5에서는 노치재 시험편의 cycle 증가에 따른 피로크랙길이와 반복수의 관계를 나타낸 것이며, Fig. 6은 이들의 결과를 종합한 것이다.

그림에 나타난 바와 같이 두 재료 모두 피로수명은 미소원공결함이 모재로부터 열영향부를 거쳐 용접계면에 가까워질수록 증가하다가 용접계면에서는 크게 감소함을 알 수 있다. 또한, 미소원공결함이 동일하게 위치한 시험편끼리 피로수명을 비교하여 보면, STR35재는 STR3재보다 모재는 약 190%, 1.0mm HAZ시험편은 약 82%씩 증가하였다. 그리고 STR3과 STR35 두 모재를 기준으로 하여 피로수명을 각각 비교하여 보면

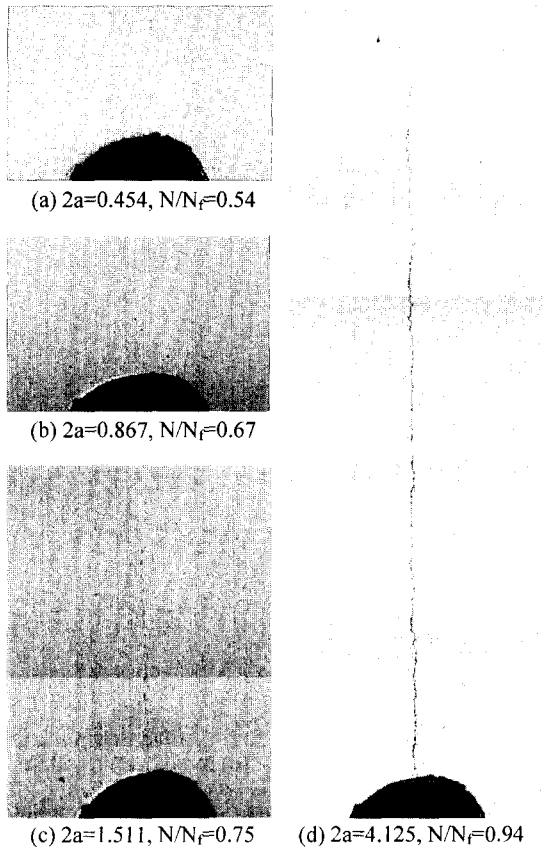


Photo 4. Photographs of fatigue cracks on STR35 1.0mm HAZ notched specimens ($\sigma_a=370.4\text{MPa} \times 100$)

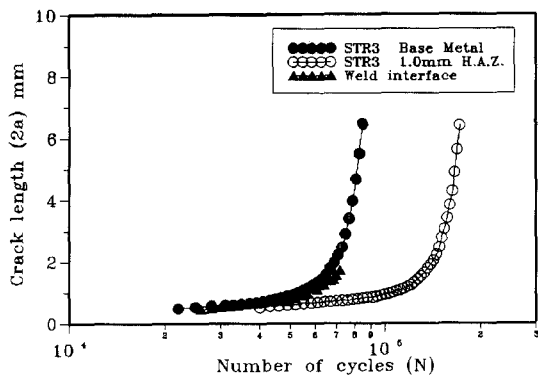


Fig. 4 Relation between crack length and number of cycles for STR3

1.0mm HAZ부 시험편은 약 99% 및 29%씩 증가한 반면, 용접계면 시험편은 약 18% 및 72%씩 각

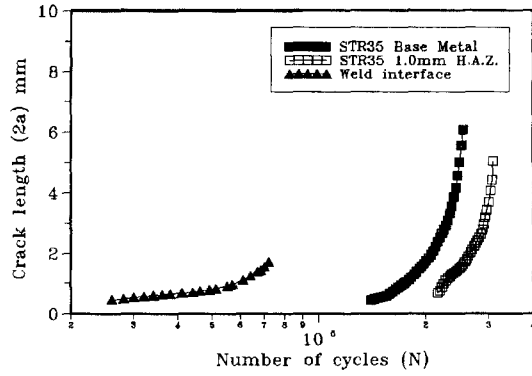


Fig. 5 Relation between crack length and number of cycles for STR35

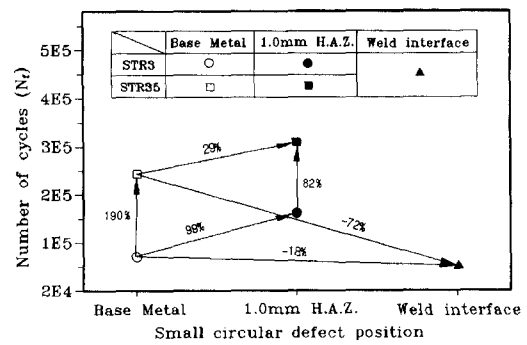


Fig. 6 Relation between notch position and fatigue life

각 감소하였다. 이러한 결과는 마찰용접에 의하여 용접계면의 경도차이 및 불균형한 응력구배에 의하여 용접 접합부의 분리 현상이 빨리 나타났기 때문으로 생각된다.

3.4 피로크랙길이와 파단수명비와의 관계

西谷⁷⁾은 피로크랙길이(2a)와 피로파단수명비(N/N_f)의 관계를 다음과 같이 표시하였다.

$$\log(2a) = A + B(N/N_f)$$

여기서 A는 원공의 크기에 따라 주어지는 상수이고 B는 비례상수이다.

한편, 손^{8,9)}는 굽힘모멘트 하에서 미소원공을 갖는 평판재의 피로시험 결과 N/N_f 가 20~90% 구간에서 직선적으로 나타나며, 상수 B가 1.0~1.29의 범위 내에 있다고 하였다. 따라서 피로크

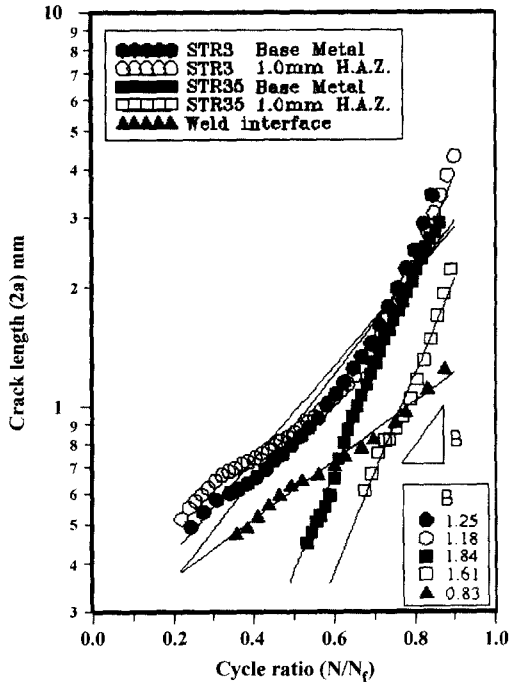


Fig. 7 Relation between crack length and cycle ratio for STR3 and STR35

랙의 발생·성장특성 등을 예측하는 것이 가능하다고 하였다.

Fig. 7은 표면크랙길이나 파단수명에 대한 반복수의 비(수명비)와의 관계를 나타낸 것이다. 이때 응력의 대소에 관계없이 피로크랙성장특성을 $2a-N/N_f$ 선도로 나타내면 각각의 데이터들이 직선의 기울기로 좁은 범위내에 모여지는 것을 알 수 있으며, 비례상수 B의 값은 0.83~1.84 범위내에 있었다.

3.5 피로파단면 고찰

재료의 파단면에는 파괴의 진행을 나타내는 특징적 형태가 남아있으며, 이것을 조사함으로써 파괴원인과 파괴기구에 관한 정보를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 주사현미경(SEM)을 이용하여 파단면을 관찰하였으며, 관찰부위는 미소원공으로부터 미소원공 깊이의 약 2배 떨어진 곳(약 0.6mm)이다.

Photo. 5는 두 재료의 미소원공결합의 위치에

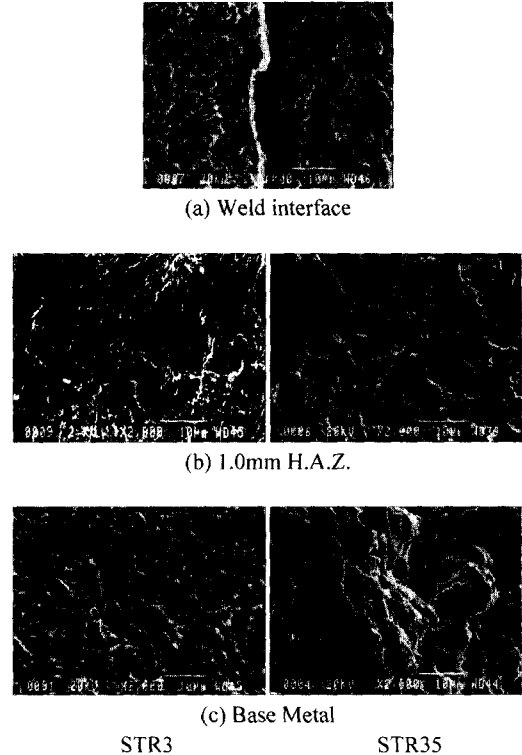


Photo. 5 SEM Fractographs of STR3 and STR35, ×2000

따른 피로파단면을 나타내는 사진이다. 여기서 용접계면 노치재 시험편의 피로 파단면으로부터 두 재료의 마찰용접부의 분리현상을 뚜렷이 볼 수 있으며, 1.0mm HAZ부 및 모재의 경우는 다소 유사한 취성파면을 나타내고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

최근 자동차 업계에서 차량용 밸브에 사용되고 있는 마르텐사이트계 STR3재와 오스테나이트계 STR35재를 대상으로 현장에서 실제 사용하고 있는 용접조건으로 마찰용접을 실시하여 마찰용접부의 피로특성을 실험적으로 고찰하였으며, 시험편은 모재(Base metal), 열영향부(HAZ) 및 접합계면(weld interface)으로 구분하여 노치 위치에 따른 피로특성을 각각 비교·고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 평활재 STR3 및 STR35 모재에 대한 피로한도는 각각 429.0MPa 및 409.4MPa로서 인장강도가 높은 STR3의 피로한도가 약 20MPa 높게 조사되었다.

2) 미소 원공결함이 모재로부터 열영향부를 거쳐 용접계면에 가까워질수록 증가하다가 용접계면에서는 크게 감소함을 알 수 있다. 또한, 미소원공결함이 동일한 위치의 시험편끼리 피로수명을 비교하여 보면, STR35재는 STR3재보다 모재는 약 190%, 1.0mm HAZ시험편은 약 82%씩 증가하였다.

3) STR3과 STR35 두 모재를 기준으로 하여 피로수명을 각각 비교하여 보면 1.0mm HAZ부 시험편은 약 99% 및 29%씩 증가한 반면, 용접계면 시험편은 약 18% 및 72%씩 각각 감소하였다. 이러한 결과는 HAZ부의 경도증가 및 용접계면의 분리현상에 의한 영향으로 사료된다.

4) 피로크랙길이와 파단수명비의 관계 $\log(2a) = A + B(N/N_f)$ 식에 본 시험재료를 적용한 결과 마찰용접 및 미소원공결함의 위치에 관계없이 비례관계가 있었다.

후 기

본 논문은 2000년도 조선대학교 학술연구지원비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- 1) 정호신, T. Shinoda, "마찰용접의 이론과 실제의 적용," 대한용접학회지, 제15권 제6호, pp. 1-12, 1997.
- 2) D. E. Spindler, "What Industry Needs to Know about Friction Welding," Welding Journal, pp.37-42, 1994.
- 3) 조현수, 서성재, "Inconel 713C와 SCM440의 마찰용접," 대한용접학회지, 제15권 제6호, pp. 564-565, 1997.
- 4) 채왕석, 권용기, 김동현, "마르텐사이트계 내 열강의 금속 및 기계적 특성에 관한 연구," 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, p.1073, 1997.
- 5) 한봉희, 금속재료, 회중당, pp.268-300, 1993.
- 6) 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, 第39卷 第323號, pp. 2005-2012, 1966
- 7) 西谷弘信, 森光武則, "小穴付き試験片の回轉軸げ試験によるき裂傳ば特性の評價," 日本機械學會論文集, 第42卷 第354號, p.328, 1976.
- 8) 이상용, "비관통 원공 결함재에 있어서 짧은 균열의 비선형 거동 및 크랙성장예에 관한 연구, 고려대학교 석사학위논문, pp.22-48, 1992.
- 9) 이동길, 이상열, 정재강, "미소원공결함을 갖는 자동차 전륜구동축재의 온도변화에 따른 피로크랙전파거동에 관한 연구," 한국자동차공학회논문집, 제6권 제6호, pp.185-194, 1998.