

티타늄 용접재의 피로크랙 성장거동에 관한 연구

최병기[†] · 국중민^{*}

조선대학교 기계공학부 · 조선대학교 대학원 기계공학과
(2001. 3. 2. 접수 / 2001. 9. 6. 채택)

A Study on the Fatigue Crack Growth Behavior of Titanium Welding Material

Byung-Ki Choi[†] · Jung-Min Kuk^{*}

Department of Mechanical Engineering, Chosun University

^{*}Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Chosun University

(Received March 2, 2001 / Accepted September 6, 2001)

Abstract : In this study, specimens were classified four welded specimens and a base metal to investigate fatigue life and crack growth rate of pure titanium welding materials, and Ti was used in turbine equipment of nuclear power generation, etc. The summarized results are as follows ; 1) Specimen-2 was bigger 712% than base metal, when it was compared with other welding materials, 2) As the result of specimens data, specimen-2 crack behavior rate was lower 30 times than base metal, and so total fracture life was very influenced by it, 3) Notch tip of Specimen-2 was offsetted 6.7mm from boundary H.A.Z, and it formed 25% in total fracture length, 4) As the considering of da/dN and ΔK , Paris' law is incongruous in this study, because two inclines were on one date.

Key Words : fatigue life, crack growth rate, base metal, H.A.Z

1. 서 론

금속의 접합방법 중 한 분야인 용접은 현대 산업의 발전에 큰 역할을 담당하고 있다. 용접에 의한 접합은 단조나 리벳이음 등과 같은 다른 접합방법에 비하여 높은 이음효율, 재료의 절감, 뛰어난 유밀성 등과 같은 많은 장점들로 인하여 현재 발전소와 같은 거대한 설비를 비롯하여 자동차, 조선, 항공분야 등의 기계공업분야에 널리 이용되고 있다.

그러나 용접은 단시간에 높은 열을 받아 용융 후 응고되는 과정에서 구조결합 및 열변형에 의한 결합을 내포하게 되며, 이러한 결합들은^{1,2)} 응력 집중원이 되어 초기크랙을 발생시키거나 피로파괴를³⁾ 초래하기도 한다.

특히 용접시 발생하는 단시간의 국부적인 가열에 따라 용접부위 근방에는 열응력, 냉각시의 수축으로

인한 잔류응력 및 뒤틀림의 발생 등이 주요 문제가 되고 있으며, 용착금속부와 취약한 열영향부 등에 기인된 피로수명의 저하로 발생하는 피로크랙에 의한 급작스런 파단이나 파손 등의 파괴사고가 빈번하게 보고되고 있다.

Irwin⁴⁾은 응력확대계수의 개념을 확립하였으며, 이러한 개념의 도입은 평판재에 있어서의 재료의 피로수명예측과 크랙전파거동을 파괴 역학적으로 평가하는데 커다란 기여를 하였다. Kitagawa⁵⁾ 등은 히스테리시스 곡선에서 안정된 반복 변형률값을 사용한 반복변형을 확대계수범위 ΔK_c 를 제안하였다. 또한, Nisitani^{6,7)} 등은 역학적 변수를 사용하여 여러가지 재료에 평활재의 피로크랙 전파거동을 적용하였으며, Frost⁸⁾에 의하여 처음 실험적으로 적용되었고, 그후 Wareing⁹⁾ 등에 의하여 상온하의 피로크랙에 대하여 그 유용성이 일부 입증되었다.

본 연구에 사용된 티타늄은 내산성이 우수하여 원자력 발전소의 터빈장치 및 열교환기, 항공기의

[†]To whom correspondence should be addressed.
bkchoi@chosun.ac.kr

프레임과 같은 화학장치에 널리 사용되고 있는 실정이다. 그러나 이러한 티타늄의 중요성에 비하여 피로실험 및 여러 가지 실험이 병행하지 못하여 자료측정이 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 순티타늄 용접재를 사용하여 모재부와 열영향부 그리고 용접부에서 크랙성장 속도 및 피로수명 등의 파괴역학적인 메카니즘을 비교·분석하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 시험편 및 시험기

본 실험에 사용한 재료는 티타늄(ASM B265, Grade2)이며, Table 1은 실험에 사용된 티타늄의 화학적 성분이며, Table 2는 기계적 성질을 나타내었다.

Table 1. Chemical compositions of ASTM B265 GR2 (wt.%)

N	C	H	Fe	O	Ti
0.006	0.002	0.002	0.03	0.144	BAL

Table 2. Mechanical properties of ASTM B265 GR2

Yield Stress (Kgf/mm ²)	Tensile Stress (Kgf/mm ²)	Elong-ation (%)	Young's Modulus (Kgf/mm ²)	Hardness (Hv)
40	49	28	10,850	0.3

사용된 시험편의 형태는 Fig. 1과 같은 CT(Compact Tension)시험편이며, ASTM E647-83에 준하여 압연 방향과 크랙 진전방향이 직각이 되도록 채취하였다.

용접하지 않은 모재 시험편을 Base metal 이라 칭하고 용접부에 노치를 가공한 시험편을 Specimen-1, 고열영향부(용접부로부터 3mm)에 노치를 가공한 시험편을 Specimen-2, 저열영향부(용접부로부터 7mm)에 노치를 가공한 시험편을 Specimen-3, 용접부에서 11mm 떨어진 거리에 노치를 가공한 시험편을 Specimen-4라고 칭하였다.

Table 3은 본 실험에 사용된 용접봉의 성분을 나타내고 있다.

Table 3. Chemical compositions of welding wire (wt.%)

N	C	H	Fe	O	Ti
0.012	0.03	0.005	0.1	0.1	BAL

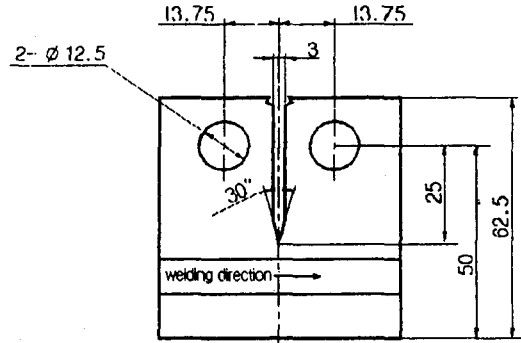


Fig. 1. Dimensions of CT specimen

실험에 사용한 시험기는 소형컴퓨터에 의해 하중의 설정 및 제어를 하도록 되어 있으며, 용량 ± 10ton의 전기유압식 서보 피로시험기를 사용하였다.

2.2. 실험방법

하중 제어방식은 폐루프(close-loop)식 제어기구를 응용한 것으로 설정하중과 수시로 검출되는 로드셀의 신호를 컨트롤러(controller)안에 내재된 A/D변환기를 통해서 소형 컴퓨터에 입력해 오차를 보정하는 방법을 택함으로써 고정도의 실험이 가능하도록 하였다.

크랙의 측정은 시험편의 전면에 클립게이지를 장착하여 크랙개구변위를 측정하였고, 이 변위와 하중 신호로부터 컴플라이언스를 구해 환산하는 방법을 이용하였다. 크랙길이 측정의 정밀도는 컨트롤러안에 내재된 12bit A/D변환기의 분해능(resolution)을 고려하면 크랙개구변위의 측정 정밀도가 대략 0.0001 mm정도이며 이를 크랙길기로 환산하면 0.01mm정도가 된다. 본 실험은 시험편의 착탈을 제외하고는 하중제어, 크랙길이 측정, 데이터 처리 등이 모두 프로그램화되어 자동으로 실행되었다.

반복하중은 하중제어에 의한 정현파형을 사용하였으며, 진동수는 20Hz, 최대하중은 400kgf, 하중비는 0.1로 설정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 피로크랙길이의와 하중 반복수와의 관계

Fig. 2는 피로크랙길이의와 하중 반복수의 관계를 나타내었다.

용착부 및 HAZ, Bond부 등의 파단수명이 모재의 경우와 비교하여 파단수명이 약 127~895%정도 높

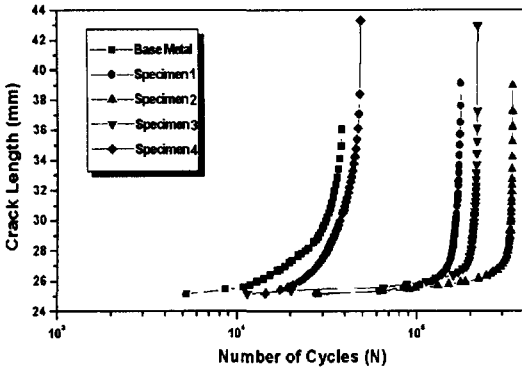


Fig. 2. Relation between crack length and number of cycles for all specimens

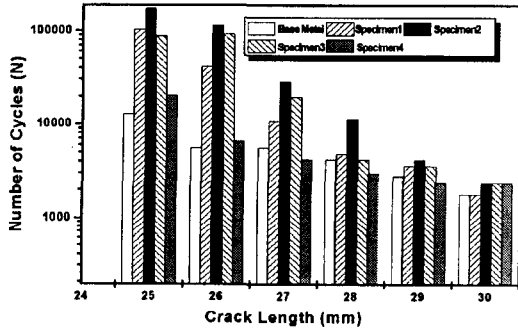


Fig. 3. Relation between number of cycles and crack length per 1mm for all specimens

게 나타남을 알 수 있었으며, 그 중 HAZ은 가장 높은 파단수명 향상을 나타내었다.

Fig. 3은 피로크랙 진전 초기단계에서 크랙을 1 mm 진전시키는데 소요되는 평균 사이클수를 표시한 것으로 용착부는 초기크랙 1mm까지 진전하는데 모재의 경우와 비교하여 약 810%정도 높게 나타났으며, 최종파단수명은 약 460%정도 높게 측정되었다.

용착부와 HAZ, Bond부의 시험편은 초기 크랙의 발생수명이 긴 반면 모재부와 용접부에서 거리가 먼 시험편일수록 초기크랙의 발생수명이 짧은 것으로 나타났다.

3.2. 피로크랙전파속도와 크랙길이와의 관계

Fig. 4는 피로크랙전파속도와 피로크랙길이와의 관계를 나타낸 것으로서 피로크랙 진전속도 da/dN 은 7점 다항식 근사법(Seven point incremental method)¹⁰⁾을 사용하였다.

용접재의 경우 모재와는 다르게 직선적인 형태가 가진 변곡점을 보이고 있었다. 이러한 원인은 크랙

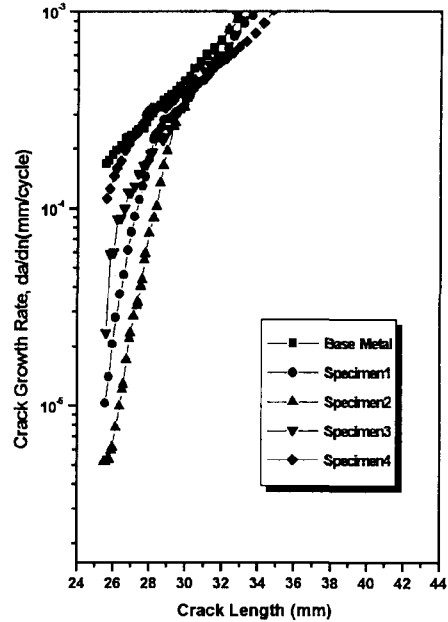


Fig. 4. Relation between crack behavior rate and crack length for all specimens

진전방향이 용접비드를 직각으로 통과하기 때문에 용접비드에 도달하기전과 후의 크랙전파속도가 달라지므로 두 개의 기울기를 나타내는 것으로 사료된다.

용접으로 인한 이종재료를 통과하는 피로크랙 진전속도는 모재의 경우에 비하여 초기에는 매우 낮은 피로크랙 진전속도를 나타내지만 크랙길이가 약 28~30mm를 기준으로 모재의 피로크랙 진전속도를 추월한 것으로 보여지며 Specimen-2재료가 이들 중 초기피로크랙 진전속도가 가장 낮았으며, 피로크랙이 동일한 점을 지나 피로크랙 진전속도가 가장 높았음을 알 수 있었다.

Fig. 5는 크랙 1mm당 모재를 포함한 시험편들의 평균속도를 나타낸 것이다. 여기에서도 Specimen-2 시험편이 가장 낮은 초기피로크랙 진전속도를 나타냈으며, 모재를 기준으로 약 30배나 낮은 속도를 나타냈다.

또한, Specimen-2를 면밀히 검토한 결과 모재와 용접 경계부는 초기크랙 부위에서 약 6.7mm 떨어진 부위에 위치하였으며, 전체파단길이 25mm를 고려할 때 약 26.8%정도 떨어진 부위에 용접이 된 경우이며, 이는 산업현장에서 응력이 집중된 부위나 결합이 있는 부위 주변에서 용접하는 경우 전체 파단 길이의 약 26.8%정도 떨어진 부위에 용접을 함으로

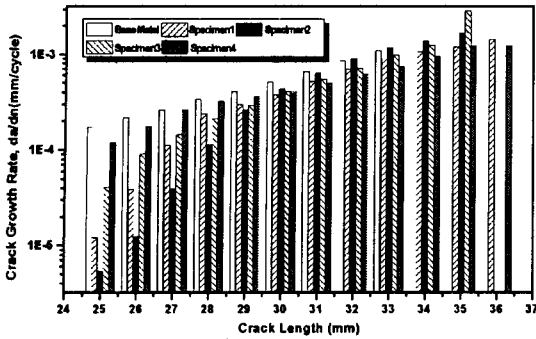


Fig. 5. Relation between crack behavior rate average and crack length per 1mm for all specimens

서 피로수명을 약 712%까지 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

3.3. 피로크랙전파속도와 응력확대계수와의 관계

피로수명 평가방법에는 여러 가지 방법들¹¹⁾이 있는데, 피로크랙 발생수명 평가에 관한 것과 피로크랙 전파수명 평가에 관한 것으로 나눌 수 있다.

본 실험에서 피로전파수명을 평가하기 위하여 식 (1)에 나타난 Paris식을 사용하였으며,

$$N_f = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C(\Delta K)^m} da \quad (1)$$

여기서 a_i 는 초기 크랙길이, a_f 는 파단직전에 조사된 크랙길이, N_f 는 파단까지의 반복수이다.

Fig. 6은 모재 및 용접된 시험편의 da/dN 과 ΔK 선도를 비교한 것이다. 여기서 용접된 시험편을 이중재료로 가정하면 식(1)을 만족하지 못하는 것은 용접으로 인하여 시험편에 영향을 미친 것으로 사료된다.

그러나 Specimen-4의 경우는 모재의 데이터 분포와 유사하게 나타나고 있으며, 이러한 원인은 용접에 대해서 영향을 거의 받지 못하고 있는 것으로 사료된다.

3.4. 파단면 고찰

Photo 1은 피로 파단면을 SEM(Scanning Electronic Microscope)으로 모재부와 열영향부의 경계부에서 50배, 그리고 모재, 열영향부, 용접부는 각각 200배의 배율로 관찰한 사진이다. Photo 2는 광학현미경으로 시험편의 모재부와 열영향부 그리고 용접부에 대하여 관찰한 조직사진이다.

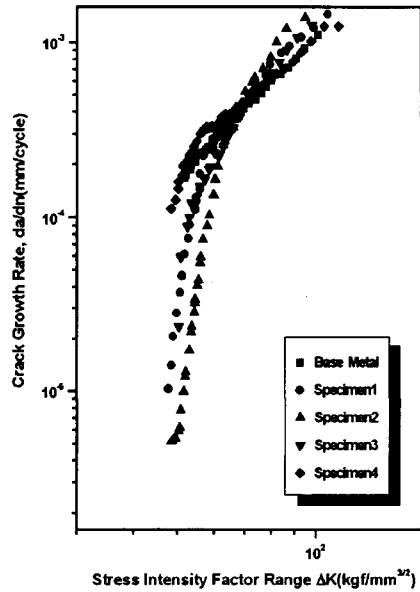
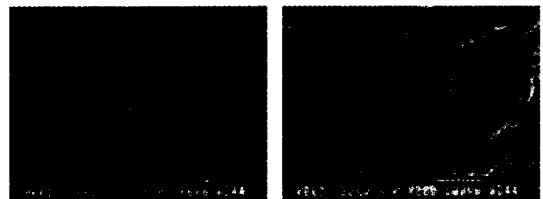


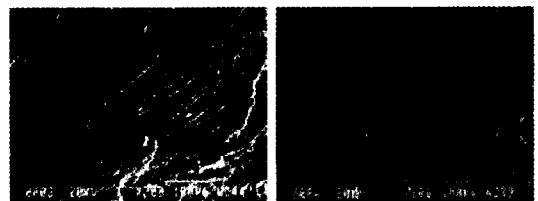
Fig. 6. Relation between crack behavior rate and stress intensity factor range for all specimens

Photo 1과 2에서 관찰되어지는 바와 같이 모재부와 용접 및 열영향부의 큰 차이점은 조직입자의 차이이며, 이는 용접판의 두께가 12.7mm로 두껍기 때문에 용접열의 영향을 많이 받은 것으로 사료된다. 그리고 이들 모두에서 나타난 취성 스트라이에이션(brittle striation)으로 보이는 무늬가 관찰되는데, 이는 순티타늄이 연성이 부족한 재료이기 때문에 전반적인 물결무늬가 나타나지 않는 것이며, 이는 벽개면을 따라 취성적으로 진행하고 응력이 커지면



(a) base metal and HAZ(x50)

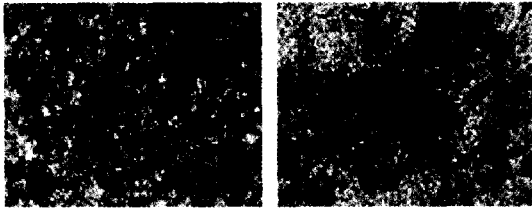
(b) base metal(x200)



(c) HAZ(x200)

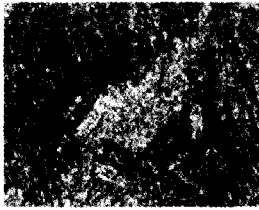
(d) welding zone(x200)

Photo 1. SEM fractographs of ASTM B265 GR.2



(a) base metal

(b) HAZ



(c) welding zone

Photo 2. Micro-structure of ASTM B265 GR.2(×500)

다소 소성변형이 일어나서 크랙이 둔화하여 진전이 정지하면서 형성된 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 원자력 발전소의 터빈장치에 사용되는 순수티타늄 용접재의 피로수명과 크랙성장속도 등을 열영향부, 용접부 그리고 모재부에서 각각 비교하기 위하여 시험편을 크게 용접된 4개의 시험편과 모재 시험편으로 나누어 피로시험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 순티타늄 용접재 중 용접에 의한 고열영향부 시험편이 모재 시험편에 비해 피로수명이 약 700%로 크게 나타났다.

2) 초기 크랙이 1mm로 성장하는데 걸리는 평균 크랙진전속도를 조사한 결과 Specimen-2가 모재에 비하여 약 30배 낮은 크랙진전속도를 나타내고 있었으며, 초기 크랙진전속도가 최종 파단 수명에 매우 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

3) 시험편 중 피로수명이 가장 큰 Specimen-2 시험편은 노치 선단으로부터 열영향부까지 거리가 약 6.7mm로 전체 파단길이의 약 25%를 차지하고 있었다.

4) da/dN 과 ΔK 를 고찰한 결과 용접으로 인해 생

긴 두 개의 기울기로 인하여 Paris 법칙에 적용하기에는 부적당함을 알 수 있었다.

감사의 글 : 이 논문은 1999년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

- 1) 宋森弘外 3人, “低炭素マルテンサイト組織の疲れ挙動におよぼす舊オスナイト結晶粒度の影響”, 日本機械學會論文集, 第39卷, 第324號, pp. 2291~2298, 1973.
- 2) J. J. Bush., “Microstructural and Residual Stress Changes in Hardened Steel due to Rolling Contact”, Trans, ASME, Vol. 54, pp. 390~398, 1961.
- 3) 徐昌敏, 金楨丰, “破面解析과 그 應用(III)”, 大韓機械學會誌, Vol. 24, No. 3, pp. 193~202, 1982.
- 4) G. R. Irwin., “Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Transversing a Plate”, Trans, ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 24, p. 361, 1951.
- 5) Kitagawa, H., Suh., C. M., “Crack Growth Behavior of Fatigue Microcracks in Low carbon Steels”, Fatigue Fracture Engineering Material Structure, Vol. 9, No. 6, pp. 409~424, 1987.
- 6) 西谷弘信, 皮籠石 紀雄, “低炭素の高溫回轉曲げにおける微小疲労き裂傳ば則”, 日本機械學會論文集(A編), 第53卷, 第491號, pp. 1163~1166, 1987.
- 7) 西谷弘信, 皮籠石 紀雄, “低炭素の高溫回轉曲げにおける微小疲労き裂傳ば則(續報)”, 日本機械學會論文集(A編), 第54卷, 第500號, pp. 663~669, 1988.
- 8) Frost, N. E., “Effects of Mean Stress on the Rate of Growth of Fatigue Cracks in Sheet Materials”, J. of Mechanical Eng. Science, Vol. 4, No. 1, pp. 22~35, 1989.
- 9) Wareing, J., “Fatigue Crack Growth in a Type 316 Stainless Steel at Elevated Temperatures”, Metallurgical Transaction A, Vol. 6A, pp. 1367~1377, 1975.
- 10) Standard Test Method for Constant-Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rate above 10-8m/cycles, ASME, Vol. 85, No. 4, p. 528, 1963.
- 11) Suresh, S. and Ritchie, O., “Behavior of short Fatigue Crack”, International Metal Review, Vol. 29, No. 6, 1984.