# CF8M과 SA508 용접재의 열화에 따른 파괴특성 평가

우승완† ·권재도*·최성종*·최영환**

# Effects of Thermal Aging on the Fracture Characteristic in the Dissimilar Welds

Seung Wan Woo, Jae Do Kwon, Sung Jong Choi and Young Hwan Choi

**Key Words:** CF8M(주조 스테인리스강), Low Alloy Steel(저합금강), Heat Affected Zone(열영향부), Dissimilar Weld(이종재 용접), Thermal Aging(열화), Elastic-Plastic Fracture Toughness(탄소성 파괴인성), Fatigue Crack Growth Behavior(피로균열진전거동)

**Abstract**

In a primary reactor cooling system(RCS), a dissimilar weld zone exists between cast stainless steel(CF8M) in a pipe and low-alloy steel(SA508 cl.3) in a nozzle. Thermal aging is observed in CF8M as the RCS is exposed for a long period of time to a reactor operating temperature between 290 and 330℃ while no effect is observed in SA508 cl.3. The specimens are prepared by an artificially accelerated aging technique maintained for 300, 1800 and 3600 hrs at 430℃ respectively. The specimens for elastic-plastic fracture toughness tests are prepared one type, which notch is created in the heat affected zone(HAZ) of CF8M. And, the specimens for fatigue crack growth tests are prepared in three classes, which notches are created at the center of deposited zone, the HAZ of CF8M, and the HAZ of SA508 cl.3. From the experiments, the J-integral values with the increase of aging time decrease, and the differences of the fatigue crack growth behaviors are relatively small in the three classes specimens.

## 1. 서 론

원전설비와 같이 고온, 고압의 특수환경하에서 장기간 사용되는 경우, 재료에 따라 금속조직이 변하고, 각종 기계적 특성의 변화가 일어나는 열화 현상이 발생한다. 이러한 열화현상은 원자로 냉각계통인 원자로(reactor pressure vessel, RPV), 증기발생기(steam generator, SG) 및 배관재료 등에서 다수 발생되고 있으며, 원전 구조안전성 평가에 있어 주요한 원인이 되고 있다.[1,2]

† 영남대학교 대학원
E-mail : lagmisia@yumail.ac.kr
TEL : (053)810-3822 FAX : (053)813-3703
* 영남대학교 기계공학부
** 한국원자력안전기술원

특히 원전 1차 냉각계통(reactor coolant system, RCS) 배관들은 RPV, SG 등의 nozzle부와 용접으로 연결되어 있으며, 이 때 용접부 nozzle은 대개 저합금강이며, 배관은 주조 스테인리스강으로 이종재료 용접부가 존재하게 된다. 이들 용접부위는 그 두께가 매우 두꺼우며, 이종재료의 용접이므로 결함 발생확률이 크다.

원전 1차 배관계통의 사용온도는 290 ~ 330℃이지만, 이 온도에서도 장기간 사용될 때에는 주조 스테인리스강의 475℃ 취성이 발생되는 것으로 알려져 있으며,[3] 이들 RCS가 300℃ 이상의 온도에 장기간 사용될 경우, 주조 스테인리스강 부분(CF8M)은 열화현상까지 일어나서 재료의 인성이 급속히 감소할 것이다. 그러나 상대 용접모재인 ASME SA508 class 3은 Mn-Ni-Mo계의 저합금강으로써 열화의 영향을 거의 받지 않는 것으로 알

려지고 있다.[4] 따라서, 주조 스테인리스강과 저합금강의 용접부에는 열화가 일어난 부분(주조 스테인리스강, CR8M)과 열화가 일어나지 않은 부분(저합금강)의 중간 영역이 있음으로 두 재료가 받는 열화에 관한 영향은 서로 다를 것이다.

따라서, 원전의 안전성 등을 고려할 때 압력용기의 nozzle과 배관 사이의 이종용접부의 경우, 장기사용으로 인한 경년열화 특성을 고려한 건전성평가 방법의 개발이 필수적이라고 사료된다.

본 연구에서는 원전 1차 배관계통의 이종재료인 CF8M과 SA508 cl.3를 용접하여, 각종 열화재를 제작한 후, 탄소성 파괴인성시험 및 피로균열 진전시험을 수행하여, 이종재 용접부의 재질열화가 건전성에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

## 2. 시험용 용접재 및 열화재의 제작

본 연구에 사용되는 두 이종재료는 원전 1차 냉각계통 배관에 사용되는 주조 스테인리스강인 ASTM A351 G. CF8M 및 nozzle의 ASME SA508 class 3이다. 용접작업은 SA508 cl.3에 ER309L을 gas-tungsten arc welding(GTAW)으로 buttering 작업을 한 후, ER308L 용가재를 사용하여 buttering된 SA508 cl.3와 CF8M을 shielded metal arc welding(SMAW)으로 용접하였다. CF8M과 SA508 cl.3의 이종재 용접조건을 Table 1에 나타내었다. 용접후열처리(PWHT)는 614℃에서 6.5시간 실시하여 용접부의 잔류응력을 최소화하였다.

본 연구에 사용된 CF8M 모재 및 SA508 cl.3 모재와 용가재로 사용된 ER308L 및 ER309L의 화학적 성분을 Table 2에 나타내었다.

모의열화재는 CF8M의 열화거동에 주안점을 두어 475℃ 취성이 발생될 수 있고,[5] 가능한 한 낮은 온도인 430℃를 선택하여 각 단계별로 제작하였다. 각 단계별 모의열화재의 제작은 본 연구실에서 개발한 430℃에서 300, 1800 및 3600시간 유지 후 수냉하는 방법을 사용하였다.[6] 본 연구에서는 열화되지 않은 용접재를 건전재(virgin)라 하였고, 각 단계별 열화재를 각각 430℃ 100시간, 300시간, 900시간, 1800시간 및 3600시간 열화재(degraded material)라 명하였다.

## 3. 시험결과

### 3.1 조직관찰

우선 건전재 및 430℃에서의 각 단계별 모의열화재의 시험편 표면을 #200 ~ #2000까지의 에머리 페이퍼를 사용하여 순차적으로 연마를 하였고, 마무리로 0.3㎛의 알루미나를 사용하였다. 에칭은 2단계로 수행하였으며, 먼저 SA508 cl.3 저합금강은 3%의 나이탈(nital; $HNO_3$(3mL)+ethanol(97mL)) 용액에서 5초간 에칭 후 광학현미경을 사용하여 조직을 관찰하였으며, CF8M 및 용가재 부분은 HCl(15mL)+$HNO_3$(5mL) 용액에서 약 10초간 에칭 후 조직관찰을 수행하였다.[7] 건전재 및 열화재에 대하여 모재, 용착부 및 열영향부(heat affected zone, HAZ)에서 관찰한 현미경 조직사진은 Fig. 1에 나타나 있으며, (a)는 건전재, (b)는 300시간

**Table 1** Welding conditions for dissimilar materials(CF8M and SA508 cl.3)

| Filler metal | Process | Current (A) | Arc voltage(V) | Preheat temp.(℉ | Interpass temp.(℉ | Travel speed (cm/min) | Heat input (KJ/cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ER309L | GTAW | DC-210 | 13 | 255 | 260-328 | 13.65 | 20 |
| ER308L | SMAW | DC-210 | 13 | 255 | 259-324 | 13.65 | 20 |

**Table 2** Chemical compositions of CF8M, SA508 cl.3, ER308L and ER309L

| Material | Element spec. | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | Si | Mn | P | S | Mo | Ni | Cr | Cu | V | Ti | Cb+Ta | N | Fe |
| ER309L | 0.019 | 0.38 | 2.25 | 0.017 | 0.001 | 0.11 | 13.67 | 23.50 | 0.14 | 0.07 | 0.008 | 0.008 | 0.060 | Rem |
| ER308L | 0.014 | 0.36 | 2.02 | 0.022 | 0.015 | 0.21 | 9.68 | 19.70 | 0.42 | 0.07 | 0.008 | 0.010 | 0.015 | Rem |
| CF8M | 0.057 | 1.28 | 0.906 | 0.032 | 0.019 | 2.17 | 9.360 | 18.46 | - | - | - | - | - | Rem |
| SA508 cl.3 | 0.19 | 0.08 | 1.35 | 0.006 | 0.002 | 0.51 | 0.082 | 0.17 | - | - | - | - | - | Rem |

열화재, (c)는 1800시간 열화재에 대하여 각각 나타낸 것이다.

CF8M 스테인리스강 모재 및 열영향부는 2상 스테인리스강으로써 오스테나이트 기지(흰부분) 내에 페라이트상(검은부분)이 내재하는 2상을 볼 수 있으며, 열화시간이 길어길수록 존재하는 페라이트상이 조대해져 그 양이 증가함을 알 수 있다. 또한 페라이트상과 구별되는 탄화물의 흔적도 관찰되고 있다. CF8M의 열영향부에 존재하는 페라이트상은 모재에 비해 그 양이 많음을 볼 수 있으며, 이러한 현상이 기계적 성질에 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다.

308L 용가재의 경우, 흰 부분인 오스테나이트 기지 내에 검은 부분인 페라이트가 보이고 있으며, 용융됨으로 인하여 조직이 CF8M에 비해 매우 미세하다. 스테인리스강의 거동과 마찬가지로 열화시간이 길어짐에 따라 오스테나이트의 양이 상대적으로 감소하는 것을 알 수 있다.

SA508 cl.3의 열영향부 및 모재의 경우, 페라이트 래스(lath) 내에 미세한 탄화물이 방향성을 가지고 배열된 베이나이트 조직을 이루고 있다. 조대한 탄화물들이 결정립과 래스(lath) 경계를 따라 석출되어 있다. SA508 cl.3의 용접시 용접 HAZ에서는 결정립 조대화, 탄화물 석출, 마르텐사이트의 생성 등과 같은 미세조직적 변화가 야기되어 파괴인성이 현저히 감소된다고 알려져 있으나,[8,9] 열화시간에 따른 조직의 변화가 그리 두드러지지 않게 나타나고 있음을 알 수 있다.

3.2 탄소성 파괴인성특성

본 실험에 사용된 탄소성 파괴인성 시험편은 ASTM E813-87[10]에 따라 두께(B) 25mm를 기준으로 하는 CT 표준시험편(compact tension specimen)을 제작하여 시험을 수행하였다.

탄소성 파괴인성시험은 단일 시험법 중 제하 컴플라이언스(unloading compliance)법을 이용하였

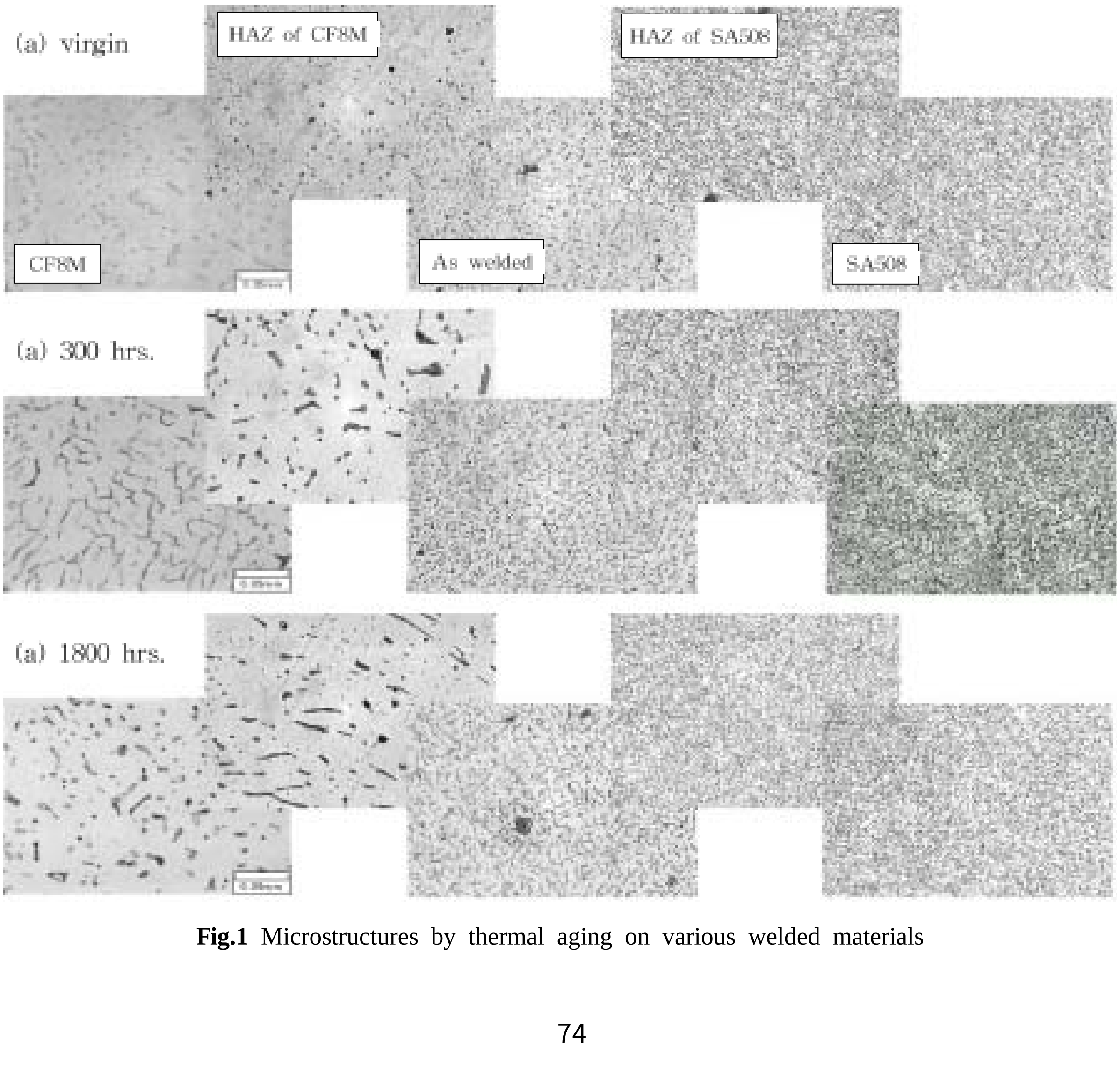


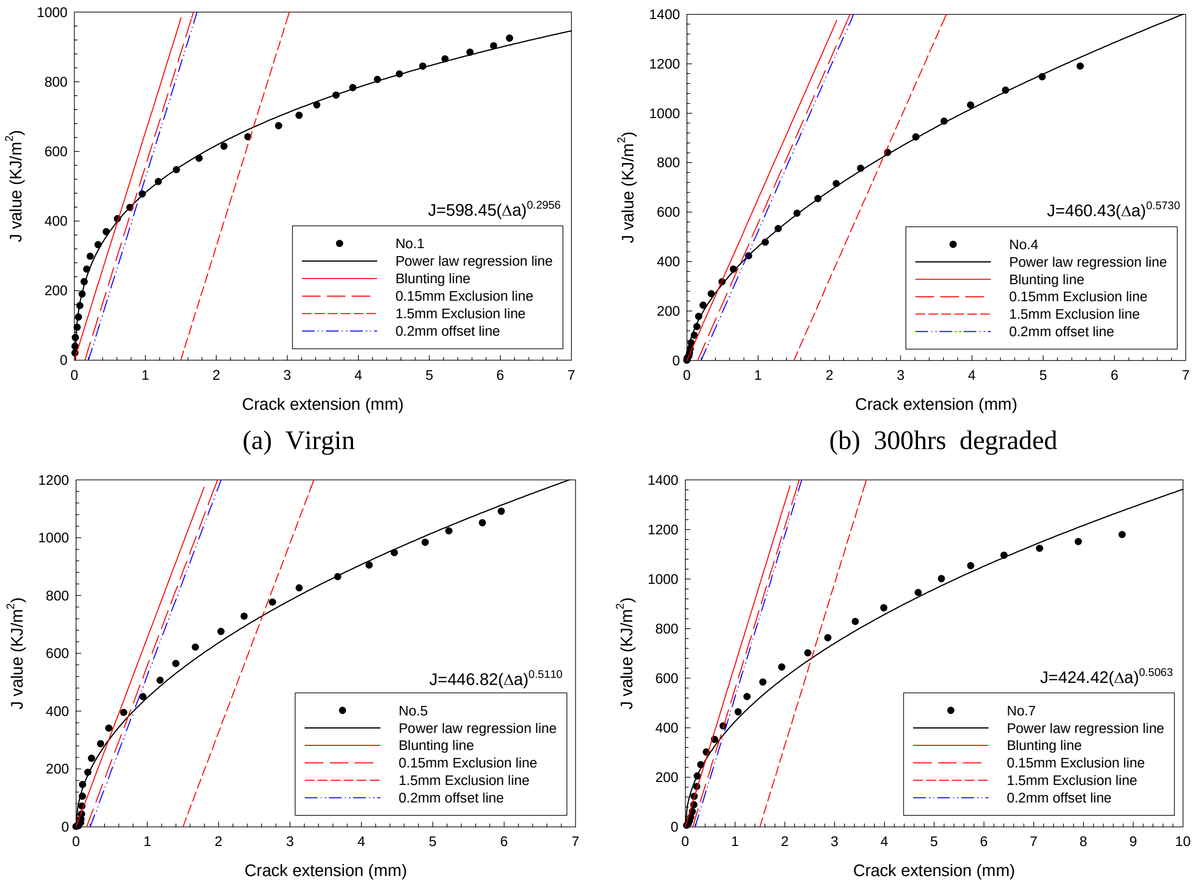

**Fig.1** Microstructures by thermal aging on various welded materials

으며,[11] 이 때 얻은 하중-하중선변위로부터 J값을 얻어 power law regression법으로 curve fitting 후 최종적으로 $J_{IC}$값을 산출하였다.

사용된 재료는 이종용접재의 건전재, 430℃ 300시간 열화재, 1800시간 열화재 및 3600시간 열화재의 4종류이며, 각 종류별로 2개씩 가공하여 실험을 수행하였다. 이 때, 노치 위치는 경도 및 인장에 관한 선행 연구결과, 열화의 영향을 많이 받아 가장 취약하다고 사료되는, CF8M의 열영향부를 선정하여 가공하였다.

이종 용접재의 건전재, 430℃ 300시간 열화재, 1800시간 열화재 및 3600시간 열화재에 대하여 $J_{IC}$값을 결정한 결과 중 작은 값을 각각 Fig. 2에 나타내었다. 그 결과, $J_{IC}$값은 건전재의 경우 각각 468.34 kJ/m$^2$ 및 476.14 kJ/m$^2$, 430℃ 300시간 열화재의 경우 418.60 kJ/m$^2$ 및 417.92 kJ/m$^2$, 430℃ 1800시간 열화재의 경우 403.81 kJ/m$^2$ 및 407.85 kJ/m$^2$, 430℃ 3600시간 열화재의 경우 374.55 kJ/m$^2$ 및 388.56 kJ/m$^2$로 나타났다.

이들 결과로부터 열화시간이 진행됨에 따른 $J_{IC}$값의 변화 특성을 Fig. 3에 나타내었다. 그 결과, $J_{IC}$값은 430℃에서 열화시간이 300시간까지는 급격히 감소하였으며, 그 후 열화시간이 진행됨에 따라 조금씩 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 CF8M 모재의 열화정도에 따른 탄소성 파괴인성의 변화 추이를 검토한 선행 연구결과,[12] 즉 열화시간이 진행됨에 따라 $J_{IC}$값의 감소가 나타나는 것과 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 조직관찰에서 나타난 바와 같이, CF8M 모재와 열영향부에서 열화시간이 증가함에 따라 페라이트상이 차지하는 면적이 증가하여 상대적으로 재료의 인성이 감소한 결과 때문으로 생각된다. 선행 연구에서 나타난 CF8M의 열화에 따른 $J_{IC}$값의 감소폭보다 용접부에서 더 작게 나타난 것은, CF8M 열영향부에 보이고 있는 페라이트상의 분포양상이 모재에 비해 상대적으로 좁은 영역으로 집중되어 탄소성 파괴인성특성에 영향을 준 때문으로 사료된다.




(a) Virgin (b) 300hrs degraded

(c) 1800hrs degraded (d) 3600hrs degraded

**Fig. 2** Determination of $J_{IC}$ values for virgin and degraded specimens

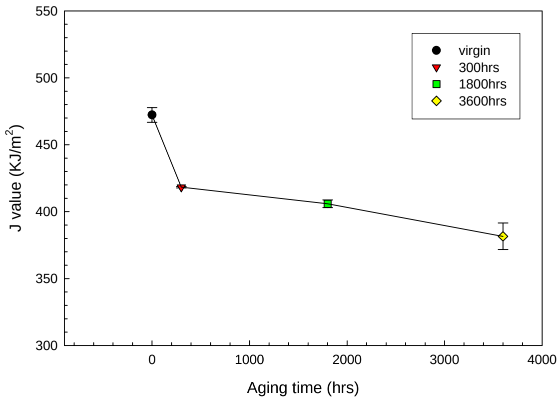



**Fig. 3** Change of $J_{IC}$ as increasing of aging time

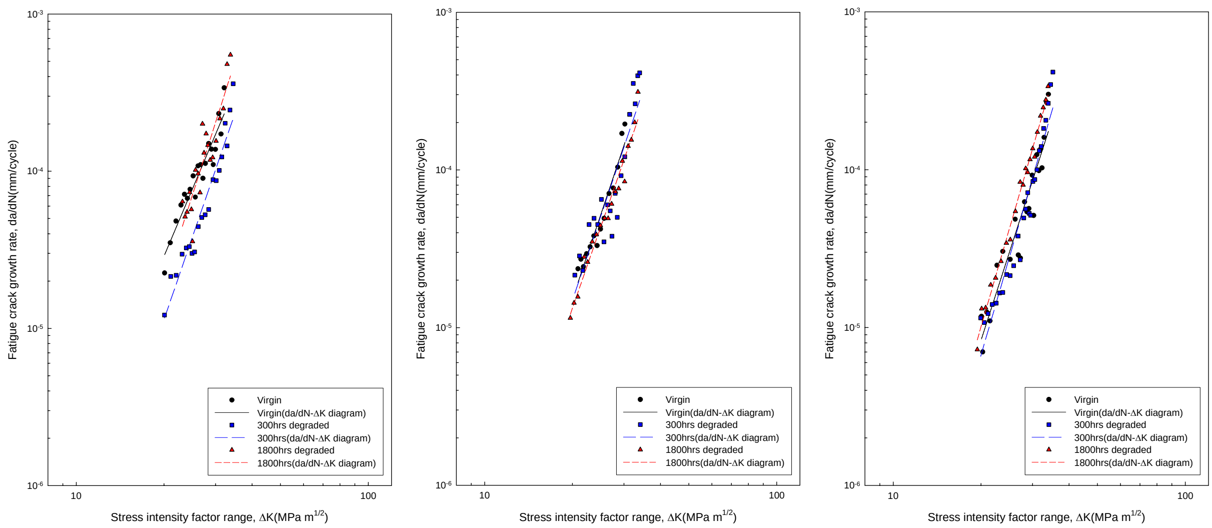
3.3 피로균열진전특성

피로균열진전시험에 사용된 재료는 이종 용접재의 건전재, 430℃에서 300시간 열화재 및 1800시간 열화재를 사용하였다. 본 시험에 사용된 중앙균열 시험편(center crack tension: CCT)은 두께 3 ㎜, 길이 160 ㎜, 폭 30 ㎜이며, 중앙노치의 피로균열발생 특성에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 먼저 센터드릴로 중앙에 홀(hole)을 뚫은 후 방전가공으로 인공노치길이, 2a=6.6 ㎜, 곡률반경, ρ=0.2 ㎜로 일정하게 가공하였다. 이 때, 노치 부분은 이종 용접재의 용가재 부분과 CF8M의 HAZ 및 SA508 cl.3의 HAZ에 위치하였다. 그리고 각 시험편을 구별하기 위하여 노치 위치에 따라 각각 "중앙부(center)", "CF8M의 열영향부(HAZ of CF8M)" 및 "SA508 cl.3의 열영향부(HAZ of SA508 cl.3)"로 명명하였다. 시험조건은 응력비, R=0.05의 사인파형, 인장-인장 하중형태를 채택하였고, 주파수는 10Hz로 일정하게 하였다.

균열진전속도는 H.Tada의 응력확대계수범위의 식(13)과 시컨트법(secant method)(14)에 따라 구하였다. Fig. 4(a)는 노치부분이 용가재에 들어간 경우이고, Fig. 4(b)는 CF8M의 HAZ에 들어간 경우이며, Fig. 4(c)는 SA508 cl.3의 HAZ에 들어간 경우 건전재와 열화재에 대해 da/dN-ΔK의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 4로부터 $da/dN=C(\Delta K)^m$ 관계(15)에서 나타나는 피로균열진전상수, C 및 피로균열진전지수, m은 최소자승법을 이용하여 구하였다.

노치 위치에 따른 세 종류의 시험편에 대한 피로균열진전시험결과, m값은 "SA508 cl.3 열영향부"에서 가장 크게 나타났다. 또한, 열화에 따른 m값의 차이는 "중앙부", "SA508 cl.3 열영향부", "CF8M 열영향부" 순으로 크게 나타났으며, 이는 열화가 진행됨에 따라 열영향부의 재료물성치가 취약해지기 때문으로 생각된다.

피로균열진전상수(C)의 경우, "SA508 cl.3 열영향부"에서 가장 작은 값을 나타났으며, 열화가 진행됨에 따라 C값의 감소현상이 나타나고 있으며, 세 종류의 시험편에서 이러한 C와 m값은 300시간 및 1800시간 열화재에서 근소한 차이를 나타냈으며, 탄소성 파괴인성결과와 일치함을 알 수 있다.




(a) "center" (b) "HAZ of CF8M" (c) "HAZ of SA508 cl.3"

**Fig. 4** ΔK-da/dN diagram

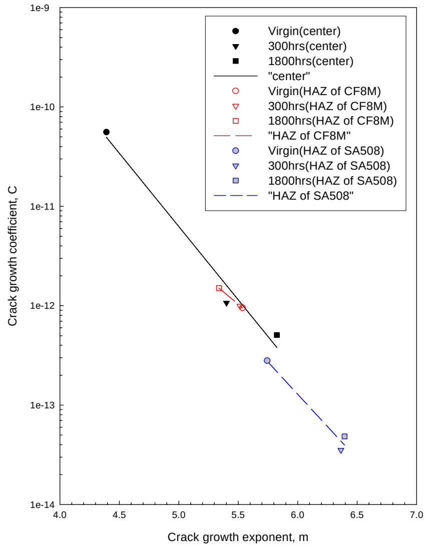



**Fig. 5** Plots of *C* and *m* using Paris law

Fig. 5는 재료가 430℃에서 열화가 진행됨에 따라 피로균열진전지수와 피로균열진전상수 사이의 관계를 반대수 그래프로 나타낸 것으로, 이종 용접재의 열화가 진행되어도 두 값들 사이에는 반대수 그래프상에서 직선적인 관계가 성립함을 알 수 있다. 이러한 C와 m 사이의 관계를 파악하면 건전성 평가를 수행함에 있어 하나의 방향을 제시할 수 있으리라 생각된다.

## 4. 결 론

CF8M과 SA508 cl.3 이종재 용접부의 선행 연구(경도, 인장, 충격시험) 결과, 열화에 따른 기계적 물성치의 저하는 CF8M의 열영향부에서 상이한 양상이 나타났으며, 두 재료간 서로 다른 기계적 성질로 인해 열영향부의 거동이 파괴인성 및 피로특성에 미치는 영향을 실험적으로 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 이종재 용접부에서 열화가 진행됨에 따라 가장 취약한 특성을 나타내는 CF8M의 열영향부에 노치를 가공하여 탄소성 파괴인성시험을 수행한 결과, 탄소성 파괴인성치 $J_{IC}$값은 건전재의 경우가 가장 높게 나타났고, 열화시간이 길어짐에 따라 그 값의 감소가 나타났다.

2) 용가재 부분, CF8M 및 SA508 cl.3의 열영향부에 노치를 가공하여 피로균열진전시험을 수행한 결과, 전반적으로 스테인리스강 부분으로 노치를 가공한 시험편의 피로균열진전속도가 탄소강 부분에 비해 다소 빠른 경향을 나타내었다.

## 참고문헌


(1) Robert, G.K. and Andre, G.R., 1985, "A Component Wear-out Analysis on Control Rod Drive Mechanisms," Westinghouse, Pittsburgh

(2) Ware, A.G., 1982, ASTM STP 756, p.165-189.

(3) Trautwein, A. and Gysel, W., 1982, ASTM STP 756, p.165-189

(4) Atkison, J.D. and Yu, J., 1997, Fatigue Fract Eng. Mater. Struct., 20, p.1

(5) Byrnes, M.L.G., Grujicic, M. and Owen, W.S., 1987, Acta Metal. 35(1853)

(6) Kwon, J. D., Park, J. C., Lee, Y. S., Lee, W. H.and Park, Y. W., 2000, Nucl. Eng. Des. 198, p.227-240

(7) Etchants, Metallography, Appendix-Ⅰ, p.632-645

(8) Pisarski, H.G. and Kudoh, J., 1987, Welding Metallurgy of Structural Steels

(9) Uchino, K. and Ohno, Y., 1988, Proc. 7th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Artic Engineering, Houston

(10) ASTM E 813-87, 1989, "Standard Test Method for $J_{IC}$, A Measure of Fracture Toughness"

(11) Clarke, G.A., Andrews, W.R., Paris, P.C. and Schmidt, D.W., 1976, ASTM STP 590, pp.27

(12) Kwon, J. D., Choi, S. J., Park, J. C., Ihn, J. H., 2002, "An Evaluation of Cast Stainless Steel(CF8M) Fracture Toughness Caused by Thermal Aging at 430℃," KSME International Journal, Vol.16, No.7, p.902-910

(13) Murakami, Y, 1979, Stress Intensity Factors Handbook, Vol.1, p.3

(14) ASTM E 647-88a, 1988, "Standard Test Methode for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates"

(15) Tada, H., Paris, P. C. and Irwin, G. R., 1985, "The Stress Analysis of Cracks Handbook", Paris Production Inc. and Del Research Corporation