

400°C에서 4500시간 열취화된 주조 스테인레스강 파괴 물성 실험연구

The Study on Fracture Properties of Thermal Aged Cast Austenite Stainless Steel at 400°C, 4500 hrs.

*김상재, 정일석, 이용성, 송택호, 석창성.
한전 전력연구원 +성균관대학교

요 약

공기중 실험조건에서 CF8MH(δ -ferrite: 25%), CF8ML(δ -ferrite: 10%), CF8A인 주조 스테인리스강에 대해 건전재와 열화재를 사용하여 인장실험, 파괴저항실험, 피로균열진전실험을 ASTM에 따라 실험 하였다. 실험 결과 열화재의 경우가 응력-변형을 선도, 인장강도, 항복강도, 연신율, 단면수축율이 크게 나타났으나 차이는 크지 않았다. 파괴저항 실험 결과 열화재의 파괴저항 곡선과 J_{IC} 값이 낮게 나타났다. 피로균열 진전 속도는 ΔK 15~25MPa·m^{0.5} 영역에서 건전재가 약간 빠른 균열진전특성을 보였으며, 25MPa·m^{0.5} 보다 높은 ΔK 영역에서는 건전재보다 열화재의 균열진전속도가 빨랐다.

Abstract

Tension tests, J-R fracture toughness tests, and fatigue crack growth rate(FCGR) tests of the unaged and the aged were performed by ASTM test procedure in room temperature to produce property data of CF8MH(δ -ferrite; 25%), CF8ML(δ -ferrite; 10%), CF8A(δ -ferrite; 15~17%) of Cast Austenite Stainless Steel(CASS) materials. Aged materials of yield strength, ultimate strength, elongation, reduction of area were a little higher than the unaged materials. However, the data value of the unaged and the aged is similar. In ΔK region above ΔK 25MPa·m^{0.5}, FCGR of the aged materials was getting faster than the unaged materials.

1. 서 론

원자력발전소 1차 계통 배관에는 내식성과 기계적 성질이 우수한 스테인리스강 소재를

주로 사용하고 있으며 특히 오래된 발전소인 경우 주조 오스테나이트 스테인리스강(CASS, cast austenitic stainless steel)을 많이 사용되고 있다. CASS는 가공성이 좋고 응력부식균열에 대한 뛰어난 저항성이 있으며 기계적 성질이 우수한 장점이 있다. 그러나 고온에서 장시간 사용될 경우 열취화 현상이 발생하므로 열취화 현상에 대한 정량적인 평가가 필요하다. 열취화 현상은 CASS가 고온에서 장시간 노출되었을 때 페라이트 상의 스피노달 분해(spinodal decomposition)로 인하여 Cr-rich상(α')과 Fe-rich상(α)으로 분리되어 충격강도, 파괴인성이 저하되고 강도가 증가하는 현상을 말한다. 이러한 열취화 현상은 특히 475°C에서 가장 크게 발생하는데, 경수로의 원자로냉각재 온도인 300°C 내외에서도 페라이트 함량에 따라 열취화 현상이 발생하는 것으로 보고되고 있다⁽¹⁾. 이와 같은 재료물성치의 변화는 CASS로 제작된 배관의 건전성에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 열취화에 따른 재료물성치를 정확하게 예측하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 CASS 재료인 CF8MH, CF8ML 및 CF8A에 대해 건전재와 포화 시점까지 모의 열화된 열화재에 대해 상온(RT, room temperature)에서 인장시험 및 J-R시험, 피로균열성장속도(FCGR, fatigue crack growth rate)을 수행하여 재료 물성치를 측정하고 결과를 고찰하였다.

2. 실험

2.1 실험용 주조 스테인리스강 배관재 제작

주조 오스테나이트 스테인리스강(CASS, cast austenitic stainless steel) 배관재의 실험 시편 제작용 강괴를 제작하였다. 비열화(as-received) 및 완전열화(fully aged) 조건에서의 baseline CASS 재료 물성치를 측정하기 위해 SA 351 CF8M 25% 페라이트(CF8MH), CF8M 10% 페라이트(CF8ML), CF8A를 제작하였다. 표 1과 같이 Aubrey 식에 따라 Ni, Cr, Mn, Si, Mo, C 등의 함량을 조절하였다⁽²⁾. 국내 전문제작업체에 의뢰하여 주조하였으며 1050°C에서 4시간동안 후열처리하고 급냉하였다.

피로균열진전(FCGR, fatigue crack growth rate) 실험, 인장실험, 파괴인성실험을 수행하기 위한 시편을 가공하였고 가공된 시험편은 전기로(electric furnace)에서 400°C의 온도로 가속 열화시켰다. 아레니우스 방정식에 의해 산출된 전기로에서의 열화 시간이 경과하여 포화(saturation)된 시편은 상온에서 물성치 측정 실험을 수행하였다.

표 1 주조 스테인리스강의 화학 성분(wt%)

Materials	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P	Co
CF8MH	0.04-0.06	0.6	1.2	20.0	9.0	2.5	0.02	0.03	0.04
CF8ML	0.04-0.06	0.6	0.8	19.5	11	2.5	-	-	-
CF8A	0.04-0.06	0.6	1.2	20.5	8.5	-	0.02	0.03	0.1

2.2 실험방법

(1) 인장실험

인장 시험 시험편은 ASTM E 8의 기준에 따라 환봉형으로 제작하였으며 시험편의 형상을 그림 1과 같다. 실험은 ASTM E 8과 E 21에 따라 실시하였다^(3,4). 실험장치는 25ton 용량의 전기식 재료시험시스템(Simadzu AG-25TG)을 사용하였고, 모든 시험의 제어, 데이터 처리 및 결과해석은 PC를 사용하였다.

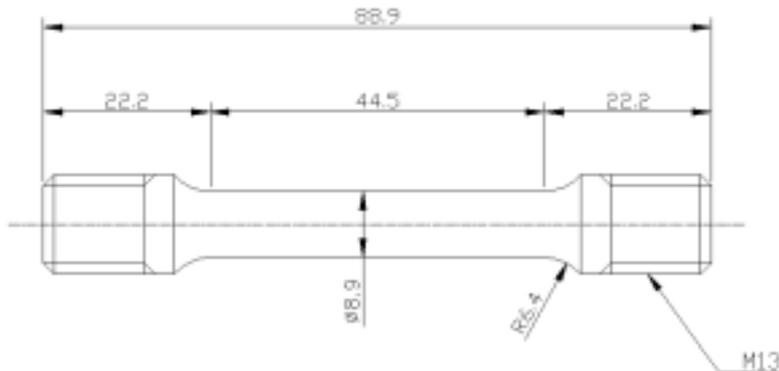


그림 1 인장실험 시험편 형상

(2) 파괴저항 실험(J-R test)

파괴저항 시험편은 ASTM E 1820의 기준에 따라 CT(compact test)형으로 제작하였으며 시험편의 형상은 그림 2과 같다⁽⁵⁾. 시험편에 a/W 가 0.55가 되도록 피로예비균열을 만든 후 ASTM E 1820에 따라 균열이 직진하도록 시험편두께(B)의 양면에 10%씩 side groove 가공을 하였다. 25ton 용량의 전기유압식 재료시험시스템(INSTRON model 1332)을 사용하여 ASTM E 1152에 따른 단일 시험편 J-R 시험 방법으로 실험 하였다⁽⁶⁾.

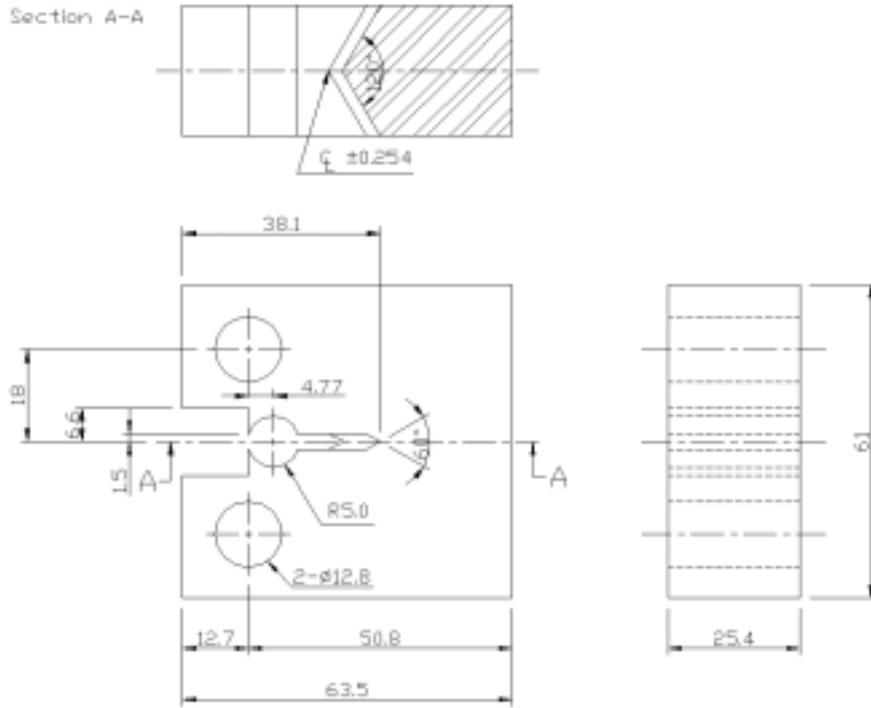


그림 2 J-R 실험용 CT 시편

(3) 피로 균열진전 실험

피로 균열 진전 시험 시험편은 ASTM E 647-95⁽⁷⁾에 근거하여 1T-CT 시험편을 준비하였다. 시편의 형상은 그림 3과 같다. 피로균열진전실험은 ASTM E 647에 의거하여 실험했으며, 실험장비는 MTS를 사용하였다.

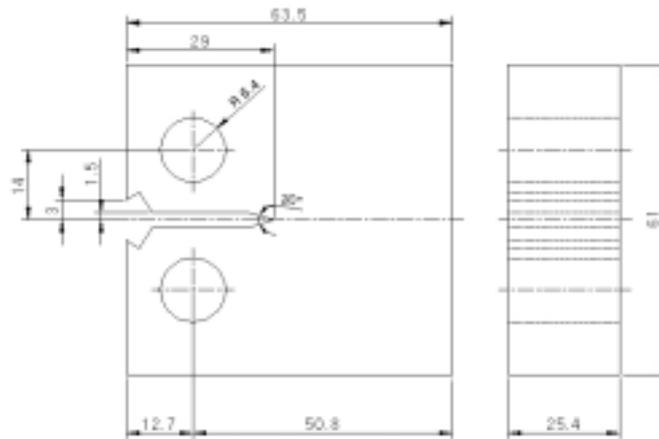


그림 3 피로균열진전 실험 시편 규격

3. 실험결과

인장실험 결과

건전재, 열화재 재료에 대해 다음과 같은 인장실험 결과를 얻었다. 항복 강도, 인장 강도, 연신율 및 단면 수축률을 표 3과 4에 정리하였다.

표 3 건전재 인장실험 결과

Material	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Ramberg-Osgood Parameters		Elongation (%)	Reduction of Area (%)
			a	n		
CF8MH	318.0	590.7	4.69	5.17	45.2	57.7
	264.8	550.0	3.33	5.41	61.4	61.7
CF8ML	302.1	598.9	3.09	5.51	57.5	59.5
CF8A	272.3	684.5	2.24	4.73	49.6	47.5
	274.6	689.0	3.64	4.30	56.1	57.2

표 4 열화재 인장실험 결과

Material	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Ramberg-Osgood Parameter		Elongation (%)	Reduction of Area (%)
			a	n		
CF8MH	288.0	610.0	2.08	5.38	53.5	66.5
	244.0	584.4	1.14	5.50	53.5	65.2
CF8ML	434.5	754.4	1.16	5.99	27.2	38.7
	268.6	591.6	1.62	5.52	43.5	56.6
CF8A	282.9	709.5	2.09	4.47	58.3	58.6
	250.5	729.1	1.57	4.41	54.3	48.3

그림 4는 건전재 인장실험 결과를 나타내었다. CF8A 재료에서 인장응력이 높게 나타났고 CF8MH와 CF8ML은 비슷한 값을 보이고 있다. 열화재 인장실험 결과는 그림 5에 나타내었다. 건전재와 마찬가지로 CF8A의 경우가 다른 재료에 비해 가장 높은 인장응력 값을 보였다. CF8MH와 CF8ML는 비슷한 경향을 보이지만 CF8ML의 경우 시험편에 따라 실험결과의 편차가 심하게 나타났다.

건전재와 열화재의 인장실험 결과를 비교하면, 전체적으로 열화재의 경우가 높은 응력-변형을 선도를 보이고 있으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

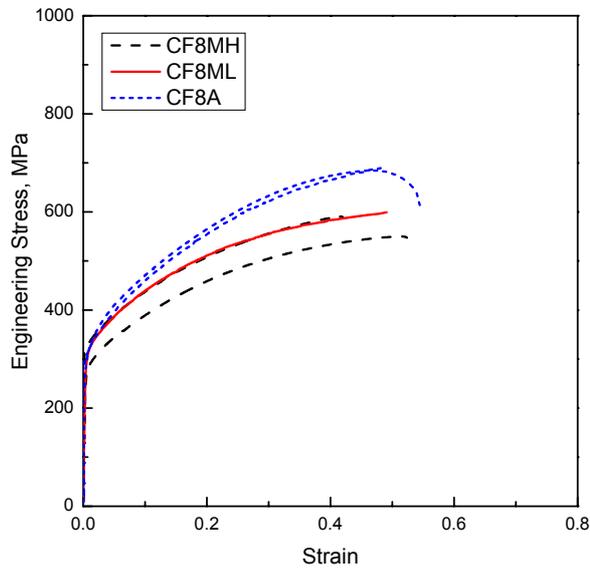


그림 4 건전재별 응력-변형률 곡선 비교

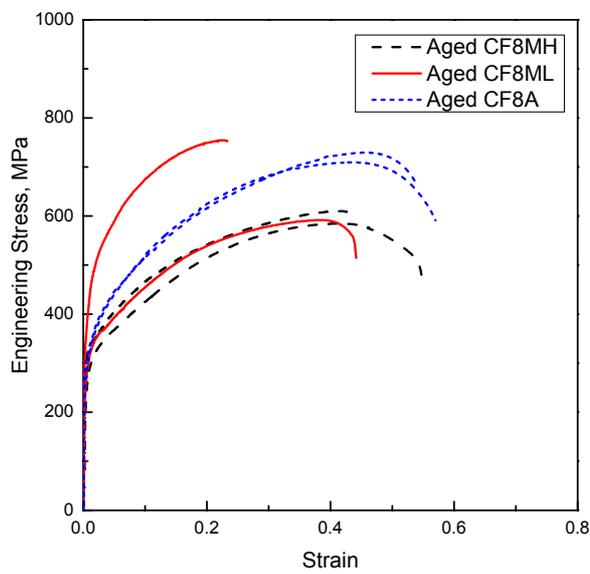


그림 5 열화재별 응력-변형률 곡선 비교

그림 6는 건전재와 열화재의 인장 강도와 항복 강도를 비교하여 나타내었다. 전체적으로 건전재와 열화재의 강도 차이는 나타나지 않고 있으나 인장 강도의 경우에는 열화재가

다소 크게 나타나고 있으며 CF8ML의 경우에는 열화재의 편차가 크게 나타나고 있다. 그림 7에는 3가지 재료에 대해서 건전재와 열화재의 연신율과 단면수축율을 비교하여 나타내었다. 연신율의 경우에는 열화재와 건전재의 차이가 나타나지 않았으며 단면 수축율의 경우에는 열화재의 경우가 미소하게 크게 나타났으나 뚜렷한 경향은 나타내지 않고 있다.

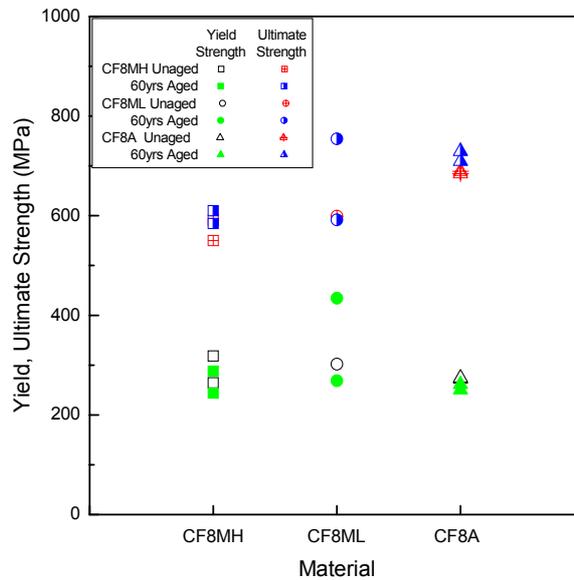


그림 6 재료별 인장, 항복강도의 열화 영향

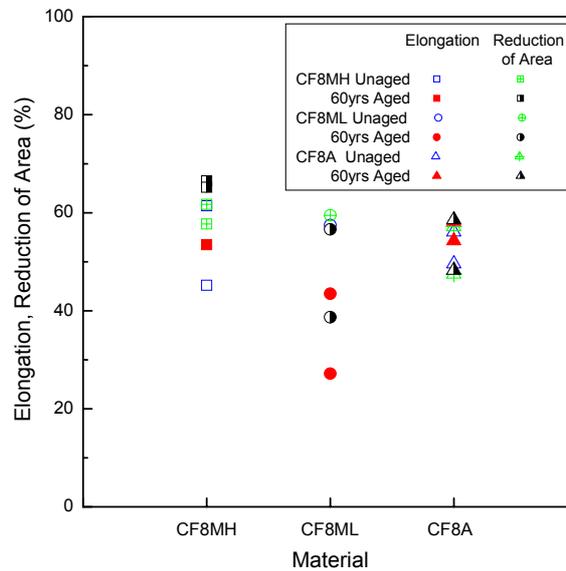


그림 7 연신율, 단면 수축율의 열화 영향

파괴저항(J-R) 실험

건전재 및 열화재 J-R 실험 결과를 표 6. 7에 정리하였다. 건전재 CF8ML은 균열 진전이 충분하지 못하여 곡선의 식을 얻을 수 없었다.

표 6 건전재 J-R 실험결과

Materials	Young's Modulus (MPa)	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	J _{IC} (kJ/m ²)	C ₁ (kJ/m ²)	C ₂
CF8MH	176080	291.4	570.4	674.5	680.0	0.456
				407.7	476.7	0.525
CF8ML	176080	302.1	598.9	1525.1	-	-
CF8A	176080	257.7	686.8	919.7	852.6	0.475
				762.4	760.0	0.444

표 7 열화재 J-R 실험결과

Material	Young's Modulus (MPa)	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	J _{IC} (kJ/m ²)	C ₁ (kJ/m ²)	C ₂
CF8MH	176080	266.0	567.0	176.2	247.9	0.393
				102.1	167.5	0.446
				178.5	245.2	0.356
CF8ML	176080	351.6	673.0	552.5	644.8	0.516
				1015.0	841.0	0.508
CF8A	176080	256.0	719.3	628.7	672.0	0.394
				486.7	609.8	0.631

그림 8에는 건전재에 대해 파괴저항 실험결과를 모두 나타내었다. CF8ML 재료의 경우가 가장 높게 나타나고 있고 CF8MH 재료의 경우가 가장 낮게 나타났다. 열화재의 파괴저항 실험결과는 그림 9에 나타내었다. CF8MH의 경우 다른 재료에 비해 현저하게 낮은 파괴저항 곡선을 보인다. CF8A와 CF8ML는 비슷하지만 CF8ML의 경우가 건전재의 결과와 같이 다소 높게 나타났다. 건전재와 열화재를 비교하면, 전체적으로 열화재의 파괴저항 곡선이 건전재의 파괴저항 곡선에 비해 낮게 나타나고 있다. CF8MH 재료의 경우에는 다른 재료에 비해 그 차이가 현저하게 크게 나타난다.

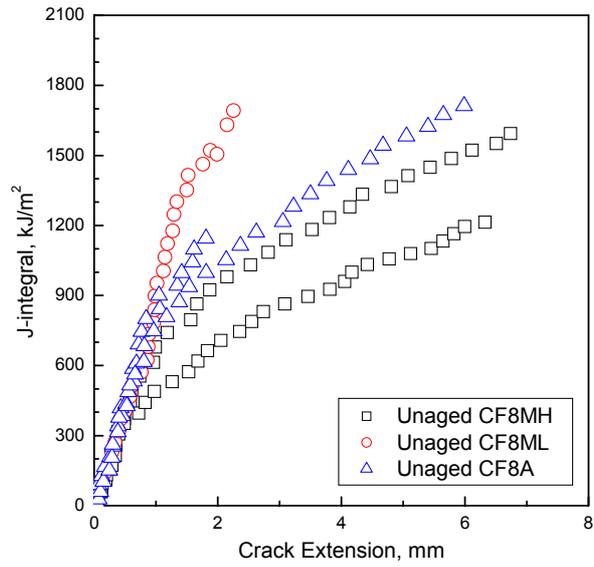


그림 8 건전재 J-R 곡선

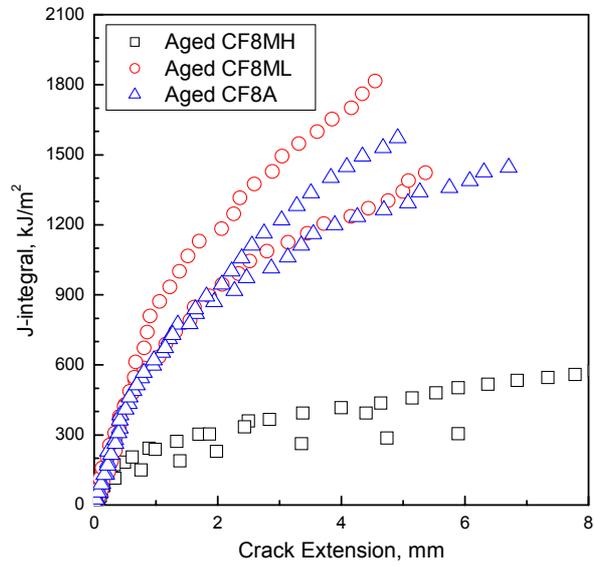


그림 9 열화재 J-R 곡선

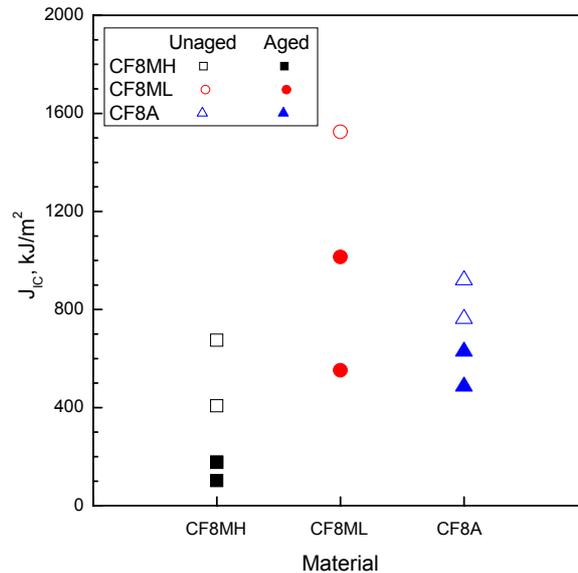


그림 10 주조 스테인리스강 재료별 열화가 J_{IC}에 미치는 영향

그림 10에는 3가지 재료에 대해서 건전재와 열화재의 J_{IC} 값을 비교하여 나타내었다. 전체적으로 건전재의 J_{IC} 값이 열화재에 비해 크게 나타나고 있어 열화에 따라 균열 진전 개시점의 J-적분 값이 낮아지고 있음을 알 수 있다. 재료별로는 CF8ML의 J_{IC} 값이 건전재와 열화재 모두 가장 높게 나타났으며 CF8MH의 J_{IC} 값이 건전재와 열화재 모두에서 가장 낮게 나타났다.

피로 균열진전 실험

피로균열 진전 시험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 계산된 C, m 값을 표 9에 정리하였으며 실험 결과로 산출된 $da/dN - \Delta K$ 선도를 그림 11에 나타내었다.

그림 11은 공기중 조건에서 CF8MH(δ -ferrite; 25%)와 CF8A(δ -ferrite; 15~17%)인 주조 스테인리스강에 대해 건전재와 열화재를 비교하여 나타낸 것이다. 건전재의 경우, CF8MH와 CF8A는 파괴인성이 높아 균열진전을 감속시키는 역할을 하는 오스테나이트와 취성특성을 갖는 페라이트의 함량차이로 인해 불연속적인 균열진전성장에 있어 페라이트 함량이 높은 CF8MH의 경우가 약간 빠른 균열진전특성을 보여주고 있다.

그러나 장시간 가속 열화되어 열취화 특성을 나타내는 CF8MH와 CF8A는 거의 유사한 균열진전특성을 보여주고 있다. 이것은 fully aged된 재료 내에 페라이트와 오스테나이트의 금속적 특성이 유사한 취성특성을 보여준다는 것을 알 수 있다. 공기중 조건의 CF8MH와 15~25MPa·m^{0.5} 정도에서는 열취화된 CF8MH와 CF8A가 유사한 균열진전속도

를 나타내지만 Paris's law에 의한 m 값으로 비교하면 빠른 동일 ΔK 영역에서 da/dN 의 가속도는 높다는 것을 의미하여 $25\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 보다 높은 ΔK 영역에서는 건전재보다 열화재가 균열진전속도가 가속화됨을 알 수 있다.

표 9 피로 균열진전 실험결과

Aging Time (Years)	Specimens	C	m
Unaged	CF8A	3.80E-13	5.75
	CF8MH	4.80E-11	4.48
Aged	CF8A	1.88E-13	6.27
	CF8MH	8.64E-12	5.17

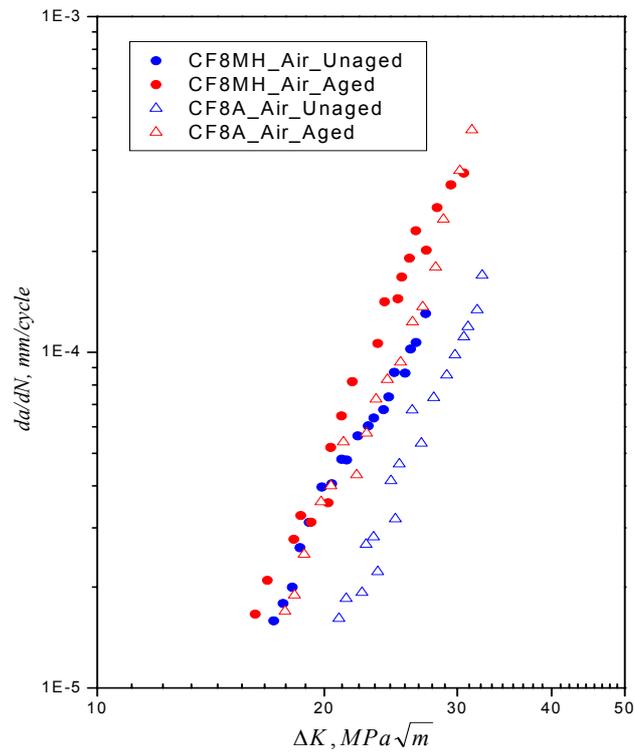


그림 11 $da/dN - \Delta K$ 선도

3. 결론

공기중 실험조건에서 CF8MH(δ -ferrite; 25%), CF8ML(δ -ferrite; 10%), CF8A(δ -ferrite; 15~17%)인 주조 스테인리스강에 대해 건전재와 열화재를 사용하여 인장실험, 파괴저항실험, 피로균열진전실험을 한후 다음과 같은 결과들 얻었다.

CF8A 재료에서 인장응력이 높게 나타났고 CF8MH와 CF8ML은 비슷한 값을 보였다. 그러나 건전재와 열화재를 비교하면 열화재의 경우가 높은 응력-변형률 선도, 큰 인장강도, 비슷한 항복강도 및 연신율, 큰 단면수축율을 보이고 있으나 그 차이는 크지 않았다.

전체적으로 열화재의 파괴저항 곡선이 건전재의 파괴저항 곡선에 비해 낮게 나타나고 있다. CF8MH 재료의 경우에는 다른 재료에 비해 그 차이가 현저하게 크게 나타났다. J_{IC} 값은 건전재의 J_{IC} 값이 열화재에 비해 크게 나타났고 재료별로는 CF8ML의 J_{IC} 값이 건전재와 열화재 모두 가장 높았으며 CF8MH의 J_{IC} 값은 건전재와 열화재 모두에서 가장 낮게 나타났다.

건전재의 경우, CF8MH의 경우가 약간 빠른 균열진전특성을 보이며, 장시간 가속 열화된 CF8MH와 CF8A는 유사한 균열진전특성을 보였다. $15\sim 25\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ ΔK 영역에서는 건전재의 경우가 약간 빠른 균열진전특성을 보이며, $25\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ 보다 높은 ΔK 영역에서는 건전재보다 열화재가 균열진전속도가 가속화되었다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 중장기 계획사업 중 원전 주기적 안전성 평가 기술개발(대과제)의 세부과제인 경년열화 손상관리 적용기술 개발의 일환으로 수행되었습니다.

4. 참고문헌

- [1]. H. M. Chung, "Aging and Life Prediction of Cast Duplex Stainless Steel Components," Int. J. of Pressure Vessel and Piping, Vol. 50, pp.179~213, 1992
- [2]. ASTM STP 756, "Ferrite Measurement and Control in Cast Duplex Stainless Steel" pp.126~164, American Society for Testing and Materials
- [3]. ASTM E 8, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," American Society for Testing and Materials
- [4]. ASTM E 21, "Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials," American Society for Testing and Materials
- [5]. ASTM E 1820, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness,"

American Society for Testing and Materials

- [6]. ASTM E 1152, "Test Method for Determining J - R Curves," American Society for Testing and Materials
- [7]. ASTM E 647, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rate," American Society for Testing and Materials