

열화재 용접부의 강도평가에 관한 연구

정의정*, 윤한용**, 임명환***, 김태식****

A Study on the Strength Evaluation of Welded Joints for Degraded Material

Ui Chung Chung*, Han Yong Yoon**, Myung Hwan Im***, Tae Sik Kim****

ABSTRACT

Welding is used not only for the shipbuilding, but also for the repairing of ships. While repairing of ships, it is inevitable to weld new materials with degraded materials. In this case, it is predicted that the strength of both the sections is not identical each other. In this study, the respective welded joints in terms of mechanical properties such as microstructure, mechanical strength and fatigue crack propagation, with the component obtained from the barge used for a long-term period, were analyzed. It was found that the material degradation had a significant effect on the welded joints. The fatigue crack propagation in welded sections showed a big difference. The rate of fatigue crack growth of degraded material for both heat affected zone and parent metal was faster than that of new material. By contrast, the result from identical materials showed that the rate of fatigue crack growth of the heat-affected zone was slower than that of parent metal.

Key Words : New material (신재), Degraded material (열화재), Welded joints (용접부), Fatigue crack propagation (피로균열전파), Heat affected zone (열영향부), Parent metal (모재)

기호설명

a = crack length B = specimen thickness
C = compliance E = elastic modulus
 ΔK = stress intensity factor range
da/dN = crack growth rate
 ΔP = load range W = specimen width

1. 서론

용접은 기계구조물이나 건축구조물의 접합이나

체결의 수단으로서 많이 사용하는 방법 중의 하나이다. 특히, 선박구조물은 구조의 약 60% 이상이 용접에 의해 연결되어 있으며, 용접부의 작업에 대한 검사도 상당히 까다롭다.^[1] 또한 용접은 새 선박의 건조에만 이루어지는 것이 아니라 사용 중인 선박의 보수에도 사용되고 있음은 자명한 사실이다. 사용 중인 선박의 보수 시, 용접은 열화재와 신재의 용접이 불가피하며, 이 경우의 강도는 신재와 신재의 용접부의 강도와는 동일하지 않을 가능성이 높을 것으로 예상된다. 현재까지의 연구는 대개의 경우 신재와 신재의 용접부 강도에 관한

☞ 2002년 1월 17일
* 목포대학교 기계공학과 대학원
** 목포대학교 기계공학과
*** 목포해양대학교 실습선
**** 동아인재대학교

것이며, 또한 열화재의 용접 특성을 연구한 예로는 열화재의 신뢰성 및 열화정도의 평가 기준 등의 모호함으로 인하여 인공열화된 재료의 용접 특성에 관한 연구 정도로 그치고 있다. 그 결과, 신재와 열화재의 용접에 관한 연구는 전무하거나 거의 눈에 띄지 않는 실정이다. 하지만 현재 국내의 많은 중대형 조선소에는 기존의 선박을 개조하거나 보수하는데 있어서 신재와 열화재를 용접하고 있고, 이와 관련된 데이터의 필요성이 인식되고 있다. 최근 열화재에 대한 국내외적인 연구는 주로 원자력 발전과 화력 발전 시스템내의 고온 고압에서 사용되는 재료에서부터 반도체, 그리고 고분자 재료 등 비철금속에 이르기까지 다양한 분야에서 활발히 진행되고 있다.^{[2]-[3]} 이처럼, 상대적으로 고온, 고압설비에서의 열화연구에 비해 일반 구조물이나 선박 등 기계장치의 용접부에 대한 열화현상 연구는 미흡하다. 본 연구에서는 공시재료로서 실제 선박에서 약 15년 이상 사용한 것으로 열화재(degraded material)로 명명하며, 동일한 재질의 신재(new material)와 용접한 다수의 시험편을 제작하여 신재만으로 용접한 시험편과 강도 특성을 비교 평가하고자 하는 데에 그 목적을 두고 있다. 먼저 선령이 15년 이상이 된 바지(barge)선의 외장판을 수거하여 미세조직관찰 및 경도시험 등을 행한 후 동일 재질의 신재를 용접하여 인장강도 및 피로균열진전시험을 행하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편 및 재료

본 시험에 사용한 재료는 선박용 외장으로 많이 사용되는 압연강재(재료기호: RD)를 열화재로 선택하였다. 신재는 열화재와 완전히 동일한 재료를 구하기 어려우므로 성분표를 비교 분석하여 비교적 원재료에 가까운 재료를 선정하였다. Table 1에 열화재의 화학적 조성을 나타내었고 Table 2에 신재의 화학적 조성을 나타내었다. 또한 Table 3에 실험재료의 기계적 성질을 나타내었다. 채취된 열화재의 표면은 UTM(Ultrasonic Thickness Meter)을 이용하여 열화정도를 두께 감소로 측정된 결과 제조 당시 공칭두께가 12mm 인데 비해 부식에 의해 약 1mm 이상의 두께감소를 보였다. 시험편의 용접은 열화재료의 노후 및 부식에 의한 두께 감소로 인하여 표면을 두께가 10mm로 가공 후 선급에

서 준하는 Fig. 1 과 같은 V 형 그루부(groove)로 가공하여 동일 두께의 신재와 맞대기 용접을 실시하였다. 용접방법은 한국 선급 및 강선규칙 제 2 편 재료 및 용접편에 의거하여 맞대기 이음으로 GMA(gas metal arc)용접을 이용하여 반자동용접을 실시하였다. Table 4 에 용접조건을 나타내었다.

시험편의 제작은 인장시험편 피로시험편 그리고 경도시험편 및 표면조직 부식시험편을 다수 제작하였으며 인장시험편의 경우는 선급(선급 및 강선규칙 제 2 편 재료 및 용접편)에서 규정하는 기호 R2A 호로 판의 맞대기 용접 인장시험편으로 제작하였다.

Table 1 Chemical composition of degraded material(%)

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.22	0.086	0.6	0.077	0.017	0.028

Cr	Ni	Mo	Al	Nb	V	Ti
0.00	0.01	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00
27	8	18	8	5	3	72

Table 2 Chemical composition of new material

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.23	0.069	0.64	0.0027	0.0008	0.021

Cr	Ni	Mo	Al	Nb	V	Ti
0.00	0.01	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00
27	8	53	1	5	18	72

Table 3 Mechanical properties of RD steel (MPa)

Yield stress	Tensile strength	Elongation(%)
235 이상	400 ~ 520	22 이상

Table 4 Welding condition

Welding material	Pass	Current	Voltage	Speed (Cm/min)
Wire (φ 1.4) Shielding gas (CO ₂)	1	240	40	25
	2	240	40	24

피로시험편은 ASTM E647 에 의거하여 CT (Compact Tension) 시험편으로 제작하였으며^[4] 시편의 노치중앙의 위치는 Fig. 2 처럼 각각 신재 및 열화재의 열영향부(HAZ), 용착부 등에 위치하도록 하였다. 시편의 표면은 가공시 용접잔류응력의 이완을 고려하여 습식으로 기계가공하였다 그리고 각각 시편의 중심부의 노치의 생성은 지름이 0.1mm 와이어(wire)를 이용하여 와이어방전가공을 한 후 예크랙(pre-crack)을 발생시켰다.

2.2 실험장치

경도시험은 자동미소비커스 경도기를 이용하였으며 표면을 경면처리후 0.25mm 간격으로 압입하중을 1kgf 로 측정하였으며 재료의 미세조직관찰은 질산과 메탄올을 각각 5cc:100cc 로 혼합한 부식액을 탈지면에 흡수시켜 시험편을 부식 시킨 다음 각각 열화재와 신재의 모재부와 HAZ 를 광학현미경을 통해 관찰하였다. 인장시험은 만능인장시험기로 변위제어방식을 이용하였으며 본 시험기는 시험편의 착탈을 제외하고는 모든 실험의 제어 및 결과값의 산출도 컴퓨터에 내장된 프로그램에 의해 자동으로 제어된다. 피로균열진전시험은 전기유압서보 피로시험기를 이용하였으며 응력비 R=0.1, 주파수 15Hz, 하중폭 7680N 에서 실시하였다. 본 실험기는 이중폐회로식 제어를 이용하

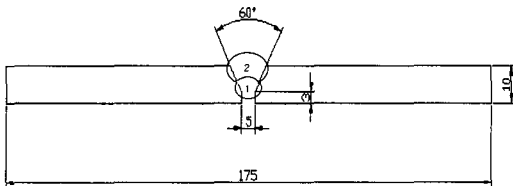


Fig. 1 Configuration of butt welding specimen

여 설정하중과 수시로 검출되는 로드셀의 신호를 제어기내의 A/D 변환기를 통해 다양한 데이터를 처리할 수 있다. 균열길이의 측정은 시험편에 부착된 클립게이지(Clip gage)를 통하여 크랙개구변위 (Displacement of crack opening)를 측정하였고 이 변위와 하중신호로 컴플라이언스(Compliance)를 환산하는 방식을 채택하였다. 크랙길이는 예크랙(Pre-crack)의 효과를 고려하여 1mm 진전한 후 기록을 시작하였으며 측정간격은 0.3mm 진전할 때마다 측

정하였다. 본 실험은 시험편의 착탈을 제외하고는 하중의 제어, 크랙길이의 측정 등이 본 PC 내의 프로그램으로 인하여 모두 자동으로 측정된다. 실험의 결과치는 응력확대계수폭 ΔK 와 크랙진전속도 da/dN 으로 정량화 시키기 위한 다음식^[5]에 의해 ΔK 를 산출하였다.

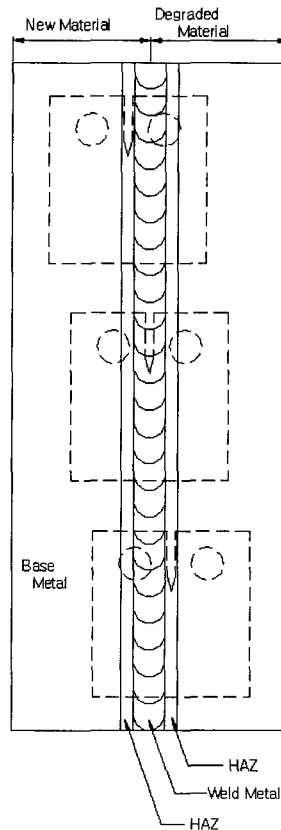


Fig. 2 Configuration of welded specimen

먼저, 균열길이의 환산을 위하여

$$a = W(1.001 - 4.6695 \cdot U + 18.46 \cdot U^2 - 236.82 \cdot U^3 + 1214.9 \cdot U^4 - 2143.6 \cdot U^5) \quad (1)$$

여기서,

$$U = \frac{1}{[1 + (B \cdot E \cdot C)^{1/2}]}$$

$$\Delta K = (\Delta P / BW^{1/2}) \cdot f(X) \quad (2)$$

$$f(X) = \frac{(2+X)}{(1-X)^{3/2}} (0.886 + 4.64X - 13.32X^2 + 14.72X^3 - 5.6X^4) \quad (3)$$

여기서,

$$X = a/W$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경년열화재의 금속학적 고찰

미소비이커스 경도계를 이용한 용접부의 위치별 경도값의 차이는 Fig. 3 과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 모재에서는 열화재가 신재보다 미세하나마 약간 높은 경도값을 나타냈으며 HAZ 를 거쳐 용착부쪽으로 갈수록 비례적으로 상승하였다. 열화재 모재가 신재보다 높은 경도값을 나타내는 것은 일반적인 고온 고압에서 사용되는 열화재와는 반대되는 현상^[6]으로 추측건대 장기간 사용에 따른 시효경화에 의해 경도가 증가되었을 것으로 사료된다. 광학현미경을 통한 미세조직관찰에서는 Fig. 4 처럼 열화재가 신재에 비해 결정립계 부근의 석출물의 양이 많고 신재는 탄화물 사이의 간격이 좁고 분산되어 있지만 열화재는 탄화물의 생성 및 조대화에 따른 넓은 입계분포를 보이고 있다. 이는 기존의 열화재의 많은 미세조직연구에서도 관찰되었다.^[7]

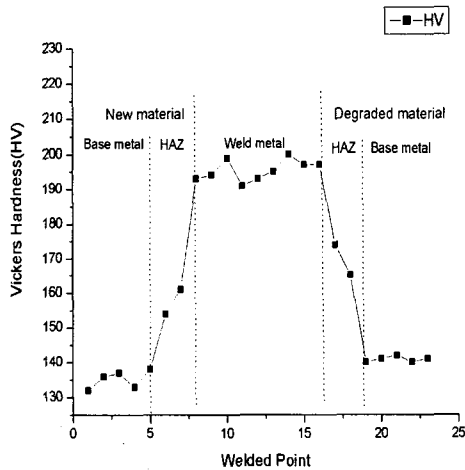


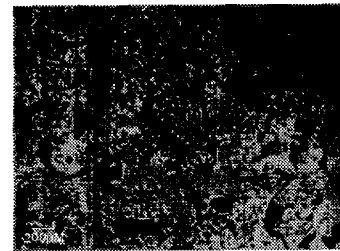
Fig. 3 Diagram of Vickers hardness value by welded position



(a) New material



(b) Degraded material



(c) HAZ of new material



(d) HAZ of degraded material

Fig. 4 Micro-structure of base metal

Fig. 4 의 (a), (b)는 각각 신재와 열화재의 조직 사진이고 (c), (d)는 신재와 열화재의 HAZ 의 조직 사진이다. 그림으로부터 알 수 있는 것처럼, 열화재 모재의 경우 결정립계 부근에 석출물이 직접되어 있는 것을 알 수 있으나 신재의 모재나 신재, 열화재 HAZ 의 경우는 입계내에 분산되어 있는

것을 알 수 있다.

Table 5 는 인장실험결과로 열화재가 신재에 비해 기계적 성질이 미세하나마 높게 나타났다.

Table 5 Mechanical properties resulted from tensile test

	Elastic (MPa)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
New material	2971	255	373
Degraded material	3000	284	392

3.1.1 피로균열진전거동

Fig. 5~Fig. 6 에 열화재와 신재 모재와 HAZ 의 a-N 선도를 각각 나타냈다. 그림에서 보듯이 동일 균열의 크기에 대한 사이클 수가 열화재가 신재에 비해 적게 나타났다

Fig. 7 은 신재모재와 열화재 모재의 피로균열진전속도(da/dN)와 응력확대계수범위(ΔK)의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 7 에 나타난 da/dN 과 ΔK 의 관계를 Paris and Erdogan 식^[8]으로 나타내면 다음의 식과 같이 표현될 수 있다.

$$\text{신재모재} : \frac{da}{dN} = 1.264 \times 10^{-13} (\Delta K)^{4.533}$$

$$\text{열화재모재} : \frac{da}{dN} = 8.121 \times 10^{-15} (\Delta K)^{5.268}$$

윗 식에서 보는 바와 같이 재료계수 m 값이 더 큰 열화재모재의 균열성장속도가 더 빠른 것을 알 수 있다.

이상에서 알 수 있듯이 열화재모재의 균열성장속도가 신재보다 약간 빠르게 나타난 것은 열화재가 조직이 장기간 사용에 따른 시효경화에 의해 더 취화되었기 때문일 것으로 판단된다.

Fig. 8 에 열화재 및 신재의 HAZ 의 균열진전속도와 응력확대계수범위를 나타내어 모재와 동일하게 재료계수 C 와 m 을 구하여 아래와 같이 나타낸다

$$\text{신재 HAZ} : \frac{da}{dN} = 3.961 \times 10^{-16} (\Delta K)^{5.676}$$

$$\text{열화재 HAZ} : \frac{da}{dN} = 2.921 \times 10^{-17} (\Delta K)^{6.265}$$

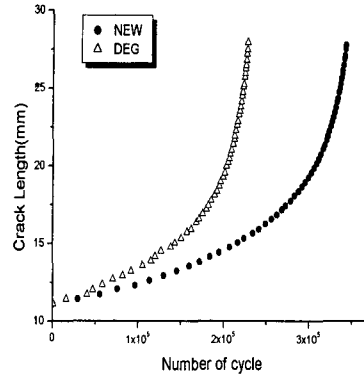


Fig. 5 Crack length-cycle of base metal

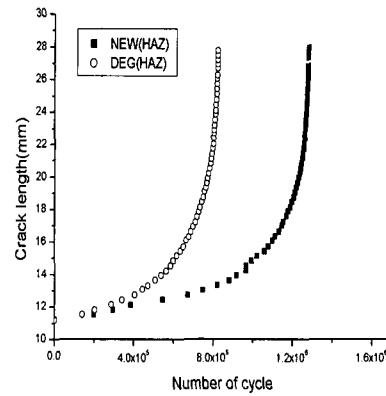


Fig. 6 Crack length-cycle of HAZ

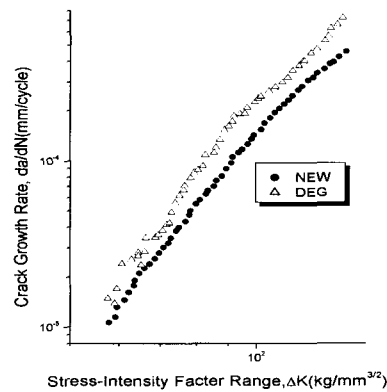


Fig. 7 ΔK - da/dN diagram of new material and degraded material for base metal

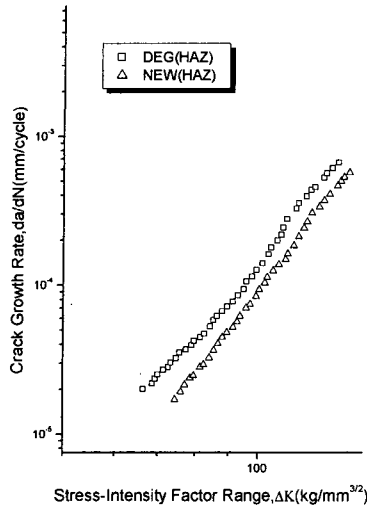


Fig. 8 $\Delta K-da/dN$ diagram of new material and degraded material for HAZ

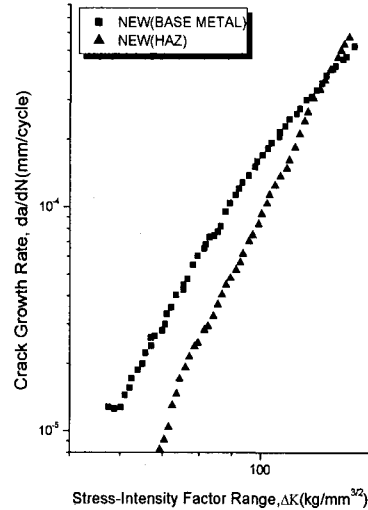


Fig. 9 $\Delta K-da/dN$ diagram of HAZ and base metal for new material

HAZ의 경우도 모재와 동일하게 열화재가 신재보다 m 값이 크게 나타난 것으로 보아 균열성장속도가 빠르게 진전됨을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 신재의 모재와 HAZ, 열화재의 모재와 HAZ의 $\Delta K-da/dN$ 를 비교한 것인데 양자 모두 그림에서 보는 바와 같이 HAZ가 모재보다 기울기가 커서 진전속도의 변화가 급격하나 전체적으로 동일 ΔK 에 대한 da/dN 값은 모재가 HAZ보다 큰 복잡한 양상을 띠고 있다. HAZ에서는 용접입열에 의한 압축잔류응력이 존재하고 경도측정의 결과에서도 알 수 있듯이 노치가 위치한 부분을 경계로 큰 경도 값의 차이를 보이고 있기 때문에 균열이 곧바로 성장하기 보다는 선택적인 경로를 택하는 것으로 여겨지며 본 연구결과와 유사한 연구결과^[9]도 찾아볼 수 있다.

Fig. 11에 열화재와 신재의 모재, HAZ, 그리고 용착부의 $\Delta K-da/dN$ 의 관계를 한꺼번에 비교하였다. 그림에서처럼 위치에 따른 명확한 피로균열진전속도의 차이를 구분하기 힘들게 서로 상반적인 결과를 나타냈다. 이것은 전반적으로 균열진전속도는 금속의 미세조직과는 크게 상관이 없다는 기존의 많은 연구가 이를 뒷받침해 주고 있듯이 본 연구에서도 이 사실을 확인할 수 있었다.^{[10]-[14]}

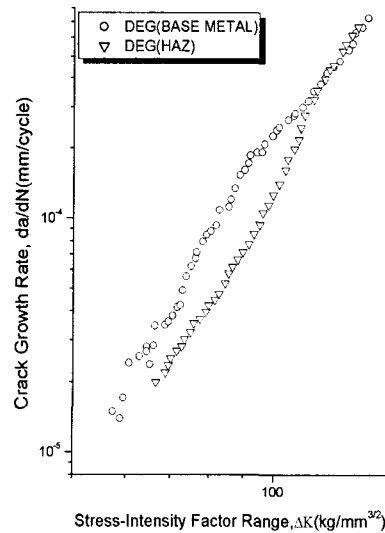


Fig. 10 $\Delta K-da/dN$ diagram of HAZ and base metal for degraded material

Fig. 12는 액체침투탐상검사(LPT)후 균열의 진행방향을 관찰한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 모재의 균열이 직선적인데 반해 HAZ의 균열

방향은 일정하지 않고 비스듬히 진전한 것을 알 수 있다. 이로써 장기간 사용된 열화재와 신재의 용접특성이 신재끼리의 용접특성에 비해 열화재의 미세조직의 변화 및 시효경화에 따른 열화현상에 기인하여 기계적 성질 및 피로균열성장거동에 미치는 영향을 확인할 수 있었다.

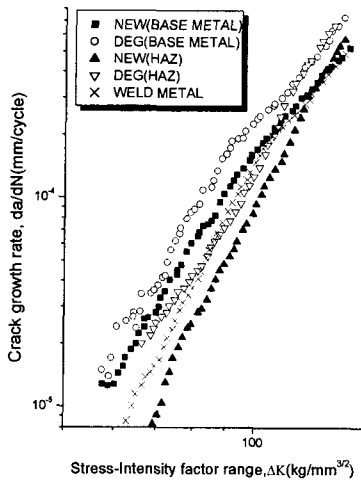
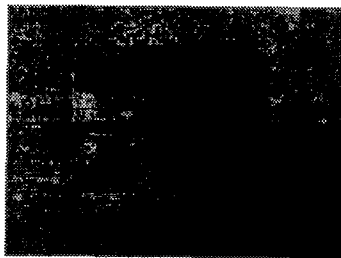


Fig. 11 ΔK - da/dN diagram of HAZ, base metal and weld metal for degraded material and new material



(a) Base metal



(b) HAZ

Fig. 12 Comparison with liquid penetrant testing

4. 결론

선령이 15 년 된 선박의 외장재를 수거하여 시편을 용접 제작하였으며 제반강도를 신강재용접재와 비교 평가하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 금속현미경의 미세조직관찰에 의해 경년열화재의 경우 결정입자가 조대화됨과 동시에 입계부근에 탄화물이 집적되어 신재보다 열화재는 용접을 실시한 경우 용접입열에 의해 탄화물이 분산되어 있는 것을 관찰할 수 있었다.

2) 열화재와 신재 모재의 피로균열성장 거동은 전반적으로 열화재가 빠른 경향으로 보아 피로강도가 저하되었음을 알 수 있었다.

3) 신재-신재의 용접재, 열화재-신재의 용접재의 균열성장속도 비교에 있어서 열화재와 신재 용접재가 장기간 사용에 의한 열화현상에 의해 신재끼리의 용접재보다 빠르게 나타나 피로강도가 저하되었음을 알 수 있었다.

4) HAZ 와 모재와의 균열성장속도를 비교한 결과 신재-신재 용접재나 열화재-신재 모두 HAZ 가 모재보다 기울기가 커서 진전속도의 변화가 보다 급격하나 전체적으로 동일 ΔK 에 대한 da/dN 값은 모재가 HAZ 보다 큰 복잡한 양상을 띠고 있다. HAZ 에서는 용접입열에 의한 압축잔류응력이 존재하고 경도측정의 결과에서도 알 수 있듯이 노치가 위치한 부분을 경계로 큰 경도 값의 차이를 보이고 있기 때문에 균열이 곧바로 성장하기 보다는 선택적인 경로를 택하는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국 선급(Korean Register of Shipping), "선급 및 강선규칙. 제 2 편, 재료 및 용접 2 편"
2. 권재도 "Life Prediction and Evaluation of Fracture Toughness of a Cr-Mo Degraded Steel During Long Service," 대한기계학회논문집(A), Vol. 16, No. 8, pp. 1421~1428, 1992.
3. 김정기, 윤재영, 송기욱, 이규진, 정세희, "A Study on the Evaluation for In-service Material Degradation of High Temperature Structural Components by Grain Boundary Etching Method,"

- 대한기계학회(A), Vol. 15, No. 3, pp. 898~906, 1991.
4. ASTM E647-93, "The Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Rates," 1993.
 5. ASTM E647-83, "Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above 10⁻⁸m/cycle," pp. 711~731, 1984.
 6. 김정기, 남승훈, 김엄기, "미소 비이커스경도에 의한 Cr-Mo-V 강의 경년열화 평가," 한국열처리공학회지, Vol. 11, No.1, pp. 54~61, 1998.
 7. 김효진, 박종진 "입계부식법에 의한 사용중인 고온구조물의 재질열화도 측정연구," 대한기계학회논문집(A), Vol. 22, No. 7, pp. 1148~1158, 1988.
 8. P.C.Paris, F.Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Law," Journal of Basic Engineering, Vol. 85, pp. 528~534, 1960.
 9. S.H. Chung, T.Y. Kim, E.G. Na, "Study on the Environmental Strength Evaluation of Welded Steel Joint in Seawater," Journal of the Korean Welding Society, Vol. 6, No. 2, pp. 56~63, 1988.
 10. 이후광, 김광수, 김충명, "Fatigue Crack Growth in the Welded Joint of a TMCP Steel," 대한기계학회, 춘계학술대회논문집(A), pp. 247~252, 1998.
 11. D.F.Socie, S.D.Antolovich, Welding Journal. pp. 267~271, 1974.
 12. L.A.James, W.J.Mills, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 107, pp. 34~40, 1985.
 13. C.Masuda, H.Sumiyoshi, A.Kosuge, A.Ohta, S.Nishijima International Journal of Fatigue, Vol. 9, No. 4, pp.233~237, 1987.
 14. Y.Z.Itoh, S.Suruga, H.Kashiwaya. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 33, No. 3, pp. 397~407, 1989.