

〈논 문〉

직류전위차법을 이용한 AISI 316강 시효재의 탄소성 파괴인성 평가

임재규* · 장진상** · Y. Iino***

(1996년 10월 10일 접수)

Evaluation of Elastic-Plastic Fracture Toughness of Aged AISI 316 Steel Using DC-Electric Potential Method

Jae-Kyoo Lim, Jin-Sang Chang and Y. Iino

Key Words : DCPDM(직류전위차법), Aged Steel(시효강), Elastic-plastic Fracture Toughness
(탄소성 파괴인성), J-R Curve(J-R 곡선), Crack Initiation Point(균열전진점)

Abstract

AISI 316 steel has been used extensively for heater and boiler tube of the structural plants such as power, chemical and petroleum plants under severe operating conditions. Usually, material degradation due to microcrack or precipitation of carbides and segregation of impurity elements, is occurred by damage accumulated for long-term service at high temperature in this material. In this study, the effect of aging time on fracture toughness was investigated to evaluate the measurement of material degradation. The elastic-plastic fracture toughness behaviour of AISI 316 steel pipe aged at 550°C for 1h~10000 h (the aged material) was characterized using the single specimen J-R curve technique and electric potential drop method at normal loading rate (load-line displacement speed of 0.2 mm/min) in room temperature and air environment. The fracture toughness data from above experiments is compared with the J_m obtained from predicted values of crack initiation point using potential drop method.

1. 서 론

대형 화학설비 및 발전설비의 가열기와 보일러 튜브 등의 고온 구조물에는 내열재료로서 고온특성이 우수한 오스테나이트계 스테인레스강이 널리 사용되고 있다. 하지만 이들 재료는 고온에서 장시간 동안 사용할 뿐만 아니라 주기적인 하중이 작용하는 열악한 환경하에서 사용되기 때문에 탄화물이나 금속간 화합물의 석출, 조대화 등으로 인하여 결정 입계간의 응집력을 약화시키는 입계취화로 인해 재

료의 결합강도를 약화시켜 입계공동이나 입계에서의 보이드(void) 생성, 미소균열(micro crack) 등이 발생하여 재료의 균열저항성이 지속적으로 감소하게 된다.^(1,2) 그러므로 이러한 재질열화에 영향을 주는 인자들을 평가하고 고온 구조물에 균열이 존재할때 입계하중 및 잔여수명을 정확히 예측하기 위해서는 사용시간에 따른 재료의 기계적 성질 및 파괴인성의 변화를 정확하게 분석해야 한다.

한편, 탄소성 파괴역학 해석에 있어서 균열성장률의 정확한 측정에는 실험실적 시험편에 의해 특성화되는 균열성장속도가 실구조물의 균열거동을 예측하는데 사용되기 때문에 아임계 균열성장에 관한 연구에 있어서 중요한 요소가 된다.⁽³⁾

따라서 이전에 적용된 균열길이 측정법의 문제점

*회원, 전북대학교 기계공학부

**대우(주) 상용차연구소

***일본, 도요다공업대학

을 보완한 단일시험편법으로써 전위차법을 본 실험에 적용하였는데, 이 방법은 균열길이를 연속적으로 기록할 수 있고, 연성 균열진전점의 검출과 crack tunneling에 대한 보정이 가능하기 때문에 평활(unsided grooved) 시험편에도 적용할 수 있으며 고온에서의 균열성장 측정이 용이하다는 장점을 가지고 있다.^(3,4)

그러므로 본 연구에서는 열화재의 파괴인성에 미치는 시효시간의 영향에 대하여 고찰하기 위해 550°C에서 1~10000 hr 동안 시효처리한 AISI 316 파이프재료를 이용하여 탄소성 파괴인성을 정량적으로 평가하고 J-R curve법과 직류전위차법에 의한 결과를 비교검토했다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

실험에 사용된 재료는 화학설비와 발전설비의 가열기와 보일러 튜브 등에 사용되는 오스테나이트계의 AISI 316 파이프용(190 mm OD, 152 mm ID, 19 mm nominal wall) 강으로서 pipe의 형상은 Fig. 1에 나타내었고 화학적 조성은 Table 1에 표시하였다. 실제로 사용중인 열화재를 종류별로 입수하는 것은 매우 어렵기 때문에 이와 유사한 사용재의 미시조직을 얻기 위해 재료의 사용온도인 450°C~550°C⁽²⁾ 중에서 가장 고온인 550°C로 각각 1시간, 10시간, 100시간, 1000시간, 10000시간 동안 무응력

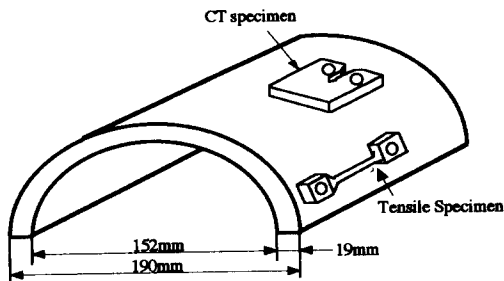


Fig. 1 Specimen orientations in the piping material

Table 1 Chemical composition of AISI 316 steel. (Wt. %)

Steel	Ni	Cr	Mo	Mn	Si	C
AISI 316	10~14	16~18	2~3	2	1	0.08

상태에서 등온시효 열처리(isothermal aging heat treatment)를 행하였다. 열처리조건은 Table 2에 제시하였다.

한편, 기계적 성질을 조사하기 위한 인장시험편과 파괴인성 실험용 CT 시험편을 제작하였고, 시험편의 두께는 pipe의 두께와 곡률반경으로 인해 12 mm로 가공하였으며, ASTM E399⁽⁶⁾에 의거하여 피로에 의한 예비균열을 도입하였다. 또한 직류전위차법을 적용하기 위해 문헌에서 채택한 최적의 입력전류 위치와 출력전압의 위치를 선정하여 기계 가공하였다.

2.2 실험방법

인장실험은 ASTM E8⁽⁶⁾에 따라 대기중의 상온(25°C)에서 INSTRON 사의 유압식 만능시험기를 사용하여 0.2 mm/min의 CHS(cross head speed)로서 단순부하를 가하며 항복강도, 인장강도, 연신률, 단면감소율 등을 측정하였다.

파괴인성실험을 위한 실험장치의 개략도는 Fig. 2와 같으며, 파괴인성의 측정은 ASTM E813⁽⁷⁾의 J_{Ic} 시험법을 이용하였으며 균열진전 저항성의 측정은 ASTM E1152⁽⁸⁾의 J-R 곡선시험법에 따라서 수행하였다. CT 시험편을 대상으로 컴퓨터제어 방식의 유압식 만능시험기를 이용하여 대기중 상온(25°C)에서 CHS=0.2 mm/min의 부하속도로 하중신호를 자동기록 저장하고, 하중선 변위를 측정하기 위해서 클립게이지를 사용하였다. 또한 균열길이를 연속적으로 기록하고 균열진전점(crack initiation point)을 검출하기 위해 직류전위차법(DC-potential drop method)을 사용하였으며 이때 균열길이는 다음식과 같이 Johnson⁽⁹⁾의 방정식에 의해 예측하였다.

Table 2 Heat treatment conditions for aging

	Aging condition
Time	Virgin, 1 h, 10 h, 100 h, 1000 h, 10000 h
Heating rate	550°C
Heating rate	6°C/min
Cooling rate	8.8°C/min
Environment	Ar gas
Equipment	Vaccum furnace

$$a(i) = \frac{2W}{\pi} \cos^{-1} \left[\frac{\cosh(\pi y/2W)}{\cosh \left[\frac{u(i)}{u_0} \cosh^{-1} \left[\frac{\cosh(\pi y/2W)}{\cos(\pi a_0/2W)} \right] \right]} \right] \quad (1)$$

여기서, W 는 시험편의 폭, u_0 는 초기 전위차, a_0 는 초기 균열길이, y 는 출력단자(output probes) 사이 거리의 절반을 나타낸다. 입력전류는 DC-5A로 하였으며, 출력전압으로 나오는 미소전압(약 0.5 mV)을 증폭하기 위해 gain×1000과 10 Hz의 필터회로를 부착한 증폭기를 사용하였다. 증폭된 전압은 데이터 획득시스템을 사용하여 컴퓨터에서 저장하였고 이 값은 Johnson의 방정식을 이용하여 균열길이를 환산하여 기록되었다.

실험이 종료된 시험편은 액체질소 분위기의 저온에서 파단시켜, 파면으로부터 최종점에서의 균열성장량을 측정하였다. 측정된 최종 균열의 길이를 예측된 값과 비교하여 0.2 mm 이상의 차이를 보이는 예측치는 식 (2)의 보간법⁽³⁾을 이용하여 보정하였다.

$$a_c = a_0 + (a_p + a_0) \left[1 + \frac{a_{mf} - a_{pf}}{a_{pf} - a_0} \right] \quad (2)$$

여기서, a_0 는 초기 균열길이, a_{mf} 는 측정된 최종 균열길이, a_{pf} 는 예측된 최종 균열길이이며, 시험 중에 전위차법으로 예측한 균열길이, a_p 를 보정한 값이 a_c 이다.

한편, 균열이 성장하는 동안 Johnson의 방정식을 이용한 직류전위차법에 대한 신뢰성을 검토하기

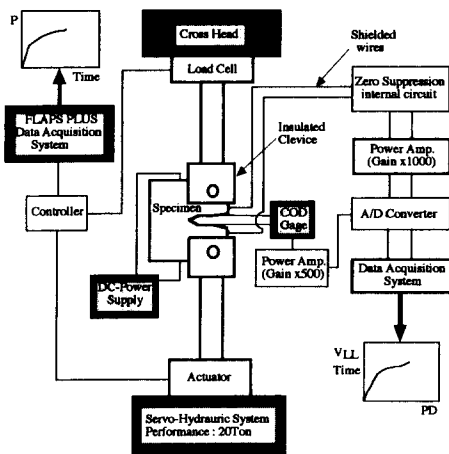


Fig. 2 Schematic of fracture toughness test and DC-potential system

위해 피로실험을 행하였다. 피로에 의한 균열성장량과 전위차와의 관계를 확인하기 위해 일정주기마다 비치마크를 생성하면서 균열을 증가시키고 동시에 이동식 현미경을 이용하여 표면균열길이를 목측하면서 전위차를 기록하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기계적 성질의 변화

인장실험에 의한 기계적 성질은 Fig. 3에 정리하였다. 그림에서 보는 바와 같이 시효에 따른 인장강도는 1시간의 시효재의 경우에 611.2 MPa로 가장 높게 나타났고 이 시간을 기준으로 다소의 저하를 보였다. 1시간의 시효재가 가장 높은 강도를 보이는 것은 시험편의 가공시 발생하는 가공경화 등에 의한 잔류응력이 뜨임온도(400~700℃) 부근의 단시간 재가열에 의해 제거되었기 때문으로 사료된다. 그리고 연신률에 있어서는, 거의 변화를 보이

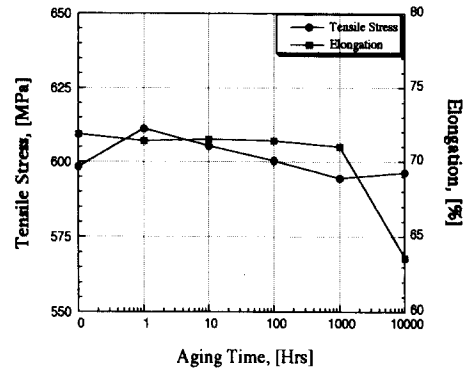


Fig. 3 Results of tensile test for aging time

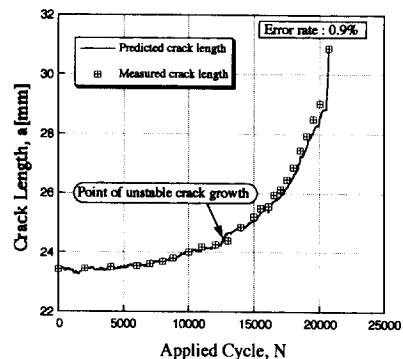


Fig. 4 Crack length(a) vs. applied cycle(N) curve for calibration

지 않다가 10000시간의 조건에서 현저한 감소를 보이고 있다.

3.2 직류전위차법의 신뢰성 평가

Johnson의 식을 사용한 직류전위차법에 대한 신뢰성을 평가하고자 피로실험을 행한 결과 Fig. 4와 같은 a-N곡선을 얻을 수 있었다. 그림에서 보는 바와같이 거의 동일한 균열성장거동을 볼 수 있으며 최종 파면을 비교한 결과 실측치와 예측치 사이의 오차는 약 0.9%의 수준에 달해 전위차법에 의한 균열성장의 평가는 신뢰성이 있음을 보여주고 있다. 또한, Fig. 5는 피로실험에서 얻은 결과를 균열비(a/W)에 대한 전위차비(U/U₀)로 나타내서 멱급수 함수로 표현한 관계이다. 그림에서 균열비(a/W)가 0.7정도까지 거의 일치하다가 그 이상에서는 약간의 차이를 보이긴 하지만, 균열진전점은 모두 a/W=0.7 이전에 발생하기 때문에 전위차법을 이용한 균열진전점의 검출은 타당성이 있음을 보여주고 있다.

한편, Table 3은 전위차법에 의한 균열길이의 예측치와 실험후 최종 파면에서 측정된 균열길이의 측정치를 비교한 것이다. 대부분의 시험편이 3%이내의 오차만을 보이고 있어 전위차법을 이용한 균열성장량의 측정은 정확성이 있음을 입증해 주고 있다.

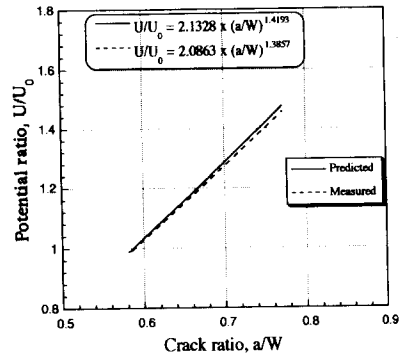


Fig. 5 Calibration curve obtained from fatigue test for CT specimen

Table 3 Comparisons of predicted crack length by PDM and measured crack length

Aging time	Items	Specimen ID	Predicted crack length (mm)	Measured crack length (mm)	Error rate (%)
Virgin		A-1	29.451	29.368	-0.28
		A-2	29.795	30.663	2.83
		A-3 (Fat.)	32.448	31.662	-2.48
1 hr aged		B-1	28.509	28.767	0.9
		B-2	29.848	29.200	-2.21
		B-3 (Fat.)	30.853	31.558	2.23
10 hr aged		C-1	28.335	28.259	-0.27
100 hr aged		D-1	30.591	30.975	1.24
		D-2	29.843	29.544	-1.01
		D-3	29.372	30.654	4.18
		D-4	28.411	28.765	1.23
		D-5 (Fat.)	30.717	30.976	0.84
1000 hr aged		E-1	29.966	29.633	-1.12
		E-2	29.158	29.431	0.93
		E-3	28.924	29.163	0.82
		E-4	27.703	28.289	2.07
		E-5	28.034	28.362	1.16
		E-6 (Fat.)	31.618	32.139	1.62
10000 hr aged		F-1	28.281	28.227	-0.19
		F-2	28.767	28.985	0.75
		F-3 (Fat.)	31.384	31.566	0.58

3.3 시효에 따른 J_Q , J-R곡선 및 J_{in} 의 변화

3.3.1 J_Q 및 J-R곡선의 변화

각 시험편에서 ASTM E813의 절차에 따라 J_Q 및 J-R곡선을 구하였으며, 대표적으로 Fig. 6과 Fig. 7에 신재와 10000시간 시효재의 J-R곡선을 제시하였고 Table 4에 정리하였다. 여기서, J_Q 값은 회귀선과 0.2 mm offset line과의 교점으로부터 계산되었다. AISI 316강 신재의 경우에 2회의 반복 실험에서 얻은 평균치가 635 kJ/m^2 으로 이 값은 Landerman과 Bamford⁽¹¹⁾가 동일재료에 대해 구한 483 kJ/m^2 보다 큰 값이 계산되었는데, 본 연구에 사용된 실험재료의 제약상 시험편의 두께를 처음 12 mm로 가공한 결과, 최종값으로 구한 J_Q 값들은 ASTM E813의 시험편 평면변형의 두께조건인 $B(\text{thickness}), b_0(\text{initial ligament}) > 25J_{IC} / \sigma_{YS}$ 을 만족하지 못하였기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 실험에서 산출된 J의 임계치를 J_Q 라고 표현하여

시효의 조건을 비교하기 위한 평가인자로 사용하였다.

Table 4에서 보는 바와같이 J_Q 는 신재나 1시간의 시효재에 비해서 1000시간, 10000시간의 시효재의 경우에 그 값이 지속적으로 감소하였음을 알 수 있다. 또한 1시간 시효재의 경우에 가장 큰 값을 보였는데 이는 시험편의 냉간가공에 따른 잔류응력이 AISI 316강의 뜨임온도($400 \sim 700^\circ\text{C}$) 내에서 제거되면서 단시간 재열처리에 의한 인성의 향상으로 보여진다.⁽¹²⁻¹⁴⁾ 그리고 고온 장시간 가열에 의한 파괴인성의 지속적인 저하는 균열선단에 작용하는 입계불순물이나 탄화물의 석출량이 증가하여 입계간의 결합강도를 저하시키는 고온손상에 의한 결과라고 볼 수 있다.^(2, 15)

한편, 균열성장의 저항성을 평가하기 위한 J-R 곡선의 기울기 $(dJ/da)_R$ 의 함수로 표현되는 찢김 계수(tearing modulus), T_{mat} 는 Table 4와 같이

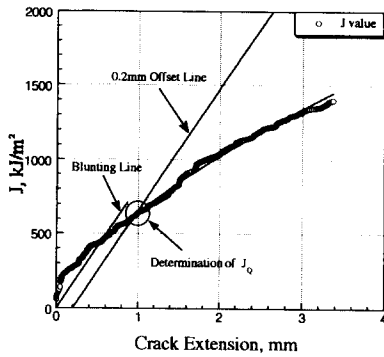


Fig. 6 J-R curve for virgin material

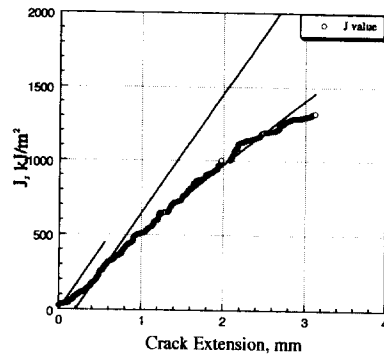


Fig. 7 J-R curve for 10000 hr aged material

Table 4 Results of fracture toughness test

Aging time		$J_Q \text{ KJ/m}^2$	$(dJ/da)_R \text{ N/mm}^2$	T_{mat}	$J_{in} \text{ KJ/m}^2$	$\Delta a_{in} \text{ mm}^2$
Virgin	A-1	641	372	428	499	0.786
	A-2	629	335	386	506	0.761
1 hr aged	B-1	612	404	445	652	1.041
	B-2	681	405	446	657	0.938
10 hr aged	C-1	493	444	501	477	0.731
100 hr aged	D-3	471	360	412	414	0.691
	D-4	472	387	443	409	0.679
1000 hr aged	E-2	437	392	467	301	0.608
	E-5	397	356	424	360	0.548
10000 hr aged	F-1	350	414	477	237	0.415
	F-2	321	435	501	254	0.488

10시간의 시효재에 대해 가장 큰 값을 보였으며 다른 조건들에서는 일정한 경향을 보이지 않았고, J-R곡선의 기울기들도 큰 차이를 보이지 않는 것으로 보아 찢김계수는 재질열화의 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있다. 따라서 AISI 316강의 고온특성은 10000시간까지의 열처리에는 균열진전 이후의 균열저항성이 저하하지 않았음을 보여주고 있으며, 단지 균열선단 소성역 주위에 집중적으로 고온 열처리에 의한 손상이 발생하였음을 짐작할 수 있다. 따라서 이와같은 T_{mat} 이외의 J_Q 값의 변화는 고온 가열에 의한 재질의 변화가 단지 균열선단의 둔화에서 균열로 진전하는 시기를 가속시키는 것으로 보인다.

3.3.2 균열진전점에서 구한 J_{in} 의 변화

균열성장과정에 대한 실험에서 균열진전점을 특성화하는 J값을 결정하기 위해 하중선 변위-전위차 신호의 관계를 각 조건에 대해서 구하였고 대표적으로 신재와 10000시간의 시효재에 대해서만 Fig. 8과 Fig. 9에 제시하였다. 전위차 신호에 대한 하중선변위의 관계에서 가시적인 EP(electric potential) blunting line을 그린후 이 선으로 부터 최초로 편향(deviation)되는 지점을 찾아 이 지점에서의 하중선 변위에 해당하는 하중-하중선변위의 기록으로부터 J값을 계산하여 J_{in} 이라 정의하였다. 이때의 J- Δa 관계에서 J_{in} 에 해당하는 균열의 증분량을 균열진전점이라 하여 Δa_{in} 으로 표시하였으며 실험에서 구한 J_{in} 과 Δa_{in} 의 값들은 Table 4에 이미 제시하였다.

Fig. 10은 J_Q 값과 J_{in} 값의 경향이 유사함을 보여주고 있다. 그런데 J_Q 는 J-R 곡선상에서 실험치의 외삽에 의해서 결정하였으므로 둔화선(blunting line)의 기울기, $J = m\sigma_{ys}\Delta a$ 에서 m 의 값에 따라 그 값이 유동적이다. 즉, ASTM E813의 경우 $m=2$ 를 사용하였으며, Mills⁽¹⁵⁾등은 고변형 경화재료(high strain hardening material)의 경우에 대해서 m 의 값은 2대신에 4를 사용할 것을 권장하였고, Davies⁽³⁷⁾는 AISI 316강에 대해 실험에서 구한 m 의 값을 3.8로하여 J_{ic} 값을 계산하였다. 이렇듯 실험에 따라 변하는 둔화선(blunting line)의 기울기에 의해 J값의 평가가 유동적이기 때문에 J-R곡선법에 의한 J값에 있어서 그 신뢰도가 저하하고 있음을 알 수 있다. 하지만 균열진전점에서의 J의 임계치가 탄소성 파괴인성이라는 파괴역학적 개념에

서 볼 때 J_Q 의 평가보다는 J_{in} 의 평가가 더 유용하리라고 생각된다. 또한 본 실험에서 J_Q 와 J_{in} 의 값들을 비교할 때, data의 산포에 있어서 J_{in} 의 값이 더욱 구체적이고, 의심이 아닌 연속적인 J-R곡선상에서 J_{in} 을 정의하였기 때문에 실험에 의해 좌우되는 둔화선(blunting line)에는 영향을 받지 않는 J

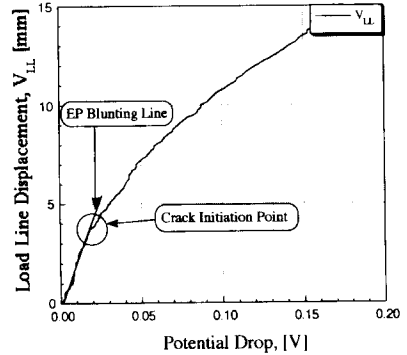


Fig. 8 Relationship between V_{LL} and potential drop for virgin material

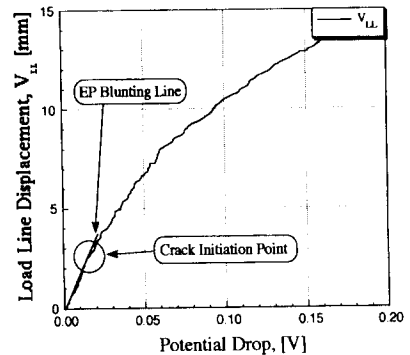


Fig. 9 Relationship between V_{LL} and potential drop fro 10000 hr aged material

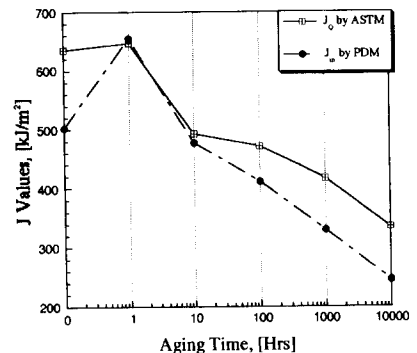


Fig. 10 Comparison of J values for aging time

의 임계치라는 사실을 발견할 수 있었다. 이러한 J_{in} 의 값에 있어서도 고온시효에 따른 균열성장 저항치의 감소를 확인하였다.

한편, Fig. 11은 시효에 따른 균열진전점의 위치가 J_{in} 의 경향과 동일하게 변화하고 있으며 재질열화에 따른 균열선단의 인성저하를 보여주고 있다.

3.4 파면관찰에 의한 시효효과 평가

위의 J-R곡선 평가를 뒷받침하기 위해 파괴인성 실험 후 파단된 시험편을 대상으로 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 파면을 분석한 결과를 Fig. 12, 13에 나타냈다. Fig. 12는 대표적으로 신재와 10000 hr 시효재의 파면관찰 예비균열부에서 균열진전 이후의 균열성장 구간까지를 저배율($\times 25$)로 관찰한 것이다. 사진에서 보는 바와같이 예비균열 후 균열선단의 blunting에 의해 발생하는 스트레치영역(stretch zone)의 형성과 이 영역과 구별되는 연성파면을 보이는 균열성장 구간이 관찰 되었다. 하지만 균열성장 구간에서의 연성파면상에는 큰 차이를 보이고 있지 않았기 때문에, 파괴의 개시를 나타내며 재료의 인성을 좌우하는 스트레치영역을 보다 세밀하게 관찰하기 위해 균열진전점을 중심으로 고배율로($\times 250$) 확대한 것이 Fig. 13이다. 사진에서 보는 바와같이 신재나 단시간의 시효재는 뚜렷한 스트레치영역의 형성을 나타내며 시간이 경과함에 따라 그 폭이 점차 감소하고 10000시간의 시효재에 있어서는 그 양이 현저히 감소하였다. 이러한 파면관찰을 통해서도 시효에 따른 균열선단의 인성저하 요인을 발견할 수가 있었으며, 권⁽¹⁵⁾의 연구 결과와도 일치하고 있다.

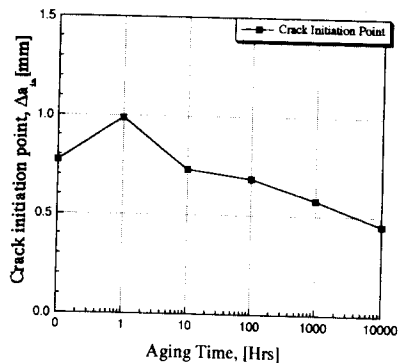
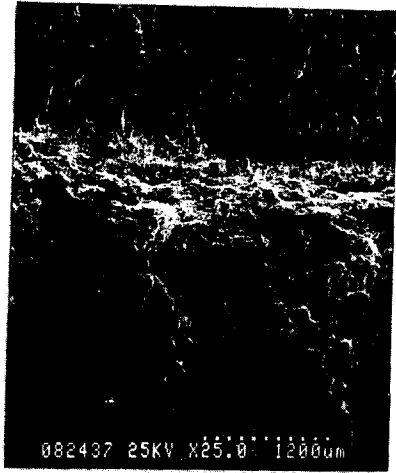
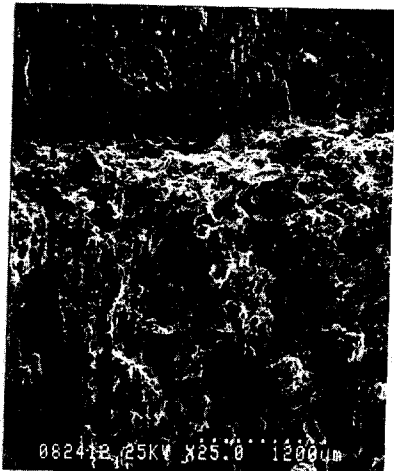


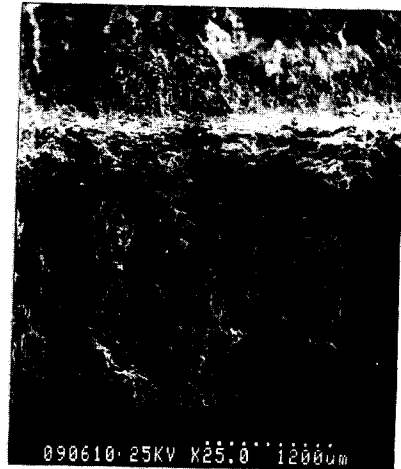
Fig. 11 Comparison of crack initiation point for aging time



(a) Virgin

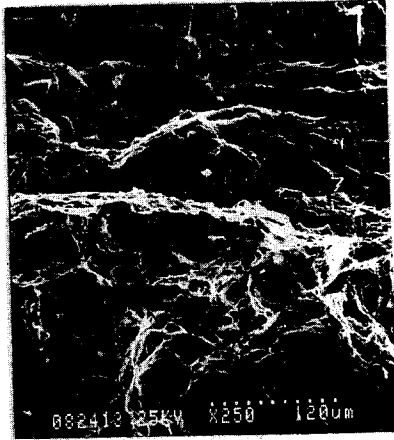


(b) 100 hr aged

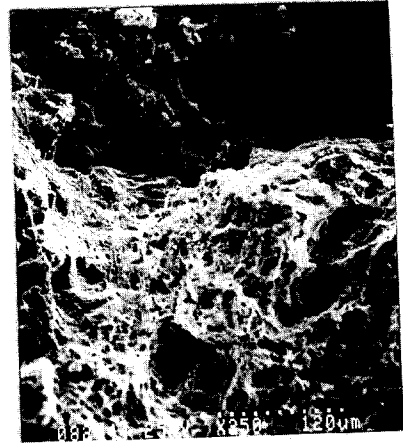


(c) 10000 hr aged

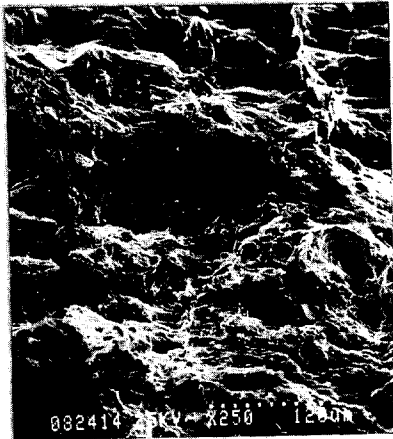
Fig. 12 SEM photographs of fracture surface ($\times 25$)



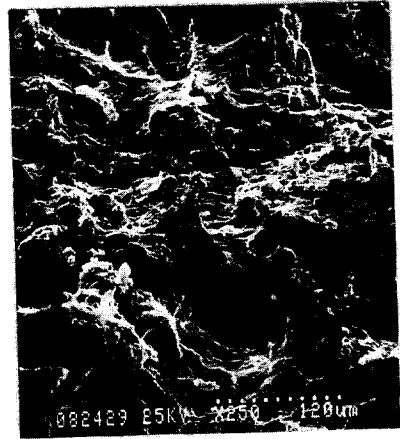
(a) Virgin



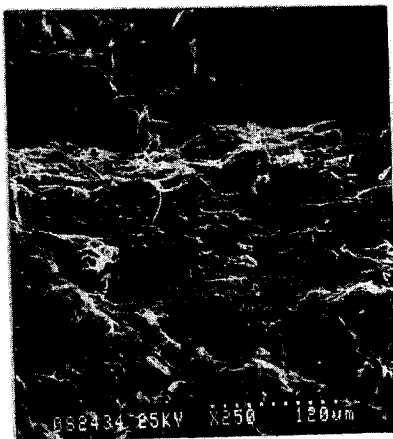
(d) 100 hr aged



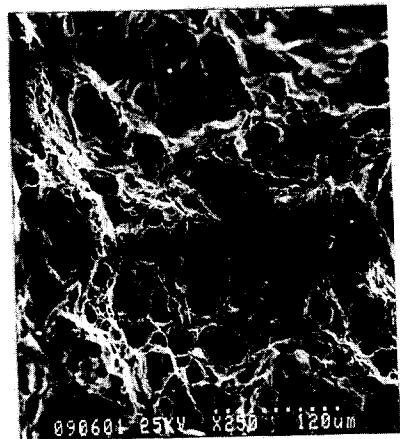
(b) 1 hr aged



(e) 1000 hr aged



(c) 10 hr aged



(f) 10000 hr aged

Fig. 13 SEM photographs of fracture surface for stretch zone($\times 250$)

4. 결 론

AISI 316강 시효재의 재질열화에 따른 탄소성 파괴인성치를 적류전위차법을 이용하여 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 적류전위차법을 이용한 균열성장량의 예측은 신뢰성이 있음을 확인하였고, 이에 의해 연속적인 J-R곡선을 획득하면 둔화직선의 기울기($J = m\alpha_{vs}\Delta a$)에 민감하지 않은 균열진전점에 해당하는 J의 임계치를 구할 수 있었다.

(2) 탄소성 파괴인성치인 J_Q 를 구한 결과 신재의 경우에 635 kJ/m^2 , 10000시간의 시효재의 경우에 335 kJ/m^2 으로 고온 장시간 가열에 의한 재질의 변화에 따라 파괴인성치가 현저히 감소하였다. 그러나 균열성장 저항곡선의 기울기 $(dJ/da)_R$ 에서 구한 무차원 계수 T_{mat} 의 값은 일정한 경향을 보이지 않고 J-R곡선의 기울기도 차이가 크지 않은 것으로부터 AISI 316강은 10000시간까지의 고온 장시간 가열이 단지 균열선단에서 안정균열의 발생시기만을 단축시킨다는 사실을 알았다.

(3) 적류전위차법에 의한 하중선변위와 전위차의 관계에서 안정균열의 진전점을 계측하여 J_{in} (균열진전 저항치)을 구한 결과, 장시간 시효재의 경우 균열의 진전이 신재에 비해 균열선단의 둔화(blunting)이후 현저히 낮은 하중선 변위값에서 발생하였다.

참고문헌

(1) Matsushita, T., Shoji, T. and Saito, Y., 1990, "Non-Destructive Evaluation of Material Degradation for Austenitic Stainless Steel by Means of Electro-Chemical Method," *J. of Materials*, Vol. 39, No. 446, pp. 1596~1601.
 (2) Inho, Y., Nakajima, Y. and Suzuki, M., 1989, "Fracture Toughness of Service-Exposed Type 321 Stainless Steel at Room and Elevated Temperature under Normal and Low Straining Rates," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 33,

No. 2, pp. 295~307.

(3) Ashok Saxena, 1980, "Electrical Potential Technique for Monitoring Subcritical Crack Growth at Elevated Temperatures," *Engineering Frature*, Vol. 15, pp. 741~750.
 (4) Wilkowski, G. M., Wambaugh, J. O. and Prabhath, K., 1984, "Single-Specimen J-Resistance Curve Evaluations Using the Direct-current Electric Potential Method and a Computerized Data Acquisition System," *ASTM STP 833*, pp. 553~576.
 (5) *ASTM Standard, E399-93*, 1993, "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials,"
 (6) *ASTM Standard, E8-93*, 1993, "Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials,"
 (7) *ASTM Standard, E813-87*, 1989, "Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness,"
 (8) *ASTM Standard, E1152-87*, 1989, "Standard Test Method for Determining J-R Curves,"
 (9) Johnson, H. H., 1965, "Materials Research and Standards," pp. 442~445.
 (10) *ASTM Standard*, 1994, "Electrochemical Reactivation(EPR) for Detecting Sensitization of AISI Type 304 and 304L Stainless Steels,"
 (11) 高橋秀明, 1988, 日本金屬學會會報, 27-8, p. 657.
 (12) Askins, M. C. et al., 1986, EPRI RP2253-1, Progress Report IAG Meeting, Washington DC.
 (13) 齊藤喜久, 庄子哲雄, 高橋秀明, 1986, 日本機械學會論文集, 52-473, p. 165.
 (14) Mills, W. J., 1987, "Fracture Toughness of Aged Stainless Steel Primary Piping and Reactor Vessel Materials," *J. Press. Vess. Technol.* 109, pp. 440~448.
 (15) 권재도, 1991, "장기사용 Cr-Mo강 열화재의 파괴인성평가와 수명예측," 대한기계학회논문집, 제16권, 제8호, pp. 1421~1428.