

SM45C 강의 피로균열전파 지연거동에 미치는 영향인자에 관한 실험적 연구

김선진* · 김종훈** · 안석환*

An Experimental Study on the Factors that Affect Fatigue Crack Growth Retardation Behavior in SM45C Steel

Seon-Jin Kim, Jong-Hoon Kim and Seok-Hwan Ahn

Key Words: Fatigue Crack Growth Retardation Behavior(피로균열전파지연거동), Multiple Overload(다중과대하중), Specimen Thickness(시험편 두께), Minimum Crack Growth Rate(최소균열전파율), Retardation Cycle(지연수명), Overload Application Position(과대하중작용위치)

Abstract

Constant ΔK fatigue crack growth tests were performed applying an intermediate multiple overload for SM45C steel. The purpose of the present study is to investigate the effects of specimen thickness at various baseline stress intensity levels(ΔK_b), overload application position(a/W) and overload application frequency(OL_{Hz}) on fatigue crack growth retardation behavior. The principal results are summarized as follows. The amount of retardation for a given ΔK_b level is increased with increasing the baseline stress intensity level in all specimen thickness. The normalized minimum crack growth rate is increased with increasing the specimen thickness, except for $\Delta K = 45MPa\sqrt{m}$. The retardation cycle is decreased with increasing the overload application position and increased with the overload application frequency.

1. 서론

기계·구조물의 파괴는 피로 모드에 기인한 것이 압도적으로 많다. 피로파괴로 인한 막대한 경제적 손실과 인명피해를 경험하고 이에 대응하는 기술자들의 많은 노력으로 피로파괴의 학문적 체계가 성립되었고 또한 많은 연구가 축적되어 왔다. 그러나 사회, 경제적 요구조건이 계속 변화함에 따라 그에 상응하는 보다 엄밀한 수명예측과 진단기술들이 필요하게 되어 피로파괴에 관한 학문적 수요는 현재에도 증가하는 추세에 있다⁽¹⁾.

반복하중에 의한 재료의 피로파괴는 균열의 발생과정과 전파과정으로 구별되지만, 피로균열의 전파 과정 중에 일련의 과대하중을 받게되면 균열의 전파율이 급격히 감소하는 지연현상(retardation)이 발생하게 된다. 과대하중에 의한 균열전파의 지연현상은 재료의 피로수명에 많은 영향을 미치므로 이의 거동을 묘사하고 변동하중하의 피로수명을 예측하기 위한 연구들이 행하여져 왔다. 현재까지의 연구에서 제안되고 있는 지연현상에 대한 기구로는 균열선단에서의 압축잔류응력과 관련한 소성영역의 효과, 균열의 닫힘, 균열선단의 둔화현상, 균열선단의 변형경화, 균열선단의 가지현상 등을 들 수 있다. 과대하중에 의한 지연현상의 이러한 기구는 변동하중하의 균열의 거동 파악이나 수명예측에 기초가 되므로 많이 연구되고 있지만, 이들은 동일한 두께를 가

* 정회원, 부경대학교 기계·자동차공학부

** 부경대학교 대학원(현 YKK근무)

진 시험편에 대한 연구가 많다. 지연현상에 미치는 영향인자는 여러 가지가 있지만 그 중에서도 시험편 두께의 영향은 실용적 관점에서도 중요하다. 이러한 두께의 영향에 관한 연구^(2,3)는 많이 있지만, 단일과대하중과 일정진폭하중하의 실험에 대한 지연현상에 대한 고찰이 대부분이다. 일정진폭하중하의 실험은 균열전단의 파괴조건, 즉 균열길이의 증가와 더불어 응력 레벨이 증가하게 되므로 지연현상에 대한 명확한 거동을 고찰하는데 좋은 방법이라고는 할 수 없다.

이러한 관점에서, 본 연구에서는 소수회의 연속 반복 다중과대하중에 의한 피로균열전파 지연 거동에 미치는 영향인자에 관한 고찰을 목적으로, SM45C강의 CT시험편을 이용하여 균열전단의 응력상태를 일정으로 제어하는 ΔK 제어 피로시험을 수행하여 여러 가지 응력 레벨에 대한 시험편 두께에 따른 지연거동을 고찰하고, 또한 동일한 두께의 시험편을 이용하여 과대하중의 작용위치 및 과대하중의 작용주파수에 따른 지연거동을 실험적으로 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용한 시험편 재료는 일반 기계구조용강인 SM45C로, 그 화학 성분과 기계적성질을 Table 1과 Table 2에 나타낸다. 시험편의 형상은 ASTM E647-93의 규정⁽⁴⁾에 의하여 가공한 폭 100mm, 두께 6, 12, 18mm인 CT시험편이며 시험편의 채취방향은 압연방향과 균열의 전파방향이 직각이 되도록 하였다.

Table 1 Chemical composition(wt.%)

| Material | C | Si | Mn | P | S | Al |
|----------|------|------|------|------|------|------|
| SM45C | 0.47 | 0.20 | 0.74 | 0.01 | 0.18 | 0.01 |

Table 2 Mechanical properties

| Material | Tensile strength | Yield strength | Elongation | Hardness (H_B) |
|----------|------------------|----------------|------------|--------------------|
| SM45C | 610MPa | 342MPa | 23.0% | 170 |

2.2 피로시험

피로시험에는 용량 100kN의 전기유압 서보식

피로시험기(Shimadzu, EHF-ED)를 이용하여, 일정 ΔK 치 제어 피로시험을 수행하였다. 시험조건은 실험실의 대기중에서 응력반복속도 10Hz, 응력비 0.2의 정현파로 하였다. 그리고 본 실험에 들어가기 전에 모든 시험편에 대하여 2~3mm의 예비균열을 삽입하였다. 본 실험에서 제어한 기준 응력확대계수범위(ΔK_b)는 25, 30, 37.5 및 45MPa \sqrt{m} 의 4종류이고, 과대하중비(OLR)는 1.5로 일정하게 하였다. 그리고 다중 과대하중 작용수(N_p)는 10cycle로 하였으며, 연속다중 과대하중은 균열길이가 약 40mm전파하였을 때 수동으로 1Hz의 작용주파수로 행하였다. 지연현상에 미치는 시험편 두께의 영향을 조사하기 위해 두께 6, 12, 18mm의 시험편에 대하여 상기의 조건으로 실험을 행하였다. 또한 과대하중 작용주파수($OLHz$)의 영향을 조사하기 위하여 18mm 시험편에 대하여 0.1, 1, 10Hz로 과대하중을 작용시켜 수행하였으며, 과대하중 작용위치의 영향에 대해서는 a/W 가 0.3, 0.4, 0.5 및 0.6일 때 연속다중 과대하중을 작용시켜 실험을 수행하였다. 균열길이는 피로시험중에 하중과 clip gauge로부터 측정된 균열개구변위를 자동계측하여 Ashok Saxena등⁽⁵⁾이 제안한 식을 사용하여 구하고, 균열길이가 0.5mm 증가할 때마다 균열길이 a , 응력반복수 N , 응력확대계수범위 ΔK , 최대하중, 최소하중, 최대개구변위, 최소개구변위 등을 플로피 디스크에 자동적으로 기록하였다. 한편, 균열전단의 응력확대계수는 ASTM E647-93에 의한 식을 이용하였으며, 피로균열전파율은 시이컨트법으로 구하였다. 본 실험의 지연현상에 대한 전형적인 개념도는 전보와 같다⁽⁶⁾. 피로균열전파 지연거동은 지연수명과 지연균열길이의 변수로 설명할 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기준 응력 레벨에 대한 시험편 두께의 영향

Fig. 1은 시험편 두께 6, 12 및 18mm에 대한 기준 응력 레벨(ΔK_b)이 25, 30, 37.5 및 45MPa \sqrt{m} 의 조건하에서 얻은 응력반복수(N)와 균열길이(a)와의 관계를 나타낸다. 세로축의 균열길이는 25mm에서 전파하는 것으로 기준화하였다. $a-N$ 곡선은 과대하중 작용진까지 거의 직선형태를 나타내고 있으며, 과대하중이 작용한 후에는 지연

현상이 일어나고 그 후 서서히 과대하중 이전의 정상적인 기울기의 곡선으로 회복됨을 보여주고 있다. 그러나, 동일 응력 레벨에 대한 시험편에 있어서도 과대하중의 작용전, 작용 후에 대한 각 시험편 곡선의 기울기가 다르고, 각 시험편에 대한 평균 피로균열전파율에는 변동성이 있음을 알 수 있다. 이는 Virkler 등⁽⁷⁾의 일정진폭하중하의 실험결과와도 일치하며, 피로균열전파율에는 명백히 변동성이 존재함을 보여준다. 만약 과대하중이 작용한 후의 수명예측을 행하는 경우에는 주의가 요구된다. 김등⁽⁶⁾은 균열까지의 영향이 비교적 적은 저응력 레벨에서의 10개의 시험편에 대한 과대하중 작용이전에 대한 수명과 과대하중 작용후의 수명을 구하여 그 변동계수를 조사한

결과 과대하중 작용이전의 전파수명의 변동계수는 7.25%로 비교적 일정하였으나 과대하중 작용 이후의 수명의 변동계수는 약 9.4% 정도로 다소 증가함을 보고하였다.

한편, 본 실험의 응력 레벨에 대한 피로균열전파 단계를 알아보기 위하여 응력확대계수범위와 과대하중 작용이전의 평균 피로균열전파율의 관계를 Fig. 2에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 본 실험의 응력 범위는 시험편 두께에 관계없이 피로균열전파의 제2단계 안정전파영역에 있음을 알 수 있다. 또한 파면의 형태는 스트라이에이션(striation)을 형성하며 전파하는 것을 알 수 있었다. 시험편의 두께가 얇을수록 평균 전파율은 낮은 경향을 나타내고 있다. 일반적으로 두께가 얇을수록 전파율이 저하하는 원인으로서는 불명확한 점이 많지만 시험편이 얇을수록 표면에서의 균열 पै쿠가 크다는 것과 평면응력이 전개하여 동일 응력 상태에서도 전파율이 저하된다고 생각된다. 본 실험 재료에 대한 균열전파율의 저하 정도는 고응력 레벨에서는 크고, 저응력 레벨에서는 적게 나타났다.

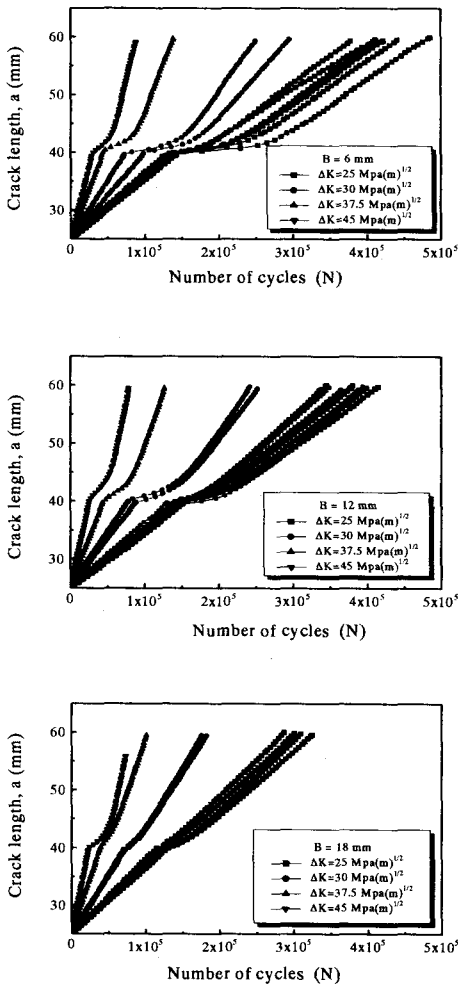


Fig. 1 $a \sim N$ curves for specimen thickness

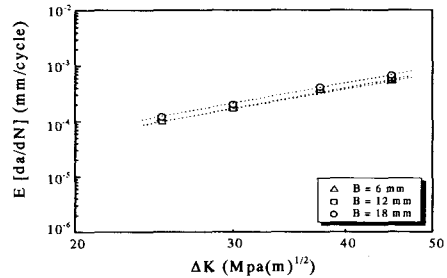


Fig. 2 Mean fatigue crack growth rate vs. stress intensity factor range

응력 레벨에 대한 시험편 두께의 영향을 고려한 지연현상을 이해하기 위해서는 지연수명 자체만으로 평가하기에는 다소 무리가 있다고 생각된다. 그래서 과대하중작용 이전의 평균수명(N_c)과 과대하중 작용이후의 지연수명(N_d)를 정규화한 N_d/N_c 의 값과 시험편 두께와의 관계를 Fig. 3에 나타낸다. 본 그림에서 알 수 있듯이 기준 응력 레벨이 $37.5MPa\sqrt{m}$ 이하에서는 시험편 두께가 증가하면 지연현상이 감소함을 알 수 있다. 그러나 ΔK_b 가 $45MPa\sqrt{m}$ 의 조건하에서는 시험편

두께와 더불어 지연현상이 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 Fig. 4에서와 같이 동일 두께에 있어서도 ΔK_b 가 증가하면 지연현상이 증가하는 경향을 보여주고 있다. 비교적 고응력 레벨인 $45\text{MPa}\sqrt{m}$ 의 조건하에서는 시험편 두께가 증가할수록 지연거동(N_d/N_c)이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 고응력 레벨에서의 평면변형률에 대한 시험편 두께의 영향이 증가하여 평면응력상태로의 응력변화와 함께 균열선단에서의 균열 가지 현상 등, 지연 현상에 대한 여러 기구들의 상호 작용과 관련이 있다고 생각된다.

Fig. 5는 각각의 시험편 두께에 대한 ΔK_b 에 대한 최소전파율의 관계를 나타낸 것이다. 두께가 6, 12mm 시험편에서는 ΔK_b 가 증가함에 따라 최소균열전파율도 증가하고 있음을 보여주고 있다. 18mm 시험편의 경우 ΔK_b 가 $37.5\text{MPa}\sqrt{m}$ 이상에서는 급격히 감소하고 있다. 이는 18mm 시험편의 경우 비교적 고응력 레벨에서의 응력상태의 변화와 함께 균열선단의 가지현상 등의 영향과 관계가 있다고 생각된다. 대표적으로 ΔK_b 가 $25\text{MPa}\sqrt{m}$ 일 경우에 있어서 과대하중 작용 이후의 최소균열전파율은 두께가 6, 12,

18mm로 증가함에 따라 각각 1.877×10^{-5} , 2.922×10^{-5} , 5.283×10^{-5} 으로 증가하였다. 이는 두께가 증가할수록 최소균열전파율에 도달한 뒤 다시 증가하여 정상상태의 균열전파율로 회복하는데 걸리는 지연수명이 짧아짐을 의미한다.

Fig. 6은 지연수명과 최소전파율의 관계를 두께와 응력레벨에 관계없이 전체적으로 나타낸 그림이다. 본 실험의 범위에 대한 두께와 응력 레벨에 있어서, 지연수명과 최소전파율 사이에는 음의 상관관계가 있음을 알 수 있다. 그림내의 두 곡선은 95% 신뢰 수준을 나타낸다. 이들 사이의 상관관계 실험식은 다음과 같다.

$$\frac{\left(\frac{da}{dN}\right)_{\min}}{\left(\frac{da}{dN}\right)_c} = A \left(\frac{N_d}{N_c} \right) + B \quad (1)$$

여기서, $A = -0.263$, $B = 0.543$ 을 얻었다. 최소전파율은 어느 정도 지연거동을 나타내는 하나의 파라미터가 될 수 있다고 생각된다⁽⁷⁾.

Fig. 7은 시험편 두께 12mm에 대한 과대하중 작용 부근에서의 표면 균열의 일레이다. ΔK_b

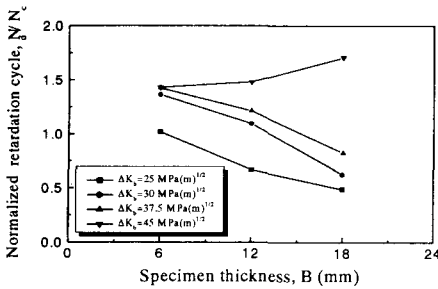


Fig. 3 Effect of normalized retardation on thickness

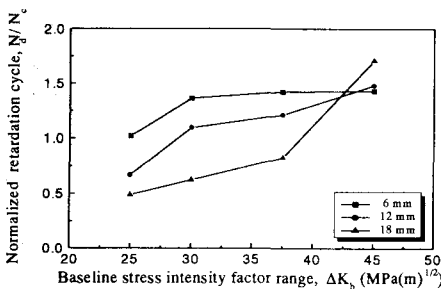


Fig. 4 Effect of retardation on ΔK_b

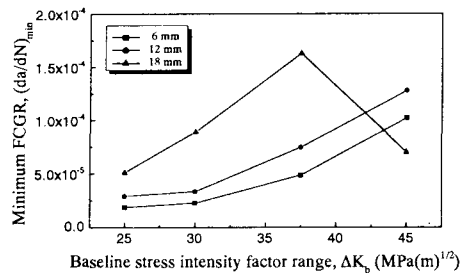


Fig. 5 Effect of minimum FCGR on ΔK_b

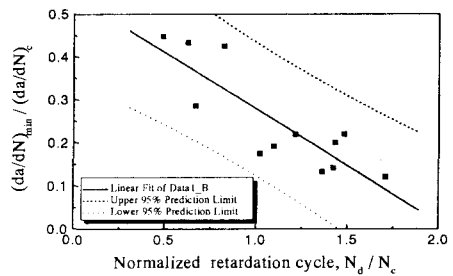


Fig. 6 $(da/dN)_{\min} / (da/dN)_c$ vs. N_d/N_c

가 $25\text{MPa}\sqrt{m}$ 의 경우 과대하중의 작용에 의한 균열선단의 가지현상은 그렇게 형성되고 있지 않음을 보여주고 있으나, ΔK_b 가 $37.5\text{MPa}\sqrt{m}$ 의 경우에 있어서는 과대하중의 작용에 의하여 균열선단에서의 균열가지 현상이 전자에 비하여 비교적 많이, 그리고 균열가지의 크기도 크게 나타남을 알 수 있었다. 이러한 균열가지 현상을 비교하면, 비교적 낮은 응력 레벨에서는 균열선단의 가지현상에 의한 것보다는 소성변형에 의한 균열선단의 압축잔류응력 등과 같은 것에 의하여 지연거동에 영향을 미치는 것이라 생각되며, 비교적 큰 응력 레벨에서는 균열선단의 균열가지의 형성에 의하여 균열전파력이 감소하여 지연거동에 영향을 줄 것으로 사료된다.

3.2 과대하중 작용위치의 영향

다음은 과대하중 작용위치(a/W)가 피로균열전파 지연거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여, ΔK_b 를 $25\text{MPa}\sqrt{m}$, 시험편 두께 18mm , 과대하중비(OLR) 1.5, 과대하중 작용수(N_p) 10으로 실험조건을 일정하게 유지하여 실험을 수행하였다.



Fig. 7 Comparison of crack surface for ΔK_b

Fig. 8은 시험편 폭(W)가 100mm 인 시험편을 사용하여 균열길이가 30, 40, 50 및 60mm 전파하였을 때 과대하중을 작용하여, 그 때의 $a \sim N$ 곡선으로부터 구한 피로균열전파율과 균열길이에 대해서 나타낸 것이다. 과대하중의 작용위치, $30(a/W=0.3)$, $40(a/W=0.4)$, $50(a/W=0.5)$ 및 $60(a/W=0.6)\text{mm}$ 에서 지연현상이 뚜렷이 나타남을 보여주고 있다. Fig. 9는 과대하중 작용위치(a/W)와 지연수명(N_d)와의 관계를 나타낸다. Bernard 등⁽¹¹⁾은 과대하중의 작용위치에 따라 지연거동에 차이가 없다고 보고하였으나, 본 실험 결과에 있어서는 a/W 가 0.4 까지는 지연수명이 증가하다가, 그 이후부터는 서서히 감소하는 경향을 보여주고 있다. a/W 에 따라 지연현상에 이러한 차이가 나는 것은 반복 응력에 의한 균열전파 경로에서의 재료의 열화와 더불어 균열전파경로의 변화로 인한 균열 단힘이나 균열선단의 응력 완화 등을 주요한 원인으로 생각할 수 있으나, 현재의 실험 단계에서 명확히 결론 내리기는 무리가 있다고 사료된다. 따라서, 여러 가지 응력

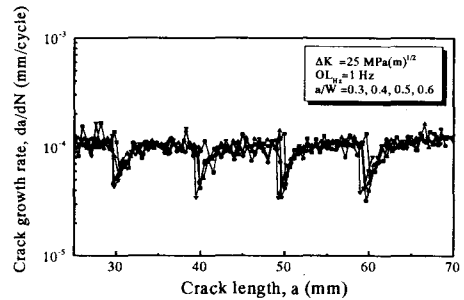


Fig. 8 Fatigue crack growth behavior for aspect ratio (a/W)

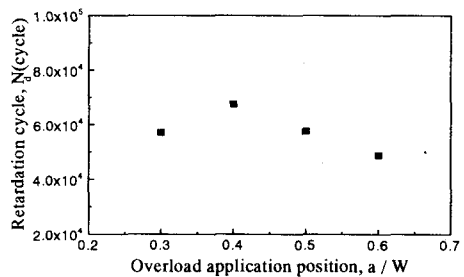


Fig. 9 Effect of N_d on a/W

레벨에 대한 더 많은 실험과 고찰이 요구된다고 하겠다.

3.3 과대하중 작용주파수의 영향

다음은 과대하중을 작용시키는 작용주파수 (OL_{Hz})가 작용위치(a/W)에 따라 피로균열전파지연거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여, ΔK_b 를 $25MPa\sqrt{m}$, 시험편 두께 $18mm$, 과대하중비 (OLR) 1.5, 과대하중 작용수(N_p) 10으로 실험조건을 일정하게 유지하여 실험을 수행하였다. 과대하중의 작용주파수는 0.1, 1 및 $10Hz$ 의 조건에 대하여 수행하였다.

Fig. 10은 과대하중 작용주파수와 지연수명과의 관계를 작용위치에 따라 나타낸 것이다. 과대하중의 작용주파수에 따라 지연현상이 나타나며, OL_{Hz} 가 증가함에 따라 지연수명도 증가하는 경향을 보여주고 있다. OL_{Hz} 에 따른 지연수명의 증가 기울기는 a/W 가 0.4에서 가장 크고, 0.5, 0.3 그리고 0.6의 순서로 감소하였다. 본 실험의 범위에서는 과대하중의 작용주파수가 증가하게 되면 지연수명도 증가하는 것을 알 수 있으나, 앞으로 여러 가지 응력 레벨과 두께에 대한 실험 및 고찰이 필요하다고 하겠다.

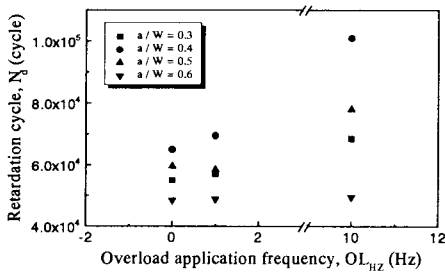


Fig. 10 Effect of N_d on OL_{Hz}

4. 결론

- (1) 본 실험의 일정 기준 응력 레벨에 대한 지연수명은 시험편 두께가 증가하면 저하하고, 그 기울기는 기준 응력 레벨이 클수록 증가하였다.
- (2) 정규화된 지연수명은 기준 응력 레벨이 $45MPa\sqrt{m}$ 인 경우를 제외하고는 시험편 두께가 증가하면 저하하고, 기준 응력 레벨의 증가와 더

불어 증가하였다.

(3) 최소전파율은 $18mm$ 시험편의 경우를 제외하고 기준 응력 레벨의 증가와 더불어 증가하였다. 또한 정규화된 최소전파율과 지연수명 사이에는 음의 상관관계가 있음을 알았다.

(4) 과대하중 작용위치에 따른 지연수명은 a/W 가 0.4까지는 증가하고 그 이후부터는 감소하였다.

(5) 과대하중 작용주파수에 따른 지연수명은 과대하중 작용주파수가 증가하면 증가하였고, 그 기울기는 과대하중 작용위치가 0.4일 경우가 가장 크게 나타났다.

참고문헌

- (1) 이순복, 1997, "신뢰성 향상을 위한 피로설계 기술", 대한기계학회 '97년도 춘계학술대회는 문집, pp.71~77
- (2) 김정규, 박병훈, 류석현, 1989, "7075-T3알루미늄 합금의 피로균열진전거동 및 지연현상에 미치는 두께의 영향", 대한기계학회논문집, 제13권 제3호, pp.577~593
- (3) Shih, T. T. and Wei, R. P., 1975, "Effects of Specimen Thickness on Delay in Fatigue Crack Growth; J. of Testing and Evaluation, Vol. 3. No. 1, pp.46~47
- (4) ASTM E647-93, 1993, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates"
- (5) Ashok Saxena and Hudak, S. J., 1978, 'Review and Extension of Compliance Information for Common Crack growth Specimen', Int. J. Fract., Vol. 14. No. 15, pp.453~462
- (6) 김선진, 남기우, 김종훈, 이창용, 박은희, 서상하, 1997, "강의 피로균열지연거동에 미치는 과대하중의 영향과 통계적 변동에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제11권 제3호, pp.76~88
- (7) Virkler, D. A., Hillberry, B. M. and Geol, P. K., 1979, "The Statistical Nature of Fatigue Crack Propagation", ASME J. Eng. Mat. and Tech., Vol. 101, pp.148~153