

# 강재의 피로균열전파율에 미치는 시험편 크기의 영향

김선진 · 안석환  
부경대학교 기계공학부

## Effect of Specimen Size on Fatigue Crack Growth Rate in Steels

SEON-JIN KIM AND SEOK-HWAN AHN

School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

**KEY WORDS:** Fatigue crack growth rate 피로균열전파율, Specimen thickness 시험편 두께, Stress ratio 응력비, Specimen width 시험편 폭, Aspect ratio 균열 형상비, Constant stress intensity factor range controlled test 응력확대계수일정제어시험

**ABSTRACT:** This paper describes the effect of specimen size on fatigue crack growth rate for the offshore structural high-tensile-strength steel, BS4360 and machine structural steel, SM45C. The purpose of the present study is to investigate the effect of stress ratio, aspect ratio, specimen width and specimen thickness on the fatigue crack growth behavior. Compact tension specimens with a LT orientation for BS4360 and SM45C steels were used. All testing was done at constant stress intensity factor range controlled fatigue crack growth condition. The investigation demonstrates that the fatigue crack growth rate is increased with increasing stress ratio and specimen thickness, and is decreased with increasing specimen width. The fatigue crack growth rate is unaffected by aspect ratio until  $a/W=0.50$ , but is increased by increasing aspect ratio from  $a/W=0.55$ .

### 1. 서 론

반복하중에 의한 재료의 파괴파괴는 균열의 발생 과정과 균열의 전파 과정으로 대별할 수 있으나 발생과 전파는 엄밀히 구별되기 어렵다. 그러나, 파괴역학의 개념이 도입된 이래 균열 전파거동을 고려하는 것은 중요한 사항중의 하나이다.

피로균열전파율은 응력 레벨( $\Delta K$ )과 밀접한 관계가 있다. Paris, Forman등(Paris and Erdogan, 1963; Forman *et al.*, 1967)의 피로균열전파법칙은 균열전파율을 고찰하는데 널리 이용되고 있다. 그러나 이 때 정식화된 피로균열전파율에도 여러 가지 불확정성 요인 예를 들면, 외력, 재료의 불균질성, 환경 그리고 부재의 크기 등의 영향은 물론 이들의 상호작용으로 확률적 변동을 한다는 것은 잘 알려져 있다. 그 때문에 많은 연구자들이 이들의 인자가 피로균열전파율(FCGR)에 어떻게 영향을 미치는가에 대하여 연구를 수행해 왔다. 그 중에서 실험실에서의 실험 데이터를 실제 구조물등에 어떻게 적용할 것인가 하는 문제는 중요하다. 이러한 관점에서 균열전파율에 미치는 시험편 크기의 영향이라는 문제에 대해서 많은 연구(윤 등, 1992; 김, 1994; 심과 김, 1998; Ritchie *et al.*, 1975; Fujitani *et al.*, 1982; Richard and Lindley, 1972; Putatunda and Rigsbee, 1985)가 있었지만, 대부분이 균열길이의 증가와 더불어 균열 선단에서의 응력 상태가 증가하는 일정하중제어 시험에 의한 연구가 대부분이고 응력확대계수범위( $\Delta K$ )를 시험편 내에서 일정하게 제어한 조직적이고 체계적인 실험을 행한 연구는 비교적 적다.

따라서, 본 연구에서는 해양 구조물용 고장력강(BS4360)을 이용하여 피로균열전파율에 미치는 시험편 폭(W), 균열 형상비

( $a/W$ ), 시험편 두께(B) 그리고 응력비(R)의 영향을 조사하였고, 특히 시험편 두께의 영향에 대해서는 일반기계 구조용강(SM45C)을 사용하여 4종류의 응력 레벨에 대하여 고찰하였다. 모든 실험은 일정  $\Delta K$  레벨하에서 수행되었다.

### 2. 실험방법

#### 2.1 재료 및 시험편

본 실험에서 사용한 시험편 재료는 해양구조물용 고장력강(BS4360)과 일반 기계 구조용강(SM45C)으로, 그 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 나타낸다.

Table 1 Chemical composition (wt. %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Al
BS4360	0.15	0.40	1.32	0.016	0.026	-
SM45C	0.47	0.20	0.74	0.01	0.18	0.01

Table 2 Mechanical properties

Material	Tensile Strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
BS4360	522	371	30.0
SM45C	610	342	23.0

시험편의 형상은 ASTM E647-93의 규정에 의하여 가공한 폭(W) 100, 200, 300mm, 두께(B) 6, 12, 18mm인 CT시험편이며, 시험편의 채취방향은 압연방향과 균열의 전파방향이 직각(L-T direction)이 되도록 하였다.

**2.2 피로실험**

본 실험에 이용한 시스템은 하중을 부하하는 전기유압 서보 피로시험기, 서보 시험기를 움직이는 유압펌프, 실험의 제어 등을 행하는 컴퓨터, 균열길이를 산출하기 위한 균열개구변위 측정장치, 그리고 주변기기 등으로 구성하였으며, 실험중 모든 장치가 자동으로 작동하도록 하였다. 일정 진폭하중하의 피로 균열전파시험은 거시적으로 응력 상태를 일정하게 유지하고 있지만, 균열이 전파함에 따라 균열선단의 파괴조건,  $\Delta K$ 가 증가하게 된다. 이것은 피로균열전파거동의 영향인자와 변동성에 대한 영향의 차이를 구별하는데 좋은 방법이라고 할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 일정  $\Delta K$  제어 피로시험을 수행하였다. 시험조건은 BS4360강에 대해서는 응력반복속도 5Hz, 응력비(R) 0.2 및 0.05로 하였으며, SM45C 강에 대해서는 응력반복속도 5Hz, 응력비 0.2로 상온의 대기 중에서 피로실험을 수행하였다. 두 가지 강종에 대한 시험조건과 시험편 수를 Table 3과 Table 4에 나타내었다. 균열길이는 피로시험 중에 하중과 변위계에 의하여 측정된 균열개구변위를 자동으로 계측하여 Ashok Saxena 등(Ashok Saxena and Hudak, 1978)이 제안한 식을 사용하여 구하였으며, 피로균열전파율은 시컨트법(secant method)에 의하여 계산하였다.

**Table 3 Test conditions for BS4360**

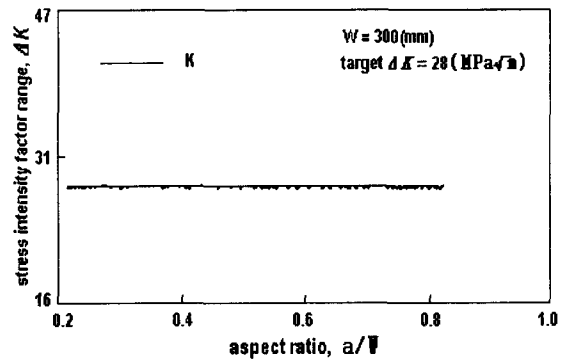
Thickness (mm)	Width (mm)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )	N. of specimen
6	100	28	3
12	100	28	4
18	100	28	1
		33	5
		40	3
	200	28	1
		33	1
		40	1
	300	28	2
		33	1
		40	1

**Table 4 Test conditions for SM45C**

Thickness (mm)	Width (mm)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )	N. of specimen
6	100	25	5
		30	5
		37.7	5
		45	5
12		25	5
		30	5
		37.5	5
18		45	5
		25	5
		30	5
		37.5	5
			45

**2.3 실험조건 확인**

본 연구의 목적인 응력비(R), 시험편의 폭(W), 균열 형상비(a/W) 그리고 시험편 두께(B) 등의 영향을 조사하기 위해서는 균열선단에서의 안정한 응력확대계수범위( $\Delta K$ )값의 일정 제어는 필요 불가결한 것이다. Fig. 1에 aspect ratio와  $\Delta K$ 와의 관계의 일례를 나타낸다. 또한 전시험편에 대한  $\Delta K$ 의 변동계수의 평균은 0.009% 이었다. 이상에서 알 수 있듯이  $\Delta K$ 치는 비교적 양호하게 제어되었다고 할 수 있다.

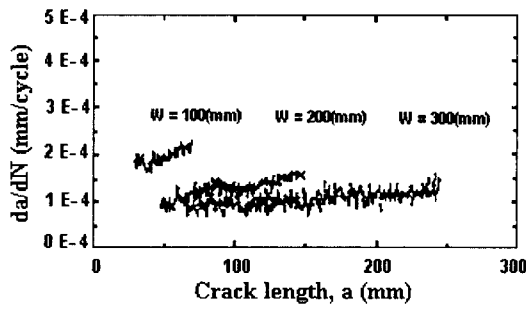


**Fig. 1 Relation between a/W and  $\Delta K$**

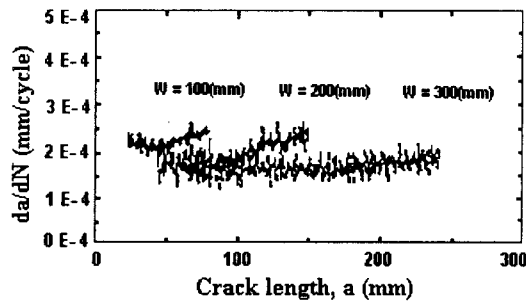
**3. 실험결과 및 고찰**

**3.1 피로균열전파율의 거동**

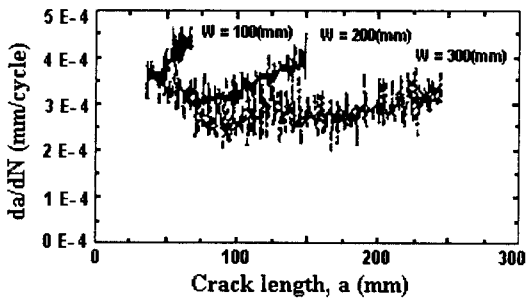
시험편 폭(W) 및 응력확대계수범위( $\Delta K$ )에 대한 균열길이(a)와 피로균열전파율(da/dN)과의 관계의 일례(B=18mm)를 Fig. 2에 나타내었다. 동일  $\Delta K$ 에서 시험편 폭이 증가하면 그 평균 피로균열 전파율은 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 동일 시험편 폭에 대하여  $\Delta K$ 치가 증가하면 피로균열전파율도 증가하였다.



(a)  $\Delta K = 28\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$



(b)  $\Delta K = 33\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$



(c)  $\Delta K = 40\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

Fig. 2 Relation between  $a$  and  $da/dN$

어느 시험편에 있어서도 피로균열전파율에는 많은 변동성을 나타내고 있으며, 이는 재질의 불균질성에 의한 균열선단에서의 균열전파에 대한 전파저항이 불규칙하게 변하기 때문이라 생각된다(Ortiz and Kiremidjian, 1986; 김, 1999).

### 3.2 응력비(R)의 영향

Table 3의  $W=100$ ,  $\Delta K=33$ 의 경우에 대하여 응력비가 0.2 및 0.05에 대하여 각각 3개 및 2개의 실험을 행하였다. Fig. 3은  $R$ - $da/dN$ 의 관계를  $a/W=0.4, 0.5, 0.6$ 에 대해서 나타낸 것이다. 동일 응력비( $R$ )에 있어서도 실험치에는 scatter가 보임을 알 수 있으며, 응력비가 0.2의 경우가 0.05의 경우보다 전파율이 다소 큰 것을 알 수 있다. Warker(Warker, 1970)의 알루미늄 합금에 대한 결과와도 동일한 양상을 보였다.

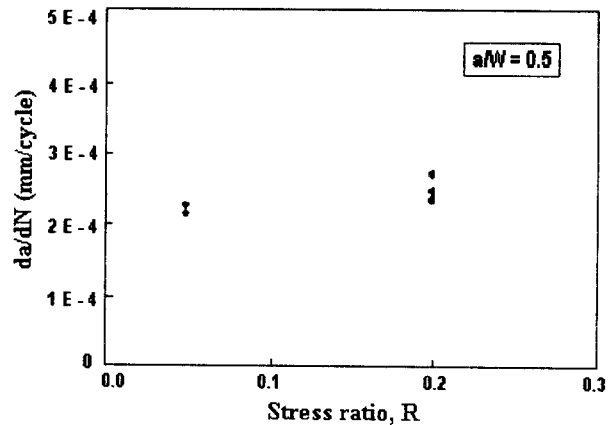
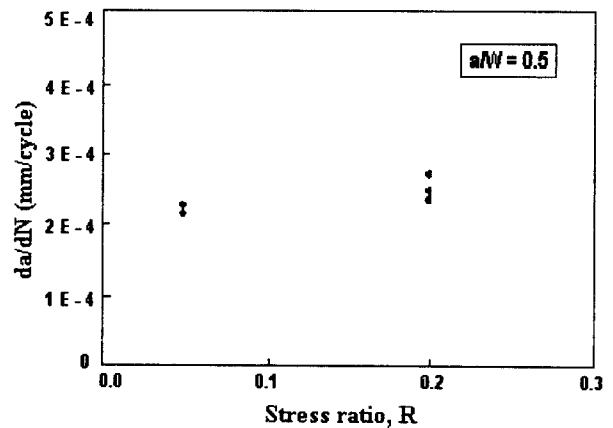
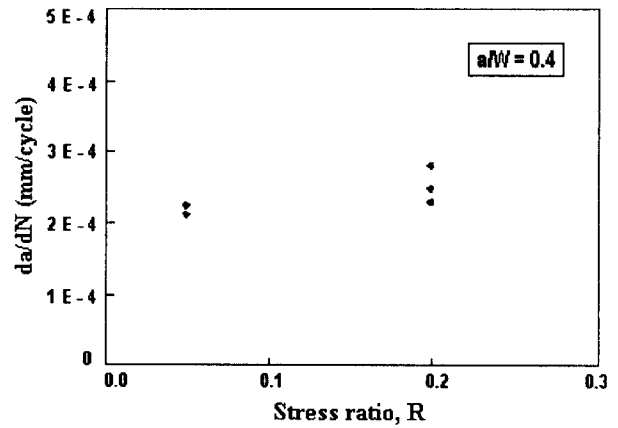
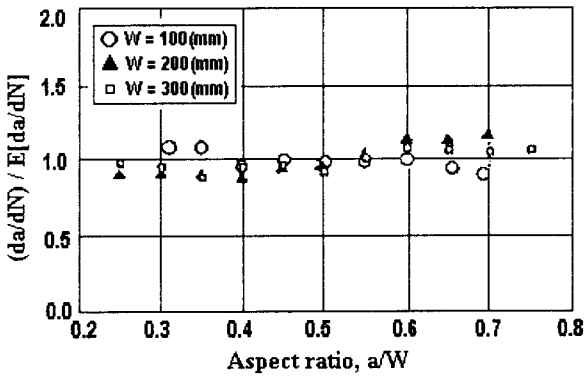


Fig. 3 Effect of stress ratio on FCGR

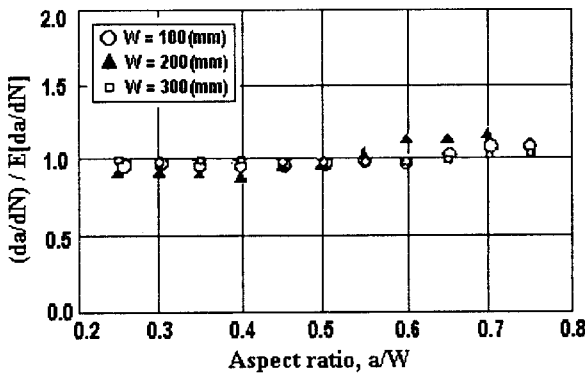
### 3.3 균열 형상비( $a/W$ )의 영향

평균으로 정규화 시킨 전파율과  $a/W$ 와의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 전체적으로 아주 작지만 전파율은 변동을 보이고 있으며,  $a/W$ 가 0.50까지는 거의 영향이 없는 것처럼 보인다. 그러나, 큰 균열 형상비( $a/W \geq 0.55$ )에서는 전파율이 낮은  $a/W$ 와 비교하여 증가하는 경향을 보이고 있다.  $a/W \leq 0.55$ 에서는 피로균열전파율이 시험편 크기에 영향을 미치

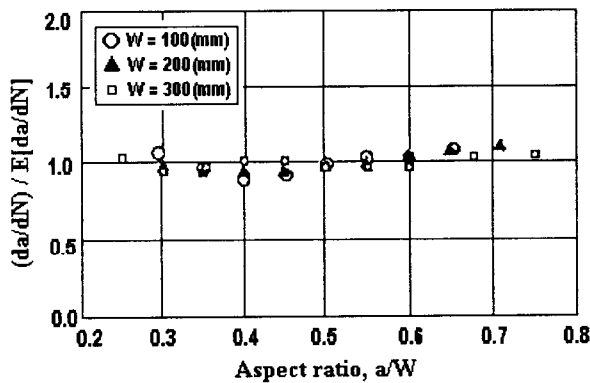
지 않는다고 할 수 있다. 이것은 AISI 4340강을 이용한 Putatunda등(Putatunda and Rigsbee, 1985)의 실험결과와 일치하는 경향이다. 이러한 결과에 대한 원인으로서는  $a/W$ 의 관계에 변화율이 크게되어  $\Delta K$ 치 일정제어에 어려움이 있다고 생각되지만,  $\Delta K$ 치가 일정하게 유지되었다 하더라도 ligament가 어떤 값보다도 짧게되면 유한판의 영향의 영향으로  $da/dN$ 이 크게 된다는 것과 균열이 진전하는 과정에 있어서  $a/W$ 가 작은 곳에서는 균열선단이 인장응력이 생기고 먼 곳의  $a/W$ 에서는 압축응력이 생겨 재료에 손상을 주어 재료특성이 변화한 것이라 생각된다.



(a)  $\Delta K = 28 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$



(b)  $\Delta K = 33 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

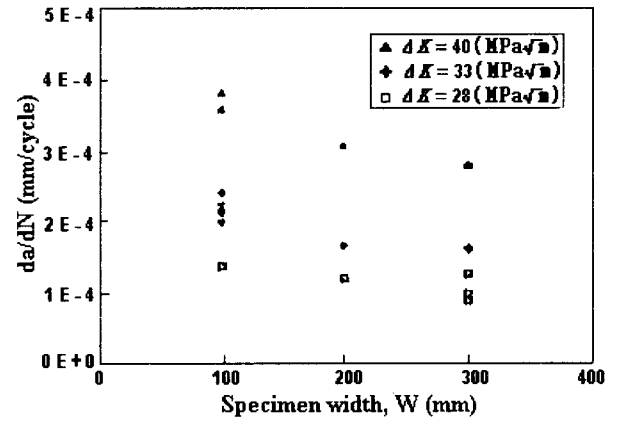


(c)  $\Delta K = 40 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

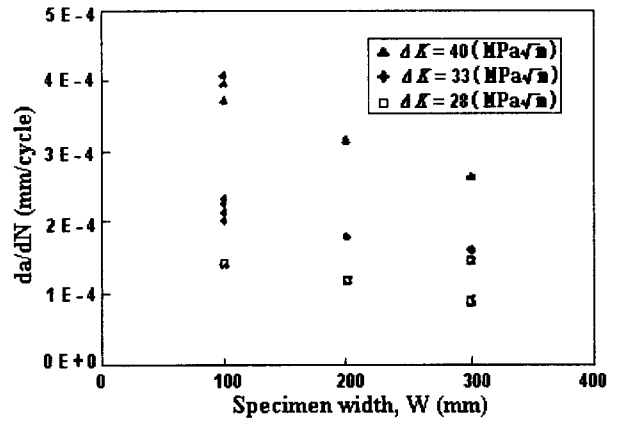
Fig. 4 Effect of aspect ratio on FCGR

### 3.4 시험편 폭(W)의 영향

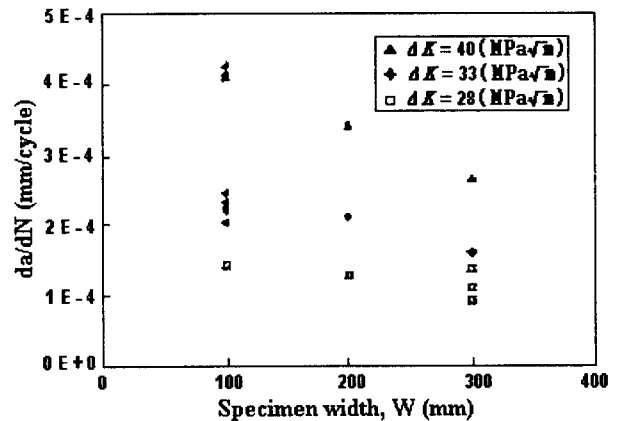
Fig. 5는 시험편 폭과 균열전파율과의 관계를  $a/W$ 에 대해서 나타낸다.  $\Delta K$ ,  $a/W$ 에 관계없이 전체적으로 시험편 폭이 증가할수록 전파율이 감소하는 경향을 보이고 있다.



(a)  $a/W = 0.4$



(b)  $a/W = 0.5$



(c)  $a/W = 0.6$

Fig. 5 Effect of specimen width on FCGR

이것은 W의 영향은 없다고 하는 Putatunda등(Putatunda and Rigsbee, 1985)의 결과와는 다르나 Georgiev등(Georgiev et al., 1981)의 연구결과와는 일치한다. 이러한 결과의 원인으로는 W가 변화하면 사용한 근사식에 의한  $\Delta K$ 치에 차이가 나타날 수 있는 것과, W가 작게되면 유한판의 영향이 존재하여 전파율이 크게 될 가능성이 있는 형상적인 문제 등이 생각된다. 한편, 전파율이 감소하는 기울기는 응력 레벨이 높을수록 증가하였다.

3.5 시험편 두께(B)의 영향

Fig. 6은 BS4360강에 대한 시험편 두께와 평균피로균열전파율과의 관계를 나타낸다. 동일 시험편 두께에 있어서도 어느 것이나 scatter가 존재함을 알 수 있으며, 평균 피로균열전파율에 미치는 시험편 두께의 영향은 무시할 수 없는 것처럼 보인다. 그러나 그림에서 알 수 있듯이 시험편 두께가 증가하면 그 평균 피로균열전파율은 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 7은 Table 4의 SM45C강에 대한 시험편 두께의 영향을 나타낸 것이다. SM45C강에서도 BS4360강과 마찬가지로 전파율에는 scatter가 존재함을 알 수 있다. 전체적으로는 BS4360강에서와 같이 시험편의 두께가 증가하면 그 평균 피로균열 전파율도 증가하는 경향을 알 수 있으며,  $\Delta K$ 가 증가할수록 평균 피로균열전파율도 증가하며 시험편 두께에 따른 전파율의 기울기는 더욱 커짐을 알 수 있다. 높은  $\Delta K$ 치 하에서는, 피로 균열전파율은 시험편 두께가 증가하면 두께의 구속과 인장응력의 증가에 의해 전파율도 증가하는 것으로 생각되며, 또한 균열선단에서의 전파저항이 두께의 증가와 더불어 더욱 평균화되어 감소하기 때문이라 생각된다.

피로균열전파율(da/dN)의 변동은 시험편간 변동(inter-specimen variability)모델과 시험편내 변동(intra-specimen variability)모델로 나눌 수 있다(市川 昌弘, 中村 武夫, 1987). Table 5는 시험편 두께와 평균 피로균열전파율의 시험편간 평균( $\mu$ )과 변동계수(COV)를 나타낸 것이다. 시험편간의 평균 피로균열전파율의 평균값은 응력 레벨에 관계없이 시험편 두께가 증가하면 증가하였다. 그러나 시험편간 전파율의 변동계수는 응력 레벨( $\Delta K$ )이 낮은 25MPa $\sqrt{m}$ 과 비교적 높은 45MPa $\sqrt{m}$ 에서는 증가하는 경향을 보였다.

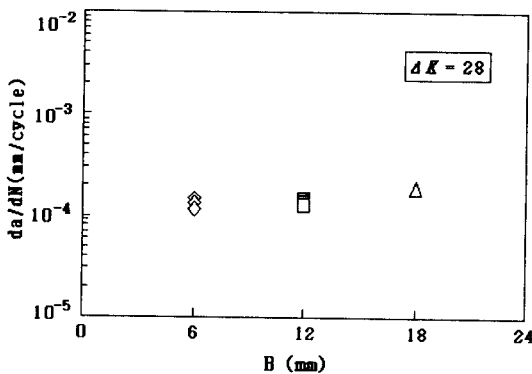


Fig. 6 Effect of specimen thickness on FCGR for BS4360 steel

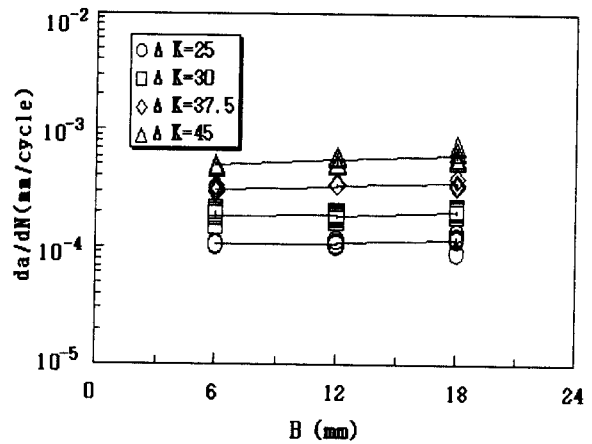


Fig. 7 Effect of specimen thickness on FCGR for SM45C

한편, Fig. 8은 균열길이에 대해서 정규화한 피로균열전파율의 관계의 일례를 나타낸다. 다른 응력 레벨( $\Delta K$ )에서도 동일한 결과를 얻었다. 그림에서 알 수 있듯이, 시험편 두께에 관계없이 시험편내에서 피로균열전파율에는 변동성이 존재함을 알 수 있다. 또한 그 변동의 양상은 응력 레벨에 관계없이 시험편 두께가 증가하면 감소하는 경향을 보였다. 이는 시험편 두께가 증가함에 따라 균열전파에 대한 재료의 강도가 평균화에 의하여 감소하기 때문이라 생각된다.

Table 5 Inter-specimen variability of da/dN

$\Delta K$	B	n	$\mu (\times 10^{-4})$	COV
25.0	6	5	1.0454	0.0130
	12	5	1.0618	0.0372
	18	5	1.1438	0.1220
30.0	6	5	1.8074	0.0941
	12	5	1.8138	0.0468
	18	5	1.9650	0.0470
37.5	6	5	3.1232	0.0484
	12	5	3.3900	0.0165
	18	5	3.4394	0.0543
45.0	6	5	4.8900	0.0265
	12	5	5.4006	0.0744
	18	5	6.2152	0.1267

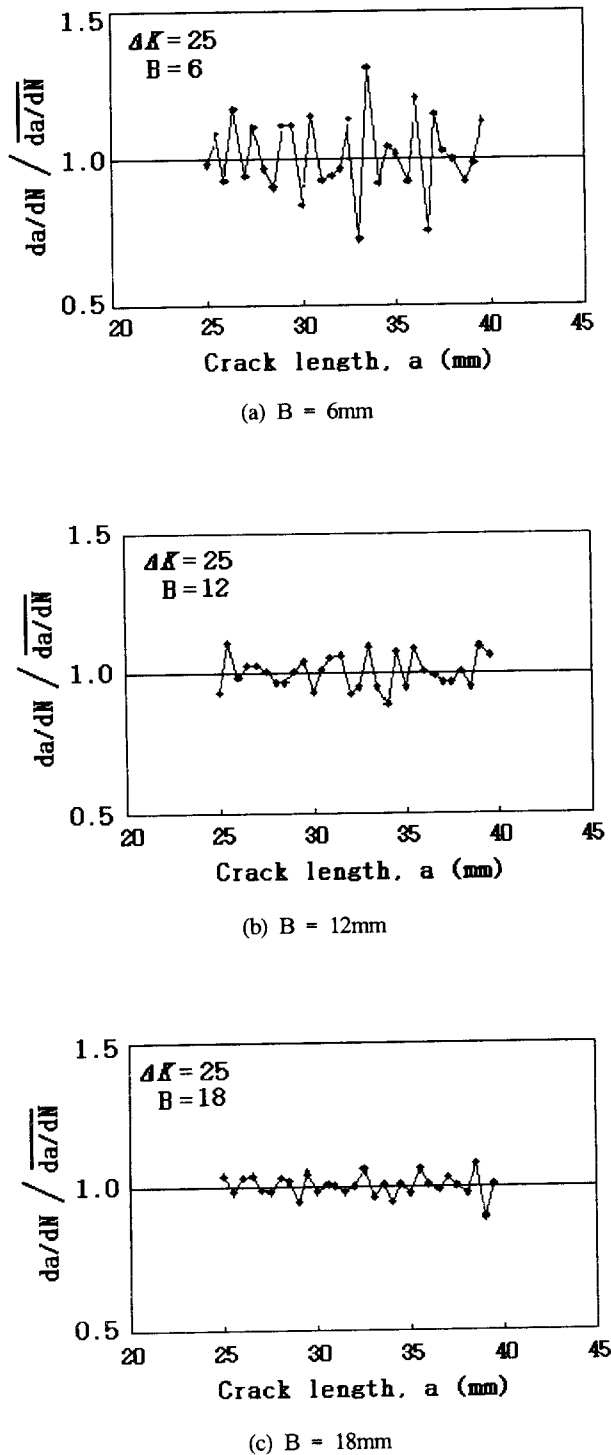


Fig. 8 Intra-specimen variability of  $da/dN$

이상의 본 실험 결과에서 관찰된 피로균열전파율의 변동은 이들 재료가 본래 가지고 있는 재료의 불균질성과 이방성의 기계적 성질에 의한 것이라 생각되며, 구조 부재의 피로균열전파 수명의 신뢰성공학(reliability engineering)적 고찰을 위해서는 재료의 공간적 변동의 양상에 대한 고찰과 더 많은 실험이 요구된다고 하겠다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 피로균열전파율에 미치는 응력비(R), aspect ratio(a/W), 시험편 폭(W) 및 시험편 두께(B) 등의 영향을 고찰하기 위하여, 두 종류의 구조용 강에 대한 CT시험편을 이용하여 응력확대계수범위 일정 제어 피로실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 피로균열전파율은 응력비의 증가와 더불어 증가하였다.
- (2) 피로균열전파율은 aspect ratio가 0.50까지는 거의 일정하고 0.55이상에서는 증가하는 경향이였다.
- (3) 피로균열전파율은 시험편 폭이 증가하면 감소하였다. 또한 전파율이 감소하는 기울기는 응력 레벨이 높을수록 증가하는 경향이였다.
- (4) 피로균열전파율은 시험편 두께가 증가하면 증가하였고, 그 기울기는 응력 레벨이 높을수록 증가하였다.
- (5) 시험편간 피로균열전파율의 변동계수는 응력레벨( $\Delta K$ )이 낮은  $25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 과 비교적 높은  $45\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 에서는 증가하는 경향을 보였으며, 중간 응력 레벨인  $30\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 과  $37.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 에서는 감소하는 경향을 보였다.
- (6) 시험편내의 피로균열전파율의 변동 양상은 응력레벨에 관계없이 두께가 증가하면 감소하는 경향을 보였다.

### 참 고 문 헌

김선진(1994). "피로균열전파저항에 미치는 시험편 두께의 영향에 관한 신뢰성공학적 고찰", 대한기계학회 94년도 재료 및 파괴부문 학술대회논문집, pp 31~34.

김선진(1999). "피로균열전파저항의 변동성에 의한 균열전파율의 해석", 대한기계학회논문집, 제23권 제7호, pp 1139~1146.

심동석, 김정규(1998). "두께변화에 따른 피로균열전진의 변동성에 대한 확률론적 해석", 대한기계학회논문집, 제22권 제8호, pp 1523~1532.

윤한용, 양영순, 윤장호(1992). "균일인폭하중하에서의 확률론적 균열전진 수명해석", 대한기계학회논문집, 제16권 제9호, pp 1691~1699.

Ashok Saxena and Hudak, S. J.(1978). "Review and Extension of Compliance Information for Common Crack Growth Specimens", International J. of Fracture, Vol. 14 No. 5, pp 453~462.

Forman, R. G., Keary, V. E. and Engle, R.M.(1967). "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic Loaded Structures", J. of Basic Engineering, Trans. ASME Vol. 89, pp 459~464.

Fujitani, K., Sakai, T, Nakagawa, A. and Tanaka, T.(1982). "Effect of Specimen Thickness on Fatigue Crack Propagation in High Strength Steels", Bull. Japan Soc. Mech. Engineers, Vol. 25, pp 1195~1201.

Georgiev, M. N., Dagadushkin, V. Yu., Minaev, V. N. and Stork, L. P.(1981). "Relationship of Fatigue Crack Growth Rate in St 3 Sp Steel to the Dimension and Orientation of the Sample", Sov. Mat. Sci., Vol. 17, pp 213~218.

- Ortiz, K. and Kiremidjian, A. S.(1986). "Time Series Analysis of Fatigue Crack Growth Rate Data", Engineering Fracture mechanics, Vol. 29, pp 317~334.
- Paris, P. C. and Erdogan, F.(1963). "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", J. of Basic Engineering, Trans. ASME Vol. 85, pp 528~534.
- Putatunda, S. K. and Rigsbee, J. M.(1985). "Effect of Specimen Size on Fatigue Crack Growth Rate in AISI 4340 Steel", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 22, No. 2, pp 335~345.
- Richard, C. E. and Lindley, T. C.(1972). "The Influence of Stress Intensity and Microstructure on Fatigue Crack Propagation in Ferritic Materials", Eng. Fract. Mech., Vol. 4, pp 951~978.
- Ritchie, R. O., Smith, R. F. and Knott, J. F.(1975). "Effects of Thickness on Fibrous Fracture from a Notch and on Fatigue Crack Propagation in low Strength Steel", Metal Science, Vol. 9, pp 485~492.
- Warker, E. K.(1970). "The Effect of Stress Ratio During Crack Propagation and Fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum", A STM STP 462, pp 1~14.
- 市川昌弘, 中村武夫(1987). "疲労き裂伝ば速度の試験片内變動と試験片間變動の分離", 材料, 第36卷 第408号, pp 922~926.

---

2000년 3월 3일 원고 접수

2000년 5월 15일 수정본 채택