

피로균열성장의 유한요소 시뮬레이션: Paris 법칙의 지수 m 의 결정

주 석 재*† · 유 총 호*

* 울산대학교 기계공학부

Finite Element Simulation of Fatigue Crack Growth: Determination of Exponent m in Paris Law

Seok Jae Chu*† and Conghao Liu*

* Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of Ulsan

(Received September 1, 2011 ; Revised May 5, 2012 ; Accepted May 8, 2012)

Key Words: Fatigue Crack Growth(피로균열성장), Stress Intensity Factor(SIF) (응력확대계수), Strain(변형률), Paris Law(Paris 법칙), Finite Element Simulation(유한요소 시뮬레이션), Crack Opening Displacement(균열개구변위), Crack Closure(균열 닫힘)

초록: 피로균열성장을 유한요소 시뮬레이션하였다. 인장시험으로 얻는 기계적 성질만을 사용하여 피로균열성장거동을 예측하려고 하였다. 유한요소해석 결과 균열선단 부근 절점의 변위의 변화를 살펴 임계 균열개구변위를 결정하였다. 균열선단 절점을 분리하여 균열성장을 시뮬레이션하였다. Paris 법칙의 지수를 결정하여 이미 발표된 값과 비교하였다. 균열닫힘을 고려한 유효 응력확대계수에 관하여 그랬을 때 더 일관성이 있는 결과를 얻었다.

Abstract: The finite element simulations of fatigue crack growth are carried out. Using only the mechanical properties usually obtained from the tensile test as input data, we attempted to predict the fatigue crack growth behavior. The critical crack opening displacement is determined by monitoring the change in displacements at the node close to the crack tip. Crack growth is simulated by debonding the crack tip node. The exponent in the Paris law was determined and compared to the published exponent. Plotting with respect to the effective stress intensity factor range yielded more consistent results.

- 기호설명 -

- a : 균열의 길이
- F : 인장하중
- K : 응력확대계수
- K_I : 모드 I 응력확대계수
- K_{op} : 균열열림 응력확대계수
- ΔK : 응력확대계수 진폭(= $K_{max} - K_{min}$)
- ΔK_{eff} : 유효응력확대계수 진폭(= $K_{max} - K_{op}$)
- N : 하중 횟수
- R : 응력비(= K_{min}/K_{max})
- t : 시편의 두께
- U : 균열열림비(= $\Delta K_{eff}/\Delta K$)
- v_y : 축방향 변위성분
- w : 시편의 너비
- α : 인장하중의 방향

1. 서론

피로는 일반적으로 3 단계로 진행된다. 1 단계에서는 표면 부근이 미끄러짐(slip)을 반복하여 미소균열로 발전하고, 2 단계에서는 하중 수직방향으로 안정적으로 성장하다가, 임계균열길이에 도달하면 불안정하게 성장하여 파단되는 것이 3 단계이다.

2 단계 균열성장속도는 단순히 계수 C 와 지수 m 으로 결정되는 Paris 법칙으로 표현된다. 계수 C 와 지수 m 의 상관관계에 대한 연구로 Nicholls⁽¹⁾는 피로시험결과인 지수 m 을 사용하여 이론적으로 계수 C 를 결정하고 검증하였다. Berger 등⁽²⁾은 피로시험결과인 계수 C 와 지수 m 의 상관관계를 제시하였다. Carpinteri 등⁽³⁾은 또 다른 상관관계를 제시하였다.

피로균열성장을 유한요소 시뮬레이션한 연구로 Nguyen 등⁽⁴⁾은 결합이론(cohesive theories)을 사용

† Corresponding Author, sjchu@ulsan.ac.kr

하였다. 그러나, 결합에너지, 결합강도, 소멸변위 등에 대한 데이터가 추가로 필요하다. Fan 등⁽⁵⁾은 다축피로기준을 사용하여 피로균열성장을 유한요소 시뮬레이션하였다. Seifi 등⁽⁶⁾도 임계 균열개구 변위를 사용하여 피로균열성장을 유한요소 시뮬레이션하였다. 그러나, 임계 균열개구 변위를 시험이나 해석 어느 것으로 결정하였는지 언급이 없다.

상용 유한요소프로그램⁽⁷⁾이 제공하는 균열성장 기준으로는 임계 개구 변위, 수직응력, 시간, 피로 균열성장법칙 등이다.

이제까지 대부분 시간이나 Paris 법칙과 같은 피로균열성장법칙 기준을 사용하여 피로균열성장을 미리 결정하여 입력하는 것이 많았다.⁽⁸⁾ 본 논문에서는 피로균열성장을 미리 결정하지 않고, 인장시험으로 얻는 기계적 성질만을 사용하여 임계 균열개구 변위를 결정하고 이것을 파괴기준으로 사용하여 피로균열성장을 시뮬레이션하고 피로균열성장속도를 예측하려고 한다. 그리고, 균열 단합이나 응력비의 영향이 제대로 나타나는지 검증하려고 한다.

2. 피로균열의 유한요소 시뮬레이션

피로균열성장 2단계는 식 (1) Paris 법칙으로 잘 표현된다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \tag{1}$$

Fig. 1에 도시한 시편은 Sander와 Richard⁽⁸⁾가 모드 I는 물론 혼합모드조건 하에서도 사용하려고 개발한 것이다. 본 논문에서도 같은 시편을 사용하였고 모드 I인 경우이므로 좌우측 구멍만 사용하고 중앙 구멍은 사용하지 않았다. 수직하중 F 는 양쪽 구멍에 고르게 나눠 작용하였다. 응력확대계수는

$$K_I = \frac{F}{wt} \sqrt{\pi a} \frac{w \cos \alpha}{w - a}$$

$$\left[\frac{0.26 + 2.65a/(w - a)}{1 + 0.55a/(w - a) - 0.08a^2/(w - a)^2} \right]^{1/2} \tag{2}$$

여기에서 α 는 하중방향과 균열수직방향이 이루는 각으로 본 논문에서는 $\alpha = 0$ 이다.

유한요소망 전체와 국부상세도는 Fig. 2와 같

다. 대칭성을 이용하여 상반부만 모델링하였다. 요소의 크기를 점점 줄여 균열선 부근 요소의 크기는 0.025 mm까지 줄였다. 균열선에 놓인 절점은 균열선에 붙여 두었다가 임계 균열개구 변위 파괴기준이 만족되면 서로 떼어 균열이 성장하게 하였다.

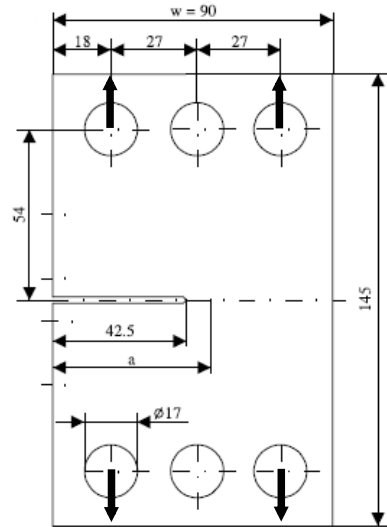


Fig. 1 Mixed-mode fatigue test specimen⁽⁸⁾

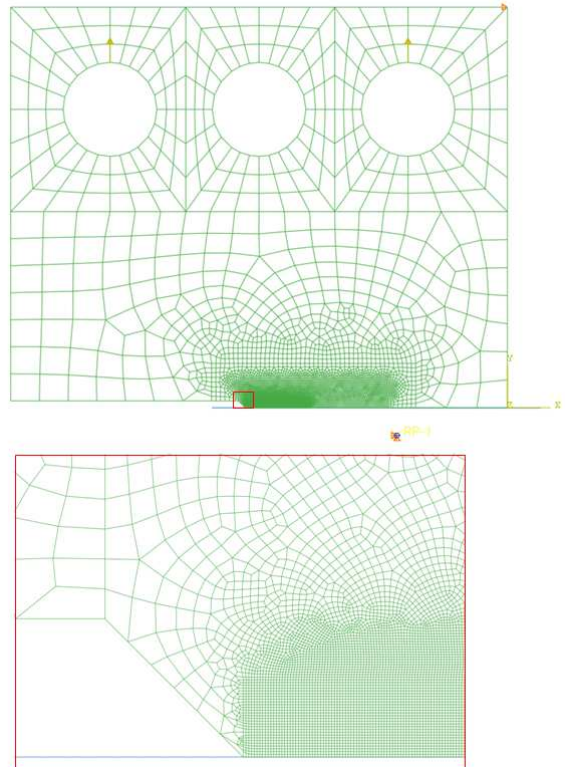


Fig. 2 Finite element mesh pattern

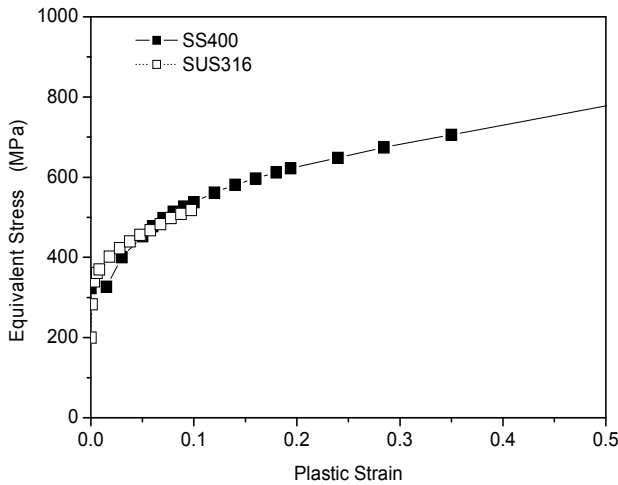


Fig. 3 True stress-true plastic strain curves

재료는 SS400과 SUS316을 선택하였다. 재료의 진응력-진변형률 곡선은 Fig. 3, 물성치는 Table 1과 같다. SS400에 대한 것은 직접 구한 것이고 (9), SUS316에 대한 것은 참고문헌 (10)에서 구하였다. 등방경화와 이동경화를 모두 고려하였다.

본 논문에서는 파괴조건으로서 임계 균열개구 변위를 선택하였다. 임계 균열개구 변위는 균열선단 부근의 변위를 지켜봄으로써 결정하였다. 즉, Fig. 4에 도시한 것과 같이 균열선단에 인접한 절점 A와 B의 변위를 지켜보았다. 균열선단 절점의 분리와 가장 밀접한 것은 절점 A의 y축 방향 변위일 것 같다. 그러나, 이것은 파괴조건으로 제공되지 않아서 직접 사용하지는 못하였다. 그 대신 임계 균열개구 변위는 파괴조건으로 제공되므로 절점 B의 y축 방향 변위를 사용하여 간접적으로 반영하였다.

임계 균열개구 변위를 결정하기 위하여 절점의 분리를 설정하지 않고 예비해석을 수행하였다. 하중을 증가시키며 절점 A와 B의 y축 방향 변위의 비를 지켜보았다. Fig. 5는 이것을 절점 B의 y축 방향 변위에 대하여 그린 것이다. 평면응력인 경우 변위의 비는 증가하여 최대점에 도달한 후 감소하였으나, 평면변형인 경우 이와 반대로 변위의 비는 감소하여 최소점에 도달한 후 약간 증가하였다. 변위의 비가 최대점 이후 감소하는 것이나 최소점 이후 증가하는 것은 절점의 분리를 설정하지 않아서 억제되었기 때문이라고 보고 절점이 분리되도록 이 때 절점 B의 y축 방향 변위를 임계 균열개구 변위로 정하였다.

대칭성을 이용하여 상반부만 모델링하였으므로

Table 1 Material properties

Material	Yield Strength	Ultimate Strength
SS400	322 MPa	508 MPa
SUS316	316 MPa	616 MPa

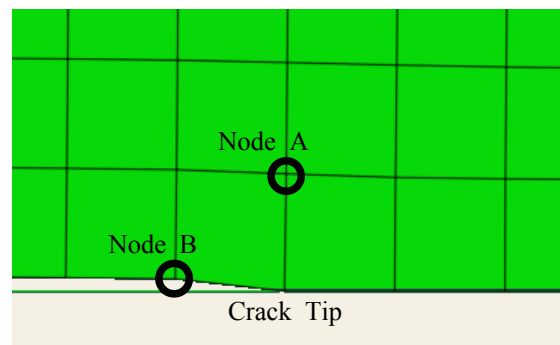
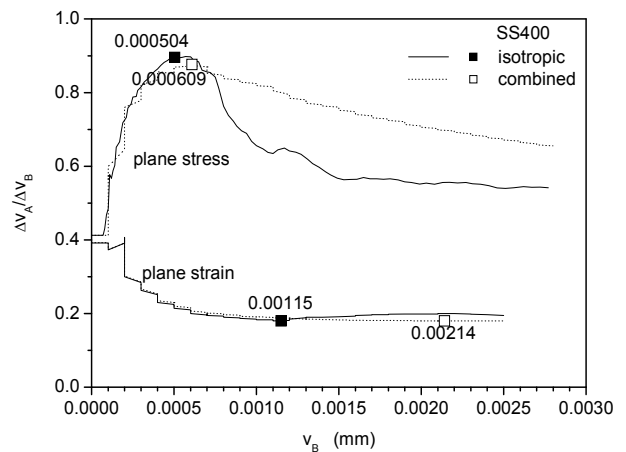
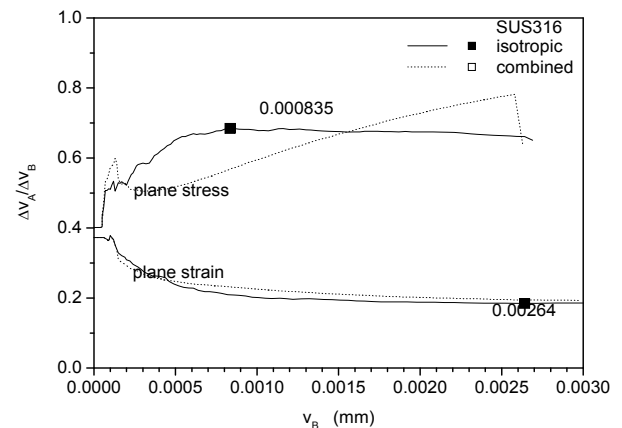


Fig. 4 Nodes used to determine the critical COD



(a) SS400



(b) SUS316

Fig. 5 Monitoring the ratio of displacement increments at node A and B

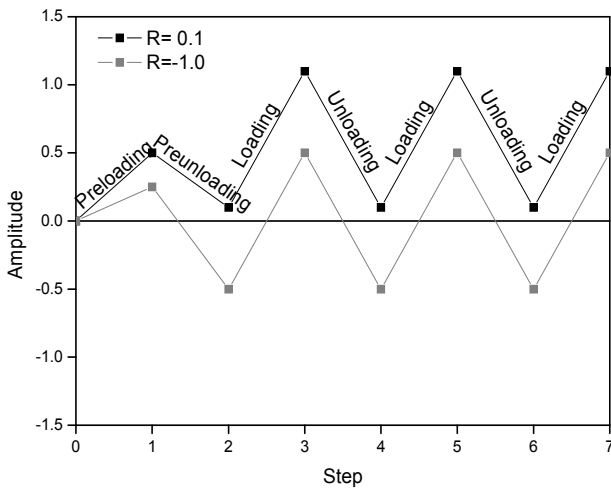


Fig. 6 Amplitude curves with pre-loading and pre-unloading for stress ratio R=0.1 and -1

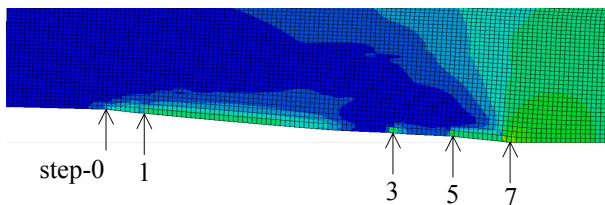


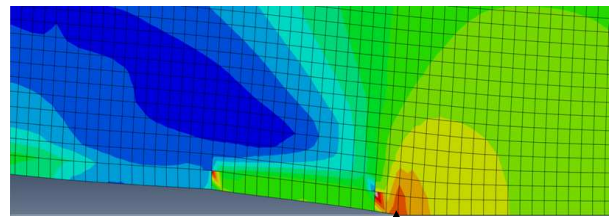
Fig. 7 Locations of the crack tip node at the end of each loading step

임계 균열개구변위로는 절점 B의 y축 방향 변위의 2 배를 입력하여야 한다.

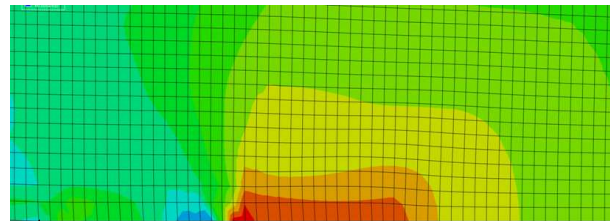
균열선단주위 응력분포가 정상상태에 이르러 안정될 때까지 Fig. 6과 같이 1-7 단계로 하중을 반복적으로 작용하였다. 단계는 하중을 작용하기 쉽게 구분한 단계(step)로 Fig. 6의 x축에 해당한다. 1 단계에서 균열이 너무 많이 성장하는 것을 피하기 위하여 진폭을 나머지 단계의 반만 설정하였다. Fig. 7과 같이 3 단계에서 균열이 많이 성장하지만 5 단계부터는 성장이 안정되었다. 각 단계의 균열선단 부근에는 높은 잔류응력이 존재하여 균열선단을 찾기 쉬웠다.

Fig. 8 (a)는 5 단계 말, (b)는 6 단계 말, (d)는 7 단계 말이다. 화살표는 균열선단의 위치를 표시한다. 균열은 (b)와 같이 닫혔다 (c)와 같이 열린다. (a) 균열선단 주위의 응력분포와 (d) 균열선단 주위의 응력분포가 서로 같으므로 응력분포가 정상상태에 이르러 안정된 것이 확인되었다.

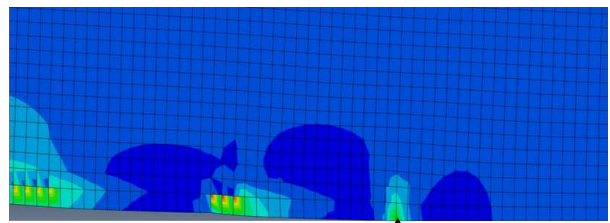
다음과 4 가지 경우의 조합 모두 16 가지 경우에 대하여 결과를 그린 것이 Fig. 9 - Fig. 16이다. x 축은 ΔK 나 ΔK_{eff} , y 축은 $\Delta a/\Delta N$ 이다.



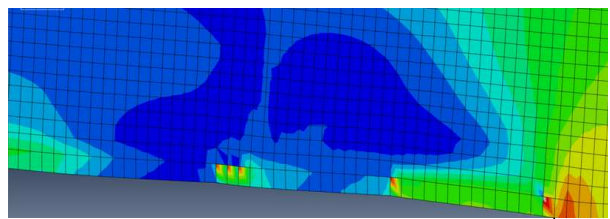
(a) Loading F=110 %



(b) Unloading F=10 %



(c) Reloading F≈60%



(d) Reloading F=110 %

Fig. 8 Crack growth, closure, open and growth. Arrows indicate the crack tip. R=0.1

- ① 재료 2 가지: SS400, SUS316
- ② 상태 2 가지: plane stress, plane strain
- ③ 응력확대계수 진폭 2 가지: ΔK , ΔK_{eff}
- ④ 경화법칙 2 가지: isotropic hardening, combined hardening

Fig. 9 - Fig. 16 1, 3, 5, 7 단계에 대한 결과 중 1 단계와 3 단계 결과는 무시하고 5 단계나 7 단계 결과를 가장 잘 대표하는 직선을 긋고 기울기, 즉 Paris 법칙의 지수 m을 구하였다. 각 단계 응력비는 R=0.1과 R=-1 2 가지이었다.

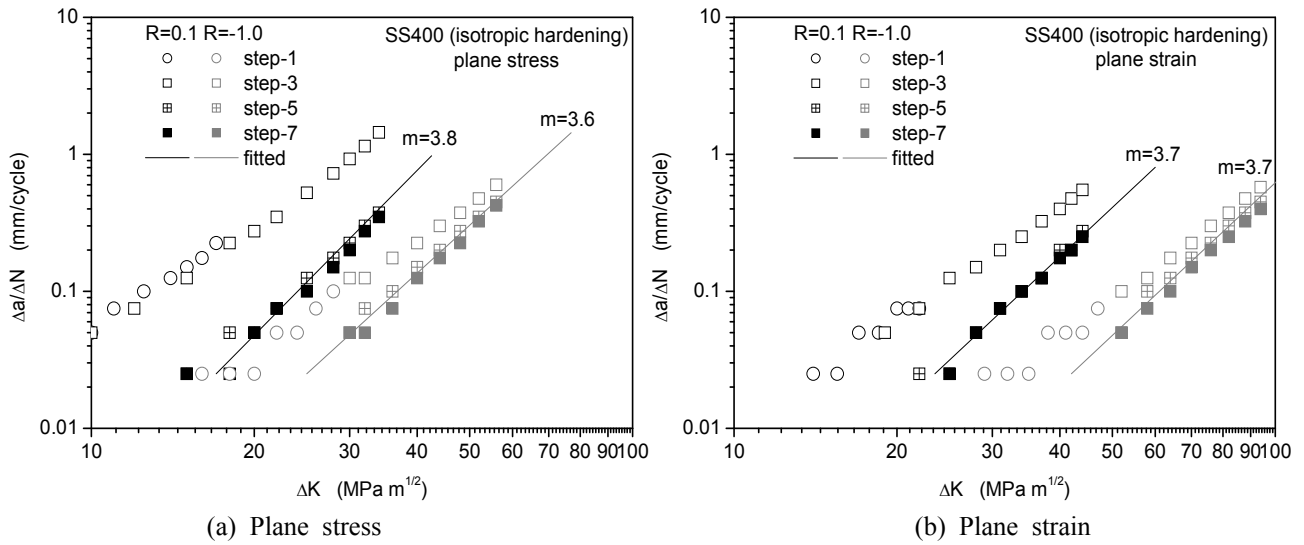


Fig. 9 Crack growth vs. ΔK (SS400, isotropic)

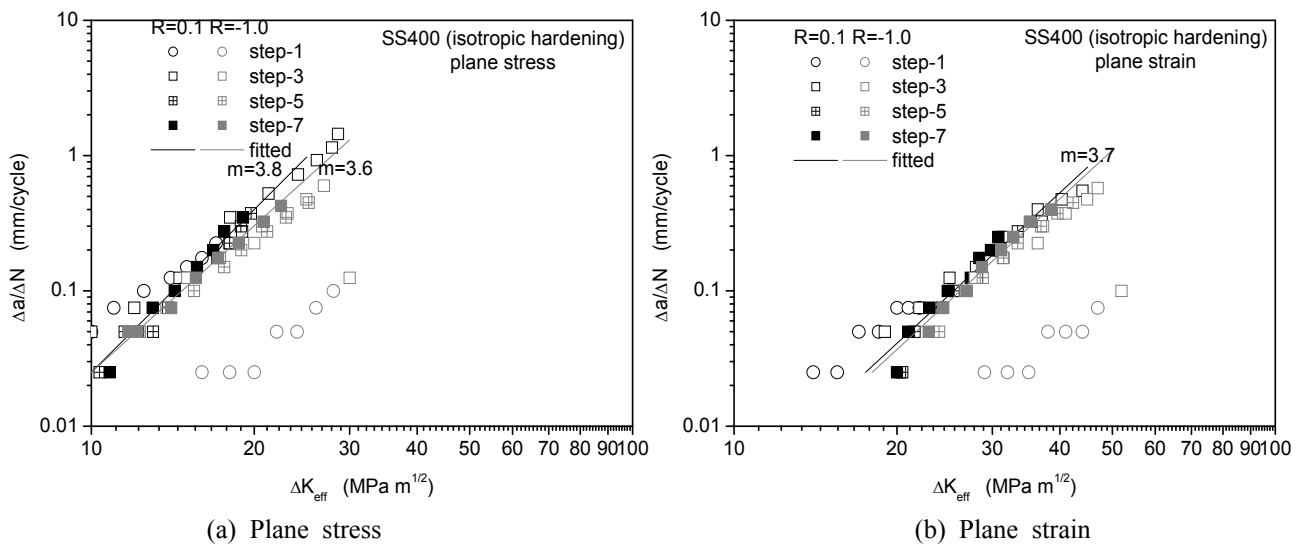


Fig. 10 Crack growth vs. ΔK_{eff} (SS400, isotropic)

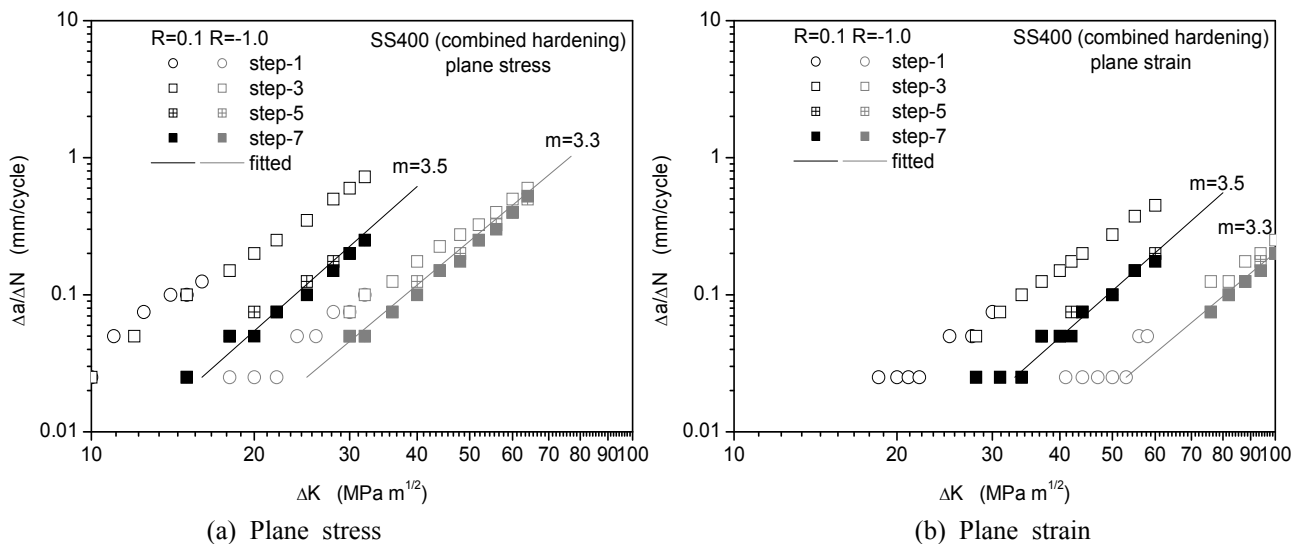


Fig. 11 Crack growth vs. ΔK (SS400, combined)

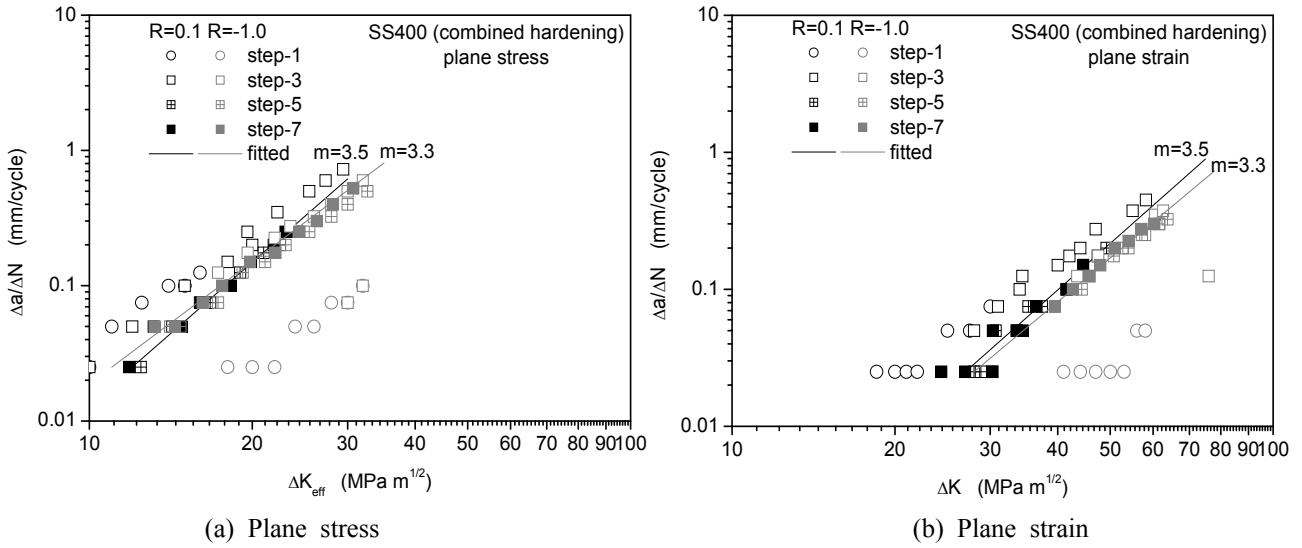


Fig. 12 Crack growth vs. ΔK_{eff} (SS400, combined)

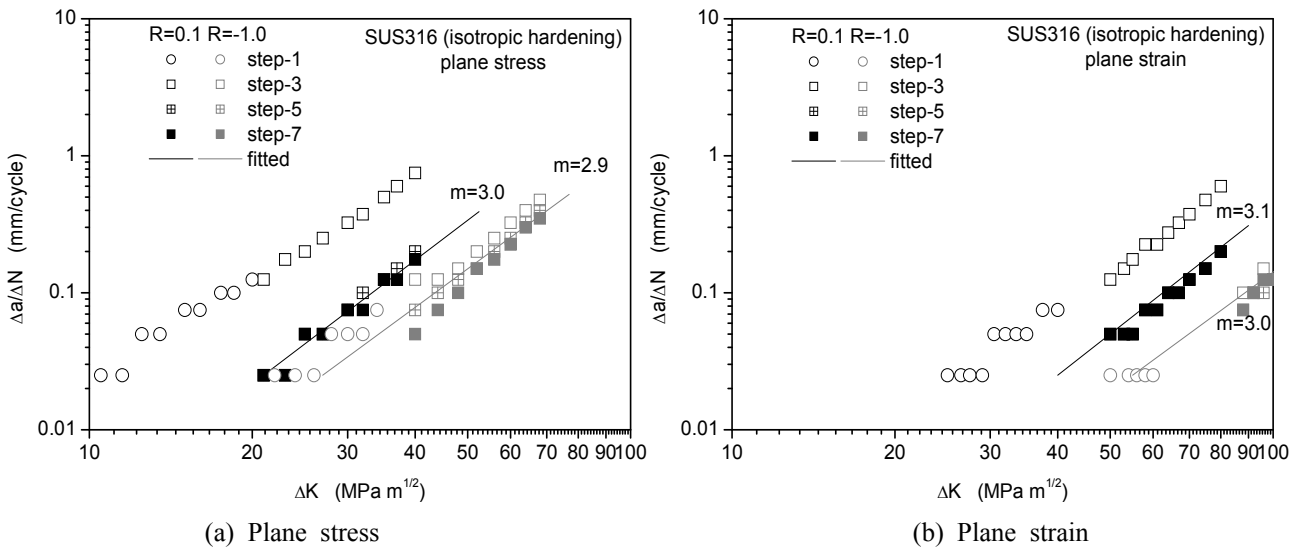


Fig. 13 Crack growth vs. ΔK (SUS316, isotropic)

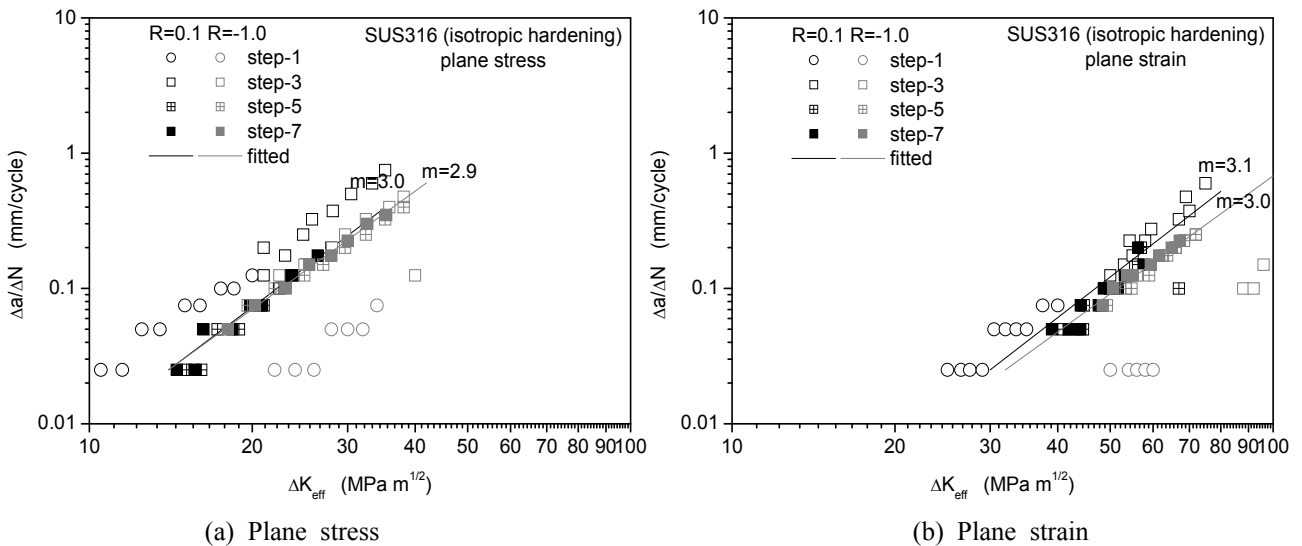


Fig. 14 Crack growth vs. ΔK_{eff} (SUS316, isotropic)

Table 2 The exponent m in the Paris law(plane stress)

Material	Work-hardening type	
	isotopic R=0.1(R=-1)	combined R=0.1(R=-1)
SS400	3.8 (3.6)	3.5 (3.3)
SUS316	3.0 (2.9)	3.0 (2.9)

Table 3 The exponent m in the Paris law(plane strain)

Material	Work-hardening type	
	isotopic R=0.1(R=-1)	combined R=0.1(R=-1)
SS400	3.7 (3.7)	3.5 (3.3)
SUS316	3.1 (3.0)	3.1 (3.0)

Fig. 9-Fig. 16 평면응력인 경우 지수 m을 다 모은 것이 Table 2, 평면변형인 경우 Table 3이다. ΔK 나 ΔK_{eff} 에 따라 지수 m은 달라지지 않았다. 그리고, 평면응력이나 평면변형에 따라서도 지수 m은 거의 달라지지 않았다.

SS400이 SUS316보다 급하게 경화되어 임계 상태에 빠르게 도달되어 임계 균열개구변위는 작고 그 결과 m은 크게 된 것으로 추정한다.

등방경화인 경우보다 이동경화인 경우 SS400에 대하여 지수 m이 약간 작아졌으나 SUS316에 대하여는 변하지 않았다. 응력비가 0.1인 경우보다 -1인 경우 지수 m이 약간 작아졌다. 이것은 참고 문헌 (11)에 실린 강이나 알루미늄에 대한 결과에도 같은 경향이 확인되었다.

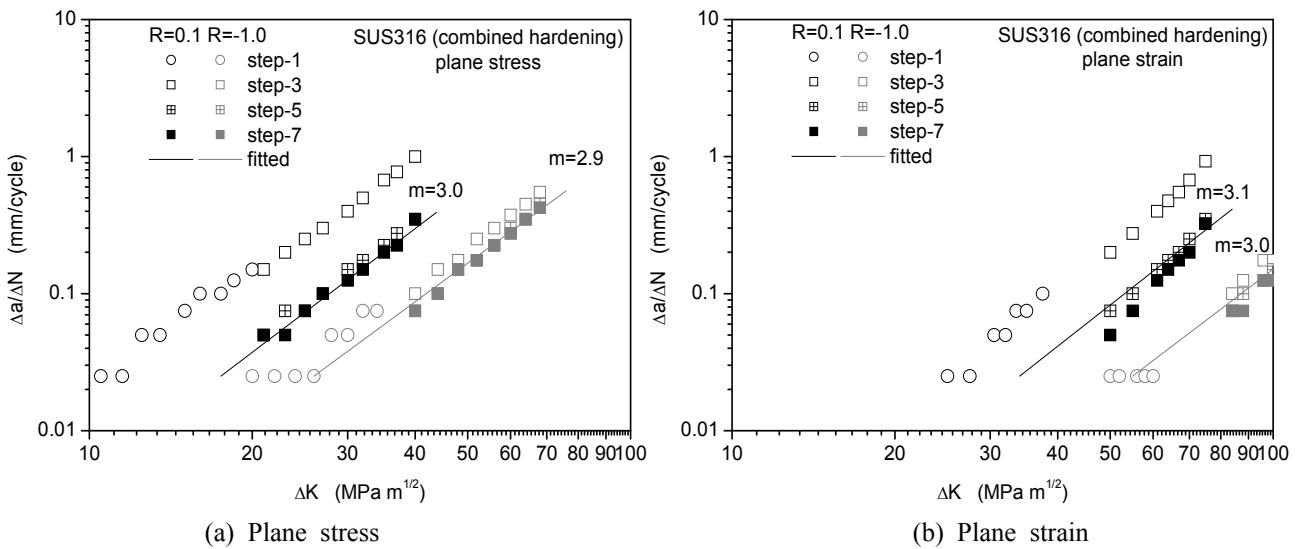


Fig. 15 Crack growth vs. ΔK (SUS316, combined)

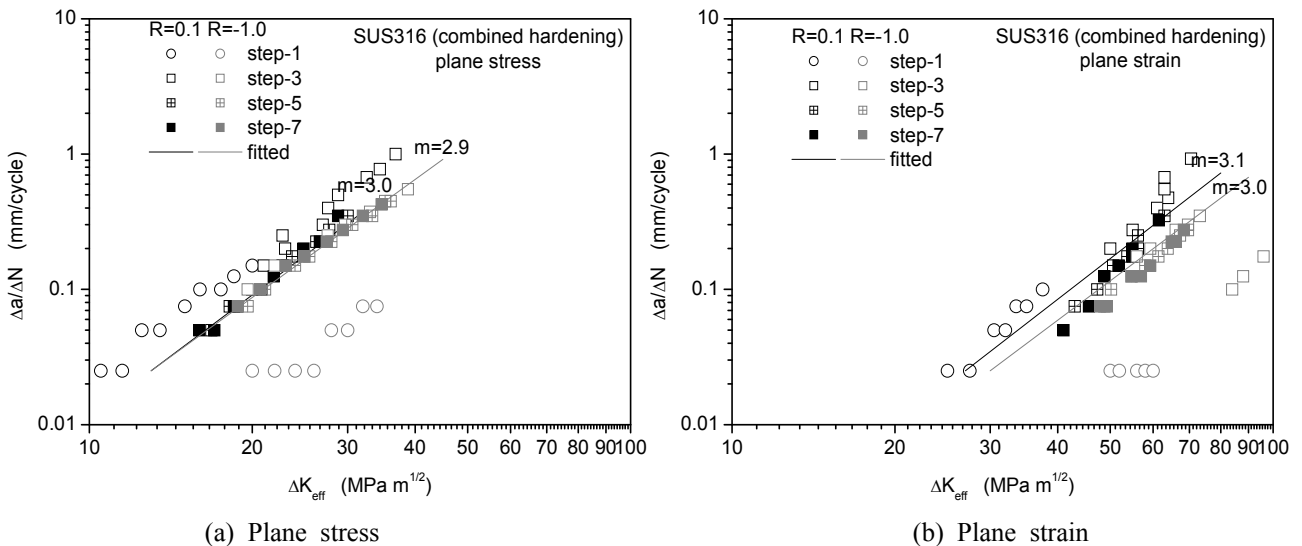
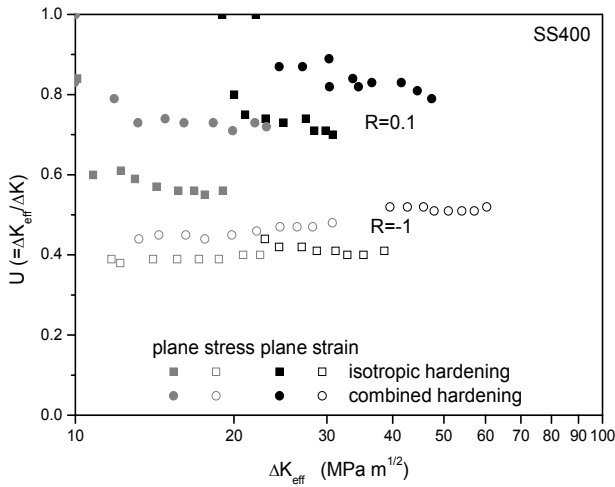
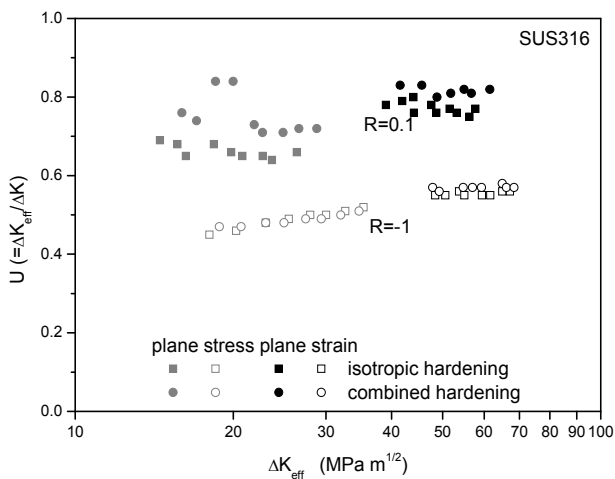


Fig. 16 Crack growth vs. ΔK_{eff} (SUS316, combined)



(a) SS400



(b) SUS316

Fig. 17 Crack opening ratio

참고문헌 (12)에 실린 상온에서 SUS316에 대한 지수 $m=3.0$ 으로 본 논문의 결과와 잘 일치한다. 이 때 $\Delta K=30-80 \text{ MPa m}^{1/2}$ 로서 Fig. 13(b)나 Fig. 15(b)의 ΔK 의 범위와도 대체로 일치한다.

7 단계 결과로 균열열림비를 계산하여 그린 것이 Fig. 17이다. 참고문헌 (11)을 보면 $R=-1$ 인 경우 $U=0.4$, $R=0$ 인 경우 $U=0.8$ 부근으로 Fig. 17과 대체로 일치한다. 그리고, ΔK_{eff} 가 커질수록 U 가 완만히 증가하는 경향도 일치한다.

3. 결 론

인장시험 결과를 처리하여 얻은 진응력-진소성 변형률 곡선만을 사용하고 그 외의 추가정보는 사용하지 않고 피로균열성장을 유한요소 시뮬레이션하였다.

파괴기준으로 사용한 임계 균열개구변위는 균열선단 부근 절점의 y 방향(균열 수직방향) 변위 성분을 지켜봄으로써 결정하였다. 균열선단 부근 90° 방향과 180° 방향 절점의 y 방향 변위의 비가 최대나 최소에 도달하였을 때 180° 방향 절점의 y 방향 변위(균열개구변위의 반)를 임계 균열개구변위로 결정하였다.

ΔK 대신 ΔK_{eff} 에 대하여 $\Delta a/\Delta N$ 를 그리면 응력비가 $R=0.1$ 과 $R=-1$ 로 서로 다른 결과가 거의 같은 선으로 모이는 것이 확인되었다. 그리고, 참고문헌에 실린 SUS316의 시험결과와 비교하니 Paris 법칙의 지수 m , ΔK 의 범위와 균열열림비가 서로 일치하였고 응력비가 작아질 때 지수 m 이 약간 감소하는 현상도 서로 일치하였다. 따라서, 본 논문에서 결정한 임계 균열개구변위의 타당성이 입증되었다.

그러나, 균열선 부근 유한요소의 크기 0.025 mm 는 실제 피로균열성장속도 $10^{-4}-10^{-3} \text{ mm/cycle}$ (12)보다 훨씬 커서 Paris 식의 계수 C 는 결정하지 못하였다.

후 기

본 연구는 2010년도 울산대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행된 것으로 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

- (1) Nicholls, D. J., 1994, "The Relation Between Crack Blunting and Fatigue Crack Growth Rates," *Fatigue Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 17, No. 4, pp. 459~467.
- (2) Berger, F. and Zouhar, G., 2000, "A New Approach to the Correlation Between the Coefficient and the Exponent in the Power Law Equation of Fatigue Crack Growth," *International Journal of Fatigue*, Vol. 22, pp. 229~230.
- (3) Carpinteri, A. and Paggi, M., 2007, "Are the Paris' Law Parameters Dependent on Each Other," *Atti del Congresso IGF19*, pp. 217~224.
- (4) Nguyen, O., Repetto, E. A., Ortiz, M. and Radovitzky, R. A., 2001, "A Cohesive Model of Fatigue Crack Growth," *International Journal of Fracture*, Vol. 110, pp. 351~369.

- (5) Fan, F., Kalnaus, S. and Jiang, Y., 2008, "Modeling of Fatigue Crack Growth of Stainless Steel 304L," *Mechanics of Materials*, Vol. 40, pp. 961~973.
- (6) Seifi, R. and Bahrami, R., 2010, "Numerical Modeling the Effects of Overloading and Underloading in Fatigue Crack Growth," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 17, pp. 1475~1482.
- (7) *ABAQUS 6.10 keywords Reference Manual*.
- (8) Sander, M. and Richard, H. A., 2005, "Finite Element Analysis of Fatigue Crack Growth with Interspersed Mode I and Mixed Mode Overloads," *International Journal of Fatigue*, Vol. 27, pp. 905~913.
- (9) Chu, S. J., 2011, "True Stress~True Strain Curves Obtained by Simulating Tensile Tests Using the Finite Element Program," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 35, pp. 25~31.
- (10) Kim, J. R. Rasmussen, 2001, "Full-Range Stress-Strain Curves for Stainless Steel Alloys," *The University of Sydney, Research Report No. R811*.
- (11) Jono, M. and Song, J. H., 2006, *Fatigue Cracks*, Interscience, pp. 78~79.
- (12) Davis, J. R., 1996, *Stainless Steels*, *ASM Speciality Handbook*, p. 52.