

< 논문 >

되풀이 균열 선단 열림 변위를 이용한 피로 균열 열림 거동 예측을 위한 유한 요소 해석

최 현 창[†]

(2006년 6월 5일 접수, 2006년 8월 22일 심사완료)

Finite Element Analysis for the Prediction of Fatigue Crack Opening Behavior Using Cyclic Crack Tip Opening Displacement

Hyeon Chang Choi

Key Words : Fatigue Crack Growth(피로 균열 진전), Finite Element Analysis(유한요소법), Prediction of Crack Opening(균열 열림 예측), Cyclic Crack Tip Opening Displacement(되풀이 균열 선단 열림 변위), Reversed Plastic Zone Size(되풀이 소성역 크기)

Abstract

The relationship between fatigue crack growth behavior and cyclic crack tip opening displacement is studied. An elastic-plastic finite element analysis (FEA) is performed to examine the growth behavior of fatigue crack, where the contact elements are used in the mesh of the crack tip area. We investigate the relationship between the reversed plastic zone size and the changes of the cyclic crack tip opening displacement along the crack growth. We investigate the effect of the element size when predict fatigue crack opening behavior using the cyclic crack tip opening displacement obtained from FEA. The cyclic crack tip opening displacement is related to fatigue crack opening behavior.

기호설명

- $\Delta\delta$: 되풀이 균열선단 열림 변위
- $\Delta\delta_i$: 유효되풀이 균열선단 열림 변위
- E : 탄성계수
- K_{max} : 최대응력강도계수
- ΔK : 응력 강도 계수 폭
- ΔK_{eff} : 유효 응력 강도 계수 폭
- R : 응력비
- Δr_p : 되풀이 소성역 크기
- σ_y : 항복 응력

- U : 유효 응력 강도 계수 폭 비
- a, b, p, q, r, s, t : 상수

1. 서론

잔류 응력장에서 균열 열림 거동과 부분 균열 열림 거동모델의 유효성은 성공적으로 수행되었다.^(1,2)

Park 등은 적정 메쉬(mesh) 크기의 개념이 유한 요소해석에 의한 피로균열 열림 해석을 위해 필수적임을 보여 주었다.⁽³⁾ 본 논문의 저자는 Park 등이 제안한 방법을 개선하여 피로 균열 닫힘 거동을 정확하게 예측하는 유한요소 해석 모델에 관하여 새로운 연구결과를 발표하였다.⁽⁴⁾ 연구를 통해 여러 종류의 요소 크기를 이용하여 Park 등의 균열 길이 고정법의 해석 결과에서 간과한 되풀이 소성영역 크기가 균열 열림점에 미치는 영향과 열

[†] 회원, 동명대학교 메카트로닉스공학과
E-mail : hcchoi@tu.ac.kr
TEL : (051)610-8354 FAX : (051)610-8056

림점 결정방법을 제안하였다. 균열이 진전함에 따라 점점 커지는 되풀이 소성역의 크기에 비례하는 균열 선단 요소를 사용하여 균열 열림점 예측을 수행하였다.⁽⁵⁾ 또한 실제 균열 열림 거동을 모사하기 위해 ANSYS의 접촉요소를 이용하여 균열 열림점을 정확히 예측함을 보여 주었다. 한편 다양한 균열 선단 요소 크기의 유한요소법 해석을 4~5회 수행하여 얻어진 결과와 수치해석 방법 이용해 균열 열림점 예측하는 방법도 제안하였다.⁽⁶⁾ 또한 되풀이 소성역보다 작은 균열 선단 요소로 계산한 유한요소법으로 결정한 되풀이 소성역으로 계산된 균열 열림점 레벨은 실험 값과 매우 잘 일치함을 보여주었다. 균열 면의 접촉에너지는 특정 하중레벨부근에서 선형 변화에서 급격히 벗어나는 천이하중이 존재하고, 이 천이하중은 물리적 변화의 존재를 의미하고 실험에서 하중-변위곡선으로부터 결정되는 균열 열림 레벨과 일치함을 보여 주었다. 되풀이 소성역 크기의 경계 점에 위치하는 요소가 열리는 하중레벨이 실험 값에서 얻은 결과와 잘 맞는 결과를 보여 주었다.^(7,8)

지금까지의 균열 열림 거동의 연구는 유한크기의 균열선단요소를 임의로 진전시킴에 따라, 사이클당 균열 진전의 양이 실제 균열 진전 양에 비하여 매우 큰 상태로, 실제 균열 열림 거동을 정확히 예측하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 위의 지적된 한계를 극복하고 균열진전 양에 상관없이 균열 진전 따라서 얻어진 되풀이 균열선단 열림 변위와 피로균열 열림 거동의 관계를 조사할 예정이다. 또 이들의 관계로부터 되풀이 균열 선단 열림 변위와 피로 균열 열림 거동과의 연관성을 알아본다.

2. 균열 열림 예측을 위한 유한요소법

균열 열림 예측을 위해 사용한 유한요소 모델은 예전의 연구 결과에 자세히 나타나 있다.^(1,3-8)

3. 균열 선단 열림 변위 해석 결과

되풀이 소성역의 크기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K}{2\sigma_y} \right)^2 \quad (1)$$

균열 선단이 닫히면 특이성은 사라지고 되풀이 소성역은 가해진 응력에 의해 발생된다. 되풀이

소성역의 크기는 처음 균열이 닫혔을 때 다음 식과 같이 나타난다.

$$\Delta r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{eff}}{2\sigma_y} \right)^2 \quad (2)$$

여기서 ΔK_{eff} 는 유효 응력강도 계수 폭이다.

한편, 되풀이 균열선단 변위는 다음 식으로 표현된다.

$$\Delta \delta = \frac{\Delta K^2}{2\sigma_y E} \quad (3)$$

식 (3)에서 ΔK 대신 ΔK_{eff} 을 대입하면 유효 되풀이 균열선단 변위가 된다.

$$\Delta \delta_i = \frac{\Delta K_{eff}^2}{2\sigma_y E} \quad (4)$$

Fig. 1은 다양한 K_{max} 에 대한 응력비 $R=0.0$ 경우의 유한요소법에 의해 계산된 되풀이 균열 선단 열림 변위를 나타낸 것이다. 여기에서 사용된 재료는 이미 예전의 연구⁽⁹⁾에서 이용된 구조용 강재 JIS SM50B이다. 이 재료의 화학 조성(wt. %)은 Si 0.33 C 0.14, Mn 1.45, P 0.018, S 0.019, 나머지는 Fe이다. 항복응력 σ_y 은 367MPa, 인장 강도 526 MPa, 연신률 29% 이다. 그림에서 보여준 바와 같이 되풀이 균열 선단 열림 변위와 되풀이 소성역 크기와 관계는 균열 선단 주위를 제외한 곡선을 다음의 1차 곡선으로 나타낼 수 있다.

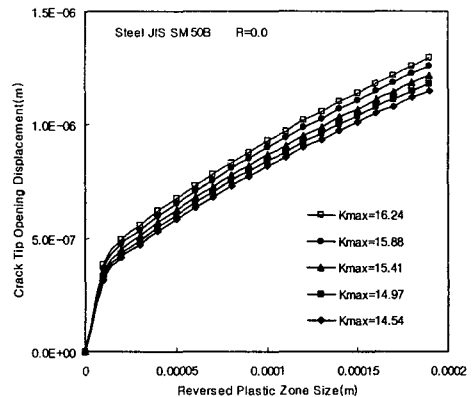


Fig. 1 The relationship between the cyclic crack tip opening displacement and the reversed plastic zone size

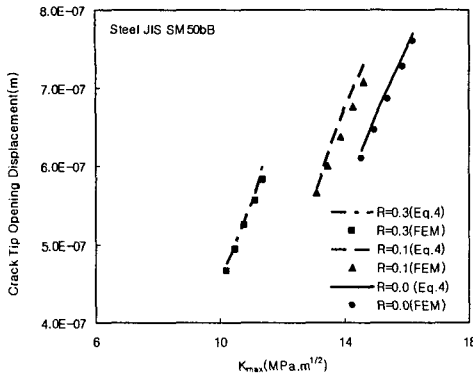


Fig. 2 Comparison of the crack tip opening displacement between the FEM and theoretical values (Eq.4) for K_{max}

$$\Delta\delta_i = a\Delta r_p + b \tag{5}$$

균열면의 모양에 따라 2 차 곡선으로도 나타낼 수 있다.

$$\Delta\delta_i = p(\Delta r_p)^2 + q\Delta r_p + r \tag{6}$$

여기서 a, b, p, q 와 r은 K_{max} 에 따른 각각의 곡선에 대하여 피팅(fitting)을 통해 얻어진 상수 값이다.

식 (4) 및 유한요소 해석으로 구한 유효 되풀이 균열 선단 열림 변위의 결과 비교를 Fig. 2에 나타내었다. 유한요소법으로 구한 결과는 식 (4)의 이론적으로 계산된 값과 응력비 R=0.0, 0.1 및 0.3에 대하여 잘 맞는 것으로 나타나고 있다. 이는 유한요소 해석으로 구한 유효 되풀이 균열선단 열림 변위를 이용하여 피로 균열 진전거동을 효과적으로 수행할 수 있음을 의미한다.

Fig. 3은 ΔK 로 정리한 되풀이균열 선단 열림 변위로서 응력비 R이 증가함에 따라 비례적으로 증가하는 현상을 나타낸다. 그림에서 ΔK_{eff} 로 표기된 왼쪽편의 데이터는 측정된 균열열림점 값으로 정리된 ΔK_{eff} 와 다양한 응력비에 대하여 계산된 유효 되풀이 균열 선단 열림 변위 값의 관계를 나타낸 결과이다. 위의 관계에서 ΔK 로 표현된 되풀이 균열선단 열림 변위는 응력비에 따라 다양한 값으로 나타나고 있는 경향을 보이지만, ΔK_{eff} 로 정리된 유효 되풀이 균열 선단 열림 변위는 응력비에 상관없이 하나의 곡선으로 정리되는 경향을 보여주고 있다.

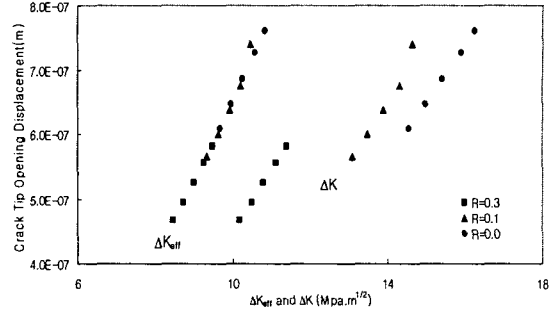


Fig. 3 Comparison of the crack tip opening displacement according to ΔK_{eff} and ΔK

이 결과는 응력비에 상관없이 유효 되풀이 균열 선단 열림 변위는 ΔK_{eff} 로 단일 곡선으로 나타낼 수 있고, 일의적인 값으로 표현될 수 있음을 알 수 있다. 위의 결과로부터 유한요소법에서 얻어진 유효 되풀이 균열 선단 열림 변위로부터 균열 열림 거동을 예측할 수 있는 관계식을 유도할 수 있다. 식 (2), 식 (4), 식 (5) 및 식 (6)로부터 다음 식을 유도할 수 있다. 1 차 곡선의 식은

$$\frac{\Delta K_{eff}^2}{2\sigma_y E} = a \frac{\Delta K_{eff}^2}{4\pi\sigma_y^2} + b \tag{7}$$

와 같이 유도되고 2 차 곡선 식은 다음과 같다.

$$\frac{\Delta K_{eff}^2}{2\sigma_y E} = p \frac{\Delta K_{eff}^4}{16\pi^2\sigma_y^4} + q \frac{\Delta K_{eff}^2}{4\pi\sigma_y^2} + r \tag{8}$$

$\Delta K_{eff} = U\Delta K$ 의 관계를 식 (7)과 식 (8)에 대입하여 U에 관하여 풀면 다음 식을 얻는다.

$$U = \sqrt{\frac{b}{\left(\frac{1}{2\sigma_y E} - \frac{a}{4\pi\sigma_y^2}\right)\Delta K^2}} \tag{9}$$

1 차 곡선의 유효 응력 강도 계수 폭 비를 얻고

$$U = \sqrt{\frac{-t \pm \sqrt{t^2 - 4sr}}{2s(\Delta K)^2}} \tag{10}$$

여기서, $s = \frac{p}{16\pi^2\sigma_y^4}$, $t = \frac{q}{4\pi\sigma_y^2} - \frac{1}{2\sigma_y E}$ 이다.

2 차 곡선의 유효 응력 강도 계수 폭 비를 얻는다.

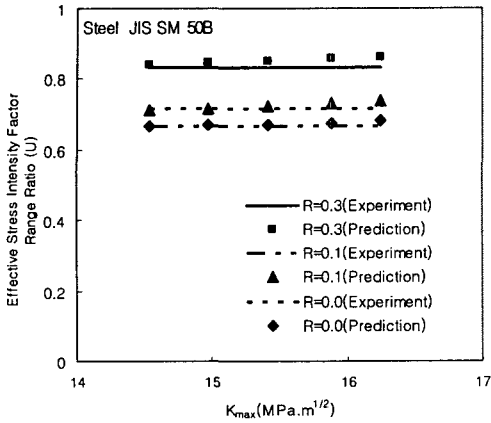


Fig. 4 Comparison of the effective stress intensity factor range ratio between the experiment and the prediction for steel

식 (9)과 식 (10)은 균열 열림 거동시의 외부하중으로부터 계산된 ΔK 와 Fig. 1 의 다양한 K_{max} 에 대한 각각 곡선의 식 (5)와 식 (6)에서 결정된 상수 값으로부터 결정할 수 있음을 의미한다.

본 연구의 전반적으로 식 (9)과 식 (10)의 각각의 1 차 곡선 및 2 차 곡선 피팅으로부터 얻어진 해석 결과는 모든 해석에 대하여 같은 값을 보여주고 있다.

Fig. 4는 JIS SM50B Steel 재료의 물성치를 이용 응력비 R=0.0, 0.1 및 0.3에 대한 앞에서 언급한 해석 방법을 이용하여 균열열림거동 예측 결과이다. 균열선단의 요소크기는 되풀이소성역크기에 비하여 충분히 작은 20 μ m을 사용하였다. 3종류의 선으로 표현된 실험 값은 Kurihara 등으로부터 얻어진 값이다. 예측 값은 모든 응력비에 대하여 실험 값에 잘 맞는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 5는 Al 2024-T351 재료의 물성치를 이용 응력비 R=0.0 에 대한 균열열림거동 예측 결과이다. 여기의 결과도 실험값⁽¹⁰⁾과 비슷한 결과를 보여준다.

앞의 결과로부터 유한요소법에서 얻어진 유효 되풀이 균열 선단 열림 변위 이용한 피로 균열 열림 거동 예측은 재료 및 응력비에 상관없이 실험 결과는 잘 맞음을 보여준다.

Fig. 7 과 Fig. 8 은 각각 JIS SM50B Steel 재료와 Al2024-T351 재료에 대한 응력비 R=0 에 대한 균열 선단의 다양한 요소 크기 5~60 μ m 에 대한 균열 열림 거동 해석 결과이다. 양 재료 및 모든 요

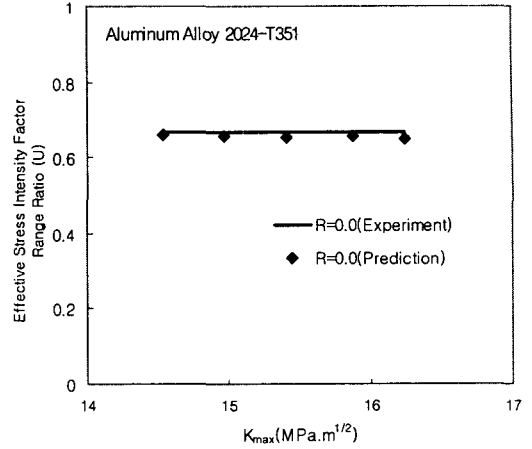


Fig. 5 Comparison of the effective stress intensity factor range ratio between the experiment and the prediction for al. alloy

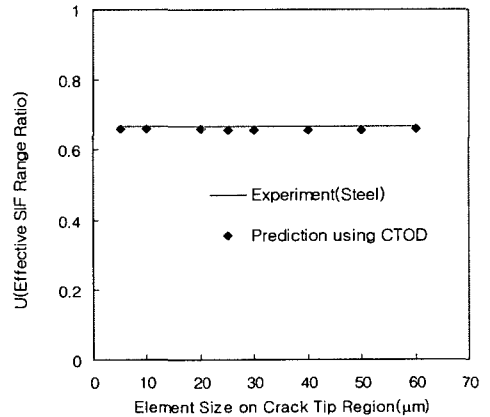


Fig. 6 Comparison of the effective stress intensity factor range ratio between the experiment and the prediction for the various element sizes on crack tip region in SM50B steel

소크기에 대하여 실험값과 잘 맞는 결과를 보여준다.

4. 토 론

좀더 자세한 결과로 강재의 경우 Table1 은 다양한 응력비에 대한 결과 비교의 값이다. Table 2 는 Table1 결과의 실험값과의 오차를 나타낸 결과이다. 해석 결과는 요소크기 50 μ m 및 60 μ m 인

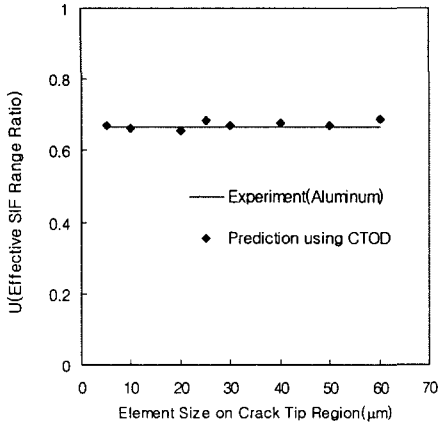


Fig. 7 Comparison of the effective stress intensity factor range ratio between the experiment and the prediction for the various element sizes on crack tip region in aluminum alloy 2024-T351

경우를 제외하고는 실험 결과와 1%이내의 오차를 보인다. 이러한 현상은 매우 흥미로운 결과이다. 일반적으로 지금까지 유한요소해석을 통한 피로균열진전 예측은 균열선단의 요소크기가 작아지면 질수록 균열 열림점의 결과는 높은 값을 보여주는 것으로 알려져 있다. 본 연구의 해석 결과는 다양한 응력비에 대하여 균열 선단 요소크기에 상관없이 예측 값이 실험값에 잘 맞는 결과를 나타낸다. 요소크기 50 μm 및 60 μm 인 경우 큰 오차는 아니지만 2%이내의 오차를 보여주는 현상은 요소크기가 되풀이 소성역 크기보다 크기 때문에 사료된다. 이러한 현상은 본 연구의 저자의 이전 연구에서도 지적한 바가 있다.⁽³⁻⁸⁾ 되풀이 소성역보다 작은 요소크기의 경우에는 크기에 영향을 받지 않는 결과를 보여주고 있다.

알루미늄 경우 Table 3과 Table 4 도 강재의 해석 결과와 비슷한 경향을 보여주고 있다.

Fig. 8은 요소크기20 μm 및 R=0.0의 경우에 대하여 이전의 방법인 유한요소법을 이용한 균열 열림 해석 방법의 선단요소 열림 현상에서 얻어진 결과와 본 연구 해석방법인 유효 되풀이 균열 선단 열림 변위법에 의해 구한 값을 비교한 결과이다. 고전적인 방법으로 얻은 결과 값이 여기서 제시한 유효 되풀이 균열 선단 열림 변위법의 결과 및

Table 1 The results of the stress intensity factor range ratio for the stress ratios and the sizes of element on crack tip region for steel

Steel.	R=0	R=0.1	R=0.3	R=-0.5	R=-1
5 μm	0.661	0.730	0.841	0.494	0.419
10 μm	0.658	0.710	0.838	0.503	0.384
20 μm	0.660	0.717	0.839	0.488	0.400
30 μm	0.656	0.714	0.831	0.491	0.403
40 μm	0.657	0.712	0.838	0.485	0.396
50 μm	0.652	0.701	0.849	0.476	0.391
60 μm	0.653	0.717	0.871	0.463	0.392
Exp.	0.667	0.714	0.833	0.500	0.400

Table 2 The tolerance percentage (%) between the experiment and CTOD results for steel

Steel.	R=0	R=0.1	R=0.3	R=-0.5	R=-1	Ave.
5 μm	0.55	1.57	0.81	0.63	1.88	1.09
10 μm	0.85	0.44	0.43	0.33	1.63	0.74
20 μm	0.68	0.30	0.58	1.19	0.04	0.56
30 μm	1.04	0.02	0.24	0.90	0.26	0.49
40 μm	0.96	0.22	0.45	1.47	0.38	0.70
50 μm	1.45	1.27	1.62	2.40	0.92	1.53
60 μm	1.32	0.27	3.74	3.68	0.78	1.96
Ave.	0.98	0.58	1.12	1.51	0.84	1.01

Table 3 The results of the stress intensity factor range ratio for the stress ratios and the sizes of element on crack tip region for aluminum

Al.	R=0	R=0.1	R=0.3	R=-0.5	R=-1
5 μm	0.672	0.730	0.859	0.498	0.393
10 μm	0.666	0.726	0.847	0.509	0.399
20 μm	0.664	0.721	0.844	0.492	0.408
30 μm	0.659	0.715	0.824	0.480	0.395
40 μm	0.669	0.712	0.839	0.480	0.390
50 μm	0.672	0.736	0.895	0.542	0.433
60 μm	0.689	0.757	0.925	0.495	0.404
Exp.	0.667	0.714	0.833	0.500	0.400

Table 4 The tolerance percentage (%) between the experiment and CTOD results for aluminum

Al.	R=0	R=0.1	R=0.3	R=-0.5	R=-1	Ave.
5 μm	0.55	1.59	2.59	0.16	0.70	1.12
10 μm	0.03	1.17	1.35	0.86	0.06	0.69
20 μm	0.24	0.69	1.06	0.85	0.82	0.73
30 μm	0.77	0.12	0.95	2.00	0.50	0.87
40 μm	0.21	0.19	0.62	2.00	1.00	0.80
50 μm	0.52	2.23	6.18	4.22	3.29	3.29
60 μm	2.29	4.28	9.12	0.54	0.36	3.32
Ave.	0.66	1.47	3.12	1.52	0.96	1.55

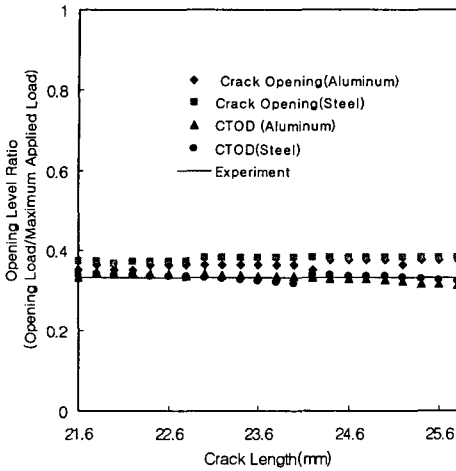


Fig. 8 Comparison of crack opening level ratio between the results of the classical opening analysis and the results obtained from CTOD

실험 결과보다 높은 경향을 보여주고 있다. Fig. 8의 고전적 해석 결과는 일정크기의 요소를 사용했기 때문에 정확한 결과를 예측할 수 없는 것으로 사료된다.

유한요소법을 이용한 균열 열림 거동 예측을 정확히 하기 위해서는 본 논문의 저자에 의해 이미 다양하게 제안된 방법⁽³⁻⁸⁾과 여기 논문의 해석 방법을 이용하면 좀더 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

5. 요약 및 결론

응력비에 상관없이 유효 되풀이 균열 선단 열림 변위는 ΔK_{eff} 와 단일 곡선으로 나타낼 수 있고, 일의적인 값으로 표현된다. 유한요소법에서 얻어진 유효 되풀이 균열 선단 열림 변위 이용한 균열 열림 거동 예측은 재료 및 응력비에 상관없이 실험결과 잘 맞음을 보여준다.

다양한 요소 크기 대한 균열 열림 거동 해석 결과도 실험값과 잘 맞는 결과를 보여준다.

균열 열림 거동 예측을 위해서 지금까지 알려진

유한요소해석방법(균열면의 열림과 닫힘을 모니터링하는 방법)의 결과 값이 여기서 제시한 유효 되풀이 균열 선단 열림 변위법의 결과 및 실험 결과보다 부정확한 결과를 보여준다.

참고문헌

- (1) Choi, H. C. and Song, J. H., "Finite Element Analysis of Closure Behaviour of Fatigue Cracks in Residual Stress Fields," *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.*, Vol. 18(1), 1995, pp. 105~117.
- (2) Choi, H. C. 1994, "Finite Element Analysis of Closure Behaviour of Fatigue Cracks in Residual Stress Fields," Ph. D. dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
- (3) Park, S. J., Earmme, Y. Y. and Song, J. H., 1997, "Determination of the most Appropriate Mesh Size for a 2-d Finite Element Analysis of Fatigue Crack Closure Behaviour," *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 20(4), pp. 533~545.
- (4) Choi, H. C., 2000, "A Study on the Determination of Closing Level for Finite Element Analysis of Fatigue Crack Closure," *KSME International Journal*, Vol. 14(4), pp. 401~407.
- (5) Choi, H. C., 2003, "Finite Element Analysis for Fatigue Crack Closure Behavior Using Reversed Plastic Zone Size," *Journal of KSME(A)*, Vol. 27(10), pp. 1703~1711.
- (6) Choi, H. C., 2004, "Numerical Analysis for Prediction of Fatigue Crack Opening Level," *KSME International Journal*, Vol. 18(11), pp. 1991~1997.
- (7) Choi, H. C., 2005, "An Evaluation on the Effect of Reversed Plastic Zone on the Fatigue Crack Opening Behavior Under 2-D Plane Stress," *Journal of KSME(A)*, Vol. 29(8), pp. 1078~1084.
- (8) Choi, H. C., 2005, "A Study on Relationship Between Fatigue Crack Opening Behavior and Reversed Plastic Zone Size," *Key Engineering Materials*, Vol. 297-300, pp. 66~71.
- (9) Kurihara, M., Katoh, A. and Kawahara, M., 1987, "Effective of Stress Ratio and Step Loading on Fatigue Crack Propagation Rate," *Current Research on Fatigue*, Tanaka, T., Jono, M. and Komai, K., Eds., Elsevier Applied Science, pp. 247~265.
- (10) Kim, C. Y., 1993, "Fatigue Crack Closure and Growth Behavior under Random Loading," Ph. D. dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology.