

응력비의 변화에 따른 혼합 모드 피로 균열 전파 거동

송삼홍*·최지훈**·이정무***

Mixed Mode Fatigue Crack Propagation Behavior due to The Variation of Stress Ratio

Sam-Hong Song, Ji-Hoon Choi and Jeong-Moo Lee

Key Words: Mixed mode(혼합 모드), Stress Ratio(응력비), Fracture Life(파단 수명), Stress Intensity Factor Range(응력확대계수범위), Loading application angle(하중작용각도)

Abstract

Most cracks in the structure occur under mixed mode loadings and those propagation depend on the stress ratio very much. So, it is necessary to study the fatigue behavior under mixed mode loading as stress ratio changes. In this paper, fatigue crack propagation behavior was investigated respectively at stress ratio 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 and we change loading application angle to 0°, 30°, 60° to apply various loading mode. The mode I and II stress intensity factors of CTS specimen used in this study were calculated by displacement extrapolation method using FEM(ABAQUS). Using both the study through the experiment and the theoretical study through FEM analysis, we studied the relation between crack propagation rate and stress intensity factor range at each loading mode due to the variation of stress ratio. Also, when the crack propagated under given stress condition and given loading mode condition, we studied what the dominant factors of the crack propagation rate were at each case.

1. 서 론

기계나 구조물은 사용중에 반복적으로 변동하는 하중 상태에 놓이게 되는 경우가 많으며, 이러한 반복하중에 의해 손상이 누적되어 피로 파괴 현상을 보인다. 기존의 많은 연구는 균열의 전파에 지배적인 영향을 미치는 균열선단에 수직으로 작용하는 인장 응력에 의한 모드 I에 대해 연구가 주로 되어 왔다. 하지만 실제 기계 요소에 작용하는 하중은 다축 방향으로 작용하므로, 기계 요소에 존재하는 균열에서는 인장응력과 면

내/면의 전단응력에 의해 모드I, 모드II, 모드III의 세가지 변형 형태의 모드가 복합적으로 발생하게 되어 혼합모드를 유발하게 된다⁽¹⁾. 따라서 균열 선단에 형성된 혼합모드에 의한 응력장은 하중이 균열 선단에 수직으로 작용하여 모드I에 의해서 형성된 응력장과는 달리 피로균열 전파거동에 있어 모드II/모드III의 영향을 크게 받는다⁽²⁾. 따라서 혼합모드 하중을 받고 있는 기계 요소에 존재하는 균열에 하중이 모드I으로 작용하는 경우의 연구 결과를 적용한다면 그 결과는 부정확하고 경우에 따라서 위험한 결과를 초래 할 수가 있다⁽³⁾ 따라서 하중이 혼합모드로 작용하는 경우 피로 균열 전파거동에 대해 연구할 필요가 있다.

또한 일반적인 기계 요소에 작용하는 하중은 일정하중이 아닌 하중형태가 달라지는 변동하중

* 고려대학교 기계공학과

** 고려대학교 대학원 기계공학과

*** 고려대학교 대학원 기계공학과

으로 작용하므로 하중형태에 따라 재료에 존재하는 균열에서는 다양한 응력장이 형성되어 피로 균열 전파거동에 큰 영향을 미친다⁽⁴⁾. 그러므로 기계 요소에 작용하는 응력비의 변화에 따라 피로균열 전파거동에 대해 연구할 필요가 있다. 또한, 하중이 혼합모드로 작용하는 경우 균열 발생 초기에 모드II성분이 증가함에 따라 응력비의 변화가 피로균열 전파거동에 미치는 영향을 연구할 필요가 있다.

본 연구에서는 하중이 모드I과 혼합모드로 작용하는 경우 응력비에 따른 피로균열 전파거동을 평가하고자 하였다. 세부적인 연구내용은 다음과 같다. 첫째, 실험을 통해 응력비와 하중 작용 각도가 피로균열 전파거동에 미치는 영향을 고찰하고 이를 바탕으로 혼합 모드 피로 거동에 지배적인 요소가 무엇인지를 분석 하였다. 둘째, 실험 결과를 FEM 해석에 반영, 균열 전파에 따른 균열 선단에서의 응력장과 변형장을 해석하였다. 셋째, 실험을 통한 연구 내용과 FEM해석을 통한 연구 내용을 비교, 검토함으로써 혼합 모드 하중이 작용하는 경우, 응력비와 응력 확대 계수의 관계, 하중 작용각과 응력 확대 계수의 관계 등의 일반적인 관계를 도출하여 응력비가 혼합모드 피로균열 전파거동에 미치는 영향과 이에 대한 반영 및 평가를 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험 재료

본 연구에 사용된 재료는 KS D 3698에 규정된 냉간 압연 스테인리스강(STS304)이며, 내열 내식성이 우수하고, 저온 강도 및 기계적 성질이 우수한 합금으로 공학적으로 다양한 용도에 적용된다. 이 재료는 자동차 부품, 건축 자재, 각종 의료 기구, 저정용 수송탱크, 선박용 부품에서 각종 발전소 및 화학 플랜트와 같은 대형 구조물의 배관, 연결 가스켓, 및 구조물의 지지용으로 널리 사용되고 있다.

2.2 시험편과 하중 장치

혼합모드의 피로균열 성장에 대한 연구에는 광범위한 혼합 모드 하중 상태를 조성하기 위하여 다양한 실험 조건과 여러 형상의 시험편이 제안되어 사용되어 왔다. 본 연구에서는 작은 크기,

단순한 형상과 용이한 가공성을 가지며, 하중 장치를 이용하여 모드의 혼합도를 모드 I에서 모드 II까지 광범위하게 조절할 수 있는 장점을 가지고 있는 CTS(Compact Tension Shear)시험편을 사용했다. 시험편의 형상과 치수는 Fig. 1에 나타난 것과 같다.

하중장치는 Richard⁽⁵⁾가 고안한 장치를 기본으로 하여 강 등이 수정, 제안한 모델을 응용한 것이다. 하중장치는 편 홀 각도변화에 따라 피로시험기의 단축 인장하중으로 시험편에 다양한 혼합 모드 하중상태를 조성할 수 있도록 제작되었다. 실험조건은 하중장치를 이용하여 하중작용각도가 0° 인 모드 I 으로부터 90° 인 모드 II까지 다양하게 변화시킬 수 있다. 하중장치의 형상과 치수는 Fig. 2와 같다.

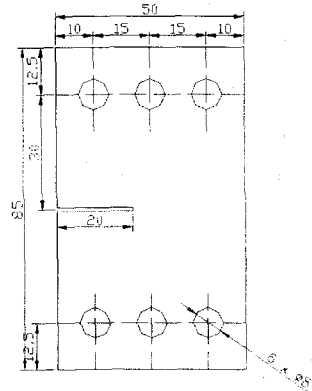


Fig. 1 Configuration of fatigue test specimen

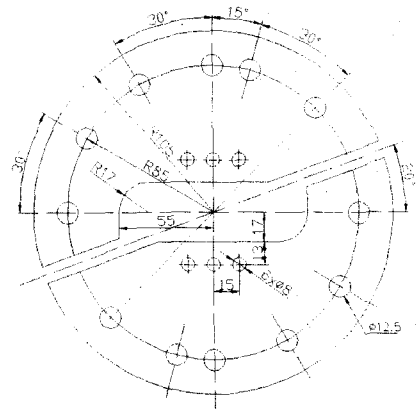


Fig. 2 Configuration of loading device

2.3 실험 방법

본 실험에서 사용한 시험기는 전기유압식 인장 압축 피로시험기인 INSTRON 1331이며, 피로시험은 인장-인장상태의 일정진폭 하중 하에서 수행하였다. 피로 시험의 작용 하중은 주파수 10Hz인 Sine파 형태로써 부식 환경이 아닌 보통의 실온 환경이므로 피로 하중의 주파수에 의한 영향은 없는 것으로 가정하였다. 실험에 사용한 응력비는 최대 하중을 고정시키고 최소 하중을 변화시켰으며 최대 하중은 항복 응력의 26.5%로 하였다. Table 3은 실험에 사용한 응력비를 나타낸다.

본 연구에서 수행한 실험 조건은 각각의 응력비에 대하여 하중 작용 각도를 0°, 30°, 60°로 조절하여 균열 선단에서 Mode I과 혼합 모드를 유발하도록 하여 실험을 수행했다.

균열 관찰 구간인 $0.4 \leq a/W \leq 0.6$ 에서 관찰 영역이 시작하는 균열길이 20mm에서 실험에 사용된 모든 시편이 가공된 노치의 영향을 받지 않고 동일 조건을 가지게 하기 위해 우선 wheel cutter를 이용하여 17mm의 노치를 가공했으며 다음으로 하중을 점진적으로 감소시키면서 3mm의 예비 균열을 가공했다.

피로균열의 측정은 ASTM E647의 규정에 따라 측정하였다. 균열 선단으로부터 전파하는 피로 균열의 수평 및 수직거리를 규정한 단위 간격에 따라 측정함으로써 피로 균열의 전파위치를 측정하여 실제 전파 길이를 산출했으며 피로 균열 전파 속도 da/dN 계산에는 7점 증분법(Seven Point Incremental Polynomial Method)을 사용하였다.

3. 실험 결과

3.1 응력비의 변화에 따른 피로 균열 전파 거동

각각의 응력비($R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}$)를 일정

Table 3 The condition of the stress ratio R (Unit: kgf)

	R=0.1	R=0.3	R=0.5	R=0.7
P_{\max}	1500	1500	1500	1500
P_{\min}	150	450	750	1050

하게 유지한 다음 하중이 균열 선단에 대해 수직으로 작용하여, 즉 하중 작용각도가 0°, Mode I을 유발하는 경우와 균열 선단에 대하여 임의의 방향으로 작용하여 Mode I, Mode II를 유발하는 경우 중 균열 선단에 대해 30°와 60° 방향으로 하중이 작용하는 경우에 대해서 피로 균열 전파 거동을 알아보기 위해 피로 시험을 실시하였다. 응력비가 0.1인 경우 피로 시험 결과를 Fig. 3에, 응력비가 0.3인 경우는 Fig. 4에, 응력비가 0.5인 경우는 Fig. 5, 응력비가 0.7 경우는 Fig. 6에 각각 나타내었다.

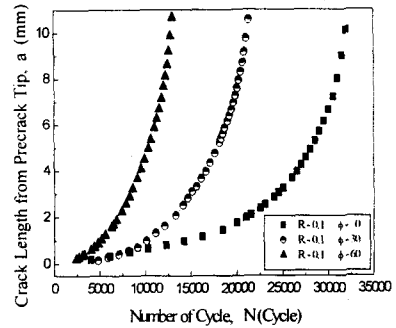


Fig. 3 Relationship between a and N at R=0.1

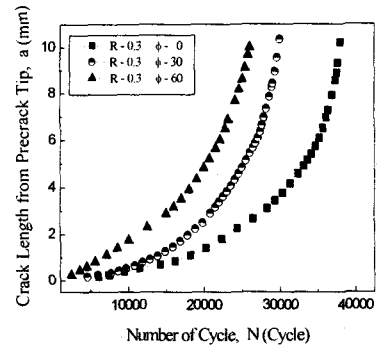


Fig. 4 Relationship between a and N at R=0.3

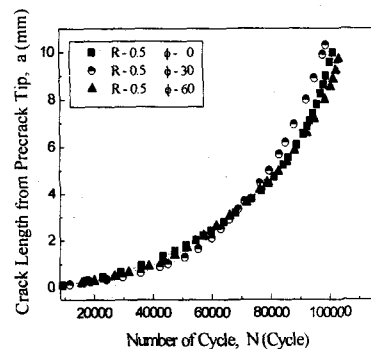


Fig. 5 Relationship between a and N at R=0.5

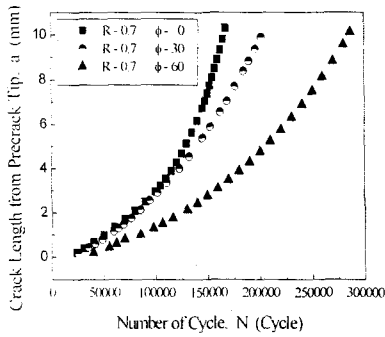


Fig. 6 Relationship between a and N at $R=0.7$

위 실험 결과를 통해 피로 균열 전파 거동에 있어 응력비의 영향과 혼합 모드비의 영향을 관찰하기 위해 사용한 하중작용각도의 영향을 관찰할 수 있었다.

응력비가 0.1인 경우, 하중작용각도가 증가함에 따라 균열 성장률이 증가하여 파단 수명이 감소하는 현상을 알 수 있었다.

응력비가 0.3인 경우 응력비가 0.1인 경우와 마찬가지로 하중작용각도가 증가함에 따라 균열 성장률이 증가하여 파단 수명이 감소했지만 하중작용각도에 따른 각각의 균열 성장률 기울기의 차이가 응력비가 0.1인 경우 보다 작아져 파단 수명간의 차이도 작아졌다.

응력비가 0.5인 경우는 각각의 하중작용각도에 따른 균열 성장률 기울기가 비슷해져 유사한 균열 성장률을 가졌으며 파단 수명이 거의 같아졌다.

응력비가 0.7인 경우는 응력비가 0.1, 0.3인 경우와 반대의 경향을 보였다. 즉 하중작용각도가 증가함에 따라 균열 성장률이 오히려 감소하여 파단 수명이 크게 증가했다.

3.2 응력비와 파단 수명과의 관계

각각의 하중작용각도에 따른 응력비와 파단 수명과의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 이 관계로부터 응력비가 0.1에서 0.5로 증가함에 따라 하중작용각도의 증가에 따른 파단 수명간의 차이가 점점 줄어들었으며 응력비가 0.5인 경우는 거의 비슷해졌다가 응력비가 0.5에서 0.7로 증가함에 따라 하중작용각도의 증가에 따른 파단 수명간의 차이가 크게 증가함을 알 수 있었다.

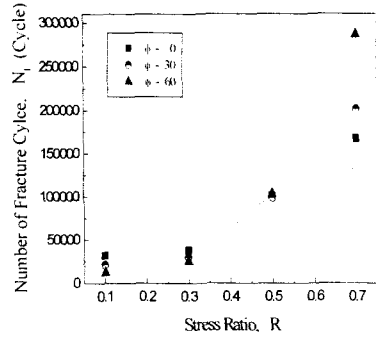


Fig. 7 Relationship between R and N_f

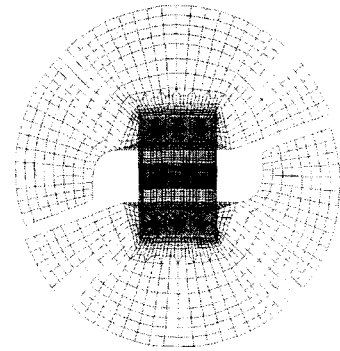


Fig. 8 Finite element analysis model of loading device and specimen

4. FEM 해석 결과

4.1 FEM 해석을 위한 모델링

응력확대계수를 구하기 위해 유한 요소 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 2차원 탄성 유한요소 해석을 수행하였다. 해석에 사용한 시험편과 하중 장치의 요소는 CPS8⁽⁶⁾(요소 형태 ABAQUS Library)이다. 선형 탄성 파괴 역학에서 균열 선단에서는 응력이 ∞ (무한대)가 되는 응력의 특이성이 나타나므로 FEM 해석에서 이 응력의 특이성을 나타나기 위해 균열 선단 요소로는 균열 선단 주위 요소들의 중간 절점을 균열 선단으로부터 변 길이의 1/4에 이동시켜 균열 선단에서 $1/\sqrt{r}$ 의 응력의 특이성이 나타나도록 하는 특이 요소를 사용했다. FEM 해석을 위한 시험편의 물성치는 인장 실험을 통해 얻은 값을 사용했다.

해석에 사용한 모델은 전모델(Full Model)로 구성하였으며 해석에 사용된 하중 장치와 시험편의 모델링은 Fig. 8에 나타냈다.

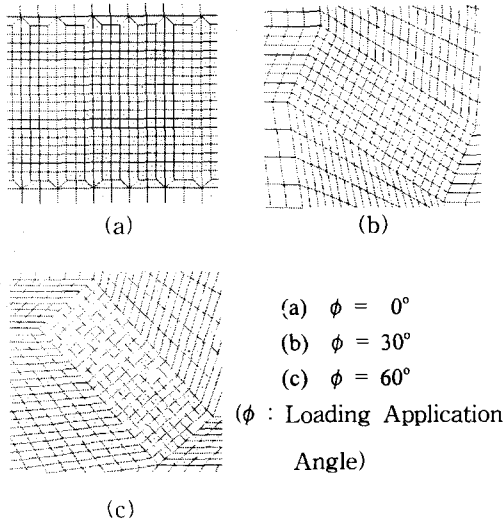


Fig. 9 FEM modeling of crack propagation path

또한 실험에서 구한 하중작용각도의 변화에 따른 균열 전파 경로를 FEM 해석에 반영한 균열 선단 주위의 모델링을 Fig. 9에 나타냈다. 실험 결과 하중작용각도가 동일한 경우 균열 전파 경로는 응력비에 무관한 것을 알 수 있어 각 응력비에 대해 Fig. 9의 모델링을 해석에 사용했다.

4.2 응력비에 따른 응력 확대 계수 범위의 변화

실험에서 사용된 응력비와 하중작용각도의 변화에 따라 균열 성장률이 증가 또는 감소함을 실험을 통해 관찰했다. 이 균열 성장률의 변화 원인을 분석하고 균열이 성장함에 따라 균열 선단에서 응력장과 변형장의 변화를 알아보고 또한 응력 확대 계수 범위의 변화를 알아보기 위해 FEM 해석을 수행하였다. FEM 해석을 위한 모델링은 각각의 응력비와 하중작용각도에서 실험을 통해 얻은 전파 경로를 반영했다. 전파경로를 반영한 모델링은 전파하는 균열의 길이를 1mm 단위마다 직선으로 가정하여 하중작용각도 0° , 30° , 60° 모델에 대하여 균열 길이를 1mm씩 10mm까지 전파시키면서 각 균열 선단에서의 응력 확대 계수 범위를 변위 외삽법⁽⁷⁾을 이용하여 구하였다. 응력비가 0.1인 경우 ΔK 의 변화를 Fig. 10에, 응력비가 0.3인 경우 ΔK 의 변화를 Fig. 11에, 응력비가 0.5인 경우 ΔK 의 변화를 Fig. 12에, 응력비가 0.7인 경우 ΔK 의 변화를 Fig. 13에 나타냈다.

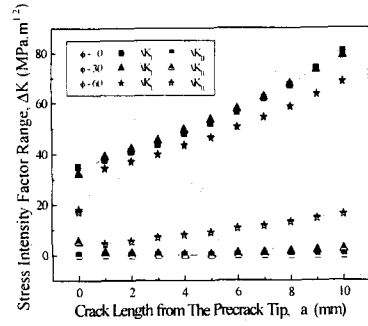


Fig. 10 The variation of ΔK due to ϕ at $R=0.1$

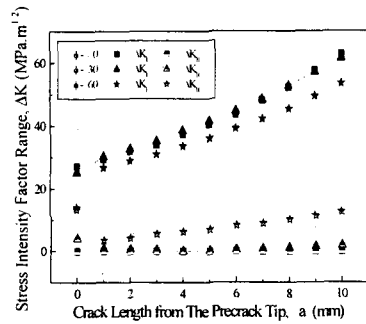


Fig. 11 The variation of ΔK due to ϕ at $R=0.3$

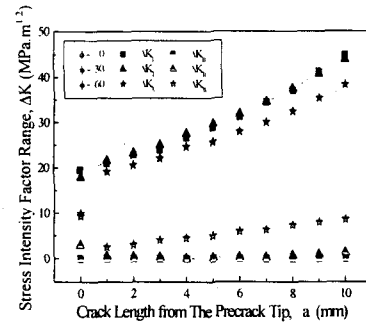


Fig. 12 The variation of ΔK due to ϕ at $R=0.5$

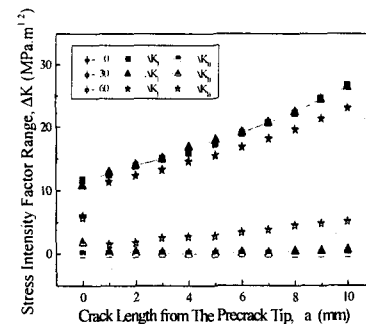


Fig. 13 The variation of ΔK due to ϕ at $R=0.7$

FEM 해석을 통해 응력비와 하중작용각도의 변화에 따른 응력화대계수범위의 변화를 알 수 있었다. 주어진 응력비에서 균열이 성장함에 따라 균열 선단에서 ΔK_I 는 점점 증가를 하고 ΔK_{II} 는 균열 발생 초기에 급격히 감소하였다가 균열이 성장함에 따라 점점 증가함을 알 수 있었다. 또한 일정한 응력비에서 하중작용각도가 증가함에 따라 ΔK_I 는 작아지고 ΔK_{II} 는 증가함을 알 수 있었다. 그리고 응력비가 작은 경우 ΔK_{II} 가 크게 작용하여 균열성장이 모드 I 하중 뿐만 아니라 모드 II 하중에 의해서도 균열성장이 가속되어 하중작용각도가 증가함에 따라 균열성장률이 증가했고, 반면에 응력비가 큰 경우는 ΔK_I 가 작아 균열면 마찰에 의해 균열 성장을 지연시켜 하중작용각도가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있었다. 그리고 하중작용각도가 30°인 경우에 ΔK_{II} 의 영향이 작게 작용하지만 60°인 경우에 ΔK_{II} 의 영향이 크게 작용함을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 CTS 시험편과 하중 장치를 이용하여 혼합모드 하중에서 응력비를 변화시키면서 피로 시험을 수행하였고 FEM 해석을 수행하여 균열이 전파함에 따른 균열 선단에서의 ΔK_I 과 ΔK_{II} 를 결정하여 실험 결과의 이론적인 해석을 수행하고 얻은 결론들을 다음과 같다.

(1) 응력비가 0.1, 0.3인 경우

Mode II로 작용하는 하중의 경우 균열면 간의 마찰로 인해 균열 성장이 지연이 된다. 하지만 응력비가 0.1, 0.3인 경우 하중작용각도가 증가함에 따라 균열 선단에 작용하는 ΔK_{II} 가 크게 작용하여 균열면의 마찰로 인한 지연 효과를 보이지 않고 ΔK_{II} 에 의해 균열성장이 더욱 가속되어 파단 수명(N_f)이 감소하는 경향을 보였다.

(2) 응력비가 0.5인 경우

하중작용각도가 증가함에 따라 ΔK_{II} 는 점점 증가하여 Mode II에 의한 균열 성장이 가속되지만 ΔK_I 가 작아 균열 성장률이 하중작용각도에 대해 비슷한 기울기를 가져 파단 수명이 유사함을 보였다.

(3) 응력비가 0.7인 경우

하중작용각도가 증가함에 따라 ΔK_{II} 는 점점 증

가하지만 Mode II 성분이 균열면 사이의 마찰에 의한 지연 효과를 극복할 만큼 크지 않기 때문에 균열면 간 마찰에 의해 균열 성장률이 감소하여 하중작용각도가 증가함에 따라 파단 수명이 크게 증가함을 보였다.

(5) 균열 발생 초기에 하중작용각도가 같은 경우, 균열이 성장하는 Paris영역에서 균열 성장률은 하중작용각도 ϕ 의 영향이 매우 작고 응력비에 지배적인 영향을 받음을 보였다.

(6) 하중이 모드 I 또는 혼합모드로 작용하는 경우 균열이 전파하는 경로는 응력비의 변화에 덜 민감하고 같은 하중 작용각도에 대해 거의 일정한 경로를 가진다.

(7) 하중작용각도가 일정할 때 응력비가 증가함에 따라 ΔK_I 과 ΔK_{II} 은 감소하여 균열 성장률이 크게 감소하여 파단 수명이 증가함을 보였다.

참고문헌

- (1) R. Plank, G. Kuhn, 1999, "Fatigue Crack Propagation under Non-Proportional Mixed Mode Loading", *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 62, pp. 203-229.
- (2) B.R.You, S.B.Lee, 1997, "Fatigue Crack Growth Behavior of SM45C Steel under Cyclic Mode I with Superimposed Static Mode II Loadings", *Fatigue Frac. Engng Mater. Struc.*, Vol. 20, pp. 1059-1074.
- (3) J. Qian and A. Fatemi, 1996, "Mixed Mode Fatigue Crack Growth: A Literature Survey", *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 55, pp. 969-990.
- (4) D.N.Lal, 1996, "A detailed physical analysis of the R-effect on LFM fatigue crack growth", *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 55, pp. 115-132.
- (5) H. A. Richard, 1983, "A Loading Device for the Criterion of Mode in Fracture Mechanics", *Int. J. Fracture*, Vol. 22, pp. R55~R58.
- (6) ABAQUS User's Manual, 1998, Version 5.8, Habbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, RI.
- (7) J. Tong, J. R. Yates and M. W. Brown, 1997, "The formation and propagation of mode I branch cracks in mixed mode fatigue failure", *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 56, pp. 213~231.