

혼합모드(Mode I+II)구현을 위한 2축 피로시험 JIG 설계 Design of 2 Axles Fatigue Test JIG for the Materialization of Mixed Mode (Mode I + II)

최성대*, 정선환*, 김기만*, 김잠규*, 최명수**, 김우재**
Seong-Dae Choi*, Seon-Hwan Cheong*, Gi-Man Kim*,
Jam-Kyu Kim*, Myoung-Su Choi**, Woo-Jae Kim**

<Abstract>

Elements of a mechanical structure are getting from multi-axles stress. so fatigue characteristic experiment Shall execute in multi-axles stress state. it is very hard to apply according to forms of a testing machine and implementation. In this study, 2 axles fatigue testing machine did a design and Development. a new JIG developed to realize a mixed mode. a stress state in mixed mode of a specimen had each other comparison using the Finite element method to examine propriety of a new JIG.

Keywords : 2 Axles Fatigue, Mixed mode, Choi Jig, FEM, Stress Concentration

1. 서 론

기계부품이나 구조물내에 존재하는 균열은 균열면에 대한 변위의 방향에 따라서 기본적으로 Mode I, II, III의 변형형태로 구분할 수 있으며, 기존의 연구는 균열의 진전에 지배적으로 영향을 미치는 Mode I 상태의 경우에 대해 집중되어 왔다. 그러나 일반적인 경우 균열의 진전 거동은 세 가지 모드가 함께 작용하여 일어나고, 실제 구조물에 작용하는 하중은 대부분 다축에 의한 것이다. 이로 인해 형성되는 응력상태와 균열에 미치는 영향은 혼합모드의 양상을 나타낸다. 또한 Mode I의 조건하에서도 미시적 관점에서의 균열전파양상은 혼합모드하의 거동이 지배적이다.

다양한 환경조건에 대한 기계구조물의 소형

화 경향에서 미소균열이 전체 파단강도에 미치는 영향이 중요하게 되었고, 복합 및 접합에 의한 비균질 또는 비등방성 소재들의 개발과 응용 및 기하학적으로 복잡한 부품, 구조물들의 설계조건 등에 의하여 균열은 실제 혼합모드 상태에서 진전하게 된다. 이러한 이유들로 혼합모드 하의 균열거동에 대한 연구가 확대되고 있다¹⁾. 혼합 모드에 대한 연구에서 대부분 혼합모드를 형성시키기 위한 방법으로 시험편의 예비균열의 방향과 1축에서 작용하는 하중과의 각도 변화를 시켜서 연구를 진행하고 있다. 그러나 이러한 실험 방법은 균열발생 초기에는 혼합모드에 의한 균열 발생의 양상이라고 볼 수 있지만, 균열이 진행될수록 균열의 진행방향은 하중방향의 수직방향으로 발생되므로 Mode I 성분만의 의한 영향이라고 판단된다.

* 교신저자, 정회원, 금오공과대학교 기계공학부, 교수, 工博
Email : sdchoi@kumoh.ac.kr

** 준회원, 금오공과대학교 대학원

* Corresponding Author, Prof., Mechanical Engineering
Dept. of Kumoh Institute of Technology, Ph. D.

** Graduate School of Kumoh Institute of Technology

본 연구에서는 일반적으로 2축시험이 가능한 십자형 시험편을 가지고 평면응력상태와 동일한 조건으로 X, Y 축으로 인장하중을 부하하여 노치부의 응력상태를 검토하여 시험편의 JIG의 개선을 실시하였다. 또한 일반적으로 2축 피로 시험에서 사용되고 있는 단순인장전단(Compact Tension Shear : CTS)시험편을 사용하여 2축 하중에 의한 혼합 모드 피로시험이 가능한 JIG를 설계하고, 기존의 실험 방법을 유한요소해석(Finite element method)를 이용하여 비교 분석하여 2축 하중에서의 혼합 모드 피로 시험의 타당성을 검증하였다.

2. 2축 하중 JIG 설계

2.1 2축 십자형 시험편

본 연구에서는 2가지 시험편을 사용하였다. 그중 평면응력 상태를 재현하기 위한 박판 십자형시험편을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 X축과 Y축으로 하중을 인장방향으로 부하하면 중심에 관통홀에 응력의 변화가 생성되는 것이 일반적인 평면응력상태를 나타낸다. 그러나 2축 시험기는 X축과 Y축의 한쪽을 고정하여 다른 한쪽에서 인장하중을 부하하는 것으로 인장하중이 중심에 있는 관통홀에 전달되기 전에 고정된 X축과 Y축의 시험편부분이 먼저 응력이 발생하여 실제로 시험편의 중심 관통홀에는 응력이 거의발생하지 않는 현상이 나타난다. Fig. 2에는 일반적인 2축 하중부하시험을 하는 시험기에 부착된 시험편의 응력상태를 구조해석을 통하여 검토하여 나타내었다. 응력해석의 조건은 Table 1에 나타내었다.

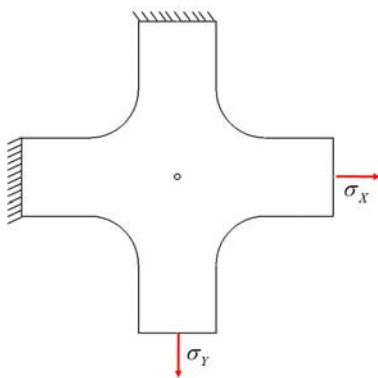


Fig. 1. Configuration of 2 axles specimen on plane stress condition.

2.2 CTS 시험편

본 연구에서 혼합모드 시험편은 Richard 와 Benitz²⁾의 모델을 Fig. 3에 나타내었다. 이 시험편은 Y축 방향으로 Mode I의 균열진전양상과 X축 방향으로 Mode II의 균열진전양상을 혼합한 것이다.

Table 1. Condition of analysis parameters

	Y.S. [MPa]	T.S. [MPa]	ν	E [MPa]
Specimen	250	460	0.3	20000
JIG	380	538	0.35	200000

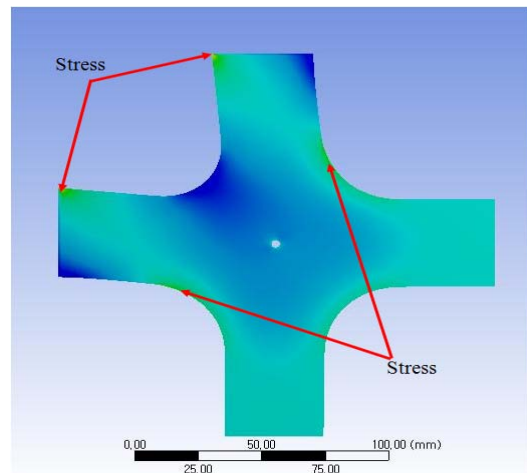


Fig. 2. Analysis results of 2 axle specimen by normal fatigue testing machine JIG.

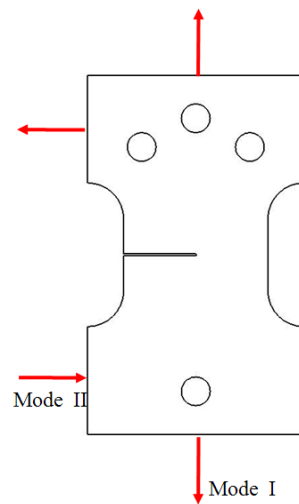


Fig. 3. Configuration of CTS(Compact Tension Shear) specimen.

이 시험편으로 일반적인 2축 시험기를 사용하여 하중을 부하 했을 때에 나타나는 현상을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에 나타낸 것과 같이 응력발생은 균열선단에 나타나는 것이 아니라 JIG에서 나타나고 있다. 이것으로 균열선단에 부하하는 하중이 실제의 하중과는 다르게 나타냄으로 정확한 실험이 어렵다고 생각된다. 따라서 일반적인 시험편의 JIG로서는 혼합모드의 실험과 2축 부하 실험이 부적절하다고 생각된다. 그래서 실제로 2축 부하시험으로 혼합모드를 부하 할 수 있는 JIG를 창안하여 설계 검토하였다.

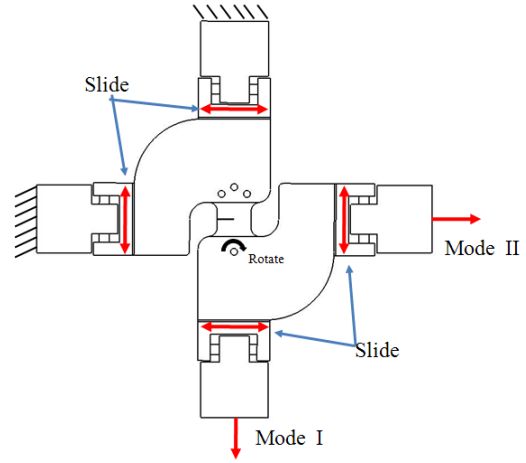


Fig. 5. Configuration of Choi JIG.

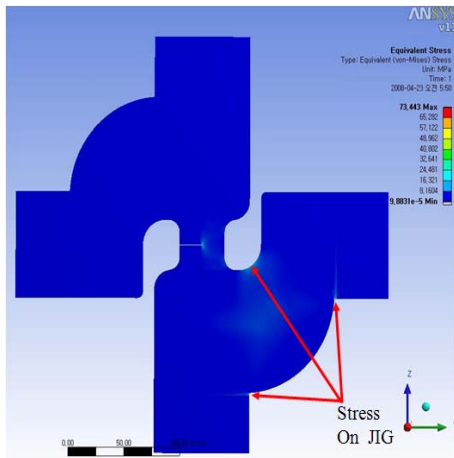
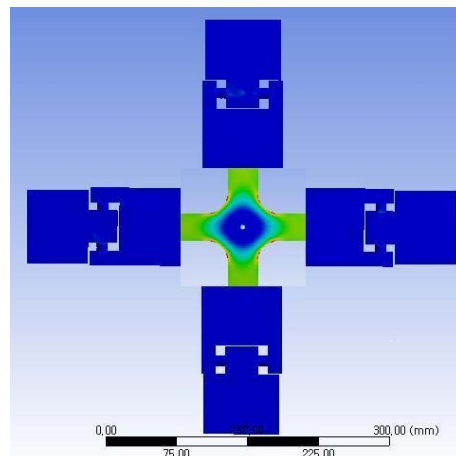


Fig. 4. Analysis results of CTS specimen by normal fatigue testing machine JIG.

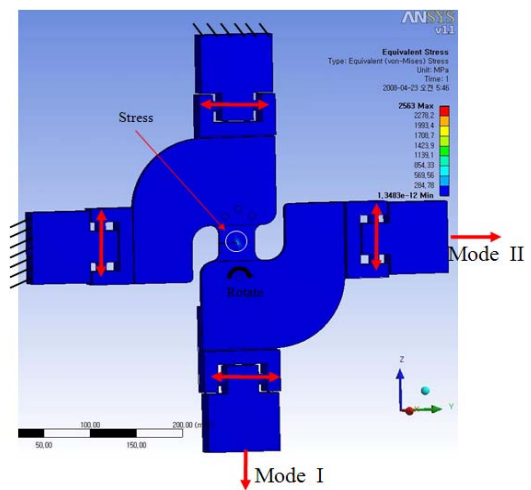


(a) 2 axle specimen

2.3 2축 및 혼합모드 가능한 JIG 설계

십자형 시험편을 이용하여 2축 피로시험을 실시하려면 하중축이 각각 독립적으로 시험편에 하중이 부하하여야 한다. 또한 서로의 하중의 간섭은 시험편 내에서만 가능하고 JIG에서는 서로 간섭이 없어야 한다는 결과를 얻음으로서 Fig. 5와 같이 각축에 슬라이딩 메커니즘을 적용하였다. X축에서는 Y축으로 하중이 전달되지 않도록 Y축으로 슬라이딩 할 수 있도록 핀으로 연결하였으며, Y축도 X축과의 하중이 서로 간섭되지 않도록 X축으로 슬라이딩할 수 있도록 핀으로 연결하였다. 이것을 Choi JIG라고 명명한다.

Fig. 6에서는 본 연구에 사용된 두 개의 시험편을 Choi JIG에 부착했을 때의 응력상태를 나타내고 있다.



(b) Mixed mode specimen

Fig. 6. Stress analysis results of 2 axle load by Choi JIG.

Fig. 6(a)에 나타난 것과 같이 X축의 하중이 Y축에 영향이 미치지 않도록 하기위해 Y축으로 슬라이딩 하도록 경계조건을 부여하여 수행한 것으로 실제의 2축 하중에서 나타난 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. 모아원에서 σ_1 과 σ_2 의 주응력이 서로 같을 때는 45° 방향으로 최대전단응력이 발생한다. 해석결과에서도 같은 결과를 나타내고 있다. Fig. 6(b)에 나타난 것과 같이 혼합모드(Mode I + Mode II)를 각 모드에서 JIG가 간섭하지 않도록 하는 것이 중요하다. 따라서 2축 부하하중에서의 혼합모드 상태를 나타내는 것은 본 연구에서 창안한 Choi JIG를 사용하는 것이 타당하다.

2.4 Richard JIG와 Choi JIG의 비교해석

Fig. 7에 나타난 것과 같이 Richard JIG⁽²⁾(이하 R-JIG라 표기함)에 CTS 시험편을 부착하여 Mode I 상태, Mode II 상태 그리고 혼합모드 상태에 대하여 노치 끝단에 발생하는 응력발생 지점과 균열진전 각도에 대하여 비교 검토하였다. R-JIG와 마찬가지로 Choi JIG도 R-JIG에 부하한 하중과 각도에 의하여 Mode I과 Mode II의 벡터값으로 변환하여 하중을 부가하였다. Fig. 7(b)에 나타난 것과 같이 mode I과 Mode II의 벡터계산에 의해 각도 15° 로 변환하여 혼합모드로 나타낼 수 있도록 R-JIG를 사용하였다. Table 2에는 R-JIG에 부하한 하중을 Choi JIG로 부하할 벡터 하중값으로 변환한 것을 나타내었다.

Table 2. Load conditions for CAE on R-JIG and Choi JIG

	R-JIG		Choi JIG	
	Rotate $\phi(^{\circ})$	Load (N)	Mode I (N)	Mode II (N)
Step 1	0	3000	3000	0
Step 2	15	3000	2898	776
Step 3	30	3000	2598	1500
Step 4	45	3000	2121	2121
Step 5	90	3000	0	3000

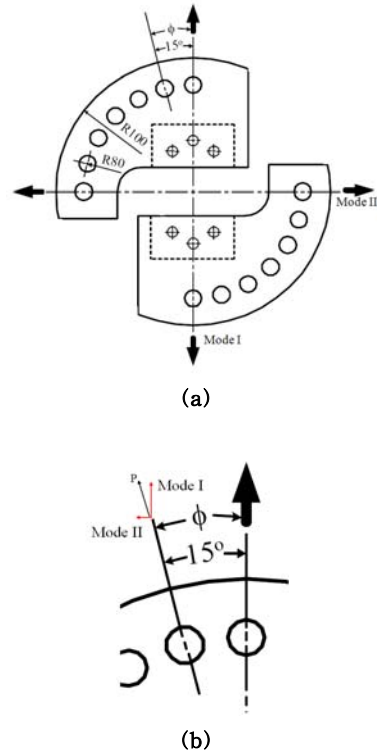


Fig. 7. Configuration of R-JIG.

3. 2축 혼합모드 해석 결과

3.1 R-JIG와 Choi JIG의 하중조건에 따른 응력집중부의 변화

Table 2에 의한 조건으로 유한요소법으로 구조해석을 실시하였다. 각 JIG의 유한요소해석을 위하여 전처리로 메쉬를 나누었다. 노치끝단의 응력 분포를 자세히 관찰하기 위하여 노치끝단은 지름 1mm로 라운딩처리를 하였고, 노치끝단은 60등분으로 메쉬를 나누었다. 각 부품들의 결합조건은 슬라이딩이 발생하는 영역을 제외한 나머지는 모두 완전 집합으로 하였다.

Fig. 8에 R-JIG와 Choi JIG의 하중조건에 따른 해석결과를 나타내었다. Fig. 8(a)는 R-JIG에서 하중부하각도 ϕ 가 45° 일 때를 나타내었다. 응력집중부도 X축에서 45° 의 각도로 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 8(b)는 Choi JIG에서 mode I와 mode II방향의 하중을 각각 2121N로 하여 해석한 결과를 나타내었다. 여기에서도 거의 45° 방향으로 응력집중부가 형성됨을 알 수 있다.

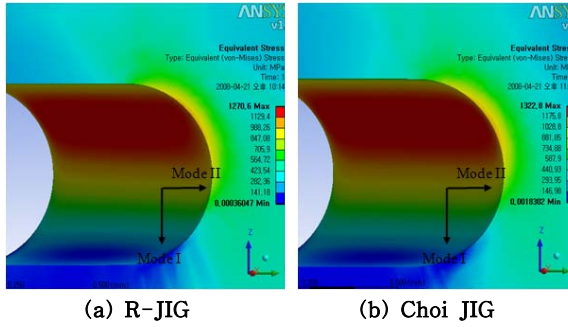


Fig. 8. Results of stress analysis at step 4 condition.

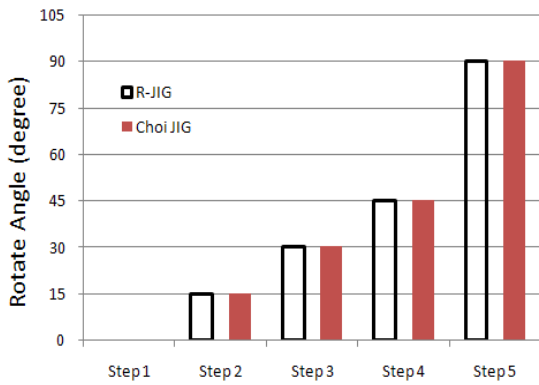


Fig. 9. Stress concentration angle for load condition.

Fig. 9에는 각 step에서 R-JIG와 Choi JIG의 응력집중부가 형성되는 해석결과를 나타내었다. 각 step에서 두 JIG의 응력집중 각도는 거의 같게 나타남을 알 수 있다. 이것은 단순 인장하중에서 2축의 형태에 따른 R-JIG와 Choi JIG는 같은 효과를 나타낸다는 것을 검증하였다. 그러나 단순 인장과 단순압축에서는 같은 효과를 나타내지만 하중방향이 서로 다르게 될 경우를 검토하여야 한다.

3.2 균열진전후에 따른 혼합모드의 유지

유한 요소 해석을 통하여 R-JIG와 Choi JIG가 혼합모드상태에서 균열발생초기에는 모드2에 의 영향으로 균열발생 각도가 하중의 벡터에 따라 일정하게 변화 되는 것을 확인하였다. 그러나 균열이 하중방향에 따라 일정한 각도로 진전된 후 부하되는 하중의 조건에 따라 응력상태를 Fig. 10에 나타내었다. 예 균열에서는 경사진 각도의 하중이 부하함으로 Mode I+II의 현상이 나타나지만 R-JIG의 경우 균열이 발생하여 진전된 후에는 균열의 진전 방향이 하중방향의 수직방향으로 진전하므로 Mode

I의 상태로 균열진전하는 것을 예측 할 수 있다. Fig. 11에는 균열이 45°로 진전 후에 대하여 응력해석을 실시하여 나타낸 결과를 제시하였다. 응력집중부는 약 42°정도에 나타난다. 이것은 절대 좌표에서는 45°로 진전하지만 시험편의 하부가 균열선단을 중심으로 회전하여 균열열림이 이루어짐으로 실제 시험편 하부면에서는 약 3°의 차이를 보이고 있다.

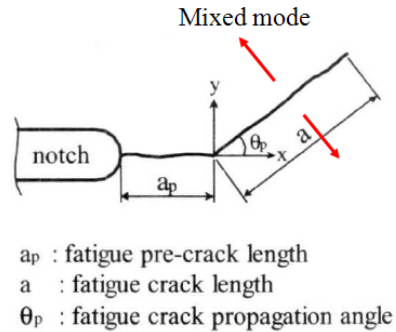


Fig. 10. Schematic illustration of fatigue crack propagation path.

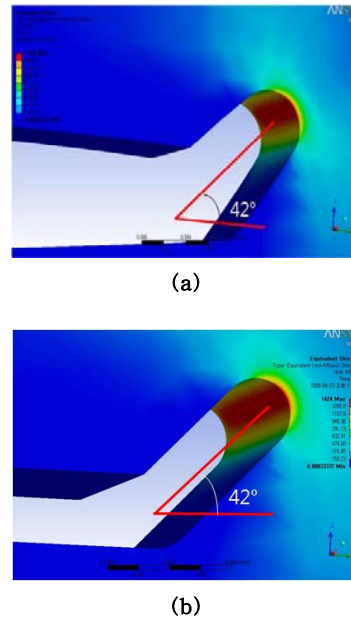


Fig. 11. Result of analysis at crack path 45° angle.

3.3 피로하중 주기에 따른 혼합모드 실험

R-JIG는 Mode I과 Mode II의 하중의 크기에 따라 균열진전 각도가 변화하지만 Fig. 12에 나타낸 것과 같이 하중주기와 하중방향에 따른 실험은 불가능하다. Fig. 12(a)와 (b)는 하중주파수는 같지만 하중방향이 서로 반대방향으로 작용하고 있는 것이다. 또한 Fig. 12(a)와 (c)의

관계에서는 Mode I의 하중의 주파수는 일정하게 작용할 때 Mode II의 주파수는 Mode I 보다도 빠르게 부가 될 때를 나타낸다. 이 때는 균열의 진전방향이 0-45°까지 변화할 수 있는 상태를 나타내고 있다. 이런 결과로 R-JIG로는 Fig. 12와 같은 하중 부하실험으로는 불가능하다는 것이라 생각된다. 그러나 Choi JIG를 이용한 2축 피로시험으로 Fig. 12와 같은 하중부하실험은 X축, Y축의 액츄에이터에 독립적인 제어와 동기부여를 실시함으로써 실제적인 혼합모드 피로시험을 구현 할 수가 있다고 생각된다.

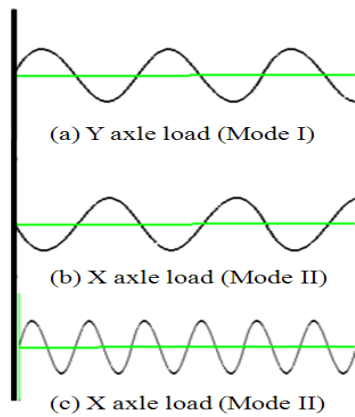


Fig. 12. Frequency load condition of each axle (each mode)

4. 결론

본 연구에서는 일반적으로 2축 피로시험에서 사용되고 있는 단순인장전단 시험편을 사용하여 2축 하중에 의한 혼합 모드 피로시험이 가능한 JIG를 설계하고, 기존의 실험 방법을 유한 요소해석을 이용하여 비교 분석하여 2축 하중에서의 혼합 모드 피로 시험의 타당성을 검증한 결과는 다음과 같다.

- (1) X축의 하중이 Y축에 영향이 미치지 않도록 하기위해 Y축으로 슬라이딩 하도록 경계조건을 부여하여 수행한 것으로 실제의 2축 하중에서 나타난 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. 이에 따라 수직, 수평 방향으로 슬라이드 메커니즘이 적용한 Choi JIG는 2축 실험 및 혼합모드시험을 수행할 수 있다.
- (2) 유한 요소 해석을 통하여 2축 하중상태에서 노치 끝단의 응력분포를 확인으로 통하여 단순 인장하중에서 2축의 형태에 따른 R-JIG와

Choi JIG는 같은 효과를 나타낸다는 것을 검증되었다.

- (3) 예비 균열에서는 경사진 각도의 하중이 부하함으로 Mode I+II의 현상이 나타나지만 R-JIG의 경우 균열이 발생하여 진전된 후에는 균열의 진전 방향이 하중방향의 수직방향으로 진전하므로 Mode I의 상태로 균열진전하는 것이라 할 수 있다.
- (4) Choi JIG를 이용한 2축 피로시험으로 2축이 서로다른 주기를 갖는 하중부하실험은 X축, Y축의 액츄에이터에 독립적인 제어와 동기부여를 실시함으로써 실제적인 혼합모드 피로시험을 구현 할 수가 있다고 생각된다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교에서 지원한 과제로서 대학 당국에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Qian, J. and Fatemi, A., *Engineering Fracture Mechanics*, **55**, **6**, 969, (1996)
- 2) Richard, H. A. and Benitz, K., *International Journal of Fracture*, **22**, 55, (1983)
- 3) Seok-Pyo Hong and Sam-Hong Song., *The Korea Society of Mechanics Engineer*, **6**, 1234, (2006)
- 4) Erdogan, F. and Sih, G.C., *J. of Basic Engineering*, **85**, 519, (1963)
- 5) A. Otsuka, K. Mori, T. Ohshima and S. Tsuyama, *Fracture (Advances in Fracture Research)*, **81**, 1851, (1981)
- 6) ASTM E647, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, pp. 565~601.
- 7) Buzzard, R. J., Gross, B. and Srawley, J. E., "Mode II Fatigue Crack Growth Specimen Development," ASTM STP 905, pp. 329~346, (1986)
- 8) Liu, A. F. and Allison, J. E., "Effects of Biaxial stresses on Crack Growth," ASTM STP 677, pp. 5~12, (1979)

(2008년 1월 25일 접수, 2008년 5월 23일 채택)