한국기계가공학회지, 제14권, 제1호, pp.78~84(2015.2) ISSN1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.14 No.1, pp.78~84(2015.2) ISSN2288-0771(online)

http://dx/doi.org/10.14775/ksmpe.2015.14.1.078

2축 하중주파수가 피로균열진전거동에 미치는 영향

김상희*, Li Jinghua**, 최성대**,#
*금오공과대학교 전자공학과, **금오공과대학교 지능기계공학과

The Effect of Behavior Fatigue Crack Propagation on 2-Axle Load Frequency

Sang-Hee Kim*, Jing-Hua Li** and Seong-Dae Choi**,#
*Kumoh National Institute of Technology, **Kumoh National Institute of Technology
(Received 19 January 2015; accepted 2 February 2015)

ABSTRACT

The stress state acting on mechanical parts and structures is generally mixed stress. This complex stress state, which is subject to changes in the environment, will produce many . Cars running on roads with different road conditions will subject the automotive parts to combined stress state. In the x direction and the y direction, a different amplitude and frequency of the fatigue load can be present. However, the load amplitude for Mode I and Mode II in a 2-axis fatigue test is limited to a constant ratio; the load frequency is always the same for any mode. In this paper, it is verified how the variation of the load frequency for mode II affects the behavior of fatigue crack propagation under mixed mode.

Key Words : Mixed Mode(혼합모드), Load Frequency(주파수), Fatigue Crack Propagation(피로균열진전), Choi JIG(초이지그), Striation(스트라이에이션)

1. 서 론

기계부품이나 구조물에 작용하는 응력상태는 혼합모드의 하중상태를 나타낸다. 이러한 복합적인 하중상태는 작업환경에 따라 가해지는 하중의 크기, 주기적인 진동에 의하여 여러 가지 복합형태의 결과를 나타낸다. 자동차는 운행 시 도로의 상태에 따라 부품에 복합적인 하중상태를 가해지고 있으며, Mode I과 Mode II의 방향에서 하중진폭과 하중주파수가 서로 다른 조건으로 부품에 피로하중을 가하고 있다. 하지만 현재까지 2축 피로실험에서는 Mode I과 Mode II의 하중진폭은 일정한 비율의 제한을 받으며, 하중주파수는 항상 같아야 했다. 때문에 이러한 제약조건을 벗어나고 하중진폭과 하중주파수의 입력조건을 서로 독립적으로 가할 수 있는 장비가 필요 했다. Choi 지그는 슬라이딩 메커니즘을 적용하여, 2축 피로시험기에 장착하여 2축 독립제어가 가능하게 되어 Mode I과 Mode II를 각각 제어 하므로 여러 가지 복합형태의 응력상태를 구현할 수 있다. 또한 재료의 복합적인 피로하중상태에서의 피로 특성을 알아보는 것도 보다 정확한 수명계산에 도움을 가져올 수 있다고 예상되며, 제품의 품질 향상에도 많은 영향을 가져올 수 있다.

본 연구에서는 자동차 강판 재료로 많이 사용되

C.A : sdchoi@kumoh.ac.kr
Tel : +82-54-478-7396, Fax : +82-54-478-7319

는 열간 압연강판을 사용하여, Mode I + Mode II의 혼합모드 피로하중하에서 Mode II의 하중 주파수의 변화가 피로균열진전에 미치는 영향을 비교 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편

본 연구에서는 자동차의 강판으로 많이 사용되는 열간압연강판을 이용하였으며, Table 1과 Table 2는 각각 재료의 화학성분과 기계적 성질을 나타냈다. 또한 시험편의 미세조직을 알아보기 위하여 시편을 마운팅한 후 사포 #500~#1200까지 연마한 후 0.3㎛의 Al_2O_3 분말을 이용하여 폴리싱 작업을 마쳤다. 또한 부식액 (HNO_3 5% + Ethanol 95%)을 사용하여 엣칭을 하였으며, 광학 현미경으로 미세조직을 관찰 하였다. Fig. 1은 미세조직을 x600배율로 관찰한 사진이며, 등방성 재료임을 알 수 있었다.

Table 1 Chemical compositions of specimen (wt%)

Material	C	O	Al	Fe	Cu	Zn
HGI	11.72	11.51	0.25	68.15	6.25	2.14

Table 2 Mechanical properties

Material	Yield Strength (kgf/mm2)	Tensile Strength (kgf/mm2)	Hardness (Hv)	Elongation (%)
HGI	27.08	36	159	23.95

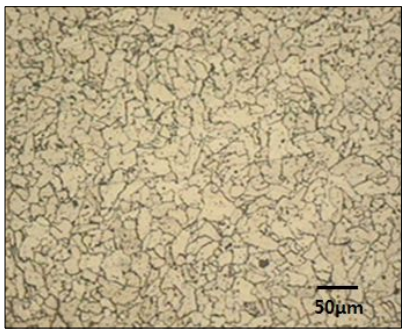


Fig. 1 The microstructure of HGI

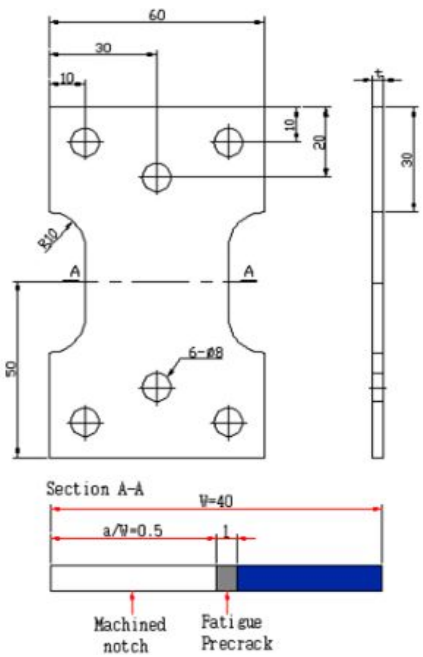


Fig. 2 The modified compact tension shear specimen

시험편은 혼합모드를 실현하기 위하여 수정단순 인장전단 시험편(Modified Compact Tension Shear : CTS)과 2축 하중장치를 사용하였다.[1][2] Fig. 2은 제작한 수정 CTS 시험편의 형상치수이다. 수정 CTS 시험편의 혼합모드 하중하에서의 응력확대계수 K_I과 K_{II}는 Richard가 제안한 식 (1),(2)(3)을 이용하여 계산하였다.[3] 혼합모드 피로균열에 대한 피로균열 진전속도는 유효응력확대계수(K_{I+II})를 도입하며, 식 (4)와 같이 Tanaka가 제안한 식을 이용하여 산출하였다.[4]

$$K_I = \frac{P\sqrt{\pi a}}{Wt}\cos\theta\frac{1}{1-\frac{a}{W}}\sqrt{\frac{0.26+2.65\frac{a}{W-a}}{1+0.55\frac{a}{W-a}-0.08(\frac{a}{W-a})^2}} \quad (1)$$

$$K_{II}=\frac{P\sqrt{\pi a}}{Wt}\sin\theta\frac{1}{1-\frac{a}{W}}\sqrt{\frac{-0.23+1.40\frac{a}{W-a}}{1-0.67\frac{a}{W-a}+2.08(\frac{a}{W-a})^{2}}} \quad (2)$$

$$\triangle K=K_{\max}-K_{\min} \quad (3)$$

$$\triangle K_{I+II}=(\triangle K_{I}^{4}+8\triangle K_{II}^{4})^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

2.2 Choi 지그 및 피로시험기

혼합모드 시험은 각각 축의 독립적인 제어가 필요했다. 하지만 기존에 사용되고 있는 Richard 지그는 1축 하중모드를 사용하기 때문에 이러한 조건을 만족 시키지 못한다. 그래서 Fig. 3와 같이 2축 하중모드를 사용할 수 있는 Choi 지그를 사용하였다. Choi 지그는 Fig. 4와 같이 하중 인가 시 슬라이딩 메커니즘에 인하여 2축 하중으로 작용 시 지그의 FIX 부분에 하중이 전달되지 않고 전부 시험편의 노치부분에 집중되어 가하게 된다. 또한 하중장치는 이에 맞는 2축 서보모터 방식의 피로시험기를 사용하였다. 이는 2개의 서보모터를 사용하여 2축을 제어하므로 각 하중을 독립적으로 제어하여 여러 가지 조합의 혼합모드를 구현할 수 있다. 이런 제어조건의 정확도를 위하여 각 축에 로드셀을 장착하여 서보모터와 로드셀의 데이터를 피드백하면서 컴퓨터로 제어한다.[5]

2.3 피로균열진전시험 조건

재료의 2축 혼합모드에서 하중주파수의 변화에 따른 영향을 관찰하기 위하여 실험조건을 Table 3과 같이 Mode I과 Mode II의 하중진폭은 같은 조건으로 계속 가하고, Mode II와 Mode I의 하중주파수 비율을 20/1, 10/1, 5/1 로 Mode II의 하중주파수가 변할 때 피로균열진전에 미치는 영향을 관찰 하였다. Fig. 5는 실험조건을 이미지로 나타낸 것이며 Mode II의 하중주파수가 1 cycle 작용할 때 Mode I의 하중주파수는 각각 20 cycle, 10 cycle, 5 cycle로 시편의 노치부에 하중을 가한다.

Fig. 3 Schematic diagram of Mixed mode fatigue test system

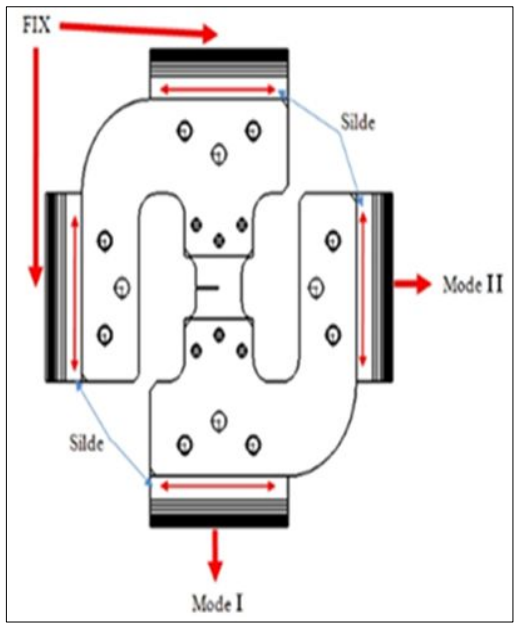
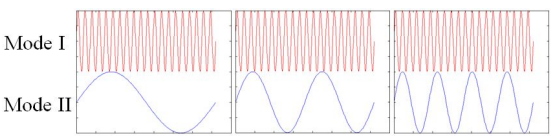


Fig. 4 Configuration of Mixed mode loading system by Choi JIG

Table 3 Conditions of fatigue test

Mode	Condition A (20/1)	Condition B (10/1)	Condition C (5/1)
R	0.3		
Mode I, II Load Range (kgf)	Max 300 Min 100		
Mode I Frequency (Hz)	20		
Mode II Frequency (Hz)	1	2	4



(A) 20/1 (B) 10/1 (C) 5/1

Fig. 5 The conditions of fatigue test by image

3. 결과 및 고찰

3.1 피로균열진전 특성

Fig. 6과 같이 피로시험을 마친 시험편의 옆면을 광학현미경으로 배율 x100배율로 촬영한 피로균열진전 사진이다. 3가지 조건에서 피로균열진전방향은 거의 Mode I과 수직되는 방향으로 진전되었으며 Mode II의 영향을 적게 받은 것을 관찰 할 수 있다.

Fig. 7은 피로균열진전길이(a)와 하중횟수(N)와의 관계를 정리한 그래프이다. 3가지 조건에서 Mode I의 하중반복수가 2.1×10^4 회일 때 균열진전길이는 조건A에서는 7.60 ㎜, 조건B에서는 8.23 ㎜, 조건C에서는 9.25 ㎜로 나타났다. Mode II의 하중주파수의 증가에 따라 피로균열길이는 같은 Mode I의 하중반복수에서 증가하는 현상을 관찰 할 수 있으며, 같은 균열진전길이까지 진전하려면 더욱 많은 반복수가 필요한 것을 예측할 수 있다.

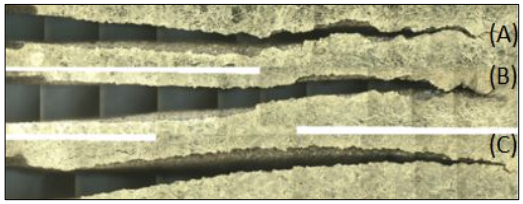


Fig. 6 The result of Mixed mode fatigue test

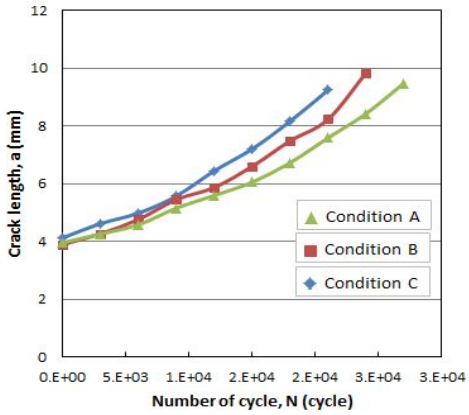


Fig. 7 Relation between fatigue crack length(a) and number of cycle(N)

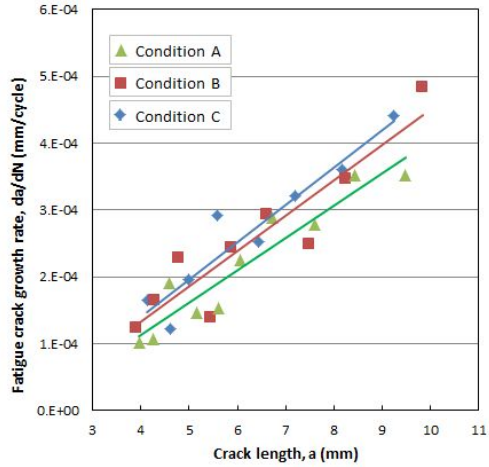


Fig. 8 Relation between fatigue crack growth rate(da/dN) and fatigue crack length(a)

Fig. 8은 피로균열진전속도(da/dN)와 피로균열진전길이(a)와의 관계를 정리한 그래프이다. 3가지 조건에서 균열진전속도는 큰 차이는 보이지 않고 있지만 미세하게 Mode II의 하중 주파수가 증가에 따라 피로균열진전속도는 증가하는 것을 관찰 할 수 있다.

Fig. 9는 피로균열진전속도(da/dN)와 응력확대계수(△K)와의 관계를 정리한 그래프이며, 각 조건에 대하여 Paris law 식 $da/dN = C(\triangle K)^m$을 만족함을 알 수 있으며, Paris law가 성립되는 안정 성장 영역에서의 재료상수 C와 m을 구하여 Table 4에 나타냈다. 재료상수 C값은 Mode II의 하중 주파수의 증가에 따라 각각 0.99×10^{-7}, 1.04×10^{-7}, 1.09×10^{-7}로 나타났으며, 이는 같은 재료에서 y축의 절편이 서로 다르다는 것을 알 수 있다. m값은 Mode II의 하중 주파수의 증가에 따라 각각 1.723, 1.761, 1.792로 나타났으며, Paris 식에 의하면 균열 제 II_b 구간에서의 기울기를 나타내며 m값의 증가는 최종적으로 균열진전속도의 증가와 관계된다는 것을 알 수 있다. 이는 같은 재료임에도 불구하고 재료상수가 변화하는 값을 나타내는 것은 혼합모드에서 피로균열진전은 Mode II의 하중주파수 변화의 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있다.

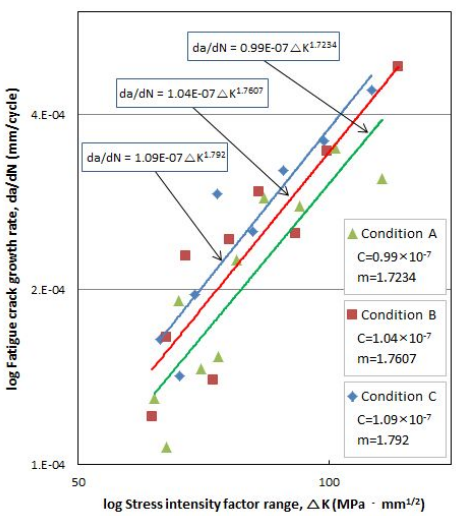


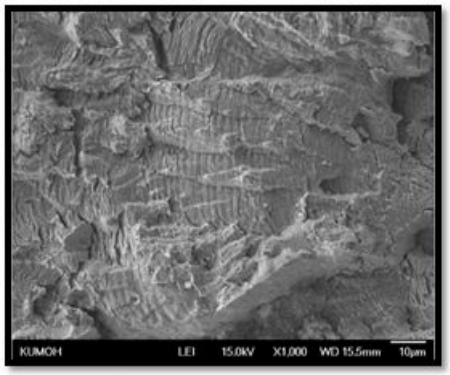
Fig. 9 Relation between fatigue crack growth rate(da/dN) and stress intensity factor range(△KI)

Table 4 C and m values obtained from da/dN and △K relations

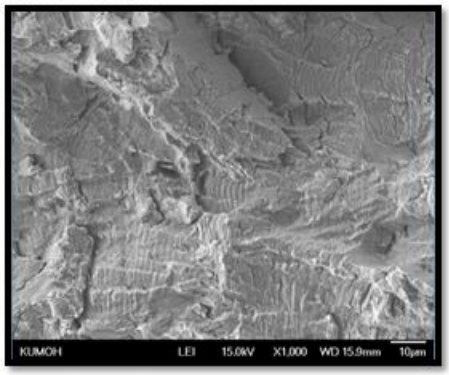
Items	C	m
condition A	0.99×10^{-7}	1.723
condition B	1.04×10^{-7}	1.761
condition C	1.09×10^{-7}	1.792

3.2 피로파면 해석

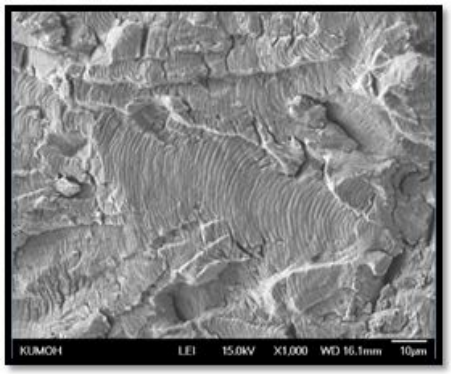
Fig. 10은 3가지 조건에서 피로시험을 진행한 시험편의 파괴단면을 SEM으로 촬영한 사진이며 선명한 스트라이에이션을 관찰 할 수 있으며, 관찰 부분은 균열선단에서 4㎜ 지점인 부분에서 스트라이에이션의 간격을 관찰 하였다. 스트라이에이션은 피로파괴의 특징이며 하중이 1 싸이클 당 균열진전길이와 대응한다.[5] 실험에서 사용한 실험조건은 복합 하중주파수이기에 피로파면을 관찰 시 2가지 스트라이에이션을 관찰 할 수 있으며, 폭이 넓은 스트라이에이션과 폭이 작은 스트라이에이션이다. 스트라이에이션의 간격은 SEM에서의 측정공구로 측정하였다. 폭이 넓은 스트라이에이션의 평균 간격은 조건A에서 0.67 ㎛, 조건B에서 1.29 ㎛, 조건C에서는 2.72 ㎛ 이며, 그 비율은 대략 1: 1.93 : 4.05 이며, Mode II의 하중주파수 비율과 거의 같은 비율을 나타내므로 폭이 넓은 스트라이에이션은 Mode II의 반복수에 의해 형성된 것으로 예측된다. 폭이 작은 스트라이에이션은 평균 간격이 3가지 조건에서 모두 0.07 ㎛ 나타내므로 이는 Mode I의 하중주파수 비율과 일치하며, 작은 스트라이에이션은 Mode I의 반복수에 의하여 형성된다고 예측된다. 또한 2가지 스트라이에이션에서 폭이 작은 스트라이에이션은 Mode II의 실험조건에 대입하여 비교하면 폭이 넓은 스트라이에이션과 거의 같은 간격을 나타내는 것을 관찰 할 수 있으며, 이런 복합 스트라이에이션은 복합 하중주파수에 의해 형성된다는 것을 진일보 예측 할 수 있다. 그러므로 같은 조건의 Mode I의 지배하에서 진전하던 균열이 Mode II의 하중조건에 의하여 생성된 스트라이에이션의 증가에 의해 균열진전속도가 증가하는 경향을 관찰하였다고 예측하였다.



(a) Condition A



(b) Condition B



(c) Condition C

Fig. 10 SEM fractography shows fracture surface for Mode I stress intensity factor range (65 MPa·mm$^{1/2}$)

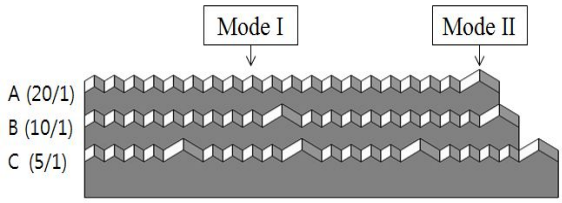


Fig. 11 Schematic diagram of fatigue crack growth mechanism by load frequency

혼합모드 피로시험에서 하중주파수가 서로 다를 때 Mode II의 하중주파수가 증가함에 따라 피로균열진전속도가 증가하는 것을 관찰 할 수 있는데 피로균열진전속도는 결국 스트라이에이션의 간격과 관계가 있다. Fig. 11은 피로균열진전 시 복합적인 스트라이에이션을 가상한 것이며, Mode I의 반복수를 기준으로 20 cycle의 균열진전길이를 표시하였다. 또한 일반적으로 Mode I 실험에서 $\triangle K$의 값이 크면 균열진전속도 da/dN도 커지게 되며, 즉 스트라이에이션의 간격이 커지게 된다. 본 연구에서의 혼합모드 피로시험에서 동일한 균열길이에서 Mode I의 하중만 작용하고 Mode II의 하중이 0일 때 $\triangle K$는 스트라이에이션을 형성하는 최소값을 갖게 되므로 폭이 작은 스트라이에이션은 Mode I의 하중에 의하여 형성된 것, Mode I과 Mode II의 하중이 동시에 최대값으로 작용할 때 $\triangle K$는 최대값을 갖게 되므로 폭이 넓은 스트라이에이션은 Mode II의 하중에 의하여 형성되었다고 가정하였다. 이런 가정하에서 조건 A, B, C에서 Mode II의 하중주파수가 증가함에 따라 폭이 넓은 스트라이에이션의 개수가 증가하게 되는데, 20 cycle에서 형성된 스트라이에이션의 전체 길이도 증가하게 된다. 그러므로 혼합모드 피로시험에서 Mode II의 하중주파수가 증가하면 피로균열진전속도도 증가한다고 판단하였다.

4. 결론

본 연구에서는 혼합모드 피로균열진전에서 Mode I과 Mode II의 하중주파수가 변화에 따른 특성을

관찰하기 위하여 자동차의 강판으로 많이 사용되는 열간압연강판을 대상으로 피로파괴특성에 대해 검토하고 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 피로균열진전 방향은 Mode I에 수직되는 방향으로 진전되었으며, Mode II의 영향을 거의 받지 않는다. 또한 균열은 일정한 지그재그의 형태를 보여주고 있으며, Mode II의 하중 주파수가 증가할수록 지그재그의 형상이 줄어든다.

2. Mode II의 하중주파수가 증가하면 같은 길이의 균열이 진전하는데 필요한 반복횟수가 감소하며, 재료의 피로수명이 낮게 평가됨을 검증 할 수 있다.
3. 피로균열진전속도는 Mode II의 하중주파수의 증가에 따라 미세하게 증가하는 것을 관찰할 수 있으며, 스트라이에이션을 비교해 보면 Mode II에 의해 형성된 넓은 폭의 스트라이에이션이 증가하기 때문에 최종 피로균열진전속도가 증가 된다고 예측한다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술지원비에 의해 수행 되었습니다. 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

REFERENCES

1. Gong. B. C, M. S. Choi, H. K. Kwon and Choi. S. D., "Effect of Stress Ratio on Fatigue Crack Growth in Mixed Mode(I+II)", Journal of the KSMPE, Vol. 8, No. 4, pp. 90-96, 2009.
2. Gong. B. C and Choi. S. D., "Crack Growth Behavior by Fatigure Load under Mixed Mode(I+II)", Journal of the KSMPE, Vol. 21, No. 2, pp. 276-282, 2012.
3. Richard, H. A. and Benitz, K., "A Loading Device for the Criterion of Mixed Mode in Fracture Mechanis", International Journal of Fracture, Vol. 22, pp. R55-R58, 1983.
4. Tanaka, K., "Fatigue Crack Propagation from a Crack Inclinrd to the Cyclic Tensil Axis", Engineering Fracture Mechanics, Vol.6, pp.493-307, 1974.
5. Choi, M. S., 2008, Study on Behavior of Fatigue Crack and Materialization Mixed Mode under 2 Axles Fatigue Load, A Thesis for a Doctorate, Kumoh National Institute of Technology, Republic of Korea.