

대칭위치에 존재하는 미소원공결함의 깊이변화가 SM20C의 피로균열거동에 미치는 영향

송삼흥(고려대 기계공학과), 김성태*(고려대 대학원 기계공학과)

The Effect of Fatigue Crack Behavior on the Variable Depth of Micro Hole Defects in SM20C at the Symmetric Position

S. H. Song(Mech. Eng., Korea Univ.) and S. T. Kim(Mech. Eng., Graduate School, Korea Univ.)

ABSTRACT

The main objective of this study is to consider the effect of fatigue crack behavior on the variable depth of micro hole defects in SM20C at the symmetric position. The fatigue crack propagation test is performed by rotary bending fatigue test machine. The relationship between crack length(2a), cycles(N) and crack growth rate(da/dN) are investigated in this study. The result from the rotary bending fatigue test under the applied stress at 250MPa turned out that the fatigue life illustrated almost constant when the depth of symmetric micro hole defects is both part A and B at the hole depth(h) = 0.5mm.

Key Words : Notch Effect (노치효과), Fatigue Life (피로수명), Main Crack (주균열), Second Crack (부균열), Crack Growth Rate (균열성장률, da/dN), Micro Hole Defect (미소원공결함), Fatigue Crack Driving Force (피로균열진전력)

1. 서론

터빈축, 유니버설 조인트 등과 같은 축재료는 결합이나 개재물 등에 의해 피로수명이 크게 좌우된다. 이러한 결합은 응력집중을 유발하여 균열을 발생시키고 최종적으로 파괴의 결과를 가져온다. 결합의 조직상태, 응력집중정도, 하중의 상태 등에 따라 균열의 발생지점은 달라지게 된다.⁽¹⁾ 특히 결합의 깊이에 따라 축재료 표면에 발생하는 균열양상은 크게 달라지며 이는 균열발생거동에 지대한 영향을 미친다. 따라서 단면에 존재하는 결합에 따른 균열의 거동에 관한 연구는 축재료의 안전 설계 측면에 있어서 매우 중요하다.

송 등⁽²⁾은 표면에 존재하는 개재물을 포함한 미소결함과 피로균열의 발생과 전파거동을 토대로 미소결함 주위에서 발생하는 응력분포와 피로균열의 상호간섭을 연구하였다. 또한, 초기결함의 대소와 피로균열 발생거동 및 그것들의 상호간섭 등을 유한요소법을 이용하여 상세히 고찰하였다. Chen⁽³⁾은 비틀

림을 받는 얇은 관의 다균열 문제를 컴플라이언스법을 이용해 계산하였으며 이를 수치해석하였다. Fonte 등⁽⁴⁾은 환봉재에서 굽힘하중과 인장하중을 동시에 받는 반타원 표면균열의 응력확대계수를 구하기 위해 유한요소법을 이용하여 결과를 보고한 바 있다. Zhixue⁽⁵⁾는 효과적인 손상발견방법을 평가하기 위해 피로손상의 과정과 관계되는 손상인자들을 연구하였다. Yip 등⁽⁶⁾은 중실시편에 관통하는 원공으로 인한 초기의 다축 피로균열을 Neuber's rule과 유한요소법을 이용하여 접근하였다. 송 등⁽⁷⁾은 원형단면내 대칭위치에 존재하는 미소결함 주위의 피로균열거동을 고찰하기 위해 Ni-Cr-Mo합금강을 이용하여 미소원공 주위에 발생, 전파하는 피로균열거동을 실험을 통하여 상세히 고찰하였다.

그러나, 구조물에 대칭으로 존재하는 결합의 깊이변화에 따른 피로균열의 거동에 대한 보고는 미진하다. 따라서 회전체 구조물의 원형단면에 대칭적으로 존재하는 결합의 깊이에 따른 피로균열의 거동에 관한 실험적 연구가 결실하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 대칭위치에 존재하는 미소 원공결함의 깊이변화가 SM20C의 피로균열거동에 미치는 영향을 고려하기 위해서 다음과 같은 연구절차로 고찰해 보았다. 첫째, 원형단면내 대칭 피로균열의 균열길이(2a)와 사이클수(N)의 관계, 둘째, 원형 단면내 대칭 피로균열의 균열성장률(da/dN)과 균열길이(2a)의 관계, 셋째, 상호대칭하는 미소원공결함이 피로균열거동에 미치는 영향 등을 정량적인 실험을 통하여 고찰하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시험편 제작

본 실험에 사용된 SM20C는 축재, 기어, 너트 등에 널리 사용된다. SM20C의 화학적 성질과 기계적 성질을 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 시험편은 치수 가공을 하기 전에 재료의 응력 제거와 조직의 균일화를 위해 전기로에서 860℃로 1시간 동안 어닐링 처리한 후 Fig. 1과 같이 가공하고 연마지를 #100부터 #2000까지 이용하여 표면연마를 실시하였다. 연마가공 후 소형탁상 드릴링머신을 이용하여 미소원공결함을 가공하였다. 미소원공결함의 형상은 Fig. 1과 같다. Part A, B 모두 원공지름 $d = 0.5\text{mm}$ 로 가공하였다. 또한, 깊이(h)는 Part A의 경우, 모두 $h = 0.5\text{mm}$, Part B의 경우, $h = 0.3\text{mm}$, 0.5mm , 0.7mm 로 변화시켜 가공하였다. 여기서 Part B의 원공깊이가 $h = 0.3\text{mm}$ 인 경우를 A-0.3B, $h = 0.5\text{mm}$ 인 경우를 A-0.5B, $h = 0.7\text{mm}$ 인 경우를 A-0.7B로 명명하였다. 이를 Table 3에 정리하였다.

2.2 회전굽힘피로시험

실험에 사용된 시험기는 회전굽힘 피로시험기(Ono type)를 사용하였고 최대굽힘모멘트는 $98\text{N}\cdot\text{m}$ 이다. 시험기의 회전수는 3600rpm 이며 응력비(R)는 $R = -1$ 이다. 적용응력의 조건은 균열선단에 형성된 소성영역의 크기가 균열길이에 비하여 충분히 작아서 탄성적 해석에 미치는 영향을 무시할 수 있는 소규모 항복조건이어야 한다. 따라서 이러한 소규모 항복조건을 만족하기 위해서는 피로실험 응력이 항복응력보다 작아야 하며 보통 항복응력의 0.8배 이하로 제한된다. 따라서 본 실험에서는 Table 2에서 나타난 바와 같이 항복강도 290MPa 의 80%에 해당하는 250MPa 의 응력을 적용하여 실험하였다. 또한, 피로균열이 발생, 전파할 때 균열길이(2a)를 측정하였고 이 때 균열길이의 측정은 이동현미경과 접안이동측미계를 사용하였다.

본 연구에서는 정량적인 결과를 도출하기 위해 동일조건에서 시험편을 10개씩 사용하였고, 그 평균값을 결과에 적용하였다.

Table 1 Chemical composition of SM20C

| Composition | C | Si | Mn | P | S |
|-------------|------|------|------|-------|-------|
| Wt% | 0.20 | 0.24 | 0.59 | 0.029 | 0.034 |

Table 2 Mechanical properties of SM20C

| Yield Strength (MPa) | Tensile Strength (MPa) | Elongation at Break (%) | Hardness (Hv) |
|----------------------|------------------------|-------------------------|---------------|
| 290 | 432 | 27 | 160.8 |

Table 3 Type of the specimen

| Specimen Name | Hole Diameter (mm) | Hole Depth (mm) | |
|---------------|--------------------|-----------------|--------|
| | | Part A | Part B |
| A-0.3B | 0.5 | 0.5 | 0.3 |
| A-0.5B | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| A-0.7B | 0.5 | 0.5 | 0.7 |

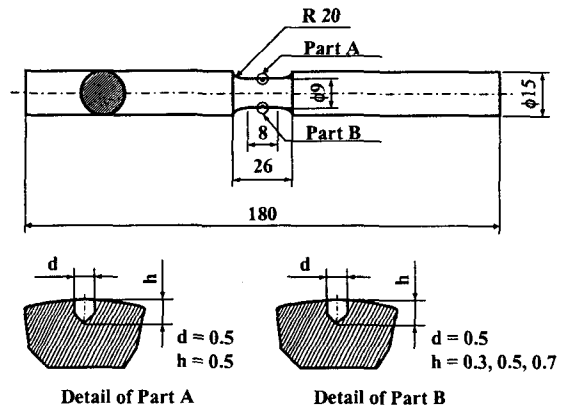


Fig. 1 Geometry of the specimen (unit : mm)

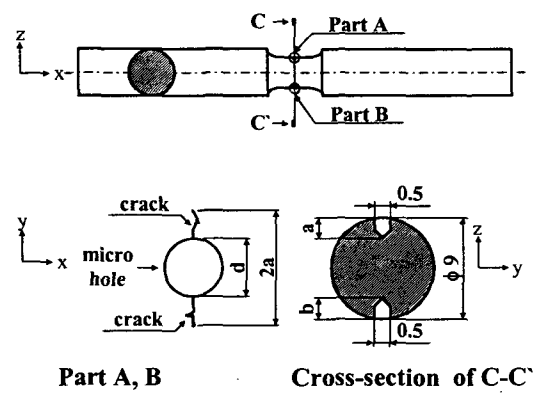
3. 실험결과 및 고찰

3.1 원형단면내 대칭 피로균열의 균열길이(2a)와 사이클수(N)의 관계

사이클수에 따라 상호 발생하는 피로균열은 원공의 위치에 따라 다른 양상을 나타낸다. Fig. 2 (a)는 본 연구에 사용된 시험편의 미소원공결함의 기하학적 형상을 나타낸 것이다. Fig. 2 (b), (c), (d)는 적용응력 250MPa 일 때 A-0.3B, A-0.5B, A-0.7B의 균열길이(2a)와 사이클수(N)의 관계를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 Fig. 2에서 제시한 두 개의 원공결함에서 사이클 증가에 따라 발생한 피로균열 중 빠르게 전

파하는 균열을 주균열이라 칭하고 느리게 전파하는 균열을 부균열이라 칭한다. 주균열과 부균열 모두 발생초기에는 비슷한 균열길이를 보이지만 사이클수가 증가할수록 주균열의 길이가 부균열의 길이에 비해 증가량이 커짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 균열 발생초기에 주균열과 부균열의 구분이 모호하지만, 사이클수가 증가함에 따라 균열선단의 조직상태나 응력집중도의 차이에 의해 한쪽의 균열이 다른 쪽의 균열보다 월등하게 증가하면서 주균열이 되기 때문이다. Fig. 2 (b)는 A-0.3B인 경우의 균열길이와 사이클수의 관계를 나타낸 곡선이다. Fig. 2 (b)에서 볼 수 있듯이 1.8×10^5 cycle까지는 Part A와 Part B 모두 유사한 경향을 보였다. 균열길이 2mm일 때 Part B가 Part A보다 피로수명에 있어서 약 20%정도 증가함을 알 수 있고 균열길이는 4.9×10^5 cycle에서 Part A가 Part B보다 약 3배정도 더 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 2 (c)는 A-0.5B인 경우의 균열길이와 사이클수의 관계를 나타낸 곡선이다. Fig. 2 (c)에서 Part A와 Part

B는 2.3×10^5 cycle까지 유사한 경향을 보였다. 균열 길이가 2mm일 때 Part A가 Part B보다 피로수명이 약 10%정도 증가했음을 알 수 있으며 4.1×10^5 cycle일 때 Part B가 Part A보다 균열길이가 약 2.5배정도 더 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 2 (d)는 A-0.7B인 경우의 균열길이와 사이클수의 관계를 나타낸 곡선이다. Fig. 2 (d)에서 Part B의 깊이가 0.7mm인 경우 균열의 초기부터 균열성장이 훨씬 빠르게 나타남을 알 수 있다. 균열길이 2mm일 때 Part A가 Part B보다 피로수명이 약 35%정도 증가됨을 볼 수 있으며 3.5×10^5 cycle일 때 Part B가 Part A보다 균열길이가 약 4배정도 더 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 2 (c)를 Fig. 2 (b), Fig. 2 (d)와 비교해 볼 때 대칭으로 존재하는 결합의 깊이가 같은 경우 피로수명과 균열길이의 차이가 가장 작게 나타남을 알 수 있다. 균열길이 2mm일 때 피로수명을 비교한 이유는 부균열이 2mm와 3mm 사이일때 시험편의 완전파단이 발생되므로 비교가 용이한 균열길이 2mm에서 피로수명을 비교하였다.



(a) Detail of the micro hole defect

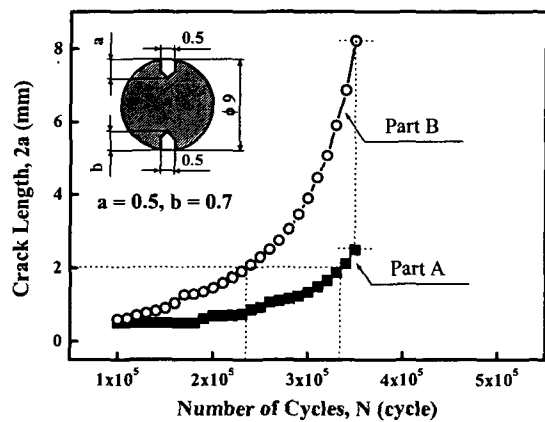
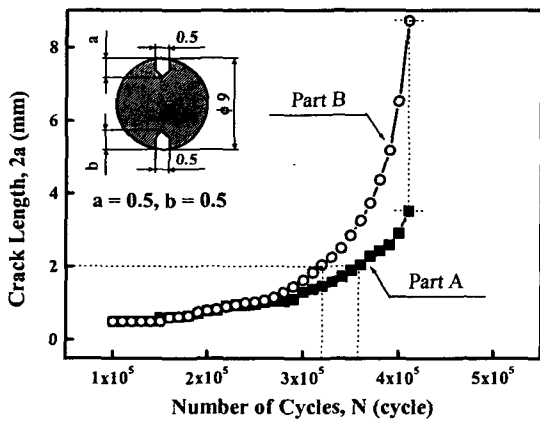
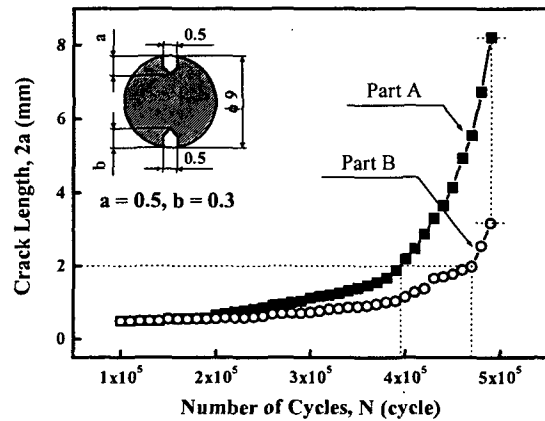
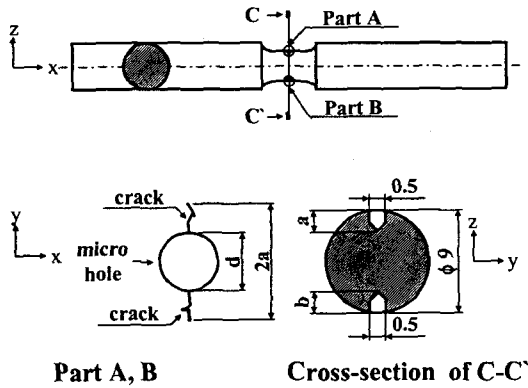


Fig. 2 Relationship between crack length(2a) and cycles(N) in SM20C under the applied stress at $\sigma = 250\text{MPa}$

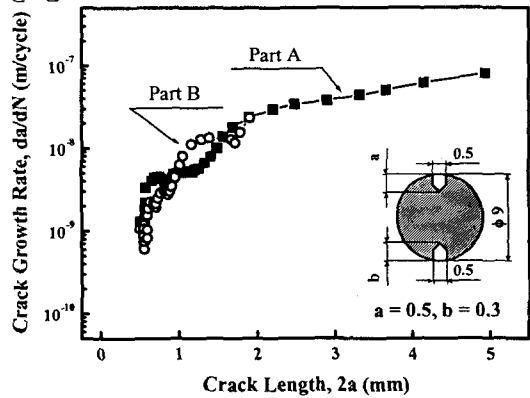
3.2 원형단면내 대형 피로균열의 균열성장률 (da/dN)과 균열길이(2a)의 관계

Fig. 3 (a)는 본 연구에 사용된 시험편의 미소원공 결함의 기하학적 형상을 나타낸 것이다. Fig. 3 (b), (c), (d)는 적용응력이 250MPa로 가해질 때 A-0.3B, A-0.5B, A-0.7B인 경우에 대한 균열성장률(da/dN)과 균열길이(2a)의 관계를 나타내는 곡선이다. Fig. 3 (b)는 A-0.3B인 경우의 균열성장률과 균열길이의 관계를 나타낸 곡선이다. Fig. 3 (b)에서 균열길이 1.6mm 일 때 Part B의 균열성장률은 감소하는 반면 상대적으로 Part A의 균열성장률은 증가함을 관찰할 수 있다. 이는 Fig. 3 (b)에서 Part B의 지연구간에 의해 Part B에 작용해야 할 응력이 Part A로 응력전이가 이루어졌기 때문이라고 생각된다. Fig. 3 (c)는 A-0.5B인 경우의 균열성장률과 균열길이의 관계를 나타낸 것이다. 균열성장률은 Part A, B 모두 초기에 증가하다 다시 급격히 감소하며 이후 다시 급격한 성장을 보인 후 비교적 긴 구간 동안 기울기의 완만함을 관찰할 수 있다. 또한, 균열 발생 초기에 일정기간 동안의 균열성장률의 저하를 관찰할 수 있었는데, 이

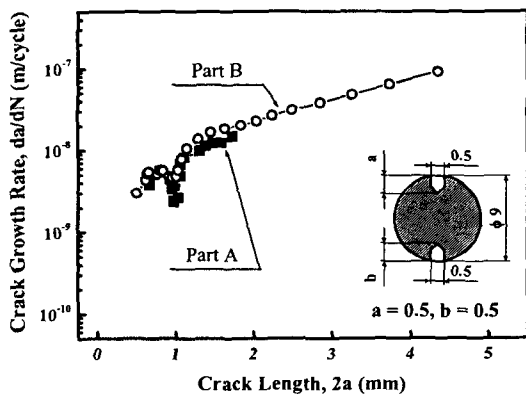
것은 시험편에 가공한 대칭으로 존재하는 미소원공 결함으로 인한 노치효과때문이라고 생각된다. 노치 효과에 관한 연구로 Ogura 등⁽⁸⁾은 노치선단에서의 균열성장률과 균열단합에 대한 연구에서 균열성장률이 균열 발생 초기에는 매우 높은 값을 보이며 그 후 어떤 한계의 균열길이까지 급속히 감소한 후 다시 증가함을 관찰하였고 이때의 한계 균열길이는 균열 발생 초기에 노치선단에서 발생하는 소성역의 크기와 일치한다고 보고하였다. 본 연구에서도 이와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 3 (d)는 A-0.7B인 경우의 균열성장률과 균열길이의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 3 (d)에서 Part A, B 모두 균열성장률이 A-0.3B, A-0.5B의 경우에 비해 비교적 완만한 기울기를 보이고 있음을 관찰할 수 있었다. Fig. 3 (b), (d)에서 Part A와 B의 균열성장률이 서로 증가·감소 또는 감소·증가의 형태로 교차하면서 증가하는 형태를 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 피로균열진전력 때문이라고 생각된다. 즉, 작용하중에 의해 발생하는 총 피로균열진전력이 주균열과 부균열에 일정한 비율로 나누어져 작용하게 되는데, 그 결과 각각의 균열 선



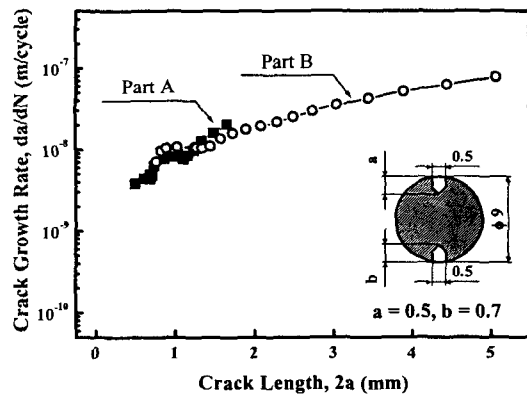
(a) Detail of the micro hole defect



(b) In case of A-0.3B



(c) In case of A-0.5B



(d) In case of A-0.7B

Fig. 3 Relationship between crack growth rate(da/dN) and crack length(2a) in SM20C under the stress at $\sigma = 250\text{MPa}$

단 주위의 응력집중정도, 조직상태 및 하중상태 등에 따라서 피로균열은 각각의 특성을 가지고 전파한다고 생각된다. 또한, 초기의 균열진전력의 배분상태는 부하가 가해질수록 계속적으로 변화하고 있기 때문이라고 생각된다.

3.3 Part B의 깊이변화가 Part A의 피로균열 거동에 미치는 영향

Fig. 4 (a)는 Part B의 깊이변화가 Part A의 피로균열 거동에 미치는 영향을 고찰하기 위해 균열길이(2a)와 사이클수(N)의 관계를 나타낸 곡선이다. Fig. 4 (a)는 A-0.3B가 A-0.7B보다 피로수명은 약 18%, 균열길이는 약 3.5배정도 증가했음을 보여주고 있다. Fig. 4 (b)는 균열성장률(da/dN)과 균열길이(2a)의 관계를 나타낸 곡선이다. Fig. 4 (b)는 A-0.3B의 경우 균열길이 0.8mm일 때 노치효과를 관찰할 수 있었고 A-0.7B의 경우 균열길이 1.1mm일 때 노치효과를 관찰할 수 있었다. 위의 내용을 종합해보면, Part B의 원공깊이가 작을수록 Part A로 전달되는 응력값이 작아지고 이로 인해 Part A의 피로수명은 길어진다.

4. 결론

본 연구에서는 대칭위치에 존재하는 미소원공결합의 깊이변화가 SM20C의 피로균열거동에 미치는 영향에 대한 정량적인 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 대칭으로 존재하는 결합의 깊이가 같은 경우 피로수명의 차이가 가장 작게 나타남을 알 수 있다.

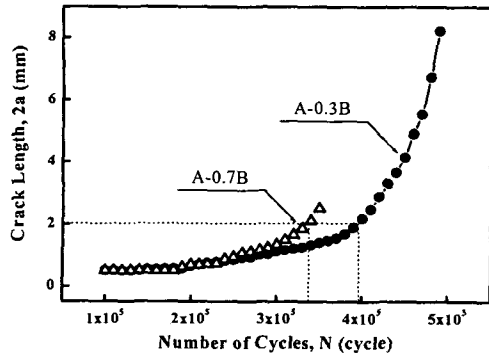
(2) 대칭 피로균열의 균열성장률은 일정하게 증가하는 경향을 나타내며 피로균열의 주균열과 부균열은 증가·감소 또는 감소·증가의 형태로 교차하면서 증가하는 형태를 나타내고 있다.

(3) Part B의 원공깊이가 작을수록 Part A로 전달되는 응력값은 작아지고 이로 인해 Part A의 피로수명은 길어진다.

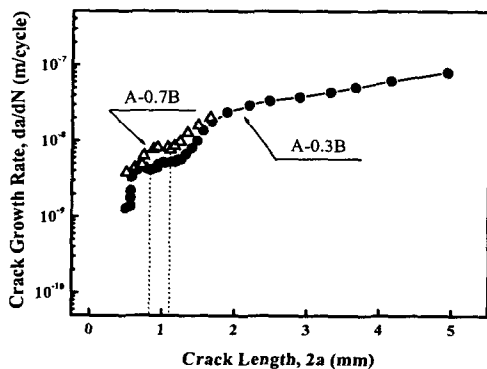
(4) 위의 내용을 종합해보면 주균열과 부균열의 응력집중도, 조직상태 및 하중조건은 균열진전력의 배분상태가 균열의 깊이에 따라 변화하기 때문에 단면 대칭위치의 결합에 상호영향을 주었다고 판단된다.

참고문헌

1. Trantina, G. G. and Barishpolsky, M., "Elastic-plastic analysis of small defect-void and inclusion," Eng. Frac. Mech., Vol. 20, No. 1, pp. 1-10, 1984.
2. 송삼홍, 김진봉, "유한요소법에 대한 결합주위의 응력분포와 피로크랙의 간섭효과," 한국정밀공학회지, 제12권, 제2호, pp. 154-161, 1995.
3. Y. Z. Chen, "Multiple crack problems for torsion thin-walled cylinder," Int. J. of Pressure Vessels and Piping, Vol. 76, No. 1, pp. 49-53, 1999.
4. Manuel da Fonte and Manuel de Freitas, "Stress intensity factors for semi-elliptical surface cracks in round bars under bending and torsion," Int. J. Fatigue, Vol. 21, No. 5, pp. 457-463, 1999.
5. Wu Zhixue, "Short fatigue crack parameters describing the lifetime of unnotched steel specimens," Int. J. Fatigue, Vol. 23, No. 4, 2001.
6. Ming-Chuen Yip and Yi-Ming Jen, "Biaxial fatigue crack initiation life prediction of solid cylindrical specimens with transverse circular holes," Int. J. Fatigue, Vol. 18, No. 2, pp. 111-117, 1996.
7. 송삼홍, 안일혁, "축 단면 내 대칭 위치의 미소원공 결합에서 발생한 피로균열 특징," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 211-216, 2001.
8. K. Ogura and Y. Miyoshi, "Fatigue crack growth and closure of small cracks at the notch root," Current Research on Fatigue Cracks, pp. 67-92, 1987.



(a) Crack length(2a) and number of cycles(N)



(b) Crack growth rate(da/dN) and crack length(2a)

Fig. 4 Comparison between 0.5mm hole depth in A-0.3B and 0.5mm hole depth in A-0.7B