

접촉피로에 있어서 균열의 발생과 진전특성

유 성 근

나고야대학 재료기능공학과

Characteristic of Crack Growth and Progress on the Rolling Contact Fatigue (In a case of Metal)

Sung-Keun Yoo

Department of Materials Science Engineering, Nagoya University

초 록 본 연구에서는 접촉피로에 있어서 균열의 발생, 진전 등의 관찰을 위해, 균열의 발생, 진전 등이 2차원적으로 되어 시험편측면에서 관찰이 가능한 평판ring형 시험편을 이용하여 반복수 증대에 따른 균열의 발생, 진전과정을 조사하였다.

그 결과 pitting, flaking형 파손의 초기손상은 접촉면하의 내부에 생기는 접촉면에 평행방향의 균열에 의해 일어나며, 이 균열은 그 방향 및 파면형태에 의해 접촉응력이 접촉면에 평행방향의 전단응력성분에 의한 모드 II 피로균열진전에 의해 형성된 것이라 생각된다. 단순한 모드 II 부하에 있어서 균열진전과 접촉피로에 있어서 균열진전과의 차는 중첩부하된 압축응력의 유무라고 생각되며, 이 가정에 근거로 하여 재료고유의 모드 II 피로균열진전특성을 구할 수 있는 장치를 개발하였다. 이 장치를 이용하여 알루미늄합금 및 공구강에 대한 $da/dN \sim \Delta K$ II 관계의 시험결과를 얻었다.

Abstract In the first part of the paper, the crack growth process in rolling contact fatigue has been investigated on ring type plate specimens, in which crack growth is two dimensional and cracks are observed on the side surface of the specimens.

The results have shown that cracks are initiated from the contact surface in tensile mode in the direction approximately normal to the contact surface and after some short length of growth, shear mode growth occurs from the tip of the crack and it grows until the separation of the surface layer, namely flaking type failure, occurs.

In the second part, mode II fatigue crack growth tests have been made by using an apparatus designed based on the concept that the subsurface fatigue crack growth in rolling contact fatigue is the mode II fatigue crack growth under the stress state where the tensile mode growth is suppressed by compression stress.

The test results have shown that the mode II fatigue crack growth occurs if the superposed compression stress is enough to suppress the tensile mode growth.

1. 서 론

레일, 베어링, 압연롤등과 같이 반복접촉압을 받는 재료의 표면에는 pitting, flaking등으로 불리는 박리형손상이 생기고, 이것을 접촉피로 (rolling contact fatigue)라 부른다. 접촉피로는 공학적으로 중요한 문제이며, 종래부터 많은 연구가 되고 있으나, 피로균열의 발생, 진전과정등 충분히 해명되고 있지 않다. 특히 최근에는 여러가지 파괴역학적 수법에 기초하여 해석^{1~7)}도 행하여지고 있으며, 또 접촉피로의 기구해명은 실용상 중요하다고 생각된다.

그래서 본 연구에서는 우선 접촉피로에 있어서 균열이 어떠한 과정에 의해서 발생, 진전하여 파손에 이르는가를 밝히기 위해 균열의 발생, 진전등이 2차원적으로 되어, 시험편 측면에서 관찰이 가능한 평판ring형 시험편을 준비하고

파괴형태, 파면상황등에 대해 조사하였다.

한편, pitting, flaking형 손상은 접촉면에 평행방향으로 진전하는 균열은 접촉응력의 전단응력성분에 의한 모드 II 진전이라고 생각된다.

일반적으로 균열을 도입한 시험편에 모드 II 반복부하를 걸어도 균열은 균열끝단에서 최대인장응력의 작용면에 가까운 방향 즉, 인장형(모드 I)으로 진전하고, 전단형(모드 II)진전은 일어나지 않는다⁸⁾. 그러나 접촉피로에 있어서 전단형 진전을 일으키는 것은 접촉응력하에서는 전단응력에 압축응력이 중첩부하되고 있기 때문이며 이 압축응력때문에 전단형진전이 일어나는것이라 생각된다. 이같은 관점에서 접촉피로에 있어서 pitting, flaking등 파손현상을 모델화한 시험방법으로 압축응력을 중첩부하한 반복전단응력 모드 II 시험장치를 제작하여 실험을 하였다.

Table 1. Chemical composition (wt%) and mechanical properties of the material.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1.01	0.34	0.30	0.01	0.005	1.53	0.02

Material	0.2% Proof Stress (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRC)
(JIS) SUJ2	1646-1686	2460-2470	0.5-1.5	62.5

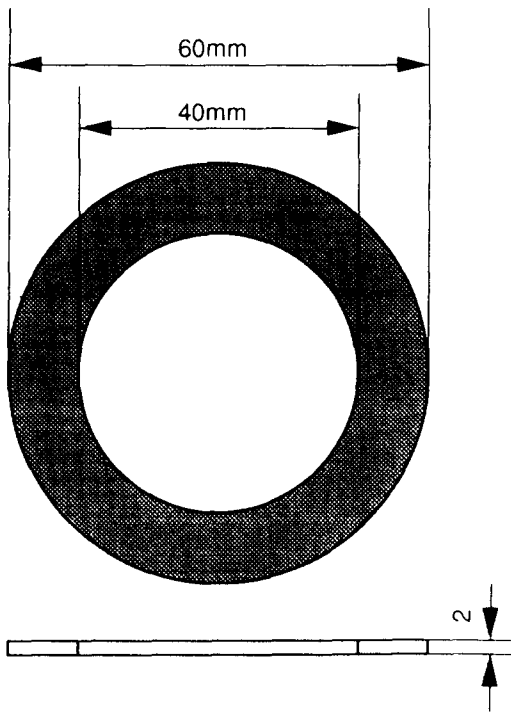


Fig. 1. Rolling contact fatigue specimen.

2. 접촉피로시험

실험방법

실험에 사용된 재료는 고탄소크롬강(JIS : SUJ2)이며, 열처리후 소입 및 소려를 실시한 것이다. 재료의 화학 성분 및 열처리후의 기계적성질을 Table 1에, 시험편의 형상 및 치수를 Fig. 1에 나타내었다. 시험편의 형상은 피로 균열의 발생, 진전등이 2차원적으로되고 시험편측면에서 균열의 발생, 진전 등의 관찰이 가능하도록 평판ring형시험편으로 하였다. 시험장치는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 spring부하식 접촉피로시험기이며, 회전계에 의해 구동롤과 종동롤의 회전속도를 계측한 결과 양쪽 롤의 회전속도는 1710rpm정도이고 미끄러짐은 거의 나타나지 않았다.

윤활유는 VG68터빈유를 사용하고 구동롤의 1/3정도를

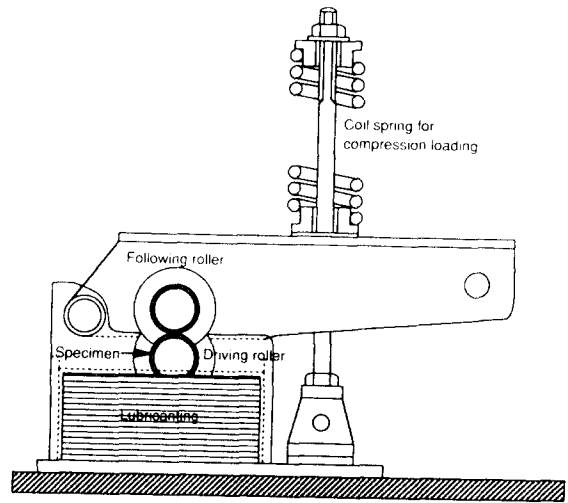


Fig. 2. Rolling contact fatigue testing machine.

윤활유중에 침적한 상태에서 실험을 하였다. 시험장치에는 본체진동레벨검지 및 모터진동레벨검지 등의 2개의 비상정지회로가 갖추어져 있고 시험편에 파손이 생긴 시점에서 시험기모터의 전원이 끊겨 시험기의 회전이 멈추어지도록 되어 있다. 상기의 시험편 및 장치를 이용하여 시험을 하고 S-N곡선을 얻었다. 또 파손된 시험편의 파면을 SEM으로 관찰하였고, 균열의 발생, 진전, 파손에 이르는 과정을 추적할 목적으로 미리 시험편의 측면을 연마하고 시험을 개시하였다.

실험결과

S-N 곡선

최대접촉면압과 파괴까지의 응력반복수와의 관계, 즉 S-N곡선을 Fig. 3에 나타낸다. 파손형태는 pitting, flaking 같이 표면층의 일부가 떨어져 나가는 형(박리형 파손)과 파괴가 단면을 관통하는 형(단면관통형)이 있고, 단면관통형에는 균열이 시험편의 폭 반경방향 일직선으로 진행되는 인장파괴형과 지그재그형태로 진행되는 전단파괴형 2종류가 있다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 단면관통형은 매우 낮은 응력 또는 짧은 수명을 나타내고 있고, 이 중에서도 인장파괴형은 낮은 하중부하를, 전단파괴형은 약간 높은 하중부하

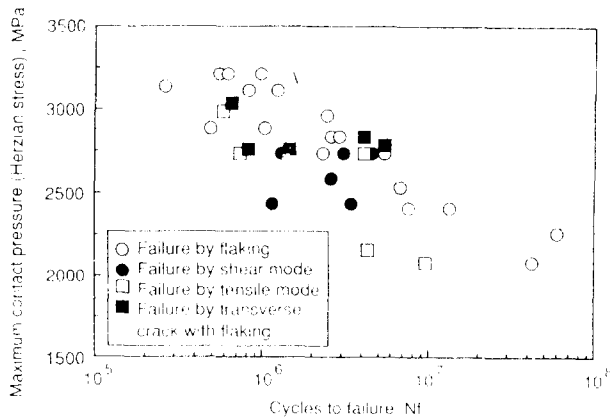


Fig. 3. Relation between maximum contact pressure and cycles to failure.

에서 파괴된 것을 나타내고 있다. 이 처럼 단면관통형은 시험편을 축에 압입하는 것에 의해 생긴 hoop stress가 갈때 생긴 현상이며, 압입에 의한 응력이 크지 않고 정상일때는 박리형 파손이 일어난다고 생각된다.

접촉피로의 파손형태

단면관통형의 예를 Fig. 4에 나타낸다. Fig. 4(a), (b)와 같이 균열이 단면을 거의 직선적으로 관통하는 파괴형태이다. Fig. 4(a)의 인장파괴형은 비교적 저응력에서 파괴가 일어나며, 박리형손상과 같은 표면층의 일부가 떨어져 나가는 것 없이 시험편압입에 의해서 생긴 원주방향의 인장응력에 대하여 거의 직각에 가까운 방향으로 균열이 진전하고 있다. 측면에서 본 파손상황은 균열이 단면을 거의 직선적으로 관통하고 있다. 이 같은 경우 시험편물과의 접촉면을 보면 회전방향과 직각의 방향으로 홈이 다수 발생하고 있고, 파괴는 이것을 거점으로 인장형균열로서 어느정도 진전한 뒤 파단된 것이라 생각된다.

Fig. 4(b)의 전단파괴형은 비교적 고응력측에서 파괴가 일어나는 것이며, 거시적으로는 인장파괴형과 거의 유사하게 단면을 관통하는 파괴이다. 측면에서 본 마크로 형태는 지그재그형태를 나타내고 있다. 이 지그재그형태는 Fig. 4(c)와 같이 전단형진전의 각스텝에 대응하고 있다. Fig. 4(d)는 표면층에 가까운 평탄한 인장형파괴를 일으킨 곳이

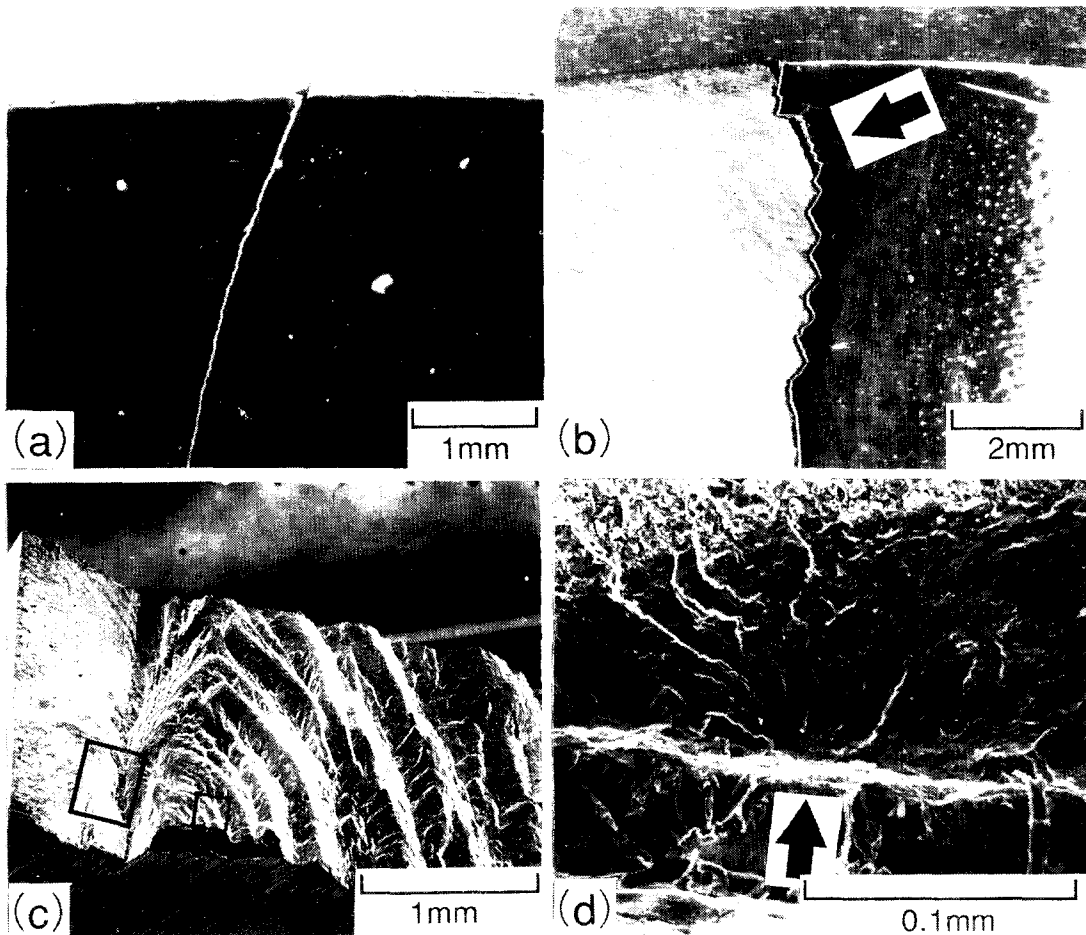


Fig. 4. Fracture surface and side view of the specimen fractured by tensile and shear mode transverse cracking. (a) Side view of tensile mode transverse cracking. (b) Side view of shear mode transverse cracking. (c) Macroscopic view of fracture surface observed from the direction shown by an arrow in figure (b). (d) Higher magnification view of the area shown by a frame in figure (c).

라 생각되는 부분의 확대도이며, 이것에 의하면 이 부분의 파괴는 내부에서 표면으로 향하고 있는 것을 알 수 있고, 이 경우 파괴의 기점은 시험편 내부(Fig. 4(d)의 화살표부분)라고 생각된다. 이 처럼 파괴가 단면을 관통하는 형태에서는 저응력측, 고응력측 어느경우도 최종적인 파괴를 지배하는 응력은 접촉면에 평행한 원주방향의 인장응력이라 생각된다. 공업적으로 이러한 형태의 파괴가 일어나는 것은 극히 적고 특이한 경우이며, 정상적인 상태에서의 수명은 박리형파손으로 결정된다고 생각된다. 급회속의 실험에서 많은수의 단면관통형파손이 생겼다. 이것은 평판ring형시험편이라고 하는 형상효과가 크게 작용했기 때문이다. Fig. 5는 박리형 파손으로 파괴된 시험편의 SEM사진을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 표면층의 일부가 떨어져 나간 상태를 나타내고 이 사진의 네모부분을 확대한 것이 Fig. 5(b)이다. 이것은 접촉면에 거의 평행한 전단응력에 의해서 진전된 것으로 생각되는 파면과 접촉면에 거의 직각인 파면으로

이루어진 것을 알 수 있다. 이러한 2종류의 파면은 특징이 전혀 다르고, 전자(Fig. 5(b)의A부분)는 비교적 매끄러운 모드 II 형(전단형) 전전파면에 가까운 형태를 나타내고 있고, 후자(Fig. 5(b)의B부분)는 정직파괴 또는 모드 I 파괴파면에 유사한 파면을 나타내고 있다.

균열의 발생과 진전

박리형파손으로 최종파괴에 이를 때 까지의 균열진전과정을 Fig. 6에 나타내었다. 실험도중에 시험편을 축에서 이탈시켜 관찰하고 다시 장착하여 실험을 수행하는 등의 반복하에 얻어진 결과, 즉 동일 시험편의 최종파손에 이를 때 까지의 균열을 반복수의 증대에 따라서 성장하는 상황을 나타낸 것이다.

Fig. 6(a)의 시점(28.6%N)에서 우선 좌측으로 접촉면에서 수직에 가까운 방향으로 인장형이라 생각되는 균열이 발생하고, Fig.6(b)의 시점(42.9%N)에서는 균열선단부근에서 경사 방향으로 전단형이라 생각되는 균열이 발생하고

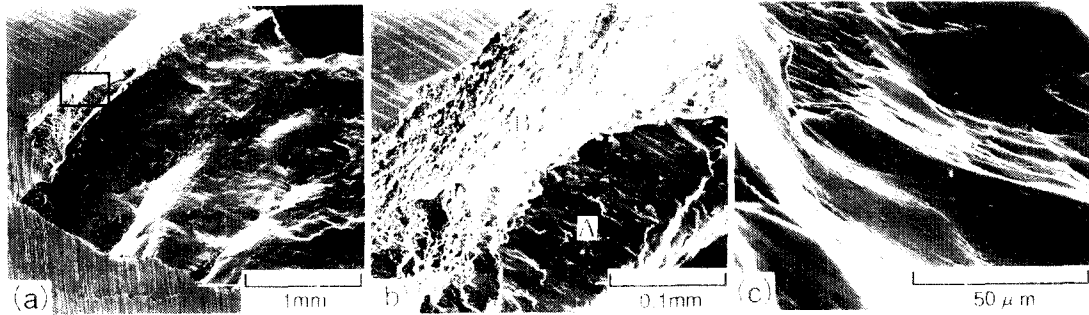


Fig. 5. Fracture surface and side view of the specimen fractured by flaking.

- (a) Macroscopic view of a failure by flaking.
- (b) Higher magnification view of the area shown by a frame in figure (a), arrow shows the fracture initiation region.
- (c) Higher magnification view of shear mode growth.

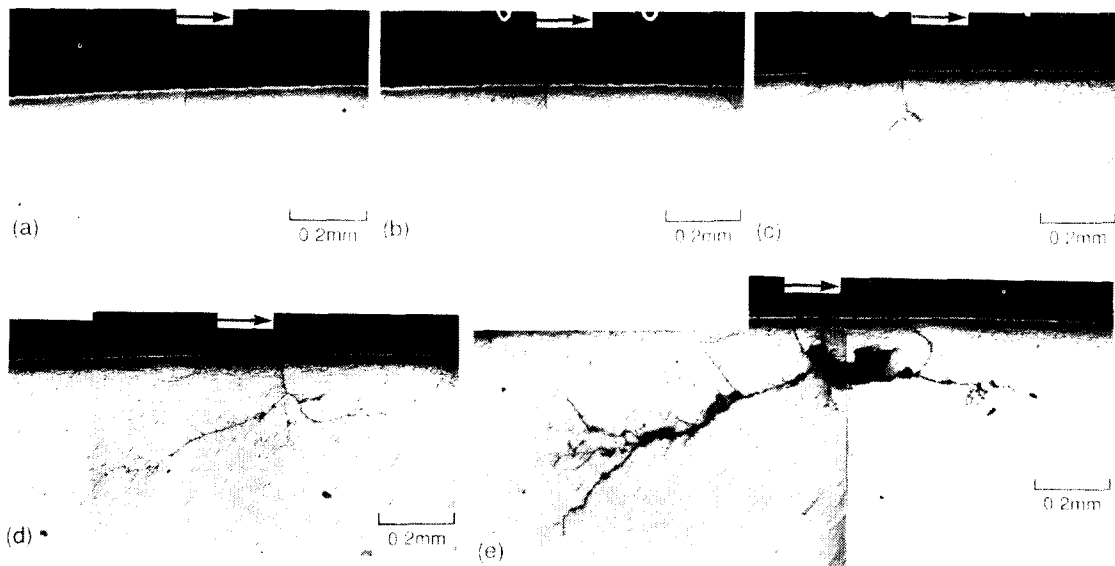


Fig. 6. Crack growth with an increase of stress cycles of the specimen designated by "A" ($P_c=3078\text{MPa}$, $N_c=1.19 \times 10^8$) in Fig. 3. (a) $N=3.42 \times 10^7$ (28.6% N.) (b) $N=5.13 \times 10^7$ (42.9% N.) (c) $N=6.84 \times 10^7$ (57.3% N.) (d) $N=8.55 \times 10^7$ (71.6% N.) (e) $N=1.11 \times 10^8$ (97.3% N.)

이므로 이 사이에 전단형 균열이 발생하였다고 생각된다. Fig. 6(c),(d)에서는 그러한 균열이 표면과 평행에 가까운 방향으로 전단균열로서 성장하고, 더욱 Fig. 6(e)에 나타난 53% N_f 에서 부터는 급속하게 균열이 확대되는 박리형 파손을 일으키고 있음을 알 수 있다. Fig. 6에서 밝혀진 것과 같이 박리형파손의 파괴기구는 우선 표면에서 인장형 균열이 발생, 내부로 진전하여 어느 한 지점에서 정지하고, 그 곳에서 접촉면에 평행한 전단형균열이 발생, 접촉면에 거의 평행으로 진전하여 최종적으로 표면이 떨어져 나가 최종파손이 일어나는 것임을 알 수 있다. 전단형피로균열진전의 시간비율이 최종파손까지의 대략 60-70% 정도이므로 전단형피로균열진전이 박리형파손상의 수명을 지배하고 있다고 생각된다.

3. 모드 II 피로균열진전시험

접촉피로에 있어서 박리형파손의 원인인 표면에 거의 평행한 균열은 압축응력의 반복전단응력에 의해 생긴것이라 생각하고 압축응력상태의 반복전단응력부하시험장치를 제작하여 전단형모드 II 균열을 재현하였다.

실험에 사용된 재료는 공구용탄소강(JIS : SK5), 고력알루미늄합금(7076-T6, 7N01-T4)이다. 알루미늄합금을 사용한 이유는 모드 II 피로균열진전이 용이하게 일어나고 과거의 실험데이터가 풍부하기 때문이다. 시험편 형상 및 치수, 압축응력부하 모식도, 시험장치의 구조를 Fig. 7에 나타내었다. 시험편은 Fig. 7(a)에 나타낸 것과 같이 중앙부에 노치를, 그 선단에는 미리 굽힘부하에 의해 모드 I 형의 피로균열을 도입하였다. 또 변형계지를 붙이고 실험시에 부하되는 압축응력의 크기를 결정하는 눈금으로 이용하였다. Fig. 7(b)의 압축응력부하모식도에서와 같이 균열면에 평행방향(y방향)의 정적압축응력(δy)만을 부하하는 방식으로 되어 있다. 이것은 모드 II 부하에 의해서 균열면에 수직방향의 인장응력은 생기지 않기때문에, 반복부하에 의한 인장형 피로균열진전을 저지할 목적으로는, 균열면에 수직방향의 압축응력부하는 필요하지 않다고 판단되었기 때문이다.

Fig. 7(c)는 모드 II 피로균열진전시험장치의 구조를 나타낸 것이다. 균열면간에 마찰력이 생기면 그것이 유효 ΔK_{II} 에 미치는 영향은 극히 크고, 그 값은 각종조건에서 크게 변동하고, 예측곤란하므로 그림중의 "P"와 같이 정적인장 부하를 주고 균열면에 마찰이 생기지 않을 정도로 벌려 놓은 상태에서 모드 II 부하를 주어 균열진전시험⁸⁻¹¹⁾을 하도록 하였다.

또 통상의 모드 I 피로균열진전이 K_I 변동범위 $\Delta K_I = K_{I(max)} - K_{I(min)}$, 또는 균열 개폐수가 있는 경우에는 $\Delta K_{I(eff)} = K_{I(max)} - K_{I(op)}$ ($K_{I(op)}$ 는 균열이 열릴때의 K_I)에 지배되는 것과 마찬가지로 모드 II 피로균열진전은 K_{II} 의 변동범위 $\Delta K_{II} = K_{II(max)} - K_{II(min)}$ 에 지배되며, 정적 K_I , K_{II} 는 모드 II 피로균열진전에는 거의 영향을 미치지 않는다고 생각된다.

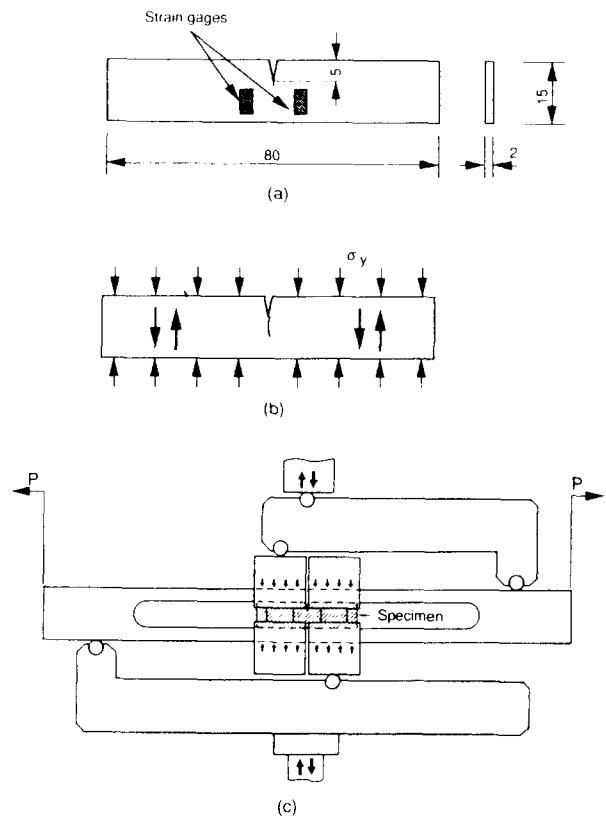


Fig. 7. Testing apparatus and specimen for mode II fatigue crack growth under compression stress parallel to the crack.

Fig. 8에 알루미늄합금(7075-T6)과 공구용탄소강의 모드 II 피로균열진전상황을 나타내었다. 알루미늄합금의 경우 균열진전개시초기를 제외하면 전단부하에 의한 피로균열은 예균열의 연장선에서 진전하고 있고 모드 II 균열진전을 일으키는 것을 알 수 있다. 또 공구용탄소강도 부가된 전단응력의 방향과 거의 평행으로 진전하고 있음을 나타내고 있다. 공구용탄소강같은 재료는 이제까지 모드 II 형의 피로균열진전은 극히 일어나기 어렵다고 말해져 왔으나 본 연구에서와 같이 압축응력을 부가하면 전단형의 모드 II 균열진전을 일으킨다는 것을 알았다.

Fig. 9에 알루미늄합금(7075-T6) 및 공구용탄소강의 모드 II 피로균열진전과면을 나타내었다.

이 중 (a)는 알루미늄합금, (b)는 공구용탄소강이며, 파면은 전단부하의 방향에 거의 평행한 균열끝단의 반복전단 변위의 결과로서 생긴것이라 생각되는 얇은 층을 중복시킨 것 같은 모드 II 진전과면의 특징적인 형태를 나타내고 있다.

이 같은 모드 II 진전과면의 특징에 관해서는 알루미늄합금 및 공구강이 공통인 것은 주목된다. Fig. 10에 모드 II 시험법으로 얻어진 $\Delta K_{II} - da/dN$ 관계(실험점으로 나타낸것)와 이번에 사용한 재료와 동일규격의 알루미늄합금에 관한 이전⁸⁻¹¹⁾의 결과(실선 및 점선으로 나타낸것)와의 비교하였다.

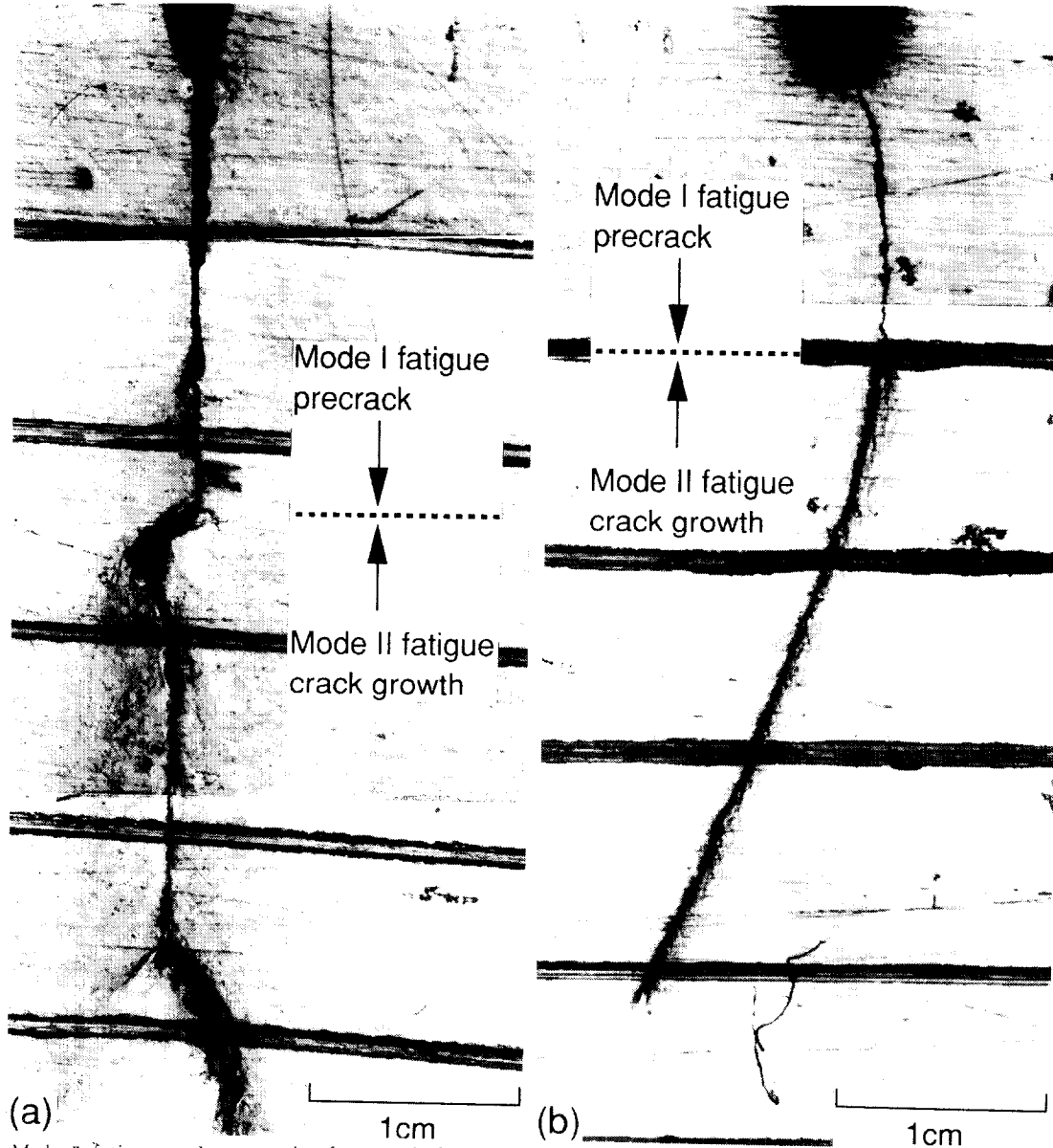


Fig. 8. Mode II fatigue cracks emanating from crack tip.
 (a) Aluminum alloy (7075-T6) (b) Tool steel (SK5, quench-tempered)

또 K_{II} 의 계산은 4점전단을 받는 편축균열시험편의 값¹²⁾을 이용하였다.

Fig. 10의 결과를 보면, 동일 규격재에 대하여서는 이전의 결과와 금희의 결과는 정량적으로 잘 일치하고 있고 균열면에 평행방향의 정적압축응력의 영향은 인정되어 지지 않고 금희의 방법으로 모드 II 진전특성시험이 가능한 것을 알았다.

공구강에 대하여서도 모드 II 피로시험이 가능한 것을 알 수 있었고, 또 이후 여러가지 조건 및 재료에 대해서도 실험데이터를 축적할 필요가 있다.

4. 결 론

1) 평판ring형시험편의 접촉피로시험결과, 접촉피로를 받으면 우선 접촉면에 거의 수직방향으로 인장형 균열이 발생한 후, 그 끝단부근에서 전단형 균열이 생기고, 이 전단

균열이 성장하는 것에 의해 박리형파손이 일어난다.

2) 모드 II 피로균열진전특성평가시험법을 제안하였고, 금희 제안된 방법으로 각종 재료의 모드 II 피로균열진전저항평가가 가능하다고 생각된다.

3) 모드 II 피로균열진전파면은 전단부하의 방향에 거의 평행한 균열끝단의 반복전단변형의 결과 생긴 것이라 생각되는 얇은 층을 쌓은 것 같은 형태를 나타내고 있다. 이 같은 모드 II 피로균열진전파면의 특징에 관해서는 알루미늄합금 및 공구강 더불어 공통적이다.

참 고 문 헌

1. J. R. Fleming and N. P. Suh, Wear, 44, 39 (1977)
2. D. A. Hills and D. W. Ashelby, Wear, 54, 321 (1979)
3. A. R. Rosenfield, Wear, 61, 321 (1980)

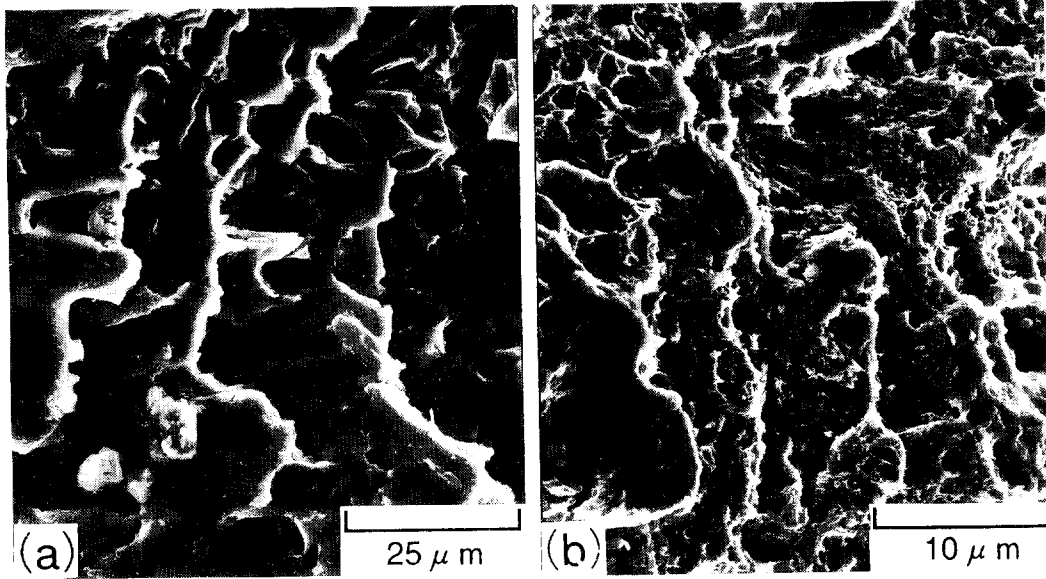


Fig. 9. Fractographs of mode II fatigue fracture surface.
 (a) Aluminum alloy (7075-T6)
 (b) Tool steel (SK5, quenched-tempered)

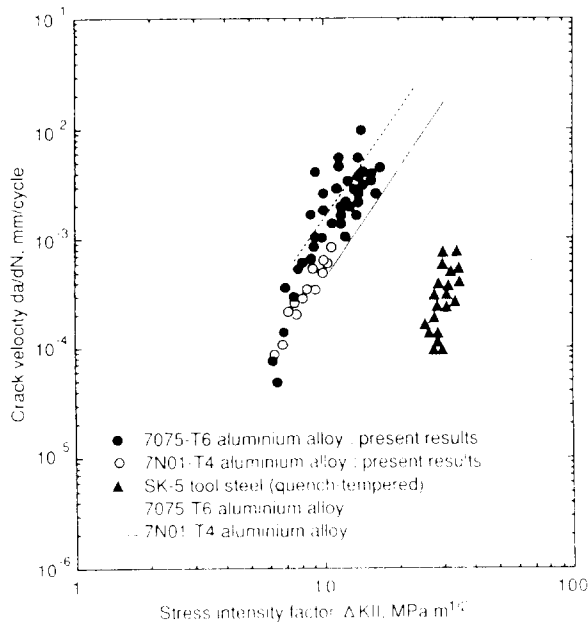


Fig. 10. Mode II fatigue crack growth rate da/dN as a function of ΔK_{II} , Comparison of the results obtained by the present apparatus shown by data points with those in the references shown by solid and dash dot lines.

4. L. M. Keer, M. D. Bryant and G. K. Haritos, J.

Lubr. Technol., 104, 347 (1982)
 5. G. T. Hahn, V. Bharange, H. Yoshimura and C. Rubin, Proc. ICF 6, Advances in Fracture Research, 1, 295 (1984)
 6. A. D. Hearle and K. L. Johnson, J. Mech. Phys. Solids, 33, 61 (1985)
 7. Y. Murakami, M. Kaneta and H. Yatsuzuka, ASLE Trans., 28, 60 (1985)
 8. A. Otsuka and K. Mori, Journal of the J.S.M.E, 45, 1312 (1979)
 9. A. Otsuka and K. Mori, The Soc. of Mater. Sci. Japan, 29, 568 (1980)
 10. A. Otsuka, K. Tohgo, T. kiba and S. Yamada, Advances in Fracture Res., proc. ICF 6, 1671 (1985) pergamon
 11. A. Otsuka, K. Mori and K. Tohgo, Current Res. on Fatigue cracks, vol.1, ed. by T. Tanaka, M. Jono and K. Komai, 149 (1987) Elsevier
 12. Y. Murakami (Ed.-in-Chief), Stress Intensity Factors Handbook, 2, 941 (1985) Pergamon