

● 論 文

2024-T3 및 황동의 작은 표면결함재의 피로균열 성장특성에 관한 연구

서 창 민* · 오 명 석**
(95년 10월 30일 접수)

A Study on the Growth Behaviors of Surface Fatigue Crack
Initiated from a Small-Surface Defect of 2024-T3 and Brass

Chang-Min Suh* · Myung-Suck Oh**

Key Words : Surface Crack(표면균열), Stress Intensity Factor(응력확대계수), Crack Growth Rate(균열성장율), Cycle Ratio(반복수), Total Strain Intensity Factor(전스트레인 확대계수)

Abstract

In this paper, rotating bending fatigue tests have been carried out to investigate the growth behaviors of surface fatigue crack initiated from a small artificial surface defect, that might exist in real structures, on 2024-T3 and 6:4 brass. The test results are analysed in the viewpoints of both strength of materials and fracture mechanics, it can be concluded as follows.

The effect of a small artificial surface defect upon the fatigue strength is very large. The sensitivity of 2024-T3 on the defect is higher than that of 6:4 brass.

The growth behavior of the surface fatigue crack of 2024-T3 is different from that of 6:4 brass. The growth rate of the surface fatigue crack of 2024-T3 is considerably rapid in the early stage of the fatigue life and apt to decrease in the later stage.

It was impossible to establish a unifying approach in the analysis of crack growth behavior of 2024-T3 and 6:4 brass using the maximum stress intensity factor because of their dependence on stress level. But if the elastic strain and cyclic total strain intensity factor range were applied to obtain the growth rate of surface fatigue cracks of the materials, the data were found to be nearly coincided.

* 경북대학교 기계공학부

** 영남전문대학 기계과

1. 서 론

각종 기계 및 구조물이 주기적으로 변화하는 반복하중을 받아 피로파괴되는 경우는 기계부품등의 파괴사고의 약 60~90%에 달한다고 보고¹⁾되어 있다. 금속의 피로현상에 대한 연구는 Wöhler의 실험(1857년)이후 약 130년 이상 경과하였으며, 피로균열에 대한 연구는 1920년대에 Gough와 Moore에 의하여 시작된 이후 약 70년 이상 경과되었다¹⁾. 한편, Paris와 Erdogan(1963년)²⁾이 피로균열의 성장속도를 파괴역학에 적용시킨 이후 피로균열성장속도의 파괴역학적 취급은 급속한 발전을 하게 되었다. 따라서 노치재의 피로균열성장기동에 착안한 파괴역학적인 연구는 최근 급속히 진보되어 재료선택뿐만 아니라 구조물 및 기기중에서 검출된 결함의 평가 및 잔존수명의 예측, 건전성 평가등에 적용되어 많은 성과를 올리고 있다.^{2~12)}

그러나 항공기 및 고압배관 등 주요 구조물의 파괴원인은 작은 표면결함에 의한 것으로 분석되는 경우가 많다. 따라서 구조물 및 기기의 파괴역학적 개념에 의한 설계, 검사, 보수 및 건전성 평가를 위해서는 실존 가능한 작은 표면결함의 피로균열 성장특성에 관한 기초적인 자료의 축적이 필요하게 되었으며 최근, 비파괴검사(NDI)기술의 발달과 더불어 이에 대한 공업적 및 공학적 중요성이 더욱 인식되고 있다.

이에 대한 연구로서 Wei⁴⁾는 피로파괴해석에 응력확대계수범위 ΔK 를 적용하였으며, Dowling⁵⁾은 파괴역학적인 변수 K/\sqrt{r} (r =notch반경)및 응력집중계수등의 관점으로부터 연구, 고찰하여 여러가지 결함재의 피로수명을 예측하였다.

Nishitani⁶⁾들은 탄소강재(S10C, S50C)와 7:3황동의 재료에 직경 0.3mm, 길이 0.3mm인 작은 인공결함을 가공하여 코액싱 효과(coaxing effect)와 균열성장거동을 조사하였다. 北川⁷⁾들은 HT80재와 SM50재에 직경 50 μ m, 길이 50 μ m인 미소인공결함을 가공한 후 편진인장피로시험을 실시, 표면피로균열성장속도의 응력확대계수범위에 대한 의존성과 균열진전의 하한계조건을 조사하여 작은 피로균열에 대한 파괴역학의 적용이 가능한가를 연구하였다.

서¹⁰⁾들은 연강에 직경 0.5mm, 깊이가 각 0.5mm, 0.23mm 및 1.0mm인 3종류의 작은 인공결함을 가공하여 회전굽힘 및 편진인장-축하중피로시험을 행하여 재료강도학적인 측면에서 피로균열거동을 조사하고 반복 스트레인 확대계수범위(cyclic strain intensity factor range) $\Delta K \epsilon$ 을 사용하여 표면피로균열에 파괴역학적 개념을 확장적용하였다. 또한 서^{11),12)}들은 고탄소강과 중탄소강에 대하여 $\Delta K \epsilon$ 을 확장적용하여 피로균열의 파괴역학적 연구를 실시하였다.

본 연구에서는 2024-T3 알루미늄 합금과 6:4황동의 작은 표면결합에서 발생, 성장하는 표면균열의 성장특성을 조사하기 위하여 다음과 같이 연구하였다. 알루미늄 합금과 6:4황동에 크기가 다른 두 종류의 결합(직경 0.5mm, 깊이 0.5mm 및 직경 0.1mm, 깊이 0.1mm)을 가공한 두 종류의 시험편을 제작하여, 상온에서 응력비 $R=-1$ 인 회전굽힘피로시험을 행하여 결합의 크기가 피로강도에 미치는 영향을 조사하였다. 또한, 표면피로균열의 성장특성을 조사하여 최대응력확대계수를 K_{max} 를 적용하는 방법과 반복 전스트레인확대계수범위 $\Delta K \epsilon$ 과 탄성스트레인확대계수범위 $\Delta K/E$ 를 적용하는 방법을 비교, 검사하여 그 유효성을 조사하고 이를 파괴역학적 측면에서 고찰하였다.

2. 시험재료 및 실험방법

2-1. 시험재료

본 실험에 사용한 재료는 2024-T3 알루미늄 합금과 6:4 황동으로서 그 화학적 성분은 Table 1과 같다. 시험편은 공급된 재료를 기계가공한 후 에머리 페이퍼(emery paper)220번에서 1200번까지 연마한 후 버핑(buffing)하여 Fig. 1과 같은 형상으로 제작하였다. 피트형상의 작은 표면인공결함의 가공은 시험편 중앙평활부에 다이알게이지를 부착한 드릴링머신으로 정밀하게 가공하였다. 이때 드릴선단과 시험편 표면과의 접촉 여부 및 드릴 회전중심의 위치는 이동식현미경(travelling microscope)을 사용하여 확인하였다.

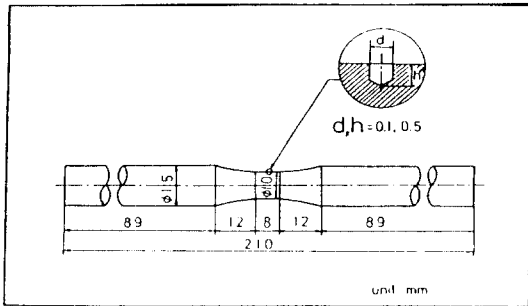


Fig. 1 Configuration of the specimen and the pits

인공결합은 직경 0.1mm, 깊이 0.1mm 및 직경 0.5 mm, 깊이 0.5mm인 2종류로서 Fig. 1에 나타난 바와 같은 피트형상이다. 이와같이 제작된 두 종류의 시험편을 표면 레프리카(replica) 및 광학현미경을 사용하여 가공정밀도를 확인한 후 피로시험을 행하였다. 6 : 4황동의 평활 및 인공결합시험편은 잔류응력을 제거하기 위하여 450°C에서 한 시간 가열한 후 서냉하였다. 알루미늄은 기계가공후 그대로 사용하였다. 또, 표면레프리카로 균열길이의 측취를 용이하게 할 수 있도록 산화크롬분말로 가볍게 버핑한 후 피로시험을 행하였다. 사용된 시험편의 열처리한 후의 기계적성질은 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical compositions (wt, %)

Mark	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Pb	Ti	Al	Material
A	4.75	0.09	0.25	0.58	1.66	0.02	0.03	-	0.03	Re.	2024-T3
B	60.6	-	0.1	-	-	37.8	-	0.6	-	-	64barass

Table 2 Mechanical properties

Material	Yield point (0.2% offset) MPa	Tensile strength MPa	Elongation (%)	Vickers hardness Hv
A	412	531	16	141
B	216	399	38.6	90

2-2. 실험방법

상기한 바와 같이 제작된 시험편을 사용하여 일정하중하에서 회전굽힘피로시험을 행하였다. 이때 사용한 피로시험기는 오노식 회전굽힘 피로시험기

로서 상온하에 회전속도는 3400rpm이다.

표면인공결합에서 발생, 성장하는 표면피로균열의 측정은 피로수명의 약 5~10% 간격마다 시험기를 정지시킨 후 표면레프리카법으로 표면피로균열길이를 채취하고 광학현미경으로 정밀하게 측정하였다.

또한 $\Delta K \epsilon$ 에 사용될 전스트레인범위(total strain range) 및 안정된 반복스트레스-스트레인 관계는 시험편균열 측정부와 반대측의 평활평행부 중앙에 스트레인 게이지(게이지 길이 2mm)를 부착하여 multiple-step method^{10),17)}를 사용하여 얻었다. 스트레인 측정시는 피로시험기를 정지시켜 스트레인 게이지를 스트레인 측정기(strain indicator)에 연결시키고, 각 응력레벨에서 일정각도, 즉 10° 씩 수동으로 시험기를 회전시켜 변화되는 전스트레인 값을 측정하였다. 이 전스트레인값과 응력치를 방안에 나타내어 응력-스트레인 관계를 얻었다.

3. 시험결과 및 고찰

3-1. S-N 특성

6 : 4황동(B재)의 평활시험편과 작은 인공결합 시험편의 회전굽힘피로시험에 의한 S-N곡선은 Fig. 2와 같다. 이때 종축은 응력진폭이며 횡축은 피로반복수이다. Al-합금(A재) 및 황동은 탄소강과는 달리 절점(knee point)이 뚜렷하게 생기지 않기 때문에^{9),10)} 평활재에 대한 피로한도는 3×10^7 회 반복하여도 결함으로부터 발생한 피로균열이 더이상 성장하지 않아 과단을 초래하지 않는 응력을 피로한도로 정하였다. 이렇게 하여 얻어진 황동 B재의 피로한도는 평활시험편이 145MPa, 직경 0.1 mm, 깊이 0.1mm 및 직경 0.5mm, 깊이 0.5mm인 인공결합재는 각각 137.2MPa 및 112.7MPa이었으며, 평활재에 대하여 각각 5.4% 및 28.7%의 피로한도가 저하되었음을 알 수 있다.

A재(2024-T3)의 피로한도는 구하지 못하였으나 Fig. 2에 나타난 바와 같이 A재가 B재(6 : 4황동)보다 현저하게 피로강도가 감소되었음을 알 수 있으며, 이것으로부터 A재가 B재보다 결함에 대단히 민감함을 알 수 있다.

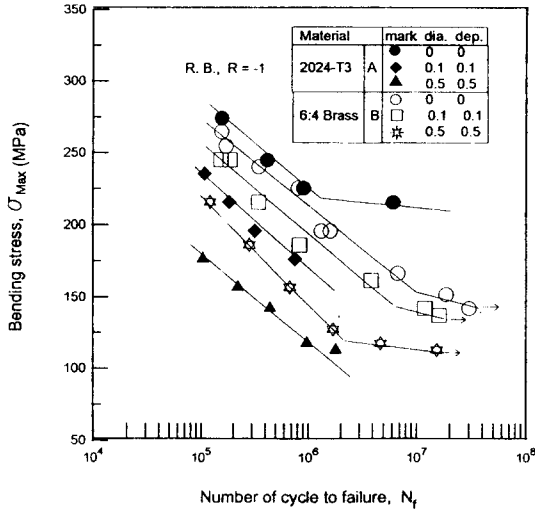


Fig. 2 S-N curves

Fig. 2에 나타난 바와 같이 작은 피트형 표면인 공결함에 의하여 양재 모두 피로강도가 저하되었음을 알았으나 좀더 상세히 알아보기 위하여 10⁷회 피로강도를 기준으로 하여 피로강도 감소율을 계산하여 보았다. 그 결과 결함의 직경 0.5mm, 깊이 0.5mm인 A재의 경우는 49.3%, B재의 경우는

28.1%, 직경 0.1mm, 깊이 0.1mm인 A재의 경우는 24%, B재의 경우는 8.8%가 저하하였다.

이와같이 재료 및 결함의 크기에 따라 피로강도의 저하에 차이가 있는 것은 재료의 강도, 결함 민감도 및 표면결함의 크기에 따라서 피로균열의 발생 및 성장특성이 다르기 때문이라 생각된다. 이 결과는 탄소강등에서도 비슷한 특성이 보고되고 있다.^{8),9),12-14)}

3-2. 피로균열의 발생과 성장특성

Fig. 3은 피로균열 성장특성을 조사하기 위하여 Fig. 2의 S-N곡선에 등균열길이 곡선을 중첩시켜 나타낸 그래프로서 2024-T3재에 대한 그래프이다.

6 : 4황동재의 실험결과에 있어 각 등균열곡선은 서로 거의 평행하였으며 S-N곡선과도 거의 평행한 경향을 나타내었다. 이는 인공표면결함재의 피로균열성장특성으로서 반복수비가 같을 경우에 응력레벨에 관계없이 거의 같은 표면균열길이만큼 성장한다는 것을 나타내며 이와같은 피로균열성장특성은 연강¹⁰⁾, 고탄소강¹¹⁾ 및 중탄소강¹²⁾의 경우에서도 볼 수 있었다. 그러나 Fig. 3의 2024-T3 표면결함재의 경우는 6 : 4황동 및 탄소강재와는 그

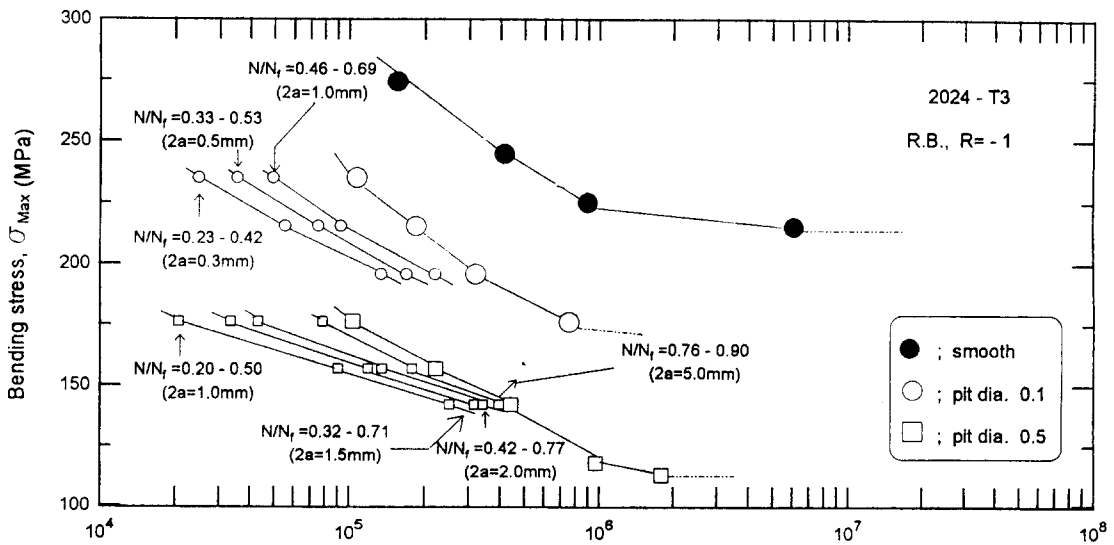


Fig. 3 Relation between bending stress and the number of load cycles for the crack length at various stages of the fatigue life

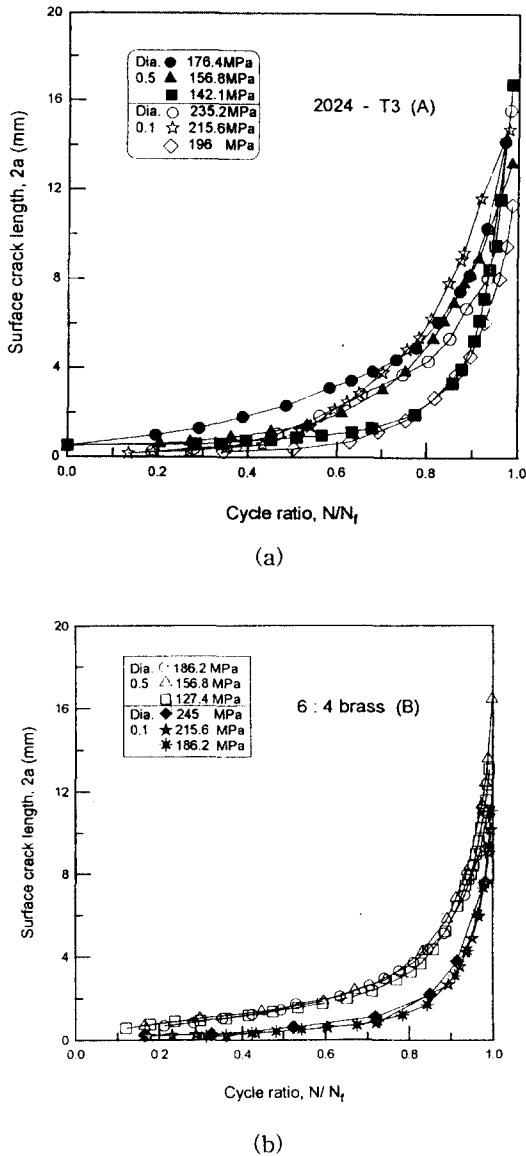


Fig. 4 Relation between surface crack length and the cycle ratio

성장특성에 다소 차이가 있어 관심이 집중된다.

Fig. 4(a) 및 (b)는 피로균열성장특성을 연구, 조사하여 파괴역학적해석을 하기 위하여 표면균열길이와 반복수와의 관계곡선을 이용하여 반복수비(N/N_f)와 균열길이와의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 2024-T3재

는 응력레벨에 따라 그 균열의 성장길이가 크게 변하여 넓은 밴드를 형성하였으나 Fig. 4(b)의 6:4황동재의 경우는 응력레벨의 차이에 관계없이 피트의 크기에 따라 각각 비교적 좁은 밴드를 형성하였다. 또한 피트형 작은 표면피로균열의 발생시기는 반복수비 N/N_f 의 0.2 이전에서 발생하여 원활하게 성장하며, 피로수명의 80% 이후에서는 급속하게 성장하여 피로파단함을 알 수 있다.

Fig. 4(a)를 보면 2024-T3재의 직경 0.1mm, 깊이 0.1mm 결합재에서는 초기에서 균열이 발생하여 피로균열길이 2a가 0.5~1.25mm 정도로 성장하였을 때 피로수명의 약 50%를 소비하였으며, 직경 0.5mm, 깊이 0.5mm인 결합재에서는 표면피로균열길이가 1~2.25mm 정도 되었을 때 피로파단반복수의 약 50%까지 성장하였으며, 표면피로균열길이가 5.5mm 정도 성장하였을 때는 결합의 크기에 관계없이 피로수명의 80~90%를 소비하였다.

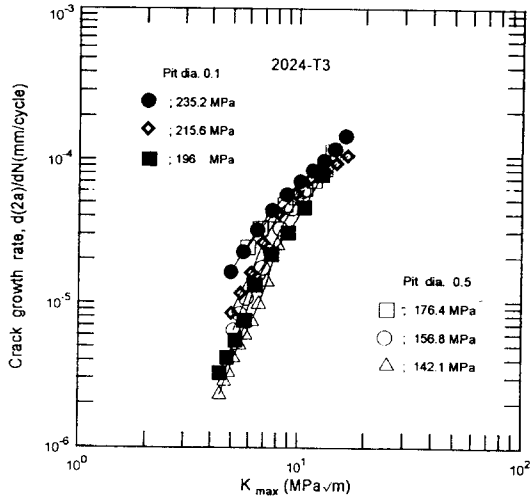
또한 Fig. 4(b)의 6:4황동재의 경우 직경 0.1mm, 깊이 0.1mm인 결합재에서는 표면피로균열길이가 1.2mm정도, 직경 0.5mm, 깊이 0.5mm인 결합재에서는 2.8mm정도 성장하였을 때 피로수명의 70~80%를 소비하였다.

이와같은 실험결과를 표면피로균열이 1mm 내지 수mm로 성장하였을 때 피로반복수가 피로수명의 대부분을 차지한다는 연구보고¹⁰⁻¹²⁾와 잘 일치함을 알 수 있다. 그리고 A재는 결합의 크기에 관계없이 B재보다 각 반복수비(cycle ratio)별 표면균열길이의 산포가 크다는 것을 알 수 있으며, B재 및 탄소강¹⁰⁾과는 달리 초기에는 균열성장속도가 상당히 빠르지만 후반기에는 감소하는 현상이 나타나고 있음을 알 수 있다. A재(2024-T3)의 이러한 특성은 균열선단에 위치한 결정방위의 영향⁸⁾ 및 Al-합금 고유의 성질에 기인하는 것으로 생각된다.

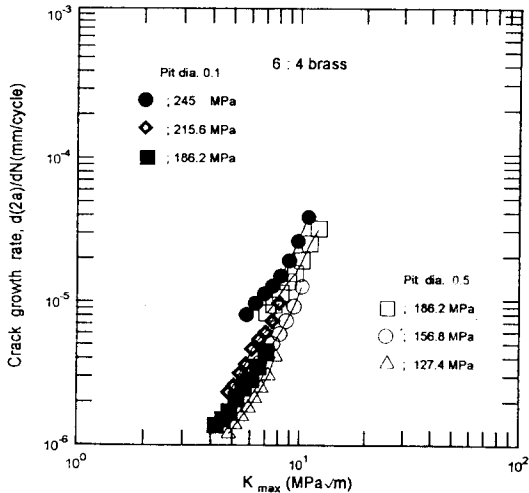
이와같이 표면피로균열의 성장특성은 재료의 종류 및 결합민감도에 밀접한 관계가 있는 것으로 생각되며, 결합이 작으면 균열이 발생하기 어렵고 결합이 크게 되면 균열발생이 빠르고 초기 성장속도가 높은 경향을 나타냄을 알 수 있었다.

3-3. 표면피로균열성장속도의 파괴역학적 정리

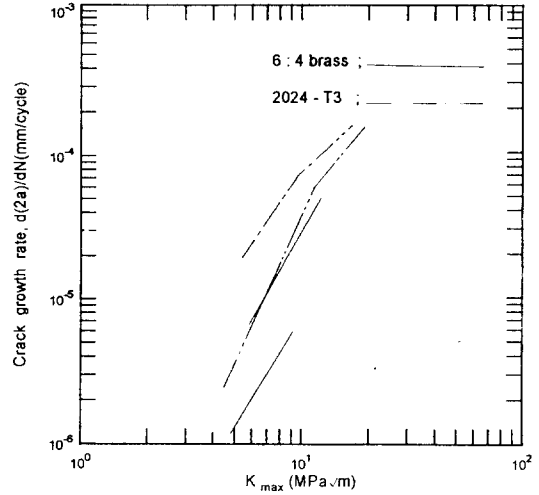
Fig. 5는 각 응력레벨별 피로균열의 길이와 반복 수와의 관계곡선을 사용하여 작은 표면인공결합재에서 발생하여 단독으로 성장하는 작은 표면피로 균열의 성장특성을 최대응력확대계수(K_{max})로 정리하여 파괴역학적인 측면에서 해석하여 얻은 결과이다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Dependence of the growth rate of small fatigue surface cracks upon the stress intensity factor

여기서 종축은 균열성장속도의 대수치 $\log(d(2a)/dN)$ 를 나타내며 횡축은 최대응력확대계수를 나타내고 있다. 여기서 응력확대계수의 평가는 Shiratori 등의 환봉에 대한 유한요소해석으로 산출한 결과를 이용하여 해석했으며¹⁸⁾ 이때 응력확대계수범위 (ΔK)는 식(1)과 같이 계산된다.

$$\Delta K = F \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \tag{1}$$

여기서, $\Delta \sigma$: 응력범위, a : 표면균열 길이, F : 수정계수이다.

수정계수 F 는 환봉에 대한 유한요소식¹⁹⁾과 다른 회전굽힘시험결과^{12),20)}에서 얻은 결과를 인용한 형상비 $b/a = 0.6$ 으로 가정하였을 때 나타난 곡선을 Curve fitting한 결과인 식(2)로 사용하였다.

$$F = 0.642343(a/r)^3 - 0.570610(a/r)^2 + 0.260825(a/r) + 0.490935 \tag{2}$$

(단, r : 시험편 반경)

이때, $\sigma_{max} \sqrt{\pi a}$ 및 $d(2a)/dN$ 값은 균열발생 직후에는 인공결합의 형상, 크기 및 재료의 미시조직

에 따른 균열성장의 변화폭이 크다. 따라서, 직경 0.1mm, 깊이 0.1mm인 결합재의 경우에는 표면피로균열길이가 약 0.3mm 이상부터 직경 0.5mm, 깊이 0.5mm인 결합재는 피로균열길이가 0.8mm 이상의 길이를 대상으로하여 피로균열의 성장속도를 파괴역학적으로 해석하였다.

Fig. 5에서 각각의 응력레벨에 대한 피로균열성장속도 $d(2a)/dN$ 는 최대응력확대계수 K_{max} 에 잘 의존하고 있다. 그러나 피트의 크기 및 응력레벨에 따라 각각 다른 직선을 나타내고 서로 거의 평행함을 알 수 있다. 이러한 응력의존성은 평활재 표면에 발생, 성장하는 미소피로균열의 경우¹⁵⁾와 직경 0.5mm, 깊이 0.5mm인 연강¹⁰⁾, 고탄소강¹¹⁾ 및 중탄소강¹²⁾ 결합재의 경우에서도 나타났음이 보고되고 있다.

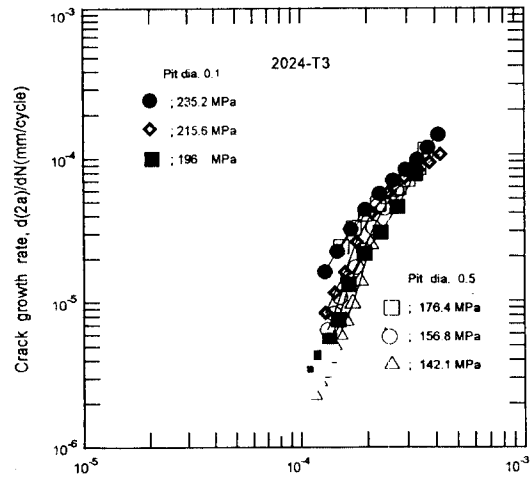
이와같이 두가지 재료의 피로시험을 통하여 얻은 균열성장속도를 최대응력확대계수 K_{max} 를 사용하여 파괴역학적 해석을 하여 본 결과, 응력 및 인공피트의 크기에 따라서 각각 다른 직선이 얻어지기 때문에 통일적인 정리가 곤란함을 알 수 있다.

특히 2024-T3 알루미늄 합금재의 결과는 Fig. 5(a)와 같이 후반기에서 성장속도가 감소하는 경향을 나타내고 있는데 이는 Fig. 4(a) 및 Fig. 4(c)의 $2a-N/N_f$ 곡선에서 지적한 바와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 5(c)는 재료간 균열성장특성을 비교, 검사하기 위하여 Fig. 5(a) 및 (b)의 최외각 밴드만을 나타낸 결과로서 두가지 재료간에 데이터가 상당히 분산되고 있음을 알 수 있다.

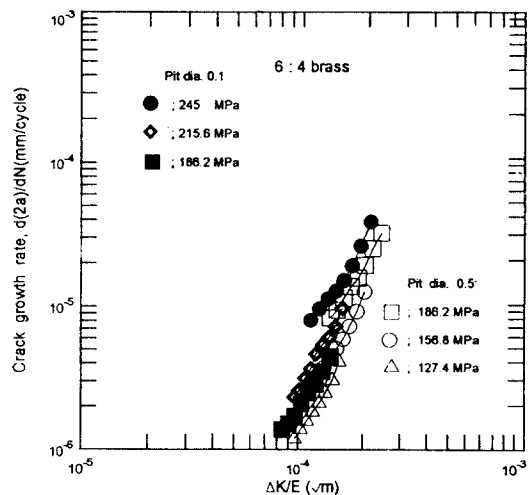
다음은 탄성스트레인확대계수범위 $\Delta K/E$ 를 사용하여 균열성장속도의 특성을 해석하여 보기로 하였다. 여기서 ΔK 는 응력확대계수범위이며, E는 재료의 탄성계수로서 2024-T3는 73,500MPa, 6 : 4 황동은 99,960MPa이다. Fig. 6(a), (b)가 탄성스트레인확대계수범위를 사용하여 얻은 결과이며, Fig. 5의 최대응력확대계수로 나타낸 것과 유사한 결과를 얻었다. 즉, 각 재료의 피트의 크기 및 응력레벨에 따라 서로 다른 직선을 나타내고 서로 거의 평행함을 알 수 있다.

그러나 Fig. 6(a), (b)의 자료중 최외각 밴드만을 나타낸 Fig. 6(c)를 보면 최대응력확대계수로 정리

한 Fig. 5(c)의 결과보다 탄성스트레인확대계수범위로 정리한 결과가 재료간 데이터의 분산이 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이것은 응력레벨대신에 스트레인 ($\epsilon = \sigma/E$)항을 포함하는 파라미터로 정리하면 E가 다른 재료의 통일적인 정리가 가능함을 예시하여 주고 있는 것이다. 따라서 다음 절에서는 반복전스트레인확대범위 ΔK_ϵ 를 사용, 균열의 성장속도를 파괴역학적으로 해석하여 보기로 한다.



(a)



(b)

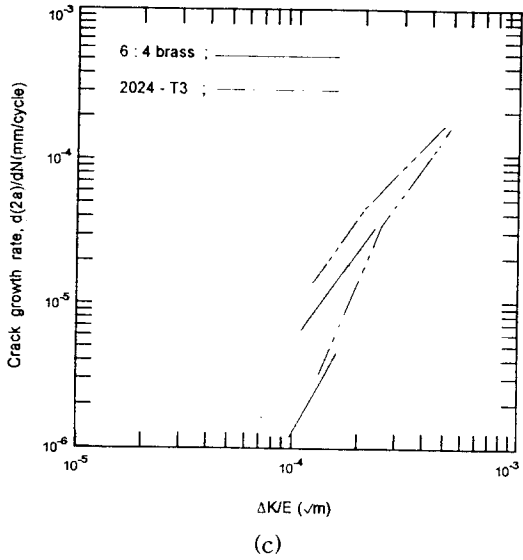


Fig. 6 Dependence of the growth rate of small fatigue surface cracks upon the elastic strain intensity factor range

3-4. 결함재의 반복스트레스-스트레인관계 및 ΔK_E 에 의한 정리

Fig. 7은 반복회전수 N의 증가에 따르는 전스트레인범위(total strain range) $\Delta \epsilon_t$ 의 변화를 나타낸 것이며, 이 실험결과는 multiple-step method^(10),17)를 사용하여 얻었다. Fig. 7(a)는 2024-T3결함재 자료이고 Fig. 7(b)는 6 : 4황동 결함재의 자료이다. 양재 모두 각 응력레벨의 피로수명이 거의 영(zero)인 상태에서 전스트레인범위 $\Delta \epsilon_t$ 가 안정되고 있음을 알 수 있다. 이것으로부터 본 시험에 사용된 2024-T3 및 6 : 4황동 결함재는 본 실험에서 택한 비교적 낮은 응력레벨에서는 가공경화현상이 나타나지 않음을 알 수 있다.

한편, Fig. 7(b)의 6 : 4황동 결함재에 있어 반복응력 215.6MPa, 피로수명 약 80% 이후에서 $\Delta \epsilon_t$ 가 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 파단직전에는 표면균열길이가 비교적 크므로 균열의 개구변위(crack opening displacement)에 의한 컴플라이언스(compliance)의 영향에 기인하는 것으로 생각되며, 여기서 컴플라이언스는 균

열이 진전되어 가는 동안의 단위하중당 변위를 말한다.

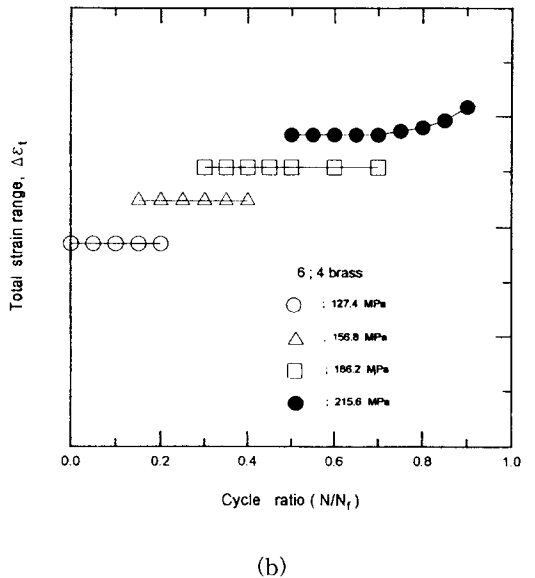
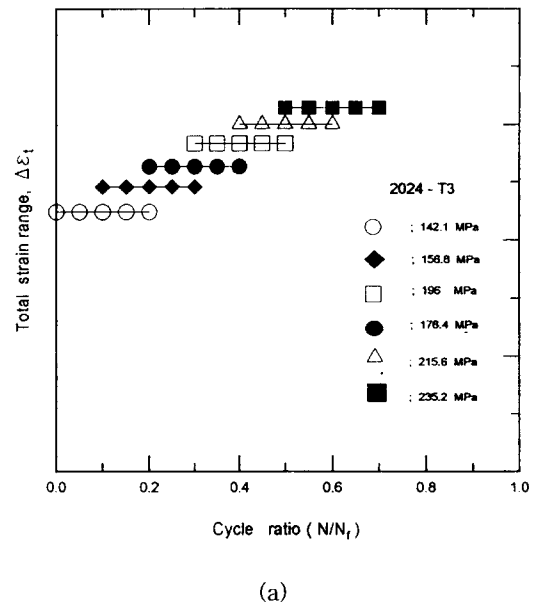


Fig. 7 Relation between the stable cyclic strain range and cycle ratio by the multiple step method

Fig. 8은 Fig. 7에 나타낸 결과를 이용하여 반복응력-스트레인 관계를 얻은 것이다. Fig. 7에서 예측된 바와 같이 Fig. 8에서 양재 모두 가공경화현상이 나타나지 않고, 응력-스트레인이 선형적으로 증가함을 나타내고 있다. 즉, 탄성계수 E가 일정한 값을 취하고 있음을 알 수 있으며, 이것으로부터 반복 전스트레인확대계수범위 ΔK_{ϵ} 을 적용하여도 데이터가 분산될 것임을 예측할 수가 있다.

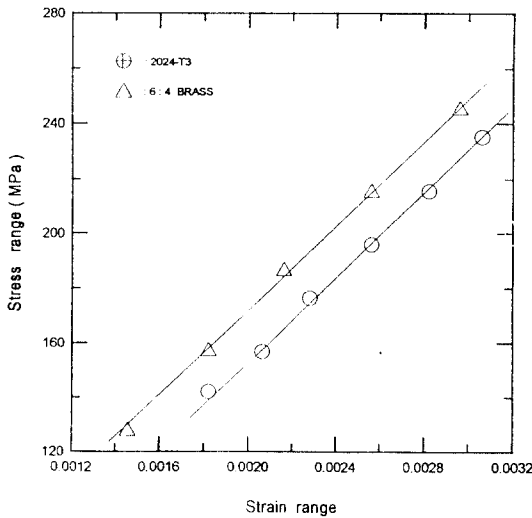
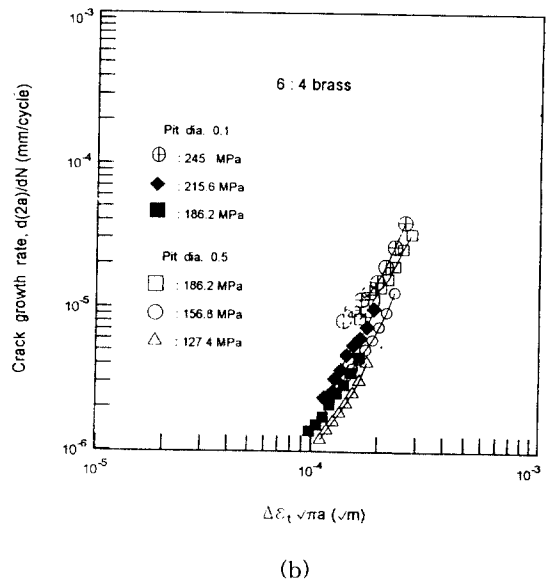
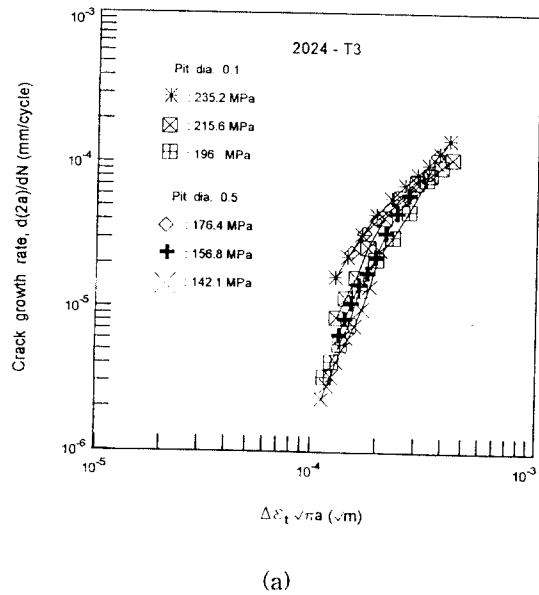


Fig. 8 Cyclic stress-strain relation obtained from defected specimen by the multiple step method

Fig. 9는 Fig. 5의 응력확대계수에서 σ_{max} 대신에 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타낸 안정된 전스트레인 $\Delta \epsilon_r$ 값을 이용한 반복 전스트레인확대계수범위 $\Delta K_{\epsilon} (= \Delta \epsilon_r \sqrt{\pi a})$ 을 사용하여 파괴역학적인 정리를 실시하여 얻은 결과이다. Fig. 9(a), (b)부터 본 실험에 사용된 재료에서는 ΔK_{ϵ} 으로 통일적인 정리가 곤란함을 알 수 있다. 또한, Fig. 9(c)는 Fig. 9(a) 및 (b)의 최외각 밴드만을 나타낸 결과이며, $\Delta K/E$ 로 정리한 Fig. 6과 같이 두 재료간의 데이터가 모이고 있음을 알 수 있다. 가공경화현상이 나타난 강재

에서는 ΔK_{ϵ} 의 적용이 유용하여 응력의존성과 결함의 영향이 없어지고 통일적인 정리가 가능하였다^{10),11),12)}. 그러나 황동과 2024-T3합금에 대해서는 안정한 반복전스트레인의 측정에 있어 좀 더 연구·실험하여 많은 데이터의 축적이 요구된다.



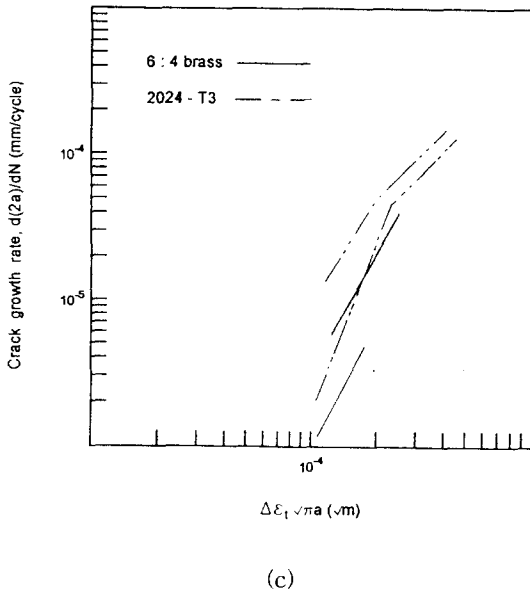


Fig. 9 Dependence of the growth rate of small fatigue surface cracks upon the strain intensity factor range

3-5. 피로한도부근에서의 피로균열성장 및 정류 거동

작은 표면인공결함이 있는 6 : 4황동의 피로한도(1.5×10^7 회 기준피로강도) 및 피로한도의 $\pm 4.9\text{MPa}$ 응력레벨에서의 피로균열이 발생, 성장하는 특성을 조사하여 Fig. 10과 같은 결과를 얻었다. 피로한도에서 피로균열은 반복회전수 N 의 증가에 따라 점차 그 성장속도가 감소하여 정류하였다. 6 : 4황동의 직경 0.5mm, 깊이 0.5mm인 결함재의 경우, $\sigma_a = 112.7\text{MPa}$ 에서 피로균열은 1.5×10^7 회 피로반복수에서 정류하였으며 직경 0.1mm, 깊이 0.1mm인 6 : 4황동 결함재의 경우, 137.2MPa의 응력레벨에서 정류하였다. 이때 정류균열길이는 직경 0.5mm, 깊이 0.5mm 및 직경 0.1mm, 깊이 0.1mm인 결함재에서

각각 1.21mm, 0.502mm이었다. 한편, 피로한도보다 각각 4.9MPa 높은 117.6MPa, 142.5MPa 응력레벨에서는 가속성장하여 피로파단하였다. Fig. 11은 6 : 4황동 결함재의 피로한도 응력레벨에서 10^7 회~ 1.6×10^7 회 피로반복수 사이의 정류균열길이를 표면 레프리카로 채취하여 나타낸 사진으로 Fig. 12에 그 결과를 정리하였다.

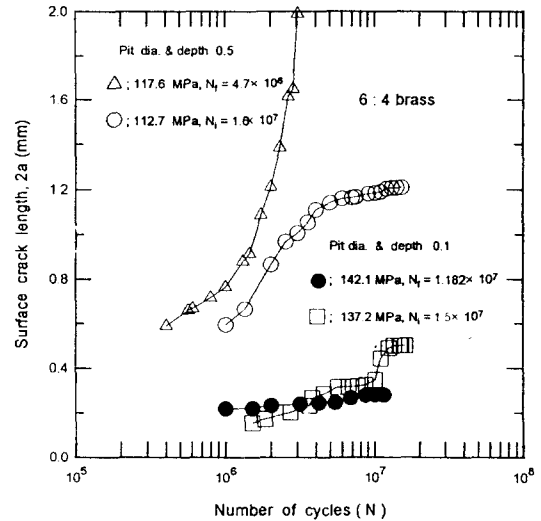


Fig. 10 Relation between the surface crack length and the number of cycles

한편, 직경 0.5mm, 깊이 0.5mm인 같은 크기의 결함을 갖는 6 : 4황동, 연강¹⁰⁾ 및 중탄소강¹²⁾의 10^7 회 정류균열길이는 각각 1.185mm, 1.02mm 및 0.99mm 이었으며, 10^7 회 피로강도는 각각 112.7MPa, 117.6MPa 및 147MPa이었다. 이것으로부터 피로한도가 높은 재료일수록 정류균열길이가 작아짐을 알 수 있었다. 이러한 결과는 다른 연구결과와 잘 일치하는 경향을 나타내고있다.¹³⁾

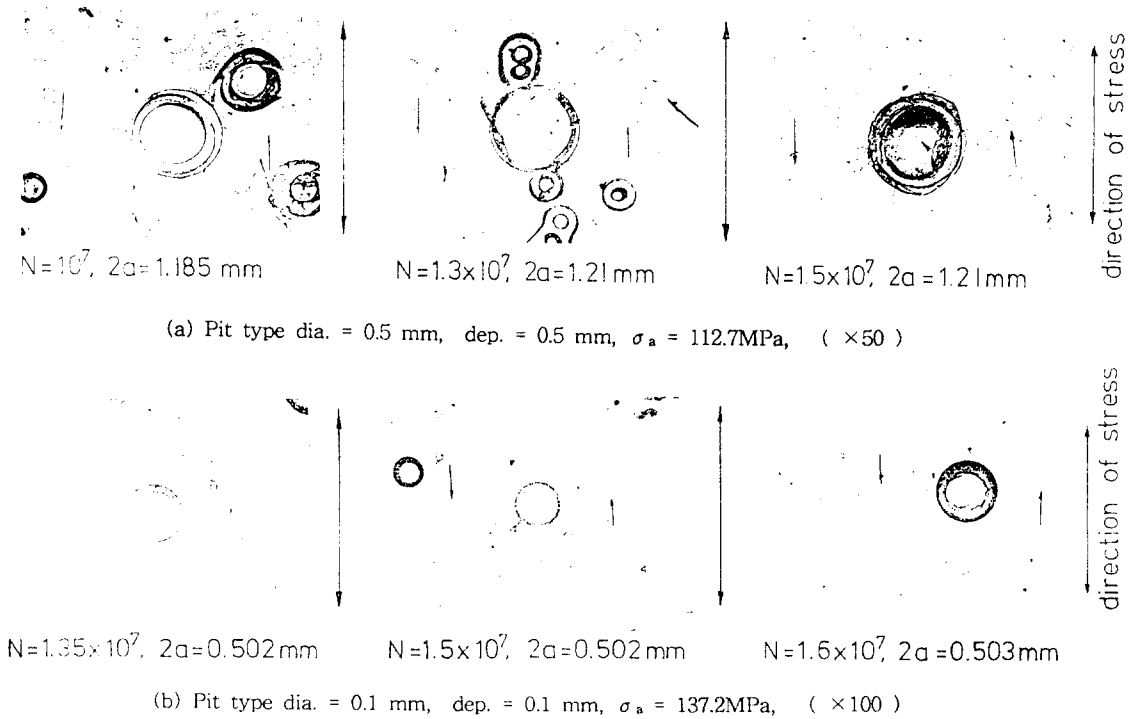


Fig. 11 Micrograph of the surface fatigue cracks by the replica method near the fatigue limit of 6 : 4 brass

4. 결 론

본 연구에서는 실구조물에 존재가능한 피트형상의 작은 표면인공결합을 2024-T3 및 6 : 4황동의 피로시험편에 가공하여 회전굽힘피로시험을 행한 후, 결함으로부터 발생, 성장하는 표면피로균열의 성장특성을 피로강도학적 및 파괴역학적인 측면에서 고찰을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

2024-T3 및 6 : 4황동의 피로강도는 작은 표면인공결합에 의하여 매우 큰 영향을 받으며, 강도가 큰 2024-T3의 경우가 6 : 4황동보다 결함에 대한 민감도가 심하였다.

2024-T3의 피로균열 성장속도는 6 : 4황동과는 달리 초기에는 상당히 빠르며 후반기에는 늦어지는 경향을 나타내었다.

작은 표면인공결합재에서 발생하는 표면피로균열이 1mm 내지 수mm 정도로 성장하였을때의 피로

반복수는 전피로수명의 70~80%에 달하였다.

2024-T3 및 6 : 4황동의 경우 최대응력확대계수 K_{max} 를 사용하여 파괴역학적 해석을 한 결과 응력 의존성이 생겨 통일적인 정리가 곤란하였다. 그러나 탄성스트레인 확대계수범위 $\Delta K/E$ 및 반복전 스트레인 확대계수범위 ΔK_e 을 사용하여 피로균열성장속도를 정리하면 양 재료간의 데이터가 모이고 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) Fuchs, H.O., and R.I. Stephens, "Metal fatigue in engineering", John Wiley and Sons, New York, pp. 1-3, 1980
- 2) Paris, P.C., and F. Erdogan, "A critical analysis of crack propagation laws", Trans. ASME J. of Basic Eng., 85:528-534, 1963

- 3) Irwin, G.R., "Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate", Trans. ASME J. of Appl. Mech., 57:361-364, 1957
- 4) Wei, R.P., "Fracture mechanics approach to fatigue analysis in design", Trans. ASME J. of Eng. Materials and Tech., 100:113-120, 1978
- 5) Dowling, N.E., "Fatigue at notches and the local strain and fracture mechanics approaches", ASTM STP 677:247~273, 1979
- 6) 西谷弘信, 山口善一, "小欠材のコ-キシソグ効果とき裂の挙動", 日本機械學會論文集, 45-391 : 260-266, 1979
- 7) 北川英夫, 高橋進, "微小な疲労き裂の成長とその下限界條件に関する破壊力學的研究", 日本機械學會論文集, 45-399: 1289-1303, 1979
- 8) 村上敬宣, 尋木好幸, 藤達雄, "アルミ合金と7:3黃銅の疲労強度に及ぼす直径 200 μ mの人工微小穴の影響とコ-キシソグ効果の存在について", 日本機械學會論文集, 47-424: 1293-1300, 1981
- 9) 村上敬宣, 尋木好幸, 藤達雄, "疲労強度に及ぼす人工微小穴の影響", 日本機械學會講演論文集, 790-9: 56-60, 1979
- 10) 徐昌敏, 北川英夫, "小さな人工缺陷からの疲労き裂成長挙動", 日本材料學會第14回疲労シンポジウム前刷集, 26-30, 1980
- 11) 徐昌敏, 姜用求, "회전굽힘응력하의 탄소강재의 表面균열의 成長挙動", 大韓機械學會論文集, 15-4, 1195~1203, 1991
- 12) 徐昌敏, 權五憲, 李正州, "작은表面缺陷에서 發生·成長하는 表面疲労균열의 成長特性에 관한 研究", 大韓機械學會論文集 제11권 제2호 pp. 191~197, 1987
- 13) 村上敬宣, 遠藤達雄, 福田四郎, "疲労強度に及ぼす微小缺陷の影響", 日本機械學會論文集, 44-388 : 4003-4013, 1978
- 14) 村上敬宣, 河野博之, 遠藤達雄, "疲労強度に及ぼす微小缺陷の影響", 日本機械學會論文集, 45-400 : 479-1486, 1979
- 15) Kitagawa, H., S. Takahash, C.M. Suh, and S. Miyashita, "Quantitative analysis of fatigue process-microcracks and slip lines under cyclic strain", ASTM STP 675:420-449, 1979
- 16) 河野博之, 村上敬宣, "直径40 μ mの微小穴から發生したき裂の成長", 日本機械學會論文集, 800-11 : 179-181, 1980
- 17) Landgraf, R.W., J. Morrow, and D. Endo, "Determination of the cyclic stress-strain curve", J. of Materials, 4-1:176-188, 1969
- 18) 徐昌敏, 姜用求, "2 1/4 Cr-1Mo鋼의 작은 表面균열의 成長에 관한 基礎的研究", 韓國海洋工學會誌, 第1卷, 第1號, pp. 104-110, 1987
- 19) 白鳥正樹, 三好俊良, 酒井義明, 張 光榮, "任意分布力を受ける表面龜裂の應力擴大係數", 日本機械學會論文集(A), 53-488, pp. 779~785, 1987
- 20) Suh C. M., Ritchie R. O. and Kang Y. G., "Growth Behavior of short surface Fatigue Cracks in 2.25 Cr-1Mo steel", KSME Journal, Vol. 3-2, pp. 78~85, 1989