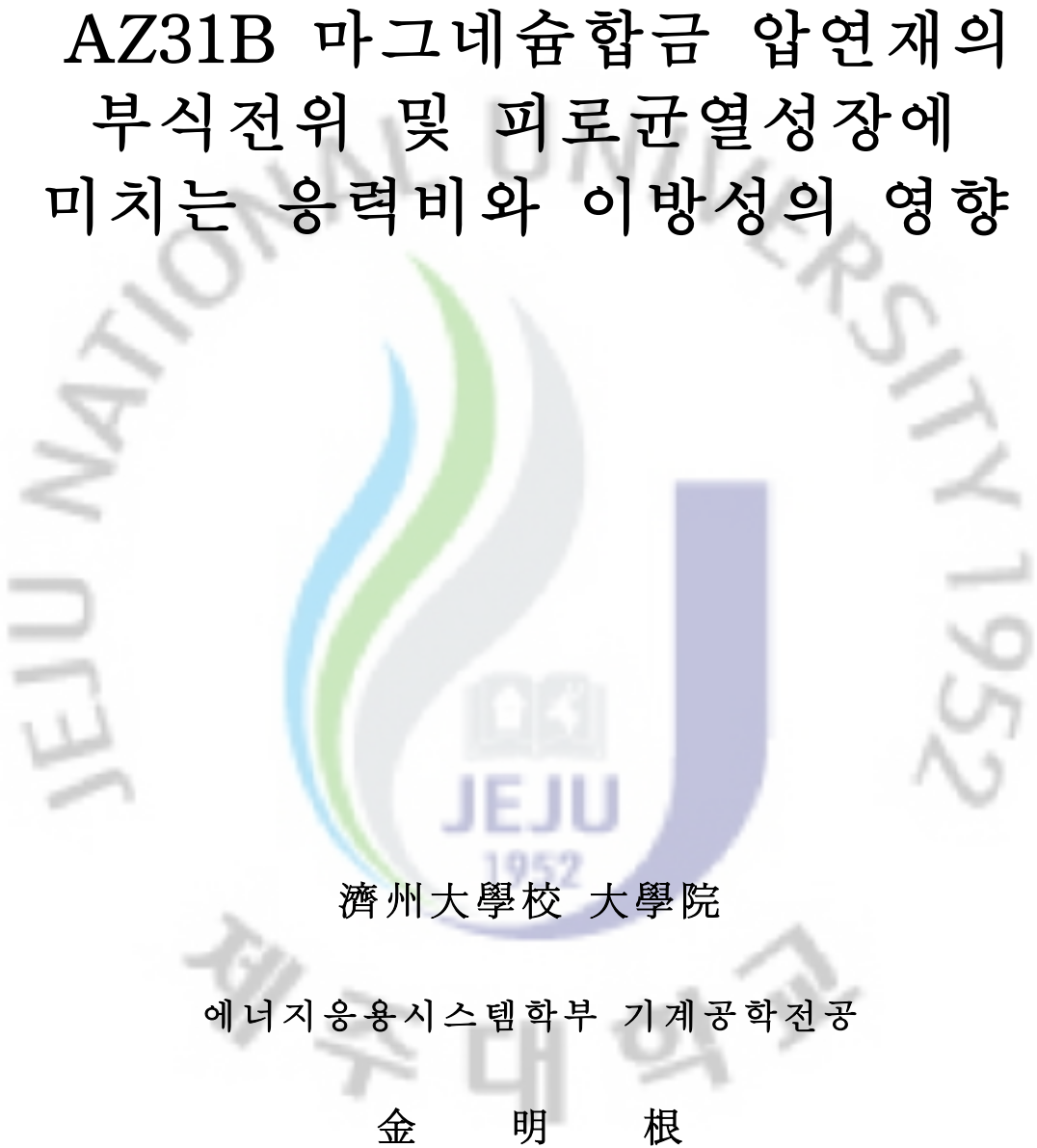


碩士學位論文

AZ31B 마그네슘합금 압연재의
부식전위 및 피로균열성장에
미치는 응력비와 이방성의 영향



濟州大學校 大學院

에너지응용시스템학부 기계공학전공

金 明 根

2009年 2月

AZ31B 마그네슘합금 압연재의 부식전위 및 피로균열성장에 미치는 응력비와 이방성의 영향

指導教授 金 貴 植

金 明 根

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2009年 2月

金明根의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ (印)

委 員 _____ (印)

委 員 _____ (印)

濟州大學校 大學院

Effect of Stress Ratio and Anisotropy on Fatigue Crack Propagation and Corrosion Behavior of AZ31B Magnesium alloy

Myeong-Keun Kim

(Supervised by professor Gui-Shik Kim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Master of Engineering

Department of Mechanical Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2009. 2.

목 차

List of Tables	vi
List of Figures	vii
SUMMARY	viii
I. 서 론	1
II. 이론적 배경	3
2-1 부식 전위	3
2-1-1 금속의 부식	3
2-1-2 부식전위 측정 방법	5
2-2 피로기구(Fatigue mechanism)	7
2-2-1 피로기구의 개념	7
2-2-2 피로균열의 거동	7
2-2-3 응력비의 영향	10
III. 재료 및 시험방법	12
3-1 재료 및 시험편	12
3-2 전기화학 실험	15
3-3 피로균열성장 실험	16
IV. 결과 및 고찰	21
4-1 분극특성	21
4-2 균열길이와 컴플라이언스와의 관계	25
4-3 피로균열성장 특성	27

4-3-1 응력비에 따른 피로균열성장 특성	28
4-3-2 재료의 이방성에 대한 피로균열성장 특성	33
4-4 파단면 관찰	38
V. 결론	43
VI. 참고문헌	45



List of Tables

Table 1 Standard Electrode Potential	4
Table 2 Chemical composition of AZ31B (wt.%)	13
Table 3 Mechanical properties	13
Table 4 Regression coefficient	18
Table 5 Corrosion electrode	21



List of Figures

Fig. 1 Schematic of polarization behavior	6
Fig. 2 Schematic variation of fatigue crack growth rate as a function of ΔK	9
Fig. 3 Terminology for alternating stress	11
Fig. 4 Tensile test specimen	13
Fig. 5 Stress-strain curve	14
Fig. 6 Potentiostat and test cell	15
Fig. 7 Compact tension specimen	19
Fig. 8 Anisotropy of specimen	19
Fig. 9 Fatigue testing machine	20
Fig. 10 Polarization behavior	24
Fig. 11 Relationships between compliance and crack length	26
Fig. 12 FCP rates of the AZ31B alloy	27
Fig. 13 Effect of stress ratio of on FCP rates of the AZ31B alloy (LT)	30
Fig. 14 Effect of stress ratio of on FCP rates of the AZ31B alloy (TL)	32
Fig. 15 Effect of anisotropy of on FCP rates of the AZ31B alloy (LT)	35
Fig. 16 Effect of anisotropy of on FCP rates of the AZ31B alloy (TL)	37
Fig. 17 SEM images of fatigue fracture surface	42

SUMMARY

This study was to investigate the effects of stress ratio and anisotropy on fatigue crack propagation, and corrosion potentials of a magnesium alloy. The experimental material was a commercial AZ31B magnesium alloy rolled plate with a thickness of 12.5mm.

The fatigue crack propagation rate tests were conducted on compact tension specimens, by a servo-hydraulic fatigue testing machine under the load control in laboratory air at ambient temperature. The compact tension specimens with 50mm width and 12.5mm thickness were prepared from as-received plate. The fatigue crack propagation directions were perpendicular and parallel to the rolling direction, i.e. LT and TL orientations.

The test condition was a sinusoidal load wave with frequency of 10Hz. Stress ratios were 0.1 and 0.7. The fatigue crack propagation rates were automatically obtained by a compliance method.

The fatigue crack propagation rates of both LT and TL specimens were almost the same value. The fatigue crack propagation rates of low stress ratio were more than that of high stress ratio in low ΔK region, but high ΔK regions were almost the same value.

For corrosion potential of magnesium alloy, the electrochemical corrosion potential (E_{corr}) and current density (I_{corr}) were measured by the dynamic polarization method using a potentiostat under NaCl solutions and distilled water.

The corrosion potentials were -1.25V(vs. SCE) in 3% NaCl solution and -1.05V(vs. SCE) in distilled water.

On fracture surface analysis by SEM micrographs, it expressed the quasi-cleavage fracture surface in low ΔK region and straight mark on the aspect of the facet in high ΔK region.

I. 서론

마그네슘은 실용금속 중 가장 가벼운 금속으로 경량성 및 환경친화적인 측면에서 우수한 특성을 가지고 있어 IT산업 및 자동차 부품, 항공우주산업의 부품소재로 매년 그 수요가 기하급수적으로 늘어나고 있다.

마그네슘합금은 밀도가 철강소재의 1/5, 알루미늄 소재의 2/3 정도인 1.8g/cm^3 정도로서 매우 낮은 밀도를 가지고 있는 대표적인 경량금속 소재일 뿐 아니라 플라스틱보다 훨씬 강한 소재로서 친환경 신소재로 각광받고 있다.

세계 8대 광물 중의 하나인 마그네슘이 각광받는 주요한 이유는 자원의 무한한 조달이 가능하다는 점이다. 마그네슘은 지표면에 마그네사이트가 대량 매장되어 있을 뿐만 아니라 해수를 전기분해하여 생산할 수도 있다. 이렇듯 원자재 수준의 변동사항이 없고, 가격 면에서도 안정되어 있는 것이 타 소재를 능가하는 장점이다. 또한 마그네슘은 현재 범세계적인 문제인 환경 문제를 해소할 수 있는 소재이다. 플라스틱 제품은 재활용률이 25%에 그치며 그마저도 재활용 과정에서 다량의 다이옥신이 발생하여 환경오염의 주요원인이 되는데 비하여, 마그네슘의 경우 회수율이 90%에 이르며 환경유해물질이 전혀 발생하지 않는 친환경 소재로도 주목받고 있다. 이런 강점으로 인해 선진 각국에서는 국가적 차원에서 마그네슘을 집중 연구하고 있으며, 국내에서도 마그네슘을 고부가가치 시대를 극복하는 신소재, 신기술의 하나로 연구 발전시키고 있다. 마그네슘 산업은 신소재를 이용한 신기술의 과학집약적 산업으로 고부가가치를 창출할 수 있는 산업으로 그 가능성이 무한하다.[1-2]

마그네슘합금은 비강도가 우수하고 기계가공성, 전자파 차폐특성을 가지고 있어 노트북, 캠코더, 휴대폰케이스 및 자동차 부품에 널리 응용되고 있다.

현재 마그네슘 합금의 사용분야는 크게 항공우주분야, ICT, 자동차 분야, 건축구조재, 주방, 의료, 레이저, 전동공구 등이 있다. 이 중 휴대폰, 노트북 케이스 등 ICT분야가 각광받고 있지만 가장 큰 시장은 자동차 부품소재 시장이 될 가능성이 크다. 2008년 이후 자동차 배기가스 규제가 강화됨에 따라 차량을 경량화 하

는 마그네슘 소재가 주요부품을 대체해 나갈 예정이다. 이렇듯 마그네슘은 항공 우주분야와 자동차 분야에서는 탁월한 경량성으로, ICT분야는 박판성형이 가능하며, 전자파 차폐효과가 있음이 경쟁력이다. 이러한 장점이 건축 구조재 분야에서도 구리, 니켈 등 고가자재의 대체품으로 각광받는 이유가 되고 있다. 이처럼 마그네슘은 산업전반에 걸쳐 다양한 용도로 사용되고 있으며, 향후 제품 시장 확대와 시장 규모는 기하급수적으로 늘어날 예정이다.[3]

현재 세계 각국에서 수송기기의 경량화를 위해 기존의 구조재를 대체할 새로운 재료에 대한 연구가 활발하게 진행 중이며 대체품으로 가장 유력한 마그네슘 합금에 대한 다양한 연구가 진행 중에 있다. 그러나 이러한 여러 가지 구조재로 사용되는 재료에 대하여 가장 우선적으로 고려되어야 할 피로특성에 대한 연구는 현재 미비한 실정이고 특히 강도설계에 반영하기 위한 피로특성은 충분한 연구가 되어 있지 않은 상황이다. 또한 우수한 특성을 가진 마그네슘합금의 최대의 결점으로서 내식성이 결핍되어 있다는 결점이 있다.[4]

모든 재료, 특히 구조재료에 있어서는 피로 및 부식거동이 수명을 결정하는 주된 기구로 알려져 있다. 피로는 재료 내부에 반복하중에 의해 생성된 균열 또는 재료 자체의 균열이 하중의 반복에 따라 점차 성장하여 최종적으로 파괴를 일으키는 기구로, 균열의 성장에 따른 하중을 지탱할 수 있는 면적이 감소하고 피로에 의하여 발생한 균열 침단에 응력이 집중됨으로 인하여 설계하중보다 크게 낮은 조건에서 파괴가 일어난다. 또한 피로에 의한 파괴는 파괴시 나타나는 징후가 관찰되지 않으며 재료에서 생성되고 성장한 균열의 성장속도가 갑작스럽게 증가함에 따라 마지막 최종 파괴시에 피해가 커지게 된다. 따라서 이러한 피로파괴가 발생할 경우를 대비하여 반복하중에 장시간 노출되는 구조물 등의 설계시 각 재료의 피로특성을 파악하고 이를 예방하는 것이 필수적이다.[5]

따라서 본 연구에서는 AZ31B 마그네슘합금을 기재로 하여 피로균열성장특성에 미치는 응력비 및 이방성이 미치는 영향에 대하여 검토하고 분극실험을 통한 전위특성을 파악하는 것을 목표로 한다.

II. 이론적 배경

2-1 부식전위

2-1-1 금속의 부식

금속재료가 그 주변 환경과의 사이에서 화학적 혹은 전기화학적으로 반응하는 과정을 통해 열화되는 현상을 부식(Corrosion)이라 한다. 그러나 좁은 의미의 부식은 금속재료가 환경과 반응하여 퇴화되어 본래의 기능을 상실하는 것을 의미한다. 이러한 금속의 부식현상은 자발적인 현상으로서 금속이나 합금이 생산되어진 원래의 광석의 상태로 돌아가려는 과정이다. 즉, 정련공정과는 반대이다. 금속은 자연계에서 대부분 산화물이나 유화물 등의 형태로 존재하고 있으며, 환원이라는 과정을 통하여 유용한 금속을 얻어서 각종 용도로 이용하고 있다. 즉, 자연 상태로 존재하는 광석을 제련의 과정을 통하여 금속을 얻게 되는데, 에너지가 투입되어 불안정한 금속이 자연 상태로 안정한 화합물 상태로 되는 것이 에너지 면에서 안정하기 때문에 금속재료는 주위에 존재하는 다른 원소와 결합하여 화합물의 상태로 돌아가려는 경향이 있으며, 이러한 과정을 부식이라고 한다.

금속의 부식은 전기화학적 반응의 결과로서 모든 부식현상은 전기화학적 반응에 의해 진행되며, 여기서 전기화학적 반응이란 화학반응의 진행과정에 전자가 참여하는 반응이며, 반드시 두 개의 반쪽반응으로 이루어지게 된다.[6-7]

금속의 부식경향은 전기화학적 개념인 전위(Potential)로서 나타내어 질 수 있다. 즉, 전위가 낮은 금속은 높은 금속과 비교해 볼 때, 부식 경향이 높다는 것으로 설명된다. 이러한 부식 전위를 설명하기 위하여 표준 기전력 계열의 개념이 도입 되었는데 표준 기전력 계열은 여러 가지 금속의 표준 반쪽 셀을 표준 수소 전극에 연결시켜 측정된 전압에 의하여 서열을 정하여 만든 것으로 Table 1에 나타내었다. 표준 기전력 계열에 나타나듯이 마그네슘 합금은 부식전위가 매우 낮은 금속으로 부식에 매우 취약한 금속이다.[8]

Table 1 Standard Electrode Potential

	Electrode Reaction	Standard Electrode Potential $V^0(V)$
	$Au^{3+} + 3e^- \rightarrow Au$	+ 1.420
	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	+ 1.229
	$Pt^{2+} + 2e^- \rightarrow Pt$	~+ 1.2
	$Ag^+ + e^- \rightarrow Ag$	+ 0.800
	$Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$	+ 0.771
	$Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$	+ 0.401
↑ Increasingly inert (cathodic)	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	+ 0.340
	$Pb^{2+} + 2e^- \rightarrow Pb$	+ 0.000
	$Sn^{2+} + 2e^- \rightarrow Sn$	-0.126
	$Ni^{2+} + 2e^- \rightarrow Ni$	-0.136
	$Co^{2+} + 2e^- \rightarrow Co$	-0.250
Increasingly active (anodic) ↓	$Cd^{2+} + 2e^- \rightarrow Cd$	-0.277
	$Fe^{2+} + 2e^- \rightarrow Fe$	-0.403
	$Cr^{3+} + 3e^- \rightarrow Cr$	-0.440
	$Zn^{2+} + 2e^- \rightarrow Zn$	-0.744
	$Al^{3+} + 3e^- \rightarrow Al$	-0.763
	$Mg^{2+} + 2e^- \rightarrow Mg$	-1.662
	$Na^+ + e^- \rightarrow Na$	-2.714
	$K^+ + e^- \rightarrow K$	-2.924

2-1-2 부식전위 측정방법

금속의 부식은 전기화학적인 면에서 보면 금속의 산화반응이며, 전기화학적인 부식법에는 타펠연장시험법(Tafel extrapolation), 선형분극 시험법(Liner polarization), 동전위분극측정법(Potentio-dynamic polarization), 국부적인 부식시험법(Pitting corrosion), 전지부식(Galvanic corrosion), 입계부식시험법(Inter-granular corrosion)등이 있다.

본 연구에서 사용한 동전위분극측정방법(Potentio dynamic)은 시편의 전위-전류관계를 이용, 용액 중에서의 부식특성을 평가하는 방법으로서 시편의 전위를 양극 혹은 음극 쪽으로 서서히 증가시켜 전체적인 전위-전류곡선을 구하여 부동태화 경향, 부식방지제 혹은 산화제의 효과 및 특성분석에 활용된다. 실험은 부식전위 혹은 그 이하 $20mV$ 에서 대략 $\pm 1.6V$ 혹은 그 이상까지 주사하며, 속도는 시간당 $1mV$ 정도 이다. Fig. 1에 전위-전류곡선을 나타내며, 여기서 활성태영역은 금속표면 또는 금속/용액의 계면에서 일어나며 전하의 교환에 의하여 지배적으로 일어날 때 나타나며 이러한 전극반응을 일반적으로 금속부식 과정에서 초기에 금속이 이온화하여 용해되거나, 혹은 수용액에서 음극반응을 일으키는 수소의 환원과정에서 수소기체의 생성과정을 예로서 들 수 있다. 부동태영역은 전위가 증가하여도 전류밀도가 감소하여 일정 전류밀도에서 거의 안정된 값을 보여 주며 금속의 표면에 용해되지 않은 얇은 피막이 형성되어 금속의 부식이 효과적으로 방지되는 현상을 말하며, 과부동태영역은 전위를 증가시킴에 따라 전류밀도가 다시 증가하는 영역으로 이미 형성된 부동태막의 파손에 의한 것으로 알려져 있다.[9]

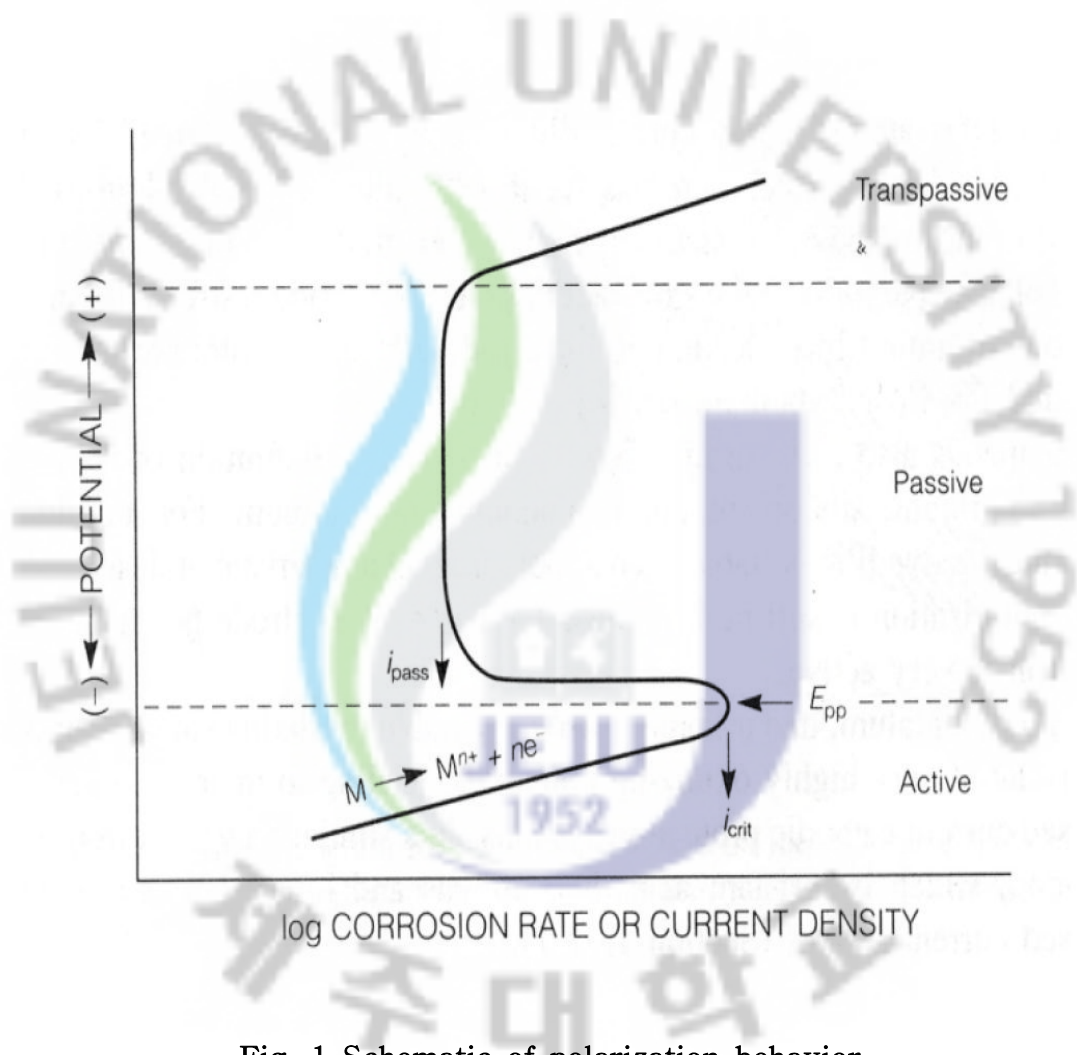


Fig. 1 Schematic of polarization behavior

2-2 피로기구(Fatigue Mechanism)

2-2-1 피로기구의 개념

재료 중에는 여러 가지 결함, 즉 대형 개재물, 용접부에서의 재질의 불균일, 구조물의 형상에 의한 응력집중부, 사용 중에 생긴 균열 등이 이미 균열의 중요한 요소로서 활동할 수 있는 결함이 존재하는 경우가 많다. 이러한 결함으로 인해 재료에 손상이 축적되어 설계조건 이하에서 파괴가 일어날 우려가 생긴다. 실제적으로 구조 재료 부재에서 일어나는 파괴의 대부분은 피로에 의한 것이며 동적 하중 또는 진동 등의 반복하중을 지속적으로 받게 되는 자동차, 항공기 등의 수송기와 모터, 펌프, 터빈 등의 기계들의 사고원인도 이러한 피로파괴에 의한 경우가 많다.

이러한 피로기구는 반복하중에 의해 생긴 균열이나 원 재료의 결함 등에 의해 야기된 균열이 지속적인 하중의 반복에 의해 점차적으로 성장해 파괴를 일으키는 기구로, 균열이 성장함에 따라 하중을 받고 있는 면적이 감소하여 점점 국부적으로 응력이 집중하게 되어 높은 에너지가 필요 없이도 파괴가 야기된다. 이렇듯 피로기구는 기계재료 등의 파괴에 있어서 중요한 변수로 작용되고 있으며 강도설계에 있어서 그 중요성이 더욱 강조되고 있다.

2-2-2 피로균열의 거동

피로파괴는 갑자기 일어나는 것이 아니고 재료의 표면에서 반복하중에 의해 슬립이 발생하게 되고 슬립선의 수 또는 폭의 증가함으로써 균열이 발생해 이 균열이 성장하여 파괴에 이르게 된다. 이러한 일련의 과정이 전 피로수명의 어떠한 단계에서 일어날지는 재료, 응력조건, 분위기조건 등에 따라 다르므로 일정하지 않다. 이러한 피로균열성장거동을 이해하기 위하여 선형탄성파괴역학(LEFM)이 도입되었다. 재료에 가해지는 하중에 따른 성장속도는 응력집중을 고려한 응력확대계수 ΔK 와 피로균열성장속도 da/dN 을 각각 로그함수로 취하여 피로균열성장곡선으로 나타낸다. 재료의 피로균열성장거동은 이 곡선에서 3가지 단계로 분류되며, 이를 Fig. 2 에 나타내었다.

영역 I의 균열성장속도 곡선은 피로균열의 성장이 시작되는 임계영역으로 임계 값 ΔK_{th} 는 보통 피로균열성장속도가 $10^{-9}m/cycle$ 이하인 점을 나타내며 ΔK_{th} 보다 낮은 값에서는 피로균열성장은 일어나지 않거나 너무 느려서 측정이 곤란하다.

실제 설계시에는 ΔK 를 ΔK_{th} 보다 낮게 하는게 바람직하며, 낮은 응력으로 많은 반복수의 하중을 받는 재료에 이용할 수 있다. 고속으로 작동되는 동력전달장치를 예로 들 수 있다.

최근 대부분의 균열성장거동에 적용되는 LEFM의 개념은 영역 II에 관계된다. 이 영역에서 ΔK 와 피로균열성장속도 ($m/cycle$)를 log의 값으로 나타내면 이 구간은 거의 직선구간이 되며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

이 식을 Paris 식이라 하며 C와 m은 재료상수이며, 하중비, 주파수 및 실험분위기 등에 따라 값이 달라진다. 이 구간에서의 피로균열성장거동은 재료의 거시적인 특성과 응력상태에 영향을 많이 받으며 시험이 용이하며 간단한 수식으로 표현할 수 있어 실제 설계에 적용되는 수명평가 예측도 이 영역에서의 실험결과가 주로 반영되어 왔다. 한편, 영역 III은 급속한 불안정균열성장이 일어난다. K_{max} 가 재료의 파괴인성에 해당하는 K_c 에 도달함에 따라 급격히 피로균열성장속도가 증가하여 최종적으로 파괴에 이르는 구간으로 실제 구조물에서는 피로균열성장속도가 이 단계에 도달하면 파괴가 순식간에 일어나므로 실제 설계에 적용되는 수명평가에는 적합하지 않다.[10]

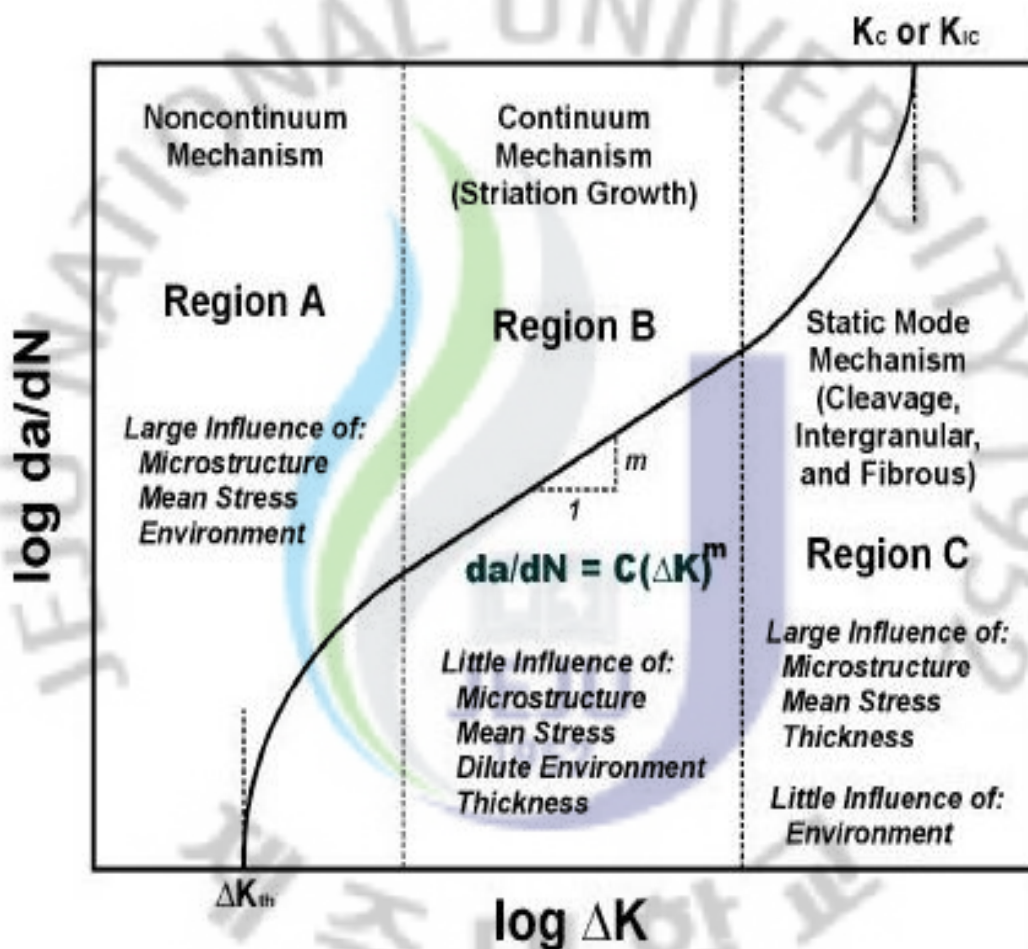


Fig. 2 Schematic variation of fatigue crack growth rate as a function of ΔK

2-2-3 응력비의 영향

기계 및 구조물의 설계 시 허용 응력 이하의 설계 조건으로 설계하지만, 반복 작동을 하게 되는 기계 시스템의 경우에는 피로에 의한 파괴 현상이 나타나게 된다. 이러한 피로 시험의 하중의 응력진폭이 같아 하더라도 평균응력이 달라지면 피로균열진전속도도 달라진다. 피로균열진전에 대한 평균응력 σ_m 의 크기를 나타내는 방법으로는 평균응력의 최대응력에 대한 상대적 위치를 평가하는 응력비 R 을 통상적으로 사용하며 이러한 평균응력에 대한 관계식들은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.[11]

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \text{응력폭(stress range)} \quad (2)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \text{응력진폭(stress amplitude)} \quad (3)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \text{평균응력(mean stress)} \quad (4)$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \text{응력비(stress ratio)} \quad (5)$$

이와 같은 응력비의 영향을 고려하기 위한 균열진전속도 평가식이 지금까지 다수 제안되고 있으나, 가장 최근에 Forman등에 의해 제안된 (6)식 이나 Walker의 (7)식이 비교적 잘 사용된다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)K_c - \Delta K} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)(K_c - K_{\max})} \quad (6)$$

$$\frac{da}{dN} = CK_{\max}^a \Delta K^b = C[K_{\max}(1-R)^m]^n \quad (7)$$

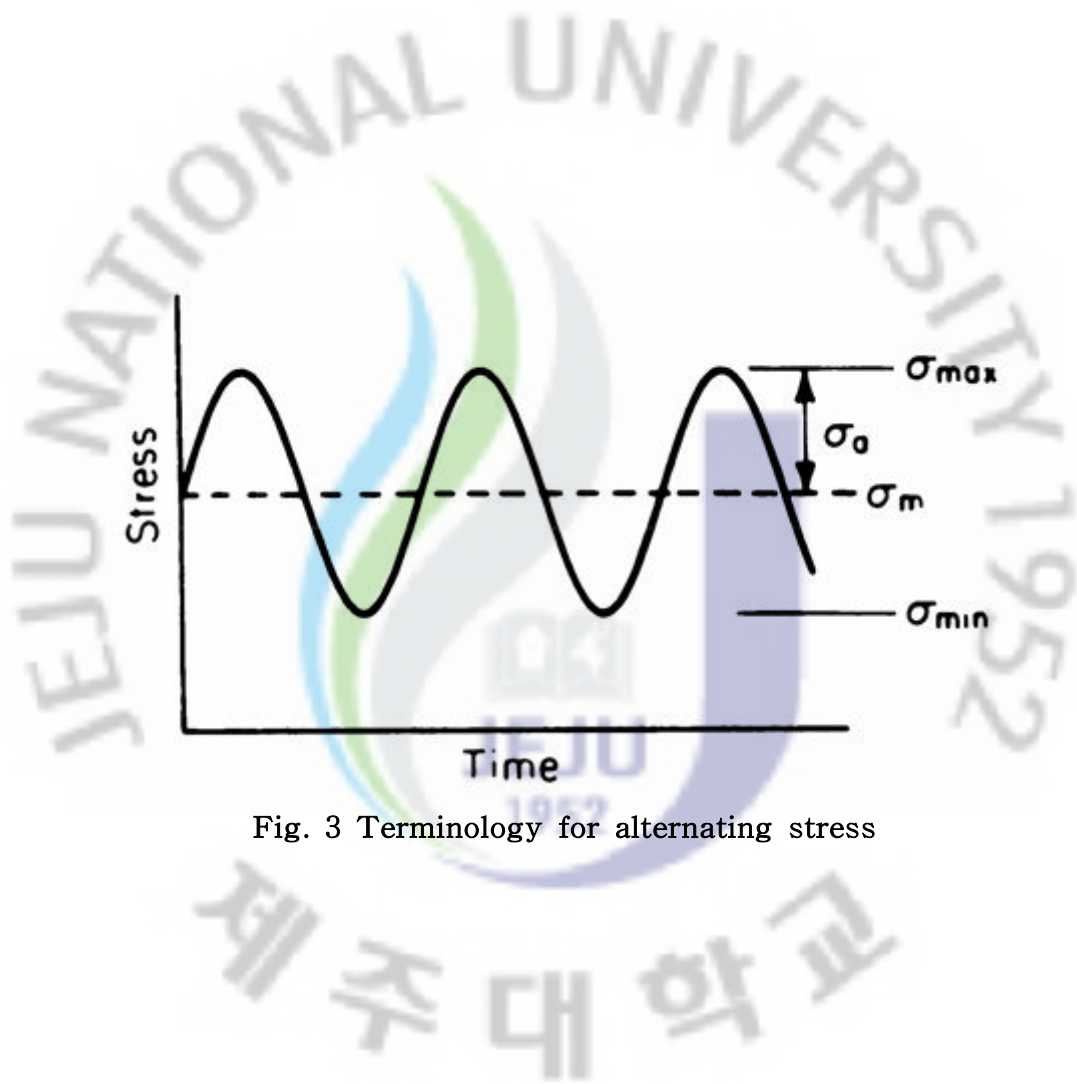


Fig. 3 Terminology for alternating stress

Ⅲ. 재료 및 시험방법

3-1 재료 및 시험편

마그네슘 합금은 Mg-Al-Zn 계와 Mg-Zn-Zr 계의 두 종류로 나눌 수 있다. 본 실험으로 사용하는 AZ31B는 Al을 3%, Zn을 1% 함유한다. Al은 기계적 성질을 개선하는 효과가 있으며 Zn은 내식성 및 강도를 개선하는 효과가 있다. 본 실험에 사용한 재료는 AZ31B 마그네슘합금 압연재로 그 화학 성분을 Table 2에 나타내었다.

한편, 재료의 기계적 성질을 평가하기 위하여 인장시험을 행하였다. 인장시험편은 Fig. 4와 같은 치수로 가공하였으며 만능재료시험기(Zwick/Roell 1494;10KN)를 사용하여 초기 변형률속도 $5 \times 10^{-4} m/sec$ 로 시행한 후, 인장강도, 항복강도 및 연신율을 측정하여 Table 3 및 Fig. 5에 나타내었다. 항복강도는 0.2% 내력을 이용하여 구하였다.

Table 2 Chemical composition of AZ31B (wt.%)

Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	other
2.5 ~ 3.5	0.6 ~ 1.4	0.2 ~ 1.0	Max 0.10	Max 0.005	Max 0.04	Max 0.005	max 0.3

Table 3 Mechanical properties

	σ_B (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	Elongation (%)
LT	255.0	176.9	22.2
TL	256.2	177.6	22.5

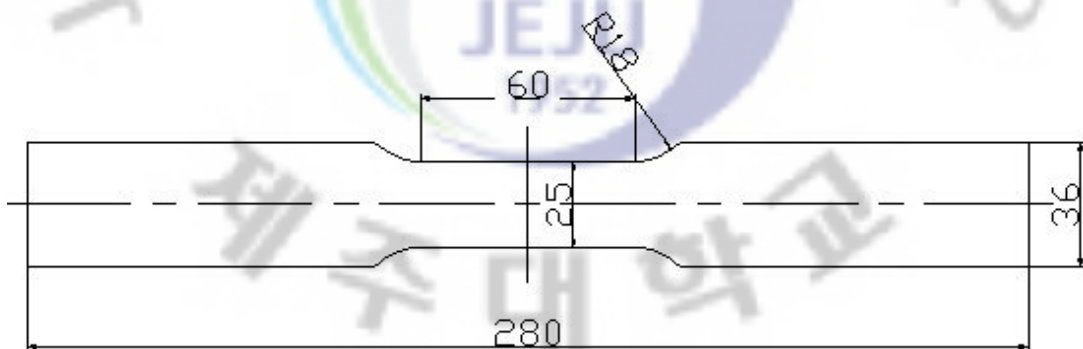
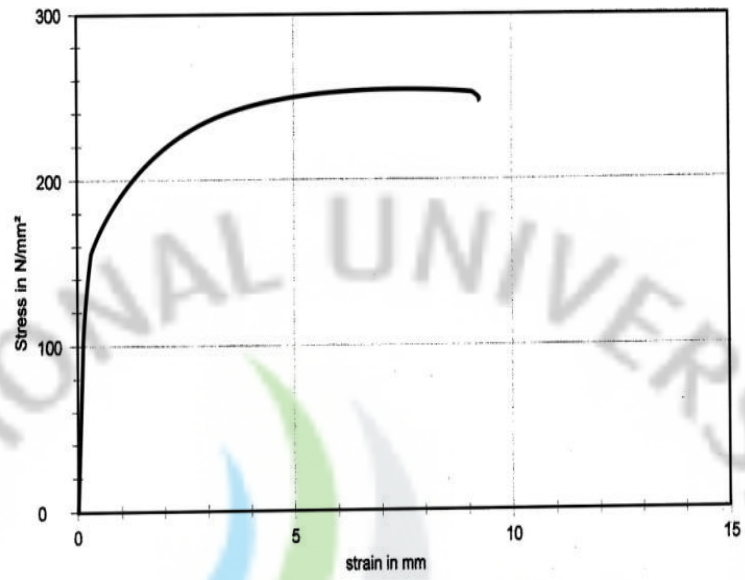
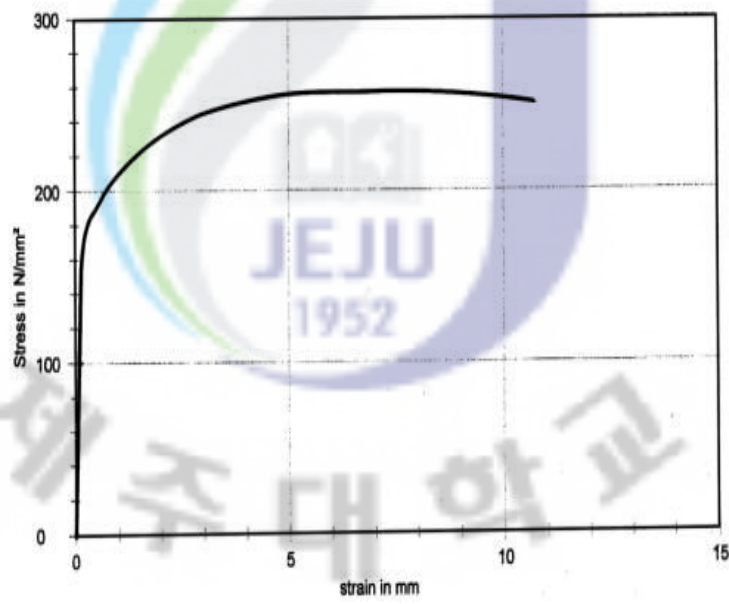


Fig. 4 Tensile test specimen



(a) LT



(b) TL

Fig. 5 Stress-strain curve

3-2 전기화학실험

전기화학 실험은 Fig. 6과 같이 전위차계(Wonatech Co. WPG100)를 이용하여 동전위분극측정방법(Potentio dynamic)으로 조사하였고, 그림에서 보듯이 기준전극은 포화칼로멜전극(Saturated calomel electrode; SCE)을, 대극은 흑연탄소봉을 사용하였다. 따라서 전위는 포화칼로멜전극에 대한 값이다. 분극전위의 구간은 $-0.8 \sim +0.8V$ 이며, 이때 Scan rate는 $0.2mV/s$ 로 주사하였으며, 실험용액은 1~3% NaCl용액과 증류수를 이용하였다. 분극실험용 시험편은 노출면적을 $1cm^2$ 으로 하였고, 그이외의 표면은 에폭시 수지로 피복하여 방식처리 하였다.

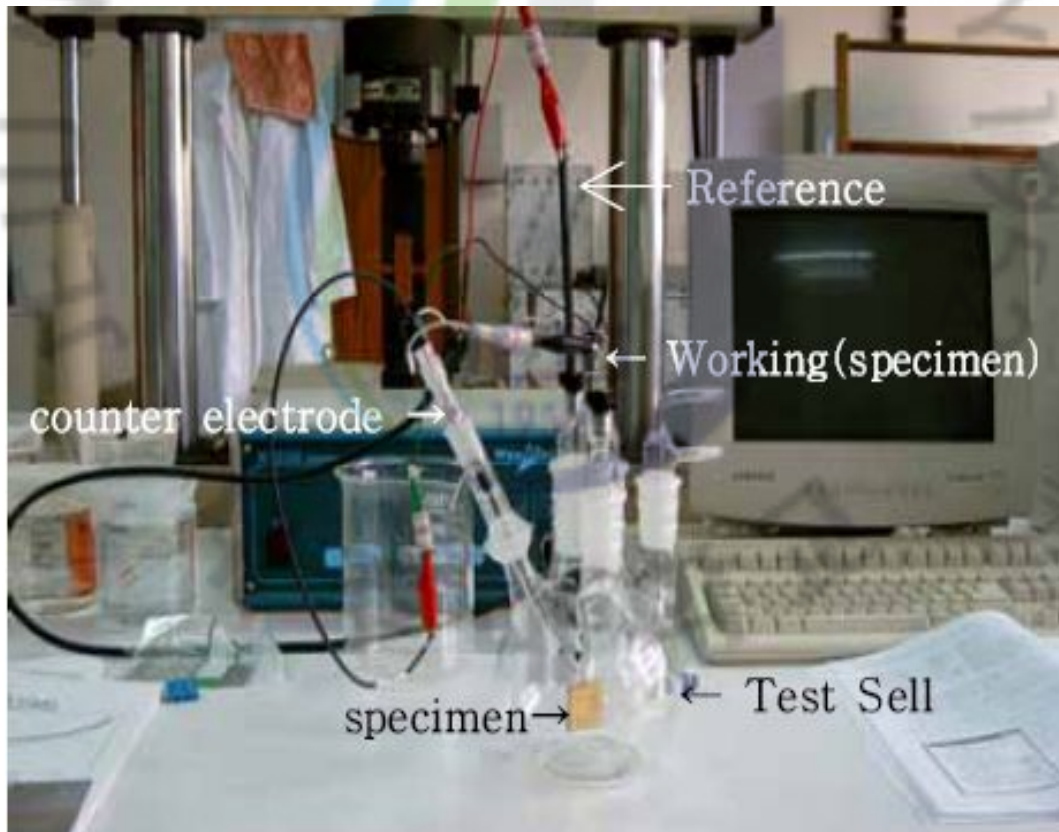


Fig. 6 Potentiostat and test cell

3-3 피로균열성장 실험

피로균열성장 시험편은 Fig. 7과 같은 형상 및 치수로 가공한 CT 시험편이다. 압연재는 일반적으로 이방성이 있기 때문에 응력축과 압연방향과의 관계가 중요하다. 따라서 압연방향과 응력축이 평행한 것을 LT재, 수직인 것을 TL재로 하여 두 종류의 시험편을 제작하였다. Fig. 8에 이방성을 고려한 시험편형상을 나타내었다.

피로시험을 위한 실험장치는 전기유압식(Electrohydraulic servo_pulser) 피로시험기(EHF-ED10-20L)를 사용하였다. 시험기 및 주변기기는 Fig. 9에 나타내었다.

피로 균열 성장 시험에 있어서 CT시험편의 노치부는 가공잔류응력을 방지하기 위하여 와이어컷 방전가공기를 이용하였으며, 노치형상이 균열성장에 미치는 영향을 제거하기 위하여 노치선단에서 3mm 예비균열을 발생시켰다.[12]

본 실험에 있어서 부하방식은 하중제어방식으로 하였으며 하중반복속도 10Hz의 정현파형으로 응력비 $R=0.1$ 과 $R=0.7$ 로 실온, 대기 중에서 실험을 행하였다.

균열성장 길이는 컴플라이언스법에 의하여 자동계측 하였으며 균열을 가진 시험편의 컴플라이언스 λ 는 다음 식으로 정의된다.

$$\lambda \equiv \lambda \left(\frac{a}{W} \right) = \frac{V}{P} \quad (8)$$

여기서 a 는 균열길이, W 는 시험편 폭, P 는 하중, V 는 하중점 변위이다. 균열길이의 증가에 따른 에너지 해방률 ζ 와 컴플라이언스 변화율 $d\lambda/da$ 의 관계는 (9) 식으로 표현할 수 있다.

$$\zeta = \frac{P^2}{2B} \frac{d\lambda}{da} \quad (9)$$

여기에서 에너지 해방률 ζ 와 응력확대계수 K 의 관계는 (11)식과 같으며 (9)식

과 (10)식으로 유도된다.

$$K^2 = E\zeta \quad (10)$$

여기에서 E 는 영률(Young's modulus)이다.

$$K = E \frac{P^2}{2B} \frac{d\lambda}{da}^{1/2} \quad (11)$$

CT시험편을 예로 취하면 W, B, E 가 일정하므로 (11)식은 아래와 같이 변형이 가능하다.

$$\frac{K}{P} BW^{1/2} = \left[\frac{1}{2} \frac{d(BE\lambda)}{d(a/W)} \right]^{1/2} \quad (12)$$

(12)식에서

$$BE\lambda = \int \frac{2K^2 B^2 W}{P^2} d(a/W) \quad (13)$$

또는,

$$\frac{a}{W} = \int \frac{P^2}{2K^2 B^2 W} d(BE\lambda) \quad (14)$$

$$\frac{a}{W} = C_0 + C_1 U_x + C_2 U_x^2 + C_3 U_x^3 + C_4 U_x^4 + C_5 U_x^5 \quad (15)$$

$$U_x = \frac{1}{\sqrt{(BE\lambda) + 1}} \quad (16)$$

컴플라이언스에 의한 균열길이는 위 (15), (16)식에 의해 환산하였고 그 계수들을 Table 4에 나타내었다.

ΔK 는 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.6a/W - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (17)$$

Table 4 Regression coefficient

C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
1.0010	-4.6695	18.460	-236.82	1214.9	-2143.6

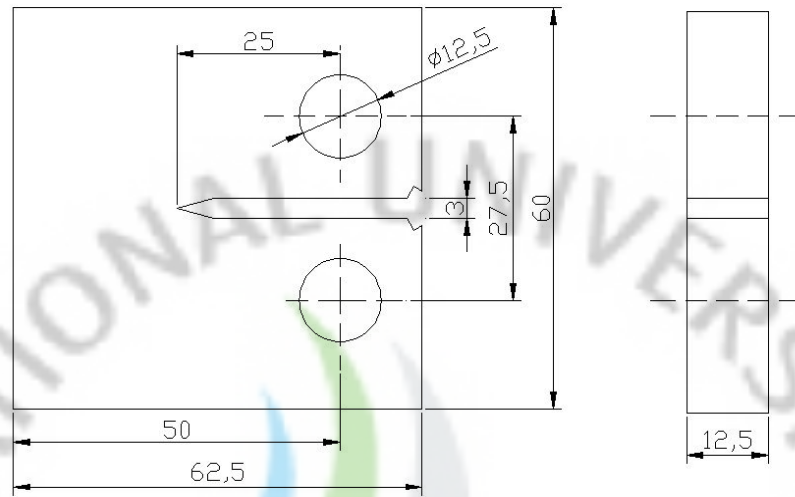


Fig. 7 Compact tension specimen

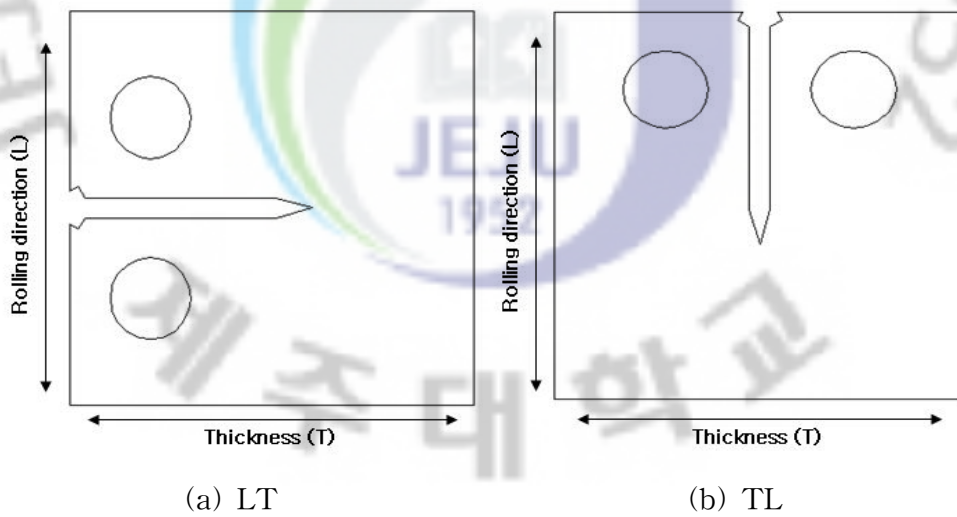


Fig. 8 Anisotropy of specimen



Fig. 9 Fatigue testing machine

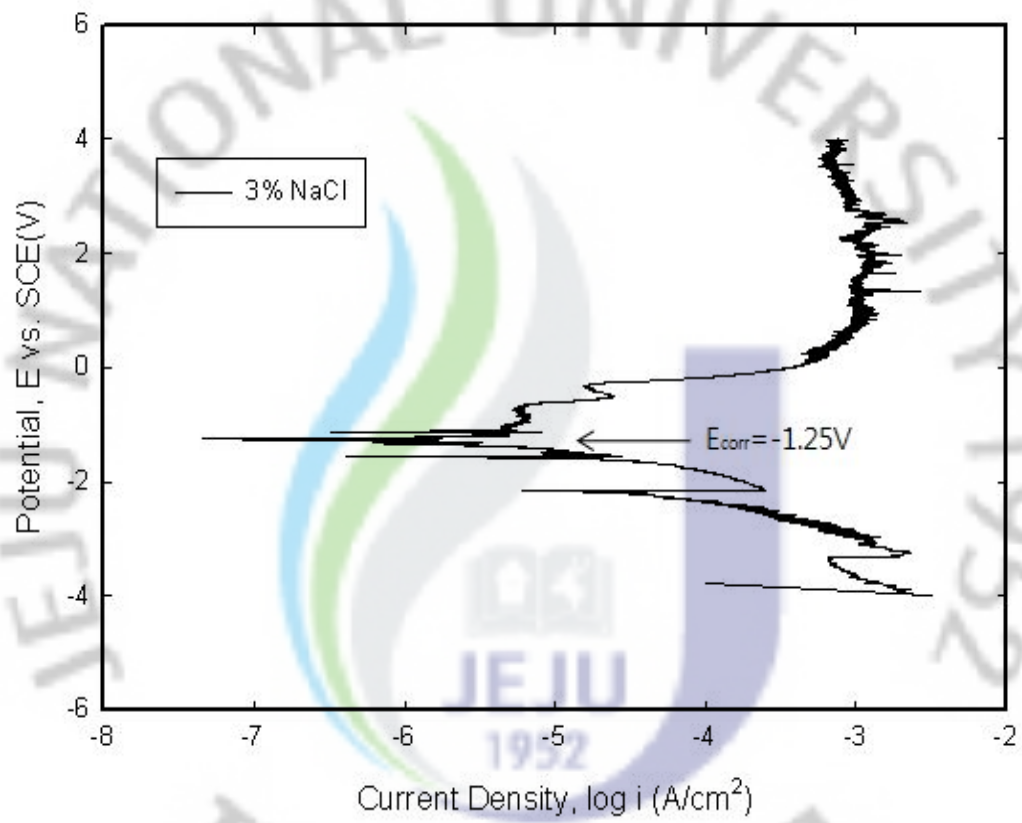
IV. 결과 및 고찰

4-1 분극특성

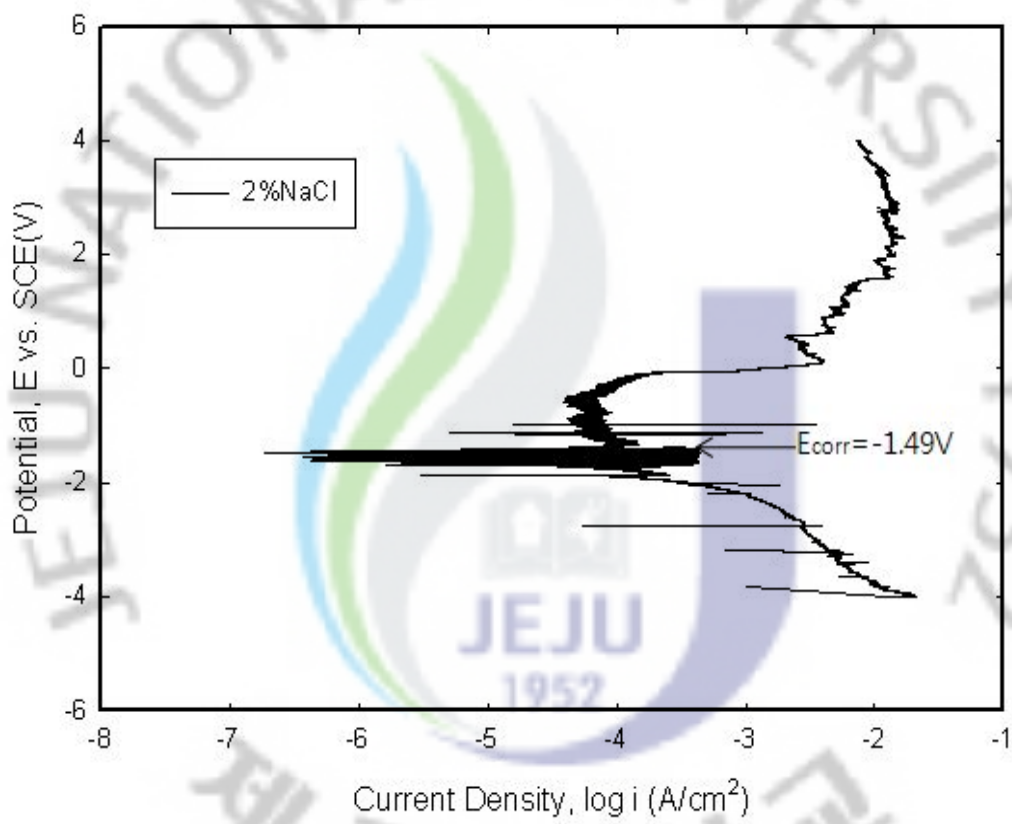
AZ31B 마그네슘합금의 부식전위 측정 결과를 Table 5와 Fig. 10에 각 시험편들의 분극특성을 나타낸다. Fig. 10(a)의 3% NaCl용액의 경우 부식전위는 $-1.25\text{V}(\text{vs. SCE})$ 이다. Fig. 10(b)의 2% NaCl용액의 경우 부식전위는 $-1.49\text{V}(\text{vs. SCE})$ 로 나타났으며 또한 Fig. 10(c)의 증류수의 경우에는 부식전위가 $-1.05\text{V}(\text{vs. SCE})$ 이다.

Table 5 Corrosion electrode

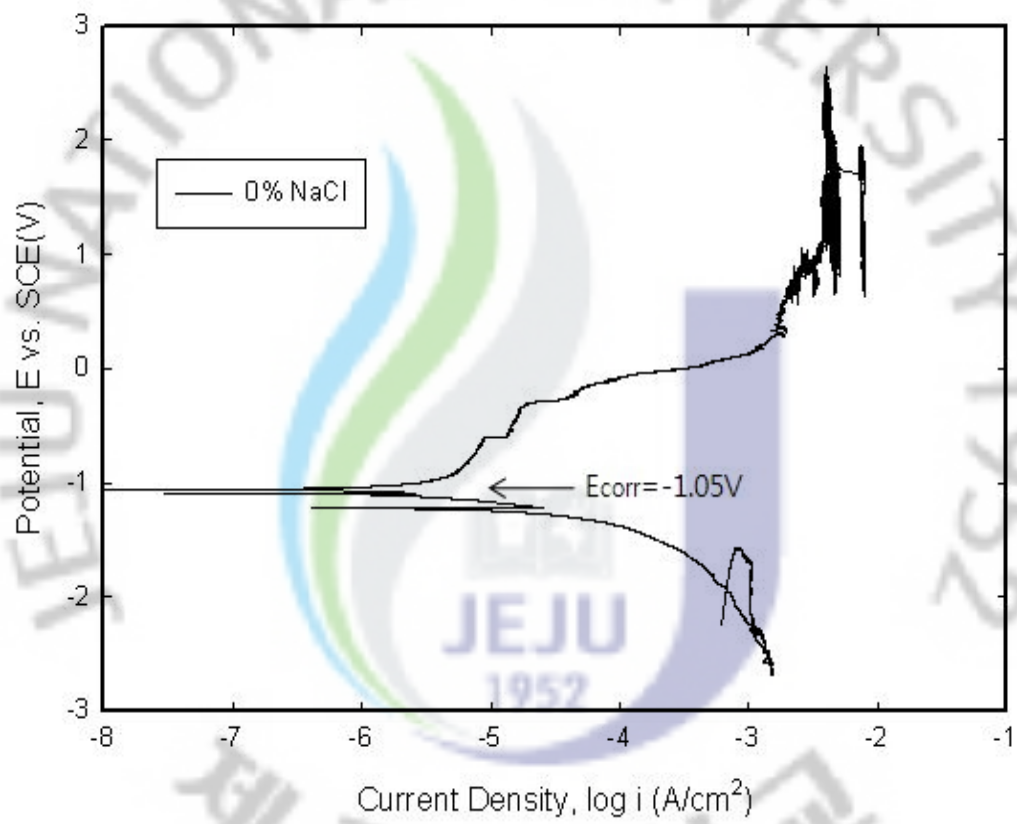
NaCl	3%	2%	Distilled water
$E_{\text{corr}}(\text{V})$	-1.25	-1.49	-1.05



(a) 3% NaCl



(b) 2% NaCl

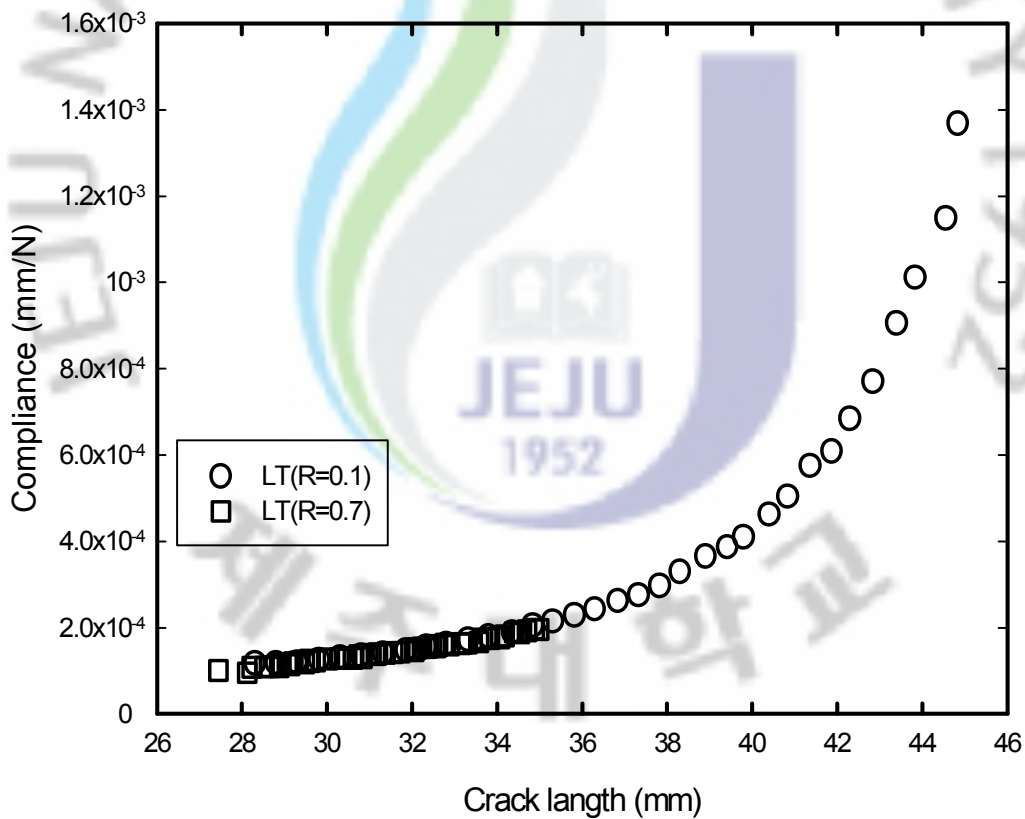


(c) distilled water

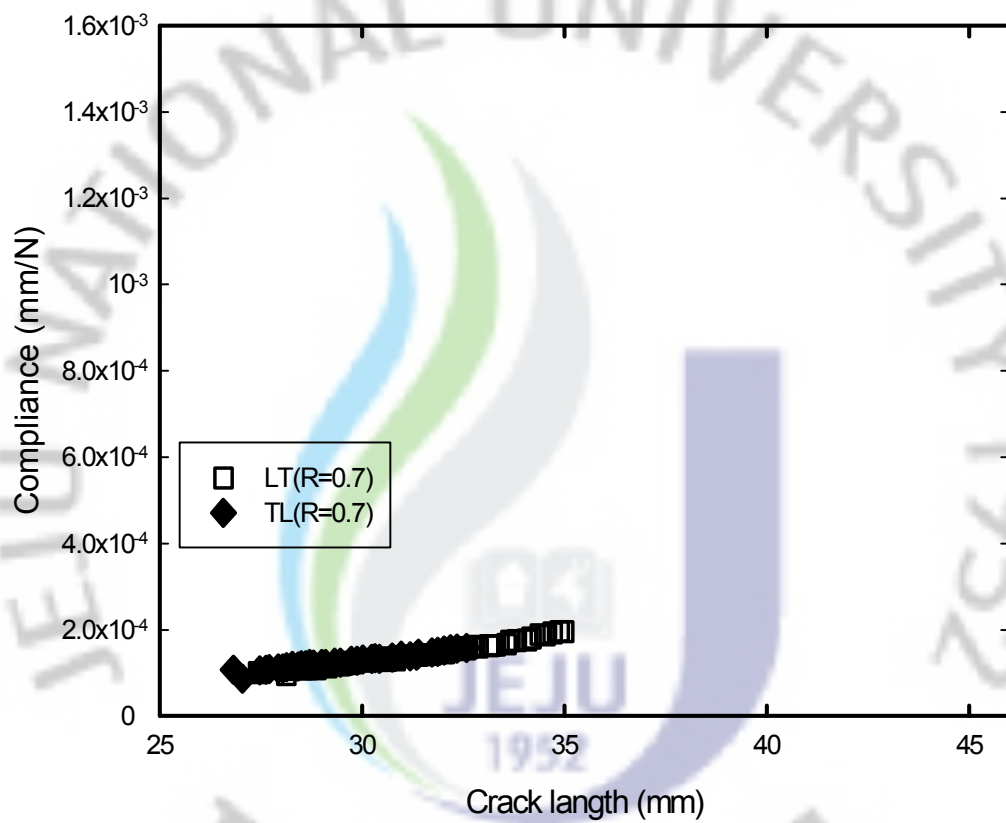
Fig. 10 Polarization behavior

4-2 균열길이와 컴플라이언스와의 관계

Fig. 11은 균열길이와 컴플라이언스와의 관계를 나타낸다. 균열길이와 컴플라이언스와의 관계를 보면 모든 시편에서 서로 같은 양상을 보이고 있으며 R=0.1인 경우 균열길이가 28mm에서 35mm까지는 서서히 증가하다가 그 이후부터 급격히 증가하는 양상을 보이고 있다. R=0.7인 경우에는 0.1일 때와 같은 양상을 보이고 있으나 균열길이가 35mm부근에서 과단이 일어났다.



(a) LT



(b) R=0.7

Fig. 11 Relationships between compliance and crack length

4-3 피로균열성장 특성

Fig. 12는 재료의 이방성을 고려하여 응력비를 0.1과 0.7로 변화시켰을 때 AZ31B 마그네슘합금의 피로균열성장속도를 나타낸 것이다.

Fig. 12에서 응력비의 영향은 LT재 TL재 모두 R=0.7의 경우가 R=0.1의 경우보다 저 ΔK 영역에서 피로균열성장속도가 크며 고 ΔK 영역으로 갈수록 응력비의 영향이 줄어드는 경향을 보이고 있다. 그 증가폭이 LT재가 TL재 보다 크다. 고응력비가 저응력비보다 피로균열성장속도가 가속되는 것은 균열닫힘(Crack closure) 현상 때문이다.

또한, 이방성에 대하여는 동일한 응력비 R=0.1의 경우 피로균열성장속도가 TL재가 LT재보다 약간 크며 R=0.7의 경우는 LT와 TL이 비슷하다.

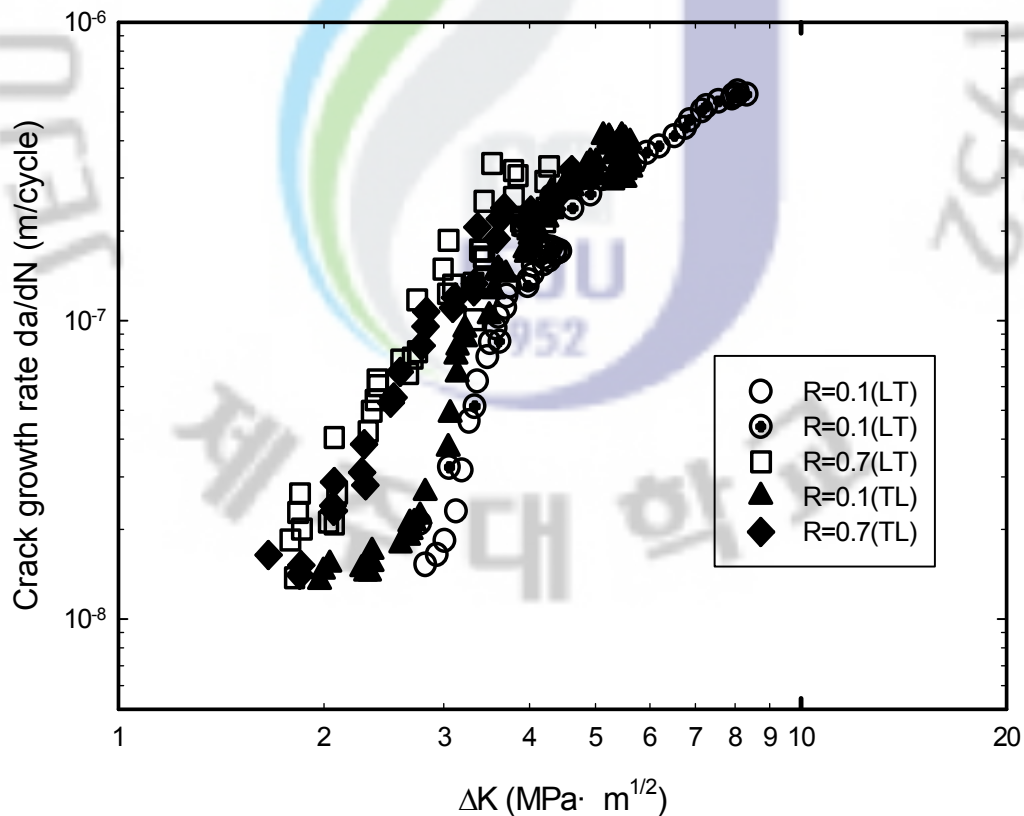
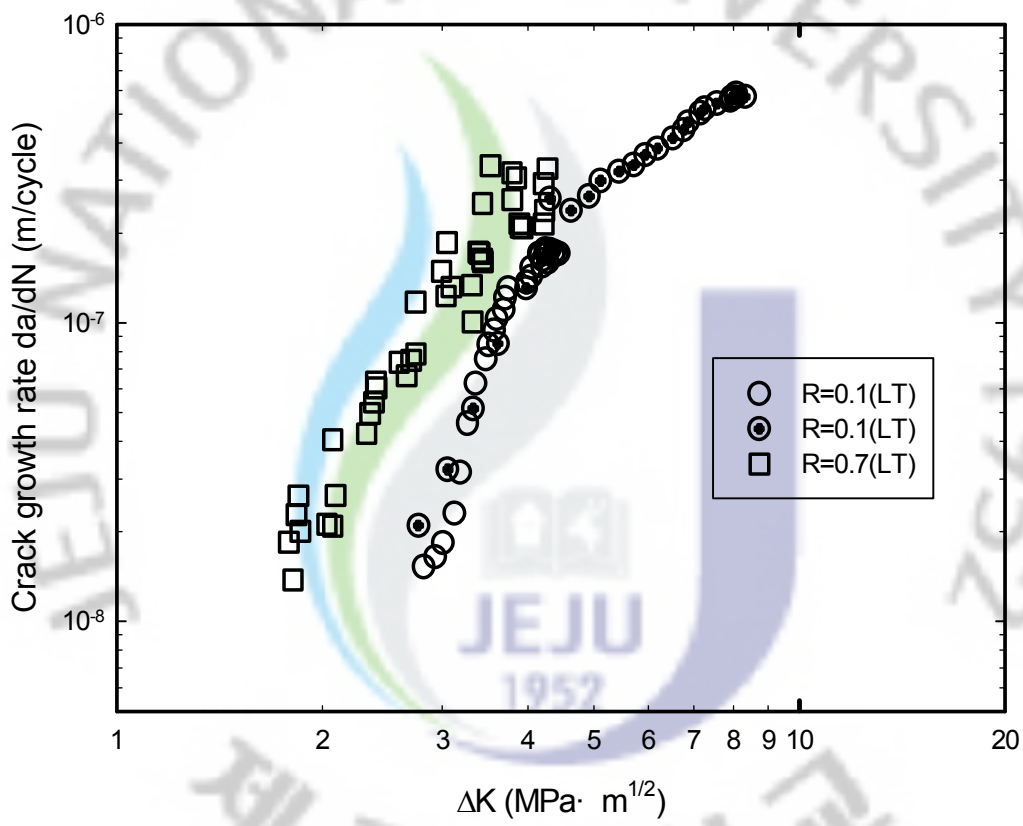


Fig. 12 FCP rates of the AZ31B alloy

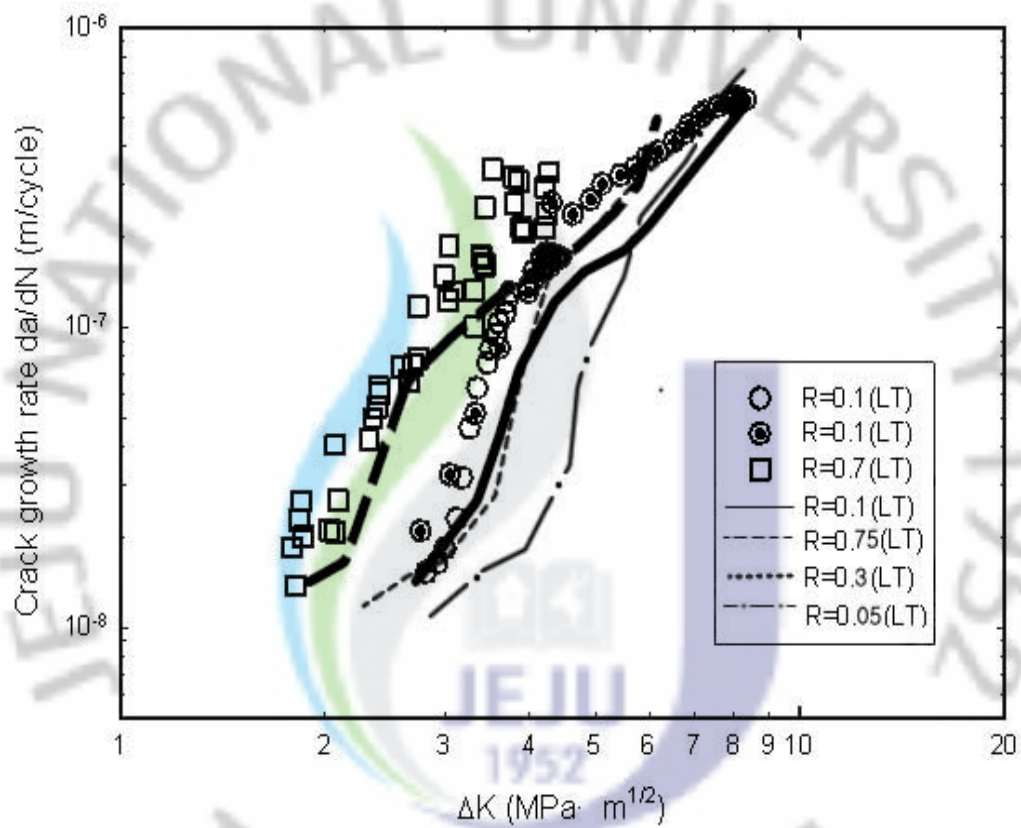
4-3-1 응력비에 따른 피로균열성장 특성

응력비에 따른 피로성장특성을 비교해본 결과를 Fig. 13와 Fig. 14에 나타낸다. Fig. 13(a)와 Fig. 14(a)는 각각 LT재와 TL재에 대하여 응력비를 0.1과 0.7로 달리하여 실험한 결과를 나타내었으며 그 결과로서 LT재 TL재 모두 저 ΔK 영역에서는 응력비가 높을수록 피로균열성장속도가 가속되는 현상을 보이고 있으나 저 ΔK 영역으로 갈수록 그 영향이 점차 줄어들어 가는 것으로 나타났다. Fig. 13(b)와 Fig. 14(b)에 송의 R=0.1, 0.75에서의 결과와 小野의 R=0.05, 0.3에서의 결과를 함께 나타내었다. 송의 R=0.1은 실선, R=0.75는 점선으로 나타내었고 小野의 LT재에 대한 R=0.3은 파선, R=0.05는 일점쇄선으로 나타내었고 TL재에 대한 R=0.3은 이점쇄선, R=0.05는 이점 점선으로 나타내었다. 두 보고 모두 균열단힘으로 인한 응력비에 따른 균열성장속도의 차이를 보이고 있으며 저응력비의 경우가 고응력비의 경우보다 고 ΔK 영역으로 갈수록 균열단힘으로 인한 영향이 줄어들어 응력비의 영향이 줄어들어 가는 경향을 보이고 있다.[13-14]

한편, 小野의 결과에 비해 본 실험의 피로균열성장속도가 가속되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 실험에 사용된 응력비의 차이에 의해 나타난 차이점으로 판단된다. 또한 小野의 보고에 사용된 재료가 AZ31M 마그네슘합금으로 합금의 종류에 의해 피로균열성장속도가 다르게 나타나는 것으로 판단된다. 송의 결과와 비교해본 결과로는 피로균열성장속도가 조금 가속되어 있으나 비슷한 경향을 보이고 있다.

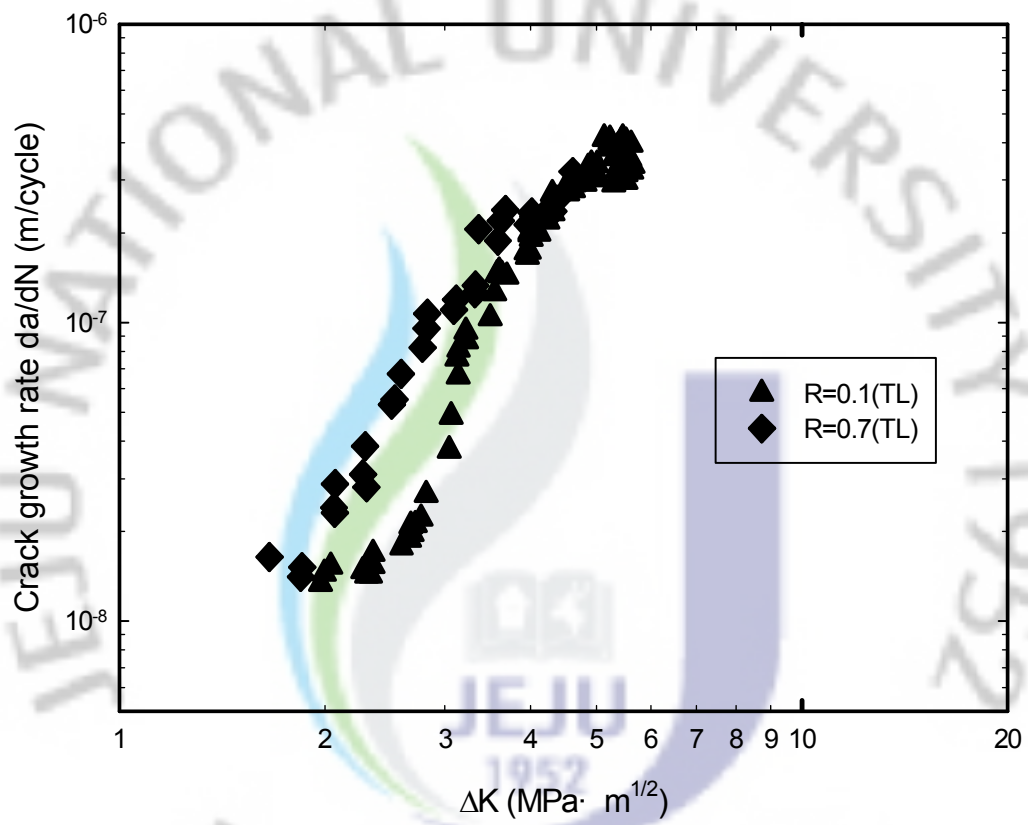


(a)

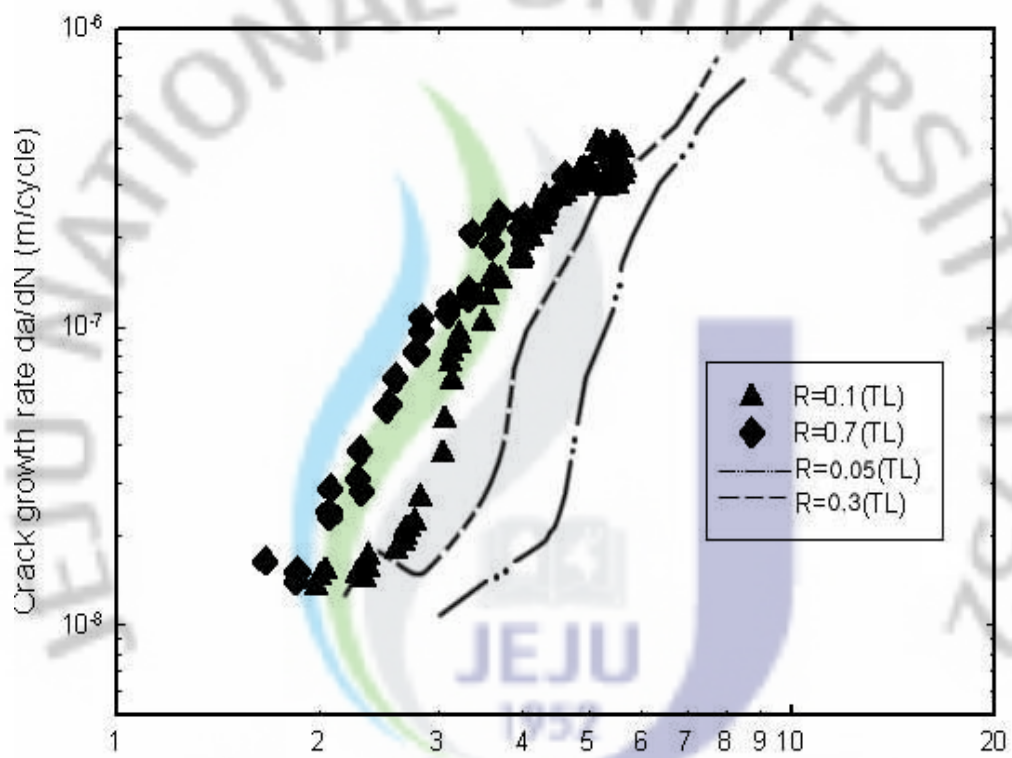


(b)

Fig. 13 Effect of stress ratio of on FCP rates of the AZ31B alloy (LT)



(a)



(b)

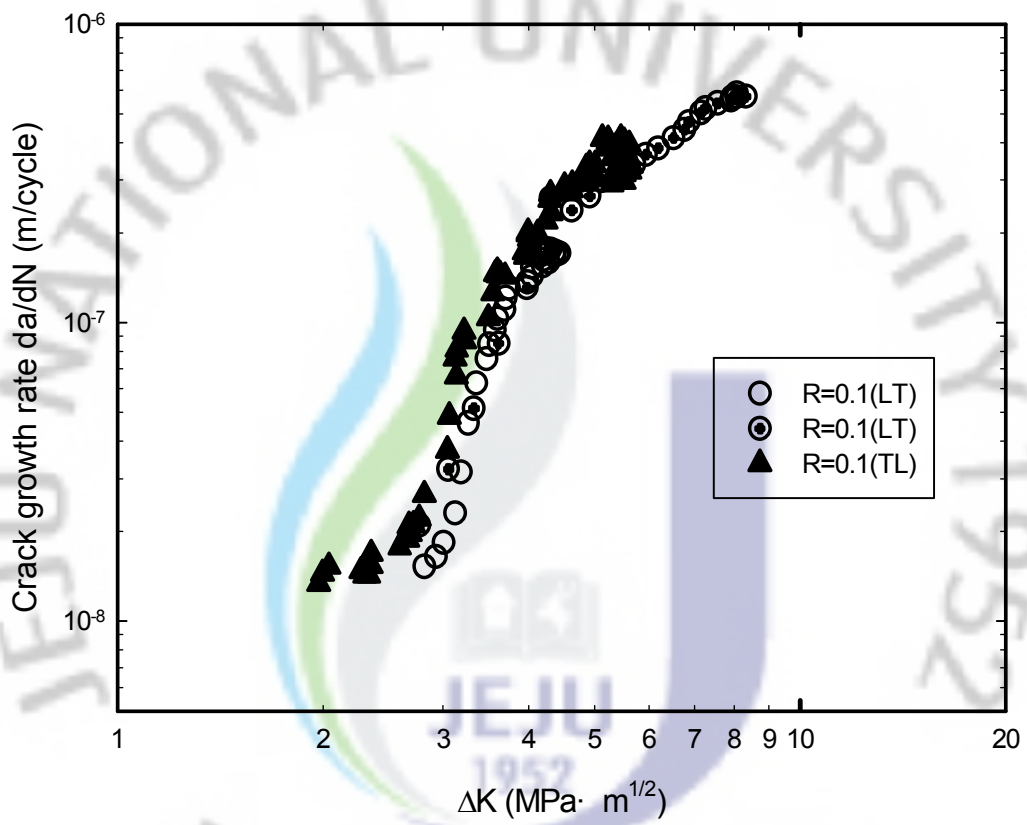
Fig. 14 Effect of stress ratio of on FCP rates of the AZ31B alloy (TL)

4-3-2 재료의 이방성에 대한 피로균열성장 특성

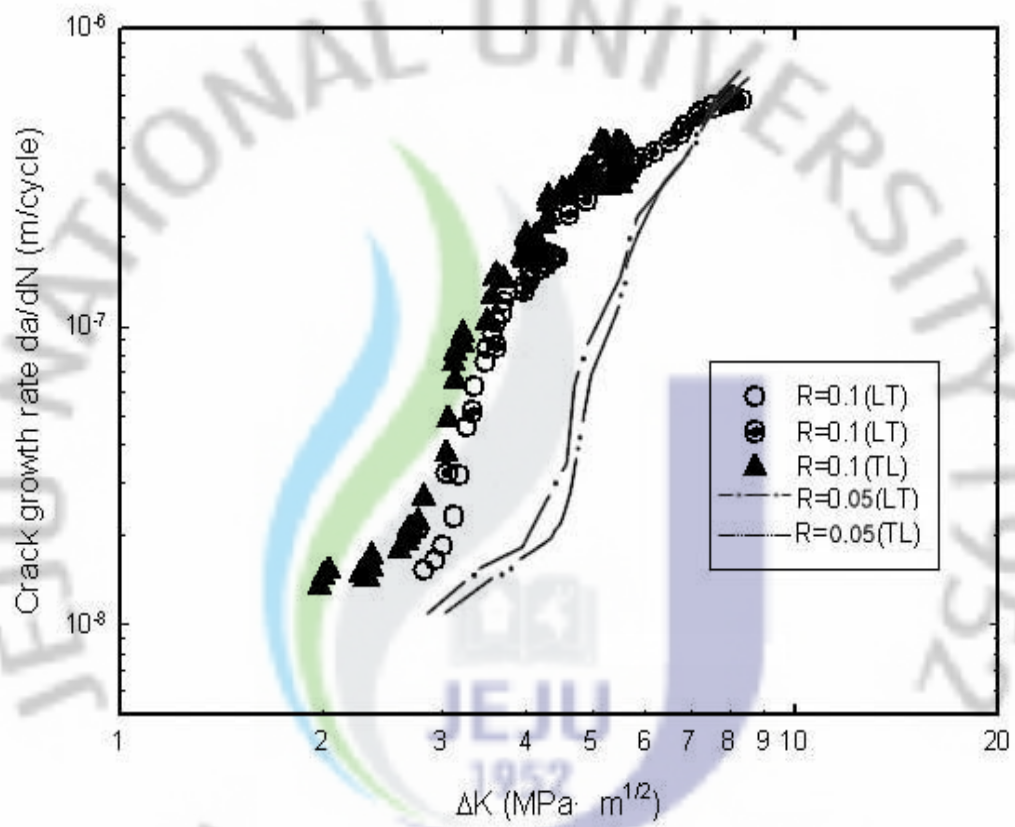
재료의 이방성이 피로균열성장 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 LT재와 TL재의 실험을 실시한 결과를 Fig. 15와 Fig. 16에 나타내었으며 小野의 결과를 Fig. 15(b)와 Fig. 16(b)에 함께 나타내었다.

그 결과로서 재료의 이방성에 대한 피로균열성장속도에 미치는 영향은 $R=0.1$ 에서는 저 ΔK 하에서는 TL재가 LT재보다 피로균열성장속도가 약간 크나 고 ΔK 하에서는 비슷해지는 양상을 보이고 있으며 $R=0.7$ 에서는 LT재, TL재 양방향 모두 비슷한 양상을 보이고 있다. 한편, $R=0.1$ 에서 피로균열성장속도가 미세한 차이를 보이고 있으나 그 값이 현저하게 작으므로 재료의 이방성에 대한 영향은 적은 것으로 판단된다.

小野의 결과에서도 마찬가지로 재료의 이방성에 대한 영향은 적은 것으로 나타났다.

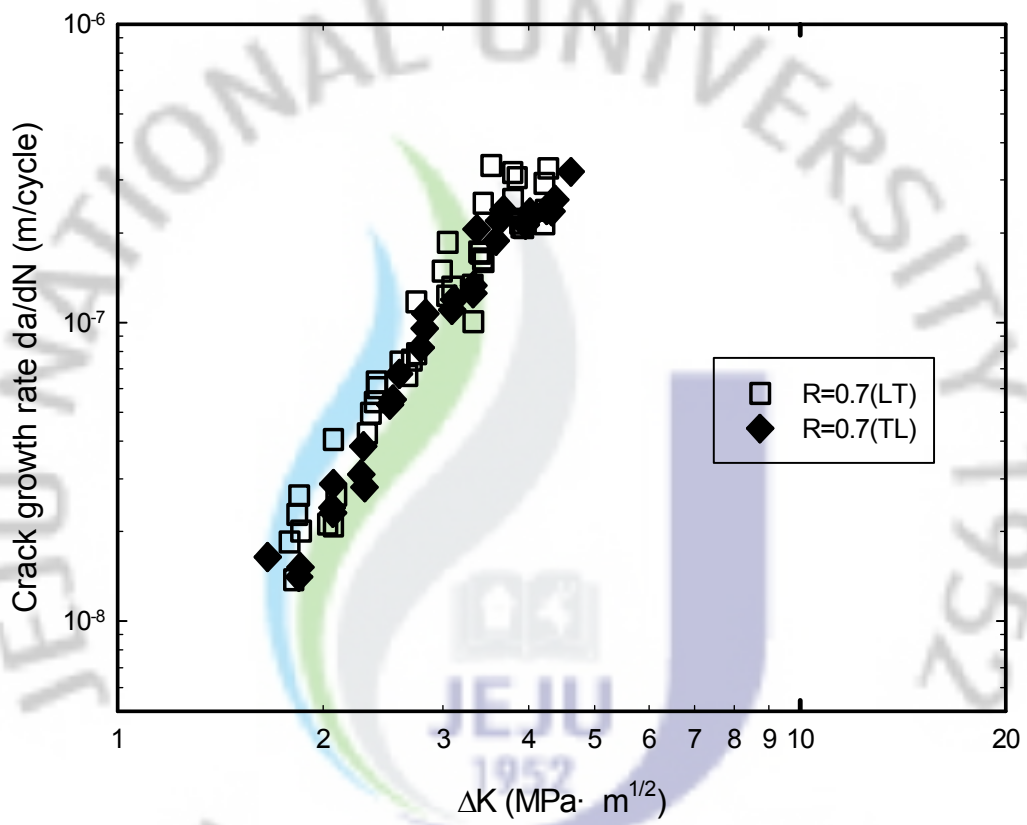


(a)

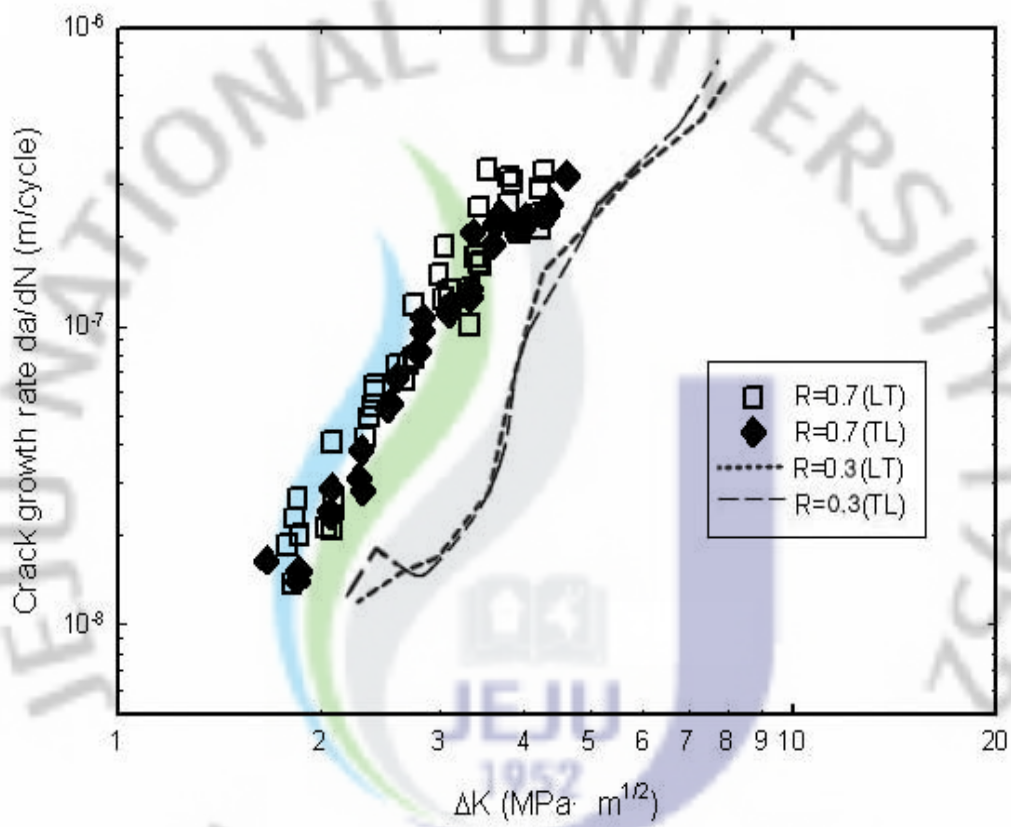


(b)

Fig. 15 Effect of anisotropy of on FCP rates of the AZ31B alloy (LT)



(a)



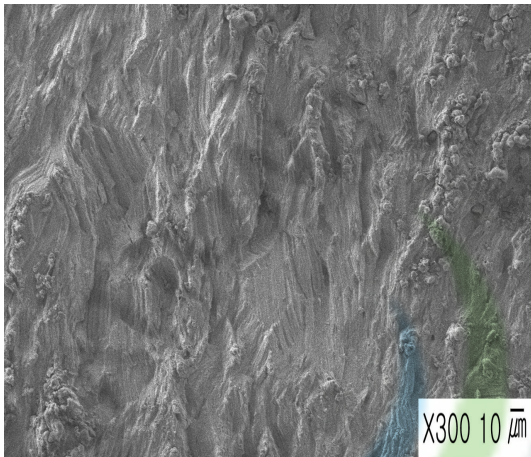
(b)

Fig. 16 Effect of anisotropy of on FCP rates of the AZ31B alloy (TL)

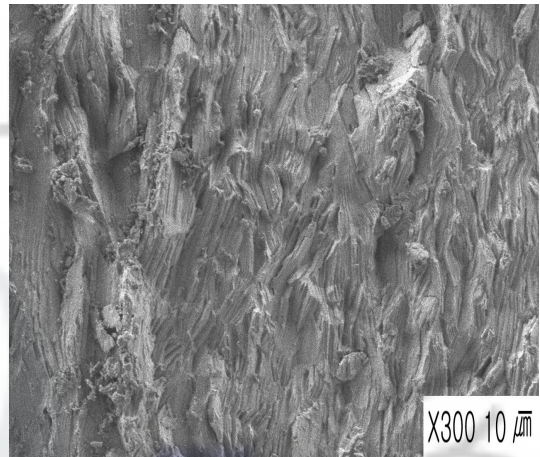
4-4 파단면 관찰

Fig. 17 은 피로시험 종료 후 전자주사현미경을 이용하여 관찰한 파단면의 형상으로서 300배의 저배율과 500배의 고배율의 두가지에 대하여 단면 촬영을 행하여 나타내었다. 저 ΔK 영역에서는 준벽개파면(quasi-cleavage fracture)양상이 나타났으며 고 ΔK 영역에서는 직선을 가진 facet 양상이 나타났다.

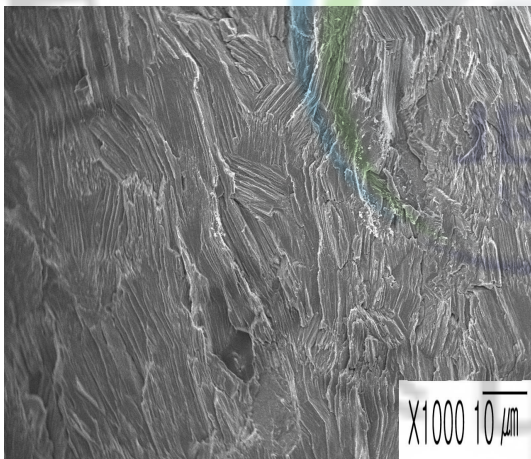
facet 양상은 곧고 평행한 균열표면이 나타나는 것이 특징이며 준벽개파면 양상은 금속의 결정립이 균열표면에 나타나는 것이 특징이다. Fig. 17 (a)와 (c)를 보면 R=0.1일 때 이 양상이 뚜렷하며 고 ΔK 영역에서는 LT재가 TL재 보다 facet 이 뚜렷이 나타나며 Fig. 17 (b), (d)를 보면 R=0.7일 때는 저 ΔK 영역에서는 준벽개파면 양상을 보이고 있으며 고 ΔK 영역에서는 facet이 나타나고 있으나 R=0.1 보다는 그 양상이 덜한 것으로 나타났다.



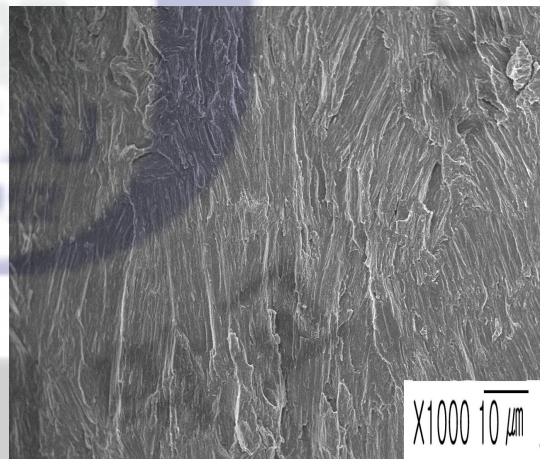
$$\Delta K = 2.93 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$



$$\Delta K = 4.27 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

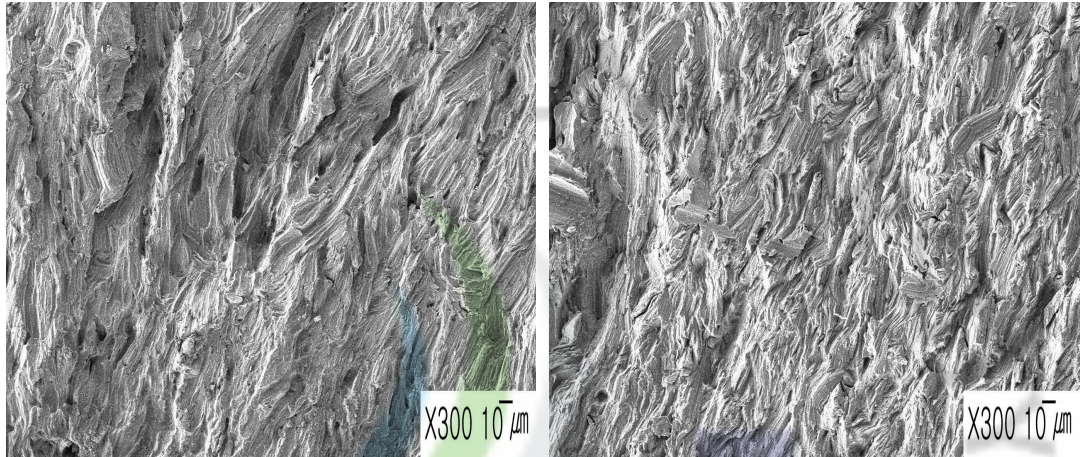


$$\Delta K = 2.93 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$



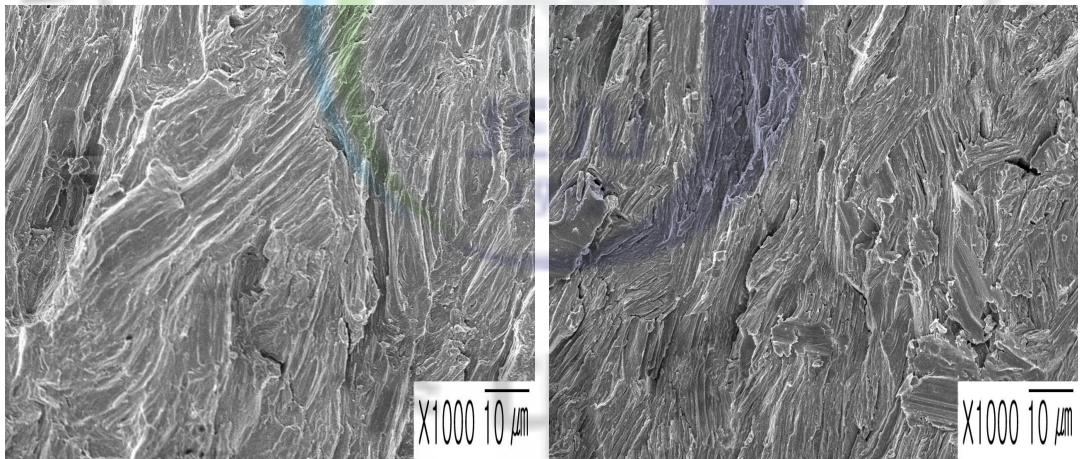
$$\Delta K = 4.27 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

(a) LT(R=0.1)



$$\Delta K = 2.08 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

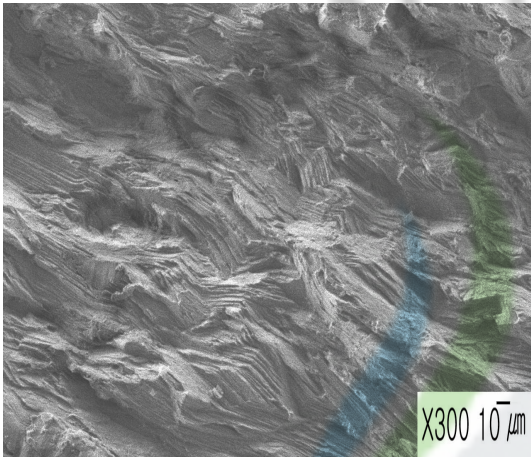
$$\Delta K = 4.35 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$



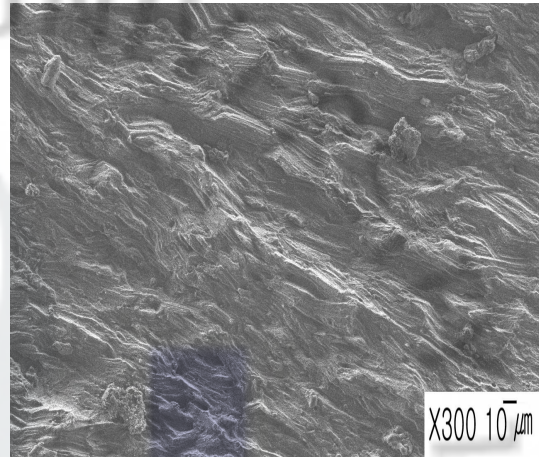
$$\Delta K = 2.08 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

$$\Delta K = 4.35 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

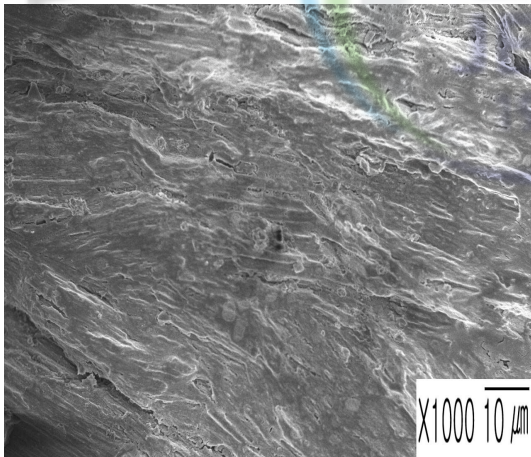
(b) LT(R=0.7)



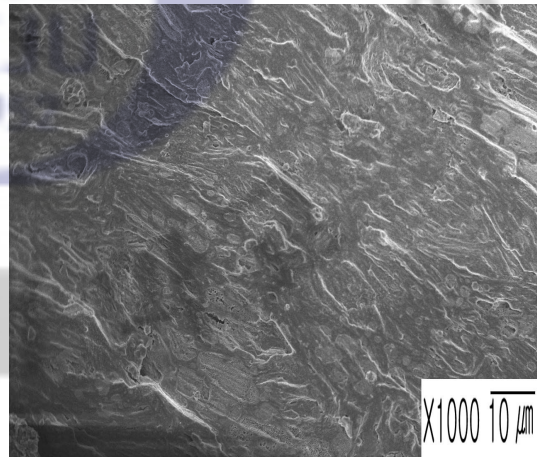
$$\Delta K = 2.59 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$



$$\Delta K = 3.54 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$



$$\Delta K = 2.59 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$



$$\Delta K = 3.54 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

(c) TL(R=0.1)

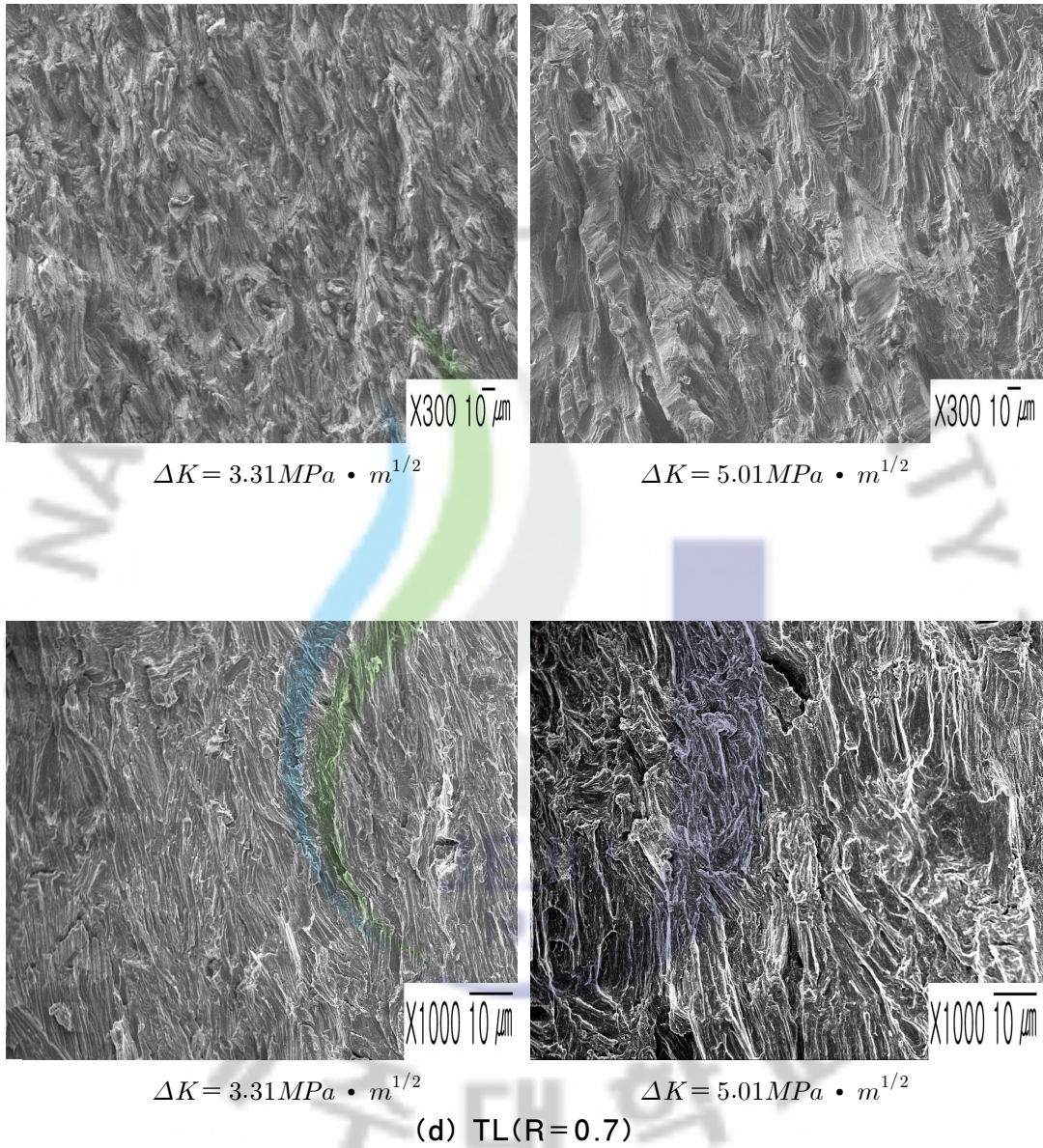


Fig. 17 SEM images of fatigue fracture surface

V. 결 론

AZ31B 마그네슘합금 압연재에서 응력비와 재료의 이방성이 피로균열성장에 미치는 영향을 조사하기 위하여 압연방향에 대해 시편을 LT, TL방향으로 가공하고 응력비 R값을 변화시키며 피로균열성장속도를 측정하고 재료의 부식성을 평가하기 위해 동전위측정법을 이용한 분극실험을 행한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. AZ31B 마그네슘합금의 부식전위 측정 결과는 3% NaCl용액의 경우 부식전위는 -1.25V(vs. SCE) 이다. 2% NaCl용액의 경우 부식전위는 -1.49V(vs. SCE) 로 나타났으며 또한 증류수의 경우에는 부식전위가 -1.05V(vs. SCE) 이다.
2. AZ31B 마그네슘합금의 이방성에 대한 피로균열성장속도에 미치는 영향은 $R=0.1$ 에서는 저 ΔK 하에서는 TL재가 LT재보다 피로균열성장속도가 약간 크나 고 ΔK 하에서는 비슷해지는 양상을 보이고 있으며 $R=0.7$ 에서는 LT재, TL재 양방향 모두 비슷한 양상을 보이고 있다. 한편, $R=0.1$ 에서 피로균열성장속도가 미세한 차이를 보이고 있으나 그 값이 현저하게 작으므로 재료의 이방성에 대한 영향은 적은 것으로 판단된다.
3. 컴플라이언스와 균열길이와의 관계를 비교해 본 결과 전구간에서 같은 양상을 보이고 있으며 균열길이가 약 38mm부터는 급격하게 성장하였다.
4. 응력비에 따른 균열성장특성은 LT, TL재 모두 저 ΔK 영역에서는 하중비가 클수록 균열성장속도가 가속화 되는 현상을 보이고 있으며 고 ΔK 영역에서는 균열성장속도가 점차 비슷해지는 경향을 보인다. 이러한 현상은 균열닫힘(crack closure)현상 때문으로 판단된다.
5. 피로파괴가 일어난 후 균열단면을 전자주사현미경을 이용하여 관찰한 결과,

저 ΔK 영역에서는 준벽개파면(quasi-cleavage fracture surface)양상이 나타났으며 고 ΔK 영역에서는 직선을 가진 facet 양상이 나타났다. 이러한 양상은 응력비 R=0.1일 때 뚜렷하며 R=0.7일 때는 저 ΔK 영역에서는 준벽개파면 양상을 보이고 있으며 고 ΔK 영역에서는 facet이 나타나고 있으나 R=0.1보다는 그 양상이 덜한 것으로 나타났다.



VI. 참고문헌

- [1] K. Tokaji, M. Kanakura, Y. Ishiizumi, N. Hasegawa, 2004, "Fatigue behaviour and fracture mechanism of a rolled AZ31 magnesium alloy", *International Journal of Fatigue*, 26, pp.1217~1224.
- [2] Ya. Unigovski, A. Eliszer, E. Abramov, Y. Snir, E.M. Gutman, 2003, "Corrosion fatigue of extruded magnesium alloys", *Materials science & Engineering*, A360, pp.132~139.
- [3] Sotomi Ishihara, Zhenyu Nan, Takahito Goshima, 2007, "Effect of microstructure on fatigue behavior of AZ31 magnesium alloy", *Materials Science & Engineering*, A468~470, pp.214~222.
- [4] M. Fregonese, H.Idrissi, H. Mazille, L. Renaud, Y.Cetre, 2000, "Initiation and propagation steps in pitting corrosion of austenitic stainless steels: monitoring by acoustic emission", *Corrosion science*, 43, pp.627~641.
- [5] S. Hasegawa, Y. Tsuchida, H. Yano, N. Matsui, 2006, "Evaluation of low cycle fatigue life in AZ31 magnesium alloy", *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, pp.1839~1845
- [6] Marion Fregonese, Lionel Jaubert, Yves Cetre, 2007, "contribution of acoustic emission technique for monitoring damage of rubber coating on metallic surfaces Comparison with electrochemical measurements", *Progress in organic coatings*, 59, pp.239~243
- [7] M. Strarostin, S.Tamir, 2006, "New engine coolant for corrosion protection of magnesium alloys", *Materials and Corrosion*, pp.345~349
- [8] Gaia Ballerini, Ugo Bardi, Roberto Bignucolo, Giuseppe Ceraolo, 2004, "About some corrosion mechanisms of AZ91D magnesium alloy", *corrosion Science*, 47, pp.2173~2184
- [9] 한세웅, 2004, "블라스팅 공법을 이용한 소형 스크류 부식제거장치의 개발에

관한 연구”, 제주대학교 대학원 기계공학과 석사논문.

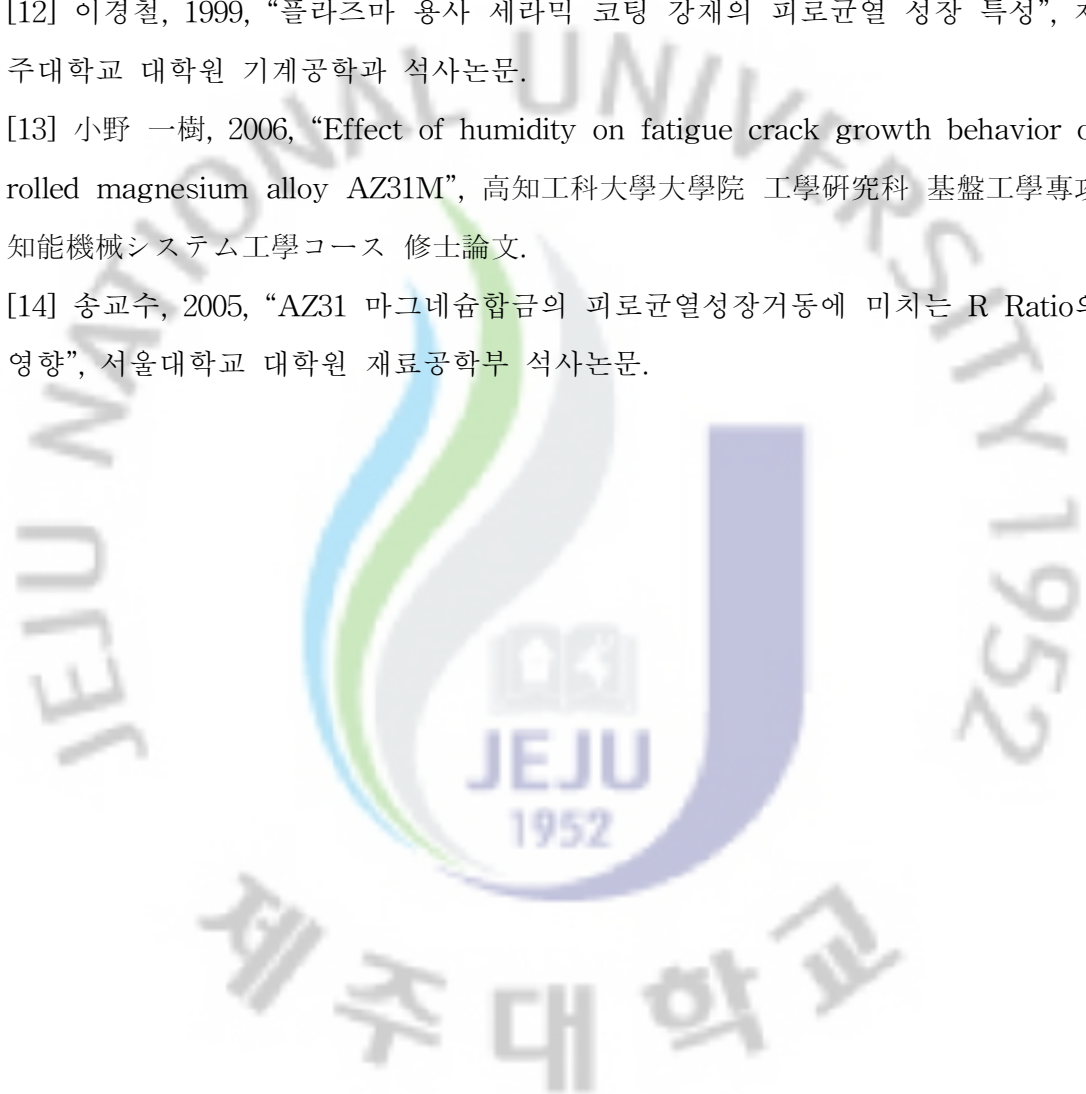
[10] 정화천, 2000, “AZ91D 마그네슘 합금의 피로균열성장거동”, 서울대학교 대학원 금속공학과 대학원 석사논문.

[11] 최용식, 한지원, 김규성, 1991, “피로성장거동의 응력비의 영향에 관한 연구”, 한국산업안전학회지, 제6권, 제3호, pp.21~26

[12] 이경철, 1999, “플라즈마 용사 세라믹 코팅 강재의 피로균열 성장 특성”, 제주대학교 대학원 기계공학과 석사논문.

[13] 小野 一樹, 2006, “Effect of humidity on fatigue crack growth behavior of rolled magnesium alloy AZ31M”, 高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻 知能機械システム工学コース 修士論文.

[14] 송교수, 2005, “AZ31 마그네슘합금의 피로균열성장거동에 미치는 R Ratio의 영향”, 서울대학교 대학원 재료공학부 석사논문.



감사의 글

처음 무엇을 해야 하는지 막연하고 두려웠던 대학원 생활이 어느덧 2년이란 시간이 지나 이렇게 학위 논문을 제출하게 되니 지난 2년의 시간들이 머릿속에서 하나하나 떠오르곤 합니다. 방향을 잡지 못하고 어리둥절하고 있는 저에게 여러 가지 조언과 많은 도움을 주신 김귀식 교수님께 우선 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 교수님께서 실험이나 과제를 할 때 옆에서 날카로우면서도 정확하게 방향을 제시해 주시고 여러 가지 실험들을 할 수 있게 해주셔서 많은 것을 배울 수 있는 2년이었던 것 같습니다. 2년이라는 시간을 허비하지 않고 배움의 시간으로 이끌어주신 교수님 정말 감사합니다. 그리고 교수님과 함께 제 옆을 항상 지켜주신 박정근 선배님께도 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 선배님 덕분에 대학원생활 하는 동안 어렵지 않게 의지하며 보낸 것 같습니다. 감사합니다.

또한 학과 사무실에서 많은 도움을 주신 양경조 선배님과 실험적으로 많은 조언을 해주신 한세웅 선배님께도 감사하다는 말을 전하고 싶습니다. 더불어 부족한 저에게 항상 질타와 함께 많은 조언을 남겨주신 연구실 졸업 선배님들께 다시 한번 감사하다고 전하고 싶습니다.

항상 인자하게 가르침을 주신 권기린 교수님과 항상 저희를 걱정해주시는 허종철 교수님, 항상 조언을 아끼지 않으셨던 현명택 교수님, 논심사위원장을 맡아 많은 지도를 주신 정동원 교수님, 항상 밝은 모습으로 저희에게 힘이 되어주신 박윤철 교수님, 논문 심사를 맡아 잘 이끌어주신 김상재 교수님까지 정말 감사의 말씀을 전하고 싶습니다.

연구실 생활을 같이 시작하고 항상 옆에서 길동무가 되어준 제석이, 굿은일도 묵묵히 최선을 다하고 많은 도움을 준 연구실 종우, 현관이, 충욱이, 동찬이, 동호 모두 고생 많았고 고맙다. 그리고 앞으로 연구실을 위해 신경 많이 써주길 바란다.

또한 동원이형, 문종이형, 경일이형, 창림이형, 형찬형, 병식이, 용성이, 정식이 등등 선후배님들에게도 감사하다고 전하고 싶고 같이 졸업하는 대학원 동기들에게도 고생 많았고 축하한다고 전하고 싶습니다.

제가 힘들어 할 때 옆에서 버팀목이 되어준 혜선이와 정아, 윤정이, 주희, 용희, 기석이, 희심이, 그리고 친구 종훈이, 태성이, 원현이, 수연이, 지윤이, 유경이 등 많은 분들께 감사의 말을 전하며 마지막으로 항상 옆에서 묵묵히 지켜봐 주신 부모님과 현주, 소영이에게도 감사의 마음을 전합니다.

2009년 2월 김명근