



2012 年 2 月

工學碩士學位論文

하드 아노다이징 工程에 따른 EV 브레이크 디스크의 機械的 特性 評價

朝鮮大學校 大學院

機械工學科

李 在 熙

하드 아노다이징 工程에 따른 EV 브레이크 디스크의 機械的 特性 評價

The Mechanical Properties Evaluation of EV Brake Disk According to the Hard Anodizing Process

2012 年 2月 24日

朝鮮大學校 大學院

機械工學科

李 在 熙

하드 아노다이징 工程에 따른 EV 브레이크 디스크의 機械的 特性 評價

指導教授 車 龍 勳

이 論文을 工學碩士學位 申請論文으로 提出함.

2011 年 10 月

朝鮮大學校 大學院

機械工學科

李在熙

李在熙의 工學碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 朴昌 宣 印 委員 朝鮮大學校 教授 成百 燮 印

委員 朝鮮大學校 教授 車龍勳 印

2011 年 11 月

朝鮮大學校 大學院

목 차

List of tables	Ш
List of photographs	IV
List of figures ······	V
Abstract ·····	VI

제 1 장 서 론

1.1	연구배경	및 목적	1
1.2	연구방법		3

제 2 장 관련이론

2.1	자동차용 일	루미늄	합금	4
2.2	아노다이징	공정 이	론	6
2.3	아노다이징	피막의	생성원리	7
2.4	아노다이징	피막의	구조	10

제 3 장 실험재료 및 방법

3.1 재료 및 시험편	15
3.2 미세조직 및 두께측정	20
3.3 하드 아노다이징	21

3.4 마모실험 ~~~~ 26

제 4 장 결과 및 고찰

4.1	모재의 미세조직 관찰 및 마모시험	29
4.2	아노다이징 후 두께 측정 및 마모실험	31
4.3	경도실험	40

REFERENCES		48
------------	--	----

List of tables

Table 3.1 Mechanical properties of 6061 alloys	15
Table 3.2 Chemical compositions of Al-6061 alloy(wt. %)	17
Table 3.3 Specimen types and specifications	19
Table 3.4 Anodizing conditions	21
Table 3.5 Wear test conditions	26
Table 4.1 Al-0 of times wear tests	30
Table 4.2 AN-1 of times wear tests	33
Table 4.3 AN-2 of times wear tests	35
Table 4.4 AN-3 of times wear tests	37
Table 4.5 AN-4 of times wear tests	39
Table 4.6 AN-1 of vickers hardness test	41
Table 4.7 AN-2 of vickers hardness test	41
Table 4.8 AN-3 of vickers hardness test	41
Table 4.9 AN-4 of vickers hardness test	41
Table 4.10 Al-0 of rockwell hardness test	42
Table 4.11 The final result test	43

List of photographs

Photo 3.1	Al-6061 specimens	18
Photo 3.2	Actual process of anodizing	25
Photo 3.3	Methods of wear test	28
Photo 4.1	Al-6061 microstructure	29
Photo 4.2	Section SEM image of AN-1	32
Photo 4.3	Section SEM image of AN-2	34
Photo 4.4	Section SEM image of AN-3	36
Photo 4.5	Section SEM image of AN-4	38
Photo 4.6	Al-6061 anodizing specimens of vickers hardness	40
Photo 4.7	Al-6061 specimens of rockwell hardness	42

List of figures

Fig	2.1	Atoms and ions of the volume change	• 9
Fig	2.2	The structure of anodized film	10
Fig	2.3	Film of the cell structure (Keller's model)	11
Fig	2.4	The structure of films (Murphy's model)	12
Fig	2.5	Keller-Hunter and Robinson formed the model of the film	13
Fig	2.6	Cells within the model of colloidal	14
Fig	3.1	Drawing of wear specimens	18
Fig	3.2	Test methods based on metal	20
Fig	3.3	Anodizing porcess	23
Fig	3.4	Schematic diagram of the electrochemical anodizing treatment	24
Fig	3.5	Factors wear test	27
Fig	3.6	Schematic diagram of the wear test	28
Fig	4.1	Wear test average of Al-0	30
Fig	4.2	Wear test average of AN-1	• 33
Fig	4.3	Wear test average of AN-2	35
Fig	4.4	Wear test average of AN-3	37
Fig	4.5	Wear test average of AN-4	39
Fig	4.6	Measurement result to the Hv hardness test of AN-1 $\cdots\!\!\!\!$	41
Fig	4.7	Measurement result to the Hv hardness test of AN-2 $\cdots\!\!\!\!$	42
Fig	4.8	Measurement result to the Hv hardness test of AN-3 $\cdots \cdots$	43
Fig	4.9	Measurement result to the Hv hardness test of AN-4 $\cdots\!\!\!\!$	44
Fig	4.10	Measurement result to the Hv hardness test of Al-0	46
Fig	4.11	Wear test results	47
Fig	4.12	Hardness test results	48
Fig	4.13	Film thickness results	48

ABSTRACT

The Mechanical Properties Evaluation of EV Brake Disk According to the Hard Anodizing Process

Lee, Jae-Hee Advisor : Prof, Cha, Yong-Hun, Ph.D Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Chosun University

In the automotive sector, the future of automotive exhaust gas reducing energy sources and alternative energy technologies for electric vehicles, hybrid vehicles, fuel cell vehicles, such as the development of electric energy-based power technologies are gaining attention. If the production of electrical energy in electric cars that arise in the course of pollution effects on the combustion of a car is a fraction of the level. In addition, electrical energy, solar energy, nuclear, and hydroelectric power generation, and the presence of various cheongjeon, as well as environmental pollution caused by driving electric cars because there is very little in terms of environment and energy has a very good technical background. A material of automotive brake disc rotor disk, since the introduction of the 1950's mostly gray cast iron has been used. However, cast iron brake discs improve the thermal conductivity and weight reduction efforts are still underway.

Repeat the lack of thermal conductivity of the brake disc and cause cracks to open when you work, and thermal diffusion capacity in order to improve this situation for the purpose of improving the control of material composition, improved methods of casting, and has been used benteuhol structural changes However, this trend is the brake disk is limited to angry and Japan, the United States, Germany, libc application of aluminum alloys and composite materials, some studies are under way.Aluminum has low density, light weight, excellent resistance to corrosion because it has such features as the demand in the industry is growing. However, it is easy to damage the surface hardness is low, since it includes a high friction characteristics is limited in its use.

In this paper, in order to overcome these limitations, one of several methods of surface treatment by using a hard anodized aluminum oxide film on the surface increases the surface hardness of the abrasive and was looking to increase resistance to corrosion. In addition verify the authenticity of the brake disc to the surface, friction, wear, experiment and tissue images were observed. In this paper, for the purpose of EV lightweight brake discs that can be applied to the study of EV in a paper for the development of the aluminum brake discs, light weight and corrosion experiments were performed using the method availability. Varying the experimental conditions for anodized aluminum Boosting the value of the mechanical properties, and to verify the results of hardness and wear tests conducted by a real electric vehicle can be applied to the brake disc was seeking whether Obtained the following conclusions.

1. Currently mainly used for brake discs, light weight cast iron about the impact factor of the target against a quality investigation was the result of the factors that are difficult to apply to EV components and the external environment, according to the weight of the corrosion was investigated.

2. Replaced by material improvements to the Al-6061, but in order to improve the mechanical properties on the anodized surface treatment is performed, varying the processing conditions to create four types of specimens were carried out laboratory experiments, the resulting coating on the surface, depending on processing time that the two were thickened.

3. Mechanical properties of anodized specimen hardness tests carried out to confirm the results of the test specimen was measured hardness values Hv296, test conditions, process conditions, with 30 minutes of the AN-4

samples with the highest value of the mechanical properties was obtained.

4. An important factor characteristics of the brake disk parts of the frictional wear test results conducted by the specimen surface is not likely to apply the coefficient of friction is too high, had to give you a free, surface wear and tear over time as the result obtained by the test specimen AN-4 two cast iron and also that the value of the coefficient of friction to find the closest was

In this paper, anodized surface, and then analyzed the mechanical properties of the aluminum brake discs replaced with a lighter when the effects can be obtained, compared to cast iron 1 / 3 the weight was reduced. However, the mechanical properties of aluminum surface treatment did not significantly effect on the brake disc to cast off that there was the danger in this paper could find. EV future through the hard anodizing process applied to a light weight is determined to play a major role, when applied to the current low-speed electric vehicles are expected to be greater the effect.

Key Words: EV, Green Car, light weight, Anodizing, Brake disk, coefficient value, wear test.

제1장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

요즘 자동차의 화두인 그린 카는 자원의 한계와 지구 온난화 등 지구가 겪 고 있는 문제의 연장선에서 연비가 높고 배출가스. CO2 배출량이 적은 차로 하이브리드자동차, 연료전지자동차, 전기 자동차, 크린 디젤 자동차, 대체 연 료전지자동차 등으로 분류할 수 있다. 단기적으로는 내연기관의 개선이 효율 적이지만 중장기적으로는 하이브리드자동차와 크린디젤자동차, 장기적으로는 전기자동차, 연료전지자동차가 주류의 시장을 선도할 것으로 예상되고 있다. 전기자동차는 기후친화적인 모빌리티로의 전환에 있어서 핵심적인 요소에 해 당되다고 할 수 있으며, 향후 하국이 산업, 경제, 지식 및 기술 분야의 선두 적인 위치를 확고히 하고 동시에 확대할 수 있는 기회이자 도전이라고 할 수 있다. 전기자동차프로젝트가 성공적으로 이루어지면 2020년까지 3만개의 추 가 일자리 창출이 예상되다^(1~4). 자동차 분야에서 미래의 에너지자원 및 자동 차의 배출가스 저감을 위한 대체에너지 기술로는 전기자동차, 하이브리드 자 동차, 연료전지 자동차 등과 같은 전력에너지 기반 동력기술의 개발이 관심 을 받고 있다. 전기 자동차의 경우 전기 에너지의 생산과정에서 발생하는 환 경오염 효과는 자동차의 연소에 비해 극히 적은 수준이다. 또한 전기 에너지 는 태양에너지, 원자력, 수력 등의 다양한 청전발전 방식이 존재할 뿐 아니 라, 전기 자동차의 주행에 의한 환경오염이 거의 존재하지 않기 때문에 환경 및 에너지 측면에서 매우 좋은 기술적 배경을 가지고 있다 (5~6).

자동차용 브레이크 디스크의 소재로는 1950년대 디스크 로터의 도입이래 주로 회주철이 이용되어 왔다. 그러나 주철제 브레이크 디스크는 열전도성

- 1 -

향상과 중량감소를 위한 노력이 계속 진행되고 있다. 열전도성의 부족은 브 레이크 디스크가 반복 작동할 때 열 균열 등을 초래하며, 이 문제를 개선하 기 위해 열확산 능력향상의 목적으로 소재조성의 조절, 주조방법의 개선, 벤 트홀 구조의 변경 등이 사용 되고 있다. 그러나 브레이크디스크이 경향화를 위해서는 한계가 있으며, 일본, 미국, 독일 등에서는 알루미늄 합금 및 복합 재료의 적용이 일부 연구가 진행되고 있다. 알루미늄은 낮은 밀도를 가지며 경량성, 부식에 대한 뛰어난 저항성 등의 특징을 가지고 있기 때문에 산업현 장에서 그 수요가 증가하고 있다. 하지만 경도가 낮고 표면이 손상되기 쉬우 며, 높은 마찰특성을 가지므로 사용에 있어서 제한적이다.

본 논문은 이러한 한계를 극복하기 위해 표면 처리의 여러 가지 방법 중 하나인 하드 아노다이징(Hard anodizing) 이용하여 알루미늄의 표면에 산화 막을 형성시켜 표면의 경도를 증가시키고 마멸과 부식에 대한 저항성을 증가 시키고자 하였다. 또한 브레이크 디스크 표면 신뢰성을 검증을 위하여, 마찰, 마모실험과 조직 사진 관찰을 실시하였다.

1.2 연구방법

 EV 브레이크 디스크 시스템의 경량화를 위하여 동일 조건하에 시험편 제작 하였으며, 아노다이징 처리 시 공정시간의 변수를 제어 시험편을 제작 하였다.

2. 모재(Base metal)의 미세조직 거동을 분석하기 위하여 광학현미경을 이 용하였으며, 아노다이징 공정 조건인 시간 변화에 따른 산화막의 두께 및 표 면거칠기 등을 실험을 실시하였다.

3. 브레이크 디스크 성능평가를 위하여 시험편은 아노다이징 처리하지 않은 시편과 아노다이징 처리 시간 변화에 따른 시험편을 비교 분석 하고, 마모시 험을 실시하여 각 시험편의 특성을 연구 및 분석하였다.

4. 본 연구에서는 Al-6061시험편을 하드 아노다이징(Hard anodizing)한 후 마모시험을 통하여 두 표면 사이의 마찰 및 마멸 특성을 평가하여 브레이크 디스크 제작에 있어서 적용 가능성을 실험하였으며, 실험의 신뢰성을 높이기 위하여 아노다이징 공정시간 별 두께 SEM사진 과 경도시험을 통하여 브레 이크 디스크의 성능평가를 실시하였다.

제2장 관련 이론

2.1 자동차용 알루미늄 합금

자동차 재료와 관련된 연구방향은 소재의 경량화에 집중되어 왔다. 그 이유 는 자동차 소재의 경량화는 엔진효율을 높일 수 있는 최적의 방법이며 궁극 적으로 자동차의 연비향상을 도모할 수 있기 때문이다. 최근 들어 심각한 환 경오염과 자동차 수요의 급격한 증가에 따른 에너지 자원의 고갈로 인해이미 선진국에서는 자동차 여비 및 배기가스의 규제를 하층 심하게 강화하고 있는 실정이어서 자동차 재료의 개발동기도 단순한 연비 향상이라는 수준을 넘어 화경규제에 따른 경쟁력 향상을 위하 새로운 기술개발이 자동차산업에서 절 실히 요구되고 있다. 최근의 자동차 관련 기술개발의 동향은 무공해자동차, 전기자동차에 대하여구와 함께 기종 자동차의 여비향상 뿐 아니라 차체 수명 연장, 안정성 향상, 배기가스의 정화, 소음방지, 그리고 자원재활용을 위한 리 사이클링 등을 위한 폭넓은 연구개발 투자가 이루어질 전망이다. 이를 위한 방법으로 엔진효율향상, 공기저항감소를 위한 새로운 차체 디자인, 그리고 재 료의 경량화 등이 있다. 특히 소재의 경량화는 엔진효율을 높여 자동차의 성 능향상을 극대화시키고 그 로 인해 연비향상을 도모할 수 있어서, 결국 소재 의 경량화는 환경오염방지와 연료절감에 가장 적합하고 효과적인 방법이다. Al은 경량성뿐만 아니라 비강도, 내식성, 열전도도 등이 우수하여 자동차용 재료로 사용되면 최고 40% 가량 경량화를 이룰 수 있으며, 종래 자동차 생산 라인의 설비를 약간 혹은 그대로 사용할 수 있다는 장점으로 자동차 경량화 를 위한 대체 재료로 주목받고 있다. 경량성뿐만 아니라 90% 이상 자원재활 용이 가능한 알루미늄 합금은 급격한 산업화로 인해 초래된 자원고갈과 환경

오염이라는 측면에서도 사용비율을 꾸준히 증가하여 80년대 초 전체 자동차 재료에서 알루미늄이 차지하는 비율이 3% 이하였으나 92년에는 6%로 증가 하였으며, 앞으로도 꾸준히 증가할 것으로 기대된다.

1. 열처리 합금

열처리 합금은 주로 열처리에 의해 강도가 향상되기 때문에 외관 등의 강 도가 중요시되는 부분에 적합하다. 고강도 Al합금으로서 이미 항공기 재료로 널리 이용되고 있는 Al-Cu계 합금은 취약한 내식성으로 인해 자동차용으로 는 그 응용이 제한되었으나 최근Cu함량을 줄여 AlCOA사에서 새로이 개발한 Al 합금은 성형성이 향상되었고 Al-Mg-Si계와 동등한 내식성을 나타내어 미국에서는 이미 사용되고 있으며 그 응용분야가 점차 확대되고 있다.

2. 비열처리 합금

비열처리 합금은 성형성이 우수하기 때문에 주로 내판 등의 성형성이 중요 시되는 용도에 적합하다. 일본에서는 성형성과 내식성이 우수한 Al-Mg계 합 금을 주로 사용한다. Al-4.5Mg에 미량의 Cu를 첨가한 합금의 경우 성형성이 우수하고 프레스가공에 의한 가공경화 효과가 baking(비틀림 제거를 위한 열 처리)에 의해 연화하지 않는 특성을 가지기 때문에 가장 많이 사용한다. Al-Mg-Si합금은 상대적으로 성형성이 저조하고 Bake 강화온도가 200℃이상 이므로 낮은 열처리도장온도(160~180℃)에서는 Bake hardening효과를 기대 할 수 없다.

2.2 아노다이징 공정 이론

양극산화 알루미늄(Anodic Aluminum Oxide, AAO)은 이름 그대로 알루미 늄 부품을 전해액에서 양극으로 하고 통전하면 양극에 발생하는 산소에 의해 서 알루미늄 표면이 산화되어 산화알루미늄(Al₂O₃)의 피막이 생기게 된다. 이 피막은 대단히 단단하고, 내식성이 크며 극히 작은 유공성, 섬유상이 되어 다 양한 색상으로 구현 할 수 있어서 내식·내마모성의 실용성과 미관상의 처리 가많다. 일본에서는 직·교류를 이용한 수산법으로 많이 행하여져서 알루마이 트(Alumite)라고 부르며 우리나라에서는 직류 유산법, 원명인 아노다이징 (Anodizing)이라 부르게 되었다. 일반적으로 행해지는 아노다이징은 유산법 (황산법)으로 유산농도가 15~20(wt. %) 연질 인 경우에서는 20℃~30℃ 범 위에서 사용되고 있으며 전압은 DC 13V~15 V 이내가 가장 많이 사용된다. 초기에는 수동으로 2V씩 상승시켜 가다가(안정기) 일정시간이 지나면 자동으 로 컨트롤 할 수 있다. 초기에는 안정기를 거쳐 말기가 되면 표면적에 부도 체 상태가 되면서 전압은 상승하고 전류는 어느 수준까지 감소하는 것을 의 미한다. 산화피막의 생성과 구조에 대해서는 미지의 점이 많으나 현재까지 알려져 있는 여구결과는 다음과 같다. 아노다이징 전해액 중에 A1을 양극으 로 해서통과하면 우선 Al₂O₃의 얇은 층(barrier laver 또는 활성 층)이 생긴 다. 이때 전압이 충분히 크면 전해액의 침식작용과 겸해서 이 얇은 피막이 파괴되면서 상당한 양의 열을 발생하고, 이 열은 더욱 전해액에 이한 침식을 조장시켜 주므로 다공성의 피막이 되며 통전이 된다. 이때 생긴 발생기의 산 소가 내부에 있는 Al을 산화시켜 새로운 활성 층이 생성된다. 이와 같은 것 이 반복 되어 산화피막이 내부로 성장한다는 것이다⁽⁷⁾.

2.3 아노다이징 피막의 생성원리

양극산화 피막도 전해의 일정이므로 Faraday의 법칙을 따르게 된다. 그러 나 공업적 양극산화법에 사용하는 전해액은 전부 산화알루미늄을 용해하는 성질을 가지고 있으므로 산화피막 생성의 전류효율은 100%로 될 수가 없다. 일반적으로 알루미늄의 산화물 생성속도는 대수법칙에 따른다. 이는 산화물 의 성장이 시간이 지남에 따라서 급격하게 늦어지며, 다음식의 (2.1)에서 나 타내고 있다⁽¹³⁾.

$$d=d0+A\log(t+B)$$
(2.1)

여기서 d:피막두께(Å)

d0:초기 피막두께(Å)

t:시간(s)

A,B:상수

또한, 단위 두께 당 전압, 즉 전장의 강도가 작으면 전류는 대부분 흐르지 않고, 일정한 임계값을 지나면 급격하게 흐르기 시작하고 그 후에 전류는 가 속도적으로 증가하게 되며, 다음의 식(2.2)에서 나타내고 있다⁽¹³⁾.

$$i=i^0 \exp(BV/d)$$
 (2.2)

여기서 I : 전류밀도(mA/cm²)

i⁰ : 초기 전류밀도(mA/cm²)

B : 상수(cm/A)

V : 피막의 양단에 걸리는 전압(V)

d : 피막의 두께(cm)

상기 식의 따라서 산화피막을 통한 전류는 Faraday의 법칙에 의해서 새로 운산화물을 형성하게 되고, 이 산화물은 기존의 산화물 위에 생성하게 된다. 이는 이온화한 알루미늄의 전장의 크기에 의해서 이동된 산화물이 외부로 나 오기 때문이며, 산화층(Al₂O₃)피막 두께는 다음의 식(2.3)로 나타낼 수 있다.

$$d_0 + M/ZF e \int i dt$$
 (2.3)

여기서 M : 산화알루미늄의 분자량

e : 밀도

F: Faraday상수

이것은 이론적인 경우이며, Fig 2.1 는 실제 산화피막 생성 때의 각 이온 및 금속 Al의 용적변화를 나타낸 것이다. 2Al : Al₂O₃ 는 이론상으로 조밀 격자(稠密格子)의 47.6 : 70.4 = 1.00 : 1.48로 된다. 금속 Al은 Al₂O₃ 가 되면 48% 만큼 용적이 커지며, Al 자체는 이온이 됨으로써 1/23로 수축하고, 산소 는 이온이 되면 23배로 커진다⁽¹³⁾.



Fig. 2.1 Atoms and ions of the volume change

2.4 아노다이징 피막의 구조

산화피막의 생성과 구조는 아노다이징 전해액 중에 A1을 양극으로 해서 통과하면 우선 Al₂O₃의 얇은 층(barrier layer 또는 활성층)이 생긴다. 이 때 전압이 충분히 크면 Fig 2.2 (a)와 같이 전해액의 침식작용과 겸해서 이 얇은 피막이 파괴되면서 상당한 양의 열을 발생하고, 이 열은 더욱 전해액에 이한 침식을 조장시켜 주므로 다공성의 피막이 되며 통전이 된다. 이때 생긴 발생 기의 산소가 내부에 있는 A1을 산화시켜 새로운 활성층이 생성된다. 이와 같 은 것이 반복되어 산화피막이 내부로 성장한다는 것이다. Fig 2.2 (b)와 같이 A1면에 접한 활성층은 구의집합이고, 이 활성층은 Al₂O₃의 성분보다 A1 성분 을 과잉으로 품고 있는 것으로 보아 A1이 전류에 의해 용융 산화되어 새로 운 활성층이 생성되고, 이와 같이 반복되어 산화 피막이 내부로 성장한다고 한다.





(a) The creation of anodizing film(b) The structure of anodizing filmFig 2.2 The structure of anodizing film

산화피막은 활성층과 외측에 파괴를 거듭해서 생긴 구멍이 있는 층 즉, 다 공층으로 되어 있으며, Fig 2.2의 (a)과 같다. 이 그림에서와 같이 산화이온은 확산에 의해서 A1이온은 외부로 나와서 산화물이 계속 생기는 것을 나타내 고 있다. 양극산화 피막의 구조를 모형으로 표시하면 Fig 2.3~Fig 2.4와 같 으며, Fig 2.2 (a)에서처럼 산화 피막은 활성층과 다공층으로 되어 있으며, 활 성층은 0.01 µ~0.1 µ정도고 다공층은 피막두께의 대부분을 차지하고 있다.



Fig 2.3 Film of the cell structure (Keller's model)

황산법은 어느 시간 이후는 황산의 피막용해 속도가 커서 다공층은 증가하 지 않으며, 다만 이론적으로 Al 이 Al₂O₃ 로 변화하면 용적이 48% 증가하는 것 뿐이다. 그러나 산화피막은 표면은 항상 전해액과 접하고 있고, 또 이것이 침식성을 가지고 있으므로 피막의 표층은 부스러져 나는 경향이 있다.



Fig 2.4 The structure of films (Murphy's model)

(× Show the application point of the electrolyte)

Fig 2.5에서 보면 우선 산화물 핵이 생긴 후에 반구(半球)의 형태를 가진 선 단과 원주형(圓柱形) 기공(氣孔)을 중심에 가진 원통형 세포가 형성된 후에 피막의 성장에 따라 상호세포의 경계면이 선으로 접촉하게 되며 6각형으로 되면서 성장한다. 또한 만체스터대학의 Wood 교수는 Fig 2.6과 같은 육각세 포 내면벽이 미세한 콜로이드로 되어 있다는 설을 제안하고 있다. 다음과 같 이 아노다이징 피막은 다공성이고 이 구멍 내부 또는 피막 자체가 콜로이드 상태이므로 염료에 의해서 쉽게 착색이 되고 있다⁽¹⁴⁾.



Fig 2.5 Keller-Hunter and Robinson formed the model of the film

Wood는 Keller와 Murppy모델의 절충안으로 Fig 2.6와 같이 검은 부분은 전해질 음이온을 포함하지 않은 치밀한 산화물 층으로 이루어져 있으며 둥근 집합체는 전해질의 음이온을 많이 포함하고 있는 알루미나 콜로이드 층으로 이루어져 있다고 나타내었다⁽¹⁵⁾.



Fig 2.6 Cells within the model of colloidal

제3장 실험재료 및 방법

3.1 재료 및 시험편

본 논문에 사용된 소재는 알루미늄을 이용하여 시험편을 제작하였으며, 산 업용으로 많이 활용되고 있으며, 알루미늄은 자연적으로 표면에 산화알루미 늄 층이 생성되어 내면을 보호하므로 내식성 및 연전성이 우수하여 성형 절 삭가공이 용이하다. 전기전도도는 동의 약 60%로 양호하고 열전도도 우수하 여 열 교환기, 엔진부품 등에 많이 사용하는 금속이다. 여러 종류의 알루미늄 합금 중 본 연구를 위하여 알루미늄 합금 소재인 Al-6061소재를 사용하였다. Al-6061은 압연 재료 재질이 재조 공정 및 열 처리 법 등의 차이로 많은 차 이를 보이고 있고 알코아와 알칸제품이 표면처리에 좋은 효과를 나타낸다. Table 3.1은 Al-6061의 기계적 성질을 나타낸 것이며 Table 3.2에 화학조성 비를 나타내었고 각 첨가금속에 따른 효과이다.

Table 3.1 Mechanical properties of 6061 alloys

Yield Strength	Tensile Strength	Elongation	Hardness Test
(N/mm²)	(N/mm²)	(%)	(HR _B)
200	185~241	12	58

Cu : 시효 강화 특성을 나타내도록 하는 원소로서 재료의 기계적 성질을 향상시키며, 첨가에 의해서 내식성은 취약하게 되며 절삭 가공성은 향상된다.

Si : 경도가 높아지며 내마모성을 향상시키나 내충격성은 저하시키며, Si의 첨가에 따라 양극산화 피막이 회색을 띤다. Mg와 공존할 경우 Mg₂ Si를 형 성하여 시효처리에 의해 강도가 향상되어 질 수 있으며, 열팽창 계수를 저하 시킨다.

Mg : 고용효과에 위한 기계적 강도를 향상시키고 Si와 Zn의 공존 여부에 따라 시효 강화 특성이 생길 수 있으며, 절삭 가공성이 우수해지며 특히 해 수에 대한 내식성이 양호해지며, 응고시 수축율이 적어진다. 용탕의 유동성이 약화되고 특히 산소와의 결합력이 강해서 잘못 처리시 산화물 유입의 원 인 이 된다.

Fe : 극히 소량으로도 Al₃ Fe화합물을 형성하며 또 Si와 결합하여 Al-Fe-Si금속간 화합물을 형성하므로 기계적 성질의 저하 요인이 된며, 소량 으로도 표면 광택이 나빠지며, 내식성 및 합금 연성을 취약하게 한다. 재결정 립 조대화를 방지하며 따라서 주조시 결정립 미세화 효과가 있다.

Mn : 내식성을 저하시키지 않고 강도 향상이 가능하며 Fe유해율을 감소 또는 방지시킨다. 결정립 미세화의 효과가 있고 전기 전도도를 저하시키며, 주물에서는 Hot Spot의 원인이 된다.

Cu	Si	Mg	Fe	Mn	Al
0.15~0.40	0.4~0.8	0.8~1.2	0.70	0.15	-

Table 3.2 Chemical compositions of 6061 alloy (wt. %)

시험편 제작은 Fig 3.1과 같이 Ø30mm × H10mm 원기둥 마모시험 시편으 로 바로 사용할수 있게 L 4mm ×W 3.5mm × T 4mm 홈이 파인 시편을 사 용하였다. Photo 3.1 은 모제인 Al-6061을 시편으로 가공한 사진이며 Photo 3.2는 아노다이징처리을 실시한 시편의 사진이다. 또 표면거칠기는 아노다이 징 처리된 시편의 표면거칠기 값과 비슷하게 아노다이징이 처리되지 않은 시 편 폴리쉬 작업을 통해 약 1µ로하여 실험을 실시 하였다.



Fig 3.1 Drawing of wear specimens



(a) No treatmenty



(b) Anodizing treatment



Table 3.3은 각 시험별로 시험편을 정리해 놓았다. 각각의 시험편을 이용하 여 마모시험을 실시하고, SEM을 이용하여 두께 측정 과 비커스 경도시험을 실시하였다.

Spcimens	Anodizing methods	Size(mm×mm)	Notes
A1-0	Al-6061	Ø30 × H10	No treatment
AN-1	15min	Ø30 × H10	Surface treatment
AN-2	20min	Ø30 × H10	Surface treatment
AN-3	25min	Ø30 × H10	Surface treatment
AN-4	30min	Ø30 × H10	Surface treatment

Table 3.3 Specimen types and specifications

3.2 미세조직 및 두께측정

금속의 미세조직을 관찰하기 위해서는 Fig 3.2와 같은 공정에 따라 가공 및 제작을 하였다. 또한 아노다이징 처리후 SEM을 이용하여 단면 두께 사진 을 촬영하였다.



Fig 3.2 Test methods based on metal

3.3 하드 아노다이징

본 실험에서 행하는 아노다이징은 유산법(황산법)으로 유산농도가 15~ 20(wt %) 연질인 경우에서는 20℃~30℃ 범위에서 고루 사용되고 있으며 전 압은 DC 13V~15 V 이내로 하였다. 초기에는 수동으로 2V씩 상승시켜 가다 가 일정시간이 지나면 자동으로 콘트롤 할 수 있다. 이것은 초기에는 안정기 를 거쳐 말기가 되면 표면적에 부도체 상태가 되면서 전압은 상승하고 전류 는 어느 수준까지 감소하는 것을 의미한다. Table 3.4는 본 실험에서 아노다 이징 조건을 간단하게 정리하였다. 15min, 20min, 25min, 30min 각각 시간에 따른 4종류의 시편을 제작 하였다.

	Density (wt%)	Temperature	Voltage	Current density	times	Spcimens
sulfuric					15min	AN-1
acid		20°C~	DC	DC	20min	AN-2
method	25%	22°C	15V	3A/dm ²	25min	AN-3
(H ₂ SO ₄)					30min	AN-4

Table 3.4 Anodizing conditions

Fig 3.3은 아노다이징 공정을 정리 한 것이며, 피막공정 전에 오염물이나 산화물이 남아 있으면 안 된다. 또한 공정간의 이동시간이 길어지면 다시 오 염이나 산화가 될 수 있다. Fig 3.3의 대표적인 공정을 간단히 설명을 추가하 였다.

- 1. 지그작업(Racking) : Photo 3.2 (c)같이 Al-6061과 같은 재질 환봉형태로 만들어 사용하였다.
- 2. 탈지(Cleaning) : 유지등 유기오염물을 제거한다.
- 3. 수세(Rinsing) : 흐르는 냉수제
- 4. 산세(Pickling) : 염산이나 인산으로 표면을 세척
- 5. 아노다이징(Andizing) :실험은 3A/dm²에서 실시 하였으며 시간 공정 조건
 을 변수로 하였다.
- 6. 건조(Drying) : 상온, 에어 및 가열건조 등이있다.
- 7. 열처리(Heat Tretment) : 가열건조시에 105℃이상 올라가면 양극피막에 미세한 헤어라인형의 잔금균열이 생길 수 있다.



Fig 3.3 anodizing process

Fig 3.4는 아노다이징 공정도를 계략적으로 설명해 놓은 그림이다.



Fig 3.4 Schematic diagram of the electrochemical anodizing treatment

Photo 3.2는 시험을 실시하는 사진을 나타내었다. (a)는 하드 아노다이징 공정에서 직류 전류를 공급하는 역할을 하는 장비이며, Fine power사의 F-series모델을 사용하였다. (b)는 황산수용액으로 황산과 증류수를 2:8비율로 희석시켜 사용하였다. (c)에서 (-)는 Pt로 (+)는 실험에 모제인 Al-6061를 모 제와 같은 소재로 만든 지그(jig)를 채결한 모습이다. (d)는 하드 아노다이징 공정모습을 나타내었다.



(a) DC Power Supply



(b) SO4H2 Aqueous Solution Pour



(c) Specimen preparation



(d) Anodizing Process

Photo 3.2 Actual process of anodizing

3.4 마모실험

미끄럼 마모 실험은 하드 아노다이징 산화층이 증착된 시편을 지름30mm, 두께10mm인 디스크 형태로 제작하고, 강구로 된 마모상대재 와 아노다이징 처리된 시편을 Boll-on-dick 타입으로 수행하였다. 미끄럼 속도는 50RPM으 로 고정하였으며, 접촉 하중은 1kg으로 하고 100초 동안 유지 하였으며, 시험 편 각각 7개씩 실험을 하여 가장 큰 값과 가 가장 낮은 값을 제외한 평균값 을 측정하였다. 마찰환경은 건마찰 실험으로 실시하였다.

Table 3.5 Wear test conditions

Relative material	Test Speed	Test Environment	Test load	Test time	Surface roughness
wear					
Steel-Boll	50 RPM	25℃, Dry	1kg	100 sec	1 μ

Fig 3.5는 마모실험시 시험 변수 및 조건 등을 도식화 한 것이다. 재료의 특성, 시험방법 및 시편모양, 분위기, 윤활방법에 따라 마모실험에 영향을 주 는 인자들이다. Table 3.5에서 확인 할수 있듯이 여러 변수들을 고정하여 실 험을 실시하였다.



Fig 3.5 Factors wear test

Photo 3.3은 마모실험을 실시한 장비의 실제 모습이다.(a)는 R&B사의 120-PD모델을 사용하여 실험을 실시하였다.(b)는 공압을 이용한 Boll-on-disk타입으로 실험을 실행하는 모습이다. Fig 3.6은 마모실험을 간단하게 계 략도로 표현하였다.







(b) The actual wear test

Photo 3.3 Methods of wear Test



Fig 3.6 Schematic diagram of the wear Test

제4장 결과 및 고찰

4.1 모재의 미세조직 관찰 및 마모실험

Al-6061합금의 경우, 미세한 침상 석출물이 강도특성에 영향을 주며, 강화 석추상(Mg2Si)의 크기, 형태, 밀도 등의 경도 변화에 크게 영향을 미친다. Al-0시험편은 하드 아노다이징 처리를 하지 않은 시편이다. Photo 4.1은 Al-6061의 광학현미경을 이용하여 촬영한 사진이다. 사진에서 나타나는 것처 럼 Al-6061의 정형적인 미세조직을 볼 수 있다. Fig 4.1은 마모시험을 실시하 여 얻은 결과 그래프며, 마찰계수(μ)의 평균적인 값은 μ=0.55으로, 마모양상 은 연삭마모의 정형적인 모습을 나타냈다. 표면처리를 하지 않아 상대적으로 경한 입자나 미세돌기와의 접촉에 의해 표면으로부터 마모입자가 일탈되는 현상으로 마모면에 긁힘자국이나 끝이 파인 홈들을 관찰 할 수 있었다.



Photo 4.1 Al-6061 Microstructure

Count	Coefficient of friction(µ)	Note
1	0.58	
2	0.56	
3	0.55	
4	0.57	
5	0.55	
Average	0.55	

Table 4.1 Al-0 of times wear tests



Fig 4.1 Wear test average of Al-0

4.2 아노다이징 후 두께 측정 및 마모실험

Photo 4.2는 AN-1 시험편의 결과로서 15분 아노다이징 처리 후 SEM을 이 용하여 두께를 측정한 값이다. 평균 두께는 2.65μm이다. Fig 4.2는 마모시험 을 실시하여 얻은 결과 그래프이며, 마찰계수의 평균적인 값μ=0.58 이며, 마 모양상은 코팅층의 막리와 함께 연삭마모의 정형적인 모습을 나타냈다. Photo 4.3은 시험편 AN-2의 결과 값으로 아노다이징 표면처리후 두께측정을 한 결과 사진이다. 평균 두께는 4.01μm로 나타났다. 또는 Fig 4.3은 마모실험 을 실시하여 얻은 결과 그래프이며, 마찰계수의 평균적인 값μ=0.53으로 앞 시험보다 낮은 마찰계수 값을 얻을 수 있었다. Photo 4.4는 시험편 AN-3의 결과 값으로 아노다이징 표면처리후 두께측정을 한 결과 사진이다. 평균 두 께는 6.41μm로 나타났다. Fig 4.4는 마모시험을 실시하여 얻은 결과 그래프 이며, 마찰계수의 평균적인 값μ=0.48 로 얻을 수 있었고 AN-1, AN-2 마모 그래프 보다 균일한 그래프를 얻을 수 있었다. Photo 4.5는 시험편 AN-4의 결과 값으로 아노다이징 표면처리후 두께측정을 한 결과 사진이다. 평균 두 께는 8.09μm 로 나타났다. Fig 4.5에서 알수 있듯이 마찰계수의 평균적인 값 μ=0.44로 측정 되었으며, 가장 균일한 마모양상을 보였다.





Photo 4.2 Section SEM image of AN-1

Count	Coefficient of friction(µ)	Note
1	0.58	
2	0.59	
3	0.60	
4	0.57	
5	0.58	
Average	0.58	

Table 4.2 AN-1 of times wear tests



Fig 4.2 Wear test average of AN-1





Photo 4.3 Section SEM image of AN-2

Count	Coefficient of friction(µ)	Note
1	0.52	
2	0.54	
3	0.52	
4	0.53	
5	0.52	
Average	0.53	

Table 4.3 AN-2 of times wear tests



Fig 4.3 Wear test average of AN-2





Photo 4.4 Section SEM image of AN-3

Count	Coefficient of friction(µ)	Note
1	0.49	
2	0.47	
3	0.46	
4	0.48	
5	0.49	
Average	0.48	

Table 4.4 AN-3 of times wear tests



Fig 4.4 Wear test average of AN-3





Photo 4.5 Section SEM image of AN-4

Count	Coefficient of friction(µ)	Note
1	0.42	
2	0.44	
3	0.42	
4	0.43	
5	0.45	
Average	0.44	

Table 4.5 AN-4 of times wear tests



Fig 4.5 Wear test average of AN-4

4.3 경도 실험

경도 시험은 아노다이징 한 시험편과 하지 않은 시편을 나눠서 시행하였다. Photo 4.6은 경도 시험을 시행하는 사진이다. (a)는 비커스 경도 실험기의 전체 모습이며 (b)는 하드 아노다이징 처리 후 시험편에 압자가 50g의 하중 을 10초 동안 유지한 후 (c)에서 압흔을 현미경으로 관찰하는 모습이다. (d) 에서처럼 마름모 모양의 압흔을 측정하여 AN-1~AN-4의 시험편에 경도측 정 후 Table 4.6~Table 4.9까지 평균 경도 값을 정리 하였다. 경도 실험을 실시한 결과 Fig 4.13그래프처럼 표면의 산화층 두께가 올라갈수록 비커스 경도 값은 높게 측정이 되었다.



(a) Vickers hardness equipment





(b) Loading by specimens



(c) Indentation Observation(d) Analysis of indentationPhoto 4.6 Al-6061 anodizing specimens of vickers hardness

Table 4.6 AN-1 of vickers hardness test

Count Hardness	1	2	3	4	5	6	7	Average
Hv	156	159	154	155	157	154	154	156

hardness loading : 50g



Fig 4.6 Measurement result to the Hv hardness test of AN-1

Table 4.7 AN-2 of vickers hardness test

Count Hardness	1	2	3	4	5	6	7	Average
Hv	208	206	205	203	205	206	207	206

hardness loading : 50g



Fig 4.7 Measurement result to the Hv hardness test of AN-2

Table 4.8 AN-3 of vickers hardness test

Count Hardness	1	2	3	4	5	6	7	Average
Hv	264	261	259	263	261	262	259	261

hardness loading : 50g



Fig 4.8 Measurement result to the Hv hardness test of AN-3

Table 4.9 AN-4 of vickers hardness test

ina anoss ioaanig oog

Count Hardness	1	2	3	4	5	6	7	Average
Hv	290	289	301	295	305	289	303	296



Fig 4.9 Measurement result to the Hv hardness test of AN-4

Al-0는 표면처리를 실시하지 않았으므로 로크웰 경도 실험을 실시하였다. Photo 4.7는 로크웰 경도 실험을 하는 사진이며 B 타입으로 실험을 하였다. Table 4.10는 경도시험 값을 나타낸 표이며, Table 3.1의 일반적인 경도값과 비슷한 결과 값을 얻었다.



(a)Rockwell hardness equipment(b) Loading by specimensPhoto 4.7 Al-6061 specimens of Rockwell hardness

Table 4.10 Al-0 of rockwell hardness test

hardness loading : 100Kg

Count Hardness	1	2	3	4	5	6	7	Average
HRB	58	55	56	57	56	58	56	56



Fig 4.10 Measurement result to the HRB hardness test of Al-O

시험편 별로 마모시험과 경도시험을 실시하여 Table 4.11에서 보여지는 결 과 값을 얻을 수 있었다. 그리고 Fig 4.11은 시험편 별로 마찰계수µ값을 나 타낸 그래프이다. 표면처리 시간에 따라 마찰계수 값은 점점 낮아짐을 알 수 있었다. Fig 4.12은 아노다이징 처리를 하지 않는 시편을 제외한 나머지 시편 의 비커스 경도 시험 결과의 그래프이며, Fig 4.13은 아노다이징 처리 시간에 따른 시험편 별 두께를 나타낸 그래프이다. 하드 하노다이징 공정시간에 따 라 산화층 두께가 증가하였다.

Test	Coefficient of	Films	hordnood	Surface	
Specimen	friction(μ)	thickness(µm)	naruness	roughness(μ)	
Al-0	0.55	0	HRB 58	1	
AN-1	0.58	2.65	Hv 156	1.2	
AN-2	0.53	4.01	Hv 206	1.1	
AN-3	0.48	6.41	Hv 261	1.2	
AN-4	0.44	8.09	Hv 296	1.2	

Table 4.11 The final result test



Fig 4.11 Wear test results of average



Fig 4.12 Hardness test results of average



Fig 4.13 Film thickness results of average

제5장 결론

본 논문은 EV의 브레이크 디스크 경량화를 목적으로 연구한 논문으로 EV 에 적용할 수 있는 브레이크 디스크 개발을 위해 알루미늄의 경량화와 부식 방식성을 이용하여 실험을 실시하였다. 실험시 아노다이징 처리 조건을 달리 하여 알루미늄의 기계적 특성 값을 향상시켰으며, 그 결과를 검증하기 위하 여 경도 및 마모시험을 실시하여 실제 전기자동차 브레이크 디스크에 적용 가능 여부를 얻고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

 1. 브레이크 디스크 경량화를 위해 현재 주로 쓰이는 주철소재의 대상으로 품질에 관하여 영향인자들에 대하여 조사를 하였으며, 그 결과 EV에 적용하
 기 어려운 요인 중 부품의 무게 및 외부환경에 따른 부식이 조사되었다.

2. 개선점으로 Al-6061 소재로 대체하였지만, 기계적 성질을 향상시키기 위하여 소재에 아노다이징 표면처리를 시행하고, 공정 조건을 달리하여 4종류의 시편을 만들어 실험을 실시하였으며, 그 결과 공정 시간에 따라 표면에 코팅층이 두꺼워지는 것을 확인 하였다.

3. 아노다이징 된 시험편의 기계적 특성을 확인하기 위해서 경도 시험을 실시 한 결과 시험편의 경도 값은 Hv296으로 측정되었으며, 시험 조건 중 30분 공정조건을 가진 AN-4 시편이 가장 높은 기계적 특성 값을 얻었다. 4. 브레이크 디스크 부품의 특성 중에 중요한 요인 중 마찰 마모 시험을 실 시한 결과 표면처리 하지 않은 시편은 마찰계수가 너무 높아 적용가능성이 없음을 알 수가 있었고, 표면처리 시간 별로 마모시험을 하여 얻은 결과로 AN-4시편이 주철과 가장 가까운 마찰계수 값을 가짐을 알 수 있었다.

본 논문에서 아노다이징 표면처리 후 기계적 특성을 분석한 결과 브레이크 디스크를 알루미늄으로 대체 하였을 때 경량화 효과를 얻을 수 있으며, 주철 대비 1/3의 중량이 감소되었다. 하지만 표면처리 하지 않은 알루미늄은 기계 적 성질이 현저히 떨어져 주철 브레이크 디스크의 성능에 준하는 부품의 특 성을 얻기에는 무리수가 있었음을 본 논문에서 알 수 있었다. 향후 하드 아 노다이징 처리 과정을 통하여 EV에 적용하면 경량화에 큰 역할을 할 것으로 판단되며, 현재 저속전기차에 적용하면 그 효과가 클 것으로 기대된다.

REFERENCE

- Environmental Protection Agency, "Ireland's national greenhouse gas emissions inventory for 2007", Environmental Protection Agency, Wexford, Ireland, 2008.
- European Commission, EU energy in figures 2009, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2009.
- Williamson, A. Emadi and K. Rajashekara, "Comprehensive efficiency modeling of electric traction motor drives for hybrid electric vehicle propulsion applications", IEEE Transactions on Vehicular Technology, 56 4, pp. 1561~1572, 2007.
- M. Ahman, "Primary energy efficiency of alternative power trains in vehicles. Energy", 26, pp. 973~989, 2001.
- 5. S. W. Lim 열처리공학회지. "전기자동차용 신재료 · 신부품 개발"제 23권
 제 6호, pp. 350~355, 2010.
- 6. 최전. "국산 전기자동차 개발현황과 전망." 대한전기협회. 전기저널. pp. 29
 ~33, 2010.
- S. H. Han, "Theories and Applications of Anodic Film Formation on Al-uminum", Surface Engineering Lab, Korea Institute of machinery&Metal, 1989.
- 8. G. S. Jang. "금속표면처리와 아노다이징 실무", youngkwang-matal, pp.51 ~59, 2004.
- S. H. Han, G. EThompson and G. C. Wood : Trans. Inst. Metal Finishing. 6, p. 102, 1988.

- I. S. Kwon and E. P. Yoon, "Electrodeposition with Pulsed Current", Dept. of MetallurgicalEngineering, Hanyang University, 1998.
- J. S. Kim, R. H. Song, S. I. Pyun, "The Principle and Practice of PulsePlating", Dept. of Materials Sci. and Eng. Korea Advanced Institute of Scienceand Technology, 1997.
- J. S. Kim, R. H. Song, S. I. PyunandH .C. Kim: J. Mater. Sci.,to besubmitted Y. Y. Wang, C. S. Tungand. C. C. Wan : Met. Finish., 78, 1980.
- J. S. Kim, R. H. Song, S. I. Pyun, "The Principle and Practice of Pulse Plating", Dept. of Materials Sci. and Eng. Korea Advanced Institute of Scienceand Technology, 1997.
- G. R. Perger, "Electro deposition and Surface Treatment", 2, p. 369, 1979.
- J. W. Hwang, Comparative Study on Anodizing Process of Aircraft Parts, Busan University, 2008.
- N. F. Mott, "Study on growth characteristics of self organized porous anodic aluminum oxide N. Cabrerraand", Rept. Progr. Phys, 12, p. 163, 1949.
- 17. Y. Xu : Ph. D. Thesis, UMIST 1984.
- 18. S. H. Han : Ph. D. UMIST 1986.
- G. E. Thompson, R. C. Furneauxand G. C. Wood : Corros. Sci 18, 1978.
- J. P. O'Sullivan and G. C. Wood : Proc. Royal Soc. London, A317, 1970.

- 21. J. S. L. leachand P. neufeld : Corros. Sci. 9, 1969.
- 22. T. P. Hoarand J. Yahalom : J.Electrochem. Soc, p.110, 1963.
- J. W. Diggle, T. C. Downieand C. W. Goulding J. Electrochem. Soc, p. 116, 196).
- 24. J.SiejkaandC.Ortega: J.Electrochem.Soc. p. 124, 1977.
- H. Hasegwa, et al., "The Friction and Wear Characteristics in Refrigerant", 1996.
- "Atmosphere", Proceedings of JAST Tribology onference Tokyo, p.489, 1991.
- M. A. Boles, "Thermodynamics" An Enineering Approach, 4thedition, pp.256~257, 1991.
- 28. Y. J. Lee, J. Y. Moon, "A Study on Friction and Wear Characteristics of the Scroll Compressor Sliding Surfaces in the atural Refrigerant CO2 Environment", 성균관대학교 일반대학원 석사학위논문, 2004.
- 29. B. K. Lee, "Tribology 개론", 동명사, pp.196~200, 1987.
- 30. S. A. Lee, "Effect on tribological behavior of the white layer ormed onhigh carbon steel", 성균관대학교 일반대학원 석사학위논문 2010.
- J. F. Archard and W. Hirst, "The wer of metals under unlubricated conditions" Proc. Roy. Soc., pp.236~397, 1956.
- T. S. Eyre, "Wear characteristics of metals", Tribology Int. Oct., pp.203~212, 1976.
- 33. M. Kruschov, "Resistance of metals to wear by abrasion: related tohardness", Engrs Conf. Lubrication and Wear, pp.655~659, 1957.
- 34. R.C.D Richardson, "The wear of metals by relatively

softabrasivesWear", pp245~75, 1968.

35. N. P. Suh, "Delamination Theory of Wear", Vol. 25, pp.111~124, 1973.

감사의 글

2년동안의 대학원 생활에 부족한 저에게 많은 도움을 주신분들을 위해 이렇 게 글을 남겨보려 합니다.

먼저 이렇게 논문이 나오기 까지 많은 조언과 큰 가르침을 해주신 지도교수 님 차용훈 교수님께 감사의 말을 드리고 싶고 또 이 논문이 완성 되기까지 많은 조언을 해주신 박창선 교수님과 성백섭 교수님께 감사하다는 말을 전하 고 싶습니다.

실험실 석·박사분들께도 감사드립니다. 그리고 저희 부모님께 한번도 고마 움을 표시 하지는 못했지만 우리집 식구들에게도 항상 건강하고 웃으면서 행 복하게 살았으면 합니다.

대학원 생활이란게 힘들기도 하지만 여러모로 많은걸 알게된 저한테 정말 뜻 깊은 시간이였던거 같습니다. 졸업이라고 해서 끝이 아닌 새로운 시작으로 생각하고 앞으로 더 열심히 높은 곳을 향해 달려 나가겠습니다.

> 2012年 2月 EV/구조성능 실험실 이 재 희