



저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

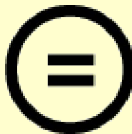
이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

표면처리에 따른 유압펌프용 피스톤
재료 SACM645의 기계적특성



2012年 8月

부경대학교 대학원

학연협동 기계공학과

김 남 석

공학박사 학위논문

표면처리에 따른 유압펌프용 피스톤
재료 SACM645의 기계적 특성

지도교수 남 기 우

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함

2012年 8月

부경대학교 대학원

학연협동 기계공학과

김 남 석

김남석의 공학박사 학위논문을 인준함

2012 年 6 月



주 심 공학박사 문 창 권 (인)
위 원 공학박사 성 기 용 (인)
위 원 공학박사 우 영 만 (인)
위 원 공학박사 손 창 석 (인)
위 원 공학박사 남 기 우 (인)

목 차

Abstract	iv
제1장 서 론	1
1.1 연구배경	2
1.2 이론적 배경	5
1.2.1 피로강도	5
1) 피로파괴의 거시적 양상	5
2) 피로파괴의 미시적 양상	5
3) 균열의 발생과 진전	6
4) 피로균열 진전속도	10
1.2.2 Diamond-like Carbon(DLC) 박막	13
1.2.3 마모	18
1) 마모 개요	18
2) Tribology	18
3) 마모(Wear)	19
4) 마모기구	20
1.3 연구목적과 필요성	27
1.4 논문의 구성 및 개요	30
참고문헌	31
제2장 표면 처리한 SACM645 재료의 인장 및 피로균열진전특성	34
2.1 서 언	35
2.2 실험방법	36
2.2.1 재료 및 시험편	36
2.2.2 미세조직의 정성 및 정량분석	36
2.2.3 인장 및 경도 시험	36
2.2.4 피로균열진전시험	36
2.3 실험결과 및 고찰	40

2.3.1 미세조직의 정량 및 정성적 관찰	40
2.3.2 인장특성	42
2.3.3 피로균열진전거동	44
2.3.4 파면관찰	48
2.4 결 언	51
참고문헌	52
제3장 표면 처리한 SACM645 재료의 피로한도	54
3.1 서 언	55
3.2 실험방법	56
3.2.1 재료 및 시험편	56
3.2.2 미세조직 관찰	56
3.2.3 피로시험	56
3.3 실험결과 및 고찰	58
3.3.1 조직 관찰	58
3.3.2 S-N 곡선	60
3.3.3 파면관찰	62
3.4 결 언	64
참고문헌	65
제4장 SACM645 재료의 마모 특성	66
4.1 서 언	67
4.2 재료 및 실험방법	69
4.3 실험결과 및 고찰	74
4.3.1 조직관찰	74
4.3.2 경도시험	74
4.3.3 인장시험	75
4.3.4 마모시험	79
1) 상온 건조 마모	79
2) 상온 윤활 마모	90

3) 고온 윤활 마모	93
4.4 결 언	97
참고문헌	99
제5장 DLC코팅된 SACM645 재료의 기계적 특성	101
5.1 서 언	102
5.2 실험방법	103
5.2.1 재료 및 시험편	103
5.2.2 인장 및 경도 시험	103
5.2.3 DLC 코팅	104
5.2.4 DLC 코팅 평가	107
1) Micro-Raman 분석	107
2) 경도 측정	107
3) 표면 거칠기 및 부착력 측정	107
4) 마모 실험	108
5.3 실험결과 및 토론	109
5.3.1 미세조직 관찰	109
5.3.2 인장강도 및 경도 측정	111
5.3.3 DLC 코팅층의 Micro-Raman 분석	113
5.3.4 DLC 코팅층의 경도	115
5.3.5 DLC 코팅층의 표면 거칠기	117
5.3.6 DLC 코팅층의 부착력	119
5.3.7 마모 실험	120
5.4 결 언	127
참고문헌	128
제6장 결 론	130
발표논문 목록	
감사의 글	

Study on the Mechanical Properties of Piston Material SACM645 for Hydraulic Pump according to the Surface Treatment

Nam Seok Kim

*Department of UR Interdisciplinary Program of Mechanical Engineering
Graduate School
Pukyong National University*

Abstract

When iron is smelted from its ore by commercial processes, it contains more carbon than is desirable. To become steel, it must be melted and reprocessed to reduce the carbon to the correct amount, at which point other elements can be added. This liquid is then continuously cast into long slabs or cast into ingots. Approximately 96% of steel is continuously cast, while only 4% is produced as cast steel ingots. The ingots are then heated in a soaking pit and hot rolled into slabs, blooms, or billets. Slabs are hot or cold rolled into sheet metal or plates. Billets are hot or cold rolled into bars, rods, and wire. Blooms are hot or cold rolled into structural steel, such as I-beams and rails. In modern foundries these processes often occur in one assembly line, with ore coming in and finished steel coming out. Sometimes after a steel's final rolling it is heat treated for strength, however this is relatively rare.

This study was investigated the tensile properties and fatigue crack propagation characteristics with heat treatment and surface treatment using the material, SACM645, for hydraulic piston pumps. Fatigue limit was examined by using base metal, QT specimen, QT nitriding specimen and QT inductive hardening specimen. Wear characteristics was investigated in the atmosphere of dry, lubrication and high-temperature lubrication after performing the heat treatment in a variety of ways. The mechanical properties of DLC-coated SACM645 were investigated. The results

obtained were as follows:

The depth of QT nitriding specimen depth were approximately 300 μm from the surface, some parts were affected by the heat. The inner parts were observed a tempered martensite structure by the QT treatment. In a tensile test of four kinds of test specimens, the maximum stress of QT specimen and QT nitriding specimen is similar to about 820 MPa and the strain showed a large difference. The surface hardness of QT nitriding specimen appears higher than the 800 Hv, while the base metal and QT specimen at a depth of 300 μm from surface were almost the same hardness. The base metal showed the longest fatigue life and fatigue crack growth rate was the most late. Hardness of QT nitriding specimen is highest and the crack initiation at the surface is slow. Thus, it is judged that QT nitriding treatment is an ideal surface treatment methods because inner has a ductile even if cracks occur. Fatigue limit is QT specimen of 492 MPa, base metal of 533 MPa, QT inductive hardening specimen of 615 MPa and QT nitriding specimen of 656 MPa, respectively. Fatigue limit of QT nitriding specimen was about 80% of tensile strength. Fatigue limit of QT specimen was 60% of tensile strength although it has the lowest fatigue limit. In the room temperature dry wear properties, Nitriding specimen, QT nitriding specimen and QT inductive hardening specimen were highly represented and QT specimen, QT shot peening specimen and base metal were similar. Overall, the room temperature lubrication wear was a lot of wear. Such as the room temperature dry wear, nitriding specimen and inductive hardening specimen showed the best wear resistance. High temperature lubrication wear was lots of wear of the nitriding specimen and inductive hardening specimen. Base metal and QT specimen showed the lowest wear rate. QT nitriding DLC coating specimen does not nearly exist graphite from the Raman analysis of DLC coating layer and peak appears at 1560 cm^{-1} . It can be confirmed that mostly made of DLC structure. But, nano-indentation measurements appear to 2,158 Hv, it was satisfied with the values of DLC coating layer. The surface roughness of QT nitriding DLC coating layer was $R_a = 0.02\text{ }\mu\text{m}$. The friction coefficient of DLC coating is less than 0.9 up to 1 km, since then, it was approximately 0.9 like the QT nitriding specimen.

第 I 章

서 론



1.1 연구배경

표면처리는 재료의 표면 특성을 개선하는 방법의 총칭이다. 종류가 다른 재료의 얇은 판을 붙이는 클래드, 표면에 종류가 다른 재료의 얇은 층을 침적시키는 도금 또는 코팅, 표면만을 경화하여 내마모성을 향상시키는 표면경화 등 여러 가지 방법이 있다. 도장도 일종의 표면 처리라고 생각할 수 있다. 클래드는 내식성을 좋게 하기 위하여, 그것에 합당한 것을 붙이는 경우와 미관상 금을 입히는 경우가 있다. 도금에도 이와 같은 목적이 있으며, 그 밖에 크롬 도금처럼 내마모성을 향상시키는 목적이 있다. 표면경화에는 여러 가지 방법이 있다. 예를 들면, 강재에서는 탄소 강재의 표면에만 탄소를 스며들게 하는 침탄, 질소를 스며들게 하는 질화 등과 같은 시멘테이션, 고주파의 코일을 감고 속에 물건을 놓고 고주파 유도전류의 표피효과를 이용해서 표층만을 유도 가열한 다음 담금질하는 방법(토코법), 강으로 만든 볼을 표면에 타격하여 가공경화 하는 쇼트피닝(shot peening) 등이 있다. 이 가운데서 쇼트 피닝은 스프링강의 표면경화 등에 사용되는데, 표면경화와 함께 압축응력을 남기므로 부하시의 응력을 경감시키는 효과가 있다. 이 외에도 알루미늄이나 마그네슘에 사용되는 양극산화법이 있다. 이것은 산화물의 보호적 피막을 표면에 붙이는 것인데, 대표적인 예로서 알루마이트가 있으며, 내식성의 향상과 표면경화를 그 목적으로 하고 있다.

특히 이온질화법은 소재 표면에 질소를 침투시켜 표면경도를 향상시킴으로써 금속의 기계적 성질을 향상시키고, 또한 종래의 침탄, 고주파 열처리에 비하여 저온에서 처리하므로 변형이 적어 정밀 부품 등의 표면처리에 적합하다. 이온질화법은 Egan에 의해 고안되어 1960년대에 Berghaus에 의해 실용화 되었는데, 진공용기 내부에서 방전에 의해 가공되는 무공해 열처리법으로서 이온의 스퍼터링 효과에 의해 표면이 활성화 되어 질화된다.⁽¹⁾

질화에 따른 기계적 성질의 향상으로는 내마모성, 내부식성, 내피로성 향상이 보고되고 있는데, 이중 내피로성에 대해서는 내마모성이나 내부식설과는

달리 학자들에 따라 피로수명의 향상정도나, 수명향상 원인에 있어서 견해가 일치하지 않다.^(2~5) 질화처리에 대한 연구를 살펴보면, 山中⁽⁶⁾은 회전 굽힘 피로시험에서 SM35C에서는 66%, SCM3에서는 89%의 피로한도 증가를 보이고 있다. 그러나 J. M. Cowling⁽²⁾ 등은 반복인장, 압출시험에서 피로한도의 상승이 나타나지 않는다고 하였으며, 또한 이임열⁽⁵⁾, Herman⁽⁷⁾ 등은 iron implantation의 경우 표면 경화에 의한 피로균열 발생억제는 굽힘 응력 피로시험의 주된 피로수명 향상원인으로 꼽으면서도 인장강도의 저하원인이나 응력양식에 따라 피로수명이 감소하는 경우, 즉 굽힘 응력피로시험에서는 피로강도가 증가하나 push-pull type의 피로시험에서는 피로강도의 감소를 설명하지 못하였다.

유압 피스톤 펌프와 모터는 간단한 구조로서 고압의 유압원을 생성하거나 소형이면서도 높은 토크를 발생하기 때문에 유압시스템에 널리 사용되고 있다. 피스톤과 실린더 사이의 좁은 간극에서의 QT 상태는 피스톤 펌프와 모터의 성능 및 수명에 직접적으로 아주 큰 영향을 미친다. 즉, 실린더 내를 왕복 운동하는 피스톤의 편심상태 등에 따라서 간극에서의 QT 특성을 크게 변화한다. 또한 간극에서의 QT 특성은 직접적으로 사판과 슬리퍼 패드 사이, 실린더 블록과 밸브 플레이트 사이 등에서의 QT 특성에도 영향을 주게 된다.^(8~17) 유압기기들의 고압화에 따라 상대운동부의 간극 및 표면조도와 함께 표면처리 기술의 중요성이 더해지고 있다. 특히 가장 고압을 발생하는 유압 피스톤의 경우 주요 부품들의 표면처리 기술을 이용한 표면경도의 확보는 부품들의 내QT성, 내피로성, 내식성 등의 향상을 위해 반드시 필요하며, 그렇지 못할 경우 QT에 의한 표면손상으로 펌프가 파손되는 결과를 초래하므로 표면처리 기술에 대한 많은 연구가 필요하다. 그러나 유압피스톤 펌프 모터에 대한 지금까지 수행된 많은 연구와 제품 개발, 생산에도 불구하고 피스톤과 실린더와의 마모 특성에 대한 이론적인 연구와 이에 관한 실험은 상당히 미흡한 실정이다.

DLC 박막은 비정질 카본 박막의 하나로서 다이아몬드와 유사한 높은 경도, 윤활성, 내마모성, 화학적 안정성, 전기절연성, 그리고 광학적 투과성을 가지고 있는 재료를 말한다. 수소를 함유한 경우에는 구조적 특성을 강조한 수소함유 비정질 카본이라는 이름이 사용되기도 한다. 최근 이러한 FVA법으로 제조된 초경질-다이아몬드상 카본 박막은 sp^3 분율이 매우 높고, 거의 다이아몬드에 가까운 기계적 물성 및 밀도 등의 특성으로 인하여 ta-C 혹은 a-D라고 불리고 있으며, 대표적인 고윤활 고경도 물질로 분류된다.^(18~19)

환경 친화 대체소재 개발의 일환으로 다양한 내열 내QT성 경질 박막(TiN, TiCN, ZrN 박막 등)을 PVD, PECVD 및 spray 방식으로 합성하는 기술이 개발되었으나, 기계 부품인 피스톤링 및 타펫의 템퍼링 온도가 약 200~400℃ 미만이므로 저온에서 공정이 이루어져야 하고 윤활성 및 두께를 기존의 박막에 비해 증가시켜야 하는 한계점에 도달하였다. 따라서 자동차 공장에서는 최근에 들어 저온 고속 증착을 구현할 수 있는 저온 플라즈마 코팅 시스템 설계와 고윤활성 및 내산화성, 내식성박막 개발을 시작하였다.⁽²⁰⁾

유압 피스톤 펌프와 모터는 간단한 구조로서 고압의 유압원을 생성하거나 소형이면서도 높은 토크를 발생하기 때문에 유압시스템에 널리 사용되고 있다. 피스톤과 실린더 사이의 좁은 간극에서의 마모상태는 피스톤 펌프와 모터의 성능 및 수명에 직접적으로 아주 큰 영향을 미친다. 이렇듯 내마모성과 인성 및 강도가 동시에 필요한 재료에서 표면만은 경하게 하고, 내부는 연하면서 인성을 가지게 하는 방법이 표면경화처리이다. 표면경화처리는 질화법과 침탄법이 있으며 현재 피스톤펌프에 사용되는 피스톤은 표면에 질화처리를 실시하여 사용되고 있다. 질화처리는 침탄처리에 비해 비용이 적게 들고 처리가 쉬워서 여러 부품에 작용되고 있다.

1.2 이론적 배경

1.2.1 피로강도

1) 피로파괴의 거시적 양상

피로파괴(fatigue fracture)는 통상, 정적파괴보다도 낮은 부하의 반복에 의해서 생기고, 균열의 발생·진전, 균열진전에 따르는 단면감소에 의해서 정적 최종과 단으로 발전하게 된다. 정적부하에서는 상당히 큰 연성을 나타내는 재료에서도 소성변형이 균열진전경로의 근방에 제한되므로 취성적 외관을 나타내는 것이 피로파괴의 특징이다. 일반적으로 피로파면은 매끄럽고 광택이 있는 것에 비해서 정적최종파면은 인장, 굽힘 등의 부하양식에 의한 소성변형을 동반하는 경우가 많고, 또 파면이 거칠기 때문에 피로파면과 정적파면과의 구별은 쉽다. 매끄러운 피로파면도 균열진전 속도 등에 따라 파면 거칠기가 다르다. 반복응력이 일정하게 유지되는 경우에는 통상, 균열의 진전과 함께 그 속도를 증가시키고 서서히 파면이 거칠어져 간다. 그러나 실 부재에 작용하는 응력은 가끔 그 크기가 변하므로, 이와 같은 경우에는 응력변동시의 균열전방(crack front)의 위치를 나타내는 비치마크(beach mark)가 나타난다. 또 어느 기점에서 생긴 균열이 다른 면으로 진전하면 그 경계는 단을 이루고, 방사상 모양이 형성된다. 이 방사상 모양을 역으로 찾아가면서 균열이 비치마크에 수직방향으로 진전하는 것을 고려하는 등, 이들의 파면의 특징을 이용하면 균열의 기점을 추정할 수 있다.

2) 피로파괴의 미시적 양상

피로파면을 광학현미경과 전자현미경으로 관찰하면 미시파괴기구를 나타내는 몇 개의 양상이 보인다. 그 대표적인 예는 스트라이에이션(striation)이라 부르는 줄모양이다. 이것은 인장응력을 받을 때의 균열선단의 소성둔화(개구)와 제하시 균열선단이 다시 날카롭게 되는 현상에 의한 것으로 그 간격이 1사이클 중의 균열진전량에 상당한다. 통상 스트라이에이션은 결정립계, 석출물, 개재물 등의 부

분에 생긴 단에 의해서 분할된 평면에 위에 있고 균열진전방향에 대해서 불록하게 만곡해 있다. 이상의 설명은 소성둔화가 상대적으로 큰 연한 재료에서 관찰되는 연성 스트라이에이션(ductile striation)에 대한 것이다. 연한 재료에서도 부식되는 상태에서 균열선단부에 형성된 산화막 때문에 소성변형이 억제되는 경우와 단단한 재료의 경우에는 벽개면에 따른 취성적인 균열진전 후 상대적으로 작은 균열선단의 소성둔화와 다시 날카롭게 되는 현상에 의해 형성된 취성 스트라이에이션(brittle striation)이 관찰된다.

3) 균열의 발생과 진전

Fig. 1.1은 전형적인 피로균열의 발생과 진전의 과정을 나타내는 모형도이다. 재료표면에서 확인되는 격심한 요철은 재료를 구성하는 결정이 외적으로 가해지는 반복응력에 의해서 반복 슬립변형이 생기는 것에 의해 형성된다. 발생한 균열은 슬립면에 따라서, 즉 결정학적인 슬립면과 방향에 지배받으며 성장한다. 이 과정이 Fig. 1.1에 나타낸 균열진전의 제 I 단계이다. 또한 균열의 발생과 슬립면 균열의 성장과는 서로 연속적 과정으로 나타난다. 이들의 과정을 합하여 균열진전의 제 I 단계라 부르는 것이 보통이다. 이 제 I 단계의 균열이 충분히 내부방향으로 성장하고 균열선단의 집중응력이 몇 개의 면상에 슬립을 구동하게 되면, 균열은 슬립면을 서로 변경하면서 이들의 슬립면에 따라서 진행함과 동시에 그 진전과정에 일부 벽개를 동반하게 된다. 이 과정에서 균열은 응력축에 대해서 경사진 슬립면 방향에서 이것에 대해 거의 수직방향으로 점차 그 방향을 바꾼다. 그래서 여기서의 파괴과정은 슬립면 균열과 벽개면 균열의 혼합된 형태를 취한다. 이와 같은 과정은 균열진전의 제 II_a단계로서 알려져 있다.

위에서 설명한 것 같이 균열진전의 제 I 및 제 II_a단계에서는 균열이 결정학적 조건에 크게 지배되며, 결정립 등의 조직적 치수를 단위로 불연속적으로 진전하므로 결국 조직민감성을 나타낸다. 평활재에서 피로수명의 대부분은 이들 과정에 의하므로 피로강도는 조직적 인자의 영향을 강하게 받는다.

슬립면 균열과 벽개면 균열이 혼재하는 영역을 통과한 피로균열은 조직학적 인자에 거의 영향을 받지 않고, 역학적 인자에 지배된다. 그 결과 균열은 응력 축에 거의 수직방향으로 진전하고, 파면에는 스트라이에이션이라 부르는 피로파괴 특유의 줄무늬 모양이 남는다. 이 과정이 Fig. 1.1에 나타낸 균열진전의 제Ⅱ_b 단계이다.

Fig. 1.2는 Laird에 의해 제안된 스트라이에이션 형성기구의 모형을 나타내고 있다.⁽²¹⁾ 이에 의하면 인장력이 반복될 경우의 균열은 그 선단부분의 결정이 국부적인 큰 슬립변형을 발생시키기 때문에 길이가 증가함과 동시에 둔화(blunting)된다(Fig. 1.2(c)). 계속해서 제하과정에서 균열은 닫히기 시작하고, 둔화된 균열선단 부분은 주름모양으로 접힌다(Fig. 1.2(d)). 이 때문에 최저점에 도달했을 때에는 균열은 그 선단의 양측에 “귀”를 남기고 재예화(re-sharpening)된다(Fig. 1.2(e)). 이와 같은 반복응력의 인장 및 제하과정중에 균열은 둔화와 재예화를 반복하고, 연속적으로 진전하다. 따라서 Fig. 1.2에서 알 수 있듯이 균열이 통과한 흔적에는 반복응력의 1사이클에 해당하는 줄무늬 모양이 남게 된다. 또한 이 진전과정에 속하는 균열의 선단에 형성된 소성역 치수는 결정립 치수 등의 조직적 치수에 비해 상당히 큰 것이 보통이다. 따라서 이 소성역 내부에서는 결정립 등의 조직을 단위로 하는 소성변형은 생기기 어렵다. 이것이 이 단계의 균열진전 특성이 조직에 대해서 민감하지 않은 주요한 원인이다.

스트라이에이션의 형성과정을 지나면 균열진전은 가속되고 재료는 불안정 파괴에 이른다. 이 단계에서 형성된 파면형태는 정적파괴에 의해서 형성된 것과 유사한 뒨플, 벽개 및 입계균열모양 등으로 특징지어진다. 이와 같은 균열진전과정은 균열진전의 제Ⅱ_c단계(Fig. 1.1)로 알려져 있고, 특히 고강도·저 연성 재료에서 현저히 나타난다.

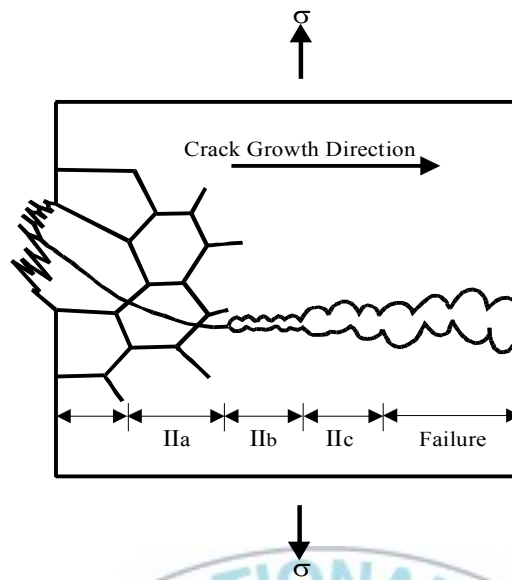
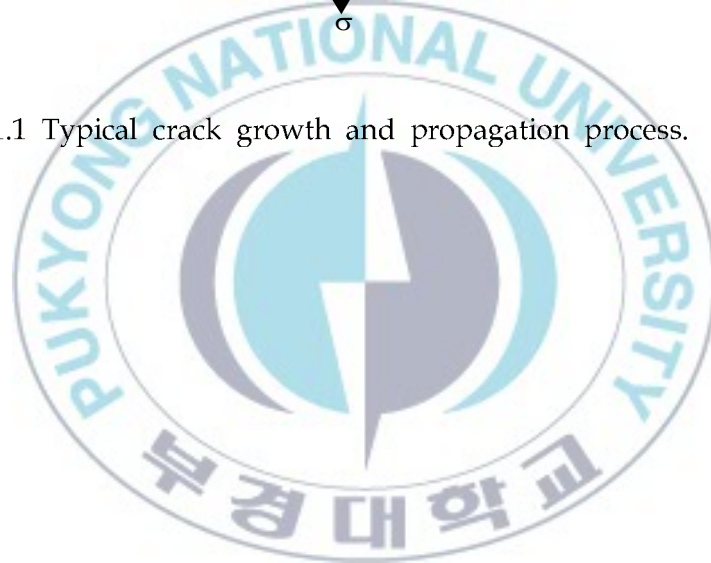


Fig. 1.1 Typical crack growth and propagation process.



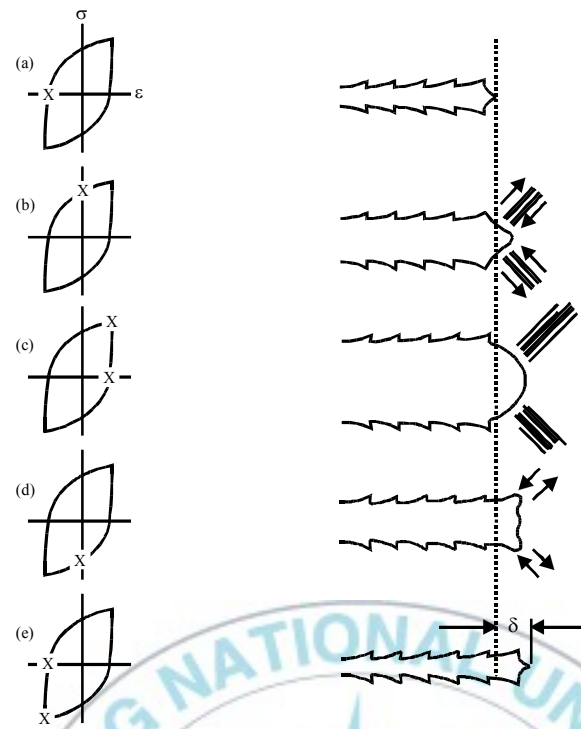


Fig. 1.2 Modeling of Striation mechanism by Laird.⁽²¹⁾

4) 피로균열 진전속도

피로균열의 진전은 제 I 단계와 제 II 단계로 구별된다. 한편, 소규모 항복조건하에서는 균열선단의 소성변형은 선형파괴역학 파라미터의 하나인 응력확대계수 (stress intensity factor) K 로 규정된다. 따라서 비교적 소규모 항복조건을 만족하기 쉬운 제 II 단계 균열의 진전속도 da/dN 은 K 의 함수로 표시될 수 있다.

지금 반복응력의 최대값, 최소값을 σ_{max} , σ_{min} 으로 할 때 K 의 최대값 K_{max} 와 최소값 K_{min} 은 이하의 식으로 나타낸다.

$$K_{max} = \sigma_{max} \sqrt{\pi a} \cdot F, K_{min} = \sigma_{min} \sqrt{\pi a} \cdot F \quad \dots\dots\dots (1 \cdot 1)$$

여기서 a 는 균열길이, F 는 시험편과 균열의 형상·치수, 부하방법 등에 의한 K 의 보정계수이다. 따라서 K 의 변동범위(stress intensity range) ΔK 는

$$\Delta K_{max} - K_{min} = \Delta \sigma_{min} \sqrt{\pi a} \cdot F \quad \dots\dots\dots (1 \cdot 2)$$

로 된다. 여기서 $\Delta \sigma = \Delta \sigma_{max} - \Delta \sigma_{min}$ 이다.

Paris와 Erdogan은 식(1·2)의 ΔK 에 의해 da/dN 가 아래의 함수로 표시될 수 있음을 밝혔다.⁽²²⁾

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad \dots\dots\dots (1 \cdot 3)$$

이 식은 일반적으로 Paris법칙이라 부른다. 여기서 C , m 은 실험상수이다. 알루미늄합금에서는 실험결과 정리해보면 $m=4$ 이며, m 은 대개 2~8의 범위를 갖는 것이 많다. 그 후 실시된 많은 실험에서 식 (1·3)은 특정의 범위에서만 성립하고 da/dN - ΔK 관계도 Fig. 1.3과 같이 3개의 영역으로 나타나는 것으로 밝혀졌다.

Fig. 1.3의 좌측의 제 II_a단계에서는 ΔK 의 감소와 함께 da/dN 은 급격히 감소하고, 균열의 진전이 사실상 없는 것으로 인정되는 ΔK 에 이른다. 이 ΔK 는 하한계 응력확대계수범위(threshold stress intensity range) ΔK_{th} 라 부른다. 우측의 제 II_c 단계에서는 ΔK 의 증가에 따라서 da/dN 는 급속히 증가하고, K_{max} 가 파괴인성 K_c 에

이르면 불안정 파괴한다. 이 K_{fc} 는 일반적으로 정적인 파괴인성보다 낮고, 피로파괴인성(fatigue fracture toughness) K_{fc} 과 부르는 경우도 있다. 양측을 제외한 중간 단계의 제Ⅱ_b단계에서는 균열이 안전하게 진전하고, Paris법칙인 식 (1·3)이 잘 성립한다. 다음에 제Ⅱ_a ~ Ⅱ_c 단계의 균열진전속도에 영향을 주는 인자와 특징을 간단히 정리하면 아래와 같다.

제Ⅱ_a단계 : 미시조직, 평균응력(응력비), 환경의 영향이 크다. 시험편 치수의 영향은 없다. 파면에는 미시조직에 대응하는 흔적이 보이고 불연속인 진전을 하고 있다고 생각된다. 균열 닫힘이 현저하게 생기는 수가 많다.

제Ⅱ_b단계 : 미시조직, 평균응력(응력비), 환경, 시험편 치수의 영향은 적고, 거의 응률에 의존하고 있다. 파면은 스트라이에이션이 주이고, 이 간격에 대응하는 연속진전을 하고 있으며, 균열 닫힘이 나타나는 수가 많다.

제Ⅱ_c단계 : 미시조직, 평균응력(응력비), 시험편 치수의 영향이 크나, 환경의 영향은 적다. 파면에는 딩플, 벽개, 입계 등 정적파괴가 접하는 비율이 50% 이상이 되고 진전속도는 점차로 ΔK 에서 K_{max} 에 지배된다. 균열 닫힘은 보이지 않는다.

이와 같이 각 단계에 미치는 영향인자가 다른 것을 알 수 있다. 여기서, 응력비(stress ratio, load ratio) R 은 다음 식으로 나타낸다.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} \dots\dots\dots (1 \cdot 4)$$

$\sigma_{\min} < 0$, 즉 $R < 0$ 의 경우에는 $\Delta K = K_{max}$ 가 일반적으로 사용되지만, 압축측도 포함한 전 응력 범위에 대해 식 (1·2)와 같은 형식으로 구한 ΔK 가 사용되는 수도 있으므로 주의를 요한다. 미시조직과 응력비는 저 및 고 ΔK 영역, 즉 제Ⅱ_a단계와 제Ⅱ_c단계의 균열진전에 크게 영향을 주고, 중간 단계의 제Ⅱ_b단계에서는 영향이 적다는 것을 알 수 있다. 또한 응력비의 영향을 고려한 진전 속도 식은 Forman에 의한 다음 식이 잘 이용된다.⁽²³⁾

$$da/dN = \frac{c (\Delta K)^m}{(1-R) K_c - \Delta K} = \frac{c (\Delta K)^m}{(1-R) (K_c - K_{\max})} \quad \dots\dots (1 \cdot 5)$$

이 식은 $K_{\max}$ 가 파괴인성 $K_c(K_{fc})$ 에 가까워지면 da/dN 가 빠르게 되는 것을 나타낸다.

균열진전속도를 결정하는 C 와 m 사이에는 명확한 물리적 근거는 없지만 다음의 실험식이 제안되어 있다.⁽²⁴⁾

$$C = \frac{A}{B^m} \quad \dots\dots\dots (1 \cdot 6)$$

여기서 A 와 B 는 실험정수이고, da/dN 를 $m/cycle$, ΔK 를 $MP \cdot a^{1/2}$ 로 했을 때, B 는 약 18, A 는 보통강에서 약 5×10^{-8} , 알루미늄합금에서 약 4×10^{-7} 이다. 이것은 강도와 조직에 의해 C 와 m 의 값은 변하며, da/dN - ΔK 관계는 $da/dN = A$ 및 $\Delta K=B$ 로 치환한 것과 같다.

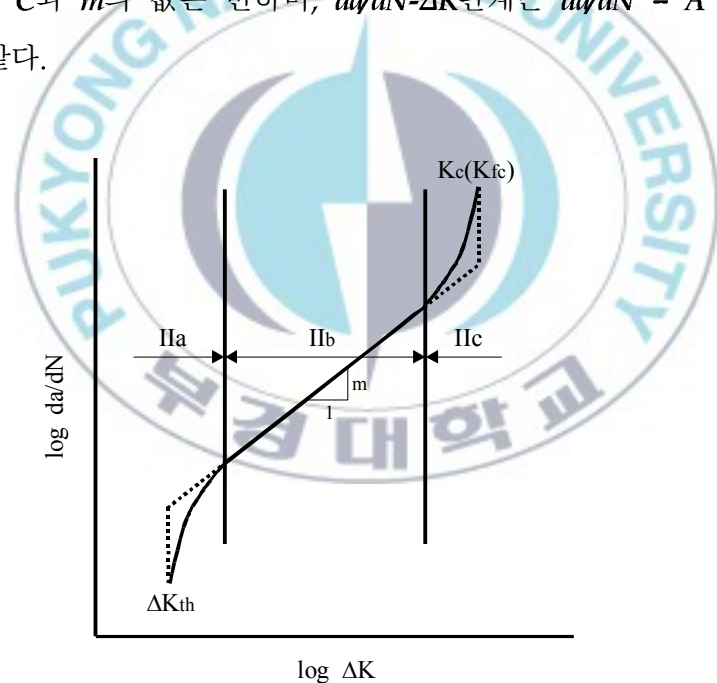


Fig. 1.3 Relationship between fatigue crack growth rate and stress intensity range

1.2.2 Diamond-like Carbon(DLC) 박막

다이아몬드상 카본 박막은 수소를 함유하는 박막의 경우에는 이온 에너지가 증가함에 따라 수소함량은 다소 감소하는데, 이는 선택적 스퍼터링 때문이거나, 기판과 이온의 충돌에 의한 반응 가스의 분해가 이온 에너지 증가에 따라 촉진되기 때문인 것으로 생각된다. 또한 이온에너지가 증가함에 따라 박막의 3차원적 결합이 증가하면서 박막의 구조는 점점 치밀해 진다.

Bubenzer 등은 thermal effusion에 의해 방출되는 가스를 분석하여 박막 내에서 탄화수소의 분자 확산에 의해 가스의 방출이 일어난다는 것을 보여 주었다. 그들은 합성에 사용된 이온의 에너지가 높을수록 작은 크기의 분자들만이 관찰되는 것을 보임으로써, 이온에너지의 증가가 박막의 구조를 치밀하게 하는 중요한 요인임을 보여주었다.

다이아몬드상 카본 박막의 원자구조는 아직 완전히 밝혀져 있지 않으나, 몇 가지의 모델들이 제시되어 있다. Angus 등은 벤젠 6각 고리들과 sp^3 결합을 하고 있는 탄소, 수소 등이 불규칙하게 결합되어 있는 fully constraint structure 모델을 제시하였는데, 이 모델은 박막의 전형적인 경도, 밀도 및 조성 값들과 잘 부합된다.^(25, 26)

또한 Tamor 등은 이와 비슷한 고결함 흑연 모델을 제시하기도 하였다. Smith 등은 박막의 광학적 특성이 클러스터 형태의 다이아몬드상 카본, 흑연상 카본, 폴리머상 탄화수소 그리고 void들이 혼합된 effective medium approximation 모델과 잘 부합된다는 결과를 제시하였다. 한편, Robertson과 O'Reilly는 비정질 기지 내에 존재하는 sp^2 결합들은 불규칙하게 분포되어 있는 것보다는 약 15 nm 크기의 클러스터를 형성하려는 경향이 있음을 보여 주었다. 따라서 다이아몬드상 카본 박막에는 이러한 sp^2 클러스터들이 존재하며 그들 주위는 수소와 결합하고 있거나 다른 클러스터들과 상호 연결되어 있다는 모델을 제시하였다. 다이아몬드상 카본 박막의 경우 수소에 의해 dangling bond들이 점유되어도 band gap이

다.⁽²⁷⁻²⁹⁾

다이아몬드의 경우보다 훨씬 작는데, 이는 박막 내에 존재하는 sp^2 클러스터들 때문이라고 설명할 수 있다. 이 모델은 또한 광원의 에너지에 따른 Raman의 peak 움직임 현상 등도 잘 설명할 수 있다. Fig. 1.4와 Fig. 1.5는 카본계의 결합 구조와 DLC 박막의 특징 및 용도를 나타내었다. 또한, Table. 1.1은 a-C와 ta-C(tetrahedral amorphous carbon), 다이아몬드 그리고 흑연의 특성을 요약하였다.^(30, 31)



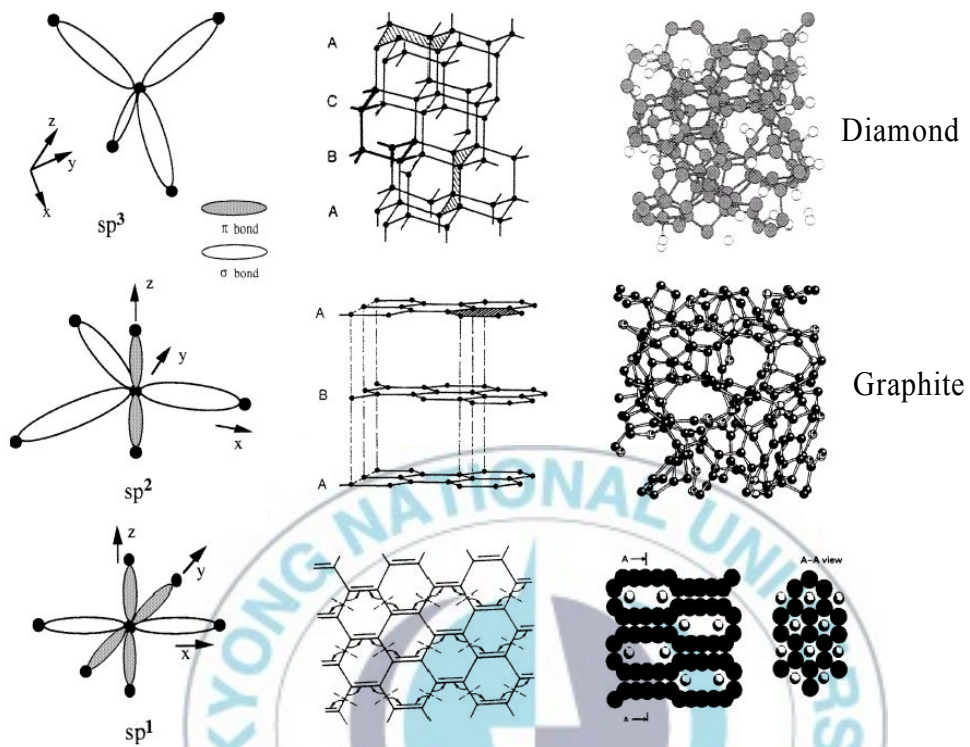


Fig. 1.4 Structure of carbon



Fig. 1.5 Properties and application of DLC films

Table 1.1 Comparison of major DLC films with those of reference materials

	ta-C	a-C	Diamond	Graphite
Structure sp ³ fraction	>80%	30~60%	100%	0%
Bond angle	110°	120°	109.5°	120°
Crystallinity	Amorphous	Amorphous	Cubic Diamond	Hexagonal
Raman	symmetric broad line at 1550 cm ⁻¹ , No 1330 cm ⁻¹ Broad line below 1330 cm ⁻¹ , No D graphitic line.	Very broad asymmetric line decreasing from 1550 to 1000 cm ⁻¹ , No distinguished D peak	1330 cm ⁻¹ sharp line	1580 cm ⁻¹ sharp line(G-line). 1350 cm ⁻¹ sharp line for nano-crystalline graphite(D-line)
hardness	120 GPa	2-5	120 GPa	-
Thermal stability	>700 °C	>200 °C	>700 °C	>700 °C

1.2.3 마모

1) 마모 개요

마모시험은 재료의 내마모성을 평가하는데 필요한 것이다. Fig. 1.6은 마모와 관련 된 구성요소가 어떻게 이루어져 있는지 개략적으로 나타낸 것으로서 독일 규격 DIN50320에 명시되어 있는 것이다. 그림에서 보면 재료, 윤활제, 환경 등이 복합적으로 작용하는 것을 알 수 있다. 트라이볼로지(tribology)는 특히 에너지 부족과 함께 최근 들어 그 중요성이 커진 연구 분야이다. 위와 같은 이유 때문에 재료시험의 여러 종류 가운데에서도 가장 표준화가 더딘 분야가 마모시험에 대한 것이다. 그러나 마모시험의 중요성이 점차 커짐에 따라 보편성이 있는 시험결과를 얻어야 하는 필요성이 더욱 커지게 되었고 이는 표준화된 시험 방법의 개발과 직결된 문제이기도 하였다.

2) Tribology

독일규격(DIN 50320)에 따르면 “마모(wear)는 물체의 표면에서 기계적인 운동에 의해 물체가 점차적으로 부스러져 떨어져 나가는 현상을 말한다.”라고 되어 있으며, 기계적인 운동으로는 기체, 액체, 고체 등의 접촉에 의한 것들이 있다고 하였다. 그러나 오늘날의 산업 현장에서 마모만이 독자적으로 작용하는 경우는 흔하지 않으며 대부분 마찰(friction)과 윤활(lubrication)이 마모(wear)와 같이 작용하여 나타나므로 매우 복잡한 양상을 띄게 된다. 따라서 마찰, 마모, 윤활의 3요소를 종합적으로 연구하는 것이 필요하며, 이들의 복합적 작용은 기계 장치의 구동 및 운전 효율에 큰 영향을 미친다. 실제로 산업계에서는 생산되는 총 에너지의 30%가 마찰 과정에서 소실되어 없어질 정도로 생산성과 밀접한 관계가 있어 에너지 절약에 직접적인 기여가 가능하다.

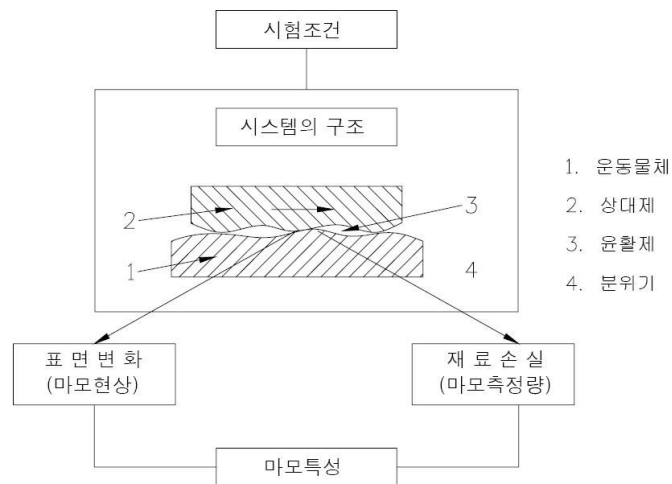


Fig. 1.6 The composition factors of friction, lubrication and wear system.

3) 마모(Wear)

마모에 대한 연구는 Leonardo da Vinci가 처음이며 그는 구름 베어링에 대해 기록을 남겼고 마모량이 하중에 비례하여 증가한다고 설명하였으며, 30%Cu-70%Sn 합금의 사용을 제시하기도 하였다. 그 이후 마모에 대한 연구는 1930년대에 독일에서부터 시작되었다. Fachsel은 건조마모(dry wear)를 표면 돌출부의 변형-전단의 반복에 의한 것으로 설명되었다. 이 이론은 Fiak, Mailander와 Dies에 의해 발전되었으며, 변형된 부분이 산화되는 것으로 마모에 있어서 분위기의 중요성을 알아내었다. Siebel은 1938년에 review 논문을 발표하였는데, 여기서 마모를 7가지로 분류하였다.

- (1) 윤활 안 된 표면에서 미끄럼마찰에 의한 마모
- (2) 윤활 된 표면에서 미끄럼마찰에 의한 마모
- (3) 윤활 안 된 표면에서 구름마찰에 의한 마모
- (4) 윤활 된 표면에서 구름마찰에 의한 마모
- (5) 진동 접촉 상태에서의 마모

(6) 움직이는 고체분말에 의한 마모(erosion)

(7) 움직이는 액체에 의한 마모(cavitations)

그리고 Siebel은 이미 마모현상에 대해 이것이 여러 가지 복잡한 작용의 결과 나타나는 것이어서 간단한 마모시험으로 재료의 마모 특성을 나타낼 수 없다고 지적하였다.

Burwell은 “마모”(wear)라는 전문 학술잡지의 창간호(1957)에서 마모현상을 다음과 같이 기구 별로 구별하였다.

(1) 응착 마모 (Adhesive wear)

(2) 연삭 마모 (Abrasive wear)

(3) 부식 마모 (Corrosive wear)

(4) 표면 피로 마모 (Surface fatigue wear)

이 분류는 오늘날까지 일반적으로 사용되고 있다.

4) 마모기구

마모기구의 분류는 앞서 밝힌 것처럼 1938년 Siebel이 제안한 것과 1957년에 Burwell이 제안한 것 두 가지가 있는데 Siebel은 상대운동의 종류에 따라 분류하였고, Burwell은 마모기구의 종류에 따라 분류한 것으로서, 기계적 성질 시험과 비교하면 전자는 인장시험, 압축시험 등의 분류와 비슷하고 후자는 취성 파괴, 연성 파괴 등의 분류와 비슷하다. 실제 마모시험에 있어서는 위의 두 가지 요소 이외에 마모에 관련되는 다른 요소들도 알아야만 시험결과의 정확히 비교가 가능하다. 마모와 관련된 요소들을 정리하면 : (1) 상대운동의 종류, (2) 관련 요소, (3) 주요 마모기구, (4) 하중, 마찰계수, 움직인 거리, (5) 재료의 마모 특성, (6) 마모율, (7) 마모표면의 형상

마모와 관련된 기본적인 상대의 운동 종류는 미끄럼, 구름, 충격, 진동, 흐름의 5가지이며, 대부분의 상대운동은 이들 기본적인 움직임이 홀로 나타나거나 둘 이상이 같이 나타나는 형태이다. 마모기구에는 표면피로, 연삭, 응착+전단, 부식마

모(tribo-chemical wear)의 4가지가 있다. 실제 상황에서는 어느 한 가지 마모기구가 홀로 나타나는 경우는 드물고, 대부분 2가지 이상이 복합적으로 작용한다. 이들 마모기구를 간단히 설명하면 아래와 같다. 이 가운데서 표면피로와 연삭은 주로 응력과 관계되는 것이고 응착 및 부식에서는 재료의 특성이 비교적 크게 작용한다.

(가) 표면 피로마모: 표면에서의 반복 접촉에 의한 피로 때문에 균열이 생겨 일어나는 마모

(나) 연삭 마모: 단단한 면의 돌기나 경질입자의 절삭 작용에 의해 일어나는 마모

(다) 응착 마모: 참 접촉부에서 생긴 응착 부분의 전단에 의해 생기는 마모

(라) 부식 마모: 분위기나 윤활제의 부식작용과 마찰의 기계적 작용이 같이 일어나면서 생기는 마모

표면피로는 주로 반복 접촉이 일어나는 구름 접촉 시스템, 즉 볼 베어링 같은 곳에서 잘 일어난다. 헤르츠의 계산 결과에 따르면 두 물체가 접촉할 때 최대 전단 응집력은 표면이 아니라 표면에 가까운 물체의 내부에서 나타난다. 따라서 베어링의 내륜이나 외륜의 어느 한 곳을 기준으로 보면 계속적으로 볼이 지나가면서 전단 응력을 반복적으로 받게 되어 결국 피로 현상에 의해 균열이 생기고 이것이 커져서 떨어져 나가게 된다. Fig. 1.7은 표면피로에 의해 생긴 마모표면으로서 핀-원판시험에서 원판이 반복적으로 하중을 받게 되어 생긴 결과이다. 연삭마모(abrasive wear)는 크게 2가지 물체가 작용하는 경우와 3가지가 작용하는 경우로 나눌 수 있으며 Fig. 1.8은 그 예이다. 이 마모기구는 마모로 인한 손실 원인 가운데 50%를 차지할 정도로 많이 나타나는 것이며 Fig. 1.9에서 보듯이 미세전단(micro-cutting)에 의한 변형이 주요 기구이다. 연삭마모 때의 마찰계수는 Table 1.2와 같이 미끄럼 마모보다 대략 1,000배 정도 크다. 따라서 연삭마모는 다른 마모에 비해 비교적 마모속도가 빠르고 이로 인한 손실이 크며 이 때문인지는 확실하지 않으나 여러 가지 마모시험 방법 가운데 비교적 일찍부터 규격화된 시험 방법이 연삭마모에 대한 것이다(ASTM G65).

연삭마모에서는 마모 부스러기나 연삭제의 정도가 매우 중요한데 정도에 따른

마모량은 Fig. 1.10과 같은 관계가 있으므로 마모손실을 줄이려면 재료의 경도가 연삭제나 마모 부스러기의 정도보다 1.3배 이상이어야 한다. 그러나 1.3배보다 무작정 커진다고 해서 비례적으로 좋아지는 것은 아니므로 굳이 1.3배 보다 크게 하려고 애쓸 필요는 없다. 응착마모는 재료의 상호작용의 중요한 요소로 작용하는 마모기구이다. 응착은 Van der wals 힘과 1nm 정도 의 거리에서 작용하는 강한 표면력에 의해 나타나는데 그 종류는 Fig. 1.12와 같다. 응착의 원인이 되는 힘의 종류에서 알 수 있듯이 금속의 표면이 산화막에 덮여 있지 않으면 응착이 더욱 잘 일어난다.

따라서 응착 마모는 진공 중에서 잘 일어나며 재료의 특징이 중요하게 작용하는 마모기구이다. 응착마모는 응착이 일어난 부분에서 전단 등에 의한 파괴가 일어나면서 재료가 옮겨 붙거나 마모 부스러기가 생겨 일어난다. Fig. 1.11은 응착 마모가 일어난 표면이다. 부식마모(tribo-chemical wear)는 앞서의 3가지 마모기구가 고체의 접촉에 의해서 나타나는 것인데 비해 주위 환경, 즉 분위기가 제 3의 요소로서 적용한다는 점이 다르다. Fig. 1.13은 이러한 예를 보여주고 있으며 일반 적으로 2개의 접촉면이 먼저 주위 분위기와 반응하여 산화물, 염화물 등의 반응 생성물이 표면에 생기고 이들이 서로 접촉하면서 반응층이 깨져나가고 마모 부스러기가 생기며 새로운 표면이 나타나면서 위의 과정 이 반복되어 일어난다. 마모기구 가운데서 가장 복잡한 형상이며 시험도 어려울 뿐 아니라 시험 결과의 해석도 쉽지 않다.

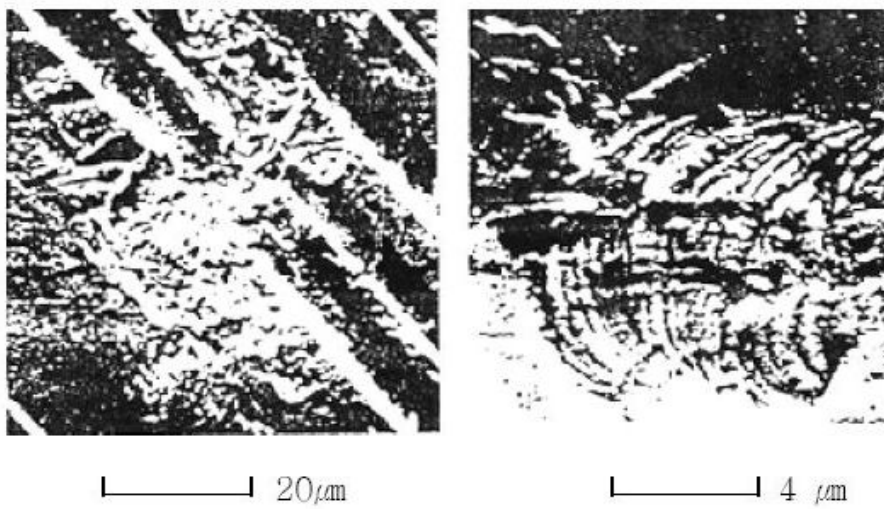


Fig. 1.7 The surface fatigue and friction surface.



Fig. 1.8 The abrasive wear shape.

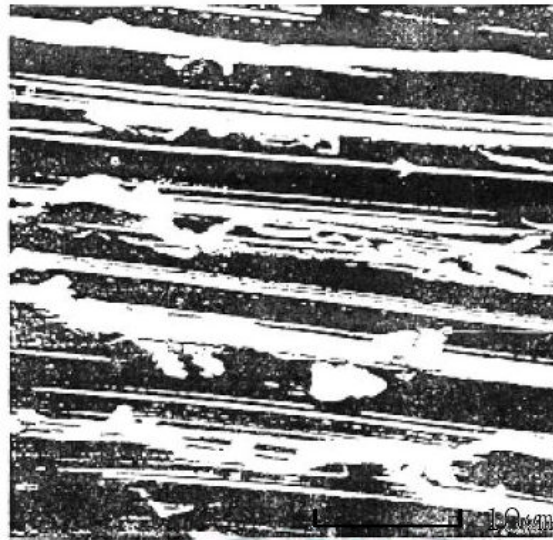


Fig. 1.9 The friction track by grinding friction.

Table 1.2 The friction process according to friction mechanism.

	마 모 과 정		
	마모물체 및 마모면	이동 파괴	변화
표면피로	피로	파괴	균열, 공식(pits)
연삭	변형	파괴	깊은 자국, 패인자국, 줄무늬모양 패인자국
응착	변형	파괴 (Transfer fracture)	원추모양(cone), 얇은 조각(flakes), 공식(pits)
부식	변형	파괴 (Adsorption fracture)	반응생성물(얇은 막, 부스러기)

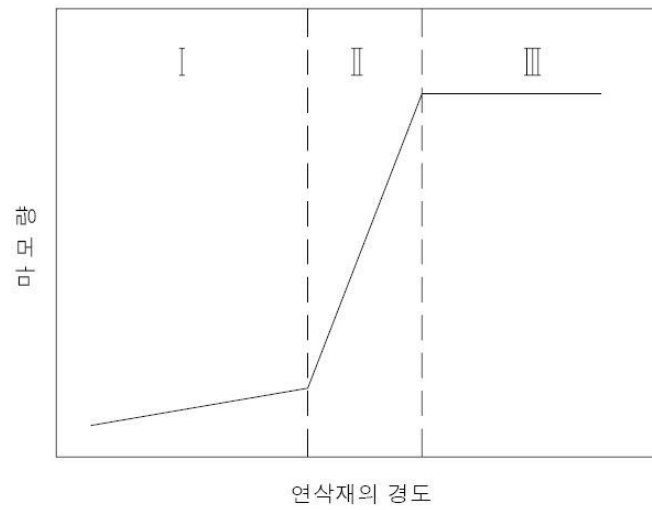


Fig. 1.10 The friction quantity with grinding material hardness.

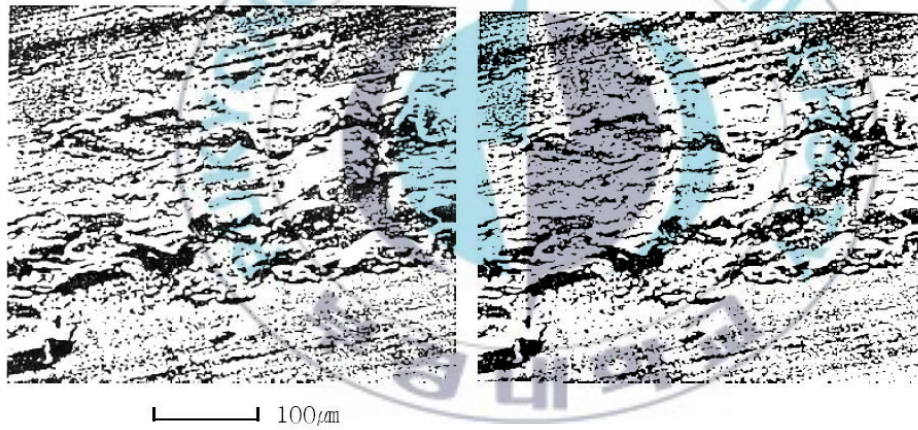


Fig. 1.11 The surface of adhesion wear.

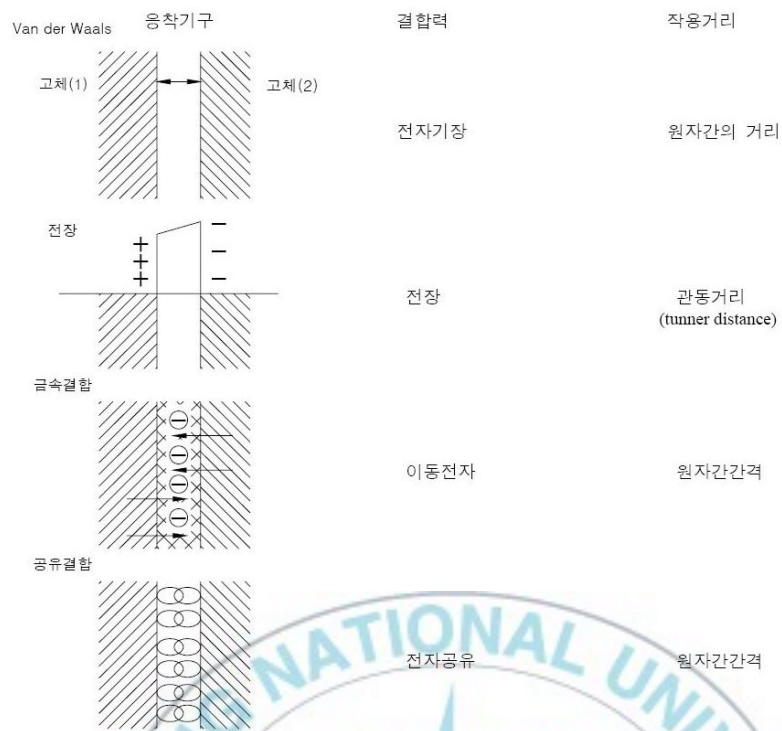


Fig. 1.12 The surface bonding force in adhesion state.

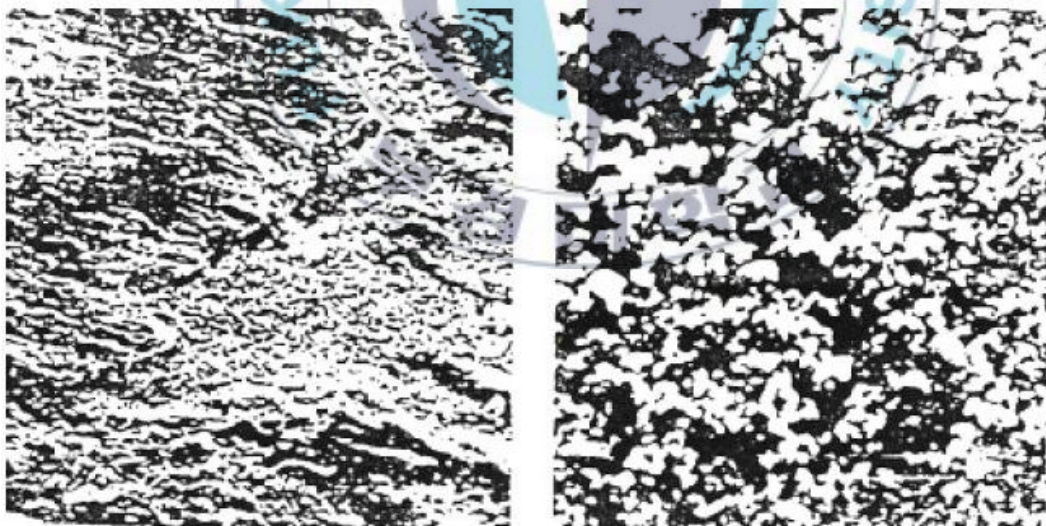


Fig. 1.13 The surface of tribo-chemical wear.

1.3 연구 목적과 필요성

유압 장치는 작은 힘으로 큰 힘을 전달할 수 있으며, 작업의 반복성이 우수하여 무거운 물체를 정밀하게 조작할 수 있다. 간단한 조작으로 운전과 정지가 가능하고, 속도 조절이 용이하며 정확하다. 복잡한 기어나 풀리 또는 레버를 사용하지 않고, 파스칼의 원리에 의해 힘을 수십 배 또는 수백 배 이상 증폭시킬 수 있다. 일정한 힘과 토크를 낼 수 있다. 기계식이나 전기식에 비하여 구성 요소가 간단하다. 힘과 전달 기구가 간단하고, 멀리 떨어진 위치에서도 배관 하나만으로 간단하게 힘을 전달할 수 있으며, 방향에 대한 제한을 받지 않는다.

유압펌프는 중장비용, 전차용 등으로 사용되고 있으며 유압을 이용하여 장비를 동작시키는 중요한 부품으로써 작은 크기의 제품으로 큰 동력을 만들어내는 목적에 사용된다. 특히, 중장비의 중량물에 대하여 상하이동 및 좌우회전 시 부드러운 동작과 함께 큰 동력을 만들어 내어 안전하고 정확한 동작을 구성하게 한다.

굴삭기, 대형크레인 등 회전용 중장비의 동력을 전달하는 중요 부품인 피스톤 펌프는 동명모트를, 제일유압 등에서 제작하여 공급하고 있으나, 아직까지 많은 제품이 보쉬렉스로스(독일), 가와사키 및 우찌다(일본) 등에서 수입하여 굴삭기, 대형크레인 및 군용 전차 등의 중장비에 적용되고, 해외기술 의존도가 높은 제품으로 핵심부품의 국산화 개발이 시급한 상황이고 이 기술을 확보함으로써 수입 대체 효과를 얻고, 국내기술을 축적하여 안정적인 생산기술을 보유하고자 한다.

굴삭기 및 대형 크레인 등의 동력을 전달하는 중요 부품인 피스톤 펌프의 부품들은 보쉬렉스로스 등에서 도입되어 해외기술 의존도가 높은 제품으로 국내에서 제작된 부품은 효율이 떨어지고 장기간 사용이 불가능한 점 등의 문제점을 가지고 있다. 국산화 개발을 통하여 설계 및 제작 기술 자료를 획득하고 해외기술에 의존하던 제품을 국내기술로 제작하여 안정적인 생산기술 확보하고자 한다.

사용 전후의 피스톤 소재의 미세 조직에서, 초기에는 질화층이 뚜렷하게 관찰

되고 있지만, 사용 시간이 경과함에 따라서 질화층이 없어지는 양상을 알 수 있다. 피스톤 펌프 구동시 내부에서 발생하는 열에 의해서 피스톤 소재의 내부 조직이 변화하고 있음을 알 수 있고, 이 조직의 변화에 따라 최초로 보유하고 있던 경도가 손실되어 내마모성이 저하되며, 최종적으로 펌프의 효율이 떨어지는 현상이 발생하는 것으로 추정된다.

따라서 피스톤 바디소재가 장기간 사용에도 최초의 고경도와 고윤활성을 유지할 수 있다면, 펌프의 효율이 떨어지는 것을 방지 할 수 있다.

다이아몬드상 카본(diamond like carbon, DLC) 박막은 비정질 카본 박막의 하나로서 다이아몬드와 유사한 높은 경도, 윤활성, 내마모성, 화학적 안정성, 전기 절연성, 그리고 광학적 투과성을 가지고 있는 재료를 말한다. 수소를 함유한 경우에는 구조적 특성을 강조한 수소함유 비정질 카본이라는 이름이 사용되기도 하며, 최근 이러한 FVA (Filtered Vacuum Arc)법으로 제조된 초경질- 다이아몬드상 카본 박막은 sp^3 분율이 매우 높고, 거의 다이아몬드에 가까운 기계적 물성 및 밀도 등의 특성으로 인해 ta-C(tetrahedral amorphous carbon) 혹은 a-D(amorphous diamond)라고 불리고 있으며, 대표적인 고윤활 고경도 물질로 분류된다.

다이아몬드상 카본 박막은 그 특이한 구조와 우수한 물리화학적 성질로 인해 많은 연구자들의 관심을 끌어 왔다. 다이아몬드상 카본 박막의 구조는 다이아몬드나 흑연과는 달리 비정질이며, 따라서 그 물리 화학적 특성이 넓은 범위에 걸쳐 있다. 박막내의 결합 형태는 카본의 경우 sp^3 , sp^2 , sp^1 혼성결합이 모두 가능하므로 단일결합 뿐 아니라 이중, 삼중 결합이 섞여 있다. 이러한 점에서 다이아몬드상 카본 박막은 같은 족인 Si의 비정질 재료보다 복잡한 결합구조를 가지고 있는데, 합성조건에 따라 이러한 결합형태의 비율을 파악하는 것이 박막구조와 특성의 이해를 위해 매우 중요하다. 다이아몬드상 카본 박막의 경도는 합성조건에 따라 크게 차이가 나지만 대체로 AlN 나 Al_2O_3 와 비슷한 수준의 값을 가지고 있다. 다이아몬드상 카본 박막의 우수한 기계적 성질중의 하나로 높은 윤활성을

들 수 있는데, 특히 습도가 낮은 조건에서의 윤활성도 뛰어나 우주산업용 기계부품의 윤활코팅에 적합하다는 평가를 받고 있다.



1.4 논문의 구성 및 개요

제1장은 종래의 연구 결과들을 살펴보고, 본 연구의 목적에 대하여 기술하였다.

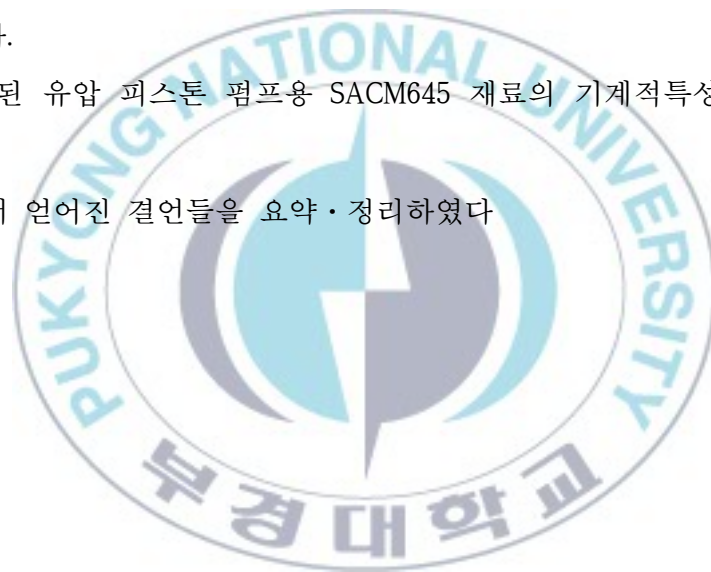
제2장은 유압 피스톤 펌프의 재료로 사용되고 있는 SACM645 재료를 열처리 및 표면 처리하여, 인장 특성 및 피로균열진전특성을 조사하였다.

제3장은 유압 피스톤 펌프의 재료로 사용되고 있는 SACM645의 모재(BM), QT시험편(QT), QT 질화시험편(QTN) 및 QT유도경화시험편(QTI)을 사용하여 피로한도를 조사하였다.

제4장은 유압 피스톤 펌프의 재료로 사용되고 있는 SACM645 재료를 다양한 방법으로 열처리를 실시한 후 건조, 윤활 및 고온 윤활 분위기에서 마모 특성을 조사하였다.

제5장은 DLC코팅된 유압 피스톤 펌프용 SACM645 재료의 기계적특성을 조사하였다.

제6장은 각 장에서 얻어진 결론들을 요약·정리하였다



참고문헌

1. 김정태, 권제인(1996), “플라즈마 이온 질화한 SACM645 강의 미세조직 및 피로균열 발생의 해석”, 한국열처리공학회지, 제9권 제1호, pp. 69~77.
2. J. M Cowling and J. W. Martin(1980), Heat Treatment 79, The metal society, pp. 178.
3. D. H Jack and S. Winnik(1980), Heat Treatment 79, The metal society, pp. 169.
4. B. K. Jones and J. W. Martin(1978), Metals Technol. July, pp. 217.
5. 이임열 (1989), 대한금속학회지, 제25권 제6호, pp. 406.
6. 山中久彦(1975), 이온 窒化法, 日刊工業新聞社, pp. 24.
7. H. Herman(1981), Nuclear Instrumenes and Method, 182/183, pp. 887.
8. 박성길(2008), “wear Test Guide”, (주)네오플러스
9. 오세욱, 이치우, 윤한기, 남기우(1993), “재료강도학”, 원창출판사, pp. 122~179.
10. 김일현(1999), “파괴 · 강도학”, pp. 54~80.
11. 한승호, 김정규(1996), 철강구조물 부재의 강도평가 및 피로균열진전거동”, 대한기계학회논문집 A권, 제21권 제10호, pp. 1694~1701.
12. 이태호, 김성준(1997), “고질소 오스테나이트계 내식강의 고온변형특성”, 대한금속학회지, 제35권 제9호, pp. 1146~1155.
13. 강창룡, 성장현, 배동수, 포스코 기술논문집, 제11권, pp. 141.
14. 송삼홍, 강명수(1997), “터빈용 Cr-Mo-V강의 고온 환경변화에 따른 피로거동에 관한 연구”, 대한기계학회논문집 A권, 제21권 제1호, pp. 173~179.
15. 소태원, 윤기봉, 정세희(1996), “표면균열을 갖는 원형봉재 시편을 이용한 고온 피로균열성장 연구”, 대한기계학회논문집 A권, 제20권 제11호, pp. 3451~3423.

16. 부명환, 박영철, 광희신웅(1998), "WC-Co초경합금의 피로균열진전특성에 미치는 미시조직의 영향", 대한기계학회논문집 A권, 제22권 제8호, pp. 1409~1417.
17. 문원진, 김익수, 강창룡, 성장현, 김기돈(1997), "냉각제어된 Fe-Si-Mn-P 고장력 강판의 미세조직 및 기계적 성질", 열처리공학회지, 제10권 제2호, pp. 109~120.
18. 김강삼, 조용기(2010), "중간층을 이용한 DLC 박막의 밀착력에 관한 연구", 한국표면공학회지, 제43권 제3호, pp. 127~131.
19. 이재훈, 김성완(2011), "실리콘 함유 DLC 박막의 마찰마모 시험에 의한 물리적 특성 및 화학적 결합 구조 변화 고찰", 열처리공학회지, 제24권 제3호, pp. 127~132.
20. 안효석(2004), "저마찰 플라즈마 코팅 마찰마모 메카니즘 규명", 한국과학기술연구원, 과학기술부 (보고서번호 kist2004_043).
21. C. Laird and G. C. Smith(1962), "Crack propagation in high stress fatigue", Philosophical Magazine, Vol. 8, pp. 847~857.
22. P. C. Paris and F. Erdogan(1963). Tran. of the ASME Ser. D, pp. 528~534.
23. Foreman, R.G. et al.(1967), "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic Loaded Structures", J. Basic Engrg., Trans. ASME, Series D, Vol. 89, pp. 459~465.
24. H. Kitagawa(1972), "疲勞き裂の成長速度に關する實驗的法則とその關聯理論", 材料, Vol. 21 No. 227, pp. 108~117.
25. V. Kudoyarova, A. Chernyshov, t. Zvonareva, N. Dzhelepova, and M. Tsolov(1998), Surf. Coat. Technol, Vol. 100, pp. 192.
26. J. H. Lee, D. S. Kim, Y. H. Lee, and B. Farouk(1996) J. Electrochem. Soc., Vol. 143, pp. 1451.
27. P. Koidl, C. Wild, B. Dishler, J. Wagner and M. Ramsteiner(1989),

- Material Science Forum., Vol. 52&53, pp. 41.
28. M. Yoshikawa(1989), Material Science Forum., Vol. 52&53, pp. 365.
29. C. Weissmantel, K. Bewilogua, C. Schuver, K. Breuer and H. Zscheile(1979). Thin Solid Films., Vol. 61, pp. 1.
30. M. Kitabatake and K. Wasa(1985), J, Appl.Phys., Vol. 58, pp. 1693.
31. C. B. Collins, F. Davanloo. E.M. Juengerman, W.R. Ocborn and D.R. Jander(1989), Appl. Phys. Lett., Vol. 54, pp. 216.



第 II 章

표면 처리한 SACM645 재료의 인장 및
피로균열진전특성



2.1 서 언

유압 피스톤 펌프와 모터는 간단한 구조로서 고압의 유압원을 생성하거나 소형이면서도 높은 토크를 발생하기 때문에 유압시스템에 널리 사용되고 있다. 피스톤과 실린더 사이의 좁은 간극에서 마모상태는 피스톤 펌프와 모터의 성능 및 수명에 직접적으로 아주 큰 영향을 미친다. 이와 같이 내마모성, 인성 및 강도가 필요한 펌프에서 표면은 단단하게 하고, 내부는 연성을 가지면서 인성을 가지게 하는 방법이 표면경화처리이다. 표면경화처리는 질화법과 침탄법이 있으며, 현재 피스톤펌프에 사용되는 피스톤은 표면에 질화처리를 실시하여 사용하고 있다. 질화처리는 침탄처리에 비하여 비용이 적게 들고 처리가 쉬워서 여러 부품에 적용하고 있다.^(1~8)

유압기기들의 고압화에 따라 상대운동부의 일정한 간극 및 미세한 표면조도를 유지하기 위하여 표면처리 기술의 중요성이 부각되고 있다. 특히 가장 높은 고압을 발생시키는 유압 피스톤의 경우, 주요 부품들의 표면처리 기술을 이용한 표면경도의 확보는 부품들의 내마모성, 내피로성, 내식성 등의 향상을 위하여 반드시 필요하다.⁽⁹⁾ 그렇지 못할 경우 마모에 의한 표면손상으로 펌프가 파손되는 결과를 초래하므로 표면처리 기술에 대한 많은 연구가 필요하다.^(10~15) 그러나 유압피스톤 펌프 모터에 대한 지금까지 수행된 많은 연구와 제품 개발, 생산에도 불구하고 피스톤 소재의 피로 특성에 대한 이론적인 연구와 이에 관한 실험은 상당히 미흡한 실정이다.

따라서 본 장에서는 유압 피스톤 펌프의 재료로 사용되고 있는 SACM645 재료를 열처리 및 표면 처리하여, 인장 특성 및 피로균열진전특성을 조사하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 재료 및 시험편

본 장에서 사용한 재료는 (주)POSCO에서 제조한 SACM645를 열처리 및 표면 처리 방법을 달리하였다. Table 2.1에 SACM645의 화학성분을 나타내었다. 시험편은 모재(BM : Base metal), QT(Quenching & Tempering) 시험편, QT질화(QTN : Quenching & Tempering + Nitriding) 시험편 및 QT유도경화(QTI : Quenching & Tempering + Inductive hardening) 시험편 등 총 4종류이다. Table 2.2에 열처리 및 표면처리 조건을 나타낸다. 인장시험편은 KS B 0801에 의하여 제작하였으며, 피로시험편에 사용한 CT(compact tension)시험편은 ASTM E647 규격에 의하여 폭 50 mm, 두께 12.5 mm, 초기균열 23 mm로 제작하였다. 2종류 시험편의 형상과 치수를 Fig. 2.1에 나타내었다.

2.2.2 미세조직의 정성 및 정량분석

재료의 열처리 및 표면 처리에 따른 미세조직 변화는 경면 연마와 1% 나이탈 용액으로 표면을 에칭하여 광학현미경과 주사전자현미경을 사용하여 관찰하였다.

2.2.3 인장 및 경도시험

열처리 및 표면 처리 종류에 따른 인장 특성을 조사하기 위하여, 만능재료시험기(INSTRON 8516)를 사용하여 크로스헤드 속도 1 mm/min로 실험을 실시하였다. 미소경도는 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 4.9 kN의 하중에서 측정하였다.

2.2.4 피로균열진전시험

피로시험은 ASTM E647 규격에 의하여 제작된 시험편을 인장시험기와 같은 시

험기를 사용하여 실시하였다. 피로시험 조건은 응력비 $R = 0.1, 0.3, 0.5$ 의 정현파, 주파수 10 Hz로 대기 중에서 실시하였다. 피로균열진전시험은 모재 및 QT시험편은 최대하중(P_{max}) 5.9 kN으로 실시하였고, QT질화시험편 및 QT유도경화시험편은 최대하중(P_{max}) 10.8 kN으로 실시하였다. 하중을 달리한 이유는 QT질화시험편은 표면에 질화처리, QT유도경화시험편은 표면 유도 가열 처리를 실시하여 표면 경도가 높아서 균열 발생이 어려울 것으로 판단하였기 때문이다. 균열진전은 클립 게이지를 사용하여 측정하였으며, 응력확대계수는 아래 식을 이용하여 계산하였다.

$$K = \left[\frac{P}{(BW^{1/2})} \right] \cdot f(x), \quad (X = a/W)$$

$$f(x) = (2 + X)/(1 - X)^{3/2} \cdot (0.886 + 4.64 \cdot X - 13.32 \cdot X^2 + 14.72 \cdot X^3 - 5.6 \cdot X^4)$$

이 식은 $0.2 \leq a/W < 1$ 에서 적용 가능하다. 여기서 B는 시험편의 두께, W는 판폭, a는 균열길이를 나타낸다.

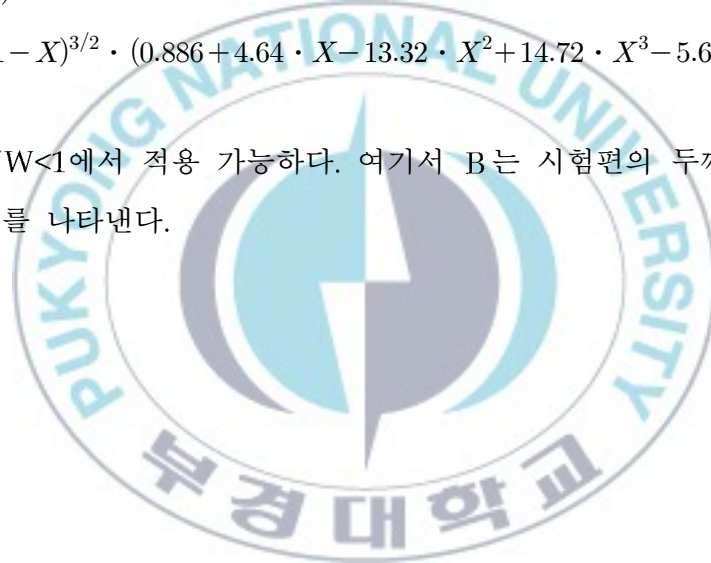
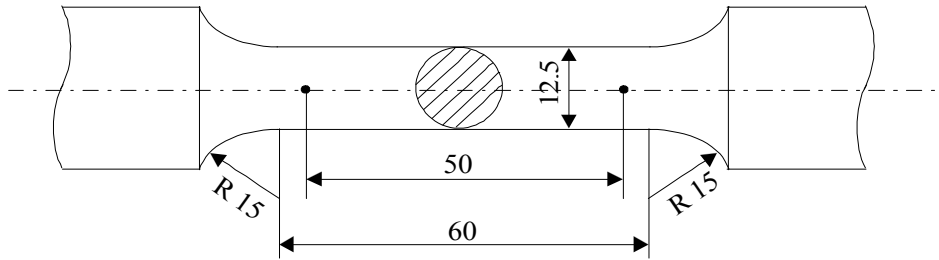


Table 2.1 Chemical compositions of SACM645

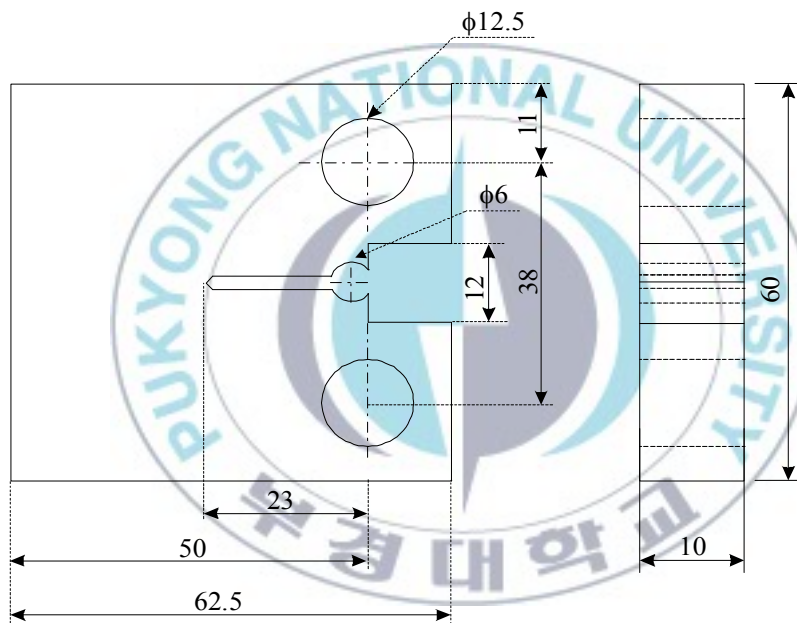
C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Fe
0.43	0.32	0.34	0.08	1.48	0.19	0.17	1.11	Bal.

Table 2.2 Each treatment conditions of SACM645

Type	Treatment condition
Base metal	As rolling
QT	900 °C oil-quenched, 650 °C 1h tempered
QT nitriding	900 °C oil-quenched, 650 °C 1h tempered and 920 °C 60 h, furnace cooling
QT inductive hardening	900 °C oil-quenched, 650 °C 1h tempered and 850 °C 1 sec, air cooling



(a) Tensile specimen



(b) CT(compact tension) specimen

Fig. 2.1 Shape and dimensions of specimen. (unit : mm)

2.3 실험결과 및 고찰

2.3.1 미세조직의 정량 및 정성적 관찰

SACM645는 여러 가지 방법으로 열처리 및 표면 처리를 실시하였지만, 대표적으로 QT질화시험편의 미세조직을 Fig. 2.2에 나타내었다. 그림에 나타내는 것처럼 질화처리는 깊이 약 300 μm 까지 이루어졌으나, 현장에서 적용하는 경화층 깊이는 통상적으로 200 μm 정도이다. 또한 이 그림은 열영향을 받은 부분도 일부 관찰되었으며, 내부는 QT 처리에 의한 템퍼드 마르텐사이트 조직으로 관찰되었다.

Fig. 2.3은 현재 유압 펌프 및 모터에 사용하고 있는 SACM645 소재의 피스톤을 절단하여, 관찰한 것이다. 그림에서 나타내는 것과 같이 양쪽 끝부분은 질화 처리된 것을 확인할 수 있으며, 내부는 템퍼드 마르텐사이트 조직을 나타내고 있다.



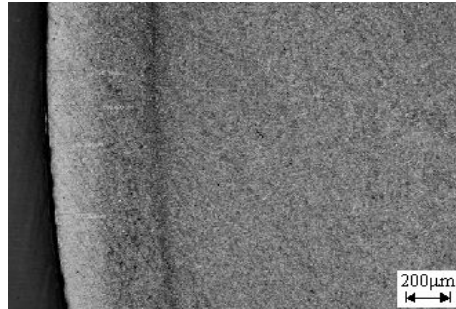


Fig. 2.2 Micro structure of the SACM645 with QT nitriding treatment.

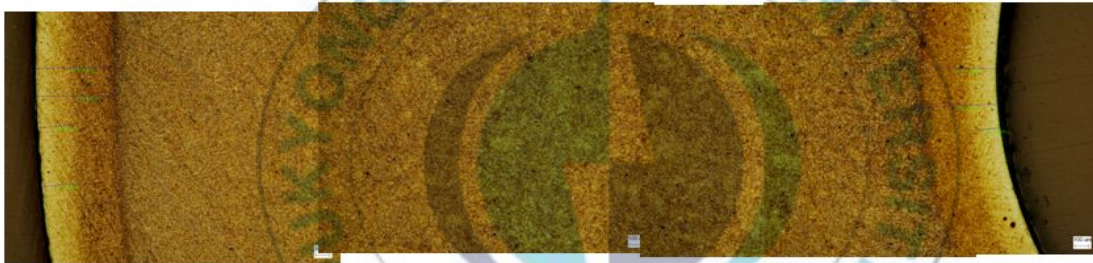


Fig. 2.3 Micro structure of commercial piston made of SACM645 for hydraulic pump.

2.3.2 인장특성

3종류의 시험편을 사용한 인장시험 결과를 Fig. 2.4에 나타내었다. QT시험편과 QT질화시험편의 최대응력은 820 MPa 정도로 비슷한 값을 나타내고 있으나, 변형률은 많은 차이를 나타내었다. 즉, 변형률의 크기는 QT시험편은 12 %정도, QT질화시험편은 약 3 %정도, QT유도경화시험편은 약 2 %정도를 나타내었다. QT 시험편은 담금질 후에 템퍼링으로 인성을 부여하였기 때문에 많은 변형이 발생하였다. 그러나 QT질화시험편은 질화처리 후 표면 경도가 800 Hv로 매우 높으며, 연성이 매우 적게 나타났다. 한편 QT유도경화시험편은 일반적으로 표면 경화에 의하여 높은 강도와 풍부한 연성을 가지게 된다. 그러나 Fig. 2.4에서 인장강도는 1,700 MPa로 매우 높았으나 연성이 매우 작았다. 이것은 유도경화처리에 의하여 내부까지 열처리된 것이 원인이라 판단된다.

각종 처리방법에 따른 경도값을 측정하여 Fig. 2.5에 나타내었다. 모재 및 QT 시험편의 경도는 210 ~ 230 Hv로 비슷하게 나타났다. 그러나 QT유도경화시험편은 내부까지 550 ~ 600 Hv 정도의 경도를 유지하고 있어, 표면경화를 넘어서 전경화 되었음을 알 수 있다. 이것은 시험편의 직경이 작아 표면에 가열된 열이 냉각되기 전에 내부에 영향을 미치게 되면서 전경화가 발생한 것으로 판단된다. 이와 달리 QT질화시험편의 경우에는 표면의 경도는 800 Hv 이상으로 높게 나타나는 반면, 시험편의 표면에서 약 300 μ m 위치에서 모재 및 QT시험편과 거의 비슷한 경도를 가지는 것을 알 수 있다. 따라서 피스톤과 같이 내마모성 및 내구성을 요구하는 구조물은 표면은 단단하고, 내부는 연성이 우수한 특성을 가져야하므로, 본 장에서 사용한 시험편은 QT질화시험편이 가장 양호하다고 판단된다.

Fig. 2.4 Stress-Strain curve of SACM645 with various heat treatment.

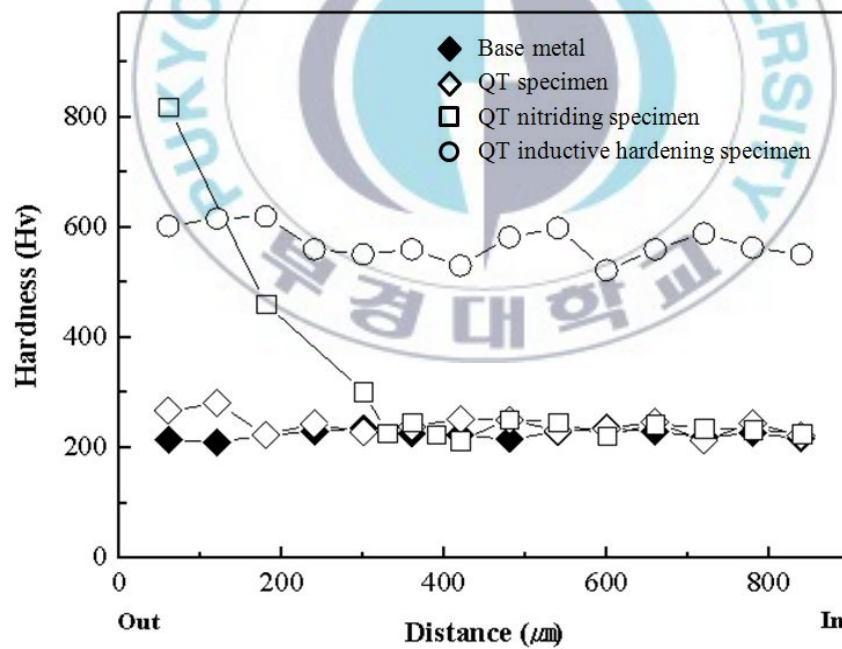


Fig. 2.5 Microhardness of SACM645 with various heat treatments

2.3.3 피로균열진전거동

SACM645의 모재, QT시험편, QT질화시험편 및 QT유도경화시험편에 대하여 균열진전시험을 실시하였다. Fig. 2.6은 피로균열길이 a 와 하중반복수 N 과의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 모든 시험편은 응력비 R 값이 증가할수록, 피로 수명이 증가하는 경향을 나타내었다. 응력비 $R=0.5$ 인 시험편은 $R=0.1$ 과 비교하여 피로수명이 1.5 ~ 2배 증가하는 것으로 나타났다. 응력비 $R=0.1$ 은 최대응력에서 균열 진전이 빠르고, 최소 응력에서 균열 닫힘이 나타나며, 응력 변동폭이 커서 균열 진전이 빠르다. 그러나 R 값이 증가할수록 작용하는 응력에 의하여 피로 균열이 열려있어, 균열 닫힘 현상 등이 나타나지 않고, 응력의 변동폭이 작기 때문이다. 또한, SACM645는 알루미늄이 첨가되어 인성이 많이 증가된 것 때문이라고 판단된다. 그러나 이 점에 대하여 향후 연구가 더 필요하다고 생각된다.

Fig. 2.7은 4종류 시험편의 피로균열성장속도 da/dN 과 응력확대계수 변동폭 ΔK 와의 관계를 나타낸 것이다. 열처리하지 않은 모재의 피로균열진전속도에서 $m=1.89 \sim 4.45$ 의 값을 나타내고 있다. 이것은 열처리된 시험편보다 균열진전속도가 더 느리게 나타나고 있다. 이것은 위에서 설명한 것처럼 SACM645는 알루미늄을 첨가하여 인성을 향상시켰지만, 열처리를 통하여 내부 조직이 변화되어 인성이 감소된 것이라 판단된다.

이상에서 모재시험편은 피로수명이 가장 길게 나타났으며, 피로균열진전속도도 가장 늦게 나타났다. 그러나 경도 측정에서 QT 질화시험편의 표면 경도가 가장 높게 나타나, 표면에서의 균열 발생이 늦고, 균열의 발생하더라도 내부는 모재의 연성을 가지고 있기 때문에 이상적인 표면처리의 방법이라 판단된다.

Fig. 2.7에서 얻어진 C 값과 m 값을 편대수상에 나타낸 결과가 Fig. 2.8이다. 이 그림에서 m 과 $\log C$ 사이에는 직선관계가 성립함을 알 수 있다. 즉, m 과 C 사이에는 서로 독립적이 아니고, 양자의 사이에는 $A = C \cdot B^m$ 의 관계가 있다.⁽¹⁶⁾ 강도와 조직에 의하여 C 와 m 의 값은 변하며, $A = da/dN$ 및 $B = \Delta K$ 로 치환한 것과 같다. 여기서, $A = 5 \times 10^{-5} \text{ mm/cycle}$, $B = 58 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{3/2}$ 이다.

(a) Base metal

(b) QT specimen



(c) QTN specimen

(d) QTI specimen

Fig. 2.6 a-N curves of four types of specimen.

(a) Base metal

(b) QT specimen

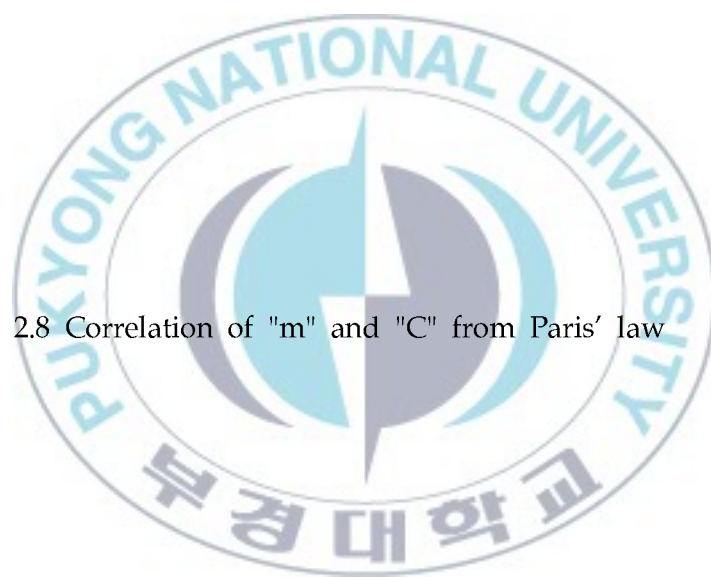


(c) QTN specimen

(d) QTI specimen

Fig. 2.7 Fatigue crack growth rate versus stress intensity factor range of four types of specimen.

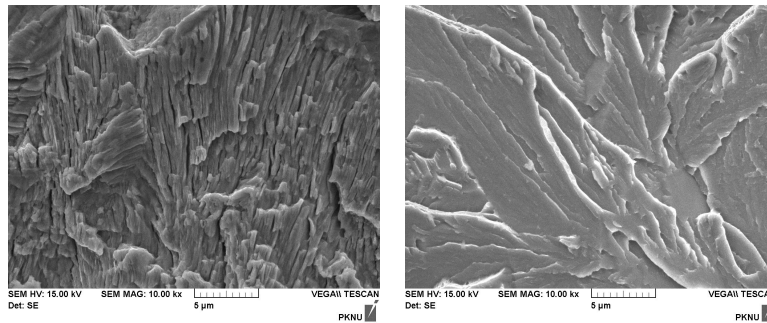
Fig. 2.8 Correlation of "m" and "C" from Paris' law



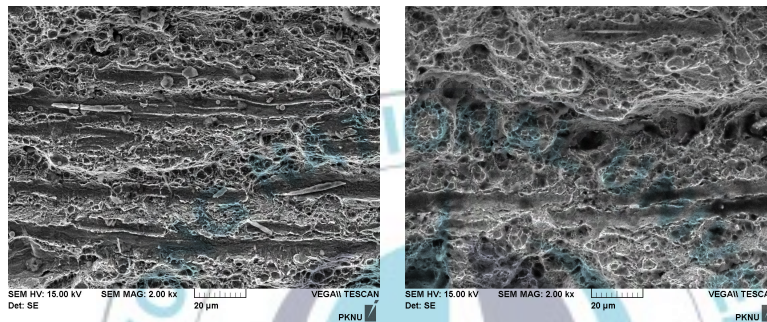
2.3.4 파면관찰

Fig. 2.9는 다양한 열처리한 SACM645 소재의 피로시험 후, 파단면을 관찰하여 나타낸 것이다. 그림에서 (a)는 모재시험편, (b)는 QT시험편, (C)는 QT질화시험편의 파면관찰을 나타낸 것이다. (a), (b) 및 (c)의 그림에서 왼쪽은 피로균열이 발생하여 진전하는 영역을 관찰한 것으로, 피로파면의 전형적인 양상인 스트라이에이션이 관찰되었다. 그러나 피로균열진전 이외의 부분을 관찰한 오른쪽은 SACM645소재가 인성이 강하여 주로 벽개 파괴 및 덩플 등 연성파괴의 양상을 나타내었다.

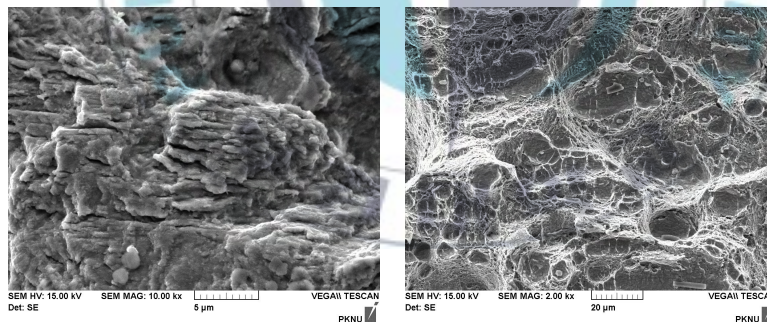
Fig. 2.9(b)의 왼쪽 사진에서 가운데에 굵은 선들이 나타나고 있다. 이것을 SEM-EDX로 분석하여, 그 결과를 2.10에 나타내었다. 분석한 결과, 이 굵은 선의 물질은 MnS 개재물로 판단된다. 강중에는 보통 Mn이 0.35 ~ 1%가 함유되어 있다. 그 중 일부는 강속에 고용되며 일부는 강중에 함유된 황과 결합하여 비금속 개재물인 MnS를 형성하는데, 이 MnS는 연성이 있어서 소성가공시 가공방향으로 길게 연신된다. 그러나 MnS의 형성으로 강속에 있는 황성분이 감소하면서 결정립이 취약해지고 저융점화합물인 FeS의 형성을 억제시킨다. 강의 내산성과 내산화성을 저해하지만 펄라이트가 미세해지고 페라이트를 고용강화시킴으로써 항복 강도를 향상시킨다. 담금질시 경화 깊이를 증가시키지만 다량 함유 시에는 MnS 개재물이 담금질균열이나 변형을 유발시킨다.



(a) Base metal

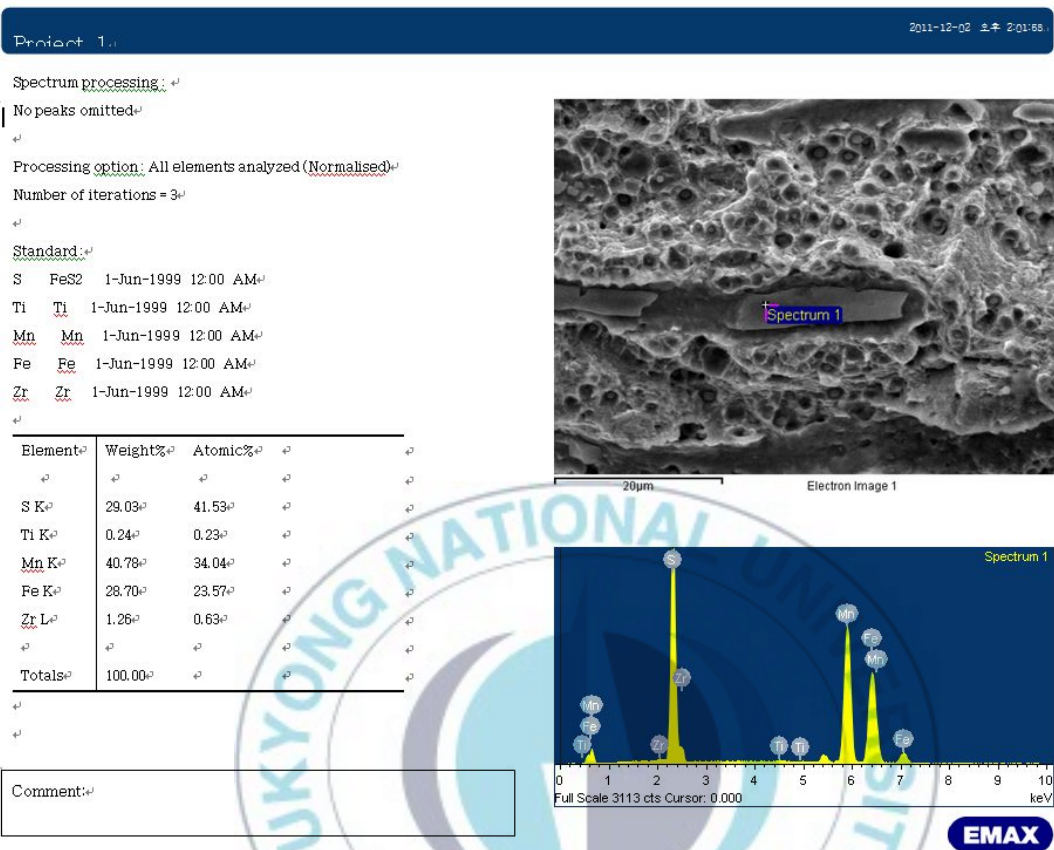


(b) QT specimen



(c) QT Nitriding specimen

Fig. 2.9 Fractographs of SACM645 materials after fatigue crack propagation experiment.



2.10 SEM-EDX analysis of inclusion of QT specimen

2.4 결 언

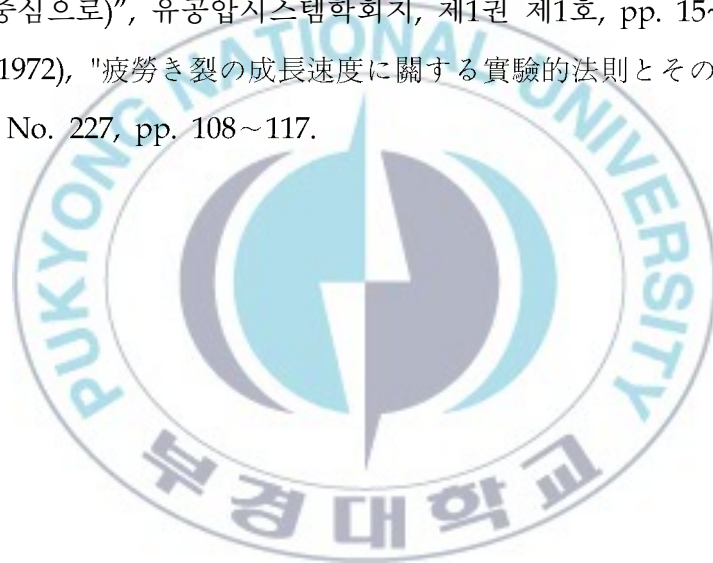
본 장에서는 유압 피스톤 펌프의 재료로 사용되고 있는 SACM645 소재를 열처리 및 표면 처리하여, 인장 특성 및 피로균열진전특성을 조사하였다.

- 1) QT 질화시험편에서 질화 깊이는 표면에서 약 300 μm 정도로 나타났으며, 열영향을 받은 부분도 일부 관찰되었다. 내부는 QT처리에 의한 템퍼드 마르텐사이트 조직이 관찰되었다.
- 2) 4종류의 인장시험에서 QT 시험편 및 QT 질화시험편의 최대응력은 820 MPa 정도로 비슷한 값을 나타내고 있으나, 변형률은 많은 차이를 나타내었다.
- 3) QT질화시험편의 표면 경도는 800 Hv 이상으로 높게 나타나는 반면, 시험편의 바깥쪽으로부터 300 μm 정도에서 모재 및 QT 시험편과 거의 비슷한 경도를 나타내었다.
- 4) 모재시험편은 피로수명이 가장 길게 나타났으며, 피로균열진전속도도 가장 늦게 나타났다. 그러나 경도 측정에서 QT 질화시험편의 표면 경도가 가장 높게 나타나, 표면에서의 균열 발생이 늦고, 균열의 발생하드라도 내부는 모재의 연성을 가지고 있기 때문에, QT 질화처리가 이상적인 표면처리의 방법이라 판단된다.
- 5) 파면 관찰결과 피로균열진전 영역에서는 모두 스트라이에이션이 관찰되었고, 피로균열진전 이외의 영역에서 벽개파괴 및 덤플 파괴 등의 양상을 나타내었다.

참고문헌

1. 김남석(2009), “유압펌프 피스톤 소재 SACM645의 마모 특성에 관한 연구”, 부경대학교 대학원 공학석사 학위논문, pp. 1~81.
2. 정재연, 백일현, 조인성, 송규근, 오석형, 정석훈(2007), “유압 피스톤 펌프의 슬리퍼 정압베어링에 관한 윤활특성 연구”, 유공압시스템학회논문집, 제4권 제3호 pp. 1~6.
3. 정재연, 송규근, 오석형, 김종기(2004), “유압 피스톤 펌프의 실린더 블록과 밸브 플레이트 사이의 유막 특성”, 유공압시스템학회논문집, 제1권 제2호, pp. 8~14.
4. 이용범, 김형의, 유영철, 박종호(2005), “유압펌프 및 모터 피스톤 조립체의 수명예측을 위한 가속실험 모델”, 유공압시스템학회논문집, 제2권 제4호 pp. 14~22.
5. 홍예선, 이상율, 김치봉, 김성훈, 임현식, 김성대(2004), “사축식 유압 피스톤 펌프의 저속 마찰 특성 개선”, 유공압시스템학회논문집, 제1권 제3호, pp. 7~13.
6. 정재연, 백일현, 조인성, 송규근, 오석형, 정용욱(2008), “사축식 유압 피스톤 펌프의 디스크 편심률에 따른 실린더블록 구동영역에 대한 연구”, 유공압시스템학회논문집, 제5권 제2호, pp. 1~7.
7. 전정식(2004), “유압유의 종류와 선정방법”, 유공압시스템학회지, 제1권 제2호, pp. 1~8.
8. 강만곤, 최세령(2007), “유압 펌프 및 유압모터의 소음 레벨 측정법”, 유공압시스템학회지, 제4권 제3호, pp. 47~55.
9. 김정태, 권숙인(1996), “플라즈마 이온 질화한 SACM645 강의 미세조직 및 피로균열 발생의 해석”, 열처리공학회지, 제9권 제1호, pp. 69~77.
10. 함영복, 박경민, 윤소남, 김성동(2004), “유압 피스톤 펌프/모터의 동력변환

- 메카니즘에 대한 고찰”, 유공압시스템학회지, 제1권 제3호, pp. 47~56.
11. 정헌술, 김형의, 김종기(2004), “유압 피스톤 펌프·모터의 효율에 관하여”, 유공압시스템학회지, 제1권 제3호, pp. 39~46.
 12. 정재연(2004), “유압 피스톤 펌프·모터의 특징과 고성능화”, 유공압시스템학회지, 제1권 제3호, pp. 32~38.
 13. 조유종, 오창근(2004), “굴삭기용 유압펌프의 최근 개발동향”, 유공압시스템학회지, 제1권 제3호, pp. 1~7.
 14. 구영모(2004), “유압시스템에서 작동유가 미치는 영향”, 유공압시스템학회지, 제1권 제2호, pp. 9~11.
 15. 조유종(2004), “국내 유압산업의 현황(건설 중장비용 액시얼 피스톤 타입의 펌프/모터를 중심으로)”, 유공압시스템학회지, 제1권 제1호, pp. 15~22.
 16. H. Kitagawa(1972), "疲勞き裂の成長速度に關する實驗的法則とその關聯理論", 材料, Vol. 21, No. 227, pp. 108~117.



第 III 章

표면 처리한 SACM645 재료의 피로한도



3.1 서 언

유압 피스톤 펌프와 모터는 간단한 구조로서 고압의 유압원을 생성하거나 소형이면서도 높은 토크를 발생하기 때문에 유압시스템에 널리 사용되고 있다. 피스톤과 실린더 사이의 좁은 간극에서의 마모상태는 피스톤 펌프와 모터의 성능 및 수명에 직접적으로 아주 큰 영향을 미친다. 이렇듯 내마모성과 인성 및 강도가 동시에 필요한 재료에서 표면은 단단하게 하고, 내부는 연하면서 인성을 가지게 하는 방법이 표면경화처리이다. 표면경화처리는 질화법과 침탄법이 있으며 현재 피스톤 펌프에 사용되는 피스톤은 표면에 질화처리를 실시하여 사용되고 있다. 질화처리^(1,2)는 침탄처리⁽³⁾에 비해 비용이 적고, 처리가 쉬워서 여러 부품에 적용되고 있다.^(4,5)

유압기기들의 고압화에 따라 상대운동부의 간극 및 표면조도와 함께 표면처리 기술의 중요성이 더해지고 있다. 특히 가장 고압을 발생하는 유압 피스톤의 경우 주요 부품들의 표면처리 기술을 이용한 표면경도의 확보는 부품들의 내마모성, 내피로성, 내식성 등의 향상을 위해 반드시 필요하며, 그렇지 못할 경우 마모에 의한 표면손상으로 펌프가 파손되는 결과를 초래하므로 표면처리 기술에 대한 많은 연구가 필요하다. 그러나 유압피스톤 펌프 모터에 대한 지금까지 수행된 많은 연구와 제품 개발, 생산에도 불구하고 피스톤 재료의 피로한도에 대한 실험은 아직 미흡한 실정이다.⁽⁶⁻¹⁰⁾

따라서 본 장에서는 피스톤 재료로 사용되고 있는 SACM645의 모재(BM), QT 시험편(QT), QT 질화시험편(QTN) 및 QT유도경화시험편(QTI)을 사용하여 피로한도를 조사하였다.

3.2 실험방법

3.2.1 재료 및 시험편

본 장에서 사용한 재료는 2.2.1에서 사용한 것과 같은 SACM645이며, 피로시험편은 4종류이다. Fig. 3.1에 피로시험편의 형상과 치수를 나타낸다.

3.2.2 미세조직 관찰

2.2.2와 같은 방법이다.

3.2.3 피로시험

피로시험은 최대용량 10톤의 만능피로시험기(INSTRON 8516)를 사용하였으며, 정현파를 이용하여, 하중반복수 10 Hz, 실온에서 실시하였다.



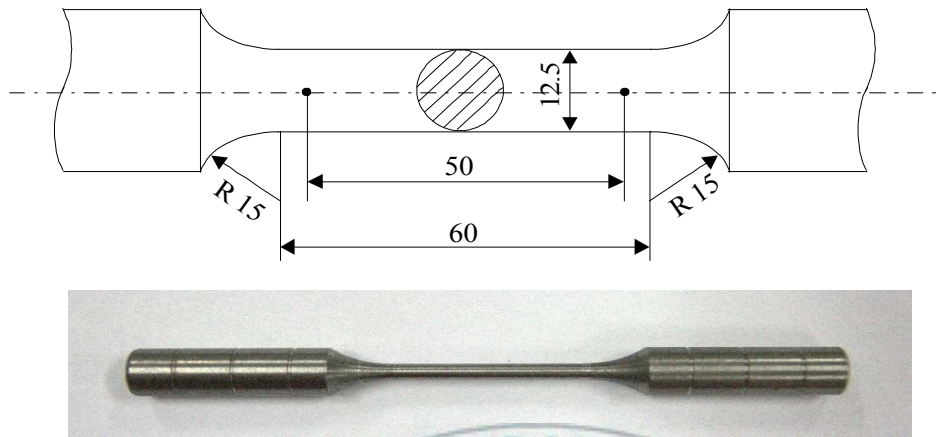


Fig. 3.1 Shape and dimensions of fatigue specimen



3.3 실험결과 및 고찰

3.3.1 조직관찰

시험편은 3가지 방법으로 열처리 및 표면처리를 실시하였지만, 대표적으로 QT 질화시험편의 미세조직을 Fig. 3.2에 나타내었다. 그림에서 질화처리 깊이는 표면에서 약 300 μm 정도로 나타났으며, 열영향을 받은 부분도 일부 관찰되었다. 내부에는 QT처리에 의한 템퍼드 마르텐사이트 조직으로 관찰되었다.

Fig. 3.3은 QT질화시험편의 피로 파면 사진을 나타낸 것이다. 그림에서 표면에 질화층과 내부조직을 뚜렷이 구별할 수 있으며, 질화층 깊이는 Fig. 3.2과 같이 300 μm 정도로 나타났다.



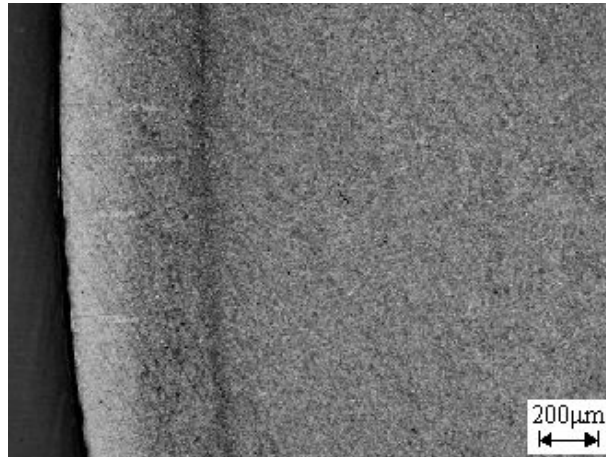


Fig. 3.2 Micro structure of the SACM645 with QT nitriding treatment.

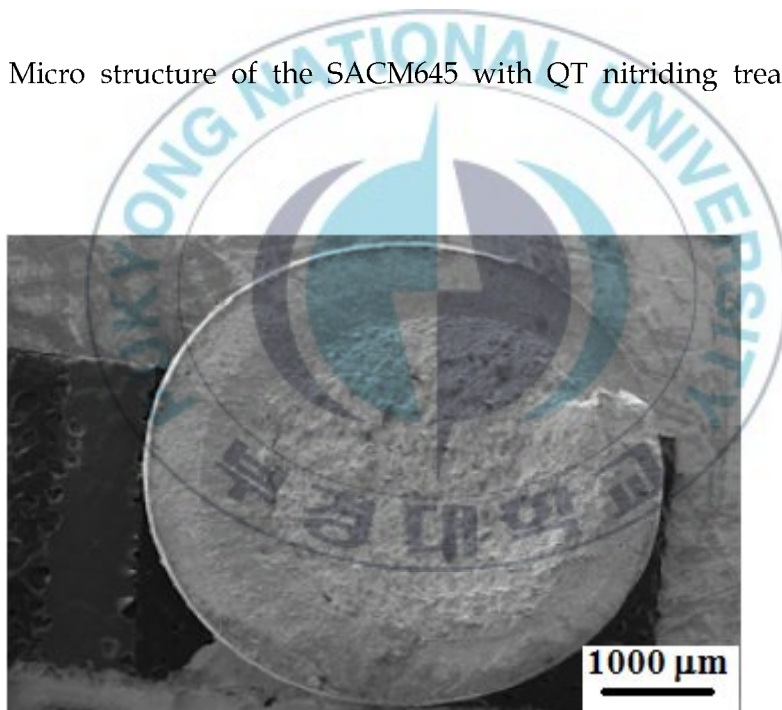


Fig. 3.3 SEM image after fatigue test of QT nitriding specimen.

3.3.2 S-N 곡선

Fig. 3.4는 SACM645 재료의 다양한 열처리 방법에 따른 피로시험의 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 QT시험편(QT), 모재(BM), QT유도경화시험편(QTI) 및 QT질화시험편(QTN) 순으로 피로 한도가 높게 나타나고 있다. 피로한도는 QT시험편 492 MPa, 모재 533 MPa, QT유도경화시험편 615 MPa 및 QT질화시험편 656 MPa로 각각 나타났다. QT시험편이 모재보다 피로한도가 낮게 나타났다. 이것은 QT 처리에 의하여 재료 내부의 인성이 감소하였기 때문이라고 판단된다. SACM645 재료는 SCM 재료에 알루미늄(Al)을 첨가하여 인성을 증가시킨 재료로 모재를 절단할 때도 인성이 커서 어려움을 겪고 있다. 그리고 QT질화시험편은 피로한도가 인장강도의 80%로 아주 높게 나타났다. 이것은 시험편 표면에 단단한 질화처리를 실시하여, 피로균열의 발생이 지연되었고, 피로균열이 발생하더라도 표면의 단단한 성질에 의하여서 균열진전속가 늦었다고 판단된다. 한편 QT유도경화시험편은 모재의 인장강도에 비하여 피로한도가 아주 작게 나타났다. 이것은 재료의 내부까지 경화되어 균열이 발생하면, 급격하게 진전하고 취성적으로 파괴하기 때문이다.

이상에서 SACM645 재료는 인성이 강한 것으로 판단되고, 피로시험에서 피로한도가 가장 낮은 QT시험편의 경우에도 피로한도는 인장강도의 60%로 나타났다. 이것은 다른 철강계열의 재료보다 피로한도가 높은 것이라 판단된다.

Table 3.1에 피로시험 후 피로한도를 정리하여 나타내었다.

Fig. 3.4 S-N curve of SACM645 specimen with various heat treatments.

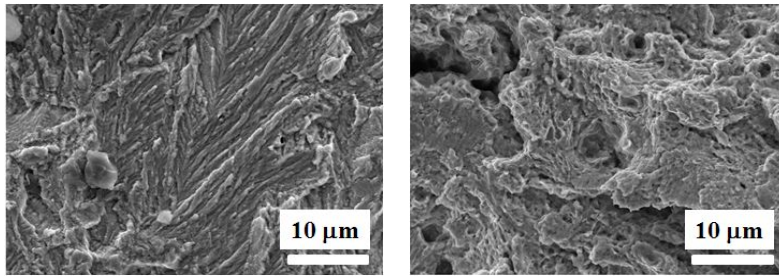
Table 3.1 Fatigue limits of SACM645 specimen with various heat treatments.

Heat treatment condition	Fatigue limit
Base metal	533 MPa
QT	492 MPa
QT nitriding	656 MPa
QT inductive hardening	615 MPa

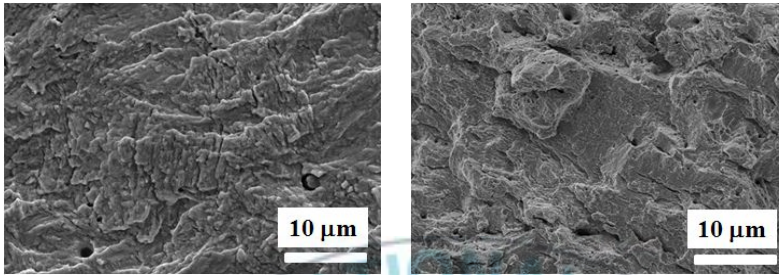
3.3.3 파면관찰

Fig. 3.5는 모재, QT시험편 및 QT질화시험편의 피로시험 후 파면을 관찰하여 나타낸 것이다. 그림에서 Fig. 3.5(a), (b) 및 (c)의 왼쪽은 피로균열이 발생하여 진전하는 영역을 관찰한 것으로서, 피로파면의 전형적인 양상인 스트라이에이션이 관찰되었다. Fig. 3.5(a), (b) 및 (c)의 오른쪽은 피로균열 진전 이외의 부분으로 최종적으로 파괴한 부분을 관찰한 것이다. 즉 시험편의 가운데 부분을 관찰한 것이다. 주로 덩플 형상이 많이 관찰되었다. SACM645 재료는 인성이 강하여 피로균열 진전 이외의 부분은 주로 연성파괴의 양상을 나타내었다. 그러나 Fig. 3.5(b) QT시험편의 오른쪽 그림은 벽개파괴의 양상이 관찰되어, 취성파괴에 가까운 것으로 판단된다. 이것은 인성이 강한 재료를 QT 처리함으로 인하여 인성이 감소하여 나타나는 현상으로 판단된다.

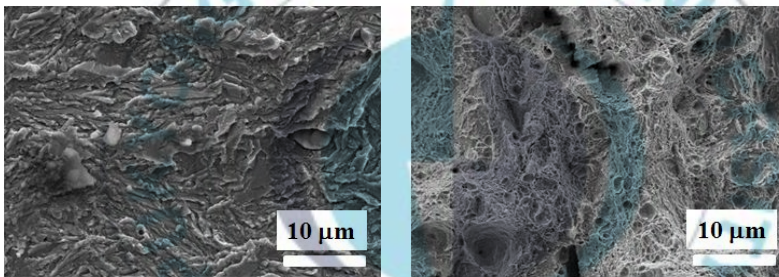




(a) Base metal



(b) QT specimen



(c) QT nitriding Specimen

Fig. 3.5 Fractography of three types of specimen after fatigue test

3.4 결 언

본 장에서는 피스톤 재료로 사용되고 있는 SACM645의 모재, QT시험편, QT 질화시험편 및 QT유도경화시험편을 사용하여 피로한도를 조사하였다.

- 1) 피로한도는 QT시험편 492 MPa, 모재 533 MPa, QT유도경화시험편 615 MPa 및 QT질화시험편 656 MPa로 각각 나타났다.
- 2) QT질화시험편은 피로한도가 인장강도의 80%로 나타났다. 이것은 시험편 표면에 단단한 질화처리를 실시하여, 피로균열의 발생이 지연되었고, 피로균열이 발생하더라도 표면의 단단한 성질에 의하여서 균열진전속도가 늦었다고 판단된다.
- 3) QT유도경화시험편은 모재의 인장강도에 비하여 피로한도가 아주 작게 나타났다. 이것은 재료의 내부까지 경화되어 균열이 발생하면, 급격하게 진전하고 취성적으로 파괴하기 때문이다.
- 4) SACM645 재료는 인성이 강한 것으로 판단되고, 피로시험에서 피로한도가 가장 낮은 QT시험편의 경우에도 피로한도는 인장강도의 60%로 나타났다. 이것은 다른 철강계열의 재료보다 피로한도가 높은 것이라 판단된다.
- 5) 파면 관찰결과, 피로균열진전 영역에서는 모두 스트라이에이션이 관찰되었고, 피로균열진전 이외의 영역에서는 QT시험편은 벽개파괴의 양상을, 모재와 질화처리 시험편에서는 딥플 파괴의 양상을 나타내었다.

참고문헌

- (1) 이준연(2008), “질화처리 기초와 질화계처리”, 열처리공학회지, 제21권 제4호, pp 219~224.
- (2) ASM International(2003), “Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing-Chapter 1 ; An Introduction to Nitriding”, pp. 1~13.
- (3) 안민주, 안인효, 류성기(2011), “SCM415 스퍼기어의 침탄처리에 관한 연구”, 한국기계가공학회지, 제10권 제1호, pp. 67~72.
- (4) Ed Rolinski and Gary SharpIon(2004), “Nitriding and Nitrocarburizing of Sintered PM Parts” Advanced Heat Treat Corp., Monroe, Mich., October 7, 2004.
- (5) 이인섭(2008), “AISI 316L stainless steel에 저온 플라즈마 침탄처리 후 질화처리 시 처리시간과 온도가 표면특성에 미치는 영향”, 대한금속·재료학회지, 제46권 제6호, pp. 357~362.
- (6) 이상훈, 박원태(1999), “표면경화재의 피로한도 예측에 대한 연구”, 한국안전학회지, 제14권 제4호, pp. 20~27.
- (7) 허용학, 김동진, 이해무, 홍성구, 박준협(2009), “동 박막의 피로한도”, 대한기계학회논문집 A, 제33권 제10호, pp. 1158~1162.
- (8) 김문정, 박수병(2005), “고정원 강화를 위해 치면에 부착한 fiber-reinforced composite과 스테인리스강 와이어의 피로한도 비교”, 대한치과교정학회지, 제35권 제4호, pp. 302~311.
- (9) 이동형, 권석진, 함영삼, 유원희(2010), “피로한도 이하에서 발생하는 압입층의 접촉손상 특성”, 한국정밀공학회지, 제27권 제8호, pp. 42~47.
- (10) 서순근, 조윤희(2009), “확률적 피로한도를 도입한 S-N곡선 :모형, 분석법, 활용”, 대한기계학회지, 제49권 제12호, pp. 49~53.

第 IV 章

SACM645 재료의 마모특성



4.1 서 언

유압 장치는 작은 힘으로 큰 힘을 전달할 수 있으며, 작업의 반복성이 우수하여 무거운 물체를 정밀하게 조작할 수 있다. 힘을 전달하는 방법은 전기를 사용하는 방법과 기계 또는 유압 장치를 사용하는 방법이 있다. 간단한 조작으로 운전과 정지가 가능하고, 속도 조절이 용이하며 정확하다. 복잡한 기어나 풀리 또는 레버를 사용하지 않고, 파스칼의 원리에 의해 힘을 수십 배 또는 수백 배 이상 증폭시킬 수 있다. 일정한 힘과 토크를 낼 수 있다. 기계식이나 전기식에 비하여 구성 요소가 간단하다. 힘과 전달 기구가 간단하고, 멀리 떨어진 위치에서도 배관 하나만으로 간단하게 힘을 전달할 수 있으며, 방향에 대한 제한을 받지 않는다.

피스톤 펌프는 고속 운전이 가능하여 비교적 소형으로도 고압, 고성능을 얻을 수 있다. 여러 개의 피스톤으로 고속 운전하므로 송출압의 맥동이 매우 작고 진동도 작다. 송출 압력은 $100 \sim 300 \text{ kgf/cm}^2$ 이고, 송출량은 $10 \sim 50 \text{ L/min}$ 정도이다. 피스톤 펌프는 축방향 피스톤 펌프와 반지름 방향 피스톤 펌프가 있다. 경사판의 경사각을 조절하여 유압유의 송출량을 조절한다.

유압펌프는 중장비용, 전차용 등으로 사용되고 있으며 유압을 이용하여 장비를 동작시키는 중요한 부품으로써 작은 크기의 제품으로 큰 동력을 만들어내는 목적에 사용된다. 특히, 중장비의 중량물에 대하여 상하이동 및 좌우회전 시 부드러운 동작과 함께 큰 동력을 만들어 내어 안전하고 정확한 동작을 구성하게 한다.^(1,2)

유압 피스톤 펌프와 모터는 간단한 구조로서 고압의 유압원을 생성하거나 소형이면서도 높은 토크를 발생하기 때문에 유압시스템에 널리 사용되고 있다. 피스톤과 실린더 사이의 좁은 간극에서의 마모상태는 피스톤 펌프와 모터의 성능 및 수명에 직접적으로 아주 큰 영향을 미친다. 즉, 실린더 내를 왕복 운동하는 피스톤의 편심상태 등에 따라서 간극에서의 마모 특성을 크게 변화한다. 또한 간

극에서의 마모 특성은 직접적으로 사판과 슬리퍼 패드 사이, 실린더 블록과 밸브 플레이트 사이 등에서의 마모 특성에도 영향을 주게 된다.^(3~11) 유압기기들의 고압화에 따라 상대운동부의 간극 및 표면조도와 함께 표면처리 기술의 중요성이 더해지고 있다. 특히 가장 고압을 발생하는 유압 피스톤의 경우 주요 부품들의 표면처리 기술을 이용한 표면경도의 확보는 부품들의 내마모성, 내피로성, 내식성 등의 향상을 위해 반드시 필요하며, 그렇지 못할 경우 마모에 의한 표면손상으로 펌프가 파손되는 결과를 초래하므로 표면처리 기술에 대한 많은 연구가 필요하다. 그러나 유압피스톤 펌프 모터에 대한 지금까지 수행된 많은 연구와 제품 개발, 생산에도 불구하고 피스톤과 실린더와의 마모 특성에 대한 이론적인 연구와 이에 관한 실험은 상당히 미흡한 실정이다.^(12~15)

본 장에서는 유압 피스톤 펌프의 재료로 사용되고 있는 SACM645 재료를 다양한 방법으로 열처리를 실시한 후, 건조, 윤활 및 고온 윤활 분위기에서 마모 특성을 조사하였다.



4.2 재료 및 실험방법

본 장에서는 피스톤과 밸브플레이트가 면 접촉을 이루고 있어 이를 가정하기 위하여 pin on disk 형태의 마모시험을 실시하였다. 실험 사용한 pin 재료는 (주)POSCO에서 제조한 SACM645 재료를 열처리 방법을 달리하여 사용하였으며, disk 재료는 GCD500을 사용하였다. Table 4.1에 사용한 재료의 화학성분을 나타내었다. Disk는 아무런 처리 없이 원재료를 사용하였으며, Pin은 모재, QT시험편, 질화시험편, 유도경화시험편, QT질화시험편, QT유도경화시험편 및 QT쇼트피닝시험편 등 다양한 처리를 실시하여 총 7가지 시험편을 제작하였다. Table 4.2에 pin의 각종 처리 조건을 나타내었다.

마모시험은 pin on disk형태로 실시하였으며, 500 m마다 시험을 중지하고 정밀저울로 마모량을 측정하였다. 마모시험 조건은 다음과 같이 실시하였다.

- Dry분위기, 상온(25 ℃), 회전수 400 rpm, 마모거리 3 km, 하중 29 MPa
- Oil분위기, 상온(25 ℃), 회전수 400 rpm, 마모거리 2 km, 하중 29 MPa
- Oil분위기, 고온(100 ℃), 회전수 400 rpm, 마모거리 3 km, 하중 29 MPa

위의 3가지 조건으로 나누어 실험을 실시하고, 위 실험의 조건에서 상대원판의 경우 dry한 분위기에서는 가능하였던 실험이 oil 분위기에서는 마모량이 발생하지 않아, 하중을 17 N까지 증가시켰지만, 마모량이 나타나지 않아 결국 실리콘카바이드연마지를 상대재로 이용하여 실험을 실시하였다. 실리콘카바이드연마지는 기존의 상대원판에 양면테이프를 이용하여 부착하였으며, 상대원판의 고정시키는 치구에 완전 밀착되어 실험 중 움직이거나 흔들리지 않도록 주의하였다.

마모시험에 사용한 오일은 베어링용 모빌 레이러스 424(Mobil Rarus 424) 제품을 이용하였으며, 한번 주입하는 오일의 양은 700~800 mL 정도이다. 오일이 고온에 의하여 변색되었거나, 마모량이 많아서 오일에 마모된 입자들에 의하여 어느 정도 검게 보이면 오일을 교체하여 실험을 계속하였다. Fig. 4.1은 핀 형상,

Fig. 4.2는 disk 형상, Fig. 4.3은 pin on disk 시험 개략도 및 Fig. 4.4는 마모 시험기를 각각 나타내고 있다.

마모시험 전 각 시험편의 표면 거칠기를 조사하여 Table 4.3에 나타내었다. 표면 거칠기는 한 시험편당 3회 실시하여 그 평균값으로 하였으며, 어느 정도의 분산은 존재하지만 산술 평균 거칠기(Ra) $0.72\ \mu\text{m}$ 이하로 나타나 우수한 표면 거칠기를 가지고 있었다. 하지만, 쇼트피닝시험편의 경우에는 쇼트 피닝 작업 때문에 표면 거칠기가 증가한 것을 알 수 있다.



Table 4.1 Chemical composition of used materials

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Fe
SACM645	0.43	0.32	0.34	0.08	1.48	0.19	0.17	1.11	Bal.
GCD500	2.70	2.65	0.30	-	-	-	-	-	Bal.

Table 4.2 Each treatment conditions of SACM645

	Treatment condition
QT	900 °C oil-quenched, 650 °C 1h tempered
Nitriding	520 °C 60 h, furnace cooling
Inductive hardening	850 °C 1 sec, air cooling
Shot peening	steel ball 50 μm , shot press 0.4 MPa shot distance 150 mm, shot time 2 min

Table 4.3 The surface roughness of each specimen

Base metal	Nitriding	Inductive hardening	QT	QT +nitriding	QT +inductive hardening	QT +shot peening
0.38 μm	0.72 μm	0.73 μm	0.26 μm	0.64 μm	0.31 μm	2.18 μm

(GCD500 : 0.69 μm)

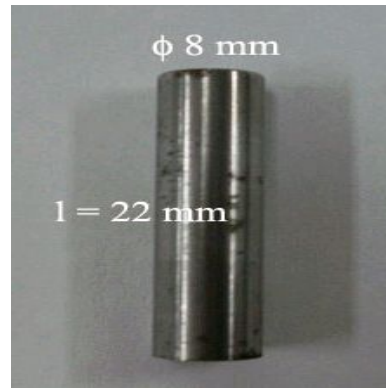


Fig. 4.1 Shape and dimension of pin specimen.

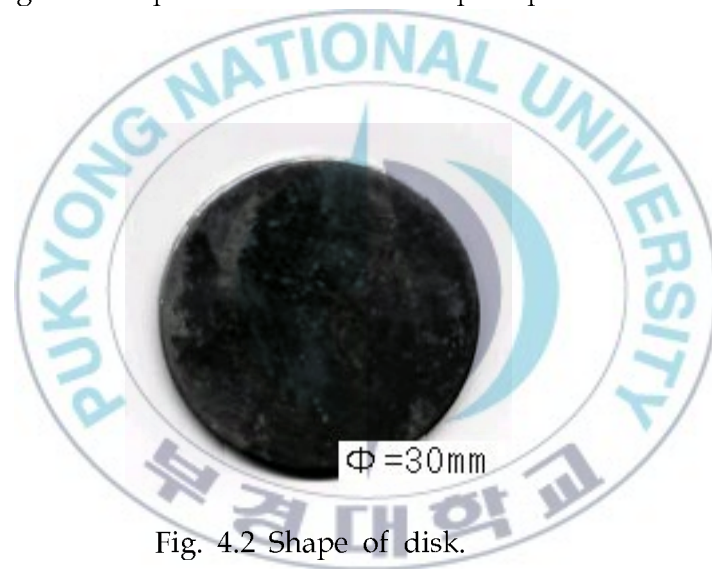


Fig. 4.2 Shape of disk.

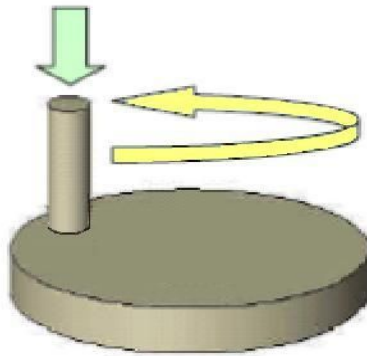


Fig. 4.3 Schematic drawing of pin-on disk type tester



Fig. 4.4 Wear tester

4.3 실험결과 및 고찰

4.3.1 조직관찰

Fig. 4.5는 본 실험에 사용한 pin 재료인 SACM645와 disk 재료인 GCD500의 미세조직을 관찰한 것이다. Pin 재료는 여러 가지 방법으로 열처리를 실시하였지만, 대표적으로 SACM645 재료의 QT질화시험편 미세조직을 Fig. 4.5(a)에 나타내었다. 그림에서 질화처리 깊이는 표면에서 약 200 μm 정도로 나타났으며, 열영향을 받은 부분도 일부 관찰되었다. 내부에는 QT처리에 의한 템퍼드 마르텐사이트 조직으로 관찰되었다. Fig. 4.5(b)는 GCD500의 미세조직으로서 전형적인 구상흑연 주철의 조직으로 나타났다. Fig. 4.5(c)는 현재 피스톤 펌프에 사용되고 있는 실제 피스톤 펌프를 절단하여 단면 미세조직을 관찰한 것이다. 그림에 나타나는 바와 같이 양쪽으로 질화처리가 된 모습을 알 수 있다.

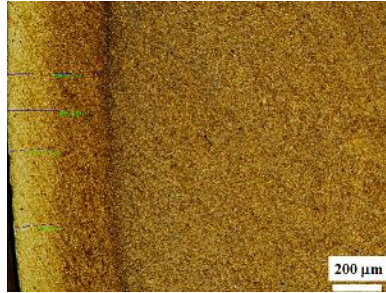
4.3.2 경도 시험

각종 열처리 및 표면처리 방법에 따른 경도를 측정하여 Fig. 4.6에 나타내었다. 모재 및 QT시험편의 경도는 210~230 Hv로 나타났으며, 시험편의 열처리에 따른 경도를 비교하여 볼 때, 유도경화시험편은 내부까지 550~600 Hv 정도의 경도를 유지하고 있어, 표면경화를 넘어서 전경화 되었음을 알 수 있다. 이것은 시험편의 직경이 작아 표면에 가열된 열이 냉각되기 전에 내부에 영향을 미치게 되면서 전경화가 발생한 것으로 판단된다. 이와 달리 질화시험편의 경우에는 표면의 경도는 800 Hv 이상으로 높게 나타나는 반면, 시험편의 바깥쪽으로부터 200 μm 정도에서 거의 모재와 QT시험편과 비슷한 경도를 가지는 것을 알 수 있다.

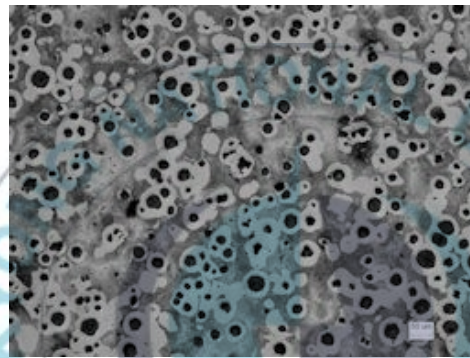
4.3.3 인장 시험

마모 시험에 사용한 시험편의 인장시험 결과를 Fig. 4.7에 나타내었다. QT 시험편, QT쇼트피닝시험편 및 QT질화시험편의 최대응력은 800 MPa 정도로 비슷한 값을 나타내고 있으나, 변형률은 많은 차이를 나타내었다. 즉, 변형률의 크기는 QT시험편, QT쇼트피닝시험편 및 QT질화시험편 순서로 감소하고 있다. QT시험편은 경화 후에 인성을 부여하였기 때문에 많은 변형이 발생하였다. 그리고 QT쇼트피닝시험편은 표면에 압축잔류응력을 부여하였으나, 표면 개질 깊이가 얇아서 인장특성에는 영향이 거의 없었고, 변형률에는 약간의 영향을 주었다. QT질화시험편은 질화처리 후 경도가 800 Hv로 매우 높으며, 연성이 매우 적게 나타났다.

피스톤은 마모가 발생하여서는 안 되는 부품이다. 마모로 인한 오차가 가장 최소화되어야 피스톤의 기능과 효율이 초기와 같이 유지될 수 있다고 생각할 때, SACM645 재료를 피스톤에 적용하려고 할 때, 현재의 데이터 값으로는 질화처리가 가장 좋은 처리방법이라고 판단된다.



(a) SACM645 after nitriding treatment



(b) GCD500 for disk



(c) Cross section of piston with nitriding treatment

Fig. 4.5 Micro structure of the used materials

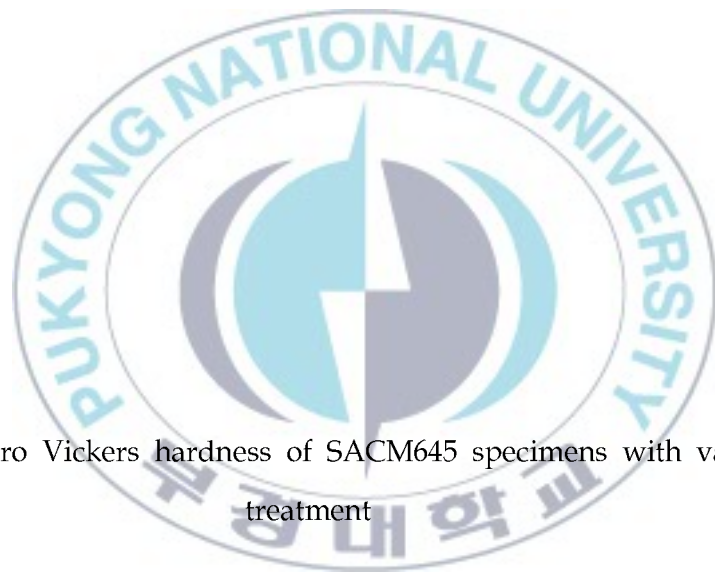


Fig. 4.6 Micro Vickers hardness of SACM645 specimens with various treatment



Fig. 4.7 Stress-strain curves of specimens with various treatment

4.3.4 마모 시험

1) 상온 건조 마모

마모실험은 SACM645 재료를 모재, 질화시험편, 유도경화시험편, QT시험편, QT질화시험편, QT유도경화시험편, QT쇼트피닝시험편 등 모두 7종류 시험편을 사용하였다. 7 종류의 SACM645 pin 시험편을 사용하여 실온 건조 상태에서 마모시험을 실시한 결과를 Fig. 4.8에 나타내었다. 마모량은 QT시험편이 가장 많았으며, 다음으로 QT쇼트피닝시험편, 모재로 나타났다. QT쇼트피닝시험편은 쇼트피닝에 의하여 수 μm 깊이까지 압축의 잔류응력을 부여하여 피로수명은 증가한다. 그러나 쇼트피닝 경화층이 마모하면, QT시험편과 같은 조건이므로 내마모성 향상에는 전혀 도움이 되지 않았다. 그리고 질화시험편, 유도경화시험편, QT질화시험편 및 QT유도경화시험편은 Fig. 4.8에 타원형으로 나타낸 것과 같이 거의 비슷한 마모량을 나타내었다. 이것을 확대하여 Fig. 4.9에 나타내었다. 질화시험편과 QT질화시험편, 유도경화시험편과 QT유도경화시험편은 각각 비슷한 마모량을 보였다. 각각에서 QT 후 표면 개질한 시험편이 약간 마모량이 적었다. 이것은 tempering에 의하여 내부의 인성이 증가하였기 때문이다. 그러나 전체적으로 유도경화시험편, 질화시험편 순서로 마모량이 적게 나타났다.

디스크의 마모량을 Fig. 4.10에 나타내었다. 디스크의 마모량은 핀 시험편의 마모량이 증가할수록 마모량도 함께 증가하였다. 이것은 핀 시험편과 디스크의 마모량이 많을수록 마모에 의한 온도 상승이 원인이라 판단한다. 디스크의 마모량은 핀 시험편의 마모량과 비슷하게 나타났다. 모재, QT시험편 및 QT쇼트피닝시험편의 디스크 순으로 마모량이 많았으며, 나머지는 Fig. 4.10의 원형에 나타내듯이 마모량이 비슷하게 나타났다. 이것을 상세하게 파악하기 위하여 타원형 부분을 확대하여 Fig. 4.11에 나타내었다. 유도경화시험편의 디스크 마모가 가장 많았으며, QT질화시험편과 QT유도경화시험편의 디스크는 비슷한 마모량을 나타내었다. 그리고 질화시험편의 디스크가 가장 적은 마모량을 나타내었다. QT질화시험

편과 QT유도경화시험편의 디스크가 비슷한 마모량을 나타낸 것은 표면의 단단한 부분과 내부의 인성이 강한 부분의 적절한 결합에 의한 것으로 판단된다. 질화시험편의 디스크의 마모량이 가장 적은 것은 전체적으로 경도가 높아서 슬립 현상이 발생한 것으로 추정된다.

핀 시험편과 디스크의 마모량 관계를 Fig. 4.12 나타내었다. 핀 시험편과 디스크의 마모량에서 기울기가 클수록 핀 시험편이 마모에 강하다는 것을 의미한다. Fig. 4.12에 원으로 표시한 부분을 확대하여 Fig. 4.13에 나타내었다. Fig. 4.12 및 4.13에서 질화시험편, QT질화시험편, 유도경화시험편 및 QT유도경화시험편은 기울기가 크게 나타났으며, QT, QT쇼트피닝시험편 및 모재는 작은 기울기를 가지는 비슷한 마모 특성을 나타내었다. 우수한 내마모성을 갖는 SACM645 재료의 열처리 방법은 유도경화처리와 질화처리를 한 것이 표면경도가 큰 만큼 마모에 잘 견디는 것을 알 수 있었다.





Fig. 4.8 Relationship between wear quantity of pin specimen and wear distance

Fig. 4.9 Enlarged figure of circle part in Fig. 4.8





Fig. 4.10 Relationship between wear quantity of disk and wear distance

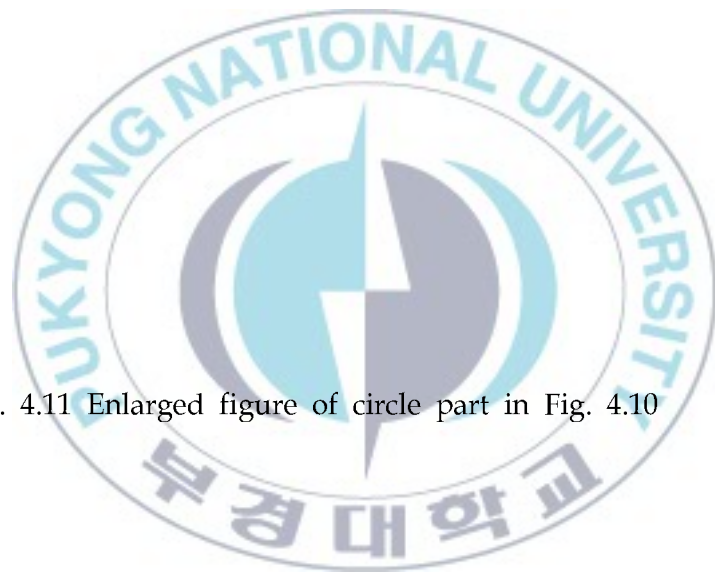


Fig. 4.11 Enlarged figure of circle part in Fig. 4.10



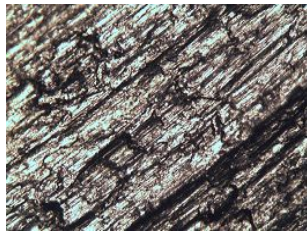
Fig. 4.12 Relationship between wear quantity of disk and wear quantity of pin specimen



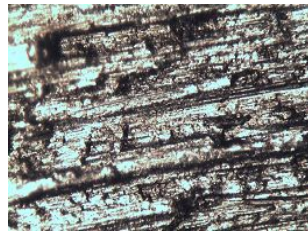
Fig. 4.13 Enlarged figure of circle part in Fig. 4.12

핀의 상온 건조 상태에서 실시한 마모면은 시험 종료 후 광학현미경을 사용하여 관찰하여, 그 결과를 Fig. 4.14에 나타내었다. 인장강도와 시험편의 마모량이 많은 (a) 모재, (b) QT시험편, (f) QT쇼트피닝시험편의 마모면은 응착마모와 연삭마모에 의한 마모흔적을 볼 수 있다. 핀 시험편은 연성이 풍부하여 주철인 디스크에 의하여 표면 돌출부의 국부적 부분에서 응착하기 때문에 고압력이 되고 양금속간에 응착이 일어난다. 계속해서 금속간의 슬립보다 응착부근에 큰 변형이 생겨 표면에 균열이 발생하기 시작하며 연삭에 의하여 많은 마모가 발생하였다. 그리고 (c) 질화시험편, (d) 유도경화시험편, (e) QT질화 시험편, (g) QT유도경화 시험편은 핀 마모량이 적은 것에서 미끄럼마모와 산화마모가 일어난 것으로 판단된다. 표면의 경도가 높아서 상대적인 접촉에 의하여 미끄럼이 발생하고, 장시간의 마찰에 의하여 온도가 상승하면서 산화에 의한 마모가 발생하였다고 판단된다.

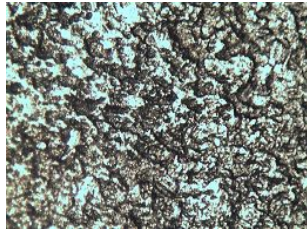




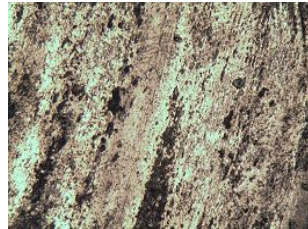
(a) BM



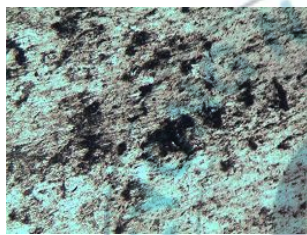
(b) QT specimen



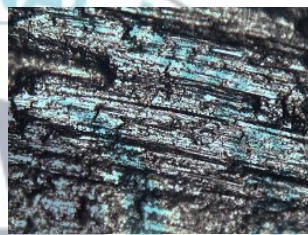
(c) Nitriding specimen



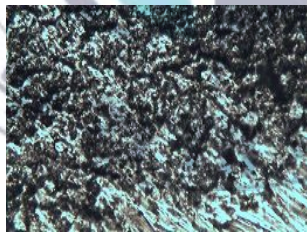
(d) Inductive hardening specimen



(e) QT nitriding specimen



(f) QT shot peening specimen



(g) QT inductive hardening specimen

Fig. 4.14 Optical microstructure of wear surface after wear test

2) 상온 윤활 마모

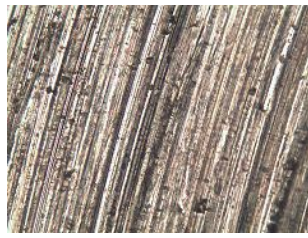
윤활 마모는 시험 핀과 상대원판 사이에서 하중을 176 N까지 증가시켰는데도 불구하고, 연삭마모가 일어나지 않고 계속적으로 미끄럼마모가 일어나면서 마모량이 발생하지 않았다. 따라서 윤활 마모는 disk를 GCD500에서 실리콘카바이드 연마지로 교체하여 마모시험을 실시하였다. 실리콘카바이드 연마지를 기존의 상대원판에 양면테이프를 이용하여 부착하였으며, 상대원판을 고정시키는 시험기 치구에 완전 고정시킴으로써 연마지가 움직이는 것을 막았다.

상온 윤활 마모의 특징으로는 우선 마모량이 많은 편이어서, 마모거리를 총 3 km까지 진행하지는 못하였고, 2/3인 2 km까지 진행하였다. 상온 윤활 상태에서의 마모 시험 결과를 Fig. 4.15에 나타내었다. 시험편의 마모량의 특성으로 볼 때, 상온 건조 조건과 마찬가지로 질화시험편, QT질화시험편, 유도경화시험편, QT 유도경화시험편의 마모량이 적었고, 모재, QT시험편, QT쇼트피닝시험편의 마모량이 많았다. 그 이유 역시 상온 건조조건과 마찬가지로 경도와 마모량의 상관관계가 있다고 판단된다. 그림에서 유도경화시험편과 질화시험편의 마모량이 처음에는 유도경화시험편이 더 작았으나, 500 m에서는 모재, QT시험편과 거의 동일한 마모량을 얻었다. 이것은 유도경화 열처리가 미치는 영역을 넘어서 원래 베이스의 마모량과 거의 흡사한 양의 마모가 발생하였다고 판단된다. 전체적으로 마모량이 많았다는 것과 열처리로 인하여 조직이 개선된 부분을 넘어서 마모가 발생하였다는 것에 미루어 추론해 볼 때, 가장 내마모성이 가장 강한 시험 편은 상온 건조 상태와 마찬가지로 질화시험편과 유도경화시험편이라고 판단된다.

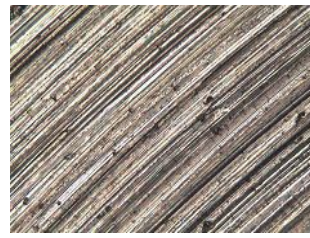
Fig. 4.16은 상온 윤활에서 마모 시험 후의 마모면을 관찰하여 나타내었다. 실리콘카바이드연마지를 사용하여 마모시험을 실시하였기 때문에, 마모면의 특성을 구분하기 어려웠고, 모두 연삭마모와 비슷한 마모면을 가지는 것을 관찰할 수 있었다.



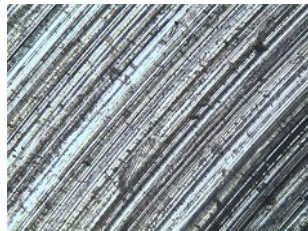
Fig. 4.15 Wear quantity of pin specimen versus wear distance using SiC paper under room temperature oil condition



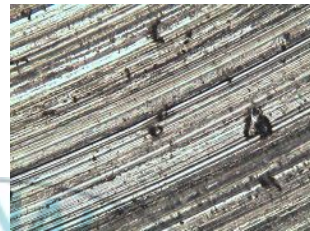
(a) Base metal



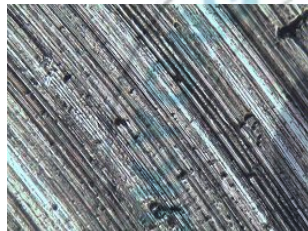
(b) QT specimen



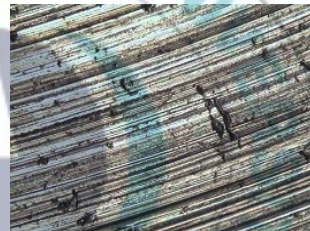
(c) Nitriding specimen



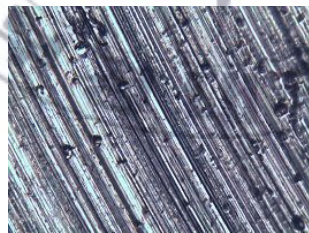
(d) Inductive hardening specimen



(e) QT nitriding specimen



(f) QT shot peening specimen



(g) QT inductive hardening specimen

Fig. 4.16 Optical microstructure of wear surface after wear test under room temperature oil condition

3) 고온 윤활 마모

상온 윤활 마모에서 나타난 바와 같이 윤활 상태에서 시험편과 상대원판 사이에서 하중을 176 N까지 증가시켰는데도 불구하고 연삭마모가 일어나지 않고 계속적으로 미끄럼마모가 일어나면서 마모량이 발생하지 않아 고온 윤활 조건에서는 disk를 GCD 500에서 실리콘카바이드 연마지로 교체하여 마모시험을 실시하였다. 실리콘카바이드연마지를 기존의 상대원판에 양면테이프를 이용하여 부착하였으며, 상대원판을 고정시키는 시험기 치구에 완전 고정시킴으로써 연마지가 움직이는 것을 막았다.

Fig. 4.17은 고온 윤활 상태에서의 마모 시험 결과를 나타낸 것이다. 시험편의 마모량은 앞의 두 실험과 다르게 질화시험편과 유도경화시험편의 마모량이 많은 편이었으며, 모재와 QT시험편이 가장 낮은 마모량을 나타내었다. QT 쇼트피닝시험편은 2 km까지 마모량이 증가하다, 그 후 일정한 마모량을 나타내었다. 고온 윤활 마모는 질화시험편이 가장 마모량이 많았다. 이것은 100 °C의 오일 속에서는 상온에서와 달리 실리콘카바이드연마지가 제대로 작용하지 않았다는 것이 가장 큰 단점이었다고 생각된다. 또한, 실험 후 시험편이 기울어진 것을 알 수 있었으며, 안쪽은 마모량이 적고 바깥쪽은 마모량이 많았다. 이것으로부터 100 °C를 견디지 못한 실리콘카바이드 물질들이 마모에 의하여 종이와 분리되어 떨어져나가면서 시험편의 바깥쪽을 마모시켜 시험편이 점점 기울어진 것으로 판단된다. 그러나 모재와 QT시험편은 마모량이 아주 작았다. 모재는 충분한 연성을 가지고 있으므로 마모될 때, 강한 실리콘카바이드 입자에 응착 마모가 발생하지만, 표면이 단단한 유도경화시험편과 질화시험편은 마모가 부서지듯이 취성 파괴가 일어나면서 시험편이 기울어지면서 마모량이 더 많았던 것이라고 판단된다.

Fig. 4.18은 고온 윤활 조건에서 마모 시험 후의 마모면의 현미경 사진을 나타낸 것이다. Fig. 4.16의 상온 윤활 조건 마모면 관찰과 마찬가지로 실리콘카바이드연마지에 의한 연삭마모의 흔적은 나타나지만, 비슷한 마모면을 나타내어 특이사항이 없는 것으로 나타났다.

마모 시험은 모의실험을 통하여, 시험편이나 조건, 분위기에 따른 데이터의 비교를 통하여 재료의 내마모성을 평가하는 시험이다. 본 장에서 건조 마모를 Oil 마모로 바꾸어 실험하였을 때 마모량이 발생하였다면 가장 좋은 실험이 될 수 있었으나, 비교할 수 없을 정도의 적은 마모량 나타내었다. 상온 및 고온 윤활조건의 마모시험은 하중을 높이고, 상대재를 실리콘카바이드 연마지를 사용하였다. 상온 윤활 마모는 마모량이 많아서 마모거리 3 km까지 실시할 수 없었고, 고온 윤활 마모는 온도라는 변수가 작용하여 건조 및 상온 윤활 마모와는 마모량이 작게 나타났다.

그러나 건조 마모에서 질화시험편과 유도경화시험편은 마모량이 거의 발생하지 않을 정도로 좋은 내마모성을 나타내었으며, 상온 윤활 마모에서도 모재와 QT시험편에 비하여 다소 좋은 내마모성을 나타내었다. 한편, 고온 윤활 마모의 내마모성은 표면경도 및 연성과 밀접한 관계를 가지고 있다는 것을 알 수 있었다.

본 장에서 하중이 증가함에 따라서 마모량이 증가한다는 것, 표면경도가 마모량에 영향을 미친다는 것, 윤활 마모는 건조 마모보다 마모량이 극히 작다는 것, 내마모성은 표면경도 및 연성과 상관관계를 가지고 있다는 것을 확인하였다.

Fig. 4.17 Wear quantity of pin specimen versus wear distance using SiC paper under 100 °C oil condition



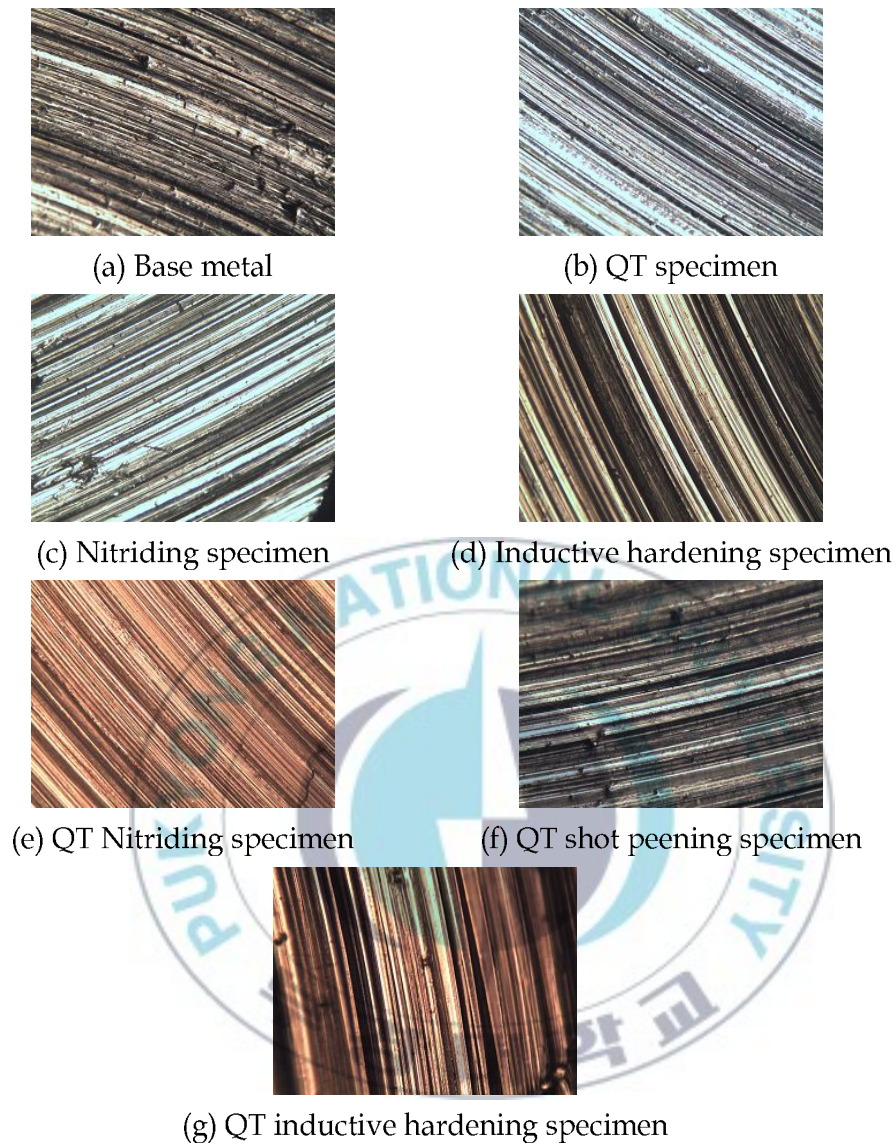


Fig. 4.18 Optical microstructure of wear surface after wear test under 100°C oil condition

4.4 결 언

본 장에서는 피스톤 재료로 사용되고 있는 SACM645 재료를 다양한 방법으로 열처리를 실시한 후 건조, 윤활 및 고온 윤활 분위기에서 마모 특성을 조사하였다.

- (1) QT시험편, QT쇼트피닝시험편 및 QT질화시험편의 최대 인장응력은 800 MPa 정도로 비슷한 값을 나타내었으나, 변형률은 많은 차이를 나타내었다. 그러나 QT유도경화시험편은 내부까지 전부 경화되어 1,700 MPa로 매우 높게 나타났다.
- (2) 질화시험편은 표면 경도가 800 Hv, 유도경화시험편은 전부 경화되어 550 ~ 600 Hv 정도로 나타났다. 그 외 대부분의 시험편은 모재와 비슷한 경도(210 ~ 230 Hv)를 나타내었다.
- (3) 질화시험편, QT질화시험편 및 유도경화시험편의 상온 건조 마모 특성은 우수하게 나타났으며, QT시험편, QT쇼트피닝시험편 및 모재는 비슷한 마모 특성을 나타내었다.
- (4) 상온 윤활 마모는 전체적으로 마모량이 많았으며, 상온 건조 마모와 같이 질화시험편 및 유도경화시험편의 내마모성이 가장 우수하다고 판단된다.
- (5) 고온 윤활 마모는 질화시험편과 유도경화시험편의 마모량이 많았으며, 모재와 QT시험편이 가장 작은 마모량을 나타내었다.
- (6) 건조 마모는 질화시험편과 유도경화시험편이 좋은 내마모성을 보여주었으며, 상온 윤활 마모에서도 모재와 QT시험편에 비하여 좋은 내마모성을 나타내었다. 그러나 고온 윤활 마모의 내마모성은 표면경도 및 연성과 상관성을 가지고 있었다.
- (7) 상온 건조 마모면은 모재시험편, QT시험편, QT쇼트피닝시험편에서 응착마모와 연삭마모에 의한 마모흔적을 볼 수 있었고, 질화시험편, 유도경화시험편, QT질화시험편, QT유도경화시험편은 미끄럼마모와 산화마모가 발생하였다.

그러나 상온 및 고온 윤활 마모에서 실리콘카바이드연마지를 상대재로 사용함으로 인하여 연삭마모의 흔적만 관찰되었다.



참고문헌

- (1) 정재연, 백일현, 조인성, 송규근, 오석형, 정석훈(2007), “유압 피스톤 펌프의 슬리퍼 정압베어링에 관한 윤활특성 연구”, 유공압시스템학회논문집, 제4권 제3호, pp. 1~6.
- (2) 정재연, 송규근, 오석형, 김종기(2004), “유압 피스톤 펌프의 실린더 블록과 밸브 플레이트 사이의 유막 특성”, 유공압시스템학회논문집, 제1권 제2호, pp. 8~14.
- (3) 이용범, 김형의, 유영철, 박종호(2005), “유압펌프 및 모터 피스톤 조립체의 수명예측을 위한 가속실험 모델”, 유공압시스템학회논문집, 제2권 제4호, pp. 14~22.
- (4) 홍예선, 이상율, 김치봉, 김성훈, 임현식, 김성대(2004), “사축식 유압 피스톤 펌프의 저속 마찰 특성 개선”, 유공압시스템학회논문집, 제1권 제3호, pp. 7~13.
- (5) 정재연, 백일현, 조인성, 송규근, 오석형, 정용욱(2008), “사축식 유압 피스톤 펌프의 디스크 편심률에 따른 실린더블록 구동영역에 대한 연구”, 유공압시스템학회논문집, 제5권 제2호, pp. 1~7.
- (6) 전정식(2004), “유압유의 종류와 선정방법”, 유공압시스템학회지, 제1권 제2호, pp. 1~8.
- (7) 강만곤, 최세령(2007), “유압 펌프 및 유압모터의 소음 레벨 측정법”, 유공압시스템학회지, 제4권 제3호, pp. 47~55.
- (8) 함영복, 박경민, 윤소남, 김성동(2004), “유압 피스톤 펌프/모터의 동력변환 메카니즘에 대한 고찰”, 유공압시스템학회지, 제1권 제3호, pp. 47~56.
- (9) 정현술, 김형의, 김종기(2004), “유압 피스톤 펌프·모터의 효율에 관하여”, 유공압시스템학회지, 제1권, 제3호, pp. 39~46.
- (10) 정재연(2004), “유압 피스톤 펌프·모터의 특징과 고성능화”, 유공압시스템학

- 회지, 제1권 제3호, pp. 32~38.
- (11) 조유중, 오창근(2004), “굴삭기용 유압펌프의 최근 개발동향”, 유공압시스템 학회지, 제1권 제3호, pp. 1~7.
- (12) 구영모(2004), “유압시스템에서 작동유가 미치는 영향”, 유공압시스템학회지, 제1권 제2호, pp. 9~11.
- (13) 조유중(2004), “국내 유압산업의 현황(건설 중장비용 액시얼 피스톤 타입의 펌프/모터를 중심으로)”, 유공압시스템학회지, 제1권 제1호, pp. 15~22.
- (14) 박성길(2008), wear Test Guide, (주)네오플러스.



第 V 章

DLC코팅된 SACM645 재료의 기계적특성



5.1 서 언

유압펌프는 유압을 이용하여 장비를 작동시키는 중요한 부품으로써 작은 크기의 제품으로 큰 동력을 만들어내는 목적에 사용된다. 특히, 중장비의 중량물에 대하여 상하이동 및 좌우회전 시 부드러운 동작과 함께 큰 동력을 만들어 내어 안전하고 정확한 동작을 구성하게 한다.⁽¹⁾

피스톤 펌프는 작동할 때, 내부에서 발생하는 열에 의하여 피스톤 재료의 내부 조직이 변화하면서, 제작시의 경도가 손실되어 내마모성이 저하되며, 최종적으로 펌프의 효율이 떨어지는 현상이 발생하는 것으로 추정되므로, 많은 연구가 실시되고 있다.^(2~6) 그러므로 피스톤 재료가 장기간 사용에도 초기의 경도와 윤활성을 유지할 수 있다면, 펌프의 효율이 떨어지는 것을 방지 할 수 있다. 이러한 방법 중의 하나가 DLC(diamond like carbon) 코팅이다.^(7~11) DLC 코팅은 비정질 카본 박막으로 다이아몬드와 유사한 높은 경도, 윤활성, 내마모성, 화학적 안정성, 전기절연성 및 광학적 투과성을 가진다. 더구나 DLC 코팅은 윤활성이 우수하며, 특히 습도가 낮은 조건에서 더욱 뛰어나 우주산업용 기계부품의 윤활 코팅에 적합하다는 평가를 받고 있다.

따라서 본 장에서는 DLC코팅된 유압 피스톤 펌프용 SACM645 재료의 기계적 특성을 조사하였다.

5.2 실험방법

5.2.1 재료 및 시험편

본 장에서 사용한 재료는 2.2.1에서 사용한 것과 같은 SACM645이다. 인장시험편은 모재, QT, QT질화시험편, QT쇼트피닝시험편 및 QT유도경화시험편이다. 인장시험편은 KS B 0801 규격에 의거하여 제작하였으며, 시험편의 형상과 치수를 Fig. 2.1(a)와 같다. DLC 코팅층의 라만분석, 경도 측정, 표면 거칠기, 부착력 측정 및 마모 시험에 사용한 코팅 전(a)과 후(b)의 시험편을 Fig. 5.1에 나타낸다.

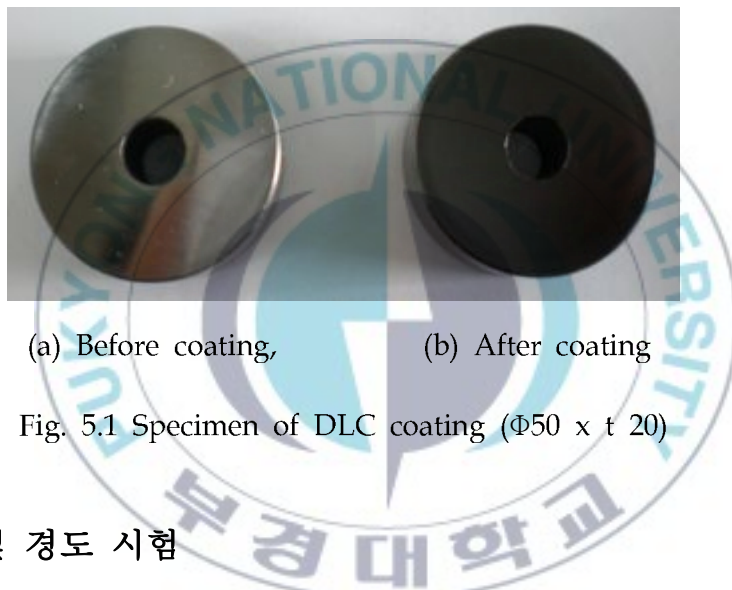


Fig. 5.1 Specimen of DLC coating ($\Phi 50 \times t 20$)

5.2.2 인장 및 경도 시험

인장시험은 최대용량 100 kN의 만능시험기(Instron model 8516)를 이용하여 표점거리 12.5 mm, cross head speed 0.5 mm/min의 속도로 총 5개의 시험편으로 인장실험을 실시하여, 평균값을 사용하였다.

대표적으로 가장 우수한 질화시험편의 표면 경도는 표면으로부터 측정하였다. 경도시험은 마이크로비커스 경도기를 사용하여 하중 980 N, 유지시간 10초로 하였다. 경도는 표면의 0.2 mm에서부터 내부 1 mm까지 0.1 mm 간격으로 각 부위별 3회 측정하여, 평균값을 나타내었다.

5.2.3 DLC 코팅

DLC 코팅은 Fig. 5.2와 같은 자체 제작한 DLC 코팅 장비를 사용하여 실시하였다. DLC 코팅은 $\Phi 50 \times t20$ 의 시험편에 질화처리하고, 폴리싱하여 DLC 코팅을 실시하였다. DLC 코팅 공정은 다음과 같다.

1) 전처리 공정

1단계 : 초음파 세척을 이용한 Synthetic Clean(시험편에 흡착된 가공유 제거)

2단계 : 초음파 세척을 이용한 Ethyl Alcohol Clean

3단계 : 5% 질산 용액 5 sec 산처리

4단계 : 초음파 세척을 이용한 Ethyl Alcohol Clean

2) 박막 공정

본 장에서는 다양한 DLC의 합성 방법 중 13.56 MHz의 RF 플라즈마를 이용한 RF-CVD법을 이용하였다. 또한 4단계로 이루어진 모든 박막공정 중에 Chamber 온도를 200 °C로 유지하였으며, 저진공($\sim 10^{-3}$ torr)배기를 위하여 로타리 펌프와, 고진공($10^{-3} \sim 10^{-6}$ torr)을 위한 터보펌프를 사용하였다(순수가스 농도를 높이기 위하여, 각 공정마다 터보펌프를 이용한 고진공 배기를 실시함).

1단계[H₂ etching]

초기 Chamber내 압력을 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ torr(고진공)로 배기 후, 4×10^{-2} torr (H₂ : 20 sccm주입)의 H₂ 분위기에서 5 ~ 10분간 600 W의 RF Plasma를 이용한 재료표면에칭.

이때 재료가 H₂ Plasma에 장시간 노출될 경우, 식각율이 높아져 표면이 상한다. 또한 200 °C의 적정 온도로 재료표면에 화학적으로 흡수되는 수소를 최소화하였다.

2단계[Ar Cleaning]

Chamber내 압력을 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ torr(고진공)로 배기 후, 3×10^{-2} torr (Ar : 20 sccm 주입)의 Ar 분위기에서 60분간 600 W의 RF Plasma를 이용한 Chamber 내 Ar 세정.

3단계[Interlayer]

Chamber내 압력을 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ torr(고진공)로 배기 후, 4×10^{-2} torr (Ar : 20 sccm 주입)의 HMDSO 분위기에서 20분간 600 W의 RF Plasma를 이용하여 시험편 표면에 중간층(Interlayer) 증착. 흔히 CVD법의 중간층으로 사용되는 SiH_4 의 경우 위험성이 높고 다루기가 어려움을 감안하여, 액화 상태인 HMDSO 용액을 Chamber의 진공압을 이용, MFC로 적정량을 기화시키는 방법을 사용하였다. 이 공정은 DLC필름의 접착력을 향상시켜주는 박막의 중간층으로써, Plasma의 반응 시간이 길어지면 Chamber내의 오염이 심각해지며, 너무 짧을 경우 재료 표면에 균일한 Interlayer 층을 얻을 수가 없다.

4단계[DLC Coating]

Chamber내 압력을 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ torr(고진공)로 배기. DLC막 생성을 위하여 본 공정에서는 CH_4 와 H_2 가스를 반응가스로 사용하였다. H_2 가스의 경우 탄화수소에서 분해되는 카본을 Plasma와 더불어 가속화 시켜 우수한 막을 생성하기 위한 support 역할로 사용하였다.

필름 합성시 진공도는 4×10^{-2} torr (CH_4 : 5 sccm, H_2 : 15 sccm)로 주입하였으며, 600 W의 RF Plasma를 사용하였다. Chamber 내 초기 온도가 상온일 경우, Plasma의 반응열로 시간이 지남에 따라 100 °C가까이 상승함을 감안하여, Chamber내 온도를 200 °C로 일정하여 유지하였다. 필름의 두께는 합성 시간을 조절하여 변화시켰다.



Fig. 5.2 DLC Coating System

5.2.4 DLC 코팅 평가

1) Micro-Raman 분석^(12~14)

코팅 층의 DLC를 평가하기 위하여 라만연구소의 라만분석장치(모델 : LabRam HR)를 이용하여, 분석하였다. 라만 시스템은 고체나 액체 시료의 라만 스펙트럼을 측정하는 장비로써, 라만 스펙트럼은 시료 내 분자나 결정의 진동 모드(phonon modes)에 대한 에너지 정보를 가지고 있다.

2) 경도 측정

경도 측정은 CSM사의 Nano indentation tester(model : NHTX)를 사용하여, 각 시험편당 랜덤하게 2회 측정하여 평균값을 사용하였다. 측정조건은 acquisition 10 Hz, max depth 400 nm, loading time 100 mN/min, unloading time 100 mN/min, poisson's ratio 0.18, Fmax 3,mN으로 하였다. DLC 코팅층은 Nano-indentation^(15~17)으로 표면 각 부위의 값이 2,000 Hv 이상되어야 한다..

3) 표면 거칠기 및 부착력 측정

표면 거칠기 측정은 JIS 2001규격에 의하여 Mitutuyo사의 표면 거칠기 측정기(model SJ-301)를 이용하였다. SJ-301 측정시 측정거리 200 μm , 측정 속도 0.5 mm/s로 각각 측정하였다. 표면 거칠기는 3회 이상 측정하여, 0.2 μm 이하가 되어야 한다.

부착력 측정은 CSM사의 scratch tester(model : RST)을 사용하여, 각 시험편당 랜덤하게 2회 측정하여 평균값을 사용하였다. 측정조건은 0~50 N의 힘을 50 N/mim의 속도로 순차적으로 시험편에 가한 후, 음향 신호와 육안 관찰을 통하여 부착력을 측정하였다. 부착력은 Scratch test로 3회 이상 측정하여, 그 값이 30 N 이상이 되어야 한다.

4) 마모실험

마모실험은 ball on disk 방식으로, 사용한 볼(Ball)은 시판중인 $\Phi 3$ 의 알루미나 볼이다. 마모실험은 SACM645 재료를 1) 모재, 2) QT시험편, 3) QT질화시험편, 4) QT유도경화시험편, 5) DLC코팅시험편 등 5종류에 대하여 실시하였다. 실험은 상온 건조 상태로 회전수 50 rpm, 하중 5 N을 가하여 총 마모거리를 3 km로 하였다. 각 시험편은 500 m마다 세척하여 마모량을 측정하였다.

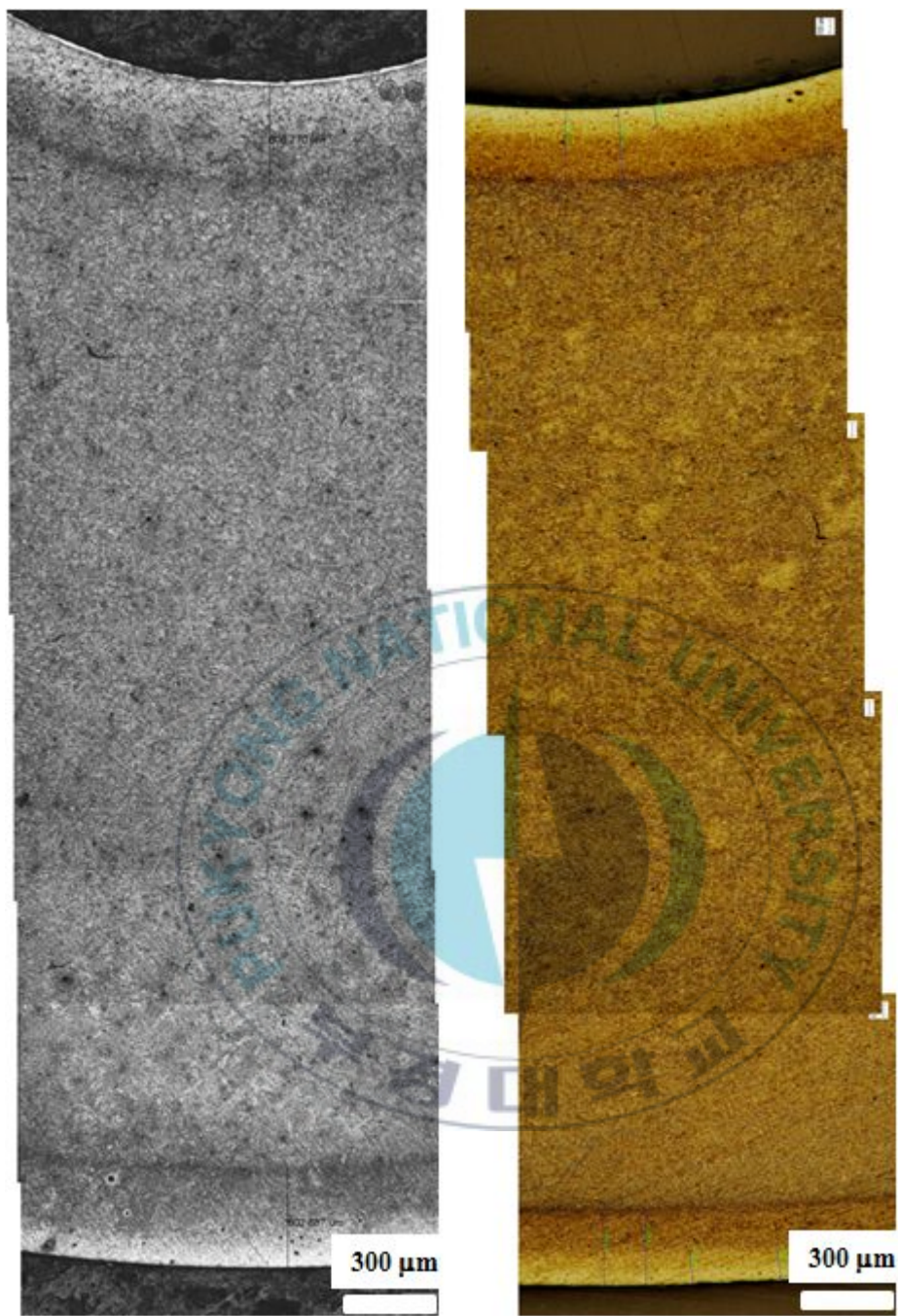


5.3 실험결과 및 토론

5.3.1 미세조직 관찰

본 장에서는 수입한 미사용 유압 펌프의 피스톤 조직과 실험에 사용한 시험편의 조직을 비교하여 Fig. 5.3에 나타내었다. 비교하기 위하여 수입 제품은 흑백으로, 시험편의 조직사진은 컬러로 표시하였다. 두 제품 모두 QT질화처리에 의하여, 조직은 템퍼드 마르텐사이트 조직으로 관찰되었다.

QT질화처리에 의한 질화처리 조직은 수입품의 경우 질화층이 뚜렷하게 구별되지 않고, 질화처리에 의한 열영향부만 뚜렷하게 나타나고 있다. 이 때 열영향부의 크기는 약 $600\ \mu\text{m}$ 정도로 나타나고 있다. Fig. 5.3(a)의 아래 부분 흰색으로 나타나는 부분이 질화층으로 구별되고 있으며, 크기는 $250 \sim 300\ \mu\text{m}$ 정도이다. 그러나 Fig. 5.3(b) QT질화시험편은 질화처리에 의하여 열영향을 받은 부분과 질화층의 구분이 뚜렷이 나타나고 있다. 열영향을 받은 부분은 약 $600\ \mu\text{m}$ 정도이며, 질화층의 두께는 $300\ \mu\text{m}$ 정도로 나타났다.



(a) Imported piston material

(b) Specimen

Fig. 5.3 Microstructure of QT nitriding specimen.

5.3.2 인장강도 및 경도 측정

인장 시험에서 얻어진 최대 강도를 Fig. 5.4에 나타내었다. Fig. 5.4에서 모재는 850 MPa, QT시험편은 840 MPa, QT쇼트피닝시험편은 837 MPa, QT유도경화시험편은 1,816 MPa, QT질화시험편은 855 MPa로 각각 나타났다. QT유도경화시험편은 시험편의 직경이 5 mm로 전부분이 경화되어 인장강도가 높게 나타났다고 판단된다.

대표적으로 QT질화시험편의 경도를 조사하여 Fig. 5.5에 나타내었다. 표면에서 약 800 Hv를 얻었다. 그리고 1 mm 위치의 경도는 모재와 비슷한 약 300 Hv를 얻었다. 이것으로부터 QT질화시험편이 양호한 표면처리가 되었다고 판단된다.



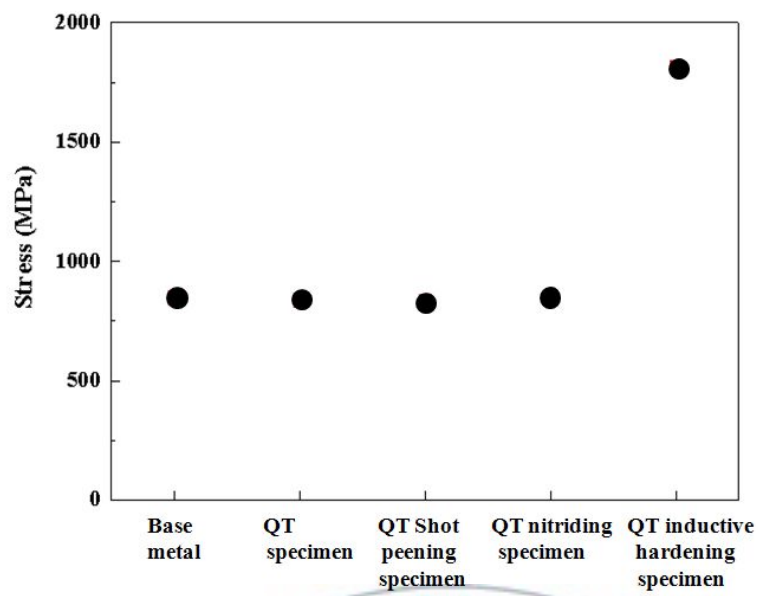


Fig. 5.4 Results of tension test by each heat treatment.



Fig. 5.5 Hardness of QT nitriding specimen.

5.3.3 DLC 코팅층의 Micro-Raman 분석

QT질화DLC코팅시험편 2개를 라만 분석하여, 그 결과를 Fig. 5.6에 나타내었다. 그림에서 나타나는 것처럼 1330 cm^{-1} 에서도 피크가 나타나고, 1560 cm^{-1} 에서 가장 큰 피크가 나타나고 있다. 1330 cm^{-1} 에서 나타나는 피크는 결정성 다이아몬드를 나타내고, 1560 cm^{-1} 에서는 DLC를 나타내고 있다. 1580 cm^{-1} 에서 나타나는 피크는 흑연을 나타내고 있다. 본 장에서 DLC 코팅한 시험편은 흑연이 거의 존재하지 않고 대부분이 DLC 구조로 이루어져 있음을 확인할 수 있다. 1330 cm^{-1} 에서 피크가 나타나는 이유는 DLC는 흑연이 이루고 있는 SP^2 구조와 결정성 다이아몬드가 이루고 있는 SP^3 구조를 동시에 혼합되어 있기 때문이라고 판단된다.



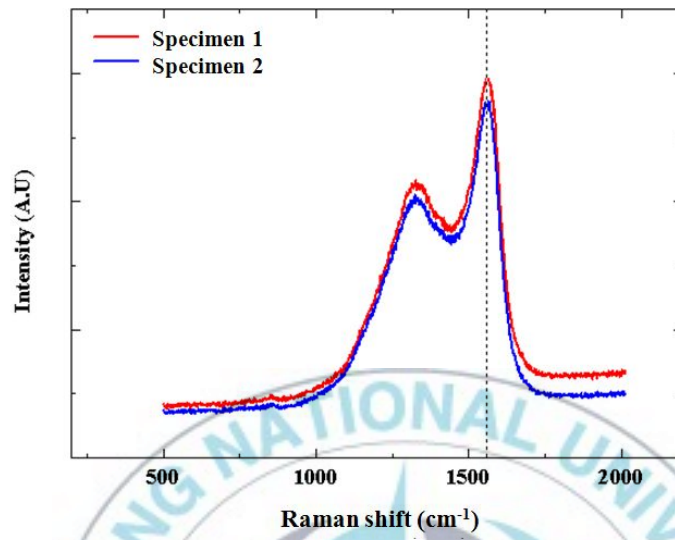


Fig. 5.6 Micro-Raman analysis of DLC coating layer.

5.3.4 DLC 코팅층의 경도

Fig. 5.7은 QT질화DLC코팅시험편의 nano-indentation 결과를 대표적으로 나타낸 것이다. 그림에서 X축은 인덴터 압자가 들어가는 깊이를 나타내며, Y축은 부하하는 하중을 나타낸다. 그래프에서 왼쪽은 하중을 부하 할 때를, 오른쪽은 하중을 제거할 때의 곡선을 의미한다. 하중이 제거될 때, 곡선의 기울기가 탄성계수(EIH)를 의미하며, 이 탄성계수와 Berkovich 경도 값(HIT)으로 계산하여 Vickers 경도 값을 계산한다. Nano-indentation 측정 결과는 2,158 Hv로 나타나, DLC 코팅층이 요구하는 값을 만족하였다.



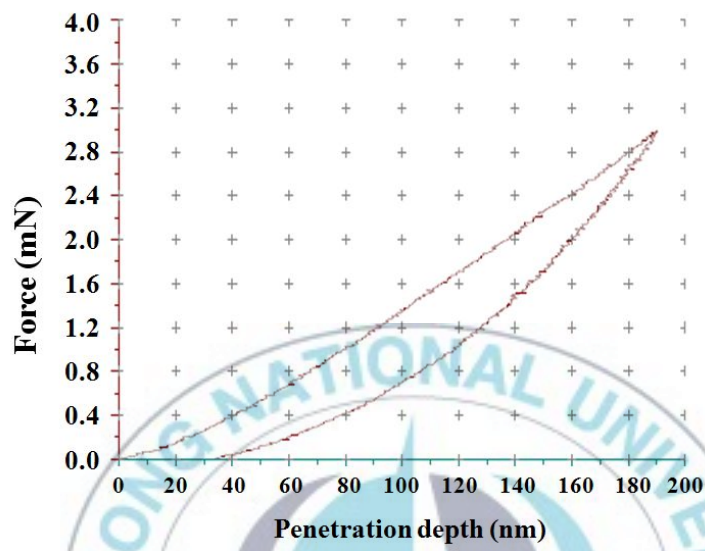


Fig. 5.7 Result of nano-Indentation of QT nitriding DLC coating specimen.

5.3.5 DLC 코팅층의 표면 거칠기

QT질화DLC코팅 시험편의 표면 거칠기 측정 결과를 Fig. 5.8에 나타내었다. SJ-301 시험기로 표면 거칠기 측정결과 R_a (중심선 평균조도)는 모든 시험편에서 $0.02\ \mu\text{m}$ 로 나타났다. 이것은 DLC 코팅층의 거칠기가 $0.2\ \mu\text{m}$ 이하가 되어야 한다는 조건보다 10배 작게 나타나, 양호한 코팅층이 얻어졌다.



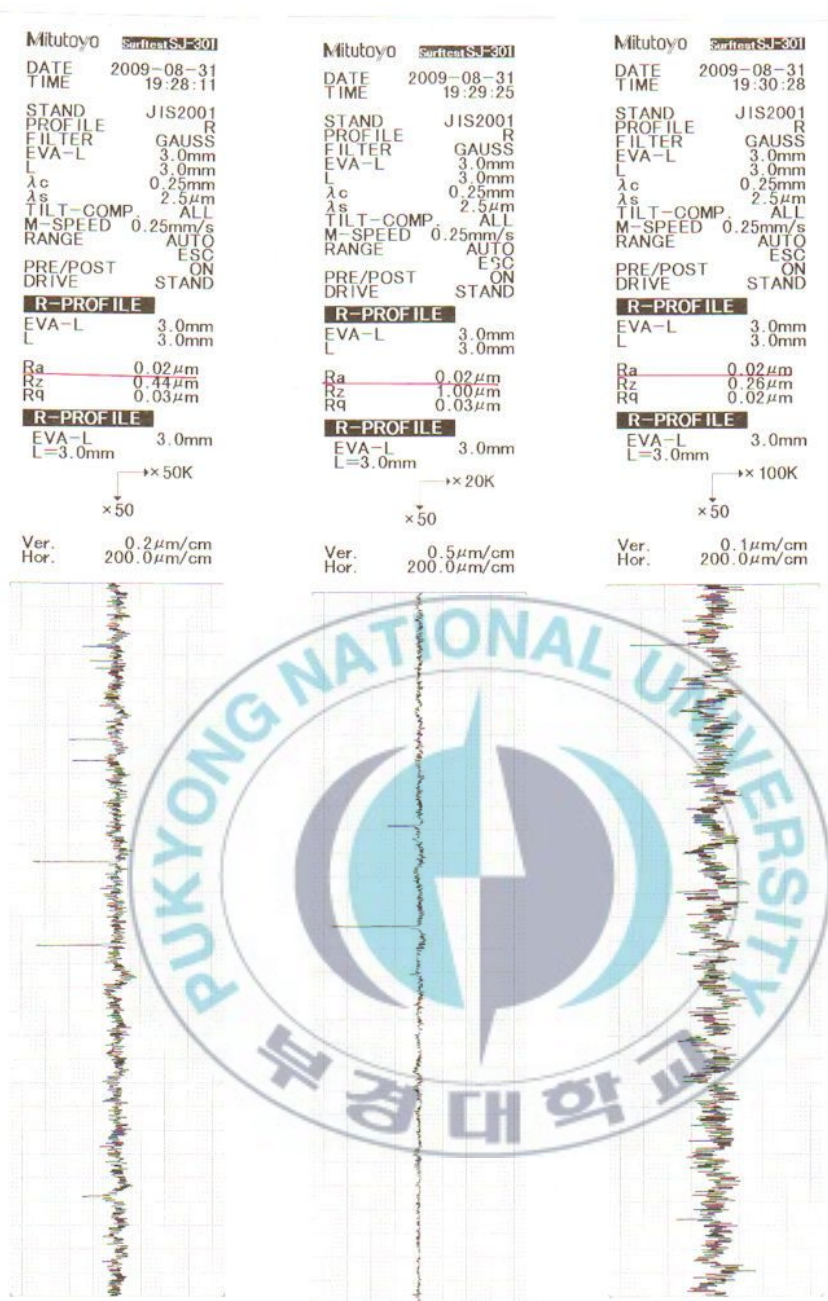


Fig. 5.8 Surface roughness from DLC coating layer.

5.3.6 DLC 코팅층의 부착력

Scratch test는 코팅부와 모재와의 부착력을 측정하기 위하여, 순차적으로 하중을 증가시켜 긁어나가면서 음향방출법으로 소리를 측정하여 박막의 최대 임계 하중을 구하는 방식으로 부착력을 측정한다. 음향방출법으로 부착력 측정이 어려운 경우에는 시험 후 광학현미경을 통하여 육안으로 부착력을 측정한다. Fig. 5.9는 QT질화DLC 코팅 시험편의 scratch test에서 얻어진 대표적인 결과를 나타낸다. 31 N 이후에서 DLC 코팅층이 박리되고 있는 것을 확인할 수 있다. Scratch test를 실시한 모든 시험편에서 30 N보다 높게 나타나, DLC 코팅층의 부착력 30 N 조건을 만족하였다.

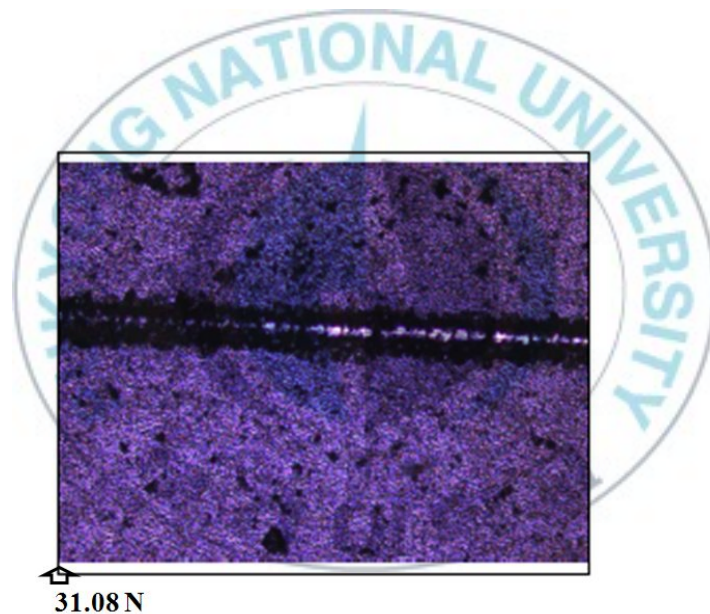


Fig. 5.9 Result of scratch test

5.3.7 마모실험

Fig. 5.1과 같은 5 종류의 SACM645 시험편을 사용하여, 실온 건조 상태에서 마모시험을 실시한 결과를 Fig. 5.10에 나타내었다. 마모량은 모재가 가장 많았으며, 다음으로 QT시험편, QT질화시험편, QT유도경화시험편, QT질화DLC코팅시험편으로 나타났다. QT시험편, QT유도경화시험편 및 QT질화시험편은 Fig. 5. 10에 나타낸 것과 같이 거의 비슷한 마모량을 나타내었다. QT처리한 시험편들이 모재보다 마모량이 작게 나타난 것은 템퍼링에 의하여 내부 인성이 증가하였기 때문으로 판단된다. QT질화DLC코팅시험편이 다른 시험편에 비하여 3 km까지의 마모량이 50g 이하로 마모량이 아주 작게 나타났다. QT질화DLC코팅시험편은 QT + 질화 처리 이후 DLC 코팅을 실시하여, 경도가 2,000 Hv이상을 나타내고 있고, 부착력도 30 N이상을 나타내고 있기 때문이라고 판단된다.



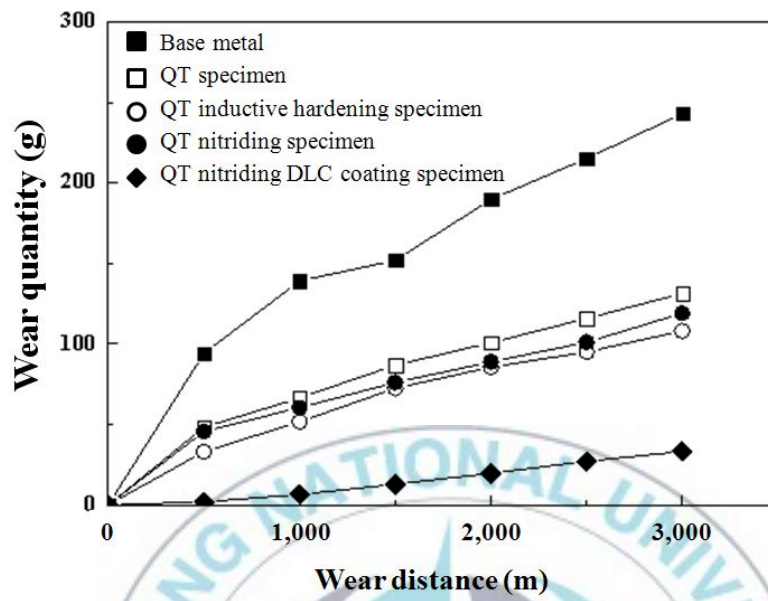
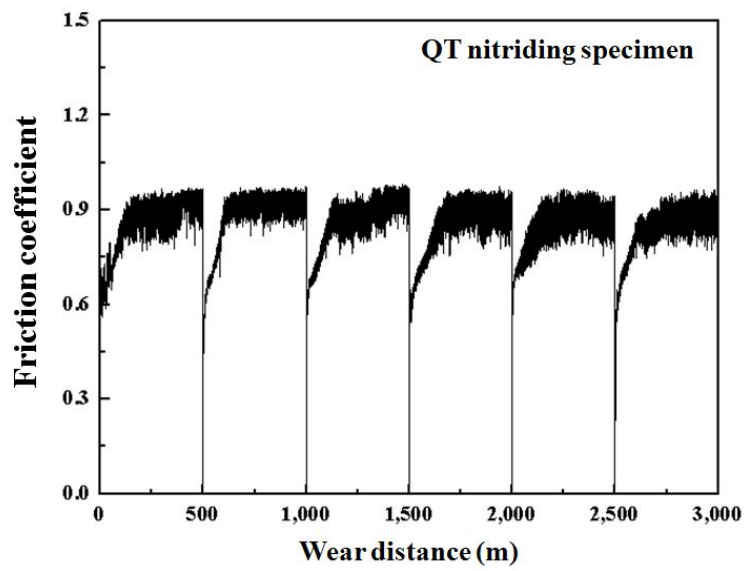


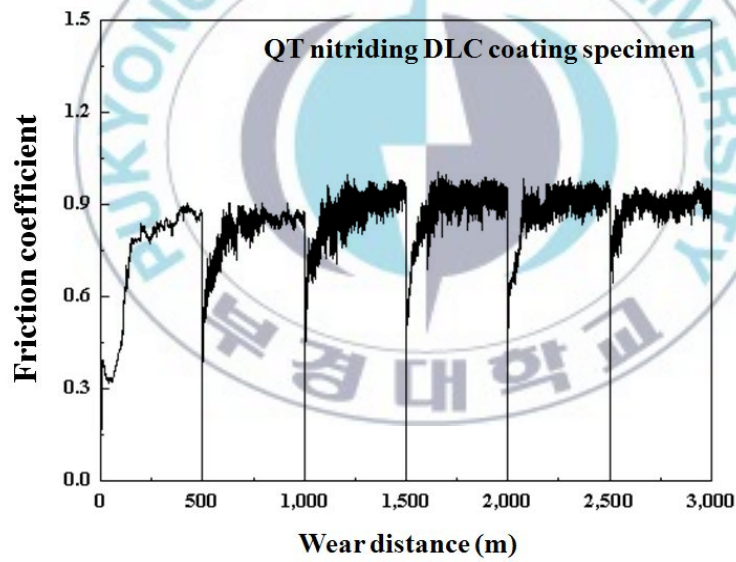
Fig. 5.10 Relationship between wear quantity and wear distance of various specimen.

Fig. 5.11은 마모실험 후의 마모 거리에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 것이다. 모든 시험편에 대해서 실시하였지만, 여기서는 대표적으로 QT질화시험편과 QT질화DLC코팅시험편에 대하여 나타내었다. Fig. 5.11(a)는 코팅을 실시하지 않은 QT질화시험편의 마찰계수를 나타낸 것으로, 6단계에서 모두 비슷한 약 0.9를 나타내고 있다. 그러나 QT질화DLC코팅시험편의 마모계수를 나타낸 Fig. 5.11(b)는 약 1 km까지는 약간 낮지만, 그 이후는 QT질화시험편과 비슷한 약 0.9를 나타내고 있다. 이것은 최초 500 m까지는 DLC 코팅층 때문이고, 500 ~ 1,000 m까지는 DLC 코팅층이 파괴되어 가고 있음을 예상 할 수 있는 부분이다. 즉, DLC 코팅층은 최초 500 m까지만 마모에 영향을 주는 것으로 판단된다. 따라서 모든 시험편에서 3 km까지 마모실험을 실시하였지만, 마찰 계수는 최초 500 m까지만 비교하여, 마모 특성을 조사하였다. 그 결과를 Fig. 5.12에 나타내었다.

Fig. 5.12는 500 m까지 마찰계수의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 5.12(a)~(d)는 모재, QT시험편, QT유도경화시험편 및 QT질화시험편의 마찰계수의 변화를 나타낸다. 마모 초기의 150 m까지 마찰계수가 서서히 증가하다가, 그 후에 분산이 있지만, 거의 일정한 값을 나타내고 있어 전체적으로 비슷한 모습을 나타낸다. 마찰계수는 약 0.87 ~ 0.92로 비슷한 값을 나타내었다. Fig. 5.12(e)는 QT질화DLC코팅시험편의 500 m까지 마찰계수를 나타낸 것이다. 그림 5.12(a)~(d)의 마찰계수와는 다른 모습을 볼 수 있다. 즉, 그래프의 분산도 거의 나타나지 않으며, 마찰계수도 약 0.82로 다른 시험편보다 우수한 값을 나타내고 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 본 장에서는 500 ~ 1,000 m 사이에서 DLC 코팅층이 파괴되는 것으로 나타났다. 즉 500 m 이전에는 고경도 고윤활 DLC코팅층이 남아있어, 이 코팅층이 세라믹 불과의 마모에 영향을 미쳤기 때문이라고 판단된다.

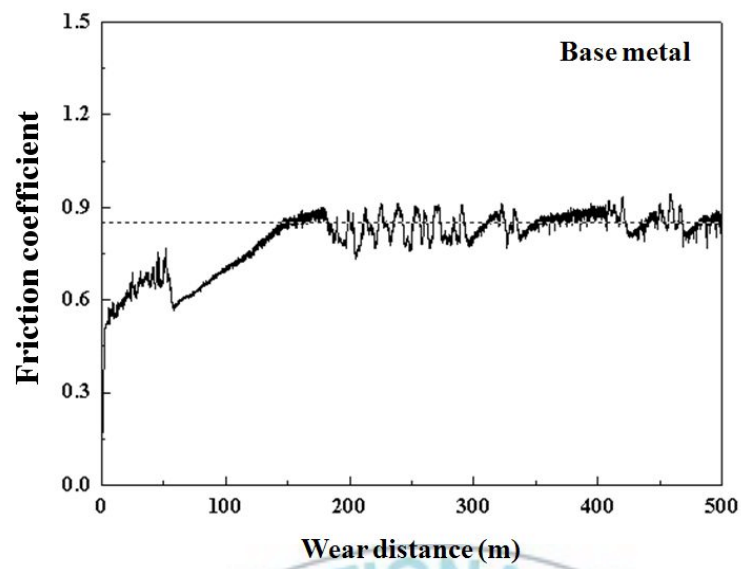


(a) Friction coefficient of QT nitriding specimen

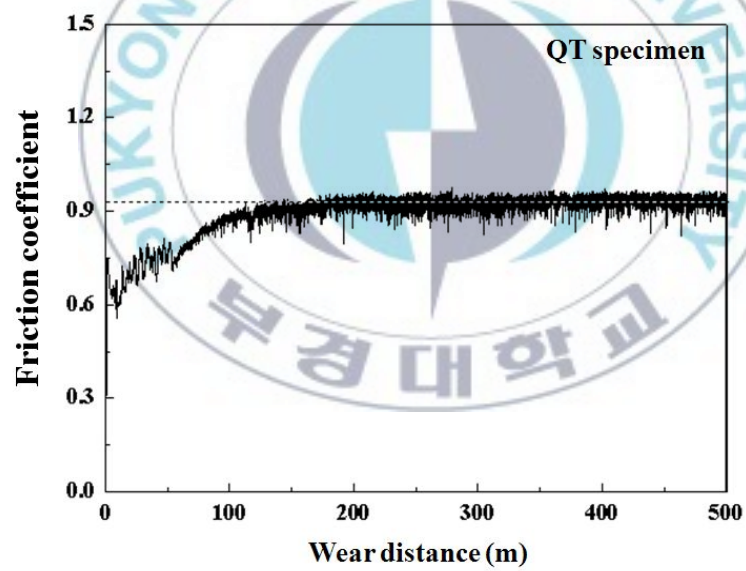


(b) Friction coefficient of QT nitriding DLC coating specimen

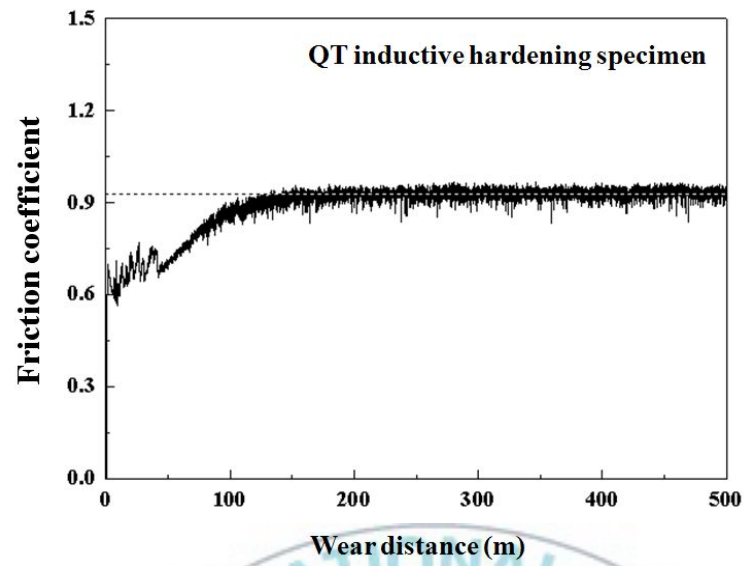
Fig. 5.11 Comparison of friction coefficient of before-and-after DLC Coating.



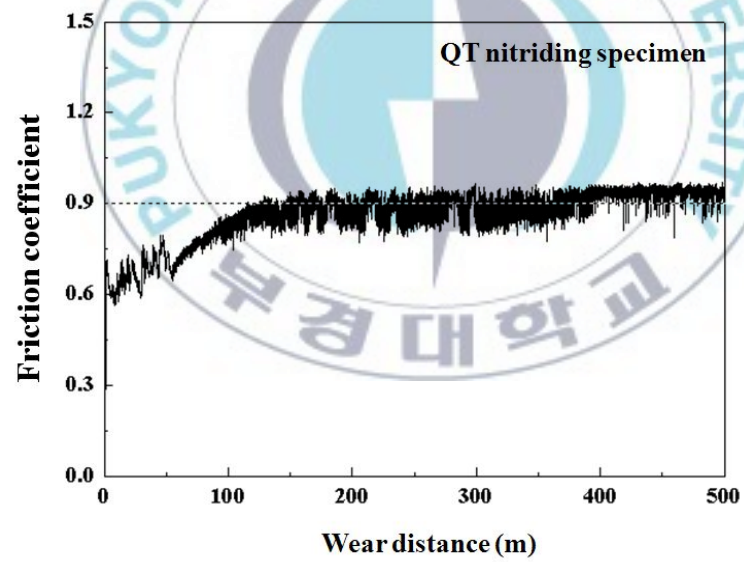
(a) Base metal



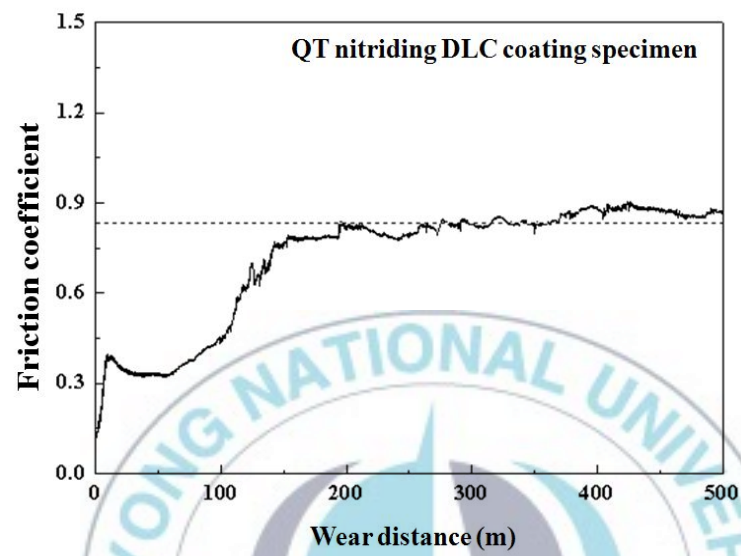
(b) QT specimen



(c) QT inductive hardening specimen



(d) QT nitriding specimen



(e) QT nitriding DLC coating specimen

Fig. 5.12 Friction coefficient to wear distance of 500 m

5.4 결 언

본 장에서는 DLC코팅된 유압 피스톤 펌프용 SACM645 재료의 기계적 특성을 조사하였다.

- 1) 인장강도는 모재 850 MPa, QT시험편 840 MPa, QT쇼트피닝시험편 837 MPa, QT질화시험편 855 MPa, QT유도경화시험편 1,816 MPa로 각각 나타났다. QT유도경화시험편이 높은 것은 전면 경화되었기 때문이다. QT질화시험편의 경도는 표면 약 800 Hv, 1 mm 위치에서 300 Hv를 나타내었다.
- 2) QT질화DLC코팅시험편은 DLC 코팅층의 라만 분석에서 흑연이 거의 존재하지 않고 1560 cm^{-1} 에서 피크가 나타나, 대부분 DLC 구조로 이루어져 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 nano-indentation 측정 결과는 2,158 Hv로 나타나, DLC 코팅층이 요구하는 값을 만족하였다.
- 3) QT질화DLC코팅시험편은 DLC 코팅층의 표면 거칠기는 모든 시험편에서 측정 범위인 $Ra=0.02\text{ }\mu\text{m}$ 로 나타났다. 이것은 DLC 코팅층의 거칠기가 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 이하가 되어야 한다는 조건보다 10배 작게 나타나, 양호한 코팅층이 얻어졌다. 부착력은 모든 시험편에서 30 N보다 높게 나타나, DLC 코팅층의 부착력 30 N 조건을 만족하였다.
- 4) QT질화DLC코팅시험편은 DLC 코팅층의 마찰계수는 1 km까지는 0.9이하이지만, 그 이후는 QT질화시험편과 비슷한 약 0.9를 나타내었다. 즉, 500 m까지는 DLC 코팅층 때문에 마찰계수 0.82로 작고, 500 ~ 1,000 m까지는 DLC 코팅층이 파괴되는 과정이고, 1,000 m 이후는 DLC 코팅층이 파괴되어 질화층의 특성을 나타내었다.

참고문헌

- (1) 성백주 (2010), “서보모터 일체형 유압펌프의 특징 및 개발동향”, 기계와 재료, 제22권 제4호, pp. 58~66.
- (2) 정종현, 김종기, 서용권 (2010), “액셀 피스톤 펌프내 유압유 유동에 대한 수치해석적 연구”, 대한기계학회논문집 B, 제34권 제2호, pp. 129~136.
- (3) 이지민, 박성환, 박용호, 이현희 (2011), “사판식 가변 용량형 액셀 피스톤 펌프의 일정출력 레귤레이터 특성 시뮬레이션”, 한국동력기계공학회지, 제15권 제2호, pp. 5~12.
- (4) 이일영, 최세령 (2011), “회전 캠 및 고정 실린더식 레이디얼 피스톤 펌프의 송출 유량 특성”, 유공압시스템학회논문집, 제8권 제1호, pp. 10~18.
- (5) 조인성, 신창근, 정재연 (201), “사축식 유압 피스톤 펌프의 압력 맥동 특성에 관한 연구”, 윤활학회지, 제27권 제4호, pp. 218~223.
- (6) 박정호, 김문경, 최석창 (2010), “특수 차량용 정용량 피스톤 펌프의 개발에 관한 연구”, 한국기계가공학회지, 제9권 제3호, pp. 19~27.
- (7) 송진수, 남태운 (2011), “중간층이 DLC 코팅에 미치는 영향”, 부식방식학회지, 제10권 제2호, pp. 65~70.
- (8) 김기주, 유석중, 최병익 (2010), “차량연비 향상을 위한 DLC 코팅 층이 엔진 마모 특성에 미치는 영향”, 한국자동차공학회논문집, 제18권 제1호, pp. 112~119.
- (9) 박순섭, 원종호 (2010), “비구면 유리렌즈 성형용 SiC 코어의 DLC 코팅에 관한 연구”, 한국정밀공학학회지, 제27권 제12호, pp. 28~32.
- (10) 최현주, 배형택, 나병철, 이진국, 임대순 (2007), “DLC 코팅과 비교된 고온 염소처리에 의한 탄소 막의 Tribological 특성”, 한국세라믹학회지, 제44권 제7호, pp. 375 ~ 380.
- (11) 신경섭, 조정우, 이영제 (2005), “모재의 표면 거칠기가 DLC 코팅의 마멸수

- 명에 미치는 영향", 윤활학회지, 제21권 제3호, pp. 130~135.
- (12) 홍원의, 노재상 (2010), '라만 분석을 통한 비정질 실리콘 박막의 고온 고상 결정화 거동', 한국표면공학회지, 제43권 제1호, pp. 7~11.
- (13) 송오성, 김종률 (2006), '고압고온 처리된 보석용 다이아몬드의 마이크로라만 분석에 의한 감별 연구' 한국산화기술학회논문지, 제7권 제5호, pp. 817~822.
- (14) 한성일, 김진범, 정성호, J.Senthil Selvan (2002), "레이저 국소증착에 의한 탄소 미세 구조물 제조 및 분광분석", 한국레이저가공학회지, 제5권 제2호, pp. 17~22.
- (15) B. Poon, D. Rittel and G. Ravichandran (2008), "An analysis of nanoindentation in linearly elastic solids". International Journal of Solids and Structures, Vol. 45, pp. 6018~6033.
- (16) W. C. Oliver and G. M. Pharra (204), "Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology", Journal of Materials Research, Vol. 19, pp. 3~20.
- (17) N. E. Kurland, Z. Drira and V. K. Yadavalli (2012), "Measurement of nanomechanical properties of biomolecules using atomic force microscopy", Micron, Vol. 43, pp. 116~128.

第 VI 章

결 론



유압 피스톤 펌프와 모터는 간단한 구조로서 고압의 유압원을 생성하거나 소형이면서도 높은 토크를 발생하기 때문에, 유압시스템에 널리 사용되고 있다. 피스톤과 실린더 사이의 좁은 간극에서의 마모상태는 피스톤 펌프와 모터의 성능 및 수명에 직접적으로 아주 큰 영향을 미친다. 이와 같이 내마모성, 인성 및 강도가 동시에 요구되는 재료에서 표면은 단단하게 하고, 내부는 연하면서 인성을 가지게 하는 방법이 표면경화처리이다. 표면경화처리는 질화법과 침탄법이 있으며, 현재 피스톤 펌프의 피스톤은 표면에 질화처리를 실시하고 있다. 질화처리는 침탄처리에 비하여 비용이 적게 들고, 처리가 쉬워서 여러 부품에 적용되고 있다.

따라서 본 논문에서는 피스톤 펌프에 사용되는 SACM645 재료에 다양한 방법으로 표면 처리하여, 기계적 특성(인장강도, 경도, 마모, 피로한도, 피로 균열전파특성 및 DLC 코팅 특성)을 조사하였다. 피스톤 펌프에 적용되고 있는 QT질화처리는 양호한 특성을 나타내고 있으나, QT질화DLC코팅을 실시한 재료의 특성은 기계적특성이 아주 우수하게 나타났다. 이것은 DLC 코팅은 비정질 카본 박막으로 다이아몬드와 유사한 높은 경도, 윤활성, 내마모성 및 화학적 안정성을 가지기 때문이다. 따라서 DLC코팅을 적용하면 고유압이 필요한 기기의 마찰 계수가 적어 기기의 장수명을 기대할 수 있을 것이라 판단된다.

발표논문 목록

<논문집(심사 유)>

1. 김남석, 김현수, 성기용, 안석환, 남기우 (2009), “유압 피스톤 펌프 소재의 마모 특성에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제23권, 제3호, pp. 30~34.
Nam-Soek Kim, Hyun-Soo Kim, Ki-Yong Seong, Seok-Hwan Ahn and Ki-Woo Nam (2009), “A Study on Wear Property of Oil Hydraulic Piston Pump Material”, J. Ocean Engineering and Technology, Vol. 23, No. 3, pp. 30~34.
2. 이수철, 김남석, 남기우, 안석환, 김현수 (2010), “GCV 소재의 DLC 코팅 마모 특성에 관한 연구” 한국해양공학회지, 제24권, 제6호, pp. 71~75.
Soo Chul Lee, Nam Seok Kim, Ki Woo Nam, Seok Hwan Ahn and Hyun Soo Kim (2010), "Study on Wear Properties of GCV Materials with DLC Coating", J. Ocean Engineering and Technology, Vol. 24, No. 6, pp. 71~75.
3. 김남석, 남기우, 박종남, 안석환, 김현수 (2010), “DLC 코팅된 SACM645 소재의 마모 특성” 한국해양공학회지, 제24권, 제6호, pp. 76~80.
Nam Seok Kim, Ki Woo Nam, Jong Nam Park, Seok Hwan Ahn and Hyun Soo Kim (2010), "Wear Property of SACM645 Material with DLC Coating", J. Ocean Engineering and Technology, Vol. 24, No. 6, pp. 76~80.
4. 김남석, 남기우, 김현수 (2011), “유압 피스톤 펌프 소재의 피로특성 연구” 대한기계학회논문집A권 제35권 제5호, pp. 555~559.
Nam Seok Kim, Ki Woo Nam and Hyun Soo Kim (2011), “Study on Fatigue Property of Material for Oil Hydraulic Piston Pump” Transactions of the KSME(A), Vol. 35, No. 5, pp. 555~559.

<발표논문(Proceeding 등)>

1. 김남석, 김현수, 성기용, 안석환, 남기우 (2009), “유압 피스톤 펌프 소재의 마모특성에 관한 연구” 2009년도 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집(2009 한국해양과학기술협의회 공동학술대회), pp. 2042~2046.

- Nam-Soek Kim, Hyun-Soo Kim, Ki-Yong Seong, Seok-Hwan Ahn and Ki-Woo Nam (2009), "A Study on Wear Property of Oil Hydraulic Piston Pump Material", Proceeding of The KSOE 2009 Spring Annual Meeting(Korea Ocean Science Technique Council 2009 Joint Meeting), pp. 2042~2046.
2. 김현수, 김남석, 성기용, 안석환, 남기우 (2009), "SACM645소재 윤활상태에서의 마모특성에 관한 연구", 한국동력기계공학회 2009 춘계학술대회 논문집, pp. 372~376.
H.S. Kim, N.S. Kim, K.Y. Seong, S.H. Ahn and K.W. Nam (2009), "A Study on Wear Property of SACM645 Material in Lubrication Conditions" Proceeding of The Korean Society for Power System Engineering 2009 Fall Annual Meeting, pp. 372~376.
 3. 김남석, 남기우, 이진호, 김태규, 박종남, 김현수 (2009), "DLC 코팅된 SACM645 소재의 마모 특성" 한국해양공학회 2009년도 추계학술대회 논문집, pp. 497~500.
Nam-Soek Kim, Ki-Woo Nam, Jin-Ho Lee, Tae-Gyu Kim, Jong-Nam Park and Hyun-Soo Kim (2009), "The Wear Property of SACM645 Material with DLC Coating" Proceeding of The KSOE 2009 Fall Annual Meeting, pp. 497~500.
 4. 이수철, 김남석, 남기우, 김태규, 김현수 (2010), "DLC 코팅된 GCV 소재의 마모특성에 관한 연구", 2010년도 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집(2010년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회), pp. 2378~2382.
Soo-Chul Lee, Nam-Seok Kim, Ki-Woo Nam, Tae-Gyu Kim and Hyun-Soo Kim (2010), "A Study on Wear Properties of GCV Materials with DLC Coating" Proceeding of The KSOE 2010 Spring Annual Meeting(Korea Ocean Science Technique Council 2010 Joint Meeting), pp. 2373~2382.
 5. 김남석, 이수철, 남기우, 김현수 (2010), "유압 피스톤 펌프 소재의 피로특성 연구", 대한기계학회 2010년도 추계학술대회 논문집, pp. 484~488.
Nam Seok Kim, Soo Chul Lee, Ki Woo Nam and Hyun Soo Kim (2010), "A Study on Fatigue Property of Oil Hydraulic Piston Pump Material" Proceeding of The KSME 2010 Fall Annual Meeting, pp. 484~488.
 6. 권효성, 남기우, 김남석, 김현수 (2011), "내압을 받는 감속배관의 파괴 거동",

2011년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회 논문집, pp. 319~324.

Hyo Seong Kwon, Ki Woo Nam, Nam Seok Kim and Hyun Soo Kim (2011), "Behavior of Failure of Wall Thinned Pipe under Internal Pressure", Proceeding of The KSME 2011 Spring Annual Meeting, pp. 319~324.

7. 김현수, 김남석, 남기우 (2011), "SACM645소재의 피로균열진전특성", 2011년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회 논문집, pp. 353~357.

Hyun Soo Kim, Nam Seok Kim and Ki Woo Nam (2011), "Fatigue Crack Propagation Property of SACM645 Material", Proceeding of The KSME 2011 Spring Annual Meeting, pp. 353~357.



감사의 글

올해는 유난히도 봄비가 자주 내렸습니다. 세상의 식물들이 봄비로 싱싱하게 녹음을 자랑하기 시작했습니다. 봄비로 인해서 많은 식물들이 건강하게 자라나듯이 저도 많은 분들의 도움으로 박사과정을 잘 마치게 되었습니다.

제가 배운 지식들이 많은 사람들에게 도움이 되도록 노력하며 살고자 하며, 옛 성인들의 가르침 중 氣山心海라는 말처럼 기운은 산처럼 마음은 바다처럼 넓게 가지고 살고자 합니다.

박사과정에 입학한 것이 엇그제 같은데 벌써 3년이라는 시간이 지났습니다. 돌아보면 인생에 있어서 고마운 시간들의 연속이었습니다. 학교에서 많은 사람들을 만났고 좋은 인연을 맺었습니다. 다시 오지 못할 시간들이기에 더 아름답게 느껴 집니다. 제가 받은 많은 도움들을 저도 후배들에게 베풀며 살려고 합니다.

제가 여기에 오기까지 많은 분들의 격려와 도움이 있었습니다. 지난 세월 돌아보니 감사 드려야 할 분들이 너무나 많습니다. 이 글을 통하여 조금이나마 감사의 마음을 전합니다.

먼저 저에게 박사과정을 소개해 주시고 공학에 적응하기 어려웠을 때마다 격려와 용기를 주셨을 뿐만 아니라, 논문이 완성되기까지 헌신적인 지도를 해주신 남기우 지도교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

또한 연구와 학사일정에 바쁘신 가운데서도 저의 논문이 완성될 때까지 연구 방향과 모든 결과물의 도출과정까지 함께 고생해주시고 도와주신 김현수 박사님께도 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 바쁘신 와중에도 귀한 시간 내주시어 논문의 부족한 부분에 대하여 세세히 지적해 주시고 충고해 주신 성기용 박사님께도 깊은 감사를 드립니다.

그리고 재료강도 및 비파괴 연구실의 여러 원우님들께도 감사드립니다. 박사과정 동안 격려해주시고 도와주신 김일천 사장님과 회사 직원여러분께도 감사의 말씀을 드립니다. 이밖에도 제가 지금까지 직장생활을 하면서 오늘의 영예로움이

있기까지 저에게 많은 격려와 용기를 주시고 도와주신 모든 분들께 감사의 말씀을 드리며 항상 건강하시고 행복하시길 빌겠습니다.

항상 참고 견디며 사랑해준 아내 송승희와 아들 김한별, 딸 김예슬에게 진심으로 감사드리며 사랑한다는 말을 전합니다.

2012년 06월

격려해 주시고 도와주신 분들께 감사를 드리면서.....

김 남 석 배상

