

# 17cc급 자동차용 압축기의 고체윤활 최적화 및 구조 설계에 관한 연구

양용군\*, 진진\*, 최요한\*,\*\*, 류성기\*,#

\*경상대학교 기계항공공학부, \*\*경남도립거창대학 항공정비계열

## Solid Lubrication Optimization and Structural Design of 17cc Automotive Compressor

Yong-Kun Yang\*, Zhen Qin\*, Yeo-Han Choi\*\*, Sungki Lyu\*,#

\*School of Mechanical & Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, Korea

\*\*Division of Aviation Maintenance, University of Gyeongnam Geochang, Korea

(Received 17 August 2020; received in revised form 05 September 2020; accepted 08 September 2020)

### ABSTRACT

Fuel economy has always been a major issue in the automobile industry, especially owing to the associated environmental concerns. It is widely known that only 5–20% of the energy generated by automobiles running on internal combustion engine engines is used as power, while the rest is consumed because of friction between components. The main components of the reciprocating piston type compressor used in vehicles, such as the shaft, swash plate, piston, and cylinder, cause severe energy loss owing to frictional contact between each other. The wear contact between the main shaft and the other components is particularly severe. Most quality issues arise owing to the sticking phenomenon that occurs between these parts. In this study, a coating solution to reduce friction is prepared by mixing adhesive solid lubricant, organic binder-polyamide, inorganic binder (Binder), and graphite in four different ratios, and the best combination is determined.

**Key Words** : Vehicle Air Condition(차량 에어컨), Compressor(압축기), Solid Lubrication(고체윤활제)

### 1. 서론

환경이슈로 연비문제는 항상 자동차산업에서 큰 과제로 여겨지고 있습니다. 특히 내연기관 엔진을 주로 사용하는 자동차에서 발생하는 에너지 중 5~20%가 동력으로 사용되고 나머지는 기타 부품간

마찰 등으로 소모되는 것으로 알려져 있다<sup>1,2)</sup>.

그중 여름에 많이 사용되는 에어컨도 에너지 동력을 많이 소모하고 있는데 그 이유는 압축기에 있다. 압축기는 엔진 구동력을 회전운동으로부터 왕복운동으로 변환시켜 에어컨 속의 냉매를 압축시켜 반영구적인 냉각활동을 도와주고 있다. 현재 일반 차량에서 보편적으로 사용하고 있는 왕복 피스톤형 압축기의 주요부품인 주축, 사판(swash plate), 피스톤과 실린더가 서로 접촉하면서 심한 마찰손실이

# Corresponding Author : sklyu@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1632, Fax: +82-55-772-1578

발생한다. 특히 주축과 실린더, 피스톤과 사판사이의 마모접촉이 제일 크며 품질이슈가 대부분 이러한 부품 사이에서 발생하는 고찰 현상이다.

본 논문에서는 이와 같은 마찰손실을 줄이기 위하여 접촉형 고체윤활제(PTFE), 유기 결합제-폴리아드이미드(PAI), 무기결합제(Binder), 흑연을 4가지 비율로 혼합한 코팅액을 만들었다. 그리고 자동차업계에서 널리 사용하는 스펙기준으로 각각 4가지 시험을 진행하였다. 마모량, 마찰계수, 경도, 접착력에 대해서 각각 시험을 진행하였고 그 결과에서 제일 적합한 코팅제 비율을 찾고자 한다. 향후 시편에 대한 시험결과를 바탕으로 실제 압축기 부품에 코팅을 하여 부품기준의 적합성 시험을 진행하였다.

Graphite는 자동차용 마찰재에 사용되는 대표적인 고체윤활제로서 마찰계수의 안정성, 내마모성, 떨림현상, 제동거리, 소음특성 등의 제동특성과 밀접한 연관성을 지니고 있다. 특히, 고체윤활제는 제동시전이막(transfer film)을 형성시키는 주요 원료로서 종류와 함량에 따라 제동 승차감에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다<sup>3,4)</sup>.

자동차용 마찰재에 첨가되는 고체윤활제는 층상구조를 지니고 있는 흑연과 MoS<sub>2</sub>가 주로 사용되고 있으며 이들과 함께 황화물 계열의 Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, ZnS, Cu<sub>2</sub>S 등이 첨가되고 있다. 이와 같이 여러종의 고체윤활제를 혼합하여 마찰재를 제조하는 이유는 단일의 고체윤활제만을 사용하였을 경우 온도, 압력, 속도, 습도 등의 다양한 제동조건에서 우수한 마찰특성을 만족시키지 못하기 때문이다. 고체윤활제간 상호효과에 관한 연구는 고체윤활제를 결합시킨 코팅층의 마찰 및 마모특성을 위주로 발표되어 왔다<sup>5,6)</sup>. 고체윤활제간 보완효과는 마찰시 화학반응에 의해 생성되는 산화물의 상호역할에 기인하는 것으로 알려져 있으며, 이들의 마찰 및 마모특성은 마찰계면의 표면형상을 통해 분석되어 왔다. 그러나 지금까지 마찰재에 사용되는 다양한 고체윤활제의 선택은 주로 경험적인 결과에 의해 결정되었으며 마찰재의 윤활특성에 관한 문헌자료도 거의 찾아보기 힘든 실정이다.

고체윤활제의 작용은 고체분말, 얇은 막 또는 고체복합재료 등으로 상대운동 하는 표면의 마찰과 마모를 줄여주고 표면을 보호하는 것이며 고체윤활

과정중 고체윤활제와 주위매체는 마찰표면과 물리적, 화학적 반응을 일으켜 고체윤활막을 생성하고 마찰마모를 줄이는 것이다. 주축의 실린더 접촉부, 사판표면 및 피스톤 표면에 고체윤활제를 코팅하여 이러한 마모를 줄이려고 하는게 일반적이다.

고체윤활막의 경우, 초기에 코팅피막의 마찰로 인해 1차 코팅층 파괴가 일어난다. 파괴된 코팅층이 분말상태로 금속표면 사이사이에 안착이 된다. 이렇게 금속표면사이를 채울 때까지 2차, 3차 파괴가 일어나면서 최종적으로 견고한 윤활층을 형성하게 된다. 이러한 과정이 결론적으로 부품의 내구성을 크게 향상시키는 것을 발견할 수 있다<sup>7)</sup>.

양호한 고체윤활제는 마찰표면에 견고하게 붙어 있어야 하고 표면사이에 윤활박막을 형성하여야 한다. 또한, 마찰계수를 최대한 낮추기 위해 낮은 전단력 강도를 가져야 한다. 그 외에도 내열성, 내약품성 등도 고려해야 할 조건들이다. 하지만 이러한 고체윤활제를 제작하기 위해서는 주요성분인 고체윤활제, 유기결합제, 무기결합제, 용매 등을 최적의 비율로 선택할 필요가 있다<sup>8,9)</sup>.

## 2. 시험

### 2.1 시편제작

본 연구에서는 C1, C2, C3, C4의 4가지 비율로 시편을 제작하여 시험을 진행하였고, 각각 비율은 Table 1과 같다. 고체윤활제(PTFE), 유기결합제-폴리아드이미드(PAI), 무기결합제(Binder) 및 흑연 등 성분을 서로 다르게 혼합하여 이들이 각각 어떠한 영향을 주는지에 대하여 고찰을 해보고자 하였다.

Table 1 Composition of coating samples(wt%)

Composition	C1	C2	C3	C4
PAI	15	25	15	15
PTFE	15	15	10	15
Graphite	-	-	5	5
MoS <sub>2</sub>	-	-	10	-
Carbon Black	3	3	-	5
Solvent	67	57	60	60
Total	100	100	100	100

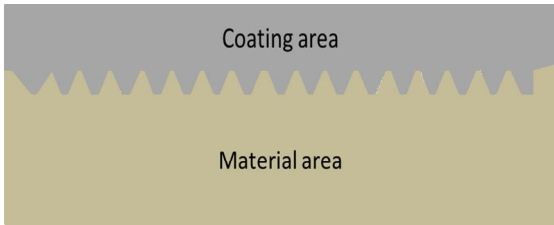


Fig. 1 Diagram of solid lubricant film

Table 2 Surface roughness of coating samples ( $\mu\text{m}$ )

Surface Roughness	Ra	Rz
R1	2.2	15.23
R2	4.4	27.46

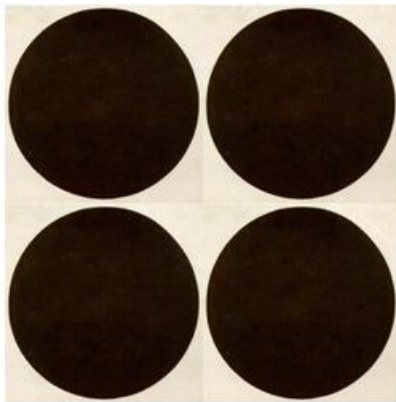


Fig. 2 Test samples

시편의 원자재는 범용소재 aluminum 재질로 두께 5 mm 직경 55 mm의 원통형으로 제작되었고 코팅과정을 거쳐 Fig. 1과 같이 제작되었다. 코팅과정에서는 Sandblast 작업이 필수이며 Sus 재질의 0.1 mm ball을 사용하였다. 또한, Table 2와 같이 표면 조도가 코팅성능에 미치는 영향을 시험하기 위하여 R1, R2 두 종류로 나누어 시편을 제작하였다. 시편의 형상을 Fig. 2에 나타냈다.

## 2.2 시험방법

### 2.2.1 마모량과 마찰계수

고체윤활제의 주요특성을 시험하기 위해서는 아래와 같은 시험을 진행하였다.

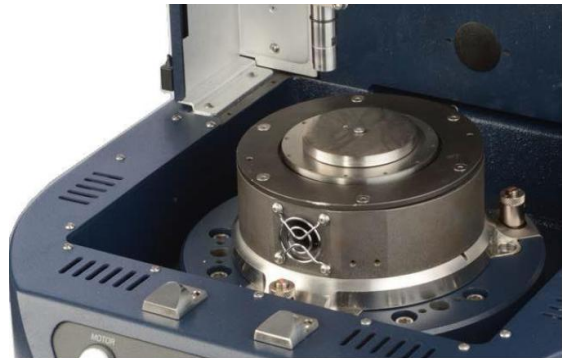


Fig. 3 Pin-on-disk test equipment

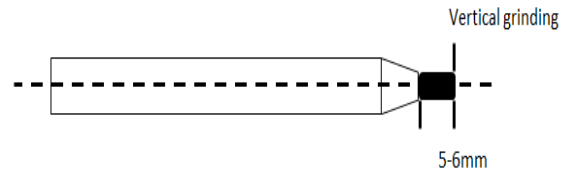


Fig. 4 Grinding method of pencil sharpener

마모량과 마찰계수를 측정하기 위해서는 Pin-on-disk 장비를 사용하였고 30분간 800 rpm, 350 N의 조건을 선정하였다.

장비는 Fig. 3과 같다. 차량용 에어컨의 압축기 부품에 적용되는 접착형 고체윤활제의 선정조건은 에어컨 내부에서 순환하는 오일이 압축기 부품까지 도착하는 60초의 무윤활 조건에서 금속표면의 파손이 없도록 유지해주는 것이다. 따라서 상기 조건으로 시험을 진행하였을 때 시편 표면에서부터 선명한 금속표면이 드러나지 말아야 한다.

### 2.2.2 경도

코팅표면의 경도를 측정하기 위해서는 연필 경도기를 사용하였고 ASTM D3363을 기준으로 하였다. 기계식 연필깎이(원통형 연필심은 그대로 두고 나무만을 제거)를 사용하여 연필을 Fig. 4와 같이 깎는다. 연필심 길이는 대략 5-6 mm로 한다. 측정품을 수평면에 놓고 깎은 연필을 수평면과 45°각으로 연필경도 H에서 6H까지 사용하여 평가한다. 박리면의 폭이 0.5 mm 미만 또는 길이가 3 mm 미만의 경우에서 가장 높은 연필경도를 시제품의 경도로 선정된다.

**Table 3 Adhesion performance specification**

Adhesion level	Peeling area
Level A	0
Level B	<5
Level C	5~15
Level D	15~35
Level E	35~65
Level F	>65

### 2.2.3 접착력

표면금속의 종류 및 접착형 고체윤활제의 접착력을 시험하기 위해서는 ASTM D3359가 제일 적합하다고 판단하였다. 도장 후 완전 건조가 된 상태에서 실시하며 실험 환경은 온도 23±2℃, 습도 50±5%에서 진행하였다. Cross-Cut Test 위치 2곳을 선정한다. (굴곡이 없고 뒤틀림이 없는 평평한 면) 일반 커터칼을 사용하여 가로 세로 1 mm 간격으로 25개의 정방형 칼집을 만들고 일반 3M 테이프를 부착 후 테이프 손잡이 부위와 부착면이 60°를 유지하며 0.5~1.0초의 균일한 속도로 천천히 뜯어낸다. 테이프 박리후 코팅표면의 잔존영역에 따라 접착력을 결정한다. 실험결과는 Table 3을 근거로 한다.

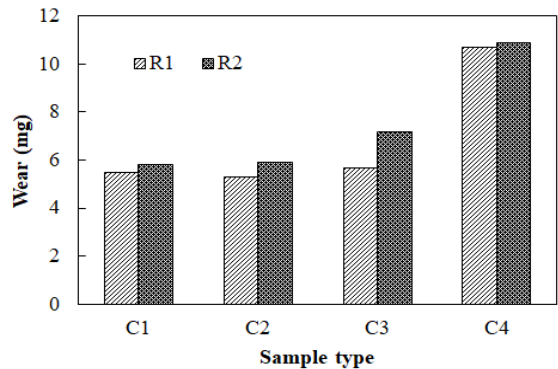
## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 마모량

마모량을 측정하기 위해서 시험이 끝난 후 시편의 무게를 시험 전 무게와 비교한 후 줄어든 무게의 양을 측정한다. 마모량은 Table 4와 같이 측정되었다. 이것을 도표로 만들었을 때 Fig. 5와 같이 나타났다. 도표로 보았을 때 C1과 C2의 경우 거의 비슷한 것으로 나타났다. 이는 PAI의 함량이 마모량에는 큰 영향을 주지 않는다고 볼 수 있다. 하지만 C3와 C4의 경우는 다르다. 특히 C3의 경우 C3R1과 C3R2 조합의 마모량이 차이가 나는 것으로 보아 표면거칠기가 확실히 마모량에 영향을 준다는 것을 볼 수 있다. 또한, C4의 경우 C4R1, C4R2가 모두 마모량이 큰 것으로 보아 시편의 표면거칠기보다 Carbon black과 Graphite의 추가가 더욱 영향이 크며

**Table 4 Comparison of wear**

Wear (mg)	C1	C2	C3	C4
R1	5.5	5.3	5.7	10.7
R2	5.8	5.9	7.2	10.9



**Fig. 5 Comparison of wear loss**

마모량이 증가하는 것으로 보인다.

마모량이 증가할수록 접촉하는 상대에게 불리하기 때문에 측정결과로 보았을 때 이번 시험에서는 C2R1 조합이 제일 적합한 것으로 보인다.

### 3.2 마찰계수

마찰계수의 측정값은 Table 5와 같다. 이를 또한 도표로 만들었을 때 Fig. 6처럼 나타났다. 도표로 보았을 때 마찰계수는 감소할수록 연비효율의 향상 및 부품의 내구성에 좋은 영향을 미치기 때문에 B의 경우가 상대적으로 제일 적합하다. 하지만 A의 경우도 비슷한 수준을 나타내며 결론적으로 큰 차이가 없는 것으로 보인다. C3의 경우에는 표면거칠기가 높은 R2시편을 사용하였을 때 R1시편보다 코팅제의 안착이 더 잘 이루어져 마찰계수가 낮은 것으로 보인다.

**Table 5 Comparison of friction coefficient**

Friction coefficient	C1	C2	C3	C4
R1	0.13	0.11	0.16	0.14
R2	0.12	0.09	0.12	0.13

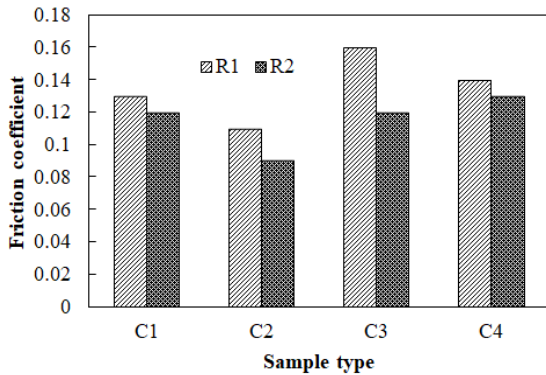


Fig. 6 Comparison of friction coefficient

따라서 표면거칠기가 무조건 낮아서 좋다고도 할 수 없다. C4의 경우 R1, R2가 거의 비슷하므로 Carbon Black의 추가로 인해 표면거칠기의 차이가 거의 없는 것으로 보인다.

C2R1, C2R2 조합이 상대적으로 적합하다. 하지만 C2R2조합의 경우 표면거칠기를 높이기 위해 sandblast 작업 중 sus ball의 소모가 상대적으로 많기 때문에 생산성에는 좋지 않다. 따라서 본 논문에서는 C2 R1 조합이 제일 적합하다고 판단한다.

### 3.3 연필경도

연필경도의 측정값은 Table 6과 동일하다. 결과로 보았을 때 C1R1과 C1R2, C2R1와 C2R2, C3R1와 C3R2, C4R1와 C4R2는 서로 같으므로 표면거칠기는 경도에 큰 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다. 하지만 C1, C2는 5H이고 C3, C4는 4H로써 약간의 차이를 보인다. 이것은 Graphite와 MoS2의 추가 유무로 보인다. 실제 자동차업계에서 해당 부품의 코팅경도에 대해서 4H과 동일 또는 이상의 Spec.을 사용하고 있기 때문에 측정결과는 양호한 것으로 보인다.

### 3.4 접착력

접착력 결과는 Table 7과 같다. 접착력 같은 경우는 C1, C2, C3, C4와 R1, R2 조합의 모든 값은 A 등급 이상이다. 이는 시험에서 사용되는 비율의 코팅제 또는 표면거칠기가 접착력에 큰 영향을 주지 않는 것으로 보인다.

Table 6 Pencil hardness

Pencil hardness	C1	C2	C3	C4	Spec.
R1	5H	5H	4H	4H	>4H
R2	5H	5H	4H	4H	

Table 7 Level of adhesion

Adhesion	C1	C2	C3	C4	Spec.
R1	A	A	A	A	>B
R2	A	A	A	A	

실제로 접착력은 코팅하는 과정에서의 코팅온도 등 외부 요인이 더 큰 것으로 판단하나 이것은 향후 다른 시험으로 증명할 필요가 있다. 단 시험 스펙의 최고 수준인 만큼 실제 자동차업계에서 사용하는 기준을 모두 만족하는 수준이다.

## 4. 결론

본 논문에서는 마모량, 마모계수, 연필 경도, 접착력 등 여러 가지 방면으로 8가지 시편의 윤활능력에 대해 검증하였고 최적한 비율을 도출해 내는 데 성공하였다.

1. 마모시험결과 C2의 마모량은 C1, C3, C4의 마모량에 비하여 각각 4%, 8%, 51% 적은 것으로 나타났다. 그 원인으로 C1, C2, C3의 경우 마모량이 유사 수준인 것에 비해 C4가 10 mg의 흑연이 많고 MoS2가 부족할수록 마모량이 더 심하다는 것을 알 수 있었다.
2. 마모시험 후 마찰계수를 고찰한 결과 C2의 마찰계수는 C1, C3, C4의 마찰계수에 비하여 각각 16%, 32%, 22% 낮게 나타났다. C1, C2의 경우 C2가 PAI함량이 약 10 wt% 많으므로 PAI함량이 많을수록 마찰계수가 낮아지는 것으로 사료된다. C3, C4의 경우 마찰계수가 비슷하므로 C1, C2대비 Graphite와 MoS2가 많을수록 마찰계수가 높은 것으로 사료된다. 또한, R1, R2의 표면거칠기는 각각 Ra2.2와 Ra4.4로 표면거칠기가 높을수록 피막의 파괴메커니즘 이론에 따라 마모입자의 재이착 확률이 높아 낮은 마찰계수를 지니는 것을 확인할 수 있다.

3. 경도는 전부 4H 이상이고 접착력 또한 전부 A등급으로써 성분비율은 이에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 보인다. 따라서 C2 R1 비율의 코팅제를 사용하는 것이 제일 적합해 보인다.

## 후기

본 연구는 과학기술정보통신부 2019년도 선도연구센터 기초연구사업(과제번호: NRF-2019R1A5A80832012)의 지원으로 수행되었음

## REFERENCES

1. Bishop, I. N., "Effect of design Variables on Friction and Economy", SAE transactions, Vol. 73, pp. 812, 1964.
2. Heywood, John. B., Internal Combustion Engine Fundamentals, New York : McGraw-Hill, pp. 712-745, 1988.
3. Bartz, W. J., Holinski, R., Xu, J., ASLE Lubrication Engineering, Vol. 42, No. 12, pp. 762-769, 1985.
4. Jang, H., Lee, J. J., Kim, S. j., Jung, K. Y., SAE Transacions 982235, pp. 1-8, 1998.
5. Jang, H., Kim, S. J., Wear, Vol. 239, No. 2, pp. 229-236, 2000.
6. Lavik, M. T., Hubbell, R. D., McConnel, B. D., ASLE Lubrication Engineering, Vol. 31, No. 1, pp. 20-27, 1973.
7. Winer, O., "Molybdenum disulfide as a lubricant: a review of the fundamental knowledge", Wear, Vol. 10, No. 6, pp. 422-4528, 1967.
8. Kim, S. J., Bae, E. G., Yoon, H. G., and Jang, H., "Experimental investigation on friction performance of brake linings with two different solid lubricants", The Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 33, pp. 72-78, 2001.
9. Rabinowicz, E., Friction and Wear of Materials, 112, 1995.