

자연냉매 CO₂ 환경에서 스크롤 압축기 구동부의 마찰 마멸특성 평가

오세두[†] · 문재용 · 조성욱* · 이인주* · 김철우* · 이영제**[‡]

성균관대학교 대학원 기계공학부
*삼성전자 Digital Appliance 연구소 요소기술그룹
**성균관대학교 기계공학부

Friction and Wear of the Scroll Compressor Sliding Surfaces in the Natural Refrigerant CO₂ Environment

Se-Doo Oh[†], Jae-Yong Moon, Sung-Oug Cho*, Cheol-Woo Kim*, Inju Lee* and Young-Ze Lee**[‡]

Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University
*Mechanical Core Technology Group, Digital Appliance Network Business,
R&D Center, Samsung Electronics Co. Ltd.
**School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

Abstract – The natural refrigerant CO₂ has attracted as an alternative refrigerant currently used in air conditioning system, which has high global warming potential. In this study, the tribological characteristics of the sliding surfaces between a fixed scroll and an orbiting scroll of the scroll compressor were investigated in CO₂/POE mixed environment. The pin-on-disk type sliding tests were carried out under the various sliding speeds, normal loads, surface roughness, and pressures. During the test, friction forces, wear amount and surface temperature were monitored.

Key words – natural refrigerant CO₂, scroll compressor, wear.

1. 서 론

현재까지 CFC계 및 HCFC계와 같은 합성물들이 냉매로써 널리 이용되어 왔다. 이와 같은 냉매들은 염소를 포함하고 있어서 염소 이온들이 금속의 표면과 반응하여 염화철 층을 형성하기 때문에 윤활 성능이 우수하게 된다[1]. 그러나 지난 수십년 동안 이러한 냉매들은 성층권의 오존층의 고갈을 가져온다는 것이 명백해짐에 따라 그것들의 사용이 제한되었다[2]. 따라서 염소원자들을 포함하지 않는 HFC계 혼합냉매가 대체냉매로 사용되기 시작하였다[3-4].

한편 오존층 붕괴와 더불어 인류가 안고 있는 또 하나의 커다란 환경문제는 지구온난화현상이다. 지구온난

화에 대한 관심의 증대로 HFC계 냉매는 높은 지구온난화지수(global warming potential; GWP) 때문에 계속해서 이용할 수 없다는 의견을 불러 일으켰다. 지구온난화지수란 각각의 기체들을 기준이 되는 기체들과 비교했을 때 대기층부터 성층권까지의 상대적인 가열효과가 어느 정도인지를 평가하는 척도이다. 그래서 연구의 초점은 지구온난화지수가 낮은 유체로 변화하였고, 자연냉매에 대한 관심을 갖게 되었다.

자연 냉매 중 최근에 가장 각광받고 있는 것은 이산화탄소(carbon dioxide)이다[5]. 이산화탄소는 CFC 냉매가 사용되기 전에 선박용 냉동이나 사무실, 극장 등의 냉방을 위한 냉매로 가장 많이 사용되었다. 그러나 효율 및 성능 면에서 우수한 CFC 냉매들의 등장으로 그 사용이 감소되었다. 이산화탄소는 다른 자연냉매와는 달리 인체와 환경에 무해하여 회수가 불필요하고 비가연성의 친환경적인 냉매로, 냉동기유 및 기기재료들

[†]주저자 : sd532@nature.skku.ac.kr

[‡]책임저자 : yzlee@yurim.skku.ac.kr

과 호환성이 좋다. 하지만 높은 작동압력과 낮은 임계 온도로 인하여 초임계 사이클로 구동될 수밖에 없다. 따라서 CO₂를 대체냉매로 사용하기 위해서는 이러한 문제들을 기술적으로 극복해야 한다[6].

냉매로써 이산화탄소를 시스템에 적용할 때는 사이클이 고압으로 작동하므로 시스템 전체의 내압 설계뿐 아니라 특히 압축기의 강도해석, 윤활해석, 누설방지기구의 설계는 필연적으로 기존 압축기와는 달리 재검토되어야 한다. 본 연구에서는 스크롤 압축기 구동부의 스크롤 접촉면에 대한 미끄럼 실험을 수행하였다. 재료의 작용하중, 미끄럼 속도, 압력 등을 변화시켜 가며 고정 스크롤 표면과 회전 스크롤 표면에 대한 마찰 및 마멸특성을 평가하였다. 그리고 스크롤 표면의 조도를 변화시켜가며 조도에 따른 마멸특성을 관찰하였다.

2. 실험

2-1. 실험 시편

스크롤 압축기의 구동부는 고정 스크롤(fixed scroll)과 회전 스크롤(orbiting scroll)로 구성되어 있으며, 구조적으로 편심을 가지고 축과 연결된 회전 스크롤의 회전으로 냉매를 압축시킨다. 따라서 두 스크롤간의 상대적인 접촉으로 인해 마멸이 발생하게 된다[7]. 스크롤 압축기의 스크롤은 주철 재료가 사용되는데, 본 연구에서는 실제 스크롤 압축기에 사용되는 스크롤 재료를 디스크 형상과 핀 형상으로 가공하여 미끄럼 실험을 수행하였다. Fig. 1은 스크롤 재료의 디스크 시편과 핀 시편을 보여주고 있다. 디스크 시편의 직경은 60 mm, 두께는 10 mm이며, 핀 시편은 6 mm×4 mm×10 mm의 크기로 가공하였다.

Table 1은 제작된 디스크 시편과 핀 시편의 표면경

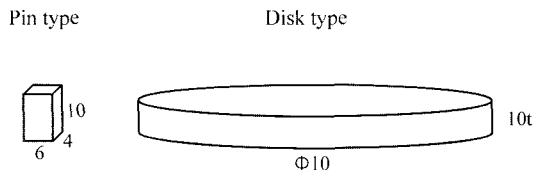


Fig. 1. The shape of pin and disk specimens.

Table 1. Surface properties of the specimens

Specimen	R _a [μ m]	Hardness [HV]
Pin type	0.47~0.50	270~320
Disk type	0.40~0.43	

Table 2. The initial surface roughness of the pin specimens

Pin specimen	Type 1	Type 2	Type 3
R _a [μ m]	0.16	0.26	0.48
R _q [μ m]	0.21	0.33	0.55

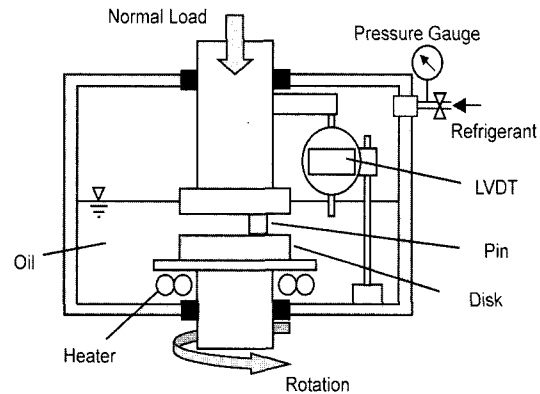


Fig. 2. Pin-on-disk type sliding test.

도와 표면조도를 보여준다. 디스크 시편과 핀 시편의 경도는 약 270~320 HV의 분포를 보이고 있다. 스크롤 재료 표면의 접촉특성을 모사하기 위해 따로 연마처리를 하지 않았는데, 디스크 시편의 표면조도는 0.40~0.43 μ m Ra정도이며, 핀 시편의 표면조도는 0.47~0.50 μ m Ra정도의 값을 가진다.

그리고 스크롤 재료의 초기 표면조도에 따른 마멸량을 측정하기 위해 핀 시편의 표면을 세 종류로 제작하였다. Table 2에 이들 세 핀 시편의 표면조도를 나타내었다. 세 번째 시편은 앞의 실험에 사용한 시편으로 가공하지 않은 시편이고, 나머지 두 시편은 연마과정을 거쳐 표면을 0.16 μ m Ra와 0.26 μ m Ra로 매끄럽게 가공하였다.

냉동윤활유로는 POE(polyol ester) 계열 오일을 사용하였다. 현재 CO₂ 압축기에 사용되는 냉동윤활유는 압축기내의 고속 고하중화 경향으로 인해 점성이 높은 윤활유가 검토되고 있다. 따라서 본 실험에서는 점도가 ISO VG68인 윤활유와 VG100인 윤활유 두 종류를 사용하였다.

2-2. 실험 장치

실험장치는 압자와 시험편의 형상을 바꿀 수 있는 다목적 고압 마모 시험기를 이용하였으며, 본 실험에서는 압자와 시험편을 pin-on-disk 형으로 사용하였다. 시험기는 압력용기를 가지고 있어서 CO₂ 냉매를 주입

하여 최대 20 bar까지 압력을 올릴 수 있다. 이 압력 용기 안에서 핀과 디스크 시편은 각각 시험편 홀더에 고정되어 핀 시편을 통하여 수직하중이 작용되고 디스크 시편이 미끄럼 회전을 하게 된다. 미끄럼 실험 동안 로드셀을 이용하여 마찰력과 마찰계수를 측정하였고, 오일 베스 바닥에 부착된 열전대를 이용하여 초기 오일의 온도를 50°C로 고정시켰으며 미끄럼 실험동안 오일의 온도를 측정하였다.

2.3. 실험 방법

미끄럼 실험 전에 시편은 초음파 세척하여 압력용기 내에 장착하였다. 미끄럼 실험은 1000, 2000 rpm의 미끄럼 속도와 50, 70, 90 kg의 하중을 이용하여 각각 수행하였다. 오일 베스에 오일을 채우고 밀폐된 상태에서 냉매를 주입시켰다. 실험 압력으로 5, 10, 15 bar의 압력을 이용하여, 미끄럼 실험을 시작하기 전에 오일의 온도를 50°C로 고정시키고 약 30분간 오일과

CO₂ 냉매가 섞이도록 하였다. 미끄럼 실험은 CO₂/POE 혼합환경에서 2시간동안 수행하였다.

또 표면조도가 다른 세 종류의 핀 시편을 이용하여 초기 조도에 따른 마멸량을 분석하였다. 이 실험은 VG100인 윤활유를 사용하여 50 kg의 하중과 2000 rpm의 속도에서 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 다양한 하중 속도에 따른 마멸량

Fig. 3은 미끄럼 속도에 따라서 각 하중에 대한 시험편의 마멸량을 보여주고 있다. POE 계열의 VG68 및 VG100인 두 윤활유 환경 모두에서 회전속도가 2000 rpm일 때가 1000 rpm일 때보다 마멸량이 더 크다. 동일한 하중에서 속도가 커질수록 마멸량이 증가하는 것은 미끄럼 거리가 증가하기 때문이다. 또 수직 하중이 증가함에 따라 마멸량은 증가하고 있다. 그림

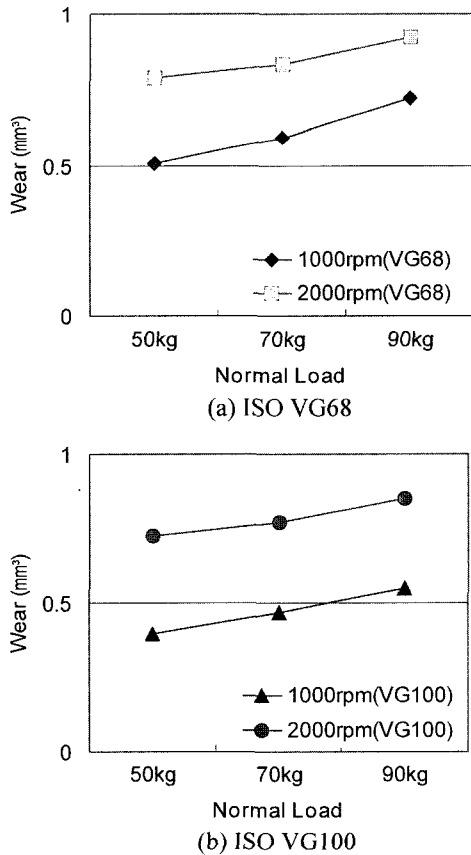


Fig. 3. Wear due to the sliding speed in the same oil.

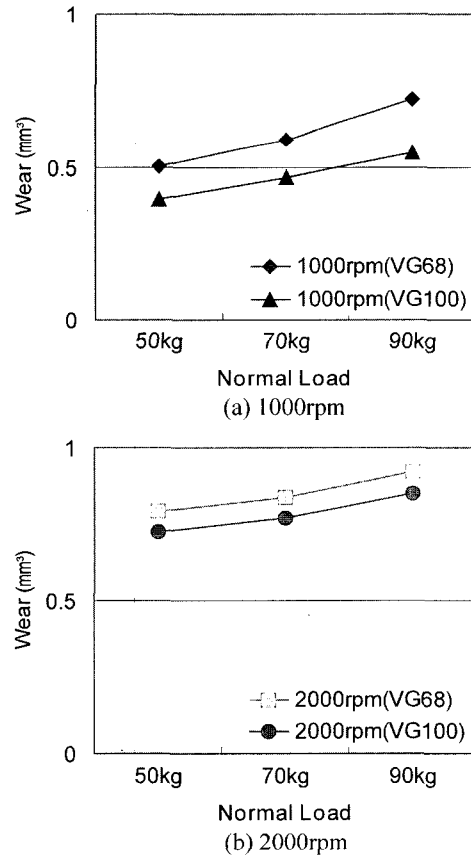


Fig. 4. Wear due to the viscosity in the same speeds.

Table 3. Friction coefficient and oil temperature after the sliding tests

		1000 rpm			2000 rpm		
		50 kg	70 kg	90 kg	50 kg	70 kg	90 kg
VG68	COF	0.129	0.135	0.166	0.138	0.144	0.177
	Temperature [°C]	103	130	148	135	161	175
VG100	COF	0.104	0.122	0.128	0.125	0.131	0.151
	Temperature [°C]	78	109	130	101	138	160

과 같이 VG68 2000 rpm 조건일 때 마멸량은 최대이고, VG100 1000 rpm 조건일 때 마멸량은 최소이다.

Fig. 4는 윤활유 점도에 따라서 하중에 대한 시험편의 마멸량을 보여주고 있다. VG100인 윤활유를 사용할 경우 VG68인 윤활유를 사용할 때보다 마멸량은 낮다. 즉, 점도가 큰 냉동윤활유를 이용할수록 CO₂ 스크롤 압축기 구동부의 내마멸성을 향상시킬 수 있다. 그러나 이것은 압축기 내의 전반적인 효율이나 냉동/공조 시스템의 성능 향상을 나타내는 것이 아니라 압축기 구동부의 내마멸성 측면에서 바라본 관점이다.

Table 3은 각 실험 조건에서 미끄럼 실험동안 측정된 평균마찰계수와 실험 후 오일의 온도를 보여준다. 선형적인 관계는 아니더라도 하중이 증가할수록 마찰계수 및 오일의 온도는 상승하고 있다. 이것은 하중이 증가할수록 접촉면에서 마찰열의 증가로 나타나는 것이다. 그리고 동일한 하중에서 미끄럼 속도가 증가할수록 마찰계수 및 최종온도도 상승한다. 윤활유의 점도가 증가하면 마찰계수와 온도상승은 작아지고 있다. 앞의 마멸량 결과와 비교하여 살펴보면, 마찰열에 의한 오일의 온도증가로 인해 윤활유의 점도는 낮아지게 되고 이것 때문에 마찰계수가 상승하게 된다. 이러한 마찰계수의 상승은 마멸량의 증가로 나타나는 것으로 판단된다.

3-2. 핀 시험편의 조도에 따른 마멸량

Fig. 5는 초기 표면조도가 다른 세 종류의 핀 시험편을 이용한 미끄럼 실험결과를 보여준다. 결과에 의하면 초기 표면조도가 0.48 μm Ra인 핀 시험편을 사용할 때의 마멸량이 가장 크게 나타났다. 핀 시험편의 표면조도가 0.26 μm Ra, 0.16 μm Ra로 낮아질수록 마멸량은 감소하였다. 따라서 스크롤 재질의 표면조도를 낮출수록 표면의 내마멸성은 향상된다.

3-3. 냉매의 압력에 따른 마멸량

고압 미끄럼 실험 결과 CO₂ 냉매의 압력은 Fig. 6

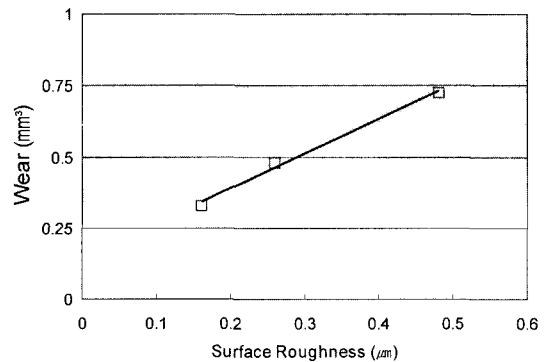


Fig. 5. Wear amount depending on the initial surface roughness.

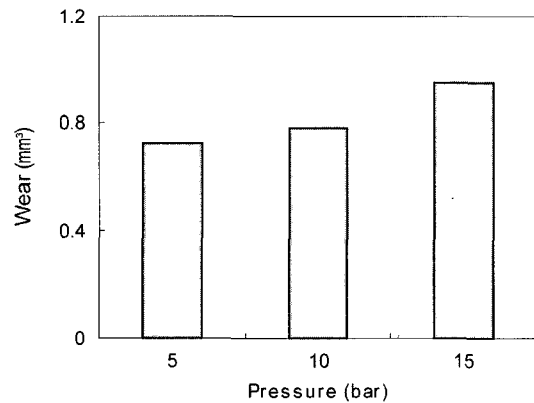


Fig. 6. Wear amount due to the pressure at 50 kg and 2000 rpm for 2 hours.

에서 보여지는 것과 같이 마멸량에 영향을 준다. 압력이 올라갈수록 마멸량은 증가하는데, 이것은 5 bars에서는 오일에 많이 용해되지 않았던 냉매가 압력의 상승으로 오일 속에 용해되기 때문이다. 압력이 커질수록 오일에 용해되는 냉매의 양을 증가하고 이에 따라 마멸량이 상승한다.

압력상승에 따른 마멸량의 증가는 냉매의 압력이 높아짐에 따라 냉매가 오일에 용해되는 양이 증가하여

오일의 점성이 떨어지기 때문이다. 점성이 떨어진 오일로 인하여 접촉면에서의 윤활막이 얇아지고 실접촉면이 증가한다. 이로 인하여 실제 마멸량이 증가하게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 자연냉매인 CO₂ 환경에서 스크롤 압축기 구동부의 마찰 마멸특성을 평가하기 위하여 CO₂/POE 혼합환경에서 스크롤 압축기 구동부 재료의 미끄럼 실험을 수행하였다. 실험결과를 통하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

(1) 내마멸성 측면에서 바라볼 때 점성이 큰 윤활유의 사용은 CO₂ 스크롤 압축기 구동부의 내마멸성을 향상시킬 수 있다.

(2) CO₂/POE 혼합환경에서 마찰열에 의해서 윤활유의 온도가 상승하는데, 이로 인해 윤활유의 점도가 낮아지며 마찰계수가 상승한다. 이러한 마찰계수의 상승은 마멸량의 증가로 나타난다.

(3) 스크롤 재료의 표면조도를 낮출수록 표면의 내마멸성은 향상된다.

(4) 냉매의 압력이 증가할수록 마멸량은 증가하였다. 압력이 상승함에 따라 오일에 용해되는 냉매의 양이 증가하게 되는데, 이로 인해 오일의 점도가 떨어지기 때문이다.

후 기

이 연구는 산업자원부 차세대신기술개발사업 중 “CO₂ 냉매용 고효율 압축기 개발”의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Hasegawa, H., *et al.*, “The Friction and Wear Characteristics in Refrigerant Atmosphere,” Proceedings of JAST Tribology Conference Tokyo, pp. 489, 1991.
2. United Nations Environment Programme., “Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer,” Final Act., 1989.
3. Jonsson, U.J., “Lubrication of Rolling Element Bearings with HFC-Polyolester Mixtures,” WEAR, Vol. 232, pp. 185-191, 1999.
4. Lee, Young-Ze, and Oh, Se-Doo, “Friction and Wear of the Vane/Roller Surfaces Depending on Several Sliding Conditions for Rotary Compressor,” Proceedings of 2002 International Compressor Engineering Conference at Purdue, Paper No. C10-1, 2002.
5. Lorentzen, G., “The Use of Natural Refrigerants: A Complete Solution to the CFC/HCFC Predicament,” Int. J. Refrigeration, Vol. 18, No. 3, pp. 190-197, 1995.
6. Rozhentsev, A., and Wang, C., “Some Design Features of a CO₂ Air Conditioner,” Applied Thermal Engineering, Vol. 21, pp. 871-880, 2001.
7. Hagita, T., Makino, T., Horaguchi, N., and Ukai, T., “Tribology in CO₂ Scroll Compressors,” Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol. 39, No. 1, pp. 31-35, 2002.