

## 미끄럼 조건에 따른 로터리 압축기 베인/롤러 표면의 마찰 마멸 특성

오세두<sup>†</sup> · 조성욱\* · 이영제\*\*<sup>‡</sup>

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

### Friction and Wear of the Vane/Roller Surfaces Depending on Several Sliding Condition for Rotary Compressor

Se-Doo Oh<sup>†</sup>, Sung-Oug Cho\* and Young-Ze Lee\*\*<sup>‡</sup>

Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

\*Mechanical Core Technology Group, Digital Appliance Network Business, Samsung Electronics

\*\*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

**Abstract** – One of the serious challenges in developing rotary compressor with HFC refrigerant is the prediction of scuffing times and wear amounts between vane and roller surfaces. In this study, the tribological characteristics of sliding surfaces using vane-roller geometry of rotary compressor were investigated. The sliding tests were carried out under various sliding speeds, normal loads and surface roughness. During the test, friction force, wear depth, time to failure and surface temperature were monitored. Because severe wear occurred on vane surface, TiN coating was applied on sliding surfaces to prolong the wear life of vane-roller interfaces. From the sliding test it was found that there was the optimum initial surface roughness to break in and to prolong the wear life of sliding surfaces. Depending on the load and speed, the protective layers, which were composed of metallic oxide and organic compound, were formed on sliding surfaces. Those would play an important role in the amounts of friction and wear between roller and vane surfaces.

**Key words** – alternative refrigerant, vane-roller system, tin coating, rotary compressor.

현재까지 CFC, HCFC와 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 수십 년 동안 이러한 냉매들은 성층권의 오존층의 고갈을 가져온다는 것이 명백해짐에 따라 그것들의 사용이 제한되었다[2]. 따라서 염소 원자를 포함하지 않은 다양한 HFC가 대체냉매로 제안되고 있다[3].

또 미네랄 오일과 같은 탄화수소계열의 윤활유는 상용되고 있는 염소를 포함하는 냉매에 아주 잘 혼합되

기 때문에 CFC 및 HCFC 계열의 냉매와 함께 널리 냉동윤활유로 사용되었다. 그러나 탄화수소계 윤활유는 염소이온이 없기 때문에 HFC 냉매와 잘 혼합되지 않는다. 그러므로 HFC 계열의 냉매와 함께 사용할 수 있는 대체 윤활유로 PAG와 POE가 제안되고 있다[4].

압축기의 고효율 용량가변화를 위한 고속, 고하중화 추세는 계속되면서 축과 베어링, 기타 구동부 등의 마찰 운동면의 미끄럼 조건은 더욱 가혹해졌고[5], 이에 적응할 수 있는 윤활구조 개발 및 재질 검토가 요구되고 있다[6-7]. 또한 고효율화를 위해 압축기 구동부에서 발생하는 마찰 손실을 감소시키고 신뢰성 확보를 위한 내마모성 향상에 많은 연구들이 진행되고 있다[8].

로터리 압축기는 베인-롤러, 축-베어링, 롤러-플랜지

<sup>†</sup>주저자 : sd532@skku.edu

<sup>‡</sup>책임저자 : yzlee@skku.edu

사이에서 마멸이 많이 발생한다. 이러한 구동부 중에서 베인-롤러 사이의 마모가 가장 문제가 되는데, 그 이유는 이 부분에서 경계윤활과 혼합윤활 영역이 공존하면서 작동하기 때문이다. 그리고 이 부분의 마멸은 곧 압축기의 동력손실을 야기하고 수명단축을 이끄기 때문에 마멸을 최소화 시켜야 한다.

따라서 본 연구에서는 로터리 압축기 구동부의 베인-롤러에 대한 미끄럼 시험을 수행하였다. 재료의 작동 하중, 속도 등을 변화시켜 가며 TiN 코팅된 베인과 비코팅된 베인에 대한 마찰 및 마멸 특성을 평가하였다. 그리고 TiN 코팅된 베인의 표면의 조도 변화를 관찰하여 수명을 늘릴 수 있는 최적의 표면 조도를 관찰하였다.

## 2. 실험

### 2-1. TiN 코팅과 베인 표면

일반적으로 경질 코팅은 다른 여러 코팅 방법과 비교하여 연삭마멸 및 응착마멸에 대한 저항성이 우수하다고 보고되고 있다[9]. 따라서 베인의 마찰 특성을 향상시키기 위해서 베인의 표면에 TiN 코팅을 하였다. 코팅의 마찰 특성은 증착 방법에 많이 의존하는데, 본 연구에서는 모재의 뒤틀림이 거의 없고 증착 후 깨끗한 코팅 표면을 얻을 수 있는 PVD 방법을 이용하였고, 그 제조법으로 아크 이온 플레이팅(arc ion plating)법을 사용하여 증착하였다. TiN 코팅의 두께는 5 μm로 하였다.

### 2-2. 실험장치 및 실험방법

실험장치는 압자와 시험편의 형상을 바꿀 수 있는 다목적 고압 마모 시험기를 이용하였으며, 본 실험에서는 압자와 시험편을 Fig. 1과 같은 vane-on-disk 형으로 사용하였다. 시험기는 압력용기를 가지고 있어서

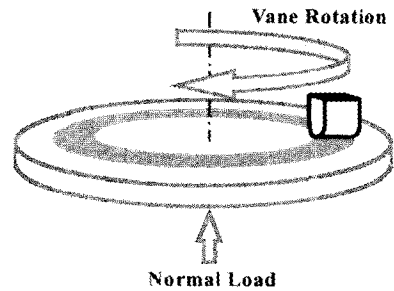


Fig. 1. Vane-on-disk type of the sliding test.

최대 20 bar까지 압력을 올릴 수 있다. 이 압력용기 안에서 베인과 디스크 시험편은 각각 시험편 홀더에 고정된다. 로드셀을 이용하여 마찰력 및 마찰계수가 측정되며, 미끄럼 시험 동안 다이얼 게이지를 이용하여 마멸트랙의 깊이를 측정하였다.

실험 시험편으로 실제 로터리 압축기의 롤러와 베인을 사용하였다. Fig. 2는 실험 시험편의 형태를 보여준다. 디스크 시험편은 압축기의 롤러 재질의 실린더 봉을 절단하였고, 베인 시험편도 실제 로터리 압축기에서 사용하는 베인 재료를 가공하여 실험에 이용하였다. 베인 표면에는 TiN 코팅을 수행하였다. 베인 재료는 고속강으로 되어 있으며, 롤러 재료는 Ni-Cr-Mo 회주철로 만들어졌다.

Table 1은 실험시험편의 표면조도와 표면경도를 보여준다. 롤러 시험편(디스크 형태)은 롤러의 실제 표면조도

Table 1. Surface properties of the roller and vane specimens

Specimen	Ra [μm]	Hardness [Hv]	
Roller	0.14	550~600	
Vane	Substrate	0.15	850~900
	After TiN coating	0.15	1250~1300

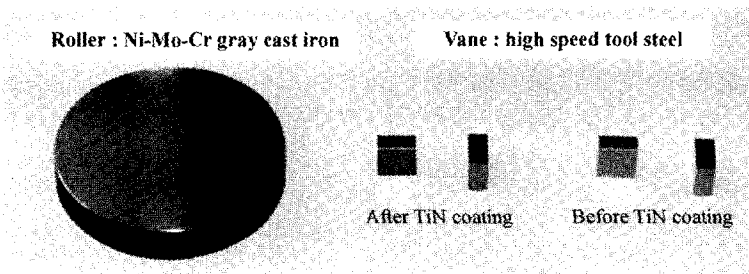


Fig. 2. Shape of roller and vane specimens.

**Table 2. Initial surface roughness of TiN coating vane**

TiN coating vane surface	Ra [ $\mu\text{m}$ ]
Smooth	0.062
Intermediate	0.151
Rough	0.275

와 유사한  $0.14 \mu\text{m}$  Ra이며 경도는 약 550~600 Hv이다. 베인 시편의 표면 조도는  $0.15 \mu\text{m}$  Ra이고, 경도는 약 850~900 Hv이다. TiN 코팅 후 베인 표면의 조도는 코팅 전 표면과 같은  $0.15 \mu\text{m}$  Ra이며, 경도는 1250~1300 Hv이다.

또 초기 조도에 따른 조도 변화 및 스캐핑 수명을 알아보기 위해 베인의 TiN 코팅면 표면조도를 Table 2와 같이 0.06, 0.15, 0.27  $\mu\text{m}$  Ra 세 종류로 제작하였다.

미끄럼 실험은 대체 냉매로 추천되고 있는 HFC 계열의 R410A와 이 냉매와의 혼합성이 뛰어나다고 보고되는 POE(polyolester)의 혼합환경에서 수행하였다. 그리고 실험은 3 bar의 압력에서 수행되었고, 초기 실험온도는  $50^\circ\text{C}$ 로 하였다.

### 3. 결 과

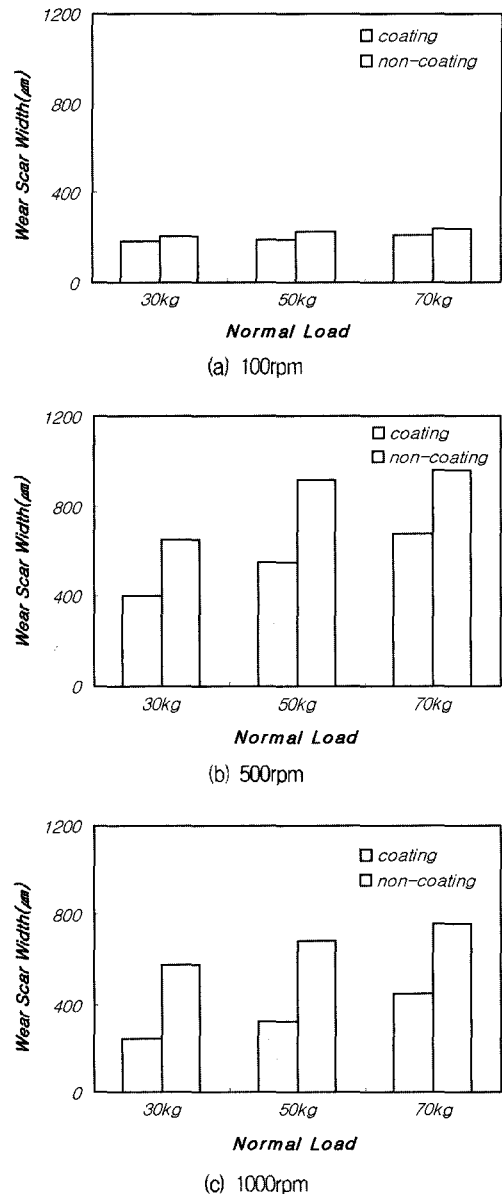
#### 3-1. 하중과 미끄럼 속도에 따른 마찰계수 및 마멸량

Fig. 3은 다양한 하중과 미끄럼 속도에 대한 베인의 마멸폭을 보여준다. TiN 코팅 베인의 마멸량이 비코팅 베인에 비해 작다는 것을 확인할 수 있으며, 두 베인의 마멸량의 차이는 속도가 커질수록 증가하고 있다. 또 미끄럼 속도가 증가하면 500rpm까지는 마멸량이 증가하지만, 1000 rpm에서는 감소하고 있다. 이것은 윤활영역이 속도가 증가함에 따라 경계윤활 영역에서 유체윤활 영역으로 천이하기 때문이다.

마멸량으로부터 마멸률을 산출하였다. 마멸률은 마멸량을 수직하중과 미끄럼 거리의 곱으로 나눈 값으로 정의되는데, 마멸률이 낮을수록 마모 저항을 크다는 것을 의미한다. Fig. 4는 다양한 미끄럼 속도에 대한 TiN 코팅베인과 비코팅 베인의 마멸율을 보여준다. 모든 미끄럼 속도에서 TiN 코팅 베인의 마멸률이 비코팅베인에 비하여 낮다. 그러므로 TiN 코팅을 함으로써 베인 접촉면의 내마모성을 향상시킬 수 있다.

#### 3-2. SEM 및 EDS 분석

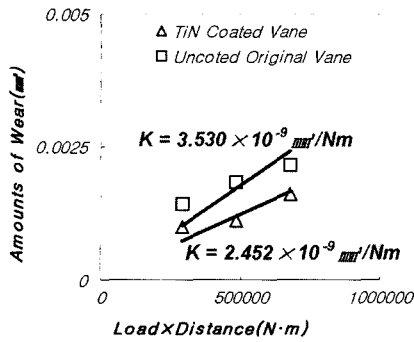
Fig. 5는 다양한 하중과 속도 조건에서 미끄럼 실험



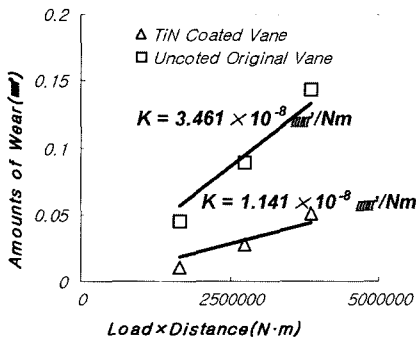
**Fig. 3. Wear scar width of the vane tip under various normal loads and sliding speed.**

후 TiN 베인 접촉면의 SEM 사진을 보여준다. 하중이 증가할수록 베인의 마멸폭은 증가하고 있다. 1000 rpm에서 30 kg과 50 kg 하중에서는 TiN 코팅 베인의 모재가 드러나지 않으며 500 rpm에서의 마멸폭이 1000 rpm에서 보다 더 큰 것을 확인할 수 있다.

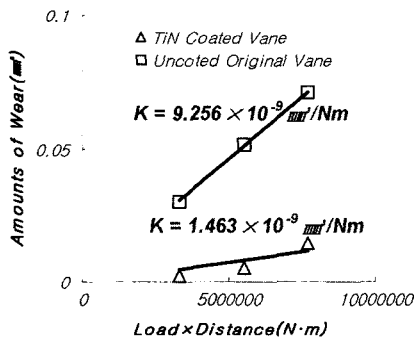
Fig. 6a는 미끄럼 실험 후 TiN 코팅 베인의 접촉부 표면을 보여준다. 접촉부에서는 TiN 코팅 부분, 베인



(a) 100rpm



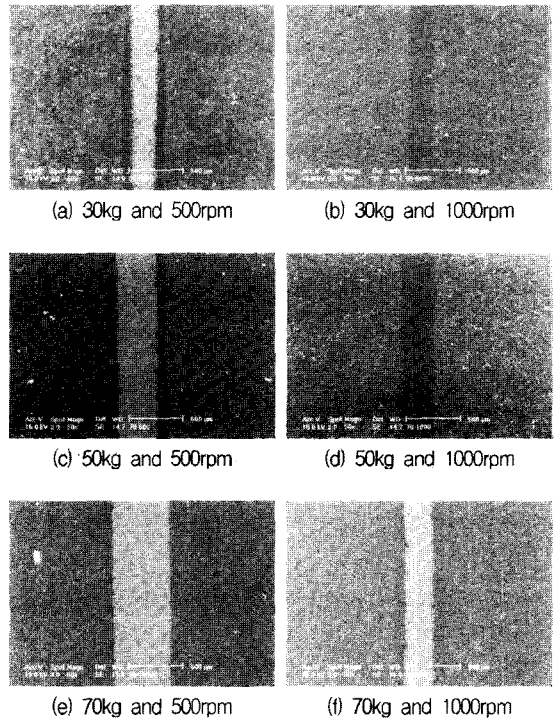
(b) 500rpm



(c) 1000rpm

**Fig. 4.** Wear rate K of the vane tip at each sliding speeds.

모재 부분, 마멸된 TiN 부분의 세 영역이 관찰된다. TiN 코팅 부분은 디스크와 접촉하지 않아서 처음 표면을 그대로 유지하는 부분이고, 베인 모재는 접촉에 의한 마멸 때문에 모재가 드러난 부분이며, 마멸된 TiN 부분은 모재를 드러나지 않지만 TiN이 마멸된 부분이다. 모재가 드러난 부분에 대하여 미끄럼 전후 EDS 성분분석을 하면 Fig. 6b와 같이 미끄럼에 관찰되던 Ti 성분이 미끄럼 수행 후 Fig. 6c와 같이 마멸 때분

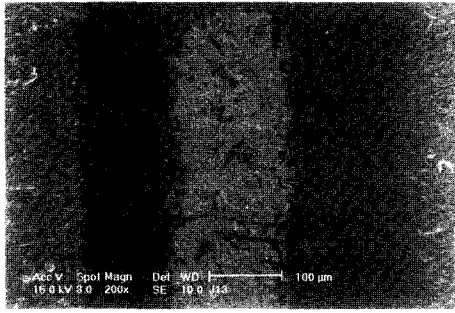


**Fig. 5.** SEM pictures of the vane tip under various normal loads and sliding speeds.

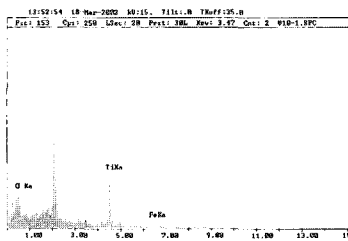
에 관찰되지 않는 것을 확인할 수 있다.

**3-3. 표면조도의 변화 및 스커핑 수명**

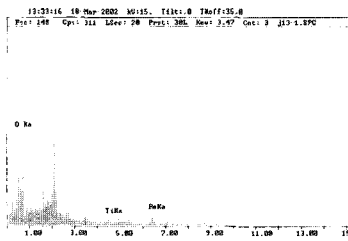
세 가지 다른 표면조도를 이용하여 초기 표면조도에 따른 스커핑 수명과 TiN 코팅된 베인의 표면조도 변화를 관찰하였다. Fig. 7은 표면조도 변화를 보여준다. 수직하중은 그림의 아래부분과 같이 초기 하중 40 kg에서 20 kg씩 단계적으로 증가시켰으며 각 하중에 대한 미끄럼 시험 후 조도를 측정하였다. 미끄럼 실험 초기에는 거친 표면과 중간 표면들은 매끄러워지고 있다. 그리고 20분 정도 미끄럼 실험을 수행하게 되면 모든 표면들이 약 0.05 μm Ra 정도로 유사하게 된다. 이후 하중이 더 증가시키면 표면들은 거칠어지는 경향을 보이는데, 중간 정도의 조도를 갖는 표면이 거친 표면과 매끄러운 표면에 비해 거칠어지는 속도가 느리다. 거친 표면은 갑자기 표면조도가 증가하면서 파괴가 발생하고 있으며, 매끄러운 표면은 30분 이후 바로 표면파괴가 발생하였다. 이와 같이 갑작스럽게 나타나는 표면파괴 현상을 스커핑이라 하는데, 중간표면이 다른 두 표면과 비교할 때 스커핑 수명이 더 길었다. 그



(a) SEM picture of TiN coating vane tip



(b) EDS analysis before sliding

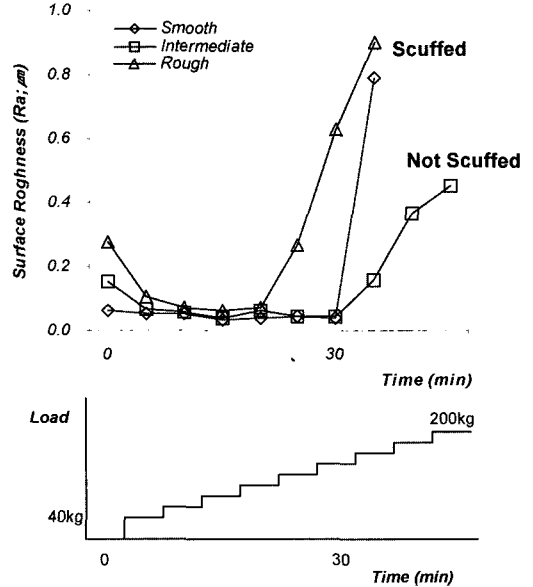


(c) EDS analysis after sliding

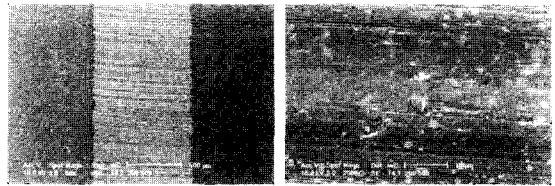
**Fig. 6.** SEM picture and EDS analysis of TiN coating vane before and after sliding.

러므로, 세 가지 다른 표면조도를 갖는 TiN 코팅 베인을 이용한 미끄럼 실험을 통하여 베인-롤러 접촉면에서 TiN 코팅 베인의 최적조도는 0.15 μm Ra이다.

Fig. 8은 코팅 베인과 비코팅 베인의 마멸 후 표면을 확대하여 찍은 SEM 사진이다. 두 베인 모두 스키핑이 발생할 때까지 실험한 후에 표면을 관찰하였다. 트랙의 크기는 코팅한 베인이 훨씬 좁다. 그리고 그 표면을 보면 코팅된 베인은 접촉에 의한 연삭마멸이 약간 발생할 뿐 크게 파손되지 않았다. 하지만 비코팅 베인의 표면은 박리현상이 보이고 표면이 많이 파괴된 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 코팅은 마찰 시 표면을 상당히 보호해 주고 있음을 알 수 있다.

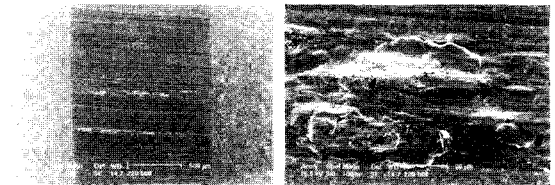


**Fig. 7.** Time to scuffing and changes of surface roughness depending on the initial surface roughness.



(a) Wear of coating vane (>50)

(b) Wear of coating vane (>2000)



(c) Wear of original vane (>50)

(d) Wear of original vane (>2000)

**Fig. 8.** Surface topography of TiN coating and original vanes after scuffing.

#### 4. 결 론

로터리 압축기 구동부의 내마모성을 향상시키기 위하여 베인의 표면에 TiN 코팅을 하였고, 대체냉매/윤활유인 R410A/POE 혼합환경에서 베인-롤러 접촉면의 마찰 및 마멸특성을 평가하였다. 실험결과를 통하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1) 베인 표면의 TiN 코팅을 하면 비코팅 베인과 비교할 때 내마모성을 향상을 가져올 수 있다.

2) 베인의 마멸량은 수직하중에 비례한다. 그리고 미끄럼 속도가 증가하면 마멸량은 증가한다. 그러나 1000 rpm에서는 다시 감소한다. 이것은 윤활영역이 경계윤활에서 유체윤활로 천이하기 때문이다. 그리고 속도가 빨라질수록 코팅 베인과 비코팅 베인 간의 마멸량의 차이가 크게 발생한다.

3) 초기 표면조도가 다른 베인을 이용한 단계하중 실험을 통하여 표면의 마모수명을 증가시킬 수 있는 최적의 조도가  $0.15 \mu\text{m Ra}$  임을 알 수 있었다.

4) 스커핑 발생 시 비코팅 베인의 표면이 코팅 베인의 표면보다 심하게 파손된다.

## 후 기

이 연구는 산업자원부 차세대신기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- Hasegawa, H. *et al.*, "The Friction and Wear Characteristics in Refrigerant Atmosphere," *Proceedings of JAST Tribology Conference Tokyo*, pp. 489, 1991.
- United Nations Environment Programme., "Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer," *Final Act.*, 1989.
- Mizuhara, K. *et al.*, "The Friction and Wear Behavior in Controlled Alternative Refrigerant Atmosphere," *STLE Paper*, No. 92-TC-3B-3, pp. 120-126, 1992.
- Nishwaki, F. and Hasegawa, H., "Mechanical Loss Reduction at Thrust Bearings of Scroll Compressors Using R407C," *Proceedings of 1995 International Compressor Engineering Conference at Purdue*, pp. 263-268, 1995.
- Jonsson, U. J., "Lubrication of Rolling Element Bearings with HFC-Polyolester Mixtures," *WEAR*, Vol. 232, pp. 185-191, 1999.
- Yoon, H., Sheiretov, T. and Cusano, C., "Tribological Evaluation of Some Aluminum-based Materials in Lubricant/Refrigerant Mixtures," *WEAR*, Vol. 218, pp. 54-65, 1998.
- Sheiretov, T., Glabbeek, W. V. and Cusano, C., "Tribological Evaluation of Various Surface Treatments for M2 Tool Steel in a Refrigerant Environment," *Proceedings of 1994 International Compressor Conference at Purdue*, pp. 103-108, 1994.
- Kawashima, T., Kawabata, H. and Watakabe, S., "Wear Characteristics of Each Composition of The Chromium Nitride Coated Vane in the Rotary Compressor for HFC-134a," *Proceedings of 1995 International Compressor Engineering Conference at Purdue*, pp. 257-262, 1995.
- Choa, S. H., "Tribological Characteristics of Various Surface Coatings for Rotary Compressor Vane," *WEAR*, Vol. 221, pp. 77-85, 1998.