

스크롤 압축기의 크랭크 샤프트의 베어링 재질에 따른 마모특성에 관한 실험적 연구

성치언, 박영도[†], 황유진, 백기대*, 안성용* 이 재근
부산대학교 기계공학과, *LG전자 DA연구소

A Study on the Wear Characteristics of Bearing According to its Material in Scroll Compressor

Chiun Sung, YoungDo Park[†], Yujin Hwang, GeeDae Back*, Sungyoung Park, Jaekeun Lee
Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
School of Architecture, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
**Digital Appliance Research Laboratory, LG Electronics, Seoul 153-802, Korea*

ABSTRACT: In this study, we investigated the tribology behaviour of two different bearing materials. One of these alloys content is Cu(90)-Sn(10) alloy and is widely used in the automotive industry. The other is Al alloy. This bearing content is Al-Sn-Si-Cu. Therefore, it is required to study on the lubricating characteristics of bearing according to different materials. In this study, compressor bearings made by respectively "PTFE solid lubricant" and "Al alloy with superior load carrying capacity, rubbing and impact endurance", have gone through journal bearing test.

Lubrication and abrasion characteristics are evaluated by analyzing the material characteristics of a scroll compressor bearing bush. The Al alloy bearing showed the most excellent lubrication and abrasion characteristics than Cu-Sn alloy under high load condition.

Key words: Al alloy(Al 합금 베어링), Cu-Sn alloy(고체 윤활 베어링), PTFE(테프론 수치 코팅)

기 호 설 명

- R : 베어링 반경 [m]
- K_T : 모터 토크 [$N \cdot m/A$]
- I : 모터 입력 전류 [A]
- ρ : 오일 밀도 [kg/m^3]
- N : 회전 주파수 [Hz]
- L : 베어링 길이 [m]
- F : 베어링 Load [N]
- C : 베어링 간극 [m]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-51-510-3441; fax: +82-51-582-6368
E-mail address: youngpar40@pusan.ac.kr

1. 서론

두 물체가 접촉하여 운동할 때에는 항상 마찰이 발생하고 마모가 일어난다. 특히 여러 개의 구성 부품으로 상대운동을 하는 기계요소에 있어서 이러한 현상들은 피할 수 없는 것으로 이들 마찰과 마모를 줄이기 위해서는 접촉하는 두면사이에 윤활유를 사용하여 물체 표면의 손상을 방지하고 있지만, 아직도 그 본질은 규명되지 않은 것이 많다.

냉동 및 공기조화 시스템에 사용되는 압축기는 왕복동 압축기(reciprocating compressor), 로터리 압축기(rotary compressor) 및 스크롤 압축기(scroll compressor)로 구분된다. 최근에는 진동문제, 흡입 및 토출밸브에서의 손실등으로 인해 저소음, 고효율, 소형경량화의 특징을 가진 스크롤 압축기의 사용이 늘어나고 있는 추세이다. 특히, 스크롤압축기의 축(Shaft)-베어링시스템은 높은 신뢰성 및 소형화가 요구되고 있다. 예전에는 압축기용 베어링으로 볼 베어링을 사용하였으나 회전 정밀도가 볼 베어링보다 높은 저널 베어링으로 바뀌어 가는 추세이다. 또한 스크롤 압축기의 경우 회전축이 수직으로 서 있으며, 원활한 오일 공급을 위하여 축이나 베어링 표면에 깊은 홈이 축방향 또는 나선형으로 파여있다.

원활한 오일 공급에 대한 축(Shaft) 및 베어링 설계 뿐만 아니라 축(Shaft) 및 베어링의 재질을 변경함으로써 축계부 마모 특성 개선에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다.

2. 축계 마모특성에 대한 이론적 고찰

Fig. 1는 스크롤 압축기에서의 전형적인 오일 공급 시스템을 보여준다. 압축기 Sheel 하부에 있는 오일 저장부의 오일은 크랭크축이 회전함에 따라 오일 픽업(Pick Up)내부의 프로펠라에 의해 축 내부의 오일 유로로 유입된다. 크랭크축이 회전은 원심펌프와 같은 기능을 수행하여 축 내부의 오일 자유면이 포물선을 그리며 상승하도록

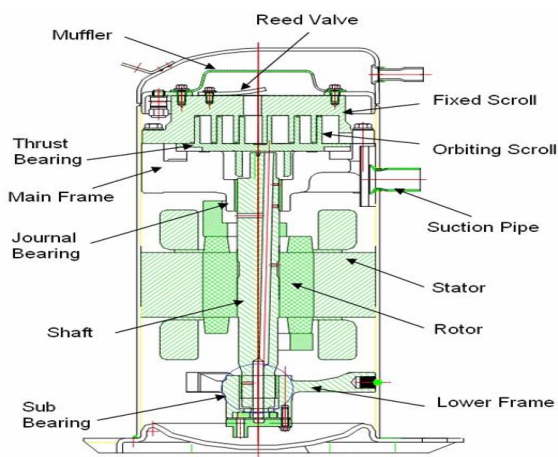


Fig. 1 Scroll compressor oil supply system

하며 이렇게 상승된 오일부는 크랭크축 내부의 오일 공급공(oil feeding hole)을 통해 축을 둘러싸고 있는 저널 베어링으로 공급되고 나머지는 계속 상승하여 크랭크핀 내에 뚫려진 구멍을 통해 선회 스크롤 허브 내부로 분출되어 슬라이더 부시 및 크랭크핀의 마찰부위를 윤활한다.

한편 크랭크 축 표면에 만들어진 오일 그루브(Groove)를 따라 상승하여 저널 베어링 윤활을 수행한 후 배유구를 통하여 쉘내부 공간으로 분출되어 오일 저장부로 돌아간다. 그리고 크랭크축 내부의 오일 유동시 가스 배출구를 통하여 냉매 가스를 배출하는데 이는 냉매가스에 의한 오일흐름의 장애를 방지하기 위함이다. 이러한 오일공급 장치는 정속 운전의 경우 크랭크축의 회전력에 근거한 원심펌프를 사용하며 가변속 운전시에 원심펌프의 경우 저속에서 오일의 공급량이 줄어들기 때문에 용적 가변형의 키니펌프 또는 트로코이드 펌프를 축하단에 설치하여 사용한다. 특히 원심펌프의 경우 저점도 오일에 대한 급유 성능이 우수한 것이 특징이다. 그리고 저온 용해도가 증가하여 오일의 점도가 떨어지면 키니 펌프의 경우 급유 성능이 현저히 저하하는 문제가 발생할 수 있다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

3.1 Crank Shaft

본 실험에서 사용될 크랭크 샤프트는 황복합 패삭강(SUM32) 화학 성분은 C(0.12 ~ 0.20%), Mn(0.60 ~ 1.0%), P(0.040 이하), S(0.10 ~ 0.20)이며 열처리 조건은 침탄열처리(930°C ± 10°C) 하여 마르텐 사이트화하여 표면경도를 강화했으며 열처리 깊이는 약 1.2 mm로 표면으로부터 0.5 mm 깊이까지의 경도는 HV 600 ~ 700으로 제작하였다.

인장시험은 공업용 재료의 기계적 성질을 알기 위한 기본적인 시험으로써 일정한 속도로 반대방향으로 잡아당기는 힘에 대한 물질의 저항성을 측정하는 실험이다. 이를 통해 재료의 변형 과정과 응력의 변화를 조사하며, 재료의 항복강도, 인장강도, 연신율, 단면 수축율등의 기계적인 특성과 탄성한계, 비례한계, 탄성계수의 물리적 특성을 구하는 것을 목적으로 한다.

본 실험에서는 인장실험으로 실험시편인 크랭크 샤프트의 인장강도, 항복강도, 파단강도, 탄성계수 등의 물리적 성질을 규명한다.

실험 시편의 인장시험결과 시험 시편의 탄성계수는 320 ~ 330 Gpa로 나타났는데 이는 현재 해석기준으로 설정되어 있는 일반강의 탄성계수인 212 Gpa에 대비하여 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 재료의 물성치나 제조방법에 기인하는 것으로 추정된다.

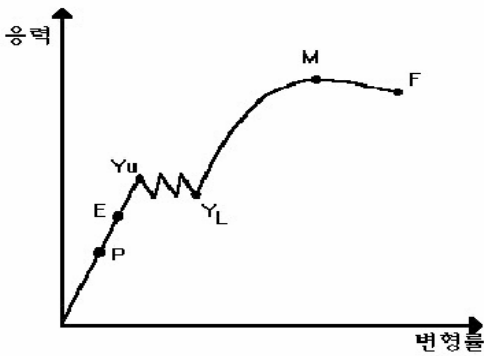


Fig. 2 Stress-Strain diagram

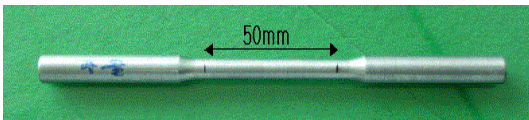
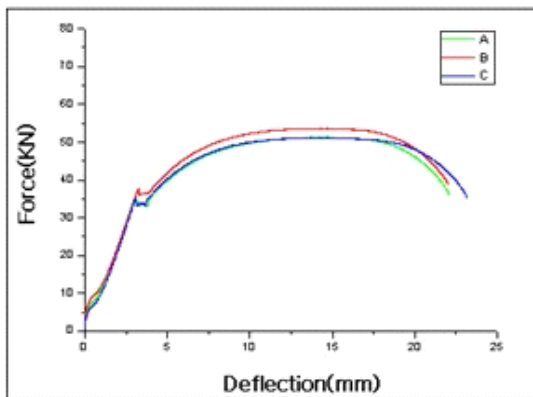


Fig. 3 Photograph of tensile test pieces



강도	종류	A	B	C
인장강도(MPA)		453.95	474.07	452.50
상향복강도(MPA)		312.39	332.97	308.89
하향복강도(MPA)		295.59	322.91	292.88
파단강도(MPA)		314.30	342.05	309.95
탄성계수(GPA)		325.04	331.67	338.80

Fig. 4 Stress-Strain diagram on steel

3.2 베어링의 역할

베어링은 마찰부분의 성능을 향상시키고, 원래의 기능을 효과적이고 장시간 유지하기 위해 중요한 것은 작동중에 마찰부분에서 일어나는 마모를 최소화하고 마찰 손실을 감소 시켜야 한다. 또한 요구 특성에 맞는 적합한 재료를 선정하여 부족한 기능을 보장하는 역할을 한다. 현재 널리 사용되고 있는 스크롤 압축기의 베어링에 대한 목록과 본 시험에 사용된 베어링의 종류 및 구성 성분은 하기의 Table. 1,2와 같으며 미세 조직은 Fig. 5와 같다.

Compressor에 사용되어지고 있는 축계 베어링은 크게 고체윤활을 하는 Dry Bearing 과 Al합금 베어링으로 구분된다.

Dry Bearing의 경우 순간적인 급유 중단이 일어나더라도 Surface layer의 PTFE와 FEP 수지 성분의 자가윤활(self-lubrication)작용으로 메탈(Metal)접촉에 의한 베어링 fail을 방지 할 수 있기 때문에 축계 베어링으로 광범위하게 사용되고 있다. 단, Dry Bearing의 경우 Surface layer는 가공하지 않는데 필요에 의해 가공을 하면 Surface layer내의 경한 Carbon fiber입자가 운전중 노출되어 축마모가 발생하는 원인이 된다. 고부하 고중용도로 사용되는 Al합금 베어링은 유체윤활 조건에서는 우수한 마모특성을 가지며 가공에 의한 표면 조도 개선으로 입력을 감소하여 성능을 향상할 수 있는 장점이 있다.

3.2.1 PTFE코팅의 소결 청동베어링

청동 베어링은 1920년경 개발되어 현재 자동차와 압축기등에 많이 사용되고있다. 일반적으로 흔히 쓰이는 청동 베어링의 성분은 90%의 Cu와 10%의 Sn이며 흑연이 약간 첨가 될때도 있다. 특히, 최근에는 고체윤활제의 코팅에 의한 표면개질 방법이 연구되고 있는데,그 중 고체 윤활제로서 PTFE(Polytetra fluoro ethylene)는 매우 낮은 마찰계수를 나타내고, -260 ~ +260℃의 온도에서 계속적으로 사용할 수 있는 유용한 기계적 성질들을 유지한다. PTFE는 화학적으로 거의 불활성적이며 흡습성이 없어서 뛰어난 형상적 안정성을 갖는다. 반면, PTFE는 응력 상태에서 냉간 유동성을 보이며, 준결정 고분자들 중에서 가장 높

은 마모율을 보인다. 이러한 단점들은 PTFE 내에 충전재(filler)를 첨가함으로써 매우 향상될 수 있다.

PTFE의 독특한 특성의 하나는 충전재가 함유될때의 내마모성의 증가가 다른 준결정 고분자보다 대단히 큰 것이다. 위에서 언급된 특성으로 인하여, PTFE는 마찰에 응용되는 고분자계 복합재료들 중에서 매우 중요한 매트릭스 고분자이다. 응용되는 PTFE계 복합 재료는 많은 종류가 있는데, 그 이유는 PTFE에는 다양한 충전재들이 함유되고, 하나 또는 그 이상의 재료들이 동시에 사용될 수 있기 때문이다.

본 실험에 사용된 수치계 베어링은 Table. 1과 같다.

3.2.2 Al합금 베어링

Table. 1 수치계(FR160) 재질 및 성분


 <p>STEEL BACK (SPCC)</p>	layer	FR160
	Resin	PTFE + FEP + Carbon Fiber+Sn
	Alloy	Cu(90%)+ Sn(10%)
	Steel	SPCC

Table. 2 Al합금계(FA66T) 재질 및 성분

Material	Composition (wt%)				
	Al	Sn	Si	Pb	Cu
FA66T	REM	6	6	-	1.0

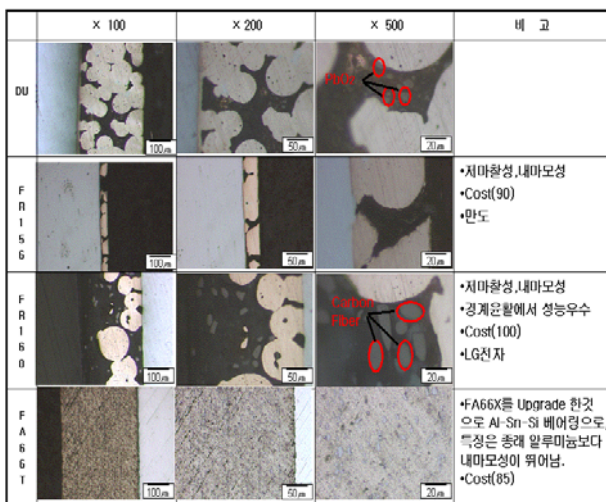


Fig. 5 Microstructure of bush surface

내마모성 알루미늄 합금으로 주로 알루미늄에 Si 및 Cu, Mg, Fe, Ti 등의 원소를 첨가한 다원계 Al-Si 합금이 널리 이용되는데, 다원계 Al-Si 합금은 우수한 주조성 및 기계적 특성을 지니고 있어 그 적용이 확대되고 있는 경량 합금이다. 특히 다원계 Al-Si 합금은 Si의 함량, 미세 조직 및 가공 공정에 따라 기계적 성질과 피로 특성은 차이를 나타나게 된다. 또한 다원계 Al-Si 합금은 상대운동을 하는 회전 및 왕복 운동 부품에 널리 사용되므로 내마모 특성에 대하여 정량적, 정성적 평가를 필요로 한다. 이전의 내마모성 Al-Si 합금에 대한 마모 특성 연구들은 주로 이원계 합금에 대하여 평가되어 왔다. Jasim 등[3]은 이원계 Al-Si 합금의 경우 공정 조성 근방에서 우수한 마모 특성이 있음을 실험을 통하여 입증하였고, Reddy 등[4]은 순수한 알루미늄에 Si를 첨가할 경우 마모 특성이 향상된다고 보고하였다. 그러나 실제 내마모성 부품에 사용되는 다원계 Al-Si 합금들에 대하여는 아직 그 연구들이 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 에어컨용 스크롤 컴프레서에서 크랭크 샤프트와 축수 윤활관계에 있는 베어링에 대해 수치계와 Al합금계를 이용하여 마모 특성에 관하여 실험적 방법으로 연구하였다.

본 실험에 사용된 Al합금계 베어링은 Table. 2와 같다. 실험에 사용된 Al합금계 베어링은 Pb가 없는(Pb Free) Al-Sn-Si bearing alloy로 Sn, Si, Cu가 첨가되어 기존의 Al 베어링 보다 마모특성에 더욱 뛰어난 영향을 미칠거라고 사료된다.

3.3 실험 장치

Fig. 6은 본 실험에서 사용한 실험장치는 마찰 및 마모특성을 평가하기 위하여 저널베어링용 벤치테스터를 사용하였으며 본 실험 장치의 주요 구성 부분으로 동력발생부, 동력전달장치, 시험부, 하중작용부, 온도측정부, 마찰계수 측정부로 구성되어 있다. 동력 전달 장치는 서보모터(0~4500 rpm)를 이용하여 구동력을 발생 하였으며 베어링 부하는 로드셀에 의해 실험용 베어링에 전달되도록 되어 있으며 윤활유는 하부 챔버내에 일정량을 공급하여 축 회전에 의한 원심급유방식에 의해 베어링에 공급되는 방식을 채택하였다.

3.3.1 실험방법

동력전달 장치는 서보모터를 이용하여 구동력을 발생하였으며 회전속도는 0 ~ 4500 rpm으로 변화가능하나, 본실험에서는 압축기 60 Hz 정격 기준 3600 rpm으로 평가하였다. 베어링 부하는 로드셀에 의해 실험용 베어링에 전달되도록 되어 있으며 가변범위는 0 ~ 8000 N으로 본실험에서는 부하를 Step별로 200 N씩 계속 증가 시키면서 평가하였다.

Shaft와 Bearing의 마찰 표면의 오일온도를 측정하기 위해 베어링 표면을 탭을 뚫어 그 속에 Thermal Couple를 삽입하였다.

윤활유는 점도 Fleol Alpha 10 G (10 cSt)를 사용하였으며 하부챔버내에 공급하였고 실험 오일 온도는 60℃로 하였다.

3.3.2 측정 방법

마찰계수 측정

Fig. 6에서 기어박스에 결합된 축이 모터에 의해 회전하고 로드셀에 의해 수직하중이 베어링에 가해지면 토크가 발생한다. 각 하중에 대한 토크로 마찰계수 변화를 계산식에 의하여 산출한다.

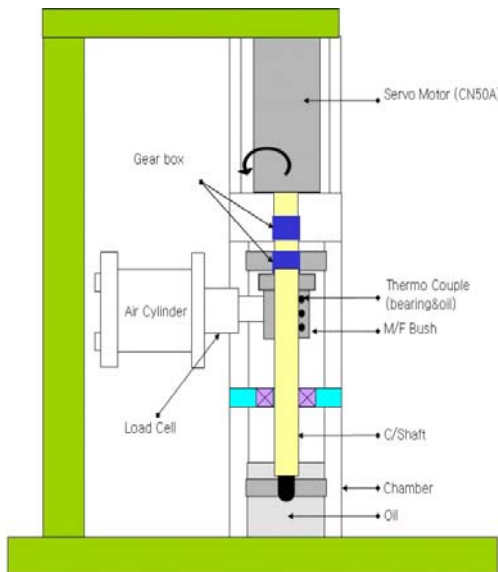


Fig. 6 Schematic diagram of test machine

축에 걸리는 토크(T)는 모터입력전류(I)에 다음과 같이 비례한다.

$$T = K \cdot T \cdot I \quad \text{----- (1)}$$

또한 마찰력에 관련한 축의 토크는 축의 베어링 부에 가해진 하중에 대하여 다음과 같이 비례한다.

$$T = \mu \cdot F \cdot R \quad \text{----- (2)}$$

식 (1)과(2)를 정리하면 마찰계수는 다음과 같은 식을 따른다.

$$\mu = \frac{k_T \cdot I}{F \cdot R}$$

Sommerfeld Number 측정

Stribeck Curve 작성을 위하여 가로축의 Sommerfeld Number는 다음과 같은 식에 의해서 계산된다.

$$So = \frac{2 \rho \nu N R L}{F} \left(\frac{R}{C} \right)^2$$

4. 실험결과

4.1 유체 윤활 영역에서의 마찰계수 변화

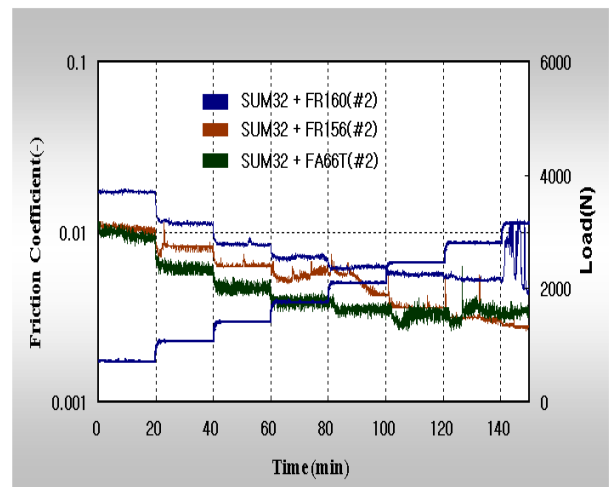


Fig. 7 Friction coefficient for time

Fig. 7은 크랭크 샤프트 재질인 황복합 쾌삭강 (SUM32)에 대한 유체윤활 영역에서의 마찰계수 변화를 나타내고 있다. 베어링 재질은 각각 수지계인 FR156, FR160 그리고 Al합금인 FA66T를 적용하여 각 Case별 실험을 하였다. 베어링 반경 간극은 FR 160이 31 ~ 33 μm , FR 156이 35 μm , FA 66T는 31 ~ 36 μm 로 적용 되었다.

실험 결과 에어컨 일반운전 조건인 평균하중 3500 N의 유체윤활 운전영역에서는 마찰계수는 Al합금계인 FA66T가 가장 낮게 나타나고 다음으로 수지계인 , FR156, FR160 순으로 낮게 나타났다. Al합금계(FA66T)가 수지계(FR160)대비 마찰계수가 약 28% 저감되는 효과를 나타내었다.

이 실험 결과로부터 에어컨의 일반운전 조건에서 FA66T의 Al합금 베어링을 사용할 경우 성능이 향상 될 것으로 판단된다.

4.2 하중변화에 따른 혼합윤활 특성

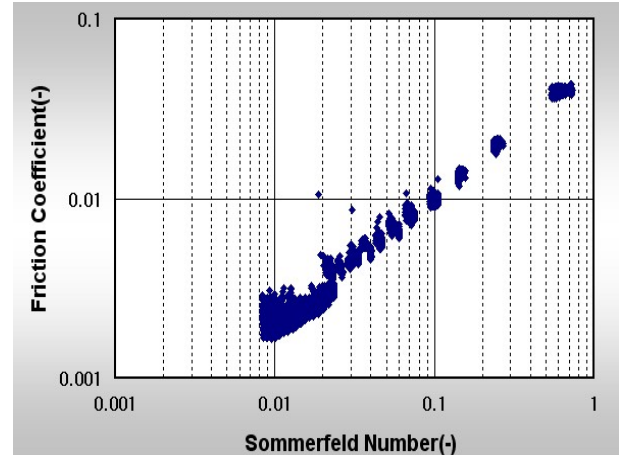
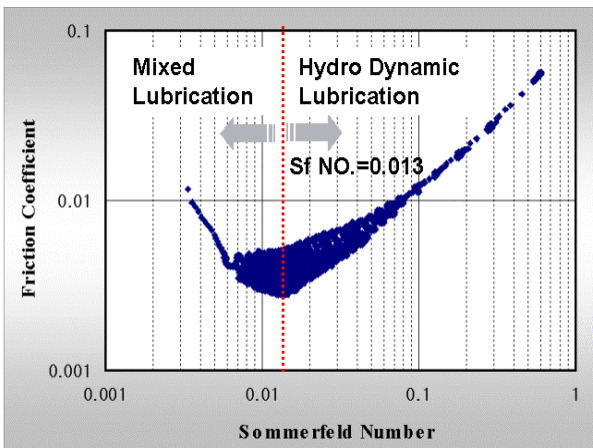
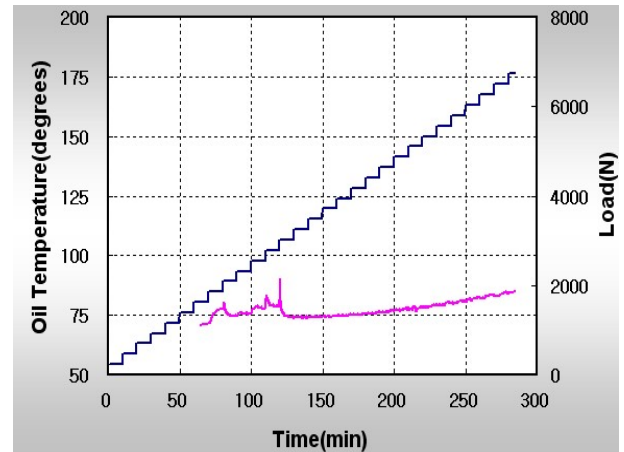
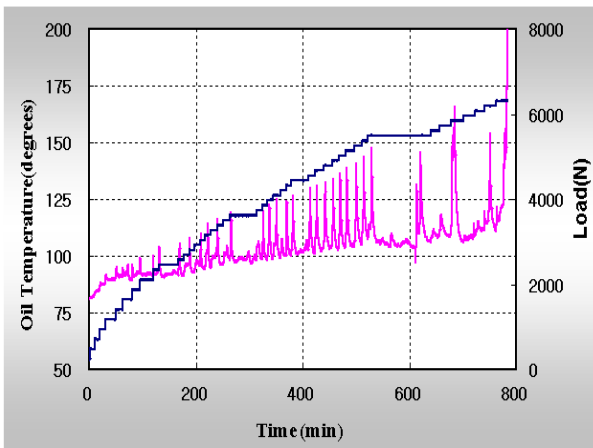


Fig. 8 Stribeck curve (SUM32 & FR160)

Fig. 9 Stribeck curve (SUM32 & FA66T)

Fig.9는 AI합금계(FA66T)베어링에 대한 하중변화에 따른 윤활 영역을 나타내고 있다. 베어링 반경 clearance는 30 μm , 베어링 조도는 1.2 Z, 크랭크축 조도는 0.8 Z이다. 실험결과 AI합금 베어링의 경우 유체윤활영역에서 혼합윤활영역으로의 뚜렷한 변화가 발생하지 않는다. 이는 AI합금 베어링의 경우 가공에 의해 표면 조도가 1.2 Z로 베어링 부하가 증가 하더라도 마찰 접촉운동을 하는 두 물체의 간극에서 표면에 돌기들의 간헐적인 접촉이 적기 때문이다. 실험장치에서 인가할 수 있는 최대 부하인 8000 N에서도 혼합윤활의 특성은 나타나지 않았고 이때의 Sommerfeld Number는 0.013이다.

하중을 계속적으로 증가하면 유체윤활 상태에서 경계윤활 상태로 변화여 급격한 온도 상승이 발생할 것으로 판단된다. 또한 하중 변화에 따른 오일온도의 변화 또한 수치계 베어링(FR160)에 대비하여 안정적인 상태를 나타내고 있다.

4.3 하중변화에 따른 경계 윤활 특성

Fig.10은 수치계(FR160) 와 AI합금계(FA66T) 베어링에 대한 step-load test 결과를 나타내고 있다. 하중변화에 대한 수치계 베어링과 AI합금 베어링에 대한 한계 하중을 측정하기 위하여 step-load test를 수행하였다.

시험 조건은 베어링 반경 clearance는 30 μm 이고 축조도는 0.8 Z, 베어링 조도는 AI합금(FA66T)이 1.0 Z, 수치계(FR160)이 16 Z이다.

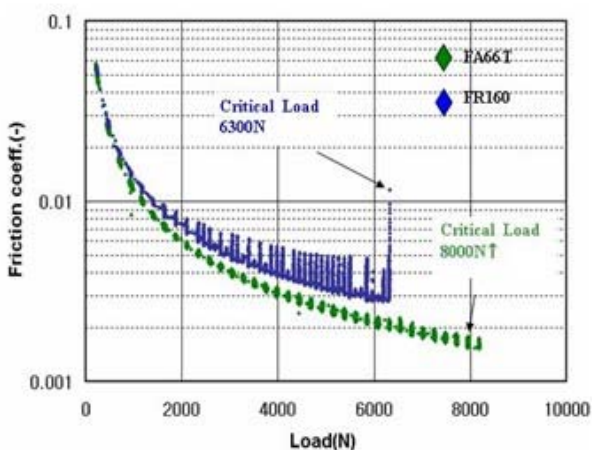


Fig. 10 Step-load test

오일은 Fleol Alpha 10 G(10 cSt)를 사용하였고 공급 오일 온도는 60 $^{\circ}\text{C}$ 로 운전 속도는 3600 rpm으로 설정 하였다.

step-load test는 하중을 200 N씩 증가하며 베어링 응착 발생시까지 시험하였다. Step-load test에서 AI합금 베어링(FA66T)은 시험기 최대 하중인 8000 N까지 마찰계수가 감소하며 정상작동 하였으나 수치계 베어링(FR160)은 6300 N 부근에서 마찰계수가 급격히 상승하면서 응착이 발생 하였다. 마찰계수는 수치계 베어링(FR160)이 6300 N에서 0.0029이고 AI합금 베어링(FA66T)의 경우 8000 N에서 0.0021로 나타났으며 전하중에서 AI베어링이 0.001정도 낮게 나타났으며 이것은 마찰계수가 약 28% 저감되는 결과를 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 스크롤 압축기에 사용되는 베어링에 대한 재질을 변경함으로써 베어링합금의 내마모성에 어떠한 효과를 가져오는지 저널베어링 테스트를 통해 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 유체윤활 영역에서 기존에 사용되던 수치계 베어링보다 AI합금계 베어링이 마찰계수 측면에서 약 25% 저감되는 효과를 얻었다. 이것은 실제 압축기 사용영역에서 AI합금 베어링 적용을 통해 스크롤 압축기의 축수윤활에 보다 높은 신뢰성을 제시하였다.

2) 유체윤활, 혼합윤활 영역에서 하중변화에 따른 베어링 표면 오일온도 분포를 볼 때 기존 수치계 베어링은 하중변화에 따른 베어링 표면 오일온도가 상당히 불안정한 반면 AI합금 베어링은 하중변화에 따른 온도변화가 상당히 안정화 되었다. 이는 실제 압축기 구동 중 베어링의 수명에 AI합금 베어링의 우수성을 제시한다.

3) 한계 하중 테스트 결과에서 기존 수치계 베어링은 6300 ~ 6800 N에서 응착현상이 발견되었지만 AI합금 베어링은 시험기 최대하중이 8000 N에서도 정상작동하였다. 이것은 앞으로 대용량에 스크롤 압축기의 대해서도 적용가능성을 시사한다.

본연구를 통해 AI합금 베어링의 내마모성에 관한 우수한 특징을 발견하였으며 향후 AI베어링의

구성성분의 함량에 따른 마모특성 변화에 관한 연구가 필요할것으로 생각된다.

10. 홍택기, 허무영, “석출경화된 Al-Pb-Cu계 베어링합금의 마모거동”, 한국윤활학회, Vol. 17, pp.54-58, 1993

참 고 문 헌

1. K. Lepper and M. James, “Sliding behavior selected aluminum alloys”, Wear, Vol 203-204, pp.46-56, 1997
2. A. Zeren, E. Feyzullahoglu, “A study on tribological behaviour of tin-based bearing material in dry sliding”, Material and Design, Vol 28, pp.318-323, 2007
3. Jasim, K. M. and Dwarakadasa, E. S., “Wear in Al-Si Alloys under Dry Sliding Conditions”, Wear, Vol. 119, No1, pp.119-130, 1987
4. Reddy, A, S., Bai, B. N. P., Murthy, K. S. S. and Biswas, S. K., “Wear, And Seizure of Binary Al-Si Alloys,” Wear, Vol. 171, Nos.1-2, pp.115-127. 1994
5. Seong Su Kim, Dong Chang Park, “Characteristics of carbon fiber phenolic composite for journal bearing materials”, Composite Structures, Vol. 66, pp.359-366, 2004
6. Cem Sinanoğlu, Fehmi Nair, “Effects of shaft surface texture on journal bearing pressure distribution” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 168, pp.344 - 353, 2005
7. Narumiya, H., Sakaino, K., 1992. “Journal bearing performance in a scroll compressor,” Proc. Of international compressor engineering conference at Purdue, Vol.3, pp.1099-1106
8. D. J. Lee, D. N. Yoon, “소결 청동 오일리스 베어링에서 분말 입도의 영향” , 대한금속재료 학회, Vol. 14, pp.232-239, 1976
9. Seong Mo Oh, Sang Don Mun, “MoS₂와 PTFE 코팅재료에 의한 자동차 피스톤 운동의 윤활특성 연구”, Transaction of the Korea Society of Machine Tool Engineers, Vol. 16, No.2, 2007

