

## 터보펌프용 극저온 볼 베어링의 성능검증

곽현덕<sup>†</sup> · 전성민 · 김진한 · 조광래\* · 김선용\*\* · 우관제\*\*

한국항공우주연구원 터보펌프개발그룹, \*한국항공우주연구원 우주발사체사업단, \*\*㈜로템 기술연구소

### Feasibility Verification of Cryogenic Ball Bearings for a Turbopump

H.D. Kwak<sup>†</sup>, S.M. Jeon, Jinhan Kim, G.R. Cho\*, S.Y. Kim\*\* and K.J. Woo\*\*

*Turbopump Department, Korea Aerospace Research Institute*

*\*KSLV Program Office, Korea Aerospace Research Institute*

*\*\*Research & Development Center, Rotem Company*

**Abstract** – In a turbopump cryogenic ball bearings are used to carry static and hydraulic loads, and these ball bearings must stand up to high load and speed in cryogenic circumstance. Verification of bearing performance is crucial to successful development of a turbopump. In this paper, focusing on the turbopump under developing by KARI, the performances of 203 and 207 bearings are verified through the series of tests simulating the real operating condition of turbopump.

**Key words** – turbopump, cryogenic ball bearing.

#### 1. 서 론

터보펌프는 액체 추진 로켓 엔진(liquid rocket engine)의 주요 핵심 부품으로, 엔진의 연소기에 추진제 및 산화제를 공급하기 위해 사용된다. 터보펌프의 구조는 산화제 펌프(LOX pump), 연료 펌프(fuel pump)와 펌프를 구동하는 터빈으로 이루어져 있으며 작동 유체를 고압으로 공급하기 위해 고속에서 운전된다. 이러한 극한 상황에서 운전되는 터보펌프의 안정성을 유지하기 위해서는 회전계를 지지하는 요소인 베어링의 신뢰성 확보가 중요하게 된다[1-3]. 특히, 터보펌프 산화제 펌프에 사용되는 극저온 베어링은 일반적인 베어링과는 달리 액체산소에 잠긴 상태에서 극심한 하중을 받으며 고속으로 회전하게 된다. 이러한 극저온 베어링이 파손될 경우 터보펌프에 비정상적인 진동을 야기할 가능성이 있으며, 심한 경우 터보펌프의 운전 자체가 불가능해질 수도 있다. 따라서 주어진 하중 조건 및 운전 속도 하에서 작동요구시간 동안 베어링이 심각한 손상 없이 안정적으로 회전하는지를 검증하는 것은 필수적

이다.

일반적으로 베어링 성능을 검증하는 파라미터로는 최대허용하중(maximum allowable load), 정격 수명(service life time), 최대한계속도(maximum allowable speed), 냉각유량(cooling flow rate) 등을 들 수 있다. 이에 본 논문에서는 현재 한국항공우주연구원에서 개발 중인 터보펌프[4,5] 산화제 펌프에 사용되는 203 및 207 베어링의 성능 검증을 수행하였다.

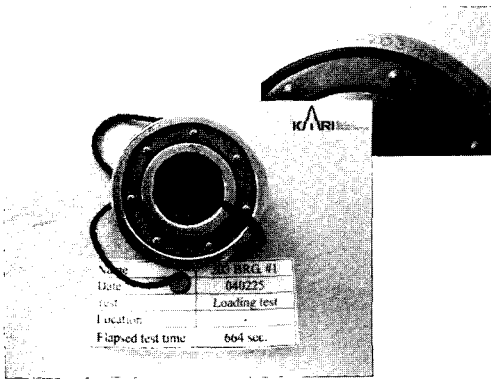
#### 2. 시험 베어링

일반적인 베어링의 경우 극저온에서의 윤활특성 및 폭발의 위험성을 고려할 필요가 없기 때문에 베어링 재질로 고강도 탄소강이나 스테인리스 강을 많이 사용한다. 그러나 액체산소 환경 하에서 위와 같은 재질을 사용할 경우 베어링의 볼과 케이지 사이의 지속적인 마찰로 폭발이 일어날 가능성이 있다. 따라서 극저온 베어링의 경우 케이지 재질로 구리합금이나 테프론을 사용하여 폭발의 위험을 방지하게 되며, 본 시험에 사용된 203 및 207 베어링의 경우 케이지의 재질로 구리합금을 사용하였다. 베어링의 자세한 사양은 Table 1

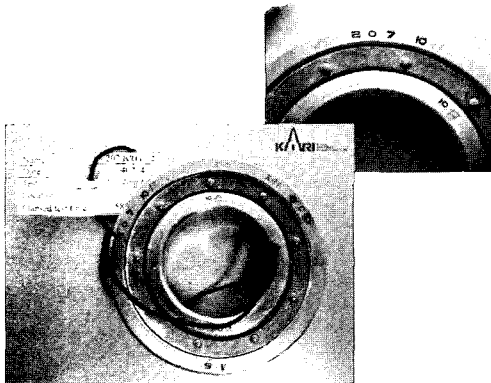
<sup>†</sup>주저자 · 책임저자 : hdkwak@kari.re.kr

**Table 1. Specifications of 203 & 207 bearing**

	203 bearing	207 bearing
RPM	20,000	20,000
Size(d×D×b), mm	17×40×12	35×72×17
No. of balls	7	9
Material of inner & outer race	Stainless steel	Stainless steel
Cage material	Copper alloy	Copper alloy
Nominal radial load, kN	2	2
Nominal axial load, kN	-	4
Cooling fluid	LOX	LOX



**Fig. 1. 203 bearing (photo was taken after test).**

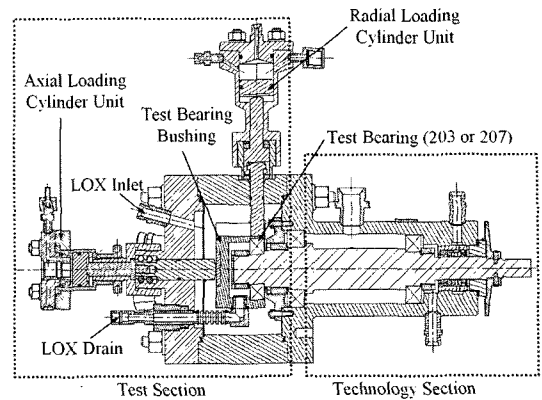


**Fig. 2. 207 bearing (photo was taken after test).**

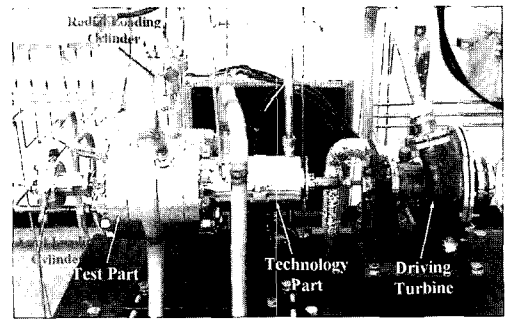
에 정리되어 있으며, Figs. 1 및 2는 각각 시험에 사용된 203, 207 베어링이다.

### 3. 시험 설비 개요

Fig. 3은 베어링 시험 장치의 단면도를 나타내고 있다[6]. 시험 베어링의 내륜(inner race)은 회전하는 축



**Fig. 3. Cross-sectional view of bearing test rig.**



**Fig. 4. Bearing test rig.**

에 결합되어 있으며, 외륜(outer race)에는 구리 재질로 된 베어링 부싱(test bearing bushing)이 조립되어 있다. 베어링 부싱의 상부 면 및 좌측 면은 반경 방향 및 축 방향 하중을 가할 수 있는 실린더 로드(cylinder rod)에 맞닿아 있다. 여기서 각각의 실린더 장치에 고압의 질소를 공급하게 되면 실린더 로드가 베어링 부싱을 밀어 시험 베어링에 하중을 가하게 되며, 이때 부가하중의 크기는 공급하는 질소압력으로 조절한다. 한편 시험 중에는 일정한 압력으로 액체산소를 시험부분(test section) 및 설비부분(technology section)에 공급하게 되며, 베어링 냉각 유량은 출구(LOX drain)에 오리피스를 달아 조절하게 된다. 마지막으로 시험 베어링의 구동은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 고온 질소로 구동되는 증동식 터빈으로 이루어졌다. Fig. 5는 베어링 시험에 사용된 P&ID를 나타내고 있다. 센서 중 기호 DD, DTC, PM 및 DO는 각각 압력센서, 온도센서, 유량계 및 타코미터를 의미하며, 각 센서의 설치 위치는 Table 2에 정리되어 있다. 매 시험마다 시험파트 액체산소의 압력 DD1을 일정하게 유지하였으며, 이

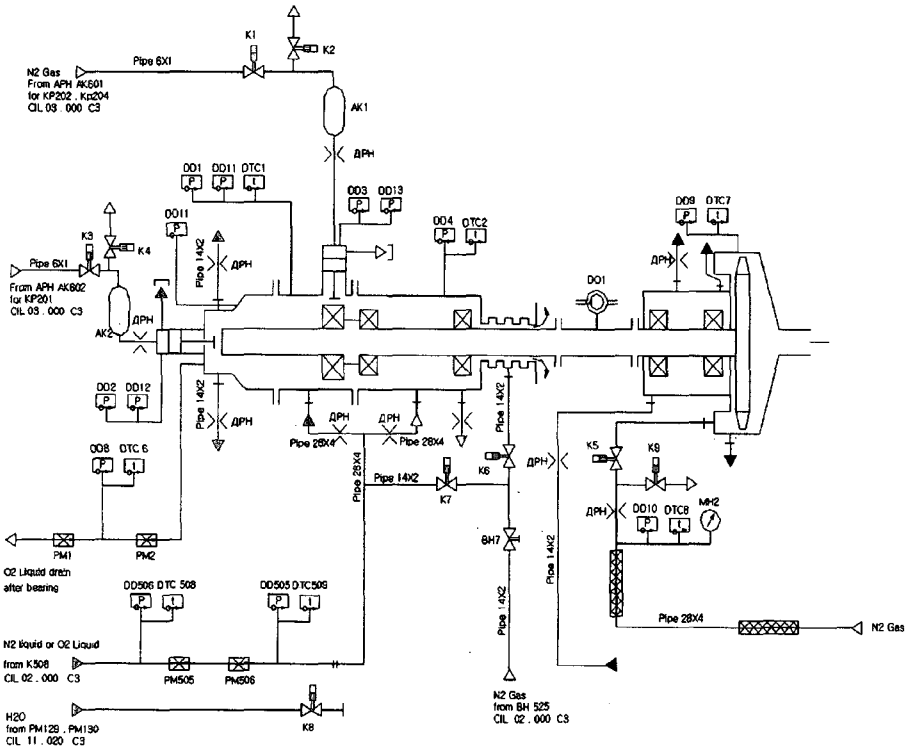


Fig. 5. P&ID of bearing test rig.

Table 2. List of measuring parameters

종류	설치위치
DO1	타코미터 터빈 RPM
DD1	Test part 내부압력
DD2	Axial loading 질소압력
DD3	Radial loading 질소압력
DD4	Technology part 내부압력
PM1	유량계 베어링 냉각 유량
PM2	유량계 베어링 냉각 유량
DTC1	온도센서 Test part 내부온도
DTC2	온도센서 Technology part 내부온도

때 베어링 냉각 유량은 오리피스를 이용하여 조절하였다. 한편, 베어링에 가하는 부가하중의 크기는 DD3 및 DD2의 압력으로 조절하였다. 베어링에 가해지는 실제 하중의 크기는 시험파트로 공급되는 액체산소의 압력을 고려하여 계산된다. 이는 실린더에 가하는 질소압력 및 가압면적과 시험부분 내부의 액체산소압력과 실린더 로드의 단면적에 의해서 결정되며 다음과

같은 식으로 정리된다.

$$F = P_{cy} \cdot A_{cy} - P_p \cdot A_{cr} \tag{1}$$

여기서  $P_{cy}$ 는 실린더에 가하는 질소압력,  $A_{cy}$ 는 실린더 내부의 질소가압면적,  $P_p$ 는 시험파트내의 액체산소압력,  $A_{cr}$ 은 실린더 로드의 단면적을 의미한다.

#### 4. 시험 항목 및 절차

203 베어링은 산화제 펌프 인듀서(inducer) 전단에 설치되는 베어링으로 축 방향 하중(axial load)은 받지 않고 오직 반경 방향 하중(radial load)만을 받으며, 운전 시 받는 최대 하중은 2 kN이다. 207 베어링은 산화제 펌프 임펠러(impeller) 후단에 설치되며 산화제 펌프에서 유발되는 축 방향 및 반경 방향 하중을 동시에 받게 된다. 207 베어링이 운전 시 받는 최대 하중은 축 방향 4 kN, 반경 방향 2 kN이다. 한편, 터보펌프의 작동시간은 120초 내외이며 베어링의 정격 수명은 2배의 안전계수를 고려하여 240초로 산정하였다. 이 시간 동안 심각한 파손 없이 운전된다면 베어링의

**Table 3. List of test conditions**

No.	Load, kN	Cooling flow rate, liter/sec	Test time
203 bearing			
1	2 (radial)	0.7	over 240
2	2 (radial)	0.5	over 240
3	4 (radial)	0.7	over 240
4	4 (radial)	0.5	over 240
207 bearing			
5	4 (axial) 2 (radial)	0.7	over 240
6	4 (axial) 2 (radial)	0.5	over 240
7	6 (axial) 2 (radial)	0.7	over 240
8	6 (axial) 2 (radial)	0.5	over 240

성능이 검증된 것으로 볼 수 있다. 마지막으로 시험 시 베어링 냉각 유량은 203 및 207 베어링에 대하여 0.7 liter/s 및 0.5 liter/s로 산정하여 시험하였다. 실제 터보펌프에 장착될 경우 시험 시 산정한 냉각유량보다 더 많은 유량이 베어링을 통과하게 되며 위 조건에서 베어링이 안정적으로 작동할 경우 냉각유량에 대한 성능검증은 완료된 것으로 판단할 수 있다. Table 3에 각각의 베어링의 시험 항목을 정리하였다. 한편, 베어링 시험 시의 절차는 다음과 같다.

1. 각 부분별 센서 정상 작동 확인
2. 액체산소탱크로부터 시험장치까지의 배관 냉각 (1시간가량 소요)
3. 시험 장치로 액체 산소 공급(DDI 압력을 일정하게 유지)
4. PM1 및 PM2 값을 확인하여 베어링 냉각유량이 시험조건과 동일한지 판단(시험조건을 만족하지 않을 경우 토출부 오리피스 크기를 조정)
5. 터빈 구동하여 시험 회전속도인 20,000 RPM으로 설정
6. 반경 방향 하중 부가
7. 축 방향 하중 부가(203 베어링의 경우 생략)
8. 모든 하중이 부가된 시점부터 설정된 시험시간 경과 후 시험 종료

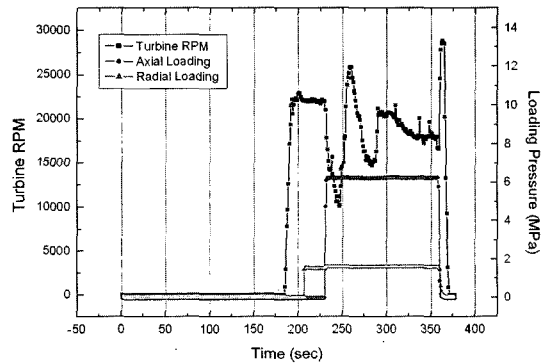
**5. 시험 결과**

시험은 207 베어링에 대하여 먼저 수행되었으며,

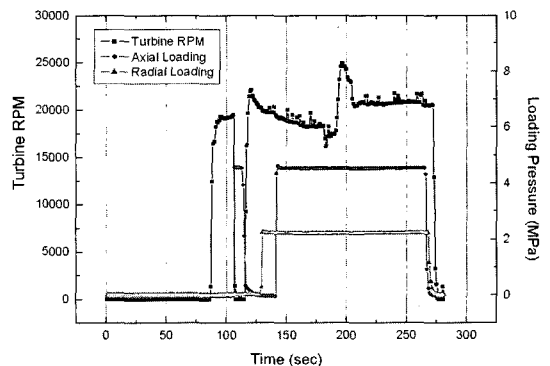
Table 3에 정리된 항목 중 5번 시험 항목은 생략되었다. 203 베어링 시험 시에는 207 베어링의 6, 7, 8번 시험항목이 성공한 것을 근거로 0.7 liter/sec 냉각 유량에 대한 시험 항목은 생략해도 무방할 것으로 판단하였으며, 시험항목 2, 4번만이 실시되었다.

**5-1. 207 베어링 시험 결과**

207 베어링 시험은 시험항목 7, 6, 8의 순서대로 시험베어링의 교체없이 수행되었으며, Figs. 6, 7 및 8은 각각의 시험항목에 대한 결과를 나타낸다. Fig. 6은 냉각 유량 0.7 liter/sec, 축 방향 하중 6 kN, 반경 방향 하중 1.2 kN을 가한 상태에서의 시험결과이다. 시험 시 설정된 반경 방향 하중은 2 kN이었으나, 질소가압 레귤레이터의 이상으로 1.2 kN만이 가해진 상태에서 시험이 수행되었다. 하중은 반경 방향 하중을 가한 후 축 방향 하중을 가하였으며, 이 시점부터 128초 경과된 시점까지 베어링이 정상적으로 작동하는 것을 확인



**Fig. 6. 207 bearing loading test (No. 7 condition in Table 3), overlapped loading time: 128 seconds.**



**Fig. 7. 207 bearing loading test (No. 6 condition in Table 3), overlapped loading time: 124 seconds.**

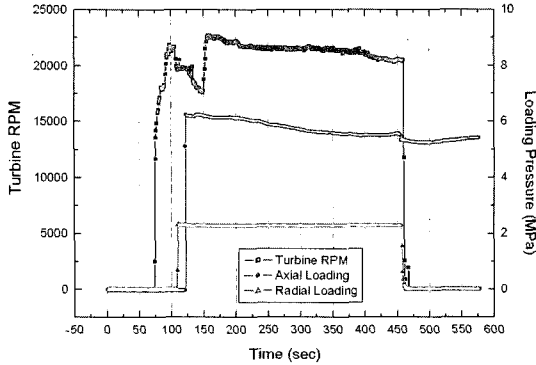


Fig. 8. 207 bearing loading test (No. 8 condition in Table 3), overlapped loading time: 337 seconds.

한 후 시험을 종료하였다. 베어링의 회전 속도는 반경 방향 하중이 가해진 시점에는 큰 변화가 없으나 축 방향 하중이 가해진 시점부터 크게 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이런 현상은 구동터빈에 걸리는 부하가 증가하여 발생하는 현상으로 시험 시간 동안 지속적으로 터빈에 공급되는 고온질소의 압력을 조정하였다. Fig. 7은 냉각 유량 0.5 liter/sec, 축 방향 하중 4 kN, 반경 방향 하중 2 kN일 때의 시험 결과이다. 앞선 시험과 마찬가지로 하중을 가한 시점부터 124초 경과된 시점까지 베어링이 정상적으로 작동하는 것을 확인한 후 시험을 종료하였다. 마지막으로 Fig. 8은 냉각 유량 0.5 liter/sec, 축 방향 하중 6 kN, 반경 방향 하중 2 kN일 때의 시험 결과이다. 시험은 산소탱크에 남아있는 액체산소를 모두 소진할 때까지 실시되었으며, 그 결과 337초간 수행되었다. Fig. 9는 시험을 통해 베어링에 가해진 하중 이력(loading history)을 나타내며,

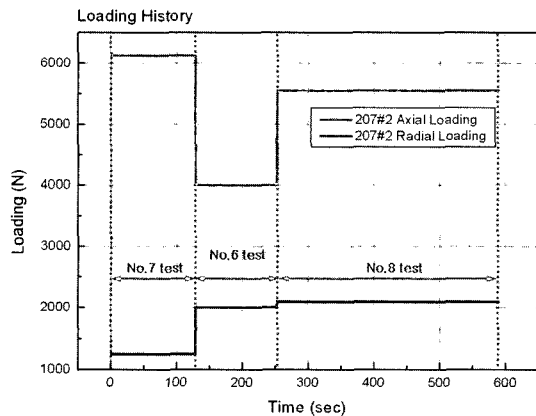


Fig. 9. 207 bearing loading history.

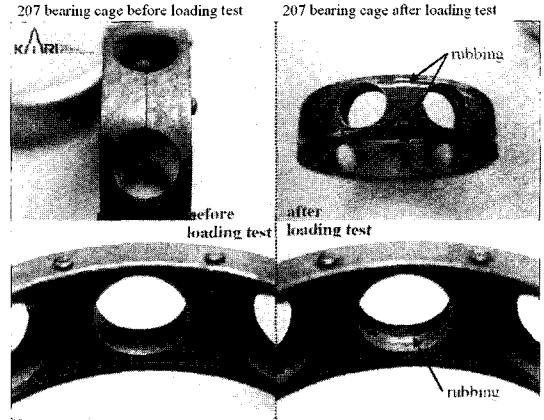


Fig. 10. Comparison of 207 bearing cage.

총 3회의 시험 동안 시험 베어링의 교체는 없었다. 따라서 시험 대상의 207 베어링은 터보펌프 운전 시와 동일하거나 더 극심한 하중조건하에서 총 589초간 안정적으로 운전되었으며, 성능 검증을 성공적으로 완료하였다. 한편, Fig. 10은 시험 전후의 207 베어링 케이지(cage)를 나타낸다. 사진에서 볼 수 있듯이 시험 후에는 볼과 케이지 및 외륜과 케이지의 접촉 마찰에 의해 코팅면의 마모가 일어난 것을 알 수 있다.

### 5-2. 203 베어링 시험 결과

203 베어링 시험은 Table 3의 시험항목 2, 4의 순서대로 시험 베어링의 교체없이 수행되었다. 앞서 기술한 바와 같이 207 베어링 시험 결과로부터 0.7 liter/sec 냉각 유량 시험을 생략하여도 무방할 것으로 판단되어 냉각 유량 0.5 liter/sec에서 두 개의 하중 조건을 시험하였다. Figs. 11 및 12는 각각의 시험항목에 대

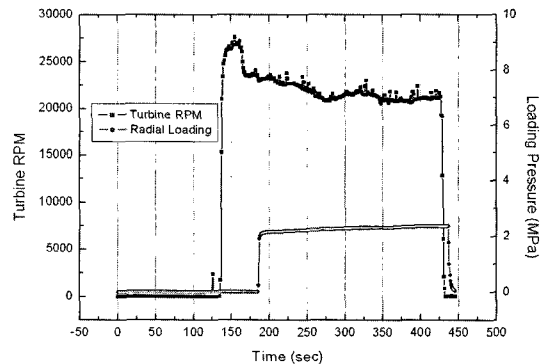


Fig. 11. 203 bearing load test (No. 2 condition in Table 3), loading time: 250 seconds.

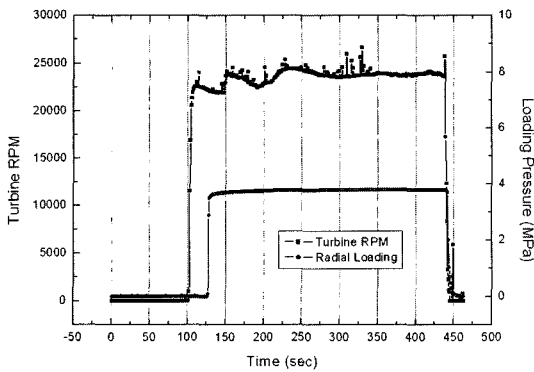


Fig. 12. 203 bearing load test (No. 4 condition in Table 3), loading time: 314 seconds.

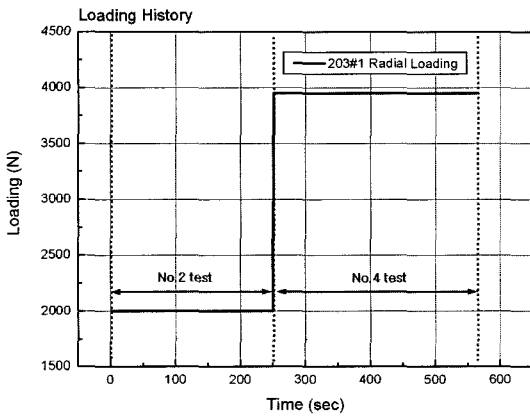


Fig. 13. 203 bearing loading history.

한 결과를 나타낸다. Fig. 11은 반경 방향 하중 2 kN을 가하였을 때의 시험 결과로 총 250초간 시험이 실시되었으며, Fig. 12는 반경 방향 하중 4 kN을 가하였을 때의 시험결과로 총 314초간 시험이 실시되었다. 시험 베어링의 교체가 없었으므로 총 시험 시간은 564초이며, 이에 대한 하중 이력은 Fig. 13에 정리되어 있다. 시험 결과에서 보이듯이 베어링은 전체 시험 시간 동안 안정적으로 운전되었으며, 203 베어링의 성능 검증 역시 성공적으로 완료되었다.

### 6. 결 론

이상의 결론은 다음과 같다.

1. 터보펌프 산화제 펌프에 사용되는 203 베어링의 액체산소 극저온 시험을 통해 반경 방향 하중 4 kN, 냉각유량 0.5 liter/sec의 조건하에서 작동요구시간 120초 이상 안정적으로 작동함을 검증하였다.

2. 터보펌프 산화제 펌프에 사용되는 207 베어링의 액체산소 극저온 시험을 통해 반경 방향 하중 2 kN, 축 방향 하중 6 kN, 냉각유량 0.5 liter/sec의 조건하에서 작동요구시간 120초 이상 안정적으로 작동함을 검증하였다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부에서 시행한 특정연구개발사업인 ‘소형위성발사체(KSLV-I)개발사업’ 연구결과의 일부입니다. 아울러 시험진행에 도움을 주신 ㈜로템의 유용인 차장님, 김동환 과장님, 진형석 대리님, 양홍준 대리님께 감사의 말씀을 드립니다.

### 참고 문헌

- 이용복, 김창호, 곽현덕, 하태웅, 우유철, “탄성 링을 갖는 볼 베어링 지지의 터보 펌프 임계속도에 관한 연구,” 유체기계공업학회 유체기계저널, 제4권 제2호, pp. 22-28, 2001.
- H.D. Kwak, Y.B. Lee, C.H. Kim, T.W. Ha and Y.C. Woo, “Prediction of Rotordynamic Stability for the High Pressure, High Speed Turbopump Unit,” IFToMM 6th Int'l Conf. on Rotordynamics, Univ. of New South Wales, Sydney, pp. 478-485, 2002.
- D.W. Childs, “The Space Shuttle Main Engine High-Pressure Fuel Turbopump Rotordynamic Instability Problem,” ASME Journal of Engineering for Power, No. 100, pp. 49-57, 1978.
- 전성민, 김진한, “30 ton급 터보펌프의 회전체 동역학 설계 및 해석,” 한국항공우주학회 2003년도 추계 학술대회, pp. 976-979, 2003.
- 김진한, 이은식, 홍순삼, 최창호, 전성민, 정은환, “액체로켓엔진용 터보펌프 개발현황,” 제5회 우주발사체기술 심포지움, KAIST, 발표예정, 2004.
- 우관제, 김경호, 우유철, “터보펌프 시스템용 베어링/실 시험설비 개발,” 한국추진공학회 2003년도 추계 학술대회, pp. 25-28, 2003.