

캔드타입 전동워터펌프용 수중베어링의 특성분석

박인겸^a, 김형진^a, 홍남표^b, 서영호^a, 김병희^{a*}

Characteristic Analysis of Underwater Bearing for Canned-Type Electric Water Pump

In Kyum Park^a, Hyung Jin Kim^a, Nam Pyo Hong^b, Young Ho Seo^a, Byeong Hee Kim^{a*}^a Dept. of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Gangwon-do, South Korea, 200-701, Republic of Korea^b Kangwon human Resources Development Institute, Hongcheon-gun, Gangwon-do, South Korea, 165-1, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	19	November	2013
Revised	6	February	2014
Accepted	26	March	2014

Keywords:

Canned-type electric water pump
Underwater bearing
Carbon bearing
Performance test system

ABSTRACT

This paper presents characteristic analysis of underwater bearing for canned type electric water pump. Characteristic analysis of underwater bearing was performed using self-developed performance tester, which capable of torque change, noise change, motor speed change and abrasion loss test with respect to temperature change of underwater bearing. The performance tester can be monitored in real time by designing the control unit using the Labview program. The performance experiment was performed through comparison of the silicon carbide (SiC) and the carbon bearing. From the experiment results, performance of SiC bearing was better than carbon bearing at the abrasion and temperature experiment.

1. 서론

최근 자동차 산업이나 공작기계 기타 여러 분야에서 연비향상 효과를 개선하기 위한 다각적인 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 특히 자동차 효율을 높이기 위해 동력장치 및 주변 장치들의 독립적인 제어를 통한 자동차 효율을 증가시키는 기술 개발이 진행되고 있다.

기존 펌프는 기계식 방식에서 친환경적인 관점을 고려하여 전력 전자식 방식으로 대체되고 있다. 이에 가변 제어기술을 응용한 전동식 워터펌프로 대체하게 된다면 에너지 소모량 효율 상승효과를 가져 올 수 있다^[1-3].

전동식 워터펌프는 냉각수를 포함하여 구동되는 펌프부와, 냉각수와 완전히 차단되어야 하는 모터부의 결합체이며 모터의 동력이

펌프부로 전달되어야 하는 구조를 가지고 있다. 이에 대한 부품으로 미캐니컬 씬을 적용한 워터펌프가 있으나 완전방수, 내구수명에서 전기자로 구성된 스테이터부와, 영구자석 등으로 구성된 로터부로 구분하여 로터부 및 로터부와 스테이터부 사이의 공극부가 냉각수에 잠기게 하고, 스테이터부와 로터부를 각각 방수처리 하는 방식의 Can-sealed 방식의 구조를 가지고 있다.

기계식 워터펌프는 내연기관 엔진 구동에 종속되어 동작하지만 전동식 워터펌프는 별도의 모터를 장착하여 구동함으로써 구동모터 제어에 의한 펌프의 최적화 운전이 가능해지면서 연비향상에 도움을 주며, 냉각수의 유출이 없고, 배기가스 배출의 감소와 엔진 연소효율을 상승 시키는 장점을 가지고 있다^[4-6].

현재 국내기술 동향 수준은 전동 워터펌프를 구성하고 있는 핵심 부품인 펌프, 모터 및 구동제어기는 각각의 개별 부품으로서 산업

* Corresponding author. Tel.: +82-33-250-6374

Fax: +82-33-259-5551

E-mail address: kbh@kangwon.ac.kr (Byeong Hee Kim).

체에서 제조 판매되고 있지만, 이 모든 부품들이 통합되어 하나의 모듈화(일체화)된 부품으로 양산 자동차에 적용된 사례는 적다^[7].

차세대 친환경 고효율 차량에 핵심적인 전장장치 중 하나인 전동 워터펌프 기술개발 분야에 있어서 수중베어링의 기술개발은 핵심적인 부분이다. 베어링은 운전시간에 따라 서서히 마모가 진행됨에 따라 내구수명을 결정하게 되는 부품이다. 이로 인해 자동차의 수명조건을 만족하기 위해서는 고내구성의 수중베어링 개발이 필수 사항이다^[8].

캔드타입 전동워터펌프에서 일반 베어링의 경우 회전자부가 냉각수에 침수되고 윤활 역할을 하는 오일이 침수됨에 따라 적용이 불가능하다. 이에 따라 수중에서 회전축을 지지하면서 작동하기 위해서는 저널 방식의 무급유 고내구성의 베어링이 요구되며, 이에 수중 베어링의 성능 평가 기준 확립을 위한 베어링 성능 평가 분석이 요구된다.

본 연구에서는 물에 의한 유체 윤활특성이 우수한 탄화규소(SiC)계 재료의 베어링을 이용하여 온도 변화에 따른 토크변화, 소음변화, 마모량 등을 측정할 수 있는 성능시험기를 제작하고 제작된 성능시험기를 통해 탄화규소(SiC)계 재료 베어링의 수중에서의 특성을 분석하고 카본베어링과의 비교를 통하여 수중베어링 성능 평가 기준 확립을 위한 표준화 기반기술에 기여하고자 한다^[9-10].

2. 본 론

2.1 베어링 선정

수중베어링은 동력에 의해서 회전하는 회전축을 지지하고, 회전부의 정적 및 동적 부하, 구성품의 하중 등을 받아, 자체 윤활성을 이용하여 축을 매끄럽게 회전시키는 요소로서, 왕복, 요동 등의 다양한 운동 형태로 힘을 전달하거나 움직여 주는 역할을 하는 장치이며, 수중 상태에서 동작할 수 있는 베어링은 재료 자체의 윤활 특성으로 인해 무급유 상태에서도 구동이 가능하도록 제조되어야 하며, 양산성이 양호하고, 무급유, 자체 윤활특성이 우수한 재료의 특징을 가지고 있어야 한다^[10-11].

따라서 고강도, 고경도, 내마모성 등의 기계적 특성과 함께 우수한 내산화성, 내부식성, 낮은 열전도성 및 열팽창계수에 의한 높은 내열충격성, 고온강도 등의 우수한 열적 특성을 보유한 탄화규소(SiC)계 수중베어링의 샘플 특성은 Table 1에 나타나 있으며(밀도 : 3.16 g/cm³, 열팽창계수 : 4.3 μm/m/°C, 경도 : 2,530 Hv), 선정된 탄화규소(SiC)계 수중베어링은 스러스트부 베어링과 레이부 베어링 두 가지 종류로 나뉘며, 로터의 앞부분에 스러스트부 베어링이 뒤쪽에는 레이부 베어링이 장착되고 레이부 베어링의 안쪽에는 레이부 내부 베어링이 삽입된다. 이에 대한 규격은 Fig. 1에 나타나 있고, 또한 수중베어링 샘플의 실측 사진은 Fig. 2에 나타나 있다.

Table 1 Main function of underwater bearing

Section	Data
Cylindricity	3 μm
Density	3.17 g/cm ³
Coefficient of expansion	3.35 μm/m/°C
Strength	558.3 kgf/mm ²
Hardness	2,530 HV

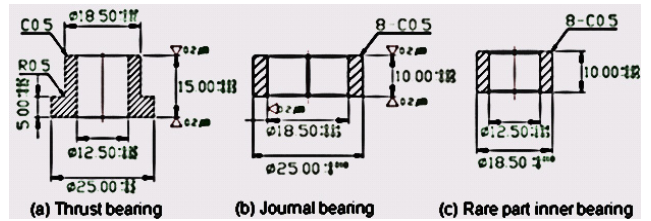


Fig. 1 The dimension of underwater bearing

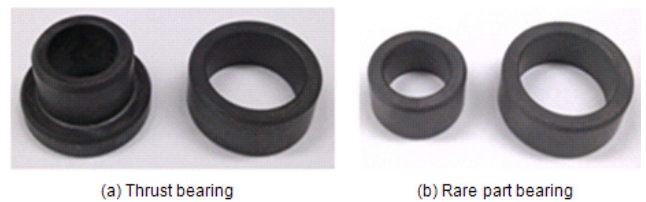


Fig. 2 SiC bearing sample of electric water pump

2.2 설계 및 제작

본 연구에서 개발된 성능시험기는 실제 엔진룸과 유사한 환경으로 탄화규소(SiC)계 수중베어링의 성능시험을 위해 Fig. 3에 나타난 개략도와 같은 완전 밀폐형 액중 시험 장치로 구성되었다. 실제 엔진룸 내부에 위치한 워터펌프는 고부하에서 운전될 때 냉각수의 온도가 150°C 이상 상승하고, 모터 및 임펠러의 회전 속도는 6,000 rpm에 달한다.

베어링 실 작동환경을 구현하고, 로터를 포함한 시험환경을 구현하기 위해서 GSBT System (GUI-based Smart Bearing Testing System)을 구축하였다. 구조물의 재료는 SUS-304를 사용하였고, 수조의 바닥면에는 히터를 장착하여 워터펌프의 주변온도를 150°C 까지 올릴 수 있도록 설계되었다. 성능시험기는 크게 모터부, 수조부, 제어부로 나뉜다. 모터부는 임펠러 부분의 회전 입력을 모사하였고, 전동워터펌프의 실 작동환경을 구현하기 위해 제작되었다. 수조부 내의 온도제어와 베어링의 온도 측정을 위하여 첫 번째 온도 센서는 냉각수의 온도를 모니터링을 하고, 두 번째 온도 센서는 베어링 하우징을 관통하여 베어링 외륜부에 직접 접촉하도록 함으로써 베어링 내구성 시험시 수중베어링의 온도 변화를 측정할 수 있도록 하였다.

또한 수중베어링의 마찰특성을 관찰하기 위하여 10 kgf/cm용량

을 갖는 토크센서(SDSA-10k)를 구동모터와 베어링 간에 장착하여 토크를 측정 할 수 있도록 하였으며, 베어링의 축 구동을 위한 모터(Sanyo, R2AA06020FXH00)를 사용하여 10~6,000 rpm

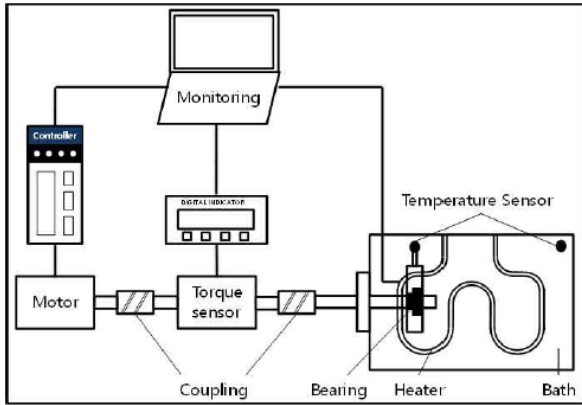


Fig. 3 Schematic of GUI-based smart bearing testing system

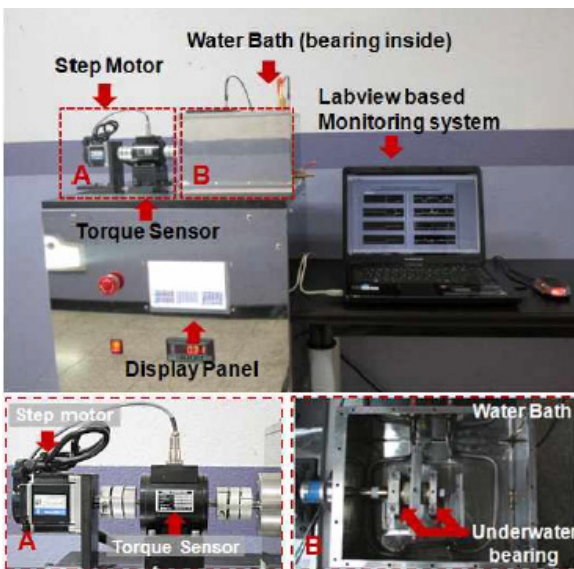


Fig. 4 Underwater bearing test system

Table 2 Main function of bearing testing system

Main function	Unit	Performance
Motor speed	rpm	6,000 (max)
Max. torque	kgf-cm	5 (max)
Torque range	kgf-cm	0~4.5
Temp. measurement	°C	0~300
Water chamber	cm ³	5,670
Heating system	°C	150 (max)
Operating time	hr	>1,000
Automatic stop	-	-
Operation system	Labview	GUI-based
Wear	-	Off-process

까지 구동하였고, 구동부와 베어링 장착부를 분리 할 수 있도록 하였다. 또한 열전도량 최소화를 위해 수조부의 온도가 100°C에 이른 후에 장시간이 지나면 열이 하부구조물을 따라 토크 센서부로 전도되어 열변형 및 센서의 오차를 막기 위해 수조부와 토크센서 중간에 열차단 포켓을 설치하여 열이 전달되는 부분을 차단하였으며, 수조부 양쪽과 토크센서, 모터 사이에 방열판을 설치하여 열을 방출함으로써 토크센서와 모터부로 전도되는 열을 차단하였다.

고온의 냉각수 내에서 수중베어링을 고속으로 안정되게 시험하기 위해서는 상대적으로 매시브(massive)한 베어링과 씰(seal), 모터, 커플링 등이 사용되게 된다. 따라서 수조의 메인 베어링(씰 포함)과 토크센서 간에 러버 커플링을 설치하여 모터와 토크센서의 영향을 차단하여 성능시험기의 신뢰성을 높였다. 이러한 성능시험기의 외관 형상은 Fig. 4와 같이 구성 되어 있으며, Table 2에는 성능시험기의 주요 기능들을 나타내고 있다.

2.3 제어 및 모니터링

제어 및 모니터링은 터치패드 방식의 모니터링/셋업 패널(HNC (주)-IEC266-7-일체형 산업용 임베디드 컴퓨터)을 설치하여 온도, 토크 회전수를 측정 및 모니터링 할 수 있도록 하였고, 다양한 성능 시험기법 셋팅이 가능하도록 제작하였다. 또한 측정된 데이터는 Labview를 통한 모니터링이 가능하도록 Labview와 PC를 연동하여 측정된 데이터를 지속적으로 PC에 저장할 수 있도록 하였고, 성능시험기가 가동하고 있을 때, 실시간으로 4가지 항목의 데이터(모터속도, 토크, 냉각수 온도, 베어링 외관온도)를 관찰할 수 있도록 제작하였다. 내구성 시험을 위한 베어링의 작동은 LCD패널 화면의 터치만으로 제어할 수 있도록 구성하였으며, 시간, 모터의 작동모드, 히터의 on/off의 제어를 통해 측정 데이터를 획득, 확인할 수 있도록 Fig. 5와 같이 구성하였다. Control part system에서 첫 번째는 토크, 두 번째는 냉각수의 온도, 세 번째는 베어링 외관부 온도를 실시간으로 나타내어 준다. GSBT 시스템을 통해 PC로 전달되는 모니터링 데이터는 약 1~2%의 오차를 보이고 있다. 이



Fig. 5 Control part of bearing testing system

는 센서의 전압을 통해 데이터를 받아오는 과정에서 프로브의 저항에 따른 오차 값으로 추정되며, 수정이 가능하다.

2.4 베어링 성능시험 기준 선정

수중베어링의 특성을 분석하기 위한 실험방법으로는 마찰계수 측정, 소음 측정, 마모량 계측을 실시하였다. 마찰계수 측정은 구동 모터와 베어링 간에 토크센서를 장착하여 수중 저널 베어링의 마찰계수를 측정, 평가하였고, 베어링의 연속구동에 따른 온도변화를 관측하여 간접적인 마찰특성을 분석하였다. 소음측정은 베어링의 성능 및 이상 현상을 확인하기 위한 방법으로 소음을 측정하여 분석하는 방법을 사용하였다. 베어링에서 발생한 소음을 마이크로폰과 심포니시스템을 통해 측정하여 마모, 파손등과 같은 현상을 규명하고자 하였다.

마모량 계측은 정속 내구시험 500시간 이상, 변속내구시험 100시간 수행 후 중량과 직경감소분을 off-process상에서 측정하였다. 내구시험의 경우 탄화규소(SiC)계 수중베어링과 카본베어링을 비교함으로써 수중베어링의 성능을 검증 하였다. 앞서 제시한 조건을 이용하여 성능 검증을 진행하였고 베어링 성능시험 기준으로 적용하였다.

2.5 성능 시험

수중베어링 성능시험은 크게 무부하 토크 측정, 냉각수 온도와 모터의 회전속도에 따른 베어링 온도 변화 특성, 냉각수 온도에 따른 토크 변화와 내마모 측정으로 나뉜다. 무부하 토크 측정 방법은 수중베어링과 로터, 냉각수가 제거된 시험기에 1,000, 3,000, 6,000 rpm으로 각각 10분씩 총 3번 측정하여 얻은 데이터의 평균값으로 하였다. 측정결과 rpm값과 상관없이 거의 일정한 0.0492 kgf·cm을 나타내었다.

시간에 따른 베어링 온도 변화를 측정하기 위해 수중베어링을 설치 한 후에 냉각수 온도를 상온(30°C), 50°C, 100°C의 온도로 변화시키면서 베어링 온도 변화를 측정하였으며, 1,000, 3,000, 6,000 rpm으로 10분씩 구동시켰다. 냉각수 온도에 따른 토크변화 측정은 히터의 가열을 하지 않고 냉각수의 온도가 상온(30°C)일 때 시간과 회전속도에 따라 변화하는 토크의 특성을 측정하였다. 토크 측정은 측정평균에서 무부하 토크를 뺀 값을 책정하였다.

소음 측정은 마이크로폰을 시험기 수조부 중심으로부터 15 cm 거리에 떨어진 곳에 위치시켜 측정하였으며, 회전속도를 1,000, 2,000, 3,000 rpm으로 하여 베어링을 구동시켰을 때의 실험 측정값에 암소음 측정값(27dB)을 뺀 결과를 책정 하였다.

내마모 측정은 수중베어링의 경우 500시간, 카본 베어링의 경우 70시간을 가동하여 가동 전과 후의 무게를 측정하여 내마모성을 확인하였다.

가혹 조건 시험의 경우, 상온에서 모터속도 1,000과 6,000 rpm을 한 시간 간격으로 변화를 주어 100시간 연속 구동 하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 캔드타입 전동 워터펌프 제조를 위한 고내구성 수중베어링의 성능시험기를 제작하고 다양한 성능시험을 통한 탄화규소(SiC)계 수중베어링과 카본베어링을 비교하여 수중베어링의 특성을 분석하였다.

실제 구동환경을 구현하기 위하여 온도 및 모터의 속도를 제어하였고, 모터의 속도를 다양하게 변화시키면서 수중베어링의 내구성을 테스트 할 수 있도록 시험기의 설계 및 제작을 하였다. 기본적인 성능시험기의 모터속도를 1,000, 3,000, 6,000 rpm으로 점진적으로 증가시켰고, 100°C의 냉각수 온도에서 탄화규소(SiC)계 수중베어링을 사용하여 실험을 수행하였다. 베어링의 온도는 약 30분 정도 경과해야 주변온도와 일치하므로 초기안정화 시간을 30분으로 하였다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 냉각수 온도에 따른 베어링 온도 변화와 시간과 회전속도 변화에 대한 소음측정을 하였다. 냉각수의 온도가 상온(30°C), 50°C, 100°C일 때 모터의 작동에 따라 베어링의 구동마찰에 의해 냉각수보다 베어링의 온도가 높게 나타나며, 베어링의 구동마찰로 인해 상온에서는 베어링 온도가 냉각수 온도보다 1.3°C 높게 나타났고, 50°C, 100°C일 때는 0.6°C 높게 나타났다. 이는 회전속도와 관계없이 일정한 것을 확인하였으며, 회전속도의 변화에 따라 베어링의 온도 변화는 없는 것으로 확인되었다. 또한 상온(30°C)에서 구동시킨 베어링의 온도변화 그래프에 비하여 가열된 냉각수에서 구동된 베어링의 온도는 상대적으로 변동이 커지는 것이 관찰 되었는데 이는 수중베어링계의 회전에 의한 냉각수의 순환 때문인 것으로 판단된다.

냉각수 온도에 따른 베어링 토크 변화는 히터를 가열 하지 않고 냉각수의 온도가 상온(30°C)일 때 측정하였다. Fig. 7는 냉각수 온도를 30°C, 50°C, 100°C로 증가시키면서 회전속도에 따라 변화하는 토크의 특성을 측정한 그래프다. 수중베어링계에서 발생하는 고유의 토크 값을 얻기 위하여 3회 실험한 측정 토크 값에서 무부하 토크를 뺀 값으로 평균하여 나타내었다. 1,000, 3,000, 6,000 rpm 일 때 베어링 토크 값은 각각 0.151, 0.36, 0.726 kgf·cm로 회전속도가 증가함에 따라 비례적으로 증가하는 것을 확인하였다. 회전속도가 1,000, 3,000, 6,000 rpm으로 증가함에 따라 베어링 토크 값은 50°C의 경우 0.107, 0.25, 0.483 kgf·cm, 100°C의 경우 0.042, 0.133, 0.314 kgf·cm으로 비례적으로 증가하는 결과를 확인하였다. 한편 온도별 그래프를 비교해보면 냉각수의 온도가 증가함에 따라(베어링 온도도 비례적으로 증가) 베어링 토크 값이 감소

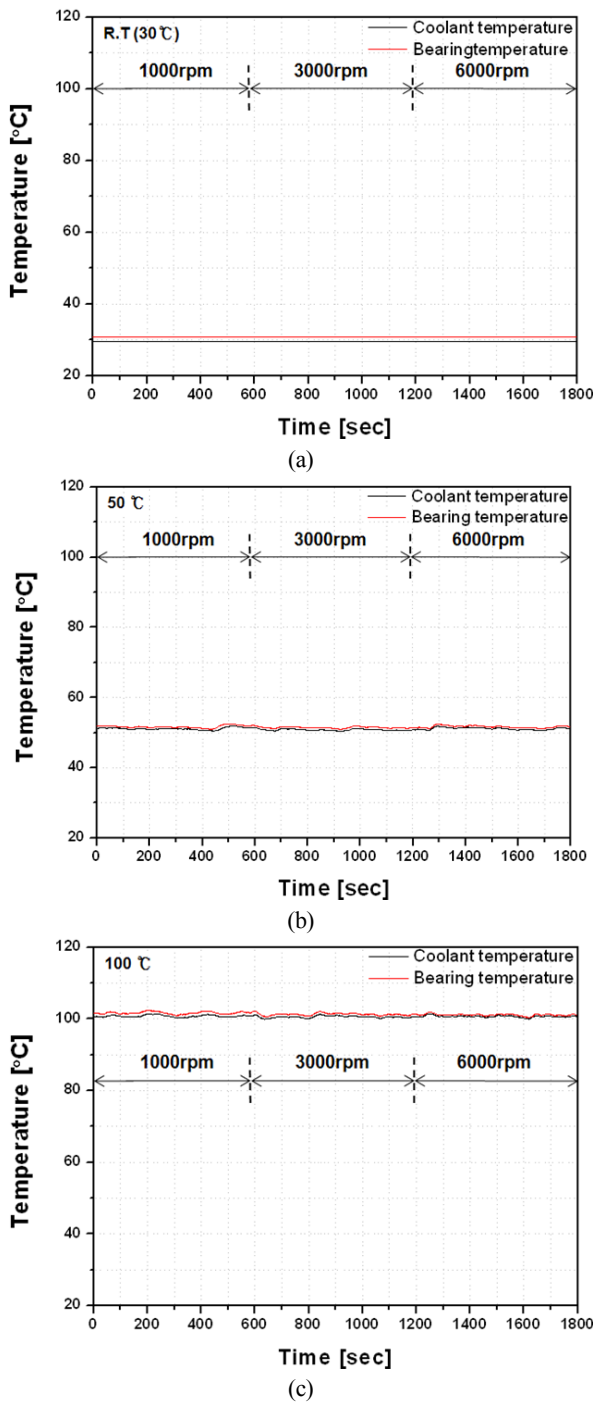


Fig. 6 Coolant temperature with respect to motor speed on SiC bearing; (a) coolant temperature of 30 °C, (b) 50 °C, (c) 100 °C

하는 결과를 확인하였다. 이는 온도의 증가에 따라 냉각수의 점도가 낮아짐에 따라 베어링 간극 사이 유체의 전단저항이 감소하여 토크값이 감소한 것으로 보이며, SiC계의 전형적인 수중 윤활특성도 온도증가에 따라 향상되는 것으로 판단된다.

Fig. 8는 1,000, 2,000, 3,000 rpm으로 탄화규소(SiC)계 수중

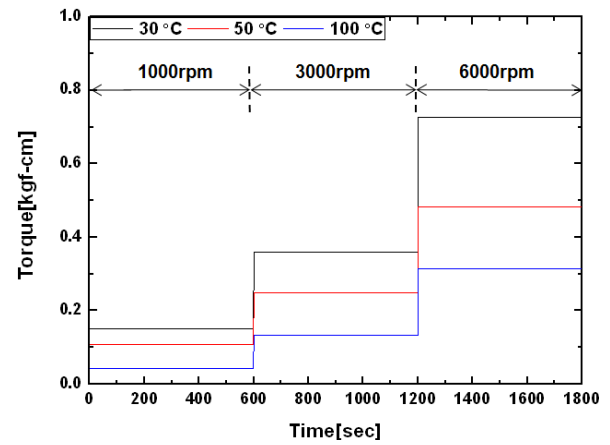


Fig. 7 Torque with respect to motor speed on SiC bearing; coolant temperature of 30 °C, 50 °C, 100 °C

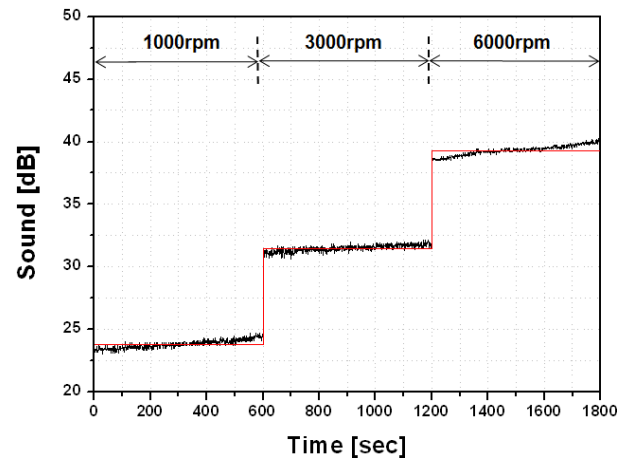


Fig. 8 Sound with respect to motor speed on SiC bearing

베어링을 구동시켰을 때의 측정평균값에서 암소음 측정값 (27 dB) 을 뺀 값으로 소음 측정값을 나타낸 그래프이다. 1,000, 2,000, 3,000 rpm에서 각각 23.805, 31.48, 39.315 dB의 결과를 나타내었다.

탄화규소(SiC)계 수중베어링의 단속적인 회전속도 변화에 의한 토크측정을 통해 가속시험을 수행하였다. Fig. 9는 모터 속도 1,000과 6,000 rpm을 한 시간 간격으로 변화를 주어 100시간 연속 구동한 결과이다. 또한 냉각수 온도는 상온(30°C)에서 수행하였다. 100시간 동안 일정한 토크를 유지함으로써 베어링의 장시간 연속 구동 테스트를 수행할 수 있음을 확인하였고, 신뢰성을 검증하였다.

카본베어링의 단속적인 회전속도 변화에 의한 가속 시험 토크 측정 그래프는 Fig. 10에 나타나 있으며, 그 결과, 회전속도가 각각 1,000, 3,000, 6,000 rpm일 때, 카본베어링의 토크값은 각각 0.015, 0.171, 0.336 kgf·cm로 회전속도의 증가에 따라 토크 값도 함께 일정하게 증가하였다. 또한 카본베어링의 회전속도 변화에 따른 카본베어링과 냉각수의 온도변화를 시간에 따라 측정한 결과는

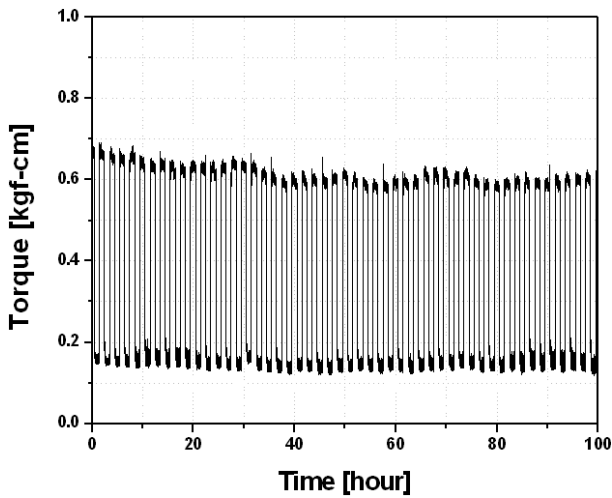


Fig. 9 100 hour testing in abrasion test on SiC bearing

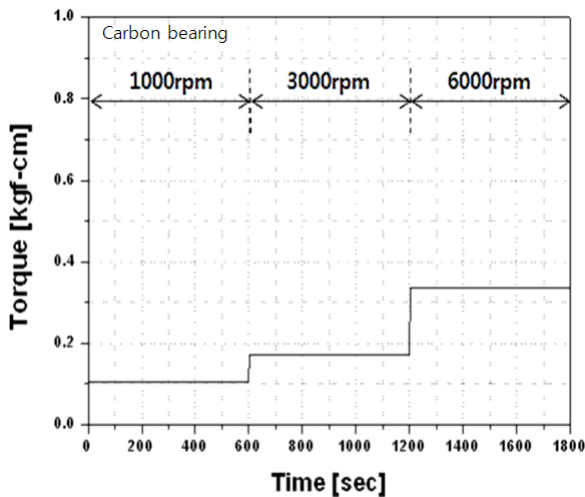


Fig. 10 Torque with respect to motor speed on carbon bearing

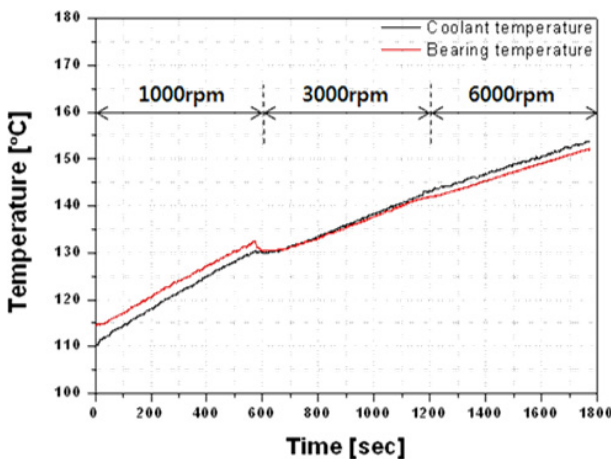
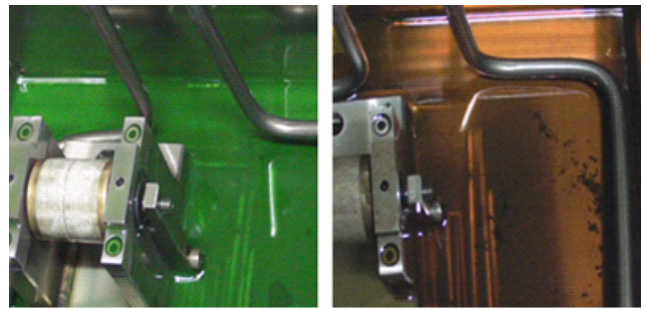
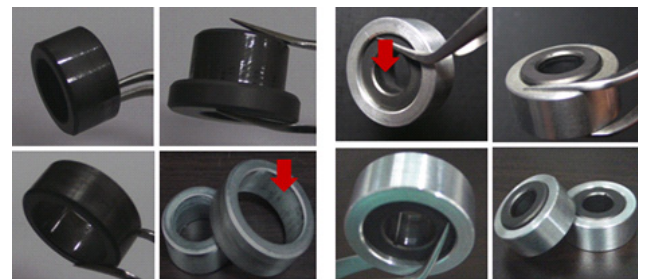


Fig. 11 Coolant temperature with respect to motor speed on carbon bearing



(a) SiC bearing (b) Carbon bearing

Fig. 12 Observation of coolant after bearing test at 100°C



(a) SiC bearing (b) Carbon bearing

Fig. 13 Observation of bearings appearance after test at 100°C

Fig. 11에 나타나 있으며, 카본베어링의 온도는 SiC 베어링의 결과와 상이하게 구동 직후부터 온도가 지속적으로 상승하는 결과를 보이고 있다.

탄화규소(SiC)계 수중베어링의 우수성을 검증하기 위해 카본베어링과 내마모성을 비교한 결과, 수중베어링의 경우 1,000과 6,000 rpm으로 한 시간 간격으로 변화를 주어 500 시간 연속 구동하였고, 카본베어링의 경우에는 같은 조건으로 70 시간 연속 구동하였다. 그 결과 Fig. 12에서 보는 바와 같이 (a) SiC 베어링의 경우 냉각수의 본래 색인 초록색을 유지하는 반면, (b) 카본베어링의 경우에는 70 시간 밖에 작동 시키지 않았음에도 불구하고 수조 바닥면에 카본베어링의 마모로 인해 발생한 다량의 침전물로 원래 냉각수의 색인 초록색이 아니라 어두운 색으로 변한 것을 확인할 수 있었으며, 냉각수도 열화학적인 영향을 받아 본래의 색을 잃고 갈색으로 변화된 것을 확인하였다.

Fig. 13는 (a) SiC 베어링과 (b) 카본베어링의 실험 후 외관 측정 모습이다. 사진에서 보는 바와 같이 베어링 안쪽에 마모흔을 확인할 수 있었으며, 베어링의 마모량을 확인하기 위해 높이와 내경 그리고 외경을 측정된 결과 탄화규소(SiC)계 수중베어링의 높이와 내경 그리고 외경은 평균 0.02 mm 이하의 감소율을 보였다. 이는 외란에 의한 단속적 마모나 낮은 동압이 원인이나 그 양이 미세한 반면, 카본베어링의 경우 표면에 넓은 영역에 걸쳐서 마모흔이 발생함을 확인하였다. 또한 측정 전과 후의 베어링의 무게를 비교한

결과 SiC 베어링의 경우 약 6.25 mg인 반면에 카본베어링의 경우 약 228.6 mg으로 카본베어링이 약 37배 더 많은 마모량을 보이는 것을 확인하였다. 이 결과로 보았을 때 탄화규소(SiC)계 수중베어링이 카본 베어링 보다 내마모성이 더 우수하다는 것이 증명되었다.

4. 결론

본 연구에서는 물에 의한 유체 윤활특성이 우수한 탄화규소(SiC)계 재질의 베어링을 이용하여 온도 변화에 따른 토크변화, 소음변화, 마모량 등을 측정할 수 있는 성능시험기를 제작하고 제작된 성능시험기를 통해 탄화규소(SiC)계 재질 베어링의 수중에서의 특성을 분석하고 카본베어링과의 비교 하였다.

실험은 마찰계수 측정, 소음측정, 마모량 측정, 내구성 실험을 하였다. 마찰계수 측정은 구동모터와 베어링 간에 토크센서를 장착하여 마찰력을 간접적으로 측정하였고 베어링의 연속구동에 따른 온도변화를 관측하여 마찰력 변화 영향을 분석하였다. 소음측정은 베어링의 성능 및 이상 현상을 확인하기 위하여 마이크로폰과 심포니 시스템을 이용하여 주기적으로 소음을 측정하였다. 마모량 측정은 정속 내구시험 500시간 이상, 가혹내구시험 100시간 수행하여 내구시험 후 증량과 직경감소분을 off-process 상에서 측정하였다.

토크 측정결과 냉각수의 온도가 증가함에 따라(베어링 온도도 비례적으로 증가) 베어링 토크 값이 감소하는 결과를 확인하였다. 이는 온도의 증가에 따라 냉각수의 점도가 낮아짐에 따라 베어링 간극 사이 유체의 전단저항이 감소하여 토크 값이 감소한 것으로 보이며, SiC계의 전형적인 수중 윤활특성도 온도증가에 따라 향상되는 것으로 판단된다. 카본베어링의 토크가 약 7~29% 높게 나타났고 고온의 수중에서의 윤활특성은 SiC 베어링이 카본베어링에 비하여 상대적으로 우수함을 확인하였다.

소음 측정결과 1,000, 2,000, 3,000 rpm으로 탄화규소(SiC)계 수중베어링을 구동시켰을 때 각각 23.805, 31.48, 39.315 dB의 결과를 나타내었다.

냉각수 온도 변화에 따른 베어링 온도 변화 특성 결과 냉각수 온도 30℃는 냉각수보다 베어링의 온도가 1.3℃ 높게 나타났고, 50℃와 100℃의 경우 냉각수보다 베어링의 온도가 0.5~0.6℃ 높게 나타났다. 냉각수 온도는 rpm 증가와 무관하게 온도가 유지됨을 확인하였다.

SiC 베어링의 가혹조건 시험결과 장시간 연속 구동하였을 때 일정한 토크를 유지함으로써 신뢰성을 검증하였다.

내구성 측정결과 SiC 베어링의 경우 500시간 연속 동작하였고 카본베어링의 경우 70시간 연속 동작하였다. 실험결과 수조 바닥면에 카본베어링의 마모로 인해 발생한 다량의 침전물을 확인하였고, 베어링 연속 동작 이후 냉각수는 열 화학적인 영향을 받아 본래

색을 잃고 변색된 것을 확인하였다. 하중측정을 통한 마모량 또한 카본베어링의 마모량이 SiC 베어링의 마모량보다 약 37배가량 더 많이 보임을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 수중베어링 성능시험기를 설계하고 제작하였으며 SiC 베어링과 카본베어링의 비교를 통하여 SiC 베어링의 우수성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20134030200240)이며 이에 감사드립니다.

References

- [1] Ko, K. H., 2010, A Study on Reduction of Fuel Consumption by Displaying Fuel Injection Data for Drivers, Trans. of KSAE 18:4 115-120.
- [2] Lee, D. E., Hwang, I. G., Jeon, D. I., Park, S. S., 2008, Development and Optimization of the Hybrid Engine System Model to Improve the Fuel Economy, Trans. of KSAE 16:6 65-73.
- [3] James T. Allison., viewed 15 March 2007, Design Optimization Model for an Automotive Electric water Pump, <<http://ode.engin.umich.edu/repository/TR2007.Allison.pdf>>
- [4] Yang, H. C., Yoon, T. J., Hong, N. P., Kim, B. H., and Kim, B. H., 2011, Performance Test System of Underwater Bearing based on Labview, Conference of the Korea Society of mechanical Engineers, Korea, 418-420.
- [5] Pierberg Pump Technology GmbH., viewed 2009, Electric coolant pumps-Always at the correct temperature, <<http://www.kspg.com>>.
- [6] Park, Y. J., Chung, S. C., 1997, Analysis and Optimal Design of Axial Magnetic Bearings, Conference of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Korea, 278-283.
- [7] Joachim, G., Jürgen, H. T., and Claude, W., 1999, Inside the Canned Motor Centrifugal Pump, World Pumps 1999:396 58-61.
- [8] Park, I. K., Kim, H. J., Hong, N. P., Park, D. Y., Seo, Y. H., Kim, B. H., 2012, Characteristic Analysis of Underwater Bearing for Canned Type Electric water pump, Conference of the Koean Society for Precision Engineering, Korea 737-738.
- [9] Calum, S., 2004, Considerations for a Canned Motor Pump, World Pumps 2004:459, 22-25.
- [10] Hirao, A., Shibuya, Y., Sekine, M., and Takayama, A., 2011, Evaluations of Ceramic Bearings Used in Electric Water Pumps, Tribology Online 6:1 71-75.

- [11] Kim, D. S., Kang, S. Y., Hong, N. P., Yang, H. C., Kim, B. H. 2011, Optical Shape Design of underwater Bearing for Canned Motor Pump, Conference of the Korea Society of mechanical Engineers Korea, 447-450.
- [12] Seong, S. M., 2010, Numerical Study on the Flow Through the Hydrostatic Bearing for a Rocket Engine Turbopump, Trans. Of the KSME 92-99.