

저속 고토크 가혹감속기의 저비용 테스트 시스템 개발에 관한 연구

A Study on the Low Cost Testing System Development of the Low Speed and High Torque Harsh Reducer

박태현^{1*}

Taehyun Park^{1*}

〈Abstract〉

The goal of this research is to verify a performance test system for a low speed, high torque, and harsh reducer at low cost. The reducer rotates a cooling fan with a diameter of 10 meters, in a high temperature (50°C) cooling tower in a geothermal power plant. It requires about 500 $\text{kgf}\cdot\text{m}$ torque and 47.75 kW power to rotate the fan at a maximum power condition. An expensive dynamometer is commonly used for performance test of a motor or a reducer. In this paper, a low cost system is developed using a hydraulic pump as a load unit to generate torque instead of a dynamometer. We accurately calculated the required power, the flow meter, and the pressure of the pump, and selected to design and optimize the system at minimal cost. The system also applied another reverse reducer and a gearbox to increase the rotational speed and to reduce the torque from the low speed and high torque target reducer. This allows low-cost systems to be built using inexpensive components. The developed system was able to successfully measure the high torque and the low rotational speed of the target reducer at high temperature.

Keywords : *Reducer, Testing System, High Torque*

^{1*} 정회원, 박태현, 경남대학교 기계공학부, 부교수
E-mail: taehyun@kyungnam.ac.kr

^{1*} School of Mechanical Engineering, Kyungnam. University

1. 서 론

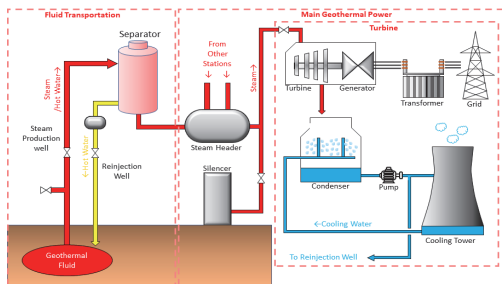
세계적으로 청정 그린 에너지에 대한 수요와 요구는 점차 확대되고 있으며 지열발전은 그 중 하나의 대체 에너지원으로 활용되고 있다. 우리나라의 지열발전은 그 규모와 발전량이 타 발전에 비해 약한 상황이나 다른 나라에서는 점차 그 활용도와 중요도가 높아지고 있다[1]. 세계 각국의 정부는 에너지 수입의존도 완화, 전력수요 충족, 전력공급 안정성 강화 등을 위해 발전용량 확대 및 전력믹스 다원화를 추진하고 있으며 그 중 지열 발전량이 매년 꾸준히 증가하는 추세이다. Fig. 1은 지열발전소의 기본적인 원리와 냉각탑을 보여주고 있다. 본 연구에서는 지열 발전에 사용되는 냉각탑의 송풍기용 감속기에 대한 개발과 그 감속기의 성능을 검증하기 위한 테스트 시스템 개발에 대한 연구이다.

지열발전은 주변의 온도가 높은 경우가 많으며

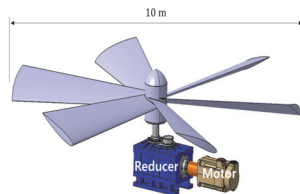
냉각탑의 송풍기에 사용되는 감속기는 고온의 주위 환경(최고 50℃)에서 정상적으로 운용되어야 하며 응축기를 냉각하는 대형 팬을 구동시키기 위해 큰 토크를 받게 된다[3]. 본 연구에서 개발한 감속기는 터키 지열발전소의 냉각탑에서 사용하게 되는 송풍기용 감속기이다[4]. 본 감속기는 지름 10 m, 최고 93 rpm 수준으로 회전하는 대형 송풍기 날개에 사용되며 이때 감속기 내부의 기름온도는 최대 120℃ 까지 도달할 수 있다. 또한, 송풍기 팬을 구동하기 위한 최고 토크는 500 kgf·m에 달하게 된다.

일반적으로 모터 또는 감속기의 성능테스트는 다이내모미터를 사용하여 측정이 가능하다. 다이내모미터는 소형에서부터 수백 kW에 이르는 다양한 범위로 제작이 가능하지만 높은 동력을 측정할 수 있는 다이내모미터의 경우 제작 비용이 억대에 이르고 있다[2]. 본 연구에서는 최소한의 비용으로 가혹조건에서 50 kW 이상의 동력전달을 요구하는 감속기와 그 감속기의 성능을 테스트 할 수 있는 시스템을 개발했다. 본 연구를 통하여 개발한 감속기 시험 시스템에 요구되는 특성은 다음과 같다.

1. 주위 온도 50℃ 시험 환경 및 측정 가능
2. 감속기 내부온도 120℃ 까지 측정가능
3. 최대 500 kgf·m 까지 토크 조절 및 측정 가능
4. 최고 93 rpm까지도 조절 및 측정 가능
5. 동력 제어 및 측정 가능
6. 최고 동력상태에서 24시간 이상 측정



(a)



(b)

Fig. 1 (a) Concept of geothermal power plant, (b) Cooling fan with reducer and motor in the cooling tower

2. 가혹 감속기 및 테스트 시스템 설계 및 제작

2.1 감속기 제원

가혹감속기는 외부온도 50℃에서 최대 55 kW의 모

터 출력을 1:16의 비율로 감속하도록 설계되었다. 기어의 재질은 SCM415이며 케이스의 재질은 FCD450을 사용하였다. 감속기 내부에는 고하중용 극압첨가제를 포함하는 합성기어유인 Syngear SCL 220 윤활유가 사용되었으며 150°C에서도 사용가능한 실리콘 재질의 씰링 오링을 사용하였다. 또한, 감속기내 국부적 온도 상승을 방지하기 위하여 강제윤활 펌프를 내부에 포함하고 있으며 오일의 온도를 측정하기 위하여 온도계를 설치할 수 있다.

Fig. 2에는 감속기의 외부와 스파이럴 베벨기어를 포함하는 내부 설계 도면을 보여주고 있다.

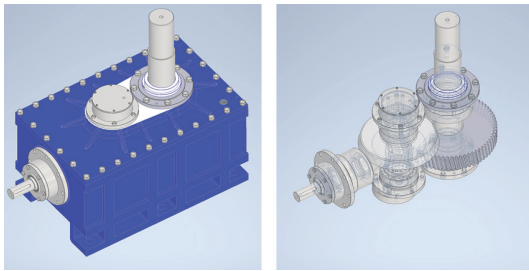


Fig. 2 Design of the reducer outside and inside with spiral bevel gear and gear set

2.2 가혹감속기 테스트 시스템 특성 및 저비용 제작 방향

감속기의 가혹환경 테스트를 위해 실제 냉각탑 송풍기를 사용하는 것은 블레이드의 제작에 고비용이 요구되며 지름 10 m의 날개를 포함하는 시험공간의 확보와 설치가 어렵다. 또한, 고온의 환경조건을 제공하기 어려우며 토크를 컨트롤하기 어렵다. 본 연구에서는 유압 브레이크 시스템을 사용하여 실제 상황과 동일한 환경을 인가하는 감속기 테스트 시스템을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 감속기 테스트 시스템은 감속기 출력의 회전속도를 증대시키고 토크를 감소시켜 저비용의 토크센서와 저비용의 유압 부품들을 사용하여 최소한의 비용으로 가혹감속기 테스트 시스템을 제작할 수 있었다.

본 연구에서 사용되는 500 kgf·m의 토크를 측정할 수 있는 다이내모미터를 제작하기 위해서는 수억 원의 비용이 수반되며 동일 토크를 측정하기 위한 토크센서 또한 수천만을 능가할 것으로 예상

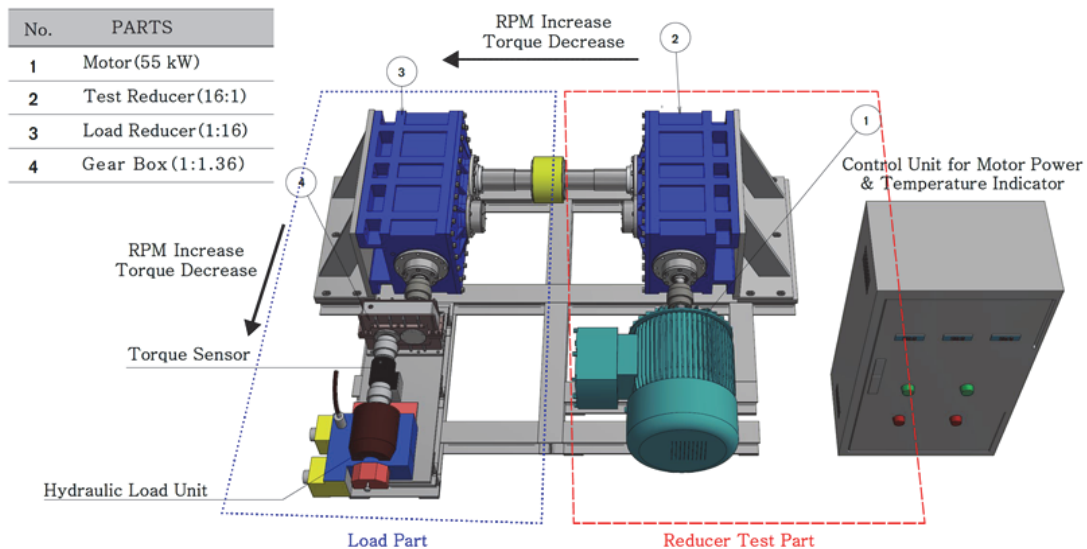


Fig. 3 Concept of reducer testing system

된다. 본 연구에서 개발한 감속기 테스트 시스템은 유압펌프의 압력을 조절하여 감속기의 토크 컨트롤을 용이하게 할 수 있었다. 또한, 입력축 대비 최종 출력축의 낮은 토크로 인하여 비교적 저비용의 유압 브레이크 요소부품을 사용하여 다이 나모미터 대비 약 10% 정도의 최소한의 비용으로 시스템을 구성할 수 있었다. 감속기 주위 온도와 내부 온도를 측정하기 위한 온도계를 설치하였으며 외부온도 50℃를 조성하기 위하여 감속기가 있는 공간은 분리하여 히터를 설치하였다.

Fig. 3에는 가혹감속기 테스트 시스템의 구성도를 보여주고 있다. 전기모터로부터 테스트 감속기를 거쳐 역방향 감속기와 기어박스를 거쳐 유압펌프에 동력이 전달되며 이 과정에서 회전속도의 증가와 토크의 감소가 수반된다. 본 시스템에 사용된 테스트 감속기의 감속비는 16:1이며 회전속도 증대를 위한 역방향 감속기의 증속비는 1:16, 기어박스의 증속비는 1:1.36이다. Reducer Test Part로 표기되어 있는 빨간색 점선 부분은 감속기 테스트 파트이며 Load Part로 표기되어 있는 점선 부분은 감속기에 토크를 인가하기 위한 부하 파트이다.

2.3 가혹감속기 테스트 시스템 설명 및 동력 이론값 계산

송풍기 작동에 필요한 동력을 계산하여 모터를 선정하였다. 송풍기를 가동하는데 소요되는 감속기의 최대 출력은 간단히 다음과 같이 계산된다.

$$Power_{max} = T_{max} \times N_{max} \quad (1)$$

여기서, $Power_{max}$ 은 송풍기 가동에 필요한 최대 동력, T_{max} 는 송풍기의 최대토크, N_{max} 은 송풍기의 최대 회전속도를 나타낸다. 송풍기의 최대토크 500 kgf·m, 최대 회전속도는 93 rpm을 대입하면

송풍기의 소요 최대 입력동력은 47.75 kW이며 또한 테스트 감속기(감속기1)의 최대 출력동력이다.

본 연구에서 사용된 전기모터는 TECO사 최대 55 kW의 3상 모터이며 세부 사양은 50 Hz, 최대 1485 rpm, 최대 전압 400 Volts, 최대효율 95%, 최대 전류 97.2 Amp 이다. 이는 감속기1의 최대 소요 동력보다 높으므로 테스트 시스템 구성에 필요한 조건을 만족한다. 모터의 회전수를 조절하기 위하여 모터 컨트롤 유닛의 가변주파수 드라이브를 사용하였으며 감속기1에 토크를 인가하기 위하여 유압펌프의 압력을 조절하였다.

감속기 부하 테스트 이론값은 다음과 같이 도출하였다. 감속기1(감속비 16:1)의 출력축 최대 회전수는 93 rpm이며 부하 감속기(감속기2, 증속비 1:16)와 기어박스(증속비 1:1.36)를 통하여 유압펌프 입력축의 최대 회전수는 다음과 같이 계산된다.

$$N_{Pump} = N_{fan} \times IR_{16} \times IR_{1.36} \quad (2)$$

여기서, N_{fan} 은 쿨링팬의 분당 회전수이며 IR_{16} 은 감속기2의 증속비, $IR_{1.36}$ 은 기어박스의 증속비를 나타낸다. 따라서, 펌프 입력축의 최대 분당 회전수 N_{pump} 는 약 2023 rpm 이다.

감속기1의 출력동력이 커플링1, 감속기2, 커플링2, 기어박스, 커플링 등을 지나 유압펌프의 입력축에 전달되는 동력은 다음의 공식으로 계산된다.

$$Power_{pump} = Power_{rd1} \times \eta_{rd2} \times \eta_{gr} \times \eta_{cp123} \quad (3)$$

여기서, $Power_{pump}$ 은 유압펌프의 입력동력이며 $Power_{rd1}$ 은 감속기1의 최대 출력동력, η_{rd2} 는 감속기2의 효율, η_{gr} 은 기어박스의 효율, η_{cp123} 은 커플링들과 기타 손실의 효율을 나타낸다. 따라서, 감속기1의 최대 출력동력을 기준으로 감속기

2(1:16, 효율 88%), 기어박스(1:1.36, 효율 95%), 커플링(효율 95%) 등을 지나 최종 출력축에 작용하는 출력은 약 34.2 kW로 예상된다.

유압펌프의 토크는 다음 식으로 계산된다.

$$T_{pump} = \frac{Power_{pump}}{N_{pump}} \quad (4)$$

따라서, 유압펌프의 입력축 토크 T_{pump} 는 약 161 Nm ($\approx 16.4 \text{ kgf}\cdot\text{m}$)로 계산되며 이론 토크 값은 실제 테스트의 토크 값에 근접할 것으로 예상된다.

2.4 가혹감속기 테스트 시스템의 핵심부품 선정

유압펌프를 선정하기 위하여 유압펌프의 입력 토크와 회전속도에 맞추어 행정체적과 최대압력을 다음과 같은 식으로 고려하였다.

$$T_{pump} = P \times V_P \quad (5)$$

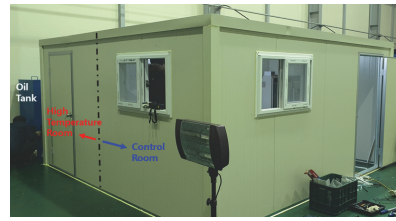
여기서, P 는 펌프의 압력, V_P 는 행정체적을 나타내며 본 연구에서는 저비용의 테스트 시스템 구축을 목적으로 행정체적 $100 \text{ cm}^3/\text{rev}$ 의 기어펌프를 선정하였다. 펌프의 효율을 100%인 펌프로 가정한다면 펌프의 최대압력은 약 10 MPa로 계산된다. 따라서, 행정체적 $100 \text{ cm}^3/\text{rev}$ 크기의 최대압력 10 MPa 이상의 표준 구매품 중 가격을 고려하여 유압펌프는 아세다사의 SAP50-100(싱글 오일 기어펌프, Displacement $100 \text{ cc}/\text{rev}$, $P_{max} = 175 \text{ kgf}/\text{cm}^2$, $N_{min} = 600 \text{ rpm}$, $N_{max} = 2500 \text{ rpm}$, Input Power = 84.7 kW)를 선정하였다.

또한, 펌프의 최대유량은 다음과 같은 식으로 계산된다.

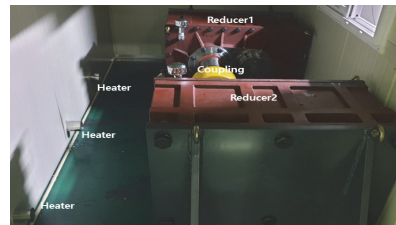
$$Q_{pump} = N_{pump} \times V_P \quad (6)$$

여기서, Q_{pump} 는 펌프의 최대유량으로 약 202 lpm으로 계산된다.

유압 시스템의 최대 압력(10 MPa)과 최대 유량(202 lpm)을 고려하여 유량조절밸브는 YUKEN사의 FG-03-125-N-30(Max Flow = 125 lpm,



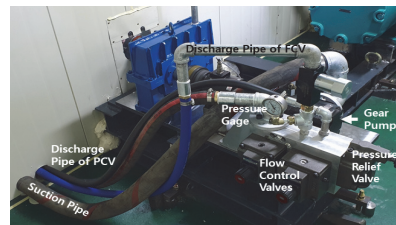
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4 Units of reducer test system with (a) Environmental chamber, (b) Reducers in the high temperature room, (c) Hydraulic load unit, gear box, torque meter, coupling, and motor in the control room, and (d) Main components of the hydraulic load unit

$Min\ Flow = 0.2\ lpm$, $P_{max} = 21\ MPa$) 2개를 병렬로 사용하여 펌프의 부하를 조절하였다. 또한, Pressure Relief Valve는 Yuken사의 BG-06-32(Pilot Operated Relief Valves, $P_{max} = 25\ Mpa$, $Max\ Flow = 200\ lpm$)을 선정하였고 Torque Transducer는 Sesntech사의 SBS-20K를 선정하였다.

실제 테스트에서는 모터는 최대 동력으로 운행하면서 감속기의 부하를 가중시키기 위하여 모터의 회전속도를 약간 줄이고 유압펌프의 압력을 높여서 감속기의 부하를 증대시켜 실험을 진행하였다.

고온 환경의 적용을 위해 감속기가 설치되는 냉각탑 주변의 환경 온도가 최대 $50^{\circ}C$ 이므로, 동일한 조건을 위해 2중 구조 판넬의 환경 챔버를 제작하여 감속기 및 유압시스템 등을 설치하였다. 환경챔버 내부는 열풍기를 사용하여 $50^{\circ}C$ 환경을 유지하는 고온실과 실온을 유지하는 제어실로 분리되어있다. 고온실은 감속기1과 감속기2가 설치되어 있으며 제어실에는 모터 및 유압 시스템 등이 설치되어 있다. 테스트 시스템의 환경챔버, 고온실의 감속기들, 컨트롤실의 모터와 유압 시스템들은 Fig. 4에 보여주고 있다. 모터의 출력축과 감속기1의 입력축, 그리고 감속기2의 출력축과 기어박스 입력축은 고온실과 제어실을 통과하여 동력을 전달한다.

3. 가혹감속기 테스트

가혹 감속기 테스트 시스템 작동 방법은 다음과 같다. 가혹 감속기의 테스트를 위해서 환경챔버 내 고온실의 히터를 가동하여 $50^{\circ}C$ 이상으로 유지하였으며 컨트롤 유닛의 가변주파수와 유압펌프의 압력을 조절하여 모터의 최대출력을 24시간 이상 유지시켰다. 이때 고온실의 온도, 감속기1의 내부 오일온도, 감속기2의 내부 오일온도, 펌프의

유량과 유압, 그리고 펌프축의 회전속도와 토크를 시간별로 24시간 동안 기록하였다. 감속기 테스트 시스템의 측정은 Fig. 5에 보여주고 있다. 감속기 내부 및 고온실 오일온도 측정을 위하여 열전대를 활용하였다.

가혹 감속기 테스트 실험으로부터 측정된 평균 값들은 다음과 같다. 유압펌프의 압력은 $8\sim 9\ MPa$ 로 이 때 유압펌프 입력축의 평균 토크는 $181\ Nm (=18.44\ kgf\cdot m)$ 이었으며 평균 회전수는 $1880\ rpm$ 로 유압펌프에 $35.61\ kW$ 의 실제 동력이 공급되었다. 이는 감속기1의 출력축에서 약 $49.68\ kW$ 의

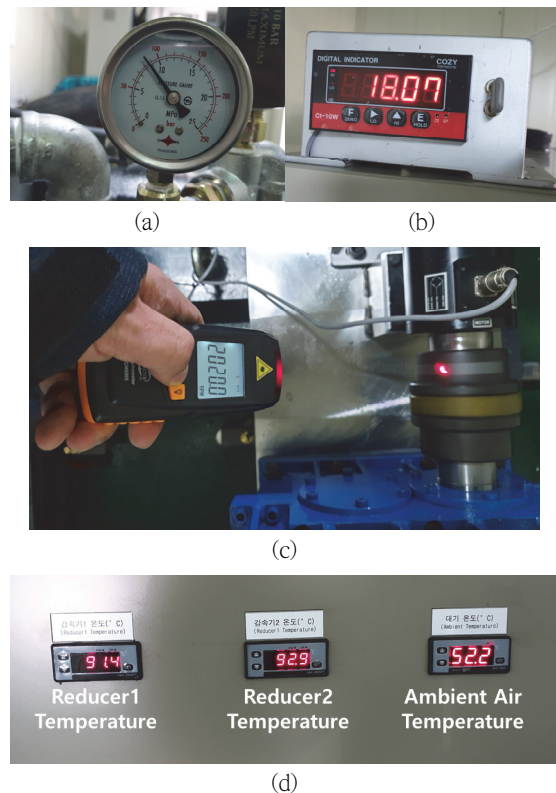


Fig. 5 Measurement parts of (a) Pressure of the hydraulic pump, (b) RPM of the hydraulic pump, (c) Torque of the hydraulic pump, and (d) Temperatures in the reducer1, reducer2, and high temperature room

동력이 인가 된 것으로서 냉각탑의 송풍기에서 요구되는 최대 소요동력 47.75 kW 를 초과하였다. 따라서, 테스트 결과로 얻은 실제 토크의 평균값이 이론값보다 크므로 $500\text{ kgf}\cdot\text{m}$, 93 rpm , 50°C 의 조건에서 운영이 가능함을 확인하였다.

감속기1과 감속기2, 고온실의 온도 그래프들은 Fig. 6에 보여주고 있으며 유압펌프의 토크, 회전 속도, 동력 그래프들은 Fig. 7에 보여주고 있다.

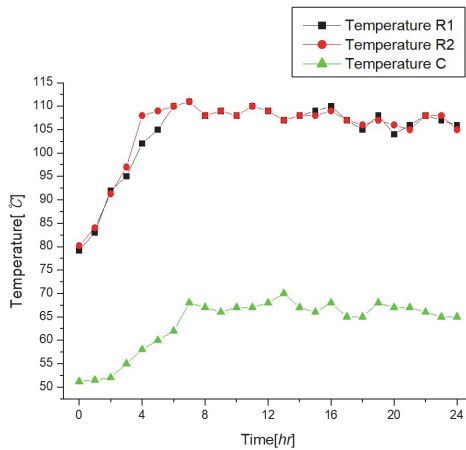


Fig. 6 Temperatures in the reducer1, reducer2, and high temperature room

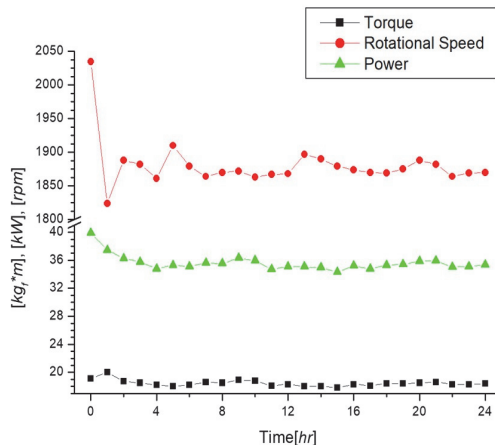


Fig. 7 Torque, rotational speed, and power of the hydraulic pump

4. 결 과

본 연구에서 개발한 가혹 감속시 테스트 시스템은 주위 온도 50°C 시험 환경에서 유압펌프의 유압조절로 최대 $500\text{ kgf}\cdot\text{m}$ 의 토크를 제어할 수 있으며 모터 컨트롤 유닛의 가변 주파수를 조절하여 감속기의 회전을 컨트롤 할 수 있었다. 최고 동력 상태에서 24시간 이상 연속 운전이 가능한 것을 검증하였다. 최대 토크 $500\text{ kgf}\cdot\text{m}$ 는 감속기2와 기어박스를 통해 나온 유압펌프 입력축의 토크를 토크 센서를 활용하여 측정 할 수 있었다. 본 연구는 저비용으로 고온상태 고토크의 감속기를 측정 할 수 있는 시스템을 설계, 제작, 실증하였다. 또한, 본 연구에서 사용된 가혹 감속기는 최대 동력 24시간 연속 운전 후 공회전 상태에서 입력부 및 출력부 rpm 측정, 소음 테스트, 감속기 기어 및 베어링 상태를 확인하였다. 감속기는 테스트 전후 기어, 베어링, 소음상태에 차이가 없이 양호하였으며 정상 작동되었으며 감속기 내부 온도가 점점 상승하다 110°C 이상 올라가지 않았음을 확인하였다.

사 사

이 논문은 2018년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다(과제제고유번호: 1415161121, 2018년도 경남창원산학융합지구 조성사업).

참고문헌

[1] 이상돈, “세계 지열발전산업 최근 동향”, 지열

- 에너지저널, 11(1), pp.16-20, (2015).
- [2] J. S. Park, K. H. Kim, L. Kim, and S. K. Lyu, "A Study on Design of Cycloid Reducer for Remote Weapons Systems", J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 34, No. 6, pp. 405-410, (2017).
- [3] H. H. Ko, C. Y. Chung, K. Y. Kim, "An Estimation of Performance Test and Uncertainty of Measurement for a Large Axial-flow Fan Based on ANSI/AMCA 210 Standard", The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 17 , No. 2, pp.24-29, (2014).
- [4] N. Kawasetsu, M. Gotoh, K. Takita, M. Koga, M. Toshima, 楊相浩, "Development of Axial Flow Fan FRP Rotor Blade for Large Thermal Power Station", The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol.9 No.2, pp.87-91, (2006).

(접수: 2022.05.09. 수정: 2022.05.27. 게재확정: 2022.05.30.)