

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.8.565

와전류를 이용한 발열기의 개발

윤동원[†] · 박희창^{*} · 홍용주^{**} · 이성휘^{*} · 김병인^{*} · 함상용^{*}
(2008년 12월 30일 접수, 2009년 6월 19일 수정, 2009년 6월 24일 심사완료)

Development of Heater Using Eddy Current

Yun Dong-won, Park Hee-chang, Hong Yong-ju, Lee Sung-hee
Kim Byung-in and Ham Sang-yong

Key Words: Eddy Current(와전류), Heater(가열기), Wind Power(풍력), Electric Generator(발전기)

Abstract

In this research, a heater using eddy current for generator is designed and some analysis is performed to validate the system. FEM (finite element method) is used for analysing eddy current phenomena at the various speed of rotor with permanent magnet. A real heater system is fabricated. Some experiment is also performed to validate the analysis result. Through the experiment, the FE analysis is validated and we found that the efficiency of developed heater is over 94%.

기호설명

- B : 자속밀도 (T)
- C_p : 물의 정압비열 (약 4180 J/kgK)
- F_d : 저항력
- F_l : 가상힘
- f : operating frequency (Hz)
- h : 높이
- I : 전류
- \dot{m} : 유량 (kg/s)
- T_{in} : 물의 입구 온도
- T_{out} : 물의 출구 온도
- t : thickness (mm)
- v : 속도 (m/s)

- Q : 발생 열량
- W_e : Eddy-current energy loss (W)
- σ : 도전율
- μ_0 : 공기의 투자율
- ζ : material constant

1. 서론

최근 석유자원의 고갈과 유류비의 급등으로 기존 에너지를 대체할 수 있는 신재생 에너지에 대한 관심이 높아지고 있으며, 풍력, 태양전지, 지열, 조력 등 여러 가지 신재생 에너지원의 개발에 많은 자본과 연구개발비가 투입되고 있는 실정이다.

풍력발전기의 경우, 블레이드에 전달되는 풍력에 의해 블레이드를 회전시키고, 여기에 연결된 발전기를 돌려 전기를 생성한 뒤 축전지에 전기를 저장시키는 시스템이다.

풍력에 의해 블레이드가 회전하는 에너지 변환 효율은 통상 30%가 넘지 않는다. 그리고 다시 증속기와 컨버터로 구성된 발전기의 효율은 64%

[†] 책임저자, 회원, 한국기계연구원 지능형생산시스템 연구본부

E-mail : dwyun@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7769 FAX : (042)868-7611

^{*} 한국기계연구원 지능형생산시스템 연구본부

^{**} 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부

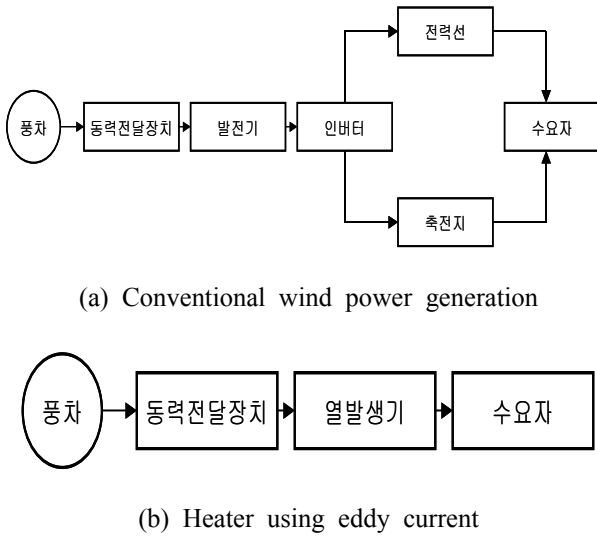


Fig. 1 Comparison of Energy transformation

로 보고 있다. 또한 풍력발전기의 경우, 발전이 가능한 풍속이 제한적이며(4.5~24m/s), 불규칙한 바람으로 축전지와 같은 에너지 저장장치가 필수적으로 필요한 상황이다.

와전류를 이용한 유도가열에 의한 가열방식은 기존의 열저항 등을 이용한 방법에 비해 효율이 뛰어나다는 것이 여러 연구를 통해 입증된 바 있다.^(1,2) 그리고, 시스템의 단순화 및 운동에너지를 열에너지로의 고효율 열변환을 위해 영구자석을 이용하여 와전류를 발생시켜 가열시키는 장치에 대한 특허 및 이와 유사한 발열기는 여러 연구자에 의해 제안 및 연구되어 왔다.⁽³⁾ 본 연구에서는 이러한 영구자석을 이용한 와전류 발생장치를 이용하여 풍력발전에 사용하기 위한 발열 시스템을 고안하고, 이론적인 해석과 실제 시스템을 제작한 후, 실험을 통하여 시스템의 성능 및 특성을 파악하였다. Fig. 1에 이러한 시스템에 대한 개념도를 보여주고 있다.

2. 시스템의 구성 및 원리

본 절에서는 본 연구에서 제안한 영구자석을 이용한 와전류 발열기의 원리를 보여주고 있다.

와전류 손실에 의한 발열기의 원리는 Fig. 2에 나와 있듯이, 회전축에 영구자석을 극성이 교번되도록 삽입하고, 회전축 주위의 고정축에는 알루미늄 재질로 열교환이 잘되는 구조로 하면, 영구자석의 회전에 의해 알루미늄 고정자를 쇠교하는 자속이 시간에 따라 변화하고 따라서 자속을

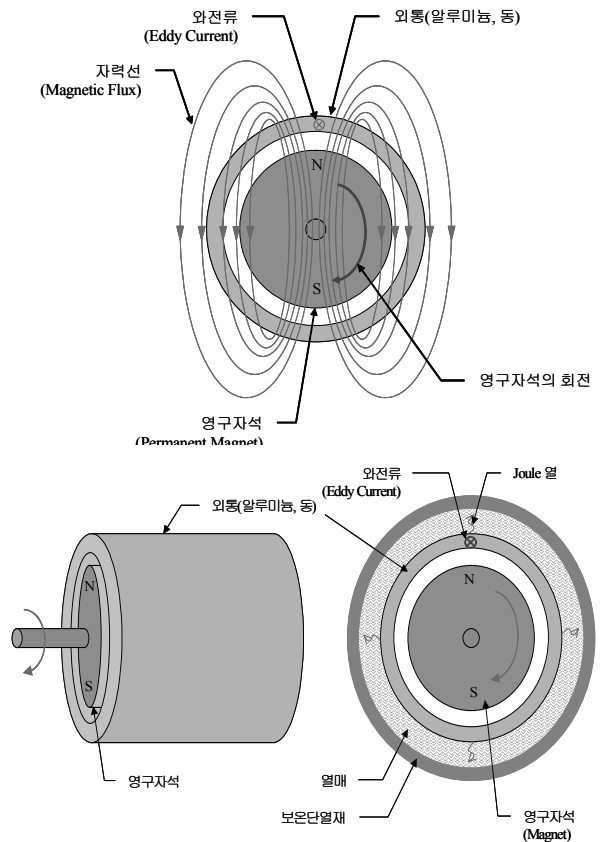


Fig. 2 Schematic of an eddy current heater system

가로지르는 방향으로 전류가 발생하면서 줄열이 발생한다. 이때, 가열하려는 물을 유도전류에 의해 가열된 도체 주위에 흘리면, 물이 가열되는 것이다. 도체에 유도전류가 흐르고, 그 저항손실이 열로 변환함으로써, 효율이 높은 가열기를 만들 수 있는 것이다.

3. 시스템의 해석

발열기 시스템에 대한 성능을 실험 전에 알아보기 위하여 유도가열 현상에 대한 해석을 수행해보기로 하였다. 이러한 해석은 여러 가지 방법이 있으나,^(5,6) 본 논문에서는 유한요소법을 이용한 시뮬레이션을 수행하기로 하였다. 본 연구에서 고려중인 유도가열 발열기는 회전 로터 주위에 20개의 영구자석이 있는 형태이나, 해석 시간의 단축과 해석 시스템에 걸리는 부하를 줄이기 위해, Fig. 3과 같이 전체 크기의 1/4에 해당하는, 로터에 5개의 자석만이 부착된 상태에서 해석을 수행하기로 하였다. 따라서, 해석결과와 4배가 실제 시스템에 대한 해석 결과치가 된다. 로터와

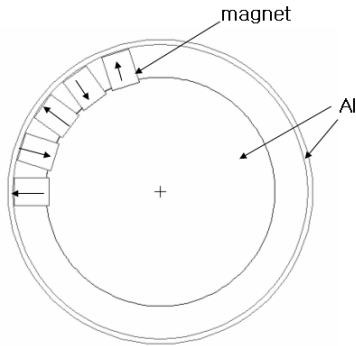


Fig. 3 Analysis model

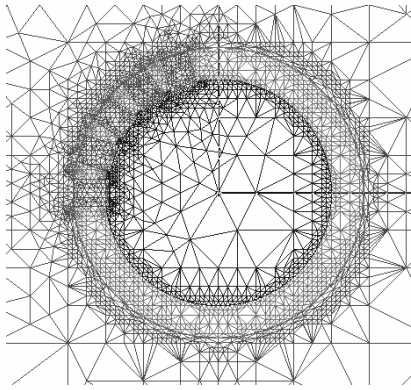
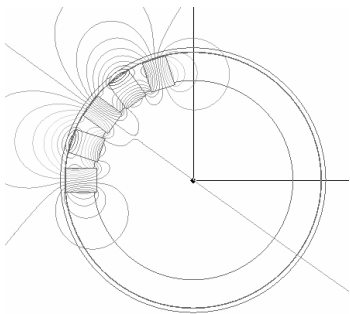
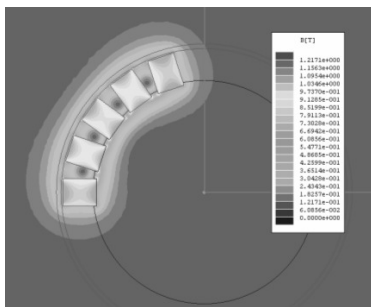


Fig. 4 FE Analysis model



(a) Magnetic flux plot



(b) Magnetic flux density distribution

Fig. 5 Magnetic field distribution

스테이터의 재질은 알루미늄과 S45C의 두 가지 경우에 대하여 고려해 보았다.

해석은 전자기 해석 전용툴인 Maxwell 2D를 이용하여 수행하였으며, 로터의 회전에 의해서 발생하는 시변자기계에 의한 와전류 현상을 해석하기 위하여, Transient 해석 모듈을 사용하여 해석을 수행하였다. Fig. 4에 유한 요소 해석을 위해 생성된 메쉬의 형상을 보여주고 있으며, Fig. 5 (a)에는 초기위치에서 자석에 의한 자속선의 분포를, Fig. 5(b)에는 그때의 자속밀도분포를 보여주고 있다. 해석은 영구자석이 표면에 고정되어 있는 회전체가 0~5,000rpm 까지 회전할 때, 각 속도에서의 토크와 power loss를 구해 보았다.

Fig. 6은 200rpm으로 회전시에 0.028sec 순간에 스테이터에서 발생하는 유도전류밀도 분포를 보여주고 있다. 회전축이 회전할 때를 해석하기 위해서, 과도응답해석을 수행하였으며, 그림에서 알 수 있듯이 자석의 회전에 의한 시변 자기계에 의해서 스테이터에 유도전류가 잘 발생한다는 것을 알 수 있다.

다음으로, 회전축의 회전속도를 가변시켜가며, 각각의 회전속도에서 토크와 손실에 대한 해석을 수행해보았다.

Fig. 7, 8은 각각 로터와 스테이터의 재질이 S45C, aluminum일 때 속도에 따른 토크와 에너지 손실의 과도응답 해석의 결과를 보여주고 있다. 유도전류에 의한 손실은

$$W_e = \zeta \frac{f^2}{100} B^2 t^2 \quad (1)$$

으로 구해진다. 이식에서 알 수 있듯이 자성체인 s45c에서 비자성체인 aluminum보다 더 많은 와전류손실이 발생하며, Fig. (7), (8)을 통해 이를 확인할 있다. 회전속도가 0~5000rpm일 때, 손실과 토크를 구해 보았으며, 결과가 Fig. 9(a)와 (b)에 나와 있다.

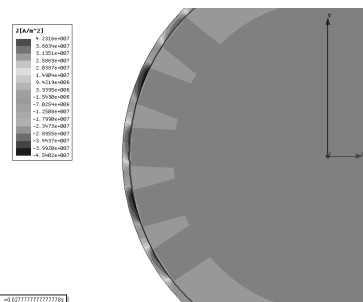
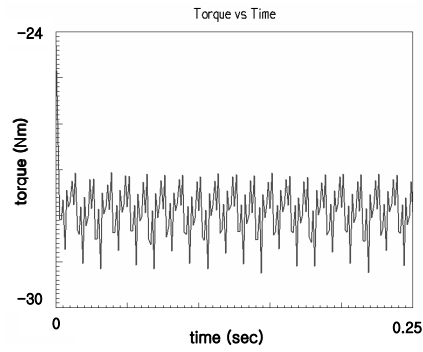
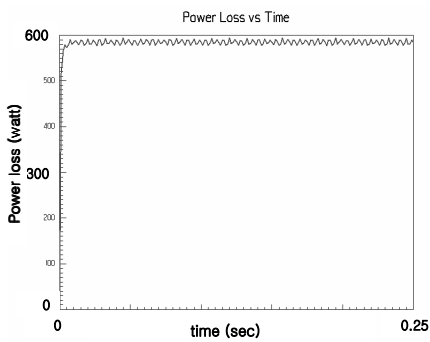


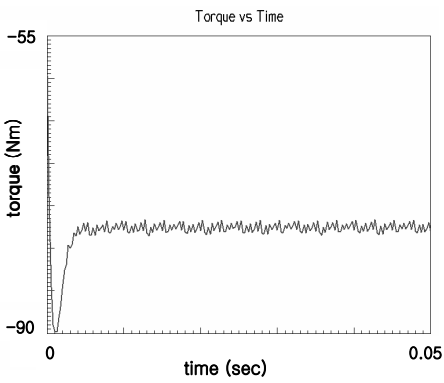
Fig. 6 Eddy current distribution at 200 rpm



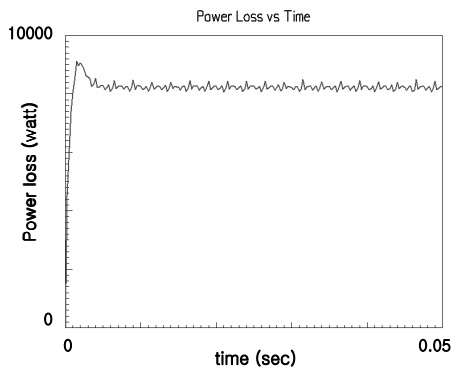
(a) Torque @ 200 rpm



(b) Loss @ 200 rpm

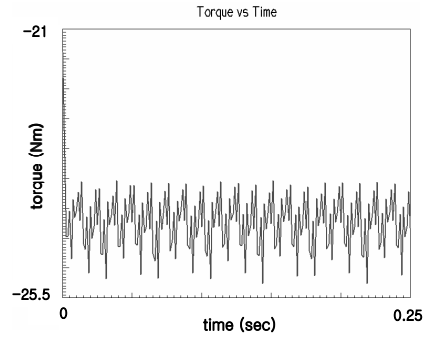


(c) Torque @ 1000 rpm

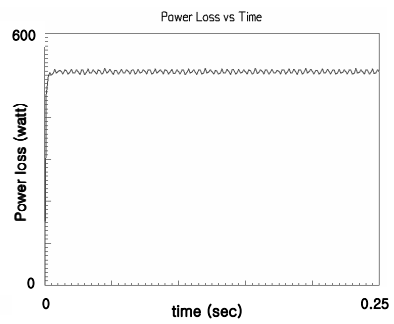


(d) Loss @ 1000 rpm

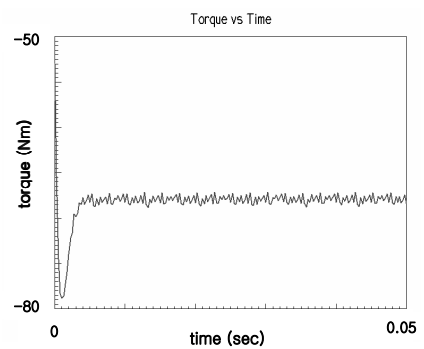
Fig. 7 Torque and loss analysis result (S45C)



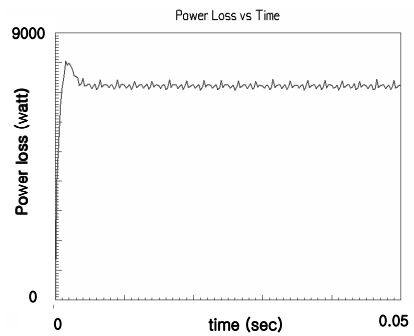
(a) Torque @ 200 rpm



(b) Loss @ 200 rpm

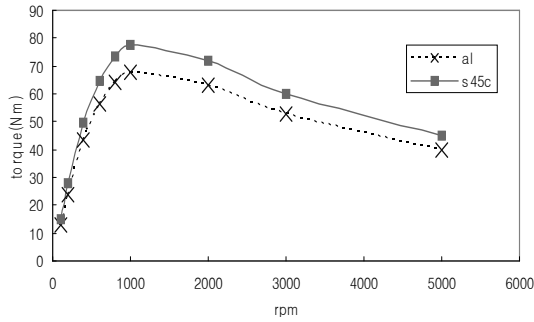


(c) Torque @ 1000 rpm

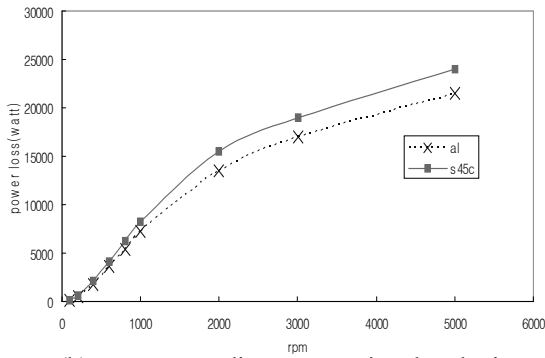


(d) Loss @ 1000 rpm

Fig. 8 Torque and loss analysis result (aluminum)



(a) Torque according to rotational velocity



(b) Loss according to rotational velocity

Fig. 9 Torque and loss according to rotation velocity

그림에서 알 수 있듯이 토크는 일정 회전속도까지는 증가하지만, 일정 회전속도이상에서는 오히려 감소한다는 것을 알 수 있다. 도전성 물체 위에서 움직이는 자석은 moving coil로 상사가 가능하며, 이때 움직이는 coil에 작용하는 drag force F_d 는

$$F_d = F_l \left(\frac{vw}{v^2 + w^2} \right) \quad (2)$$

$$\text{(where } F_l = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi z}, w = \frac{2}{\mu_0 \sigma h} \text{)}$$

와 같이 표현이 가능하다.⁽⁴⁾ drag force F_d 에 의해 토크가 발생하게 되며, 식(2)을 통해서 토크는 초기에 증가하다가 어느 속도이상에서 감소함을 알 수 있고, 이는 Fig. 9(a)의 해석결과와 일치한다.

그리고, 에너지 손실량은 회전속도가 증가함에 따라 같이 증가한다는 것을 알 수 있다. 가열기에서는 이 손실이 열전달에 의해 물의 온도를 높이게 된다. 해석결과, 자성체인 S45C의 경우가 비자성체인 알루미늄에 비해서 손실이 더 크게 발생한다는 것을 알 수 있다. 그러나, 실제 시스

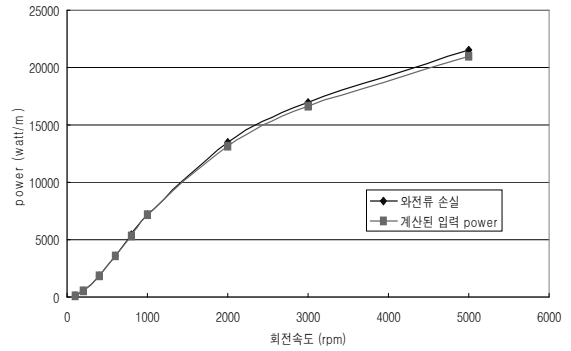


Fig. 10 Comparison between input and output power

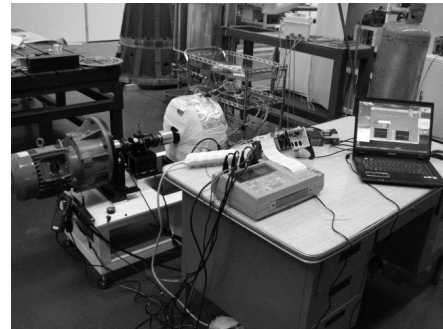
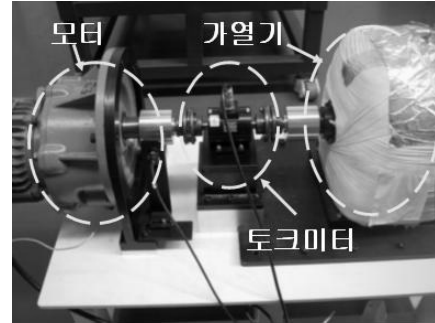


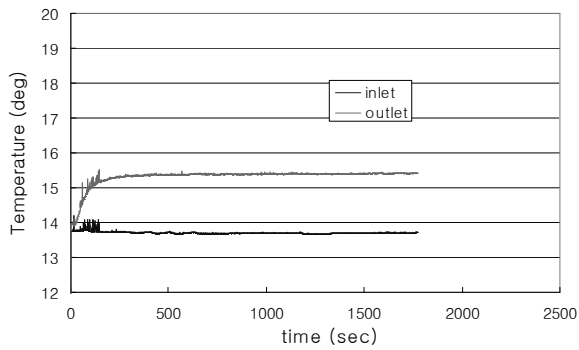
Fig. 11 Test rig for heater

템을 제작시에는 물과의 접촉에 의한 부식 문제 등을 고려하여 로터와 스테이터의 재질로서 알루미늄을 선택하였다.

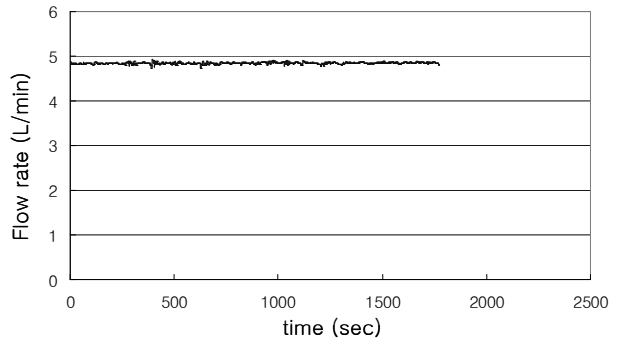
Fig. 10에 회전속도와 토크를 이용해서 구한 입력 에너지와 유한요소 해석을 통해서 구한 에너지를 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 입력값과 출력값이 거의 일치하며, 시스템의 효율 또한 높을 것이라는 것을 알 수 있다.

4. 발열기의 실험

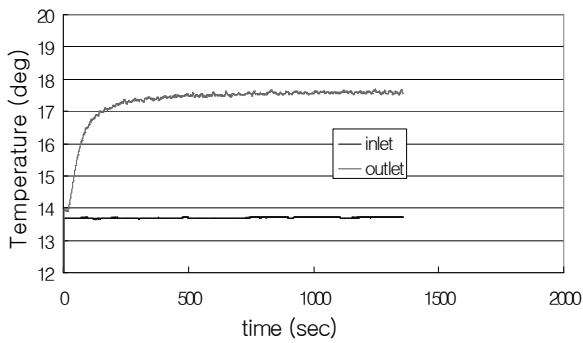
해석된 유도가열 발열기를 직접 제작하고 실험을 수행하였다. Fig. 11에 실험 장치의 모습이 보



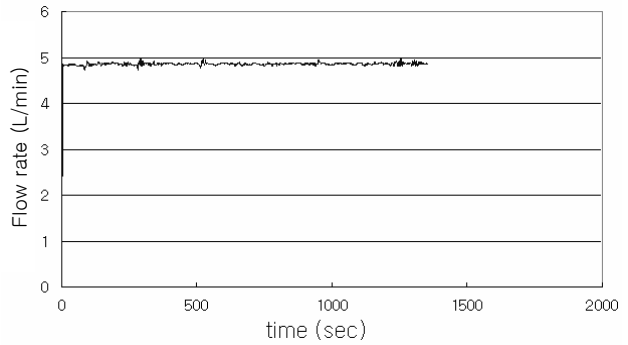
(a) Temperature change @ 118 rpm



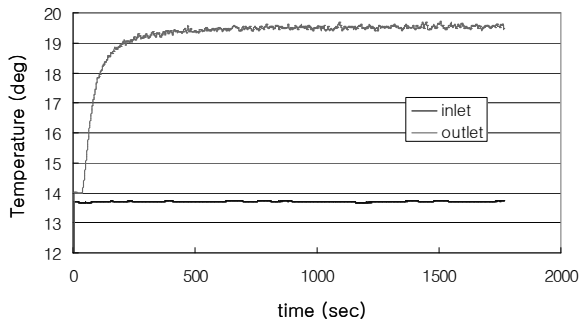
(b) Flow rate @ 118 rpm



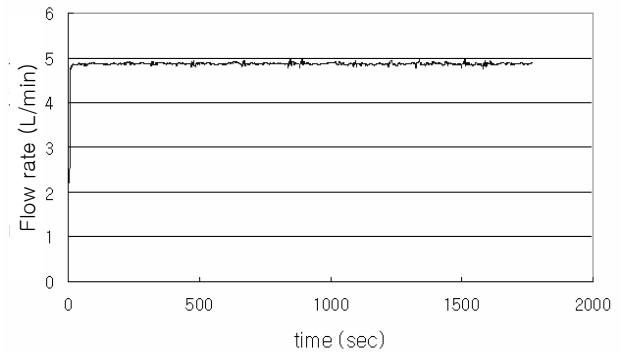
(c) Temperature change @ 184 rpm



(d) Flow rate @ 184 rpm



(e) Temperature change @ 230 rpm



(f) Flow rate @ 230 rpm

Fig. 12 Experiment result for heater

여지고 있다. 유도가열 발열기에 일정 유량의 물을 공급하고, 모터를 이용하여 회전체를 회전시켰다. 이때, 입구와 출구에서의 물의 온도변화를 측정하여 발열기에서 발생하는 열량을 측정하기로 하였다. 그리고, 효율을 구하기 위해서는, 시스템에 입력되는 에너지를 알아야 하므로, 회전축에 토크미터를 설치하여 실험을 수행하였다.

모터의 출력축 회전축에 걸리는 토크와 회전수를 측정하고, 모터 입력단에서 측정한 시스템 입력 전력량도 구하여, 토크미터를 이용해 구한 결과와 비교해 보았다. 본 실험에서는 회전체의 속도가 각각 118rpm, 184rpm, 230rpm일 때의 세 가지 경우에 대한 실험을 수행하였다.

Table 1 Comparison between power meter result and torque meter result

회전수 (rpm)	power meter를 이용하여 구한 입력값 (W1)	토크미터, 회전수를 이용하여 구한 입력값 (W2)	Δ (W1-W2)	비율 ($\Delta/W1$)
118	724-109(무부하손실)=615	518.7	96.3	15.7%
184	1627.5-140(무부하손실)=1487.5	1215.1	272.4	18.3%
230	2401-169(무부하손실)=2232	1835.4	396.6	17.8%

Table 2 Efficiency calculation according to rotation speed

rotation speed (rpm)	efficiency (%)
118	94.8
184	99.6
230	99.0

Table 1에 전력계를 이용하여 모터에 입력되는 전력과 토크미터와 회전속도를 이용하여 발열기의 회전축에 들어가는 파워를 비교하였다. 실험 결과 모터의 자체에서 소모되는 전력은 약 16% 정도임을 알 수 있었고, 따라서, 실험에 사용된 유도모터의 효율은 약 84% 정도임을 알 수 있었다. 발열기의 효율을 구하기 위한 발열기의 입력 전력은 토크미터에 의해 측정된 토크와 회전수를 이용하여 구하여 사용하였다.

Fig. 12에 3가지 경우의 속도에서의 입구/출구 온도 변화, 유량의 변화 등에 대한 실험 결과가 나와 있다. 이 실험결과들을 이용해서, 유도가열 발열기에 의해 발생된 열량은 다음의 식으로 부터 구할 수 있다.

$$Q = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (3)$$

Table 1에서 구한 입력 전력과 식 (3)에서 구한 출력 전력을 이용하여 발열기의 효율을 구해본 결과 Table 2와 같이 발열기의 효율을 구할 수 있었다.

Table 2에서 알 수 있듯이 유도가열을 이용한 발열기의 효율은 약 94% 이상임을 알 수 있었다.

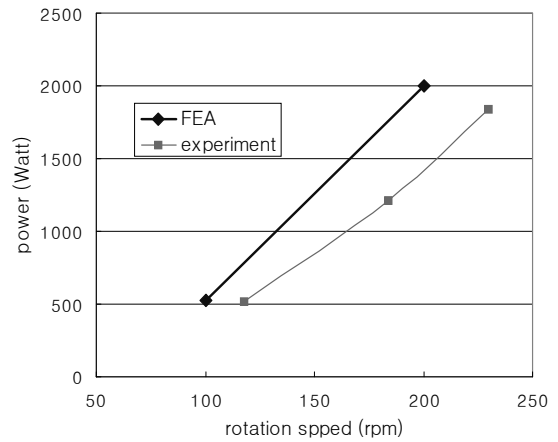


Fig. 13 Comparison between FEA result and experiment

Fig. 13는 유한요소해석결과와 실험 결과를 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 해석결과에 비해 실험에 의한 발열량이 더 적다는 것을 알 수 있다. 이는 베어링 손실, 열손실 등의 여러 요인에 의한 손실에 의해 실제 실험에서의 열발생량이 해석치보다 적은 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 풍력발전 등에 사용될 수 있는 와전류를 이용한 가열기의 성능을 파악하기 위해서, 몇 가지 해석을 수행하였다. 유한 요소법을 이용하여 전자기 시스템의 과도응답해석을 수행하였으며, 해석한 결과, 입력되는 에너지가 와전류로 바뀐 후, 저항손실로 거의 대부분 열로 바뀐다는 것을 알 수 있었으며, 기계적 회전운동이 와전류 현상을 통해 열에너지로 바뀐다는 것을 확인하였다. 이러한 해석을 바탕으로 실제 발열기 시스템을 설계 및 제작하여 실험을 수행하였다. 3가지 경우의 회전축의 회전속도에 따라 토크와 회전수를 측정하여 발열기의 입력 전력량을 측정하였고, 발열기에 흐르는 물의 입구온도, 출구온도, 유량 등을 측정하여 발열량을 측정하여 전체 발열기의 효율을 계산하였다. 계산 결과 본 논문에서 제작된 발열기의 효율은 94% 이상임을 확인하였다. 본 회전형 와전류 열발생 장치는 풍력발전기와 같은 발전기에서 기존의 전기적 발전기 대신 본 장치를 축에 연결 사용하게 되면 풍력에너지를 전기에너지로 변환시키지 않고 바로 열에너지를 발생시켜 활용할 수 있게 될 것이다.

기존의 발전기에 비해 구조가 매우 간단하고 유지보수도 매우 용이할 수 있음을 확인하였다. 또한 소형 풍력장치에 부착하여 농가시설, 양어장, 산간벽지 난방장치, 빙판도로의 해빙장치 등 다양한 열에너지 공급장치로서 활용이 가능하리라 생각된다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원에서 지원한 자체사업에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Park Hee-chang, 1998, "Development of Induction Heating Roll," *KIMM*.
- (2) Park Hee-chang, 2007, "Development of High Efficient Induction Contactor Heat Exchanger," *KIMM*.
- (3) Magtek, llc, "Magnetic Heater Apparatuses and Method," Int. CI: H05B 6/02, Pat. No: PCT/US2002/023569.
- (4) Sinha, P.K., 1987, "Electromagnetic Suspension Dynamics & Control," Peter Peregrinus Ltd.
- (5) Karol Aniserowicz et al, 1997, "A New Concept for Finite Element Simulation of Induction Heating of Steel Cylinders," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 33, No. 4, pp. 893~897.
- (6) Park Hee-chang, Yun Dong-won, Lee Sung-hee and Kim Byung-in, 2008, "Analysis for a Novel Heater Using Eddy Current," *KSME conference*.