

# 서로 다른 자석 배열을 가지는 와전류 열원화 장치의 성능 측정

윤택한\*, 손영우, 이장호\*\*

## Performance Measurement of the Eddy Current Heat Generator with Different Array of Permanent Magnets

Teak-Han Yun\*, Young-Woo Son and Jang-Ho Lee\*\*

**Abstract** Eddy Current is one of ways to make heat using rotational energy of wind turbine rotor. Four difference arrays of permanent magnets around rotor surface are used to generate heat using eddy current in this study. For the evaluation of heating performance, new test rig is prepared to measure water flow and temperatures in the inlet and outlet of the eddy current heat generator. In the test, torque and rotational speed are also measured in the motor driven system, and evaluated if the torque is matched with it of wind turbine rotor or not. It will be shown that the eddy current heat generator can be applied to real urban wind energy systems in this study.

**Key words** Wind Turbine Blade(풍력 터빈 블레이드), Eddy Current Heater(와전류 발열기), Permanent Magnet Array(영구자석배열)

(접수일 2012. 11. 14, 수정일 2013. 2. 20, 게재확정일 2013. 2. 20)

\* 군산대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kunsan National University)

■ E-mail : yunteakhan@naver.com ■ Tel : (063)469-4869 ■ Fax : (063)469-1965

\*\* 군산대학교 공과대학 자동차기계공학부 (School of Mechanical & Automotive Engineering, Kunsan National University)

■ E-mail : jangho@kunsan.ac.kr ■ Tel : (063)469-4869 ■ Fax : (063)469-1965

### Nomenclature

$C_{p,water}$  : 물의 정압비열, J/kgK  
 $\Delta T$  : 물의 입·출구 온도차,  $^{\circ}C$   
 $\eta$  : 열변환 효율, %  
 $\dot{m}$  : 유량, kg/s  
 $P$  : 입력 회전에너지, W  
 $Q$  : 출력 열에너지, W  
 $T$  : 토크, N·m  
 $\omega$  : 회전각속도, rad/s

### 1. 서론

소형풍력발전 시스템은 정격풍속과 정격 회전수에서 정격 발전량이 결정되고 그에 따라서 풍력 블레이드의 공력특성이 결정 된다. 이때 풍속이 증가하면 바람에너지는 풍속의 3승에 비례하여 증가하는데 정격 풍속 이상이 되면, 발전기 보호를 위해서 발전량이 더 이상 증가하지 않도록 제어 된다. 이에 반하여 풍 열원화 장치는 풍속에 따른 별다른 제어가 필요하지 않고 구조물이 허용 가능한 풍속까지 바람에너지가 열

에너지로 변환 될 수 있다.

Table 1은 바람에너지가 전기와 열로 변환 하였을 경우의 효율을 대략적으로 비교한 것이다. 바람에너지가 회전에너지로 변환 될 때의 최대 효율은 Betz<sup>(1)</sup>이론에 따라 약 60% 정도이다. 그리고 회전에너지가 전기에너지로 변환 될 경우 회전수에 따라 발전기의 효율이 달라지는데, Cut-in풍속에서는 발전기 효율이 약 20%정도이며 정격 풍속 일 경우에는 약 85%정도이고, cut-out 풍속 일 경우는 시스템을 정지 시켜 출력이 없게 된다. 여기에 추가적으로 인버터 변환 효율과 전기 손실 등을 고려하면 전체적으로 바람에너지의 약 20%~30% 만이 풍력발전기를 통해 전기에너지로 변환 될 수 있다. 그러나 바람에너지가 열에너지로 변환 될 경우에는 블레이드의 효율과 열손실 10%정도만 고려되므로 전체 변환효율이 약 50% 정도로 전기로의 변환효율보다 2배 이상 높다.

여러 발열 방식 중 와전류 발열의 원리는 도전성 재료의 외통 안에 있는 영구자석을 회전시켜 외통에서 열이 발생되게 하는 것이다. 영구자석의 자속이 N극에서 S극으로 이동하는 동안 외통을 관통하게 되면, 자석이 회전하면서 이동자계에 의해 외통에 와전류가 유기되고 주열열이 발생된다. 와전류로 인해 얻은 열에너지는 축열 수조에 회수 저장되어 난방 및 냉방의 열원으로 활용 될 수 있다.

윤동원<sup>(2)</sup> 등은 영구자석을 이용한 와전류 발생 장치를 이용하여 풍력발전에 사용하기 위한 발열 시스템을 고안하고, 이론적인 해석과 실제 시스템을 제작한 후, 실험을 통하여 시스템의 성능 및 특성을 파악하였다. 한 가지 유형의 영구 자석 배열을 118, 184, 230rpm에서 성능 시험 결과 94 % 이상

의 효율이 측정되었으나, 자석배열의 영향에 대해서는 구체적으로 검토하지 않았다.

이상엽<sup>(3)</sup> 등은 와전류 손실을 열 전도판의 형상에 따라서 분석하였다. 특히 열 전도판을 분할하여서 각각을 전기적으로 절연시키는 방법 혹은, 열 전도판에 슬릿(Slit)효과를 주는 방법을 제안하고 이를 해석하였다. 해석 결과, 열 전도판의 분할에 따른 와전류 손실 저감 효과를 확인하였고, 또한 슬릿의 위치와 개수에 따라 변화하는 와전류 손실의 특성이 확인되었다.

이정근<sup>(4)</sup> 등은 컨버터용 변압기의 여자전류 해석을 통해, 자속밀도-여자 전류 곡선 그래프를 도출하였으며, 이를 통해 DC성분 유입시 철심이 포화되는지를 확인하였다. 또한 와전류 손실해석을 통해 각각 다른 두 재질의 손실을 비교하였고 누설 자속이 Lock Plate의 STS가 아닌 SS400에 집중이 됨을 확인 하였다.

장석명<sup>(5)</sup> 등은 내전형 브러시리스 모터의 고정자의 고주파수 기자력에 의하여 자속이 발생하고 회전자에 놓여진 영구자석이 회전하므로 영구자석의 표면에 와전류가 유도되는데 이 와전류에 의하여 열이 발생하는 와전류 손실특성을 해석하였다.

이정종<sup>(6)</sup> 등은 영구자석의 내부 와전류손을 해석하기 위하여 2D Finite-Element Method(FEM)를 사용하였으며, 영구자석 내부 전류의 전체 loop를 표현하지 못하는 단점을 보완하기 위하여 영구자석 길이와 폭의 형상비율을 이용하여 내부 전류 loop를 고려하였다.

위 연구들은 와전류를 손실로 보는 연구들이지만, 다른 측면으로 와전류발열 장치의 열원 가능성을 보여주고 있다. 본 연구에서는 열 발생 장치로써의 와전류 발열장치를 구성하고 회전축이 풍력 블레이드의 회전축과 연동되어 작동 될 수 있도록 회전자에 여러 가지 자석 배열을 구현하였으며 이들의 토크와 열변환 효율을 측정하고 분석하여 풍력 블레이드와 연동되는 와전류 발열 장치의 가능성을 제시 한다.

Table 1. Efficiency Comparison between electricity and heat conversion

항 목	전기	열
바람 에너지	1	1
회전 에너지 전환 효율	0.6	0.6
발전기 효율	cut-in	X
	rating	
	cut-out	
인버터 효율	0.9	X
열 변환 효율	X	0.9
열 손실	X	0.05
전기 손실	0.05	X
합 계	0.20	0.51

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

### 2.1 풍 열원화 장치

Fig. 1은 2D와 3D Modeling한 풍 열원화 장치의 그림이

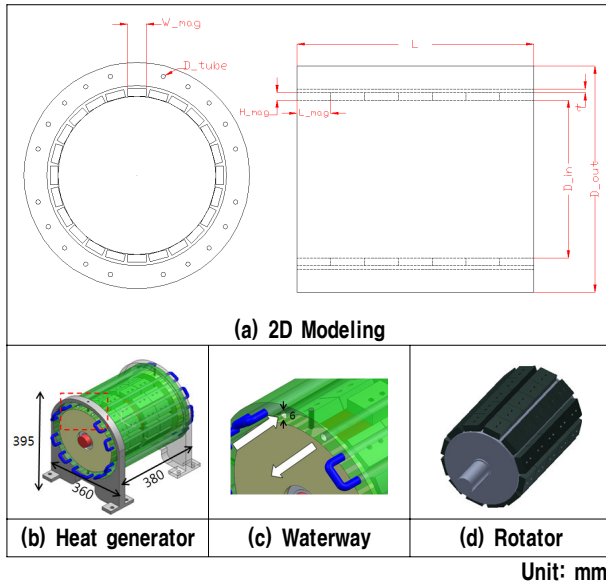


Fig. 1 3D Modeling of eddy current heater

Table 2. Unit of eddy current heater Unit: mm

D_out	D_in	L	t	D_tube	W_mag	H_mag	L_mag
300	210	380	8	6	25	10	40

다. 실험 장치는 소규모 실험실 규모의 실내에 설치되고, 1kW 이내의 용량으로 성능 실험이 될 수 있도록 설계 제작되었다. 풍 열원화 장치의 알루미늄 외통 안에는 자석 배열을 가진 회전자가 배치되며, 알루미늄 외통에는 발열된 에너지를 회수하기 위한 냉각수로가 구성된다. 풍 열원화 장치의 치수에 대해서는 Table 2에 표기된 바와 같다. 여기서  $D_o$ 는 풍 열원화 장치 외통의 바깥지름,  $D_{in}$ 은 내통의 안지름,  $L$ 은 길이,  $t$ 는 자석과 외통사이의 간극,  $D_{tube}$ 는 물관로의 지름이며, 자석의 크기로서  $W_{mag}$ 는 세로길이,  $H_{mag}$ 는 두께,  $L_{mag}$ 는 가로길이를 나타낸다.

Table 3. Specifications of magnet

항목	내용
잔류자속밀도 (G)	4,000
보자력 (kA/m)	880
최대 에너지 (kJ/m <sup>3</sup> )	290.0
온도 계수 (°C)	-0.15
큐리 온도 (°C)	320
주원료	Nd, Fe, B

본 실험에 사용 된 자석은 희토류 영구자석의 종류로서 높은 잔류자속밀도와보자력 특성을 가지는 네오디움 자석을 선택하였다. 표면에서의 잔류자속밀도는 평균 4,000GAUSS이며 보자력은 880kA/m인 특성을 가진다. 영구자석에 대한 특성은 Table 3에 표기된 바와 같다.

## 2.2 실험 장치 구성 및 실험 방법

풍 열원화 장치의 구성은 Fig. 2의 실험 장치와 Fig. 3의 계측 장비로 이루어져 있다. 실험 장치는 풍 열원화 장치와 이 장치의 회전자 토크 및 회전수를 계측 할 수 있는 토크미터, 동력을 전달해주는 AC 삼상모터로 구성 되어 있으며 편심과 편각을 보완할 수 있는 플렉시블 커플링으로 축이 연결 된다.



Fig. 2 Test rig of eddy current heater



Fig. 3 Test and measurement system

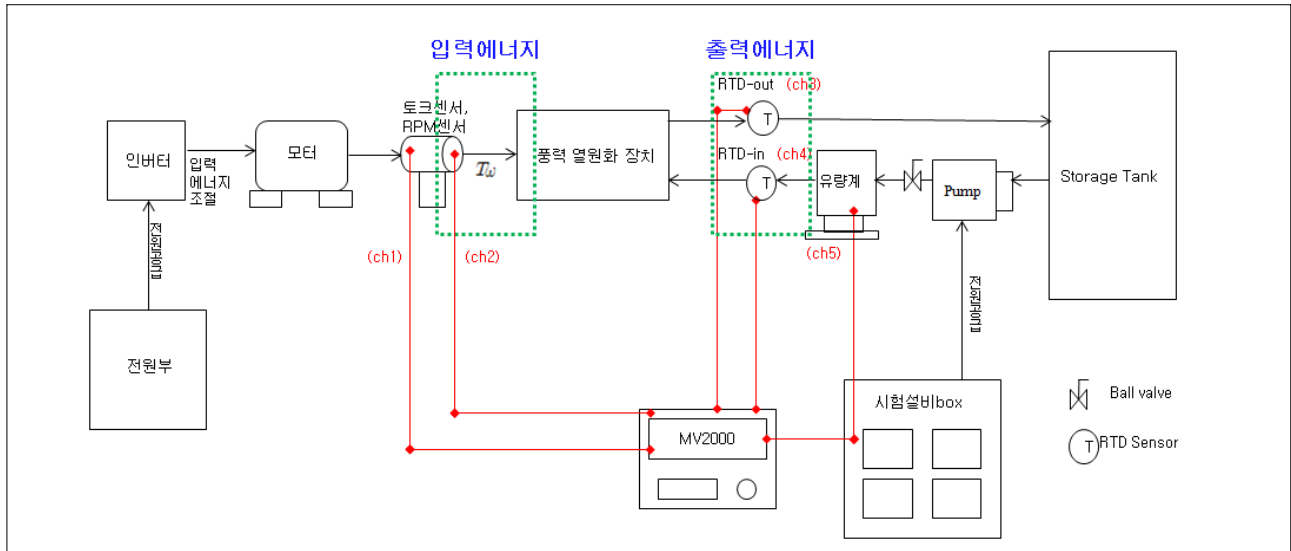


Fig. 4 Test rig for the performance measurement of eddy current heater

계측장비는 실시간 데이터를 모니터링 할 수 있는 컴퓨터와 토크, 회전수, 입구온도, 출구온도, 유량을 측정하는 MV2000로 구성되며 모터의 출력을 측정하는 파워미터와 온도센서를 보정해주는 calibrator와 ICE-Point cell로 구성 된다. 계측장비에 대한 사양은 Table 4에 표기된 바와 같다.

풍 열원화 장치의 열변환 성능을 측정하기 위해 새롭게 구성된 실험장치의 개략도는 Fig. 4와 같다. 전원부에서 공급되는 전력은 인버터를 통해 회전수와 토크를 제어하는데 이용된다. 냉각수 공급계는 수조와 유량계 그리고 펌프로 구성된다. 온도를 포함하는 모든 데이터는 MV2000을 통해 동일한 시간에서 계측, 저장된다.

실험 장치에서 유량펌프를 먼저 가동시키고 볼 밸브와 스피드 컨트롤러를 이용하여 개폐도 차압을 조절하고, 맥동을 제거한 후에 유량을 제어한다. 온도의 안정화를 위해 30분간 펌프를 가동 시키고 입구온도와 출구온도가 같게 된 후부터

실험이 실시된다. 계측기를 동작시킨 후, 전원부의 전력을 공급하여 모터를 작동 시키고 인버터의 주파수를 조절하여 회전수를 실험 지점에 맞춘 다음 2시간 이상 데이터를 취득한다.

### 2.3 실험 조건

열 발생장치의 회전수에 따른 온도 변화를 알아보고 시스템의 열 변환 효율을 검토하기 위하여 600, 1200, 1800rpm

Table 4. Specifications and accuracies of measurement

No	Names	Specifications
1	Computer & Monitor	데이터 저장 및 실시간 모니터링
2	Power Meter	$\pm(0.1\% \text{ of rdg} + 0.05\% \text{ of rdg})$
3	Calibration	$\pm 0.0025\%$
4	Ice Point Cell	$\pm 0.1^\circ\text{C}$
5	MV2000	$\pm(0.15\% \text{ of rdg} + 0.3^\circ\text{C})$

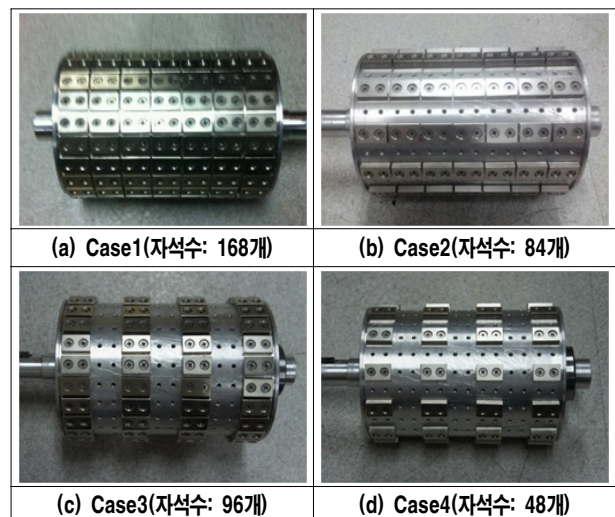


Fig. 5 Test cases with different magnet arrays

의 세 가지 조건에서 실험이 실시되고, 자석배열에 따른 영향을 검토하기 위해 Fig. 5와 같이 총 네 가지 조건의 영구자석 배열이 검토 된다. 각 자석배열은 Case1을 기준으로 원주방향으로 격줄 씩 제거한 배열이 Case2, 길이방향으로 격줄 씩 제거한 배열이 Case3, 원주방향과 길이방향으로 격줄 씩 제거한 배열이 Case4 이다. 모든 자석의 착자법은 바깥 부분이 N극이며 내통과 맞닿은 부분이 S극 이다.

### 2.4 실험 데이터 정리

실험 장치가 충분한 시간동안 작동 된 후 실험 장치의 안정화가 확인되면 30분 동안의 데이터를 이용하여 실험 결과가 정리된다. 이때 유량과 온도차를 사용하여 출력에너지는 식 (1)을 통해 계산되고, 입력에너지는 토크와 회전속도를 사용하여 식 (2)을 통해 계산된다. 풍 열원화 장치에 대한 효율은 식 (3)을 통해 계산된다.

$$Q = \dot{m} C_{p,water} \Delta T \quad [W] \quad (1)$$

$$P = T\omega \quad [W] \quad (2)$$

$$\eta = \frac{Q}{P} \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

본 실험의 불확도는 최대 2% 미만인 것으로 분석되었다 (APPENDIX 참조).

### 3. 실험 결과

Table 5는 Case1의 실험결과를 정리한 표이다. Case1의 경우 실험조건 600rpm일 때 토크 6.46N·m, 질량유량 0.014 kg/s, 입·출구 온도차는 6°C로 측정 되었다. 이때 입력에너지는 398W이며 출력에너지는 363W로 효율은 91% 정도 이다. 실험조건 1,200rpm일 때는 토크 10.05N·m, 질량유량 0.016 kg/s, 입·출구 온도차는 16.9°C로 측정 되었다. 이때 입력에너지는 1,251W이며 출력에너지는 1,128W로 효율은 90% 정도 이고 마지막 실험조건 1,800rpm일 때는 토크 11.85N·m,

질량유량 0.036kg/s, 입·출구 온도차는 13.3°C로 측정 되었다. 이때 입력에너지는 2,193W이며 출력에너지는 2,001W로 효율은 91% 정도 이다.

각 Case 별 회전수에 따른 열 변환 효율은 Table 6과 Fig. 6에 각각 나타내었다. 실험을 통한 모든 Case의 열 변환 효율은 Fig.6 과 같이 90%이상으로 확인 되었으며, 회전수의 변화에 따라 큰 차이는 보이지 않는 것으로 나타났다.

풍 열원화 장치 회전자의 자석 배열에 따른 회전토크를 측정한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, Case2의 회전토크가 가장 크고 Case3의 회전토크가 가장 작은 것으로 나타났다. 그리고 Case2와 Case4의 토크는 다른 경우 보다 상대적으로 매우 큰 것으로 나타났으며, 회전수가 조금만 증가해도 출력이 1kW이상 벗어난다. 본 연구에서는 1kW급 풍력 블레이드와의 연동을 목적으로 함으로 출력이 1kW이상 되는 점들은 실험에서 제외 되었다.

Table 5 Experimental results for Case1

항목	회전수 (rpm)		
	6,00	1,200	1,800
토크 (N·m)	6.46	10.05	11.85
회전속도 (rad/s)	62	124	185
입력에너지 (W)	398	1,251	2,193
입력에너지 불확도 (%)	2.0	1.4	1.2
질량유량 (kg/s)	0.014	0.016	0.036
입구온도 (°C)	18	15.5	16.3
출구온도 (°C)	24	32.4	29.6
ΔT (°C)	6	16.9	13.3
출력 에너지 (W)	363	1,128	2,001
출력에너지 불확도 (%)	3.0	1.0	0.9
효율 (%)	91	90	91

Table 6 Heat conversion efficiency for all case

회전수	Efficiency (%)			
	case1	case2	case3	case4
100	-	90	-	98
200	-	-	-	96
300	-	-	-	97
600	91	-	96	-
1,200	90	-	91	-
1,800	91	-	90	-

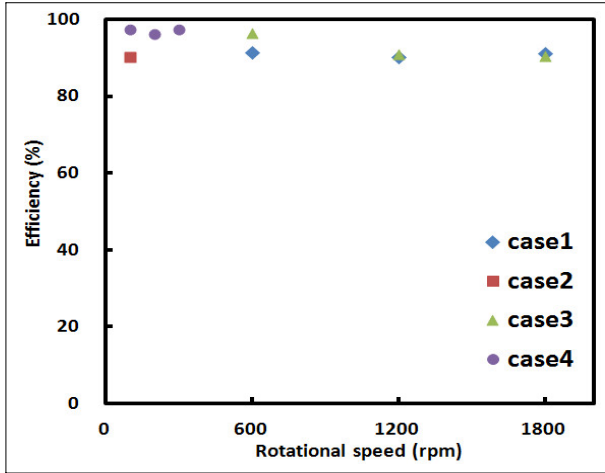


Fig. 6 Heat conversion efficiency with different array of magnet and rotational speed

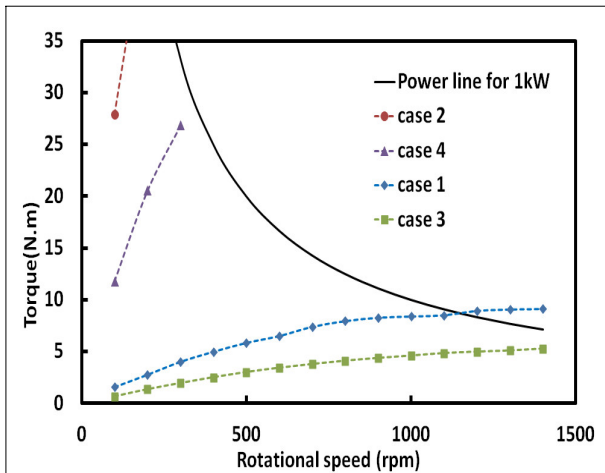


Fig. 7 Torque with different array of magnet and rotational speed

Case1과 Case2 그리고 Case3와 Case4의 자석배치를 비교했을 때, Case2와 Case4는 각각 Case1와 Case3와 비교해서 자석이 원주 방향의 격 줄로 띄어져 배치된 형식이다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 Case2와 Case4는 Case1와 Case3에 비해 자석 수가 반절 가까이 감소됨에도 불구하고, 역으로 회전토크는 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 회전자의 원주방향으로 자석들의 공간이 일정부분 확보되면 이 간극 사이로 자력선 들이 비자성체인 내통을 통과하여 안정된 분포를 이루기 때문인 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 바람의 운동 에너지로부터 변환되는 블레이드의 회전 에너지가 열에너지로 직접 변환 될 수 있는 풍 열 원화 장치를 개발하고, 이 장치의 성능을 측정 할 수 있는 실험 장치를 새롭게 구성하였다. 이를 활용하여 여러 가지 자석 배열을 가진 회전자를 서로 다른 회전수에서 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 열 변환 효율은 회전자의 회전수에 따라 크게 변화하지 않으며 회전수에 상관없이 약 90% 이상의 변환 효율이 나타나는 것으로 측정되었다.
2. 원주방향의 자석 배열이 촘촘하게 배열된 것 보다 여유롭게 배치된 경우의 회전토크가 오히려 더 증가되는 것으로 나타났으며 이는 회전자의 자력선이 일정부분 안정적으로 확보되기까지 원주방향의 자석 사이의 공간이 커짐에 자력선의 분포 공간이 충분히 확보되어 회전토크가 증가하는 현상으로 판단되며 이러한 현상은 자석수의 감소로 인한 자력선 세기의 감소효과가 나타나는 간격까지 계속 될 것으로 추정된다.
3. 회전자의 자석배열 실험을 통해 발열장치의 회전 토크를 수십 배 이상 크게 변화시키거나 미세하게 조절할 수 있음이 확인되었었으며 이를 통해 같은 회전에너지라도 다양한 토크와 회전수의 운전 점이 결정될 수 있을 것이다. 이에 따라 풍력블레이드의 토크와 발열장치의 토크가 서로 매칭 되도록 설계될 수 있을 것이며 발열장치의 회전축은 풍력블레이드의 공력토크에 의해 구동될 수 있게 될 것이다. 향후, 발열장치 회전자의 회전토크를 현실에 맞게 조정하고 풍력블레이드의 발생토크와 매칭하기 위한 추가적인 연구들이 요구된다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)(20124010203240)과 중소기업청(No.00043886)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

## References

- [1] Peter Jamieson, "INNOVATION IN WIND TURBINE DESIGN", A John Wiley & Sons, Ltd, Publication, pp.14-16.
- [2] 윤동원, 박희창, 홍용주, 이성휘, 김병인, 함상용, 2009, "와전류를 이용한 발열기의 개발", 대한기계학회, 대한기계학회 논문집 B권, 제33권 제8호 (통권 제287호), pp. 565-572.
- [3] 이상엽, 곽상엽, 박명진, 김우석, 이지광, 최경달, 배준한, 2007, "600 kJ SMES용 열 전도판의 구조에 따른 와전류 손실 특성", 대한전기학회, 2007 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부 문회 춘계학술대회 논문집, pp. 132-133.
- [4] 이정근, 이근, 조익춘, 2008, "FEM을 이용한 컨버터용 변압기 여자전류 및 와전류 손실해석", 대한전기학회, 2008 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 750-751.
- [5] 장석명, 조한욱, 이성호, 정연호, 2002, "영구자석 브러시리스 AC 모터의 와전류 손실 특성해석", 대한전기학회, 2002 대한전기학회 하계학술대회 논문집 B, pp. 700-702.
- [6] 이정중, 정재우, 이상호, 권순오, 홍정표, 2008, "유한요소해석을 이용한 영구자석의 와전류 손실 해석", 대한전기학회, 2008 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 794-795.

## APPENDIX

A형 표준불확도는 반복 실험으로 얻어지는 자료를 통계적으로 처리하는 평가 방법으로 표본분산에 해당되는 값이다. B형 표준불확도는 실험 장비의 성능, 측정에 있어서의 선택적인 경험, 혹은 문헌을 통해 측정값이 가질 수 있는 확률밀도함수를 가정하여 구하는 것이다. 본 연구에서는 AIAA의 불확도 분석 방법을 사용한다. 모든 에너지의 불확도는 약 5%이고 약 95% 신뢰 수준을 주는 포함인자(Coverage factor)  $k=2$ 를 곱한 표준불확도에 근거로 한다. 물의 질량 유량( $\dot{m}$ )에 대한 불확도는 물의 밀도에 대한 불확도  $\left(\frac{U_\rho}{\rho}\right)$ , 물의 체적 유량에 대한 불확도  $\left(\frac{U_V}{V}\right)$ 로 나타낼 수 있다. 위의 항들로 물의 질량유량에 대한 불확도를 계산한 결과 0.6%로 계산되어진다. 물의 비열( $C_p$ )는 물성치에 대한 불확실성으로 0.3%이고, 물의 입·출구 온도차( $\Delta T$ )에 대한 불확실성은  $2\left(\frac{U_{\Delta T}}{\Delta T}\right)$ 로 계산할 수 있다. 위 사항을 모두 고려한 풍 열원화 장치의 출력에너지(Q)의 불확도는 600 RPM일 때 3%, 1200 RPM일 때 1%, 1800 RPM일 때 0.9%로 계산 된다. 출력에너지 (Q)에 대한 불확도는 식 (A-1)에 의해서 구해진다.

$$\frac{U_Q}{Q} = \left[ \left( \frac{U_\rho}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{U_V}{V} \right)^2 + \left( \frac{U_{C_p}}{C_p} \right)^2 + 2 \left( \frac{U_{\Delta T}}{\Delta T} \right)^2 \right]^{(0.5)} \quad (A-1)$$

입력에너지(P)에 대한 불확도는 식 (A-2)에 의해서 구해진다.

$$\frac{U_P}{P} = \left[ \left( \frac{U_T}{T} \right)^2 + \left( \frac{U_\omega}{\omega} \right)^2 \right]^{(0.5)} \quad (A-2)$$

펄스에 대한 측정값은 대체적으로 정확하기 때문에 0.1%로 가정하여 계산하였다. 풍 열원화 장치의 입력에너지(P)의 불확도는 600RPM일 때 2%, 1,200RPM일 때 1.4%, 1,800 RPM일 때 1.2%로 계산 된다.

**윤택한**



2012년 군산대학교 기계공학과 공학사

현재 군산대학교 기계공학과 석사과정  
(E-mail : yunteakhan@naver.com)

**손영우**



2008년 군산대학교 기계공학과 공학사  
2012년 군산대학교 기계공학과 공학석사

현재 세대 에너지 설계본부  
(E-mail : syw@sedae.co.kr)

**이장호**



1988년 서울대학교 농공학사  
1995년 포항공과대학교 대학원 기계공학과  
공학석사  
1999년 LG전자 선임연구원  
2004년 포항공과대학교 대학원 기계공학과  
공학박사

현재 군산대학교 풍력기술연구센터장, 군산대학교 기계자동차공학부 교수  
(E-mail : jangho@kunsan.ac.kr)