

횡류형 터빈을 적용한 수직축 풍력발전시스템의 성능평가를 위한 실험 연구

조현성¹, 정광섭², 김철호^{3*}

¹서울과학기술대학교 NID융합기술대학원, ²서울과학기술대학교 공과대학 건축학부

³서울과학기술대학교 공과대학 기계·자동차공학과

An Experimental Study for the Performance Analysis of a Vertical-type Wind Power Generation System with a Cross-flow Wind Turbine

Hyun-Sung Cho¹, Kwang-Seop Chung² and Chul-Ho Kim^{3*}

¹NID Fusion Graduate School, Seoul National University of Science and Technology

²School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology

³Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and
Technology

요약 본 최근 성장하고 있는 해상 풍력의 실험연구에서 풍동시험이 수직형 횡류 풍력발전시스템의 성능을 조사하기 위해 실시되었다. 풍동의 시험 부분은 제한된 크기로 인해 실제 풍력 발전의 입구 안내 배인을 약 1/5로 축소시켰고, 터빈 임펠러의 지름을 모형 임펠러의 1/2로 감소시켰다. 임펠러 블레이드 갯수는 풍력 발전 시스템의 출력에 대한 또 다른 중요한 변수이기 때문에 8개와 16개로 변경하여 시험하였다.

실험 분석 결과, 모형 풍력 터빈의 출력 제동력은 정격 풍속 12m/s에서 블레이드 갯수가 8개 보다 16개일 때 82% 출력이 증가된 278와트로 측정되었고, 정격 제동력은 정격 작동 조건에서 3.9kW로 계산되었다.

Abstract In this experimental study for the current growing offshore wind, a wind tunnel test was conducted to examine the performance of the vertical-type cross-flow wind turbine power generation system. Due to the limited size of the test section of the wind tunnel, the inlet guide vane of the original wind power generation was scaled down to about 1/5 and the turbine impeller diameter was also reduced to 1/2 of the prototype impeller. The number of the impeller blade is another important parameter to the output power of the wind power generation system and the number was varied 8 and 16.

From the analysis of the experimental result, the output brake power of the model wind turbine was measured as 278watts with the 16-blade at 12 m/s of the rated wind speed and the rated brake power of the prototype wind turbine is calculated to 3.9kW at the rated operating condition.

Key Words : Computational fluid dynamics, Cross-flow wind turbine, Wind tunnel test, Wind turbine

1. 서론

대기의 기압차에 의해 발생하는 바람의 운동에너지를 전기에너지로 변환하기 위해 에너지 변환장치로 풍력터빈을 개발하여 활용해 오고 있다. 풍력에너지는 태양광/

태양열, 수력, 조류, 조력 등의 다른 종류의 신재생에너지에 비해 에너지 밀도가 매우 낮아 개발의 가치가 낮게 평가되어왔다. 최근 바람의 방향과 세기가 지상의 바람에 비해 우수한 해상풍력에너지 자원의 개발에 풍력발전의 선진국들이 적극 나서고 있다.

본 논문은 국토해양부 첨단도시개발 연구개발사업의 연구비지원(과제번호 “12첨단도시C12”)에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Chul-Ho Kim(Seoul National Univ. of Science and Technology)

Tel: +82-10-5219-6304 email: profchkim@seoultech.ac.kr

Received February 4, 2014

Revised March 3, 2014

Accepted March 6, 2014

풍력발전을 위한 바람에너지의 질은 크게 세 가지로 정의될 수 있다. 즉 바람의 방향과 풍속 그리고 바람의 지속성이 바람의 질을 결정하는 중요한 요소이다. 이러한 측면에서 볼 때 지상에서의 바람은 해상에서 발생하는 바람에 비해 난류성이 강한 질이 낮은 풍력에너지 자원이다.

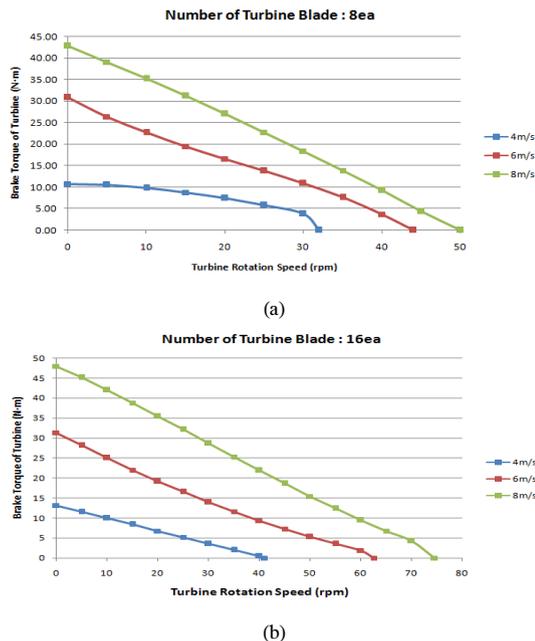
본 실험 연구에서는 선행설계연구[1]에서 개발된 2kW 급 풍력발전시스템의 축소 모델을 제작하였으며 개방형 아음속 풍동장치를 이용하여 풍속과 풍력발전용 터빈의 날개 기수의 변화에 따른 제동출력을 측정하였다. 이러한 모델 풍력발전장치의 실험 결과를 바탕으로 실물 풍력발전 장치에서 생산하게 되는 출력성능을 산출해 보았다.

1.1 성능평가 실험결과 및 분석

모델 풍력발전장치의 풍속변화에 따른 터빈임펠러의 회전수와 토크의 크기변화를 알아보았다. 일정한 풍속 즉 풍력발전장치로 유입되는 바람의 운동에너지가 일정한 조건에서 터빈의 회전수를 증가시키면 토크는 감소하게 되며, 터빈 날개의 기수가 증가할수록 많은 풍력에너지를 흡수한다는 사실을 알 수 있다.

1.1.1 풍속변화에 따른 터빈의 토크/회전수변화

Fig. 1에서 알 수 있듯이 일정한 풍속에서 유입되는 바람의 운동에너지가 일정하므로 회전수가 감소하게 되면 터빈의 제동토크는 증가한다는 사실을 알 수 있다.



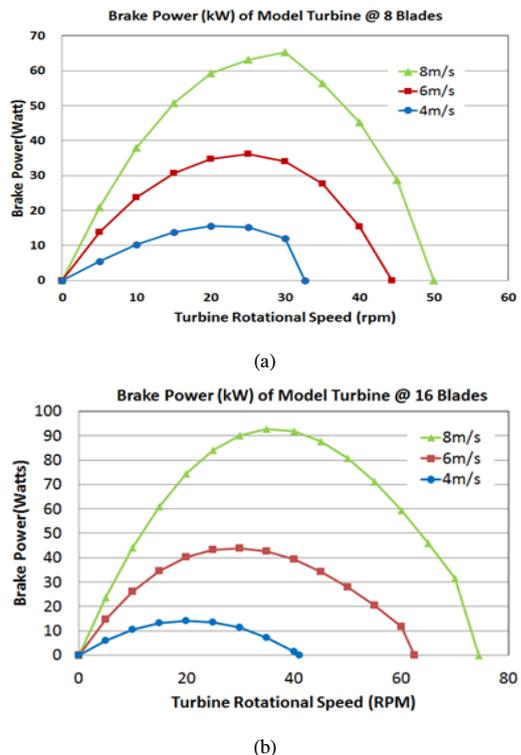
[Fig. 1] Variation of the model turbine speed with the brake torque with the change of the wind speed. (a) No. of turbine blade : 8ea, (b) No. of turbine blade : 16ea

또한 동일한 풍속에서 터빈의 날개 기수가 8개보다 16개 일 때가 에너지 흡수율이 높다는 사실을 알 수 있다. 즉 8m/s의 풍속에서 날개 기수가 8개일 때에는 최대 토크가 43.7 N·m정도이나 16개일 경우에는 약 48.0 N·m정도로 약 10%정도 제동 토크가 증가한다는 사실을 알 수 있다. 최대 회전수 역시 날개 기수가 16개일 때가 약 49% 증가하였다.

1.1.2 모델 풍력발전장치에서 터빈회전수 변화에 따른 제동출력변화

Fig. 2는 실제 프로토타입 풍력발전시스템에 비해 약 (1/5) scale의 크기인 모델 풍력발전시스템의 제동출력의 변화를 나타내는 선도이다. 일정한 풍속에서 터빈의 회전수가 증가할 때 출력이 증가하나 특정속도에 도달하게 되면 제동토크의 감소로 출력이 다시 감소하게 된다.

8m/s의 동일한 풍속에서 터빈 날개의 기수가 8개인 경우는 최대 출력이 65.3watt로 측정되나 16개인 경우는 최대 출력이 약 42% 증가하는 92.8watt가 측정되었다.



[Fig. 2] Variation of the brake torque of the model turbine with the turbine rotational speed with the change of the wind speed. (a) Brake power (kW) of model turbine @ 8 blades, (b) Brake power (kW) of model turbine @ 16 blades

1.1.3 실물 풍력발전장치에서 터빈회전수 변화에 따른 제동출력변화

본 실험연구에서 설계/제작하여 출력성능을 실험한 모델 풍력발전장치(model wind power system)의 크기는 실물 풍력발전장치(Prototype wind power system)에 비해 기하학적으로 입구의 면적비가 약 (1:5.6)이며, 터빈 임펠러의 직경역시 (1:2)의 비율로 축소된 크기이다. 즉,

(1) 실물풍력발전장치(Prototype Wind Turbine)의 크기:

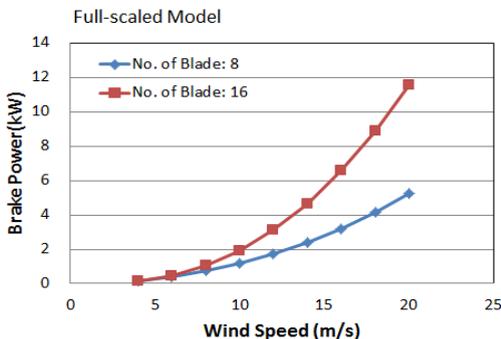
- 입구가이드베인 면적: 16m x 2m
- 실물 터빈의 투영면적비: 2m x 2m

(2) 축소모델발전장치(Model Wind Turbine)의 크기:

- 입구가이드베인 면적: 3.6m x 1.6m
- 모델 터빈의 투영면적비: 1m x 1.6m

위의 실물형상과 모델형상의 기하학적 형상의 비율을 고려하여 실물형상 풍력발전장치의 출력성능을 예측해 보면, 유입되는 공기의 운동에너지의 양이 약 5.6배 증가하게 되며, 터빈 임펠러를 통해 흡수되는 에너지의 량 역시 이론적으로 약 2.5배 정도 증가하는 것으로 판단할 수 있다. 이러한 기하학적 상사(geometrical similarity)의 개념을 도입하여 모델과 실물형상 풍력발전시스템의 출력성능을 예측해 보면,

Fig. 2에서 알 수 있듯이 날개의 기수가 2배인 16개의 터빈 임펠러를 장착하였을 경우 제동출력이 매우 크게 증가한다는 사실을 알 수 있다. 정격풍속인 12m/s에서 8개의 기수인 경우는 출력이 153watt이며, 16개인 경우는 278watt로 산출되었다. 즉 약 82%정도 출력이 증가하는 것으로 나타났다.



[Fig. 3] Variation of the brake power of the prototype wind turbine with the wind speed with the change of the blade number.

Fig. 3은 실물 풍력발전시스템의 제동출력(brake power)을 산출한 결과이다. 바람의 정격속도인 12m/s에서 날개의 기수가 8개인 경우 출력이 2.14kW가 산출되었으며, 16개인 경우는 제동출력이 약 82%증가한 3.9kW로 산출되었다.

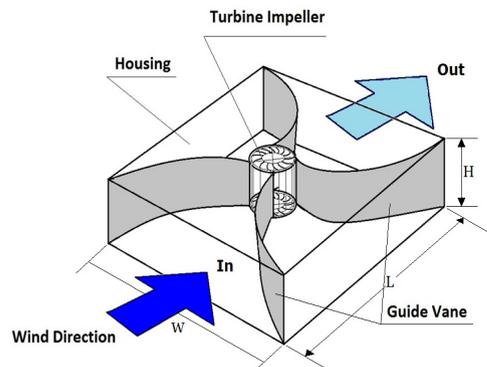
2. 본론

2.1 횡류형 수직풍력발전장치의 구조 및 형상 설계

본 연구에서 개발 중인 풍력발전시스템은 기존의 축류형(axial-flow type) 방식과는 달리 육상 바람의 질(wind quality)의 문제를 극복하기 위해 저 풍속(4m/s)에서도 발전이 가능하도록 터빈의 입구에 바람의 에너지를 모으는 역할을 하는 입구 가이드 베인(inlet guide vane)을 설치하였으며 이 가이드베인은 바람의 방향에 상관없이 바람의 유입각도를 터빈임펠러의 최적 유입각도를 유지하는 역할을 하게 된다.

본 연구에서 개발된 수직축 횡류형 풍력터빈은 양력식 터빈이 아닌 항력식 발전용 풍력터빈으로 바람의 속도에너지가 입구쪽의 가이드베인을 통과하는 순간 가속이 되며, 터빈임펠러의 입구에서 압력에너지로 전환되어 터빈 임펠러를 회전시키는 회전일로 변환된다.

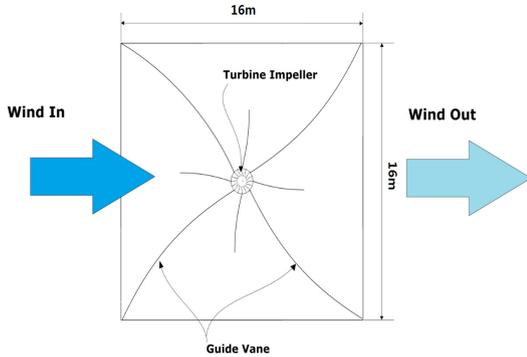
Fig. 4에서 알 수 있듯이 터빈 입출구에서의 압력차가 클수록 터빈을 구동하는 가용에너지가 커지게 되며, 선행연구^[1]를 통해 알 수 있었듯이 터빈임펠러 외부에 설치되는 가이드베인의 구조물은 터빈임펠러의 출구부분에서 강한 와류현상을 유발하며 이로 인해 터빈임펠러 전후방에서의 압력차를 증폭시키는 역할을 하게 되며 이는 항력식 풍력터빈에 매우 긍정적인 작용을 하게 된다.



[Fig. 4] Physical concept of the model wind power generation system: 16m(W)x16m(L)x2m(H)

2.1.1 풍력발전장치의 구조

Fig. 5는 본 연구에서 개발된 횡류형 터빈을 장착한 2kW급 수직풍력발전장치의 평면형상을 보여준다.



[Fig. 5] Configuration of the developed model wind power generation system; (top-side view)

실제 풍력 터빈입구에 설치되는 가이드베인 입구면적의 크기는 (16mx2m)로 설계되었으나 본 실험연구에서는 가용한 아음속 풍동의 검사체적의 크기에 맞추어 가이드베인 입구의 면적비를 실물의 약 1/5 scale로 제작하여 설계 풍력터빈의 성능평가 시험을 실시하였다.

실험을 위한 모델 가이드베인의 입구와 목의 면적비 ($AR=A_{th}/A_{in}$)는 0.19로 설정하였다.

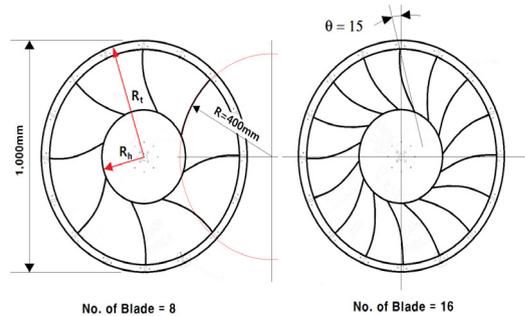
Fig. 6은 아음속 풍동의 검사공간 내부에 설치된 1/5 축소모델 풍력발전장치의 형상을 보여준다.



[Fig. 6] The model wind turbine system with the guide vanes and turbine impeller installed at the test section of the subsonic wind tunnel.

2.1.2 횡류형 풍력터빈 임펠러의 구조

Fig. 7는 본 연구에서 개발된 횡류형 터빈임펠러의 평면도를 보여준다. 본 실험연구를 위해 (1/2) scale의 축소 모델을 제작하여 출력성능 실험을 실시하였다. 임펠러 블레이드의 코드(chord) 길이는 31.7cm이며, 붙임각(θ)은 15도이다. 임펠러의 $(R_h/R_t)R$ 는 0.4로 설계하였으며 임펠러 날개의 기수는 8개와 16개로 고정하여 설계하였다.



[Fig. 7] 2-Dimensional view of the model turbine impeller and its geometry.



[Fig. 8] The model turbine impeller assembled with 16 blades and mounted on the test

d. Fig. 8는 터빈 블레이드가 16개 장착된 임펠러가 조립되어 토크와 회전수를 측정하는 장치에 장착된 모습을 보여준다.

2.2 풍력발전시스템의 성능평가실험

본 실험연구에서는 선행연구[2]를 통해 설계된 수직형 풍력발전시스템의 최적화 축소 모델을 완성하고, 제작하여 풍력발전 성능을 평가하기 위해 실험용 풍동실험을 실시하였다. 실험풍속을 3단계로 나누어 모델터빈의 출력성능을 측정하였으며, 풍속변화에 따른 터빈의 회전수

와 토크를 측정하여 제동출력을 산출하였다.

2.2.1 실험을 위한 풍동시험 장치

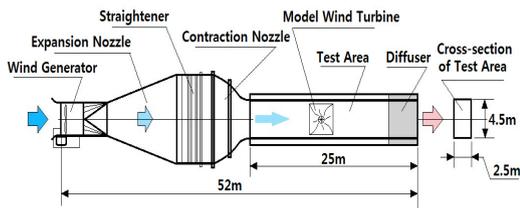
개발된 모델 풍력발전장치의 풍속조건 변화에 따른 제동출력(brake power)을 측정하기 위해 개방형 풍동을 사용하였으며 풍동 검사부의 재원은 폭 4.5m, 높이 2.5m 그리고 길이 25m로 자세한 작동제원은 아래 Table 1에 주어진 바와 같다.

풍동은 아음속 개방형 풍동으로 검사부의 폭과 높이가 각각 4.5m, 2.5m로 검사부의 크기를 고려하여 본 연구에서 개발한 모델 풍력발전장치의 크기를 결정하여 가이드 베인의 크기는 약 (1/5)배로 축소하고 풍력터빈 임펠러의 경우는 (1/2)배의 크기로 축소하여 제작하여 실험을 실시하였다.

[Table 1] Specification of the Wind Tunnel

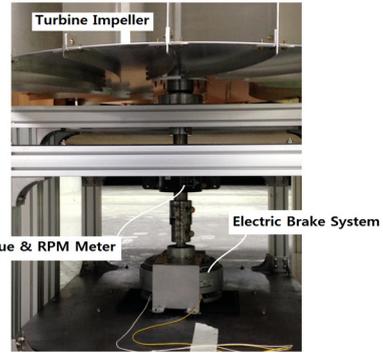
Type	Subsonic Open-type Wind Tunnel
Total Length	52m
Test section size	4.5m×2.5m×25m
Wind speed	0.3~17.5m/s
Turbulent intensity	< 5%
Flow uniformity	within 1.5%

Fig. 9은 본 연구에 사용된 개방형 아음속 풍동이 평면도를 보여주며 검사부(test area)의 중앙부에 모델 풍력터빈을 설치하고 바람 속도변화에 따른 토크와 임펠러 회전수를 측정하여 터빈의 제동출력을 산출하였다.



[Fig. 9] Top-view of the 4.5x2.5x25m open-type low speed wind tunnel.

제동출력의 산출을 위해 터빈 임펠러의 하단부위에 토크미터와 전자제어식 제동장치를 부착하고 각 실험 풍속 (4, 6, 8m/s)에서 터빈의 회전수를 변화 시켜가며 제동토크(brake torque)의 변화를 측정하였다.



[Fig. 10] Assembly of the electric brake system and digital torque meter with the model turbine impeller.

Fig. 10은 터빈 임펠러 하단부위에 설치된 전자제어식 제동장치(electric controlled brake system)과 터빈임펠러 축과 제동장치 축 사이에 설치되어 축의 제동토크(brake torque)변화를 측정하기 위한 동력계의 사진을 보여준다.

2.2.2 터빈성능평가를 위한 주요 실험변수

본 연구에서 설계/제작된 풍력발전시스템은 가이드 베인의 크기가 3.6m x 3.6m x 1.6m이며, 내부에 장착되는 횡류형 터빈 임펠러는 Fig. 4에서 보듯이 외경이 1.0m, 내경이 0.4m이며 날개의 기수가 8, 16개인 2종류를 제작하여 실험을 실시하였다. 모델 발전장치를 풍동의 시험부에 설치 후 풍동의 가용 풍속을 판단하기 위해 예비실험을 실시하였으며 그 결과 풍동 관속도의 변화에 따른 최대 풍속이 8.5m/s로 측정되었다. 이를 근거로 실험을 위한 풍속을 결정하였다.

발전장치의 입구풍속은 4m/s, 6m/s, 8m/s 3단계로 나누어 실험하였으며 이때 바람의 속도와 온도는 가이드 베인 입구의 전방 3.5m에서 측정하였다.

[Table 2] Experimental Parameters and Its Ranges

Parameter	Range
Wind speed	4~8m/s
No. of Blade	8, 16
Wing-tip clearance	10mm

2.3 실험결과 분석을 위한 이론

풍속의 변화에 따라 터빈 임펠러의 제동토크와 임펠러 회전수를 측정하여 제동출력은 다음의 식으로 풍력터빈의 제동출력을 산출하는 이론은 다음과 같다.

- 풍력터빈의 제동출력(P_{brake}),

$$P_{brake} = T_{brake} \times N = \frac{2\pi N}{60}$$

- 풍력터빈의 유입에너지(P_{inlet}),

$$P_{inlet} = \frac{1}{2} \dot{m} V^3 = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

- 풍력터빈의 제동효율(η_{brake})

$$\eta_{brake} = \frac{P_{brake}}{P_{inlet}} \times 100 (\%)$$

3. 결론

본 실험연구에서는 현재까지 설계된 횡류형 터빈을 장착한 수직형 풍력발전시스템을 제작하여 풍동장치를 이용하여 풍속의 변화에 따른 모델 풍력발전장치에서의 제동출력성능을 측정하였다. 또한 본 실험을 결과를 바탕으로 실물크기의 프로토타입 풍력발전시스템에서의 출력성능을 산출하였다. 실험결과에 의하면 최초 연구과제의 목표치인 풍속 12m/s에서 풍력발전시스템 당 2kW의 출력을 충분히 생산할 수 있는 풍력발전시스템의 개발이 가능한 것으로 판단된다. 본 연구결과를 정리해 보면,

(1) 모델 풍력발전시스템 출력성능의 경우 정격 풍속인 12m/s의 속도에서 날개 기수가 8개일 때 153watt의 출력이 측정되었으며, 16개인 경우는 82%의 출력이 증가된 278watt의 출력이 측정되었다. 즉 터빈 날개의 기수가 증가할 수 록 보다 많은 바람의 속도에너지를 흡수한다는 사실을 알 수 있었다. 선행의 이론연구[3]에서는 날개의 기수가 최대 24개까지 출력이 증가하는 것으로 나타났으므로 추후 보완적 실험연구가 필요한 것으로 판단된다.

(2) 모델 풍력발전시스템의 실험결과를 바탕으로 기하학적 상사의 개념을 도입하여 프로토타입 실물 풍력발전시스템의 성능을 산출해 본 결과 정격 풍속인 12m/s에서 날개의 기수가 8개인 경우 제동출력이 2.14kW가 산출되었으며, 16개인 경우는 3.9kW의 출력이 산출되었다. 이 경우 역시 터빈 날개의 기수를 최대 24까지 늘렸을 때 출력이 더욱 상승할 것으로 기대되며 보완연구가 필요한 것으로 판단된다.

References

- [1] Kwang-Seop Chung, Chul-Ho Kim, Hyun-sung Cho, "Effect of Rear-Vortex of a Convergent-Divergent Duct on the Flow Acceleration Installed in a Vertical Structure", Korean J. Air-Conditioning and Ref. Eng., Vol. 25, No. 2, pp. 94-10, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.6110/KJACR.2013.25.2.094>
- [2] Sang-Hoon Jung, Kwang-Seop Chung, Chul-Ho Kim, "Development of a Cross-flow Type Vertical Wind Power Generation System for Electric Energy Generation Using Convergent-Divergent Duct", Korean J. Air-Conditioning and Ref. Eng., Vol. 23, No. 8, pp.543-548, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.6110/KJACR.2011.23.8.543>
- [3] Kwang-Seop Chung, Chul-Ho Kim, Final Report : A development of 10kW-class wind power generation system applicable for the roof of the building, high-tech city development project in 2012., Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2012.
- [4] Douglas, J. F., et al, Fluid Mechanics, Prentice Hall, pp. 406-447, 2001.
- [5] Y. A.Cengel and J. M.Cimbala, Fluid Mechanics Fundamentals and Applications, McGraw-Hill International, 2nd edition, pp.472-476, 2009.

조 현 성(Hyun-Sung Cho)

[정회원]



- 1993년 10월 : NSW대학교 기계-생산대학원 산업공학과 (공학 석사)
- 2002년 2월 : 서울과학기술대학교 NID융합기술대학원 나노·IT 융합기술프로그램학과 (공학박사 과정)
- 1999년 1월 ~ 2009년 1월 : 트라이인컴기술연구소 연구소장
- 2013년 8월 ~ 현재 : 서정대학교 자동차과 겸임 교수

<관심분야>

메카트로닉스, CFD시뮬레이션, 정보통신

정 광 섭(Kwang-Seop Chung)

[정회원]



- 1974년 2월 : 한양대학교 공대 건축공학과 (공학사)
- 1991년 8월 : 한양대학교 대학원 건축공학과 (공학박사)
- 2008년 10월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 건축기계설비연구소 소장
- 1981년 6월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 건축학부 교수

<관심분야>

친환경건축, 건축공기조화설비

김 철 호(Chul-Ho Kim)

[정회원]



- 1982년 2월 : 인하대학교 공과대학원 항공공학과 (공학석사)
- 1995년 7월 : NSW대학교 기계·생산공학부 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1984년 2월 ~ 1986년 7월 : 육군3사관학교 대학부 전임강사
- 1987년 9월 ~ 1996년2월 : LG 전자연구소 책임연구원
- 1996년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 공과대학 기계·자동차공학과 교수

<관심분야>

엔진설계, 자동차공기역학, CFD시뮬레이션