

풍동과 예인 수조를 이용한 터빈 성능 비교 시험

강정민*, 이영호, 이규찬**

A Comparative Performance Test for Turbine in Wind Tunnel and Towing Tank

Jungmin Kang*, Yeongho Lee and Kyuchan Lee**

Abstract

The objective of this paper is to suggest a new method of a wind turbine performance test. The performance test of a wind turbine is generally carried out in a wind tunnel. The test needs not only a high-accuracy measuring system but also durable structure to withstand high speed turbine rotation and wind flow. Therefore, we tried turbine performance test using a towing tank to improve stability and reliability. Because a turbine rotates more slowly and generates more torque in the water than in the wind tunnel under similarity conditions. In this study, we developed turbine performance test systems and verified the turbine test method using a towing tank through comparing results of the wind tunnel and the towing tank test.

Key words

Wind turbine(풍력터빈), Performance test(성능 시험), Model test(모형 시험), Wind tunnel(풍동), Towing Tank(예인수조)

(접수일 2011. 9. 7, 수정일 2011. 12. 15, 게재확정일 2011. 12. 19)

* 현대중공업 선박해양연구소

■ E-mail : kangjm@hhi.co.kr ■ Tel : (052)203-9349 ■ Fax : (052)202-3410

** 현대중공업 선박해양연구소

■ E-mail : kcleee@hhi.co.kr ■ Tel : (052)202-5531 ■ Fax : (052)202-3410

Nomenclature

P : Power, W
 τ : Torque, $N \cdot m$
 N : Revolution, rpm
 V : Flow speed, m/s
 ρ : Density, kg/m^3
 μ : Viscosity, $kg/m \cdot s$

1. 서론

지구 온난화와 같은 화석 에너지에 의한 환경문제가 대두되고 화석 연료의 고갈에 대처하기 위해 친환경적인 재생 에너지의 수요가 점점 증가하고 있다. 그 중에서 풍력 발전은 재생 가능한 청정 대체에너지 가운데 가장 경쟁력이 있는 발전 방식으로 주목받고 있다. 또한, 정부의 녹색 에너지 성장 정책과 시장의 요구에 힘입어 국내에서도 많은 기업들이 풍력 발전기에 대한 연구를 활발하게 진행하고 있다.

풍력 발전기 개발에서 풍력 터빈 설계는 가장 핵심적인 요소이다. 풍력 터빈을 설계하고 그 성능을 평가하는 과정의 상당 부분은 수치해석을 통해 이루어지며 축소 모형 시험으로 검증한다. 그러나 축소 모형 시험은 모든 상사 요인을 일치시키기 어려울 뿐만 아니라 고정밀을 요구하는 축소 시험에서 발생하는 실험 오차 등으로 인해 실제 성능과 차이가 발생할 여지가 크다. 특히 대형 풍력 발전 장치를 시험할 만한 풍동 시험 설비는 드물고, 모형의 형상이 축소됨에 따라서 출력이 매우 작으므로 정밀한 계측 시스템이 필요하다. 또한, 풍동에서 성능 평가 시험을 수행할 때는 터빈이 수 천 rpm으로 고속 회전하므로 시험 설비는 내구성과 안정성을 갖추어야 한다.

본 연구에서는 터빈 블레이드 공력 성능 시험을 위한 축소 모형 풍동 시험법의 문제점을 보완하기 위해 예인수조를 이용한 터빈 공력 성능 평가법을 제시하고자 한다. 동일한 터빈을 풍동과 예인수조에서 각각 시험하여 얻어진 성능 평가 데이터를 비교하여 두 시험 방법 간의 상사성을 검증하고 각 시험 방법의 특성을 분석하고자 하였다.

2. 풍력 터빈 성능 평가 방법

풍력 터빈의 성능을 나타내는 중요한 지표로 사용되는 출력 특성곡선은 각 풍속에 따른 최고 출력 값을 찾아내는 방법으로 얻을 수 있다. 따라서 특정 풍속에서 정확한 출력을 계측하는 것이 터빈 성능 평가에 가장 중요한 요소이다.

터빈 출력을 측정하기 위해 필요한 변수는 유속, 회전수, 토크이다. 성능 평가 시험 시 여러 가지 변수를 동시 통제하기 어렵고, 실험 오차가 발생할 여지가 크다. 따라서 본 연구에서는 유속, 유체의 특성, 온도, 압력 등의 환경 요소를 최대한 고정시키고 모터를 이용하여 터빈의 회전수를 변화시키면서 발생하는 토크를 정밀하게 계측한다. 회전수와 토크 계측치를 이용하여 출력이 최대로 발생하는 점을 특정 유속에서 터빈의 출력 특성으로 결정한다.

토크 계측 과정에서 터빈 출력 이외 다른 요인, 즉 모터 회전에 의해 발생하는 토크 발생량을 제거해야 한다. 따라서, 유속이 전혀 없고 모터에 의해 터빈이 일정 속도로 회전하면서 축에 발생하는 토크를 측정하였다. 유체에 의한 영향이 아니라 터빈이 모터에 의해 정속 회전하면서 발생하는 토크는

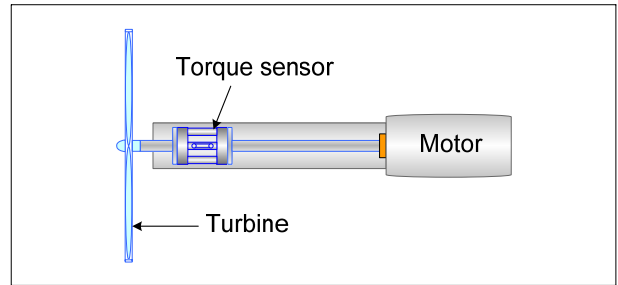


Fig. 1 Schematic of the turbine test system

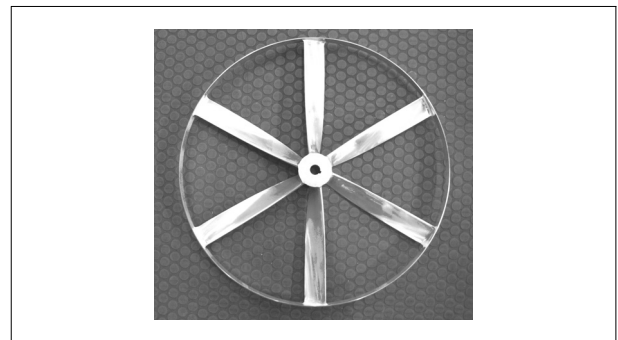


Fig. 2 Ring type wind turbine model

성능 평가에 영향을 미치기 어려운 매우 낮은 수준이었으며, 오프셋 에러로 간주하고 각 회전수마다 계측하여 측정 결과에서 제거하였다. 결과적으로 모터는 터빈의 회전수만 제어할 뿐 출력에는 영향을 미치지 않는다. 또한, 시험 과정에 터빈에 의해 모터에서 발생하는 역기전력은 모터 드라이버에서 흡수하여 모터의 구동 특성에 영향을 최소화하면서 설정한 회전수를 유지하도록 구성하였다.

Fig. 1은 이와 같은 성능 평가 방법을 위한 시험 장치의 구성도이다.⁽¹⁾ 터빈은 토크 센서를 거쳐 모터와 직결하였으며, 토크 센서에 축 방향 힘에 의한 간섭이 없도록 스러스트 베어링을 설치했다. 풍동 시험과 예인 수조 시험은 각 시험 환경에 따른 약간의 구조적 변경 사항이 있지만, 기본적으로 Fig. 1의 구성을 벗어나지 않았다. 각 시험에 따른 장비에 대해서는 각 장에서 다시 언급하겠다.

3. 성능 평가 대상 터빈

본 연구에서 평가 대상으로 선정한 터빈은 현대중공업(주)에서 자체 개발한 링 타입 터빈의 축소 모형이다. 모형은 Fig. 2

에서 보이는 바와 같으며, 모형의 지름은 0.5m이다. 터빈은 알루미늄 합금 재질로 일체형으로 제작되었다.

4. 풍동을 이용한 성능 시험

4.1 풍동 설비 제원

풍동 시험 설비는 공군사관학교의 아음속 풍동을 이용하였다. 풍동은 단일 폐쇄 회로식으로 총 길이는 65m이고, 최대 풍속은 92m/s이다. 측정부의 크기는 길이 8.7m, 폭 3.5m, 높이 2.45m이고, 수축비는 7.26:1이다. 풍동의 성능 및 유질 특성은 Table 1에 나타난 바와 같다.⁽²⁾

4.2 성능 평가 시스템

성능 평가를 위한 시험 장치는 Fig. 1과 같은 구성으로 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 제작되었다. 터빈의 회전수가 수 천 rpm으로 예상되어 고속에서 시스템이 안정적으로 동작하도록 모터와 축, 토크 센서, 터빈의 허브가 감속 기어 없이 일체형으로 조립되게 설계하였다. 모터 시스템은 Siemens의 1.8kW PMSM 모터와 SINAMICS 모터 드라이브 시스템을 사용하여 회전수를 정밀하게 제어하였다.

Table 1. Wind tunnel performance & Flow quality

특 성		수 치
최대 유속		92m/s
유속 제어		± 0.029 m/s
유속 안정성		0.11%
압력계수구배 (at 74m/s)		0.001/m
흐름각 (at 74m/s)	Pitch	$< 0.1^\circ$
	Yaw	$< 0.1^\circ$
압력분포 (at 74m/s)	$\Delta P_t/q$	0.09%
	$\Delta P_s/q$	0.18%
	$\Delta q/q$	0.18%
난류도 (at 74m/s)	u'/U	0.04%
	v'/U	0.09%
	w'/U	0.09%
온도 분포 (at 74m/s)		$\pm 0.25^\circ\text{C}$

4.3 토크 계측 장비

풍동 시험 장비는 앞서 언급한 바와 같이 고속으로 회전하고, 토크는 수 N·m로 비교적 낮은 편이다. 따라서 고속 회전에 대한 내구성을 갖고 매우 정밀한 토크의 변화를 계측할 수 있는 정밀 토크 미터가 필요하다. 그러나 본 시험에 적합한 상용 토크 미터를 선정하기 쉽지 않았다. 시스템의 구조상 일반적인 축형 토크 미터를 장착하기 적합하지 않았고, 슬립링을 통한 아날로그 데이터 전송에 따른 노이즈가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 Bluetooth 통신을 이용한 무선 토크 계측 시스템을 개발하여 적용하였다.^(1,3) 토크 센서는 축 방향 응력과 계측하고자 하는 토크가 독립적으로 작용할 수 있도록 Fig. 4와 같이 제작되었다.

토크 센서에서 계측된 신호는 Fig. 5와 같이 구성된 무선계측장치를 통해 데이터 패킷으로 구성되어 Bluetooth 프로토콜에 따라 PC로 전송된다. Fig. 6은 무선계측장치 실물이다.



Fig. 3 Wind tunnel test bench



Fig. 4 Torque sensor

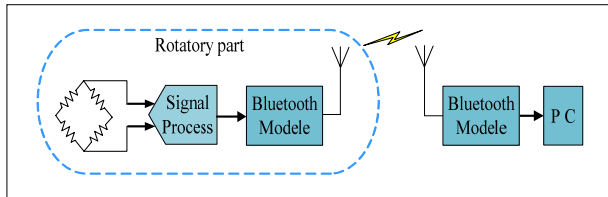


Fig. 5 Schematic of the torque meter

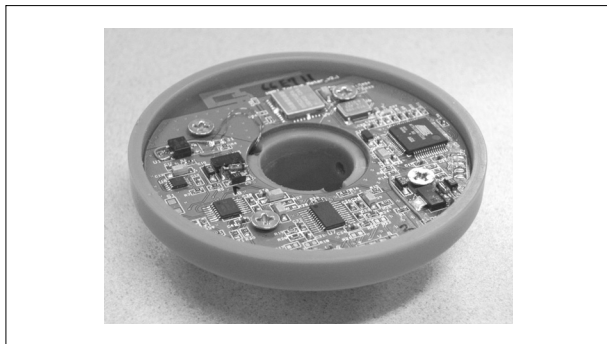


Fig. 6 Torque meter circuit

개발된 토크 미터의 선형성을 검증하기 위한 캘리브레이션 결과, 선형성 오차는 0.10%로 1N·m 토크당 107.31mV의 출력이 나왔다. 5회 반복 보정 시험 결과, 개발된 계측 장비의 재현도 오차는 0.11%이며 부하를 연속적으로 증가 및 감소시키면서 출력을 비교한 결과, 하중이력 오차는 0.45%로 확인되었다.

4.4 성능 시험 결과

본 연구에서 개발된 시험 시스템을 이용하여 2장에서 설명한 바와 같이 각 풍속마다 회전수를 변동시키면서 토크를 측정하여 최고 출력점을 도출하였다. Fig. 7과 같이 각 풍속에 따른 출력 특성곡선을 구하고 각 풍속의 최고 출력점을 추출함으로써 터빈의 출력 특성곡선이 결정되었다.

풍동 시험 결과로서 풍력발전용 터빈의 출력 성능을 평가할 수 있는 데이터가 산출되었다. Fig. 8의 결과는 풍속 변화에 따라 터빈의 최고 출력이 발생하는 점의 터빈 회전수를 의미한다. Fig. 9의 그래프는 풍속의 변화에 따라 터빈에서 발생하는 최고 토크를 의미하고, 이 결과에 최적 회전수를 이용하여 Fig. 10과 같이 터빈 출력 곡선이 얻어졌다.

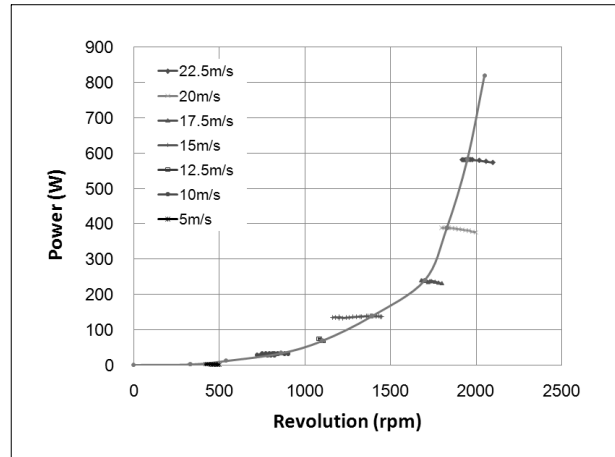


Fig. 7 Result of turbine test in the wind tunnel

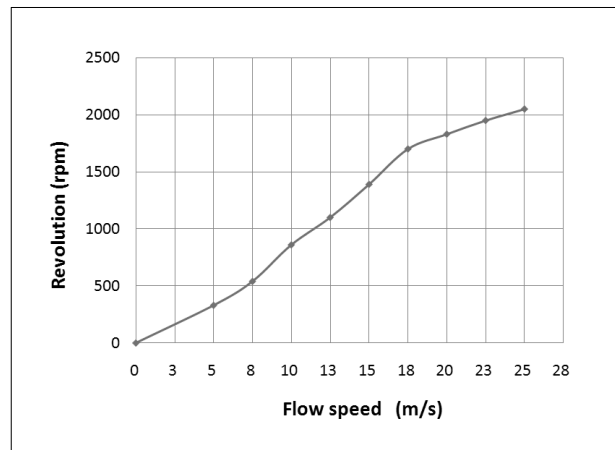


Fig. 8 Result of Turbine revolution in the wind tunnel

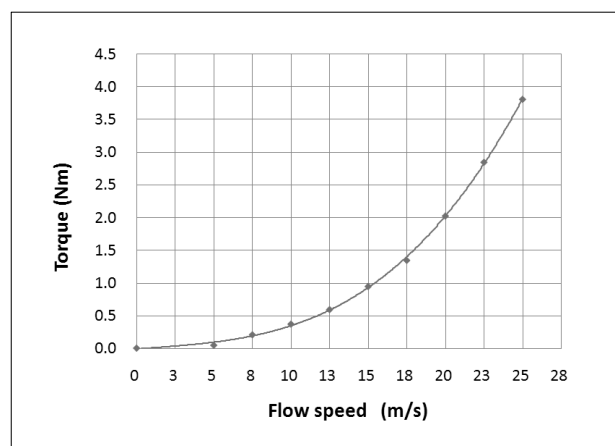


Fig. 9 Result of Turbine torque in the wind tunnel

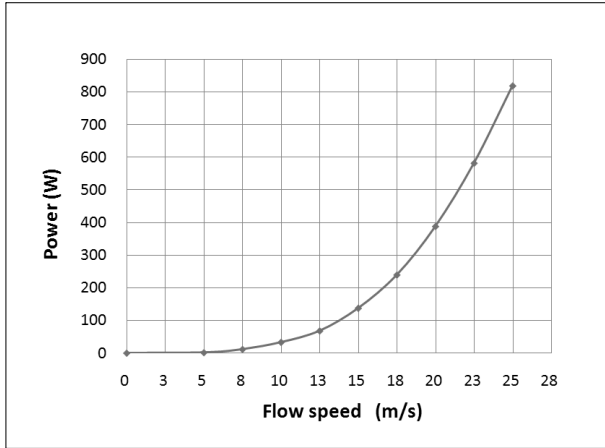


Fig. 10 Result of Turbine work in the wind tunnel

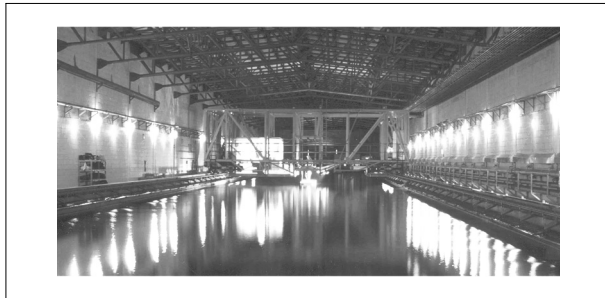


Fig. 11 Towing tank and Carriage

5. 예인 수조를 이용한 성능 시험

5.1 예인 수조 설비 제원

터빈 성능 평가를 위해 Fig. 11과 같은 현대중공업 선박해양연구소 예인 심수조 설비를 이용하였다. 예인 심수조는 총 길이 210m, 폭 14m, 깊이 6m이며, 모형을 끄는 예인전차는 600kW 급 직류 전동기로 최고 속도 11m/s로 운전 가능하다. 속도 제어 오차는 ± 0.0007 m/s으로 터빈에 매우 균일한 유속을 발생시킬 수 있다.

5.2 성능 평가 시스템

예인수조를 이용한 터빈 성능 평가 시스템은 Fig. 12와 같은 형태로 제작되었다. 제작된 계측 시스템은 예인 전차에 의해 수심 0.8m에서 일정 속도로 이동하면서, 시험 풍동 시험

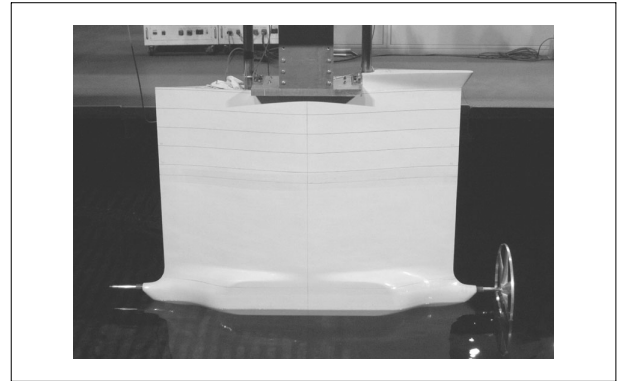


Fig. 12 Towing tank test system

과 동일한 터빈을 일정 속도로 회전시키면서 발생하는 토크를 측정한다. 시험 장치 내부에는 5kW DC 3상 유도 전동기와 상용 토크 미터가 장착되어 있다.

5.3 토크 계측 장비

예인수조 시험 설비는 풍동 시험 설비에 비해 크기가 크고, 구조적으로 안정적이어서 상용 토크미터를 장착할 수 있었다. 유체가 공기에서 물로 바뀌면 밀도가 증가함에 따라 토크 발생량도 크게 증가한다. 따라서 계측 범위가 0~100N·m에 이르는 상용 토크 미터를 사용하였다. 사용된 토크 미터의 선형성 오차는 0.1%이며, 하중이력 오차와 재현성 오차 역시 0.1% 수준이었다.

5.4 성능 시험 결과

예인수조를 이용하여 터빈의 성능 곡선을 도출하는 시험을 수행하였다. 공기에 비해 밀도가 큰 물을 이용하여 터빈을 회전시키므로 시험 유속은 풍동 시험에 비해 상당히 낮은 0~3.5m/s의 범위에서 시험하였다.

0.25m/s 단위로 유속을 변화시키면서, 유속에 따른 최대 출력점을 도출하였다. 시험 방법은 풍동 시험과 동일하게 고정된 유속에서 터빈의 회전수를 변화시키면서 토크를 계측하여 터빈 출력을 계산하였다. Fig. 13은 유속에 따라 최대 출력이 발생하는 터빈의 회전수를 나타내고, 그 때 발생하는 토크량은 Fig. 14의 그래프와 같이 나타났다. 최대 출력점에서 얻어진 회전수와 토크량을 이용하여 Fig. 15와 같은 터빈 출

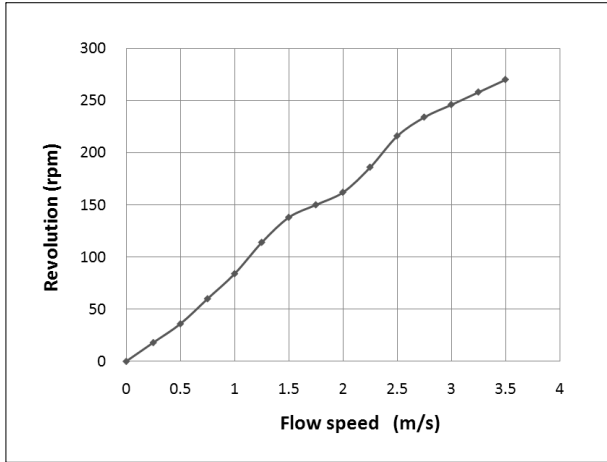


Fig. 13 Result of Turbine revolution in the towing tank

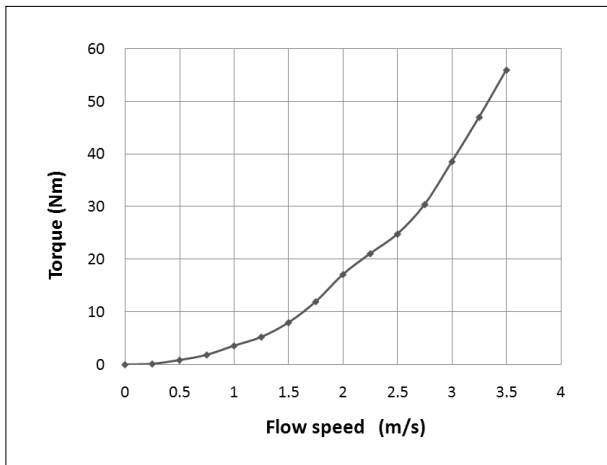


Fig. 14 Result of Turbine torque in the towing tank

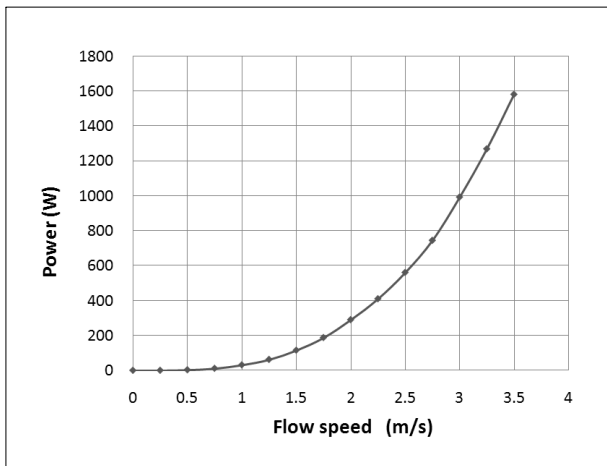


Fig. 15 Result of Turbine power in the towing tank

Table 2. Properties of Fluids

조 건	풍 동	예인수조
유 체	공 기	물
온도(°C)	-2	20
밀도(kg/m ³)	1,3028	998,21
점성계수(kg/m·s)	1,725E-05	1,003E-03

력 곡선을 구하였다.

6. 풍동과 예인수조 시험 데이터 비교

6.1 풍동과 예인수조 시험 간 관계

풍동 시험은 공기가 터빈을 회전시키는 유체로 작용하며 예인수조 시험은 물이 터빈을 회전시킨다. 동일한 터빈을 두 시험 설비를 통해 성능 평가를 하기 때문에 스케일에 따른 보정을 할 필요는 없지만 터빈을 구동하는 유체의 특성은 Table 2와 같이 다르다. 따라서 두 시험 방법에 따른 결과를 비교하기 위해서는 유체의 특성의 차이를 보정해야 한다.

공기와 물의 특성을 비교하는 무차원수로서 Re 수를 사용하였다. 풍동 시험의 Re 수와 예인수조 시험에서의 Re 수를 일치시키기 위한 유속비를 계산하면 다음 식과 같다.

$$\frac{V_{air}}{V_{water}} = \frac{\frac{\mu_{air}}{\rho_{air}}}{\frac{\mu_{water}}{\rho_{water}}} = \frac{\frac{1.725 \times 10^{-5}}{1.3028}}{\frac{1.003 \times 10^{-3}}{998.21}} = 13.177$$

두 시험의 Re 수를 일치시키기 위해서 예인수조의 유속을 약 13.177배로 변환하면 풍동 시험의 조건과 유사해 짐을 알 수 있다. 따라서 물의 유속을 풍속으로 환산하여 유속별 Tip speed ratio 기준으로 터빈의 회전수를 Fig. 16과 같은 그래프로 표시하였으며 풍속 기준으로 환산한 두 결과가 상당히 일치하게 나타남을 알 수 있었다.

6.2 데이터 비교 및 경향성 분석

예인수조와 풍동에서 각각 시험한 결과와 비교 분석해 보았다. 앞 절에서 언급한 수조와 풍동의 유체의 특성을 고려하

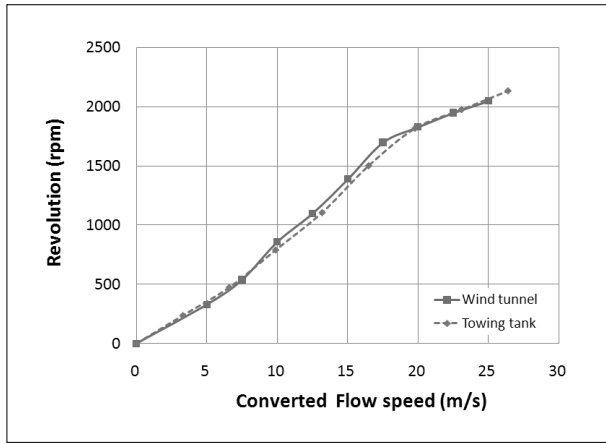


Fig. 16 Comparison of Turbine revolution

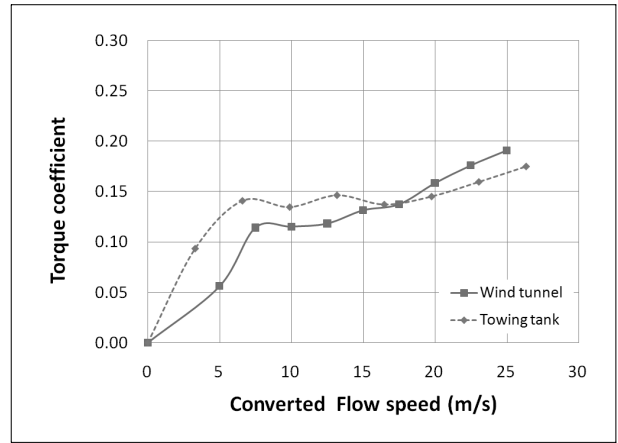


Fig. 18 Comparison of Torque coefficient

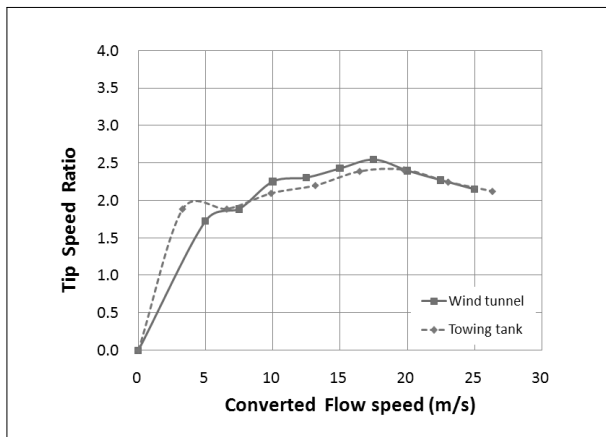


Fig. 17 Comparison of Tip speed ratio

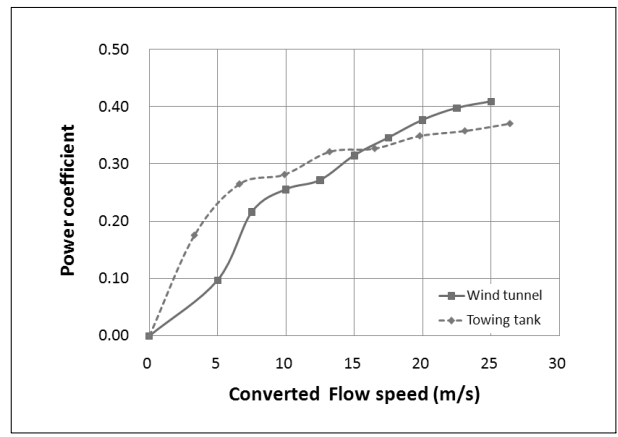


Fig. 19 Comparison of Power coefficient

여 수조 시험 데이터의 유속을 풍속으로 변환하고, 터빈의 주요 성능 지표를 무차원화 시켜서 두 시험 결과를 비교하였다.

두 시험의 터빈 회전수를 무차원화하여 주속비로 나타내었다. 이미 Fig. 16을 통해 터빈 회전수가 거의 일치함을 알 수 있었으며, Fig. 17은 풍속에 따른 최고 출력 발생 주속비 역시 유사한 경향을 보이고 있다.

각 유속별 최고 출력 발생점에서 계측된 토크 값을 무차원화 시킨 토크계수는 Fig. 18과 같이 결과가 나왔다. 약간의 오차가 있지만 전체적으로 유사한 경향성을 보이고 있다. 낮은 유속에서의 토크 계수의 차이는 풍동 시험에서 발생한 시험 오차로 추정되었다. 풍동 시험의 경우, 회전수가 높고 토크 발생량이 매우 작기 때문에 매우 정밀한 토크 계측이 필요하며 자체 개발한 토크 센서와 시험 설비에 의한 오차가 토크

계측 결과에 영향을 주는 것으로 판단된다. 그 결과 0~10m/s 낮은 유속에서의 출력 계수가 큰 차이를 보이고 있다.

풍동 시험과 예인수조 시험에서 얻어진 유속별 터빈 최고 출력을 효율로 변환하여 결과를 비교하였다. 출력을 산출하는 요소에는 회전수와 토크가 있다. 두 시험 결과에서 회전수는 매우 잘 일치하는데 비해 토크 결과는 약간의 차이가 있어서 출력 효율 곡선은 Fig. 19와 같이 토크 계수 비교 곡선과 유사한 경향성을 보이고 있다.

결과적으로 예인수조를 이용한 터빈 성능 평가 방법은 풍동 시험과 유사함을 알 수 있고, 안정적으로 신뢰성 높은 데이터를 취득할 수 있어서 풍동 시험보다 정밀한 결과를 얻을 수 있다.

7. 결론

동일한 크기의 풍력 터빈 모형을 풍동 설비와 예인수조 설비를 통해 각각의 출력 특성곡선을 구하고, 그 결과를 분석하였다. 각 실험 결과를 유체 특성에 맞게 보정하여 무차원화하면 주속비, 토크 계수, 출력 효율에서 유사한 경향성을 얻을 수 있었으며, 유속에 따른 최적 회전수를 구할 수 있는 주속비의 경우 거의 일치한 결과가 나타났다.

따라서 터빈 성능 평가를 시험 조건이 까다로운 풍동 시험을 대신하여 예인수조를 이용한 시험으로 대체할 수 있게 되었다. 즉, 수 m/s 범위의 저속 예인수조 시험으로 수십 m/s 이상의 높은 풍속의 풍동 시험을 대체 할 수 있으므로 안정적인 시험을 수행 할 수 있을 뿐만 아니라 측정하는 토크가 커서 측정결과의 오차에 대한 여유를 크게 가질 수 있는 장점이 있다.

추후 좀 더 정밀한 계측 시스템의 구성, 모형스케일의 변화 및 시험환경에 따른 오차를 최소화하며 풍동과 예인수조 시험 사이에 발생하는 오차 요인을 더 상세하게 분석하여 상사

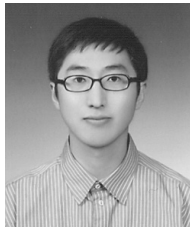
성을 높이고자 한다.

본 연구를 통해 일반적으로 풍동에서 수행하는 축소 모형 터빈 블레이드 공력 시험을 예인수조 시험법으로 대체하여 안정적이고 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

References

- [1] Kang, J. M., Lee, Y. H. and Lee, K. C., 2010, "Development of Telemetry System for Wind Turbine Performance Test", HHI Engineering Review, Vol. 30, No. 1, pp. 34-39.
- [2] KAFA, 2006, KAFA Subsonic Wind Tunnel, Korea Airforce Academy, Chungbuk, pp. 1-4.
- [3] Kang, J. M., Kauh, S. K., 2009, A Research on telemetry system using Bluetooth and In-situ torque measurement of heavy-duty engine, Seoul National University, Seoul, PP. 18-42.

강 정 민



2007년 건국대학교 기계공학부 공학사
2009년 서울대학교 기계항공공학부 공학석사

현재 현대중공업 선박해양연구소 제작계측실
(E-mail : kangjm@hhi.co.kr)

이 영 호



1989년 서울시립대학교 전자공학과 공학사
1992년 경희대학교 계측제어공학과 공학석사

현재 현대중공업 선박해양연구소 제작계측실
(E-mail : lyh@hhi.co.kr)

이 규 찬



1984년 중앙대학교 전기공학과 공학사
1995년 울산대학교 계측제어공학과 공학석사

현재 현대중공업 선박해양연구소 제작계측실
(E-mail : kcleee@hhi.co.kr)