

미국과 유럽의 풍력터빈 풍동실험

장 병희¹⁾

Wind tunnel test of wind turbine in United States and Europe

Byeong Hee Chang

Key words : Wind turbine(풍력터빈), Wind rotor(풍력로터), Wind tunnel(풍동), Wind tunnel test(풍동시험), Wind tunnel experiment(풍동실험)

Abstract : In spite of fast growing of prediction codes, there is still not negligible uncertainty in their results. This uncertainty affects on the turbine structural design and power production prediction. With the growing size of wind turbine, reducing this uncertainty is becoming one of critical issues for high performance and efficient wind turbine design. In this respect, there are international efforts to evaluate and tune prediction codes of wind turbine. As the reference data for this purpose, field test data is not appropriate because of its uncontrollable wind characteristics and its inherent uncertainty. Wind tunnel can provide controllable wind. For this reason, NREL has done the full scale test of the 10m turbine at NASA-Ames. With this reference data, a blind comparison has been done with participation of 18 organizations with 19 modeling tools. The results were not favorable. In Europe, a similar project is going on. Nine organizations from five countries are participating in the MEXICO project to do full scale wind tunnel tests and calculation with prediction codes. In this study, these two projects were reviewed in respect of wind tunnel test and its contribution. As a conclusion, it is suggested that scale model wind tunnel tests can be a complementary tool to calculation codes which were evaluated worse than expected.

1. 서 론

최근 풍력발전의 대형화 추세에 따라 풍력터빈도 커지고 있다. 세계 최대의 풍력터빈이라고 알려진 REPower사의 5MW 풍력터빈의 경우, 직경이 126m 에 이른다. 이러한 대형터빈의 경우, 정확한 공력하중 예측은 과도한 안전계수를 피할 수 있으므로 효과적인 구조설계가 가능해지고 정확한 성능예측은 풍력발전단지의 정확한 경제성 분석을 가능하게 해준다. 이런 점들은 신뢰도가 관건인 해상 풍력발전 단지에서는 더욱 중요하다.

풍력터빈의 성능과 공력하중을 계산하는 코드들도 많은 발전이 있었다. 그러나 이런 코드들은 풍력터빈에 작용하는 돌풍이나, 급변풍향, 측풍, 경계층, 타워후류 등의 영향을 제대로 계산하기에는 부족하다. 실속전의 영역에서는 성능예측은 10-20%, 동적하중 예측은 30% 정도의 정확도를

갖는다고 알려져 있다.⁽¹⁾

그러나 이러한 정확도는 노지시험과의 비교를 통해 얻어진 결과인데, 노지에서의 자연풍은 시험조건을 조절할 수 없으며, 시간에 따라 끊임없이 변하고 있어 많은 불확도를 포함하고 있다.

이러한 측면에서 최근 미국의 National Renewable Energy Laboratory (NREL)을 중심으로 NASA-Ames 의 24.4m x 36.6m 풍동에서 직경 10m 풍력터빈의 풍동실험(Unsteady Aerodynamics Experiments, UAE)이 있었고, 유럽에서도 MEXICO(Model Experiments under Controlled Conditions)라는 유사한 프로젝트가 진행 중이다.

본 연구에서 이들 두 풍동실험 사례를 조사 분석하고, 풍력터빈의 공력하중과 성능예측을 향상시킬 수 있는 추가적인 방법을 제시하고자 한다.

2. NREL UAE

2.1 배경

NREL은 풍력터빈에 작용하는 공력특성을 파악을 위해 10m 직경의 풍력터빈을 제작하여 National Wind Technology Center (NWTC)에서 10년 이상 노지시험을 수행하였다. 또한 이와는 별도로 네덜란드, 영국, 미국, 덴마크로 이루어진 IEA Annex XIV 에서도 1992년부터 5년간 5개 기관에서 노지시험을 수행되었다. 그러나 이들 시험 결과 공히, 풍력터빈에 작용하는 유동현상이 예상보다 훨씬 복잡하다는 점이 인지되었다. 따라서 미국과 유럽은 각각 제어가능한 유동장내에서 풍력터빈 실험을 위해 풍동실험을 계획하게 되었다.

NREL은 계산코드들을 개발하고 검증하는데 필요한 데이터들의 우선순위와 실험 목적을 결정하기 위해 풍력터빈과 모델링 분야의 전문가들로 자문위원회를 구성하였으며 1998년 10월에 첫 회의를 개최하였다. 실험 모델은 노지시험에 사용되었던 10m 풍력터빈을 그대로 사용하였으며 사용 풍동은 NASA-Ames의 24.4m x 36.6m 풍동이였다.

Table 1 Blind-Comparison Participants and Modeling Codes Used [2]

Organization	Code	Type
U. of Illinois	PROPID-C PROPID-UI	Performance Performance
TU of Denmark CRES Greece	ROTABEM	Performance
Global Energy Concepts	ADAMS	Aeroelastic
Longborough Univ. CREST UK	YAWDYN	Aeroelastic
Windward Engineering	ADAMS-1	Aeroelastic
	ADAMS-2	Aeroelastic
	ADAMS-3	Aeroelastic
Garrad-Hassan	BLADED	Aeroelastic
NASA Ames	Camrad II	Aeroelastic
Risoe	HawC HawC-3D	Aeroelastic Wake
ECN	PHATAS	Aeroelastic
FFA/Nordic Windpower Teknikgruppen	VIDYN	Aeroelastic
Risoe	EllipSys3D	CFD
TU of Denmark	ADDWANS	CFD
Georgia Tech	Hybrid CFD	CFD
CRES-NTUA	GENUVP	Wake
U. of Glasgow	HawDawg	Wake
TU of Delft	PREDICDY N	Wake
CRES-NTUA	NS3D	CFD

총 1700개 이상의 실험이 수행되었으며 2000

년 5월에 완료되었다. 그 이후, NREL은 실험결과를 공개하지 않고, 계산코드들의 결과를 받아 비교하는 "blind comparison"을 조직하게 되었다. 비교를 위한 실험조건은 총 20개였으며, Table 1 과 같이 18개 기관(유럽 12개), 30명의 전문가들이 19개의 코드를 갖고 참여하였다.

2.2 실험장치

실험에 사용된 NASA-Ames의 24.4m x 36.6m 풍동은 기존의 폐회로 방식의 12.2m x 24.4m 풍동에 개방회로 방식으로 대형시험부를 추가한 설비이다. 그러나 시험부가 대기에 노출되어 있는 개방회로 풍동이지만 상당한 우수한 유질특성을 보인다. 측정결과 유속 불균일도는 0.25% 이하, 흐름각 불균일도는 0.5°이하, 흐름방향 난류도는 0.5% 이하였다. 시험부 최대속도는 50m/sec이며, 30초 동안의 유속변화의 표준편차는 Table 2와 같았다.⁽²⁾

Table 2 Standard deviation of flow speed variation during 30 seconds [2]

U(m/sec)	5	10	15	20	25
S.D.(m/sec)	0.17	0.08	0.07	0.05	0.05

사용된 풍력터빈은 NREL에서 10년 이상 노지 시험에 사용해 오던 2-balde 형식의 직경 10m, 20kW 용량의 UAE 풍력터빈이다.

DAQ 또한 NREL에서 노지시험을 하던 DAQ 장치를 그대로 사용하였는데, 유속측정의 경우, NASA Ames 의 자체 측정값과의 차이가 0.0008 psi 정도로 충분한 정확도가 확인되었다.

시험부 벽면에 의한 봉쇄효과는 풍속 10m/sec 이상에서는 1% 이하로 나타났으며, 대부분의 실험에서 벽면에 의한 봉쇄효과는 무시할 만 하다.

2.3 실험 결과

Fig. 1 는 풍속 13m/sec에서, 30도 요우각 풍력터빈의 0.3R에서 36회전 동안 표면압력을 측정하여 계산한 힘(normal(Cn), tangential(Ct))과 피칭모멘트(Cm)의 거동을 보여주고 있다. 사용된 익형은 NREL S809로 15도의 정적 실속각을 갖는데⁽³⁾, Fig. 1에서 보는 바와 같이 동적 실속은 좀 더 높은 받음각에서 일어나지만 실속후의 공력변화는 큰 폭의 변화를 보여준다. 또한 같은 받음각이라도 회전방향에 따라 공력특성이 달라지는 동적특성을 보여주고 있다. 이러한 공력특성의 변화는 계산코드들로 예측하기가 매우 어렵다.

NREL은 UAE 결과를 비밀로 한 채 계산코드들의 성능비교를 위한 Blind Comparison을 주도하였다. 그러나 참가자들의 부담을 덜기 위해 결과

공개 시 참가기관명 대신 Table 1의 코드 Type으로 명시하였다.

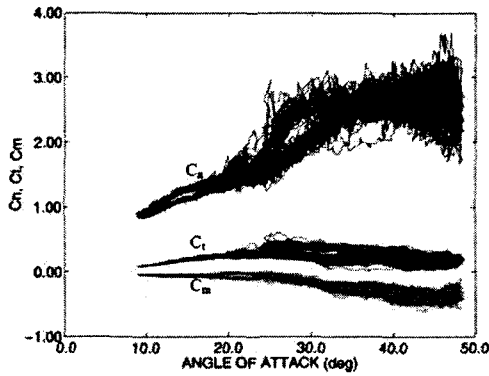


Fig. 1 0.3R 지점에서 36회전 동안의 공력변화 (풍속=13m/sec, yaw=30°) [2]

Fig. 2 은 Blind Comparison 결과를 토우크 측면에서 비교한 결과이다. 예상과 달리 계산코드들의 결과는 풍동실험결과와 많은 차이가 있으며, 유속이 증가할수록 그 차이는 대체적으로 커진다. 그러나 토우크는 블레이드에 작용하는 공력의 총합으로 나타나므로 토우크 결과가 잘 맞다고 해서 계산코드의 정확도를 의미하는 것은 아니다.

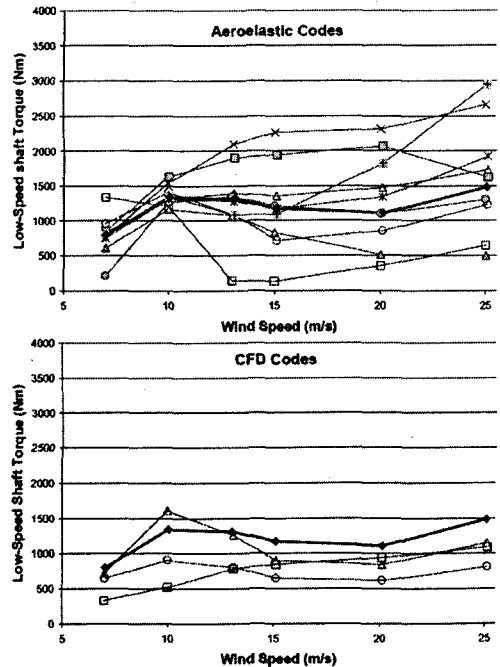
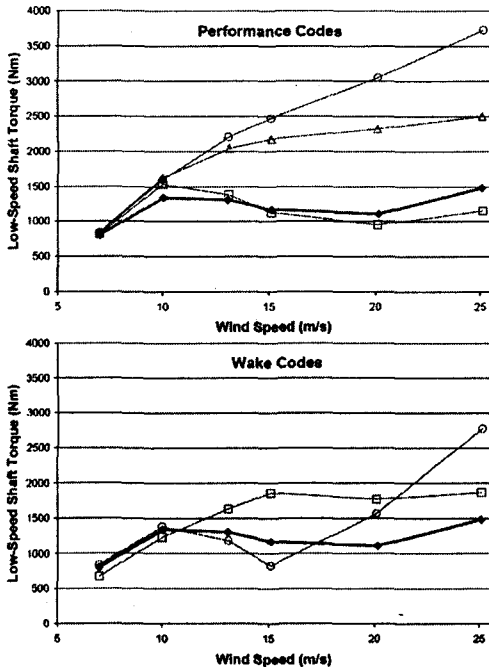


Fig. 2 Low-speed shaft torque (upwind, yaw=0°) [2]

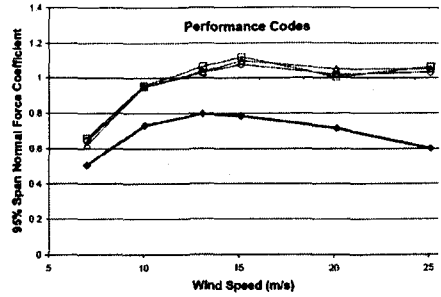


Fig. 3 0.95R normal force coefficient Low-speed shaft torque (upwind, yaw=0°) [2]

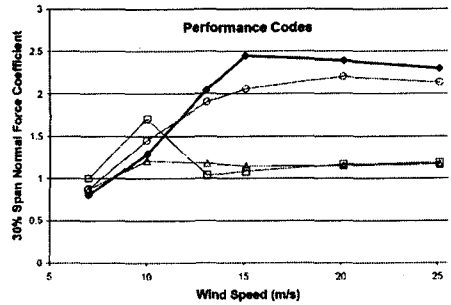


Fig. 4 0.3R normal force coefficient Low-speed shaft torque (upwind, yaw=0°) [2]

예를 들어 Fig. 2의 Performance Code 중 빈사 각형 결과는 토우크에서는 풍동실험치와 매우 유사하지만, Fig. 3에서 보는 바와 같이 0.95R 위치에서는 단면에 걸리는 수직력은 과대예측하고 있고, 반대로 Fig. 4의 0.3R 위치에서는 수직력을 과소예측하고 있다. 즉, 이 코드는 풍력터빈의 전체 출력은 근사하게 예측할 수 있을지라도 블레이드에 걸리는 하중분포를 잘못 예측하여 구조적인 위험을 초래할 가능성이 있다. 이러한 경향은 다른 코드들에서도 유사하게 나타나는데, 이는 tip loss와 root 근처에서의 실속지연 효과를 고려하지 못했기 때문이다.

비교결과 모든 계산코드들이 한두 변수들에서는 우연히도 유사한 결과를 주기도 하였으나 전체적으로 많은 차이를 보여 주었다. 그 결과를 요약하면 Table 3과 같다. 놀랍게도 실속이 일어나기 전인 풍속 7m/sec 조건에서도 출력과 bending 예측에서 많은 오차가 있었다. 이러한 오차는 주로 Aeroelastic 코드들에서 발생함을 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 그러나 실속이 발생하는 풍속 15m/sec 이상에서는 어느 코드라도 많은 차이를 보인다. 특히 거의 모든 코드들이 블레이드 bending을 과대 평가하고 있었다. 실속영역에서의 불완전한 예측능력은 stall 제어 방식의 설계한계를 의미한다. 이런 이유로 우수한 성능을 얻기 위해서는 피치제어 방식이 선호되고 있다.

Table 3 Standard deviation of flow speed variation during 30 seconds [2]

U(m/sec)	turbine power	bending force
7	25-175%	85-150%
20	30-250%	
25		75-150%

모든 경우에도 풍동실험 결과와 가장 유사한 결과를 유지하는 코드는 3D 비압축성 Navier-Stokes CFD 코드였다. 그러나 CFD 코드는 많은 계산시간이 요구되므로 upwind, yaw=0° 경우만 결과를 제출하였으므로 yaw 각이 있는 경우에 대해서는 알 수 없었다. 따라서 CFD 코드를 풍력터빈 설계에 활용하기 위해서는 아직도 좀 더 많은 연구가 필요하다.

결과적으로 off-yaw 상황에서의 동적실속, 타워후류 간섭, 3D 회전효과(inboard에서는 실속을 지연시키고, outboard에서는 tip loss 를 발생시키는) 등이 계산코드들에 오차를 일으키는 중요한 요인이라고 분석되었다.

3. MEXICO

3.1 배경

미국 NREL의 UAE 프로젝트에 자극 받아 유럽에서는 Table 3과 같이 5개국 10개 기관의 참여로 유사한 풍동실험 프로젝트를 추진하게 되었다.

Table 3 MEXICO 프로젝트 참여기관

국가	기관	역할
네덜란드	ECN	총괄, 로터설계, BEM
	Dut	가시화, 2D 실험
	NLR	DAQ
	Polymarine	고객관점
덴마크	RISOE	실험 Matrix
	DTU	NaS 지원
스웨덴	FFA	가시화
그리스	CRES	NaS 지원
	NTUA	NaS 지원
이스라엘	Technion	실험모델 제작

MEXICO의 실험내용은 미국 NREL의 UAE 시험과 유사하지만, 가능한 한 서로 보완적인 실험이 되도록 구성하였다고 하며 다음과 같은 차이점이 있다.

Table 4 NREL UAE 와 MEXICO 의 차이점

	NREL UAE	MEXICO
blade	2	3
taper	low	high
Re 변화	high	low
입구 풍속	5-hole@5-Span (34,51,67,84,91%)	단면전체 : PIV 입구유동장 동특성
블레이드 압력	pressure hole & p-ducer	Kulite
측정 주 대상	실속 이후	실속 이전
bending	압력 적분	strain gauge

3.2 실험장치

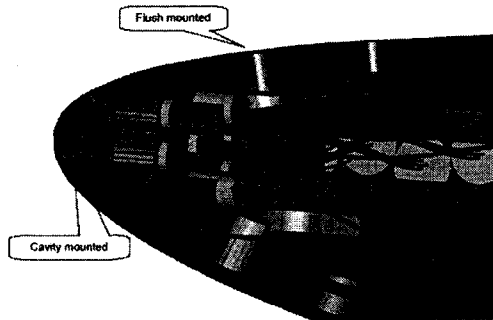
NREL UAE와 다른 실험중의 하나는 Kulite 센서를 이용한 블레이드 표면의 동적압력 측정이 가능하다는 점이다. Kulite 센서는 기존의 스트레인게이지 방식의 센서와는 달리 반도체방식을 이용하며, 압력튜브없이 직접 표면에 설치할 수 있다는 점이 특징이다. 물론 앞전이나 뒷전과 같이 설치공간이 없는 경우에는 압력튜브를 사용하기도 한다. Picture 1 은 이와 같은 두 가지 방식의 Kulite 설치 모습을 보여주고 있다.

3.3 결과

당초 계획은 36개월의 사업기간으로 2001년 1

월에 착수하였으나, 실제 진행은 많이 지연되었다. 더구나 최근 이스라엘에서 풍동실험 모델이 완성되어 DNW LLF로 운반되던 도중, 모델에 손상이 생겨 다시 수리 중에 있다. 따라서 실제 풍동실험은 내년에야 가능할 것이라고 한다.

2001, "Unsteady Aerodynamics Experiment Phase IV : Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns," NREL/TP-500-29955, National Renewable Energy Laboratory.



Picture. 1 Installation of Kulite sensor on leading edge

4. 결론

NREL과 MEXICO 프로젝트들에서는 계산코드들의 검증을 위한 기준자료로서 풍동실험을 하였다. 그러나 NREL UAE의 비교결과로 보면, 대부분의 계산코드들이 예상보다 심각한 계산오차를 갖고 있음이 알려졌다. 따라서 고정익 항공기의 경우처럼, 풍력터빈에서도 축소모델 풍동실험이 계산코드들과 상호 보완 도구로 활용할 가능성을 검토해 볼 필요가 생겼다.

한국항공우주연구원에서는 보유중인 국내 최대풍동에서의 축소모델 풍력터빈 풍동실험으로 NREL의 UAE는 물론, 진행되고 있는 MEXICO 프로젝트에도 자료공유 형태로 참여할 계획이다.

References

- [1] H. Snel and J.G. Schepers, 2005, "MEXICO, Summary of the project," Web site of Energy research Center of the Netherlands, http://www.ecn.nl/wind/other/mex_summ.html.
- [2] D. A. Simms, S. Schreck, M. M. Hand, and L. J. Fingersh, 2001, "NREL Unsteady Aerodynamics Experiment in the NASA-Ames Wind Tunnel : A Comparison of Predictions to Measurements," NREL/TP-500-29494, National Renewable Energy Laboratory.
- [3] M.M. Hand, D.A. Simms, L.J. Fingersh, D.W. Jager, J.R. Cotrel, S. Schreck, and S.M. Larwood,