

# 풍동시험에서 블레이드 표면상태에 따른 풍력터빈 성능변화

조태환<sup>1)</sup>, 김양원<sup>2)</sup>, 이덕호<sup>3)</sup>, 장병희<sup>4)</sup>

## Wind turbine test results by blade surface condition in wind tunnel test

TaeHwan Cho, YangWon Kim, DeokHo Lee, ByeongHee Chang

**Abstract** NREL Phase VI 12% 축소모델을 사용한 표준풍력터빈 풍동시험은 2006년에 1차 시험이 수행되었다. 1차 풍동시험은 복합재 블레이드를 사용하여 표준조건(설치각 3도)에 대해 수행되었으며 블레이드 표면상태에 따라 측정값이 영향을 받는 것을 파악하였다. 2007년 4월에 수행된 2차 풍동시험은 표면상태의 영향을 보다 정확히 파악하기 위해 알루미늄 블레이드를 사용하여 시험을 수행하였으며, 블레이드 제작 정밀도에 따른 영향을 파악하였다. 낮은 레이놀즈 수 영역(저속영역)에서는 블레이드 표면상태 따라 토크 값 다르게 나타나며, 블레이드 끝단 부근의 제작 정밀도는 최대 토크 이후의 영역에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 0.1mm 이내의 정밀도로 제작된 모델의 경우 NREL 시험결과와 전체적인 형상이 유사하게 나타나며, 축소효과에 의한 영향으로 최대토크는 약 25% 정도 감소현상을 보이고 있다.

**Key words** Wind Tunnel Test(풍동시험), Wind Turbine(풍력터빈), Scale effect(축소효과), NREL Phase VI

\* 한국항공우주연구원 첨단공력구조팀

■E-mail : thcho@kari.re.kr ■Tel : (042)860-2628 ■Fax : (042)860-2604

### Nomenclature

V<sub>wind</sub> : wind speed, m/s  
V<sub>rot</sub> : rotational speed, m/s

### subscrip

KARI LSWT : KARI Low Speed Wind Tunnel  
NREL : National Renewable Energy Laboratory

## 1. 서론

풍력터빈의 성능을 결정하는 주요한 요소인 블레이드의 공기역학적 특성은 수치전산해석 부분에서는 활발히 연구되고 있으나, 실험 부분에서는 2차원 익형 등에 대해서만 집중되고 있다. 풍력터빈이 대형화하는 추세에서 실제 풍력터빈을 실험할 수 있는 시험설비가 매우 희귀하며, 일반적인 풍동시험 기법인 축소모델풍동시험의 경우 시험의 효율성에 대해 많은 논란이 있다. 본 연구는 한국항공우주연구원 중형아음속풍동(이하 KARI LSWT)에서 수행된 ‘프로토타입/풍력터빈 풍동시험 기술 연구’의 일환으로 회전체 풍동시험 기법을 확보하기 위해

수행되었다. 풍력터빈 풍동시험 기법은 표준풍력터빈 시험장치 운용과 풍력터빈 축소효과 보정기법 확립을 주 목표로 한다. 연구는 2005~2007, 3년에 수행될 예정이며 2005(1차년)에는 전산해석을 통한 축소효과 보정기법 개발이 수행되었으며, 2006(2차년)에는 표준풍력터빈 시험장치 개발 및 1차 풍동시험이 수행되었다. 2007(3차년) 2차 풍동시험은 1차 풍동시험에서 제기된 블레이드 표면상태에 따른 영향과 블레이드 제작 정밀도에 따른 영향을 파악하였다. 6월에 예정된 3차 풍동시험은 블레이드 확장에 따른 영향과 소음측정이 수행될 예정이다.

풍동시험은 KARI LSWT(시험부 단면 4m x 3m)에서 수행하였으며, 풍력터빈 모델은 NREL Phase VI에서 사용된 모델을 사용하였다.

## 2. 표준풍력터빈

한국항공우주연구원 중형아음속풍동(이하 KARI LSWT)은 1999년 완공되어 2006년까지 100여회의 시험을 수행한 풍동으로 시험부 단면적은 4mx3m이며, 시험부 최대 풍속은 120m/s이다. 완공 후 측정된 시험부 유질이 표 1에 나타나 있다.

Table 1 KARI LSWT Flow Quality

$q/q(\%)$	$a(^{\circ})$	$T(^{\circ}C.)$	$u'/U(\%)$	$v'/U(\%)$	$w'/U(\%)$
0.3	0.1	0.3	0.07	0.13	0.13

### 2.1 NREL Phase VI 모델

풍력터빈 풍동시험의 축소효과를 파악하기 위해 실 모델 풍동시험결과가 공개되어 있는 NREL Phase VI 모델을 선정하였다. 선정된 모델은 풍력터빈 비정상 유동 해석을 위해 NASA Ames(80'x 120') 풍동에서 다양한 조건에 대해 시험한 후, 시험조건 및 기준형상 시험결과를 공개한 모델이다. NREL Phase VI 모델 기준형상 풍동시험조건은 아래와 같다.

- 터빈 직경 5m
- 블레이드 : 단면 S809, 개수 2
- 정격회전수 : 72 RPM
- 시험 풍속 : 6m/s ~ 25 m/s

### 2.2 시험장치 및 1차 시험결과

KARI LSWT 표준풍력터빈 모델은 시험부 봉쇄율 및 끝단 마하수, 최대 토크등을 고려하여 설계/제작 되었으며, NREL Phase VI 모델의 12% 축소모델로 제작되었다. 시험표준 조건은 블레이드 끝단 마하수를 일치시키기 위해 600RPM을 선정하였다.

표준풍력터빈 시험장치는 그림 1과 같은 형상으로 제작되었으며, 1차시험은 토크와 축력을 동시에 측정할 수 있는 주문형 센서(DACELL MC2110K)를 사용하였으나, 축력의 경우 허브 하중에 의한 간섭영향 및 회전에 따른 신호 불안정성으로 계속 사용되지 않았다. 시험장치의 안정성을 위해 2차시험은 상용센서(DACELL TRB-5K)를 사용하여 토크만을 측정하였다.

2006년 수행된 1차 풍동시험은 복합재 블레이드를 사용하였으며, 3차원 측정결과 제작된 블레이드는 흐름방향으로 0.6도 정도 틸트각이 형성되어 있으며, 틸트각을 보정한 후에도 페인

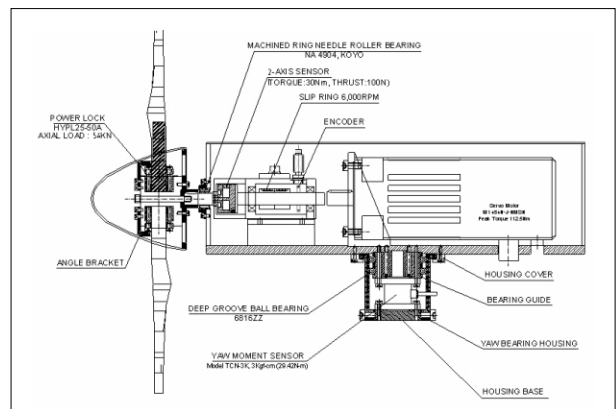


Fig. 1 Model design(12%) : Nacelle

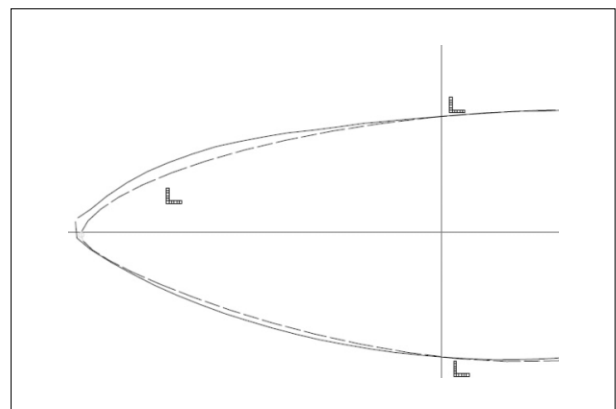


Fig. 2 Blade accuracy(93% section)

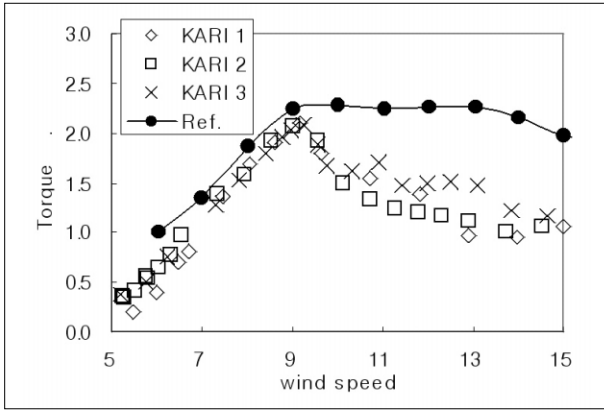


Fig. 3 Blade surface condition

Table 2 Legend for 'Fig. 3'

Legend	Condition
KARI 1	No treatment : Clean
KARI 2	Silicon tape 부착
KARI 3	0.18mm trip dot 부착
Ref.	NASA Ames 기준시험

트 두께 등의 영향으로 0.5mm 이상의 오차가 있는 것으로 판명되었다. 또한, 3차원 표면 생성 오차로 인해 그림 2와 같이 블레이드 끝단 부근에서 익형 앞 부분 형상이 0.3mm 정도 차이가 존재한다. 그림 3에서 점선은 S809 익형이며, 실선은 틸트각을 보정한 후, 측정값이며, '1'자는 가로 세로 0.6mm 표시자이다.

1차 풍동시험 결과 그림 3과 같이 블레이드 표면상태에 따라 저속영역의 토크값이 변하며, 최대 토크 이후 영역은 KARI 시험결과와 NREL 시험이 상이한 결과를 보이고 있다.

### 3. 2차 풍동시험

#### 3.1 블레이드

1차 시험에 사용된 블레이드는 표면에 페인트가 도색되어 있어 도트 및 테이프를 탈/부착하는 과정에서 표면에 손상이 발생하여 표면 상태에 따른 시험을 수행하기에는 적합하지 않으며, 표면도색 등으로 인해 설계형상에 비해 0.5mm 정도 두꺼운 형상을 가지고 있다. 표면 상태와 형상차이로 인한 영향을 확인하기 위해 동일한 블레이드를 알루미늄으로 제작하였다.

Table 3 Blade Type

구분	재질	형상
Blade#0	복합재	익형 앞단 오류(0.3mm)
Blade#1	알루미늄	익형 앞단 오류(0.3mm)
Blade#2	알루미늄	Blade#1 15% Chord 확장형
Blade#3	알루미늄	익형 앞단 오류수정
Blade#4	알루미늄	Blade#3 15% Chord 확장형(예정)

또한, 3차원 표면 생성 오차로 인해 그림 2와 같이 블레이드 끝단 부근에서 익형 앞 부분 형상이 0.3mm 정도 차이가 존재하므로 이를 수정한 블레이드를 추가로 제작하였다. 시험에 사용된 블레이드는 총 4종이며 각 조건은 표 3과 같다. 블레이드 표면조건이 풍동시험결과에 미치는 영향을 분석하기 위해 본 논문에서는 코드를 확장하지 않은 블레이드 #0, #1, #3의 시험결과를 비교하였다. 코드 확장효과는 별도의 논문에서 분석할 예정이다.

#### 3.2 풍동시험

2차 풍동시험은 2007. 3월~4월에 KARI LSWT에서 수행하였으며, 시험에 사용된 계측장비 및 시험방법은 1차 시험과 동일하며 참고문헌 1에 기술되어 있다. 그림 4에 2차 풍동시험모델이 시험부에 설치된 모습이 나타나 있다. 풍력터빈 토크를 측정하는 센서는 '2.2'에서 언급한 바와 같이 토크/추력 겸용 센서에서 토크 전용센서로 교체하였으며, 모터와 블레이드 연결부위 일부를 수정하였다. 이러한 시스템의 변화가 측정결과에 미치는 영향을 파악하기 위해 블레이드0을 이용하여 전체 시스템 점검을 수행하였다. 2차 시험은 표 4와 같이 구성되었으며, 블레이드 3은 표면효과 및 피치각 영향을 비교하였다. 블레이드 1과 2는 15% chord 확장효과를 점검하기 위해 사용되었다.

Table 4 RUN Configuration

Blade	Surfae	Pitch	RPM	Comment
0	Clean	3	600	시스템 점검용
1	Clean	3	500~700	확장효과 비교용
2	Clean, 7.2mil dot, 0.05mm Tape	3	500~700	확장효과 비교용
3	Clean, 7.2mil dot, 0.05mm Tape	0,3,6	500~700	표면효과 검증용

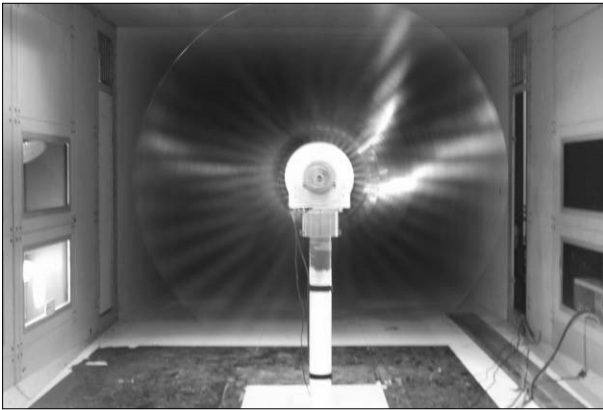


Fig. 4 KARI LSWT Wind turbine test

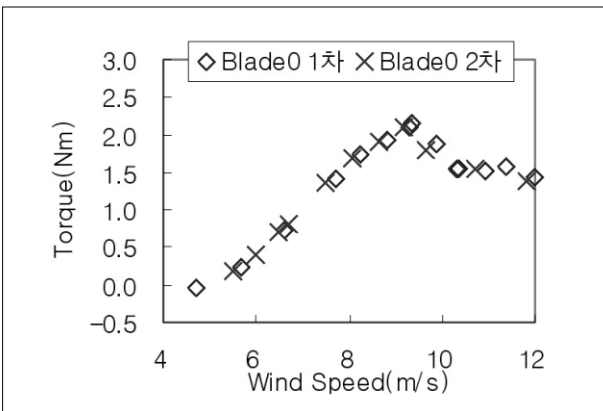


Fig. 5 Test result 1 : Blade0

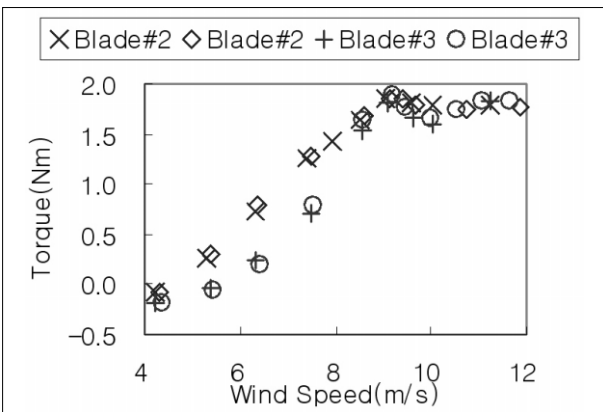


Fig. 6 Test result 2 : Repeatability

### 3.3 시험 반복성

시험시스템의 비교/점검을 위해 블레이드0를 사용하여 1차 시험결과와 비교하였다. 시험결과(그림 5) 1차/2차 시험은 동



Fig. 7 Blade surface : 0.05mm tape



Fig. 8 Blade surface : 7.2mil dot

일한 결과를 나타내고 있다. 2차 시험의 정밀도를 파악하기 위해 동일한 블레이드 조건에 대해 반복시험을 수행하였다. 반복 시험은 전체 블레이드를 분해하여 재 설치한 후, 시험을 수행하는 방식으로 수행하였다. 시험반복성은 그림 6와 같이 0.05Nm 이내로 나타났다.

### 3.4 표면처리효과

블레이드 표면상태에 따른 효과를 파악하기 위해, 익형코드 의 10%위치에 0.05mm Tape(폭 2mm)와 7.2mil 도트(높이 0.18mm, 직경1.2mm, 간격 3.2mm)를 부착한 상태(그림 7,8)와 표면이 매끄러운 상태에 대해 시험을 수행하였다. 표면처리는 블레이드 상/하면을 모두 동일하게 처리하였다. 블레이드3을 600RPM으로 회전하였을 때 표면상태에 따른 토크변화가 그림 9에 나타나 있다. 풍속 7m/s 이하의 낮은 속도에서 측정 토크값이 크게 변하는 것으로 나타났다. 회전하지 않는 익형의

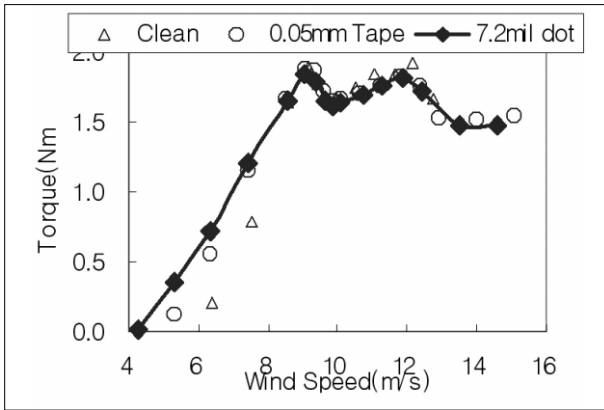


Fig. 9 Test result 3 : Surface treatment

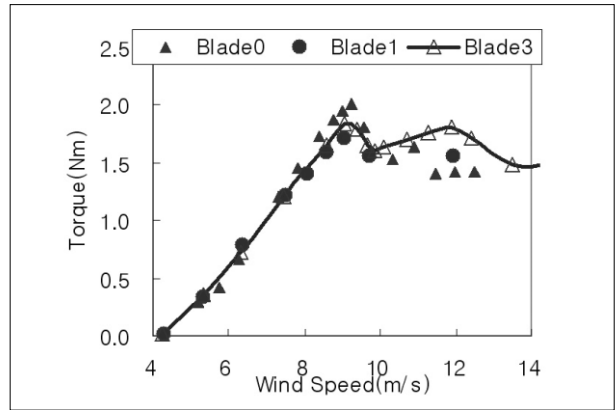


Fig. 12 Test result 6 : Blade Type

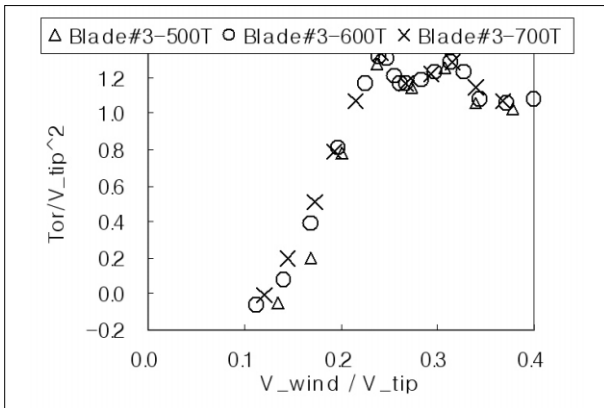


Fig. 10 Test result 4 : Surface(0.05Tape)

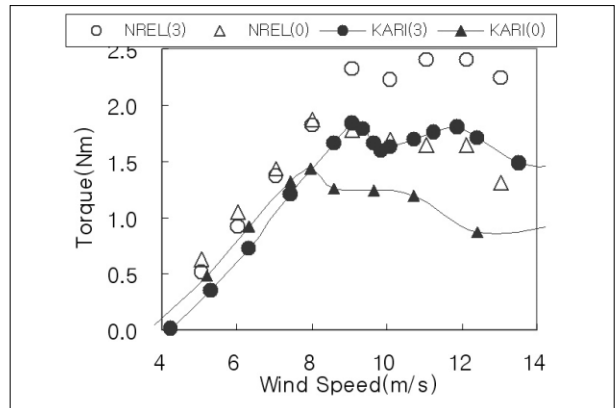


Fig. 13 Test result 7 : NREL & KARI comparison

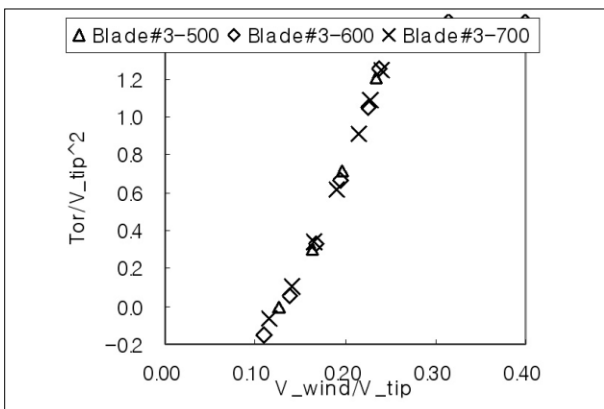


Fig. 11 Test result 5 : Surface(7.2mil dot)

경우 10% 코드위치에서 예상되는 경계층 높이는 0.21~0.59mm이므로, 표면에 부착한 Tape와 도트는 부착지점에서 경계층 천이를 일으키기에 낮은 높이이나, 익형 표면 흐름의 난류도를 증가시켜 천이지점을 앞당기는 역할을 하는 것으로 판단된다. 표면처리의 타당성을 검증하기 위해 블레이드

드 회전수를 500, 600, 700RPM으로 변화시켜 시험을 수행하였다. 회전수증가(Re수 증가) 영향을 파악하기 위해 풍속과 토크를 블레이드 끝단 속도를 사용하여 계수화 하였다.

0.05mm tape를 부착한 시험의 경우 회전수(Re수)가 증가함에 따라 계수화한 토크가 증가하나(그림10), 7.2mil 도트를 부착한 시험은 회전수가 증가하여도 계수화한 토크는 동일한 값을 나타내고 있다. 이상의 결과에서 레이놀즈수의 영향을 줄이기 위해서는 7.2mil 도트를 부착한 상태에서 풍동시험을 수행하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

### 3.5 블레이드 형상영향

블레이드0, 1, 3은 동일한 형상으로 고안되었으나, 제작 및 설계상의 문제로 인해 약간의 차이가 존재한다. 블레이드 3을 기준으로 하였을 때, 블레이드 1은 반경 70% 지점부터 익형 앞단이 0.1~0.3mm 높은 형상을 가지고 있으며, 블레이드 0은

블레이드 1에 비해 0.5mm 두께가 높으며 0.6도 정도의 바람 방향 각도를 형성하고 있다. 익형 앞단이 높은 블레이드 0,1은 블레이드 3에 비해 선형영역에서는 높은 토크를 보이고 있으나 실속 이후영역에서는 급격한 감소현상을 보이고 있다. 블레이드 3은 실속제어방식으로 설계된 풍력터빈의 특성을 잘 나타내고 있다.

### 3.6 NREL 데이터 비교

12% 축소모델의 영향을 파악하기 위해 NASA 80'x40' 풍동에서 시험된 실물 시험결과(NREL)와 KARI LSWT 시험결과를 비교하였다. 비교는 블레이드3에 7.2mil 도트를 부착한 시험을 사용하였다. 블레이드 끝단 각도 0, 3도 비교결과가 그림 8에 나타나 있다. 12% 축소모델 시험결과는 실속 속도 및 속도에 따른 토크변화는 실물모델과 매우 유사한 형태를 나타내고 있으나, 전체적인 값은 약 25%정도 작은 값을 보이고 있다.

## 4. 결론

KARI 중형아음속풍동에서 표준풍력터빈 시험장치를 사용하여 블레이드 조건에 따른 토크값 변화 및 축소효과를 시험하였다. 시험결과 블레이드 형상의 미세한 변화에 의해서도 토크값은 많은 변화를 보이며, 특히 저속영역의 경우 표면거칠기에 의한 영향이 크게 나타나고 있다. 12%축소모델 시험은 100%모델에 비해 25%정도 작은 값을 나타내고 있으나, 실속속도 및 실속특성은 동일하게 나타나고 있다. 코드확장에 따른 축소효과 보정시험 및 블레이드 소음측정시험이 향후 진행될 예정이다.

## 후 기

본 연구는 '프로토타입/풍력터빈 공력/소음 풍동시험기술 연구'의 일환으로 수행되었습니다.

### References

- (1) 조태환, 장병희, "KARI LSWT 표준풍력터빈 풍동시험", 한국신재생에너지학회지, 2007.12
- (2) M.M. Hand, D.A. Simms, L.J. Fingersh, D.W. Jager, J.R. Cotrell, S. Schreck, and S.M. Larwood, 2001, "Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns", NREL/TP-500-29955
- (3) C. Lindenburg, 2004, "Modeling of rotational augmentation based on endengineering considerations and measurements", ECN-RX-04-131
- (4) 박영민, 장병희, 2006, "NREL Phase VI 풍력터빈 축소효과 보정", 한국 신재생에너지학회 추계 학술대회

---

**조 태 환**

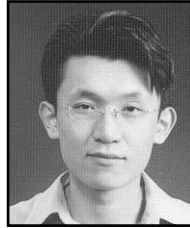


1993년 한국과학기술원 물리학과 학사  
1995년 한국과학기술원 항공우주공학과 공학석사

현재 한국항공우주연구원 첨단공력구조팀  
(E-mail : thcho@kari.re.kr)

---

**김 양 원**



2006년 한밭대학교 전기공학과 학사

현재 한국항공우주연구원 첨단공력구조팀  
(E-mail : kywdi@kari.re.kr)

---

**장 병 희**



1984년 서울대학교 항공공학과 학사  
1986년 한국과학기술원 항공우주공학과 공학석사  
1996년 한국과학기술원 항공우주공학과 공학박사

현재 한국항공우주연구원 KHP 사업관리팀  
(E-mail : cbh@kari.re.kr)

---

**이 덕 호**



2002년 한국항공대 항공운항학과 학사

현재 한국항공우주연구원 첨단공력구조팀  
(E-mail : splash@kari.re.kr)