한국동력기계공학회지 제19권 제4호 pp. 17-23, 2015년 8월, ISSN 1226-7813(Print) ISSN 2384-1354(Online)
Journal of the Korean Society for Power System Engineering http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2015.19.4.017
Vol. 19, No. 4, pp. 17-23, August 2015

아라미드섬유 보강 풍력발전기 로터 블레이드의 연성해석 강도평가
The FSI Analysis Evaluation of Strength for the Wind Turbine Rotor Blade Improved by the Aramid Fiber

김석수* · 강지웅** · 권오헌***†
Seok-Su Kim*, Ji-Woong Kang** and Oh-Heon Kwon***†

(Received 02 February 2015, Revision received 25 June 2015, Accepted 26 July 2015)

Abstract: Because of the energy resources shortage and global pollution, the wind power systems have been developed consistently. Among the components of the wind power system, the rotor blades are the most important component. Generally it is made of GFRP material. Recently, GFRP material has been replaced by CFRP composite material in the blade which has an aerodynamic profile and twisted tip. However the failures has occurred in the trailing edge of the blade by the severe wind loading. Thus, tougher material than CFRP material is needed as like the aramid fiber. In this study, we investigated the mechanical behaviors of the blade using aramid fiber composites about wind speed variation. One-way FSI (fluid-structure interaction)analysis for the wind rotor blade was conducted. The structural analyses using the surface pressure loading resulted from wind flow field analysis were carried out. The results and analysis procedure in this paper can be utilized for the best strength design of the blade with aramid fiber composites.

Key Words : Rotor blade, Mechanical behavior, Fluid structure interaction, Aramid fiber composites

1. 서 론

대체에너지원으로서 바람이 가지고 있는 자연에너지를 유용한 전기에너지로 변환시켜주는 풍력발전기는 회전력을 변환시켜주는 블레이드와 너셀부 및 타워로 구성된다. 구성품 중에서 여러 기술의 복합체인 블레이드는 고속 회전하므로 사고의 위험에 가장 많이 노출되게 된다.[1] 블레이드의 변형 및 구조적 손상 원인은 환경적 요인에 따라 바람에 의한 압력과 타워 구조에 의해 가해지는 힘과 모멘트이다. 특히 태풍의 규모가 커지고 빈도수가 증가하면서 바람에 의한 예기치 않는 극한하중과 연속적인 하중을 받아 블레이드에 미치는 영향이 손상 발생에 주요인이 됨에 따라 블레이드 강도 향상에 관한 연구는 매우 중요하게 되었다.[2] 블레이드를 구성하는 재료는 유리섬유 강화 복합재가 일반적으로 사용되고 있다. 풍력발전설비의 대형화에 수반하여 블레이드 무게가 증

***† 권오헌(교신저자) : 부경대학교 안전공학과
E-mail : kwon@pknu.ac.kr Tel : 051-629-6469
* 김석수 : 부경대학교 대학원 안전공학과
** 강지웅 : 대구한의대학교 보건학부

***† Oh-Heon Kwon (corresponding author) : Department of Safety Engineering, Pukyong National University
E-mail : kwon@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6469
* Seok-Su Kim : Graduate school, Pukyong National University
** Ji-Woong Kang : Faculty of Health Science, Daegu Haany University

가함에 따라 설치비용 및 효율 증대를 위해 CFRP/GFRP 복합재료를 사용하여 경량화와 강도를 유지하는 경향이 증가하고 있으나, 블레이드의 후연(Trailing edge)을 구성하는 부분에서는 여전히 파손이 수반되고 있다. 대용량 풍력발전시스템 블레이드 강도평가는 GL 규정과 IEC 61400-22 규정에 따라 극한하중 안전성과 피로해석 연구가 주로 진행되고 있다.[3,4] 또한 돌풍 및 태풍을 고려하지 않은 평균 풍속에 대한 블레이드 단일 모델에 바람의 압력이 적용되어 최대 응력에 대한 변위 평가 연구가 진행되었다.[5] Almohammadi 등[6]은 CFD 해석을 통하여 수직축 풍력 터빈 블레이드에 대한 수치해석을 수행하였다.[7-9] 풍력 블레이드에 돌풍이 하중으로 작용할 때 예상치 못한 심각한 블레이드 구조변형이 발생할 수 있으며, 사용 불능상태의 파손고장을 야기할 수도 있다. 하지만 바람의 유동장을 고려한 블레이드 강도 평가에 대한 연구는 아직 충분하지 않은 실정이다. 대형화되어가는 풍력 블레이드의 구조적 안정성에 미치는 응력 및 변형률을 평가할 때 평균 풍속과 돌풍 및 태풍에 의한 구조적 변형을 고려하여 유체 및 구조 간의 상호연계 연성해석이 필수적으로 이루어져야 한다. 아라미드섬유는 고강도, 고탄성, 고내열성 및 전기절연성 등이 탁월하고 가격대비 우수하며 특히 파라계 아라미드 섬유는 탁월한 절단저항력으로 방탄 등 인성 및 강도가 요구되는 소재에 사용되고 있다.[9] 따라서 본 연구에서는 CFRP/GFRP 복합재료로 구성된 3MW급 대형 풍력발전기 블레이드에 대하여 외부스킨 부분을 아라미드섬유로 대체한 경우에 대하여 바람의 속도를 고려하여 강도평가를 연성해석으로 수행하였다. 해석에 사용된 아라미드섬유는 진동흡수성과 압축강도 및 변형 저항성이 뛰어나 항공분야에 사용되는 Kevlar 49를 상정하였으며 아라미드섬유 보강 전후의 블레이드 강도변화를 비교 평가하여 강도 향상에 미치는 영향을 조사하였다. 얻어진 결과는 향후 대형 블레이드의 경량화 추세에 따라 손상부위를 최소화하는 최적설계에 반영하여 경제성과 안전성의 개발에 기여할 것으로 여겨진다.

2. 해석 모델링

2.1 블레이드 연성 해석

연성해석 즉 FSI(Fluid-Structure Interaction) 해석은 크게 One-Way FSI와 Two-Way FSI 두 가지 해석이 있다. One-Way FSI는 유동에 의해 발생하는 변위가 큰 영향을 미치지 않는 경우에 사용하고, Two-Way FSI는 유연한 구조물에서 유동장의 영향에 의해 변위가 큰 영향을 받는 경우에서 반복계산이 필요한 수법이다.[10] 바람에 의한 블레이드 변위가 유동장에 영향이 크지 않는 로터 블레이드는 One-way FSI 기법으로 해석하는 것이 바람직하다. 평가는 먼저 유동해석을 통해 로터 블레이드에 작용하는 압력을 외력으로 구한 후에 이에 대한 결과를 구조해석에 적용하여 수행하였다.

2.2 블레이드 모델링 및 재료 물성치

본 연구에서 사용된 모델은 3MW급 대형 풍력발전기에 사용되는 풍력 블레이드 모델을 대상으로 하였다. 전장 길이는 42.65 m이며, 최장 폭이 3.456 m로 CATIA로 설계된 3차원 모델링을 Fig. 1에 나타내었다. 사용된 CFRP 복합재는 CF 3327 EPC인 평직 강화 프리프레그를 적층하여 이용하였고 아라미드 섬유는 Kevlar 49를 적용하였다. 세부적인 블레이드 적층은 기존 연구의 결과[11]를 적용하여 Fig. 2와 같이 외부 표면에서부터 스킨(GFRP or Kevlar 49)-UD - 발사코어 - 평직CFRP-스킨으로 구성하였다. Table 1은 해석에 사용된 재료의 물성값을 나타내고, Fig. 2는 블레이드의 단면을 나타낸다.

Fig. 1 The modeling of a rotor blade

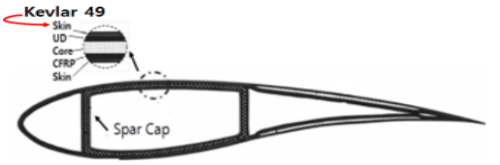


Fig. 2 The cross-section of a rotor blade

Table 1 Material property of the rotor blade

Material	Elastic modulus(GPa)	Poisson's ratio	Ultimate strength (MPa)
Kevlar 49	112	0.36	3,620
Skin(GFRP)	10.3	0.3	151
UD fiber	37	0.31	986
Balsa Core	3.518	0.3	13
Plain(CFRP)	149.3	0.1	1,546

3. 결과 및 고찰

3.1 로터 블레이드 유동해석

3.1.1 격자 및 계산조건

유동해석에서 격자의 적절한 생성이 수치해석 결과의 신뢰성에서 가장 큰 영향을 미치는 요소 중의 하나이다. Fig. 3은 블레이드 주위 유동장에 대한 격자를 나타내고, 약 240만 개의 요소를 가진다.

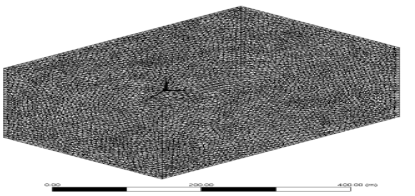


Fig. 3 CFX domain grid around blades

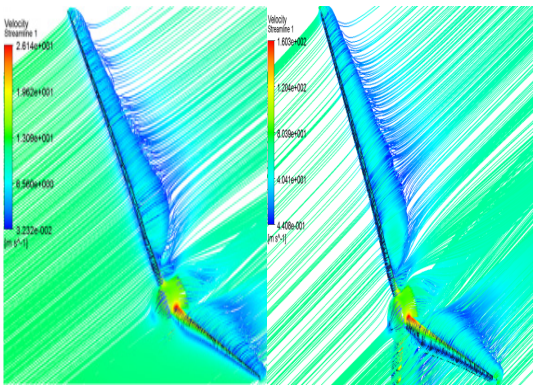
난류 유동장의 수치해석기법은 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식을 적용하였으며, 유한 체적 법을 지배방정식으로 하여 이산화했다. 난류 모델은 풍력발전 유동해석 분야에서 널리 사용되는 k-ω 모델 기반의 SST(Shear Stress Transport) 모델[12)]을 적용하였다. 경계조건은 Table 2에 나타내었다. 연성해석에 사용된 입구속도는 2가지 경우로 정하였다.

Table 2 Boundary condition

Inlet	Uniform normal speed (12 m/s , 70 m/s) - 2cases
Outlet	Average static pressure Reference pressure = 0 [Pa]
Surrounding	Smooth wall (Nonslip condition)
Blade & Hub	

3.1.2 CFX의 압력결과

유동해석을 수행하기 위한 바람의 적용기준은 우리나라 최대 평균 풍속인 10~12 m/s와 최대설계기준 및 돌풍으로 인한 평균 풍속 70 m/s 조건을 부여하여 로터 블레이드가 받는 압력해석을 수행하였다. Fig. 4(a), (b)는 12 m/s 및 70 m/s 일 때 블레이드가 받는 속도 흐름을 나타낸다. Fig. 5는 70 m/s 일 때 블레이드가 받는 압력분포를 나타낸다. Fig. 4(a)에 나타내는 것처럼 블레이드에 적용된 풍속은 12 m/s 조건일 때 전체 풍속의 약 45%가 10.4~13 m/s 풍속으로 블레이드에 적용되었고, Fig. 4(b)처럼 70 m/s 조건일 때는 64~80 m/s 풍속이 약 45%의 비율로 블레이드에 적용되었다. Fig. 4(a), (b)에서 나타난 풍속에 의하여 작용한 경우에 로터 블레이드 표면에 발생하는 압력은 70 m/s의 경우에 Fig. 5와 같다. v=12 m/s 의 경우에도 비슷한 경향이 나타났으나, 풍속이 12 m/s일 때 최대 압력은 91.1043 Pa이며, 풍속 70 m/s일 때에는 최대 3016.2 Pa이 얻어졌다. 로터 블레이드



(a) (b)

Fig. 4 The velocity streamlines on the rotor blade ((a)v=12 m/s and (b)v=70 m/s)

에 작용하는 압력은 음압과 양압이 공존하지만 12 m/s 경우에는 －121.375～－68.2551 Pa 사이의 압력의 분포가 약 47%를 차지하고 있으며, 70 m/s 경우에는 －4,323.52 Pa～－2,488.61 Pa 사이의 압력 분포가 약 33%로 가장 많은 분포를 차지하였고, 풍속이 70 m/s 경우가 12 m/s 경우보다 약 36배 정도 더 큰 압력을 받고 있음을 알 수 있었다.

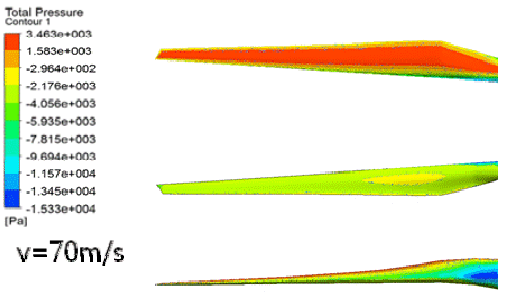


Fig. 5 The pressure contours on the rotor blade (v=70m/s)

3.2 로터 블레이드 구조해석

로터 블레이드에 대한 구조해석은 사면체(tetrahedral) 8절 점 요소를 사용하였으며 33만 개의 요소개수를 가진다. Fig. 6은 로터 블레이드의 요소분할 예를 나타낸다.

하중은 Hub을 고정하여 유동해석으로 얻어진 압력 분포를 적용하였다. 기존 로터 블레이드 스킨은 GFRP로 구성되어 있으며, 외부스킨 부분을 아라미드 섬유 Kevlar 49로 대체 보강하기 전과 후의 응력을 얻어 Fig. 7에 나타내었다. 연성-구조해석방법을 이용하여 계산된 블레이드 각각의 날개의 응력과 변형 값의 오차는 거의 없으므로 3개 중 하나만을 나타내었다.

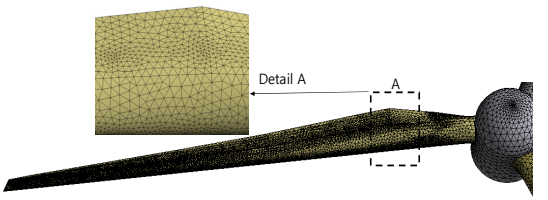


Fig. 6 The finite element mesh of a blade

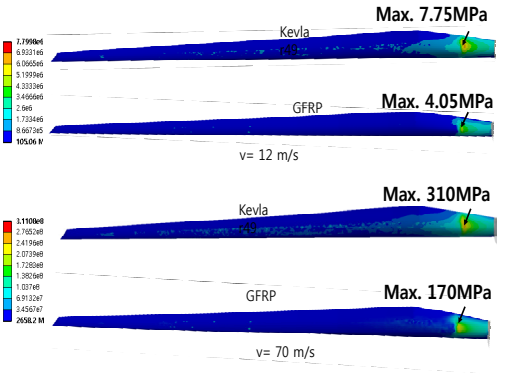


Fig. 7 The contours of the equivalent stress contours in the rotor blade skin with the aramid fiber and GFRP at v=12 m/s and v=70 m/s

또한 블레이드의 구조 특성상 스킨의 두께가 서로 다른 부분이 많고, Hub에 고정된 상태로 회전하기 때문에 Hub으로부터 5 m까지 블레이드 표면에 응력집중 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. 전체적으로 유사한 형태의 분포를 나타내고 있으나 풍속이 12 m/s에서 70 m/s로 높아짐에 따라 등가 응력의 변화는 30~40배 이상 증가함을 알 수 있다.

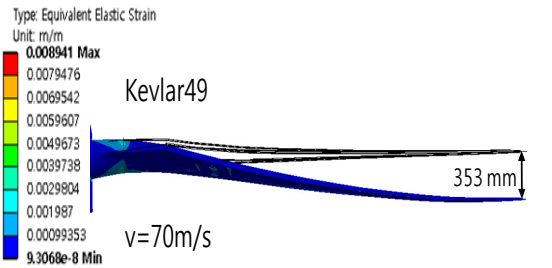


Fig. 8 The contours of the equivalent strain contour in the rotor blade with the aramid fiber at v=70 m/s

Fig. 8은 아라미드 섬유인 Kevlar49로 블레이드 스킨을 교체한 후 극한 조건인 풍속 70 m/s 인 경우에 발생한 변형률의 등고선을 나타낸다. 최대 변형률은 0.0089로 블레이드 끝단에서의 최대 처짐 변위는 353 mm로 얻어졌다. 기존의 GFRP 복합재료로 구성된 경우에는 변형형태가 유사하게

나타나 여기에서 변형률 등고선을 제시하지 않지만, 최대변형률 값이 0.043이고, 처짐 변위는 1.48 m로 얻어져 아라미드 섬유로 대체 보강됨에 따라 블레이드의 변형이 대폭 개선되었음을 알 수 있었다. 또한 v=12 m/s 의 경우에는 처짐 변형이 최대 30 mm에서 8.9 mm로 향상되었다. Fig. 10은 로터 블레이드의 표면에서 발생하는 von Mises 등가 응력을 재료의 극한 응력으로 나눈 응력(Normalized stress)값과 등가 변형률 값을 Fig. 9에 표시된 방향에 대해서 나타낸다.

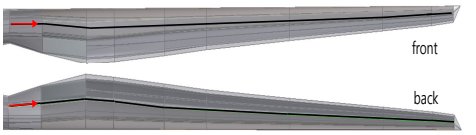
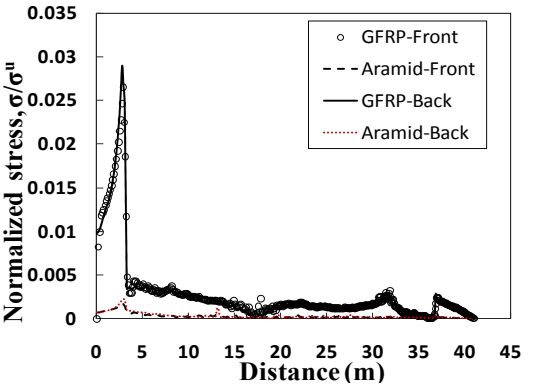
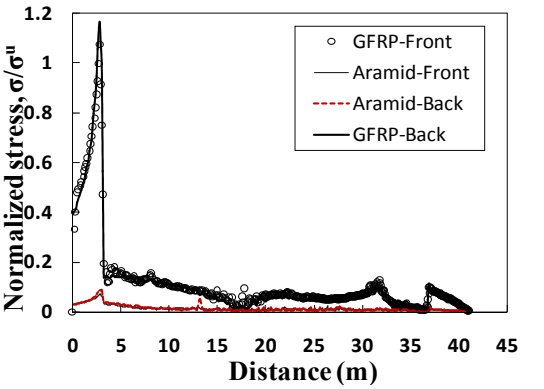


Fig. 9 The direction for the evaluation of the normalized stress and equivalent strain

Fig. 10 (a),(b)에서는 아라미드 섬유인 Kevlar 49를 로터 블레이드 외부스킨에 대체 보강한 전과 후를 각각 12 m/s, 70 m/s에서 블레이드 앞면(front)과 뒷면(back)의 2가지 경우로 분류하여 normalized stress로 나타낸 것이다. 전체적인 응력 변화를 보면 모든 경우에 대하여 아라미드 섬유인 Kevlar 49로 대체된 경우가 GFRP 스킨의 경우보다 낮은 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 응력의 변화에 있어서 로터 블레이드의 허브 부위가 다른 부위보다 크게 나타나며, 특히 GFRP 스킨의 경우는 Kevlar 49의 경우보다 과도한 응력 크기를 나타내고 있는데, 이 부분은 해석의 경계조건에 의하여 고정됨을 고려하더라도 매우 높은 응력이 발생함을 알 수 있다. 더욱이 v=70 m/s의 풍속이 발생하면 normalized stress 값이 1을 초과하여 나타나므로 파손의 위험성이 발생한다. 반면에 kevlar 49 섬유로 보강된 경우는 블레이드 전장에 있어서 normalized stress 값이 매우 낮은 값으로 감소하였다. 최대 normalized stress 값의 차이는 v=12 m/s 및 v=70 m/s에서 각각 0.02473, 1.0074로 나타났다. Fig. 11은 블레이드에 발생한 등가 변형률의 변화를 나타낸다. 등가 변형률은 각각의 경우에 대하여 바람의 압력에 의한 normalized stress 값과 비례적으로 변형이 나타났다. v=12 m/s 의 GFRP와 Kevlar 49 스킨 로터 블레이드에 대하여



(a) v=12 m/s



(b) v=70 m/s

Fig. 10 Results of the normalized stress

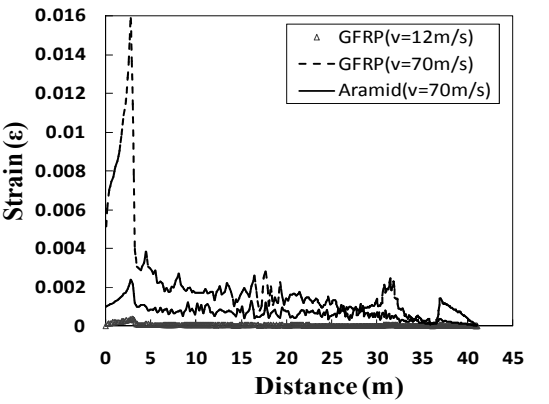


Fig. 11 Results of the equivalent strains at the front according to the material

해석된 등가 변형률은 0.000334차이로 미소하게 나타났으나, v=70 m/s일 때에는 허브에서 최대 0.01362 차이가 났으며, 특히 GFRP 스킨의 경우에 나타나는 30~40 m 근방 후연부 변형률 크기가 아라미드로 대체한 경우에 거의 사라짐을 알 수 있다.

Table 3 Results of max. & min. stress & strain

wind velocity	v=12 m/s		v=70 m/s	
skin / value	GFRP	Aramid	GFRP	Aramid
Normalized stress(min)	8.26E-05	1.25E-05	3.16E-03	3.80E-04
Normalized stress(max)	2.65E-02	1.77E-03	1.08E+00	7.26E-02
Equivalent strain(min)	1.24E-06	5.79E-07	4.72E-05	1.96E-05
Equivalent strain(max)	3.92E-04	5.82E-05	1.59E-02	2.38E-03

바람에 의한 직접적인 영향을 받는 앞면과 블레이드의 상부와 하부에서 걸쳐 바람에 영향을 받는 뒷면의 응력과 변형률은 평균적으로 차이는 나타나고 있지 않지만, 최고값인 허브 연결부위 뒷면에서 약간 높은 값이 나타났다. 뒷면에서 응력과 변형이 약간 높게 발생하는 이유는 바람이 로터디스크에 접근하게 되면 풍속은 감소하고 이에 따라 정압력이 상승하다가, 로터 디스크를 통과하면서 대기압보다 낮은 압력으로 압력 강하가 발생하여 허브 앞면과 뒷면에서 발달한 경계층의 와류 현상 영향에 의한 것으로 사료된다.[13] Table 3은 Fig. 10과 11에서 얻어진 값에서 최대, 최소값을 나타낸 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 로터 블레이드의 기존 스킨에 사용되는 GFRP를 대신하여 아라미드섬유인 Kevlar 49를 상정하여 보강한 전후의 로터 블레이드의 강도변화를 바람의 속도를 고려하여 평가하였다.

1) 바람의 속도와 압력을 고려하여 아라미드 섬유로 보강된 로터 블레이드의 표면에 적용되는 압력은 풍속이 12 m/s, 70 m/s 일 때 최대 압력은 각각 91.1043 Pa, 3016.2 Pa로 얻어졌다.

2) 뒷면에서 정압력변화 차이로 인한 와류현상으로 앞면보다 뒷면에서의 응력과 변형률이 약간 높게 나타났다.

3) 길이 방향으로 GFRP 스킨의 경우보다 블레이드 외부스킨에 아라미드 섬유를 대체한 경우에 Normalized stress 값은 매우 낮은 값이 나타나 블레이드 표면 강도성능이 향상된 것으로 간주된다.

4) 등가변형률 값은 아라미드 섬유를 채용한 경우가 기존 GFRP 스킨의 경우보다 v=70 m/s에서 최소 0.000334, 최대 0.01362로 감소하여 블레이드에 적용될 경우 충분한 안전성이 확보될 것으로 판단된다.

References

I. S. Yang, S. W. Kim and N. H. Kyong, 2005, “A Classification of the Wind Turbine Accident”, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 25, No. 4, pp. 29-35.

2. P. Gipe, 2001, “Wind Energy-The Breath of life or the Kiss of Death”, Contemporary Wind Mortality Rates, http://www.wind-works.org.

3. J. S. Kwak and Y. K. Park, 2013, “Strength Assessment for Multi-megawatt Wind Turbine Blade”, The Spring Proceeding of KSME CAE & Applied Mechanics, KSME 13CA-Th03A-4, pp. 141-142.

4. J. S. Park, J. K. Park and B. S. Hwang, 2011, “Development and Construction of Static and Fatigue Test System for Multi-megawatt Wind Turbine Blade in Korea”, Journal of Drive and Control, Vol. 8, No. 1, pp. 50-54.

5. Y. G. Kim and K. C. Kim, 2005, “Computation of Fluid-Structure Interaction on a Blade used in Wind Power”, Journal of The Korean Society for New and Renewable Energy, Vol. 4, No. 1, pp. 698-701.

6. K. M. Almohammadi, D. B. Ingham and L. Ma, 2013, “Computational Fluid Dynamics Mesh Independency Techniques for a Straight Blade Vertical Axis Wind Turbine”, Energy, Vol. 58, pp. 483-493.
7. O. K. Yu and O. J. Kwon, 2014, “Predicting Wind Turbine Blade Loads and Aeroelastic Response using a Coupled CFD-CSD Method”, Renewable Energy, Vol. 70, pp. 184-196.
8. L. Li, Y. H. Li, Q. K. Liu and H. W. Lv, 2014, “Flapwise Non-linear Dynamics of Wind Turbine Blades with Both External and Internal Resonances”, International Journal of Non-Linear Mechanics, Vol. 61, pp. 1-14.
9. I. S. Han, D. S. Kim, J. Y. Lee, O. H. Kim and T. H. Park, 2011, “Para-Aramid Fiber Developments of Trends”, Fiber Technology and Industry, Vol. 15, No. 1. pp. 7-15.
10. F. K. Benra, H. J. Dohmen, J. Pei, S. Schuster and B. Wan, 2011, “A Comparison of One-Way and Two-Way Coupling Methods for Numerical Analysis of Fluid-Structure Interactions”, Journal of Applied Mathematics, Vol. 2011, Article ID 853560, pp. 1-16.
11. W. Y. Jeong, 2011, “The Study of Strength Improvement of The Composite Material Blade for The Health ensurance of Wind Turbine System”, Dissertation of M. D., Pukyong National University.
12. F. R. Menter, 1993, “Zonal Two Equation k-ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows”, AIAA Paper 93-2906.
13. K. H. Bergey, 1980, “The Lanchester-Betz Limit”, Journal of Energy, Vol. 3, No. 6, pp. 382-384.