

공탄성 변형효과를 고려한 5MW급 풍력발전 블레이드의 피치각에 따른 성능해석

김요한* · 김동현** · 황미현* · 김경희** · 황병선*** · 홍은성***

Aerodynamic and Structural Design of 6kW Class Vertical-Axis Wind Turbine

Yo-Han Kim*, Dong-Hyun Kim**, Mi-Hyun Hwang*, Kyung-Hee Kim**,
Byung-Sun Hwang***, Un-Sung Hong***

Key Words : Aeroelastic Response Analysis(공탄성응답해석), CFD(전산유체역학), CSD(전산구조동역학), Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations(RANS 방정식)

ABSTRACT

In this study, performance analyses have been conducted for a 5MW class wind turbine blade model. Advanced computational analysis system based on computational fluid dynamics(CFD) and computational structural dynamics(CSD) has been developed in order to investigate detailed dynamic responded of wind turbine blade. Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations with K- ϵ turbulence model are solved for unsteady flow problems of the rotating turbine blade model. A fully implicit time marching scheme based on the Newmark direct integration method is used for computing the coupled aeroelastic governing equations of the 3D turbine blade for fluid-structure interaction (FSI) problems. Predicted aerodynamic performance considering structural deformation effect of the blade show different results compared to the case of rigid blade model.

1. 서 론

풍력발전기에서 발생하는 출력은 로터의 직경과 연관되기 때문에 최근에 풍력터빈 시스템은 발전효율을 높이기 위하여 그 크기가 점차 대형화되고 있다. 게다가, 풍력발전기의 고 효율화를 위하여 블레이드의 대형화, 경량화가 이루어지고 있는 추세이다. 하지만 터빈의 대형화로 인해 커진 공기력에 비하여 터빈 블레이드의 구조적 강도가 약해졌으며 이로 인해 단순히 대형 풍력 터빈 블레이드의 구조안정성 뿐만 아니라 플러터 안정성의 중요도도 높아지고 있다. 풍력발전기에서 회전날개(Rotor Blade)는 바람의 힘을 기계적인 힘으로 변형시키는 부분으로서, 풍력발전 시스템 성능의 핵심 요소이며, 블레이드의 설계에 따라 풍력발전기의 용량과 효율이 결정된다.

때문에 대형화된 풍력터빈 시스템의 안정성 검토를 위해 플러터 해석이 국내외적으로 연구되었다^(1~6).

본 연구에서는 블레이드를 각각 강체블레이드와 유연체 블레이드로 가정하고 성능을 예측하였을 때의 차이를 확인하고자 풍력 터빈 블레이드의 공탄성 해석을 수행하였다. 이를 위해 유동 영역은 동적이동격자기법과 국부변형기법이 적용된 비정렬 격자 시스템을 사용하여 모델링하였고, FLUENT (Ver.6.3)을 사용한 k- ϵ 난류모델 RANS 방정식과 개발된 3차원 공탄성 해석 user-defined function (UDF) 코드를 이용하여 블레이드 회전과 변형 효과의 비정상 유동 해석을 수행하였다. 유체구조 연계 알고리즘과 요구되는 다양한 부가적인 모듈은 CAE-KOREA에서 개발된 예제 프로그램 모듈인 FSIPRO3D (Ver1.0)을 사용하였다. 개발된 FSI 프로그램은 정확한 유체구조 연계해석을 수행하기 위해 engineering feedback mechanism (Fig. 1)을 고려한 2-way 방식을 적용하였다.

* 국립경상대학교 기계항공공학부

** 효성 (주)

*** 한국기계연구원 재료연구소 풍력핵심기술연구센터

† 교신저자, E-mail : dhk@gnu.ac.kr

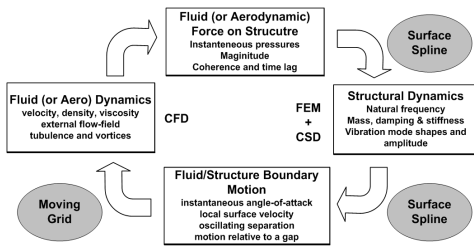


Fig. 1 Aeroelastic engineering feedback mechanism between fluid and structure domains

2. 이론적 배경

2.1 유체유발진동 지배방정식

물리영역에서 구조 비선형성 및 감쇠를 고려한 탄성체의 운동방정식은 다음과 같이 전형적인 행렬형태로 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K(\omega)]\{u(t)\} = \{F(t, u, \dot{u}, \omega)\} \quad (1)$$

여기서, [M]은 질량행렬, [C]는 감쇠행렬, [K(ω)]는 강성행렬로 블레이드 회전각속도에 따라 변화하게 된다. 또한 {F}는 블레이드 주위를 흐르는 유동에 기인한 외력 벡터로 회전속도에 따른 충격과 및 유동박리 현상이 고려되어야 하며, 매 시간스텝 단계에서 블레이드의 구조진동응답 현상이 피드백으로 반영되어 새롭게 구해져야 한다. 참고로 유체유발진동 현상을 정밀하게 해석하는데 있어 가장 어려운 점은 탄성구조물의 3차원 진동응답 변형 형상을 매 시간스텝마다 반영하여 유동해석 격자를 변형시켜 비정상 유동해석을 결정하는데 있다. 특히 난류 유동점성 효과를 고려하는 경우 블레이드 면으로 격자가 매우 밀집되어야 하기 때문에 구조 변형을 반영한 격자 재생성시 수치 안정성 확보가 중요한 문제가 된다.

위 식에서 총 n-자유도의 변위계 $u_i(t)$ ($i=1,2,\dots,n$)에 대하여, 고유모드 벡터들로 이루어진 상수 변환행렬(transformation matrix)을 $[\phi]$ 로 정의하면, 일반화된 좌표계(genrealized coordinate) $q_i(t)$ ($i=1,2,\dots,m$)에 대하여 다음과 같은 선형변환을 정의할 수 있다.

$$\{u(t)\} = [\phi(\omega)]\{q(t)\} \quad (2)$$

특정 회전속도에 대해 고유모드 벡터로 이루어진 변환행렬 $[\phi]$ 는 상수이므로 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\{\dot{u}(t)\} = [\phi(\omega)]\{\dot{q}(t)\} \quad \{\ddot{u}(t)\} = [\phi(\omega)]\{\ddot{q}(t)\} \quad (3)$$

따라서, m-자유도계로 감축된 시스템의 운동방정식은 일

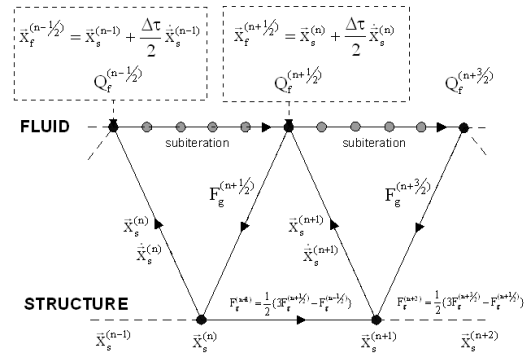


Fig. 2 Fluid-Structure coupled computational process using the second-order time-accurate staggered method

반화된 좌표계(generalized coordinate)에 대하여 다음과 같이 행렬형태로 표현될 수 있다.

$$[M_y(\omega)]\{\ddot{q}(t)\} + [C_y(\omega)]\{\dot{q}(t)\} + [K_y(\omega)]\{q(t)\} = \{Q(t, q, \dot{q}, \omega)\} \quad (4)$$

여기서, $\{q(t)\}$ 는 일반화된 변위벡터(generalized displacement vector), t 는 물리영역에서의 시간을 의미한다. $[M_y]$ 는 일반화된 질량행렬, $[C_y]$ 는 일반화된 감쇠행렬, $[K_y(\omega)]$ 는 회전속도가 고려된 일반화된 강성행렬을 의미하며, $\{Q\}$ 는 시간영역에서의 일반화된 공기력(generalized aerodynamic force, GAF) 벡터를 나타내며 각각 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \{q(t)\}^T &= [q(t)_1, q(t)_2, q(t)_3, \dots, q(t)_m] \\ [M_y(\omega)] &= [\phi(\omega)]^T [M] [\phi(\omega)] \\ [K_y(\omega)] &= [\phi(\omega)]^T [K(\omega)] [\phi(\omega)] \\ \{Q(t, q, \dot{q}, \omega)\} &= [\phi(\omega)]^T \{F(t, u, \dot{u}, \omega)\} \end{aligned}$$

위 식에서 일반화된 공기력 벡터는 유동-구조 피드백 메커니즘을 고려하여 정밀하게 계산되어야 한다. 일반적으로 유동해석을 위한 CFD 격자체계와 구조진동 해석을 위한 FEM 격자체계가 상이하기 때문에 상호 정보교환을 위한 보간 체계가 요구된다. 본 논문에서는, coupled time-marching 기법을 사용하여 회전 블레이드 시스템의 비정상 공탄성 응답의 특징을 효과적으로 확인하였다. 유체구조 연계에 사용된 time marching 과정은 2차 staggered algorithm으로 수행되었다.(Fig.2) 이 계산 기법의 더 자세한 이론적 기술과 적용은 참고문헌(7-9)에서 찾을 수 있다.

2.2 유체유발진동 지배방정식

비정상 압축성 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 유동해석 지배 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \tilde{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\tau_{ij} + R_{ij}] \quad (6)$$

여기서, 전단응력 텐서, 변형 텐서는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= 2\mu[S_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}] \\ S_{ij} &= \frac{1}{2}[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}] \end{aligned} \quad (7)$$

또한

$$\tilde{u} = u_j - u_{g,j}$$

여기서, $u_{g,j}$ 는 격자속도를 의미한다. 또한 레이놀즈 응력 텐서 R_{ij} 는 Bossiness 가설에 따라 다음과 같이 가정된다.

$$R_{ij} \cong \mu[S_{ij} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij}] - \frac{2}{3}(\rho k)\delta_{ij} \quad (8)$$

본 연구에서는 식(6)~(8)의 수치해석을 위해 유한체적법(finite volume method)에 근거한 CFD 유동해석기법을 적용하였다. 개발된 FSIPRO3D 유체유발진동 해석 시스템은 자체적으로 개발된 CFD 유동해석 코드뿐만 아니라 상용전산 유체 해석 프로그램인 Fluent(Ver.6.3)을 연동하여 일반적인 유체유발진동 해석을 수행할 수 있다. 본 연구에서는 풍력발전 터빈 블레이드의 비정상 점성 유동해석을 위해 난류 모델 $k-\epsilon$ 모델을 적용하였으며, RANS 방정식의 공간 이산화를 위해서 Roe의 FDS(flux difference splitting) 기법에 근거한 2차의 풍상차분법을 적용하였다.

3. 해석결과 및 검토

본 해석에서는 유체-구조 연계 해석 프로그램인 FSIPROD(Ver.1.0)을 활용하여 5 MW급 풍력 터빈 블레이드의 공탄성 해석을 수행하였다. 해석에 사용한 풍력 터빈 블레이드 모델의 형상정보는 Fig. 3과 같다. 로터의 직경은 128 m 이며 블레이드의 스패 길이는 64 m 이다.

해석 조건은 해면고도에서 13, 16, 18, 20, 22 그리고 25

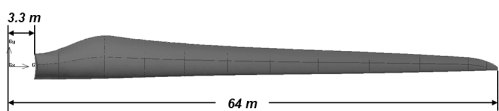


Fig. 3 Geometric configuration of 5 MW wind-turbine blade model

m/s의 풍속 조건에서 12 RPM의 회전속도를 적용하였다. 또한 다양한 피치각 변화에 대한 유동해석을 효율적으로 수행하기 위하여 상용 격자생성 프로그램인 Gambit(Ver. 2.3.16) 소프트웨어의 journal 파일을 이용한 자동 격자 생성 기법을 자체적으로 개발하여 블레이드의 피치각을 $0^\circ, -3^\circ, -3.5^\circ, -4^\circ$ 로 바꾸어가며 해석을 수행하였다. 본 연구에서 적용한 피치각은 블레이드의 회전중심에서 75% 지점에서 측정하였으며 블레이드의 회전면과 시위선사이의 각도를 의하였다. 블레이드의 앞전이 유동흐름을 맞서는 방향으로 회전하는 것을 양(+의) 피치각으로 정의하였다. (Fig. 4)

Fig. 5는 블레이드의 고유진동해석을 수행하기 위한 블레이드의 유한요소 모델을 보여주고 있다. 3차원 4노드 shell요소를 사용하였고, 활용된 총 노드의 수는 8,894개이다. 구조물의 재질은 복합재이며 Table 1에서 사용된 복합재의 물성치를 나타내었다. 블레이드에 12 RPM의 회전속도를 가하였고, 블레이드 허브 부분에 고정지지 조건을 부여하여 해석하였다.

계산된 고유진동수는 Table 2에 나타내었으며 모드 형상은 Fig. 6에 나타내었다. 1차 고유모드는 1차 flapwise 굽힘 모드, 2차 고유모드는 1차 edgewise 굽힘모드, 3차 고유모드는 2차 flapwise 굽힘모드, 4차 고유모드는 2차 edgewise

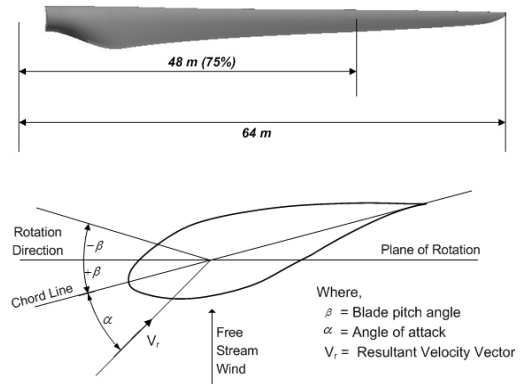
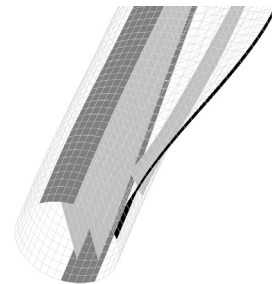


Fig. 4 Schematic of blade pitch angle



a) Configuration of 5MW-class the wind turbine blade



(b) Internal structures of blade

Fig. 5 Geometric configuration of blade

Table 1 Material Properties of composite blade

UD				
E11(GPa)	E22(GPa)	G12(GPa)	ν_{12}	$\rho(\text{kg/m}^3)$
43.1	13.2	3.62	0.241	1,939
S1T(MPa)	S2T(MPa)	S1C(MPa)	S2C(MPa)	SS(MPa)
916	41	759	124	38
Balsa Wood				
E(GPa)	ν		$\rho(\text{kg/m}^3)$	
3.72	0.1		151	

Table 2 Calculated natural frequencies for the 5MW wind turbine blade
(Unit : Hz)

Pitch angle(°)	1 st mode	2 nd mode	3 rd mode	4 th mode
0	0.9586	1.4856	2.8740	4.9865
-3	0.9581	1.4858	2.8740	4.9865
-3.5	0.9580	1.4859	2.8739	4.9866
-4	0.9579	1.4860	2.8740	4.9866

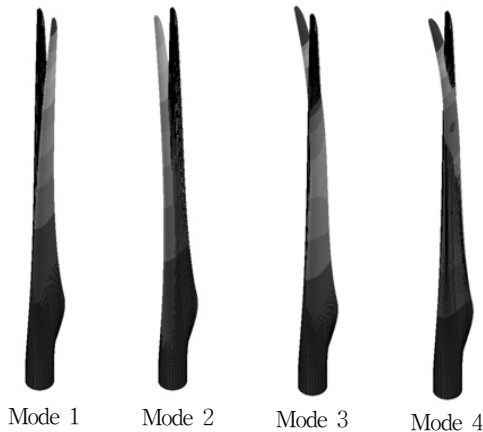
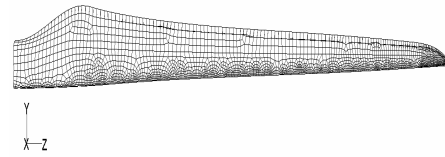


Fig. 6 Natural vibration mode shapes

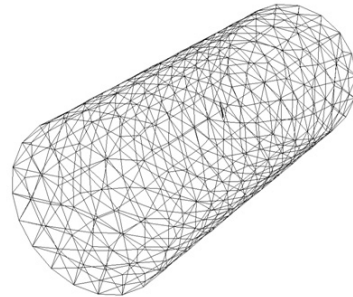
굽힘모드가 나타났다.

Fig. 7은 유동해석 수행을 위한 블레이드의 표면격자와 블레이드 주위 유동장 격자를 나타내고 있으며 유동격자에 사용된 총 격자수는 117,311개이다. MRF(Multiple Reference Frame) 기법을 활용하여 유동장에 (-)x 방향으로 12 RPM의 회전효과를 부가하였다. 풍속조건은 Velocity Inlet Boundary를 사용하여 x방향 Inlet flow 속도를 부가하였다. 계산에는 k-ε 난류모델을 적용하였다. 각 조건에 대해서 블레이드를 강체모델로 고려하여 풍속별로 해석한 결과를 Fig. 8에 나타내었으며 블레이드를 유연체로 가정하여 5MW의 출력을 갖는 블레이드의 피치각에 따른 풍속에서 공탄성 해석을 수행한 결과를 Fig. 9와 Table 3에 나타내었다.

대표적으로 피치각-0.42°와-3.5°의 경우에 대해 공탄성 변형효과를 고려한 해석결과와 강체모델의 해석결과를 비교하였



(a) Computational surface grid



(b) Computational domain grid

Fig. 7 CFD grid of 5MW turbine blade

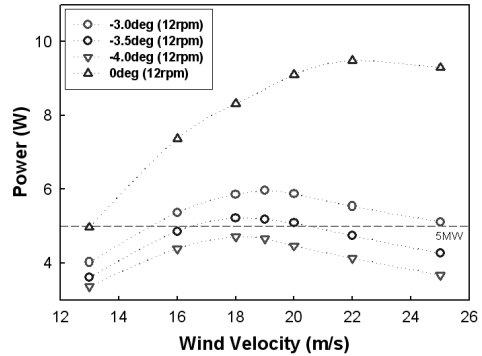


Fig. 8 Performance of Rigid wind turbine blade according wind speed and pitch angles

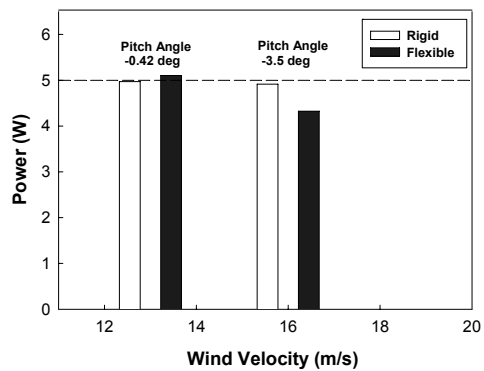


Fig. 9 Comparison of aerodynamic power between rigid and flexible blade models

다. 강체모델에서 5MW가 발생하는 풍속(각각 13m/s 와 16m/s)을 기준으로 해석을 수행하였으며 공탄성 변형효과로 출력이 약 12%의 차이를 나타내는 16m/s 에서는 피치각을 변경하여 공탄성 변형효과를 고려하고 5MW의 출력을 내는 피치각을 도

출해 보았으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 본 결과에서 볼 수 있듯이 수립된 공탄성 변형효과를 고려한 출력예측 결과는 물리적으로 매우 중요한 의미를 가지며 블레이드가 대형화 될수록 그 영향은 더욱 중요하게 나타날 수 있다.

3차원 풍력 터빈 블레이드 모델의 공탄성 특성을 확인하기 위해 세밀한 공탄성 응답을 시간영역에서 나타내었다. 회전하는 풍력 터빈 블레이드의 순간의 공탄성 변형 형상을 Fig. 10에 나타내었다. 공탄성 변형은 전형적으로 flapwise (유동방향, X축) 와 edgewise (lead-lag) 의 두 형태로 이루어짐을 확인할 수 있다. 또한 유동흐름이 10초가 되는 순간 블레이드의 주변의 유동벡터를 Fig. 11에 나타내었다.

계산에 사용된 컴퓨터는 Intel Core2 Quad 2.66 GHz CPU에 4 GB RAM과 500 GB HDD 사양의 하드웨어이며

Table 3 Comparison of calculated power between the rigid and the flexible models

Wind Velocity(m/s)	Pitch angle(°)	Power (Rigid Model)	Power (Flexible Model)	Difference (%)
13	-0.42	4.97 MW	5.11 MW	2.82
16	-3.5	4.91 MW	4.32 MW	12.02
	-2.8	5.43 MW	5.16 MW	4.97

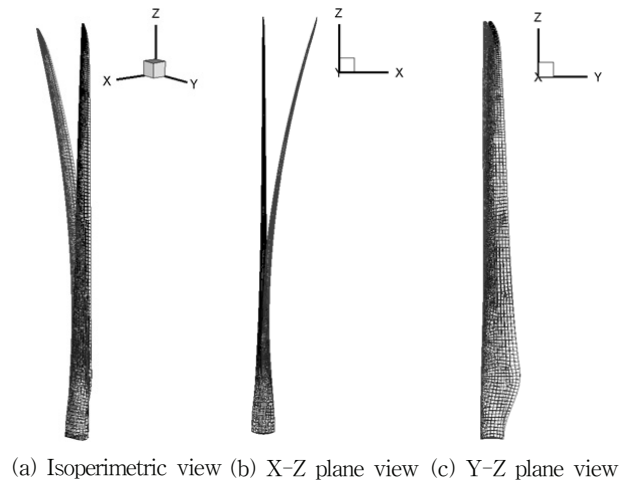


Fig. 10 Instantaneous aeroelastic deformation shapes

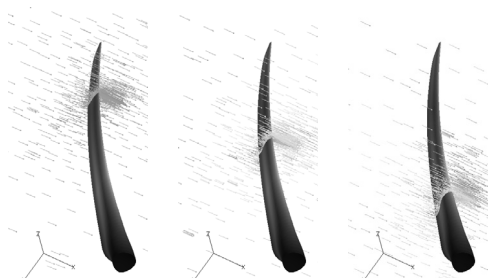


Fig. 11 Instantaneous velocity contours with vector plot for different span point

$\Delta t=0.005$ sec에 subiteration 20회를 추가하였다. 15 sec까지의 공탄성 응답 계산을 수행하기 위해 1개의 CPU사용을 기준으로 3000번 반복계산에 약 15시간의 계산시간이 소요되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 5MW급 초대형 복합재 블레이드 모델에 대해 실제 운용조건과 유사하게 회전 및 공탄성 변형효과를 고려한 성능해석을 성공적으로 수행하였다. 본 연구에서 개발하여 적용한 2-way 방식의 유체-구조 연계 수치해석 기법은 이론적으로도 매우 정교한 기법들이기 때문에 해석의 신뢰도가 매우 높은 특징이 있다. 본 연구를 통하여 초대형 풍력발전 블레이드의 성능해석에서 일반적으로 수행하는 강체 모델에 대한 해석결과는 실제 운용조건과 많은 차이를 나타낼 수 있음을 중요하게 확인하였다. 개발된 해석시스템은 실제 운용조건에 매우 근접한 관련 데이터를 제시할 수 있기 때문에 다양한 초대형 풍력발전 시스템의 블레이드 및 피치 제어기 설계 시 유용한 활용이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력 양성사업과 "5MW급 대형 해상풍력발전 시스템 개발" 과제 의 일환으로 수행된 연구결과의 일부이다.

참고문헌

- (1) 조맹효, 이인, 1994, "3차원 비정상 공기력을 사용한 무회전 로우터 블레이드의 공탄성 해석," 한국항공우주학회, 한국항공우주학회 학술 발표회 논문집.
- (2) Murty, H., Bottasso, C., 1996, "Aeroelastic Analysis of Rotor Blades Using Nonlinear Fluid/Structure Coupling," the American Helicopter Society.
- (3) 김경남, 정성남, 김승조, 1997, "비정상 공기력 효과를 고려한 복합재료 블레이드의 공탄성 해석," 한국항공우주학회, 한국항공우주학회 학술발표회 논문집.
- (4) Chaviaropoulos, P. K., 1994, "Flap/Lead-Lag Aeroelastic Stability of Wind Turbine Blade Sections," Wind Energy, Vol. 2, No. 2, pp. 99~112.
- (5) 조규원, 오우섭, 권오준, 이인, 2002, "비정렬 동적 격자를 이용한 블레이드-와류 간섭에 따른 공탄성 변위예측," 한국항공우주학회, 한국항공우주학회지.
- (6) M.O.L. Hansen, J.N. Sorensen, S. Voutsinas, N Sorensen, H.Aa.Madsen, 2006, "State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity," Progress in Aerospace Sciences, Vol. 42, No. 4, pp. 285~330.

- (7) D. H. Kim, H. J. Kwon, and I. Lee, 2003, "Transonic Aeroelastic Computations for a Full Configuration Fighter with Control Surface Motions and External Stores," International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics (IFASD).
- (8) D. H. Kim, Y. M. Park, I. Lee, and O. J. Kwon, 2005, "Nonlinear Aeroelastic Computation of a Wing/Pylon/Finned-Store Using Parallel Computing," AIAA Journal.
- (9) D. H. Kim, S. W. Oh, and Y. S. Kim, 2007, "Flow-Induced Vibration Analyses of Stator and Moving Rotor Cascade with Viscosity Effects," GT2007-28030, ASME Turbo Expo.