

풍력발전시스템의 유연체 다물체 동역학 시뮬레이션 프로그램 개발

송진섭*, 임채환, 남용운, 배대성

Wind Turbine Simulation Program Development using an Aerodynamics Code and a Multi-Body Dynamics Code

Jinseop Song*, Chaewhan Rim, Yongyun Nam and Daesung Bae

Abstract

A wind turbine simulation program for the coupled dynamics of aerodynamics, elasticity, multi-body dynamics and controls of turbine is newly developed by combining an aero-elastic code and a multi-body dynamics code. The aero-elastic code, based on the blade momentum theory and generalized dynamic wake theory, is developed by NREL(National Renewable Energy Laboratory, USA). The multi-body dynamics code is commercial one which is capable of accounting for geometric nonlinearity and twist deflection. A turbulent wind load case is simulated for the NREL 5-MW baseline wind turbine model by the developed program and FAST. As a result, the two results agree well enough to verify the reliability of the developed program.

Key words

wind turbine dynamic simulation(풍력발전 동역학 시뮬레이션), aero-elastic coupled dynamics(공탄성 역학), multi-body dynamics(다물체 동역학), finite element(유한 요소), geometric nonlinearity(기하학적 비선형성)

(접수일 2011. 10. 12, 수정일 2011. 12. 1, 게재확정일 2011. 12. 12)

* 한국기계연구원

■ E-mail : jssong@kimm.re.kr ■ Tel : (042)868-7442 ■ Fax : (042)868-7417

1. 서론

풍력발전기는 다양한 외부 환경에 노출되면서도 통상 20년간의 내구성이 요구되므로 시스템의 개발 단계에서 합리적인 동하중의 추정과 최적의 시스템 설계를 위하여 매우 중요하다. 풍력발전기는 공기역학, 구조동역학, 그리고 제어와 상호 연계된 해석이 필요하며 풍력발전기 동역학 해석프로그램으로는 GH-Bladed, FAST, 그리고 S4WT 등이 있다.

최근에는 해상풍력발전단지 개발과 관련하여 부유형 풍력발전기 등 다양한 하부구조물 형식에 대한 연구가 활발히 전

개되고 있으며 이러한 연구를 위해서는 유체역학, 대변위, 대변형 등을 고려할 수 있는 풍력발전해석프로그램이 필요하다. 본 연구에서는 부유형 풍력발전 등 다양한 형식의 풍력발전해석프로그램으로의 확장을 위한 기초 연구로서 풍력발전 동역학 해석을 위한 기본 프로그램을 개발하였다. 미국신재생에너지연구소(NREL)에서 개발한 공력계산프로그램인 AeroDyn⁽¹⁾과 상용 다물체 동역학 프로그램인 DAFUL⁽²⁾을 기반으로 풍력발전시스템 동역학 해석 프로그램을 개발하고 NREL의 FAST⁽³⁾ 해석결과와 비교함으로써 개발된 프로그램을 검증하고 그 특성에 대하여 고찰하였다.

2. 풍력발전 해석 프로그램의 구성

2.1 프로그램의 이론적 배경

풍력발전기의 해석을 위해서는 Fig. 1에 나타난 바와 같은 모델링 및 해석조건을 구현할 필요가 있다. 주어진 바람 장(wind field)에 대하여 날개의 공기역학적 특성 및 제어조건에 따라 공력이 계산되고 그에 따른 전달하중 및 구조응답이 계산 된다.

익요소 이론에 따르면, 익요소의 단위길이당 양력(f_L)과 항력(f_D)은 다음과 같이 표현할 수 있다⁽⁴⁾.

$$f_L = \frac{1}{2} \rho c V_r^2 C_L(\alpha) \quad (1)$$

$$f_D = \frac{1}{2} \rho c V_r^2 C_D(\alpha) \quad (2)$$

ρ 는 공기밀도이고 c 는 코드이다. 그런데, 날개의 운동 및 변형이 발생하면 각 날개 단면에서의 상대풍속(V_r) 및 받음각(α)이 변하게 되고 그에 따라 양력계수(C_L), 항력계수(C_D)도 변화하게 되어 식 (1), (2)에 따라 공력이 변화한다. 날개의 변형 및 운동의 효과는 공력과 구조동역학 계산을 수렴할 때까지 반복계산 하는 방법으로 고려할 수 있다.

AeroDyn은 수평축 풍력터빈에 대한 이러한 공탄성 해석을 수행하는 프로그램이며 웨이크(wake)효과의 계산을 위하

여 익요소 운동량(blade element momentum)모델과 GDW (Generalized Dynamic Wake) 모델을 제공하고 있다⁽¹⁾. 익요소 운동량 모델은 익형 주위의 유동이 항상 정상상태를 이룬다는 가정에 기반하여 축방향과 회전방향 유도계수를 계산하여 날개요소에 작용하는 공력을 계산하는 방법이다. 이때, Prandtl의 끝단 손실계수(tip loss correction factor)도 추가적으로 고려된다^(5,6). 익요소운동량이론은 운동량이론과 익요소 이론에 기초를 두고 있다. 그런데, 운동량이론은 비정상 상태 유동 효과를 고려할 수 없고 로터(rotor) 회전면 전후에서의 운동량 보존을 가정하기 때문에 로터변형효과를 고려하지 못한다. 또한 익요소이론은 기본적으로 2차원 익형을 가정하기 때문에 날개길이 방향 유동에 의한 압력변화를 고려하지 못하는 등의 한계가 있어 발전기의 크기가 커지고 풍속이 빠를수록 오차가 증가한다. GDW모델은 포텐셜 유동이론에 기반한 모델^(7,8)로서 유동의 공간적 변화를 고려하는 모델이기 때문에 비정상 웨이크 거동(unsteady wake dynamics) 및 끝단손실에 의한 효과가 내재적으로 고려되므로 익요소운동량모델에 비하여 보다 정확한 공력계산이 가능한 것으로 알려져 있다⁽¹⁾. 그러나, 평균풍속에 비하여 유도 풍속(induced velocity)이 충분히 작다는 가정을 내포하고 있기 때문에 낮은 풍속에서는 수치적 불안정성을 보이는 한계가 있다. 따라서, 일반적으로 풍속에 따라 익요소운동량모델과 GDW모델을 선택적으로 적용하게 된다. AeroDyn은 동적 스톨(dynamic stall) 효과를 고려할 수 있는 경험식 기반의 Beddoes-Leishman모델⁽⁹⁾도 포함하고 있다. 본 연구에서 개발한 풍력발전 시뮬레이션 프로그램에서는 AeroDyn v.12.58을 채용하였다.

구조동역학 계산용 코드로는 상용 다물체 동역학 해석 프로그램인 DAFUL을 채용하였다. DAFUL은 유연체를 취급할 수 있는 다물체 동역학 해석 프로그램으로서 지배방정식은 다음과 같다⁽⁷⁾.

$$M\ddot{q} - Q_f - Q_c + \Phi_q^T \lambda = 0 \quad (3)$$

$$f_e = ku + c\dot{u} \quad (4)$$

$$\Phi = 0 \quad (5)$$

q 는 일반 좌표계, u 는 변형, Q_f 는 외력이다. f_e 는 유연체 요소의 탄성력과 감쇠력의 합이며 f_e 로부터 일반좌표계에서

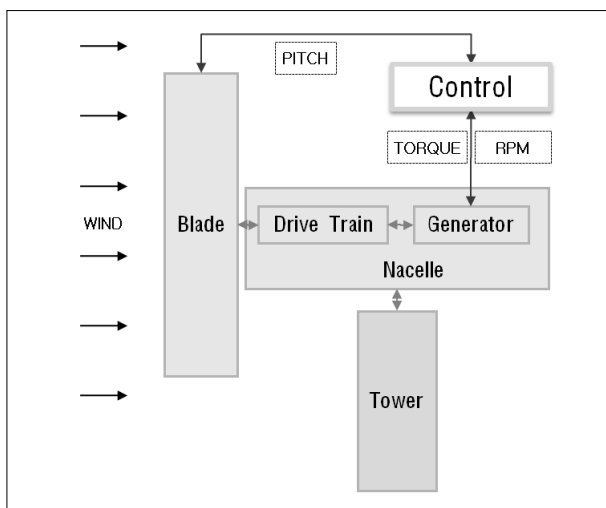


Fig. 1 Schematics for the wind turbine simulation

의 탄성력 벡터인 Q_c 가 구성된다. Φ 는 구속방정식, λ 는 라그랑주 승수(Lagrange multiplier)벡터, M 은 일반좌표계의 질량행렬이며, k , c 는 유연체요소에서의 강성 및 감쇠 행렬을 의미한다. 이때, 유연체를 유한요소로 모델링할 경우, 강성행렬은 기하학적 비선형성을 고려하여 구성된다. 따라서, GH-Bladed나 FAST에 비하여 날개 및 타워 등의 대변형에 대하여 보다 정확한 해를 구할 수 있고 관심구조에 대해서는 유한요소를 활용한 상세 모델링을 통하여 응력분포까지도 계산이 가능하다.

발전기의 토크는 정격토크 이하에서는 식 (6)과 같은 간단한 관계식을 따르고 정격토크 이상에서는 일정한 토크로 제어된다. 정격속도 이상에서의 피치제어를 위해서는 사용자 정의 서브루틴(user defined subroutine)과 연계하여 구현된다.

$$T_g = k\Omega_g^2 \quad (6)$$

T_g , Ω_g 는 발전기 토크 및 회전속도이며 k 는 상수이다.

2.2 해석 모델링 및 입력 데이터

풍력발전기 날개의 공력특성은 날개요소의 노드 위치, 초기 비틀림각, 날개요소의 길이, 코드, 그리고 적용된 익형의 공력특성을 정의하게 된다⁽¹⁾. AeroDyn 계산을 위한 익형의 공력특성은 2-D 공력특성 데이터로부터 Fig. 2에서와 같이 계산된다. NREL에서 개발한 AirfoilPrep 프로그램을 활용하

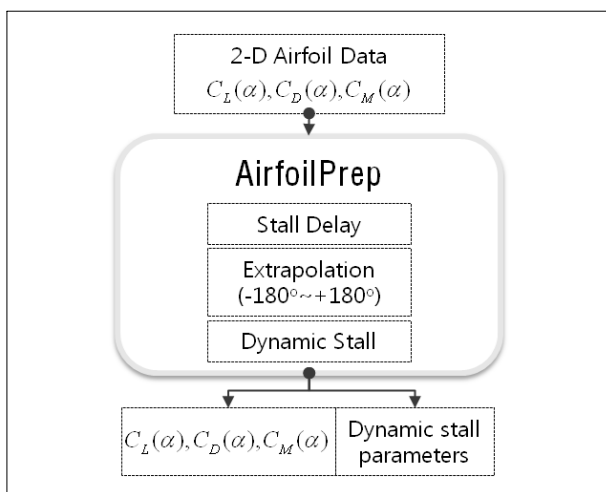


Fig. 2 Aerodynamic property evaluation for AeroDyn

면, 회전하는 날개에 의한 스톨 지연(Stall delay)을 고려할 수 정^(10,11), Viterna 방법⁽¹²⁾에 따라 전 범위 받음각(-180°~180°)에 대한 항력계수, 양력계수, 모멘트 계수(C_M)의 외삽, 그리고 동적 스톨 파라미터(Table 1)의 계산이 가능하다.

풍력발전기의 구조해석모델은 Fig. 3, 4에서 보는 바와 같이 날개 및 타워는 보 요소(beam element)로 모델링하고 동

Table 1. Dynamic stall parameters

Math, Expression	Aerodynamic Properties
$\alpha _{stall}$	Stall angle
$\alpha _{C_N=0}$	Zero C_N angle
$(dC_N/da) _{C_L=0}$	C_N slope for zero lift
$C_N _{+\alpha _{stall}}$	C_N at positive stall angle of attack
$C_N _{-\alpha _{stall}}$	C_N at positive stall angle of attack
$\alpha _{C_D=C_D, \min}$	Angle of attack for minimum C_D
C_D	Minimum C_D

* C_N is aerodynamic force coefficient normal to airfoil chord

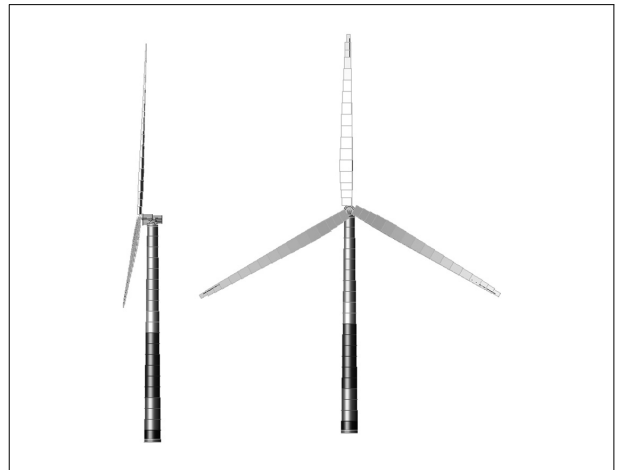


Fig. 3 Wind turbine structural model : Blades and tower

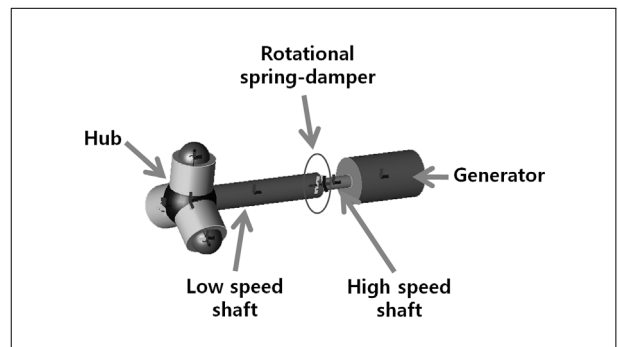


Fig. 4 Drive Train Model

Table 2. Joint element used for drive-train structural modeling

Joint position		Joint type
Blade root	Hub	Revolute
Hub	Low speed shaft	Fixed
Low speed shaft	High speed shaft	Revolute + Rotational Spring & Damper
High speed shaft	Generator	Fixed
High speed shaft	Rotor	Revolute
Rotor	Nacelle	Revolute
Nacelle	Tower	Revolute + Rotational Spring
Tower	Ground	Fixed

력전달장치(Drive train)는 강체 요소와 Table 2의 조인트 요소로 모델링 된다. 특히, 저속 회전축과 고속회전축 사이의 기어박스에 의한 응답지연효과는 회전방향 스프링-감쇠요소를 이용하여 구현하였다. 그리고 필요하다면 관심구조를 유연체로 상세히 모델링하면 응력 및 변형에 대한 해석결과도 얻을 수 있다.

3. 프로그램 검증 모델

NREL에서는 연구목적으로 Table 3에 표시한 바와 같은 5-MW 풍력발전기 자료를 제공하고 있다(FAST해석을 위한 입력 데이터 역시 제공하고 있음)⁽¹³⁾. 이를 기준으로 본 연구에서 개발한 해석 프로그램을 적용할 수 있는 모델을 구성하였다.

FAST 모델에서 날개의 공력특성은 17개의 요소로 모델링 되었으며 이는 DAFUL모델에서도 동일하게 구현하였다. FAST의 구조모델은 모달 모델(modal model)로 구성되었으며, 타워에 대해서는 2개의 전후 모드와 2개의 좌우모드로 구성되었고, 날개에 대해서는 2개의 날개 회전면과 수직인 방향

Table 3. Specifications for the NREL 5-MW baseline wind turbine model

Rating	5MW
Rotor Orientation, Configuration	Upwind, 3-Bladed
Rotor, Hub Diameter	126m, 3m
Hub Height	90m
Control	Variable Speed Collective Pitch

(flapwise) 모드와 1개의 날개 회전방향(edgewise) 모드로 구성되었다. 타워 및 날개 모두에서 비틀림 모드는 상대적으로 고유진동수가 높아 구조모델에서 제외되었으므로 비틀림 변형은 발생할 수 없다. 이에 비하여, DAFUL의 구조모델은 선형 스프링 요소로 구성되었으므로 비틀림 변형이 나타날 수 있다. 이러한 비틀림 변형의 차이는 구조변형 측면뿐만 아니라 공력측면에서도 받음각의 변화를 초래한다는 관점에서 유의할 필요가 있다.

NREL 5-MW 풍력발전모델은 피치제어를 통하여 정격출력 이상의 파워가 발생하지 않도록 제어되는 모델이지만 본 해석에서는 피치제어 알고리즘은 생략하고 Fig. 5에 나타난 바와 같이 정격 토크 조건으로 토크를 제어하며 식 (6)의 상수는 0.0255764이다. FAST 모델에 대해서도 이와 동일한 제어조건으로 변경한 해석을 진행함으로써 직접적인 결과비교를 용이하게 하였다.

평균풍속 11.4m/s, 표준편차 1.981m/s인 만 모델(Mann Model)을 적용한 630초 간의 3차원 바람 장(wind field)에 대하여 해석을 수행하였으며 풍차의 허브 높이 평균풍속의

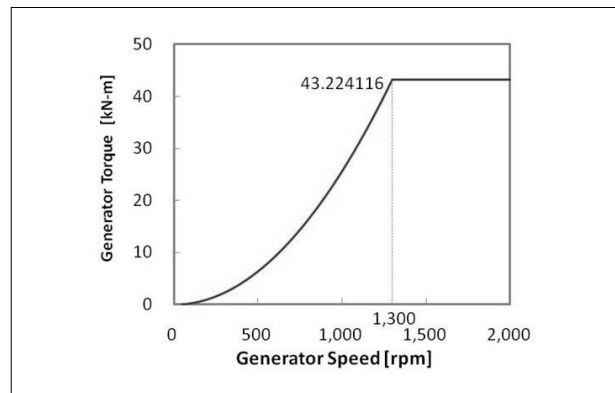


Fig. 5 Variable speed control for the verification Simulation

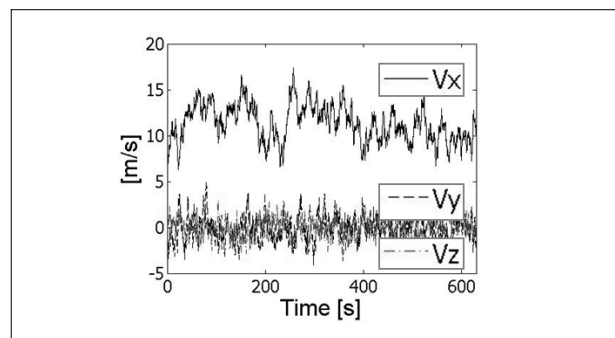


Fig. 6 Wind speed at hub height in the verification simulation

Table 4. Applied AeroDyn Options for the Verification Simulation

Applied Options	Physics
BEDDOES	Beddoes & Leishman Dynamic Stall
USE_CM	Include Pitching Moment Effect
DYNIN	GDW Inflow Model

변화는 Fig. 6에 나타난 바와 같다.

AeroDyn 공력계산에서는 Table 4와 같은 조건을 적용하였다.

4. 시뮬레이션 결과

Fig. 7을 보면 발전기의 응답 및 추력이 FAST 결과와 대체로 일치함을 확인할 수 있다. 날개의 피치제어 없이 토크제어만 작동하기 때문에 Fig. 7(a)의 발전기의 출력은 5MW를 상회하는 구간도 나타나고 있다.

Fig. 8은 구조변형 효과가 가장 크게 나타나는 날개 끝 요소(Blade element 17)에서의 공력계산 결과를 정리한 것이다. 날개요소의 비틀림 변형에 의하여 피치각의 변화가 FAST 결과에 비하여 상대적으로 크게 나타나며 받음각의 차이가 나타나고 있으며 날개 요소에서의 공력 또한 FAST에 비해 다소 작게 계산됨을 알 수 있다. 공력차이에 따라 Fig. 9에서도 구조변형의 차이가 나타나고 있다. 비틀림 모드가

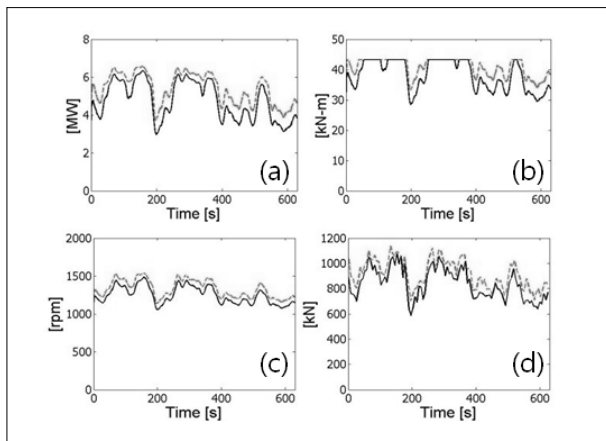


Fig. 7 Generator responses and rotor thrust force for 630 seconds : (a) Generator power, (b) Generator torque, (c) Generator speed, (d) Rotor thrust force (solid line : developed program, dash line : FAST)

제외된 모델링 때문에 날개 및 타워에서의 비틀림 변형이 FAST 결과에는 나타나지 않았다. FAST와의 구조동역학 계산방법 및 모델링 차이 때문에 구조해석 결과에 차이가 발생하고 공력-구조 연성에 의해 공력계산결과에서도 차이가 발

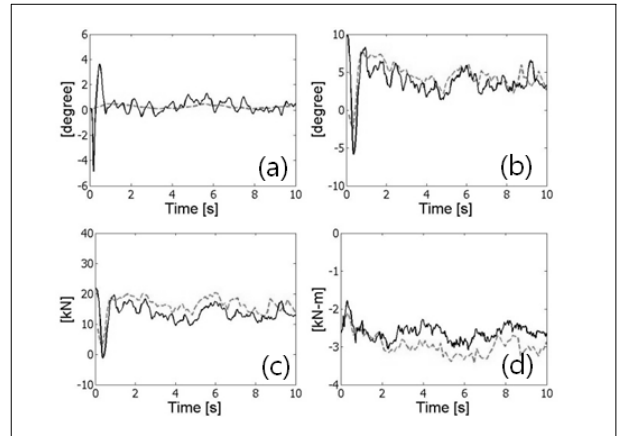


Fig. 8 Aerodynamic responses for initial 10 seconds at blade element 17 located at the blade tip : (a) Pitch angle (b) Angle of attack (c) Normal force, (d) Pitching moment (solid line : developed program, dashed line : FAST)

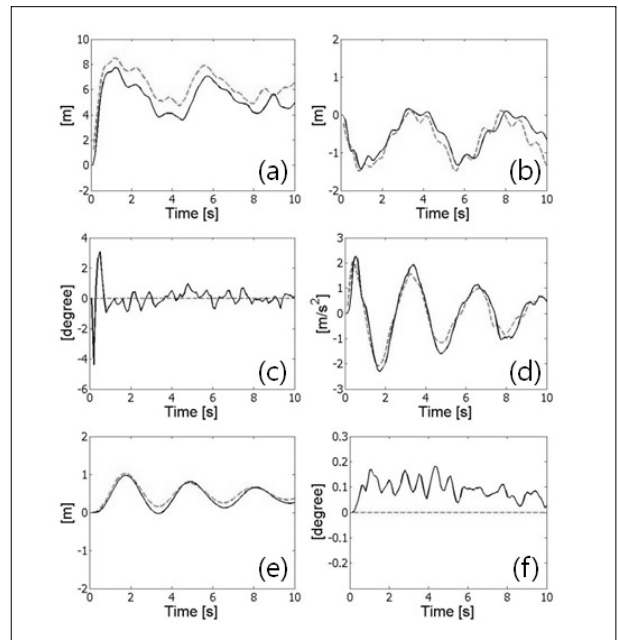


Fig. 9 Structural responses for initial 10 seconds : (a) Out of plane deflection of blade 1, (b) In plane deflection of blade 1, (c) Twist deflection of blade 1 (d) Tower top longitudinal acceleration, (e) Tower top longitudinal deflection, (f) Tower top twist deflection (solid line : developed program, dashed line : FAST)

Table 5. Natural Frequencies in Hz for NREL 5-MW Baseline Wind Turbine

Mode	Description	Frequency
1	1 st Tower Fore-Aft	0.3240
2	1 st Tower Side-to-Side	0.3120
3	1 st Drive train Torsion	0.6205
4	1 st Blade Asymmetric Flapwise Yaw	0.6664
5	1 st Blade Asymmetric Flapwise Pitch	0.6675
6	Blade Collective Flap	0.6993

* Source : NREL/EL-500-38060⁽¹³⁾

생한 것으로 추정된다.

발전기 회전속도(약 1,200rpm)와 기어비(97:1)를 고려해 보면 날개회전에 따른 샘플링 기진 주파수(rotational sampling excitation frequency) 대역은 0.2Hz 및 0.6Hz 근처에 존재한다. 또한, Table 5와 같이 시스템의 고유주파수가 존재한다. Fig. 10은 630초간의 해석결과를 주파수 변환한 결과이며 Fig. 10(a)(b)의 공력 및 날개변형 스펙트럼에서 0.2Hz 근처에서 나타나는 피크 주파수는 샘플링 기진 주파수의 영향이며 0.6~0.7Hz 사이의 날개 모드운동의 영향은 나타나지 않고 있다. Fig. 9(c)(d)의 추력 및 타워 끝에서의 가속도 스펙트럼에서 나타나는 0.3Hz 근처의 피크 주파수는 타워의 모드운동 영향이며 0.6Hz 근처의 피크는 샘플링 기진 주파수의 영향이다.

630초간의 해석에 소요된 시간은 Window XP 64bit 3.07GHz CPU 11.9GB RAM 기준으로 3분 24초가 소요되었다.

5. 결론

본 연구에서는 부유형 해상풍력발전기 해석프로그램 개발을 위한 기초 연구로서 풍력발전기 해석 기본 프로그램을 개발하였다. NREL의 공력해석 프로그램인 AeroDyn과 상용 다물체 동역학 해석프로그램인 DAFUL을 제어알고리즘과 연동하였다. 개발된 프로그램으로 NREL 5-MW 풍력발전기에 대해 해석을 수행하고 FAST 해석결과와 비교함으로써 프로그램의 신뢰성을 검증하고 프로그램의 특성을 분석하였다.

해석결과는 전반적으로 FAST와 유사한 수준을 보이면서

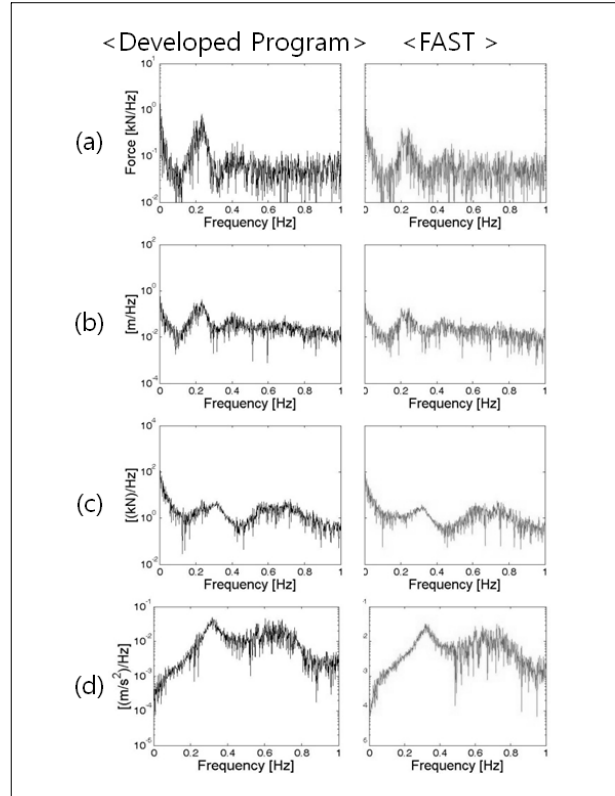


Fig. 10 Power spectra of 630 second analysis results
 (a) Normal force at blade element 17,
 (b) Out of plane deflection of blade 1,
 (c) Rotor thrust force, (d) Tower top longitudinal acceleration
 (solid line : developed program, dashed line : FAST)

도 공력 및 변형이 다소 작은 수준으로 나타남을 확인하였다. 공력 계산프로그램으로는 FAST와 동일하게 AeroDyn을 적용하였기 때문에 FAST 결과와의 차이는 구조동역학 해석 및 모델링 방법 차이에서 기인한다고 볼 수 있다. 날개와 타워를 유연체 모델로 고려함에 있어서, FAST에서는 선형이론에 기초한 모달 모델로 구성되면서 기본적으로 선형 구조해석의 한계를 갖는 것은 물론 날개의 비틀림 모드가 고유진동수가 상대적으로 높고 변형에 미치는 영향이 작아 제외되었으나 개발된 프로그램에서는 스프링 구조요소로 모델링 되면서 모드의 제한이 없고 기하학적 비선형성도 고려될 수 있다. 개발된 프로그램과 FAST에 의한 계산 결과의 차이는 이러한 구조동역학 모델링 차이에서 기인된다고 추정해 볼 수 있으며 정확한 원인분석을 위해서 체계적인 검증 및 비교 연구가 진행될 예정이다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.
(No. 20093020020020)

References

- [1] Moriarty, P. J. and Hansen, A. C., 2005, "AeroDyn Theory Manual", *NREL/EL-500-36881*.
- [2] Lee, C.H., Bae, D.S. and Lee, S.H., 2009, "A Parametric Generalized Coordinate Formulation For Multibody System Dynamics", *Multibody System Dynamics*, vol. 22(2), pp. 145-162.
- [3] Jonkman, J. M. and Marshal, L. B., 2005, "FAST User's Guide", *NREL/EL-500-38230*.
- [4] Bianchi, F.D. Battista, H.D. and Mantz, R.J., 2007, *Wind Turbine Control Systems*, Springer.
- [5] Betz, A., 1919, "Schrauben Propeller mit Geringstem Energieverlust", Diss. Gottingen Nachrichtenm Gottingen.
- [6] Glauert, H., 1935, "Airplane Propellers", *Aerodynamic Theory* (ed. WF Durand), vol. IV, Division L, pp. 191-269. New York: Springer.
- [7] Pitt, D.M and Peters, D.A., 1981, "Theoretical Prediction of Dynamic-Inflow Derivatives", *Vertica*, 5, pp. 21-34.
- [8] Suzuki, A., 2000, "Application of Dynamic Inflow Theory to Wind Turbine Rotors", Salt lake City : Department of Mechanical Engineering, University of Utah.
- [9] Leishman, J.G. and Beddoes, T.S., 1989, "A Semi-Empirical Model for Dynamic Stall", *Journal of the American Helicopter Society*, vol. 34(3), pp. 3-17
- [10] Du, Zhaohui and Selig, Michael S., 1998, "A 3-D Stall-Delay Model for Horizontal Axis Wind Turbine Performance Prediction", *Collection of the 1998 ASME Wind Energy Symposium Technical Papers Presented at the 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 12-15 January 1998, Reno, Nevada.*, New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. and American Society of Mechanical Engineers (ASME); pp. 9-19.
- [10] Eggers, A. J., et al., 2003, "An Assessment of Approximate Modeling of Aerodynamic Loads on the UAE Rotor", *Collection of the 2003 ASME Wind Energy Symposium Technical Papers Presented at the 41st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 6-9 January 2003, Reno, Nevada.* New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. (AIAA) and American Society of Mechanical Engineers (ASME); pp. 283-292.
- [12] Viterna, L.A. and Janetzke, D.C., 1982, "Theoretical and Experimental Power from Large Horizontal Axis Wind Turbines", NASA TM-82944, Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, September.
- [13] Jonkman, J. M., Butterfield, S., Musial, W. and Scott, G., 2009, "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development", *NREL/EL-500-38060*.

송진섭



1995년 서울대학교 조선해양공학과 공학사
2000년 서울대학교 조선해양공학과 공학석사
2004년 펜실베이니아주립대학교 기계공학과
공학박사

현재 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부 선임연구원
(E-mail : jssong@kimm.re.kr)

임채환



1980년 서울대학교 조선해양공학과 공학사
1982년 서울대학교 조선해양공학과 공학석사
1993년 미시건대학교 조선해양공학과 공학박사

현재 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부 책임연구원
(E-mail : cwrin@kimm.re.kr)

남용운



1982년 부산대학교 조선해양공학과 공학사
1984년 부산대학교 조선해양공학과 공학석사
1994년 부산대학교 조선공학과 공학박사

현재 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부 책임연구원
(E-mail : yynam@kimm.re.kr)

배대성



1982년 한양대학교 기계공학 공학사
1983년 University of Iowa 기계공학 공학석사
1986년 University of Iowa 기계공학 공학박사

현재 한양대학교 공학대학 기계공학과 교수
(E-mail : dsbae@hanyang.ac.kr)