

# FAST, GH Bladed 및 CFD기법을 이용한 5MW 해상풍력터빈 시스템 설계하중조건 해석 및 비교

김기하\* · 김동현\*\*† · 곽영섭\* · 김수현\*\*\*

## Design Load Case Analysis and Comparison for a 5 MW Offshore Wind Turbine Using FAST, GH Bladed and CFD Method

Ki-Ha Kim\*, Dong-Hyun Kim\*\*†, Young-Seob Kwak\*, Su-Hyun Kim\*\*\*

*Key Words* : Offshore Wind Turbine(해상풍력터빈), Design Load Cases(설계하중케이스), Blade Element Momentum Theory(블레이드 요소모멘텀 이론), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학)

### ABSTRACT

Design lifetime of a wind turbine is required to be at least 20 years. The most important step to ensure the design is to evaluate the loads on the wind turbine as accurately as possible. In this study, extreme design load of a offshore wind turbine using Garrad Hassan (GH) Bladed and National Renewable Energy Laboratory (NREL) FAST codes are calculated considering structural dynamic loads. These wind turbine aeroelastic analysis codes are high efficiency for the rapid numerical analysis scheme. But, these codes are mainly based on the mathematical and semi-empirical theories such as unsteady blade element momentum (UBEM) theory, generalized dynamic wake (GDW), dynamic inflow model, dynamic stall model, and tower influence model. Thus, advanced CFD-dynamic coupling method is also applied to conduct cross verification with FAST and GH Bladed codes. If the unsteady characteristics of wind condition are strong, such as extreme design wind condition, it is possible to occur the error in analysis results. The NREL 5 MW offshore wind turbine model as a benchmark case is practically considered for the comparison of calculated designed loads. Computational analyses for typical design load conditions such as normal turbulence model (NTM), normal wind profile (NWP), extreme operation gust (EOG), and extreme direction change (EDC) have been conducted and those results are quantitatively compared with each other. It is importantly shown that there are somewhat differences as maximum amount of 18% among numerical tools depending on the design load cases.

### 1. 서 론

풍력터빈에서 블레이드는 바람이 가지는 운동에너지를 기계적인 회전에너지로 변환하는 기능을 담당한다. 블레이드로부터 발생하는 로터의 회전에너지는 주축을 통하여 발전기에 전달되어 전기에너지로 변환된다. 풍력터빈 시스템에서 블레이드는 회전하는 대형 탄성 구조물이며 시스템에 작

용하는 하중(load) 및 출력(power)에 가장 중요한 영향을 미치는 핵심부품에 해당한다. 풍력터빈은 최소한 20년 이상의 설계수명 보장이 요구되는데, 이를 보장하는 설계를 수행하기 위해서는 가능한 하중해석을 정확하게 수행하여야 한다.<sup>(1)</sup> 최근 풍력발전기의 용량 증가로 인한 블레이드의 길이가 점차적으로 증가하면서 경량화와 고강도 설계에 대한 요구를 충족시키기 위해서 높은 정밀도 및 첨단 해석기술이 요

\* 국립경상대학교 기계항공공학부 대학원(Graduate School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University)

\*\* 국립경상대학교 항공우주시스템공학과 및 그린에너지융합연구소(Dept. of Aerospace and System Engineering, Research Institute for Green Energy, Gyeongsang National University)

\*\*\* 씨에이코리아(주)(CAE-KOREA Co., Ltd.)

† 교신저자, E-mail : dhk@gnu.ac.kr

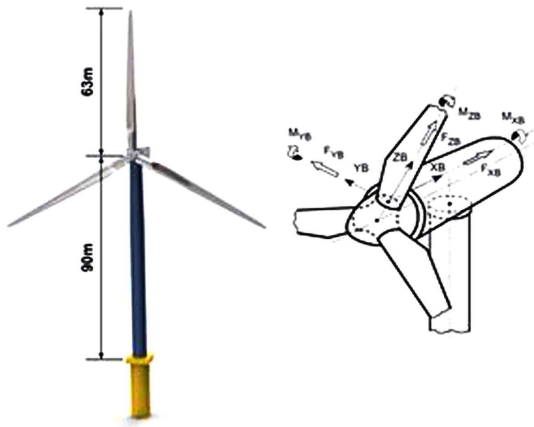


Fig. 1 Geometric configuration of the 5 MW wind turbine model and definition of blade coordinate system

구되고 있다.

본 연구에서는 국내외 풍력터빈 설계과정에서 대표적으로 상용되고 있는 하중 및 공탄성 해석프로그램으로 GH Bladed(Ver.4.4)<sup>(2~3)</sup> 및 NREL FAST(Ver.7.02)<sup>(4)</sup> 코드를 사용하였으며, 이 코드들은 국제적인 설계인증 받은 해석 프로그램들이다. 이러한 풍력터빈 공탄성 해석 코드들은 방대한 설계하중해석 조건들에 대해 빠른 수치해석으로 효율성이 우수하지만, 대부분 풍력터빈의 공력탄성학적 하중(aeroelastic load)을 계산하는데 있어 unsteady blade element momentum(UBEM) 이론, generalized dynamic wake (GDW), dynamic inflow model, dynamic stall model 및 tower influence model 등과 같은 수학적 모델링 이론에 기반하고 있다. 따라서 극한 설계풍속조건(extreme design wind condition)<sup>(5)</sup>과 같이 바람의 비정상 특성이 강한 경우에는 해석결과에 다소 오차가 발생할 수도 있다. 이에 대한 면밀한 검토를 위해 5 MW 급 해상풍력터빈 시스템 모델<sup>(6)</sup>에 대한 설계하중해석을 수행하고 정성적인 비교평가 연구를 수행하였다.

## 2. 설계하중조건(DLC) 모델링 및 해석기법

본 논문에서는 해석 모델로 최근 국제적으로 활발한 연구가 수행된 NREL 5 MW reference 풍력터빈 모델을 선정하였다. 이 모델은 블레이드, 허브, 나셀, 및 타워에 대한 공기역학적 정보 및 다물체 동역학 해석을 위한 분포질량 및 질량관성에 대한 상세한 물성치(강성 및 질량분포) 등이 공개되어 있다. 로터의 직경은 126 m, 타워 높이는 90 m이고, 정격풍속(rated wind speed)은 11.4 m/s, 정격회전수(rated rotating speed)는 12.1 RPM 이다. Fig. 1과 Table 1은 본 연구에서 고려한 5 MW 해상풍력터빈의 형상과 블레이드 좌표계의 정의를 보여주고 있다. 본 연구의 해석에서는 회전하

Table 1 Design parameters of the NREL 5 MW wind turbine

Rating	5 MW
Rotor Orientation, Configuration	Upwind, 3 Blades
Control	Variable Speed, Collective Pitch
Drive train	High Speed, Multiple-State Gearbox
Rotor, Hub Diameter	126 m, 3 m
Hub Height	90 m
Cut-In, Rated, Cut-out Wind Speed	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
Cut-In, Rated	6.9 RPM, 12.1 RPM
Rated Tip Speed	80 m/s
Overhang, Shaft Tilt, Precone	5 m, 5 degrees, 2.5 degrees
Rotor Mass	110,000 kg
Nacelle Mass	240,000 kg
Tower Mass	347,000 kg
Coordinate Location of Overall CM	(-0.2 m, 0.0 m, 64.0 m)

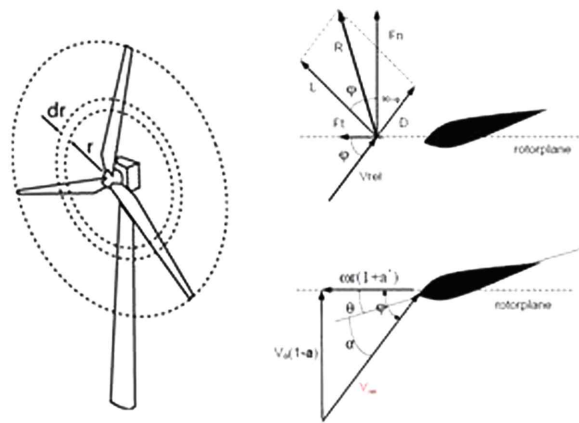


Fig. 2 Blade element with an annulus ring

는 블레이드와 타워의 간섭효과 및 블레이드 피치각(blade pitch angle, BPA) 변화 영향 등이 모두 고려되었다.

고전적인 Blade element momentum (BEM) 이론에서는 터빈의 날개를 Fig. 2와 같이 각속도  $\Omega (= \omega r)$ 로 회전하는 실제 터빈 날개의 형상을 이용하지만, CFD 해석과 같이 블레이드 길이방향으로 연속적인 모델링을 수행하는 것이 아니라 블레이드 스패방향으로 미소한 길이 dr에 대한 공력 하중을 계산한 후 적분하는 방식을 취하게 된다.<sup>(7)</sup> 따라서 BEM 이론에서는 임의의 반경 r에 위치한 에어포일의 미소 길이 dr에 작용하는 양력(L) 및 항력(D)을 개별적으로 계산한 후 블레이드 전체의 추력 및 회전토크 등을 적분하여 구하기 때문에 블레이드 스패방향으로의 순간적인 공기역학적 변화 및 상호영향 등이 완벽하게 고려된다고 볼 수는 없다.

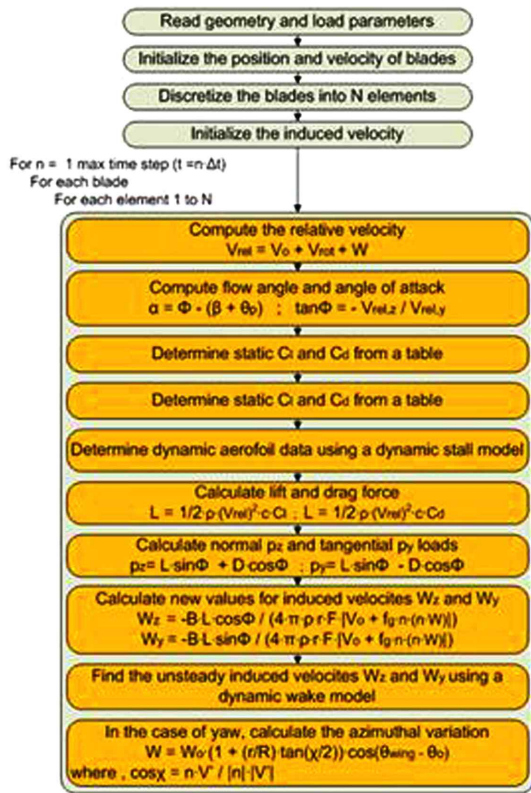


Fig. 3 Unsteady blade element momentum theory algorithm

GH Bladed 및 NREL FAST 코드에서는 블레이드에 작용하는 공력하중 계산을 위해 UBEM 기법에 기반한 비정상 공력해석 이론을 사용하고 있다. 또한 Beddoes-Leishman's dynamic stall model 및 3-D stall delay model<sup>(8)</sup> 등을 포함하고 있으며, Prandtl의 끝단손실계수(tip loss factor)와 추력계수  $C_T$ 와 축 방향 유도계수(axial induction factor) 사이의 실험적 관계에 대한 Glauert 보정을 수반한다. UBEM 코드에서는 평형 상태의 공력하중에 대해 시간에 따른 변화 영향을 고려하기 위해, 공력발전기 블레이드가 변동하는 운동에 의한 영향을 고려하는 dynamic inflow 모델과 타워 간섭효과모델 등을 포함하고 있다. 바람 분포가 알려진 지역에서 공력발전기의 연간 생산에너지는 정상상태 가정의 기본 BEM이론을 적용하여 계산하면 되나, 시간에 대한 비정상(unsteady)적인 바람의 변동에 기인한 공력터빈 블레이드 및 시스템의 공탄성 거동을 예측하기 위해서는 바람경계층(wind shear) 및 회전 블레이드-타워 간섭효과를 고려한 UBEM 이론을 사용해야 정확한 공력해석이 가능하다. 참고로 Fig.3은 UBEM 공력해석 코드 개발시 요구되는 주요 모듈 구성과 해석 절차를 제시하였다. 고정식 풍력터빈에 비해 부유식 풍력터빈을 해석하는 경우에는 시간에 따른 하부 지지구조의 6 자유도 운동과 블레이드 회전과 바람의 공간적 변화 등을 동시에 고려하여 해석이 수행되어야 하기 때문에 수치알고리즘의 개발이 매우 복잡해지게 된다. 본 연구팀도

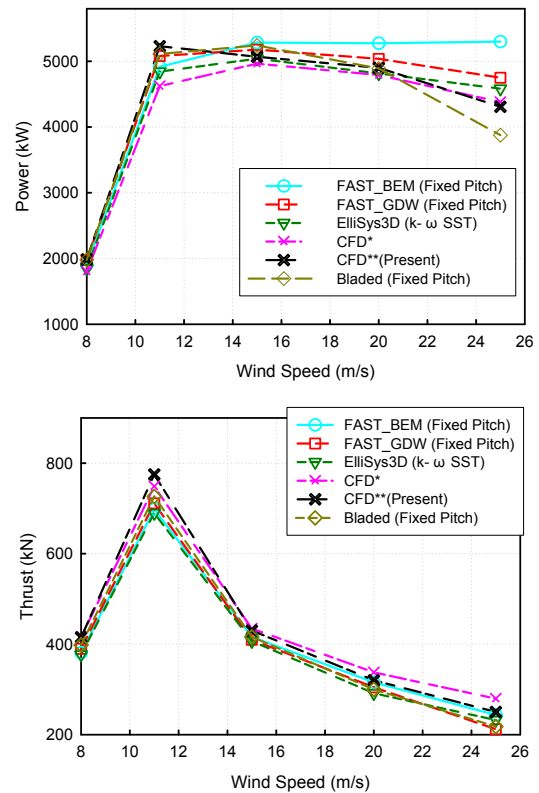


Fig. 4 Comparisons of predicted aerodynamic power and thrust for various wind speeds

자체적으로 UBEM코드를 지속적으로 개발하여 이미 부유식 풍력터빈 블레이드에 적용 가능한 수준으로 확장 및 응용한 사례가 있다<sup>(9)</sup>. 또한 본 논문에서 적용한 CFD-Multibody dynamic coupling 하중해석 기법에 대한 내용 및 검증은 참고문헌<sup>(10)</sup>을 참조하기 바란다.

### 3. 해석결과 및 비교

#### 3.1 성능해석결과 및 비교 검증

Fig. 4는 NREL 5 MW 해상풍력터빈 모델의 풍속에 대한 출력과 추력을 비교한 결과로 GH Bladed(Ver.4.4), FAST 코드(Ver.7.02) 및 3차원 CFD 해석기법을 적용하여 수행된 것이다. 이 경우 각 풍속에 대한 블레이드 피치각(pitch angle) 조건은 참고문헌<sup>(10)</sup>에 제시되어 있다. 본 연구에서는 고정된 블레이드 피치각 조건 및 피치 제어를 작동한 경우에 대한 해석을 모두 수행하여 비교하여 보았는데 피치 제어를 작동하는 경우는 정격풍속 이후에서 모두 일정한 터빈 출력을 확인할 수 있었다.

본 예비해석은 동일한 바람 및 작동 조건에서 해석기법에 따른 정량적인 상대 비교가 목적이므로 피치 제어를 작동한 경우의 결과는 제외하였다. 이유는 피치제어를 작동하

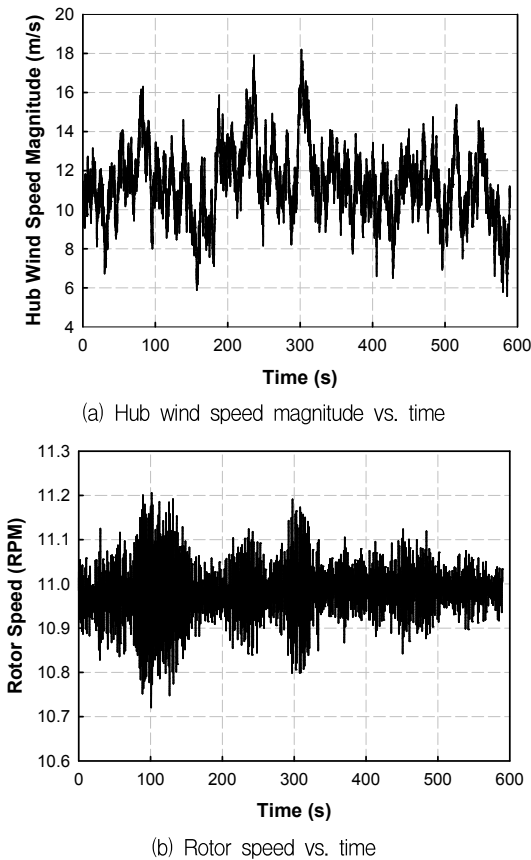


Fig. 5(a) Time history of the hub wind speed magnitude and rotor speed for the NTM condition ( $V_{avg}=11$  m/s, 10 min)

게 되면 각 해석코드에 제어알고리즘이 반영되는 기법에 대한 영향이 혼합되어 객관적인 평가가 난해해 지기 때문이다. 터빈 추력은 풍력발전기의 좌표계에서  $F_x$ 에 해당하는 힘이 지배적으로 영향을 미치게 되는데 전반적으로 상이한 해석 기법들이 유사한 경향의 결과를 보여주고 있다. Fig. 4에서 EllipSys3D 해석결과는 서로 다른 3차원 CFD 해석기법의 결과를 비교하기 위해 참고로 제시한 것이다. 물리적으로 터빈의 출력(power)은 터빈 블레이드를 통해 허브에 작용하는  $M_x$  모멘트에 지배적으로 영향 받게 된다. 풍속변화에 따른 터빈 출력(power) 비교결과 그래프에서 FAST 코드의 경우 BEM 옵션을 적용한 결과는 generalized dynamic wake (GDW) inflow 모델을 적용한 경우, GH Bladed 및 CFD 해석 결과와도 정격 풍속이후에서 큰 차이를 보임을 발견하였다. 따라서 이후의 해석에서는 FAST 코드 적용시 GDW 옵션을 일괄적으로 적용하여 해석을 수행하였다.

### 3.2 하중해석결과 상호비교 및 검증

본 논문에서 적용한 풍력터빈 설계하중조건은 GL Guideline 2010<sup>(5)</sup>에 기반하여 선정하였다. 본 논문에서 하

중해석결과로 제시한 주요 바람조건은 Normal Turbulence Model (NTM), Normal Wind Profile (NWP), Extreme Operating Gust (EOG), Extreme Direction Change (EDC) 이다.

Fig. 5(a)는 평균풍속 11 m/s에서 NTM 설계하중조건 해석을 위해 생성된 10분 동안의 난류바람 풍속변화를 보여주고 있다. 본 해석에서는 IEC 61400-1에서 규정하는 가장 강한 난류등급인 'A' class를 고려하였으며, 난류모델은 Kaimal spectrum을 적용하였다. 'A' class의 가장 강한 난류조건을 고려하였기 때문에 평균풍속 11 m/s인 난류바람은 10분 내에 최대 18 m/s의 풍속에서 최저 6 m/s까지 변화하는 특성을 보이고 있다. Fig. 5(b)는 5 MW 풍력터빈에 대한 해석결과의 예로 설정된 난류 바람 조건에서 로터의 회전속도 변화를 보여주고 있는데, 난류조건에 따른 풍속 변화에 따른 로터의 급격한 회전수 변화를 관찰할 수 있다.

Fig. 6은 풍속 11 m/s에서 동일한 5 MW 풍력터빈 모델에 대한 NTM, NWP, EOG 및 EDC 설계하중 조건에서 FAST 및 GH Bladed 코드로 해석한 블레이드의 시간에 대한 하중변화를 블레이드 좌표계(Fig. 1)에 대해 비교한 결과이다. 참고로 블레이드 좌표계는 블레이드에 고정되어 함께 회전하게 된다. 상대적인 차이를 분석하기 위해 동일한 평균 풍속 조건에서 해석이 수행되었다. 결과를 보면 설계하중 조건에 따라 블레이드에 작용하는 공기역학, 타워간섭 및 회전속도가 달라지기 때문에 하중응답의 특성이 다르게 나타남을 볼 수 있다. Fig. 6(a)는 Fig. 5(a)의 난류 바람조건에 대한 시간 하중응답으로 난류바람의 변동적인 풍속특성 때문에 블레이드에 부가되는 하중 또한 심하게 변동됨을 알 수 있다. 이러한 하중의 변동특성은 블레이드 및 터빈 부품의 피로수명에 중요한 영향을 미치게 된다. FAST 및 GH Bladed로 해석한 결과가 거의 유사한 경향을 보이고 있으나 하중응답의 위상은 약간의 차이를 보이고 있다. Fig. 6(b)~(d)는 NWP, EOG 및 EDC 조건에 대한 블레이드 루트하중의 시간에 대한 하중응답을 보여주고 있다. NWP조건인 경우는 FAST 및 GH Bladed 해석결과가 거의 동일하나 EOG 및 EDC 조건의 경우는 다소 차이를 보이고 있다. EOG 조건의 경우는 200초에서 210초 사이에 돌풍(gust) 영향이 반영되게 되는데 이 구간에서 바람의 영향이 가장 큰  $F_{XB}$  및  $M_{YB}$  하중이 차이를 나타내고 있는데 이는 바람의 시간변동 특성을 반영하여 해석하는 알고리즘이 상이하기 때문으로 판단된다. 유사한 이유로 EDC 조건의 경우도 돌풍이 작용한 이후에  $F_{XB}$ ,  $F_{ZB}$ ,  $M_{XB}$ ,  $M_{YB}$ 에서 다소 차이가 나타나고 있다. 이러한 차이는 다음 그림에서도 세부적으로 관찰할 수 있다.

Fig. 7은 블레이드 방위각(azimuth angle)에 대해 설계하중 변화를 비교한 결과이다. 이번 비교에서는 좀 더 명확한 비교 및 고찰을 위해 GH Bladed와 FAST 해석결과뿐만 아니라 비정상 3차원 전산유체역학(CFD)과 다물체 동역학을

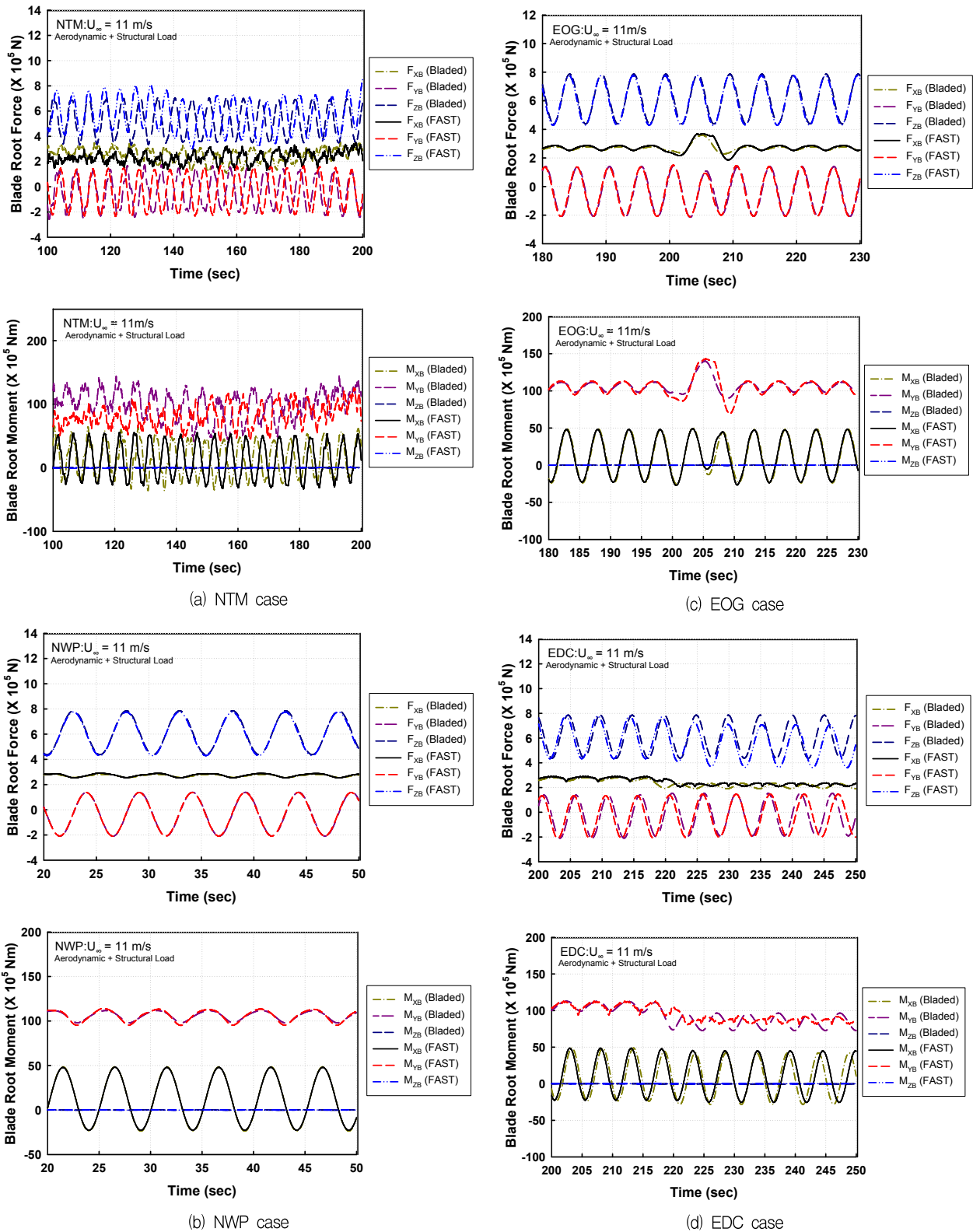


Fig. 6 Comparisons of blade root force and moment between FAST and GH Bladed for different design wind condition ( $V_{avg}=11$  m/s, time history)

연성(coupling)한 정밀 하중해석 결과를 함께 비교하였다. NWP 조건의 경우 GH Bladed, FAST 및 CFD 해석결과가

모두 잘 일치하는 경향을 보이고 있는데, 다만  $M_{yB}$ 의 경우는 블레이드와 타워 사이에 간섭효과가 유발되는 방위각 180도



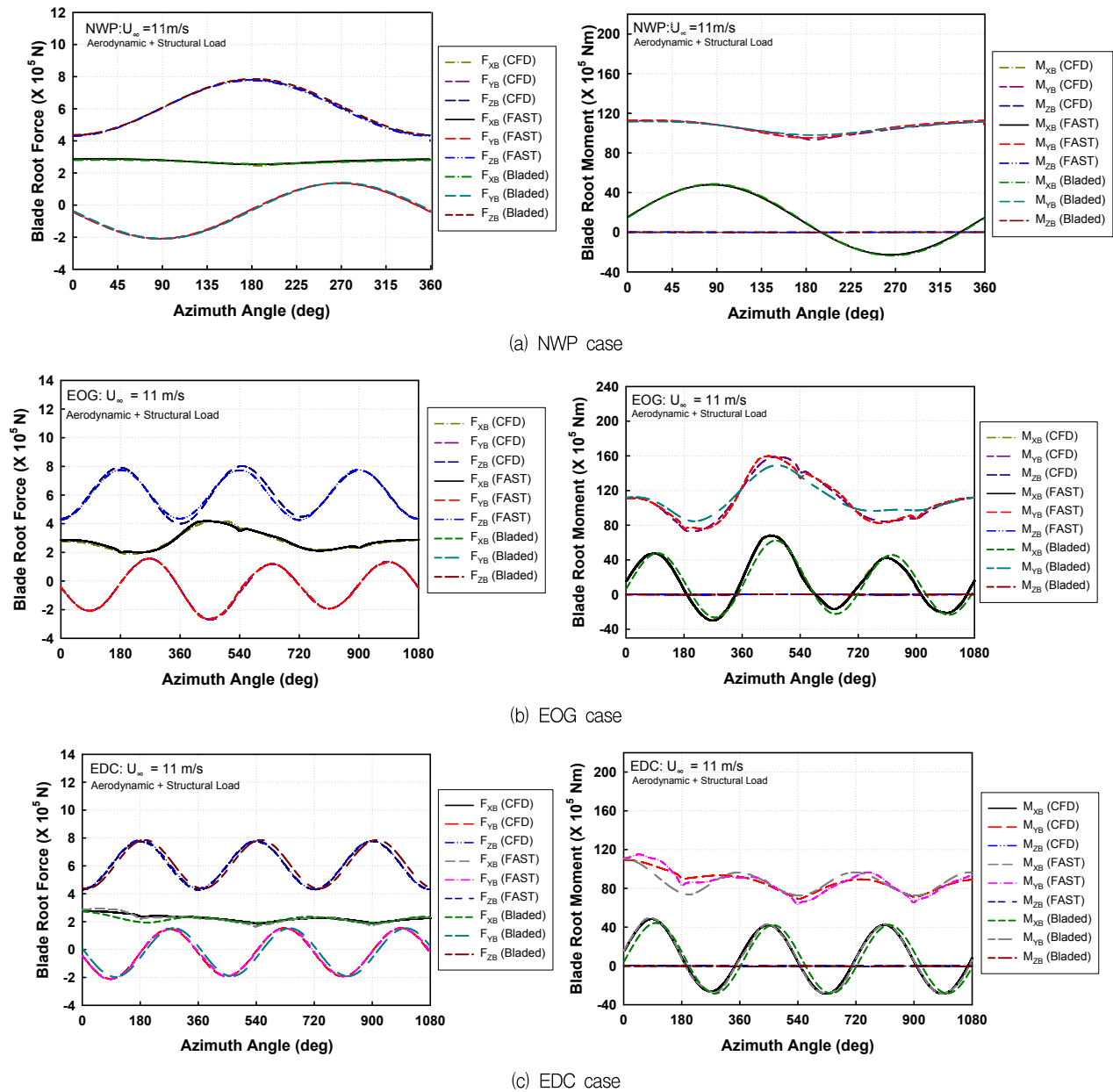


Fig. 7 Comparisons of blade root force and moment between FAST, GH Bladed and CFD for different design wind condition ( $V_{avg}=11$  m/s, azimuth angle history)

부근에서 약간의 차이를 보이고 있다. 이론적으로 해석의 정확도는 CFD 해석기법이 가장 높다고 할 수 있는데 FAST코드 해석 결과는 CFD 해석과 거의 일치하고 있으나 GH Bladed 해석결과는 약간 차이를 보이고 있다. EOG와 EDC 바람조건인 경우에는 돌풍에 기인한 바람 속도 및 방향의 급격한 변화 영향으로 하중해석 결과에 다소 차이를 관찰할 수 있다. 특히 EOG 조건의 경우 CFD 및 FAST 결과는 유사하나 GH Bladed 해석 결과는 최대 블레이드 모멘트가 2,000 kNm 정도 낮게 예측하고 있다. 또한 EDC 바람조건인 경우는 방위각 0도~240도 구간에서 큰 차이를 보인 후 이후에는

유사한 결과를 보이고 있다.

Fig. 8(a)~(d)에서는 계산된 피크하중 차이를 보다 명확하게 검토하기 위해서 최대하중수준을 막대그래프 형태로 나타내었다(단, NTM 조건의 경우는 root mean square (RMS) 값을 함께 비교함). Fig. 8(a)는 NTM 조건에 대한 비교 결과를 보여주고 있다. RMS blade root force의 경우 가장 큰 차이는  $F_{zB}$ 에서 약 8% 정도 발생하였고 FAST 코드가 상대적으로 높은 값을 예측하였다. Blade root moment의 경우는  $M_{xB}$ 는 거의 동일한 수준이나  $M_{yB}$ 의 경우는 GH Bladed 코드가 약 18% 정도 높은 값을 나타내었다. 순간 최

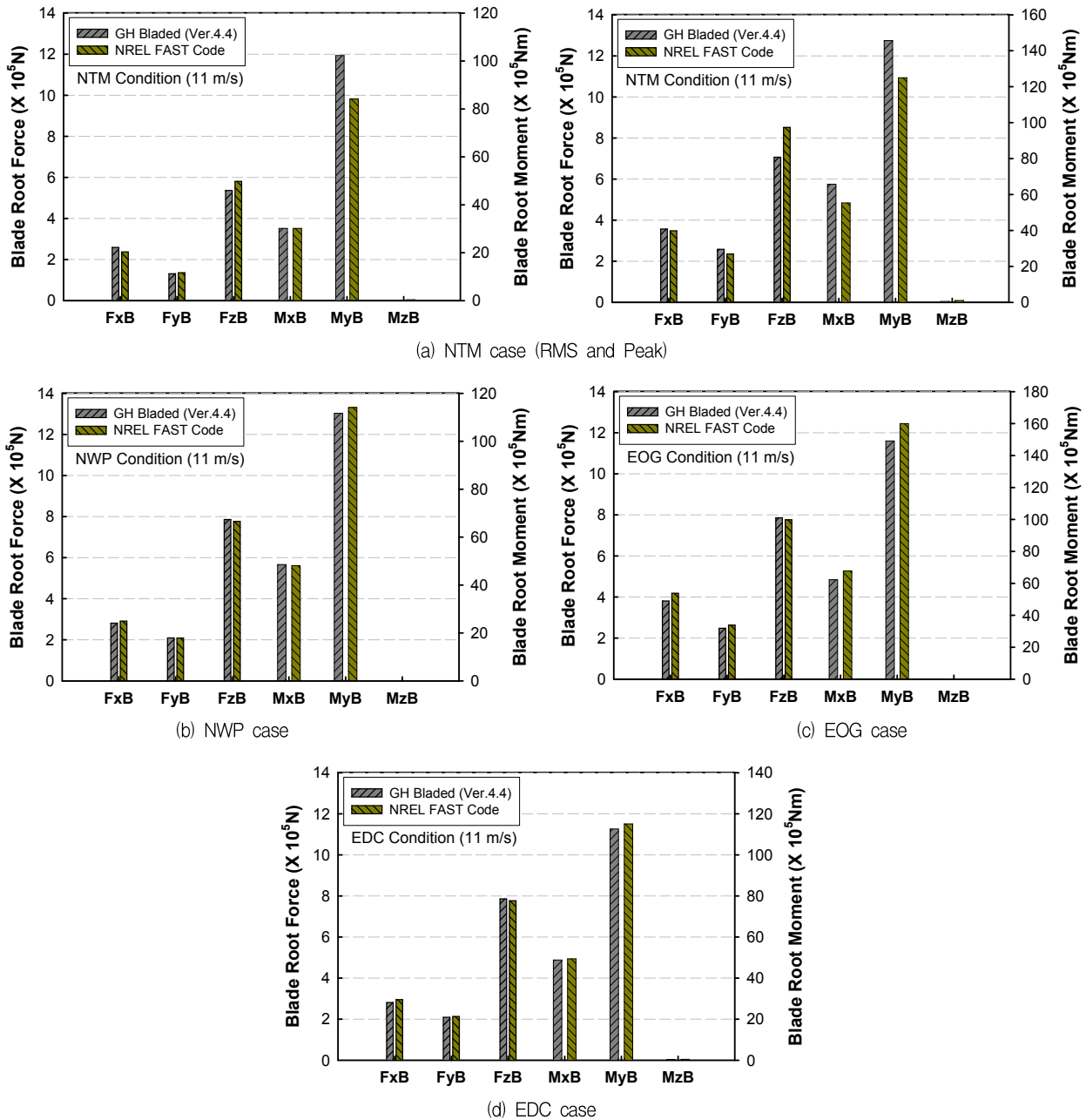


Fig. 8 Comparison of peak blade root force and moment between FAST and GH Bladed ( $V_{avg}=11$  m/s)

대 응답하중의 경우는 FAST 해석결과가 GH Bladed 코드의 경우보다  $F_{zB}$  하중에서 약 17% 높게 예측한 반면  $M_{xB}$ 와  $M_{yB}$ 에 대해서는 GH Bladed 코드가 예측한 결과가 각각 약 15.7%와 14.2% 높은 수준을 나타내었다. Fig. 8(a)에 제시한 10분 평균 하중의 최대 값의 차이는 설계하중 바람조건에 따라 편차를 보이고 있다. 최대 피크하중의 경우에는 바람조건에 따라서 그 차이가 많게는 약 15% 이상 발생될 수 있음을 볼 수 있다. Fig. 8(b)에 제시한 NWP조건인 경우는  $F_{xB}$ 에 대해서 FAST 코드가 3.4% 높게,  $F_{yB}$ 에 대해서는 GH Bladed 코드가 0.2% 높게 예측하였다.  $F_{zB}$ 에 대한 결과는 GH Bladed가 1.2% 높게 하중을 예측하였다.  $M_{yB}$ 에 대해서는 FAST가

GH Bladed 코드 보다 2.1% 높게 하중이 도출되었다. 대체적으로 FAST와 GH Bladed 코드의 결과 값이 잘 일치하는 것을 확인하였다. Fig. 8(c)는 50년 1회 발생빈도 EOG 조건에 대한 최대하중 값을 비교한 결과이다.  $F_{xB}$  최대 값의 경우 GH Bladed가 FAST 코드에 비해 약 10% 낮은 값을,  $F_{yB}$ 의 경우에는 상대적으로 5.7% 낮게 예측하였으나  $F_{zB}$ 의 경우는 오히려 GH Bladed 코드가 1.3% 높은 값을 나타내었다.  $M_{xB}$ 의 경우는 GH Bladed 코드가 8.7% 낮게,  $M_{yB}$ 의 경우는 GH Bladed 코드가 약 6.8% 낮은 값을 예측하였다.  $M_{zB}$ 의 경우는 상대적으로 무시할만한 수준을 보이고 있으나 FAST 코드의 해석 결과가 13.4% 큰 값을 나타내었다. Fig.

8(d)에서는 EDC 조건에 대한 최대하중 값을 비교하였다.  $F_{XB}$ 의 경우 FAST 코드가 약 4.8% 높게 예측하였으며  $F_{YB}$ 의 경우는 1.9% 상향된 값을 예측하였다.  $F_{ZB}$ 의 경우는 GH Bladed 코드가 1.21% 정도 높은 값을 제시하였다.  $M_{XB}$ 의 경우는 GH Bladed 코드가 1.2% 높게 예측하였고,  $M_{YB}$ 의 경우는 FAST 코드가 약 2.1% 증가된 값을 예측하였다.  $M_{ZB}$ 의 경우는 상대적으로 무시할만한 수준을 보이고 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 NREL FAST(Ver.7.02) 코드와 GH Bladed(Ver.4.4) 및 자체 구축한 CFD-Dynamics 연성해석 기법을 적용하여 NREL 5MW 풍력터빈에 대한 설계하중조건 해석을 수행하고 상호 비교연구를 수행하였다. 고려한 주요 설계하중조건은 NTM, NWP, EOG, EDC 조건들이며 각 조건에 대한 블레이드 시간하중응답 및 방위각에 따른 하중 변화 양상을 상세하게 비교하여 제시하고 분석하였다. 결과를 비교해 보면 정성적인 관점에서는 대부분 일치하는 경향을 보였으나, 정량적 관점에서 서로 다른 설계하중조건에 따라 예측된 최대 하중 값이 약 5~18% 정도의 상대적인 편차를 보일 수 있음을 중요하게 파악하였다. 본 연구 결과는 향후 국내에서 개발 가능한 7~10 MW 급 이상의 대형 풍력터빈의 보다 정확한 하중해석 및 경량화 최적설계 과정에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 논문은 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원 (KETEP) (No. 20114010203070) 및 동남지역사업평가원의 광역경제권 선도 산업 육성사업의 일환으로 수행된 연구결과이며 지원에 감사를 표하는 바입니다.

#### References

- (1) Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., and Bossanyi, E., Wind Energy Handbook, Wiley, 2008, ISBN 978-0-471-48997-9.
- (2) Bladed Theory Manual (Ver.4.4), Garrad Hassan & Partners Ltd., 2013.
- (3) Bladed User Manual (Ver.4.4), Garrad Hassan & Partners LTD, 2013.
- (4) Jonkman, J., FAST: An Aeroelastic Computer-Aided Engineering (CAE) Tool for Horizontal-Axis Wind Turbines, National Renewable Energy Laboratory (NREL), USA, <https://nwtc.nrel.gov/FAST>.
- (5) Guideline for the Certification of Wind Turbines, Edition 2010, published by Germanischer Lloyd (GL), Hamburg.
- (6) Jonkman, J., Butterfield, W. M., and Scott, G., "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development," Technical Report NREL/TP-500-38060, February 2009.
- (7) 장종훈, 2010년, 풍력터빈의 기초, 도서출판 GS 인터비전, 신도브레뉴 1301호, pp. 87.
- (8) Lindenburg, C., "Modeling of rotational augmentation based on engineering considerations and measurements", European Wind Energy Conference, London, 22-25 November, 2004.
- (9) Tran, T. and Kim, D. H., "Computational Fluid Dynamic Analysis of a Floating Offshore Wind Turbine Experiencing Platform Pitching Motion," Energies Journal, Vol.7, 2014, pp. 5011~5026.
- (10) 이장호, "비정상 CFD기법을 활용한 5MW 해상풍력터빈 극한 설계하중조건 해석," 공학석사학위논문, 경상대학교, 2014.2.
- (11) 이장호, 김동현, 광영섭, 정우식, 박종길, 김현구, 2013 "국내 태풍환경을 고려한 대형 해상풍력터빈 설계하중해석", 한국풍력에너지학회 추계학술대회. 부산 한화리조트 해운대, 2013.11.25~11.27.