

초기 조건이 부유식 풍력터빈 동역학 해석의 과도응답에 미치는 영향

송진섭* · 임채환* · 문석준* · 남용윤*

*한국기계연구원 기계시스템안전연구본부

Effects of Initial Conditions on Transient Responses in Dynamic Simulation of FOWT

Jin-Seop Song*, Chae-Whan Rim*, Seok-Jun Moon* and Yong-Yun Nam*

*Mechanical Systems Safety Research Division. KIMM, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Floating offshore wind turbine 부유식 해상풍력터빈, Dynamic Simulations 동역학 해석, Transient Responses 과도 응답, Initial Conditions 초기 조건, Design Loads Analysis 설계하중 해석

ABSTRACT: The IEC standard for onshore or offshore wind turbines requires additional dummy simulations (at least 5 s) for the transient responses due to initial conditions. An increase in the dummy time causes a considerable increase in the computational cost considering multiple design spirals with several thousand design load analysis cases. A time of 30 s is typically used in practical simulations for a wind turbine design with a fixed platform. However, 30 s may be insufficient for floating offshore wind turbines (FOWT) because the platforms have lower natural frequencies, and the transient responses will last much longer. In this paper, an initial condition application algorithm is implemented for WindHydro, and the appropriate dummy simulation time is investigated based on a series of dynamic simulations of a FOWT. As a result, it is found that more than 300 s is required for the platform to have stationary motion after the initial transient responses for the FOWT under the conditions considered.

1. 서 론

육상 및 해상 고정식 풍력터빈 설계에 관한 IEC(International electrotechnical commission) 표준에서는 각각의 시간영역 동역학 해석에서 설계하중 산출에 필요한 해석시간에 더하여 초기의 과도응답 특성을 배제하기 위하여 5초 이상의 추가적인 해석을 수행하도록 명시하고 있으며(IEC, 2005; IEC, 2009), 이러한 목적의 추가해석 시간으로서 풍력터빈 설계에서는 30초를 일반적으로 채택하고 있는 것으로 알려져 있다. IEC 표준 등에서 상당수의 설계하중 해석조건이 바람의 주파수 특성을 고려한 600초의 난류에 대해 해석을 수행하는 것을 고려하면 30초의 추가해석시간으로 하여 약 5%의 해석시간 증가를 유발한다고 볼 수 있다.

고정식 풍력터빈의 동역학 해석에서 초기 조건은 로터의 속도와 로터블레이드의 피치각으로 제한되어 있는데 비하여 부유식 풍력터빈은 플랫폼의 운동에 대한 초기 조건이 추가적으로 존재하고 플랫폼의 고유 운동주기도 상당히 길다. 이러한 특성 때문에 부유식 풍력터빈의 동역학 해석에서 초기의 과도응답은

상당한 시간동안 지속될 것임을 예상할 수 있기 때문에 과도응답 특성이 충분히 감소된 해석결과를 얻기 위해서는 그 만큼의 추가적인 계산비용 증가가 불가피하다고 볼 수 있다.

부유식 풍력터빈은 2009년 Hywind 실증 프로젝트를 필두로 구체화되기 시작하여 일본 후쿠시마 해안에 143기로 구성된 1GW 규모의 부유식 풍력발전단지 건설프로젝트가 2012년부터 2020년에 걸쳐서 진행되고 있다. 이러한 세계적 추세에 대응하여 부유식 해상풍력터빈 설계표준의 필요성이 대두되었고 이를 위한 IEC 공식 활동(IEC TC88 WG 3-2)이 활발히 전개되고 있으나, 과도응답특성 배제를 위한 추가해석시간에 대한 구체적인 기준은 아직까지 알려져 있지 않다.

해양파의 스펙트럼 특성에 따라 시간영역 동역학 해석에서 통계학적으로 합리적인 최대 응답을 찾아내기 위해서는 3시간 이상의 해석을 필요로 하는 것으로 알려져 있다. Haid 등은 이러한 단일 해석에 대한 장시간 해석 대신 여러 개의 짧은 해석으로 나누어 계산하더라도 동일한 수준의 극한강도하중 및 피로강도하중을 얻을 수 있음을 해석적 사례연구를 통하여 보인 바 있다(Haid et al., 2013). 이 경우, 여러 대의 컴퓨터를 활용함

Received 29 May 2014, revised 3 July 2014, accepted 19 August 2014
Corresponding author Jin-Seop Song: +82-42-868-744, jssong@kimm.re.kr
© 2014, The Korean Society of Ocean Engineers

으로써 실질적으로 계산결과를 얻는데 걸리는 시간을 줄일 수 있는 이점이 있다. 그러나, 3시간 해석의 경우에는 한 번의 초기 과도 응답 계산만을 수행하면 되는 데 비하여, 여러 개의 해석으로 나눌 경우 그 만큼 여러 번의 추가적인 해석시간이 필요하게 되므로 초기 과도응답시간이 전체 해석 비용 증가에 상당한 영향을 미칠 수 있다.

한국기계연구원에서는 부유식 해상풍력터빈에 대한 동역학 해석을 수행할 수 있는 WindHydro(Rim et al., 2011)를 개발한 바 있으며, 본 연구에서 과도응답 시간 최소화를 고려한 초기조건 부여 알고리즘을 개발하고 이를 WindHydro에 추가하였다.

본 논문에서는 OC3-Hywind 부유식 풍력터빈 모델(Jonkman, 2010)에 대해 WindHydro 및 FAST(Jonkman and Buhl, 2005)를 이용한 동역학 해석을 통하여 초기 과도응답특성에 대한 WindHydro 초기조건 부여 알고리즘의 효과와 초기 조건이 부유식 풍력터빈의 과도응답 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

2. WindHydro 초기조건 부여 알고리즘

WindHydro는 비선형 다물체동역학 해석 알고리즘(Lee et al., 2008)에 기초하기 때문에 모든 초기 조건을 정지 상태로 가정할 수밖에 없다. 따라서 정지 상태가 아닌 초기조건을 부여하는 방안으로서 정지 상태에서부터 짧은 시간동안 선형적으로 증가시키는 알고리즘이 일반적이다. 그러나 예를 들어 변위를 짧은 시간동안에 증가시키게 되면 초기조건에 도달하는 순간 과도한 속도 및 가속도가 불가피하게 부여되기 때문에 초기조건에 의한 과도응답이 상당히 크게 나타날 수밖에 없다.

본 연구에서는 이러한 WindHydro에서의 초기조건에 의한 과도응답 영향을 최소화하기 위하여 Fig. 1에서 보는 바와 같이 원하는 초기조건까지 일정시간동안(Rise time) 선형적으로 증가시킨 후 일정시간동안(Stay time) 강제적으로 일정한 운동 상태를 유지시키는 초기 조건 알고리즘을 WindHydro에 추가하였다.

한편, 풍력터빈 동역학 해석 분야에서 대표적인 상용 프로그램인 GH-Bladed(Bossanyi, 2007)와 NREL(National renewable energy laboratory)에서 개발한 FAST에서는 다물체동역학 해석

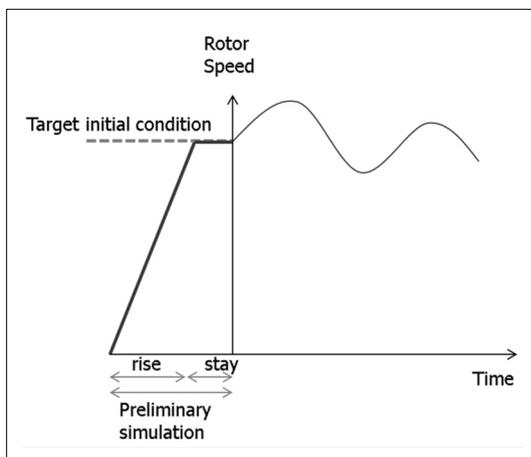


Fig. 1 Initial condition assignment algorithm of WindHydro.

알고리즘이 선형이론에 기반하기 때문에 직접적으로 초기조건을 부여할 수 있고 따라서 별도의 초기조건 부여 알고리즘이 필요하지 않다.

3. 고정식 풍력터빈의 과도응답 특성

부유식 풍력터빈의 과도응답특성을 살펴보기에 앞서 고정식 풍력터빈에서의 과도응답특성을 살펴보기 위하여 NREL 5MW 풍력터빈 모델(Jonkman et al., 2009)에 대하여 동역학 해석을 수행하였다.

로터 회전면에 수직 방향으로 공간적 및 시간적으로 균일한 유동으로 10m/s로 입사하는 바람에 대하여 블레이드 피치는 0도를 유지하고 로터 회전속도의 초기조건은 0 또는 11.5rpm 조건을 부여하였다. 터빈의 정격풍속이 11.4m/s이므로 풍속 10 m/s 조건에서는 블레이드 피치는 0도를 유지하게 되며 로터의 속도는 11.4rpm을 추종하도록 제어가 이루어지게 된다.

GH-Bladed, FAST, 그리고 WindHydro를 각각 적용하여 고정식 풍력터빈에 대한 동역학 해석을 수행하고 그 특성을 비교하였

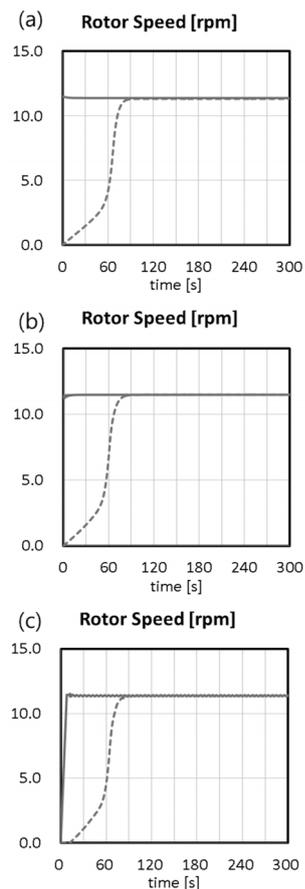


Fig. 2 Initial transient response characteristics for onshore wind turbine analyzed with and without initial condition by (a) GH-Bladed, (b) FAST, (c) WindHydro : dashed line for zero initial condition and solid line for appropriate initial condition

다. WindHydro의 초기조건 부여에서는 증가시간(Rise time)은 8 초, 유지시간(Stay time)은 4초를 적용하였고, GH-Bladed와 FAST를 이용한 해석에서는 사용자 매뉴얼에 따라 초기조건을 부여하였다.

고정식 풍력터빈에 대한 과도응답 특성 해석결과는 Fig. 2에 나타난 바와 같다. GH-Bladed는 정상상태 해석결과가 초기조건에 따라 약간의 차이를 보이며(Explicit solver 특성) Wind Hydro에서는 로터 회전주기특성이 강하게 나타나는 등(날개 구조요소를 직접 모델링하기 때문에 Azimuth angle에 따른 공력변화 발생) 해석 프로그램별로 다소간의 응답특성의 차이를 보이고 있으나 대체로 동등 수준의 과도응답특성이 나타나고 있다. 로터 블레이드의 초기조건을 정지 상태로 가정한 경우(0rpm 조건)에는 정상상태에 도달하기까지 약 90초 정도가 소요 되지만, 정상상태의 회전속도에 근접한 초기조건(11.5rpm)이 주어진 경우에는 30초 이내에 과도응답 특성이 대부분 사라지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 고정식 풍력터빈의 동역학 해석에서도 30초의 추가 해석으로써 초기의 과도응답 특성을 배제한 결과를 얻기 위해서는 적절한 초기 조건의 적용이 전제되어야 함을 알 수 있다.

4. 부유식 풍력터빈의 과도응답 특성

4.1 초기조건의 결정

부유식 풍력터빈의 과도응답 특성을 살펴보기 위한 기준 모델로서 OC3-Hywind 부유식 풍력터빈(Jonkman, 2010)을 FAST와 WindHydro를 이용하여 해석을 수행하였고 WindHydro의 초기조건 부여에서는 증가시간(rise time)은 8초, 유지시간(stay time)은 4초를 적용하였다.

부유식 풍력터빈의 동역학 시뮬레이션을 위한 환경조건은 바람과 파랑을 고려하였으며 그 구체적인 조건은 Table 1에 나타난 바와 같다.

해석 초기조건으로서 고정식 풍력터빈에서는 블레이드 피치와 로터 속도만을 고려하였으나 부유식 풍력터빈에서는 부유체의 운동상태에 관한 초기조건을 추가적으로 고려할 필요가 있다. 플랫폼의 속도와 가속도는 바람 및 파랑의 위상변화에 따라 변동성이 크게 나타나기 때문에 그 위상까지 고려하여 초기조건을 부여하는 것은 난류유동 및 불규칙파의 경우에는 실용적으로 어렵기 때문에 본 연구에서는 플랫폼의 변위만을 초기조건으로 추가하였다.

Table 1 Loading conditions for the dynamic simulations of floating offshore wind turbines.

Item	Conditions	Others
Wind	Wind speed = 10 m/s	uniform
Wave	Wave Height = 6 m Wave Period = 10 s Incident angle = 0 degree	Regular Airy

부유식 풍력터빈 동역학 해석 초기조건으로서의 플랫폼 변위는 과도응답 이후에 나타나는 평균변위를 기준으로 부여하는 것이 타당하다고 볼 수 있다. 파강제력(Wave excitation)의 시간 평균은 0으로 수렴하기 때문에 이러한 평균변위에 기여하는 외력성분은 평균풍속에 의한 로터의 추력이다. 따라서 일정 풍속 조건에서의 동역학 해석을 통하여 플랫폼 변위의 초기조건을 결정하였다.

Table 1의 바람조건에 대하여 WindHydro를 이용하여 NREL 5MW OC3-Hywind 모델의 초기조건 결정을 위한 동역학 해석을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 3에 나타난 바와 같다. 해석결과를 토대로 Table 1과 같은 외력조건에 대한 부유식 풍력터빈 동역학 해석의 초기조건은 Table 2에 나타난 바와 같이 결정하였다. 정격풍속 이하이므로 블레이드 피치는 0으로 일정하며 풍향이 부유식 풍력터빈의 정면이기 때문에 Sway, Roll, 그리고 Yaw는 0으로 결정하였으며 유효자리 3자리를 기준으로 초기값으로 결정하였다. 한편, 동일한 조건(Table 1)에 대해 정상상태 응답이 FAST에서는 WindHydro와 약간의 차이가 나타나기 때문에 FAST의 초기조건은 동일한 과정을 거쳐 계산하였고 Table 2에 함께 나타내었다.

4.2 초기조건과 과도응답

부유식 풍력터빈의 동역학 해석에서 Table 2와 같은 초기조건의 부여가 초기 과도응답 지속시간에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Table 3에서와 같은 일련의 조건들에 대하여 해석을 수행하였다. 바람 및 로터회전속도에 대한 초기조건은 공통적으로 부여된 상태에서, 파랑(6초 주기 및 10m 파고의 규칙파)과 플랫폼의 초기조건의 여부에 따른 해석결과를 비교해 보기 위한 해석조건들의 조합이다.

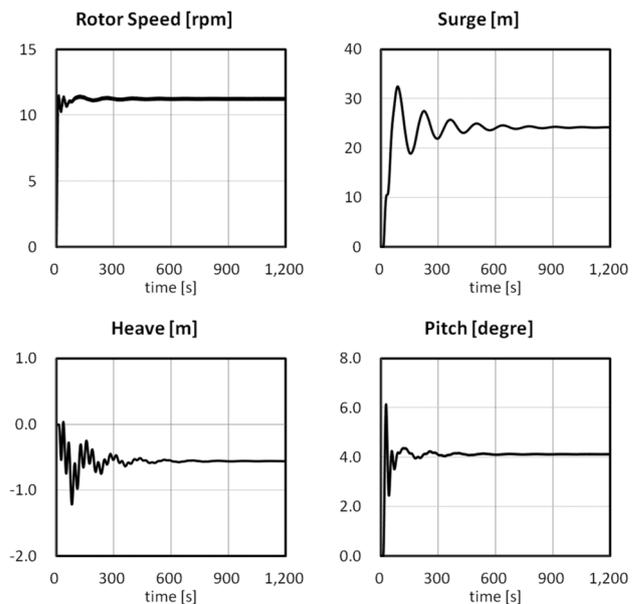


Fig. 3 Dynamic simulation responses of NREL 5 MW OC3-Hywind by WindHydro with zero initial conditions under 10 m/s uniform wind.

Table 2 Selected initial conditions to minimize the initial transient responses in the dynamic simulations of the floating offshore wind turbine.

Variables	Initial conditions for WindHydro	Initial conditions for FAST
Rotor Speed	11.5 rpm	11.5 rpm
Blade pitch	0.0 degree	0.0 degree
Platform surge	24.2 m	20.6 m
Platform sway	0.00 m	0.0 m
Platform heave	-0.557 m	-0.412 m
Platform roll	0.00 degree	0.00 degree
Platform pitch	4.13 degree	4.13 degree
Platform yaw	0.00 degree	0.00 degree

Fig. 4는 파랑이 없는 조건에서 플랫폼에 대한 초기조건은 부여하지 않는 경우와 부여한 경우에 대하여 WindHydro에 의한 해석결과를 비교한 것이다. 이를 보다 정량적으로 비교해 보기

Table 3 Analysis cases to analyze the effect of initial conditions on the initial transient response duration of floating offshore wind turbines.

Analysis case	Wind	Wave	Rotor ICs	Platform ICs
A-1	○	X	○	X
A-2	○	X	○	○
B-1	○	○	○	X
B-2	○	○	○	○

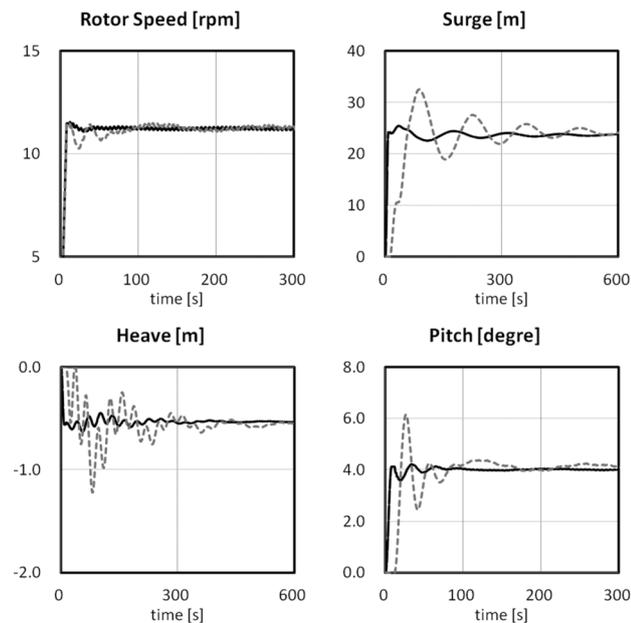


Fig. 4 Dynamic simulation responses of NREL 5 MW OC3-Hywind by WindHydro for A-1 and A-2 of Table 3 : dashed line for A1 and solid line for A2.

Table 4 Comparison of settling time between analysis case .A-1 and A-2 by WindHydro and FAST.

Analysis program	Analysis case	Settling time [s]			
		Rotor speed	surge	heave	pitch
WindHydro	A-1	201.6	583.4	720.0	336.2
	A-2	12.4	256.9	388.1	69.9
FAST	A-1	51.4	546.0	600.5	250.4
	A-2	0.0	0.0	184.4	22.5

위하여 정상상태의 응답크기를 기준으로 응답의 진폭이 2% 이하가 되는 시간을 Table 4에 정리하였다. WindHydro 해석을 기준으로 초기조건을 부여한 경우에서 피치운동의 과도응답시간이 21% 수준으로 감소하였으나 heave의 경우는 54% 수준으로 감소폭이 상대적으로 작다. 한편, FAST의 경우 초기조건 부여를 통하여 Heave의 경우에도 과도응답시간이 31% 수준으로 감소하는 등 초기의 과도응답이 WindHydro에 비하여 빠르게 소멸하는 것을 확인할 수 있다.

한편, 파랑이 있는 조건에서 초기조건이 없는 경우와 있는 경우에 대한 WindHydro 해석결과는 Fig. 5 및 Fig. 6에 나타난 바와 같으며, 초기조건에 의한 과도응답이 사라진 이후에도 파랑에 의한 변위변화가 발생함을 확인할 수 있다. 따라서, 이 경우에는 안정시간(Settling time)의 기준을 정상상태에서의 응답진폭 대비 2% 이하의 오차가 발생하는 시간으로 설정하고 안정시간을 계산하였다.

Table 5에 정리된 바와 같이, 파랑이 있는 경우에는 전반적으로 파랑이 없는 경우에 비하여 초기조건 부여에 의한 과도응답 지속시간 감소 효과가 매우 제한적으로 나타남을 알 수 있

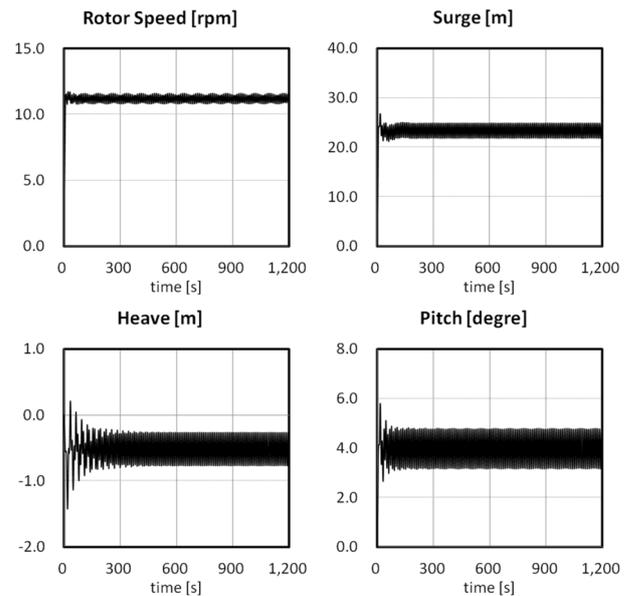


Fig. 5 Dynamic simulation responses of NREL 5 MW OC3-Hywind by WindHydro for B-1 of Table 3.

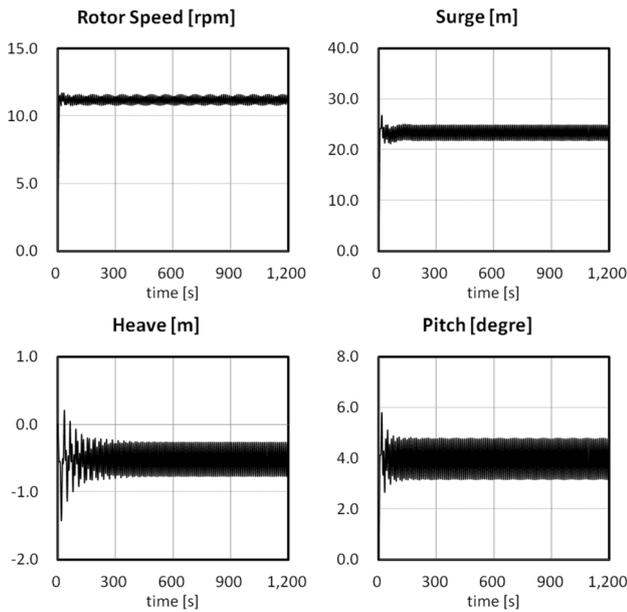


Fig. 6 Dynamic simulation responses of NREL 5 MW OC3-Hywind by WindHydro for B-2 of Table 3.

다. 특히, 플랫폼의 피치운동을 기준으로 살펴보면 WindHydro 해석에서 과도응답 지속시간 감소율이 79%(Table 4)에서 37%(Table 5) 수준으로 현저하게 감소하였으며 FAST의 경우에는 91%에서 38% 수준으로 감소하였다. 이는 파랑이 있는 경우에는 정상상태 응답이 평균변위보다 변동변위에 의해 더 크게 좌우되기 때문이라고 볼 수 있다.

파랑이 없는 경우(Table 4)에서는 FAST에 의한 동역학 해석이 초기조건에 의한 과도응답지속시간 감소율뿐만 아니라 과도응답시간도 절대적으로 작게 나타나지만 파랑이 있는 경우(Table 5)에는 정반대의 현상이 나타남을 관찰할 수 있다. 이는 각 코드의 특성(FAST는 Explicit & linear MBD, WindHydro는 Implicit & nonlinear MBD)과 초기조건 부여 알고리즘 차이에서 기인하는 것으로 추정해 볼 수 있다. WindHydro의 초기조건 부여 알고리즘이 정지상태로부터 초기조건이 달성될 때까지 시스템의 실제 응답을 계산하기 때문에 임의의 상태가 초기조건과 다소 다르더라도 빠르게 적용할 수 있다. 이에 비하여 FAST의 경우는 초기조건 값이 인위적으로 주어지기 때문에 임의의 상태가 주어진 초기조건과 달라지면 실질적인 시스템의 응답을 계산하는 과정이 필요하다고 볼 수 있다. 왜냐하면, 해석기는 선형해석기이지만 부유식 풍력터빈시스템은 계류력 등을 포함하여 비선형성을 모델링에 포함하고 있기 때문이다. 부유식 풍력터빈 설계를 위한 동역학 해석은 대부분 규칙파 또는 불규칙파가 존재하는 조건에서의 해석이라는 점을 고려해 보면 WindHydro의 초기조건 부여 알고리즘이 과도응답특성 측면에서 상당히 효과적이라고 볼 수 있다.

고정식 풍력터빈에서와 달리 부유식 풍력터빈의 동역학 해석에 있어서 초기조건에 의한 과도응답지속시간은 해석프로그램에 따라 상당한 편차를 보이고 있다. 그럼에도 불구하고 부유식 풍력터빈의 동역학 해석에 있어서 초기의 과도응답특성을 배제

Table 5 Comparison of settling time between analysis case B-1 and B-2 by WindHydro and FAST.

Analysis program	Analysis case	Settling time [s]			
		Rotor speed	surge	Platform heave	pitch
WindHydro	B-1	269.2	404.7	532.2	264.9
	B-2	77.5	167.7	404.7	167.6
FAST	B-1	455.6	680.8	597.8	420.6
	B-2	395.4	565.6	447.8	260.8

하기 위해 추가적으로 필요한 시간은 최소한 300초 이상의 추가해석시간이 필요하다는 것을 Fig. 6에서 확인할 수 있다.

5. 결 론

풍력터빈의 설계하중을 산출하는데 있어서도 수천의 조건에 대한 동역학 해석을 필요로 하며 해석결과로부터 정상상태 응답만을 취하는 점을 고려하면 초기조건에 의한 과도응답지속시간은 그만큼의 해석비용 증가를 유발하게 된다. 부유식 풍력터빈은 고정식과 달리 부유체 운동의 장주기 특성 때문에 동역학 해석에 있어서 초기조건에 의한 과도응답지속시간이 필연적으로 길게 나타나게 된다. 따라서 부유식 풍력터빈의 동역학 해석에 있어서 이러한 과도응답 특성을 파악하고 이를 최소화하는 것은 해석비용이라는 실용적 측면에서 중요하다.

본 연구에서는 초기조건에 의한 과도응답 지속시간 경감을 고려하여 초기조건 부여 알고리즘을 설계하고 이를 WindHydro에 구현하였으며 NREL 5MW OC3-Hywind 모델해석에 적용하고 FAST와 비교함으로써 그 유효성을 검증하였고 부유식 풍력터빈 동역학 해석에 있어서 과도응답특성에 대해 고찰하였다.

파랑하중이 존재하는 조건에서 로터 회전속도 및 플랫폼 평균변위를 초기조건으로 부여하는 경우(Table 5)에서 WindHydro를 이용한 해석결과에서 과도응답지속시간이 FAST에 비하여 상대적으로 짧게 나타났지만 그 효과는 고정식에서와 달리 매우 제한적으로 나타났다.

과도응답 지속시간은 안정시간 기준, 바람 및 파랑특성, 풍력터빈사양 그리고 해석프로그램에 따라서 달라질 수 있다. 그러나, Fig. 6을 기준으로 설계하중 계산 시 초기 과도응답에 의한 왜곡을 방지하기 위해서는 최소한 300초 이상의 추가해석시간이 필요하다고 볼 수 있다. 이는 이러한 조건의 부유식 풍력터빈은 고정식에 비해 동역학 해석 시 초기과도응답지속시간으로서 10배 이상의 시간이 필요함을 의미한다. 특히, 해석시간이 비교적 긴 하나의 해석을 여러 개의 10분 단위의 해석으로 분할하는 방법을 적용하는 경우(Haid et al., 2013), 과도응답배제를 위한 추가해석시간이 유효 해석시간의 50% 이상이 될 수도 있음을 의미한다. 따라서 부유식 풍력터빈 설계하중 계산을 위한 동역학 해석의 실질적 해석시간 감소를 위해서는 이와 같은 특성을 감안한 해석시간 분할이 필요하며 적절한 해석초기조건 부여방법에 대한 추가적인 연구도 필요하다.

후 기

본 연구는 2014년도 지식경제부 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(2012T100100730).

References

- Bossanyi, E.A., 2007. GH Bladed Theory Manual. Garrad Hassan and Partners Ltd.
- Haid, L., Martha, D., Stewart, G., Lackner, M., Jonkman, J., Robertson, A., 2013. Simulation Length Requirements in the Loads Analysis of Offshore Floating Wind Turbines. NREL/CP-5000-58513, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- International Electrotechnical Commission (IEC), 2005. Wind Turbines-Part1 : Design Requirements. IEC61400-1 3rd Edition.
- International Electrotechnical Commission (IEC), 2009. Wind Turbines-Part3 : Design Requirements for Offshore Wind Turbines. IEC61400-3 2nd Edition.
- Jonkman, J., 2010. Definition of the Floating System for Phase IV of OC3. NREL/TP-500-47535, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- Jonkman, J., Buhl, M.Jr., 2005. FAST User's Guide. NREL/EL-500-38230, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., Scott, G. 2009. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development. NREL/TP-500-38060, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- Lee, C.H., Bae, D.S., Lee, S.H., 2008. A Parametric Generalized Coordinate Formulation For Multibody System Dynamics. Proceedings of 4th Asian Conference on Multibody Dynamics, 22(2), 145-162.
- Rim, C.W., Song, J.S., Chung, T.Y., Moon, S.J., Go, J.Y., Lee, S.K., Bae, D.S., Bae, D.H., 2011. A Study on a Dynamics Simulation Program Development for Floating Wind Turbines. Journal of Wind Energy, 2(2), 30-37.