

풍력발전타워의 설계/시공 자립화 기술 개발 연구

Development Study on Design and Construction of Wind Turbine Tower



김평화(Pyung-Hwa Kim) 학생회원 | 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 | E-mail: kph2008@naver.com

강성용(Sung-Yong Kang) 학생회원 | 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정 | E-mail: jokeksy@korea.ac.kr

박종섭(Jong-Sup Park) 이사 | 상명대학교 건설시스템공학과 교수, | E-mail: jonpark@smu.ac.kr

강영종(Young-Jong Kang) 부회장 | 고려대학교 건축사회환경공학과 교수 | E-mail: yjkang@korea.ac.kr

1. 서론

기상 변화에 따른 지구 온난화와 자연환경의 오염 및 화석 에너지의 고갈로 대체 에너지에 대한 중요성이 부각되고 있다. 대체 에너지로는 친환경 에너지를 예로 들 수 있으며, 태양열 에너지, 풍력 에너지, 수력 에너지, 지열 에너지 등 종류가 매우 다양하다. 특히 효율적인 측면을 고려할 때, 풍력발전산업에 큰 관심을 보이고 있으며, 시장의 규모가 점점 커지는 경향을 보이고 있다. 풍력 발전은 천연 상태의 바람이 가지는 에너지를 이용하여 전기에너지를 생산함으로써 재사용이 가능하며 무한정 사용할 수 있는 에너지원이다. 풍력발전타워 터빈의 대형화하여 바람이 많은 산간지역에 설치하면 에너지 획득에 소요되는 비용을 줄일 수가 있다. 하지만 터빈의 대용량화에 따른 중량의 증가로 인해 운송이나 경관 등의 문제를 일으키며, 타워의 유지 및 보수에 큰 어려움을 겪고 있다. 반면, 유럽 및 선진국에서는 설계 및 시공 유지관리 측면의 독자적인 기술을 갖고 있으며 국내에서는 그대로 인용하거나 보정을 하여 적

용하는 정도에 그치고 있다. 국내 환경 조건을 고려하지 않고 설계/시공을 하여 안정성과 경제성을 만족하지 못하고 있다. 국내 환경 조건에 적합한 시공 기술 및 지침을 개발해야 할 필요가 있다.

2. 국내 설계/시공 자립화 연구

풍력발전 타워의 증가 및 대형화에 따른 국내 환경조건 반영을 통한 자립화된 국내 설계 기준 및 세계적 수준의 풍력타워 설계 경쟁력을 확보하기 위해 연구를 진행하였다.

2.1 풍력발전 타워의 정적 및 동적 거동 분석

1) 풍력타워 원통형 셸 구조물의 초기변형 효과를 고려한 좌굴 강도

Eurocode에서는 일정한 초기변형의 크기로 좌굴 강

도를 제시하고 있으며, 단면의 초기변형은 좌굴 강도에 민감한 영향을 주기 때문에, 초기변형을 일정하게 고려할 경우 다양한 초기변형을 고려하지 못하여 보수적인 설계를 유발할 수 있다.

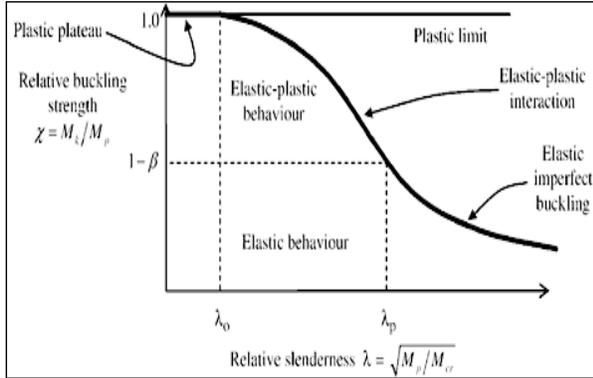


그림 1. 셸 좌굴 강도 곡선(EN 1996-1-6)

좌굴감소 계수와 Eurocode에서 제시하는 Relative slenderness와의 관계를 이용하여 원통형 셸 좌굴강도 곡선을 그림 1과 같이 나타내고 있다. λ(Relative slenderness)는 전단면이 항복하는 M_p (Full plastic moment), 와 M_{cr} (Linear bifurcation analysis)로 구성 되어 있으며 무차원 값인 좌굴감소 계수 χ 는 다음과 같다.

$$\lambda = \sqrt{M_p/M_{cr}} \quad (1)$$

$$\chi = M_k/M_p \quad (2)$$

여기서 M_k 는 실험을 통하여 구하거나 초기결함을 고려한 기하·재료비선형 해석(Geometrically and Materially Nonlinear explicit Imperfection Analysis, GMNIA)을 통하여도 얻을 수 있는 좌굴강도이다.

Eurocode의 좌굴감소 계수 χ 는 단면의 세장비에 따라 다음 식으로 결정된다.

좌굴감소 계수와 세장비의 관계는 α (elastic imperfection reduction factor), β (plastic range factor), λ_0 (squash limit relative slenderness) 그리고 η (interaction exponent)

$$\chi = 1 \quad \lambda \leq \lambda_0 \quad (3a)$$

$$\chi = 1 - \beta \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_p - \lambda_0} \right)^\eta \quad \lambda_0 \leq \lambda \leq \lambda_p \quad (3b)$$

$$\chi = \frac{\alpha}{\lambda^2} \quad \lambda_p \leq \lambda \quad (3c)$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{0.62}{1 + 1.91(\Delta w_k/t)^{1.44}} \quad (5)$$

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} t \quad (6)$$

의 계수로 이루어져 있다. 초기결함을 반영하는 α 값은 연구를 통하여 식 (5)와 같이 제시하였다. 여기서 Δw_k (characteristic imperfection amplitude)는 Q (meridional compression fabrication quality parameter)의 등급에 따라 식 (6)과 같이 결정된다. 본 연구에서는 EN 1993-1-6, ANNEX D에서 제시하는 $Q=16$ (Class C)을 해석에 적용하여 분석하였다. 또한 EN 1993-1-6 ANNEX D에서는 원통형 셸에 대해서 $\lambda_0 = 0.2$, $\beta = 0.6$ 그리고 $\eta = 1.0$ 을 사용하도록 제시하고 있다.

표 1. Fabrication quality parameter(Q)

Fabrication tolerance quality class	Description	Q
Class A	Excellent	40
Class B	High	25
Class C	Normal	16

탄성좌굴강도에 초기결함의 영향을 고려하는 계수인 α 의 관계식($M_{GMNIA} = \alpha M_{LBA}$)을 이용하면 일정 세장비 이후의 탄성좌굴영역에 도달하면 초기결함 크기에 따른 특정 α 값에 의해 좌굴강도가 결정된다. 그림 3의 그래프에서 기울기가 급격히 변화하는 부분의 x축 값을 α 라 산정하였으며, 이에 따라 연구를 수행하였다.

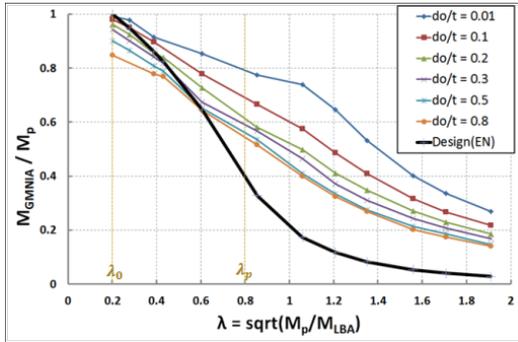


그림 2. GMNIA 결과

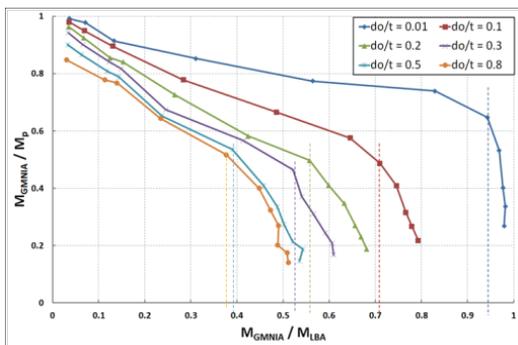


그림 3. GIA 결과

2) 풍력발전 타워 개구부 강도

풍력발전 타워의 개구부에 응력집중이 발생을 하며, 응력집중계수는 1.45로 한다. 보강재를 활용할 경우 개구부 지점에서의 주응력이 13~78% 까지 감소하는 것을 보인다.

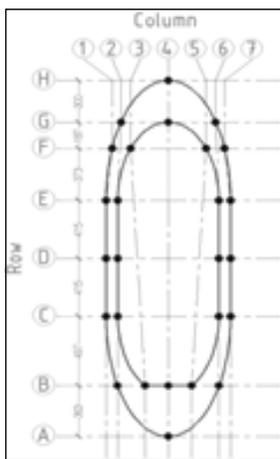


그림 4. 개구부 모델

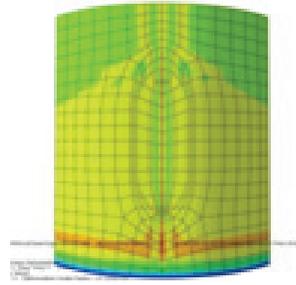


그림 5. 개구부와 보강재가 없는 경우

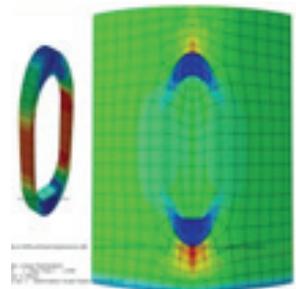


그림 6. 개구부 없이 보강재가 있는 경우

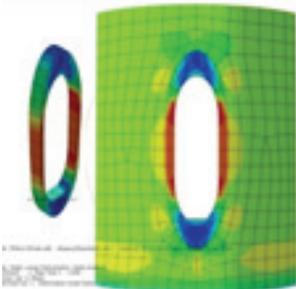


그림 7 개구부와 보강재가 있는 경우

개구부에서의 응력집중을 정량적으로 분석을 하였으며, 평균응력집중 계수는 1.45이다. 개구부와 보강재의 유무에 따른 파괴 거동을 관찰하였으며 국제 표준 설계에 부합하는 해석 기법과 설계 예제를 제공하였다.

3) 풍력타워 연결부 거동 특성

풍력타워 플랜지의 기하학적 형상과 고장력 볼트의 초기인장응력에 따른 연결부 거동 특성에 대한 연구를 수행하였으며, 연결부 볼트 접합에 대한 설계기준 Eurocode(EN1993-1-1), AISC-LRFD 매뉴얼을 따라 설계를 진행하였다.

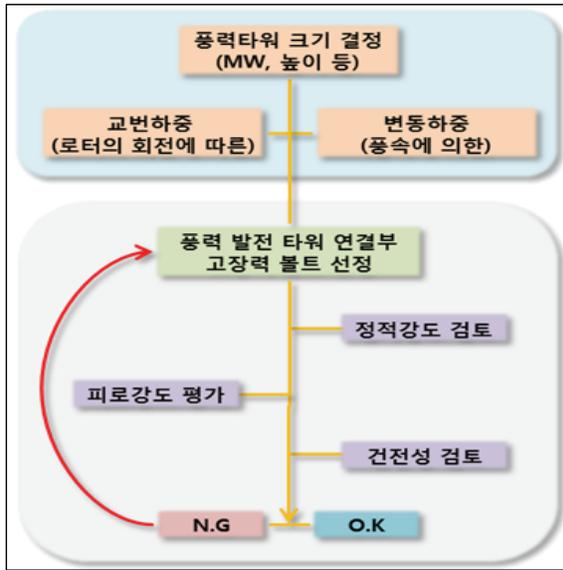


그림 8. 연결부 설계 Flow chart

4) 지반특성을 반영한 동특성 분석

풍력발전타워는 단순한 기둥 구조물과 달리 운용중 주기적인 하중이 발생한다. 풍력터빈의 RPM(Revolution per Minute)을 기준으로 로터가 한 바퀴 회전하는 주파수를 1P, 3개의 블레이드 통과주파수를 3P로 정의한다. 타워의 공진을 회피하기 위해서는 1P와 3P 사이의 공진 회피 주파수를 만족하여야 한다. 타워의 지반조건에 따라 고유 진동수가 달라지며, 일반적으로 Fixed 경계 조건을 활용한 구조해석이 진행되었다. 기초-지반 상호작용을 고려하지 않고 구조해석을 할 경우 지반의 연성을 고려하지 못하여 보수적인 결과를 도출할 수 있어 본 연구에서는 기초-지반과의 상호작용을 고려한 고유 진동수 분석을 진행하였다.

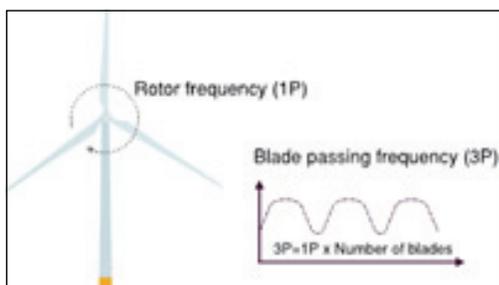
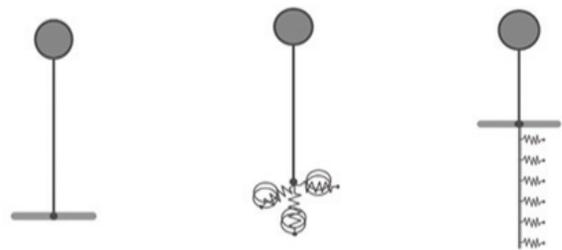


그림 9. 로터의 회전주파수, 블레이드 통과 주파수

지반경계조건 모델로는 3가지며 첫 번째로는 일반적으로 많이 사용되는 Fixed 경계모델이다. Fixed 경계모델의 경우 기초-지반 상호작용을 고려하지 못하지만 비교적 단순하다. 두 번째로 Coupled Spring 모델이 있다. Coupled Spring 모델의 경우 Novak(1974)에 의해 연직, 수평, 회전, 상호간섭 효과를 고려한 관계식을 도출하였으며, 기초-지반 상호작용을 고려하여 비교적 쉬운 방법으로 동적거동을 반영할 수 있다. 세 번째로 Winkler Spring 모델이 있으며, 상부구조와 말뚝체를 모델링하고 말뚝과 지반간 상대변위를 의미하는 p-y곡선으로부터 횡방향 스프링 계수를 산정하여 기초-지반 상호작용을 고려한다. 하지만 비교적 해석진행 과정이 복잡하다. 지반의 특성을 고려하여 점토지반, 모래지반 그리고 모래와 점토가 섞인 혼합지반 층을 대상으로 타워의 고유 진동수를 분석하였다.



(a) Fixed (b) Coupled Spring (c) Winkler Spring
그림 10. 기초모델링 기법

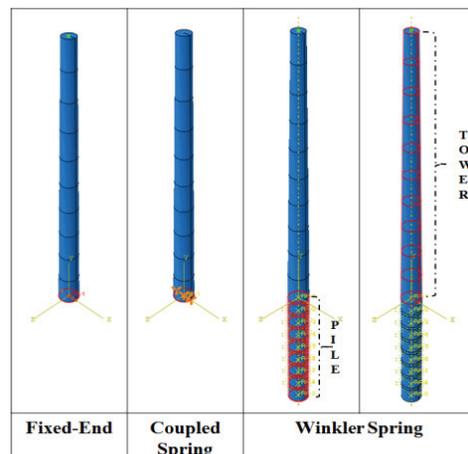


그림 11. 경계조건 별 모델링 형상

표 2. 지반 조건에 따른 1차 모드 비교

	Fixed 경계	Coupled Spring 경계	Winkler Spring 경계
1차 모드 (점토)	0,33589	0,30008	0,25724
1차 모드 (모래)	0,33589	0,31779	0,29674
1차 모드 (Multi)	0,33589	0,29231	0,26471

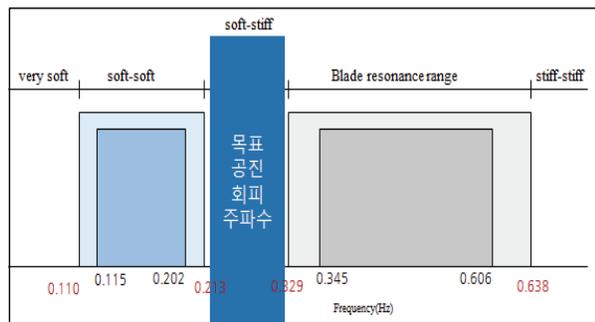


그림 12. 공진 회피 목표 주파수 실 구간

Fixed 경계조건으로 구조 해석 시, 3P 범위에 머물며 공진을 발생시킨다. 하지만, 지반의 강성을 고려한 Coupled Spring 경계와 Winkler Spring 경계로 해석을 진행한 경우 공진 회피 목표 주파수에 들어가는 것을 볼 수 있다. 풍력 발전타워는 공간상의 제약으로 해상에 설치가 많이 되고 있으며, 해상의 경우 연약 점토 지반의 경우가 많으므로, 특히 지방강성을 고려한 경계 조건을 사용해야 한다. 타워 설계 시, 기초 구조물-타워의 상호 영향을 고려하여 설계 할 경우 합리적이고 경제적인 설계를 할 수 있으며 지반과 기초에 대한 영향을 미리 고려 할 필요가 있다.

5) 내진설계 및 지진응답해석

풍력타워에 작용하는 지진하중을 결정하기 위해 50년간 초과발생확률 10%에 상응하는 475년의 재현주기를 가진 지진 가속도를 사용하여 지진응답해석을 수행하였다. 지진응답해석에는 응답스펙트럼해석과 시간이력해석이 사용될 수 있으며, 응답스펙트럼해석에는 충분한 수의 진동모드, 시간이력해석에는 충분한 수의 시물레이션을 요구한다.

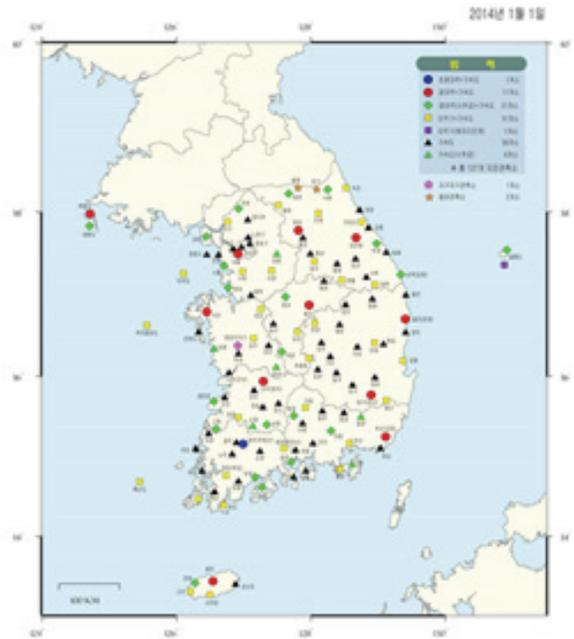


그림 13. 국내 지진 관측소

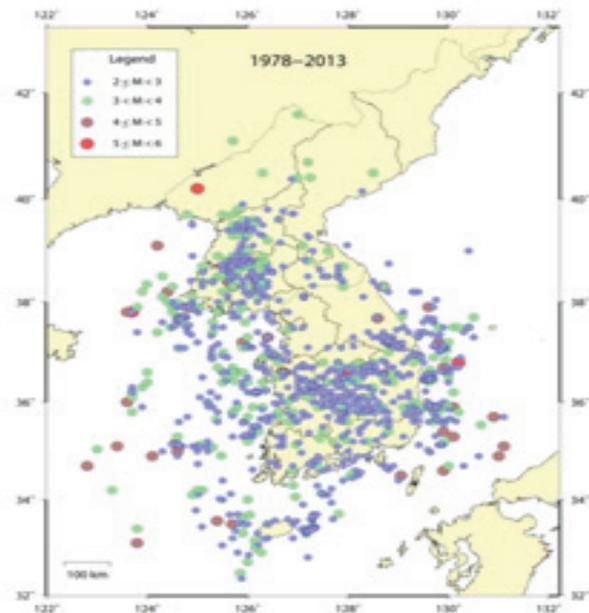


그림 14. 국내 진앙 분포도

응답스펙트럼의 경우 특정 지진에 대해 단자유도 구조물이 갖는 응답은 감쇠비가 일정한 경우 구조물의 고유진동수에 따라 변한다. (1941, M.A. Biot & G.W. Housner) 서로 다른 고유진동수를 갖는 단자유도 구조

물의 최대 응답을 크기로 하고 고유진동주기(또는 고유진동수)를 가로축으로 하여 작성된 그래프를 응답스펙트럼이라 한다. 응답스펙트럼을 이용하여 다자유도 구조물의 각 모드별 최대 응답을 구할 수 있으며, 각 모드별 최대 응답을 적당한 방법에 의해 조합하면 구조물의 최대 거동을 쉽게 예측할 수 있다.

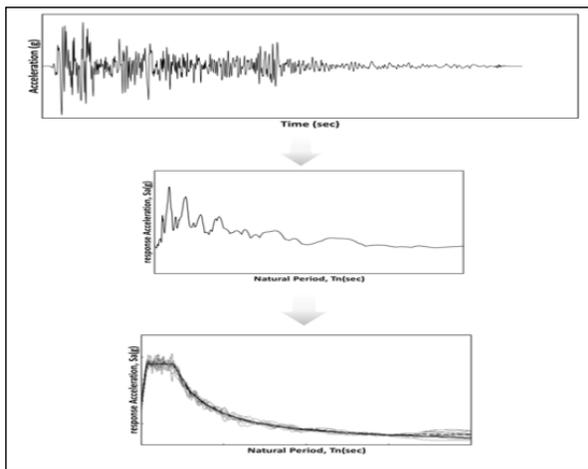


그림 15. 설계응답스펙트럼

특정한 지진데이터에 대한 응답스펙트럼은 구조물의 고유진동수 또는 고유 진동기에 따라 매우 민감하게 변한다. 발생지진의 불확실성을 고려할 경우, 내진설계기준에 규정된 응답스펙트럼이 구조물의 고유진동수의 미소변화에 지나치게 민감하게 변하는 것은 합리적이지 못하다. 대상 지역에서 발생 가능하다고 판단되는 다양한 강진기록에 대한 응답스펙트럼을 통계적인 방법으로 처리하여 구조물의 고유진동수에 따라 민감하게 변하지 않는 설계응답스펙트럼을 이용하여 내진설계기준에 반영한다.

시간이력해석의 경우 구조물의 비선형 동적 거동에 대한 가장 정확한 해석방법으로 지진데이터를 구조물에 직접 적용시켜 시간에 따른 거동을 분석한다. 특정한 지진데이터의 특성이 반영되므로 다양한 시뮬레이션의 수행이 요구되며 해석시간의 소요가 크다. 인공지진 생성 프로그램인 SIMQKE를 통해 생성된 설계응답

스펙트럼에 준하는 인공지진과 데이터(0.01초 간격, 20초간)를 이용한다.

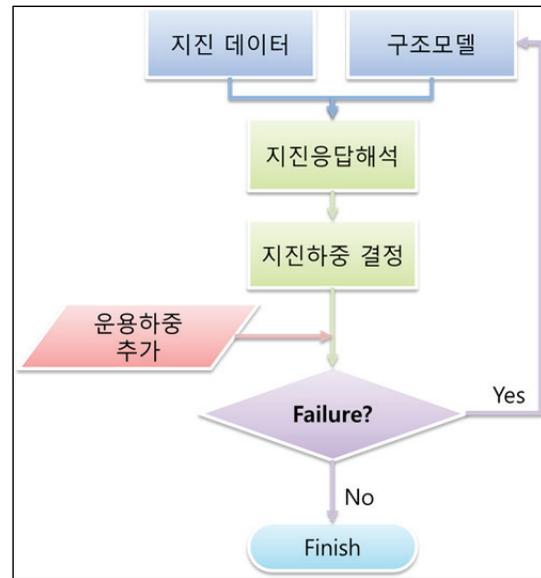


그림 16. 내진설계 Flow chart

6) 풍하중 영향 분석

풍속은 시간에 따라 변화하는 임의의 함수이며, 이러한 풍속은 불규칙 변수(Random Variable)의 특징을 나타내게 된다. 이러한 풍속을 무한한 기간 동안 연속적으로 취득하여 도수분포표를 그리게 되면 연속데이터에

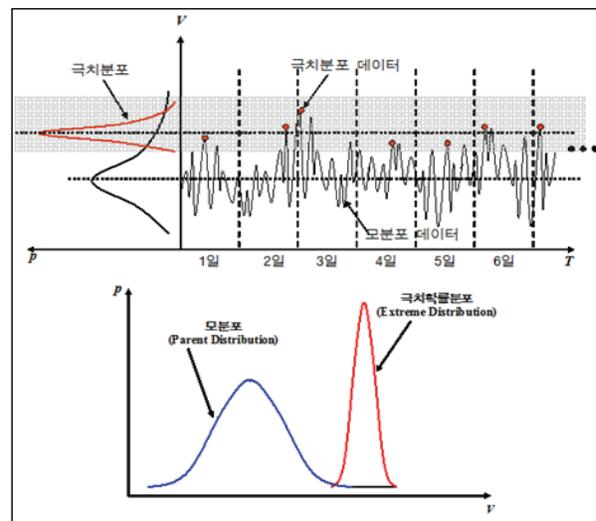


그림 17. 풍속의 확률밀도함수

의한 도수 분포를 얻을 수 있다. 이러한 도수분포를 확률로 변환하여 나타내면 그림 14와 같이 임의의 지역에서 발생하는 풍속의 확률밀도함수(Probability Density Function)를 얻을 수 있다.

연속적으로 취득한 풍속데이터 확률밀도함수로 나타내게 되면 임의의 지역에서 발생한 전체 풍속에 대한 확률분포를 얻게 되므로 이를 모분포(Parent Distribution)이라 한다. 1일 동안 발생한 최대풍속을 무한히 취득하여 도수 분포를 그려보면 모분포와 유사하게 임의의 확률분포로 나타내게 되는데 이를 극치분포(Extreme Distribution)이라 한다. 내풍 설계에서 하중산정의 기본이 되는 설계풍속은 아래와 같은 이유로 극치분포를 이용하여 산정된다. 따라서 일정한 시간간격, 즉 1일 또는 1년 기간에 대한 최댓값을 기록하여 이를 바탕으로 확률적인 분석을 실시하고 재현주기별 최대 풍속을 예측하게 된다. 주로 하중평가에 사용되는 설계풍속의 산정 시 사용되는 극치분포모델은 Type 1(또는 Gumbel 분포)이며, 이를 이용하여 재현기간 별 설계 풍속이 추정된다.

타워 단일 모형일 경우 외부 유입풍속에 대한 타워부분 풍하중이 우세하였으며, 타워 너셀 분리모형의 경우 외부 유입풍속과 로터회전 시 후류에 의한 타워부분 풍하중(후류 영향 미미)이 우세하였고, 타워 너셀 결합모형의 경우 외부 유입풍속과 로터회전 시 후류에 의한 타워부분 풍하중과 추력이 우세하였다. 풍동실험을 통해 로터를 적용한 풍력 타워의 각형 별 풍력 및 추력 계수를 산정하였다.



그림 18. 타워 단일모형(12각형)



그림 19. 타워 너셀 분리모형



그림 20. 타워 너셀 결합모형

표 3. 풍동실험 결과

	원형		12각형		8각형	
	타워 풍하중	타워 풍하중 +추력	타워 풍하중	타워 풍하중 +추력	타워 풍하중	타워 풍하중 +추력
모형 하중	0.27N	1.48N	0.31N	1.50N	0.37N	선단 속도비 2.23 측정 불가
타워풍력계수 (타워단일모형)	0.74		0.85		1.01	
추력 계수 (선단 속도비 =2.23)	0.110 (타워 너셀 결합모형-타워 단일모형)		0.108 (타워 너셀 결합모형-타워 단일모형)		0.100 (선단속도비 1.75)	

2.2 시공 기술 기반 구축

국내 법규를 반영한 모듈러 풍력타워 세그먼트 최대 허용 운반규격을 제시하였다(도로법상 허가 가능 운행제한 차량규격 조사 및 분석).

현용되는 도로법을 준수하기 위해서는 운반 차량의 모든 제원이 중량 및 제원허가의 최대치를 만족해야 하며, 즉 모듈러 타워를 운반하는 차량은 모듈러 타워를 상차한 상태에서 최대로 허가 가능한 운행제한 차량 규격을 초과해서는 안된다. 중량허가 기준인 총 하중 48톤은 도로 노선에 따라 크게 차이를 보이지 않고, 총 하중 운행제한 차량 규격은 허가 기준인 48톤으로 설정하였다. 규격에는 최대 길이 운반규격, 최대 높이 운반규격, 최대 폭 운반규격, 최대 총 중량 운반규격이 있으며, 이에 따른 법규와 규격을 조사하였다.



그림 21. 운행제한 단속기준(서울시)

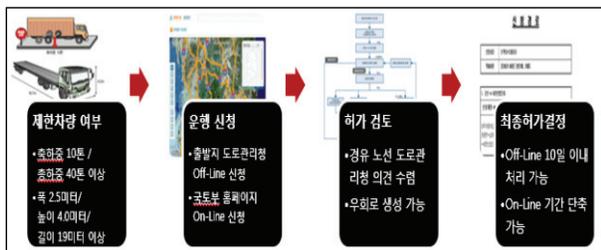


그림 22. 국내 운송조건을 고려한 운송단계

2.3 설계용 풍속 및 풍하중 산정방안 정립 (환경 대응 방안 제시)

극한 풍속을 추정하기 위한 기상자료로서 대상지역에서 가장 가까운 서귀포 기상관측소(189)의 1971년~2013년에 관측된 연 최고최대풍속 시계열을 이용하였다. 이때 풍속은 10분 평균 풍속을 의미하며, 서귀포에서 관측된 연 최고최대풍속 시계열의 최댓값은 1987년 8월 31일에 측정된 26.2m/s이며, 표 4의 ‘조도구분’ 열은 도로교설계기준에서 정의하고 있는 지표조도구분에 따른 구분이며, 1975년부터 2000년 까지 5년 단위로 제작된 대분류토지피복지도를 이용하여 지표조도구분을 실시하였으며, 2000년 이후의 지표조도구분은 최근 위성사진을 바탕으로 반경 1km 이내의 지역을 목안으로 판별하여 지표조도구분을 실시하였다.

표 4. 재현기간 50년 및 1년, 10분, 3초 평균풍속 (지상 10m)

지점	비고	관측풍속 극치분석		태풍 MCS	
		10분평균 풍속(m/s)	3초평균 풍속(m/s)	10분평균 풍속(m/s)	3초평균 풍속(m/s)
제주	내륙/해안	33.9/40.8	47.7/57.5	30.9/37.1	43.5/52.4
서귀포	내륙/해안	29.8/35.9	41.7/50.3	20.7/37.0	43.3/52.2
대관령	내륙	33.9	47.8	23.6	33.3
평창	내륙	33.9	47.8	23.6	33.3
영덕	내륙	20.0	28.2	25.1	35.4
태백	내륙	16.2	22.9	24.1	34.0
영광	해안	34.9	49.3	35.8	50.5
신안	해안	34.9	49.3	35.8	50.5
군산	해안	33.9	47.8	34.5	48.6
울진	해안	32.0	45.1	29.5	41.6
울산	해안	27.1	38.2	33.1	46.7
영암	내륙	22.3	31.5	29.0	40.8

재현주기에 따른 풍하중을 산정하기 위한 풍속 프로파일의 국내-외 기준 분석을 수행하였고, 극치 분포 및 태풍 시뮬레이션을 통한 설계 기본 풍속을 산정하였다.



그림 23. 풍력타워 설계기본풍속 대상 지점

2.4 재해 및 재난에 대한 위험도 기법 개발

2.4.1 태풍-선박 충돌 시뮬레이션을 통한 확률적 위험도 기법 개발

타워의 탄성과 소성을 고려한 해석을 수행하여 위험도를 분석하였다. 위험도 평가는 RSM을 기초로, 허용응력상태에 대한 FORM 신뢰성 해석방법을 이용하였고, 신뢰성 해석은 Nessus 프로그램을 활용하였다. 일반적으로 구조물의 목표 신뢰성 지수는 3이상이며, 풍력타워 신뢰성 지수는 11이상 (파괴확률은 0으로 수렴)으로 도출한다. 따라서, 풍력타워는 구조적으로 문제가 없다는 안정성을 확보하였다. 태풍 및 선박 충돌 시뮬레이션의 해석 기법 및 방법론을 정립하였다.

2.4.2 지진-쓰나미 시뮬레이션을 통한 취약도 함수 개발

국내 환경에 맞는 지반운동 에너지 감쇠특성은 지역마다 지진과 지반의 특성에 따라 상이하기 때문에 각

지역에 적합한 방정식을 만들어 적용하는 것이 이상적이다. 방법론 분석결과 최우도 추정법이 유연한 해석적 접근이 가능하므로, 향후 최우도 추정법을 사용하여 지진 시뮬레이션을 수행하였다. RSM 모델로 쓰나미 위험도 평가 기법을 정립하였으며, 국내 환경조건에서 쓰나미 발생 사례가 없으므로, 태풍/해일 시의 데이터베이스를 통한 파랑 및 파고의 하중 모델을 산정하고자 하였다.

3. 결론

본 연구는 풍력발전타워 국내 설계/시공 자립기반 구축을 목표로 풍력 발전 타워의 정적 및 동적 거동 분석, 시공 기술 기반 구축, 풍환경에 따른 대응 방안에 대하여 연구를 수행 하였으며, 해당 연구 수행을 통하여 다음과 같이 자립화된 설계 기술을 구축하고자 한다.

- 1) 자립화된 기술을 확보하고, 기존의 선진국 설계를 보완 및 추가하여, 세계적 수준의 설계기술 확보.
- 2) 풍력 및 토목 엔지니어들의 설계 기술에 대한 이해도를 높이고자, 다양한 설계 가이드 제공(설계 플로우 및 방법, 상세)
- 3) 국내의 환경조건을 반영한 설계/시공 기준에 대한 가이드라인 및 설계기준 제시.
- 4) 개발된 설계 기술에 대한 지속적인 연구 수행을 통하여, 국가적 차원에서 풍력 타워 설계에 대한 경쟁력 및 기술력 확보.

감사의 글

본 연구는 국토교통부의 국토교통과학기술진흥원이 지원하는 국토교통기술촉진연구사업(12기술혁신E09)으로 수행된 것으로 연구 지원에 깊은 감사를 드립니다. 또한 우수한 연구가 진행될 수 있도록 적극적인 지

원을 아끼지 않고 있는 (주)포스코, 고려대학교, 상명대학교, 인하대학교, (주)대우건설에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. BSI (British Standards Institution) (2004). BS EN 1991-1-4:2004: Eurocode 1: Actions on Structures — General Actions — Part 1-4: Wind Actions. BSI, London, UK.
2. DNV (Det Norske Veritas) (2010). DNV-OS-J101: Design of Offshore Wind Turbine Structures. DNV, Oslo, Norway.
3. GL Renewables (2012). “Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines”. GL Renewables Certification, Hamburg, Germany.
4. Jørgensen, E. (1990). “Notat om undersøgelse af spændingsforhold ved luge på rørtårn”. Denmark.
5. J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott (2009). (2010). Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, Technical Report NREL/TP-500-38060.
6. Nicholas Stromblad (2014). Modeling of Soil and Structure Interaction Subsea. Master’s Thesis in Applied Mechanics.
7. Brian Petersen, Marty Pollack, Benjamin Connell, David Greeley, Dwight Davis, Charles Slavik, Benjamin Goldman (2010). Evaluate the Effect of Turbine Period of Vibration Requirements on Structural Design Parameters: Technical Report of Findings. Report No. M10PC00066-8.
8. 원종범, 김만응, 음학진, 2007, 풍력발전기의 지진에 따른 진동특성 연구, ANSYS User conference.
9. Hirai, S., Honda, A., Karikomi, K., Hayashi, Y., 2010, Fluctuating wind load analysis of wind turbine tower, Renewable Energy 2010.
10. Ishihara, T., Phuc, P.V., Fujino, Y., Takahara, K., Mearu, T., 2005, A field test and full dynamic simulation on a stall regulated wind turbine, APCWE-VI, pp. 599-612.
11. Arsenaault, T.J., Achuthan, A., Marzocca, P., Grappasonni, C., and Coppotelli, G. (2013) Development of a FBG based distributed strain sensor system for wind turbine structural health monitoring, Smart Materials and Structures, Vol. 22 No. 7, Article ID075027.
12. Bang, H.J., Kim, H.I., and Lee, K.S. (2012) Measurement of strain and bending deflection of a wind turbine tower using arrayed FBG sensors, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 13 No. 12, pp. 2121-2126.
13. Burgmeier, J., Schippers, W., Emde, N., Funken, P. and Schade, W., (2011) Femtosecond laser-inscribed fiber Bragg gratings for strain monitoring in power cables of offshore wind turbines, Applied Optics, Vol. 50 No. 13, pp. 1868-1872.