



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

陸上 風力基礎 缺陷原因 및 共振分析

濟州大學校 産業大學院

風力工學科

李 忠 祺

2015 年 8月

陸上 風力基礎 缺陷原因 및 共振分析

指導教授 高 炅 男

李 忠 祺

이 論文을 風力工學科 碩士學位 論文으로 提出함

2015 年 8月

李忠祺의 風力工學科 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 ----- (인)

委 員 ----- (인)

委 員 ----- (인)

濟州大學校 産業大學院

2015 年 8月

The cause of damage to onshore wind turbine foundation and the resonance analysis

Choong-Kee Lee
(Supervised by professor Kyung-Nam Ko)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the
degree of Master of Engineering

2015. 8.

This thesis has been examined and approved.

.....
Thesis director, Sang-Yeol Park, Prof. of Civil Engineering

.....
Thesis director, Kyung-Nam Ko, Prof. of Faculty of Wind Energy Engineering

.....
Thesis director, Dong-Woo Ko, Prof. of Architectural Engineering

.....
Date

Department of Wind Energy Engineering

Graduate School of Industry

Jeju National University

목 차

LIST OF FIGURES	i
LIST OF TABLES	iii
SUMMARY	iv
I. 서 론	1
1. 연구 배경	2
2. 연구 목적	2
3. 논문의 구성	3
II. 육상풍력발전기 기초	4
1. 육상풍력발전기 기초	4
2. 육상풍력발전기 타워	5
1) Soft 및 Stiff 타워구조	5
2) 타워설계의 동역학적인 개념	6
3. 기초와 타워 접합부	7
1) 접합부 형식 분류	7
2) 앵커링 형식 접합부	9
3) 앵커볼트 형식 접합부	11
III. 육상 풍력기초 결함사례 및 원인분석	12
1. 유럽 육상풍력 기초 결함	12
1) 개 요	12
2) 앵커볼트 형식	12
3) 단일플랜지 앵커링 형식	13
4) 이중플랜지 앵커링 형식	15
2. 일본 육상 풍력기초 결함	18
1) 개 요	18

2) 단일플랜지 앵커링 형식	18
3. 국내 육상 풍력기초 결합	21
1) 단일플랜지 앵커링 형식	21
2) 설계적인 문제 원인분석	22
3) 시공적인 문제 원인분석	25
IV. 육상 풍력기초 결합 및 보강에 따른 공진분석	26
1. 기초 결합에 따른 공진분석	26
1) 초기결합 모델에 따른 타워주파수 해석	26
(1) 개 요	26
(2) 풍력발전기 제원	26
(3) 초기결합 모델링	28
(4) 초기결합 모델 해석결과	30
(5) 초기결합 모델에 따른 공진분석	32
2) 결합진행 모델에 따른 공진분석	34
(1) 결합진행 모델링	34
(2) 결합진행 모델 해석결과	35
(3) 결합진행 모델에 따른 공진분석	36
2. 기초 보수보강 방법 및 보강에 따른 공진분석	37
1) 현 기초 보수보강 방법	37
(1) 그라우트 주입 보수법	38
(2) 상부플랜지 보강법	38
2) 앵커볼트 접합부형식 변경 보강방법	39
3) 앵커볼트 접합부형식 변경 보강방법에 따른 공진분석	42
3. 기초 결합 및 보강에 따른 공진분석 결과	43
1) 개 요	43
2) 각 Case 별 주파수 변화에 따른 공진분석	44
V. 결 론	46

참고문헌 47

LIST OF FIGURES

- Fig. 1 풍력터빈 고장과 운전정지 시간
- Fig. 2 기초 결함으로 인한 풍력터빈 전도
- Fig. 3 확대 기초
- Fig. 4 파일기초 및 앵커기초
- Fig. 5 풍력터빈 타워의 구조모델
- Fig. 6 가변속도 터빈시스템의 진동수 구간 정의
- Fig. 7 120m, 100m 및 80m로 회전하는 로터 및 블레이드 1P, 3P 진동수
- Fig. 8 접합부 형식
- Fig. 9 단일플랜지 앵커링형식 기초 철근배근 상세
- Fig. 10 앵커링 형식 상부철근 조립과정
- Fig. 11 철근콘크리트 기초 3차원 유한요소 해석으로 철근응력 분석
- Fig. 12 기초 콘크리트 타설 전 앵커볼트
- Fig. 13 풍력타워와 콘크리트기초 사이의 접합부
- Fig. 14 측면 გადა 그라우트 모르타르
- Fig. 15 플랜지 하부 그라우트 모르타르 결함
- Fig. 16 앵커링 형식 접합부 결함 진행과정
- Fig. 17 이중플랜지 앵커링 형식 압축력과 인장력 발생 시 모델
- Fig. 18 이중플랜지 앵커링 형식 실제거동에 의한 균열발생
- Fig. 19 타워로부터 350mm 거리에서의 균열
- Fig. 20 균열 및 팽팽작용에 의한 하부콘크리트 분출
- Fig. 21 이중 플랜지 앵커링 형식 기초하부 전단균열
- Fig. 22 이중 플랜지 앵커링 형식 기초하부 전단균열 콘크리트 시편
- Fig. 23 기초와 타워 간 수직·수평 변위량 측정
- Fig. 24 풍력터빈 타워 시멘트분말 발생 사진
- Fig. 25 보수 전 후 수평변위 및 현재 수평변위
- Fig. 26 설계 시 가정한 힘의 경로
- Fig. 27 앵커링과 콘크리트 기초사이 이격 발생
- Fig. 28 이격 발생으로 인한 실제 힘의 경로
- Fig. 29 플랜지하부 기초콘크리트 유한요소 해석
- Fig. 30 Tower 모델링
- Fig. 31 타워상부 Mass 하중 및 지반과 기초와의 경계조건
- Fig. 32 초기결함 모델

- Fig. 33 초기결합 모델 Modal 해석 Mode Shape
- Fig. 34 초기결합 모델 Campbell Diagram
- Fig. 35 결합진행 모델
- Fig. 36 결합진행 모델 별 Campbell Diagram
- Fig. 37 그라우트 주입 보수법
- Fig. 38 타워고정 및 그라우트 주입
- Fig. 39 높은 인장력이 필요할 때 사용하는 앵커볼트
- Fig. 40 앵커볼트 접합부형식 보강개념 및 보강형식
- Fig. 41 타워보강 전후 Campbell Diagram
- Fig. 42 결합모델 별 및 보강모델 Campbell Diagram

LIST OF TABLES

Table 1 단일플랜지 앵커링 형식 플랜지하부 콘크리트 두께

Table 2 Vestas V90-3.0MW 발전기 제원

Table 3 초기결함 모델 해석결과 1차 모드 주파수 비교

Table 4 초기결함 모델에 의한 IEC 기준 공진검토

Table 5 결함모델 별 고유주파수 비교

Table 6 결함진행 모델에 의한 IEC 기준 공진검토

Table 7 기초보강에 의한 IEC 기준 공진검토

Table 8 결함모델 및 보강모델 고유주파수 비교

SUMMARY

The causes of damage to the connection of the tower and the foundation of a wind turbine were investigated through literature search. In addition, two types of damaged foundation and one type of repaired foundation models were analyzed to provide a good solution to the damage in this thesis.

There are two connection types to link the wind turbine tower to the foundation: a anchored type and anchor bolt type. Based on literature search, anchored type may lead to formation with voids between concrete and anchoring flange due to continuous wind turbine vibrations. As for the anchor bolt type, turbine dynamic loads may cause the cracking of mortar grout between the tower bottom flange and concrete foundation. However, damages of anchor bolt type connection occurred less than those of anchored type. Even if the damages occur, those could be repaired easily by means of replacing damaged grout. It is recommended that the anchor bolt type should be applied for linking tower and foundation of a wind turbine.

Using Abaqus software application, initial damage model, developed damage model and repaired model for the foundation and the tower of Vestas V90-3MW were analyzed for checking resonance. Eigenvalue analysis was performed, and the results showed that initial damage model and developed damage model approached to rotor resonance frequency bandwidth, lowering tower frequency up to 9.55%. On the other hand, repaired model approached to higher frequency up to 11.23% to avoid rotor resonance bandwidth compared with the developed damage model, recovering the damaged lowered frequency. Therefore, repaired model proposed in this thesis may be a good solution to the damage of foundation connection of a wind turbine.

I. 서론

1. 연구 배경

최근에 국내 및 국외에서 결함으로 인해 사용기간에 대한 요구조건과 구조안전성에 대한 요구조건을 만족시키지 못하는 경우도 많이 보고되고 있다[1].

Fig. 1은 풍력운영 및 유지보수 중 기계, 전기부품 고장과 운영정지 시간을 13년간 분석한 데이터로서 고장의 발생빈도와 운전정지 시간이 일치하지 않음을 알 수 있다. 특히, 풍력터빈 기초결함의 경우 고장의 빈도가 상대적으로 낮다.

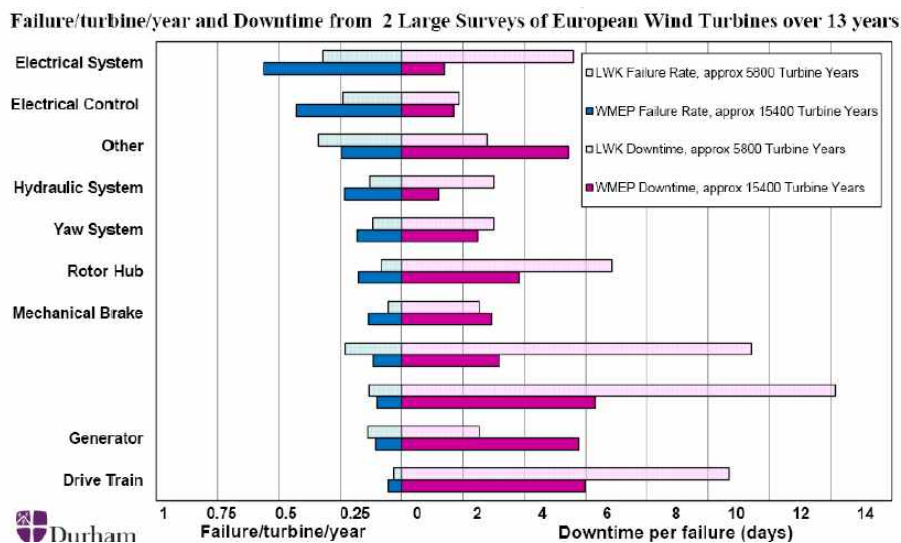


Fig. 1 풍력터빈 고장과 운전정지 시간[2]

그러나, 풍력기초의 경우는 비록 결함비율은 낮지만 만약 문제가 발생된다면 아래 Fig. 2 같이 풍력터빈을 다시 사용할 수 없을 정도로 운전정지 시간이 클 수도 있다. 실제로 국내 한 풍력단지에서는 기초문제로 인해 전력생산이 중단된 사례가 발생하기도 하였다.[3]

이와 같이 풍력기초는 결함 발생 시 발전운영 정지에 미치는 그 영향이 매우 크다. 따라서 기초결함을 연구하는 것은 풍력터빈의 안정적인 전력공급을 위해서 매

우 중요한 문제로 특히, 기초의 결함원인 및 공진을 분석 할 필요가 있다.

해상 풍력기초는 전체 프로젝트에 차지하는 공사비 비중이 매우 높고 풍력기초 문제 발생 시 발전단지에 미치는 영향이 매우 크므로 풍력발전 단지 내 해상특성을 고려하여 여러가지 혁신적인 기초 형식이 제안되어 설치되고 있다[4][5]. 특히, 최근에는 유럽, 일본, 미국 등에서 기존의 해양플랜트 기술을 이용한 부유식 해상풍력 기초를 적용하여 수심이 수백 m까지 그 적용에 대하여 연구하고 있다[6].



Fig. 2 기초 결함으로 인한 풍력터빈 전도[7]

2. 연구 목적

최근에 해외 및 국내에 많은 풍력발전 기초에서 구조적인 신뢰성에 대한 문제가 많이 보고되고 있다. 본 논문은 육상풍력 기초의 해외 및 국내에서의 결함사례를 조사하고 공진분석을 하여 기초부분 결함의 예방과 유지보수의 중요성을 인식시키는 것을 그 목적으로 한다.

3. 논문의 구성

본 논문은 총 5장으로 구성되어 있으며, 2장에서는 육상풍력발전기 기초, 풍력발전기 타워 설계개념 그리고 타워와 콘크리트 접합부 형식을 앵커링 접합부 형식 및 앵커볼트 접합부 형식으로 나누어 설명 하였다.

3장에서는 구체적인 기초 결함사례로 유럽, 일본 및 한국 앵커볼트형식 접합부 결함, 앵커링 형식 접합부에 대해 접합부 결함원인 분석 하였다. 유럽의 경우는 앵커링형식 접합부는 단일플랜지와 이중플랜지 두 종류에 대하여 기술하였고 일본 및 한국은 단일플랜지 앵커링 형식 한 종류에 대하여 결함원인을 분석 하였다.

4장에서는 기초결함이 발생한 Vestas V90-3MW 풍력터빈 콘크리트기초를 기초 접합부를 결함의 정도에 따라 초기결함 모델, 결함진행 모델로 구분하여 모델에 따른 타워주파수 분석을 통해 로터회전 진동과 공진발생 가능성이 분석하였다.

또한, 결함이 심하게 발생한 앵커링 형식 접합부 보강 방법으로 현재 일반적인 보강 방법이 아닌 앵커볼트 접합부형식 변경 보강방법을 제안하여, 보강에 따른 타워주파수 변화를 분석 하였다.

마지막, 5장 결론에서는 앵커볼트 형식이 앵커링 형식보다 유리하며 제안된 보강 개념이 동역학적인 관점에서 장점이 있음을 다시 한번 기술 하였다.

II. 육상풍력발전기 기초

1. 육상풍력발전기 기초

풍력타워 기초설계 시 기본개념은 크게 3가지로 나누어진다. 지반에 대한 설계, 콘크리트기초 구조설계 및 기초전도에 대한 안정성 설계로 구분할 수 있다.

Fig. 3은 지반이 충분한 지지력을 가진 경우에는 하중은 풍력터빈에서 확대기초로 전달하는 그림이다. 확대기초는 지내력, 기초의 자중 및 기초콘크리트 전도에 저항하는 콘크리트 상부의 되메우기 흙에 의해서 결정된다[15].

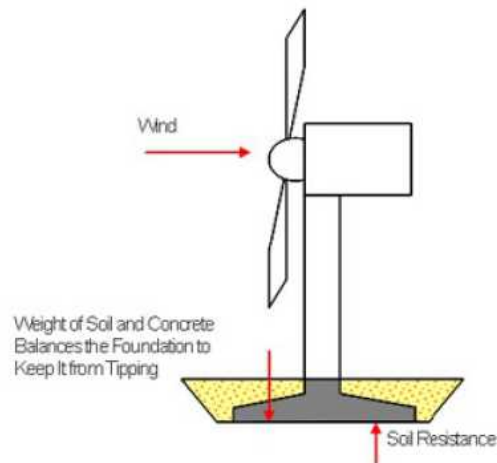


Fig. 3 확대 기초[9]

Fig 4(a)는 지반의 지내력이 충분하지 않으면 하중을 견고한 지반까지 전달시키기 위해 파일기초를 사용한다. 풍력터빈의 바람에 의한 횡력에 의해 기초 기울짐에 대한 저항은 파일의 압축력과 인장력에 의해 결정된다.

Fig 4(b)는 지반이 매우 견고할 경우, 확대기초는 기초 상부의 지내력을 최대한 이용하고 암반의 인장에 대한 저항력을 최대로 이용하기 위해 앵커를 사용하기도 한다.

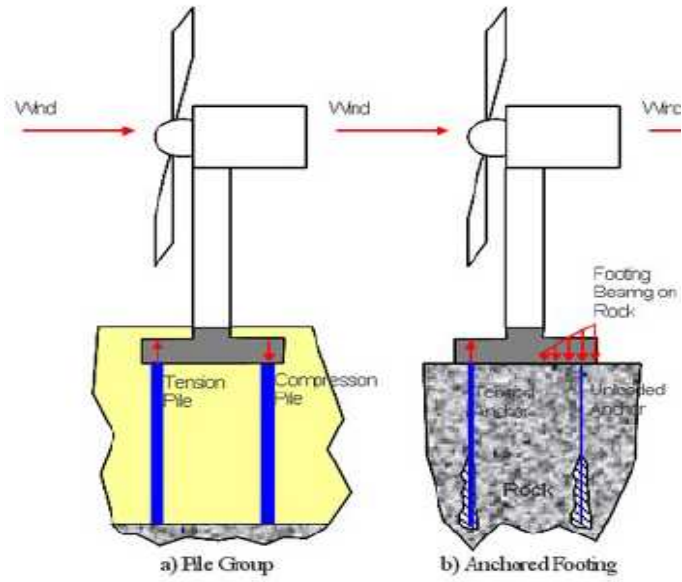


Fig. 4 파일기초 및 앵커기초[9]

2. 육상풍력발전기 타워

1) Soft 및 Stiff 타워구조

풍력타워 설계에 있어서는 타워의 고유진동수와 로터 회전주파수(1P)와 블레이드 통과주파수(3P)가 공진이 생기지 않도록 주의 깊게 설계를 해야 한다. 풍력타워의 1차 고유주파수는 Fig. 5와 같이 낫셀 및 로터의 질량을 타워 상단부에 질점으로 작용하여 고유치해석을 수행하면 쉽게 구해진다.

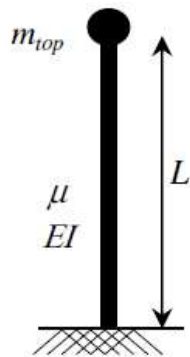


Fig. 5 풍력터빈 타워의 구조모델[10]

타워의 고유주파수가 1P구간과 3P구간 사이에 공진이 생기지 않게 설계해야 하며 1P 이하인 매우 세장한 타워의 경우를 Soft-soft 구조 1P와 3P 사이를 Soft-stiff 구조 3P 이상인 매우 강성이 높은 타워의 경우를 Stiff-stiff 구조라고 한다.

2) 타워설계의 동역학적인 개념

가변속도 풍력발전기 Vestas V90-3MW 발전기는 9.9-16.1-18.4 RPM와 같은 가변속도로 인해 회전속도 범위를 가진다. 이것은 Soft-stiff의 간격이 좁아지는 것을 의미한다.

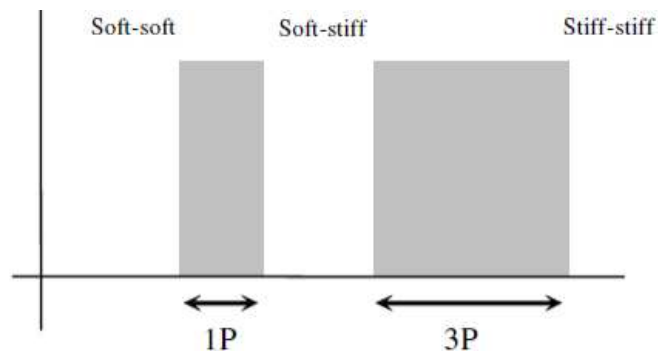


Fig. 6 가변속도 터빈시스템의 진동구간 정의[11]

현재 발전기는 대형화 되는 추세로 로터직경이 길어지고 타워 꼭대기 질량이 증가하고 있다. 아래 식 (1)으로 정의에 따라 1P에 해당하는 주파수는 아래 식(2)와 같다.

$$\lambda = \frac{V_{tip}}{V_w} = \frac{\Omega R}{V_w} = \frac{f_{1P} \pi D_{rotor}}{V_w} \quad (1)$$

$$f_{1P} = \frac{\lambda V_w}{\pi D_{rotor}} \quad (2)$$

이것은 최적화된 Tip-Speed 비에서 지름이 커지면 회전 주파수가 감소하는 것을 의미한다. 위의 수식의 풍속 $V_w=11.4\text{m/s}$, $\lambda=8$ 이고 로터지름이 120m, 100m, 80m 일 때 주파수는 아래 Fig. 7과 같다.

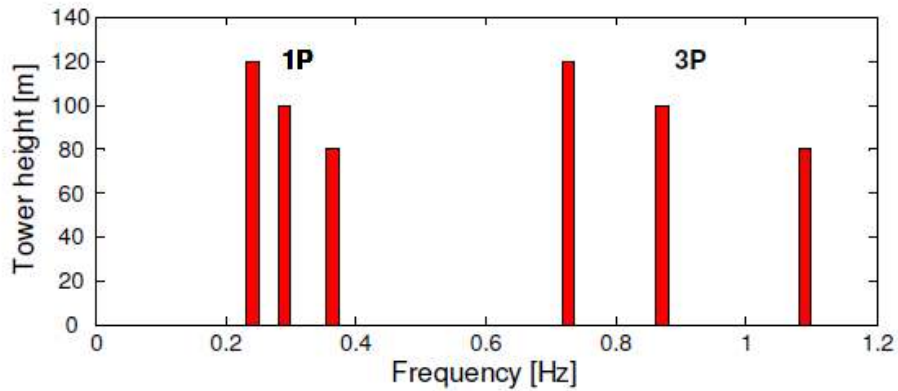


Fig. 7 120m, 100m 및 80m로 회전하는 로터 및 블레이드 1P, 3P 진동수[11]

3. 기초와 타워 접합부

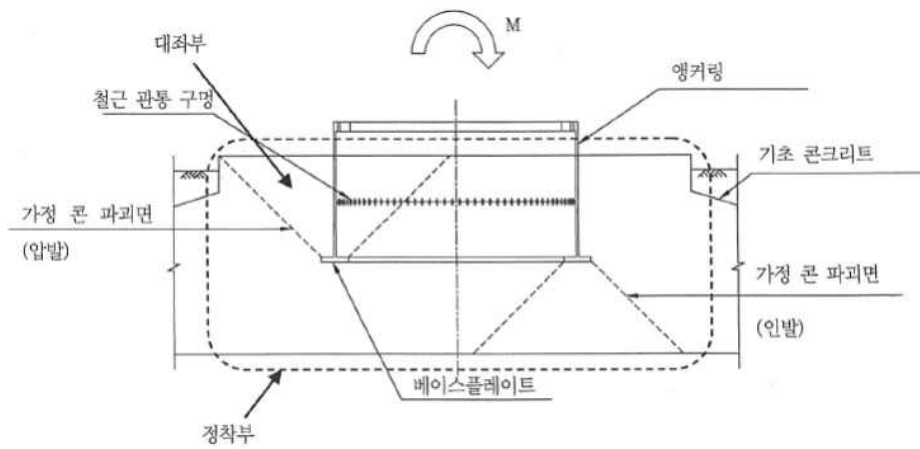
1) 접합부 형식 분류

풍력터빈은 타워와 콘크리트 기초의 접합은 콘크리트에 타워일부를 매입시키는 앵커링 형식과 별도 앵커볼트가 매입되어 상부타워와 볼트접합을 하는 앵커볼트 형식이 있으며 앵커링 형식은 다시 단일플랜지 형식과 이중플랜지 형식으로 나누어진다[12].

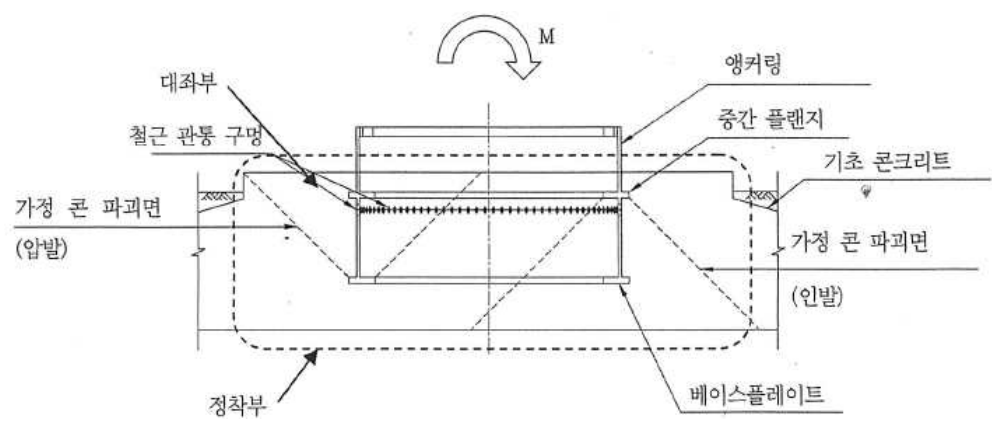
Fig. 8(a)는 단일플랜지 앵커링 형식이다. 앵커링 하부플랜지가 압축력 작용 시 하부 콘크리트에 압축력을 가한다. 이때, 플랜지하부 콘크리트의 인발저항 성능이 하부 콘크리트 두께를 결정하므로 충분한 두께 확보가 필요하다.

Fig. 8(b)는 이중플랜지 앵커링 형식이다. 설계 시 가정개념은 압축력은 상부플랜지가 저항하여 상부플랜지 하부 콘크리트에 인발력을 작용시키고 하부플랜지는 인장력에 저항하여 하부플랜지 상부 콘크리트에 압발력을 가한다. 따라서, 단일플랜지 앵커링형식에 비해 앵커링 하단부 콘크리트 두께가 얇게 설계된다.

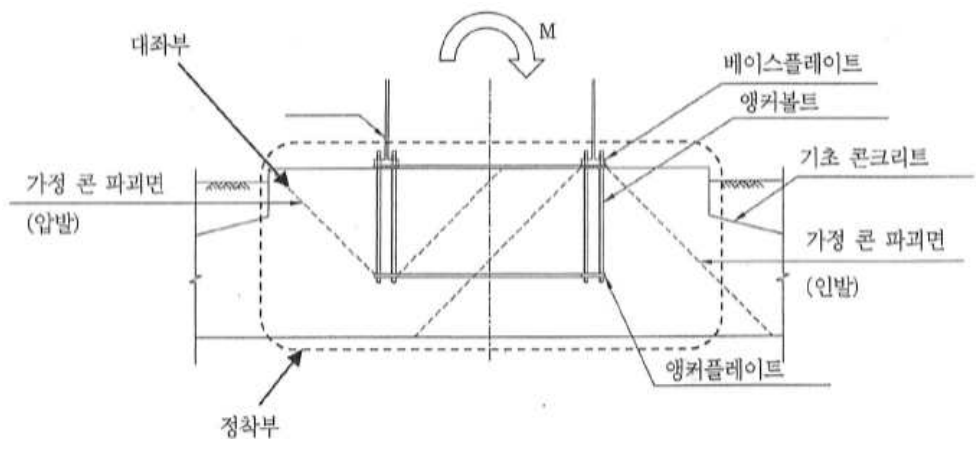
Fig. 8(c)는 앵커볼트 방식의 대표적인 예이다. 앵커볼트 방식은 타워에서 기초로 작용하는 압축력을 베이스 플레이트에 작용하고, 앵커볼트의 인발력은 앵커플레이트에 작용한다. 이와 같은 앵커볼트 방식의 경우, 특히 앵커볼트 인발력에 의한 콘크리트의 콘의 파괴를 고려하여 설계되어야 한다.



(a) 단일플랜지 앵커링 형식



(b) 이중플랜지 앵커링 형식



(c) 앵커볼트 형식

Fig. 8 접합부 형식[12]

2) 앵커링 형식 접합부

풍력산업의 초기 단계에는 설치의 용이함으로 인해 앵커링 형식 접합부로 대부분의 풍력터빈을 설치하였다. 당시에는 풍력터빈이 기초에 손상이 발생할 정도로 풍력터빈 용량이 크지 않고 허브높이가 높지 않았다. 그러나, 풍력터빈이 대형화되면서 콘크리트 기초와 상부 매입된 타워 사이의 앵커링 형식 접합부에 손상이 발생할 정도로 이르게 되었다[14].

앵커링 상부에 타워가 접합될 수 있도록 플랜지가 있고, 또 하나의 링 하부에 플랜지가 있어 압축하중과 인장하중을 전달할 수 있다. Fig. 9는 콘크리트에 매립된 앵커링과 콘크리트 기초의 상세를 보여주고 있다. 위의 상세에는 크게 앵커링의 인장하중과 압축하중 작용 시 이에 저항하는 앵커링 내부 및 외부에 배근된 수직철근인 U-bar 철근, 앵커링의 인장력에 의한 기초상부에 부모멘트가 발생하면 이에 저항하는 앵커링을 관통하는 상부철근 및 앵커링의 압축력에 의한 기초하부에 정 모멘트가 발생하면 이에 저항하는 하부철근을 보여주고 있다. Fig. 10은 앵커링을 관통하는 상부철근의 철근 조립과정을 보여주고 있다.

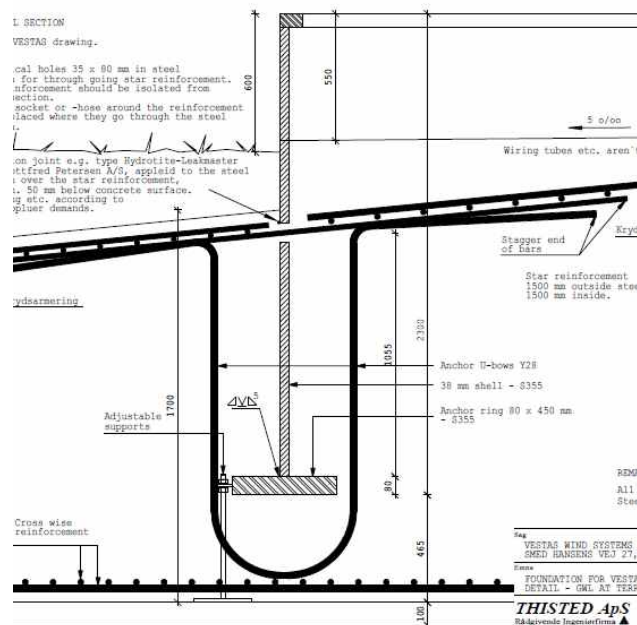


Fig. 9 단일플랜지 앵커링 형식 기초 철근배근 상세[13]



Fig. 10 앵커링 형식 상부철근 조립과정[14]

Fig. 11는 역학적인 거동에 대해서는 Pekka Maunu가 앵커링 형식의 접합부를 가진 콘크리트 기초를 3차원 솔리드요소를 사용하여 유한요소 해석을 수행한 결과이다[15].

앵커링이 콘크리트에 매입된 경우 연직력과 모멘트가 결합된 경우, 접합부에 있어서 앵커링 모멘트에 대한 저항은 콘크리트와 앵커링의 수평 접촉력으로 약 35% 전달되고 수직 접촉력으로 나머지 65%를 전달한다. 따라서 수직력이 주된 힘으로 앵커링 측면 수직철근 및 앵커플레이트 하부 콘크리트 전단설계가 중요함을 알 수 있다. Fig. 11은 가장 인장력을 많이 받는 지배적인 철근은 앵커주위 수직철근과 부 모멘트에 의한 상부철근이 붉은색을 보여주고 있다.

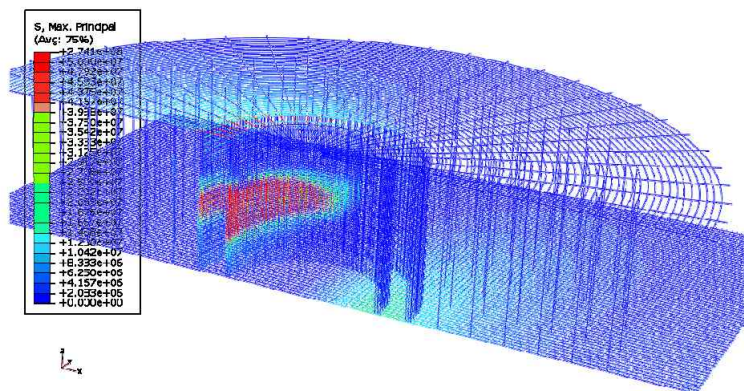


Fig. 11 철근콘크리트 기초 3차원 유한요소 해석으로 철근응력 분석[15]

3) 앵커볼트 형식 접합부

Fig. 12는 콘크리트 타설 전 앵커볼트 관찰할 수 있는 바와 같이 타워와 기초의 접합은 앵커볼트를 통해 하부가 지지되어 있다. 앵커볼트는 콘크리트 풍력기초 하부에 플랜지에 의해 고정되어 있다.

앵커볼트 접합부와 앵커링 형식의 접합부 결합사례를 비교해 보면 앵커볼트 형식의 결합은 그라우트 부분의 사소한 결합이 대부분이다. 따라서, 원자력발전소, 화력발전소의 터빈 발전기기초 등 각종 진동기 기초, 건축물, 교통시설물 등 여러 분야에서 적용되고 있다.



Fig. 12 기초 콘크리트 타설 전 앵커볼트[16]

Ⅲ. 육상 풍력기초 결합사례 및 원인분석

1. 유럽 육상 풍력기초 결합

1) 개요

유럽의 하자사례는 크게 앵커볼트 타입의 경우에 타워 플랜지와 콘크리트 기초사이의 모르타르가 시공될 때의 모르타르에 대한 결합사례 및 앵커링 형식 접합부 결합으로 크게 나누어서 설명한다[14].

2) 앵커볼트 형식

상부 풍력타워는 Fig. 13에서 보듯이 미리 설치된 앵커볼트에 의하여 연결된다. 타워의 플랜지와 콘크리트기초 사이에는 고강도 그라우트가 타설된다.

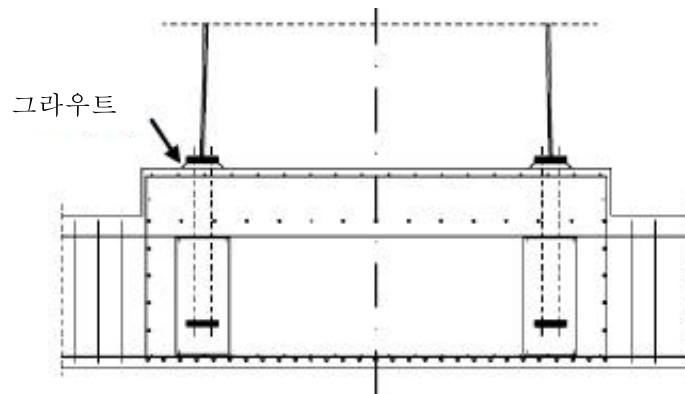


Fig. 13 풍력타워와 콘크리트기초 사이의 접합부[14]

이 기초 접합부 형식은 타워의 동적인 반복하중에 의하여 아래와 같은 결함이 발생한다.

- 건조수축 균열
- 끝단 부분에서 과도한 그라우트[Fig. 14].
- 저온 시공에 의한 강도 부족

- 그라우트에 공기포함으로 콘크리트 플랜지 결함 발생[Fig. 15].

첫 번째 2가지 문제는 이 가운데 크게 문제가 없으나, 나머지 2가지는 모르타르를 교체하는 등의 다른 부수조치가 필요하다.



Fig. 14 측면 과다 그라우트 모르타르[14]



Fig. 15 플랜지 하부 그라우트 모르타르 결함[14]

3) 단일플랜지 앵커링 형식

Fig. 16은 앵커플랜지 하나를 가진 앵커링 형식에서의 결함 진행과정이다. 단일 플랜지 앵커링 형식은 Fig. 16에서 보듯이 타워를 콘크리트에 고정하는 하부 T-flange와 타워를 설치하기 위한 상부 L-flange로 구성된다.

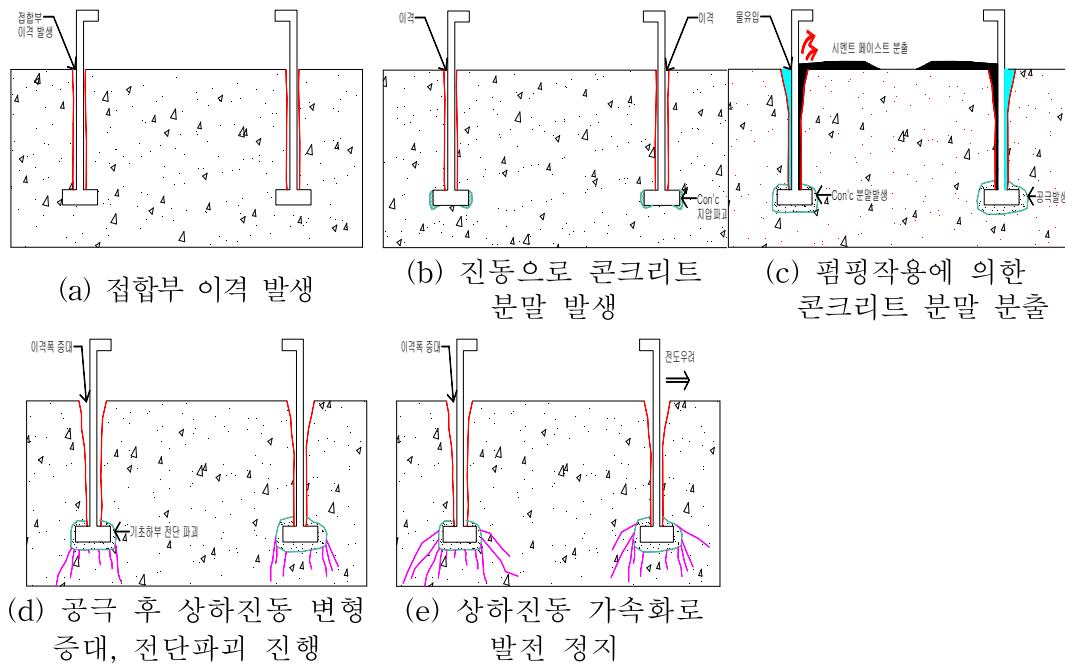


Fig. 16 앵커링 형식 접합부 결합 진행과정[3]

이러한 접합부를 가진 기초형식은 소형풍력에서는 기능을 잘 수행 하였다. 그러나, 대형풍력 발전기에서는 다음과 같은 균열 메카니즘으로 인해 기초균열과 타워와 비 부착문제를 발생 시킨다.

- (a) 하중에 의한 강재타워의 변형률은 타워와 콘크리트간의 이격이 발생한다.
- (b) 좌우방향의 진동으로 철근으로 보강되지 않은 콘크리트 상부 피복에 진동에 의한 균열을 초래하며, 콘크리트 마모로 시멘트 분말이 발생한다.
- (c) 우수에 의한 물의 침투와 진동으로 인한 펌핑작용으로 시멘트 분말을 외부로 누출 시킨다[Fig. 20]
- (d) 시멘트 분말의 누출에 따른 하부공극 형성으로 인해 상하, 좌우 진동은 더욱 가속화 되어지고 플랜지 하부 콘크리트 두께가 얇을 경우 전단파괴를 일으킨다.
- (e) 방치 시 기초구조 건전성을 악화시켜 발전 정지 등 전력생산을 하지 못할 정도로 성능을 약화시킨다. 1차적인 원인은 발전기의 진동이며 2차적인 원인은 우수의 침입에 의한 펌핑작용으로 인한 콘크리트 내부에 공극 형성이다.

4) 이중플랜지 앵커링 형식

Fig. 17은 콘크리트에 매입된 두 개의 플랜지를 가진 앵커링의 저항메커니즘으로 압축력은 상부 플랜지는 부담하고 반면 하부 플랜지는 인장응력을 콘크리트에 부담하는 형태를 취한다.

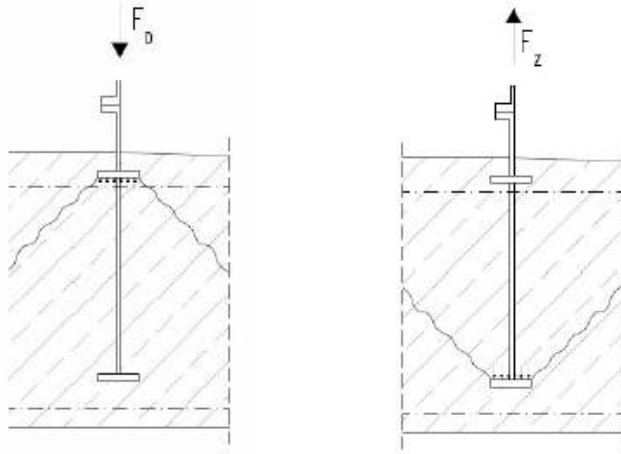


Fig. 17 이중플랜지 앵커링 형식 압축력과 인장력 발생 시 모델[14]

Fig. 18은 인장하중에 의해 상부가 균열이 발생된 경우이다. 파괴메커니즘은 극한 한계상태(ULS)이고 사용성 한계상태(SLS)에서 거동을 고려되지 못한 것이기 때문에 이 모델은 앵커링 변형률, 팽창 및 축소는 설명하지 못한다.

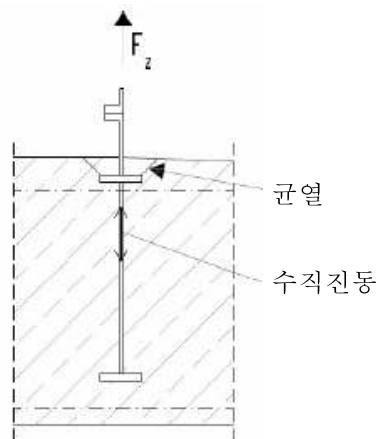


Fig. 18 이중플랜지 앵커링 형식 실제거동에 의한 상부 균열발생[14]



Fig. 19 타워로부터 350mm 거리에서의 균열[14]



Fig. 20 균열 및 팽창작용에 의한 하부콘크리트 분출[14]

Fig. 19에서 나타나듯이 강제타워의 길이변화에 의해, 상부 플랜지는 콘크리트 표면에 힘을 가하는데, 인장력은 상부 플랜지에 의해 기초상부 콘크리트에 균열을 발생시킨다.

일반적으로 압축력은 앵커링 벽체를 통해 하부플랜지를 통해 플랜지 하부의 콘크리트로 전달된다. 플랜지 하부의 콘크리트 두께가 충분하지 않아 플랜지 압축응력에 대한 충분한 전단내력을 가지고 있지 않다. Fig. 21은 상부 플랜지의 압축력으로 플랜지하부 콘크리트에 균열이 발생하는 것을 보여준다.

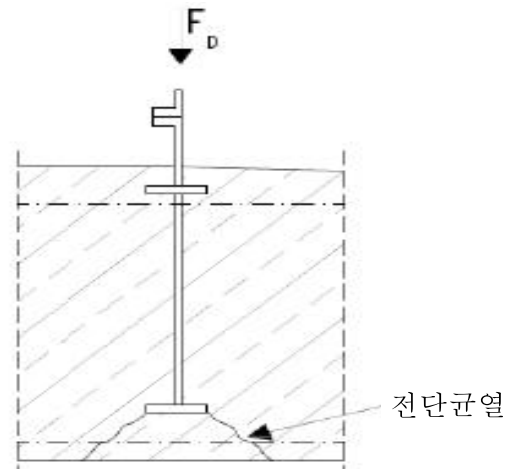


Fig. 21 이중플랜지 앵커링 형식 기초하부 전달균열[14]

Fig. 22는 풍력기초를 코어로 뚫어 보면 기초하부에 관통균열이 발생 하였음을 알 수 있다.



Fig. 22 이중 플랜지 앵커링 형식 기초하부 전달균열 콘크리트 시편[14]

이러한 형태의 균열이 자주 관찰됨에 따라 그 원인에 대해 좀 더 자세한 조사가 이루어졌다. 이론적으로 콘크리트와 타워 사이에 수직변위를 일으키는 3가지 메커니즘은 다음과 같다.

- 인장응력에 의한 강재타워의 늘어남
- 플랜지 사이의 콘크리트의 압축
- 플랜지 사이의 콘크리트의 건조수축

위에서 언급한 메커니즘은 전체 2mm 정도의 수직 변위를 발생시킨다. 그리고 아래의 3가지 요소로 추가적인 수직변형이 발생할 수 있다.

- 잘 타설되지 못한 콘크리트와 불량한 다짐은 플랜지 하부와 타워 주위에 콘크리트간에 공극을 발생시킨다.
- 블리딩, 타설된 콘크리트 재료분리 및 콘크리트 침하는 플랜지 하부 콘크리트에 견고하지 못한 콘크리트층을 생성시킨다.
- 압축력에 의한 플랜지 하부의 전단균열은 인서트 링을 충분하게 지지할 수 없게 된다.

다양한 풍력터빈에 대해 조사한 결과 수직변위는 1~2mm의 범위 안에 있었다. 앵커링과 기초상부에서 3~5mm 정도의 수직변위도 발생하였으며 10mm 이상의 수직변위도 발생 하였다[14],[18].

2. 일본 육상 풍력기초 결함

1) 개 요

일본의 결함사례는 2003년에 발생한 태풍 매미에 의한 결함사례[17] 이외 태풍·저기압 등의 폭풍에 의한 결함사례[12] 등이 있다. 아래 기초결함 사례는 운영중인 풍력발전기의 동적이 반복하중에 의한 풍력기초 접합부 결함사례로 단일플랜지 앵커링 형식 접합부 결함사례를 보여준다[3].

2) 단일플랜지 앵커링 형식

일본의 신이즈모 풍력발전소는 Vestas V-90 3 MW 26기로 총용량 78MW로 풍력발전기 기초 접합부형태는 단일플랜지 앵커링 형식이다. 이중에서 6기가 기초 접합부에 문제가 발생하여 2011년과 2012년 사이에 모두 보수 하였다. 보수공사 실시 후 일시적으로 계측을 실시한 결과 2013년 3월까지 6기 모두 동일현상은 발생하지 않고 있다. 단, 그 당시 보수를 실시하지 않은 풍력발전기 한 호기는 추가로 기초에 성능 저하현상이 나타났다.

Fig. 23은 수직 및 수평변위를 측정하고 있는 것을 보여준다. 일본에서 주기적으

로 각호기 별 주 풍향 방향의 수직·수평 변위량, 주 풍향 직각방향의 수직·수평 변위량 조사를 실시하고 있다. 여기에서 일본은 풍력발전기 앵커링 형식의 기초문제를 잘 인식하고 있으며 전체 풍력발전기를 주기적으로 계측하고 문제 발생 시 유지보수를 하고 있어 시사 하는 바가 크다고 할 수 있다.

조사된 총 26기 풍력발전기의 수직 변위량은 23기는 1mm 이하로 아주 우수하고 두 호기는 3mm 이하로 관찰되었으며 한호기는 최고 4mm로 유럽의 경우는 가장 일반적인 경우가 1mm~2mm, 간혹 3mm~5mm, 드물게 10mm 이상이 발생 한다는 보고와 비교하여 아주 양호함을 알 수 있다[14][18].

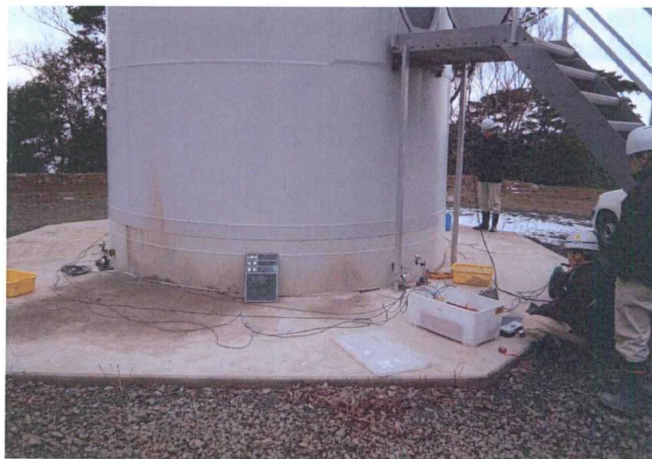


Fig. 23 기초와 타워간 수직·수평 변위량 측정[3]

또한, 시멘트 분말 분출량의 경우 내륙부에 위치한 풍력발전기가 연안에 위치한 풍력발전기 보다 많은 경향이 있는데 난류에 의한 진동하중의 증가가 원인인 것으로 추정된다. 일반적으로 수직·수평 변위량이 큰 발전기 기초가 시멘트 분말량이 많다.

2012년 보수 전 앵커링에 변형이 가장 크게 발생되었던 보수 완료 후 2013년 2월까지 문제는 발생하기 않고 있으며, 또 다른 호기로 2012년 보수 당시에 큰 문제가 없었으나 2013년 2월 현재는 보수 이전에 다른 풍력발전기에서 발생되었던 시멘트 분말 유출 현상이 서서히 나타나고 있는 상태이다. Fig .24는 타워 내부 및 외부의 시멘트 분말 발생된 것을 보여주고 있다.



(a) 타워외부

(b) 타워내부

Fig. 24 풍력터빈 타워 시멘트분말 발생 사진[3]

기타 일본의 한 풍력발전소의 앵커링 형식 기초 접합부에서 하자의 발생으로 2002년~2003년 총 4기의 풍력발전기에 대하여 보수를 실시하였다[3].

3. 국내 육상 풍력기초 결합

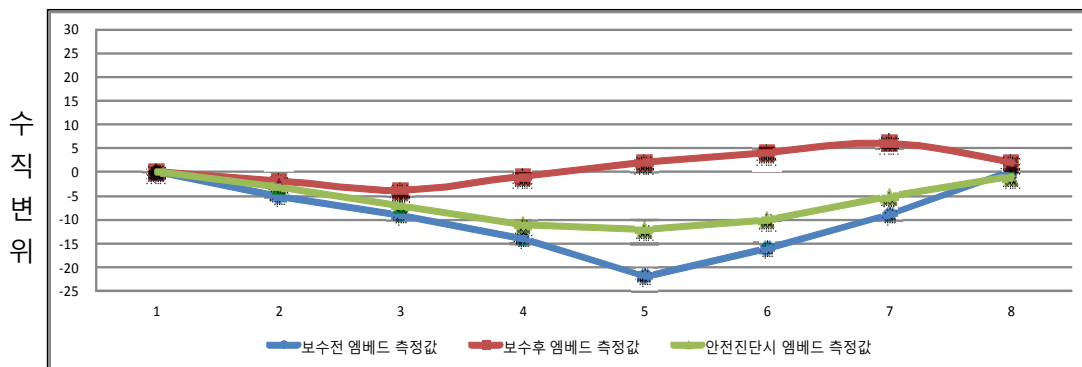
1) 단일플랜지 앵커링 형식

제주도 풍력발전기 두 호기에 기초구조물에 상하진동이 심하게 발생하여 이로 인해 전체 풍력발전기 V90-1.5MW 4기, V90-3MW 5호기 및 V80-2MW 10기 총 41MW 기초구조물 19기를 조사가 이루어졌다[3].

전체 기초구조물 접합부 형태는 앵커링 방식(단일플랜지) 이며 기초구조물에 상하진동이 심하게 발생한 구조물은 풍력발전기 V90-3MW 및 V80-2MW 이다.

문제가 된 두 호기 기초구조물 상하 진동현상이 발생하여 보수한 사례가 있으나 다시 진동이 발생 하였다. Fig. 25는 V90-3MW의 풍력발전기 기초구조물 수직변위 측정 결과 보수 전 후를 비교 분석한 결과, 위치 5에서 보수 전 -22mm가 침하 하였으나 보수 후 다시 -12mm가 침하하여 10mm 침하가 다시 진행된 것으로 조사되었다. -22mm 침하는 유럽이나 일본에서 발견되지 못한 아주 높은 침하량으로 결합의 정도가 심함을 알 수 있다.

일본의 보수사례에서는 다시 침하가 발생되지 않는 것으로 보고되고 있는 것과 다른 현상으로 앵커링과 콘크리트 사이의 공극발생 단계를 초과하여 플랜지 하부 콘크리트에 전단균열이 발생 되었음을 추정되어 진다.



1개호기 타워외경에서 측량위치 8개소

Fig. 25 보수 전후 수평변위 및 현재 수평변위[3]

또 다른 V80-2MW는 최대 -8mm가 침하 하였으나 보수 후 다시 -11mm로 보수 전후 대비 3mm가 침하한 것으로 조사 되었다.

2) 설계적인 문제 원인분석

실제 하중경로에 따라 힘은 앵커링 플랜지 하부 콘크리트에 집중된다. 따라서 앵커링 하부 콘크리트 전단성능 및 수직하중에 저항하는 앵커링 측면 수직철근U-Bar의 성능이 중요하다.

Fig. 26은 제주에서 결함이 발생한 풍력기초 접합부 설계 시 앵커링과 기초 콘크리트를 완전부착 조건을 가정하여 설계가 이루어 졌다.

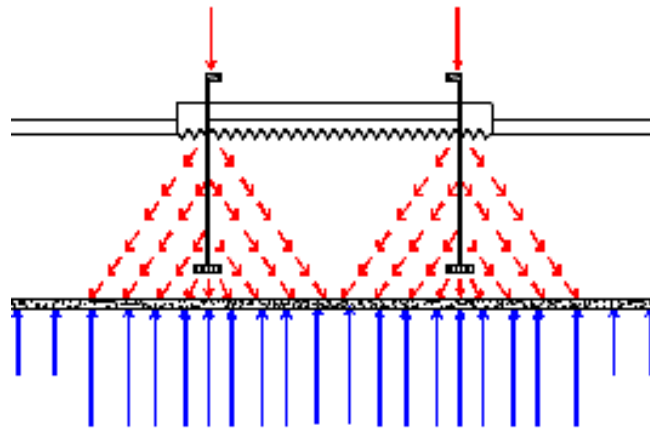


Fig. 26 설계 시 가정한 힘의 경로

Fig. 27은 타워와 기초사이에 이격이 발생된 모습을 보여주고 있다. 제주도 풍력단지 앵커링 형태의 기초방식 1.5MW 4기, 2MW 10기 및 3MW 5기 41MW를 현장 조사한 결과 앵커링과 기초 콘크리트는 단지 별 각각 평균 (0.5mm~2.0mm), (0.5mm~1.5mm)까지 접합부가 이격이 조사되었다. 이에 대한 원인으로는 앞서 유럽의 사례에서 설명한 바와 같이 풍력발전기 진동에 의한 이격 발생 및 콘크리트와 앵커링 사이의 이질재료로 건조수축 등이 원인으로 볼 수 있다. Fig. 28은 이와 같은 이격이 반영됨에 따라 설계 시 가정과 다른 힘의 전달이 이루어져 플랜지 하부에 하중이 집중됨을 보여주고 있다.

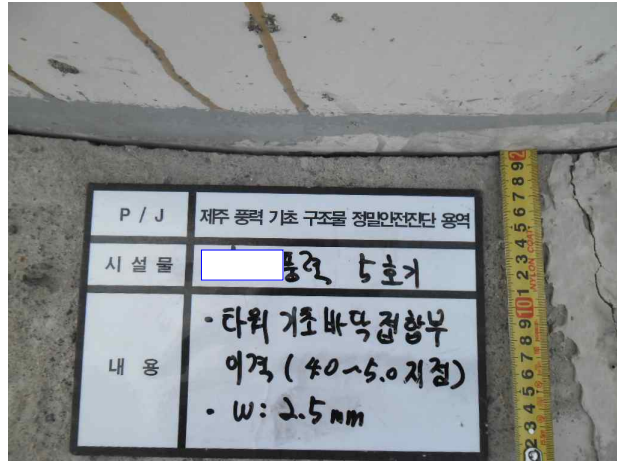


Fig. 27 앵커링과 콘크리트 기초사이 이격 발생[3]

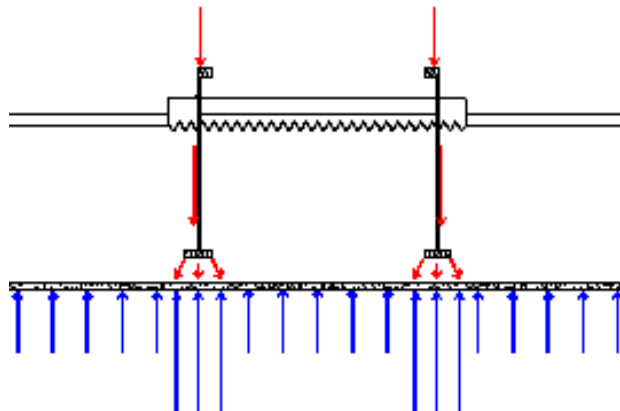
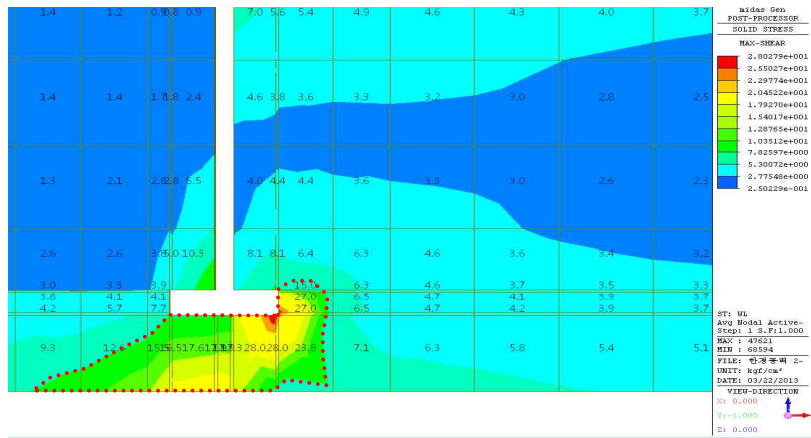
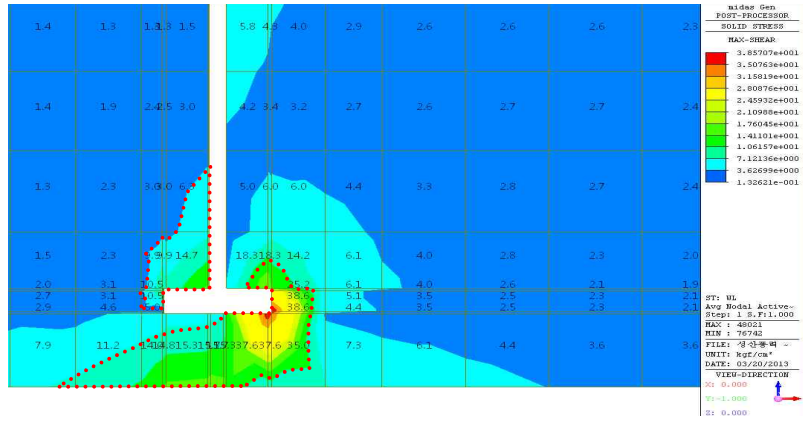


Fig. 28 이격 발생으로 인한 실제 힘의 경로

Fig. 29는 집중하중을 분석하기 위해 상하진동이 많이 발생한 풍력 V-90 3MW, V-80 2MW에 대하여 기초 전단 균열을 검토하기 위해 유한요소 해석을 수행한 결과이다[3]. 응력 초과부분은 점선으로 표시되어 있으며 Ratios가 각각 2.83과 2.23으로 안전성을 확보하지 못하고 전단균열에 대한 저항성능이 부족한 것을 보여주고 있다.



(a) V90-3MW 기초콘크리트 전단응력($\tau_u/\tau_n=2.83$)



(b) V80-2MW 기초콘크리트 전단응력($\tau_u/\tau_n=2.23$)

Fig. 29 플랜지하부 기초콘크리트 유한요소 해석[3]

Table 1은 앵커링 플랜지 하부 콘크리트 최소두께를 비교한 것이다. 일본 표준도면은 1200mm로 두께가 충분하여 전단파괴 성능은 매우 우수하다. 전단파괴가 발생한 제주풍력은 두께가 320mm와 420mm로 매우 얇다. 만약 전단파괴가 발생되면 보수보강 방법이 매우 어려워 앵커링 플랜지 하부 콘크리트의 충분한 두께를 확보하도록 설계 시 고려하여야 한다.

Table 1 단일플랜지 앵커링 형식 플랜지하부 콘크리트 두께

구 분	플랜지 하부 두께(mm)	비 고
유럽 표준도면 (Vestas)	465	2002.11
	650	2009.11
일본 표준도면	1,200	
제주도 풍력	320	전단파괴 발생
	420	"
영덕풍력 기초도면	450	
태백풍력 기초도면	580	

3) 시공적인 문제 원인분석

원형 모양의 앵커링 관통 상부철근은 중앙부에 철근과밀로 철근간격 부족이 발생한다. 수직철근인 U-BAR가 앵커플랜지와 수평 및 수직철근 과밀로 타설 공간 부족에 의해 채움 부족과 다짐 부족이 발생할 가능성이 있다. 또한, 콘크리트 타설 이후 콘크리트 침하로 인한 앵커플랜지 하부에 공극이 발생 할 수 있다. 시공 시 공극이 발생하면 앵커링과 기초 콘크리트간의 이질재료 특성(기초콘크리트의 건조수축, 온도변화에 따른 이질재료 변형률 차이)과 상부구조물의 진동으로 인해 이격 및 공극이 확산으로 수평변위 및 수직변위가 증가할 것으로 판단된다.

IV. 육상 풍력기초 결합 및 보강에 따른 공진분석

1. 기초 결합에 따른 공진분석

1) 초기결합 모델에 따른 타워주파수 해석

(1) 개요

기초 접합부 결합에 의한 정확한 타워 고유주파수 값은 실제계측을 통해서만 알 수 있다. 하지만, 시뮬레이션 역시 중요하므로 2가지 경우 가정모델에 대해 ABAQUS 6.13 프로그램을 사용하여 주파수 변화를 알아보하고자 한다.

기초의 결합이 발생한 Vestas V-90 3MW 풍력기초의 앵커링 접합부 결합을 손상의 초기단계 초기결합 모델과 손상이 상당히 진행된 결합진행 모델로 구분하여 가정모델에 따른 타워의 고유주파수 변화를 모드해석을 통해 확인해 보고자 한다. 이러한 기초 접합부모델에 따라 타워 고유주파수 변화가 풍력발전기 로터회전 주파수 1P 영역 및 블레이드 통과주파수 3P영역과의 공진유무가 있는지 분석하고자 한다.

(2) 풍력발전기 제원

Table 2는 Vestas V-90 3MW 제원이다. 3개의 날개를 가진 Upwind형, 날개 직경 90m 및 허브높이 80m을 가진 풍력발전기이다. 이 풍력발전기는 현무암 지반위에 가로 22m×세로 22m×높이 2.05m 콘크리트기초 위에 앵커링 타입의 단일플랜지 형식 접합부로 타워와 결합되어 있는 형식이다. 따라서 이 풍력발전기 적용하여 기초 접합부 결합을 반영한 결합모델 및 접합부 보강방법을 반영한 보강 모델을 사용하여 타워주파수 해석을 수행하였다. 결합 및 보강에 따른 타워주파수 변화가 로터회전주파수 1P영역 및 블레이드 통과주파수 3P영역과 공진을 발생 시키는지에 대한 검토를 할 것이다.

Table 2 Vestas V90-3.0MW 발전기 제원

Items		Vestas 3.0MW	비 고
Foundation Connection Type		Anchor Ring Type	
Model		V90-3.0MW	
Nominal Rating (kW)		3,000	
The number of blade / Wind Direction		3/Upwind	
Generator	Type	Asynchronous	
	Speed (RPM)	1,758	
	Cooling Method	Water cooling	
Wind Condition (m/sec)	Cut-in	4m/s	
	Rated	16m/s	
	Cut-out	25m/s	
	Maximum wind speed in design	70m/s (3 second average)	
Blade	Blade Dia. (m)	90	
	Rotation Speed (RPM)/ (Hz)	9.9-16.1-18.4/ 0.165-0.268-0.307 variable speed	
	Swept Area (m ²)	6,362	
	Type / Material	Reinforced glass fiber	
Hub Height (m)		80	
Tower	Type	Tubular Tower	
	Material	S355 J2G31/NL	
Weight (ton)	Tower	155	
	Nacelle	68.0	
	Rotor	39.8	
Type of Power Control		Pitch Control	

(3) 초기결합 모델링

Fig. 30는 Abaqus로 타워를 모델링한 결과를 보여주고 있다. 타워를 3개의 Section과 하나의 콘크리트 매입 앵커링 구성되어 있다. 각각 Section은 볼트로 접합되어 있다. 상부 Top section과 Section 2는 두께와 직경이 다른 10개의 Sub-segment를 용접하여 접합되어 있으며 하부 Section 1은 7개의 Sub-segment를 용접으로 접합되어 있다. 타워는 Shell element로 각각의 단면을 입력 하였으며 탄성계수 205GPa, 포아송비 0.3을 사용하였다.

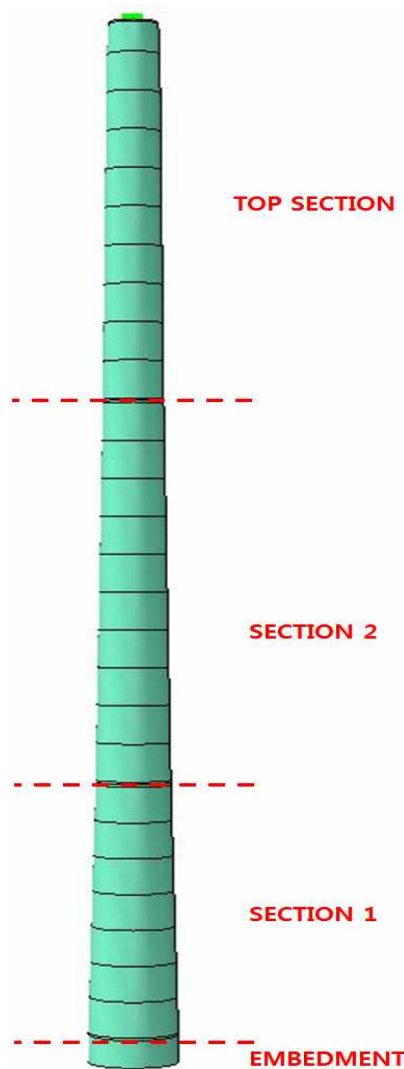
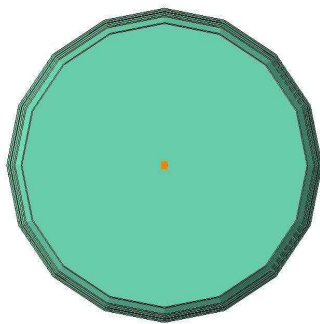


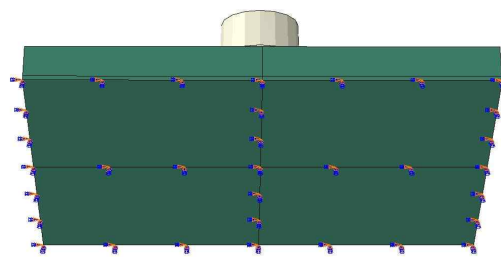
Fig. 30 Tower 모델링

Fig. 31(a)는 3MW 풍력타워의 상부에 낫셀 무게 68톤, 로터 무게 39.8톤을 더한 107.8톤의 질량을 타워상부 중심에 Mass 하중으로 주었다.

Fig. 31(b)는 콘크리트 기초는 Solid element(C3D8R)를 적용 하였으며 단위질량 2500kg/m³, 탄성계수 32.64GPa를 사용 하였다. 또한, 풍력발전기가 위치한 지반은 현무암으로 매우 높은 강성이 추정되므로 기초와 암반을 완전히 고정시켜 x,y,z축에 대한 변위와 회전에 대하여 구속하였다.



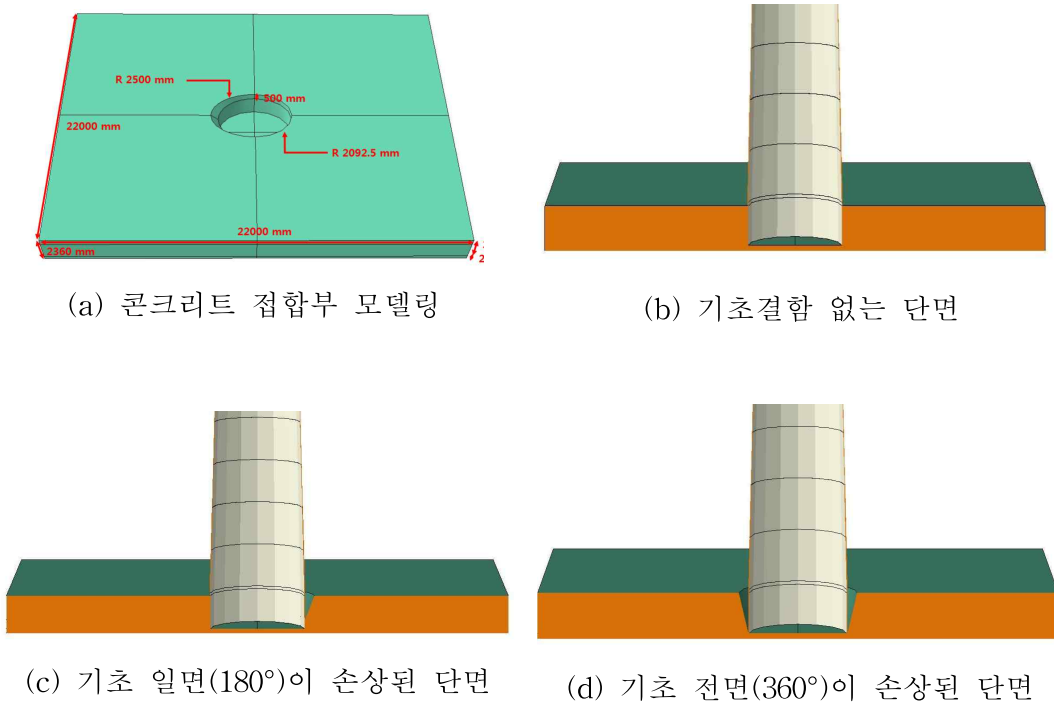
(a) 낫셀, 로터 Mass하중



(b) 지반과 기초와의 경계조건

Fig. 31 타워상부 Mass 하중 및 지반과 기초와의 경계조건

Fig. 32(a)는 타워 콘크리트기초를 보여주고 있다. Fig. 32(b)는 현재 발생한 타워-기초 접합부 초기결함을 콘크리트와 타워가 분리가 되지 않은 건전한 상태를 보여 준다. Fig. 32(c)는 접합부 한쪽 측면(180°)이 분리된 경우이다. 분리 깊이에 따라 0.5m, 1m, 1.5m로 구분 하였다. Fig. 32(d)는 접합부 측면 전 방향(360°)이 1.75m 깊이로 분리된 경우 모델링 결과이다. 타워 내부는 콘크리트는 없는 것으로 가정 하였다. 플랜지 하단 및 분리되지 않은 타워 측면부분은 Shell element와 콘크리트기초 Solid element로 TIE 옵션을 적용하여 수직 및 수평변위를 구속하여 같이 거동 하도록 하였다.



(a) 콘크리트 접합부 모델링

(b) 기초결합 없는 단면

(c) 기초 일면(180°)이 손상된 단면

(d) 기초 전면(360°)이 손상된 단면

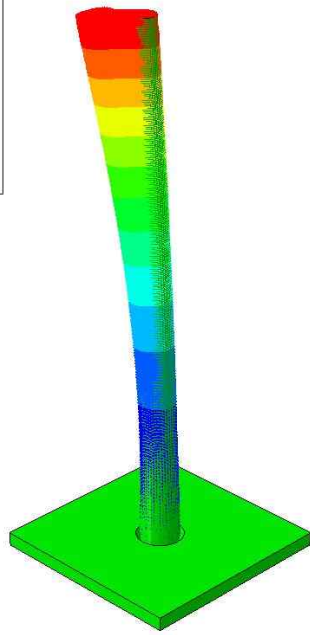
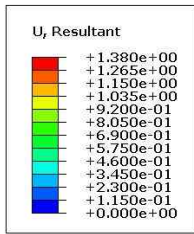
Fig. 32 초기결합 모델

(4) 초기결합 모델 해석결과

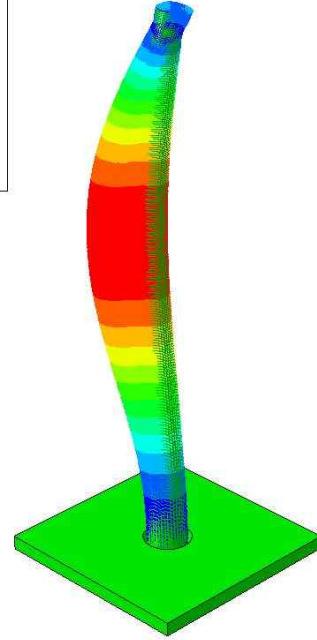
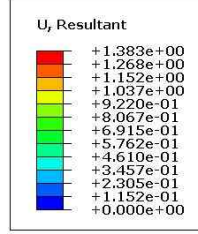
Fig. 33은 기초 접합부 초기 손상모델에 따른 Modal 해석 Mode Shape 결과를 보여 주고 있다.

Table 3은 풍력발전기 기초 초기결합 모델의 1차모드 주파수를 비교한 것이다. 결합초기에 콘크리트와 타워가 분리되어 타워측면에 간격이 발생하는 단계의 해석 결과로 손상이 전혀 없는 경우, 타워주위 한쪽측면(180°)이 콘크리트와 분리되는 경우 분리깊이를 각각 0.5m, 1.0m, 1.5m로 구분하고 및 타워주위 전측면(360°)이 분리 깊이가 1.75m로 분리된 경우 각각의 주파수는 0.3154Hz, 0.3149Hz, 0.3144Hz, 0.3139Hz 및 0.3109Hz 이다.

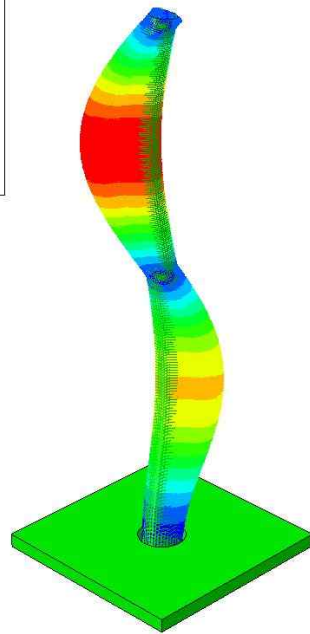
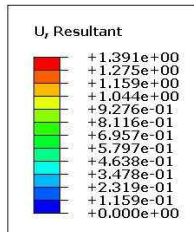
여기에서 주파수변화는 손상이 전혀 없는 경우의 0.3154Hz에서 측면전체(360°)가 손상된 경우의 0.3109Hz로 주파수 감소는 -1.014%로 초기결합 시 타워측면의 간격발생은 타워의 고유주파수 변동에는 영향이 거의 없음을 확인 할 수 있다.



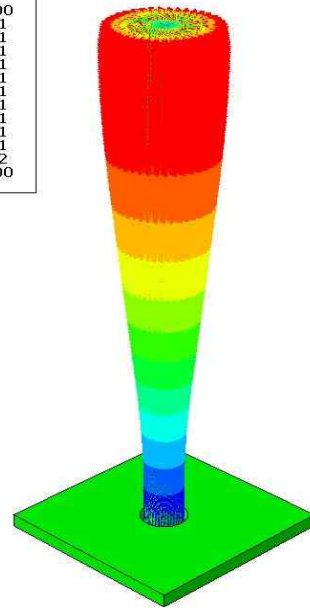
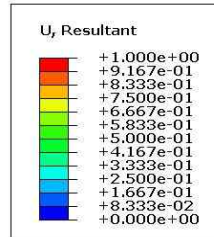
(a) bending mode shape 1



(b) bending mode shape 2



(c) bending mode shape 3



(d) torsion mode shape 1

Fig. 33 초기결합 모델 Modal 해석 Mode Shape

Table 3 초기결합 모델 해석결과 1차 모드 주파수 비교

결합상태 구분			타워 고유주파수	비 고
손상 없음(A)			0.3154Hz	
초기결합 모델	일면손상 깊이(m) (B)	0.5	0.3149Hz	
		1	0.3144Hz	
		1.5	0.3139Hz	
	양면손상 상태(C)		0.3109Hz	
	주파수 차이 (A/C)		-1.014%	감 소

(5) 초기결합 모델에 따른 공진분석

Vestas 3.0MW 가변속도 풍력발전기 로터 회전주파수범위는 9.9-16.1-18.4rpm이고 $(9.9/60=0.165)$ - $(16.1/60=0.268)$ - $(18.4/60=0.307\text{Hz})$ 이다. 여기에서 0.268-0.307Hz는 제어로 인해 주파수가 머무는 시간이 짧아 이 구간을 제외하고 진동영역을 0.165-0.268Hz를 사용 하였다. 이 영역은 로터의 회전에 의해 발생하는 1P영역 구간이다. 따라서 블레이드 회전에 의해 공기층 통과로 발생시키는 진동구간 3P영역은 $(0.165*3=0.495)$ - $(0.268*3=0.804\text{Hz})$ 구간이다.

Fig. 34 는 발전기 진동구간 1P구간 주파수, 3P구간 주파수를 동시에 나타내어 결합 모델에 따른 타워의 고유치 해석결과를 비교한 결과를 보여주는 Campbell Diagram이다. 해당 풍력발전기 타워는 1P구간 영역과 3P구간 영역 사이인 Soft-stiff 구조이며 공진에는 이상이 없다. 전체적으로 보아 기준범위 안에서 1P영역에 가까워 타워가 경제적으로 설계되어 있음을 확인할 수 있다. 또한, 풍력발전기 정격출력 로터주파수 0,268Hz일 경우 타워 고유주파수와 가장 근접되어 있음을 확인할 수 있다.

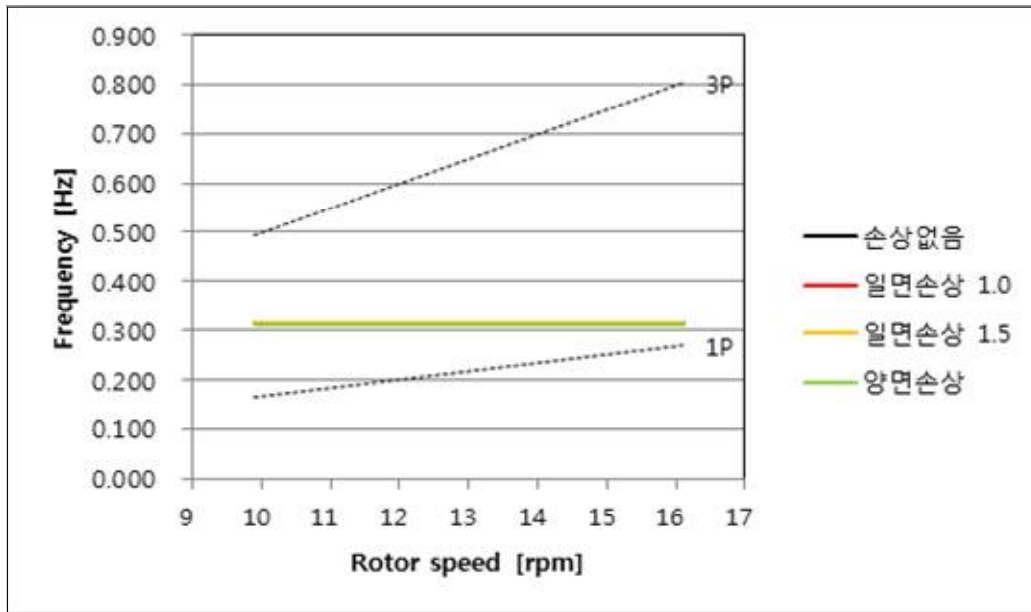


Fig. 34 초기결함 모델 Campbell Diagram

Table 4는 IEC 기준에 따라 공진회피 유무 검토를 위한 표이다. 로터 회전주파수 구간은 $9.9/60=0.165$ - $16.1/60=0.268$ 로 1P구간, 3를 곱하면 3P구간 주파수 $0.165*3=0.495$ - $0.268*3=0.804$ Hz 구해진다. 타워 고유주파수는 손상없음, 앵커링 측면 일면 손상상태(180°) 및 양면 손상상태(360°)에 대하여 표에 나타나 있다. 로터회전주파수 f_r 를 타워 1차 고유주파수 $f_{0,1}$ 로 나눈 값을 표에 나타낸 값 이다. 여기에서 값이 1 이면 두 주파수가 정확히 일치하는 값이다. IEC 기준에서는 공진을 회피하기 위해 안전율을 10%로 고려하고 있어 1P에 대해서는 0.90이하를 3P에 대해서는 1.10 이상을 기준으로 정하고 있다. 표에서 표시된 값 중 가장 근접한 경우는 값은 로터 회전주파수 16.1rpm일 경우 1P 주파수 값 $16.1\text{rpm}/60=0.268$ Hz를 양면손상일 경우의 타워 주파수값 0.3109Hz로 나눈 $0.268\text{Hz}/0.3109\text{Hz}=0.862$ 는 0.90이하로 기준을 만족한다. 따라서 전체 값이 IEC 기준 값을 만족하고 있다.

Table 4 초기결합 모델에 의한 IEC 기준 공진검토

Gearbox ratio				109.000				
Gen. Speed[rpm]				1,079.100		1,754.900		
Rot. Speed[rpm]				9.900		16.100		
Harmonic[Hz]				1P	3P	1P	3P	
				0.165	0.495	0.268	0.805	
Tower freq [Hz]	손상 없음			0.3154	0.523	1.569	0.850	2.552
	손상	일 면 손 상	0.5	0.3149	0.524	1.572	0.851	2.556
			1	0.3144	0.525	1.574	0.852	2.560
			1.5	0.3139	0.526	1.577	0.854	2.565
	양면 손상상태			0.3109	0.531	1.592	0.862	2.589
기 준				≤ 0.90	≥ 1.10	≤ 0.90	≥ 1.10	

공진회피 기준 : $fr/f_{0,1} \leq 0.90$ or $fr/f_{0,1} \geq 1.10$

fr : 로터 회전주파수,

f_{0,1} : 타워 1차 고유주파수

2) 결합진행 모델에 따른 공진분석

(1) 결합진행 모델링

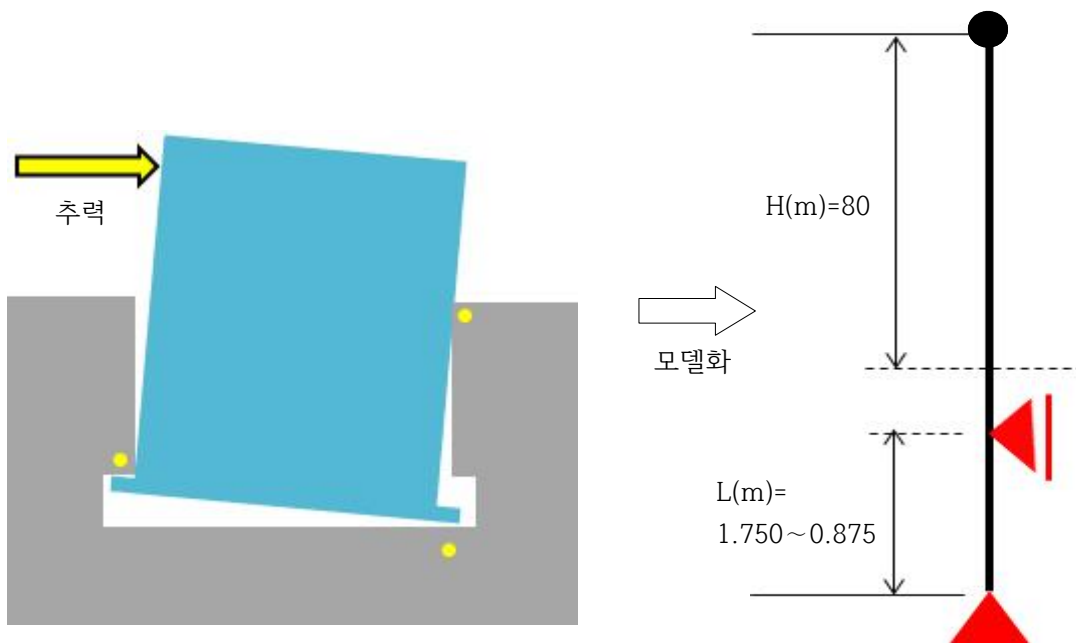
앵커링 형식의 접합부 기초의 지속적인 진동에 의하여 콘크리트 기초내부 앵커링 플랜지 상하부 및 타워측면부에 콘크리트 기초에 공극이 형성되어 진동이 심한 경우를 모델화 하였다.

풍력발전기가 운영 중 강한 추력을 받고 있으므로 하부 공극으로 인한 상하진동 좌우 진동은 긴급정지를 제외하고 전력 생산 시에는 추력에 의해 수직진동은 하지 않는다. 추력으로 인해 타워는 상부 콘크리트 한쪽 측면에서 구속되고 하부 플랜지도 콘크리트에 의해서 구속된다. Fig. 36(a)는 결합진행으로 콘크리트 공극과 타워 추력에 의해서 약간 회전하는 것을 과장하여 그림으로 나타 낸 것이다.

Fig. 35(b)는 타워를 Beam요소로 처리하고 타워하단은 Pin으로 타워측면 상단은 Roller로 가정하여 모델링 하였다. Vestas-3.0MW 풍력발전기 앵커링의 매입깊이 h=1.75 일 때 결합의 더욱 진행됨에 따라 콘크리트 상단부 Roller 지점이 점점 하부

로 이동하는 것으로 가정하여 지점 간격이 1.75m(h), 1.313m(3/4*h), 0.875m(1/2*h)로 지점 간격이 줄어드는 것으로 모델링 하였다.

초기 결함모델에서 타워의 Shell element를 Beam element로 변경하여 모델링 하였다. 따라서, 모델링 차이로 발생하는 약간의 주파수 차이는 Shell element의 손상 없음 상태를 기준으로 하여 각각의 주파수를 비례로 보정하여 동일 비교가 가능하도록 하였다.



(a) 하부공극 및 측면공극 발생으로 회전발생 (b) 결함진행 Beam 모델화

Fig. 35 결함진행 모델

(2) 결함진행 모델 해석결과

Table 5는 풍력발전기 기초 결함진행 모델링 해석결과 이다. 손상이 없는 경우를 0.3154Hz, 결함정도에 따라 상부 Roller 지점이 각각 1.75m, 1.316m, 0.875m인 경우로 각각의 주파수는 0.3011Hz, 0.2963Hz 및 0.2879Hz 이다.

여기에서 주파수변화는 손상이 전혀 없는 경우의 0.3154Hz에서 가장 손상이 심한 경우로 모델이 된 지점거리 0.875m인 경우 0.2879Hz로 주파수 감소는 -9.552%로 공극발생으로 상하진동이 발생하는 단계인 결함진행 모델의 경우는 타워의 고유주파수 변동이 약 10%정도 감소되어 타워와 콘크리트 이격발생 단계인 초기결함 모

텔이 1%와 비교하여 상당이 감소되는 것을 확인 할 수 있다.

Table 5 결함모델 별 고유주파수 비교

결함상태 구분			타워 고유주파수(Hz)	비 고
손상 없음(A)			0.3154	
결함진행 모델	지점 간 거리(m)	(B) 1.750	0.3011	-4.749%
		(C) 1.316	0.2963	-6.446%
		(D) 0.875	0.2879	-9.552%
	주파수 차이 (A/D)		-9.552%	감 소

(3) 결함진행 모델에 따른 공진분석

Fig. 36은 결함진행 모델 별 타워주파수와 발전기 회전주파수 사이의 관계를 보여주는 Campbell Diagram 이다. 결함정도가 정도가 심해짐에 따라 타워 고유주파수가 저주파수로 이동하므로 정격출력 시 16.1rpm/60=0.268Hz 결함발생 타워와 매우 근접 있음을 확인 할 수 있다.

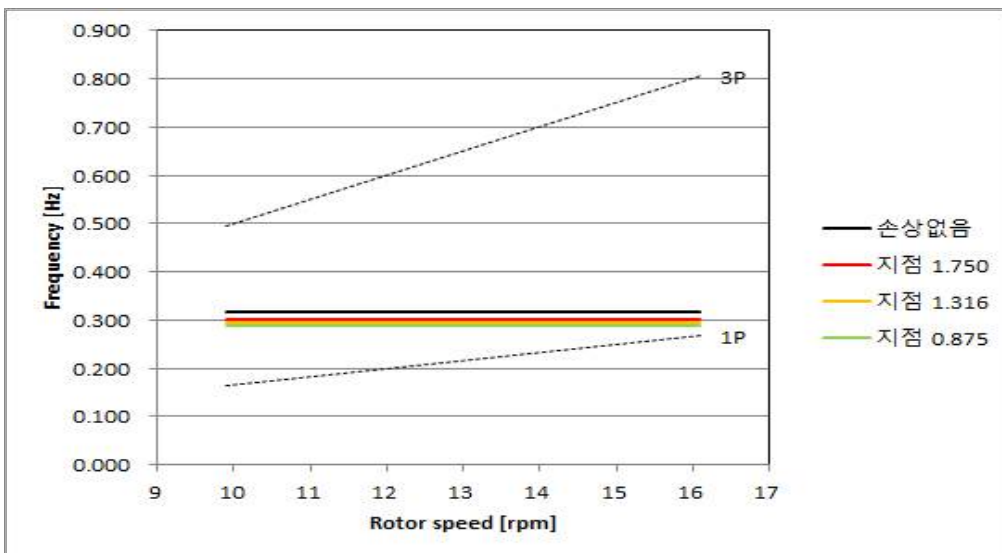


Fig. 36 결함진행 모델 별 Campbell Diagram

Table 6은 결합진행 모델에 의한 IEC 기준에 따라 공진검토를 검토한 결과이다. 표시된 값 중 가장 근접 한 경우는 값은 로터 회전주파수 16.1rpm일 경우 1P 주파수 값 $16.1\text{rpm}/60=0.268\text{ Hz}$ 를 상단부 Roller 지점이 접합부 손상으로 이동하여 지점 거리 0.875m인 경우 타워주파수 값 0.2879Hz로 $0.268\text{Hz}/0.2879\text{Hz}=0.932$ 는 0.90이상이므로 IEC 기준을 만족 시키지 못하며 공진영역에 매우 근접되어 있음을 확인할 수 있다.

Table 6 결합진행 모델에 의한 IEC 기준 공진검토

Gearbox ratio			109.000				
Gen. Speed[rpm]			1,079.100		1,754.900		
Rot. Speed[rpm]			9.900		16.100		
Harmonic[Hz]			1P	3P	1P	3P	
			0.165	0.495	0.268	0.805	
Tower freq [Hz]	손상 없음		0.3154	0.523	1.569	0.850	2.552
	지점 거리(m)	1.750	0.3011	0.548	1.644	0.891	2.673
		1.316	0.2963	0.557	1.671	0.906	2.717
		0.875	0.2879	0.573	1.719	0.932	2.796
기 준			≤ 0.90	≥ 1.10	≤ 0.90	≥ 1.10	

공진회피 기준 : $f_r/f_{0,1} \leq 0.90$ or $f_r/f_{0,1} \geq 1.10$

f_r : 로터 회전주파수, $f_{0,1}$: 타워 1차 고유주파수

2. 기초 보수보강 방법 및 보강에 따른 공진분석

1) 현 기초 보수보강 방법

풍력발전기 기초의 결함을 해결하는 방법에는 문제가 기초를 결함이 발생되기 이전상태로 복구하는 것을 보수라고 하며 이전 구조물보다 성능을 높이는 것을 보강이라 한다. 풍력기초 보수 보강법을 아래와 같이 그라우트 주입 보수법, 상부 플랜지 보강법 및 앵커볼트 접합부형식 변경 보강법으로 분류 하였다.

(1) 그라우트 주입 보수법

이 방법은 가장 일반적으로 많이 적용되는 방법이며 플랜지하부 콘크리트가 충분한 전단저항 성능이 있을 경우 적용하는 것이 합리적이다. 타워의 반복하중에 의한 콘크리트 침식, 물의 유입 인한 팽창작용에 따른 타워와 콘크리트간의 공극을 보수하는 방법이다. 먼저, Fig. 37(a)는 타워 내부 및 외부에 천공위치를 보여준다. Fig. 37(b)는 하부플랜지까지 천공한 기초단면을 보여준다. 그라우트를 기초하부에 주입하여 결합으로 생긴 공극을 메워 결합 이전상태로 복구시키는 방법이다.

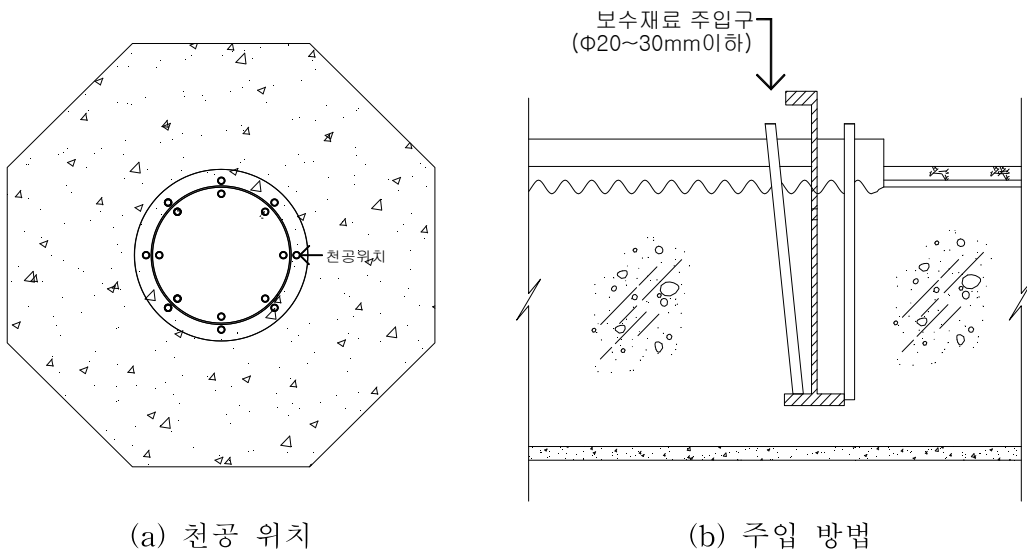


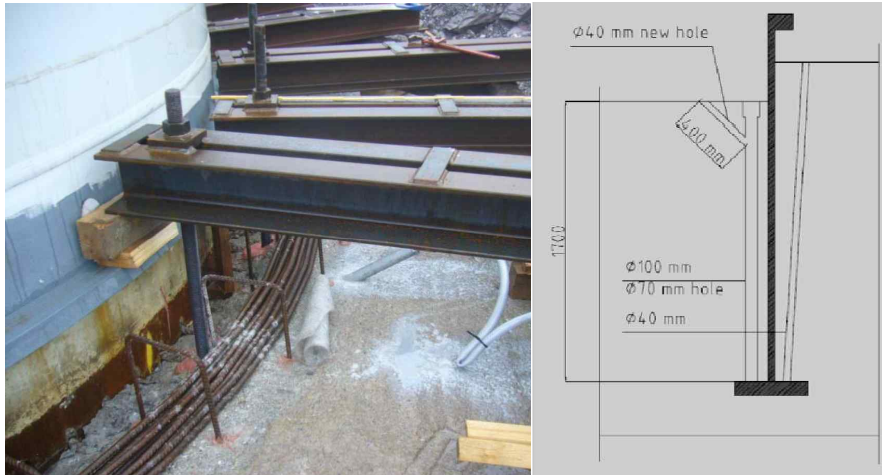
Fig. 37 그라우트 주입 보수법[3]

(2) 상부플랜지 보강법

이 보강 방법은 앵커플랜지 하부콘크리트 전단저항 성능이 설계적으로는 부족하나 전단파괴가 발생하지 않은 경우에 적용하는 것이 합리적이다. 영국의 한 풍력단지에서 기초결합 보강방법으로 적용 하였던 방법이다[20]. 그라우트 주입 보수법으로 기초와 타워간의 이격이 증진 하고 추가로 상부플랜지를 보강하여 타워의 추가 압축력을 받도록 한다. 인장력은 단일플랜지 형식과 마찬가지로 하부플랜지가 동일하게 받는 개념이다.

보강 순서를 보면 먼저 타워에 상부플랜지를 타워에 용접 접합한다. Fig. 38은 플

랜지를 이용하여 그라우트 주입 및 양생하는 동안 수직 움직임을 앵커볼트와 철골 보로 구속시킨 것을 보여준다. 타워 내부 및 외부에 구멍을 뚫고 에폭시를 주입 후 양생 시킨 다음 상부플랜지와 하부콘크리트 사이에는 추가로 콘크리트를 타설하여 플랜지가 압축력을 받게 한다.



(a) 타워고정 (b) 타워 내부 외부 에폭시 주입

Fig. 38 타워고정 및 그라우트 주입[20]

2) 앵커볼트 접합부형식 변경 보강방법

앵커플랜지 하부의 콘크리트 기초가 전단파괴가 발생 되었을 경우에 이 논문에서 제안하는 접합부 보강방법 이다. 만약, 앞에서 유럽 및 국내결함 사례에서 플랜지 하부에 전단균열이 발생된 경우를 소개 하였다. 전단파괴가 발생되었을 경우 위에서 기술한 보수 보강방법에 의해 그라우트를 주입시킬 경우 하부균열을 통해 외부로 그라우트가 누출되고 기초하부 전단균열에 대한 근본적인 보수 방법으로 한계가 있다.

따라서, 제안된 보강 방법은 기초 외부에서 타워접합부 별도로 만들어 인장력을 받는 앵커볼트에 접합하여 보강하는 방법이다. 이 보강방법은 타워하부 일부를 강재로 보강하기 때문에 타워의 주파수 변화도 동시에 검토 되어야 한다. 또한, 이방법은 풍력발전기 기초 보강방법으로는 적용한 사례는 아직 없지만 이미 다른 기초에는 적용된 사례가 많이 있다.

풍력발전기는 바람에 의한 강한 추력으로 인하여, 타워와 기초 접합부에 매우 높은 하중을 가한다. 압축력은 콘크리트가 저항하기 때문에 문제가 없지만 인장저항에 필요한 앵커볼트가 필요하다. Fig. 39는 산업계에서 사용되고 있는 앵커볼트를 높은 인장성능의 앵커볼트를 보여준다. 문헌[19]에 의하면 실제로 앵커볼트는 직경 D63.5mm의 경우 항복하중 2,122kN, 극한하중 2,534kN까지도 가능하다.

타워접합부의 극한하중 및 피로하중에 대한 구체적인 설계방법은 이 논문의 범위를 넘기 때문에 언급 하지는 않는다. 하지만, 이러한 방법이 적용하기 위해서는 먼저 구조 동역학적인 관점에서 타워 보강으로 인한 주파수변화로 인해 발전기와 공진검토가 선행 되어져야 한다.

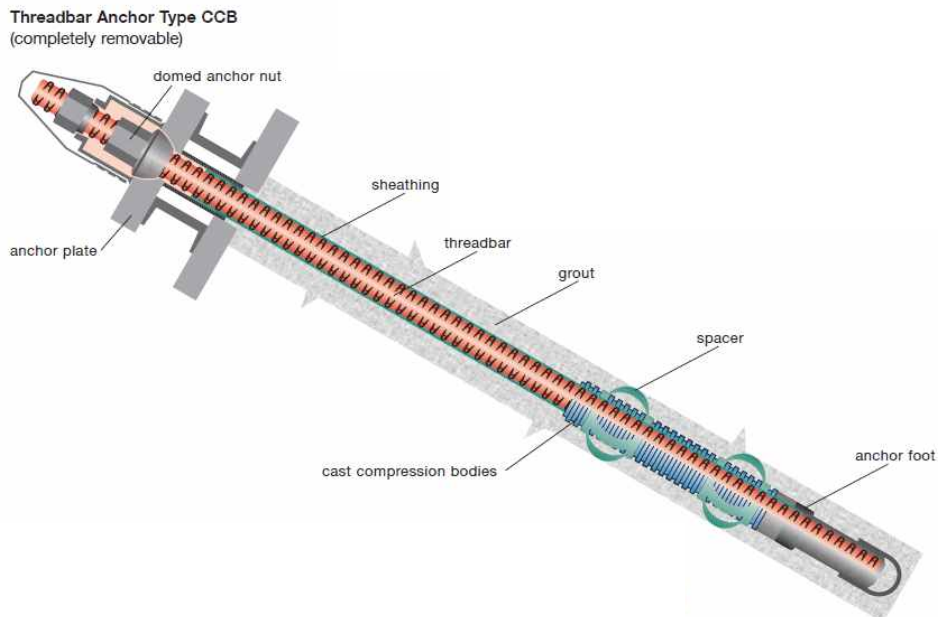


Fig. 39 높은 인장력이 필요할 때 사용하는 앵커볼트[19]

Fig. 40(a)는 교통시설물 형식과 같은 풍력타워 접합부 보강방법 개념을 보여준다. 신호등 기초 접합부 형태와 같은 간단한 개념이다. Fig. 40(b)는 베이스플레이트와 스틱프너로 보강된 타워에 앵커볼트가 접합된 형태다. 먼저 풍력타워를 두께 50mm Base Plate를 원형폭 500mm로 용접한 후 스틱프너 두께 32mm 폭 500mm 높이 500mm 직각삼각형 모양 32ea를 수직으로 용접한다. 따라서 타워하부 550mm를 보강 하였다. 콘크리트와 경계조건은 고정지점으로 회전강성과 수직강성을 모두

구속하였다. Fig. 40(c)는 스티프너보강 및 상부 1m를 접합부 형성 강성 증가효과 반영을 위해 10×Es를 적용한 모델이다. Fig. 40(d)는 마찬가지로 접합부 형성 및 별도 기초설치 효과를 나타내기 위해 타워하단부 1.5m 강성을 10배 증가시킨 10×Es를 적용시킨 모델이다.

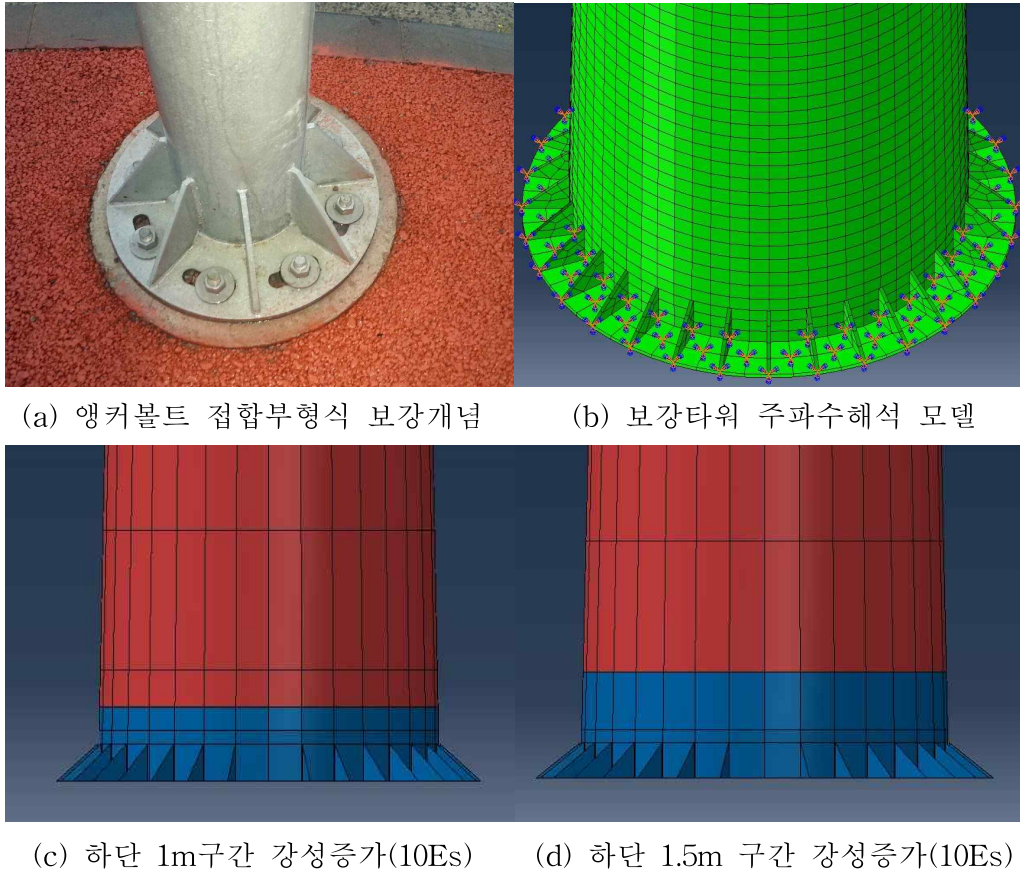


Fig. 40 앵커볼트 접합부형식 보강개념 및 보강방법

3) 앵커볼트 접합부형식 변경 보강방법에 따른 공진분석

그라우트 주입 보수법과 상부플랜지 보강법은 타워강성을 증가되지 않아 타워 주파수변화를 기대하기는 어렵다.

Fig. 41은 타워보강 전후 Campbell Diagram을 보여준다. 접합부 결함이 없어 손상이 없는 상태, 앵커볼트 형식으로 보강한 경우, 추가로 타워 하부 1m 구간를 강성 10배를 증가시킨 경우 및 1.5m 구간를 강성 10배를 증가시킨 경우로 구분하여 타워주파수를 분석한 결과를 보여주고 있다.

각각의 보강모델 1, 2, 3에 대하여 타워주파수 변화는 손상이 없는 콘크리트 기초 접합부와 비교하여 각각 0.4%~1.7% 정도로 차이가 거의 없음을 확인할 수 있다. 하지만, 결함진행 모델과 비교하면 주파수는 11.23% 증가한다.

1P 영역 및 3P 영역 모두 공진과 거의 무관하며 만약 타워보강 영역을 확대하여 강성을 증가시키면 현재 고유주파수가 1P 영역에 근접하고 있어 공진회피에 유리한 효과가 있음을 알 수 있다. 따라서, 타워하부 강재보강이 동역학적 개념에서 설계 제약이 없으므로 콘크리트와 타워간 다양한 접합부를 설계할 수 있어 많은 해결책이 존재함을 알 수 있다.

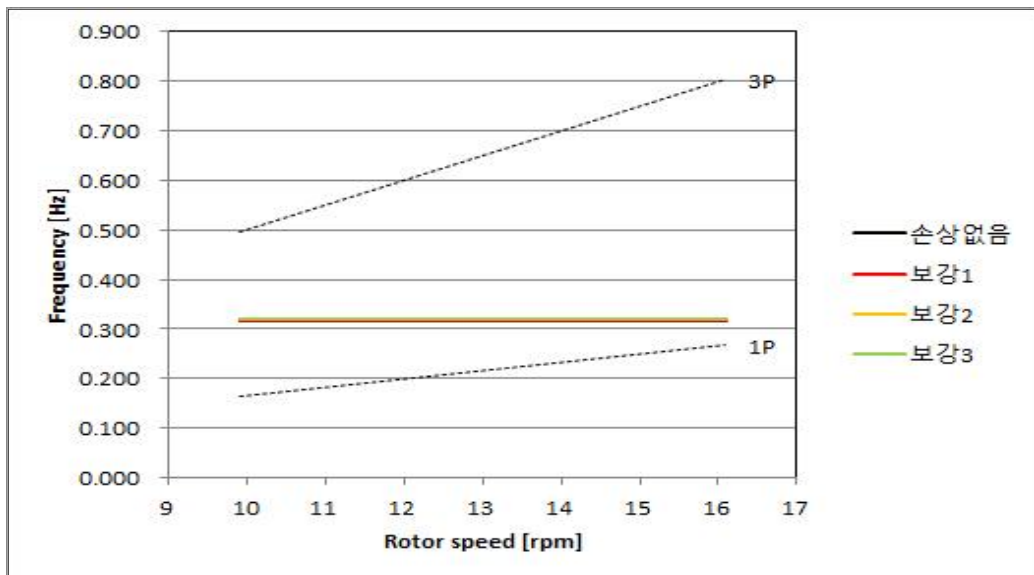


Fig. 41 타워보강 전후 Campbell Diagram

Table 7은 타워보강에 따른 IEC 기준 공진검토를 시행한 결과이다. IEC 기준상 결합진행 모델에서는 기준을 만족시키지 못하고 있었으나 타워보강으로 인한 고주파수 효과로 기준을 만족하고 있는 것을 확인 할 수 있다.

Table 7 타워보강에 따른 IEC 기준 공진검토

Gearbox ratio			109.000			
Gen. Speed[rpm]			1,079.100		1,754.900	
Rot. Speed[rpm]			9.900		16.100	
Harmonic[Hz]			1P	3P	1P	3P
			0.165	0.495	0.268	0.805
Tower freq [Hz]	손상 없음	0.3154	0.523	1.569	0.850	2.552
	보강 case1	0.3168	0.521	1.563	0.845	2.541
	보강 case2	0.3197	0.516	1.548	0.838	2.518
	보강 case3	0.3207	0.515	1.544	0.836	2.510
	기 준			≤0.90	≥1.10	≤0.90

공진회피 기준 : $fr/f_{0,1} \leq 0.90$ or $fr/f_{0,1} \geq 1.10$

fr : 로터 회전주파수,

f_{0,1} : 타워 1차 고유주파수

3. 기초 결합 및 보강에 따른 공진분석 결과

1) 개 요

이제까지 기초결합 모델은 초기결합 모델, 결합진행 모델로 보강모델은 앵커볼트 접합부형식 변경 보강방법으로 주파수 분석을 시행하여 공진 가능여부를 분석하였다. 이중에서 각각의 손상 모델 중 손상이 가장 심한 경우와 보강방법에서 가장 강성이 증가된 경우 각각에 대하여 Campbell Diagram을 작성하여 분석하였다.

2) 각 Case 별 주파수 변화에 따른 공진분석

Table 8은 결함모델 및 보강모델 고유주파수를 비교한 것을 보여준다. 기초결함 및 앵커볼트 접합부형식 보강에 따른 공진분석 결과 최초 결함이 없는 기초를 기준으로 앵커링 접합부 초기결함 모델, 결함진행 모델 및 앵커볼트 접합부형식 변경 모델 중 강성을 1.5m까지 증가시킨 한 case를 비교하면 다음과 같이 분석된다.

초기결함 모델 중 앵커링이 콘크리트와 전측면(360°)에서 이격이 발생하는 경우는 주파수는 -1.014% 감소되고 계속적인 진동으로 기초 내 공극이 발생된 경우 결함진행 모델로서 주파수는 -9.552% 감소하였다. 다시 앵커볼트 접합부 형식변경으로 보강한 접합부는 결함이 없는 기초와 비교하여 +1.681% 증가 하였으며 결함진행 모델 대비 11.233% 증가 하였다.

Fig. 42는 결함모델 별 및 보강모델 Campbell Diagram 이다. 타워는 전체적으로 3P 영역보다 1P 영역에 근접하여 Soft-stiff구간 내에서 경제적으로 설계되어 있다. 지속적인 결함진행에 따른 주파수 감소는 1P 공진영역으로 접근하고 기초 접합부 보강은 주파수 증가효과로 1P영역에서 멀어져 공진회피에 유리한 것을 확인 할 수 있다. 따라서, 만약 앵커링형식 접합부가 콘크리트 하부에 전단균열이 발생하여 현재의 보강방법으로 어려울 경우 앵커볼트 접합부형식 변경 보강방법 또는 철골과 콘크리트를 합성한 별도의 추가 기초설치 등 다양한 해결책이 존재할 수 있다.

Table 8 결함모델 및 보강모델 고유주파수 비교

구 분	타워 고유 주파수(Hz)	주파수 증 감	비 고
손상없음 모델	0.3154	기 준	
초기결함 모델	0.3011	-1.014%	
결함진행 모델	0.2963	-9.552%	
접합부 보강모델	0.3207	+1.680%	

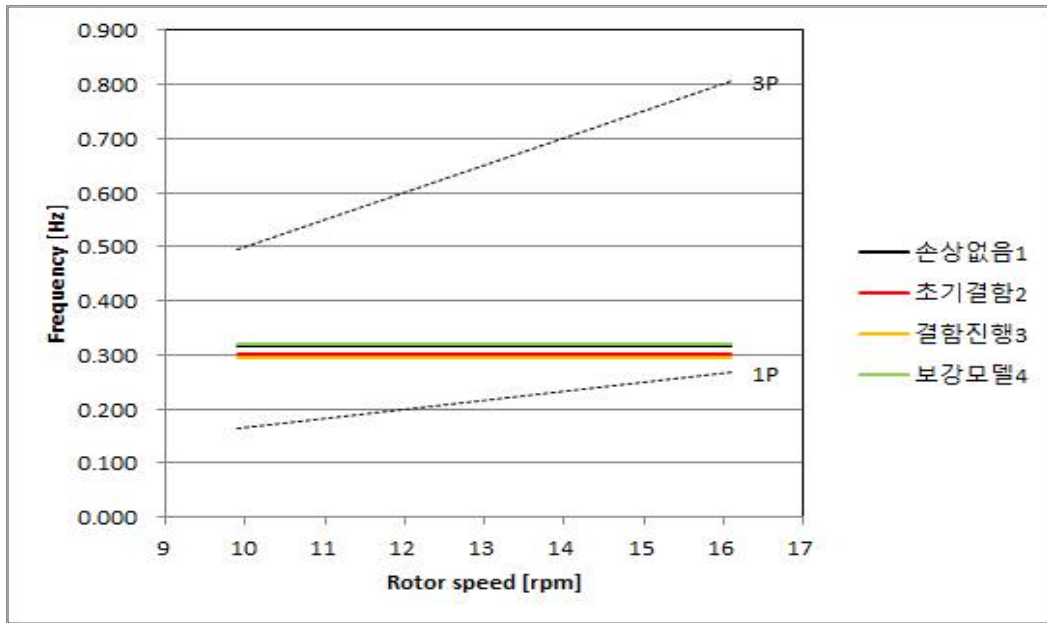


Fig. 42 결함모델 별 및 보강모델 Campbell Diagram

V. 결 론

이 연구에서는 먼저 육상 풍력기초 결함원인을 문헌조사를 통해 알아 보았다. 또한, 실제 문제가 발생한 Vestas 3MW 풍력발전기의 기초 접합부 결함을 Abaqus 프로그램으로 모델링하여 결함에 따른 주파수변화 및 보강에 따른 주파수변화를 분석 하였다. 그 결과 다음과 같은 주요 결론을 얻을 수 있었다.

첫 째, 결함의 빈도수 및 유지 보수 비용의 용이성 등으로 판단할 때, 풍력발전기 타워와 기초의 접합부 형식은 앵커볼트 형식을 적용하는 것이 앵커링 형식을 적용하는 것보다 적절할 것으로 생각된다.

둘 째, 앵커링 형식의 현재 보수보강 방법인 그라우트 주입법 및 상부플랜지 보강법은 앵커링 플랜지 하부 콘크리트에 전단파괴가 발생할 경우에는 보수보강이 어렵다. 이와 같은 결점을 보완하기 위해 타워 하단부에 별도 접합부를 형성하여 앵커볼트 접합부 변경 보강방법을 제안 하였다.

세 째, 결함모델을 선정하고 고유치해석을 통하여 결함 시 주파수 변화가 공진영역으로 진행 하는 것을 확인 하였다. 이 연구에서 제안된 접합부 보강방법을 적용 시 결함에 따른 저주파수 효과를 회복하고 공진회피에 유리한 방향으로 주파수가 이동함을 확인 할 수 있었다.

네 째, 풍력발전기 타워 하단부 접합부 보강영역을 모델링하여 이 접합부에 강성을 10배 까지 높여도 접합부에 결함이 발생하지 않은 경우의 타워주파수와 비교하여 변화가 거의 없음을 확인 하였다.

참고문헌

- [1] EPRI, Onshore Wind Foundation Management : “Risk Mitigation, Maintenance, Inspection, and Repair Guidelines”, Technical Report, 2014.
- [2] CJ crabtree, Y Feng, PJ Tavner : “Detecting Incipient Wind Turbine Gearbox Failure : A Signal Analysis Method for On-line Condition Monitoring”, EWEC, 2010.
- [3] 풍력 기초구조물 정밀안전진단 보고서, 2013.
- [4] Phil de Villiers : “Carbon Trust Offshore Wind Accelerator New Inovative Foundations Concepts For Deep Water”, Jeju Island, 2012.
- [5] Phil de Villiers : “Carbon Trust Offshore Wind Accelerator Driving Down The Cost of Offshore Wind”, PPT materials, Hamburg, 2014.
- [6] Takao MADEA : “Wind Energy and Industry Status in Japan”, Korea Wind Energy Association Spring Conference, 2014.
- [7] <http://www.toryaardvark.com/>
- [8] Henrik Svensson : “Design of Foundations for Wind Turbines”, Master Thesis, LUND University, 2010.
- [9] <http://www.altenergymag.com/emagazine/2010/04/in-support-of-wind-energy-the-foundations-that-underlie-wind-projects/1478>
- [10] Vugts, JH : “Considerations on The Dynamics of Support Structures for an OWEC Section Offshore Technology”, Delft University of Technology, 2000.
- [11] Jan van der Tempel and David-Pieter Molenaar : “Wind Turbine Structural Dynamics-A Review of the Principles for Modern Power Generation, Onshore and Offshore. Wind Engineering Volume, No.4, 2002.
- [12] 송명관, 양민수, 박도현, 전중호 역 : “풍력발전설비 지지구조물 설계지침·동해설”, 씨·아이·알, 2013.
- [13] VESTAS Wind Systems A/S : “Standard Foundation for Wind Turbine (V80/2.0MW-76.3M Tube Tower) Groudwater Level at Terrain Drawing Description”, 2004.

- [14] Manouchehr Hassanzadeh, : “Cracks in Onshore Wind Power Foundations”, 2012.
- [15] Pekka Maunu : “Design of Wind Turbine Foundation Slabs”, Master Thesis, Lulea University of Technology, 2008.
- [16] <http://www.altenergymag.com/emagazine/2010/04/in-support-of-wind-energy-the-foundations-that-underlie-wind-projects/1478>.
- [17] Takeshi Ishihara : “An Analysis of Damaged Wind Turbines by Typhoon Maemi in 2003”, The Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (APCWE-VI), Seoul, Korea, 2005.
- [18] Magnus Currie, Christos Tachtatzis, Mohamed Saafi, Francis Quail, : “Structural Health Monitoring for Wind Turbine Foundations”, 2013.
- [19] DSI-DYWIDAG_Geotechnical_Product_Range_en_01.pdf.
- [20] Francesco Miceli : “Wind Turbine Foundation Remedial Work”, 2012.