

## 해상 풍력 타워에 관한 자동요소 생성법

김남형<sup>1,†</sup> · 강현진<sup>2</sup>

<sup>1</sup>제주대학교 해양과학대학 토목공학과

<sup>2</sup>제주대학교 대학원 풍력특성화협동과정

## Automatic Mesh Generation Method on The Offshore Wind Tower

Namhyeong Kim<sup>1,†</sup> and Hyunjin Kang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil engineering, Jeju National University, Korea

<sup>2</sup>Graduate school of specialized wind energy, Jeju National University, Korea

### 요 약

더욱 정확한 수치 해석이 필요하면 할수록, 해석하고자 하는 구조물 상의 절점과 요소를 적절하게 배치하는 것이 중요하게 된다. 본 연구에서는 천해영역에서 구조적인 이점과 경제성의 두 가지 장점을 가지고 있는 원형 단면의 하부 구조물에 대한 3차원 삼각 Shell 요소 생성기법을 개발하였다. 높이와 형태와 같은 상세한 데이터를 입력하여 제어하는 것에 의해 기초와 타워를 다양한 유한요소 조건에서 고려할 수 있도록 하였다. 또한 기존의 3차원 Delaunay 삼각요소분할법을 사용한 결과의 수치와 비교, 검증하였으며, 현재 제안되어진 기초와 하부구조물에 적용한 요소 분할의 예를 들었다. 본 연구의 결과는 현존하거나 제안되어진 풍력 터빈의 기초부와 타워의 제원에 대해 다양하게 적용될 수 있을 것이라 사료된다.

**Abstract** – The more accurate numerical analysis is needed, The more important to arrange nodes and elements properly on the structures wanted to be analyzed. In this study, automatic mesh generation method is developed for triangular mesh modeling in wind tower and substructure formed in circular sections especially, which have structural and economical benefits in shallow water area. It can consider variety conditions by inputting the detail data such as height and types. Also, this study includes the comparison and verification with the mesh generation by Delaunay triangular technique on 3 dimensional space and the examples of mesh generation for proposed tower and substructure. The result of this study will be widely applied to analyze the existing and proposed models for wind turbines.

**Keywords:** Offshore wind power(해상풍력), Wind turbine substructure(풍력 터빈 하부구조물), 3 dimensional triangular mesh generation(3차원 삼각형 요소 생성), Finite elements(유한요소)

### 1. 서 론

최근에는 자원고갈과 기존의 화력 발전방식에서 발생하는 환경 오염, 온실효과에 의한 여러 가지 문제점들로 인해 풍력, 파력, 조력, 태양열 등을 이용한 친환경 신재생에너지에 대한 연구와 개발이 많이 이루어지고 있다.

신재생에너지의 한 종류인 풍력은 이산화탄소를 발생시키지 않는 무공해 에너지원으로써 주로 육상풍력발전과 해상풍력발전의 두 갈래로 나뉘는데, 풍력 발전기의 발전량에 있어서 가장 중요한 요

인인 풍황 자원은 육상보다는 주로 해상에서 좋은 관측값을 보이고 있으며, 풍력 발전 터빈의 대형화, 단지화로 인한 설치 장소의 확보, 전자파, 소음 문제 등의 이유로 점차 육상보다는 해상 풍력 발전으로 무게의 중심이 이동되고 있으며, 세계 각국에서 다양한 연구가 이루어지고 있는 추세이다(Byrne & Houlby[2003]).

해상 풍력 발전을 위해 사용되어지는 하부 구조물에 대한 영향을 알기 위해서 수치해석을 수행할 경우 해석하고자 하는 영역에 적절하게 절점과 요소를 배치하여 모의하는 것이 필요하다. 타워와 기초구조물은 파랑이나 해류의 힘을 되도록 적게 받는 구조적인 이점을 취하기 위해, 또한 천해영역에서의 시공 방법에 따른 경제적인 이득을 취하기 위해 단면의 형태가 원형인 것이 많이 사용되고 있다.

<sup>†</sup>Corresponding author: nhkim@jejunu.ac.kr

해상타워 해석의 전처리 과정의 하나인 삼각형 요소 작성기법에 대해서는 국내 및 해외의 수많은 연구자들에 의해 다양한 연구가 수행되었다(Shimada[1993], Yamasita *et al.*[2001], Kim *et al.*[2010]). 2차원 영역에서의 삼각형 요소 작도의 경우에는 절점의 번호를 재배열하고 Delaunay의 삼각기법을 이용하여 격자를 나눈 후, Laplace 보간을 수행함으로써 보다 좋은 삼각형을 얻을 수 있었으나, 3차원 영역에서는 Delaunay의 삼각기법을 적용할 경우에는 요철(凹凸)이 있는 경계층에서의 영역 내·외부 판정을 추가로 수행하여 불필요한 요소를 제거하는 과정이 필요하다.

풍력 터빈 하부 구조물의 경우 폭 방향보다 높이 방향의 치수가 크기 때문에 요소 분할 시 주의를 기울여야 한다. 높이 방향의 요소 밀도가 작아진다면 실제보다 강성이 더 딱딱해질 수 있으며 세 장비 역시 중요한 고려 대상이 된다(Son *et al.*[2010]). 따라서 본 연구에서는 원형 단면을 갖는 하부 구조물을 데이터를 제어하는 것에 의해 해석 영역에 밀도를 부여하여 3차원 삼각형 요소로 분할할 수 있는 기법을 개발하였다.

## 2. 삼각형 요소 생성 기법

풍력터빈의 타워와 기초구조물에 경계작용소  $\partial$ 를 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S = \partial V \tag{1}$$

$$L = \partial S \tag{2}$$

여기서, 식 (1)의  $V$ 는 구조물의 체적,  $S$ 는 구조물의 경계면, 식 (2)의  $L$ 은 경계면을 이루는 주위(周圍)이다. 주위  $L$ 을  $m$ 개의 선분의 합으로 나타내고, 원주를 따라  $m$ 개의 절점을 놓는 것으로 식 (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다(Fig. 1).

$$L = \sum_{i=1}^m \{l(i)\} \tag{3}$$

$$\partial\{l(i)\} = \{P(i), P(i+1)\} \tag{4}$$

여기서,  $l$ 은 구간으로 나누어 놓은 작은 선분,  $P(i)$ 와  $P(i+1)$ 은 각기

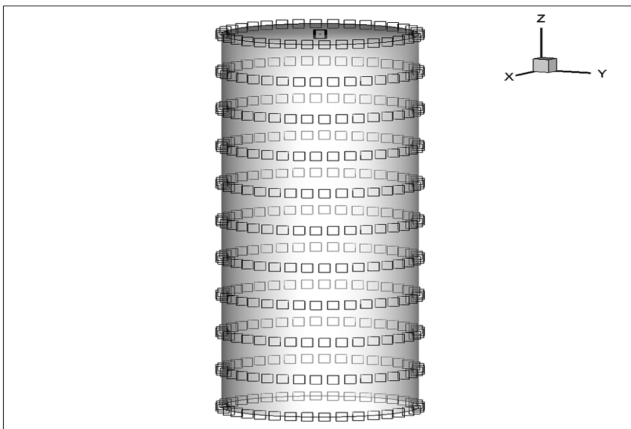


Fig. 1. Nodes arrangement in offshore wind tower.

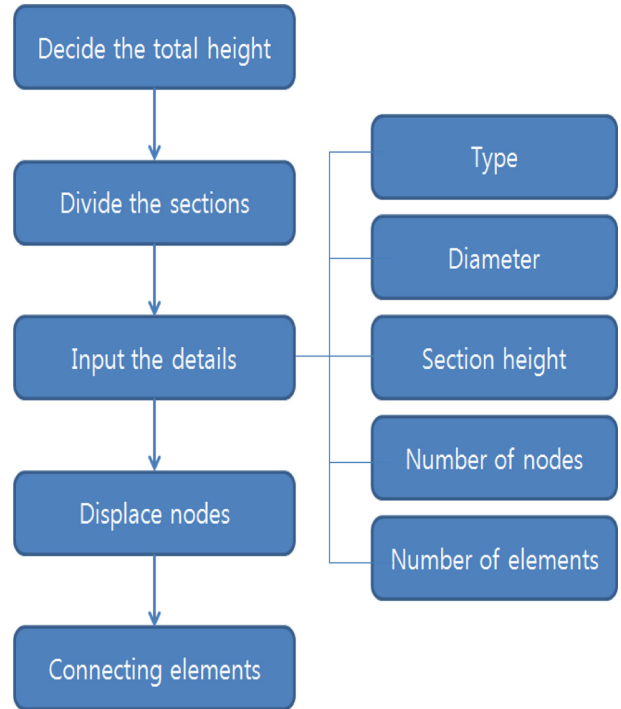


Fig. 2. Flow chart of mesh generation.

작은 선분  $l$ 의 시작점과 끝점이다.

삼각형 요소를 생성하기 위한 과정은, 우선 대상으로 하는 구조물의 총 높이와 대상영역을 세분화한 각 영역의 원하는 형상과 높이, 절점 수, 요소 층의 수, 직경과 같은 세부적인 정보를 입력한다(Fig. 2). 각 영역에서의 정보가 입력되면 식 (5-7)과 같이 반지름과 정현 및 역현을 이용하여 타워의 경계면상의 주위에 절점을 지정한 수까지 동일한 각도로 할당하여 배치한다.

$$X(i)_{P(i)} = \frac{D}{2} \times \left( \cos\left(\frac{360}{P(m)}\right) + \cos\left(\frac{360}{P(m)}\right) \times \frac{K-1}{2} \right) \tag{5}$$

$$Y(i)_{P(i)} = \frac{D}{2} \times \left( \sin\left(\frac{360}{P(m)}\right) + \sin\left(\frac{360}{P(m)}\right) \times \frac{K-1}{2} \right) \tag{6}$$

$$Z(i)_{P(i)} = \frac{H_s}{E_s} \times (K-1) \tag{7}$$

유한요소법에서는 삼각형 Shell 요소의 형태가 정삼각형에 가까울수록 정도(精度)가 높기 때문에 첫 번째 요소 층에서의 절점 배치 이후로는 각 절점의  $X(i)$ ,  $Y(i)$  값에 바로 이전 층 같은 번호의 절점에서 할당받은 각도의 1/2씩 더 진행하게 하여 배치한다. 여기서  $X(i)$ ,  $Y(i)$ ,  $Z(i)$ 는 각각  $P(i)$ 번째 절점의  $x$ 좌표,  $y$ 좌표,  $z$ 좌표의 값,  $D$ 는 지정한 영역의 직경,  $P(m)$ 은 한 요소 층을 이루는 절점군의 마지막 절점,  $K$ 는 요소 층의 번호,  $H_s$ 는 대상영역의 높이,  $E_s$ 는 대상영역의 총 요소 층 개수이다. 단, 상단과 하단의 연결부에서 요소의 개수가 2배 이상 차이 나는 경우에는 바로 이전 요소 층에서의 각도 값을 그대로 받아서 사용한다. 원하는 형상을 만들기 위한 절

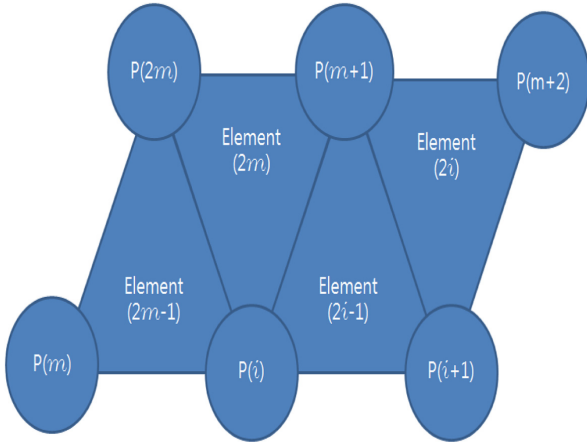


Fig. 3. Connection of nodes for elements.

점의 배치가 이루어지면 식 (8)을 만족시키기 위해 식 (9)를 이용하여 Fig. 3과 같이 절점  $P(i)$ 에서  $P(m)$ 까지 가장 가까운 곳에 있는 세 점을 이어 삼각형 Shell 요소를 생성한다.

$$S = \sum_{i=1}^k S(i) \tag{8}$$

$$\partial\{s(i)\} = l \tag{9}$$

여기서  $s(i)$ 는 표면을 이루는 작은 면,  $l$ 은 면을 구성하는 작은 선분이다.

한 영역에서의 절점은 어떠한 수가 입력되더라도 서로 대응될 수 있으나, 절점 사이의 각도가 너무 크게 입력된 경우에는 원의 곡면을 제대로 구현하지 못하며, 또한 해석하려는 두 영역이 서로 만나는 부분에서 절점간의 구성이 서로 맞지 않으면 삼각형의 한 내각이 극단적으로 크거나 작은 각도를 가진 삼각형 요소를 생성하게 된다. 따라서 보다 해석의 정도가 높은 3차원 삼각 Shell 유한요소해석을 하기 위해서는 각 영역별로 동일한 개수의 절점이나, 상부, 하부층에서의 각도를 두 배의 차이가 나도록 배치하는 것이 가장 이상적이며 경우에 따라 급격히 조밀한 요소로 영역을 해석해야 하는 경우에는 상, 하단 경계층의 사이에서 두 배의 값을 갖는 완충선을 놓아 요소를 매끄럽게 구성한다(Fig. 4).

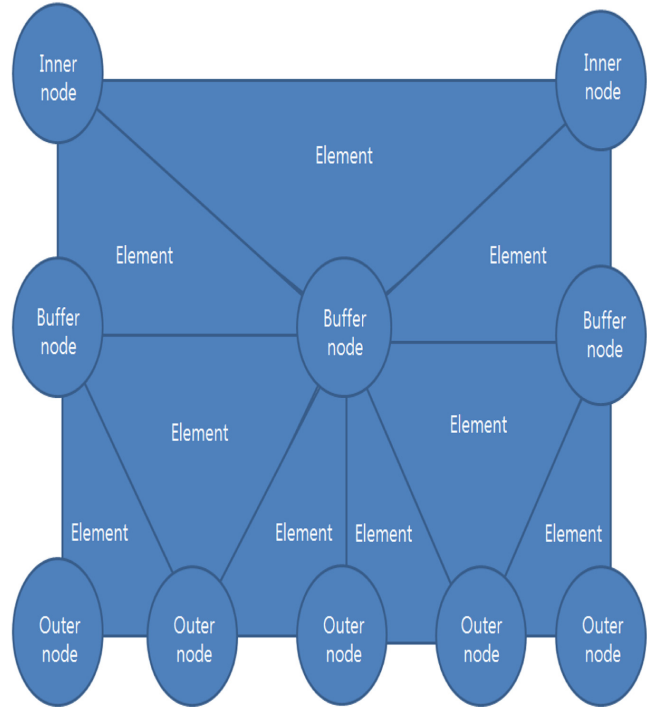


Fig. 4. Arrangement of buffer line between inner and outer nodes.

### 3. 수치의 검증 및 고찰

Table 1은 동일한 절점조건으로 배치되어 있는 원통형(cylinder)과 원추형(cone), 계단형(stair-type)의 요소에 관해서 각각 Delaunay 삼각분할기법을 이용하여 3차원 유한요소법을 위한 자동요소분할 프로그램을 개발한 Taniguchi Takeo와 Moriwaki Kiyooki[2006]의 결과와 비교하였다.

Delaunay의 삼각분할기법이란 국소적인 최소각 최대원리에 근거한다. 이 방법은 절점에 의해 정삼각형에 가까운 형태로 삼각형을 분할하는 것으로 경계의 생성과 내부의 절점에 의한 삼각분할로 구분할 수 있다(Sloan[1987]). 초기에는 각 절점이 인접한 모든 절점에 대응되도록 연결되나, 높이마다  $X-Y$  평면에서의 경계를 이루는 경계 절점 설정 후 내부의 절점을 소거하고, 절점 번호를 재배열하여 반시계 방향과 시계 방향으로 각각 읽음으로서 반시계 방향으로 읽히는 절점구성은 내부 영역으로 판단하여 요소를 생성시키고, 시계 방향으로 읽히는 절점 구성은 경계면 외부의 영역으로 판

Table 1. Comparison of the result of Taniguchi Takeo, Moriwaki kiyooki[2006] with current method in the same nodes arrangement

		Taniguchi Takeo, Moriwaki kiyooki [2006]			Current method		
Height		20 m	40 m	60 m	20 m	40 m	60 m
cylinder	nodes	864	1512	2232	864	1512	2232
	elements	2419	5966	8978	1512	2952	4392
cone	nodes	864	1512	2232	864	1512	2232
	elements	2581	5882	8975	1512	2952	4392
stair-type	nodes	864	1584	2304	864	1584	2304
	elements	3817	7671	11500	1656	3096	4536

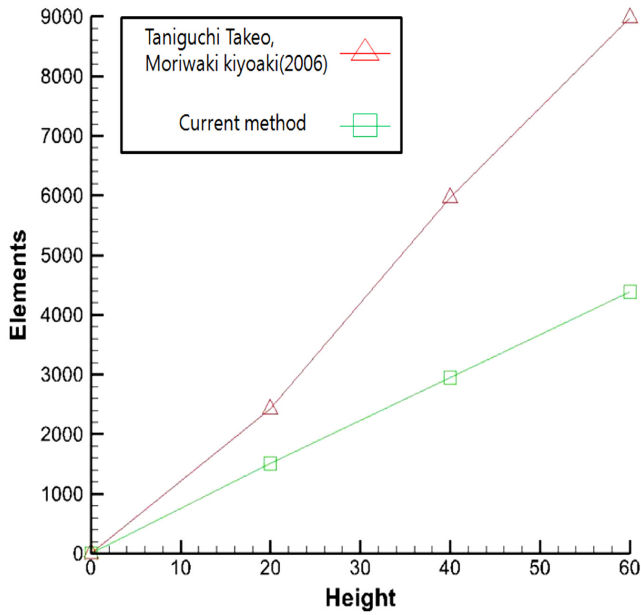


Fig. 5. Number of elements comparison with both methods in cylinder by cylinder height.

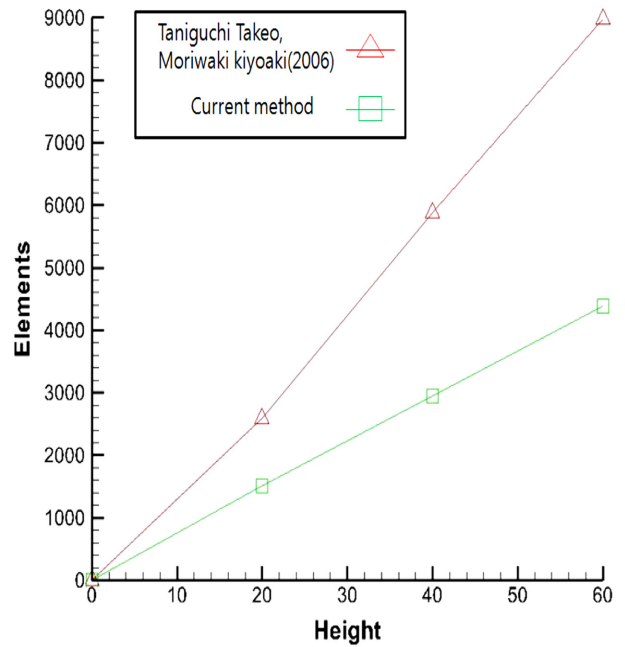


Fig. 7. Number of Elements comparison with both methods in cone by cone height.

단하여 생성된 요소들을 제거한다.

Fig. 5는 원통(cylinder)형 직립원주 구조물의 높이 변화에 따라 생성되는 요소 숫자의 변화를 비교한 것이다. 구조물 표면에서의 삼각형 Shell 요소를 생성하기 위하여 Delaunay의 삼각분할을 사용할 경우, 원통형 구조물의 높이가 높아져 감에 따라 원하는 영역의 요소 분할을 위한 연산 과정에서 결과물을 가시화했을 때 기하학적으로 표현이 불가능한 숨겨진 요소가 많이 발생하며, 특히 20 m-40 m 구간에서 큰 폭으로 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 구조물의 높이가 각각 20 m, 40 m, 60 m일 때 생성되는 요소의 형상을 나타낸다. Delaunay의 삼각분할의 경우, (a)에서 삼각형의 형상비가 좋지 못한 요소가 생성되는 영역이 있음을 확인할 수 있으며, (b)와 (c)에서는 가로 경계가 아닌 세로 경계로 나눔으로서 삼각형의 형상비가 좋지 못한 삼각형 요소를 생성하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 상부로 갈수록 직경이 줄어드는 원추(cone)형 구조물의 높이 변화에 따라 생성되는 요소 수의 비교이다. 원통형의 경우와

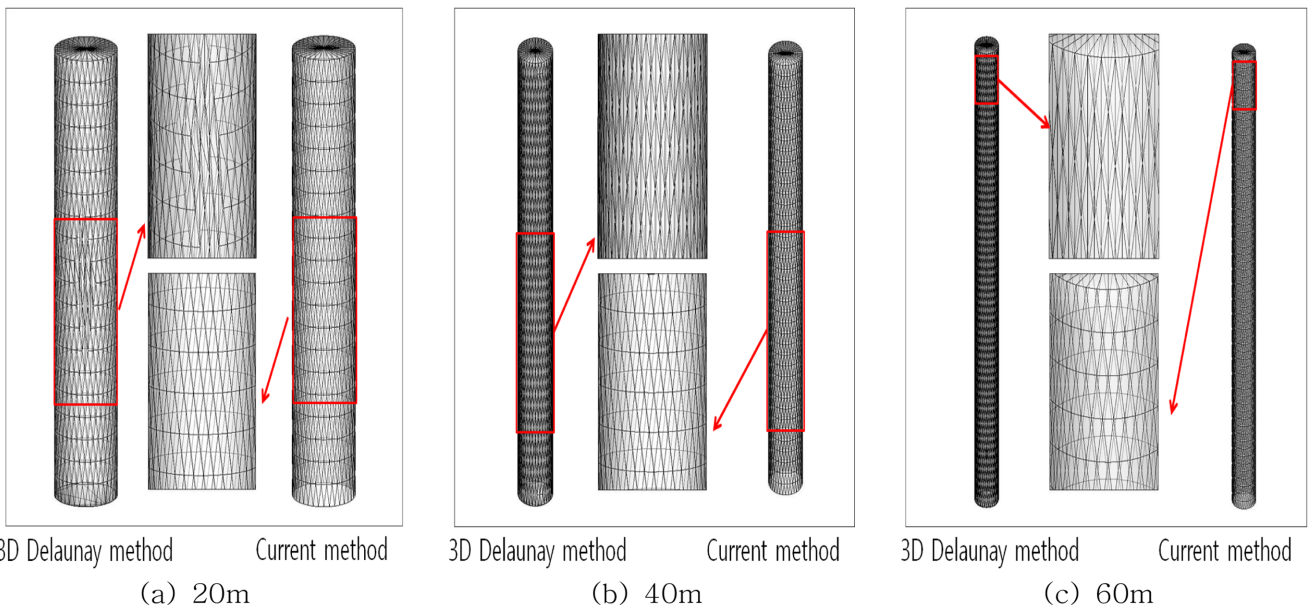


Fig. 6. Graphic comparison with both methods in cylinder.

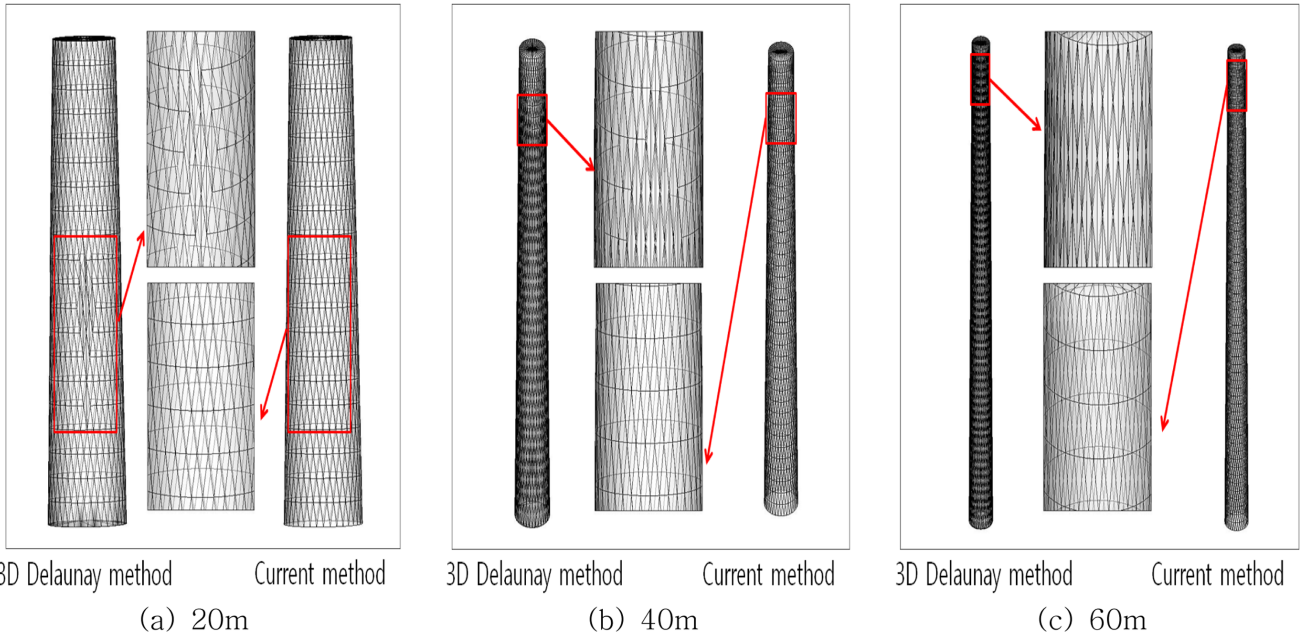


Fig. 8. Graphic comparison with both methods in cone.

마찬가지로 3차원 Delaunay의 삼각분할을 사용할 경우 표면에서의 Shell 요소를 구현하기 위해서는 불필요하게 생성되는 요소의 수가 많은 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 구조물의 높이가 각각 20 m, 40 m, 60 m일 때의 형상을 나타낸다. 20 m에서는 원통형 구조물에서와 마찬가지로 비슷한 높이의 영역에서 삼각형의 형상비가 좋지 않은 요소들이 생성되며, 40 m 높이의 구조물에서는 상단부에서 갑작스런 요소 형성의 변화를 겪는 것을 알 수 있다. 60 m 구조물을 요소 분할하는 경우는 20 m,

40 m와 달리 요소는 균일하게 형성하나 원통형에서와 같이 삼각형의 형상비가 좋지 않음을 알 수 있다.

Fig. 9는 구조물을 세 영역으로 나누고 각 영역에서 층지어져 있는 단을 만든 계단형 구조물의 높이 변화에 따라 생성되는 요소 수의 변화를 비교한 것이다. 원통형, 원추형의 Delaunay 삼각분할 결과와는 달리 계단형에서의 Delaunay 삼각분할은 일정한 정도로 요소를 생성한다. 그러나 위의 두 경우와 마찬가지로 높이가 높아질수록 표현되지 못하는 절차 상의 요소의 수가 기하급수적으로 누적됨을 알 수 있다.

또한 Fig. 10에서 보여지듯이 3차원 Delaunay의 삼각분할은 상단부와 하단부의 요철을 제대로 표현하지 못하고 경계가 무너지므로 요소 생성 후에 추가로 후 처리를 하여 영역의 내 외부 판정을 수행하고 요소의 절점 구성을 조절할 필요가 있음을 알 수 있다. 위의 결과에서 알 수 있듯이, 본 연구는 3차원 Delaunay의 삼각분할 기법에 비교할 때, 표면에서의 절점 구성에 의한 삼각형 요소가 규칙적으로 일정하게 생성되어 계산 상의 경제성과 정확성을 확보할 수 있고, 특히 Fig. 10에서처럼 전 처리 과정에서 영역 상, 하단의 내·외부의 판정을 추가로 수행하여 요소 구성을 조절할 필요가 없음을 알 수 있다. 또한 사용자가 원하는 정도의 계산 경제성과 정확성을 조절하기 위하여 상단과 하단의 절점 구성이 급격히 차이나게 될 경우, Fig. 4에서와 같이 완충선을 놓아 인접한 두 영역이 매끄럽게 연결되도록 삼각형 요소를 생성할 수 있다(Fig. 11).

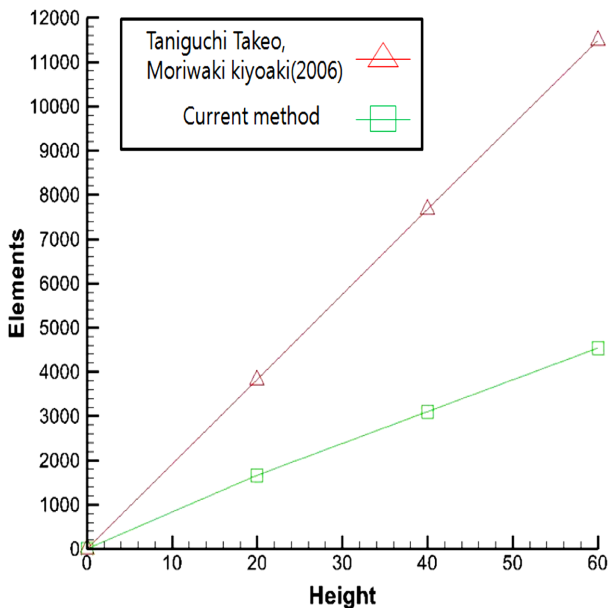


Fig. 9. Number of elements comparison with both methods in staircase by its height.

#### 4. 삼각 요소 생성기법의 적용

Fig. 12는 실제 덴마크 Tuno knob 지역에 설치된 중력식 기초를 가진 5 MW 풍력터빈의 기초단면도이며(Park et al.[2010]) Fig. 13,

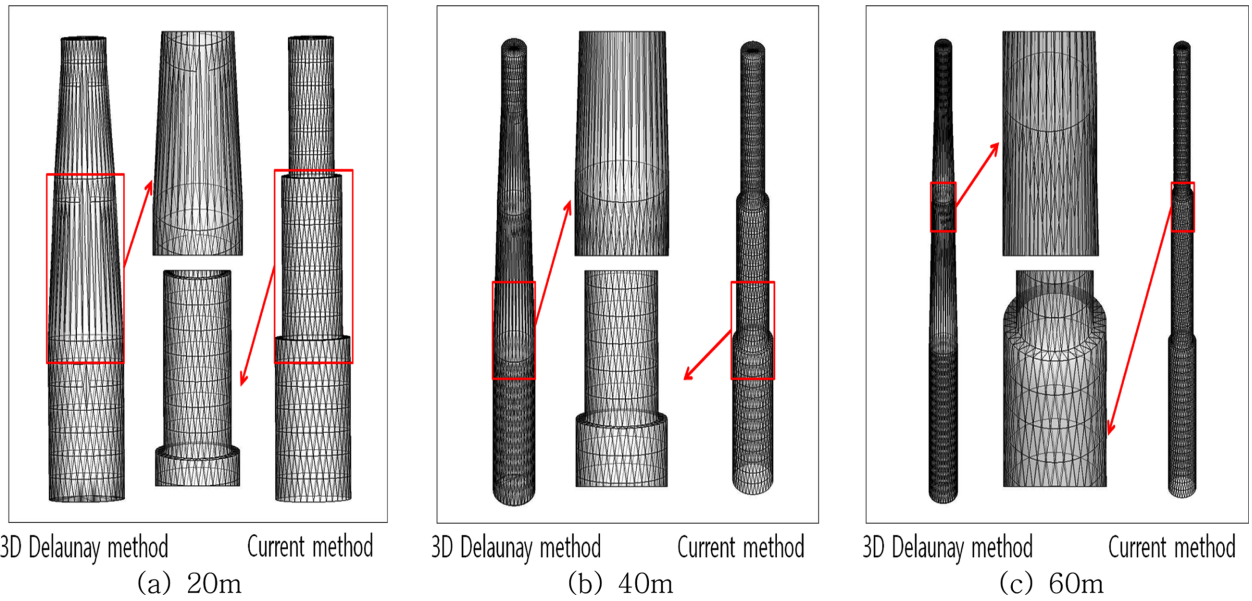


Fig. 10. Graphic comparison with both methods in stair-type.

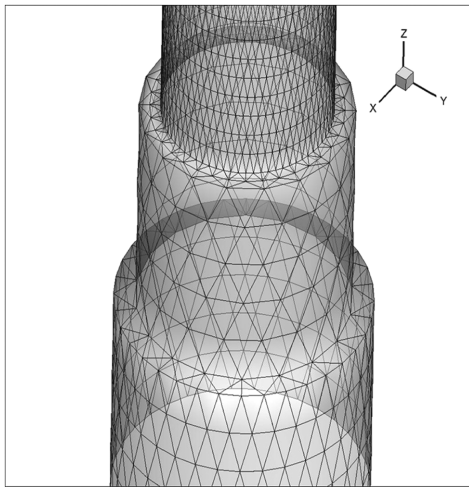


Fig. 11. Connection of each section in different element density.

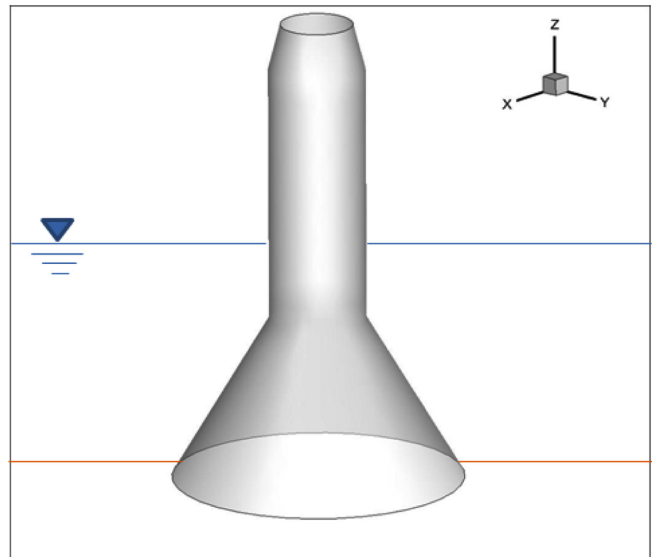


Fig. 13. Surface of the substructure.

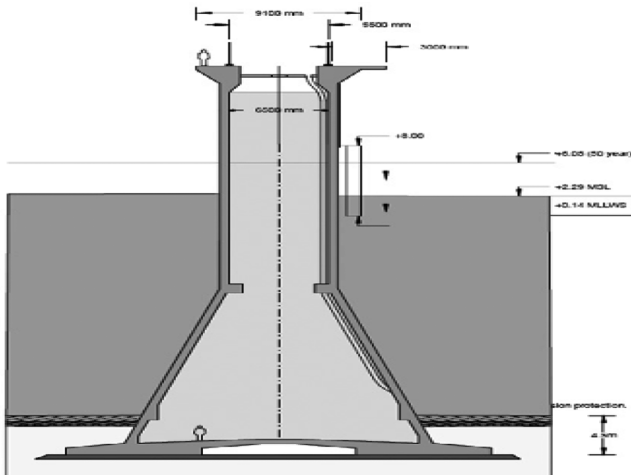


Fig. 12. Gravity-based substructure for the wind turbine in Tuno knob, Denmark.

14는 유한요소 해석을 위해 기초부와 타워를 삼각형 Shell 요소로 모델링한 결과이다.

Fig. 13은 중력식 기초와 타워의 표면을 나타내며 Fig. 14는 경계의 부드러운 곡면의 표현을 위하여 한 요소 층의 절점을 각도  $\theta=10^\circ$ 로 하여 원 둘레를 따라 36개를 배치하고 높이를 1 m 간격으로 하여 삼각형 요소로 분할한 것을 나타낸다.

Fig. 15, 16에서와 같이, 만약 특정 영역에서 보다 정밀한 해석을 원할 경우, 해석하고 싶은 세부영역의 절점 개수와 요소 층의 수를 조절함으로써 더욱 조밀한 삼각형 Shell 요소를 얻어낼 수 있으며, 반대로 유한요소 해석에서의 계산 경제성이 필요하다면 생성되는 요소를 줄임으로써 확보할 수 있다.

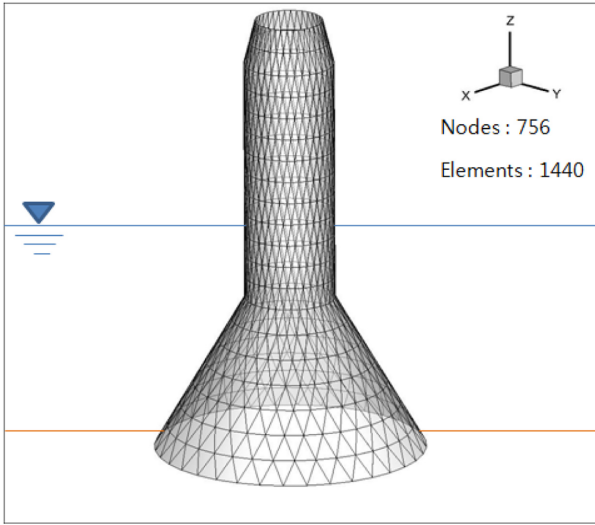


Fig. 14. Triangular mesh generation for FEM.

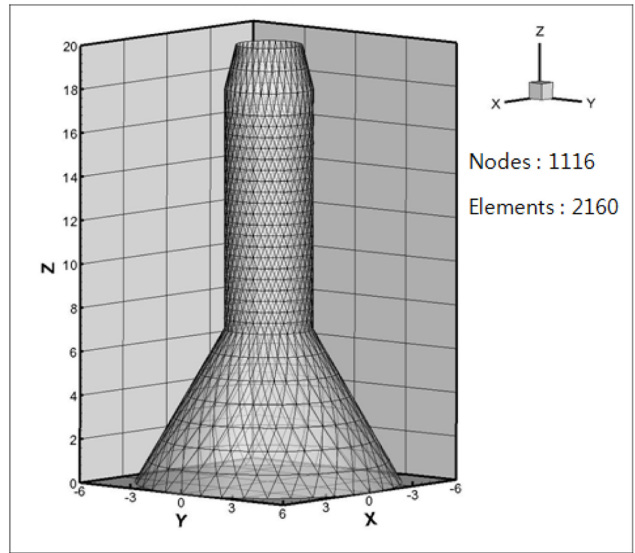


Fig. 16. Fine triangular meshes in transition piece for offshore wind turbine.

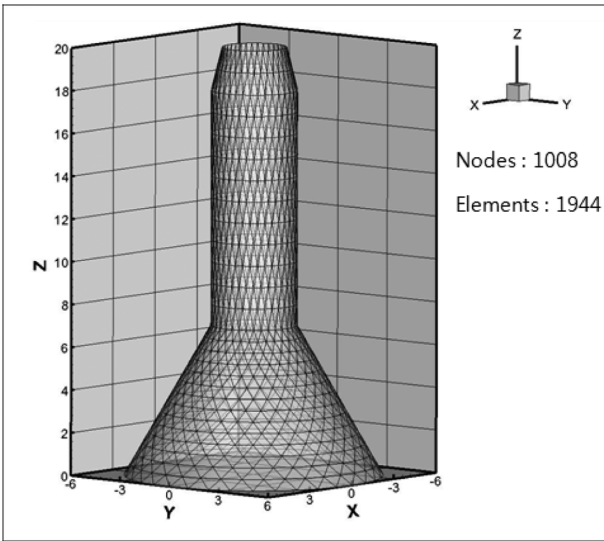
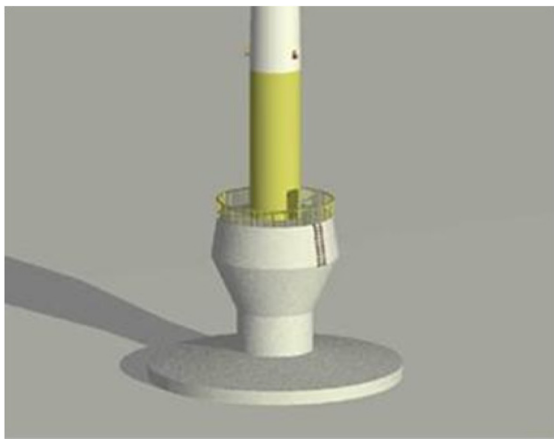


Fig. 15. Fine triangular meshes in foundation for offshore wind turbine.

Fig. 17은 현재 제안되어진 또 다른 형식의 중력식 기초의 형상 들이며 Fig. 18은 각각의 구조물에 대한 3차원 삼각 Shell 분할 결과이다. 영역에 각기 다른 밀도를 부여하여 분할하는 것에 대한 결과는 위의 Fig. 15, 16을 통해 나타내었으므로 생략하였다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 해상에서의 구조물, 특히 2차원 좌표계에서 원형의 단면을 가지며, 천해영역에서의 시공경제성을 가지고 있는 풍력 발전 터빈의 중력식, 모노파일식의 기초 형상과 타워를 3차원으로 확장하고, 대상 영역을 세분화 하여 삼각형 Shell 요소로 작성할 수 있는 기법을 개발하였다. 입력데이터를 제어하는 것에 의해 사용자가 원하는 영역의 세부적인 형상과 외부 경계에서의 요소의 크기

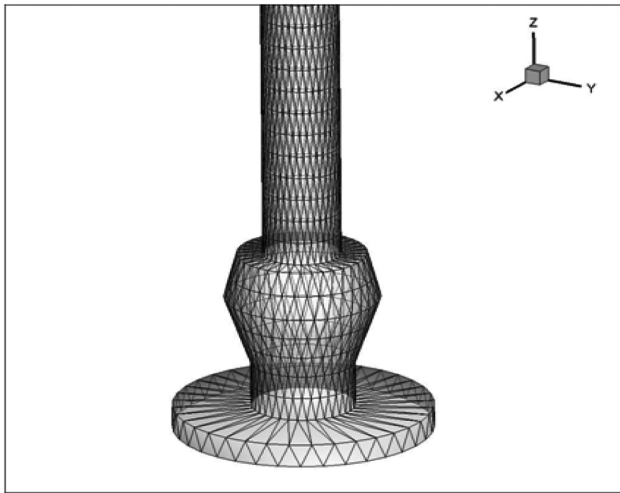


(a) Type A

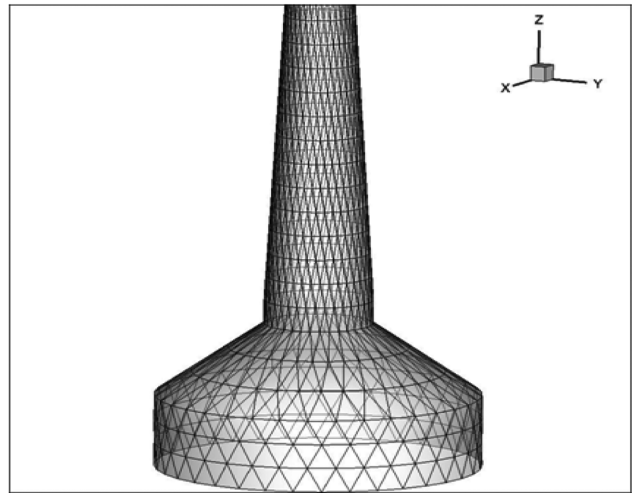


(b) Type B

Fig. 17. Proposed gravity-based foundations for offshore wind turbine.



(a) Type A



(b) Type B

Fig. 18. Triangular mesh generation of each case above for FEM.

를 조절할 수 있으며, 전 처리 과정에서의 Delaunay 삼각기법을 사용한 모델링과 비교한 결과, 보다 매끄럽고 정도가 높은 삼각형 요소를 생성할 수 있었으며 요철(凹凸)이 있는 경계면에서의 후 처리 과정이 필요하지 않음을 알 수 있다. 또한 다양하고 복합적인 전 처리 과정에서의 모델링으로 인해 보다 폭 넓은 조건에서의 수치해석이 가능할 것이라 사료된다.

## 후 기

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 풍력특성화대학원 인력양성사업의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(NO.20094020200020).

## 참고문헌

[1] B. W. Byrne and G. T. Houlsby, 2003, "Foundations for offshore wind turbines", The royal society, 2910-2926.  
 [2] Kim, N.H., Yoon, H.C. and Hur, Y.T., 2010, "Development of Generating Technique for Triangular Mesh by using Distinct Element Method", Korean Institute of Navigation and Port Research, Vol.34, No.05, pp. 367-373 (in Korean).

[3] Park, H.I., Kim, D.J., and Choo, Y.W., 2010, "The Type of Offshore Wind Foundation and Understanding", Korean Geotechnical Society, Vol.26, No.12, pp. 20-26 (in Korean).  
 [4] Shimada, K., 1993, "Physically-Based Mesh Generation: Automated Triangulation of surfaces and Volume via Bubble Packing", Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, U.S.A  
 [5] Son, C.R., Lee, K.S., Kim, M.W., Kim, K.H., Hwang, B.S. and Lee, K.H., 2010, "Offshore Wind Power Generation", A-JIN Publishing Co., Ltd, pp. 91-133 (in Korean).  
 [6] Sloan, S.W., 1987, "A fast algorithm for constructing Delaunay triangulations in the plane", Adv. Eng. Software, 9(1), pp. 34-55.  
 [7] Taniguchi, T. and Moriwaki, K., 2006, "Automatic Mesh Generation Method for 3-Dimensional Fem", Morikita publishing Co., Ltd. (in Japanese).  
 [8] Yamasita, Y., Moriwaki, K., and Taniguchi, T., 2001, "Surface generation of arbitrary 3-dimensional domain by using nodes on its surface", JSCES, Vol.2001, pp. 257-364 (in Japanese).

2013년 4월 9일 원고접수  
 2013년 5월 6일 심사수정일자  
 2013년 5월 13일 게재확정일자