

자유형상 보요소 해석을 위한 NURBS기반의 전·후처리 모듈 개발

정성진¹, 박세희^{1*}
¹한남대학교 건축공학과

A Development of NURBS-Based Pre and Post Processor for Structural Analysis of Free-Shaped Beam

Sung-Jin Jung¹, Se-Hee Park^{1*}

¹Division of Architectural Engineering, Hannam University.

요약 최근 빈번히 건설되고 있는 비정형 건축물들은, 개별부재의 수직/수평적 연결방식에서 벗어나, 외관 및 내부 구성요소들의 단면이 자유롭게 변화되는 곡선의 형태를 띠고 있다. 이러한 구조물의 안정성 평가를 위해서 고전적 방식의 유한요소 해석기법이 적용된 상용프로그램이 사용되고 있으나, 과도한 절점분할 방식 또는 유한요소망(Finite Element Mesh)의 도입으로 인하여 해석시간이 길어지고 사용성 및 해석 정밀도가 낮은 문제점을 안고 있다. 따라서 본 연구에서는, 전술된 문제점을 개선하기 위하여, 임의의 곡률을 가진 단위 부재 및 단위요소에 대한 수학적 해석모형을 활용하여 비정형구조물에 대한 구조 안정성 평가를 효과적으로 수행할 수 있는 전후처리 모듈을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 전후처리 모듈은 곡선형 부재의 곡률을 NURBS 제어점을 이용하여 제어할 수 있도록 개발되었으며, 그로 인해 상용프로그램보다 빠른 형상 모델링이 가능하였다. 또한, 자유로운 형상에 대한 시각적 확인이 가능하여 비정형 건축물의 형상과 거동양상의 현실적인 묘사가 가능하였다.

Abstract Recently, the free form buildings are constructed frequently. Exterior and interior components of these buildings have the free cross-section and a curved shape. So, There are many usages of classical finite element having tapered section and free-style shape. Some general commercial applications like ETABS, SAP2000, MIDAS are usually used for the safety evaluation of the free form structures. However, there are some limits in the accuracy of structural analysis and the length of analysis time because a very complicated finite element mesh have to be used. Therefore, In this study, a pre and post program module was developed to take advantage of general 3-D curved beam element which has a free-style curved shape and mathematical backgrounds. Pre-post processing module has been developed in this study was developed to control the curvature of the curved members by the NURBS control points. As a result, fast geometric modeling than was possible commercial applications. In addition, realistic depiction of the shape and behavior patterns were possible because of the free-form building allows visual check of the free form.

Keywords : Free form building, Finite element, Structural analysis, Pre processor, Post processor

1. 서론

현대의 기념비적인 건축구조물의 형태는 시공기술의 발전과 건축물을 바라보는 철학적 시각의 변화에 따라 비정형적인 형태로 탈바꿈하고 있다. 그러나 비정형 구조물은 2D기반의 정보로는 표현하기가 힘들고, 설계된

건축물의 안정성 및 시공성 검토의 난이도가 높아 비정형 형태를 구현하기 위한 기반기술의 이해와 적용방법에 대한 연구가 필요하다. 이에 기존 연구[1]에서는 3차원 자유형상보의 안정성 검토를 위한 해석요소를 개발하였으며, 본 연구에서는 이의 실용화를 위한 전후처리 기능을 구축하고자 하였다.

본 논문은 한국연구재단 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. 과제번호 2010-0024517

*Corresponding Author : Se-Hee Park(Hannam Univ.)

Tel: +82-10-2990-7820 email: destiny2021@naver.com

Received July 3, 2015

Accepted October 8, 2015

Revised August 10, 2015

Published October 31, 2015

2. 본론

2.1 자유형상보 요소의 개발 필요성

비정형 건축물을 구성하고 있는 부재들 중 상당수는 재축(Longitudinal Axis)이 곡선으로 변하며 단면 또한 일정하지 않은(Tapered Section) 자유형상(Free Shape)을 갖게 된다. 그러나 현재 건축물의 구조해석 실무에서 사용되고 있는 프로그램 대부분은 자유형상을 표현할 수 있는 요소를 탑재하고 있지 않아 하나의 자유형상 부재를 여러 개의 직선 부재로 분할하여 구조물을 모형화 하고 있다. 이렇게 비정형 형상을 분할하여 모형화할 경우, 실제 부재 형상과 유사한 거동을 유추하기 위해서 매우 많은 절점들과 요소들로 분할되어야 한다. 이에 따라 해석시간 및 메모리와 같은 컴퓨터 리소스 사용상의 문제가 발생하게 되며, 분할 개수와 분할 방식에 따라 발생한 해석오차가 전체구조물의 거동에 영향을 미치게 된다. 이에 기존 연구[1]에서는 분할 방식에 의해 발생하는 오차를 줄이고, 보다 현실적인 형상을 표현할 수 있는 요소로써 3차원 곡선형 보요소를 개발하였다.

2.2 3차원 곡선형 보요소

기존 연구[1]에서 개발된 자유형상보는 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 재축이 곡선으로 변하며, 부재의 단면 또한 재축을 따라 변하는 6-자유도 보요소를 의미한다.

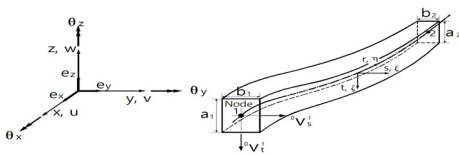


Fig. 1. Free Shape Beam Element

이러한 자유형상보요소의 질량행렬 및 강성행렬을 구성하기 위하여 절점의 개수에 따른 형상함수(Shape Function)를 구성하였으며, 구성된 형상함수를 적용하여 자유형상보요소의 질량행렬 및 강성행렬을 구성하기 위한 알고리즘을 개발하였다.

또한 개발된 알고리즘을 토대로 요소를 프로그램화(sNs)하였으며, 기본적인 특징을 묘사할 수 있는 아치(Arch) 구조물에 대한 해석을 수행하였다. 그리고 해석된 결과를 상용 프로그램인 SAP2000과 MIDAS의 직선 분할방식 및 ABAQUS를 이용한 메쉬(Mesh) 분할방식

의 해석결과와 비교함으로써 개발된 요소에 대한 정합성 및 효율성을 검증하였다.

기존 연구[1]를 통해 개발된 3차원 곡선형 보요소의 형상함수는 2~4절점 요소까지 고려하고 있으나, 본 연구에서는 곡선을 표현할 수 있는 가장 기본적인 형태인 3절점 요소를 사용하였다.

2.3 곡선 요소의 그래픽 처리 방식

비정형 구조물에서 곡선 요소의 입력 및 해석결과에 대한 그래픽 처리는 절점 정보보다 형상에 대한 가시화가 더 중요한 것으로 판단된다. 실제로 ‘동대문 디자인 파크’의 외장패널 지지를 위한 스페이스프레임은 Rhino로 제작된 외장패널의 형상 정보를 바탕으로, 산출된 좌표 데이터를 통해 자동으로 모델링하는 방식을 채택하였다. 결국 비정형 형태의 구조물 해석에 있어 해석을 위한 절점 정보는 형태를 먼저 구축하고 필요한 데이터를 추출해 내는 방식으로 진행되는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 개발하고자 하는 곡선 요소에 대한 전·후처리 기능은 NURBS(Non-uniform B-spline)기반의 그래픽 처리 방식에 초점을 맞추었다.

실제 다양한 CAD 시스템들에서는 NURBS 곡선의 매듭벡터를 조절할 수 있게 하여 사용자로 하여금 Fig. 2와 같이 다양한 곡선 형태를 유연하게 만들어 낼 수 있게 개발되었다.

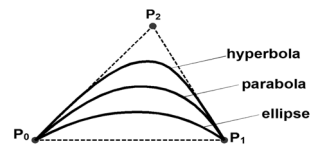


Fig. 2. The shape of the curve by the knot vector

그러나 본 연구에서는 곡선 요소의 해석에 필요한 내부 좌표를 간편하게 도출하기 위하여 NURBS 곡선의 매듭벡터(Knot vector)를 { 0, 0, 0, 1, 1, 1 }로 제한하고, 2차 베지어(Bézier) 곡선식을 활용하였다[3]. 베지어 스플라인(Bézier spline) 근사법은 프랑스 공학자 피에르 베지어(Pierre Bézier)가 르노 자동차의 차체 디자인에 사용하기 위해 개발된 것으로 곡선과 곡면 디자인에 매우 유용하고 편리하며, 구현이 쉽다는 장점을 가진다[3]. 또한 Fig. 2에 나타난 다양한 곡선 형태들의 경우, Fig. 3과 같이 베지어(Bézier) 곡선 두 개를 조합함으로써 표

현이 가능하다.

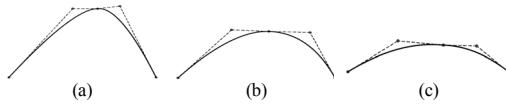


Fig. 3. Various curves with Bezier curves
(a)hyperbola (b)parabola (c)ellipse

2.4 전후처리 연동 시스템구축

본 연구에서는 2.1~2.2절에서 전술된 바와 같이, 기존 연구[1]를 통해 개발된 알고리즘을 토대로 구현한 컴퓨터 프로그램 sNs(사용언어: FORTRAN, 개발환경: WINDOWS 운영체제)를 이용하여 3차원 곡선형 보요소를 모델링하고 해석결과를 가시화하기 위한 전후처리 연동 시스템을 구축하였다. Fig. 4는 전체 프로그램의 설계도로써, 메인 로직은 데이터의 저장 및 연산과 sNs의 프로세스 구동을 담당하고, 내부 자료구조는 UI와 상호작용함으로써 모델링 및 해석결과 처리를 위한 데이터를 저장한다.

Fig. 5는 개발된 프로그램의 전체 외형 및 주요 기능을 보여주고 있으며, 1~6의 기능은 해석모형의 생성 및 해석수행에 대한 절차에 근거하여 번호를 부여하였다.

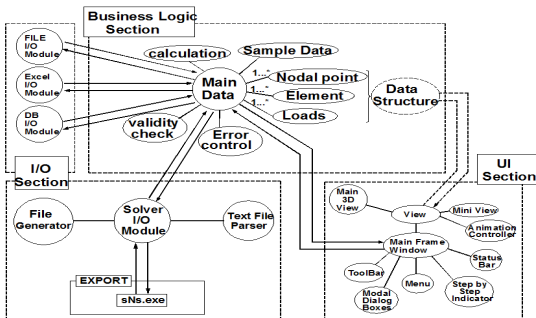


Fig. 4. Design of the whole program

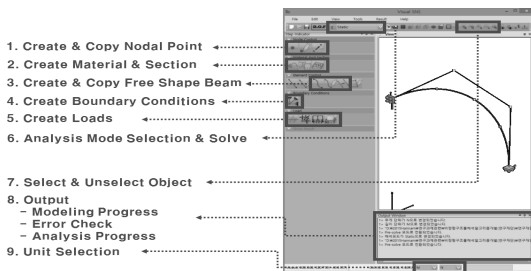


Fig. 5. The whole program look and Main features

2.5 3차원 곡선형 보요소의 전처리 모듈

본 연구에서는 기존 연구를 통해 개발된 sNs의 3차원 곡선형 보요소 중 3절점 요소를 사용하며, 요소 하나를 해석하기 위한 입력 정보는 양단의 절점정보와 중간절점 및 참조절점, 그리고 재료 및 단면 정보이다. Fig. 6과 같은 형상의 부재를 입력할 경우, 절점 정보의 입력 순서는 Table 1에 보이는 바와 같이 양단의 절점 정보를 입력한 후 곡선을 표현하기 위한 중간의 절점과 부재가 존재하는 평면을 구성하기 위한 참조 절점을 입력한다. 그 후 재료정보와 단면정보의 순서로 입력을 진행한다. Table 2는 sNs의 입력 데이터 작성 시 절점 정보에 대한 입력 방식, 그리고 3절점 곡선 요소 하나를 정의하기 위한 입력 방식을 나타내고 있다.

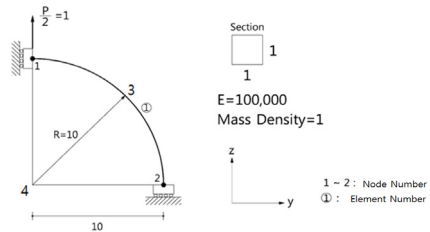


Fig. 6. Example of Analysis Model

Table 1. The order of the input sNs data

Step	Data
1	Node 1
2	Node 2
3	Node 3 (Middle point)
4	Node 4 (Reference point)
5	Material
6	Section

Table 2. Input form of curved beam of sNs

Data	Input form
Nodal Point	JOINT INFORMATIONS
	1 X= 0. Y= 0. Z=10.
	2 X= 0. Y=10. Z= 0.
	3 X= 0. Y= 7.0710678 Z= 7.0710678
Element	4 X= 0. Y= 0. Z= 0.
	FSBEAM ELEMENT GROUP 1 1 NODE=1 2 3 4 MAT=1 SEC=1

sNs에서 입력받는 정보 데이터는 해석을 위한 질량행렬 및 강성행렬을 구성하기 위한 정보이며, 실제 비정형 구조부재의 형상을 가시적으로 표현해 주기 위해서는 이와는 다른 방식의 접근이 필요하다. 이에 본 연구에서는

2.3절에서 전술된 바와 같이 전처리 시 NURBS기반 곡선의 제어점을 이용한 시각적 모델링 방식을 통해 실무자가 곡선형 부재의 실제 형상을 표현할 수 있는 입력방식을 채택하였다. 또한 모델링된 형상으로부터 프로그램 내부적으로 sNs에 필요한 입력정보를 생성하여 연동시킬 수 있도록 시스템을 구축하였다.

일반적으로 단일곡률을 가지는 곡선부재의 경우 Fig. 7(a)에 보이는 바와 같이 1개의 제어점으로 표현이 가능하다. 그러나 다중곡률을 가지는 부재의 경우 제어점 1개로 표현이 불가능하며 Fig. 7(b)에 보이는 바와 같이 2개 이상의 제어점이 필요하다.



Fig. 7. Comparison the number of control points (a)Single curvature (b)Multiple curvature

이때 제어점이 1개일 경우는 Fig. 8과 같이 내부적으로 하나의 부재로 해석모형을 생성하게 되며, 제어점이 2개일 경우 Fig. 9와 같이 2개의 부재로 분할하여 해석모형을 생성하게 된다.

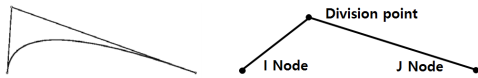


Fig. 8. Analysis model using one control point

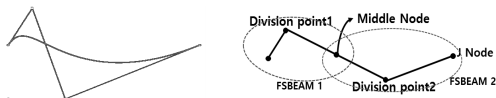


Fig. 9. Analysis model using two control point

이 때, 부재의 형상으로부터 해석을 위한 내부 분할절점의 좌표를 생성하는 방법은 베지어(Bézier) 곡선이론에 근거하며 다음 식을 적용하여 내부 제어점 위치를 도출할 수 있다[3].

$$P(u) = \sum_{k=0}^n P_k BEZ_{k,n}(u), \quad 0 \leq u \leq 1$$

여기서, 배합함수 : $BEZ_{k,n}(u) = C(n,k)u^k(1-u)^{n-k}$

$$\text{이항계수 : } C(n,k) = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

$$x(u) = \sum_{k=0}^n x_k BEZ_{k,n}(u)$$

$$y(u) = \sum_{k=0}^n y_k BEZ_{k,n}(u)$$

$$z(u) = \sum_{k=0}^n z_k BEZ_{k,n}(u)$$

내부 제어점 위치 변수(u)는 베지어 곡선의 순환적 분할방식을 통해 찾아낼 수 있으며, 이 때 곡선은 내부의 제어점들이 연결되어 이루어지는 공간인 컨벡스 헐(Convex Hull) 내부에 존재하여야 한다[4].

Fig. 10은 개발된 전처리 모듈을 이용하여 제작된 아치 구조물에 대한 해석모형을 보여주고 있다. 제어점을 드래그 하여 부재의 형상을 나타낼 수 있으며, 중간에 자동으로 생성되는 절점 좌표의 정보를 메인 윈도우에서 직접 확인할 수 있다. Fig. 11은 제어점 2개를 사용한 경우의 예를 보여주고 있다.

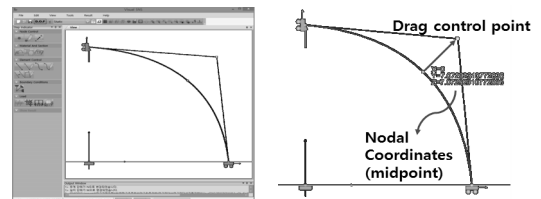


Fig. 10. Creation analysis model of arch structure

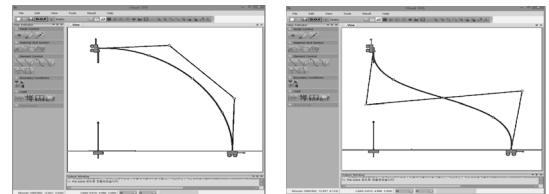


Fig. 11. Creation analysis model using two control points

개발된 방식을 통해 해석모형을 생성할 경우, 일반 상용 구조해석 프로그램에서 곡선부재를 해석하기 위한 부재 생성 방식에 비해 빠른 형상 모델링이 가능해진다. 상기 2개의 제어점을 이용하여 아치 구조물을 생성한 경우

를 예로 들면, 상용프로그램인 SAP2000에서는 Fig. 12(a)에 보이는 바와 같이 5개의 절점 정보를 입력하고 4개의 부재를 입력해야 한다. Table 3에 보이는 바와 같이 절점 입력 시 절점마다 x, y, z 좌표에 대한 3개의 정보가 필요하며, 부재 4개를 생성하기 위해서는 5개의 절점을 순차적으로 클릭해야 하므로 결국 20번의 입력행동이 발생하게 된다. 그러나 본 연구에서 개발된 방식을 사용하게 되면 양단에 대한 2개의 절점 정보와 이 2절점을 클릭함으로써 곡선 요소에 대한 필요 정보를 자동으로 생성할 수 있다. 이후 제어점을 드래그 하여 최종적인 아치 구조물의 형상을 만들어 낼 수 있다. 즉, 절점 정보 생성을 위한 6번의 좌표 입력과 2번의 절점 클릭, 2번의 제어점 드래그를 통해 부재를 생성하게 되며 총 10번의 입력행동이 발생하게 된다. 결과적으로 상용프로그램에 비해 입력행동이 반으로 줄어들어 효과적인 부재 형상 모델링이 가능할 것으로 판단된다.

Table 3. Comparison of the method of generating member(Sap2000, Development Program)

PGM.	Sap2000		Development PGM.	
	Action	Count	Action	Count
Node1	Input X=0, Y=0, Z=10.	3	Input X=0, Y=0, Z=10.	3
Node2	Input X=0, Y=3.83 Z=9.24	3	Input X=0, Y=10, Z=10.	3
Node3	Input X=0, Y=7.07 Z=7.07	3	-	-
Node4	Input X=0, Y=9.24 Z=3.83	3	-	-
Node5	Input X=0, Y=10, Z=0.	3	-	-
Create Element	Node1->Node2-> Node3->Node4-> Node5	5	Click Node1->Node2	2
Control Point	-	-	Drag Control Point 1-> Control Point 2	2
Total		20		10

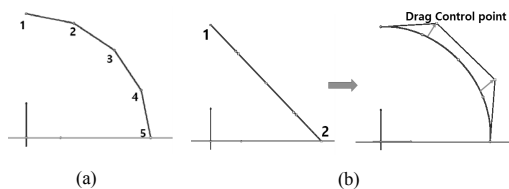


Fig. 12. The method of generating member
(a)SAP2000 (b)Development Program

2.5 3차원 곡선형 보 요소의 후처리 모듈

본 연구에서는 기존 연구[1]를 통해 개발된 sNs 프로그램의 3차원 곡선형 보요소의 해석결과를 가시화시켜 주기 위한 후처리 모듈을 개발하였다. sNs 솔버를 통해 도출할 수 있는 3차원 곡선형 보요소의 해석결과 데이터는 절점 변위, 부재력, 지점 반력이다. 본 연구에서는 변위에 따른 변형 형상 및 변위 Contour, 그리고 부재력에 대한 Contour를 후처리 모듈로 개발하였으며, Fig. 13~15는 해석 후 각각의 시각화 기능을 제어하기 위한 대화상자와 결과를 보여주고 있다.

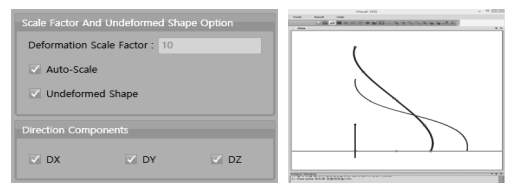


Fig. 13. Deformed shape of the curved beam

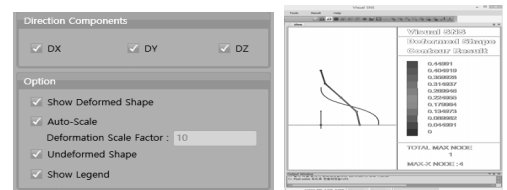


Fig. 14. Displacement contour of the curved beam

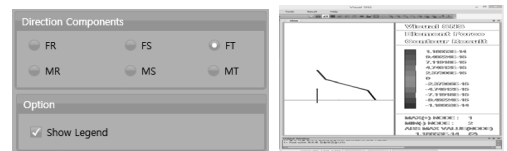


Fig. 15. Element Force contour of the curved beam

여기서, 변형형상은 실제 구조부재 전체에 대한 변화 양상을 파악할 수 있어야 한다. 그러나 해석결과로는 절점에 대한 데이터만 추출할 수 있으므로 곡선형태의 변형형상을 나타낼 수가 없다. 따라서 절점에 대한 변위 데이터를 가지고 전체리 구현 시 사용된 베지어 곡선의 순환적 분할방식을 역으로 적용하여 절점 변위로부터 제어점을 찾아가는 방법을 이용하였다.

3. 결론

본 연구를 통해 개발된 자유형상 3차원 보요소의 해석을 위한 전·후처리 모듈에 대한 특징을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 자유형상보의 안전성을 평가하기 위한 수치해석 모듈은 기존 연구[1]를 통해 개발되었으며, 2~4절점을 고려할 수 있는 형상함수와 구성된 형상함수를 적용하여 질량행렬 및 강성행렬을 구성하기 위한 알고리즘을 개발하고, 이를 프로그래밍(sNs)하였다. 본 연구에서는 개발된 수치해석 모듈 중 곡선을 표현할 수 있는 가장 기본적인 형태인 3절점 요소를 활용하였다.
- 2) 본 연구에서는 비정형 구조물의 해석에 있어 곡선 요소의 생성은 절점 정보 보다는 형상에 대한 가시화가 중요하다고 판단되며, 이에 따라 본 연구에서는 NURBS기반의 그래픽 처리방식을 이용하여 개발된 곡선 요소에 대한 전·후처리 기능을 구현하였다.
- 3) 본 연구를 통해 개발된 프로그램은 곡선형 부재의 곡률을 제어점을 이용하여 조절할 수 있도록 개발하였으며, 2개의 제어점을 이용하여 다중곡률을 가진 부재를 표현할 수 있다.
- 4) 본 연구에서 채택한 제어점을 이용한 NURBS기반 모델링 방식과 일반적인 상용 구조해석 프로그램에서 곡선부재를 생성하는 방식을 Table 3과 같이 비교하였으며, 결과적으로 상용 구조해석 프로그램보다 빠른 형상 모델링이 가능할 것으로 판단된다.
- 5) 본 연구에서는 기존 연구[1]를 통해 개발된 sNs Solver를 이용한 곡선 요소의 해석결과를 시각화하기 위하여 변형형상 및 부재력에 대한 다양한 시각화 기능을 개발하였다.

상기 전술된 바와 같이 본 연구를 통해 개발된 전·후처리 모듈은 기존의 상용 프로그램에서 찾아볼 수 없었던 정합성 및 효율성이 검증된 곡선 요소에 대한 수치해석 모듈을 사용하고 있다. 또한, 자유로운 형상에 대한 시각적 확인이 가능하게 함으로써 비정형 건축물의 형상과 거동양상을 보다 현실적으로 묘사할 수 있는 대안을 제시하였다. 이상과 같은 특징들로 말미암아 비정형 건축물에 대한 자연스러운 해석모형 저장이 가능할 것으로 보이며, 앞으로 빈번히 발생하게 될 비정형 구조물에 대한 안전성 평가에 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Sung-Jin Jung, Min-Sub Lee, Se-Hee Park, "A Development of General 3-D Curved Beam Element for Structural Analysis of Free Form Building", *Journal of Architectural Institute of Korea* Vol.27, No.8, pp. 65-72, August, 2011.
- [2] K.J. Bathe, *Finite Element Procedures*. Prentice Hall, 1996.
- [3] Donald Hearn, M. Pauline Baker, Warren R. Carithers, *Computer Graphics with OpenGL*, Pearson Education Korea, pp.492-522, March, 1999.
- [4] Edward Angel, Dave Shreiner, *Interactive Computer Graphics*. Hongreung Science Publishing, pp.598-603, 2014.
- [5] Computer and Structures, *SAP2000-ANALYSIS REFERENCE*. Ver. 6.1
- [6] ADINA ENGINEERING, *ADINA - System verification manual*. REPORT AE 83-5, June, 1983

정 성 진(Sung-Jin Jung)

[정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 대학원 건축공학과 (공학석사)
- 1993년 2월 : 서울대학교 대학원 건축공학과 (공학박사)
- 1985년 3월 ~ 1996년 2월 : 현대건설(주) 과장
- 1996년 3월 ~ 2005년 2월 : 영동대학교 건축학부 부교수
- 2005년 3월 ~ 현재 : 한남대학교 건축공학과 교수

<관심분야>
건축구조

박 세 희(Se-Hee Park)

[정회원]



- 2011년 2월 : 한남대학교 대학원 건축공학과 (공학석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 한남대학교 대학원 건축공학과 박사과정

<관심분야>
건축구조