

단층 프리폼 구조의 노드 개발을 위한 유한요소해석

Finite Element Analysis for the Development of Node of Single Layered Freeform Structure

오진탁* 이경주** 주영규*** 우운택**** 김상대*****
Oh, Jin-Tak Lee, Kyoung-Ju Ju, Young-Kyu Woo, Woon-Taek Kim, Sang-Dae

요약

최근 건축 경향에 따라 단층 프리폼 구조에 대한 관심이 증대되고 있다. 축력과 모멘트를 동시에 받는 구조적인 특성으로 인해 프리폼 구조에서 노드는 응력이 집중되는 부분으로 상세 개발이 이루어져야 한다. 본 논문은 단층 프리폼 구조의 모멘트형 노드를 제안하고 축력과 모멘트에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석을 통해 내력이 검증된 모델에 구멍 크기 및 위치에 따른 변수를 적용하여 변수해석을 진행하였고 결과를 비교분석하여, 구조적인 성능을 만족하여 안전성을 가지고 동시에 물량도 가장 절약할 수 있는 노드 Prototype을 결정하였다.

Abstract

Due to architectural requirement, the attention of single layered freeform spatial structure is increasing nowadays. Because the node of single layered structure should resist the bending and axial forces simultaneously, it is necessary to develop a new proper type of node in detail. In this study, a new type of node for single layered freeform spatial structure was proposed. And the structural performance for the node was analytically evaluated using the commercial FEM software(ABACUS). As a result, a node prototype was selected and the proposed node showed good structural behaviors.

키워드 : 단층 프리폼 구조, 노드, 모멘트 지배형, FEM 해석

Keywords : Single layered freeform Structure, Node, Moment-typed, FEM analysis

1. 서론

새로운 건축 경향이 추구되어지면서 건축물 형태에 대한 관심이 고조되고 자유로운 공간 구성을 시도하고자 하는 흐름이 강하게 나타나고 있다. 이는 경제성과 효율성을 추구하려는 의도를 넘어 건축물에 대한 개성 표현 및 미적 추구를 고려한 것으로 보

인다. 이러한 요구에 따라 획일적이고 박스형인 건축물을 탈피한 비정형 건축물에 적합한 구조로 프리폼 구조를 적용하고 있으며 비정형 건축에서 노드 시스템은 가장 중요한 요소 중에 하나이다.(Hwang, 2010¹⁾)

프리폼 구조의 시스템에 따라 노드의 형상이 달라 지는데, 복층 프리폼 구조를 많이 사용하던 과거와는 달리 최근 건물의 투명함을 확보하고 경제적인 부재사용을 위해 평면골조를 사용하는 사례가 늘어남에 따라 그 노드의 형상도 새로 개발되고 있다. 노드는 노드에 가해지는 하중 특성에 따라 축력 지배형과 모멘트 지배형 노드로 구분할 수 있다.

* 고려대학교 건축사회환경공학과 석박사통합과정

** 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정

*** 교신저자, 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수

E-mail : tallsite@korea.ac.kr

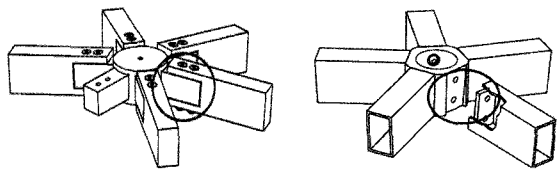
Tel : 02-3290-3327 Fax : 02-921-2439

**** 동양구조안전기술 연구소장, 공학박사

***** 고려대학교 건축사회환경공학과 교수

단층 프리폼 구조의 축력 지배형 중 대표적인 것으로 다이아그리드(Diagrid)가 있으며 이것의 노드 부는 정인용 등(2009)에 의해 국내에서 고려된 바 있다.

모멘트 지배형 노드의 경우에는 국외에서 개발된 노드는 접합 방식에 따라 Splice node connection 과 End-Face node connection으로 분류할 수 있다.(STEPHAN et al, 2004²⁾) Splice node connection 은 노드와 부재 사이에 이음재를 두어 연결하는 것으로 독일의 Schlaich Berger mann & Partner에서 개발한 SBP-1, Polonyi & Fink에서 개발한 POLO-1 등이 있다. End-Face node connection은 부재의 단부와 연결면이 종축 방향에 수직으로 연결되는 것으로 오스트리아의 Waagner-Biro AG에서 개발한 WABI-1, MERO에서 개발한 MERO-1 등이 있다.(STEPHAN et al, 2004²⁾) 두 접합 방식의 노드는 적용 사례에 따라 다른 특성을 갖지만 볼트 접합인 경우 Splice node는 이음재를 통해 힘이 전달되기 때문에 축력 및 모멘트 전달에 있어서 End-Face node보다 각 부재가 안정적이지만 시공상 더 복잡할 수 있다. End-Face node의 경우 연결면의 각 변화를 통해 수평, 수직, 비틀림 방향으로의 기하학적 수용력이 좋기 때문에 그 사례가 늘어나고 있다.



(a) Splice node SBP-3 (b) End-Face node MERO-1(Cylinder)

〈그림 2〉 모멘트 지배형 노드의 예 (STEPHAN et al, 2004²⁾)

그러나 국내에서는 아직 개발된 노드가 없고 이러한 국외의 기술 또한 개방하고 있지 않기 때문에 국내에서의 기술개발이 활발하게 이루어 지지 않고 있는 것이 현실이다.

따라서 본 논문에서는 단층 프리폼 구조의 경제적이며 구조적으로 합리적인 노드 개발을 위한 유한요소해석을 진행함으로써 Prototype을 결정하고 구조 성능을 평가하고자 한다.

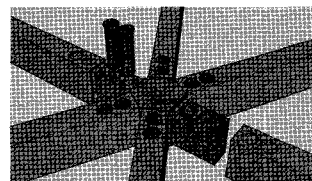
2. 노드 제안

2.1 노드 형상

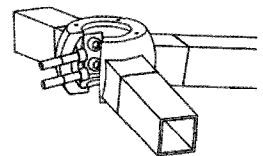
Node 형상에 대한 방향을 결정하기 위해 아래와 같은 기준을 두었다.

- ① 대공간 구조물에 사용되는 노드로 한다.
- ② 6개의 부재가 만나는 하나의 노드로 국한한다.
- ③ 대공간 구조물의 비정형성에 따른 곡률 차이가 크지 않을 것이므로 노드에 붙는 부재는 직선 부재로 계획한다.
- ④ 시공성을 위해 노드부 접합은 볼트로 한다.
- ⑤ 필요한 경우 보강 와이어의 사용이 가능하도록 한다.

새로운 형태의 노드를 제안함에 있어 창의적인 사고를 반영하고 다양한 노드를 접하기 위해 많은 제한을 두지 않았다. 제시한 조건을 최대한 만족시키면서 적은 수의 볼트로도 충분한 내력을 발휘할 수 있으며 그 형태가 복잡하지 않은 단순한 모델을 고려한 결과, 〈그림 3〉과 같은 새로운 노드를 제안하였다.



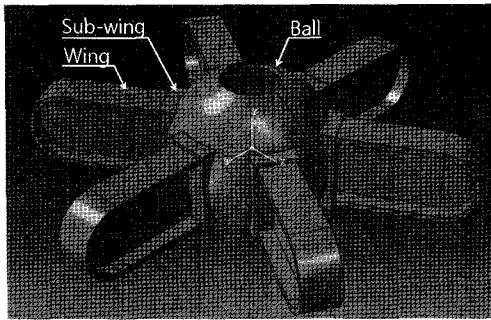
〈그림 3〉 노드 초안



〈그림 4〉 OCTA-1

제안된 노드를 기준으로 대공간 구조물의 자유로운 형상 구현을 위해 수평, 수직 방향으로의 이동이 가능하도록 고려하여 Octatube Space Structures

BV(Holland)에서 개발한 OCTA-1(STEPHAN et al, 2004²⁾)과 같이 구의 형상을 취하였으며 노드에 사용되는 물량을 최소화하기 위해 구(이하 Ball) 내부를 비우고 상부의 구멍을 뚫었다. Ball 하부의 경우 우선 Ball의 내력 보완을 위해 막아두었으나 해석을 통해 비우는 것을 고려할 것이다. 노드 사이 각형강관 부재를 Wing에 끼워 Ball과 연결될 수 있도록 하기 위해 Wing과 Ball 사이에 연결부(이하 Sub-wing)를 두어 시공성과 디자인을 고려하였다. 물량 감소를 위해 Wing의 단면을 H형으로 하여 아래와 같은 형태를 고안하였다.



〈그림 5〉 노드 및 각부 명칭

이 노드는 전체적으로 Splice node의 형태를 취하고 있기 때문에 축력 및 모멘트 전달에 있어서 우수하며 End-Face node의 장점인 기하학적 변화가 가능하도록 수직, 수평으로의 이동을 고려한 것으로 기존 노드의 기하학적 수용성과 내부력 이동성을 모두 우수하게 결합한 형태를 취하고 있다.

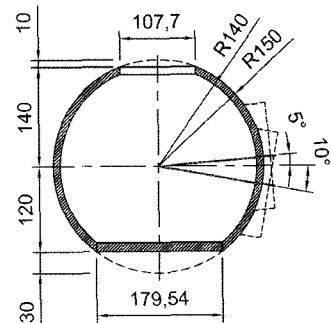
2.2 노드 세부 결정

노드 사이 부재의 크기를 기준으로 전체적인 노드의 크기를 결정하였다. 부재 크기를 결정할 때 시공성을 고려하여 인부 2명이 들 수 있는 중량 40kg으로 제한하였고 그에 따라 부재 길이 2m의 각형강관 150×100×4.5(SPSR400)을 선택하였다.

노드의 크기 결정을 위해 다음의 조건을 두었다.

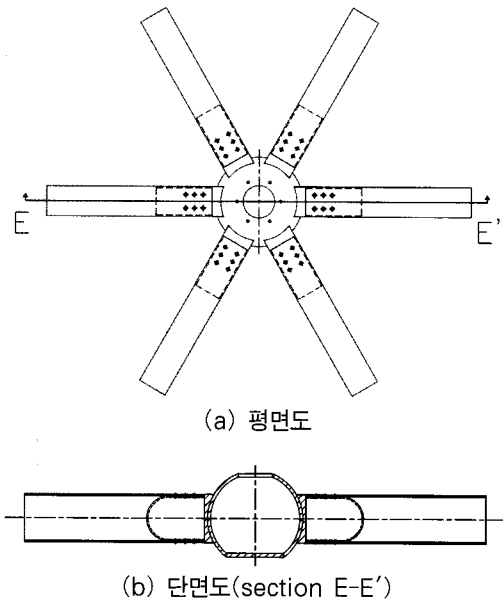
- ① 선택한 노드 사이 부재의 수용이 가능하고 노드의 중량은 한 사람이 들 수 있는 중량인 20kg을 넘지 않도록 한다.
- ② 노드의 수직각 변화의 경우 중심을 기준으로 15도까지 이동이 가능하도록 한다.
- ③ Node Ball의 두께는 노드의 형상이 독특하여 주물 제작하여야 하므로 제작 가능한 최소 두께인 10mm를 넘어야 한다.

조건을 만족시키기 위해 고려한 결과 Ball의 지름은 300mm(외부 표면), 두께는 10mm이다. Sub-wing의 최소 두께는 Sub-wing의 중앙부에 위치하고 구 표면에서 반대쪽 단부 끝까지 거리 중 최소거리를 10mm로 설정하였으며 Sub-wing 단부의 가로, 세로 길이는 노드 사이 부재를 수용하기 위해 각각 100mm, 150mm이다. Wing의 두께는 노드 사이 부재의 두께를 넘지 않는 4.5mm이고 Sub-wing 단부에서 Wing 반대쪽 끝단까지의 거리는 볼트 접합을 고려하여 190.5mm로 설정하였다. 노드 Ball 윗부분에 고무 패킹 및 유리 설치를 위한 공간이 30~40mm 필요하므로 Wing은 Ball 중심을 기준으로 위쪽으로 5도 아래쪽으로 10도 이동 가능하다.



〈그림 6〉 Ball 단면

제시된 노드의 크기는 Prototype을 결정하고 내력을 알아보기 위한 기준으로써 실제 적용할 경우 사용공간의 크기에 따라 비율에 의한 노드의 크기 조절이 가능할 것으로 보인다.



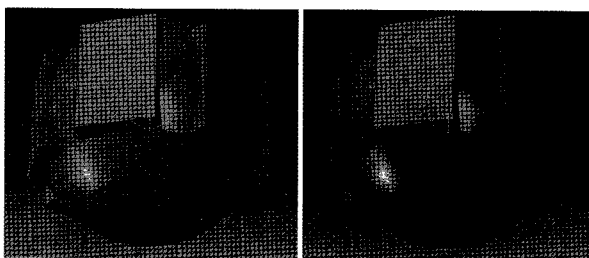
〈그림 7〉 노드부 도면

〈그림 7〉은 노드부 전체를 나타내는 도면으로 노드와 각형강관 부재를 볼트(M12) 6개로 연결하였다.

3. 유한요소해석

3.1 해석대상

본 연구는 고안된 노드 Ball의 내력을 확인하기 위한 것으로 Ball에 작용하는 축력과 모멘트에 대한 해석을 진행하여 구조 성능 및 안정성을 평가하였다. 2장에서 제시한 노드에서 Ball의 내력에 따른 형상을 최적화하기 위해 Ball 하부 구멍이 있는 것과 없는 것을 대상으로 유한요소해석을 수행하였다.



(a) Ball1(하부 구멍 없음) (b) Ball2(하부 구멍 있음)

〈그림 8〉 Node Ball 모델

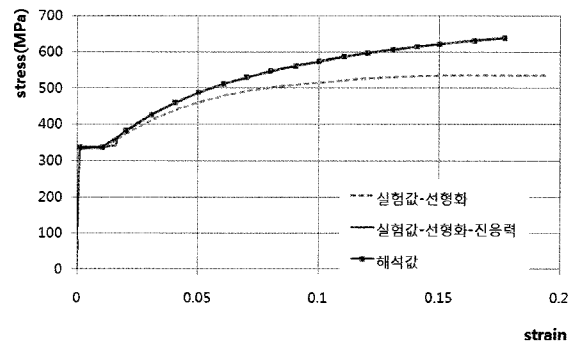
〈그림 8〉의 (a)는 기본 모델에서 하부에 구멍이 없는 형태이고 (b)는 구멍이 있는 형태를 나타낸 것이다. 크기는 2장에서 제시한 바와 같다.

3.2 모델링

유한요소 해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/CAE Version 6.9를 사용하였다. 해석 모델은 이형적인 형상을 고려하기 위해 Solid 요소를 사용하여 모델링하였다. 모델링 재료는 SCW480을 사용하였고 재료실험을 통해 얻은 응력 변형률 그래프를 이용하여 수치해석 모델을 위해 재료의 물성값을 간략화 하였다. 실험에 의한 변형률과 응력은 소성영역에서의 물성값 입력을 위해 식 (1)과 (2)를 이용하여 진변형률(True Stress)과 진응력도(True Strain)로 변환하여 사용하였다. 탄성 이후 부분을 세분화하여 〈그림 9〉에 나타낸 해석값을 적용하였다.

$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon_{nom}) \quad (1)$$

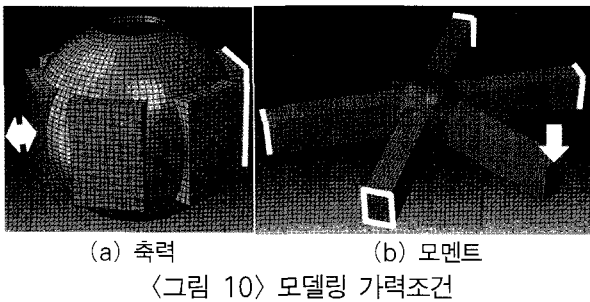
$$\sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 + \epsilon_{nom}) \quad (2)$$



〈그림 9〉 재료 그래프

각 모델마다 축력과 모멘트를 가력하는 것으로 해석을 수행하였다. 압축·인장의 경우 〈그림 10〉과 같이 노드 사이 각형강관 부재와 Wing 없이 Sub-wing만을 두어 하나의 Sub-wing 단부를 지점으로 두고 반대쪽 Sub-wing 단부에 압축력이나 인

장력을 가하였다. 모멘트의 경우 Node에서 Wing을 제거하고 노드 사이 각형강관 부재를 솔리드 부재로 하여 Sub-wing에 부착함으로써 Ball과 완전하게 일체화되어 거동하는 것으로 가정하였으며 솔리드 부재의 길이는 500mm이다. 5개의 솔리드 부재에서 4개 부재의 단부를 지점으로 하고 나머지 한쪽 부재 끝에 가력점을 두었다. 축력과 모멘트 해석 모두 가력점의 변위를 제어하는 방식으로 1축 가력 하였다.



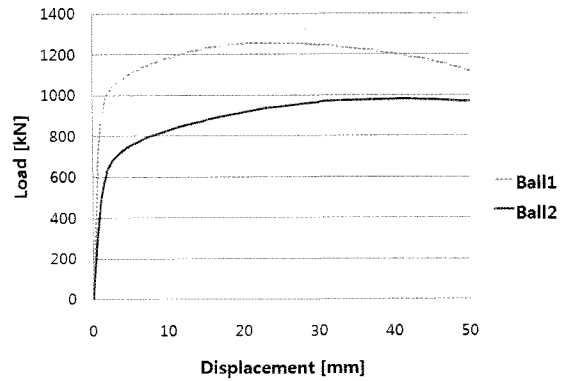
메쉬(mesh)는 Ball의 경우 구 중심방향으로 하여 6면체가 되도록 분할하였으며, Sub-wing과 각형강관 부재는 균질한 6면체로 분할하였다.

3.3 해석 결과 및 비교

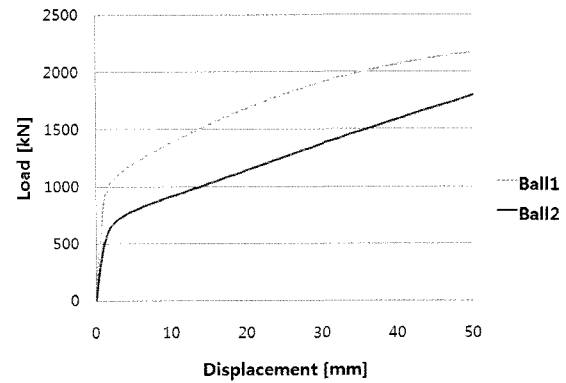
노드의 안전성을 평가하기 위해 KBC Code에 따라 노드 사이 각형강관 부재(150×100×4.5, SPSR400)의 강도와 볼트(M12)강도를 계산하였으며 그 값은 <표 1>과 같다.

<표 1> KBC Code에 의한 Node부 강도 (한국강구조학회 2009³⁾)

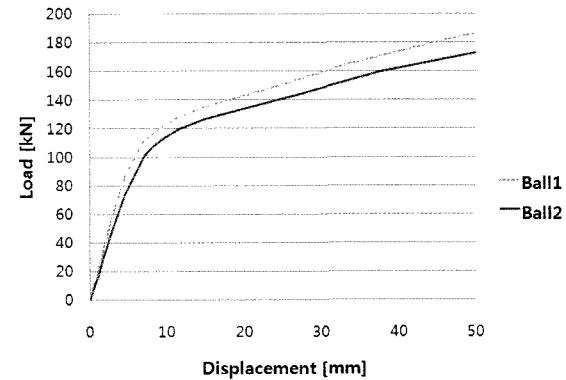
풍하중	부재압축강도	부재인장강도	고력볼트 전단강도
0.99 kN·m	434.9 kN	249.6 kN	407.2 kN



(a) 압축력



(b) 인장력



(c) 모멘트

<그림 11> 하중-변위 곡선

<표 2> Ball 해석 결과 비교

	압축 성능평가		인장 성능평가		모멘트 성능평가	
	항복강도 (kN)	변위 (mm)	항복강도 (kN)	변위 (mm)	항복강도 (kN·m)	변위 (mm)
Ball1	979.2	1	989.6	1	59.3	5.9
Ball2	693.6	1.5	699.4	1.5	57.1	6.8

모델 가력점에서의 변위 제어를 통해 해석을 진행하였고 압축, 인장, 모멘트 가력에 대한 결과 그래프는 <그림 11>과 같고 각 Ball에 대한 항복강도와 변위 값은 <표 2>와 같다.

<표 1>과 <표 2>의 강도값을 살펴보면 노드 사이의 부재 압축강도는 해석 상 압축력 가력 시 Ball1, Ball2의 항복강도의 각각 44%, 63%이고 인장력 가력 시 부재 인장강도는 노드 항복강도의 각각 25%, 36%이며 풍하중 값은 모멘트 가력 시의 항복강도에 비해 모두 무시할 수 있을 정도로 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 파괴 시 인장력에 의해 노드 사이의 부재에서 파괴될 것으로 예상할 수 있으며 Node Ball은 모두 안전하다는 것을 알 수 있다.

해석 결과에서 압축력과 인장력 작용 시 항복강도를 보면 Ball1이 Ball2에 비해 41%정도의 더 큰 강도를 발휘하고 있으나 모멘트 가력 시의 항복강도 값은 비슷하다. <그림 12>의 응력 변화를 보면

며 좌굴하고 있지만 Ball2에서는 하부 판이 없음에 따라 많은 응력이 Sub-wing과 Ball의 상하부 구멍 부분에 몰리고 있다는 것을 확인할 수 있다. 모멘트의 경우 응력 차이가 다소 보이기는 하나 그 변화가 크지 않으며 Sub-wing의 모서리 부분에서 집중 응력이 발생함에 따라 하부 판의 유무는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 따라서 Ball 하부의 판 유무는 축력에 큰 영향을 미치지만 모멘트에는 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

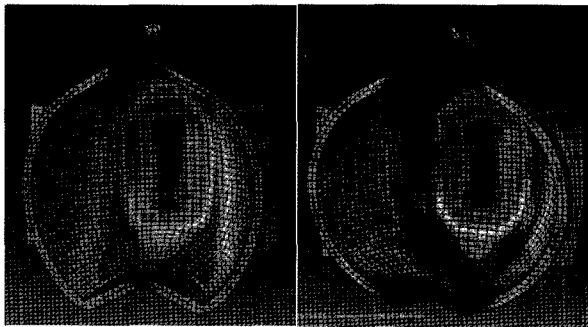
Ball1이 Ball2보다 큰 항복강도 값을 갖는다 하더라도 두 Ball 모두 노드 사이 부재와 볼트에 비해 충분한 내력을 가지고 있고 Ball1과 Ball2의 물량을 비교해 볼 때 각각 2537.8cm^3 , 2218.2cm^3 로 Ball2가 Ball1에 비해 12.6% 정도 적은 물량이 소요되므로 Node Prototype을 선정함에 있어 Ball2가 더 적합하다.

4. 변수해석

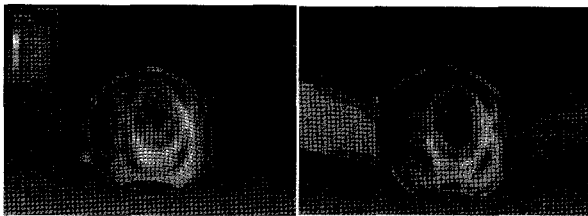
4.1 변수해석대상

본 장에서는 유한요소해석을 통해 내력이 검증된 Ball2 모델에 변수를 적용하여 해석을 진행함으로써 비교 분석하여 최적화된 노드 Prototype을 선정하고자 한다. 3장에서 <그림 12>을 통해 Ball1과 Ball2의 응력 변화를 살펴 본 결과 하중 가력 시 응력을 많이 받는 부분과 받지 않는 부분을 확인할 수 있었으며, 이러한 각 부분의 단면 손실이 있을 경우 볼의 내력에 미치는 영향을 알아보고 경제적이면서 구조적으로 효율적인 노드 prototype을 선정하고자한다. 따라서 Ball2에 적용하는 변수는 Ball에 뚫리는 구멍 위치와 크기로서 구멍 위치는 Sub-wing과 맞닿는 Ball 부분과 각 Sub-wing 사이의 Ball 부분이다.

<그림 13>의 (a) Ball3은 응력을 가장 적게 받고 있는 Sub-wing과 맞닿는 Ball 부분의 중앙부에 구멍을 뚫은 것이다. Sub-wing은 구멍을 완전히 덮으면서 Ball에 용접됨으로써 하중 가력시 응력을 충분



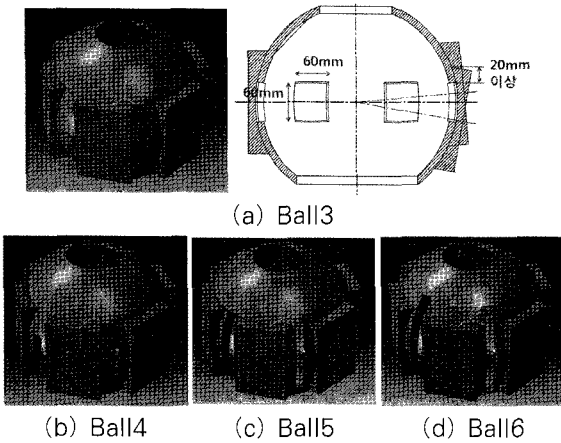
(a) 축력-인장(좌:Ball1, 우: Ball2)



(b) 모멘트(좌:Ball1, 우: Ball2)

<그림 12> Ball1, Ball2 내부 응력
(실제 변형 사이즈와 동일함)

알 수 있듯이 인장력 발생 시 Ball1은 하부 판이 스티프너 역할을 하면서 판으로 응력 분배가 이루어지



〈그림 13〉 Node Ball 변수 해석 모델

히 전달할 수 있어야 한다. 또한 Sub-wing은 Ball 중심을 기준으로 위로 5도, 아래로 10도 이동 가능하므로 이러한 Sub-wing의 이동성이 고려되어야 한다. 따라서 구멍을 사각형으로 하여 사각형의 각 변으로부터 Sub-wing의 끝단이 적어도 20mm이상 떨어져 있도록 고려한 결과 수직거리로 60mm인 정사각형의 구멍을 뚫을 수 있었다. 〈그림 13〉의 (b), (c), (d)는 Sub-wing 사이에 구멍이 있는 경우로써 Ball4의 경우 구멍이 작으나 Ball5, Ball6에 구멍 크기를 늘려 응력이 주로 발생하는 부분까지 뚫음으로써 내력에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. Sub-wing 사이의 최대간격이 54mm이므로 양쪽 Sub-wing의 용접을 고려하여 구멍의 가로방향 길이를 20mm로 하였고 세로방향 길이는 Sub-wing의 세로방향 길이를 기준으로 더 짧은 경우와 긴 경우로 설정하여 Ball4는 20mm×60mm, Ball5는 20mm×150mm, Ball6는 20mm×200mm 크기의 구멍을 뚫었다. 각 변수 해석 모델의 구멍은 모두 6개씩이다.

4.2 모델링

범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/ CAE Version 6.9를 사용하였고 해석 모델은 Solid 요소

를 사용하여 모델링하였다. 축력과 모멘트에 대한 해석을 각각 진행하였으며 모델링 재료, 메쉬 및 가력 방법 등은 3장에서 진행한 해석과 동일하다.

4.3 해석 결과 및 비교

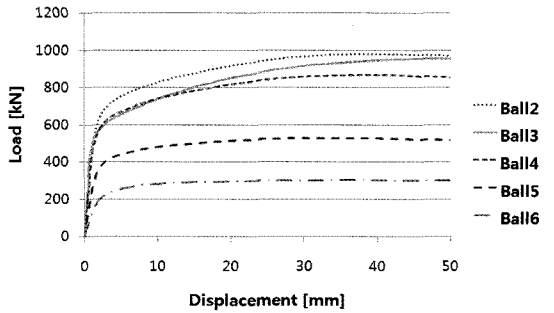
가력점에서의 변위제어를 통해 해석을 진행하였다. 각 해석으로부터 얻어진 하중-변위 곡선을 〈그림 14〉에 나타내었고 각 하중 가력 시의 항복강도와 변위를 〈표 3〉에 나타내었다. 각 Ball의 응력 변화는 실제 변형 사이즈와 동일하게 1:1로 하여 살펴보았다.

전체적으로 보면 각 Ball이 항복할 때 변위 값의 변화가 크지 않다는 것을 알 수 있으나 항복강도 값은 점차 작아지는 양상을 보인다. 곡선의 추이와 각 항복강도 값을 보면 Ball3와 Ball4는 Ball2에서 구멍을 뚫었음에도 불구하고 Ball2와 비슷한 양상을 보인다는 것을 알 수 있다. Sub-wing 사이에 구멍을 뚫은 Ball4, Ball5, Ball6은 구멍의 크기가 점점 커짐에 따라 축력과 모멘트에서 모두 내력이 감소되는 것으로 나타났으며 이것은 응력을 주로 받는 부분의 단면 손실이 클수록 내력 저하에 미치는 영향이 크다는 것을 의미한다. 가장 큰 응력을 받는 부분이 Ball 상하부에 뚫린 구멍 및 서브윙 주변 부분으로 Ball5, Ball6의 경우 다른 Ball과는 달리 이 부분의 단면적을 감소시킴에 따라 서브윙 상하부에 응력이 집중됨으로써 〈그림 15〉와 같은 형상으로 내력이 크게 저하된 것으로 보인다.

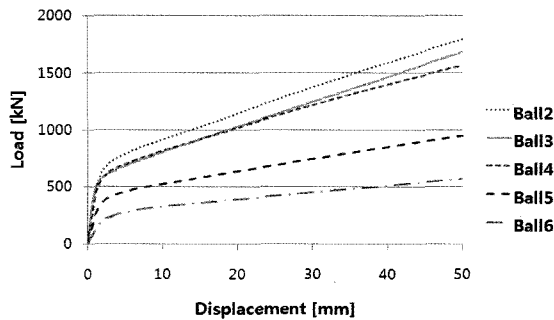
KBC Code에 따라 계산한 〈표 1〉의 노드 강도 값을 보면 노드 사이 각형강관 부재에서 인장력에 의해 파괴가 되도록 설계되어 있다. 각 변수해석 모델과 부재 인장강도(249.6kN)과 부재 압축강도(434.9kN)을 비교해보면 Ball5, Ball6를 제외하고 더 큰 항복강도 값을 가짐으로써 Ball3, Ball4에 대해서 안전하다는 것을 확인할 수 있다.

〈표 3〉 변수 모델 해석 결과 비교

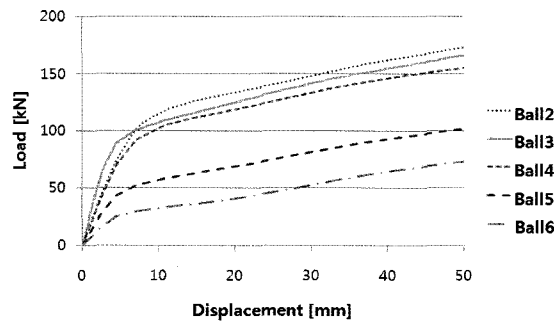
	압축 성능평가		인장 성능평가		모멘트 성능평가	
	항복강도 (kN)	변위 (mm)	항복강도 (kN)	변위 (mm)	항복강도 (kN)	변위 (mm)
Ball2	693.6	1.5	699.4	1.5	114.1	6.8
Ball3	546.3	0.9	548.4	0.9	97.3	4
Ball4	597.3	1.4	601.6	1.4	99.8	6.3
Ball5	388.4	1.5	391.5	1.5	51.9	4.9
Ball6	247.0	1.9	264.4	2	23.4	3.8



(a) 압축력

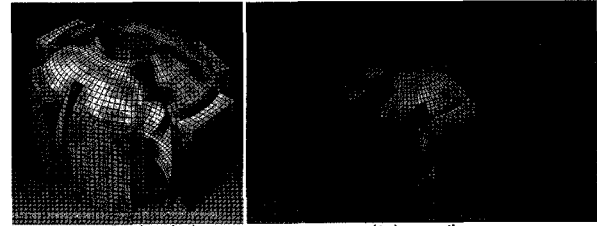


(b) 인장력



(c) 모멘트

〈그림 14〉 변수 해석 모델 하중-변위 곡선



(a) 축력-인장

(b) 모멘트

〈그림 15〉 Ball6 외부 응력

〈표 4〉 변수 모델 부피 비교

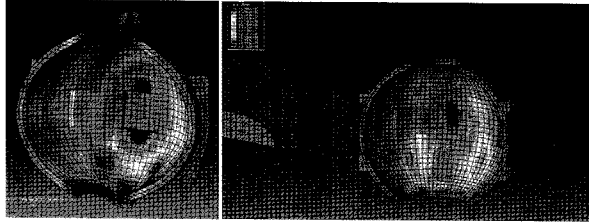
	Ball 부피 (cm ³)	Ball2 대비 부피 감소량 (cm ³)	Ball2 대비 감소 비율 (%)
Ball2	2218.2	0	0
Ball3	2015.0	203.2	9.2
Ball4	2148.4	69.8	3.1
Ball5	2029.0	189.2	8.5
Ball6	1953.4	264.8	11.9

각 변수에 따른 부피 변화를 비교하기 위해 〈표 4〉로 정리하였다. Ball5, Ball6는 각각 8.5%, 11.9%로 다소 큰 물량 감소를 보이지만 앞서 말하였듯이 안전성에 문제가 되므로 9.2%의 Ball3과 3.1%의 Ball4를 고려할 수 있다. Ball3와 Ball4의 해석 결과를 비교해 보면 모멘트에서는 큰 차이가 없으나 축력에서 Ball4가 Ball3보다 약 11%의 더 큰 내력을 갖는다. 경제성과 구조적 합리성을 고려할 때, Ball3, Ball4 모두 안전하고 Ball3가 6% 정도의 물량을 더 줄일 수 있으므로 Ball3가 prototype으로 가장 적절하다.

4.4 노드 Prototype

물량 감소와 내력을 비교해 본 결과 Ball3가 노드 Ball Prototype으로 적합하다는 것을 알 수 있다. Ball3의 내부 응력 변화를 살펴보면 〈그림 16〉과 같이 단면을 감소시켰음에도 불구하고 Ball3의 구멍 주변에는 응력을 받지 않고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 Ball2에서 응력을 가장 적게 받았던 부분으

로 구멍 위에 Sub-wing이 덮이고 Sub-wing의 모서리 부분을 통해 Ball에 응력을 전달함에 따라 전체 내력에 영향을 많이 미치는 않는 것으로 사료된다.



(a) 축력-인장 (b) 모멘트

〈그림 16〉 Ball3 내부 응력

5. 결 론

본 논문에서는 국외에 의존하고 있는 단층 프리폼 구조 노드를 개발하고 최적화된 Node Ball의 형상 구현 및 내력 검증을 위해 Node Ball에 변수를 적용하여 유한요소해석을 진행하였다. Ball의 구멍 유무에 따른 변수를 적용한 총 6개 Ball의 해석 결과로부터 Ball3가 가장 적절한 Prototype임을 확인하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) KBC Code에 따른 강도 값과 모멘트 가력 시 해석 결과로부터, 변수에 따라 모멘트의 해석 결과는 요구되는 강도값에 비해 작게는 23배 크게는 114배 큰 값을 가지고 축력의 해석결과는 요구되는 강도의 0.6~2.25배 값을 가지므로 Ball의 모멘트 성능은 축력 성능에 비해 충분한 것을 알 수 있다. 또한 단면 손실이 생길 경우의 적절성 여부는 Ball의 축력 성능에 의해 결정 된다.
- (2) 변수에 따라 Ball2에 비해 9.2%, 3.1%, 8.5%, 11.9% 물량을 감소 시켰지만 항복강도는 21.2%, 13.9%, 44.0%, 64.4%가 감소되는 것을 확인 할 수 있다. 이것으로 응력이 집중되지 않는 부분의 물량 감소는 노드 볼(Ball)의 강도 감소에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

감사의 글

본 논문은 중소기업청 지원 산학연공동기술개발 사업(No. R1007811)의 지원과 (주)삼영엠텍의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 감사를 드립니다.

- 참고문헌 -

1. Kyung-Ju Hwang(2010), Advanced Investigations of Grid Spatial Structures Considering Various Connection Systems, Doctoral dissertation, University of Stuttgart
2. Soeren STEPHAN et al(2004), Reticulated Structures on Freeform Surfaces, Proceedings of the IASS Symposium, France 20 Sep 2004 - 24 Sep 2004
3. 한국강구조학회(2009), KBC2009 강구조설계, 구미서관
4. Jaime SANCHEZ-ALVAREZ(2009), Practical aspects determining the modelling of the space structure for the free-form envelope enclosing Baku's Heydar Aliyev Cultural Centre, Proceedings of the IASS Symposium 2009, Valencia
5. 주영규 외 3인(2010), 프리폼 구조의 노드 기술 현황 분석, 한국공간구조학회지, v.10 n.3(통권 41호)

(접 수 일 자 : 2011년6월17일)

(심사완료일자 : 2011년8월24일)

(계재확정일자 : 2011년8월31일)