

축력과 모멘트를 동시에 받는 FREE NODE의 실험적 평가

Experimental Evaluation of FREE NODE with Axial Load and Moment for Single Layer Free-Form Structures

오진탁* 정광량** 김도현***
Oh, Jin-Tak Chung, Kwang-Ryang Kim, Do-Hyun

Abstract

Single layer free-form structures are being highlighted in the field of architecture due to its attractive shape. In these structures, node connecting system is very important because the node must resist bending and axial stress simultaneously. So the local and global stabilities of entire structure can be determined by the stiffness of node system. In this study, therefore, various types of bending test with axial force were performed. As a result, bending capacity with axial force of a new spherical node for free-form structure could be performed and structural capacities were checked to use in real structure.

Keywords : single layer freeform, FREE node, spherical node system, spatial structure, bending stiffness

1. 서 론

기존의 공간구조 시스템에서 넓은 공간을 확보하는 방안으로 더블레이어 시스템(트러스)이 주로 사용되어 왔다. 더블레이어 시스템은 구조 부재가 축력만을 받기 때문에 구조 설계가 간단하다는 장점을 가지고 있다. 하지만 현대의 건축물들은 자유로운 형상과 아름다움을 추구하고 있고, 많은 부재들을 사용하는 더블레이어 시스템은 이러한 건축 경향을 만족시키지 못한다<Fig. 1(a)>.

싱글레이어 시스템은 더블레이어 시스템과는 달리 하나의 면으로 공간을 형성하므로 자유로운 형상에 쉽게 대응할 수 있다.¹⁾ 그리고 최소화된 구조 부재로 건축물이 가지는 본연의 형상을 돋보이게

한다<Fig. 1(b)>.

싱글레이어 시스템은 기하학적 형상으로 스스로를 지지하므로 노드에 연결되는 부재들은 다양한 각도를 가진다. 또한 노드는 축력과 모멘트를 동시에 견뎌야 한다.²⁾ 따라서 싱글레이어 시스템에서 노드의 성능은 가장 중요한 부분이다.

싱글레이어 노드의 개발은 독일 등 유럽에서 활발히 진행되고 있다. 노드는 접합 방식에 따라 Splice형과 End-Face형으로 나뉜다.³⁾ Splice형은 부재의 길이 방향으로 노드와 구조부재 사이에 이음재를 두어 연결하는 방식으로, 연결 형태에 따라 전단력을 전달할 수 있는 1~2개의 접촉면이 생긴다. 이 접촉면을 볼트를 이용하거나 용접하여 연결한다. Courtyard roof of the city History Museum(독일, 함부르크)에 사용된 SBP-1, Roof structure of the railway station(독일, 베를린)에 사용된 SBP-2 그리고 Canopy roof of the railway station(독일, 쾰른)에 사용된 POLO-1 등이 그 예이다. End-Face형은 노드와 부재의 단부가 만나는 면을 볼트나 용접으로 연결하는 방법이다. Courtyard roof of the

* 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 석박사통합과정 School of Civil, Env. & Arch. Eng., Korea Univ.

** 정회원, 동양구조안전기술 대표, 공학박사 Dongyang Structural Engineers Corp.

*** 교신저자, 대우건설 방재연구팀 선임연구원, 공학박사 Daewoo E&C, Disaster Prevention Research Team
Tel: 031-250-1142 Fax: 031-250-1132
Email: dohyun.kim@daewoenc.com



(a) Double layer system
(The Hong Kong Polytechnic University,
Hong Kong)



(b) Single layer system
(Osaka Maritime Museum, Osaka Japan)

〈Fig. 1〉 Double and Single layer system

German Historical Museum(독일, 베를린)의 SBP-4, Courtyard roof of the British Museum(영국, 런던)의 WABI-1 그리고 New Fair Milan(이탈리아, 밀란)에 사용된 MERO-4가 그 예이다.⁴⁾

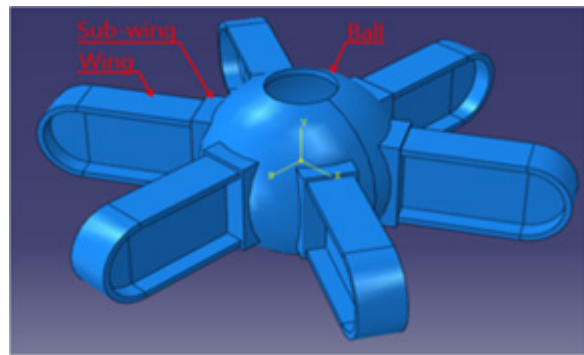
각각의 노드는 수평, 수직, 비틀림 각의 수용여부와 축력, 휨모멘트에 대한 내구성 평가가 되어야 한다. “Reticulated Structures on Free-Form surfaces”²⁾, “State-of-the-art Node for Freeform Structure”³⁾와 같은 연구에서 노드들의 성능에 대해 비교 분석 하였다. 하지만 노드의 수치화된 성능에 대한 연구는 공개되어 있지 않아 각 노드별로 정성적인 비교만이 가능하다.

그러므로 본 연구에서는 “단층 프리폼 대공간 구조물의 노드에 대한 축하중 구조성능 평가”⁵⁾, “Cast iron joint for single layer space structure subjected to axial loadings”⁶⁾, “Bending tests on an advanced spherical node system in the steel free form spatial structure”⁷⁾에서 제안하고 검증된 FREE NODE에 대해 수평, 수직, 비틀림 각도의 자유도를 평가하고, 축력과 휨모멘트를 동시에 받을 때의 구조적 성능을 실험을 통해 검증하고자 한다.

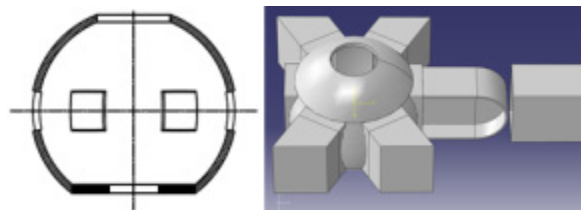
2. FREE NODE 시스템

2.1 FREE NODE 상세

FREE NODE(Flexible, Resilient, Efficient, Economic NODE)의 상세는 <Fig. 2>에서 설명하고 있다. 각형강관의 보 부재들이 볼트로 접합되는 Wing, 구의 형상을 한 중앙에 위치한 Ball, 그리고 Ball과 Wing을 연결해 주는 Sub-Wing으로 이루어져 있다. Sub-Wing은 Ball과 맞닿는 부분이 Ball의 구 곡률과 동일하기 때문에 프리폼 구조물의 노드에서 문제가 되기 쉬운 자유로운 각도 표현을 추가적인 공정작업 없이 위치만 결정하여 용접하면 되도록 하는 역할을 한다.



〈Fig. 2〉 Detail of FREE NODE



〈Fig. 3〉 Shape of FREE NODE and connecting method

싱글레이어 프리폼의 노드 부분은 축력과 모멘트를 동시에 받고 있고 전체 구조물이 기하학적 형상을 기반으로 하중에 저항하므로 노드에 작용하는 축력과 모멘트에 대해 각각 그리고 동시에 고려해야 한다. 축력에 대해 효율적으로 저항하기 위해 노드의 중앙에 위치한 Ball의 기본형상이 구이며, Ball의 상·하부를 절단하고 하부의 오프닝에 보강링을 설치하였다. 또한 부재를 노드에 접합하는 방식으로

Wing을 이용하여 각형강관의 길이 방향으로 밀어 넣어 결합하는 방식을 사용하여 모멘트에 대한 성능 향상을 꾀하였다<Fig. 3>.

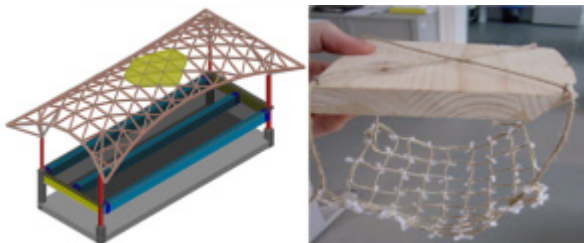
2.2 목표 성능

싱글레이어 프리폼 시스템 구조물에서 노드는 축력과 모멘트가 집중될 뿐만 아니라 구조물이 기하학적 형상을 유지하는데 중요한 역할을 하고 있으므로 노드와 노드를 연결하는 부재보다 먼저 파괴되지 않도록 설계하는 것을 기본 목표 성능으로 잡았다. 2m 길이의 150x100x4.5(SPSR 400) 각형강관의 좌굴강도와 인장내력에서 가장 지배적인 블록쉬어, 그리고 볼트(M12) 전단 내력을 KBC 코드에 따라 계산하여 <Table 1>로 나타내었다.⁸⁾

<Table 1> Require capacity of FREE NODE

Buckling capacity of member	Tensile capacity of member	Shear capacity of bolt	Moment capacity
434.9 kN	250.0 kN	407.2 kN	11.54 kN•m

모멘트 성능은 Node 하나가 영향을 미치는 부분을 고려하여 노드를 중심으로 육각형의 면적을 기준으로 산정하였다. Node의 무게(32.1kgf), 각형강관(2m, 85.8kgf), 지붕재(유리, 130kgf)와 같은 고정하중, 활하중(KBC 2009기준 표 0303.2.1, 265.13kgf), 풍하중(KBC 2009 기준 0305.3~0305.5)의 하중조합을 통해 가장 큰 하중이 작용하는 1.2D+1.6L+0.65W으로 산정하였다.



<Fig. 4> Roof of double curvature using FREE NODE

풍하중은 개발된 FREE NODE를 이용한 싱글레

이어 프리폼 구조물인 신성건설 충주 사업소 내의 기술 전시 공간의 지붕에 맞추어 산정하였다<Fig. 4>. 이중 곡률을 가지는 지붕(너비21m x 7m, 높이 3m)으로 2층 높이에 설치되었다.

3. 실험계획

2장에서 설명한 바와 같이 Ball의 구조적 안정성 여부가 싱글레이어 프리폼 시스템의 안정성을 결정하는데 가장 중요한 역할을 한다. FREE NODE는 Sub-Wing과 Wing은 용접으로, Wing과 노드 사이를 연결하는 부재는 용접 또는 볼트 접합으로 디자인되어 있지만 가력점에서 Ball까지 힘이 전달되며 발생하는 손실을 최소화 시키고 가장 중요한 Ball의 구조적 성능을 측정하기 위해 Wing을 생략하고 Sub-Wing에 각형강관을 바로 용접시켰다.

3.1 재료 실험

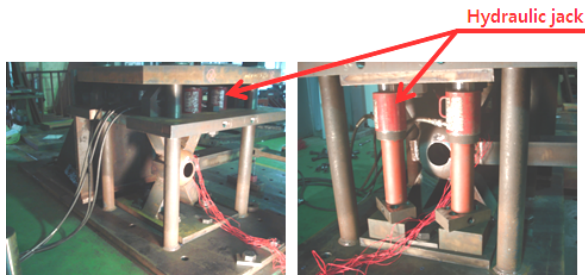
Ball과 Sub-Wing은 SCW480($F_y=235\text{MPa}$), Wing은 SS400($F_y=235\text{MPa}$) 그리고 각형강관은 SPSR400($F_y=235\text{MPa}$)강재를 사용하였다. SCW480의 시편은 KS B 0801 10호 규격을, SS400과 SPSR400 시편은 KS B 0801 5호 규격에 따른 것으로 KS B 0802에 의한 인장 시험을 하였다. 시험 결과 모두 F_y 값이 235MPa를 상회하였고 이를 <Table 2>에 정리하였다.

<Table 2> Test of specimens

		Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
SCW480	Test 1	307.9	521.1	32.5
	Test 2	318.9	522.7	31.2
SS400	Test 1	326.2	444.2	34.6
	Test 2	343.7	454.0	32.3
SPSR400	Test 1	379.6	452.3	35.6
	Test 2	383.6	469.9	35.4

3.2 변수 설정

축력과 모멘트를 동시에 받을 때의 구조성능을 검증하기 위해 앞서 진행한 축력 실험의 결과를 이용하였다. 압축력에 대한 FREE NODE 항복하중의 50%, 80%를 실험체에 먼저 가하고 추가로 모멘트를 가하여 압축 및 인장력이 없는 순수한 모멘트가 가해졌을 때의 결과와 비교할 수 있도록 하였다.



〈Fig. 5〉 Install of hydraulic jack

실험은 먼저 실험체에 축력(압축 항복하중의 50%와 80%, 인장 항복하중의 50%와 80%)을 가하기 위해 <Fig. 5>와 같이 4개의 유압잭을 이용하였고 실험체에 목표 축력이 가해진 후 액추에이터로 모멘트를 가하는 방식으로 진행하였다<Fig. 6>. 압축력을 가하기 위해서 순수 모멘트만 가력한 실험체의 세팅에서 위쪽 플레이트의 네 꼭짓점 부근에 미리 파놓은 홈에 유압잭을 놓고 그 위에 추가 플레이트를 얹고 이를 바닥에서부터 연결되는 봉에 연결하여 볼트로 조였다. 유압잭에 압력을 가하면 고정되어 있는 추가 플레이트를 밀어내며 실험체에 압축을 가할 수 있다. 인장력을 가하기 위해서는 실험체의 아래쪽 플레이트에 기둥을 설치하고 그 위에 유

압잭은 놓고 실험체 위쪽 플레이트와 연결한 추가 플레이트를 밀어내어 실험체에 인장을 주었다.

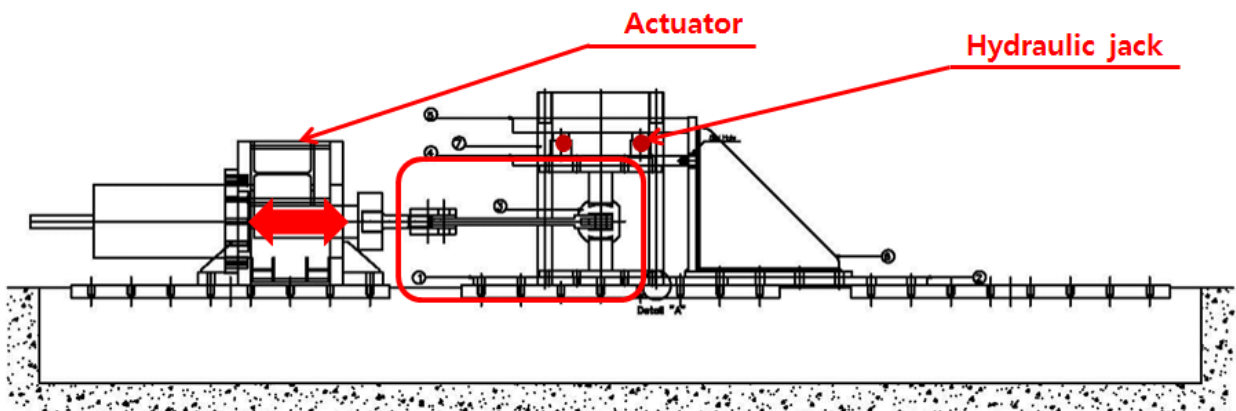
하부에 보강링이 설치된 FREE NODE의 압축에 대한 항복하중은 786kN, 인장에 대한 항복하중은 850kN)이므로 유압잭으로 가해지는 축력은 압축의 경우 393kN(50%)와 629kN(80%), 인장의 경우 425kN(50%)와 680kN(80%)이다. 실험체의 상세는 <Table 3>과 같다.

〈Table 3〉 Test specimens list

Name	Loading condition	Axial force (kN)	Qty
M-Mo-n_R(C50)	Compression	393 (Yield load 50%)	1
M-Mo-n_R(C80)	Compression	629 (Yield load 80%)	1
M-Mo-n_R(T50)	Tension	425 (Yield load 50%)	1
M-Mo-n_R(T80)	Tension	680 (Yield load 80%)	1

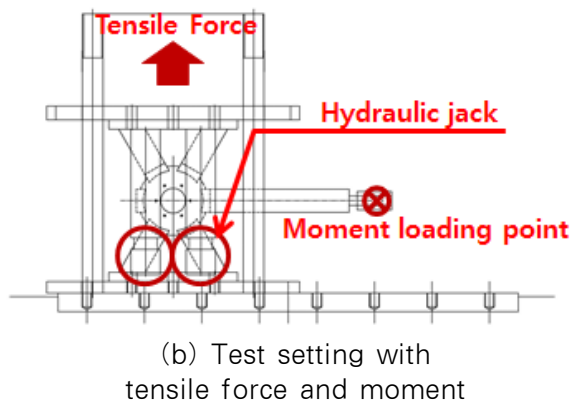
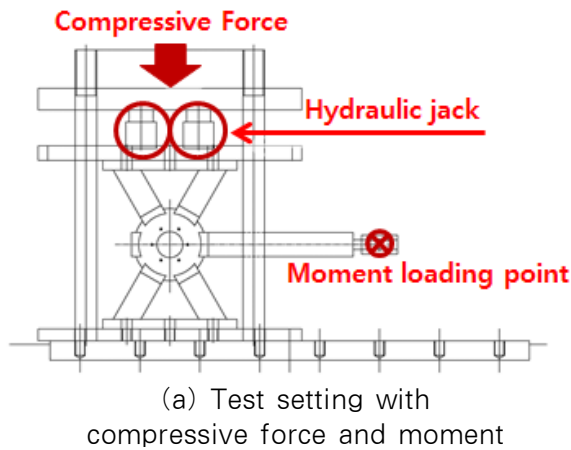
3.3 계측 계획

실험체의 설치는 <Fig. 7>에서 나타내었다. 모멘트를 받는 노드의 거동을 구현하기 위해 노드에 위치한 6개의 Sub-Wing 중 1곳은 캔틸레버와 같이 각형강관을 설치하고 액추에이터가 힘을 줄 수 있도록 그 끝에 핀으로 고정할 수 있도록 마무리 하였다. 그리고 동시에 축력을 주기 위해 인접한 Sub-Wing에 설치된 각형강관 2개를 하나의 철판으로 연결하였고, 이를 대칭으로 만들어 누르거나 당겨서 압축력과 인장력을 가력 할 수 있도록 하였다.



〈Fig. 6〉 Install of actuator and hydraulic jack

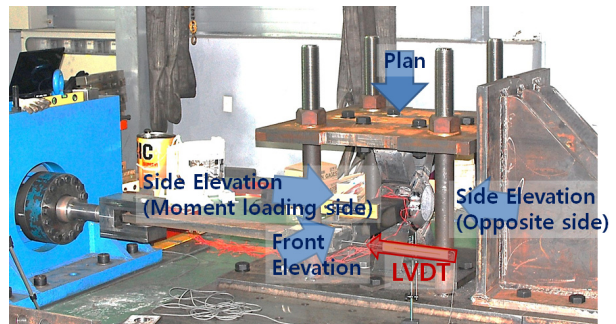
<Fig. 8>의 표시된 방향에 맞춰 Ball에 설치한 gage 위치를 <Fig. 9>에 나타내었다. gage ①~④, ⑤~⑨는 Ball의 세로 방향으로 일직선으로 배치함으로써 Ball의 중심부와 상·하부의 오프닝 부분과 인접한 부분의 상하부방향 응력 분포를 확인하려 하였고, ⑩~⑮는 오프닝 주변의 가로 방향 즉 팽창하고자 하는 방향의 변형률을 살펴봄으로써 오프닝 주변에서 응력이 집중되는 부분이 있는지 검증하였다.



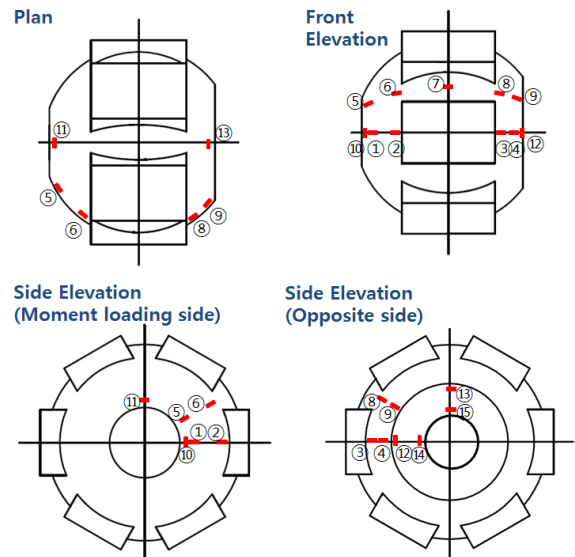
<Fig. 7> Specimens setting

액추에이터와 실험체는 앞서 설명한 바와 같이 핀을 이용해 결합하였고, LVDT를 이용하여 Ball에 연결되어 뺀어 나온 각형강관 부재가 이동한 길이를 측정하였다<Fig. 8>. 측정된 길이는 부재 각형강관의 길이에 비하여 작으므로 기초 계산학에서 사용하는 곡률 방정식을 이용한 아래 (1)식에 의하여 모멘트-회전각의 거동을 구할 수 있다.

$$M = F \times L, \quad \tan \theta = \frac{\delta}{L} \approx \theta \quad (|\theta| < 1) \quad (1)$$



<Fig. 8> Install of LVDT and plan view



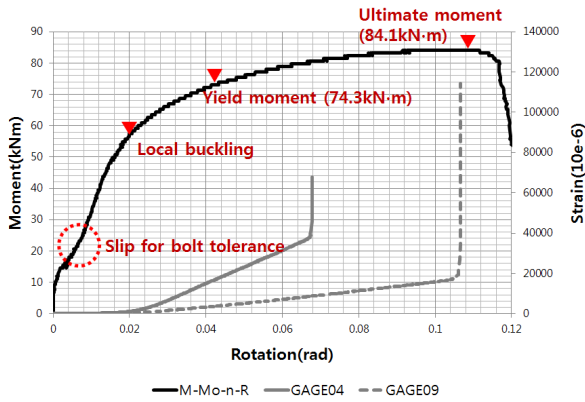
<Fig. 9> Install of strain gages

4. 실험 결과

4.1 M-Mo-n_R

<Fig. 10>에 축력을 주지 않고 순수한 모멘트만 가한 실험체인 M-Mo-n_R의 모멘트-회전각 값과 주요 gage를 그래프로 나타내었다. 좌측 y-축은 모멘트(kN·m), 우측 y-축은 gage 값(10⁶)이고 x-축은 회전각(radian)이다. gage04와 gage09 모두 볼의 하부 방향으로 휨 모멘트를 주었을 때 압축력을 받는 부분이다. 0.02 radian 부근에서 모멘트가 가해지는 선상에 위치한 gage04의 값이 증가 하는 것을 확인

할 수 있으며 이를 통해 국부 좌굴이 시작되었음을 알 수 있다. 그래프를 통해 구한 탄성구간의 최대 모멘트 값은 74.3kN·m으로 2.2절에서 제시한 목표 모멘트보다 543% 높은 값을 가진다.



<Fig. 10> Moment-rotation / gage-rotation relationship of M-Mo-n_R

실험 종료 후 실험체는 휨에 의해 압축되는 일부 부분에서 국부적으로 좌굴되어 패인 부분이 있으나 반대쪽 휨에 의해 인장을 받는 부분과 상·하부 오픈 부근의 변형은 없었고(<Fig. 11>), 이는 gage 분석에 의해서도 확인 할 수 있다.



(a) Top opening under tensile force



(b) Bottom opening under compressive force

<Fig. 11> M-Mo-n_R

<Fig. 10>의 모멘트-회전각 그래프의 초기 탄성 구간에서 기울기가 일정하지 않은 것은 실험체를 고정할 때 사용한 방법으로 볼트 접합을 사용하고 핀을 이용해 액추에이터와 실험체를 연결하였기 때문에 발생한 공차에 의한 슬립이라고 판단된다. 반면 M-Mo-n_R(C50), M-Mo-n_R(C80), M-Mo-n_R(T50), M-Mo-n_R(T80)과 같은 실험체들은 추가적으로 가해진 압축력 또는 인장력으로 인해 실험체가 바닥면에 강하게 밀착됨으로써 더 큰 마찰력을 가지게 되어 공차로 인한 영향을 덜 받았으리라 생각할 수 있다.

4.2 M-Mo-n_R(T50) & M-Mo-n_R(T80)

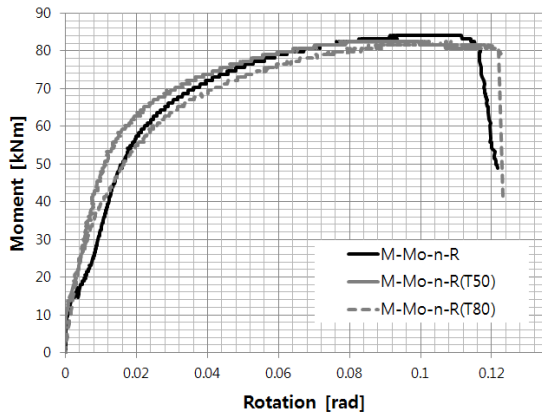
M-Mo-n_R(T50)과 M-Mo-n_R(T80) 항복 모멘트, 최대 모멘트, 초기 회전 강성, 파괴 모드를 <Table 4>에 나타내었다.

<Table 4> Structural performance of M-Mo-n_R(T)

Specimen	Yield moment (kN·m)	Ultimate moment (kN·m)	Initial stiffness (kN·m/rad)	Failure mode
M-Mo-n_R	74.3	84.1	3257.8	Local Buckling
M-Mo-n_R(T50)	68.3	82.4	4187.5	Local Buckling /tension crack
M-Mo-n_R(T80)	59.8	82.4	4941.3	Local Buckling /tension crack

4.2.1 모멘트-회전각 관계

축력 실험을 통해 얻은 인장 항복 하중의 50% (425kN)와 80%(680kN)를 실험체 M-Mo-n_R(T50)과 M-Mo-n_R(T80)에 각각 유압잭을 이용하여 가력한 후 액추에이터를 이용해 모멘트를 가력 하였다. 각각의 모멘트-회전각 그래프를 축력 없이 모멘트만 가력한 M-Mo-n_R과 비교하여 <Fig. 12>에 나타내었다. 최대 모멘트는 크게 차이 나지 않음을 확인할 수 있고, 인장력을 많이 받을수록 항복 모멘트가 감소하고 초기 회전 강성이 증가하는 경향이 있다.



<Fig. 12> Moment-rotation relationship curves of M-Mo-n_R(T)

4.2.2 gage 분석

<Fig. 13(a)>는 각 실험체의 gage04의 값을 정리한 그래프이다. M-Mo-n_R(T50)과 M-Mo-n_R(T80)의 gage 측정값은 M-Mo-n_R의 경향과 흡사하여 gage04가 가장 급격하게 변하는 값을 가진다. 이러한 경향은 각 실험체 별로 모멘트로 인해 인장을 받는 부분에 위치한 gage02의 그래프(<Fig. 13(b)>)에서도 확인 할 수 있다. 이를 통해 추가 인장력의 여부가 모멘트를 받을 때의 응력 분포에 크게 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다.

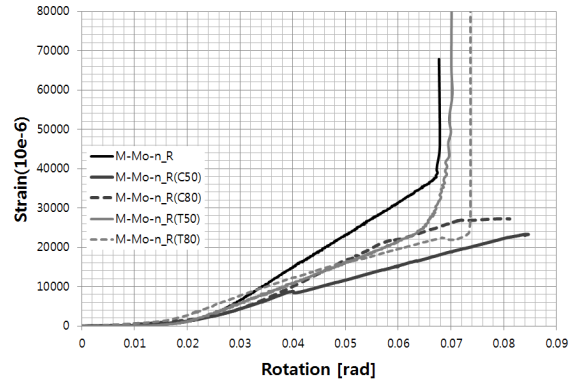
4.2.3 파괴 형상

추가 인장력을 가한 실험체들은, 순수하게 모멘트만 받는 M-Mo-n_R의 파괴 모드인 모멘트로 인해 압축을 받는 부분의 국부 좌굴 외에 인장을 받는 부분의 Sub-Wing 모서리 주변의 Ball이 찢어진다. 이것은 모멘트 가력 전에 인장력이 Ball에 가해져서 초기의 Ball보다 인장력에 취약한 상태에서 모멘트가 인한 인장이 추가적으로 발생되므로 생기는 현상으로 판단된다. gage와 모멘트-회전각 그래프를 통해 비교해 보았을 때 압축 측면의 국부 좌굴이 일어나고 후에 인장 측면의 찢어짐이 일어남을 알 수 있다.

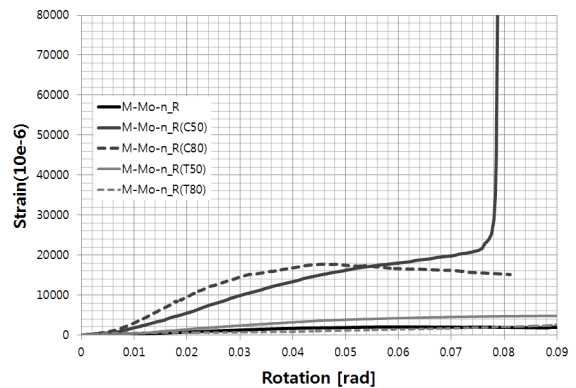
4.3 M-Mo-n_R(C50) & M-Mo-n_R(C80)

M-Mo-n_R(C50)과 M-Mo-n_R(C80) 항복 모멘트,

최대 모멘트, 초기 회전 강성, 파괴 모드를 <Table 5>에 나타내었다.



(a) gage04



(b) gage02

<Fig. 13> M-Mo-n_R

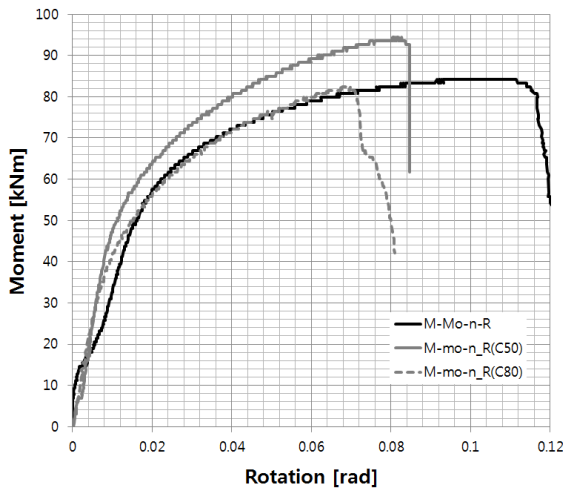
<Table 5> Structural Capacity of M-Mo-n_R

Specimen	Yield moment (kN·m)	Ultimate moment (kN·m)	Initial strength (kN·m/rad)	Failure shape
M-Mo-n_R	74.3	84.1	3257.8	Local buckling
M-Mo-n_R(C50)	68.2	94.4	4940.3	Local buckling
M-Mo-n_R(C80)	57.0	82.4	5181.3	Local buckling

4.3.1 모멘트-회전각 관계

축력 실험을 통해 얻은 압축 항복 하중의 50% (393kN)와 80%(629kN)를 실험체 M-Mo-n_R(C50)과 M-Mo-n_R(C80)에 각각 유압잭을 이용하여 가력한 후 액추에이터를 이용해 모멘트를 가력 하였다. 압축력을 가한 실험체를 순수 모멘트만 가해진 M-Mo-n_R의 모멘트-회전각 그래프와 비교하여

<Fig. 14>에 나타내었다. 초기 압축력을 받지 않은 실험체의 최대 회전각에 비해 항복 압축력의 50%를 받고 있는 M-Mo-n_R(C50)의 최대 회전각은 25.0%, M-Mo-n_R(C80)의 최대 회전각은 36.3% 각각 감소하였다. 국부 좌굴에 의해 최종 파괴가 일어나므로 가해지는 압축력에 비례하여 최대 회전각이 제한됨을 알 수 있다. 또한 M-Mo-n_R(C50)의 최대 모멘트 값을 제외한다면 항복 모멘트와 초기 회전 강성의 경향성은 인장력을 받는 실험체와 유사함을 확인 할 수 있다.



<Fig. 14> Moment-rotation relationship curves of M-Mo-n_R(C)

4.3.2 gage 분석

<Fig. 13>의 gage02, gage04의 그래프를 보면 압축력을 추가로 받는 실험체가 다른 실험체와 경향이 다른 것을 알 수 있다. 압축을 받는 gage04에서는 M-Mo-n_R(C50)과 M-Mo-n_R(C80) 실험체의 gage 값이 급격한 변화가 없음을 확인할 수 있고, 인장을 받는 gage02에서는 다른 실험체들의 값에 비해 변화가 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 이는 Ball이 구형이어서 압축력으로 인해 3축 효과가 발생하였기 때문에 국부 좌굴로 인한 변형이 인장력을 받는 실험체나 순수 모멘트만 받는 실험체에 비해 어려웠고, 반대쪽의 인장면에서 변형이 생기기 쉬웠기 때문으로 판단된다.

4.3.3 파괴 형상

M-Mo-n_R 파괴 형상과 동일하게 모멘트로 인해 압축을 받는 Sub-Wing 모서리 부분의 Ball에 국부 좌굴이 발생하였다. M-Mo-n_R(T) 실험체들에 비해 응력이 분산되었지만 모멘트 가력 전에 압축력을 받고 있는 Ball에서 모멘트로 인해 발생하는 인장력이 상쇄되는 효과를 가져와 Ball의 찢어짐 없이 국부 좌굴로 인해 파괴되었음을 알 수 있다.

<Table 5>에서 확인할 수 있듯이 M-Mo-n_R(C50)의 최대 모멘트, 초기 회전 강성이 다른 실험체에 비해서 높은 것을 알 수 있다. 이것은 Ball의 모멘트 성능이 국부 좌굴에 좌우되는 것으로 미루어 볼 때 국부 좌굴이 일어나는 부분 또는 전체적인 Ball이 보수적인 제작으로 인해 상대적으로 기존의 실험체와 차이가 있었을 것으로 추정된다.

5. 결 론

싱글레이어 프리폼 시스템의 노드로 개발된 FREE NODE에 대해 축력과 모멘트를 동시에 받을 경우의 구조적 성능을 검증하기 위한 실험을 진행하였다. 압축력을 받지 않고 순수한 모멘트가 가력된 실험체와 축력실험에서 산정한 항복 하중의 50%, 80%를 축력으로 받으며 모멘트가 가력된 실험체 각각의 모멘트-회전각 관계, 파괴형상, gage 분석을 진행하였고 그 내용을 정리하면 다음과 같다.

- (1) M-Mo-n_R은 압축력 없이 순수한 모멘트를 받는 실험체로 모멘트로 인해 발생하는 압축력에 의해 Sub-Wing 주변이 국부 좌굴되며 파괴되었다. 탄성 구간의 최대 모멘트는 목표 모멘트에 비해 543% 초과한 값으로 FREE NODE의 모멘트 성능이 기준에 만족함을 나타내고 있다.
- (2) 인장력과 함께 모멘트를 받는 M-Mo-n_R(T50), M-Mo-n_R(T80) 실험체는 모멘트로 인

해 발생하는 인장면에서 Ball에 균열이 생김과 동시에 압축면에서 국부좌굴이 발생되며 파괴되었다. 초기에 가해진 인장력의 영향과 모멘트로 인해 생기는 휨에 의한 인장력에 의한 효과가 더해져서 균열이 발생한 것으로 판단된다. 항복 모멘트는 인장력을 많이 받을수록 낮아지지만 가장 작은 값을 가지는 M-Mo-n_R(T80)의 모멘트가 59.8kN·m로 목표 값에 비해 418% 초과한다.

(3) 압축력과 함께 모멘트를 받는 M-Mo-n_R(C50), M-Mo-n_R(C80)의 항복 모멘트는 68.2kN·m, 57.0kN·m로 목표 값에 비해 491%, 394% 초과한다. 압축력을 많이 받는 실험체일수록 항복 모멘트가 감소하는 경향을 보인다.

(4) 가력한 압축력에 비례해서 항복 회전각이 줄어들고 국부의 좌굴을 더욱 빠르게 일으키지만 전체적인 구조성능은 필요 성능에 비해 충분한 여유가 있으므로 FREE NODE의 성능을 결정하는 주요한 하중조건은 축력임을 알 수 있고 이러한 결론은 싱글레이어 구조물의 하중 전달 메커니즘과 일치한다.

따라서 FREE NODE를 축력 성능에 최적화 되도록 추가적인 연구를 진행할 예정이다.

또한 싱글레이어 프리폼 구조에서는 기하학적 형상에 따라 축력과 모멘트의 다양한 조합이 존재할 수 있으므로 본 논문에서 언급한 축력과 모멘트의 조합 외에 압축력, 인장력 그리고 모멘트를 동시에 받는 경우, 모멘트를 가력하는 개수와 방향이 다양화 되었을 경우의 구조성능 영향을 실험 또는 해석을 통해 검증하여야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 중소기업청 산학연공동기술개발사업(NO. R1007811), 한국연구재단 2013년도 일반연구자지원사업(R1305331)의 지원과 (주)삼영엠텍의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 감사를 드립니다.

References

1. 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
2. Soeren STEPHAN et al(2004), Reticulated Structures on Freeform Surfaces, Proceedings of the IASS Symposium, France 20 Sep 2004 - 24 Sep 2004
3. 주영규 외 3인(2010), 프리폼 구조의 노드 기술 현황 분석, 한국공간구조학회지, v.10 n.3(통권41호)
4. Kyung-Ju Hwang(2010), Advanced Investigations of Grid Spatial Structures Considering Various Connection Systems, Doctoral dissertation, University of Stuttgart
5. 이경주 외 4인 (2012), 단층 프리폼 대공간 구조물의 노드에 대한 축하중 구조성능 평가, 한국강구조학회 논문집 제24권 1호(통권116호), 59-71
6. Jintak Oh(2012), Cast iron joint for single layer space structure subjected to axial loadings, Proceedings of the AMPT 2012, Wollongong, Australia,
7. Kyung-Ju Hwang(2011), Bending Tests on an Advanced Spherical Node System in the Steel Free Form Spatial Structure, Proceedings of the ISSS 2011, Seoul, Korea
8. 한국강구조학회(2009), KBC2009 강구조설계, 구미서관

(접수일자 : 2013년 08월 30일)

(심사완료일자 : 2013년 10월 11일)

(게재확정일자 : 2013년 10월 18일)