

인천공항 제2터미널 에너지코어 단층 스페이스 프레임 구조물의 안정에 관한 연구

A Study on Stability of Single-layer Space Frame Structure for Energy Core of Incheon Airport Second Terminal

정 환 목*
Jung, Hwan-Mok

Abstract

The roof grid of single-layer space frame structure, for Energy Core of Incheon Airport Second Terminal, is very simple and aesthetic, but it is apt to buckle under external force because of mild curvature and complex shape.

The object of this study is to estimate the stability of single-layer space frame structures for Energy Core of Incheon Airport Second Terminal with the analytical conditions of structural design.

The results show that the buckling load of model(pin-pin, uniform load, rigid joint), that is, the most similar model to the analytical conditions of structural design, was 10.7kN/m².

Keywords : Stability, Single-layer, Space frame structure, Energy core of Incheon Airport Second Terminal

1. 서론

일반적으로 3차원 입체트러스로 볼 수 있는 스페이스 프레임 구조는 2차원 트러스와는 달리 구조물을 구성하는 골조가 상호 평등하게 응력을 부담하는 역학적으로 매우 우수한 구조형식이다.

그러나 단층 스페이스 프레임의 경우 주 부재 배치가 단순하여 골조미가 있는 반면 좌굴에 대해서는 복층보다 취약한 특성을 갖는 것이 일반적이다¹⁻³⁾. 따라서 단층으로서 대공간 구조물을 설계할 경우 일반적으로 지붕 곡률을 크게 확보하는 것이 구조물 강성 확보에 유리하다.

인천공항 제2터미널 에너지코어 구조물은 외부구조는 복층 트러스로 설계되고 있으며, 중앙부는 이 복층 트러스구조에 단층 스페이스 프레임 구조가 연결되어 있다. 이 단층 스페이스 프레임 구조는 그리드가 단순하고 미적이라서 골조를 그대로 노출시킬

수 있는 장점이 있는 반면 기하학적 형상이 복잡하고, 지붕곡률이 매우 작아서 부재 응력해석에 의한 구조 설계로서는 그 안정성을 장담할 수 없다. 국내에서는 법적으로 이에 대한 검증을 요구하고 있지는 않지만 대공간 구조물 붕괴는 개개부재 설계강도 부족보다는 구조물 전체의 안정문제로 인한 경우가 많으므로 이에 대한 다양한 설계조건 및 해석조건에 따른 시스템적인 연구가 반드시 필요하다.

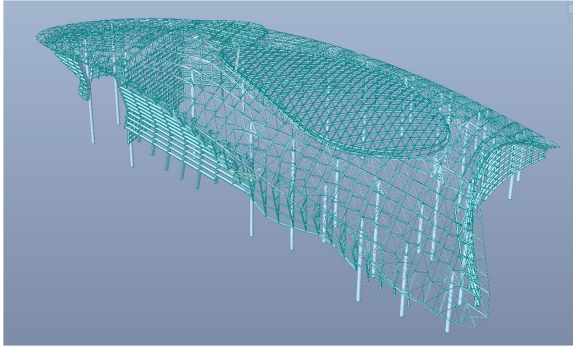
따라서 본 연구의 목적은 인천공항 에너지코어 구조물중에서도 좌굴에 매우 불리하다고 판단되는 단층 스페이스 프레임 구조물에 대한 구조물 전체의 안정성(stability)을 평가하는 것이다.

2. 모델 및 해석방법

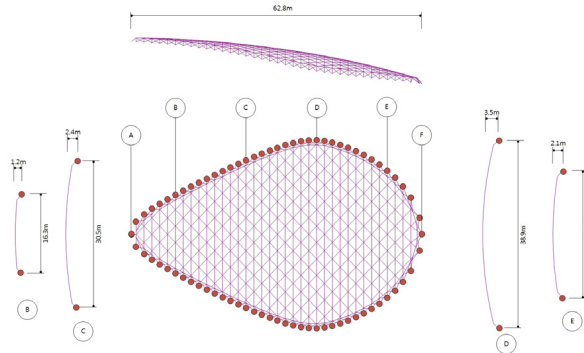
2.1 형상모델

본 연구의 해석대상인 단층 스페이스 프레임 구조의 크기는 단축 X방향 약 39m, 연직높이 Y방향 약 9.5 m, 장축 Z방향 약 63m의 크기를 갖고 있으며, 구

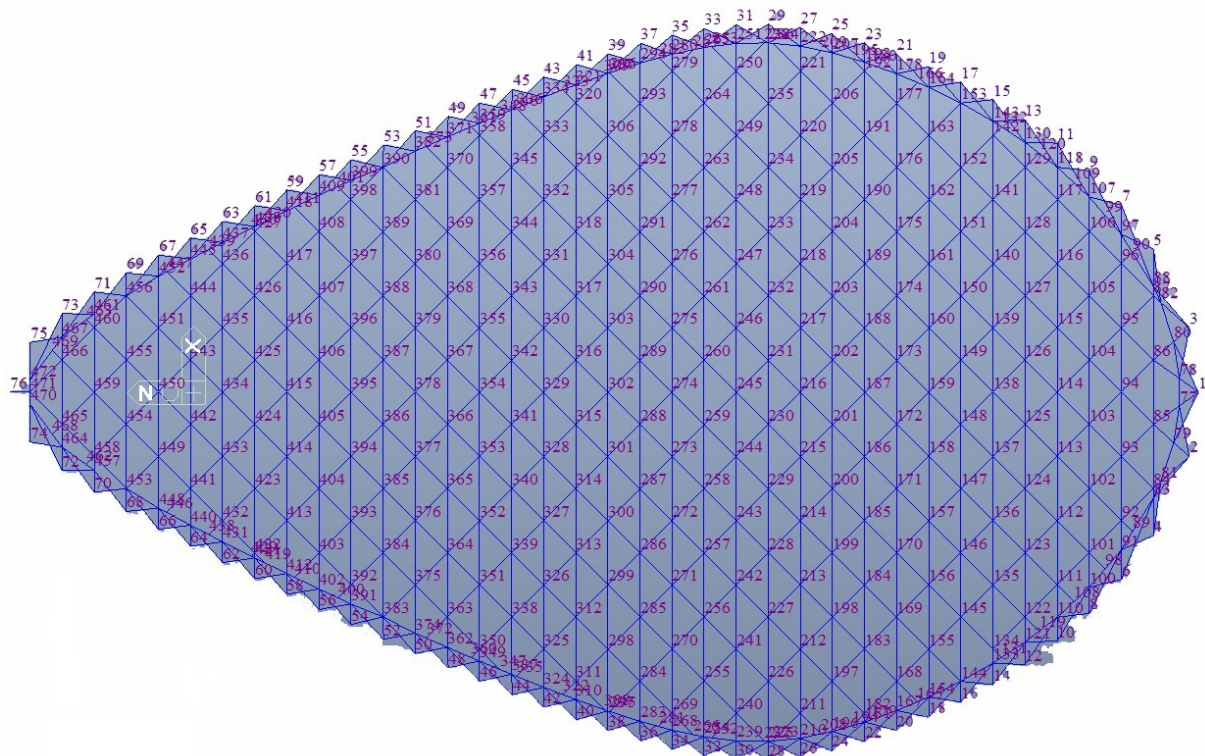
* 정희원, 경동대학교 건축디자인학과 교수, 공학박사
Department of Architecture Design, Kyungdong University
Tel: 031-869-9703, Email: hmjung@kduniv.ac.kr



<Fig. 1> Bird's-eye view of Energy Core frame



<Fig. 2> Network pattern & section of analysis model



<Fig. 3> Coordinate axis and support numbers(1~76), joint numbers(77~472)

조물 전체의 형상 및 조감도와 골조형상 및 절점번호는 <Fig. 1~3>에 나타낸다.

2.2 해석모델

<Table 1>은 해석모델의 모델명과 제원을 나타낸다. 본 연구에서는 <Table 1>에서 나타내는 것처럼 시스템적인 연구와 상호 비교를 위해 10개의 해석 모델을 도입한다. 여기서 반강접합은 후술하는 3.2.1의 (1) 식에서 무차원화한 휨강성계수 $K_{\theta} = 10^0$ 의 값 즉 $K_{\theta} = 1$ 을 적용한 것을 의미한다.^{3,4)}

<Table 1> Analytical conditions

Model	Support	Load	Joint
1	pin-pin	uniform	rigid
2			semi-rigid
3		half-uniform	rigid
4	pin-slide	uniform	rigid
5		half-uniform	semi-rigid
6	rigid-rigid	uniform	rigid
7		half-uniform	rigid
8		uniform	rigid
9	rigid-slide	half-uniform	rigid
10		uniform	rigid
Member data	* main member : □-100×400×16 * sub-member : L-150×150×15 * steel materials : SS400		

모델 1~6은 본 구조물의 구조설계 조건과 유사하며, 모델 7~9는 모델 1~6의 해석결과와 비교하기 위하여 추가 해석 모델로 도입한다. 좌굴하중은 계수하중이 아닌 사용성 하중을 고려한다. 하중방향은 자중과 적설하중을 고려하여 연직하중으로 한다.

2.3 해석 방법

구조물의 안정해석은 단층 스페이스 프레임 골조를 기하학적 비선형성을 고려하는 유한요소법에 의해 정식화했으며, 수치계산은 최대변위증분을 갖는 절점변위에 대하여 변위증분법을 적용하고, 각 증분 단계에서 강성행렬의 행렬식을 계산하여서 분기점을 구한다. 또한 이 분기점에서 고유치 해석을 행하여 이 고유벡터로부터 분기좌굴모드를 구한다^{2,6)}.

3. 해석 결과 및 분석

3.1 해석 결과

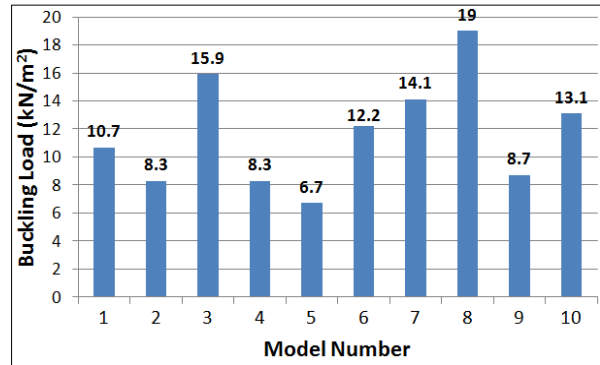
<Table 2> Results of analysis for each models

Mode	Qcr (kN/m ²)	Qn	Vmax (mm)	Vn	Pmax (kN)	ip-jp
1	10.7	395	410	395	3456	223-225
2	8.3	395	354	395	3204	223-225
3	15.9	379	463	379	3613	223-225
4	8.3	395	416	395	3760	80-82
5	6.7	406	363	406	3451	77-85
6	12.2	387	470	379	3042	74-470
7	14.1	395	319	395	-1675	395-405
8	19.0	355	421	355	-2298	379-387
9	8.7	395	416	395	4421	80-82
10	13.1	387	473	379	3827	80-82

<Table 2>는 각 모델의 해석 결과를 나타낸다. <Table 2>에서 Qcr, Qn, Vmax, Vn, Pmax, 그리고 ip-jp 은 각각 좌굴하중, 좌굴하는 지점의 절점번호, 최대연직변위, 최대연직변위 절점번호, 최대부재축하중 그리고 최대축하중 부재의 양단 절점번호를 나타낸다. 부재축하중에서 - 는 압축하중을 나타낸다. 여기서 최대연직변위 값과 최대부재축하중 값은 구조물 전체의 좌굴 바로 직전 값으로서 구조설계에서 제시하는 값과는 차이가 있음을 밝혀둔다.

3.2 결과분석

3.2.1 좌굴하중



<Fig. 4> Buckling load for each models

<Fig. 4>는 <Table 2>의 결과를 그림으로 나타낸 것이다. <Table 2>와 <Fig. 4>로부터 가장 대표적인 해석조건인 편-편, 전재, 강접합인 경우, 좌굴하중 값은 1 m² 당 10.7kN, 즉 Qcr=10.7kN/m² 이다. 이 값은 설계하중값인 4.2kN/m² 값(추정치)의 약 250%에 해당하는 값이다. 반재하중의 경우는 전재 하중보다 전 모델에서 좌굴하중이 높은 것으로 평가되어 본 연구에서는 전재하중에 의해 안정성이 지배를 받고 있음을 알 수 있다.

지점조건의 경우는 상식을 벗어나지 않는 결과로서 편-편 조건의 경우가 편-슬라이드 조건보다 전 모델에서 좌굴하중이 큰 것을 알 수 있다. 편-슬라이드의 경우 X방향 변위 값은 support 시공 시 매우 중요한 요소가 될 수 있으므로 변위 및 변형모드에서 상세하게 검토하고자 한다.

본 구조물은 접합부 강성을 강접합으로 설계하고 있으나 본 연구에서는 접합부 휨강성 변화에 따른 좌굴내력의 변화를 시트템적으로 검토하기 위하여 접합부에 집중하는 이상적인 스프링강성에 의해 접합부 휨강성을 아래식으로 모델링한다^{3,4)}.

$$K_{\theta} \times \frac{6EI}{L_i} \tag{1}$$

여기서 K_{θ} 는 무차원화한 휨강성의 계수를 나타내며, 우수좌표계에서 부재축방향을 Z축으로 할 때 $K_{\theta} = K_{\theta_x}$ (면내휨) = K_{θ_y} (면외휨)를 나타내며, K_{θ_z} (비틀림) = ∞ 로 가정한다. 단, $K_{\theta_z} = \infty$ 는 접합부

휨강성 모델링의 경우에만 적용하는 값이다. E 는 영계수, I 는 단면2차모멘트, L_i 는 i 번 부재의 부재 길이를 나타낸다.

본 해석에 있어서 K_θ 는 $10^5 \sim 10^{-5}$ 까지 11종류로 하며, 이때 10^5 은 강접합, 10^{-5} 는 핀접합을 의미하고, 나머지의 것은 그 중간적인 강성상태를 나타낸다. 또한 본 해석에 있어서 접합부 휨강성은 부재 축방향의 응력과는 관계가 없다고 가정한다.

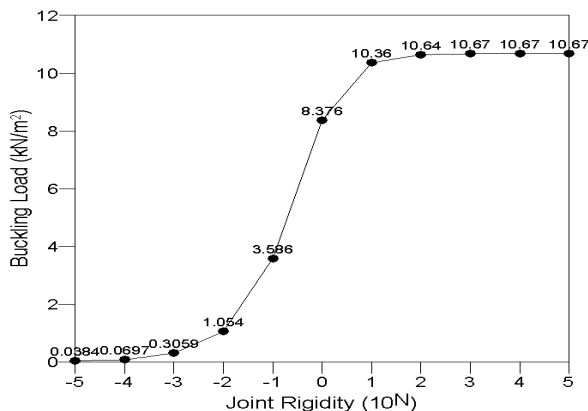
상기 식 (1)을 적용하여 핀-핀, 전재하중 조건 모델을 대상으로 접합부 강성조건에 따른 좌굴내력을 구한 결과를 <Table 3>과 <Fig. 5>에 나타낸다.

부재절점이 완전핀인 경우는 좌굴하중이 0.04kN/m^2 를 넘지 않을 정도로 거의 내력을 갖지 못하는 결과를 얻었으며, 반강접합인 $K_\theta=10^0$ 에서 좌굴내력이 8.3 kN/m^2 으로 강접합의 약 78% 정도의 내력을 갖는 것을 알 수 있다.

<Fig. 5>에서 알 수 있는 것처럼 반강접합 조건인 접합부강성계수 $K_\theta=10^{-2} \sim 10^1$ 값 사이에서 좌굴하중이 급격하게 변하는 것을 알 수 있다. 이는 접합부 강성조건 미세한 차이에도 불구하고 좌굴내력은 큰 차이를 나타냄을 의미한다.

<Table 3> Q_{cr} for K_θ (pin-pin & uniform load)

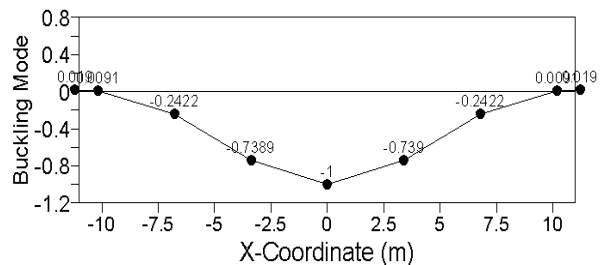
K_θ	Q_{cr} (kN/m ²)	K_θ	Q_{cr} (kN/m ²)
10-5	0.04	101	10.36
10-4	0.07	102	10.64
10-3	0.31	103	10.67
10-2	1.05	104	10.67
10-1	3.59	105	10.67
100	8.38		



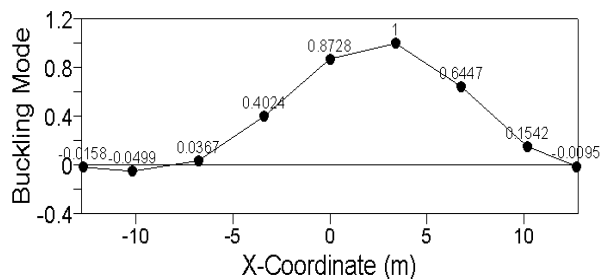
<Fig. 5> Buckling load according to K_θ (pin-pin, uniform load)

3.2.2 좌굴모드

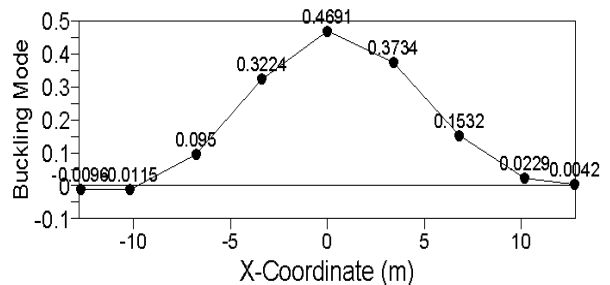
<Fig. 6~11>은 해석모델의 좌굴절점을 포함하는 X-X단면에 대한 좌굴모드를 나타낸다. 전재하중, 핀-핀, 강접합의 경우 좌굴모드는 좌굴직전 변형모드와 유사한 형상으로 좌굴하는 것을 나타내고 있으며, 반재하중, 핀-핀, 강접합의 경우는 안정문제에서는 큰 의미를 갖는 것은 아니지만 좌굴직전의 변형모드와는 다르게 중앙부가 연직상방향으로 좌굴하는 것을 알 수 있다. 대부분의 해석모델에서 좌굴하는 위치는 <Table 2>의 Q_n 에서 나타내고 있는 것처럼 X방향으로 지간이 짧은 지붕의 중앙부에서 발생하고 있다. 본 해석에서는 지붕의 곡률과 부재 단면성질을 고려하여 압축력에 의한 부재좌굴이 발생하지 않는다고 가정하였으며, 그 결과 좌굴형태는 전 모델에서 절점군을 중심으로 좌굴하는 전체좌굴이 발생한다.



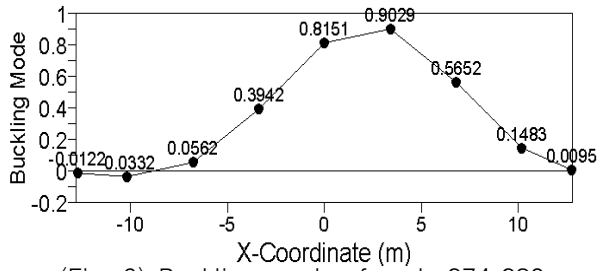
<Fig. 6> Buckling mode of node 374-382 section (pin-pin, uniform load, rigid joint)



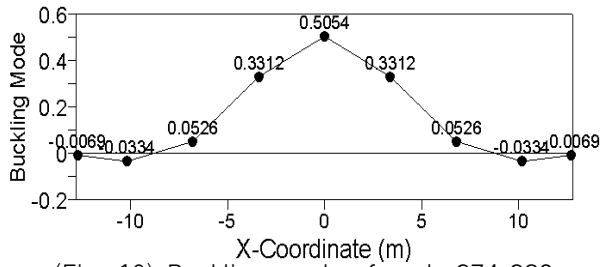
<Fig. 7> Buckling mode of node 374-382 section (pin-pin, half uniform load, rigid joint)



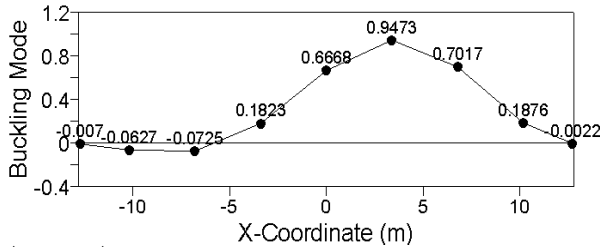
<Fig. 8> Buckling mode of node 374-382 section (pin-slide, uniform load, rigid joint)



<Fig. 9> Buckling mode of node 374-382 section(pin-slide, half uniform load, rigid joint)



<Fig. 10> Buckling mode of node 374-382 section(fix-fix, uniform load, rigid joint)



<Fig. 11> Buckling mode of node 374-382 section (fix-fix, half uniform load, rigid joint)

3.2.3 좌굴직전 변위 및 변형모드

<Table 4> Maximum displacement of each direction for typical models

Model	U _{max} (mm)	U _n	V _{max} (mm)	V _n	W _{max} (mm)	W _n
1	30	284	410	395	44	274
2	27	293	354	395	39	274
3	-41	261	463	379	54	312
4	65	39	416	395	50	149
5	55	37	363	406	44	149
6	75	37	470	379	60	174

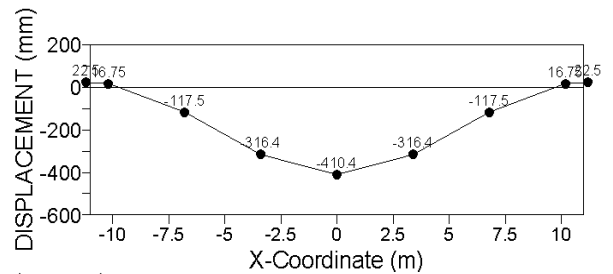
<Table 4>는 대표적인 모델 즉, 판-이동 조건의 경우, 각 모델의 각 방향 최대변위값을 나타낸다. <Table 4>에서 U_{max}, V_{max}, W_{max}은 각각 x, y, z 방향의 최대변위이며, U_n, V_n, W_n은 최대변위가 발생하는 절점번호를 나타낸다. <Table 4>에서 알 수 있는 것처럼 판-이동인 경우 X축 방향 수평최대변위는 이동단 지점에서 발생하였으며, 가장 큰 수평변위는

반재하중, 강접합의 경우가 75mm로 가장 큰 값을 가지며, 전재하중, 강접합의 경우는 이보다 작은 65mm의 값을 나타낸다.

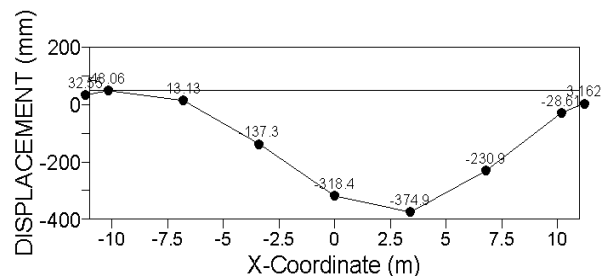
좌굴직전 최대변위는 전 모델에서 X, Z방향보다는 Y방향 즉, 연직방향이 가장 크게 나타난다.

<Fig. 12~17>은 대표적인 단면의 연직방향 변형모드를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 판-전재, 강접합조건에서의 절점번호 374-382를 지나는 단면의 연직방향 변형모드는 중앙부에서 연직하방향으로 최대변위가 나타나며, 단부 부근에서는 미소한 값이긴 하지만 연직상방향을 변형분포를 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

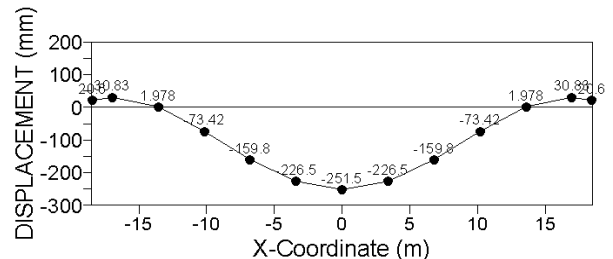
이는 양단편을 갖는 부정정 보의 경우에는 볼 수 없는 현상으로 본 구조물은 작지만 지붕 곡률을 가지고 있기 때문에 아치나 구형 스페이스 프레임이 갖는 막응력이 작용하여 구조물 전체의 강성 확보에 기여하고 있음을 의미한다.



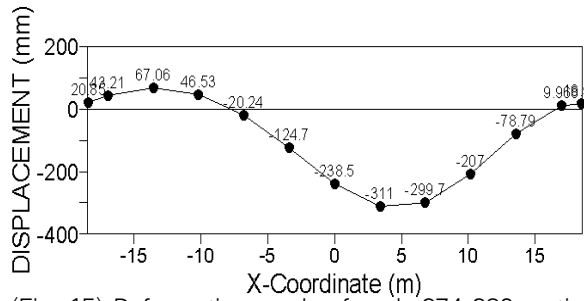
<Fig. 12> Deformation mode of node 374-382 section (pin-pin, uniform load, rigid joint)



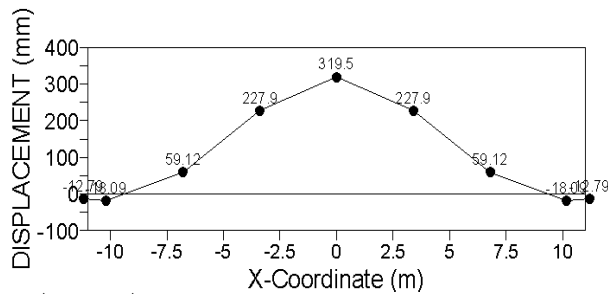
<Fig. 13> Deformation mode of node 374-382 section(pin-pin, half uniform load, rigid joint)



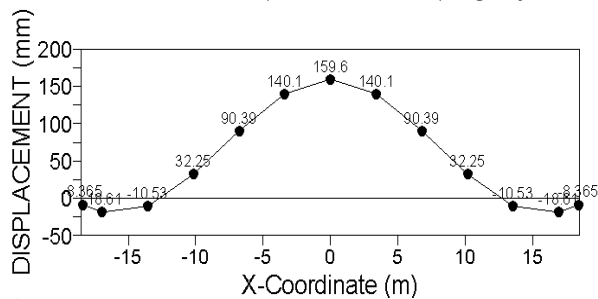
<Fig. 14> Deformation mode of node 374-382 section(pin-slide, uniform load, rigid joint)



<Fig. 15> Deformation mode of node 374-382 section (pin-slide, half uniform load, rigid joint)



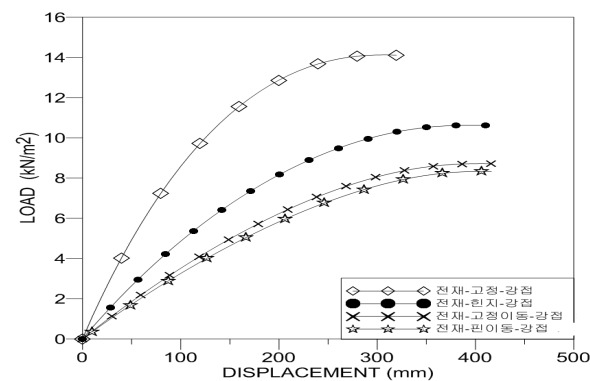
<Fig. 16> Deformation mode of node 374-382 section (fix-fix, uniform load, rigid joint)



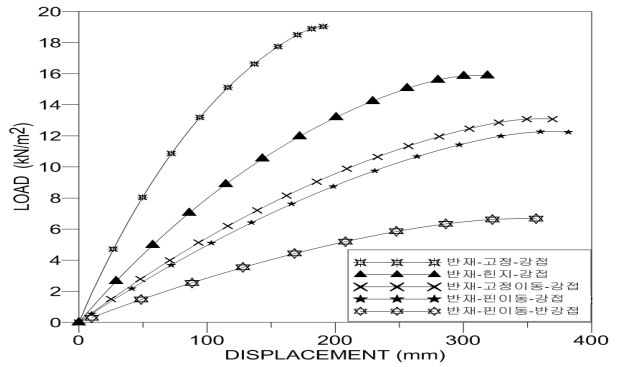
<Fig. 17> Deformation mode of node 374-382 section (fix-fix, half uniform load, rigid joint)

3.2.4 하중-변위 관계 곡선

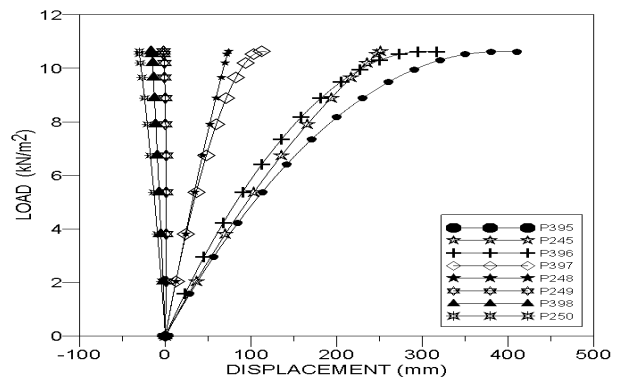
<Fig. 18~19>은 대표적인 좌굴절점인 395번 절점에 대한 전재하중과 반재하중의 경우 좌굴 전 하중-변위 관계곡선을 나타낸다.



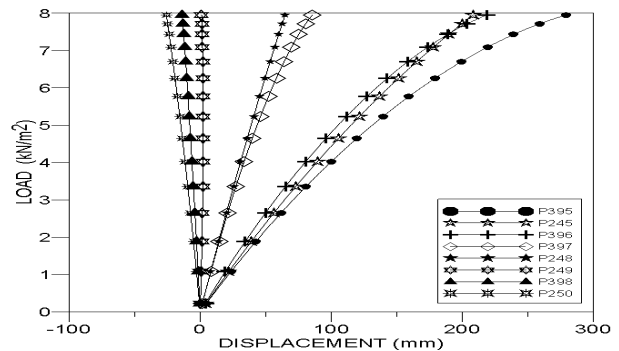
<Fig. 18> Load-displacement curve before buckling at point 395 (uniform load)



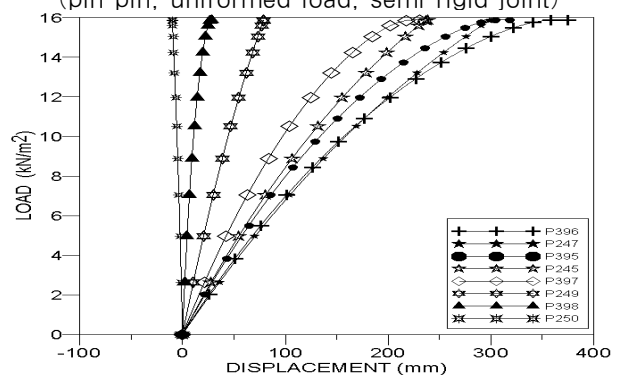
<Fig. 19> Load-displacement curve before buckling at point 395 (half-uniform load)



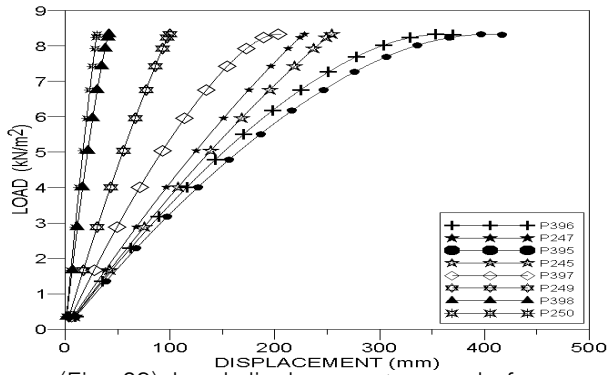
<Fig. 20> Load-displacement curve before buckling (pin-pin, uniform load, rigid joint)



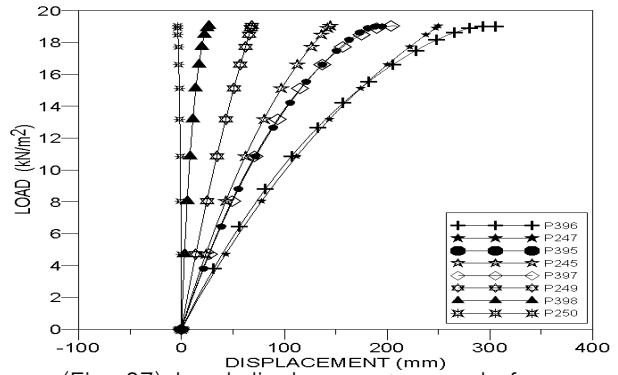
<Fig. 21> Load-displacement curve before buckling (pin-pin, uniform load, semi-rigid joint)



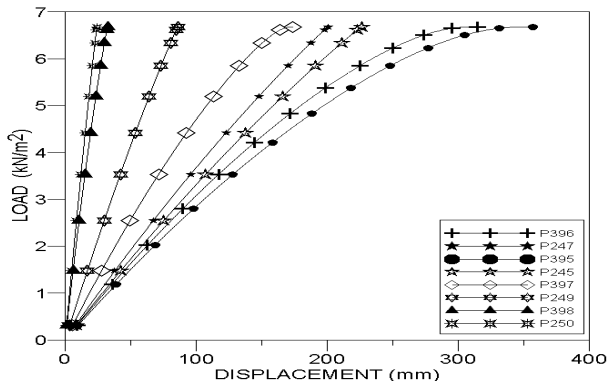
<Fig. 22> Load-displacement curve before buckling (pin-pin, half uniform load, rigid joint)



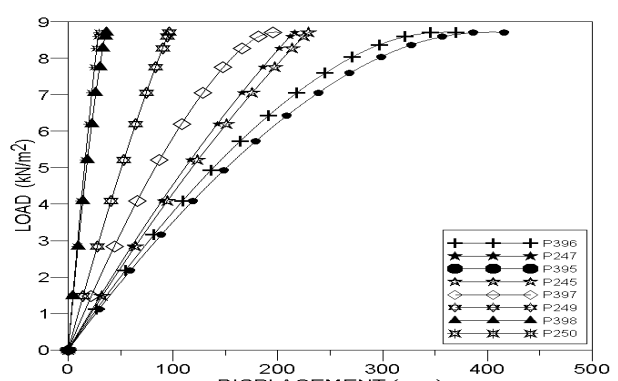
〈Fig. 23〉 Load-displacement curve before buckling(pin-slide, uniformed load, rigid joint)



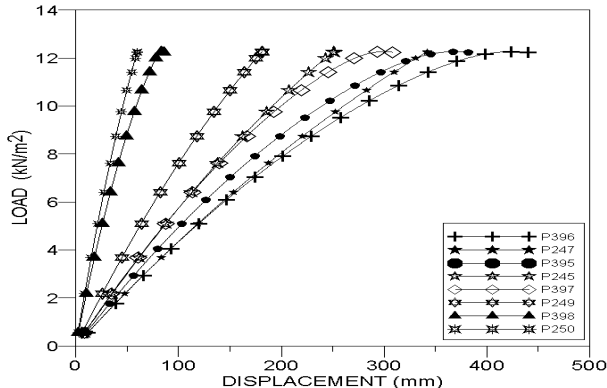
〈Fig. 27〉 Load-displacement curve before buckling(fix-fix, half uniform load, rigid joint)



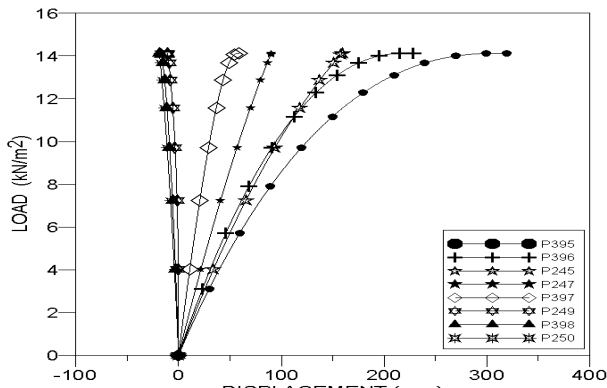
〈Fig. 24〉 Load-displacement curve before buckling(pin-slide, uniformed load, semi-rigid joint)



〈Fig. 28〉 Load-displacement curve before buckling(fix-slide, uniformed load, rigid joint)



〈Fig. 25〉 Load-displacement curve before buckling(pin-slide, half uniform load, rigid joint)

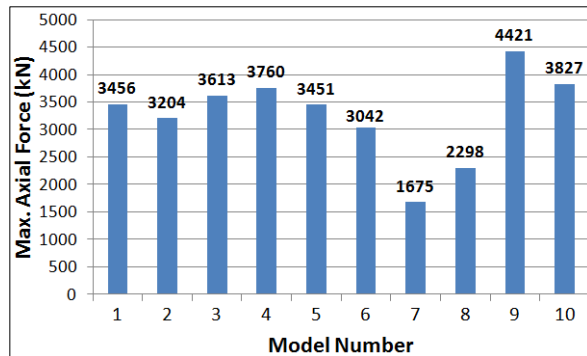


〈Fig. 26〉 Load-displacement curve before buckling(fix-fix, uniformed load, rigid joint)

〈Fig. 20~28〉는 해석조건 별 각 모델의 좌굴 전 하중-변위 관계곡선을 나타낸다.

그림으로부터 좌굴 전까지 하중에 따른 각 절점의 변위를 알 수 있으며, 〈Fig. 20〉에서 알 수 있는 것처럼 핀-핀, 전재하중, 강접합인 경우, 지붕골조의 X축 기준으로 중앙부에 위치한 좌굴절점인 395번 절점에서 가장 큰 처짐이 발생하고 있으며, 이 변위는 좌굴직전까지 기하학적인 비선형성이 매우 강하게 나타나고 있다. 한편, 본 구조물의 경우 하중-변위 관계곡선으로부터 알 수 있는 것처럼 스냅스루 좌굴현상에서 나타나는 것과 같은 순간적으로 급변하는 매우 복잡한 변형상태는 나타나지 않는다. 따라서 처짐을 통해 구조물 전체의 안전성을 사전에 확인할 수 있는 골조형상 및 단면으로 설계되어 있음을 알 수 있다. 〈Fig. 20~28〉의 하중-변위곡선 데이터는 자중, 시공하중, 적재하중 등이 사용하중으로서 작용하는 경우, 재하 단계별 절점 변위를 알 수 있기 때문에 설계 및 시공기술자는 본 데이터를 활용하여 시공의 효율성을 높일 수 있으며, 완공 후는 유지관리 측면에서 활용할 수 있을 것이다.

3.2.5 부재 응력



<Fig. 29> Pmax values for each models

<Fig. 29>는 <Table 2>의 결과로부터 전 모델에 대한 부재의 최대축응력값을 나타낸다. 최대축응력을 받는 부재는 전 모델에서 구조물의 경계부에 위치하고 있으며, X축과 평행하는 메인 부재이다. 이 결과는 스페이스 프레임 구조가 갖는 최고의 장점인 개개의 부재가 균등하고 평등하게 응력을 부담하는 결과와는 다소 차이가 있지만, 본 구조물처럼 형상이 복잡하고 곡률이 완만한 구조물의 경우에는 주부재인 X축과 평행하는 부재에 응력을 집중시켜 구조물의 힘의 흐름을 단순화시킴으로 시공 후 유지관리 등에 유리한 점을 고려하여 설계한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구를 통하여 인천공항 제2터미널 에너지코어 단층 스페이스 프레임 구조물에 대한 좌굴특성 등을 파악할 수 있었으며, 설계조건에 가장 근접하는 해석조건인 편-편, 전재, 강접합 모델의 경우, 좌굴하중 값은 10.7kN/m²으로서, 추정 설계하중값 4.2 kN/m²의 약 250%에 해당하는 값을 얻었다.

이 결과로부터 본 구조물은 추정 설계하중 범위 내에서는 구조물의 안정성이 확보된다는 것을 확인할 수 있었다. 특히 본 연구는 자중과 적설하중이 연직방향으로 작용하는 경우만 해석조건으로 가정하였으며, 풍하중 및 구심하중이 작용할 경우는 별도의 검토가 필요함을 밝혀 둔다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 경동대학교 산학협력단 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. Y. Hangai, "Architectural Institute of Japan. Stability of Sing-layer Latticed Domes State-of-the-art", edited by K. Heki, August, 1989, pp. 121-254
2. Yamada, M. et al., "Theoretical and Experimental Study on the Buckling of Rigidly Jointed Single Layer Latticed Spherical Shells under External pressure", Shell, Membranes & Space Frame, Preceedings of the IASS Symposium, Osaka, 1986, pp. 113-120
3. Kwon, Young-Hwan, Choi, Young-Sik, "Study on the Effect of Joint Flexibility on the Buckling-Characteristics of Single-Layer Latticed Domes with Triangular Network", Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol9, No.5, 1993.5, pp. 97-109
4. Jung, H. M et al., "A Study on Buckling Characteristics of Single-Layer Latticed Domes with Triangular Network", Second Asian-Pacific Conference on Computational Mechanics, Sydney, 8. 1993
5. Kim, Cheol-Hwan, Suk, Chang-Mok and Jung, Hwan-Mok, "The Buckling Characteristics of Single-Layer Lam Domes according to Support Position under Construction", Journal of the Korea Association for Spatial Structures, Vol.10, No.4, 2010.12, pp. 67~74
6. Jung, Hwan-Mok,, Yoon, Seok-Ho, "A Study on Stability of Arch-Type Vinyl House Structures", Journal of the Korea Association for Spatial Structures, Vol.14, No. 4, 2014.12, pp. 81-88

- Received : November 16, 2015
- Revised : December 07, 2015
- Accepted : December 09, 2015