

지붕하중 증가에 따른 공장건물 안정성확보를 위한 지붕외장재의 구조성능정보의 필요성

강경수
동명대학교 건축공학과

The Necessity of Structural Performance Informations of Sandwich Panels for The Stability of Industry Building using Sandwich Panel as Roof Assemblies.

Kyung-Soo Kang

Department of Architectural Engineering, TongMyong University

요약 구조해석기법의 발전과 경제성을 중시하는 현실에 의해 건축물 주골조의 모멘트 강도비($M_u/\phi M_n$)는 점차 증가하고 있다. 따라서 본 연구에서는 지붕재로 샌드위치패널을 사용하는 건축물의 안전성검토를 위하여, 지붕하중의 증가에 따른 구조해석을 실시하여 주구조부재의 M_u/M_y 와 M_u/M_p 의 변화를 검토하였다. 해석모델은 PEB구조 건물과 일반 H형강구조 건물을 대상으로 지붕하중을 증가시켜 구조해석을 실시하였다. 해석결과 해석모델의 지붕 설계하중의 약11% 증가할 경우, 주구조부재의 M_u/M_y 가 1을 초과하였고, 약 36% 증가할 경우 작용모멘트가 소성모멘트보다 커져 부재의 파괴가 예상되었다. 중도리간격에 따른 지붕외장재가 지지할 수 있는 최대하중, KS기준에서 제시한 최대하중, 외장재생산업체의 시험값으로 산정한 최대하중을 비교하였다. 3가지 방법으로 구한 패널이 지지할 수 있는 최대하중값은 주구조부재의 파괴가 예측되는 하중보다 큰 값을 나타내었다. 따라서 예상치 못한 지붕하중 증가로 인해 외장재의 파괴이전에 주구조부재의 파괴로 인한 구조물 전체 붕괴가 발생할 수 있으므로 안전성 확보를 위해서는 지붕외장재의 구조성능에 대한 정확한 정보의 필요성과 외장재 역시 구조설계대상임을 알 수 있었다.

Abstract The strength ratio of the main structures of buildings is gradually increasing, due to the advances made in analysis and cost saving techniques. In this study, to examine the stability of industry buildings using sandwich panels as roof assemblies, we examine the changes in the moment strength ratio of the main structures caused by increasing the roof load. This study adopts the PEB structure and three H-steel structure as the structural analysis models. In the case where the additional load exceeds about 11% of the roof design load, the strength ratio exceeds 1 for the main structure. In the case where the additional load exceeds about 36% (of the roof design load), the working moment exceeds the plastic moments, which leads to major damage to the structure. This study compares 1) the maximum load according to the purlin spaces, 2) the maximum load by KS, and 3) the maximum load calculated from the test results of the manufacturer. The maximum bearing load of the panels determined by all three methods exceeds the structure failure threshold load of the main structure. This study provides evidence that an unexpected increase in the roof load might cause the whole structure to collapse, due to the failure of the main structural members, before the failure of the roof assemblies.

Therefore, information on the structural performance of the sandwich panels is required for the structural design, and the sandwich panels should be considered to be an integral part of the overall structural design.

Keywords : Maximum Load, Roof Assemblies, Sandwich Panels, Strength Ratio, Structural Performance Of Sandwich Panels

*Corresponding Author : Kyung-Soo Kang(TongMyong Univ.)

Tel: +82-51-629-2464 email: koosin@tu.ac.kr

Received August 28, 2017

Revised September 7, 2017

Accepted November 3, 2017

Published November 30, 2017

1. 서론

지붕외장재로 널리 사용되는 샌드위치패널의 경우, 풍하중과 적설하중에 대한 하중지지능력을 지녀야 하지만, 적합한 구조성능에 관한 설계기준이나 하중이력 특성에 관한 정보는 불확실하다.

또한 건물 구조설계 실무현장에서는 구조해석기법, 해석 및 설계 소프트웨어의 발전으로 보다 정밀한 구조설계가 가능해지고, 구조물량 감소를 통한 경제적설계가 주안점이 되어 구조부재에 작용하는 강도비가 점점 증가하는 추세이다. 이로 인해 예상치 못한 지붕하중의 증가에 따른 주골조에 과도한 응력 현상이 발생하기도 한다. 만약 예상치 못한 과도한 하중이 발생할 경우, 외장재의 파괴가 먼저 발생하지 않고, 주 구조부재의 파괴로 인해 구조물 전체 붕괴 현상을 초래할 수도 있을 것이다. 경량패널, 커튼월과 같은 외장재는 풍하중, 적설하중에 대한 저항성이 확보되어야 하지만 이들 외장재에 대한 구조성능에 대한 연구나 구조기준은 주골조를 구성하는 구조부재에 비해 상대적으로 미미한 현실이다.

따라서, 본 연구에서는 지붕하중 증가에 따른 주골조를 이루는 부재들의 모멘트비 변화를 검토하여 외장재의 구조성능의 필요성을 제시하는데 그 목적이 있다. 이를 위하여 지붕외장재로 샌드위치패널을 사용하는 기존 공장건물에 지붕하중을 증가시켜 기둥, 보 등의 구조부재의 모멘트 강도비변화와 파괴위험성을 검토하였다. 또한, 지붕외장재의 구조성능을 가정하여 지지기구인 중도리 간격에 따른 최대하중, KS기준에서 제시한 최대하중과 외장재생산업체의 시험값으로 산정한 최대하중과 주 구조부재의 파괴위험성을 초래하는 부가하중을 비교하였다.[1],[2],[3]

2. 구조해석

2.1 해석 모델

구조설계된 기존 PEB구조로 설계된 건물과 이를 바탕으로 일반 H형강 구조 건물로 재설계한 공장건물들을 해석모델로 설정하였다. 모델링 기본정보는 Table. 1과 같다.[4]

Table 1. modeling informations

vertical load	roof D.L	0.4kN/m ²
	roof L.L	0.6kN/m ²
wind load	Basic wind Speed	25m/s
	exposure index	C
	importance factor	2
steel type	SS400	fy=235MPa

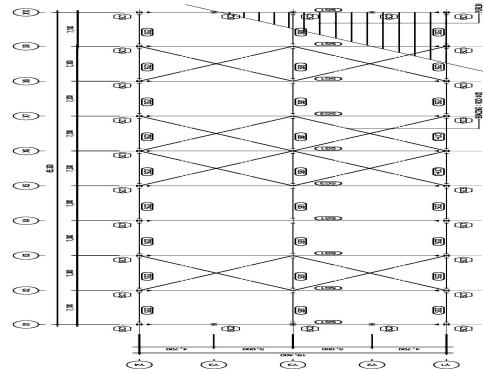


Fig. 1. Roof Floor Frame Plan

H형강구조 건물은 최초 설계시 구조부재의 모멘트 강도비가 각각 90%, 80%, 70%대를 나타내는 3개 모델을 선정하였다. Table. 2는 해석 모델의 설계하중에 따른 주골조의 모멘트 강도비($M_u/\phi M_n$)를 나타낸 것이다.

Table 2. moment strength ratio of main structure members

PEB structure		
element	SIZE	strength ratio($\frac{M_u}{\phi M_n}$)
SC1	H-600x300x6x12	0.927
SG1 (end)	H-900-400x200x6x12	0.940
SG1 (center)	H-400x200x5x9	0.988
H-steel structure1		
element	SIZE	strength ratio($\frac{M_u}{\phi M_n}$)
SC1	H 500x200x10x16	0.931
SG1	H 500x200x10x16	0.989
H-steel structure2		
element	SIZE	strength ratio($\frac{M_u}{\phi M_n}$)
SC1	H 506x201x11/19	0.803
SG1	H 506x201x11/19	0.872
H-steel structure3		
element	SIZE	strength ratio($\frac{M_u}{\phi M_n}$)
SC1	H 600x200x11x17	0.756
SG1	H 600x200x11x17	0.793

2.2 하중증가에 따른 주구조부재 안정성

하중 증가에 따른 주 구조 부재의 안전성을 검토하기 위하여, 기본 지붕설계하중에 하중계수를 적용하지 않은 적재하중을 증가시켜 최초 주 구조부재의 작용모멘트/항복모멘트(M_u/M_y)가 1을 초과할 때의 하중을 구하였다. 또한 부재의 파괴위험성을 예측하기 위해서 부재의 작용모멘트와소성모멘트(M_u/M_p)비를 검토하였다.

2.2.1 PEB 구조와 H형강구조1($M_u/\phi M_n$ 가 90% H형강구조)

실제 구조설계된 PEB구조와 유사한 구조부재의 강도비를 가진 H형강구조 건물1을 대상으로 구조해석을 실시하였다.

1) 주골조를 최초로 항복시키는 부가하중

주골조 부재의 M_u/M_y 를 1보다 큰 값을 갖게하는 최초 하중을 구하기 위해 설계하중에 하중계수를 곱하지 않은 사용하중을 점차 증가시켜 구조해석을 실시하였다. 그 결과 M_u/M_y 가 1보다 큰 값을 나타내는 최초 부가하중은 0.15kN/m^2 으로 나타났다. 이 값은 지붕설계하중의 약 11%가 증가한 값이다. 기둥 부재 SC3과 보 부재인 SG3의 중앙부에서 M_u/M_y 가 1보다 큰 값을 나타내었다. 부가하중 0.15kN/m^2 인 경우, 구조부재의 M_u/M_y 는 Table. 3과 같다.

Table 3. M_u/M_y of PEB structure members

element	SIZE	M_u/M_y
SC1	H-600x300x6x12	0.927
SC3	H-600x300x6/15	1.016
SG1(end)	H-900-400x200x6x12	0.940
SG1(center)	H-400x200x5x9	1.006
SG3(end)	H-900-500x200x6x15	0.916
SG3(center)	H-500x200x5x12	0.694

PEB구조의 경우, SC3, SG1 부재가 항복을 시작함을 알 수 있다. SG1 부재의 경우 중앙부가 먼저 항복이 시작 되므로 하중이 점차 증가한다면 PEB부재 단면특성에 의해 모멘트의 재분배가 이루어지지 않고 소성모멘트 도달한 이후 붕괴가 예측된다.

Table. 4는 부가하중이 0.15kN/m^2 일 때 H형강 구조1의 M_u/M_y 를 나타낸 것으로 SG1 부재가 최초 항복하며, 단부에서 항복이 시작되므로 항복이후에도 모멘트 재분

배 가능할 것으로 예측된다.

Table 4. M_u/M_y of structure members (H-steel structure1)

element	SIZE	M_u/M_y
SC1	H 500x200x10x16	0.934
SC3	H 482x300x11/15	0.984
SG1	H 500x200x10x16	1.020
SG3	H 482x300x11/15	0.958

2) 붕괴 위험성 예상 부가하중

부재 작용모멘트/소성모멘트비가 형상계수값 보다 클 경우, 소성힌지의 발생으로 인해 건물 붕괴위험성이 예상된다고 가정하였다.

PEB 구조의 변단면 보부재 중앙부(H-400x200 x5x9)의 소성모멘트값은 형상계수값 1.10 적용하여 항복모멘트 $\times 1.10$ 로 산정하였다.

$$\text{형상계수} : \frac{Z_x}{S_x} = 1.10 \quad (1)$$

형상계수와 항복모멘트(M_y)를 이용하여 소성모멘트(M_p)를 구하였다.

$$M_y = S_x \times F_y \quad (2)$$

$$M_p = Z_x \times F_y = S_x \times F_y \times 1.10 \quad (3)$$

Z_x : 소성단면계수, S_x : 탄성단면계수

부가하중을 점차 증가시켜 M_u/M_p 가 형상계수값보다 클 때의 부가하중을 산정한 결과 그 값은 0.50kN/m^2 로 나타났다. 이 값은 설계지붕하중의 약 36%가 증가한 값이다. 해석결과는 Table. 4와 같다.

Table 5. M_u/M_p of PEB structure members additional load (0.50kN/m^2)

element	SIZE	M_u/M_p
SC1(X6, Y5)	H-600x300x6x12	1.045
SC3	H-600x300x6/15	1.163
SG1(end),(X6)	H-900-400x200x6x12	1.071
SG1(center),(X6)	H-400x200x6x12	1.191
SG3(end), (X5,7)	H-900-500x200x6x15	1.067
SG3(center)	H-500x200x6x15	0.792

PEB구조의 보 부재 SG3를 제외한 모든 부재가 항복하였고, SC3부재와 SG1부재의 M_u/M_p 가 형상계수값 보다 큰 값을 나타낸다.

Table 6. M_u/M_p of structure members (H-steel structure1)additional load (0.50kN/m²)

element	SIZE	M_u/M_p
SC1	H 500x200x10x16	1.055
SC3	H 482x300x11/15	1.102
SG1	H 500x200x10x16	1.147
SG3	H 482x300x11/15	1.092

H형강 건물1의 경우, 부재(H 500x200x10x16)의 소성 모멘트값은 형상계수값 1.14를 적용하여 항복 모멘트×1.14로 산정하였다. M_u/M_p 가 형상계수값 보다 큰 값을 나타내는 부재는 SG1부재로 나타났다.(Table. 6)

2.2.2 H형강 구조2($M_u/\Phi M_n$ 가 80% H형강구조)

일반 H형강 구조1을 구조부재의 $M_u/\Phi M_n$ 가 80%대로 재설계한 H형강 구조2 모델건물에 하중을 증가시켜 구조부재의 M_u/M_y 를 검토하였다.

M_u/M_y 가 1보다 큰 값을 나타내는 최초 부가하중의 크기는 0.30 kN/m²이며, 구조부재의 M_u/M_y 는 Table. 7에 나타내었다.

Table 7. M_u/M_y of structure members (H-steel structure2)additional load (0.3kN/m²)

element	SIZE	M_u/M_y
SC1	H 506x201x11/19	0.845
SC3	H 482x300x11/15	1.021
SG1	H 506x201x11/19	0.899
SG3	H 482x300x11/15	1.004

부재의 작용모멘트/소성모멘트(M_u/M_p)가 형상계수값 (1.14) 보다 큰 결과를 나타내는 부가하중의 크기는 0.70kN/m²이다. SC3, SG3 부재에서 작용모멘트/소성모멘트값이 1.14보다 큰 결과를 나타낸다. 구조부재의 M_u/M_p 는 Table. 8 과 같다.

Table 8. M_u/M_p of structure members (H-steel structure2)additional load (0.7kN/m²)

element	SIZE	M_u/M_p
SC1	H 506x201x11/19	0.977
SC3	H 482x300x11/15	1.170
SG1	H 506x201x11/19	1.066
SG3	H 482x300x11/15	1.157

2.2.4 H형강 구조3($M_u/\Phi M_n$ 가 70% H형강구조)

일반 H형강 구조1을 구조부재의 $M_u/\Phi M_n$ 가 70%대로 재설계한 H형강 구조3 모델건물에 하중을 증가시켜 구조부재의 M_u/M_y 를 검토하였다.

M_u/M_y 가 1보다 큰 값을 나타내는 최초 부가하중의 크기는 0.85 kN/m²이며, 구조부재의 M_u/M_y 는 Table. 9에 나타내었다.

Table 9. M_u/M_y of structure members (H-steel structure3)additional load (0.85kN/m²)

element	SIZE	M_u/M_y
SC1	H 600x200x11/17	0.939
SC3	H 582x300x12/17	0.907
SG1	H 600x200x11/17	1.008
SG3	H 582x300x12/17	0.899

부재의 작용모멘트/소성모멘트(M_u/M_p)가 형상계수값 (1.15) 보다 큰 결과를 나타내는 크기는 1.20 kN/m²이다. SC3부재에서 작용모멘트가 소성모멘트보다 큰 결과를 나타낸다. 구조부재의 M_u/M_p 는 Table. 10 과 같다.

Table 10. M_u/M_p of structure members (H-steel structure3)additional load (1.20kN/m²)

element	SIZE	M_u/M_p
SC1	H 600x200x11/17	1.036
SC3	H 582x300x12/17	1.003
SG1	H 600x200x11/17	1.167
SG3	H 582x300x12/17	0.995

부재의 작용모멘트/소성모멘트(M_u/M_p)값이 형상계수보다 큰 경우, 소성힌지의 발생으로 하중증가에 의한 부재파괴로 건물전체의 붕괴위험성을 예상할 수 있다. 해석 결과를 종합하여 부가하중에 따른 M_u/M_p 가 형상계수보다 큰 부재의 개수(소성힌지개수)를 정리하여 Table. 11로 정리하였다. 부가하중이 증가할수록 붕괴위험성이 증가함을 알 수 있다.

Table. 11. number of plastic hinge

additional load	number of plastic hinge			
	PEB structure	H-steel structure1	H-steel structure2	H-steel structure3
0.5kN/m ²	3 EA	1 EA	-	-
0.7kN/m ²	4 EA	9 EA	7 EA	-
1.2kN/m ²	5 EA	23 EA	10 EA	1 EA

2.3 패널의 최대지지하중

패널이 지지할 수 있는 최대하중의 크기가 구조부재의 항복, 파괴를 초래하는 하중보다 크다면 과하중이 작용할 경우, 패널 파괴 이전에 구조물이 붕괴할 가능성이 있다. 따라서 명확한 패널 하중저항능력은 안전한 구조물 설계에 중요한 요소이다.

2.3.1 중도리 간격에 따른 최대지지하중

지붕외장재를 지지하기 위한 중도리간격은 일반적으로 구조계산으로 결정되는 것이 아니라 시공성을 고려하여 간격이 결정되며 일반적인 중도리 간격은 0.6m, 0.9m, 1.2m이다.

중도리 간격에 따른 외장재의 하중저항능력을 검토하기 위해 중도리에 지지되는 샌드위치패널은 중력방향으로 분포하중이 작용할 경우, 연속된 1방향슬래브 근사해석법을 적용하였다. 하중, 최대모멘트, 항복응력, 단면계수 등으로 구성된 수식을 통해 중도리 간격별 하중 지지능력을 비교하였다.

$$M_{\max} = Z_x \times f_y \quad (4)$$

$$M_{\max} = \frac{w_u \times l_n^2}{Factor} \quad (5)$$

(4), (5)번 수식을 이용하여 하중과 지지간격과의 관계식을 통해 패널최대지지하중(w_{\max})은 다음과 같다.

$$w_{\max} = \frac{Factor \times Z_x \times f_y}{l_n^2} \quad (6)$$

f_y : 중도리재료의 항복강도

$Factor$: 근사해석법 계수

w_u : 판넬 하중, l_n : 중도리 간격

식(6)으로부터 지지하중은 중도리 간격의 제곱과 반비례함을 알 수 있다. 식(6)을 이용하여 중도리간격 1.2m를 기준으로 간격0.9m, 0.6m의 최대지지하중 크기를 비교하면 Table. 12와 같다.

Table 12. available load vs span length

span length	available load
1.2m	w_u
0.9m	$1.778w_u$
0.6m	$4.0w_u$

2.3.2 패널 하중저항능력

샌드위치패널의 하중저항능력을 산정하기 위해서 철판과 중간재인 스티로폼이 일체화 되었다는 가정 하에 계산된 패널의 단면계수값을 적용하였다. 철판 두께 0.5mm, 패널두께 100mm인 경우, 패널의 최대지지하중을 식(6)을 사용하여 계산하면 28.79kN/m^2 이며 이값은 해석에 사용된 지붕설계하중 1.4kN/m^2 의 20배를 초과하는 값이다.

이 값은 복합재료인 패널의 구조성능, 하중이력의 특성을 고려하지 않은 값이므로 보다 신뢰할 수 있는 패널의 최대지지하중값을 계산하기위해 산업표준심의회의 건축용철강재 지붕판에서 제시한 분포압강도규격과 지붕패널 생산업체의 단순굽힘 시험결과값을 비교하였다.[1],[2],[3]

KS에 제시된 지붕용 외장재 분포압강도는 최대 $2,255\text{Pa}$ 값이며, 단위면적당 하중으로 환산하면 2.255kN/m^2 가 된다. 이값은 해석모델전물의 부가하중값이 0.815kN/m^2 으로 해석모델 PEB구조, H형강 구조1 및 H형강 구조2의 주골조에 소성현지를 발생시킬 수 있는 하중값이다.

패널생산업체에서 실시한 단순굽힘시험 결과는 지붕용 두께 100mm 샌드위치패널의 형태에 따라 최대지지하중값은 8.80kN/m^2 에서 최대 12.05kN/m^2 의 값을 나타낸다. 이 값은 해석모델의 지붕하중의 6배 이상의 값이다. 이 값은 패널의 구속조건이 단순지지로 실험한 결과 값으로 패널 하부의 중도리지지조건을 반영한다면 패널의 지지하중은 더 커질 수 있다. 이상의 결과를 통해 예상치 못한 지붕하중의 증가는 지붕외장재인 샌드위치패널의 파괴가 발생하기 이전에 주 골조에 위험을 초래할 가능성이 있음을 알 수 있었다.

3. 결론

본 연구에서는 공장건물에 지붕하중을 증가시켜 구조부재의 작용모멘트변화와 패널의 최대지지하중을 계산하여 대상건물의 안정성을 평가하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 해석건물의 경우 지붕설계하중의 약11%인 0.15kN/m^2 를 증가하였을 경우, PEB구조 및 H형강 구조1 건물의 주골조 부재에서 M_u/M_y 가 1보다 큰 값을 나타내기

시작하였다.

2. 지붕설계하중의 약36%인 0.50kN/m^2 를 증가하였을 경우, PEB구조의 부재들은 작용모멘트/소성항복모멘트값이 형상계수값보다 커져 부재파괴에 따른 건물 전체 붕괴가 예상되었다. 부재설계 모멘트강도비 ($M_u/\phi M_n$)가 90%인 일반 H형강 구조1 역시 일부 부재가 $M_u/\phi M_n$ 가 형상계수값 보다 큰 값을 나타내어 구조부재의 파괴위험성을 예측할 수 있다.
3. 샌드위치패널의 단면계수값과 중도리간격을 이용하여 계산된 최대지지하중, 산업표준심의회에서 제시한 분포압강도를 이용한 최대지지하중, 생산업체에서 실시한 단순굽힘시험 결과값을 이용하여 계산된 패널의 최대지지하중값은 주골조의 파괴를 초래할 수 있는 하중값 보다 상당히 큰 값을 나타내었다.

이상의 결과 샌드위치패널은 설계하중보다 훨씬 더 큰 하중을 지지함을 알 수 있었다. 또한 샌드위치패널 경우, 구성재료인 철판의 변형능력으로 항복이후 파괴에 도달할 때 까지 하중지지능력이 상당할 것으로 예상된다. 이러한 외장재의 구조성능정보의 불확실성은 전체 구조물의 붕괴 확률을 높일 수 있다. 근래 예기치 못한 적설량에 인해 PEB 구조 건물이 붕괴된 사례가 있다. 그 이후 KBC2016에 적설하중에 대한 내용을 정밀화하여 개정되고 건축법에 특수건축물 관련법규가 추가되어 구조물의 안전에 관한 기준과 법이 강화되었다.[5]하지만 최근 이상 기후현상에 따른 적설량의 예측이 쉽지 않고 태풍과 같은 강풍 현상도 발생할 소지가 있어 이러한 대책은 구조물의 안전성을 완전히 보장할 수 없다고 판단된다.

규격화된 지지조건에 따른 하중재하 실험결과 값과 이를 바탕으로 한 패널의 구조성능 정보로 구조설계가 이루어져야 샌드위치패널과 같은 외장재를 가지는 건물의 안전성을 확보할 수 있다고 판단된다.

References

- [1] Korea Industrial Standards Commission, KS F 4736, 2017.
- [2] Korea Industrial Standards Commission, KS F 2273. 7.9, 2017.
- [3] <http://blog.naver.com/khbkgs1004/40188346566>, distribution-pressure strength test for urethane

Prefabricated roofing panels, 2015.

[4] MIDAS Gen, Analysis & Design, 2016.

[5] Architectural Institute of Korea, Korean Building Code-Structural, 2016.

강 경 수(Kyung-Soo Kang)

[정회원]



- 1992년 2월 : 서울대학교 대학원 건축학과 (공학석사)
- 1997년 8월 : 서울대학교 대학원 건축학과 (공학박사)
- 1997년 10월 ~ 2000년 2월 : 삼성물산건설부문 기술연구소
- 2000년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 건축공학과 부교수

<관심분야>

구조물진동, 철근콘크리트구조