

# 브레이스로 보강된 사각형 래티스돔의 좌굴내력 평가

## An Estimation of Buckling-Strength of Braced Rectangular Latticed Domes

황영민\*                      석창목\*\*                      박상훈\*\*  
Hwang, Young-Min      Suk, Chang-Mok      Park, Sang-Hoon

### Abstract

In case of rectangular latticed pattern which shearing rigidity is very small, it has a concern to drop Buckling-strength considerably by external force. So, by means of system to increase buckling-strength, there is a method of construction that lattice of dome is reinforced by braced member. In a case like this, shearing rigidity of braced member increase buckling-strength of the whole of structure and can be designed economically from the viewpoint of practice. Therefore, this paper is aimed at investigating how much does rigidity of braced member united with latticed member bearing principal stress of dome increase buckling-strength of the whole of structure. the subject of study is rectangular latticed domes that are a set of 2-way lattice dome which grid is simple and number of member gathering at junction is small. Analysis method is based on FEM dealing with the geometrically nonlinear deflection problems.

*keywords : Rectangular latticed domes, Buckling-Strength, Shearing rigidity, FEM*

## 1. 서론

최근 경제발전과 주 5일제 근무로 인하여 국제회의, 스포츠 및 레저에 대한 관심이 높아지고 있다. 따라서 대회의장, 대규모 스포츠경기장 및 체육관 등의 건립의 요구가 증대되어지고 있다. 이와 같은 요구를 충족하기 위해서는 불필요한 기둥을 제거하여 사용 가능한 넓은 공간 및 자유로운 내부공간을 가진 대규모 건축물을 건설할 필요가 있다. 이러한 건축물 중 돔은 위의 요건을 충분히 만족할 수 있다. 이러한 돔 중 사각형 네트워크 돔은 그리드가 간단하고, 접합부에 모이는 부재수가 적어서 가공 및 시공 면에서 우수하지만, 원주방향으로 강성의 주기성이 나타난다. 기존의 연구<sup>[4],[5]</sup>에 의하면 돔의 경우 전단강성이 좌굴내력에 미치는 영향은 매우 큰 것이 보고 되어져 있다.

이와 같이 전단강성이 매우 작은 사각형 격자패

턴의 경우 좌굴내력이 현저하게 저하할 우려가 있다. 따라서 돔의 격자에 브레이스로 보강하여 시공하는 방법이 있을 수 있는데, 이 경우 구조물 전체의 좌굴내력을 향상시킬 수 있어 실용상 매우 경제적인 설계를 가능하게 할 것이다.

그러므로 본 연구의 목적은 돔의 주응력을 부담하는 격자부재와 일체화된 브레이스의 강성이 구조물 전체의 좌굴내력을 확보하는데 어느 정도의 효과가 있는가를 검토하는데 있다.

본 연구의 연구범위는 원주방향으로 현저한 강성의 주기성을 갖는 2방향 그리드(2-Way Grid)를 가진 단층의 사각형 래티스돔을 대상으로 하며, 세부 사항으로는 세장비의 크기에 따라 7종류의 부재를 선정하여 각 부재별로 6종류의 라이즈비에 대한 브레이스 강성 즉, 전단강성비에 따른 좌굴내력비 및 3종류의 원주방향 분할수에 대한 전단강성비에 따른 좌굴내력비를 분석하여 전단강성비가 구조물 전체의 좌굴내력향상에 어느 정도 효과가 있는지를 검토한다.

\* 학생회원 · 경북대학교 건축학부, 석사과정

\*\* 정회원 · 경북대학교 건축학부, 공학박사

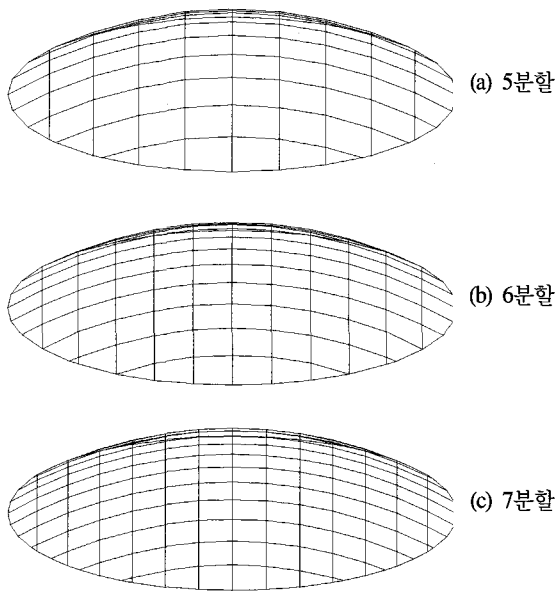
## 2. 해석모델 및 해석방법

### 2.1 해석모델

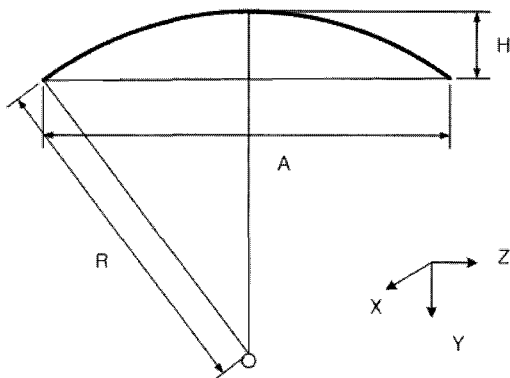
#### 2.1.1 형상모델

본 연구의 돔 형상은 <그림 2-1>에서 보여 지듯이 그리드가 간단하고, 접합부에 모이는 부재수가 적어서 가공 및 시공면에서 우수하지만 전단강성이 매우 작은 네트워크 패턴을 갖는다. 그 네트워크는 가능한 한 부재길이가 일정하도록 분할하며 정점에서 1경계까지 곡면을 5등분, 6등분 및 7등분한다.

<그림 2-2>는 본 연구에서 도입하는 단층 래티스 돔의 단면형상으로 A는 돔의 직경, R은 곡률반경, H는 돔의 높이이며, 우수계의 3차원 직각좌표계를



<그림 2-1> 2방향 그리드 돔의 형상



<그림 2-2> 돔의 단면형상 및 좌표계

<표 2-1> 라이즈비에 따른 형상모델(5분할)

| 곡률반경 R(cm) | 라이즈비 | 돔의 형상 | 부재길이 L(mm) |
|------------|------|-------|------------|
| 7083       | 4/18 |       | 6196       |
| 5817       | 5/18 |       | 6304       |
| 5000       | 6/18 |       | 6435       |
| 4440       | 7/18 |       | 6588       |
| 4042       | 8/18 |       | 6761       |
| 3750       | 9/18 |       | 6955       |

도입한다.

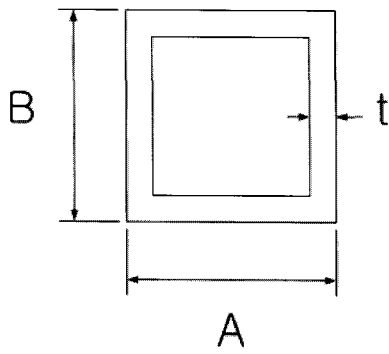
그리고 저면반경(A/2)에 대한 높이(H)비 즉, 라이즈비(r)에 따른 브레이스의 강성, 즉 전단강성이 좌굴내력에 미치는 영향을 파악하기 위하여 라이즈비(r)가 4/18, 5/18, 6/18, 7/18, 8/18, 9/18인 6종류의 모델을 선정하였으며, 이들 라이즈비는 돔의 직경(A)을 60m로 고정하고 높이를 변화시켰다. <표 2-1>은 5분할일 때 라이즈비에 따른 형상모델을 나타낸다.

#### 2.1.2 부재모델

본 연구에서 도입하는 부재는 탄성계수(E)가 2,100tf/cm<sup>2</sup>인 각형강관이며 <표 2-2>에 나타난다. 이 7개 단면이 선정된 이유는 5분할의 모델을 기준으로 세장비가 40~180사이가 되도록 단면을 결정하였다. 여기서, 세장비의 좌굴길이는 2방향 그리드 돔을 분할할 경우 각각의 부재길이가 일정하지 않아서 격자 부재상의 임의 부재를 대표 부재길이를 결정하였다. 부재길이를 구하는 식은 다음과 같다.

$$L = 2R0 \cdot \sin \frac{\phi}{2N}$$

여기서,  $\phi$ 는 반개각, N은 분할수이다.



<그림 2-3> 부재단면형상

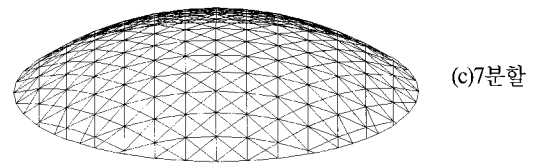
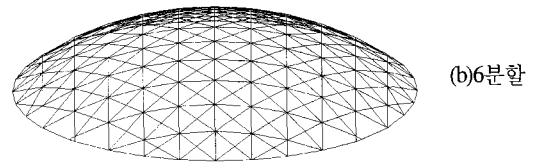
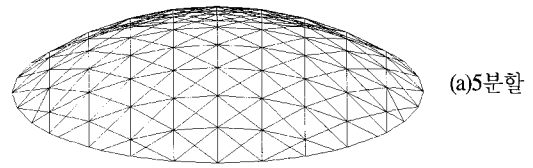
<표 2-2> 격자부재의 단면크기

| 모델명 | 단면크기(mm) (A×B×t) | 단면적(mm <sup>2</sup> ) |
|-----|------------------|-----------------------|
| M1  | □ 100×100×6      | 2256                  |
| M2  | □ 150×150×6      | 3456                  |
| M3  | □ 200×200×6      | 4656                  |
| M4  | □ 250×250×6      | 5856                  |
| M5  | □ 300×300×6      | 7056                  |
| M6  | □ 350×350×6      | 8256                  |
| M7  | □ 400×400×6      | 9456                  |

그리고, 래티스돔의 전단강성이 좌굴내력에 미치는 영향을 평가하기 위해서 격자부재의 축강성에 대한 브레이스의 전단강성비( $C_3$ )를 사용하여 평가하고자 한다. 전단강성비에 따른 보강부재의 단면크기는 <표 2-3>에 나타낸다. 그리고 <그림 2-4>는 각각의 분할수에 대하여 X형 브레이스로 보강하여 모델링한 것을 보여준다.

<표 2-3> 전단강성비( $C_3$ )에 따른 보강부재의 단면크기

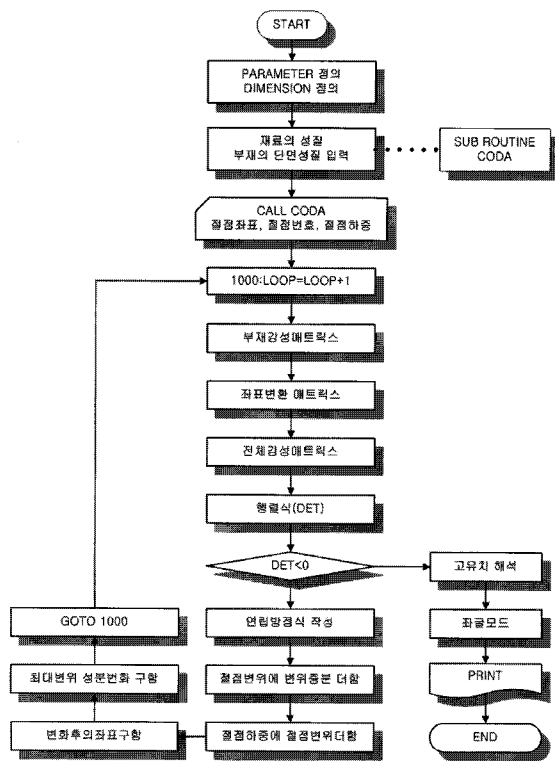
| 격자부재<br>$C_3$ | M1<br>(100×100×6) | M2<br>(150×150×6) | M3<br>(200×200×6) | M4<br>(250×250×6) | M5<br>(300×300×6) | M6<br>(350×350×6) | M7<br>(400×400×6) |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1.5%          | 8×8×2             | 11×11×2           | 14×14×2           | 17×17×2           | 20×20×2           | 23×23×2           | 26×26×2           |
| 2.8%          | 13×13×2           | 19×19×2           | 25×25×2           | 31×31×2           | 37×37×2           | 43×43×2           | 49×49×2           |
| 4.3%          | 19×19×2           | 28×28×2           | 37×37×2           | 46×46×2           | 55×55×2           | 64×64×2           | 73×73×2           |
| 5.7%          | 25×25×2           | 37×37×2           | 49×49×2           | 61×61×2           | 73×73×2           | 85×85×2           | 97×97×2           |
| 7.0%          | 30×30×2           | 45×45×2           | 60×60×2           | 75×75×2           | 90×90×2           | 105×105×2         | 120×120×2         |
| 8.5%          | 36×36×2           | 54×54×2           | 72×72×2           | 90×90×2           | 108×108×2         | 126×126×2         | 144×144×2         |
| 9.8%          | 41×41×2           | 62×62×2           | 83×83×2           | 104×104×2         | 125×125×2         | 146×146×2         | 167×167×2         |
| 11.3%         | 47×47×2           | 71×71×2           | 95×95×2           | 119×119×2         | 143×143×2         | 167×167×2         | 191×191×2         |
| 12.8%         | 53×53×2           | 80×80×2           | 107×107×2         | 134×134×2         | 161×161×2         | 188×188×2         | 215×215×2         |
| 14.1%         | 58×58×2           | 88×88×2           | 118×118×2         | 148×148×2         | 178×178×2         | 208×208×2         | 238×238×2         |



<그림 2-4> X형 브레이스로 보강한 모델

## 2.2 해석방법

본 연구에서는, 라이즈-스팬비, 분할수, 격자부재의 단면크기에 따른 단층 사각형 래티스돔의 좌굴내력은 3차원 공간에서의 부재를 기하학적 비선형성을 고려하는 유한요소법에 의해 정식화한 프로그램을 사용하여 구한다. 그리고, 수치해석은 최대변위 증분을 갖는 절점변위에 증분법을 적용하고 각 단계에서 강성행렬의 행렬식을 계산하여서 좌굴을 판정하였다. 해석프로그램의 흐름도는 <그림 2-5>와 같다.



〈그림 2-5〉 프로그램의 순서도<sup>(4)</sup>

### 3. 해석결과 및 고찰

이 장에서는 2장에서 정식화한 유한요소해석 프로그램에 의하여 수행한 결과를 나타낸다. 고찰의 내용은, 3-1절에서는 각각의 격자부재 단면에 대해서 라이즈비에 대한 전단강성비에 따른 좌굴내력비의 검토, 3-2절에서는 각각의 라이즈비에 대하여 격자부재의 단면에 대한 좌굴내력비의 검토 및 3-3절에서는 각각의 라이즈비에 대하여 분할수에 대한 좌굴내력비의 검토한다. 이러한 고찰내용을 바탕으로 격자부재의 단면, 라이즈비 및 분할수에 대하여 돔의 브레이스 보강이 구조물 전체의 좌굴내력향상에 어느 정도 효과가 있는지를 검토한다.

#### 3.1 라이즈비에 대한 좌굴내력비

이 절은 라이즈비에 대하여 전단강성비( $C_3$ )에 따른 좌굴내력비를 검토한다.

〈그림 3-1〉는 5~7분할모델의 각각의 라이즈비에 대한 전단강성비( $C_3$ )에 따른 좌굴내력비를 보여준다.

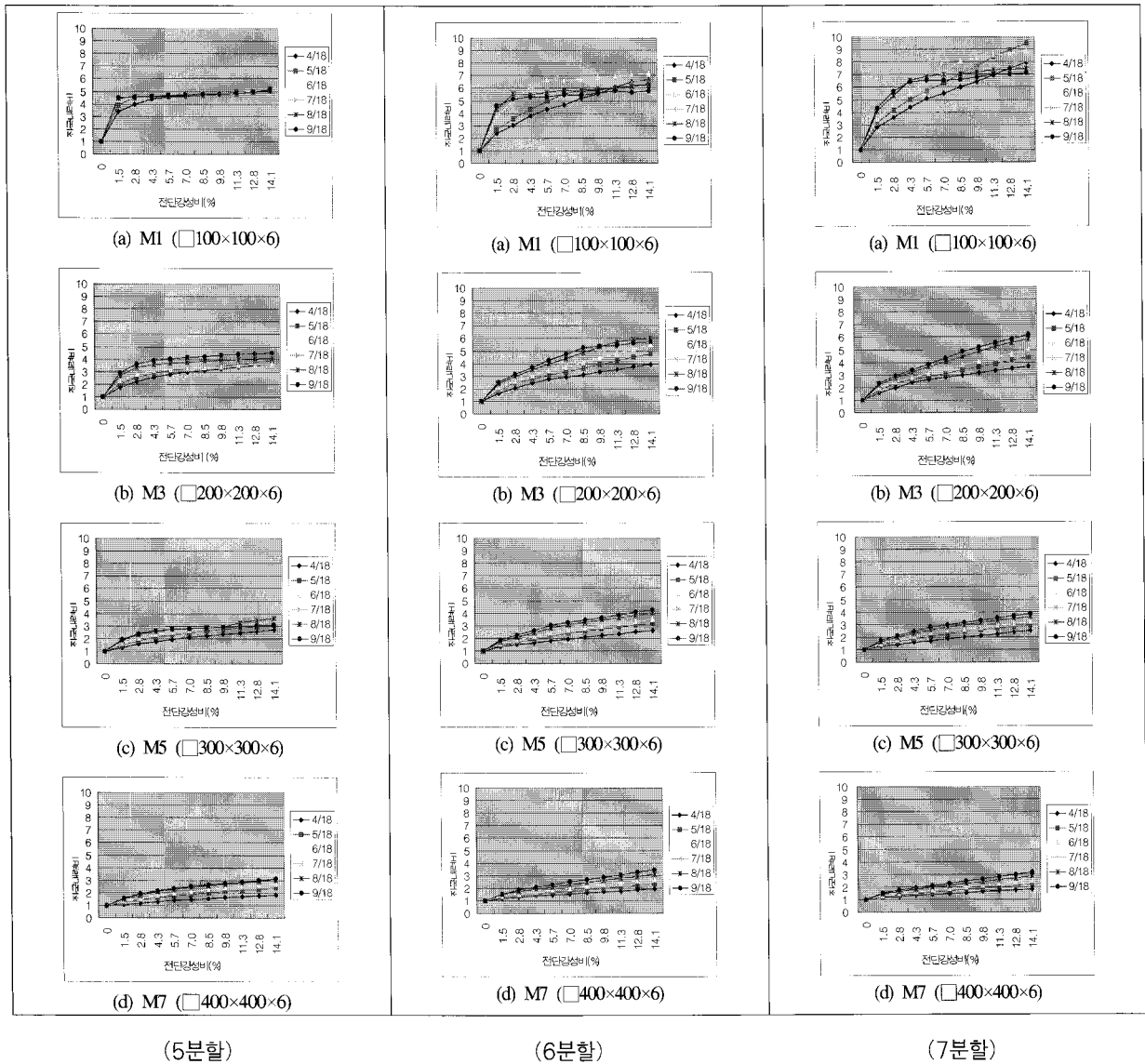
5분할모델에서 알 수 있듯이 단면이  $M1(□100 \times 100 \times 6)$ 인 모델은 모든 라이즈비에서 전단강성비가 1.5%이상일 때 좌굴내력비의 값이 일정함을 볼 수 있고 이는 브레이스에 의한 전단강성의 효과가 매우 크고 1.5%이상 일 때는 더 이상의 브레이스에 의한 전단강성의 효과가 없음을 알 수 있다. 단면이 커짐에 따라 라이즈비에 따른 곡선의 형태가 선형을 보임을 볼 수 있고, 또한 좌굴내력비의 값이 작아짐을 알 수 있다. 이는 단면이 커짐에 따라 브레이스의 보강 효과가 작아짐을 나타낸다. 그리고 동일한 단면과 분할수일 때 라이즈비가 커질수록 좌굴내력비값이 일반적으로 작아지는 것을 볼 수 있다.

그리고, 6분할모델에서 보여 지듯이 5분할의 단면  $M1(□100 \times 100 \times 6)$ 에서 보여준 1.5%이상일 때의 일정한 좌굴내력비의 값이 여기서는 라이즈비 4/18과 5/18을 제외한 라이즈비에서 5.7%이상일 때 일정한 값이 나타남을 볼 수 있었다. 그리고  $M3(□150 \times 150 \times 6)$ 의 단면모델부터는 전단강성비의 값에 따른 좌굴내력비가 일정하게 나타나지 않으며 점차 증가하는 값을 보이는 것을 알 수 있다. 단면이 커짐에 따라 좌굴내력비의 값이 작아지고 동일한 단면에서 라이즈비가 클수록 좌굴내력비가 큼을 알 수 있다.  $M1(□100 \times 100 \times 6)$ 에서는 수렴하는 부분이 라이즈비가 4/18을 제외한 모든 라이즈비에서 나타나게 되나  $M3(□200 \times 200 \times 6)$ 에서는 전단강성비 8.5%이상일 때 라이즈비가 9/18부분에서 약간 나타난다.

7분할모델에서,  $M1(□100 \times 100 \times 6)$ 에서는 라이즈비가 7/18에서는 전단강성비가 5.7%, 라이즈비가 8/18, 9/18에서는 전단강성비가 4.3%이상일 때 거의 일정한 값을 유지하게 된다. 그리고 모든 라이즈비에 있어서 전단강성비의 증가에 따른 좌굴내력비의 증가가 매우 크게 나타나고 있다. 그 외의 단면에서는 전단강성비에 따른 좌굴내력비의 값이 선형적으로 증가함을 볼 수 있다.

#### 3.2 단면크기에 대한 좌굴내력비

이 절은 격자부재 단면에 대해서 전단강성비( $C_3$ )에 따른 좌굴내력비를 검토한다. 그림3-2는 분할수가 5, 6, 7일 때, 각각의 단면크기에 대하여 전단강성



(그림 3-1) 라이즈비에 대한 전단강성비(C3)에 따른 좌굴내력비

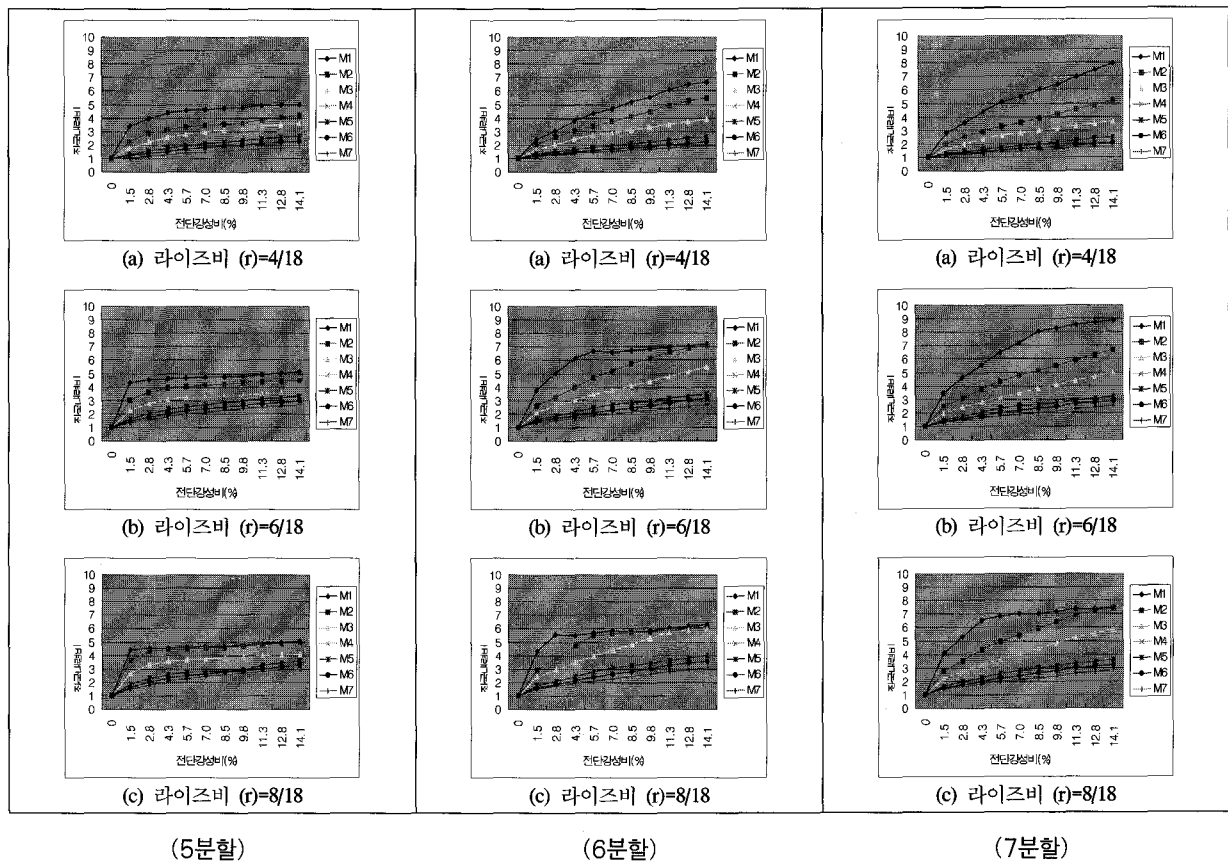
비에 따른 좌굴내력비를 나타낸다.

5분할모델의 라이즈비가 4/18인 <그림(a)>에서, M1(□100×100×6)단면은 전단강성비가 4.3%이상일 때 좌굴내력비가 거의 일정하여 더 이상의 브레이스 보강효과가 없음을 보여준다. 이는 전단강성의 보강 효과가 크지는 않지만 조금씩 증가함을 알 수 있다.

그리고 라이즈비가 6/18인 <그림(b)>에서는 M1(□100×100×6)단면이 전단강성비 1.5%이상일 때, M3(□200×200×6)단면은 전단강성비가 5.7%이상일 때 좌굴내력비가 수렴함을 볼 수 있다. 단면이 증가할수록 수렴하는 전단강성비의 크기가 커짐을 볼 수 있다. 그 외의 M5(□300×300×6)단면~M7(□400×400×6)단면까지는 선형적으로 좌굴내력비가 2.5~

3.5까지 증가함을 볼 수 있다. 그림(c)(r=8/18)에서는 M1(□100×100×6)단면은 전단강성비가 1.5%이상일 때 좌굴내력비가 4.7정도로 수렴되어진다. M3(□200×200×6)단면은 전단강성비가 4.3%이상일 때 3.8 정도의 좌굴내력비를 보이고 그 외의 M5(□300×300×6)단면~M7(□400×400×6)단면까지는 전단강성비 5.7%이상에서 2.5~3.2 정도의 좌굴내력비를 가지면서 수렴된다.

그리고, 6분할모델의 <그림(a)>(r=4/18)에서는 M1(□100×100×6) 단면은 비슷한 기울기로 좌굴내력비가 증가됨을 볼 수 있고 다른 M3(□200×200×6)~M7(□400×400×6)단면까지의 좌굴내력비에 비해 큰 값을 보이고 있다. 이것은 단면의 크기가 작을수록



〈그림 3-2〉 격자부재의 단면에 대한 전단보강비(C3)에 따른 좌굴내력비

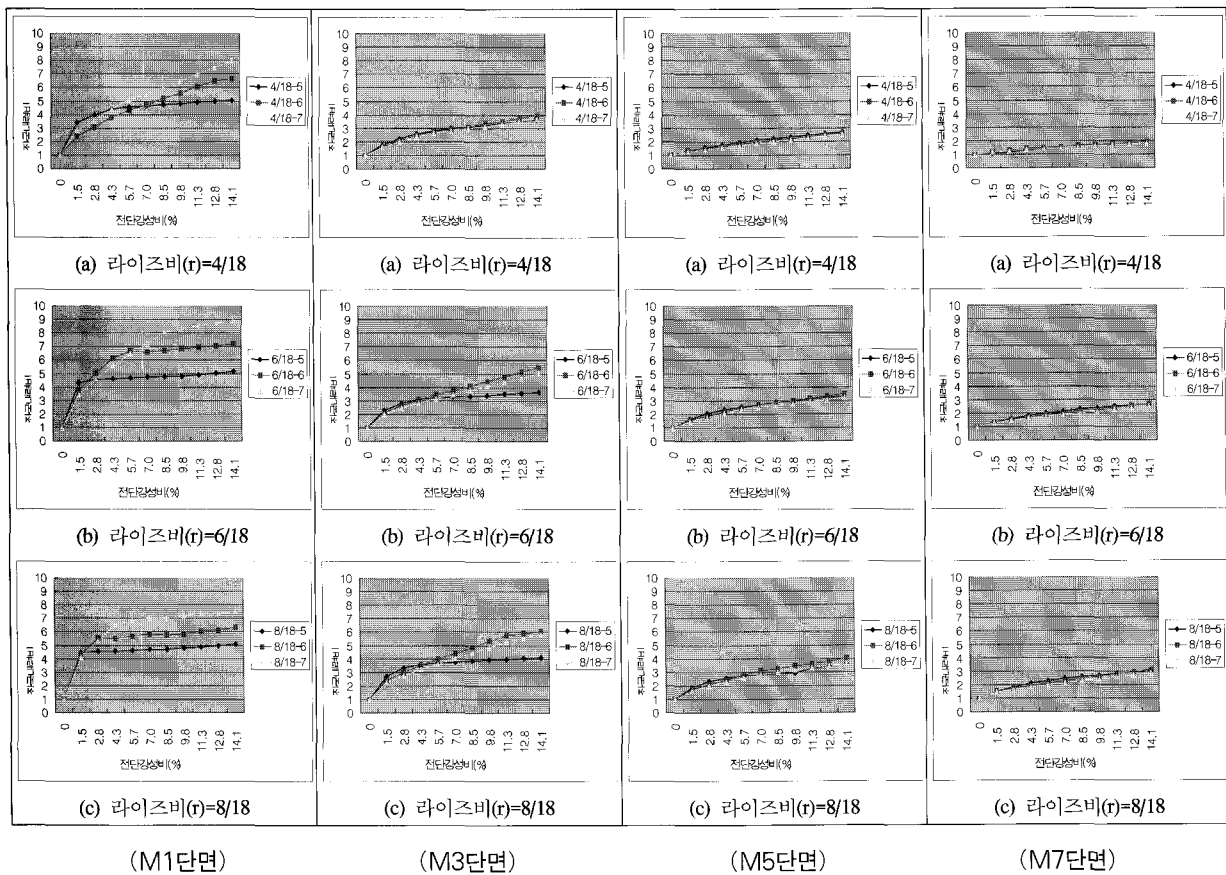
전단보강에 의한 효과가 더욱 크다는 것을 알 수 있으며, 5분할 모델에서와 거의 비슷한 좌굴내력비의 값을 보이고 있다. <그림(b)> (r=6/18)인 6분할 모델에서는 M1(□100×100×6)단면이 전단강성비 5.7% 이상일 때 좌굴내력비가 수렴되는 것을 볼 수 있고 나머지 M3(□200×200×6)~M7(□400×400×6)단면까지는 좌굴내력비가 수렴되는 것이 발견되지 않고 선형적인 증가를 보이고 있다. <그림(c)>(r=8/18)에서는 M1(□100×100×6)단면이 전단강성비 2.8% 이상에서, M3(□200×200×6)단면은 전단강성비가 11.3% 이상일 때 좌굴내력비가 5.7정도의 값으로 수렴되어진다. 나머지 단면은 거의 선형적으로 증가함을 볼 수 있다.

7분할모델의 <그림(a)>(r=4/18)에서는 M1(□100×100×6)단면은 전단강성비가 4.3% 이상일 때 6.5정도의 좌굴내력비로 수렴되어지고 나머지 단면은 6분할 모델에서와 마찬가지로 선형적으로 증가되어진다. <그림(b)>(r=6/18)에서는 다른 단면에 비하여 M1(□100×100×6)단면이 전단강성비의 증가에 따른

좌굴내력비의 증가가 매우 크게 나타났다. 그 외의 단면은 6분할 모델과 거의 비슷한 결과를 보이고 있다. <그림(c)>(r=8/18)에서는 M1(□100×100×6)단면이 전단강성비 7.0% 이상일 때 7.5정도의 좌굴내력비로 수렴되어지고 나머지 단면은 선형적으로 좌굴내력비가 증가된다.

### 3.3 분할수에 대한 좌굴내력비

이 절은 분할수에 대한 전단강성비(C3)에 따른 좌굴내력비를 검토한다. <그림 3-3>은 그 결과를 도식화한 것이다. 단면이 M1(□100×100×6)일 때, 라이즈비가 4/18에서의 5분할은 전단강성비가 1.5% 이상일 때 좌굴내력비의 값이 거의 일정한 값을 보임을 알 수 있고 나머지 6분할과 7분할은 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 라이즈비가 5/18에서 5분할은 2.8%, 6분할은 8.5% 이상에서 좌굴내력비의 값이 일정한 값을 보여주고 있다. 그리고 라이즈비가 7/18 일 때는 7분할에서 전단강성비 7.0%에서부터 일정



〈그림 3-3〉 분할수에 대한 전단강성비( $C_3$ )에 따른 좌굴내력비

한 값이 나타나 모든 분할수에서 일정한 좌굴내력비의 값이 나타나는 구간이 생기기 시작한다. 라이즈비의 값이 커짐에 따라 전단강성비의 값이 일정한 구간이 늘어나고 9/18일 때는 5분할과 6분할은 1.5%에서부터 그리고 7분할에서는 4.3%에서부터 일정한 값이 나타나 전단강성의 보강 효과가 없음을 보여준다. 라이즈비 전체적으로 볼 때는 라이즈비가 증가함에 따라 각각의 분할수의 모델은 일정한 좌굴내력비의 값을 보여 지고 있다. 그리고 분할 수가 작은 모델이 먼저 수렴하고 큰 모델은 라이즈비가 큰 모델에서 수렴하기 시작한다.

그리고, 단면이 M3( $\square 200 \times 200 \times 6$ )일 때의 그림에서 알 수 있듯이 라이즈비가 4/18에서는 모든 분할수에서 거의 같은 좌굴내력비의 값을 보이고 있으며 라이즈비가 증가함에 따라 5분할에서 점차 전단강성비가 작은 쪽에서 좌굴내력비의 값이 증가하는 것을 볼 수 있으며 라이즈비가 6/18에서는 5분할 모델에서 전단강성비가 4.3%에서부터 일정한 값이 나타나기 시작한다. 전체적으로는 라이즈비가 증가함에

따라 전단강성비에 따른 좌굴내력비가 증가함을 볼 수 있다. 또한 전단강성비의 값이 클수록 좌굴내력비의 값의 증가폭이 더 큼을 볼 수 있다.

M5단면( $\square 300 \times 300 \times 6$ ) 및 M7단면( $\square 400 \times 400 \times 6$ )일 때는 라이즈비가 9/18을 제외하고는 모두 거의 비슷한 전단강성비에 따른 좌굴내력비의 값을 가지고 있다. 라이즈비가 9/18에서 5분할이 전단강성비 2.8%에서부터 일정한 구간이 생기는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 원주방향으로 현저한 강성의 주기성을 갖는 2방향 그리드(2-Way Grid)를 가진 단층의 사각형 래티스돔을 대상으로 세장비의 크기에 따라 7 종류의 부재를 선정하여 3차원 공간에서의 부재를 기하학적 비선형을 고려하는 유한요소법을 이용한 프로그램으로 각 부재별로 6종류의 라이즈비에 대한 보강부재의 전단강성비에 따른 좌굴내력비 및 3

종류의 원주방향 분할수에 대한 전단강성비에 따른 좌굴내력비를 분석하여 돔의 브레이스 보강이 구조물 전체의 좌굴내력향상에 어느 정도 효과가 있는지를 검토하였다.

이상에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

첫째, 동일한 분할수와 단면크기에 대하여 전단강성비에 따른 좌굴내력비는 라이즈비에 상관없이 동일한 경향의 증가곡선을 보여주고 있으며, 동일한 전단보강비에 대하여 라이즈비가 커질수록 좌굴내력비는 증가한다.

둘째, 동일한 라이즈비와 분할수에 대하여 단면크기가 작을수록 즉, 세장비가 100이상의 부재에 대한 전단강성비에 따른 좌굴내력비는 비선형적인 증가곡선을 보이지만 그 이하의 부재에 대해서는 선형적인 증가곡선을 보인다. 그리고 동일한 전단보강비에 대하여 세장비가 클수록 좌굴내력비는 증가한다.

셋째, 라이즈비에 상관없이 동일한 전단강성비에 대하여 세장비가 큰 부재일수록 분할수에 따른 값의 차이가 크지만, 세장비가 작은 부재일수록 분할수에 따른 그 값의 차이는 미비하다.

## 참고 문헌

1. Chajes, A., Principles of Structural Stability Theory, prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1974.
2. 川井忠彦, 藤谷義信, 挫屈問題解析, 培風館, 1991.
3. 권택진 외 4명, SPACE FRAME 구조물의 구조해석, 설계 및 시공, 제12회 전산구조공학회 기술강습회. 1995. 7.
4. 鄭煥穆, 四角形ネットワーク單層ラチスト-ムの座屈特性に関する研究, 東北大學博士學位論文, 1992.
5. 박상훈, 강성분포가 주기성을 갖는 구형셀의 좌굴해석, 공학박사학위논문, 경북대학교. 2003. 12.
6. 박상훈, 석창목, 정환목, 권영환, "지붕마감재 강성효과를 고려한 2방향그리드 단층 돔의 좌굴특성에 관한 연구", 한국공간구조학회지, 제2권, 제1호, 2002. 3, pp.85-92.
7. 박상훈, 석창목, 정환목, 권영환, "라이즈비에 따른 사각형 격자 돔의 좌굴해석 - 지붕재의 강성을 프레임의 유효폭으로 평가", 한국셀·공간구조학회 논문집, 제3권, 제2호, 2003. 6, pp.69-75.