

우산형 셸 지붕의 보강재 보강효과

손병직 · 정대석* · 이규환†

건양대학교 건설시스템공학과 · *중부대학교 사회기반시스템공학과
(2007. 2. 5. 접수 / 2007. 5. 21. 채택)

Reinforcing Effects of Umbrella-type Shell Roofs with Stiffeners

Son Byung Jik · Jung Dae Suck* · Lee Kyu Hwan†

Department of Civil Engineering, Konyang University

*Department of Civil Engineering, Joongbu University

(Received February 5, 2007 / Accepted May 21, 2007)

Abstract : In this study, reinforcing effects of umbrella-type shell roofs structures such as stadium, exhibition, auditorium and museum are analyzed. Umbrella-type shell roofs treated in this study are practical shapes of conical shells. The objective of this study is to analyze reinforcing effects of umbrella-type shell roofs with stiffeners. Various locations of stiffeners, that is, edge ring A, B, center ring, junction stringer and center stringer are presented and the effects of reinforcement is examined. Also, the reduction effects of roofs thickness by stiffeners are examined. It is shown that the thickness of roofs can be reduced about 20~30% by junction stringer and more than 60% by edge ring A.

Key Words : umbrella-type shells, roofs, stiffeners, ring, stringer, conical shells

1. 서 론

셸구조 형식은 직선 구조형식과 비교해 볼 때 초기 곡률로 인하여 공학적인 효율성이 양호하고 미관이 수려하여 토목구조물은 물론 압력구조물, 잠수함구조물, 선박구조물, 항공구조물 등 그 밖의 많은 구조물 설계에 중요시 되고 있다. 특히, 몇 개의 세그먼트로 구성된 지붕 구조형식은 경기장, 공연장, 영화관, 박물관 등의 미관이 강조되는 구조물에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 원뿔형 셸의 실질적인 구조형태인 우산형 셸 지붕을 해석대상으로 설정하였다.

셸의 다중구조 해석에 대한 연구를 살펴보면, 원통형 셸로 구성된 다중구조에 대한 해석은 많이 있으나¹⁾, 본 연구에서 다루는 원뿔형 셸로 구성된 다중구조에 대한 해석은 거의 없는 실정이다. 원뿔형 셸로 구성된 다중구조 형식은 초기에 유한차분법으로 Setlur²⁾에 해석되었으며, 그 후 Sabir과 Mousa³⁾

에 의해 유한요소법으로 해석되었다. 이러한 연구들은 모두 등방성인 경우이며, 다양한 파라미터 연구가 되어 있지 않아, 설계자가 참조하기에 부적절한 면이 있다. 이에 대해서 손병직 등^{4,5)}은 우산형 셸 지붕의 모델링 및 거동에 관해서 연구를 수행한 적이 있다.

본 연구에서는 우산형 셸 지붕의 보강효과 즉, 보강재의 위치변화 및 보강재에 의한 모재 두께 감소효과에 대해서 분석하였다. 구조물의 보강방안은 크게 세가지로 구분할 수 있다. 셸의 단면을 크게 하는 방법, 보강재로 보강하는 방법 그리고 복합재를 사용하는 방법이다. 본 연구에서는 보강재로 보강하는 방법을 이용하여 다양한 보강효과에 대해서 고찰하였다.

2. 기본 이론

본 연구에서 우산형 셸 지붕의 보강효과에 대해서 연구하였다. Fig. 1은 원뿔 세그먼트의 미소요소에 대한 좌표계 및 변위장을 나타내며, Fig. 2는 면내력을, Fig. 3은 면외력을 나타낸 것이다. Fig. 2와 Fig. 3의 합응력과 변형을 관계는 식 (1)~(3)과 같다.

† To whom correspondence should be addressed.
khlee@konyang.ac.kr

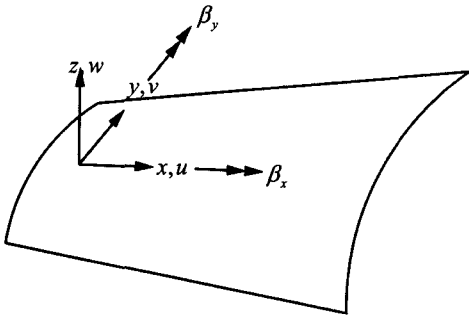


Fig. 1. The cylindrical coordinate system and displacement fields of conical shells.

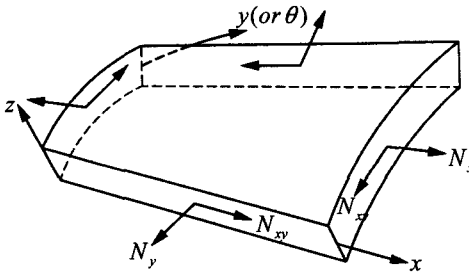


Fig. 2. In-plane forces for conical shells.

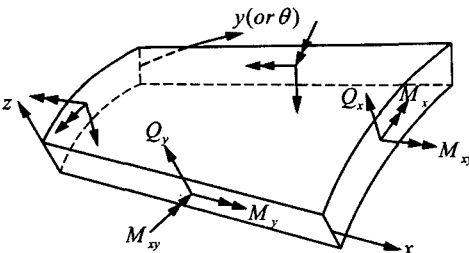


Fig. 3. Out-of-plane forces for conical shells element.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} Q_y \\ Q_x \end{Bmatrix} = K_l \begin{bmatrix} A_{44} & A_{45} \\ A_{45} & A_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{yz}^0 \\ \gamma_{xz}^0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서,

$$(A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}) = \int_{-t}^t \bar{Q}_{ij}(1, z, z^2) dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} [\bar{Q}_{ij}]_k (1, z, z^2) dz \quad (4)$$

이고, A_{ij} 는 면내력 강도, B_{ij} 는 휨-면내력 연계강도, D_{ij} 는 휨강도 그리고 K_l 는 전단보정계수를 의미한다. 또한 \bar{Q}_{ij} 는 재료축에서의 재료강도를 구조축으로 좌표변환하여 구한 재료강도를 나타낸다. 본 연구에서처럼 등방성인 경우 B_{ij} 는 0이며, A_{ij}, D_{ij} 는 2개의 독립된 등방성 상수로 표현된다⁶⁻⁸⁾.

3. 유한요소법

본 논문에서는 쉘요소로 평면쉘요소를 선택하여 해석을 수행하였다. 평면쉘요소는 본 논문에서 고려한 우산형 쉘 지붕구조의 적용성을 높이며, 요소의 각도를 5°이하로 세분화하면 좋은 정도를 얻을 수 있다. 기존의 쉘요소들은 잠김(locking)현상과 같은 많은 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 비적합 모드, 직접수정법, 대체전단 변형률을 사용하여 요소를 개선시켰으며^{6,9)}, 복합재료를 사용할 수 있게 재구성 하였다⁶⁾.

해석모델의 Fig. 4에서와 같이 기둥 및 다이아프램 등의 선요소는 3차원 보요소를 사용하여 해당 자유도에 중첩을 시켜 해석을 수행하였다.

4. 해석 예 및 결과분석

4.1. 해석모델

본 연구에서 고려하는 해석모델의 기본 형태는

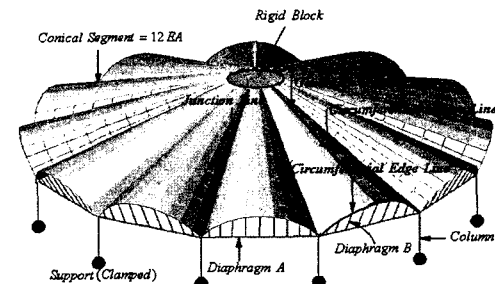
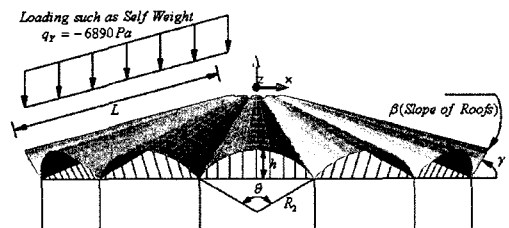


Fig. 4. Basic model of narrow fluted conical shell roofs. ($t=2.54\text{cm}, R_1=20t, L=500t, \theta=120^\circ, \beta=15^\circ$)

Table 1. Material properties of shell and beam elements

Steel	E	G	ν
	200GPa	$E/2(1+\nu)$	0.3

Table 2. Section properties

Thickness of Shell		$t = 2.54\text{cm}$
Section (Solid Circle)	Column	$R_c = 40t$ (Radius of section) Length of column = $120t$
	Diaphragm	$R_D = 4t$ (Radius of section)
	Stiffeners	$R_S = 2t$ (Radius of section)

Fig. 4와 같다. 해석모델의 기본치수는 손병직(2006)⁵⁾ 등의 이전 연구의 파라미터 해석에서 효과적인 형상으로 제시된 치수를 사용하였다. 즉, 원뿔 세그먼트의 개수 12개, 세그먼트 중심각 $\theta = 120^\circ$, 지붕의 경사각 $\beta = 15^\circ$ 로 설정하였다.

재료의 물성치는 Table 1과 같으며, 기타 단면특성치는 Table 2와 같이 설정하여 해석을 수행하였다.

4.2. 해석 프로그램

본 연구의 해석 프로그램은 이전 연구⁴⁾의 검증된 연구성과를 사용하였다. 해석 프로그램은 2, 3절의 이론을 토대로 FORTRAN 95를 사용하여 직접 코딩하였다.

4.3. 결과 분석

보강재의 위치는 Fig. 5와 같이 설정하였으며, 중앙 링(Center Ring), 끝단 링(Edge Ring A, B), 중앙 스트링거(Center Stringer), 끝단 스트링거(Junction Stringer)의 보강효과에 대해서 분석하였다.

4.3.1. 보강재 효과

Table 3, 4는 경계조건에 따른 보강재의 효과를 나타낸 것이다. Boundary type A는 Fig. 4의 그림처럼 상부가 강체 블록(Rigid Block)으로 연결된 경우이며, Boundary type B는 강체 블록(Rigid Block)이 없는 경우이다.

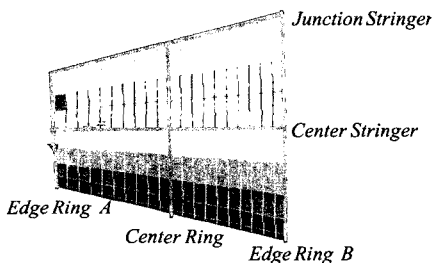


Fig. 5. Location of stiffeners.

Table 3. Effects of stiffeners for Boundary type A

	$R_S = 2t$			
Absolute Maximum Value	U_Y	M_x	M_y	M_{xy}
No Stiffeners	0.17	9.27	3.87	6.79
Center Ring	0.16	9.25	3.86	6.79
Edge Ring B	0.16	9.02	2.61	6.64
Center Stringer	0.16	8.99	3.84	6.33
Junction Stringer	0.13	4.77	3.50	5.19

Table 4. Effects of stiffeners for Boundary type B

	$R_S = 2t$			
Absolute Maximum Value	U_Y	M_x	M_y	M_{xy}
No Stiffeners	2.47	5.98	19.93	0.97
Center Ring	2.44	5.91	19.68	0.96
Edge Ring A	0.69	1.23	4.03	0.15
Center Stringer	2.46	5.96	19.87	0.97
Junction Stringer	2.36	5.73	19.08	0.93

결과들(U_Y, M_x, M_y, M_{xy})의 아래 첨자에서 대문자 Y는 자중 방향의 전체좌표계를 의미하며(Fig. 4), 소문자는 요소좌표계를 의미한다(Fig. 2, 3). 중력 방향 변위와 모멘트 합응력의 절대 최대값을 결과 분석에 활용하였으며, 보강재의 두께는 셸 지붕 두께의 2배를 사용하였다($R_S = 2t$).

강체 블록이 있는 Boundary type A의 경우는 Junction Stringer의 효과가 가장 크게 나타났으며, 강체 블록이 없는 Boundary type B의 경우는 Edge Ring A의 효과가 가장 크게 나타났다.

Fig. 6은 중력 방향의 변위(U_Y)를 대표적인 각 라인별로 도시한 것이다. 강체 블록이 있는 경우이며, 보강재 중 Junction Stringer의 영향이 가장 크게 나타났으며, 또한 Junction line의 효과가 가장 크게 나타났다. 상대적으로 원주 방향의 Edge line상의 효과는 거의 없는 것으로 나타나는데, 그 이유는 Edge line상에는 이미 Diaphragm의 영향(Fig. 4)을 받았기 때문인 것으로 판단된다.

4.3.2. 보강재에 의한 모체 두께 감소 효과

본 절에서는 전 절에서 사용한 보강재 두께로 보강했을 경우, 셸 지붕의 두께를 얼마나 감소시킬 수 있는지에 대해서 분석하였다.

Fig. 7은 중력 방향의 변위(U_Y)를 대표적인 각 라인별로 도시한 것이다. 강체 블록이 있는 Boundary type A인 경우이며, 전 절에서 가장 효과가 크게 나타난 Junction Stringer로 보강한 경우이다.

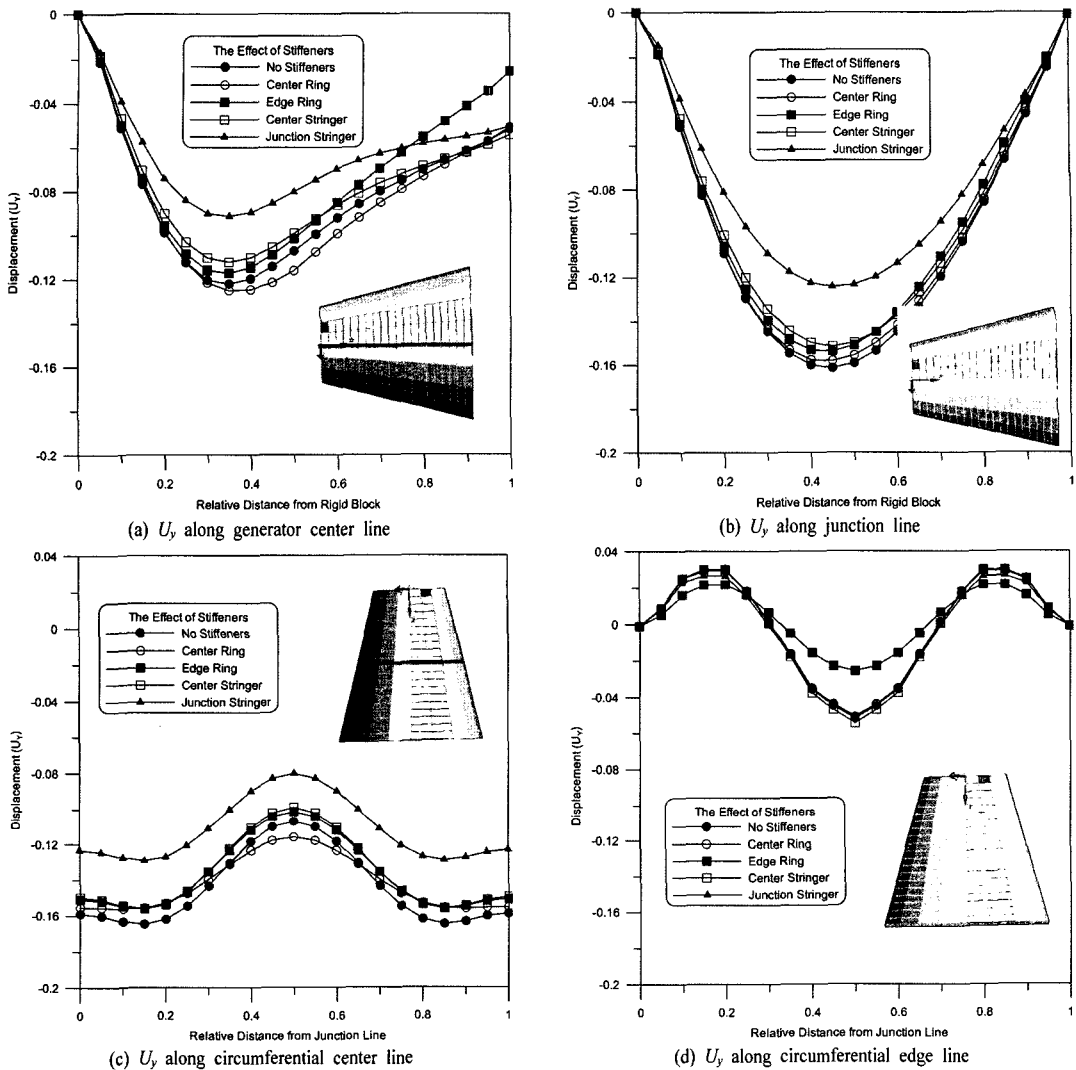


Fig. 6. Effects of stiffeners for Boundary type A.

Fig. 7의 범례는 원래 두께의 보강되지 않은 경우와 보강된 경우의 점차적인 두께 감소를 의미한다. Generator 중앙 선상에서는 보강재에 의한 30%이상의 모재 두께 감소효과를 기대할 수 있으며(Fig. 7(a)), 나머지 선상에서는 20~30%의 모재 두께 감소효과를 기대할 수 있다.

Table 5, 6은 Boundary type A, B의 보강재에 의한 모재두께 감소효과를 표로 나타낸 것이다. 합응력 대신 응력을 산출하여 결과에 나타내었다.

두께가 감소하면 합응력은 그에 상응하게 감소하게 되어 비교가 되지 못하므로 응력으로 결과 값을 비교, 검토하였다. Table 5의 경우는 Junction Strin-

ger의 효과를, Table 6의 경우는 Edge Ring A의 효과를 나타낸 것이다. Junction Stringer에 의해서 약 20~30%의 모재두께 감소효과가, Edge Ring A에 의해서는 60%이상의 모재두께 감소효과가 나타났다. 이처럼 지점조건에 따라서 적절한 보강재로 보강한다면 모재의 두께를 현저히 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 우산형 셀 지붕의 보강효과에 대해 고찰하였다. 즉, 보강재의 위치변화 및 보강재에

우산형 셸 지붕의 보강재 보강효과

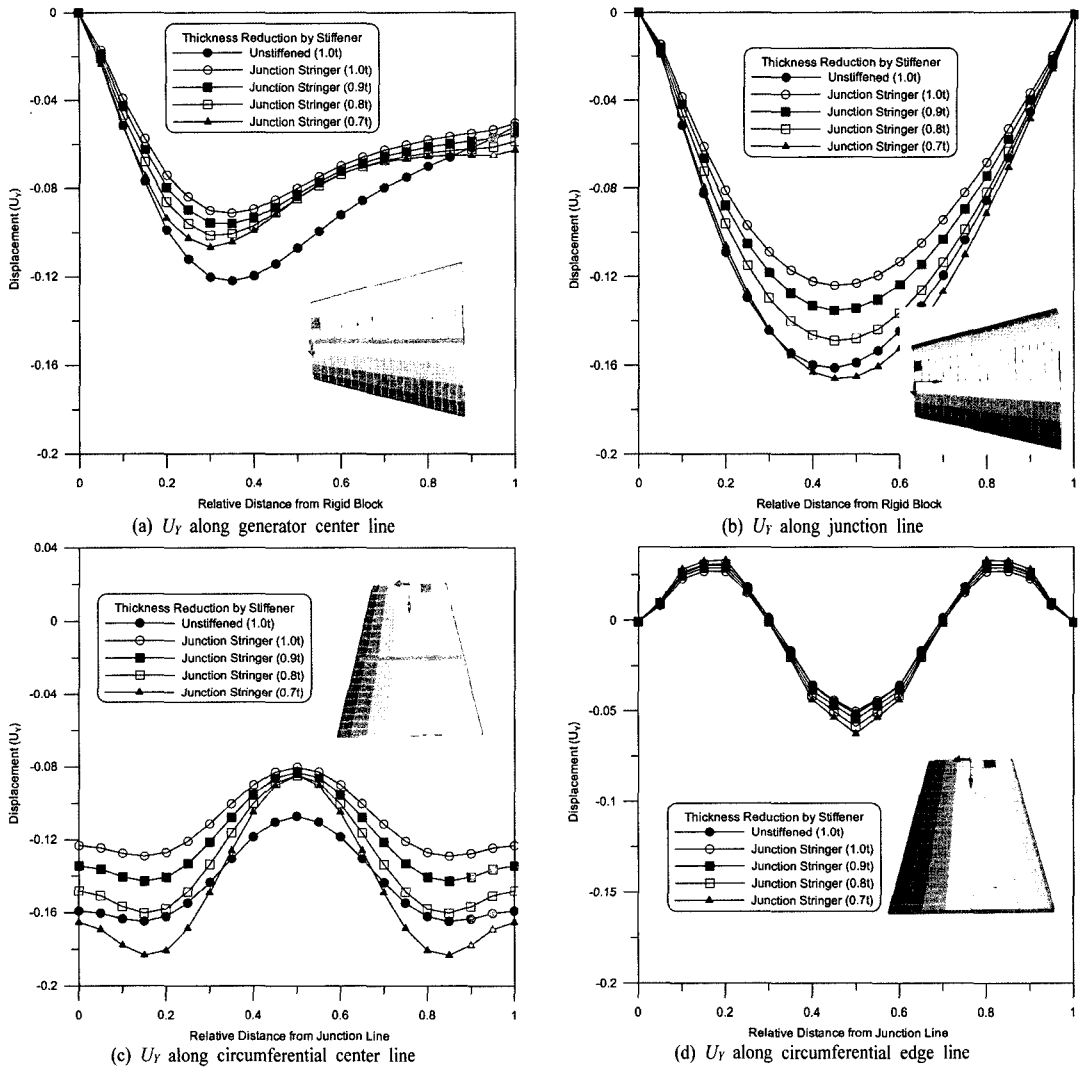


Fig. 7. Effects of thickness reduction for Junction stringer (Boundary type A)

Table 5. Reduction effects of shell thickness for Boundary type A (Junction stringer, $R_S/t=2$)

	Absolute Maximum Value					Thickness Reduction (%)
	Unstiffened	Stiffened (Junction Stringer)			Thickness Reduction (%)	
	Original Thickness(t)	Original Thickness(t)	Reduction 10% (0.9 t)	Reduction 20% (0.8 t)		
U_Y	0.1663	0.1293	0.1429	0.1603	0.1833	20~30%
σ_x	9.4856	5.0313	5.2867	5.5665	5.9018	About 20~30%
σ_y	5.2103	4.7589	5.1228	5.5606	6.1048	
σ_{xy}	7.3186	5.2120	5.6765	6.2301	6.9045	

Table 6. Reduction effects of shell thickness for Boundary type B (Edge ring A, $R_S/t=2$)

	Absolute Maximum Value					Thickness Reduction (%)
	Unstiffened	Stiffened (Edge Ring A)			Thickness Reduction (%)	
	Original Thickness(t)	Original Thickness(t)	Reduction 10% (0.8 t)	Reduction 20% (0.6 t)		
U_Y	2.4727	0.6928	0.7662	0.8516	0.1001	More Than 60%
σ_x	35.9360	8.4005	8.7317	11.6676	17.7545	
σ_y	121.8055	27.9522	26.0670	22.7682	18.4382	
σ_{xy}	5.8944	4.2141	4.9400	6.1953	8.8506	

의한 모재 두께 감소효과에 대해서 분석하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 강체 블록이 있는 경우는 Junction Stringer의 효과가, 강체 블록이 없는 경우는 Edge Ring A의

효과가 가장 크게 나타났다.

2) 강재 블록이 있는 경우 Junction Stringer로 보강했을 경우, Junction line상에서 효과가 크게 나타났으며, 상대적으로 원주 방향의 Edge line상에서는 거의 효과가 없는 것으로 나타났다. 그 이유는 Edge line상에는 이미 Diaphragm의 영향을 받고 있기 때문인 것으로 판단된다.

3) 보강재의 두께를 모재두께의 2배로 설정한 경우, Junction Stringer로 20~30%의 모재두께 감소효과가, Edge Ring A로 60%이상의 모재두께 감소효과가 나타났다.

4) 이와 같이 경제조건에 따라서 보강재의 위치 및 두께를 효율적으로 선택한다면, 모재의 두께를 현저히 줄일 수 있어 경제적인 설계를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) Assan, A.E., "Analysis of multiple stiffened barrel shell structures by strain-based finite elements", Thin-Walled Structures 35, pp. 233~253, 1999.
- 2) Setlur, A. V., "Analysis of a Fluted Shell Roof Structure Circular in Plane", Ph.D. Thesis, Purdue University, 1965.
- 3) Sabir, A. B. and Mousa, A. I., "Analysis of Fluted Conical Shell Roofs using the Finite Element Method", Computers & Structures Vol. 64, No. 1~4, pp. 239~251, 1997.
- 4) 손병직, 임성순, 장석윤, "복합적층 우산형 셸 지붕의 모델링 및 해석", 대한토목학회논문집, 제24권, 제2A호, pp. 423~429, 2004.
- 5) 손병직, 박원태, "우산형 셸 지붕의 파라미터 해석", 한국안전학회지, 제21권, 제1호, pp. 114~119, 2006.
- 6) 박원태, 최재진, 손병직, "복합적층 원뿔형 셸의 링 보강효과 연구", 한국안전학회지, 제19권, 제1호, pp. 94~101, 2004.
- 7) Jones, R. M., "Mechanics of Composite Materials", McGraw-Hill, 1975.
- 8) Reddy, J. N., "Mechanics of Laminated Composite Plates", CRC press, 1997.
- 9) Choi, C. K. and Lee, P. S., "Defect-free 4-node flat shell element:NMS-4F element", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 8, No., pp. 207~231, 1999.