

원자로 격납건물 기하학적 특성을 고려한 내압해석

백 용 락, 이 상 국, 이 계 현, 윤 철 호
한국원자력안전기술원

신 재 철
충남대학교

요 약

본 연구는 원자로 격납건물 내압해석에 있어 대표적 기하학적 변단면을 변수로하여 그 영향을 분석함으로써 격납건물 구조건전성시험(SIT : Structural Integrity Test)시 정확한 계측계획의 수립 및 시험결과와 비교 평가를 위한 해석상의 고려사항을 도출하고자 수행되었으며, 장비출입구 주변의 단면설계를 위한 부분모델 작성시 고려되어야 하는 비영향영역 범위를 설정하고자 수행되었다. 해석결과 본 논문에서 고려된 대표적 기하학적 변단면의 영향이 비교적 큰 것으로 평가되어 격납건물 구조건전성 시험의 수행 및 평가에 고려되어야 할 요소가 도출되었으며 부분모델 작성시 고려되어야 하는 비영향 영역을 설정할 수 있었다.

1. 서 론

사고시 압력하중에 의한 격납건물의 실제거동을 정확히 분석하기 위해서는 격납건물 전체의 기하학적 특성을 적절히 고려하여야 하며 이들 기하학적 변단면의 영향정도가 평가되어야만 격납건물 구조건전성시험을 위한 적절한 계측계획을 수립하고 계측결과를 정확하게 분석할 수 있다. 또한 격납건물의 부위별 특성을 고려한 부분모델 작성시는 국부해석 결과에 영향을 주지 않도록 경계영역이 합리적으로 설정되어야만 국부해석의 정확성을 기할 수 있게 된다. 본 연구에서는 국내원전의 표준화 모델인 영광 3,4호기 격납건물을 대상으로 내압해석결과에 영향이 클 것으로 예상되는 격납건물의 부벽(Buttress), 개구부(Opening) 및 개구부 주변의 보강단면 등 격납건물의 대표적 변단면에 대한 기하학적 특성을 변수로 하여 그 영향을 분석함으로써 원자로격납건물 내압해석에서의 필수고려 요소를 도출하였고, 격납건물의 실제거동을 고려한 계측계획 및 시험수행의 개선방안을 모색하였으며 아울러 기존 내압해석 모델인 2차원 축대칭 모델 사용의 적절성을 검토하였다. 또한 장비 출입구 주변의 국부단면 설계를 위한 부분모델 비영향영역 설정의 합리성을 검토하였다.

2. 구조해석

격납건물 구조건전성시험 조건에서 내압해석은 ASME SEC. III Div. 2 CC-3000 표 CC-3230-1에 기술된 하중조합조건에 대해 수행되나, 실제 시험조건에서는 하중조합에서 고려된 각종 사하중 및 활하중, 포스트텐션링 하중에 의한 변위가 이미 발생된 상태이므로 시험시는 압력하중에 의한 발생변

위만을 계측하게 된다. 따라서 본 연구를 위한 구조해석도 영광 3,4호기 격납건물의 기하학적 형상과 재료특성값(표 1)을 그대로 사용하였고 입력하중도 시험압력(62.1 psi)만을 고려하였다. 연구목적에 따른 기하학적 특성을 고려하기 위해 여러가지 해석모델(그림 1(a)-1(d))이 작성되었는데 그림 1 (a)와 같이 기하학적 변단면이 없는 3차원 유한요소 모델을 기본으로 하여 영향분석 대상인 기하학적 특성을 모델에 추가하여 이들 영향정도를 확인할 수 있도록 하였다. 모델에 사용된 유한요소는 격납건물의 구조형상 및 제원을 고려하고, 작용하중이 압력하중인 점을 고려하여 요소당 4절점을 갖는 쉘요소를 사용하였다. 또한 격납건물의 기하학적 특성에 의한 영향비교의 용이성과 해석의 편의성을 고려하여 기초슬래브와 접하는 원통형 벽체 하부를 고정단으로 가정하였다. 구조해석을 위해 사용된 전산 프로그램은 개인 전산기용 구조해석 프로그램인 COSMOS/M (Version 1.71, 1994)[2] 을 이용하였다.

3. 결과분석

3.1 부벽의 영향

부벽의 영향에 의한 격납건물의 거동은 그림 2와 같다. 반경방향 변위는 표 2 에서와 같이 부벽과 부벽의 중간지점인 270° 지점에서 가장 크게 발생하며 서서히 감소하여 부벽에서의 변위가 최소가 된다. 이는 강성이 상대적으로 큰 부벽의 영향으로 일반단면(Regular Section)인 270° 지점에서의 변위가 가장크게 나타났으나 절대변위는 변단면이 없는 모델(그림 1(a))의 해석결과와 비교하여 보면 그 차이가 10% 미만으로 일반단면에 대한 부벽의 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 다만 부벽자체의 단면에서의 변위 (그림 2의 210° 지점)는 변단면이 없는 경우에 비해 평균 20%정도 작은 변위를 보여 주고 있어 시험수행시 계측기 및 계측상의 오차를 고려하더라도 그 차이가 비교적 크므로 격납건물 구조건전성 시험을 위한 계측부위 선정시 부벽에 대한 별도의 고려가 있어야 함을 확인하였다. 또한 수직방향 변위는 그 영향이 반경변위에 비해 크지 않은 것으로 나타났는 바 이는 부벽의 영향이 반경방향에 비해 상대적으로 작는데 기인하는 것으로 부벽의 배치와 형상을 고려할때 예상된 결과이다

3.2 장비출입구 및 주변 보강부의 영향

영광 3,4호기 격납건물의 구조형상의 특징은 장비출입구와 비상출입구를 포함하는 비교적 규모가 큰 보강단면부이다. 이중 개구부가 없는 보강단면만의 영향은 강성이 다른 단면이 존재한다는 측면에서 앞서 기술된 부벽의 영향과 유사할 것으로 예상되므로 부벽의 효과가 배제된 개구부 및 단면보강부를 조합하여 영향을 분석하였다. 해석결과, 그림 3(c)와 같이 반경방향 변위는 장비출입구 중심으로 부터 상당한 영역까지 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었는데 비교지점인 240° 지점에서의 변위는 변단면이 없는 모델의 해석결과에 비해 최대 약 57%까지 큰 변위를 나타냈었다. 이러한 변위차는 장비출입구 중심부 부근 높이 148 ft 지점에서 가장크며 중심부에서 멀어질 수록 그 차이가 감소하여 비교대상 위치중 높이 108 ft지점에서는 약 30%의 차이를, 230 ft지점에서는 약 20 %차이를 나타내었다 (표 3) 이상과 같이 개구부가 포함된 보강부의 영향은 보강단면 단부에서 상당한 범위의 일반단면까지 영향을 미치므로 본 연구에서 제외된 다른 개구부 및 보강부에 대한 검토가 필요하다. 수직변위의 경우는 반경방향 변위와는 달리 변단면이 없는 해석결과와의 차이가 4% 미만으로 그 영향이 작은 것으로 평가되었다.

3.3 기하학적 변단면이 조합된 경우의 영향

그림 4(c) 및 표 4 에서 비교된 바와 같이 격납건물의 대표적 기하학적 변단면이 모두 고려된 모델의 해석결과는 일반단면이라도 위치에 따라 상당한 차이를 보여 주고 있으며, 변단면이 고려되지 않은 3차원 모델의 해석 결과보다 부위에 따라 작거나, 큰 결과를 보여주고 있다. 이러한 현상은 그림 4(a)~(c)를 보면 기하학적 변단면 영향에 따른 반경방향의 거동을 분명하게 보여주고 있는데 이들 변단면의 효과에 장비출입구(Equipment Hatch) 및 비상출입구등 개구부의 영향이 부가되어 장비출입구 주변의 상당한 영역까지 변단면이 고려되지 않은 모델의 해석결과에 비해 상당히 큰 변위를 나타내었다. 벽체의 경우 반경방향 변위는 개구부 중앙으로부터 원환방향 양쪽으로 약 35° 지점에서 최대변위가 나타났으며 이들 최대변위 발생부위로부터 원환방향으로 서서히 감소하여 변단면의 영향이 비교적 작은 일반단면에서는 그값이 변단면을 고려치 않은 해석모델의 결과와 약 10% 내외의 차이를 나타내고 있다. 또한 부벽의 고려유무에 대한 분석결과 격납건물 거동전반에 대한 부벽의 영향은 매우 작은 것으로 확인되었다. 그러나 부벽자체의 변위는 앞서 3.1에서 기술한바와 같이 상대적으로 큰 강성으로 인해 개구부와 인접한 330° 지점의 부벽을 제외하고는 일반단면의 반경변위에 비해 상대적으로 작은 값을 보여주고 있다. 개구부 주변의 발생변위도 단면보강부(4 ft)의 영향으로 상대적으로 강성이 작은 일반단면에 비해 매우 작은 변위를 보여주고 있으나 보강부위 단부를 벗어나 일반단면으로 접아들면 그 값이 급격히 증가하며, 최대변위 발생부위(원환방향 양쪽으로 약 43°지점)로 부터는 서서히 감소하여 부벽등의 영향이 나타날때까지는 그 값이 대체로 일반단면 해석결과와 유사한 상태가 유지됨을 알 수 있다. 따라서 일반단면만을 고려한 2차원 축대칭 모델의 해석결과만으로 부위별 예상변위를 산정하는 것은 충분치 않으며 최대변위 발생부위는 시험수행시 계측대상 부위로 반드시 선정하여 평가되어야한다. 또한 일반단면간에도 해석결과 차이가 매우 큰 것을 고려할 때 부분모델 경계부의 입력값 선정에 신중을 기해야 할 것으로 판단되는 바 기하학적 변단면에 의한 영향을 무시하고 2차원 축대칭 모델의 해석결과를 부분모델의 경계부의 입력값으로 설정한 기존의 해석방법은 해당부위 단면설계에 비보수적인 결과를 유발할 수 있으므로 부분모델의 비영향 영역설정에 유의하여야 한다. 격납건물의 대표적 기하학적 변단면을 모두 고려한 해석결과를 토대로 장비출입구를 포함한 국부해석 모델을 위한 비영향영역을 추정할 수 있는데 이러한 비영향 영역은 장비출입구를 중심으로 최소한 120°~140° 범위이며 수직변위의 경우는 보강단면의 규모 및 영향영역을 고려 할 때 벽체 전 높이(EL 147 ft) 모두가 고려되어야 할것으로 판단된다. 따라서 이범위 까지를 국부해석 모델에 포함시켜야 국부모델의 경계조건이 해석결과에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

4. 결 론

원전 격납건물의 기하학적 변단면의 영향분석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 본 연구에서 고려한 격납건물의 대표적 변단면을 모두 고려한 3차원 전체모델의 해석결과 이들 기하학적 변단면의 복합적인 영향으로 최대반경변위는 장비출입구로 부터 각각 35° 떨어진 부위에서 발생하였으며, 위치에 따라 차이는 있으나 변단면이 없는 3차원 모델의 해석결과 보다 약 20-70% 큰 변위를 나타내었다. 따라서 격납건물 구조조건전성 시험조건에서의 거동예측에는 기존의 2차원 축대칭 해석결과만으로 미흡하며, 기하학적 변단면에 의한 영향을 무시하고 2차원 축대칭 모델의 해석결과를 부분모델 경계부의 입력값으로 설정한 기존의 해석방법은 해당부위 단면설계에 비보수적인 결과를 유발할 수 있으므로 부분모델의 비영향 영역설정에 유의하여야 한다.

- (2) 격납건물 건전성시험의 예상변위 산정은 대표적 기하학적 특성이 고려된 해석결과를 토대로 산정되거나 장비출입구 주변의 부분모델 해석영역을 최대변위 발생부위까지 확대하여 주변의 예상변위를 산정하여야 할 것으로 판단된다. 또한 최대변위 발생 부위에 대한 계측 및 결과의 평가가 필수적으로 이루어지도록 시험방법의 개선이 따라야 한다.
- (3) 격납건물의 대개구부인 장비출입구 주변의 국부모델 작성시 해석모델의 비영향 영역의 선정은, 본 연구결과 원환방향은 장비출입구 중심에서 양쪽으로 약 65°, 총 130° 범위정도로 설정되어야 하며 수직방향은 벽체 전체 높이를 포괄하여야 할 것으로 분석되었다. 이를 고려할때 기존의 장비출입구 주변의 단면설계를 위한 부분모델의 비영향 영역의 설정범위 90° 는 부적합한 것으로 평가되었다.
- (4) 각각의 기하학적 특성에 따른 영향정도에 대한 분석결과 개별적으로는 일반단면의 거동에는 영향이 작으나 이들 변단면 조합에 의한 영향은 매우 큰 것으로 확인되었으며 특히 격납건물 전체거동에 영향을 주는 지배적인 인자는 개구부 및 개구부주변의 단면보강 부위에 의한 영향으로 분석되었다. 따라서 추후 이들 개구부 및 주변의 보강단면 크기에 따른 격납건물 거동전반의 영향분석이 수행되어야 할 것으로 판단되며 그 결과에 따라 본 논문 분석대상에서 제외된 인원출입구, 주증기 배관 관통부 부위에 대한 고려여부가 검토되어야 한다

참고문헌

- [1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec.III. Div 2. Article CC-6000 "Structural Integrity Test of Concrete Containment Structures", American Society of Mechanical Engineers, 1986
- [2] Structural Research & Analysis Corporation, User's Manual of Code COSMOS/M. "Finite Element Analysis System", 1994.
- [3] YGN 3&4 Design Report, "Containment General Report No. 9-310-C-409-001", KOPEC, 1989
- [4] YGN 3&4 Design Report, "Containment Shell and Dome Report No 9-310-C-409-003", KOPEC, 1989
- [5] Analysis of Area Near Large Penetration Calculation No 9-316-C304-020, KOPEC, 1988

표 1. 해석모델의 재료특성

항 목	대상부위	벽체 및 돔	기초 슬래브
설계기준강도(f_c)		5500 PSI	4000 PSI
콘크리트 탄성계수 (E)		6.09×10^5 KSF	5.19×10^5 KSF
콘크리트 단위중량 (γ)		0.15 KCF	0.15 KCF
포아송비 (ν)		0.17	0.17

표 2. 부벽의 유무에 따른 해석결과와 비교

구분	비교대상 비교위치 ⁴⁾ (ft)	해석결과 비교 (변위 : inch)				Diff. (%) 3D-1
		모델 3D-1 ¹⁾ 일반단면	모델 3D-2 ²⁾ 270° ³⁾ 240° 210°			
반경 변위	EL 108	0.199	0.198	0.208	0.124	160
	128	0.229	0.228	0.246	0.137	167
	148	0.222	0.218	0.242	0.139	160
	177	0.221	0.214	0.240	0.166	133
	203	0.224	0.214	0.236	0.235	95
	230	0.161	0.145	0.169	0.182	88
수직 변위	260	0.087	0.067	0.094	0.109	80
	돛정점	0.266	0.265	0.265	0.265	100
	돛 285 ⁵⁾	0.252	0.250	0.244	0.240	105
	돛 298 ⁶⁾	0.233	0.234	0.224	0.216	108
	벽체 230	0.166	0.170	0.158	0.143	116
	벽체 142	0.070	0.072	0.065	0.058	121

- 주: 1) 모델 3D-1 : 변단면이 없는 3차원 전체 모델
 2) 모델 3D-2 : 3D-1에 120° 간격으로 Buttress 요소 (Beam element) 달은 경우
 3) 270° : 부벽과 부벽의 중간부위 (일반단면)
 240° : 일반단면부위
 210° : 부벽의 정위치 (부벽 폭 13', 두께 2'-11")
 4) 격납건물 하단의 높이는 83 ft임.
 5) 돛정점에서 반경거리 25 ft 지점
 6) 돛정점에서 반경거리 50 ft 지점

표 3. 장비출입구 및 주변 보강단면을 고려한 해석결과

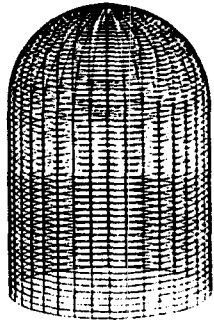
구분	비교대상 비교위치 ⁴⁾ (ft)	해석결과 비교 (변위 : inch)						
		모델 3D-1 ¹⁾ 일반 단면	모델 3D-3 ²⁾ 90° ³⁾ 120° 150° 210° 240° 270°					
반경 변위	EL 108	0.199	0.200	0.199	0.199	0.188	0.264	0.130
	128	0.229	0.231	0.230	0.231	0.210	0.347	0.140
	148	0.222	0.220	0.219	0.220	0.189	0.348	0.194
	177	0.221	0.220	0.220	0.220	0.197	0.332	0.151
	203	0.224	0.222	0.223	0.221	0.217	0.294	0.219
	230	0.161	0.154	0.154	0.153	0.161	0.193	0.155
수직 변위	260	0.087	0.078	0.078	0.079	0.090	0.099	0.092
	돛정점	0.266	0.257	0.257	0.257	0.257	0.257	0.257
	돛 285 ⁵⁾	0.252	0.249	0.249	0.249	0.248	0.247	0.246
	돛 298 ⁶⁾	0.233	0.232	0.232	0.231	0.230	0.227	0.225
	벽체 230	0.166	0.169	0.169	0.166	0.164	0.169	0.154

- 주: 1) 모델 3D-1 : 변단면이 없는 3차원 전체 모델
 2) 모델 3D-3 : 3D-1에 장비출입구와 주변보강단면 (57ft x 83ft, 두께 8ft) 부위만 고려
 3) 각도(°) : 격납건물 원환방향별 분할 각도
 4) 격납건물 하단의 높이는 83 ft임.
 5) 돛정점에서 반경거리 25 ft 지점
 6) 돛정점에서 반경거리 50 ft 지점

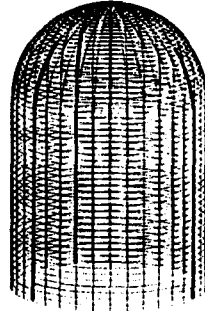
표 4. 기하학적 변단면이 고려된 모델 해석결과

위치	Plant Azimuth ¹⁾ 단면특성	114		90		42		330		304		287		272		267		244		210		162	
		일반 단면	부벽	일반 단면	부벽	Hatch 보강 단면	E/H 중심	Hatch 보강 단면	Hatch 보강단면 단부	일반 단면	부벽	일반 단면	부벽	일반 단면	부벽	일반 단면	부벽	일반 단면	부벽	일반 단면	부벽	일반 단면	부벽
반경 변위 (in)	EL 91 ²⁾	0.062	0.032	0.060	0.044	0.051	-	0.046	0.062	0.079	0.031	0.061											
	EL 108 ³⁾	0.202	0.144	0.204	0.217	0.095	-	0.098	0.213	0.297	0.134	0.207											
	EL 144	0.215	0.200	0.225	0.364	0.137	-	0.164	0.332	0.401	0.174	0.233											
	EL 154 ⁴⁾	0.212	0.199	0.222	0.364	0.192	-	0.179	0.349	0.399	0.173	0.232											
	EL 164	0.211	0.197	0.222	0.355	0.165	-	0.176	0.337	0.389	0.174	0.232											
	EL 184 ⁵⁾	0.215	0.197	0.225	0.315	0.132	-	0.164	0.277	0.353	0.183	0.235											
수직 변위 (돛,in)	230	0.155	0.128	0.163	0.166	-	-	-	0.206	0.135	0.165												
	돛정점	0.257	0.257	0.257	0.257	0.257	-	0.257	0.257	0.257	0.257												
	25ft offset		0.240	0.238	0.237	0.237	-	0.237	0.237	0.237	0.237	0.238											
수직 변위 (벽체,in)	50ft offset	0.220	0.215	0.220	0.210	0.212	-	0.215	0.215	0.217	0.215	0.219											
	230	0.159	0.150	0.159	0.149	0.140	-	0.150	0.150	0.161	0.147	0.160											

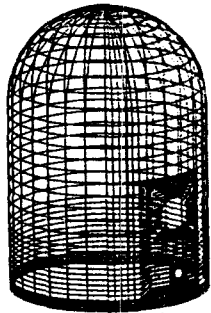
- 주: 1) 영광 3,4호기 원자로 격납건물의 실제 계획된 각도(°), 2) 단면보강부의 시작 위치,
 3) 비상출입구(Emergency Airlock)의 중심 높이, 4) 장비출입구(Equipment Hatch)의
 중심 높이, 5) 단면보강부의 단부 위치



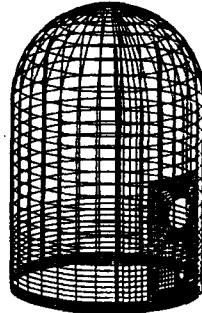
(a) 해석모델 (3D-1)



(b) 해석모델 (3D-2)



(c) 해석모델 (3D-3)



(d) 해석모델 (3D-4)

그림 1 기하학적 특성을 고려한 해석모델

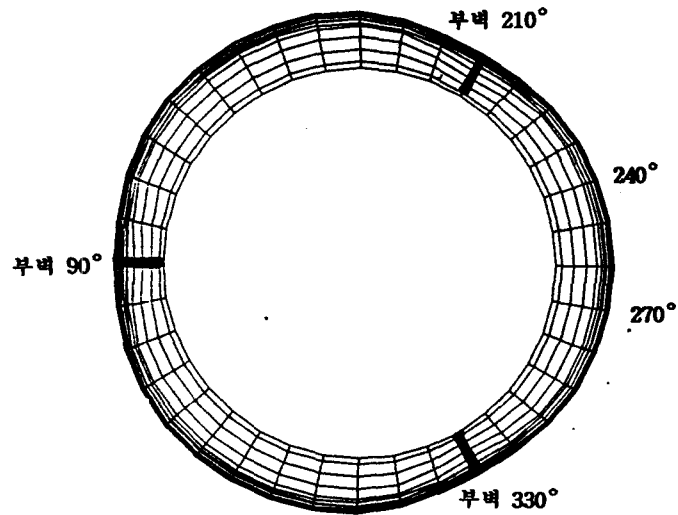


그림 2. 부벽의 영향에 의한 벽체(EL. 83-230 FT) 변형상태(평면)

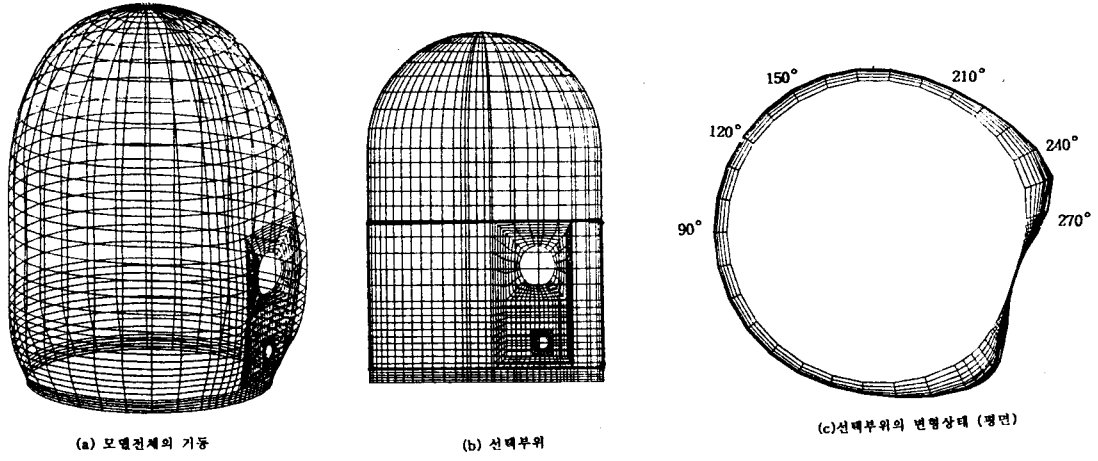


그림 3 개구부 및 개구부 주변 보강단면의 영향에 의한 변형상태

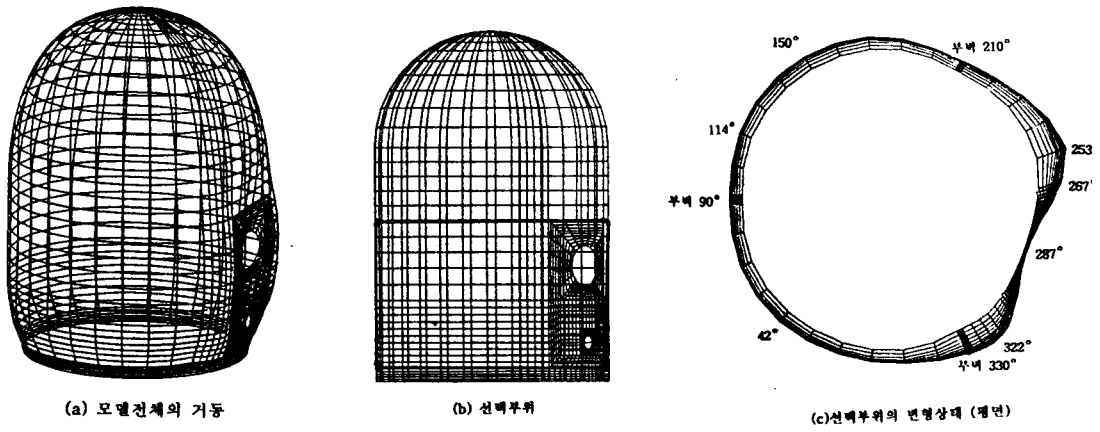


그림 4 기하학적 특성을 조합한 경우의 변형상태