



콘크리트 격납구조물 돔과 링빔의 개선된 설계기법

전세진^{1)*} · 김영진¹⁾

¹⁾(주)대우건설기술연구원

An Advanced Design Procedure for Dome and Ring Beam of Concrete Containment Structures

Se-Jin Jeon^{1)*} and Young-Jin Kim¹⁾

¹⁾Daewoo Institute of Construction Technology, Suwon 440-210, Korea

ABSTRACT The concrete containment structures have been widely used in nuclear power plants, LNG storage tanks, etc., due to their high safety and economic efficiency. The containment structure consists of a bottom slab, wall, ring beam and dome. The shape of the roof dome has a very significant effect on structural safety, the quantity of materials, and constructability; the thickness and curvature of the dome should therefore be determined to give the optimum design. The ring beam plays the role as supports for the dome, resulting in a minimized deformation of the wall. The main issues in designing the ring beam are the correct dimensions of the section and the prestress level. In this study, an efficient design procedure is proposed that can be used to determine an optimal shape and prestress level of the dome and ring beam. In the preliminary design stage of the procedure, the membrane theory of shells of revolution is adopted to determine several plausible alternatives which can be obtained even by hand calculation. Based on the proposed procedures, domes and ring beams of the existing domestic containment structures are analyzed and some improvements are discussed.

Keywords : containment structure, nuclear power plant, LNG storage tank, dome, ring beam, shell, membrane theory

1. 서 론

콘크리트 격납구조물은 구조적 안전성이 뛰어나고 경제적이므로 원자력발전소 격납건물, LNG 저장탱크, 사일로, 유체 저장탱크 등에 널리 사용되고 있다. 이러한 격납구조물은 Fig. 1의 예와 같이 크게 바닥판, 벽체, 링빔(ring beam), 돔(dome)으로 구성되며, 각 부위는 필요에 따라 RC(철근콘크리트) 또는 PSC(프리스트레스콘크리트)로 설계된다. 격납구조물의 설계 과정에서 정밀한 해석을 위해서는 일반적으로 유한요소법에 기반을 둔 선산구조해석이 사용된다. 하지만 또 한편으로는 효율적인 설계를 위한 이론적 검토 시에 활용될 수 있는 유용한 수계산 절차들이 제안되어 왔다. 그러나, 이들 대부분은 원통형 셸(cylindrical shell) 이론에 기초하여 격납구조물 벽체의 거동을 규명하는데 초점을 맞추어 왔다.¹⁻⁸⁾ 상대적으로 격납구조물의 지붕 돔과 링빔의 거동을 이론적으로 분석한 자료는 적은 편이며, 그나마 실무자들이 활용할 수 있는 수준으로 체계적이고 실용적으로 정리되어 있지는 못하다고 생각된다.⁹⁻¹²⁾ 따라서 이 연구에서는 돔

과 링빔의 설계 초안을 도출하기 위한 예비 해석 시 유용하게 활용할 수 있는 기법을 제안해보고자 한다.

격납구조물의 돔은 Table 1과 같이 구조물에 따라 반구형 돔을 비롯하여 납작한 형상의 돔까지 여러 가지 형태 및 두께로 설계되어 왔다. 지붕 돔의 형태는 구조재료의 물량, 구조적 안전성 및 시공 난이도에 큰 영향을 미치므로 최적의 형태와 프리스트레스 수준을 도출하고자 하는 노력이 필요하다. 한편 링빔은 이러한 돔을 지지하여 벽체의 변형을 최소화시키는 역할을 하며, 역시 단면 크기와 더불어 프리스트레스량을 적절히 결정하는 것이 설계의 핵심이 된다. 하지만, 지금까지 국내에서 설계된 격납구조물 돔 및 링빔은 이러한 면밀한 검토없이 기존 사례나 경험에 의존한 바가 컸다고 생각된다. 또한 체계적인 이론적 절차없이 단면 형상이나 프리스트레스 수준을 바꾸어가며 유한요소해석을 반복적으로 수행하는 시행착오적인 방식은 구조적으로 효율적인 돔 및 링빔 설계에 대한 통찰력을 주지 못한다는 단점이 있다.

이 연구에서는 축대칭 회전셸의 막이론을 적용하여 본 설계 시의 유한요소해석에 앞서 돔과 링빔의 초기 형상이나 프리스트레스 수준을 효율적으로 결정할 수 있는 기법을 제안하였다. 이러한 기법을 국내에서 시공된 격납구조물의 돔과 링빔에 적용하여 분석하고 단면 형상이나 프리스트레싱 설계에 대한 개선 방안을 고찰하였다.

*Corresponding author E-mail: jsj@dwconst.co.kr

Received July 29, 2010, Revised September 4, 2010,

Accepted September 10, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

Table 1 Shape of dome and ring beam of domestic containment structures

Structure	Nuclear containment building		LNG storage tank	
	OPR1000 ¹⁾	CANDU ²⁾	Tongyeong (140,000 m ³ capacity)	Incheon (100,000 m ³ capacity)
Shape of dome and ring beam				
Ring beam	×	○	○	○
Liner plate attached to inner face of dome	○	×	○	○
Prestressing tendon	Dome	○	×	×
	Ring beam	-	○	○

¹⁾Optimized Power Reactor 1000 MWe ²⁾CANada Deuterium Uranium

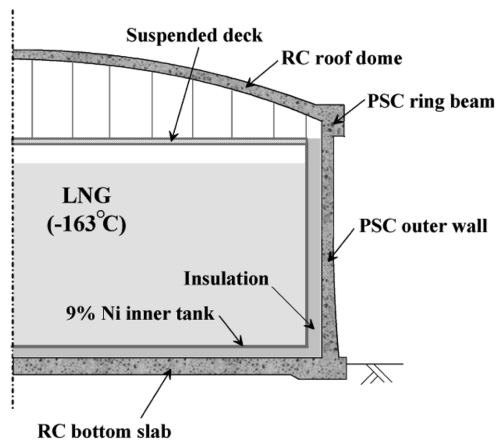


Fig. 1 Cross section of LNG storage tank

2. 이론적 배경

2.1 개요

ACI 373¹³⁾에서는 콘크리트 돔 해석 시에 탄성셀 이론을 따르도록 하고 있으나 구체적인 방법론은 제시되어 있지 않다. 하지만 돔 형상의 특징을 고려한다면 해석 효율성상 축대칭 쉘(shell of revolution) 이론^{11,12)}이 유력할 것으로 판단된다. 축대칭 쉘의 해석법도 크게 막이론(membrane theory) 및 휨이론으로 나눌 수 있다. 여기에서 막이론은 곡면 쉘이 하중에 대해 휨을 발생시키지 않고 면내력(in-plane force)에 의해서만 저항한다는 가정이 내포된 이론이다. Fig. 2의 자중에 의한 돔의 단면력 예와 같이 막이론은 집중하중부나 경계부를 제외하고는 비교적 정확한 값을 산출하며 평형방정식만으로도 지배방정식을 도출할 수 있는 등 수계산 과정이 비교적 용이하다. 한편 휨이론은 막이론에 휨거동까지 추가로 도입한 것으로서, 결과가 좀 더 정확한 반면 계산이 복잡해지는 단점이 있다. 이 연구의 목적은 실무에서 용이하게 활용할 수 있는 돔 및 링빔 검토 절차를 제시하는 것이

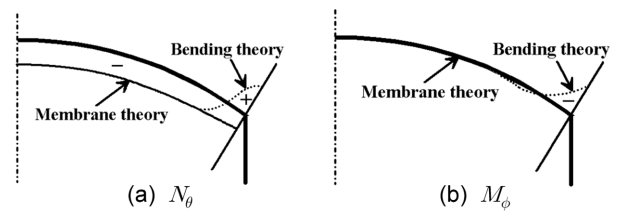


Fig. 2 Section forces due to self-weight of dome

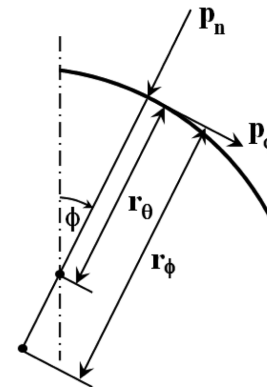


Fig. 3 Analysis of dome(shell of revolution)

므로 막이론을 채택하여 분석하였다.

2.2 돔의 해석

축대칭 쉘의 막이론에 근거하여 면내력을 산출하기 위해서는 Fig. 3에 대하여 평형방정식을 세우면 된다. 이때 단위길이당 면내력은 식 (1) 및 (2)와 같이 산출된다.

$$N_{\phi} = -\frac{1}{r_{\theta} \sin^2 \phi} \times \left\{ \int_0^{\phi} [r_{\theta} r_{\phi} \sin \phi (p_{\phi} \sin \phi + p_n \cos \phi)] d\phi + C \right\} \quad (1)$$

$$\frac{N_{\phi}}{r_{\phi}} + \frac{N_{\theta}}{r_{\theta}} + p_n = 0 \quad (2)$$

여기서 ϕ : 자오선 방향
 θ : 원환 방향
 r_ϕ, r_θ : 자오선 방향 및 원환 방향의 주반경
 p_ϕ, p_n : 자오선 방향 및 법선 방향의 압력
 N_ϕ, N_θ : 자오선 방향 및 원환 방향의 면내력
 C : 상수(정점의 집중하중 고려)

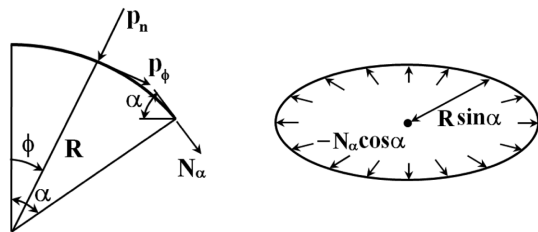
정점이 뾰족하지 않은 일반적인 돔 형상에서는 각 방향의 주반경이 일치하므로 이를 R 이라 두고, 또한 압력 이외의 집중하중은 없다고 보면 $C=0$ 이므로 식 (1) 및 (2)는 식 (3) 및 (4)와 같이 간략화될 수 있다. 이러한 수식들에서는 기본적으로 축대칭 하중을 가정하였지만, 비축대칭 하중의 경우에도 푸리에 급수를 이용하면 해를 구할 수 있다.

$$N_\phi = -\frac{R}{\sin^2 \phi} \int_0^\phi (p_\phi \sin^2 \phi + p_n \sin \phi \cos \phi) d\phi \quad (3)$$

$$\frac{N_\phi + N_\theta}{R} = -p_n \quad (4)$$

2.3 링빔의 해석

링빔은 Fig. 4(a)와 같이 돔으로부터 전달되어 오는 자오선 방향 면내력, 즉, 추력(thrust)을 지지하는 역할을 하며, Fig. 4(b)를 참조할 때 링빔에는 식 (5)와 같은 인장력이 발생하게 된다. 이러한 링빔의 인장력에 효과적으로 대처하기 위해서는 링빔 자체의 강성 확보와 더불어



(a) Section force transmitted from dome (b) Thrust

Fig. 4 Analysis of ring beam

링빔에 원환 방향으로 텐던을 배치하여 프리스트레스를 도입하는 경우가 많으며, 이를 고려한 링빔의 응력은 식 (6)과 같다. 식 (5)로부터, 돔 해석에 막이론을 적용할 경우 반구형 돔에서는 추력이 발생하지 않으므로 구조적으로 링빔이 필요없게 된다. 이는 대부분의 반구형 돔에 링빔이 없는 이유를 잘 설명해 주고 있다(Table 1 참조).

$$T_{rb} = -N_\alpha R \sin \alpha \cos \alpha \quad (5)$$

$$\sigma_{rb} = \frac{(T_{rb} - P_{rb})}{A_{rb}} \quad (6)$$

여기서 T_{rb} : 돔 하중에 의해 링빔에 발생하는 인장력
 N_α : $\phi = \alpha$ 일 때의 N_ϕ
 α : 돔 정점에서부터 스프링(링빔 위치)까지의 자오선 방향 각도
 σ_{rb} : 링빔에서 발생하는 응력
 P_{rb} : 링빔의 원환텐던에 의한 긴장력의 총합
 A_{rb} : 링빔의 단면적

3. 돔의 분석

3.1 개요

돔의 주요 설계하중에는 자중, 내압, 돔 상부의 분포하중, 풍하중, 지진하중, 온도하중, 프리스트레싱 하중 등이 있다. 여기에서 프리스트레싱 하중은 돔 자체에 배치된 텐던 또는 링빔에 배치된 텐던에 의해 발생한다. Table 2에서는 식 (3) 및 (4)에 의해 지배적인 하중들이 발생시키는 돔의 면내력을 유도한 결과를 정리하였다.

Table 2에서 특기할 사항은 다음과 같다. 먼저 내압의 경우 R 이 작을수록, 즉, 곡률이 클수록 면내력이 작게 발생하며, 따라서 반구형 돔에서 면내력이 최소가 된다. 이는 사고시의 내압이 지배적인 설계하중인 원전 격납건물의 돔 형상이 반구형인 경우가 많은 이유를 잘 설명해 주고 있다. 자중 또는 돔에 접하여 작용하는 분포하중에 대해서는 N_θ 값이 $\phi = 52^\circ$ 이하에서 압축, 그 이상에서는 인장인 특징이 있다. 따라서, 콘크리트 돔의 형상

Table 2 In-plane forces of dome induced by design loads

Type of load	Internal pressure	Self-weight or distributed load	Distributed load on projected area	Prestressing load of dome tendons
Illustrative figure				
N_ϕ	$\frac{pR}{2}$	$-\frac{pR}{1 + \cos \phi}$	$\frac{pR}{2}$	$-P$
N_θ	$\frac{pR}{2}$	$pR \left(\frac{1}{1 + \cos \phi} - \cos \phi \right)$	$-\frac{pR}{2} \cos 2\phi$	$-P$

이 납작할 경우 돔의 전구간에서 N_θ 가 압축으로 유지될 수 있어 유리하다. 이는 돔의 자중이 지배적인 설계하중인 LNG 탱크, 사일로, 유체 저장탱크 등에서 납작한 돔 형상을 선호하는 경향을 잘 설명해 주고 있다. 실제 돔 설계 시에는 분포하중을 돔의 투영면인 수평면에 작용하는 것으로 가정하는 경우가 많은데 이 경우에는 N_θ 의 부호가 바뀌는 임계 각도가 $\phi = 45^\circ$ 로 된다. 한편, 프리스트레싱 하중에서 P 는 돔을 분리해 냈을 때 잘린 단면의 원주 방향 단위길이당 긴장력이고, 이 때 프리스트레싱이 유발하는 압력 $p_{ps} = 2P/R$ 이다.

3.2 국내 격납구조물 돔의 분석

제안된 절차 및 이론에 따라 국내 콘크리트 격납구조물 돔에서 발생하는 응력의 수준을 유추해보고 돔 형상에 대한 개선안을 제시해 보았다. 분석시의 가정이나 전제조건은 다음과 같다. 첫째, 돔 두께는 일정하다고 가정하였다. 일반적으로 납작한 형상의 돔에서는 Fig. 2(b)와 같은 부모멘트에 대비하여 스프링부 부근에서는 두께를 증가시킨다. 둘째, 기밀성 확보 등을 위하여 돔 안쪽에 부착되는 5~6 mm 두께의 라이너의 강성 기여는 무시하였다. 여기에서는 콘크리트의 응력 수준에 따른 돔 형태의 구조적 효율성을 주로 평가하며, 본설계 단계에서 강도설계법이나 한계상태설계법 등에 의해 콘크리트 단면과 배근의 적합성 등을 상세하게 검토하게 된다.

면내력에 의한 인장 또는 압축응력 중에서 주된 검토 대상은 콘크리트의 특성상 인장응력이며, 따라서 Table 2의 수식 형태로 볼 때 N_θ 가 주관심사가 된다. 한편 콘크리트의 인장강도는 휨인장강도(파괴계수), 쪼갬인장강도, 직접인장강도로 나눌 수 있는데 면내력에 의한 인장응력과 비교를 위해서는 직접인장강도(f_t)를 택함이 타당하다. 설계기준압축강도 f_{ck} 로부터 인장강도를 추정하

는 식은 설계기준마다 차이가 있지만 ACI 207¹⁴⁾에 의하면 쪼갬인장강도는 $0.56\sqrt{f_{ck}}$ 이고 직접인장강도는 쪼갬인장강도보다 25% 정도 더 작다고 명시하고 있다. 따라서, 이 연구에서는 직접인장강도를 $0.42\sqrt{f_{ck}}$ 로 두었다.

먼저 분석한 구조물은 Table 1에서도 언급된 통영의 지상식 LNG 탱크이다. 탱크 전체가 지상에 노출되어 있는 지상식 LNG 탱크의 경우 돔의 곡률반경을 벽체의 직경과 동일하게($R=D$) 설계하는 경우가 대다수였다. 하지만, 지붕만이 지상에 노출된 지중식은 $R=0.82D \sim 0.83D$,¹⁵⁾ 탱크 전체가 매입되어 있는 지하식 LNG 탱크의 경우 $R=1.31D$ ¹⁶⁾로 설계된 사례가 있는 등 돔의 효율적인 곡률에 대해서는 재고해 볼 여지가 있는 것이 사실이다. 설계기준에 콘크리트 돔 자체의 곡률에 대한 제약사항은 없으나, 일부 기준에 명시된 돔 라이너 곡률에 대한 규정(API¹⁷⁾의 경우 $R=0.8D \sim 1.2D$)이 제약이 될 수도 있다. Table 3의 분석결과는 돔의 정점에서 스프링까지의 자오선 방향 각도(Fig. 4(a)의 α)를 5등분했을 때 스프링에 가까운 1/5 지점에서의 응력값을 정리한 것이다. 스프링, 즉, 링빔과의 접합부에서는 응력이 더 크게 발생하지만 앞서 언급했듯 경계부에서는 막이론의 정확성이 다소 저하되므로 스프링을 어느정도 벗어난 위치를 기준한 것이다.

Fig. 5를 참조하면 대상 구조물의 경우 돔 두께가 일정할 때 돔의 곡률반경을 줄여서 라이즈(rise)를 높여보면 응력이 약간 감소하다가 다시 증가하였으며, 그 결과 case 2가 원안인 case 1보다 더 작은 응력을 산출하였다. 즉, 자중이나 외부 분포하중이 지배하는 사일로나 유체 저장탱크의 경우 납작한 형상의 돔이 유리하지만, 내압도 혼재하는 LNG 탱크의 경우에는 내압의 영향으로 인해 구조적인 최적 곡률이 존재하는 것으로 나타났다. 그러나, 구조적 효율성과는 별도로 라이즈가 높아질수록 콘크리트, 라이너 및 철근의 물량이 늘어나고 또한 납작한 돔에서는 필요 없었던 돔 상면 거푸집이 추가로 필요할

Table 3 Analysis of dome shape of an LNG tank

Case	Radius of curvature (R) ¹⁾	Thickness (t) (m)	Hoop stress ($\sigma_\theta = N_\theta/t$, MPa)				Quantity of concrete (m ³)	Remarks
			Internal pressure (0.03 MPa)	Self-weight (25 kN/m ³)	Distributed load (0.005 MPa)	Sum (ratio to case 1) ²⁾		
1	1.0D	0.6	2.15	-0.84	-0.24	1.07 (1.00)	3,736	Original shape of Tongyeong LNG tank
2	0.8D	0.6	1.72	-0.55	-0.14	1.04 (0.97)	3,915	Variation of curvature
3	0.58D	0.6	1.25	-0.10	0.02	1.17 (1.09)	4,626	
4	0.5D	0.6	1.08	0.49	0.14	1.71 (1.60)	6,971	
5	1.0D	0.7	1.84	-0.84	-0.21	0.80 (0.74)	4,358	Variation of thickness
6	1.0D	0.5	2.58	-0.84	-0.29	1.45 (1.36)	3,113	
7	1.0D	0.4	3.23	-0.84	-0.36	2.02 (1.89)	2,490	
8	0.8D	0.5	2.06	-0.55	-0.16	1.35 (1.26)	3,262	Variation of curvature and thickness

¹⁾D = 86 m, slope of dome at the spring : 30°(1.0D), 39°(0.8D), 60°(0.58D), 90°(0.5D)

²⁾ $f_{ck} = 30$ MPa, $f_t = 0.42\sqrt{30} = 2.30$ MPa

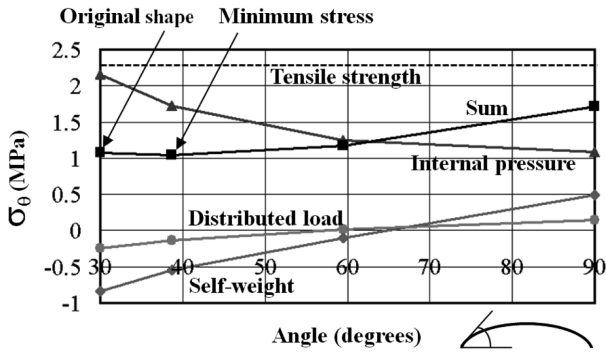


Fig. 5 Analysis of dome curvature of the LNG tank

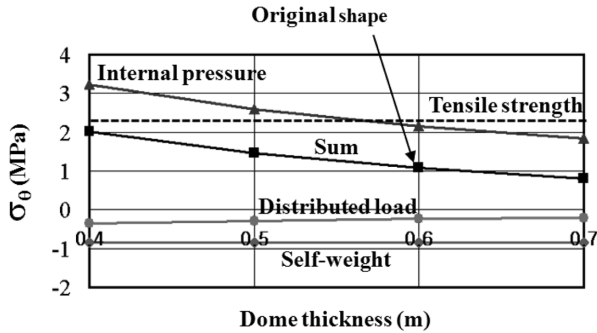


Fig. 6 Analysis of dome thickness of the LNG tank

수 있으므로 시공비의 증가 요인도 함께 분석할 필요가 있다. 또한, 라이즈가 높아지면 시공 난이도이나 작업 위험성이 증가 할 가능성도 있다. Fig. 6와 같이 돔의 두께를 감소시켜 소정의 안전도가 확보되는 한도 내에서 물량을 감소시킬 여지가 있는지 분석해 보는 것도 매우 유용하다. 실제 지상식 LNG 탱크의 국내의 사례를 분석해보면 돔 두께 0.4 m까지도 성공적으로 시공되었으며, 대상 구조물의 경우에도 Fig. 6와 같이 원안보다 두께를 감소시킬 수 있는 가능성이 있는 것으로 분석되었다. 돔 두께와 곡률이 구조적 안전도와 물량에 미치는 영향이 각각 분석되면 case 8의 예와 같이 최종적으로는 두 가

지를 동시에 조절하여 최적의 돔 형상을 찾는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

다음으로 분석한 구조물은 Table 1의 한국형 원전(OPR1000)이다. LNG 탱크와 비교할 때 원전 격납건물의 두드러진 특징은 설계내압이 LOCA(Loss Of Coolant Accident)나 MSLB(Main Stream Line Break)와 같은 사고시를 가정하여 매우 크다는 점과, 이러한 내압에 대응하여 돔 텐던이 배치된다는 점이다. OPR1000에는 Fig. 7과 같이 2방향으로 돔 텐던이 배치된다. 이처럼 비축대칭으로 배치된 돔 텐던의 프리스트레싱 효과를 축대칭 모델에서 근사적으로 구현하는 기법은 기존 연구¹⁸⁾에서 논의되었으며, OPR1000에서 Table 2의 P값은 7,864 kN/m로 계산된다. Table 4에서 분석결과를 정리하였으며 역시 스프링을 약간 벗어난 위치에서 원환 방향 응력을 분석하였다. Case 1의 원안을 살펴보면 비록 내압에 의한 인장응력이 크게 발생하지만 반구형 돔 형상으로 이를 최소화시켰으며, 또한 높은 수준으로 도입된 프리스트레스가 이러한 인장응력을 상쇄하고 있음을 알 수 있다. 분석 대상 구조물의 내압이 워낙 큰 관계로 돔에 도입된 프리스트레스가 일정한 상태에서 돔을 납작한 형상으로 변화시키는 것은 내압에 의한 인장응력이 더욱 증가하여 불리함을 알 수 있다. 하지만, 납작한 돔일수록 물량이 감소하므로 예상되는 응력 수준에 근거하여 돔의 곡률을 조정하는 것도 바람직할 것으로 생각된다. 이 때

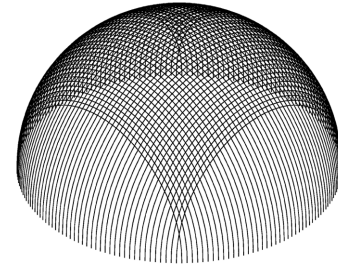


Fig. 7 Arrangement of dome tendons of OPR1000

Table 4 Analysis of dome shape of a nuclear containment building

Case	Radius of curvature (R) ¹⁾	Thickness (t) (m)	Hoop stress ($\sigma_{\theta} = N_{\theta} / t$, MPa)					Quantity of concrete (m ³)	Remarks
			Internal pressure (0.42 MPa)	Self-weight (25 kN/m ³)	Distributed load (0.005 MPa)	Dome prestressing (P = 7,864 kN/m)	Sum ²⁾		
1	0.5D	1.07	4.32	0.25	0.04	-7.35	-2.74	3,254	Original shape of OPR1000
2	0.58D	1.07	5.01	-0.05	0.01	-7.35	-2.38	2,160	
3	0.8D	1.07	6.91	-0.28	-0.04	-7.35	-0.76	1,827	
4	1.0D	1.07	8.64	-0.43	-0.07	-7.35	0.79	1,744	
5	0.5D	0.9	5.13	0.25	0.05	-8.74	-3.30	2,737	Variation of thickness
6	0.5D	0.75	6.16	0.25	0.06	-10.49	-4.02	2,281	
7	0.5D	0.6	7.70	0.25	0.07	-13.11	-5.08	1,825	

¹⁾D = 44 m, slope of dome at the spring : 30°(1.0D), 39°(0.8D), 60°(0.58D), 90°(0.5D)

²⁾ $f_{ck} = 38.5 \text{ MPa}$, $f_t = 0.42 \sqrt{38.5} = 2.61 \text{ MPa}$

주의할 점으로는 뒤에서 분석하겠지만 돔이 납작해질수록 돔 자체의 물량은 감소하지만 돔을 지지하는 링빔이 추가로 필요할 수 있으므로 물량 분석시 이를 고려해야 한다. 참고로 Table 1의 CANDU형 원전의 경우에는 설계내압이 OPR1000의 30% 수준으로 작기 때문에 납작한 돔 형상이 가능했다고 판단된다. 또한 Table 4는 프리스트레스가 사고시 내압을 상쇄하는 것 이상 충분히 도입된 경우, 돔 두께가 감소하면 내압에 의한 인장응력도 증가하지만 프리스트레스에 의한 압축응력도 함께 증가하여 오히려 더 유리한 결과가 산출될 수도 있음을 보여주고 있다.

제안된 절차는 이처럼 돔의 곡률반경이나 두께와 같은 돔 형상의 변화가 구조안전도에 미치는 영향을 일목요연하게 파악하고 개선안을 도출할 수 있는 장점이 있다.

4. 링빔의 분석

Table 5에서는 Table 1의 통영 LNG 탱크의 돔 및 링빔 제원을 기본으로 하여 제안된 절차에 따라 링빔 원설계의 적정성을 분석하고 개선안을 제시해 보았다. 단, 돔에 작용하는 내압은 추력을 오히려 감소시켜 링빔에 유리한 면이 있으므로 안전측으로 무시하였다. 링빔 원환텐던의 모든 프리스트레스 손실 후 텐던당 유효 긴장력은 원안에 따라 2,150 kN으로 보았으며 필요시 텐던 개수를 조정해 보았다. 원안은 링빔의 원환 방향 응력이 다소 과도하게 발생하는 반면, 돔의 곡률반경을 작게 하거나 링빔의 단면적 또는 링빔 프리스트레스량을 증가시킴으로써 링빔 응력을 허용값 이내로 조절할 수 있었다. LNG 탱크 돔의 곡률반경을 작게 하는 것은 Table 3와 같이 돔 자체의 응력을 감소시키는 효과도 있었으나, 링

빔의 추력을 감소시켜 유리한 점도 있었다. Case 5에서는 돔의 곡률반경 및 두께, 링빔 단면을 동시에 최적화시켜 보았으며 그 결과 링빔에 발생하는 응력이 작아지면서도 돔과 링빔의 물량이 줄어드는 효과가 있었다. 링빔 단면의 크기를 설계할 때에는 식 (6)과 같이 단면 크기가 응력에 미치는 영향 이외에, 필요한 링빔 원환텐던들을 텐던의 최소간격 규정¹³⁾을 만족하면서 모두 수용할 수 있는지도 함께 고려해 보아야 한다.

다음으로 링빔의 적정한 응력 수준에 대해 추가로 논하고자 한다. 원형 PSC 탱크 구조물의 설계 개념 중 여유압축응력 개념이 있다. 이는 프리스트레싱 텐던에 의해 도입된 압축응력 중 주요 설계하중에 의한 인장응력을 상쇄하고도 남아 있는 여분의 압축응력을 의미한다. 여유압축응력은 건조수축이나 온도변화 등에 대비하는 역할 이외에, 유체저장 탱크의 유체와 접하는 단면 부위에서는 수밀성 확보 차원에서도 중요하다. 이의 적정한 크기는 설계기준마다 차이가 있지만 예를 들어 ACI 373¹³⁾의 경우 200 psi(1.4 MPa)로 명시하고 있다. 또한, 링빔의 과도한 프리스트레스 및 그로 인한 불리한 변형을 최소화하기 위하여 최대 프리스트레스를 1,000 psi(7 MPa) 또는 $0.55f_{cr}$ 로 제한하고 있다. 여기에서 f_{cr} 는 긴장시의 콘크리트 초기강도이다. Table 5에서 분석한 링빔 원안 및 대안들은 인장응력 상태에 있는 것으로 나타나지만 이는 내압을 무시했기 때문이며 내압을 고려하면 여유압축응력 이상의 압축응력 상태를 유지하고 있다.

한편 링빔의 응력상태는 엄밀히 말해 시공단계에 따라 계속적으로 변동하므로 모든 시공단계에 있어 과도한 압축이나 인장이 발생하지 않도록 해야 한다. 예를 들어 기존 LNG 탱크에서 다음과 같은 순서로 돔 및 링빔을 시공한 사례가 있다.

Table 5 Analysis of ring beam of an LNG tank

Case	Radius of curvature of dome (R) ¹⁾	Dome thickness (t) (m)	Ring beam dimension (m)	Hoop stress of ring beam (σ_{rb} , MPa)					Quantity of concrete (m ³)			Remarks
				Dome loads			Ring beam prestressing (# of tendon) (P=2,150 kN/tendon)	Sum (ratio to case 1) ²⁾	Dome	Ring beam	Sum	
				Internal pressure (0.03 MPa)	Self-weight (25 kN/m ³)	Distributed load (0.005 MPa)						
1	1.0D	0.6	1.5 × 3.2	Neglected	5.36	1.67	-4.03 (9)	3.00 (1.00)	3,736	1,319	5,055	Original shape of Tongyeong LNG tank
2	0.8D	0.6	1.5 × 3.2		4.05	1.20	-4.03 (9)	1.22 (0.41)	3,915	1,319	5,234	Variation of dome curvature
3	1.0D	0.6	1.6 × 3.4		4.73	1.47	-3.56 (9)	2.65 (0.88)	3,736	1,497	5,233	Variation of ring beam dimension
4	1.0D	0.6	1.5 × 3.2		5.36	1.67	-4.48 (10)	2.55 (0.85)	3,736	1,319	5,055	Variation of ring beam prestress
5	0.8D	0.5	1.4 × 3.0		3.86	1.37	-4.61 (9)	0.63 (0.21)	3,262	1,153	4,415	Variation of dome curvature and thickness, and ring beam dimension

¹⁾D = 86 m ²⁾ $f_{ck} = 40$ MPa, $f_t = 0.42 \sqrt{40} = 2.66$ MPa

- (1) 링빔 시공
- (2) 링빔 1차 프리스트레스(50%)
- (3) 돔 1층 타설(1/2 두께)
- (4) 돔 2층 타설(1/2 두께)
- (5) 링빔 2차 프리스트레스(나머지 50%)

이를 살펴보면 최종적인 링빔 응력은 Table 5의 결과와 같지만 시공 중에는 그보다 큰 압축이나 인장응력 상태도 발생할 수 있음을 알 수 있다. 즉, case 1의 원안을 예로 든다면, (2)단계 직후에는 -2.02 MPa의 압축응력이 도입되고 (4)단계 직후에는 3.34 MPa의 인장응력이 도입되는 것으로 계산된다. 프리스트레스의 장기 손실이 모두 발생하기 이전인 시공단계에서는 Table 5에서 가정된 유효 긴장력보다 좀 더 큰 긴장력이 도입되지만 편의상 유효 긴장력을 계산에 사용하였다. 이 예제에서는 시공 중에 변동하는 링빔 응력이 압축 측면에서는 큰 문제가 없지만, 인장응력은 일시적으로 사용 시보다 좀 더 큰 수준으로 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 일시적인 인장응력은 (2)단계의 프리스트레스 비율을 늘림으로써 저감할 수 있다. 제안된 절차를 사용하면 이처럼 시공 시와 사용 시 발생하는 링빔의 응력상태 및 안전도 평가를 용이하게 수행하고 개선점을 도출할 수 있는 장점도 있다.

5. 돔과 링빔의 설계 절차 제안

이상에서 언급한 절차를 반영하여 콘크리트 격납구조물의 돔과 링빔을 합리적으로 설계할 수 있는 절차를 Fig. 8과 같이 제안해 보았다. 음영 처리된 부분이 이 논문에서 제안되어 기존의 설계절차와 차별화되는 부분으로, 이러한 절차를 통하여 구조적으로 최적화된 돔 및 링빔 설계를 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 최종적으로는 전체 격납구조물의 유한요소해석을 통해 개별하중 및 하중조합에 대한 단면력을 도출하고 이를 적절히 배근된 단면의 내력과 비교하여 돔과 링빔 설계의 적정성을 재검토하게 된다. 격납구조물 돔과 링빔의 배근시 참조할 수 있는 규정에는 ACI 334,¹⁹⁾ ACI 349,²⁰⁾ ACI 373¹³⁾ 등이 있다.

또한 본문에서 자세히 다루지는 않았지만 일반적인 설계검토 사항 이외에 추가적인 검토가 필요한 사항은 크게 다음과 같다. 먼저, 돔 두께의 적정성 확인시에는 가정된 충격체에 의해 돔에 관입, 관통, 스캐빙 등의 국부손상이 발생하는지의 여부를 기존에 제안된 국부손상 평가식²¹⁾을 통해 검토해 봄이 바람직하다. 또한, 콘크리트 돔의 좌굴¹³⁾이나 돔 라이너의 좌굴에 대한 검토도 수행해 보아야 한다. 돔 라이너는 콘크리트 돔 타설시 하부 거푸집의 역할도 겸하는데, 콘크리트 돔의 분할타설 두께나 평면상 타설 순서에 따라 좌굴 안전도가 변동하므로²²⁾ 콘크리트 돔 설계 및 시공계획 수립시 이를 반영해야 한다.

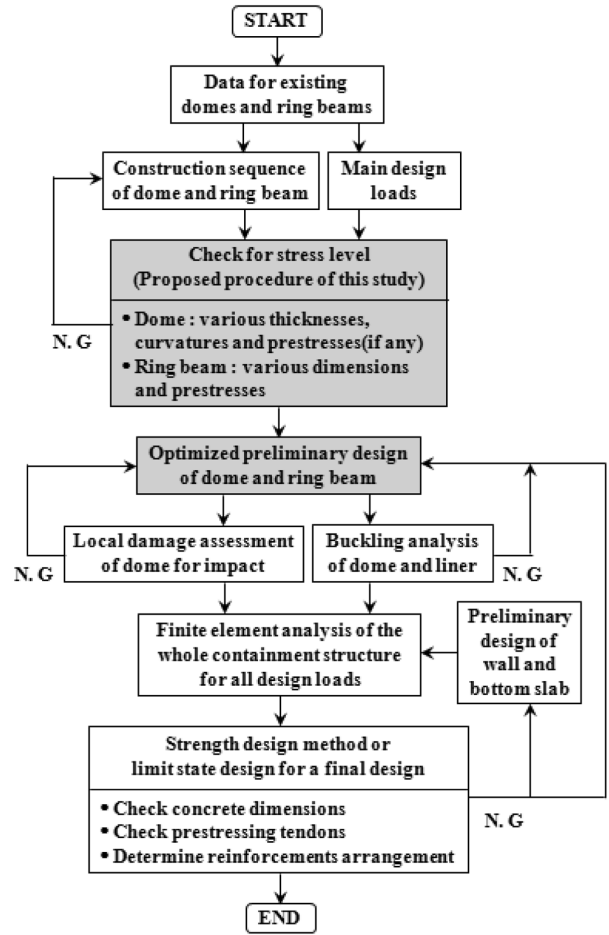


Fig. 8 Flow chart of dome and ring beam design

6. 결 론

원자력발전소 격납건물이나 LNG 저장탱크 등과 같은 콘크리트 격납구조물 중에서 돔과 링빔은 다른 부분보다 설계 및 시공 난이도가 높다. 일반적인 설계에서는 유사한 기존 사례를 참조하여 돔과 링빔 단면을 설정하는 경우가 많았는데 이는 자칫 보수적이고 비경제적인 설계로 이어질 우려가 있다. 따라서, 이 연구에서는 본설계 시의 유한요소해석에 앞서 돔과 링빔의 초기 형상이나 프리스트레스 수준을 효율적으로 결정할 수 있는 기법을 제안하였다. 돔과 링빔 해석 시에 적용할 수 있는 셀 이론에는 여러 가지가 있지만 여기에서는 실무자들이 좀 더 용이하게 활용할 수 있도록 축대칭 회전셀의 막이론을 적용해 보았다. 이러한 기법을 국내에서 시공된 격납구조물의 돔과 링빔에 적용하여 분석하였으며, 더 나아가 실구조물의 돔과 링빔의 단면 형상이나 프리스트레스를 변경시켜 가며 구조적으로 더 안전하면서 물량 측면에서도 경제적인 대안을 고찰해 보았다. 이를 통해 도출해 낸 개선안들이나 그 과정에서 논의된 사항들은 추후 격납구조물 돔 및 링빔 설계 시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- Ghali, A. and Elliott, E., "Prestressing of Circular Tanks," *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 6, 1991, pp. 721~729.
- Ghali, A., *Circular Storage Tanks and Silos*, 2nd Ed., E & FN Spon, 2000, 330 pp.
- Brøndum-Nielsen, T., "Prestressed Tanks," *ACI Structural Journal*, Vol. 82, No. 4, 1985, pp. 500~509.
- Brøndum-Nielsen, T., "Design of Prestressed Tanks," *ACI Structural Journal*, Vol. 89, No. 3, 1992, pp. 245~250.
- Brøndum-Nielsen, T., "Creep Compensating Prestress of Tanks," *ACI Structural Journal*, Vol. 90, No. 1, 1993, pp. 32~36.
- Brøndum-Nielsen, T., "Orthotropic Shells," *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No. 3, 1996, pp. 290~294.
- Brøndum-Nielsen, T., "Optimum Prestress of Tanks with Pinned Base," *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 1, 1998, pp. 3~8.
- Priestley, M. J. N., "Analysis and Design of Circular Prestressed Concrete Storage Tanks," *PCI Journal*, Vol. 30, No. 4, 1985, pp. 64~85.
- Nawy, E. G., *Prestressed Concrete - A Fundamental Approach*, Prentice-Hall, Inc., 1989, 739 pp.
- Billington, D. P., *Thin Shell Concrete Structures*, 2nd Ed., McGraw-Hill, Inc., 1982, 373 pp.
- Timoshenko, S. P. and Woinowsky-Krieger, S., *Theory of Plates and Shells*, 2nd Ed., 1970, 580 pp.
- Flügge, W., *Stresses in Shells*, 2nd Ed., Springer-Verlag, 1973, 525 pp.
- ACI Committee 373, *Design and Construction of Circular Prestressed Concrete Structures with Circumferential Tendons(ACI 373R-97)*, American Concrete Institute, 1997, 26 pp.
- ACI Committee 207, *Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete(ACI 207.2R-95)*, American Concrete Institute, 1995(Reapproved 2002), 26 pp.
- 高木 淳, 中下兼次, 和賀秀悦, 名倉健二, "世界最大 20万kl LNG 地下タンクの開発と施工," *コンクリート工學*, Vol. 34, No. 2, 1996, pp. 23~32.
- 後藤貞雄, 中野正文, 中澤 享, 黒田正信, "世界初の埋設式 LNG 地下タンクの開発と建設," *コンクリート工學*, Vol. 35, No. 2, 1997, pp. 18~25.
- API, *Welded Steel Tanks for Oil Storage(API Standard 650)*, 10th Ed., American Petroleum Institute, 1998.
- 전세진, "원전 격납건물 돔 텐던의 축대칭 모델링 기법. II. 수치예제를 통한 검증," *콘크리트학회 논문집*, 17권, 4호, 2005, pp. 527~533.
- ACI Committee 334, *Concrete Shell Structures Practice and Commentary(ACI 334.1R-92)*, American Concrete Institute, 1992(Reapproved 2002), 10 pp.
- ACI Committee 349, *Code Requirement for Nuclear Safety Related Concrete Structures(ACI 349-01)*, American Concrete Institute, 2001, 134 pp.
- Sugano, T., Tsubota, H., Kasai, Y., Koshika, N., Itoh, C., Shirai, K., von Rieseemann, W. A., Bickel, D. C., and Parks, M. B., "Local Damage to Reinforced Concrete Structures Caused by Impact of Aircraft Engine Missiles. Part 2. Evaluation of Test Results," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 140, 1993, pp. 407~423.
- Suzuki, H., Nose, Y., Tanaka, T., Mizoguchi, Y., Nakachi, I., Nakano, M., Hirofani, A., Ogawa, T., and Fukada, A., "Design and Erection of Temporary Steel Roof for Under-Ground LNG Storage Tank," *Proceedings of LNG 13*, 2001, PO-27.1~PO-27.10.

요 약 콘크리트 격납구조물은 구조적 안전성이 뛰어나고 경제적이므로 원자력발전소 격납건물, LNG 저장탱크 등에 널리 사용되고 있다. 격납구조물 중 지붕 돔의 형태는 구조적 안전성, 물량 및 시공 난이도에 큰 영향을 미치므로 최적의 두께와 곡률을 도출하고자 하는 노력이 필요하다. 한편 일반적으로 PSC 구조로 설계되는 링빔은 이러한 돔을 지지하여 벽체의 변형을 최소화시키는 역할을 하며, 단면 크기와 더불어 프리스트레스 수준을 적절히 결정하는 것이 설계의 핵심이 된다. 이 연구에서는 축대칭 회전셀의 막이론을 적용하여 본설계 시의 유한요소해석에 앞서 돔과 링빔의 초기 형상이나 프리스트레스 수준을 효율적으로 결정할 수 있는 기법을 제안하였다. 이러한 기법을 국내에서 시공된 격납구조물의 돔과 링빔에 적용하여 분석하고 단면 형상이나 프리스트레싱 설계에 대한 개선 방안을 고찰하였다.

핵심용어 : 격납구조물, 원자력발전소, LNG 저장탱크, 돔, 링빔, 셀, 막이론