

특 집

|| 최신 프리스트레스트 콘크리트 ||

프리스트레스트 콘크리트를 이용한 격납 구조물

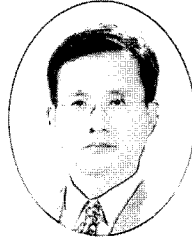
- Containment Structures Using Prestressed Concrete -



김상윤*
Kim, Sang Yun



최강룡**
Choi, Kang Ryong



이만섭***
Lee, Man Seop



오창열****
Oh, Chang Yeol

1. 서 론

Guyon은 “프리스트레스트에 의하여 해결할 수 없는 구조문제는 아마도 없을 것이다.”라고 언급한바 있다. 프리스트레스트 콘크리트(이하 “PSC”) 구조물이라고 하면 먼저 떠올리는 것이 교량을 떠올리는 경우가 많으나, Guyon의 말처럼 도로포장, 수조, 원자력 발전소 격납건물, 사일로(silo), 해양 구조물, 타워, 어스앵커, 건축물, 공장제품 등 여러 가지 형태로 응용되고 있다.

PSC를 적용하는 대표적인 격납 구조물로는 원자력 발전소 격납 구조물, LNG 탱크, 사일로 등을 들 수가 있다. 이중 LNG 탱크는 이미 특집 기사를 통해 소개된바 있어 본고에서는 원자력 발전소의 격납건물과 사일리에 대한 설계, 시공에 대해서 언급하고자 한다.

2. 원자력발전소 격납건물

2.1 개요

핵분열로 발생하는 반응열을 이용하여 전력을 생산하는 원자력 발전소(이하 ‘원전’)는 방사성물질의 누출로 인한 피해를 막는 데 최우선의 목표를 두고 있으며, 정상조건 및 사고조건시 방사성물질의 누출을 방지하는 최종보루의 역할을 원자로 격납건물이 하

게 된다. 원자로 격납건물은 원자로 및 증기발생기와 같은 중량 기기를 지지하기 위하여 매우 두꺼운 기초슬래브를 갖게 되고, 사고시 내부압력에 저항하게 하기 위하여 콘크리트 격납건물의 경우에는 통상 프리스트레스트를 도입하게 되며, 기밀성을 유지하기 위하여 내부에 강재 라이너플레이트를 갖게 된다.

원자로 격납건물은 건설재료 측면에서 철근 콘크리트, PSC 및 강재 격납용기로 분류되며, 형태상으로는 크게 원통형과 구형으로 분류되고, 격납건물 외부에 차폐건물을 두는지 여부에 따라 단일 격납건물과 이중 격납건물로 분류된다.

국내 원전의 격납건물 형태는 크게 3가지로 구분되는데 강재 격납용기와 철근 콘크리트 차폐건물로 구성된 고리 1, 2호기, PSC 격납건물과 강재 라이너플레이트로 구성된 고리 3, 4호기, 영광 1, 2, 3, 4, 5, 6호기, 울진 1, 2, 3, 4호기, 그리고 PSC 격납건물과 비금속라이너로 구성된 월성 1, 2, 3, 4호기가 그것이다.

PSC 격납건물은 우리나라 원전에서 가장 많이 채택하고 있는 형식으로서 철근 콘크리트에 비해 단위 콘크리트 내 철근량을 감소시킬 수 있고, 콘크리트 단면도 축소할 수 있다는 장점이 있다. 또한, PSC 내에 발생 가능한 균열을 최대한 억제할 수 있으며, 철근 콘크리트의 경우에는 지진발생시 예상되는 전단력에 저항할 수 있도록 경사철근으로 보강하여야 하나, 경사철근의 사용을 배제할 수 있는 장점이 있다. 따라서 건설공기단축, 건설용이성 등의 관점에서 유리하다. 그러나 포스트텐션닝계통에 대한 가동중검사 요건이 복잡하고, 포스트텐션닝계통 설치를 위하여 텐드갯러리 및 2~4개의 부벽을 설치하여야 하며, 부벽의 설치로 인하여 판통부의 최적설치위치에 제한을 가할 수 있다는 단점이 있다. 한국

* 정회원, 한국원자력안전기술원 책임연구원
** 정회원, 한국원자력안전기술원 구조부지실장
*** 정회원, (주)코비코리아 사장
**** 시빌테크 사장

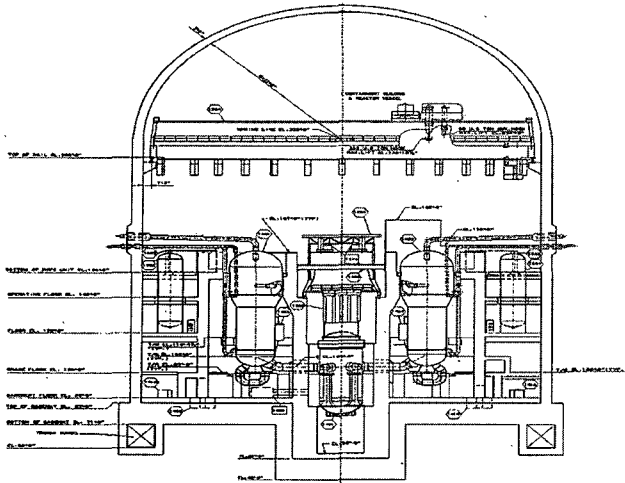


그림 1. PSC 격납건물 단면도

표준형원전에 사용되고 있는 PSC 격납건물은 <그림 1>과 같다.

원통형 벽체와 반구형 돔 형태의 PSC(<그림 2~4>)와 강재 라이너플레이트로 되어 있으며, 철근 콘크리트로 된 독립된 원형 기초슬래브를 갖고 매립깊이가 58ft에 달한다. 격납건물 제원, 시공재료 및 포스트텐션링계통의 사양은 <표 1>과 같다.

2.2 설계

2.2.1 설계 하중 및 하중조합

(1) 설계하중

원자로 격납건물 설계에는 일반구조물 설계시 고려되는 사하중, 활하중 및 풍하중외에 사고 압력 및 온도 하중, 지진하중, 포스트텐션링하중 등이 중요하게 고려되며, 궁극적으로는 방사선 재해를 야기시킬 수 있는 사고의 발생확률을 일반구조물의 파괴 확률인 약 10^{-5} /년보다 훨씬 낮은 10^{-7} /년 이하로 유지시키는 것이 설계 목표이다. 따라서 원자로 격납건물 설계시에는 냉각재 상실사고(발생확률 약 10^{-3} /년)와 안전정지지진(발생확률 10^{-3} /년 ~ 10^{-6} /년)이 동시에 발생한다고 가정하여 설계에 반영할 정도로 매우 희박한 하중조건도 설계에 반영한다. 여기서 냉각재상실사고란 원자로와 연결되어 있는 냉각재배관의 파단으로 인한

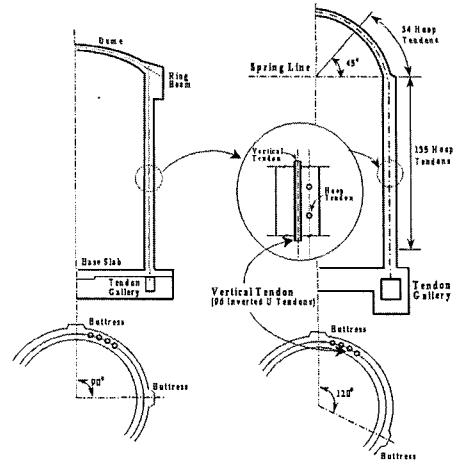


그림 2. 프리스트레싱 텐돈 배열

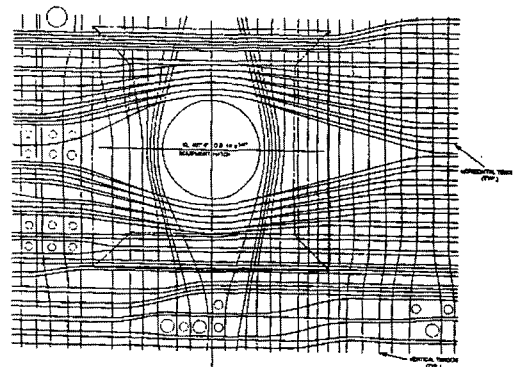


그림 3. 장비출입구 주위 텐돈 배치형태

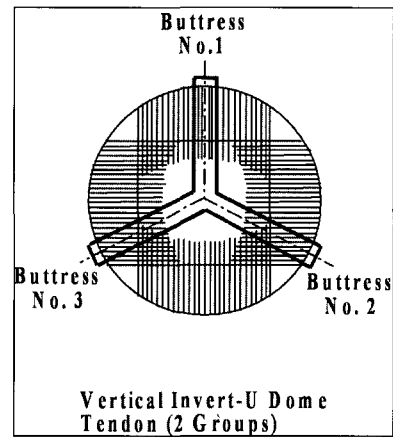


그림 4. 돔 부위 텐돈 배치형태

표 1. 한국표준형원전에 사용된 PSC 격납건물의 구조특성

격납건물 제원	격납건물 시공재료	포스트텐션링계통 사양
<ul style="list-style-type: none"> - 원통형 벽체의 내부직경 144 ft, 높이 147 ft, 두께 4 ft - 돔 : 내부반경 72 ft, 두께 3.5 ft - 격납건물 내부높이 : 219 ft - 격납건물 전체높이 : 265.25 ft <ul style="list-style-type: none"> · 기초슬래브 본체 : 직경 160 ft, 두께 12 ft · 원자로공동 : 벽체두께 6ft, 슬래브두께 12 ft · 장비진입관통부 : 직경 25 ft 	<ul style="list-style-type: none"> - 콘크리트 : 설계압축강도 5500 psi(벽체 및 돔), 4000 psi(기초슬래브) - 철근 : ASTM A 615, Gr. 60, 항복응력 60 ksi - 구조용 강재 : ASTM A 572, Gr.60 등 - 탄소강 라이너플레이트 계통 : 두께 1/4 in., ASME SA 516, Gr.55 등 	<ul style="list-style-type: none"> · 프리스트레싱 강선(VSL E-55 system) - Seven-wire strand tendons : ASTM A 416, low relaxation, Gr.270 - Anchor head : AISI 1045 - Wedge : AISI 86L20 - Strand 수 : 55개 - 40-year relaxation loss : 4% @ 0.7 fpu - 텐던 스트랜드 탄성계수 : 28×10^3 ksi - 텐던인장응력, fpu : 270 ksi - 강선 총단면적 : 8.415 in² - 배치 : <그림 2(우측), 3, 4> 참조

표 2. 자연재해로 인한 설계하중별 발생확률

구분	재해정의 및 발생확률		비고
	심한환경	극심한환경	
바람	100년빈도 풍속	1,000만년빈도 설계기준토네이도(DBT)	ANSI/ANS 2.12, Table A-1 (참고문헌 3)
홍수	100년빈도 홍수	1,000만년빈도 설계기준홍수(DBF)	
강우	100년빈도 강우	1만년 ~ 10만년빈도 가능최대강수량(PMP)	
지진	운전기준지진(OBE), (100년빈도 ~ 1,000년빈도)	안전정지지진(SSE), (1,000년빈도 ~ 100만년빈도)	

DBT(Design Basis Tornado), DBF(Design Basis Flood), PMP(Probable Maximum Precipitation)

OBE(Operating Basis Earthquake) : 가동기간 내 발생될 수 있다고 가정되는 지진

SSE(Safe Shutdown Earthquake) : 예측될 수 있는 최대 지진

냉각재의 상실사고이며, 이 경우 약 4 bar에 달하는 압력과 약 140 °C의 온도가 격납건물 내부 면에 작용하게 된다. 또한, 안전정지지진(SSE, Safe Shutdown Earthquake)이란 발전소 부지에서 예측될 수 있는 최대지진을 의미한다.

자연재해에 대한 설계관점에서 일반구조물 설계에는 심한환경 조건(severe environmental condition)까지 고려되나, 원자로 격납건물 설계에는 심한환경조건뿐만 아니라 극심한환경조건(extreme environmental condition)도 고려된다. 여기서 심한환경조건이란 통상 10⁻³/년 이상의 발생확률을 갖는 재해를 의미하며, 극심한환경조건이란 통상 10⁻³/년 ~ 10⁻⁷/년의 발생확률을 갖는 재해를 의미한다. 이러한 발생빈도의 자연재해를 설계에 적용하는 것은 원전 설계시 가정되는 내부사고의 발생확률보다 더 적은 확률의 자연재해를 설계에 고려한다는 원칙이 적용된 것이다. 원전설계에 고려되는 자연재해로 인한 설계하중별 발생확률은 <표 2>와 같다.

풍속을 고려하는 풍하중과 토네이도는 유사 범주로 간주하여 극심한환경조건에서는 재해영향이 더 클 것으로 예상되는 토네이도를 설계에 고려하며, 이 때 풍속뿐만 아니라 동반되는 기압차와 비산물 효과도 고려한다.

(2) 하중조합

원자로 격납건물의 설계하중조합은 ASME 코드(Section III, Division 2)에 따르며, 발생빈도에 따라 사용하중과 계수하중으로 분류되는데 자세한 내용은 <표 3>과 같다.

하중계수는 하중의 중요도 또는 그 하중 작용 결과의 심각성, 평균값과 변동계수로서 정의될 수 있는 하중의 확실성, 고려하는 하중의 발생빈도를 고려하여 결정한다. 심한환경상태는 수명기간 중 드물게 발생하는 하중으로, 극심한환경상태는 발전소 부지에서 발생 가능성은 있으나 그 확률이 매우 적은 하중으로, 비정상 하중 상태는 설계기준사고에 의한 하중으로 볼 수 있다.

표 3. 격납건물 설계하중조합(ASME Table CC-3230-1)

구분	D	L	F	Pt	G	Pa	Tt	To	Ta	Eo	Ess	W	Wt	Ro	Ra	Yr	Yj	Ym	Pv	Ha
사용 하중	시험	1.0	1.0	1.0	1.0	-	-	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	건설	1.0	1.0	1.0	-	-	-	1.0	-	-	-	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
	정상상태	1.0	1.0	1.0	-	1.0	-	1.0	-	-	-	-	-	1.0	-	-	-	-	1.0	-
계수 하중	심한 환경상태	1.0	1.3	1.0	-	1.0	-	1.0	-	1.5	-	-	-	1.0	-	-	-	-	1.0	-
		1.0	1.3	1.0	-	1.0	-	1.0	-	-	-	1.5	-	1.0	-	-	-	-	1.0	-
	극심한 환경상태	1.0	1.0	1.0	-	1.0	-	1.0	-	-	1.0	-	-	1.0	-	-	-	-	1.0	-
		1.0	1.0	1.0	-	1.0	-	1.0	-	-	-	-	1.0	1.0	1.0	-	-	-	1.0	-
	비정상 하중상태	1.0	1.0	1.0	-	1.0	1.5	-	-	1.0	-	-	-	-	-	1.0	-	-	-	-
		1.0	1.0	1.0	-	1.0	1.0	-	-	1.0	-	-	-	-	-	1.25	-	-	-	-
		1.0	1.0	1.0	-	1.25	1.25	-	-	1.0	-	-	-	-	-	1.0	-	-	-	-
	비정상/심한 환경상태	1.0	1.0	1.0	-	1.0	1.25	-	-	1.0	1.25	-	-	-	-	1.0	-	-	-	-
		1.0	1.0	1.0	-	1.0	1.25	-	-	1.0	-	-	1.25	-	-	1.0	-	-	-	-
		1.0	1.0	1.0	-	1.0	-	-	1.0	-	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0
1.0		1.0	1.0	-	1.0	-	-	1.0	-	-	-	1.0	-	-	-	-	-	-	1.0	
비정상/극심한 환경상태	1.0	1.0	1.0	-	1.0	1.0	-	-	1.0	-	1.0	-	-	-	1.0	1.0	1.0	1.0	-	

사하중(D), 활하중(L), 프리스트레싱하중(F), 정상운전 또는 정지상태의 온도하중(To), 정상운전 또는 정지상태의 배관반력하중(Ro), 격납건물 내·외부의 압력변화에 의한 하중(Pv), 건설하중, 시험하중(Pt, Tt), 설계풍하중(W), 운전기준지진하중(Eo), 안전정지지진하중(Ess), 토네이도 및 비산물충격하중(Wt), 내부홍수에 의한 하중(Ha), 설계압력하중(Pa), 설계기준사고시의 온도하중(Ta), 설계기준사고시의 배관반력하중(Ra), 설계기준사고시의 배관파단하중(Y), 고 에너지 배관의 파단에 의한 반력하중(Yr), 고에너지 배관의 파단에 의한 증기충격하중(Yj), 고 에너지 배관의 파단에 의한 배관충격하중(Ym)

2.2.2 해석 및 설계 방법

설계는 크게 설계하중 산정, 구조해석, 단면설계로 구분된다. 격납건물의 설계는 원통형 벽체 및 돔의 대표적 단면 설계, 기초 슬래브 설계, 장비진입 관통부 주위 벽체단면 설계, 주증기관 관통부 주위 벽체단면 설계, 부벽 설계, 폴라크레인 설치주위 벽체 단면 설계, 라이너플레이트 설계 및 포스트텐션닝계통 설계 같이 여러 부위로 구분되어 수행된다.

해석과정에서 경계조건에 대한 가정, 축대칭과 비축대칭 하중 해석, 과도하중과 국부하중 해석, 냉각재상실 사고 후 발생하는 온도하중 해석 등을 적절히 수행하고, 콘크리트의 크리프, 건조 수축 및 균열, 물성값의 변동, 기초의 들림효과 등을 적절히 고려해야 하며, 검증된 전산코드를 사용하여야 한다.

한편, 원자로 격납건물은 일반구조물에 비해 매우 정밀하고 보수적인 내진설계 방법에 의해 설계된다. 내진설계는 해석을 위한 입력자료의 선정단계, 동적 지진응답 해석단계, 구조물 내진설계 단계로 구분되고, 지반조건이 견고하지 않을 때 동적 지진응답 해석단계에서 지반-구조물 상호작용을 고려하게 되며, 구조물 부재 설계를 위해서는 주로 응답스펙트럼 해석법이 사용된다.(그림 5)

또한, 지진계측시스템을 설치하여 운전기준지진 크기 이상의 지진발생시 발전소를 정지하게 되며 기록된 지진기록을 분석하여 구조물 및 안전설비가 설계조건을 초과하였는지, 지진해석 방법 및 절차가 타당하였는지를 검증하게 된다.

각 하중에 대한 해석을 통해 구해진 일정위치에서의 단면요구력을 <표 3>에 명시된 하중조합에 따라 조합하여 각 단면위치에서의 최종 요구력을 결정한 후 이에 대한 설계를 ASME 코드에

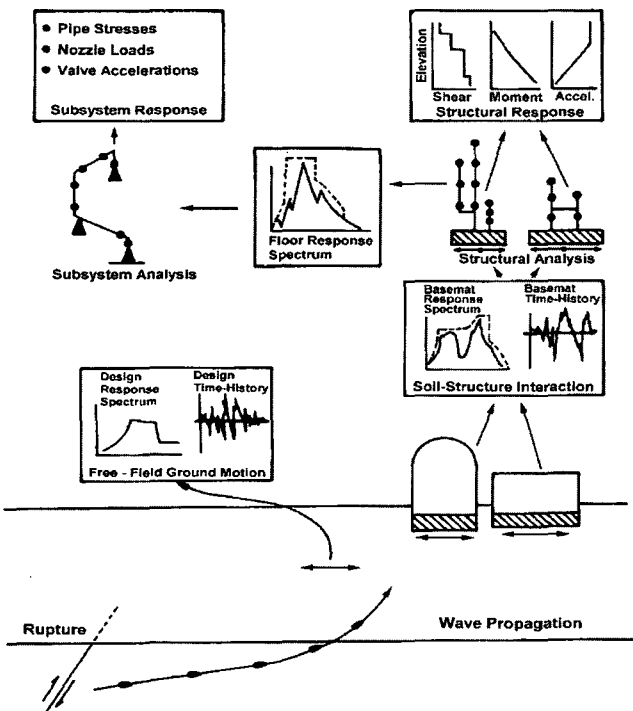


그림 5. 원자로격납건물 내진해석 절차

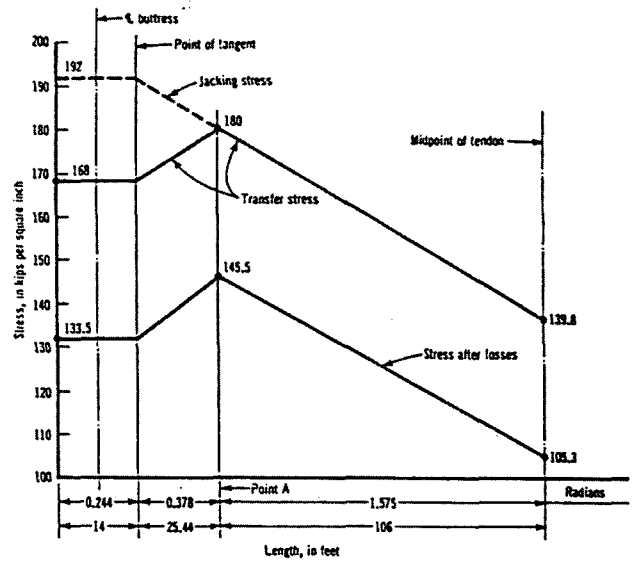


그림 6. 개별 원환텐돈의 응력 분포

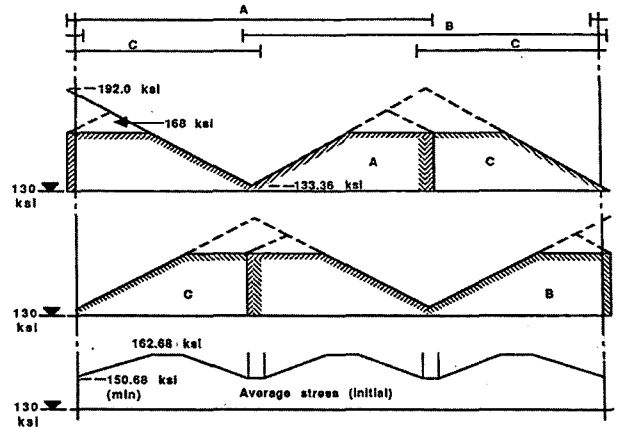


그림 7. 원환텐돈의 평균응력 분포

따라 수행하게 된다. ASME 코드에 따른 콘크리트 단면의 설계 방법은 허용응력설계법이지만 일반적인 경우와 차이가 있다. 즉, 계수하중조합에 대해서 허용응력의 크기를 철근의 경우 항복강도의 0.9배까지, 콘크리트의 경우 설계압축강도의 0.75배(1차응력 조건)까지로 정하며 이는 일반구조물에 적용되는 허용응력설계법에서는 허용되지 않는 값이다. ASME 코드에서 하중의 불확실성 등을 고려하기 위하여 하중계수를 도입하게 되었고 이에 따라 구조적 허용기준도 상향 조정된 것으로 보인다.

2.2.3 프리스트레스 설계

(1) 프리스트레스 하중 분포

격납건물 위치에 따라 마찰저항 및 정착과정에서의 응력전달 차이 등으로 인하여 프리스트레스하중의 크기가 변하게 되고 그 분포형상의 예는 <그림 6>과 같다.

원환 텐돈의 경우 인접 텐돈을 포함하여 긴장력을 평균하면 각 위치에서 비교적 일정한 텐돈응력 분포를 보여준다.<그림 7>

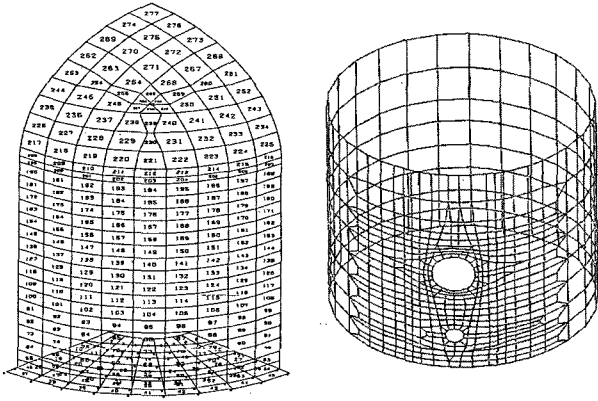


그림 8. 프리스트레시하중 해석을 위한 격납건물 1/4 셸 유한요소모델 및 관통부 주위 3차원 유한요소모델

(2) 해석 및 설계 방법

프리스트레시하중에 대한 격납건물 해석은 초기 텐돈하중과 유효 텐돈하중의 두 가지 경우에 대하여 수행된다. 구조물에 대한 해석시 텐돈하중의 적용방법은 주로 트러스요소를 이용한 등가온도하중 적용방법과 등가압력하중으로의 적용방법이 이용되고 있다. 프리스트레시하중에 대한 외벽의 해석은 1/4 셸모델을 사용하여 수행할 수 있으며, 관통부 주위에서의 해석은 전체 원통모델을 사용하여 수행할 수 있다.(그림 8)

수직텐돈은 격납건물 벽체 중앙에 위치하여야만 하며 이는 축압축력만 작용하고 휨모멘트의 발생을 방지하기 위한 것이다. 원환텐돈은 가급적 벽체단면 외측에 배치하는데 설계에 고려되는 비산물이 손상을 입히지 않을 정도의 충분한 단면깊이에 위치하여야 하며, 화재로부터 텐돈을 보호하기 위하여 콘크리트 표면에서 최소 6 in.의 피복을 유지하여야 한다. 관통부 주위 곡선텐돈은 평면내 응력 뿐만 아니라 평면외 방사방향 하중을 발생시킨다. 따라서 관통부 주위에 굴곡되어 배치된 텐돈은 콘크리트로부터 텐돈이 떨어져 나가는 현상에 대한 전단 검토가 이루어져야 한다.

(3) 프리스트레스 손실

원전의 수명이 일반적으로 40년임을 감안할 때 이 기간동안의 프리스트레스 작용력을 정확히 추정·설계·관리하는 일은 격납건물의 구조적 건전성을 확보하는데 매우 중요하다.

통상 극한강도 270 ksi의 고강도 강재가 요구되는 것은 콘크리트의 크리프와 건조수축으로 인한 프리스트레스 손실을 낮은 비율로 제한시키기 위한 것이며, 초기 프리스트레스는 극한강도의 73% 이하(항복강도보다 약간 낮은 상태)로 설치하게 된다.

유효 프리스트레스를 결정하기 위한 프리스트레스 손실량을 산정하기 위해서는 정착에서의 미끄러짐, 콘크리트의 탄성수축변형, 콘크리트의 크리프 및 건조수축, 강선의 응력이완, 텐돈 곡률에 의한 마찰 손실을 고려하여야 한다. 또한, 마찰손실은 실험적으로 결정된 파상마찰계수와 곡률마찰계수들을 바탕으로 프리스트레싱 작업 중에 확인하도록 하고 있으며, 프리스트레싱 강재의

긴장력과 신장량에 대한 허용범위가 규정되어 있다. 한편, 포스트텐션닝계통의 설계프리스트레스 작용력은 콘크리트 크리프, 건조수축 및 강선의 응력이완으로 인한 프리스트레스 손실 상한 값 (high time-dependent loss)을 고려하여 결정하도록 요구하고 있으며, 이는 실험 값의 불확실성을 고려한 것으로 실험평균값에서 추가로 고려되는 변동크기가 크리프는 + 25% 및 - 15%, 건조수축은 ± 20%, 그리고 강선의 응력이완은 ± 15%이다. 원자로 격납건물 설계시 프리스트레스 손실량을 산정하는 상세한 방법은 참고문헌 6과 7에 기술되어 있다.

2.2.4 기타 평가

원자로 격납건물에 대한 기타 평가사항으로는 크게 비산물 충돌하중 평가와 극한내압능력 평가로 구분될 수 있다. 비산물 충돌하중 평가는 자연재해, 터빈사고, 항공기 충돌사고 등과 같이 발전소 소내외에서 발생하는 비산물에 대하여 발전소 구조물의 안전성을 평가하는 것을 목적으로 하며, 평가방법은 크게 국부손상 평가와 전반적 구조응답 평가의 두 가지로 구분된다. 국부손상 평가과정에서는 관통깊이를 추정하고 콘크리트 구조물일 경우 전면파쇄, 후면파쇄 영향에 의한 2차 비산물 발생 가능성을 평가한다. 전반적 구조응답 평가과정에서는 구조물의 탄소성 거동을 평가하게 되며 비산물 하중에 대한 적합한 하중-시간이력 곡선이 필요하게 된다.

미국의 TMI 사고를 계기로, 방사성물질 누출방지를 위한 최후의 보루인 원자로 격납건물은 설계압력에서는 물론 중대사고시에도 그 건전성이 확보되어야 한다고 그 기능요건이 강화되었다. 이에 따라 설계압력을 초과하는 사고압력의 발생을 가산하여 격납건물의 극한내압능력을 규명하는 것이 필요하게 되었으며, 격납건물의 구성재료 및 구조의 비선형 거동을 고려한 평가가 수행되게 되었다. 이러한 평가를 위해서는 콘크리트, 철근, 라이너플레이트 및 텐돈의 비선형거동을 파악할 수 있는 모델링이 필요하며, 일반단면뿐만 아니라 관통부 주위와 같은 국부적인 단면에서의 내압능력도 평가되어야 한다.

2.3 시공

콘크리트 격납건물은 일반구조물에 비하여 부재치수가 크고 해안에 위치하고 있으므로, 건설시 수화열 및 건조수축에 의한 초기균열을 작게 하는데 유리하고 동시에 해수중의 염분이나 황산염에 대한 저항성이 우수한 시멘트가 사용된다. 콘크리트의 설계 압축강도는 5500 psi 정도이며, 최대 #18까지의 대구경 철근이 사용되므로 캐드웰드(cadweld)와 같은 철근기계적이음이 사용되게 된다.(그림 9)

텐돈긴장과정에서 일부 강선이 손상을 받을 수 있으므로 이런 경우를 대비하여 강선 파손의 허용범위가 시방서에 반드시 명시되어 있어야 한다. 또한, 가정된 마찰계수가 타당한지 단계별로

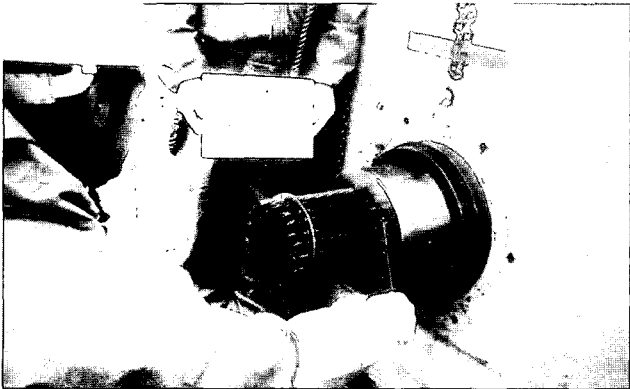
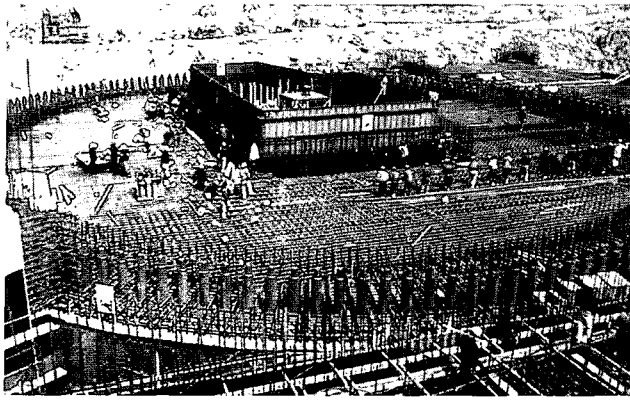


그림 9. 격납건물 기초슬래브 텐돈 트림펫과 철근 설치상태 및 가동중점검 모습

긴장력과 신장량을 측정하는 시험을 수행한다. 신장량 측정이 중요한 것은 텐돈의 탄성계수가 변동성이 매우 적어 긴장력을 확인하는데 좋기 때문이다. 그리고 격납건물 설계자가 격납건물 설계에 미치는 영향을 평가하여 텐돈의 긴장순서를 결정하는데 작업자가 이 순서를 준수하는 것이 매우 중요하다.

격납건물 시공자재, 건설 및 시험과정에서의 품질을 확인하기 위해 발전소 사업자와 별개로 독립된 공인검사기관(한국기계연구원)에 의해 공인검사가 수행된다. 또한, 국내에서는 원전 건설시 건설업자와 발전소 사업자의 2중 품질보증체제로 운영되고 있으며, 격납건물에는 4개의 품질등급(Q, T, R, S) 중 가장 엄격한 Q등급이 적용되어 품질보증요건 18개 항목 모두가 준수되어야 한다.

한편, 격납건물에 대해서는 건설후 기능적, 구조적 성능 확인을 위하여 각각 설계압력(약 4 bar) 및 설계압력의 115%로 실증시험을 하게 되며 이를 통하여 격납건물의 기밀성과 탄성거동 여부를 확인하게 된다. 시험압력까지 4~5 단계 가압 및 감압을 거치게 되며 압력단계별로 격납건물의 변위측정과 균열조사를 수행한다.

2.4 유지관리

가동년수가 오래됨에 따라 열화 및 노후화 현상이 발생하게 되므로 가동중 원전에 대하여 격납건물등 안전관련 구조물에 대한 지속적인 점검, 평가 및 보수가 이루어지게 된다. 대표적으로 격

납건물 포스트텐션닝계통의 가동중점검은 시간경과에 따른 텐돈의 인장력 감소를 측정하고, 격납건물 표면의 균열 등 결함을 조사 분석함으로써 격납건물의 건전성을 확인하는데 목적이 있다.

검사주기는 초기 구조건전성시험 후 1, 3, 5년 및 이후 매 5년이다. 텐돈종류(수직, 수평 등)에 따라 그룹을 나눈 후, 각 그룹에서 대표될 수 있는 텐돈을 선정하여 검사시편으로 하는데, 검사주기가 1, 3, 5년의 경우는 각 그룹별 전체 텐돈의 4% 이상을, 그 이후 매 5년마다는 각 그룹별 전체 텐돈의 2% 이상을 검사시편으로 선택한다. 검사방법은 크게 3가지로 구분되며 콘크리트 표면, 정착헤드, 텐돈가닥, 웨지, 지지판, 그리스에 대한 육안검사, 텐돈 인장력(lift-off force) 확인을 위한 응력검사, 텐돈가닥, 그리스에 대한 재료시험이 그것이다. 가동중점검 과정에서는 강선의 응력이완, 앵커헤드의 파손여부 등에 대해 주의를 기울여 확인하여야 한다.(그림 9)

3. 사일로(Silo)

3.1 개요

3.1.1 개요 및 경향

곡물저장용 용기로서 타워형의 구조물을 사용한 것은 수세기 전부터였다. 그러나 이러한 구조물이 곡물저장용만이 아닌 과일형 재료를 보관하기위한 것으로 상업적목적으로 널리 사용된 것은 1800년대 중반부터이다.

초기의 사일로는 적당한 크기의 저장용기가 주목적이었으나 최근의 공업용 사일로는 제품의배합, 생산과 유통에 있어 중요한 역할을 하게 되고 경제발전에 따른 수요를 충족하기 위하여 사일로의 크기나 규모가 점차 커지고 있다.

대부분의 사일로는 높이가 높은 동일단면을 사용하기 때문에 슬라이딩 폼(sliding form)공법을 사용하여 시공을 하게되는데 저장량이 대략 2만 톤 이상의 규모 사일로는 측압이 커서 철근콘크리트조의 사일로 시공은 무리가 있게된다. 따라서, 최근의 큰 규모의 사일로는 포스트텐션닝(post-tensioning)을 도입하여 시공하고 있다.

3.1.2 용어의 구분

사일로 관련자료를 보게되면 "Bin", "Silo", "Bunker"와 같은 용어들을 많이 접하게 되는데 기능은 같으나 구조물의 형태에 의하여 다음과 같이 구분을 하고있다.

Bin	Silo	H > 1.5D for circular silo
		H > 1.5a for rectangular silo
	Bunker	H > 1.5D for circular silo
		H > 1.5a for rectangular silo

(여기에서, H : 높이, D : 직경, a : 단변의 길이)

3.1.3 PSC 도입구조의 장점

사일로에 대한 PSC의 도입은 구조적인 이점뿐 아니라 다음과 같은 시공적인 장점이 있다.

- 시공이 수월하다.(슬라이딩 폼, 철근량 감소)
- 사일로 벽체의 두께를 줄일 수 있어 기초공사를 줄일 수 있다.
- 사일로 벽체에 균열이 없으며 내구성이 뛰어나다.
- 유지관리비용이 거의 없다.
- 대규모 용량의 사일로 시공이 가능하다.

3.1.4 구조개요 및 시방

사일로는(그림 9) 재료의 저장을 위한 기능성 구조물로서 저장물의 측압에 의하여 사일로 벽체에 순수한 인장응력을 유발시키게 되며 이측압이 구조물의 안전성을 평가하는 중요요소가 된다. 보다 안전하고 높은 효율성을 갖춘 사일로 건설을 위하여 세계의 여러 나라들은 이미 오래전부터 사일로의 설계 및 시공을 위한 규준을 사용하고 있는데 아래와 같다.

- DIN 1055(Germany)
- CH 302(Soviet Union)
- ACI 313(United States)
- French code 등

3.2 사일로의 설계

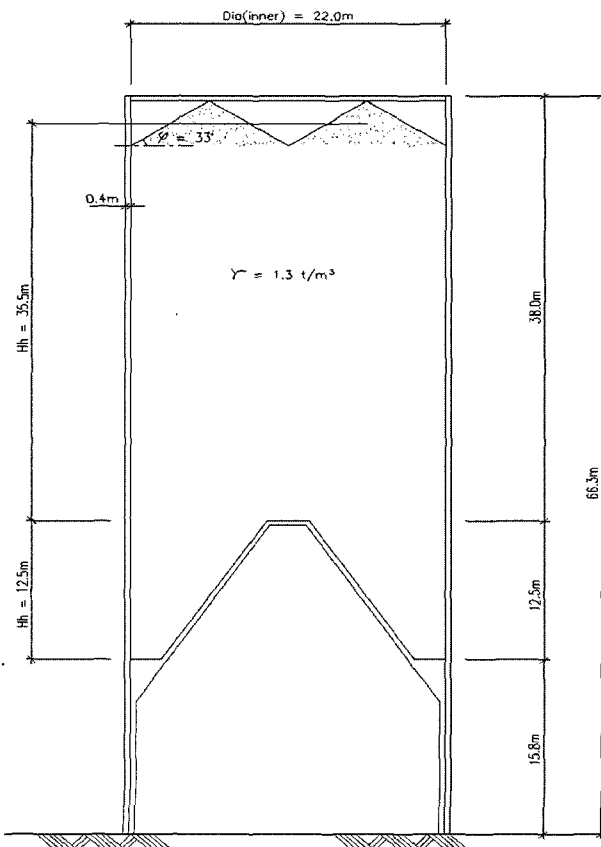
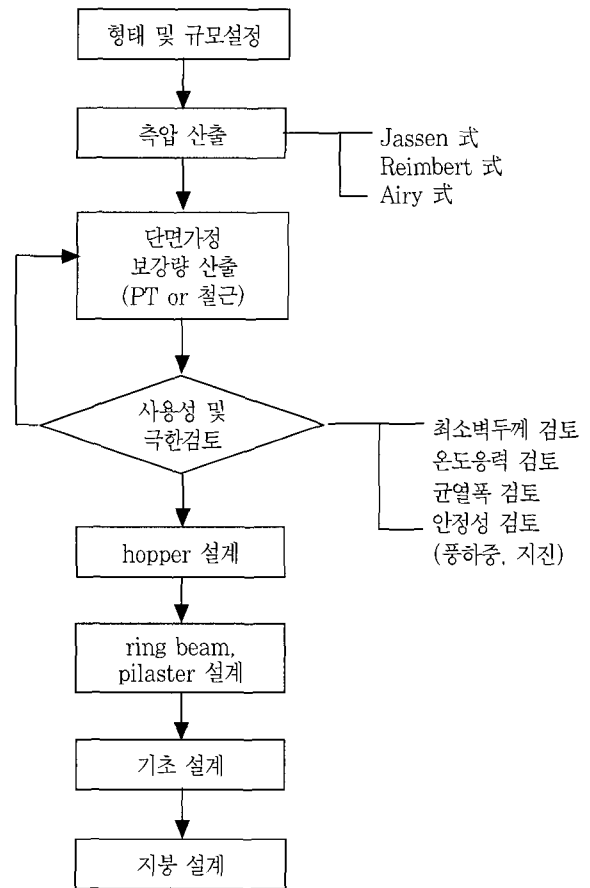


그림 9. 사일로의 단면

3.2.1 측압산출

측압산출에 사용되는 공식은 다음과 같이 3가지 방법이 주로 사용되고있다. 측압에 있어서는 Janssen식이 대체적으로 적게 산출이 되고 수직압에 있어서는 Reimbert식이 작게 산출이 된다. 정적해석을 위한 수직압 및 측압산출에 있어서 어느 방법을 적용하더라도 문제는 없다. 이는 측압을 산출함에 있어 저장물의 안식각, 벽체와의 마찰각 등 여러 가지 변수가 작용하게 되는데 실제로는 재료가 쌓이는 형태나 재료를 배출하는 형식이나 방법에 따라 변하는 측압의 정도가 더 크기 때문이다. 이러한 것을 감안하여 산출한 측압에 overpressure factor(Cd, <표 5>)와 impact factor(Ci, <표 6>)를 고려하여 설계용 측압을 산출한다.

(1) Janssen식

① vertical pressure

$$q = \frac{\gamma \cdot R}{\mu' \cdot D} (1 - e^{-\mu' ky/r})$$

② horizontal pressure

$$p = \frac{\gamma \cdot R}{\mu'} (1 - e^{-\mu' ky/r})$$



여기서, $K = \frac{1 - \sin \rho}{1 + \sin \rho}$ or $K = \tan^2(45 - \rho/2)$

(2) Reimbert식

① vertical pressure

$$q = \gamma \left[Y \left(\frac{Y}{C} + 1 \right)^{-1} + \frac{h}{3} \right]$$

② horizontal pressure

$$p = p_{\max} \left[1 - \left(\frac{Y}{C} + 1 \right)^{-2} \right]$$

여기서, $p_{\max} = \frac{\gamma \cdot D}{4\mu'}$, $C = \frac{D}{4\mu'K} - \frac{h}{3}$

(3) Airy식

① vertical pressure

$$q = \frac{p}{k}$$

② horizontal pressure

$$p = \frac{\gamma \cdot D}{\mu + \mu'} \left[1 - \sqrt{\frac{1 + \mu^2}{\frac{2Y}{D}(\mu + \mu') + 1 - \mu\mu'}} \right]$$

여기서, $\mu = \tan \rho$

$\mu' =$ 마찰계수, coefficient of friction against wall (표 4)

$\rho =$ 재료의 안식각, angle of repose (표 4)

$\gamma =$ 재료의 비중, density (표 4)

$R =$ hydraulic radius, $D/4$

표 4. 재료별 하중 및 설계계수

materials	γ (kg/m ³)	ρ (degree)	μ'	
			against concrete	against steel
cement (clinker)	1410	33	0.6	0.3
cement (portland)	1344 ~ 1600	24 ~ 30	0.36 ~ 0.45	0.3
clay	1810 ~ 2210	15 ~ 40	0.2 ~ 0.5	0.36 ~ 0.7
gravel	1600 ~ 2000	25 ~ 35	0.4 ~ 0.45	
grain	736 ~ 990	23 ~ 37	0.29 ~ 0.47	0.26 ~ 0.42

표 5. Over pressure factor, C₀

SEE ALSO COMMENTARY FOR SECTION 4.4.2.2. FOR MASS FLOW DISCUSSION		OVERPRESSURE FACTOR C ₀				
		X < 2 X/0	X < 3 2 X/0	X < 4 3 X/0	X < 5 4 X/0	X > 5 5 X/0
TOP OF MATERIAL AND SILO	JANSEN	1.35	1.45	1.55	1.65	1.75
	REIMBERT	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80
TOP OF HOPPER	JANSEN	1.45	1.55	1.65	1.75	1.85
	REIMBERT	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90
BOTTOM OF HOPPER	JANSEN	1.55	1.65	1.75	1.85	1.95
	REIMBERT	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00
BOTTOM OF SILO	JANSEN	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00
	REIMBERT	1.65	1.75	1.85	1.95	2.05
CONCRETE BOTTOM		1.30	1.35	1.40	1.45	1.50
STEEL BOTTOM		1.75	1.80	1.85	1.90	1.95

표 6. Impact factor, Ci

Ratio of volume dumped in one load to total silo capacity	1 : 2	1 : 3	1 : 4	1 : 5	1 : 6 and less
	Ci	concrete bottom 1.40	1.30	1.20	1.10
	steel bottom 1.75	1.60	1.50	1.35	1.25

(4) PT 케이블의 설계 및 배치

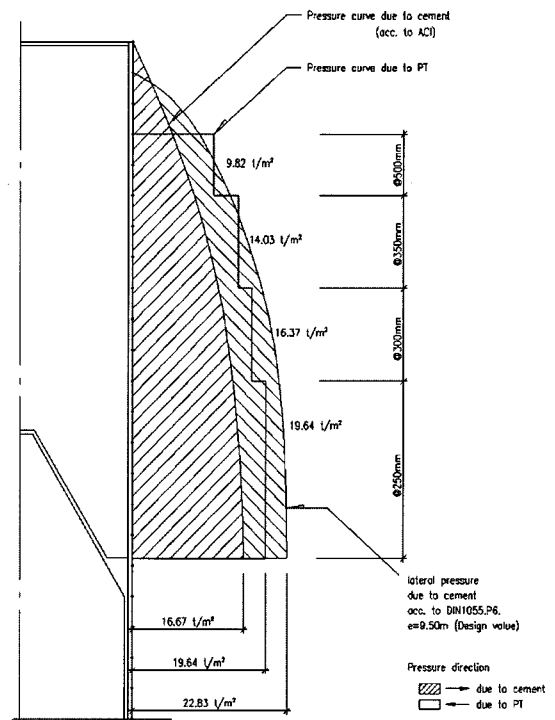


그림 10. 사일로 프리스트레싱의 개념도

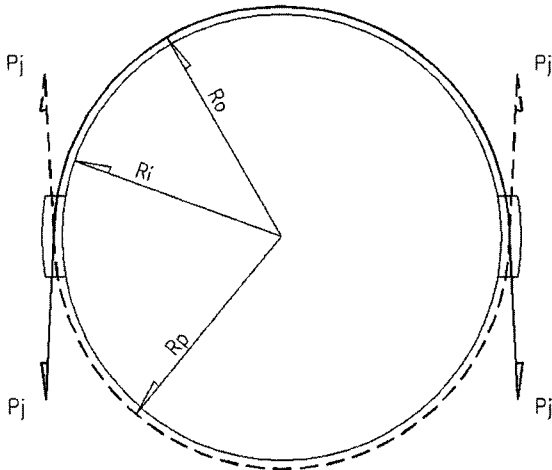


그림 11. 사일로의 측압도

3.2.2 사용성 및 극한상태 검토

(1) 최소 wall두께 검토

$$h_{min} \geq \left(\frac{mE_s + f_{st} - nf_{c,ten}}{f_s f_{c,ten}} \right) \cdot \frac{qD}{2}$$

여기서, m : shrinkage coefficient, 0.0003

E_s : 철근의 탄성계수

f_{st} : 보강철근의 허용응력

n : 탄성계수비

$f_{c,ten}$: 콘크리트의 인장응력, $0.1f_c$

(2) 온도차에 의한 벽체응력 검토

시멘트 클링커의 경우 Silo에 채워지기전 온도의 변화는 다음과 같다.<표 7>

표 7. 시멘트 클링커용 사일로의 온도변화

위치 및 시간	클링커의 온도
on the conveyor belt	250 °C
falling in silo	200 °C
at the top of stock	140 °C
inside air temperature	115 °C
inside silo wall	120 °C

클링커의 접촉에 의한 사일로 벽체 내부의 설계온도는 사일로 내부에 내용물이 얼마나 채워지는가에 따라 클링커의 온도가 떨어지는 정도가 다르게 된다. 따라서, 설계를 위한 온도하중은 내용물이 90 ~ 100 % 채워진 경우를 기준으로 하여 75 °C를 기준으로 하여 설계한다.

① 온도하중에 의한 사일로 벽체의 발생모멘트(vertical, horiz)

$$M_{xu} = M_{yu} = \frac{1.4E_c t^2 \alpha_c \Delta T}{1 - \nu}$$

여기서, 1.4 : 하중계수

ν : poisson's ratio, 0.167

$T_{i,des} = T_i - 44.5 \text{centigrade}$

T_i : temperature of stored

T_0 : design winter temperature

t : wall thickness(cm)

② 온도하중에 의한 사일로 벽체의 발생응력(vertical, horiz)

$$\sigma_{temp} = \pm \frac{\alpha_c E_c \Delta T}{2(1 - \nu)}$$

(3) 균열폭 검토

$$w_{cr} = w_1 - w_2 + w_3 < 0.2mm$$

여기서, w_1 : overpressure를 고려한 단기하중에 의한 균열폭

w_2 : 단기 정하중에 의한 균열폭

w_3 : 장기 정하중에 의한 균열폭

$$w_n = \frac{\gamma S_{cr} \sigma_t}{E_s}$$

reduction $\gamma = 1 - 0.7 \left(\frac{0.8A_c \sigma_t}{T_{tot \text{ or } T_{st}}} \right)$ for 단기하중

$\gamma = 1 - 0.35 \left(\frac{0.8A_c \sigma_t}{T_{st}} \right)$ for 장기하중

$$\text{crack spacing } S_{cr} = \frac{A_c \beta}{\Sigma_0}$$

β : 0.7 for 이형철근

Σ_0 : 인장철근의 주장

(4) 사일로의 안정성 검토

사일로는 고가구조물로서 풍하중이나 지진하중과 같은 수평하중에 대한 전단이나 전도에 대한 안정성을 검토해야 한다. 풍하중은 ANSI 또는 UBCdp 준하여 산출하며 지진하중은 ACI-313에 준하여 산출한다.

3.3 시공

사일로 시공은 슬라이딩 폼을 이용하여 시공되며, 공사전경은 <그림 12> ~ <그림 16>와 같다.

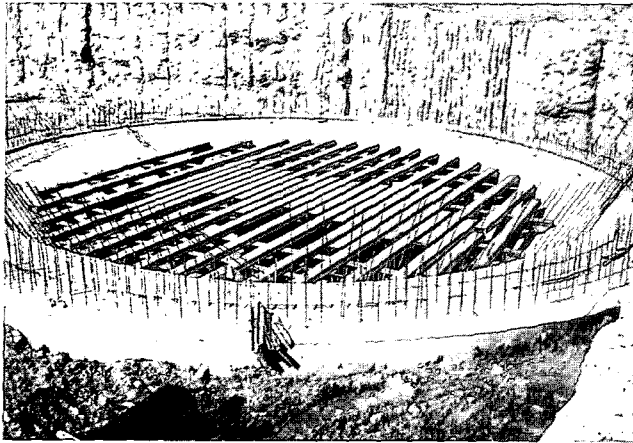


그림 12 바닥판 시공 전경

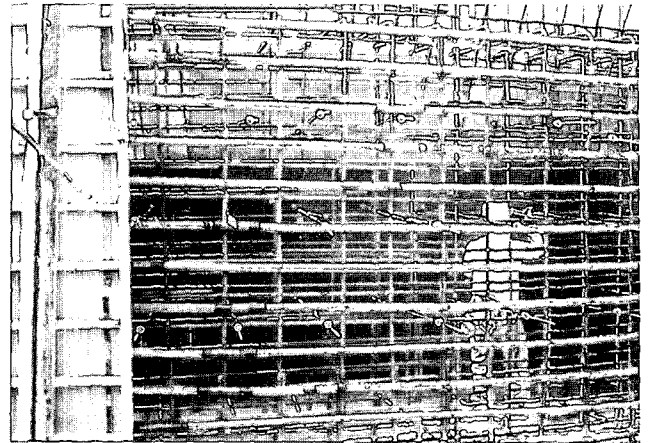


그림 13 덕트시공 전

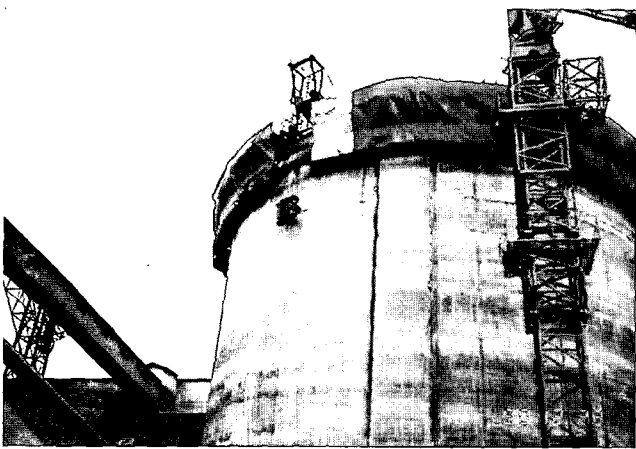


그림 14. Sliding Form을 이용한 시공 전경

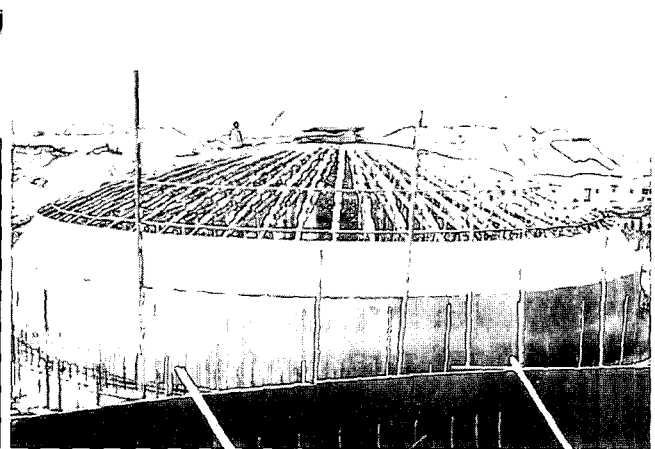


그림 15. 지붕 시공 전경

4. 결 언

PSC의 응용분야인 원자력발전소 격납건물과 사일로 설계, 시공에 대하여 살펴보았으며, 앞으로 다양한 응용 구조물이 많이 설계되고 시공되기를 기대한다. □

참고문헌

1. 규제요원 훈련교재, "구조공학 및 부지평가(A3)", 한국원자력안전기술원, 2002.
2. "ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 2, CC - Concrete Containment," American Society of Mechanical Engineers, 1998.
3. ANSI/ANS 2.12-1978, "Guidelines for Combining Natural and External Man-made Hazards at Power Reactor Sites."
4. "Structural Analysis and Design of Nuclear Plants Facilities," Manuals and Reports on Engineering Practice- No.58, ASCE, 1980.
5. "International Seminar on Probabilistic and Extreme Load Design of Nuclear Plant Facilities," ASCE, 1977.
6. Regulatory Guide 1.35.1, "Determining Prestressing Forces for Inspection of Prestressed Concrete Containments," USNRC, 1990.
7. 이태규, "원자력발전소 격납건물의 프리스트레싱 손실량 산정 기술", 콘크리트학회지, Vol.12, No.2, 2000. 3.
8. Regulatory Guide 1.35, "Inservice Inspection of UngROUTED Tendons in Prestressed Concrete Containment Structures," Rev.3, USNRC, 1990.

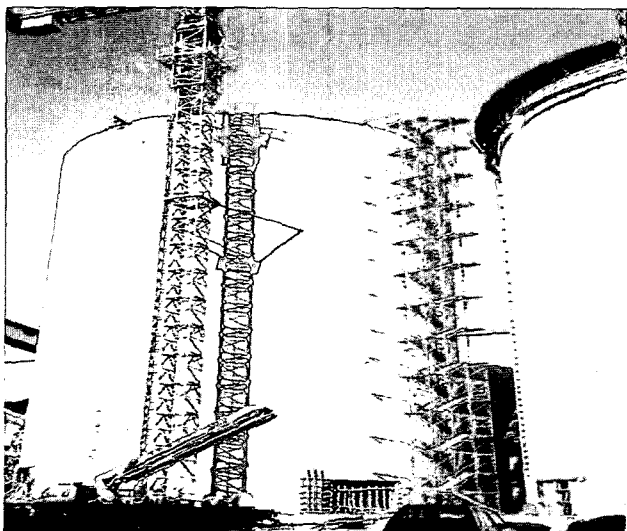


그림 16. 공사 완료후 전경