

원자로 격납건물의 해석 및 설계

정 영 훈*

1. 개 요

원자로 격납건물(Reactor Containment Bldg)은 정상가동시는 물론 냉각재상실사고(LOCA)를 포함하는 설계기준사고(DBA) 및 설계기준지진(DBE) 발생시 구조물 자체의 건전성 확보는 물론 주기기(NSSS Equipment)를 포함하는 안전관련 계통 및 기기를 안전하게 보호/지지하므로써 핵누출을 방지하여 발전소 종사자를 포함하는 국민의 재산과 생명을 보호하는 역할을 하는 원자력발전소에서 가장 중요한 구조물이다. 원자로 격납건물은 압력용기(Pressure Vessel : 설계내압 5 psi 이상인 용기)로 설계되는 격납용기(Containment)와 1, 2차 차폐구조 등의 내부구조물(Interior Structures)로 구성되는데 이 중 본 소고에서는 격납용기의 해석 및 설계 그리고 구조건전성 시험 및 사용중검사에 대해서만 간략하게 기술한다.

원자로 격납건물의 주요 기능은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 생물학적 차폐, 방사능물질의 외부 누출차단
- 사고시 발생하는 고온/고압 하에서의 구조적 건전성 확보
- 지진(SSE, OBE) 발생시 구조적 건전성 확보
- 내·외부의 비산물(Missiles)로부터 안전관련 계통/기기 보호

- 천정크레인(Polar Crane) 지지
- 원자로, 증기발생기, 원자로냉각재펌프, 가압기 등의 주기기(NSSS Equipment) 지지
- SIT, RDT, Refueling Machine, Heat Exchanger, Pipings, HVAC, Cable Tray, Instruments 등의 기기 및 부품 지지

2. 격납용기의 종류

격납용기는 사용하는 재료의 종류에 따라 철근콘크리트 격납용기, P.C. 격납용기, 강재 격납용기로 구분되며 이 중 철근콘크리트 격납용기와 P.C. 격납용기는 ASME CC Code로, 강재 격납용기는 ASME NE Code에 따라 각각 설계한다.

2.1 철근콘크리트 격납용기

가. 철근콘크리트(R.C. : Reinforced Concrete) 격납용기는 보통 강도의 콘크리트를 사용하며 기초슬래브, 원통형 벽체 및 반구형 돔으로 구성된다.

나. 천정크레인의 지지를 위하여 2차 차폐벽을 이용하거나 격납용기 셸(Shell)이 천정크레인을 지지하도록 설계한다.

다. 격납용기 내면은 6~13mm 두께의 라이너플레이트로 피복된다.

라. 자오선 방향, 원환 방향의 주근 외에 대각선 방향의 철근이 설치된다.

마. 같은 용량의 P.C. 격납용기와 비교하여 벽체 두께가 0.15~0.3m정도 더 두꺼우며 배근형태

* 한국전력기술(주) 토목구조기술처 책임기술원

가 복잡하여 시공이 어렵고 콘크리트의 균열을 방지하기 어렵다.

바. 다른 격납용기에 비해 설계내압이 상대적으로 작다.

2.2 P.C. 격납용기

가. P.C.(Prestressed Concrete) 격납용기는 설계강도 $300\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상의 콘크리트를 사용하며 포스트텐션 방식으로 프리스트레스를 도입하므로써 사고시의 내압에 효과적으로 저항하는 구조이다. 통상 쉘 및 돔에만 프리스트레스를 도입한다.

나. 격납용기 내면은 라이너플레이트 또는 에폭시로 피복한다.

다. 프리스트레스의 도입을 위한 텐돈(긴장재)은 쉘에는 자오선 및 원환의 2방향, 돔에는 대략 45도 높이까지 3방향(자오선 2방향, 원환1 방향)으로 설치된다.

라. 원환 방향 텐돈을 정착시키기 위한 부벽이 요구된다.

마. 기초슬래브 하부에는 자오선 방향 텐돈의 정착을 위하여 텐돈갤러리(Tendon Gallery)를 설치한다.

바. 돔의 형태는 미국에서는 반구형, 유럽에서는 부분구형이 주로 사용된다.

사. P.C. 격납용기는 Post-Tensioning 시스템에 대한 정기적인 사용중검사(Inservice Inspection) 때문에 철근콘크리트 격납용기보다 유지보수비가 더 소요된다. 그러나 콘크리트에 미리 압축력을 가함으로써 콘크리트의 균열이 감소되어 밀폐기능이 향상되며 배근량이 감소되어 시공성이 좋으며 높은 사고압력에 견딜 수 있는 장점이 있다.

2.3 강제 격납용기

가. 강제 격납용기의 형태에는 원통형과 구형이 있다. 강제 격납용기는 그 외부에 비산물 방호 및 생물학적 차폐 목적으로 철근콘크리트 건물이 이중으로 설치되어 격납용기를 보호한다.

나. 원통형 강제 격납용기의 경우 강관두께는 벽체 및 기초에서 38mm, 돔에서 19mm 정도이다.

다. 구형 강제 격납용기의 강관 두께는 38~45mm이다.

라. 용접후열처리(PWHT) 문제로 두께가 제한된다.

마. 구형 강제 격납용기는 시공이 어려운 대신 내압능력이 크고 인구 조밀지역, 방사성 가스의 확산이 나쁜 기상조건 또는 항공기 충돌하중 및 큰 지진 하중이 고려되어야 할 경우에 유리하다.

3. 격납용기의 해석 및 설계

상기한 바와 같이 격납용기의 형태에는 여러가지가 있으나 여기에서는 울진 3, 4호기의 P.C. 격납용기의 설계에 대하여 간략하게 기술한다.

3.1 기초슬래브 설계

가. 개요

기초슬래브(Basemat)는 원반형의 기초로서 상부 격납용기 즉 외벽(Shell & Dome을 통칭한다), 내부구조물(1차 및 2차 차폐구조, Refueling Pool, Enclosure, 슬래브, 강구조, PWR : Pipe Whip Restraint 등) 및 각종 기기를 지지하며 수직 텐돈의 정착을 위한 텐돈갤러리가 그 하부에 일체 구조로 시공된다.

나. 적용코드 : ASME Sect. III Div. 2 CC-3000, -4000

다. 해석모델

기초슬래브의 해석은 평판요소를 사용한 3차원 유한요소 해석모델을 사용하여 수행한다. 여기서 3차원 모델은 기초슬래브, 원자로공동(Reactor Cavity) 벽체 및 바닥, 쉘, 2차 차폐구조 및 텐돈 갤러리 구조 전체로 구성되며 이와같이 기초슬래브와 연결된 구조물 전체를 해석모델에 포함시키는 이유는 이들 구조가 기초슬래브에 미치는 강성 효과/경계효과를 실제와 근접하게 고려하므로써 정확한 설계단면력을 얻기 위해서이다. 통상 해석 모델에 1차 차폐구조는 포함시키지 않는다. 그 이유는 1차 차폐구조가 기초슬래브의 중심에 위치하므로 지진 및 내압하중 해석 특히 기초의 들림(Uplift) 해석에 영향을 주지 않기 때문이다(그림 1).

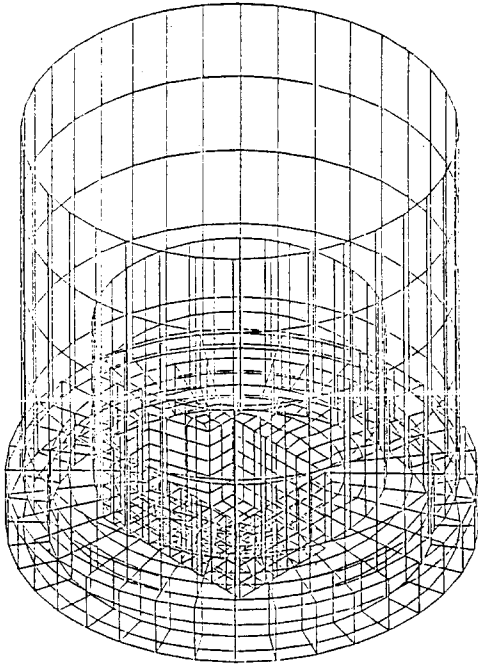


그림 1. 기초슬래브 3차원 평판요소 해석모델

라. 주요 하중

사하중, 프리스트레스트하중, 지진하중, 내압하중, 기기반력 등이 기초슬래브 설계시 주요 하중이며, 특히 프리스트레스트하중 및 내압에 의한 셸-기초 접합부에서의 모우멘트와 반경방향력이 정확히 고려되어야 한다.

마. 해석 및 설계

상부구조의 강성효과를 고려하기 위하여 적정한 높이의 셸 및 돔, 2차 차폐구조를 해석모델에 포함시킨 3차원 셸요소모델을 사용하여 해석을 수행한다. 해석시 기초의 들림 효과를 필히 고려하여야 하며, ASME Table CC-3230-1(표 1)의 주요 하중조합별 최종 들림 상태에서의 Critical Element의 설계단면력에 대하여 부재를 설계한다. 이와같이 기초의 해석시 들림을 고려하여야 하므로 개별하중에 대한 해석을 수행하여 그 결과를 하중조합에 따라 조합하는 것은 의미가 없다. 특히 기초의 전체면적 대비 들림 면적이 1/3 이상일 경우 필히 조합하중에 대하여 해석을 수행하여야 한다.

주요 하중조합별로 결과된 Radial, Hoop 각 방

표 1. 격납용기의 설계 하중/ 하중조합

Category	D	L(1)	F	P _t	G	P _s	T _t	T _c	T _s	E _o	E _{ss}	W	W _t	R _o	R _s	R _t	P _v	H _s
Service																		
Test	1.0	1.0	1.0	1.0	...	...	1.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Construction	1.0	1.0	1.0	...	...	...	...	1.0	...	...	...	1.0	...	...	...	...	...	...
Normal	1.0	1.0	1.0	...	1.0	...	...	1.0	...	...	...	...	...	1.0	...	...	1.0	...
Factored																		
Severe environmental	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	...
Extreme environmental	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	...
Abnormal	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	...	...
Abnormal /severe environmental	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
Abnormal /extreme environmental	1.0	1.0	1.0	...	1.0	1.0	...	...	1.0	...	1.0	...	...	...	1.0	1.0	...	...

NOTE :

(1) Includes all temporary construction loading during and after construction of containment.

향의 설계단면력은 기초의 중심 반경을 기준하여 수 개의 그룹으로 분류하고 각 그룹별 Radial, Hoop 방향의 필요 철근량을 계산한다. 배근시 주의점은 기초슬래브의 철근이 수직 텐돈 정착부의 Trumpet 및 Grease Injection Pipe와 간섭되지 않도록 하는 것과 셸 및 2차 차폐벽의 수직철근 배치간격을 감안하여 기초의 철근 크기 및 배치를 결정하여야 한다는 것과 수직 텐돈 정착부의 철근 배치 요건을 만족하여야 한다는 것이다.

3.2 외벽 설계

가. 개요

외벽(셸 및 돔)은 내·외부 하중으로부터 주요 설비/기기를 보호하고 사고시 외부로의 방사능 물질 누출을 방지하는 최후의 방벽 역할을 하는 P.C. 구조물이다.

나. 적용코드 : ASME Sect. III Div. 2 CC-3000, -4000

다. 해석모델

축대칭하중에 대한 해석을 위한 2차원 축대칭 셸요소 해석모델, 돔 부분의 프리스트레스하중의 해석을 위한 1/4 3차원 셸-트러스요소 해석모델, 온도하중 해석을 위한 전체 3차원 셸요소 해석모델, 대구경 관통부의 해석을 위한 돔이 없는 3차원 셸-트러스요소 해석모델 등을 사용한다.

라. 주요 하중

사하중, 활하중, 프리스트레스하중, 온도하중, 지진하중, 내압하중

마. 해석 및 설계

외벽의 해석은 작용하중의 특성과 구조물 거동을 고려하여 하중별로 가장 적합한 해석기법/해석모델을 사용하는 것이 중요하다.

1) 2차원 축대칭 셸요소 해석모델 : 그림 2

격납용기의 전체적 기하학적 형상은 축대칭이므로 축대칭 하중 즉, 사하중, 내압하중, 프리스트레스하중 등에 대해서는 축대칭 모델을 사용하여 해석한다. 비축대칭하중(천정크레인 반력, 풍하중 관통부의 배관반력 등)에 대해서는 Fourier 급수를 이용하여 집중하중을 Fourier 계수 하중으로 모의하여 해석을 수행한다. 기초슬래브와 1, 2차 차폐구조도 함께 모델링하는 것이 기초의 들림이

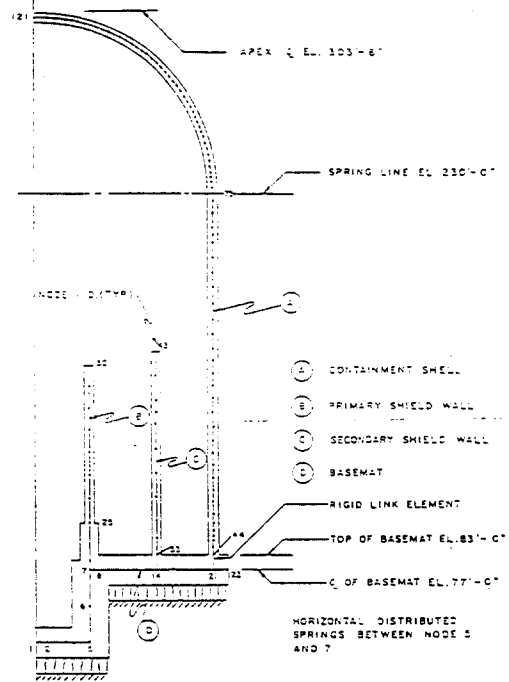


그림 2. 2차원 축대칭 셸요소 해석모델

고려되므로 정확한 해석결과를 준다. 전체 3차원 셸요소 해석모델도 사용가능하다 셸-기초 접합부에서의 상세한 모우먼트 변화를 알기 어렵고 해석모델의 사이즈가 커지므로 현실적으로 바람직하지 않다.

2) 1/4 3차원 셸-트러스요소 해석모델 : 그림 3

돔의 약 45도 높이까지는 원환 방향의 텐돈이 배치된다. 따라서 3방향의 텐돈이 교차되는 지점이 생기며, 이 지점에서 프리스트레스하중에 의한 정확한 단면력을 구하기 위한 목적으로는 그림 2의 축대칭 모델은 부적절하다. 따라서 대칭 경계를 적용한 1/4 3차원 셸-트러스요소 해석모델이 필요하다. 텐돈의 배치를 나타내도록 해석모델의 Mesh를 구성하고 셸 절점을 공유하는 트러스요소를 삽입하되 프리스트레스 준위에 맞게 트러스요소의 강성 및 온도 감소량을 정의하므로써 프리스트레스를 모의한다.

3) 전체 3차원 셸요소 해석모델 : 그림 4

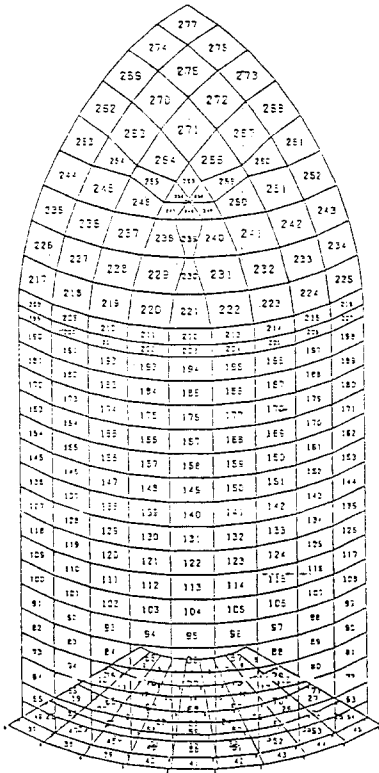


그림 3. 1/4-3차원 셸-트러스요소 해석모델

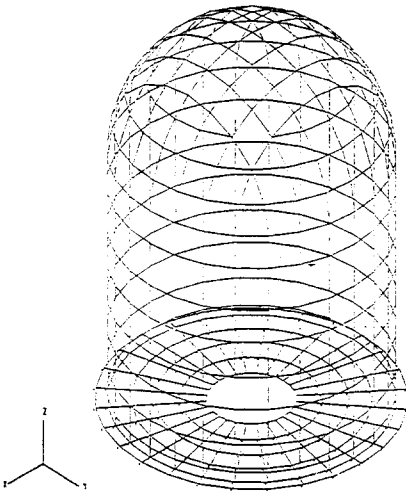


그림 4. 전체 3차원 셸요소 해석모델

격납건물에 인접한 건물(보조건물)에 의해 격납용기 외벽의 부분별 외기 온도가 상이하다. 그리고 집중질량 보요소 해석모델로 구해진 외벽의 지진응답 즉, 층전단력(Story Shear) 및 모우멘트는 구조 전체의 거동이므로 Local Shell Modes가 고려되지 않는 단점이 있다(이 Local Shell Modes를 고려하면 지진시의 원환 방향의 막응력 및 모우멘트가 커진다). 따라서 이를 고려하기 위해 이 해석모델을 사용한다.

4) 돔이 없는 3차원 셸-트러스요소 해석모델 :
그림 5

대구경 관통부가 존재하는 지역(기기반입구/비상출입구, 인원출입구 및 주증기관 관통부)에서는 응력집중이 생기므로 이를 고려할 수 있는 적절한 3차원 모델을 사용하여 해석을 수행하여야 한다. 스프링라인(Spring Line)에서의 경계조건은 축대칭해석 결과를 사용하되 반경방향은 지지변위, 수직방향은 지지점력으로 정의하는 것이 정확한 해석결과를 준다. 관통부의 텐돈 배치는 가능한 한 실제와 근접하게 나타내어야 한다. 사

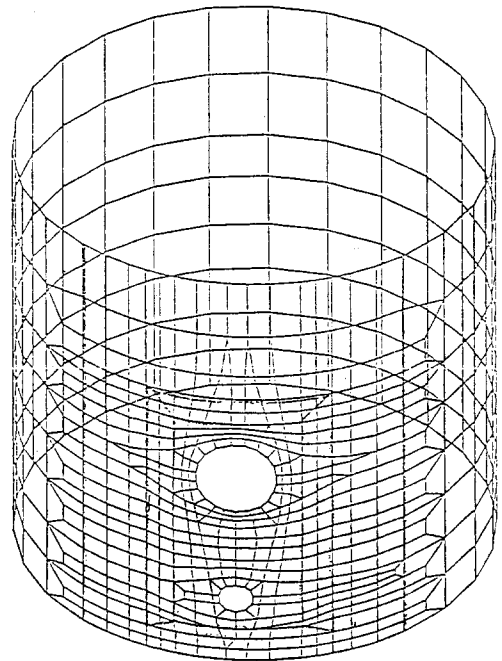


그림 5. 3차원 셸-트러스요소 해석모델(w/ o Dome)

하중, 프리스트레스하중, 내압하중, 지진하중, 온도하중에 대해 해석한다.

전산 프로그램은 축대칭 셀요소 해석의 경우 DYNAX, 3차원 셀요소 해석의 경우는 SLSAP을 사용하였다. 하중조합에 따라 개별하중의 해석결과를 조합하여 선정된 최대단면력에 견디도록 균열단면을 고려하는 전산프로그램 TEMCO를 사용하여 철근량을 산정하였다. ASME Code CC-3420, CC-3430의 콘크리트 및 철근의 허용응력도 요건을 만족하는 지를 검사하여야 하며, 특히 개구부는 CC-3422.1.(c)(3), CC-3422.1.(d) & (e)의 요건에 유의하여야 한다.

2.3 Post-Tensioning 시스템 설계

가. 개요

프리스트레스하중은 개념적으로 사고시의 내압과 평형을 이루는 하중이다. 프리스트레스 도입을 위한 Post-Tensioning 시스템은 격납용기의 셀 및 돔에 설치되며 울진 3&4 호기에서는 VSL E5-55(1/2" Dia Strand, 55-7연선 텐돈, 단면적=8.415 sq inch)시스템이 사용되었다. 프리스트레스를 도입시키므로써 콘크리트 단면에 미리 압축력을 작용시켜 LOCA시의 내압 및 지진하중에 견딘다. 텐돈은 SA-416 Gr 270(4% Relaxation)을 사용하였다. 자오선 방향, 원환 방향의 텐돈의 Stress Profile은 각각 그림 6, 그림 7과 같다.

나. 적용코드 : ASME Sect. III Div. 2
CC-3135, -3423, -3433, -3540

다. 주요 하중

프리스트레스하중, 사하중, 내압, 지진하중

텐돈의 긴장으로 인한 프리스트레스하중은 장·단기적 응력손실을 고려하여 초기 및 최종상태의 하중으로 구분된다. 특히 크리이프와 건조수축으로 인한 손실이 크므로 초기 설계시 사용할 콘크리트의 특성을 미리 알면 좋다. 크리이프 손실은 가해진 외력에 따라 다르므로 자오선 방향, 원환 방향 각각의 응력에 대해 별도 계산하여야 한다.

라. 해석 및 설계

도입할 프리스트레스의 준위는 상기한 셀 및 돔의 해석결과를 사용하여 결정하되 축대칭 해석결

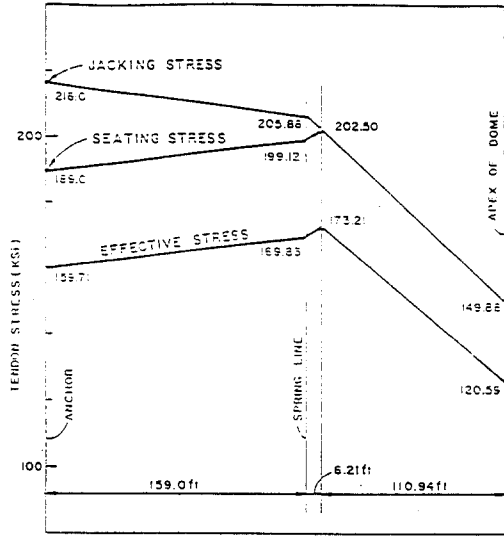


그림 6. 수직(역 U)텐돈의 초기 및 유효 응력도

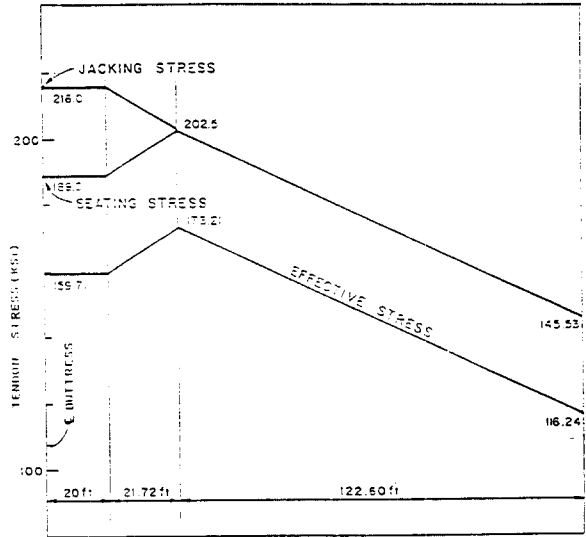


그림 7. 수평(Hoop)텐돈의 초기 및 유효 응력도

과를 사용하면 충분하다. 자오선 방향 및 원환 방향의 프리스트레스의 준위는 다음의 두 가지 조건을 만족하도록 결정한다.

- 1) 사하중, 프리스트레스 및 내압을 하중계수 없이 조합한 경우 각 방향의 막응력은 항상 압축이어야 한다(CC-3521.1.(b).(2)의 Nm 정의 참조)
- 2) 지진 또는 내압이 포함된 주요 하중조합에서

계산된 주인장응력은 $4(fc')^{0.5}$ 을 초과할 수 없다 (Paragraph 3.8.1. II.5 NUREG-0800)

3.4 라이너플레이트 시스템 설계

가. 개요

라이너플레이트(Liner Plate) 시스템은 라이너 플레이트와 앵커의 어셈블리를 의미한다. 라이너 플레이트(이하 라이너)는 시공시에는 콘크리트 타설 압력, 풍하중 및 작업하중 등 외력에 저항하는 Stress Member이며, 발전소 정상가동시 또는 사고시에는 방사성물질 누출차폐(Leak-Tightness) 기능을 수행하는 Strain Member이다. Membrane과 Bending을 동시에 고려한 경우 라이너의 허용 최대변형률은 0.014이다. 앵커(Anchor)는 라이너에 용접 부착되는 자오선 방향의 보강 앵글(L 형강)과 이 앵글에 용접 부착되는 원환 방향의 보강 찬넬(C 형강)로 구분된다. 앵글은 라이너의 국부좌굴시의 면내 전단력에 견뎌야 하며 Table CC-3730-1의 허용 변형(Allowable Deformation) 요건을 만족하여야 한다. 관통부 밀집지역에 주로 사용되는 보강판(Reinforcing Plate)은 Stress Member로서 설계하며 AISC에 따른다(CC-3730, CC-3740)(울진 3&4 호기에서는 보강판이 사용되지 않았음). 라이너는 SA-516 Gr 55(or 60), 앵커는 A36 재료를 주로 사용한다.

나. 적용코드: ASME Sect. III Div. 2 CC-3120, -3600, -3700, -3800 & AISC

다. 해석모델

N/A

라. 주요 하중

시공시 고려하중은 콘크리트 타설압력, 풍하중이며, 정상가동중 또는 LOCA시 고려하중은 콘크리트의 크리이프 및 건조수축, 온도하중, 프리스트레스하중, 압력하중이다.

마. 해석 및 설계

시공시 라이너는 최소 콘크리트 타설 압력 600 psf(ACI-347-88)에 대해 안전하여야 하며 특히 돌 콘크리트 타설시 콘크리트 자중을 부담할 수 있는 지를 검토해야 한다. 정상가동중 또는 LOCA시는 보강 앵글의 간격(15 inch)을 연속 지간으로 한 좌굴 해석을 LAFD 프로그램을 사용하여 수행하

므로써 라이너 시스템을 설계한다. 풍하중에 대한 라이너의 전체/국부 좌굴은 제작/설치시 발생하는 국부변형(Imperfection)을 고려하여 안전측으로 검사한다. 설계에 따라서는 라이너의 용접선을 따라 라이너 배면에 Leak Chase System을 설치할 수 있다.

4. 구조건전성시험 및 사용중검사

4.1 구조건전성시험

가. 개요

발전소 가동전에 구조건전성시험(Structural Integrity Test : SIT)을 수행하여 격납용기가 설계의도에 부합되도록 시공되었는지의 여부 및 구조적으로 적합한 지를 확인하여야 하며 시험 결과와 결론은 반드시 문서화하여 보존하여야 한다.

나. 시험의 목적

- 1) 예상되는 설계사고압력에 대하여 격납용기가 구조적으로 안전한 지를 확인하고,
- 2) 측정 변위량과 계산 변위량을 비교하여 사용된 재료 및 시공의 적합성을 입증한다.

다. 적용코드

- 1) ASME Sect. III Div. 2 CC-6000
- 2) Reg. Guide 1.18(withdrawn in 1981)
- 3) Reg. Guide 1.136

라. 시험요건

- 1) 시험압력 : 설계압력의 115%
- 2) Non-prototype 격납용기는 변위 측정만 요구된, Prototype 격납용기는 변위 뿐만 아니라 변형률 측정도 요구된다(스트레인 게이지 설치 필요).
- 3) 시험압력은 최소 5단계로 가압하되 각 단계의 압력 증가량은 거의 일정하여야 한다.
- 4) 변위는 Radial, Diameter 및 Vertical의 3방향의 주요 위치에서 측정한다(Equipment Hatch 주위는 Radial 방향으로 최소 12(4 points x 3 circles) 지점 측정하여야 한다). 변위 측정장치의 정도(Accuracy)는 예상 최대변위값(해석치)의 5%와 0.01 inch중 큰 값으로 한다(CC-6232, CC-6232.1)
- 5) 가압에 의해 격납용기 내부의 온도가 상승하

므로 온도 변화에 의한 Invar wire의 길이 변화에 대해 보정하여야 한다.

6) Crack Mapping은 폭이 0.01 inch 이상이고 길이가 6 inch 이상인 Crack에 대해 실시되되 가압 전, 매 가압 단계 그리고 가압시험 완료 후에 실시한다. 각 Mapping Location의 면적은 40 sq feet 이상이어야 한다.

7) 압력 게이지의 가압 범위는 시험압력의 1.5 배 이상, 4배 이하이어야 한다.

8) 모든 게이지는 측정 전·후에 검교정하여야 한다.

마. 허용기준

구조 허용기준은 다음과 같다 :

1) 철근 인장력이 항복하중을 초과하지 않아야 한다(균열폭, 변위로 판단).

2) 콘크리트나 라이너에 육안으로 식별할 수 있는 영구적인 구조적 손상이 발생되지 않아야 한다 (Spalling, Lamination, 라이너 배면의 Voids 등).

3) 압력 완전제거 후 24시간 이내에 측정된 변위 복원률은 80% 이상이어야 한다.

4) 최대 변위가 예상되는 부위의 측정 변위는 계산 변위보다 30%이상 커서는 아니된다. 단, 압력 완전제거 후 24시간 이내에 측정된 변위 복원률이 90% 이상인 경우 이 기준은 적용하지 아니한다.

바. 재시험 기준

1) 상기 허용기준 중 3), 4)를 만족하지 못한 경우, 설계자는 측정값 또는 계산값의 부정확성을 유발시킬 수 있는 인자 및 크리이프, 온도변화 영향 등을 검토하여 만약 그러한 원인에 의해 허용기준 3), 4)가 만족되지 못한 것으로 판단되면 재시험을 실시할 수 있다.

2) 구조건전성시험 후 주요한 구조 변경 또는 보수를 요하는 심각한 손상이 발생한 경우 시정조치(보수 등) 후 재시험을 실시할 수 있는 이 경우 충분한 추가 측정을 하여 보수 부위의 구조건전성을 확인하여야 한다.

4.2 사용중검사

가. 개요

포스트텐션 방식으로 프리스트레스를 도입한 격납용기는 시간 경과에 따라 프리스트레스의 손실이 증가하며, 경우에 따라서는 콘크리트에 균열이 발생하고 텐돈이 부식하는 등 결함이 발생되므로 주기적인 사용중검사(Inservice Inspection : ISI)가 요구된다. ISI는 부착식 텐돈(Grouted Tendon)의 경우 Reg. Guide 1.90, 비부착식 텐돈(Ungouted Tendon)의 경우는 Reg. Guide 1.35의 요건에 따라 시행되어야 한다. 검사를 통하여 발견된 결함의 원인은 정확하게 분석되어야 한다. 텐돈의 부식, 정착단의 파손과 같은 발생 가능한 결함의 모든 영역을 검사하고, 임계상태(파괴)에 도달하기 전에 재료의 결함을 발견하므로써 적절한 대책을 강구할 수 있어야 한다.

여기에서는 비부착식 텐돈의 ISI에 대하여 기술한다.

나. 적용코드

1) ASME Sect. XI, Subsection IWL(1992 version)

2) Reg. Guide 1.35(Rev 3, 1990. 7)

3) Reg. Guide 1.35.1(Rev 0 1990. 7)

다. 검사 프로그램

1) 검사용 시편

가) 검사용 텐돈(시편)은 미리 지정하여서는 아니되며 모든 텐돈이 시편이 될 수 있다. 각 그룹(수직, 역U, 원환(Hoop), 둘)의 텐돈 그룹에서 취한 시편에서 그룹별로 최소 1개를 Control Tendon으로 지정하여야 한다.

나) 최초 SIT(ISIT) 시행 후 1, 3, 5년차 검사시, 각 그룹별 텐돈에서 취할 시편의 갯수는 그 그룹의 전체 텐돈 갯수의 4% 이상으로 하되 최소한 4개 이상이어야 한다.

다) 1, 3, 5년차 검사에서 문제가 없으면 후속 정기검사(매 5년 마다)에서 취할 시편 갯수는 각 그룹의 전체 텐돈 갯수의 2% 이상으로 하되 최소한 3개 이상이어야 한다.

2) 육안검사

가) 정착관 : 부식, 균열발생 및 과대변형

나) 정착헤드 : 균열 및 부식, 썩기구멍의 변형 및 부식

다) 텐돈 : 파단 및 응력이완

라) 정착판 주위 콘크리트 : 균열, 표면파쇄, 변질

마) 그리이스 캡(특히 수직 텐돈의)의 변형

바) 콘크리트 표면 결함(Spalling, Scaling, Cracking, Grease Leaking)

3) 응력감사

가) 검사 텐돈의 Lift-off Force를 측정한다.

나) 검사 텐돈의 인장력은 계산된 유효인장력 범위 이내에 들어야 한다.

다) 검사 텐돈의 유효인장력이 허용범위의 하한치 보다 작으면 인장력 감소가 예상치를 초과하는 것이며 이는 격납용기의 내압능력 감소를 의미한다.

라) 재긴장력(Retensioning force)은 텐돈 인장강도의 70% 이하로 한다.

4) 그리이스의 불순물 검사 시료

Post-Tensioning 시스템에서, 슈이스에 그리이스를 충전하는 목적은 텐돈을 염분, 수분 및 공기 중의 산소 등으로 부터 차단하여 부식방지를 하기 위함이다. 그리이스의 변질 유무를 알기 위해 각 텐돈 시편에 대해 그리이스 시료를 다음의 검사 규격에 따라 채취, 시험하여 초기의 성분과 비교한다 :

- 함수량 : ASTM D95
- 염화물 : ASTM D512
- 질화물 : ASTM D992
- 황화물 : APHA 427
- 알칼리도 : ASTM D974

5) 재료특성 검사를 위한 텐돈 시편

인장력 측정 후 텐돈을 인장 해제하고 강연선(Strand)의 인장시험을 위해 3개의 시편을 취하되 텐돈 정착 부위에서 약간 떨어진 곳과 중앙 부위에서 각각 취한다.

라. 허용기준

1) 육안검사

가) 콘크리트 균열폭은 정착부 주위에서 0.01 inch 기준이다.

나) 균열폭이 0.01 inch 이상일 경우 주기적인 검사가 요구된다.

다) 그러나 콘크리트 균열이 시공시 콘크리트

표면의 보수작업으로 발생된 것이 명확하고(건조 수축 등) 구조적 영향을 미치지 않는 것으로 판명되면 문제시하지 않아도 된다.

라) 부식상태는 다음의 등급으로 구분한다.

(1) 녹이 보이지 않으면 문제가 없는 것으로 간주한다.

(2) 등급 1 : 눈으로 녹을 볼 수 있으나 단면이 부식하지 않은 상태

(3) 등급 2 : 미소한 요철상태(패인 깊이가 0.01 inch 이하)인 경우

(4) 등급 3 : 심한 요철상태인 경우

부식등급 1등급은 허용된다. 그러나 추후 검사를 위하여 기록하여 둔다. 외부에 노출된 정착판과 그리이스 캡의 부식등급 2등급은 표면녹을 제거한 후 재도장을 한다면 허용된다.

마) 그리이스에는 자유수가 없어야 한다.

2) 응력검사

가) 검사한 텐돈의 인장력 측정치가 허용범위(계산치) 내에 있으면 합격이다.

나) 검사한 텐돈의 인장력 측정치가 허용범위 하한치의 95%와 90% 사이에 있을 경우 인접한 두 개의 텐돈의 인장력을 측정한다. 인접한 두 텐돈의 인장력 측정치 및 해당 그룹의 남은 모든 검사 텐돈의 측정치가 모두 허용범위 하한치의 95% 이상이면 합격이다.

다) 시험한 인접 텐돈 중 어느 하나가 95% 기준을 만족하지 못하거나 처음 시험한 텐돈의 측정치가 하한치의 90%에 못미치면 불합격이다. 이 경우 추가로 해당그룹의 모든 텐돈을 측정하여 그 범위를 조사하여야 하며, 그 원인을 규명하여 격납용기의 구조건전성에 미치는 영향을 평가하여야 한다.

라) 측정된 텐돈의 연신률은 설치시와 비교하여 10% 이상 다르지 않아야 한다.

3) 그리이스의 함수량 및 불순물 기준치

- 함수량(중량비)은 10% 이하.
- 염화물, 질화물, 황화물은 각 10ppm 이하
- 알칼리 보유도는 Base Number로,
 - 초기치의 50% 이하 또는
 - 초기치가 0인 경우 5 이하.