原子力 発電所 格納建物의 設計基準과 應力解析(上)

李 在 根
〈工博 · 韓国重工業常務〉

1. 머 릿 말

원자력 발전소의 사고는 수많은 인명과 재산의 피해를 가져오므로 일반 건물이나 공장 건설에 적용하는 설계기준 외에도 가상사고와 천재지변을 고려하여 설계하여야 한다. 현재 설계기준으로 적용되고 있는 가상사고에는 송수관의 파열, 폭발물에 의한 사고, 항공기의 추락 등이 있고 천재지변으로는 해일과 지진을 들수 있다. 도표 1 - 1은 원자력 발전소의 각 건물에 설계기준으로 적용하여야 하는 가상사고와 천재지변을 보여준다. 발전소의 구조물이 이로해서 받게되는 하중은 대부분이 동하중(動荷重)이므로 구조계산과 아울러 내진설계(耐震設計)를 하여야 한다. 내진설계의 활발한 연구, 특히 지진에 대한 연구는 원자력 발전소 건설에 힘입은 바가 크다.

원자력 발전소가 정상으로 가동할 수 있는 기간은 약 30년이며 경제적인 관점에서 보면 15년이 알맞은 가동기간이다. 이 기간동안에 앞에서 말한 가상사고나 천재지변이 일어날 확율은 아주 적고 이때의 하중이 너무 커서 이에 대비하여 탄성설계(彈性設計)를 하는 것은 경제적이지 못하며 탄소성설계(彈塑性設計)나 항복선이론(降伏線理論)에 따른 설계를 하게 된다. 가상사고나 천재지변이 있은 후에는 원자력 발전소를 폐쇄하게 되지만 가동이 완전히 정지될 때까지 안전기기들이 보호되어야 하며 발전소를 완전히 해체할 때까지 방사선이 유출되지 않도록 설계하여야 한다.

우리나라에서도 앞으로 수십기의 원자력 발전소를 건설하게 된다. 이글은 필자가 서독에서 1973년부터 1978년 까지 1300Mew 가압식 경수로의 설계 감리팀 책임자로 일하면서 모은 자료를 도움이 될까하여 정리한 것이다.

2. 원자로격납 건물의 구조

원자로 격납건물은 원자로를 비롯하여 증가발생기와 냉각계통의 중요기기들을 보호하며 방사선이 밖으로 유출되지 않도록 차단하는 임무를 가지고 있다. 격납건물의 건축구조는 원자로의 종류와 제작회사에 따라 조금씩 다르나 일반적으로 Biological Shield, Inner Cylinder, Steel Containment와 Containment Building Shield로 구성되어 있다.

Biological Shield는 원자로를 둘러싸고 있는 두께 약 2m의 콘크리트 벽체로서 가동시에는 주로 중성자선을 차단한다. 중성자의 조사를 받으면 벽체의 온도가 약 60°C까지 올라가게 된다 이 때문에 특별한 냉각시설을 할 필요는 없다. 발전소의 가동이 중지되었을 때에는 Biological Shield가 원자로에서 나오는 모든 방사선을 차단할 수 있도록 설계되어 있다. Biological Shield의 바깥쪽으로 원자로와 연결되는 파이프와 대부분의 중요기기가 배치되고 그 바깥쪽을 Inner Cylinder가 둘러싸고 있다.

도표 1 - 1

	가상최대지진	설계지진	가동지진	폭발물사고	항공기추락	사보타쥐	해일, 조파	화재	송수관파열
Reactor Building	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Reactor Building-Annulus	X	X	X	X	X	X	X	X	-
Compartment for Life steam and Feed water Valves	X	X	X	X	X	X	X	-	X
Reactor Auxiliary Building	X	X	X	-	-	X	-	X	-
Emergency Feed Building	X	X	X	X	X	X	X	X	-
Switchgear Building	X	X	X	-	-	X	-	-	-
Emergency Diesel Generator Building	X	X	X	-	-	X	-	-	-
Intake for Aux. Cooling Water	X	X	X	X	X	X	X	-	-
Pump House for Nuclear Aux. and Emergency Cooling Water Pumps	X	X	X	X	X	X	X	-	-
Nuclear Aux. Cooling Water Lines	X	X	X	X	X	-	X	-	-
Exhaust Stack	X	X	X	X	-	-	-	-	-
Cable Ducts from Emergency Diesel Generators to Switchgear Building	X	X	X	-	-	X	-	-	-
Cable and Piping Ducts from Emergency Feed Building to Reactor Annulus	X	X	X	X	X	X	X	X	-
Cable Bridges from Switchgear Building to Reactor Building	X	X	X	-	-	-	-	-	-
TurbineHouse	-	-	X	-	-	-	-	-	-
Condensate Polishing Plant	-	-	X	-	-	-	-	-	-
Cooling Water Intake	-	-	X	-	-	-	-	-	-
Building for Cooling Water Pumps	-	-	X	-	-	-	-	-	-
HV Switchgear Building	-	-	X	-	-	-	-	-	-
Unit Transformer Foundation	-	-	X	-	-	-	-	-	-
Aux. Transformer Foundation	-	-	X	-	-	-	-	-	-
Amenities Building	-	-	X	-	-	-	-	-	-
Workshop and Store Building	-	-	X	-	-	-	-	-	-
Aux. Boiler, Station Air Supply	-	-	X	-	-	-	-	-	-
Central Chilled Water Plant	-	-	X	-	-	-	-	-	-

Inner Cylinder는 두께 약 80cm의 콘크리트 벽체로서 가동시에는 이들 기기에서 나오는 감마선을 차단하고 내부구조물의 주축이 된다. 발전소의 가동이 중지되었을 때에는 Biological Shield와 Inner Cylinder 사이의 공간에 사람이 들어가서 작업을 할 수 있다.

Steel Containment는 두께 약 35mm의 철판으로 파이프나 밸브, 펌프 등이 파열하여 생기는 압력과 온도하중에 견디어 방사선을 가진 기체나 액체가 새어나가는 것을 방지한다. Steel Containment와 Containment Building Shield를 합쳐서 Containment라고 부르기도 하며 Containment Building Shield에 Steel Lines를 부착하여 Steel Containment의 역할을 대신하기도 한다. 원자력 발전소의 개발초기에 특히 비등식 경수로에서는 지름이 약 25m인 구형(球型) Steel Containment를 일반건물에 설치하였었으나 지금은 격납건물과 거의 같은 크기로 만들고 있다. Containment Building Shield는 격납 건물의 바깥 벽체이며 보통 지름 40m 두께 약 1m인 Cylinder 모양의 콘크리트 벽체로 되어 있다. 최근 콘크리트 외에도 P.S 콘크리트와 수직방향만 Prestress한 철근콘크리트로 설계하기도 한다.

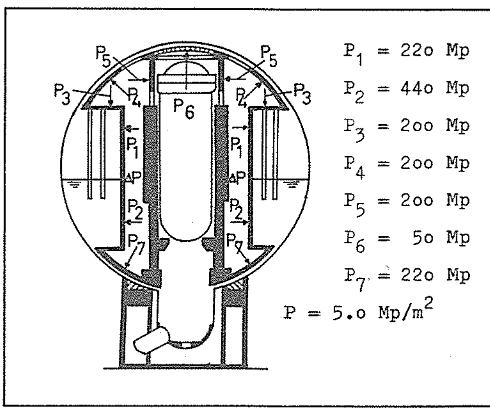
KWU(Kraftwerk Union)에서는 1965년 이후 지름이 60m 되는 구형 Steel Containment와 철근 콘크리트 Containment Building Shield를 개발하여 사용하고 있다. 이 Containment의 특징은 핵연료의 저장시설이 Containment 안에 있어서 핵연료를 교체하는 시간이 단축되고 안전하다는 점이다.

또 Containment 내부의 공간이 넓어서 사고발생시에 압력이 낮고 기계의 조작과 Inspection이 편리하며 대부분의 수리가 Containment 안에서 가능하다. Containment 안의 압력은 외부 기압보다 0.1 기압 또는 5PSI를 낮게 유지하는데 이것은 방사선을 가진 기체가 밖으로 새어나가지 못하도록 하기 위함이다.

3. 송수관의 파열

격납건물 내부에서 일어날 확율이 가장 많고 하중이 큰 사고가 송수관의 파열이다. 특히 송수관이 서로 직각으로 연결된 부분에서 지금까지 많은 균열이 발견 되었었다. 내부의 압력 상승이나 자재의 결함으로 해서 핵 반응으로 자체가 파열할 가능성도 있으나 아직까지는 핵 반응로의 파열에 대비

그림 3 - 1



하여 격납건물을 설계하지는 않고 있다. 독일 BASF 회사에서 회사안에 원자력 발전소를 건설하고자 하였을때에 이 사고의 가능성이 검토된 적이

있으나 건설계획이 취소되었고 독일 법원에서 이 사고가 날 가능성이 있다는 이유로 Wyhl 원자력발전소의 건설허가를 보류시킨적이 있다. 이 외에도 사보타쥐에 의한 폭발사고를 생각할 수 있는데 한 사람이 운반할 수 있는 TNT의 양을 설계기준으로 하고 있다.

송수관이 파열하였을 때에 생기는 하중으로는 직접적인 증기발사로 인한 단일 집중 하중과 Containment 안의 증기가 팽창하면서 생기는 압력과 온도의 상승이 있다. 단일 집중 하중은 콘 크리트 벽체가 견디어 내어야 하며 Steel Containment 안에 이 하중에 견딜수 있는 벽체를 설치한다. 그림 3 - 1은 비등식 경수로의 Steel Containment 안에 설치한 콘크리트 벽체가 송수관의 파열로 인해서 받게되는 하중을 보여준다. 압력과 온도의 상승에 따른 하중은 Steel Containment나 Steel Lines를 부착한 Concrete Containment가 견디어 낸다. 비등식 경수로에서는 물을 반쯤 채운 Pressure Suppression Chamber를 만들고 증기의 일부를 이 물속으로 유도하여 냉각시키므로써 압력을 낮추고 있다. 가압식 경수로에서는 Pressure Suppression Chamber가 없이 전 압력을 설계에 고려하는 것이 보통이나 근래에 Westinghouse에서 Ice Condenser를 설치하여 압력을 낮추도록 설계하고 있다.

1970년대에 건설된 원자력 발전소의 대부분이 가압식 경수로이며 차츰 1200Mew급으로 표준화 되어가고 있다. 가압식 경수로의 제작회사로는 Westinghouse, Babcock & Wilcox, Combustion Engineering, Knaftwerk Union 등이 있고 Framatome, Creusot-Loire, ACEC, WENESE, Mitsubishi 등이 Westinghouse와 기술제휴하여 제작하고 있다. 이들 제작회사에 따라서 원자로의 안전 시스템이 약간씩 달라지며 이에 따라 단일 집중 하중이나 내부공간의 압력하중도 달라진다. 그림 3 - 2는 KWU의 1300Mew급 가압식 경수로의 단면을 보여주며 이 발전소를 예로써 설명하고자 한다.

송수관의 파열은 1차계통, 2차계통과 비상 냉각급수 계통에서 일어날 수 있다. 그림 3 - 3은 송수관의 파열로 해서 생길수 있는 단일집중 하중의 위치와 크기를 보여준다. 이 하중이 벽체에 작용하는 면적은 직경 약 90cm인 원이며 하중의 절반이 직경 약 45cm의 내부면적에 작용하고 나머지 절반이 바깥면적에 작용한다. Steel Containment의 설계기준이 되는 최대가상 사고는 1차계통의 송수관이 동시에 두곳에서 파열되었을 경우에 생긴다. 독일에서는 1차계통의 모든 증기가 발산되는 10초 이내에 한개의 증기발생기 안에 있는 2차계통의

도표 3 - 2

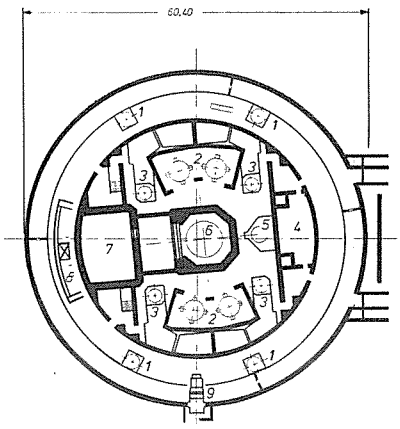


그림 3 - 3

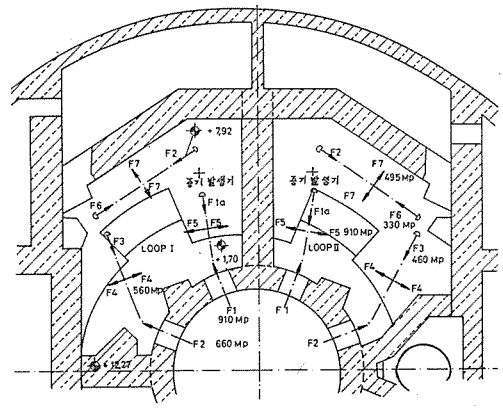
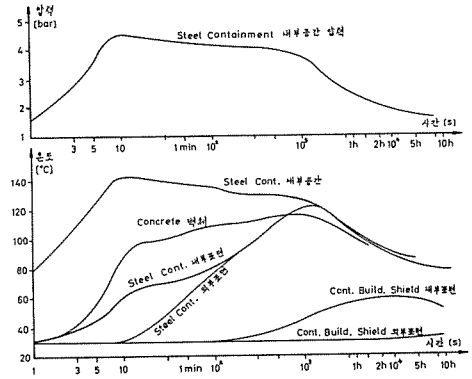


도표 3 - 4



이런 경우를 고려하지 아니하는 미국의 계산방법보다 약 10%가 더 안전하다. 도표3－4는 Steel Containment의 설계기준이 되는 압력과 주변온도의 변화를 보여준다. 이 도표에서 보면 Steel Containment의 온도는 최대압력이 작용하는 10초때에 약 70℃이고 최대압력 보다 약 1.2기압이 내려간 1000초후에 최고 120℃까지 올라간다. 그러나 설계기준으로는 최대압력의 1.15배와 135℃때의 허용응력을 적용하며 안전도는 1.5배 이상이어야 한다. Containment 내부의 콘크리트 벽체들이 받는 압력하중은 각 공간에 작용하는 압력의 차이이며 이것은 내부의 최대압력 보다는 훨씬 적다. 도표3－5는 최대가상 사고시에 Containment 내부 각 공간에 생기는 압력의 변화를 보여준다. 도표3－6은 단일집중 하중의 시간에 따른 변화를 보여주며 이와 같은 동하중(Dynamic Load)을 받는 구조물은 내진설계를 하여야 한다. 가장 간편한 내진설계는 구조물의 그림3－7과 같이 질량점과 스프링으로 대체하여 동하중 계수(Dynamic Load Factor)를 구해주는 방법이다. 구조물의 스프링 계수 K는 하중이 작용하는 지점에서 단위변형 1을 일으키는데에 필요한 힘이나 모멘트와 같다. 단일 질량점일 경우에 진동의 미분방정식은

$$m \cdot \ddot{y} + k \cdot y = F(t) \qquad (3.\ 1)$$

이며 Duhamel 적분을 사용하여 해를 구하면

$$y = \int_o^t \frac{F(t)}{m \cdot w} \sin\ \omega(t-\tau)\, d\tau \qquad (3.\ 2)$$

$$\left(\omega = \sqrt{\frac{K}{m}}\right)$$

가 된다. 증기 발사로 인한 단일집중 하중의 경우

$$0.005\text{sin 일때 } F(t) = \max F \cdot \frac{\tau}{0.005\text{sec}} \qquad (3.\ 3)$$

$$t \geqq 0.005\text{sec 일때, } F(t) = \max F \qquad (3.\ 4)$$

를 대입하면 t초 때의 동하중계수(DLF)는

$$0.005\text{sec 일때 } DLF = \frac{1}{0.005\text{sec}} \cdot \left(t - \frac{\sin \omega t}{\omega}\right) \qquad (3.\ 5)$$

$$t \geqq 0.005\text{sec 일때 } DLF = 1 + \frac{1}{\omega \cdot 0.005\text{sec}}\{\sin \omega (t-0.005\text{sec}) - \sin wt\} \qquad (3.\ 6)$$

이 된다. 여기에서 보면 DLF는 각속도 ω 또는 주기 $T = \frac{2\pi}{\omega}$와 하중이 증가하는 시간 Tr=0.005sec

도표 3－5

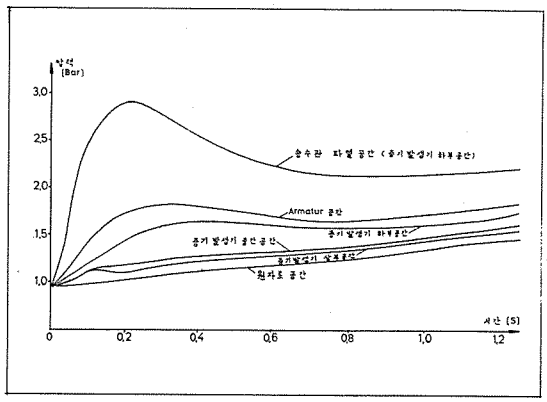
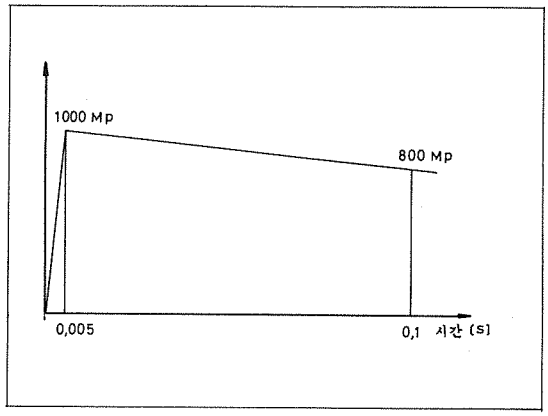
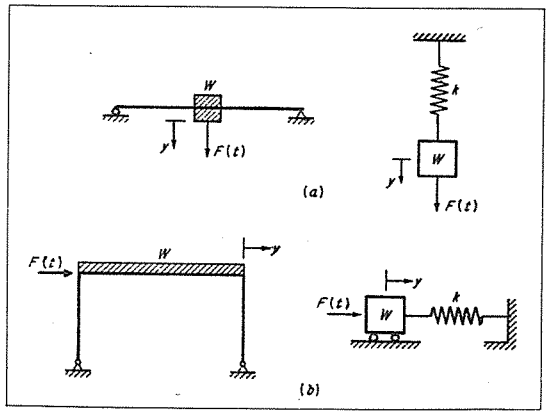


도표 3－6



에 따라서 변하는 것을 알 수 있다. 실제로 설계를 하는 데에는 DLF의 최대값만 알아도 충분하다. 도표3－8은 진동주기가 변하는데에 따른 DLF의 최대값을 보여주며 이와 같은 도표를 Respons Spectra라고 한다. 증기발사로 인한 단일집중하중

도표 3－7



을 탄성변형으으로 견딜수 있게 설계하는 것은 경제적이지 못하므로 도표3－9와 같이 탄성한계점까지는 탄성변형을 그이상은 소성변형을 고려하여 설계한다. 변형이 탄성한계점에서의 변형 yel에 이르게 되면 스프링에 작용하는 힘 k·y는 최대값 Rmax에 이르며 그 이상 증가하지 아니한다. 그러므로 소성영역에서의 진동 방정식은

$t \geq tel$ 일때 $m \cdot \ddot{y} = F(t) - Rmax$ (3. 7)

가 되며 식(3. 4)를 대입하여 적분하면

$$y = \frac{1}{2m}(Fmax - Rmax) \cdot (t - tel)^2 + C_1(t - tel) + C_2 \quad (3.\ 8)$$

이 된다. t=tel 일때의 경계조건

$$yel = \frac{Fmax}{K}\left\{1 + \frac{1}{\omega \cdot 0.005sec}[\sin \omega(tel - 0.005\ sec) - \sin \omega\ tel]\right\} \quad (3.\ 9)$$

$$yel = \frac{Fmax}{K} \cdot \frac{1}{0.005sec}\cos \omega(tel - 0.005sec) - \cos \omega\ tel] \quad (3.\ 10)$$

을 대입하면

$$y = \frac{1}{2m}(Fmax - Rmax) \cdot (t - tel)^2 + yel(t - tel) + yel \quad (3.\ 11)$$

이 되고 시간 $t = \frac{m}{Rmax - Fmax} \cdot yel$ 일때에 최대변형 ymax에 이르게 된다. 도표3－10은 탄성－소성이론에 따라서 계산한 maximum Response를 보여준다. 여기에서 λ는 Rmax와 Fmax의 비율로서 DLF와 같고 te는 진동주기 T에 해당하며 방정식

$$te = 2\pi\sqrt{\frac{m \cdot yel}{Rmax}} \quad (3.\ 12)$$

로서 구한다. β는 소성최대변형 ymax를 탄성한계

도표 3－8

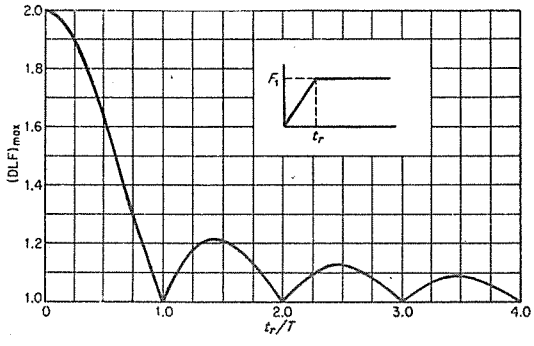


도표 3－9

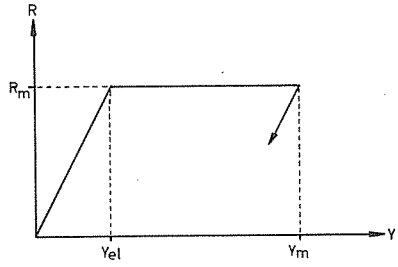
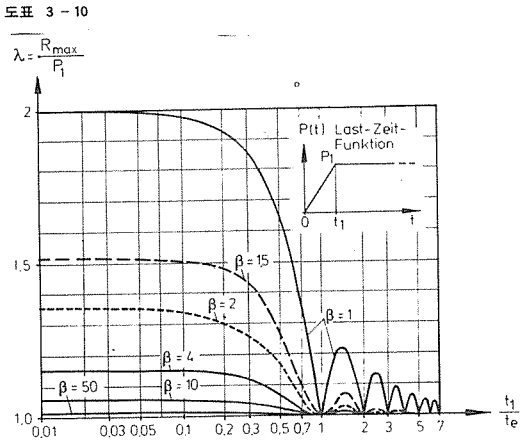


도표 3－10



점의 변형 yel로 나눈값으로 구조물의 변형이 일정한 값을 넘지 않도록 제한할 필요가 있을 때에는 이 값을 ymax로 택하면 된다.

β가 1인 경우는 탄성진동을 의미한다. 도표3－10에서 알 수 있듯이 β가 2만 되어도 동하중 계수는 아주 낮아진다. 원자력 발전소 설계에 실제로 적용한 동하중 계수는 보나 기둥의 모멘트에는 1.4, 전단력에는 1.1, 평판이나 쉘에는 1.2 정도 였었다. 송수관의 파열로 인한 단일집중 하중은 0.005초에서 0.015초라는 짧은 시간에 최대의 값까지 도달한다. 이와 같이 하중의 증가속도가 아주 높은 경우에는 철근의 항복강도가 일반 하중의 경우보다 약 1.1배 증가한다. 여기에서 일반하중은 40초만에 최대값까지 도달하는 하중을 말한다.

독일에서는 1974년 7월 이에따른 철근의 허용응력을 증가시키지 않는 대신에 송수관의 파열로 인한 단일집중 하중에 대한 안전도를 1.1에서 1.0으로 낮추었었다.