원자력 압력용기의 설계기준과 응력 해석방법

<上>

김 천 옥

연 세 대 학 교 이공대 교수

1. 서 론

원자로압력용기는 용기내에서 핵반응에 의하여 발생되는 열과 압력을 유지시키든가 또는 이를 보조하는 설비로서 원자력발전소의 설비중 가장 중요한 부분이다. 따라서 사고가 생겼을 경우 위험성이 막대하므로, 극히 엄격하게 용기의 각부분에 대하여 응력을 계산하고 이 값들이 어떤 기준치 이하가 되도록 제한하고 있다. 원자로압력용기의 설계와 제작에 있어 세계적으로 통용되고 있는 미국기계학회「보일러 및 압력용기 기술기준」[1] 에서는 압력용기의 제작자 또는 그 대리인은 반드시 원자력발전소의 제1종 및 MC용기에 대하여 완전한 응력해석을 실시하고 그 결과를 제출하도록 요구하고 있는데, 이 응력해석은 용기의 제작에 사용될 도면상의 설계가 기준의 규정과 설계사양의 요구사항을 만족시키고 있는 가를 확인하는 것이다.

참고문헌[1]의 규정에 의하면 강도에 관한 설계이념은 최대전단응력에 두고 응력강도를 1차 일반막응력, 1차국부막응력, 1차굽힘응력, 2차 응력, 및 피이크응력으로 분류하여 용기의 파손에 대하여 3형식으로 방지하도록 하고 있다. 이와같은 설계이념은 일본에서도 그대로 채택되어 1965년 통상산업성령 제62호로 고시[2] 하여 시행하고 있다.

우리나라는 최근에 원자력발전시대로 접어들어 고리원자력발전소 1호기가 건설중에 있으며 고리2호기와 제3호 원자로가 오는 가을에는 기공될 예정에 있다. 이러한 상황하에서 국내에 설치되는 원자력발전설비는 그 안전성을 분석 검토하여 판단할 책임을 정부가 가지고 있다. 이를 뒷받침하는 것은 국내의 기술진이며, 이 새로운 기술을 조속히 소화하도록 촉진하는 것이 본 심포지움의 목적으로 생각한다.

원자로압력용기의 응력해석결과를 분석하고 안전성을 판별하기 위하여서는 설계기준의 이해가 앞서야 하므로, 먼저 설계기준을 요약하여 설명한다. 그리고 응력해석방법에는 최근에 발전된 수치해법에 의하여 여러가지 해석법이 발달되어 왔으나, 현 시점에서 우리의 목표가 원자력발전설비의 안전성분석을 위한 토대의 구축이 우선하므로 참고문헌[1] 에서 추천하는 고전방법을 설명하기로 한다.

2. 설계기준

2-1. 용어의 의의

설계기준을 설명함에 앞서 사용되는 용어의 의의를 먼저 정의한다.「제1종용기」라는 것은 원자로압력용기 및 가압기, 증기발생기 및 기타 용기로서 통상 운전시에 원자로압력용기내의 냉각재 또는 감속재와 거의 같은 온도, 압력 및 방사성물질의 농도의 냉각재 또는 감속재를 내장하는 것을 말한다.

「제2종용기」라는 것은 원자로격납용기 및 이것에 접속하는 용기로서, 원자로 격납용기 및 이것에 접속하는 용기내의 기계 또는 기구로 부터 방출되는 방사성물질등의 해로운 물질이 새어나감을 방지하기 위하여 설치한 것을 말한다.

「제3종용기」라는 것은 제1종용기, 제2종용기 및 보조보일러 이외의 용기로서 그 최고사용압력이 0kg/cm³을 넘는 것을 말한다.

「제4종용기」라는 것은 제1종용기, 제2종용기, 제3종용기 및 보조보일러 이외의 액체를 저장하기 위한 용기로서 안전계에 속하는 것 또는 저장하는 액체의 방사성물질의 농도가 1μC/cm³이상인 것을 말한다.

「제1종관」이라는 것은 제1종용기 서로를 연락하는 관 또는 제1종용기에 부착되는 관(제1종용기 서로를 연락하는 관을 제외한다)으로서, 해당 용기로 부터 이것에 가장 가까운 스톱밸브(제2스톱밸브가 필요한 경우에는 제2스톱밸브)까지의 것을 말한다.

「제2종관」이라는 것은, 제1종관 및 방사선관리설비에 속하는 덕트(duct) 이외의 관으로서, 최고사용압력이 0kg/cm³를 넘는 관을 말한다.

「제3종관」이라고 하는 것은 방사성관리설비에 속하는 덕트로써 내포하는 방사성물질의 농도가 1$\mu\mu$C/cm³ 이상의 것을 말한다.

「응력강도」라는 것은 주어진 점에서의 주응력의 대표적인 최대치와 최소치의 차를 말한다. (인장응력의 부호는 정(正)으로, 그리고 압축응력의 부호는 부(負)로하여 계산한다).

「막응력」이라는 것은 단면의 수직응력의 평균치와 같은 해당 단면에 수직인 응력성분을 말한다.

「굽힘응력」이라는 것은 수직 이외의 평균치로부터의 변화성분을 말한다.

「1차응력」이라는 것은 외력, 내력 및 모우멘트에 대하여 단순한 평형의 법측을 만족하는 수직응력 또는 전단응력을 말한다.

「1차일반막응력」이라는 것은 압력 또는 기계적하중에 의하여 생기는 막응력으로써, 구조상의 불연속성 및 응력집중이 없는 부분의 것을 말한다.

「1차국부막응력」이라는 것 압력 또는 기계적하중에 의하여 생기는 국부막응력을 말한다.

「피이크응력」이라는 것은 응력집중 또는 국부열응력에 의하여 1차응력 또는 2차응력에 부가되는 응력의 증가분을 말한다.

「피이크응력강도」라는 것은 1차응력, 2차응력 및 피이크응력을 조합하여 구한 응력강도를 말한다.

「반복피이크응력강도」라는 것은 피이크응력강도의 사이클을 구해서 그 극대치와 극소치의 차의 1/2을 말한다.

「열응력」이란 온도의 불균일한 분포 또는 열팽창계수의 차이에 의하여 생기는 자기평형응력이다. 열응력은 온도의 변화에 따라 재료의 부피와 치수가 변화되는 것이 구속되었을 경우 언제나 고체에서 발생한다.

다음의 그림1에서는 원자로용기의 단면을 보여준다. 핵반응이 일어나는 연료봉이 있는 곳은 하반부원통쉘부분이며 이 부분에는 내압에 의한 막응력이 주가 된다. 1차굽힘응력은 원자로용기를 지지하기 위한 지지브래킷 부근에 생기는 것과 노즐에 작용하는 기계적하중에 의한 것으로 된다. 지지브래킷과 노즐이 있는 부분은 두께가 두꺼워지는데 이로 인하여 하반부원통쉘과 노즐보강부의 접속부 그리고 하부의 반구형경판의 접속부에는 2차응력인 굽힘응력과 전단응력이 생기게 된다.

노즐접속부는 원통쉘에 구멍을 뚫고 관을 잇는 것이므로 내압에 의하여서도 국부적인 응압집중현상이 일어난다. 이 경우의 응력은 피이크응력으로 피로해석에서 고려된다.

원자로용기의 상부는 연료봉을 교환하기 위하여 정기적으로 분해하여 본체에서 떼어낼 수 있게 되어있다. 따라서 플랜지가 붙은 상부경판을 스터드보울트와 너트로 고정한다. 원자로용기내의 압력은 운전조건에 따라 상승되고 하강되므로 장기간의 사용을 위해서는 스터드보울트에 피로해석을 실시한다.

이 경우에도 보울트의 나사골밑엔 응력집중이

생기므로 이를 피로해석에서 고려한다.

열응력은 2종으로 분류된다. 첫째는 일반열응력으로서 그것이 발생하는 구조물의 변형을 수반한다. 만일 이 종류의 항복점의 2배를 초과하였을 때에는 탄성해석은 적용될 수 없고 계속되는 열사이클은 점차로 증가되는 변형을 가져올 수도 있다. 그러므로 이 종류는 2차응력으로 분류된다. 이런 일반열응력의 보기는 원통쉘에서 길이방향온도분포가 일정하지 않든가, 노즐과 쉘 사이에 온도차가 있든가 또는 원통쉘에 반경방향의 온도분포에 구배가 있을 경우 등에 생긴

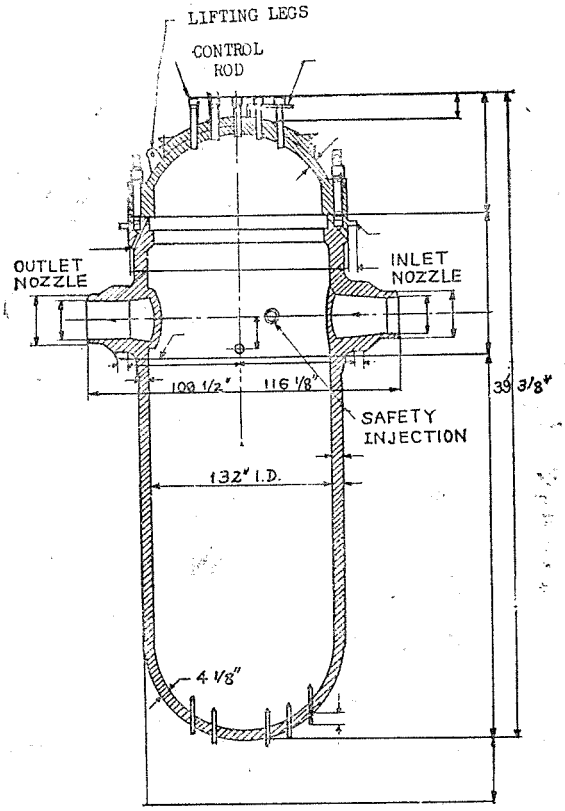

그림 1. 原子爐容器

다. 그러므로 열응력을 최소로 하기 위하여 원자로용기, 증기발생기 등은 철저하게 절연된다.

둘째 종류는 국부열응력으로서 다만 피로해석에서 고려된다.

2-2. 설계의 일반과정

원자로압력용기는 원통쉘이 근간을 이루고 있으며 이 원통쉘의 상하부에 경판을 붙인 구조로 하는 것이 일반적이다. 원자로용기 처럼 연료봉의 교환을 위하여 정기적인 분리가 필요할 경우에는 한쪽 경판에 플랜지를 붙여 스터드보울트로 체결하고 있다. 경판에는 반구형이 가장 많이 채용되고 있으나 반타원형, 원추형 및 평판형등도 사용되고 있다. 이들 원통쉘과 경판의 응력해석방법은 참고문헌[1] 의 부록에서 주고 있다.

표 1. 응력해석의 방법[1]

구 분	내 용	비고
A—2000	Analysis of Cylindrical Shells	
A—3000	Analysis of Spherical Shells	
A—4000	Pressure Stresses in Ellipsoidal Heads	준비중
A—5000	Analysis of Flat Circular Heads	
A—6000	Discontinuity Stresses	
A—7000	Thermll Stresses	
A—8000	Stresses in Perforlte Paltes	

설계는 먼저 내압을 고려한 두께의 결정으로부터 시작된다. 두께를 결정하는 공식은 다음의 표2와 같다.

표 2. 쉘두께(Pressure thickness)의 계산식

원 통 쉘
$t=\frac{pR}{Sm-0.5p}$ 또는 $t=\frac{pR_0}{Sm+0.5p}$
구 형 쉘
$t=\frac{pR}{2Sm-p}$ 또는 $t=\frac{pR_0}{2Sm}$

주 : t = 쉘 또는 경판의 두께, in.
p = 내압, psi
R = 쉘 또는 경판의 내반경, in.
R_0 = 쉘 또는 경판의 외반경, in.

Sm= 설계상 허용응력강도, psi

다음에는 관을 연결하기 위한 노즐부의 접속 또는 맨홀을 위한 구멍을 뚫게된다. 이런 구멍 중에서 구멍의 지름이 쉘 또는 경판의 반경에 비하여 아주 작은 때에는 보강이 요구되지 않지만 그렇지 않은 경우에는 보강이 필요하다. 보강이 요구되지 않는 구멍의 범위는 다음의 표3과 같다.

표 3. 보강이 필요없는 구멍의 관계

구 분	내 용
구멍이 1개인 경우	구멍의 지름 d가 $\sqrt{0.2}\sqrt{Rt}$ 보다 작거나 같을 때
구멍이 2개 이상인 경우	(1) 인접하는 두 구멍의 중심간의 거리가 $1.5(d_1+d_2)$이상 이어야 한다. (2) 보강이 없는 구멍의 집단은 $0.5\sqrt{Rt}$ 의 지름을 갖는 원 안에 있어야 한다.
구멍 또는 구멍집단과 다른 집단과의 거리	한 구멍의 주변 또는 구멍집단의 외주원(外周圓)으로부터 다른 구멍, 불연속부 또는 1차국부막응력이 $1.1Sm$을 넘는 부분과의 최소거리는 $2.5\sqrt{Rt}$ 이상으로 한다.

보강에 필요한 면적은 내압을 받을 경우 다음식에서 규정하는 면적 이상이어야 한다.

$$A = dtrF \cdots\cdots (1)$$

여기서,

d = 완성된 구멍의 지름 (in)

tr = 구멍이 없는 경우 1차일반막응력강도에 기준하여 요구되는 두께 (in)

F = 보정계수(Fig·NB-3332.2-1 이 적용되지 않는 모든 경우에는 1.00으로 한다 다만, 경판이 평판인 경우에는 0.5로 한다)

이 보강에 유효한 면적은 다음의 제한을 받는다.

(1) 보강에 필요한 면적의 2/3이상의 보강에 유효한 면적은 구멍의 중심으로 부터 다음의 계산식에 따라 계산한 값과 같은 거리안에 있어야 한다.

$$p = r+0.5\sqrt{Rt}$$

여기서 p는 거리이고 r은 구멍의 반경이다.

(2) 보강에 필요한 면적의 1/2이상의 보강에 유효한 면적은 구멍의 중심선 양쪽에 있어야 한다.

그림2에서는 보강면적의 계산방법을 설명해 주고 있다. 이 그림에서 보강에 유효한 면적은 빗금친 부분이며 이 면적의 총합이 식(1)로 주어지는 필요면적의 1/2보다 크면 된다.

이와 같이 보강이 끝나면 설계 사양에서 주어진 각종 운전조건과 하중상태에서 기준에 정해진 수치 이하임을 확인하는 응력해석이 이루어진다.

응력해석은 다음의 3구룹으로 대별하여 생각할 수 있다.

2-3. 강도해석

(a) 응력의 종류와 기호

응력해석에 사용되는 주된 응력의 종류와 기호는 다음과 같다.

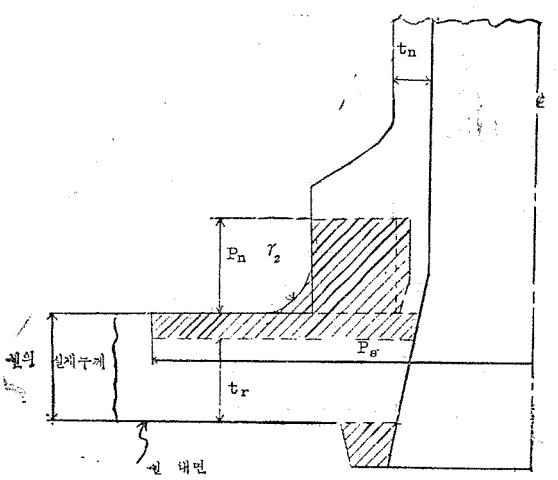

그림 2. 노즐부의 보강

p_m = 1차일반막응력
p_L = 1차국부막응력
p_b = 1차굽힘응력
p_e = 팽창응력
Q = 2차응력
F = 피이크 응력

(b) 용기에 작용하는 하중의 종류

용기에 작용하는 하중을 대별하면 다음과 같다

(1) 내압, 외압등 용기의 내외면에 균일하게 작용하는 하중
(2) 열 하 중
(3) 용기 및 배관의 자중
(4) 용기가 열팽창할 때 생기는 마찰반력
(5) 지진하중
(6) 노즐부 등에서의 배관의 열팽창에 의한 반력
(7) 보울트체결력, 나사체결력 등의 하중
(8) 그 밖의 기계적하중에 의한 진동, 추력 등에 의한 하중, 낙하물 등에 의한 충격적하중

(c) 응력강도의 한계

응력강도의 한계는 원칙으로 다음 표에 따른다

표 4. 응력강도의 한계

응력의 종류 / 상태의 종류	1차일반응력강도 Pm	1차국부막응력강도 PL	1차막응력+1차굽힘응력강도 PL+Pb	1차응력+2차응력강도 PL+Pb+Q	1차응력+2차응력+피이크응력강도 PL+Pb+Q+F
최고사용압력 및 자중, 그 밖의 기계적하중	Sm	1.5Sm	1.5Sm	—	—
운전상태	—	—	—	3Sm	$\Sigma^n vi \leqq 1$
시험상태	0.9Sy	—	1.35Sy		$i=1$

(비고) 윗 표에서 응력의 기호는 다음 과같다

Sm = 설계응력강도, psi
Sy = 항복응력, psi
Sa = 허용반복회수에 대응하는 반복 피이크응력강도의 값, psi
Salt = 교번응력강도 (NB-3216.1)
Vi = 개개의 Salt에 대한 피로손상계수
$v = \sum_{i=1}^{n} vi$ = n종류의 Salt에 대한 피로누적계수

그리고 지진을 고려할 경우 응력강도의 한계는 다음의 표5에 따른다.

표 5. 지진을 고려한 응력강도의 한계

종 별	하 중 의 조 합	산정응력	허용응력
	설계지진 + 설계하중	Pm	Sm
		PL+Pb	1.5Sm
	설계지진 + 운전하중	PL+Pb+Q	3Sm
로심구조물	설계지진 + 설계하중	최대응력[1]	SY
제어봉구동장치	설계지진 + 설계하중	Pm	Sm
		PL+Pb	1.5Sm

주 (1) 원칙적으로 1차응력으로 한다.

2-4. 피로해석

(d) 기계적하중에 의한 피이크응력

내압, 외력 등 기계적하중에 의한 피이크응력은 국부적인 구조상의 불연속에 대한 응력집중계수 및 특수한 형상의 용접부에서의 피로강도저하율로 부터 1차응력과 2차응력의 부과분으로 구하여 진다.

이들은 실험적으로 구한 피로강도저하율이 사용되지 않는 한, 이론적응력집중계수를 사용하여 산정한다. 그리고 다음 표의 좌란에 열거한 용기의 부분의 응력집중계수는 표에서 주는 값을 사용할 수 있다. 다만, 노즐과 용기쉘과의 연결부분에 대해서는 응력계수방법(NB-3338.2)으로 내압에 의한 피이크응력(이 경우에는 PL+Q+F)을 계산할 수 있다.

표 6. 응력집중계

용 기 의 부 분	응력집중계수
국부적인 구조상의 불연속부	5
보울트의 나사부	4
용기에 브래켓 및 래그 등을 부착하는 필레트 용접부	4

(b) 열에 의한 피이크응력

열에 의한 피이크응력에는 판두께방향의 온도분포에 따라 생기는 실제의 응력과 직선온도분포응력과의 차 및 응력집중등에 의한 응력의 부가분이 있다. 이들은 모두 구조물의 국소적인 응력이고 전체의 변형에는 기여하지 않는다.

(c) 피로해석

응력사이클이 2종이상이었을 경우에는 누적효과가 산정되어야 한다. 보기로 한 종류의 응력사이클이 응력진폭을 0에서 +60,000 Psi까지 1,000회 반복하고 다른 종류의 응력사이클이 응력진폭을 0에서 −50,000 Psi로 10,000회 반복한다면

1형 사이클 : $n_1 = 1,000$

$Salt_1 = (60,000+50,000)/2 = 55,000$Psi

2형 사이클 : $n_2 = 9,000$

$Salt_2 = (50,000+0)/2 = 25,000$Psi

이와 같이 계산한 Salti에 대하여 피로설계곡선(Fig. I-9-1~II-9-4)으로 부터 최대허용반복 수 Ni를 구하고 피로손상계수 Vi=ni/Ni를 계산한다. 피로누적계수 v는

$$= \sum_{i=1}^{n} vi$$

로 부터 구하며 이 값이 1.0이하 이어야 한다.

2-5. 열응력해석

(생 략)

2-6. 응력해석 장소

다음의 표7에서는 그림1에서 보여준 원자로용기의 응력해석장소를 설명한다.

표 7. 원자로용기의 응력해석 장소

응력해석계산장소	구 성 부 재	구조해석	열및피로해석
프랜지둘레	상부경판, 상부경판 프랜지, 상부쉘프랜지 상부쉘, 스터드, 너트,	○	○
냉각재입구노즐	입구노즐, 상부쉘, Safe end	○	○
냉각재입구노즐	출입노즐, 상부쉘, Safe end		
하부쉘과 경판접속부	하부쉘, 하부경친	○	○
안전주입용노즐	안전주입용노즐, 상부쉘, Safe end	○	○
제어봉구동장치 하우징	제어봉구동장치 heap adapter	○	○
계측용노즐	로내계장용 슬리이브, 하부경판	×	×
용기받침쇠	원자로 받침쇠, 상부쉘	×	○
로심받침쇠	하부로심지지주, 하부쉘, 하부경판	×	○
상부경판 들어올림골	상부경판	○	×

3. 응력해석방법

원자로압력용기는 그림 1에서 보여주는 원자로용기의 예와 같이 몇개의 쉘요소와 노즐도 구성되어 있다.

이들 쉘 요소는 압력, 기계적 하중 및 열적하중에 대하여 각각 변형량이 다르므로 용기로서 기하한적 연속성을 유지시키기 위하여 각 요소의 접속부에는 전단력(剪斷力)과 굽힘모우멘트가 작용하게 된다.

이들 전단력과 굽힘모우멘트는 쉘의 평형방정식 만으로는 계산되지 않고 접속에서의 변형의 연속조건이 주어져야만 결정된다. 따라서 압력용기는 부정정계(不靜定系)이며 위의 접속9에서의 전단력과 굽힘모우멘트를 간단히 불정정력이라고도 부른다.

<다음 호에 계속>