

원자로용기의 압력·온도 운전한계곡선에 대한 작성절차

김 일·최석남·박성호

Procedure for the Generation of Pressure/ Temperature Operation Limit Curves for Reactor Vessel

Yil Kim · Seog-Nam Choi · Sung-Ho Park



- 김 일 (한국원자력연구소 계통기계설계실)
- 1957년생.
- 파괴역학분야의 피로파괴를 전공하였으며, 압력용기의 건전성평가에 관심을 가지고 있다.



- 최석남 (한국원자력연구소 계통기계설계실)
- 1962년생.
- 파괴역학분야의 탄소성파괴를 전공하였으며, 기계구조물의 균열거동해석에 관심을 가지고 있다.



- 박성호 (한국원자력연구소 계통기계설계실)
- 1953년생.
- 원자력발전소 기기들의 구조해석 및 해석업무를 하고 있으며, 동역학해석에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

그림 1에 나타난 원자로용기는 핵연료를 내장하는 압력용기로서 핵분열을 이용하여 전력생산에 필요한 열을 발생하기 때문에 원자력발전소의 심장과 같은 부품이다. 따라서 원자로용기는 원자력발전소의 수명기간(약 40년) 동안 충분한 건전성이 유지되도록 설계되고 운전되어야 한다. 운전중에 원자로용기의 건전성을 확보하기 위하여 원자로벽에 임의 크기의 결함을 가정하고 운전압력 및 온도변화에 대해 가상결함이 성장하지 않도록 하고 있다.

원자로용기는 정상출력시 고온상태(550°F

~650°F)에 있다. 따라서 정상출력시에는 원자로용기 재료의 파괴인성치가 워낙 크고 내압(2250psig)에 의한 후프응력(hoop stress)만이 존재하기 때문에 어느 정도의 결함이 있다고 가정하여도 건전성 확보에 큰 문제가 없다. 그러나 가열 및 냉각시(70°F~650°F)에는 후프응력과 함께 열응력이 가해지고 원자로벽의 온도변화에 따라 파괴인성치가 변화하기 때문에 임의 크기의 결함에 대한 건전성 확보가 용이하지 않다. 원자로용기의 가열 및 냉각시에 건전성을 확보하기 위해서 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III Appendix G⁽¹⁾(이하 ASME코드)에서는 선형탄성파괴역학에 기초를 둔 해석 절차를 제시하고 있다. 이러한 절차를 사용

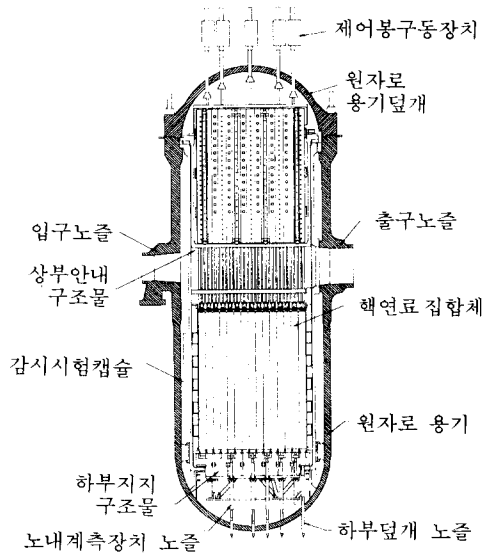


그림 1 원자로용기

하여 원자로용기의 가열 및 냉각시 압력 및 온도변화에 제한을 두는데 이러한 제한곡선을 압력·온도 운전한계곡선(이하 압력·온

도 곡선)이라고 한다.

이 글에서는 노심대(Beltline : 핵연료 주위의 원자로용기 부위로서 중성자 조사를 받아서 원자로용기 수명기간중 원자로재료의 취화가 발생하는 곳)와 노즐에 대한 압력·온도 곡선을 작성하기 위해 ASME코드가 제안한 해석절차를 기술하고 원자로용기에 적용한 예를 살펴보고자 한다.

2. 노심대에 대한 압력·온도 곡선 작성절차

2.1 파괴인성치

그림 2는 원자로용기의 재질(일반적으로 SA-533 Grade B, SA-508 Class 1, SA-508 Class 2, SA-508 Class 3)에 대한 파괴인성치를 보인 것으로 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$K_{IR} = 26.78 + 1.223 \exp [0.0145(t - RT_{NDT} + 160)] \quad (1)$$

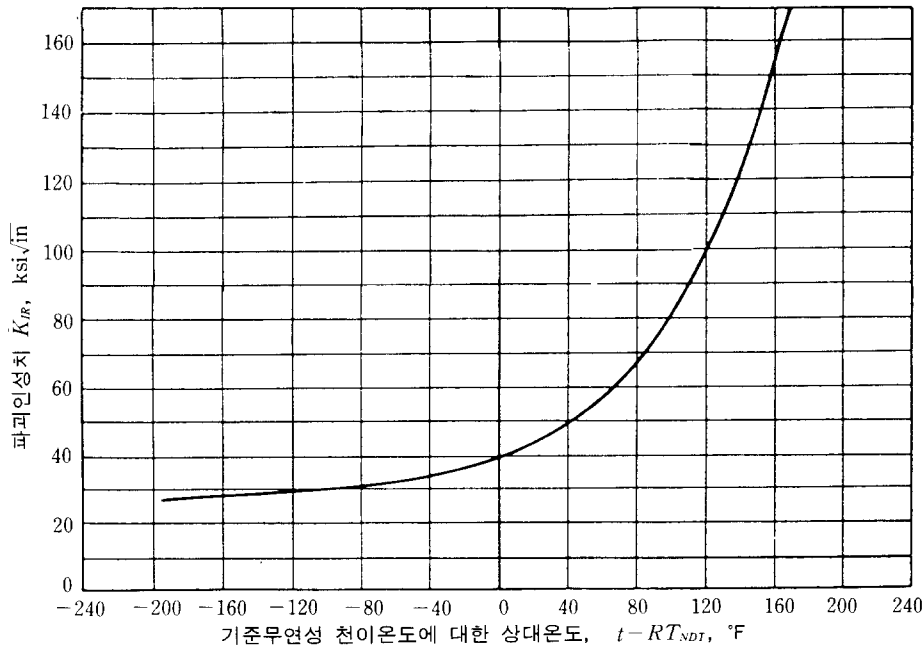


그림 2 원자로용기 재질의 파괴인성치

여기서, K_{IR} 은 재료의 파괴인성치로서 단위는 $\text{ksi}\sqrt{m}$ 이다. ASME코드에서 제시하고 있는 K_{IR} 은 K_{IC} (정적하중상태에서의 파괴인성치), K_{Ia} (동적하중상태에서 파괴인성치), K_{Ia} (성장중인 결함이 정지할 수 있는 파괴인성치) 등 여러가지 파괴인성치를 조합한 후 가장 보수적인 데이터를 이용하여 선정된 파괴인성치이다. t 는 결함선단에서의 온도로서 단위는 °F이다.

RT_{NDT} 는 재료의 초기 소기준무연성 천이 온도(reference nil-ductility transition temperature)와 중성자조사에 의한 재료의 기준 무연성 천이온도 변화량을 고려한 값으로 단위는 °F이다. 재료의 초기무연성 천이온도는 ASME코드의 규정(ASME코드 NB-2331)에 따라 측정되어지며 중성자조사에 의한 기준 무연성 천이온도 변화에 대해서는 본 특집의 다른 글에서 상세히 기술되고 있기 때문에 이글에서는 생략하기로 한다.

2.2 가상결함 크기

원자로 벽두께를 T 라 할 때, 결함깊이(crack depth)가 $T/4$ 이고 결함길이(crack length)가 $3T/2$ 인 표면반타원결함을 가정한다(가상결함의 형상비, aspect ratio=결함깊이/결함길이=($T/4$)/($3T/2$)=1/6). 원자로 벽두께가 4인치 이하인 경우와 12인치 이상인 경우에는 결함을 측정하는 비파괴검사기술에 큰 차이가 없기 때문에 원자로 벽두께가 4인치 이하인 경우에는 가상결함깊이를 1인치로 하고 원자로 벽두께가 12인치 이상인 경우에는 가상결함깊이를 3인치로 한다.

2.3 내압에 대한 응력확대계수 계산

ASME코드에서는 노심대에서 발생하는 막응력(membrane stress)에 의한 모드 I 응력확대계수(이하 응력확대계수)를 다음과 같이 계산한다.

$$K_{Im} = M_m \times \sigma_m \quad (2)$$

여기서, K_{Im} 은 막응력에 의한 응력확대계수로서 단위는 $\text{ksi}\sqrt{\text{in}}$ 이다. M_m 은 막응력수정계수로서 그림 3에 나타나 있으며 σ_m 은 내압에 의한 막응력으로 단위는 ksi이다.

ASME코드에서 제안한 식은 WRC Bulletin 175⁽²⁾를 근거로 하여 만들어진 것으로 그 내용을 요약하면 다음과 같다. 막응력에 의한 표면반타원결함의 응력확대계수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$K_{Im} = \sigma_m^{1.1} M_k \sqrt{\pi a / Q} \quad (3)$$

여기서, σ_m 은 막응력(단위: ksi)이고 M_k 는 수정계수이며 a 는 결함깊이(단위: 인치)이다. Q 는 형상계수(crack shape factor)로서 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$Q = [\Phi^2 - 0.212(\sigma_m/\sigma_y)^2] \quad (4)$$

여기서, Φ 는 식 (5)와 같으며, σ_y 는 재료의 항복강도(단위: ksi)이고 b 는 결함길이(단위: 인치)이다. θ 는 결함선단에 따른 원주각이다.

$$\Phi = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \left[\frac{b^2 - \theta^2}{b^2}\right] \sin^2 \theta} d\theta \quad (5)$$

식 (3)에서 가상결함 ($a=T/4$, 결함형상비=1/6, $M_k=1.075$)을 적용하면 다음식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} K_{Im} &= \sigma_m^{1.1} M_k \sqrt{\pi a / Q} \\ &= \sigma_m^{1.1} 1.075 \sqrt{\pi (T/4) / Q} \\ &= \sigma_m 1.048 \sqrt{T / Q} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)를 식 (2)와 비교하면 $M_m=1.048/\sqrt{Q}$ 임을 알 수 있으며 그림 3에서 M_m 이 \sqrt{T} 의 함수로 표시된 이유를 알 수 있다.

2.4 열응력에 대한 응력확대계수 계산

ASME코드에서 제안한 식은 다음과 같다.

$$K_{It} = M_t \times \Delta t \quad (7)$$

여기서, K_{It} 은 열응력에 대한 응력확대계수(단위: $\text{ksi}\sqrt{\text{in}}$)이고 M_t 는 수정계수로서 그림

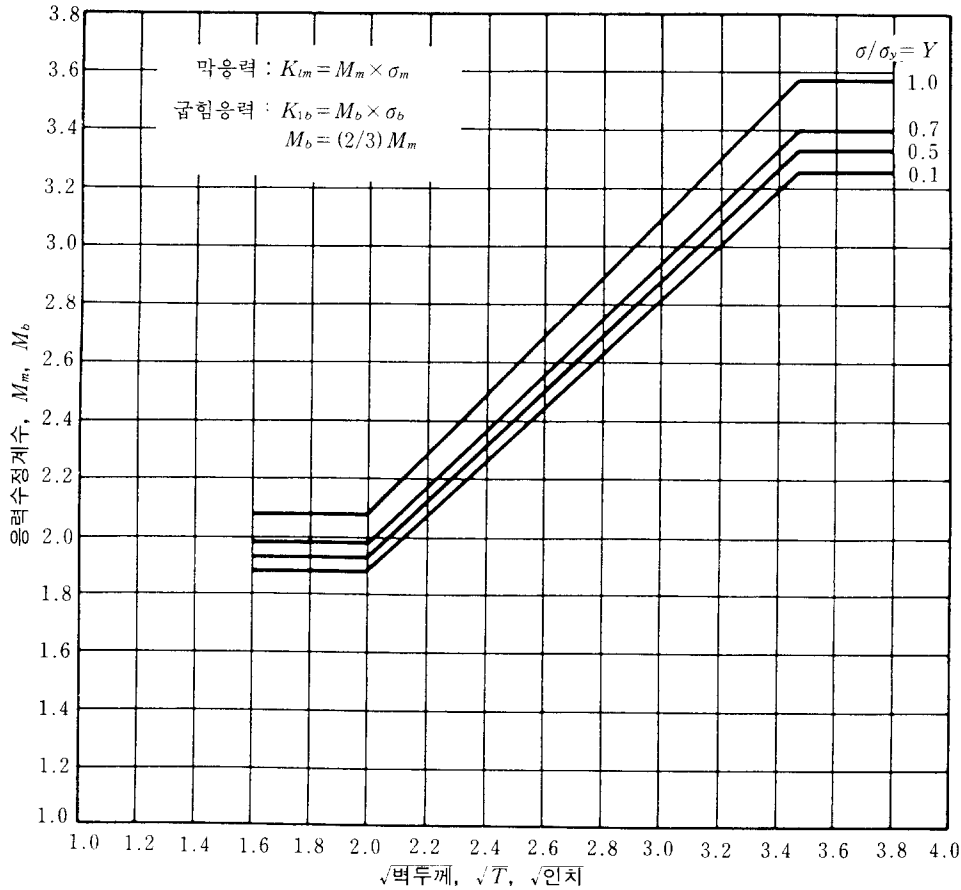


그림 3 응력수정계수

4에 나타나 있다. Δt 는 원자로 내면과 외면의 온도차(°F)이다.

식 (7)은 원자로벽의 온도차를 알고 있으면 열응력을 구하지 않고도 쉽게 응력확대계수를 구할 수 있다는 장점이 있으나 너무 보수적인 값을 가진다는 단점이 있다. 또 다른 계산방법으로 열응력을 직접 구하여 계산하는 방법이 있다. 열응력은 보통 굽힘응력의 형태로 나타나기 때문에 굽힘응력에 대한 ASME코드의 제안식을 이용하여 열응력에 대한 응력확대계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_{lb} = M_b \times \sigma_b \quad (8)$$

여기서, K_{lb} 는 굽힘응력에 대한 응력확대계수(단위 : ksi $\sqrt{\text{in}}$)이고 M_b 는 굽힘응력 수정계수로서 그림 3에 나타나 있다. σ_b 는 굽힘응력(또는 열응력)으로 단위는 ksi이다. 그림 3에서 굽힘응력 수정계수 $M_b = 2/3 M_m$ 으로 기술되어 있는데 그 배경은 다음과 같다. WRCB175⁽²⁾에 따르면 굽힘응력에 대한 응력확대계수는 다음 식과 같다.

$$K_{lb} = \sigma_b M_B \sqrt{\pi a / Q} \quad (9)$$

여기서, M_B 는 수정계수로서 가상균열($a = T/4$, 결함형상비=1/6)의 경우, $M_B = 0.785$ 이다. 따라서 식 (9)를 다시 쓰면 다음과 같다.

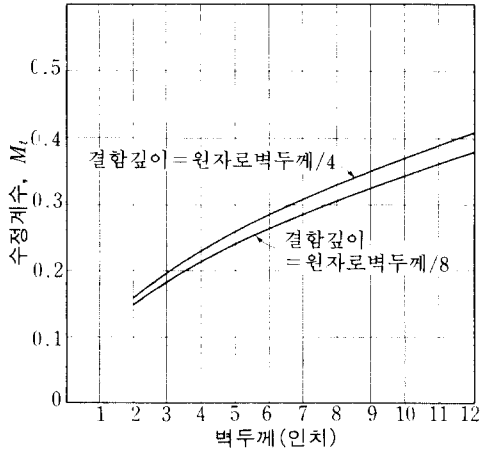


그림 4 온도차에 대한 수정계수

$$K_{lb} = \sigma_b \cdot 0.785 \sqrt{\pi(T/4)/Q}$$

$$= \sigma_b \cdot 0.696 \sqrt{T/Q} \quad (10)$$

식 (8)과 식 (10)을 비교하면, $M_b = 0.696/\sqrt{Q}$ 가 된다. 따라서 식 (6)과 비교하면 $M_b/M_m = 0.696/1.048 = 2/3$ 가 된다.

2.5 최대허용압력 계산

열응력에 대한 응력확대계수, K_{lt} (2.4절) 및 재료의 파괴인성치, K_{lr} (2.1절)을 구한 후에 내압을 상승시키면서 K_{lm} 을 계산하여 다음 식이 만족되는 최대허용압력을 구한다.

$$2K_{lm} + K_{lt} \leq K_{lr} \quad (11)$$

여기서, K_{lm} 에 2를 곱한 것은 막응력에 대해 안전여유를 고려한 것이다. 식 (11)을 만족하는 최대허용압력을 냉각재의 온도에 따라 도식하면 노심대의 압력·온도 곡선을 얻는다.

2.6 노심대의 압력·온도 곡선 예

원자로용기의 노심대에 상기 절차를 적용하여 압력·온도 곡선을 구해보자. 해석에 필요한 데이터들은 다음과 같다.

- 노심대 내부반경 = 82.015인치
- 노심대 외부반경 = 90.075인치

- 노심대 벽두께 (T) = 8.06인치
- 운전압력 = 2250 psig
- 냉각재 초기온도 = 70°F
- 냉각재 최종온도 = 650°F
- 기준무연성 천이온도 (T/4) = 75°F
- 기준무연성 천이온도 (3/4T) = 67°F
- 가열 및 냉각률 = 시간당 100°F

그림 5와 그림 6은 가열 및 냉각시의 압력·온도 곡선을 각각 나타낸 것으로 곡선의 우측은 운전이 허용되는 영역이고 좌측은 운전이 허용되지 않는 영역이다. 그림 5와 그림 6에서 노심대 내면결합이라고 표시되어 있는 곡선은 가상결합이 노심대 내면에 위치하는 경우의 해석결과를 말하는 것이고 노심대 외면결합이라고 표시되어 있는 곡선은 가상결합이 노심대 외면에 위치하고 있는 경우의 해석결과를 말한다. 또한 정상상태라고 표시되어 있는 곡선은 노심대가 정상상태 (steady state)에 도달하는 경우, 다시 말해서 원자로벽의 열응력이 무시된 경우의 압력·온도 곡선을 나타낸 것이다. 그림 5에서 보면 노심대 외면결합에 대한 곡선이 내면결

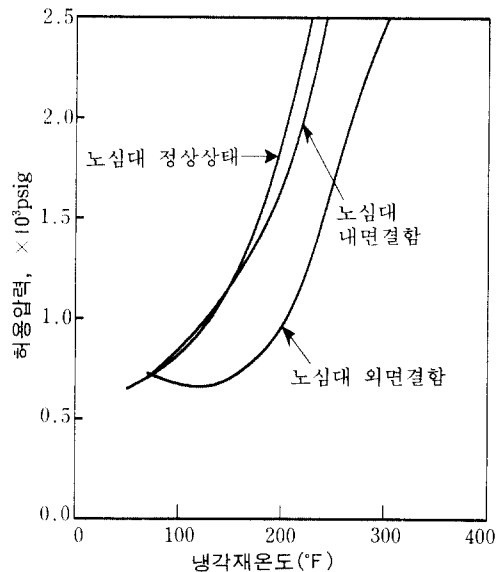


그림 5 가열시의 노심대 압력·온도 곡선

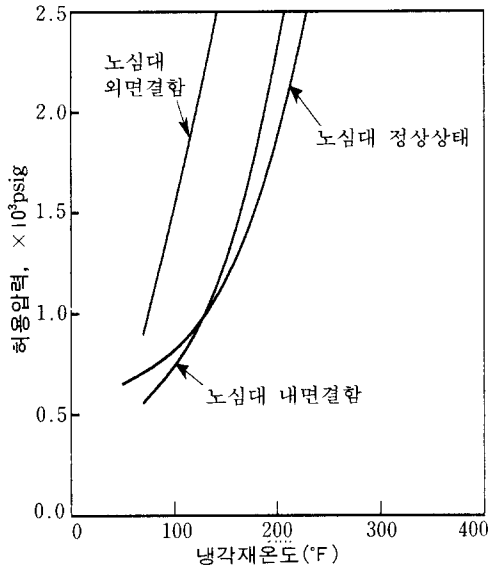


그림 6 냉각시의 노심대 압력 · 온도 곡선

함이 있는 경우보다 더 제한적인데 그 이유는 가열시 열응력이 노심대 내면에는 압축응력으로 걸리나 외면에는 인장응력으로 걸리기 때문이다. 가열시와 반대로 냉각시에는 노심대 내부에 인장응력이 걸리고 외면에는 압축응력이 걸리기 때문에 그림 6에서와 같이 내면결함이 있는 경우의 압력 · 온도 곡선이 외면결함이 있는 경우보다 더 제한적이다.

3. 노즐에 대한 압력 · 온도 곡선 작성절차

3.1 파괴인성치

노즐에 대한 파괴인성치는 2.1절에 기술된 내용과 동일하다. 단, 노즐은 중성자조사량이 많지 않기 때문에 기준무연성 천이온도의 변화가 거의 없다. 따라서 식 (1)의 RT_{NDT} 는 재료의 초기기준무연성 천이온도를 적용한다.

3.2 가상결함크기

원자로 셀두께를 T 라 할 때, 결함깊이가

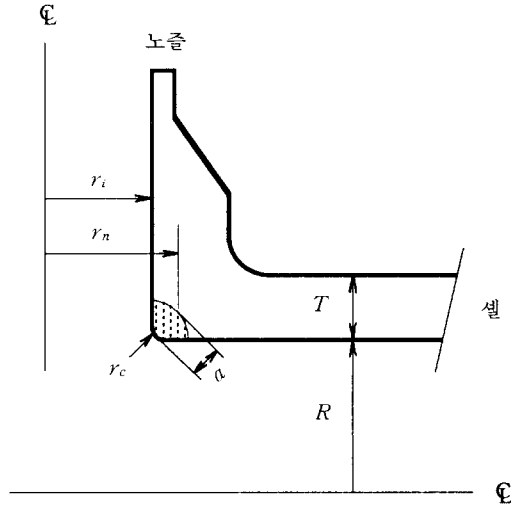


그림 7 노즐형상 및 가상결함 위치

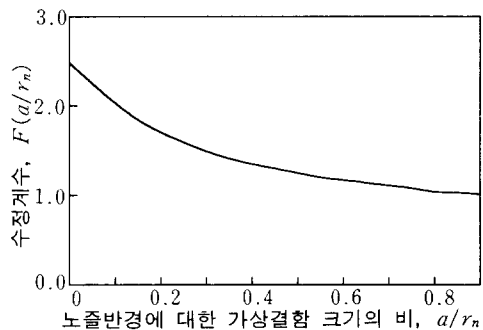


그림 8 노즐의 응력확대계수

$T/10$ 인 표면결함을 가정한다(그림 7). 그림 7에서 보듯이 결함의 위치는 응력집중이 가장 큰 노즐머서리에 위치하고 있는 것으로 가정한다.

3.3 내압에 의한 응력확대계수 계산

응력확대계수는 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$K_{Im} = F(a/r_n) \times \sigma m \sqrt{\pi a} \quad (12)$$

$$r_n = r_i + 0.29 r_c$$

여기서, K_{Im} 은 내압에 의한 응력확대계수로

서 단위는 $\text{ksi}\sqrt{\text{in}}$ 이다. $F(a/r_n)$ 은 노즐형상으로 인해 셀부분의 막응력에 고려되는 수정 계수로서 그림 8과 같다. σ_m 은 셀부분의 막응력(단위: ksi)이고 a 는 결함깊이(단위: 인치)이다. r_n 은 노즐의 모서리 곡률반경(그림 7의 r_c)을 고려하여 계산된 노즐반경(단위: 인치)으로 노즐중심으로부터 노즐내면과 셀의 내면이 수직으로 만나는 지점까지의 가상 거리를 의미한다.

3.4 열응력에 대한 응력확대계수
식 (8)을 이용하여 계산한다.

3.5 최대허용압력 계산

식 (11)를 이용하여 계산한다. 단, 식 (11)에서 K_{Im} 의 계산에는 식 (12)를 이용하고 K_{Ic} 의 계산에는 식 (8)을 이용한다.

3.6 노즐의 압력·온도 곡선 예

해석에 필요한 데이터들은 다음과 같다.

- 노즐재료 = SA-508 Class 3
- 셀 두께 (T) = 10.19인치
- 셀내부 반경 (R) = 81.50인치
- 가열 및 냉각률 = 시간당 100°F
- 입구노즐
 - 모서리 반경 $r_c = 1.25$ 인치
 - 내부반경 $r_i = 17.875$ 인치
 - 초기기준무연성 천이온도 $RT_{NDT} = 10^\circ\text{F}$
- 출구노즐
 - 모서리 반경 $r_c = 1.26$ 인치
 - 내부반경 $r_i = 22.59$ 인치
 - 초기기준무연성 천이온도 $RT_{NDT} = -10^\circ\text{F}$

가열 및 냉각 노즐의 압력·온도 곡선은 각각 그림 9, 그림 10과 같다.

3.7 원자로용기에 대한 압력·온도 곡선

지금까지는 노심대와 노즐 각각에 대한 압력·온도 곡선을 기술하였다. 그러나 원자로 용기의 운전시에는 노심대와 노즐이 동시에

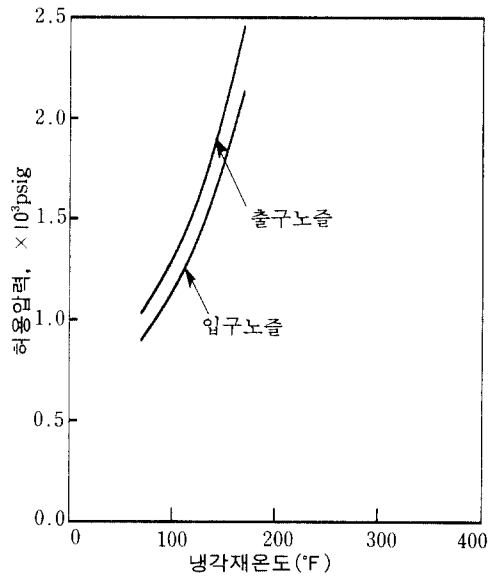


그림 9 가열시의 노즐 압력·온도 곡선

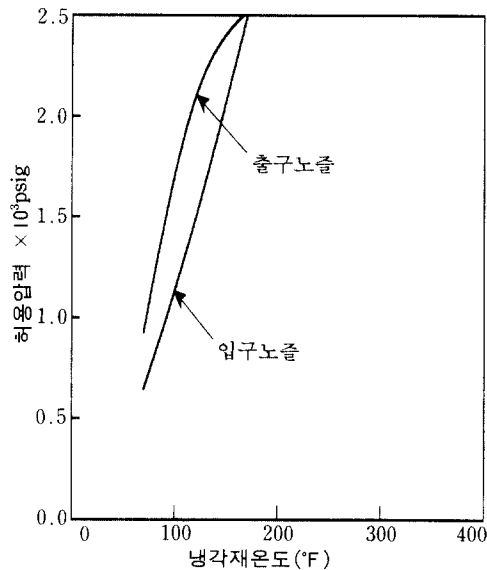


그림 10 냉각시의 노즐 압력·온도 곡선

가열되고 냉각되기 때문에 계산된 가열 및 냉각곡선을 모두 취합하여 가장 제한적인 곡선을 도출해야 한다. 그림 11은 노심대와 노즐의 가열시 압력·온도곡선(그림 5와 그림 9)을 모두 보인 것이다.

그림 11에서 가장 제한적인 곡선을 굵은 실선으로 표시하였다. 노심대 외면에 결함이 있는 경우가 가장 제한적임을 알 수 있다. 그림 12는 노심대와 노즐의 냉각시 압력·온도곡선(그림 6과 그림 10)을 모두 보인 것이

다. 그림 12에서 가장 제한적인 곡선을 굵은 실선으로 표시하였다. 그림 11에서 보면 냉각재온도가 낮은 경우(<150°F)에는 노심대 내면에 결함이 있는 경우가 가장 제한적이거나 온도가 높아짐(>150°F)에 따라 정상상태인 경우가 더 제한적임을 알 수 있다.

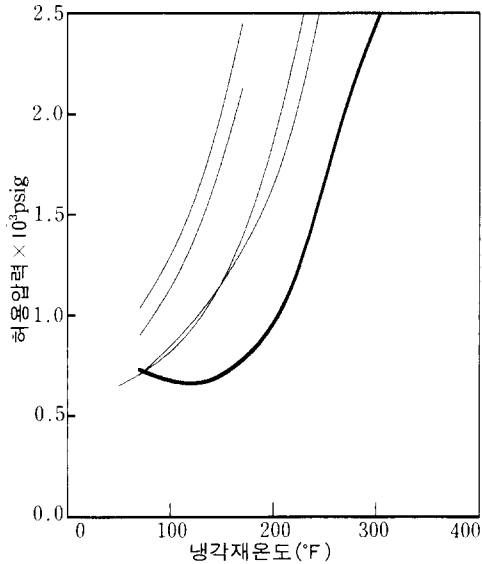


그림 11 가열시 원자로용기의 압력·온도 곡선

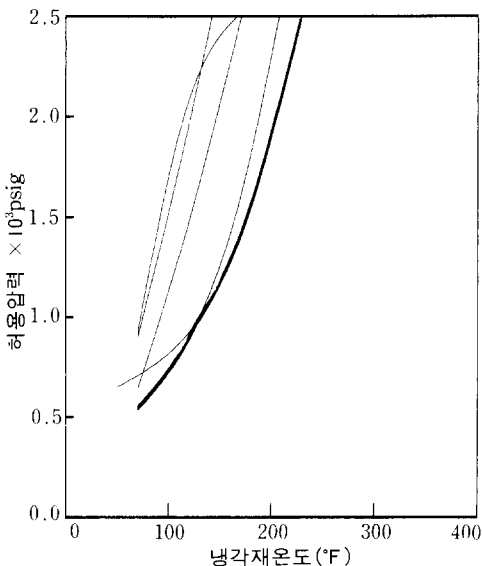


그림 12 냉각시 원자로용기의 압력·온도 곡선

4. 맺음말

원자로용기의 노심대와 노즐의 압력·온도 곡선에 대한 배경 및 적용을 살펴보았다. 그러나 원자로용기의 실제 압력·온도 곡선^(3,4)은 노심대와 노즐 이외에도 플랜지, 수압 및 수밀시험, 노심임계, 최저운전온도, 계기오차 등을 고려해야 한다. 이글에서는 시간당 100°F의 가열 및 냉각에 대해서만 고려하였으나 시간당 20°F, 40°F 등 다른 가열 및 냉각률에 대해서도 고려하여야 한다. 따라서 원자로용기의 실제 압력·온도 곡선은 이글에서 기술한 것보다 훨씬 복잡하다. 그러나 어느 경우에라도 압력·온도 곡선을 구하는 기본적인 이론 및 방법은 이글에서 기술한 내용에 기초를 두고 있다.

최근들어 국내 원자력발전소의 가동경험이 축적됨과 동시에 국내기술이 중심이 된 원자력발전소의 건설이 계속되고 있다. 그 반면에 안전성 측면에 대한 논란과 부지선정에 따른 주민들의 반발 등이 크게 대두되고 있다. 따라서 원자력발전소 부품에 대한 건전성 확보가 중요함은 두말할 나위가 없다. 건전성 관련 연구 및 학문분야 특히 파괴역학을 전공하신 분들의 노력과 관심이 요청된다.

참고문헌

- (1) "Protection Against Nonductile Failure," ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III Appendix G, 1989.
- (2) "PVRC Recommendations on Tough-

- ness Requirements for Ferritic Materials,"
Welding Research Council Bulletin 175,
1972.
- (3) Hazelton, W. S., et al. 1972, "Basis for
Heatup and Cooldown Limit Curves,"
Westinghouse Electric Co., WCAP-7924.
- (4) McIntyre, T., 1992, "System 80+ RCS
Pressure-Temperature Limits," ABB
Combustion Engineering Co., 00000-FS-C-
029. 