

중수로 압력관 두께 변화 예측

송택호, 장창희
전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원전수명관리 측면에서 경수로와 중수로를 비교해 보면, 경수로의 경우 원자로 압력용기가 주요기기중 가장 중요한 위치에 있는 반면에 중수로는 압력관이 가장 중요한 기기이다. 압력관 손상종류는 DHC와 dimensional change로 크게 분류되는데 dimensional change는 creep, 부식마모, 처짐현상으로 구분된다. 본 논문에서는 creep과 부식마모 현상 발생시 예상되는 압력관 두께 변화를 계산하였으며, 중수로 수명관리 측면에서 가동 시작년도부터 50년까지 변화되는 두께를 ASME 허용기준과 비교하였다. creep과 부식마모에 의하여 감소 예상되는 압력관 두께는 50년까지 모두 ASME 허용 Margin안에 있음을 볼 수 있었다.

1. 서론

세계적으로 상업 운전중인 중수로는 현재 중간수명인 20년 안팎에 도달하고 있으며, 그 중 Pickering 1호기는 98년 현재 27년째 운전중이다[1].

원전 수명관리 측면에서 볼 때 경수로의 경우 원자로 압력용기가 주요기기중 가장 중요한 위치에 있는 반면에 중수로의 경우에는 압력관이 가장 중요하다. 압력관 손상종류는 DHC(Delayed Hydride Cracking)와 Creep과 부식마모 현상에 의한 dimensional change로 크게 분류된다.

DHC는 중수소(Deuterium, D)가 압력관 내부에 침입하여 Hydride를 형성함으로써 발생하며, D가 많이 들어가면 들어갈 수록 DHC 균열발생 확률은 커지게 된다. Hydride의 형성 확률은 인장응력집중 및 관벽의 높은 온도구배에 의해 지배된다. 인장응력집중이 크면 클수록, 온도구배가 크면 클 수록 하이드라이드 형성 확률은 높아진다. 스페이스 이동에 의하여 뜨거운 압력관과 차가운 칼렌드리아관이 접촉하는 현상이 발생한다면 접촉부분에 높은 온도구배가 형성되어 취성이 매우 큰 Brittle hydride blister가 발생하면서 LBB 없이 곧바로 관파열이 발생하는 사고가 난다. Pickering A 호기에서 DHC에 의한 압력관 파단사고가 일어났고, Ontario Hydro사에서는 Pickering A 1호기 압력관을 1985년에, 2호기 압력관을 1985년에, 3호기 압력관을 1989년에, 4호기 압력관을 1991년에

각각 대량 교체하였다[2].

교체전 Pickering A 원전에서 사용한 압력관 재질은 Zr-2이었으며 Fuel Channel에는 2개의 스페이서가 사용되고 있었다. 교체시 DHC 저항성이 큰 Zr-2.5Nb 압력관을 설치하였으며, 스페이서도 기존 2개에서 2개를 더 넣었다. 압력관 파단사고후 DHC에 대해 많은 연구가 진행되었으며 대처방안도 상당히 수립되었다.

압력관 dimensional change는 axial creep, circumferencial creep, 부식마모, 처짐현상으로 구분된다. Creep 변형량은 중성자속, 온도, 응력과 함수관계를 보인다. creep 종류는 방향에 따라 axial creep과 circumferencial creep으로 구별된다. 운전중인 중수로 압력관에서 axial creep은 연간 약 3~5 mm 정도, circumferencial creep은 원주길이의 약 0.1% 정도 발생한다고 보고되고 있다[2]. 운전중 압력관을 채취 분석한 연구에서, 연간 부식마모율은 3micron 정도로 측정되고 있다[3]. 압력관 설계시 설계여유도는 axial creep 150mm, circumferencial creep 2.3% 로, 부식마모에 대비해서는 0.2mm를 더하는 것으로 각각 설계되었다[2]. 이 설계여유도는 80% 가동율로 30년간 운전했을 때의 체적변형을 고려한 것이며, 운전중 실제 체적변형량이 설계허용치 이상이 된다면 설계 수명이전이라도 압력관은 교체될 수 밖에 없다.

그런데, 압력관 체적이 일정한 상태에서 axial & circumferencial creep이 일어난다면 압력관 두께는 감소할 것으로 예상된다. creep이외에도 부식마모에 의해 두께 감소가 일어날 것으로 예상된다. 본 논문에서는 creep과 부식마모 현상 발생시 예상되는 압력관 두께 변화를 계산하였으며, 중수로 수명관리 측면에서 가동시작년도부터 50년까지 변화되는 두께를 ASME 허용기준과 비교하였다.

2. Creep과 부식마모 현상에 의한 Tube 두께 변화량

월성 압력관 dimension은 길이 약 6.3m, 내경 약 10.3. cm, 두께 약 4mm로 구성되어 있다. 중수로 50년 운전 중 Creep 발생시에 감소되는 압력관 두께를 계산하기 위해 압력관 부피, 길이, 직경의 상관관계로 부터 유도된 아래의 계산식을 사용하였다.

$$\text{압력관두께} = [C/(2\Pi)] - \sqrt{(C/(2\Pi))^2 - V/(\Pi L)} \text{----- (1)}$$

여기서,

V = 압력관 부피(교체부분) = 상수

L = 압력관 길이 = 변수

\Pi = 원주율 = 상수

C = 바깥 원주길이 = 변수

이 식에서 볼 수 있듯이, 압력관 두께는 원주와 길이의 함수이다. axial creep은 연간 약 3~5 mm 정도, circumferencial creep은 원주길이의 약 0.1% 정도 발생한다고 보고되고 있으며[2], 이렇게 보고되고 있는 실측치를 반영하여 본연구의 두께 계산에서는 원주가 연간 0.1% 늘어나고, 길이가 연간 5mm 증가한다고 가정하여, t year 후의 길이와 원주를 다음식 2와 3으로 계산 하였다.

$$L_t = L_i + 5t \text{-----} (2)$$

$$C_t = C_i + 0.1t \text{-----} (3)$$

where,

L_t = length after t year (mm)

L_i = initial length (mm)

C_t = circumference after t year (mm)

C_i = initial circumference (mm)

t = operation year

가동시작년도에서 50년 사용년도까지 변화되는 원주와 길이를 2와 3식을 통하여 계산한 뒤 (1)식을 통하여 두께 변화를 계산 하였으며 그 결과를 Figure 1에 도시하였다.

Figure 1에 세개의 곡선을 나타내었는데, 첫 상단 곡선은 axial creep에 의한 두께 변화를, 두번째 곡선은 circumferencial creep에 의한 두께 변화를, 세번째 곡선은 axial creep, circumferencial creep, 부식마모 모두에 의한 두께 변화를 각각 보여주고 있다. 이 그림에서 보듯이, 압력관을 50년 사용하면 최고 0.4mm 정도까지 두께는 감소한다.

그러나 실제 압력관에서는 발생하는 creep은 전체길이에서 균등하게 발생하는 것이 아니고 길이방향에 따라 그 정도가 다르다. Figure 2에서 볼 수 있듯이, creep이 크게 일어나는 부분은 전체길이의 30% 정도 길이에 해당되는 중앙부분이다. 이 분포는 H3DMAP이라는 전산코드로 예측된 것이며 Pickering 압력관 비파괴 검사 결과로부터 그 분포양상이 확인된 것이다[5,6].

Pressure Tube creep에 의한 형상 변화가 30% 길이에서만 일어난다고 보수적으로 가정하고 이 길이부분의 두께가 얼마나 크게 변화되었는가를 계산하여 Figure 3에 도시하였다. Figure 3에서 볼 수 있듯이, 압력관 creep이 중앙부분에서 집중적으로 일어난다고 가정한 경우에는 압력관 전체에서 균등하게 creep이 일어난다고 가정한 경우보다 약 2배 가량 더 큰 두께 감소결과가 나왔다. 이렇게 두께가 운전년수에 따라 변하기 때문에 장기 사용시에 두께 감소가 허용치 이내에 있는가를 검증하기 위하여 다음과 같이 ASME의 최소허용두께와 상기결과를 비교분석 하였다.

3. ASME Pressure Tube 최소허용두께

압력관 최소허용두께는 ASME NB-3641.1에 의거 아래의 수식(4)를 이용하여 계산하였다[4].

$$T_m = \text{the minimum required wall thickness} \\ = PD/[2(S_m + P_y)] + A \text{-----}(4)$$

where,

P = Internal Design Pressure, Mpa

D = Outer Diameter of the tube

S_m = Maximum allowable stress intensity,

$y = 0.4$

A = An additional thickness to provide for material removed in erosion-corrosion etc.

월성 2/3/4호기 FSAR에서 발췌한 아래의 데이터를 사용하여 ASME 최소허용 압력관 두께를 구하였다.

위 식 (4)에 대입하였다.

Diameter = 214.4 mm

$S_m = 480$ MPa

$P = 11$ MPa

$y = 0.4$

$A = 0.203$

계산 결과, ASME 규정 최소허용 압력관 두께 값은 2.434 mm로 나타났다. 이 계산결과를 Figure 1과 3에 각각 도시하였다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 압력관 전체에서 균등하게 creep이 일어난다고 가정한 경우에는 50년 운전시 최고 0.4mm 정도까지 두께가 감소하고, 압력관 creep이 중앙부분에서 집중적으로 일어난다고 가정한 경우에도 0.7mm 정도까지 두께가 감소하지만 ASME 기준치는 충분히 만족한다.

따라서, 압력관 체적이 일정한 상태에서 axial & circumferencial creep이 일어남으로써 발생하는 두께 감소는 평가 결과 50년 이상 운전시에도 ASME 허용기준안에 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 creep과 부식마모 현상 발생시 예상되는 압력관 두께 변화를 계산하였으며, 중수로 수명관리 측면에서 가동시작년도부터 50년까지 변화되는 두께를 ASME 허용기준과 비교하였다. 가동시작년도부터 50년까지 계산된 두께는 압력관 전체에서 균등하게 creep이 일어난다고 가정한 경우와 압력관 creep이 중앙부분에서 집중적으로 일어난다고 가정한 경우 모두 ASME 최소허용 두께를 만족하였다.

References

1. Edward J. Dunstan, *Regulatory aspects of nuclear plant life management*, International conference and exhibition of Nuclear PLIM & PLEX, 1995.
2. W.R. Clendening, *Assessment of safety margins and residual life of CANDU Pressure tubes*, IAEA Presentation material, 1996.
3. C.K. Chow, *Properties of an irradiated heat-treated Zr-2.5Nb Pressure tube Removed from the NPD reactor*, Zirconium in the nuclear industry, eleventh international symposium, ASTM STP 1295, 1996.
4. ASME, *Section III, Division 1 Subsection NB-3000*, 1986.
5. N. Christodoulou, *Modeling In-reactor Deformation of Zr-2.5Nb Pressure Tube in CANDU Power Reactors*, Zirconium in the nuclear industry; eleventh symposium, ASTM STP 1295, 1996.
6. G. D. Moan, C. E. Coleman, *LBB in the Pressure Tubes of CANDU Reactors*, International Journal of pressure Vessel and Piping Vol 43(1990).

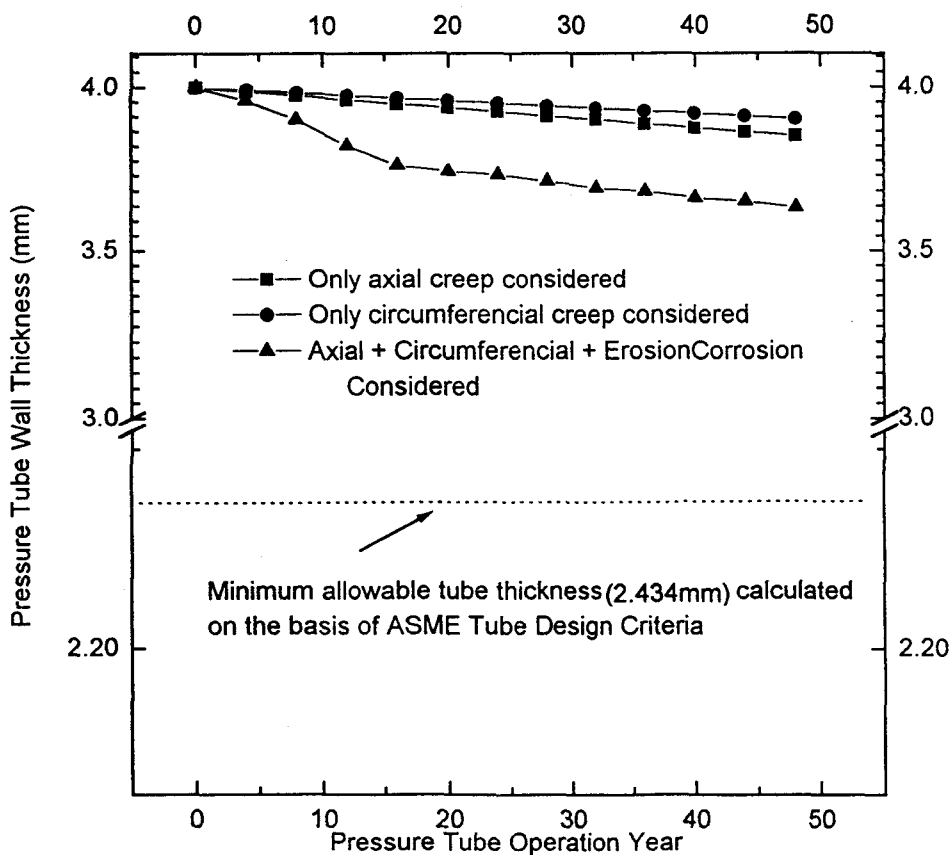


Figure 1. Prediction of Pressure Tube Wall Thickness Change for 50 Year of Reactor Operation, when it is assumed that creep occurs uniformly through all the length.

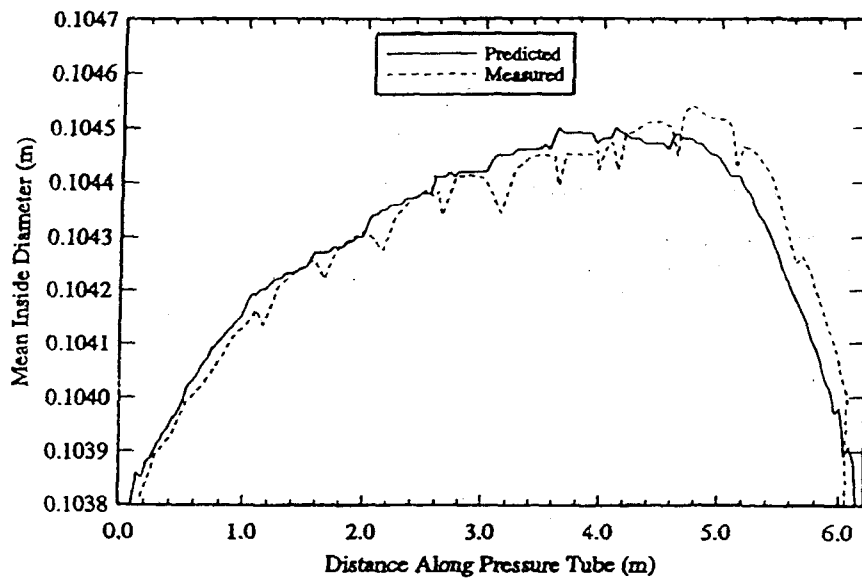


Figure 2. Diametral profile of a Pickering pressure tube after ten years of operation. The calculated curve was determined from H3DMAP Code(5).

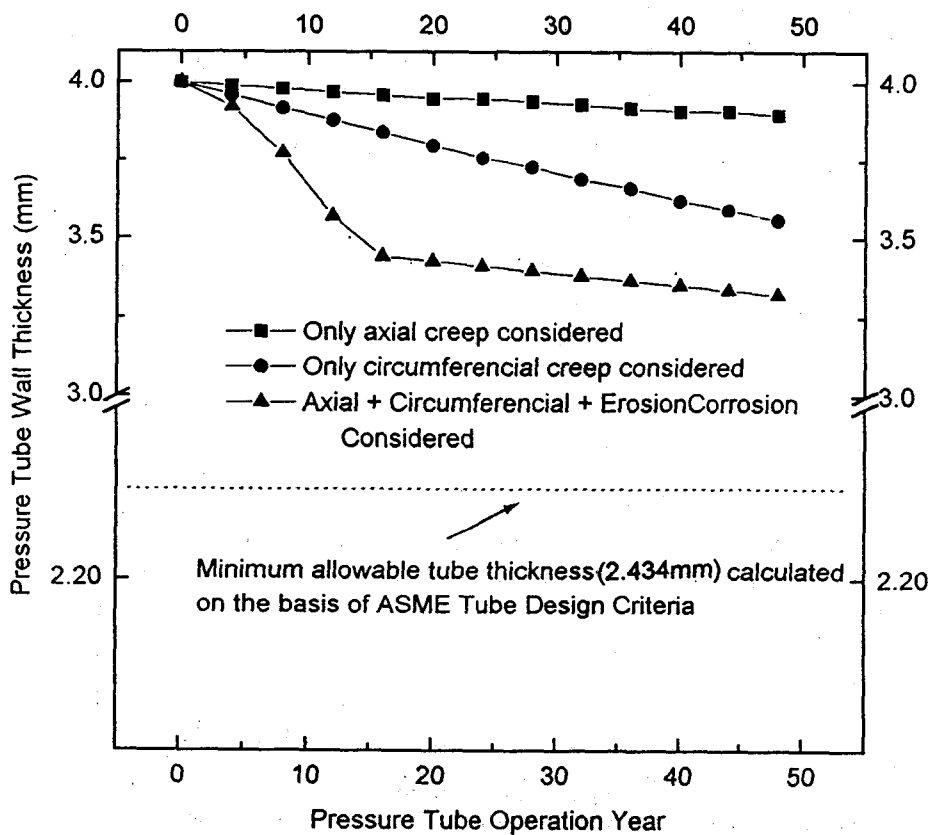


Figure 3. Prediction of Pressure Tube Wall Thickness Change for 50 Year of Reactor Operation, when it is assumed that creep occurs only at 30% region of total length.