

중수로원전 압력관의 원주방향 크립 및 성장에 대한 수명평가 Life evaluation of the CANDU Pressure Tube against the Diametral Creep and Growth

이경수, 이용성, 정일석, 김태룡

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

국내 중수로원전 핵연료압력관은 냉간가공된 Zr-2.5%Nb이고 사용온도는 260°C~310°C, 속중성자속은 약 3×10^{17} n/m²s이다. 이와 같은 운전상태에서는 온도 및 중성자 조사영향에 의한 크립 및 성장이 발생하는 것으로 알려져 있다. 크립 및 성장이 발생하면 이로 인해 압력관의 길이 및 직경이 늘어나게 된다. 월성 1호기 압력관을 검사한 결과 실제로 압력관의 길이 및 직경이 증가하고 있는 것으로 확인되었다. 본 논문에서는 월성 1호기 압력관 설계 및 검사자료를 바탕으로 하여 압력관의 직경변형을 및 잔여수명을 평가하였다.

Abstract

The pressure tubes of Wolsong-1 are made of cold-worked Zr-2.5%Nb. The operating temperature is about 260°C~310°C and neutron flux level at full power is about 3×10^{17} n/m²s, which causes thermal creep, irradiation creep and irradiation growth. The creep and the growth result in the longitudinal elongation and diametral expansion of the pressure tubes, which have their design limit, respectively. The Wolsong-1 pressure tubes were confirmed by the inservice inspection that the longitudinal elongation and diametral expansion has been progressed. This paper shows the lifetime evaluation for Wolsong-1 pressure tubes against diametral expansion due to creep and growth.

1. 서 론

국내 최초의 가압중수로형(PHWR CANDU) 원전인 월성 1호기는 1983년 4월에 가동하여 19년째 가동되고 있다. 월성 1호기의 압력관의 설계수명은 210,000 EFPH(Effective Full Power Hour)이므로[1] 이용률 80%로 운전될 경우 약 30년간 사용이 가능한 것으로 되어있다. 월성 1호기의 2001년말까지 평균 이용률은 약 85%로서 현재 이용률이 지속될 경우 압력관은 사용기간 30년 이전에 설계수명에 도달할 가능성이 있다. 압력관은 핵분열이 발생하는 우라늄연료를 내장하고 있기 때문에 고온, 고압, 고방사선 환경에서 사용된다. 월성 1호기 압력관의 운전온도는 260°C~310°C, 압력은 약 100 MPa, 중성자속 준위는 3×10^{17} n/m²s 정도로서 이로 인해 운전년수가 경과함에 따라 여러 가지 경년열화 현상이 발생한다. 대표적인 열화기구 중의 하나가 고온 및 중성자조사에 의한 크립 및 성장이다. 이로 인해 압력관은 사용년수가 지날수록 직경 및 길이가 증가하며 두께는 감소하게 된다. 한편으로는 압력관 내부의 연료 및 냉각재의 하중에 의해 압력관의 처짐현상도 발생한다. 이와 같은 현상은 압력관 재료의 건전성에 영향을 미치기 때문에 그 한계치가 설계상으로 제한되어 있으며 정기적으로 그 증가정도를 감시하고 있다. 압력관에 대한 정기검사는 CSA N285.4에 검사요건 및 방법이 규정되어 있으며 월성 1호기도 이에 따라 검사를 수행해 왔다. 압력관의 치수변화는 체적탐상검사를 수행하며 실제검사는 초음파를 이용하여 직경 및 두께변화를 측정하였다. 검사 수행 결과 월성 1호기 압력관에서 설계당시에 예상한 바와 같이 크립 및 성장이 발생하고 있는 것으로 확인되었다. 향후 월성 1호기 수명관리 관점에서 압력관에 대한 수명평가 연구가 진행중에 있으며 본 논문에서는 크립 및 성장에 의한 압력관 직경팽창의 영향 및 그로 인한 잔여수명을 예측하고자 하였다.

2. 본 론

가. Zr-2.5%Nb 합금의 크립 및 조사성장 특성

미국기계기술자협회 기술기준에 의하면 ASME Sec.III에 적용을 받는 재료는 경수로 원전의 운전온도 범위에서 크립이 발생하지 않을 것으로 예상된다. 시간의존성 크립에 대한 설계가 요구되지 않는 온도한계는 페라이트강은 약 371°C, 오스테나이트 강 및 오스테나이트 합금은 427°C로 되어 있다. 그러나 운전온도가 ASME Sec.III NH에 규정한 크립영역에 있는 액체금속고속증식로(LMFBR) 및 고온가스열교환기(HTGR)는 설계시 크립 및 크립부식이 기기에 미치는 영향을 매우 중요하게 반영해야 한다. 가압경수로(PWR) 원전이라 할지라도 중성자 조사에 의해서는 오스테나이트 강이나 니켈 합금강에서 크립이 발생할 가능성이 언급되어 있다[1].

월성 1호기 압력관 재료인 Zr-2.5%Nb 합금은 ASME Sec.III에 채택되지 않은 재료로서 비교적 크립이 잘 일어나는 재료로 알려져 있다. 발전소 운전 환경에서 온도 및 중성자 조사에 의해 크립 및 성장이 발생한다. 크립은 재료가 특정 온도(압력) 또는 중성자속 이상 환경에서 응력이 작용하는 상태에서 시간 경과에 따라 변형되는 현상이고 성장은 응력이 없음에도 불구하고 중성자 조사에 의해 재료가 변형되는 현상이다. 고에너지의 중성자 조사에 의해 지르코늄 합금 압력관은 시간에 따라 크립과 성장이 발생하고 이로 인해 축방향과 반경방향 크기가 증가하고 상대적으로 두께는 얇아진다. 압력관의 크립 및 성장에 의한 변형량은 식 (1)에 표시한 것과 같이 고온, 고압에 의한 열적크립($\dot{\epsilon}_{thermal}$), 중성자 조사에 의한 크립($\dot{\epsilon}_{ir,creep}$), 중성자 조사성장($\dot{\epsilon}_{ir,growth}$)의 세 요소에 복합적으로 영향을 받는다. 각 요소의 관계식을 식 (2),(3),(4)에 표시하였으며 각 크립 상수(K), 비등방성 계수(C), 크립 활성화온도(Q_{th})를 구하기 위한 많은 실험이 수행되고 있다[2]. 각 식을 살펴보면 열적크립은 온도와 응력, 중성자조사크립은 중성자플루언스, 온도, 응력, 그리고 중성자 조사성장은 응력과는 무관하게 온도와 중성자속의 함수임을 알 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{total} = \dot{\epsilon}_{thermal} + \dot{\epsilon}_{ir,creep} + \dot{\epsilon}_{ir,growth} \quad (\text{식 1})$$

$$\dot{\epsilon}_{thermal} = K_{th} C_{th}^d \sigma_{th}^2 \exp(-Q_{th}/T) \quad (\text{식 2})$$

$$\dot{\epsilon}_{ir,creep} = K_c C_c^d \sigma_c \Phi \exp(-Q_c/T) \quad (\text{식 3})$$

$$\dot{\epsilon}_{ir,growth} = K_g G^d \Phi \exp(-Q_g/T) \quad (\text{식 4})$$

여기서 σ 는 압력관에 작용하는 응력, Φ 는 중성자속, T는 압력관의 절대온도이다.

중수로 압력관의 연신은 주로 중성자 조사크립 및 성장이 지배적이며 열적크립은 총 연신의 약 5% 정도로서 상대적으로 영향이 적은 것으로 알려져 있다. 또한 Zr-2.5%Nb 압력관은 조밀육방정(Hexagonal Closed Packed) 결정구조를 갖고 있어서 강한 방향특성을 갖는다. 각 방향의 전위밀도 및 Basal Pole Fraction은 다음 표 1과 같다[2].

표 1. Zr-2.5%Nb의 전위밀도 및 Basal Pole Fraction

재료	전위 밀도($m^{-2} \times 10^{14}$)		Basal Pole Fraction		
	$\langle a \rangle$	$\langle c \rangle$	f_R	f_T	f_L
Zr-2.5%Nb	3.0 ± 0.5	0.6 ± 0.2	0.32	0.62	0.06

크립 및 성장을 또한 강한 방향성을 갖으며 그에 대한 많은 실험이 진행중에 있다. 그 중 오시리스 원자로에서 수행한 중성자 조사실험 결과를 다음 표 2 및 그림 1,2,3에 나타내었다[3],[4].

표 2. Zr-2.5%Nb 압력관의 크립 및 성장률[3]

시편번호	실험온도(°C)	크립율($m^2 n^{-1} MPa^{-1}$)			성장률($m^2 n^{-1} MPa^{-1}$)		
		$\dot{\epsilon}_a$	$\dot{\epsilon}_t$	$\dot{\epsilon}_a / \dot{\epsilon}_t$	$\dot{\epsilon}_a$	$\dot{\epsilon}_t$	$\dot{\epsilon}_a / \dot{\epsilon}_t$
1/3	282/268	0.55×10^{-30}	0.78×10^{-30}	0.705	4.2×10^{-29}	-4.0×10^{-29}	-0.95
2/4	315/321	0.84×10^{-30}	1.16×10^{-30}	0.724	2.6×10^{-29}	-2.7×10^{-29}	-1.04
평균				0.715			-1.00

이에 따르면 크립율은 축방향 및 원주방향 모두 양의 값을 갖으며 그 크기는 축방향크립율이 원주방향크립율의 약 0.7배로서 원주방향 크립이 길이방향 크립보다 크다. 반면, 조사성장율은 길이방향은 양의 값을 갖지만 원주방향은 음의 값을 갖으며 그 절대값의 크기는 거의 비슷하다.

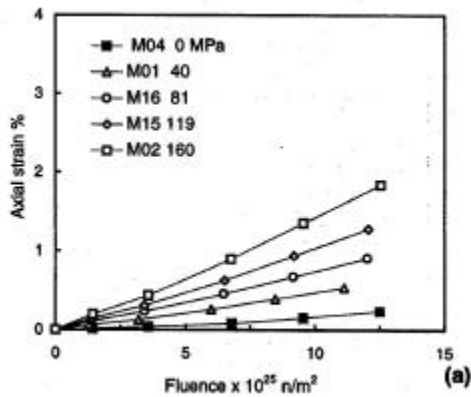


그림 1. 중성자 플루언스와 축방향 크립

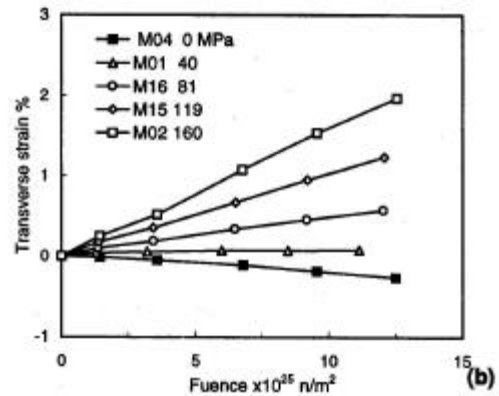


그림 2. 중성자 플루언스와 원주방향 크립

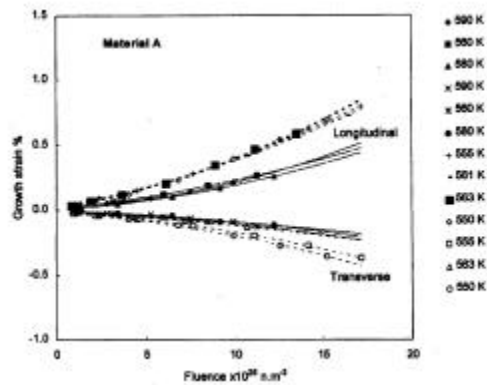


그림 3. 중성자 플루언스와 조사성장율

나. 월성 1호기 압력관 설계 및 제작 요건

월성 1호기는 가압중수로형 CANDU 600 원전으로서 2 루프로 되어 있다. 압력관은 경수로 원전의 원자로심에 해당하는 기기로서 압력관내에 핵연료를 내장하고 있다. 압력관은 총 380개로 구성되어 있으며 압력관 당 12개의 핵연료다발이 내장되어 있고 그 사이를 중수 냉각재가 흐르고 있다. 압력관 주위를 칼란드리아관이 둘러싸고 있으며 칼란드리아관과 압력관은 4개의 이격스프링(garter spring)으로 간격을 유지하고 있으며 그 공간은 이산화탄소로 충전되어 있다. 칼란드리아관 외부는 감속재가 충전되어 있다. 원자로출력은 감속재내의 독물질량과 제어봉 삽입 깊이 및 액체출력영역의 높이로 조절한다. 아래 그림 4,5에 월성 1호기의 원자로냉각재계통 및 핵연료채널을 표시하였다[5].

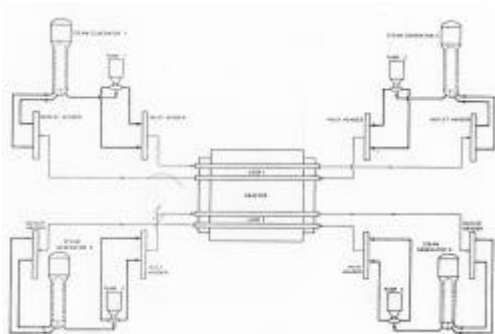


그림 4. 월성 1호기 원자로냉각재계통

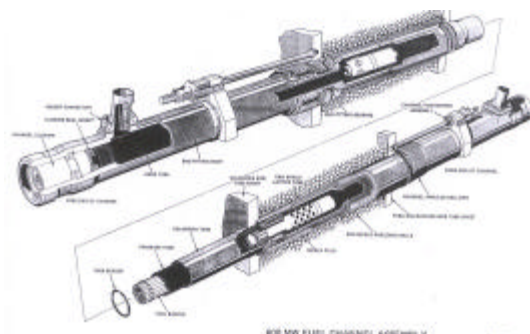


그림 5. CANDU 600 핵연료 채널

월성 1호기 압력관은 기술사양서 요건에 따라 지르코늄-2.5% 나이오비움 합금으로 제작되었다. Zr-2.5%Nb 합금강은 저중성자 흡수단면적, 고강도, 고내부식성을 가지고 있기 때문에 캔두원전 압력관 재료로 채택되었다. 지르코늄 합금강은 미국기계기술자협회(ASME) 보일러 및 압력용기 규격(BPVC)에 제작에 관한 요건이 기술되어 있지 않다. 그렇지만 월성 1호기 연료채널은 ASME BPVC (1971년 추가판 및 1972년 겨울판)의 Section III, NB 요건을 만족토록 설계 및 분석되었다. 압력관은 진공아크 용융, 고온 단조, 고온 압출, 저온 인발 및 오토클레이브에서 잔류응력제거 과정으로 제작되었다. 이 제작과정에서는 압력관의 종방향보다는 원주방향의 강도가 더 크고 앞쪽 보다는 뒤쪽의 압력관의 강도가 더 큰 특성을 갖는다. 월성 1호기 압력관의 21℃에서 371℃ 범위의 재료물성값은 다음 표 3과 같다[6].

표 3 월성 1호기 압력관의 재료물성값

온도(℃)	인장강도(ksi)	항복강도(ksi)	설계강도(ksi)	영계수 (psi x 10 ⁶)	열팽창계수 (in/in.°F x 10 ⁻⁶)
21	105	75.0	35.0	13.70	2.89
38	102	71.5	35.0	13.42	2.89
93	92.7	64.2	30.9	12.84	2.89
149	84.0	57.5	28.0	12.30	2.89
204	76.2	52.0	25.4	11.75	2.89
260	71.4	49.2	23.8	11.20	2.89
316	65.3	47.8	21.8	10.65	2.89
371	63.0	44.8	21.0	10.04	-

설계응력강도값은 해당온도에서 최소 인장강도값의 1/3과 같다. 인장강도값은 종방향 최소값이다. 표에 의하면 인장강도 및 항복강도는 온도증가에 따라 감소하지만 열팽창계수는 상기 온도 범위내에서 변화가 없는 것을 알 수 있다.

월성 1호기 설계응력해석보고서는 운전중 중성자 조사, 고온 및 압력에 의해 치수 변화가 발생할 것을 가정하여 수행되었다. 압력관의 직경 및 두께 관련하여 응력해석보고서에 가정된 치수는 표 4와 같다.

표 4 월성 1호기 압력관의 직경 및 두께 설계값[5]

항목	설계값	응력해석보고서값 (0 EFPH)	응력해석보고서값 (210,000 EFPH)
반경방향 크립변형률(%)	4.117	0	4.117
두께감소 (mm)	0.279	0	0.279
내부마모 및 부식 (mm)	0.165	0.165	0.165
외부 부식 (mm)	0.038	0.038	0.038
여유값 (mm)	0.051	0.051	0.051
최대 내경 (mm)	104.09	104.42	108.72
최소 두께 (mm)	4.191	3.937	3.658

Zr-2.5%Nb 압력관은 운전중 중성자 조사에 의해 강도가 증가하고 연성은 감소한다. 이러한 변화는 대부분 2×10^{19} n/cm² 이내의 선량에서 발생하고 그 이후에서는 포화상태에 도달한다. 연구로에서 측정된 300℃, 2×10^{20} n/cm² 시점에서 0.2% 항복강도는 70% 증가, 극한인장강도는 45% 증가, 연신율은 38% 감소하였다. 월성 1호기 설계자료에 의하면 30년간 최대 원주방향 크립은 4.117%로 예상되고 입구로부터 75% 길이 위치에서 발생한다. 직경 변형률 5%가 보수적인 설계한계로 간주되었다. 원주방향 크립에 의한 두께감소 예상량은 0.279mm 이었다.

다. 월성 1호기 압력관 직경 측정 자료

월성 1호기는 CAN/CSA N285.4 및 가동중검사 프로그램에 따라 압력관의 직경을 측정하였다. 압력관 설치후 검사와 네 번의 가동중 검사를 통해서 총 39개 채널, 51회의 검사를 수행하였다. 각 채널별 측정데이터를 표 5에 정리하였다. 여기서 EFPH는 Effective Full Power Hour의 약자이며 유효전출력을 의미한다. 51,261EFPH는 1990년 4월 9일, 70,729EFPH는 1992년 9월 26일, 81,161EFPH는 1994년 1월 30일, 137,200EFPH는 2001년 9월 5일에서 전체채널의 평균 유효전출력이다.

표 5. 월성 1호기 압력관 직경 측정 데이터

채널 번호	0 EFPH (mm)	51261 EFPH (mm)	70729 EFPH (mm)	81161 EFPH (mm)	137200 EFPH (mm)
C08	103.94	-	-	105.4	106.2
E09	103.91	-	-	105.8	107.1
E10	103.94	-	-	105.5	-
E11	104.01	-	-	105.5	-
E14	104.01	105.3	-	-	-
F07	103.96	-	105.4	-	-
F09	103.91	105.2	-	-	-
F12	103.96	-	105.7	-	-
G10	104.01	-	105.3	-	-
G14	103.99	-	-	105.5	-
H06	103.94	104.9	-	-	-
J11	103.99	-	105.3	-	-
K05	104.04	-	105.3	-	-
L06	104.01	-	-	105.9	-
L09	104.01	-	105.7	-	106.8
L13	103.96	-	-	105.7	-
L16	103.89	105.1	-	-	-
M11	103.99	105.1	105.6	106.0	-
N03	103.99	105.1	-	-	-
N06	103.96	-	105.5	-	-
N11	103.94	-	105.0	-	-
N15	103.99	-	105.4	-	-
O08	104.14	-	105.0	-	-
O14	103.91	105.2	105.4	-	107.0
Q06	104.06	105.3	105.5	-	106.8
Q07	103.99	-	-	-	107.2
Q08	104.04	-	-	-	107.0
Q11	103.91	-	105.5	-	107.0
Q16	104.14	105.3	-	-	-
R03	103.99	104.7	-	-	-
R12	103.99	-	-	105.8	-
S03	104.14	-	-	104.9	-
S05	103.94	-	105.2	-	-
S07	103.99	-	-	105.6	-
S15	104.14	105.3	105.5	-	-
T06	103.91	-	-	105.3	-
U11	104.01	-	105.3	-	106.5
V11	103.80	-	-	105.1	-
W14	103.91	-	-	104.8	-
검사수량	39	11	17	14	9

가동중 검사를 수행한 39개 압력관의 초기 직경은 103.80~104.14mm로서 평균값은 103.98mm이었다. 압력관 직경증가는 압력관에 조사된 중성자플루언스와 상관관계가 있으므로 이를 채널의 출력영역에 따라 구분하여 노심지도에 표시하면 그림 6과 같다. 그림 6의 붉은 영역이 고출력영역이며 붉은 영역의 바깥은 저출력, 안쪽은 중간출력영역이다. 채널에 기입되어 있는 숫자는 가동중 검사중 압력관의 직경을 측정한 횟수이다.

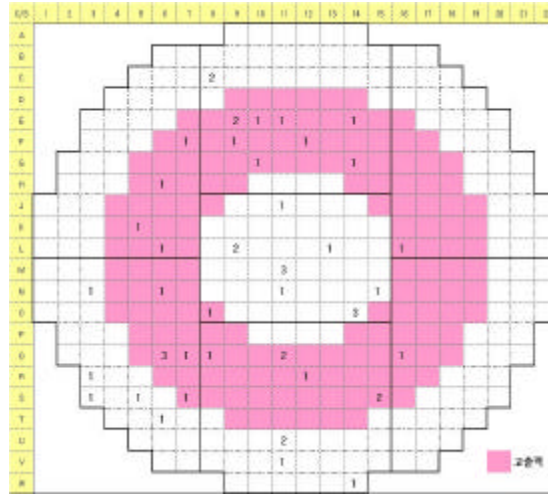


그림 6. 압력관 직경 측정 채널 및 횟수

라. 압력관 직경 증가율 및 수명평가

압력관의 직경증가는 온도에 의한 크립, 중성자 조사에 의한 크립, 중성자 조사성장에 의한 영향이 복합적으로 나타난 것으로서 측정데이터만으로는 각각의 영향을 구분하여 설명하기는 어렵다. 본 논문에서는 측정데이터를 분석하여 이의 세 영향이 복합적으로 나타날 때 압력관의 직경 증가 경향 및 압력관 운전수명과 직경증가와의 상관관계를 평가하였다.

(1) 초기값 영향 평가

현재까지 월성 1호기 380개 압력관 중에서 가동중 직경을 측정한 채널은 39개이며 이 중 3회 반복측정한 채널은 3개, 2회 반복 측정한 채널은 6개, 1회 측정한 채널은 30개이다. 이들 채널에 대해 선형 회귀분석($y=ax+b$)을 수행한 결과는 다음과 같았다. 표에서 a는 $d(\text{직경}=\text{mm})/d(\text{운전시간}=\text{EFPH})$ 이고 b는 초기값 또는 초기값의 평균이고 R은 회귀식의 상관계수이다.

표 6. 측정데이터의 초기값 영향 평가

채널명	초기값을 제외한 경우			초기값을 포함한 경우		
	$a(x 10^{-5})$	b	R	$a(x 10^{-5})$	b	R
전체 (39개)	2.047	103.96	0.898	2.019	103.98	0.973
1회 측정채널(30개)	2.192	103.78	0.831	1.957	103.97	0.962
C08 (2회)	1.428	104.24	-	1.658	103.97	0.998
E09 (2회)	2.320	103.92	-	2.325	103.91	1
L09 (2회)	1.655	104.53	-	2.037	104.09	0.995
M11 (3회)	2.954	103.57	0.994	2.402	103.95	0.995
O14 (3회)	2.174	103.99	0.993	2.227	103.93	0.997
Q06 (3회)	1.799	104.31	0.996	1.968	104.14	0.996
Q11 (2회)	2.257	103.90	-	2.252	103.91	1
S15 (2회)	1.027	104.77	-	1.992	104.17	0.991
U11 (2회)	1.805	104.02	-	1.815	104.01	1

분석결과에 의하면 초기값을 포함하는 경우가 보다 강한 선형관계를 나타낸다. 직경 증가율은 초기값을 제외한 경우가 초기값을 포함한 경우 보다 큰 것으로 나타났으나 이는 1회 측정한 채널의 영향이 크게 작용한 것이고 2회 이상 측정한 채널에서는 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다. 따

라서 현재 측정된 데이터에 의하면 운전년수 증가에 따라 압력관의 직경 증가가 선형적인 관계를 보인다고 할 수 있다.

(2) 압력관의 출력 및 위치 영향 평가

그림 6에 직경을 측정된 압력관의 위치를 표시하였다. 압력관 직경 증가는 중성자 플루언스량의 함수이므로 같은 시간을 운전할 경우 중성자속(출력)이 높은 채널의 중성자 플루언스값이 크다고 할 수 있다. 출력영역별로 선형회귀분석을 수행한 결과를 표 7에 표시하였다.

표 7. 출력영역별 압력관 직경증가율

영역	초기값을 제외한 경우			초기값을 포함한 경우		
	a(x 10 ⁻⁵)	b	R	a(x 10 ⁻⁵)	b	R
전체 (39개)	2.047	103.96	0.898	2.019	103.98	0.973
고출력 (23개)	2.189	103.95	0.959	2.135	104.0	0.989
중간출력 (7개)	2.080	104.05	0.972	2.159	103.98	0.993
저출력 (9개)	1.733	103.86	0.889	1.640	103.95	0.970

분석한 결과에 의하면 대체적으로 고출력영역에 있는 압력관의 직경증가율이 크나 초기값이 포함된 경우의 중간출력 영역값이 고출력 영역에서의 값보다 다소나마 큰 것은 예상과 상이한 결과이다. 이는 같은 고출력영역 또는 중간출력영역이라 하더라도 영역내 채널간 출력이 서로 상이하고 측정데이터가 충분히 많지 않음으로 인해 나타난 현상으로 추정된다. 상기 분석결과를 그림 7 및 8에 도시하였다.

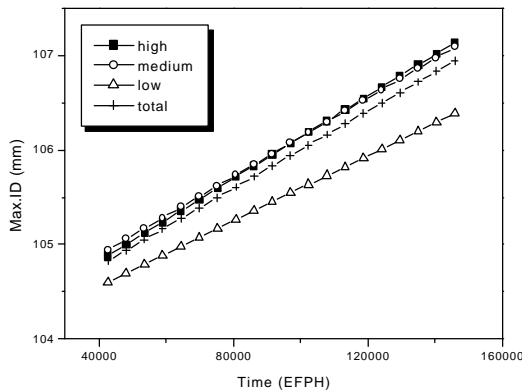


그림 7. 직경과 EFPH 관계(초기값 제외)

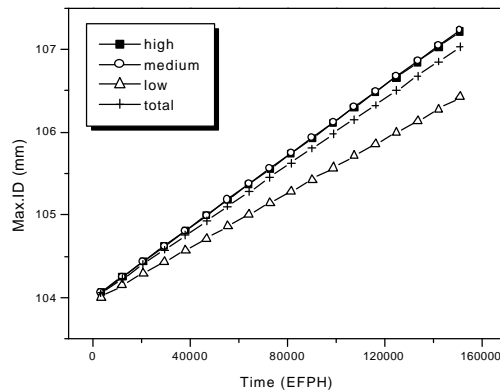


그림 8. 직경과 EFPH 관계(초기값 포함)

(3) 채널 고유 유효전출력 운전시간과의 관계

압력관의 직경과 유효운전수명과의 상관관계를 분석하기 위해 RC-1930 노심해석코드를 사용하여 각 채널의 유효전출력 운전시간을 계산하였다. RC-1930 코드에 의해 계산된 각 채널의 균등화계수 및 그에 의한 검사시점에서의 각 채널의 유효전출력시간은 다음 표 8과 같다. 각 채널의 운전시간을 균등화하여 평가한 유효전출력 운전시간과 압력관 직경과의 상관관계를 분석한 결과를 그림 9, 10에 표시하였다.

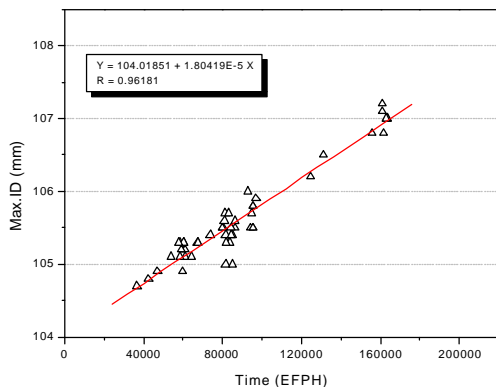


그림 9. 직경과 EFPH 관계(초기값 제외)

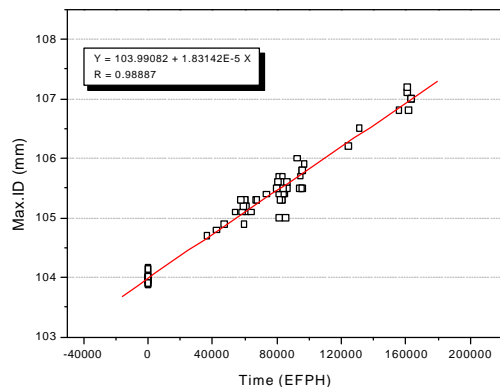


그림 10. 직경과 EFPH 관계(초기값 포함)

분석결과에 의하면 선형회귀식의 결정계수값이 초기값을 포함할 경우 0.989, 초기값을 포함하지 않을 경우 0.962로서 채널 운전시간을 균등화시키지 않았을 때의 0.973, 0.898보다 매우 높은 상관관계를 나타내었다. 또한 초기값을 고려한 경우의 직경증가율이 초기값을 고려하지 않은 경우보다 높은 결과를 나타내었는데 이를 통해 월성 1호기 압력관의 직경증가가 운전시간 경과에 따라 특별히 비선형 양상을 나타내고 있지 않은 것으로 판단할 수 있다.

표 8. 검사 압력관의 균등화 유효전출력시간

CHANNEL		51261 EFPH	70729 EFPH	81161 EFPH	137200 EFPH
W1C08	0.908	46547	64224	73697	124582
W1E09	1.173	60154	82999	95241	161001
W1E10	1.178	60409	83351	95644	161683
W1E11	1.158	59368	81915	93997	158900
W1E14	1.173	60115	82945	95179	160897
W1F07	1.151	59026	81442	93454	157982
W1F09	1.167	59839	82565	94742	160159
W1F12	1.151	58998	81404	93411	157908
W1G10	1.171	60032	82831	95048	160675
W1G14	1.175	60217	83086	95341	161170
W1H06	1.163	59597	82231	94359	159511
W1J11	1.181	60538	83530	95850	162030
W1K05	1.156	59239	81737	93792	158552
W1L06	1.195	61268	84536	97004	163983
W1L09	1.178	60395	83331	95622	161646
W1L13	1.166	59761	82457	94618	159949
W1L16	1.195	61232	84486	96948	163887
W1M11	1.142	58555	80793	92709	156722
W1N03	1.051	53885	74349	85315	144222
W1N06	1.222	62626	86410	99154	167617
W1N11	1.152	59034	81454	93467	158004
W1N15	1.200	61519	84883	97402	164655
W1O08	1.206	61810	85284	97863	165434
W1O14	1.190	60981	84140	96550	163214
W1Q06	1.134	58152	80237	92071	155644
W1Q07	1.174	60161	83009	95252	161021
W1Q08	1.192	61081	84278	96708	163482
W1Q11	1.188	60923	84060	96458	163059
W1Q16	1.172	60078	82894	95121	160798
W1R03	0.714	36614	50519	57970	97996
W1R12	1.177	60351	83271	95553	161530
W1S03	0.579	29701	40980	47025	79494
W1S05	0.835	42804	59061	67772	114566
W1S07	1.062	54438	75112	86191	145702
W1S15	1.128	57826	79787	91555	154771
W1T06	0.828	42426	58539	67173	113554
W1U11	0.955	48956	67548	77511	131030
W1V11	0.790	40521	55911	64157	108455
W1W14	0.524	26838	37031	42493	71832

(4) 잔여수명 평가

위에서 수행한 세 가지 방법으로 측정데이터를 분석해 본 결과, 초기값을 포함시켜서 각 채널의 유효전출력 운전시간과 압력관 직경증가량의 상관관계를 계산하는 것이 가장 신뢰도가 높고 이론 및 실험결과와 부합하는 것으로 확인되었다. 따라서 이 방법에 따라 압력관 직경 증가에 따른 압력관의 잔여수명을 평가하는 것이 타당하다. 월성 1호기 설계응력해석보고서에 분석된 최대내경은 108.72mm이고 압력관과 가터스프링이 압착(Nip-up)이 발생하는 시점은 108.43mm이다[6]. 한편 설계지침서에서는 제시된 운전한계치는 직경팽창 5%로서 이에 해당하는 값은 채널마다 차이가 있을 수 있으나 초기 직경 평균값 103.8mm를 기준할 때 108.99mm에 해당한다. 이에 도달하는 시점을 유의수준 $\alpha = 0.01$ 로 하여 99.9% 신뢰구간으로 상하 경계를 산출하였다. 그 결과는 다음 그림 11과 같다.

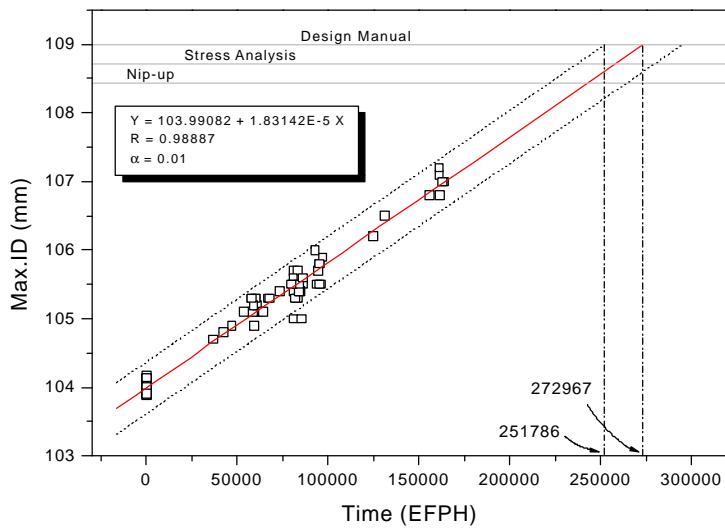


그림 11. 월성 1호기 압력관 직경증가에 대한 수명평가

3. 결론

월성 1호기 압력관 설계 자료 및 측정자료를 분석하여 압력관의 직경증가율을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. 압력관의 직경증가는 각 압력관의 유효전출력 운전시간과 매우 밀접한 상관관계를 갖는다. 압력관 직경증가량은 압력관의 유효전출력 운전시간과 강한 선형적인 관계를 나타내며 그 상관계수는 0.989 (결정계수 $R^2 = 0.978$)이었다. 압력관의 직경증가는 각 채널의 유효전출력 운전시간과 선형적으로 평가하여도 무방할 것으로 판단된다. 길이방향 팽창과는 달리 반경방향의 경우 압력관의 크립율은 중성자 플루언스량과 양의 상관관계를 갖지만, 신장율은 음의 상관관계를 갖기 때문에 직경증가율이 급격한 증가를 보일 것으로는 예상되지 않는다.

나. 압력관의 직경증가량을 채널의 유효전출력 운전시간에 대해 선형적으로 평가한 결과 약 250,000 EFPH 시점에 설계지침서 제한치인 108.99mm에 도달하며 약 220,000 EFPH 시점에 압력관 가터스프링에 Nip-up이 발생할 것으로 예상된다.

다. 본 논문의 평가는 전체 380개 압력관 중 직경을 측정할 이력이 있는 39개 압력관의 데이터를 기초로 한 것이다. 두께를 측정하지 않은 채널에 대해서도 RC-1980 해석코드에 의한 고유 유효전출력 운전시간을 구하면 본 연구에서 제시한 상관식에 따라 잔여수명을 예측할 수 있다.

참고문헌

- [1] ASME Sec.III, Appendix W, W-4410
- [2] N.Christodoulou, "Modelling In-Reactor Deformation of Zr-2.5Nb Pressure Tubes in CANDU Power Reactors", 11차 지르코늄 심포지움 논문집
- [3] A.R.Causey, "Irradiation-Enhanced Deformation of Zr-2.5Nb at High Neutron Fluences", 12차 지르코늄 심포지움 논문집
- [4] R.A.Holt, "High-Fluence Irradiation Growth of Cold-Worked Zr-2.5Nb"
- [5] N.P.Sinch, DM-59-31100, "Design Manual, Wolsong-1 Nuclear Power Plant Fuel Channel Assembly" p.2-1
- [6] Stress Report, 59-31100-SR-001, "Wolsong-1 Nuclear Power Plant Fuel Channel Assembly"