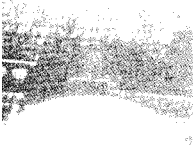




원자력 발전소 연료 봉들의 누설을 시험하기(X)

Leak Testing of Nuclear Power Reactor Fuel Elements(X)



본 원고는 지난 1999년 6월호
(VOL.32 NO.3) 기술사지부터 연재
되어 온 원고입니다.

글 | 朱昇煥

(Choo, Seung Hwan)
방사선관리기술사, 공학 박사,
고려공업검사(주) 연구소장,
SRI, 본회 홍보위원.
E-mail : shchoo@unitel.co.kr



5.6 원전연료 봉의 압력 감쇠 누설시험 해설

다음에 해설한 압력 감쇠(pressure decay) 누설시험 시스템은 원전연료 봉의 정량적인 누설시험법이며, $10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($10^{-8} \text{ std cm}^3/\text{s}$) 만큼 낮은 누출률의 결합들을 검출할 수 있다. 이 누설시험법은 세 가지의 기본 동작들을 포함한다:

1. 알려진 부피의 어떤 압력 유지 챔버 안에 연료 봉의 용접된 끝 덮개를 밀봉하기
2. 미리 정해진 압력에서 이 챔버 속으로 알고 있는 양의 가스를 주입하기
3. 챔버 안에 생긴 압력이 지정된 값을 초과하는 속도로 줄어드는 지의 여부를 살피기.

5.7 압력 감쇠 시험법의 바탕 관계들

원자량이 낮은 단일 가스를 압력 감쇠 누설시험 용으로 쓸 경우, 압력 감쇠의 크기에 대한 바탕 관계는 '이상 기체 법칙'에 따라 유도된다. 이 법칙에 따른 압력 변화의 실제 관계는 등식 14로 설

명된다.

$$P_1 - P_2 = (N_1 - N_2)(RT/V) \dots \dots \dots \text{식 14}$$

등식 14에서 첨자 1은 압력, P_1 에서 알고 있는 가스의 양, N_1 을 주입시킨 후 그 챔버에 시험 챔버 안의 조건들에 해당한다. 첨자 2는 시험 챔버로부터 연료 봉의 안으로 유입된 최대 N_2 의 양에 따라 나타난, 챔버 압력을 P_2 로 줄인 조건들에 해당한다. $N_1 - N_2$ 가 연료 봉 속으로 허용된 누설 가스의 최대 양일 경우, 그 때 $P_1 - P_2$ 는 시험 챔버 안에서 최대 허용 감쇠 압력 (maximum permissible pressure decay)이다.

등식 14에서 $(N_1 - N_2)$ 는 미리 확정된 허용 기준으로부터 얻어진다. V 항은 시험 챔버의 알려진 부피를 나타내고, 그것의 모양이나 교정으로 결정된다. R 은 '만유 가스 상수' (universal gas constant)이고 T 는 누설 시험기간 중에 그 챔버 안의 절대 온도이다. 보통 지정된 허용 누출률은

아주 낮고, 그 가스의 온도는 그 챔버 구조가 흡수하기 때문에 일정하게 유지된다. 그러므로 ($P_1 - P_2$)는 압력 감쇠를 나타내고, 압력 변환기들을 써서 쉽게 측정된다. 등식 14는 압력 감소 또는 압력 감쇠를 결정하여 누출량을 측정할 비파괴적 사법의 바탕 등식이다.

5.8 원전연료 봉의 압력 감쇠 시험 설비

<그림 9>는 압력 감쇠 시험 시스템을 계통적으로 표시한 그림이다. <그림 10>은 이 시스템의 시험 챔버를 그림으로 보여준다. 시험 챔버를 제외한 모든 부품들은 표준부품들로서, 상품화된 품목들이다. <그림 9>에서 보여준 채움 챔버(charging chamber)는 단순히 특정한 부피를 가진 선택된 튜브의 길이 단면이다. 3방향 공기구멍 밸브는 개별 누설시험을 완료한 후에 시스템에 들어 있는 가스를 대기로 내보내기 위한 것이다. 채움과 시험 챔버들 사이에 보여준 개/폐 밸브들은 시

<표 1> 원전연료의 압력 감쇠 누출량에 쓰이는 시험 챔버의 교정 데이터(<그림 11>에 나타난 재시험 No. 3 시험 데이터 참고). 교정봉의 제거와 삽입에 대한 챔버 압력(psig) 0.13mm(0.005 in.) 위치 증가(a)

재시험 번호	0	1	2	3	4	5	6
1	601.1	579.5	561.5	544.0	562.0	580.0	600.0
2	602.0	581.0	562.5	543.0	562.5	579.5	600.5
3	602.0	583.0	564.5	547.5	565.5	584.5	604.0
4	602.0	580.5	562.5	544.0	563.0	581.0	601.0
5	602.0	580.0	561.5	543.5	561.0	580.0	601.3
평균	601.8	580.8	562.5	544.4	562.9	581.1	601.3
ΔP	21.0	18.3	18.1	18.5	18.2	20.2	

챔버의 온도 : 시험 시작 -25 °C(298 K), 시험 종료 25°C(298 K)

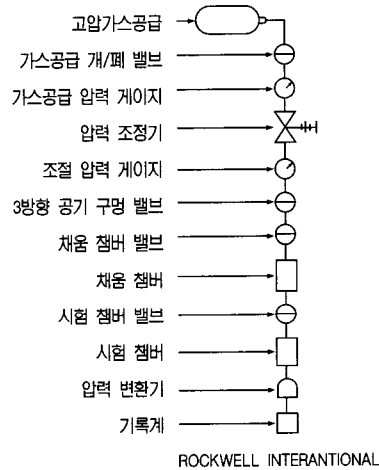
- (a) 0 점 위치는 교정봉을 시험 챔버 속에 완전히 삽입했을 때의 초기 조건이고, 늘린 양 0.13 mm(0.005 in.)로 빼낸 것은 위치의 늘린 양 1, 2, 그리고 3에서 시험되었다. 0.13 mm(0.005 in.) 재 삽입은 위치 4, 5 그리고 6에서 이뤄졌다. 따라서 위치 0과 6, 1과 5, 그리고 2와 4는 시험 챔버 안에서 교정 봉의 같은 위치이다. 교정 봉의 치수는 등식 17에서 매 0.13 mm(0.005 in.) 늘린 양 ΔV인 0.00195 cm³(0.0001191 in³.)로 주어진 4.425 mm(0.1742 in.)였다.

험 챔버 부피 내부의 한 부분이다.

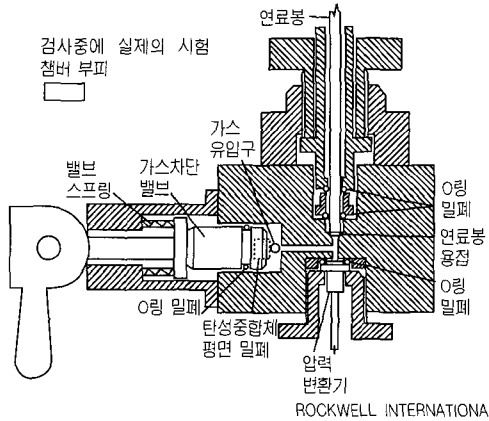
이런 설계의 모습은 작은 시험 챔버 부피 V를 유지하기 위하여 바람직하다. 이 설계는 시험 시스템의 부피를 좁게 하여 누출량 감도를 높여 그 시스템으로부터 결함을 갖는 연료 봉 속으로 적은 양의 가스 누출에서도 시험 챔버 압력을 더 심하게 떨어지게 할 것이다.

<표 2> 원전연료 봉들의 누출량 시험의 채움 챔버를 이용한 시험 챔버 압력의 재현성 시험에서 얻어진 시험 자료임(영미식 단위계로 얻은 자료이며, SI 단위를 덧붙임).

재시험(NO.)	(채움 챔버의 압력)		(채움 + 시험 챔버 압력)		(재현된 시험 챔버 압력)	
	MPa	psig	MPa	psig	MPa	psig
1	4.516	655.0	3.820	554.0	4.296	623.0
2	4.516	655.0	3.823	554.5	4.306	624.5
3	4.516	655.0	3.820	554.0	4.299	623.5
4	4.516	655.0	3.820	554.0	4.306	624.5
5	4.516	655.0	3.816	553.5	4.302	624.0
평균			3.820	554.0	4.302	623.9
표준 편차			0.0041	0.6	0.0048	0.7



<그림 9> 핵연료 봉 압력 감쇠 누설 시험 시스템의 모식도



〈그림 10〉 압력 감쇠 연료 통 누출량 시험 챔버의 모식도

5.9 압력 감쇠의 시험 챔버 부피의 교정

시험 챔버의 부피는 등식 14를 이용하여 압력 감쇠를 결정하기 위하여 반드시 알고 있어야 한다. 이 부피는 '이상 가스 등식'을 포함하는 방법의 적용으로부터 결정될 수 있다. 여기서 최소 미지 부피(V)가 알고 있는 양(ΔV)으로 변환되고 온도가 일정하게 유지되는 환경을 고려해보자.

$$PV = P_1V_1 \dots\dots\dots\text{식 15}$$

여기서,

$$V_1 = V + \Delta V \dots\dots\dots\text{식 16}$$

그리고

$$V = (P_1 \Delta V) / (P - P_2) \dots\dots\text{식 17}$$

여기서

P는 알고 있는 챔버 부피, V의 처음 시험 챔버의 압력

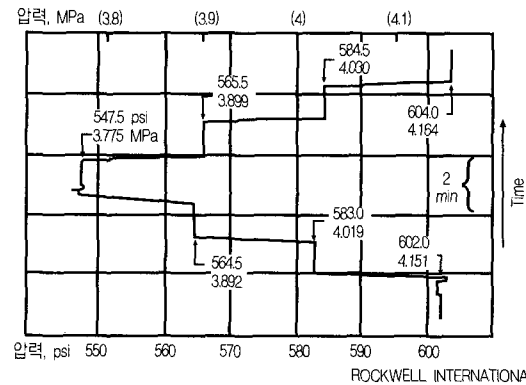
P₁는 알고 있는 부피 변화 ΔV로 된 후, 시험 챔버의 압력

〈그림 10〉에서 보여준 시험 챔버 설계도를 써서 P와 P₁은 압력 변환기를 읽어 결정되고, V는 알고 있는 거리(면적 × 길이 = 부피), 알고 있는 단면적 통을 끼집어내던가 또는 삽입으로 결정된다.

〈그림 11〉은 전형적인 시험 챔버 부피 교정 결과를 보여 준다. 대상이 된 부피(V)는 챔버 안에

안전하게 삽입된 한 연료 통의 것이고, 이것은 챔버 안 바닥의 알고 있는 지름 통으로 모의 실험한 것이다. 스크루 드라이브를 이용하여 알고 있는 거리를 앞뒤로 조절하고 다이얼 표시 계기를 이용하여 움직인 통의 양을 측정했다. 이 교정 기법의 완벽한 재현성을 증명하기 위하여 0.12mm (0.005 in.)를 앞뒤로 올려 실험한 것은 추가의 반복 정보를 얻기 위한 거였다. 재-삽입은 압력이 떨어지는 것이 밀봉 누출량으로 생겨난 뚫이 아님을 관측하려고 실시하였다.

〈그림 11〉은 〈그림 10〉〈표 1〉에 나타난 시험 챔버의 교정을 3 번 반복으로 나타난 압력을 보여 준다. 〈표 2〉의 평균한 데이터로부터 선택한 이 시험 챔버의 부피(V)는 0.059 cm³(0.00358 in³)이다.



〈그림 11〉 핵연료 통의 압력 감쇠 누설 시험에 쓰인 전형적인 시험 챔버의 부피 교정 기록

5.10 연료 통 누출량 시험에서 최대한 허용할 수 있는 압력 감쇠를 결정하기

시험 챔버의 부피와 시험기간 중에 그 가스의 온도(방안 분위기의 온도라고 할 수 있음)를 밝혀야 하는 것은 등식 14에 있는 (N₁ - N₂) 값을 결정하기 위한 것이다. 이 값은 대개 질량 흐름률의 항목에 지정된 누출률 허용 기준으로부터 유도된다. 한 전형적인 누출률 시방서는 40 MPa(40 기압)인 외부 압력에서 최대 2 × 10⁻⁵ Pa ·

m³/s(2 × 10⁻⁴ std cm³/s)이다. 하지만, 등식 14에서 쓰인 형태의 누출률 값은 시간에 따른 변화량이 빠져 있다. 이것은 어떤 임의의 기간, 말하자면, 5분 동안 압력 감쇠 시험을 수행함으로써 쉽게 알 수 있다.

등식 18은 정해진 누설시험 시간, t에서 연료 봉으로 가스 누출량을 나타낸다.

$$(N_1 - N_2) = (MPLR/2240)t \text{ 몰} \dots \text{식 18}$$

여기서

N₁은 시험 이전에 챔버 안에 있는 가스 몰 수효

N₂는 시험 종료 챔버 안에 있는 가스의 몰 수효

MPLR은 최대 허용 누출률, Pa · m³/s

t는 누출량 시험의 경과 시간, 초(s)

2240은 Pa · m³/s의 몰 환산 계수

<주> 1 Pa · m³/s = 10 std cm³/s

5.11 핵연료 봉 압력 감쇠 시험의 최대 허용 누출률

한 지방서는 지정한 핵연료 봉의 최대 허용 누출률(maximum permissible leakage rate)이, 앞서 말한, 4 MPa(40 기압)의 외부 압력에서 10⁻⁵ Pa · m³/s(10⁻⁴ std cm³/s)이다. 이 누출률 그리고 5 분 동안의 압력 감쇠 시험으로 누출한 가스의 허용 누출량을 셈하여 본다. 등식 18을 써서

$$\begin{aligned} N_1 - N_2 &= (MPLR/2240)t \\ &= (2 \times 10^{-5}/2240) \times 5 \times 60 \\ &= 2.679 \times 10^{-6} \text{ (몰)} \end{aligned}$$

5.12 연료 봉 누설시험의 최대 허용 압력 감쇠율

핵연료 봉들의 누출량 시험기간 동안에 최대 허용 압력 감쇠를 나타내는 등식 14를 푸는 데는 편리한 SI(또는 cgs)단위계를 쓰는 것이 바람직하다. SI 단위계에서 가스 상수, R=8.3145/mol · K이며, 그리고 최대 허용 압력 감쇠율(maxim-

um permissible pressure decay rate)은 매초마다 파스칼 단위(Pa/s)로 나타낸다. 영국식 단위계로서 이 값은 보통 압력 지시계의 제곱인치마다 파운드(psi) 단위로 환산될 수 있다. 표 1의 데이터에 대한 시험 챔버의 예제로서 등식 14를 푸는 데는 등식 18을 이용하여 다음처럼 셈이 된다.

$$N_1 - N_2 = (2 \times 10^{-5})/2240 \text{ 몰/초}$$

등식 14로부터 1 초 동안

$$P_1 - P_2 = (N_1 - N_2)(RT/V)$$

그래서

$$\begin{aligned} P_1 - P_2 &= \{(2 \times 10^{-5})/2240\} \\ &\quad \times \{8.314 \times 298\}/(59 \times 10^{-9}) \\ &= 375 \text{ Pa/s} \end{aligned}$$

여기서

T는 (273 + 20)K(실내 온도)

V = 59 × 10⁻⁹ m³(0.05 cm³)(시험 챔버의 부피). 이전에 셈한 것과 같음. 1초보다 더 긴 시간은 그 시간을 배수로 곱해주면 허용할 수 있는 Pa 압력 감쇠수량이 됨.

5.13 압력 감쇠 누설시험 시스템의 채움 챔버 부피의 선정

<그림 9>에 있는 검사 시스템의 설계와 <그림 10>에 있는 시험 챔버의 상세한 자료에서는 아주 큰 흠결이 있는 한 연료 봉이 수용될 수 있음을 알게 된다. 이런 것은 시험 챔버의 압력높임 기간 중에 일차 근원으로부터 가스의 흐름을 제한할 방도가 전혀 없는 경우. 그리고 연료 봉의 압력 감쇠가 시작되기 이전에 최대의 시스템 압력에 가스를 채운다면 일어날 수도 있을 것이다. 채움 챔버의 기능은 가스의 특정한 양을 격리시킴으로써 그리고 그 다음에 시험 챔버 속에 그것을 채움으로써 이런 상황을 막자는 것이다. 그래서 큰 누설은, 수용할 수 없는 좁은 누설들이 지나친 압력 감쇠

값들로서 나타나는 동안, 시험 챔버의 절대 압력이 예비측정 최소 값에 미치지 못했을 경우에 문제가 될 것이다.

선택할 채움 챔버의 부피는, 용접으로 폐쇄된 연료 봉에서 큰 누설로 압력이 떨어짐을 쉽게 관찰할 수 있는 텅 빈 공간의 크기와 견주어서, 상대적으로 반드시 충분히 좁은 부피여야 한다. 또한 쓰인 압력은 반드시 채움 챔버를 열고 난 이후, 그 시험 챔버 안에 있는 그 연료 봉에 닿을 필수적인 외부 압력에 도달할 만큼 충분히 높아야 한다.

채움 부피와 앞서 말한 기준에 맞을 압력 값은 챔버의 부피(배관은 간편한 챔버를 이루기 때문에 배관라인의 길이)와 시스템 압력을 변경시키면서 실험으로 가장 쉽게 측정되게 해야 한다. 라인의 시행착오 길이로 연결된 4.52 MPa(655 psi)의 시스템 압력이 둘 사이의 밸브가 열려서 눈금 잣대가 시험 챔버 속에 완전히 삽입되었을 때 시험 챔버 압력은 3.82 MPa로 떨어진다. 그 다음, 시험 챔버 밸브를 닫은 후에 시험 챔버의 압력은 4.52 MPa(654 psi)까지 회복된다. 이렇게 된다면, 지정한 외부 압력의 허용 간극(tolerance band)을 충족시킨 것이다. 이런 증가의 까닭은 <그림 10>의 시험으로부터 확인된다. 시험 챔버의 밸브는 가스의 유입 라인과 시험 챔버 끝 사이에 걸린 가스를 압축한다. <표 2>는 재현성을 검증하려고 반복한 시스템의 시험 데이터의 예이다.

5.14 연료 봉들에 있는 큰 누설들을 들춰낼 채움 챔버의 압력 선택

채움 챔버 압력의 수치는 원전 연료에서 큰 누설들이 있는 것을 쉽고 빠르게 입증하는 것이면 된다. <그림 12>에 보여준 그 시스템의 뒤편으로만 생각함으로써 채움 챔버의 부피를 결정할 수 있다. '이상 가스 법칙'으로부터 나타낼 수 있는 등식은:

$$P_i V_{cc} = P(V_{cc} + V) \dots \dots \dots \text{식 19a}$$

그리고 유도될 수 있는 채움 챔버 부피의 등식은

$$V_{cc} = PV/(P_i - P) \dots \dots \dots \text{식 19b}$$

채움 챔버의 부피는 등식 12로부터 알 수 있고, 폐쇄 몸통 속에 연료 봉 충전 가스 공극(fuel element fission gas void space)의 개략적인 부피(대개 약 2 cm³)를 추정할 수 있을 때, 총 시스템 압력을 등식 20으로 결정할 수 있다:

$$P_{fe} = (P_i V_{cc}) / (V_{fe} + V_{cc} + V) \dots \dots \dots \text{식 20}$$

여기서

V_{cc} 는 채움 챔버의 부피

V 는 시험 챔버의 부피

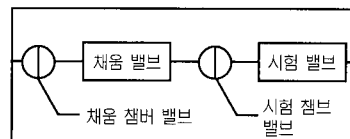
V_{fe} 는 연료 봉에 있는 간극

P_i 는 시험 챔버 쪽 밸브를 열기 전(표 2의 두 번째 칸) 채움 챔버 안에서 처음 압력

P 는 채움 챔버 압력과 시험 챔버(표 2의 세 번째 칸) 압력을 더한 것임

P_{fe} 는 어떤 큰 누설(채움 챔버, 시험 챔버, 그리고 연료 봉의 부피를 모두 포함)을 관통한 후의 총-시스템 압력

예컨대, 등식 19로부터 <표 2>에서 2와 3번째 칸의 압력 데이터, 그리고 등식 19로부터 결정된 시험 챔버의 부피, 채움 챔버의 부피 V_{cc} 는 0.312 cm³으로 측정된다. 등식 20으로 결정된 어떤 큰 누설에서 총-시스템 압력 P_{fe} 는 이 예에서 590 kPa(86 psi)이다.



ROCKWELL INTERNATIONAL

<그림 12> 핵연료 봉에 있는 큰 누설들의 효과 분석에 쓰인 그림 9의 시스템 일부

아무런 누설이 없는 표 2의 셋째 칸과 같은 총-시스템 압력 3.82 MPa(554 psi)를 나타낸 까닭은 이 값보다 훨씬 낮은 최종 시험 압력이 연료 봉에 어떤 큰 누설이 기여한 것일 것이다.

5.15 원전 연료 봉들에 대한 압력 감쇠 누설시험의 작업 절차

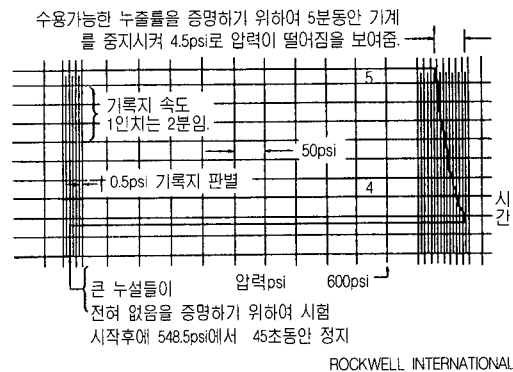
다음 운전 절차서는 <그림 10>에서 그림으로 보여준 원전연료 봉의 압력 감쇠 누설시험 시스템에 적용시켜 설명한다. 검사기간 중에 시스템의 운전은 그림 9의 시험 시스템 설계 기준과 이미 논의된 예제들에서 정의된 것들이다. 절차서의 단계들은:

1. 처음에 모든 밸브들을 폐쇄된 자리에 놓을 것
2. 시험 시스템 누설 내성 체크의 시험 챔버에서 교정 봉을 넣고 잠글 것
3. 시험 가스 공급 밸브를 열고 공급 압력 조절기로 4.52 MPa(655 psi)까지 조절할 것. 조절된 공급 라인 압력계의 정확성과 식별은 당연히 3~6 kPa(0.5~1.0 psi) 범위에 있게 해야 한다
4. 시험 챔버 쪽에 3방향 통기 밸브를 열고 난 다음 채움 챔버 밸브와 시험 챔버 밸브를 열어준다. 압력 변환기는 당연히 공급 가스 압력계로 4.52 Mpa(655 psi)와 일치되게 표시할 것이다
5. 채움 챔버 밸브를 닫고, 그리고 외부 영향으로부터 격리된 시스템을 10분 동안 유지한다. 10 kPa(1.5 psi) 또는 그 아래의 압력 손실은 적절한 누설 내성을 갖는 시험 시스템의 표시로 생각할 수 있다
6. 3방향 밸브를 이용하여 시험 챔버 안의 가스 압력을 계측기로 내 보낼 것. 그리고 교정봉을 움직일 것. 그 시스템은 일차 연료 봉의 검사를 위한 준비가 된 것이다
7. 연료 봉을 넣고 시험 챔버에 지정한 가스를 채워

시험 챔버 밸브를 닫을 것

8. 3방향 밸브로 채움 챔버를 4.52 MPa(655 psi)까지 압력을 높이고, 채움 챔버의 밸브를 닫을 것
9. 시험 챔버 밸브를 열고 압력 기록계를 돌릴 것. 적어도 30 초 동안 압력 변환기로부터 기록된 압력이 3.4 MPa(500 psi)를 넘어서는 경우, 그 연료 봉에는 큰 누설이 없는 것이다. 그 다음에 시험 챔버 밸브를 폐쇄할 것
10. 시험 챔버는 당연히 4.14 MPa(600 psi)를 초과한다. 5분 동안 압력을 높인 시스템을 그대로 유지할 것, 5분이 지난 후, 감소된 압력이 110 kPa(16 psi로 떨어짐)이면, 외부 압력 4.14 MPa(600 psi)에서 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($2 \times 10^{-4} \text{ std cm}^3/\text{s}$)의 인수 기준보다 큰 연료 봉의 누설이 있다는 표시이다

연료 봉 시험기간 중에 기록된 압력이 예상했던 바대로 반응치 않을 경우, 시험 시스템에 누설이 없음을 확인하고 나서 다시 그 연료 봉을 시험해야 한다. 시스템의 손상으로 생긴 가장 흔한 누설은 탄성중합체의 밀봉 쪽이다. <그림 13>은 원전 연료의 압력 감쇠 누설시험 기간 동안 허용 가능한 시험 압력 기록의 대표적인 사례이다.



<그림 13> 압력 감쇠 누출량 시험 중에 시험한 수용 가능한 핵연료 봉의 압력 기록

(원고 접수일 2000. 8. 22)