

《解 說》

고리원자력발전소 제 1 호기 격납용기 전체누설률시험

오병환 · 이삼래 · 김병구

韓國原子力研究所

(접수 : 1977. 9. 9)

1. 서 론

격납용기내에는 원자로가상사고시 뿐만아니라 정상가동시에도 그 내부공기에 방사능물질이 함유하고 있으므로 격납용기는 이를 허용량이하로 누출을 억제하도록 설계되어 있다. 따라서 원자력발전소 격납용기 및 그에 부착된 모든계통들에 대한 누설률을 측정하여 허용량과 비교하게 되며, 만일 측정된 누설률이 허용량을 초과한다면 누설부분을 조사하여 보수가 완전히 이루어진후 재측정을 하여 허용량이하임을 입증하여야 한다.

고리 1호기에서도 위와같이 격납용기 및 그의 부수되는 계통들의 건설완료와 더불어 국내최초로 격납용기전체누설률 시험(Containment Vessel Integrated Leak Rate Test)이 1976년 10월 28일부터 1976년 11월 9일의 기간동안에 수행되었다.

격납용기전체 누설률시험(ILRT)은 국부 누설률시험(Local Leak Rate Test)에 대응하는 말로서 격납용기 관통부분(Containment Penetration), 인원및장비출입구(Personnel and Equipment Access Hatch)등 국부적인 장소의 누설률시험인 국부누설률시험이 끝난후 격납용기전체에 대하여 행하는 누설률측정시험을 말한다. 그러므로 국부누설률시험에서 만족한 결과가 나오지 않는다면 격납용기 전체누설률시험을 수행할 수 없게 된다. 고리1호기는 국부누설률시험이 끝난후 바로 전체누설률시험에 들어갔으며, 이 누설률시험실시에 대한 적용법규및기준은 10 CFR Part 50의 부록 J “경수냉각로의 격납용기누설률시험”과 ANSI N45.4-1972 “원자력발전소 격납구조물의 누설률시험”의 실시근거에 따라 수행되었다. 이 적용근거는 한전과 W 간의 계약서상에 명시된 적용조건이며 이 근거에서 요구하는 모든 조건에 만족할 수 있도록 시험이 행해져야 한다. 또한 격납용기전체누설률시험은 가동전에 가동전시험(Pre-oper-

ational Test)의 일환으로 실시 될 뿐만아니라 가동중에도 10년에 3번씩 주기적으로 시험을 실시하여 누설률을 측정하도록 되어 있다.

본 해설은 국내 최초로 수행된 고리 1호기 격납용기 전체누설률시험의 중요성에 비추어 시험에 관한사항을 빠짐없이 서술코저, 시험의 구체적인 근거, 시험과정, 시험장비및기기등에 관한 기술적인면은 제2장에, 누설률계산방법, 측정치처리, 오차분석등에 관한 이론적인면은 제3장에 그리고 마지막 결론을 제4장에 수록하였다.

그리고 참고를 위하여 고리1호기의 격납용기전체누설률시험의 결과를 외국의 다른 원자력 발전소의 누설률 시험결과와 비교하면 표 1과 같다.

2. 시험방법의 기술성검토

2.1. 시험기준

고리 1호기 격납용기전체누설률시험은 한국원자력법의 시설점사규정에 의거 한전계약서상의 누설률시험규정의 해당적용법규 및 기준에 따라 실시되었으며 그 근거규정을 요약하면 다음과 같다.

2.1.1. 한국원자력법

원자로의 건설 및 운영관리등에 관한 규정 제11조(시설검사) : 원자로 설치자는 제10조 “설계및공사방법의 승인”의 규정에 따라 승인을 받은 원자로시설에 관한 공사에 대하여 구체적인 사항을 기재한 신청서를 과학기술처 장관에게 제출하여 그 검사를 받아야 한다.

2.1.2. 한전 계약서

한전계약서 KEC-70-100에 대한 기술사양서중 부록 제 3.2.7.2절에는 “누설시험”에 대하여 다음과 같이

표 1. 세계각국의 격납용기 누설률 시험결과 비교⁶⁾

격납용기명	용적 (m ³)	허용 누설률 (용적 %/day)	시험 압력 (kg/cm ² G)	측정된 누설률 (용적 %/day)	측정법
고리 1호기	41,060	0.1	3.01, 1.505	0.055, 0.052	절대법
BigRock Point	26,000	0.5	1.9, 0.7	0.036, 0.021	기준용기법
CVTR	6,800	0.1	1.98	0.074	"
Dresden	82,000	0.5	2.07, 1.93 0.35	0.1, 0.06 0.0187	"
ETR River	8,100	0.1	1.5	0.09	"
Enrico Fermi	7,900	0.15	2.1	0.036	"
EBR-II	12,500	0.125	—	—	절대법
EGCR	38,500	0.5	0.63	0.1	"
HWCTR	9,000	1.0	1.68	0.56	기준용기법
Indian Point	51,000	0.1	1.76, 0.7	0.014, 0.02	"
NS Savannah	900	1.5	4.2	—	"
Pathfinder	4,100	0.2	5.5	0.1	"
PRTR	11,300	0.25	1.05	—	"
Saxton	4,000	—	2.1	0.04	"
VBWR	3,500	1.0	3.15	0.1	"
Yankee	24,500	0.1	1.86, 1.12 1.05, 0.85	0.027	절대법 및 기준용기법
EBWR	11,300	0.25	—	0.05	절대법
JPDR	6,110	0.5	3.66	—	절대법 및 기준용기법

규정하고 있다. “격납용기에 대한 건설의 완료와 더불어 실시되는 격납용기누설률시험에 있어서 측정되는 누설률은 가상사고압력에서 24시간동안에 격납용기내의 공기체적의 0.1%를 넘어서는 안된다. 시험방법은 절대법(Absolute Method)이나 기준용기법(Reference Vessel Method)중 어느 방법으로 실시해도 좋으나 적용기준은 American Nuclear Society의 기준(ANSI)에 따라 실시되어야 한다.”

2.1.3. 시험시 적용법규 및 기준

가) 미국 10 CFR Part 50, 부록 J, “경수 냉각로의 격납용기 누설률시험”

나) ANSI N45.4—1972, “원자력발전소 격납구조물의 누설률시험”

다) ASME Code, Section III, Class B Vessels, 1968의 Article 7 “Testing”

위의 세가지 요구조건을 만족시키도록 누설률시험이 실시되어야 한다.

2.1.4. 시험의 수락기준(Acceptance Criteria)

시험실시결과 측정된 누설률은 10 CFR Part 50, 부

록 J,에 규정된 수락기준내에 들어야 하며 각 시험단계별 수락기준은 다음과 같다.

가) 환산압력누설률시험(Reduced Pressure Leak Rate Test)시 : 누설률이 0.75 L_r [L_r 는 환산압력(21.5 psig)에서의 24시간동안의 허용 누설률]이내이어야 한다.

나) 최고압력 누설률시험(Peak Pressure Leak Rate Test)시 : 누설률이 0.75 L_o [L_o 는 최고압력(43 psig)에서의 24시간동안의 허용 누설률]이내이어야 한다.

고리 1호기의 경우 허용누설률 L_r 및 L_o 는 0.1%/day로 되어 있다.

2.2. 시험압력

격납용기전체누설률시험압력은 원자로 최대가상사고시의 최고압력인 43 psig(고리 1호기 최종안전성분석보고서 제3.8.2.3.1.8.항 참조)에서 최고압력누설률시험을 실시하며, 그 준비 시험단계로서 21.5 psig에서의 환산압력 누설률시험(10 CFR Part 50, 부록 J에 최고압력시험을 하기전에 반드시 최고압력의 50%이상의 압력에서 환산압력 시험을 수행하도록 되어있다)을 먼저 실시한다.

그리하여 원자로가상사고시의 높은 압력하에서도 방사능물질의 외부누출이 허용치 이내라는것을 입증해야만 하는 것이다. 또한 원자로가상사고시의 높은압력하에서 격납용기의 구조적 완전성(Structural Integrity)을 점검하고, 구조역학적 강도를 입증하기 위하여 설계 압력(38.7 psig, 고리 1호기 최종안전성분석보고서 3.8.2참조)의 1.25배 (ASME Code Section III, 1968년도판, 제 7 항, N-713.2 참조)인 48.4 psig에서 구조적 완전성시험(Structural Integrity Test, SIT)을 실시하여 격납용기가 충분한 강도를 유지하고 있음을 확인해야 한다.

위 각 압력에서의 시험방법 및 과정은 다음절의 시험과정에서 상세히 설명되고 있다.

2.3. 시험방법

시험실시에 따라 분석에 필요한 자료를 수집하여 처리 및 분석하는 방법에는 다음과 같은 종류의 방법이 있다.

2.3.1. 절대법(The Absolute Method)

격납용기내 공기의 절대온도, 절대압력 및 습도를 직접 측정후 (제 2.5절에서 자세히 설명됨) 이를 이용하여 규정된 시간간격동안의 공기누설률을 계산하는 법이다. 고리 1호기에서는 절대법을 사용하여 시험이 실시되었으므로 이에 대한 자세한 시험방법 및 누설률 계산은 2.4절과 3장에 서술한다.

2.3.2. 기준용기법(The Reference Vessel Method)

격납용기 내부의 전체공기의 평균온도를 대표할 수 있도록 설치된 기밀기준계통(Gas-tight Reference System)과 격납구조물과의 압력차를 측정하여 계산하는 법이다. 격납용기의 누설은 위치에 따라 변화하며 24시간 당 변화의 범위는 격납용기내 전체체적의 2%~0.1%에 이른다. 시험이 실시되는 가운데 측정되는 사항은 격납용기 내부 및 외부의 압력, 온도 및 습도와 격납용기와 기준계통(Reference System)간의 압력변이 등이다. 실제계산에서는 측정된 각항에 있어서 보정이 이루어져야 한다. 절대값들의 변화는 대단히 작기 때문에 실시후 첫 24시간의 결과와 일치되지 못한 경우에는 24~48시간을 더 계속하여 실시되어야 한다.

실제에 있어서 측정치기록은 매시간당으로 취해지며 이로부터 누설률이 계산된다. 수집된 자료로부터 누설률계산 공식은 다음과 같다³⁾.

$$\% \text{ Loss} = \frac{1}{P_1 - P_{w1}} \left[\frac{\Delta P_2 T_1}{T_2} - \Delta P_1 - (P_{w1} - \frac{P_{w2} T_1}{T_2}) \right] \times 100$$

여기서

P : 격납용기내의 절대압력으로 계기압력과 대기압의 합계

P_w : 격납용기내의 수증기압

ΔP : 격납용기와 기준계통간의 압력차(Inches of Water)

T : 격납용기내의 온도 ($^{\circ}R (=^{\circ}F + 460)$)

위에서 점자 "1"은 시험이 실시된 시각의 값이고 "2"는 시험이 시작된후 t 시간 만큼후의 값을 나타낸다. 상기 기술된 식은 시간당으로 수집된 자료를 바탕으로 계산된 값이다. 계산된 결과는 t 시간동안의 값이므로 24 시간 동안의 누설률은 $24/t$ 를 곱하여 주면된다. 격납용기내의 온도와 습도를 나타내기 위한 노점(Dew Point)은 기준계통의 각 부분에 의해 대표되는 체적에 따라가중평균되어야 한다. 온도의 변화로 인하여 격납용기와 기준계통간의 압력변화는 상승과 하강을 하기때문에 시험이 시작될때는 어느 방향으로든지 그 변화를 감지할 수 있도록 1.5~2.0 inch의 수주의 압력변이를 읽을 수 있도록 해야 한다.

2.4. 시험과정

격납용기 전체누설률시험(10 CFR Part 50, 부록 J에서는 A형시험으로 분류되나 이는 곧 격납용기전체누설률시험을 의미한다.)은 국부누설률시험(B형, C형시험으로서 격납용기 관통부분, 인원 및 장비 출입구, 격리밸브등의 국부적인곳의 시험을 말한다.)을 완료한 후에 실시되어진다.

고리 1호기의 격납용기전체누설률시험은 국부누설률시험이 완료된후에 위의 제2.1.3절에 규정된 기준에 의하여 수행되었으며, 이 기준과 실제 수행된것을 종합하여 시험선행조건, 시험시의 제한 및 주의사항, 시험의 시행순서, 시험중의 측정치 수집 및 결과분석등을 서술하면 다음과 같다.

2.4.1. 시험선행조건

시험의 선행조건은 시험실시전에 이루어져야 할 모든 계통 및 갖추어야 할 모든 사항들을 말하며 이것이 완료되어야 시험이 실시될 수 있다.

전체누설률시험의 선행조건중 중요한것 몇가지를 들면 다음과 같다¹⁰⁾.

가) 격납용기 건설이 완료되고, 그에 부수되는 관통부분(Penetration), 에어록(Air-lock), 장비반입구(Equipment Access Hatch), 등에 대한 시험이 완료되어야

한다.

나) 국부누설률시험이 완료된 후다야 하며 이 누설률이 규정허용치 ($0.6L_a$) 이내에 들어온다는 것을 입증해야 한다.

다) 격납용기내부의 모든 수분이 제거되어야 하며 시험압력에 견딜 수 없는 계통및기기를 외부로 옮기거나 압력용기의 뚜껑을 열어놓아야 한다.

라) 내부의 모든 가연성물질, 소화기등이 제거되어야 하고, 원환부(Annulus)부분에 동바리 및 조명시설이 완료되어 시험시 외부검사를 할 수 있게끔 해야 한다.

마) 시험기기의 보정과 정밀성이 시험되어야 한다.

2.4.2. 시험상의 제한 및 주의사항

이는 시험도중에 지켜야할 몇가지 제한사항들이며 주요한것 몇가지를 들면 다음과 같다.¹⁰⁾

가) 격납용기를 48.9 psig 이상 가압하여서는 안된다. [설계압력 38.7 psig, 구조적 완전성시험(SIT) 압력 48.4 psig]

나) 원환부의 평균온도가 30°F 이하일때는 가압하지 않아야 한다.

다) 시험도중 대량의 누설이 발견되면 가압을 중지하고 보수후 다시 시작해야 한다.

이 밖에도 용기내부에 들것을 준비할 것, 가압시 가압공기속에 기름이 섞여 들지 않도록 할 것등의 제한사항이 있다.

2.4.3. 시험순서

시험과정의 서술은 고리현장에서 실제로 수행된 것을 중심으로 각 시험단계별 진행과정과 점검사항들을 기술하려 한다. (시험단계는 그림 1참조)

가) 12 psig에서의 격납용기 내외부 검사

가압준비가 완료되면 3 psig/hr 이내의 일정률로 가압을 시작하여 12±0.5 psig에 이르면 가압을 중단하고, 내외부 검사를 실시한다. 12 psig에서 검사를 실시하는 것은 누설부분 및 손상부분을 미리 점검해냄으로써 사전보수를 실시하고자 함이며, 압력을 12 psig로 정한것은 사람이 14.3 psig 이내의 압력하에서는 격납용기 내부에 특별한 조치없이 출입활동할 수 있기 때문이다. (ANSI N45.4-1972, 제7.5절 참조). 내부검사에 들어가는 사람은 간단한 의학적인 신체검사를 받아 합격해야 하며, 조명등과 초음파 누설탐지기(Ultrasonic Leak Detectors)를 지참하고 들어간다. 외부 검사시에는 비누물시험을 실시한다. 이와같이 하여 어떤 이상이 발견되지 않았을 때에는 다음단계로 가압이 시작된다.

나) 21.5 psig에서의 환산압력 누설률 시험

이 압력에서 시험을 실시하는 것은 최고압력시험전에 시행하는 예비시험으로서 최고압력(43 psig)의 50%이상의 압력($21.5^{+0.5}_{-0.0}$)에서 시행하도록 규정되어 있다.

(10 CFR 50, 부록 J). 압력이 시험압력에 도달하면 4~6시간의 안정시간이 필요하고, 이 후부터 적당한 시간을 택하여 24시간의 누설률측정에 들어간다. 24시간동안의 누설률이, 0.75 Lt(Lt는 21.5 psig에서의 규정된 누설량, 즉 0.1%/day)이내에 들어야 합격이라고 판정될 수 있으며, 실제로 고리의 시험결과는 매 시간분석(Point-to-Point Analysis)으로 0.032%/day, 전시간 분석(Total Time Analysis)으로는 0.052%/day 였으므로 무난히 만족하였다.

다) 21.5 psig에서의 환산압력확인시험

이 확인시험은 앞서행한 24시간동안의 환산압력이 과연 확실히 입증할 수 있는 결과이었던가를 확인하기 위하여 행하는 시험으로서 임의의 누설률을 정해서 오리피스(orifice)를 통해 이 양만큼 누설을 시키면서 같은 압력하에서 12시간동안 누설률을 측정하게 된다. 그러므로 실제 누설률은 측정된 누설률에서 정해진 누설률을 빼 나머지로써 이값이 앞서 행한 누설률시험과 거의 일치한다면 정확한 것이다. 여기서 허용치는 $0.75(Lt_m + L_0) < V_{LR} < 1.25(Lt_m + L_0)$ 으로서

Lt_m : 환산압력시험에서 측정된 누설률

L_0 : 임의의 누설률(Known-Leak Rate)

V_{LR} : 확인시험에서 측정된 누설률

을 가리킨다.

고리 현장에서는 임의의 누설률을 0.1 %/day로 고정해 놓고 시험을 시행했으며 그 결과는 매시간분석으로 0.139 %/day(허용치는 0.114~0.190 %/day), 전시간 분석으로는 0.129 %/day(허용치는 0.092~0.154 %/day)로서 만족스러운 결과였다. 즉 앞서행한 환산압력시험의 결과가 정확했다는 것을 입증한 결과가 된다.

라) 격납용기 구조적완전성시험(SIT)

이 시험은 격납용기의 강도가 설계압력하에서 이상이 없으며, 구조적으로 안전하가를 검사하는 시험으로서 시험압력은 설계압력(38.7 psig)의 1.25배(ASME Code 68년도판, Article 7참조)인 48.4 psig에서 약 1시간 가량 실시되었으며 아무 이상없이 끝났다. 이때에는 원환부에 들어가 이상유무를 점검하였다.

마) 43 psig에서의 최고압력 누설률시험

48.4 psig까지 가압된 상태에서 다시 압력을 내려 43 psig에서 고정시켜놓고 시험을 실시했다. 이 43psig는 가장사고시 발생하는 최고압력으로선 이때의 누설률

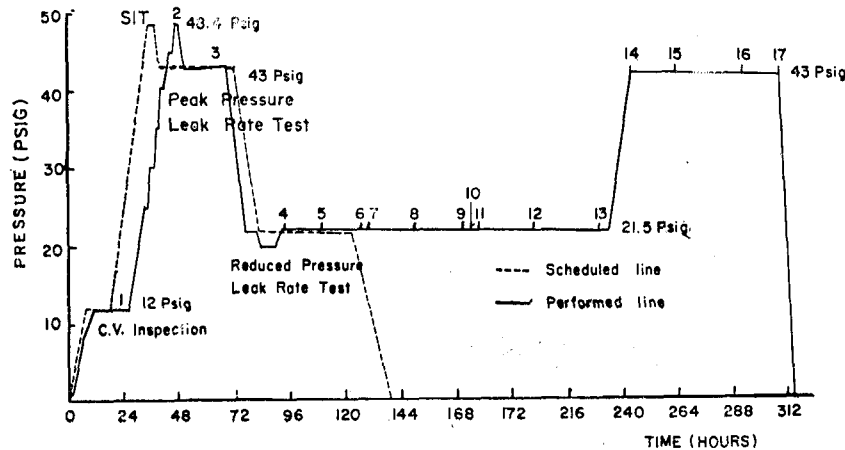


Fig. 1 ILRT Test Pressure Profile for KO-RI 1

주) 그림 1에서의 누설률 시험 진행상황

- ① 12 psig에서의 격납용기 내부검사
- ② 격납용기 구조완전성 검사
- ③ 누설량의 과다로 최고압력에서의 시험중단
- ④ 누설지점 조사 및 보수
- ⑤ 환산압력에서의 누설률 시험시작 (21.5 psig)
- ⑥ " " 시험중단(격납용기 시험에 관련된 밸브의 열림으로 인한)
- ⑦ 환산압력하 누설률시험 재시작
- ⑧ 현재까지 취한 결과 비리고 다시 누설률 계산시작

- ⑨ 누설량 초과로 다시 중단
- ⑩ 격납용기 압력측정용 압력계 감속자 갈아끼움
- ⑪ 환산압력 누설률 시험 다시시작
- ⑫ 환산압력 누설률 시험 완료
- ⑬ 환산압력하의 확인시험 완료
- ⑭ 최대압력 43 psig 도달
- ⑮ 최고압력하의 누설률시험 시작
- ⑯ 최고압력하의 누설률시험 완료
- ⑰ 최고압력에서의 확인시험완료 및 감압시작

이 허용치 이내에 들어야 전체누설률시험이 성공적으로 끝난다. 시험의 진행과정은 21.5psig의 환산압력시험때와 같으며 처음 4~6시간의 안정시간을 두고 난뒤 측정에 들어갔다. 이때의 측정결과는 매 시간분석으로 0.041%/day, 전시간분석으로 0.055 %/day이었으며 허용치인 0.75La (La는 규정된 최대허용누설률=0.1 %/day)이내에 들었으므로 만족스러웠다.

바) 43 psig에서의 최고압력확인시험

이 시험도 3)항과 마찬가지로 앞서의 결과를 확인하는데에 목적이 있으며 임의의 누설률을 0.1 %/day로 고정해 놓고, 4~6시간의 안정이 끝난뒤 12시간동안 시험이 실시되었다. 이때의 측정결과는 매 3시간분석으로 0.154%/day 허용치는 0.106~0.176 %/day, 전시간 분석으로 0.143%/day(허용치 0.116~0.193%/day)이었으며 허용치 이내에 들었으므로 만족스러웠다. 이와 같이 함으로서 실제시험은 모두가 끝났으며 결과가 양호하였으므로 일정한 감압률(4 psig/hr)로 압력을 내림으로서 모든 시험이 끝나게 되었다. (고리 1호기 격납용기 누설률시험 압력현황은 그림 1참조)

2.5. 시험장비 및 기기

2.5.1. 가압장치

격납용기내에 압력을 가하기 위한 장비로서 고리현장에서는 250 GPM의 용량을 가진 콤프레서 8대가 사용되었다.

2.5.2. 온도측정장치

용기내부의 온도를 측정하기 위하여 24개의 온도측정기(RTD)를 설치하여 그들의 평균온도가 누설률 계산에 사용되었다. 가압으로 인하여 용기내부에 생기는 온도차를 없애기 위해 환풍기로 내부공기를 강제순환시켜 내부온도를 비교적 고르게 유지한다. 내부온도는 30분 간격으로 측정되었다. 시험중에 참고하기 위하여 원환 부분의 온도도 측정하는데 이 온도는 누설률 계산에는 사용되지 않는다.

2.5.3. 압력측정장치

용기 내부의 압력을 정밀하게 측정하기 위하여 사용되는 기기로서 시험전에 반드시 보정이 이루어져야 한

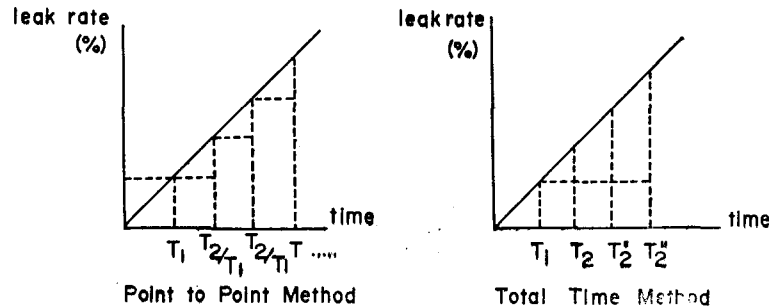


Fig. 2 Leak Rate Calculation Method

다. 압력의 측정은 30분마다 이루어지며 이 결과치가 누설률로 계산된다.

2.5.4. 습도계

용기내부의 습도를 측정하여 압력변화를 수정한다. 이 습도계는 노점의 온도를 측정하여 이 값으로 증기표 (Steam Table)에서 수증기압을 구하여 정밀압력계에서 읽은 압력을 보정한다.

2.5.5. 유속계(Flow Meter)

이 기기는 확인누설률시험시에 임의의 누설량을 측정하는데 사용되는 기기이다. 임의의 누설량의 선정은 실제 시험시 측정된 누설량과 비슷하게 정하는 것이 좋다.

위에 기술한 기기외에도 정밀기압계 (Precision Barometer)를 이용하여 대기압을 측정하며 압력계를 이용하여 격납용기내의 압력을 측정한다.

3. 시험결과와 분석

3.1 누설률계산

3.1.1. 계산식

고리 1호기 격납용기에 적용된 누설률 시험은 절대법으로서 이 방법에 의한 누설률계산은 다음식을 사용하여 계산하며 이에 필요한 측정치들을 매시간 수집하여 처리함으로써 누설률이 구해진다.

$$LR = \frac{24}{H} \left\{ 1 - \frac{T_1}{T_2} \times \frac{(P_2 - P_{v2})}{(P_1 - P_{v1})} \right\} (100)^{23, 10}$$

여기서

LR : 24시간동안의 누설량백분율 (%/day)

H : 누설률을 계산하고자 하는 시간간격

T_1, T_2 : 시간간격 H에서의 초기 및 말기의 평균절대 온도

P_1, P_2 : 시간간격 H에서의 초기 및 말기의 격납용기

내 절대압력

P_{v1}, P_{v2} : 격납용기내 수증기압 (격납용기내 습도로 인한 압력의 보정을 위해 측정된다)

위 측정치중에서 T_1, T_2 는 격납용기내 평균절대온도로서 24개의 지점에서 측정된 온도를 각각의 가중치 (Weighting Factor)를 곱하여 평균한 값이다. P_1, P_2 는 정밀압력계에서 측정된 격납용기의 압력과 측정당시의 대기압을 합하여 얻은 절대압력이다. P_{v1}, P_{v2} 는 3개의 습도계를 이용하여 격납용기내의 노점을 측정하여 이를 증기표 (Steam Table)에서 수증기압으로 환산한 값으로서 격납용기내의 습도로 인한 압력보정을 위해 측정한다.

3.1.2. 계산방법

누설률의 계산은 윗식을 이용하여 다음과 같은 2가지 방법으로 계산한다.

가) 매시간 계산 (Point-to-Point Calculation)

바로전에 측정된 값 T_1, P_1, P_{v1} 과 누설률계산시의 측정값 T_2, P_2, P_{v2} 사이의 누설률을 계산하는 방법으로 보통 시간간격은 1시간이다. 그러므로 기준시점이 자주 변하며 바로 1시간전 측정치가 T_1, P_1, P_{v1} 이 된다. 이 방법은 바로 전 측정치의 오차를 찾는 데 유리하며, 시험이 진행중에 누설률의 변화상태를 고려하기 위해 사용된다 (그림 2참조).

나) 전시간 계산 (Total Time Calculation)

시험시작시의 측정치 T_1, P_1, P_{v1} 은 항상 기준치로서 존재하며 그 사이의 계산시점의 측정치를 T_2, P_2, P_{v2} 로 하여 시간 간격 H마다의 누설률을 계산한다. 그러므로 각 단계의 누설률은 처음부터의 평균된 누설률이라고 할 수 있다. (그림 2참조)

3.2. 자료처리

3.2.1. 측정자료의 처리

가) 온 도

격납용기내 24개소에서 측정되는 온도는 측정시간이나 장소에 따라 편차가 큰 측정치는 사용할 수 없게 된다. 자료수집에서 수락된 이 24개의 측정치에서 누설률을 계산할 때 입력되는 값은 이 24개의 산술평균 온도 값이 아니라 각각 온도계의 위치에 따라 가중치를 곱하여 평균된 값이다.

$$\text{즉 } \frac{1}{T_{eff}} = \sum_{n=1}^{24} \frac{K_n}{T_n} \text{이며}$$

윗식을 이용하여 $M_i = \frac{PV}{RT_{eff}}$ 로 계산된다.

여기서

T_n : 측정시간 t 에서의 n 번째 온도계의 온도

K_n : n 번째 온도계의 가중치

M_i : 측정시간 t 에서의 격납용기내 전질량

각 온도계들의 측정치 사이의 편차가 클에 따라 T_{eff} 는 산술평균온도 T 와 비교할때 그만큼 확산된 값을 갖게 된다. (24개의 가중치의 합은 1.0이 됨)

나) 노점 (Dew Point)

3개의 습도계로부터 노점온도를 측정하게 되며, 이 측정값도 온도와 마찬가지로 가중치를 곱하여 평균된 값이다.

3.2.2. 누설률계산 결과의 처리

누설률계산식에 따라 각 시간별로 나온 계산치들은 일반적으로 시간에 따라 선형적인 증가를 보이지 않고, 분산된 값들을 갖게 되는데, 이 값들에 가장 적합한 누설률과 시간과의 관계식을 최소자승법 (Least Square Fitting)에 의해 구해낸다.

즉 $y = a + bx$ 에서

$$a = \frac{(\sum y_i)(\sum x_i^2) - (\sum x_i)(\sum x_i y_i)}{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{N(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2}$$

여기서

x : 시간 t

y : 시간 t 에서의 누설률

a : 시간 $t=0$ 에서의 누설률

b : 관계식의 경사

N : 측정회수

위의 식으로 구해진 누설률-시간 관계로 95%의 신뢰도를 갖는 편차범위를 정하여 실제 누설률계산결과가 이 범위내에 들어오면 신뢰할 수 있는 계산결과라고 할 수 있다.

3.2.3. 오차분석

기기의 오차는 측정된 전자료를 신뢰할 수 있는가 없

는가에 대한 중요지표가 되는 것으로서 측정기기의 오차계산은 기기구입시 혹은 시험시행전에 꼭 이루어져야 할 사항이다. 여기서 고리 1호기의 기기오차 분석방법과 그 결과를 수록하면 다음과 같다.^{6), 11)}

가) 기기오차 계산식

누설률의 오차식은^{6), 11)}

$$eLR = \left(\frac{24}{H}\right) (100) \left\{ \left(-\frac{T_1}{T_2 P_1} \cdot eP_1\right)^2 + \left(-\frac{T_1 P_2}{T_2 P_1^2} \cdot eP_1\right)^2 + \left(-\frac{P_2}{T_2 P_1} \cdot eT_1\right)^2 + \left(-\frac{T_1 P_2}{T_2^2 P_1} \cdot eT\right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

여기서

P_1, T_1 : 격납용기의 초기절대압력 및 절대온도

P_2, T_2 : 격납용기의 최종절대압력 및 절대온도

eLR : 기기의 누설률 총오차

누설률(LR)이 작은 상태이기 때문에 (고리의 경우는 0.1%/day) $T_2 = T_1$, $P_2 = P_1$ 이라고 할 수 있으며 따라서 $eT_2 = eT_1$, $eP_2 = eP_1$ 이 된다. 그러므로 위 계산식은 다음과 같은 간단한 꼴로 표시된다.

$$eLR = \left(\frac{24}{H}\right) (100) \left\{ 2\left(\frac{eP}{P}\right)^2 + 2\left(\frac{eT}{T}\right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

나) 압력에 의한 오차(eP)

압력에 의한 오차는 압력계이지의 오차(ePG), 대기압의 오차(ePB), 수증기압의 오차(ePV)로 구분되며 압력에 의한 총오차는¹¹⁾

$$eP = \{(ePG)^2 + (ePB)^2 + (ePV)^2\}^{\frac{1}{2}}$$

로 계산된다.

여기서

$ePG = (\text{계이지 정밀도}) \times (\text{계이지의 끝읽음})$

$$= (\pm 0.00015) \times (49.0 \text{ psi})$$

$$= \pm 0.00735 \text{ psi}$$

$ePB = (\text{대기압력계이지의 정밀도})$

$$= \pm 0.0004 \text{ bars}$$

$$= \pm 0.0058 \text{ psi}$$

$$ePV = \frac{(\text{압력계이지의 정밀도})}{(\text{계이지의 총수})^{\frac{1}{2}}}$$

$$= \frac{\pm 1.0^\circ \text{C}}{\sqrt{3}} = \pm 1.04^\circ \text{F}$$

$$= 0.009125 \text{ psi (증기표에서 } 60^\circ \text{F일때의 값)}$$

그러므로

$$eP = \{(0.00735)^2 + (0.0058)^2 + (0.009125)^2\}^{\frac{1}{2}} = 0.0130 \text{ psi}$$

다) 온도에 의한 오차 (eT)

온도에 의한 오차 eT 는

$$eT = \frac{(\text{온도계의 정밀도})}{(\text{온도계의 총수})^{\frac{1}{2}}} = \frac{0.3^\circ \text{C}}{\sqrt{24}} = 0.0612^\circ \text{C}$$

$$=0.1102^{\circ}\text{F}$$

라) 기기의 누설률 총오차 (eLR)

위 (가) 항의 오차계산식에 (나) 항의 압력오차, (다) 항의 온도오차를 대입하면

$$\begin{aligned} eLR &= \frac{(24)}{H} (100) \left\{ 2 \left(\frac{eP}{P} \right)^2 + 2 \left(\frac{eT}{T} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{(24)}{(24)} (100) \left\{ 2 \left(\frac{0.0130}{57.7} \right)^2 + 2 \left(\frac{0.1102}{539.7} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \\ &= 0.043\%/24 \text{ hours} \end{aligned}$$

여기서

H : 24시간(시험시행시간)

P : 57.7 psi(시험시 최고압력)

T : 80°F (시험시 온도)

위 계산결과에서 알 수 있듯이 고리 1호기의 누설량의 총기기 오차는 0.043%/day로서 허용누설량 0.1%/day에 비해 매우 큰 편임을 알 수 있다.

현재 미국에서 사용하고 있는 기기의 총 오차는 0.01%/day¹⁴⁾로서 매우 작은 값이며 이는 기기오차가 누설률 계산결과에 적부판단에 중요한 역할을 하고 있음을 시사해 주는 것이라 하겠다.

4. 결 론

위에서 설명된 바와 같이 고리 1호기 격납용기전체누설률시험은 국내 최초로 수행되었다는 데에 더욱 큰 의의가 있으며 시험도중 많은 어려움이 있었음에도 불구하고 최고압력시험시의 측정결과치가 매시간분석으로 0.041%/day, 전시간분석으로 0.055%/day가 나옴으로서 허용기준치인 0.1%/day이내에 들어 만족스러운 결과로서 성공리에 끝을 맺게 된것이다. 이 측정결과치는 서론의 표 1에서 보는 바와 같이 세계각국의 격납용기전체누설률시험결과치와 비교할때 아주 우수한 편에 들고 있다.

그러나 시험과정속에서 일어났던 시험수행상의 문제점은 많았는데 그중 몇가지 중요한 예를 든다면 시험선행조건이 완료되지 않은상태(전체누설률시험전에 국부누설률시험결과가 나오지 않았음)에서 시험이 실시되었으며 시험절차서(Test Procedures)를 따르지 않거나 시험절차서를 적당한 계통도 밝지않고 함부로변경하는 사례가 발생하였다. 또한 시험기기의 보정(Calibration)이 시험전에 정확하게 이루어지지 않았으며, 시험기기

의 복합오차분석(Combined Error Analysis)결과가 큰 값을 나타내는 등 여러가지 문제점들을 대두시켰다.

이와같은 문제점들은 반드시 수정되어야 하며 후속기전설사업에 참고해야할 중요사항들이 될 것이다.

참 고 문 헌

1. U.S. 10CFR Part 50, Appendix J. "Primary Reactors Containment Leakage Testing for Water-Cooled Power Reactors."
2. ANSI N45.4-1972 "Leakage-Rate Testing of Containment Structures for Nuclear Reactors."
3. Kenneth C. Lish "Nuclear Power Plant Systems and Equipment." Industrial Press Inc., 1972.
4. U.S. NRC, Regulatory Guide 1.68, "Pre-operational and Startup Test Programs for Water-Cooled Power Reactors."
5. 고리원자력발전소 제 1호기 품질보증계획감사 및 가동전시험계획감사에 관한 연구, 한국원자력연구소 1976, 12. 20
6. 三菱重工技報 Vol.7, No.2, "Leak Rate Test on Nuclear Reactor Containment Vessel." 1970. 3.
7. Ko-Ri Nuclear Power Plant Unit. No. 1 FSAR, KECO, 1977.
8. Contract for Ko-Ri Nuclear Power Plant, KECO, Contract No. KEC-70-100.
9. ASME Boiler and Pressure Vessel code, 1968 Edition, Section III, "Nuclear Vessel."
10. C.V. Leak Rate Test Procedure for Ko-Ri Unit 1. (Procedure No. A-3.1.0-3), 1976.
11. 고리 1호기 격납용기 누설률시험 보고서, 고리원자력발전소, 1977.
12. 원자로의 건설 및 운영관리등에 관한 규정, 과학기술처, 1974.
13. 원자력법, 과학기술처, 1973.
14. 미국 Burns & Roe, Inc. 의 시운전 전문가 Mr. B.J. Van Erem 과의 대담내용 (1976.10.6~1976. 11.20)