

## 격납용기 내부 RCS 누설 판정기법 최적화에 관한 연구

### A Study on the Optimization of Decision Technique about RCS Leakage inside Containment Vessel

김준섭, 김승평, 김성영  
조선대학교  
광주광역시 동구 서석동 375

#### 요 약

원자력발전소의 운전 년 수가 증가됨에 따라, 격납용기 내부 RCS 누설이 빈번히 발생되고 있다. 이러한 RCS 누설로부터 발전정지 및 방사선 오염확산과 사고확대 방지를 위해 원전 종사자의 신속한 누설부위 확인 및 조치는 매우 중요하다 하겠다. 이러한 측면에서 본 연구에서는 원전 시뮬레이터를 이용한 모의시험과 운전경험사례 분석을 통한 격납용기 내부 RCS 누설 여부 판정을 위한 최적 기법을 제시하였다.

#### ABSTRACT

Due to the increase in the number of operating nuclear plants, the experience of Reactor Coolant System leakage has been continuously increased. Since commercial operations began with Kori Unit 1 in April 1978, the number of unplanned reactor trips due to RCS leakage inside containment vessel is fifteen as of the end of 2001. Reactor operator's quick decision and action on RCS leakage are very important in order to minimize unplanned shutdowns and to prevent radiation contamination and accident extension due to RCS leakage. Therefore in this study, optimization techniques are suggested to decide RCS leakage inside containment vessel through the results of the analysis of simulation and operation experience examples.

#### 제 1 장 서 론

세계 원자력산업은 그동안 지속적인 성장을 거듭하여 2001년 말 현재 전 세계 31개 국가에서 438기의 원전이 가동 중에 있다<sup>[1]</sup>. TMI 및 체르노빌 원전 사고이후, 국내외적으로 원전의 안전문제가 더욱더 부각되고 있으며, 안전규제 또한 강화되고 있는 실정이다. 뿐만 아니라, 국내 원자력산업도 고리 1호기가 1978년 8월 상업운전을 개시한 이래 지속적인 발전을 거듭하여 2002년말 현재 총 18기의 원전이 운전 중에 있으며 울진 5, 6호기, 신고리 1, 2호기, 신월성 1, 2호기가 건설 중에 있다<sup>[1,2]</sup>.

원자력발전소에 있어서 안전성과 신뢰성 제고는 그 무엇보다 중요하다 하겠다. 원전의 운전 년 수가 증가됨에 따라서 계통 배관, 밸브 및 용접부의 경연 열화 등의 원인으로 격납용기 내부에서 RCS 누설이 국내외 원전에서 빈번히 발생되고 있다. 특히 RCS는 고온, 고압의 방사성 유체를 함유하고 있기 때문에 계통 누설시 신속한 누설부위의 확인과 격리가 이루어지지 않으면 CV 내부 방사능 오염 확산 및 사고 확대로

이어질 수 있다. 그러므로 RCS 누설 시 즉각적인 누설부위 확인과 차단 조치는 원자력발전소 운영에 매우 중요하며, 특히 RCS 누설증상을 조기에 탐지해 내는 것은 원전 안전운전의 필수 요소라 하겠다. 이러한 관점에서 격납용기 내부 RCS 누설 시 누설 판정기법을 최적화하여 신속한 RCS 누설여부 판정 및 누설부위 확인, 격리함으로써 격납용기 내부의 방사선 오염 및 종사자의 방사선 피폭선량을 최소화하고, 사고확대를 사전에 방지하고자 본 연구를 수행하였다.

따라서 본 논문에서는 1단계로 격납용기 내부 주요 RCS 누설 현황에 대하여 분석해 보았고, 2단계로 RCS 누설 판정기법 최적화 방안에 대하여 분석해 보았다. 먼저 1단계인 격납용기 내부 주요 RCS 누설 현황 분석에서 RCS 누설 정의 및 판정기준, RCS 누설 탐지설비 및 누설판정 인자, 그리고 RCS 누설 현황에 대하여 연구를 수행하였다. 다음 2단계인 RCS 누설 판정기법 최적화 방안 연구에서는 RCS 누설률 판정기법 분석, RCS 누설시 주기별 주요 운전변수 분석, Simulator 모의시험과 실증사례 분석 등에 대한 연구를 수행하여 RCS 누설 판정 체적화 기법을 제시하였다. 그리고 주요 RCS 누설 징후 판정인자에 대해 Simulator 모의시험과 실증사례를 비교, 분석함으로써 RCS 누설 최적판정 인자들의 우선순위 부여 및 최적 대안 선정작업을 수행하였다.

## 제 2 장 국내외 격납용기 내부 RCS 누설 현황 분석

### 제 1 절 격납용기 내부 RCS 누설 정의 및 판정기준

원자력발전소에서 정상운전 중 격납용기 내부에서 누설 가능성이 있는 계통으로 크게 1차계통과 2차계통으로 대별할 수 있는데, 본 논문에서는 방사성물질을 함유하고 있는 1차계통, 즉 원자로냉각재계통(RCS) 누설에 관한 최적 판정기법 개발에 관한 연구를 수행하였다.

#### 1. 계통 기능<sup>[3]</sup>

가. 원자로냉각재계통(Reactor Coolant System)

원자로냉각재계통은 원자로에서 연료의 핵분열로 발생하는 열에너지를 전달하고 수송하는 냉각재의 계통이다. 이 계통은 보통 터빈 또는 열교환기를 포함한 순환유로를 구성하고 있다.

나. 격납용기계통(Containment Vessel System)

격납용기계통은 원자력시설의 공학적 안전설비의 하나로서 비상시에 원자로 및 부속장치로부터 누설될 가능성이 있는 방사성 물질이 외부에 방출되지 않게 하기 위하여 설치한 기밀성 및 내압성을 가진 건물로서 핵물질의 밀폐를 위해 설계된 물리적인 장벽을 의미한다.

#### 2. 원자로냉각재계통(RCS) 누설 정의<sup>[4]</sup>

가. 확인 누설 :

- 1) 밀폐계통인 격납용기 배수조 또는 수집탱크로 유입되는 펌프밀봉이나 밸브 Packing 누설
- 2) 누설탐지계통의 작동을 방해하지 않거나, 압력경계누설이 아닌 것으로 알려진 특정위치의 누설 원으로부터 격납용기 대기로의 누설
- 3) 증기발생기 Tube를 통해 2차측으로의 원자로냉각재 누설

나. 미확인 누설 : 확인누설 및 제어누설을 제외한 모든 누설

다. 제어 누설 : 원자로냉각재펌프(RCP) 밀봉장치 밀봉수 유출 유량 누설

라. 압력경계 누설 : RCS 기기 본체, 배관 또는 원자로 용기벽의 격리 불가능한 결함을 통한 누설(증기발생기 튜브누설 제외)

#### 3. RCS 누설률 판정기준<sup>[4]</sup>

가. 압력경계 누설 : 없음

나. 미확인 누설 : 0.227 m<sup>3</sup>/hr(1gpm) 미만

다. 확인 누설 : 2.27 m<sup>3</sup>/hr(10gpm) 미만

- 라. 모든 증기발생기의 1차측에서 2차측으로 총 누설 : 0.227 m<sup>3</sup>/hr(1gpm) 미만
- 어느 한 증기발생기 누설 : 1.89 m<sup>3</sup>/Day(500gpd) 미만
- 마. RCS 압력이 157.14±1.41 kg/cm<sup>2</sup>일 때 제어누설 : 6.8 m<sup>3</sup>/hr (30gpm) 미만
- 바. RCS 압력이 157.14±1.41 kg/cm<sup>2</sup>일 때 압력차단밸브 누설 : 0.227 m<sup>3</sup>/hr(1gpm) 미만

**4. RCS 누설시 조치사항<sup>[4]</sup>**

- 가. 어떤 압력경계 누설이 있을 때 6시간 내에 최소한 고온대기 상태에 있어야 하고 그 이후의 30시간 내에 저온정지 상태에 있어야 한다.
- 나. 압력경계 누설과 RCS 압력 격리밸브로부터의 누설을 제외한 어느 원자로 누설률을 그 한계치 이내로 감소시키거나 혹은 그 이후 6시간 이내에 적어도 고온대기 상태이어야 하며 그 다음 30시간 이내에 저온정지 상태이어야 한다.
- 다. 어떤 RCS 압력격리 밸브의 누설이 위의 한계치 보다 큰 경우에는 4시간 이내에 누설률을 한계치 내로 감소시키거나 최소한 2개의 닫혀진 수동밸브 혹은 작동되지 않은 자동밸브를 사용하여 저압부분을 영향 받은 계통의 고압부분으로부터 격리시켜야 하며, 그렇지 않으면 그 이후 6시간 이내에 적어도 고온대기 상태이어야 하며 그 다음 30시간 이내에 저온정지 상태이어야 한다.

**제 2 절 격납용기 내부 RCS 누설탐지계통 및 누설 판정 인자**

본 절에서는 원자력발전소 정상운전 중 격납용기 내부 RCS 누설탐지계통, RCS 누설 판정 인자 그리고 RCS 누설 점검 주기에 관해 분석해 보았다.

**1. RCS 누설 탐지계통<sup>[4,19~22]</sup>**

- 가. 격납용기 대기 기체 및 입자방사선 감시계통
- 나. 격납용기 배수조 수위 감시계통
- 다. 격납용기 습도 측정계통

**2. RCS 누설 판정 인자<sup>[4,19~22]</sup>**

- 가. 격납용기 대기 입자, 가스, 옥소 방사능
- 나. 격납용기 대기 습도
- 다. 격납용기 대기 온도
- 라. 격납용기 대기 압력
- 마. 격납용기 Sump 수위
- 바. RCS 누설률

**3. RCS 누설 감시관련 주요 운전변수 점검항목 및 점검 주기<sup>[4,19~22]</sup>**

표 2-1과 같이 RCS 누설 감시관련 주요 운전변수에 대한 점검 주기는 다양하다. 누설탐지계통의 운전변수는 12시간 주기로 점검을 수행하며, RCS 누설률 점검은 72시간마다 수행한다.

표 2-1 RCS 누설 감시관련 주요 운전변수 점검항목 및 점검 주기

점검 주기	12 시간	24 시간	72 시간
점검 항목	· 격납용기 대기 입자, 가스, 옥소 방사능 준위 감시 · 격납용기 대기 습도 감시 · 격납용기 Sump 수위	· Rx Head Flange 누설 · 격납용기 대기 온도 · 격납용기 대기 압력	· RCS 누설률 감시

### 제 3 절 격납용기 내부 RCS 누설 현황 분석

원자로냉각재계통은 고온, 고압의 방사성 유체를 함유하고 있고 운전 년 수가 증가됨에 따라 RCS 누설이 빈번히 발생되고 있으며, 누설 가능성 또한 매우 크다고 할 수 있다. 이런 측면에서 RCS 누설 여부를 조기에 판정하기 위한 적절한 대응조치를 취하는 것은 사고 확대 방지 및 방사선 오염 확산 방지 측면에서도 매우 중요한 일이라 하겠다<sup>[5]</sup>. 따라서 본 절에서는 격납용기 내부 RCS 누설 관련 발전정지 현황과 격납용기 내부 RCS 누설 현황에 대해서 분석하였다.

#### 1. 국내 원자력발전소 정지 현황 분석

##### 가. 국내 원전별 고장정지 현황 및 CV 내부 RCS 누설로 인한 발전정지 현황 분석<sup>[6,7]</sup>

고리 원자력 1호기가 상업 운전을 시작한지 23년이 지난 2001년 말 현재 국내 원전 고장정지 건수는 총 346회이고, RCS 누설로 인한 발전정지 건수는 총 15회로 분석되었다. 따라서 격납용기 내부 RCS 누설로 인한 발전정지 비율은 총 고장정지 건수 대비 약 4.3%를 차지하고 있다.

표 2-2 국내 원전별 고장정지 현황 및 CV 내부 RCS 누설로 인한 발전정지 현황

년도	고리				영광				울진				월성				고장정지/ RCS 누설정지 (회)
	#1	#2	#3	#4	#1	#2	#3	#4	#1	#2	#3	#4	#1	#2	#3	#4	
1978	17																17
1979	13																13
1980	8																8
1981	7																7
1982	4																4
1983	9/1	5											4/1				18/2
1984	7	5											4				16
1985	8	15	4										3				30
1986	4/1	4	9	4	7								5/1				33/2
1987	3	5	5	4/1	5	3							1				26/1
1988	1	0	1	3	2	2			2				2/2				13/2
1989	3	3/1	0/1	1	1	2/1			0	1			2				13/3
1990	2	0	3	3	2	1			3	3			1/1				18/1
1991	11	1	0	2	1	2			3/1	1			3				24/1
1992	4	1/1	0	4	1	3			1	0			1				15/1
1993	1	2	3	3	0	2			1	1			1				14
1994	1	1	0	1	1	0			0	1			3/1				8/1
1995	1	2	1	0	1	1	3		1	1			0/1				11/1
1996	0	1	0	0	1	0	1	4	2	1			0				10
1997	0	0	0	0	1	1	1	3	1	1			1	4			13
1998	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0			0	0	3		6
1999	1	0	1	0	1	3	3	1	1	0	1		0	1	0	0	13
2000	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	8
2001	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	1	0	1	1	0	8
계	105/ 2	47/ 2	29/ 1	26/ 1	24/ 0	21/ 1	9/ 0	9/ 0	17/ 1	13/ 0	2/ 0	1/ 0	31/ 7	6/ 0	4/ 0	1/ 0	346/ 15

나. CV 내부 RCS 누설관련 발전정지 현황 분석<sup>17,171</sup>

표 2-3과 같이 2001년 말 현재 CV 내부 RCS 누설로 인한 발전정지 건수는 총 15회로 분석되었으며, 주요 누설계통 및 누설부위는 원자로냉각재계통 RTD 우회배관 차단밸브 누설 및 시료채취 배관 누설로 분석되었다.

표 2-3 CV 내부 RCS 누설관련 발전정지 현황 분석

구분 발전소	노형/ 용량(MWe)	누설 계통	누설 원인	후속 조치 사항
1983. 12. 28 (고리1호기)	PWR/587	RCS	· RCS RTD 우회배관 플랜지 누설	· 원자로 정지 후 우회배관 오리피스 교체
1983. 5. 18 (월성1호기)	PHWR /678.7	연료 취급	· 연료채널 중수 누설	· 원자로건물 삼중수소 농도 증가로 원자로 정지 후 누설부위 정비
1986. 5. 8 (고리1호기)	PWR/587	RCS	· RCP 밀봉수 누설	· 원자로 정지 후 누설부위 용접
1986. 11. 15 (월성1호기)	PHWR /678.7	RCS	· 시료채취 배관 중수 누설	· 원자로건물 삼중수소 농도 증가로 원자로 정지 후 누설부위 정비
1987. 9. 11 (고리4호기)	PWR/950	RCS	· RCS RTD 우회배관 차단밸브 누설	· 원자로 정지 후 밸브 Stem 및 Packing 교체
1988. 8. 16 (월성1호기)	PHWR /678.7	RCS	· 시료채취 배관 중수 누설	· 원자로건물 삼중수소 농도 증가로 원자로 정지 후 누설부위 정비
1988. 9. 9 (월성1호기)	"	RCS	· 제2정지계통 중수 누설	· 원자로건물 삼중수소 농도 증가로 원자로 정지 후 누설부위 정비
1989. 1. 2 (고리2호기)	PWR/650	RCS	· 증기발생기 1차측 Manhole 누설	· 원자로 정지 후 Gasket 교체
1989. 5. 15 (고리3호기)	PWR/950	RCS	· RCS RTD 우회배관 차단밸브 누설	· 원자로 정지 후 우회배관 차단밸브 분해 정비
1989. 6. 17 (영광2호기)	PWR/950	RCS	· RCS RTD 우회배관 차단밸브 누설	· 원자로 정지 후 우회배관 차단밸브 Stem 교체
1990. 12. 2 (월성1호기)	PHWR /678.7	RCS	· 시료채취 배관 중수 누설	· 원자로건물 삼중수소 농도 증가로 원자로 정지 후 누설부위 정비
1991. 6. 6 (울진1호기)	PWR/950	RCS	· 가압기 안전밸브 플랜지 누설	· 원자로 정지 후 플랜지 부위 손상 Gasket 교체
1992. 8. 30 (고리2호기)	PWR/650	RCS	· RCS RTD 우회배관 차단밸브 누설	· 원자로 정지 후 밸브 교체
1994.10.20 (월성1호기)	PHWR /678.7	RCS	· RCS PORV 누설	· 원자로 정지후 누설 PORV Diaphragm 교체
1995.9.24 (월성1호기)	"	RCS	· 금속시편감시계통배수밸브 누설	· 원자로 정지후 내부누설 배수밸브 점검 및 교체

2. 국내의 CV 내부 주요 RCS 누설 현황 분석

표 2-4, 5와 같이 국내의 CV 내부 주요 RCS 누설 현황을 분석하였다. 분석 결과 주요 RCS 누설 부위는 CVCS 충전 및 유출 유로 차단 밸브 누설로 분석되었으며, 최초 누설 탐지계통은 CV Sump 수위 감시계통과 CV 대기 방사능 감시계통으로 분석되었다.

가. 국내

표 2-4 국내 원전의 CV 내부 주요 RCS 누설 현황 분석<sup>[8,17]</sup>

발전소	구분	노형/용량 (MWe)	누설 탐지계통	누설 부위
영광1호기('86.12.14)		PWR/950	CV Sump 수위	· CVCS 충전 Line 밸브 Stem
영광1호기('86.12.28)		PWR/950	CV 방사능 준위	· RCS RTD Line Flow Orifice
영광1호기('88. 3. 1)		PWR/950	CV Sump 수위	· CVCS 충전 Line 밸브 Stem
영광1호기('88.10.20)		PWR/950	CV Sump 수위	· RCS RTD 차단밸브 Stem 누설모관
영광2호기('89. 1.30)		PWR/950	CV 현장 순시	· RCS RTD Line Flow Orifice
고리3호기('89. 2.26)		PWR/950	RCS 누설률	· RCS RTD 우회배관 차단밸브
영광2호기('89. 6.16)		PWR/950	CV Sump 수위	· RCS RTD 차단밸브 Stem
영광2호기('90.12.23)		PWR/950	CV Sump 수위	· CVCS 충전 Line 밸브 Stem
영광2호기('91. 4.13)		PWR/950	CV Sump 수위	· RCS RTD 차단밸브 Stem
영광1호기('91. 4.21)		PWR/950	CV Sump 수위	· CVCS 충전 Line 밸브 Stem
영광2호기('91.12.29)		PWR/950	CV 방사능 준위	· RCS RTD 차단밸브 Stem
영광1호기('92.10. 3)		PWR/950	CV Sump 수위	· CVCS 유출 Line 밸브 Stem
영광2호기('93. 9.11)		PWR/950	CV Sump 수위	· RHR Pump 입구차단밸브 Stem
영광2호기('93.12.12)		PWR/950	CV 방사능 준위	· PASS 설비
영광2호기('94. 9.17)		PWR/950	VCT 수위	· CVCS 충전 Line 밸브 Stem
영광1호기('96.12.30)		PWR/950	CV Sump 수위	· PZR Spray V/V Bonnet Flange
울진1호기('98. 6.27)		PWR/950	CV 방사능 준위	· CVCS 충전유량 격리 밸브
영광1호기('98. 7. 4)		PWR/950	CV 방사능 준위	· RCS RTD Line Flow Orifice
고리2호기('99. 5. 1)		PWR/650	CV Sump 수위	· 제어봉 구동장치 배기 Plug
영광2호기('99. 7.18)		PWR/950	CV Sump 수위	· CVCS 유출 Line Orifice 용접부위
영광2호기('99. 9.24)		PWR/950	CV Sump 수위	· CVCS 유출 Line Orifice 용접부위
영광2호기('00. 3.16)		PWR/950	CV Sump 수위	· RCS 유량측정기 차단밸브
영광2호기('02. 8.11)		PWR/950	CV 방사능 준위	· RCS 유량측정기 차단밸브

나. 국외(미국)

표 2-5 국외 원전의 CV 내부 주요 RCS 누설 현황 분석<sup>[9,10,18]</sup>

발전소	구분	노형/용량 (MWe)	누설 탐지계통	누설 부위
Trojan('88)		PWR/1178	-	· RCP "C" 플랜지 볼트 풀립
Vandellos#2('90.7)		PWR/982	VCT 보충 주기	· RCS Loop "A" RTD Bypass Line Flow Meter Flange Gasket 손상
Oconee Nuclear#3('91)		PWR/934	-	· RCS 고온관 상부 계측관 (3/4") 이탈
Bugey #3('91)		PWR/880	Acoustic System	· Rx Vessel Head Sleeve Crack 누설
Biblis-B('95)		PWR/1300	Camera Monitor	· CVCS Charging Line Leak
Prairie Island#2('98.1)		PWR/560	CV 방사선 준위	· 부분장 제어봉 구동 Housing Crack
Oconee Nuclear #1('00.2)		PWR/934	CV Sump 수위	· RCS 저온관 배수 라인(1 1/2")
Calvert Cliffs#1('00.5)		PWR/860	CV Sump 수위	· RCP 차압 전송기 격리밸브 밀봉부
Crstal River#3('00. 8)		PWR/860	RCS 누설률	· 가압기 PSV 내부 누설
BVPS#2('00.12)		PWR/860	RCS 누설률	· RCS Loop2 배수밸브 Packing
North Anna#2('01.1)		PWR/950	RCS 누설률	· RCS Loop3 Bypass 밸브 Packing

### 제 3 장 CV 내부 RCS 누설 판정기법 최적화 방안 연구

#### 제 1 절 국내 원전별 RCS 누설률 점검방법 및 판정기법 최적화 방안

##### 1. 국내 원전별 RCS 누설률 점검방법<sup>[11~13]</sup>

표 3-1과 같이 국내 원자력발전소에서는 다양한 RCS 누설률 점검방식을 채택하고 있다. RCS 누설률 점검 목적은 RCS 확인 또는 미확인 누설량을 측정하여 방사능 오염사고를 최소한으로 줄이고 더 크게 진행될 수 있는 누설사고를 예방하기 위함이다.

표 3-1 국내 원전별 RCS 누설률 점검방법

발전소 내 용	영광		고리		울진	
	1발전소	2발전소	1발전소	2발전소	1발전소	2발전소
점검 방법	수동	소내 전산기 자동/수동	소내 전산기 자동/수동	수동	수동	소내 전산기 자동/수동
점검 주기	72 시간	72 시간	72 시간	72 시간	24 시간	72 시간
초치 사항	· 압력경계누설 : 6 시간 이내 고온대기 · 기타누설 : 4 시간복귀, 그후 6 시간 이내 고온대기	· 운전제한치의 1/2 값 (114 l/hr, 0.5gpm)도달 시 경고발생 · RCS누설경보, CV고방사능경보 발생 시 1시간 내 계산	· 압력경계누설 : 36 시간 이내 저온정지 · 기타누설 : 4 시간 이내 복귀, 그후 36 시간 이내 저온정지	· 압력경계누설 : 6 시간 이내 고온대기 · 기타누설 : 4 시간 이내 복귀, 그후 6 시간 이내 고온대기	· 미확인 누설률이 230 l/hr (1gpm) 이상시 4 시간 이내 고온대기	· 운전제한치의 1/2 값 (114 l/hr, 0.5gpm)도달 시 경고발생 · RCS누설경보, CV고방사능경보 발생 시 1 시간 내 계산
경보장치	없음	있음	없음	없음	없음	있음
제한치	미확인 누설률	227 l/hr (1gpm)	227 l/hr (1gpm)	227 l/hr (1gpm)	227 l/hr (1gpm)	227 l/hr (1gpm)
	확인 누설률	2270 l/hr (10gpm)	2270 l/hr (10gpm)	2270 l/hr (10gpm)	2270 l/hr (10gpm)	2270 l/hr (10gpm)

##### 2. 국내 원전별 RCS 누설률 점검항목<sup>[11~13]</sup>

표 3-2와 같이 RCS 누설률 점검관련 점검항목이 다양하고 발전소 간 운전변수의 적용에 있어 다소의 차이점이 있다. 특히 울진 1, 2호기의 경우 타 발전소에 비해 RCS 누설률 점검시 다양한 운전변수(격납용기 배수조 수위, 1차측 시료채취량, 축압탱크 수위, 순수 및 봉산수 보충체적 등)를 적용하여 RCS 누설률을 점검하고 있다. 이러한 운전변수의 다양화는 소량의 RCS 누설 시에도 신속한 누설 여부 판정에 크게 기여하고 있다.

표 3-2 국내 원전별 RCS 누설률 점검항목

발전소	영광 원자력	고리 원자력	울진 원자력
1발전소	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 시험 시간</li> <li>2. RCS 평균 온도 및 압력</li> <li>3. VCT 온도, 수위, 압력</li> <li>4. 가압기 온도, 수위</li> <li>5. PRT 온도, 수위</li> <li>6. RCDT 수위</li> <li>7. 모든 S/G를 통해 1차에서 2차측으로 누설되는 총 누설량</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 시험 시간</li> <li>2. RCS 비교최대평균 온도, 압력</li> <li>3. VCT 온도, 수위, 압력</li> <li>4. 가압기 온도, 수위</li> <li>5. PRT 온도, 수위</li> <li>6. RCDT 수위</li> <li>7. SG-"A,B,C" 세관 누설률</li> <li>8. 원자로 출력</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 시험 시간</li> <li>2. RCS 평균 온도</li> <li>3. VCT 수위</li> <li>4. 가압기 수위</li> <li>5. 순수 보충체적</li> <li>6. 봉산수 보충체적</li> <li>7. 격납용기 수조 수위</li> <li>8. 1차측 시료채취계통 시료채취량</li> <li>9. 축압탱크 수위</li> <li>10. 원자로용기 누설 수위</li> <li>11. 가압기보호탱크 수위</li> <li>12. RCS 배수 탱크 수위</li> <li>13. 공정배수탱크 수위</li> <li>14. RCP #3 밀봉수 탱크 수위</li> <li>15. 증기발생기관 누설률</li> </ol>
2발전소	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 시험 시간</li> <li>2. RCS 평균 온도(Tavg)</li> <li>3. VCT 온도, 압력, 수위</li> <li>4. 가압기 온도, 압력, 수위</li> <li>5. RCDT 온도, 압력, 수위</li> <li>6. EDT 온도, 압력, 수위</li> <li>7. CV 온도</li> <li>8. SIT 압력, 수위</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 시험 시간</li> <li>2. RCS 평균 온도, 압력</li> <li>3. VCT 온도, 수위, 압력</li> <li>4. 가압기 온도, 수위</li> <li>5. PRT 온도, 수위</li> <li>6. RCDT 수위</li> <li>7. SG-"A,B,C" 세관 누설률</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 시험 시간</li> <li>2. RCS 평균 온도</li> <li>3. VCT 온도, 압력, 수위</li> <li>4. 가압기 온도, 압력, 수위</li> <li>5. RCDT 온도, 압력, 수위</li> <li>6. EDT 온도, 압력, 수위</li> <li>7. CV 온도</li> <li>8. SIT 압력, 수위</li> </ol>

### 3. RCS 누설률 판정기법 체계화 방안<sup>[11~13]</sup>

표 3-1와 같이 RCS 누설률 점검방법으로 영광 1, 2호기, 고리 3, 4호기, 울진 1, 2호기는 점검 Sheet에 의한 수동계산 방법을 채택하고 있는 반면, 영광 3, 4호기, 울진 3, 4호기, 고리 1, 2호기는 소내 전산기에 의해 자동으로 수행됨으로써 더욱더 최적화된 방법으로 RCS 누설률을 점검하고 있다. 또한 한국표준형 원전인 울진 3, 4호기 및 영광 3, 4호기에서는 안전기능 감시설비에 "RCS Leakage" 및 "RCS Unidentify Leak Over 0.5 GPM Alarm" 경보 장치와 "ICI Cavity/Containment Sump Leak Rate Hi" 경보창이 설치되어 있어 영광 1, 2호기, 고리 1~4호기, 울진 1, 2호기에 비해 RCS 누설여부 판정에 더욱더 효율적이고 신속, 정확하게 RCS 누설 여부를 판정할 수 있다.

따라서 현행 각 원전별 연속 또는 주기적으로 RCS 누설률을 점검하고 있으나, 실시간 RCS 누설률 점검 및 연속 감시 체제로 설비 개선 확대 및 운영기술 향상이 선행되어야 한다. 이를 위해서는 RCS 누설률 자동계산 및 자동 경보시스템 확대 도입 등 누설감시 장치의 첨단화와 누설검출 장치의 다양화가 절대적으로 필요하다 하겠다.



#### 4. RCS 누설률 측정 도표<sup>[13]</sup>

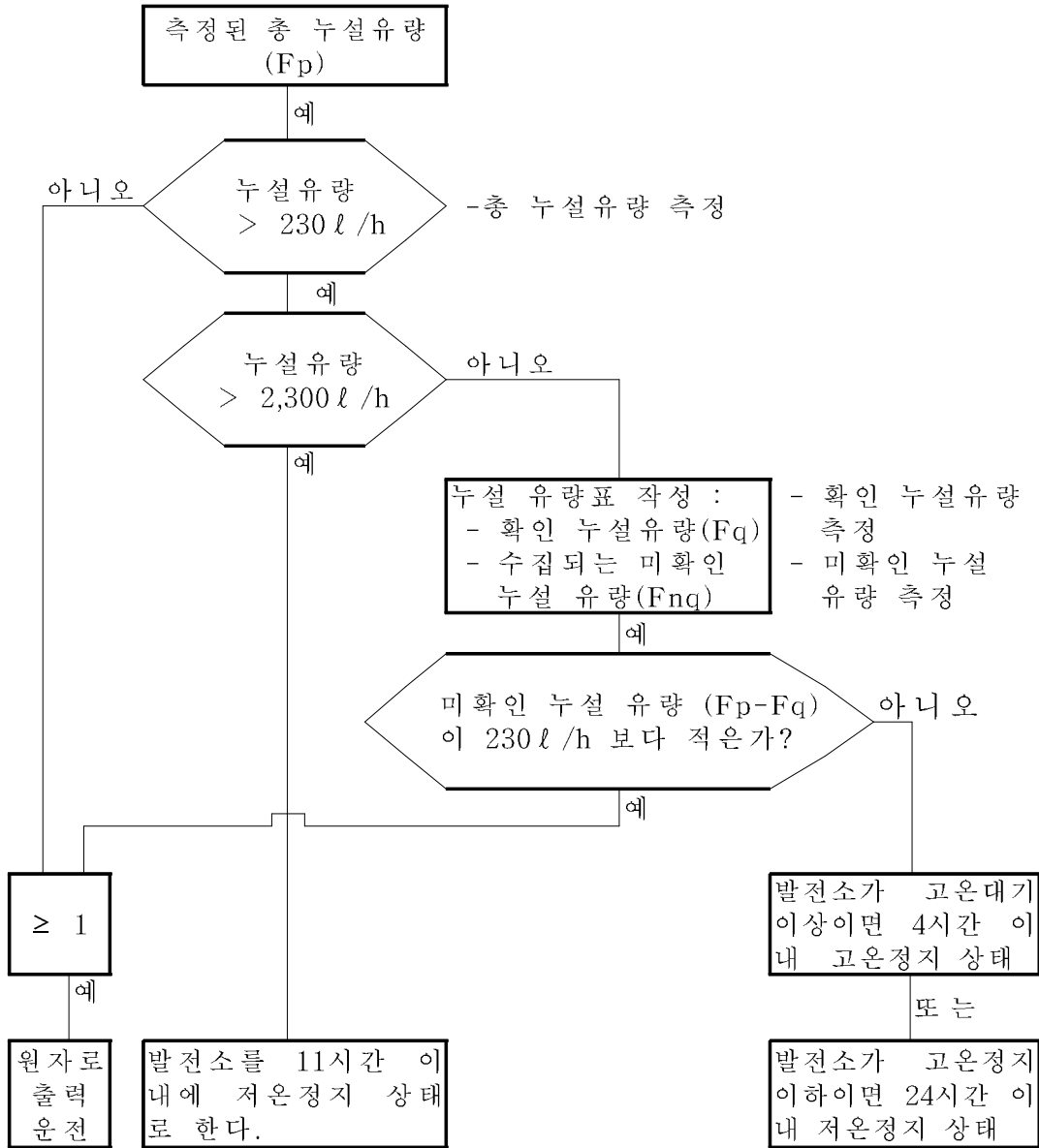


그림 3-1 RCS 누설률 측정 도표<sup>1)</sup>

1) : 상기 도표와 별도로, 증기발생기 1차측에서 2차측으로 누설 유량이 70 l/h 이상이면 발전소를 13시간 이내에 정비 저온정지 상태로 전환한다.

## 제 2 절 모의시험 및 실증사태를 통한 RCS 누설률 판정기법 체적화 방안

### 1. Simulator 모의시험을 통한 RCS 누설률 판정기법 체적화 방안

#### 가. RCS 소량 누설시 주요 운전변수 분석

영광 원전 1, 2호기 Simulator를 통해 RCS 누설량에 따른 주요 운전변수를 분석해 보았다. Simulator 모의시험은 VCT 수위, CV 대기 방사능 준위, CV Sump 수위 그리고 CV 대기 온도 등 4가지 운전변수를 대상으로 수행되었다. 그림 3-2와 같이 본 모의시험 결과, RCS 누설량이 소량인 약 200 l/hr(기술지침서 제한치 : 227 l/hr, 미확인 누설량) 이하일 때, RCS 누설에 따른 VCT 수위 변화는 서서히 감소했으며, CV 대기 방사능 준위는 RCS 누설이 지속됨에 따라 지속적으로 증가되었다. 그러나 CV Sump 수위 변화 및 CV 대기 온도변화에 대한 반응은 일정 기간동안 나타나지 않았다. 따라서 본 모의시험 결과 RCS 소량 누설 시 RCS 누설 여부 판정인자로서 가장 민감하게 반응을 보인 인자는 CV 대기 방사능준위로 분석되었다. 여기서 CV Sump 수위 변화가 민감한 반응을 보이지 않는 이유는 고온, 고압의 RCS 누설수가 CV 대기로 누설 시 증기화로 CV 전역 확산 및 응축되기까지 지연시간으로 인한 영향으로 분석되었으며, RCS 누설수의 CV Sump 유입경로 또한 영향을 준 것으로 분석된다. CV 대기 온도 변화 또한 RCS 누설 후 CV 전역으로 확산되기까지 일정기간 지연되는 것으로 분석되었다.

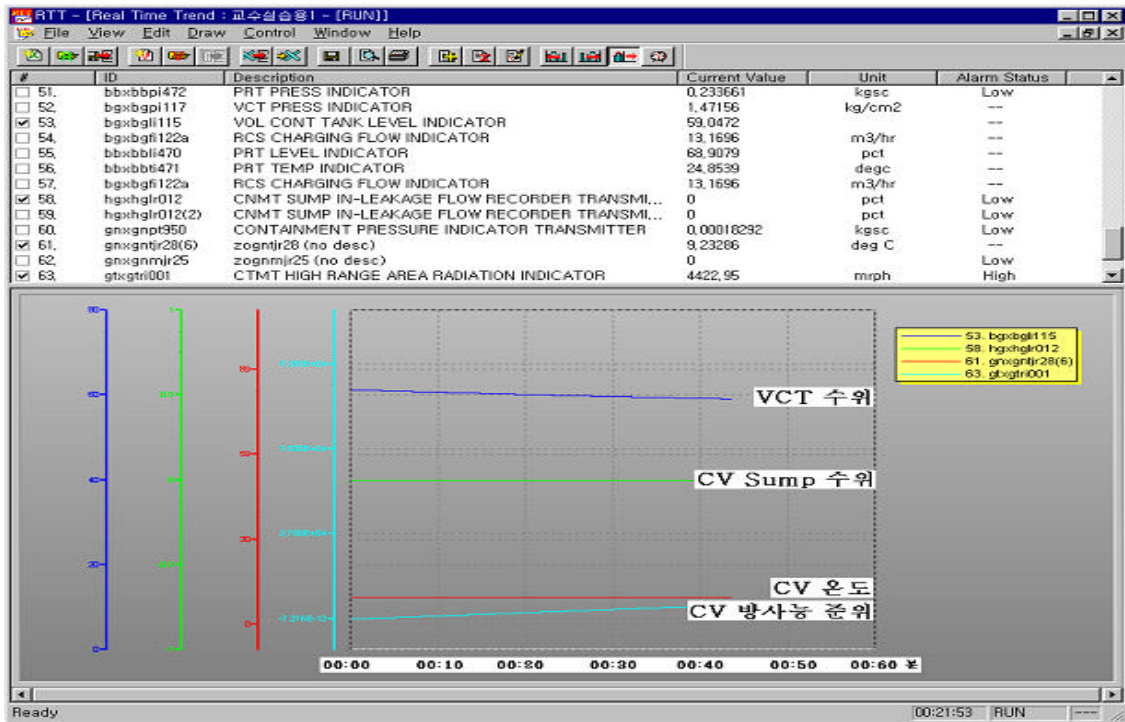


그림 3-2 RCS 소량 누설시 주요 운전변수 변화(Simulator 모의실험 결과)

#### 나. RCS 다량 누설시 주요 운전변수 분석

그림 3-3와 같이 RCS 누설량이 초기 소량(약 200 l/hr) 누설에서 다량(약 12m<sup>3</sup>/hr)으로 증가함에 따라 CV Sump 수위 및 CV 대기 온도변화는 다소 지연반응을 보인 후 급격하게 상승하였고, CV 대기 방사능 준위도 급격하게 증가되었다. 또한 RCS Inventory 상실로 VCT 수위는 감소 후 자동보충으로 다시 증가하는 것으로 분석되었다. RCS 소량 누설 때와 마찬가지로 누설량 증가 시 가장 민감한 반응을 나타낸 인자는 CV 대기 방사능 준위로 분석되었다.

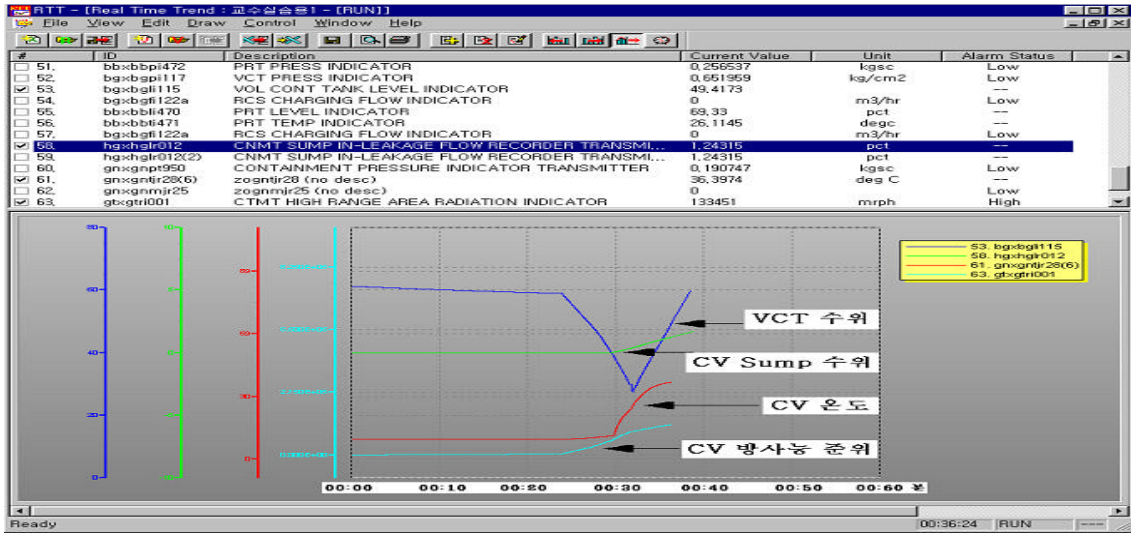


그림 3-3 RCS 다량 누설시 주요 운전변수 변화(Simulator 모의실험 결과)

## 2. 주기별 주요 운전변수 분석을 통한 RCS 누설률 판정기법 체적화 방안<sup>[14]</sup>

영광 1호기 주기별(총 13주기 : 1986. 8. 25 ~ 2002. 2. 2) RCS 총 방사능 준위 변화에 따른 CV 대기 방사능 준위 변화를 분석하였다. 그림 3-4와 같이 격납용기 내부에서 RCS 누설시 CV 내부 RCS 총 방사능준위, CV 대기 입자방사능 준위, CV 대기 가스방사능 준위 변화에 따른 반응을 주기별 운전변수간 상호관계를 분석하여 RCS 누설률 판정기법 체적화 방안을 제시하였다. 그림 3-4와 같이 13주기 동안 RCS 총 방사능 준위는 전체적으로 하향 감소 추세에 있다. RCS 총 방사능 준위 변화는 초기(1~3주기)  $10^{-1}$  uCi/cc에서 지속적으로 감소하여 중기 이후(8, 9주기)에는  $10^{-3}$  uCi/cc로 감소한 후, 후기(10~13주기)에는  $10^{-2}$  uCi/cc로 증가 후 안정추세를 보이고 있다. 또한 RCS 총 방사능 준위 변화에 따라 CV 대기 입자방사능 준위 변화에 영향을 주는 것으로 분석되었다. 그러나 RCS 총 방사능 준위는 주기 초부터 지속적으로 일정 기간 감소하고 있는데, 이는 원전 사업자의 지속적인 RCS 수질관리 및 개선하려는 노력의 결과라 하겠다. 특히 11주기에는 CV 대기 입자 및 가스 방사능 준위가 앞 주기에 비해 그 증가율이 상대적으로 높는데 이는 CV 내부 RCS 누설로 인한 영향으로 분석되었다.

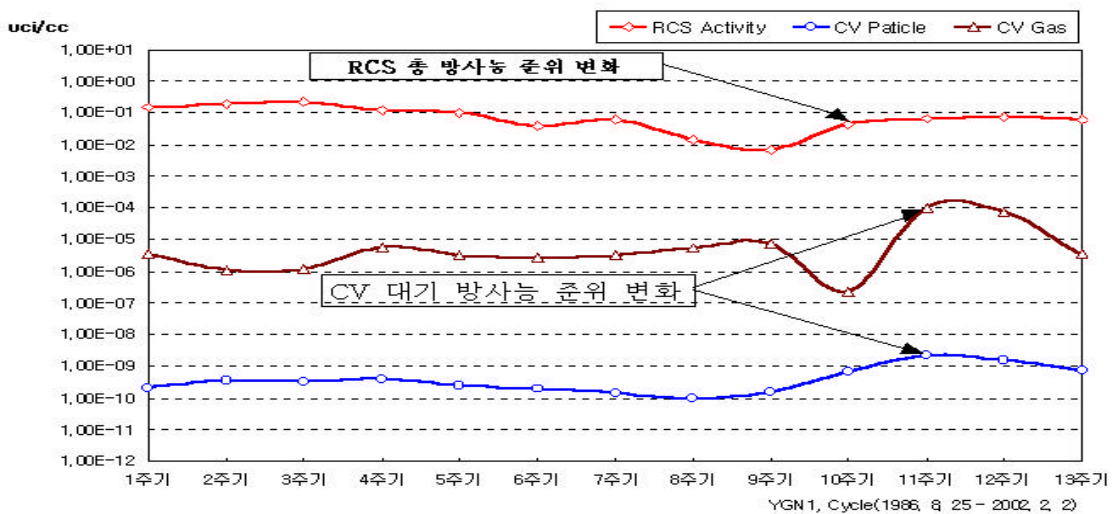


그림 3-4 영광 1호기 주기별 RCS 총 방사능 준위 및 CV 대기 방사능 준위 변화

### 3. 실증사례 분석을 통한 RCS 누설률 판정기법 체적화 방안 가. 영광 1호기 11주기 주요 RCS 누설 사례 분석<sup>[14,15]</sup>

그림 3-5과 같이 영광 1호기 11주기 1998년 4월~7월까지 3개월 동안 RCS RTD Line Orifice 통해 CV 내 RCS 누설 시 RCS 누설률, CV 대기 방사능, CV Sump 수위 변화에 대한 주요 운전변수를 비교 분석하였다. RCS 누설 초기 CV 대기 가스방사능 준위는 증감을 반복하다 중기 이후에는 포화 상태에 도달하여 일정한 준위를 유지하는 반면, CV 입자방사능 준위는 RCS 누설 초기부터 누설부위 격리 시까지 지속적으로 증가됨을 알 수 있다. 누설부위 격리 이후에는 CV 대기 입자 및 가스방사능 준위가 급격히 감소한 후 일정 기간 지난 후 누설 전 준위 값 이하에서 포화상태에 이른다. 따라서 RCS 누설 여부 판정에 CV 대기 방사능 준위 변화가 중요한 운전변수로 분석되었다.

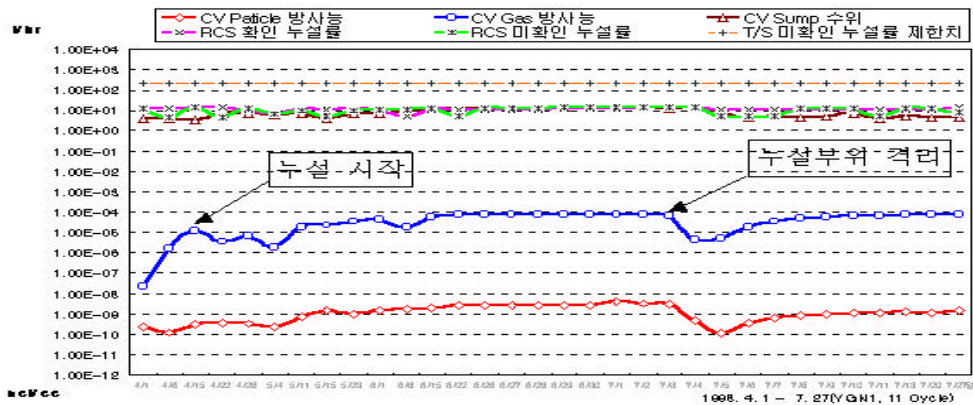


그림 3-5 영광 1호기 11주기 RCS 누설시 CV 대기 방사능 준위 변화

그림 3-6과 같이 CV Sump 수위 증가율은 RCS 누설 초기부터 지속적으로 증가하고 있으며, 누설부위 격리 시 급격히 감소하여 정상상태로 복귀됨을 알 수 있다. 또한 RCS 확인 누설률의 반응은 둔감한 반면 RCS 미확인 누설률은 누설 초기부터 지속적으로 증가하여, 누설부위 격리시 급격히 감소하는 민감한 반응을 보이고 있다. 따라서 RCS 누설 징후 판정에 CV Sump 수위 증가율 변화와 RCS 미확인 누설률 변화가 중요한 운전변수임을 알 수 있다. 또한 RCS 누설량이 소량일 경우 단일 운전변수 감시에 의한 RCS 누설 여부 판정에는 오류가 발생할 수 있으며, RCS 누설을 상당 기간 인지하지 못하는 경우가 있으므로 다양한 운전변수의 감시가 요구된다.

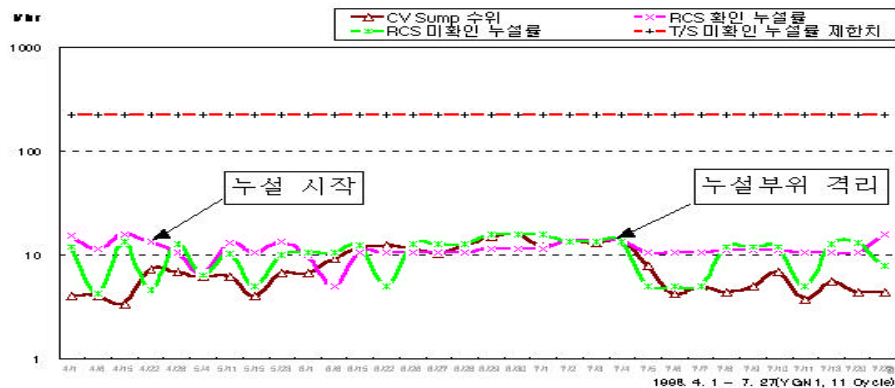


그림 3-6 영광 1호기 11주기 RCS 누설시 CV Sump 수위 및 RCS 누설률 변화

나. 영광 2호기 11주기 주요 RCS 누설 사례 분석<sup>[15,16]</sup>

그림 3-7와 같이 영광 2호기 11주기 CV 내부 RCS 누설(2000. 3)시 CV 대기 온도, 습도, 방사능 준위 및 VCT 수위 변화에 대한 반응을 분석해 보았다. 분석 결과 CV 내부 RCS 누설이 지속됨에 따라 CV 대기 입자방사능 준위는 지속적으로 증가(RCS 누설 전  $10^{-10}$ 에서 누설 후  $10^{-8}$  uCi/cc 증가, 단 RCS 미확인 누설률 : 8.6 l/hr 미만)하는 것으로 분석되었다. 그러나 CV Sump 수위 변화를 제외한 CV 내부 다른 운전변수의 반응은 감지되지 않았다. 즉 RCS 미확인 누설량이 10 l/hr 이하의 소량일 때에는 CV 대기 온도, 습도, 압력 등의 반응은 감지하기 어렵다는 분석 결과를 얻었다

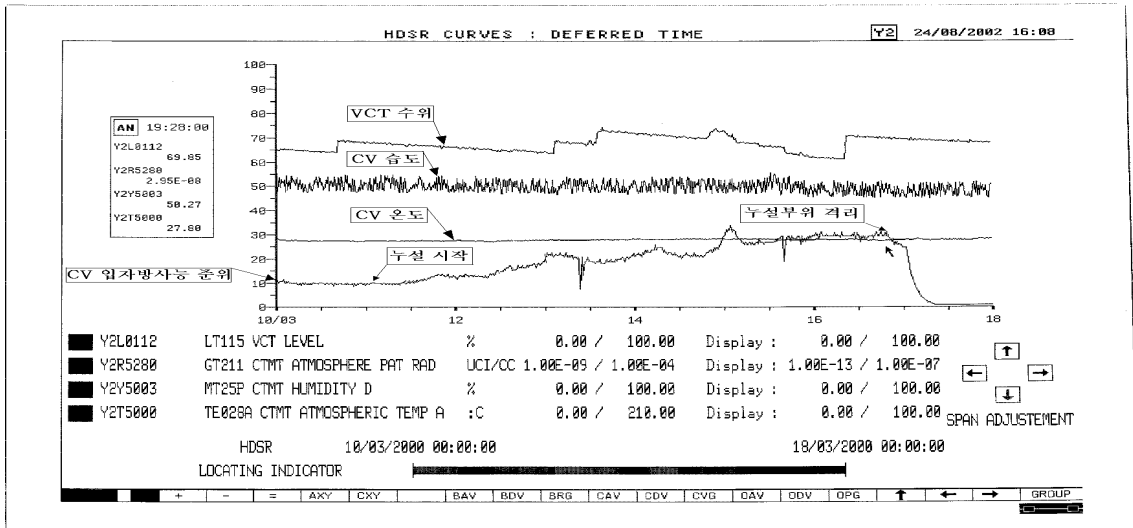


그림 3-7 영광 2호기 11주기 RCS 누설시 CV 대기 온도, 습도, 방사능 준위 및 VCT 수위 변화

그림 3-8과 같이 CV 대기 입자, 가스, 옥소 방사능 준위에 대한 반응을 분석한 결과 CV 내부로 RCS 누설이 지속됨에 따라 입자방사능 준위는 지속적으로 증가(RCS 누설 전  $10^{-10}$ uCi/cc에서 누설 후 최대  $10^{-8}$  uCi/cc)한 후, 누설부위 격리 시 방사능 준위가 급격히 감소하는 것으로 분석되었다. 그러나 가스 및 옥소 방사능 준위의 변화는 감지되지 않았다. 따라서 RCS 소량 누설 시 RCS 누설 여부 판정에 CV 대기 입자 방사능 준위 및 CV Sump 수위 변화가 가장 민감한 반응을 보이는 운전변수로 분석되었다

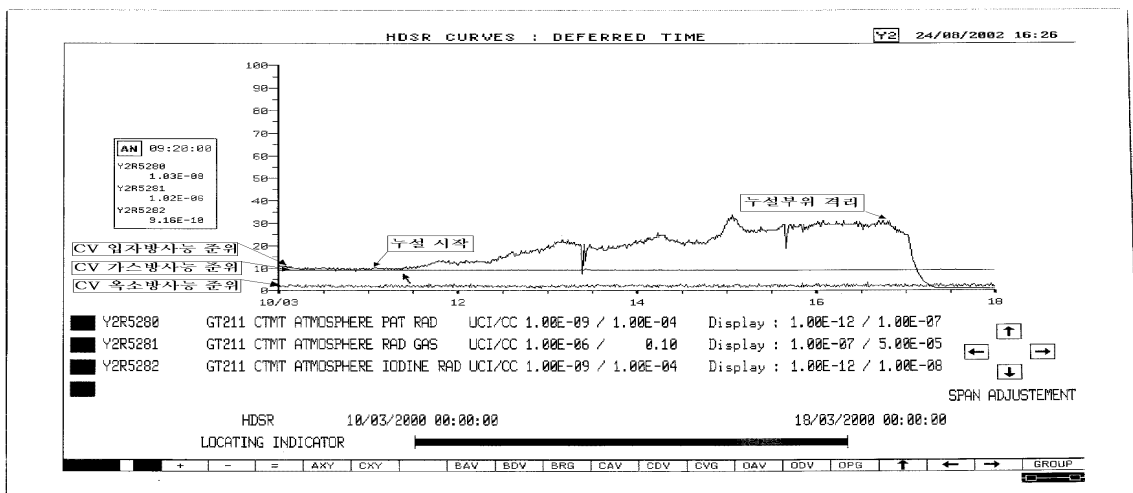


그림 3-8 영광 2호기 11주기 RCS 누설시 CV 대기 방사능 준위 변화

### 다. 영광 2호기 13주기 주요 RCS 누설 사례 분석<sup>[15,16]</sup>

그림 3-9와 같이 영광 2호기 13주기 CV 내부 RCS 누설(2002. 8)시 CV 대기 온도, 습도, 방사능 준위 및 VCT 수위 변화에 대한 반응을 분석하였다. 분석 결과 RCS 확인 누설량이 최대 24 l/hr 일 때 CV 대기 입자방사능 준위는 RCS 누설 전  $10^{-10}$ 에서  $10^{-7}$  uCi/cc로 증가한 후 누설부위 격리 시 급격히 감소하여 정상상태로 복귀하는 것으로 분석되었다. 즉 RCS 누설량이 다량(10 l/hr 이상) 일 때 CV 대기 입자 방사능 준위 변화와 더불어 CV 습도 및 VCT 수위 변화에도 반응이 감지되었다. 그러나 CV 대기 온도, 압력 등의 반응은 감지되지 않는다. 따라서 본 연구 결과 RCS 누설량이 10 l/hr 이상 다량 누설 시 CV 내 RCS 누설여부 판정에 가장 민감하게 반응하는 운전변수로 CV 대기 입자방사능 준위 및 습도 변화 그리고 CV Sump 수위 변화로 분석되었다

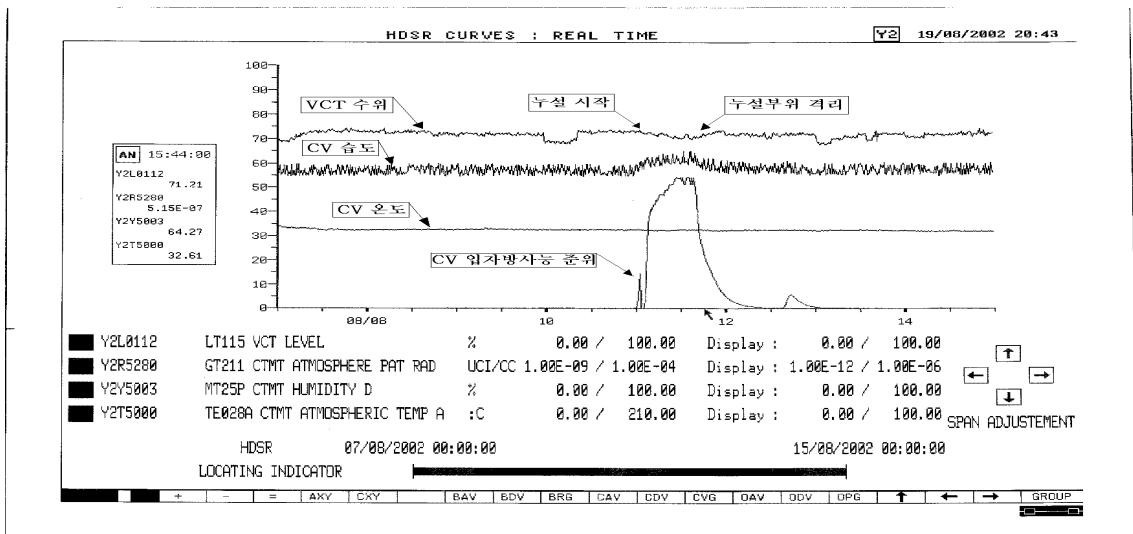


그림 3-9 영광 2호기 13주기 RCS 누설시 CV 대기 온도, 습도, 방사능 준위 및 CVT 수위 변화

## 제 4 장 결 론

원자력발전소의 정상 출력운전 중 CV 내부 RCS 누설 여부 판정 및 누설부위 확인을 위한 최적의 방법은 CV 내부 주요 운전변수 분석을 통한 원전 종사자의 고도의 숙련된 누설 판정기법이라 하겠다. 뿐만 아니라, 이러한 원전 종사자의 최적 누설 판정을 위한 다양하고 첨단화된 고효율의 누설탐지시스템은 필수요소라 하겠다. 이러한 관점에서 격납용기 내부 RCS 누설 유형에 따른 Simulator 모의시험과 원전 운전경험 사례로부터 누설탐지시스템의 주요 운전변수들에 대한 반응을 비교, 분석하여 정상 출력운전 중 격납용기 내부 RCS 누설 판정 기법에 대한 다음과 같은 최적화 방안을 도출하였다.

격납용기 내부 RCS 누설관련 발전정지 현황을 분석한 결과 총 고장정지 건수 대비 약 4.3%를 차지하는 것으로 분석되었고, 주요 누설계통은 원자로냉각계통으로 분석되었으며, 누설부위는 RTD 우회배관 차단밸브 및 시료채취 배관 그리고 CVCS 충전 및 유출 유로 차단 밸브 누설로 분석되었다. 그리고 CV 내 RCS 누설 시 최초 누설 탐지계통은 CV Sump 수위 감시계통과 CV 대기 방사능 감시계통으로 분석되었다. 또한 RCS 누설을 최적 판정을 위한 현행 점검방법 분석결과 RCS 누설을 실시간 자동계산 및 자동 경보시스템 확대 도입 등 누설감지 장치의 첨단화와 다양화가 요구되는 것으로 분석되었다. 그리고 CV 내 RCS 소량 누설 시 RCS 누설 여부 최적 판정 인자로서 가장 민감하게 반응을 보인 인자는 CV 대기 입자 방사능준위와 CV Sump 수위로 분석되었다. RCS 다량 누설 시에는 CV 대기 입자 방사능준위 및 CV Sump 수위 변화와 더불어 CV 습도 변화가 민감하게 반응하는 것으로 분석되었다. 반면 CV 대기 온도, 압력, 가스 방사능준위 및 옥소 방사능준위 등은 상대적으로 민감한 반응을 나타내지 않았다.

## 참 고 문 헌

- [1] 과학기술부: 원자력기관 주요현황 및 통계자료, 2002. 9
- [2] 과학기술부: 제 2차 원자력진흥종합계획, 2001
- [3] 한국원자력산업협회: 최신 원자력용어사전, 1996
- [4] KHNP: YGN 1&2 Final Safety Analysis Report, Vol. 8, 5.2.5.2 RCS, Vol. 14, 16.3/4.4.6.1~2, Vol. 14, Table 16.3.3~6, 1985
- [5] 한국수력원자력(주) 고리원자력연수원: 발전실무반 과정 과제 토의집, 1988
- [6] 산업자원부: 2002년 원자력발전백서, 2002, 9
- [7] 영광원자력본부: 고장정지 예방 Task Force Team 활동 보고서, 2001
- [8] 영광원자력본부: 운전 및 정비경험 사례집, 1998
- [9] INPO: Plant Event Reports. Operating Experience Reports 16034, 16305, 16703, 16795, 2000~2001
- [10] WANO: EAR PAR 90-047, EAR ATL 98-006, 1990~2001
- [11] 영광원자력본부 1&2발전소: 점검-123(RCS 누설량 평형점검)&정기-30(RCS 누설량점검)
- [12] 고리원자력본부 1&2발전소: 1-9-003(RCS 누설률시험)&정기-발-13(RCS 누설량평형점검)
- [13] 울진원자력본부 1&2발전소: 정기 13-1(RCS 누설률 점검)&정기-발-13(RCS 누설 점검)
- [14] 영광원자력본부 1발전소: 일일운전현황, 1986~2002
- [15] 영광원자력본부 1발전소: 점검-112(12, 24, 72시간 주기점검), 1998~2002
- [16] 영광원자력본부 1발전소: 운전지원컴퓨터시스템, 1997
- [17] 영광원자력본부: 운전경험보고서 모음집, 1996
- [18] 영광원자력본부: 세계 원자력발전소 주요 고장 사례 100선집, 1994
- [19] KHNP: YGN 3&4 최종안전성분석보고서, 3.6.3.1.3.1
- [20] KHNP: ULCHIN 1&2/3&4 최종안전성분석보고서, 16.4.7.1.3/3.6.3.1.3.1
- [21] KHNP: KORI 1/2/3/4 최종안전성분석보고서, 3,4,6,2/4,4,6,2/16.3.4.6.2/16.4.4.6.2.1
- [22] KHNP: Korea Nuclear Units 7&8 Station Manual, Reactor Coolant System, 1987

## 약 어 (List of Abbreviation)

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>· CRDM : Control Rod Drive Mechanism</li> <li>· SG : Steam Generator</li> <li>· F.O : Flow Orifice</li> <li>· OACS : Operation Add Computer System</li> <li>· RCP : Reactor Coolant Pump</li> <li>· RHR : Residual Heat Removal</li> <li>· PASS : Post Accident Sampling System</li> <li>· PORV : Power Operated Relief Valve</li> <li>· PWR : Pressurized Water Reactor</li> <li>· CVCS : Chemical and Volume Control System</li> <li>· TMI : Three Mile Island Nuclear Power Plant</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>· CV : Containment Vessel</li> <li>· EDT : Equipment Drain Tank</li> <li>· OSR : Operation Status Report</li> <li>· RCDT : Reactor Coolant Drain Tank</li> <li>· RCS : Reactor Coolant System</li> <li>· RTD : Resistance Temperature Detector</li> <li>· VCT : Volume Control Tank</li> <li>· PRT : Pressurizer Relief Tank</li> <li>· PZR : Pressurizer</li> <li>· SIT : Safety Injection Tank</li> <li>· PHWR : Pressurized Heavy Water Reactor</li> </ul> |
|--|--|