



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2016년 2월  
석사학위 논문

격납건물 계기용공기 상실시  
최적대응방안 연구(한빛 3,4호기)

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 영 철

격납건물 계기용공기 상실시  
최적대응방안 연구(한빛 3,4호기)

Study on the Optimal Countermeasures for Loss of  
Containment Building Instrument Air  
(HANBIT Nuclear Power Plant Unit 3 & 4)

2015년 11월 26일

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 영 철

- ii -

# 격납건물 계기용공기 상실시 최적대응방안 연구(한빛 3,4호기)

지도교수 : 송 종 순

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2015년 11월 26일

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 영 철

## 김영철 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 정운관 (인)

위원 조선대학교 교수 김진원 (인)

위원 조선대학교 교수 송종순 (인)

2015년 11월 26일

조선대학교 대학원

# 목 차

목 차 .....	i
표 목 차 .....	iii
그림목차 .....	iv
ABSTRACT .....	v
<b>제 1 장 서 론 .....</b>	<b>1</b>
<b>제 2 장 계기용 공기 .....</b>	<b>2</b>
제 1 절 계기용 압축공기계통 .....	2
1. 개 요 .....	2
2. 설계기준 .....	2
3. 계통구성 및 연동신호 .....	3
제 2 절 공기구동밸브(AOV) .....	5
1. AOV 기능 및 구조 .....	5
2. AOV Positioner 동작원리 .....	7
제 3 절 격납건물 계기용공기 공급 밸브 .....	12
1. 격납건물 계기용공기(VIA-20) 공급밸브 사양 .....	12
2. 격납건물 계기용공기(VIA-20) 공급밸브 연동신호 .....	12
<b>제 3 장 격납건물 계기용공기 상실 가능성 고찰 .....</b>	<b>14</b>
제 1 절 계기용 압축공기계통 완전 상실 .....	14
1. 계기용 압축공기계통 비정상 운전 .....	14
2. 계기용 압축공기계통 완전 상실가능성 검토 .....	15
제 2 절 CSAS 오동작에 의한 계기용공기 상실 .....	18
1. CSAS 발생시 자동동작 기기 .....	18

2. CSAS 오동작에 의한 격납건물내 계기용공기 상실가능성 검토 .....	19
<b>제 3 절 격납건물 계기용공기 공급 밸브 고장에 의한 계기용공기 상실 .....</b>	<b>21</b>
1. 격납건물 계기용공기 공급밸브 고장유형 검토 .....	21
2. 격납건물 계기용공기 고장 단힘 발생시 재개방 가능성 .....	21
<b>제 4 장 격납건물 계기용공기 상실시 발전소 거동 .....</b>	<b>22</b>
제 1 절 격납건물 공기구동밸브(AOV) 설치 현황 .....	22
제 2 절 가압기 수위제어 불능 .....	24
1. 가압기 수위 제어 목적 및 수단 .....	24
2. 격납건물 계기용공기 공급밸브 고장시 가압기 수위 증가 원인 .....	26
3. 가압기 수위 복구 실패시 조치사항 .....	27
제 3 절 원자로냉각재펌프 제어유출수 유로 전환 .....	28
1. 원자로냉각재펌프 제어유출수 유로 .....	28
2. 원자로냉각재펌프 제어유출수 유로 전환시 문제점 .....	29
3. 해외 운전경험 사례 .....	30
<b>제 5 장 격납건물 계기용공기 상실시 최적대응방안 .....</b>	<b>31</b>
제 1 절 국내원전 격납건물내 계기용공기 공급설비 현황 .....	31
제 2 절 격납건물 계기용공기 공급설비 개선방안 .....	32
1. 격납건물내 계기용공기 공급설비 개선방안 검토 .....	32
2. 개선방안 상세 검토 .....	32
제 3 절 주제어실 경보 신설 .....	34
제 4 절 비정상절차서 개선 .....	34
1. 개선 대상 비정상절차서 .....	34
2. 비정상절차서 개정 내용 .....	34
<b>제 6 장 결 론 .....</b>	<b>36</b>
참고문헌 .....	37

# 표 목 차

표 2-1. 격납건물 계기용공기 공급밸브 사양 .....	12
표 3-1. 주제어실 계기용 압축공기계통 관련 경보 및 설정치 .....	14
표 3-2. 계기용 압축공기 상실시 주제어실 지시계 상태변화 .....	15
표 3-3. CSAS 동작시 자동동작 기기 목록 .....	18
표 3-4. 격납건물 계기용공기 공급밸브 고장 유형 분류 .....	21
표 4-1. 격납건물내 계기용공기 상실시 AOV 거동 .....	23
표 4-2. 가압기 수위 관련 운영기술지침서 항목 .....	27
표 4-3. 해외 운전경험 사례 .....	30
표 5-1. 국내원전 계기용공기 공급밸브 현황 .....	31
표 5-2. 개선방안 검토 .....	32



# 그림 목 차

그림 2-1. 계기용 및 작업용공기 계통 .....	2
그림 2-2. AOV 구조 및 구성요소 .....	5
그림 2-3. AOV 구동원 상실시 동작 형식 .....	7
그림 2-4. Valve 및 Positioner 제어 블록도 .....	8
그림 2-5. Positioner 제어 구성도 .....	8
그림 2-6. Positioner 동작 개략도 .....	9
그림 2-7. AOV Positioner 동작원리 .....	10
그림 2-8. 힘 평형(Force Balance)식 Feedback 원리 .....	11
그림 2-9. 변위 평형(Motion Balance)식 Feedback 원리 .....	11
그림 2-10. 격납건물 계기용공기 공급밸브 .....	12
그림 3-1. 3, 4호기 공통관 연결밸브 및 관련 제어 로직 도면 .....	16
그림 3-2. 계기용 압축공기 완전상실시 조치 흐름도 .....	17
그림 3-3. CSAS 오동작 발생시 조치 흐름도 .....	19
그림 4-1. 가압기 수위 제어 프로그램 .....	25
그림 4-2. 가압기 수위 제어 개념도 .....	25
그림 4-3. 원자로냉각재펌프 축 밀봉장치 구조 .....	26
그림 4-4. 원자로냉각재펌프 제어유출수 정상 유로 .....	29
그림 4-5. 계기용공기 상실 후 원자로냉각재펌프 제어유출수 유로 .....	29
그림 5-1. 전환절차 개념도 .....	33
그림 5-2. 신고리 1호기 AOV .....	33

## ABSTRACT

### Study on the Optimal Countermeasures for Loss of Containment Building Instrument Air (HANBIT Nuclear Power Plant Unit 3 & 4)

Kim, Young Chul

Adviser : Prof. Song, Jong Soon, Ph. D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

AOV used in all systems of a nuclear power plant uses Instrument Air as a driving source. The Instrument Air system is a key system important for the safe operation of the power plant, which is required to operate normally, regardless of the power plant's operating mode. Facilities to secure normal supplies of Instrument Air even if the air compressor that supplies Instrument Air fails have been reflected in the design of a nuclear power plant, so there is no possibility of a complete loss of the Instrument Air system during normal operation. However, since Instrument Air in Containment Building is supplied through an air-operated SOV, there is a possibility of a loss of Instrument Air in Containment Building, if an automatic block of the Instrument Air supply valve occurs because of a failure of the Containment Building Instrument Air supply valve or malfunction of ESFAS. If a loss of Instrument Air in Containment Building occurs, all AOVs installed in Containment Building cannot be operated, so a measure for rapid restoration is needed. It is expected that a serious transient might occur like the manual shutdown of the reactor, if rapid restoration failed. This study analyzed the complete loss of Instrument Air, malfunction of CSAS(Containment Spray Actuation Signal) and the probability of a failure of the Containment Building Instrument Air supply valve and reviewed the possibility of a loss of Instrument Air in

Containment Building and the power plant behavior upon a loss of Instrument Air in Containment Building. Through this study, it was found that there is a possibility of a loss of Instrument Air in Containment Building with a complete loss of Instrument Air and malfunction of CSAS(Containment Spray Actuation Signal), but equipment prepared for coping with the complete loss of Instrument Air has been reflected in the design of the power plant, so there is no total possibility of a loss of Instrument Air. In addition, it was found that the occurrence of a transient of the nuclear power plant caused by a loss of Instrument Air in Containment Building could be prevented by taking emergency corrective measures on the abnormal operation procedure, if the malfunction of CSAS(Containment Spray Actuation Signal) occurs. However, the loss of Instrument Air in Containment Building due to the failure of the Containment Building Instrument Air supply valve causes the occurrence of a serious transient accompanied by the manual shutdown of the reactor and an inappropriate leak of the reactor coolant by an unusual increase in Pressurizer level and the switch of the flow path of the RCP(Reactor Coolant Pump) controlled bleed-off. The Containment Building Instrument Air supply valve has been designed to supply IA stably during the operation of a nuclear power plant. However, there is no means to resume the supply of Instrument Air into Containment Building when the valve is blocked due to a failure of the supply valve, so it is required to establish a corresponding measure to secure the safe operation of the power plant. This study started to improve improper release of radioactive materials and prevent the possibility of the manual shutdown of the reactor through the establishment of plans for the improvements of the power plant safety, such as improvement of the equipment of the Containment Building Instrument Air supply valve and the improvement of related the abnormal operation procedure.

## 제 1 장 서 론

원자력발전소 모든 계통에 사용되는 공기구동밸브(AOV)의 구동원인 계기용공기계통은 발전소 안전운전에 필요한 핵심계통으로 발전소 운전모드와 상관없이 항상 정상운전이 요구되고 있다. 계기용공기를 공급하는 공기압축기의 고장시에도 계기용공기의 정상적인 공급을 보장하기 위한 설비들이 원자력발전소 설계에 반영되어 있어 정상운전 중 계기용 공기계통의 완전상실 가능성은 없다. 그러나 공기구동 SOV를 통해 공급되는 격납건물 계기용공기는 계기용공기 공급밸브의 고장이나 공학적안전설비작동신호(ESFAS) 오동작에 의해 격납건물 계기용공기 공급밸브가 차단될 경우 격납건물내 계기용공기 상실가능성은 존재한다.

본 연구에서는 계기용공기계통의 완전상실, 격납건물살수동작신호 오동작, 격납건물 계기용공기 공급밸브 고장 가능성을 분석하여 격납건물내 계기용공기 완전상실 가능성과 상실시 발전소 거동을 검토하였다.

본 연구를 통해 계기용공기의 완전상실과 격납건물살수동작신호 오동작에 의한 격납건물내 계기용공기 상실 가능성은 존재하나, 계기용공기계통 완전상실에 대비한 대응설비가 설계에 반영되어 있어 계기용공기계통의 완전상실 가능성은 없음을 확인하였다. 또한 격납건물살수동작신호 오동작시 비정상절차서 긴급조치사항의 신속한 수행을 통해 격납건물내 계기용공기 상실에 의한 과도상태를 예방할 수 있음을 확인하였다. 그러나 격납건물 계기용공기 공급밸브 고장에 의한 격납건물내 계기용공기 상실은 가압기수위의 비정상적인 증가, 원자로냉각재펌프 제어유출수 유로전환에 의한 원자로 수동정지 및 부적절한 원자로냉각재 누설을 동반하는 심각한 과도상태 발생을 초래한다.

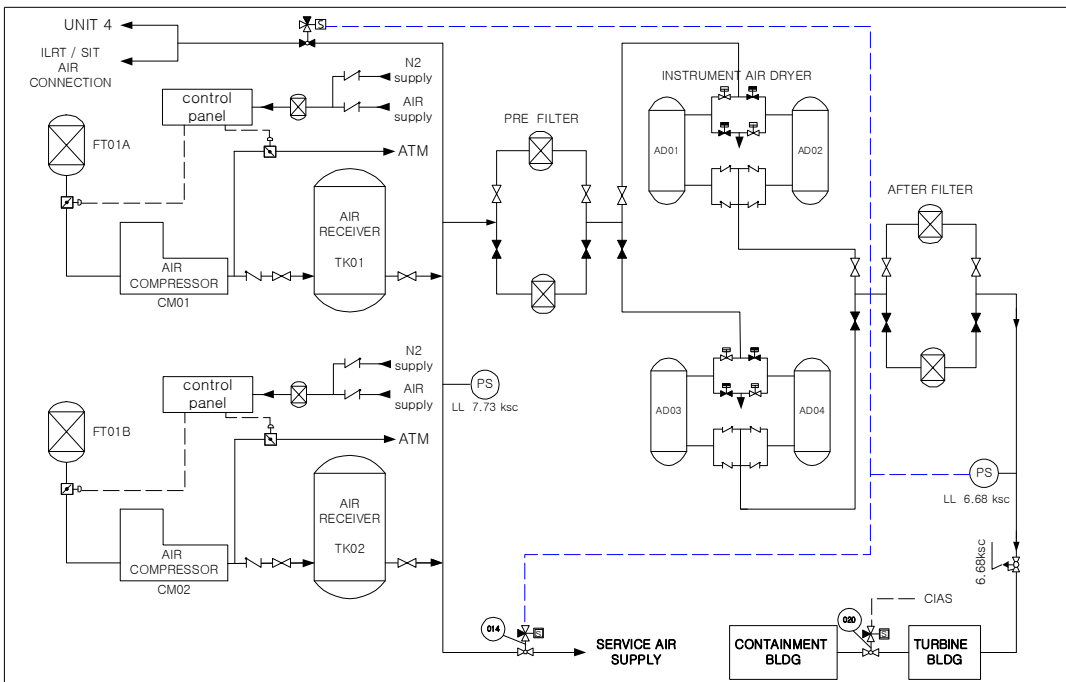
격납건물 계기용공기 공급밸브는 원자력발전소 운전 중 계기용공기를 안정적으로 공급하기 위해 설계되었다. 하지만 계기용공기 공급밸브 고장에 의한 밸브 차단시 격납건물내 계기용공기의 공급을 재개할 수단이 없어 발전소 정상운전 중 격납건물내 계기용공기 상실에 의한 부적절한 방사능물질 방출 및 원자로 수동정지를 예방하기 위해 본 연구를 시작하게 되었다.

## 2 장 계기용 공기

### 제 1 절 계기용 압축공기계통

#### 1. 개 요

작업용 압축공기와 계기용 압축공기는 호기당 두 대의 전동기 구동 공기압축기에 의해 발전소 정상운전 및 정지 중 필요한 압축공기를 소내에 공급한다. 계기용 압축공기는 발전소 모든 운전모드에서 안전관련 기기 및 비안전 관련 기기의 공기구동밸브(AOV : Air Operated Valve)와 공기구동 제어기기 및 계측기의 구동력과 제어신호용으로 사용하기 위해 여과되고 습분과 오일성분이 제거된 무오일성 압축공기를 제공한다.



[그림 2-1] 계기용 및 작업용공기 계통

#### 2. 설계기준

##### 가. 안전기능(Safety Function)

- (1) 격납건물살수신호(Containment Spray Actuation Signal : CSAS) 발생시 격납 건물 계기용공기 공급밸브(IA-V20) 자동 차단

### 나. 운전기능(Operation Function)

- (1) 정상운전 중 오일을 함유하지 않은 건조된 압축공기를 공기구동 설비 및 계측기에 공급한다.
- (2) 작업용공기계통(Service Air)은 발전소 운전 및 유지보수 기간 중 작업용으로 압축공기를 사용한다.
- (3) 계기용 압축공기계통 용량은 아래 설정 기준을 모두 만족해야 한다.
  - (가) 계측기 및 동작기기의 개별적 사용시 공기 요구량
  - (나) 계통 누설
  - (다) 발전소 모든 운전모드에서의 공기 요구량
  - (라) 운전중인 유사 발전소의 공기 요구량
- (4) 공기압축기 1대의 용량은 호기당 요구되는 총 압축공기량의 100%를 공급하며 대기중인 공기압축기는 운전중인 공기압축기의 정비를 허용한다.
  - (가) 공기압축기는 방출압력 8.8 kg/cm<sup>2</sup>의 압축된 공기를 공급해야 한다.
  - (나) 공기건조기 및 필터유니트의 각 계열은 8.8 kg/cm<sup>2</sup>, 이슬점 (-)40 ℃에서 계기용공기 최대유량의 150 % 용적을 가져야 한다.
  - (다) 공기저장탱크 용량은 운전중인 공기압축기 고장으로 대기중인 공기압축기 기동 지연시간 동안 필요한 공기를 저장, 공급할 수 있는 크기여야 한다.
- (5) 인접호기와 공통관 배관을 통한 계기용공기의 상호 공급이 가능해야 한다.

## 3. 계통구성 및 연동신호

### 가. 계통구성

- (1) 공기압축기(Air Compressor)
  - (가) 수량 : 100 % 용량 2대/호기
  - (나) 형식 : 원심형 전동기구동 수냉각 2단 압축방식
  - (다) 용량 : 1,456 scfm at 14.7 psig, 15.6 ℃  
dry air 1 SCFM(Standard Cubic Feet Per Minute) : 0.0283 m<sup>3</sup>/min
  - (라) 정상운전 용량 : 700 ~ 900 scfm
  - (마) 설계압력 및 온도 : 10.5 kg/cm<sup>2</sup>, 65.6 ℃

- (바) 정상운전 압력 : 8.0 ~ 8.8 kg/cm<sup>2</sup>
- (사) 제작사 : 미국 INGERSOLLAND Co.
- (아) 회전수 : 3,575 rpm (1단 : 43,822 / 2단 : 64,690 rpm)
- (자) 전압 : 4.16 KV, 62 Amp, 500 Hp
- (차) 효율 : 57 %
- (2) 공기저장탱크(Air Receiver Tank)
  - (가) 계기용 공기저장탱크 : 2대
  - (나) 작업용 공기저장탱크 : 2대
- (3) 공기 건조기(Air Dryer)
  - (가) 수량 : 공기건조기 2대/호기
  - (나) 용량 : 150 %/대
- (3) Filtering Unit
  - (가) 수량 : 2대/호기
  - (나) 용량 : 150%/대

## 나. 연동신호

정상운전 중 압축공기 모관압력(8.0 ~ 8.8 kg/cm<sup>2</sup>) 유지를 위해 100 % 용량 공기압축기 1대가 상시 운전중이며, 나머지 1대는 정상 대기상태를 유지한다. 운전중인 압축기는 모관 압력 8.8 kg/cm<sup>2</sup>에서 최소부하로 운전되고, 8.0 kg/cm<sup>2</sup>에서 부하운전모드로 전환된다.

- (1) 압축공기 모관압력 7.7 kg/cm<sup>2</sup> 이하 도달시 대기중인 공기압축기 자동기동
- (2) 압축공기 모관압력 6.7 kg/cm<sup>2</sup> 이하 도달시 작업용공기 공급밸브(V-014) 및 인접호기 공급용 계기용공기 공통관밸브(VIA-017) 차단
- (3) 격납건물살수신호(Containment Spray Actuation Signal : CSAS) 발생시 격납 건물 계기용공기 공급밸브(VIA-020) 차단

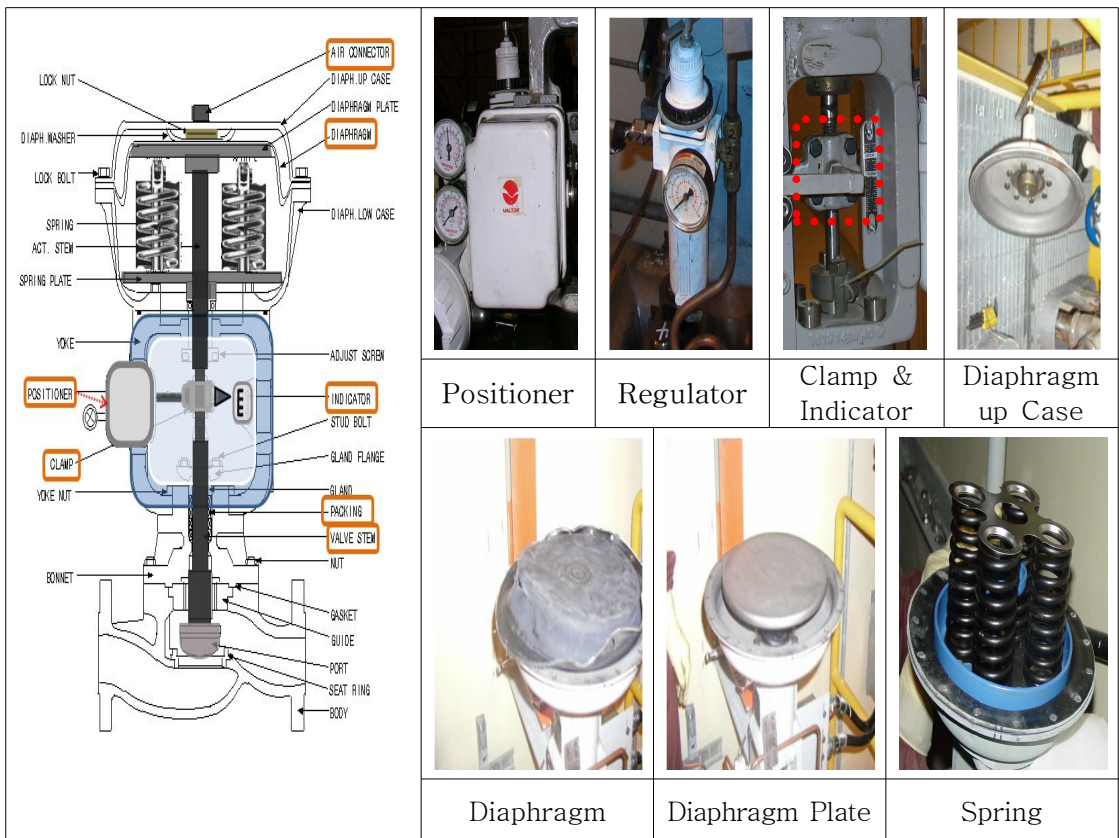
## 제 2 절 공기구동용밸브(AOV)

### 1. AOV 기능 및 구조

#### 가. AOV 기능

Air Operated Valve(AOV)는 압축된 계기용공기를 구동원으로 활용하여 밸브 스템을 동작시켜 배관에 흐르는 유체의 흐름 개폐(On-Off), 유량 및 압력제어, 유체 유로 방향 전환을 수행한다.

#### 나. AOV 구조



[그림 2-2] AOV 구조 및 구성요소

제어밸브 구동자는 전기, 공기 또는 전자력을 이용하여 밸브 스템을 동작시키는 역할을 한다. 공기압 구동자를 사용하는 AOV(Air Operated Valve)는 공기압 신호를



변환없이 밸브 구동부에 사용할 수 있는 장점이 있다. 공기식 구동자는 다른 구동자에 비해 신뢰도가 높고 저렴하여 발전소에서 많이 사용하고 있다.

(1) AOV 구성기기

(가) 공기식 제어기

제어변수의 설정값과 측정값을 비교하여 차이값에 해당하는 공기압 출력신호를 만들어 밸브 Positioner에 제공한다.

(나) 밸브 구동부(Actuator)

밸브 Positioner 입력신호가 전달될 때 공기압으로 스템을 구동함

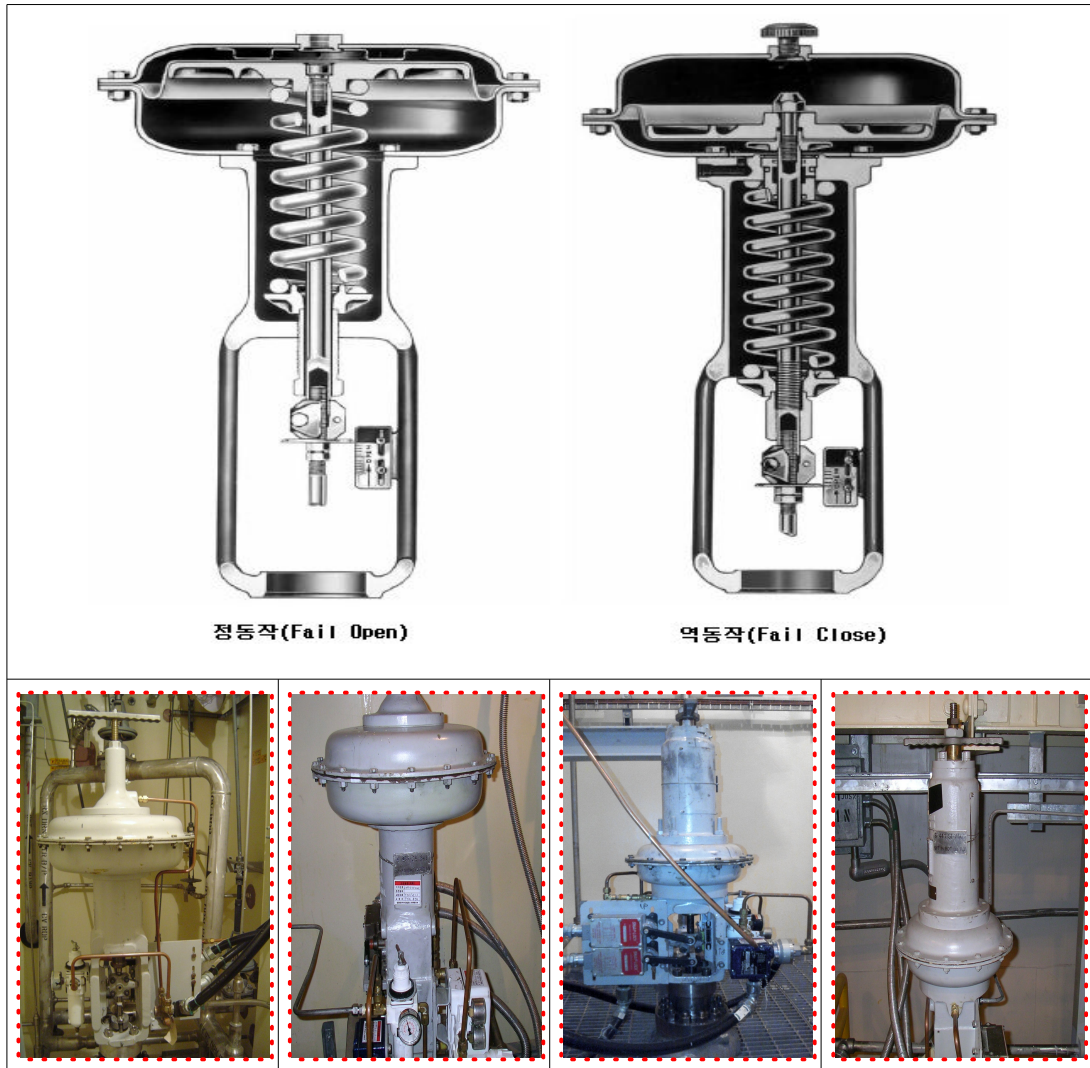
(다) 위치 조절기(Positioner)

밸브개도 제어기의 출력(3 ~ 15 psi)을 제공받아 제어밸브 위치 제어

(라) 압력 조절기(Regulator)

계기용공기 압력을 조절하여 기기에 일정한 공기압력을 유지하고 습분을 제거하는 기능 수행

다. AOV 구동원 상실시 동작 방향



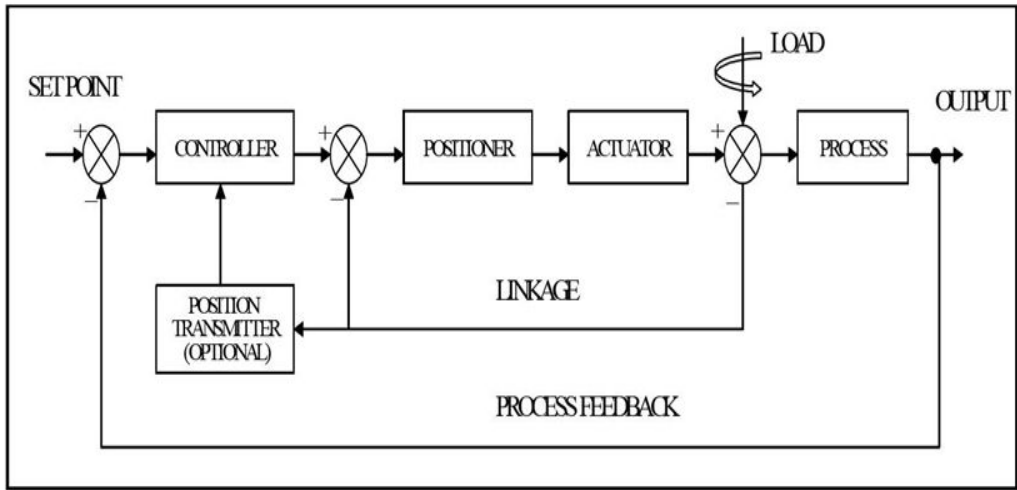
[그림 2-3] AOV 구동원 상실시 동작 형식

2. AOV Positioner 동작원리

가. AOV Positioner 기능

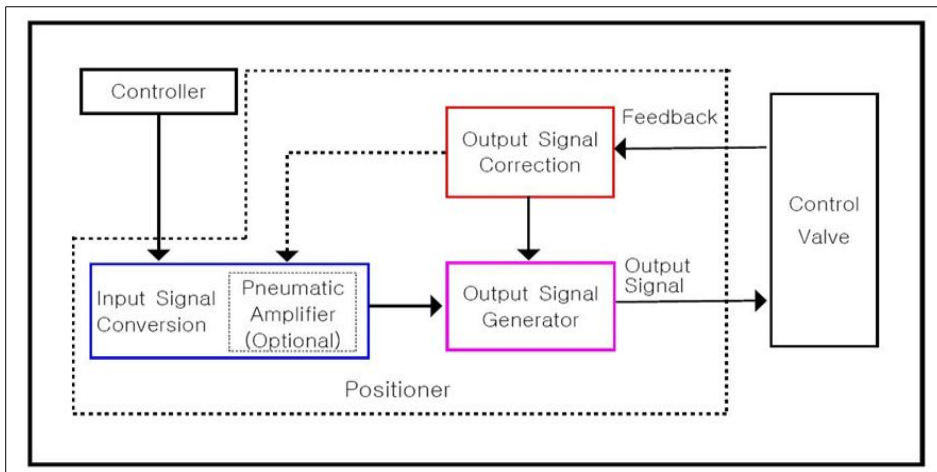
밸브 제어용으로 사용되는 Positioner는 프로세스 제어기에서 발생된 동작 요구신호(유량, 수위제어 등)를 밸브 위치 응답으로 변환하는 장치로, 밸브 불감대 제한, 마찰로 인한 비선형성 완화, 밸브 유량특성 변경, 이중작용 밸

브 구동기 동작, 밸브 차단력 증가, 밸브 구동범위 조절 및 계통의 시간지연과 불감대 영향을 감소시켜 제어 계통의 이득을 증가시킨다.



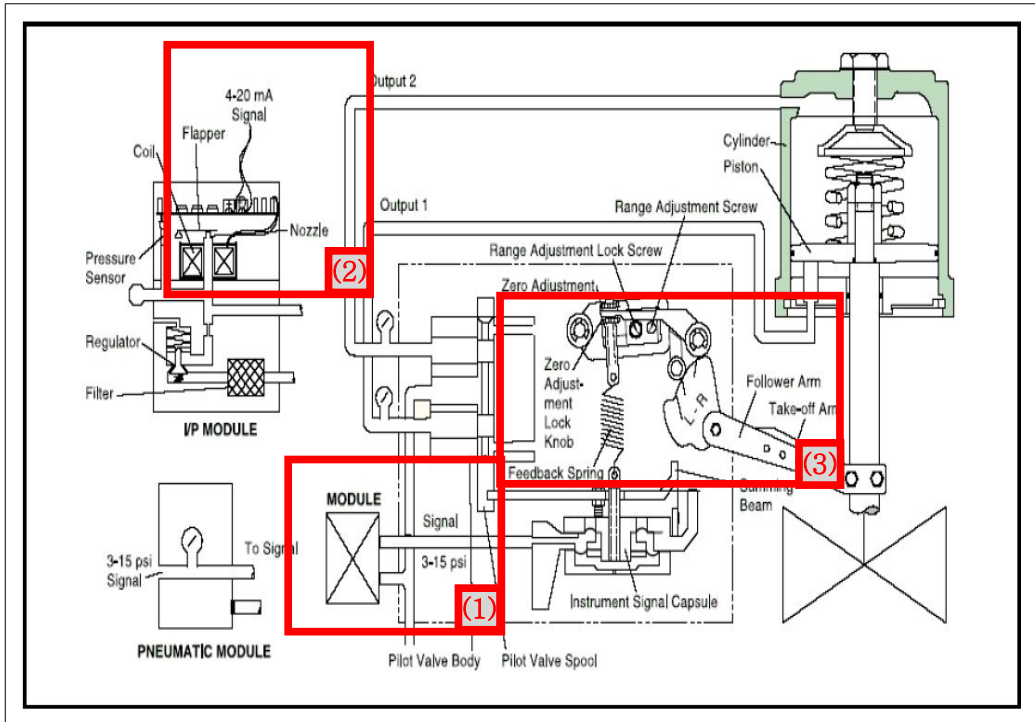
[그림 2-4] Valve 및 Positioner 제어 블록도

#### 나. Positioner 구성



[그림 2-5] Positioner 제어 구성도

Positioner는 입력신호 변환부(Input Signal Conversion), 출력신호 발생부(Output Signal Generator) 및 출력신호 보정부(Output Signal Correction)로 구성된다.



[그림 2-6] Positioner 동작 개략도

(1) 입력신호 변환부(Input Signal Conversion)

3 ~ 15 Psig로 입력된 제어신호는 Bellows(Diaphragm)에 의해 Nozzle과 Flapper 사이의 간극을 조정하여 계기용공기 공급압력을 제어한다.

(2) 출력신호 발생부(Output Signal Generator)

방향성 제어밸브 위치변화는 구동기에 공기압을 공급하거나 배기하는 역할을 수행하며, 스톱 제어밸브의 경우 Diaphragm의 기계적인 움직임에 의해 위치가 변화되며, 압력제어밸브의 경우 Nozzle-Flapper에 의해 제어압력으로 Diaphragm의 위치를 변화시킨다.

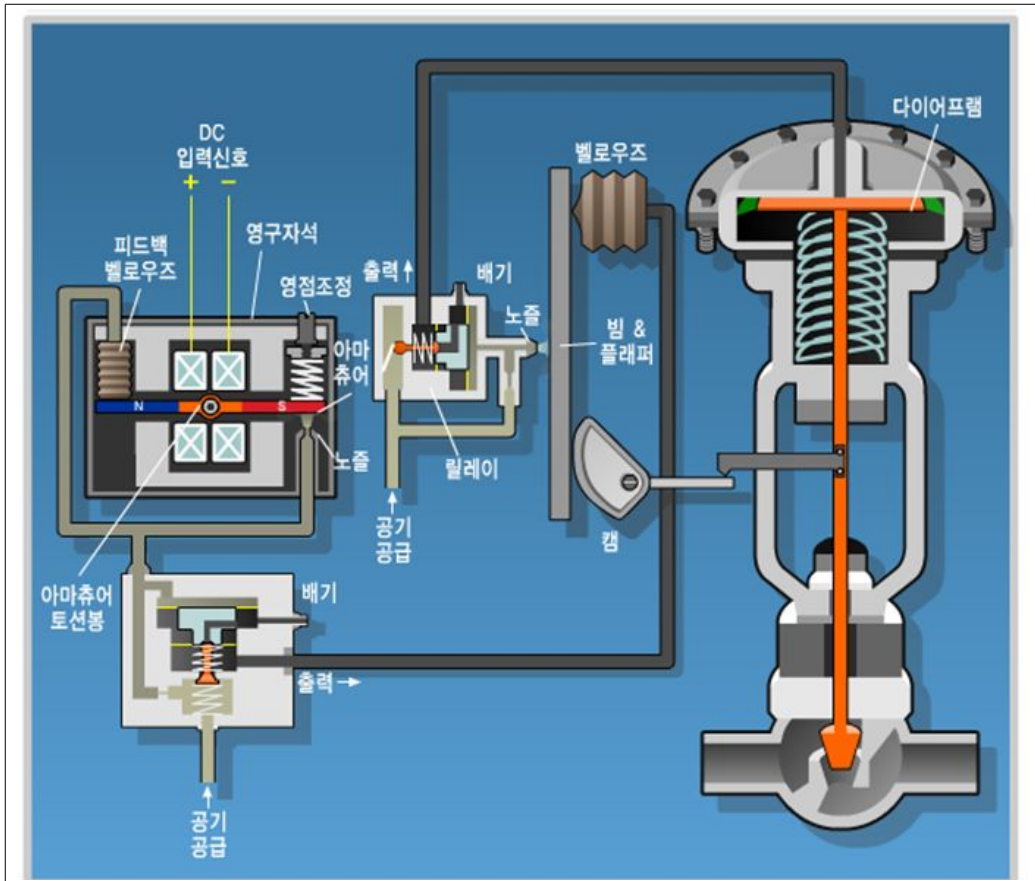
(3) 출력신호 보정부(Output Signal Correction)

원하는 밸브 개도 도달 후 출력평형을 유지하기 위해 출력신호 보정용 피드백 신호로 사용된다.

다. AOV Positioner 동작원리

Valve Positioner는 제어기와 밸브 구동기(Actuator) 사이에 설치되어 제어기의 출력(Positioner 입력)과 밸브 구동기의 축 위치를 비교하여 발생된 편차를

해소시키는 방향으로 출력신호를 발생시키는 비례조절기로, 출력신호는 밸브개도를 Positioner 입력과 동일하게 일치시켜 제어한다.



[그림 2-7] AOV Positioner 동작원리

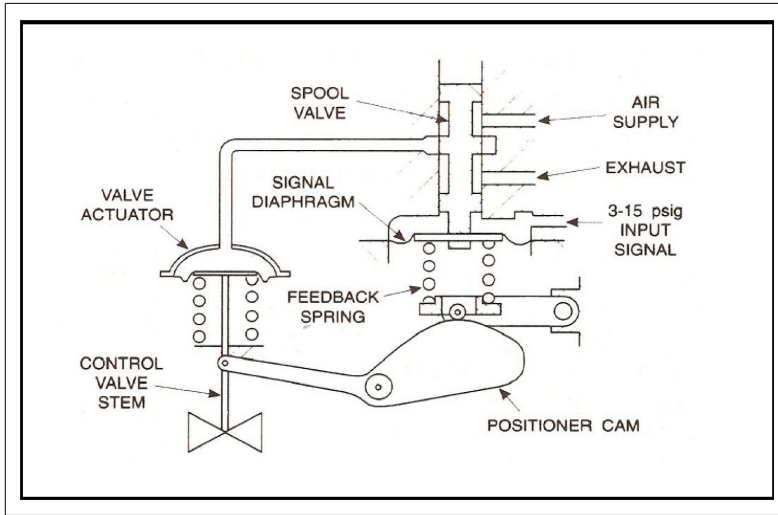
- (1) 입력신호(벨로우즈 공기압)가 증가되면 빔과 플래퍼가 노즐쪽으로 이동
- (2) 증가된 노즐 배압으로 인해 릴레이가 좌측으로 이동하여 공기공급밸브 개방
- (3) 밸브 조작부로 공급되는 공기압력의 증가로 밸브 스템 하향 이동
- (4) 밸브 개도지시계와 연결된 캠에 의해 노즐과 플래퍼 간격 이격으로 노즐 배압이 감소하여 릴레이 우측 이동
- (5) 공기공급밸브가 닫히면서 힘의 평형이 이루어져 AOV는 일정 개도 유지

## 라. Positioner Type

- (1) 힘 평형(Force Balance) 식

입력된 신호에 의해 발생된 공기압과 구동축의 변위에 의해 발생하는 스프링

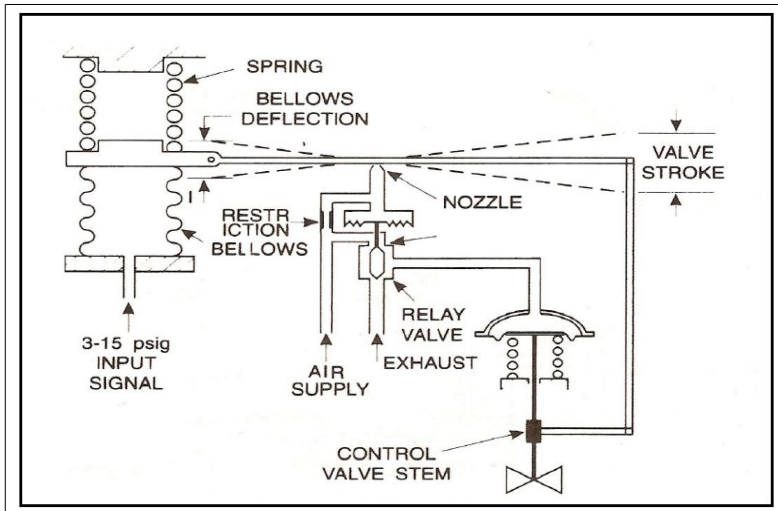
장력을 비교하여 평형을 유지하며, 복원장치에는 평형용 스프링이 설치되어 있다.



[그림 2-8] 힘 평형(Force Balance) 식 Feedback 원리

(2) 변위 평형(Motion Balance) 식

입력신호에 의해 Bellows가 움직이면 Balance beam이 움직이면서 Flapper와 Nozzle 변위를 조절하며, Positioner Feedback 신호에 의해 beam을 동작시켜 평형을 유지하는데, 복원장치에 스프링을 사용하지 않고 Balance beam을 사용한다.

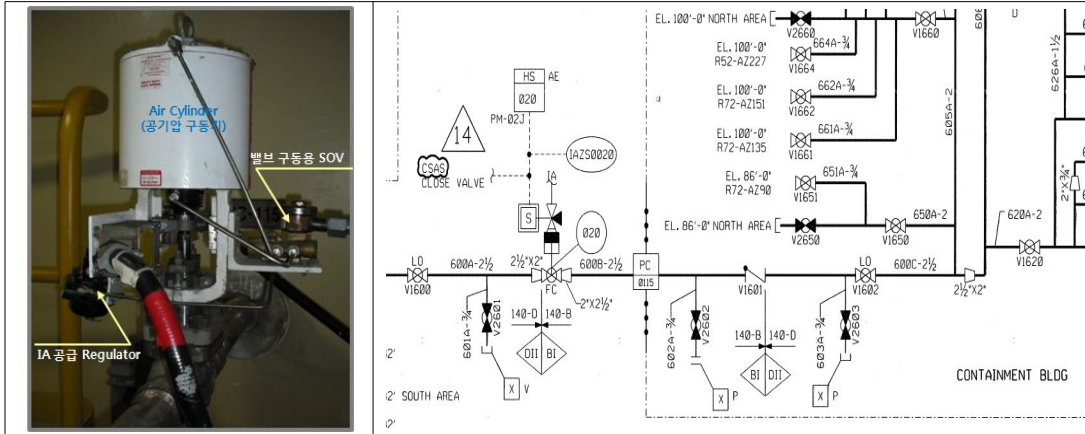


[그림 2-9] 변위 평형(Motion Balance) 식 Feedback 원리



### 제 3 절 격납건물 계기용공기 공급밸브

#### 1. 격납건물 계기용공기(VIA-20) 공급밸브 사양



[그림 2-10] 격납건물 계기용공기 공급밸브

[표 2-1] 격납건물 계기용공기 공급밸브 사양

밸브 제작사	VALTEK
밸브 구동 형식	Solenoid 구동 AOV
정상운전 중 밸브 상태	Normal Open(Fail Close Type)
연동신호	CSAS(ESF-1) 발생시 밸브 Close
밸브 분해 정비 주기	7 주기
밸브 구동용 SOV 교체 주기	2 주기

#### 2. 격납건물 계기용공기(VIA-20) 공급밸브 연동신호

##### 가. CSAS(격납건물 살수 동작신호) 발생시 밸브 자동 차단

공학적안전설비계통은 원자로냉각재상실사고(LOCA)와 같은 발전소 설계기준 사고(DBA) 발생시 원자로냉각재계통으로부터 핵분열생성물의 누출을 차단하여 발전소 종사자와 발전소 주변지역 주민의 안전을 확보하기 위한 계통이다.

격납건물살수계통은 원자로냉각재상실사고(LOCA), 주증기 또는 주급수관 파열 사고에 의한 격납건물살수동작신호(CSAS) 발생시 격납건물 대기에 고농도 방사수를 살수하여 격납건물내 대기의 온도 및 압력 상승을 제한하고 격납건물 대기로부터 제거된 요오드(I)를 집수조내에 수용상태로 유지하여 핵분열생성물을 제거한다. 격납건물살수동작신호는 격납건물 고-고 압력(1421 cmH<sub>2</sub>O) 조건 만족시 발생되며, 실제 격납건물살수동작신호 발생시에는 격납건물내 계기용공기 운전가능성이 요구되지 않는다. 신호발생시 격납건물 계기용공기 공급밸브(VIA-20)는 자동으로 격리된다.

#### 나. ESF-1, ESF-2 신호

ESF-1 신호는 공학적안전설비작동신호(ESFAS)의 Reset 조건이 만족된 후 발전소 보호계통(PPS)과 ESFAS 보조계전기 Cabinet에서 해당 ESF 동작신호를 Reset 해야 주제어실 조작스위치의 ESF-1 상태등이 소등되며 이 후 해당기기의 운전조작이 가능하다. ESF-2 상태등이 점등된 기기는 주제어실 조작스위치의 ESF-2 상태등을 한번 누르면 ESF-2 신호가 제거되어 상태등이 소등되고, 이 후 해당기기의 운전조작이 가능하다.



## 제 3 장 격납건물 계기용공기 상실가능성 고찰

### 제1절 계기용 압축공기계통 완전상실

#### 1. 계기용 압축공기계통 비정상 운전

##### 가. 정상운전

- (1) 정상운전 중 계기용압축공기계통 압력 7.7 kg/cm<sup>2</sup> 이상 유지
- (2) 호기당 설치된 공기압축기 2대 중 1대 상시운전 및 1대 대기상태 유지
- (3) 주제어실 관련 계측기 및 경보를 통해 공기압축기 운전상태 상시 감시 가능

[표 3-1] 주제어실 계기용 압축공기계통 관련 정보 및 설정치

경보창		경보명	설정치
PM-02J	04-1G	RECEIVER DSCH HDR PRESS LO	7.7 kg/cm <sup>2</sup>
	04-2G	DRYER DSCH PRESS LO	6.7 kg/cm <sup>2</sup>
	04-3G	COMPRESSOR ELECT PROT TROUBLE	
	04-4G	DRYER TROUBLE	N/A
	04-5G	SYSTEM TRBL/DIS	N/A
	04-3B	IA SYSTEM TROUBLE	N/A
PM-08J	19-3C	FW CONTROL VLV 1113/1112 AIR LOSS	3.5 kg/cm <sup>2</sup>
	19-3D	FW CONTROL VLV 1123/1122 AIR LOSS	2.1 kg/cm <sup>2</sup>

##### 나. 비정상 운전

운전중인 공기압축기의 불시 정지 또는 계통 누설에 의해 계기용공기 모관 압력이 7.7 kg/cm<sup>2</sup> 까지 감소 되면 주제어실에 IA RECEIVER DSCH HDR PRESS LO 정보 발생과 동시에 대기 중인 공기압축기가 자동으로 기동된다. 대기 중인 공기압축기의 자동기동 후에도 계기용공기 모관 압력이 회복되지 않으면 6.7 kg/cm<sup>2</sup>에서 작업용 압축공기 차단밸브(VIA-017)가 자동으로 차단되며, 운전원은 관련 비정상절차서(비정상-3596A 압축공기 완전상실) 따라 아래 절차를 수행한다.

[표 3-2] 계기용 압축공기 상실시 주제어실 지시계 상태변화

지시계		정상값	상태변화
AIR COMPRESSOR 01C 상태등	IA-ZL-001	1대 이상 점등	소등
AIR COMPRESSOR 02C 상태등	IA-ZL-002		소등
AIR SUPPLY HEADER PRESS	IA-PI-006	$\geq 7.7 \text{ kg/cm}^2$	감소
AFTER FILTER DSCH PRESS	IA-PI-012	$\geq 6.7 \text{ kg/cm}^2$	감소
SERVICE AIR SUPPLY VLV	IA-HS-014	OPEN	CLOSE
V-IA-020 조작스위치	IA-HS-020	OPEN	CLOSE

- (1) 공기압축기 정지 여부 확인 및 대기중인 공기압축기 자동기동 확인
- (2) 대기중인 공기압축기 자동기동 실패시 현장에서 수동기동
- (3) 모든 공기압축기(2대) 운전불능 시 3, 4호기 공통관 격리밸브(VIA-17)와 공통관 수동격리밸브(VIA-1001)를 개방하여 압축공기 공급 시도
- (4) 만약 인접호기의 공기압축기 2대 운전조건에서 인접호기의 계기용공기 모관 압력이 지속적으로 감소되면 압축공기계통 대량 누설로 간주하고 고장이 인접호기로 과급되는 현상을 방지하기 위해 3, 4호기 공통관 격리밸브(VIA-17)와 공통관 수동격리밸브(VIA-1001) 차단
- (5) 공기압축기 고장이 아니면 계통내 배관 손상 및 압력방출밸브 개방 고착 여부를 점검하여 누설부를 격리하거나 누설 완화조치 수행
- (6) 계기용공기 모관 압력 지속 감소시 복수기진공 유지 및 원자로냉각재 온도 제어 조치 등을 수행하고 계기용공기 완전 상실로 증기발생기 수위 및 발전소 안정상태 유지 실패시 원자로 수동 정지

## 2. 계기용 압축공기계통 완전상실 가능성 검토

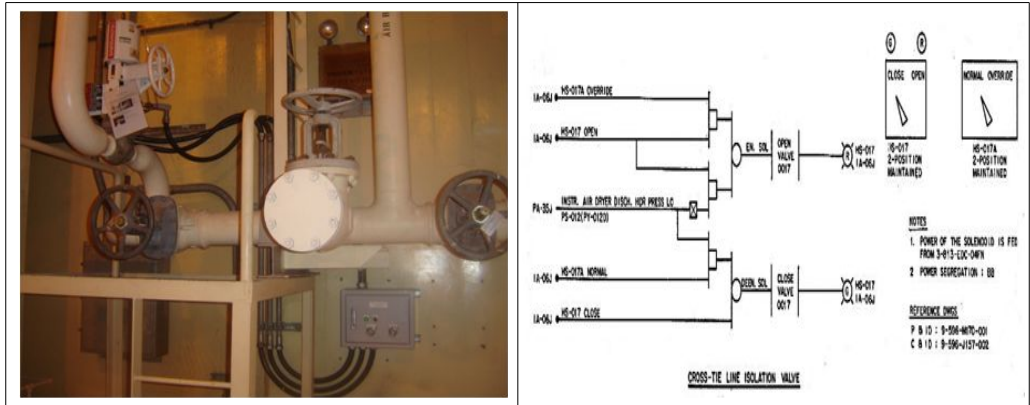
### 가. 공기압축기 2대 동시 상실

공기압축기 2대 중 1대는 항상 운전상태를 유지하고 있으며, 각각의 공기압축기는 독립된 계열로부터 전원을 수전받고 있어 정상운전 중 공기압축기 2대가 동시에 상실될 가능성은 매우 낮다. 또한 운전중인 공기압축기의 고장 및 전원 상실에 의한 불시정지 발생시 대기중인 공기압축기가 자동기동되어 계기용공기

모관압력을 7.7 kg/cm<sup>2</sup> 이상으로 가압하여 발전소 과도상태 발생을 예방할 수 있다.

### 나. 3, 4호기 공통관 운전

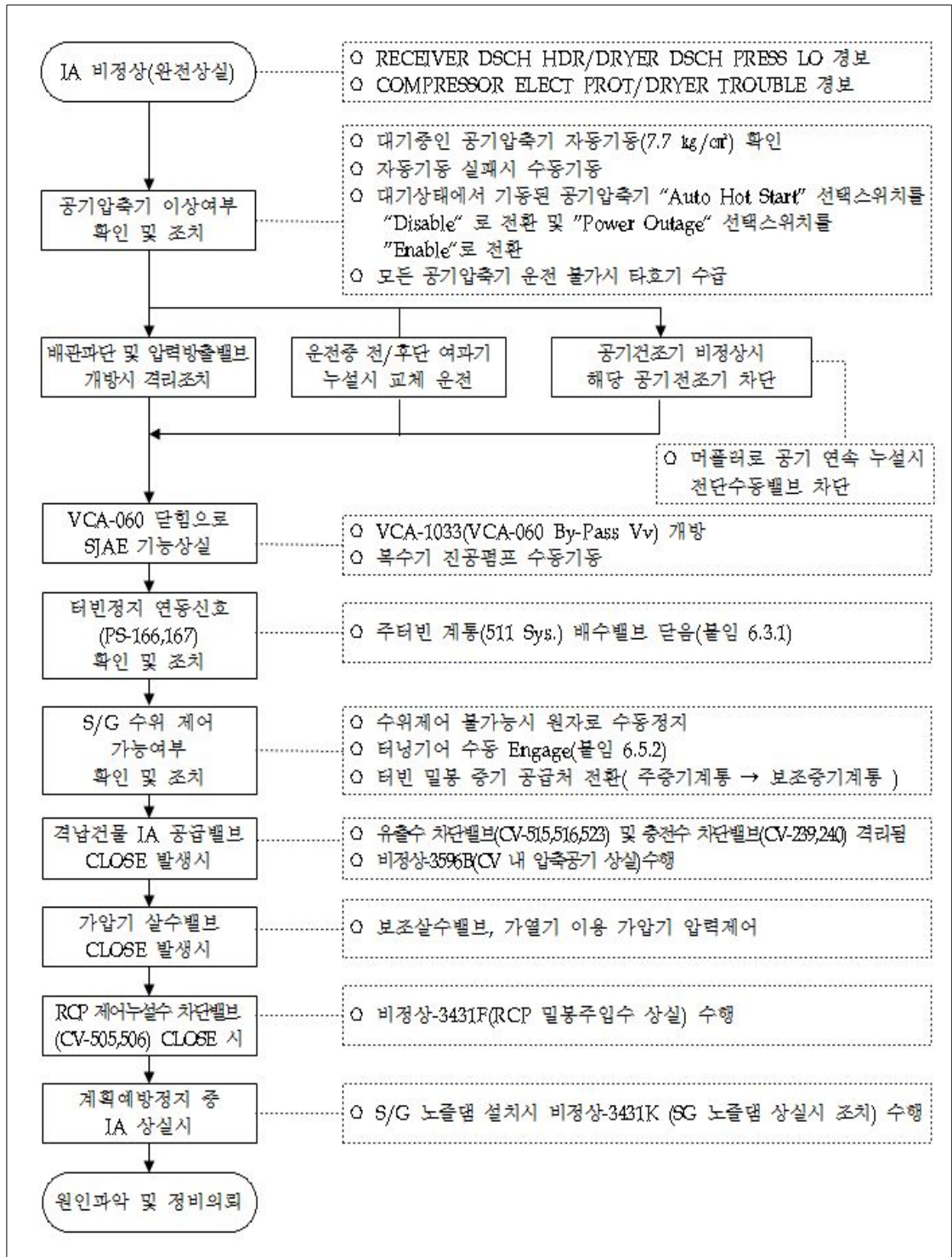
가능성은 낮지만 공기압축기 2대 모두 운전 불가능한 상황이 발생되더라도 3, 4호기 공통관 운전을 통해 인접 호기로부터 계기용 압축공기를 공급받아 계기용 공기 모관압력을 7.7 kg/cm<sup>2</sup> 이상 유지가 가능하다.



[그림 3-1] 3, 4호기 공통관 연결밸브 및 관련 제어 로직 도면

### 다. 계기용 압축공기계통 완전상실 가능성 검토 결과

호기당 2대씩 설치된 공기압축기의 동시 운전 불가능한 상황의 발생 가능성은 없으며, 공기압축기 2대가 모두 운전 불가능한 경우에도 호기간 공통관 운전을 통해 계기용공기 모관의 가압상태 유지가 가능하다. 또한 계기용 압축공기계통의 누설이 발생 될 경우에도 관련 비정상절차서(비정상-3596A : 압출공기 완전상실)에 따라 누설부의 신속한 격리가 가능하여 계기용 압축공기계통 완전상실 가능성은 매우 낮을 것으로 판단된다.



[그림 3-2] 계기용 압축공기 완전상실시 조치 흐름도

## 제 2 절 격납건물살수동작신호(CSAS) 오동작에 의한 계기용공기 상실

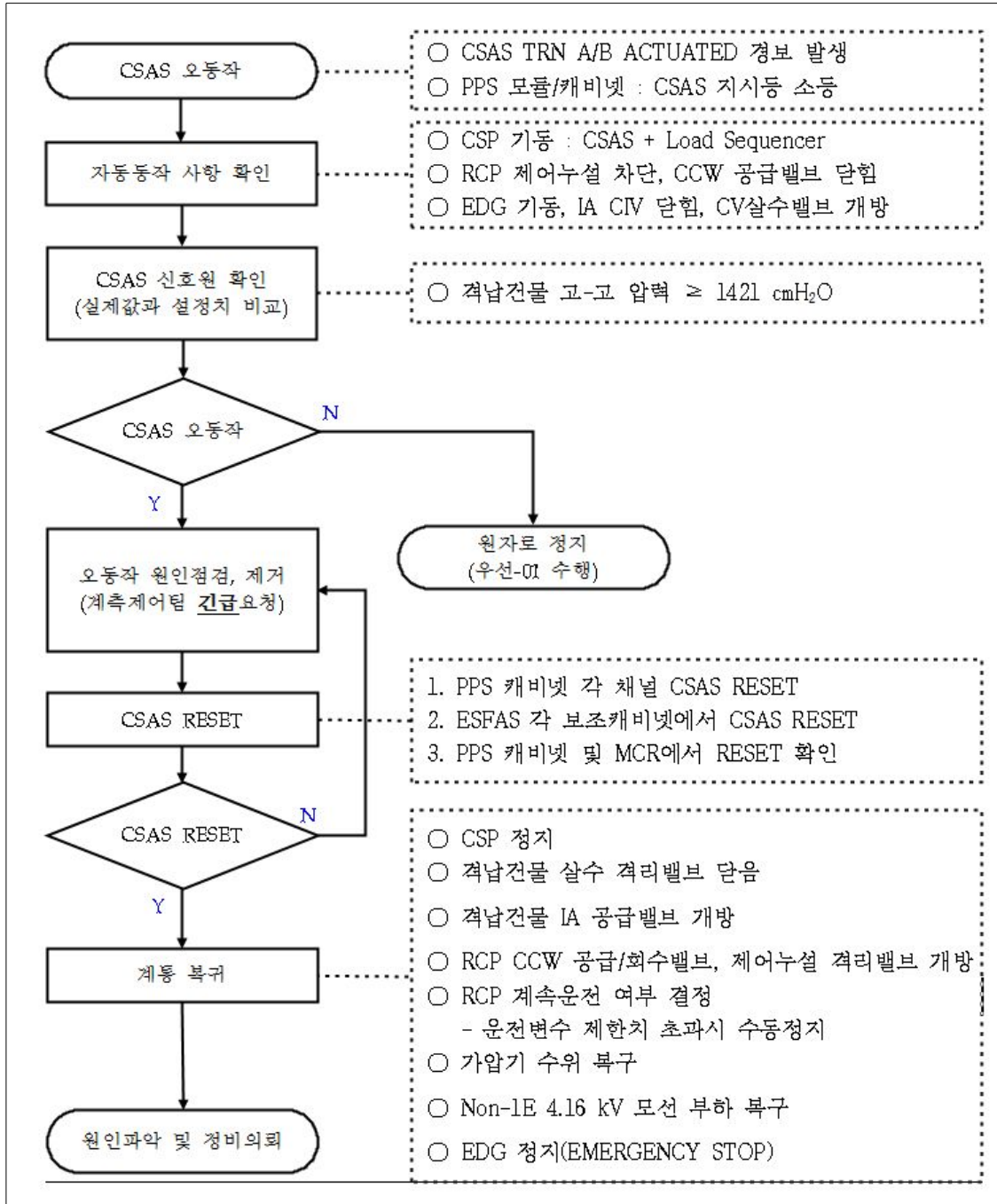
격납건물살수동작신호(CSAS) 오동작 발생시 격납건물내 계기용공기 공급밸브(VIA-20)는 자동으로 격리되며, 이 신호는 ESF-1으로 CSAS Reset 조건이 만족된 경우에만 발전소보호계통(PPS)과 ESFAS 보조계전기 Cabinet에서 Reset 후 주제어실에서 계기용공기 공급밸브(VIA-20)의 재개방이 가능하다. CSAS 오동작 발생시 신속한 복구조치가 요구되며 복구조치 실패시 원자로 수동정지가 요구된다.

### 1. CSAS 발생시 자동동작 기기

[표 3-3] CSAS 동작시 자동동작 기기 목록

H/S 번호	동작 기기명	정상 운전상태	자동 동작상태
CS-HS-017	격납건물 살수펌프 01PA	STOP	START
CS-HS-007	살수 첨가펌프 02PA	STOP	START
CS-HS-013	살수 첨가 격리밸브	CLOSE	OPEN
CS-HS-035	격납건물 살수 격리밸브	CLOSE	OPEN
AP-HS-106	N-1E BUS 01SN ALT SUP BKR	OPEN	OPEN
CV-HS-506	RCP 제어 유출수 격리밸브	OPEN	CLOSE
CC-HS-162	RCP CCW 공급 격리밸브	OPEN	CLOSE
CC-HS-164	RCP CCW 출구 격리밸브	OPEN	CLOSE
DG-01KA	C-1E D/G 01KA	STOP	START
IA-HS-020	격납건물 IA 공급 격리밸브(ESF-1)	OPEN	CLOSE
AP-HS-109	N-1E 4.16kV 03SN TIE BKR	CLOSE	OPEN
CC-HS-105	D/G CCW 공급 격리밸브	CLOSE	OPEN

2. CSAS 오동작에 의한 격납건물내 계기용공기 상실 가능성 검토  
가. CSAS 오동작 발생시 비정상 운전



[그림 3-3] CSAS 오동작 발생시 조치 흐름도



CSAS 오동작 발생시 비정상-3712A(CSAS 오동작) 절차서에 따라 신속한 복구 조치가 필요하다. CSAS 오동작 발생 후 수행이 요구되는 긴급조치항목들은 중요도에 따라 비정상절차서에 복구절차가 반영되어 있으나, 허용된 시간내에 모든 설비를 복구하기 위해서는 운전원의 높은 숙련도가 요구된다. CSAS 오동작 발생 후 복구조치가 지연되거나 복구조치 실패시 예상되는 문제점은 다음과 같다.

첫째, 격납건물내 모든 공기구동밸브 운전불능 초래

둘째, 원자로냉각재펌프에 공급되는 기기냉각수 상실로 원자로 수동정지 가능성 존재

셋째, CVCS 유출유로 차단에 의한 가압기 수위 증가로 운영기술지침서 운전 제한조건 적용(1시간내 복구, 복구 실패시 원자로 수동정지 후 운전모드 3 진입)

#### 나. CSAS 오동작 발생 후 격납건물내 계기용공기 확보

CSAS(Containment Spray Actuation Signal) 오동작 발생시 격납건물내 계기용공기 공급밸브(VIA-20)의 건전성은 유지되고 있으므로 오동작에 의해 발생된 CSAS 정상 Reset 후 격납건물 계기용공기 공급밸브는 즉시 재개방이 가능하다. 만약 CSAS Reset에 실패 할 경우 격납건물 계기용공기 공급밸브의 동작을 제어하는 연계논리 계통(ILS : Interposing Logic System) Cabinet에서 CSAS 입력신호 제거 후 격납 건물내 계기용공기 공급밸브의 재개방을 통해 격납건물내 계기용공기의 정상적인 공급이 가능하다.

#### 다. CSAS 오동작 후 격납건물내 계기용공기 완전상실 가능성 검토

비정상-3712A(CSAS 오동작) 절차서는 CSAS 오동작 Reset 후 격납건물 계기용공기 공급밸브 복구 절차와 CSAS Reset 실패 후 격납건물 계기용공기 공급밸브 복구 절차가 구분되어 기술되어 있으며, CSAS 오동작 발생시 격납건물내 계기용공기 공급밸브(VIA-20)의 건전성은 확보된 상태이므로 CSAS 오동작에 의한 격납 건물내 계기용공기 완전상실 가능성은 매우 낮다. 다만 CSAS 오동작 발생 후 요구되는 긴급조치항목들은 운전원의 높은 숙련도와 전문지식이 요구되고 있어 Simulator와 Image Training의 반복 수행을 통해 신속하고 정확한 복구 조치가 가능하도록 교육훈련을 수행하고 있다.

## 제 3 절 격납건물 계기용공기 공급밸브 고장에 의한 계기용공기 상실

### 1. 격납건물 계기용공기 공급밸브 고장 유형 검토

[표 3-4] 격납건물 계기용공기 공급밸브 고장 유형 분류

고장 유형	대응 수단	상세 내용
밸브 구동전원 상실	없 음	안전등급 125VDC 전원 사용 밸브 구동전원 상실시 밸브 차단 구동전원 상실시 밸브 재개방 불가능
밸브 구동용 SOV 고장	없 음	Air Cylinder 상부에 계기용공기 공급 하부측 계기용공기 배기에 의해 밸브 차단 SOV 고장시 밸브 재개방 불가능
Air Cylinder 누설	없 음	소량 누설 : 공급되는 계기용공기압에 의해 밸브 개방상태 유지 가능 대량 누설 : 계기용공기압 감소로 Cylinder 상부 스프링에 의해 밸브 차단 누설부 차단 전 밸브 재개방 불가능

### 2. 격납건물 계기용공기 고장 단힘 발생시 재개방 가능성

격납건물 계기용공기 공급밸브(VIA-20)는 Fail Close Type 공기구동밸브(AOV)로 안전등급으로 설계되어 높은 설비 신뢰도를 보유하고 있지만, 밸브 구동전원 상실, 밸브 구동용 SOV 고장, Air Cylinder를 통한 대량의 계기용공기 누설이 발생할 경우 밸브를 재개방 할 수단이 없다. 따라서 격납건물 계기용공기 공급밸브 고장 단힘이 발생될 경우 긴급정비가 요구되며, 신속한 복구조치에 실패할 경우 원자로 배수탱크(RDT) 만수위에 의한 파열판 파손 및 가압기수위의 증가로 원자로 수동 정지가 요구된다.



## 4 장 격납건물 계기용공기 상실시 발전소 거동

격납건물 계기용공기 상실가능성 검토를 위해 계기용 압축공기계통의 완전상실과 격납건물살수동작신호(CSAS) 오동작 및 격납건물 계기용공기 공급밸브 고장 등을 검토한 결과 격납건물 계기용공기 공급밸브 고장에 의한 격납건물내 계기용공기의 완전 상실가능성이 존재함을 확인하였으며, 격납건물내 계기용공기 상실시 예상되는 과도상태는 다음과 같다.

첫째, 격납건물내 모든 공기구동밸브 운전불능 초래

둘째, 원자로냉각재펌프에 제어유출수 유로 전환에 의한 원자로배수탱크 만수위 도달

셋째, CVCS 유출유로 차단에 의한 가압기 수위 증가로 운영기술지침서 운전제한 조건 적용(1시간내 복구, 복구 실패시 원자로 수동정지 후 운전모드 3 진입)

### 제 1 절 격납건물내 공기구동밸브(AOV) 설치현황

격납건물내에는 화학 및 체적제어계통의 유출수 격리밸브, 가압기 주살수밸브, 충전수 배압조절밸브, 원자로냉각재펌프 제어유출수 격리밸브 등 총 36개의 공기구동밸브(AOV)가 설치되어 있으며, 격납건물내 계기용공기 완전상실시 공기구동밸브 거동은 다음과 같다.

[표 4-1] 격납건물내 계기용공기 상실시 AOV 거동

밸브번호	명 칭	정상 상태	IA 상실시
VCV-0244	원자로냉각재펌프 2B 밀봉주입 차단밸브	열 립	열 립
VCV-0507	원자로냉각재펌프 유출수 압력방출밸브 차단밸브	열 립	열 립
VCV-0506	원자로냉각재펌프 유출수 차단밸브	열 립	단 힘
VCV-0515	원자로냉각재 유출수 차단밸브	열 립	단 힘
VCV-0516	원자로냉각재 유출수 차단밸브	열 립	단 힘
VCV-0560	원자로배수탱크 출구 차단밸브	단 힘	단 힘
VCV-0540	원자로배수탱크 배기 차단밸브	단 힘	단 힘
VVQ-0032	격납건물 저용적 공급팬 03C, 04C 후단밸브	단 힘	단 힘
VVQ-0033	격납건물 저용적 공기정화기 02S 전단밸브	단 힘	단 힘

밸브번호	명 칭	정상 상태	IA 상실시
VRC-0100E	원자로냉각재계통 2B 가압기 살수밸브	단 힘	단 힘
VRC-0100F	원자로냉각재계통 2A 가압기 살수밸브	단 힘	단 힘
VSI-0322	장기 안전주입 1 역지밸브 누설시험 차단밸브	단 힘	단 힘
VSI-0332	장기 안전주입 2 역지밸브 누설시험 차단밸브	단 힘	단 힘
VSI-0611	안전주입탱크 2A 충수 차단밸브	단 힘	단 힘
VSI-0612	안전주입탱크 2A 질소 공급 차단밸브	단 힘	단 힘
VSI-0618	안전주입탱크 2A 역지밸브 누설시험 차단밸브	단 힘	단 힘
VSI-0619	안전주입탱크 2A 질소 공급 차단밸브	단 힘	단 힘
VSI-0621	안전주입탱크 2B 충수 차단밸브	단 힘	단 힘
VSI-0622	안전주입탱크 2B 질소 공급 차단밸브	단 힘	단 힘
VSI-0628	안전주입탱크 2B 역지밸브 누설시험 차단밸브	단 힘	단 힘
VSI-0629	안전주입탱크 2B 질소 공급 차단밸브	단 힘	단 힘
VSI-0631	안전주입탱크 1A 충수 차단밸브	단 힘	단 힘
VSI-0632	안전주입탱크 1A 질소 공급 차단밸브	단 힘	단 힘
VSI-0638	안전주입탱크 1A 역지밸브 누설시험 차단밸브	단 힘	단 힘
VSI-0639	안전주입탱크 1A 질소 공급 차단밸브	단 힘	단 힘
VSI-0641	안전주입탱크 1B 충수 차단밸브	단 힘	단 힘
VSI-0642	안전주입탱크 1B 질소 공급 차단밸브	단 힘	단 힘
VSI-0648	안전주입탱크 1B 역지밸브 누설시험 차단밸브	단 힘	단 힘
VSI-0649	안전주입탱크 1B 질소 공급 차단밸브	단 힘	단 힘
VSI-0661	안전주입 충수관 배수 차단밸브	단 힘	단 힘
VSI-0682	격납용기내 안전주입탱크 충수 차단밸브	단 힘	단 힘
VCV-0239	원자로냉각재 충전 차단밸브	열 림	단 힘
VCV-0240	원자로냉각재 충전 차단밸브	열 림	단 힘
VCV-0241	원자로냉각재펌프 1A 밀봉주입 차단밸브	열 림	열 림
VCV-0242	원자로냉각재펌프 1B 밀봉주입 차단밸브	열 림	열 림
VCV-0243	원자로냉각재펌프 2A 밀봉주입 차단밸브	열 림	열 림

## 제 2 절 가압기 수위 제어 불능

### 1. 가압기 수위 제어 목적 및 수단

#### 가. 가압기 수위 제어 목적

가압기는 정상운전 중 가압기를 제외한 모든 원자로냉각재계통(RCS) 내에서 막비등이 일어나는 것을 방지하기 위해 포화상태로 액체와 증기가 평형을 유지하는 RCS의 구성기기이다. 가압기 주요기능은 정상운전 동안 요구되는 1차계통 압력을 일정하게 유지하고 정상 부하 변동시 원자로냉각재의 열적 팽창과 수축에 의한 압력 변화를 제한하는 것이다.

가압기 최대수위 제한(57%)은 정상운전 중 가압기 살수 및 전열기를 통한 원자로냉각재 압력제어와 예상설계기준 과도상태에서 적절한 압력변동을 허용하기 위해 액체와 증기 공존영역이 존재하도록 설정되었다. 가압기 수위를 운영기술지침서에 따라 제한하는 것은 다음과 같은 2가지 목적이 있다.

첫째, 발전소 정상운전 중 가압기 압력 제어를 통해 원자로냉각재 유로를 과냉각 상태로 유지하여 최적의 열전달 상태를 유지한다.

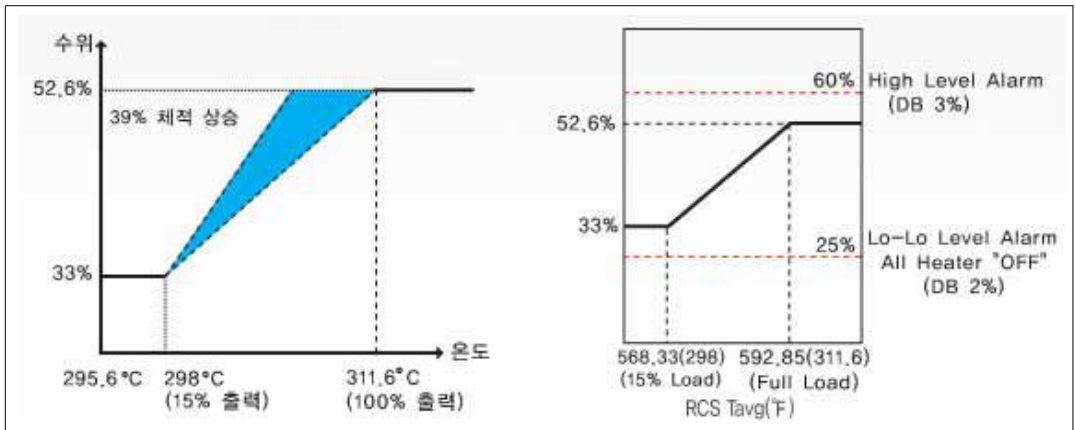
둘째, 가압기 최대수위를 제한함으로써 예상되는 원자로냉각재 체적증가(가압기로 냉각재 유입)에 의한 압력 제어능력을 저하시킬 수 있는 과도한 수위변화가 발생되지 않도록 유지한다.

정상운전 중 가압기 최대수위를 제한하여 충분한 증기공간을 확보함으로써 설 계운전압력 유지를 위해 가압기살수 및 전열기를 운전할 수 있다. 또한 수위 제한치는 예상설계기준 과도상태 조건에서도 가압기 만수위를 방지하여 가압기 안전밸브를 통해 액상이 아닌 증기를 방출함으로써 계통내 과압방지를 보증한다. 만약 가압기로 다량의 냉각재가 유입되어 가압기 안전밸브를 통한 방출을 초래하는 과도상태가 발생하기 전 가압기 수위가 제한치인 57%를 초과하면 원자로냉각재계통 최대 압력이 안전제한치인  $193.3 \text{ kg/cm}^2\text{A}$ 를 초과할 수 있다.

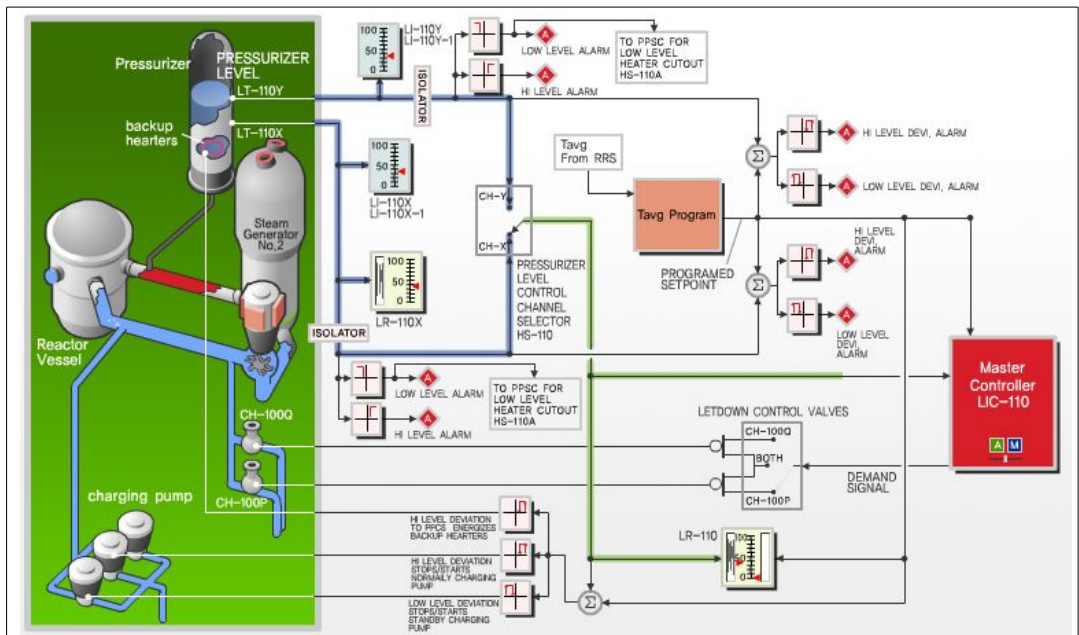
#### 나. 가압기 수위 제어 수단

가압기 수위 제어 프로그램은 원자로냉각재 평균온도( $T_{avg}$ )에 따라 33 %에서 52.6 % 까지 선형적으로 증가 되도록 설계되어 출력 감소시 가압기 전열기 보호

및 가압기 체적변화를 수용하며, 출력 증가시 가압기 수위 증가 제한 및 부하감  
 발에 따른 가압기 체적 유지가 가능하다. 실제 가압기 수위를 원자로냉각재 평균  
 온도에 따라 프로그램 되어 있는 설정치와 일치시키기 위해 충전펌프 운전대수와  
 유출유량 제어밸브 개도를 제어하여 가압기 수위를 제어한다.



[그림 4-1] 가압기 수위 제어 프로그램

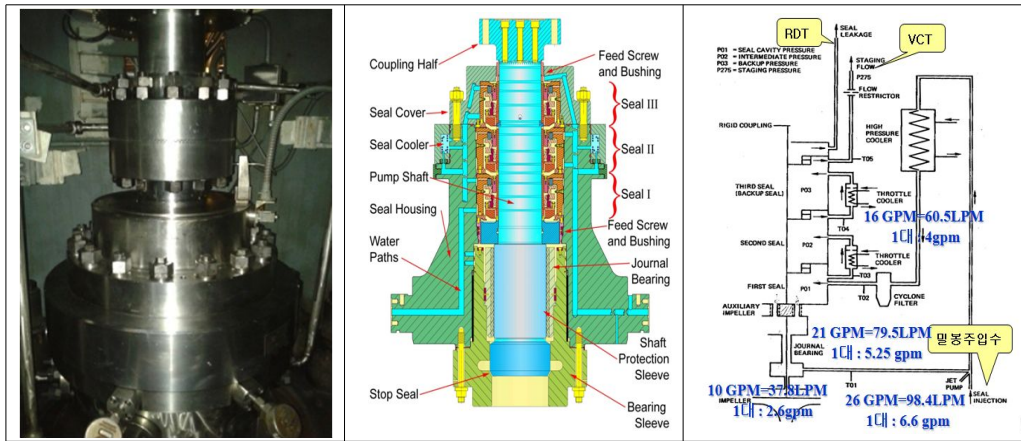


[그림 4-2] 가압기 수위제어 개념도

## 2. 격납건물 계기용공기 공급밸브 고장시 가압기 수위 증가 원인

격납건물 계기용공기 공급밸브 고장 단힘 발생시 격납건물내에 설치된 36개의 공기구동밸브 중 원자로냉각재 유출수 차단밸브(VCV-515, 516)가 밸브 구동용 계기용공기 상실에 의해 차단된다. 유출수 유로 차단 상태에서 원자로냉각재펌프 기계적 축 밀봉장치에 밀봉수 공급을 위해 충전펌프를 1대 연속 운전할 경우 가압기 수위가 증가된다.

### 가. 원자로냉각재펌프 축 밀봉장치



[그림 4-3] 원자로냉각재펌프 축 밀봉장치 구조

원자로냉각재펌프 축 밀봉장치는 유체 동역학적 3단 밀봉장치로 구성되어 있으며 3단 밀봉장치 모두 동일한 구조로 설계되어 있다. 정상운전 중 1단 및 2단 밀봉장치에서 원자로냉각재계통 압력의 84 % 감압이 이뤄지며 3단 밀봉장치에서 계통압력의 16 %로 운전된다. 원자로냉각재계통 온도가 66 °C를 초과하거나 원자로냉각재계통 수위가 저온관 상부(104' 7")를 초과할때는 항상 밀봉주입수가 공급되어야 한다.

원자로냉각재펌프 정상운전 중 밀봉주입수 공급이 차단되면 Auxiliary Impeller를 통해 밀봉주입수가 제공되어 원자로냉각재펌프 축 밀봉장치의 운전가능성은 확보되며, 이때 밀봉주입수 유량은 펌프 제어유출수 유량과 같다. Auxiliary Impeller를 통해 제공된 밀봉주입수는 냉각 및 정화된 상태로 밀봉장치를 통과하므로 원자로냉각재펌프 운전에 영향은 없지만 미세 불순물 침적에 의한 밀봉장치의 밀봉면 수명 저하 가능성이 있어 최대한 빨리 밀봉주입수 공급을 재개해야 한다.

## 나. 가압기 수위 관련 운영기술지침서 항목

[표 4-2] 가압기 수위 관련 운영기술지침서 항목

<b>3.4 원자로냉각재계통</b>		
<b>3.4.9 가압기</b>		
<b>운전제한조건 3.4.9</b>	가압기는 다음 조건에서 <b>운전가능</b> 해야 한다.	
	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 가압기 수위가 <b>27% 이상, 57% 이하</b>, 그리고</li> <li>2. <b>2개</b> 그룹의 가압기 전열기가 각 그룹 당 용량이 <b>150 kW 이상</b>에서 <b>운전가능</b>한 상태이고, 비상 전원 공급계통으로부터 수전 가능한 상태이어야 한다.</li> </ol>	
<b>적용</b>	<b>운전모드 1, 2, 3</b>	
<b>불만족시 조치</b>		
<b>불만족상태</b>	<b>조치요구사항</b>	<b>제한시간</b>
1. 가압기 수위가 제한치를 벗어날 때	1.1 가압기 수위를 제한치 이내로 복구한다.	1시간

## 3. 가압기 수위 복구 실패시 조치사항

### 가. CVCS 유출수차단 조건에서 가압기 수위 57 % 도달 시간

격납건물 계기용공기 공급밸브 고장 단힘 발생시 격납건물내 계기용공기 압력상실에 의해 격납건물내에 설치된 공기구동밸브인 화학 및 체적제어계통의 유출수 격리밸브 (VCV-515, 516)가 차단된다. 유출수 격리밸브가 차단된 조건에서 원자로냉각재펌프 축 밀봉장치에 밀봉수 공급을 위해 충전펌프 1대를 계속 운전할 경우 가압기 수위는 7.7분(462초) 경과 후 운영기술지침서에서 제한하는 수위인 57 %에 도달된다.



## 나. 가압기 수위 증가시 긴급조치사항 및 문제점

격납건물 계기용공기 공급밸브 및 화학 및 체적제어계통의 유출수 격리밸브 재개방에 실패하여 가압기 수위가 57 %를 초과하게 되면 운영기술지침서에 따라 1시간내에 가압기 수위를 57 % 이하로 복구해야 하나, 격납건물내 계기용공기 압력이 회복되기 전에는 화학 및 체적제어계통의 유출수 격리밸브를 재개방할 수단이 없어 가압기 수위 복구가 불가능하다. 따라서 가압기 수위가 57 %에 도달하기 전 원자로냉각재펌프 밀봉주입수 공급을 위해 운전중인 충전펌프를 신속하게 정지해야 한다.

격납건물 계기용공기 공급밸브 및 화학 및 체적제어계통의 유출수 격리밸브 차단 후 운전중인 충전펌프를 정지해야 하는 7.7분(462초)은 격납건물내 계기용공기 상실원인 파악, 원자로냉각재펌프 밀봉주입수 상실에 따른 영향 검토 및 관련 비정상절차서 수행 등 여러 긴급조치사항을 모두 수행하기에는 불충분한 시간이다.

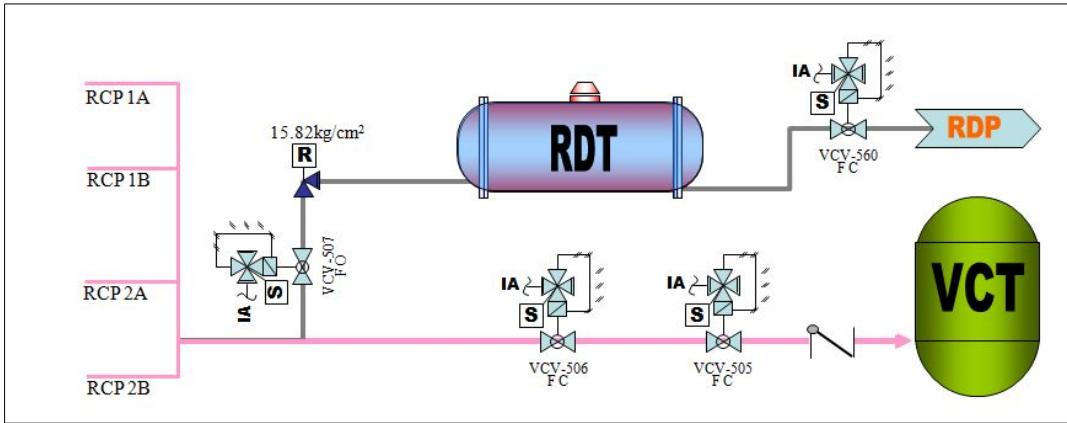
격납건물내 계기용공기 상실 후 가압기 수위가 57 %를 초과하여 격납건물내 모든 공기구동밸브 운전이 불가능한 상태에서 운영기술지침서에 따라 운전모드 3을 진입하기 위한 발전소 정지운전에 착수 할 경우 더욱 심각한 과도상태를 유발할 가능성이 존재한다.

## 제 3 절 원자로냉각재펌프 제어유출수 유로 전환

### 1. 원자로냉각재펌프 제어유출수 유로

#### 가. 제어유출수 정상운전 유로

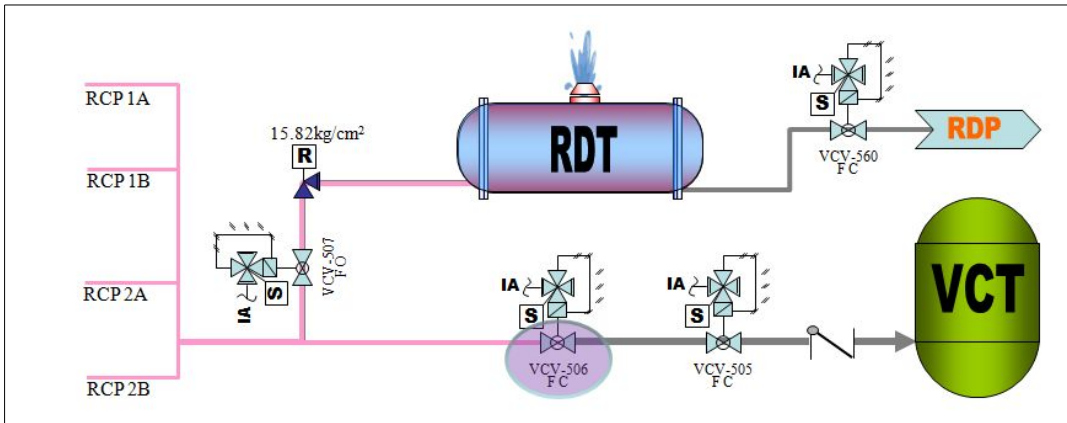
원자로냉각재펌프 1단 밀봉장치로 유입된 밀봉주입수는 2개의 유로로 나뉘는데 첫 번째 유로는 저널베어링의 냉각과 오염된 원자로냉각재가 밀봉장치내로 유입되지 않도록 보조임펠러에 의해 원자로냉각재로 주입되는 유로이며, 두 번째 유로는 1단 밀봉장치 전단에 작용하여 트로틀 쿨러를 거쳐 2단 밀봉장치의 고압측에 작용하는 유로이다. 2단 밀봉장치의 고압측에 작용한 밀봉주입수 역시 또 하나의 트로틀 쿨러를 거쳐 3단 밀봉장치의 고압측에 작용한 후 3단 밀봉장치의 고압측에 연결된 배관 및 오리피스를 통과한 후 체적제어탱크(VCT)로 회수된다.



[그림 4-4] 원자로냉각재펌프 제어유출수 정상 유로

### 나. 계기용공기 상실 후 제어유출수 유로

격납건물내 계기용공기 상실 후 밸브 구동원인 계기용공기 상실로 인해 Fail Close Type으로 설계된 원자로냉각재펌프 제어유출수 라인 격리밸브(VCV-506)는 격리되고, Fail Open Type으로 설계된 제어유출수 라인 압력방출밸브 전단 격리밸브(VCV-507)가 개방되어 원자로냉각재 펌프 3단 밀봉장치를 통과한 제어 유출수는 원자로배수탱크(RDT)로 회수된다.



[그림 4-5] 계기용공기 상실 후 원자로냉각재펌프 제어유출수 유로

## 2. 원자로냉각재펌프 제어유출수 유로 전환시 문제점

### 가. 원자로냉각재 누설률 증가

원자로냉각재펌프 제어유출수 유량이 체적제어탱크로 회수되지 않고 원자로배수



탱크(RDT)로 회수될 경우 제어유출수는 압력경계누설은 아니지만 운영기술지침서에서 제한하는 확인누설에 해당되며, 누설량이 10 gpm을 초과할 경우 운영기술지침서 3.4.12(원자로냉각재 운전누설) 항목에 따라 복구조치를 수행해야 한다.

### 나. 원자로배수탱크(RDT) 파열판 손상

제어유출수 유로가 원자로배수탱크(RDT)로 전환된 후 42 ~ 92분 경과시 원자로배수탱크는 만수위에 도달되며, 만수위 도달 전 원자로배수탱크 파열판 손상에 의한 원자로냉각재의 격납건물내 방출을 방지하기 위해 비정상절차서에 따라 원자로냉각재 펌프 및 원자로를 수동 정지해야 한다.

## 3. 해외 운전경험 사례

[표 4-3] 해외 운전경험 사례

호 기 명	Palo Verde 3	관리번호	OE30475	발생 일시	2009. 03. 12
제 목	격납건물 계기용 압축공기 상실로 원자로 수동정지				
<p>1. 개요</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>□ 격납건물에 공급되는 계기용공기 차단으로 원자로배수탱크 수위, 압력을 유지할 수 없어 원자로를 수동정지 함.</li> </ul> <p>2. 경험내용</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>□ 격납건물로 공급되는 계기용 압축공기의 차단밸브 고장 단힘으로 격납건물내 압축공기 공급이 차단됨</li> <li>□ 원자로냉각재펌프 제어유출수 유로의 격납건물 격리밸브 단힘</li> <li>□ 유입되는 제어유출수에 의해 원자로배수탱크의 수위, 압력이 증가하여 파열판 손상을 방지하기 위해 원자로 및 원자로냉각재펌프를 수동정지 함</li> </ul> <p>3. 원인 및 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>□ 차단밸브 슬레노이드의 제작 결함</li> <li>□ 격납건물 압축공기 상실 시 원자로배수탱크(RDT) 파열판 손상 방지 절차 미흡</li> <li>□ 정보절차서에 계기용공기 격리밸브의 단힘 상태를 확인할 수 있는 절차 미흡</li> </ul> <p>4. 조치</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>□ 원자로 및 원자로냉각재펌프를 수동정지 후 격납건물 계기용공기 차단밸브 정비</li> </ul>					





## 5 장 격납건물 계기용공기 상실시 최적대응방안

격납건물 계기용공기 공급밸브의 고장에 의한 계기용공기 상실시 발전소 거동을 검토한 결과 원자로배수탱크(RDT) 파손에 의한 원자로냉각재 상실사고 및 원자로 수동정지를 초래할 가능성이 높음을 확인하였다. 본 장에서는 격납건물 계기용공기 상실 후 원자로냉각재 상실사고 및 원자로 수동정지를 방지하기 위한 최적대응방안 수립을 위해 다음사항을 검토하였다.

- 첫째, 격납건물내 계기용공기 공급설비 개선방안
- 둘째, 격납건물 계기용공기 비정상 정보 제공용 주제어실 경보 신설
- 셋째, 운전원의 최적대응을 위한 관련 비정상절차서 검토

### 제 1 절 국내원전 격납건물내 계기용공기 공급설비 현황

[표 5-1] 국내원전 계기용공기 공급밸브 현황

발전소	계기용공기 공급밸브	격납건물 계기용공기 상실시 영향 및 대응수단
고리 1호기		격납건물내 계기용공기 상실시 CVCS 유출수 격리밸브 및 가압기 주살수밸브 차단 현장 수동개방용 공부 및 개방 절차 비치
고리 2, 3, 4호기 한빛 1, 2호기		격납건물내 계기용공기 상실시 가압기 주살수밸브 차단 CVCS 유출수 격리밸브 및 가압기 PORV 정상 운전상태 유지
한울 1, 2호기		격납건물내 계기용공기 상실시 CVCS 유출수 격리밸브 및 가압기 주살수밸브 차단 격납건물내 24시간 용 비상용 IA 압축탱크 설치
한울 3 ~ 6호기 한빛 5, 6호기		격납건물내 계기용공기 상실시 CVCS 유출수 격리밸브 및 가압기 주살수밸브 차단 현장 수동 개방 가능



한빛 3, 4호기를 제외한 대부분의 국내 원자력발전소는 격납건물내 계기용공기 공급밸브 고장 발생시 발전소에 미치는 영향이 없거나, 비상시 대응수단이 반영되어 있어 발전소 과도상태 발생없이 해당 설비의 정비가 가능하다.

## 제 2 절 격납건물 계기용공기 공급설비 개선방안

### 1. 격납건물내 계기용공기 공급설비 개선방안 검토

[표 5-2] 개선방안 검토

순번	내용
1	계기용공기 공급밸브 'AOV → MOV' 변경
2	계기용공기 공급밸브 우회밸브(MOV) 신설
3	격납건물내 비상용 계기용공기 압축탱크 신설
4	안전주입탱크 가압용 고압질소 배관 활용
5	작업용공기(VSA-001) 계통 활용
6	밸브 구동용 계기용공기 가압 라인 전환
7	수동조작이 가능한 AOV로 밸브 교체

### 2. 개선방안 상세 검토

#### 가. 계기용공기 공급밸브 MOV 변경

계기용공기 공급밸브를 AOV에서 MOV로 변경하기 위해서는 안전등급 480V 전원용 케이블의 신규 포설이 필요하며, 안전성 검토 등 작업량 및 비용이 증가되는 단점이 존재한다.

#### 나. 계기용공기 공급밸브 우회밸브(MOV) 신설

한빛 3, 4호기 현장 검토결과 현장에 설치할 공간이 부족하며, 안전등급 480V 전원 케이블의 신규 포설 및 안전성 검토 등 작업량 및 비용이 증가되는 단점이 있다.

#### 다. 격납건물내 비상용 계기용공기 압축탱크 신설

격납건물내에 비상용 계기용공기 압축탱크를 신설한 공간이 부족하며, 계측기와 가

압라인 및 관련 경보 신설 등 작업량 및 비용증가의 문제점이 있다.

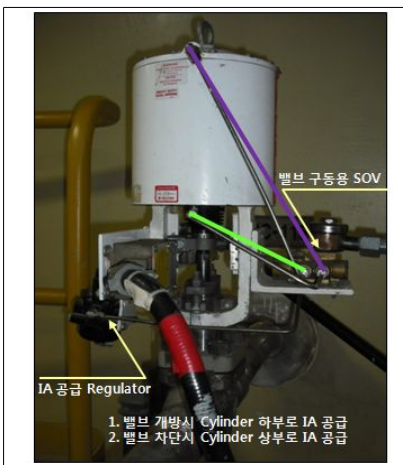
### 라. 안전주입탱크 가압용 고압질소 배관 활용

질소를 계기용공기로 활용하기 위해서는 이물질, 습분 등의 제거용 필터, 드라이어 및 압력조절밸브 등의 신설이 필요하며, 계기용공기 품질 저하에 의한 공기구동밸브(AOV) 신뢰도 저하 가능성이 존재한다.

### 마. 작업용공기(VSA-001) 계통 활용

작업용공기를 계기용공기로 활용하기 위해서는 이물질, 습분 등의 제거용 필터, 드라이어 및 압력조절밸브 등의 신설이 필요하며, 계기용공기 품질 저하에 의한 공기구동밸브(AOV) 신뢰도 저하 가능성이 존재한다.

### 바. 밸브 구동용 계기용공기 가압 라인 전환



[그림 5-1] 전환절차 개념도

밸브 구동용 계기용공기 가압 라인 전환은 밸브 구동용 SOV에 공급되는 계기용공기 라인을 전환하여 밸브를 재개방하는 방안으로 고리 1호기에서 활용하고 있으며, 설비의 변경없이 적용이 가능하나 숙련된 운전원의 조작이 필요하며, 공기구동기(Air Cylinder) 누설에 의한 밸브 고장시 차단밸브가 재개방 되지 않는다.

### 마. 수동조작이 가능한 AOV로 밸브 교체(최종 선택안)

밸브 교체 후 격납건물내 계기용공기 상실에 따른 문제점 해결이 가능하며, 고장형태에 관계없이 격납 건물내 계기용공기의 공급이 가능하다. 현재 CVCS에 적용 중인 AOV로 한빛 3, 4호기를 제외한 모든 한국 표준형 원자력발전소에서 사용 중이며, 안전성을 고려할 때 가장 효율적인 개선안으로 판단된다.



[그림 5-2] 신고리 1호기 AOV

### 제 3 절 주 제어실 정보 신설

격납건물 계기용공기 공급밸브 고장 발생시 주 제어실에 근무하는 운전원이 신속한 대응 조치를 위해서는 격납건물 계기용공기 공급밸브의 비정상적인 차단을 조기에 인지하는 것이 중요하다. 격납건물내 계기용공기 공급밸브가 차단된 후 계기용공기 배관내 잔압을 이용한 원자로배수탱크(RDT) 사전배수를 통해 원자로배수탱크 파열판 보호를 위한 추가적인 시간 확보가 가능하다. 또한 화학 및 체적제어계통의 유출수 격리밸브(VCV-515, 516) 차단 전 가압기 수위 감소운전을 착수하여 운영기술지침서 운전제한조건 진입 가능성을 낮출수 있으며, 비정상 복구에 필요한 여유시간의 추가 확보가 가능하다.

격납건물 계기용공기 공급밸브의 비정상적인 차단 직후에는 배관내 계기용공기 잔압에 의해 격납건물내 공기구동밸브(AOV)는 정상운전 상태를 유지하며, 계기용공기가 완전 고갈된 후에 발전소 과도상태가 발생되므로 주 제어실 운전원이 비정상적인 밸브의 차단을 조기에 인지할 수 있도록 주 제어실에 'IA CIV CLOSED' 정보창 신설이 필요하다.

### 제 4 절 비정상절차서 개선

#### 1. 개선 대상 비정상절차서

격납건물 계기용공기 상실시 최적대응을 위해 개정이 필요한 절차서는 비정상-3596(격납 건물내 계기용공기 상실)과 비정상-3712A(CSAS 오동작) 그리고 정보-10(화학 및 체적제어 계통) 절차서이다.

#### 2. 비정상절차서 개정 내용

격납건물 계기용공기 공급밸브의 비정상적인 차단 후 배관내 계기용공기 잔압을 이용한 원자로배수탱크(RDT) 배수 절차를 반영하여 원자로배수탱크의 여유 공간 확보가 가능하다. 이 절차는 원자로냉각재펌프 제어유출수 유로가 체적제어탱크(VCT)에서 원자로배수탱크로 전환된 후 원자로배수탱크 만수위 도달시간을 지연시켜 운전원에게 최적대응을 위한 추가적인 여유시간의 제공이 가능하다.

또한 비상조작용 핸들이 설치되어 있는 공기구동밸브(AOV)인 원자로냉각재펌프 제어유출수 격리밸브(VCV-506)를 수동으로 개방하여 하여 원자로배수탱크 파열판 손상 및 부적절한 원자로냉각재 상실사고의 예방이 가능하다.

## 제 6 장 결 론

한빛 3, 4호기 발전소 정상운전 중 격납건물내에 공급되는 계기용공기에 의해 동작되는 공기구동밸브는 모두 36개로 발전소 운전에 중요한 필수적인 설비이다. 현재 설비를 기준으로 할 때 한빛 3, 4호기의 격납건물 계기용공기 공급밸브가 비정상적으로 차단될 경우 재개방할 수단이 없으며, 신속한 재개방 조치가 실패할 경우 가압기 수위 증가에 의한 운영기술지침서의 운전제한조건 진입, 원자로냉각재펌프 제어유출수 유로 전환으로 원자로배수탱크(RDT) 파열관 손상에 의한 원자로냉각재 상실사고 등 심각한 사고를 초래할 수 있다. 동일 노형의 한국표준형 원전과 선행호기의 격납건물 계기용공기 공급밸브를 비교해 본 결과 한빛 3, 4호기의 격납건물 계기용공기 공급밸브의 개선이 필요함을 확인하였다. 이러한 불합리한 설비 개선을 위해 다음 세가지의 최적대응방을 제시하여 현재 진행중에 있다.

첫째, 격납건물내 계기용공기 공급밸브를 수동조작이 가능한 공기구동밸브로 변경하여 고장형태와 관계없이 격납건물내 계기용공기의 연속적인 공급을 보장했고

둘째, 주제어실에 'IA CIV CLOSED' 경보창을 신설하여 운전원의 신속한 대응조치 및 배관내 계기용공기 잔압을 이용한 비정상 복구에 필요한 추가적인 여유시간을 제공했다.

셋째, 관련 절차서(비정상 2건, 경보 1건) 개정을 통해 원자로배수탱크(RDT) 파손에 의한 부적절한 원자로냉각재 상실사고를 방지했으며, 운전원의 체계적인 비정상 대응조치가 가능하도록 절차서를 최적화했다.

발전소 비정상 발생시 운전원의 중요한 대응수단인 비정상절차서는 단일기기 및 계통 고장에 최적대응이 가능하도록 기술되어 있으나 격납건물 계기용공기 공급밸브와 같은 핵심설비가 운전 불가능할 경우 최적의 복구조치가 불가능하다. 격납건물 계기용공기 공급밸브의 설비 개선 및 관련 비정상절차서 개선을 통해 부적절한 방사능물질 방출 가능성 및 원자로 수동정지 가능성을 감소시키는 것이 본 연구의 목적이었으며, 이번 연구는 격납건물 계기용공기 공급밸브 고장 발생시 운전원의 대응 역량 향상에 도움이 될 것이며, 원자력발전소 설비의 안전성 및 신뢰도 향상에 크게 기여할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 1) “비정상-3712A, CSAS 오동작”, 한빛원자력 2발전소 운영절차서
- 2) “비정상-3596B, CV내 계기용공기 상실”, 한빛원자력 2발전소 운영절차서
- 3) 한빛3,4호기 운영기술지침서
- 4) 한빛3,4호기 운영기술지침서 기술배경서
- 5) 한빛3,4호기 OM Manual
- 6) 한빛 3,4호기 Functional Block Diagram
- 7) 한빛 3,4호기 계통설명서
- 8) 해외기술정보(OE33444) : Solenoid Operated Valve Coil Failure causes Loss of Instrument Air to Containment (Palo Verde Generating Station)
- 9) 해외기술정보(OE33444) : Manual Trip due to Loss of Instrument Air to Containment (Palo Verde Generating Station)



## 감사의 글

입사 후 한빛 3,4호기 시운전 현장운전원으로 시작한 발전팀 근무가 20년이 넘었습니다. 직장생활을 하면서도 학업에 대한 갈증은 있었지만, 직장생활과 대학원 학업을 병행하는 것을 마음속에 담아둔 채 회사생활에만 전념하였습니다. 하지만 조선대학교와 우리 한빛원자력본부 간 산학협력 증진의 일환으로 시행된 석박사과정의 개설은 학업에 대한 저의 열망을 실현시킬수 있는 좋은 기회로 여겨졌습니다.

석사과정 시작 후 어려웠던 시간도 있었지만 지금까지 많은 분들의 훌륭한 가르침과 도움으로 이 자리에 설 수 있었던 것 같습니다. 제자들의 배움에 대한 열정을 잊지 않으시고 먼 길을 한걸음에 달려와 주셨던 조선대학교 원자력공학과 송종순 교수님, 정운관 교수님, 김진원 교수님, 나만균 교수님, 이경진 교수님, 그리고 박병주 교수님께 감사를 드립니다. 특히 부족한 저를 위해 많은 조언과 따뜻한 격려를 아끼지 않으셨던 송종순 지도교수님께 머리 숙여 감사의 인사를 드립니다.

또한 오늘의 이 자리가 가능하도록 본 과정을 개설해 주시고 적극적인 후원을 보내 주신 양창호 본부장님, 저를 배움의 길도 이끌어 주신 김철준 전본부장님과 송기홍, 김원동 전본부장님께도 감사의 인사를 드립니다.

마지막으로 학업으로 인해 가장의 역할에 충실하지 못했던 남편을 위해 응원해 준 아내와 아이들, 그리고 오늘도 저를 위해 항상 기도하시는 사랑하는 어머니께 이 모든 영광을 돌리고 싶습니다.

2015년 10월

김 영 철