



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 8월

석사학위논문

# 표준형 원전 2차계통 수격현상 분석 및 방지 방안 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

조 동 기

# 표준형 원전 2차계통 수격현상 분석 및 방지 방안 연구

Analysis and Study on Water Hammer Prevention  
Measures in KSNP Secondary System

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

조 동 기

# 표준형 원전 2차계통 수격현상 분석 및 방지 방안 연구

지도교수 이 경 진

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 4월

조선대학교 대학원

원자력공학과

조 동 기

## 조동기의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 송 종 순 (인)

위 원 조선대학교 교수 나 만 균 (인)

위 원 조선대학교 교수 이 경 진 (인)

2016년 5월

조선대학교 대학원

# 목 차

|  |    |
|--|----|
| 표 목차 .....                                 | iv |
| 그림 목차 .....                                | v  |
| ABSTRACT .....                             | vi |
| <br>                                       |    |
| 제1장 서 론 .....                              | 1  |
| 제 1 절 연구배경 및 필요성 .....                     | 1  |
| <br>                                       |    |
| 제 2 장 수격현상에 대한 고찰 .....                    | 2  |
| 제 1 절 수격현상 기본 개념 .....                     | 2  |
| 1. 압력파(Pressure Wave) .....                | 2  |
| 2. 충격량과 힘(Impulses and Forces) .....       | 5  |
| 제 2 절 발전소 수격현상 메카니즘 분석 .....               | 7  |
| 1. 수격현상 메카니즘 식별 .....                      | 7  |
| 2. 수격현상 메카니즘 분석 .....                      | 7  |
| 가. 메카니즘 1 : 수직 배관에서의 과냉각수에 의한 증기 응축 .....  | 8  |
| 나. 메카니즘 2 : 수평 배관에서의 증기와 물의 대향류(對向流) ..... | 9  |
| 다. 메카니즘 3 : 증기가 채워진 수직 배관으로의 가압수 유입 .....  | 10 |
| 라. 메카니즘 4 : 저압 배관으로의 고온수 유입 .....          | 11 |
| 마. 메카니즘 5 : 증기에 의한 물(Water Slug)의 유동 ..... | 12 |
| 바. 메카니즘 6 : 밸브의 급속한 작동 .....               | 13 |
| 사. 메카니즘 7 : 빈 배관의 충수 .....                 | 14 |
| 아. 메카니즘 8 : 캐비테이션 또는 밸브의 불안정한 작동 .....     | 14 |
| 3. 수격현상의 분류 .....                          | 15 |
| 가. 응축기인 수격현상 .....                         | 15 |
| 나. 물 슬러그 기인 수격작용 .....                     | 16 |
| 다. 급속한 밸브 동작에 의한 수격작용 .....                | 16 |
| 라. 기포 배관의 충수에 의한 수격작용 .....                | 16 |
| <br>                                       |    |
| 제 3 장 수격현상 사례 분석 및 방지 대책 .....             | 17 |

|   |    |
|---|----|
| 제 1 절 수격현상 발생 현황 .....                        | 17 |
| 1. 증기발생기 취출수 계통(SGBD) .....                   | 18 |
| 가. 계통 개요 .....                                | 18 |
| 2. 터빈 추기 계통(ES) .....                         | 19 |
| 가. 계통 개요 .....                                | 19 |
| 3. 급수가열기 배수 및 배기 계통(HD) .....                 | 21 |
| 가. 계통 개요 .....                                | 21 |
| 나. 계통 운전 .....                                | 21 |
| 4. 복수 계통(CD) .....                            | 23 |
| 가. 계통 개요 .....                                | 23 |
| 나. 계통 운전 .....                                | 23 |
| 제 2 절 수격현상 경험 사례 분석 .....                     | 25 |
| 1. SGBD 재생 열교환기 냉각수 공급배관 변형 및 지지대 손상 .....    | 25 |
| 가. 개 요 .....                                  | 25 |
| 나. 설계 및 운전 현황 .....                           | 25 |
| 다. 수격현상 원인분석 .....                            | 28 |
| 라. 수격현상 방지대책 .....                            | 28 |
| 2. SGBD 재생열교환기 후단과 탈기기 입구배관 수격현상 .....        | 30 |
| 가. 개 요 .....                                  | 30 |
| 나. 원인분석 .....                                 | 30 |
| 다. 수격현상 방지 대책 .....                           | 31 |
| 3. 고압급수 가열기 5A/5B 정상 배수관 수격현상 .....           | 31 |
| 가. 개 요 .....                                  | 31 |
| 나. 원인분석 .....                                 | 32 |
| 다. 수격현상 방지 대책 .....                           | 33 |
| 4. SGBD CBD TK → 고압급수 가열기 5A/5B 배관 수격현상 ..... | 33 |
| 가. 개 요 .....                                  | 33 |
| 나. 원인분석 .....                                 | 34 |
| 다. 수격현상 방지 대책 .....                           | 34 |
| 5. SGBD CBD TK 입구 배관 수격 현상 .....              | 35 |
| 가. 원인분석 .....                                 | 35 |

|  |    |
|--|----|
| 나. 수격현상 방지 대책 .....                      | 35 |
| 6. 주급수 격리밸브(V105/V106) 후단 배관 수격 현상 ..... | 36 |
| 가. 원인분석 .....                            | 36 |
| 나. 수격현상 방지 대책 .....                      | 36 |
| 제 4 장 결론 .....                           | 37 |
| 참고문헌 .....                               | 38 |



## 표 목 차

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 표 2.1 수격현상 메카니즘 분류 .....     | 8  |
| 표 3.1 표준형 원진 수격현상 현황 .....   | 17 |
| 표 3.2 터빈 추기증기 배관 연결 구성 ..... | 19 |

## 그 립 목 차

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 그림 2.1  | 공기 함유량 변화에 대한 압력과 속도 .....              | 3  |
| 그림 2.2  | 오리피스 장착 배관에서의 전송과와 반송과 .....            | 4  |
| 그림 2.3  | 불구속 곡관부를 통한 과전달 .....                   | 6  |
| 그림 2.4  | 수직 배관에서의 과냉각수에 의한 증기 응축 .....           | 9  |
| 그림 2.5  | 수평 배관에서의 증기와 물의 대향류(對向流) .....          | 10 |
| 그림 2.6  | 증기가 채워진 수직 배관으로의 가압수 유입 .....           | 11 |
| 그림 2.7  | 저압 배관으로의 고온수 유입 .....                   | 12 |
| 그림 2.8  | 증기에 의한 물(Water Slug)의 유동 .....          | 13 |
| 그림 2.9  | 밸브의 급속한 작동 .....                        | 13 |
| 그림 2.10 | 빈 배관의 충수 .....                          | 14 |
| 그림 3.1  | 증기발생기 취출수계통 개략도 .....                   | 18 |
| 그림 3.2  | 터빈 추기증기 계통 개략도 .....                    | 20 |
| 그림 3.3  | 급수가열기 배수 및 배기 계통 개략도 .....              | 22 |
| 그림 3.4  | 복수 계통 개략도 .....                         | 24 |
| 그림 3.5  | H발전소 3호기 복수계통 Layout 개략도 .....          | 26 |
| 그림 3.6  | 배관 변형 사진 .....                          | 27 |
| 그림 3.7  | SGBD 재생열교환기 냉각수 공급배관 ISO DWG .....      | 27 |
| 그림 3.8  | 복수계통 개략도 .....                          | 29 |
| 그림 3.9  | SGBD 재생 Hx → 탈기기 입구배관 수격현상 발생 개략도 ..... | 30 |
| 그림 3.10 | 고압급수 가열기 5A/B 정상배수관 수격현상 개략도 .....      | 31 |
| 그림 3.11 | 고압급수 가열기 5A/B 정상배수관 Layout 개략도 .....    | 32 |
| 그림 3.12 | 고압급수 가열기 5A/B 입·출구 배관 개략도 .....         | 33 |
| 그림 3.13 | SGBD CBD TK 입구 배관 개략도 .....             | 35 |
| 그림 3.14 | 주급수 격리밸브 배관 개략도 .....                   | 36 |

## ABSTRACT

### Analysis and Study on Water Hammer Prevention Measures in KSNP Secondary System

By Cho, Dong Ki

Adviser : Prof. Lee, Goung Jin, Ph. D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

Water hammer in nuclear power plant has occurred for a variety of reasons, mainly in the secondary system. Although water hammer is not threaten directly the safety of nuclear reactor, in the long term, water hammer can disturb the plant operation and cause damage to the equipment, such as piping, piping supports and welded joint.

Water hammer, which is one of the thermal-hydraulic instability can occur at any time and requires close attention because it can be a factor to inhibit the safety and reliability of the equipment of a nuclear power plant.

Water hammer occurred in KSNP has been mostly occurred during start-up, shut-down operation, it occurred in a two-phase fluid flow environment due to the condensation of steam, such as HP HTRs connection pipe, SGBD connection pipe, deaerator connection pipe.

In this study, we analyzed the physical phenomena and processes occur, root cause for each mechanisms that water hammer most often characteristic equipment and systems to a common occurrence in KSNP secondary system.

In addition, we analyzed the causes based on the operating conditions of the water hammer occurs, and established and applied water hammer prevention measures.

This report could be applied to similar industries suffering water hammer.

It could be referred for further studies to analyze and retrofit equipments related to water hammer in NPP.

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구배경 및 필요성

원자력발전소에서 수격작용은 저온과 고온계통, 저압과 고압계통, 안전계통과 비안전계통에서 다양한 원인으로 발생하고 있다. 이것은 설계 및 운전에 대한 근본적인 원인 규명과 적절한 조치가 미흡한 결과에서 비롯되었다고 할 수 있으며, 수격작용으로 인해 관련 배관, 지지대 등의 기기가 손상되기도 하였고, 관련 종사자가 부상을 입은 사고도 보고된 바 있다.

원자력발전 초기에서부터 많은 수격작용을 경험하면서 미국 원자력 규제위원회는 '78년에 수격작용을 미해결 안전성 문제(Unresolved Safety Issue) A-1호로 지정하기도 하였다. 그 이후 문제 해결에 많은 연구를 거듭한 결과 현재는 수격작용의 이론적 배경과 해석, 예방, 진단, 평가 등에서 괄목할 만한 수준에 도달하였으며, 원자력발전소에서의 수격작용 발생 빈도도 현저히 줄어 들었다.

그러나 열수력학적 불안정성의 하나인 수격작용은 언제라도 발생할 수 있고, 원자로 안전을 직접적으로 위협하지는 않지만 장기적으로 배관, 지지대 및 용접이음부 등 설비 손상을 유발하여 발전소 운전에 지장을 초래 함 으로서 원자력발전소의 안전성과 설비의 신뢰성을 저해하는 요인이 될 수 있으므로 세심한 주의를 필요로 한다.

국내 표준형 원전에서 발생한 수격작용 현상은 대부분 2차 계통에서 발전소 기동, 정지 운전 중 발생되고 있으며, 고압급수가열기 연결 배관, 증기발생기 취출(SGBD) 계통 연결배관, 탈기기 연결배관 등 고온 고압의 증기와 응축에 의한 2상 유체 유동 환경에서 발생 되었다.

본 연구는 국내 표준형 원전 2차계통에서 발전소 기동, 정지 및 정상운전 중 빈번하게 발생하는 수격현상 사례를 수집하고, 발전소에서 경험한 수격작용 사례를 발생 개소별로 발생 당시의 운전조건 및 설비 설계자료 등을 토대로 원인분석 및 방지 방안을 수립하여 원전의 안전성과 설비의 신뢰성을 확보 하고자 한다.

## 제 2 장 수격 현상에 대한 고찰

### 제 1 절 수격현상 기본 개념

#### 1. 압력파(Pressure Wave)

일반적으로 폐쇄 관로의 유체가 외부 압력, 밸브 개폐 등에 의해 급격한 유량 변화를 수반할 경우 운동에너지가 압력에너지로 변환 압력파가 관로 속을 음속으로 왕복 운동하는 과도현상을 수격작용(Water Hammer)이라고 말한다. 이러한 수격작용은 밸브 개폐뿐만 아니라 슬러그, 증기 생성 및 응축 등에 의해서도 발생한다.

이러한 수격작용은 19세기 말부터 광범위한 연구가 시작되었으며, 주로 대형 펌프 설치에 대한 설계 차원에서 연구되었다. 초기에는 배관계에서 펌프의 기동, 펌프의 트립, 또는 밸브의 급작스런 폐쇄 등으로 인한 수량의 가속과 감속에 의해 수격작용이 발생하는 것으로 생각하였다. 이러한 형태의 수격작용은 단지 단상 유동 환경에서 발생하는 것이므로 원자력발전소는 이러한 과도현상을 예상하여 설계하였기 때문에 심각한 손상을 초래하는 경우는 드물다. 그러나 수격작용은 단상 유동 환경 이외의 다양한 환경에서 발생하며 이러한 수격작용은 모두 심각한 충격과 기기의 손상을 유발하게 된다.

따라서 이러한 수격작용의 원인을 규명하기 위해서는 압력파의 강도를 이해하는 것이 중요하다. 배관에서의 유체의 질량 및 모멘텀에 대한 보수적인 원리를 근거로 하여 수격작용의 압력 파동은 유체 속도의 변화에 비례하게 되며, 이에 대한 식 (Joukowsky Equation)은 다음과 같다.

$$\Delta P = \rho \cdot a \cdot \Delta V \quad (1)$$

여기서,  $\Delta P$  : 압력상승 정도

$\rho$  : 유체 밀도

$a$  : 압력파 속도

$\Delta V$  : 유체 속도 변화

이다.

액체 계통에서 속도가 갑자기 1 fps로 변하면 압력 파동은 거의 50 psi에 이른다.

이 압력 파동은 배관 배치에 따라 파동의 반사가 이루어질 때까지 진행된다. 물로 채워진 배관에서의 압력과 속도는 다음과 같다.

$$a = \frac{\sqrt{K/\rho}}{\sqrt{1+[(K/E)(D/e)]c}} \quad (2)$$

여기서, K : 물의 탄성계수(lb/ft)

E : 배관의 탄성에 대한 영 계수(lb/ft)

D : 배관 직경(ft)

e : 배관의 벽 두께(ft)

c : 배관 지지 조건에 대한 상수(0.85~1.0)

배관내의 액체에 약간의 공기가 포함되어 있다면 압력과 속도는 크게 감소한다. 그림 2.1은 공기 함유량의 함수로 파형속도의 이론적 및 실험적 결과를 보여주며, 압력 47 psi에서 공기가 0.1% 포함되어 있을 경우에 압력과 속도는 4000 ft/s에서 2000 ft/s로 감소 시키는 것을 나타낸다.

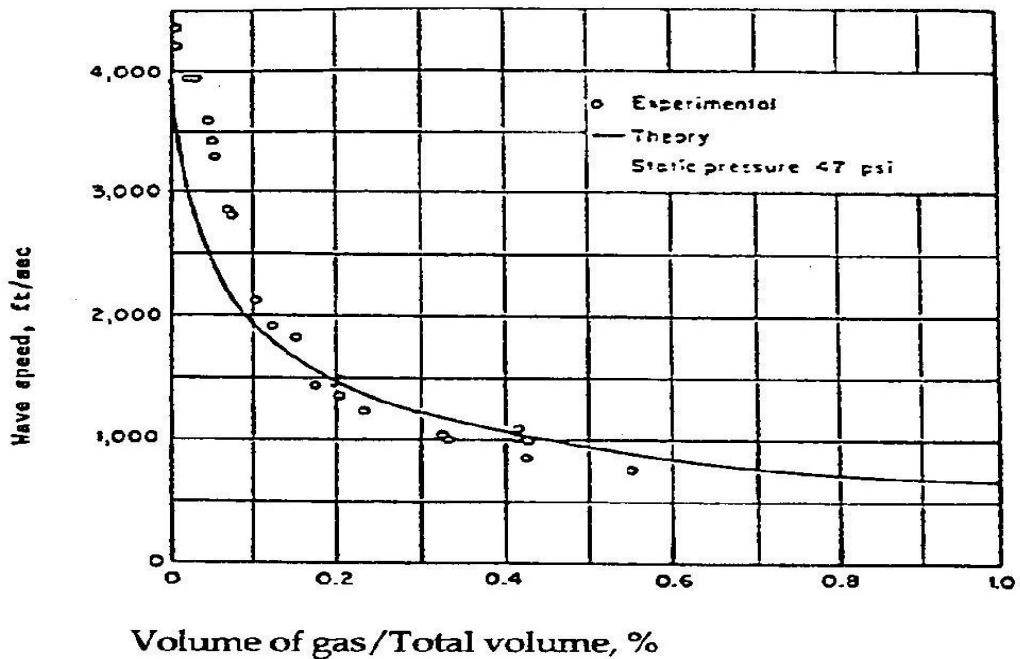


그림 2.1 공기 함유량 변화에 대한 압력과 속도

압력파는 배관내의 유로 저항 또는 단면적이나 재질의 변화가 있으면 바뀌게 된다. 이러한 압력파는 그림 2.2와 같이 배관 경계부에서 전송(Transmission)과 반송(Reflection)의 효과를 가진다.

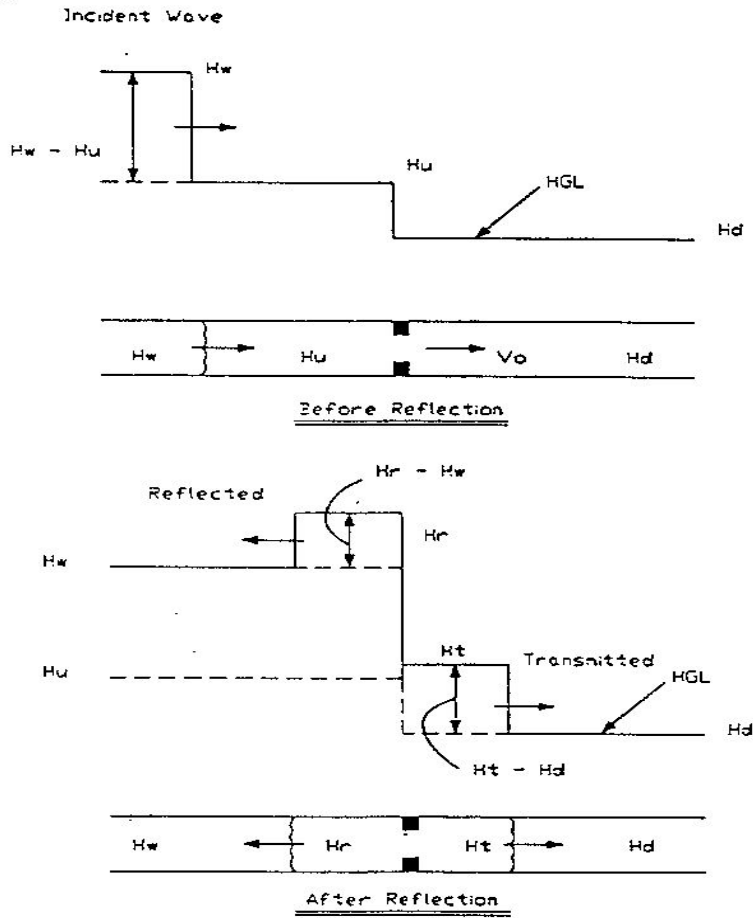


그림 2. 2 오리피스 장착 배관에서의 전송파와 반송파

압력파 전송 인자(Transmission Factor, TF)는 압력파 개시 강도에 대한 전송파의 압력수두 증가에 대한 비율을 말하며, 반사 인자(Reflection Factor, RF)는 압력파 개시 강도에 대한 반송파의 압력수두 변화에 대한 비율을 말하며 수식으로 다음과 같이 표현한다.

$$TF = \frac{H_t - H_d}{H_w - H_u} \quad (3)$$

$$RF = \frac{H_r - H_w}{H_w - H_u} \quad (4)$$

여기서,  $H_u$  : 경계부 전단의 초기 압력수두

$H_d$  : 경계부 후단의 초기 압력수두

$H_w$  : 압력과 개시 수두

$H_t$  : 전송파

$H_r$  : 반송파

이다.

## 2. 충격량과 힘(Impulses and Forces)

수격현상으로 발생한 순간 압력 충격 메카니즘은 충격적 형태의 하중을 발생 시킨다. 만약 배관이 유연하다면, 즉 탄성적 이어서 유연하고 유동성이 있다면 유체와 배관 구조물 사이의 상호작용은 수격 현상 발생 중에 일어난다. 배관에서의 이런 다양한 형태의 유동은 비틀림, 횡 전단력(Transverse Shear)과 구부림(Bending), 그리고 배관 벽과 유체에서 축방향 압축파(Axial Compression Waves)를 포함한다.

유체가 동적으로 배관 구조물에 접촉하는 두 가지 메커니즘은 접합 커플링(Junction Coupling)과 포아송 커플링이다. 접합 커플링은 T자관, 끝단 막힌 배관, 밸브등과 같은 곳에서 수격 압력파가 배관에 대해 축방향으로 힘이 작용할 때 발생한다. 다음으로 배관 움직임은 이동하는 경계로서 작용하거나 유체속으로 전파되는 요동을 발생시킨다. 포아송 커플링은 축을 따라 발생한다. 수격 압력파가 배관 속으로 전파되면서, 파이프 벽면에서 발생하는 원주 방향 스트레인은 축방향 스트레인을 발생시키고 결국 축방향의 변위를 일으킨다. 이런 소위 선단파(Precursor Wave)는 배관 벽면에서 액체 음향파의 3 ~ 5배의 속도로 이동한다. 포아송 커플링은 배관길이에 따라 분포된다. 반면에 접합 커플링은 불연속적이며, 유동 지역이나 방향이 변화되는 곳에 존재한다. 두 가지 중 배관 움직임에 미치는 영향은 접합 커플링이 포아송 커플링보다 훨씬 크다. 슬러그에 의한 움직임에 대해, 힘은 배관 접합부에서 유체 운동량 변화에 의해 유도되고 포아송 커플링은 존재하지 않는다.



접합 커플링은 상호간 동적 현상이다. 위에서 언급한 것처럼, 일단 배관이 움직이면 배관은 내부 경계조건으로 작용한다. 예를 들어, 그림 2.3-a 와 같이 2개의 90도로 구부러진 액체로 채워진 배관 내에서의 수격 펄스의 전파를 가정해 보자. 2개의 구조적 자유도(Degrees of Freedom)가 존재한다. 하나는 x방향, 다른 하나는 y방향이이다. 압력 펄스는 P1위치의 밸브에서 갑작스런 초기 유동의 멈춤에 의해 발생한다. 그림 2.3-b는 밸브 전단에서 즉시 기록된 압력-시간 이력을 나타낸다. 비교를 위해 비 상호작용적(Noninteractive) Joukowski 예측을 나타내고 있다. 압력파의 형태는 더 이상 평탄하지 않고, Joukowski 값에 대해서 요동하며 두 개의 구조적 진동모드에 기인한 높은 주파수를 보여주고 있다. 이 두 가지 모드의 진동은 그림 2.3-c 에서 상부 엘보우에서의 구조물의 두 속도성분을 관찰함으로써 명확해진다.

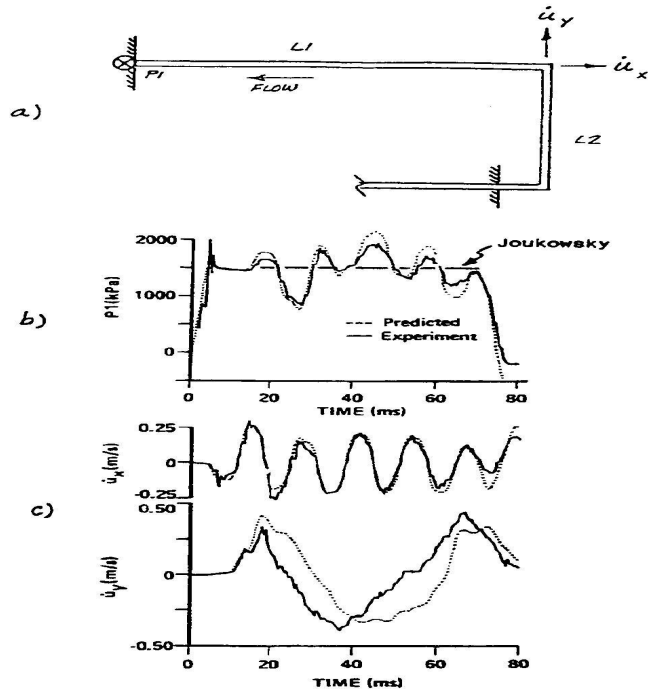


그림 2.3 불구속 곡관부를 통한 파전달

## 제 2 절 발전소 수격현상 메카니즘 분석

### 1. 수격현상 메카니즘 식별

원자력발전소에서 일어난 대부분의 수격사고(Water Hammer Events)는 펌프기동이나 밸브 닫힘에 있어서와 같이 배관에서 유체 흐름의 가속이나 감속에 의해 일어난다. 이런 종류의 수격작용은 대부분 단 상(Single-Phase)의 유동 환경에서 발생한다. 이런 과도현상으로부터 발생하는 압력과는 음속으로 전파되며 실험과 현장 측정에 의해 증명되어진 재래식 수격기술을 사용함으로써 쉽게 측정되어 질 수 있다. 또한, 이런 사고와 관련된 근본 원인은 일반적으로 쉽게 이해되고 있다. 이런 사고의 직접적인 손상은 발생부하가 배관설계에서 수용될 때 경미해 진다.

그러나 과도한 부하를 발생시키는 2상(Two-Phase) 유량 혼합을 포함한 수격사고들이 있다. 이런 대부분의 심각한 사고는 급속한 증기 응축이 원인이다. 급속한 증기 응축은 국부적이지만 강한 물 덩어리(Water Slug)에 의한 심한 충격을 일으킨다.

이런 사고들은 분석하기가 매우 복잡하다. 그러나 이런 사고들은 발전소 운전에서 심한 충격을 발생시킬 수 있으며 배관 지지대와 배관 구성품에 심각한 손상을 초래한다. 명백히, 이런 심각한 증기응축사고는 사용 가능한 모든 방법을 사용하여 막아야 한다.

### 2. 수격현상 메카니즘 분석

원자력발전소에서 수격작용이 발생할 수 있는 물리적이고도 기계적인 조건이 상존하고 있으며, 수격작용의 발생 가능성은 적절한 계통 설계 및 운전 절차를 통해 대부분 최소화되었지만 아직도 수격작용은 발생하고 있다.

수격작용은 보통 두 가지 범주로 분류하고 있다. 즉, 예상할 수 있는 일반적인 수격작용과 예상하지 못한 심각한 수격작용이다. 일반적인 수격작용은 계통의 정상 운전 중 발생하며 물리적 손상을 일으키지 않는다. 그러나 심각한 수격작용은 근본적인 설계 고려사항을 초과하여 물리적인 손상을 일으킬 수 있다.

일반적인 수격작용은 펌프의 기동 및 트립, 제어밸브 또는 격리밸브 작동, 역지밸브 폐쇄, 안전밸브 및 압력방출밸브의 작동, 주증기 터빈의 트립, 빈 계통의 충수 등에 의해 발생한다. 이러한 수격작용은 보통 단상 유체의 유동 환경에서 발생하며, 이에 대한 원인은 잘 알려져 있다. 이와는 달리 심각한 수격작용은 보통 2상 유체의 유동 환경에서 발생하기 때문에 분석하기가 복잡하고 발전소 운전에 대해 큰 영향을 미치며 배관 지지대 또는 배관 기기에 심각한 손상을 일으킨다. 심각한 수격작용을 일으킬 수 있는 특정 Mechanism에 따라 구분하면 <표 2.1>과 같다.

표 2.1 수격현상 메카니즘 분류

| 구 분 | Mechanism                        |
|-----|----------------------------------|
| 1   | 수직 배관에서의 과냉각수에 의한 증기 응축          |
| 2   | 수평 배관에서의 증기와 물의 대향류(Counterflow) |
| 3   | 증기가 채워진 수직 배관으로의 가압수 유입          |
| 4   | 저압 배관으로의 고온수 유입                  |
| 5   | 증기에 의한 물(Water Slug)의 유동         |
| 6   | 밸브의 급속한 작동                       |
| 7   | 빈 배관의 충수                         |
| 8   | 캐비테이션 또는 밸브의 불안정한 작동             |

**가. 메카니즘 1 : 수직 배관에서의 과냉각수에 의한 증기 응축**

이 현상은 그림 2.4와 같이 과냉각수가 차 있는 수조에 증기가 배출될 때 발생한다. 증기 배출 밸브를 완전히 닫거나 조금 열어 놓아 증기의 유동이 정체되거나 감소하면 증기 포켓이 과냉각수 표면위에 갇히게 된다. 이 증기가 순간적으로 응축하면서 물을 배출관으로 순식간에 빨아 올리게 된다. 이 물은 완전히 또는 부분적으로 개방되어 있는 밸브에 충격을 주며, 이때 압력 파동이 발생하고 이 파동이 충수된 배관을 이동하면서 배관에 심각한 영향을 주게 된다.

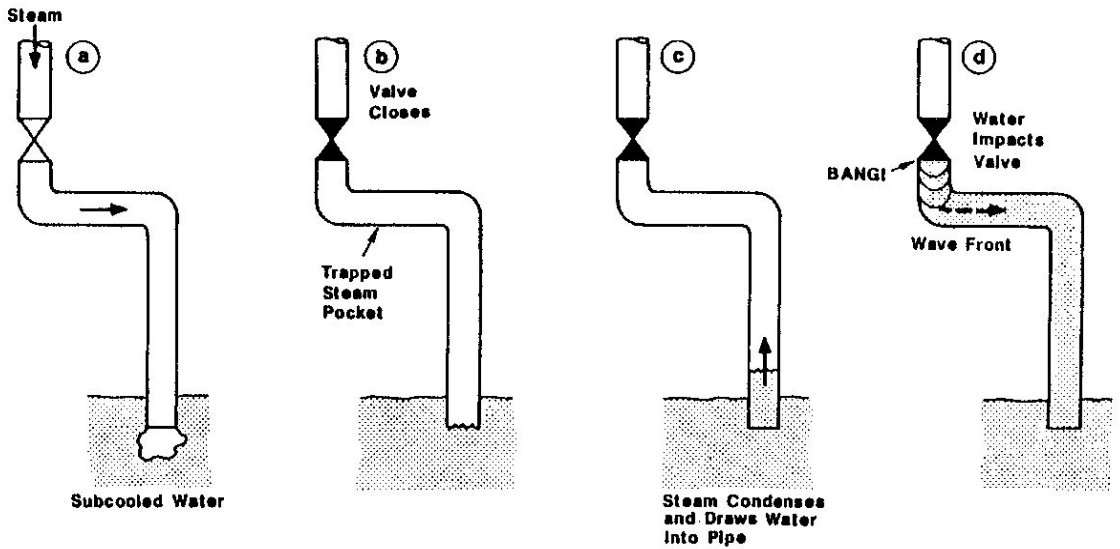


그림 2.4 수직 배관에서의 과냉각수에 의한 증기 응축

## 나. 메카니즘 2 : 수평 배관에서의 증기와 물의 대향류(對向流)

이 현상은 그림 2.5와 같이 수평 배관에서 물과 증기가 서로 반대로 흐를 때 증기와 과냉각수 사이의 접촉면이 생기게 된다. 일반적으로 이러한 현상은 고압의 증기가 저장되어 있는 곳에 긴 수평 배관을 통해 적은 양의 과냉각수가 주입될 때 일어난다. 액체 접촉면에서의 증기의 급속한 응축은 과냉각수 유동방향과 반대 방향으로 고속의 증기 유동을 일으킨다. 이러한 역류는 물의 슬러그가 유동하면서 증기 포켓을 형성하게 된다. 이렇게 갇힌 증기가 순간적으로 응축하면서 물의 슬러그에 대한 큰 차압이 발생하고 증기가 붕괴된 빈 공간으로 물의 슬러그 이동이 가속되면서 수격작용이 발생한다(그림 2.5의 b). 한편으로는 충수가 진행될 때 엘보우를 지나면서 격리된 증기 포켓이 형성(그림 2.5의 c)되고 이 증기가 응축되면서 압력이 감소하게 된다. 이 현상도 슬러그의 이동을 가속화하게 된다. 이 증기 포켓이 소멸(그림 2.5의 d)될 때 슬러그의 이동이 순간적으로 정지되면서 압력파를 일으킬 수 있다. 이러한 압력파가 배관계통을 따라 진전되면서 심각한 손상을 일으키게 된다.

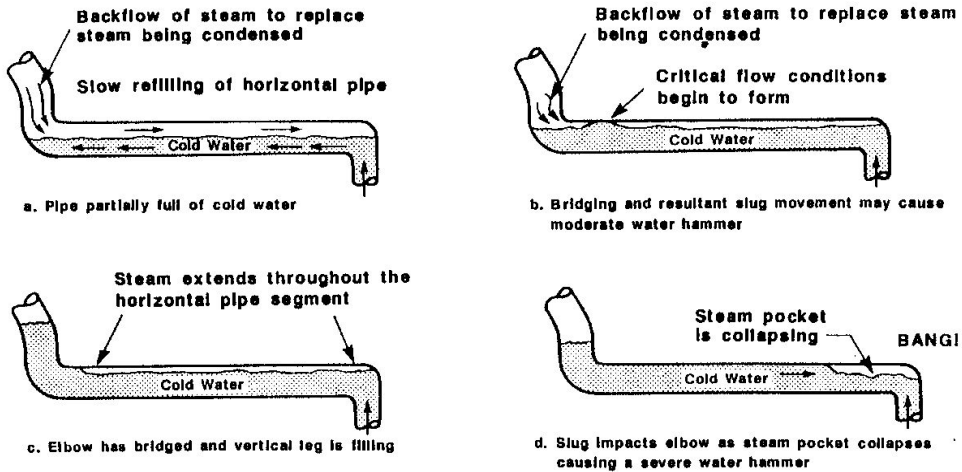


그림 2.5 수평 배관에서의 증기와 물의 대향류(對向流)

#### 다. 메카니즘 3 : 증기가 채워진 수직 배관으로의 가압수 유입

수평에서 상부로 3°이상 기울어지고 증기가 차있는 수직 배관의 하부측에서 가압수가 들어가면 증기 포켓이 붕괴되는 과도현상이 발생하게 된다. 이 과도현상을 일으키는 충수율은 증기 포켓의 응축에 따른 차압이 아니라 펌프나 충수 장치에 의한 액체의 관성과 압력에 따라 결정된다.

그림 2.6에서는 배관의 하부에서 충수되는 경우와 상부에서 충수되는 경우를 나타내고 있다. 증기가 차있는 배관의 하부로부터 충수(그림 2.6의 a)를 할 때 증기 포켓이 붕괴되면서 닫혀 있는 인접한 밸브에 충격을 주면서 계통에 심각한 압력파를 일으킨다(그림 2.6의 b). 배관 상부로부터 충수할 때 서서히 충수하면 수격작용은 발생하지 않는다(그림 2.6의 c). 그러나 배관 상부로부터 충수가 기포의 속도보다 빠르면 슬러그가 유동하는 형태가 된다(그림 2.6의 d). 이때 슬러그가 배관을 채우고 기포가 순간적으로 붕괴하면서 수격작용이 발생하게 된다.

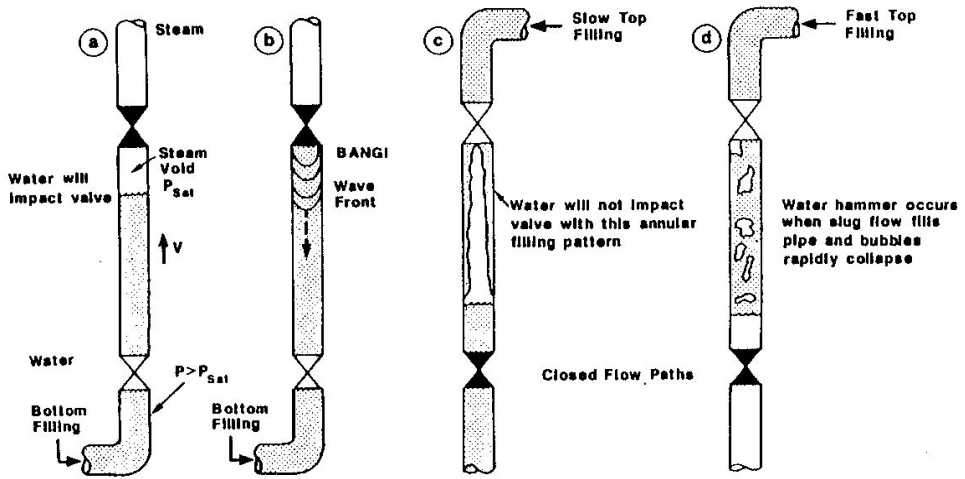
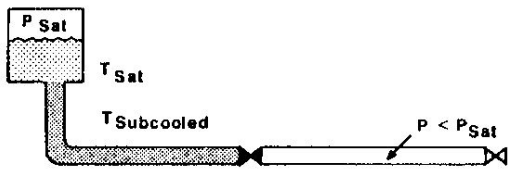


그림 2.6 증기가 채워진 수직 배관으로의 가압수 유입

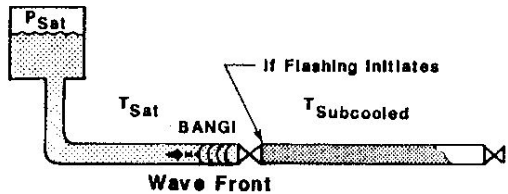
#### 라. 메카니즘 4 : 저압 배관으로의 고온수 유입

수많은 발전소에서 경험한 심각한 수격작용은 저압 배관으로 고온수가 유입되면서 발생하는 과도현상이다. 이러한 수격작용은 가열기 배수계통에서 복수기로 배출되는 곳, 급수계통 및 증기발생기 취출계통에서 많이 발생한다.

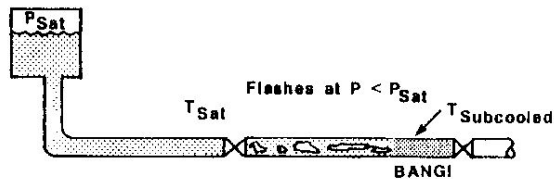
그림 2.7의 a는 포화온도인 가압수가 탱크에 차 있고, 배출관에는 닫혀 있는 밸브 입구측에 정체된 과냉각수가 차 있다. 밸브가 열리면 이 과냉각수가 밸브를 빠른 속도로 통과하며, 이때 뜨거운 물과 보다 차가운 물의 유동 속도 차이에 의해 수격작용이 발생한다(그림 2.7의 b). 포화수의 속도는 밸브에서의 초우킹 효과로 과냉각수의 속도보다 느리다. 밸브 후단에서 포화수가 기화(Flash)되면 물 슬러그가 생성되어 이동하게 되고, 저항부에서 슬러그가 충격하면서 수격작용이 발생한다(그림 2.7의c).



a. Initial conditions when valve opens



b. Possible water hammer when hot water reaches first valve or any significant restriction in the flow path if flashing occurs.



c. Hot water may flash downstream of the first valve which will propel cool water causing slug flow water hammer upon impact with downstream valve (See Mechanism 5)

그림 2.7 저압 배관으로의 고온수 유입

### 마. 메카니즘 5 : 증기에 의한 물(Water Slug)의 유동

이 현상은 그림 2.8의 a와 같이 닫혀 있는 밸브 전단에서 응축수를 수집하는 배관 계통 혹은 정상적으로는 비어 있는 증기 배출관에서 물 슬러그가 형성될 수 있는 곳(그림 2.8의 c)에서 일어난다. 이 현상은 대부분 보조급수계통의 터빈 증기축, 주 증기계통 및 원자로 냉각재계통에서 발생하고 있다.

그림 2.8의 a와 b는 증기에 의해 슬러그가 이동하는 경우를 보여주고 있다. 닫혀 있던 밸브가 열리면서 증기 유동이 슬러그의 이동을 가속하여 수격작용이 발생한다. 슬러그에 대한 증기압력이 상대적으로 작아도(예를 들면 25 psi) 슬러그의 속도는 매우 커지고 빠르게 이동하는 슬러그가 엘보우를 통과하거나 저항부를 타격하면 큰 힘이 작용한다. 그림 2.8의 c와 같이 비어 있는 배관에서 응축수가 수집되면 초기의 슬러그가 배관 단면적을 모두 채우지 않을 수 있으며 그림 2.8의 b와 같이 증기 유동으로 이 물이 슬러그처럼 휩쓸려 가면서 심각한 수격작용을 유발하게 된다.

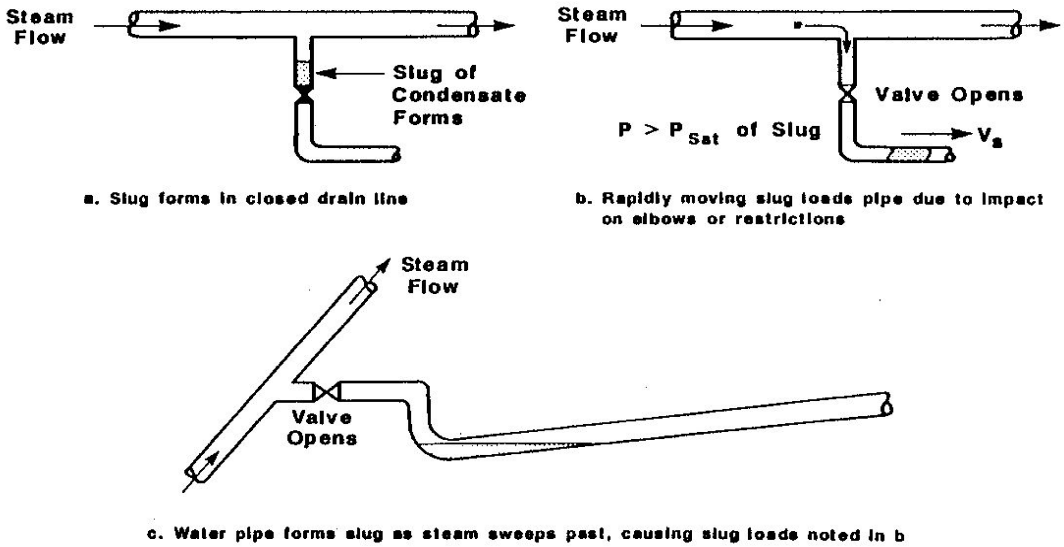


그림 2.8 증기에 의한 물(Water Slug)의 유동

### 바. 메카니즘 6 : 밸브의 급속한 작동

밸브의 급속한 작동이란 그림 2.9의 a와 같이 열려 있는 역지밸브가 급속히 닫히거나 그림 2.9의 b와 같이 밸브가 비정상적으로 열리거나 닫히는 경우를 말한다. 이 경우 급격한 유동속도의 변화로 인하여 압력 맥동이 발생하며 밸브가 정상적으로 열리거나 닫힐 때의 과도현상보다 심각해지게 된다. 밸브가 급속히 닫히면 저압측에서 국부적인 수주 분리(Column Separation)나 결합 현상도 발생할 수 있다.

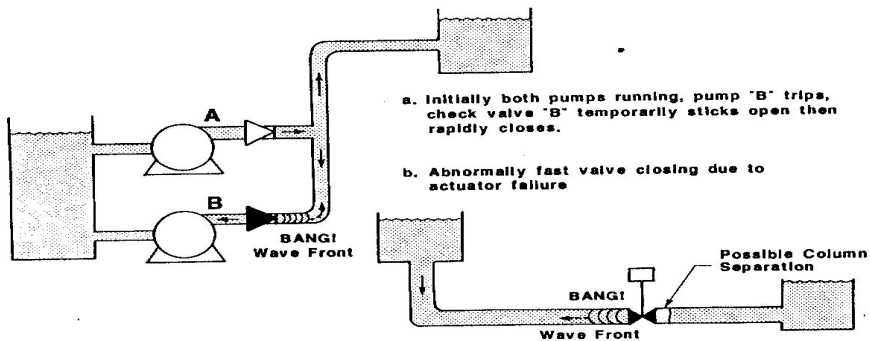


그림 2.9 밸브의 급속한 작동



### 사. 메카니즘 7 : 빈 배관의 충수

그림 2.10은 3단계의 수주 분리 및 결합 현상을 나타내고 있다. 높이가 30 ft 이상의 배관은 펌프가 트립된 뒤 역지밸브의 누설 혹은 충수 유지계통이 작동되지 않는 경우에 진공이 형성될 수 있다. 이 빈 공간은 펌프의 재 기동으로 없어지면서 압력 맥동을 유발하게 된다. 많은 배관 계통이 이러한 유형의 수격작용을 일으키기 쉬우며, 급수계통 및 잔열제거계통에서 발생한다.

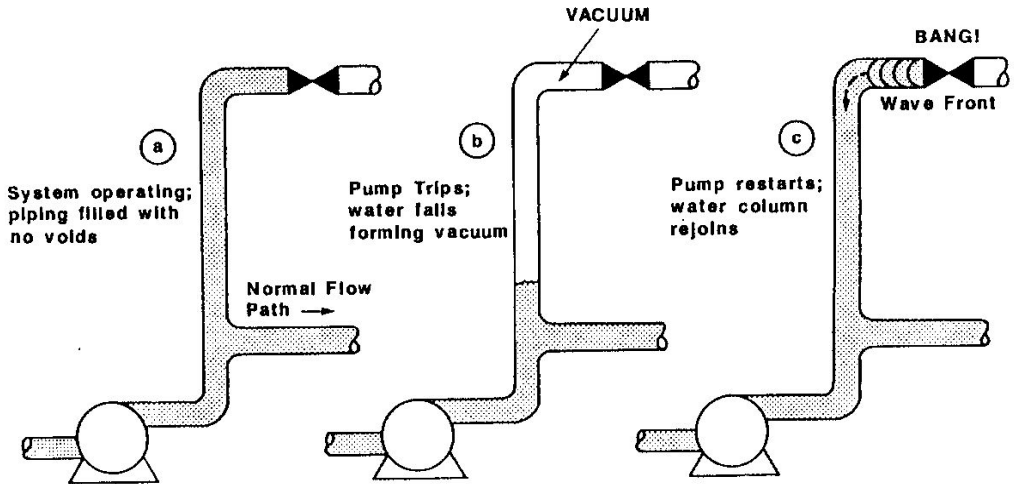


그림 2.10 빈 배관의 충수

### 아. 메카니즘 8 : 캐비테이션 또는 밸브의 불안정한 작동

액체가 펌프나 밸브를 통과할 때 유동 속도가 증가하고 압력이 포화증기압 이하로 감소할 수 있다. 이 경우 액체는 기화되고 다시 압력이 포화증기압 이상으로 증가하면 이 기체가 급격히 붕괴되면서 수격작용을 일으키게 된다. 밸브가 정상적으로 작동하지 않고 급격히 작동할 경우에도 압력 맥동을 유발하면서 수격작용을 일으키게 된다.

### 3. 수격현상의 분류

#### 가. 응축기인 수격현상

응축 및 증기화(Flashing)로 인한 수격작용은 응축기인 사건 하에 논의된다. 메커니즘 1, 2 및 3 은 심각한 응축기인 수격현상으로 유도되고, 메커니즘 2가 가장 심각할 가능성이 있다. 메커니즘 4는 심각한 증기화 기인 수격작용으로 이어질 수 있다. 수직 증기배관에 가압수 유입(메커니즘 3)은 메커니즘 7 기포배관 충수와 몇 가지 관점에서 비슷하지만 넓은 범위의 배관 기하학적 조건에 걸쳐 심각한 과도현상을 유발 할 수 있다. 저압관에 고온수 유입(메커니즘 4) 또한 많은 원자력발전소 배관 계통에 대한 흔한 조건이다. 특히 복수기로 연결되는 급수가열기 배수 배관이 그렇다. 메커니즘 2와 같은 응축기인 수격작용은 증기와 물 성층화 환경의 수평배관에서 발생 할 수 있다. 만약 물이 높은 과냉각 상태면 급격한 응축이 발생한다. 이 급속한 응축과정은 물 표면에서 심각한 증기 유량을 발생시킨다. 증기와 과냉각수 사이의 경계면에서 전단력은 파를 발생시켜 물 슬러그를 형성할 만큼 성장하여 고립된 증기 포켓을 형성한다. 갇혀진 증기의 지속적인 급속 응축은 물 슬러그를 기포 쪽으로 가속시켜 수격작용 손상을 유발한다. 메커니즘 2 응축기인 수격작용을 촉발시키기 위해서는 계통에 다음의 2가지 조건이 동시에 존재해야 한다.

- ① 상당히 긴 수평 또는 준 수평 배관에 성층화된 대향류의 증기 및 과냉각수 존재
- ② 증기-물 경계에서 실질적 파도 존재

유체가 펌프나 밸브를 통과할 때 유동 속도가 증가하고 압력이 포화증기압 이하로 감소할 수 있다. 이 경우 액체는 기화되고 다시 압력이 포화증기압 이상으로 증가하면 이 기체가 급격히 붕괴되면서 수격작용을 일으키게 된다. 밸브가 정상적으로 작동하지 않고 급격히 작동할 경우에도 압력 맥동을 유발하면서 수격작용을 일으키게 된다.

2상 유체 흐름 환경에서 기포 분율과 과냉각에 의존하는 증기응축 및 기포 붕괴에 의해 야기된 압력파의 크기는 심각할 수 있다. 이들 사건은 모든 수단을 동원하여 발생을 예방해야 한다.

## 나. 물 슬러그 기인 수격작용

물 슬러그 기인 수격작용은 종종 증기배관에서 계통이 대기상태에 있을 때 부적합한 배수로 인해 증기배관에 응축수가 축적되는 곳에서 발생한다. 배관에서 증기 유량이 형성될 때 슬러그 양단의 압력차로 인해 물 슬러그가 가속되어 슬러그가 다른 수주에 충격을 가하거나 엘보우, 역지밸브, 또는 오리피스와 같은 방해물을 만날 때 까지 가속된다. 그와 같은 사건에 의해 야기된 충격력은 아주 큰 물 슬러그의 운동량에 의존 하며 대단히 파괴적이다.

## 다. 급속한 밸브 동작에 의한 수격작용

급속한 밸브 개방이나 닫음에 의해 과도한 압력이 발생할 수 있다. 정상운전 조건에서 대부분의 밸브들은 상대적으로 저속에서 동작되어 계통 설계 기준을 초과하는 압력파가 발생하지 않는다. 따라서 여기서 고려되는 밸브 작동에 의한 수격작용은 단지고착 개방된 역지밸브의 급속한 닫힘이나 구동부가 고장 난 밸브의 급속 작동과 같은 비정상 밸브 작동 조건을 말한다. 이들 형태의 비정상 밸브 작동은 심각한 압력파와 힘을 발생시켜 배관이나 배관 지지대에 손상을 유발한다.

요약하면, 급속 밸브 작동에 의한 수격작용 메커니즘은 고착 개방된 역지밸브의 급속 닫음과 큰 수동 버터플라이 밸브의 구동부 고장에 의한 급속 닫힘을 포함한다.

수격 메커니즘은 메커니즘 6 : 급속 밸브 작동

## 라. 기포 배관의 충수에 의한 수격작용

물로부터 아주 높은 위치에 있는 배관의 기포공간의 충수는 계통 기동 후 수주의 충격으로 보통정도의 수격현상이 발생 할 수 있다.

수격 메커니즘은 메커니즘 7 : 기포 배관의 충수

## 제 3 장 수격현상 사례 분석 및 방지 대책

### 제 1 절 수격현상 발생 현황

표준형 원전에서 발생한 수격작용 현상은 주로 2차계통에서 다양한 원인으로 발생하고 있으며, 2차측에서 발생한 수격현상은 대부분 발전소 기동/정지 운전 중에 발생 되었고, 고압 급수가열기 연결 배관, 증기발생기 취출(SGBD) 계통 연결 배관, 탈기기 연결배관, 주급수 계통 등 고온 고압의 증기와 응축에 의한 2상 유체 유동 환경에서 발생 되었다.

표준형 원전에서 계통의 수격작용 발생을 경험한 주요 부위 및 발생 원인을 정리하면 표 <3.1>과 같이 요약 할 수 있다.

표 3.1 표준형 원전 수격현상 현황

| 수격현상 발생 부위                      | 발생 원인              | 발전소 공정  |
|---------------------------------|--------------------|---------|
| SGBD 재생 Hx → 탈기기 입구 배관          | 고온의 계통수와<br>저온수 혼입 | 기동/정지 중 |
| SGBD CBD TK 배기배관 → HP HTR 5A/5B | 저온의 응축수와<br>증기 혼입  | 기동 운전 중 |
| SGBD CBD TK 및 입구 배관             | 응축 및 Flashing      | 기동 운전 중 |
| HP HTR 5A/5B 정상 배수배관            | 저온의 응축수와<br>증기 혼입  | 기동/정지 중 |
| SGBD 재생 Hx 냉각수 공급배관             | 배관 미충수 상태<br>펌프 기동 | 정지 운전 중 |
| 주급수 격리밸브(V105/V106) 후단 배관       | 빈관로의 급격한<br>충수     | 기동 운전 중 |

본 논문의 이해를 돕기 위해 수격현상이 발생한 2차측 주요 계통의 구성 및 계통 역할 등의 이해가 필요하다.

2차 계통의 기본 설계 개념은 대부분의 원전 설비에서 유사 하지만 본 논문에서는 표준형 원전(OPR 1000MWe) 설비를 위주로 기술 하고자 한다.

## 1. 증기발생기 취출수 계통(SGBD)

### 가. 계통 개요

증기발생기 취출계통은 급수계통의 화학약품 주입설비 및 복수탈염기 계통과 연계하여 급수의 화학적 성분을 조절하고 불순물을 제거하는데 사용된다. 본 계통은 플래시탱크를 사용함으로써 탱크 내 증기를 고압가열기로 이송하고, 응축수의 열을 복수계통으로 전달함으로써 취출수의 열을 재생할 수 있도록 설계되어 있다. 증기발생기 수질개선을 하는 계통으로서 증기발생기에서 발생하는 용해성, 비용해성 불순물 및 부식 생성물을 제거하는 기능을 수행한다.

연속취출수 플래시탱크에서 발생한 증기는 고압급수 가열기(5A, 5B)로 배기시켜 열을 재생한다. 탱크내에 응축된 취출수는 재생 열교환기를 통과하면서 튜브를 통해 흐르는 복수계통에 열을 전달하고 가열된 복수는 탈기기로 보내진다. 재생 열교환기를 통해 흐르는 취출수의 온도는 복수계통에 설치된 조절밸브에 의해 복수계통의 유량을 조절함으로써 일정하게(130°F, 54°C) 유지된다. 재생 열교환기를 통과한 취출수는 비재생 열교환기를 거치며, 셀측으로 흐르는 기기 냉각수에 의해 추가로 냉각되나 별도의 온도제어 설비는 없다. 냉각된 취출수는 여과기 및 탈염기를 거쳐 복수기(A 또는 C)로 이송된다. 그림 3.1은 한빛 5,6호기 증기발생기 취출수 계통의 개략도를 나타낸 것이다.

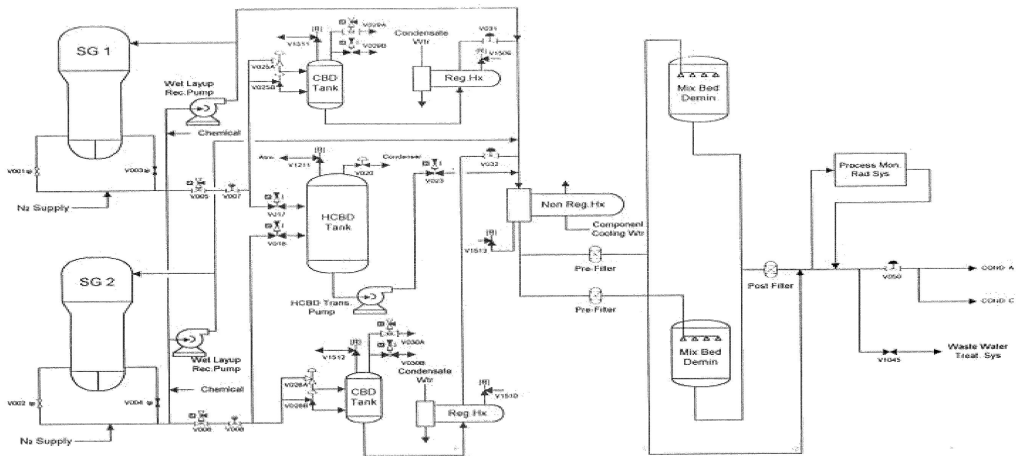


그림 3.1 증기발생기 취출수계통 개략도

## 2. 터빈 추기 계통(ES)

### 가. 계통 개요

터빈으로부터의 추기증기를 고압, 저압 급수가열기 및 탈기기에 공급하여 가열기를 통과하는 급수와 복수를 가열한다. 급수가열기는 3계열의 병렬형 저압급수가열기, 1대의 탈기기, 2계열의 병렬형 고압급수가열기로 구성되며 각 저압급수가열기 계열은 #1,2,3으로 구성되고 각 고압급수가열기 계열은 #5,6,7로 구성된다. 탈기기는 저압급수가열기와 고압급수가열기 사이에 설치된다. 터빈과 급수가열기 계열에 추기증기 배관 연결부는 표<3.2>와 같이 구성 된다.

표 3.2 터빈 추기증기 배관 연결 구성

| 터 빈/단    | 연결 배관수 | 급수가열기 |
|----------|--------|-------|
| 고압터빈 3단  | 2      | 7     |
| 고압터빈 5단  | 2      | 6     |
| 고압터빈 7단  | 2      | 5     |
| 저압터빈 9단  | 1      | 4     |
| 저압터빈 10단 | 2      | 3     |
| 저압터빈 11단 | 4      | 2     |
| 저압터빈 13단 | 8      | 1     |

정상운전 중 고압터빈 및 저압터빈으로부터 추기증기는 고/저압급수 가열기 셀측과 탈기기로 공급된다. 추기증기 유량은 가열기를 통해 흐르는 급수유량과 발전소 부하에 따라 조정되며 정상운전 중 차단밸브와 역지 밸브는 개방되고 배수밸브는 닫힘 상태를 유지 한다. 내용량 부하감발 또는 터빈 트립 중 추기계통 배관, 급수가열기 셀측 및 탈기기에 축적된 에너지 방출로 인한 터빈과속을 방지하기 위해 전원보조 역지 밸브는 차단된다. 그림 3.2는 한빛 5,6호기 터빈 추기 계통의 개략도를 나타낸 것이다.

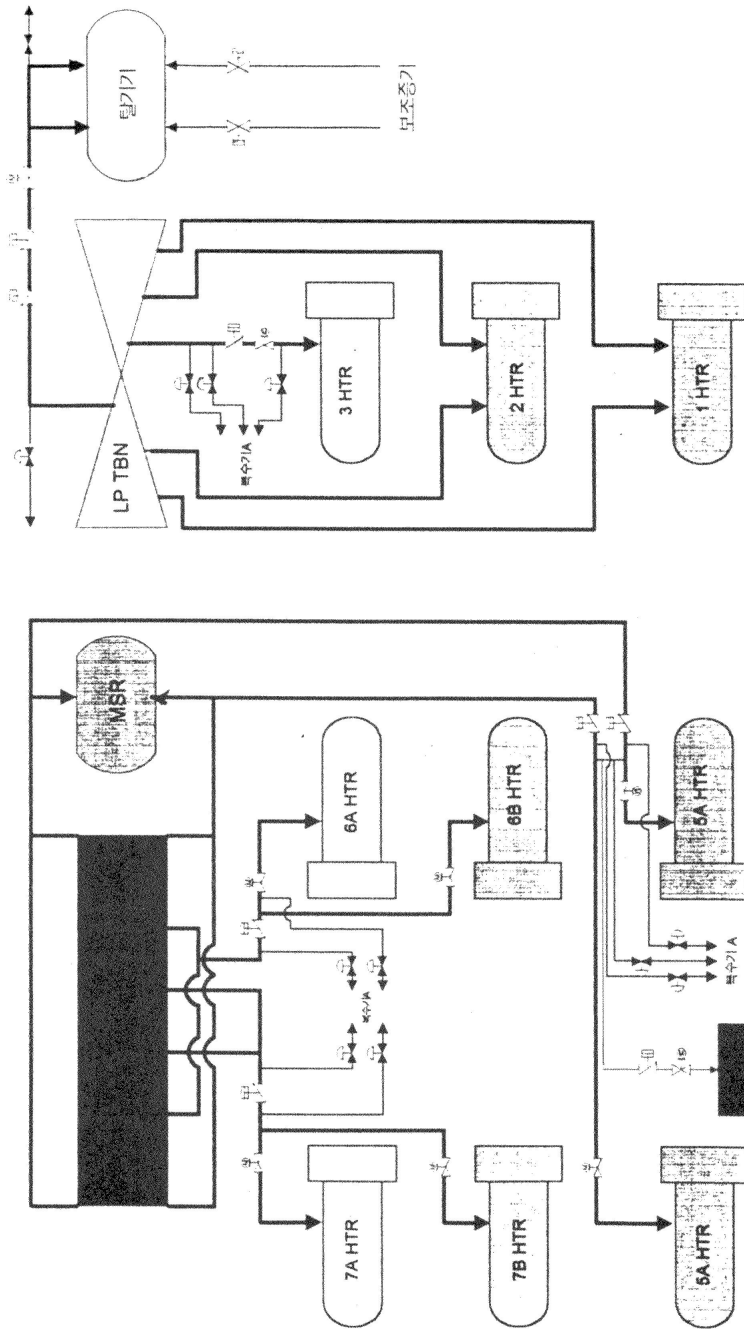


그림 3.2 터빈 후기증기 계통 개략도

### 3. 급수가열기 배수 및 배기 계통(HD)

#### 가. 계통 개요

1, 2단 재열기 배수탱크(#1,2 RHTR Drain Tank)와 폐회로인 고압, 저압 급수가열기의 동체 측 응축증기를 차하단의 급수가열기 또는 복수기로 응축증기를 이송하는 역할을 한다. 1, 2단 재열기, 1, 2단 재열기 배수탱크 및 습분분리기 배수탱크에서 배기되는 배기증기를 5, 7번 가열기, 또는 복수기로 배기하는 역할을 한다.

1단 재열기와 습분분리 배수탱크의 응축증기는 5번 급수가열기를 거쳐 탈기기로 배수되며, 2단 재열기 배수탱크의 응축증기는 7번 급수가열기로 배수된다. 7번 급수가열기의 응축증기는 6번, 5번 급수가열기를 거쳐 탈기기로 배수된다. 3번 급수가열기의 응축증기는 2번, 1번 급수가열기를 거쳐 복수기로 배수된다.

#### 나. 계통 운전

##### (1) 정상 운전

정상운전 중 저압급수 가열기로부터 배수는 차하단계 저압급수 가열기를 경유하여 최 하단 급수가열기(# 1 HTR) 에서는 복수기로 배수된다. 고압급수 가열기로부터 배수는 차하단계 급수가열기를 경유하여 #5 급수가열기에서는 탈기기로 배수된다.

각 습분분리기로부터 배수는 배수탱크로 유입되고 재열기로부터 배수는 각 재열기 배수탱크로 유입된다. 습분분리기 배수탱크와 1단재열기 배수탱크의 배수는 #5A/B로, 2단 재열기 배수탱크는 고압 급수가열기 7A/B로 배수된다.

##### (2) 기동 및 정지

기동, 정지 및 저부하운전중 가열기 사이의 차압이 가열기들간의 유량 유입 형성에 불충분할시 비상배수 밸브가 조절되어 유량의 일부가 복수기로 덤프 된다. 습분분리기 재열기 배수탱크 비상배수밸브는 터빈부하 10% 미만에서 개방되어 복수기로 덤프 한다. 2단 재열기 배수탱크 비상배수 밸브는 터빈부하 20% 미만에서 복수기로 덤프 한다.

그림 3.3은 한빛 5,6호기 급수가열기 배수 및 배기 계통의 개략도를 나타낸 것이다.



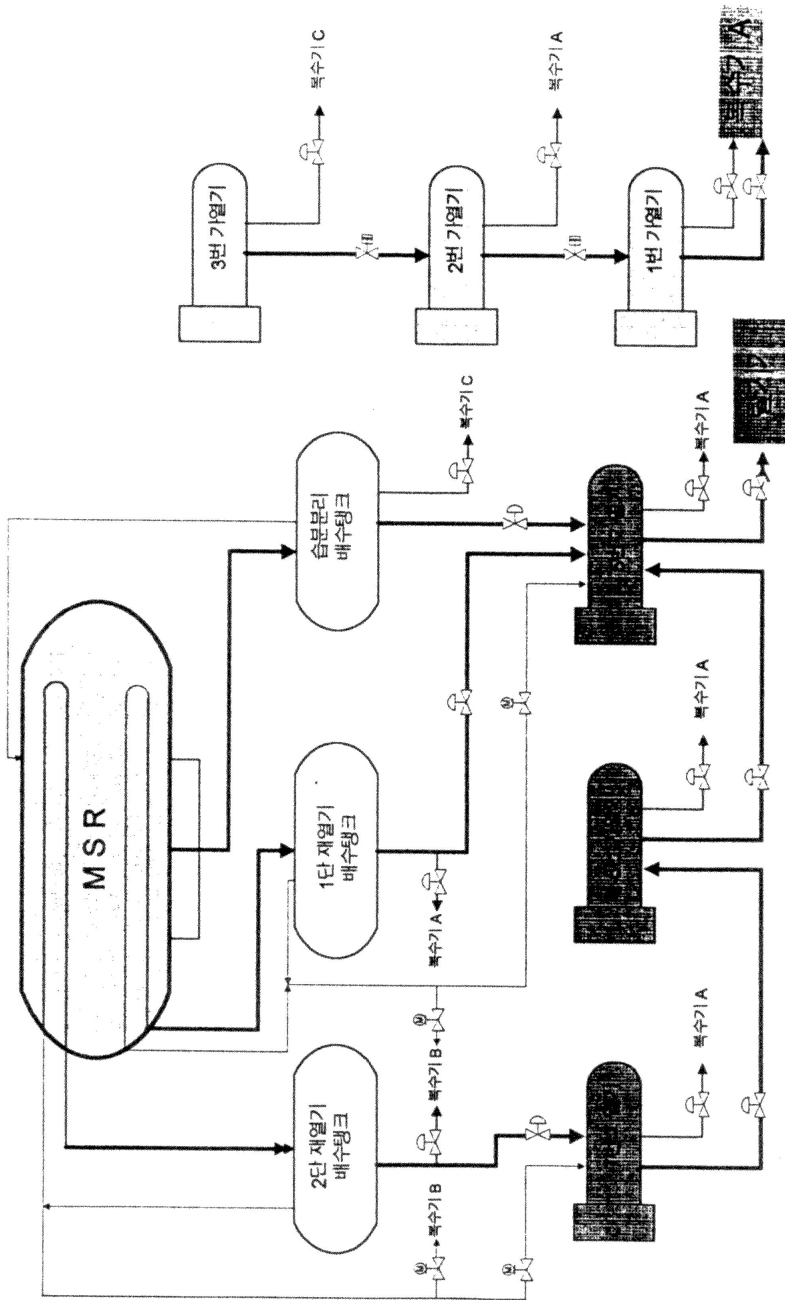


그림 3.3 급수가열기 배수 및 배기 계통 개략도

## 4. 복수 계통(CD)

### 가. 계통 개요

복수계통은 증기사이클의 일부로서 증기를 응축하여 이를 복수기 온수조에 수집하여 급수계통에 이송하는 기능을 갖는다. 복수 배관 밸브, 펌프, 열교환기, 제어, 계측 및 재생 급수 가열을 이용한 폐쇄 증기 사이클에서 가열된 급수를 증기발생기에 공급하는 관련 기기들로 구성된다. 그림 3.4 는 한빛 5,6호기 복수계통 개략도를 나타낸 것이다. 주 복수기 온수조의 보충수는 복수저장탱크에서 공급된다. 복수 펌프는 주복수기 온수조에서 복수를 흡입하여 탈기기로 공급한다. 복수펌프는 공통 입출구 모관에 3대의 전동기 구동, 50%용량의 원심 펌프로 구성되어, 정상운전 시 2대의 펌프가 운전되며 1대의 복수펌프 비상 정지 시에 대기 펌프가 자동으로 기동한다. 복수펌프는 주복수기 온수조에서 복수를 흡입하여 복수정화계통, 증기식 공기추출기 중간 및 후단 냉각기, 증기 패킹 배출기 및 저압 급수 가열기를 통해 탈기기 및 탈기기 저장 탱크로 복수를 공급한다. 1번 및 2번 저압 급수가열기는 주복수기 목(neck)안에 설치되며, 3번 가열기는 가열기 베이에 수평으로 설치된다. 탈기기를 제외한 모든 저압 급수가열기는 폐쇄형으로 일체형 배수 냉각기를 가지고 있으며 탈기기는 직접 접촉식 탈기형 급수 가열기이다. 1, 2 및 3단 저압 급수가열기는 3개의 저압 급수가열기 계열로 배열되며 이들 저압 급수가열기 계열에는 전동기구동 차단밸브가 설치된다.

### 나. 계통 운전

전 부하운전 중 2/3의 복수펌프 → 복수정화 탈염기 → 증기분사 공기 추출기 튜브축 → 증기패킹 추출기 튜브축 → 저압급수 가열기 #1, 2, 3 → 탈기기 수위 제어밸브 → 탈기기 → 탈기기 저장탱크로 유입 된다.

탈기기는 직접 접촉형 탈기 가열기로서 복수와 저압터빈으로부터 유입 되는 추기를 혼합시킴으로서 복수를 가열하고 아울러 내포된 불응축성 가스를 제거한다.

저압급수 가열기 전단에서 분기된 또 하나의 복수관은 증기발생기 취출수 재생열교환기 냉각수로서 공급된다. 냉각재로서 이용된 복수는 탈기기 또는 복수기로 회수된다.

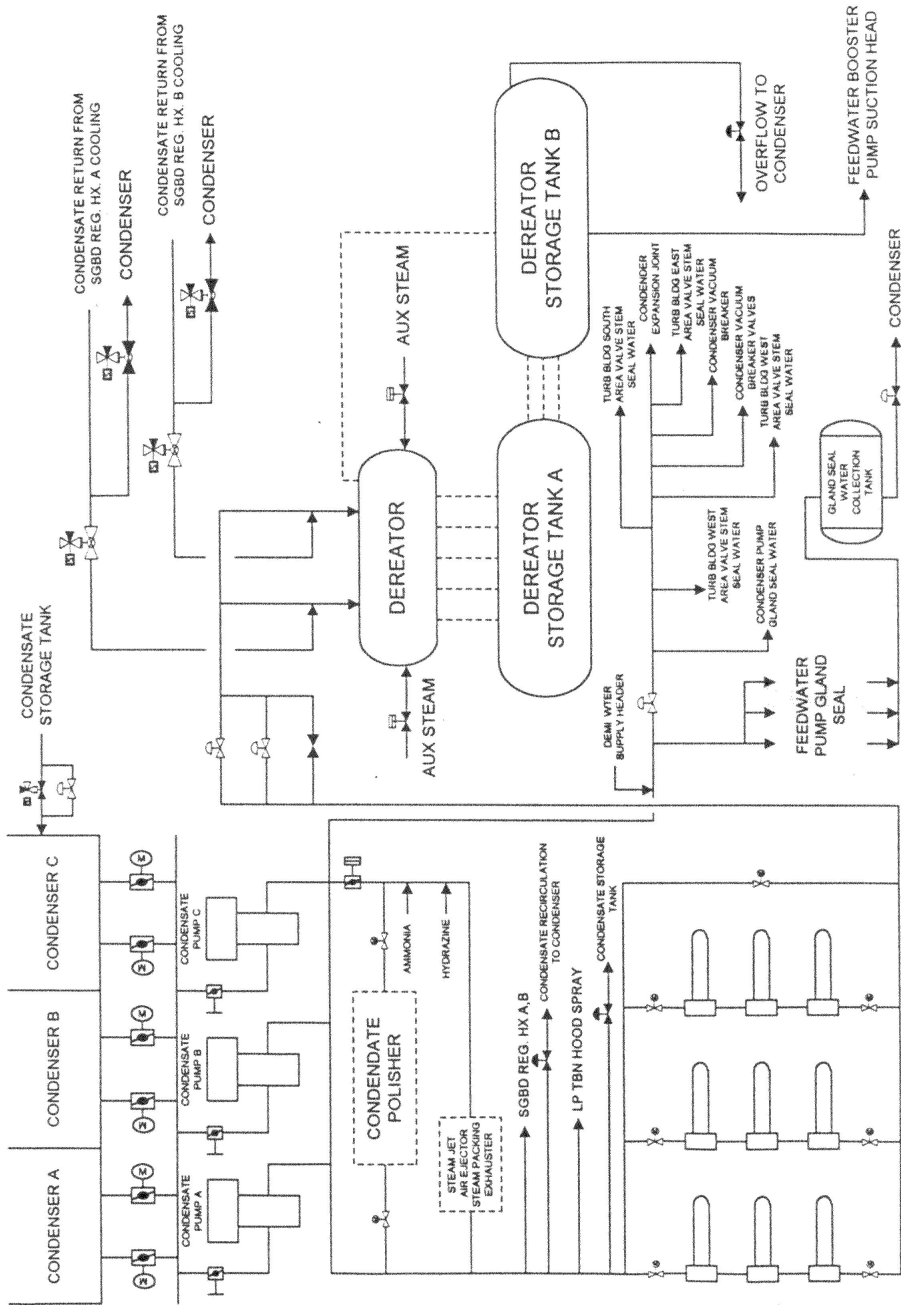


그림 3.4 복수 계통 개략도

## 제 2 절 수격현상 경험 사례 분석

### 1. SGBD 재생 열교환기 냉각수 공급배관 변형 및 지지대 손상 (H발전소 3호기, OPR 1000MWe)

#### 가. 개 요

H 발전소 3호기 발전정지 후 2차계통 습식 보관 운전 중 증기발생기 취출수 계통(SGBD) 재생 열교환기 냉각수(복수) 공급배관에 수격현상이 발생하여 배관 지지대 손상 및 배관 변형이 발생 되었다.

#### 나. 설계 및 운전 현황

##### (1) 재생열교환기 냉각수(복수) 공급배관 운전 현황

발전소 정상 운전 시 탈기기 수위제어밸브(531-V214/215)는 탈기기 수위와 연동되어 자동으로 운전 된다. 이때 탈기기 수위제어 우회밸브는 닫혀 있으며, 최소유량 오리피스 전단밸브(531-V2301)는 개방상태로 운전된다.

재생열교환기 냉각수공급은 복수계통의 탈기기 수위제어밸브 전단에서 분기되어 공급되며, 증기발생기 취출계통 온도가 적절하게 유지 되도록 재생열교환기 후단 온도와 재생열교환기 탈기기 복수 회수 조절밸브(531-V901/902)가 연동되어 복수 유량을 조절한다. 만약 탈기기 수위가 높을 경우 복수회수 조절밸브를 폐쇄하고 복수기로 복수가 배출되도록 복수회수 조절밸브(531-V306/308)가 자동으로 개방된다.

##### (2) 발전소 기동 시 운전(Short Path 운전)

발전소 기동 시 세정을 위하여 복수펌프 최소 유량 조절밸브가 개방되며, 탈기기 수위제어밸브, 우회밸브 및 오리피스 전단 밸브는 폐쇄된다.

복수계통 단 구간 세정(Short Path) 운전모드에서는 증기발생기 취출계통이 운전되지 않으므로 취출계통 온도가 낮음에 따라 탈기기 복수회수 조절밸브는 닫혀 있으며, 또한 탈기기로의 복수 유입이 없으므로 탈기기 수위가 증가되지 않음에 따라 복수기 회수 조절밸브는 닫혀있는 상태이다.

(3) 수격현상 발생당시 운전 현황

발전소는 계획예방 정비 중 복수계통은 단 구간 세정(Short Path) 운전 중 이었으며, 복수펌프 운전 시 복수펌프 최소유량 조절 밸브 및 증기 발생기 취출계통 재생 열교환기 복수기 회수 조절밸브가 개방 운전되고, 복수펌프 정지 후 복수기 복수회수 조절 밸브(531-V306/308)가 개방 상태로 유지되었음이 확인 되었다. 그림 3.5는 H 발전소 복수계통 Layout 개략도이며, 그림 3.6은 수격현상 발생으로 배관 변형이 발생한 상태를 나타낸다.

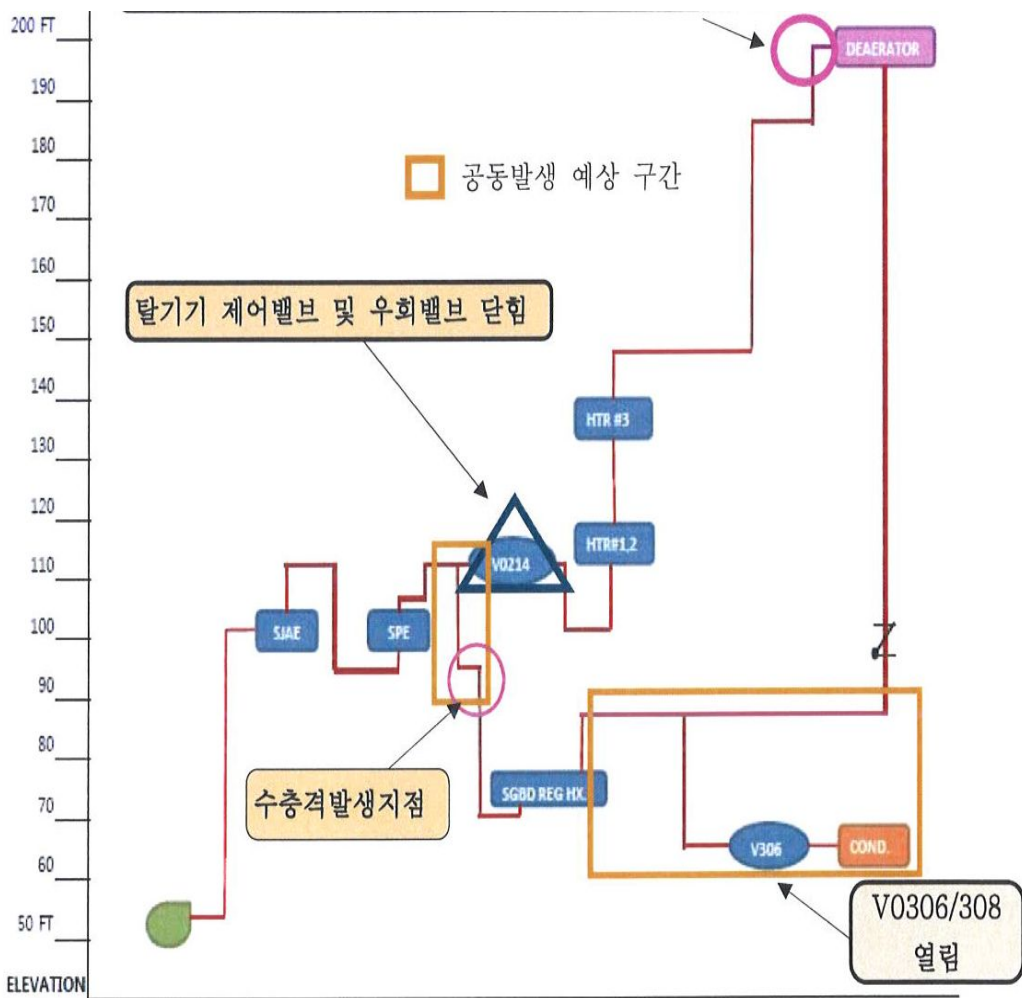


그림 3.5 H발전소 3호기 복수계통 Layout 개략도

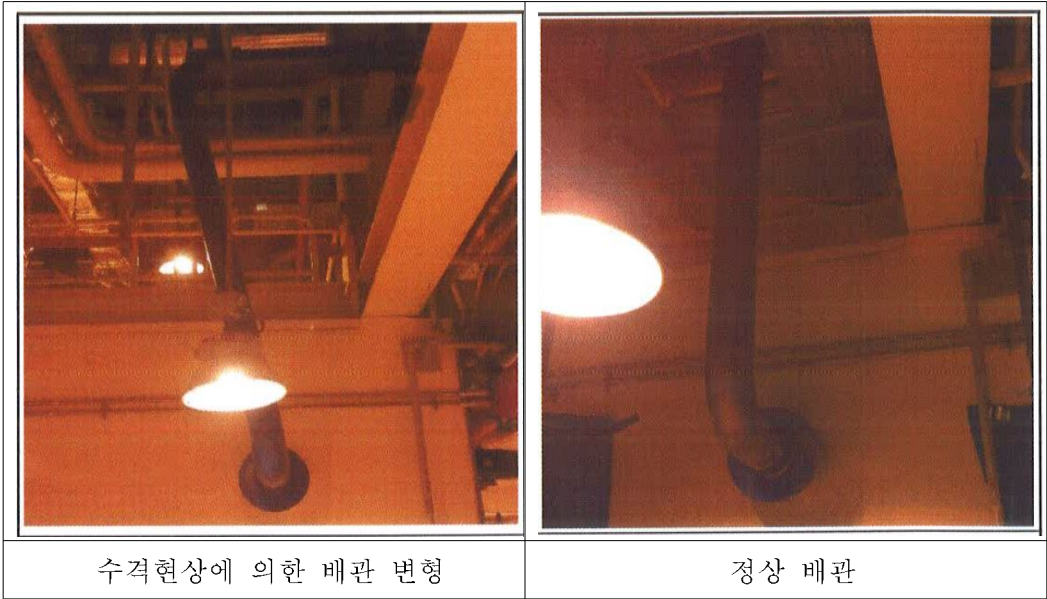


그림 3.6 배관 변형 사진

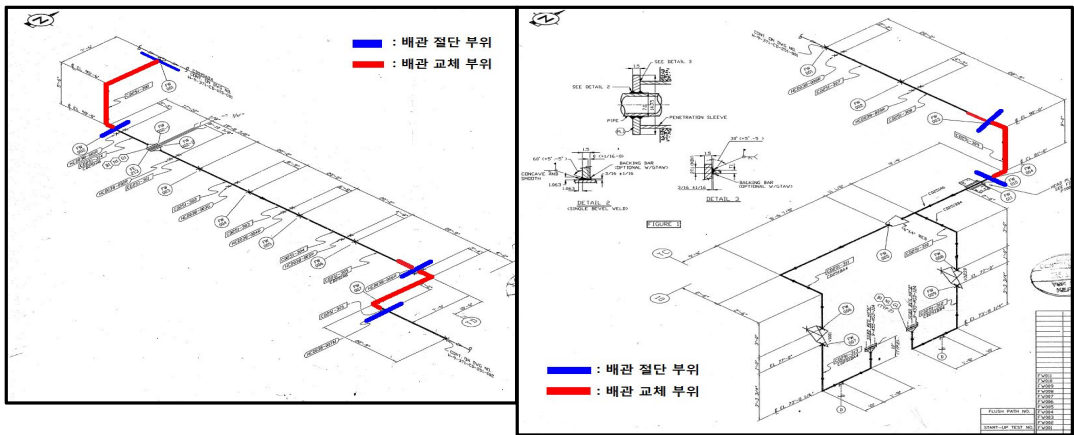


그림 3.7 SGBD 재생열교환기 냉각수 공급배관 ISO DWG

## 다. 수격현상 원인 분석

배관 및 지지대 손상이 일정하게 방향성을 가지며, 발전소 계획예방정비 기간동안 복수기 압력이 대기압시 탈기기 수위제어밸브(V0214/0215) 및 주변 밸브(V1088, V2031)가 모두 닫힘 상태에서 복수기 복수회수 조절밸브 V306 또는 V308(위치 : 68ft, 그림 3.5 참조)이 개방되고 복수펌프 운전 정지 시 배관 내 복수가 배수된 것으로 판단된다. 이때 복수펌프(위치 : 50ft)로부터 재생 열교환기까지 구간 중 가장 높은 지점인 Steam Packing Exhauster(위치 : 111ft)를 중심으로 수주분리가 발생되고, 재생열교환기 후단에서 복수기 방향으로 배관이 상승 및 하강함에 따라 가장 높은 위치인 87ft까지 재생 열교환기 전/후단 배관 내부는 충수상태가 유지될 것이다. 배관 및 지지대 손상원인은 수격현상에 의한 충격발생이 원인으로 판단되며, 수격현상 발생원인은 계획예방정비를 위한 복수계통 단 구간(Short Path) 세정 시 재생 열교환기 복수기 복수회수 조절밸브가 개방된 상태에서 복수펌프가 정지되어 재생 열교환기 전단에 공동(Void)이 발생 되었으며, 계통 충수 시 재생열교환기 전단의 긴 수평배관과 배기밸브 미 설치에 따른 불완전 충수로 인하여 발생된 Air Pocket 으로 분리된 수주가 복수펌프 기동에 따라 재결합하여 수격현상이 발생 되었다.

## 라. 수격현상 방지대책

### (1) 복수펌프 후단 배관 충·배기 개선 필요사항 검토

탈기기 수위제어밸브(V0214/0215) 닫힘 상태에서 탈염수로 복수펌프 출구에서 탈기기 수위조절 밸브 전단 구간을 충수 하면서 아래의 배기밸브를 통하여 배기를 수행 한다.(그림 3.8 참조)

- SJAЕ 상부배관 배기 (VCA-2642,2643) [위치 : 터빈건물 100']
- 밀봉증기배출기 상부배관 배기(VCD-1305) [위치 : 터빈건물 100']
- 탈기기 수위조절밸브 전단 배기(VCD-1296,1297) [위치 : 터빈건물 100']

SGBD 재생열교환기 냉각수 공급배관에는 별도의 배기밸브는 설치 되어 있지 않으나, 루프실(Loop Seal) 형태의 곡관부가 없으므로 충수 시 충분한 배기기 이루어져 배기 불충분에 의한 배관 내 수격현상 발생은 없을 것으로 판단된다.



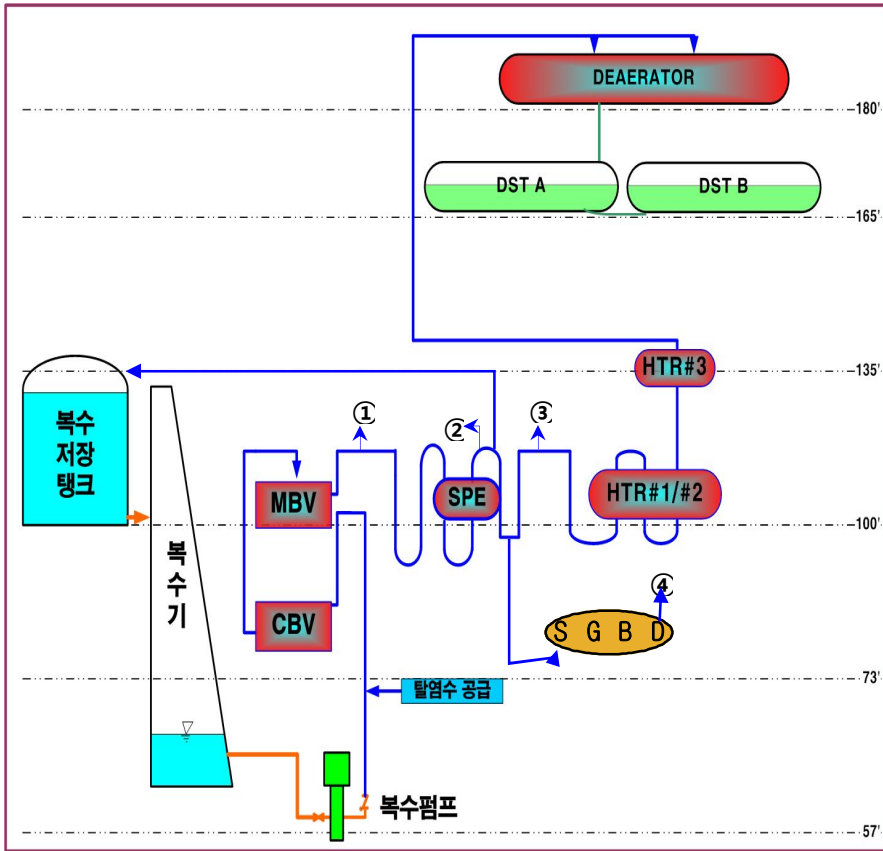


그림 3.8 복수계통 개략도

(2) 운전방법 개선

계통 과압 방지를 위해 복수펌프 기동 후 재순환 밸브 제어기를 이용하여 수동으로 개방하여 압력을 약 30kg/cm<sup>2</sup>으로 조절 후 자동모드로 전환하도록 운전 절차를 변경하였다. 펌프기동 후 재순환밸브 개방이 늦어질 경우 계통 과압을 유발할 수 있기 때문이며, 펌프 기동 시 발생하는 순간적인 높은 압력 상태에서 유체의 흐름이 곡관부 배관에 동적 하중으로 작용하여 배관 변형을 일으킬 수 있기 때문이다. 또한, 복수펌프 정지 전 재생 열교환기 복수기 복수 회수조절밸브를 폐쇄하고 복수펌프를 정지 하도록 운전 절차를 변경 하였다. 추가적으로 재생열교환기 전단 수평배관 구간에 배기배관 설치와 복수펌프 후단 모터구동 밸브 설치, 재생열교환기 수평배관 전단에 격리밸브 설치 등의 설계변경 검토가 필요하며 상기 운전방법 개선사항과 병행하여 적용할 경우 수격현상 방지에 매우 효과적일 것으로 판단된다.



## 2. SGBD 재생열교환기 후단과 탈기기 입구배관 수격현상

### 가. 개요

계획예방 정비 후 출력 증발 운전 중 SGBD 재생 열교환기 출구 유로를 복수기에서 탈기기로 전환하는 정상화 과정에서 과도한 수격현상이 발생 하였다. 본 사례의 경우는 표준형 원전에서 공통적으로 경험한 사례이다.

### 나. 원인 분석

터빈이 정지된 상태에서는 급수가열기의 추기증기가 모두 자동 격리되어 탈기기로 유입되는 복수 온도는 상온(약 40℃) 상태이다. 증기발생기 수질유지를 위해 증기발생기 취출수는 최대유량으로 운전되고 있으며, SGBD 재생열교환기 냉각용 복수의 온도는 고온(약 130℃) 상태이다.

이때 SGBD 재생 열교환기 출구 유로를 복수기에서 정상유로인 탈기기로 전환하는 과정에서 그림 3.9와 같이 SGBD 재생 열교환기 냉각용 복수인 고온수(약 130℃)와 저온(약 40℃)의 복수와 접촉하는 과정에서 수격현상이 발생 되었다.

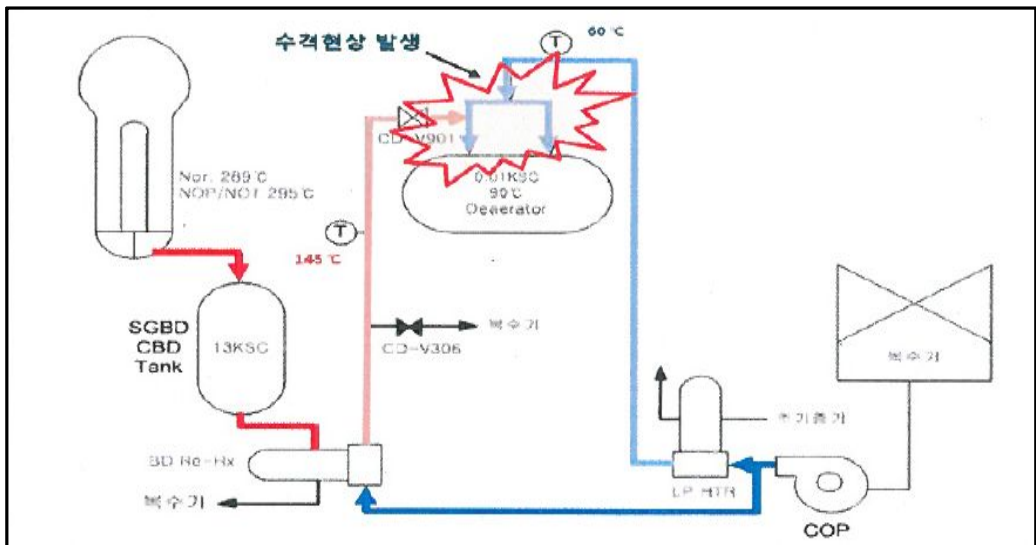


그림 3.9 SGBD 재생 Hx → 탈기기 입구배관 수격현상 발생 개략도

### 다. 수격현상 방지 대책

SGBD 재생 열교환기 복수유로 전환 시점을 두 유로의 복수온도 편차가 있을 경우에는 SGBD 재생열교환기를 통과한 복수유로를 복수기로 전환하여 운전하고, 저압급수가열기를 거친 복수온도가 추기증기에 의해 가열되어 두 유로의 온도편차가 적어지는 시점(터빈출력 약 15% 이상)에서 정상유로인 탈기기로 전환하도록 운전 절차를 변경 하였으며, 적용 결과 수격현상을 현저하게 저감 할 수 있었다.

## 3. 고압급수 가열기 5A/5B 정상 배수관 수격현상

### 가. 개 요

발전소 기동 시(계통 병입 전·후) 그림 3.10과 같이 고압급수 가열기 5A/B 정상 배수 배관에서 수격 현상이 발생 하였다. 본 사례는 표준형 원전에서 공통적으로 경험한 사례이다.

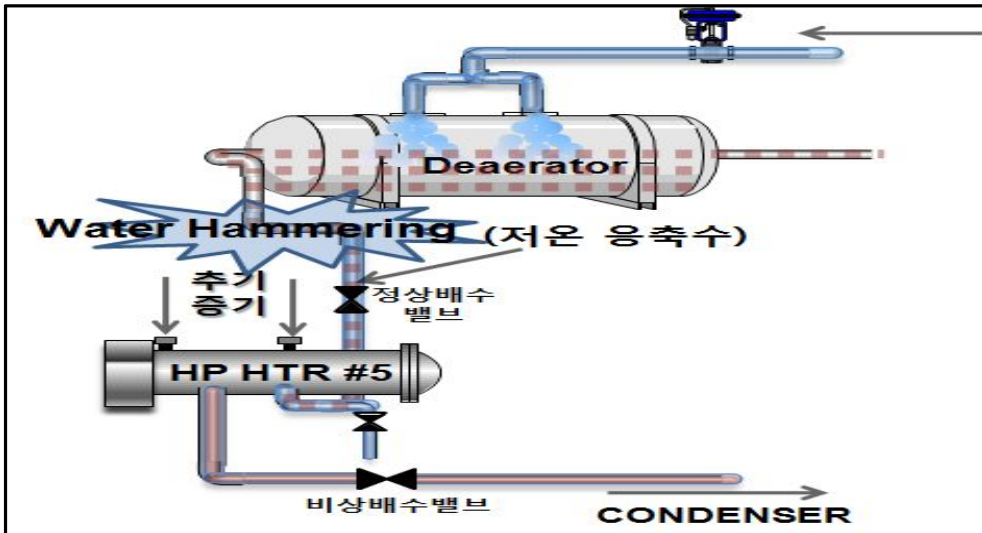


그림 3.10 고압급수 가열기 5A/B 정상배수관 수격현상 개략도

## 나. 원인 분석

발전소 정지 및 재 기동 중 저출력에서 터빈 추기증기가 고압급수가열기 5A, 5B로 유입된 후 응축되어 탈기기로 배수 되어야 하나, 고압급수가열기 5A, 5B에서 탈기기가까지의 배관은 그림 3.11과 같이 Loop Seal 배관을 포함한 90 ft 높이의 수직/수평 배관으로 구성되어 있어 기동 전후 이미 응축 정체되어 있던 저온의 유체가 존재한다. 터빈 기동/정지 시 고압급수가열기 5A, 5B 셀측 압력이 4.5kg/cm<sup>2</sup>(터빈출력 50%) 이상으로 형성될 때 급수가열기 압력에 의해 응축수가 정상유로인 탈기기로 배수되며, 이때 정상배수관의 Loop Seal 배관 응축수와 급수가열기에서 가열된 고온의 계통수가 접촉하여 수격현상이 발생 되었다.

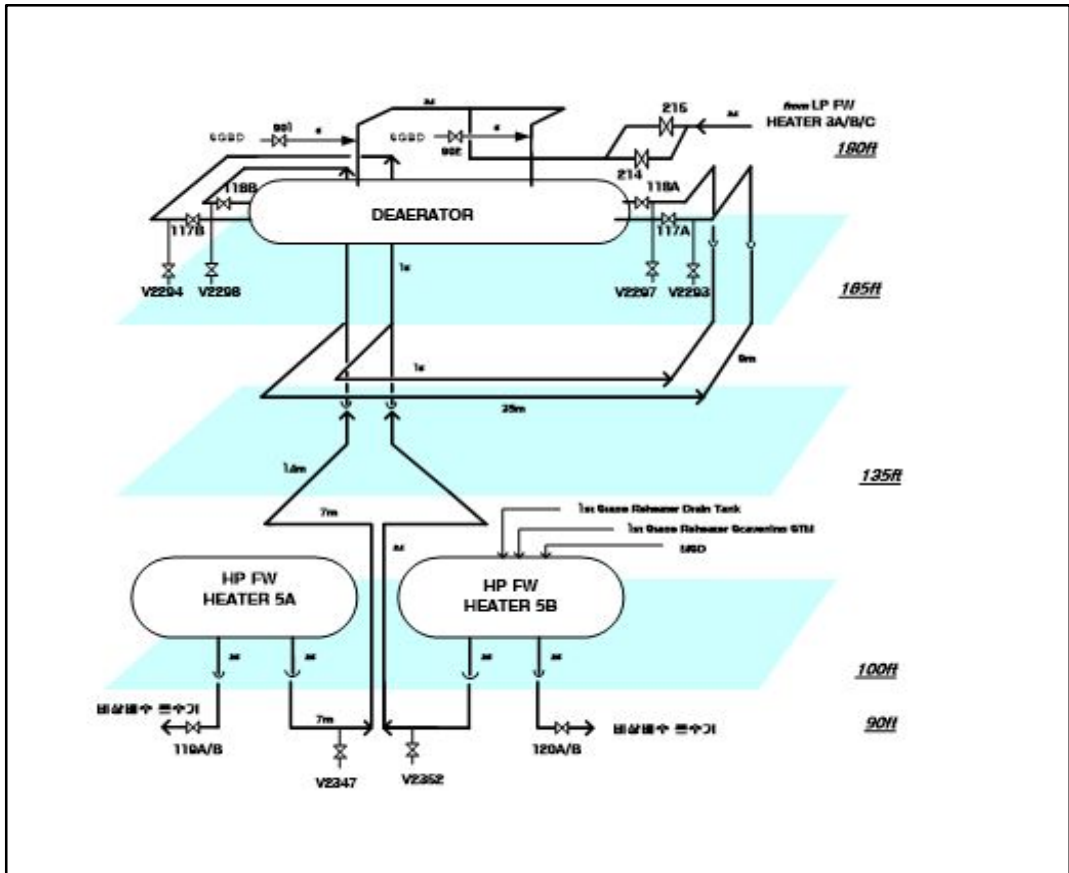


그림 3.11 고압급수 가열기 5A/B 정상배수관 Layout 개략도

### 다. 수격현상 방지대책

급수가열기 셀측 압력이  $4.5\text{kg}/\text{cm}^2$ (터빈출력 50% 이하) 이하에서는 정상유로를 수동 차단상태로 유지한 상태에서 비상 배수관으로 유로를 형성하여 운전하도록 운전 절차를 개선하였다.

Loop Seal 배관의 저온의 응축수를 주기적으로 배수하고 비상 배수관에서 정상 배수관으로 전환하기 전 반드시 배수밸브를 통해 증기가 나올때 까지 응축수 배수를 수행한 후 급수가열기 압력이  $4.5\text{kg}/\text{cm}^2$ (터빈출력 50%이상) 이상 증가하여 유체의 구동력이 형성되는 시점에서 탈기기로 정상유로를 형성하도록 절차서 변경을 통한 운전방법 개선 조치를 수행한 결과 수격현상을 방지 할 수 있었다.

## 4. SGBD CBD TK → 고압급수 가열기 5A/5B 배관 수격현상

### 가. 개요

H 발전소 5호기(OPR 1000MWe) 계통병입 전·후 시점에서 그림 3.12와 같이 고압급수 가열기 5A/5B로 추기증기 유입으로 정상 배수관에서 수격현상이 발생되었다. 정상 배수관에 고인 응축수를 배수하기 위해 배수배관 연장설치 및 배수절차가 있지만 매 계획예방 정비 후 기동 시 마다 수격현상이 발생 되었다.

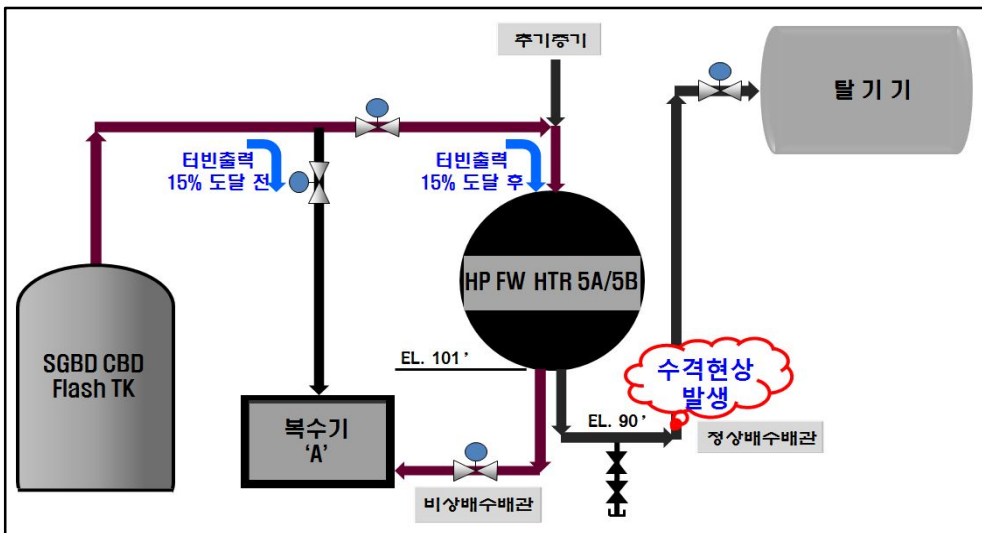


그림 3.12 고압급수 가열기 5A/B 입·출구 배관 개략도

## 나. 원인 분석

계통병입 전 탈기기로부터 연속배기유로를 통해 역유입 되어 생성된 응축수(저온수)는 고압급수 가열기 5A/5B 정상배수 배관의 배수밸브를 개방하여 제거 하고 있다. 터빈 기동 및 계통병입 후에 응축된 추기증기의 고온수와 고압급수 가열기 5A/5B 정상 배수배관에 상대적으로 차가운 저온수가 접촉하여 수격 현상이 발생되었다. 탈기기 연속 배기유로를 통해 고압급수 가열기 5A/5B 쉘측에 모인 응축수(저온수)가 소량이기 때문에 배수밸브를 통한 배수는 응축수를 제거할 뿐, 정상배수배관을 예열하는 데에는 한계가 있다. 따라서, 고압급수가열기 쉘측에 추기증기가 유입되기 전에 정상배수배관의 충분한 예열이 필요하다.

## 다. 수격현상 방지대책

증기발생기 취출수 계통(SGBD) In-service 시점부터 연속 취출수 플래시 탱크의 배기증기를 고압급수 가열기 5A/5B로 공급하여 다량의 고온수에 의해 고압급수가열기 5A/5B 정상배수관의 충분한 예열을 수행함으로써 수격현상을 방지 할 수 있었다. 또한 고압급수 가열기 튜브측 급수와 열교환이 이루어짐으로써 급수온도 증가에 기여하여 발전소 효율 개선에도 기여 할 수 있었다.

### (1) 운전방법 변경 전 운전 유로

- 터빈출력 15% 도달 전 : 연속 취출수 플래시 탱크 → 복수기 ‘A’
- 터빈출력 15% 도달 후 : 연속 취출수 플래시 탱크 → 고압급수가열기 5A/5B  
→ 복수기 ‘A’

### (2) 운전방법 변경 후 운전 유로

- SGBD In-service 시점 : 연속취출수 플래시 탱크 → 고압급수가열기 5A/5B  
→ 복수기 ‘A’

## 5. SGBD CBD TK 입구 배관 수격 현상

### 가. 원인 분석

증기발생기 취출계통(SGBD) 초기 Inservice 과정에서 고온의 증기발생기 취출유량이 연속 취출수 플래시 탱크(CBD TK)내의 저온의 응축수로 유입되어 응축과 Flashing 현상으로 수격현상이 발생 되었다.

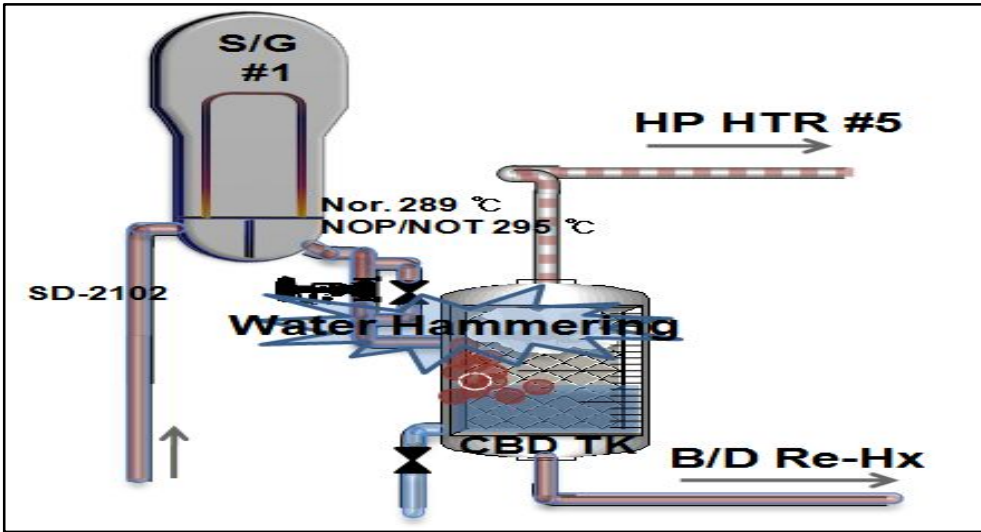


그림 3.13 SGBD CBD TK 입구 배관 개략도

### 나. 수격현상 방지대책

증기발생기 취출계통(SGBD) In-service 수행 전에 연속 취출수 탱크내 저온의 응축수를 완전히 배수하고, 고온의 취출수를 최소유량으로 주입하면서 운전온도(100°C 이상)까지 충분한 예열운전을 수행함으로써 Flashing 현상에 의한 수격작용을 방지할 수 있었다.

## 6. 주급수 격리밸브(V105/V106) 후단 배관 수격 현상

### 가. 원인 분석

주급수 계통 정화운전을 위해 계통 충수 시 이코노마이저/다운콤퍼 배관이 미충수된 상태에서 증기발생기 이코노마이저 배관의 급수공급을 위해 전단 격리밸브(V105/V106) 개방 시 고온, 고압의 급수가 급수 제어밸브에 충격을 가하여 압력파가 발생되었다.

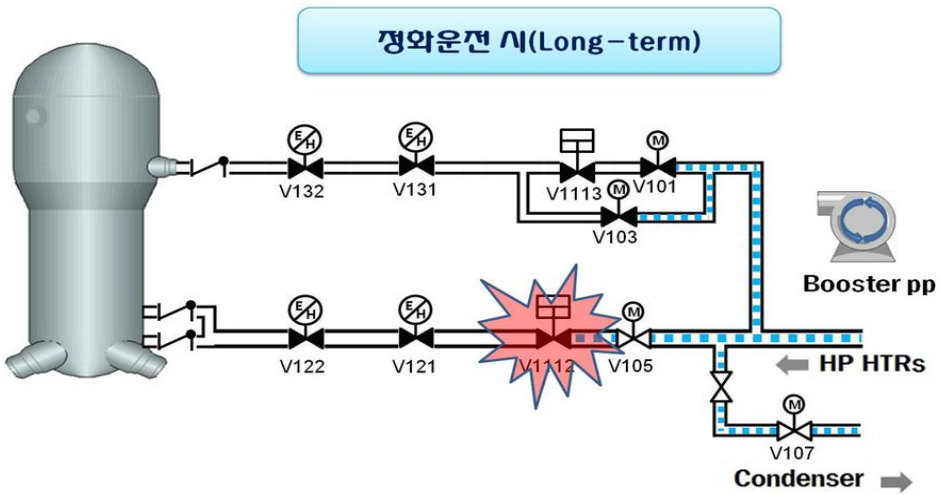


그림 3.14 주급수 격리밸브 배관 개략도

### 나. 수격현상 방지대책

급수계통 충수 시 이코노마이저/다운콤퍼 배관을 MFIV 후단 배기밸브 이용하여 충수 상태로 유지하고, 급수온도가 상승하기 전(기동용 급수펌프 기동 전) 격리밸브(V105/V106)를 개방상태로 유지함으로써 수격현상을 방지 하였다.

## 제 4 장 결 론

원자력 발전소에서 발생하는 수격작용은 거의 모든 계통에서 발생하는 것으로 보고되고 있다. 이러한 수격작용을 방지하기 위해 발전소 설계단계에서부터 이것을 충분히 고려하여 반영하였다 하더라도 고온 고압의 유체가 가지는 불안정성으로 인하여 조금만 부주의하면 어떠한 형식의 수격작용이라도 발생할 가능성이 상존한다.

표준형 원전에서 발생한 수격작용은 데이터에서도 보여주듯이 증기발생기 취출수 계통과 급수 가열기 배수 및 배기계통의 연결 배관에서 증기 또는 고온의 계통수와 저온수와의 접촉으로 인한 응축 및 Flashing 현상에 의해 대부분 발생 되었다.

발전소 기동 또는 계통의 운전 조건 변경 시 온도와 압력에 의한 유체의 상변화나 급속한 유동이 일어나지 않도록 주의하여야 하고, 특히 안전주입탱크의 봉산수가 타 계통으로 누설되면 저압배관에서 질소가스 포켓이 형성될 수 있으므로 봉산수 누설 시에는 누설처를 철저히 규명하여야 한다. 펌프를 기동할 경우에는 반드시 관련 배관과 최상단부의 배기를 실시한 후 펌프를 기동하는 것이 중요하며 후단 배관의 충수에도 서서히 충수가 되도록 하여야 한다.

운전 및 시험 중 수격작용이 발생하면 관련 배관, 기기, 지지대 등의 손상여부를 면밀히 조사하고, 수격작용 Mechanism에 대한 철저한 진단 및 분석이 있어야 하며, 이러한 결과에 따라 적절한 설계변경과 절차서의 개정이 뒤따라야 한다.

본 연구에서는 표준형 원전 2차 계통에서 설비 특성상 가장 빈번하게 공통적으로 발생하고 있는 수격작용 각각의 메커니즘에 대해 물리적인 현상과 발생과정, 근본 원인을 분석 하였다.

수격작용 방지를 위해 발전소 계통과 연계하여 운전방법상 개선 필요사항을 도출하여 적용함으로써 수격현상 방지에 크게 기여 할 수 있었다.

본 연구내용을 통해 향후 비슷한 운전환경의 산업시설에서 수격현상을 예방하는데 유용하게 활용될 것으로 확신한다.



## 참고문헌

- [1] EPRI TR-106438[Water Hammer Handbook for Nuclear Plant Engineers and Operators]
- [2] EPRI NP-6766[Water Hammer Prevention]
- [3] 권갑주, 수격작용의 Mechanism에 대한 고찰
- [4] 한국수력원자력(주), 운전경험보고서(KONIS-원자력 기술정보 활용)
- [5] 이신선, 발전소의 수격현상 분석 및 응축수에 의한 사건 연구(2007)
- [6] 김민철, 원자력 발전소 증기발생기 취출수 계통 수격작용 원인분석 및 건전성 향상방안 연구(2012)
- [7] 한국수력원자력(주), 계통설명서

## 감사의 글

2016년 올해는 제가 원자력분야에 근무한지 19년차 되는 해입니다. 그 19년은 저에게 생소했던 원자력분야를 알기 위해 나름 고군분투했던 시간이었습니다. 어느 사람과 마찬가지로 저 또한 원자력을 공부하면 할수록 또는 경험이 쌓이면 쌓일수록 자신의 지식과 경험이 부족함을 느꼈음을 고백하지 않을 수 없습니다. 저의 이런 부족함에 대한 아쉬움이 결국 제가 석사과정을 시작한 동기가 되었고 어느새 졸업을 앞두고 되었습니다.

지난 2년간의 과정을 돌아보면 감사할 일이 많지만 무엇보다도 광주에서 영광까지 직접 오셔서 늦은 밤까지 열강을 해주신 조선대학교 원자력 공학과 교수님 들께 가장 먼저 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 특히 바쁘신 와중에도 논문을 처음 시작할 때부터 하나하나 꼼꼼하게 검토해 주시고 조언을 아끼지 않으셨던 이경진 교수님께 깊은 감사의 마음을 전합니다. 교수님 덕분에 막연히 어렵게만 느껴졌던 논문 작성을 순조롭게 잘 마무리 할 수 있었습니다. 또한 묵묵히 저의 공부를 지지해 주고 응원해준 저의 아내와 정빈, 서윤에게도 감사의 마음을 전합니다.

지식에 대한 목마름을 채우기 위해 시작했던 석사과정은 아직도 배워야 할 더 많은 지식이 있다는 것을 알게 되었다는 것에서 의미를 찾아야 할 듯합니다. 지난 2년간 원자력 선후배님들의 많은 도움으로 석사과정과 논문 작성을 무사히 마칠 수 있었다 생각합니다. 저 또한 석사과정을 통해 배운 지식을 바탕으로 원자력분야 발전에 미약하나마 일조 할 수 있길 소망해 봅니다.