



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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](#) 

2010年 11月  
碩士學位論文

原電 1次機器 冷却海水系統  
流量調節밸브 浸蝕 改善에 對한 考察

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

金 政 郁

原電 1次機器 冷却海水系統  
流量調節밸브 浸蝕 改善에 對한 考察

Investigation on the Improvement of Erosion at Flow Control  
Valve in Nuclear Service Cooling Water System

2010年 11月

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

金 政 郁

原電 1次機器 冷却海水系統  
流量調節밸브 浸蝕 改善에 對한 考察

指導教授 金 辰 源

이 論文을 工學 碩士學位申請 論文으로 提出함

2010年 11月

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

金 政 郁

# 金政郁의 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 宋 鍾 淳 (印)

委 員 朝鮮大學校 教授 羅 滿 均 (印)

委 員 朝鮮大學校 副教授 金 辰 源 (印)

2010年 11月

朝鮮大學校 大學院

# 목 차

ABSTRACT .....	iv
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 1차기기 냉각해수계통 고찰 .....	2
제 1 절 1차기기 냉각해수계통 설계 .....	2
1. 기능 및 구성 .....	2
2. 계통 설계 .....	3
제 2 절 계통설계 고찰 .....	13
1. 계통 EGL(Energy Gradient Line) .....	13
2. 1차기기 냉각해수펌프 .....	15
3. 밸브 완전개방이 계통에 미치는 영향 .....	16
제 3 장 유량조절밸브 침식 원인 분석 .....	20
제 1 절 유량조절밸브 적절성 분석 .....	20
1. 유량조절밸브의 적정 개도량 고찰 .....	20
2. 밸브 재질측면의 원인 분석 .....	26
3. 밸브 형식의 적합성 고찰 .....	27
제 2 절 유량조절밸브 Cavitation 평가 .....	38
1. 입력자료 .....	38
2. 계통 모델링 .....	40
3. Cavitation 평가 결과 .....	41
제 4 장 유량조절밸브 침식 개선방안 .....	44
제 1 절 밸브 재질 개선 .....	44
1. 일반적 침식손상 방지 .....	44
2. 밸브 재질 변경 방안 .....	45
제 2 절 밸브 및 계통 설계 개선 .....	47
1. 계통측면의 밸브 손상기구 .....	47
2. 밸브 침식 개선방안 .....	48
제 5 장 결론 .....	51
참고문헌 .....	52

# 표 목 차

표 2.1.1	1차기기 냉각해수계통 해수 설계유량 산출 기준 .....	4
표 2.1.2	1차기기 냉각해수계통 전 양정(TDH) .....	4
표 2.1.3	영광1,2호기와 고리3,4호기 설계현황 비교 .....	6
표 2.1.4	유량조절밸브 및 오리피스 설치에 따른 압력강하 비교 .....	8
표 2.1.5	냉각해수 정상배출/해수저저수위 기준 EGL 계산표 .....	10
표 2.1.6	냉각해수 정상배출/해수고고수위 기준 EGL 계산표 .....	11
표 2.1.7	냉각해수 비정상 배출/해수저저수위 기준 EGL 계산표 .....	12
표 2.1.8	냉각해수 비정상 배출/해수고고수위 기준 EGL 계산표 .....	12
표 2.1.9	유량변화에 따른 TDH 변화표 .....	17
표 3.1.1	1차기기 냉각해수 유량조절밸브 교체 이력 .....	25
표 3.1.2	해수의 유속이 금속 및 합금의 침부식에 미치는 영향 .....	27
표 3.1.3	VALTEK사 18 inch Valve Sizing .....	32
표 3.1.4	VALTEK사 24 inch Valve Sizing .....	32
표 3.1.5	ENERTECH사 18 inch, 15,000 gpm에서의 계산치 .....	33
표 3.1.6	ENERTECH사 18 inch, 18,000 gpm에서의 계산치 .....	34
표 3.1.7	ENERTECH사 18 inch, 24,000 gpm에서의 계산치 .....	34
표 3.1.8	ENERTECH사 24 inch, 15,000 gpm에서의 계산치 .....	35
표 3.1.9	ENERTECH사 24 inch, 18,000 gpm에서의 계산치 .....	35
표 3.1.10	ENERTECH사 24 inch, 24,000 gpm에서의 계산치 .....	38
표 3.2.1	1차기기 냉각수 열교환기 열부하 제거에 요구되는 최소 해수유량 .....	42
표 3.2.2	유량조절밸브 압력손실 및 Cavitation 발생 평가결과 .....	43
표 4.1.1	SR50A, Monel 및 Al-Bronze의 기계적 성질 .....	46
표 4.1.2	밸브 재질별 경제성 비교 .....	47
표 4.2.1	오리피스가 추가로 감당할 $\Delta P$ .....	50

## 그림 목차

그림 2.1.1	1차기기 냉각해수계통 구성 개략도 .....	3
그림 2.1.2	설계기준 1차기기 냉각해수펌프 운전특성 .....	5
그림 2.1.3	계통 개략도 .....	9
그림 2.1.4	실제 EGL(EF-HV104/204 부분 개도유지 기준) .....	14
그림 2.1.5	EF-HV104/204 완전 개방시 EGL .....	15
그림 2.1.6	실체계통 운전조건 기준 1차기기 냉각해수펌프 운전특성 .....	18
그림 3.1.1	유량조절밸브 침식 손상 사진 .....	23
그림 3.1.2	밸브 고유 유량 특성 곡선 .....	25
그림 3.1.3	유속에 의한 밸브침식 형상 .....	26
그림 3.2.1	Flow-Series 모델링 .....	40



# ABSTRACT

## Investigation on the Improvement of Erosion at Flow Control Valve in Nuclear Service Cooling Water System

Kim, Jeung Wook

Adviser : Prof. Kim, Jin Weon

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

The function of Nuclear Service Cooling Water(NSCW) system is for supplying cooling water(sea water) to the Component Cooling Water Heat Exchangers, Essential Chillers and Emergency Diesel Generator Chillers. In the NSCW system, the Flow Control Valve(FCV) is installed to prevent an overflow of the system. As metal loss damage(erosion) inside the FCV due to the cavitation and sea water corrosion occurred frequently, the material of valve disc was changed from AL-Bronze to Monel in 1996. After changing the material, the erosion by sea water corrosion was clearly improved. But the erosion induced by cavitation is still observed.

System overflow is prevented by a FCV(18 inch), and an orifice is provided at the downstream of the heat exchanger to avoid cavitation due to excessive pressure drop through a FCV, and to meet the flow rate through each flow line. The FCV is of a butterfly type, which is commonly used for modulating in the opening angle range of  $20^{\circ}\sim 70^{\circ}$ , because in general it has an equal percentage nature in this range.

To calculate the pressure drop through the FCV, Flow-Series, a system sizing computer program, was used. The pressure loss charged by the FCV was

calculated based on the conditions of low low water level and high high water level, and it was evaluated to determine whether or not cavitation occurred at this pressure drop. The result shows that cavitation occurs at the pressure drop where the valve should be charged, in a manner dependent on the sea water flow rate and sea water level.

Damage of the valve disc and the body shows typical erosion, and it has a uniform direction. This phenomenon is caused by the fact that wear occurs on the metal surface due to the serious turbulent flow of the fluid, and the flow velocity varies more rapidly as the FCV operates in a state of partial opening at around 65% during operation. It is assumed that the mixed coarse sand presents a more serious environmental factor in terms of the likelihood of erosion.

Although the present valve material, Monel, has superior corrosion resistance and relatively excellent erosion resistance against sea water, the erosion speed increases rapidly when solid particles such as sand are included in the fluid. To address this weakness, it is desirable to apply super stainless steel(SR50A), which has excellent corrosion and erosion resistance, as the valve material. SR50A has excellent corrosion resistance against sea water to the same extent as Monel, and its mechanical characteristics are much more superior than those of Monel and Al-Bronze.

The plan suggested is that the valve size be increased to 24 inch to mitigate the high velocity through the valve, while the required head be decreased so as not to generate cavitation at the valve, and the orifices installed at downstream of the heat exchanger and the cooler of each flow path additionally charge the reduced head.

This study describes the reasons for valve damage and the plan to address these reasons by reviewing the design data of the NSCW system and the FCV, analyzing the operating condition, and evaluating to determine whether or not cavitation occurs at the pressure drop that the valve charges. The results indicate that it is desirable to replace valve material with SR50A, which can endure in sea water that includes coarse sands and which has excellent corrosion and erosion resistance, to increase the valve size to 24 inch from 18 inch to mitigate the high flow velocity, and finally to decrease  $\Delta P$  of the valve by increasing  $\Delta P$  that the orifice charges at the upstream of the valve.

# 제 1 장 서 론

원자력발전소에서 발생하는 각종 열을 냉각시키기 위해 다양한 열교환기가 설치되어 운전 중이며, 열교환기에 공급되는 기초 냉각원으로 국내원전은 해수를 사용하고 있다. 냉각해수는 취수구에서 1차, 2차기 냉각해수 및 순환수 펌프로 흡입되어 해당 관로, 배관, 기기 및 열교환기 등을 거쳐 중공에는 방수로로 합쳐져서 다시 바다로 방출된다. 열교환기에 설계유량의 냉각해수가 공급되어야 사고를 포함한 발전소의 모든 운전상태에서 안전하게 발전소를 운전할 수 있다.

영광1,2호기 1차기 냉각해수계통의 냉각해수는 기기냉각수 열교환기, 필수냉각기 및 비상디젤발전기 냉각기에 공급되며 계통내 수두차, 해수위변화에 의한 수두차로 인한 과유량 방지기능을 열교환기 후단의 18 inch 나비형밸브가 수행하고 있다. 나비형 밸브는 1930년부터 존재해왔지만 유량조절(교축)용으로 사용되기 시작한 지난 25년 전 까지 주로 단순 개폐 차수밸브로 사용되었다. 영광1,2호기 등 국내 대부분의 원전에서 1차기 냉각해수계통의 적정 유량, 압력을 조절하기 위해 동 밸브를 부분개도 상태로 운전하고 있다.

밸브가 부분개도 상태로 운전됨에 따라 밸브를 통과하면서 유속이 증가하고 압력이 포화증기압 이하로 저하되면서 유체내 이물질 표면 등에서 기포가 발생한다. 밸브를 통과한 유체가 밸브 후단에서 압력이 회복되면서 기포가 터지는 Cavitation(공동화)이 발생하고 이때의 내파로 밸브표면이 박리되고 있다.

이를 개선하고자 '96년에 밸브 DISC 재질을 AL-Bronze에서 Monel로 변경하여 부식에 의한 손상은 개선되었지만, Cavitation에 의한 침식은 여전히 계속되고 있어 계획 예방정비마다 밸브를 취외하여 점검 및 정비를 하고 있어 근본적인 Cavitation 저감방안이 필요하다.

이에 본 연구에서는 영광1,2호기 1차기 냉각해수계통을 중심으로 계통 설계 자료와 운전현황 검토를 통한 유량조절밸브의 부분 개방운전의 적절성과 밸브 압력강하의 정량적 분석, 밸브 손상 원인을 계통설계측면에서 분석하고자 계통 Sizing 전산 프로그램으로 Cavitation 평가를 수행하여 영광1,2호기뿐만 아니라 국내외 원전 1차기 냉각해수계통의 유량조절밸브에 대하여 밸브 후단의 과도한 압력강하로 Cavitation에 의한 침식에 저항성이 강한 재질 선정 및 유량조절밸브 압력강하를 경감시키기 위한 밸브 설계검토와 밸브의 감소된 수두를 계통으로 분산시키는 방안을 논의하고자 한다.

## 제 2 장 1차기기 냉각해수계통 고찰

### 제 1 절 1차기기 냉각해수계통 설계

#### 1. 기능 및 구성

영광1,2호기 1차기기 냉각해수(Nuclear Service Cooling Water)계통은 발전소 사고를 포함한 모든 운전단계에서 공학적 안전 설비인 기기냉각수 열교환기(Component Cooling Water Heat Exchanger), 필수 냉동기(Essential Chiller) 및 디젤 발전기 냉각수 열교환기(Diesel Generator Cooling Water Heat Exchanger)에 냉각용 해수를 공급하고 제거된 열을 바다로 방출한다. 1차기기 냉각해수계통은 2개의 100% 다중성이고 독립적인 계열로 구성되어 있으며 각 계열에는 100% 용량을 가진 펌프가 2대가 있고 이 펌프는 내진범주 I인 취수구조물을 통해 최종냉각수원으로부터 냉각해수를 취수한다. 모든 운전모드 동안 각 계열에서는 1대의 펌프가 운전되고 다른 1대는 대기상태에 있으며 운전 중인 펌프가 고장 나면 동일계열에 대기 중인 펌프가 자동으로 기동하게 된다. 각 계열의 기기냉각해수 배수관은 모터구동형 유량조절밸브 후단에서 합쳐지고 순환수 배수로에 연결된다.

1차기기 냉각해수펌프는 취수구에서 해수를 흡입하여 36 inch 토출측 역지밸브와 모터구동 격리밸브를 거쳐 36 inch Prestressed 콘크리트 배관으로 토출시키는데 36 inch Prestressed 콘크리트 배관은 24 inch 및 30 inch Prestressed 배관으로 분기되며 분기된 24 inch 배관은 다시 10 inch 및 12 inch 로 분기되며 각각 필수 냉동기와 디젤발전기 열교환기에 연결되고 30 inch Prestressed 배관은 기기냉각수 열교환기에 연결된다.

필수 냉동기, 디젤 발전기 열교환기 및 기기냉각수 열교환기에서 각각 냉각기능을 수행한 해수는 36 inch 토출측 공동 배관에 연결되며 이 36 inch 내진 토출측 배관과 비내진 36 inch 토출측 배관 연결점 상류 측에 18 inch 모터 구동 나비형밸브 및 36 inch Standpipe가 설치되어 있다.

Standpipe는 비내진 토출배관측(순환수 토출 Conduit)으로 냉각해수를 배출시킬 수 없는 비상시 냉각해수 배출구로 사용된다. 1차기기 냉각해수 계통 각 열(train)의 비내진 36 inch 토출측 배관은 53 inch 공동토출배관에서 연결되고 이 53 inch 공동토출배관은 다시 순환수(Circulating Water)계통 토출 Conduit에 연결되어진다.

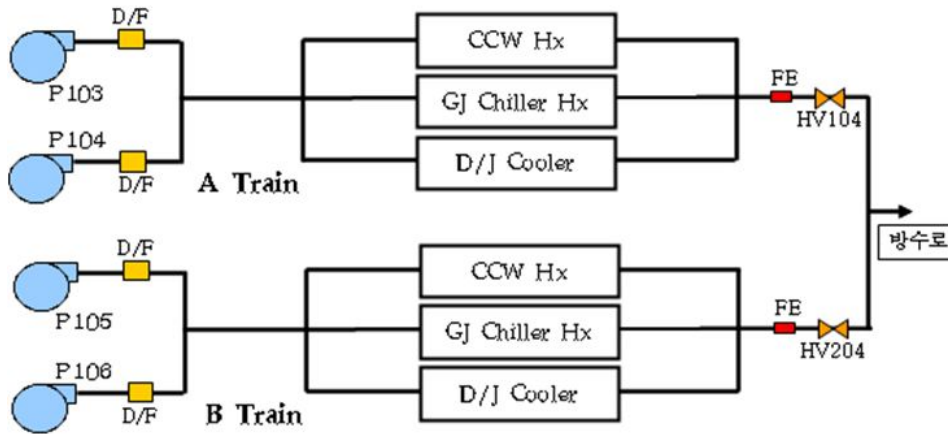


그림 2.1.1 1차기 냉각해수계통 구성 개략도

## 2. 계통 설계

### 가. 계통설계 기본개념

1차기 냉각해수계통의 해수 취입구 및 토출구 위치는 계통내의 기기냉각수 열교환기, 필수 냉동기 및 디젤 발전기 냉각수 열교환기의 설치 위치보다 낮으므로 계통 운전 중에는 계통내에 Siphon이 형성되어 열교환기 출구에서의 압력이 대기압 이하가 될 수 있다.

열교환기 출구의 압력이 대기압 이하가 되면 냉각해수의 증발, 냉각해수 계통내로 공기의 유입 등에 따라 냉각해수의 흐름을 방해하게 되며 열교환기 Tube 측 및 계통내의 배관 등의 설비에 부식 등의 문제를 초래할 수 있을 뿐만 아니라 냉각해수 공급량이 냉각해수펌프의 최대유량을 초과할 수 있다.

따라서 이러한 제반 문제점을 방지하기 위하여 계통내 가장 높은 위치의 1차기 냉각수 열교환기(CCW Heat Exchanger) 출구의 압력을 대기압 이상(Positive Pressure)으로 유지될 수 있도록 1차기 냉각수 열교환기 출구에서 HGL(Hydraulic Gradient Line, 수력구배선)이 최소한 120 ft가 될 수 있도록 하기 위한 제어 수단으로써 18 inch Butterfly형 밸브를 Standpipe 상류 측에 설치하여 정상운전시에는 밸브개도를 약 63°로 유지하고 Stand pipe를 통한 냉각해수 배출시에는 이들 밸브를 Jogging 제어하여 완전 개방하도록 함으로써 냉각해수펌프 양정 증가에 따른 냉각해수 공급량이 어떠한 조건에서도 설계기준 공급량 이하가 되지 않도록 하고 있다.

## 나. 1차기 냉각해수펌프 유량 및 양정

### 1) 설계 유량

1차기 냉각해수계통의 해수설계 유량은 표 2.1.1과 같은 기준에서 산정하였다.

표 2.1.1 1차기 냉각해수계통의 해수 설계유량 산출 기준

기 기 명	해수 소요량(gpm)
CCW Heat Exchanger	15,000
Emergency Diesel Generator	2,000
Essential Chiller	824
P.C Pipe 누설 손실	600
여유 용량	740
합 계	19,164

실제 해수 요구량은 19,164 gpm이나 고리3,4호기의 설계유량과 같은 21,000 gpm을 펌프 설계유량으로 하였다.

### 2) 설계 양정

#### 가) 펌프 용량선정 및 계통설계 배경

1차기 냉각해수펌프(Nuclear Service Water Pump) 용량 선정 시 유량은 설계 유량 항목에서 검토된 설계 기준에 따라 21,000 gpm으로 선정하였으며 전 양정(Total Developed Head : TDH)은 표 2.1.2와 같은 각각의 운전 조건 및 해수 수위에 따른 펌프 출구 기준 EGL(Energy Gradient Line, 에너지구배선)과 해수 수위의 차이중 최대 값을 냉각해수펌프의 전 양정으로 하였다.

표 2.1.2 1차기 냉각해수펌프의 전 양정(TDH)

운전형태 항 목	STANDPIPE	STANDPIPE	NORMAL	NORMAL
	LLWL	HHWL	DISCH HHWL	DISCH LLWL
1. 펌프 토출구 EGL(ft)	185.98	182.26	170.17	169.39
2. 해수수위(ft)	54.33	79.75	79.75	54.33
3. 흡입 손실(ft)	2.0	2.0	2.0	2.0
TDH *(1-2+3)	133.65	104.51	92.42	117.06
선정 TDH(ft)	135			

☞ LLWL : Low Low Water Level, HHWL : High High Water Level

따라서 펌프 용량은 해수저저수위(LLWL : Low Low Water Level)일 때 냉각해수의 Standpipe 통한 비정상 배출시(TDH 최대 소요점)를 기준하였으므로 발전소 정상 운전 중 정상 배출구(해수 Discharge Conduit)를 통한 냉각해수 배출시는 TDH 감소에 따라 냉각해수 유량은 그림 2.1.2에 보는바와 같이 정격 유량인 21,000 gpm 이상이 공급된다.

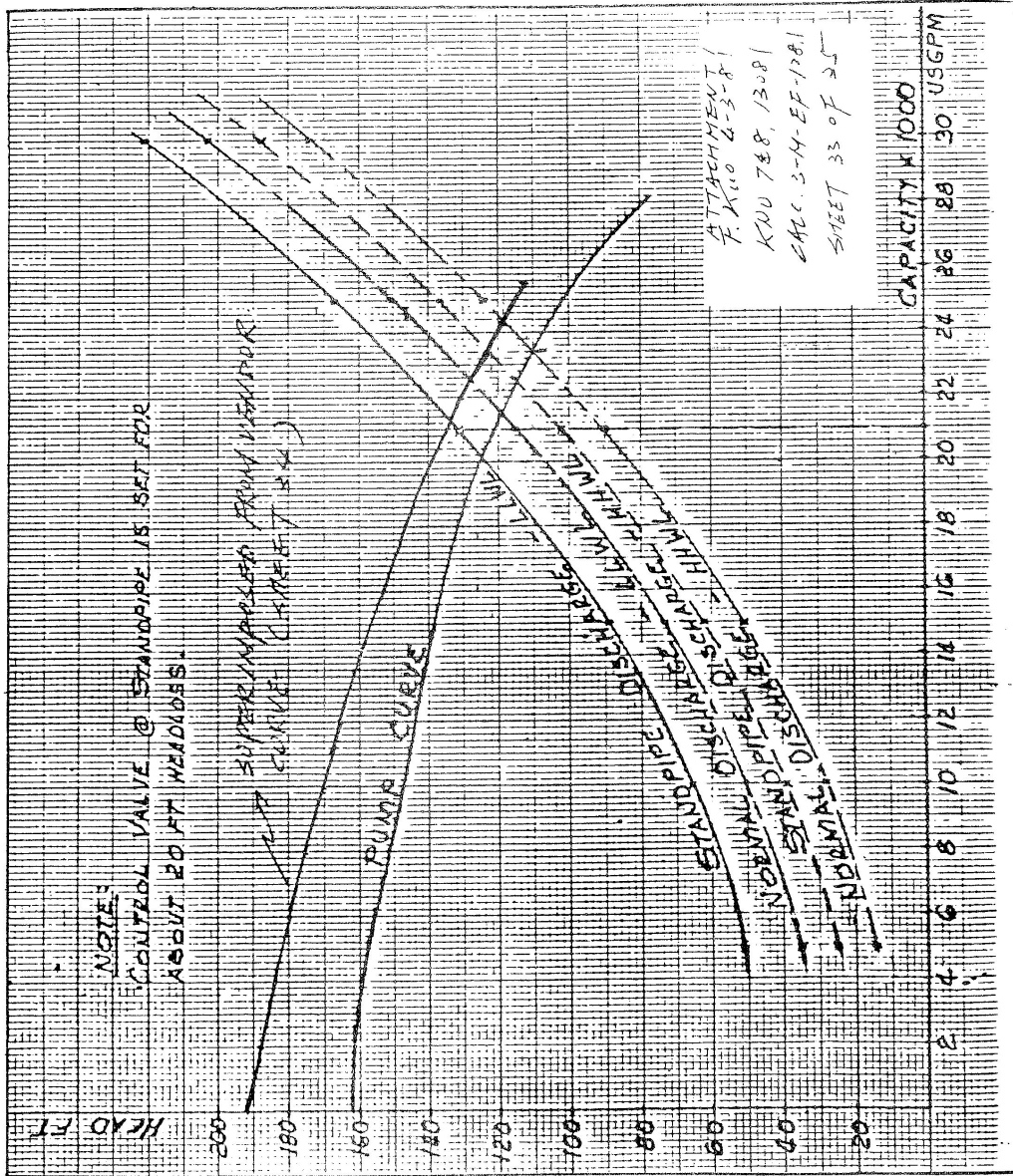


그림 2.1.2 설계기준 1차기 냉각해수펌프 운전특성

### 다. 고리3,4호기와 설계 차이점

영광1,2호기의 1차기기 냉각해수계통은 고리3,4호기의 1차기기 냉각해수계통을 참조로 하였기 때문에 설계개념은 동일하다. 고리3,4호기의 경우 유량조절밸브가 Rubber Lining 손상 및 내부부품 침식 경험 있으며 일부 밸브가 교체된 것으로 파악되었다. 표 2.1.3은 고리3,4호기 및 영광1,2호기의 1차기기 냉각해수계통에 대한 설계 현황을 비교한 것이다.

표 2.1.3 영광1,2호기와 고리3,4호기 설계현황 비교

		고리3,4호기	영광1,2호기	비고
설계 유량		21,000 gpm	21,000 gpm	
운전 유량		18,000 gpm이상(3호기) 17,000 gpm이상(4호기)	15,000 gpm 이상 (1호기)	
펌프 TDH	계산서	120ft(at 18,000 gpm)	135ft(at 21,000 gpm)	
	구매	120ft(at 21,000 gpm)	135ft(at 21,000 gpm)	
해수위	LLW	66.36 ft	54.33 ft	
	HHW	71.67 ft	79.75 ft	
CCW Hx ΔP		10 psi	10 psi	
D/G ΔP		2.5 psi	2.5 psi	
이물질 여과기		없음	있음	
유량조절밸브 크기		18 inch	18 inch	
유량조절밸브 개도		100%	약 50%(1호기)	
오리피스		있음	있음	

상기 표에서 기술된 바와 같이 차이가 나는 부분은 다음과 같다.

#### 1) 펌프 TDH

영광1,2호기의 경우 펌프 TDH를 설계 유량을 기준으로 계산하여 동 조건에 맞는 펌프를 구매하였고 고리3,4호기의 경우 펌프 TDH를 정상 운전 및 사고시 요구되는 최소 유량을 기준으로 계산하여 동 TDH 및 설계 유량에 적합한 펌프



를 구매하였다. 이러한 고리3,4호기 계산은 설계 및 운전에서 발생하는 압력손실 차이를 최소화하여 유량조절밸브가 감당해야 할 압력손실을 감소시키는 효과가 있다.

## 2) 해수위

고리3,4호기의 저저해수위와 고고해수위 차이는 약 5.3ft로 영광1,2호기의 저저해수위와 고고해수위 차이 25.4ft에 비해 상당히 적다. 1차기기 냉각해수펌프의 TDH는 저저해수위를 기준으로 계산되었고 보통 정상운전시 저저해수위보다 높은 수위에서 운전되므로 해수위 차이가 크면 클수록 유량조절밸브가 감당해야 할 압력손실이 크게 된다.

## 3) 유량조절밸브 개도

고리3,4호기 대비 영광1,2호기는 해수위 차이가 크고 설계 유량으로 계산된 펌프 TDH에서 여유를 가지고 있으며 정상 운전 유량이 낮다. 이러한 모든 것들을 유량조절밸브가 감당해야 하므로 밸브 개도는 작게 된다.

## 4) 이물질 여과기

고리3,4호기에 비해 영광1,2호기의 해수 수질이 좋지 않아 발전소 가동 후에 영광1,2호기는 이물질 여과기가 추가되었다.

## 라. 유량조절밸브와 오리피스 관계

1차기기 냉각해수계통은 냉각해수의 배출 경로 및 해수 수위 변화에 따라 EGL (Energy Gradient Line, 에너지구배선)을 작성하였으며 EGL 작성 시 1차기기 냉각수 열교환기 출구에서의 HGL이 최소한 120 ft 이상으로 유지될 수 있도록 1차기기 냉각수 열교환기 후단 계통내에 인위적으로 압력손실을 조절할 수 있는 Butterfly 밸브 HV104/204를 설치하였으며 이에 따라 HV104/204는 정상운전시 부분개도를 유지하고 냉각해수펌프의 정격용량은 Standpipe를 통한 냉각해수 배출시를 기준으로 하고 있다.

그러나 설계 최종 단계에서 Verification of NSCWS Pump Parameters(계산서 NO. 3-M-VEF-228), Restricting Orifices Data Sheet(3-J-EF-E06, Rev.1), P&ID에서 보는 바와 같이 각 열교환기에 있어서의 Flow Balance를 위해 오리피스 FO127~129를 1차

기기 냉각수 열교환기 출구 측에 추가적으로 설치함으로써 오리피스가 HV104/204의 교축에 따른 압력강하 역할을 대신하도록 설계 반영되었다.

그러나 시운전 기록집에 따르면 FO127~129 설계시 HV104/204가 부분개도를 유지하는 것을 기준하는 등 설계기준이 상호일치하고 있지 않다. HV104/204 밸브 및 FO127~129 설치에 따른 예상 실제 압력강하를 비교하면 표 2.1.4와 같다.

표 2.1.4 유량조절밸브 및 오리피스 설치에 따른 압력강하 비교

항 목	압력강하(ΔP)		비 고
	Psi(lb/in <sup>2</sup> )	Ft	
유량조절밸브 (EF-HV104/204)	-	22.38	계산서 3-C-ZY-200
오리피스 (FO127~129)	22	49.84	Data Sheet 3-J-EF-E06. Rev.1

그러나 현재 1차기기 냉각해수계통의 운전시 FO127~129의 추가 설치에도 불구하고 관련 절차서에 따라 HV104/204를 부분 개도 상태로 운전하고 있으므로 FO127~129 설치에 따른 계통내 추가 압력손실(49.84 ft)에 상당하는 공급해수 유량의 감소가 발생되고 있으며 1차기기 냉각수 열교환기 출구 측에는 필요 없이 과도한 압력이 유지되고 있는 것으로 판단되다.

따라서 HV104/204를 완전개방(Full Open) 하여도 FO127~129가 실제 관련 Data Sheet에 따라 제작 및 설치되었다면 1차기기 냉각수 열교환기 출구의 압력은 HV104/204를 통한 압력강하가 22.38 ft시 대기압이 유지되도록 계산되어 있으므로 대략적으로 27.46 ft(49.84 ft - 22.38 ft = 27.46 ft, 0.85 psig)가 될 것이며 1차기기 냉각수 열교환기 출구에서의 해수 Flashing 현상에 따른 문제는 없는 것으로 판단된다. 단지 초기 설계시와 비교하여 계통 압력손실 증가(49.84 ft - 22.38 ft = 27.46 ft)가 발생하므로 이에 따른 냉각해수 유량은 어느 정도 감소할 것으로 판단된다.

#### 마. 계통 EGL 작성내용 검토

영광1,2호기 Nuclear Service Water Cooling System Energy Gradient Line and System Curve(계산서 번호 3-C-ZY-200)에 근거한 각각의 경우 계통내 각점(그림 2.1.3 계통 개략도 참조)에 있어서의 EGL은 다음과 같다.

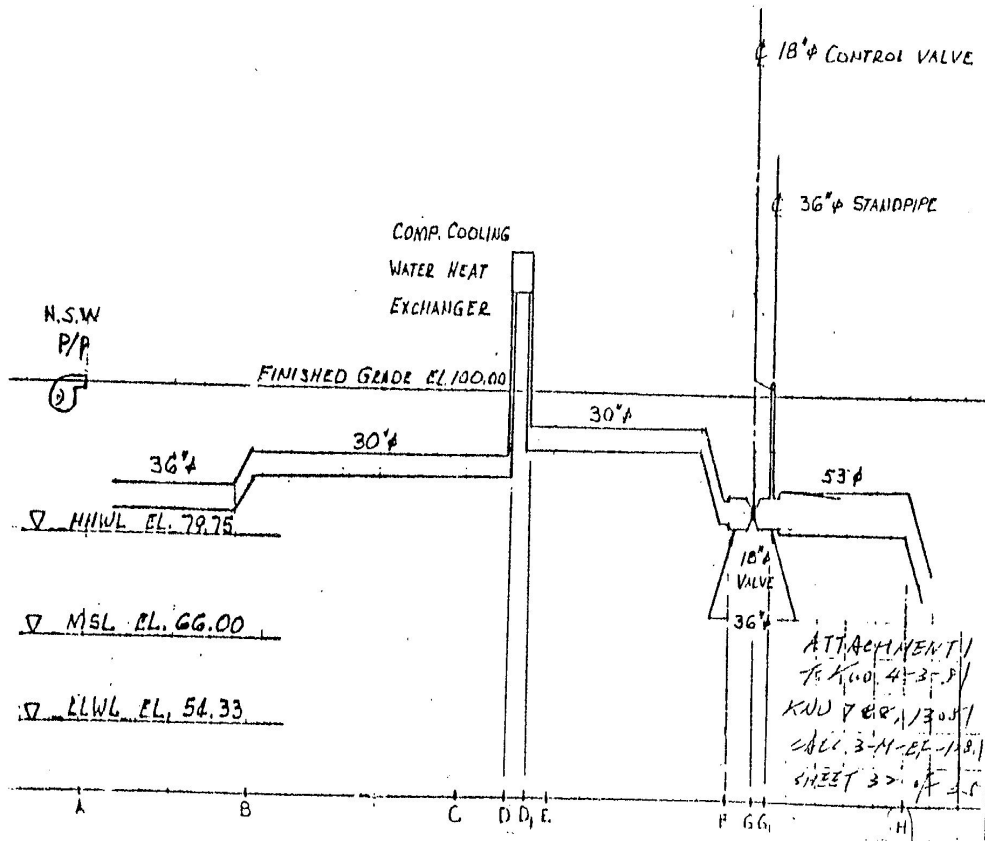


그림 2.13 계통 개략도

1) 냉각해수 정상 배출/해수저저수위 기준(Normal Discharge At Low Low Water Level)

본 운전 조건 기준한 계통 설계는 표 2.1.5에 보는 바와 같이 1차기 냉각수 열교환기 출구(그림 2.1.3의 D.점)에서의 HGL을 최소한 120 ft 이상으로 유지하기 위해서 HV104/204 Butterfly Valve를 교축시켜 밸브에서의 압력강하가 22.38 ft 발생되도록 하였으며 이에 따라 Design Criteria 및 Station Manual 상의 관련 계통에 본 계통상의 HV104/204의 개도를 63°로 유지할 것을 요구하고 있는 것으로 판단된다.

표 2.1.5 냉각해수 정상배출/해수저저수위 기준 EGL 계산표

From	To	Q (gpm)	D (inch)	L (ft)	KM minor loss (k)	A (ft <sup>2</sup> )	V (ft/s)	V <sup>1/2</sup> g -	R x10 <sup>6</sup>	F friction factor	H head loss (ft)	HGL (ft)	EGL (ft)
												84.58	85.34
H	G												
G	AT VALVE	21,000	18	5.08	.48		26.48	10.89			28.75		
													114.09
G	F	21,000	36	60	.98		6.62	.68			1.01		
													115.10
F	E	17,500	30	465	.68		7.94	.98			5.54		
													120.64
E	D <sub>1</sub>	17,500	50	55	1.20		7.94	.98			1.75		
												120.00	122.39
D <sub>1</sub>	D										31.99		
													154.38
D	C	17,500	30	110	1.93		7.94	.98			3.04		
													152.42
C	B	17,500	30	545	2.62		7.94	.98			8.28		
													165.70
B	A	21,000	36	430	1.78		6.62	.68			3.69		
													167.39

2) 냉각해수 정상 배출 / 해수고고수위 기준(Normal Discharge At High High Water Level)

본 운전 조건 기준한 계통 설계는 표 2.1.6에 보는 바와 같이 1차기 냉각수 열교환기 출구(그림 2.1.3의 D.점) 에서의 EGL이 125.27 ft로써 해수저저 수위 기준시보다 해수수위 차이에 의한 각점의 EGL이 증가하는 점 외에는 앞의 1)항에서 논의된 제 현상이 동일하게 발생할 것으로 판단된다.

표 2.1.6 냉각해수 정상배출/해수고고수위 기준 EGL 계산표

From	To	Q (gpm)	D (inch)	L (ft)	KM minor loss (k)	A (ft <sup>2</sup> )	V (ft/s)	V <sup>1/2</sup> g -	R x10 <sup>6</sup>	F friction factor	H head loss (ft)	HGL (ft)	EGL (ft)
													89.44
H	G	21,000	53	400	.86	15.32	3.05	.14	1.274	.0182	.36		89.80
G	AT VALVE	21,000	18	5.08	.48	1.77	26.48	10.89			28.47		118.27
G	F	21,000	36	60	.98	7.06	6.62	.68	1.875	.0198	.94		119.21
F	E	17,500	30	465	.68	4.91	7.94	.98	1.875	.0207	4.44		123.65
E	D	17,500	30	55	1.20	4.91	7.94	.98	1.875	.0207	1.62		125.27
D	D										31.97		157.26
D	C	17,500	30	110	1.93	4.91	7.94	.98	1.875	.0207	2.78		160.04
C	B	17,500	30	565	1.62	4.91	7.94	.98	1.875	.0207	6.99		167.03
B	A	21,000	36	430	1.78	7.06	6.62	.68	1.875	.0198	3.14		170.17

### 3) 냉각해수 비정상 배출(Standpipe Discharge)

본 운전 조건은 elevation 100.17 ft에 위치하는 Standpipe를 통해 비정상적으로 냉각해수를 배출하는 경우로써 HV104/204를 완전개방 상태로 운전함으로써 설계 냉각해수 소요량을 공급하도록 하였으나 설계 최종 단계에서 오리피스 FO127 및 227을 1차기 냉각수 열교환기 출구 측에 추가적으로 설치함으로써 HV104/204의 개도조정에 의한 냉각해수 유량조정의 필요성이 없어졌다.

또한 Standpipe를 통한 냉각해수의 비정상 배출시는 배출구의 Elevation이 높아 밸브나 오리피스 같은 인위적인 압력강하가 없어도 1차기 냉각수 열교환기 출구 측의 압력이 대기압이상으로 충분히 유지되며 인위적인 계통내 추가적인 압력강하는 오히려 냉각해수 배출 유량의 감소를 초래할 수 있다. 표 2.1.7 및 2.1.8은 관련 계산서에서 인용된 Standpipe를 통한 냉각해수 비정상 배출 시의 해수 저저수위 및 고고 수위를 기준한 EGL 계산표이다.

표 2.1.7 냉각해수 비정상 배출/해수저저수위 기준 EGL 계산표

From	To	Q (gpm)	D (inch)	L (ft)	KM minor loss(k)	A (ft <sup>2</sup> )	V (ft/s)	V <sup>1/2</sup> /2g -	R x10 <sup>6</sup>	F friction factor	H head loss(ft)	HGL (ft)	EGL (ft)
												100.85	100.85
G <sub>1</sub>	G	21,000	36	34	1.30		6.62				1.08		101.93
G	AT VALVE	21,000	18	5.08	.48		26.5				28.75		130.68
G	F	21,000	36	60	.98		6.62				1.01		131.69
F	E	17,500	30	468	.68		7.94				5.54		137.23
E	D <sub>1</sub>	17,500	30	55	1.20		7.94				1.75		138.98
D <sub>1</sub>	D										31.99		170.97
D	C	17,500	30	110	1.93		7.94				3.04		174.01
C	B	17,500	30	545	2.62		7.94				8.28		182.29
B	A	21,000	36	430	1.75		6.62				3.69		185.96

표 2.1.8 냉각해수 비정상 배출/해수고고수위 기준 EGL 계산표

From	To	Q (gpm)	D (inch)	L (ft)	KM minor loss(k)	A (ft <sup>2</sup> )	V (ft/s)	V <sup>1/2</sup> /2g -	R x10 <sup>6</sup>	F friction factor	H head loss(ft)	HGL (ft)	EGL (ft)
													100.85
G <sub>1</sub>	G	21,000	36	34	1.3		6.62	0.68	1.88	0.020	1.04		101.89
G	AT VALVE	21,000	18	5.08	.48	1.77	26.5	10.89			28.5		130.36
G	F	21,000	36	60	.98	7.06	6.62	.68	1.88	.0198	.94		131.3
F	E	17,500	30	465	.68	4.91	7.94	.98	1.88	.0207	4.44		135.74
E	D <sub>1</sub>	17,500	30	55	1.20	4.91	7.94	.98	1.88	.0207	1.62		137.36
D <sub>1</sub>	D												169.35
D	C	17,500	30	110	1.93	4.91	7.94	.98	1.88	.0207	2.78		172.13
C	B	17,500	30	545	1.62	4.91	7.94	.98	1.88	.0207	6.99		179.12
B	A	21,000	36	430	1.78	7.06	6.62	.68	1.88	.0198	3.14		182.26

## 제 2 절 계통설계 고찰

### 1. 계통 EGL(Energy Gradient Line)

본 계통 초기 설계시 작성된 EGL은 본 논문 2장 1절의 2. 계통설계에서 보는바와 같은 계산 과정을 통하여 해수의 각 수위별에 대한 냉각해수 정상 배출 및 비정상 배출(Standpipe를 통한 배출)에 대한 각각의 경우에 있어서의 EGL을 작성하였다.

그러나 앞에서 논의된 바와 같이 초기 설계 이후 1차기기 냉각수 열교환기 출구 측에 오리피스 설치 및 발전소 상업운전기간중에 냉각해수펌프 출구 측에 이물질 여과기를 추가설치 하였으므로 해수가 오리피스 및 이물질 여과기를 통과함에 따른 추가 압력손실 발생 상당량만큼 그림 2.1.3의 구간 D<sub>1</sub> -A에서 실제 운전시 EGL은 상승되게 된다.

그림 2.1.4 및 2.1.5는 설계시 EGL(HV104/204 부분개도 유지 기준)선도와 현재의 운전 상태의 실제 EGL(오리피스 및 이물질 여과기 추가 설치, HV104/204 부분 개도 유지) 및 HV104/204 완전개방(Full Open)시의 예상 EGL(오리피스 및 이물질 여과기 추가 설치 고려)을 각각 비교하여 나타낸 것이다.

오리피스 및 이물질 여과기를 통한 압력손실은 관련 Data를 참조하여 각각 22psi (49.84 ft) 및 2.3 psi(5.2 ft) 을 기준으로 하였으며 HV104/204 완전개방시 밸브를 통한 압력손실은 1.64 psi(3.7 ft)로 하였다. 그림 2.1.4에서 보는 바와 같이 현재 실제 냉각해수계통 운전시 1차기기 냉각수 열교환기 출구에서의 EGL은 최저 177.43 ft(정상 배출 및 해저 수위 저저 기준)로써 설계 기준치인 122.39 ft 보다 과도하게 높은 것으로 판단되며 실제 정상 운전 중 1차기기 냉각수 열교환기 출구 측에 설치되어 있는 PI-110에서 측정된 압력은 약 2.2 kg/cm<sup>2</sup>g(해수 수위 고고 기준)이며 이 값은 1차기기 냉각수 열교환기 기준한 EGL 180.31 ft를 압력으로 환산한 값, 180.31 ft - 120 ft(위치수두) - 0.98 ft(속도수두) = 59.33 ft(26.2 psig, 1.84 kg/cm<sup>2</sup>g)와 유사하다.

그림 2.1.5에서 보는 바와 같이 HV104/204를 완전 개방하여도 1차기기 냉각수 열교환기 출구에서의 EGL은 냉각해수의 정상 및 비정상 배출시 어떠한 해수 수위 조건에서도 120 ft 이상을 충분히 유지할 수 있으며 오리피스 FO127~129 재 설계시 오리피스 통과유량을 냉각해수펌프 최대 유량 이내로 설계하면 FO127~129의 개선설계 이후에도 HV104/204 완전개방에 따른 냉각해수펌프의 Run-out도 방지될 수 있다.

또한 HV104/204의 완전 개방상태 운전은 밸브에 있어서의 Cavitation 현상 방지도 크게 기여할 것이며 계통 압력손실 감소에 따라 냉각해수 유량 증대에도 기여할 것으로 판단된다.

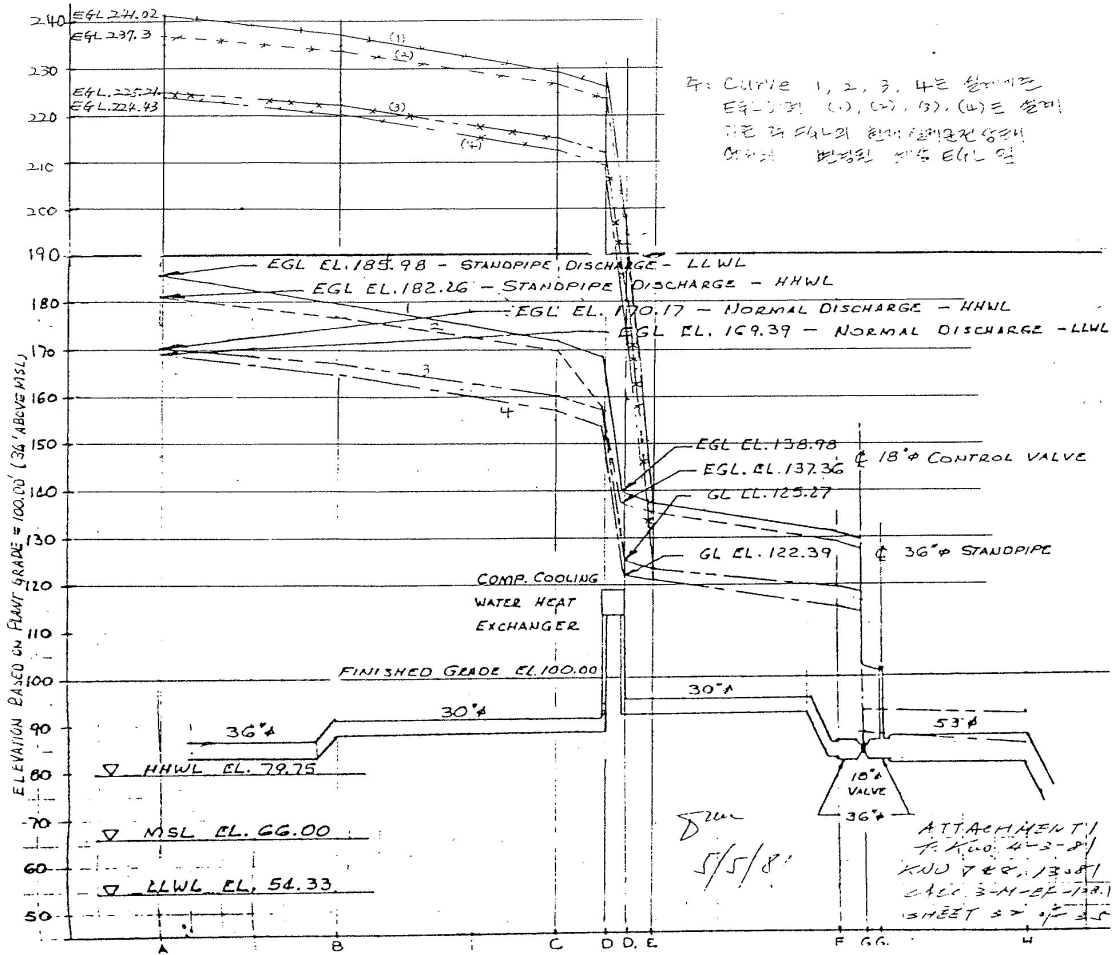


그림 2.1.4 실제 EGL(EF-HV104/204 부분 개도유지 기준)



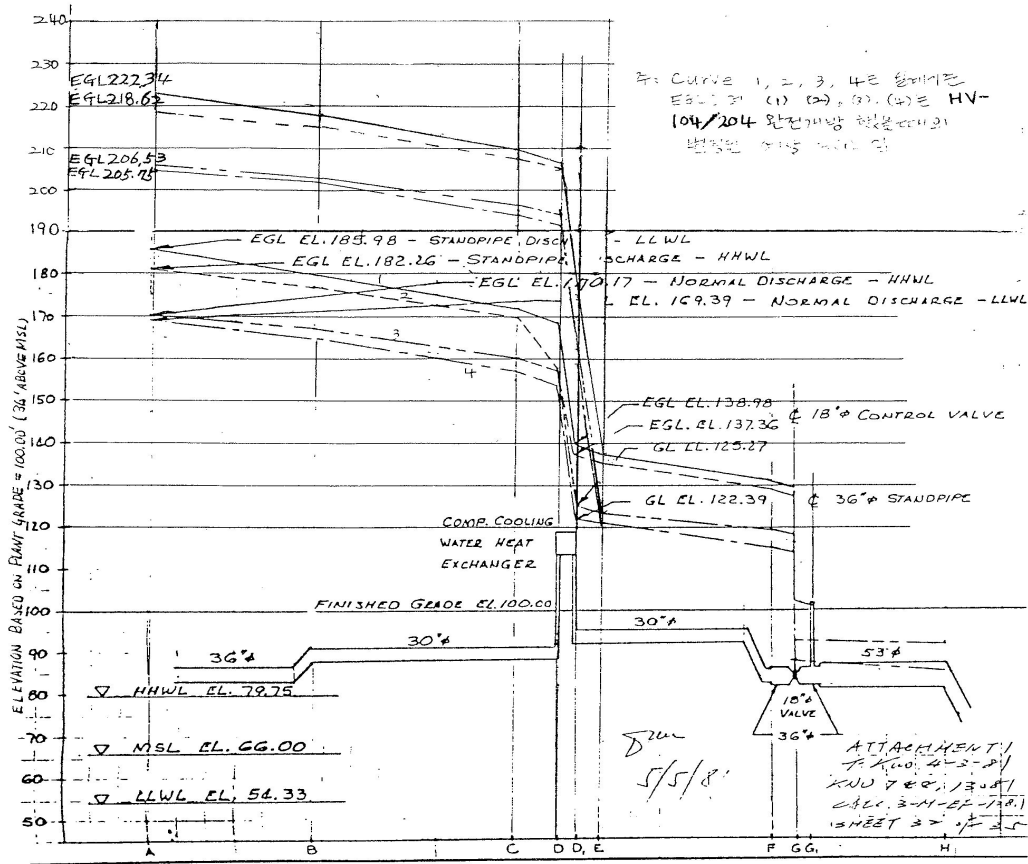


그림 2.1.5 EF-HV104/204 완전개방시 EGL

## 2. 1차기기 냉각해수펌프

현재 설치된 냉각해수펌프의 특성곡선을 기준으로 분석할 때 현재 순환수 토출 Conduit로 냉각해수를 배출시킬 수 없는 비정상적인 조건(Standpipe로 통한 배출)에서는 설계기준 냉각해수 유량을 공급할 수 없는 것으로 판단된다.

본 계통의 현재 운전기록을 기준으로 하여 Standpipe를 통한 냉각해수 배출시 최저 예상유량은 다음과 같다. 원자로 운전일지에 따르면 Train A의 최저유량은 15,057 gpm이며 Train B의 최저 유량은 17,118 gpm이므로 이때 각각의 펌프 TDH는 펌프 특성곡선에서 각각 152 ft, 147 ft 이다.

Standpipe를 통한 냉각해수 배출시 펌프 TDH는 약 16 ft 증가하므로 A 및 B Train의 예상 공급량은 각각 약 13,600 gpm, 15,800 gpm으로 냉각해수 소요량 18,000 gpm

보다 상당히 적으므로 발전소의 정상운전에 지장을 초래할 것으로 예상되며, 또한 현재 설치된 냉각해수계통 설계조건을 기준하여 추정된 냉각해수 유량 보다 상당히 적다. 이러한 냉각해수 공급량의 차이는 다음과 같은 원인에 기인하는 것으로 판단된다.

- 오리피스 FO127~129의 현 설계유량이 냉각해수 비정상 배출시를 기준한 18,000 gpm이며, 정상적인 냉각해수 배출시는 최대 24,400 gpm(해수수위 고고기준)을 통과할 수 있어야 한다. 따라서 오리피스 FO127~129를 재설계 및 교체하되 냉각해수펌프의 최대유량 이내의 설계로 설계유량을 제한함이 적절한 것으로 판단된다.
- 계통 운전연수 경과에 따라 계통내 오리피스, 배관, 열교환기 등의 오염에 따른 계통내 손실압력 증가 및 냉각해수펌프 성능저하에 따라서 현 냉각해수계통이 어떠한 운전조건에서도 설계기준 냉각해수를 공급하기 위해서는 FO127~129의 설계유량을 변경하여 재설치하고 계통내 압력손실이 최소화 될 수 있도록 계통을 유지하여야 할 것이다.

### 3. 벨브 완전개방이 계통에 미치는 영향

발전소 정상 운전 중 냉각해수를 정상적인 배출구인 해수 Discharge Conduit를 통한 운전시 냉각해수 유량은 해수 수위에 따라 Train A는 950~990 1/s(15,057~15,691 gpm) 이며 Train B는 1,080~1,130 1/s(17,118~17,910 gpm)로써 그림 2.1.2에서 보이는 바와 같이 설계 기준 유량(21,500~24,400 gpm) 보다 상당히 적을 뿐만 아니라 설계 기준 냉각해수 소요량(약 18,000 gpm)보다 공급 냉각해수 유량이 적다.

더구나 Standpipe를 통한 비정상 냉각해수 배출시는 표 2.1.9에서 보는 바와 같이 펌프의 TDH가 증가하므로 냉각해수 공급량이 설계기준 냉각해수 소요량보다 상당히 적을 것으로 예상되어 발전소의 정상 운전에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

그림 2.1.6에서 해수 수위 고고(HHWL) 기준한 냉각해수 정상배출시 현계통의 운전 공급 냉각해수 유량은 20,600 gpm이 정상적이나 실제 운전시 측정치는 15,000~17,900 gpm으로써 현 계통 운전조건 기준한 정상 공급유량의 73~87% 에 불과한 실정이다. 이러한 냉각해수 유량의 감소는 냉각해수펌프 성능저하 또는 본 계통이 설계와 다르게 시공되었거나 오리피스 FO127~129의 설계유량 부족, 운전 연수 경과에 따라 본 계통을 구성하고 있는 열교환기 Tube, 배관 등의 오염(Fouling) 특히 오리피스 구멍의 오염 또는 일부 막힘에 의해 계통내 압력손실이 설계 값보다 증가하였기 때문으로 판단된다.

표 2.1.9 유량변화에 따른 TDH 변화표

항목		운전조건		NORMAL(gpm)						STAND PIPE(gpm)					
		고고수위			저저수위			고고수위			저저수위				
		15,000	21,000	25,000	15,000	21,000	25,000	15,000	21,000	25,000	15,000	21,000	25,000		
펌프 토출측 총 압력손실 (ft)	설계기준	41.2	80.7	114.4	42.9	84.1	119.1	41.6	81.4	115.4	43.4	85.1	120.6		
	현재 운전기준	69.3	133.8	192.4	70.9	139.1	197.1	69.6	136.5	193.4	71.5	140.2	198.6		
	밸브 개방기준	59.8	117.1	165.9	61.4	120.4	170.6	60.1	117.8	166.9	61.9	121.5	172.2		
펌프 출구기준 EGL(ft)	설계기준	130.6	170.7	203.9	127.8	169.4	204.7	142.7	182.3	216.6	143.9	185.9	221.8		
	현재 운전기준	158.7	223.2	281.9	155.8	224.4	282.7	170.2	237.3	294.6	172.1	241.1	299.8		
	밸브 개방기준	149.2	206.5	255.4	146.3	205.8	256.2	160.6	218.6	268.1	162.5	222.3	273.3		
펌프 입구기준 EGL(ft)		79.75			54.33			79.75			54.33				
TDH (ft)	설계기준	50.9	90.4	124.1	73.4	115.1	150.4	62.3	102.5	136.8	89.6	131.7	167.4		
	현재 운전기준	78.9	143.5	202.1	101.5	170.1	228.4	90.4	157.6	214.8	117.7	186.7	245.5		
	밸브 개방기준	69.4	126.8	175.6	91.9	151.4	201.9	80.9	138.9	188.3	108.2	168.1	218.9		

- 주1. 현재 운전기준 : 오리피스(FO-127~129) 및 이물질 여과기를 통한 총 압력손실 (55.04 ft : 21,000 gpm 기준)은 유량의 제공에 비례하는 것으로 하여 설계기준시의 총 압력손실에 더하여 계산함
2. 밸브 개방기준 : 오리피스(FO-127~129) 및 이물질 여과기를 통한 총 압력손실 (55.04 ft : 21,000 gpm 기준)에서 HV-104/204 63° 개방시 압력 손실(동일 밸브 완전개방시 압력손실)의 값을 뺀 압력손실 (36.25 ft : 21,000 gpm 기준)이 유량의 제공에 비례하는 것으로 하여 계산한 설계 기준시의 총 압력
3. 상기표의 TDH는 펌프입구 손실은 무시하였음

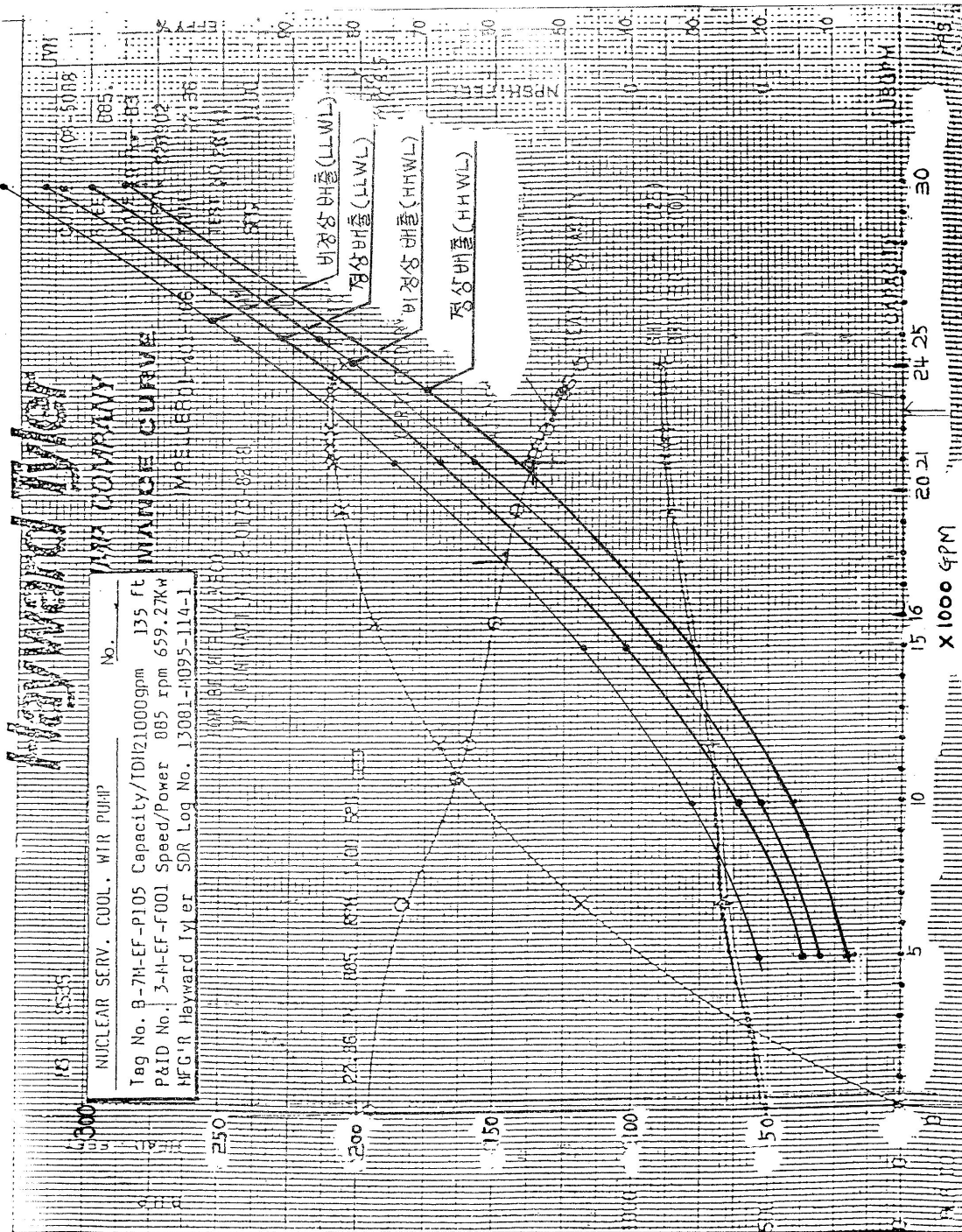


그림 2.16 실제 계통 운전조건 기준 1차기 냉각해수펌프 운전특성

따라서 냉각해수 유량을 증가시키기 위해서는 FO127~129의 재설계 및 재설치하고 계통내 압력손실이 최소화될 수 있도록 하여야하므로 계통내 압력손실의 주요인자인 HV104/204를 현재의 부분개도 운전상태에서 완전개방상태로 운전함에 따른 문제점에 대한 검토가 필요하다.

HV104/204 개방이 계통에 미칠 수 있는 영향은 기기냉각수 열교환기 출구에서의 HGL 120 ft 이하 발생 및 냉각해수펌프의 Run-out 발생이나 본 논문 2장 2절의 1. 계통 EGL에서 검토한 결과 HV104/204 개방시 HGL 120 ft 이상 유지는 가능한 것으로 보인다.

한편 HV104/204를 완전 개방했을 때 FO127~129가 적절히 설치된다면 냉각해수 정상 배출시 공급 유량은 20,000 ~ 21,600 gpm 이며 Standpipe를 통한 비정상 배출시는 18,800 ~ 20,800 gpm 으로서 어떠한 운전 조건에서도 냉각해수펌프의 Run-Out 유량인 24,000 gpm을 초과하지 않을 뿐만 아니라 설계 기준 냉각해수 유량도 만족할 수 있을 것으로 예상되나 냉각해수 공급량 증가에 따라 펌프 소비동력은 현재에 비해 증가할 것으로 예상된다.

## 제 3 장 유량조절밸브 침식 원인 분석

### 제 1 절 유량조절밸브 적절성 분석

#### 1. 유량조절밸브의 적정 개도량 고찰

##### 가. 기존밸브 설계

###### 1) 설계요건

###### 가) 밸브의 기능

18 inch 규격의 버터플라이 밸브는 교축기능(Jog Throttling)을 갖고 있으며, 60~70% 밸브 개도(계통설계 기준상 63%)로 운영되고, 공정 배관내 Syphon 형성에 따른 Syphon 정점에 있어서의 증기압 방지 및 냉각해수펌프 유량조절 기능을 갖고 있다.

###### 나) 계통 운전 특성

1차기 냉각해수계통은 공학적 안전 설비를 위한 계통 건전성을 유지하기 위한 설비와 운전 절차를 가지고 있는 원자력 안전등급의 운전 특성을 지니고 있다.

###### 다) 설비 설계 기준

(1) 안전 설계기준은 10 CFR 50, GDC 44, "Cooling Water"에 따른다.

(2) 본 계통이 단일 사고에 대비한 설계와 SSE에서 기능을 유지하여야 하는 안전설계 기준을 적용하므로 본 설비 역시 이에 준하는 설계 기준에 따른다.

(3) 10 CFR 50, GDC 45, "Inspection of Cooling Water System" 및 GDC 45, "Testing of Cooling Water System"에 따라 검사 및 시험이 수행되어야 한다.

(4) 적용규격 및 표준은 다음과 같다.

- ASME SEC. III, Class 3 및 Seismic Category 1.
- ASME SEC. XI
- AWWA 및 ASTM(콘크리트 배관의 안전 관련 부분)
- HI (Hydraulic Institute) Standard
- 10 CFR 50, Appendix A & B
- ANSI B31.1 Power Piping & Valves
- ANSI B11.5 Dimensions of Flanges and Flanged Fitting

2) 밸브 설계 현황

가) 밸브 사양

(1) 밸브 내용

- P&ID : 3-M-EF-001
- P.O NO. : 3-J-605
- Valve no.: A-7J-EF-HV104, B-7J-EF-HV204, A-8J-EF-HV104, B-8J-EF-HV204
- Service : NSCW TO OUTFALL
- Supplier : BIF in USA
- Type of Valve : Butterfly Valve
- Model No. : 0668-18

(2) 공정조건

- Fluid : Sea Water
- Flow Rate(Max./Min, gpm) : 21,000/21,000
- Upstream Press(Max./Min, psig) : 25/13
- Downstream Press(Max./Min, psig) : 22/10
- Design Press(psig) : 80
- Design Temp(°F) : 150
- Radiation Exp. :  $1 \times 10^5$  RADS
- Specific Graviity : 1.02
- Vapor Press(psia) : 0.6982
- Shutoff  $\Delta P$ (psi) : 80
- Process Line Material : CS, Rubber Lined

(3) 밸브 제작 사양

(가) 밸브 몸체

- Control Mode : Modulating in Jogging Mode
- Body Size : 18 inch
- End Connection : Lugged Wafer
- ANSI Class : 150#
- Body Material : CS, SA516GR70
- Packing : Grafoil
- Lining : BUNA-N

- Active/Non Active : Active
- Material
  - Dsic : CS, SA516GR70
  - Seat : EPDM
  - Main Bearing : BRZ, AST
  - Disk : CS, SA516GR70

(나) Motor Actuator

- Type : Electric
- Class : Class 1E
- Power : 450VAC, 60HZ, 3PH
- 정 격 : 0.7HP, 1700 RPM
- Enclosure : NEMA 4
- Closing Time : 30 Sec
- Motor MFR : RELIANCE
- Actuator MFR/MODEL NO. : LIMITORQUE/SMB-00-10

(다) 밸브 Data Sheet : 3-J-EF-V23 & V24

나) 밸브 특성

본 밸브는 버터플라이 밸브로써 영광1,2호기의 1차기기 냉각해수계통에 설치되어 있는 데 다음과 같은 설계특성을 가지고 있다.

(1) 누수율

누수율은 AWWA C504에 의한 허용범위를 충족하였다.

(2) 유량특성

유량 특성에는 Linear, Equal percentage 및 Quick Opening 등의 특성이 있는데, 본 밸브는 밸브 개도 변화율만큼의 통과 유량이 변화하는 "Equal Percentage" 유량특성을 갖추었다.

(3) 밸브 크기 계산

제작자 밸브 계산서 및 Cavitation 계산 결과를 확인할 수 없었다.

(4) 밸브 소음

제작자가 제시한 밸브 소음은 85 DBA 미만이었다.

다) 설치특성

1차기기 냉각해수계통의 관련 냉각기기들의 2차측 원전배수로는 36 inch 크기



로 지중에 매설되어 있다. 따라서 이러한 배관 중에 설치되는 밸브의 보수유지, 경제성 및 계통내에서의 역할 등을 고려하여 36 inch x 18 inch x 36 inch의 규격으로 별도의 지하공간을 확보하여 Valve Vault내에 설치되었다. 그러나 장소가 보수유지를 위한 최소한의 공간만 확보된 상태로 필요시 확장하는 데는 많은 어려움이 예상된다.

#### 나. 기존밸브 운전현황

영광1호기 운전 중 86년 10월 25일(상업운전 2개월 후) Butterfly 밸브 Disc Rubber Lining 손상이 발생하였고 이 Hole이 점점 확대되자 임시로 Steel Band 설치 및 그라우트 보강으로 운전하였다. 이 문제점은 영광2호기에서도 똑같이 발생하였으며, 현재 영광1,2호기는 매 정기보수(Refueling)기간에 밸브 디스크를 정비/교체하고 있는 실정이다.

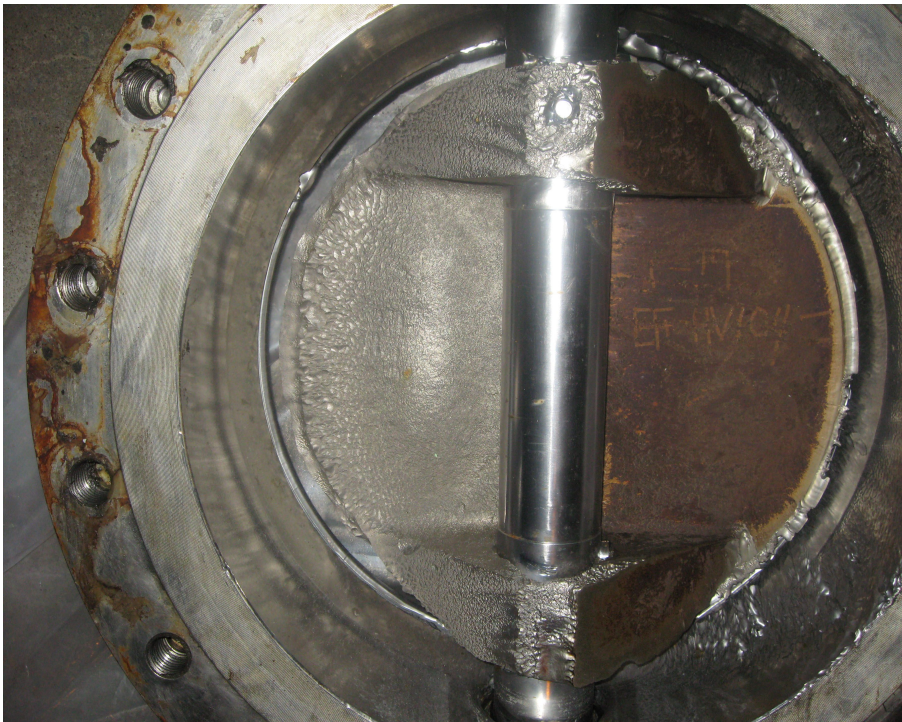


그림 3.1.1 1차기기 냉각해수 유량조절밸브 침식 손상 사진(A)



그림 3.1.1 1차기기 냉각해수 유량조절밸브 침식 손상 사진(B)

1) 밸브 운전 현황

가) 설비상태

- (1) 1차기기 냉각해수계통 후단에 설치되어 유량과 압력을 조정하고 있으나 밸브의 THROTTLE 운전으로(63% OPEN) 침식과 마모가 극심함
- (2) 디스크는 카본스틸에 RUBBER LINING 되어있는 형식으로 RUBBER 손상시 해수와 카본스틸이 직접 접촉되어 부식이 심함.
- (3) 배관직경이 36 inch - 18 inch - 36 inch로 변함에 따른 유속증가로 밸브손상이 극심함
- (4) NSCW DISCHARGE HEADER에 위치한 BUTTERFLY 밸브는 계통의 유량 및 압력평형을 위하여 LOCK THROTTLE 상태로 운전되고 있어 밸브후단을 통과한 유체의 VELOCITY HEAD가 급격히 증가되고, PRESSURE HEAD는 급격히 감소되어 밸브 DISK 후단에 FLASHING에 의하여 침식 현상이 발생됨.
- (5) 밸브의 부분 손상으로 보수 빈도가 증가됨

나) 밸브 교체이력

표 3.1.1 1차기 냉각해수 유량조절밸브 교체 이력

호 기	밸브번호	보수년도				
		88	89	92	96	98
#1	EF-HV104			0		0
	EF-HV204			0		0
#2	EF-HV104	0		0	0	
	EF-HV204		0	0	0	

다) 밸브 주요 정비내용 : SEAT, DISC 및 DISC RUBBER LINING 손상 정비/교체

**다. 유량조절밸브의 적정 개도량 검토**

유량조절밸브의 형태는 나비형으로 동 밸브를 Modulating 으로 사용 시 통상적으로 60° 회전을 사용한다. 나비형밸브의 특성상 밸브 개도가 60° 이상이 되면 유량이 기하급수적으로 증가하여 구동하는데 힘이 많이 필요함으로 70° 이상에서는 Modulating으로 적당하지 않다. 일반적으로 나비형밸브의 고유 유량특성은 밸브 개방 20°~70°에서 Equal Percentage 이기에 이 구간에서 Modulating으로 사용을 많이 한다.[그림 3.1.2 참조] 하지만, 각 제작사별로 디스크의 형상에 따라 밸브 개방 90° 까지 Equal Percentage인 경우도 있으며 제작사별로 디스크 형상을 달리하여 Linearity 특성을 갖는 경우도 있다.

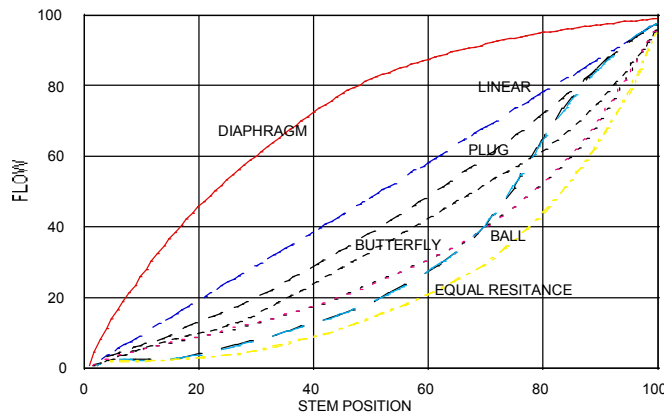


그림 3.1.2 밸브 고유 유량 특성 곡선

영광1,2호기의 경우 유량조절밸브는 ENERTECH에서 제작, 공급하였고 동 밸브의 고유 유량 특성 곡선은 아쉽게도 입수하지 못했다. 일반적으로 나비형밸브의 고유 유량 특성은 Equal Percentage 특성을 갖고 있으므로 동 밸브의 기능에 부합하기 위해서는 밸브 개도가 60° ~ 70°정도에서 유지되는 것이 바람직하다고 판단된다.

## 2. 밸브 재질측면의 원인분석

### 가. 손상 형상 검토

상기의 손상 원인 분석계획 보고에 제시되어 있는 유량조절밸브의 손상 형상을 밸브 재질측면에서 검토한 결과는 다음과 같다.

- 1) 밸브 Disc 및 Body의 손상 형상은 전형적인 침식 손상의 형태로 홈(Groove), 도랑(Gully), 파도(Wave), 둥근 구멍 또는 골짜기 모양으로 나타나고 있으며 그림 3.1.3과 같이 일정한 방향성을 갖고 있다.

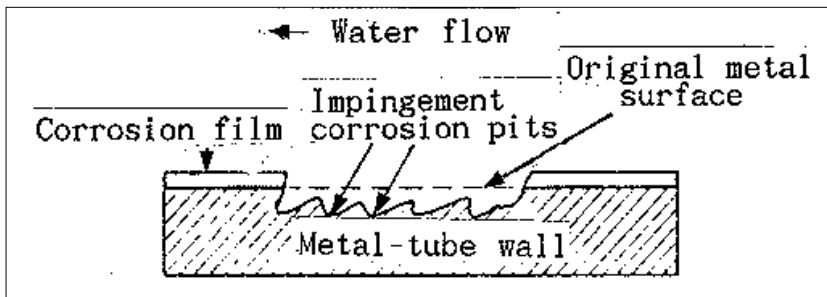


그림 3.1.3 유속에 의한 밸브침식 형상

- 2) 이러한 현상은 유체의 심한 유동으로 금속표면에서 마모(Wear)가 일어나기 때문이며 이는 유체내에 모래와 같은 굵은 입자가 있을 때 급격히 가속화된다. 이와 같은 현상은 펌프 임펠러, 밸브, 배관 엘보우 등 유속이 심해지는 기에서 발생할 수 있다.
- 3) 표 3.1.2는 해수에서 유속에 따른 침, 부식 속도를 나타내고 있는데 Al-Bronze나 Monel의 경우는 해수에 대해 내부식성이 있는 재질로 부식현상보다는 주로 침식에 의한 손상기구를 나타내고 있다.

표 3.1.2 해수의 유속이 금속 및 합금의 침식에 미치는 영향

Material	Typical corrosion rates, mdd		
	1 ft/sec	4 ft/sec	27 ft/sec
Carbon steel	34	72	254
Cast iron	45	-	270
Silicon bronze	1	2	343
Admiralty brass	2	20	170
Hydraulic bronze	4	1	339
G bronze	7	2	280
Al bronze(10% Al)	5	-	236
Aluminum brass	2	-	105
90-10 Cu Ni(0.8% Fe)	5	-	99
70-30 Cu Ni(0.05% Fe)	2	-	199
70-30 Cu Ni(0.5% Fe)	<1	<1	39
Monel	<1	<1	4
Stainless steel type 316	1	0	<1
Hastelloy C	<1	-	3
Titanium	0	-	0

SOURCE : International Nickel Co.

- 4) Monel의 경우는 해수에서 내부식성이 뛰어나며, 내침식성도 비교적 우수한 편이나 유속이 증가하고 또한 유체내 모래와 같은 고체입자가 포함될 경우 급속히 침식속도가 증가하게 된다.
- 5) HV104/204 밸브는 정상운전 중 밸브 개도가 약 50%정도 부분 개방되어 운전되므로 유속이 더욱 급속하게 변하게 되며, 또한 굵은 모래의 혼입으로 침식에 더욱 가혹한 환경이 조성된 것으로 판단된다.

### 3. 밸브 형식의 적합성 고찰

1차기기 냉각해수계통내의 HV104/204는 기기냉각수 열교환기 출구에 있어서의 HGL을 어떠한 운전조건에 있어서도 120 ft 이상으로 유지하기 위해 부분개도(약 63°)로 운전하도록 초기 기본 설계시 요구하고 있으나 이로 인해 과도한 냉각 해수 통과면적의 축소에 따른 빠른 유속에 의한 침식 현상이 초래된 것으로 보인다. 따라서 밸브의 크기 및 Cavitation 영향 등을 검토하고자 한다.

## 가. 밸브 선정 일반

사용목적, 사용유체 특성, 공정조건, 밸브규격 등을 고려하여 밸브형태, 밸브 특성 및 재질 등을 정하고, 밸브 크기 계산(Valve Sizing)과 Cavitation 생성여부를 검토하게 된다. 그리하여 기술성, 경제성, 보수유지의 편리성 등을 고려하여 밸브를 선정한다. 여기에서 밸브 특성, 재질, 밸브크기 계산 및 Cavitation 검토 등은 제작자 특성(고유사항)이 강하게 반영되는 항목이다.

밸브 선정 시, 부적당한 밸브 선정으로 초래되는 대표적인 사항 몇 가지를 기술하면 다음과 같다.

- 1) Valve Size가 너무 작을 때는 최대 요구 유량을 만족할 수 없으며, 밸브의 압력 손실이 크고 밸브에서 유속이 빨라져 Cavitation이나 Flashing이 발생할 확률이 높다. Size가 클 때는 경비과다 현상을 초래하고 밸브개도가 보다 적게 운전되어 Disc 손상이 가속화되며 계통이 불안정해질 수 있다.
- 2) 재질(선택)은 공정조건에 적절치 아니한 재질 선택시 침식, 부식 및 누수현상이 발생될 수 있다.
- 3) 부적절한 밸브 선정 시 계통 중에 Cavitation이 발생할 수 있으며 보수 빈도의 증가로 비경제적 운영이 될 수 있다.

## 나. 밸브크기 계산 및 Cavitation 계산에 의한 검토

- 1) 밸브크기 계산 및 Cavitation 계산을 위한 계통소요자료

가) 공정조건 및 밸브관련 자료

- Fluid : Sea water
- Design Press : 150 psig
- Design Temp : 150 °F
- Press Rating : 150B
- Valve Body Size : 18 inch BUTTERFLY VALVE
- Valve Class : Nuclear Class
- Process Data :
  - Flow(gpm, Max./Normal/Min.) : 24,000/18,000/15,000
  - Upstream Press(psia, Max/Normal/Min.) : 30.7/29.4/19.4

- Downstream Press(psia, Max./Normal/Min.) : 14.5/14.5/14.5
- Temp.(F , Max./Normal/Min.) : 90/90/90
- Specific Gravity : 1.02
- Vapor Press(psia) : 0.6982
- Max. Diff. Press(psia when valve closed) : 88

나) 관련 밸브

- 밸브명 : 1차기기 냉각해수 유량조절밸브
- 밸브번호 : 7J-EF-HV104, 8J-EF-HV104, 7J-EF-HV204, 8J-EF-HV204

2) 밸브 Cavitation 현상

가) Cavitation 현상 일반

제어밸브의 악영향 가운데 가장 큰 것 중의 하나가 Cavitation과 Flashing을 들 수 있다. 이러한 현상은 소음이나 진동을 발생시켜 밸브의 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 흐르는 유체내에서 기포의 형성과 이 기포의 연속적인 터짐(implosion)이 제어밸브 및 인접한 배관에 손상을 입히는 주된 요인이다.

유체가 제어 밸브와 같은 제한된 공간을 통과하면서 유체의 운동 Energy와 압력 Energy는 상호 변화한다. 즉, 유체가 밸브를 통과하면서 정상유량을 유지하기 위해 속도수두는 증가하고 정압은 감소한다. 다시 말해서, 유체가 흐르는 단면적이 최소인 점을 Vena Contracta라고 하며, 그 점에서 속도는 최대가 되고 압력은 최소가 된다.

이점에서의 압력이 액체의 포화증기압 이하로 떨어지면서 유체내에서 기포가 생기기 시작한다. 기포가 생성되는 비율은 압력이 증기압 이하로 더욱 떨어질수록 증가한다.

만일 밸브의 출구측 압력이 증기압 이상으로 회복(상승)된다면 기포가 붕괴되면서 폭발음을 내며 밸브의 각 부품 및 배관에 기계적 손상을 입히게 된다.

만일, 밸브의 출구측 압력이 여전히 액체의 증기압 이하라면 유체내의 기포가 Downstream 쪽에 계속 존재할 것이고 그 체적은 증가되며 이러한 현상을 Flashing이라 한다. Flashing에 의한 손상은 Erosion에 의한 것이기 때문에 Cavitation에 의한 손상 보다는 덜 거칠며, 때때롭게 생긴 형상을 띤다.

가장 큰 Flashing 손상은 속도가 가장 빠른 부분에서 일어나는 경향이 있다.

## 나) Cavitation 손상

Cavitation으로 인한 손상은 밸브에 구조적 손상을 가하고 더 나아가 밸브 하류측 배관류에도 손상을 가하게 되며 손상은 기계적 손상, 화학적 손상 등으로 분류할 수 있다. 다시 말해서 침식 및 부식현상을 초래한다.

다) Cavitation으로 인한 손상을 줄이거나 방지하기 위해서는 계통설계(밸브크기, 공정조건, 설치위치 등)시 충분히 제반여건을 고려하여 반영하는 것이다. 또한 Back Pressure 증가용 오리피스 Plate 설치, 재질선택 및 Anti-Cavitation 제품의 사용 등을 예시할 수 있다.

### (1) Back Pressure 오리피스 Plate 설치

제어 밸브가 가능한 높은 배압(Back Pressure)을 갖도록 설치한다. 배압을 증가시키기 위해 Downstream 쪽에 배압용 오리피스를 설치하는 방법이 있으나, 이것은 밸브에서의 Cavitation은 방지할 수 있으나 오리피스에서 Cavitation을 일으켜 오리피스의 Downstream에 손상을 입히게 되어 Cavitation이 배제된 것이 아니고 단순히 발생위치만 변경시킨 결과 밖에 안 되는 경우도 있다.

### (2) 재질선택

Trim 등 유체가 직접 통과, 또는 제어되는 부분은 Corrosion 및 Erosion 등에 잘 견기는 재질 또는 Hard-Facing 재질 등으로 하는 방법이 있으나, Cavitation 손상을 완전하게 견딜 수 있는 재질이 없기 때문에 최상의 대책은 될 수 없다.

### (3) Anti-Cavitation 제품의 사용(기포고립과 Energy 분산)

Cavitation으로 인한 손상을 최소화시키는 가장 효과적인 수단은 Cavitation을 제어 할 수 있는 특수한 장치를 사용하는 것이다. 대부분의 밸브 제작사들은 Anti-Cavitation 제품을 생산하고 있다.

## 라) Cavitation 검토

밸브 Sizing시 Cavitation 발생 여부도 포함하여 검토하여야 하며, 각 제작사의 제품 특성에 따라 Cavitation 발생여부의 판정이 약간씩 차이가 날수 있으므로 일반적으로 밸브 Cavitation 발생여부는 제작자의 "Valve Sizing Program"에 의해 검증된다.



### 3) 밸브 크기 계산 및 Cavitation 계산에 의한 검토

영광1,2호기 자체 조사 결과 1차기기 냉각해수 유량조절밸브 후단에서 소음과 Cavitation 현상을 발견하였다.

1987년 8월 작성된 보고서(영광1,2호기 토건부 작성)에 의하면 문제발생 원인을 다음과 같이 기술하고 있다.

- 계통기기(열교환기) 오리피스에서의 부적절한 압력저하 방지를 위해 Discharge측 Butterfly 밸브를 과도하게 교축(Flow area가 1/8로 축소)함으로써 빠른 유속으로 인해 Vapor가 발생하고 다시 밸브 후단부분에서 Flow Area가 급격히 확대되어 Cavitation이 발생. 이로 인해 밸브 내부부품이 손상된 것으로 사료됨.

- Reducer가 완만히 축소/확대되지 않고 급격히 축소/확대됨으로써 공동 현상을 가중시킨 것으로 봄.

- Stand Pipe 상부 밀봉으로 압력저하가 유도되어 공동현상이 가중된 것으로 봄. 이러한 현상은 현장 확인결과 대부분 확인되었다. 이에 밸브 크기를 계산하여 검토하고자 기존 밸브 공급사인 ENERTECH사(舊, BIF사)의 컴퓨터 프로그램으로 밸브 Sizing을 수행하였고 비교용으로 종합 밸브 공급자인 VALTEK사의 컴퓨터 프로그램에 의한 밸브 Sizing 결과를 또한 검토하였다.

종합적인 검토를 위해서는 기존 밸브를 분석하고 또한 공급 가능한 참조 제작사의 방법에 의한 계산결과를 비교하여 분석 결과를 도출하여야 하나, 기존 밸브에 대한 자료가 없으므로 보수용 밸브를 공급하기로 결정된 ENERTECH사의 프로그램에 의한 계산, 계통분석 결과에 의한 공정조건 등의 제반 자료를 이용하여 "Valve Sizing and Cavitation Calculation"을 검토하였다.

#### 가) VALTEK사 컴퓨터 프로그램에 의한 계산

종합 밸브 제작사이며 국내 원자력, 화력발전소에 많은 공급경험을 가지고 있는 VALTEK사의 "Valve Sizing Program"을 사용하여 계산하였다. 표 3.1.3에는 18 inch 밸브인 경우의 계산 결과를 나타내었는데, Full Cavitation이 발생됨을 알 수 있으며 설계유량이 통과될 수도 없음을 확인할 수 있다. 즉 표에서 "Valve Required Cv값"이 "Max Cv값"보다 큰 것으로 나타났는데 이는 설계유량을 통과시킬 수 없는 밸브 크기인 것을 나타낸다. 그러므로 VALTEK사 제품의 경우 주어진 공정조건을 위해서는 18 inch 밸브를 사용할 수 없음을 말해준다. 그리하여 24 inch 크기의 경우도 계산하였으며, 표 3.1.4에 그 계

산 결과가 나타났다.

최소유량의 경우는 Cavitation이 일어나지 않으나 최대 및 정상유량에서 "Incp Cav"의 현상이 일어나고 있음을 발견할 수 있다. "Incp Cav"란 Inceipient Cavitation으로서, "간헐적으로 Cavitation에 근접한 상황이 발생됨"을 말한다. 이는 밸브 및 배관에 현저한 침식을 유발할 상황은 아니나 밸브 및 2차측 배관류의 재질을 정상보다 강화시키거나 밸브 2차측에 배압용 오리피스를 설치하는 등의 방법으로 개선할 수 있을 것이다.

VALTEK의 계산 결과를 종합하면 본 계통 설계조건을 변경하지 않는 한 18 inch 밸브는 부적절하며 24 inch 규격의 밸브를 사용하여야 한다.

표 3.1.3 VALTEK사 18 inch Valve Sizing

	MAXIMUM	NORMAL	MINIMUM	비 고
유량(gpm)	24,000	18,000	15,000	
압력 강하	18.2	14.9	4.90	
질식 강하	9.48	10.2	6.14	
밸브 요구 Cv	11,852.8	8,479.2	9,369.4	Max Cv : 9,950
밸브 개도	90°	77°	83°	
Cavitation 평가	Full Cav.	Full Cav.	Incp Cav.	

표 3.1.4 VALTEK사 24 inch Valve Sizing

항 목	MAXIMUM	NORMAL	MINIMUM	비 고
유량(gpm)	24,000	18,000	15,000	
압력 강하	16.2	14.9	4.90	
질식 강하	18.9	19.8	11.0	
밸브 요구 Cv	7,593.1	5,930.2	8,617.6	Max Cv : 19,600
밸브 개도	47°	41°	51°	
Cavitation 평가	Incp Cav.	Incp Cav.	-	

나) ENERTECH사 컴퓨터 프로그램에 의한 계산

ENERTECH사의 계산 결과는 표 3.1.5에서 3.1.10까지에 나타내었다.

ENERTECH사에서는 18 inch 밸브에서는 55° 개도 근처에서의 몇 포인트에서 Cavitation에 가까운 현상이 나타났다. 이것은 밸브의 1차측 압력과 온도의 약간의 변화가 밸브 2차측 배관류에 Erosion과 Cavitation을 초래할 수 있음을 말한다. 상기를 제외한 밸브 개도에서는 Cavitation이 발생되지 않고, 밸브 크기 24 inch 에서는 Cavitation이 발생되고 있지 않음을 알 수 있다.

표 3.1.5 ENERTECH사 18 inch, 15,000 gpm에서의 계산치

밸브 개도	Cv	유량(gpm)	밸브 강하	계통 강하	질식 강하	Cavitation
0	0	0	88.00	16	-	-
10	296	1193	16.20	16.20	21.74	no
15	474	1909	16.20	16.20	21.74	no
20	741	2983	16.20	16.20	21.74	no
25	1037	4176	16.20	16.20	21.44	no
30	1334	5369	16.20	16.20	21.14	no
35	1749	7039	16.20	16.20	20.84	no
40	2223	848	16.20	16.20	20.84	no
45	2816	11334	16.20	16.20	19.93	yes
50	3557	14317	16.20	16.20	19.03	yes
55	4417	15000	11.53	13.78	17.82	no
60	5514	15000	7.40	9.65	16.61	no
65	6877	15000	4.76	7.01	15.70	no
70	8418	15000	3.17	5.42	14.80	no
75	10227	15000	2.15	4.40	14.50	no
80	12361	15000	1.47	3.72	13.89	no
85	13843	15000	1.17	3.42	13.89	no
90	14051	15000	1.14	3.39	13.59	no

표 3.1.6 ENERTECH사 18 inch, 18,000 gpm에서의 계산치

밸브 개도	Cv	유량(gpm)	밸브 강하	계통 강하	질식 강하	Cavitation
0	0	0	88.00	15	-	-
10	296	1144	14.90	14.90	20.81	no
15	474	1831	14.90	14.90	20.81	no
20	741	2861	14.90	14.90	20.81	no
25	1037	4005	14.90	14.90	20.52	no
30	1334	5149	14.90	14.90	20.23	no
35	1749	6751	14.90	14.90	19.94	no
40	2223	8582	14.90	14.90	19.94	no
45	2816	10870	14.90	14.90	19.07	no
50	3557	13731	14.90	14.90	18.21	yes
55	4417	17049	14.90	14.90	17.05	yes
60	5514	18000	10.66	13.89	15.89	no
65	6877	18000	6.85	10.09	15.03	no
70	8418	18000	4.57	7.81	14.16	no
75	10227	18000	3.10	6.33	13.87	no
80	12361	18000	2.12	5.35	13.29	no
85	13843	18000	1.59	4.93	13.29	no
90	14051	18000	1.64	4.86	13.00	no

표 3.1.7 ENERTECH사 18 inch, 24,000 gpm에서의 계산치

밸브 개도	Cv	유량(gpm)	밸브 강하	계통 강하	질식 강하	Cavitation
0	0	0	88.00	5	-	-
10	296	656	4.90	4.90	13.61	no
15	474	1050	4.90	4.90	13.61	no
20	741	1640	4.90	4.90	13.61	no
25	1037	2297	4.90	4.90	13.42	no
30	1334	2953	4.90	4.90	13.23	no
35	1749	3871	4.90	4.90	13.04	no
40	2223	4921	4.90	4.90	13.04	no
45	2816	6234	4.90	4.90	12.47	no
50	3557	7874	4.90	4.90	11.91	no
55	4417	9777	4.90	4.90	11.15	no
60	5514	12205	4.90	4.90	10.39	no
65	6877	15228	4.90	4.90	9.83	no
70	8418	18635	4.90	4.90	9.26	no
75	10227	22638	4.90	4.90	9.07	no
80	12361	24000	3.77	4.90	8.69	no
85	13843	24000	3.01	4.90	8.69	no
90	14051	24000	2.92	4.90	8.50	no

표 3.1.8 ENERTECH사 24 inch, 15,000 gpm에서의 계산치

밸브 개도	Cv	유량(gpm)	밸브 강하	계통 강하	질식 강하	Cavitation
0	0	0	88.00	16	-	-
10	527	2121	16.20	16.20	21.74	no
15	843	3394	16.20	16.20	21.74	no
20	1317	5303	16.20	16.20	21.74	no
25	1844	7424	16.20	16.20	21.44	no
30	2371	9545	16.20	16.20	21.14	no
35	3109	12514	16.20	16.20	20.84	no
40	3952	15000	14.40	14.85	20.84	no
45	5006	15000	8.98	9.42	19.93	no
50	6324	15000	5.63	6.07	19.03	no
55	7852	15000	3.65	4.09	17.82	no
60	9802	15000	2.34	2.79	16.61	no
65	12226	15000	1.51	1.95	15.70	no
70	14966	15000	1.00	1.45	14.80	no
75	18181	15000	0.68	1.13	14.50	no
80	21975	15000	0.47	0.91	13.89	no
85	24610	15000	0.37	0.82	13.89	no
90	24979	15000	0.36	0.81	13.59	no

표 3.1.9 ENERTECH사 24 inch, 18,000 gpm에서의 계산치

밸브 개도	Cv	유량(gpm)	밸브 강하	계통 강하	질식 강하	Cavitation
0	0	0	88.00	16	-	-
10	527	2034	14.90	14.90	20.81	no
15	843	3255	14.90	14.90	20.81	no
20	1317	5085	14.90	14.90	20.81	no
25	1844	7120	14.90	14.90	20.52	no
30	2371	9154	14.90	14.90	20.23	no
35	3109	12002	14.90	14.90	19.94	no
40	3952	15256	14.90	14.90	19.94	no
45	5006	18000	12.93	13.57	19.07	no
50	6324	18000	8.10	8.74	18.21	no
55	7852	18000	5.26	5.90	17.05	no
60	9802	18000	3.37	4.01	15.89	no
65	12226	18000	2.17	2.81	15.03	no
70	14966	18000	1.45	2.09	14.16	no
75	18181	18000	0.98	1.62	13.87	no
80	21975	18000	0.67	1.31	13.29	no
85	24610	18000	0.53	1.18	13.29	no
90	24979	18000	0.52	1.16	13.00	no

표 3.1.10 ENERTECH사 24 inch, 24,000 gpm에서의 계산치

밸브 개도	Cv	유량(gpm)	밸브 강하	계통 강하	질식 강하	Cavitation
0	0	0	88.00	5	-	-
10	527	1167	4.90	4.90	13.61	no
15	843	1866	4.90	4.90	13.61	no
20	1317	2916	4.90	4.90	13.61	no
25	1844	4083	4.90	4.90	13.42	no
30	2371	5249	4.90	4.90	13.23	no
35	3109	6882	4.90	4.90	13.04	no
40	3952	8749	4.90	4.90	13.04	no
45	5006	11082	4.90	4.90	12.47	no
50	6324	13998	4.90	4.90	11.91	no
55	7852	17381	4.90	4.90	11.15	no
60	9802	21697	4.90	4.90	10.39	no
65	12226	24000	3.85	4.90	9.83	no
70	14966	24000	2.57	3.71	9.26	no
75	18181	24000	1.74	2.88	9.07	no
80	21975	24000	1.19	2.33	8.69	no
85	24610	24000	0.95	2.09	8.69	no
90	24979	24000	0.92	2.06	8.50	no

다) 밸브 크기 계산 및 Cavitation 계산 검토

밸브 크기 계산 및 Cavitation 계산은 Control Valve Selection and Sizing by Les Driskell, ISA 등을 통하여 수행할 수 있으나 제작 특성을 고려하여야 하고 여러 가지 보정계수의 적용 등이 밸브 제작사마다 고유하므로 각 제작사의 "Valve Sizing Program"을 이용한 계산 결과로 밸브 선정의 적정성을 검증하고 있는 현실을 고려하여야 한다. 상기 가) 및 나) 항에서 알 수 있듯이, ENERTECH사에서는 18 inch Valve의 일부 밸브개도에서 Cavitation 현상이 발생되고 있으며, 적절한 모델 선정 및 재질 강화로 본 계통에 18 inch 밸브 사용의 적용이 가능하다고 하나, VALTEK사 Program에서의 계산 결과는 18 inch 밸브에서 Full Cavitation이 발생함을 알 수 있다.

ENERTECH사의 계산결과 기존 밸브가 사용가능한 상태임에도 불구하고, 현재 사용 중인 밸브 Disc에도 손상 현상이 발생되고 있으며, 더욱이 VALTEK사의 계산 결과에 의하면 18 inch 밸브에서는 Full Cavitation 현상이 생기고, 또한 설계유량의 통과가 되지 않는 밸브 개도 상태도 있는 것을 고려하고, 밸브를

완전 개방하여 운전하여도 계통에 영향을 미치지 아니한 점 등을 고려할 때 현재 63°의 밸브 개도로 운전하는 것을 90°의 밸브 개도로 시운전하여 그 결과에 따라 다음의 개선 방안 중에서 적절한 방안을 선정하여야 한다고 검토되었다.

(1) 제 1안 : 18 inch 밸브유지 및 90° 밸브 개도 운전

VALTEK사에서는 Full cavitation이 생기므로 논외로 하고, ENERTECH사에서도 55~60° 의 밸브개도 근처에서 Cavitation이 발생하나 90°의 밸브개도에서는 Cavitation이 발생하지 않으므로 90°의 완전개방 운전으로 시운전하여 실제의 Cavitation 발생여부를 확인할 것을 권고하며, 만약 발생치 않으면 재질을 강화하는 수준에서 개선을 수행할 수 있다고 본다. 이 방안이 현실비를 그대로 수용하는 가장 경제적인 방안으로 보인다.

(2) 제 2안 : 24 inch 밸브로 교체

만약 제 1안의 시운전시 여전히 Cavitation 현상이 상존한다면 밸브 크기는 24 inch로 변경하여야 하며, ENERTECH사 및 VALTEK사 공히 Cavitation 손상 현상이 발생치 않는 계산 결과에 근거한 것이며, Cavitation 손상 현상을 개선하기 위한 방안중 하나인 재질 향상(강화)을 추가로 수행하여 밸브 손상 현상을 방지하여야 한다고 본다. 이 안은 밸브 규격이 커져 비용 상승요인이 되나 보수 유지 절감에 의해 보상될 수 있으리라 본다.

## 제 2 절 유량조절밸브 Cavitation 평가

### 1. 입력자료

계통측면에서의 손상 원인 분석은 1차기기 냉각해수계통은 설계 대비 운전 조건에서 어느 정도 여유를 확보하고 있고 이러한 여유는 유량조절밸브가 감당하고 있으므로 유량조절밸브의 과도한 압력강하로 인한 Cavitation 발생 여부를 평가하는 것이다. 기존 밸브 공급사인 ENERTECH사(舊, BIF사)의 컴퓨터 프로그램 밸브 Sizing 결과는 일부 밸브개도에서 Cavitation 현상이 발생되고 있으며, 재질 강화로 본 계통에 18 inch 밸브 사용이 가능하며, 비교용으로 종합 밸브 공급자인 VALTEK사의 컴퓨터 프로그램에 의한 밸브 Sizing 결과는 18 inch 밸브에서는 Full Cavitation 현상이 발생하는 것으로 되어 있어 양쪽 회사의 결과가 상이한 관계로 계통 Sizing 전산 프로그램인 Flow-Series를 이용하여 현재 설치되어 있는 18 inch 밸브의 압력손실을 계산하여 Cavitation 발생여부를 평가하고자 한다.

### 가. 가정

- 1) 밸브특성곡선은 보유하고 있지 않으므로 1994년에 밸브 원 제작사가 평가한 Cavitation 계산 결과에 제시되어 있는 밸브 개도별 Cv 값을 이용한다.
- 2) 운전일지에 기록된 1차기기 냉각해수펌프 후단 압력 및 1차기기 냉각해수유량의 변동이 심하여 기준치를 정할 수 없는바 현 배관 배치를 기준으로 작성한 계통 모델링은 적정하다고 가정한다.
- 3) 계통 모델링은 1호기 A계열 P104 펌프가 운전되는 것을 기준으로 작성한다. 1차기기 냉각해수는 1차기기 냉각해수펌프 계산서에 기술된 바와 같이 유량조절 밸브 후단의 Standpipe로 방출된다고 가정한다.

### 나. 계산방법

배관 내 흐름을 위한 공식들은 많으나 계통 Sizing 전산 프로그램인 Flow-Series에 적용되는 방법은 다르시(Darcy-Weisbach) 공식으로서 원형 배관의 경우 공식은 다음과 같이 표현한다.



$$h = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

여기서 h는 손실수두로 단위는 m 또는 ft, f는 단위가 없는 마찰계수, L은 길이로 단위는 m 또는 ft, D는 배관 안지름으로 단위는 m 또는 ft, v는 유속으로 단위는 m/sec 또는 ft/sec, g는 중력가속도로서 9.81m/sec<sup>2</sup> 또는 ft/sec<sup>2</sup>이다. 다르시 공식의 이점들은 다음과 같다.

- 원리에 기초를 두었다.
- 단위(차원)의 일치성
- 임의의 유체(oil, gas, brine, sludge)에 유효하다.
- 층류흐름 영역에서 분석적으로 유도된다.
- 층류흐름과 충분히 발달된 난류흐름 사이인 천이영역에서도 유효하다.
- 마찰 factor의 변화자료가 잘 정립되었다.

## 다. 입력 자료

주요 기기들의 입력 자료들은 다음과 같으며, 표 3.2.1은 입력 자료를 구체적으로 보여주고 있다.

- 1) 1차기기 냉각해수펌프 : 펌프성능곡선의 수두 및 유량 입력
- 2) 이물질 여과기 수두손실 : 1000mbar(14.5psi)
- 3) 1차기기 냉각수 열교환기 수두손실 : 10psi
- 4) 필수냉각기 수두손실 : 9.24psi
- 5) 비상디젤발전기 냉각기 수두손실 : 2.5psi
- 6) 오리피스 수두손실
  - . FO 127 : 108inch at 15000gpm
  - . FO 128 : 284.4inch at 824gpm
  - . FO 129 : 324inch at 2000gpm
- 7) 해수위
  - . LLWL: 54.33ft
  - . HHWL: 79.75ft

## 2. 계통 모델링

현재 설치되어 있는 배관 배치를 기준으로 1차기 냉각해수계통을 모델링 하였고 각 기기의 설계 자료는 공급자로부터 제공된 최종 자료를 사용하였다. 그림 3.2.1은 Flow-Series 모델링을 보여주고 있다.

그림 3.2.1 Flow-Series 모델링

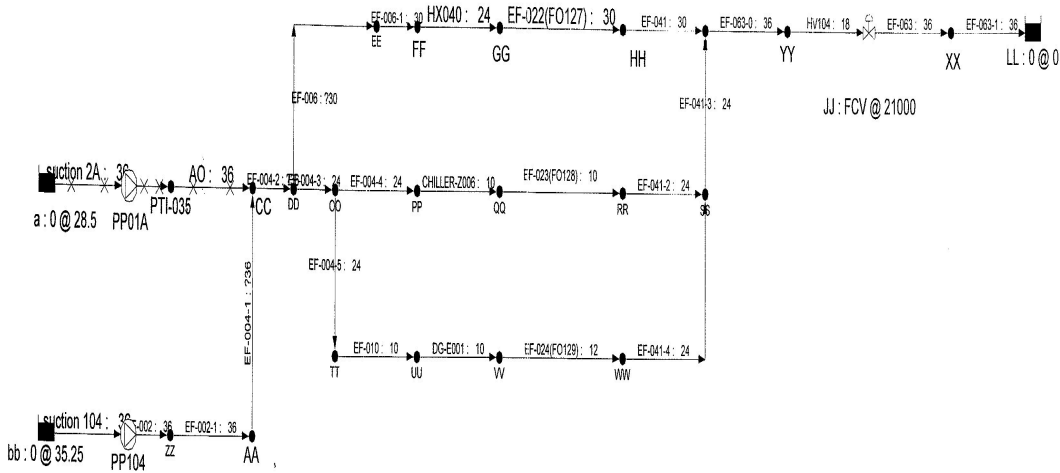


그림 3.2.1의 모델링에서 노드 DD로부터 노드 GG등을 포함한 노드 II까지는 기기냉각수열교환기 유로를 나타내고 있고 노드 OO로부터 노드 QQ등을 포함한 노드 SS까지는 펄수냉각기 유로를 나타내고 있으며 OO로부터 노드 VV등을 포함한 노드 SS까지는 비상디젤발전기 냉각기 유로를 나타내고 있다. 그림 3.2.1의 주요 지점들에 대한 설명은 다음과 같다.

- ▶ PP-104 : 1차기 냉각해수펌프(P104)
- ▶ AA : 노출배관과 매설 콘크리트관 분기점
- ▶ CC : P103 펌프 방출 유로와 연결 지점
- ▶ DD : 기기냉각수열교환기 유로와 분기점
- ▶ EE : 기기냉각수열교환기 유로(입구측)의 노출배관과 매설 콘크리트관 분기점
- ▶ FF : 기기냉각수열교환기 입구
- ▶ GG : 기기냉각수열교환기 출구 측 배관 크기 변경 지점

- ▶HH : 기기냉각수열교환기 유로(출구측)의 노출배관과 매설 콘크리트관 분기점
- ▶II : 기기냉각수열교환기 유로와 펴수 냉각기 유로 및 비상디젤발전기 냉각기 유로와의 연결 지점
- ▶YY : 유량조절밸브 입구
- ▶JJ : 유량조절밸브
- ▶XX : 유량조절밸브 후단 Standpipe 연결 지점
- ▶OO : 펴수냉각기 유로와 비상디젤발전기 냉각기 유로의 분기점
- ▶PP : 펴수냉각기 입구
- ▶QQ : 펴수냉각기 출구
- ▶RR : 펴수냉각기 유로(출구측)의 노출배관과 매설 콘크리트관 분기점
- ▶SS : 펴수냉각기 유로와 비상디젤발전기 냉각기 유로의 연결 지점
- ▶TT : 비상디젤발전기 냉각기 유로(입구측)의 노출배관과 매설 콘크리트관 분기점
- ▶UU : 비상디젤발전기 냉각기 입구
- ▶UU : 비상디젤발전기 냉각기 출구
- ▶WW : 비상디젤발전기 냉각기 유로(출구측)의 노출배관과 매설 콘크리트관 분기점

### 3. Cavitation 평가 결과

1차기기 냉각해수펌프의 양정은 저저해수위(LLWL)를 기준으로 유량조절밸브 후단의 Standpipe로 해수가 방출되는 것을 기준으로 산정되었고 각 유로에 설치된 오리피스를 통한 압력손실은 상기의 입력 자료에 기술되어 있다. 이를 기준으로 유량조절밸브가 감당하는 압력손실을 계산하여 동 압력손실에서 Cavitation 발생 여부를 평가하였고 추가로 해수위가 고고해수위(HHWL)일 때 유량조절밸브가 감당하여야 할 압력손실이 가장 크므로 고고해수위에서도 Cavitation 발생 여부를 평가하였다. 유량조절밸브가 감당하여야 하는 압력손실은 Flow-Series를 이용하여 계산하였고 동 압력손실에서 Cavitation 발생 여부는 Valve Flow Coefficients-Rockwell International에 기술되어 있는 내용을 참고하여 평가하였다. 또한 유량조절밸브가 감당하여야 하는 압력손실 및 Cavitation 발생 여부는 해수 유량 15,000 gpm, 18,000 gpm 및 21,000 gpm의 세 가지 경우에 대해 평가하였다. 참고로 1차기기 냉각해수계통의 설계유량은 21,000 gpm으로 발전소의 모든 운전 조건에서 동 유량이 기본적으로 유지되어야 한다.

상기의 해수 유량을 선정한 근거는 15,000 gpm은 1차기 냉각해수계통 정상운전 절차서(절차서 번호: 정상 531)에 따르면 저유량 경보 설정치이기 때문이고 18,000 gpm 및 21,000 gpm은 1차기 냉각해수펌프 계산서에 따르면 각각 정상운전 및 사고시 요구되는 최소 유량과 설계유량이기 때문이다. 운전일지에 따르면 1호기 A계열의 경우 저유량경보 설정치 근처에서 운전되는 것을 볼 수 있다. 정상운전동안 기기냉각수열교환기 유로를 통해서만 열부하가 제거되므로 동 유로에서 요구되는 유량인 15,000 gpm을 저유량 경보로 설정한 것으로 판단되나 정상운전동안 필수 냉각기 유로와 비상디젤발전기 냉각기 유로로도 해수가 공급되므로 이는 기기냉각수열교환기 유로로 15,000 gpm이 공급되지 않게 된다. 1차기 냉각해수계통은 안전성관련 계통으로 모든 운전 조건에서 운전 가능하고 각 유로의 필요 유량을 공급해야 하므로 저유량 경보 설정치는 사고시 요구 유량인 18,000 gpm으로 변경되는 것이 바람직하다고 판단된다. 참고로 정상운전시 해수가 89.6°F로 공급되고 기기냉각수 출구온도 95°F를 만족하는 조건에서 기기냉각수열교환기로부터 열부하를 제거하기 위해 요구되는 해수의 최소 유량은 13,800 gpm으로 아래 표 3.2.2와 같다.

표 3.2.1 1차기 냉각수 열교환기 열부하 제거에 요구되는 최소 해수유량

	TH1 -CCW Temp In (°F)	TH2 -CCW Temp Out (°F)	TC2 -NSCW Temp In (°F)	TC1 -NSCW Temp Out (°F)	Q -Duty (Btu/hr) (°F)	MCmin -CCW Flow (Btu/hr)	MCmax -NSCW Flow (Btu/hr)	TH1 -TH2 (°F)	U	A	UA (Btu/hr-°F)
Normal (DataSheet)	105.42	94.57	89.6	98.77	70,500,000	6,500,000	7,687,500	10.85	239.5	51,051	12,226,714.5
		<95				<b>13,000gpm</b>	<b>15,000gpm</b>				
Normal (Requird SX flowrate)	105.81	94.97	89.6	99.63	70,500,000	6,500,000	7,028,656	10.85	239.5	51,051	12,226,714.5
		<95					<b>13,000gpm</b>				
LOCA	134.26	108.57	96.8	118.52	167,000,000	6,500,000	7,687,500	25.70	239.5	51,051	12,226,714.5
		<120					<b>15,000gpm</b>				
LOCA (Requird SX flowrate)	145.20	119.50	96.8	137.79	167,000,000	6,500,000	4,074,583	25.70	239.5	51,051	12,226,714.5
		<120					<b>8,000gpm</b>				

유량조절밸브가 감당하여야 하는 압력손실 및 Cavitation 발생 여부를 해수 유량 및 해수위변화에 따라 평가한 결과를 요약한 결과는 표 3.2.2 유량조절밸브 압력손실 및 Cavitation 발생 평가결과와 같다.

표 3.2.2 유량조절밸브 압력손실 및 Cavitation 발생 평가결과  
- LLWL 경우

해수유량 (gpm)	펌프수두 (ft)	각 유로에서 유량(gpm)			HV104 요구수두 (psi)	Cavitation 발생	밸브개도
		CCW Hx	Chiller	D/G			
15000	156.8	12560	673.3	1767	31.31	Yes	45
18000	146.5	15072	807.6	2121	16.42	Yes	55
21000*	-	-	-	-	-	-	-

\* 최대 유량: 20,979 gpm

- HHWL 경우

해수유량 (gpm)	펌프수두 (ft)	각 유로에서 유량(gpm)			HV104 요구수두 (psi)	Cavitation 발생	밸브개도
		CCW Hx	Chiller	D/G			
15000	156.8	12560	673.3	1767	41.87	Yes	41
18000	146.5	15072	807.6	2121	26.98	Yes	51
21000	135.1	17583	942	2475	9.75	Yes	65

상기 결과는 해수 유량 및 해수위변화에 따라 유량조절밸브가 감당하여야 할 압력손실에서 Cavitation이 발생하고 있음을 나타낸다.

## 제 4 장 유량조절밸브 침식 개선방안

### 제 1 절 밸브 재질 개선

#### 1. 일반적 침식손상 방지 방안

일반적으로 부식은 정체된 부식용액에 의해 일어나는 현상이지만, 침식-부식 현상은 유체의 유동으로 인하여 금속 표면의 보호피막이 파괴되어 부식 속도가 더욱 증가되는 현상을 말한다.

이러한 침식-부식은 유속이 빠른 부위에서 발생되며, 유속에 따른 부식속도는 유속이 빠를수록 증가되는 것이 일반이나 재료의 종류에 따라 다양한 특성을 가지고 있다. 특히 스테인레스강의 경우는 유속이 증가 될 경우 부식속도가 감소한다. 이는 재료 표면에서의 부동태 피막이 유속증가에 따라 파괴되느냐, 더 잘 형성되느냐의 차이이다. 또한 Cavitation 부식이 유체의 유동 특성에 따라 발생될 수가 있으며 이는 침식-부식의 한 형태로서 재료 표면 가까이의 액체에서 기포가 발생한 후 소멸될 때 발생하는 충격파에 의한 표면 손상을 의미한다.

이러한 손상현상을 해소 또는 저감시키는 방안으로 재질적인 측면에서는 ① 사용재질의 교체 ② 금속표면의 피복 ③ 전기방식 설비의 이용 등이 있으며, 원인해소 측면에서는 ① 유속감소 ② Cavitation 현상해소 등을 고려할 수 있겠다.

본 설비에 적용할 수 있는 방식으로 사용재질의 교체와 금속 표면의 피복측면을 살펴해보겠다.

먼저 금속 표면의 피복에는 금속 피복 방법, 세라믹 및 피복방법, 유기피복(Organic Coation) 방법 등이 있으며, 이 가운데 유기피복을 다시 세분하면, 금속 표면을 도료 및 래커(Lacquer)를 비롯하여 고무(Rubber), 에폭시(EPOXY), 폴리에틸렌(Poly Etylene 및 Teflon 등으로 피복하는 방법 등이 있다.

고무피복 방법은 해수 설비의 부식 방지목적으로 많이 사용되고 있으며, 비교적 시공이 용이하고 가격이 저렴한 특성이 있으나 내마모성이 높지 않아 유속 또는 Cavitation 부식에 의한 손상을 입을 수 있다.

그리고 에폭시 피복은 고무보다 내마모성이 우수하며 해수배관류에 널리 사용되고 있으나 충격에 의해 균열이 잘 발생하는 단점이 있다.

한편 폴리에틸렌 피복은 고무나 에폭시 피복방법에서의 문제점인 내마모성과 내균열성이 매우 우수하여 해수배관에 권장할 수 있는 방법이나 이 또한 제작 및 공급 가능성 측면이 검토 되어야 한다.

다음으로 사용 재질의 교체는 여러 가지 재질을 고려할 수 있겠으나 내부식성(유속 제한 4ft/sec) 내균열성이 뛰어나고 내마모성도 비교적 우수한 스테인레스강(316L등급 수준)으로 교체할 수 있겠다. 물론 이 경우 기존 배관계에 끼치는 영향 및 공급 가능성, 보수 유지의 편리성 등이 고려되어야 한다.

## 2. 밸브 재질 변경 방안

### 가. 해수용 재료 일반

일반적으로 탄소강은 해수에서 내식성이 매우 낮다. 그러므로 해수용 재료로는 주로 니켈합금, 구리합금, 스테인레스강 및 티타늄 합금을 사용하고 있다.

니켈합금으로는 Ni-Cu, Ni-Cr 등이 있으며, Ni-Cu 합금은 Monel, Ni-Cr 합금은 Inconel이라고 부른다. 밸브 및 펌프용으로는 Monel 400[66.5% Ni, 31.5% Cu]을 사용하며, Valve-seat Inserts로는 Monel 404[54.5% Ni, 44.0% Cu]를 주로 사용한다.

구리합금으로는 구리에 아연(Zn)을 첨가한 황동(Brass)과 주석(Sn)을 첨가한 청동(Bronze)이 있다. 또한 황동에 알루미늄(Al)을 첨가한 알루미늄 황동(Aluminium Brass)이 있으며, 내해수성이 우수하여 복수기튜브, 급수가열기, 열교환기 튜브용으로 사용하고 있다. 구리에 니켈을 첨가한 큐프로니켈(Cupronickel)은 내해수성 및 내마모성이 우수하여 해수용 재료로 널리 사용하고 있다. 그러나 구리합금은 내마모성이 약해 해수 중에 빨이 많은 경우 손상될 가능성이 많다.

316L 등급이상의 스테인레스강은 기계적 성질, 내부식성 및 내마모성이 매우 우수하여, 해수용 재료로 널리 사용되고 있다. 스테인레스강은 탄소함량이 높을수록 내부식성이 저하되는 경향이 있으며, 이는 탄소가 내식성 향상을 위해 첨가한 Cr과 결합하여 Cr고갈지역을 형성시켜 공식(Pitting) 손상을 유발시키기 때문이다. 따라서 탄소함량이 높은 316(0.08% 이하)은 탄소함량이 낮은 L-grade인 316L(0.03% 이하)보다 내식성이 떨어진다. 그러므로 L-grade는 주로 용접성 및 내공식성의 향상을 위해 사용하고 있다. 그런데 스테인레스강은 유속이 낮을 경우(4ft/sec 이하) 공식현상에 의해 손상된다. 따라서 유속이 느리거나 장기간 해수에 잠기는 부분에는 사용하지는 안 된다.

티타늄 합금은 내식성이 우수하여 원자력발전소의 복수기 튜브로 사용되고 있으나,

가격이 비싸고, 열전도율이 떨어지는 단점이 있다.

일반적으로 유속이 빠른 경우에는 침식/부식 손상이 일어난다. 유속이 증가함에 따라 부식손상기구는 균일부식에서 침식/부식으로, 그리고 Cavitation 부식으로 바뀐다. 유속이 4 ft/sec 이하일 경우에는 침식/부식 손상이 거의 일어나지 않으며, 재료에 따른 침식/부식속도 차이는 없다. 그러나 유속이 27 ft/sec 이하일 경우에는 침식/부식 손상이 거의 일어나지 않으며, 재료에 따른 침식/부식속도의 차이는 없다. 그러나 유속이 27 ft/sec 이상일 경우에는 Titanium, Stainless Steel type 316, Monel, Cupronickel 의 순으로 침식/부식속도가 증가한다. Titanium의 침식/부식에 대한 저항성은 매우 우수하지만, 앞에서 언급한 바와 같이 가격이 비싼 단점이 있다. 또한 최근에는 Alloy 20, Hastelloy C 또는 ASTM A351 Duplex Stainless Steel 등을 적용하기도 한다.

### 나. 밸브 재질 변경 검토

현 밸브 재질인 Monel의 경우는 해수에서 내부식성이 뛰어나며, 내침식성도 비교적 우수한 편이나 유속이 증가하고 또한 유체내 모래와 같은 고체입자가 포함될 경우 급속히 침식속도가 증가하게 되므로 이와 같은 단점을 보완하기 위해 밸브 재질로 Super Stainless Stee (SR50A)을 적용하는 것이 바람직하다.

- 1) 재질의 내침식성에 미치는 성분은 Cr, Mo, N이 있는데 SR50A는 22~24%Cr, 6.0~6.8%Mo, 0.21~0.32%N의 성분을 포함하고 있어 Al-Bronze 및 304 스테인리스강에 비해서도 월등히 우수한 내침식성을 갖는 것으로 알려져 있다.
- 2) SR50A의 경우 해수에 대한 내부식성에 있어서 Monel과 같은 정도로 우수하며, 기계적 성질은 Monel 및 Al-Bronze 보다 우수하다.(표 4.1.1 참조)

표 4.1.1 SR50A, Monel 및 Al-Bronze의 기계적 성질

내 용	SR50A (ASTM A743 CK35MN)	Monel (N04400)	Al-Bronze (ASME SB148 C95200)
인장강도(ksi)	min. 83	min. 70	min. 65
항복강도(ksi)	min. 41	min. 25	min. 25
경도(HB)	-	-	min. 110
연신율	min. 35%	min. 35%	min. 20%



3) SR50A는 ASME Code Case N-736에 따라 안전성기기용으로 사용이 가능하므로 Body용 재질로 적용가능하다.

#### 다. 밸브 재질 경제성 비교

표 4.1.2는 SR50A를 적용하여 밸브 Disc 또는 전체를 교체할 경우의 비용을 탄소강 재질 대비로 평가한 자료이다.

표 4.1.2 밸브 재질별 경제성 비교

재질 규격	탄소강 기준 밸브 상대가격	탄소강밸브 기준 Disc 상대가격	비고
SR50A	10	2.5	
Monel	10	2.5	
SA216-WCB (탄소강)	1(기준)	0.25	Rubber Lining 또는 코팅제의 금액임

## 제 2 절 밸브 및 계통설계 개선

### 1. 계통측면의 밸브 손상기구

1차기기 냉각해수계통의 관련 열교환기 등에서 각각 냉각기능을 수행한 해수는 36 inch 토출측 공동배관을 통하여 원전 배수구로 배출되며, 이 공동 배관에 설치되어 있는 1차기기 냉각해수 유량조절밸브(EF-HV104/204)에 나타나고 있는 침식 등에 의한 손상 방지 방안을 도출하기 위해 계통적인 측면 밸브 손상(선정의 적절성) 측면을 검토하였다.

먼저 계통 검토 측면에서 보면, 1차기기 냉각해수계통의 정상운전시 냉각수 공급량(약 15,200~17,900 gpm)이 설계기준 냉각수 소요량(18,000 gpm)보다 적으며, 이는 계통내 압력손실 증가요인의 발생(오리피스-FO127~129 의 부적절한 설계 및 설치, 이물질 여과기 추가 등) 및 냉각해수펌프 성능 저하 등에 따른 것으로 추정된다.

또한 본 계통내의 1차기기 냉각해수 유량조절밸브는 기기냉각수 열교환기 출구에

있어서의 HGL을 어떠한 운전조건에 있어서도 120 ft 이상으로 유지하기 위해 부분개도(약 63°)로 운전하도록 초기 설계되었다. 그러나 오리피스가 추가 설치되어 밸브에서의 인위적인 압력손실 없이도 초기 설계 목적중 하나인 120 ft의 HGL을 유지할 수 있으므로 밸브의 부분개도 유지는 오히려 냉각해수 공급량 감소 및 밸브에 있어서의 Cavitation을 초래하고 있는 주요 원인으로 판단된다.

결론적으로 오리피스 FO127~129의 개선, 계통내 오염물질 제거 및 밸브 완전개방 운전 등으로 계통 설계기준 예상 소요 냉각해수 공급량(정상 배출기준, 20,000~21,600 gpm)에 만족한 조건이 되며, Standpipe를 통한 냉각해수 배출 운전조건도 충족될 수 있을 것으로 판단되며 이때 냉각해수펌프의 소요동력은 현재에 비해 증가할 것으로 판단된다.

다음으로 밸브 선정의 적절성 검토 측면에서 보면, 1차기기 냉각해수 유량조절밸브의 현 설계 상태 및 운전 특성과 현상에 대해 영광1,2호기 자체조사, 밸브 제작사의 밸브 크기계산 결과 및 Flow-Series를 이용한 밸브 압력손실 평가결과 등을 고려하여 검토해 볼 때, 63°의 부분개도로 운전하게 될 경우 밸브에 Cavitation 등에 의한 손상이 일어날 수밖에 없다고 보인다. 공정배관에 비해 Undersizing된 밸브를 선정하게 되는 주된 이유는 경제성 및 보수·유지의 편리성 등을 고려하는 것이 일반적 밸브 선정 방법인데 과도한 밸브 크기 축소는 Cavitation 등에 의한 손상 현상을 초래하게 된다. 설계특성을 볼 때 주어진 공정 조건에서의 18 inch 밸브 선정 및 63°개도 유지운전은 과도한 축소인 것으로 이해할 수 있으며 특히 밸브 크기 계산에서 Cavitation 현상이 발생하는 것을 컴퓨터 프로그램에 의한 계산 결과에서 확인할 수 있었다.

계통측면에서 손상 원인을 분석한 결과 유량조절밸브의 내부 손상은 유량조절밸브의 과도한 압력강하로 Cavitation이 발생하고 동 밸브 내에서 빠른 유속과 유체내에 포함되어 있는 고체입자에 의한 침식 손상에 기인한다고 추정할 수 있다.

## 2. 밸브 침식 개선방안

계통측면의 검토 결과 18 inch 이상의 밸브 크기에서 완전개방 운전이 가능한 것을 볼 수 있다. 여기에 제작사인 ENERTECH사의 경우 18 inch 밸브의 55~60°개도에서 Cavitation 현상이 발생되며, 참조 제작사인 VALTEK사의 경우 18 inch 밸브의 전 운전개도에서 Full Cavitation 현상이 발생되고, Flow-Series 계산결과도 18 inch 밸브

의 45~65° 개도에서 Cavitation 현상이 발생되며, 또한 당초 설계시의 밸브 교축운전 (Throttling Mode) 특성 유지 등을 고려할 때 밸브 크기를 24 inch로 변경하는 것이 바람직하다. 그러나 Valve Sizing은 제작자 계산 결과가 중요한데, 기존 설비 공급사인 ENERTECH사의 계산 결과 18 inch의 완전 개방 운전시 Cavitation이 발생되지 않는다고 하므로 1차적으로 본 논문 2장 2절 계통설계 고찰을 참조하여 18 inch 밸브의 완전 개방으로 계통을 시운전하여 Cavitation 발생현상을 검토한 후, 만약 발생치 않을 경우 이 방안으로 운전개선을 하는 것이 보다 경제적인 방안이다.

지금까지의 내용을 종합해볼 때 밸브 및 계통설계측면에서 유량조절밸브의 내부부품 손상 문제를 해소하기 위한 방안으로 다음과 같은 2가지 안이 있다. 동 방안들은 유량조절밸브의 내부부품 손상에 국한하여 제시된 해결책으로 영광1,2호기의 경우 정상운전 및 사고시 요구되는 최소 유량인 18,000 gpm이 흐르지 않은 바 1차기기 냉각해수의 저유량 문제가 우선적으로 해결된 후 동 방안이 적용되어야 한다고 판단된다. 이는 1차기기 냉각해수 유량에 따라 오리피스에서 추가적으로 감당하여야 할 압력손실이 변화하기 때문이다.

참고로 각 유로에 설치된 오리피스는 시운전동안 유량 평형 시험을 수행한 결과로 오리피스의 Bore 직경이 결정되었기 때문에 교체하지 않는 것이 바람직하나 현장 실사 결과 유량조절밸브의 감소된 수두를 감당하기 위한 신규 오리피스 설치 장소가 적당하지 않아 각 유로에 설치되어 있는 오리피스가 추가 압력손실을 감당하는 것으로 고려하였다.

#### 가. 제 1안 : 밸브 크기 유지(18 inch) + 오리피스 교체(요구 수두 증가)

밸브 크기는 현재 크기인 18 inch를 유지하나 동 밸브에서 Cavitation이 발생하지 않도록 요구 수두는 감소시키고 1차기기 냉각해수가 공급되는 각 유로의 열교환기 및 냉각기 후단에 설치된 오리피스가 밸브의 감소된 수두를 추가로 감당하는 방안이다. 상기에서 검토한 유량조절밸브의 적정 개도(65° 기준)에 해당되는 압력손실을 기준으로 각 유로에 설치된 오리피스가 추가로 감당해야 할 결과는 표 4.2.1과 같다.

표 4.2.1 오리피스가 추가로 감당할  $\Delta P$

해수수위	유량 (gpm)	유량조절밸브		오리피스 추가 요구 $\Delta P$ (psi)	비고
		요구 $\Delta P$ (psi)	개도65° $\Delta P$ (psi)		
LLWL(54.33')	15000	31.31	5.53	25.78	
	18000	16.42	7.97	8.45	
	21000	-	-	-	
HHWL(79.75')	15000	41.87	5.53	36.34	
	18000	26.98	7.97	19.01	
	21000	9.75	6.22 <sup>(1)</sup>	3.53	

Note 1. 개도 70° 기준

**나. 제 2안** : 밸브 크기 증가(24 inch) + 오리피스 교체(요구 수두 증가)

밸브에서의 고유속을 완화하기 위해 밸브 크기는 24 inch로 증가시키나 동 밸브에서 Cavitation이 발생하지 않도록 요구 수두는 감소시키고 1차기 냉각해수가 공급되는 각 유로의 열교환기 및 냉각기 후단에 설치된 오리피스가 밸브의 감소된 수두를 추가로 감당하는 방안이다.

## 제 5 장 결 론

1차기기 냉각해수계통 유량조절밸브는 발전소 주요 열교환기에 설계유량을 만족하는 해수를 공급하기 위하여 부분 개도상태로 운전할 수밖에 없는 환경에 놓여 있다. 밸브 부분개방 운전과 밸브와 밸브 전·후단 배관의 직경 차이로 밸브 후단에서 Cavitation에 의한 밸브 Disc, 스템 등 내부부품에서 침식이 발생하여 밸브 정비 및 교체가 빈발하고 있다.

국내 1차기기 냉각해수 유량조절밸브 손상의 대표적인 발전소인 영광1,2호기의 계통 및 밸브에 대한 설계자료, 운전 현황 등을 검토하고 Cavitation에 의한 밸브 손상여부를 정량적으로 확인하고자 계통 Sizing 및 Cavitation 계산 프로그램인 Flow-Series 모델링을 수행하였고, 그 결과 현재의 계통구조와 운전상황에서는 밸브 후단에서 압력강하가 발생하고 이로 인해 Cavitation에 의한 밸브침식이 발생하는 것으로 평가되었다.

본 연구에서는 이러한 밸브침식을 개선하고자 1단계로 밸브 재질을 현재의 Monel보다 인장, 항복강도 등의 기계적 성질이 우수하여 내부식성 및 내침식성이 보다 확보되는 SR-50A로 변경하여 계통의 불안요소를 조속히 해소하고, 2단계로 밸브에서의 고유속과 압력강하의 완화를 통해서 Cavitation이 발생하지 않도록 밸브 및 계통설계 측면에서 첫째, 밸브 크기를 현재의 18 inch로 유지한 채 오리피스스를 교체하여 오리피스가 밸브의 감소된 수두를 추가로 감당하는 방안과 둘째, 밸브 크기를 기존의 18 inch에서 24 inch로 확대하고 증가시키고 열교환기 후단의 오리피스가 밸브의 감소된 수두를 추가로 감당하는 방안을 제시하였다.

본 연구는 영광1,2호기뿐만 아니라 국내외 원전의 1차기기 냉각해수 유량조절밸브 손상에 적용될 수 있음은 물론, 본 연구의 방법론은 밸브와 배관 등에서 발생하는 Cavitation에 의한 기기 손상 및 감육을 개선하는 데에도 응용될 수 있을 것으로 기대한다.

## 참고문헌

- [1] “영광1,2호기 Station Manual”, 한국수력원자력(주)
- [2] “영광1,2호기 P&ID”, 한국수력원자력(주)
- [3] 3-M-EF-128.1, 영광1,2호기 1차기기 냉각해수계통 Pumps 계산서, 한국수력원자력(주)
- [4] 3-C-ZY-200, 영광1,2호기 1차기기 냉각해수계통 Energy Grade Line and System Curves, 한국수력원자력(주)
- [5] 3-M-VEF-228, 영광1,2호기 1차기기 냉각해수계통 Pumps Design Parameters, 한국수력원자력(주)
- [6] 영광1,2호기 1차기기 냉각해수계통 배관 Isomeric Drawing, 한국수력원자력(주)
- [7] 영광1,2호기 1차기기 냉각해수계통 정상운전 절차서(정상 531), 한국수력원자력(주)
- [8] Valve Handbook - Mcgraw-Hill/Osborne, Mcgraw-Hill Book Company, 2004
- [9] Pump Handbook - Igor J. Karassik / Mcgraw-Hill, 4th Edition
- [10] 3-M-VEF-228, 영광1,2호기 Verification of NSCWS Pump Parameters, 한국수력원자력(주)
- [11] 3-J-EF-E06, Rev.1, 영광1,2호기 Restricting Orifices Data Sheet, 한국수력원자력(주)
- [12] 영광1,2호기 1차기기 냉각해수계통 시운전 기록집, 한국수력원자력(주)
- [13] 영광1,2호기 Design Criteria, 한국수력원자력(주)
- [14] 영광1,2호기 원자로 운전일지, 2007. 3 ~ 8월, 한국수력원자력(주)
- [15] Valve Flow Coefficients-Rockwell International
- [16] 1차기기 냉각수 열교환기 Data Sheet, 한국수력원자력(주)
- [17] Essential Chiller Data Sheet, 한국수력원자력(주)
- [18] EDG Jacket Cooler Data Sheet, 한국수력원자력(주)

## 감사의 글

학창시절에 완성하지 못한 학문에 대한 향수와 십 수 년의 회사생활동안 항상 부족하다고 느껴온 학술지식을 보충해보겠다는 생각만으로 만학의 길로 뛰어 들었던 때가 엇그제 같습니다. 회사업무와 학업의 병행이라는 현실의 벽 앞에서 처음의 열정이 식어갈 때마다 저를 격려하고 이 자리까지 이끌어 주신 모든 분들께 머리 숙여 감사의 말씀을 올립니다.

‘口耳之學’의 수준에 머물러 있던 저를 무한한 애정으로 채찍질하며 ‘格物致知’의 방법을 가르쳐 주신 김진원 교수님께 감사드리며, 논문 심사 시 지도편달을 아끼지 않으신 송종순 교수님, 나만균 교수님과 깊이 있는 배움의 길을 보여주신 김승평 교수님, 정운관 교수님 그리고 이경진 교수님께 감사드립니다.

바쁜 일정에도 불구하고 따뜻한 조언과 생생한 지식을 가르쳐주신 강재열 영광원자력본부장님과 전제근 소장님, 장응수 소장님, 김대겸 소장님, 양창호 실장님 그리고 양연석 실장님께 감사드리며, 여러 가지 회사 현안에도 불구하고 배움의 시간을 갖도록 항상 배려해주고 학업에 정진할 수 있도록 지원을 아끼지 않으신 정병호 팀장님께 감사드립니다.

저 혼자라면 어려웠을 이 배움의 길을 같이 가면서 격려해주고 어려울 때마다 힘이 되어준 방극진 차장님과 동창생들, 그리고 선배님들께 감사드립니다.

끝으로 온갖 가사, 육아 그리고 직장생활로 항상 바쁘면서도 회사업무와 학업을 핑계로 집안일을 소홀히 하는 남편을 이해해주며 논문일정 등을 선생님처럼 챙기며 독려해준 사랑하는 아내 전주진, 같이 지내주는 시간이 적은 아빠지만 항상 힘을 북돋아준 세상 누구보다도 예쁜 딸 서현 그리고 만학의 길을 걷고 있는 자식이 혹여 힘에 부칠까 걱정하시던 부모님께 본 지면을 통해 삼가 감사의 말씀을 올립니다.

2010년 11월  
김 정 욱 올림

## 저작물 이용 허락서

학 과	원자력공학과	학 번	20097284	과 정	석사
성 명	한글 김 정 욱	한문 金 政 郁	영문 Kim, Jeung Wook		
주 소	광주광역시 서구 치평동 쌍용금호아파트 201동 1804호				
연락처	e-mail : kimjw3@khnp.co.kr				
논문제목	한글 : 원전 1차기 냉각해수계통 유량조절밸브 침식 개선에 대한 고찰				
	영문 : Investigation on the Improvement of Erosion at Flow Control Valve in Nuclear Service Cooling Water System				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함(다만, 저작물의 내용변경은 금지함)
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함

동의여부 : 동의( ○ )    반대(    )

2010 년 11 월 일

저작자 : 김 정 욱 (인)



**조선대학교 총장 귀하**