



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](#)

2021년 08월

석사학위논문

원인 분석을 통한 원자로냉각재계통
역지밸브 침식/부식 개선방안 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

신 동 옥

원인 분석을 통한 원자로
냉각재계통 역지밸브
침식/부식 개선방안 연구

A Study on the Improvement of Erosion and Corrosion of Check Valves Installed in Reactor Coolant System by Root Cause Analysis

2021년 08월 27일

조선대학교 대학원

원자력공학과

신 동 옥

원인 분석을 통한 원자로
냉각재계통 역지밸브
침식/부식 개선방안 연구

지도교수 김진원

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2021년 04월

조선대학교 대학원

원자력공학과

신 동 욱

신동옥의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 이경진 (인)

위 원 조선대학교 교수 나만균 (인)

위 원 조선대학교 교수 김진원 (인)

2021년 05월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	vii
제 1 장 서 론	1
제 1절 연구배경	1
제 2절 연구목적 및 방법	3
제 2 장 원자로 냉각재 고온관 역지밸브 고찰	4
제 1절 원자로 냉각재 고온관	4
제 2절 역지밸브 검사 및 손상이력	7
제 3 장 고온관 역지밸브 부식원인 고찰	11
제 1절 부식원인 정비자료수집 및 분석	11
제 2절 부식원인 운전자료 분석	13
제 3절 역지밸브 밀봉 금속재 부식분석 고찰	19
제 4절 밸브 유동에 따른 분석	20
제 4 장 손상원인에 따른 금속변형 해석	23
제 1절 밸브설치 모델해석	23
제 2절 역지밸브 변형해석 및 평가	31
제 3절 밸브 변형해석에 따른 결과도출	37
제 4절 손상과정 분석	39
제 5절 손상원인 분석	42
제 5 장 손상분석에 따른 해결방안	45
제 1절 역지밸브 설계 및 기능적 변경	45
제 2절 역지밸브 운전방법 개선	48
제 6 장 결론	49
참고문헌	50

표 목 차

표 2.1	표준원전 고온관 역지밸브(밸브-A/B) 형식	6
표 2.2	HB3 역지밸브 검사 및 보수이력	7
표 2.3	HB4 역지밸브 검사 및 보수이력	8
표 3.1	동일표준원전 역지밸브 온도측정 자료(고온관 온도 측정된 자료)	14
표 3.2	역지밸브(HB4 밸브-A) 운전자료 분석(10차 점검)	15
표 3.3	역지밸브(HB4 밸브-B) 운전자료 분석(10차 점검)	16
표 3.4	역지밸브(HB3 밸브-A) 운전자료 분석(11차 점검)	17
표 3.5	역지밸브(HB3 밸브-B) 운전자료 분석(11차 점검)	17
표 3.6	진동 측정자료-속도(단위: mm/s)	21
표 3.7	진동 측정자료-진폭 (단위: μm)	21
표 4.1	역지밸브 누설량 별 디스크 온도분포	28
표 4.2	역지밸브 주요 부품별 재질	32
표 4.3	ASME SA182 F-316 열팽창계수 및 열전도계수	33
표 4.4	Stellite 6 열팽창계수	33
표 4.5	Stellite 6 탄성계수	34
표 4.6	Stellite 6 강도 및 밀도	34
표 4.7	밸브 설치위치 변경 전, 후 해석결과 비교	38
표 4.8	원인분석 종합	44
표 5.1	역지밸브 위치 변경 전후 배관길이	46
표 5.2	역지밸브 위치 변경 전후 온도분포 해석결과 비교표	46

그림 목 차

그림 1.1	역지밸브 및 원자로 냉각재 고온관계통 설치 요약도	1
그림 2.1	발전소 계통 요약도	4
그림 2.2	안전주입계통 역지밸브 설치 요약도	5
그림 2.3	정지냉각 계통 요약도	5
그림 2.4	역지밸브(밸브-A/B) 시트 손상상태 검사결과	8
그림 2.5	역지밸브(HB3 밸브-A/B)10차 디스크 손상검사	9
그림 2.6	역지밸브(HB4 밸브-A)10,11차 시트검사	9
그림 2.7	역지밸브(HB3 밸브-B)11차 디스크, 시트검사	9
그림 2.8	역지밸브(HB4 밸브-A) 시트검사 비교	10
그림 2.9	역지밸브(HB4 밸브-A) 디스크검사 비교	10
그림 2.10	역지밸브(HB3 밸브-A/B) 디스크검사 비교	10
그림 3.1	역지밸브(HB4 밸브-A) 7차 검사	11
그림 3.2	역지밸브(HB4, 7차) 시트검사	12
그림 3.3	계통 압력계(PI) 설치 요약도	15
그림 3.4	역지밸브(밸브-A/B) 손상 사진	19
그림 3.5	분기관외 Vortex Chattering 생성 과정	20
그림 4.1	역지밸브(밸브-B) 설치위치 변경 전 계산영역	24
그림 4.2	역지밸브(밸브-B) 설치위치 변경 후 계산영역	25
그림 4.3	역지밸브(밸브-B) 설치위치 변경 전 온도분포	25
그림 4.4	위치 변경전(밸브-B) 밸브 디스크 단면 온도분포	26
그림 4.5	역지밸브(밸브-B) 밸브위치 변경 후 온도분포	27
그림 4.6	위치 변경 후 역지밸브(밸브-B) 디스크 단면 온도분포	27
그림 4.7	역지밸브 전단 단열재가 없을 때 밸브 디스크단면 온도분포	27
그림 4.8	스윙타입 역지밸브 일반적인 형상(디스크와 힌지 연결부위)	31
그림 4.9	디스크와 시트링의 접촉면	32
그림 4.10	역지밸브 유한요소 모델	35

그림 4.11	역지밸브의 열해석 결과	36
그림 4.12	열하중에 의한 역지밸브의 변형	36
그림 4.13	밸브설치 위치 변경 후 유동해석 결과 온도분포	37
그림 4.14	밸브 설치 위치 변경 후 열해석 및 열하중에 의한 결과	38
그림 4.15	밸브 시트와 디스크의 밀봉상태	39
그림 4.16	틈새부식으로 인한 손상	40
그림 4.17	표준원전 역지밸브 검사결과(HB3,4 10차) 디스크 손상상태	41
그림 4.18	역지밸브(HB3 밸브-A) 11차 검사결과 디스크 손상 상태	41
그림 5.1	역지밸브 위치변경 전	47
그림 5.2	역지밸브 위치변경 후	47

ABSTRACT

A Study on the Improvement of Erosion and Corrosion of Check Valves Installed in Reactor Coolant System by Root Cause Analysis

Shin, Dong Ok

Adviser : Prof. Kim, Jin Weon, Ph. D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

Engineered Safety Features Actuation System(ESFAS), a part of nuclear power plant protection system of Korean Standard Nuclear Power Plant(KSNPs), is designed to inject borated water into the reactor and to ensure long-term cooling of the core, when Loss-Of-Coolant Accident(LOCA) occurs. The check valve installed in the ESFAS system injects borated water into the reactor coolant system and prevents the injected water from flowing back to the Safety Injection(SI) system. But the check valves in many KPNPs are replaced due to erosion and corrosion damage of metal sealing parts.

Therefore, the objective of this study is to perform the root cause analysis of the erosion and corrosion damage to propose a corrective actions, and to verify its effectiveness. For this objective, this study modeled the check valve and SI hot leg and analyzed temperature distribution of the check valve and SI hot leg through the thermo-hydro analysis. Using the temperature distribution, the deformation of the contact surface between check valve sheath and disc due to the temperature difference and moment from piping structure was analyzed. In particular, the physical phenomena

and scenario of damage observed at hot leg check valve were analyzed based on the operating experience of HB unit 3,4.

In addition, the influencing factors affecting erosion and corrosion damage of the check valve, such as material and environmental characteristics at different check valve positions, were analyzed. From the analysis results, it was found that the root cause of erosion and corrosion damage is a failure of passivation film by cavitation and flashing as the result of the operating condition of reactor coolant hot leg, and that the failure of passivation film is enhanced under high temperature and high pressure water environment.

Based on the results of root cause analysis, the following corrective action to mitigate the erosion and corrosion damage at hot leg check valve were derived and applied to the operation of KSNPs.

- (i) Changing valve position to reduce the downstream temperature of check valve
- (ii) Keeping the pressure of SI pipe over the saturated steam pressure
- (iii) Charging water with a constant flow rate to SI pipe

After applying the corrective action to the operation of KSNPs, it was indicated that the replacement and serious maintenance of the check valve due to the erosion and corrosion damage have been reduced remarkably. Thus, it can be concluded that the root cause analysis and corrective actions proposed by this study are effective. Since long-term operating experience is insufficient, however, it is believed that the effectiveness of the corrective actions will be more clearer as long-term operation experience is accumulated.

제 1 장 서 론

제 1절 연구배경

국내 원자력발전소는 운영 중인 발전소 24기 중 한국표준형 원전모델은 16기가 운영 중이다.

원자력발전소에는 원자로냉각재 상실사고 시 원자로 노심에 붕산수를 주입하여 장기 노심 냉각을 통한 원자로 안전을 확보하고 발전소 정지 시 원자로냉각재계통(Reactor Coolant System, RCS)을 냉각시키기 위한 안전주입계통이 설계, 반영되어 있으며, 이 계통에는 발전소 정상 운전 중 고온, 고압, 고방사성 유체인 원자로냉각재가 안전주입계통으로 역류하는 것을 방지하기 위한 목적으로 RCS 압력경계 역지밸브들이 설치되어 있다. 이러한 원자로냉각재 누출사고를 방지하기 위해 밸브의 내, 외부 차단검증 시험을 수행하고 있다.

이러한 RCS 압력경계 차단검증 시험 결과 그림.1.1 계통 요약도에 도시된 것처럼 RCS 1차 압력경계인 안전주입 역지밸브의 내부누설이 발생하고 있음을 발견하게 되었다.

이러한 한국표준형 원전(Korean Standard Nuclear Power Plants, KSNPs)의 고온관 역지밸브는 2000년 이후부터 원자로냉각재 고온관에 설치된 안전주입(Safety Injection, SI) 역지밸브의 부속품인 디스크와 시트(Disc & Seat)에서 침식 및 부식 등이 빈번하게 발생하여 RCS 압력경계 차단능력을 위협하게 되었다.

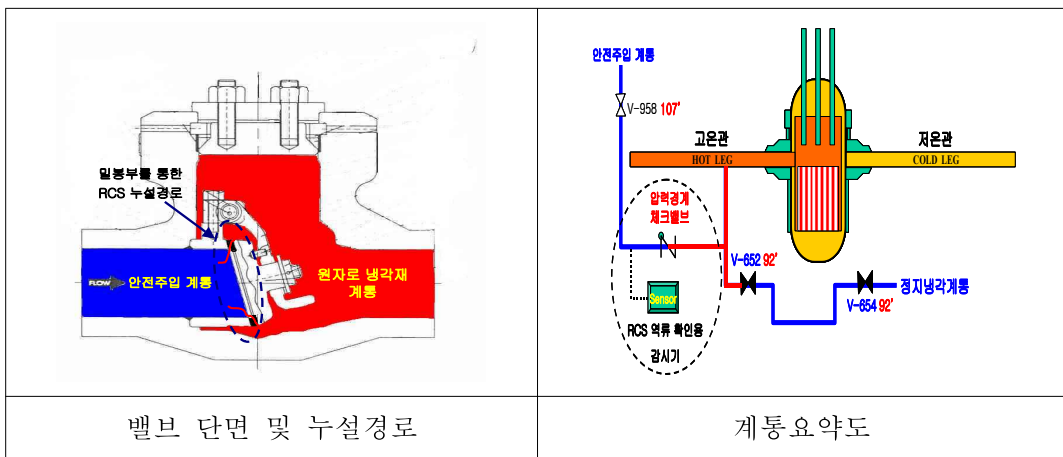


그림 1.1 역지밸브 및 원자로냉각재 고온관계통 설치 요약도

특히, 한국표준형원전에서는 고온관 역지밸브의 설치 위치가 원자로냉각재계통 노심이하(Mid-Loop, 약 32m)인 (EL-29.2m)에 설치되어 있어 밸브 정비환경 조건이 열악한 상태(고방사선 피폭 및 원자로에서 핵연료 전체 인출)에 있으므로 역지밸브의 밀봉부 손상은 RCS를 격리하여 압력경계 건전성을 유지해야하는 안전기능저하와 점검 인원의 방사능 피폭증가 등으로 안전성 및 유지관리 비용에 많은 영향을 주고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 역지밸브 디스크 및 시트 손상원인과 운영 개선방안을 도출 하여 RCS 안전기능 및 역지밸브 격리기능을 향상시켜 안정운영에 기여하고자 연구하게 되었다.

제 2절 연구목적 및 방법

본 연구의 목적은 원자력발전소에서 가장 중요하게 관리하고 있는 원자로냉각재계통으로 주입되는 안전주입 역지밸브에서 빈번하게 손상되는 사례가 한국표준형 원전뿐만아닌 경수로 원전에서 광범위하게 나타나고 있어 역지밸브 손상문제를 해결하기 위해 개선방안을 고찰하고 원인분석을 통한 조치 결과 자료를 수집, 분석하여 개선방안 및 결과를 제시하여 고온관 역지밸브에 설비개선 및 운전방법 적용을 통한 원자로냉각재계통 압력경계 역지밸브 침식/부식 영향분석 평가, 확인함으로써 계통의 건전성과 신뢰성을 확보하고자 한다.

이러한 고온관 안전주입 역지밸브 손상문제를 해결하기 위해 아래와 같은 방법으로 연구를 진행하였다.

(i) 배관과 역지밸브를 모델링한 후 고온관 배관 및 역지밸브 밀봉부에 대한 온도를 열유체 컴퓨터 해석프로그램으로 분석하였고 그 결과에 대한 해석과 원자로냉각재계통 고온관의 높은 온도 차와 배관으로부터 모멘트가 작용할 때 역지밸브 시트와 디스크면의 변형 경향을 ANSYS 프로그램을 이용하여 분석하였다.

(ii) 원자로냉각재계통의 역지밸브 정비 경험을 바탕으로 정비 자료 및 검사 결과 등 발전소 운전 자료를 취합, 분석하였고, 손상된 부품재료의 특성인 스테인리스강(Stainless Steel)의 특성과 밀봉면에 경면 처리한 스텔라이트(Stellite)재료의 침, 부식 및 봉산부식 연구 자료를 수집하여 검토하였다.

(iii) 원자로냉각재계통 고온관 역지밸브에서 발생하는 물리적 현상을 분석하여 정리하였으며, 손상발생 시나리오를 분석을 검토하여 문제해결 방안을 위해 심도있게 근본 원인을 도출하였다.

제시된 해결 방법을 원자로냉각재계통 고온관 압력경계 역지밸브 운영 및 밸브 점검에 적용하였으며, 적용 결과를 제시하고자 한다.

제 2 장 원자로냉각재 고온관 역지밸브 고찰

제 1절 원자로냉각재 고온관

1. 고온관 역지밸브 기능

원자로냉각재 안전주입 고온관 역지밸브의 기능은 다음과 같으며, 그림 2.1 계통요약도에 도시하였다.

가. 고압안전주입(HPSI) 및 저압안전주입(LPSI)계통에 설치되고 원자로냉각재 유로(RCS Loop)로 공급하는 배관의 1차 압력경계 밸브로써, 그림 2.2와 같이 원자로냉각재가 안전주입계통으로 역류되지 않도록 격리시켜 주는 기능을 수행한다.

나. 원자로냉각재 확인 누설량이 3.8L/min(1gpm)을 초과할 경우 4시간 안에 복구하거나 복원 불가능 할 경우 6시간 안에 발전소를 고온대기 상태로 유지해야하는 안전성관련 밸브이다.

다. 고압안전주입 및 저압안전주입계통의 유로를 원자로냉각재계통의 각 Loop로 공급하는 배관에 설치되어 원자로냉각재가 안전주입계통으로 역류되지 않도록 격리시켜 주는 기능을 수행한다.

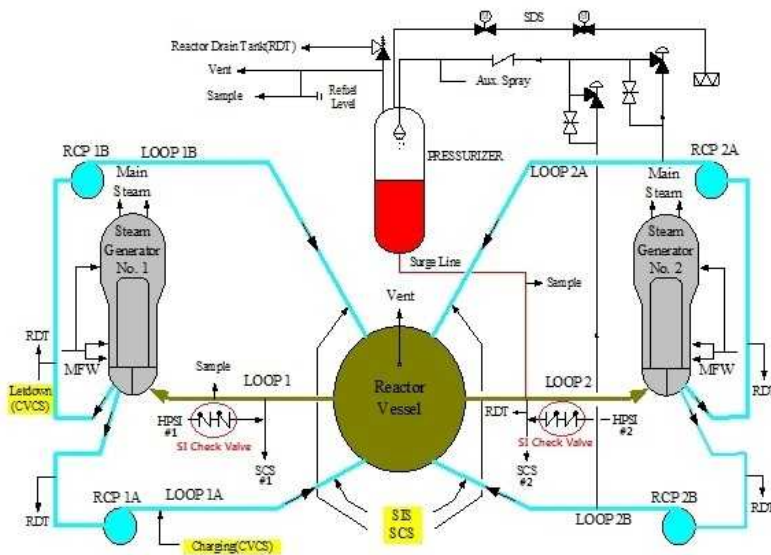


그림 2.1 발전소계통 요약도

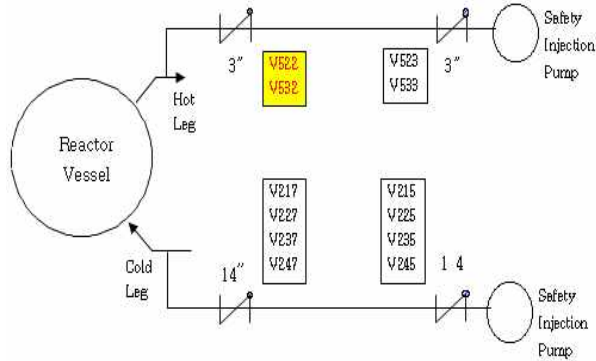


그림 2.2 안전주입계통 역지밸브 설치 요약도

라. 원자로냉각재 고온관 역지밸브는 원자력발전소 원자로냉각재 외부누출과 같은 설계기준사고 시 원자로 노심에 봉산수를 주입하는 비상 자동 봉산수 주입모드계통 운전과 원자로냉각재를 감압 및 감온시켜 장기 노심냉각(붕괴열 제거)을 통한 안전성 확보 목적으로 충분한 정지여유도를 확보하도록 되어 있다. 그림 2.3 정지냉각계통 요약도에서 도시된 바와 같이 정지냉각계통에 역지밸브는 정상운전 시 원자로냉각재 역류로 인한 안전주입계통의 상실을 방지하는 중요한 목적을 가진 밸브이다.

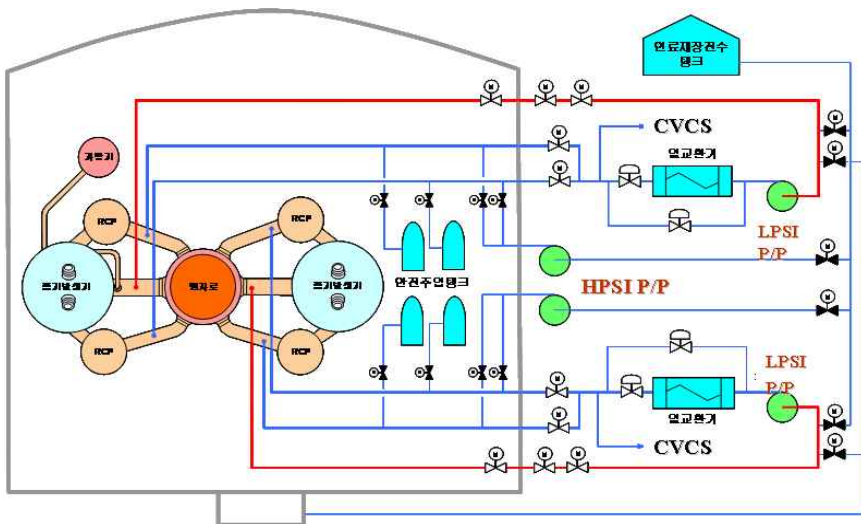


그림 2.3 정지냉각계통 요약도

2. 고온관 역지밸브 사양

표준원전에 설치된 고온관 역지밸브는 호기당 2대가 설치되어 있으며 제작사양은 아래 표 2.1과 같다.

표 2.1 표준원전의 고온관 역지밸브(밸브-A/B)

항 목	내 용
밸브-A	HPSI HDR#1 → RCS HOT Leg #1
밸브-B	HPSI HDR#2 → RCS HOT Leg #2
밸브 형식	Swing Check Valves(Pressure seal type)
밀봉부(Disc & Seat)	SUS F316 SA-182 Seal Face Stellite No.6
사이즈	7.62cm 단조형 밸브
밸브 제작사	Velan Ltd CO.
설계 온도/압력	343℃ / 175 kg/cm ²
품질등급	Q, Class I

제 2절 역지밸브 검사 및 손상이력

1. 검사 및 정비 이력

역지밸브(밸브-A/B)는 매회 정비기간마다 분해 검사를 수행하였으며 검사 결과 디스크 및 시트가 손상되었음이 발견되어 부품정비 또는 밸브 전체를 교체하여 왔다. 역지밸브(밸브-A/B) 검사 및 보수 현황은 다음과 같다.

표 2.2 HB3 역지밸브 검사 및 보수이력

점검차수	밸브-A		밸브-B	
	주요 보수	손상 정도	주요 보수	손상 정도
4차	Disc & Seat lapping	경미한 손상	Disc & Hinge pin 교체	Disc 중대한 손상
5차	Disc & Hinge pin 교체	Disc 중대한 손상	Disc & Hinge pin 교체	Disc 중대한 손상
6차	Disc & Seat lapping	경미한 손상	Disc & Seat lapping	경미한 손상
7차	Disc & Seat lapping	경미한 손상	Disc & Seat lapping	경미한 손상
8차	밸브교체	Disc & Seat 중대한 손상	밸브교체	Disc & Seat 중대한 손상
9차	Disc & Hinge pin 교체	Disc 중대한 손상	Disc & Hinge pin 교체	Disc 중대한 손상
10차	Disc & Hinge pin 교체	Disc 중대한 손상	Disc & Hinge pin 교체	Disc 중대한 손상
11차	Disc & Hinge pin 교체	Disc 중대한 손상	Disc & Seat lapping	경미한 손상

표 2.3 HB4 역지밸브 검사 및 보수이력

점검차수	밸브-A		밸브-B	
	주요 보수	손상 정도	주요 보수	손상 정도
4차	Disc & Seat lapping	경미한 손상	Disc & Seat lapping	경미한 손상
5차	Disc & Hinge pin 교체	Disc 중대한 손상	Disc & Hinge pin 교체	Disc 중대한 손상
6차	Disc & Seat lapping	경미한 손상	Disc & Seat lapping	경미한 손상
7차	Disc & Hinge pin 교체	Disc 중대한 손상	Disc & Hinge pin 교체	Disc 중대한 손상
8차	Disc & Seat lapping	경미한 손상	Disc & Seat lapping	경미한 손상
9차	밸브교체	Disc & Seat 중대한 손상	밸브교체	Disc & Seat 중대한 손상
10차	Disc & Seat lapping	경미한 손상	Disc & Hinge pin 교체	Disc 중대한 손상

2. 손상이력

가. 역지밸브 손상이력 분석

역지밸브의 시트 밀봉부 손상은 불규칙적이며, 그림 2.4의 밸브 A/B에 대한 연속된 점검(5차~6차)을 통해 확인하였듯 대체적으로 비슷한 형태의 손상 정도를 나타낸다. 밸브 정비밸브 시트 접촉면 전체 7mm중 4mm 정도가 침/부식되어 있고 약 3mm 정도의 접촉면만 유지된 것으로 판단된다.

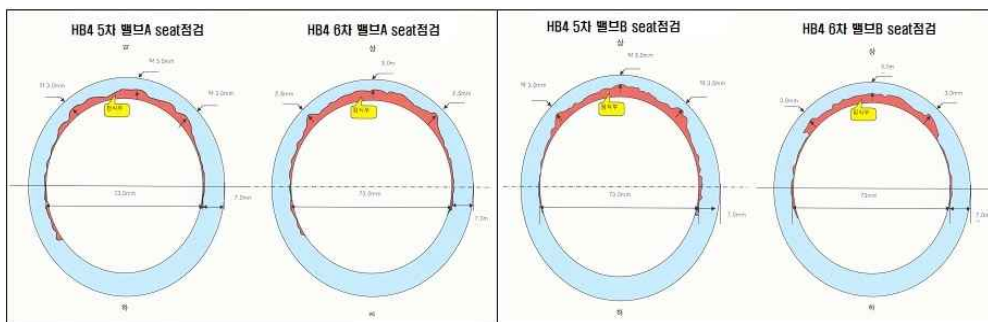


그림 2.4 역지밸브(밸브-A/B) 시트손상 상태 검사결과

나. 역지밸브 손상 사진

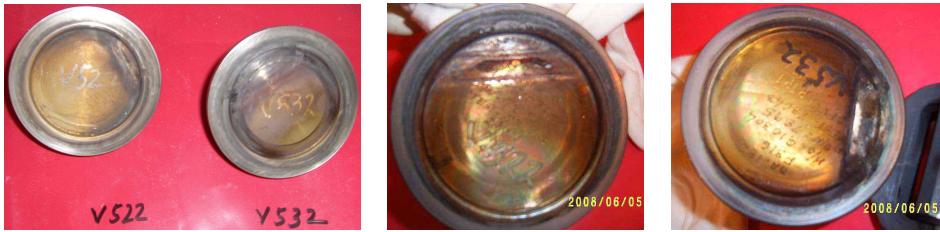


그림 2.5 역지밸브(밸브-A/B) 디스크 손상 상태 검사결과(HB3-10차)



그림 2.6 역지밸브(밸브-A)시트 검사결과(HB4-10,11차)

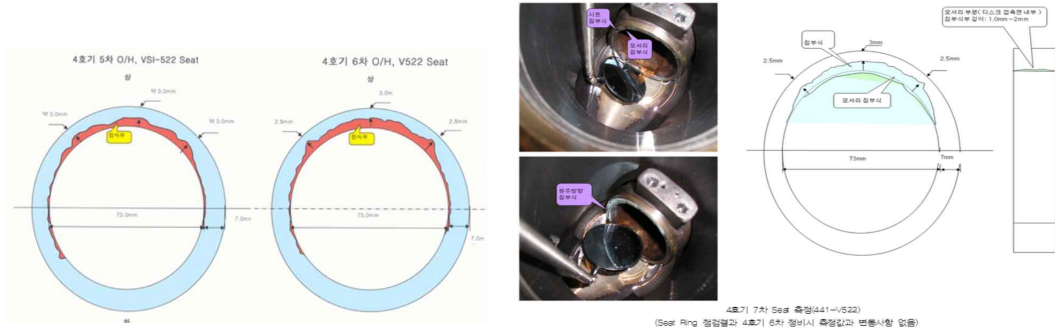


그림 2.7 역지밸브(밸브-A) 디스크 / 시트 검사결과(HB3-11차)

다. 손상이력에 따른 경향분석

역지밸브(밸브-A/B)의 밀봉부 손상형태는 불규칙적인 침식형태로 나타나며 시트부 손상은 상기 그림 2.8에서와 같이 침/부식에 의한 밀봉부 손상이 디스크 접촉면에 영향을 주어 그림 2.9 및 2.10에서와 같이 밀봉부 손상위치가 동일하게 나타나고 있다. 그러므로 시트 및 디스크 손상 속도는 비슷한 것으로 추정된다.

(1) 고온관 역지밸브(밸브-A) 시트 및 디스크 손상이력



[HB4-5차 점검기간] [HB4-6차 점검기간] [HB4-7차 점검기간]
 그림 2.8 역지밸브(밸브-A) 시트검사 비교(HB4-5,6,7차 큰 변동사항 없음)

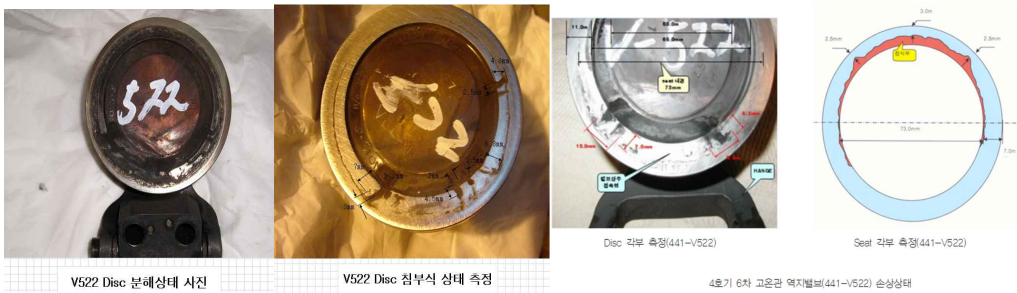


그림 2.9 역지밸브(밸브-A) 디스크검사 비교(심한 침.부식현상 발견)

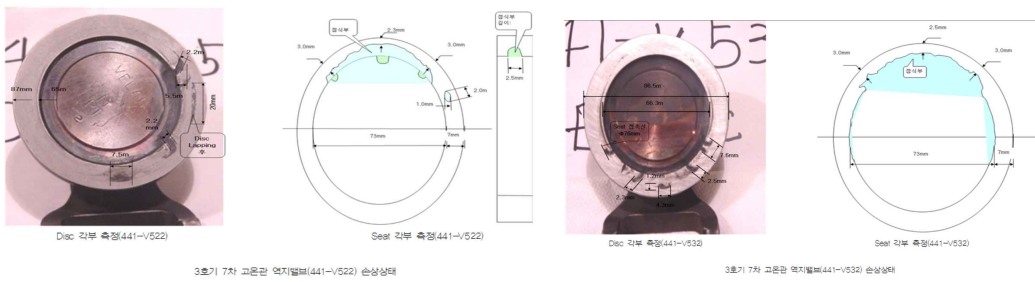


그림 2.10 역지밸브(밸브-B) 디스크검사 비교(심한 침.부식현상 발견)

제 3 장 고온관 역지밸브 부식원인 고찰

제 1절 정비자료 수집 및 분석

1. 고온관 역지밸브 검사 결과

가. 디스크 검사

밸브-B와 동일하게 디스크와 시트접촉면을 기준으로 밸브 내부의 안전주입측에서 RCS 고온관측 경계면인 디스크 상단지역(상단에서 1cm 정도 아래 부위)의 시팅면이 손상되고 있음을 그림 3.1에서 확인할 수 있다.

이는 시트면의 스텔라이트 경면재와 스테인리스강 경계점까지 붕산이 석출된 흔적이 보이고 상단의 고온 고압 경계면과 안전주입 측 경계면에서 침식에 의한 디스크 손상 상태가 매우 심하게 일어나고 있음을 선명하게 보여지고 있다.



V522 Disc 침부식 상태 측정



V532 Disc 침부식 상태

그림 3.1 역지밸브 디스크 침식상태(HB4-7차 점검기간)

나. 시트 검사

시트 손상은 디스크 경계면에서 밀봉기능에 큰 영향은 없었으나 침식현상이 일어난 상태로 관측된다. 검사를 위한 밸브 접근은 고방사선 구역으로 접근성에 한계가 있었으나 Lapping Tool을 사용하여 시트접촉 상태를 그림 3.2와 같이 확인한 결과, 시트 밀봉 접촉면 7mm 중 4mm 정도 침, 부식 현상이 일어난 것으로 확인 되었다. 침식현상에 의한 밸브 수명단축이 빠르게 진행되고 있음을 확인하였다. 원자로냉각재 압력경계 밸브시트 특성상 경미한 손상일지라도 밀봉기능 역할이 현저히 저하되면 밸브를 교체해야 하는 부담이 있다.

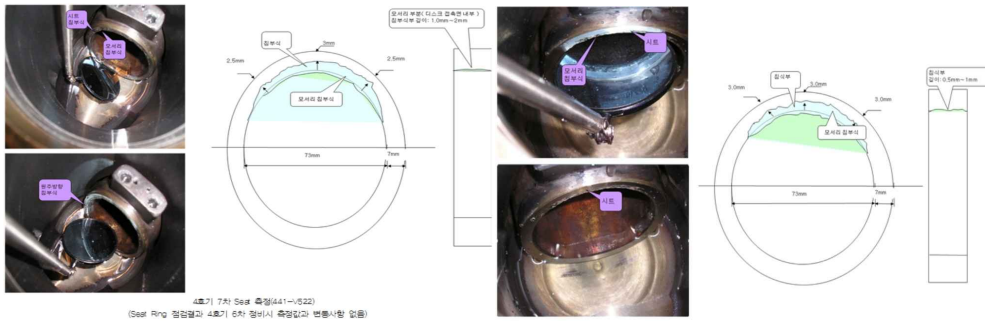


그림 3.2 역지밸브 시트검사(HB4-7차 점검기간)

2. 고온관 역지밸브 손상문제 고찰

고온관 역지밸브의 손상 경향을 살펴보면 아래와 같은 특징이 있다.

- 가. 역지밸브-A/B의 손상은 불규칙으로 발생되었다.
- 나. 시트보다 디스크에서 심한 손상이 발생하며, 시트 손상은 손상속도로 진행되었다.
- 다. 밸브-B 상단 1/3부분부터 상변화 흔적이 관측되며, 디스크 면과 경면 경계점에서 손상이 발생하기 시작한다.
- 라. 디스크 뒷면(원자로냉각재 측)은 변색이나 손상이 없이 깨끗한 것으로 관측된다.

제 2절 부식원인 운전자료 분석

1. 운전 이력 분석

가. 역지밸브(밸브-A) 운전이력(HB3-11차)

밸브-A 전단에서 비등이 발생하는 조건에서 운전한 시간이 약 92.3%로 압도적으로 많은 시간동안 운전한 것으로 판단된다. 누설량은 매우 적은 것으로 판단되며, 밸브-A 디스크에 일반균일부식이 발생한 것으로 관측되는 바 비등조건에서 장시간 운전이 일반 부식 조건을 형성하는 한 원인이 되는 것으로 판단된다.

나. 역지밸브(밸브-B) 운전이력(HB3-11차)

밸브-B 밸브는 포화증기압력 이하에서 운전한 시간이 약 73.3%로 포화증기 이상의 압력에서 운전한 시간(약 26.7%)보다 많은 것으로 판단된다.

그러나 밸브-B는 디스크 상태는 나쁘지만, 부식손상은 관측되지 않으므로 약 73% 시간 동안 비등조건에서 계속 운전할 경우 비등이 발생한 흔적은 남기지만 부식은 발생하지 않음을 알 수 있다.

다. 역지밸브(밸브-A) 운전이력(HB4-11차)

HB4의 밸브-A 전단 압력계 자료를 분석한 결과 예상 최대 운전온도에 해당되는 포화증기 압력 이하에서 운전한 시간이 31.8%, 포화증기압력 이상에서 운전한 시간이 68.2%이다. 포화증기 압력이상에서 운전하면 비등이 발생하지 않으며 봉산농축이 되지 않아 정상적인 pH 조건을 유지할 수 있다. 이런 조건에서 운전한 밸브-A에서는 손상이 관측되지 않았다.

라. 역지밸브(밸브-B) 운전이력(HB4-11차)

밸브-B 역지밸브의 전단(안전주입측) 압력은 0-20 kg/cm²이하에서 가장 많은 시간 동안 운전하였고 안전주입계통 역지밸브 전단압력은 형성되지 않았다. 밸브-B전단에서 비등이 발생할 수 있는 조건에서 운전시간이 약 97.7%로 압도적으로 많은 시간 동안 운전된 것으로 판단된다. 이러한 조건에서 운전한 밸브-B 역지밸브의 검사결과 디스크면의 손상 흔적이 발견 되었다.(그림 3.1, 본문 1절 참조)

2. 밸브-A/B 온도측정자료(표준원전과 동일한 설계자료 분석)

한국표준원전과 동일하게 설계된 한울 원전의 정지냉각 역지밸브 점검사례를 분석한 결과 밸브-A/B의 온도측정 및 분석은 표 3.1과 같이 나타냈으며, 고온관 온도 293℃에서 측정한 밸브-A/B 전단 온도는 약 118℃~130℃로 나타냈다.

정상운전 조건인 고온관 온도 327℃에서 운전온도는 더 상승할 것이다. 역지밸브 전단 온도와 손상은 직접적인 관련이 있음을 알 수 있다.

표 3.1 동일표준원전(한울원전) 역지밸브 온도측정 분석자료

		전단온도(℃)			손상여부		
		한울 3	한울 4	한울 5	한울 3	한울 4	한울 5
밸브-A	상단	118	130	44	손상	손상	정상
	중앙	89	126	39	정상	손상	정상
	하단	74	96	39	정상	정상	정상
밸브-B	상단	79	128	67	정상	손상	정상
	중앙	67	122	55	정상	손상	정상
	하단	64	87	48	정상	정상	정상

가. 역지밸브 운전자료 분석

역지밸브(밸브-A/B) 손상 원인분석을 위해 그림 3.3에 표시된 바와 같이 역지밸브(밸브-A/B)의 전단압력을 나타내는 PI-390/391압력계기의 운전자료를 수집하여 분석하였다.

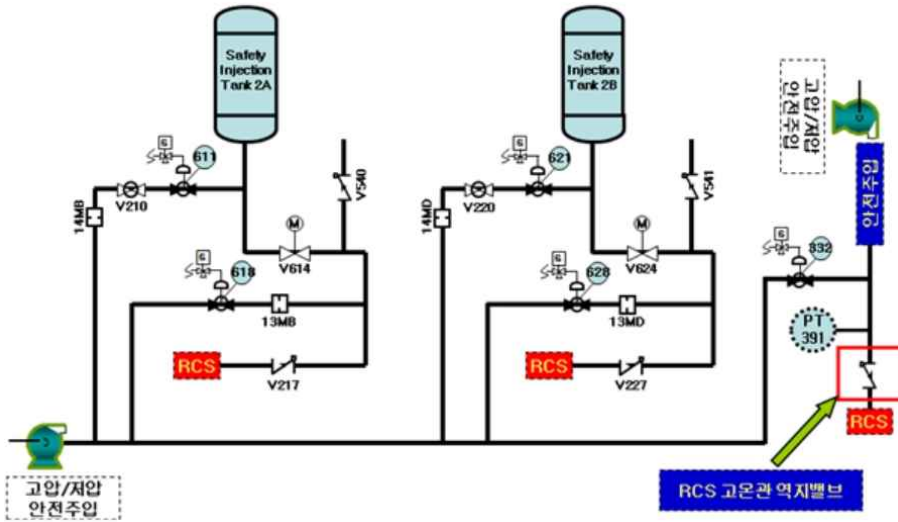


그림 3.3 계통 압력계(PI) 설치 요약도

(1) 표 3.2 안전주입 역지밸브(밸브-A, HB4) 진단압력계(PI-390/391) 자료를 수집하여 개략적인 경향 분석을 위해 다음 표 3.2과 같이 분류하였다.

표 3.2 역지밸브(HB4 밸브-A) 운전자료 분석(10차 점검)

번호	입력범위 (Kg/cm)	첨두압력 (Kg/cm)	반복횟수 (회)	최저압력 (Kg/cm)	밸브-A전단 예상온도(°C)	포화압력 (Kg/cm)	지속시간 (Hr)	지속시간 비율(%)
1	0~20	12.6	7	0.2	151	1.3	8928.8	81.8
2	21~40	29.7	6	8	151	1.3	8419.2	68.2
3	41~60	55	1	4.6	151	1.3	9.3	0.1
4	61~100	70	1	1.7	151	1.3	0.7	0
5	100이상	98.7	1	8.7	151	1.3	0.8	0

: 포화증기 압력이하에서 운전한 시간
 : 포화증기 압력이상에서 운전한 시간

(2) 역지밸브(밸브-B, HB4-10차) 압력계(PI-391) 자료 분석

역지밸브 진단(안전주입측) 압력계측기(PI-391) 자료를 수집하여 개략적인 경향 분석을 위해 다음 표 3.3과 같이 분류 하였다.

표 3.3 역지밸브(HB4 밸브-B) 운전 자료(PI-391) 분석(10차 점검)

번호	압력범위 (Kg/cm)	첨두압력 (Kg/cm)	반복횟수 (회)	최저압력 (Kg/cm)	밸브B전단 예상온도(°C)	포화압력 (Kg/cm)	지속시간 (H)	지속시간 비율(%)
1	0~20	9.8	7	0.1	151	1.3	12095.7	97.7
2	21~40	27	2	0.24	151	1.3	278.8	2.2
3	41~60	57.7	2	0.19	151	1.3	8.8	0.1
4	61~100	76.5	1	0.85	151	1.3	0.8	0
5	100이상	104.6	1	0.4	151	1.3	0.8	0

: 포화증기 압력이하에서 운전한 시간
 : 포화증기 압력이상에서 운전한 시간

(3) 분류자료 분석결과

(가) 밸브-A역지밸브(PI-390)

표 3.2 자료를 분석해 보면 역지밸브(밸브-A)의 전단(안전주입측)압력은 포화압력 이상에서 운전시간이 전체 운전시간의 약 68.2%로 비등이 발생하지 않고 운전된 시간이 더 긴 것으로 판단된다. 비록 비등이 발생하는 조건에서 운전하였더라도 그 기간이 부식을 발생시키는 조건이 되지 못한 것으로 판단된다. 압력 증가율이나 감소율은 큰 의미를 갖지 않으며 경험 자료를 비추어볼 때 누설량이나 압력증가율 또는 압력 감소율은 손상과 밀접한 상관관계를 보이지 않는 것으로 판단된다.

(나) 역지밸브 압력계(밸브-B, PI-391)

표 3.3 자료를 분석해보면 밸브-B 역지밸브의 전단(안전주입측) 압력은 0-20kg/cm² 이하에서 가장 오래 운전하였고 압력변동이 거의 없었다. 밸브-B전단에서 비등이 발생할 수 있는 조건에서 운전시간이 약 97.7%로 압도적으로 많은 시간 동안 운전된 것으로 판단된다. 밸브-B 역지밸브 검사결과 디스크면에 경미한 손상 흔적이 발견 되었다. 따라서 장시간 동안 비등조건에서 운전한 사항은 디스크 손상의 원인이 될 수 있을 것으로 판단된다.

압력증가율이나 감소율은 큰 의미를 갖지 않으며 경험 자료를 비추어볼 때 누설량이나 압력증가율 또는 압력감소율은 손상과 밀접한 상관관계를 보이지 않는 것으로 판단된다.

(4) 역지밸브(밸브-A, HB3) 진단 압력계(PI-390) 자료 분석(11차 점검)

역지밸브 진단(안전주입측) 압력계측기 PI-390 자료를 수집하여 개략적인 경향 분석을 위해 다음 표 3.4과 같이 분류하였다.

표 3.4 역지밸브(HB3 밸브-A) 운전자료(PI-390) 분석(11차 점검)

번호	압력범위 (Kg/cm ²)	침투압력 (Kg/cm ²)	반복횟수 (회)	최저압력 (Kg/cm ²)	밸브A진단 예상온도(°C)	포화압력 (Kg/cm ²)	지속시간 (Hr)	지속시간 비율(%)
1	0~20	16.9	8	0.2	151	18.5	11108.8	92.8
2	21~40	29.7	8	0.48	151	18.5	845.1	2.9
3	41~60	69.7	1	0.25	151	18.5	578.5	4.7
4	61~100	98.7	1	8.7	151	18.5	9.8	0.1

: 포화증기 압력이하에서 운전한 시간
 : 포화증기 압력이상에서 운전한 시간

(5) 역지밸브(밸브-B, HB3) 압력계(PI-391)자료 분류(11주기)

역지밸브 진단(밸브-B 안전주입측) 압력계측기 PI-391 자료를 수집하여 개략적인 경향 분석을 위해 다음 표 3.5과 같이 분류하였다.

표 3.5 역지밸브(HB3 밸브-B) 운전 자료(PI-391) 분석(11차 점검)

번호	압력범위 (Kg/cm ²)	침투압력 (Kg/cm ²)	반복횟수 (회)	최저압력 (Kg/cm ²)	밸브B진단 예상온도(°C)	포화압력 (Kg/cm ²)	지속시간 (Hr)	지속시간 비율(%)
1	0~20	14.8	8	2.9	151	18.5	8824.7	78.8
2	21~40	40	7	1.8	151	18.5	1828.8	11.04
3	41~60	67.8	6	1.56	151	18.5	1879.2	15.6
4	61~100	76.5	1	0.85	151	18.5	2.8	0.08
5	100이상	100	1	4.8	151	18.5	0.8	0

: 포화증기 압력이하에서 운전한 시간
 : 포화증기 압력이상에서 운전한 시간

(6) 분류자료 분석결과

(가) 역지밸브(밸브-A, PI-390)

표 3.5의 자료를 분석하면 밸브-A 진단에서 비등이 발생하는 조건에서 운전시간이 약 92.3%로 압도적으로 많은 시간동안 운전한 것으로 판단된다. 누설량은 매우 적은 것으로 판단되며 밸브-A 디스크에 약간의 일반부식이 발생한 것으로 관측되는 바, 비등조건에서 운전이 일반부식 조건을 형성하는 한 원인이 되는 것으로 판단된다.

(나) 밸브-B(PI-391)

표 3.5의 자료를 분석하면 밸브-B 밸브 진단의 압력은 포화증기 이하의 압력에서 운전한 시간이 약 73.3%로 포화증기 이상의 압력에서 운전한 시간 약 26.7% 보다 많은 것으로 판단된다. 그러나 밸브-B는 디스크 상태는 나쁘지만 부식은 발생하지 않았음이 관측된 바, 약 73%시간 동안 비등조건에서 계속 운전할 경우 비등이 발생한 흔적은 남기지만 부식을 발생하지 않음을 알 수 있다. 그러나 한주기 운전자료만 분석하였으므로 부식이 발생하는 비등시간을 정확하게 산출할 수 없다.

나. 고온관 역지밸브 입구측 압력에 따른 결론

안전주입 진단 압력계 압력 운전 자료와 역지밸브(밸브-A/B) 검사 결과를 분석한 결과 다음 결론을 얻었다.(HB4-10차 및 HB3-11차)

(1) 포화압력 이상에서, 즉 비등이 발생하지 않는 조건에서 지속적으로 운전하면 부식 손상이 발생하지 않는다.

(2) 포화압력이하 즉 비등이 발생하는 조건에서 장시간(전체 운전 시간의 약 73%이상) 지속적으로 운전할 경우 부식손상 발생 원인이 될 수 있다.

제 3절 역지밸브 밀봉 금속재 부식분석 고찰

1. 고온관 역지밸브의 손상문제 고찰

역지밸브(밸브-A/B, HB3,4)는 국내 다른 발전소의 고온관 안전주입 역지밸브에 비해 손상 정도는 덜 심각하다. 그러나, 역지밸브 상단에 스텔라이트 경면재와 스테인레스 강(SUS, F-316) 모재 경계점에서 깊게 패인 형태의 손상과 상단 F-316 모재에서 넓은 범위의 일반 균일부식 손상이 관측되었다. 손상이 발견되지 않을 경우도 있으며, 손상이 관측되는 빈도는 불규칙적이다.

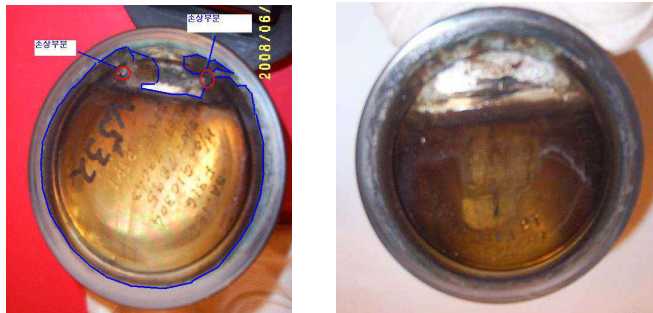


그림 3.4 밸브-A/B 손상 사진

2. 손상 원인 인자 분석

가. 밸브-A/B 설치 위치 및 운전조건

밸브-A/B 역지밸브는 406.4mm 정지냉각 흡입 배관에서 분기된 76.2mm 고온관 안전주입 배관에 설치되어 있다. 고온관 안전주입 배관 분기점은 고온관으로부터 0.7m 떨어져 있으며 밸브-A/B 역지밸브는 분기점으로부터 4.5m 떨어진 지점에 설치되어 있다. 이 위치의 운전온도는 약 151-200℃, 밸브 전단의 운전압력은 대기압이며, 밸브 후단 운전 압력은 158kg/cm²이다.

나. 밸브-A/B 유체의 화학조건

역지밸브 전단의 유체는 재장전수이며, 붕산농도는 4400ppm으로 공기포화 상태이다. 후단은 원자로냉각재로 붕산농도는 2200ppm이고, 용존산소는 0.1ppm이하를 유지한다.

제 4절 밸브 유동에 따른 분석

1. 진동측정 자료 분석

가. 원자로냉각재펌프 진동(맥동)측정에 의한 밸브 마모부식 가능성 분석

원자로냉각재펌프 진동에 의한 밸브 디스크의 채터링(Chattering)현상으로 밀봉면 손상원인을 줄 수 있다는 가정 하에 다음과 같은 방법으로 분석하였다.

(1) 측정결과 분석 : 밸브 채터링에 의한 마모부식 가능성 분석

RCS 계통에는 원자로냉각재 펌프(Reactor Coolant Pump, RCP) 운전에 의한 RCP 회전주파수 성분의 미세한 압력 맥동이 상존하며, 표3.6 및 3.7의 진동측정 진폭 값(HOR)에서 나타난 바와 같이 미세한 압력맥동은 안전주입계통에서 증폭되고 역지 밸브 A/B 부위에서 최대가 되어 안전주입계통의 고유진동수에 의해 공진을 일으켜 밸브 디스크 채터링 및 밀봉부 접촉부위에서 마모, 부식 촉진 등을 유발시킬 수 있다.

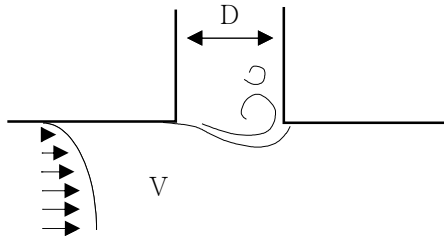


그림 3.5 분기관외 Vortex Chattering 생성 과정

(2) 측정 데이터

역지밸브(HB4 밸브-A/B)에서의 진동 측정자료는 다음과 같다.

측정장비 : DATAPAC 1500(Frequency Range 0.5Hz to 58kHz)/Accelerometer
(ICP Type IRD 970 P/U)

표 3.6 진동 측정자료-속도(단위: mm/s)

운전조건	밸브-A		밸브-B	
	VER.	HOR.	VER.	HOR.
RCP02A/02B/ 01A/01B운전	0.85	0.86	0.67	0.89

표 3.7 진동 측정자료-진폭(단위: μm)

운전조건	밸브-A				밸브-B			
	VER.		HOR.		VER.		HOR.	
	주파수 (Hz)	진폭	주파수 (Hz)	진폭	주파수 (Hz)	진폭	주파수 (Hz)	진폭
RCP02A/02B/ 01A/01B운전	5Hz	2.4	15Hz	4.8	5Hz	5.3	22.5Hz	3.7

2. 공동현상 및 프래싱현상에 따른 분석

밸브-A/B 역지밸브는 고온관 안전주입계통 배관에서 원자로냉각재계통을 첫 번째로 격리하는 밸브로 설계조건 상으로 전 후단 최대 압력차가 158.2 kgf/cm²가 된다. 그러나 역지밸브 전단압력이 상승하여 4.2~7 kgf/cm²를 유지하는 경우도 있으므로 전 후단 압력 차가 151~158.2kgf/cm²범위가 될 것으로 판단된다. 압력 차가 매우 크므로 누수 경로가 형성되면 공동현상(cavitation)이나 프래싱현상(flashing)이 발생할 가능성이 있는 조건이다. 따라서, 역지 밸브에서 공동현상과 프래싱현상 가능성을 평가하기 위해 각 특성을 분석하였다.

가. 공동현상

공동현상은 액체상태에서만 발생하는 동적현상이다. 유체가 좁은 제한된 지역을 통과할 때나 박리지역의 와류에서 또는 난류의 경계에서 포화증기압 이하의 저압 지역이 형성된다. 공동현상은 이러한 저압 지역과 배관 벽과 같이 고체와 액체의 경계선, 조그만 가스(gas) 핵에서 기포가 발생하기 시작한다. 벽과 같이 고체와 액체의 경계선에서는 고체 표면의 불규칙성이 액체 표면 장력의 허점(weak spot)이 되므로 거기에서 기포가 발생한다. 공동(cavity)의 압력이 포화증기압 이상으로 증가하면 기포가 붕괴되어 공동현상이 발생한다.

이러한 공동현상 문제를 금속 재질적으로 해결하기 위해 시트면에 경면 처리 (hard-facing)를 하고있다. 경면처리된 부분에서는 공동현상이 발생하여도 큰 손상은 발생하지 않고 약간의 침식은 발생할 수 있을 것이다. 적은 유량이 누설될 경우에는 공동현상에 의한 손상이 거의 발생하지 않으므로 역지밸브에서 발생하는 적은 양의 누수는 공동현상에 의한 손상을 유발하지 않을 것으로 판단된다.

나. 프래싱현상

좁은 제한된 유로에서 포화증기압 이하로 압력이 감소하여 증기가 발생한 후 좁은 유로를 지난 후에도 압력이 회복되지 않아 계속 증기상태로 분출되는 현상이 프래싱이다.

프래싱현상이 구조물에 손상을 주는 요소는 높은 속도이다. 프래싱 발생 시에 액체가 기체로 상이 변경되면서 부피팽창이 발생하기 때문이다. 예를 들면 37.78℃의 물이 기체로 변경되면 부피가 21,700배로 커진다.

또한 프래싱현상이 발생하면 고속의 유동이 형성될 수 있어 하류부분에 침식을 일으킬 수 있으며, 조그만 물방울이 증기에 의해 가속 추진되어 표면제거(sand blasting)와 유사하게 금속에 손상을 준다.

3. 고온관 역지밸브 운전조건 고찰

가. 역지밸브(밸브-A/B)의 운전조건 및 화학조건

(1) 밸브-A/B 후단(RCS측) 운전조건

역지밸브의 후단(RCS측) 운전온도는 해석결과 및 측정결과를 기준으로 보면 151~171℃ 이상이 되며 압력은 원자로냉각재계통 압력인 158.2kgf/cm²가 된다.

(2) 밸브-A/B 전단(안전주입측) 운전조건

역지밸브(밸브-A/B)의 안전주입측 전단 운전온도는 해석결과 및 측정결과를 기준으로 보면 151~171℃가 되며 압력은 대기압 상태가 된다. 유체온도가 포화온도 이상이 되므로 디스크면에서 비등이 발생하는 조건이 된다.

제 4 장 손상원인에 따른 금속변형 해석

제 1절 밸브설치 모델해석

1. 역지밸브 운전온도 해석

원자로냉각재계통이 정상운전 조건일 때 밸브-A/B 역지밸브의 온도를 분석 하고자 한다. 원자로냉각재계통 첫 번째 격리밸브이므로 고온에 노출되어 있고 반대 측면에서는 저온의 안전주입수와 접촉하므로 온도 차가 커서 시트와 디스크의 변형을 유발한다. 또한 비등을 일으킬 수 있는 고온 조건은 국부적으로 비등을 유발하여 봉산 농축으로 pH가 매우 낮아 부식을 일으킬 수 있는 환경조건이므로 온도분석이 필요하다.

가. 밸브기능에 따른 온도분석

고온관 안전주입 역지밸브 밸브-A/B(크기 3")의 누설 원인 중 하나로 사료되는 것이 밸브 디스크에서 온도 차에 의한 열 변형이다. 역지밸브의 온도 차에 의한 열변형을 구조해석으로 구하기 위해서 정상운전 중 밸브의 온도 분포를 경계 조건으로 사용해야 한다. 또한, 역지밸브 전단에서 비등이 발생할 경우 부식 환경이 조성되므로 비등 발생에 대한 분석이 필요하다.

따라서, 이에 필요한 배관 및 역지밸브 온도분포 자료를 얻기 위해 FLUENT Code를 사용해 정상운전 중 역지밸브(밸브-B)의 온도분포를 해석으로 구하였다.

먼저 현재 설치된 고온관 안전주입 배관 및 밸브설치 상태에서 열 유동장해석을 통해 역지밸브(밸브-B)의 온도분포를 구하고 밸브위치를 고온관으로부터 온도 감소가 충분히 발생할 수 있는 배관 후단으로 이동한 후 역지밸브 몸체의 온도 분포를 구하여 비교분석 하였다. 이때 밸브의 누설은 없는 것으로 가정하여 평가하였다.

나. 가정 및 물리모델

다음 2가지 경우에 대한 계산을 수행하였다.

- Case 1. 밸브-B밸브 위치 변경 전 온도분포 해석
- Case 2. 밸브-B밸브 위치 변경 후 온도분포 해석

다. 밸브-B 밸브 위치 변경 전 온도분포 해석

물리적으로 고온관 내부를 흐르는 약 7200kg/s의 빠른 유속 때문에 고온관과 40.64cm 배관 연결부에서 난류성 관통현상(turbulent penetration)이 발생한다.

이 난류성 관통부에 의해서 고온관의 고온유동(327.3℃)이 40.64cm 배관을 통해 7.62cm 배관을 지나 밸브-B 밸브 까지 온도를 전파시킨다.(그림 4.1 참조)

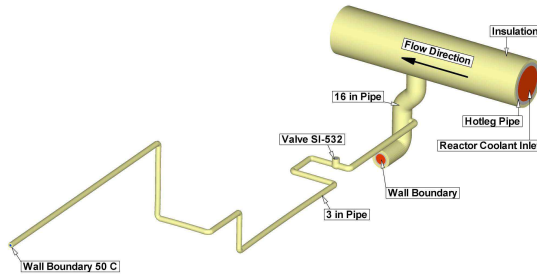


그림 4.1 역지밸브(밸브-B) 위치 변경 전 계산영역

따라서 계산영역은 일부 고온관 구간을 포함하여 연결된 40.64cm 배관에 설치된 첫 번째 격리밸브 입구까지이며 40.64cm 배관에 연결된 7.62cm 배관은 밸브-B를 포함하였으며, 고온관 영역은 실제 고온관과 동일한 두께(schedule)을 가지는 직선형 배관으로 가정하였으며 압력경계조건(차압)을 운전유량(7200kg/s)으로 조절 하였다.

40.64cm 배관에 설치된 첫 번째 역지밸브 입구는 벽으로 가정하였으며 실제 난류성 관통에 의한 대류 열전달이 역지밸브를 통해 빠져나가는 열량보다 매우 커 역지 밸브의 온도는 고온관을 흐르는 냉각재와 온도차가 거의 없어 단열 경계조건을 적용 하였다.

7.62cm 배관 끝부분(SI쪽)은 50℃의 벽(wall)로 가정하여 밸브 후단의 유동영역은 갇힌 유동영역으로 가정하였다.

배관 내의 파울링(fouling)에 의한 열전도 감소현상은 무시하였으며, 배관과 단열재의 내부의 기공이나 틈, 접촉면의 열 저항 효과 및 기타 불순물이 존재 하지 않은 등방성 매질로 가정하였다.

라. 밸브-B 밸브 위치 변경 후 온도분포 해석

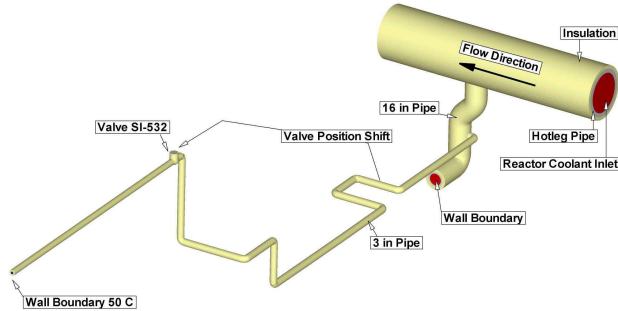


그림 4.2 역지밸브(밸브-B) 위치 변경 후 계산영역

밸브 위치 변경 후 온도분포는 앞에서 언급한 위치변경 전 해석조건에서 밸브-B 밸브의 온도를 낮추기 위해 1.6m 뒤쪽으로 위치를 이동 시켰으며, 다른 조건은 동일하게 적용 하였다.

마. 해석 모델

작동유체는 원자로냉각재이며, 온도/압력 조건은 327.3℃, 158.2kg/cm²으로 하고, 안전 주입 측 온도 및 압력 조건은 50℃, 1kg/cm², 대기압조건과 배관 재질은 스테인리스강이며, 배관보온재는 칼슘 실리 케이트로 설정하여 해석함.

바. 해석결과 고찰 및 평가

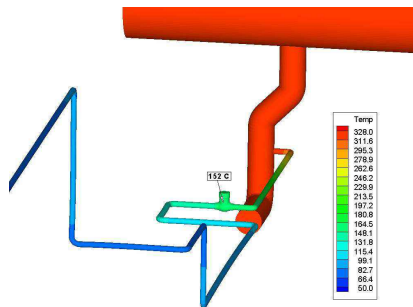


그림 4.3 역지밸브(밸브-B) 위치 변경 전 온도분포

40.64cm 배관의 경우 난류성 관통에 의해 대류 열전달로 전달되는 열량이 배관 벽과 단열재를 통해 빠져나가는 열량보다 커 온도 변화가 거의 없어 40.64cm 배관 첫 번째 격리 밸브 디스크 표면온도는 약 326.3℃이다.

그러나 7.62cm 배관의 경우 내경이 40.64cm 배관에 비해 스케일이 상대적으로 매우 작아 난류성관통부의 강도가 줄어들어 대류 열 전달로 전달되는 열량이 7.62cm 배관 벽을 통해 빠져나가는 열량보다 작다.

따라서 배관의 길이에 비례하여 온도가 계속해서 떨어지게 된다. 그림 4.3은 7.62cm 배관 단열재를 통해 빠져나가는 열량에 의해 밸브 온도가 152℃까지 떨어지는 해석 결과를 보여주고 있다.

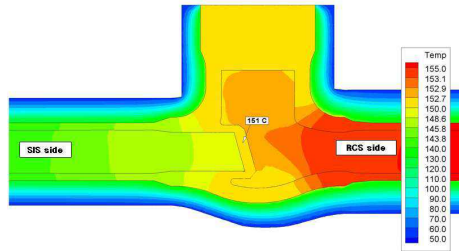


그림 4.4 위치 변경전 역지밸브(밸브-B) 디스크 단면 온도분포

그림 4.4은 고온관 역지밸브 디스크 단면의 온도분포 결과를 보여주고 있다. 본 해석에서 배관내의 파울링에 의한 열전도 감소현상은 무시하였으며 배관과 단열재의 내부 기공이나 틈, 접촉면의 열 저항 효과 무시 및 기타 불순물이 존재하지 않은 등방성 매질로 가정하였다. 밸브-B 밸브 위치 변경 후 온도분포 그림 4.6의 밸브 디스크 온도분포는 변경 전과 비교하여 현저히 감소하였으며 비등점 이하로 떨어졌다. 변경 전 밸브위치에서 178cm 후단에 위치한 배관온도가 100℃ 미만이며 그 이후부터 온도 감소율이 전단보다 급격히 떨어지고 있다. 따라서 178cm 후단 이후로 밸브위치를 설치할 경우 밸브 온도가 비등점 이하로 떨어지는 것으로 사료된다. 따라서 밸브-B 밸브의 위치를 안전주입측 배관 후단으로 위치 이동한 것은 설계상 바람직한 것으로 사료된다. 그림 4.5 및 그림 4.6은 위치변경 후 밸브-B 밸브 디스크 단면 온도분포 및 단열재 제거상태에서 온도분포를 나타낸다.

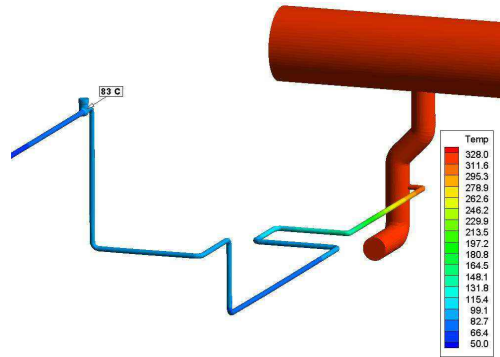


그림 4.5 역지밸브(밸브-B) 위치 변경 후 온도분포

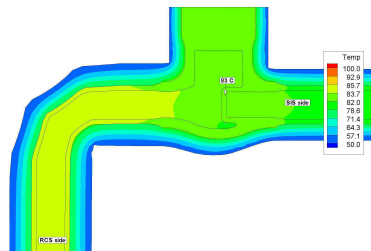


그림 4.6 위치 변경 후 역지밸브(밸브-B) 디스크 단면 온도분포

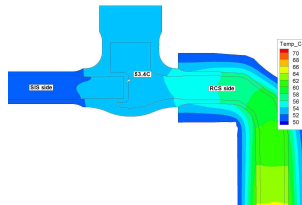


그림 4.7 역지밸브 전단 단열재가 없을 때 밸브 디스크단면 온도분포

밸브 후단의 단열재가 없을 경우 표면의 열손실이 단열재가 있을 때보다 매우 크므로 역지 밸브(밸브-B)의 몸체온도는 그림 4.7과 같이 상당히 감소함을 알 수 있다. Case 2와 비교할 경우 밸브디스크 온도가 83℃에서 53.4℃로 약 30℃가량 떨어지는 것을 알 수 있다.

또한 밸브 전, 후로 온도 구배가 크지 않고 주변 대기 온도(50℃)와 거의 차이가 나지 않는다. 따라서 충분히 온도 감소가 발생하여 디스크 변형에 영향을 미치지 않고 밸브 전단에서 비등이 발생하지 않는 위치로 밸브가 이동된 것으로 사료된다.

사. 밸브위치 변경 전, 후 온도분포 해석에 따른 결론

상기와 같은 온도분포 해석 및 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 밸브의 온도 감소는 원자로냉각재 고온관 위치에 비례하여 온도를 감소시킬 수 있다.

(2) 위치 변경 전 역지밸브(밸브-B) 디스크 후단의 온도는 비등점보다 높은 152℃로 비등이 발생하여 부식환경이 조성될 수 있으며 시팅면 변형으로 누설의 원인이 될 수 있다. 그러나 위치 변경 후에는 밸브 디스크의 온도가 83℃로 떨어져 고온 비등에 의한 부식 환경이 제거 되어 손상이 발생하지 않고 밸브 디스크 변형에 의한 누설가능성이 많이 줄어들 것으로 평가된다.

(3) 위치 변경 후 밸브-B 역지밸브 및 전단에 단열재가 없을 때 디스크 온도는 83℃ 에서 53.4℃로 약 30℃ 가량 떨어진다. 주변 대기온도를 50℃로 가정하였으므로 실제 대기 온도와 밸브 디스크의 온도는 큰 차이가 없을 것으로 판단된다.

(4) 표 4.1은 디스크를 통한 누설량 별 밸브 디스크 온도를 계산한 값이다. 누설 유량이 20cc/min 경우까지 누설로 발생하는 열전달 량이 밸브 디스크 변형 온도에 미치는 영향이 미미한 것을 알 수 있다. 그러나 30cc/min이상의 경우 디스크 온도 변화에 미치는 영향이 커지기 시작하였으며 70cc/min 이상의 경우 온도변화는 감소하나 밸브 위치 변경 전과 비슷한 수준의 배관 온도 분포를 가지게 된다. 따라서 계산상으로 비등에 의하여 부식의 영향이 작은 30cc/min 이하의 누설 량을 유지하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

표 4.1 역지밸브 누설량 별 디스크 온도분포

누설량(cc/min)	밸브 디스크 온도(℃)
10	58.4(58.03)
20	67.9
30	85.6
40	104.7
50	127.3
60	143.4
70	159.8
100	191.2
200	247.6
700	300.6

2. 역지밸브 물리적 변형해석

가. 역지밸브 시팅면 변형해석 자료

역지밸브 디스크의 양단 온도 차가 큰 경우 온도 차에 의한 열변형과 배관 모멘트가 작용할 경우 배관 모멘트에 의한 시트 및 디스크 변형이 발생한다. 디스크 안쪽으로 변형이 발생하지만 매우 작은 양(0.0034 mm)이므로 틈새부식 등 손상에는 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 그러나 시팅면의 표면 거칠기 또는 편평도의 정밀도가 떨어져 틈새가 생길 경우 열 및 모멘트에 의한 변형은 틈새부식을 발생시키는 틈새를 형성하는 원인이 될 수 있다.

나. 역지밸브의 물리적 현상 분석

역지밸브(밸브-A/B)에서 물리적 현상에 대한 분석은 역지밸브 후단(RCS측)은 $158\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 가압되어 비등이 발생하지 않으며 RCS의 화학조건을 유지하는 조건에서 물리적 현상을 다음과 같이 분석하였다.

(1) 디스크 표면에서의 현상

역지밸브 전단의 운전압력이 대기압이므로 디스크표면에서 비등이 발생한다. 비등이 발생하면 물이 수증기로 되며 증기기포(pocket)가 형성된다. 내부 순환유량이 형성되고 비등이 발생하는 디스크 표면 근처에서는 난류가 형성된다.

압력이 대기압일 경우 포화비등(bulk boiling)이 일어나고 누설이 되어 압력이 상승할 경우에는 금속표면에서 국부적으로 막비등(film boiling)이 발생한다. 비등이 발생하면 금속 표면의 열전달이 저하되므로 금속 표면에서 온도가 급격히 상승하여 붕산이 농축되고 용융붕산수 상태로 변한다. 용융붕산수는 매우 부식성이 강한 상태의 붕산수이며 이때 붕산수의 pH는 2이하가 된다.

(2) 누설이 발생할 때의 현상

시트와 디스크의 틈새를 통하여 누설이 발생하면 역지밸브 전단의 압력이 상승하고 원자로냉각재 물이 시트면을 통과하면서 압력이 감압되어 증기상태로 분사된다.

증기는 다시 물로 응축되기도 하지만 온도가 높기 때문에 증기상태로 그대로 존재하여 증기부피가 확대된다. 압력이 증가되면 증기가 깨지면서 공동현상이 발생할 수도 있다.

또한, 원자로냉각재의 용존산소는 0.1ppm이하 이므로 시팅면에 틈새가 발생하여

국부적으로 원자로냉각재가 고인 상태가 된다면 주변 재장전수와 용존산소 농도차가 발생한다.

따라서 시팅면에 생긴 틈새부분은 pH가 매우 낮고 산소 농도 차이가 가혹한 틈새 부식 환경이 형성되어 분사되는 증기의 속도가 매우 빠르므로 침식이 발생하는 조건이 될 수 있다. 안전주입측 압력이 증가하여 포화압력 이상이 되면 비등이 발생하지 않아 봉산 농축이 발생하지 않을 수도 있다.

이러한 경우 유체내에서는 봉산농축에 의한 부식환경이 조성되지 않을 수 있다.

(3) 누설이 발생하지 않을 경우 물리적 현상

디스크면에서 비등이 발생하고 증기기포가 국부적으로 발생하여 증기기포 부분은 더 온도가 증가한다. 증기기포 부분과 물 경계면은 비등으로 인해 봉산농축이 발생하고 부식성이 강한 용융(molten) 봉산이 생성되어 일반부식 환경이 조성될 수 있다. 또한, 물과 수증기의 경계면에서 비등이 발생하여 가혹한 부식환경이 형성된다.

다. 디스크와 시트 접촉면에서 물리적 현상

(1) 디스크와 시트 접촉면에 틈새가 존재할 경우

누설이 발생하면 틈새에는 국부적으로 원자로냉각재가 채워져 있어 산소가 부족한 지역이 된다. 특히 용존산소를 0.1ppm 이하로 조절된 원자로냉각재용존산소 농도가 낮기 때문에 틈새 부위에서 산소농도가 더욱 낮은 지역이 된다. 틈새에서의 온도가 매우 높기 때문에 비등이 발생하며 봉산이 농축되어 pH가 2 이하로 낮아지며 봉산수는 부식성이 강한 용융봉산수(molten boric acid)상태가 된다. 누설수는 매우 빠른 속도로 시팅면을 통과하기 때문에 부식방지기능을 하는 피동막이 손상되고 부식이 발생하면 부식 속도가 크게 가속된다. 누설이 발생하지 않는다면 안전주입측에 있는 재장전수 물이 차서 틈새에 고여 있다. 재장전수는 봉산농도가 높기 때문에 틈새에서 비등이 발생하면 봉산 농도가 더 높아져 부식성이 더 강한 환경이 조성된다. 따라서 시팅면 틈새는 봉산농축에 의한 낮은 pH 조건, 높은 산소농도차가 존재하는 가혹한 부식환경이 형성된다.

(2) 디스크와 시트 접촉면에 틈새가 없을 경우

접촉면에서 특별한 물리적 현상이 없다. 차압이 크기 때문에 틈새가 없다면 완전 밀착이 되므로 틈새부식 환경이 조성되지 않는다.

제 2절 역지밸브 변형해석 및 평가

1. 밸브 변형해석 개요

고온관 안전주입격리 역지밸브(밸브-A/B)는 ASME BPVC Code Section III NB 3500의 밸브 설계 기준에 따라 설계되었고, 이를 근거로 밸브에 대한 변형해석은 정상운전 조건에서 발생하는 밸브누설 및 부식의 원인을 파악하기 위해 시트 및 디스크에 대해 수행하였다. 역지밸브 변형해석에서 주요 관점은 고온 고압의 운전조건에서 밀봉 구성품인 디스크와 시트의 상대적 변형과 접촉표면의 응력분포를 확인하는 것이다.

이에 따라 역지밸브를 3차원 모델링을 통해 실제 형상으로 모사하였고 밸브의 각 구동부 및 접촉부를 접촉요소로 모델링하여 밸브 변형으로 인한 이상 거동과 접촉부의 분리 현상을 파악할 수 있는 비선형 구조해석을 수행하였다. 본 해석을 통해 운전조건에서 각 하중에 의한 밸브의 변형 및 응력분포를 제시하였으며, 손상 원인 분석 자료로 활용하였다.

가. 밸브 해석모델

해석 대상인 고온관 안전주입격리 역지밸브(밸브-A/B)는 7.62cm(3inch) 스윙타입 역지밸브이다. 밸브 형상은 그림 4.8와 유사하며, 밸브몸체, 커버, 디스크, 시트링 및 힌지 등으로 구성되어 있다. 밸브 작동 시 회전하는 힌지와 힌지핀 사이에 유격이 있어서 밸브 개방시 원활히 움직일 수 있는 구조이다. 힌지와 연결되는 디스크도 제한적이지만 상하 좌우로 움직일 수 있는 유격이 있어 디스크가 닫힐 때 시트링과 완전 밀착할 수 있는 구조로 되어 있다. (그림 4.8 참조) 해석에 이용되는 밸브 치수는 밸브 설계문서를 참고하여 모델링하였다.

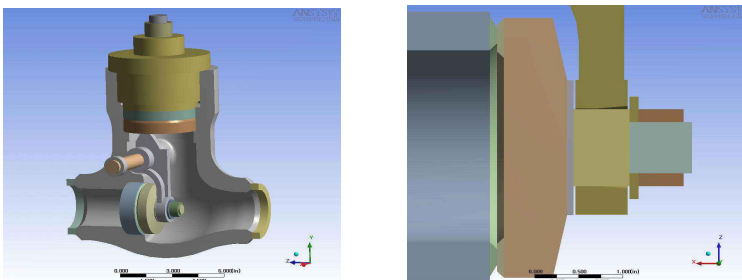


그림 4.8 스윙타입 역지밸브 일반적인 형상(디스크와 힌지 연결부위)

역지밸브의 밀봉부 부품에는 아래 그림 4.9처럼 육성용접 후 가공을 통해 접촉면이 형성 되어 있다.

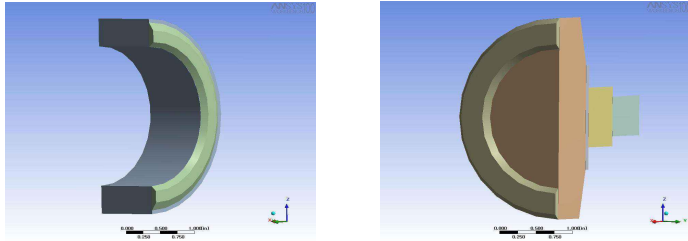


그림 4.9 디스크와 시트링의 접촉면

(1) 밸브 재질

역지밸브를 구성하는 부품별 재질은 다음과 같다. 변형해석에는 1/2 대칭면만 사용하므로 해석 모델에 포함되지 않은 Plug Bolt는 포함하지 않았다.

표 4.2 역지밸브 주요 부품별 재질

부품명	재질
Body	ASME SA-182 Grade F316
Cover	ASME SA-240 Grade F316
Disc	ASME SA-182 Grade F316
Hinge	ASME SA-182 Grade F316
Hinge Pin	ASME A-564, Type 630, H1100
Cover Retainer	ASME SA-182 Grade F316
Retainer Stud	ASTM A-564, Type 630, H1100
Contact Hard Face	Stellite 6

(2) 밸브 물성치

밸브 변형해석을 위한 각 주요 재질별 물성치는 표 4.2 및 표 4.3과 같이 주어졌다. 재질별 물성치는 ASME BPVC Code Section II, Materials, 2004년 판을 참고하였다.

(가) 밸브주요 재질에 따른 물성치

밸브몸체와 디스크 재질 등으로 이용되는 ASME SA-182, Grade F316 또는 ASME SA-351, Grade CF8M 재질은 주조와 단조에 따른 재질구분 이며 물성치는 동일하다.

표 4.3 ASME SA182 F-316 열팽창계수 및 열전도계수

온도(°C)	열팽창계수 ($\times 10^6$ mm/mm/°C)	열전도계수 (kcal/m ² h-°C)	온도(°C)	열팽창계수 ($\times 10^6$ mm/mm/°C)	열전도계수 (kcal/m ² h-°C)
21.1	15.3	40.0	21.1	17.1	47.8
37.8	15.5	40.5	37.8	17.3	48.8
65.6	15.8	42.0	65.6	17.5	49.8
93.3	16.0	43.0	93.3	17.6	51.2
121.1	16.4	44.4	121.1	17.6	52.2
148.9	16.6	45.4	148.9	17.8	53.2
176.7	16.9	46.3	176.7	18.0	54.7

표 4.4 Stellite 6 열팽창계수

온도(°C)	열팽창계수($\times 10^6$ mm/mm/°C)
20	11.4
100	11.4
200	13.0
300	13.6
400	13.9

(나) 밸브 경면재 Stellite 6 탄성계수 적용

고온에서의 Stellite 6의 탄성계수는 상온에서 탄성계수가 동일한 니켈합금(N02200)의 온도별 탄성계수 변화율과 밸브디스크 재질인 SA-182, F316의 온도별 탄성계수 변화율의 평균값(-0.005)을 이용해 고온에서의 탄성계수를 가정하였다.

표 4.5 Stellite 6 탄성계수

온도(°C)	탄성계수 ($\times 10^6$ kgf/cm ²)
21.1	2.1
371.1	1.9

(다) 밸브 경면재 Stellite 6 강도 및 밀도 적용

페라이트강과 오스테나이트강의 경우 설계응력강도는 해당온도에서 인장강도(Su)의 1/3과 항복응력(Sy)의 2/3 중 작은 값으로 설정된다. Stellite 6에 대한 설계응력 강도는 보수적으로 인장강도의 1/4 수준인 2,107.7kgf/cm²로 정하였다.

표 4.6 Stellite 6 강도 및 밀도

항목	물성치	단위
인장강도(Su)	8,647	kgf/cm ²
항복응력(Sy)	7,115	kgf/cm ²
설계응력강도(Sm)	2,109	kgf/cm ²
밀도(Density)	8.44	g/cm ³

나. 하중조건

역지밸브 변형해석에서 고려한 하중은 밸브 전, 후단의 온도차에 의해 발생하는 열 하중과 내압 그리고 배관으로부터 전달되는 구조하중을 고려하였다.

(1) 열하중

역지밸브 유동해석 결과를 토대로 노즐 부분에서의 평균온도를 해석입력으로 이용하였다. 전단(SI측) 온도는 154.2°C(309.56°F), 출구(RCS 측) 온도는 172.95°C(343.31°F)를 각각 밸브 내부의 전단과 후단에 대류조건으로 입력하였다. 밸브 바깥쪽은 단열조건으로 보수적인 열하중이 적용되도록 하였다.

(2) 압력하중

밸브내부에 작용하는 내압은 Thermal Pressure Mode Diagram으로부터 전단에는 3.6kgf/cm², 후단(RCS측)에는 158.2kgf/cm²를 밸브 내부에 각각 적용하였다.

다. 밸브 변형해석

(1) 역지밸브 유한요소 모델

역지밸브 변형해석은 ANSYS Workbench 10.0 버전을 이용하여 수행하였다. 밸브의 변형해석은 각 하중조건에서 디스크와 시트링의 변형 및 응력분포를 중점적으로 하였다. ANSYS의 요소 중 사면체 요소에는 10절점 사면체 요소인 SOLID187, 육면체 요소에 대해서는 20절점 육면체 요소인 SOLID186이 사용되었고, 접촉부에는 비선형 접촉 요소인 CONTA174 요소가 적용되었다. 변형 해석용 역지밸브 유한요소모델은 그림 4.10과 같다. 각 접촉부에서는 정확한 접촉부 변형 및 거동을 모사하기 위해 조밀하게 요소망을 생성하였다.

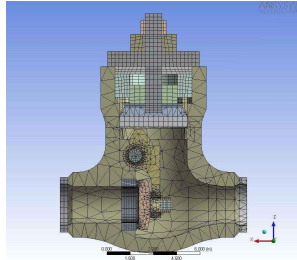


그림 4.10 역지밸브 유한요소 모델

(2) 해석 경계조건

모드해석을 위한 모델은 밸브 전체를 이용하여 작성하였으며 외형은 상기 그림 4.10과 같다. 밸브 노즐의 양쪽 끝단을 고정하여 밸브의 고유진동수를 산출할 수 있도록 하였다.

변형해석을 위한 유한요소 모델은 내부의 압력하중 및 열하중을 적용하기 위해 밸브의 1/2 단면만을 해석모델로 이용하였고, 단면에는 대칭(Symmetry) 경계조건을 적용하였다.

라. 열하중 해석결과

밸브의 유동해석결과로부터 양쪽의 온도를 대류조건으로 입력하여 해석한 결과, 그림 4.11과 같은 온도분포를 보인다. 이 온도분포를 기준으로 해석코드 내부적으로 온도별 물성치를 계산하여 각 요소망에 적용하였다.

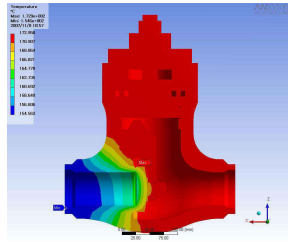


그림 4.11 역지밸브의 열해석 결과

또한, 열하중에 의한 변형 해석 결과는 그림 4.12와 같다. 그림에서와 같이 밸브 디스크 전면과 후면의 온도차에 의한 디스크의 변형이 발생한다.

디스크 후면이 더 많은 열변형을 함으로써 안쪽 접촉면에는 미세한 틈새가 발생하였다. 이 결과는 내압이 없는 상태의 온도 차에 의한 변형이며 매우 작은량(0.0034mm)이지만 전, 후단의 온도차가 커지거나 운전조건에 따라서 접촉면 안쪽의 밀착력에 영향을 줄 것으로 판단된다.

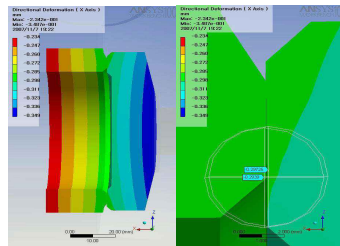


그림 4.12 열하중에 의한 역지밸브의 변형

마. 압력하중 해석결과

내압에 의한 변형 해석 결과 압력차에 의해 디스크 중앙 부분이 미세하게 전면으로 변형되는 결과를 보인다. 전체적으로 내압에 의한 시트링과 디스크의 변형은 매우 작은 것으로 확인되었다.

바. 열 및 압력하중 해석결과

열 하중과 압력이 동시에 작용할 때의 변형과 응력분포 해석 결과, 디스크의 전면과 후면의 변형편차에 의한 디스크 안쪽의 틈새는 발생하지 않았다. 압력에 의해 디스크 중심부가 전면으로 변형되면서 열 하중에 의한 변형을 상쇄하는 것으로 판단된다.

제 3절 밸브 변형해석에 따른 결과 도출

1. 결과 분석

고온관 안전주입격리 역지밸브(밸브-A/B)에 대한 변형 해석결과, 정상운전조건에서 열하중, 내압, 구조하중에 대한 응력은 ASME BPVC Section III 3500 밸브설계기준의 허용응력을 모두 만족하는 것으로 확인되었다.

특히, 변형해석 결과의 핵심은 순수한 열 변형일 경우, 밸브 디스크 전, 후면의 온도 차에 의해 디스크 후면이 더 많이 변형하여 디스크 안쪽에 미세한 틈새가 발생할 수 있다는 것을 확인한 것이다. 그러나 내압이 작용하는 전체적인 운전조건하에서는 내압에 의해 열변형이 상쇄되는 결과를 가져왔고 디스크 안쪽에 응력이 집중되는 현상을 보였다.

따라서, 밸브 변형해석에 따라 밸브의 전, 후단 온도차를 줄일 수 있는 방법을 도입한다면 온도 차에 의한 역지밸브의 열 변형을 줄일 수 있고 응력수준을 낮출 수 있어 밸브 온도 차에 기인한 변형으로 인한 틈새부식 및 응력을 해소할 수 있을 거라 판단된다.

2. 역지밸브 위치변경 후 변형해석

가. 해석입력 변경

고온관 안전주입격리 역지밸브의 설치 위치가 변경됨에 따라 관련 하중이 변경되었다. 밸브 설치 위치 변경이후의 유동해석 결과를 반영하여 새로운 온도 조건을 작성하였다. 그림 4.13은 밸브 설치위치 변경 후의 온도분포이다. 밸브 전단의 온도는 83.41°C(182.13°F), 밸브 후단의 온도는 83.94°C(183.092°F)를 밸브안쪽에 대류 조건으로 입력하였다.

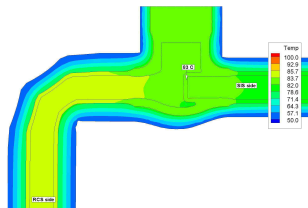


그림 4.13 밸브설치 위치 변경 후 유동해석 결과 온도분포

밸브 전, 후단에 걸리는 압력은 설치위치 변경전과 동일하며, 배관 구조하중의 경우 배관 배치 변경으로 인해 변경될 가능성이 있으나 배관계의 온도가 감소함에 따라 적절하게 지지될 경우 배관계에서 전달되는 구조하중도 감소될 가능성이 많았다.

나. 최종 변형해석 결과 및 분석(열하중 해석결과)

밸브 설치 위치 변경 이후의 온도조건을 반영한 해석 결과로부터 주어진 온도분포는 그림 4.14와 같다. 시트링과 디스크의 열하중에 의한 변형은 최대 0.085mm로 밸브 설치위치 변경전의 0.35mm 에 비해 24%로 줄어든 결과를 보인다.

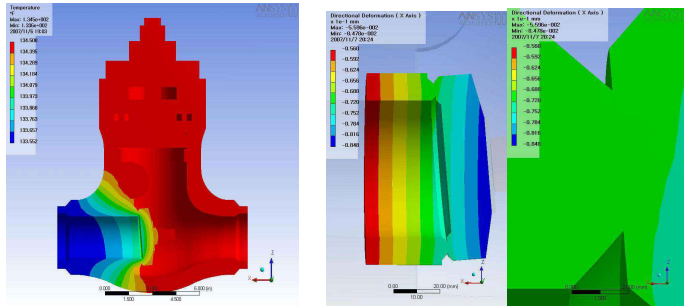


그림 4.14 밸브 설치 위치 변경 후 열해석 및 열하중에 의한 결과

다. 결과 요약

역지 밸브 해석모델 변경과 밸브 설치 위치 변경전과 후의 각 하중 조건에서 변형 해석을 수행하였으며, 주요 결과를 표 4.9에 요약하였다. 밸브 설치 위치 변경 전, 후 해석결과 모두 허용응력을 만족하였으며 밸브 설치위치 변경 후에 밸브 온도가 낮아짐에 따라 응력수준도 많이 낮아짐을 확인할 수 있다. 밸브 설치위치 변경의 결과로서 전체적인 열변형의 감소와 응력수준의 감소를 가져왔고, 이에 따라 밸브 디스크의 기밀성을 더 확보하는 결과를 가져왔음을 해석결과를 통해 확인할 수 있다.

표 4.7 밸브 설치위치 변경 전, 후 해석결과 비교

항목	설치위치 변경 전(a)	설치위치 변경 후(b)	b/a
열하중에 의한 시트링과 디스크의 변형량	0.35 mm	0.085 mm	24.3%
내압에 의한 디스크의 변형량	0.0233 mm	0.0254 mm	109.0%
내압에 의한 디스크의 응력	7,523 kgf/cm ²	7,101 kgf/cm ²	94.4%
구조하중에 의한 시트링의 응력	162.4 kgf/cm ²	125 kgf/cm ²	77.0%
열+ 내압에 의한 시트링의 응력	2,643.5 kgf/cm ²	801.5 kgf/cm ²	30.3%
열+ 내압에 의한 디스크의 응력	2,960 kgf/cm ²	963.2 kgf/cm ²	32.5%

제 4절 손상과정 분석

1. 역지밸브 손상과정 분석

가. 밸브전단이 물로 완전히 차있는 상태에서 손상분석

역지밸브 전단에는 항상 물로 완전히 차있어야 한다. 역지밸브 전단에 물로 완전히 차있을 경우 손상과정을 분석하였다.

(1) 지역 1(밸브디스크면)에서 손상분석

그림 4.15에서 지역 1의 틈새는 제작 단계에서 부정확한 제작으로 발생하거나 시트와 디스크 전, 후단 높은 온도 차와 배관 모멘트에 의해 발생하는 변형으로 생긴 국부적인 틈새이다. 이 지역에서는 4400ppm의 붕산수가 정채되어 갇혀 있는 상태이다. 이 지역은 152℃ 이상으로 높은 온도 조건이므로 비등이 발생하면서 붕산이 농축되므로 pH2 이하로 고 산성 지역이다. 비등이 발생하면서 용존산소가 고갈된 저 산소지역으로 완전 증기 상태로 채워져 있어 틈새 부식환경이 형성된다. 특히 pH가 매우 낮은 고산성이고 산소가 부족한 아주 가혹한 틈새부식 환경이므로, 아주 큰 틈새가 존재하여도 틈새부식이 발생할 수 있다.

밸브-A/B 역지밸브는 지역1에서 손상이 관측되지 않았으며, 이는 타 발전소에 비해 온도가 낮아 부식속도도 느리므로 손상이 발생하지 않는 것으로 판단된다.

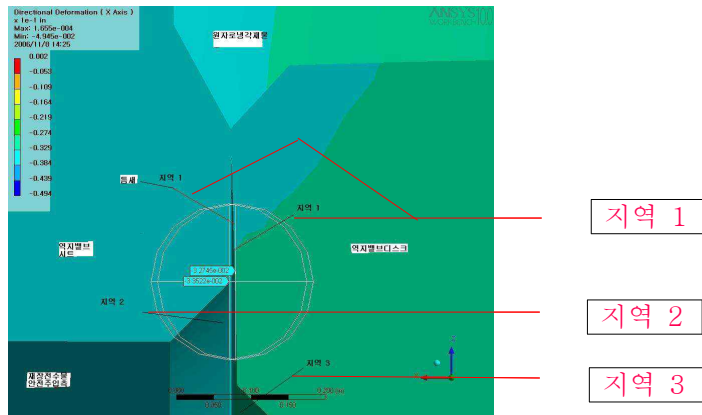


그림 4.15 밸브 시트와 디스크의 밀봉상태

(2) 지역 2(밸브 시트면)에서 손상분석

그림 4.15에서 지역 2는 밀봉되지 않는 지역으로 시트와 디스크 사이에 1-2mm 정도의 간극이 존재하며, 이 지역에서는 151℃ 이상의 고온으로 비등이 발생하고 지역 1과 동일하게 붕산이 농축되는 고 산성 지역이다. 또한 밀봉지역과 밀봉되지 않은지역의 경계선에서는 고 산성, 저 산소 지역으로 주변과 산소 농도 차가 발생하여 국부적인 산소전지가 형성된다.



그림 4.16 틈새부식으로 인한 손상

따라서, 이 경계선 지역은 가혹한 틈새부식 환경이 형성된다. 시팅 경계선에서는 배관 모멘트와 시팅 하중, 잔류응력으로 집중 인장응력이 작용한다. 이 지역에서는 부식 환경에 의해 부식이 형성되고 산소 농도 차 전지, 시팅하중 또는 잔류응력으로 부식이 가속화된다. 경우에 따라 깊은 국부손상이 발생한다. RCS 고온관 역지밸브에서는 그림 4.16과 같이 이 지역에 손상이 관측되지 않았다. 역지밸브(밸브-A/B) 진단 정지 냉각계통의 운전온도가 낮아 부식 속도가 매우 느리기 때문에 부식손상 영향이 적은 것으로 보인다.

(3) 지역 3(디스크 RCS측)에서 손상분석

그림 4.15의 지역 3에서는 고온지역이지만 물로 완전히 채워져 있고 압력이 높아 포화비등이나 막비등이 발생하지 않을 경우 붕산농축이 발생하지 않고, 손상을 발생시킬 수 있는 부식 환경이 형성되지 않는다.

2. 원자로냉각재 고온관 역지밸브의 손상과정

가. 검사결과 손상과정(HB3 점검10차)

역지밸브(밸브-B) 손상은 유사한 손상현상을 보이거나 HB4-10차 검사 때의 밸브 손상이 더 심각하다. 그러나 그림 4.17과 같이 동일한 한국표준원전인 타 호기의 역지밸브(밸브-A/B)보다 훨씬 덜 심각한 것을 확인 할 수 있다.

이는 역지밸브에서 운전온도가 낮기 때문에 부식속도가 상대적으로 느렸던 것으로 판단된다. 밸브 밀봉구성품 중 시팅 경면재와 모재 사이에서 약간의 손상 흔적은 갈바닉 부식 환경이 조성되고 비등으로 인해 물과 증기의 경계면에서 봉산농축 현상이 일어난 것으로 보여진다. 또한 pH가 매우 낮고 부식성이 강한 봉산상태가 되어 가혹한 부식 환경이 조성되었을 뿐 아니라 인장응력이 많이 걸리는 부분이기 때문에 부식이 발생하고 가속화되어 손상 진행이 급격히 커진 상태로 판단된다.



그림 4.17 표준원전 역지밸브 검사결과(HB3,4 10차) 디스크 손상상태

나. 검사결과 손상과정(HB3 점검 11차)

11차 검사결과 밸브-B는 별 다른 손상이 관측되지 않지만, 그림 4.18의 밸브-A는 모재에 넓은 범위에 걸쳐 흰색으로 변색되면서 넓은 범위가 패인 손상흔적이 관측된다. 이러한 손상은 처음 발견된 것으로 비등이 광범위하게 발생하고 증기 포켓이 폭 넓게 형성된 것으로 판단된다. 증기 포켓에서 봉산농축으로 부식성이 강한 봉산이 생성되고, 부식성이 강한 봉산수가 포켓 내에서 계속 순환한 것으로 판단된다. 이러한 부식성 유체의 순환에 의해 넓은 면적에 일반 균일봉산부식이 발생하여 파인 형태의 손상흔적을 보인다.



그림 4.18 역지밸브(HB3 밸브-A) 11차 검사결과 디스크 손상 상태

제 5절 손상원인 분석

1. 원인분석

역지밸브(밸브-A/B) 손상분석으로 물리적 현상을 분석하였다. 역지밸브 후단(RCS측)은 158kg/cm²로 가압되어 비등이 발생하지 않으며 RCS의 화학 조건을 유지한다.

따라서 역지밸브 후단에서는 별다른 물리적 현상이 없었음을 확인하였다. 역지밸브 전단측인 고온관 안전주입계통 배관측 역지밸브 안전주입측 전단에서 물리적 현상을 다음과 같이 분석하였다.

가. 디스크 표면에서의 현상

역지밸브 전단의 운전압력이 대기압이므로 디스크 표면에서 비등이 발생한다. 비등이 발생하면 물이 수증기화하여 증기 포켓이 형성된다. 내부 순환유량이 형성되고 비등이 발생하는 디스크 표면 근처에서는 난류가 형성된다.

압력이 대기압일 경우, 포화비등이 일어나고 누설이 발생하여 압력이 상승할 경우에는 금속 표면에서 국부적으로 막비등이 발생한다. 비등이 발생하면 금속 표면의 열전달이 저하되므로 금속 표면에서 온도가 급격히 상승하여 붕산이 농축되고 용융 붕산수(molten boric acid)상태로 변한다. 용융붕산수는 매우 부식성이 강한 상태의 붕산수이며 이때 붕산수의 pH는 2 이하가 된다.

나. 누설이 발생할 때의 현상

시트와 디스크의 틈새를 통하여 누설이 발생하면 역지밸브 전단의 압력이 상승하고 원자로냉각재가 시트면을 통과하면서 압력이 감압되어 증기상태로 분사된다.

증기는 다시 물로 응축이 되기도 하지만 온도가 높기 때문에 증기상태로 존재하여 증기 부피가 확대된다. 압력이 증가하면 증기가 깨지면서 공동현상이 발생할 수도 있다. 디스크 표면과 접한 수증기 부분은 주변보다 온도가 높고 물이 증발되어 붕산이 농축되고 pH가 2 이하로 낮아져 더 가혹한 부식 환경이 된다.

또한 원자로냉각재는 용존산소를 0.1ppm 이하이므로 원자로냉각재가 시팅면 틈새로 스며들어 국부적으로 고인 상태가 되면 주변 재장전수와 용존산소의 농도 차가 발생한다. 따라서 시팅면에 생긴 틈새부분은 pH가 매우 낮고 산소농도차가 큰 가혹한 틈새부식 환경이 형성된다. 그리고 분사되는 증기의 속도가 매우 빠르므로 침식이 발생하는 조건이 될 수 있다.

2. 원인분석 종합

가. 부식에 의한 손상

역지밸브(밸브-A/B) 시트와 디스크의 손상은 고온상태에서 유체의 비등과 국부적인 봉산수 농축에 의한 pH 감소(pH 2 이하로 감소)로 가혹한 부식 환경이 형성되어 갈바니 부식 조건이 되는 모재와 스텔라이트 경면 경계선에서 부식이 발생하고, 그 부식이 고온 조건, 응력 및 잔류응력, 누수로 인한 고속의 증기에 의해 부식이 가속화되어 손상이 심하게 발생한 것으로 판단된다.

또한, 비등조건에서 장시간 운전하므로 증기와 물 경계면에서 부식성이 강하고 pH가 낮은 강산성의 봉산수가 생성되어 갈바니 부식 조건이 형성되는 스텔라이트 경면 부분과 모재 경계선 모서리 부분의 부식손상 상태에서 부식성이 강한 봉산수의 내부순환으로 밸브 밀봉면 모재인 스테인리스 강(SUS F316 SA-182)에서 광범위한 일반 균일부식 손상도 발견된다.

나. 침식 및 부식에 의한 손상

누수가 발생하여 역지밸브 전단의 압력이 증가할 경우, 배수 운전을 반복적으로 수행하는 과정에 고속의 누수유량이 형성되어 부식으로 손상된 부분을 침식으로 더욱 손상을 가속화하고, 부식과 침식이 병행하여 더욱 손상이 심각해질 가능성이 있다. 그러나 HB3,4 역지밸브의 경우 RCS 운전 자료에는 누설에 의한 배수 운전 이력이 없는 것으로 보아 누설빈도와 누설량은 시트 및 디스크 손상과 직접적인 연관관계가 없는 것으로 판단된다.

다. 공동현상 및 프레싱현상

공동현상 및 프레싱현상에 의한 직접적인 손상은 관측되지 않는다. 시팅면은 경면으로 처리되어 심각한 공동현상이나 프레싱현상에 의한 손상은 나타나지 않을 뿐 아니라 시팅면이 비교적 긴 거리이므로 직접적인 공동현상에 의한 손상은 발생하지 않을 것으로 판단된다. 또한 스테인리스강 특성상 내부식 보호막이 파괴되어도 정상적인 조건에서는 보호막이 재생되어 부식이 발생하지 않지만 부식 환경이 악화된 경우에는 보호막이 재생되지 않을 수 있으므로 이는 부식을 유발하고 가속화시킬 수 있는 요인이 될 수 있다. 그러나 손상의 직접적인 원인은 아니다.

표 4.8 원인분석 종합

손상 원인	일차적 원인 요소	이차적 원인요소	가능성	비고
부식	고온조건	· 지속적인 비등 · 부식률 가속	매우 높음	손상 근본 원인
	비등	봉산농축으로 pH감소 가혹한 부식환경 조성	매우 높음	
	산소 농도차	국부적 산소농도차 전지형성으로 부식 환경 조성	매우 높음	
	배수운전에 의한 국부적 증기부분 형성, 증기와 물 경계면 형성	· 증기와 물 경계선 형성 · 경계면에서 비등발생 · 높은 온도차 또는 밸브제작 불량으로 틈새 발생 · 누수량증가, 부식성 강한 봉산수생성, 일반부식 또는 틈새부식 생성	매우 높음	손상 근본 원인
부식	· 높은 인장 응력 · 응력 집중	· 부식촉진 요인	중간	부식률 가속화
침식 및 부식 병행으로 부식 가속	누수량 증가에 의한 고속의 증기	· 내부식 보호막 파괴로 부식원인 제공 · 침식으로 손상 심화	중간	부식률 가속화
	냉각재 누수로 국부적 산소농도차 전지 형성	· 부식발생 원인 제공 · 산소농도 차, 비등으로 부식 가속	중간	부식률 가속화
공동현상	고 차압 조건의 누수 발생 및 기포 파괴	· 기포붕괴로 손상발생	낮음	손상흔적이 발견되지 않음
프레싱현상	고 차압 조건의 누수 발생	· 기포 파괴되지 않고 고속 증기로 분출	낮음	전단압력이 대기압일 경우 증기 상태로 분출

제 5 장 손상 분석에 따른 해결방안

제 1절 역지밸브 설계 및 기능적 변경

1. 역지밸브 설치위치 변경으로 온도감소

역지밸브의 위치를 원자로냉각재계통 고온관으로부터 멀리 이격되도록 옮기고 높이를 Mid-Loop이하(29m)에서 33m로 옮겨 원자로냉각재 고온관계통의 운전온도를 감소 시켜 온도차에 의한 고온관 밸브 영향을 최소화할 수 있는 밸브 위치 변경이 필요하다.

앞에서 언급한 온도분포해석 결과에 나타난 바와 같이 역지밸브 전단에서 151℃의 고온 조건이 형성된다. 이 고온 조건이 부산부식의 직접적인 원인이므로 비등이 발생하지 않는 저온 조건으로 변경해주는 것이 필요하다. 스테인리스 Type 316 재질과 스텔라이트 재질은 비등이 발생하지 않는 저온 조건에서는 내부식성이 강한 재질이므로 충분히 부식을 방지할 수 있다.

가. 온도저감을 위한 변경 전·후 배관길이 비교

역지밸브의 위치를 변경한 후 고온관으로부터 역지밸브(밸브-A/B)까지 배관 길이는 다음 표 5.1과 같다. 배관 길이의 변경에 따라 운전온도도 감소한다. 고온관으로부터 역지밸브(밸브-A/B)까지 배관길이는 11m에서 36m로 증가되었다. 따라서 밸브설치 위치를 변경할 경우, 표 5.2과 같이 역지밸브 에서의 온도는 83℃로 감소할 것으로 판단된다.

표 5.1 역지밸브 위치 변경 전후 배관길이

구 분 \ 대 상 기 기			HB3,4(변경 전)		HB3,4(변경 후)	
			밸브-A	밸브-B	밸브-A	밸브-B
배관 및 밸브 크기(cm)			7.62	7.62	7.62	7.62
설치 위치(m)			29.23	29.23	33	33
배관길이(m)	Hot Leg로부터 정지냉각배관 분기관까지 거리	수직	1.8	1.8	1.8	1.8
		수평	0.67	0.67	0.67	0.67
	정지냉각배관 분기관에서 역지밸브까지 거리	수직	0	0	27	30
		수평	8.6	8.8	3.5	3.5
	총합		11.1	11.3	33	36
정지냉각배관 분기관에서 역지밸브까지 곡관 개수	수평	2	2	9	9	
	수직	0	0	2	2	
	합	2	2	11	11	

표 5.2 역지밸브 위치 변경 전후 온도분포 해석결과 비교표

경계 \ 위치	역지밸브 위치 변경 전	역지밸브 위치 변경 후	비 고
역지밸브 전단 (안전주입 측)	151℃ (물이 완전히 차있을 경우) 171℃이상 (물이 완전히 차있지 않았을 경우 증기에 접하는 부분)	83℃ (물이 완전히 차 있을 경우)	안전주입 측 물의 수위가 감소할 경우 온도는 더 상승할 수 있다
역지밸브 후단 (RCS 측)	171.2℃ (물이 완전히 차있을 경우)	83℃	물의 수위가 감소할 경우 온도는 더 상승할 수 있다

주 ; 고온관 온도 327℃일 때 위치변경 전후 온도분포 해석결과 임.

나. 역지밸브 설치위치 변경

역지밸브의 위치를 옮겨 운전온도가 현저히 감소하면 디스크 전, 후단 온도차가 없어 시트와 디스크 변형으로 인한 틈새가 발생하지 않아 틈새부식 가능성을 배제시켜 누수를 방지할 수 있다.(밸브위치변경 29m → 33m)

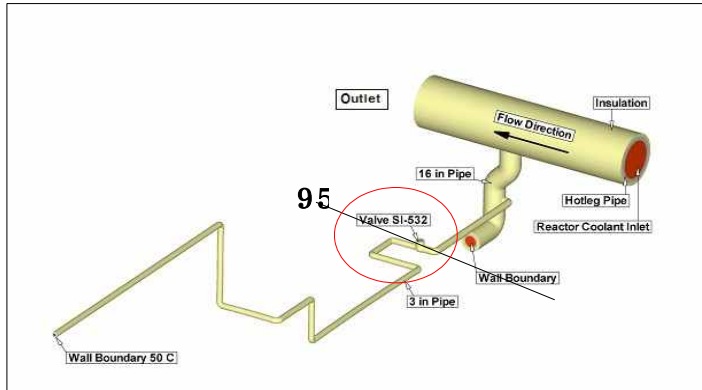


그림 5.1 역지밸브 위치변경 전(29m, 95ft)

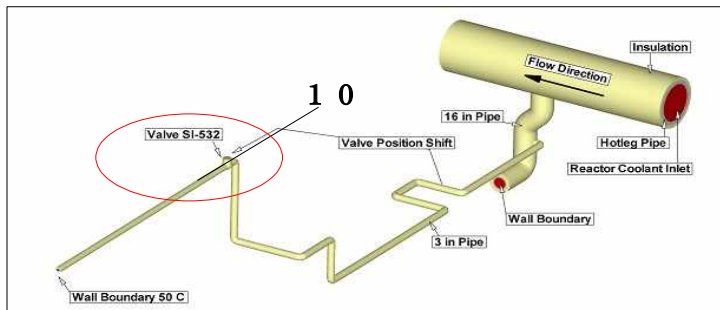


그림 5.2 역지밸브 위치변경 후(33m 108ft)

제 2절 역지밸브 운전방식 개선

1. 밸브전단 충수 운전으로 공동현상 제거

정지냉각계통 역지밸브 전단에 항상 물로 채워져 있게 충수운전할 경우 물과 증기의 경계면에 공동이 형성되지 않고, 역지밸브 전·후단 온도 차가 없기 때문에 누수 및 비등이 발생하지 않아 시트면을 통한 누설을 방지할 수 있다.

i) 시팅면을 통한 누수로 역지밸브 전단압력이 상승하여 배수운전을 반복할 경우, 역지밸브 전단에 국부적으로 증기의 경계점에서 큰 틈새가 형성된다. 이 틈새를 통한 누수가 전단 온도를 상승시켜 비등을 유발하여 넓은 부위의 손상을 일으킬 수 있다. 또한, 지속적인 비등으로 국부적인 증기부분이 형성되어 증기와 물의 경계면이 발생하여, 모재와 스텔라이트 경계점에서 갈바닉 부식발생의 근본 원인을 제공하므로 물을 가득 충수한 상태에서 운전하는 것이 바람직하다. 그러나 충수절차가 복잡하고 발전소 전체 운전에 영향을 줄 수 있으므로 충분한 운전검증과 시범적용 검토 후 적용이 필요하다.

ii) 역지밸브 전단에서 지속적인 비등발생시 봉산 농축으로 인한 pH 저하 등 부식환경이 조성되므로 비등방지를 위해 전단압력을 포화증기 압력이상으로 유지하는 것이 바람직 하다. 따라서 역지밸브(밸브-A/B) 전단압력을 40kg/cm²으로 일정하게 유지하여 역지밸브 전단 온도가 상승하여도 비등이 발생하지 않도록 조치하는 것이 바람직하다.

시범운전 기간 동안 정지냉각 입구측(밸브전단) 충수 및 전단압력을 일정 압력으로 유지하여 시범운전 및 점검한 결과, 밀봉부 부식 및 손상 징후를 발견하지 못했다.

2. 밸브 내부부품 시팅면 개선

틈새부식 환경을 제거하기 위해 디스크와 시트의 시팅면에 틈새를 제거해야 한다. 또한, 역지밸브의 시트면을 통해 많은 누수가 발생할 경우 역지밸브 전단 온도가 비등점 이상으로 상승할 수 있고 전단 압력증가로 배수 운전을 자주하게 되어 전단에 수위가 낮아져 동일한 손상이 재발할 가능성이 있으므로 누수를 최소화하기 위해 밀봉성능 개선 이 필요하다. 그러나 시범운전 후 내부누설 점검결과와 같이 역지밸브 전단 정지냉각계통에서 누설징후가 발견되지 않았으며, 밸브 내장품 점검결과 디스크 및 시트 상태가 양호하고 틈새부식이 발견되지 않은 점으로 미루어 본 연구결과에 의한 밸브 손상 원인분석에 따른 개선조치는 성과가 있는 것으로 판단된다.

제 6 장 결 론

한국형 표준원전의 고온관 역지밸브 밀봉부 손상은 RCS 압력경계 차단기능이 상실되는 안전기능 저하와 설치위치가 노심이하(Mid-Loop)에 설치되어 역지밸브를 정비하기 위해서는 RCS 고온관의 고방사선 피폭과 원자로에서 핵연료 전체를 인출해야 하는 열악한 환경적 조건에서 역지밸브 내장품 손상의 원인을 규명하고 표준원전의 안정적 운영에 기여하고자 매년 정비 차수에 역지밸브 손상상태를 모니터링하여 내장품 침식/부식 영향분석, 평가를 수행하였다.

본 연구에서는 역지밸브 내장품 손상상태 점검 결과로, 표준원전의 고온관 역지밸브 손상원인을 도출하기 위해 아래와 같이 여러 가지 방법으로 연구를 진행하였다.

첫 번째로, 역지밸브 밀봉부에 대한 RCS 고온관의 높은 온도 차와 배관으로부터 모멘트가 작용할 때 시트와 디스크면의 변형 경향을 ANSYS 프로그램을 이용하여 분석하였다.

두 번째로, 손상된 밸브 밀봉부 재질인 스테인리스강의 특성과 밀봉면에 경면 처리한 스텔라이트 재질의 침, 부식 자료를 수집하여 검토하였다.

세 번째로, 고온관 역지밸브에서 발생하는 물리적 현상을 분석하여 정리하였으며 손상발생 시나리오를 분석하여 발전운영 및 밸브점검에 적용하였다.

그 결과 역지밸브 후단(RCS측)은 $158\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 가압되어 비등이 발생하지 않았으며 RCS의 화학조건을 유지된 것으로 보아 밸브 후단에서는 물리적 현상이 없었으며, 밸브 전단에서의 디스크 및 시트 손상은 부식성이 강한 용융붕산수와 시트부의 미세한 누설로 인한 공동현상과 누설부분의 틈새로 침식이 발생하는 조건이 될 수 있음을 확인하였다.

이러한 손상원인 분석에 따라 RCS 고온관의 역지밸브 밀봉부 전, 후단 온도 차를 감소시키기 위해 밸브 위치를 Mid-loop이상으로 변경하였으며, 밸브 전단 온도조건을 비등이 발생하지 않는 저온조건으로 변경하기 위해 밸브 전단에 냉각수를 충수하는 배관충수 운전으로 해결할 수 있었다.

이는 기존의 표준원전에서 발생하는 고온관 역지밸브의 운전방법과 설치위치 문제점을 도출하여 최적화 한다면 RCS 압력경계 압력과단의 위험과 고 방사선 구역에서의 밸브교체 및 정비문제를 큰 비용부담 없이 개선할 수 있고, RCS 안전운전 신뢰성을 증가 시킬 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. RCS 압력경계 역지밸브 침, 부식 발생 현황 및 대책보고 - HB3,4 정비계획서
2. 고온관 안전주입 역지밸브 개선방안 - HB3,4 정비계획서
3. 고온관 안전주입 격리 역지밸브 문제해결 용역보고서 - 한국전력기술(주)
4. 고온관 안전주입 역지밸브 개선용역 진도보고서 - 한국전력기술(주)
5. 고온관 안전주입 역지밸브 설치위치변경 설계변경서 - 영이3,4-기계-441-982
6. 고온관 역지밸브 문제해결 용역보고서(한빛 1발, 고리 2발, 한울 2발) - 한국전력기술(주)
7. 표준원전 RCS 배수 및 노즐 부분 충수 운전절차서(종합-06)
8. 표준원전 정지냉각계통 상실시 조치 운전절차서(비정상-45)
9. 표준원전 발전소 정지 중 안전기능 점검 운전절차서(비정상-45)
10. 원자로냉각재 고온관 역지밸브 개선사항 및 적용검토 보고서 - 한전 KPS(주)
11. EPRI/MPR, Boric Acid Corrosion(BAC) Testing Program: Immersion Test Result
12. EPRI, "Boric Acid Corrosion Guideline Rev 01
13. EPRI, "Boric Acid Corrosion Evaluation(BACE) Program Phase 1-Task 1 Report", 1993년 12월
14. Fisher Emerson, "Control Valve Handbook"
15. Operability Demonstration Report for 3-inch Stainless Steel Swing Check Valve
16. Combined Design & Seismic Report for Stainless Steel Swing Check Valve
17. ASME BPVC Section II Materials - Part D Properties, 2004 Edition.
18. Instruction Manual E2-13593-N Velan Check Valves
19. Velan Check Valve정비 절차서(Y34M-범용-VV-D-127-Q)

감사의 글

만학도의 기분이 이런 걸까? 묘한 감정이 앞서지만 시작의 끝을 보게 된 기나긴 석사과정을 마치고 성취감에 잠시 취해 감사의 글을 올립니다.

한빛 3,4호기 건설 및 시운전을 시작으로 원자력과 인연을 맺은 삼십년 가까이 발전소 업무에 종사 하면서도 원자력 발전운영에 대하여 만족과 보람보다는 아쉬운 마음이 늘 앞서기만 했습니다. 그 이유는 제가 알고 있는 기초지식과 현장업무 수행 중 갖고 있는 의문점 사이에서 전문지식 부족으로 원인평가 미흡이라는 이론적 한계에 부딪쳤고, 그럴 때 마다 부족한 지식을 채워야 한다는 생각을 늘 하게 되었습니다. 이런 저에게 석사학위 과정은 큰 도전으로 다가왔고, 과감한 도전은 학위를 마칠 수 있는 성과로 보상받을 수 있었습니다.

1차계통 밸브업무를 접하면서 RCS압력경계 역지밸브 문제가 한국표준원전의 고질적인 문제가 되고 있음을 알게 되었고, 근본적인 문제점 파악을 위해 자료수집 및 원인분석 연구를 통한 개선방안 도출 후 계통기기의 성능시험, 평가 등 현장에 적용하는 과정 동안 도출된 개선안을 적용함에 따른 원자로 냉각재계통 압력경계 기기의 운전신뢰성을 향상시키는 결과를 얻게 되었습니다.

학위과정은 전문지식을 채우는 과정이기도 했지만 개인적으로는 일과 학업을 병행해야 하는 어려움과 국외(UAE)로 근무지가 바뀌는 환경적 요인으로 학업을 중단해야 했던 기간에도 김진원 교수님의 애정 어린 지도와 선, 후배님들의 응원이 유난히 길었던 학위과정을 무사히 마칠 수 있는 원동력 이었다 생각합니다.

다시 한번 뜨거운 열정과 자상함으로 논문의 완성도를 올리기 위해 본 논문을 지도해 주신 김진원 교수님께 진심으로 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 논문 심사과정과 학과 수업시간에 변함없는 애정과 관심으로 격려해주신 이정진 교수님, 나만균 교수님, 정운관 교수님, 송종순 교수님, 또한 학과 업무로 바쁘심에도 불구하고 항상 관심을 가져주신 김종현 학과주임교수님께도 머리 숙여 깊은 감사를 드립니다.

또한, 학위과정을 무사히 마칠 수 있도록 도와주신 회사 선배님들, 특히 김재성님, 이성완님, 조용완님, 최종학님과 동료분들께 특별히 감사를 드립니다.

기나긴 학업기간 포기하지 않고 무사히 마칠 수 있도록 물심양면 아낌없는 지원과 많은 용기를 북돋아준 사랑하는 가족들에게 감사드리고 항상 저와 함께 동행해주시고 인도해주신 하나님께 감사와 영광을 올립니다.

2021년 5월

신 동 욱