

웨스팅하우스형 원전의 보조급수계통 설계변경 영향 평가

나장환[†] · 배연경* · 이은찬*

A Safety Improvement for the Design Change of Westinghouse 2 Loop Auxiliary Feedwater System

Jang Hwan Na[†], Yeon Kyoung Bae* and Eun Chan Lee*

(Received 18 July 2013, Revised 10 August 2013, Accepted 20 August 2013)

ABSTRACT

The auxiliary feedwater is an important to remove the heat from the reactor core when the main feedwater system is unavailable. In most initiating events in Probabilistic Safety Assessment(PSA), the operation of this system is required to mitigate the accidents. For one of domestic nuclear power plants, a design change of a turbine-driven auxiliary feedwater pump(TD-AFWP), pipe, and valves in the auxiliary system is implemented due to the aging related deterioration by long time operation. This change includes the replacement of the TD-AFWP, the relocation of some valves for improving the system availability, a new cross-tie line, and the installation of manual valves for maintenance. The design modification affects the PSA because the system is critical to mitigate the accidents. In this paper, the safety effect of the change of the auxiliary feedwater system is assessed with regard to the PSA view point. The results demonstrate that this change can supply the auxiliary feedwater from the TD-AFWP in the accident with the motor-driven auxiliary feedwater pump(MD-AFWP) unavailable due to test or maintenance. In addition, the change of MOV's normal position from "close" to "open" can deliver the water to steam generator in the loss of offsite power(LOOP) event. Therefore, it is confirmed that the design change of the auxiliary feedwater system reduces the total core damage frequency(CDF).

Key Words : Probabilistic Safety Assessment(PSA, 확률론적안전성평가), Turbine-driven Auxiliary Feedwater Pump (TD-AFWP, 터빈구동 보조급수펌프), Motor-driven Auxiliary Feedwater Pump(MD-AFWP, 모터구동 보조급수펌프), Loss of Offsite Power(LOOP, 소외전원상실사고), Core Damage Frequency(CDF, 노심손상빈도)

1. 서론

원자력발전소의 보조급수계통은 일반적으로 기동, 고온대기 및 정지시 원자로를 냉각하기 위해서 증기 발생기로 급수를 공급하는 기능을 수행한다. 비상조 건하에서 주급수계통을 이용할 수 없을 경우 원자로 냉각재로부터 노심의 열을 제거하기 위해 비상계통으

로서 기능을 수행한다¹⁾. 보조급수계통은 주급수펌프 상실이나 주급수격리밸브 후단의 급수배관 파손시에 도 충분한 양의 급수 유량을 유지할 수 있도록 설계되어 있다.

비상상황에서 보조급수계통은 잔열제거계통이 이용 불가능하거나 전력이 상실되더라도 증기발생기로 급수공 급 기능을 계속 수행할 수 있다^{2,3)}. 또한 보조급수계통 은 확률론적안전성평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA)에서 고려되는 초기사건 중 냉각재상실사고군의 소형냉각재상실사고, 증기발생기 전열관 파단사고와 대부분의 과도사건에서 사고 발생시 이차측 열제거를

† 책임저자, 회원, 한국수력원자력(주) 중앙연구원
E-mail : janghna@khnp.co.kr
TEL : (042)870-5640 FAX : (042)870-5999

* 한국수력원자력(주) 중앙연구원

위해 사용되는 중요한 사고완화계통이다³⁾.

참조발전소인 웨스팅하우스형 원전은 모터구동 보조급수펌프 2대와 터빈구동 보조급수펌프 1대가 설치되어 있다. 해당 원전이 약 30년 동안 운영됨에 따라 터빈구동 보조급수펌프, 관련 배관, 밸브 등이 노후화되고 예비품이 확보되지 않아 계통의 성능과 신뢰성 확보를 위해 설비의 교체가 요구되었다.

특히 기존 터빈구동 보조급수펌프에는 펌프 보호를 위한 전기적 과속도 정지 장치가 설치되어 있지 않아 과속도 정지시험을 수행하지 않았다.

그리고 옥외 배관 및 밸브는 외부 부식 및 국부적인 감육이 발생하여 교체가 필요한 상태였다. 따라서, 이들 노후화 설비는 안전성 배관 및 밸브에 대한 기술기준에 따라 교체되었다⁴⁾. 설비교체와 더불어 안전성과 계통 정비 편이성 측면에서 밸브 위치 변경, 교차연결 배관 추가, 정비작업을 위한 밸브 신설 등의 설계변경이 수행되었다.

본 논문에서는 이 보조급수계통의 전반적인 설비 교체 및 설계 변경 사항에 대해 신뢰성 및 안전성 측면에서 그 영향을 평가하고자 한다.

2. 계통 개요

보조급수계통은 2대의 증기발생기에 충분한 보조급수를 공급할 수 있는 1대의 터빈구동 보조급수펌프와 각각의 증기발생기에 보조급수를 공급할 수 있는 2대의 모터구동 보조급수펌프로 구성되어 있다. 그 외에

복수저장탱크, 청수탱크, 관련 밸브 및 배관으로 구성되어 있다^{2,3)}.

각각의 모터구동 보조급수펌프가 기동되면 후단 모터구동밸브가 자동으로 개방되어 각각의 증기발생기에 보조급수를 공급한다. 모터구동 보조급수펌프가 이용불능인 경우 터빈구동 보조급수펌프는 주증기 계통으로부터 증기를 받아 구동되고 후단 모터구동밸브가 개방된다. 증기발생기로 공급되는 보조급수는 공기구동 유량조절밸브에 의해 조절된다. 보조급수펌프의 수원은 복수저장탱크이고 이 탱크 고갈을 대비하여 청수탱크가 독립된 배관으로 연결되어 있다³⁾. 보조급수계통의 단순계통도는 Fig. 1에 나타내었다.

3. 설계 변경

3.1 설계변경 사항

Fig. 2는 Fig. 1의 보조급수계통을 설계변경한 후의 단순계통도를 나타낸 것이다.

설계변경된 부분은 도형으로 표시하였고, 설계변경내용과 그 사유는 다음과 같다.

- 1) 보조급수펌프 후단에 설치되어 있는 수동밸브 VFE-29A와 29B는 해당 모터구동 보조급수펌프 시험시 차단된다. 이 밸브들을 터빈구동 보조급수 공급 배관 연결부 전단으로 이설하여 해당 모터구동 보조급수펌프 시험시에도 터빈구동 보조급수펌프에 의해 보조급수가 공급될 수 있도록 유로를 확보하였다.
- 2) 터빈구동 보조급수펌프 후단 차단밸브인 VFE-

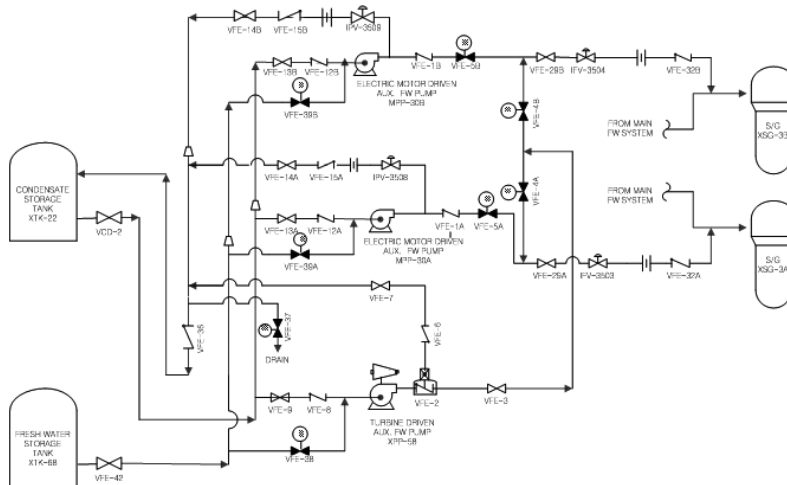


Fig. 1 Schematic diagram of auxiliary feedwater system before a design change

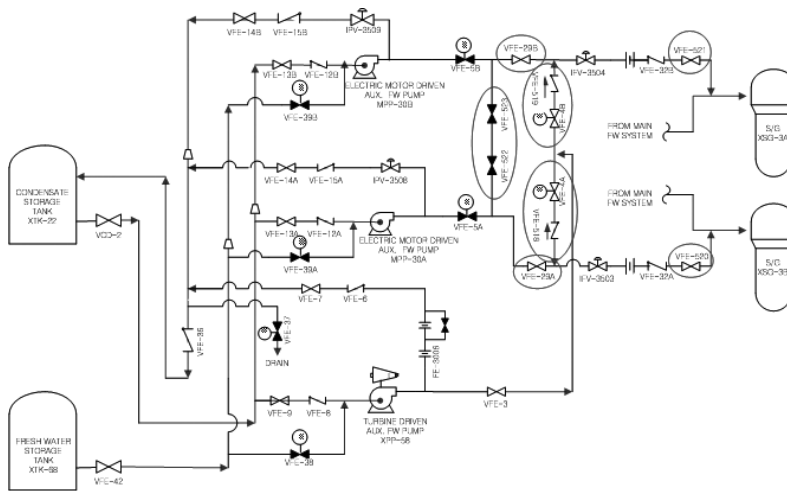


Fig. 2 Schematic diagram of auxiliary feedwater system after a design change

4A와 4B는 정상운전 중 “단합”으로 설계되어 있어 밸브 작동 불능 발생시 터빈구동 보조급수펌프에 의한 보조급수 공급이 불가능하므로 정상운전 중 “열림”으로 변경하고 역류방지를 위해 각 밸브 후단에 체크밸브 VFE-518과 519를 추가하여 터빈구동 보조급수펌프에 의한 보조급수 공급이 가능하도록 변경하였다.

3) 기존에는 계열별로 해당 증기발생기에 모터구동 보조급수를 공급하였으나, 터빈구동 보조급수펌프에 의한 보조급수 공급이 실패할 경우 서로 다른 계열로 모터구동 보조급수 공급이 가능하도록 교차연결배관에 차단밸브 VFE-522와 523을 신규로 설치하였다. 이 밸브는 정상운전 중 닫힘 상태이다.

4) 증기발생기로의 급수 공급 유로에 있는 체크밸브 VFE-32A와 32B는 누설이 발생하거나 정비가 필요할 경우 체크밸브 후단에 차단밸브가 없어서 정비가 불가능하여 수동 격리밸브 VFE-520과 521을 신설하여 정비시에 차단이 가능하도록 하였다⁴⁾.

3.2 고장수목 모델링 가정사항

설계변경된 사항을 고장수목에 반영하기 위해 사용된 가정사항은 다음과 같다.

- 1) 모터구동 보조급수펌프 후단으로 이설된 수동밸브 VFE-29A, 29B에 대하여 운전원이 수동 차단을 실패하는 운전원 조치 실패 사건은 모터구동 보조급수펌프 후단(XPP-30A, 30B) 세그먼트에서 고려한다.
- 2) 터빈구동 보조급수펌프 후단 차단밸브인 VFE-4A

Table 1 Failure rate of check, manual, and motor operated valve

기기명	고장(확)률	연간고장확률	비고
Check Valve	1.63E-4/d	-	Fail to open
Manual Valve	2.27E-8/hr	1.80E-4	Transfer closed ^a
MOV	1.40E-7/hr	1.11E-3	Fail to remain open ^b
2/2 CCF of Check Valves	1.18E-1	-	Fail to open

* 데이터 출처 : PSA 보고서(07.5)/EPRI URD(95.12)

^a2.27E-8/hr×24hr/1day×30days/1month×11month = 1.80E-4

^b1.40E-7/hr×24hr/1day×30days/1month×11month = 1.11E-3

와 4B의 고장모드는 개방 유지실패이고, 이 밸브는 구동 전원 고장시에도 개방상태를 유지하기 때문에 보조계통은 모델링하지 않는다. 이 모터구동밸브의 기기 고장률은 1.40E-7/hr이다.

3) 교차연결배관에 있는 수동 밸브 VFE-522와 523의 고장모드는 개방실패이고 운전원 조치 실패를 모델링한다.

4) 터빈구동 보조급수펌프 후단 차단밸브의 후단 체크밸브인 VFE-518과 519의 고장모드는 개방 실패이고 공통원인고장을 모델링한다.

5) 정상운전 중 개방상태로 잠겨있는 VFE-520과 521이 닫힐 가능성은 없으나 기계적인 원인에 의해 닫히는 것을 모델링한다.

Table 1은 설계 변경으로 추가되고 고장모드가 변경된 밸브들의 고장률을 나타낸 것이다^{3,5)}.

4. 분석 결과

4.1 보조급수계통의 이용불능도

Table 2는 정점사건별 보조급수계통의 이용불능도를 나타낸 것이다. GAF-TOP은 정상운전시 과도사건이 발생하여 2개의 증기발생기에 모터구동 보조급수펌프나 터빈구동 보조급수펌프에 의한 보조급수 공급이 실패하는 사건이다. GAF-TOP-LOP와 GAF-SBO는 각각 소외전원상실사고와 발전소정전사고가 발생하였을 때 보조급수 공급이 실패하는 사건이다. 보조급수계통의 설계변경을 반영하여 정량화한 결과 계통 신뢰도측면에서 볼 때 소외전원상실사고시와 정상운전시 이용불능도를 각각 13%, 17%정도 감소시켰다.

그러나 발전소정전사고시에는 이용불능도가 0.3%만이 감소하여 해당 설계변경 사항들이 발전소정전사고 측면에서 계통의 이용불능도를 감소시키지는 못하는 것으로 평가되었다.

정상운전 및 소외전원상실사고시 보조급수계통의 이용불능도를 감소시킨 가장 큰 원인은 VFE-29A와 29B를 터빈구동보조급수펌프 공급 배관 전단으로 이설하여 모터구동 보조급수펌프 시험중에도 터빈구동 보조급수펌프에 의한 급수 공급이 가능하게 한 것과 터빈구동 보조급수펌프 공급배관에 있는 VFE-4A와 4B의 정상위치를 닫힘에서 열림으로 변경한 것이다.

Table 2 Unavailability of the top events for the auxiliary feedwater system

정점사건	이용불능도		감소율(%)
	개선전	개선후	
GAF-TOP	1.599E-4	1.325E-4	-17.1
GAF-TOP-LOP	2.326E-4	2.025E-4	-12.9
GAF-SBO	2.381E-2	2.374E-2	-0.3

4.2 노심손상빈도

Table 3은 전체 노심손상빈도에 중요하게 영향을 미치는 상위 15개 사고경위에 대해 설계변경 전·후의 노심손상빈도를 비교한 것이다. 소외전원상실사고의 사고경위 5번이 보조급수계통의 설계변경이 이루어짐에 따라 순위가 8위에서 15위로 내려갔음을 알 수 있다. 사고경위 5번의 사고 발생후 진행순서는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 비상디젤발전기 기동이 성공하지만 이차측 열제거에 실패하여 방출 및 주입운전을 수행하였으나 고압재순환운전에 실패하는 것이다. 해당 사고경위

Table 3 Comparison of results for frequencies of important sequences contributed to the total CDF in internal events

사고경위	빈도		중요도 순위	
	변경전	변경후	전	후
IE-LOP006	7.75E-06	7.70E-06	1	1
SL-MRI-LOP	1.30E-06	1.30E-06	2	2
IE-SBO006	9.01E-07	9.01E-07	3	3
IE-GTN006	6.81E-07	5.93E-07	4	5
IE-SLOCA003	5.97E-07	5.97E-07	5	4
IE-LKB006	5.33E-07	5.02E-07	6	7
SL-MRI-GTN	5.09E-07	5.09E-07	7	6
IE-LOP005	3.25E-07	1.74E-07	8	15
IE-MLOCA003	3.08E-07	3.08E-07	9	8
SL-MRI-LKA	3.03E-07	3.03E-07	10	9
IE-SGTR006	2.54E-07	2.53E-07	11	10
IE-SBO011	2.32E-07	2.32E-07	12	11
IE-LKA006	2.13E-07	1.87E-07	13	13
IE-SLBU002	2.04E-07	2.05E-07	14	12
IE-SBO016	1.75E-07	1.75E-07	15	14

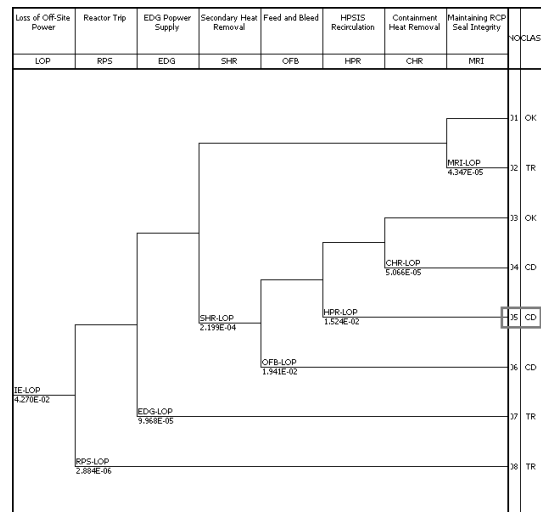


Fig. 3 Event tree of loss of offsite power

의 노심손상빈도가 내려간 것은 소외전원상실사고시의 보조급수계통의 이용불능도가 감소하였기 때문이다.

Table 4는 보조급수계통 설계변경 전후의 초기사건별 노심손상빈도 변화를 나타낸 것이다. 냉각재상실사고로 분류되는 초기사건에서는 소형냉각재상실사고와 증기발생기 전열관 파단사고의 노심손상빈도가 각각 0.16%, 1.08% 감소하였다. 과도사건 군에서는 발전

Table 4 Comparison of core damage frequency with initiating events

초기사건명		변경전 (CDF)	변경후 (CDF)	감소비율 (%)
LOCA군	SLOCA	6.44E-07	6.43E-07	-0.16
	SGTR	4.63E-07	4.58E-07	-1.08
과도사건군	GTRN	1.21E-06	1.12E-06	-7.44
	LOFW	2.86E-07	2.44E-07	-14.69
	LOCV	2.33E-07	1.99E-07	-14.59
	SLBU	2.73E-07	2.42E-07	-11.36
	SLBD	9.37E-08	8.92E-08	-4.80
	LOCCW A	1.32E-08	1.26E-08	-4.55
	LOCCW B	1.32E-08	1.26E-08	-4.55
	LOKV A	5.37E-07	4.93E-07	-8.19
	LOKV B	6.62E-07	6.05E-07	-8.61
	LODC A	8.31E-08	7.98E-08	-3.97
	LODC B	5.47E-08	5.25E-08	-4.02
	LOOP	9.37E-06	9.18E-06	-2.03
	ATWS	1.56E-07	1.43E-07	-8.33

Table 5 Cutset and CDF analysis of before and after the design modification of the auxiliary feed-water system

구분	최소단절집합 총수	CDF 감소율(%)
변경전	16,183	-
변경후	14,445	-3.7

소정전사고를 제외한 대부분의 사고에서 노심손상빈도가 최소 2.0%에서 최대 14.7%까지 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 냉각재상실사고군보다 과도사건 군에서 설계변경의 효과가 더 높게 나타나는 것을 볼 수 있다.

Table 5는 전체 노심손상빈도 변화와 전체 최소단절집합 개수를 나타낸 것이다. 4.1항에서 언급한 바와 같이 VFE-4A와 4B의 정상운전시 밸브의 상태가 닫힘에서 열림으로 변경되어 이와 관련된 공동원인고장 사건이 최소단절집합에서 제거되었다. 따라서 이 감소가 전체 노심손상빈도에도 영향을 나타낸 것이다. 보조급수계통의 설계 변경으로 전체 노심손상빈도는 3.7% 감소하는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 논문에서는 안전성 향상의 일환으로 웨스팅하우스

스형 원전의 보조급수계통을 설계변경함에 따라 해당 발전소의 PSA 모델을 수정하고 이에 따른 안전성 향상 여부를 평가하였다. 평가 결과에 따르면 정상운전 상태와 소외전원상실사고시에 보조급수계통의 이용불능도를 각각 17%, 13% 감소시켰으나, 발전소 정전사고시에는 이용불능도의 변화가 미미하였다. 이는 초기사건별 노심손상빈도 변화에서도 볼 수 있는데, 발전소 정전사고를 제외한 이차측 열제거와 관련 있는 초기사건에서 노심손상빈도가 최대 14.7%까지 감소하였다. 이러한 감소율은 전체 노심손상빈도의 감소로 이어져 변경 후 3.7%정도 감소하는 것으로 나타났다.

설계변경 사항 중 계통의 이용불능도와 노심손상빈도 감소에 가장 기여도가 높은 요인으로 두 가지를 들 수 있다. 첫째는 터빈구동 보조급수펌프에 의해 보조급수를 양쪽 증기발생기로 공급할 경우 교차배관에 있는 모터구동밸브의 운전상태가 닫힘에서 열림으로 변경된 것이다. 모터구동밸브의 구동전원이 상실되더라도 터빈구동 보조급수펌프에 의한 급수를 공급할 수 있게 해주기 때문이다. 두번째는 터빈구동보조급수펌프 후단에 설치되어 있던 수동밸브를 모터구동 보조급수펌프 후단으로 이설하여 모터구동 보조급수펌프 이용불능시에도 터빈구동 보조급수펌프로 증기발생기에 급수를 공급해 줄 수 있기 때문이다.

상기 분석결과로 볼 때 해당 보조급수계통의 설계변경은 계통의 신뢰도를 향상시키고 사고시 안전 대처를 강화할 수 있는 것으로 평가되었다.

본 논문에서 고려된 확률론적안전성평가 결과는 향후 국내 원전의 보조급수계통 설계변경시 설계검토 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. KINS, 2009, "Safety Review Guide for PWR".
2. KHNP, 2003, "Final Safety Analysis Report for Kori 1 unit".
3. KHNP, 2003, "Probabilistic Safety Review for Kori 1 unit".
4. KHNP, 2012, "Design Change for the Auxiliary Feedwater System for Kori 1 unit".
5. EPRI, 1995, "Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document, Vol. II, ALWR Evolutionary Plant Ch.1, Appendix A rev. 7.