

<연구논문>

중수로 증기발생기 다중 전열관 파단사고시 파단 전열관 수에 대한 영향 분석

유선오[†] · 이경원^{*}

Influence Analysis on the Number of Ruptured SG u-tubes During mSGTR in CANDU-6 Plants

Seon Oh Yu[†] and Kyung Won Lee^{*}

(Received 7 November 2022, Revised 18 November 2022, Accepted 2 December 2022)

ABSTRACT

An influence analysis on multiple steam generator tube rupture (mSGTR) followed by an unmitigated station blackout is performed to compare the plant responses according to the number of ruptured u-tubes under the assumption of a total of 10 ruptured u-tubes. In all calculation cases, the transient behaviour of major thermal-hydraulic parameters, such as the discharge flow rate through the ruptured u-tubes, reactor header pressure, and void fraction in the fuel channels is found to be overall similar to that of the base case having a single SG with 10 u-tubes ruptured. Additionally, as the conditions of low-flow coolant with high void fraction in the broken loop continued, causing the degradation of decay heat removal, the peak cladding temperature (PCT) would be expected to exceed the limit criteria for ensuring nuclear fuel integrity. However, despite the same total number of ruptured u-tubes, because of the different connection configuration between the SG and pressurizer, a difference is found in time between the pressurizer low-level signal and reactor header low-pressure signal, affecting the time to trip the reactor and to reach the PCT limit. The present study is expected to provide the technical basis for the accident management strategy for mSGTR transient conditions of CANDU-6 plants.

Key Words : CANDU-6 (중수로), SGTR (증기발생기 전열관 파단), Multiple events (다중 사건), Fuel channel integrity (핵연료채널 건전성), MARS-KS code (MARS-KS 코드)

1. 서 론

증기발생기 전열관 파단(SGTR: Steam Generator Tube Rupture) 사고는 가동 중 원자력발전소에서 연료로부터 핵분열생성물인 방사성 물질이 외부로의 누설 또는 방출 경로를 형성하는 대표적인 사건 유형 중 하나이다. 방사화된 고온 고압의 일차 계통의

냉각재가 파단된 증기발생기 전열관을 통해 이차 계통으로 이동한 후 주증기관의 방출밸브를 통해 원자로 건물을 우회하여 대기환경에 직접 도달할 수 있다.

국내 중수로 원전의 경우 캐나다 Darlington 원전 경험으로부터 전열관 10개까지의 파단을 5등급 사건으로 고려하여 안전성 확인을 위한 평가⁽¹⁾가 수행되었다. 복수의 전열관이 파단(mSGTR: multiple SGTR)되는 경우에는 단일 전열관 파단의 경우보다 비교적 빠른 과도로 인해 운전원의 조치보다는 공정 계통 또는 안전계통의 동작으로 mSGTR 과도에 대응하게 된다.

[†] 책임저자, 회원, 유선오(Korea Institute of Nuclear Safety, Univ. of Science and Technology)
E-mail : k378yso@kins.re.kr
TEL : (042)868-0586 FAX : (042)868-0168

^{*} Korea Institute of Nuclear Safety

mSGTR이 발생하고 원자로와 터빈이 정지한 후 공정계통이 가용할 경우에는 비상운전절차서에 따른 운전원의 사고 완화 조치로 핵연료 및 핵연료채널은 냉각가능한 것으로 평가⁽¹⁾된다. 즉, 열수송 펌프에 의한 냉각재의 강제순환과 주급수 펌프에 의한 급수 공급으로 노심은 냉각되고, 냉각재의 온도가 설정치 이하로 되면 정지냉각계통(SCS: Shutdown Cooling System)의 동작으로 노심의 냉각은 유지된다.

한편 mSGTR의 진행 과정에서 터빈 정지 후 소내 전원이 완전히 상실되고 운전원의 조치가 가용하지 못한 경우에는 열수송 펌프 정지에 의한 냉각재 유량 감소와 주급수 공급이 중단된 상태에서 파단 전 열관을 통한 냉각재 방출이 지속되어 일차 계통 내 냉각재 재고량은 감소한다. 결국 잔여 냉각재는 비등되어 잔열제거가 저하되면서 핵연료채널 건전성 상실이 예상⁽²⁾되었다.

이때 상기 두 경우^(1,2)들은 특정 단일 SG에서의 전열관 양단 파단임에 주목할 필요가 있다. 파단 전열관을 갖는 SG#4와 원자로 출구 모관 사이에 가압기와의 연결 배관이 있기 때문에, 전열관 파단 시 broken loop 내 냉각재 뿐만 아니라, intact loop의 냉각재가 가압기를 경유하여 파단 전열관을 통해 이차측으로 방출되는 경로가 형성될 수 있다.

그러나 특정 단일의 SG에서 10개의 전열관 모두가 파단되는 것보다는 복수의 SG에서 전열관이 파단되는 것이 더 일반적일 수 있다. 만일 파단 전열관의 총 개수가 10개로 같은 조건에서 동일 loop 내 2개의 SG에서 전열관이 파단되는 경우에는 SG와 가압기와의 연결 상태에 따라 냉각재의 방출량과 계통 내 압력 및 재고량 등 주요 변수의 거동이 다르게 예상되고 핵연료채널 건전성이 상실되는 시점에도 영향을 줄 수 있어 이에 대한 정량적인 분석이 필요하다. 이러한 연구는 일본 후쿠시마 원전 대형사고 이후 국제기구와 원전 운영국이 사고관리 조치로 수행하는 안전 관련 사안에 관한 안전성 재평가 및 재확인 활동^(3,4) 등 최근의 사고해석 흐름을 반영한다고 할 수 있다.

따라서 본 연구는 가동 중 중수로 원전에서 동일 loop 내 2개의 SG에서 총 10개의 전열관이 동시에 양단 파단되는 mSGTR을 분석 대상으로 설정하고, 계통열수력분야 최적 해석코드인 MARS-KS⁽⁵⁾를 활용하여 SG별 파단 전열관 수에 대한 주요 열수력 변수의 영향을 분석하였다.

2. 수치해석 모델링

2.1 중수로 계통 모델링

중수로 원전을 구성하는 주요 계통에는 일/이차측 열수송 계통, 주 감속재 계통, 출력제어운전을 위한 공정계통과 비상노심냉각계통과 같이 사고결말 완화를 위한 안전계통 등이 있다. 본 연구는 SG별 파단 전열관 수의 열수력 거동에 미치는 영향을 분석하기 위해 mSGTR과 SBO의 다중 사건 모의를 위한 MARS-KS 입력모델⁽²⁾을 활용하였다.

Fig. 1은 중수로 원전 사고해석을 위한 주요 기기와 연결배관의 전형적인 노드를 보여주며, 일차측 열수송 계통(PHTS: Primary Heat Transport System)은 수평핵연료채널, 원자로 입/출구 모관(RIH/ROH: Reactor Inlet/Outlet Header), 채널과 모관을 잇는 자관(feeder), 열수송 펌프, SG, 가압기, 중수충수계통 등과 이들을 연결하는 배관으로 구성되어 있다.

CANDU-6의 경우 압력관, CO₂ gap, 그리고 칼란드리아 관으로 구성된 총 380개의 수평핵연료채널은 2개의 loop (loop 당 2개 pass)를 형성하며, pass 당 7개의 그룹(그룹 당 11~16 채널)으로 총 28개의 평균 채널로 모델링⁽⁶⁾하였다. 그리고 정상 출력운전의 103%를 노심 출력으로 설정하고, 각 pass의 평균 채널 출력에는 각 채널의 위치, 개수, 그리고 단일 출력을 적용하였으며 축방향의 출력 분포는 sine 형태로 가정하였다.

SG별 파단 전열관 수에 대한 주요 열수력 변수의 영향 분석을 위해 Fig. 1과 같이 동일 loop 내의 SG#3과 SG#4에서 총 10개의 전열관이 양단 파단되는 mSGTR을 모의하였다. 냉각재의 SG 쉘측으로의 파단 방출 유량 계산에는 Henry-Fauske의 임계유속 상관식을 적용하였다. 이때 중수인 냉각재가 경수로 채워진 SG 쉘측으로의 파단 방출 모의는 참고문헌⁽²⁾의 방법을 두 SG에 동일하게 적용하였다. 또한 SG 전열관 파단으로 감소하는 PHTS의 재고량과 압력 제어를 위해 중수저장탱크로부터의 중수 운전과 가압기 전열기 작동도 참고문헌⁽²⁾과 동일한 제어논리를 적용하여 모의하였다.

2.2 사건 시나리오 모델링

기본 시나리오는 정상운전 중인 원전에서 SG#4의 전열관 10개가 동시에 양단 파단되고 터빈 정지와

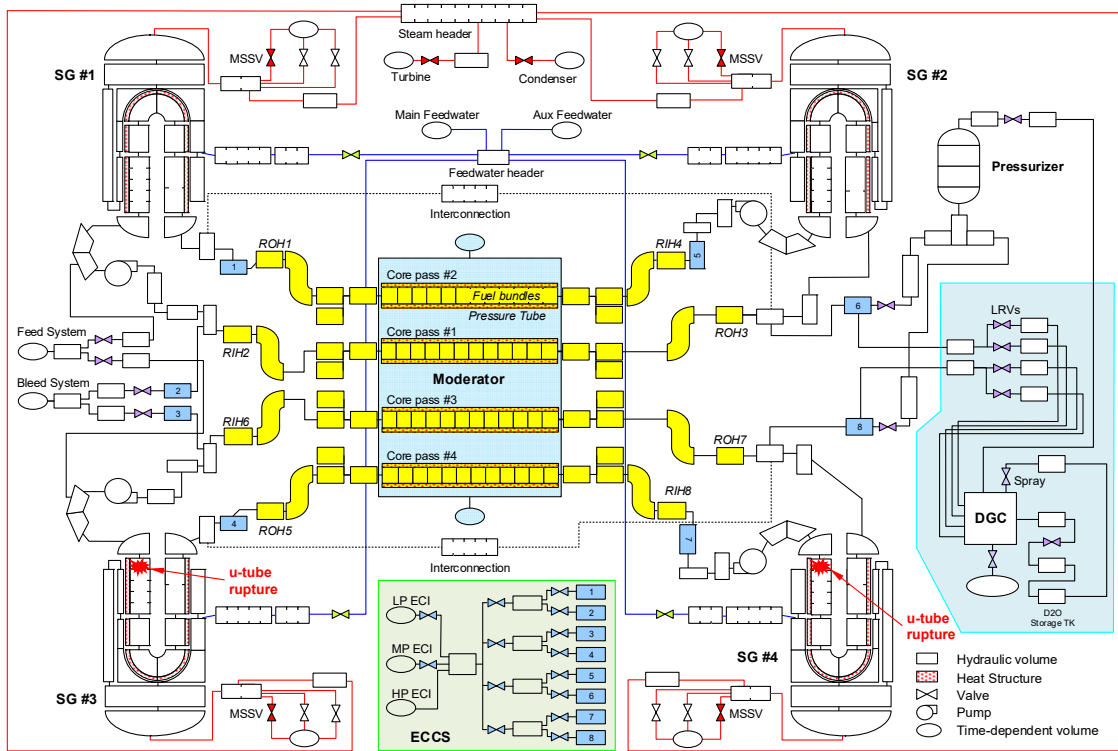


Fig. 1 MARS-KS nodalization of a CANDU-6 plant with two ruptured locations.

함께 소내 교류전원이 상실된 후 전원 및 안전계통의 복구 등 운전원 조치가 부재한 경우이다. 그리고 Table 1과 같이 동일 loop 내 두 SG의 파단 전열관 수의 영향 분석을 위해 다음과 같은 가정을 고려하여 과도 입력모델을 개발하였다.

Table 1 Calculation matrix for mSGTR analysis

	Base	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
SG#3	0	1	3	5	7	9
SG#4	10	9	7	5	3	1
Total	10	10	10	10	10	10

- 파도는 0.0초에 두 SG의 전열관이 동시에 양단 파단되면서 시작된다. 이때 파단 전열관의 총 개수는 10개로 동일하다.
- PHTS 재고량과 압력 제어를 위한 중수충수계통과 가압기 내 전열기는 전원 상실 전까지 작동 가능하다.
- 원자로는 모관 저압력과 가압기 저수위 신호에 의해, 그리고 터빈은 주증기 저압력 신호에 의해

여 각각 정지된다.

- 터빈 정지와 함께 소내 전원은 상실되어 열수송 펌프, 감속재 냉각순환 펌프, 주급수 펌프 그리고 SCS는 작동 불능이 된다. 그리고 열수송 펌프의 밀봉 기능 상실로 펌프에서의 냉각재 누설을 고려한다.
- 비상노심냉각계통(ECCS: Emergency Core Cooling System)의 조건부 논리가 만족되는 경우 accumulator의 고압 안전주입은 가용하다. 그러나 중압/저압 비상냉각수 주입을 위한 ECCS 펌프는 가용하지 않다.
- 과도 기간 동안 대기증기방출밸브 개방 또는 주증기안전밸브 개방-고정의 급속 냉각(crash cooling) 등 운전원 조치는 고려하지 않는다.
- mSGTR 과도 계산은 아래와 같이 과압 한도, 채널 건전성, 핵연료 건전성 기준⁽¹⁾을 초과하는 시점에서 60초 후 종료한다.
 - 최대 모관 압력 ≥ 13.0 MPa(a) 또는,
 - 최대 압력관 온도 ≥ 873.15 K (600°C) 또는,
 - 최대 핵연료피복관 온도 $\geq 1,073.15$ K (800°C)

3. 전산해석코드 결과

3.1 정상 출력운전

중수로 원전의 체적 모델링과 주요 기기의 작동 논리 그리고 초기 및 경계 조건을 활용하여 정상 출력운전 상태를 모의하였다. Table 1 각각의 경우에 대한 정상 출력운전의 계산결과와 목표 값⁽¹⁾을 비교한 결과, Table 2와 같이 계통의 압력과 온도, 수위, SG 재순환 유량비 등의 계산 값은 모든 경우에서 목표 값을 적절히 모의하였고 정상 출력운전 상태로의 안정적인 도달을 확인하였다.

Table 2 Steady-state condition for normal power operation

Parameters	MARS-KS	CATHENA	Rel.diff., [%]
Pressure of RIH, [MPa(a)]	11.41	11.4	0.09
Pressure of ROH, [MPa(a)]	10.00	10.0	0.00
Temperature of RIH, [K]	541.15	541.15	0.00
Temperature of ROH, [K]	583.44	583.15	0.05
Quality of ROH, [%]	4.9	4.9	0.00
ΔP of PHT pumps, [MPa(d)]	1.80~1.83	1.80	0.00~1.67
Level of Pressurizer, [m]	12.48	12.48	0.00
Pressure of SGs, [MPa(a)]	4.83~4.88	4.7	2.77~3.87
Level of Separators, [m]	2.5	2.5	0.00
Recirculation ratio of SGs	5.1:1	5.1:1	0.00
Heat Load to SG, [MW]	533.37	532	0.26
Outlet Temperature of Moderator, [K]	342.16	342.15	0.00

3.2 주요 열수력 변수에 대한 영향 분석

파단 전열관의 총 개수가 10개인 조건에서 Table 1과 같이 동일 loop 내 SG별 파단 전열관 수에 따른 주요 열수력 변수의 거동을 고찰하였다.

전열관 파단 직후 일차 냉각재의 SG 쉘측으로의 총 방출 유량은 약 79.16~79.27 kg/s이며, 기본 경우인 79.97 kg/s와 약 1.0% 이내로 유사하였다. 그리고 파도 기간 동안 각 SG 쉘측으로의 냉각재 유량과 방출 누적량은 유동 면적-유량 간 선형 관계에 따라 파단 전열관의 수에 비례 증가하였다. 일차측에서 이차측으로의 냉각재 방출 유량, 모관 압력, PHTS 내

냉각재 유량, 모관 기포율은 기본 경우⁽²⁾와 동일한 거동을 보여 SG별 파단 전열관 수에 따른 주요 변수의 전반적인 파도 거동의 변화에는 영향이 크지 않은 것으로 평가되었다.

Table 3은 각 경우에 대해 MARS-KS 코드로 계산된 주요 사건 경위를 보여준다. SG 전열관 파단 후 약 2~5초 이내에 재고량 제어 논리에 의해 중수저장탱크로부터 냉각재가 주입되어 방출된 냉각재를 보충하였다. 그리고 10개의 파단 전열관을 통해 방출되는 냉각재의 양이 중수저장탱크로부터의 주입량보다 크기 때문에 CATHENA 코드⁽¹⁾의 경우와 같이 60초 이내에 탱크 저수위 경보가 발생하였다.

파단 전열관의 총 개수가 10개로 같은 경우라도 동일 loop 내 두 SG의 가압기와의 연결 상태에 따라 가압기 저수위와 모관 저압력의 설정치에 이르는 시간에서 차이가 있음을 알 수 있었다. 즉, ROH7과 SG#4 사이에서 가압기가 연결되어 있기 때문에, SG#4의 파단 전열관 수가 많은 경우(base, cases 1~3) 채널 내 냉각재 뿐만 아니라 가압기 내 냉각재도 SG#4 쉘측으로 방출되어 가압기 저수위 신호가 모관 저압력 신호보다 먼저 발생하였다. 하지만 가압기와 직접적으로 연결되지 않은 SG#3의 파단 전열관 수가 많으면(cases 4-5), 가압기 내 냉각재 보다는 broken loop 내 냉각재가 SG#3 이차측으로 더 많이 방출되므로 가압기 저수위 신호보다는 broken loop 내 모관 압력이 더 빨리 감소하였다. 따라서 SG별 파단 전열관 수에 따라 가압기 저수위와 모관 저압력 신호의 설정치에 이르는 시간이 다르게 예측되었고, 이로 인해 Fig. 2와 같이 기본 사건 대비 원자로 정지 시간 비(t_{case}/t_{base})가 Case 4의 경우 0.86까지 감소하였다.

전열관 파단 후 PHTS 압력 감소, 원자로 정지에 의한 압력 급감, 열수송 펌프 정지에 의한 PHTS 압력 증가 등 파도 기간 동안 압력의 거동은 모든 경우에서 기본 경우와 전반적으로 동일한 경향을 보였다. 원자로 정지 후 PHTS 압력은 급격히 감소하여 약 627.17~725.69초 사이에 LOCA 신호가 발생하였고 broken loop과 intact loop는 상호 격리되었다. 이때 모든 경우에서 PHTS 저압력 지속 조건이 충족되지 않아 ECCS의 고압 안전주입은 발생하지 않는 것으로 평가되었다. 또한 PHTS 계통 내 유량은 열수송 펌프 정지에 따른 냉각재 유량 급감 시점의 차이 이외에는 intact loop에서의 순방향 유동과 broken loop

Table 3 Comparison of event sequences

Sequences	Time (s)						
	Base	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	CATHENA*
Event initiation	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
D ₂ O feed starts	2.2	2.3	2.7	3.2	4.0	4.8	-
Low level of D ₂ O tank	43.0	43.2	43.5	44.0	44.8	45.6	< 60.0
Low level of pressurizer	575.6	563.8	567.0	568.2	590.6	630.6	504.9
Low pressure of ROH	689.4	672.6	669.6	641.1	550.2	413.8	691.1
Reactor trip	693.2	676.4	673.4	644.9	594.4	634.4	691.1
Turbine trip/SBO starts	720.2	703.6	700.6	672.0	621.9	661.7	733.8 / n/a
Loop isolation	725.7	708.6	705.5	677.1	627.2	667.0	724.4
MSSVs open firstly	1,140.1	1,135.0	1,136.0	1,099.0	1,048.1	1,078.0	crash cooling
PCT limit reach	2,131.2	1,759.5	1,633.7	1,509.7	1,570.9	1,968.6	-
SCS operation	-	-	-	-	-	-	available

*파단 전열관 수는 Base 경우와 동일하나, 공정계통과 안전계통, 운전원 조치가 가용한 mSGTR 시나리오임

에서의 순방향, 정체, 역방향 유동의 불규칙적인 반복 형성 등 모든 경우에서 기본 경우와 유사한 거동을 보였다. 모관에서의 기포율 또한 열수송 펌프 정지 후 채널 내 유량이 크게 감소하면서 기포율이 급증하는 시점 이외에는 두 loop의 입·출구 모관 기포율 거동은 모든 경우에서 기본 경우와 크게 다르지 않음을 확인하였다.

급수 공급이 가능하여 모든 경우에서 핵연료채널은 냉각 가능하였다. 핵연료피복관은 큰 열적 부하없이 모두 정상 출력운전의 상태를 유지하였고, 지속적인 냉각재 방출로 인한 압력과 재고량 감소로 원자로가 정지하면서 PCT는 약간 감소하였다. 이후 LOCA 신호에 의해 broken loop과 intact loop이 서로 격리되어 두 loop의 채널 내 냉각재 유량, 기포율에서 상호 비대칭적인 거동을 보였다. 그리고 열수송 펌프 정지로 인한 냉각재 유량의 급감과 파단 전열관을 통한 broken loop의 재고량 감소가 지속되면서 intact loop 보다는 broken loop의 잔여 냉각재는 더 활발히 비등되었고 그로 인해 기포율이 급증하여 잔열 제거율은

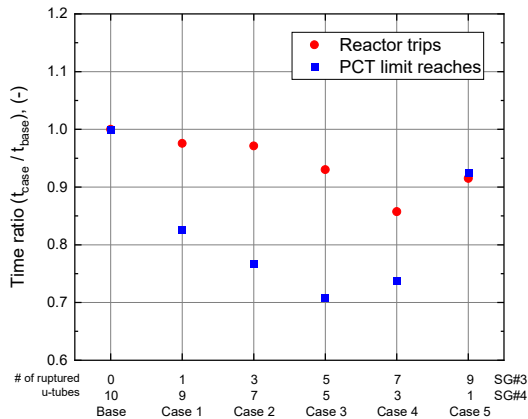


Fig. 2 Comparison of times of reactor trip and PCT limit reach by case.

Fig. 3은 SG별 파단 전열관 수에 따른 최대 핵연료 피복관 온도(PCT: Peak Cladding Temperature) 거동을 보여준다. 전열관 파단 후 터빈 정지 전까지 냉각재는 열수송 펌프에 의해 강제순환되고 SG로의 주

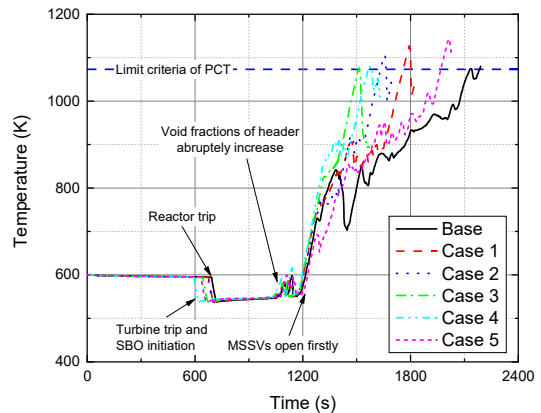


Fig. 3 Comparison of peak cladding temperatures by case.

저하되었다. 즉, 터빈 정지 및 전원 상실 후 운전원의 조치없이 냉각재의 2차측 헬륨으로의 방출은 지속되어 PCT는 모든 경우에서 제한값까지 증가하여 핵연료채널의 건전성 상실이 예상되는 것으로 평가되었다. 이때, SG별 파단 전열관 수에 따라 PCT 제한값에 이르는 시간에 차이가 있음을 확인하였다. 즉, Fig. 2와 같이 기본 경우 대비 PCT 제한값 도달 시간 비(t_{case}/t_{base}) 값이 Case 3의 경우 0.71까지 감소하였고, 이는 비록 파단 전열관의 총 개수가 동일하더라도 어느 SG에서 몇 개의 전열관이 파단되었는가에 따라 PCT 제한값 도달 시간이 기본 경우와 비교하여 상당히 단축될 수 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 정상출력운전 중인 중수로 원전에서 동일 loop 내 두 SG에서 전열관 10개가 파단(mSGTR) 되고 터빈 정지와 함께 소내 교류전원이 상실(SBO) 된 후 전원 및 안전계통의 복구와 같은 운전원의 조치가 부재한 가상의 다중 사건을 대상으로 MARS-KS 코드를 활용하여 SG별 파단 전열관 수에 따른 주요 계통 열수력 변수에 대한 영향을 분석하였다.

파도 기간 동안 SG별 파단 전열관 수에 따른 냉각재 파단 유량, 모관 압력, PHTS 내 냉각재 유량, 기포율, PCT 등 주요 열수력 변수의 거동은 단일 SG에서 10개 전열관이 파단되는 기본 경우와 전반적으로 유사하였다. 또한 LOCA 신호에 의해 두 loop가 상호 격리되고, 열수송 펌프 정지 후 냉각재 유량의 급감과 broken loop 내 기포율 급증으로 잔열 제거가 저하되면서 모든 경우에서 PCT는 제한값을 초과하여 핵연료 건전성 상실이 예상되는 것으로 평가되었다. 다만, 파단 전열관의 총 개수가 같은 경우라도 가압기 저수위와 모관 저압력 신호 설정치에 이르는 시간에서 차이가 있었고, 이는 동일 loop 내 두 SG의 가압기와의 다른 연결상태에서 비롯된 것으로 분석되었다. 그 결과, SG별 파단 전열관 수에 따라 원자로 정지 시점과 PCT 제한값 도달 시점에 있어서 기본 경우와 비교하여 상당히 단축될 수 있음을 확인하였다. 따라서 만일 보수적인 사고해석을 수행할

경우 최대 10개의 전열관 파단을 가정하더라도 단일 SG에서의 전열관 파단 뿐만 아니라, SG별 파단 전열관 수에 따른 영향도 고려할 필요가 있다.

결론적으로 본 연구의 중수로 원전 MARS-KS 코드 입력모델은 분석 대상 사건 시나리오를 적절히 모의하고 SG별 파단 전열관 수의 영향 분석에 활용되어 상기 가상의 다중 사건에 대한 열수력 상세 분석 및 평가의 신뢰성 제고에 기여할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다. (No. 1805003)

참고문헌

- (1) KHNP, 2022, "Final Safety Assessment Report of Wolsong 3,4 units," Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd.
- (2) Yu, S. O., Lee, K. W., Baek, K. L. and Kim, M. W., 2021, "Analysis on Hypothetical Multiple Events of mSGTR and SBO at CANDU-6 Plants Using MARS-KS Code," *Trans. of the KPVP*, Vol. 17, No. 1, pp. 18-27. doi:http://dx.doi.org/10.20466/KPVP.2021.17.1.018.
- (3) IAEA, 2015, "The Fukushima Daiichi Accident," International Atomic Energy Agency, Vienna, *Pub-1710*.
- (4) OECD, 2016, "Five Years after the Fukushima Daiichi Accident: Nuclear Safety Improvements and Lessons Learnt," Nuclear Energy Agency, Paris, *No. 7284*.
- (5) KINS, 2021, "MARS-KS Code Manual," Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon, *KINS/RR-1822*.
- (6) Yu, S. O., Cho, M. K., Lee, K. W. and Baek, K. L., 2020, "Code Analysis of Effect of PHTS Pump Sealing Leakage during Station Blackout at PHWR Plants," *Trans. of the KPVP*, Vol. 16, No. 1, pp. 11-21. doi:http://dx.doi.org/10.20466/KPVP.2020.16.1.011.