에너지공학, 제20권 제4호(2011)
Journal of Energy Engineering, Vol. 20, No. 4, pp. 259~266 (2011)
http://dx.doi.org/10.5855/ENERGY.2011.20.4.259

중수로 정지냉각계통의 냉각능력 분석

신정철†
우송정보대학 기계자동차설비계열
(2011년 8월 1일 접수, 2011년 11월 14일 수정, 2011년 11월 15일 채택)

Analysis of Cooldown Capability for the HWR Shutdown Cooling System

Jung-Chul Shin†
Mechanical, Automotive & Air Conditioning Department, Woosong College
(Received 1 August 2011, Revised 14 November 2011, Accepted 15 November 2011)

요 약

원자로 정지냉각계통은 원자로 정지 시 핵연료 잔열 제거를 위하여 냉각수가 충분히 공급하고 원자로기기들을 보호할 수 있는 냉각율을 유지할 수 있도록 설계되어야 한다. 경수로 정지냉각계통을 분석하기 위한 KDESCENT코드를 중수로 정지냉각계통에 적용하여 보았으며 기존의 중수로형 해석코드인 SOPHT, SDCS 코드 결과와 비교분석하였다. 정지냉각펌프 모드와 열수송펌프 모드에서 정상냉각 운전상태는 계통의 설계요건을 만족시켰으며 정지냉각 열교환기를 열제거원으로 사용하였을 때 냉각률은 설계요건에서 규정하고 있는 제한치인 2.8℃/min 이하의 값을 얻었다. 전반적인 냉각능력 분석 결과 월성 2, 3, 4호기 정지냉각계통은 핵연료로부터 핵분열 생성물의 방출을 충분히 제한하고 핵연료채널의 건전성을 유지시키기 위한 충분한 냉각을 핵연료에 제공하였다.

주요어 : 중수로, 원자로 정지냉각계통, 냉각율, 핵연료 건전성, 정지냉각펌프

Abstract — Following the reactor shutdown, the reactor shutdown cooling system must be designed to supply the coolant sufficiently not only to remove the decay heat but to maintain the adequate cooling rate to protect the reactor equipments. In this study, KDESCENT code for the light water reactor and SOPHT, SDCS codes for the heavy water reactor were compared and analyzed to investigate the cooling capability during the shutdown cooling process. The shutdown cooling system design requirements were satisfied during cooling process for both the SDCP and the HTP modes and the design cooling rate of 2.8℃/min or below was maintained using the SDC heat exchangers. This study shows that the shutdown cooling system in the Wolsong 2, 3, 4 reactors provides sufficient cooling to maintain the nuclear fuel integrity by removing the decay heat of the nuclear fission product.

Key words : heavy water reactor, reactor shutdown cooling system, cooling rate, nuclear fuel integrity, shutdown cooling pump

1. 서 론

원자로 정지 이후에도 핵분열생성물로 인하여 계속해서 잔열이 발생되며 이로 인한 핵연료의 심각한 손상을 방지하기 위하여 원자로 냉각재의 계속적인 냉각을 필요로 한다. 정지냉각계통은 증기발생기 초기 급속냉각 이후 핵연료의 손상방지 및 급수관 파열사고에 대비하여 열수송계통의 충분한 냉각을 제공한다. 정지냉각계통의 목적은 원자로기기 보수를 위한 원자로 정지 시 잔열을 제거하고 냉각수 온도를 54℃까지 낮추어 보수기간동안 장시간 유지되도록 하는 것이다. 본 논문에서는 경수로 정지냉각계통의 냉각능력

†To whom corresponding should be addressed.
226-2 Jayang-dong, Dong-gu, Daejeon-city, South Korea 300-715
Tel : 042-629-6411; E-mail : jcshin@wst.ac.kr

해석코드인 KDESCENT 코드를 중수로형인 월성 2, 3, 4호기 정지냉각계통 설계에 적용하였으며 KDESCENT 결과를 기존의 해석코드인 SDCS 코드 결과와 비교 검토하여 월성 2, 3, 4호기 정지냉각계통의 해석을 검증하고자 한다. 또한 정지냉각계통 해석을 위해 AECL (Atomic Energy Canada Limited)이 새로이 사용한 SOPHT 코드를 재검증하고 KDESCENT 코드를 사용하여 여러 가지 운전모드에서 월성 2, 3, 4호기 정지냉각계통의 냉각능력을 분석하고자 한다.

1-1. 정지냉각계통의 설계특성 및 요건

Figure 1에서 보는 바와 같이 월성 2, 3, 4호기 정지냉각계통은 원자로의 양 끝에 각각 독립적인 루프로 구성되어 있으며 각 루프에는 펌프와 열교환기가 한 대 씩 있고 양쪽 열수송(Heat Transport)계통 루프의 입구모관과 출구모관 사이에 연결되어 있다. 정지냉각 운전은 열수송펌프(HTP Mode)나 정지냉각펌프(SDCP Mode)를 이용하여 냉각이 이루어질 수 있도록 한다. HTP Mode는 입구모관에서 정지냉각 열교환기와 정지냉각펌프를 우회하여 출구모관으로 향한다. SDCP Mode는 출구모관에서 정지냉각 열교환기를 거쳐 입구모관으로 향한다.

정지냉각(Shutdown Cooling)계통은 원자로건물 내부에 위치하며 계통 전체는 원자로모관 높이 아래에 위치한다. 원자로 정상운전시 HT계통으로 부터의 주차단밸브는 닫혀 있고 펌프차단밸브는 항상 열려 있다.

SDC계통은 어떤 조건 하에서도 이 계통의 고장이 냉각재 상실사고를 발생시킬 수 있으므로 CSA Standard CAN3-N285.0에 따라 Nuclear Class 1 계통으로 분류등록되어 있다. 따라서 이 계통은 ASME CODE Section III 및 CSA Standard CAN3-N285.1의 요건에 따라 설치 및 등록되며 Class IV급 전원 상실시 III급 전원에서도 운전되도록 설계된다 [1,2].

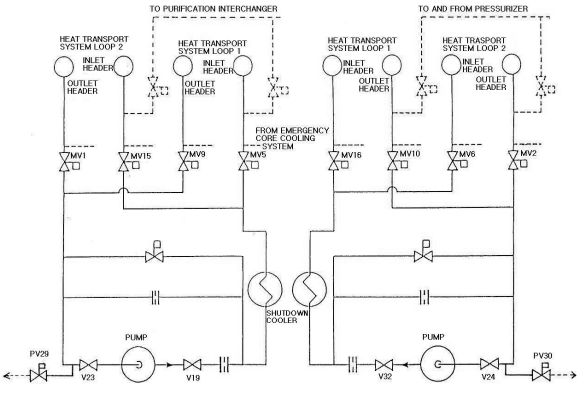

Fig. 1. Wolsong-2, 3, 4 shutdown cooling system configuration.

원자로 정상운전시 SDC계통은 HT계통으로 부터 차단되고 감압되며 압력은 대기압 보다 약간 높다. 이 때 계통 내 중수 온도는 38℃이며 차단밸브를 통한 누출은 최소가 되도록 한다. SDC계통이 작동하기 전의 계통온도(260℃)와 압력(8 MPa(a))으로부터 177℃로 HT계통은 냉각은 복수기 증기방출밸브(Condenser Steam Discharge Valve, CSDV) 또는 대기 증기방출밸브(Atmospheric Steam Discharge Valve, ASDV)를 통해 증기를 방출시킴으로서 이루어진다. SDC계통은 HT계통을 원자로 정지(Trip)후 30분 이후에 177℃(350°F), 그 후 6시간 내에 54℃(130°F)로 냉각할 수 있도록 설계된다. 이것은 열을 D_2O 냉각재로 부터 SDC 열교환기를 경유하여 기기냉각수계통(Recirculated Cooling Water Sysytem)으로 전달함으로써 얻어진다 [3]. SDC계통은 HT계통의 모관 높이까지 배수되거나 가압 또는 감압될 때 일정기간동안 HT계통을 54℃(130°F) 이하로 유지 시킬 수 있다. SDC 열교환기로 공급되는 기기냉각수는 대기모드(Stand-by Mode)에서 1차측(Primary)의 동결을 방지하기에 충분한 온도가 있어야 한다. 이 때 기기냉각수의 공급온도는 18℃와 35℃ 사이이며 7℃ 이하로 떨어져서는 안된다 [4]. SDC 열교환기의 입구와 출구의 온도 측정을 위한 기기를 설치하고 또한 SDC펌프의 압력과 유량도 측정되어야 한다. 비상운전시 SDC계통은 HTP Mode는 SDCP

Table 1. SDC Pump Service Limit.

	SDC System		PHT System	
Event	Level	Cycle	Level	Cycle
Hot Conditioning	A	2	A	2
Hydro Test	Test	10	Test	10
Leak Test	Test	10	Test	10
Cooldown- SDCP Mode Cooldown- HTP Mode	A A	600 600	A B	250 800
Loss of Class IV Power	B	50	B	50
Loss of One SDC Pump	B	50	-	-
Cooldown from 260℃ - SDCP Mode	B	10	B	10
Cooldown from 260℃ - HTP Mode	B	10	B	10
Design Basis Earthquake	C	1	C	1
LOCA	D	1	D	1

Mode에 대하여 Level B 운전한도(Service Limit)를 초과하지 않고 전계통의 압력과 온도로부터 HT계통을 냉각할 수 있다.월성 2호기의 SDC펌프의 운전한도를 Table 1에 나타내었다.

SDC계통은 아래와 같은 비상사고 시에 대해서도 운전이 가능하도록 한다.

(1) SDC계통의 한 루프에서 단일 SDC펌프 상실사고
(2) SDCP Mode에서 냉각시 IV급 전력상실사고(Loss of Class IV Power)시 III급 전원에서의 운전

원자로 정지 30분 이후에 HT계통의 온도 177℃에서 1대의 SDC펌프를 작동시켜 노심비등(Core Boiling)이 일어나지 않도록 보장한다. 펌프 수두는 보수모드(Maintenance Mode) 이전에 HT계통의 배수를 할 수 있도록 설계된다. SDC계통은 SDC펌프를 사용하여 중수저장탱크로 HT계통에 대한 배수 경로를 제공한다. SDC계통은 제한된 순환횟수 동안에 영출력 고온상태(Zero Power Hot)에서 밸브가 작동하도록 설계된다. SDC계통의 설계요건은

1-1-1. **정상운전시**

1) 원자로 정지 중에 일정 기간 동안 HT계통을 냉각시키고 노심으로부터 잔열을 제거한다.
2) 증기발생기와 HT펌프를 보수할 수 있도록 HT계통을 모관 높이까지 배수시켜 노심 냉각을 하도록 하며 HT계통의 배수, 재충수 및 수위 제어를 위한 수단을 제공한다.
3) HT계통이 모관 높이까지 배수될 때를 제외하고 그 이외의 경우에 SDC계통 운전의 모든 상태에서 HT계통의 중수를 정화시키기 위한 수단을 제공한다.

1-1-2. **비정상운전시**

1) 증기발생기로 급수의 완전 손실과 같은 비상조건시 영출력고온(260℃)으로부터 HT계통을 냉각시킨다.
2) 냉각재상실사고(Loss of Coolant Accident, LOCA) 이후 보수에 적절한 온도로 HT계통을 냉각시킨다.
3) 격납용기 내부의 주증기관의 파단사고 후에도 운전이 가능하도록 한다. 즉 증기발생기의 이용불능 시 SDC계통이 원자로를 냉각시킬 수 있도록 한다.

2. 정지냉각 운전모드

2-1. **원자로 정상출력시 대기모드**

원자로 정상출력시 SDC계통은 HT계통으로부터 차단되어 있고, 38℃의 중수로 가득 채워져 있으며, 압력은 대기압보다 약간 높다. SDC계통과 HT계통 간의 압력차이로 두 차단밸브를 통한 약간의 중수 누출이 있으며 이는 관을 통하여 중수누출수집계통으로 배수된다.

2-2. **정상냉각 운전모드**

260℃에서 149℃로 HT계통의 냉각 초기상태에는 증기발생기로부터 증기를 방출시킴으로써 이루어진다. 이 증기는 터빈을 우회하여 복수기 증기방출밸브에 의해 터빈 복수기로 흐른다. 이러한 냉각은 약 30분 동안 이루어지며 HT펌프는 원자로 냉각재를 증기발생기를 통하여 계속해서 순환시킨다. 그 이후의 냉각은 아래의 두 가지 방법 중 한 가지에 의해 이루어진다.

1) 정지냉각펌프 모드(SDCP Mode): SDC펌프와 SDC열교환기를 사용한다. 이 경우의 계통도는 Fig. 2와 같으며 SDC펌프가 냉각재를 원자로 입구모관으로 순환시키지만 전체 유량의 약 55%는 증기발생기의 HT펌프를 거쳐 노심을 우회한다. 이로 인하여 노심을 통과하는 냉각재의 온도는 약 77℃ 정도 증가한다(2% 잔류 출력). 따라서 채널비등과 유량정체를 방지하기 위해 원자로 출구

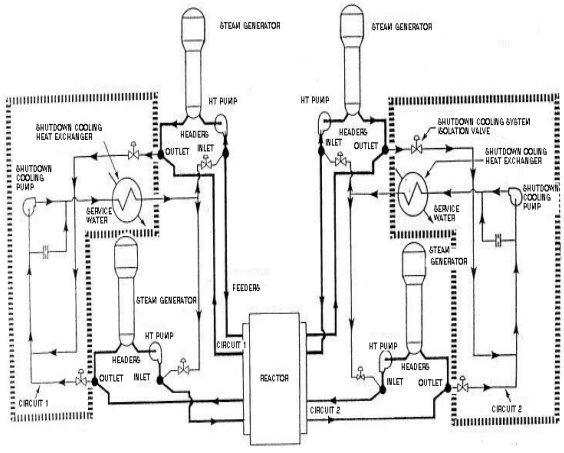

Fig. 2. Shutdown cooling flow diagram for SDCP mode.

모관에서 높은 압력을 유지시켜야 한다. 이 모드에서는 HT계통을 149℃에서 54℃로 냉각시킬 수 있다.

2) 열수송펌프 모드(HTP Mode): 초기에 HT펌프와 SDC 열교환기를 사용한 후 말기에 SDC펌프 사용한다. 이 경우의 계통도는 Fig. 3과 같으며 HT펌프는 노심을 우회하여 SDC 열교환기를 통과하는 회로에 의해 HT계통을 냉각시킨다. SDC계통을 통과하는 질량유량은 HT계통의 모관 대 모관의 안력강하에 따라 달라진다. 질량유량은 체적유량이 일정하기 때문에 HT계통의 온도가 감소함에 따라 증가한다. 이러한 운전방법은 모든 HT펌프를 정지시켜도 SDC계통으로의 열전달량이 부족할 때, SDC 열교환기 용량이 계속적인 냉각을 수행하는데 불충분한 경우에 177℃에서 88℃로 냉각하는데 사용된다. 이 후 54℃로의 계속적인 냉각은 SDC펌프를 이용하여 유량을 순환시킴으로써 이루어진다. HT펌프를 이용한 냉각은 2대 또는 4대의 HT펌프를 작동시킴으로써 이루어진다. 그러나 2대의 펌프가 이용되면 펌프가 정지되는 시점에 회로를 통과하는 유량을 급격히 감소시킨다. 2대의 펌프를 이용한 냉각의 장점은 HT펌프 열로 인한 HT계통으로 부터 SDC계통으로의 열전달을 반으로 감소시킬 수 있다는 점이다.

HT계통의 온도가 54℃로 떨어질 때 HT계통은 감압되어 모관으로 배수될 수 있다. 이 운전을 위하여 출구모관 압력 설정치는 약 0.24 MPa(g)로 낮춰진다. 충수밸브(Feed Valve)는 그 후 수동조작상태로 놓여져 차단된다.

2-3. 비정상냉각 운전모드

SDC펌프를 사용한 260℃에서의 비정상냉각은 ASDV, CSDV, HT펌프들이 사용 불가하여 HT계통을 177℃로 냉각시킬 수 없는 특별한 경우이다. HT계통이 냉각재로 채워져 있을 때 SDC계통의 우회밸브는 정상시 닫혀 있는 위치에 놓인다. 이 때 SDC펌프가 작동하여 HT계통을 위의 정상운전모드에서 기술한 방법으로 계속 냉각시킨다.

HT펌프를 사용한 260℃에서 비정상냉각은 ASDV, CSDV가 이 계통을 260℃에서 177℃로 냉각시키는데 사용할 수 없는 경우이다. 따라서 HT펌프와 SDC 열교환기가 260℃에서 88℃로 냉각시키는데 사용된다.

3. 정지냉각계통 해석코드

본 해석에 사용된 KDESCENT 코드는 CE(Combustion Engineering)사가 개발한 코드로서 경수로인 영광 3, 4호기, 울진 3, 4호기 등 실제 발전소의 SDC계통의 냉각능력을 평가하기 위해 사용되었다. 기본적인 냉각공정은 HT계통에서 기기냉각수로 열을 전달함으로써 이루어진다. 이용 가능한 원자로 냉각재의 열이 SDC 열교환기의 열제거 용량과 비교되고, 시간의 변화에 따른 최대 제거열량을 계산하기 위한 일련의 식이 반복법(Iteration Method)으로 계산된다. 원자로 정지 후 원자로심 붕괴열을 최대로 고려하고 냉각 개시 전 충분한 시간 동안 발전소가 정상출력상태로 유지되었음

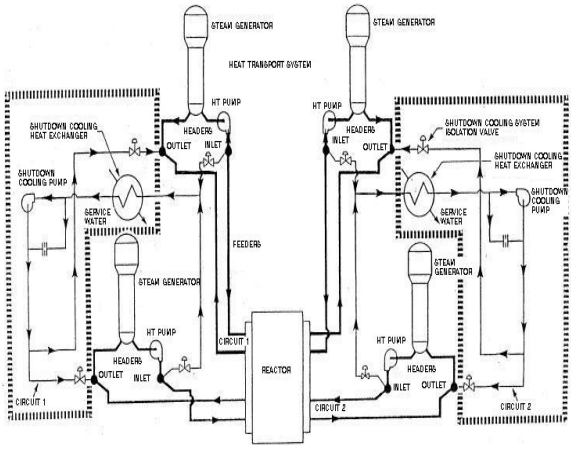

Fig. 3. Shutdown cooling flow diagram for HTP mode.

Table 2. D_2O Inventory of HT System.

증기발생기 튜브	38.94 m^3
증기발생기 입구모관	4.94 m^3
증기발생기 출구모관	4.94 m^3
펌프 흡입 배관	2.75 m^3
펌프 방출 배관	1.95 m^3
펌프	1.95 m^3
입구 모관(Inlet Header)	2.75 m^3
입구 공급관(Inlet Feeder)	8.67 m^3
입구 종단차폐체(Inlet End Shield)	9.26 m^3
출구 종단차폐체	9.26 m^3
채널(Channel)	7.82 m^3
출구 공급관	18.97 m^3
출구 모관(Outlet Header)	3.34 m^3
증기발생기 입구 배관	4.64 m^3
합 계	120.2 m^3

을 가정하여 해석의 추기조건으로 적용한다. 정상운전 시 전계통 온도에서 SDC계통의 초기온도는 SDCP모드에서 149℃이고 HTP모드에서 177℃이다.

중수로형인 월성 2, 3, 4호기의 냉각능력 해석에 KDESCENT코드의 적용 타당성을 검토하기 위해 HTP모드에서 원자로 정지 30분 이후에 177℃로 부터의 냉각 경우를 선택하였다. 이 경우에 대한 SOPHT 결과와 KDESCENT 결과는 Fig. 6에 보여진다. 초기냉각시(188～3900초) KDESCENT와 SOPHT에서의 최대온도차는 4℃로 거의 같은 결과를 얻었다. 그 이후의 1분 동안 SOPHT는 약간의 온도 상승이 일어났다. 이는 SOPHT와 DESCENT의 기본 가정의 차이 때문이다. 즉, SOPHT에서는 냉각재의 온도가 121℃에 도달했을 때 HT펌프가 트립되고 1분 후에 SDC펌프가 작동한다고 가정하였으며, KDESCENT에서는 HT펌프의 트립과 동시에 SDC펌프가 작동된다고 가정하였다. 따라서 SOPHT의 경우 SDC펌프가 아직 작동하지 않을 때 HT펌프의 트립으로 인해 노심을 통과하는 냉각재의 유량이 급격히 감소함으로써 냉각재의 온도 상승이 발생하였다.이 두 결과에서 3760초 이후의 시간 동안에 냉각재의 온도는 급격히 하락하였는데 , 이는 SDC 차단밸브가 열려 SDC계통 내에 있던 차가은 중수와 유입되는 뜨거운 중수가 혼합되어 일어난 것이다. 그러나 KDESCENT에서는 SOPHT 결과와 비교해서 급하강의 온도 변화는 없었다.

Figure 7은 KDESCENT코드 결과와 SDCS코드 결과를 비교하여 도시하였다. 이 두 결과로부터 최대 온도차는 약 12℃ 정도이다. 이는 SDCS가 운전모드의 전환시 중수 혼합과 같은 천이상태에 대해서 고려하지 않았기 때문이며 이점을 고려해 볼 때 KDESCENT의 결과에서 나타난 경향은 타당하다고 볼 수 있다. 따라서 KDESCENT는 중수로형인 월성 2, 3, 4호기 SDC계통의 냉각능력 해석에 적요 가능하다고 판단되며 이에 따라 각 경우에 대한 냉각 능력을 검토하고자 한다.

Table 3. Major parameters of Wolsong-2, 3, 4.

주요 변수	변수값
원자로 출력	2,158 MWt
HT계통 입구 온도	267℃
HT계통 출구 온도	310℃
노심 입구 압력	11.05 MPa(a)
HT계통 냉각재 용적	120.2 m^3
HT계통 구성의 금속 열량	48.9 kw
냉각재로 전달되는 전체 SDC펌프 열량	2.8 MWt
냉각재로 전달되는 전체 HT펌프 열랄	17.0 MWt
증기발생기 및 HT펌프 보수 온도	54℃
SDC 열교환기로 공급되는 용수 유량	1,090 m^3/hr
SDC 열교환기의 유효면적	568.0 m^2
정지냉각펌프 : 공급유량	0.182 m^3/hr
수두	73.8 ft
유효흡입수두	4.57 m

4. 해석 결과

4-1. 정상냉각 운전

1) SDCP모드에서 원지로 정지 40분 이후 149℃로부터 냉각 시작:

SDC펌프가 중수를 입구 모관으로 순환시키지만 약 55%는 노심을 우회하므로 노심에서의 온도는 77℃로 상승한다(2% 잔류출력). 채널 내에서의 비등과 유동정체 가능성을 배제하기 위해 계통 압력을 6 MPa(a)으로 높게 유지시킨다. 채널에서 비등이 발생할 때 압력손실 증가로 인해 이용가능한 수두가 매우 낮아 유체를 밀어 채널을 통과하도록 하기에는 불충분하기에 비등이 발생하면 각 채널에서 유동정체현상이 일어날 수 있다.

초기온도 과도변화를 감소시키기 위해 전기기냉각수 공급량의 40%를 SDC 열교환기로 공급한다. SDC계통의 차단밸브는 최대온도 149℃에서 작동된다. 공급되는 기기냉각수의 유량은 20분 후에 전유량의 65%까지 증가되고, 40분 후에는 전유량으로 증가된다. 냉각은 HT계통의 보수를 위해 배수될 수 있는 온도인 54℃까지 계속된다. SOPHT에서 시간 변화에 따른 냉각재 온도의 변화 곡선은 Fig. 4에 나타내었다.

초기 60초 동안 급격한 온도 하락 현상을 보여주는데 이는 이 코드에서 SDC 차단밸브가 HT펌프가 트립한 후 1분 후 에 열린다고 가정했기 때문이다. 즉

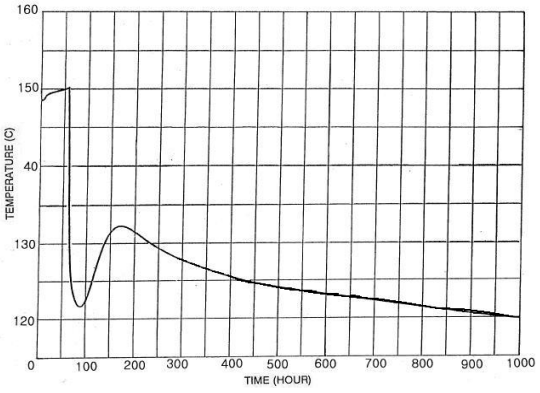

Fig. 4. Cooling start from 149℃ for SDCP Mode using SOPHT (40 min after reactor trip).

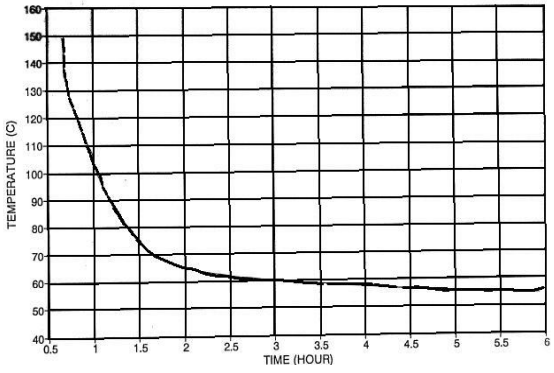

Fig. 5. Cooling start from 149℃ for SDCP Mode using KDESCENT.

영출력 고온상태에서 HT펌프에 의해 원자로 냉각재를 증기발생기로 순환시킴으로써 초기 냉각이 이루어지는데 그 후 SDC계통이 아직 작동하지 않을 때 HT펌프는 트립되었기 때문에 노심을 통과하는 냉각재의 유량이 급격히 감소하게 된다. 따라서 HT펌프에서 발생하는 열(17 MW)은 0으로 떨어지며, HT계통의 유량이 급격히 감소함으로써 급격한 온도 하락현상이 발생하였다. 또한 60초 후 SDC 차단밸브가 열려 SDC계통에 체류하고 있던 차가운 중수로 인하여 유입 냉각재의 온도 하락 현상은 가속화되었다. Fig. 4에서는 1000초까지의 변화 만을 나타내었는데 그 이유는 SOPHT가 정상 냉간운전시(260℃부터 냉각 시작) 잔류출력이 2%로 일정하다고 가정하였기 때문이다.

KDESCENT에서 시간 변화에 따른 냉각재 온도의 변화 곡선은 Fig. 5에 나타내었다. 본 코드에서는 HT펌프가 트립과 동시에 SDC 차단밸브가 열리고 이 운전모드의 변화 동안에 노심을 통과하는 냉각재는 정상상태에 있다고 가정하였다. 이 운전모드에서 냉각률은 HT계통의 온도가 낮아짐에 따라 감소하였다. 초기의 냉각률은 설계요건인 2.8℃/min을 초과하는 21.7℃/min까지 올라갔으며 그 이후의 시간에 대해서는 2.8℃/min 이하의 냉각률을 유지한다. 초기에 급격한 온도 변화는 SDC계통에 있던 차가운(38℃) 중수와 HT계통에서 일차 냉각된 149℃의 뜨거운 중수가 혼합됨으로 인한 현상이다. 본 결과로부터 얻은 냉각률은 다음과 같다.

기간(시간)	냉각률(℃/min)
0.5~1.0	2.1
1.0~3.0	1.4
3.0~6.0	0.3

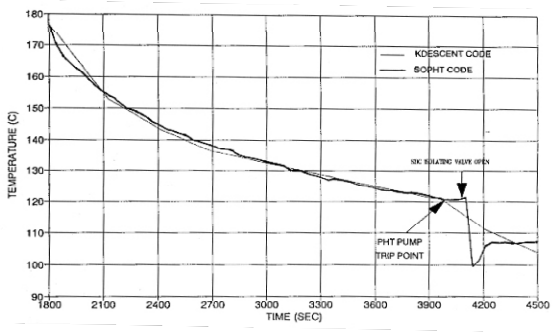

Fig. 6. Cooling start from 177℃ for HTP Mode using KDESCENT and SOPHT.

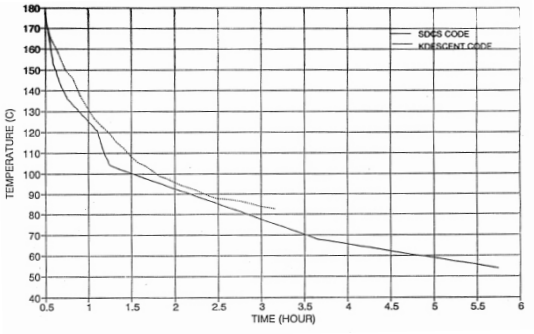

Fig. 7. Cooling start from 177℃ for HTP Mode using KDESCENT and SDCS.

KDESCENT 분석결과는 SOPHT에서 분석되지 않은 1000초 이상(2% 이하 잔류 출력)의 시간 동안에 SDC계통의 냉각능력을 보여 주었으며 설계요건인 원자로 정지 40분 이후 6시간 내에 54℃로 HT계통을 냉각시킴을 알 수 있었다.

2) HTP모드에서 원자로 정지 30분 이후 177℃로부터 냉각 시작:

이 운전의 초기에 HT계통의 온도와 압력은 177℃, 6 MPa(a)이다.

이 때 배수선(Drain Line)에 있는 공기구동밸브(3341-PV29, PV30)는 닫혀 있고 SDC펌프 방출차단밸브(3341-V19, V32)는 열리며 원자로 출구모관 차단밸브가 열려 SDC계통을 가압한다. 원자로 입구모관밸브가 열림과 동시에 냉각재는 SDC 열교환기를 통해 흐른다. 이 때 기기냉각수는 전유량으로 SDC 열교환기에 공급된다. 이 운전모드에서 SDC펌프 축에 있는 역류방지 래칫이 펌프의 역회전을 방지해 준다.

Figure 6에서 HT펌프가 트립되기 이전의 최대 냉각률은 SOPHT 및 KDESCENT에서 100～500초 동

안에 2.4℃/min으로 같은 결과를 나타내었다. 이는 설계요건인 2.8℃/min의 제한치보다 적은 값이다.

Figure 7은 SDCS코드와 본 해석에서 사용된 KDESCENT 코드로부터 원자로 정지 이후에 시간에 따른 SDC계통의 온도 변화를 보여준다. 본 결과는 SDCS코드의 결과와 일치함을 보여주며 냉각률은 아래와 같다. 위 결과로부터 HTP모드에서 냉각은 설계요건을 충족시킨다.

기간(시간)	냉각률(℃/min)
0.5~1.2	1.60
1.2~3.5	0.36
3.5~6.0	0.11

4-2. 비정상냉각 운전

1) SDCP모드에서 원자로 정지 10분 이후 260℃로부터 냉각 시작:

이 경우 운전모드는 다음의 가상사고 중 하나로 인한 것이다.

- 4급 전원과 보조급수공급의 동시 상실
- 역류방지벨브의 상부 급수선에서의 파열
- 주급수펌프와 보조급수펌프의 기계적 고장

이 경우 시간변화에 따른 온도의 변화를 Fig. 8에 나타내었으며 KDESCENT코드의 분석 결과 냉각률은 아래와 같다.

기간(시간)	냉각률(℃/min)	
	경우 1	경우 2
0.17~0.19	10.50	10.50
0.19~0.50	4.68	6.41
0.50~1.00	2.67	1.81
1.00~1.50	0.52	0.40
1.50~2.50	0.12	0.11
2.50~5.50	0.04	0.04

여기서 경우 1에서는 SDC 열교환기로 공급되는 기기냉각수의 유량이 초기 20분 동안에 전유량의 40%이며 그 이후에는 100% 전유량으로 공급되는 경우이다. 경우 2는 초기부터 100% 전유량으로 기기냉각수가 공급된다고 가정하는 경우이다.

Figure 8로부터 기기냉각수가 100%로 공급되는 경우와 40%로 공급되는 경우의 초기 냉각률은 같음을 알 수 있다. 이는 비록 공급되는 기기냉각수의 유량을 감소시켰더라도 SDC계통 내에 있는 차가운 중수와 유입되는 뜨거운 냉각재와의 혼합효과로 인한 온도 하락에 영향을 주지 못했기 때문이다. 위의 냉각률로 볼 때 냉각률은 설계요건보다 훨씬 높다. 이는 냉각이 시작되기 전에 HT계통의 온도는 260℃이고 SDC계통의 온도는 38℃이다. 따라서 SDC계통의 차가운 중수가 HT계통의 고온의 중수와 섞이어 혼합 중수의 온도는 HT계통의 온도보다 최소한 20℃ 정도 낮아진다. 또한 HT계통 구성기기들의 금속열(Metal Heat)과 증기발생기 2차측이 열을 고려하면 이 온도는 훨씬 더 낮아지게 된다. 그러나 이러한 초기상태(냉각 시작후 30분) 이후의 냉각률은 2.67℃/min과 1.81℃/min 이하로써 설계요건의 제한치를 잘 충족시킨다.

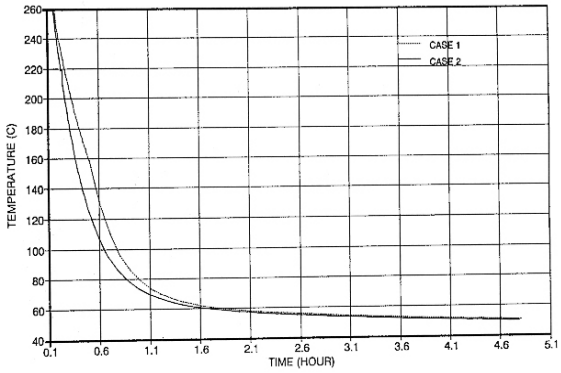

Fig. 8. Cooling start from 260℃ for SDCP Mode using KDESCENT.

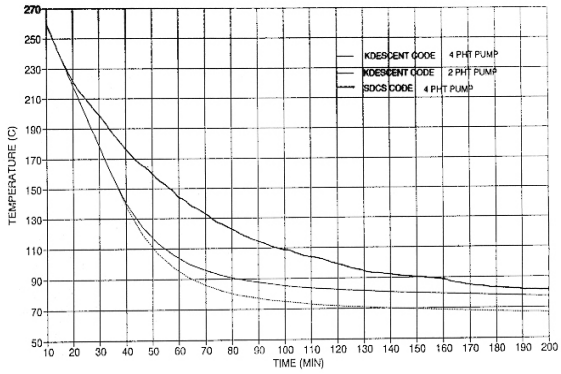

Fig. 9. Cooling start from 260℃ for HTP Mode using KDESCENT and SDCS.

2) HTP모드에서 원자로 정지 10분 이후 260℃로부터 냉각 시작:

이 운전모드는 주급수펌프와 보조급수펌프의 기계적 고장으로 인한 급수 유량의 급격한 감소의 발생시 사용된다. 이때 원자로는 영출력고온 조건에서 정

지하며 HT계통 압력은 8 MPa(a)로 감소된다. SDC 열교환기의 입구(원자로 입구모관 노즐)의 온도는 차단밸브가 열리자 마자 260℃로 급격히 증가하며 SDC 계통을 통한 역류가 허용된다. 열교환기로 공급되는 기기냉각수는 전유량 상태이다. 냉각재의 온도가 121℃에 도달하였을 때 SDC펌프를 사용하여 냉각재를 54℃로 계속 냉각시킨다. 이 경우의 시간변화에 따른 온도변화는 Fig. 9에 나타내었으며 KDESCENT 분석 결과 냉각률은 아래와 같다.

기간(시간)	냉각률(℃/min)	
	4 HT펌프	2 HT펌프
0.17~0.57	4.07	4.07
0.57~1.57	1.26	1.44
1.57~3.00	0.09	0.21

Figure 9에서 4대의 HT펌프를 사용했을 경우와 2대의 HT펌프를 사용하여 냉각했을 경우를 보여주며 이 결과를 SDCS코드의 결과와 비교하였다. 두 경우 모두 냉각 초기의 냉각률은 같았다. 이는 위에서 설명한 것과 같은 이유이며 그 이후의 냉각률은 2대의 HT펌프를 사용하였을 때보다 4대의 HT펌프를 사용했을 때가 더 높았다. 그 이유는 4대의 HT펌프에서 발생되는 열(17 MW)이 냉각재로 전달되어 오히려 냉각률을 떨어뜨리기 때문이다. 따라서 2대의 HT펌프를 이용하는 것이 HT펌프에서의 발생열을 반으로 감소시키기 때문에 더욱 효과적이다.

5. 결 론

1) 경수로용 KDESCENT코드 해석 결과와 중수로용 SDC계통에 사용되는 SDCS코드 결과를 비교한 결과 최대 온도차가 10℃ 정도 발생하고 있으나 이는 SDCS코드에서는 초기 중수 혼합에 따른 온도 강하 효과를 고려하지 않았기 때문이다. 따라서 두 코드의 서로 다른 가정치를 고려해 볼 때 KDESCENT코드의 중수로 적용이 가능하다고 판단된다.
2) 정상냉각 운전시 HTP모드와 SDCP모드에서는 설계요건이 요구하는 냉각을 제한치인 2.8℃/min을 충족시켰으며운전모드 전환시 온도의 급격한 변화가 나타났다. 이는 SDC계통의 냉각용량과 관계되는 것이 아니라 SDC계통 내의 차가운 중수와 HT계통의 뜨거운 중수의 혼합으로 인한 현상으로 단지 짧은 시간동안 지속되었다.
3) 비정상냉각 운전시 냉각률은 설계요건보다 높은 4.07℃/min(HTP모드), 4.68℃/min(SDCP모드)이었으나 짧은 시간 지속되었으며 비상 조건임을 고려할 때 수용가능하다고 판단되었다.

참고문헌

1. B. Zhai, “Design Manual for Shutdown Cooling Sysytem for Wolsong-2” 86-33410 /63341-DM-000, Rev. 0, Nov. 1992.
2. J.K.Ha, A.H.Stretch, “System Classification List, Nuclear Steam Supply System for Wolsong 2” 86-01345-SCL-001, Jan. 1992.
3. R. Abdallah, “Design Manual for Reactor Building Recirculated Cooling Water System for Wolsong 2 Nuclear Power Plant” 86-71340/67134-DM-000, Rev. 1, Mar. 1992.
4. A. J. Adams, “Design Manual for Service Water inside Service Building for Wolsong-1 Nuclear Power Plant” DM-0059-71300-01, Rev. 1, Dec. 1980.
5. S. J. Baik, “Design Manual for Primary Heat Transport System for Wolsong-2” 86-33100/63310-DM-000, Rev. 0, Dec. 1992.