

'95 추계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

SOPHT 코드를 이용한 열수송계통의 정지냉각 천이해석

김태한, 김영보, 정종식, 한상구

한국원자력연구소

요 약

CANDU-6형 원자로의 정지냉각계통(Shutdown Cooling System ; SDCS)은 영출력 고온상태의 원자로를 상온상태로 냉각시킬 수 있도록 설계되었다. 본 해석은 증기발생기와 복수기 증기방출밸브(CSDV) 및 정지냉각펌프를 이용한 정상냉각과 열수송펌프를 이용한 260 °C부터 냉각 및 정지냉각펌프를 이용한 260 °C부터 냉각의 2가지 비정상냉각에 대해서 중수로 계통설계의 열수력 해석코드인 SOPHT 코드를 사용하여 해석하였다. 해석결과에 따라 주요기기들의 냉각천이에 따른 운전부하(service loadings)조건이 주어졌으며 또한 정지냉각계통은 열수송계통과 관련보조계통을 정지냉각계통 열교환기 2차측에서 비등이 발생하지 않고 정상냉각 허용한계인 2.8 °C/min를 만족하면서 냉각할 수 있음을 확인하였다.

1. 서론

원자로 정지냉각계통은 원자로 양쪽 끝에 한 대의 펌프와 한 대의 열교환기로 구성되어 열수송계통의 원자로 입구모관(RIH)과 원자로 출구모관(ROH) 사이에 연결되어 열수송펌프나 정지냉각펌프를 이용하여 원자로 정지후의 열수송계통(PHTS)을 냉각시킬 수 있도록 설계되어 있다. 이러한 냉각은 정상냉각(level A service condition) 및 비정상냉각(level B service condition)으로 구분되며, 본 해석은 하나의 정상냉각과 2가지의 비정상적인 냉각천이현상에 대해서 SOPHT 전산코드[1]를 사용하여 해석하였다. 해석 사례별 주요 결과들은 천이곡선의 형태로 제시되었다.

2. 해석사례

2.1 증기발생기와 복수기 증기방출밸브를 이용한 260 °C부터 냉각

정상적인 원자로 냉각의 첫 단계로 원자로는 정지상태이고 출구모관은 260 °C, 10 MPa로써 정지냉각계통은 차단되어 있다. 냉각을 실시하기 전에 출구모관은 8 MPa로 감압된다. 증기발생기 압력제어는 냉각모드로 증기발생기의 증기를 복수기 증기방출밸브로 방출하도록 되어 있다. 이러한 증기방출은 열수송계통의 온도를 낮추어 최종상태는 출구모관온도가 177 °C 또는 149 °C이고 압력은 6 MPa이다.

2.2 정지냉각펌프를 이용한 149 °C부터 냉각

초기상태는 출구모관온도가 149 °C인 2.1절의 최종상태이다. 이 온도에서 복수기 증기방출밸브는 닫히고 증기발생기는 더 이상 원자로를 위한 열제거원이 아니다. 열수송펌프는 정지되고 정지냉각펌프가 기동된다. 정지냉각계통은 정지냉각계통 차단밸브를 단계적으로 열면서 연결된다. 이러한 냉각모드에서 원자로는 정지냉각펌프와 열교환기에 의해 냉각된다.

2.3 열수송펌프를 이용한 260 °C부터 냉각

비정상 냉각의 하나로서 초기조건은 원자로 정지상태이고 출구모관은 260 °C, 10 MPa이며

증기발생기는 더 이상 열제거원이 아니다(예: 급수상실 등). 정지냉각계통이 260 ℃에서 연결되고 정지냉각펌프는 기동되지 않는다. 냉각제는 열수송펌프에 의해 순환되고 정지냉각 열교환기가 열제거원이 된다. 출구모관온도가 121 ℃에 이르면 열수송펌프를 정지하고 정지냉각펌프를 기동하여 냉각한다.

2.4 정지냉각펌프를 이용한 260 ℃부터 냉각

비정상 냉각의 하나로서 초기조건은 원자로 정지상태이고 출구모관은 260 ℃, 10 MPa이며 증기발생기는 더 이상 열제거원이 아니다. 열수송펌프는 정지되고 정지냉각펌프를 기동하여 열수송계통이 정지냉각계통과 연결된다. 냉각제는 정지냉각펌프에 의해 순환되고 정지냉각 열교환기가 열제거원이 된다. 이러한 운전은 냉각종료시 까지 계속된다.

3. 해석가정

260 ℃에서 냉각을 위한 원자로 붕괴열은 4 %FP(Full Power)[2]로 원자로 정지 후 60 초에서의 붕괴열이다. 정지냉각펌프 모드의 149 ℃부터의 냉각은 1.65 %FP 붕괴열을 가진다. 붕괴열 1.65 %FP는 0 초에서 4 %FP의 붕괴열이 생성될 때 2.8 ℃/min의 냉각한계[3]를 근거로 계산하였다. 비록 원자로 붕괴열이 냉각기간 동안 감소하지만 냉각해석을 위하여 일정한 붕괴열이 가정되었다. 4 %FP 이하에서는 붕괴열의 감소비율이 느리므로 적용 가능하며 냉각동안 비록 짧은 기간이나 일정한 붕괴열의 가정은 보수적이다.

4. 해석 절차

4.1 초기조건 확립을 위한 정상상태 분석

냉각전이 현상을 분석하기 전에 일련의 정상상태 분석이 수행되었다. 첫 번째 정상상태 분석은 100 %FP에서의 열수송계통 조건을 제공한다. 정상상태의 열수송계통 온도는 증기발생기 이차측 온도에 의존한다. 증기발생기 이차측은 항상 포화상태이다. 이러한 정상상태 분석은 냉각전을 위한 3개의 열수송계통 초기조건을 생성하고 이는 다음과 같다.

- i) 원자로 붕괴열 4 %FP, 출구모관 압력 10 MPa, 출구모관온도 260 ℃
- ii) 원자로 붕괴열 4 %FP, 출구모관 압력 8 MPa, 출구모관온도 260 ℃
- iii) 원자로 붕괴열 1.65 %FP, 출구모관 압력 6 MPa, 출구모관온도 149 ℃

4.2 증기발생기와 복수기 증기방출밸브를 이용한 260 ℃부터 냉각

4.1절 (ii)의 상태를 초기조건으로 하여 분석한 것으로 정지냉각계통은 차단되어 있다. 증기발생기 압력제어는 냉각모드이고 복수기 증기방출밸브를 통해 증기를 방출하여 일차측의 온도를 감소시킨다. 일차측 온도감소를 2.8 ℃/min로 유지하기 위하여 증기발생기 압력제어에 의해 복수기 증기방출밸브로 제어한다. 이 분석은 두번 수행하는데, 첫번째 분석은 출구모관온도가 225 ℃일 때 중지하고 두번째 분석은 이 상태에서 출구모관 압력을 6 MPa로 입력하고 다시 수행된다. 본 해석은 3000 초 동안 수행하였다.

4.3 정지냉각펌프를 이용한 149 ℃부터 냉각

이 분석은 4.1절 (iii)의 경우를 초기조건으로 하여 분석하였다. 증기발생기는 열제거원이 아니므로 모든 증기발생기와 관련된 이차측 밸브는 초기에 닫혀 있다고 가정한다. 정지냉각계통 열교환기를 위한 재순환 냉각수는 정상상태 유동의 40 %NF(nominal flow)로 조정한다. 정지냉각계통을 연결하기 전에 열충격을 줄이기 위하여 일련의 밸브조작으로 예열한다. 이 분석은 4단계로 구분하여 수행하였다. 첫번째는 정지냉각계통의 예열을 실시하였고, 두번째는 열수송펌프를 정지하고 정지냉각펌프를 기동하였다. 세번째는 정지냉각 펌프모드 사용 20분 후에 재순환 냉각수를 65 %NF로 증가하였고 네번째는 65 %NF 증가 후 20분 뒤에 100 %로 재순환 냉각수를 증가하였다. 이 분석은 4000 초 동안 수행되었다.

4.4 열수송펌프를 이용한 260 ℃부터 냉각

본 해석은 4.1절 (i)의 상태를 초기조건으로 분석하였다. 증기발생기는 4.3절과 같이 열제거원이 아니라고 가정한다. 정지냉각계통은 정지냉각계통 차단밸브가 열림으로써 연결되며 열수송펌프는 작동되고 정지냉각펌프는 작동되지 않는다. 재순환 냉각수 유량은 100 %NF로 유지된다. 이러한 냉각은 냉각천이의 끝까지 가능하나 분석은 2000 초까지만 수행하였다.

4.5 정지냉각펌프를 이용한 260 ℃부터 냉각

본 해석은 4.1절 (i)의 상태를 초기 조건으로 분석하였다. 증기발생기는 역시 4.3절과 같이 열제거원이 아니라고 가정한다. 천이의 시작시 열수송펌프는 정지되고 정지냉각펌프가 기동된다. 정지냉각 열교환기를 통한 재순환 냉각수 유량은 100 %NF이다. 정지냉각계통의 차단밸브는 4.3절과 같이 연결된다. 이러한 냉각은 냉각천이의 끝까지 운전가능하나, 열수송계통 온도가 감소되면 붕괴열이 감소하여 4.3절과 같이 수행될 수 있으므로 분석은 3000 초까지만 수행하였다.

5. 결과 및 토의

5.1 증기발생기와 복수기 증기방출밸브를 이용한 260 ℃부터 냉각

정상적인 원자로 냉각의 첫단계로서 열수송계통의 출구모관온도를 그림 1-1에 나타내었다. 전체적인 온도감소 비율은 2.53 ℃/min이며 이는 증기발생기 압력제어에 의해 복수기 증기방출밸브를 통한 증기방출로 조절된다. 이는 냉각허용한계인 2.8 ℃/min를 만족한다. 복수기 증기방출밸브로 증기를 방출하면 증기발생기 수위가 낮아지므로 수위를 유지하기 위하여 급수밸브가 열리고 이러한 급수로 열수송계통의 온도를 저하시켜 1250 초 와 1750 초에서 출구모관온도가 감소되었다.

출구모관온도가 225 ℃(1346 초)에 도달하면 출구모관 압력을 8 MPa에서 6 MPa로 감소시킨다. 이 압력감소는 가압기의 증기방출밸브를 사용하여 수행한다. 증기방출이 시작되면 가압기의 온도 및 압력이 감소되고 가압기로부터 증기방출이 시작되면 탈기용축기의 압력, 온도, 수위가 상승한다. 이때 탈기용축기의 수위제어밸브가 열려 중수저장탱크로 유동이 형성되고 가압기에서의 증기방출이 중지되면 외부로의 유동도 중지한다. 냉각동안 정지냉각계통은 차단된다.

5.2 정지냉각펌프를 이용한 149 ℃부터 냉각

복수기 증기방출밸브로 증기를 방출하여 원자로 출구모관온도가 149 ℃까지 감소하면 정지냉각계통이 냉각을 수행하게 된다. 그림 2-1은 출구모관 온도를 나타낸 것이다. 운전절차서에 따르면 정지냉각계통은 차단밸브의 특정 조작에 의해 뜨거운 중수와 먼저 섞이게 한다. 이러한 밸브의 작동은 천이의 초기에 출구모관온도를 변동(fluctuation)시키고 이어서 일정하게 감소하게 된다. 초기 변동후 전체적인 감소비율은 1.2 ℃/min로서 허용한계를 만족한다. 원자로 출구모관 압력은 6 MPa로 일정하게 유지된다. 그림 2-2는 정지냉각계통으로부터 원자로 입구모관으로의 냉각재 유량을 나타낸 것이다. 정지냉각계통을 섞이게 하기 위하여 차단밸브가 열릴 때 정지냉각펌프는 정지상태를 유지하고 열수송펌프만 작동되며 이때 정지냉각계통을 통한 유동의 흐름은 역방향으로 흐르고 열수송펌프가 정지되고 정지냉각펌프가 작동되면 유동의 흐름이 정방향으로 바뀐다. 그림 2-3는 열수송펌프를 통한 유량을 나타낸 것으로 열수송펌프가 정지되고 정지냉각펌프가 기동하면 열수송펌프를 통한 유동방향이 바뀐다. 역방향의 유동은 일정치 않으나 약 1800 초에 정지냉각펌프를 통한 유량은 180 kg/s으로 172 kg/s는 연료채널로 흐르고 8 kg/s는 열수송펌프를 통해 역방향으로 흐른다. 즉, 전체 유량의 95.6 %는 연료채널로 흐르고 4.4 %는 열수송펌프를 통해 우회한다. 그림 2-4는 정지냉각열교환기의 출구온도를 나타낸 것으로 정지냉각계통이 섞이면 열교환기 튜브 출구 쪽은 뜨거운 냉각재를 열수송계통의 원자로 입구모관으로부터 받아서 온도가 30 ℃에서 140 ℃이상으로 상승한다. 정지냉각펌프가 기동되고 정지냉각계통의 차단밸브가 열리면 열교환기 튜브를 통한 반대의 유동이 형성된다. 반대방향의 유동은 정지냉각계통에 존재하던 찬 냉각재를 열교환기를 통하여 흐르게 함으로써 열교환기의 출구온도를 감소하게 한다. 정지냉각계통 내의 찬 냉각재 전부가 열교환기를 통과한 후 출구온도는 순간적으로 상승했다가 열수송

계통과 함께 냉각한다. 40 %NF의 재순환 냉각수 유량에서 셀측 최대 온도는 90 ℃로 비등은 발생하지 않는다. 1450 초에 재순환 냉각수 유량은 65 %NF로 증가시켜 열교환기의 출구온도를 낮추게 하고 2650 초에 재순환 냉각수 유량을 100 %NF로 증가시켜 열교환기 출구온도를 더욱 낮춘다. 증기발생기 2차측도 정지냉각계통에 의해 냉각되나 열수송펌프와 증기발생기를 통한 연료채널 우회유동은 매우 작아서 증기발생기 2차측에 대한 영향은 매우 작다.

5.3 열수송펌프를 이용한 260 ℃부터 냉각

본 해석은 원자로 출구모관온도가 260 ℃에서 시작한다. 그림 3-1은 원자로 출구모관온도를 나타낸다. 정지냉각계통이 연결되기 전에 열제거원이 없으므로 출구모관온도는 어느 정도 상승한다. 정지냉각계통이 연결되면 출구모관온도는 약 2.0 ℃/min로 감소한다. 또한 원자로 입구모관의 온도천이는 출구모관 온도천이와 유사하고 출구모관 압력은 10 MPa이다. 그림 3-2는 열수송펌프 유동을 나타낸 것으로 정지냉각계통이 연결될 때 유량이 상승하는 것을 볼 수 있다. 정지냉각계통은 연료채널의 우회라인이므로 연결이 되면 열수송펌프의 유동저항이 감소되므로 이는 갑작스런 펌프유동의 상승을 초래한다. 갑작스런 상승후 열수송펌프 유동은 서서히 상승한다. 연료채널의 유량도 열수송펌프 유량과 동일한 이유로 증가한다. 정지냉각계통을 통한 유량은 정지냉각펌프의 역방향으로 형성된다. 그림 3-3는 정지냉각 열교환기 셀측 출구온도로 최대온도는 103 ℃이나 압력이 대기압보다 상당히 높아서 열교환기 이차측에서의 비등은 발생하지 않는다.

5.4 정지냉각펌프를 이용한 260 ℃부터 냉각

본 해석은 5.2절과 유사하나 원자로 출구모관온도가 149 ℃가 아닌 260 ℃에서 시작하였다. 그림 4-1은 원자로 출구모관 온도천이를 나타낸 것으로 평균 감소비율은 2.2 ℃/min 이다. 초기의 온도변동은 밸브와 펌프작동에 의한 것이다. 출구모관 압력은 10 MPa로 유지된다. 그림 4-2은 정지냉각계통을 통한 유동을 나타낸 것으로 차단밸브가 열려 정지냉각계통을 예열할때 유동은 정지냉각펌프의 역방향이다. 열수송펌프가 정지된 후 정지냉각펌프가 기동되면 유동은 정방향으로 바뀐다. 그림 4-3는 열수송펌프 유동을 나타낸 것으로 여전히 정방향이다. 이 경우는 원자로 출구모관 온도가 5.2절의 냉각시점보다 상당히 높을때 시작하므로 thermo-syphoning 효과가 더 커서 역방향 유동을 방지한다. 그림 4-4는 열교환기 셀측 출구온도를 나타낸 것으로 최대온도는 103 ℃이나 압력이 대기압보다 높은 상태이므로 비등이 발생하지 않는다.

6. 결 론

열수송계통의 냉각현상 해석은 정지냉각계통의 열교환기 셀측에서 비등의 발생없이 정상적인 냉각상태의 냉각허용비율 2.8 ℃/min를 만족함을 확인할 수 있었으며 열교환기, 펌프, 밸브작동의 변화 시에는 다소의 온도변화가 있음을 알 수 있었다. 이러한 정상냉각 및 비정상냉각 과정중의 온도변화는 응력해석을 위하여 운전부하 보고서[4, 5]에 포함되어 있다. 비정상적인 냉각시 정지냉각계통은 원자로 출구모관온도가 260 ℃일때 연결됨으로서 열교환기 입구온도는 정상냉각시보다 매우 높으나 열교환기 셀측에서 비등은 발생하지 않으며 부품에 손상은 발생하지 않는다.

7. 참고문헌

1. SOPHT Control Model and Data for Wolsong NPP 2, 3 and 4 Trip Coverage Analysis, 86-03500-AR-002
2. CANDU Channel Decay Power, AECL-5704
3. Design Manual, Shutdown Cooling System, Wolsong 2, 3 and 4, 86-33410/63341-DM-000
4. Service Loading Report, Shutdown Cooling Pumps, 86-33410-210-001
5. Service Loading Report, Shutdown Cooling Heat Exchangers, 86-33410-210-002

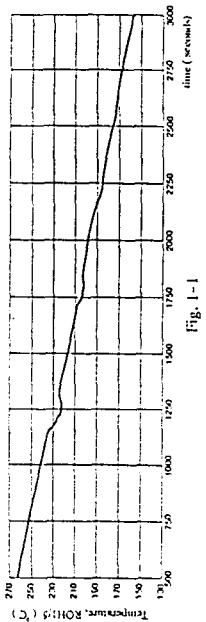


Fig. 1-1

FIG. 1. COOLDOWN FROM 360 °C, SG & CSDV

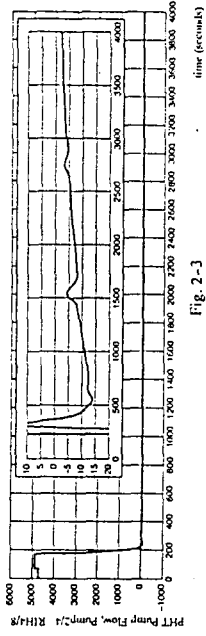


Fig. 2-3

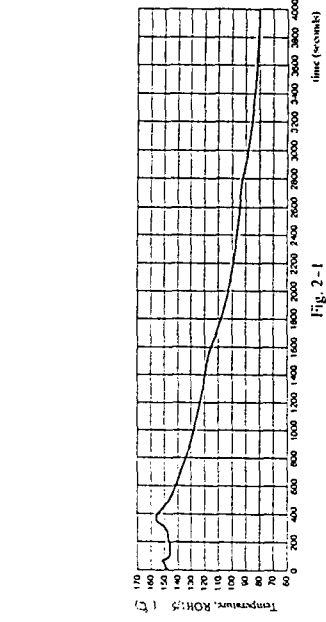


Fig. 2-1

FIG. 2. COOLDOWN FROM 149 °C, SDC PUMP MODE

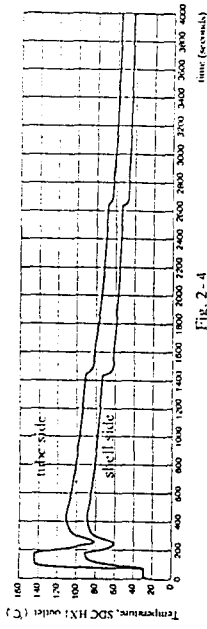


Fig. 2-4

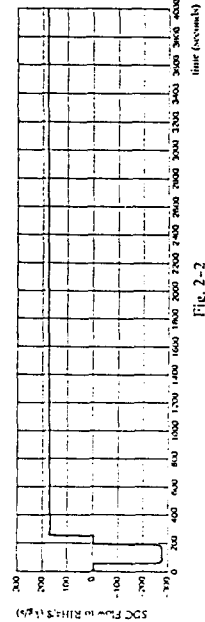


Fig. 2-2

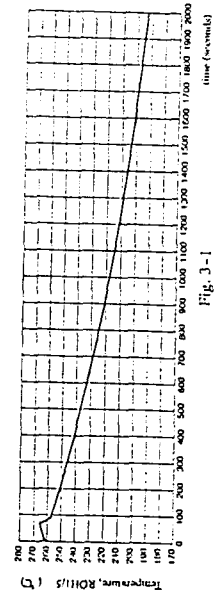


Fig. 3-1

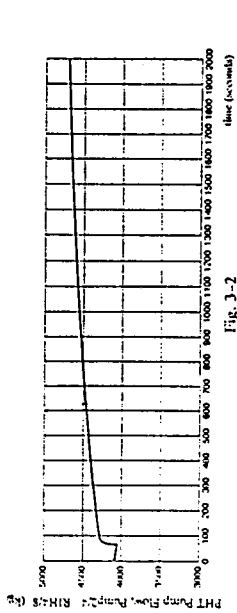


Fig. 3-2

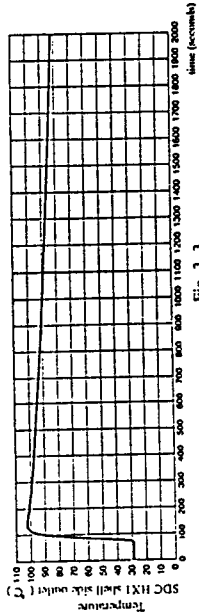


Fig. 3-3

FIG. 3. COOLDOWN FROM 260 °C, PHT PUMP MODE

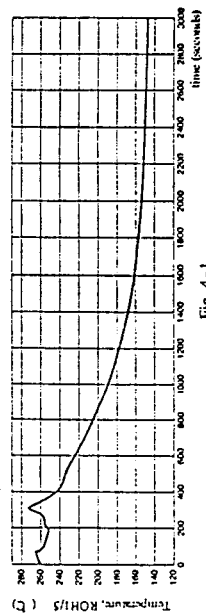


Fig. 4-1

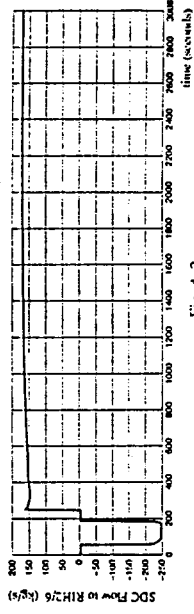


Fig. 4-2

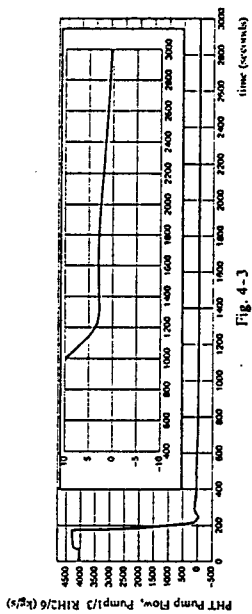


Fig. 4-3

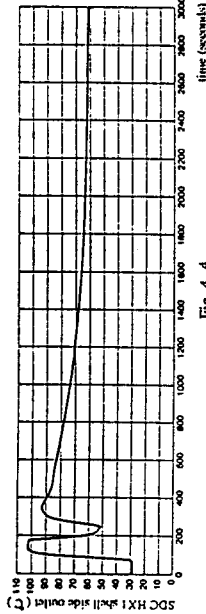


Fig. 4-4

FIG. 4. COOLDOWN FROM 260 °C, SDC PUMP MODE