2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

한국표준원전 정지냉각성능시험 평가

Evaluations on Shutdown Cooling Performance Test for Korean Standard Nuclear Power Plants

김길곤, 오종필, 이광원, 김은기
한국전력기술㈜
대전광역시 유성구 덕진동 150번지
ggkim@kopec.co.kr

요 약

연료장전전 정지냉각 성능시험 시운전 조건을 적절히 평가하기 위하여 KDSCNT1[1] 코드를 사용하여 한국표준원전의 정지냉각 성능 시험 허용 요건이 새로이 개발되었다. 연료장전전 고온기능시험단계에서 울진5호기 정지냉각계통 A와 B 계열에 대하여 각각 고온정지상태에서 재장전운전 상태까지 냉각시키는 정지냉각계통성능 시험이 수행되었다. 이러한 시험 결과와 새로운 시험 허용기준을 비교 평가하였다. 성능시험 후반에서 실측치와 예측치간에 약간의 차이가 있지만 새로운 시험 허용기준은 연료장전전 고온기능 시험단계의 정지냉각계통 성능 확인에 적절한 것으로 나타났다. 실측치와 예측치간의 차이는 예측치 계산 가정에서 고려되지 않은 원자로냉각재펌프 운전에 의한 에너지 증가 및 증기발생기에 의한 열제거 때문인 것으로 판단된다.

ABSTRACT

The new acceptance criteria for shutdown cooling performance test for Korean Standard Nuclear Power Plant (KSNP) were developed using KDSCNT1 code and to adequately evaluate the actual pre-core cooldown test conditions. The UCN 5 cooldown tests from hot shutdown to refueling modes under the pre-core hot functional test (HFT) conditions were performed using Shutdown Cooling System (SCS) Train A and B, respectively. The test results were evaluated as compared with the new acceptance criteria. These evaluations show that the new acceptance criteria appear to be reasonable to verify the SCS performance during the pre-core HFT cooldown stage, although there is a little deviation at the later stage of cooldown between the test result and the prediction. This deviation seems to be caused by the energy addition of the reactor coolant pump (RCP) operations and the heat removal of steam generators, which is not assumed in the prediction assumptions.

1. 개요

정지냉각계통(SCS)의 설계요건을 규정한 U.S. NRC BTP RSB 5-1[2]에 의하면 한 계열의 정지냉각계통은 36시간 내에 원자로냉각재계통 현열과 연료 잔열을 제거하여 원자로냉각재계통 고온관 온도를 350°F에서 200°F로 냉각할 수 있어야 한다고 요구하고

있다. 한편, 원자로계통설계자는 연료 재장전 운전을 위하여 두 계열의 정지냉각계통을 이용하여 24시간 내에 원자로냉각재 평균온도를 350°F에서 125°F로 냉각할 수 있도록 설계하고 있다. 정지냉각열교환기 용량 설계 시 재장전 운전 정지냉각 성능이 사용된다. 원전 건설 후 시운전 시험 단계에서 연료 장전 전에 성능 시험을 수행하고 연료 잔열이 없으므로 (시운전 단계에서는 연료 장전 후에도 연료 잔열이 없음) 열부하가 현열과 정지냉각펌프 출력뿐이다. 저온과압보호밸브 열림을 방지하고 순수한 정지냉각계통 성능을 확인하기 위하여 원자로냉각재펌프는 정지되는 것이 바람직하나, 원자로냉각재펌프가 운전될 경우 열부하가 추가된다. 그리고 일반적으로 시험 시 기기냉각수 온도는 정지냉각계통 설계 시 가정하는 기기냉각수 온도 보다 약 40~25°F 정도 낮다. 한편 정지냉각 성능해석 시에는 정지냉각 열교환기 세관의 오염계수를 가정하나 시운전 시에는 오염상태가 아니므로 열제거가 효과적이다. 정지냉각운전 중 원자로냉각재계통 압력경계 건전성 유지를 위하여 냉각률을 75°F/hr로 제한되므로 열제거율이 큰 정지냉각 초기에는 열교환기를 통과하는 유량은 저 유량이어야 한다. 따라서 본 논문은 열부하가 작고 열제거 효율이 큰 시운전 시 정지냉각 성능시험을 적절히 평가할 수 있는 시험 요건을 새로이 개발하고자 한다. 아울러 울진5호기 정지냉각계통 A와 B계열 시험 결과와 정지냉각 열교환기 성능 해석을 통하여 새롭게 개발된 시험요건의 타당성을 평가하고자 한다.

2. 정지냉각 성능 시험 요건

시운전 시 정지냉각계통 성능시험은 정지냉각계통 가압열충격의 가능성을 줄이기 위한 예열 과정이 적절하게 수행되는지와 정지냉각계통 유량을 적절히 조절하여 제한된 냉각률 이내에서 계통성능요건을 만족시킬 수 있는지를 판별하는 시험이다.

2.1 상온정지 냉각 시험 요건

NRC BTP RSB 5-1[2)]에 의하면 원자로정지 후 3.5시간에 정지냉각계통이 운전된다고 가정하고 정지냉각열교환기는 한 계열로 정지냉각 개시 후 32.5시간 내에 원자로냉각재온도가 350°F에서 200°F로 냉각시킬 수 있는 용량으로 설계하도록 요구하고 있다.[2,3)] 영광5,6호기 시험에서는 연료 잔열이 없는 조건에서 NRC BTP RSB 5-1의 요건을 적용하고 있었다. 가동전 고온기능시험 시에는 연료 잔열이 없으므로 정지냉각열교환기는 많은 시간동안 원자로냉각재계통을 최대 냉각률 제한치로 냉각이 가능하다. 여기에 정지냉각열교환기 설계시 적용하는 기기냉각수 온도 조건은 원자로 정지후 3.5시간 이후에는 110°F, 5.5시간 이후에는 105°F, 20.5시간 이후에는 100°F, 27.5시간 이후에는 95°F인 반면 시험 기간 중의 기기냉각수 온도는 일반적으로 이보다 훨씬 낮은 약 70°F~90°F이므로 정지냉각 성능시험 초기에는 정지냉각열교환기 최대 성능보다는 원자로냉각재계통 최대 냉각률 제한치에 제한되게 되므로 운전원은 튜브측 유량을 감소시키는 방법을 사용한다. 그래서 정지냉각 목표 온도 및 정지냉각 시간만 측정이 가능하고 연료 잔열 및 기기냉각수 온도를 감안한 성능을 측정하기 곤란했다. 울진5,6호기 시험에서는 고온기능시험 시에는 연료 잔열이 없는 것을 감안하여 정지냉각열교환기 튜브측 유량을 40분까지는 1,000~1,050gpm, 40분 이후는 1,150~1,200gpm으로, 정지냉각열교환기 쉘측 유량을 2,000~2,200gpm으로 사용하여 시험하도록 시험절차서를 작성하였다. KDSCNT1 코드를 사용한 정지냉각 성능해석을 통하여 기기냉각수 온도는 시험 조건에 따라 사용할 수 있도록 65°F, 75°F, 85°F, 95°F와 110°F에서 허용기준을 산정하여 제시하였다. 허용기준은 표 1과 같으며 시험 당시의 기기냉각수 온도에 따라 내삽법 또는 외삽법을 사용하여 허용기준을 결정한다. 그리고 해석에 의하면 연료 잔열이 있고 기기냉각수 온도 조건 (2시간 까지 110°F, 17시간 까지 105°F, 그리고 24시간까지 100°F)을 적용하고, 원자로냉각재계통을 최대 냉각률 제한치 내에 유지하기 위하여 정지냉각열교환기 쉘측 유량은 8,000gpm으로 하고, 튜브측 유량을 0~4,800gpm까지 변화시키면서 해석하면 일반적인 열전달계수 계산 불확실도 20%를 감안하여 4.3시간이면 정지냉각열교환기 한 계열로 원자로냉각재계통을 350 °F에서 200°F로 냉각시킬 수 있다.

2.2 재장전운전 정지냉각시험 허용기준

발전운영자 요건 (계통설계 요건)인 재장전운전 정지냉각요건에 의하면 원자로정지 후 3.5시간에 정지냉각계통이 운전된다고 가정하고 정지냉각계통 두 계열로 정지냉각 개시 후 24시간 내에 원자로냉각재온도가 350°F에서 125°F로 냉각시킬 수 있는 용량으로 설계하도록 요구하고 있다. 울진5,6호기 시험에서는 연료 잔열이 없는 상태에서 한 계열의 정지냉각열교환기 튜브측 유량을 40분까지는 1,000~1,050gpm, 40분 이후는 1,150~1,200gpm으로, 정지냉각열교환기 쉘측 유량을 2,000~2,200gpm으로 사용하여 시험하도록 시험요건을 개발하였다. KDSCNT1 코드에 의한 정지냉각 성능해석을 통하여 기기냉각수 온도는 시험 조건에 따라 차이가 있으므로 65°F, 75°F, 85°F, 95°F와 110°F에서 허용기준을 산정하였다. 허용기준은 표 2와 같으며 시험 당시의 기기냉각수 온도에 따라 내삽법 또는 외삽법을 사용하여 허용기준을 결정한다. 그리고 해석에 의하면 연료 잔열이 있고 기기냉각수 온도 조건 (2시간 까지 110°F, 17시간 까지 105°F, 그리고 24시간까지 100°F)을 적용하고, 원자로냉각재계통을 최대 냉각률 제한치 내에 유지하기 위하여 정지냉각열교환기 쉘측 유량은 8,000gpm으로 하고, 튜브측 유량을 0~4,800gpm까지 변화시키면서 정지냉각열교환기 두 계열을 사용할 때 약 22시간이면 원자로냉각재계통을 350°F에서 125°F로 냉각시킬 수 있다. 재장전운전온도 정지냉각 요건은 상온정지냉각 요건보다 더 큰 용량이 요구되는 제한적인 요건이므로 정지냉각열교환기 용량 선정 요건이 된다. 그리고 표 3에서는 울진5,6호기에 적용되는 새로운 정지냉각시험 허용기준과 이전의 요건을 비교하고 있다.

3. 시험 방법

울진5호기 정지냉각계통 A와 B 계열을 사용하여 시험을 수행하였으며 계통도는 그림 1, 2와 같으며 시험 결과는 그림 3~10과 같다. 정지냉각 B 계열시험의 경우, 시험 시작 57분만에 원자로냉각재펌프 01A을 정지하였고 65분만에 원자로냉각재펌프 02A를 정지했다. 그리고 4시간 28분 만에 125°F에 도달하였다. 열교환기를 통과하는 유량을 측정하는 계기가 없으므로 초음파 유량계를 14인치 배관에 설치하였는데 이 유량계는 248°F 이상에서는 손상 가능성이 있어 248°F 이하에서만 유량을 측정하였다. 반면에 울진5호기 정지냉각계통 A계열 시험은 계속 원자로냉각재펌프를 운전하면서 시험을 수행하였다.

4. 해석 모델

KDSCNT1 코드는 튜브측(원자로냉각재)에서 쉘측(기기냉각수)으로의 열전달에 의한 원자로냉각재계통의 냉각과정을 해석하는 모델로 구성되어 있다. 잔열제거 과정의 해석은 다음의 두 과정으로 나누어진다. 잔열제거를 시작하면 정지냉각펌프의 유량이 크므로 최대 냉각률을 초과하지 않도록 정지냉각계통 유량의 일부는 정지냉각열교환기를 우회하게 된다. 냉각이 진행됨에 따라 상기의 최대냉각률을 유지하기 위하여 정지냉각열교환기로의 유량은 증가하게 된다. 이 유량이 최대 정지냉각계통유량에 도달하면 냉각률은 감소하기 시작할 것이다. 다음에 설명된 냉각과정 A는 주어진 최대유량내에서 정지냉각열교환기로의 유량을 조절하는 과정이다. 냉각과정 B는 일정한 정지냉각열교환기로의 유량으로 냉각률을 감소하는 과정이다. 정지냉각계통의 개략도는 그림 2와 같다. 수행되는 기본적인 계산은 각 시간 단계에서 일차측의 최대방출열과 정지냉각열교환기의 열제거용량을 비교하여 원자로냉각재의 온도를 결정하는 것이다.

냉각과정 A와 냉각과정 B에 대한 계산을 간략히 기술하면 다음과 같다. 냉각과정 A에서는 노심의 잔열, 정지냉각계통펌프의 발열량 그리고 주어진 최대 냉각률에서 원자로냉각재계통의 현열량을 합하여 발전소의 전 발열량을 계산하고 이것을 가동중인 정지냉각계통의 수로 나누어 한 정지냉각계통에 걸리는 부하를 계산한다. 정지냉각열교환기의 주어진

쉘측 입구온도와 추정된 튜브측 유량을 가지고 정지냉각열교환기의 열제거 용량을 계산한다. 열제거 용량, 발열률, 및 유량을 고려하여 원자로냉각재 온도를 구한다. 냉각과정 A 동안 최대 정지냉각계통유량에 도달하였음에도 불구하고 열제거 용량이 부족하면 냉각률을 감소시키는 냉각과정 B 운전 모드로 변경하게 된다. 냉각과정 B 동안 냉각률은 감소하여 열제거가 가능한 냉각률을 결정하여 열제거 용량과 발열률이 같아지는 유량을 구하여 원자로냉각재 온도를 구한다.

정지냉각계통으로 제거되어야 하는 일차측 열량은 연료 잔열, 원자로냉각재계통 현열, 정지냉각펌프 출력으로 구성된다. 정지냉각열교환기의 열제거용량(QHX)은 다음의 열전달식으로 구해진다[4).

$$QHX = U * F * LMTD * AREA \quad \cdots (1)$$

U : 열전달계수 (Btu/Hr-°F-ft^2)
AREA : 유효 열전달 면적(ft^2)
F : 열교환기 평균 대수 온도차 보정계수

$$F = \frac{\sqrt{R^2+1}}{R-1}\ln\left(\frac{1-P}{1-PR}\right) / \ln\left(\frac{\frac{2}{P}-1-R+\sqrt{R^2+1}}{\frac{2}{P}-1-R-\sqrt{R^2+1}}\right) \quad \cdots (2)$$

P: 열교환기 열효율계수
R: 열교환기 열용량비
LMTD : 열교환기 평균 대수 온도차

$$LMTD = \frac{(TEMP - TCCW2) - (THX2 - TCCW1)}{\ln\frac{(TEMP - TCCW2)}{(THX2 - TCCW1)}} \quad \cdots (3)$$

TEMP : 열교환기 튜브측 입구온도
TCCW2 : 열교환기 쉘측 출구온도
THX2 : 열교환기 튜브측 출구온도
TCCW1 : 열교환기 쉘측 입구온도

정지냉각열교환열전달계수(U)는 다음과 같이 계산한다.

$$A = \frac{1}{UFINAL} - C \quad \cdots (4)$$

$$TRRF = A\frac{TRRF}{TRRF + SRRF} \quad \cdots (5)$$

$$SRRF = A - TRRF \quad \cdots (6)$$

$$U = \frac{1}{TRRF\left(\frac{UFLOW}{FLOHXX}\right)^X + SRRF\left(\frac{SFLOW}{FLOCCW}\right)^Y + C} \quad \cdots (7)$$

$$TFF = \frac{FLOHXX}{UFLOW} \quad \cdots (8)$$

$$SFF = \frac{FLOCCW}{SFLOW} \quad \cdots (9)$$

UFINAL : 정격 유량에서 총열전달계수
C : 저항계수 보정 인자
UFLOW : 튜브측 정격 유량

SFLOW : 쉘측 정격 유량
FLOCCW : 쉘측 유량
FLOHXX : 튜브측 유량
X=0.7, Y=0.6

5. 시험 및 해석 결과

원래 시험 요건에서는 원자로냉각재펌프 정지를 가정한다. 그러나 울진5호기 정지냉각 A와 B 계열시험에서는 원자로냉각재펌프 두 대를 운전하였으며, B 계열시험에서는 약 1시간 후에 두 대의 원자로냉각재펌프를 정지하고 계속 정지냉각을 수행했고 A 계열시험에서는 두 대의 원자로냉각재펌프를 계속 운전하면서 정지냉각을 수행했다 (그림 3 참조).

열교환기 쉘측 유량 (기기냉각수 유량)은 A 계열시험 시 조금 높게 조정되었고 B 계열시험에서는 시험 요건에서 요구했던 유량 범위에서 조정되었다. 이 차이에 의한 영향은 무시할 수 있다. 밸브 특성 상 열교환기 쉘측 유량 (기기냉각수 유량)을 더 이상 유량 조절을 하는 것은 어려웠으며 정격 대비 저 유량 (약 25%)이므로 약간의 유량계 오차가 있을 것으로 판단된다 (그림 4 참조).

열교환기 쉘측 입구온도는 B 계열시험 보다 A 계열시험 시 약 10°F 정도 높게 나타났다. A 계열시험 시 열교환기 쉘측 입구온도는 일정했으며 약 3시간 후쯤 튜브측 유량을 증가 시켜 열제거률을 증가시키므로써 열교환기 쉘측 입구온도가 약간 증가하다가 다시 감소되어 일정하게 유지되었다. B 계열시험은 A 계열시험 보다 약 2주 먼저 수행된 관계로 기기냉각수계통을 사용하는 다른 계통이 적어 열교환기 쉘측 입구온도가 낮았다. 냉각 초기에 열제거가 많아 쉘측 입구온도가 증가하다가 원자로냉각재펌프를 정지하는 시점에서 쉘측 입구온도가 감소하여 튜브측 유량 증가에 따라 서서히 증가되었다 (그림 5 참조).

A 계열시험에서 튜브측 유량은 초기에는 B 계열 시험과 같이 조정되었으나 약 2시간 후 원자로냉각재계통 온도가 감소되어 열제거율이 감소되고 원자로냉각재펌프 출력으로 인하여 열부하 증가로 인하여 튜브측 유량을 약 3,000gpm 까지 증가시켰고, 원자로냉각재온도가 점차 냉각됨에 따라 4,500gpm 까지 튜브측 유량을 증가시켰다. B 계열 시험 시에는 약 1시간 후에 원자로냉각재펌프를 정지하였으므로 열부하가 감소되었기 때문에 원자로냉각재 온도가 낮아져 열제거율이 감소되어도 약간의 튜브측 유량 증가로 충분히 정지냉각을 수행할 수 있었다 (그림 6 참조).

A 계열 시험은 원자로냉각재펌프 두 대가 계속 운전 중인 상태에서 수행되었고 실측치는 시험 조건하에서 측정한 값이다. 허용기준 곡선은 시험 요건 개발 시 요구하는 유량 및 실제 시험 조건하의 쉘 측 입구 온도를 사용하고 원자로냉각재펌프 운전 및 증기발생기 이차측 열전달은 고려하지 않고 계산된 값이다. 허용기준 곡선은 여유도를 포함하는 곡선과 포함하지 않는 곡선 둘 다 나타내었다. 실측치와 허용기준 곡선의 가정의 차이에도 불구하고 차이가 거의 없어 보이는 이유는 원자로냉각재펌프 부하 차이, A와 B 계열시험의 튜브측 유량차이, 쉘측 유량차이와 쉘측 입구온도 차이의 복합적인 효과로 나타난 현상이다. A 계열 시험 결과에 의하면 여유도를 포함하는 시험 허용기준 보다 원자로냉각재 고온관 온도가 낮게 유지되므로 허용기준을 만족했다고 판단된다. (그림 7 참조)

A 계열 시험은 원자로냉각재펌프 두 대가 계속 운전 중인 상태에서 수행되었고 실측치는 시험 조건하에서 측정한 값이고, 계산치는 시험 조건하에 증기발생기 이차측 열전달은 고려하지 않고 원자로냉각재펌프 운전은 고려하여 계산된 값이다. A 계열 시험의 실측치는 원자로냉각재 고온관 온도 176°F 이후의 기록이 없는 관계로 176°F 까지만 나타냈고 계산치는 176°F에서의 조건으로 이후의 정지냉각을 수행하는 것으로 가정하여 계산한 것이다. 기록은 없지만 176°F 이후도 계산치와 같이 튜브 측 유량이 약 4,500gpm으로 증가하였으므로 계산치와 같이 온도가 급감하는 경향을 보일 것이다. 튜브측 유량이 4,500gpm으로 증가하기 전 실측치와 계산치의 차이는 증기발생기 이차측에

의한 열제거의 누적 현상으로 일정하게 차이가 증가하는 경향을 보이다가 튜브측 유량이 증가하여 정지냉각 열교환기에 의한 열제거가 상대적으로 많아져 증기발생기 이차측에 의한 열제거 효과가 상대적으로 낮아져 실측치와 계산치간의 차이가 감소하는 경향을 보인 것으로 판단된다. (그림 8 참조)

B 계열 시험은 원자로냉각재펌프 두 대를 운전하다가 약 1시간 후에 정지한 상태에서 튜브측 유량은 초기에는 A 계열시험과 거의 동일하게 유지하다가 A 계열 시험은 4,500gpm 까지 증가했으나 B 계열 시험의 경우 1,300gpm까지만 증가시킨 상태에서 시험이 수행되었다. 따라서 A 계열 시험과 같이 후반에 냉각이 급속하게 되는 현상이 발생하지 않고 B 계열 시험에서는 일정한 비율로 냉각됨을 알 수 있었다. A 계열시험과 같이 B 계열 시험 결과도 여유도를 포함하는 시험 허용기준 보다 원자로냉각재 고온관 온도가 낮게 유지되므로 허용기준을 만족했다고 판단된다. (그림 9 참조)

B 계열 시험은 시험 후 튜브측 유량이 적은 관계로 정지냉각 열교환기 열제거율이 적어 증기발생기 이차측에 의한 열제거 효과가 상대적으로 비중이 커져 실측치와 계산치간의 차이가 증가하는 경향을 보인 것으로 판단된다. (그림 10 참조)

이상과 같은 울진5호기 A와 B 계열 시험 결과를 볼 때 시험 요건에서 기술하고 있는 유량 조건을 정밀하게 조절하는 것은 사실상 어렵다고 판단되며, 쉘측 및 튜브측 유량의 범위에 적용되는 여러 개의 허용기준을 제공하는 것도 한 가지 방법으로 판단된다. 시험 요건에서는 저온과압보호밸브 방출사고를 예방하기 위하여 원자로냉각재펌프 운전을 가정하지 않았는데 운전을 수행하였으므로 시험요건에서 가정한 조건과 약간의 차이가 있었다. A 계열 시험 시 원자로냉각재펌프를 운전하였고 증기발생기 이차측과 원자로냉각재계통간의 에너지 이동으로 열교환기 열부하 감소하여 원자로냉각재 온도 감소가 가속되었으나, 이러한 사항을 시험 요건 개발 시 고려되지 못하여 시험에 어려움이 있었으나 기본적으로 울진5,6호기 정지냉각 시험 요건 변경은 적절했던 것으로 판단된다. 다만 증기발생기 이차측 열제거를 최소화하도록 운전절차화하고 유량 조절 범위, 원자로냉각재 펌프 운전을 고려하여 해석하면 적절한 시험 요건이 될 것으로 판단된다.

6. 결론

설계 조건이 아닌 시험 조건을 감안하여 새로운 울진5,6호기 정지냉각 성능시험 요건을 개발하여 울진5호기 정지냉각 A와 B 계열에 대하여 시험을 수행하였다. 열교환기 쉘측 유량은 시험요건을 만족하였으며 튜브측 유량은 시험 요건에서 요구된 유량과 약간 차이가 있었으나 실제 시험 수행성을 고려하여 볼 때 시험은 적절했다고 판단된다. 시험 요건에서는 원자로냉각재펌프 정지를 가정하고 있지만 울진 5호기 시험에서는 두 대의 원자로냉각재펌프를 운전하여 열부하를 증가시켰다. B 계열 시험 시 약 1시간 후에 원자로냉각재펌프를 정지하고 정지냉각 시험을 수행하였고 A 계열 시험에서는 정지냉각 시험 전 기간 동안 원자로냉각재펌프를 운전하면서 시험을 수행하였다. 원자로냉각재펌프를 운전하는 것과 운전하지 않는 경우 차이를 시험할 수 있어서 정지냉각 분석에 도움이 되었다. 분석 결과 평가에 의하면 새롭게 개발된 울진5,6호기 정지냉각성능 시험 허용기준은 적절한 것으로 판단된다. 차후 시험 요건 개발 시에는 증기발생기 이차측 열제거 최소화 운전 절차 요건, 시험 유량 범위 증가, 원자로냉각재 펌프 운전 여부를 고려해야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. “Computer Code, KDSCNT1,” Rev. 00, 한국전력기술㈜, (1994).

2. “Design Requirements of the Residual Heat Removal System,” RSB 5-1, NRC Branch Technical Position, USA, (1981).

3. “Design Criteria for Safe Shutdown Following Selected Design Basis Events in Light

Water Reactors," ANSI/ANS 58.11-1995, ANS, USA, (1995).

4. Chisholm, D., "Developments in Heat Exchanger Technology," pp14-39, Applied Science Publishers (1980).

표 1. 상온정지냉각시험 허용기준

기기냉각수 온도, °F	350°F에서 200°F로 냉각 시 최대허용시간	
	계산	계산+여유도
65	2.7	3.3
75	2.9	3.5
85	3.1	3.7
95	3.2	3.9
110	3.6	4.3

표 2. 재장전운전 정지냉각시험 허용기준

기기냉각수 온도, °F	350°F에서 125°F로 냉각 시 최대허용시간	
	계산	계산+여유도
65	5.7	6.8
75	6.2	7.5
85	6.9	8.3
95	7.9	9.5
110	10.5	12.6

표 3. 정지냉각성능시험 요건 비교

요 건	울진5,6 호기 이전	울진5,6 호기
상온정지냉각요건	다른 시험 조건에 관계 없이 정지냉각열교환기는 한 계열로 정지냉각 개시 후 32.5시간 내에 원자로냉각재온도가 350°F에서 200°F로 냉각시킬 수 있어야 한다.	튜브측 유량은 40분까지는 1,000~1,050gpm, 40분 이후는 1,150~1,200gpm 으로, 정지냉각열교환기 쉘측 유량은 2,000~2,200gpm 시험 조건으로 정지냉각열교환기는 한 계열로 정지냉각 개시 후 표 1의 요구 시간 내에 원자로냉각재온도가 350°F에서 200°F로 냉각시킬 수 있어야 한다.
재장전운전정지냉각요건	다른 시험 조건에 관계 없이 정지냉각계통 두 계열로 정지냉각 개시 후 24시간 내에 원자로냉각재온도가 350°F에서 125°F로 냉각시킬 수 있어야 한다.	튜브측 유량은 40분까지는 1,000~1,050gpm, 40분 이후는 1,150~1,200gpm 으로, 정지냉각열교환기 쉘측 유량은 2,000~2,200gpm 시험 조건으로 정지냉각열교환기는 한 계열로 정지냉각 개시 후 표 2의 요구 시간 내에 원자로냉각재온도가 350°F에서 200°F로 냉각시킬 수 있어야 한다.

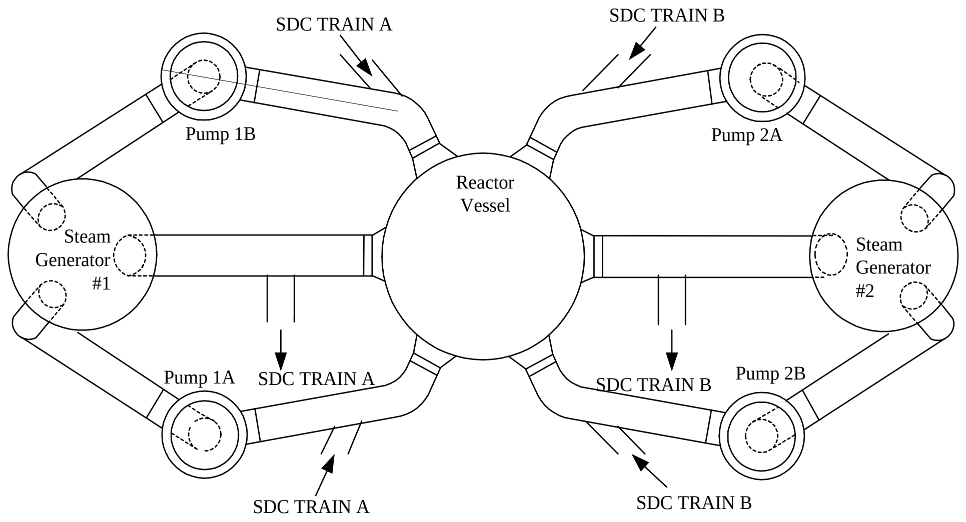

그림 1. 원자로냉각재계통 계통도

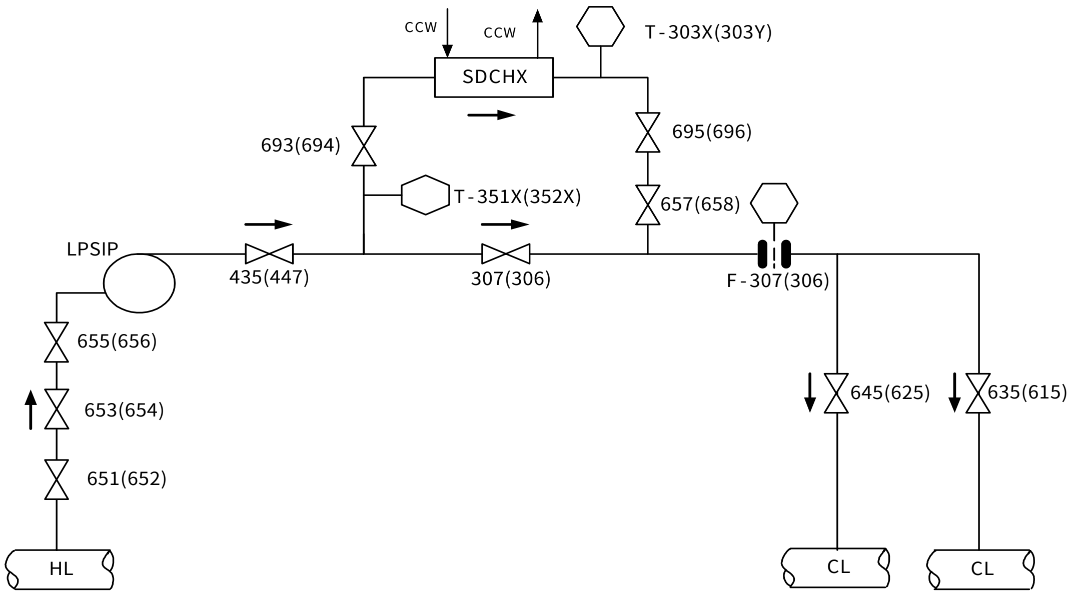

그림 2. 울진5호기 정지냉각계통 계통도

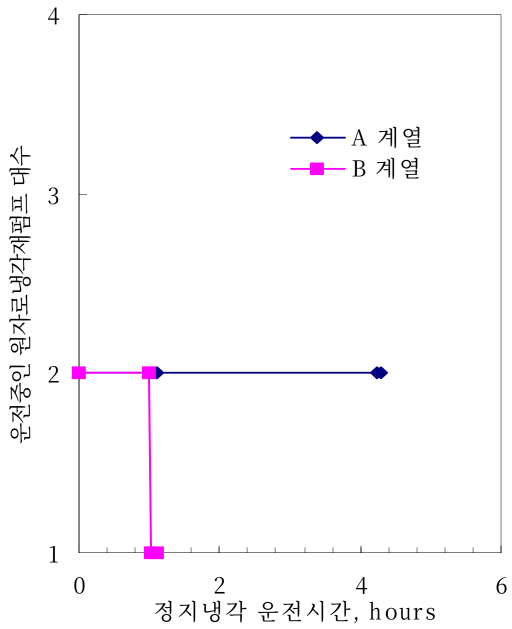

그림 3. 정지냉각시험중 원자로냉각재 펌프 운전 대수

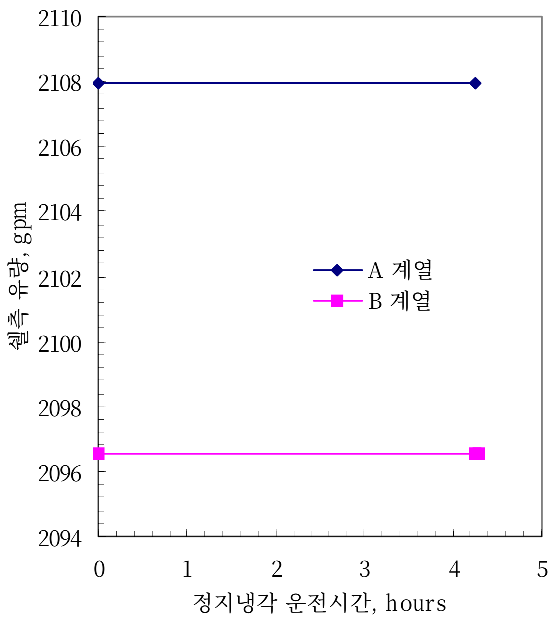

그림 4. 열교환기 쉘측 (기기냉각수) 유량

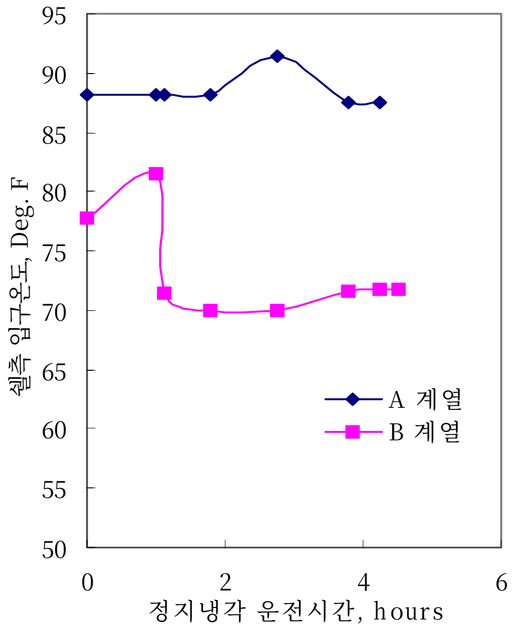

그림 5. 열교환기 쉘측 (기기 냉각수) 입구 온도

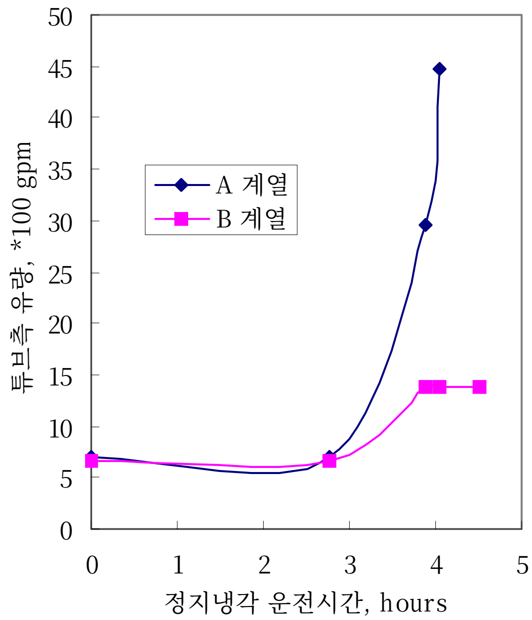

그림 6. 열교환기 튜브측 유량

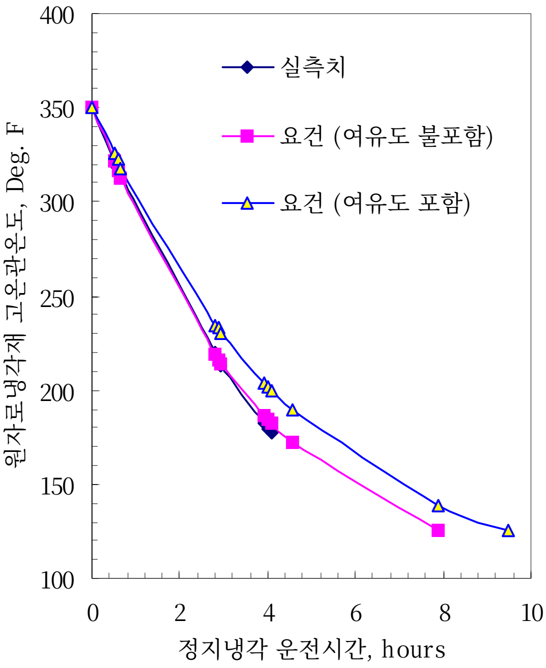

그림 7. 원자로냉각재 고온관 온도 (A 계열)

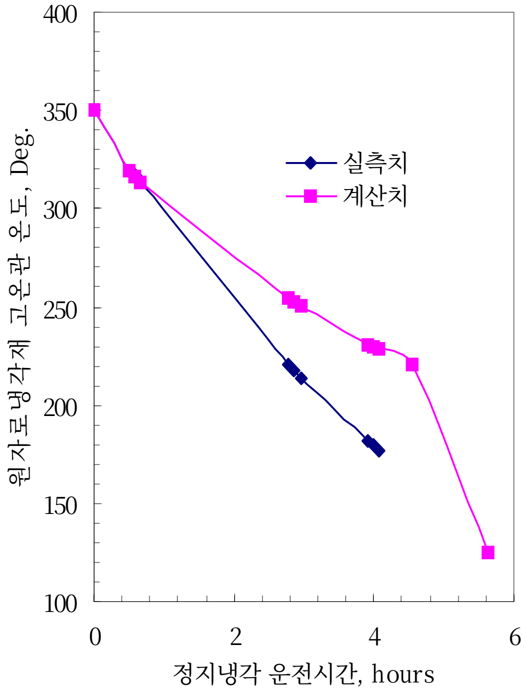

그림 8. 원자로냉각재 고온관 온도 (A 계열)

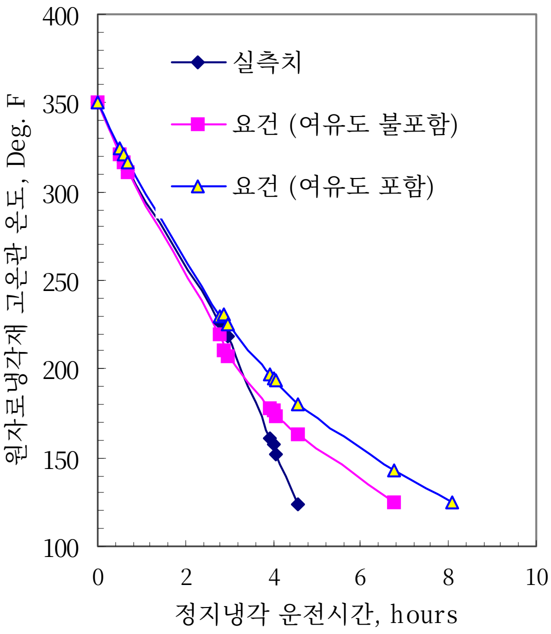

그림 9. 원자로냉각재 고온관 온도 (B 계열)

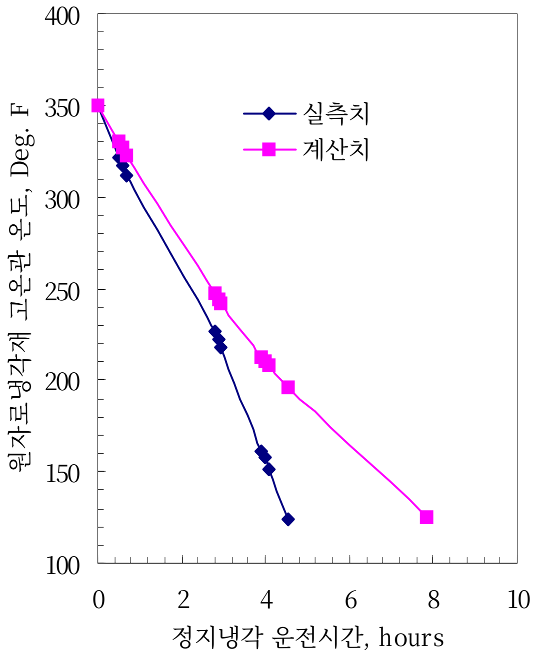

그림 10. 원자로냉각재 고온관온도 (B 계열)