

하나로에서 자연대류 냉각 특성 시험

Natural Circulation Tests in HANARO

채희택, 박상준, 김현일, 임인철, 김학노

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로는 정격 출력이 30MW_{th} 인 연구용 원자로로서 원자로 정지 후에는 노심 잔열이 자연대류에 의해 냉각되도록 설계되어 있다. 하나로에서 형성되는 자연 순환은 1차 냉각계를 통한 자연 순환과 수조를 통한 자연 순환으로 구분된다. 자연대류 냉각 시험은 6% 전출력까지 단계적으로 실시하였으며 이 논문에서는 5%와 6% 전출력 즉, 1.5MW와 1.8MW 열출력에서 수행된 시험 내용을 기술한다. 시험 결과, 2차 냉각계의 작동 여부에 상관없이 두 가지 자연순환 모드가 동시에 형성되었으며 주된 열제거원은 2차 펌프가 작동할 때는 열교환기가 되고 2차 펌프가 정지되었을 때는 원자로 수조수가 되었다. 2차 냉각계가 작동할 경우, 두 개의 침니 출구 노즐을 지나는 자연대류 유동은 낮은 출력의 이전 실험과 달리 정방향으로 형성되었고 적은 양이지만 우회 유동도 존재하였다. 수조 자연순환을 가능하게 하는 플랩 밸브는 1차 펌프가 정지하고 2차 펌프가 작동할 때에는 약간 열려 있었으며 2차 펌프 정지 시에는 밸브 개도가 더 커졌다. 결론적으로 5%와 6% 전출력에서 자연대류 시험이 정상적으로 완료되고 플랩밸브의 성능이 검증됨으로써 하나로에서 노심 잔열은 자연대류에 의해 충분히 제거될 수 있음을 확인하였다.

Abstract

HANARO, 30MW_{th} research reactor, was designed to remove the decay heat by the natural circulation cooling after reactor shutdown. HANARO has two natural circulation cooling modes ; the loop and the pool natural circulation. Natural circulation tests have been carried out up to 6% full power. In this paper, recent test results conducted at 5% and 6% full power are presented. It was confirmed that both the loop and the pool natural circulation were simultaneously established regardless of the secondary cooling system conditions. But the heat exchanger becomes main heat sink in case of the secondary pump-on condition and the reactor pool water does in case of the secondary pump-off condition. It was observed under the secondary pump-on condition that the recirculation flow found in the previous low power tests did not appear at two outlet nozzles and small amount of bypass flow existed. The flap valves opened a little under the primary pump-off and the secondary pump-on condition and opened more under the secondary pump-off condition. In conclusion, the natural circulation tests verified the flap valve performance and that the decay heat in HANARO core is sure to be passively removed by the natural circulation.

1. 서론

하나로에서 정상적으로 원자로를 정지시키면 노심 잔열을 고려하여 1, 2차 냉각 펌프를 30분 후에 정지시키고 이 후 노심 잔열은 자연대류 냉각에 의하여 제거된다. 이 밖에 냉각 기능이 상실되는 사고 시에도 사고 직후부터 장시간 후까지 노심은 안전하게 냉각될 수 있어야 하므로 하나로에서 자연대류 냉각은 중요한 열제거원이 된다. 자연대류 냉각 특성 시험에서는 원자로 출력을 상승시키며 자연 순환 유로에 따른 열수력 인자들을 측정한다. 시험 목적은 자연 대류 유동 특성과 관련 기기의 작동 상태를 점검하고 자연순환 상태로 안전하게 냉각시킬 수 있는 최대 출력을 확인하는데 있다. 하나로에서 형성되는 자연 순환은 그림 1과 같이 1차 냉각계통을 통한 자연 순환(Loop Natural Circulation, LNC)과 수조를 통한 자연 순환(Pool Natural Circulation, PNC)으로 구분된다. 1차 냉각펌프는 정지하고 2차 냉각계통이 운전되면 주된 열제거원이 열교환기가 되고 자연순환 유로는 강제 냉각과 같은 방향으로 형성되는데 이 과정이 LNC 상태이다. PNC 상태는 1차, 2차 냉각 펌프가 모두 정지하면 플랩밸브를 통하여 원자로 수조수가 노심으로 유입되고 노심 잔열이 주로 원자로 수조로 전달되는 과정이다. 플랩밸브는 일종의 역류 방지용 체크밸브로서 미세한 차압에서 동작하도록 설계된 자연대류 냉각용 특수 밸브이다[1,2]. 자연대류 냉각 운전 시험은 하나의 출력 상승 시험 단계에서 6% 전출력까지 단계적으로 실시하게 되어 있으며 현재까지 3차에 걸쳐 수행되었다. 1995년과 1996년에 1%에서 5% 전출력까지 1, 2차로 시험이 수행되었고[3,4] 이 논문에서는 2000년에 3차로 수행된 시험 결과를 기술한다. 3차 자연대류 냉각 운전 시험은 5%와 6% 전출력 즉, 1.5MW와 1.8MW 열출력에서 수행되었으며 LNC와 PNC 상태에서 계통의 유량과 온도 변화를 측정하고 플랩밸브의 작동 상태를 관찰하였다. 이를 통하여 하나의 자연대류 유동 특성과 냉각 능력을 확인하고 피동개념을 도입하여 설계된 자연대류 냉각 계통의 성능을 검증하였다.

2. 시험

2.1 시험 출력

자연대류 시험은 30MW 전출력의 5%와 6%를 고려하여 1.5MW와 1.8MW 출력에서 수행하였다. 하나로는 2차 냉각계통에서 측정하는 열출력을 기준으로 출력이 결정되며 새로운 노심이 구성되면 열출력과 중성자 출력의 관계식을 얻기 위하여 단계적으로 출력을 올리며 출력 교정시험을 수행한다. 시험 시 원자로의 운전 출력은 전출력의 80%에 해당하는 24MW였으며 운전 출력에서 중성자 출력과 열출력이 같아지도록 한 출력 교정식은 다음과 같다.

$$P_{thermal} = 0.9568 * P_{neutron} + 0.3289$$

여기서 $P_{thermal}$ 은 1차 냉각계통 펌프열(0.7MW)을 제외한 노심 열출력을, $P_{neutron}$ 은 중성자 출력을 말한다. 위 식으로부터 열출력 기준으로 시험 출력인 1.5MW와 1.8MW는 중성자 출력으로 1.23MW와 1.54MW에 해당한다.

2.2 시험 장비

시험 장비로는 1, 2차 냉각계통 각 부위에 설치된 온도계와 압력계 등을 이용하였으며 측정 가능한 열수력 인자들을 제어실에서 읽어 기록한다. 자연대류 유량은 시스템 유량계의 측정 범위를 벗어난 저유량 영역이므로 4개 채널을 동시에 측정할 수 있는 초음파유량계를 추가로 설치하였다. 유량계 센서는 그림 1과 같이 노심 출구 배관에 두 개, 입구 배관에 한 개, 우회 배관에 1개를 설치하였다. 추가로 사용한 온도계는 Thermistor thermometer로 측정 단자를 침니의 출구노즐 위치와 플랩밸브 앞단에 두었다. 이와 함께 시험 동안 플랩밸브 거동을 관찰하기 위하여 수중 카메라를 밸브 앞단에 설치하였다.

2.3 시험 절차

자연대류 시험은 1.5MW와 1.8MW 시험을 연속적으로 수행하였으며 시험 절차는 다음과 같다.

- 1) 원자로 정지상태에서 1, 2차 냉각펌프를 기동하고 정상상태에 도달하면 측정 파라미터들의 초기 상태를 2시간 동안 10분 간격으로 기록한다.
- 2) 온도 측정장치를 통하여 침니의 출구노즐 위치와 플랩밸브 앞단의 온도를 측정하고 수중 카메라로 플랩밸브 상태를 확인한다.
- 3) 원자로를 임계시키고 0.1MW까지 정상적인 절차에 따라 출력을 올린다. 0.1MW에서 측정 데이터를 기록한다.
- 4) 0.3MW, 0.5MW, 0.7MW, 0.9MW 출력에서 측정 데이터를 기록한다.
- 5) 이후 기포 발생 시점까지 0.1MW씩 증가시키며 측정 데이터를 기록한다. 또한 수조 상부에 설치된 비디오 카메라와 제어실 모니터를 통하여 육안으로 기포 발생 여부를 확인하며 플랩밸브 상태를 수중 카메라로 계속 감시하고 사진을 촬영한다.
- 6) 1.5MW 시험 출력까지 0.1MW씩 출력을 상승시키며 측정 데이터를 기록하고 플랩밸브 상태를 사진 촬영한다. 수조 상부에 설치된 비디오 카메라를 통하여 관측되는 기포를 촬영한다.
- 7) 1.5MW 시험 출력에서 2차 펌프 가동 상태의 자연대류 유동에 대해 2시간동안 5분 간격으로 측정 데이터들을 기록하고 플랩밸브 상태는 10분 간격으로 촬영한다.
- 8) 1.8MW로 원자로 출력을 상승시킨다. 위와 같은 방법으로 2시간동안 측정 기록하고 플랩밸브 상태와 관측되는 기포를 촬영한다.
- 9) 원자로 출력을 1.5MW로 낮춘다.
- 10) 1.5MW에서 출력 안정 후 2차 펌프를 정지시킨다. 이후 2시간 동안 측정 파라미터들을 5분 간격으로 기록하고 플랩밸브 상태를 10분 간격으로 촬영한다.
- 11) 원자로 출력을 1.8MW로 올리고 11)과 같은 방법으로 1시간동안 측정한다.
- 12) 정상적인 절차에 따라 원자로를 정지시킨다.
- 13) 원자로 수조와 정화계통에서 냉각수를 표본 채취하여 방사능 준위를 측정하고 핵연료의 건전성을 확인한다.

3. 시험 결과

3.1 1.5MW 시험

1) 자연대류 유동

그림 2는 시간에 따른 측정 채널의 유량 변화 곡선이며 Outlet-1 유량의 경우 시험 시작 약 400분 후에 측정 에러가 발생하여 측정이 중단되었다. 1.5MW LNC 상태에서 Outlet-1 유량은 약 9kg/sec, Outlet-2 유량은 약 7kg/sec이고 노심 입구 유량과 우회 유량은 각각 15kg/sec와 1kg/sec로 나타났다. 노심 입출구 유량이 약 16kg/sec로 같아지므로 질량 보존이 이루어지고 측정치에 대한 신뢰도를 확인할 수 있다. 한편 1995년에 수행된 1차 실험에서는 한쪽 출구 노즐에만 유동이 형성되고 다른 쪽은 재순환되거나 거의 정지 상태에 있었는데[3,4] 이번에는 양쪽 출구 노즐에서 같이 정방향 유동이 형성되었다. 이러한 현상은 1차 시험의 경우 시험 출력에서 운전 중이던 1차 냉각펌프를 정지시키며 시험을 시작하였는데 이번 시험에서는 1차 펌프가 정지된 상태에서 단계적으로 시험 출력에 도달하였기 때문에 나타난 결과로 생각한다. 2차 냉각펌프를 정지시키면 노심 입출구 유량은 급격히 감소한 후 약간 증가했다가 다시 감소하는 경향을 나타내었다.

2) 온도 분포

그림 3은 1차 냉각계통 각 지점의 냉각재 온도 변화를 보여 주고 있다. LNC 상태에서 열교환기 입출구 온도차는 약 16.3℃를 유지하다 PNC 상태에서는 약 2.6℃ 정도로 감소하였다. PNC 상태에서 플랩밸브 입구와 열교환기 입구의 온도차는 18.5℃ 정도를 유지하였다. 노심 출구 온도

의 급격한 온도 변화는 노심 유동이 침니수와 혼합되고 측정 단자가 약간 흔들리기 때문에 나타나는 것으로 보이며 변동폭은 약 5℃ ~ 8℃였다.

3) 열전달량 평가

이전 실험 결과와 같이 1차 냉각펌프가 정지하면 2차 냉각계통의 작동 여부와 상관없이 플랩밸브는 열리고 LNC와 PNC가 동시에 형성됨을 확인하였다. 표 1에서 1차 냉각계통 유량은 LNC의 경우 16.2kg/sec, PNC의 경우 5.7kg/sec이다. LNC 상태에서 HX로 전달되는 열전달량은 1.1MW로 열출력의 74%에 해당하고 나머지는 수조로 전달된다. 시험 출력에서 HX 열전달량을 제외한 나머지가 수조로 전달된다는 가정 하에 추정된 플랩밸브 유량은 6.3kg/sec이고 노심 유량은 21.3kg/sec이었다. 자연대류 냉각 능력 평가[5]시 계산된 LNC 상태의 노심 유량은 22.1kg/sec로 측정치가 약간 작게 나타났다. PNC 상태에서 열교환기를 통해 전달되는 열출력은 0.06MW로 노심 출력의 4%에 해당하므로 노심 발생열의 대부분은 원자로 수조로 전달된다. 추정된 플랩밸브 유량은 18.6kg/sec이고 노심 유량은 23.9kg/sec이었다.

3.2 1.8MW 시험

1) 자연대류 유동

1.8MW 시험은 1.5MW에서 출력만 올린 상태이므로 LNC 유동은 같은 유로에서 유량만 약 1.5kg/sec 정도 증가하였다. LNC 상태에서 loop-1 유량은 약 9kg/sec, loop-2 유량은 약 8kg/sec이고 노심 입구 유량과 우회 유량은 각각 16.5kg/sec와 0.7kg/sec로 나타났다. PNC 상태에서는 1.5MW와 같이 노심 유량이 약간 증가했다가 서서히 감소하였다.

2) 온도 분포

1.8MW 출력에서 1차 냉각계통 각 부분의 냉각재 온도는 그림 3에 나타나 있다. LNC 상태에서 열교환기 입출구 온도차는 17.9℃를 유지하다 PNC 상태에서는 약 2.4℃ 정도로 감소하였다. PNC 상태에서 플랩밸브 입구와 열교환기 입구의 온도차는 18.9℃ 정도를 유지하였다.

3) 열전달량 평가

1차 냉각계통을 흐르는 자연대류 유량은 LNC의 경우 17.0kg/sec, PNC의 경우 5.8kg/sec 정도로 나타났다. LNC 상태에서 HX로 전달되는 열전달량은 표 1과 같이 1.27MW로 열출력의 약 71%에 해당하고 나머지는 수조로 전달되었다. 추정된 플랩밸브 유량은 7.8kg/sec이고 노심 유량은 24.4kg/sec이 된다. 자연대류 냉각 능력 평가[5]시 계산된 LNC 상태의 노심 유량은 23.8kg/sec로 1.5MW 상태와 달리 측정치가 약간 크게 나타났다. PNC 상태에서 열교환기를 통해 전달되는 열출력은 58kW로 노심 출력의 3%에 해당하며 계산으로 추정된 플랩밸브 유량은 22.0kg/sec이고 노심 유량은 27.3kg/sec이었다.

3.3 플랩 밸브 상태

플랩밸브는 일종의 역류 방지용 체크밸브로서 미세한 차압에서 동작하도록 설계된 자연대류 냉각용 특수 밸브이다. 노심 입구배관에 설치된 플랩밸브는 그림 4와 같으며 디스크 양단에 걸리는 차압이 0 ~ 100Pa 사이에서 열리고 300Pa에서 완전 개방되며 이 때 유량이 8.5kg/sec 이상이 되도록 설계되었다. 플랩밸브 앞단에 설치한 수중 카메라를 통하여 1차와 2차 냉각펌프 작동 상태에 따른 밸브 거동을 관찰한 결과, 작동 상태는 그림 5와 같으며 LNC 상태에서 약간 열려 있고 PNC 상태에서는 밸브의 개도가 더 커짐을 확인하였다. 플랩밸브의 개방 시점이 설계 시 예측했던 시점보다 빠르지만 이는 수조 자연순환 유동이 형성되는 것을 돕는 방향으로 작용하고 다른 계통에는 영향이 없으므로 밸브의 설계 성능을 만족하였다.

3.4 기포 관측

자연대류 시험 동안 노심에서 기포가 발생하는지 여부는 원자로 수조에 설치된 수중 카메라와 수조 상부에서 육안으로 관찰하였다. 시험 출력에서 침니를 통해 수조 상부로 올라오는 기포는 몇 개씩 간헐적으로 관측되었다. 기포 발생이 연속적이지 않고 소량인 점으로 보아 미포화 비등에 의한 기포가 아니라 노심이나 원자로 구조물에 붙어 있던 불용성 가스이거나 수조수에 녹아있는 용존 가스가 수온 상승으로 용해도가 떨어져 생기는 기포일 것으로 추정한다.

3.4 수조 상부 방사능 준위 및 1차 냉각수 분석 결과

수조 상부 방사능 준위는 PNC 상태에서 약 $32\mu\text{Gy/h}$ 까지 상승하였다. 이는 원자로 수조수 온도가 상승하여 방사화된 노심 유동이 수조 상부까지 올라오기 때문에 나타난 결과로 보이며 손상 핵연료 감시계통(Failed Fuel Detection System)의 측정값은 변함이 없었으므로 핵연료는 건전한 것으로 판단하였다. 자연대류 실험 종료 후 1차 냉각수를 표본 채취하여 분석한 결과, 핵분열 생성물들이 검출되지 않았으므로 시험 기간 동안 핵연료는 건전하였음을 확인하였다.

4. 결론

하나로는 원자로 정지 시 노심 잔열을 자연대류 냉각에 의해 제거하도록 설계되어 있다. 이에 따라 원자로 성능 시험 때부터 단계적으로 출력을 올리면서 3차에 걸쳐 자연대류 냉각 운전 시험을 수행하였다. 이 논문에서는 붕괴 출력 준위를 고려하여 5%와 6% 전출력 즉, 1.5MW와 1.8MW 열출력에서 수행된 3차 자연대류 시험에 대하여 기술하였다. 자연대류 시험에서는 LNC와 PNC 상태에서 계통의 유량과 온도 변화를 측정하고 플랩밸브의 작동 상태를 관찰하였다. 시험 결과, 이전 시험과 같이 2차 냉각계통의 작동 여부에 상관없이 LNC와 PNC가 같이 형성되었으며 주된 열제거원은 2차 펌프가 작동할 때는 열교환기가 되고 2차 펌프가 정지하였을 때는 원자로 수조수가 되었다. 2차 냉각계통이 작동하는 상태의 자연순환 유로는 이전 실험과는 달리 두 개의 침니 출구 노즐에서 정방향 유동을 형성하였고 우회 배관으로도 일정 양의 유동이 존재함을 확인하였다. 플랩 밸브는 2차 냉각 펌프의 작동 여부에 상관없이 항상 열려 있으나 설계 의도대로 2차 펌프 정지 시 밸브 개도를 더 크게하여 원활하게 PNC 유동을 형성함을 확인하였다. 시험 시간동안 노심에서 기포가 발생하는지 여부는 수중 카메라나 육안으로 확인할 수 없었으며 손상 핵연료 감시계통과 냉각수 분석을 통하여 핵연료는 건전성을 유지하였음을 확인하였다. 결론적으로 6% 전출력 자연대류 시험이 정상적으로 완료되고 자연대류 냉각을 위한 계통의 성능이 검증됨으로써 하나로에서 노심 잔열은 피동적으로 충분히 제거될 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

1. I.C.Lim, et. al, "The Residual Heat Removal System of KMRR and Flap Valve Design", Proceeding of 3rd IGORR Meeting, 1993.
2. H.T.Chae and G.Y.Han, "Design and Performance Tests of Flap Valve for HANARO Natural Circulation Cooling", Proceeding of ISRR, 1999.
3. H.T.Chae, et. al, "On The Natural Convection Cooling in HANARO ; Experiment and

RELAP5/KMRR Simulation, NURETH-8, 1997.

4. 채희택, "자연대류 냉각 운전 시험", TR-RPT-P-03, 한국원자력연구소, 2001.

5. 채희택, "자연대류 냉각 능력 평가", KM-033-RT-K059, 한국원자력연구소, 1993.

표 1. 자연대류 냉각 운전 시험 결과

| 항 목 | 2차 냉각계통 작동 | | | | 2차 냉각계통 정지 | | | |
|----------------------|------------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|
| | 1.5 | | 1.8 | | 1.5 | | 1.8 | |
| (1) 원자로 출력, MW | 1.5 | | 1.8 | | 1.5 | | 1.8 | |
| (2) 열제거원 | HX | Pool | HX | Pool | HX | Pool | HX | Pool |
| (3) HX 입구 온도, °C | 45.1 | | 47.6 | | 57.5 | | 64.5 | |
| (4) HX 출구 온도, °C | 28.8 | | 29.7 | | 54.9 | | 62.1 | |
| (5) 플랩 입구 온도, °C | | 30.1 | | 31.5 | | 38.9 | | 45.5 |
| (6) 온도차, °C | 16.3 | 15.0 | 17.9 | 16.1 | 2.6 | 18.5 | 2.4 | 18.9 |
| (7) 1차 냉각계통 유량, kg/s | 16.19 | | 17.00 | | 5.72 | | 5.80 | |
| (8) 원자로 입구유량, kg/s | 15.01 | | 16.55 | | 5.33 | | 5.33 | |
| (9) 플랩밸브 유량, kg/s | | 6.32 | | 7.84 | | 18.57 | | 21.98 |
| (10) 열전달량, kW | 1.103 | 0.397 | 1.272 | 0.528 | 0.061 | 1.439 | 0.058 | 1.742 |
| (11) 노심 유량, kg/s | 21.33 | | 24.39 | | 23.90 | | 27.31 | |

주 : 1. 측정 온도와 유량은 정상상태를 유지하는 동안의 평균값

2. (9),(10),(11)은 계산값

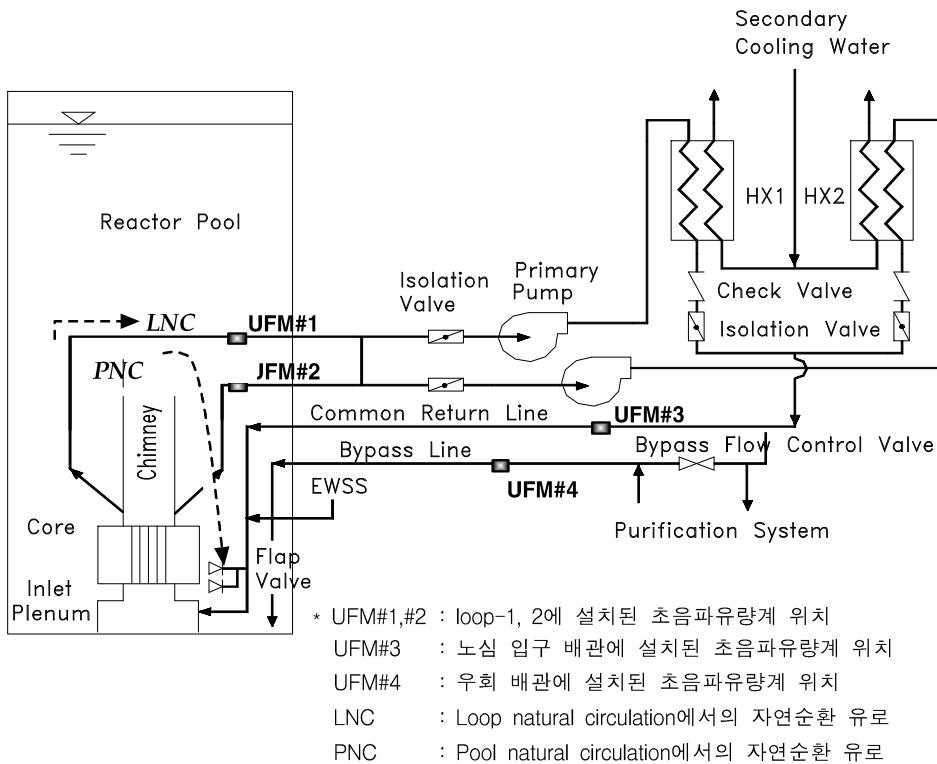


그림 1. 하나로의 1차 냉각계통 개략도 및 초음파 유량계 설치 위치

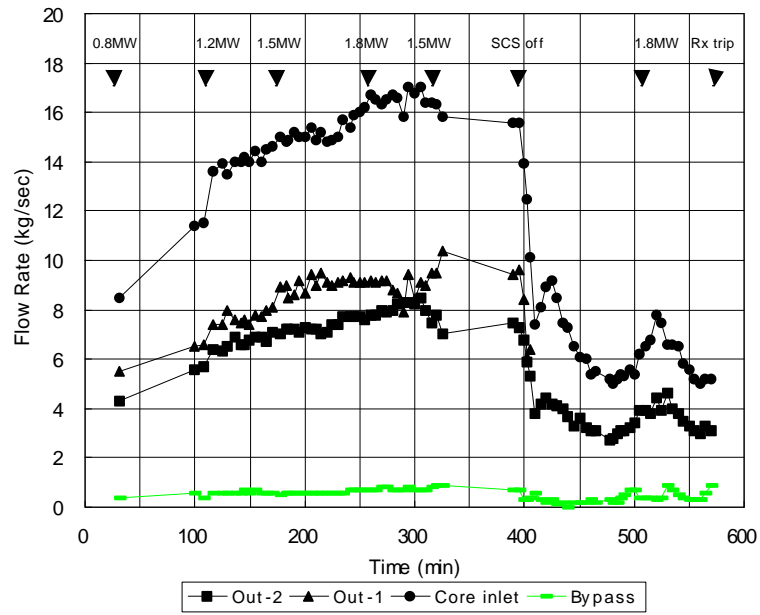


그림 2. 1.5MW와 1.8MW 자연대류 시험에서 원자로 입출구 유량 변화

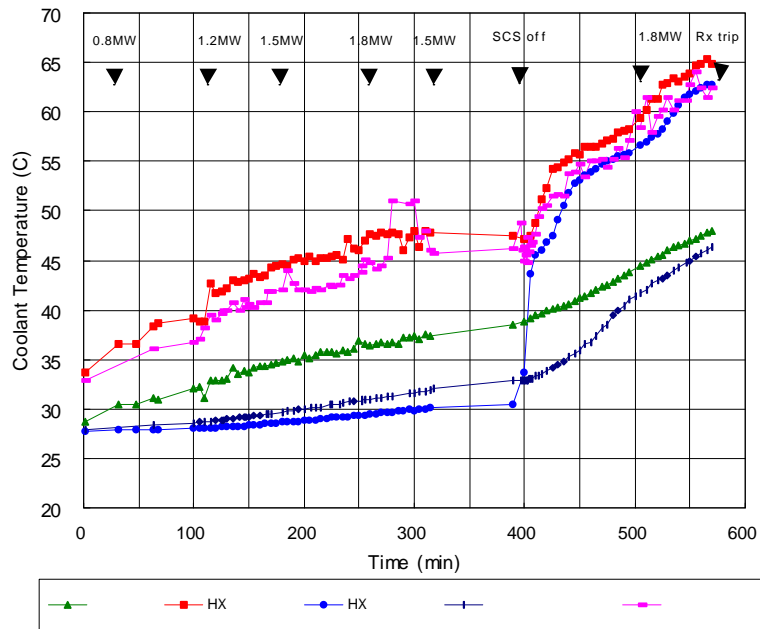


그림 3. 1.5MW와 1.8MW 자연대류 시험에서 1차 계통 냉각재 온도 변화

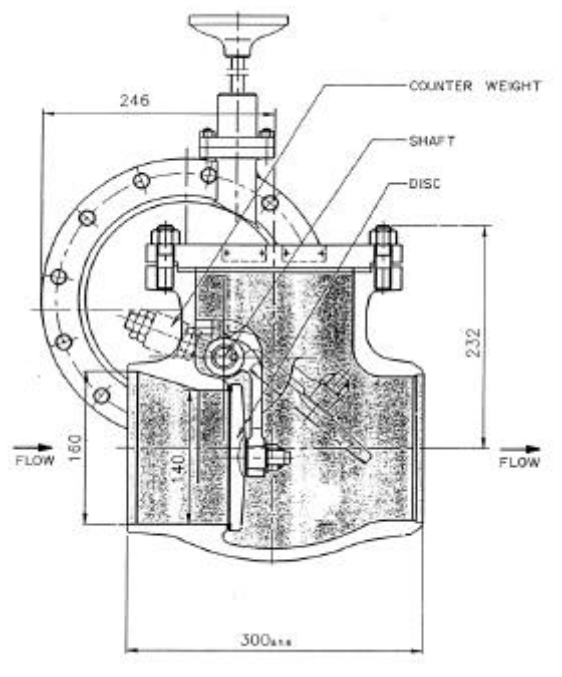
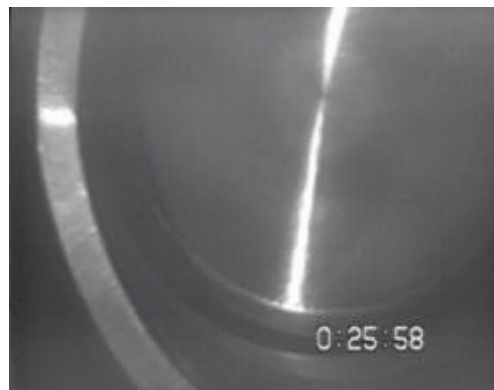


그림 4. 플랩밸브 개략도



1) 1차 냉각계통을 통한 자연 순환 상태
(LNC, 1.5MW, V-004)



2) 수조 자연 순환 상태
(PNC, 1.8MW, V-004)

그림 5. 자연 대류 냉각 운전 시험 시 플랩밸브 거동