

연구용 원자로의 정지봉 장치 성능에 미치는 인자 분석과 성능 시험

김경련* · 김석범* · 고재명* · 문균영* · 박종호**

Performance test and factor analysis on the performance
of shutoff units with the research reactor

Kyoung-Rean Kim*, Seoug-Beom Kim*, Jae-Myoung Ko*,
Gyoon-Young Moon*, Jong-Ho Park**

Key Words : Half-core test loop(1/2 노심시험 시설), HANARO(하나로), Shutoff unit(정지봉 장치), Hydraulic system(수력계통), Drop time(낙하시간), Withdrawal time(인출시간)

ABSTRACT

The shutoff unit was designed to provide rapid insertion of neutron absorbing material into the reactor core to shutdown the reactor quickly and also to withdraw the absorber slowly to avoid a log-rate trip. Four shutoff units were installed on the HANARO reactor but the half-core test facility was equipped with one shutoff unit. The reactor trip or shutdown is accomplished by four shutoff units by insertion of the shutoff rods. The shutoff rod(SOR) is actuated by a directly linked hydraulic cylinder on the reactor chimney, which is pressurized by a hydraulic pump. The rod is released to drop by gravity, when triplicate solenoid valves are de-energized to vent the cylinder. The hydraulic pump, pipe and air supply system are provided to be similar with the HANARO reactor. The shutoff rod drops for 647 mm stroke within 1.13 seconds to shut down the reactor and it is slowly inserted to the full down position, 700 mm, with a damping.

We have conducted the drop test of the shutoff rod in order to show the performance and the structural integrity of operating system of the shutoff unit. The present paper deals with the 647 mm drop time and the withdrawal time according to variation of the pool water temperature, the water level and the core flow.

1. 서론

하나로 유동모의 시험설비는 실험장치를 연구용 원자로인 하나로 (HANARO)에 장전하기 전에 구조적 건전성과 실험장치의 성능을 예측하기 위해 개발되었다. 이 유동모의 시험설비는 하나로 원자로 노심의 약 반으로 구성된 1/2 노심 구조물 집합체로 핵연료 대신에 유동모

* 충남대학교 기계공학과 대학원

** 충남대학교 기계공학과 교수

E-mail : jhpark@cnu.ac.kr

의 오리피스스를 장전하여 방사능의 피폭 없이 시험할 수 있는 장점이 있다. 따라서 연구용 원자로의 정지봉 장치를 하나로 원자로에 장전하기 전에 유동모의 실험장치에서 구조적 건전성과 그 성능을 분석할 수 있다.

정지봉 장치는 원자로의 비상사고로 인해 원자로를 신속하게 정지할 필요가 있을 시 중성자 흡수물질인 정지봉을 원자로 노심에 신속히 삽입함으로써 원자로를 안전하게 정지시킨다. 캐나다에서 수입한 4개의 정지봉 장치는 하나로 원자로에 설치되어 있다. 이 정지봉은 원자로 침니(chimney)에 설치된 수압 실린더와 원자로 상부에 설치된 수압 펌프에 의해 작동된다.

본 연구는 국내에서 설계하여 개발한 정지봉장치의 성능을 파악하고자 한다. 따라서 1차 냉각계통(primary cooling system) 기동시 수조수 온도와 수위 변화에 따라 정지봉 장치의 낙하시험을 수행하였다. 이 시험을 수행함으로써 정지봉의 낙하시간(drop time)과 인출시간(withdrawal time)을 도출하여 정지봉 장치의 구조적 건전성과 성능을 분석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 하나로 유동모의 시험설비

하나로 유동모의 시험설비는 1/2 노심 구조물 집합체와 유체순환계통 및 보조계통 등으로 구성된다. 1/2 노심 구조물 집합체는 하나로 원자로와 마찬가지로 플레넘(plenum), 그리드 플레이트(grid plate), 노심(core), 침니 및 모의 수조로 이루어진다. 이 집합체의 노심은 하나로 원자로의 반에 해당하는 육각 유동관 13개와 외부 노심 3개를 포함한 원형 유동관 7개로 구성되어 있다.

유체순환계통은 노심유량과 노심우회유량을 포함한 410 kg/s의 총유량을 공급하기 위해 설치되었다^{(1),(2)}. 노심유량은 노심채널에서 운전온도 40 °C와 설계차압 209 kPa (±10%)을 유지할 때, 13개의 육각 유동관에 설계 유량 19.7 kg/s를 각각 공급한다. 또한 유동관 외부를 냉각하기 위해 틸새 구멍에 하나로의 반에 해당하는 약 25 kg/s의 틸새 유량을 공급한다. 이를 합한 유량이 노심 유량이며 총유량의 90%에 해당하는 369 kg/s이다. 노심 우회유량은 노심채널을 통과한 유동의 체트유동을 억제하기 위해 침니 상부로 총유량의 10%에 해당하는 41 kg/s의 유량을 공급한다.

보조계통은 동절기에 유체순환계통의 순환수 펌프가 정지되면 동파를 방지하기 위해 정화펌프, 여과기, 이온

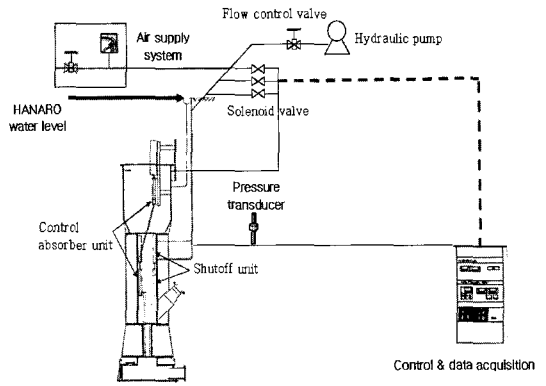


Fig. 1 System schematic of the experimental facility

교환기, 열교환기, 냉각탑, 온수기, 계기류 및 배관 등을 설치하였다^{(3),(4)}. 아울러 이 보조계통은 순환유체의 수질을 청결하게 유지하는 역할도 한다.

2.2. 정지봉 장치

정지봉 장치 성능시험을 위한 시험 시설은 Fig. 1에서 보여주고 있다. 정지봉 장치의 시험시설은 수압 실린더, 공기 공급 계통, 솔레노이드 밸브, 피스톤 밸브, 수압 펌프 및 데이터 취득 장치 등으로 구성되어 있다. 정지봉이 원자로 노심에 낙하 시 정지봉의 진동을 방지하기 위해 수압 댐핑 장치와 압축 스프링을 실린더 완충기 내부에 설치하였다. 실린더 하부와 상부에 설치된 압력 개폐장치는 정지봉 도착 상태를 감지할 수 있고, 실린더 내부에 설치된 피스톤은 상하로 자유롭게 움직인다. 수압펌프는 실린더 내부로 물을 공급하며, 수압펌프와 실린더 사이에 설치된 유량제어 밸브는 정지봉의 인출속도를 제어한다.

2.3. 실험방법 및 실험조건

Table 1은 정지봉 장치 성능시험의 시험조건을 나타낸다. 시험조건은 노심유량 (369 kg/s), 노심우회유량 (41 kg/s), 수조수의 유체 온도 (33~37 °C)이다. 수조의 유체온도가 37 °C를 초과하였을 경우에는 보조계통인 냉각탑의 작동으로 유체의 온도를 제어할 수 있다. 정지봉 장치의 낙하는 3개의 솔레노이드 밸브 중 최소 밸브 2개만 작동하여도 낙하되도록 설계하였다.

본 연구에서는 솔레노이드 밸브 조합을 ABC로 3개 모두 작동시켰다.

Table 1 Test condition for performance test of the shutoff unit

Half-core test loop	Fluid	Water
	Pool water temperature	33~37 °C
	Core flow rate	369 kg/s
	Bypass flow rate	41 kg/s
Shutoff units	Throttling valve open	6.5 Turn
	Bypass valve open	1 Turn
	Air supply pressure	35 psi
	Solenoid valve combination	ABC

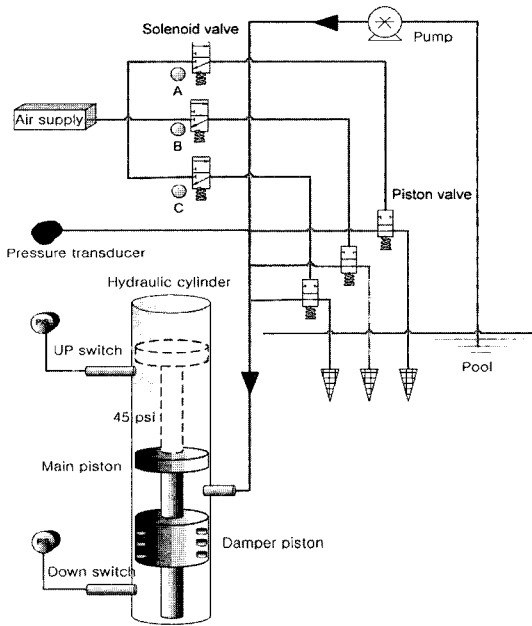


Fig. 2 Flow diagram of the shutoff unit hydraulic system

Figure 2는 정지봉 장치의 열수력 계통을 보여주고 있으며, 정지봉이 원자로 상부에서 대기상태로 유지할 수 있도록 수압 실린더 내부에 물을 계속적으로 공급하여 일정한 압력을 유지한다. 정지봉 실린더는 개별적으로 설치된 정지봉 펌프로 가압된다. 원자로 비상정지 신호가 발생하면 병렬로 연결된 3개의 솔레노이드 밸브는 전력이 차단되어 자력을 잃고 닫힘으로서 피스톤 밸브로 공급되는 공기압을 차단하여 피스톤 밸브를 개방한다. 이로 인해 실린더 내부의 물과 펌프로부터 공급된 물은 피스톤 밸브를 통해 수조로 방출되어, 정지봉은 자

중에 의해 중력 낙하된다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 정지봉 장치 밸브 민감도 시험

밸브의 성능은 일반적으로 사용 환경, 용도 및 목적에 따라 변화된다. 그래서 정지봉 장치의 성능시험을 하기 전에 1/2 노심 정지봉 펌프에 설치된 밸브 민감도 시험을 수행하여야 한다. 본 연구는 밸브 민감도의 특성을 파악하기 위해 밸브 개도에 따라 유량조절을 하여 밸브의 특성과 성능시험을 수행하였다.

Figure 3은 본 연구에 사용된 밸브로 주급수 유량제어밸브 (throttling valve)와 우회유량 밸브 (bypass valve)로 구성되어 있다. 주급수 유량제어밸브는 수동 개방장치 (hand wheel)를 9회전 개방하였을 시 완전히 열리게 되고 우회유량 밸브는 10회전을 열었을 때 완전히 개방된다. 본 연구는 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 주급수 유량제어밸브와 우회유량 밸브개도 변화에 따라 정지봉 낙하시험을 수행하여 인출시간을 측정하였다. 정지봉의 인출시간은 30~60 sec 이내로 인출되어야 정지봉 장치의 성능시험을 할 수 있다. 주급수 유량제어밸브가 6회전 이하로 개방하여 정지봉 낙하시험을 수행한 결과, 실험장치의 계통 압력이 약 30 psi 이하로 하락하여 정지봉의 인출이 불가능했다. 주급수 유량제어밸브 6.5회전, 우회유량 밸브를 1회전 개방하였을 시 정지봉이 30~60 sec 이내에서 인출되므로 정지봉 장치 성능시험을 하는데 적절하다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 정지봉의 인출시간은 우회유량 밸브보다 주급수 유량제어밸브 조정에 더욱 민감한 반응을 보이고 있다.

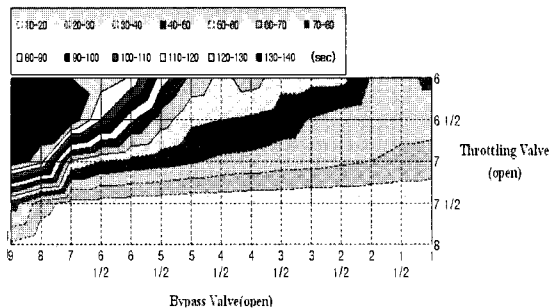


Fig. 3 Valve sensitivity with valve opening variation of the throttling valve and bypass valve

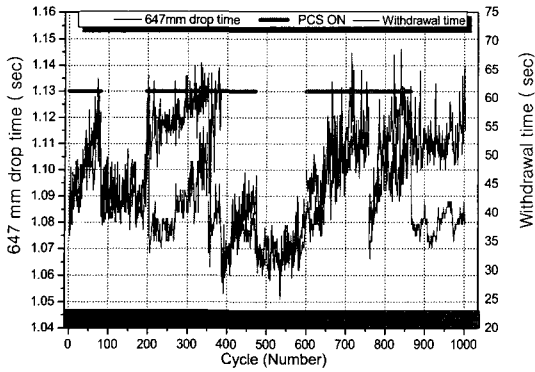


Fig. 4 Drop time and withdrawal time of shutoff rod with primary coolant system

3.2. 정지봉 장치 성능시험

정지봉 장치의 낙하시간과 인출시간은 Fig. 4에 나타내었다. 정지봉의 647 mm 낙하시간 (drop time)은 1.05 ~ 1.125 sec 이내에 낙하되므로 설계조건 1.13 sec을 만족한다. 1차 냉각계통 (primary cooling system)을 기동하지 않은 상태보다 1차 냉각계통을 기동하였을 경우, 정지봉 647 mm 낙하시간이 더욱 지연된다. 1차 냉각계통을 기동하였을 경우, 원자로 노심을 통과한 유체는 중력으로 인해 낙하된 정지봉과 부딪혀 저항을 일으킨다. 이로 인해 정지봉의 낙하시간이 지연되는 것으로 판단된다.

정지봉의 인출시간은 낙하시간과 같이 1차 냉각계통을 기동하였을 경우, 1차 냉각계통의 유체와 정지봉 장치는 서로 충돌하여 상호작용을 일으킨다. 이로 인해 정지봉 장치표면에 유체의 점성과 약한 진동이 발생하여 정지봉의 인출을 방해한다.

Figure 5는 수조수위 변화에 따라 정지봉의 647 mm 낙하시간을 보여주고 있다. 수조수위가 증가하면, 수조의 유체는 정지봉을 더욱 크게 가압하기 때문에 정지봉의 647 mm 낙하시간이 빨라진다. 아울러 정지봉의 647 mm 낙하시간이 1.13 sec 이내이므로 설계조건을 만족한다.

수조온도 변화에 따라 정지봉의 인출시간은 Fig. 6에 나타내었다. 정지봉 인출시험은 수조온도 33~37 °C에서 수행되었다. 수조온도가 증가함에 따라 정지봉 인출시간도 증가하며, 수조온도가 35 °C일 때 정지봉 인출시간은 약 45 sec이내에서 인출되었다.

Figure 6에서 볼 수 있듯이 정지봉이 60 sec 이하로 인출되므로 설계조건을 매우 만족한다.

3.3. 내구성 시험

정지봉의 내구성 시험은 하나로 원자로와 유사하게 노심유량, 수조온도 및 수위의 시험 조건을 만족한 상태

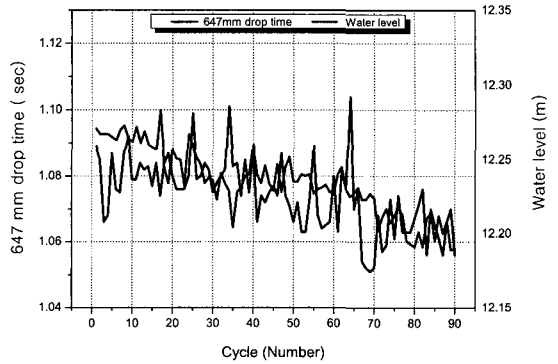


Fig. 5 Drop time with the water level variation of the half-core test loop

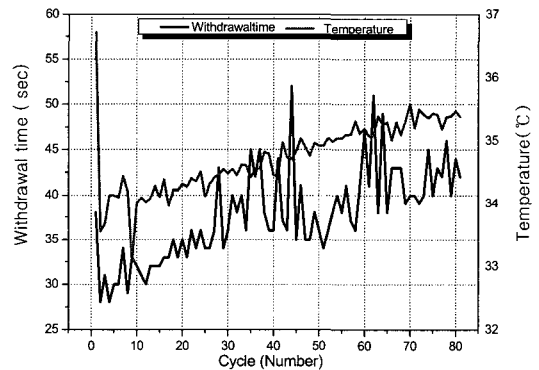


Fig. 6 Withdrawal time with water temperature of the half-core test loop

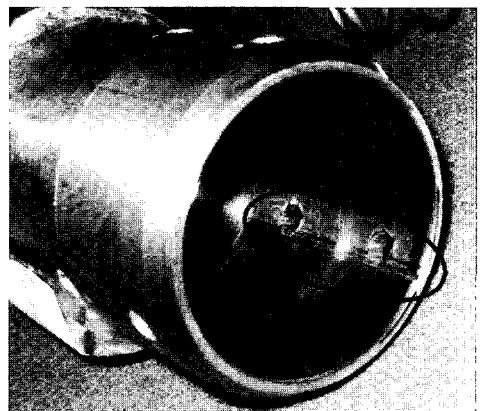


Fig. 7 Scratch of the cylinder surface after 5000 cycles

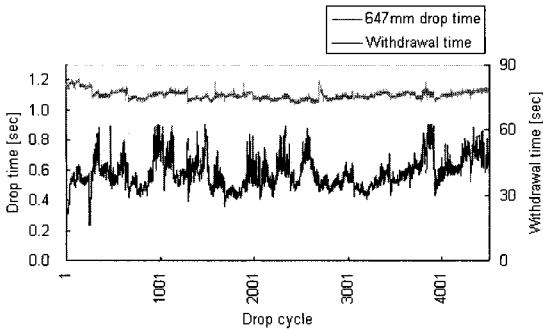


Fig. 8 Performance of the shutoff rod during endurance test

에서 수행한다. 정지봉 및 실험장치의 결함 발견과 마모량을 측정하기 위해 정지봉을 5,000번 이상 낙하시켰다. Fig. 7은 정지봉을 약 5,000번 낙하 후 정지봉과 실린더를 분해하여 육안검사를 수행해 보니 실린더와 정지봉에 약간 굵은 흔적이 있었다. 마모량은 주 부속품인 피스톤에서 0.025 mm, 캐리지 집합체에서 0.03 mm 발생하였다. 그러나 이러한 마모는 정지봉 장치 성능에 큰 영향을 미치지 못한다.

Figure 8은 정지봉에 대한 낙하 시간과 인출시간을 나타낸 것으로, 정지봉의 인출시간은 30~60 sec 범위 이내에서 인출된다. 정지봉을 약 5,000번 낙하시킨 결과, 정지봉의 647 mm 낙하시간은 수조온도와 수위가 설계치를 벗어남에 따라 약간의 낙하 횟수를 제외하고는 대체적으로 1.13 sec 이내로 낙하되었다.

4. 결론

본 연구에서는 정지봉장치를 개발하기 위한 것으로 정지봉장치의 성능시험과 인자분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 정지봉의 낙하시간과 인출시간은 수조수의 온도, 수위 및 1차 냉각계통의 노심유량 변화에 따라 영향을 미친다.
- (2) 수조온도가 낮을 경우 인출시간이 빨라지며, 수조수위가 증가할 경우에는 정지봉의 인출시간과 낙하시간이 빨라진다.
- (3) 정지봉의 647 mm 낙하 시간은 1.13 sec 이내, 인출

시간은 30~60 sec이므로 설계조건에 매우 만족한다.

- (4) 정지봉을 5,000 사이클 이상 낙하함으로써 정지봉 장치의 성능, 구조적 건전성 및 수명연장에 대한 타당성을 입증할 수 있다.

참고문헌

- (1) Kim, Kyoung. Rean., and Park, Yong. Chul., 2004, "The flow measurement for the core channel in HANARO Flow Simulation Facility," transactions of KNS autumn meeting, pp. 625~630.
- (2) Park, Yong. Chul., et. al. 2002, "Technical Specification for Fabrication of Flow Circulation System in HANARO Flow Simulation Facility," KAERI TR-2290
- (3) Park, Yong. Chul., 2004, "The Analysis for Flow Circulation System in HANARO Flow Simulation Facility," KFMA, Vol. 7, No. 1, pp. 30~35.
- (4) Kim, Kyoung. Rean., and Cho, Yeong. Garp., 2005, "An experimental study on the factors for the performance of a shutoff unit in the half-core test loop of HANARO," transactions of KNS autumn meeting.
- (5) Park, Yong. Chul., et. al. 2002, "Technical Specification for Fabrication of Support System in HANARO Flow Simulation Facility," KAERI TR-2299.
- (6) Cho, Yeong. Garp., and Kim, Kyoung. Rean., 2005, "Endurance test for the lifetime extension of the shutoff units in HANARO," transactions of KNS autumn meeting.
- (7) Cho, Yeong. Garp., and Woo, Jong. Sup., 2005, "Status of life extension program for HANARO shutoff units," proceedings of KNS sprig meeting.