

진공도 및 히터제어를 이용한 재료조사시험용 캡슐 온도제어시스템 개발 Capsule Temperature Control System Development by using of Vacuum and Heater Control Method

김창희, 서상문, 박승재, 강영환
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구에서는 원자로 노심 재료의 조사 손상 및 조사 거동을 실험하기 위한 캡슐의 온도제어 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 캡슐내 환형 갭의 진공도와 마이크로 히터를 동시에 제어하여 캡슐내 시편의 온도를 사용자가 원하는 일정 온도로 유지하는 방법을 채택하였다. 본 시스템의 성능을 평가하기 위해 연구로인 하나로의 CT홀과 IR-2 홀에 장입하여 원자로 출력 변화에 따른 온도제어기의 성능시험을 수행하였다.

Abstract

An overview is presented of the development of the capsule temperature control system(CTCS) used in the HANARO reactor to obtain the information essential to the design of advanced nuclear materials and the integrity evaluation of the conventional power reactor materials. The CTCS consists of two sub-systems: a vacuum control system and a multi-stage heater control system. These two sub-systems cooperate to effectively control the temperature of the specimen. A series of the performance tests were done in the test hole CT and IR2 of HANARO and test results are reviewed in detail.

1. 서 론

우리 나라에는 1978년 고리 1호기의 상업운전을 시작으로 가압 중수로 2기, 가압 경수로 10기가 현재 가동중에 있다. 이들 원전에서 사용되는 노내 핵심재료들은 원전 가동 년수가 늘어남에 따라 중성자 조사에 의한 조사 취화 현상이 발생할 수 있고, 이 현상으로 인한 재료들의 물성 저하는 발전소 건전성 및 수명을 단축하는 요인이 된다. 이런 이유로 기존에 사용된 원전 재료뿐만 아니라 새로운 재료의 개발, 주요 구성품의 설계 변경시 이들 재료들의 노내 조사 거동을 분석하기 위해서는 연구로를 이용한 조사시험을 수행해야 한다.

재료의 조사 손상 및 조사 거동은 크게 중성자속이나 조사 온도에 따라 다르게 나타난다. 그러나 연구로 노심내 조사공의 중성자속은 조사시간에 따라 핵연료 연소도가 변함에 따라 달라지게 되므로 시편의 조사온도가 일정하게 유지되지 않는 문제점이 발생한다. 따라서, 중성자속의 변화에 대해서도 조사시편을 항상 일정한 온도(예, $290 \pm 10^\circ\text{C}$)로 유지하기 위해서는 온도제어가 가능한 캡슐장치의 개발이 필요하다[1,2].

일반적으로 캡슐내 시편의 온도제어는 캡슐과 시편사이의 단열층에 진공도를 조절함으로써 열전도율을 변화시키는 방법[3]과 시편 주변에 히터를 부착시켜 히터의 발열량을 조절하여 온도를

제어하는 방식[4]이 있다.

본 연구에서는 캡슐내의 진공도와 히터를 동시에 제어하여 캡슐내 시편의 온도를 설정값으로 일정하게 유지하는 온도제어시스템을 개발하였다. 개발된 제어시스템은 설정된 진공도를 유지하는 진공제어부, 히터 제어부, 그리고 캡슐내의 상태나 정보표시 및 운전 조작을 제공하는 운전원 조작패널 등으로 구성되어 있다. 본 시스템의 성능 평가를 위해 개발된 시스템을 연구로인 하나로 노심(CT홀과 IR-2홀)에 설치하여 원자로 출력 변화에 따른 온도제어기의 성능시험을 수행하였다.

2. 하나로와 캡슐의 개요

하나로는 1985년 설계를 시작으로 1995년 2월 8일 첫 임계에 도달하였고, 현재 정상 운전중에 있다. 이 연구로는 열출력 30MW이며 전 출력시 냉각수의 온도는 약 45~50℃ 정도이고, onen-tank-in-pool형으로 설계되어 있다. 하나로에는 재료 조사 시험을 위해 노심내에 7개의 조사공이 있고, 조사공의 크기는 직경 60mm 캡슐을 설치하여 실험할 수 있는 1m 정도의 높이로 되어 있다. 특히, 노심내 조사공의 고속 중성자속은 $3 \times 10^{14} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 정도이고, 이 값은 상용발전소보다 높아 상용로에 비해 조사시험기간을 단축할 수 있는 잇점이 있다.

재료 개발에 필요한 자료를 얻거나 노내 건전성 평가자료를 확보하기 위해 수행되는 조사 시험은 실험 목적에 따라 다르나 일반적으로 캡슐이나 루프(loop)를 이용하여 실험을 수행한다. 그러나 경제성과 편리성 때문에 루프시험보다는 캡슐시험을 통해 필요한 정보를 얻는 것이 보편화되어 있다.

시편의 조사시험을 위해 개발된 캡슐은 5단 독립 온도제어형 계장 캡슐로 본체의 직경은 60mm, 높이는 870mm인 원통형구조물이고, 제어용 배선 배관이 들어 있는 5m 보호관과 원자로 수조로부터 제어패널까지 캡슐을 연결하는 안내관으로 구성되어 있다[1,2]. 계장 캡슐의 안내관은 하나로 수조상부에 있는 penetration hole을 통해 빠져 나와 온도제어시스템과 연결되어 있다. 캡슐내에는 조사시편과 12개의 온도측정용 열전대가 설치되어 있다. 또한, 시편 주위에는 나선형으로 부착된 마이크로 히터와 중성자속 측정형 도시미터가 설치되어 있다. 마이크로 히터는 각 단에 하나씩 모두 5단으로 구성되어 있고, 각각 독립적으로 조절할 수 있다.

3. 온도 및 압력제어시스템

1) 계장 캡슐 온도제어시스템의 구성

계장캡슐 온도제어시스템은 하나로 원자로에 설치된 계장 캡슐내의 온도를 사용자 설정온도로 유지하고, 필요한 조작을 수행하기 위한 시스템이다. 따라서, 본 제어시스템은 캡슐내의 히터나 진공도를 연속적으로 제어하고, 각 계측기로부터 계측된 온도, 압력, 진공도, 유량 등의 정보를 운전원에게 제공하는 기능을 갖는다. 이 시스템의 구성은 다음 그림 1과 같다. 그림에서 PLC(Programmable Logic Controller)는 계장캡슐내에 설치된 온도 센서신호, 진공도 조절을 위한 압력 센서신호, 그리고 중성자속 측정형 도시미터 신호를 취득하여 주 컴퓨터로 전송하고, 주 컴퓨터에서 전송된 제어신호에 따라 캡슐내의 히터와 진공도를 제어하는 기능을 수행한다. 주 컴퓨터는 캡슐내의 정보와 제어상태를 연속적으로 감시할 수 있는 운전원 연계화면과 온도제어에 필요한 모든 밸브나 펌프, 온도 설정치 설정 및 제어기 이득을 조절한다. 로컬 캐비닛에는 각종 정보를 표시하는 정보창과 지시계가 설치되어 있고, 주 제어용 컴퓨터의 이상시 수동으로 캡슐을 조작할 수 있는 수동조작 패널과 연속 기록계가 설치되어 있다. 또한, 별도의 수납박스에는 캡슐내의 진공조절을 위한 각종 밸브와 부대 장치들이 설치되어 있다.

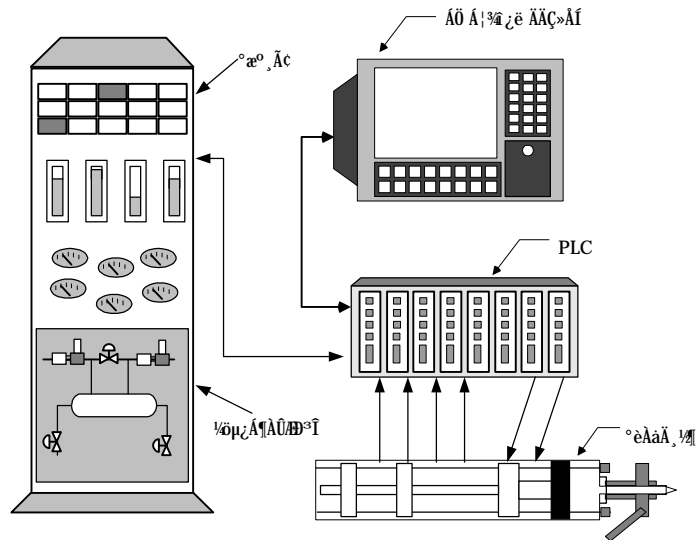


그림 1. 계장캡슐 온도제어시스템 구성도

2) 계장 캡슐 온도제어기

조사 시편을 캡슐내에 장입하여 하나로 노심에 장전하면 조사중 시편은 T 히팅에 의해 자기 발열을 하게 된다. 그러나 T 선의 강도는 대개 노심의 중성자속에 따라 다르기 때문에 캡슐내의 모든 조사시편이 동일한 온도로 포화되지는 않는다. 따라서, 중성자속의 변화에 대해서도 조사시편을 항상 일정한 온도로 유지하기 위해 개발된 온도제어시스템은 히터제어와 진공제어를 혼용하는 방법을 사용하였다.

진공제어는 시편과 캡슐 내통 사이의 환형 갭에 주입된 헬륨 개스의 진공도를 조절하여 캡슐 벽과 시편 사이의 열전도율을 변화시킨다. 기체의 열전도율은 진공도가 낮을수록 높아진다. 이것은 압력이 높을수록 내부의 기체 운동은 활발해져 열을 전달하는 능력이 높아지기 때문이다. 따라서, 환형 갭의 진공도를 변화시켜 원자로 냉각수와 열교환을 조절하기 위해 그림 2와 같이 진공 제어부를 구성하였다.

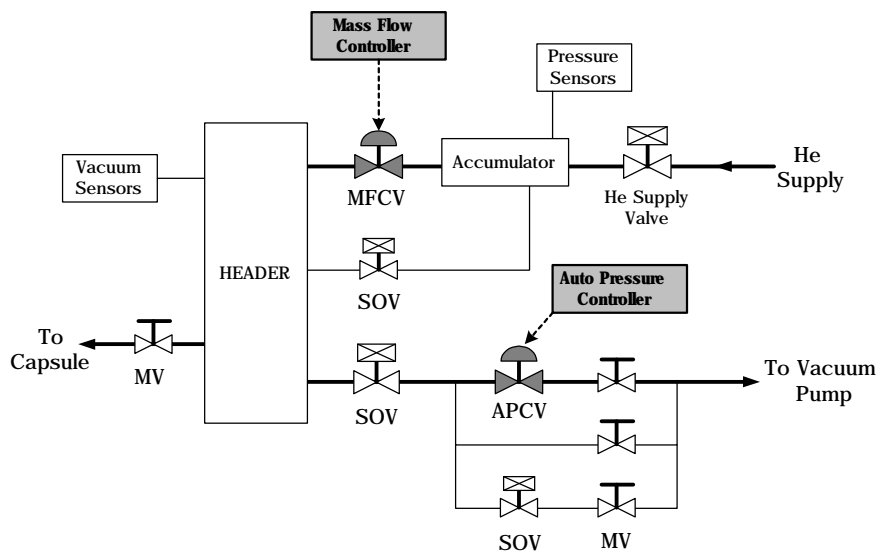


그림 2. 진공장치부의 개략도

진공장치부의 헤드에는 모두 3개의 진공센서(V-1/2/3)를 설치하였다. 이들 센서중 V-1과 V-2는 저 진공용 센서로 1atm에서 760Torr까지의 측정범위를 갖고, V-3는 고 진공용 센서로 1atm에서 10^{-3} Torr까지의 측정범위를 갖는다. 따라서, 저 진공 제어시에는 V-1이나 V-2의 신호를 사용하고, 고 진공 제어시에는 V-3 신호를 사용하여 진공도를 제어한다.

질량 유량제어기(MFC)는 헬륨 가스 공급부에서 공급되는 헬륨의량을 조절하는 제어기로 진공 센서신호를 피드백 받아 질량 유량 제어밸브(MFCV)를 제어한다. 그리고 자동 압력제어기는 진공 펌프를 통해 빠져나가는 헬륨 가스의량을 조절하는 제어기로 진공 센서신호를 피드백 받아 자동 압력 제어밸브(APCV)를 조절한다. 이들 제어기는 모두 anti-windup 구조를 갖는 PID 제어기로 구성하였다. 그림 3은 진공도 제어에 사용된 폐루프 제어시스템의 구성을 나타낸다.

계장 캡슐내에 설치된 히터는 공간상의 이유로 인해 작은 용량(1.5KW)의 마이크로 히터를 사용하였다. 히터에 의한 시편의 온도 응답성은 진공 제어에 의한 변화보다 빠르기 때문에 효과적인 온도제어를 할 수 있다. 그러나 히터 용량이 작기 때문에 큰 온도 범위를 제어할 수 없는 단점이 있다. 개발된 캡슐은 여러개의 조사 시편을 상하 방향으로 장전하는 형태이므로 시편의 위치에 따라 중성자속이 달라 캡슐 내의 진공도를 일괄 제어하는 진공제어로는 시편마다 동일한 온도를 유지할 수 없다. 따라서, 캡슐내에는 모두 5단의 개별 히터를 설치하여 이들을 개별적으로 제어함으로써 중성자속의 차이에 큰 영향없이 전체 시편의 온도를 동일하게 유지할 수 있도록 설계하였다. 따라서, 모두 5개의 히터 제어기를 구성하였고, 각 히터 제어기의 구성은 그림 4와 같다.

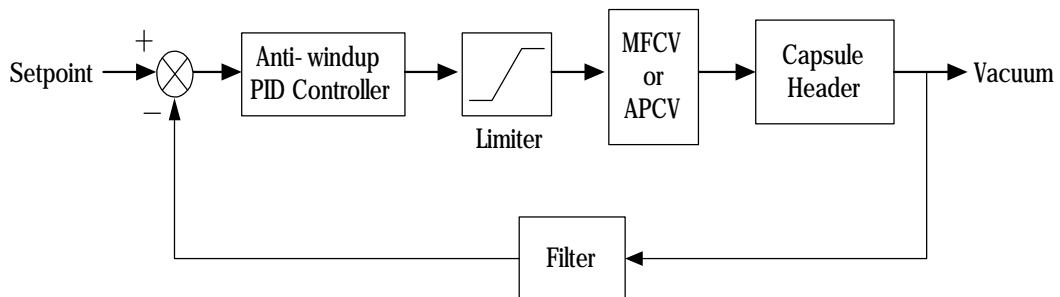


그림 3. 진공도 제어 블록 다이어그램

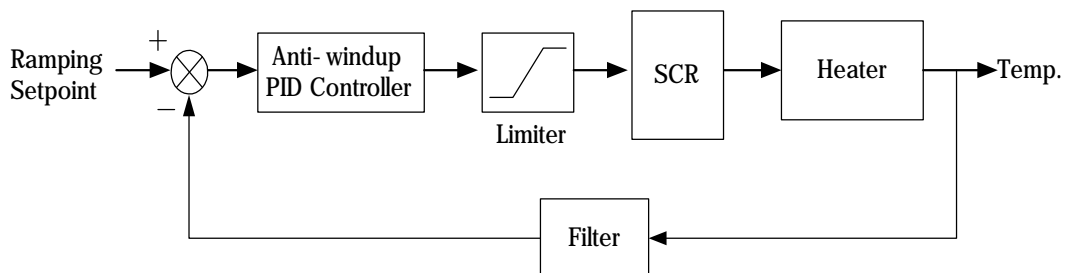


그림 4. 히터 제어 블록 다이어그램

그림 4에서 제한기(limiter)는 과도한 전류로 인해 히터의 손상을 방지하기 위한 것이고, 필터는 잡음을 제거하기 위한 것이다. 급격한 온도 설정치의 변동시 발생할 수 있는 오브슈터를 방지하기 위해 히터 제어기는 설정치 램핑 기능을 사용하였다. 이 기능은 시편의 과도한 온도변화를 방지하고, 오브슈터나 언더슈터에 의한 트립을 방지하기 위한 것이다.

3) 운전원 연계화면

본 시스템의 운전원 연계화면은 크게 오브뷰 화면, 제어기 화면, 트렌드 화면, 그리고 정보 화면으로 구성하였다. 이들 화면은 트랙 볼이나 할당된 기능 키를 사용하여 조작할 수 있고, 각 화면에서 상세화면을 팝업으로 호출할 수 있다.

오브뷰 화면은 캡슐의 모든 정보나 운전 상태를 보여주고, 운전원은 이 화면을 사용하여 각 기기들을 조작할 수 있다. 각 기기는 실물과 유사한 심벌로 표시하였고, 상태 변화를 색깔로 구별하여 운전원 인지적 오류가 발생하지 않도록 설계하였다. 특히, 중요 기기들을 조작할 때 발생할 수 있는 운전원 오류를 방지하기 위해 상세 화면이 자동으로 팝업되도록 설계하여 보다 세부적인 정보를 운전원이 확인한 후 조작하도록 설계하였다. 그림 5는 오브뷰 화면과 팝업된 상세정보화면을 나타낸다.

제어 화면은 5개의 마이크로 히터제어기, 질량 유량제어기, 그리고 자동 압력제어기의 튜닝 파라미터와 설정치, 자동/수동 전환 키 등 PID 제어기에 관련된 설정 변수와 측정값 및 제어량에 관한 트렌드 정보를 제공한다. 그림 6은 제어기 화면과 팝업화면을 나타낸다.

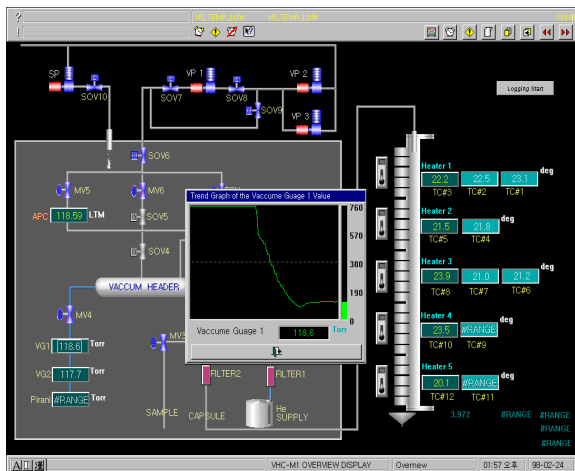


그림 5. 오브뷰 화면과 팝업 상세 정보화면

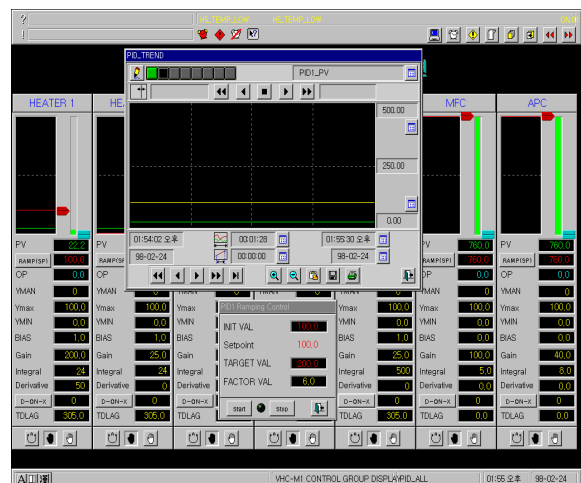


그림 6. 제어기 화면과 팝업화면의 구성

트렌드 화면은 캡슐 운전중 필요한 정보를 그룹화하여 트렌드로 표시한다. 특히, 트렌드 화면은 실험 데이터 분석을 위해 트렌드 확대기능과 시간 축 확장기능을 갖고 있고, 트렌드에 등록된 모든 정보들은 최고 매 50msec 주기로 하드디스크에 저장되도록 설계하였다. 정보화면은 조사 시험 중 이상 상태로 인해 발생하는 경보를 발생 시간별 및 우선 순위도 별로 표시한다. 또한, 표시된 정보에는 경보 발생 내용, 운전원 인지 상태 등이 표시된다.

4. 하나로 설치 시험 및 결과

개발된 온도제어시스템의 성능을 시험하기 위해 하나로 조사 시험공(CT 및 IR2 홀)에 장입하여 온도 및 진공제어의 특성을 평가하였다. 본 시스템의 운전은 먼저 진공도 제어를 통해 캡슐내 시편의 온도를 특정 온도까지 상승시킨 후 마이크로 히터를 제어하여 온도를 원하는 설정치까지 증가시키는 방법을 사용하였다. 그 이유는 마이크로 히터의 용량이 작아 히터에 의한 온도제어 범위 보다 진공도에 의한 온도 제어범위가 더 크기 때문이다.

그림 7은 하나로 열 출력 10MW에서 히터 출력 50%를 유지한 다음 캡슐내 진공도를 38Torr에서 16Torr로 계단 변화시켰을 때 캡슐내 온도변화 및 진공도 변화를 나타낸다. 그림에서 진공도는 질량 유량제어기와 자동 압력제어기에 의해 약 1분내에 설정치로 도달하였고, 38Torr에서 190℃로 포화되어 있던 온도는 진공도가 높아짐에 따라 240℃까지 증가하였다. 여기서, 캡슐내 온도는 3단의 온도를 나타낸다.

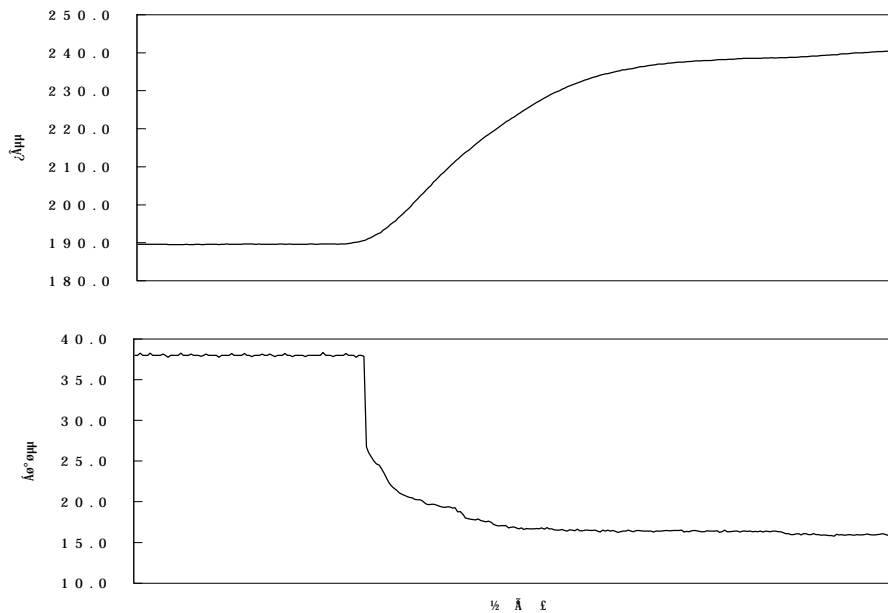


그림 7. 하나로 열 출력 10MW시 진공도 제어 결과
(히터 출력 50%, 진공도를 38Torr에서 16Torr로 계단 변화)

그림 8은 각 단의 온도제어 특성을 살펴보기 위해 각 단마다 온도 설정치를 다르게 하여 실험한 결과이다. 이 실험은 하나로 열출력 20MW에서 히터 출력을 0%로 한 후 진공도를 38Torr로 유지하여 캡슐내 온도를 포화시킨 다음 각 단의 온도 설정치를 다른 값으로 설정하여 히터 제어기의 성능을 시험하였다. 이때, 1단은 160℃로, 2단은 180℃, 3단과 4단은 200℃로 온도 설정치를 계단 증가시켰고, 5단은 185℃로 계단 감소 시킨 후 히터 제어기를 자동으로 설정하였다. 실험 결과에서 알 수 있듯이 각 단의 온도는 오브슈터나 언드슈터 없이 설정치에 잘 도달하였고, 각 단간에는 온도 간섭이 발생하지 않아 캡슐내 단간의 열 차폐 설계가 잘 되어 있다는 사실을 확인할 수 있었다.

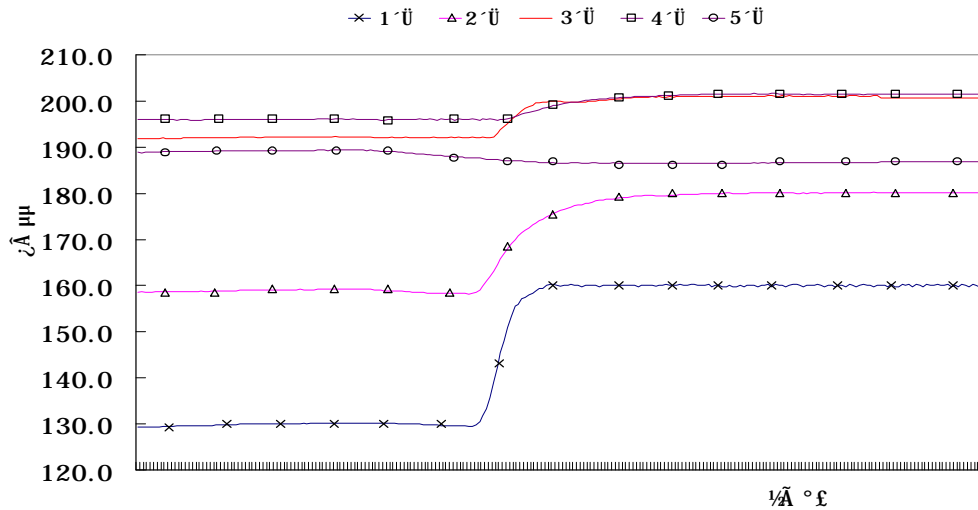


그림 8. 하나로 열출력 20MW에서 각 단의 온도제어 시험 결과
(진공도 38Torr, 히터 출력 0%로 유지후 각 단의 온도 설정치 계단 변화)

5. 결론 및 추후과제

본 연구에서는 진공도 및 히터제어를 이용한 재료조사시험용 캡슐의 온도제어시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 연구로인 하나로의 IR-2 홀에 장입하여 원자로 출력 변화에 따른 히터 제어기와 진공제어기의 성능을 분석하였다. 진공도 제어 실험결과 진공도 설정치를 변경하였을 때 질량 유량제어기와 자동 압력제어기에 의해 약 1분내에 설정치에 도달하였고, 압력 변화에 따른 캡슐내 온도가 증가한다는 사실을 확인하였다. 또한, 각 단의 온도 설정치를 다르게 선정하여 각 단의 히터 제어기 특성을 실험을 수행한 결과 오브슈터나 언드슈터 없이 각 단의 온도가 설정치에 도달하였고, 각 단간의 온도 간섭이 발생하지 않는다는 사실을 확인하였다.

추후과제로는 본 시스템의 기동 및 정지 운전시 운전원의 작업 부하를 줄이기 위해 자동기동 및 정지가 포함된 온도 제어시스템의 개발이 필요하다.

Acknowledgement

본 연구는 1998년도 과학기술부의 원자력연구 개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 강영환 외 2인, "재료 조사시험용 계장캡슐의 열적 및 역학적 특성", 한국원자력학회 '95추계학술대회논문집, 1995.
2. Y.H.Kang, et al., "Thermal and Mechanical Characteristics of Instrumented Capsule for Material Irradiation Test", 5th Asian Symposium on Research Reactors, Vol. 1, pp.328~332, 1996.
3. F. Saito, et al., "Programmed Temperature Control of Capsule in Irradiation Test with Personal Computer at JMTR", JAERI-M92-028, 1992.
4. J.C. Smith, "Irradiation of Clad Graphite in High-Temperature High-Pressure CO₂", BMI-1333, 1959