2001년 추계 학술 발표 논문집
한국원자력학회

수냉 도가니를 이용한 UO2/ZrO2 혼합물 용융 실험 및 해석

Experiment and Analysis on Melting of the UO2/ZrO2 mixtures using a Cold Crucible

홍 성완*, 민 병태*, 박 익규*, 신 용승*, 김 종환*, 장 영조*, 김홍집*, 송 진호*, 김 희동*, 최종건**
*한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150
** 동신 대학교
전남 나주시 대호동 252

요 약

한국원자력 연구소에서는 원자로 물질을 사용하여 용융물과 냉각수 반응 실험인 TROI(Test for Real cOrium Interaction with water) 프로그램을 수행 중에 있으며, 이 프로그램의 일환으로 고 융점 산화 금속물질에 대한 용융 및 방출 방법이 연구되어왔다. 수냉 도가니 용융법을 이용하여 원자로 물질 성분인 UO2/ZrO2 혼합물(무게비 8:2) 약 10kg을 용융하여 FCI 실험에 적용하였다. 고주파 가열장치의 운전 변수를 사용하여 유도코일, 수냉 도가니, 용융물로 전달되는 열량을 계산하였으며, 수냉 도가니와 용융물로 전달되는 열량과 수냉 도가니를 통한 전도와 용융물 상부로 전달되는 복사 열손실과의 열평형을 이용하여 용융물의 과열도를 계산한 결과 용융물은 최대 500K 이상까지 과열되는 것으로 나타났다. 한편, 이색 방사 온도계를 이용한 용융물 온도 측정에서 복사율 비의 설정이 필요하지만, 복사비는 사용 환경에 따라 달라진다. 본 실험의 경우 UO2/ZrO2 혼합물의 복사율 비는 약 1.18로 추정되었다.

Abstract

Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI) has been carrying the fuel-coolant interaction(FCI) experiments called the Test for Real cOrium Interaction with water(TROI) program using the reactor material. As a part of the program, the melting and release method of oxide materials with high melting points has been studied. The melting experiment of UO2/ZrO2 mixture (w/o 8:2) is carried out using the cold crucible melting method. About 10 kg melt is obtained from the melting experiments and was successfully applied to FCI experiments. The heat transferred to the induction coil, the cold crucible and melt is calculated using operating parameters of R.F generator. Also, the superheat of melt is predicted from heat balance analysis between the heat input, which is transferred to the cold crucible and melt, and the heat loss, which is removed through the cooling water from the crucible and the radiation from the melt surface. The melt is superheated over 500K in maximum from the calculation result. Meanwhile, when the two-color pyrometer is used for the temperature measurement, the emissivity ratio has to be set but depends on the surrounding conditions. In the UO2/ZrO2 test, the emissivity ratio of the pyrometer is guessed about 1.18.

I. 서론

한국원자력 연구소에서는 실제 원자로 물질을 사용하여 용융물과 냉각수 반응 실험인 TROI(Test for Real cOrium Interaction with water) 프로그램[1]을 수행 중에 있으며, 이 프로그램의 일환으로 FCI(Fuel-Coolant Interaction) 실험을 위해 고 용융점을 가진 산화금속물질에 대한 용융 및 방출 방법을 개발하여 왔다. 중대사고 시 원자로 물질(Corium)은 사고 조건에 따라 UO2/ZrO2/Zr/SS의 혼합물로 구성비가 다르나 약 2500。C 이상의 고 용융점을 가지고 있어 이들 혼합 물질을 용융하기 위한 용기의 재질 선정이 매우 제한적이다. 현재까지 이러한 금속산화물을 담기 위한 용기로는 몰리브덴(용융점 : 2700。C) 또는 텅스텐(용융점 : 3400。C)과 같은 일부 소수의 물질이 가능한 것으로 알려져 있다. 일반적으로 용기는 용융하고자 하는 물질의 용융점보다 보다 높아야 하며, 화학적으로 안정되어야 하나 이러한 성질을 갖는 물질은 거의 존재하지 않는다. 따라서 용융하고자 하는 물질 자신이 도가니 역할을 하는 수냉 도가니 용융법(Cold Crucible Melting)을 사용 할 경우 이러한 한계가 극복될 수 있다[2]. 따라서 TROI 실험에서는 고융점 산화물의 용융 및 방출 기술 개발을 위해 수냉 도가니 용융법을 채택하여 왔으며, 그 동안 수냉 도가니 용융법을 이용한 TiO2[3] 및 ZrO2[4]에 대한 용융 및 방출 실험에 대한 결과를 발표하였다.

본 논문은 수냉 도가니 용융법을 이용한 원자로 물질 성분인 UO2/ZrO2 혼합물 약 10kg 용융시키는 실험에 대한 결과이다. 용융 및 방출이 성공적으로 수행되어 FCI 실험에 적용하였다. FCI 실험에서 가장 중요한 변수 중의 하나인 용융물의 과열도를 측정치와 열 평형 분석을 통해 얻어진 값과 비교 분석하였다. 용융 실험의 성공여부는 용융물의 충진 방법에 따라 달라졌으며, 열 평형 분석은 용융물 상부로의 복사 열손실의 정확한 예측이 매우 중요하였다.

II. 실험장치

그림 1은 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 고주파 발진기(R.F Generator)는 용융을 위해 유도코일에 전원을 공급하는 장치로 UO2/ZrO2 혼합물 약 10kg 용융을 위해 입력 최대 용량 150kW, 주파수 50kHz가 각각 사용되었다. 초기 유도체로는 증기폭발 시 ZrO2의 순도를 유지하기 위해 내경 50mm, 높이 10mm, 두께 10mm의 100g인 Zr 금속 링을 사용하였다. 수냉 도가니(Cold Crucible)는 높이 20cm, 내경 15cm의 크기가 사용되었다. 냉 도가니의 튜브사이의 간격은 1-2mm로 제작되었으며, 튜브사이의 간격이 넓은 경우 용융물이 간극사이로 방출되는 경우도 있어 간극을 줄이기 위해 냉 도가니 외벽에 석고를 발라 간극도 줄이고 용융물 방출을 방지하였다. 냉각기(Chiller)는 고주파 가열장치, 냉 도가니, 마개에 냉각수를 공급하기 위해 사용되었다. 마개(Plug)는 용융 기간 동안 용융물을 도가니 안에 유지시키며, 용융물 방출하고자 하는 시점에 마개를 연후 천공장치(Puncher)를 이용하여 도가니 하부에 형성된 소결층을 천공하여 용융물을 방출 시킨다.

UO2/ZrO2 혼합 용융물 생성을 위해 UO2의 경우 지름 8mm, 길이 15mm의 pellet을 사용하였으며, ZrO2의 경우 평균 직경 60mesh의 파우더를 이용하였다. UO2를 사용하기 때문에 Hood에서 충진 한 후 실험장치로 이동하게 된다. 따라서 이동 중 UO2/ZrO2 충진물의 도가니 중앙 구멍으로 누출을 방지하기 위해 도가니 최저층에는 ZrO2분말을 알코올과 혼합하여 충진 하였다. 실험장치의 운전 순서는 아래와 같다.

① 도가니 하부 구멍을 임시적인 마개로 막은 후 ZrO2분말을 알코올과 섞어 도가니 하부 5mm를 충진 한다.

② 건조 ZrO2 분말을 약 5mm 충진 한다.

③ UO2 pellet을 충진 후 pellet사이의 공동에 건조 ZrO2 분말을 채워 넣는다. 이 과정을 반복하

면서 도가니 바닥으로부터 약 8cm 높이까지 UO2 pellet과 ZrO2 분말을 충진 한다.

④ 초기 유도체를 파손 방지를 위해 ZrO2 분말을 약 10mm정도 충진 한다.

⑤ 유도체인 Zr 금속링을 장입 한다.

⑥ 용융 시 가스 방출을 위해 금속링 상부 중앙에 직경 2cm 나무막대 봉 등을 이용하여 세운 다음, 초기유도체 위에 다시 UO2 pellet과 ZrO2 분말을 도가니 상부까지 채운다.

⑦ 가스 방출을 위한 나무 봉을 제거한다.

⑧ 고주파 가열장치의 전원을 공급 후 운전을 시작한다.

⑨ 시간이 지남에 따라 고주파 가열장치의 입력전원의 크기를 증가시킨다.

⑩ 수냉 도가니 및 마개 입.출구에 온도계 및 유량계를 설치하여 고주파 가열장치 가열입력과 마개 상부에 형성된 소결층의 두께 관계를 확인을 위한 반복 용융 실험을 통해 소결층이 충분히 얇아지는 마개의 입.출구 온도에서 마개를 연다.

⑪ 사용자가 원하는 시간에 용융물을 방출시키기 위해 천공장치를 이용하여 소결층을 파손시킨다. 천공장치는 소결층을 파손 후 용융물 방출 통로에 장애가 되지 않도록 측면으로 회전시킨다.

위의 ①부터 ⑥까지의 과정은 Hood에서 이루어지며, 나머지 과정은 충진된 도가니를 실험장치에 장착 후 이루어진다.

고주파 가열장치의 운전과 관련된 변수로는 용융물의 용융 상태를 판단하기 위해 용융물의 전기전도도와 상관관계를 갖는 Q값과 시스템으로의 전체 입력전원의 크기를 판단하기 위한 전류 및 전압 등이 측정되었다. 전체 입력 전원 크기의 시스템의 각 부분으로의 열 손실을 평가하기 위해 수냉 도가니 및 마개로의 냉각수 유량 및 입 출구온도가 측정되었으며, 도가니 및 유도 코일로의 손실 전력을 측정하기 위한 전류 및 전압이 측정되었다. 또한, 용융물의 온도가 이색 방사 복사 온도계를 사용하여 측정하였다.

III. 실험 결과

충진 과정에서 용융물의 성공여부는 초기 유도체의 위치와 초기 유도체 하부의 충진 밀도가 매우 중요하였다. 그림 2의 왼쪽 그림은 초기 유도체를 도가니 하부로부터 8cm에 위치하고 초기 유도체 하부의 충진 밀도가 낮은 경우 초기 13 kg을 충진하여 5kg의 용융량을 얻었다. 그러나 그림 2의 오른쪽 그림에서처럼 도가니 하부의 충진 밀도를 증가시키기 위해 UO2 pellet을 상대적으로 많이 충진하고, 초기 유도체를 9cm 정도로 하는 경우 초기 13kg을 충진하여 9.5kg정도의 용융량을 얻었다. 이에 대한 원인으로는 UO2/ZrO2의 충진 밀도가 충분하지 않은 경우 용융물질에 의한 유도가 충분하지 못해 주변으로 용융이 확산되지 못하기 때문이다.

그림 3은 고주파 가열장치의 대표적인 입력전원 및 관련변수에 대한 운전 이력 곡선을 보여주고 있다. 그림에서 전류 및 전압의 곱이 입력전원(power)로 나타냈으며, 주파수는 47kHz가 측정되었다. 입력전원의 크기 제어는 원격으로 고주파 가열장치의 최대 입력전원에 대한 비를 제어하도록 되어 있다. ZrO2 분말이 용융이 시작되는 여부는 Q값을 이용하여 판단하며, 완전 용융상태에서 최소값을 보인다. 약 실험 시작 1,500초(25분)부터 용융이 초기 유도체 부근에서 시작되는 것을 알 수 있다. 이후 용융은 초기 유도체 부근에서 전체 도가니를 확산되어 간다. 전체 도가니에 확산이 이루어진 후 입력 전원의 크기와 손실과의 열 평형 관계에 따라 용융물의 과열이 진행된다.

용융과정 동안 도가니로의 냉각수 유량 및 입.출구 온도를 이용하여 용융물의 과열도를 계산하기 위해서는 용융물과 도가니로의 입력전원의 크기를 계산하여야 하기 때문에 유도 코일, 도가니, 그

리고 용융물로 전달되는 각각의 입력전원의 크기를 알아야 한다. 그림 4는 입력 전원 분포에 대한 전기 회로 구성으로 입력전원의 분포는 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{tot} &= I^2 R \\ &= I^2(R_{coil} + R_{crucible} + R_{melt}) = I(V_{coil} + V_{crucible} + V_{melt}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 I : 전류, R : 저항, V : 전압

각 성분으로의 전력 분포계산을 위해 동일 전류 값에 대해 각 성분으로의 전압 값을 알면 된다. 따라서 각 성분으로 전원 분포를 계산하기 위하여 유도코일만 설치된 상태에서 전류 및 전압을 측정하여 코일로의 손실을 계산하였으며, 유도코일과 도가니가 설치된 상태에서 전류 및 전압을 측정하여 코일로의 손실을 제거하는 방법으로 도가니로의 손실을 계산하였다. 표 1에서 유도 코일만 설치된 상태에서 전류가 50A인 경우 전압은 38V로 약 1.9kW의 전력이 유도코일로 전달되며, 100A인 경우에도 같은 방법으로 계산되었다. 유도 코일과 도가니가 설치된 경우에도 같은 전류 값에서 손실을 계산하였다. 표 1에서 유도코일 및 도가니 전류 값의 변화에 따라 전압이 비례함을 알 수 있어 나머지 전류 값은 비례관계를 이용하여 손실을 계산 할 수 있다. 실험에서는 유도코일, 도가니, 그리고 용융물로의 전류 전압이 측정되나 열 평형 분석을 위해 필요한 전원의 크기는 용융물과 도가니로의 손실이다. 따라서 전체 입력 전원의 크기에서 코일로의 손실을 제거하거나 coupling factor인 Q값을 이용하여 용융물로의 열전달과 도가니로의 열손실을 합쳐 계산하는 방법이 있다. 표 2는 대표적인 몇몇 시간대에서 손실 및 용융물로 전달되는 입력전원의 크기를 보여주고 있으며, 그림 5는 전 실험구간에 대해 각 성분으로의 손실과 도가니 및 용융물로 전달되는 입력전원의 크기를 보여주고 있다. 어느 경우로 계산하든 용융물과 도가니로의 전달되는 전력 값이 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 6은 용융물 방출이 이루어진 후 수냉 도가니 벽면에 형성된 소결층을 보여주고 있다. 측면의 소결층은 2-3mm 정도로 매우 얇게 형성되었으며, 바닥의 경우도 3-4mm 정도로 얇게 형성되었다.

IV. 열평형 분석

FCI 실험 시 용융물 온도의 정확한 측정은 매우 중요한 실험 변수 중의 하나 이다. 현재까지 한쪽이 막힌 텅스텐 튜브를 사용하여 흑체로 조건(emissivity=1.0)을 형성하여 측정하는 방법이 알려져 있으나[5] 텅스텐 튜브의 제작이 곤란하다. 그림 7은 본 실험에서 용융과정동안 도가니 내의 용융물에 대한 개념으로 용융물 상부에 안정된 소결층을 형성시켜 이색 방사온도계를 사용하여 구멍을 통해 용융물의 온도를 측정하였다. 초기에는 피막층이 형성된 후 과열이 진행되면서 피막층이 용융되어 용융물 표면의 온도를 측정하게 된다. 이색 복사 온도계의 경우 복사율 비(Emissivity ratio)를 설정해야 하는데, UO2/ZrO2에 대한 온도 측정 시 사용해야 하는 복사율 비를 알수 없다. 그러나 복사율 비를 어떤 측정값으로 측정한 후 복사율 비를 알 수 있는 방법이 있다면 복사율 비에 따라 측정된 용융 온도를 변환이 아래와 같이 가능하다.

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} + k\ln(\gamma) \quad (2)$$

여기서 T=기준 온도(복사율 비가 1일때), K=0.00034106412005457로 교정계수, γ= 복사율 비

따라서 반대로 복사율 비를 1이 아닌 값을 사용하여 측정한 후 다른 복사비율을 갖는다고 할 때

온도를 구할 수 있다.

UO2/ZrO2 혼합물에 대한 용융물 온도 과열도 추정은 용융점부터 용융물의 잠열 증가는 입력 전원의 크기와 시스템으로의 손실 차이 만큼이 기여한다는 방법으로 이루어졌다. 즉

$$\int_{t,melt}^{t} M_m C_{p,m} \Delta T dt = \int_{t,melt}^{t} \left(p_{input}(t) - q_{loss}(t)\right) dt \tag{3}$$

여기서 M_m : 용융물 질량, $C_{p,m}$: 용융물 비열, ΔT : 용융물 과열도

$P_{input}(t)$: 도가니로의 입력 전력 크기와 용융물로의 흡수전력의 합

$Q_{loss}(t)$: 도가니, 마개, 그리고 복사열 손실의 합

$P_{input}(t)$는 그림 5로부터 얻을 수 있다. 한편, 손실되는 열량은 도가니로 전달되는 열량, 마개로 전달되는 열량, 그리고 용융기간 중 상부 소결층 및 용융물 표면으로부터 방출되는 복사 열손실로 구성되어 있다. 도가니, 마개, 상부 소결층과 용융물 표면으로 전달되는 열 손실은 아래와 같이 계산된다.

$$\dot{Q}_{crucible} = \dot{m}_{crucible} C_{p,w} \left(T_{o,crucible} - T_{i,system}\right) \tag{4}$$

$$\dot{Q}_{plug} = \dot{m}_{plug} C_{p,w} \left(T_{o,plug} - T_{i,system}\right) \tag{5}$$

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \varepsilon A_{loss} \left[\left(T_{m.p} + \Delta T\right)^4 - T_{sur}^4\right] \tag{6}$$

여기서, $\dot{m}$: 질량 유량(kg/s), $C_{p,w}$: 냉 각수 비열, T_o : 출구온도

T_i : 입구 온도, σ : Stefan-Boltzman Constant, ε : emissivity

$T_{m.p}$: UO2/ZrO2 용융온도, T_{sur} : 대기 온도

여기서 식 (3)에 식(6)을 대입하는 과정에서 식(6)의 우변을 아래와 같이 나타내고

$$\left(T_{m.p} + \Delta T\right)^4 \cong T_{m.p}^4 + 4 T_{m.p}^3 \Delta T \tag{7}$$

정리하면 용융물의 과열도 ΔT는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta T = \frac{P_{input}(t) - \dot{Q}_{crucible} - \dot{Q}_{plug} - \sigma \varepsilon A_{loss} \left(T_{m.p}^4 - T_{sur}^4\right)}{M_m C_{p,m} + 4 \sigma \varepsilon A_{loss} T_{m.p}^3} \tag{8}$$

그림 8은 용융기간 동안 측정한 용융물 온도를 보여주고 있다. 이 경우 복사율 비는 1.0으로 측정한 결과이다. 온도는 입력전원 가열 시작 후 약 1,000sec에서 감지되기 시작하였으며, 약 1,700초 부근에서 온도가 급격히 상승하는 것은 초기 유도체인 Zr 금속링의 발화에 의해 발생한다. 이후 용융물의 온도는 직접 측정되지 않고 용융물 표면에 형성된 소결층을 통해 측정되는 온도이다(그림 9의 왼쪽 그림). 따라서 약 3,000초까지 온도는 일정 율로 증가하는데 이는 용융물이 가열되고 있음을

뜻하며, 이후 용융물의 점차 용융되기 시작하여 일정온도를 유지하다 입력전원의 증가에 따라 용융물의 온도가 다시 상승한다. 용융이 완전히 이루어진 후 가해지는 열량이 증가함에 따라 용융물의 온도는 계속 상승한다. 약 5,000초부터 과열이 시작되는 것으로 판단되며, 5,700초 부근에서 용융물 상부에 형성된 소결층이 용융되어 순간적으로 온도계를 통해 감지되는 온도가 상승한다(그림 9의 오른쪽 그림).

식(8)에서 여기서 분모의 첫번째 항과, 두 번째, 그리고 세번째 항은 측정자료로부터 계산 할 수 있으며, 분모의 첫 번째 항의 용융물 질량은 실험 후 측정함으로써 비교적 정확한 값을 얻을 수 있다. 그러나 복사 열손실 관련 항인 분모의 마지막 항과 분자의 마지막 항에는 복사율, 복사 면적에 불확실성이 존재한다. 복사율의 설정은 기존에 알려진 실험자료[6]로 같이 0.8을 사용하였으다. 현재까지 UO2/ZrO2에 대한 복사율도 고온의 경우 잘 알려지지 않고 있다. 복사 면적의 설정은 가스 방출구의 크기를 통한 복사량과 용융물 상부 소결층을 통한 복사량을 합한 값이 얻어지도록 하였는데, 이는 용융 기간 동안 용융물 표면이 나타나는 복사면적이 그림 7에서 직경 3cm 정도 이나 이 경우 그림 10에서처럼 용융물 온도 예측 값이 지나치게 크게 나타났다. 따라서 복사는 용융물 표면이 나타나는 부분뿐만 아니라 도가니 상부 전 표면에서 복사가 이루어 짐을 알 수 있다. 따라서 용융물 표면이 나타나는 부분과 용융물 표면이 나타나지 않는 부분으로 나누어 복사 열손실이 고려되어야 한다. 용융물 표면이 나타나지 않는 부분은 온도가 1,950K로 가정하여 계산하였다. 두 복사 열손실을 합산하여 계산한 값을 단일 복사 열손실로 합산하여 얻은 값과 동일하도록 손실면적을 계산하였다. 이때 전도열손실을 고려하지 않은 것은 복사 열손실에 비해 매우 작기 때문이다. 식 (7)과 같은 온도계산은 그림 11과 같이 과열도가 500K 인 경우 약 10%정도의 복사 열손실 차이가 발생 할 수 있다.

그림 12는 여러 가지 복사율과 복사 열손실 면적에서 용융물의 과열도를 보여주고 있다. 그림에서 복사율 0.8, 복사면적 직경 6.3cm일 때 복사율 비를 1로 측정한 값을 식(2)에 의해 복사율 비를 1.18로 가정한 결과와 같은 경향을 나타내었다. 복사율 비를 1.18로 환산한 이유는 그림에서 5700초 부근에서 용융물 상부 표면에 형성되었던 피막층이 파손(그림 9의 오른쪽 그림 참조)되기 때문에 이 온도를 용융 온도로 설정하였다.

V. 토의

수냉 도가니 용융법은 용융물을 담기 위한 텅스텐과 같은 별도의 용기를 필요로 하지 않으며, 화학적으로 용융물과 도가니와의 반응이 없어 안정하다. 이러한 냉 도가니 용융법을 이용한 ZrO2를 이용한 개발한 도가니 하부 방출 기술로 원자로 물질인 UO2/ZrO2 혼합물에 대해 용융 및 방출 실험에 적용하였다. 실험결과 UO2/ZrO2 혼합물의 용융 성공 여부는 도가니 내에 UO2 pellet과 ZrO2 분말의 충진 방법이 매우 중요하였다. 즉, 초기 유도체 하부의 충진 밀도를 높임으로써 용융량이 충분하여 유도될 수 있을 만큼 되어야 Coupling이 잘 이루어져 충분한 용융량을 얻을 수 있었다.

측정 된 시스템 운전 변수를 사용하여 시스템을 구성하고 있는 유도코일, 도가니, 용융물로 각각 전달되는 입력전원 분포를 계산하였다. 이를 이용한 열 평형 분석을 수행한 결과 대부분의 고주파 가열장치를 통해 입력된 입력전원의 크기는 용융물로 전달되었다. 이러한 열 평형 분석결과를 이용한 용융물 온도를 예측방법을 제시하였다. 용융물은 최대 500K 이상까지 과열되는 것으로 나타났다.

한편, 이색 복사 온도계를 이용한 온도 측정은 측정된 온도추이로 판단 할 때 복사율 비는 1.18로 나타났다. 이색 방사 복사 온도계의 복사율 비를 조정하는 방법으로 용융물 온도와 계산 값과 비교가 이루어졌으나 향후 흑체로 가정이 가능한 텅스텐 튜브를 사용하여 용융물 온도를 계산 값과 비교가 진행될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 박 익규 등, ZrO2를 이용한 다차원적 용융물-냉각수 반응에 대한 실험적 연구, 2000년 추계 원자력 학술발표회, 2000. 11.
2. E. Kaldis, "Current Topics in Material Science: Vol. 1", north- Holland, Chapter 6: pp.421-480.2, 1978.
3. 홍 성완 등, Experimental Results for TiO2 Melting and Release using Cold Crucible Melting 2000년 춘계 원자력 학술 발표회, 2000년 5월
4. 홍 성완 등, A Study on the Control of the Bottom Crust Thickness in the Cold Crucible Melting, 2001년 춘계 원자력 학술 발표회, 2001년5월
5. V. Asmolov et al., “TULPAN Facility Measurement”, KURCHATOV INSTITUTE, OECD Report, RP-TR-31, Aug. 1997.
6. VDI-Warmeatls, 1991

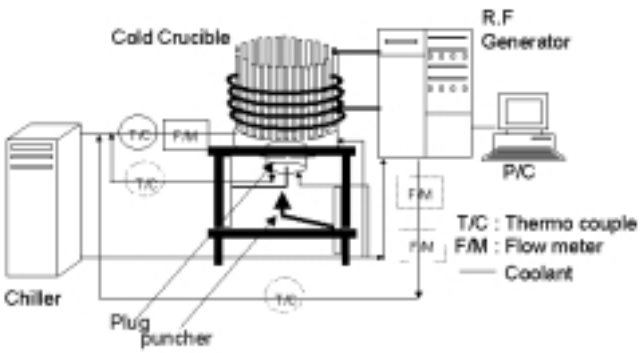

Fig 1. Schematic Diagram for Test Facility

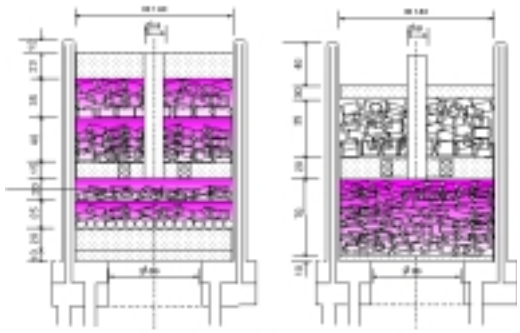

Fig 2. Charging of UO2 Pellet and ZrO2 Powder

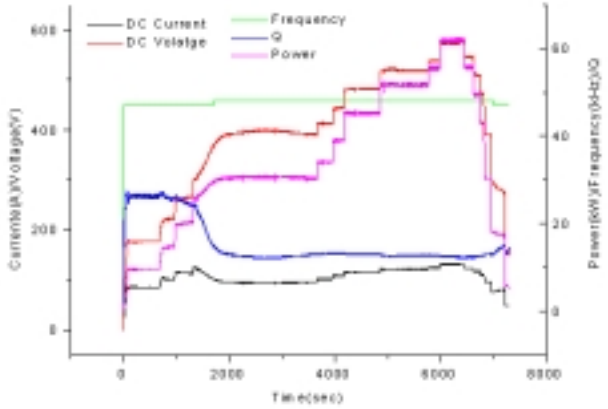

Fig 3. Operating Curves of R.F Generator

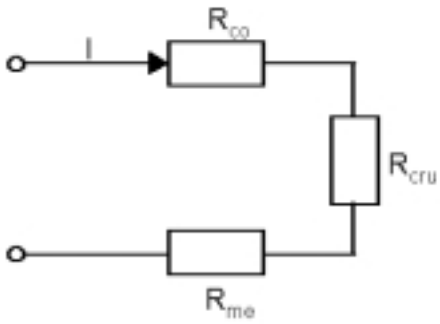

Fig 4. Electrical Resistance Circuit for System

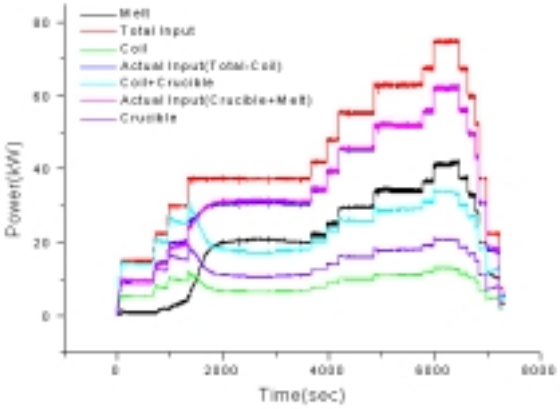

Fig 5. Absorbed Power to the System

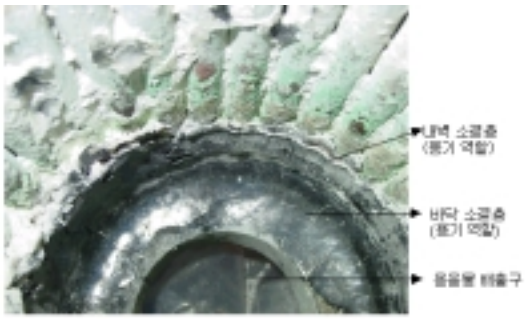

Fig 6. Inside Picture of the Crucible after Melt Release

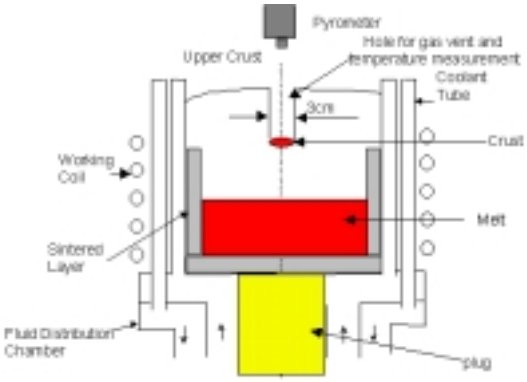

Fig 7. Schematic Picture for Melt Temperature Measurement

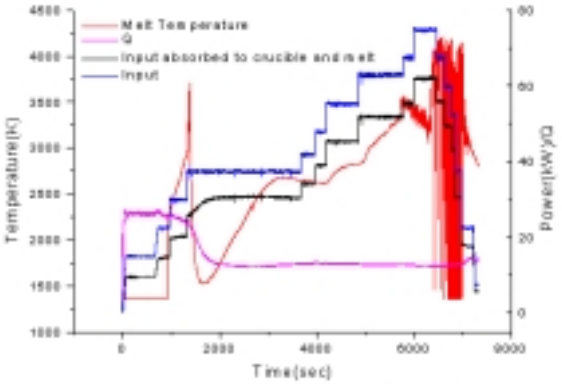

Fig 8. Measured Temperature of Melt

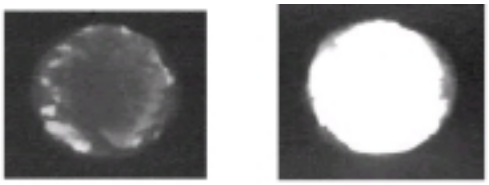

Fig 9. Melt Picture showed through gas vent hole

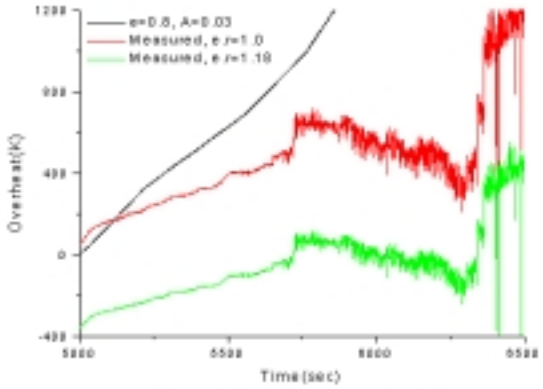

Fig 10. Temperature comparison

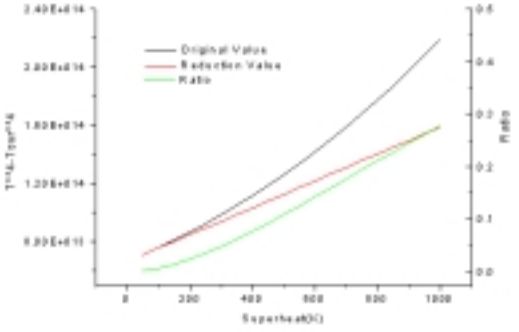

Fig 11. Comparison between Original and Reduced Value

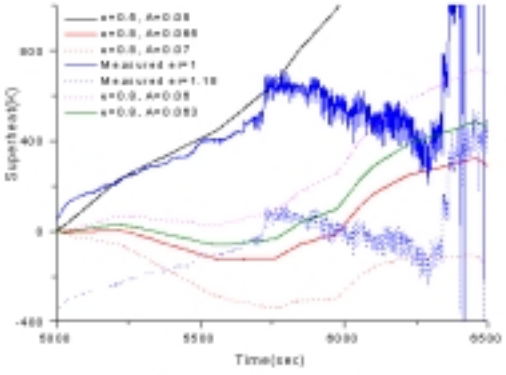

Fig 12. Temperature Comparison

표 1. Coil 및 Crucible 손실

	DC 전류(A)	DC 전압(V)	Power(kW)	비고
Coil	50	38	1.9	Measured
	94	71.4	6.7	Cal
	100	74	7.4	Measured
	121	91.96	11.1	Cal
	123	93.48	11.5	Cal
	131	99.56	13.0	Cal
Coil + Crucible	50	96	4.8	Measured
	94	180.48	17.0	Cal
	100	198	19.8	Measured
	121	239.58	29.0	Cal
	123	243.54	30.0	Cal
	131	259.38	34.0	Cal

표 2. Coil, Crucible and Melt Loss

Time(sec)	DC 전류	DC 전압	Co+Cr+Me	Melt	Coil	Crucible	Melt+Cru	Total
22.50	50.00	96.00	4.80	0.504	1.90	2.90	3.40	2.90
709.70	100.00	210.00	21.00	0.233	7.40	12.40	12.63	13.60
1714.80	100.00	372.00	37.20	17.442	7.40	12.40	29.84	29.80
2500.00	94.00	398.00	37.41	20.75	6.70	10.27	31.01	30.71
3797.40	101.00	412.00	41.61	22.200	7.40	12.40	34.60	34.21
5000.00	121.00	522.00	63.16	34.660	11.1	17.9	52.54	52.06
5500.00	121.00	518.00	62.68	33.890	11.1	17.9	51.79	51.58
6000.00	131.00	570.00	74.67	40.980	13	21.0	61.98	61.67
6500.00	123.00	541.00	66.91	37.570	11.5	17.5	55.07	55.41