2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

TROI 실험장치에서 수행된 ZrO_2/냉각수 FCI 실험

ZrO_2/Water FCI Experiments at TROI Facilities

박익규, 장영조, 신용승, 김종환, 홍성완, 민병태, 송진호, 김희동

한국원자력연구소
대전 유성 우체국 사서함 105 호

요 약

한국원자력연구소는 실제 노심용융물질을 사용한 중간규모의 용융물/냉각수 반응실험 (Test for Real corium Interaction with water: TROI)을 수행하고 있으며, TROI-1 실험결과를 2000 년 춘계원자력학회에 소개한 바 있다. TROI 실험의 목적은 실제 노심용융물을 사용하여 노심용융물의 구성비, 다차원적인 용융물/냉각수 혼합, 그리고 수소발생 등이 노심용융물/냉각수 반응, 특히 증기폭발성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하는 것이다. 본 논문에서는 TROI 실험의 첫 단계로 수행한 ZrO_2/냉각수 반응실험인 TROI-1~5 실험에 대해서 논하고자 한다. 이 실험에서는 직경이 5cm 인 원기둥형태의 ZrO_2 용융물 5kg 을 온도가 30~95 °C 이고 깊이가 67cm 인 냉각수에 투입하였다. ZrO_2/냉각수 반응과정을 가시화하기 위하여 고속비디오카메라 및 일반비디오카메라를 사용하였다. 일부 실험에서는 자발증기폭발이 발생하였으며, 수집된 데브리 및 압력 등으로 확인할 수 있었다. ZrO_2/냉각수 반응실험은 2001 년 4 월까지 진행될 예정이며 추후 UO_2를 사용한 실험을 계속 진행할 예정이다.

Abstract

Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) launched a intermediate scale steam explosion experiment named “Test for Real cOrium Interaction with water (TROI)” using reactor material, and the TROI-1 test results were already introduced in last conference of Korean Nuclear Society. The purpose of the TROI tests is to systematically investigate the effect of material composition, multi-dimensional melt/water interaction, and hydrogen generation on the steam explosions. In this paper, the first series of tests(TROI-1~5) were discussed. The ZrO_2 jets with 5kg mass and 5cm diameter were poured into the 67cm deep water pool at 30 ~ 95 °C. The melt water interactions were monitored by video cameras. The spontaneous steam explosions were observed, and the morphology of debris and pressure wave profiles show that there were mild local steam explosions. The ZrO_2/Water interaction tests will continue until 2001 April, and the test using UO_2 will be followed.

1. 서론

원자력발전소 중대사고시 노심용융물/냉각수 반응에 대한 실험연구가 지난 20 년간 진행되어 왔다. 단일방울분쇄[1], 혼합실험[2] 등의 많은 소규모실험이 증기폭발의 물리적 현상을 규명하고 해석적 연구에 기여하기 위하여 수행되었으며, FITS 실험[3], ALPHA 실험[4], 그리고 KROTOS 실험[5,6]

등의 중간규모의 폭발실험은 증기폭발력을 측정하기 위하여 수행되었다. 특히, 원자력발전소 중대사고시 저압모드에서 원자로용기 내부에서의 노심용융물/냉각수 반응을 좀더 현실적으로 모사하고자 150kg 의 대량의 코륨을 사용한 FARO 실험[7,8]도 수행되었다. 이러한 기존연구를 기반으로 1995 년 Steam Explosion Review Group, 1997 년 FCI Specialist Meeting, 그리고 OECD/NEA Meeting 등을 통하여 원자력발전소 중대사고시 알파모드 파손확률은 일어나지 않을 것이라는 전문가의 동의 의견이 도출되는 등 증기폭발에 대한 많은 문제들이 해결되었으며, 몇몇 미해결된 증기폭발에 관련된 원자력발전소 안전성에 관한 몇 가지 현안들에 대한 논의가 지속되고 있다. 그 중 하나는 원자로압력용기와 격납건물 관통관을 지지하고 있는 원자로공동에 코륨이 낙하하였을 때 증기폭발로 인한 기계적파손의 여부이다. 또 하나는 새로운 원자로 개념인 원자로용기를 냉각수에 담아 놓음으로서 노심용융물을 원자로용기내에 억제시킬 목적의 in-vessel retention(IVR) 에 있어서 원자로용기바닥이 파손되어 용융물이 냉각수 내부로 직접분사되었을 경우 노심용융물/냉각수 반응에 관한 것이다.

이러한 문제들을 해결하는 데는 실험자료의 부족(특히, 코륨을 사용한 실험)이 부족한 형편이다. KROTOS 실험에서 입증되었듯이 대부분 전문가들은 산화물질의 물리적 성질이 증기폭발성 혹은 폭발력에 큰 영향을 줄 것이라는데 동의하고 있다. 노심용융물은 UO_2, ZrO_2, Zr, 그리고 SS 등 다양한 물질로 구성되어 있는데, 이 구성비에는 상당한 편차가 있을 것으로 예상된다. 하지만 기존의 노심용융물/냉각수 실험에서는 노심용융물의 구성비에 대한 고려가 충분치 않고 대체로 80 대 20 의 UO_2-ZrO_2 혼합체가 주로 사용되었다. 또한, 과거 코륨을 사용한 실험에서 수소발생이 관측되었는데, 수소발생이 증기폭발을 억제할 것인지 아니면 폭발을 촉진 시킬 것 인지에 관한 불확실성이 남아 있다. 그리고, 대표적인 코륨/냉각수 증기폭발실험인 KROTOS 실험은 3cm 의 작은 투하직경을 사용한 1 차원적인 실험으로 코륨/냉각수의 혼합체가 반경방향으로 큰 2 차원적인 효과를 관측하는데 한계가 있다. 소규모실험[9]에서 관측된 바로는 용융물의 양 혹은 직경이 커지면 증기폭발의 폭발력은 더욱 강해지는 것으로 보고되었다. 홍성완 [10] 등은 KROTOS 실험의 경우 투입된 용융물이 2kg 정도로 작고, 반응용기와 용융물의 기하형태가 일차원적인 기하형태를 가지고 있다고 지적하였다. 이렇게 용융물의 제트가 물과 혼합되는 형상이 일차원적 이므로 KROTOS 실험결과를 실제 원자로에서의 다차원적인 용융물과 물 반응에 적용시키는데 어려움이 있음을 지적하고 용융물의 제트의 지름을 크게 하고, 냉각수 탱크가 다차원적인 모양을 가지는 실험의 필요성을 제기하고 있다.

한국원자력연구소에서는 1997 년도부터 정부의 중장기과제의 하나로서 노심용융물/냉각수 반응실험(Test for Real cOrium Interaction with water: TROI)을 수행하고 있다. 본 과제의 목표는 한국형차세대원전의 노외증기폭발에 대한 안성성 문제의 해결과 적절한 중대사고관리(severe accident management: SAM)의 제시에 있다. 또한, 용융물의 구성비, 수소발생, 다차원적 혼합이 증기폭발에 미치는 영향에 관해 체계적인 공헌을 할 것이다. 본 논문에서는 TROI 실험장치와 TROI 실험의 일단계로 수행한 ZrO_2/냉각수 반응실험 결과에 대해 논하고자 한다.

2. TROI 실험장치

실험장치의 주요부는 그림 1 과 같이 압력용기 상하부, 용융로, 슬라이딩밸브, 반응용기로 구성되어 있다.

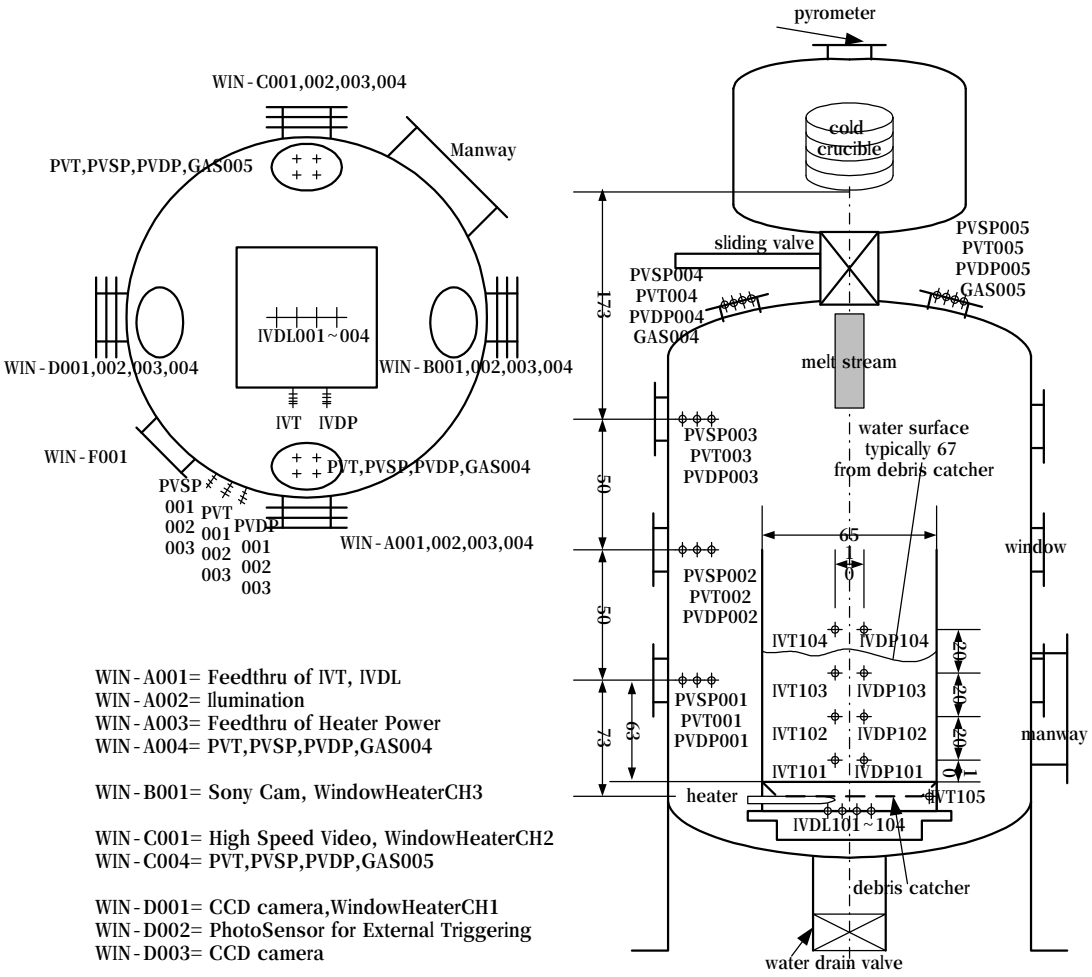


그림 1. TROI Facilities Configuration(unit=cm)

2.1. 압력용기

압력용기는 반응용기를 수용하는 하부압력용기와 용융로를 수용하는 상부압력용기 두개로 구성되어있다. 하부압력용기의 설계 압력은 25 kg 의 용융물이 물과 반응하여 순간적으로 수증기를 발생시키는 것으로 하여 계산된 정압에 3 배 안전계수를 곱하여 20 bar 로 결정되었다. 증기 폭발의 동하중에 대해서는 용융물의 에너지 45 MJ, 에너지 변환율 3%, 폭발파 3ms 폭을 가지는 삼각파를 가정하여 이 동하중에 대해 측면 및 윗면 안전도를 TNT 등가공식으로 계산하였고, 이 동하중에 의해 용기 하부면이 파손되는 것을 방지하기 위해 ANSI 코드계산에 의해 충분한 두께로 결정되었다[11].

상부압력용기는 용융물을 압력용기 내부로 방출할 때 외는 슬라이딩밸브에 의해 압력용기와 고립되지만 슬라이딩밸브의 고장 등으로 용융로 보호용기 또한 증기폭발로 인한 충격파 혹은 압력증가에 대비하여야 한다. 이러한 이유로 용융로 보호용기도 212°C , 20bar 의 설계온도, 압력으로 제작되었다. 파이로미터로 용융물의 온도를 계측하기 위하여 용융로용기 상단부에 직경 4 인치의 투명창을 설치하였으며, 용융로와 같은 위치에 직경 4 인치의 관측창을 설치하여 용융물의 방출여부를 관측할 수 있도록 하였다.

2.2. 용융로

용융로는 용융로용기 내부에 설치되어 있으며, 용융로, 플러그, 펀처 등으로 구성되어 있다. 종래

의 Thermite 반응 방법이나, 직접 가열 방법의 단점을 보완하기 위하여 저온용융로 (cold crucible) 기술을 적용하였다. 이 방법은 유도 가열 방법의 일종으로 냉각수가 흐르는 구리관으로 용융로를 만들고, 용융로의 내부에 세라믹재료를 넣고 가열하여 상변화에 의한 전기 저항의 변화로 용융이 되는 장치이다. 용융되는 과정에 용융로 외부에 소결층이 형성되어서 고온의 용융물과 용융로 벽면이 직접 접촉되지 않게 된다. 이런 장점으로 인해 보석 재료를 만들기 위해 상용으로 많이 실용화된 방법이다. 용융하고자 하는 세라믹 물질의 전기적인 특성에 따라 유도가열로의 제원을 결정해야 하는데, 코륨을 녹인 종전의 연구가 없어서 유도가열로 운전을 위한 새로운 제원을 결정해야 한다. 먼저 코륨과 성질이 비슷한 TiO2 를 이용하여 용융 및 전달 실험을 완료하였고 그 결과는 참고 문헌 12 에 자세히 논의되고 있다. 이 방법을 이용하여 ZrO_2 를 성공적으로 용융하였다.

용융로용기 겉부분은 냉각관으로 구성되어 있기 때문에 용융물질이 빠져 나올 수 없는데, 용융물을 방출하고자 하는 부위에 먼저 플러그형태로 된 냉각관으로 막고 있다가 용융물을 방출할 시점에 플러그를 뺀다. 플러그가 빠진 부분은 아주 얇은(1cm 이하) 용융물질 고체막이 있는데 이 부분을 공기압을 사용한 펀처로 쳐서 부수면 이 부숴진 구멍으로 용융물이 빠져 나오게 된다.

2.3. 반응용기

반응용기는 650x650x1450 mm 인 직사각기둥으로 되어 있으며 주요 구성부는 배출부, 가열부, 데브리캐처부, 반응부로 구성되어 있다. 냉각수를 배출하기위한 배출부는 반응용기하단에서 압력용기 밸브연결 플랜지에 부착되어 있기 때문에 수압외에 압력을 받지 않게 설계되었다. 가열부는 용기하단 180 mm 이하의 냉각수를 직접가열하기 위한 히터(220V 단상, 5kWx3 개) 및 온도조절기를 장착하기 위한 부분이다. 데브리캐처부는 가열부위에 강철판을 올려놓는 구조인데 반응용기에 투입된 용융물을 담아 수거하고자 하는 것이다. 이 데브리캐처부의 하단은 물로 채워져 있기 때문에 용융물이 냉각수를 통과하는 동안 냉각정도가 낮아도 충분히 열하중을 견딜 수 있다.

반응부는 4 면이 두께 15mm 의 pc 판으로 제작되어 있어 용융물/냉각수 반응을 관측할 수 있도록 설계되었다. 반응부의 높이는 1290mm 로 냉각수의 높이를 충분히 조정할 수 있다. 반응용기 한면에는 높이 20cm 간격으로 열전대와 동압계를 설치할 수 있는 어댑터를 장착하였으며 냉각수 유입구를 상단부에 설치하였다.

2.4. 계측 장치

동압을 측정하기 위한 동압센서(piezoelectric charge mode pressure sensor model 112A, Nat' l frequency : 350kHz, Sensitivity : 1pC/PSI, PCB PIEZOTRONICS INC) 4 개가 설치되었다. 2 개의 동압센서(60MPa)가 반응용기벽면(IVDP101, IVDP103)에 설치되어 냉각수 내부의 동압을 측정하였으며, 2 개의 piezo-electric 압력센서(6MPa)를 압력용기 벽면(PVDP001, PVDP002)에 설치하여 압력용기 내부 대기에서 감쇠된 압력파를 측정하였다. 반응시 압력용기 대기 및 반응용기 냉각수의 온도변화를 측정하기 위하여 총 7 개의 K-type 열전대를 설치하였다. 1.6mm 열전대 3 개를 압력용기(PVT001, PVT002, PVT003)부위에 설치하였으며 1.0mm(ungrounded) 열전대 4 개를 반응용기(IVT101, IVT102, IVT103, IVT104)부위에 설치하였다. 용융물/냉각수 반응으로 야기되는 압력용기의 압력증가를 측정하기 위하여 압력용기벽면(PVSP002, PVSP003)에 절대압력계(Druck 사, Model PMP4060, Range:0-35bar)를 설치하여 압력변화를 측정하였다

TROI 데이터 어퀴지션은 위와 같이 크게 다른 두 가지의 데이터(>10kHz, 100Hz)를 동시에 저장할 수 있게 구성이 되어있다. TROI 실험에서는 Agilent 사 VXI 시스템(800kHz sampling/channel, 1kHz/channel)을 이용하여 1 개의 제어프로그램을 이용하여 이와 같이 상이한 종류의 데이터 어퀴지션을 하였다. 동압센서의 시그널은 20 μs 간격으로 샘플링하였으며, 정압과 온도 등의 시간에 따른

변화량이 느린 신호는 10ms 간격으로 샘플링하였다.

4 개의 CCD 카메라, 1 개의 디지털비디오, 그리고 1 개의 고속디지탈비디오카메라가 TROI 실험을 위하여 사용되었다. 2 개의 CCD 카메라는 용융물제조 및 전달시 용융로 관측과 플러그 및 펀처작동을 감시하기 위하여 상부압력용기 가시창에 설치되었다. FCI 반응현상 관측을 위하여 3 대의 30pps 비디오와 1 대의 1000pps 고속비디오를 사용하였다. 피차체가 3000C 로서 매우 센 발광체여서 이를 영상화하기 위해서는 광량을 감쇄시키거나 노출시간을 조정하여야 한다. 2 개의 CCD 카메라 및 1 개의 디지털홈비디오에는 편광필터 2 장씩을 장착하여 용융물 전달 및 FCI 반응을 가시화하기 위하여 하부압력용기에 설치되었다. 고속디지탈비디오카메라는 노출시간 조정이 10us 까지 가능하므로 용융물로부터 나오는 광량을 충분히 감쇄시킬수 있다.

표 1. Measurements Position and Sensor Description

Parameter	Sensing location	Sensor description
Coolant temperature	IVT101~IVT104	1mm, Thermocouple
Dynamic pressure in the coolant	IVDP101,IVDP103	PCB model 112A <60MPa
Atmosphere temperature in the pressure vessel	PVT001~PVT003	1.6mm, Thermocouple
Transient pressure in the pressure vessel	PVSP002,PVSP003	Druck model PMP4060 <35bar
Dynamic pressure in the pressure vessel	PVDP001,PVDP002	PCB model 112A <20MPa
FCI phenomena visualization	13 windows available	30pps videos and 1000pps video

3. 실험진행순서

먼저 냉각수를 설정치에 맞추어 가열한 후 8kg 의 ZrO_2 분말이 채워진 용융로를 운전하여 충분히 용융물이 생성될 때까지 가열한다. 용융물 생성이 완료되면 30pps 비디오 녹화를 시작한다.슬라이딩 밸브를 개방하고 용융로의 플러그를 제거한다. 용융로의 펀처를 작동하여 ZrO_2 소결층을 깨고, 동시에 동적신호 계측 및 고속비디오카메라 촬영을 위한 트리거를 발생시킨다. 용융물이 반응용기내부로 완전히 들어갔다고 판단되는 때 슬라이딩밸브를 폐쇄한다.

4. TROI-ZrO_2 실험결과

TROI-ZrO_2 실험에서는 대략 8kg 의 ZrO_2 를 저온용융로에서 용융시키고 3373K 이상 가열하여 플러그를 제거한 후 펀처가 작동하여 대략 5kg 의 용융물이 방출되었다. 5 번의 TROI-ZrO_2 실험에서 2 번의 자발증기폭발이 관측되었다. 이는 기존의 UO_2-ZrO_2/냉각수 반응실험에서 자발증기폭발이 발생하지 않았던 것을 고려하며 매우 흥미로운 결과이다. 자발증기폭발이 발생하지 않은 TROI-ZrO_2 실험에서의 용융물 분쇄 양상 또한 기존의 UO_2-ZrO_2/냉각수와는 매우 다른 것으로 판단된다. 표 2 에 TROI-ZrO_2 초기조건 및 실험결과가 제시되어 있으며, 본 장에서는 실험결과를 측정인자 별로 논의하고자 한다.

표 2. Initial Condition & Results for TROI-ZrO_2 Tests(SS=Steam Spike, SE=Steam Explosion)

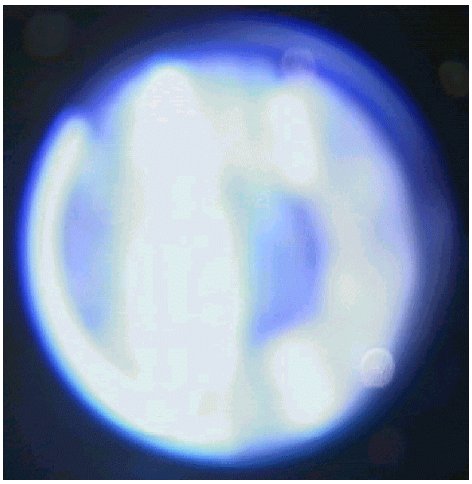
TROI test number		Unit	1	2	3	4	5
Melt	Composition UO_2 / ZrO_2 /Zr	[w/o]	0/99/1	0/99/1	0/99/1	0/99/1	0/98/2
	Temperature	[K]	>3327	-	3200	3200	3900
	Charged mass	[kg]	8.01	8.4	7.8	7.2	6.4
	Initiator mass	[kg]	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Released mass	[kg]	5	5.5	4.88	4.2	2.9
	Initial jet diameter	[m]	0.037	0.052	0.060	0.028	0.038

	Free fall in gas	[m]	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Test Section	Water mass	[kg]	283	283	283	283	283
	Height	[m]	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
	Cross section	[m^2]	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
	Initial temperature	[K]	365	365	323	292	337
	Subcooling	[K]	5	8	50	81	36
Pressure Vessel	Initial pressure(air)	[MPa]	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Free volume	[m3]	8.032	8.032	8.032	8.032	8.032
Results	Maximum PV pressurization	[MPa]	0.02	0.008	0.01	0.03	0.035
	Maximum PV heat-up	[K]	15	20	25	37	40
	Maximum water heat-up	[K]	4	10	10	-	-
	Steam explosion		SS	NO	NO	SE	SE
	Dynamic pressure peak	[MPa]	1	-	-	2.1	0.9
Debris	Total amount	[kg]	2.2	5.5	4.88	4.256	3.02
	Crust(>50mm)	[kg]	0.98	2.54	2.56	1.36	0.62
	Crust(10~20mm)	[kg]	-	-	-	0.76	0.58
	Particle(10~20mm)	[kg]	0.2	2	1.12	0.18	0.04
	Particle-dominated(2~5mm)	[kg]	0.67	0.67	0.77	1.116	0.74
	Particle(710μm~2mm)	[kg]	0.15	0.25	0.35	0.54	0.54
	Fine particle(<710 μm)	[kg]	0.04	0.04	0.08	0.26	0.5

4.1. ZrO_2/냉각수 반응 가시화

ZrO_2 용융물을 냉각수에 전달할 때 편광필터를 장착한 30pps CCD 카메라 그리고 디지털홈비디오 카메라를 이용하였으며, ZrO_2/냉각수 반응을 가시화하기 위하여 고속카메라를 이용하였다. 그림 2 에는 용융물제트가 용융로에서 냉각수로 자유낙하하는 모습과 FCI 반응현상을 가시화 한 사진이 제시되어 있다. 그림 2.a 에서 보듯이 편광필터를 이용한 경우 빛의 분산을 막기가 어렵기 때문에 용융물제트직경측정은 어려우나 용융물의 위치 및 전체적인 모양 파악이 가능하므로 용융물제트 속도측정이 가능할 것으로 판단된다.

그림 2.b 는 800μs 노출시간과 500pps 촬영속도로 촬영한 ZrO_2/냉각수반응 과정이다. 전체적인 혼합체의 직경은 대략 20cm(한격자가 10cm)이며 주 용융물제트로 인한 혼합체는 대략 직경이 10cm 인 것으로 판단된다. 용융물이 투입되는 위치에서 수증기가 발생하고 있으며, 용융물제트 주변으로 잔해물이 떨어지고 있다.



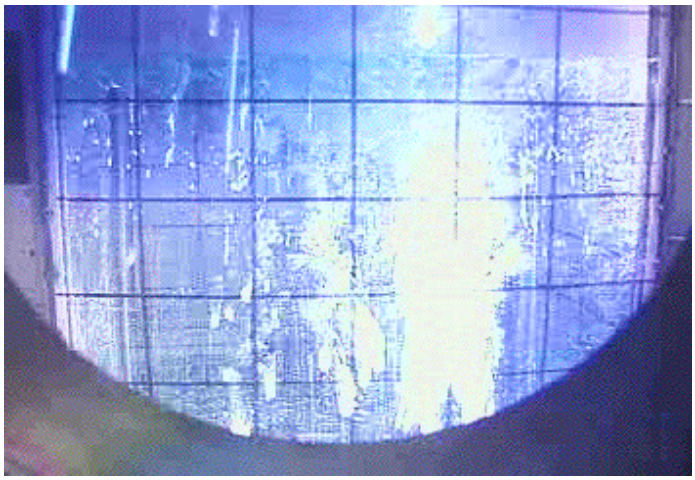


그림 2. ZrO_2 Melt Release(a) and the ZrO_2/Water Mixing Behaviors(b)

4.2. 용융물온도

용융물온도는 용융로에서 ZrO_2 용융물을 제조할 때 상부압력용기 상단에 설치된 가시창을 통하여 파이로미터로 측정하였다. ZrO_2 용융물의 온도는 대개 본 실험에서 사용한 파이로미터의 측정범위를 벗어나므로 파이로미터의 설정 emissivity 를 1.2 로 조정하고 다음과 같은 식을 사용하여 외삽할 수 있다.

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} + K \ln(g)$$

여기서, S, T, K, 그리고 g 는 각각 실제 온도, 파이로미터로 측정된 온도, 파이로미터 측정상수, 파이로미터 설정 emissivity 을 나타낸다. 이와같은 방법으로 TROI-5 에서는 3900K 에 이르는 용융물의 온도가 측정되었다.

4.3. 동적압력

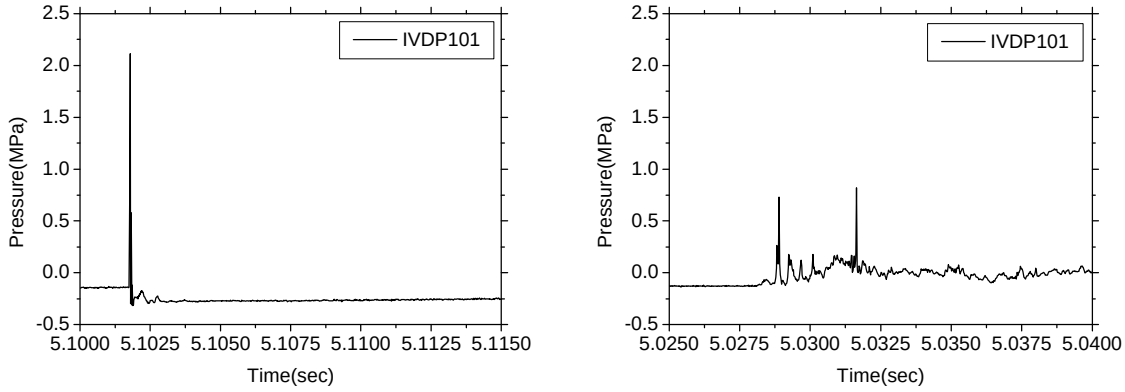


그림 3. Measured Dynamic Pressure Profiles at TROI-4, 5 tests

TROI-3,4,5 실험에서 동적압력이 측정되었다. 또한 TROI-4,5 에서는 폭발음이 관측되었고, 반응용기의 기계적인 손상이 발생되었다. 그림 3 에는 TROI-4, 5 에서 측정된 동적압력의 시간에 따른 추이를 나타낸것이다. TROI-4 에서 동적압력파의 특징은 그 피크가 2MPa 에 이르며 거의 피크만 있는 것으로 판단된다. TROI-5 에서의 동적압력파는 그피크는 1.0MPa 로서 TROI-4 보다는 작지만 피크를 밀어주는 팽창압력파형이 수 ms 동안 진행됨을 보여 주고 있다. 그 폭발음 및 기계적인 파손정도를 고려할 때 TROI-5 실험이 TROI-4 실험에 비해 강력했으며, 이는 다음에 논의될 데브리분석에서도 일관성을 보여준다. 이렇게 증기폭발의 폭발력은 폭발압력파의 피크치보다는 그 피크압력을 밀어주는 팽창압력파에 영향을 받음을 알 수 있다.

4.4. 하부압력용기 온도 및 압력

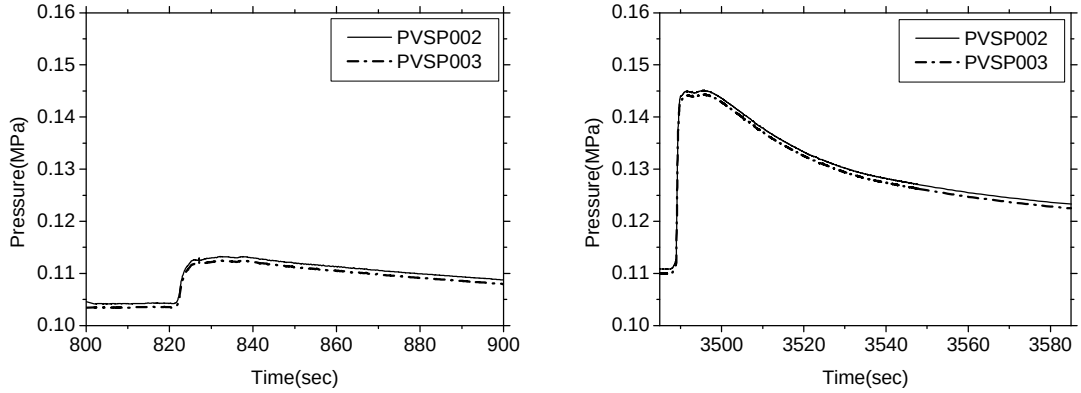


그림 4. Transient Pressure Profiles in the Pressure Vessel Atmosphere at TROI-2, 5 tests

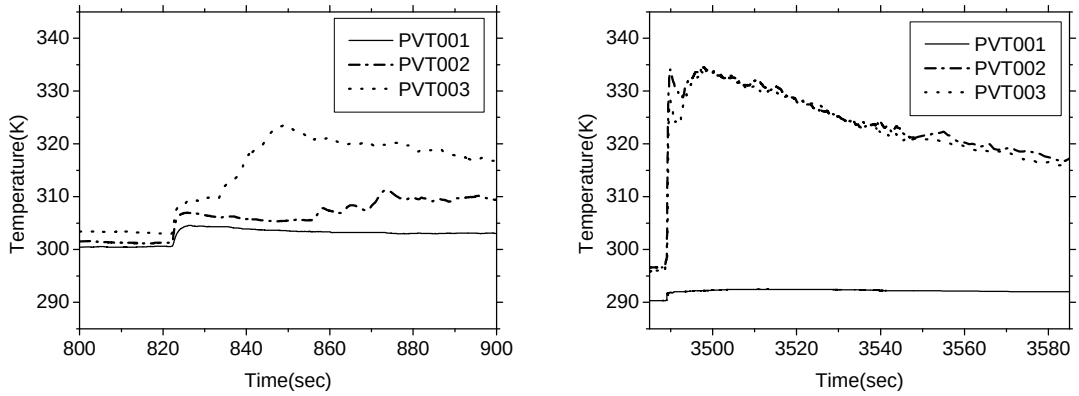


그림 5. Transient Temperature in the Pressure Vessel Atmosphere at TROI 2, 5 tests

표 2 에서 보면 자발증기폭발이 발생한 TROI-4,5 경우 하부압력용기의 압력증가분은 0.03MPa 로서 자발증기폭발이 발생하지 않은 TROI 2,3 의 경우 0.01MPa 인것에 비해 매우 크다. 그림 4 에서는 TROI-2,5 실험에 대한 시간에 따른 하부압력용기의 대기압력의 시간에 따른 추이를 나타낸 것으로 자발증기폭발이 발생한 TROI-5 에서는 그 압력증가분 뿐만 아니라 증가율에 있어서도 그 반응이 매우 격렬함을 알 수 있다. 또한 TROI-5 대기압력파형의 피크부분에서는 압력의 급격한 증가 후 약간 감소하였다가 다시 증가하는 것을 보 수 있는데 첫번째 피크는 증기폭발팽창과정으로 인한 대기의 압축과정으로 판단되며, 두번째 피크는 용융물로부터 열전달로 인한 것으로 판단된다.

표 2 와 그림 5 에서 보여주는 압력용기 대기온도의 추이는 대기압력의 추이와 일관성을 보여주고 있다. 표 2 에서 제시된 바와 같이 자발증기폭발이 발생한 TROI 4,5 실험에서의 대기온도증가분은 25K 로 자발증기폭발이 발생하지 않은 TROI-1,2,3 의 15K 에 비해 거의 1.7 배에 달한다. 그림 5 에서 TROI-5 의 대기온도증가는 TROI-1 에 비해서 매우 빠르다. 특히 TROI-5 의 대기온도는 대기압력과 같이 2 개의 피크치를 가지고 있는데, 첫번째 피크는 증기폭발로 인한 압축과정에서 나타난 것으로 판단되며 두번째 피크는 용융물로부터의 열전달에 의한 것으로 판단된다.

4.5. 냉각수온도

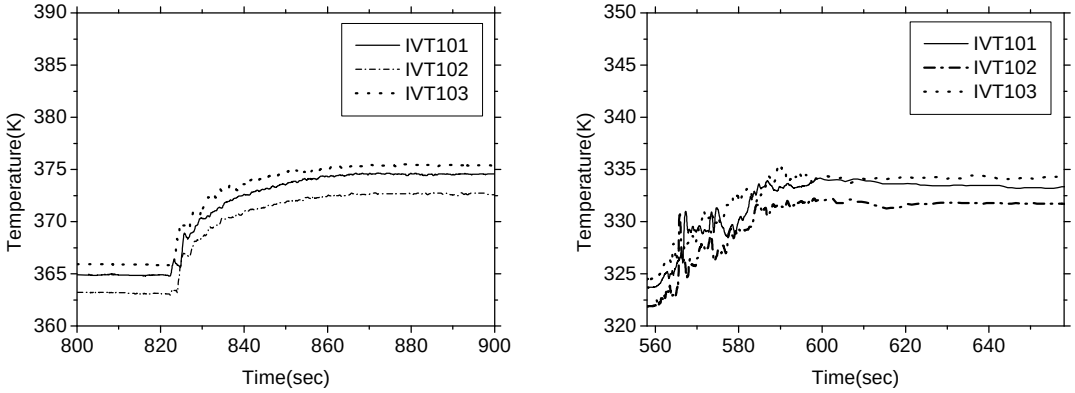


그림 6. Transient Temperature Profiles of the Water at TROI 2, 3 tests

TROI 4,5 의 경우 반응용기가 자발증기폭발로 인해 파손되었기 때문에 냉각수온도 측정에 불가능 하였다. TROI-1,2,3 의 경우를 보면 냉각수의 온도는 10K 정도이며, 그림 6 에 주어진 봐와 같이 대기온도증가와 비교하면 그 증가율이 작음을 알 수 있다.

4.6. 데브리분석

실험이 완료된후 5 개의 실험에 대해서 메쉬를 사용하여 그 크기별 분석을 시도하였으며 그 결과가 표 2 에 제시되어 있으며, 대표적인 크기별 사진이 그림 7 에 제시되어 있다. 본 TROI-1~5 실험에서는 대표적으로 2 가지 종류의 데브리로 나뉠 수 있는데 하나는 껍질형태의 것(그림 7.a)이며 또 하나는 구형알갱이 형태의 것이다. 폭발이 발생하지 않을 경우 크기가 5cm 이상인 껍질형태의 것과 크기가 1cm 이상인 구형 알갱이형태의 것(그림 7.c)들이 다량으로 수집되었다. TROI-1,2,3 의 실험에서는 투입된 용융물의 전체 질량의 50%정도의 큰소라모양의 껍질이 수집되었으며 20%정도의 큰알갱이들이 수집되었다. 기존 UO_2-ZrO_2/냉각수 반응실험에서는 증기폭발이 없을 경우에도 그 알갱이들의 크기가 0.5cm 이하의 것들이 였는데 비해 ZrO2 실험의 알갱이 들은 제법 큰 것이 주목된다.

자발증기폭발이 발생한 경우에는 2mm 이하의 크기를 가진 작은 구형알갱이(그림 7.e) 들이 많이 수집되었으며, 특히 710μm 이하의 분말형태의 것(그림 7.f)들도 매우 많이 수집되었다. 반면에 자발증기폭발이 발생치 않은 경우에 많이 검출되었던 1cm 이상의 큰 알갱이들은 현저히 감소하였으며, 폭발력이 가장 센것으로 판단되는 TROI-5 실험에서는 1cm 이상의 큰알갱이들은 거의 관측될수 없었다. 이것은 1cm 이상의 큰알갱이들이 주로 폭발에 참여하면서 아주 작은 분말형태의 것들로 분쇄된 것으로 판단된다. 또한 자발폭발이 발생치 않았을때는 큰 소라모양의 껍질밖에 발생치 않았으나, 자발폭발이 발생한 TROI-4,5 에서는 1cm 보다 작은 껍질파편이 형성되었다. 이것은 증기폭발 팽창과정시에 유동이 큰 소라껍질을 부순것으로 보인다.

증기폭발이 발생한 경우와 발생치 않은 경우에서 데브리분포의 주요차이점은 큰 알갱이들과 분말형태의 알갱이의 비율에서 찾아볼 수 있다. 분말형태의 것들은 자발증기폭발이 발생치 않은 TROI-1,2,3 에서는 현저히 그 양이 적으며 자발증기폭발이 발생한 TROI-4,5 에서는 그양이 제법 수집되었다. 또한, 증기폭발의 강도가 상대적으로 큰 TROI-5 에서는 0.5kg 의 분말이 수집되어 0.26kg 이 수집된 TROI-4 와 비교할 때 폭발의 강도는 분말형태의 데브리가 수집된 정도에 비례하는 것을 알 수가 있다.

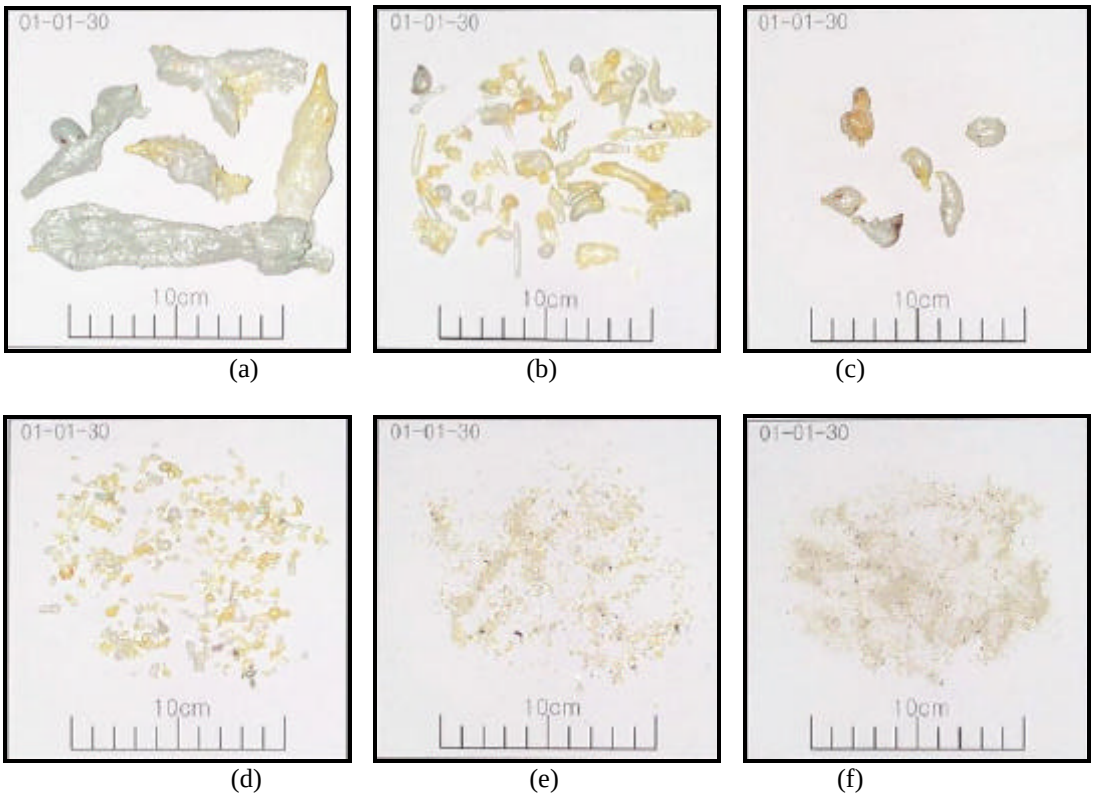


그림 7. Debris Configurations (a. Crust 5~10cm, b. Crust 1~2cm, c. Particle 1~2cm, d: Particle-dominated 2~5mm, e. Particle 0.710μm~2mm, f. Particle <710 m)

4.7. 증기폭발 대 냉각

위에서 논의 한 바와 같이 용융물/냉각수 반응실험에서 그 반응의 격렬함은 동적압력, 폭음, 분말 데브리, 압력증가율, 그리고 온도증가율 등에서 구분될 수 있음을 알 수 있다. 본 논문에서는 TROI-2 실험과 TROI-5 실험을 대표적인 경우로 선택하여 이를 정리할 수 있다. TROI-5 실험에서는 그 지지 압력이 수 ms 에 이르고 피크가 1MPa 에 이르는 동적압력이 측정되었으며, 상당히 큰 폭음을 관측할 수 있었다. 또한 압력용기의 대기압력 및 온도의 증가율이 매우 크고 대기압축의 증거를 발견할 수 있었으며, 데브리 분석에서 미세한 분말이 0.5kg 정도가 추출되었다.

반면 TROI-2 실험에서는 동적압력 및 폭음을 측정할 수 없었으며, 대기압력 및 온도증가율도 매우 미미 하였다. 또한 데브리 분석에서 미세한 분말은 거의 추출되지 않았으며, 반대로 상당히 굵은 알갱이 들이 다량 추출되었다. 이러한 거동들은 TROI-1,3,4 실험에서도 일관된 경향을 보이고 있다.

5. 결론

한국원자력연구소에서는 “Test for Real cOrium Interaction with water (TROI)”라고 명명된 중간규모의 노심용융물/냉각수 반응실험을 수행하고 있다. 이 실험을 위하여 TROI 실험장치가 건립되었고, 열수력학적 인자를 측정하는 계측시스템이 구축되었다. TROI 실험의 첫번째 시리즈로서 5 회의 TROI-ZrO_2 실험이 수행되었으며, 추가 실험 후 UO_2/ZrO_2 혼합용융물을 이용한 노심용융물/냉각수 반응이 수행될 예정이다. 본 논문에서는 TROI-ZrO_2 실험결과에 관하여 논의하였으며 그 내용은 다음과 같다.

(1) TROI 실험장치를 이용한 ZrO_2/냉각수 반응에서 자발증기폭발이 발생하였다.

(2) 동적압력, 폭음, 반응용기의 기계적 손상, 대기압력 및 온도추이, 데브리 분석 등을 통하여 용융물/냉각수 반응에 대해 일관성 있는 평가를 할 수 있었다.

(3) ZrO_2/냉각수 반응시 증기폭발이 발생하지 않은 경우 그 데브리 분석결과 1cm 이상의 큰 알갱이들이 다량으로 수집되어 기존 UO_2-ZrO_2/냉각수 실험결과에서 0.5cm 이하가 주류인 것과는 대조적이다.

결론적으로, 본 연구에서는 세계 처음으로 ZrO_2/냉각수 반응에서의 자발적인 증기폭발을 관측하였다. 이것은 ZrO_2가 노심용융물의 20%정도를 차지하는 주요 물질인 것을 고려하면 UO_2-ZrO_2/냉각수 반응에서도 자발증기폭발 가능성을 배제할 수 없는 것을 의미한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 중장기과제에서 재정적인 지원을 받았습니다. 이 실험준비를 위해 황인태 씨가 수고하셨습니다.

참고문헌

1. X. Chen, R. Luo, W. W. Yuen, T. G. Theofanous, “Experimental simulation of microinteractions in large scale explosions”, Proc. of final program of CSNI specialist meeting on fuel coolant interactions, pp. 364-390, JAERI-Tokai, Japan, 1997.
2. M. K. Denham, A. P. Taylor, and D. F. Fletcher, “Experiments on the mixing of molten Uranium dioxide with water and initial comparisons with Chymes code calculations”, Proc. of NURETH-5, Vol. IV, Utah, SA, 1992.
3. D. E. Mitchell, M. L. Corradini, W. W. Tarbell, Intermediate scale steam explosion phenomena: Experiments and analysis, SAND81-0124, SNL ,1981.
4. N. Yamano, Y. Maruyama, T. Kudo, A. Hidaka, J. Sugimoto, “Pehnomenological studies on melt-coolant interactions in the ALPHA program”, Nuclear Engineering and Design, Vol. 155, pp.369-389, 1995.
5. I Huhtiniemi, D. Magallon, and H. Hohmann, “Results of recent KROTOS FCI tests: Alumina vs. Corium Melts”, Proc. of final program of CSNI specialist meeting on fuel coolant interactions, JAERI-Tokai, Japan, May 19-21, 1997.
6. Huhtiniemi and D. Magallon, “Insight into Steam Explosions with Corium Melts in KROTOS”, Proc. of NURETH-9, San-Francisco, California, U.S.A. October 1999.
7. D. Magallon, I. Huhtiniemi, and H. Hohmann, “Lessens learnt from FARO/TERMOS corium melt quenching experiments”, Proc. of final program of CSNI specialist meeting on fuel coolant interactions, JAERI-Tokai, Japan, May 19-21, 1997.
8. D. Magallon and I. Huhtiniemi, “Corium melt quenching tests at low pressure and subcooling water in FARO”, Proc. of NURETH-9, San-Francisco, California, U.S.A. October 1999.
9. M. L. Corradini , “A Review of Experiments for Accident Analysis”, Nuclear Safety, Vol. 32, No. 3, July-September, 1991.
10. 홍성완, 박익규, 김희동, 노심 용융물과 냉각수 반응시 증기 폭발 가능성 고찰, 한국 원자력 학회 추계 학술대회 발표 논문집, p.213, 1999.
11. J. H. Song et al, Experimental research on the multi-dimensional fuel-coolant interaction using reactor material, 한국원자력학회 추계학술대회 발표논문집, 1999.
12. S. W. Hong, B. T. Min, J. H. Song, H. D. Kim, J. K. Choi, “A Study on the Melting and Release of Refractory Materials using Induction Skull Melting”, Proc. of NTHAS2, Fukuoka, 2000.