

원자로 물질을 이용한 증기폭발 실험

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

Experiments on Steam Explosion Using Reactor Materials

J.H. Kim*, I.K. Park*, S.W. Hong*, B.T. Min*, Y.S. Shin*, J.H. Song** and H.D. Kim**

Keywords : Steam Explosion, Corium, TROI Experiment, Dynamic Pressure, Dynamic Load, Conversion Ratio

Abstract

A series of steam explosion experiments using real core materials of ZrO_2 and corium(a mixture of ZrO_2 and UO_2) has been performed to evaluate the risk of steam explosion load in nuclear power plants. Surprisingly, spontaneous steam explosions are observed for both materials, which have been thought to be inexplusive so far. The dynamic pressure and morphology of the debris clearly indicate the evidence of an explosion. The experimental results also indicate that ZrO_2 is more explosive than corium.

1. 서론

원전에서의 증기폭발은 노심용융사고(중대사고)에 기인하는 현상으로 원자로 압력용기나 격납건물의 건전성을 해칠 수 있다. 고온의 노심 용융물이 찬 냉각수와 접촉할 때, 고온 용융물의 열 에너지가 찬 물질로 전달이 되는데, 때로는 서서히 때로는 파괴적인 압력파를 동반하며 급격히 열전달된다. 전자를 냉각(quenching)이라고 하고 후자를 증기폭발(steam explosion)이라 한다.

증기폭발이 격납건물의 건전성을 해칠 수 있기 때문에, 이것은 중대사고에서 중요한 쟁점이 되어왔고, 이에 대한 많은 실험적, 해석적 연구들이 수행되었다. 실험적 연구들로는 소형 실험[1], 중간 규모의 실험[2, 3, 4], 노심 원물질을 이용한 대규모 실험[5, 6], 그리고 폴리머 수용액을 사용하여 증기폭발을 억제하기 위한 실험[7, 8] 등이 있다.

비록 그 동안의 증기폭발 연구에서 많은 성과가 있었지만, 아직까지 증기폭발이 원자로용기 하부반구의 건전성에 영향을 미치는지, 또 노심용융물(코륨)이 증기폭발을 일으키는 지에 대한 쟁점이 남아 있다[9]. 그러나, JRC-Ispra의 FARO/KROTOS 실험의 종결로 코륨을 사용하는 증기폭발 실험이 한국 원자력 연구소에서 수행하는 TROI 실험 밖에 없다. TROI 실험은 증기폭발에서 발생하는 동하중을 적절히 평가하기 위한 실험 데이터를 코드 계산에 제공하기 위하여 수행되었다. 이 실험은 먼저 예비실험으로 ZrO_2 를 용융물로 하여 수행되었으며[10, 11], 본 실험에서는 코륨을 용융물로 하여 수행되었다. 여기에서는 ZrO_2 를 사용한 실험과 코륨을 사용한 실험 각각 1개씩을 비교 기술

하였다.

2. 실험 장치

TROI실험장치는 그림 1에 나타나 있다. 실험장치는 용융로, 용융로 보호용기, 슬라이딩밸브, 압력용기와 반응용기 등으로 구성되어 있다. 용융로 보호용기와 압력용기는 212°C에서 20기압의 압력을 견디게 설계되었다. 용융로 보호용기는 고온(>3000K)의 용융물을 담는 도가니가 설치되어 있으므로 용융물에서 발생하는 복사열을 지탱할 수 있도록 water jacket으로 설치되어 있다. 여기에 사용된 가열방법은 유도 가열법으로 출력 150kW, 주파수 50kHz를 사용하였다.

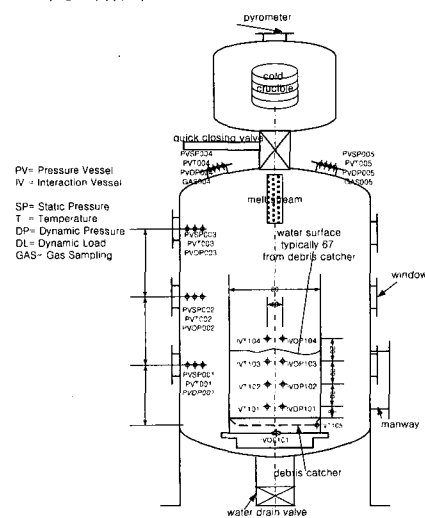


그림 1. Schematic diagram of TROI facility

용융과정 중에 용융물의 온도가 매우 높아 보통의 도가니로는 고온을 견딜 수가 없다. 이러한 고온을 견딜 수 있는 물질로는 텅스텐과 폴리브덴 등 몇 가지 밖에 없

* 원자력연구소 열수력안전연구팀, kimjh@kaeri.re.kr

** 원자력연구소 열수력안전연구팀, dosa@kaeri.re.kr

고, 또한 그 물질들은 가격이 매우 비싸다. 그래서 이 실험에서는 Lebedev Institute of the Academy Science of the USSR에서 개발된[12] 저온도가니 유도가열법(cold crucible induction heating method)을 사용하였다.

압력용기에는 온도 센서, 동압계, 정압계, 가스 포집 장치 및 고속 카메라가 설치되어 있고, 반응용기에는 온도 센서, 동압계 및 동하중 센서가 설치되어 있다. 주요 계측 인자와 사양이 표 1에 나타나 있다.

표 1. Sensor description in TROI tests

Parameter	Sensing location	Sensor description
Coolant temperature	IVT101 ~ IVT104	1mm, Thermocouple
Dynamic pressure in the coolant	IVDP101 ~ IVDP104	PCB model 112A <60MPa
Dynamic load at the test section bottom	IVDL101	PCB model 210B50 <50000 lb _f
Atmosphere temperature in the pressure vessel	PVT001 ~ PVT005	1.6mm, Thermocouple
Transient pressure in the furnace vessel	FVSP1	Druck model PMP4060 <35bar
Transient pressure in the pressure vessel	PVSP002, PVSP003	Druck model PMP4060 <35bar
Dynamic pressure in the pressure vessel	PVDP004, PVDP005	PCB model 112A <20MPa

용융물의 온도 측정은 용융로 보호용기 상단에 설치된 가시창을 통하여 2색 적외선 온도계(IRCON, 1500~3500°C)를 사용하여 측정하였다.

여러 개의 K-type 열전대가 반응용기의 물온도와 압력용기의 대기온도를 측정하기 위하여 설치되었다. 그리고 압전형 압력계(Piezoelectric pressure transducer, PCB Piezotronics Inc., Model 112A, maximum range: 69MPa과 6.9MPa)가 증기폭발시 동압을 측정하기 위해 반응용기와 압력용기에 각각 설치되었고, 증기폭발시에 하부로 전달되는 동하중은 재기 위해 반응용기 하부에 설치된 load cell을 이용하여 측정하였다. 또, 정압계(Druck Co., Model PMP4060, maximum range: 35bar)가 압력용기와 용융로 보호 용기에 설치되어 정압을 측정하였다. 데이터 획득 장치로는 VXI system(Agilent Technology)을 사용하여 정압이나 온도와 같은 느린 신호와 증기폭발시의 빠른 동적 신호를 한꺼번에 받을 수 있었다.

3. 실험결과

코륨(UO₂ : ZrO₂ = 70 : 30의 비율) 및 ZrO₂를 용융물로 사용한 TROI 실험 중 TROI-14 실험과 TROI-15 두 실험을 비교하였다. 이 실험의 실험 인자와 주요 결과는 표 2에 나타나 있다.

3.1 TROI-14 실험

TROI-14 실험은 코륨 용융물과 냉각수와의 반응시 증기폭발의 발생 유무를 알아보기 위해 수행되었다. 이 실험에서는 13.7kg의 코륨을 용융로에 충전하였는데 그 중

6.545kg의 용융물이 상온, 대기압의 물이 67cm까지 채워져 있는 반응용기에 낙하되었다. 그림 2는 용융물의 표면 온도를 보여준다. 용융물의 온도는 최고 3500K까지 증가하였으며 방출 직전의 온도는 약 3000K이었다.

표 2. Initial conditions and test results

	TROI test number	Unit	14	15
			Date	12/07/01
Melt	Initial Charge Composition	[w/o]	70/30	0/100
	UO ₂ / ZrO ₂			
	Temperature	[K]	3000	3750
	Charged mass	[kg]	13.7	9.5
	Initiator mass	[kg]	0.1	0.1
	Released mass	[kg]	6.545	2.280
	Initial jet diameter	[m]	-	-
	Free fall in gas	[m]	3.8	3.8
Test Section	Water mass	[kg]	189	189
	Initial Height	[cm]	67	67
	Final height	[m]	-	-
	Cross section	[m ²]	0.283	0.283
	Initial temperature	[K]	285	290
	Sub-cooling	[K]	88	83
	Pressure Vessel	Initial pressure(air)	[MPa]	0.105
Free volume		[m ³]	8.032	8.032
Results	Maximum PV pressurization	[MPa]	0.015	0.007
	Time to reach peak	[sec]	2	3
	Maximum PV heat-up	[K]	30	5
	Time to stabilize	[sec]	<1	30
	Maximum water heat-up	[K]	12	41
	Time to reach peak	[sec]	<1	20
	Steam explosion		SE	SE
	Dynamic pressure peak	[MPa]	0.8	11.5
	Duration	μsec	0.5ms	0.25ms
	Impulse	kN	210	>250
	Duration	μsec	13ms	10ms
Debris	Total	[kg]	6.545	2.280
	>6.35mm	[kg]	0.290	0.465
	4.75mm ~ 6.35mm	[kg]	0.455	0.135
	2.0mm ~ 4.75mm	[kg]	2.525	0.275
	1.0mm ~ 2.0mm	[kg]	1.145	0.330
	0.71mm ~ 1.0mm	[kg]	0.475	0.120
	0.425mm ~ 0.71mm	[kg]	0.630	0.245
<0.425mm	[kg]	1.025	0.710	
H2 gas	Before/After the interaction	[ppm]	93/1200	4/3
	Mass	[g]	0.79	0.002

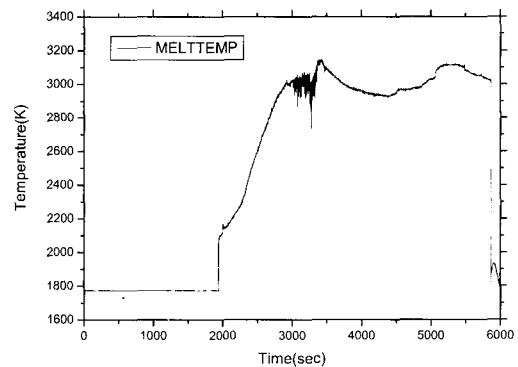


그림 2. Melt temperature in TROI-14 test

그림 3은 반응용기 내에서의 동압을 보여준다. 그 크기는 0.8MPa로서 낮게 나타났다. 그림에서 보는 바와 같이 여러 개의 피크 치가 보이는데, 이로부터 다중 폭발이 일어난 것으로 생각된다. 그림 4는 반응용기 하부로의 동하중을 보여준다. 그 최대치는 약 210kN으로 나타났으며, 지속 시간은 13ms로 나타났다. 표 2에서 보는 것처럼, 반응용기 내의 물온도와 압력용기 내의 대기의 온도는 각각 최대 12K와 30K까지 증가하였다. 그림 5은 반응후 파편의 분포를 보여 주는데, 증기폭발로 인해 미세파편(0.71mm 이하)이 26%정도 생성되었다.

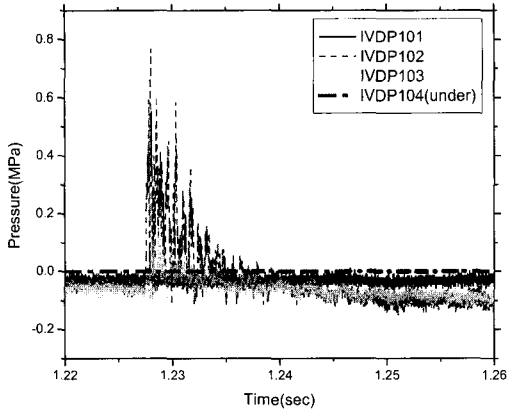


그림 3. Dynamic pressures in TROI-14 test

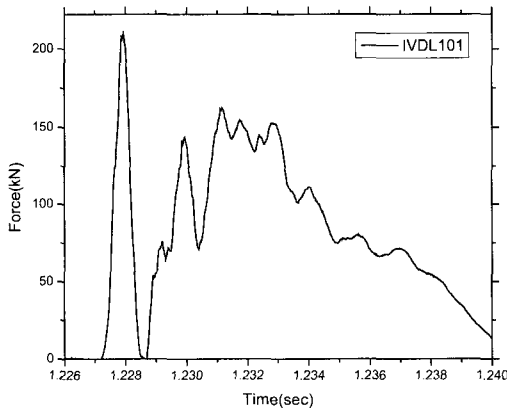


그림 4. Dynamic loads in TROI-14 test

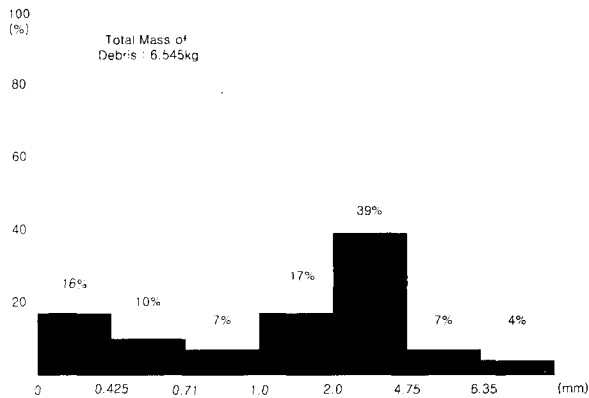


그림 5. Debris distribution in TROI-14 test

3.2 TROI-15 실험

TROI-15 실험은 노심물질 중의 하나인 ZrO_2 와 냉각수와의 반응시 증기폭발의 발생 유무를 알아보기 위해 수행되었다. 이 실험에서는 9.5kg의 ZrO_2 분말을 용융로에 충전하였는데 그 중 2.280kg의 용융물이 상온, 대기압의 물이 67cm까지 채워져 있는 반응용기에 낙하되었다. 그림 6은 용융물의 온도를 보여준다. 용융물의 온도는 TROI-14 실험에서와는 완전히 다르고 복잡하게 나타났다. 처음의 온도 증가는 발화제로 넣은 Zr 링의 산화에 의한 발열의 영향으로 보인다. Zr 링의 산화로 치솟은 온도는 용융물 온도 측정을 위해 인위적으로 만들어 놓은 구멍이 발생가스의 고화로 막히면서 측정되지 못하다가 구멍이 다시 뚫리면서 서서히 증가해 3750K까지 증가하였다.

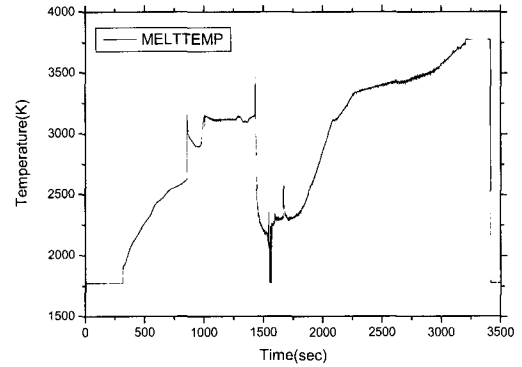


그림 6. Melt temperature in TROI-15 test

그림 7은 반응용기 내에서의 동압을 보여준다. 그 크기는 11.5MPa로서 TROI-14실험에 비해 매우 높게 나타났다. 그림 8은 반응용기 하부로의 동하중을 보여준다. 그 최대치는 이 실험에서 사용한 load cell의 측정 한계치인 250kN을 훨씬 초과하였으며, 그 지속 시간은 10ms로 나타났다. 압력용기 내의 대기 온도와 반응용기 내의 물온도는 각각 최대 23K와 24K까지 증가하였다. 그림 9는 반응후 파편의 분포를 보여 주는데, TROI-14 실험보다 더 많은 분률인 42%의 미세 파편이 발생하였다. 이것이 이 실험에서 TROI-14 실험보다 더 강력한 증기폭발이 일어난 것을 설명하고 있다.

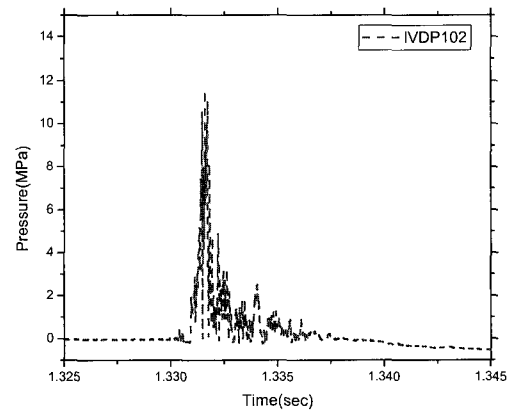


그림 7. Dynamic pressures in TROI-15 test

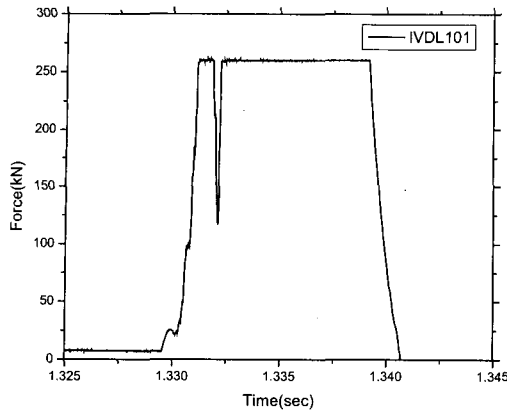


그림 8. Dynamic loads in TROI-15 test

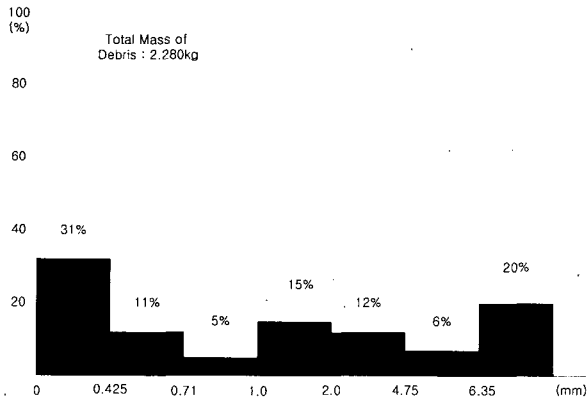


그림 9. Debris distribution in TROI-15 test

4. 결론

실제 원자로 물질의 기폭성을 평가하기 위한 증기폭발 실험을 수행하였다. 코륨과 ZrO_2 를 용융물로 하여 상온의 냉각수와 반응시킨 결과 자발적인 증기폭발이 일어났다. ZrO_2 용융물의 경우 코륨보다 증기폭발시 발생하는 압력과 동하중이 크며, 그때 미세파편도 많이 발생하였다. 향후에 체계적인 실험을 통해 실제 원자로 조건에서 코륨의 기폭성 및 에너지 변환률(conversion ratio)을 평가하고자 한다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 과제에서 재정적인 지원을 받았습니다.

참고문헌

- [1] K. MATSUMURA and H. Nariai, "Self-Triggering Mechanism of Vapor Explosions for a Molten Tin and Water System," *Journal of Nuclear Science and Technology*, **33**, No.4 (1996), pp.298-306.
- [2] D. E. MITCHELL, M. L. Corradini and W. W. Tarbell, "Intermediate scale steam explosion phenomena: Experiments and analysis," SAND81-0124, SNL(1981).
- [3] N. YAMANO, Y. Maruyama, T. Kudo, A. Hidaka and J. Sugimoto, "Phenomenological Studies on Melt-coolant Interactions in the ALPHA Program," *Nuclear Engineering and Design*, **155** (1995), pp.369~389.
- [4] D. H. CHO, D. R. Armstrong and W. H. Gunther, "Experiments on interactions between Zirconium-containing melt and water," NUREG/CR-5372 (1998).
- [5] D. MAGALLON, I. Huhtiniemi, and H. Hohmann, "Lessons learnt from FARO/TERMOS corium melt quenching experiments," *Nuclear Engineering and Design*, **189** (1999) pp.223-238.
- [6] D. MAGALLON and I. Huhtiniemi, "Corium melt quenching tests at low pressure and subcooled water in FARO," *Nuclear Engineering and Design*, **204** (2001), pp.369-376.
- [7] M. F. DOWLING, B. M. Ip and S. I. Abdel-Khalik, "Suppression of Vapor Explosions by Dilute Aqueous Polymer Solutions," *Nuclear Science and Engineering*, **113** (1993), pp.300-313.
- [8] K. H. BANG and G. D. Jeun, "Minimum Film Boiling Temperatures for Spheres in Dilute Aqueous Polymer Solutions and Implications for the Suppression of Vapor Explosions," *Journal of Korean Nuclear Society*, **27**, No.4 (1995), pp.544-554.
- [9] J. H. SONG, I. K. Park, Y. J. Chang, Y. S. Shin, J. H. Kim, B. T. Min, S. W. Hong and H. D. Kim, "Experiments on the interactions of molten ZrO_2 with water using TROI facility," *Nuclear Engineering and Design*, **213** (2002), pp.97-110.
- [10] 박익규 외, "TROI 실험장치에서 수행된 ZrO_2 /냉각수 FCI실험", *한국원자력학회 춘계학술 발표회 논문집* (2001).
- [11] 김종환 외, " ZrO_2 와 UO_2/ZrO_2 용융물의 FCI 특성에 대한 실험적 연구", *한국원자력학회 추계학술 발표회 논문집* (2001).
- [12] V. I. ALEKSANDROV, V. V. Osiko, A. M. Prokhorov and V. M. Tatarntsev, *Synthesis and crystal growth of refractory materials by RF melting in a cold container*, Chapter 6, Current topics in materials science, Vol. 1, edited by E. Kaldis, North-Holland publishing company (1978).