

# 금속이 함유된 코륨을 이용한 TROI 증기폭발 실험

김종환<sup>†</sup> · 민병태\* · 홍성완\* · 홍성호\* · 박익규\* · 송진호\* · 김희동\*

## The TROI Steam Explosion Experiments Using Metal-added Corium

Jong-Hwan Kim, Beong-Tae Min, Seong-Wan Hong, Seong-Ho Hong, Ik-Kyu Park,  
Jin-Ho Song and Hee-Dong Kim

**Key Words :** Steam Explosion(증기폭발), TROI Facility(TROI 실험장치), Corium(코륨), Severe Accident(중대사고), External Trigger(외부기폭)

### Abstract

Two steam explosion experiments were performed in the TROI facility by using metal-added molten corium (core material) which is produced during a postulated severe accident in the nuclear reactor. A triggered steam explosion occurred in a case, but no triggered steam explosion did in the other case. The dynamic pressure and the dynamic load measured in the former experiment show a stronger explosion than those performed previously with oxidic corium. A steam explosion is prohibited when the melt temperature is low, because the melt is easily solidified to prevent a liquid-liquid interaction.

## 1. 서 론

### 1.1 증기폭발 연구의 배경

원자력 발전소에서 중대사고가 발생하여 원자로 노심이 녹아 내리면 냉각수와 용융물이 반응하여 급격히 증기가 발생되고 이로 인해 파괴적인 압력파를 동반하는 증기폭발이 일어날 수 있다. 증기폭발이 발생하면 원자로 압력용기가 손상되거나 격납건물이 파손되어 방사성 물질이 격납건물 외부로 유출되고 나아가 대중의 안전이 위협받을 수도 있다. 이러한 증기폭발 현상은 노심이 용융되었던 미국의 TMI 원전 사고 이후 중대사고 연구에서 중요한 쟁점이 되어왔고, 이에 대한 많은 연구들이 수행되었다[1-6].

### 1.2 TROI 증기폭발 실험의 필요성 및 범위

지금까지 증기폭발 연구에서 많은 성과가 있었지만, 아직까지 원자로 노심의 용융 혼합물인 코륨이 증기폭발을 일으키는지 등에 대한 쟁점이 남아 있다[7]. 지금까지 ANL 의 ZREX 실험[2]이나 JRC-Ispra 의 FARO/KROTOS 실험[3-6]에서는 각각 zirconia 나 코륨의 자발적인 폭발이 일어나지 않는다고 알려져 왔다. 그러나 원자력 연구소에서 수행한 TROI 실험에서는 zirconia 나 코륨에서 용융물의 성분비에 따라 자발적인 그리고 외부기폭에 의한 증기폭발의 발생이 발견되었다[8,9].

실제 노심 용융물은 핵연료(UO<sub>2</sub>), 피복재(Zr), 산화 피복재(ZrO<sub>2</sub>)와 구조재(스틸)로 구성되어 있으므로 용융시 우라늄 금속이 화학반응에 의하여 석출된다[10]. 이 금속은 물과 반응하여 수소를 생성시켜 증기폭발성을 증가시킨다. 그러므로, 노심 원물질의 폭발성을 알기 위해서는 금속이 함유된 코륨을 사용한 증기폭발 실험 연구를 수행하여야 한다.

본 논문에서는 원자로 노심 원물질과 가까운 금속이 함유된 코륨 용융물을 사용한 TROI 실험

<sup>†</sup> 한국원자력연구원  
E-mail : kimjh@kaeri.re.kr  
TEL : (042)868-2649 FAX : (042)863-3689

\* 한국원자력연구원

(TROI-51 & 52)에 대하여 기술한다.

## 2. TROI 실험 장치

TROI 실험장치(TROI-51)는 그림 1에 나타나 있다. 실험장치는 용융로, 용융로 보호용기, 격리 밸브, 압력용기와 반응용기 등으로 구성되어 있으며 자세한 내용은 참고문헌[11]에 기술되어 있다. 압

력용기에는 온도 센서, 동압계, 정압계, 가스 포집 장치 및 고속 카메라가 설치되어 있고, 반응용기에는 온도 센서, 동압계 및 동하중 센서가 설치되어 있다. 용융물의 온도 측정은 용융로 보호용기 상단에 설치된 가시창을 통하여 2색 적외선 온도계로 측정하였다. TROI-51 실험에 대한 자세한 측정변수와 사양은 표 1에 나타나 있다. 그리고 외부폭장치로서는 화약(PETN, 1g)을 사용하였다.

Table 1 Measurement parameters and their descriptions in TROI-51

Parameter	Sensing location	Sensor description
Melt temperature	Melt delivery path	IRCON pyrometer model 3R-35C15-0-0-0-1 (1500 ~ 3500°C)
Coolant temperature	IVT101 ~ IVT106	0.5mm, Thermocouple
Dynamic pressure in the coolant	IVDP101 ~ IVDP106	KISTLER 6005 <100MPa
Under-water dynamic pressure	UWDP101,UWDP102	PCB model W138A26 <160MPa
Dynamic load at the test section bottom	IVDL101	KISTLER 9081A <650kN
Ambient temperature in the pressure vessel	PVT001 ~ PVT005	1.0mm, Thermocouple
Static pressure in the furnace vessel	FVSP001	Rosemount model 1511 <2.0MPa
Static pressure in the pressure vessel	PVSP004, PVSP005	Druck model PMP4060 <3.5MPa
Dynamic pressure in the pressure vessel	PVDP004, PVDP005	KISTLER 6061B <25MPa
Melt velocity	IVT201 ~ IVT209	0.5mm, Thermocouple
Void Fraction	VFDP101 ~ VFDP103	Honeywell DP ST3000 STD924
Gas Sampling for Hydrogen detection	GAS005	Gas sampling bottle

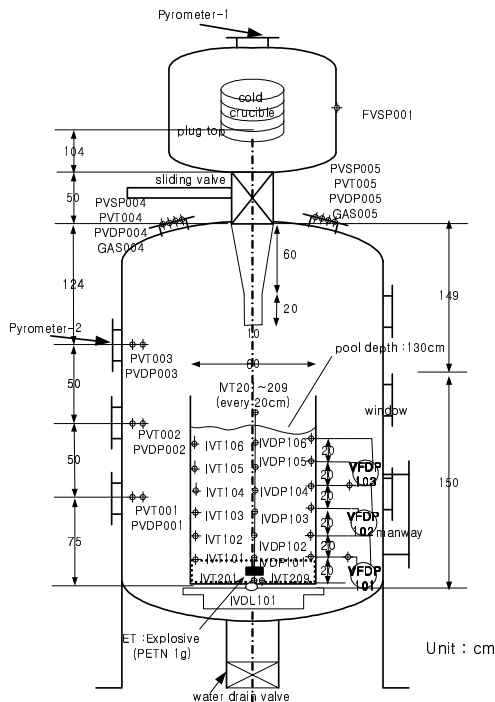


Fig. 1 Schematic diagram of TROI-51

2 색 적외선 온도계(IRCON, 1500~3500°C)는 TROI-51 실험에서는 용융물이 낙하하는 경로의 온도를 측정하기 위해 하부에 설치하였고, TROI-52 실험에서는 용융중의 용융물의 온도를 측정하기 위해 상부에 설치하였다. 용융물의 온도는 회색체 조건으로 가정하여 측정할 수 있었다.

그러나 용융물의 온도 측정은 TROI-51 실험에서 설치한 강화 유리 가시창의 영향을 받았다. 그래서 유리창의 효과를 보정하기 위하여 한국표준연구원에서 교정시험을 수행하였다. 이 시험 결과는 참고문헌에 잘 기술되어 있다[12]. 이 시험에서 강화유리를 통과한 온도는 실제온도보다도 높게 나타났는데, 이는 강화 유리의 투과율이 적외선 온도계의 파장에 유관하므로, 온도측정을 왜곡시켰기 때문이다. 교정시험은 1500 ~ 2700°C에서 이루어 졌으며, 그 교정식은 다음과 같다.

$$T_c = 376.4 + 0.8083 \cdot T_m \quad (1)$$

여기에서,  $T_c$  는 교정온도,  $T_m$  은 측정온도이며, 단위는 절대온도(K)이다.

그러나 가시창을 석영 유리로 교체하였을 경우

에는 방사율의 비를 0.996 으로 하였을 때, 표준온도와 측정온도가 일치하였다. 그리하여 TROI-52 실험에서는 가시창을 석영유리로 교체하여 실험을 수행하였고, 온도보정이 불필요하였다.

### 3. TROI 실험 결과

#### 3.1 개요

금속이 함유된 코륨이 증기폭발에 어떠한 영향을 미치는지를 연구하기 위하여 TROI-51 과 52 의 두 증기폭발 실험이 수행되었다. 용융물이 낙하하여 냉각수가 차있는 반응용기의 바닥에 도달할 때, 외부기폭을 수행하였다.

TROI-51 과 52 실험의 초기조건과 간략한 결과가 표 2 에 나타나 있다. 반응용기에는 대기압, 상온의 물이 수심 1.3m, 직경 0.6m 로 채워져 있었다. 외부기폭은 TROI-51 실험에서는 1.35 초에, 그리고 TROI-52 에서는 1.67 초에 이루어 졌으나, 기폭장치와 DAS(Data Acquisition System)의 오차로 인해 약간의 차이가 발생하였다. 이때, 시간 0 은 도가니 속의 용융물을 배출하기 위해 천공장치가 용융물의 밑바닥을 천공한 시점이다.

#### 3.2 TROI-51 실험

이 실험은 금속이 함유된 코륨을 사용하여 증기폭발을 기폭시키려 수행한 실험이다. 금속 함유 코륨은 용융시에 우라늄을 포함한 금속층을 석출하기에, 석출된 금속층이 증기폭발의 강도에 미치는 영향을 알아보려 하였다.

UO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Zr 과 스테인레스 스틸을 각각 62.8, 13.5, 12.5 과 11.1%의 비율로 도가니에 충전하여 용융하였다. 이 무게비는 OECD/MASCA 실험[10]의 비율을 참조하여 결정된 값이다.

도가니 속에서 용융된 코륨은 냉각수가 채워져 있는 반응용기 속으로 낙하되었다. 용융물의 낙하중에 용융물의 온도를 적외선 온도계로 측정하였으며, 이는 그림 2 에 나타나 있다. 최고 용융물의 온도는 3420K 로 측정되었으며, 강화유리의 효과를 보정한 후의 온도는 3141K 이었다.

용융물 제트가 반응용기 내의 물속을 지나 반응용기의 바닥에 도달하는 시점인 용융물 낙하 후 1.35 초에 외부기폭 장치가 작동하였다.

그림 3 은 반응용기 벽면에 장착된 동압계를 사용하여 측정된 물속에서의 동압을 보여 준다. 두 개의 압력파가 1.327 초와 1.329 초에 측정되었다. 첫 번째 압력파는 바닥(IVDP101)으로부터 상부(IVDP104)로의 압력파의 전파를 보여 준다. 이 압

력파는 바닥에 설치된 외부기폭장치로부터 발생한 것이다. 두 번째 압력파도 상부로부터 바닥으로의 압력파의 전파를 보여 준다. 이것은 용융물 제트의 선단이 바닥에 도달하지 못하고 상부에 있을 때 증기폭발이 외부기폭에 의해 유도된 것이라 생각된다. 유도된 증기폭발에 의한 압력파의 크기는 32 MPa 로서, 금속이 함유되지 않고 산화물만으로 이루어진 코륨(UO<sub>2</sub> 와 ZrO<sub>2</sub>)에서 발생한 증기폭발의 크기(~20 MPa)보다 큰 값이다.

Table 2 Test conditions and results

	TROI test number	Unit	51	52
Melt	Charge Composition	[w/o]	62.8/13.5/12.6/11.1	61.0/16.0/12.2/10.8
	UO <sub>2</sub> / ZrO <sub>2</sub> /Zr/SS			
	Measured temperature	[K]	3420	2650
	Corrected temperature	[K]	3141	2650
	Charged mass	[kg]	13.705	14.105
	Released mass	[kg]	6.309	8.604
	Initial jet diameter	[cm]	6.5	6.5
	Free fall in gas	[m]	3.2	3.2
Test Section	Water mass	[kg]	367	367
	Initial height	[m]	1.3	1.3
	Final height	[m]	1.02	1.23
	Cross section	[m <sup>2</sup> ]	0.283	0.283
	Initial temp.	[K]	294	285
	Sub-cooling	[K]	79	88
Press. Vessel	Initial pressure	[MPa]	0.115	0.116
	Initial temp.	[K]	297	289
	Free volume	[m <sup>3</sup> ]	8.023	8.023
Results	Maximum PV pressurization	[MPa]	0.053	0.070
	Time to reach peak	[s]	3.2	3.0
	PV heat-up	[K]	53	276
	Time to stabilize	[s]	6	10
	Water heat-up	[K]	5	10
	Time to stabilize	[s]	11	18
	Steam explosion		Yes	No
	Triggering (ET) time after melt delivery	[s]	1.35	1.67
	Dynamic pressure	[MPa]	32 (SE)	11 (ET)
	Duration	[ms]	1.1 (SE)	1.2 (ET)
	Impulse	[kN]	580 (SE)	275 (ET)
Duration	[ms]	11 (SE)	9 (ET)	
Debris	Total	[kg]	6.309	8.604
	> 6.35 mm	[kg]	0.595	0.510
	4.75 ~ 6.35 mm	[kg]	0.400	1.005
	2.0 ~ 4.75 mm	[kg]	1.355	3.645
	1.0 ~ 2.0 mm	[kg]	1.075	1.835
	0.71 ~ 1.0 mm	[kg]	0.450	0.515
	0.425 ~ 0.71 mm	[kg]	0.700	0.555
< 0.425 mm	[kg]	1.734	0.539	

그림 4 는 물속에 매달려 있는 동압계로 측정된 동압을 보여 준다. 이는 벽면에 장착된 동압계의 결과와 비슷한 형태를 보여 주는데, 그 크기는 훨씬 작다. 그 이유는 이 동압계가 고정되지 않아

폭발에 의해 움직였기 때문이라 생각된다. 압력과 폭은 약 1.1ms 로 벽면에 장착된 동압계와 비슷하게 나타났다.

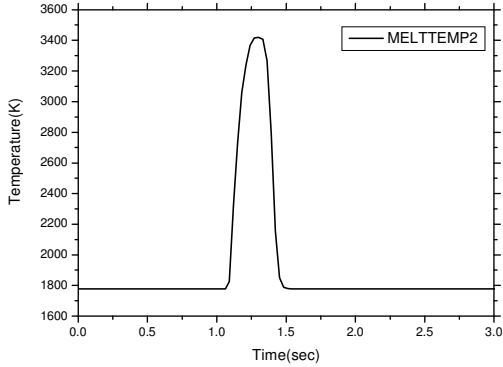


Fig. 2 Melt temperature during delivery in TROI-51

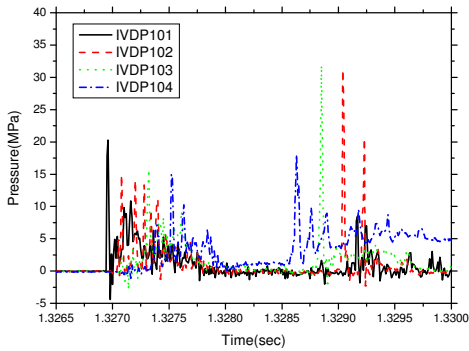


Fig. 3 Dynamic pressures from wall-mounted sensors in TROI-51

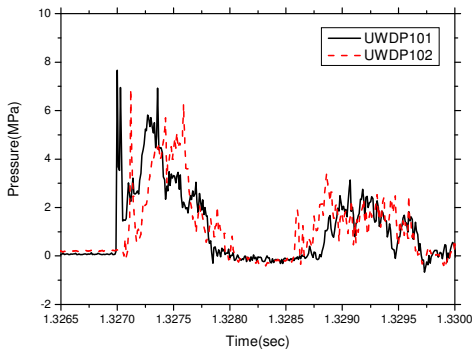


Fig. 4 Dynamic pressures from under-water sensors in TROI-51.

그림 5 는 반응용기 하부로의 동하중을 보여 준

다. 최대 동하중은 580 kN 으로 측정되었으며, 폭은 11ms 이었다. 외부기폭의 시점은 1.327 초임을 보여 준다. 동하중의 크기는 금속이 함유되지 않은 코를을 사용한 실험에서의 크기(~300 kN)보다도 더 컸으며, 이로부터 강력한 증기폭발이 발생하였음을 알 수 있다.

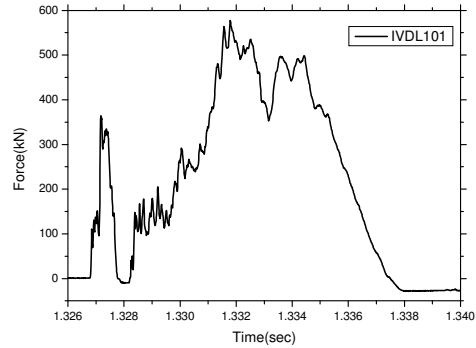


Fig. 5 Dynamic load in TROI-51

그림 6 은 증기폭발 후에 수거된 파편층의 크기 분포를 보여 준다. 이 그림에서는 0.425mm 보다 작은 파편층의 무게비가 27.5%이었다. 이 수치는 증기폭발이 일어나지 않은 경우(~10%)보다 훨씬 크며, 또한 파편층의 질량평균직경(mass mean diameter)도 1.2mm 로 증기폭발이 일어나지 않은 경우(~2mm)보다도 작았다. 미세하게 분쇄된 파편층이 급격한 증기의 발생을 초래하였고, 이로 인해 강력한 증기폭발이 유도되었다.

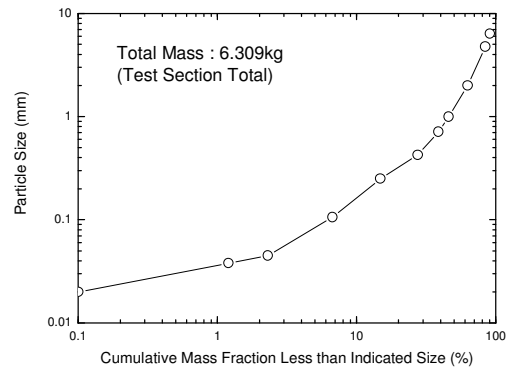


Fig. 6 Debris size distribution in TROI-51

### 3.3 TROI-52 실험

이 실험은 TROI-51 실험의 반복 실험으로 수행되었다. 혼합 충전물인  $UO_2$ ,  $ZrO_2$ ,  $Zr$  과 스테인레

스 스틸의 무게비는 약간 변화하여 각각 61.0, 16.0, 12.2 와 10.8%이었다.

혼합 충전물의 용융중에 측정된 온도가 그림 7에 나타나 있다. 이 실험에서는 가시창으로 석영유리를 사용하였으므로 적외선 온도계를 이용하여 측정된 온도는 보정할 필요가 없이 용융물의 온도로 사용하였다. 용융물의 온도는 최대 2650K로 측정되었는데, 이는 TROI-51 실험에 비해 약 500K 정도 낮은 값이다. 이 용융물은 용융 시작 후 5860 초 경에 냉각수가 채워져 있는 반응용기로 낙하하였다.

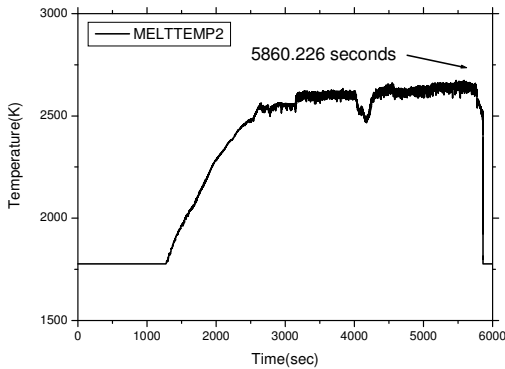


Fig. 7 Melt temperature during melting in TROI-52

그림 8 과 9 는 반응용기 벽면에 설치된 동압계와 물속에 매달린 동압계로 측정된 압력파이다. 이 그림에서 오직 하나의 압력파만이 1.715 초에 관측되었음을 보여 준다. 이 압력파는 하부에서 상부로의 압력 전파만을 보여주고 있으므로, 하부에 위치한 외부기폭장치에 의한 폭발이란 것을 알 수 있다. 그러므로 증기폭발은 유도되지 않았다고 추론할 수 있다. 증기폭발이 발생하지 않은 이유는 용융물의 온도와 과열도가 너무 낮아서, 용융물이 냉각수를 지날 때 쉽게 고화되어, 증기폭발에 필수 조건인 액체와 액체간의 반응이 이루어지지 않았기 때문이라 생각된다.

그림 10 은 반응용기 하부로의 동하중을 보여준다. 이 실험에서의 동하중은 TROI-51 실험에서의 크기보다 훨씬 낮아 증기폭발이 유도되지 않았음을 암시한다.

실험 후, 파편층을 모아 크기를 분류하여 그 결과를 그림 11 에 나타내었다. 파편의 직경이 0.425mm 보다 작은 미세 입자의 무게비가 6.3%로 TROI-51 의 결과보다도 훨씬 작았다. 또한 파편층의 질량평균직경은 2.6mm 로 TROI-51 의 경우보다도 훨씬 컸다. 이는 용융물의 미세파편화가 적게

일어났다는 것을 말해주며, 그리하여 급속한 증기 발생이 억제되어 증기폭발이 일어나지 않았다는 것을 설명해 준다.

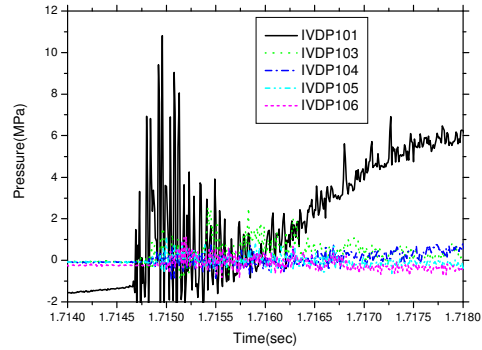


Fig. 8 Dynamic pressures from wall-mounted sensors in TROI-52

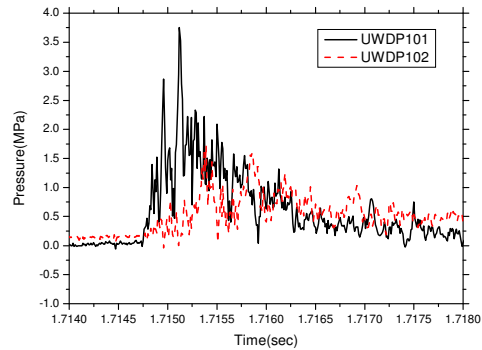


Fig. 9 Dynamic pressures from under-water sensors in TROI-52

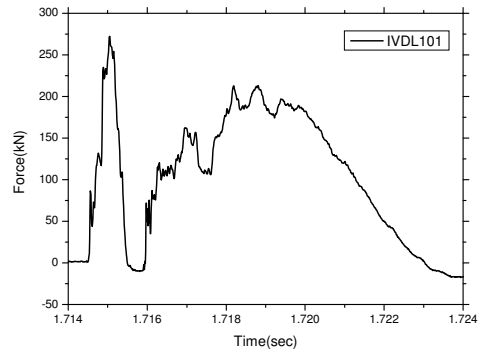


Fig. 10 Dynamic load in TROI-52

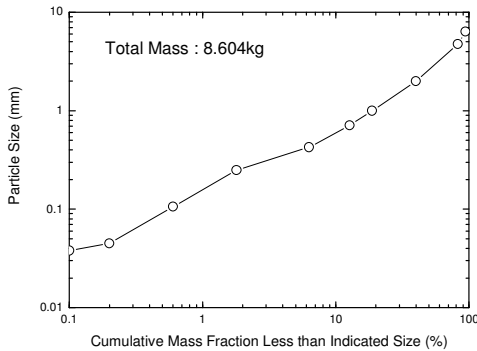


Fig. 11 Debris size distribution in TROI-52

#### 4. 결론

금속이 함유된 코륨을 사용하여 두 실험을 수행하였다. 용융물의 온도가 충분히 높은 경우의 실험에서는 외부기폭에 의한 증기폭발이 유도되었으나, 용융물의 온도가 낮을 경우에는 증기폭발이 발생하지 않았다. 용융물의 온도가 높을 때는, 증기폭발에 필수적인 용융물의 미세파편화가 이루어졌으나, 낮을 때는 용융물의 이른 고화로 미세파편이 적게 발생하였다. 금속이 함유된 코륨의 경우 증기폭발이 발생하였을 때 그 강도가 산화물만으로 구성된 코륨에서 발생한 증기폭발보다도 그 강도가 컸다. 증기폭발의 강도가 용융물의 종류에 영향을 받으므로, 원자로 설계시 물질 효과를 감안하는 것이 필요하다. 향후에 금속을 함유한 코륨을 사용한 증기폭발 실험을 좀 더 수행하여, 이 물질의 폭발성을 확인하여야 할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 과제에서 재정적인 지원을 받았습니다.

#### 참고문헌

(1) D. E. Mitchell, M. L. Corradini and W. W. Tarbell, 1981, "Intermediate scale steam explosion phenomena: Experiments and analysis," SAND81-0124, SNL.

(2) D. H. Cho, D. R. Armstrong and W. H. Gunther, 1998, "Experiments on interactions between Zirconium-containing melt and water," NUREG/CR-5372.

(3) D. Magallon, I. Huhtiniemi, and H. Hohmann, 1999, "Lessons learnt from FARO/TERMOS corium melt quenching experiments," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.189, pp.223~238.

(4) I. Huhtiniemi, D. Magallon and H. Hohmann, 1999, "Results of Recent KROTOS FCI Tests: Alumina versus Corium Melts," *Nuclear Engineering and Design*, **189**, pp.379~389.

(5) D. Magallon and I. Huhtiniemi, 2001, "Corium melt quenching tests at low pressure and subcooled water in FARO," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.204, pp.369~376.

(6) I. Huhtiniemi and D. Magallon, 2001, "Insight into steam explosions with corium melts in KROTOS," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.204, pp.391~400.

(7) 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, 2002, "Experiments on the interactions of molten  $ZrO_2$  with water using TROI facility," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.213, pp.97~110.

(8) J. H. Kim, I. K. Park, B. T. Min, S. W. Hong, Y. S. Shin, J. H. Song and H. D. Kim, 2004, "The Influence of Variations in the Water Depth and Melt Composition on a Spontaneous Steam Explosion in the TROI Experiments," *Proceedings of International Congress on Advanced Nuclear Power Plant (ICAPP'04)*, Pittsburgh, PA USA, June 13-17.

(9) J. H. Kim, I. K. Park, B. T. Min, S. W. Hong, J. H. Song and H. D. Kim, 2004, "An Effect of Corium Composition Variations on Occurrence of a Spontaneous Steam Explosion in the TROI Experiments," *Proceedings of NUTHOS-6*, Nara, Japan, October 4~8.

(10) V. Asmolov and V. Strizhov, 2004, "Overview of the Progress in the OECD MASCA Project," *CSARP Meeting*, Washington DC, USA.

(11) J. H. Kim, I. K. Park, B. T. Min, S. W. Hong, H. Y. Kim, J. H. Song and H. D. Kim, 2005, "Triggered Steam Explosion Experiments in the TROI Facility," *Proceedings of International Congress on Advanced Nuclear Power Plant (ICAPP'05)*, Seoul, Korea, May 15~19.

(12) J. H. Kim, I. K. Park, S. W. Hong, B. T. Min, S. H. Hong, J. H. Song and H. D. Kim, 2006, "Steam Explosion Experiments Using Nuclear Reactor Materials in the TROI Facility," *Proceedings of NTHAS5*, Jeju, Korea, November 26~29.