

냉각재 주입 방법에 따른 고온 용융물과 냉각재 반응 특성 연구

강경호, 김상백, 방광현, 이성재, 서균렬
한국원자력연구소

요 약

노심 손상이 일어나는 중대사고 발생시 고온의 노심 용융물이 원자로 용기를 파손시키며 캐비티 내로 유출되는 경우, 노심 용융물과 냉각재의 폭발적 반응을 억제하고 잔열제거를 위한 효과적인 냉각수 주입 방법을 규명하는 실험을 수행하였다. 냉각수 주입 방법은 파이프 관을 이용한 단순 Pouring 방식과 노즐을 이용한 Spray 방식, 그리고 반응용기의 옆면으로 냉각수를 주입하는 세 가지 방식을 채택하였다. 동일한 실험 조건에서 각각의 주입 방법에 따른 반응 형태 및 냉각 정도를 알아보는 실험을 수행하였다. 본 논문에서는 일차적으로 노심 용융물의 모사체로 사용한 주석 용융물에 Pouring 방식과 Spray 방식으로 냉각수를 주입한 경우의 실험 결과를 정리하였으며, 분석 결과 Spray 방식으로 냉각수를 주입한 경우에 폭발적 반응이 일어나지 않고 냉각됨을 알 수 있었다.

1. 연구 배경 및 목적

원자력 발전소에서 LOCA 등의 설계 기준 사고 이상의 노심 손상이 일어나는 중대사고 발생 시 고온의 노심 용융물이 원자로 용기를 파손시키며 캐비티 내로 유출되는 경우가 발생할 수 있다. 캐비티 내로 유출된 고온 용융물은 콘크리트 바닥 면을 침식시키고, 이로 인해 발생된 가연성 가스 및 불활성 기체, 핵분열 생성물은 격납용기 내부의 압력을 급격히 증가시켜 결국 격납 용기를 파손시킬 수 있다. 그러므로 냉각수를 주입시켜 캐비티 내에 존재하는 고온의 노심 용융물을 냉각시키는 것은 사고의 진행을 캐비티 내에서 종결시켜

궁극적으로 원자로 격납 용기의 건전성을 유지할 수 있는 중요한 사고 관리 전략이다. 그러나, 고온의 용융물과 냉각수가 접촉하면 고온 용융물의 내부에너지가 저온의 냉각수에 전달되어 고압에서 기포화되고 팽창하여 강력한 파괴력을 가진 증기폭발 현상 (Steam Explosion) 으로 발전될 수 있다. 이러한 증기폭발 현상은 격납 용기 안전성에 위해를 가하는 또 하나의 사고 인자이므로 캐비테 내의 노심 용융물과 냉각수가 폭발적으로 반응하지 않고 효과적으로 냉각시킬 수 있는 냉각수 주입 방법을 도출하는 것은 원자력 발전소의 안전성 측면에서 중요한 과제이다.

본 연구에서는 노심 용융물 모사체로 주석을 사용하고, 파이프 관을 이용한 단순 Pouring 방식, 노즐을 이용한 Spray 방식, 그리고 반응 용기 옆면에서 냉각수를 주입하는 방식의 세 가지 냉각수 주입 방법에 따른 반응 형태와 냉각 정도를 규명하는 실험을 수행하였다.

본 논문은 한 가지 실험 조건에 대해서 Spray 방식과 Pouring 방식의 반응 형태를 기술한 것이다. 따라서, 추가 실험은 여러 가지 실험 조건, 예를 들면 주석 용융물의 온도, 냉각수 주입 유량 및 온도 등, 을 변화시키면서 세 가지 주입 방법에 따른 반응의 차이를 규명하고, 냉각 정도의 정량적인 해석을 수행하는 방향으로 진행될 것이다.

2. 실험 장치

노심 용융물이 원자로 용기의 하부를 녹이고 캐비티에 용융물 상태로 고여있는 경우를 가정하여 노심 용융물의 잔열 제거를 위해 냉각수를 주입하는 본 실험의 과정에 맞게 실험 장치를 설계 제작하였다.

실험 장치의 개략도를 그림 1에 나타내었으며, 그림 2는 반응 용기 및 실험 장치의 개념도이다. 다음은 실험 장치의 주요한 부분의 특성 및 성능을 기술한 것이다.

2.1 금속 용융 부문

주석 용융물의 가열 방식은 고주파 유도 가열 방식(High Frequency Induction Heating Method)을 사용한다. 고주파 유도 가열 방식은 전자기 유도 작용에 의해 금속 물체 중에 생기는 유도 전류가 금속 물체 중의 저항 손실에 의해 Joule 열로 변환되는 것을 이용한 방식으로서, 고출력으로 금속을 용해하므로 용해 시간을 단축시킬 수 있고 완전히 균질화된 금속 용융이 가능하며 열원을 사용하지 않는 가열 방식이므로 이론상으로는 가열 온도에 제한이 없는 등 여러 가지 장점을 가지고 있다. 본 실험 장치에 사용된 고주파 유도 가열 장치의 출력은 최대 50 kw 이다. 주석 용융물을 반응 용기로 전송하는 방법은 용해로 (Furnace)의 유도코일과 도가니(Crucible)를 일체형으로 제작하여 용해로를 유압을 이용한 tilting 방식에 의하여 반응 용기로 전송하며 tilting의 시작과 종료 및 속도 조절은 별도의 조절판에서 한다.

2.2 반응 용기 부문

반응 용기는 20 mm 두께의 스테인레스 스틸 재질이며 길이 370 x 폭 140 x 높이 240 mm 크기의 직사각형 모양이다. 반응 용기의 앞 면에는 Video 촬영을 할 수 있도록 220 x 150 mm 의 석영 유리판을 부착하였고, 실험 특성에 따라 스테인레스 스틸 판으로 교체가 가능하게 설치하였다. 실험 진행 중의 주석 용융물 및 냉각수의 온도를 측정하기 위한 열전대 봉을 부착하였고, 증기 폭발이 발생할 경우 Dynamic Pressure 를 측정하기 위해 PCB Pressure Transducer 를 장착하였다.

2.3 냉각수 공급 및 주입 부문

주석 용융물을 냉각시키기 위해 주입되는 냉각수는 용량 200 liter 의 저장 탱크에 저장되며 탱크 내에 부착된 Heater 에 의해 실험 조건에 맞는 온도로 가열된다. 냉각수의 유량은 저장 탱크 하부와 연결되어 있는 DC motor 펌프에 의해 조절되며, 냉각수 주입관에 설치되어 있는 유량계에 의해 측정된다. 본 실험에 사용되는 유량계는 OVAL 사의 D025S-SS-311 모델로서 측정 범위는 0 - 18 kg/min 이며 순간 유량은 Data Acquisition System (DAS) 에 연결되어 저장된다.

2.4 보호 용기 부문

보호 용기는 반응 용기 외부에 설치되어 있으며 옆면은 원통형 (지름 600, 높이 600, 두께 5 mm)이고 윗 면은 반구형으로 스테인레스 스틸로 제작되었다. 실험 시 증기 폭발 반응에 의해 발생하는 압력과 주석 용융물의 파편으로부터 실험자 및 장비를 보호하기 위하여 크기 및 두께를 결정하였으며 압력 및 파편 형성 시 이를 외부로 유도하기 위한 Quenching System (지름 150, 두께 5 mm)이 보호 용기 상부에 부착되어 있다.

2.5 자료 처리 장치 (Data Acquisition System)

본 실험을 위한 Data Acquisition System 은 실험으로부터 얻어진 압력, 온도 및 유량 등의 Analog 신호를 Digital 신호로 바꾸거나 신호를 증폭하는 기능을 수행하는 VXI 계통과 VXI 로부터 정리된 Data 를 컴퓨터로 연결 시켜주는 Interface, Data 를 해석하는 Main Computer 로 구성되어 있다. 현재 구성된 DAS 는 압력 신호 처리 기능을 가지는 2 개의 채널과 유량에 관련된 2 개의 채널 및 16 개 채널의 온도 처리 기능 부분으로 나뉘어져 있다.

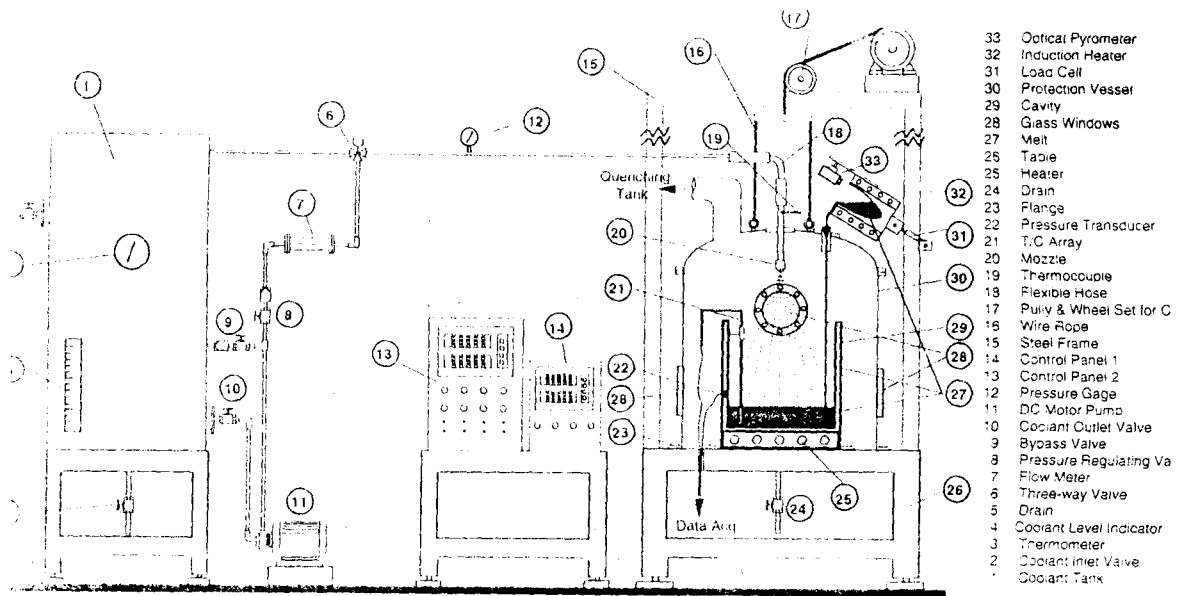


그림 1. 실험 장치 개략도

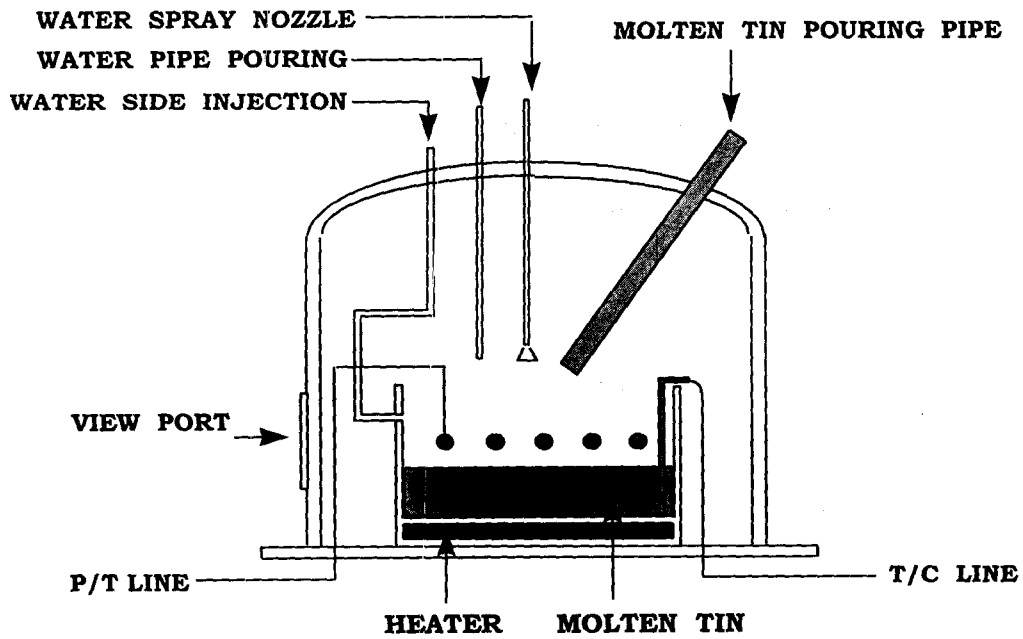


그림 2. 반응 용기 및 실험 장치 개념도

3. 실험 방법

본 실험은 고주파 유도 가열 방식으로 주석을 용융시킨 후 tilting 방식으로 반응 용기 내로 주입시킨 다음 Pouring 방식이나 Spray 방식 등으로 냉각수를 주입한다. 주석 용융물을 주입하기 전에 반응 용기를 일정 온도로 예열시켜 고온의 주석 용융물이 차가운 반응 용기 바닥면에 닿으면서 생길 수 있는 국부 지점의 열 팽창을 방지하고 반응 용기를 통한 열 손실을 최소화하였다. 도가니 안에서 용융되고 있는 주석의 온도는 Pyrometer 를 이용하여 측정하며 보호 용기 주입구 내로 진입 시점에서의 온도 및 반응 용기로 주입된 후부터 실험 중의 온도는 k-type 열전대로 측정한다. 직경 1 mm 의 열전대 12 개를 장착한 열전대 지지봉을 반응 용기 내에 설치하여 주석 용융물 및 냉각수 그리고 경계면에서의 온도 및 냉각 과정을 파악할 수 있게 하였다. 본 논문에 게재한 두 가지 실험과 같이 주석 20 kg, 냉각수 5.3 kg 를 사용한 경우 반응 용기 내의 주석 용융물의 높이 및 냉각수의 높이는 각각 5.3, 10 cm 가 된다. 반응 용기 내의 열전대 지지봉의 설치 모양 및 열전대 위치는 다음 그림 3 에 나타내었다.

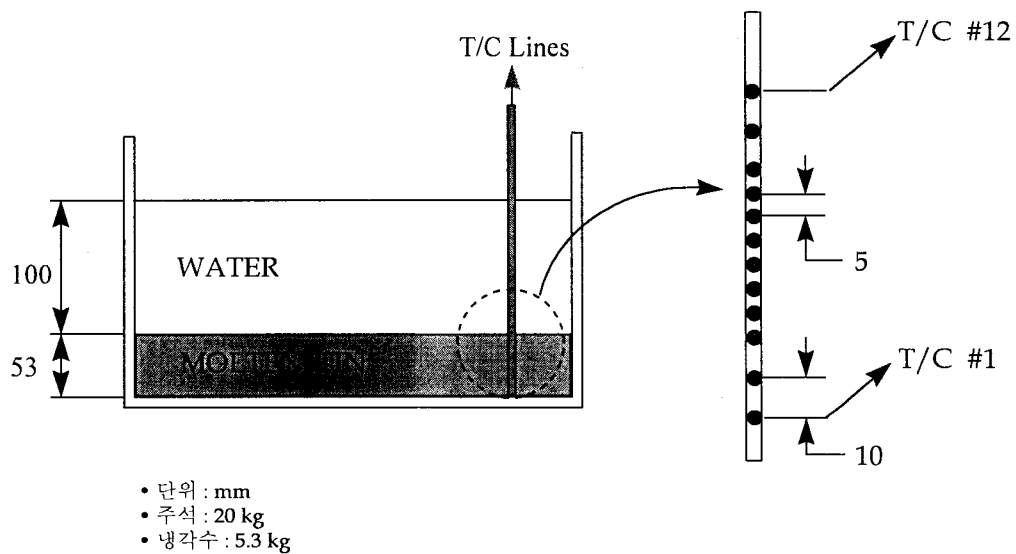


그림 3. 열전대 지지봉 설치 모양 및 열전대 위치도

냉각수는 저장 탱크 내의 Heater 를 이용하여 실험 조건 온도로 가열한 후 DC motor 펌프에 의해 폐쇄 루프를 돌다가 일정 유량 및 시간 동안 Solenoid Valve 를 개폐시킴으로써 반

응 용기 내로 주입된다. 냉각수 주입관 끝 부분에는 Conductivity Probe 를 장착하여 반응 용기 내로 냉각수가 주입되는 직전의 시간을 확인할 수 있다.

주석 용융물과 냉각수가 반응 시 폭발 현상의 유무는 반응 용기에 설치한 PCB Pressure Transducer 를 이용하여 압력 파형을 확인함으로써 알 수 있다. 압력, 온도 및 유량의 측정 시작 시간을 기록하여 반응의 전반적인 과정을 분석할 수 있고, 압력 및 유량은 0.0001 초 단위로 20 만개의 Data 를 측정하며 총 측정 시간은 20 초이다.

4. 실험 결과

4.1 실험 조건

본 논문에서는 Pouring 방식과 Spray 방식을 이용하여 냉각수를 주입하는 경우에 대하여 실험 결과를 기술하였다. 두 실험에서 주석 용융물의 질량 및 온도, 그리고 냉각수의 온도, 유량 및 주입 시간 등의 제반 조건은 동일하게 하였으며, 구체적인 실험 조건은 다음 표 1에 기술하였다.

표 1. 실험 조건

	POURING TEST	SPRAY TEST
주석 용융물 질량, kg	20.0	20.0
주석 용융물 온도, °C	820.0	827
냉각수 유량, kg/min	9.7	9.7
냉각수 주입 시간, sec	33.0	33.0
반응용기 예열 온도, °C	148.0	150.0
Spray Nozzle Type		4 각형 FULL CONE SPRAY 오리피스 직경; 4.0 mm

4.2 파이프 관을 이용한 단순 Pouring 방식(POURING_TEST)

POURING_TEST 는 주석 용융물을 820 °C 로 가열하여 반응 용기 내로 주입시킨 후 냉각수를 파이프 관을 통해 단순 Pouring 한 실험이다. 그러나, 반응 용기 내의 주석 용융물의 온도가 600 °C 정도로 낮아진 것으로 나타났는데 이는 주입 시간 중의 온도 손실로 생각된다. Conductivity probe 파형과 압력 파형을 비교해 보면 냉각수가 반응 용기 내로 주입된 시점에서 약 2 초 후에 폭발 반응이 일어났음을 알 수 있다. 반응 시 폭발음을 분석해보면 폭발 반응이 3-4 번 일어난 것으로 생각되는데 압력 파형은 첫 번째 반응만을 보여준다.

이는 첫 폭발 후 반응에 참여한 고온의 주석 파편이 Pressure Transducer 에 열적 충격을 주어 파형을 변형시킨 것으로 생각된다. 반응이 끝난 후 실험 장치를 해체해 본 결과 주석 용융물의 3/4 정도가 폭발 반응에 참여하여 반응 용기 밖으로 분출된 것을 볼 수 있었다. 다음 그림 4, 5 는 압력 및 Conductivity probe 파형을 나타낸 것이다.

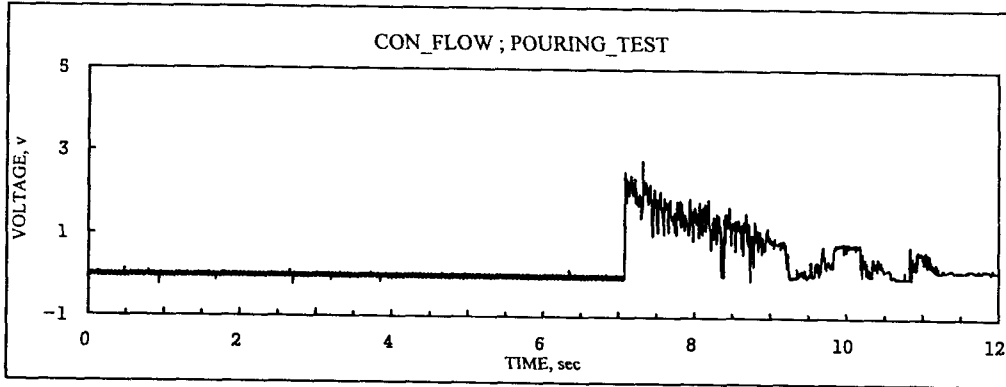


그림 4. POURING 실험 ; Conductivity Probe 파형

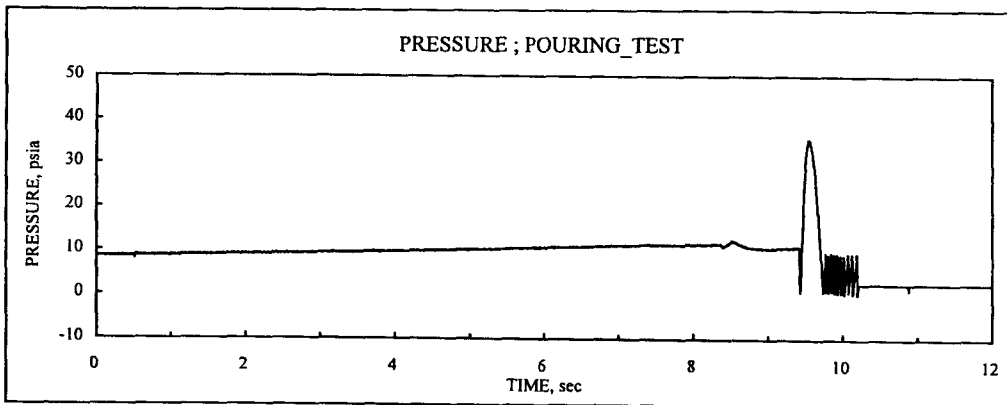


그림 5. POURING 실험 ; 압력 파형

4.3 노즐을 이용한 Spray 방식(SPRAY_TEST)

SPRAY_TEST 는 주석 용융물을 827 °C로 가열하여 반응 용기 내로 주입시킨 후 오리피스 직경이 4 mm 이고, 분사 형태는 4 각형 모양의 Spray 노즐을 이용하여 냉각수를 주입시킨 실험이다. 같은 조건의 POURING_TEST 와는 달리 격렬한 폭발 반응은 발생하지 않았으며 단지 주석 용융물 표면에서 미세한 반응이 있었을 뿐이다.

다음 그림 6은 Spray 노즐을 이용한 경우의 주석 용융물과 냉각수의 온도 변화를 나타낸 그래프이다. 그래프의 온도 변화를 보면 600 °C의 주석 용융물이 약 6분 동안 100 °C 정도로 냉각됐음을 알 수 있다.

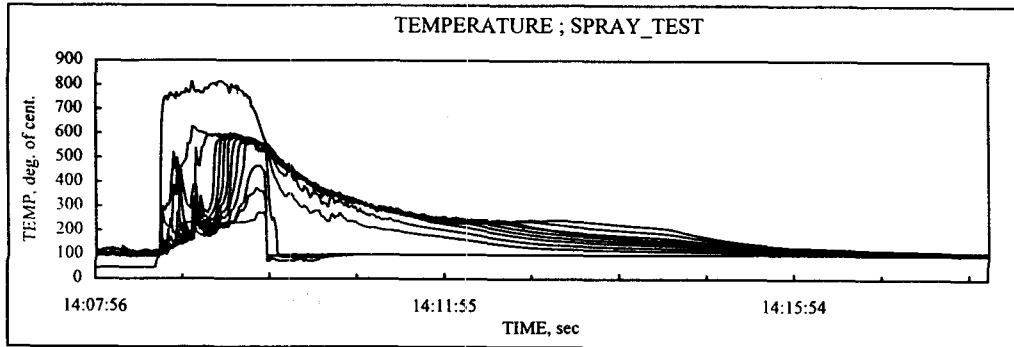


그림 6. SPRAY 실험 ; 온도 파형

5. 결론 및 향후 연구 계획

캐비티 내의 노심 용융물의 효과적 냉각 방법을 규명하고자 냉각수 주입 방법을 달리 하여 냉각 정도를 알아보는 실험을 수행하였다. 본 논문에 기술한 실험은 파이프 관을 이용한 단순 Pouring 방식과 노즐을 이용한 Spray 방식을 사용하여 반응 정도를 알아본 것이다. 동일한 실험 조건에서 Spray 방식이 Pouring 방식에 비해 폭발적인 반응을 억제하며 고온의 용융물을 냉각시킬 수 있음을 알 수 있었다. 그러나, 실험 횟수가 적어서 냉각 정도에 대한 정량적인 해석을 수행하지 못했다. 차후에는 세 가지 주입 방식에 대해 냉각수 주입 유량 및 질량, 그리고 주석 용융물의 질량 및 온도를 변화시키면서 실험하여 이에 대한 정량적인 해석을 수행할 것이다.

참고 문헌

1. Y. Maruyama, N. Yamano, 1995, " Ex-Vessel Core Melt Debris Coolability ", OECD/NEA Preliminary Reports
2. R. Anderson, D. Armstrong, 1988, " Experimental and Analytical Study of Vapor Explosions in Stratified Geometries ", ANS Proc. of 1998 Nat. Heat Trans. Conf. pp. 236-243, July
3. K. H. Bang, M. L. Corradini, 1992, " Thermodynamic Analysis of Vapor Explosions: Comparison of Models ", NURETH-5
4. G. A. Greene et al., 1983, " Some Observations on Simulated Molten Debris-Coolant Layer Dynamics ", Proc. of Int. Mtg. on LWR Severe Accident Evaluation, Cambridge, MA, Vol.2