

IFCI 6.0 전산코드를 이용한 노심용융물-냉각재 상호작용 분석

Analysis of Fuel Coolant Interaction using IFCI 6.0 code

서남덕, 박재홍, 김한철

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

미국 NRC에서 개발한 노심용융물-냉각재 상호작용 (Fuel-Coolant Interaction, FCI) 분석코드인 IFCI 6.0 코드를 이용하여 FARO 실험결과를 분석하였다. IFCI 계산 결과는 제어체적의 노드수, 수치계산에 필요한 입력 및 응축계수에 민감하게 반응하였다. 따라서 IFCI를 사용하여 FCI 분석을 할 경우 먼저 이러한 변수들의 조합에 대하여 충분히 민감도 분석을 하여 수렴조건을 찾는 것이 필요하며 이런 과정을 거칠 경우 IFCI 계산결과는 전반적으로 신뢰할 수 있는 것으로 평가되었다.

Abstract

Fuel-Coolant Interaction analysis is performed using the IFCI 6.0 code developed by USNRC. The code is very sensitive to the input parameters like nodalization, condensation factor and numerical inputs including error convergence ratio and calculation time step. Thus before doing any serious calculation a sensitivity analysis combining all the above parameters seems to be in need. Once a converging result comes out, the result can be reasonably referred.

1. 서 론

노심용융물-냉각재 상호작용(FCI, Fuel Coolant Interaction)이란 중대사고가 발생하여 노심이 용융되고 이 노심용융물이 원자로용기 내부나 외부의 물과 반응하는 과정을 말한다. FCI가 발생하면 노심용융물에 저장되어 있던 많은 에너지가 급격하

게 물로 전달되고 이로 인해 충격파가 발생하여 원자로용기나 격납건물을 파손 시킬수 있는데 이를 증기폭발이라고 한다. 비록 증기폭발이 일어나지는 않는다 해도 FCI 과정에서 많은 증기가 발생하며 이로 인해 원자로용기 내부 또는 격납건물 내부의 압력이 급격히 상승할 수 있으므로 FCI는 여러 가지 면에서 안전성을 위협하는 현상이다. 따라서 원자력발전소의 중대사고 관리전략을 수립하기 위해서는 FCI가 일어날 경우에 증기폭발이 일어날 것인지, 아니면 격납건물 내부의 압력은 어느 정도까지 상승 할 것인지를 정확히 파악하는 것이 매우 중요하다. 이 때문에 미국과 유럽등에서는 FCI에 대한 실험과 또 이를 분석하기 위한 코드개발에 많은 노력을 기울여 현상의 이해 측면에서는 상당한 진척이 있었다고 할 수 있다. 그러나 현상 자체가 복잡하기 때문에 실험을 통하여 얻어지는 결과를 실제 발전소에 적용하기에는 여전히 많은 어려움이 있다.

이에 OECD/CSNI에서는 이제까지 축적된 많은 실험결과로부터 실제 발전소의 FCI 분석에 적용할 수 있는 방법론을 찾고자 SERENA(Steam Explosion REsolution for Nuclear Application) 프로그램을 2002년 1월부터 시작하였다. 원자력안전기술원에서도 신형경수로 1400의 인허가과정을 통하여 중대사고 대처설비 및 사고관리전략의 심사를 위하여서 신뢰 할만한 수준에서 FCI 분석을 수행할 필요가 있음을 절감하고 본 프로그램에 참가하고 있다. 안전기술원에서는 분석코드로 NRC가 개발한 IFCI(Integrated Fuel Coolant Interaction) 코드를[1] 사용하고 있는데 이 코드는 90년대 초에 처음 개발된 후 NRC가 더 이상의 개발을 포기하여 그 후 코드개정이 이루어지지 않고 있다. 따라서 IFCI 이후에 개발된 TEXAS나 PM-ALPHA 등의 코드와 비교할 때 코드에 사용된 모델들은 어떤 의미에서 최근의 연구결과를 반영하지 못하는 면이 있다. 그러나 전산코드는 분석을 수행하기 위한 도구에 불과하며 그 도구의 특성을 충분히 잘 파악하고 있다면 항상 도구로서의 역할은 수행할 수 있고 따라서 가장 최근에 개발된 코드를 사용해야 만 신뢰할 만한 결과를 얻는 것은 아니다. 특히 안전기술원과 같이 규제 의사결정에 사용하기 위한 분석에서는 많은 연구를 통하여 장단점을 충분히 파악하고 있는 전산코드가 최근에 개발된 전산코드보다 도구라는 면에서 더 신뢰성이 높을 수도 있다. 이와 같은 배경으로 안전기술원에서는 IFCI 코드를 선정하여 SERENA 프로그램에 참석하고 있으며 본 논문은 이 과정의 첫 단계로 FARO실험결과를 분석한 결과와 그 과정에서 파악하게 된 IFCI 코드의 특성에 대한 연구결과이다.

2. 실험 개요

FARO 실험은 JRC Ispra에서 수행한 실험이다[2]. 일련의 FARO 실험중 L-14는 ISP-36으로 이미 선정되어 분석된 적이 있다. OECD 보고서[3]에는 FARO실험의 자세한 구조와 여러 가지 코드를 사용한 분석결과가 기술되어 있으며 실험장치의 세부적인 사항은 OECD 보고서를 참조하는 것이 바람직하다. 우리나라에서는 한국 원자력연구소에서 IFCI 6.0을 사용하여 ISP-36에 참가하여 실험을 분석하였으며 이에 대한 자세한 내용은 참고문헌[4]에 기술되어 있다. 금번 SERENA 프로그램에서는 새롭게 L-28을 분석대상으로 선정하였는데 그 이유는 실험압력, 온도, 그리고 용융물의 질량이라는 측면에서 일련의 실험 중 원자로용기 외부에서 발생할 수 있는 FCI(ex-vessel FCI) 조건에 가장 근접하기 때문이다. L-28의 실험 초기조건을 요약하면 다음과 같다.

Melt	
Composition, w%	80 UO ₂ + 20 ZrO ₂
kg	139.9 UO ₂ + 35 ZrO ₂
Mass, kg	174.9
Temperature, K (*)	3053
Initial delivery nozzle diameter, m	0.05
Final diameter of nozzle, m (**)	0.044
Δp delivery	gravity
Initial height in release vessel above valve S05, m	0.35
Free fall in gas, m	0.89
Water in test vessel	
Mass, kg	516.9
Depth, m	1.44
Temperature (average), K	423.7
Fuel to coolant mass ratio	0.33
Gas Phase (high pressure region)	
Composition, w%	98 steam + 2 Ar
Volume, m ³	3.528
Initial Temperature (K)	465
Test Vessel (FAT)	
Internal cylinder diameter, m	0.71
Pressure, MPa	0.51
Saturation temperature at 0.51 MPa (K)	424.6

표1. L-28 실험의 초기조건

3. IFCI 코드 개요 및 입력작성

IFCI는 2-D, 3-field 코드이다. 즉 기하학적으로는 r,z 좌표로 표시되는 실린더 구조를 모사하며 유체형태는 증기(vapor), 물 그리고 용융물 3가지가 서로 상호작용하는 현상을 모사한다. 이들 각각의 field 사이에는 물질교환, 열 교환 및 운동량교환이 이루어지며 또한 각 field는 질량, 운동량 및 에너지 보존법칙을 만족시킨다. IFCI에서 사용되는 지배방정식 및 열전달 모델, 상간교환(interfacial exchange) 모델 등에 대해서는 코드의 사용자 매뉴얼[1]을 참조하는 것이 바람직하다. 이중 실험의 모사와 전반적인 분석의 성공에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 용융물 분쇄 모델이다. 현재 IFCI 6.0에서 사용되는 분쇄모델은 90년대초 미국의 Pilch[5]가 개발한 모델이다. 이 모델에서는 Rayleigh-Taylor 파동에 의해 액적이 분쇄된다는 가정하에 개발하였으며 용융물의 크기는 다음 방정식으로 주어진다.

$$\frac{dD}{dt} = - \frac{(1-N^{-1/3})}{T^+} |\nu_r| \epsilon^{0.5}$$

이 방정식은 높은 웨버수의 실험에서 액적이 무차원 시간 T^+ 내에 3내지 5개의 주된 부분으로 나뉘어 진다는 관측에 의한 것이다. 한편 이 주분쇄 현상과 함께 미세 분쇄현상도 동시에 다루어지는데 이는 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{dS}{dt} = C_0 C_f^{0.75} \frac{1}{D} We^{0.25} |\nu_r| \epsilon^{0.5}$$

여기에서 D는 액적의 직경, N은 초기분쇄수, ϵ 는 밀도비(ρ_∞/ρ_d) 등이며 자세한 내용은 Pilch의 논문[5] 또는 코드 매뉴얼을[1] 참고하여야 한다.

분석을 위하여 FARO 실험설비를 다음과 같이 25×10의 체적으로 나누었다. 축방향 노드의 크기에서 $\Delta h_1 = 0.096m$, $\Delta h_2 = 0.089m$ 이다. 반경방향 노드의 위치는 첫 번째 노드로부터 각각 0.022, 0.057, 0.105, 0.167, 0.229, 0.291, 0.3531, 0.4834, 0.6137, 0.744m 이다. 그림에서 내부에 굵은 선으로 표시된 선은 실험설비의 내부에 설치된 용기를 모사하고 있으며 초기조건에서 물은 이 내부용기의 높이 1.44m까지 채워지게 된다. IFCI 코드의 특성상 노심용융물은 좌,상단 노드 바깥에서 제어체적안으로 주입되는 것으로 모사된다. 그림1에서 알수 있듯이 용융물이 내부용기에 주입되어 수위가 상승하다가 높이 1.796m이상이 되면 물은 내부용기 바깥으로

흐르게 된다. 용융물이 주입되는 속도는 코드의 입력으로 주어져야 하는데 계산에 사용된 값은 그림2와 같다. 용융물이 분출되는 출구의 직경은 처음에는 0.05m 이나 시간이 지나면서 용융물이 식고 주위에 부착되므로 실험종료후 측정된 실제 직경은 0.044m 이었다. 계산에서는 처음부터 출구의 직경이 0.044m인 것으로 가정하고 분석을 수행하였다.

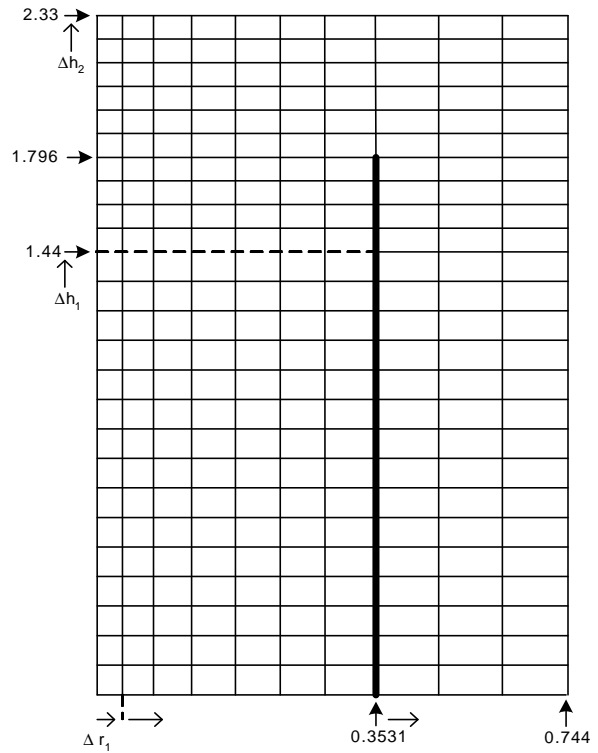


그림.1 FARO실험장치의 노드화

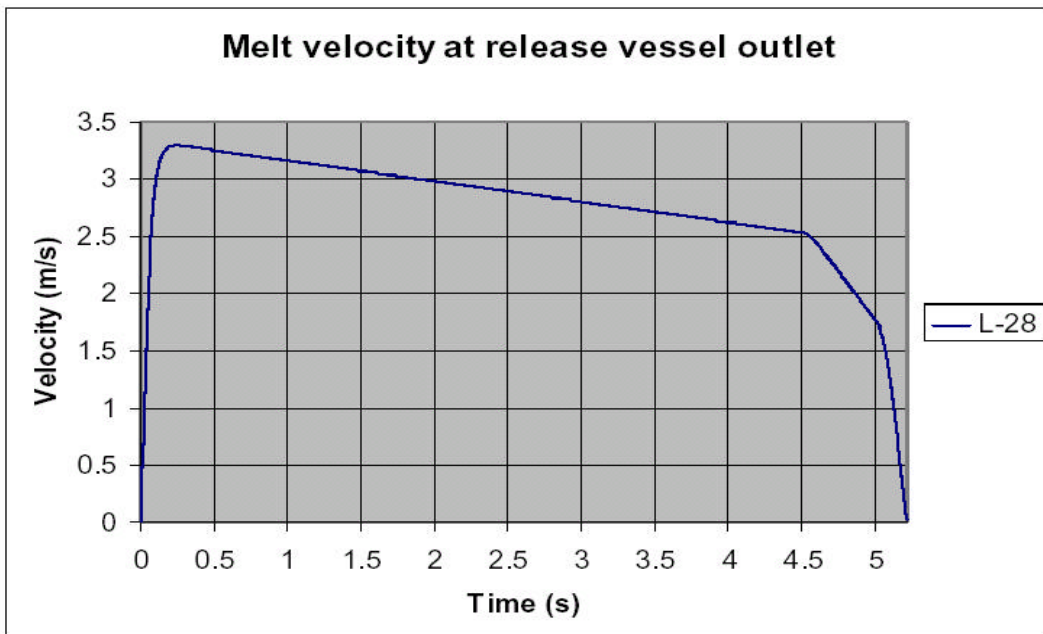


그림2. 용융물 주입속도

IFCI 계산결과는 노드의 개수에 민감하게 반응하므로 실제적인 계산을 하기전에 34×16, 34×10, 15×10등의 노드에 대하여 민감도 계산을 하였다. 그 결과 전체적인 계산결과가 수렴하고 또 계산시간등을 고려하여 최종적으로 25×10 노드를 선정하게 되었다. 또한 IFCI에서는 액적의 초기 직경을 입력으로 주게되어 있는데 본 계산에서는 0.01m로 가정하였다. 이 값은 이전의 ISP-39 분석경험으로부터 가장 실험결과에 근접한 결과를 주는 값으로 알려져 있다.

4. IFCI 분석결과

코드분석결과를 실험치와 비교하였다. 먼저 FCI 계산결과중 가장 중요한 값인 실험장치 내부의 압력상승은 그림3과 같이 주어진다. 주입된 용융물이 물과 반응하여 급격한 압력상승이 시작되는 시점이 실험에서는 0.5초 이후이나 계산결과에서는 1초 이후로 미루어지고 있다. 그러나 압력상승률, 그리고 최종도달 압력은 계산결과가 실험치와 상당히 유사하다. 이러한 결과는 기본적으로 용융물이 물과 처음 접촉하면서 급격하게 쇠분되는 과정을 현재의 모델이 적절하게 모사하지는 못하는 것으로 볼 수 있다. 또한 IFCI 코드에서는 실험용기 외벽과 대기와의 사이에서 일어나는 열전달을 모사하는 부분이 완전하지 못한 것으로 판단되며, 실험용기의 열전달 계수에 대하여 구체적인 자료가 주어진다면 이 부분에 대한 민감도 분석을 통하여 코드의 거동을 파악할 필요가 있다.

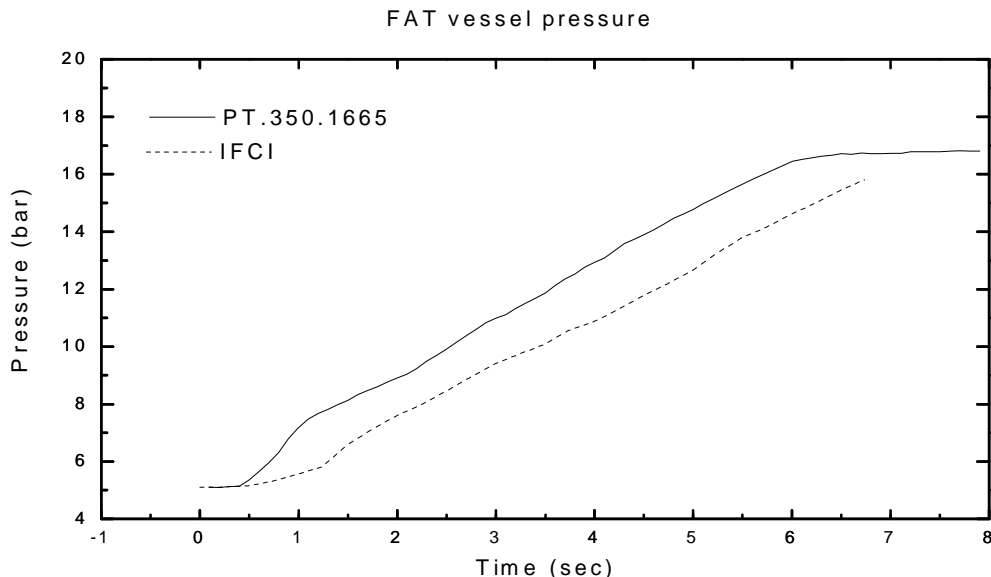


그림3. 실험용기 내부압력

FARO 실험용기 내부로 주입된 용융물 전단의 이동위치를 추적함으로써 용융물이 공기중을 자유낙하하여 내부용기에 있는 물과 접촉하고 바닥에 안착하는 과정을 그림4.에 모사하였다. 그러나 현재까지 개발된 FCI 분석코드 중에서 용융물의 전단이 진행되는 위치에 대해 정확한 정보를 제공하는 코드는 없다. IFCI 에서도 알 수 있는 것은 각 노드에서 용융물이 차지하는 체적분율 뿐이다. 따라서 그림4는 이러한 체적분율이 1%가 되면 실제로 용융물이 그 노드안으로 들어왔다고 보고 높이를 노드내에서 비례적으로 적절히 분배하여 계산한 것이다. 그림4의 계산값은 그림5의 실험값과 잘 일치하고 있으며 따라서 용융물이 진행되는 과정은 IFCI에서 적절히 모사되고 있음을 알 수 있다. 예를 들어 0.5초 때의 위치는 두 그림에서 모두 1m 부근이다. 초기조건에서 물이 채워진 높이가 1.44m 이므로 용융물이 물속에 들어와 진행되는 과정이 적절히 모사되고 있음을 알수있다. FCI 현상의 복잡성과 여러 가지 실험상관식 및 모델의 불확실성을 고려할 때 이 정도의 계산결과는 신뢰할만한 결과로 평가할 수 있을 것이다.

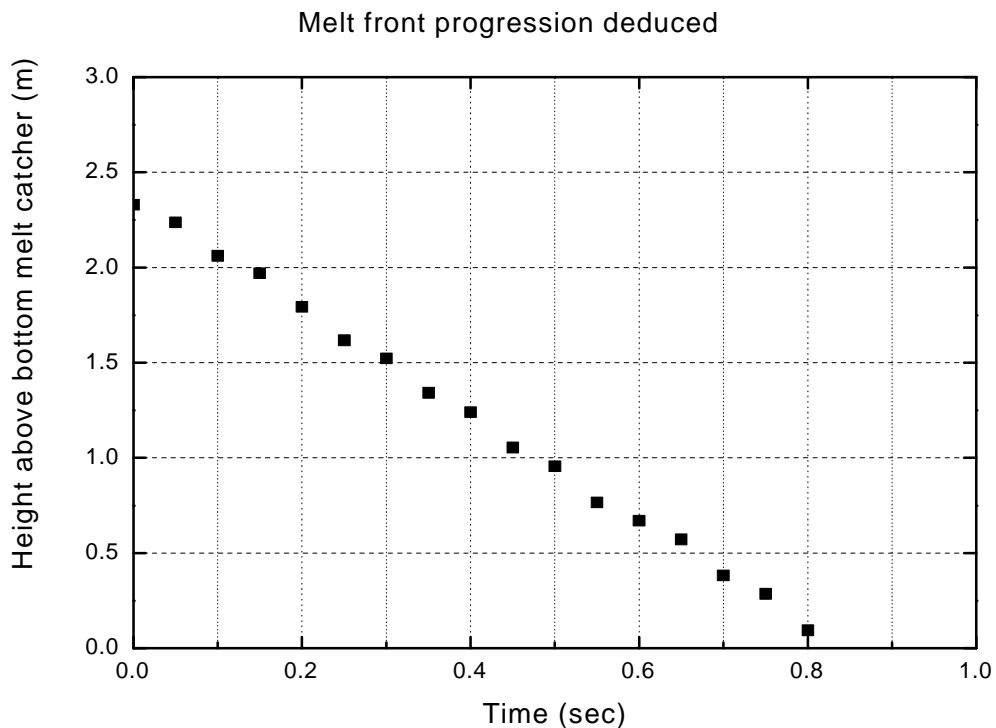


그림4. 용융물 전단의 이동위치 (계산값)

이와 같이 IFCI는 입력변수의 변화에 따른 코드의 거동을 이해하고 조심스럽게 분석하면 실험결과를 적절한 수준에서 모사할 수 있는 것으로 평가된다. 그러나 실험경수로 1400과 같은 실제 발전소 조건에 대하여 FCI 분석을 하였을 경우 그 결과를 얼마나 신뢰할 수 있는가 하는 것은 별개의 문제이다. 이것은 앞으로 좀더 다양한 실험결과에 대한 분석을 수행하면서 계속 연구되어야 할 과제이다.

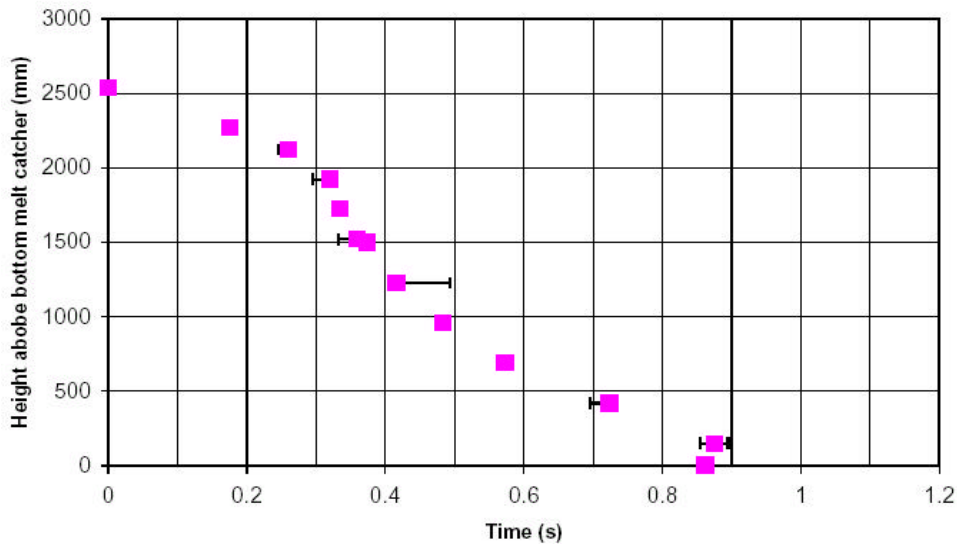


그림5. 용융물 전단의 이동위치 (측정치)

5. 결론

IFCI 6.0코드를 이용하여 FARO 실험을 분석하여 실험용기내의 압력상승률, 최종 도달압력 그리고 용융물 전단의 이동위치등에 대해 실험값과 비교하였다. 그 결과 전반적으로 계산결과는 신뢰할 수 있는 것으로 평가되었다. IFCI 계산 결과는 제어 체적을 분할하는 노드의 수, 시간 간격이나 수렴조건과 같이 수치계산에 필요한 기본입력, 그리고 응축계수에 매우 민감하게 반응하였다. 따라서 새로운 조건에 대하여 분석을 할 경우 노드수, 시간간격 및 응축계수에 대하여 여러 조합을 만들어 분석하여 계산결과가 수렴하는 조건을 먼저 찾는 노력이 필요하며 이렇게 수렴된 계산결과는 실험결과와 적절한 수준에서 일치한다. IFCI 코드가 실험결과를 적절히 분석할 수 있음을 알았지만 실제 원자로에 대해 FCI 분석을 수행하였을 경우 그 결과가 얼마나 신뢰할 만한 것인지는 아직 파악할 수 있는 방법이 없다. 추후 이러한 방법론에 대한 연구가 진척되어 인허가 규제업무에 활용되어야 할 것이다.

6. 참고문헌

- [1] NUREG/CR-6211 SAND94-0406 Integrated Fuel-Coolant Interaction (IFCI 6.0) Code
- [2] D.Magallon,I.Huhtiniemi , Corium melt quenching tests at low pressure and subcooled water in FARO, Nuclear Engineering and Design, 204(2001) 369-376
- [3] NEA/CSNI/R(97)31 FARO test L-14 on fuel coolant interaction and quenching
- [4] KAERI/TR-996/98 IFCI6.0 모델 및 검증계산 (FARO L-14 실험모의: ISP-39)
- [5] M. Pilch, Acceleration Induced Fragmentation of Liquid Drops, Ph.D dissertation, University of Virginia, Charlottesville VA.(1991)