

2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

IFCI 6.0 전산코드를 이용한 신형경수로1400의 노외증기폭발 하중평가

Evaluation of Ex-Vessel Steam Explosion Load for APR1400 using IFCI
6.0 code

서남덕, 김호정

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

미국 NRC에서 개발한 노심용융물-냉각재 상호작용 (Fuel-Coolant Interaction, FCI) 분석코드인 IFCI 6.0 코드를 이용하여 신형경수로 1400의 노외증기폭발 하중을 평가하였다. 코드의 검증을 위하여 먼저 FARO-28, KROTOS-44 및 TROI-13 증기폭발실험을 분석하였다. 이러한 분석결과를 바탕으로 APR1400의 원자로공동에서 발생할 수 있는 증기폭발하중을 계산하고 한수원이 APR1400 인허가 과정에서 분석한 결과와 비교하였다. IFCI 계산결과는 증기폭발이 발생할 경우 원자로공동의 건전성이 위협받을 수 있는 것으로 나타났으며 이는 한수원의 분석결과와는 배치되는 결과이다.

Abstract

The load of ex-vessel steam explosion for APR1400 is evaluated using the IFCI 6.0 code developed by US NRC. The IFCI code is applied to analyse the FCI experiments of FARO-28, KROTOS-44 and TROI-13 as a code V/V process. The load of ex-vessel steam explosion for APR1400 is calculated based on the conditions applied during the code V/V and the load was compared with the analysis result of licensee. The IFCI analysis result shows that the integrity of cavity might not be guaranteed once a steam explosion occurs and the result is in contrast with that of licensee.

1. 서론

노심용융물-냉각재 상호작용(Fuel Coolant Interaction, FCI)이란 중대사고가 발생하여 노심이 용융되고 이 노심용융물이 원자로용기 내부나 외부의 물과 반응하면서 압력상승을 유발하는 전반적인 과정을 말한다. 그리고 FCI 중 급격하게 노심용융물의 에너지가 물로 전달되고 압력상승이 일어날 때 충격파가 발생하여 원자로용기나 격납건물을 파손시킬 수 있는데 이러한 과정을 특히 증기폭발이라고 한다. 비록 증기폭발이 일어나지는 않는다 해도 FCI 과정에서 많은 증기가 발생하고 이로 인해 원자로용기 내부 또는 격납건물 내부의 압력이 과도하게 상승할 수 있으므로 FCI는 여러 가지 면에서 안전성을 위협하는 현상이다. 따라서 원자력발전소의 중대사고 대처능력을 평가하기 위해서는 증기폭발이 일어날 경우의 하중을 평가하고 격납건물 건전성에 미치는 영향을 파악하는 것이 중요하다.

국내에서 개발되고 신고리 3&4호기로 건설될 신형경수로 1400의 경우 원자로용기 외벽냉각을 통한 노심용융물 노내억류(In-Vessel-Retention through External Reactor Vessel Cooling, IVR-ERVC)를 중대사고를 완화시킬 수 있는 전략으로 설계에 고려하고 있다. IVR 전략을 수행하기 위하여서는 원자로용기 저온관 높이까지 물을 주입하여야 하는데 만일 이러한 조건에서 노심용융물이 노외로 누출되어 증기폭발이 일어난다면 원자로용기나 원자로공동 구조물에 미치는 영향은 원자로공동 전체가 충수되지 않을 때 보다 더 크게 된다. 신형경수로 1400의 사전설계안전성 심사과정에서 이 문제가 제기되어 원자력안전기술원에서는 한수원에 노외 증기폭발 하중을 분석할 것을 요구하였고 한수원은 TEXAS-V 코드를 사용하여 분석한 결과를 제출하였다⁽¹⁾.

본 논문은 한수원의 분석결과에 대한 검증계산을 하기위하여 기술원에서 IFCI(Integral Fuel Coolant Interaction) 6.0 코드를 사용하여 분석한 중간결과이다. FCI 현상이 복잡하고 코드의 분석결과가 아직은 불확실성이 높아 현재의 분석결과를 단정적으로 받아들이기는 어렵지만 IFCI는 한수원과 배치되는 분석결과를 보여주고 있다. 아래 2절에는 IFCI 코드를 실제로 사용하기 전 코드검증의 일환으로 현재 가용한 3가지 증기폭발실험을 분석한 결과가, 그리고 3절에는 실제 신형경수로 1400의 증기폭발하중을 IFCI 코드를 사용하여 평가한 결과가 간단히 기술되어있다.

2. IFCI 코드의 검증

IFCI⁽²⁾ 코드는 증기폭발 해석용 코드로 1980년대에 미국 NRC 주관으로 SNL의 Young이 개발하였으며 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 등은 코드의 사용자 매뉴얼⁽²⁾에 자세히 기술되어 있다. 현재 IFCI 6.0이 사용되고 있는 이 코드는 FCI 전 과정을 모사할 수 있도록 개발되었으며 개발 당시 여러 실험결과를 분석하면서 검증과정을 거쳤다. 열수력 현상에 대한 예측능력은 오차 10% 정도 내에서 정확하다는 것이 OECD의 결론으로 나오기도 하였으나⁽³⁾, 폭발모델에 대한 검증은 상대적으로 미약한 상태로 코드의 개발이 종료되었다. IFCI를 증기폭발하중계산용으로 사용하기 위해서는 코드의 폭발모델에 대한 추가 검증이 필요하며, 이를 위하여 OECD에서 실제원전에서의 증기폭발현상 평가를 위해 운영하고 있는 SERENA(Steam EXplosion Resolution for Nuclear Application) 프로그램에 참여하여 FARO-28, KROTOS-44등의 실험 자료를 받아 코드검증을 추가로 수행하였다. 아래에 SERENA 프로그램에서 도출된 결과를 중심으로 간단히 그 결과를 기술하였다.

2.1 FARO-28

FARO 실험은 JRC Ispra에서 수행한 실험이다⁽⁴⁾. 일련의 FARO 실험중 L-14는 ISP-36으로 이미 선정되어 분석된 적이 있다⁽⁵⁾. OECD 보고서⁽⁵⁾에는 FARO실험의 자세한 구조와 여러 가지 코드를 사용한 분석결과가 기술되어 있으며 실험장치의 세부적인 사항은 OECD 보고서를 참조하는 것이 바람직하다. 우리나라에서는 한국원자력연구소에서 IFCI 6.0을 사용하여 ISP-36에 참가하여 실험을 분석하였으며 이에 대한 자세한 내용은 참고문헌⁽⁶⁾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 조건에 가장 근접하기 때문이다. 그림1은 FARO 실험장치의 개요도이고 그림2는 이 실험을 모사하기 위하여 IFCI 입력 작성시에 사용한 제어체적이다. 실험조건은 표1에 비교되어 있다. FARO-28 실험은 그림1과 표1에서 볼 수 있듯이 UO₂:ZrO₂ 구성비가 80:20인 노심상사물 175kg이 0.89m 높이의 공기구간을 자유낙하한 후 높

이 1.44m의 냉각수조로 들어가면서 냉각되는 과정을 측정하였다. L-28의 경우 증기 폭발은 일어나지 않고 노심용융물이 냉각되면서 실험용기의 압력을 상승시킨다.

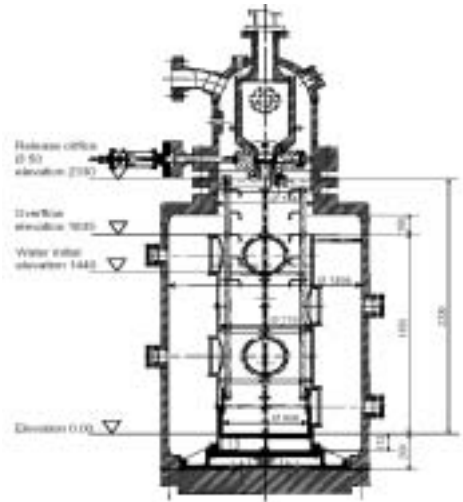


그림1. FARO 실험장치개략도

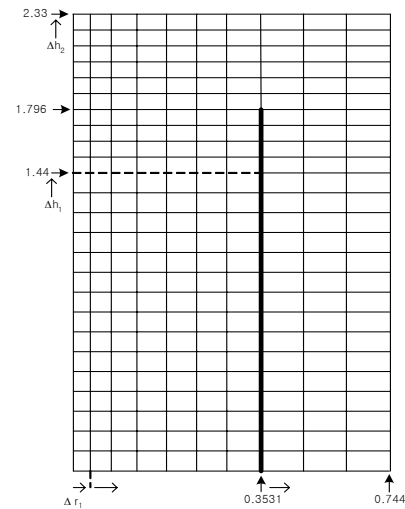


그림2. IFCI 입력 제어체적

분석을 위하여 FARO 실험설비를 그림2 같이 25×10 의 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.

L-28에서 측정한 주요 변수는 용융물이 수조용기 속으로 들어가는 기계적 과정과 FCI로 인한 실험용기의 압력상승이다. 먼저 용융물이 떨어지면서 냉각수와 접촉하는 과정에 대한 계산값과 측정값을 비교하면 그림3과 같다. 그림3은 OECD/SERENA 프로그램 진행과정에서 생산된 결과물로서 여러 가지 코드들이 예측한 값을 함께 비교하고 있다. 용융물 전단이 실험용기의 물과 접촉하는 시간은 측정값이 0.38초, IFCI 계산값이 0.37초이고, 실험용기의 바닥과 접촉하는 시간은 측정값이 0.85초, IFCI 계산값이 0.88초로 매우 정확하며 다른 코드의 결과와 비교하여도 정확한 값이다.

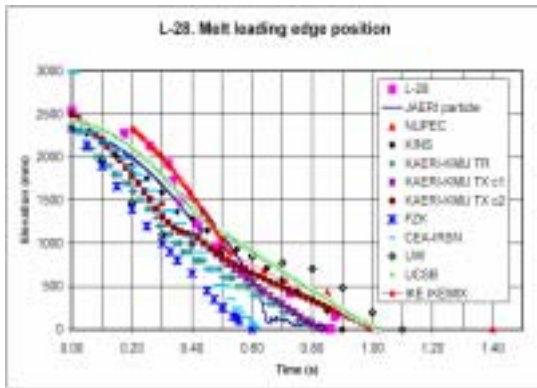


그림3. 노심용융물 전단면의 위치

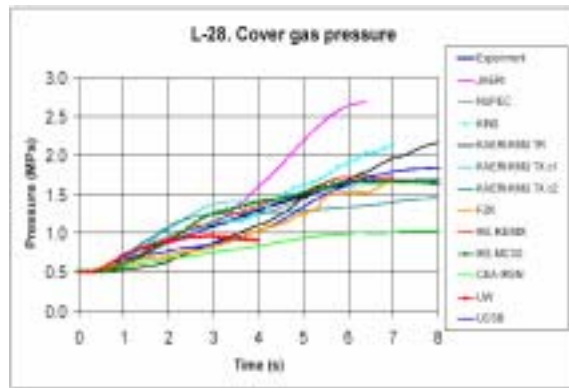


그림4. 압력용기 압력

FCI에 따른 압력상승의 경우 그림4에서 볼 수 있는 것과 같이 측정값은 5초 이후에는 1.7 MPa 정도로 수렴하나 IFCI 계산은 4초 이후 계속 커진다. 그러나 4초 전까지는 거의 정확한 값을 예측하고 있다. 실제의 경우는 노심용융물이 노외로 나온 후 2초 이내에 폭발을 하기 때문에 이정도의 정확도는 받아 들일 수 있는 범위 이내로 보인다.

2.2 KROTOS-44

FARO L-28 실험 분석시에 사용한 입력조건을 그대로 사용하면서 KROTOS-44 폭발 실험을 분석하였다. KROTOS-44 역시 JRC Ispra에서 수행된 실험이며 가장 강렬한 폭발압력이 측정된 실험이다. 그림5 KROTOS 실험장치의 개요도에서 볼 수 있듯이 알루미늄 상사물질 1.45kg이 0.43m를 자유낙하한 후 1.115m의 수조 속으로 주입된다. 용융물 온도, 압력등 구체적인 실험조건은 표1에 비교되어 있다. 그림1과 그림5를 비교해 보면 알 수 있듯이 FCI 실험장치들은 기본적인 구조는 대동소이하다. KROTOS 실험장치의 경우 반경 방향 크기가 작아서 축방향 1차원 효과를 측정할 수 있도록 실험장치가 구성되어 있고 초기의 FCI 코드에 사용된 모델들을 개발하기 위하여 많은 실험을 수행하였다.

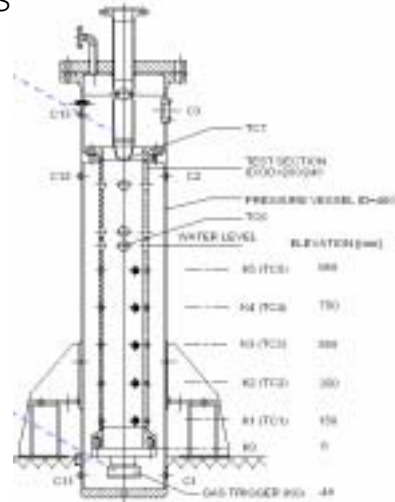


그림5 KROTOS 실험장치 개략도

IFCI 분석은 26×9개의 제어체적을 가지도록 만들었다. IFCI 입력구조는 그림2와

동일하며 축방향 셀의 크기는 0.05m, 반경 방향의 셀위치는 각각 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.125, 0.15, 0.175, 0.2m 이다. 분석조건은 대부분 표1에 나와 있는 실험조건과 동일하다. 다만 실험의 경우 그림5의 K0 위치에서 기폭을 시키나 IFCI 분석의 경우 이것이 불가능하여 K1위치의 제어체적이 4MPa이라는 조건을 주어서 기폭을 시켰다.

KROTOS-44실험은 가장 강렬한 폭발이 일어난 실험이기 때문에 압력만을 서로 비교하였다. 그림6에서 푸른 선은 측정된 압력값이고 검은 선은 IFCI 가 계산한 값이다. 전반적으로 상당히 정확하게 압력을 예측하고 있음을 알 수 있다. IFCI 코드에서 사용하고 있는 모델들이 KROTOS 실험결과를 기준으로 개발되었기 때문에 IFCI 코드의 경우 입력만 정확히 주면 KROTOS 실험결과를 잘 모사할 수 있는 것 같아 보인다.

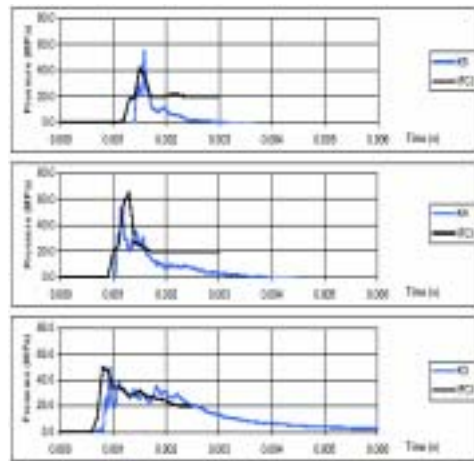


그림6 증기폭발 압력

2.3 TROI-13

TROI 실험은 UO_2 노심상사물을 쓰면서 최초로 자발폭발을 보여준 실험이라는 면에서 많은 주목을 받고 있으며, 한국원자력연구소에서 수행되었다. TROI 실험은 그림7에서와 같이 $UO_2:ZrO_2(70:30)$ 노심상사물 7.7 kg이 약 3.9m를 자유낙하한 후 0.69m의 수조로 들어가도록 구성되어 있다. 구체적인 실험조건은 표1에 다른 실험과 비교되어 있다. 용융물의 온도가 너무 높고 자유낙하 거리가 긴 점등이 다른 실험과 상이하며 UO_2 상사물질을 사용하면서 최초로 자발적인 증기폭발이 일어난 실험이다.

IFCI분석은 그림7의 실험장치를 32×10개의 제어체적을 사용하여 모사하였다. 축방향 제어체적의 높이는 0.04m이다. 다른 실험장치에 비하여 실험장치가 커서 좀더 많은 제어체적이 사용되었다. IFCI 입력작성 시 기하학적 구조와 관련해서는 그림7과 동일하도록 작성하였고, 그 외의 선택사항은 FARO-28, KROTOS-44 분석 시에 사용한 선택과 동일한 값을 사용하여 분석의 일관성을 유지하도록 하였다.

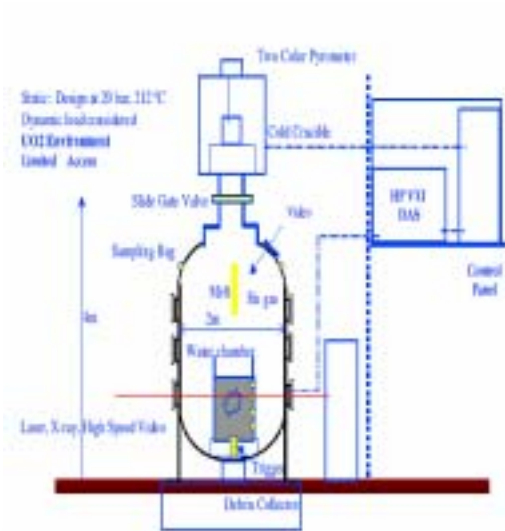


그림7 TROI 실험장치 개략도

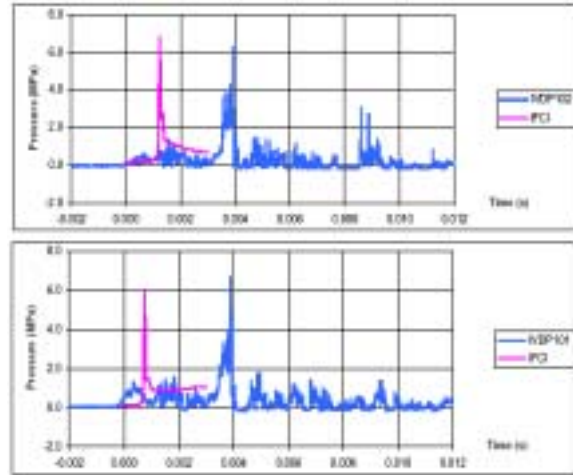


그림8 증기폭발 압력

그림8은 측정된 압력값과 IFCI 계산압력을 비교하여 보여주고 있다. 실험에서는 4ms 부근에서 최대압력이 나타나고 있으나 계산상으로는 기폭후 1ms에서 최대압력을 보여주고 있다. TROI-13은 자발적인 증기폭발이 일어난 실험인 반면, 코드계산에서는 기폭을 시켜주어야 하는데 기폭조건을 실험으로부터 얻을 수 없다. 따라서 실험과 동일한 기폭조건을 분석시에 줄 수가 없었으며 그림8에서 증기폭발 시점이 다른 것은 이로부터 기인한 것으로 이해할 수 있다. 이러한 차이에도 불구하고 그림8에서 보듯이 최대 압력 및 압력파의 폭은 코드가 적절히 예측하고 있음을 볼 수 있다.

이상과 같이 FARO L-28, KROTOS-44, 및 TROI-13의 3가지 FCI 실험결과를 코드 검증 차원에서 IFCI 코드로 분석하였다. 코드계산값과 측정값을 일치시키도록 임의로 변수를 조절하지 않고, 최대한 일관성 있게 입력변수를 선택하여 분석을 수행한 결과 비록 증기폭발의 세부적인 과정을 정확하게 모사하지는 못하더라도 압력등 주요변수는 적절한 수준에서 모사할 수 있음을 파악할 수 있었다.

3. APR1400 원자로공동에서의 노외증기폭발 하중평가

2절에서와 같은 코드 검증작업을 거치면서 IFCI 코드의 분석능력을 파악하고, 실험을 분석할 때에 사용한 입력변수를 사용하여 APR1400 노형의 원자로공동에서 발생할 수 있는 노외증기폭발 하중을 분석하였다.

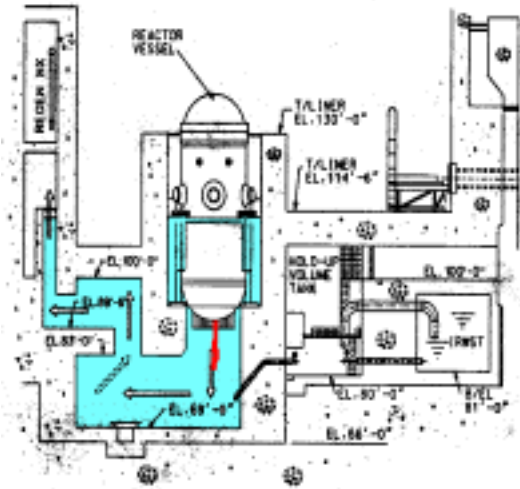


그림9. APR1400의 원자로공동구조

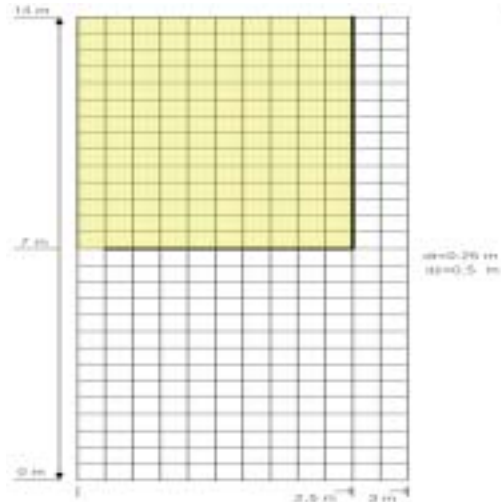


그림10. IFCI 제어체적

그림9는 APR1400의 원자로공동 구조이며 증기폭발이 일어날 당시 원자로용기 외 벽냉각을 위하여 원자로 저온관 높이까지 냉각수가 채워져 있다고 가정하였다. 그림10은 실제의 원자로공동을 IFCI 입력으로 만들때에 사용한 제어체적을 보여주고 있다. 본 분석의 목적은 한수원이 TEXAS-V로 분석한 결과에 대한 검증계산이기 때문에 계산 조건은 한수원이 분석에 사용한 조건과 가능한 동일하도록 노력하였다.

증기폭발 분석결과에 가장 영향을 미치는 변수는 참여하는 노심용융물의 양, 원자로공동의 압력 및 냉각수의 온도이다. 한수원이 분석할 결과 중 가장 보수적인 조건은 2800K의 노심용융물 1.14톤이 대기압 및 상온의 냉각수와 반응한 경우였다. 본 분석에서는 원자로용기내에 있던 약 70톤의 노심용융물이 직경 0.5m 파손부위를 통하여 자유낙하로 원자로공동으로 나오는 것으로 모사하였다.

그림11은 노심용융물이 원자로용기에서 원자로공동으로 방출되는 과정을 보여준다. 물론 이 과정은 주어진 계산조건에 한정된 현상이기는 하지만 우리가 주목하여야 할 현상은 비록 원자로용기에 70톤의 용융물이 있어도 실제 원자로공동에 쏟아지는 양은 1.2톤 전후이라는 것이다. 이는 그림 12에서 명확히 확인할 수 있다. 원자로용기 하부가 깨어져 용융물이 쏟아지더라도 차가운 냉각수와 반응으로 상향으로 흐르는 증기유량이 발생하고 이로 인해 용융물이 무한정 원자로공동으로 나오지는 않는다. 이 과정은 현상학적으로 적절한 것으로 보여지며 따라서 실제 증기폭

발에 참여하는 노심용융물의 양이 수십 톤이 아니고 일정한 상한값을 가질 수 있음을 보여준다. 여러 가지 조건에서 실제로 원자로공동으로 분출되는 노심용융물의 양이 어느 정도 인지를 파악하는 것은 매우 중요하며 추가적인 연구가 필요하다.

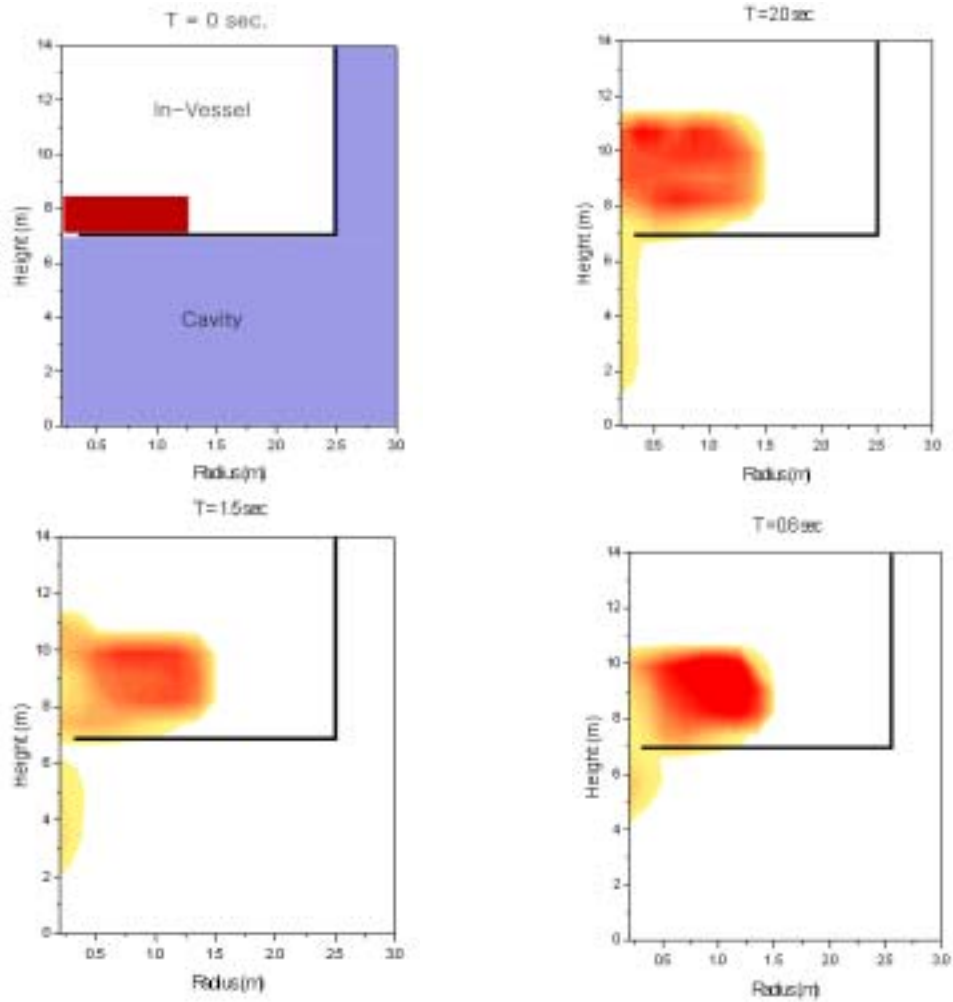


그림11. 노심용융물 노외방출과정

그림12은 약 1.4톤의 노심용융물이 있는 상태에서 증기폭발이 일어날 경우의 압력이다. 증기폭발이 일어나지 않을 경우의 최대 압력은 3.0MPa 이하이나 이 그림에서의 최대압력은 90MPa 이다. 폭발을 약 3ms정도로 가정하고 간단히 수계산을 하여도 임펄스는 135 kPa-s 정도이며 이는 사업자의 계산값 10.4 kPa-s를 초과하는 값이다.

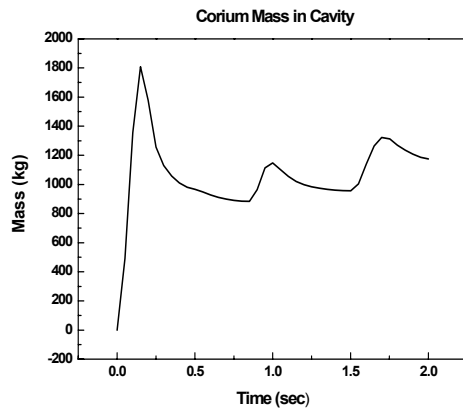


그림12 원자로공동내의 노심용융물 양

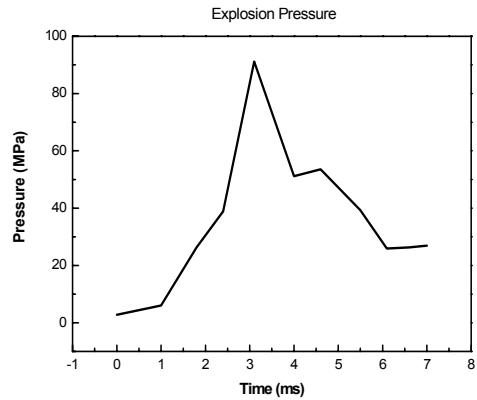


그림13 증기폭발시의 압력

5. 결론

IFCI 6.0 코드를 사용하여 신형경수로 1400의 원자로공동에서 일어날 수 있는 노외증기폭발 하중을 평가하였다. 분석은 사전설계안전성 심사과정에서 한수원이 TEXAS-V로 분석한 결과를 검증하기 위하여 수행되었으며 증기폭발에 참여하는 노심용융물의 양과 원자로공동조건이 동일하도록 하였다. 또한 코드의 검증을 위하여 IFCI 코드로 3가지 증기폭발실험을 분석하였으며 이때 사용한 변수 및 입력조건을 그대로 적용하여 분석의 일관성이 유지될 수 있도록 하였다. IFCI 분석결과에도 여전히 불확실성이 많아 현재의 계산결과를 가지고 실제 상황에 대해 단정 짓기는 어렵지만 동일한 조건에서 계산한 한수원의 계산결과와는 배치되는 결과를 얻었으며, 원자로공동의 건전성이 위협 받을 수도 있는 것으로 보인다. 그러나 증기폭발하중 평가에 내재한 불확실성을 줄이기 위해서는 추가적인 국내외의 연구노력이 더 필요할 것이다.

표1.증기폭발 실험조건

실험	FARO L-28	KROTOS-44	TROI-13
용융물 구성	UO ₂ :ZrO ₂ (80:20)	Al ₂ O ₃	UO ₂ :ZrO ₂ (70:30)
주입된 용융물 양	175 kg	1.45 kg	7.7 kg
용융물 온도	3053 K	2673 K	3300K
용융물 superheat	203 K	359 K	
실험장치 압력	0.51 MPa	0.1 MPa	0.1 MPa
냉각수 온도	424 K	363 K	292 K
냉각수 과냉각도	0 K	10 K	81 K
주입직경	0.05 m	0.03 m	0.02 m
용융물 주입 Δp	Gravity	gravity after crucible impact	gravity
자유낙하 거리	0.89 m	0.43 m	3.9 m
냉각수 깊이	1.44 m	1.115 m	0.69 m
시험용기 직경	0.71 m	0.2 m	0.6 m
자유체적	폐체적(3.5 m ³)	폐체적 (0.23m ³)	폐체적(8.03 m ³)
기폭	N/A	yes (at bottom)	N

6. 참고문헌

- [1] Assessment of In-Vessel Core Debris Coolability for the APR1400 Design, App.I, KEPRI, 2001
- [2] NUREG/CR-6211 SAND94-0406 Integrated Fuel-Coolant Interaction (IFCI 6.0) Code
- [3] OCDE/GD(97)198, Level 2 PSA Methodology and Severe Accident Management, OECD, 1997
- [4] D.Magallon,I.Huhtiniemi , Corium melt quenching tests at low pressure and subcooled water in FARO, Nuclear Engineering and Design, 204(2001) 369-376
- [5] NEA/CSNI/R(97)31, FARO test L-14 on fuel coolant interaction and quenching,1997
- [6] KAERI/TR-996/98 IFCI6.0 모델 및 검증계산 (FARO L-14 실험모의: ISP-39),1998