

종합전산코드용 증기폭발 하중 예측 모듈 개발- II. 모듈 개발 및 MELCOR 개선

박익규, 김동하, 송진호

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

중대사고 해석용 종합코드인 MELCOR에 생략되어 있는 용기외 증기폭발 모듈을 삽입하여 MELCOR로 하여금 원자로공동에서의 증기폭발력을 계산할 수 있게 개선하였다. 먼저, 증기폭발 상세 해석 코드로 선정된 TEXAS-V를 이용하여 원자로공동에서 증기폭발 예제 계산 및 불확실성 인자에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 증기폭발 거동이 냉각수 및 용융물의 열수력 조건에 따라 달라지므로 이 열수력 조건을 변화시켜가며 TEXAS-V 코드 계산을 수행하여 검색표를 개발하였다. 이 검색표와 다항식 보간법을 이용하여 증기폭발력을 계산하는 모듈을 개발하였고, 이렇게 개발된 증기폭발 모듈을 MELCOR에 접목하였다. PWR 원자로공동에서 용융물-냉각수 반응을 모의하기 위한 MELCOR 입력 자료를 개발하여, 개선된 코드가 원자로공동에서의 증기폭발력을 적절히 제시함을 확인하였다. 개발된 증기폭발 모듈의 적용 한계는 상세 해석 코드로 생산된 검색표에 의해 제한이 된다. 따라서, 다양한 사고 시나리오에 대해서 적용하기 위해서는 가용한 상세 해석 코드를 효과적으로 활용하여 현재 검색표의 상하한선을 벗어나는 곳에서의 자료를 수집하여 검색표를 확장하는 작업이 요구된다.

Abstract

MELCOR code has been improved to estimate ex\_vessel explosion work. First, steam explosion sample calculations and sensitive studies on uncertain parameters at PWR cavity were conducted using TEXAS-V, which is a mechanistic steam explosion analysis code. TEXAS-V simulations were performed to evaluate steam explosion work based on the thermal-hydraulic conditions of fuel and coolant, which cover the actual situation during the accident. Those results were used to prepare the look-up table. That table and Lagrangian interpolation scheme were merged into MELCOR code. To simulate fuel-coolant interaction at the reactor cavity, MELCOR input data were prepared. It was found that the improved MELCOR could estimate the steam explosion work at the reactor cavity from the look-up table for a given initial condition calculated from MELCOR. As the steam explosion module is limited by the upper and lower boundary of the look-up table parameters, these boundaries will be expanded to cover various accident sequences.

## 1. 개요

MELCOR[1,2]는 원자력발전소 중대사고 모델링 및 분석도구로서 사용되는 대표적인 전산코드로서 이를 이용하여 모든 원자로용기 내외의 중요한 모든 시스템을 동시간에 해석할 수 있으며 광범위한 민감도 및 불확실성 분석을 수행할 수 있다. 또한, 이 코드는 사고평가를 위해 빠른 계산 수행능력을 가지고 있으며 거의 모든 시스템이 모듈로 구성되어 있어서 유지보수 및 모델개선이 용이하다. MELCOR는 사고평가를 위한 전산코드로서 사고진행경위 개개의 물리적인 현상에 대한 자세한 이해보다는 개개의 사고경위가 하나의 사고시나리오에 미치는 영향을 모사하고 있다. 용융물과 냉각수 반응과 같은 개별 현상에서 대해서는 자세한 열수력적 거동은 배제되어 있으며 물리적으로 합리성을 유지하며 최대한 간략하게 표현하고 있다. 이렇게 용융물과 냉각수의 반응과정이 간략하게 표현되어 있기 때문에 이 반응으로 인한 수증기발생, 수소발생, 그리고 증기폭발의 영향 평가가 어렵다는 것이다.

특히, 용융물과 냉각수 반응으로 인한 증기폭발 평가는 보류되고 있다. 지난 수십년간 증기폭발에 관한 많은 실험적, 이론적 연구가 수행되어 왔으며, 이로 인하여 증기폭발에 대한 상당한 이해가 이루어졌고 증기폭발시 폭발압력 및 에너지 변환비 등이 어느 정도 예측이 가능해진 상황이다. 최근에는 그 동안 수행된 증기폭발 연구를 토대로, FARO 실험[3]과 같은 대규모의 고압 실험을 근거로 하고, 원자로용기 내부에서 강력한 외부 기폭이 없다는 견지 하에서, 중대사고시 노심 용융물과 원자로용기 잔류 냉각수가 반응할 때 증기폭발의 발생으로 인한 알파 모드 사고의 가능성은 없다는 전문가 의견을 도출했다. 그러나, 원자로공동에서의 증기폭발로 인한 원자로공동 벽 파손 여부 등 용기의 폭발에 있어서 실험 자료가 부족하여 전문가들의 일치된 의견 도출이 힘든 상황이다. 또한 APR1400에서 채택을 고려하고 있는 IVR 전략은 원자로공동에 과냉각도가 큰 냉각수를 가득 채우는데 이때 원자로용기가 파손되어 노심 용융물이 원자로공동으로 투입된다면 강력한 용기의 증기폭발이 우려된다. 따라서, 원자로공동에서의 증기폭발에 대한 실험 및 해석적인 노력이 좀더 요구되고 있다.

다양한 사고 시나리오에 따라 원자로공동에서 발생하는 용융물-냉각수 반응 거동을 해석하기 위해서는 증기폭발 상세 해석 모델을 중대사고 평가 종합코드에 포함시키는 것이 필요하다. 증기폭발 상세 해석 코드인 TEXAS-V 모델의 일부를 SCRAP-RELAP5에 병합한 것은 이러한 노력의 결실이다[4]. 그러나, 위와 같이 증기폭발 상세해석 모델을 중대사고 평가 종합코드에 직접 병합할 경우 증기폭발 상세 해석 코드의 계산 속도 및 수렴성에 보장이 있어야 한다. 한편, 민감도 및 불확실성 분석을 수행하기 위하여 빠른 계산을 특징으로 하는 MELCOR 코드에 이와 같은 방법은 부적절하다. 증기폭발 현상이 매우 복잡한 물리적 현상들로 이루어져 있기 때문에 간단한 상관식의 형태로서 이를 해석하는 것은 매우 어렵다. 따라서, 기존에 개발된 증기폭발 상세 해석 코드의 결과를 도표화하여 다항식 보간법을 사용 MELCOR 코드에 적용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

본 연구의 목적은 MELCOR코드에서 생략되어 있는 용기의 증기폭발 모듈을 삽입하여 MELCOR로 하여금 원자로공동에서의 증기폭발력을 계산할 수 있게 개선하는 것이다. 이를 위하여 먼저 상세 해석 도구로 선택된 TEXAS-V 코드의 입력을 검토하고 원자로공동에서의 증기폭발 계산을 위한 예제 계산을 통해 이 코드의 특성 분석 및 불확실성 인자에 대한 민감도 분석을 수행하였다[5]. 증기폭발 거동이 냉각수 및 용융물의 열수력 조건에 따라 달라지므로 이 열수력 조건을 변화시켜가며 TEXAS-V 코드 계산을 수행하여 검색표를 개발하였다. 이 검색표와 다항식 보간법을 이용하여 증기폭발력을 계산하는 모듈을 개발하였고, 이렇게 개발된 증기폭발 모듈을 MELCOR에 접목하였으며, 평가용 MELCOR 입력자료를 활용하여 이를 확인하였다.

## 2. 증기폭발 모듈 개발

## 2.1. TEXAS-V를 이용한 원자로공동에서 증기폭발 예제계산 및 불확실성 인자 분석

원자로공동에서의 증기폭발은 그림 1에서와 같이 노심 용융물이 원자로용기 하반구에 쌓였다가 관통부가 파손되어 원자로공동으로 낙하하면서 발생된다. 이때 노심 용융물 및 냉각수의 열수력 조건은 증기폭발 현상을 분석하는데 주요한 초기 인자가 되며, 본 연구에서는 표 1과 같은 조건을 가정하여 TEXAS-V코드의 입력 자료를 준비하였다. 또한, 증기폭발 기폭의 시점은 매우 불확실하며 증기폭발력을 결정짓는 중요한 요소가 될 수 있다. 예제 계산에서는 용융물 제트가 원자로공동의 바닥에 닿았을 경우에 기폭이 된다고 가정하였으며, 기폭 시점이 폭발력에 미치는 영향 분석도 수행하였다. 반응부의 단면적은 FARO 실험의 제트직경에 대한 반응용기 직경비 7의 3배에 해당하는 값이다.

이상의 조건을 입력으로 하여 원자로 공동에서의 증기폭발 예제 계산수행하였고, 그림 2에 0.2m 간격으로 설치된 각 압력 측정 위치 P1, P2, P3(격자번호 4, 6, 8; 바닥부터 높이가 0.25m, 0.45m, 0.65m)에서 시간에 따른 압력 파형을 제시하였다. 이 그림에 의하면 폭발의 최고 압력과 전파 속도는 각각 40 MPa, 1500 m/s에 이르고 그 파장은 위치별로 차이는 있지만 대략 1 msec정도로 판단된다. 원자로공동에 투입된 전체 용융물의 열 에너지와 냉각수의 운동 에너지를 고려한 최대 에너지 변환비는 0.4 %로 계산되었다. 하지만 실제 냉각수와 혼합된 용융물의 질량은 총 투입된 용융물의 20 %에 해당하므로 이를 고려한 에너지 변환비는 2.0 % 이다.

증기폭발 해석에 영향을 미칠 수 있는 격자 개수, 격자 단면적(반응 단면적), 혼합 완료 조건, 그리고 기폭력에 대한 민감도 분석도 결과를 표 2 ~ 5에 제시하였다. 원자로공동에서의 증기폭발 예제 계산으로 시간에 따른 폭발 압력과, 압력파의 전파속도, 그리고 에너지 변환비 등을 계산할 수 있었다. 4개의 불확실한 인자에 대한 민감도 분석 결과 격자 개수와 기폭력은 증기폭발 예측에 큰 영향이 없는 것으로 판단되었다. 그러나, 격자 단면적과 혼합 완료 조건은 폭발력 예측에 영향을 주는 것으로 밝혀졌다.

검색표 개발 계산에서는 용융물 제트 직경이 0.1-0.2m이기 때문에 0.25 m의 격자 길이와 기저 압력 대비 0.4MPa 높은 기폭 압력을 사용하였으며, 격자 단면적을 결정짓기 위해서 제트 직경에 대한 격자의 직경비를 FARO 실험과 같은 7을 사용하였다. 또한 혼합 완료 조건으로 증기 분율 0.1을 사용하여 용융물이 냉각수에 투입된 후 특정 격자에서 증기 분율이 0.1을 초과할 경우 혼합 계산을 완료한 후 이 특정 격자를 기폭 격자로 지정하여 폭발 계산을 수행하였다.

## 2.2. 계산 Matrix 개발

증기폭발 계산에 있어서 초기변수로는 냉각수 및 용융물의 열수력 조건이다. 냉각수의 열수력 조건으로는 냉각수 깊이, 냉각수 온도, 냉각수 압력, 그리고 냉각수 직경을 들 수 있으며, 용융물의 열수력 조건으로는 용융물 제트 직경, 용융물 제트 속도, 그리고 용융물 온도를 고려할 수 있다. 냉각수 직경이 문제가 되는 것은 TEXAS-V 코드가 1차원이기 때문이며 본 연구에서는 FARO 실험의 용융물 제트 직경/냉각수 직경 비 7:1을 유지하였기 때문에, 최종적으로 Maxtrix 구성에 필요한 변수는 냉각수 깊이, 냉각수 온도, 냉각수 압력, 용융물 제트 직경, 용융물 제트 속도, 그리고 용융물 온도 등이다.

냉각수 깊이는 용융물 제트가 투입될 수 있는 거리를 결정짓게 되며 따라서 혼합체 결정에 중요한 역할을 하게 된다. 냉각수 깊이가 얕으면 냉각수와 혼합될 수 있는 용융물도 작아지게 되고 이에 따라 증기폭발력도 낮게 나타날 것으로 예상된다. 냉각수 깊이가 깊어지면 이에 따라 냉각수와 혼합될 수 있는 용융물도 많아지게 되므로 상대적으로 증기폭발력은 크게 나타날 것으로 예상된다. 그러나, 냉각수 깊이가 깊어지더라도 혼합길이가 길어지면 수증기량이 많아져서 증기폭발력이

작아지거나 발생하지 않을 수 있어서 냉각수 깊이에 따른 증기폭발력 증가에는 한계가 있을 것으로 판단된다.

냉각수 온도는 일반적으로 기폭의 확률을 지배하는 것으로 알려져 있다. 과냉각도가 큰 냉각수는 쉽게 증기폭발을 일으키는 반면에 과냉각도가 작거나 포화온도에 이르면 증기폭발은 거의 발생하지 않는 것으로 알려져 있다. 그러나, 냉각수 온도와 증기폭발력과의 상관 관계는 명확하지 않으며 냉각수 온도가 높을 때 냉각수의 기화열이 작으므로 증기폭발력이 상대적으로 크게 나타날 가능성을 배제할 수는 없다.

냉각수 압력도 냉각수 온도와 같이 일반적으로 기폭의 확률을 지배하는 것으로 알려져 있다. 냉각수 압력이 대기압보다 높아지게 되면 용융물 입자를 둘러싸고 있는 수증기막의 내부 에너지가 커져서, 튼튼해지기 때문에 기폭 확률이 낮아진다는 것이다. 냉각수 압력이 증기폭발의 발생을 억제하는 반면에 이 억제력은 증기폭발이 발생한다면 그 폭발력을 더욱 크게 할 수 있다는 점을 가지고 있다.

용융물 제트 직경은 냉각수와 혼합될 수 있는 용융물의 양과 직접 관련이 있다. 용융물 제트 직경이 크면 똑같은 깊이의 냉각수에서도 많은 양의 용융물이 혼합될 수 있다. 그러나, 용융물 제트의 붕괴 양상이 제트 직경이 상당히 작으면 제트 전체가 붕괴될 수 있고, 제트 직경이 상당히 크면 제트의 몸체는 붕괴되지 않을 수 있는 등, 제트 직경에 따라 다를 것으로 예상되어 이에 대한 구체적인 영향은 상당히 불확실성을 지니고 있다. 이와 같은 용융물 제트 붕괴는 전산 모델에 도입되고 있는 제트 붕괴 모델에 상당히 영향을 많이 받을 것으로 예상된다.

용융물 제트 속도는 두 가지 측면에서 냉각수와 혼합될 수 있는 용융물의 양을 결정짓는데 역할을 할 것으로 판단된다. 하나는 용융물 제트 속도가 빠르면 용융물 제트 붕괴가 빨라져 상대적으로 많은 수증기를 생산할 것이기 때문에 증기폭발력을 작게 하는 요인이 된다. 한편으로는 용융물의 투입 속도가 빠르기 때문에 짧은 시간에 더욱 많은 양의 용융물이 냉각수로 투입될 수 있어 증기폭발력을 크게 하는 측면도 있다.

용융물 온도는 용융물이 냉각수에 열을 부여할 수 있는 열량과 직접적으로 관련이 있는 인자이다. 일단 용융물 온도를 제외한 혼합체의 조건이 동일할 시에 증기폭발력은 용융물의 온도에 비례할 것으로 판단된다. 하지만, 용융물의 온도가 과도하게 높을 때에 혼합체의 수증기 분율이 많아져서 증기폭발이 잘 발생하지 않는다는 실험의 결과도 있다. 용융물의 온도가 용융점에 가까워지면 용융물이 혼합 과정에서 고화될 가능성이 있기 때문에 폭발력은 상당히 감소될 것으로 판단된다.

위에서 고찰한 바와 같이 냉각수 및 용융물의 6가지 열수력 조건은 증기폭발 혼합 및 폭발 과정에서 주요 변수로 판단된다. 본 연구에서는 이와 같은 변수들을 변화시켜가면서 증기폭발력을 TEXAS-V를 이용하여 계산하여 도표화하여 이를 이용하고자 한다. 도표화에 앞서 변수들의 상하한선을 설정하는 것이 매우 중요한데, 원자력 발전소 중대사고 시나리오에 따른 모든 불확실성을 고려하여 상하한선을 정하는 것은 어렵고 또한 TEXAS-V 코드의 현재 계산 능력으로 이 모든 계산을 수행하는 것 또한 매우 어렵다. 따라서, TEXAS-V 코드의 계산 능력 및 계산 시간을 고려하여 비교적 작은 범위 내에서 도표를 작성하여 검색 프로그램 개발 및 MELCOR 접목을 검증한 뒤 추후 좀 더 많은 중대사고 시나리오를 커버할 수 있도록 도표를 확장하는 것이 합리적이라 판단된다.

검색표 구성에 필요한 변수 및 보간점에 대한 정보가 표 6에 제시되어 있는데, 이들 보간점에 대해서는 추후 보간점의 개수 및 상하한값의 확장이 요구된다.

### 2.3. 검색표 작성 및 검색 프로그램 개발

검색표 구성의 변수가 되는 냉각수 깊이, 냉각수 온도, 냉각수 압력, 용융물 제트직경, 용융물 제

트 속도, 용융물 온도 등의 값을 변화시켜 가면서 TEXAS-V 코드를 이용하여 증기폭발력을 계산하였다. 표 6에서 제시된 6개의 변수 각각의 보간점에 대해 3x3x3x3x3x3개의 증기폭발 계산을 수행하였다. TEXAS-V 코드는 시간에 따른 폭발 압력을 그 계산 결과로 주는데, 이를 이용하여 최고 폭발 압력 및 폭발시 임펄스를 계산하여 TABLE.DAT라는 파일에 표 7과 같은 검색표를 구성하였다.

만약 증기폭발력에 영향을 미치는 중요한 두 인자를 변수 x, y로 선택한다면 각 값의 상하한(x1, xK), (y1, yL)에서 증기폭발 압력 및 충격량을 상세 해석 코드를 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{peak} \text{ or } I &= f(x_1, y_1), P_{peak} \text{ or } I = f(x_2, y_1), \dots, P_{peak} \text{ or } I = f(x_K, y_1) \\ P_{peak} \text{ or } I &= f(x_1, y_2), P_{peak} \text{ or } I = f(x_2, y_2), \dots, P_{peak} \text{ or } I = f(x_K, y_2) \\ &\dots \\ P_{peak} \text{ or } I &= f(x_1, y_L), P_{peak} \text{ or } I = f(x_2, y_L), \dots, P_{peak} \text{ or } I = f(x_K, y_L) \end{aligned}$$

여기서, x, y는 냉각수 또는 용융물의 열수력적 조건이며 다음 Lagrangian 보간법을 사용하여 주어진 점 외에서의 압력 또는 충격량을 계산할 수 있다.

$$f(x, y) = \sum_{l=0}^L \delta_{L,l}(y) \left\{ \sum_{k=0}^K \delta_{K,k}(x) f(x_k, y_l) \right\}$$

여기서,  $\delta$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\delta_{K,k}(x) = \prod_{i=0, i \neq k}^K \frac{x - x_i}{x_k - x_i}, \quad \delta_{L,l}(y) = \prod_{i=0, i \neq l}^L \frac{y - y_i}{y_l - y_i}$$

다항식 보간법을 사용하여 좀더 정확한 근사치를 얻기 위해서는 보간점을 추가하거나, Lagrangian 보간법의 단점을 보완할 수 있는 여러 가지 보간법에 대한 선택 사용이 가능할 것이다. 이와 같은 Lagrangian 보간법을 6개의 변수에 대해 적용하여 폭발 압력 및 폭발 임펄스를 검색하는 프로그램을 개발하여 사용하였다.

검색 프로그램이 검색표를 검색하여 적절한 계산을 수행하는 것을 확인하기 위하여 먼저 각 보간점에서 검색 프로그램이 계산하는 값과 검색표 값을 비교하였으며 이 두 값이 정확히 일치함을 확인하였다. 검색 프로그램이 보간점이 아닌 곳에서 적절한 계산을 수행하는지 확인하는 것은 수 계산 결과와 비교하는 것이 타당하다. 먼저 6개 변수 각각 2개의 보간점에 대해 총 64(2X2X2X2X2X2)번의 계산을 수행하여 이의 평균을 구한다. 이 평균값과 6개 변수 각각 2개의 보간점의 중간치를 검색 프로그램의 입력으로 하여 구한 값을 비교한 결과 이 두 값이 일치함을 확인하였다.

### 3. 증기폭발 모듈의 MELCOR 점목 및 영향 평가

#### 3.1. 모듈점목 내용

중대사고 진행 도중 원자로용기가 파손되면 노심 용융물이 원자로공동으로 전달된다. 이때 원자로공동에 냉각수가 존재한다면 노심 용융물과 냉각수의 반응으로 증기폭발이 발생할 수 있다. 이 증기폭발력이 커서 원자로공동이 파손된다면 원자로 구조물의 건전성을 크게 저해할 수 있으며 핵분열생성물의 거동 또한 달라질 것으로 예상된다. 따라서 증기폭발 상세 해석 코드를 활용하여 작성한 검색표를 MELCOR 코드에 점목하여 원자로공동에서의 증기폭발력을 계산하는 능력을 추가하였다.

검색표를 이용하기 위해서 원자로공동 냉각수 깊이, 온도, 압력, 용융물 방출 직경, 용융물 방출 속도, 용융물 온도 등 6가지의 열수력 인자들을 원자로용기의 파손 당시에 추출할 필요가 있다. 또한 검색표를 이용하여 추출된 열수력 인자들에 의한 증기폭발력을 계산하기 위해서는 검색 프

로그래밍(STX\_IPL.F)이 요구된다. 본 논문에서는 열수력 인자들의 추출하여 검색 프로그램에 넘겨주는, 즉 MELCOR코드와 검색 프로그램을 매개하는 프로그램(STX\_MEL.F)과 이 매개 프로그램과 직접 관련이 있는 MELCOR 부프로그램을 중심으로 간략히 기술하였으며, 자세한 사항은 참고 문헌[6,7]에 제시되어 있다.

### 3.2. 냉각수 및 용융물 관련 부프로그램 확인

저압 방출 혹은 고압 방출에서 원자로공동의 냉각수 깊이, 온도, 압력 등의 열수력 인자들은 MELCOR 부프로그램 CAV2CV.F에서 추출할 수 있으며, 저압 방출에서 용융물 방출 직경, 방출 속도, 용융물 온도 등의 열수력 인자들은 MELCOR 부프로그램 FDISRT.F 와 FDICON.F에서 추출할 수 있다.

개발된 증기폭발 모듈(STX 모듈)에 관련된 컨트롤 변수로는 FAILOPT9, FAILOPTOLD9, CAVOPT9 등 세 가지가 있는데 이들의 초기화는 FDISRT.F와 FDICON.F를 불러들이는 상위 단계의 프로그램인 FDIRN1.F에서 수행한다. 따라서 STX 모듈과 관련한 프로그램으로는 MELCOR 부프로그램인 FDIRN1.F, FDISRT.F, FDICON.F, CAV2CV.F와 검색 프로그램 STX\_IPL.F와 매개 프로그램인 STX\_MEL.F의 총 6개 이며, 아래에 증기폭발과 관련된 부프로그램에 대하여 간단히 요약하였다.

STX\_MEL.F: MELCOR로부터 증기폭발 계산을 위한 열수력 입력 인자를 추출하고 이들 인자를 STX\_IPL.F에 넘겨주는 매개 프로그램

STX\_IPL.F: 상세해석코드를 활용하여 작성된 증기폭발력 검색표를 검색하여 다항식 보간법을 활용 용융물 및 냉각수의 열수력 인자에 따른 증기폭발력을 계산하는 검색 프로그램

STX\_HED.F: MELCOR의 데이터를 STX 모듈에 전달하기 위한 COMMON BLOCK 지정 헤더화일

FDIRN1.F: FCI 반응을 제어하는 팩키지로서 FCI가 이 TIME STEP에서 시작하는지 이미 시작하였는지를 판단하여, 저압 방출, 고압 방출 혹은 증기폭발을 다루는 부프로그램을 불러들이는 역할.

FDISRT.F: 전달 모듈로부터 용융물에 관해서 묻고 용융물 전달이 저압 방출인지 고압 방출인지 결정

FDILOW.F : 저압 방출에서 FCI를 제어하는 부프로그램, 저압 FCI의 혼합이나 증기폭발을 위한 시험에서 혼합 계산, 만약 증기폭발이 발생하면 혼합 계산없이 리턴

FDICON.F: FCI 계산이 이미 시작되었을 때 용융물 전달 모듈, 방출모드에 관계없음

FDISXLF, FDISEX.F: 증기폭발 계산을 위한 부프로그램, 현재 모델링 제외

CAV2CV: CAVITY MODEL 팩키지로서, 부피 변화와 질량을 예측함

### 3.3. 증기폭발 모듈 접목 절차

먼저, STX 모듈에서 요구되는 COMMON BLOCK을 FILE STX\_HED.FOR에 설정한다. 원자로 용기 파손, 출력 화일 OPEN, 원자로공동의 열수력 조건 저장 유무를 나타내는 CONTROL FACTOR, 계산간격, 원자로용기 파손 시각, 현재 시간, 용융물 속도, 용융물 온도, 용융물 부피, 용융물 질량, 용융물 방출직경, 그리고 STX 모듈에서 궁극적으로 추출하고자 하는 값으로서 각각 원자로공동의 냉각수 깊이, 온도, 압력, 방출되는 용융물의 직경, 속도, 온도가 포함되어 있다.

STX 모듈은 FDIRN1.F, FDISRT.F, FDICON.F를 통하여 방출되는 용융물의 직경, 속도, 온도를 구하고, CAV2CV.F를 통하여 원자로공동 냉각수의 깊이, 온도, 압력 등을 제공한다. 이러한 목적

을 달성하기 위하여 본 연구에서는 MELCOR 코드의 위 4 개 부프로그램에서 냉각수 및 용융물의 열수력 조건을 추출하기 위한 부프로그램 STX\_MEL.F과 STX\_MEL.F에 의해 불리워져 추출된 열수력 조건과 증기폭발 상세 해석 코드를 활용하여 작성된 검색표를 보간하여 폭발압력과 충격량을 계산하여 STX\_MEL.F에 되돌려주는 STX\_IPL.F를 작성하였다.

증기폭발 모듈의 접목 절차에 관한 플로우 차트는 그림 3과 같으며, 자세한 내용은 참고문헌 [6,7]에 정리되어 있다.

### 3.4. 증기폭발 모듈 평가

그림 1과 같이 초기에 용융물이 원자로용기 하반구에 존재하였다가 하반구가 파손되면 용융물이 원자로공동에 투입된다. 이때 기존 MELCOR 코드에서는 증기폭발을 계산하는 능력이 없기 때문에 용융물은 냉각수와 반응하여 Quenching 과정을 겪을 뿐이다. 개선된 MELCOR 코드에서는 원자로용기 하반구가 파손되었을 때 STX 모듈을 불러들여 용융물의 낙하조건 및 원자로공동의 냉각수 조건을 읽어들인다. STX 모듈은 이 냉각수 조건과 검색표 및 다항식 보간법을 사용하여 폭발최고 압력 및 폭발최고 충격량을 계산하게 된다.

원자로공동에서 용융물과 냉각수반응을 모의하기 위하여 울진 원자력 발전소에 대한 MELCOR 입력[8]중 격납건물과 원자로용기 부분을 활용하고, 나머지 부분은 생략한 간략한 입력을 마련하였다. 원자로용기의 노심입력 또한 울진 원자력 발전소의 MELCOR입력을 활용하였다. 최초에 원자로용기 Lower Plenum에는 40 ton가량의 연료가 용융 상태로 있으며 원자로공동에는 냉각수가 대략 1 m정도의 높이로 냉각수가 대기압 상태에서 311 C를 유지하고 있다. 계산이 시작되면 MELCOR는 자체 모델에 따라 원자로용기 바닥을 파손시키고 용융물을 원자로공동으로 전달한다.

그림 4 ~그림 7에는 원자로공동에서의 증기폭발 계산을 할 때 입력자료가 되는 중요한 열수력 인자들이 정리되어 있다. 그림 4에서 초기에는 원자로용기 및 원자로공동의 압력이 각각 2 기압과 1 기압을 유지하고 있다가 용융물로 인한 가열로 인해 원자로 용기 압력이 2.5 기압까지 증가한다. 계산 시작 후 10초후에는 용융물 방출이 시작되어 원자로용기의 압력은 급격히 감소한다. 그림 5 와 6에서 원자로공동의 냉각수 조건은 용융물 방출로 인해 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타나는데 이것은 용융물의 양이 4 ton정도로 냉각수에 비해 상당히 작은 양이기 때문이다. 그림 7에서 용융물 방출은 계산 시작 후 10초에 시작되며 25초에 이르러서 원자로용기에 있던 모든 용융물이 방출됨에 따라 용융물 방출은 마무리된다.

증기폭발 모듈 삽입 전에는 원자로공동에서 증기폭발력을 계산할 수 없었지만 모델 삽입 후에는 증기폭발 모듈로부터 표 8과 같은 증기폭발 결과를 얻을 수 있다. 표 8에서 STX\_MEL 이라는 부프로그램이 MELCOR로부터 원자로공동 냉각수의 열수력 조건 및 원자로용기로부터 방출되는 용융물의 열수력 조건을 읽어들여, STX\_IPL 이라는 부프로그램에 이를 넘겨준다. STX\_IPL은 Look-up table 인 TABLE.DAT을 읽어들여 STX\_MEL로부터 넘겨 받은 열수력조건하에서 증기폭발력을 계산하여 이를 다시 STX\_MEL에 넘겨준다.

표 8의 STX\_MEL3에서 계산 시작 후 8.5초에 용융물은 원자로용기에서 원자로공동으로 방출되기 시작하여 13.6초에 방출이 완료된다. STX\_MEL5와 STX\_MEL6에서 냉각수의 깊이, 온도, 압력, 그리고 용융물의 체트직경, 속도, 온도의 값은 각각 1.82m, 311 K, 0.1MPa, 0.18m, 8.35 m/s, 2773.5K 로 나타났다. STX\_IPL7과 STX\_IPL8에서 STX\_MEL 이라는 부프로그램은 STX\_IPL이라는 부프로그램에 냉각수와 용융물의 열수력조건을 제대로 넘겨줌을 확인할 수 있다. STX\_MEL9와 STX\_MEL10에서 냉각수와 용융물의 열수력조건에 따라 예측한 증기폭발의 하중과 침투압력이 각각 116.34  $kPa \cdot sec$ , 106.78 MPa임을 알 수 있다. 이 값들은 용융물 체트직경에 대해 7배의 직경을 가진 반응용기 벽면에서의 값으로 실제 원자로 공동에 적용하기 위해서는

원자로 공동의 실제 직경을 고려하여야 한다.

#### 4. 결론

증기폭발 현상이 매우 복잡하여 수치적으로 적절한 해를 얻는데 있어서 많은 어려움이 있어서 증기폭발을 해석하는 상세 해석 코드를 종합코드와 연결하는 것은 어렵다. 본 과제에서는 증기폭발 상세 해석 코드를 이용하여 예상되는 상하한선에서 증기폭발을 계산하고 이를 도표화하여 종합코드에서 활용하였다.

먼저, 상세 해석 코드로 선정된 TEXAS-V코드의 입력을 검토하였고 이 코드의 특성을 파악하기 위하여 예제 계산을 수행하였다. 예제 계산 결과 TEXAS-V 코드는 1차원 코드이기 때문에 반응 단면적에 대한 정의가 필요하며, 기폭에 대한 정의에 따라 폭발력이 달라지기 때문에 이에 대한 일관성 있는 정의가 요구됨을 파악하였다. 본 연구에서는 용융물 제트 직경과 반응 단면적의 비를 FARO 실험과 동일하게 1:7로 하였으며, 기폭시점은 특정격자에서 냉각수의 증기 분율이 사용자 정의값을 초과하게 되었을 때 혼합 계산을 완료하였고 그 점을 기폭 격자로 지정한 후 폭발 계산을 수행하였다. 이렇게 TEXAS-V 코드의 고유 특성에 대한 정의를 내린 뒤 냉각수 및 용융물의 열수력 조건을 변화시켜가면서 생산한 계산 Matrix에 따라 증기폭발력을 계산하여 검색표를 개발하였다. 이 검색표를 읽어들이 MELCOR코드에서 제시하는 원자로공동의 냉각수와 원자로용기에서 방출되는 용융물의 열수력 조건에 대해 증기폭발력을 계산할 수 있는 증기폭발 모듈을 개발하여 이를 MELCOR에 접목하였다.

증기폭발 모듈의 접목으로 인한 MELCOR 코드 거동의 영향을 살펴보기 위하여 원자로용기, 원자로공동, 그리고 격납건물만을 지닌 간단한 예제 계산을 통하여 접목된 증기폭발 모듈이 MELCOR에서 계산하는 원자로공동의 냉각수와 원자로용기에서 방출되는 용융물의 열수력 조건을 정확하게 읽어들이 증기폭발을 성공적으로 예측함을 확인하였다.

본 연구에서 개발된 증기폭발 모듈의 적용 한계는 상세 해석 코드로 생산된 검색표에 의해 제한이 된다. TEXAS-V를 포함한 증기폭발 상세 해석 코드들이 그 수렴성에 있어서 떨어지므로 예상되는 중대사고 모든 시나리오에 대해 계산한다는 것은 상당히 어려운 현실이다. 따라서, 가용한 상세 해석 코드를 효과적으로 활용하여 현재 검색표의 상하한선을 벗어나는 곳에서의 자료를 수집하여 검색표를 확장하는 작업이 요구된다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 중장기과제에서 재정적 지원을 받았습니다.

#### 참고문헌

- [1] R.O.Gauntt et. al, "MELCOR Compter Code Mannual" NUREG/CR-6119, Vol.1, Rev.1, SAND97-2398, 1997.
- [2] R.O.Gauntt et. al, "MELCOR Compter Code Mannual" NUREG/CR-6119, Vol.2, Rev.1, SAND97-2398, 1997.
- [3] D. Magallon, H. Hohmann, "Experimental Investigation of 150kg-Scale Corium Melt Jet Quenching In Water", Proceedings of the 7th International Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics NURETH-7, NUREG/CP-0142. Vol.3, 1688-1711, 1995.
- [4] L.J.Siefken et. al, "SCRAP/RELAP5/MOD3.3 Code Mannual", NUREG/CR-6150, Vol.2,



Rev.2, INEL-96/0422, 2001.

- [5] 박익규, 김동하, 송진호, “중합전산코드용 증기폭발 하중 예측 모듈 개발- I. 방법론 및 예제계산”, 2001 원자력학회 추계학술발표회 논문집.
- [6] 박익규, 김동하, 송진호, “MELCOR 코드 개선-증기폭발 동하중 예측 모듈 개발”, KAERI 기술보고서 발간 예정.
- [7] 박익규, 김동하, 송진호, “TEXAS-V 코드를 이용한 원자로공동의 증기폭발 예제해석”, KAERI/TR-1939/2001.
- [8] 박수용, 최영, 안광일, “MELCOR 코드를 이용한 차세대 원자로의 TMLB’ 및 LOCA사고해석”, KAERI/TR-1677/2000, 2000.

표 1. 원자로공동 증기폭발시 예상되는 열수력 조건

Component	Property	Results
Melt	Jet diameter(m)	0.15
	Jet Velocity(m/s)	9.0
	Temperature(K)	2800.
	Melting Temp.(K)	2700.
	Density(kg/m3)	8000.
	Specific heat(J/kgK)	565.
Water	Pressure(MPa)	0.1
	Temperature(K)	363
	Depth(m)	1.1
Test Section	Height(m)	8
	Area(m2)	7.54

표 2. 혼합 완료 조건에 따른 폭발 압력의 변화

혼합완료조건	폭발압력 (MPa)	기폭격자 용융물질량 (kg)	기폭격자 증기 분율
IBOTTOM1	16	226	0.48
IBOTTOM2	32	71	0.08
IBOTTOM3(0.2)	20	155	0.2
IBOTTOM3(0.1)	26	85	0.1
IBOTTOM3(0.07)	34	71	0.07
IBOTTOM3(0.05)	40	42	0.05
IBOTTOM3(0.03)	34	42	0.03
IBOTTOM3(0.01)	40	14	0.01

표 3. 기폭력에 따른 폭발압력의 변화

기폭력(MPa)	폭발압력 (MPa)	기폭격자 용융물질량 (kg)	기폭격자 증기 분율
0.5	40	42	0.05
0.7	40	42	0.05
1.0	40	42	0.05
1.3	40	42	0.05

표 4. 격자 개수에 따른 폭발 압력의 변화

격자 개수	격자 길이(m)	폭발압력 (MPa)	기폭 격자의 용융물질량 (kg)	기폭 격자의 증기 분율
41	0.2	30	85	0.05
65	0.125	36	57	0.05
81	0.1	40	42	0.05
126	0.065	56	42	0.05

표 5. 격자 단면적에 따른 폭발 압력의 변화

격자단면적 (m <sup>2</sup> )	격자직경 (m)	폭발압력 (MPa)	기폭격자 용융물질량 (kg)	기폭격자 증기 분율
1.89	1.55	38	28	28
4.26	2.33	52	42	42
7.54	3.1	40	42	42
11.75	3.87	22	71	71

표 6. 검색표 구성에 필요한 변수 선정

변수	보간점
냉각수 깊이	1.0m, 2.5m, 4.0m
냉각수 온도	303K, 333K, 363K
냉각수 압력	0.1MPa, 0.3MPa, 0.5MPa
용융물 제트직경	0.1m, 0.15m, 0.2m
용융물 제트속도	5.0m/s 7.0m/s 9.0m/s
용융물 온도	2600K 2800K 3000K

표 7. TEXAS-V 코드를 이용하여 작성한 검색표 예시

냉각수 깊이	냉각수 온도	냉각수 압력	용융물 제트직경	용융물 제트속도	용융물 온도	폭발압력	임펄스
1.0	303	0.1	0.1	5.0	2600	20	0.1
“	“	“	“	“	2800	25	0.12
“	“	“	“	“	3000	20	0.1

표 8. 증기폭발 모듈 삽입으로 얻은 원자로공동에서의 증기폭발 계산 과정 및 그 결과

```

STX_MEL1: *****
STX_MEL2: *** EX-VESSEL FUEL-COOLANT INTERACTION
STX_MEL3: ***EJECTION STARTING & ENDING TIME= 0.85695E+01 0.13630E+02
STX_MEL4: *****
STX_MEL5: WATER DEPTH, TEMP, PRES, JET DIA, VEL, TEMP:
STX_MEL6: 1.82 M 311.00 K 0.10 MPA 0.18 M 8.35 M/S 2773.52 K
STX_MEL7: CALL STX_IPL
STX_IPL1: TRY TO OPEN TABLE.DAT(31)
STX_IPL2: SUCCEED IN OPENING TABLE.DAT(31)
STX_IPL3: THE NUMBER OF I, J, K, L, M, N DATA
STX_IPL4: 3 3 3 3 3 3
STX_IPL5: SUCCEED IN READING DATA POINT
STX_IPL6: SUCCEED IN READING DATA POINT
STX_IPL7: WATER DEPTH, TEMP, PRES, JET DIA, VEL, TEMP:
STX_IPL8: 1.82 M 311.00 K 0.10 MPA 0.18 M 8.35 M/S 2773.52 K
STX_IPL9: TRY TO READ RAW DATA AND PROCESSING
STX_IPL10: SUCCEED IN READING RAW DATA AND PROCESSING
STX_IPL11: CLOSE TABLE.DAT(31)
STX_MEL8: FROM SUBROUTINE STX_MEL:
STX_MEL9: EXPLOS. IMPULSE AND PRESSURE=
STX_MEL10: 116.34KPA*SEC 106.78MPA
STX_MEL11: CLOSE STXMODULE(32)
    
```

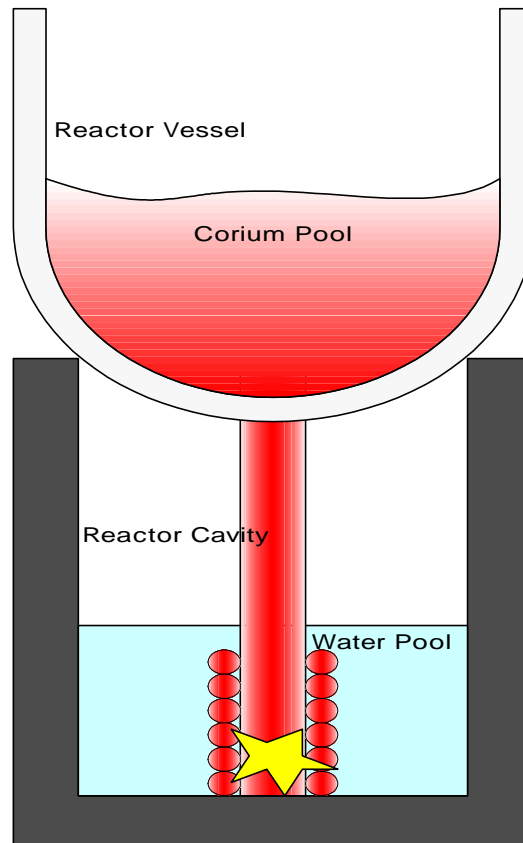


그림 1. 원자로공동에서의 증기폭발 개념도

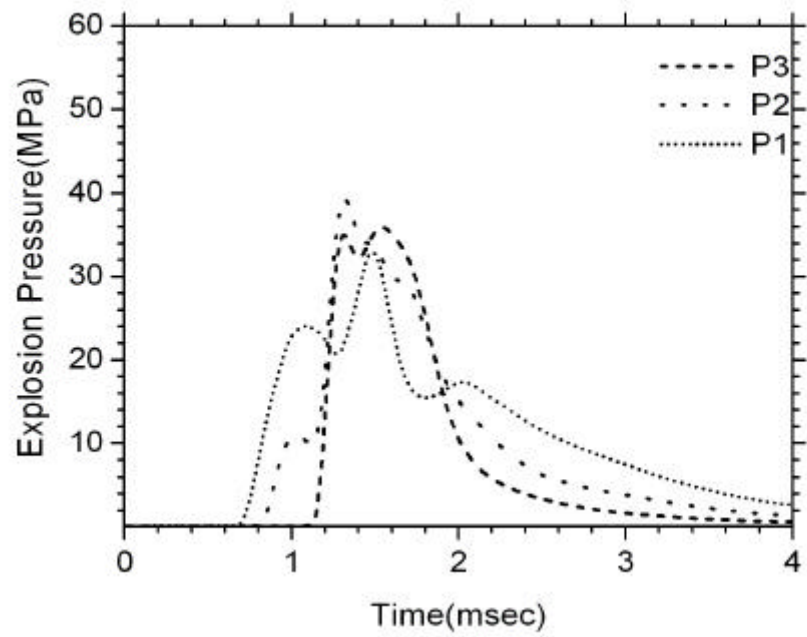


그림 2. 시간에 따른 폭발 압력 변화

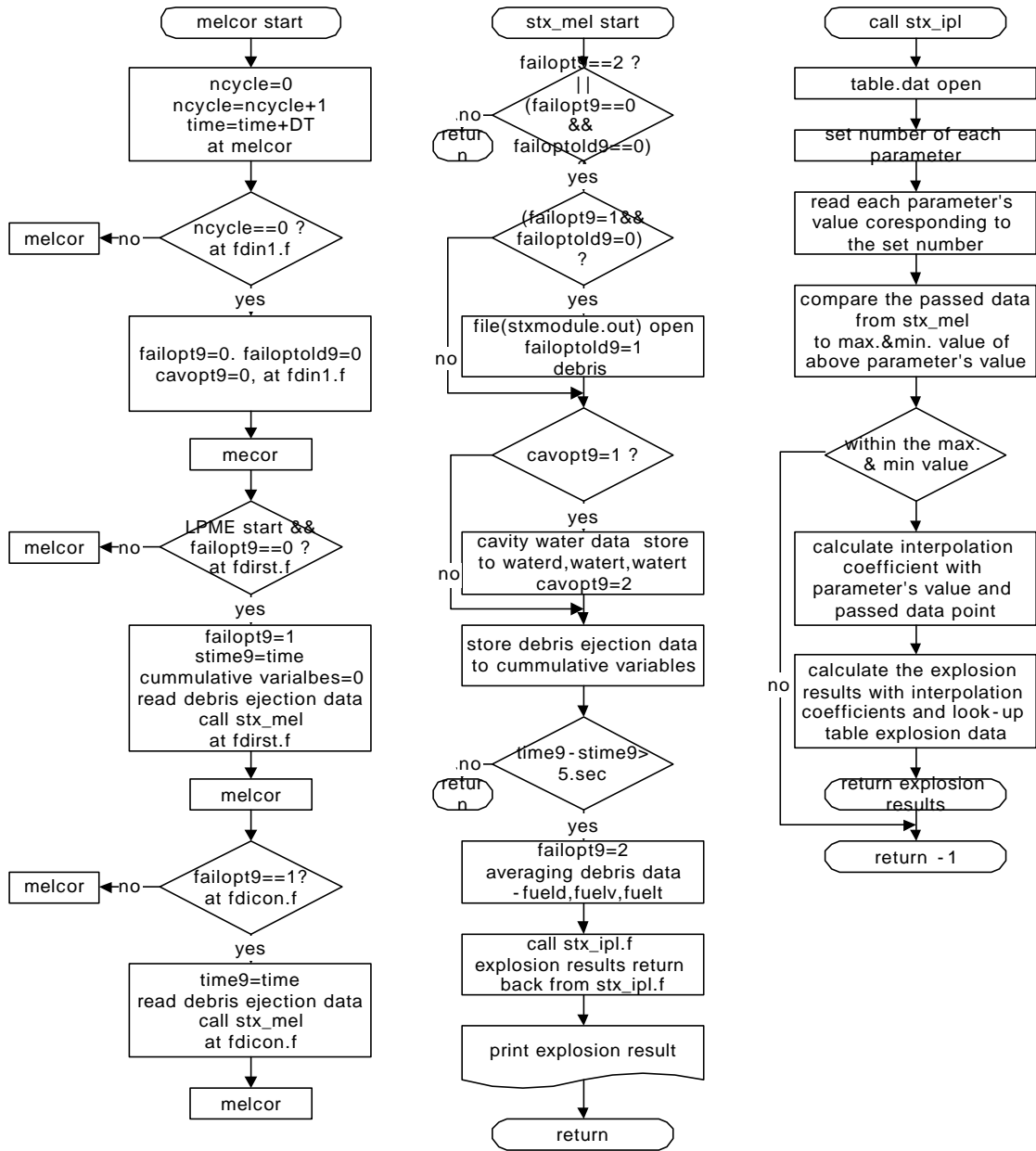


그림 3. MELCOR 증기폭발 모듈 플로우 차트

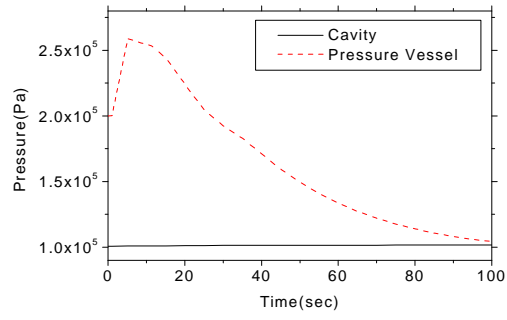


그림 4. 원자로공동 및 원자로용기의 압력

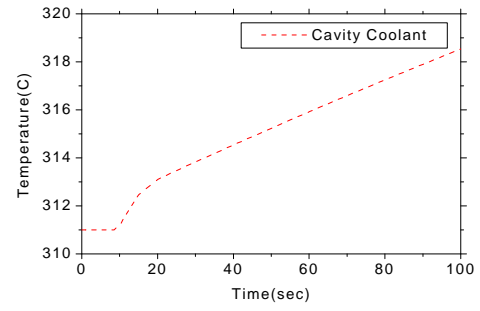


그림 5. 원자로공동 냉각수의 온도

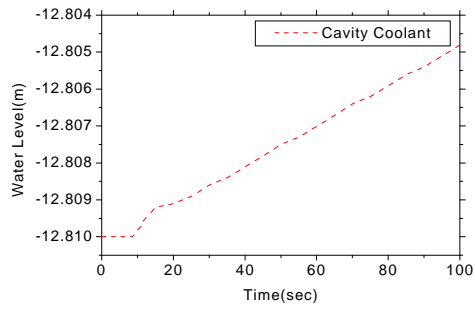


그림 6. 원자로공동 냉각수의 수위

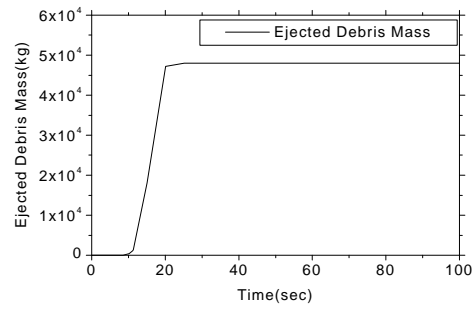


그림 7. 원자로용기로부터 용융물 방출량