

MELCOR 및 MAAP4 원자로 하반구모델 개선을 위한 연구

A Study for Potential Improvements of the Reactor Lower Head Models Employed in MELCOR and MAAP4

안광일, 김동하, 김상백, 김희동
한국원자력연구소

요 약

MELCOR 와 MAAP4 는 중대사고시 원자로 하반구 전반적인 거동을 종합적으로 해석할 수 있는 대표적인 중대사고 해석코드이다. 본 연구는 이들 중대사고 해석코드에 내재된 원자로 하반구 노심용융물 거동모델에 대한 상호 비교 및 이를 통하여 얻어진 각 모델의 장·단점을 바탕으로 보다 유연한 하반구 거동 해석능력 확보를 위하여 고려될 수 있는 개선사항을 제시하는 것을 주 목적으로 한다. 이를 위하여 최근까지 수행된 하반구 거동을 모의하는 관련실험 및 해석경향을 반영하여 하반구 거동을 특징짓는 9 가지 세부모델을 선정하고 각 모델의 특징을 비교하였다. 이어서 선정된 하반구 모델들에 의하여 기술되는 사고진행과정의 일관성, 상세성 및 불확실성 관점에서 각각의 장·단점을 정성적으로 평가하였다. 마지막으로, 이 결과들을 바탕으로 보다 다양하고도 유연한 하반구 용융물거동 해석능력을 확보하기 위하여 요구되는 각 모델에 대한 개선점을 제시하였다.

Abstract

MELCOR and MAAP4 are the representative computer codes which are currently available for the integral analysis of the reactor lower head corium behavior during severe accidents. Main objectives of the present study are to identify features of each relevant models employed in these codes, and to give some strategies for their potential improvement. For these purposes, first, the general approaches for modeling of the lower head corium behavior have been clearly described. Considering the existing experiments and the recent trend of analysis, then nine reference models have been selected featuring the lower head corium behavior and the essential features of the selected models have been critically analyzed. Second, their merits and limitations have been qualitatively assessed by model-to-model comparison, in the view point of the consistent description of corium behavior and related uncertainties. Based on these results, finally, some articles for their potential improvement have been presented to ensure more flexible and improved analysis of the lower head corium behavior.

1. 서 론

본 연구에서 고려된 MELCOR1.8.4 [1] 와 MAAP4 [2] 는 지금까지 개발된 원자로 하반구 전반적인 거동을 종합적으로 해석할 수 있는 대표적인 두가지 중대사고 해석코드이다. 코드 활용측면에서 보면, 상기 두 해석코드는 원자로 하반구 및 하반구내 용융물 거동을 모의하기 위한 가장 최근 모델이 내장되어 있으나 기본적으로 단순 매개변수 방식(Simplified Parametric Approach) 으로 현상을 기술하고 있고 관련 모델에 대한 불확실성이 상존함으로 인하여 사고해석시 유연성 및 신뢰성을 제약시키는 요인으로 남아있다. 이는 두 코드의 개발 목적상, 적절한 수준의 계산속도와 정확성을 요구하는 중대사고 사고해석용 코드의 필요성에 기인한 것으로 볼 수 있다. 이를 보완하기 위하여 중대사고 후반부 사고해석시 현상학적인 불확실성이 많은 모델에서는 불확실성 인자나 민감도 계수로 처리함으로써 다양한 사고경위 및 해석조건을 포용할 수 있는 여지를 남겨두고 있다. 본 연구의 주요 관심사인 원자로 하반구 현상학적 모델링 측면에서 보면, 노심용융물 및 하반구 수치모델을 다루는 데 있어서는 MELCOR 가 하반구 제어체적(Control Volume) 을 기준으로 각 제어체적내에는 용융물을 구성하는 물질이 혼재하고 각 구성물질의 거동 및 열전달 관계를 개별적으로 다루는 데 비하여, MAAP4 에서는 각 계산노드가 용융물의 상태 및 구성성분 특징적인 계산노드를 바탕으로 용융물 거동을 모의하고 있다는 점이 주된 차이이다. 이러한 수치모델링의 차이점은 하반구 거동 및 사고진행과정을

모의하는 상세 모델들의 특징을 결정짓는 요인이 될 뿐만 아니라, 이들에 의한 해석결과에도 중요한 차이를 유발할 수 있다. 이로 인하여 동일한 조건의 중대사고 경위를 해석함에 있어 사용자에게 적절한 코드선택의 어려움을 야기할 수 있으며 최종적인 하반기 거동 해석결과에 있어 뚜렷한 차이를 보일 경우 사용된 코드에 대한 신뢰성을 약화시킬 수 있는 요인이 되기도 한다. 이러한 상황을 반영하여, 본 연구는 고려된 두가지 중대사고 해석코드에 내재된 원자로 하반기 거동 해석방법 및 관련 현상학적 모델들에 대한 비교평가를 통하여 각 코드의 특징을 정성적으로 기술하고, 각 모델의 장,단점을 도출하며, 이들을 바탕으로 코드개선점을 제시하는 것을 주요 목적으로 한다 [3]. 그 결과는 중대사고 후기 노심손상 과정시 원자로 하반기 거동결과에 대한 보다 신뢰성 있는 해석방안 및 향후 지속적인 중대사고 코드개선에 중요한 근거를 제공할 것으로 판단된다.

상기 목적을 위하여 먼저 두 코드에 내재된 전반적인 사고진행 및 현상학적 모델들의 특징을 간략히 언급하고, 하반기 용융물 거동을 특징짓는 9 가지 세부 모델, 즉 노심용융물 초기 하반기 재배치모델, 하반기내 용융물 배열 및 구조, 하반기내 용융물 이동 및 확산모델, 하반기 용융 파편층간 열전달모델, 하반기내 용융 파편층-잔존 냉각수간 열전달모델, 하부 피막층-하반기 내벽에서 형성될 수 있는 간극을 통한 열제거모델, 하반기 외벽 침수로 인한 외벽냉각모델, 하반기 파손모델, 및 하반기벽을 통한 열전달모델등을 주 비교대상으로 선정하여 각 모델간 특징을 비교, 분석하였다. 이어서 하반기 노심용융물 거동기술에 대한 일관성, 상세성, 및 불확실성 관점에서 장,단점을 정성적으로 평가하였다. 마지막으로, 상기 결과들을 바탕으로 보다 개선된 하반기 용융물거동 해석능력을 확보하기 위하여 요구되는 모델 개선점을 제시하였다.

2. 원자로 하반기모델 전반적인 특징

(1) MELCOR 원자로 하반기모델

MELCOR1.8.4 [1] 하반기 노심용융물 거동은 초기 노심용융물 재배치과정 및 하반기 외벽냉각현상은 독립적인 MELCOR-COR 모듈에서, 하반기에 축적된 노심용융물의 거동은 MELCOR-BH 모듈에서 다루어지는 특징이 있다. MELCOR 노심용융물 재배치모델에서는 상세한 모델을 적용하지 않고 기존 실험 및 해석결과로 나타난 증거 (예 용융물분사 및 파편입자 크기) 를 간단한 매개변수 입력 데이터로 처리함으로써 초기 재배치거동 (즉 열전달 및 질량관계) 를 모의한다. 반면에, 본격적인 노심용융물 하반기 거동은 두가지 조건, 즉 ① 원자로 하반기에 충분한 양의 노심용융물이 축적되고 (최소한 사용자가 지정 1단 파편층 제어체적 높이 이상), ② 잔존 냉각수가 고갈(Dryout) 된 이후에 MELCOR-BH 모듈에서 다루어진다. 이러한 조건은 사고과정동안 자동적으로 만족될 수도 있고 사용자가 모델 변수값 (예,노심용융물 침강율, 파편층 공극율, 하반기벽 또는 침투관으로의 열전달계수) 을 조절함으로써 강제적으로 지정될 수도 있다. 하반기에 존재하는 초기 노심용융물 상태로는 Dryout 이전에 형성된 파편층은 모두 규정된 공극율을 갖는 고체입자층으로, Dryout 이후에 유입되는 노심용융물은 고체 및 액체 혼합물로 특성화된다. 이 경우 고체입자는 하반기 파편층 상부에 축적되고 액체용융물은 파편층으로 침투하게 된다.

일단, 상기 하반기 사고 초기조건이 만족되면 다음으로 하반기내 용융물 거동은 미리 규정된 제어체적 및 노드의 기하학적 구조 (3단 5열 제어체적 파편층) 하에서 제어체적 파편층-파편층간 또는 파편층-경계면간 열전달 및 질량이동을 고려함으로써 비교적 상세히 모의된다. 각 제어체적 파편층을 구성하는 물질들은 순수 또는 공융혼합물로 존재할 수 있으며 대표적인 제어체적 질량 및 에너지는 각 구성물질들의 질량 또는 체적평균으로 나타낸다. 또한 제어체적내 액체용융물 질량이동은 사용자가 지정한 반경 및 축방향으로의 이동을 고려함으로써 계산되고, 이 과정동안 제어체적에 존재하는 용융물의 양에 따라 제어체적 크기가 조정된다.

한편, 하반기 용융물 거동에 중요한 역할을 하는 산화용융물 피막층은 2 단 및 3 단 제어체적에서 주로 고려되나, 피막층과 하반기 내벽간의 간극을 통한 열제거모델은 따로 모사되지 않는다. 피막층의 경우 2, 3 단 제어체적 가장 바깥쪽 노드에서 지정된 두께로만 고려됨으로써 내부 용융물, 피막층, 및 하반기 내벽을 통한 열전달 관계가 비교적 단순하게 모의된다. 냉각수에 의한 파편층 냉각현상은 재충수 또는 노심용융물 후기 유입과정시 비교적 상세히 모의되며, 앞에서 언급된 것처럼 하반기 거동초기 파편층 안정화 단계에서는 냉각수 영향이 따로 고려되지 않는다.

상기 사고진행과정으로부터, 하반기 제어체적 파편층 및 인접 경계면 각각에 대하여 열 및 질량 전달에 대한

수치 모형을 구하고, 열전달 및 질량 변화율을 통합함으로써 각 계산 시간동안 원자로 건전성 및 파손여부가 결정된다.

(2) MAAP4 원자로 하반구모델

MAAP4 [2] 에서 고려되는 원자로 하반구 노심용융물의 거동모델은 다음과 같이 요약된다. 초기 하반구 과도기적 현상 모델에서는 노심과 하반구 사이의 구조물 때문에 하반구에 존재하는 냉각수로 유입되는 대부분의 노심 용융물은 작은 반경의 pour stream 형태를 취하게 된다. 재배치 과정은 비교적 상세한 매개변수 모델에 의하여 묘사되며, 재배치시 적용되는 용융물-냉각수 사이의 입자수송 모델에 의한 노심 용융물의 분해정도를 결정하고, 이는 두가지 유형의 특성화된 파편층 (파편입자층 및 용융물연속층) 을 만든다. 파편입자층은, 용융물 침강시 냉각수와 반응시 생성된 파쇄입자들의 축적물로 불과 금속층, 용융 고화층, 그리고 원자로 용기 벽을 포함한 구조와 함께 그 에너지를 교환하는 물질층으로, 용융물 연속층은 노심 용융물 침강시 파쇄되지 않고 하반구에 축적되는 물질층으로 하반구 열침원들과의 접촉으로 고화된 피막층을 갖는 물질층으로 특성화된다.

일단, 축적된 각 물질층은 하반구내에서 안정화단계를 거치면서 물질간 열 및 질량교환을 수행하게된다. 연속층은 항상 고체인 주변 고화층과, 용융되거나 고화된 중앙 노심지역으로 구분된다. 특정 조건하에서 하반구 구조물과 노심물과 원자로 용기간 접촉저항에 의한 간극이 형성될 수 있다. 이 간극으로 잔존냉각수 유입은 간극사이 비등에 의한 에너지 제거율을 결정하며, 그 크기는 사고진행 및 하반구 Creep 조건에 따라 확장 및 축소과정을 되풀이한다. 한다. 간극 저항과 비등열 제거는 MAAP4 가장 특징적인 하반구 모델의 하나로 노심층, 원자로와 금속 구조물, 그리고 노심 고화층 간극에 침투한 물로의 열전달에 대해 적용된다.

상기 사고진행과정으로부터, 하반구 각 물질파편층에 대하여 열 및 질량 전달에 대한 수치 모형을 구성하고, 열전달 및 질량 변화율을 통합하면 각 파편층거동(즉, 형성, 성장, 및 축소) 과정이 계산되며, 이에 따라 각 코드 계산시간동안 하반구 건전성 및 파손여부가 결정된다.

3. 주요 모델간 비교분석

위에서 언급된 것처럼 원자로 하반구 노심용융물 거동을 다루는 데 있어서 고려된 두 코드 해석 모델간에는 여러가지 특징적인 차이가 있다. 여기서는 하반구 거동을 특징짓는 주요 모델을 보다 세분화된 9 가지 모델로 나누어 비교한다.

(1) 노심용융물 초기 하반구재배치

원자로 하반구로 노심용융물이 재배치 (Relocation) 되는 과정은 원자로 하반구 용융물 거동 분석을 위한 파편층 초기조건을 제공하는 부분이다. MELCOR 재배치모델은 재배치 각 단계에서 발생하는 현상을 관련 모델로 다루는 MAAP4 에 비하여 상당히 단순하며, 대부분이 사용자 입력으로 처리된다.

(2) 하반구 용융물 배열 및 구조

재배치 과정후 노심용융물은 잔존 냉각수와의 열전달 과정을 거치면서 하반구에 파편입자 또는 액체용융물 형태로 축적되는 데, 이 경우 축적된 용융물은 각 하반구 코드모델 특징적인 기하학적 배열 및 구조를 갖게되는데 이러한 노심용융물 배열의 차이는 하반구 용융물 파편층간 거동을 제어하는 주요인자가 된다. MELCOR 초기 노심용융물은 Dryout 이전에는 모두 고체상태로 주로 하단파편층을 형성하고 Dryout 이후에 유입되는 고체용융물은 하단파편층 상부에 축적되며 및 액체용융물은 하단파편층 공극속으로 규정된 침투율로 침투하게 된다. 한편, MAAP4 에서는 초기 용융물 분사중 파쇄되지 않은 액체용융물은 연속층으로, 파쇄된 입자들은 입자층으로 MAAP4에 규정된 배열을 기초로 하반구에 축적된다.

(3) 하반구 용융물 거동 (용융, 고화, 이동)

일단, 상기 각 제어체적 파편층 및 물질층 구조 및 차원이 정해지면, 각각의 특성 (공극율, 대표질량, 온도등)을 계산하고 이들로부터 각 물질층간 또는 물질층을 둘러싼 경계면사이 열전달 및 질량변화가 모의된다. 파편층

내부에서는 지속적인 붕괴열 발생으로 인하여 고체상태의 파편층은 액체용융물이 될 수 있고, 액체용융물은 주변으로 열전달에 의하여 냉각, 고화될 수 있다. MELCOR 경우 액체용융물은 주어진 이동을 (사용자입력)에 따라 인접 제어체적으로 이동을 모의하나, MAAP4에서는 용융물 상태변화시 해당 물질층으로 순간적인 이동을 모사한다. 액체용융물 이동은 각 제어체적 또는 각 물질층에 대한 새로운 질량 및 에너지 관계를 반복하면서, 용융물 거동 및 하반구 파손을 결정한다.

(4) 하반구 물질층간 열전달

MELCOR 용융물 파편층간 거동 및 열전달은 인접 제어체적-제어체적, 제어체적-하반구 용기 사이에서 주로 고려되나, MAAP4에서는 인접 물질층-물질층, 물질층-하반구 내벽 사이에 주로 고려된다. 또 다른 주요 차이점은 각 모델에서 사용된 용융물질층 배열의 차이로 인하여 MAAP4에서는 간극, 피막층, 용융물 거동이 주요 하반구 열전달 대상으로 다루어지는 반면, MELCOR에서는 이들의 영향을 따로 취급하지 않는다는 점이다.

(5) 하반구 파편층-냉각수 열전달 모델

노심용융물 냉각을 위한 일차적인 인자로서 하반구 잔존냉각수는 충분한 양의 존재시 지속적으로 노심용융물 냉각에 관여하여 원자로 하반구 파손시기를 상당히 지연시키는 효과를 가져오지만 하반구 노심용융물 상당부분이 용융되어 용융파편층속으로 냉각수 침투가 제한되는 경우에는 냉각효과는 급격히 감소한다. 이 경우 하반구외벽을 통한 용융물 간접냉각이 이루어지지 않는 한 원자로 하반구는 결국 파손시점에 이를 수 밖에 없다. MELCOR 및 MAAP4 모델 공히 하반구에 연속적인 냉각수 유입이 이루어지지 않는 경우, 상부파편층으로부터 냉각수로의 대류열전달에 대한 정확한 계산은 상부 대기층으로의 복사 및 전도열전달 특성을 지배하는 하반구 용융물 건조시점과 밀접한 관계가 있다.

(6) 간극을 통한 열제거

원자로 하반구내벽과 하부피막층 사이에 형성될 수 있는 간극을 통한 열제거모델은 MELCOR에서는 따로 모사되지 않는 MAAP4 가장 특징적인 모델중의 하나이다 [2,4]. MAAP4 모델에서 간극은 원자로 하반구에 냉각수가 존재하는 경우 노심용융물 재배치 과정시 노심 용융물이 하반구 내벽과 접촉하는 시점에 생성된다고 본다. 일단 초기간극이 형성되면 하반구에 축적된 용융물과 하반구용기의 상대적인 운동으로 그 크기는 시간에 따라 변할 수 있는 데, 간극이 확장되는 경우 간극속으로 유입될 수 있는 냉각수에 의하여 하부피막층을 통한 하반구용융물 냉각을 고려할 수 있다. 하지만, 비록 간극이 형성되더라도 간극속으로 연속적인 냉각수 침투가 이루어지지 않으면 하부피막층을 효과적으로 냉각시킬 수 없다. 간극속으로 냉각수 침투는 일차적으로 상부금속층과 접촉한 원자로용기 사이의 틈 존재여부에 달려 있으므로, 냉각수가 간극속으로 침투할 정도로 하부용기와 접촉한 금속층 변형이 먼저 이루어져야 한다. 다음으로 간극을 통한 실제적인 냉각수 유입이 이루어지기 위해서는 간극을 통한 상승증기류 (Counter current flow) 를 극복할 수 있어야 한다. 이러한 간극형성 및 간극을 통한 냉각수 침투조건이 만족되면 간극에서는 하부피막층 및 원자로 하부용기 내벽 (간극 냉각수보다 온도가 높은 경우) 으로부터 열을 제거할 수 있다.

MAAP4 간극모델에서 시간에 따른 간극크기 변화는 원자로 하반구반경, 하반구 Creep 시 인장계수, 및 Creep에 의한 원자로 용기 파손분율의 함수로 주어지며, 간극을 통한 열제거량은 간극크기 및 간극내 증기의 특성을 반영한다. 또한, 간극을 통해 열제거될 수 있는 최대열유속 계산시 MAAP4는 수직평판 실험으로부터 유도된 Monde et al. [5], 상관식을 사용하는 데, 이는 하반구 기하학적 모형이 갖는 곡률의 영향을 반영하지 못하는 단점이 있다. 다른 주요 불확실성 인자중 하나는 간극을 통한 냉각수 유입 조건 및 능력에 대한 것으로 단순 입력 조건보다는 실험 및 해석결과를 바탕으로 한 보다 개선된 모델을 필요로 한다.

(7) 하반구 외벽냉각모델

하반구 간극을 통한 노심용융물 냉각은 하반구 파손확률을 크게 낮출 수 있는 내부 자연적인 현상의 하나로 간주되고 있는 반면, 하반구 파손확률을 줄일 수 있는 외부 조건의 하나가 원자로공동에 냉각수 강제주입으로 인한 하반구 외벽냉각이다. 이에 따른 부수적인 효과로 비록 하반구가 파손되더라도 노심용융물을 원자로 공동내에서 냉각할 수 있으며, 격납용기 직접가열현상 및 원자로공동에서 가능한 노심용융물-콘크리트 반응의

정도를 크게 줄일 수 있다. 부정적 효과로는 원자로 하반구 내부-외부 온도차로 인하여 외벽재료에 가해지는 열충격 (thermal shock)으로 하반구 용기벽이 Creep 파손될 수 있다는 점이다. 그럼에도 불구하고 최근에 원자로 하반구 파손없이 하반구 노심용융물을 지속적으로 냉각할 수 있는 가장 유력한 수단의 하나로 고려되고 있다. 하반구 외벽으로부터 냉각수로 열전달은 MELCOR 및 MAAP4 모두 수력학적 2 상 (two phase) 열전달모델을 사용하여 계산되나 상세성에 있어서는 뚜렷한 차이가 있다.

(8) 하반구 파손모델

원자로 하반구 용융물 거동의 최종 관심사는 하반구에 존재하는 노심용융물의 열적 및 기계적 거동에 의한 하반구벽의 건전성 또는 파손 예측으로 요약될 수 있는데, 이는 하반구 노심용융물 거동을 얼마나 현실적으로 묘사하는가에 따라 하반구 파손특성이 달라질 수 있음을 의미하기도 한다. 원자로 하반구 파손특성은 묘사되는 하반구모델, 사고진행 시점에 따라 약간씩 차이가 있으나 가장 중요한 파손특성은 시간을 두고 조금씩 형성되는 비복원성 Creep 파손 및 하반구 열팽창에 의한 침투관 파손을 들 수 있다. 하반구 Creep 파손 모델은 Larson-Miller [6] 매개변수를 사용하여 계산한다. 이 경우 하반구 각 노드에서의 온도편향과 이에 따른 열응력 조건으로부터 비가역성 인장을 계산하여 연속적인 시간 간격동안 발생한 용기 파손분율을 평가하게 된다. 그러면, 특정 계산 시간동안 하반구 각 노드에 가해진 인장은 그 시간까지 매 계산 시간 간격당 이루어진 인장의 합이 되고 합산된 인장을 사용자가 지정한 파손 인장과 비교함으로써 하반구 Creep 파손 여부를 결정하게 된다. 침투관 파손은 침투관과 침투관을 관통하는 하반구 내벽과의 용접부위의 파손과 침투관 자체의 용융에 의한 파손으로 구분된다.

(9) 하반구벽을 통한 열전달

일반적으로 하반구 모델에서 가장 중요한 열침원의 하나로 취급되는 원자로 용기벽 자체는 1 차원 열전도 모델을 적용하기에는 상당히 두껍게 되어 있다. 따라서 MELCOR 나 MAAP4 에서는 세분화된 열전달노드를 고려한 공히 2 차원 열전도 모델을 사용하고 있으며, 이들은 기본적으로 하반구 중심축에 대하여 대칭으로 묘사된다. MELCOR 하부용기 열전달 노드는 축방향 18 개 반경방향 3 개로 구성되어 있고, MAAP4 에서는 축방향 반경방향 모두 5 개의 노드로 구성되어 있다. 두 코드 모두 2 차원 열전달모델은 평판모델에 기초한 축방향 및 반경방향으로의 열전도를 고려하고 있다.

4. 모델간 장단점

지금까지 MELCOR 및 MAAP4 에 내재된 하반구 거동모델중 중요하다고 판단되는 9 가지 세부모델에 대하여 각각의 특징을 비교,분석하였는데, 이들을 바탕으로 분석된 각 모델의 장단점은 아래와 같이 요약된다.

(1) 하반구과편층 수치모형화

원자로 하반구에서 용융과편층 거동을 모의하기 사용된 MELCOR 제어체적 노드와 MAAP4 물질층 노드간에는 표 1 에 주어진 것과 같은 특징적인 장단점이 있다. 표 1에서 보는 것처럼, MELCOR 제어체적 노드개념의 가장 큰 장점은 하반구 전반적인 용융물 연속적인 거동을 주어진 계산틀 내에서 일관성 있게 기술할 수 있다는 것이다. 하지만 현재 MELCOR 는 하반구 중간 및 하부 제어체적내 형성가능한 용융물의 독자적거동 및 관련된 피막층거동을 따로 고려하지 않음으로 인하여 이와 직접 관련된 간극현상을 다룰 수 없는 단점이 있다. 반면, MAAP4 에서 고려된 분리물질층 개념은 충분한 용융풀이 형성되고 난 후에는 용융물 거동을 일관성 있게 기술할 수 있으나, 과편입자층이 주된 하반구 물질이 되는 하반구거동 초기과정에는 입자들의 용융, 이동, 확산과정을 상세히 분석할 수 없다는 단점이 있다. 또한, 물질층간 이동을 연속적으로 다루지 못하고 순간적 이동으로 묘사함으로써 실제 용융물 거동을 자연스럽게 못하게 기술하는 단점이 있다. 하지만 MAAP4 주요 장점으로는 하부피막층과 하반구벽 사이에 간극을 모의함으로써 하반구 용융물 냉각관련 현상을 모델을 보다 다양하게 다룰 수 있다는 점이다. 상기 장,단점 관점에서 볼 때, 차후 MELCOR 및 MAAP4 개선은 각각의 일관적인 분석틀내에 장점은 최대 활용하고 단점은 보완하는 선에서 이루어질 필요가 있다.

(2) 하반구과편층 현상학적 거동

상기 수치모형화에 따른 하반구 노심용융물 현상학적 거동모델의 장,단점은 표 2 와 같이 요약될 수 있다.

과편층 수치모형화는 각 코드의 특징적인 방법으로 하반구 노심용융물 거동을 기술하게 되며 현상학적 모델 비교측면에서 보면, MELCOR 모델의 주요 장점으로, 용융물의 연속적 이동 및 2차원 열전달, 과편층의 기하학적 변화, 상세한 용융물 개별 구성성분의 거동 및 하반구 외벽냉각 모델을 들 수 있는 반면, MAAP4의 경우에는, 초기 노심용융물 재배치, 각 물질층간 효과적인 열전달 (용융풀, 피막층, 금속층등) 거동, 하부피막층과 하반구 벽사이에 형성될 수 있는 간극을 통한 열제거, 및 다양한 모드의 하반구 파손형태가 비교적 상세하게 모델링된 것으로 파악된다.

5. 결론

MELCOR 및 MAAP4 하반구 수치모델링에 있어서 차이는 하반구 거동 및 사고진행과정을 모의하는 상세 모델들의 특징을 결정짓는 요인이 될 뿐만 아니라, 이들에 의한 해석결과에도 중요한 차이를 유발할 수 있다. 본 연구에서는 현재까지 개발된 원자로 하반구 전반적인 거동을 종합적으로 해석할 수 있는 대표적인 중대사고 해석코드인 MELCOR 및 MAAP4 원자로 하반구 거동 해석방법 및 관련 현상학적 모델들에 대한 비교,평가를 통하여 각 코드의 특징을 정성적으로 기술하고, 각 모델의 장,단점을 도출하였다. 마지막으로, 중대사고 후기 노심손상 과정시 원자로 하반구 거동결과에 대한 보다 신뢰성 있는 해석방안 및 향후 지속적인 중대사고 코드개선을 위한 다음과 같은 개선점을 도출하였다.

- 하반구 수치해석 모형: 충분한 양의 냉각수 존재시 원자로 하반구에서 노심용융물 거동 초기에는 입자과편층 거동이 중요한 역할을 하게되므로 과편층의 연속적인 용융, 이동, 및 고화, 재용융 과정이 비교적 상세히 모델링 하여야 한다. 이 경우 과편층은 액체 용융물 존재하의 다공성 매질로 모델링할 필요가 있으며 이러한 관점에서 볼때 MELCOR 과편층 제어체적에 의한 수치적 모형화가 현실적인 대안으로 고려될 수 있다.
- 과편층 거동 및 열전달 모델: 사고진행시 과편층 용융으로 인하여 충분한 양의 용융풀이 형성되면 이후로는 용융풀 확장 및 표면의 냉각, 고화로 인한 피막층형성 및 이들의 열적 거동이 중심이 되므로 보다 상세한 용융풀 온도분포 및 피막층 두께변화가 모델링 하여야 한다. 수치적 모델링 관점에서 보면 MAAP4 처럼 분리된 물질층 (중앙 용융풀, 주변 피막층 및 상부 입자층) 거동이 보다 용이하나 현실적으로 용융풀 주위에 용융되지 않은 상당한 양의 입자층이 상존할 수 있으므로 초기에 설정된 제어체적 개념하에서는 이들이 각각의 물질층을 유지하면서 열전달 및 용융물 이동을 동시에 고려하는 것으로 다루어져야 할 필요가 있다. 이 경우 용융풀과 피막층 사이의 열전달 및 상변화 과정은 MAAP4 모델을 사용할 수 있으나, 각 물질층간 연속적인 이동 및 확산을 모델링하기 위해서는 인접 피막층이 재 용융되거나 피막층 자체의 불안정한 구조로 인하여 용융물 유입 및 방출 통로가 마련되어야 한다. 또한 용융풀내에서 상부로 부유된 금속성분이 용융상태로 존재하는 경우에는 상부에 존재하는 입자층들이 금속층을 통하여 침강하면서 용융풀내로 유입될 수 있으나 일단 고화된 경우에는 유입통로가 더 이상 존재할 수 없다. 따라서 보다 현실적으로 용융물 거동을 모의하기 위해서는 용융물의 연속적인 이동을 모델링 할 수 있어야 한다. 상기 용융물 거동에 대해서는 MELCOR 및 MAAP4 모두 상세히 모델링되어 있지 않으므로 추가적 모델이 필요하다.
- 간극 냉각모델: 하반구 과편층 거동 초기 또는 사고 후단계에 하반구 바닥에 존재하는 입자층이 충분히 용융되어 용융풀이 형성되면 잔존 냉각수나 하반구벽으로 열전달에 의하여 용융풀 표면은 냉각 고화되어 피막층이 형성될 수 있다. 이 경우 MELCOR에서는 고려되지 않으나 MAAP4 특징적인 모델의 하나로 간주되는 냉각수 존재시 하부 피막층과 하반구 벽사이 간극을 통한 MAAP4 열제거 모델이 적용될 수 있다. 하지만 기존 MAAP4 간극모델의 한계적인 간극생성 및 역류로 인한 냉각 메카니즘이 보다 상세하게 고려될 필요가 있다.
- 하반구 외벽냉각 모델: 하반구 외벽 침수로 인한 외벽냉각은 하반구내 냉각수에 의한 용융물 냉각 (상부 냉각수 및 간극을 통한 열제거) 이 지속적으로 이루어질 경우 2 차적인 용융물 냉각방안으로 간주되며, 하반구내 냉각수의 고갈로 Dryout 상태가 된 이후부터는 최종적인 하반구 용융물의 냉각방안의 하나로 고려된다. 하반구 외벽냉각 모델의 경우 상세한 열전달 특성 및 하반구 곡률에 의한 경사각의 영향을 효과적으로 반영한 MELCOR 모델이 보다 유연한 해석능력을 제공한다.
- 용융물 산화 및 냉각수 거동모델: 하반구에서 발생된 증기에 의한 용융물 산화모델은 재배치 과정동안은 MAAP4 모델이 보다 자세하게 기술하고 있으며, 과편층에서 발생된 증기의 영향은 MELCOR 에 보다 자세하게 모델되어 있다. 따라서 사고진행 시점을 기준으로 양측의 모델을 효과적으로 조합할 수 있다. 한편, 냉각수 증발로 인한 하반구내 냉각수 수위 변화에 대한 수치적

모델은 MAAP4 에서 보다 자세히 다루어진다. 냉각수에 의한 냉각모델은 일반적으로 1 차원 열전달 모델로도 충분하다고 알려져 있으나 하반구 노심용융물의 지속적 냉각을 위한 가장 중요한 수단이 되므로 보다 상세한 현상기술이 필요하다.

- 하반구 Creep 파손모델: 하반구 Creep 파손 모델은 MELCOR 및 MAAP4 공히 Larson-Miller 매개변수 모델을 사용하고 있다. 유효응력의 함수로 주어지는 매개변수는 최근 실험 결과를 바탕으로 한 MELCOR 에서 보다 세분하게 정의되어 있으므로 MELCOR 모델이 고려될 수 있다. 하지만 Creep 파손을 정의하는 누적인장 조건은 두 모델에서 서로 차이를 보이므로 적용시 보다 세심한 주의를 요한다.
- 기타 모델: 상기모델을 제외한 나머지는 MELCOR 및 MAAP4 공히 유사한 모델을 사용하고 있고 하반구 전반적인 용융물 거동에 큰 영향을 미치지 않는다고 판단된다.

본 연구에서 수행된 하반구 모델 비교는 주로 정성적 해석에 치중하고 있어, 두 코드 모델들의 장단점에 대한 종합적인 결론을 내리기에 는 미흡한 점이 있다. 종합적인 모델 및 해석결과의 비교 평가는 정량적 해석결과에 바탕을 둔 모델 평가를 추가적으로 필요로 한다. 따라서, 본 연구는 기존 중대사고 해석코드 원자로 하반구 모델개선을 위한 1단계 작업으로 간주되어야 한다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] R.M. Summers, et al., "MELCOR Computer Code Manuals," SNL, NUREG/CR-6119, SAND93-2185, 1994.9. : Updated Version MELCOR 1.8.4 (Released 1997).
- [2] "MAAP4 : Modular Accident Analysis Program for LWR Plants," Code Manual Vols. 1-4, Prepared by Fauske & Associates, Inc., Burr Ridge, IL, USA for the EPRI, Palo Alto, CA, USA (May 1994).
- [3] K.I.Ahn, et al., "A Comparative Analysis of Reactor Lower Head Debris Cooling Models Employed in the Existing Severe Accident Analysis Codes," KAERI/TR-1125/98, Korea Atomic Energy Research Institute (August 1998).
- [4] K.Y.Suh and R.E.Henry, "Integral Analysis of Debris Material and Heat Transport in Reactor Vessel Lower Plenum," *Nuclear Engineering & Design*, **151**(1), pp.203-221 (November 1994).
- [5] M.Monde, H.Kusuda, and H.Uehara, "Critical Heat Flux during Natural Convective Boiling in Vertical Rectangular Channels submerged in Saturated Liquid," *J. Heat Transfer*, **104**, pp.300-303 (May 1982).
- [6] F.R.Larson and J.Miller, "A Time-Temperature Relationships for Rupture and Creep Stress," *ASME Trans.*, pp.765-775 (July 1952).

표 1 하반기과편층 수치모형화 장,단점 비교

노드 개념	MELCOR	MAAP4
노드 정의	. 제어체적 과편층 개념	. 고유물질층 개념
주요 장점	. 제어체적내 과편층 구성성분 종합적인 거동모의(용융,고화,재용융) . 액체 및 고체 혼합다공매질을 통한 용융물 연속적인 이동 . 제어체적 과편층형상 변화 모의 . 용융물이동시 제어체적 조정가능	. 고유물질층 특성성분 독립적인 거동모의(용융,고화,재용융) . 고체, 액체로 특성화된 물질층간 용융물 순간적인 이동,편입 . 구조화된 물질층 두께변화모의 . 용융풀,피막층,하반기 간극현상 모의
주요 단점	. 초기 Dryout 조건하에서만 계산시작 . 용융풀,피막층,간극현상 모의 부족	. 비현실적 용융물 순간적인 이동만 모의 . 고정된 물질층 형상유지: 상부피막층 파손으로 인한 모의 없음
개선 사항	. 용융풀,피막층,간극현상 모델링 . 피막층 연속적인 두께변화 모델링 . 노심용융물 초기재배치모델 개선	. 용융물 연속이동 및 유입경로 고려 . 유연성있는 물질층 형상변화 모델링 . 간극냉각모델 개선 (크기, 냉각수침투,열속)

표 2 하반기과편층 현상학적 거동모델 장,단점 비교

현상학적 모델	MELCOR		MAAP4	
	모델	장 · 단점	모델	장 · 단점
노심용융물 재배치	단순	.대부분 사용자 입력	상세	.수리적 매개변수모델 사용
초기하반기 과편층구조	단순	.건식조건 (Dryout) Dryout이전: 고체입자 Dryout이후: 액체+고체혼합물 중심축에 대하여 대칭	상세	.Dryout 조건없음 .건식, 습식조건 모의 액체,고체 고유물질층 .중심축에 대하여 대칭
과편층 용융물상변화 용융물 이동 용융풀 거동 피막층 거동 금속층 거동	중간 x x x	.제어체적:2상,구성성분:단상 .이동율에 의한 연속적 이동 해당없음	단순 단순 상세 단순	.용융풀: 2상,기타: 단상 .물질층간 순간적 이동 .단일온도, 단일반기 구조 .온도분포, 노드별 두께차이 .단일온도, 단일평판 두께
과편층-과편층열전달 산화거동	상세 중간	.과편층간 열전달 (2차원) .모든 과편층 제어체적에 적용	상세 단순	.물질층간 열전달 (1차원) .입자층만 고려
과편층-냉각수열전달	상세	.모든 과편층 제어체적에 적용	중간	.입자층, 하부피막층에서고려
피동 열침원 열전달 원자로 용기벽	단순	.1 차원 열전도 모델 .2 차원 열전도 모델	상세	.2 차원 열전도 모델 .2 차원 열전도 모델
간극을 통한 열제거	없음	.해당없음	중간	.간극형성, 크기, 열제거모델
하반기 외벽냉각	상세	.세부적인 열전달영역고려 .하반기 곡률경사각 고려	단순	.단순 핵비등모델 .하반기 내,외벽 면적비 고려
하반기 주요파손모드	중간	.하반기 Creep: Larson-Miller .용접부 및 침투관 용융파손	상세	.하반기 Creep:Larson-Miller .용접부 및 침투관 용융파손 .금속층-하반기벽 용융