

국내 중대사고 해석 종합 전산 코드 개발 방향에 관한 연구

김 동하, 김 회 동, 김 시달, 박 수용

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

중대사고 해석 전산 코드 국산화의 필요성이 대두되고 있는 이때 우리가 개발해야 할 코드의 요건을 다음 여섯 가지로 정리하였다: 1) 종합적인 해석 코드, 2) 1차계통과 격납건물 모사 능력의 유연성, 3) 자세한 발전소 거동 모사, 4) 사용자 편의성, 5) 개선 및 새로운 모델 접목의 용이성, 그리고 6) 최신 모델 포함. 이런 관점에서 기존의 중대사고 해석 코드를 분석한 결과 코드 개발의 기준 코드로 MELCOR를 선정하였다. MELCOR는 계통 모사의 유연성 때문에 상용 발전소 뿐만 아니라 앞으로 개발 계획 중인 차세대나 중소형 원자로까지도 확장이 가능하며, 상세한 열수력 기본 지배 방정식을 활용하고, 모델 분석 및 개선에 필요한 코드에의 자유로운 접근이 허용되며, 지속적인 코드 개선이 이루어져 최신 모델을 보유하고 있다. 이미 MELCOR는 상당한 수준의 결과를 예측하고 있지만, 노심 손상 모델을 개선하고 격납건물 안에서의 주요 현상 모사 모델을 추가하며, 또한 국내에서 이루어지고 있는 SONATA 실험이나 증기 폭발 실험 결과들을 MELCOR에 반영하는 것이 가급적 짧은 시간에 기술 자립을 이룰 수 있는 방법으로 판단된다.

1. 배경

1979년 TMI에서의 원자력 발전소 사고로 상상으로만 그쳤던 중대사고에 대한 인식이 전세계적으로 높아짐에 따라, 미국을 포함한 세계 여러나라에서는 중대사고에 대한 실험 및 해석 코드 개발 프로그램에 착수하였고, 체르노빌 사고이후 더욱 더 원자력 발전소의 중대사고에 대한 안전성 확보에 관심을 갖게 되었다.

미국에서는 원자력 규제위원회 (NRC)의 후원으로 국립연구소가 중심이 되어 상세 코드 (SCDAP/RELAP5, CONTAIN 등)와 종합코드 (MELCOR)를 개선하고 있으며, 미국 전력계에서

는 전력연구원 (EPRI)을 중심으로 MAAP4 전산코드를 개발하고 있다. 가까운 일본의 경우 주로 미국에서 개발된 중대사고 해석용 전산코드들의 검증/평가와 아울러 자체적으로 THALES/ART 등의 코드를 개발하여 중대사고 해석 및 원전 안전성 평가에 사용하고 있다. 프랑스에서도 ICARE 전산코드를 자체 개발하여 PHEBUS 실험결과와 비교하며 코드를 개선중에 있고, 캐나다도 CANDU 발전소에서의 중대사고 해석을 위해 MAAP-CANDU를 비롯한 중대사고 분석용 종합코드를 개발하고 있다.

이와는 달리 국내에서의 전산 코드 개발은 주로 발전소 설계 국산화와 관련하여 설계 기준 사고 중심으로 진행되어 왔고, 중대사고에 대한 연구는 외국의 중대사고 해석 코드를 들여와 우리 시스템에 설치하고 우리 목적에 맞도록 사용하는데 치중하였다. 중대사고 개별 현상 모델 개발과 관련하여서는 증기폭발 모델, 화염 전파모델, MCCI 모델, 그리고 독립적인 수소연소분석 모델 및 원자로 하부 파손 기구 분석 모델들을 개선하였다[1]. 이외에도 월성 2/3/4호기 원자력 발전소의 중대사고 해석을 위해 ISAAC 전산코드가 개발되었다[2]. 그러나 중대사고와 관련한 자체적인 대형 코드 개발 능력은 아직 걸음마 단계에 있다.

앞서 살펴본 바와 같이 현재 전세계적으로 원자력 선진 국가들은 자체적인 중대사고 해석 코드를 보유, 개선하고 있으며, 지적 소유권 문제로 모든 국가들이 외국의 코드를 더 이상 쉽게 사용할 수 없게 됨에 따라 한국도 이제는 국내 기술로의 코드 개발의 필요성이 대두되고 있다. 코드 국산화 작업은 외국으로부터의 기술 의존에서 탈피하고, 한발 더 나가 우리가 주도적으로 선도할 수 있는 기반을 구축함으로써, 국민에게 원자력에 관한 자긍심과 안전성에 대한 신뢰감을 증진시키기 위하여 더 늦출 수 없는 필요한 과제이다.

2. 개발 대상 코드의 요건

중대사고를 해석하기 위한 개발 대상 코드의 요건으로 다음 6가지를 선정하였다.

1) 코드 형태

일반적으로 중대사고를 모사하는 전산코드는 모델링 깊이와 사용 목적에 따라 가장 최신의 자세한 모델을 가지고 구체적인 현상을 모델하는 개별 현상 분석 코드 (separate phenomena codes)와 종합적인 중대사고 해석 코드 (integrated codes), 그리고 간단한 매개변수 형태의 코드 (simple parametric codes)로 구분할 수 있는데 개발 대상 코드의 개발 목적이 개별 현상보다는 발전소 전반에 관한 분석이므로 종합 전산 코드로의 개발이 바람직하다.

2) 1. 2차계통과 적납건물 모사능력의 유연성

코드의 중대사고 분석 대상을 기존의 상용 원자로를 포함하여 차세대 원자로와 중소형 원자로까지 확장할 수 있도록 계획하고 있으므로, 대상 코드는 1차계통이나 2차계통, 그리고 격납건물 등을 분석 대상에 따라 가변적으로 모사할 수 있도록 이러한 계통들과 계통의 구성 요소들을 노드로 연결시킬 수 있어야 한다.

3) 보다 자세한 발전소 거동 모사

계산 시간의 단축을 위해 질량과 에너지 보존식을 기본 지배 방정식으로 사용하기도 하지만, 최근에는 빠른 컴퓨터의 등장과 보다 자세한 현상 분석 결과들이 요구되어 종합 코드들도 모멘텀 보존 방정식을 같이 연결시키고 있다. 따라서, 세계적인 추세와 앞으로의 활용범위를 고려하여 질량, 에너지, 그리고 모멘텀 보존 방정식이 기본 방정식으로 사용되어야 한다.

4) 사용자 편의성

일반적으로 기존의 코드는 입출력 과정이 복잡하여 사용자가 입력을 준비하는데 많은 시간이 요구된다. 따라서 사용자의 편의성이 고려되어 손쉽게 입출력을 처리할 수 있는 코드 체계를 선호한다.

5) 개선 및 새로운 모델 접목의 용이성

지속적인 모델 개선과 새로운 모델의 접목을 위해서는 단위 프로그램의 분리와 추가가 용이한 모듈 형태의 구조를 선호한다.

6) 최신 모델 포함

중대사고 현상에 대한 지금까지의 실험 및 해석 노력들로 여러가지 예측 모델들이 많이 개발되어 왔으므로 가급적 이러한 최신 모델들이 포함되어야 한다.

3. 기존 중대사고 해석 코드 타당성 검토

전산 코드를 개발하기 위한 방법은 크게 두가지로 나눌 수 있다. 하나는 아주 간단한 코드를 참조 코드로 선정하여 개발 계획에 따라 코드를 확장시켜 나가는 방법으로, 단계별로 자체적인 기술 축적이 가능하고 대외적인 코드 국산화의 명분이 뚜렷한 반면, 장기간의 코드 개발 기간이 소요되고 코드 개발을 위한 종합적인 인력이 요구된다. 다른 한가지는 기존의 코드를 검토하여 개발 요건에 가장 부합되는 코드를 선정하여 개발 목적에 맞게 개선해 나가는 방법으로, 코드 체계의 독창성 확보는 어렵지만, 기존 코드의 장점을 최대한 활용할 수 있으며 상대적으로 빠른 시간에 개선 사항을 접목할 수 있는 장점이 있다. 두

가지 방법 중 선택할 수 있는 주요한 판단 근거는 주어진 기간 내의 양질의 결과물이며, 따라서 첫 번째 방법은 대형 전산 코드의 개발 경험이 없는 상태에서 택하기는 조심스러워 여기서는 기존 코드의 특성을 살펴봄으로써 기존 코드로의 활용 가능성을 타진해 보고자 한다. 분석 대상으로는 종합 전산 코드인 MELCOR [3]와 MAAP4 [4], 그리고 상세코드인 SCDAP/RELAP5 [5]를 선정하였다.

1) 1, 2차계통과 격납건물 모사능력의 유연성

MELCOR의 경우 사용자의 분석 목적에 따라 1, 2차 계통과 격납건물을 여러 노드로 구분하여 노드끼리 연결함으로써 다양한 발전소 형태에 대한 모사가 가능하다. SCDAP/RELAP5도 1차 계통 모사에 대한 유연성을 가지고 있지만, 코드의 분석 범위가 1차 계통으로 제한되어 있다. MAAP4는 산업계에서의 활용을 목적으로 개발되어, PWR과 BWR 각각에 대한 고정된 1차 계통 구조를 유지하고 있으나, 격납건물은 Generalized Containment Model을 이용하여 사용자가 필요에 따라 구역을 정의할 수 있도록 되어 있다.

2) 보다 자세한 발전소 거동 모사

MELCOR와 SCDAP/RELAP5는 1차 계통 내에서의 열 수력 거동을 모사하기 위하여 질량, 모멘텀, 그리고 에너지 보존의 세가지 지배 방정식을 모두 적용하고 있는 반면, MAAP4는 질량과 에너지 방정식만 사용한다. MAAP4는 1차 계통을 하나의 노드로 정의하여 1차계통 안에서의 전체적인 경향을 빠른 시간에 파악할 수 있는 장점을 가지고 있으나, 1차 계통 안에서의 주요 변수의 분포는 얻을 수 없는 한계가 있다.

3) 사용자 편의성

세가지 코드 중에는 MAAP4가 가장 사용자의 편의성을 고려하고 있다. 1차 계통이 간단하기 때문에 관련 변수도 상대적으로 간단하며, 운전자 조치사항들을 포함한 필요 입력도 쉽게 준비할 수 있도록 배려하였다. 출력 변수도 사용자의 필요에 따라 plot 파일을 생성하여 쉽게 도형화할 수 있다. 입력 준비와 주 프로그램, 그리고 출력간의 연계를 위한 입출력 처리 장치가 도입되면 사용자의 편의성을 향상시킬 수 있다. MELCOR나 SCDAP/RELAP5는 처음 입출력 관련 입력 준비와 코드 체제에 익숙하기에 시간이 상대적으로 많이 소요되지만, 일단 체제가 구축되면 최소한의 수정으로 원활히 코드를 활용할 수 있다.

4) 개선 및 새로운 모델 접목의 용이성

분석 대상 코드 모두 모듈 구조로 구성되어 있어 모델 분석이나 개선이 양호한 편이나, 사용 변수 이름의 친근성과 모듈별 연결 측면에서 보면 MAAP4가 가장 나은 편이다. 특

정 모델의 수정을 위해서는 그 모델의 코드 안에서의 연관 관계를 이해하기 위한 코드 구조 전반에 걸친 설명이 필요한데 지침서 중에는 MAAP4가 가장 자세히 제공하고 있다. MELCOR는 상세한 모델을 사용하는 한편 모델별로 민감도 변수를 도입하여 프로그램의 수정없이 입력으로 여러 가지 모델의 영향 평가를 할 수 있는 장점이 있다.

5) 최신 모델 포함

분석 대상 코드 모두 개발 기관과 사용자 그룹을 중심으로 모델 검증 및 개선이 꾸준히 이루어지고 있다. 1997년을 기준으로 MELCOR 1.8.4, MAAP 4.03, SCDAP/RELAP5/MOD 3.2 등의 최신 판이 출시되어 최근의 실험 결과와 코드 자체의 약점들을 지속적으로 개선하고 있다.

이상에서 논의된 대로, MAAP4은 여러 가지 장점에도 불구하고, 1차 계통을 사용자가 재구성 할 수 없고, 만일 바꿀 필요가 있는 경우에는 프로그램 자체를 수정해야 하기때문에 코드의 사용권 문제를 차치하고라도 기준 코드로서의 어려움이 지적되었다. SCDAP/RELAP5는 격납건물 모델을 추가하여 사용할 수도 있으나 상세코드로 개발되어 계통간 모델의 불균형과 개선된 모델의 영향 평가시 소요되는 긴 계산 시간 때문에 역시 기준 코드로서 적합하지 않았다. 따라서 분석 대상 코드 중에는 MELCOR가 사용자 편의성이 다소 떨어지지만 가장 요건에 근사함을 알 수 있었다. 즉, MELCOR는 계통 모사의 유연성 때문에 상용 발전소 뿐만 아니라 차세대나 중소형 원자로까지도 적용이 가능하며, 상세한 열수력 기본 지배 방정식을 활용하고, 지속적인 코드 개선이 이루어져 최신 모델을 보유하고 있다. 또한 국제 공동 연구 과제에 참여하고 있어 모델 분석 및 개선에 필요한 코드에의 자유로운 접근이 허용되고 있다.

MELCOR는 미국 NRC와 샌디아 국립연구소에서 개발하는, 경수형 원자력 발전소의 1차 계통과 격납건물에서의 열수력 현상, 노심 가열, 파손 및 재배치, 그리고 핵분열 생성물 방출 및 이송 등 전반적인 중대사고 현상을 다룰 수 있는 2세대 전산코드로, 1982년 개발에 착수한 이래 1994년 9월에 1.8.3으로 개선되어 널리 쓰이고 있으며 최근 MELCOR 1.8.4가 출시되었다. 미국의 Brookhaven 국립연구소와 Sandia 국립연구소를 통해 코드 검증이 진행되고 있으며, 국제적인 코드 검증 프로그램으로 MCAP이 운영되고 있다.

4. 결론

종합적인 중대사고 해석 코드를 개발하는 목적은 자체적인 기술 축적 뿐 아니라, 앞으로 계획되고 있는 발전소의 안전 해석에도 적극 활용하는데 있다. 그런데, 개발 대상 코드의 구조를 처음부터 구성하여 기본 방정식을 세우고, 위에서 논의된 코드의 요건을 만

족하도록 개발하는 것은 자체적인 종합적 중대사고 해석 코드의 개발 인력과 경험이 부족한 현 상황에서 제한된 기간 안에 추진하기는 어렵다고 판단된다. 또한 기존 코드와 비교할 수 있는 양질의 결과물을 생산하는 것도 상당한 기간을 요구한다. 따라서 기존 코드의 장점을 최대한 활용하며 부족한 면을 보완하는 것이 코드 개발 방향으로 바람직하고, 이를 위해서는 널리 알려진 MELCOR를 기존 코드로 활용하는 것이 좋다고 판단된다.

MELCOR에서 사용하는 모델에 대한 개선도 꾸준히 이루어지고 있으나 아직도 개선의 여지가 많이 있다. MELCOR 1.8.4가 출시되면서 원자로 하부 구조물의 파손, 세시움과 구조물 표면에서의 화학반응, 물에서의 핵분열 생성물 제거 모델, 그리고 수용성 메어로졸의 거동에 관한 모델 등이 새롭게 포함되고, 노심 손상 모델도 개선되었지만, 지속적인 개선 항목으로 노심 손상 (연료봉 피막재 파손 모드, 유텍틱 물질의 형성 및 거동, 재충수 현상)과 핵분열 생성물 거동 등이 지적되고 있다. 격납건물 안에서의 현상과 관련하여서는 아직 이슈로 남아있는 증기 폭발이나 격납건물 직접가열, 수소 폭발 등에 관한 모델이 보완되어야 한다.

이미 MELCOR는 상당한 수준의 결과를 예측하고 있지만, 입출력 처리 장치를 도입하여 사용자의 편의성을 도모하고, 노심 손상 모델의 개선과 격납건물 안에서의 현상 모사 모델을 추가하며, 또한 국내에서 이루어지고 있는 SONATA 실험이나 증기 폭발 실험 결과들을 MELCOR에 반영하여 코드를 국산화하는 것이 가급적 짧은 시간에 기술 자립을 이룰 수 있는 방법으로 판단된다.

참고문헌

1. "중대사고 분석코드 개발," 원자력 안전성 향상 연구, KAERI/RR-1748/96, 과학기술처, 1997.7
2. "가압 중수로형 원자력발전소의 2단계 PSA를 위한 전선코드 개발," KAERI/RR-1573/95, 1995.12
3. R.M. Summers, et al., "MELCOR Computer Code Manuals," SNL, NUREG/CR-6119, SAND93-2185, 1994.9
4. "MAAP4 (Modular Accident Analysis Program for LWR Plants Code Manual)," EPRI, 1994.5
5. C.M. Allison, et al., "SCDAP/RELAP5/MOD3.1 Code Manual," NUREG/CR-6150, EGG-2720, INEL, 1993.10