'2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

MARS/MASTER 코드에서의 상세 노심 열수력 계산능 구현

Implementation of Refined Core Thermal-Hydraulic Calculation Feature in the MARS/MASTER Code

주한규, 정재준, 조병오, 지성균, 이원재, 장문희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

최적 계통/노심 통합 코드인 MARS/MASTER의 노심 열수력 계산의 신뢰도를 높이기 위해 조밀한 열수력 계산 격자를 사용하는 방법을 MASTER 코드에 내장된 COBRA III-CP 모듈을 통해 구현한다. COBRA-III 모듈은 핵연료집합체 단위 크기의 노드를 대상으로 핵연료내 열전도 및 열수력 계산을 수행할 수 있으므로 해상도가 높은 열수력 궤환 효과의 처리를 가능하게 해 준다. COBRA-III의 노심 열수력 계산은 MARS의 계통 열수력 계산으로부터 생산된 노심 상하단에서 소격 열유동 경계 조건으로 하여, 매 시구간 마다 독립적으로 노심 열수력 상세 계산을 수행하도록 하였다. OECD MSLB 벤치마크 문제에 대해 얻어진 결과는 상세 열수력 계산을 할 경우, 노심총출력 같은 전체적인 과도 거동에는 큰 변화가 없으나 국부적으로는 도플러 계산의 정확성 향상으로 인해 최대 15% 까지 첨두 출력 인자를 감소시키는 것으로 나타났다.

Abstract

As an effort to enhance the fidelity of the core thermal/hydraulic calculation in the MARS/MASTER code, a best-estimate system/core coupled code, the COBRA-III module of MASTER is activated that enables refined core T/H calculations. Since the COBRA-III module is capable of using fuel-assembly sized nodes, the resolution of the T/H solution is high so that accurate incorporation of local T/H feedback effects becomes possible. The COBRA-III module is utilized such that the refined core T/H

calculation is performed using the coarse-mesh flow boundary conditions specified by MARS at both ends of the core. The results of application to the OECD MSLB benchmark analysis indicate that the local peaking factor can be reduced by upto 15% with the refined calculation through the accurate representation of the local Doppler effect evaluation, although the prediction of the global transient behaviors such as the total core power change remain essentially unaffected.

1. 서론

MARS/MASTER 코드는 최적 계통/노심 통합 코드로서 원전 성능/사고 해석 결과의 정확성를 제고시키기 위한 목적으로 개발되었다.[1] 이 코드는 계통 삼차원 열수력 모듈인 MARS[2]와 노심 삼차원 동특성 코드인 MASTER[3]가 결합되어 만들어 졌는데, 심각한 출력 분포나 열수력장 변수의 변화를 초래하는 과도 현상의 해석에 사용될 경우 기존의 점운동모델 및 일차원 열수력 모델에 기반한 계산 결과에 수반되는 불필요한 보수성을 절감하는 데 효과적이다. 이 통합 코드의 정확성은 OECD 주증기관 파단 사고 벤치 마크 해석에 참여한 다른 코드들과 비교를 통해 입증된 바 있다.[4]

통합 코드로 노심내 열수력 계산을 수행하는 방법에는 기본적으로 두 가지가 있다. 하나는 계통 열수력 코드가 핵연료봉내 열전달을 포함한 노심 열수력 계산을 수행하게 하는 것이고 다른 하나는 노심 동특성 코드에 이미 포함되어 있는 열수력 계산 모듈을 이용하는 것이다. 후자의 경우, 노심 유동장과 계통 유동장을 연계 시켜야 하는데, 압력을 통해 두 유동장을 연계시켜 동시해를 구하는 방법은 수치해법을 포함한 상당한 코드 변경을 요하므로 비현실적이다. 이에 비해 전자의 경우, 두 유동장의 연계가 이미 계통 코드에 의해 해결되어 있으므로 코드 통합에 있어 열수력 해법은 문제가 되지 않는다. 그러나 이 경우 계산 시간상의 문제와 수치해 안정성 때문에 노심내 열수력 노드의 크기를 어느 정도 이상 유지해야 한다는 제약이 따른다. 한 예로, MARS/MASTER 를 사용한 OECD MSLB 해석의 경우 열수력 반경 방향 노드의 크기는 약 10 개의 핵연료 집합체를 포함하는 정도로 크게 설정되었다. 열수력 계산 관점에서는 이 정도의 노드 크기는 계산 결과의 정확도의 악화를 초래할 정도로 크지 않지만, 중성자 군정수에 대한 열궤환 효과, 특히 도플러 효과, 관점에서는 집합체 정도 단위의 국부적인 열궤환를 세밀하게 고려하지 못함으로 인해 출력 분포의 오차가 허용 범위 이상으로 커지는 문제점을 초래한다.

초기 MARS/MASTER 코드에서는 MARS 가 노심 열수력을 전담하도록 하였다. 그러나 전술한 소격 열수력 격자의 문제점 때문에 노심 열수력 계산을 세밀하게 할 필요성이 대두되었고, 이를 구현할 방법으로 MASTER 내 이미 내장되어 있는 COBRA III-CP [5]모듈을

사용하기로 하였다. 이 경우, MARS의 열수력장과 COBRA-III의 열수력장 간의 연결이 필수적이 된다. 이 논문에서는 이러한 두 열수력장의 연계 방법과 상세 열수력 계산의 시험 및 개선 효과 평가를 주로 다룬다. 이에 앞서 다음절에서는 MARS와 COBRA-III의 열수력 계산 방법을 간략히 기술하고, 3, 4절에서 구체적인 상세 열수력 계산 구현 방법과 시험 내용을 각각 설명한다.

2. MARS와 COBRA-III 열수력 계산 방식 개요

MARS 코드는 RELAP5/MOD3와 COBRA-TF 코드를 근간으로 하여 만들어진 코드로서 노심내 유동장은 삼차원으로 해석하고 계통의 유동장은 일차원으로 해석한다. MARS 코드내 이 두 코드 모듈은 모두 이상 유동 지배 방정식을 기반으로 하고 Steam Table 같은 열수력 물성 자료, 실험 상관식 등을 공유한다. 두 모듈이 각기 다루는 노심의 유동장과 계통의 유동장은 압력 용기의 계통 연결구에서 만나며, 압력을 통해 직접 연계 되도록 되어 있어 매 시구간 마다 양쪽 유동장에 대한 동시해가 구해 진다. MARS에서는 노심 유동장이 삼차원으로 모의되고 그 해가 직접 해법에 의해 구해지는 만큼, 노심 내 열수력 노드 수가 증가하게 되면 계산 시간은 노드 수에 세제곱에 비례하여 급격히 증가한다. 따라서 MARS 계산에서 노심 내 노드 수를 증가시키는 것은 바람직 하지 않다. 이는 계통에서 발생하는 열수력 현상과 노심 내 열수력 현상의 중요성 및 균형을 고려할 때도 타당한 사실이다.

MASTER 코드에 내장되어 있는 COBRA-III 모듈[5]은 COBRA-TF에 비해 단순한 지배 방정식, 즉 균질 평형 모델 (Homogeneous Equilibrium Model)을 기반으로 하여 핵연료내 열전달 계산, Cross Flow를 고려한 노심내 유동장 해석, 간이 DNB 계산 등을 수행한다. COBRA-III 계산에서 반경 방향 노드 크기는 중성자 계산의 노드 크기와 동일하게 선택된다. 즉, 핵연료 집합체 당 한 개 혹은 네 개씩의 노드를 사용하여 노드별 핵연료 온도와 냉각재 온도 밀도 등을 계산해 준다. 축 방향 열수력 노드의 길이 역시 중성자 계산 노드 길이와 유사한 정도로 취해지고 그 크기는 약 20cm 정도이다. MASTER는 각 중성자 노드 별로 계산된 열수력 조건을 군정수 계산에 사용한다. 이렇게 조밀한 격자 구조를 가지고 Cross Flow를 고려한 삼차원 문제를 해석함에도 불구하고, COBRA-III의 계산 시간은 MASTER의 다른 부분에 비해 월등히 많지는 않다. 이는 COBRA-III 에는 효과적인 열수력 반복 계산 방식이 도입되어 있기 때문이다.

COBRA-III 는 노심 영역만을 대상으로 하기 때문에 노심의 상하단에서 유동 경계 조건

을 지정하여야만 계산이 가능하다. 유동 경계 조건은 주로 노심 출구에서의 압력, 입구에서의 유량 및 엔탈피 분포를 지정하는 것으로 정해진다. COBRA-III 단독의 과도 계산에서는 이러한 유동 경계 조건이 시간의 함수로 제공되어야 한다.

3. MARS 와 COBRA-III 의 연계

서론에서 논의한 바와 같이 서로 두 코드가 각기 다루는 계통 유동장과 노심 유동장을 연계하여 동시해를 구하는 방법은 원칙적으로는 최선이나 코드 변경 측면이나 계산 시간 측면에서 모두 과중한 부담을 초래하여 현실적이지 못하다. 이러한 원칙적인 방법 대신에 여기서는 MARS 코드가 이미 연계된 유동장에 대한 해를 구하고 있고 COBRA-III 노심 상하단에서의 경계 조건만을 필요로 한다는 데 착안하여 간접적인 연계 방법을 개발하였다. 이 방법은 두 코드를 독립적으로 수행하되, 매 시구간 마다 MARS 계산을 선행시키고, 이 결과 얻어진 노심 출구의 압력분포와 노심 입구에서의 엔탈피와 유량 분포를 COBRA-III 에 공급하여 COBRA-III 가 상세 노심 열수력 계산을 할 수 있도록 하는 것이다. 그림 1 에는 이러한 간접적 연계 방식이 도시 되어 있다.

이 간접 연계 방식하에서는 노심에 대한 열수력 계산이 매 시구간 마다 두 번 이루어진다. MASTER 는 MARS 와 COBRA-III 모듈에 의한 각각의 노심 열수력 계산을 위해 각 열수력 노드 구조에 맞는 열원 정보를 공급한다. 큰 열수력 노드를 사용하는 MARS 계산의 경우, 한 열수력 노드에 여러 개의 중성자 노드가 포함되게 되므로, MASTER 는 여러 중성자 노드의 열출력을 합산하여 열원 정보를 생성하여 공급한다. 반면, COBRA-III 의 경우 반경방향으로는 열수력 노드와 중성자 노드가 일대일(1:1)로 대응하므로 합산 과정이 필요 없다. COBRA-III 는 MASTER 와 MARS 로부터 공급 받은 열원 정보와 노심 양단의 유동 경계 조건을 바탕으로 각 상세 열수력 노드별로 핵연료 온도와 냉각재 온도 및 밀도를 계산한다. 이 세 열수력 변수는 MASTER 에 공급되어 중성자 군정수에 대한 열궤환 효과의 처리에 사용된다. 이 연계 방식에서, MARS 가 COBRA-III 로 부터 직접적으로 제공받는 계산 결과는 전혀 없으며, 단지 MASTER 가 제공하는 열원 정보를 통해 간접적으로 COBRA-III 상세 열수력 계산의 영향을 받는다.

이러한 간접 연계 방식의 타당성은 COBRA-III 에 주어지는 열유동 경계 조건의 상세 노드에 대한 의존성을 고찰하면 입증이 가능하다. 세 가지의 COBRA 경계 조건 중, 출구 압력은 노심내 열수력 노드의 크기에 매우 둔감하고, 입구에서의 엔탈피 분포와 유량 분포 또한 노심 내에서의 노드 크기에 영향을 받기 보다는 계통과 Down-comer, Lower Plenum의 모델링의 주로 영향을 받는다는 점을 고려하면, 유동에 경계 조건에 관한한 오차의 소지는 매우 적다고 판단할 수 있다. 다만, 노심 출구에서의 냉각재 온도 분포 관점에서는 COBRA-

III 계산 결과와 MARS 계산 결과간의 국부적으로 큰 차이를 보일 수 있다. 그럼에도 불구하고 MASTER 가 제공하는 열원의 총량이 서로 같기 때문에 출구 평균 온도의 차이는 미미할 것이고, 따라서 이 간접적 연계 방식은 충분히 정확한 결과를 보장할 것이라고 판단된다.

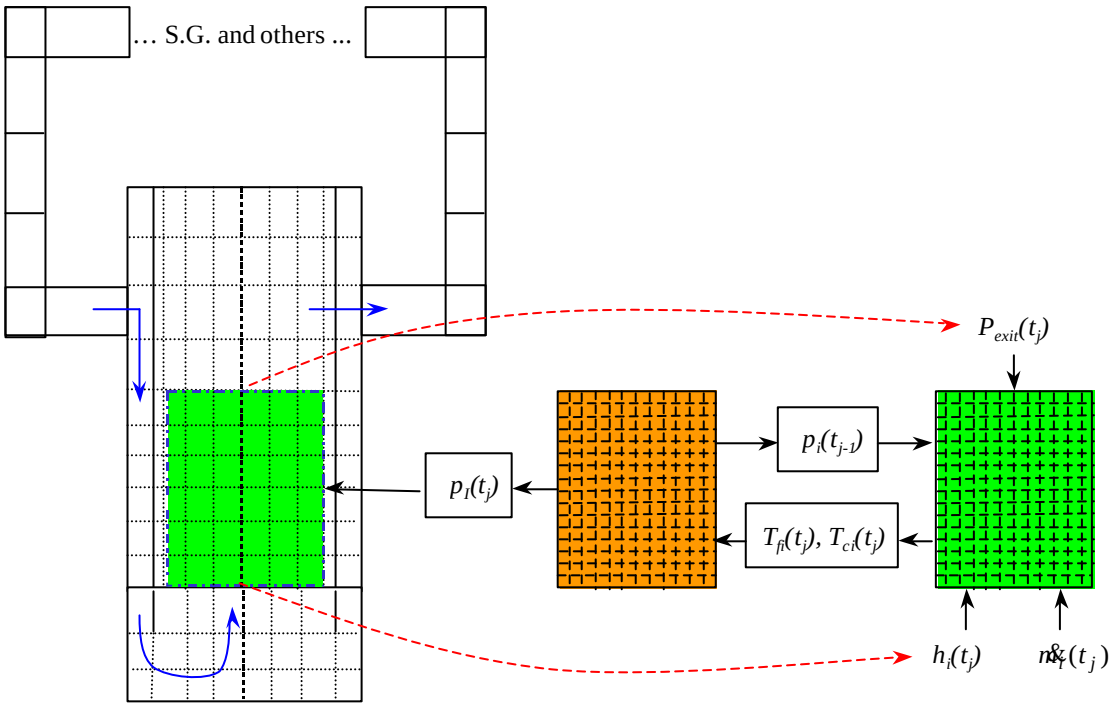
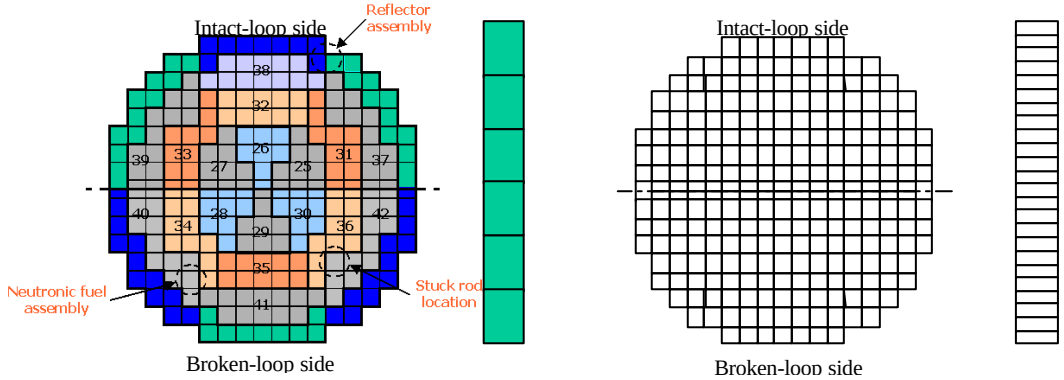


그림 1. MARS/MASTER/COBRA 연계 계산 시 노드 구조 및 연계 변수 교환 과정 (색칠한 부분은 노심, 대문자 P 는 압력, 소문자 p 는 출력, 대문자 I 는 MARS 의 큰 열수력 노드, 소문자 i 는 COBRA-III 의 작은 열수력 노드, j는 시구간 번호를 나타냄)

4. 주증기관 파단사고에 대한 상세 열수력 계산능 평가

COBRA-III 모듈을 통한 MARS/MASTER 코드의 상세 열수력 계산능의 시험과 평가를 위해 이미 이 코드로써 해석을 수행한 바 있는 OECD MSLB 주증기관 파단 사고 벤치마크 문제 [4,6]를 상세 열수력 노드 구조을 사용하여 재해석하였다. 그림 2 는 재해석에 사용된 열수력 노드 구조가 나타나 있다. 여기에는 MARS 용과 COBRA-III 용의 두 가지 노드 구조가 나와 있는데, MARS 용은 원해석에 사용된 것과 동일하다.



MARS COBRA-III

그림 2. MARS 와 COBRA-III 에 사용된 열수력 노드 구조 (MARS: 18 Channel-6 Plane, COBRA 177 Channel-24 Plane)

활성(active) 노심 영역에 대해, MARS 계산용 노드가 반경 방향으로 18 개, 축 방향으로 6 개, 총 108 개의 노드로 이루어 진데 비해, COBRA-III 용 노드는 반경방향으로 177 개, 축 방향으로 24 개, 총 4248 개로 MARS 노드 수 보다 약 40 배가 많다. MARS 용 노드 중 36 번 반경 방향 노드를 한 예로 들면, 이 노드에는 10 개의 핵연료 집합체가 포함되어 있고 여기에 속한 10 개의 핵연료 집합체 온도는 개개의 출력에 무관하게 모두 동일하게 취급된다. 이에 따라, 출력이 높은 핵연료에 인가될 도플러효과가 실제 보다 작게 되고, 그로 인해 상대 출력은 더 높아진다. 역으로 말하면, 조밀한 열수력 노드 구조를 사용할 경우 출력 분포가 평탄해 진다.

표 1 에는 전출력 초기 정상 상태에 대한 MARS 만을 사용한 경우와 COBRA-III 를 함께 사용한 경우의 주요 계산 결과가 비교되어 있다. 이 표에 보여진 대로 두 경우의 평균 감속재 온도와 핵연료 온도는 큰 차이가 없음에도 불구하고, 노심 유효 증배 계수에는 약 200 pcm 의 차이가 발생한다. 이 차이는 중성자 출력 분포의 차이에서 오는 중성자 누설의 차이에서 발생한다고 판단된다. 그러나 이 정도의 유효 증배 계수의 차이로는 상세 열수력 계산의 중요성이 부각되지는 않는다.

표 1. OECD MSLB 벤치마크 초기 정상 상태에 대한 소격 및 상세 열수력 계산 결과의 비교

	MARS Only	with COBRA-III	차이
k-eff	1.00591	1.00392	199 pcm
평균 감속재 온도, °K	579.19	579.60	-0.41
평균 핵연료 온도, °K	814.08	828.19	-14.11
첨두 핵연료 온도, °K	890.48	955.68	65.2

정상 상태에서와 마찬가지로 과도 계산에서도 노심 총출력 같은 노심 전체적인 특성 인자는 상세 열수력 계산에 의해 크게 달라지지 않는다. 이 사실은 과도 노심 출력에 대한 원해석 (MARS only) 결과와 재해석 (MARS/COBRA-III) 결과를 보여주는 그림 3 를 통해 확인할 수 있다.

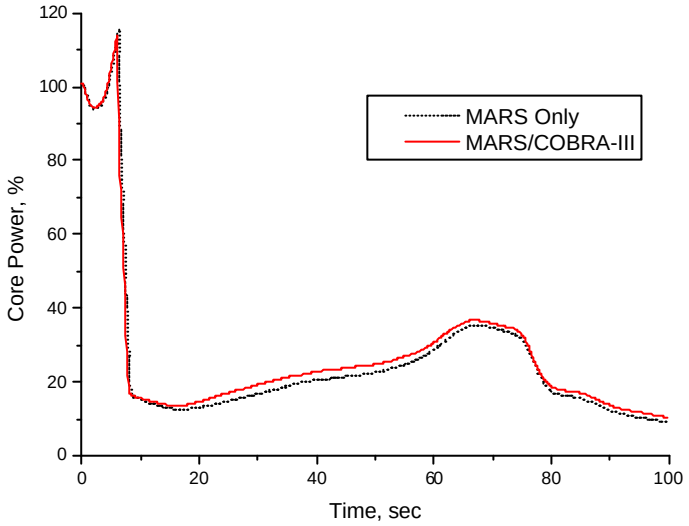


그림 3. 과도 노심 출력에 대한 소격 및 상세 열수력 계산 결과의 비교

그러나 국부적인 출력 관점에서는 상세 열수력 계산이 매우 중대한 개선 효과를 가져온다. 이는 그림 4 에 보여진 삼차원 (F_q) 및 반경 방향 (F_r) 첨두 출력 인자의 비교에서 극명하게 나타난다. 최대 출력 회귀가 나타나는 시점인 60 초 전후에서, MARS 단독 열수력 계산의 경우 Fq 가 약 7.3 인데 비해 COBRA-III 계산의 경우는 약 5.8 로 약 20% 정도 작아진다. 이렇게 첨두 출력 인자가 크게 줄어드는 것은 그림 5,6 에서 확인할 수 있듯이 반경 방향 출력 분포 뿐만 아니라 축방향 출력 분포가 평탄해지기 때문이다.

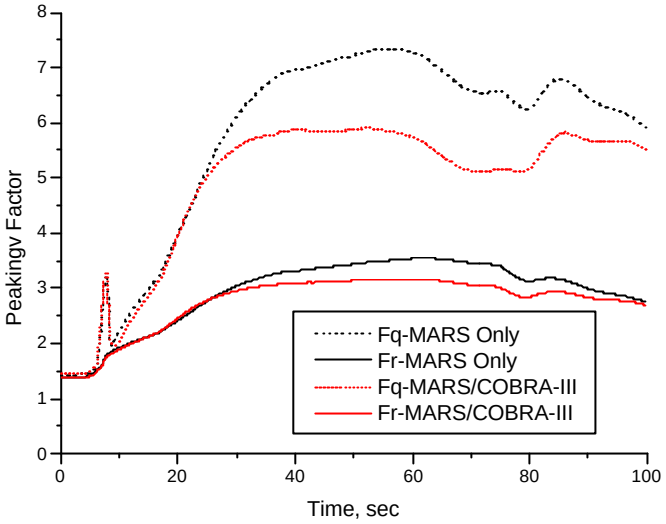
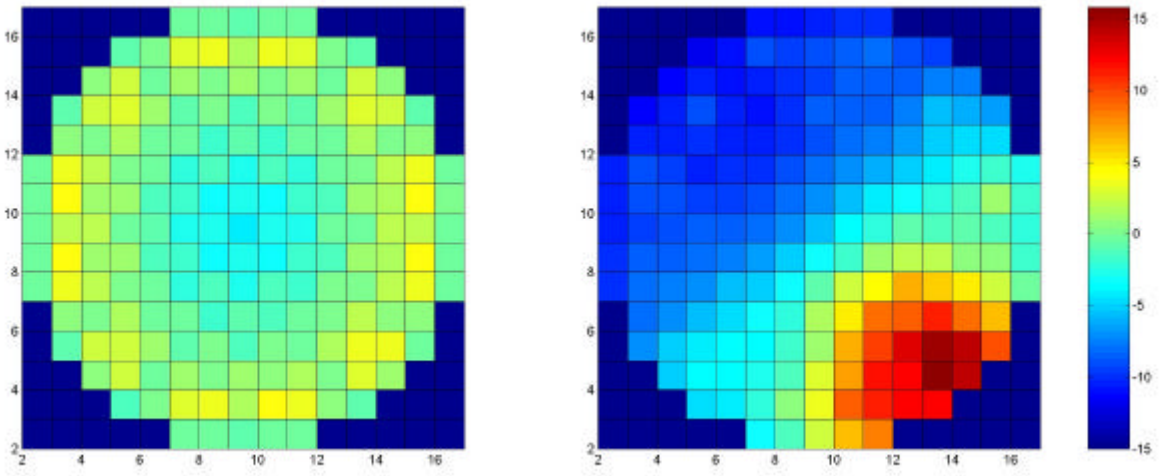


그림 4. 첨두 출력 인자 변화에 대한 소격 및 상세 열수력 계산 결과의 비교



초기 정상 상태 최대 출력 회귀 시점

그림 5. 소격 열수력 (MARS-only) 계산과 상세 열수력 (MARS/COBRA-III) 간의 상대 출력 밀도 차이 (기준은 COBRA-III, 단위는 %)

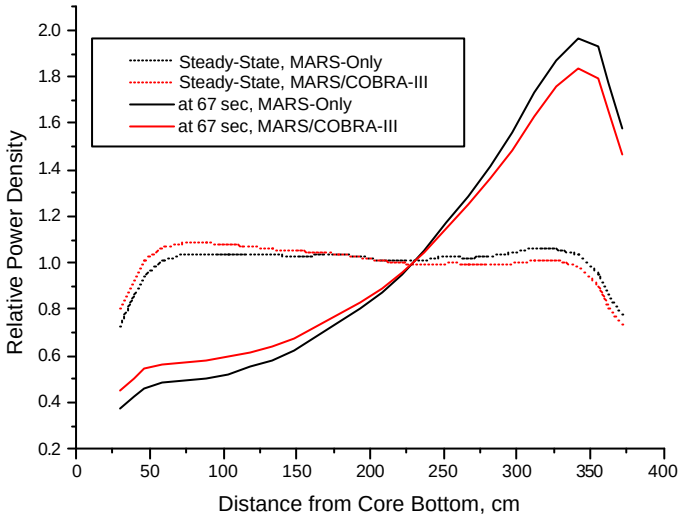


그림 6. 소격 열수력 (MARS-only) 계산과 상세 열수력 (MARS/COBRA-III) 간의 축방향 출력 분포 비교

5. 결론

비냉각재상실사고시 원자로의 안전해석에는 전체적인 계통 과도 거동뿐만 아니라 핵연료 용융이나 DNB 발생 등 국부적인 안전 관련 현상의 정확한 예측이 중요하다. 상세 열수력 계산을 통해 국부 계산 결과의 정확도를 향상시켜 과도하게 도입된 보수성을 절감할 수 있다면 설계 유연성과 열적 여유도 확보에 큰 도움이 될 것이다.

이 연구에서는 MASTER 코드의 COBRA-III 모듈을 사용하여 MARS/MASTER 코드의 상세 열수력 계산 기능을 개발하였다. 즉, MARS 에서 계산되는 노심 상하단의 열수력적 조건을 경계조건으로 활용하여 COBRA-III 모듈이 상세 열수력 계산을 수행하도록 하였다. OECD 주증기관 파단 사고 예시 계산을 통하여, 상세 열수력 통합 해석은 노심의 국부적인 출력 분포 오차를 15% 이상 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 이는 주요 안전 변수인 노심 DNB 의 안전 여유도를 증대시키는 효과를 준다. 또한, 소격 열수력 노드를 사용하더라도 노심 전체적인 특성 인자의 변화에 발생하는 오차는 무시할 만하므로 이러한 방식으로 계통/노심 연계 계산을 선행하고 이 계산의 결과를 유동 경계 조건으로 삼아 부수로 해석을 포함한 상세 열수력 계산을 수행하는 것도 타당하다고 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 중장기 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었다.

참고 문헌

[1] Jeong, J.-J., Joo, H.G. *et al*., "Development of a Draft Version of MARS/MASTER; A Coupled Code of MARS 1.3 and MASTER 2.0," *Proc. Korean Nucl. Soc. Fall Mtg*., Seoul, Korea, Oct. 30 – 31, 1998, p. 157 (Paper 86 in CDROM), 1998.

[2] Lee, W. J. *et al.,* "Improved Features of MARS 1.4 and Verification" KAERI/TR-1386-99, Korea Atomic Energy Research Institute, 1999.

[3] Cho, B.O. *et al*., "MASTER-2.0: Multi-purpose Analyzer for Static and Transient Effects of Reactors," KAERI/TR-1211/99, Korea Atomic Energy Research Institute, Jan. 1999.

[4] Jeong, J.-J., Joo, H.G. *et al*., "MARS/MASTER Solution to OECD Main Steam Line Break Benchmark Exercise III", J of the Korean Nuclear Society, Vol 32, No. 3, pp. 214~226, June 2000.

[5] Jackson, J. and Todreas, N., "COBRA III-C/MIT-2: A Digital Computer Program for Steady State and Transient Thermal Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements," MIT-EL81-018, MIT, 1981.

[6] Ivanov, K., Beam, T., and Baratta, A., "PWR MSLB Benchmark, Final Specifications," NEA/NSC/DOC(99)8, OECD Nuclear Energy Agency, April 1999.