

Optimization of Coupling between CFD-ACE Computational Fluid Dynamics and DeCART Whole-Core Neutron Transport Code for Realistic Flow Analysis of Nuclear Reactor

C. H. Shin,^a K. W. Seo,^a T. H. Chun,^a W. K. In,^a H. G. Joo^a

^a Korea Atomic Energy Research Institute, P.O. Box 105, Yuseong, Daejeon, 305-600, ex-shinch@kaeri.re.kr

1. Introduction

한국원자력연구소는 미국 알곤연구소 (Argonne National Laboratory)와 협력하여 원자로 노심현상의 상세 모사를 위한 수치 원자로 (Numerical Reactor)를 개발하고 있다.[1,2] 이를 위해 우선 노물리 해석코드와 전산유체해석코드를 연계하는 것이 진행되는데, 노물리코드는 한국원자력연구소에서 개발한 DeCART (Deterministic Core Analysis based on Ray Tracing)코드를 전산유체해석코드로는 상용 CFD(Computational Fluid Dynamics) 코드인 StarCD[3] 혹은 CFD-ACE[4]를 사용하고 있다.

두 코드를 서로 연계하기 위해서는 두 코드를 이어주는 연계모듈(Interface Module)이 필수적이다. StarCD와 DeCART에 기반한 연계모듈[5]을 CFD-ACE에 맞도록 수정하여 연계해석을 검증하고, 연계해석의 가치를 앞선 연구에서 평가하였다.[6] 본연구에서는 이러한 연구를 기반으로 전노심해석에 필요한 계산격자를 최소화하기 위한 최적화 작업을 수행하였고, 핵연료 집합체에 대한 연계 계산을 수행하여 최적화된 격자의 계산 성능을 평가하였다.

2. Interface Module

전산유체해석코드와 노심해석 코드의 연계된 계산을 위해 사용된 연계모듈은 크게 세부분으로 이루어져 있다. 사용자 입력 및 연계 코드제어를 위한 주 모듈, 각 코드의 격자간 대응자료들을 생산하는 모듈, 그리고 이 자료들의 전달을 담당하는 소켓으로 구성된다.

CFD-ACE 에서 계산된 유체의 온도와 밀도를 DeCART 에 전달하고, DeCART 의 출력분포를 CFD-ACE 의 열원으로 전달하며, DeCART 의 출력 분포가 일정한 잔차범위내에 도달하면 전체 계산이 종료된다.

3. Optimization

연계계산을 전 노심의 해석으로 확대하기 위해서는 전노심 해석에 사용되어질 전산유체해석의 격자를 최대한 줄임으로서 계산비용의 절감이 반드시 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 간단한 문제인 Multi-pin model에 대해 축방향 격자와 DeCART에서 냉각재 영역에 대한 ring개수의 영향에 대해 평가를 수행하였으며, 병렬계산에서

분할 (decompose)영역의 변화에 대한 연구를 수행하였다.

3.1 축방향 격자의 영향

횡방향의 격자를 일정하게 유지하고, 축방향의 격자를 50에서 500개로 나누어 계산을 수행한 결과를 표 1에 표시하였다. 표에 나타난 바와 같이 출구온도의 경우 거의 0.03 K이내의 일정한 값을 보이고 있으며, 평균 냉각재온도에서도 최대 0.3 K 차이에 불과하다. 밀도와 연료온도에 대해서도 1% 이내의 결과를 보여주고 있다. 또한 유효증배계수의 경우 최대 20pcm정도 내에서 격자에 따라 변하고 있음을 알 수 있다. 축방향 격자를 가장 적게 설정한 50개의 경우 채널 중심에서 다른 경우에 비해 유체온도를 다소 높게 예측하고 있으며, 출구에서는 거의 유사한 값을 보였다. 따라서 축방향 격자는 현재의 계산에서는 100이상인 경우 큰 차이를 갖지 않음을 알 수 있다.

3.2 DeCART 에서 반경방향 ring 의 영향

전노심 해석 코드 DeCART는 반경방향에 대해서 ring의 형태로 구역을 나눈다. 이때 연료, 피복관, 냉각재에 대해 각각의 ring개수를 부여하는데 여기서는 냉각재영역에 대한 ring의 분할에 대한 효과를 분석하였다. DeCART에 내장된 열수력 모델은 일차원 에너지 방정식에 기초하고 있으므로, 냉각재 영역에서 ring의 분할이 큰 의미를 갖지 않지만, 연계된 계산에서는 CFD 코드가 각 ring 영역의 값을 계산하고, 평균값을 DeCART에 전달하므로, ring분할의 효과가 클 것으로 생각되었다. 하지만 결과에서는 DeCART 단독계산시에도 ring의 분할에 따라 약 35pcm의 차이를 보였으며, 연계계산에서도 33pcm의 차이를 보인다. 또한 연계계산과 DeCART 단독계산에서의 차이는 동일한 ring개수하에서는 약 60pcm의 차이를 보인다.

3.3 병렬계산시 Decompose 의 영향

전체 노심의 해석을 위해서는 CFD에서 많은 격자를 요하게 되고, 병렬계산이 필요하다. 따라서 전체 계산 격자를 병렬계산에 사용되어지는 CPU 개수에 따라 분할하게 된다. CFD-ACE는 이러한 분할을 위해 여러가지 형태의 옵션을 사용

Table 1. Axial mesh dependency for the Multi-pin model

Case	T _{out} [°C]	Core Averaged Values			K-effective
		T _{coolant} [°C]	$\rho_{coolant}$ [kg/m ³]	T _{fuel} [°C]	
Axial Mesh 50	313.5	295.6	731.2	413.6	1.30889
Axial Mesh 100	314.5	295.4	731.6	413.5	1.30902
Axial Mesh 200	314.5	295.4	731.8	413.4	1.30912
Axial Mesh 500	314.5	295.3	732.0	413.4	1.30917
DeCART only	313.9	294.4	735.1	400.7	1.30958

Table 2. Dependency of DeCART coolant ring for the Multi-pin model

DeCART only	1ring	313.9	294.4	735.1	400.7	1.30993
	2rings	313.9	294.4	735.1	400.7	1.30958
Coupled	1ring	313.5	294.9	733.1	413.0	1.30933
	2rings	314.4	295.5	731.6	413.5	1.30901

Table 3. Decompose dependency for the Multi-pin model

Table 3. Decompose dependency for the Multi-pin model						Elapsed time
Default		295.50	731.48	413.52	1.30886	47,194 sec
Along z-dir.		295.45	731.57	413.49	1.30901	14,481 sec

할 수 있지만, 여기서는 기본 옵션과 축방향 옵션을 사용하여 분할한 경우의 결과를 비교하여 표 3에 정리하였다. 기본 옵션을 사용한 경우 각 노드별 분할된 셀의 개수가 축방향을 따른 경우에 비해 월등히 많으므로, 전체 계산시간의 증가와 다소 계산상 오차를 갖게 된다. 따라서 계산시간의 비교에서 알 수 있듯이 약 3배정도 계산시간이 많이 소요되고, 수렴을 위한 반복계산도 많이 소요된다. 결국 병렬계산을 위해서는 최소한의 셀이 분할될 수 있게 하여야 할 것이다.

4. Conclusion

전산유체역학코드와 전노심 중성자 수송 코드의 연계에 의해 원자로의 사실적 유동장 해석을 위한 최적의 격자를 도출해 내고 이를 핵연료집합체 모델에 적용하였다. 축방향 격자는 계산결과에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었고, DeCART에 대한 ring갯수 또한 30cm 정도의 적은 차이만을 보였다. 하지만 병렬계산에서는 병렬처리에 사용되는 중첩 셀의 개수를 최소화함으로써 계산속도를 3배 이상 감소시킬 수 있었다. 이러한 최적화된 격자구조를 사용하여 핵연료집합체 모델인 mini-core problem에 적용하였다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 과학기술부와 미국 에너지부가 지원하여 수행되는 국제원자력에너지 개발계획 (I-NERI, International Nuclear Energy Research Initiative)

의 일환으로 이루어졌으며 이에 대해 관계자 여러분께 감사 드립니다.

REFERENCES

- [1] Weber, D.P., Sofu, T., Pfeiffer, P.A., Yang, W.S., Taiwo, T.A., Joo, H. G., Cho, J.Y., Kim, K.S., Chun, T.H., Downar, T.J., Thomas, J.W., Zhong, Z., and Kim, C.H., The Numerical Nuclear Reactor for High Fidelity Integrated Simulation of Neutronic, Thermal-Hydraulic and Thermo Mechanical Phenomena, PHYSOR 2004, Chicago, IL, April 25-29., 2004
- [2] Weber, D.P., Taiwo, T.A., Yang, W.S., Pfeiffer, P.A., Froehle, P.H., Tzanos, C.P., Cahalan, J.E., and Sofu, T., Integrated 3-D Simulation of Neutronic, Thermal-Hydraulic And Thermo-Mechanical Phenomena, NURETH-10, Seoul, Korea, October 5-9., 2003
- [3] StarCD, Version 3.150A, CD-Adapco Group, Melville, NY.
- [4] CFD-ACE, Version 2003, CFD Research Corporation, Huntsville, Alabama.
- [5] Weber, D.P., Sofu, T., Yang, W.S., Downar, T.J., Thomas, J.W., Zhong, Z., and Joo, H.G., Coupled Calculation Using the Numerical Nuclear Reactor for Integrated Simulation of Neutronic and Thermal-Hydraulic Phenomena, PHYSOR 2004, Chicago, IL, April 25-29., 2004
- [6] C.H. Shin, K.W. Seo, T.H. Chun, W.K. In, and H.G. Joo, Coupling of CFD-ACE Computational Fluid Dynamics Code and DeCART Whole-Core Neutron Transport Code for Realistic Flow Analysis, Proc. 3rd National Congress on Fluid Engineering, Jeju, Korea, August 26-28, 2004