



원자력발전소 핵심설비 해체공정 최적화를 위한 이산사건 시뮬레이션 기술 기반 해체공정 통합평가 기술



현동준

한국원자력연구원 해체기술연구부 책임연구원

- 연세대학교 기계공학 학사
- 연세대학원 제어 및 로봇 석사, 박사
- 현대자동차 연구원
- KIST 박사후연구원
- 엘지디스플레이 책임연구원
- 한국원자력연구원 책임연구원

들어가며

필자가 1998년 자동차 회사의 설계팀에 입사하여 주로 활용한 기술은 3D CAD(Computer Aided Design)였다. 그때는 3D CAD가 막 도입되던 시기였는데, 기존에 개발된 자동차의 설계를 변경하려면 제도 용지에 출력된 도면에서 변경할 선도를 칼로 긁어내고 제도용 펜으로 다시 그리는 작업을 해야 했고, 새로 설계하는 신차에나 3D CAD 시스템이 적용되었다. 3D CAD 시스템은 UNIX 기반의 OS에서 구동되었고, 많은 명령을 명령창에 일일이 타이핑하여 입력해야 할 정도로 GUI가 조악했으며, 다른 소프트웨어와 연계할 수 있는 기능 역시 열악했다. 이후 2003년 즈음에 윈도우즈 OS에서 구동되는 3D CAD 시스템이 적용되면서 지금과 유사한 GUI가 도입되었고, 윈도우즈 OS 기반의 다른 소프트웨어와 연계하기 수월해졌다.

산업계에 도입된 3D CAD 기술은 FEM(Finite Element Method) 기반 구조해석이나 다물체(Multi-Body) 기구학해석과 같은 다양한 CAE(Computer Aided Engineering) 분야와 연계하면서 엄청난 시너지 효과를 발휘하여 제품 개발 능력을 획기적으로 향상했고, 20여 년이 지난 현재 산업계에 없어서는 안 될 중요한 축으로 자리 잡았다.

이산사건 시뮬레이션(Discrete Event Simulation) 기술은 3D CAD 분야에서 파생된 기술로, 제조업 분야에서 생산설비를 구축하기 전 3차원 가상 환경에서 생산설비를 구축하고, 공정 시나리오를 이산사건으로 구현하여 시뮬레이션함으로써 가동 중 발생할 수 있는 문제점을 사전에 검증하며, 공정 사이클 타임이 최적화 되도록 공정 시나리오를 재구성하여 생산성을 향상하는 기술이다. 최근에는 4차 산업혁명이 화두로 떠오르면서 생산설비의 3차원 형상과

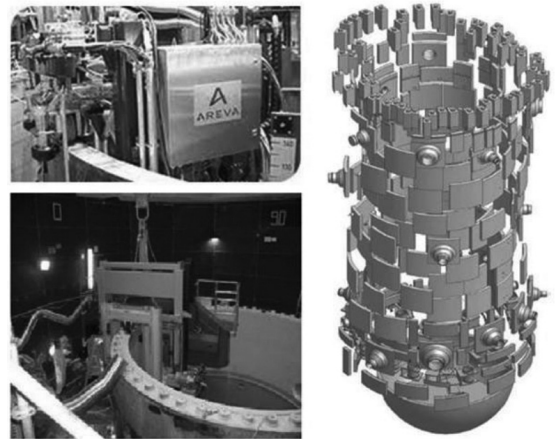
기구적 움직임뿐 아니라 내부적으로 통신하는 신호와 센서 반응과 구성 요소의 물리적 움직임까지 모사하는 디지털 트윈(Digital Twin) 기술로 발전하고 있다[1].

원자력발전소 핵심설비 해체공정에 기존의 이산사건 시뮬레이션 기술을 활용한다면 해체공정에서 발생할 수 있는 문제점을 사전에 검증하고 싸이클 타임을 최적화함으로써 해체공정의 안전성과 생산성을 획기적으로 개선할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 원자력발전소 핵심설비 해체공정 중 예상치 못한 문제가 발생하였을 때 방사성폐기물의 특성상 작업자의 추가 피폭과 작업장의 인허가 관련 문제를 일으키기 때문에 문제를 해결하는데 드는 비용과 시간이 타 산업 대비 급격하게 증가한다. 따라서 문제점을 사전에 인지하여 안전성을 향상할 수 있는 시뮬레이션 기술의 중요성이 타 산업 분야와 대비하여 매우 크다고 할 수 있다. 그러나 기존의 이산사건 시뮬레이션 기술은 제조공정과 해체공정의 근본적인 메커니즘 차이로 인해 효율성이 급격히 저하되어 원자력발전소 핵심설비의 전체 해체공정 수립에 이산사건 시뮬레이션 기술이 도입된 바가 없다.

절단공정 시뮬레이션 메커니즘

원자력발전소의 핵심설비는 원자로 및 1차 냉각 시스템으로 구성되는데, 장기간 운전 시 구조물의 소재가 방사화되기 때문에 영구정지 과

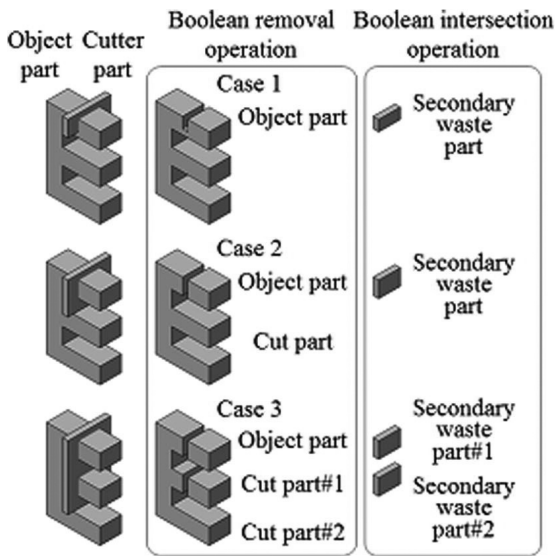
정을 거쳐 해체될 때는 방사성폐기물로 분류되므로 폐기물 등급에 따라 처분에 각별한 주의가 요구된다. 대형 금속 구조물인 원자력발전소 핵심설비를 절단하여 철거할 때 소요 비용과 2차 폐기물 발생 최소화를 위해 필수 절단 작업만 수행하여 철거하는 방법도 있으나, 장기간 운전한 원자력발전소를 해체하는 경우 방사화 정도가 심한 핵심설비 대부분은 폐기물 부피 감용을 위하여 해체공정에 매우 많은 절단공정이 포함된다([그림 1] 참고).



[그림 1] Wurgassen 원전 RPV 해체 사례

이러한 절단공정의 유무로 이산사건 시뮬레이션 시스템에서 해체공정과 제조공정의 메커니즘에는 근본적인 차이가 발생한다. 제조공정의 경우 부품을 이송하고 조립하는 이산사건으로 구성되므로, 시뮬레이션 시스템이 CAD 시스템에서 제공된 개체를 수정하는 작업 없이 시뮬레이션을 수행할 수 있으며, 기존 기술과 같이 CAD 시스템과 시뮬레이션 시스템이 독립적으로 기

능하여도 문제가 없다. 하지만, 해체공정의 경우 시뮬레이션 시스템이 CAD 시스템에서 제공된 개체를 절단공정이라는 이산사건에 적용하면 개체의 형상이 변경되고 개체 수가 증가해야 하는데, 기존의 시뮬레이션 시스템은 CAD 시스템에서 제공한 개체를 수정하거나 신규로 생성할 수 없으므로 CAD 시스템이 다시 개입되어야 한다. 이 과정은 매우 복잡하고 많은 추가 작업을 요구하기 때문에 해체공정의 시뮬레이션 시나리오를 작성하는 작업자의 작업량이 급격하게 증가하는 문제가 발생한다(그림 2 참고).



[그림 2] 절단공정 시뮬레이션 메커니즘 [3]

연구 내용

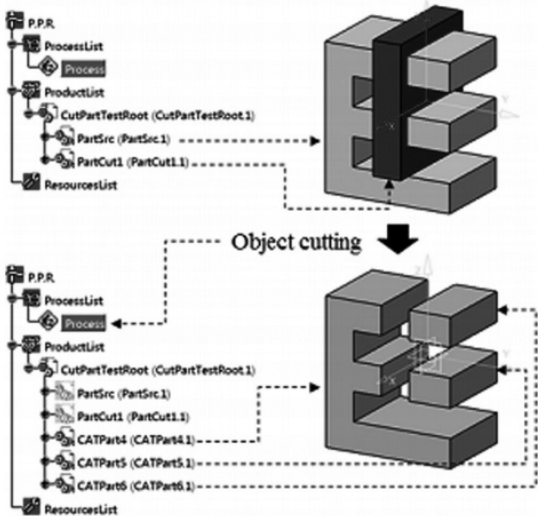
본 연구에서는 기존의 상용 이산사건 시뮬레이션 시스템이 CAD 커널(kernel)에 직접 접근하여 절단공정 모사에 필요한 CAD 개체를 생

성하고, 생성한 CAD 개체를 절단공정 이산사건 리스트에 연동할 수 있는 방법론, 그리고 원자력발전소 핵심설비 해체공정의 통합평가에 필요한 공정 소요 시간, 비용 및 2차 폐기물량을 계산할 수 있는 방법론을 고안하고 구현하였다.

이산사건 시뮬레이션 시스템을 이용하여 일반적인 제조공정을 구현하기 위해서는 시뮬레이션 시스템에 제조공정에 필요한 이동이나 결합 및 분리와 같은 단순한 이산공정 함수가 정의되어 있어야 한다. 예를 들어 하나의 부품을 이동하여 다른 부품과 결합하고, 그립퍼가 결합된 제품을 옮기는 제조공정을 모사하는 경우, 이동을 위한 이산공정 함수에 첫 번째 부품과 이동 방향 및 거리를 입력하고, 결합을 위한 이산공정 함수에 첫 번째 부품과 두 번째 부품을 입력한다. 이를 다시 결합 이산공정 함수에 첫 번째 부품과 두 번째 부품과 그립퍼를 입력하고, 이동 이산공정 함수에 그립퍼와 이동 방향 및 거리를 입력한 다음 각각의 이산공정 함수를 순서대로 리스트에 입력한 후 해당 이산공정 함수들을 수행하면 앞서 기술한 제조공정이 모사되는 것이다.

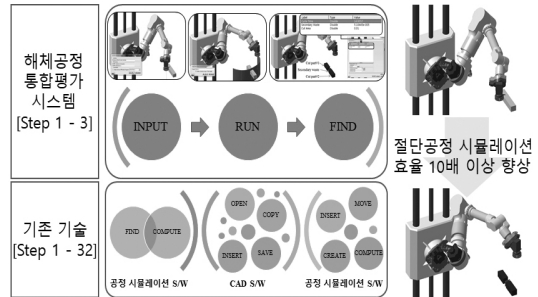
본 연구에서는 이산사건 시뮬레이션 시스템에 절단공정을 모사하는 절단공정 이산사건 함수를 개발하였다. 절단공정 이산사건 함수의 입력 요소는 절단 대상과 절단 장치의 단면 형상과 절단 궤적이다. 절단공정 이산사건 함수는 CAD Kernel 상에서 절단 장치의 단면 형상과 절단 궤적을 이용하여 절단 솔리드를 생성하고, 절단

대상에 대해 생성된 절단 솔리드로 불리언 리무벌 오퍼레이션(Boolean Removal Operation)을 수행한다. 여기서 불리언 리무벌 오퍼레이션으로 생성된 다수의 솔리드를 각자 새로운 CAD 개체로 생성하며, 이를 이산사건 시뮬레이션 시스템의 이산사건 리스트에 등록한다. 이러한 과정을 거친 후 해체공정 통합평가에 필요한 절단 공정 소요 시간, 비용 및 2차 폐기물량을 계산하여 계산 결과를 이산사건 리스트에 등록된 절단 공정 이산사건에 부가정보로 등록한다(그림 3)참고).



[그림 3] 절단공정 이산사건 함수 동작 예

개발된 절단공정 이산사건 함수는 단순한 입력요소를 가지고 있으나, 톱날 절단, 드릴링, 레이저 절단, 와이어 절단 등 해체공정에서 활용되는 다양한 공법의 절단공정을 모두 구현할 수 있으며, 각 절단공정에 걸리는 시간, 비용 및 2차 폐기물량을 계산할 수 있는 특징을 갖는다.



[그림 4] 해체공정 시뮬레이션 작업 효율성 분석

본 연구에서는 개발된 절단공정 이산사건 함수를 활용하여 해체공정 통합평가 시스템을 개발하였으며, 개발된 시스템의 성능을 검증하기 위해 고리1호기 원자로압력용기 및 내부구조물의 전체 해체공정에 대해 시뮬레이션과 공정평가를 수행하여 개발된 시스템이 성공적으로 활용될 수 있음을 확인하였다[4].

본 연구에서 개발된 해체공정 통합평가 시스템은 이산사건 시뮬레이션 시스템을 통해 직접 CAD 개체를 절단하고, 절단공정에 소요되는 시간, 비용 및 2차 폐기물량을 계산하여 기존 기술 대비 시뮬레이션 시나리오를 작성하는 작업자의 작업 효율을 10배 이상 향상할 수 있다. 기존 기술을 이용하여 단순 절단 공정을 구현할 경우, 절단 궤적을 통한 절단 솔리드 생성, 절단 대상의 절단 후 생성 개체 수만큼 복제, 불리언 리무벌 오퍼레이션을 통한 절단 후 형상 생성, 이의 이산사건 리스트 적용, 그리고 소요 시간, 비용 및 2차 폐기물량을 산출 등에 이산사건 시뮬레이션 시스템과 CAD 시스템을 활용하는 32개의 작업이 필요한 것으로 분석되었다. 반면 본

기술의 경우 단 3개 작업만으로 이를 수행할 수 있고, 각 단위 작업에서 작업자가 조작해야 하는 작업의 난도가 훨씬 낮아 실제 효율은 10배 이상 향상된다.

맺음말

국내 원전 총 26기 중 고리 1호기와 월성 1호기 등 2기가 영구정지 되었고, 원전 계속운전이 되지 않으면 2029년까지 총 12기의 원전이 영구정지에 들어갈 것으로 예상되며, 2020년 3월 기준으로 전 세계 원전 중 442기가 운전 중이고, 187기가 영구정지 되었으며, 이 중 21기만 해체가 완료되었다. 가동 연수가 30년 이상 된 원전이 증가함에 따라 세계적으로 2025년 이후 원전해체 시장이 활성화되고, 2035년도를 전후하여 원전해체 시장이 정점에 이를 것으로 전망되고 있다[5].

해외에서는 국내보다 상대적으로 이른 시기에 원자력 시설이 건설되었기 때문에 해체 기술 수요 또한 이른 시기에 요구되어 이미 많은 기술과 경험이 축적되어 있다. 단 그 경험과 기술은 대부분 1990년대에서 2000년대 초반에 형성되었으므로 최근 대두되는 ICT 기술과 연계성이 부족한 것도 현실이다. 따라서 해외 선진국 대비 기술 경쟁력을 확보하기 위해 ICT 기술 등을 접목한 독자 기술 확보가 매우 중요한 상황이다.

시뮬레이션 기술은 경험이나 실험을 완전히 대체할 수는 없지만 동일 수준의 경험치 축적이거나 최적화에 드는 시간을 압축할 수 있으며, 예측되는 현상을 영상으로 가시화할 수 있어 일반적인 문자와 그림보다 훨씬 강력한 정보전달력을 갖는다. 본 연구에서 개발된 해체공정 통합평가 기술은 해체공정에 특화된 시뮬레이션 기술이 갖는 강점을 국내 해체산업계에 제공함으로써, 국내 해체 산업의 기술 경쟁력을 높일 수 있을 것으로 기대된다. **KAIF**

[참고 문헌]

- [1] <https://www.gereports.kr/the-rise-of-digital-twins/>
- [2] Bruhn, J. H. (2010). AREVA: Experience in dismantling and packing of pressure vessel and core internals.
- [3] Hyun, D., Kim, I., Lee, J., Kim, G. H., Jeong, K. S., Choi, B. S., & Moon, J. (2017). A methodology to simulate the cutting process for a nuclear dismantling simulation based on a digital manufacturing platform. *Annals of Nuclear Energy*, 103, 369-383.
- [4] 최병선 외, “해체공정 통합평가 및 원격 제어기술 개발”, KAERI/RR-4174/2016
- [5] <http://www.keei.re.kr/keei/download/nprd/WNPMI200821.pdf>