

시스템 다이내믹스 접근법과 원자력 부문

김성호(한국원자력안전기술원)

송인진(한국원자력안전기술원)

최광식(한국원자력안전기술원)

최영성(한국원자력안전기술원)

초 록

최근에, 에너지 부문의 지속가능성을 달성하는 하나의 패러다임으로 전체론적 접근법(holistic approach)이 국내외적으로 관심의 대상이 되고 있다. 에너지 부문에서, 특히 원자력 시설과 같이 복잡 시스템은 전체론적 접근법 대신에 주로 결정론적 방법이나 확률론적 방법과 같은 기존의 분석적 접근법으로 다루지고 있다. 하지만, 시스템 다이내믹스와 같은 전체론적 접근법으로 문제들을 다루는 경우, 기존 접근법으로 얻을 수 없는 다양한 정보를 얻을 수 있다. 이 작업의 목적은 한국 원자력 부문에 시스템 다이내믹스가 어떻게 적용되고 있는 지 그 현황을 소개하고, 앞으로 이러한 방법론이 활용될 수 있는 가능성을 논의하고자 한다. 이를 통해, 시스템 다이내믹스 방법론과 분석적 방법론의 융합에 기반한 정보와 기술력의 시너지 효과를 기대해 본다.

I. 서론

요즘에는 공학을 포함한 모든 학술 분야에서 학제 분야의 경계를 융합하는 복합학의 흐름이 확산되어 가고 있다. 이러한 추세에 편승하여 적응하는 학제 부문도 있지만, 그렇지 못한 부문도 있을 것이다. 특히, 에너지 부문은 다각적인 측면에 연계되어 있으므로, 이러한 추세를 다른 부문보다 더 필요로 하는 위치에 있다고 본다. 그러므로 에너지 부문에 전체론적 접근법의 하나인 시스템 다이내믹 접근법의 도입은 앞으로 에너지의 지속가능성 달성에 일조하는 매우 희망적인 이니셔티브가 될 것이다.

우리가 살고 있는 석유 경제 시대에서는 석유 에너지의 지정학적인 편중, 석유 자원 고갈 우려 등이 국지적인 갈등, 국제적인 갈등을 야기시키고 있다. 공급 불안정으로 원유는 배럴 당 100달러의 초고유가에 다가가면서 전세계를 에너지 위기로 몰아가고 있는 실정이다. 이러한 석유 경제의 패러다임으로부터 미래 수소 경제의 패러다임으로 전환하려 하고 있는 21세기 초입에, 인류는 초유의 심각한 에너지 문제에 직면하고 있다. 더욱이, 에너지 문제는 그 자체만의 독립적인 것이 아닌 기후 변화나 석유 자원 고갈이라는 지구적인 환경 문제와 상호의존적이다. 이런 복잡성을 관리하기 위해 다양한 노력들이 시도되고 있다.

이러한 상황에서, 에너지 부문, 특히 원자력 부문에서 기존의 접근법과 접목되고 있는 시스템 다이내믹 접근법의 현황을 살펴보는 것은 매우 의미 있는 작업이라고 볼 수 있다. 이 접근법은 원자력이 가지고 있는 고유의 기술적 특성(예: 이산화탄소 배출량 저감 효과 파급 문제, 핵 물질 비확산 문제, 방사성 물질 관리 문제 등)뿐만 아니라 이와 연계된 비기술적인 특성(예: 에너지 믹스 문제, 국민 수용성, 국제적 수용성, 장기적 관리 정책) 때문에 앞으로 다각적인 측면에서 활발히 연구 개발될 것이라고 전망할 수 있겠다.

그렇지만, SD 접근법의 동태성에 기인하고 있는 이 접근법의 한계는 바로 시뮬레이션 결과의 검증 기술에 있다고 본다. 안전성 때문에 그 어떤 부문보다도 더욱 더 실증 기술(proven technology)에 기반을 두고 있는 원자력 부문에서, 이러한 검증 방법론 연구 개발은 앞으로도 계속해서 극복되어야 할 도전과제가 될 것이다.

II. 연구 개발 현황 및 전망

원자력 부문에서 SD-기반 연구 개발 활동은 크게는 1) 원자력 규제자 측면, 2) 원자력 산업계 측면 등으로 분류될 수 있다.

더 구체적으로 살펴보면, 규제자 측면에서는 SD 접근법을 통해 규제 정책의 다면적인 영향 관계를 파악할 수 있고 특정 정책의 지렛대 효과를 최적화 하여 효율적인 정책 개입 지

점을 발견할 수 있다. 원자력 산업계 측면에서는 SD 접근법을 통해 비 기술적 인자의 안전성 평가, 원자력의 전력 수급 정책, 안전성 관점에서 조직/인간 인자의 자원 할당, 기술 지침서의 개선, 원자력 산업의 기술 경쟁력 평가, 사보타지 리스크 관리, 기술 가치 평가, 선량 평가, 자원 할당, 방사성 폐기물 처분 시설의 입지 등을 비용 효과적으로 취급할 수 있다.

1. 규제자 측면에서의 응용

원자력 발전소의 안전성 규제 절차와 관련하여, 다양한 의사결정 행위자(또는 actor, player)나 이해관계자(예: 규제자, 운영자, 지역주민, 국민, NGO, 매스미디어, 국제 단체)의 활동 및 원자력 발전소 안전성 성능의 상호작용이 되먹임 루프와 시간 지연 효과를 통해 모델링 될 수 있다.

시스템적인 사고(systems thinking)에 바탕을 두고, 정책 의사결정 행위자(예: 운영자, 규제자, 지역 주민, 국민) 간의 되먹임 상호작용, 원전의 안전성 성능과 이들 행위자간의 상호작용 등이 하나의 인과 다이어그램(CLD)으로 제시되었다 [Choi, 2007].

이들 CLD는 원자력 발전소 안전성 성능과 두 행위자(예: 규제자/운영자, 규제자/국민, 규제자/지역 주민) 사이의 상호작용, 성능과 세 행위자(예: 국민/지역 주민/운영자, 규제자/국민/지역 주민) 사이의 상호작용, 성능과 네 행위자(예: 규제자/국민/지역 주민/운영자) 사이의 상호작용 등을 (-) 되먹임 루프 또는 (+) 되먹임 루프의 다중 고리로 표현할 수 있다.

여기서는 이러한 관계의 되먹임 효과가 수정된 후에 Table 1에 정리되어 제시되었다. 표를 보면 알 수 있듯이, (-) 되먹임 루프 모델에서는 그 구조적 특성이 상승 효과를 보이는 반면에, (+) 되먹임 루프의 특성을 갖는 모델에서는 그 구조적 특성이 상쇄 효과를 나타내고 있다.

규제의 관점에서 볼 때, 주로 안전성 성능 및 국민 만족 모두를 향상시키는 방향으로 SD-기반 규제 모델의 구조가 조정되어야 한다.

첫째, 정책 지렛대의 개입의 관점에서 (+) 되먹임 루프 모델이 더 관심 있게 관리되어야 한다. 예를 들면, 운영자 부하 증가는 운영자의 유한한 자원 때문에 안전 활동 감소를 야기시켜 성능 감소를 유발할 수 있다. 또한, 규제자 부하 증가도 규제자의 유한한 자원 때문에 안전 활동 감소를 야기하여 성능 감소를 유발할 수 있다. 그러므로 규제자 측면에서 운영자를 규제하는 경우에, 운영자 안전 활동에 악영향을 미치는 운영자 부하의 임계 질량(critical mass)을 넘지 않는 정도의 규제를 적용하는 전략이 개발되어야 한다. 이러한 SD 접근법의 전략적 유연성은 기존의 분석적 접근법에서는 찾아보기 어렵다.

둘째, 규제 정책의 단기적 또는 중장기적 특성이 반영된 모델이 개발되어야 한다. 시간 틀 안에서 나타나는 정책의 영향을 모델링 하는 경우, 시간 지연 효과가 도입될 수 있다. 일반적으로, 이러한 효과는 SD-기반 모델의 시뮬레이션을 통해 가능하다. 이러한 시간 지연은

규제 정책 모델의 파동적인 거동을 초래할 것이다.

[표 1] 안전성 성능과 행위자 간의 영향 관계를 표현하는 되먹임 모델링

극성 모델	(-) 되먹임 루프: 5 개	(+) 되먹임 루프: 6 개
규제자/운영 자 모델	성능 감소→규제자 부하 증가→운 영자 지식 향상→성능 증가	성능 감소→규제자 부하 증가→운영자 부하 증가→운영자 안전 활동 감소→ 성능 감소
규제자/국민 모델	(없음)	성능 감소→국민 만족 감소→규제자 부하 증가→규제자 안전 활동 감소→ 성능 감소
규제자/지역 주민 모델	성능 감소→지역 주민 관여 증가 →규제자 임무 의식 증가→성능 증가	성능 감소→지역 주민 관여 증가→규 제자 부하 증가→규제자 안전 활동 감 소→성능 감소
국민/지역 주 민/운영자 모 델	성능 감소→국민 만족 감소→지역 주민 관여 증가→운영자 안전 의 식 증가→성능 증가	성능 감소→국민 만족 감소→지역 주 민 관여 증가→운영자 부하 증가→운 영자 안전 활동 감소→성능 감소
규제자/국민/ 지역 주민 모델	성능 감소→국민 만족 감소→지역 주민 관여 증가→규제자 임무 의 식 증가→성능 증가	성능 감소→국민 만족 감소→지역 주 민 관여 증가→규제자 부하 증가→규 제자 안전 활동 감소→성능 감소
규제자/국민/ 지역 주민/운 영자 모델	성능 감소→국민 만족 감소→지역 주민 관여 증가→규제자 부하 증 가→운영자 지식 향상→성능 증가	성능 감소→국민 만족 감소→지역 주 민 관여 증가→규제자 부하 증가→운 영자 부하 증가→운영자 안전 활동 감 소→성능 감소

2. 산업계 측면에서의 응용

원자력 발전소에서 비기술적인 인자의 안전성 평가와 관련하여, 전력회사의 영향 인자(예: 조직 인자, 인간 인자)가 발전소 성능이나 안전성(또는 발전 설비의 잠재적 문제)에 미치는 정성적인 영향 평가가 시스템적 사고 접근법을 통해 수행되었다 [유재국외, 2001]. 발전소 종사자와의 면담/설문을 통해 개발된 원자력 발전소의 영향인자-안전성 CLDs에서는 다중 고리의 (+) 되먹임, (-) 되먹임 루프 등이 파악되었다. 원자력 발전소에서의 인간활동에 대하여 개발된 5 가지의 CLDs는 다음과 같다: 1) 설비투자/인력투자/안전성 모델; 2) 규제활동/안전성 모델; 3) 내부정보학습/안전성 모델; 4) 외부정보학습/안전성 모델; 5) 문제해결능력/안전성 모델. 다만, 외부정보학습/안전성 모델에서는 되먹임 루프가 형성되지 않고 단방향적

인 영향만이 나타났다. 예컨대, 규제활동/안전성 모델에서는 긍정적인 영향(즉 (-) 되먹임 루프)과 부정적인 영향이 모두 파악되었다. 전자는 규제활동 증가→절차선 개선→운전업무 질 향상→잠재적 문제 감소→안전성 향상, 후자는 규제활동 증가→추가 업무량 증가→전체 업무량 증가→ 운전업무 질 감소→잠재적 문제 증가→안전성 감소 등의 되먹임 구조에서 나타났다.

원자력 발전의 전력 수급 정책의 효율성 평가와 관련하여, 정량적 변수(예: 수요량, 발전량, 공급량, 발전 설비)로 구성된 SD-기반 수급 정책 모델이 구축되었다 [허훈 & 이명호, 2003]. 이 발전설비/수급 모델에서는 발전 설비의 공급량과 전력소비량의 되먹임 관계가 표현되었으며, 운영/경영 전략 부분의 정성적 변수가 이 모델에 연계되었다. 또한 에너지 가격 정책(예: 저가 정책)이 전력 수급 정책에 미치는 영향을 VESIM 도구를 통해 모사하였다. 이 연계 모델을 통해, 수급 정책의 효율성을 증대시키는 요인 변수를 발견할 수 있다.

원자력 발전소의 조직/인간 인자와 안전성의 상호작용을 표현하는 SD-기반 모델이 시뮬레이션 도구 VENSIM을 통해 연구되었다 [유재국외, 2004; Yu et al., 2004]. 하드웨어 결함과 인간 실수(즉, 업무의 질) 모두의 영향이 PSA 방법론으로 정량화된 안전성 지표(예: 노심 손상 확률)로 표현되었다. 사례 연구 결과, 조직의 교육 파견 인력은 안전성에 장기적으로 부정적인 영향을 주고, 교육 훈련은 더 큰 영향을 주는 것이 발견되었다. 인력은 증가보다는 감소가 더 큰 부정적인 영향을 주며, 최적화가 가능하다는 것이 발견되었다. 업무 절차 단순화는 안전성에 긍정적인 영향을, 업무 절차 복잡화는 안전성에 부정적인 영향을 주는 것으로 나타났다.

최종 안전성 분석 보고서에 포함된 기술 지침서의 개선과 관련하여, 월성 중수로의 보조급수 계통에 대한 운전 제한 조건(LCOs)의 동태적인 평가에 SD 접근법이 적용되었다 [Kang & Jae, 2005]. 기술 지침서의 한 항목인 LCOs에는 허용정지시간(AOTs) 및 요구 조치사항 등이 포함되고 있다. 몇 가지 운전 모드(예: 전출력, 정지) 별로 이들 LCOs가 동태적 위험도에 미치는 영향이 노심 손상 확률로 정량적으로 표현되었다. 여기서는 LCOs 운전 대안들의 민감도 분석을 통해 최저 위험도를 비교하면 최적화가 가능하다. 또한, 불확실성 분석을 통해 모드 변경의 최소 AOT나 최대 AOT 등이 얻어졌다.

원자력 발전 산업의 기술 경쟁력 평가와 관련하여, 기술 개발 정책 분야에서, 정책 지원 모델의 SD 접근법을 통한 정책 변수(예: 연구비 규모, 연구비 비율)의 효율화가 시도되었다 [이용석외, 2004]. 이들 정책 변수의 민감도 분석을 통해 효율적인 연구비 증가 전략을 파악하고, 최적 대안을 평가하였다.

원자력 시설의 사보타지 리스크 관리와 관련하여, 물리적 보안 시스템의 설계 인자들의 상호작용 모델링에 SD 접근법이 적용되었다 [Kim, 2005]. VENSIM 도구로 이들 모델의 시뮬레이션이 수행되었다. 물리적 보안 시스템 자체나 절차 등의 사보타지 취약성이 모사되었다. 또한, 현행 절차 및 시스템의 동태적 특성(예: 취약 침투 경로)의 효과성이 평가되었다.

원자력 발전 기술의 기술 가치 평가와 관련하여, 다섯 가지 모듈이 결합된 SD-기반 기술

가치 모델이 개발되었다 [이용석, 2006]. 이 모델에서는 전력 수요 규모 효과, 기술 발전의 절감 효과, 전원 구성비 경쟁 효과, 발전량 효과, 총 발전 비용 효과 등이 기술 가치와 상호 작용하고 있다. 목적 함수로는 원자력 기술 개발 유무에 따른 총 발전 비용의 차액이 선정되었다. 여러 가지 발전원(예: 원자력, 유연탄, LNG, 신재생, 기타)별 기술 개발 여부에 따른 시나리오 대안들이 구성되었고, 이 대안에 대한 기술 가치가 모사되었으며, 그 결과 발전원 별 순위가 결정되었다.

원자력 발전소의 안전성 평가와 관련하여, SD-기반 종합적인 방사선학적 모델이 개발되었다 [Kang & Jae, 2007]. 모델 단계에서는 방사성 핵종 농도를 제공하는 동태적인 대기 분산 모델 및 섭취 선량을 주는 동태적인 먹이 사슬 모델(즉, 섭취 경로 모델) 등이 구성되었다. 분산 모델은 시간에 따른 방사성 핵종의 거동을 다루고 있다. 경로 모델은 다양한 영향(예: 증착, 풍화, 세출, 재부유, 뿌리 흡수, 변위, 침출, 노화, 토양 및 먹이의 동물 흡입/배설)에 따른 이들 핵종의 시간적인 전달 반응과정을 서술하고 있다. 시뮬레이션 단계에서는 SD 도구의 하나인 VENSIM 언어가 사용되었으며, 변수들의 불확실성 거동도 취급되었다. 이러한 SD-모델을 통해 방사선학적 평가에서 다양한 변수들의 상대적 중요도가 파악될 수 있고, 리스크 감소 및 사고 관리 관점에서 여러 가지 전략들이 평가될 수 있다.

자원 할당 분야에서는, 자원 할당 활동(예: 계획 정비, 예방 정비)과 원자력 발전소의 경제성 및 안전성의 상호작용을 고려한 단순 SD 모델이 개발되었다 [Lee, 2007]. 위험도 정보-활용 자산관리 (RIAM) 방법론에 바탕을 둔 이 모델은 진보 RIAM (Advanced RIAM) 모델이라고 불리며, 시뮬레이션 도구 VENSIM을 통해 연구되었다. 이러한 진보 RIAM 모델은 시스템의 경제성 지표 및 안전성 지표의 상호작용을 고려하였다. 이 모델은 정비 활동의 영향이 이들 지표의 관점에서 정량적으로 계량하여 자원 할당의 의사결정을 보조할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이 모델의 시뮬레이션을 통해, 원전 운영자는 다른 여러 분야 (예: 예산 편성, 설비 교체, 수명 연장 등)에서 의사결정에 활용할 수 있다.

중저준위 방사성 폐기물 처분 시설의 입지분야와 관련하여, 그 시설 입지 후에 지역사회에 나타날 장기적 파급 효과가 SD 접근법을 통해 동태적으로 여러 측면에서 평가되었다 [오영민 & 유재국, 2006]. 다중 강화 루프와 균형 루프로 구성된 경주시 처분장 모델의 시뮬레이션을 통해, 처분 시설의 입지에 따른 여러 정책적 지원 사업의 효과가 파악될 수 있다. 이 통합 모델은 약 20개의 저장 유량 다이어그램(SFD)으로 구성되었다. 모델의 타당성 검증 단계에서는 경험적 자료를 사용한 상향식 기법과 객관적 자료를 사용한 하향식 기법이 사용되어 시스템의 구조와 행태가 검토되었다. 모델의 시뮬레이션 단계에서는 처분 시설의 입지 여부 시나리오가 다양한 변수(예: 인구, 산업수, 산업 발생률, 산업 인력, 요구 주택수, 사회 간접 자본, 토지 면적, 지방 재정, 중저준위 폐기물 처분량)에 미치는 파급 효과를 살펴보면서 장기적인 관점(예: 1996~2026년)에서 복잡한 도시에 미치는 영향이 평가되었다.

Ⅲ. 결어적 시사점

앞에서 알아본 바와 같이, 원자력 부문에서는 SD 접근법이 주로 산업계 측면에서 다양한 분야에서 상대적으로 활발하게 활용되고 있다. 반면에, 규제 측면에서는 앞으로 더욱 활용 분야가 확대되어야 한다는 것을 알 수 있다. 결국, 국내적으로 원자력 부문에서는 기존의 환원적인 접근법에 비해 전체론적 접근법의 도입이 적극적으로 진작되어야 한다는 점을 지적하지 않을 수 없다.

방법론과 관련하여서는, SD 기법 자체뿐만 아니라 기존의 분석적 방법론(예: 확률론적 기법)이나 여타 전체론적 방법론(예: 에이전트-기반 모델 기법) 등과 융합된 SD 기법의 창출도 기대될 수 있다. 시뮬레이션 도구와 관련하여, VENSIM뿐만 아니라 여타 도구(예: POWERSIM)의 도입을 통한 도구의 다양화 노력이 요구된다. 가장 중요한 사안으로, 역사적 자료나 경험적 자료와 SD-기반 모델의 시뮬레이션 결과를 비교하여 SD-모델의 타당성을 검증하는 단계에서 다양한 검증 기술(예: 전문가 인터뷰, 설문)의 개발이 필수적이다.

[참고 문헌]

- 오영민, 유재국(2006). 방사성 폐기물 처분장 입지 후 지역 변화 모델 구축, 한국시스템다이내믹스 연구, 7(1), 119-146.
- 유재국, 곽상만, 안남성 (2004). 원자력 발전소 조직 및 인적 인자 평가 기술 개발, 2004년 하계 학술대회 발표논문집.
- 유재국, 안남성, 곽상만 (2001). 원자력 발전소의 조직 및 인적 인자 영향관계 모델 개발, 한국 시스템 다이내믹스 연구 2 (2), 63-83.
- 이용석(2006). SystemDynamics를 이용한 원자력 발전의 기술 가치 평가, 한국시스템다이내믹스 연구, 7(2), 57-80.
- 이용석, 정창현, 곽상만, 김도형 (2004). 원자력 발전 산업 기술 개발 정책 지원 모델 개발에 관한 연구, 2004년 하계 학술대회 발표논문집.
- 허훈, 이명호 (2003). 국내 전력 산업의 효율성 제고 모형에 대한 SD 모형 연구 - 원자력 산업을 중심으로, 한국 시스템 다이내믹스 연구 4 (2), 153-171.
- Jaekook Yu, Namsung Ahn, Moosung Jae (2004). A Quantitative Assessment of Organizational Factors Affecting Safety Using System Dynamics Model, JKNS 36 (1), 64-74.
- K. Choi (2007). New approach for nuclear safety and regulation, KNS 2007 Spring Conference, May, 2007.
- Kim, C. (2005). Study on the evaluation of physical protection system in nuclear power plant using system dynamics approach, Master's Thesis, Seoul National University.
- Kyung Min Kang, Moosung Jae (2005). A Study on an Assessment Method for Improving Technical Specifications Using System Dynamics, JKNS 37 (1), 109-120.
- Kyungmin Kang, Moosung Jae (2007). Development of radiation risk management simulator using system dynamics methodology, Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Jeju, Korea, May 10-11, 2007, 2pp.
- Lee, G. (2007). Development of Advanced Risk Informed Asset Management Tool Based on System Dynamics Approach for Nuclear Power Plant, Master's Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
- Nairn, G. (2007). Need to take a holistic approach to sustainability, Financial Times, Oct. 3, 2007.