

혁신 SMR과 규제요건 개발방향



설광원

한국원자력안전기술원 책임연구원

- 연세대학교 기계공학과 학사
- KAIST 기계공학과 석사, 박사
- 前 한국원자력안전기술원 실장
- 前 국가과학기술심의회 전문위원
- 現 한국원자력안전기술원 재직

들어가는 말

최근 국내외에서 소형모듈원자로(SMR, Small Modular Reactor)에 대한 관심이 뜨거워지고 있다. SMR이 글로벌 기후변화에 대응하는 클린 에너지로서 중요한 역할을 담당한다는 전문가들의 전망부터, 향후 글로벌 원자력 에너지 시장에서 새로운 게임 체인저로 등장할 거라는 경제적 전망까지 다양하다. 이러한 관심사를 반영해 지난 5월 12일 한국원자력학회에서는 ‘경수로형 SMR 기술 개발 (부제: Green Energy를 위한 원자력의 역할)’이라는 주제로 워크숍을 개최하였다. 이 워크숍에서 발표된 규제 관점에서 바라본 글로벌 SMR 개발 현황을 여기서 다시 한번 소개하고자 한다.

국제원자력기구, IAEA에서는 작년에 ‘SMR 기술의 발전’이라는 2020 Edition을 발간하였다 [1]. 전 세계적으로 약 18개국에서 개발하고 있

는 72종의 새로운 SMR 설계를 자세히 소개하고 있다. 미국, 러시아 등 원자력 선진국뿐만 아니라 원자력 후발국에서도 다양한 SMR 개념들을 개발하고 있어, 가히 SMR 경쟁 시대라고 말할 수 있다. 또한, 경제협력개발기구, OECD/NEA에서는 올해 초 ‘SMR 도전과 기회’라는 저널을 발간하였다[2]. 여기서 대표적인 25개 SMR을 소개하면서, 향후 SMR 글로벌 시장에 대한 전망을 논하고 있다. 기술, 시장경쟁력, 정부정책과 국제협력 측면의 다양한 분석을 통해, 2030년대 초반에는 SMR이 글로벌 시장에 등장할 것이라 전망하고 있다. 우리 생각보다 상당히 빠르게 SMR 개발이 진행되고 있음을 알 수 있다.

현재 개발되고 있는 SMR 설계는 원자로 노심을 무엇으로 어떻게 냉각시키느냐에 따라, 대략 5가지로 분류된다. 기존과 같이 물로 냉각시키는 경수로(LWR-based SMRs), 가스로 냉각

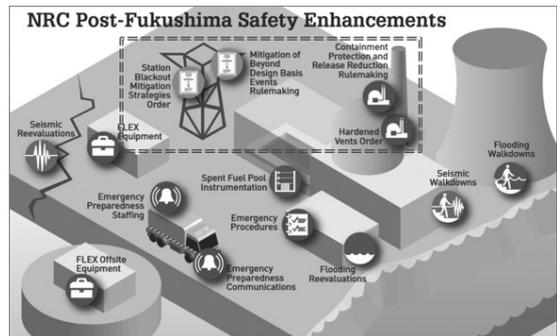
시키는 고온가스로(High Temperature Gas-cooled SMRs), 소듐을 냉각재로 사용하는 소듐원자로(Fast neutron SMRs, Molten Salt SMRs), 그리고 열전도관(Heat pipe)과 같이 새로운 개념의 열 제거 방식을 채택하는 초소형 원자로(Micro-reactor) 등이 있다. 현재 서방 세계의 SMR 선도국은 미국, 캐나다, 영국 등이며, 인허가 관점에서는 미국 원자력규제위원회(NRC)가 가장 앞서고 있다. 본 기고는 경수로 기반의 SMR 개발 현황에 초점을 맞추고, NRC에서 수행하고 있는 SMR의 인허가 현황, 그리고 향후 규제 방향에 대한 내용을 집중적으로 다루고자 한다[3].

1. 안전기준이 강화되고 있다

요즘 왜 SMR인가? 라는 질문들을 많이 한다. 그 대답으로서 화석 에너지의 효율적 대체 수단, 글로벌 시장 경쟁력, 혹은 전력생산 이외에 열원의 다목적성(Versatility)에 있다고 이야기한다. 모두 맞는 말이다. 하지만 인허가 규제 관점에서 본다면 당연히 안전성 때문이라고 말할 수 있다. 소형모듈원전은 현재의 대형원전에 비해 안전성을 대폭 향상시킬 수 있는 다양한 잠재력을 가지고 있다.

2011년 발생한 일본 후쿠시마 원전사고 이후, 전 세계는 원자력 안전규제를 다양한 방법으로 강화하고 있다. 그 핵심적인 내용은 기존 설계기준사건(DBE, Design Basis Event) 대응보

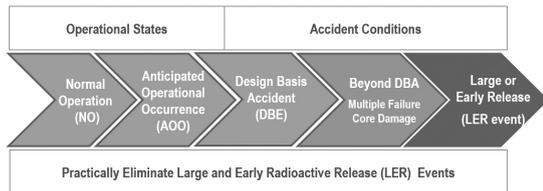
다는 설계기준초과사건(Beyond DBE)에 대한 완화능력을 강화하도록 요구하고 있다. 이의 이행 방안으로 심층방어(Defence-in-Depth) 전략을 강화하는 시설과 설비들을 추가하고, 규제 방법론으로서 기존 결정론적 방법론에 추가해 리스크 해석 방법론을 다양하게 활용하도록 허용하고 있다. 이미 승인되어 운영 중인 가동원전의 경우, 리스크 저감(Risk Reduction)이라는 안전성 향상 목표가 제시되었으며, [그림 1]에서 보는 바와 같이, 다양한 후속 조치로서 SBO(Station Blackout) 완화전략, Beyond DBE에 대한 완화 규정, 격납건물 보호 및 유출 저감 규정 등, 리스크 저감 방안이 마련되어 이행, 추진되고 있다. 가동 원전의 안전성 향상에 상당히 기여를 하고 있다.



[그림 1] 미국 NRC의 후쿠시마사고 이후 안전강화조치

한편, 신규원전인 경우는, 설계 단계에서 LER 사건(Large and Early Release Event)을 실질적으로 배제한다는 새로운 안전 목표가 제시되었다. 여기서 LER 사건은 사고 초기에 대규모 방사성 물질이 유출되는 사건으로, 바로 후

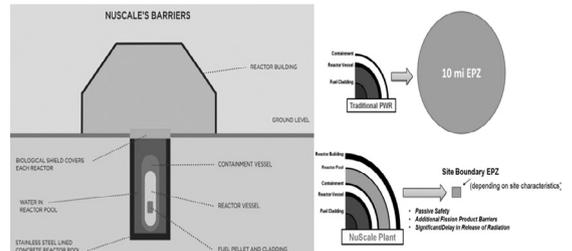
쿠시마 사고를 의미한다. 방사선 유출이 대규모로 사고 초기에 빠르게 진행된다면 비상대응절차가 무용지물이 되고, 피해는 엄청나게 증가할 수 있다. 이러한 LER 사건의 해결을 설계 단계에서 요구하는 것은 IAEA 안전기준에서도 마찬가지이다. 노심손상사고의 발생빈도(CDF, Core Damage Frequency)를 줄이는 설계뿐만 아니라, [그림 2]에서 보듯이 LER 사건으로 진행되는 것을 근본적으로 방지할 수 있도록 설계 안전기준을 제시하고 있다.



[그림 2] 노심손상사고에서 LER 사건으로 진행 개념

한 예로서, 경수로 기반 SMR인 미국 NuScale은 7개 방어벽으로 원자로를 지하 냉각수 풀에 설치하는 설계를 제시하고 있다. 기존과 다르게 격납건물(Containment Building) 대신에 격납용기(Containment Vessel) 개념을 채택하고 있으며, 다중방어벽의 강화 설계를 통해 CDF를 10^{-8} /년 이하 수준으로 낮추고, 방사능 유출빈도, LERF(LER Frequency)를 극히 낮추고 있다. 그 결과, [그림 3]에서 보듯이 기존 10마일 비상계획구역(EPZ, Emergency Planning Zone)을 부지 경계(Site boundary)로 대폭 축소할 수 있는 설계를 제안하고 있다. 혁신적인 안전성 강화 설계를 통해 원전 사업자에게 상당한 운영상의

이득을 얻을 수 있는 좋은 예라 하겠다.



[그림 3] NuScale의 다중방어벽 강화 설계와 비상계획구역의 축소개념

<표 1>은 최근 Gen III/III+ LWR 원자로들의 NRC 인허가 현황을 보여준다. 웨스팅하우스 AP1000, 우리나라의 APR1400, 유럽의 EPR1600과 같이 대형 원전의 인허가에서, 이후에 NuScale, mPower, SMR, BWRX 등, 소형 모듈원전의 인허가로 규제 환경이 바뀌고 있음을 볼 수 있다. 더욱이, [그림 4]는 미국 NRC에서 논의 중인 비경수로 SMR, 즉 non-LWR 신형원자로(Advanced Reactor)는 다양한 제4세대 원자로뿐만 아니라 초소형 마이크로원자로까지 다양한 설계를 모두 포함한다. 현재 X-energy와 TerraPower는 데모플랜트 건설을 준비하고 있으며, 심지어 Oklo Aurora 원자로는 건설/운영 통합인허가가 진행 중에 있다. 대부분 안전성을 혁신적으로 증가시킨 새로운 원자로 개념들이다.

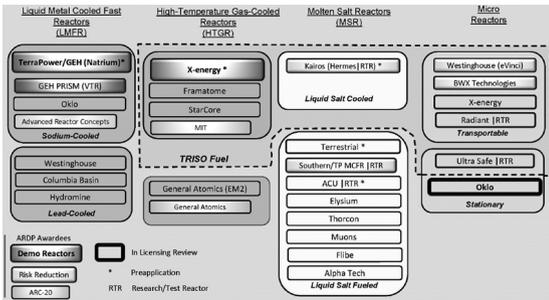
2. 상용화를 목표로 하는 혁신형 SMRs

세계적으로 다양하게 개발되고 있는 SMR은

〈표 1〉 미국 NRC, 최근 신청원자로 인허가 심사현황

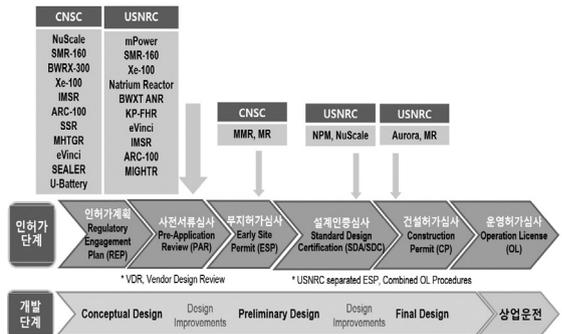
| Designs | Application Types | Applicants |
|---------------------------------|----------------------|--------------------|
| Advanced BWR | DC, 1997 (App. A) | GE Nuclear Energy |
| System 80+ | DC, 1997 (App. B) | WHE Co.(ABB-CE) |
| Advanced Passive 600 (AP 600) | DC, 1999 (App. C) | WHE Co. |
| Advanced Passive 1000 (AP 1000) | DC, 2006 (App. D) | WHE Co. |
| Economic Simplified BWR (1520) | DC, 2014 (App. E) | GEH Nuclear Energy |
| APR 1400 | DC, 2019 (App. F) | KEPCO and KHNP |
| US APWR 1700 | DC, under review | Mitsubishi HI |
| US EPR 1600 | DC, suspended | AREVA |
| NuScale (60) | DC, 2020 (App. G) | NuScale Power, LLC |
| NuScale 720 | SDA, pre-application | NuScale Power, LLC |
| mPower™ (iPWR), 180 | Pre-Application | BWXT mPower, Inc. |
| SMR-160 | Pre-Application | SMR, LLC. Holtec. |
| BWRX-300 (ESBWR) | Pre-Application | GEH Nuclear Energy |

대부분의 SMR은 미국의 경우, 사전심사(Pre-Application Review) 단계에, 캐나다의 경우, 밴더설계심사(Vender Design Review) 단계에 있고, 미국 NuScale이 설계인증(DC, Design Certification) 마무리 단계에, 그리고 Aurora 마이크로 원자로가 가장 앞선 통합 인허가 단계에 있음을 볼 수 있다. 인허가 단계가 진행되면서 개념설계, 기본설계, 상세설계로 원전 개발이 진행되고, 상용화에 가까워지고 있음을 볼 수 있다.



[그림 4] 미국 비경수로(Non-LWR) 신청원자로 개발현황

상용화를 목표로 추진되고 있다. 글로벌 시장 선점이 우선 목표이다. 상용화라는 목표를 달성하기 위해서는 복잡하고 긴 인허가를 통과해야만 한다. 따라서 SMR의 인허가 획득은 SMR 개발에 필수 프로세스임을 알 수 있다. [그림 5]에서 보듯이 인허가는 사전심사 단계에서부터 표준설계인증 단계, 부지허가 단계, 건설허가 단계, 운영허가 단계 등 복잡하지만 체계적으로 구성되어 있다. [그림 5]는 이러한 인허가 단계와 SMR 개발 단계를 함께 보여주고 있으며, 미국과 캐나다 규제기관에서 진행하고 있는 SMR 인허가 단계도 보여준다.



[그림 5] SMR 개발단계와 인허가단계 : 미국/캐나다 규제기관의 SMR 인허가 현황

여기서, 경수로 기반 SMR 설계로서 인허가 단계가 가장 앞서고 있는 NuScale의 심사 현황을 살펴보고자 한다. NPM(NuScale Power Module)은 NuScale 설계인증을 받기 위해 아래와 같이 많은 인허가 신청서류를 개발, 제출하였다. 이중에서 가장 중요한 서류는 ②번 최종안전성분석보고서(FSAR)이며, 여기에는 주제별보고서(Topical Report)와 기술보고서(Technical Report)들이 포함된다. 특히 주제별보고서는 별도로 NRC 심사, 승인을 받아 향

후 건설허가, 운영허가 신청 시에 참조하는 인허가 문서로서 핵심기술 문서에 해당된다. <표 2>는 NuScale 설계인증 단계에서 승인된 14건의 주제별보고서 목록을 보여준다. 주로 사고해석 코드 및 해석 방법론에 관한 것과 새로운 핵연료 사용에 관한 것, 그리고 품질보증 프로그램에 관한 것이다. 이러한 핵심기술 및 관련 인허가 문서들을 개발하고, DC 단계에서 규제기관 승인을 받는 인허가 전략은 국내 SMR 개발자들이 참조해볼 만하다.

- ① General and Financial Information
- ② Final Safety Analysis Report (FSAR) and Certified Design Descriptions (CDD) and Inspections, Tests, Analyses, & Acceptance Criteria (ITAAC), including Topical and Technical Reports
- ③ Applicants Environmental Report - Standard Design Certification
- ④ Generic Technical Specifications, Emergency Plans and Security Plans
- ⑤ Exemptions and License Conditions
- ⑥ Withheld Information
- ⑦ Quality Assurance Program Description

NuScale 설계를 심사하는 NRC는 2016년 NuScale 용 표준심사지침(NuScale Design-Specific Review Standard)을 개발해 심사에 활용하였다. 심사지침을 심사 이전에 개발하지 않으면 기존 심사지침을 활용하는데, 이 경

<표 2> NuScale 핵심기술에 해당하는 주제별보고서 목록

| | Topical Report Title | FSAR |
|----|--|-----------|
| 1 | Applicability of AREVA Fuel Methodology for the NuScale Design | 4 |
| 2 | Applicability of AREVA Method for the Evaluation of Fuel Assembly Structural Response to Externally Applied Forces | 4 |
| 3 | Nuclear Analysis Codes and Methods Qualification | 4 |
| 4 | Subchannel Analysis Methodology | 4 |
| 5 | Evaluation Methodology for Stability Analysis of the NPM | 4 |
| 6 | NuScale Power Critical Heat Flux Correlations | 4 |
| 7 | Design of the Highly Integrated Protection System Platform | 7, 15 |
| 8 | Safety Classification of Passive NPP Electrical Systems | 8, 15 |
| 9 | Loss-of-Coolant Accident Evaluation Model | 15 |
| 10 | Non-Loss-of-Coolant Accident Analysis Methodology | 15 |
| 11 | Rod Ejection Accident Methodology | 15 |
| 12 | Accident Source Term Methodology | 3, 12, 15 |
| 13 | Risk Significance Determination | 17, 19 |
| 14 | Quality Assurance Program Description for the NuScale NPP | 17 |

우 NuScale 설계 고유한 현안들이 발생할 경우, 시기적절하게 대응하지 못하고 길고 복잡한 심사과정을 거치게 되며, 인허가의 실현성이 불투명해질 수 있다. 따라서 규제기관에서는 새로운 SMR 설계를 심사하기 이전에 새로운 심사지침의 개발여부를 검토하는 것이 필수적이라 할 수 있다.

NRC는 표준심사지침을 기반으로 FSAR과 14개 주제별보고서를 심사했으며, 약 41개월에 걸쳐 2,400여개의 질의답변이 있었고, 최종적으로 작년 9월에 안전성평가보고서(Safety Evaluation Report)를 발행하였다. 현재 NuScale은 이러한 심사경험을 반영해 출력을 증가시킨 업그레이드 버전의 NuScale 설계를 추가적으로 설계인증 받고자 규제기관과 DC를 논의 중에 있다. 여기서, 국내 개발자와 규제자가 관심을 가져야 할 사항이 하나있다. 바로 신청서류 중에 규제적용면제 보고서(Exemption

report)가 제출되었다는 점이다. 혁신적인 설계로 인해 현재의 규제요건을 적용할 수 없을 경우에 면제 요청을 하는 것으로 뒤에서 좀 더 자세히 소개하고자 한다.

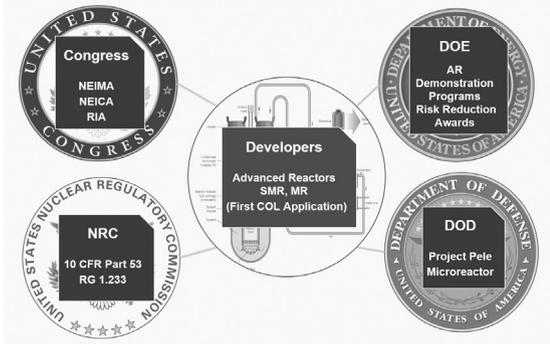
다음은 NuScale 핵심기술 중에 하나인, 냉각재상실사고(LOCA, Loss of Coolant Accident) 해석방법론에 대해 간단히 소개하고자 한다. NuScale은 일체형원자로 개념이므로 대형 LOCA는 배제되고, 소형 LOCA의 발생이 가능하다. NuScale 사고해석에 사용된 코드 체계는, Stability 해석용으로 PIM 코드, LOCA, non-LOCA, LTC(Long-Term Cooling) 해석용으로 NRELAP5 코드, REA(Rod Ejection Accident) 해석용으로 COSMO5/SIMULATE5 코드, 부수로 해석용으로 VIPRE 코드, 방사선 결말분석 용으로 RADTRAD 코드 등을 개발, 사용하고 있다. 다양한 개별효과실험(Separate Effect Tests)과 종합효과실험(Integral Effect Tests) 데이터를 사용해 코드 검증(V&V)을 수행하였으며, 주제별보고서로 NRC에 제출되어 심사를 받았다. LOCA 해석 방법론은 기존 복잡한 최적평가(Best Estimate) 방법론이 아닌 보수적 평가방법론(Conservative Evaluation Method)을 사용하였으며, 이는 LOCA 설계 안전여유도가 충분히 확보되었기 때문으로 볼 수 있다. 최종 LOCA EM 승인 코드는 NRELAP5 v1.4이며, 승인된 주제별보고서는 TR-0516-49422-A(미공개본)이다.

여기서 한 가지 국내 개발자, 규제자가 유의할

점이 하나있다. 바로 열수력계통해석용 코드인 NREALP5 코드가 3차원(3D) 코드라는 점이다. 그리고 NRC도 3차원 코드인 TRACE 코드를 사용해 안전성에 대한 독립 검증을 수행했다는 점이다. 일체형원자로는 기본적으로 사고 조건에서 3차원 열수력 거동 특성을 보인다. 따라서 3D 코드를 사용하는 것은 당연하며, 기존 1D 코드를 사용할 때 발생하는 여러 문제점들을 근본적으로 해결하고 있음을 주의해 볼 필요가 있다.

3. 혁신 SMR, 규제환경이 바뀌고 있다

소형모듈원전의 인허가 환경이 바뀌고 있다. 기존 대형 경수로 기반의 규제환경에서 비경수로(Non-LWR)를 포함하는 다양한 신형원자로 규제환경으로 빠르게 전환되고 있다. [그림 6]에서 보듯이, 미국 SMR 개발은 혁신 민간기업 주도로 추진되고 있으며, 공공기관은 법적, 제도적, 재정적으로 지원하는 국가개발정책에 근간을 두고 추진되고 있다. 개발자를 중심으로, 미국에너지부(DOE)에서는 예산, 기술, 시설을 개발자에게 제공하고, 국방부(DOD)는 원자력에너지 기술의 사용자로서 여러 프로젝트를 운영하며, 규제기관(NRC)은 신형원자로 인허가를 위한 미연방 규정을 새롭게 제정하고 있다. 또한 미국의회에서는 양당 공동발의로 원자력에너지 개발과 상용화를 지원하는 여러 법령들을 제정해 지원하고 있다.



[그림 6] 미국 신형원자로의 국가개발프로그램 참여 부처

최근 미국의회에서 발의, 제정된 대표적인 법률은 아래와 같다. 특히, NEICA는 미국 내 민간혁신기업에 재정지원과 기술지원이 가능하도록 하고 있으며, NEIMA는 규제기관이 2027년까지 신형원자로 인허가 규정을 수립해 허가를 줄 수 있도록 요구하고 있다. 그리고 NRC와 DOE는 10년짜리 장기 비전과 전략(Vision and Strategy)을 수립하고, 체계적, 종합적인 이행조치 프로그램들을 개발, 운영하고 있다[4,5]. 혁신적 변화로서 미래를 준비하고 있음을 알 수 있다.

- ① 원자력에너지 혁신역량법 (NEICA, Nuclear Energy Innovation Capabilities Act, Jan. 2017)
- ② 에너지부 연구혁신법 (RIA, DOE Research and Innovation Act, Sep. 2018)
- ③ 원자력에너지 혁신 및 현대화법 (NEIMA, Nuclear Energy Innovation and Modernization Act, Jan. 2019)

첫째 변화는, 신형원자로 인허가 규정을 새롭게 제정하고 있다는 점이다(신규 10 CFR Part 53 제정). 인허가 체계를 현대화(Licensing Modernization)하고자 추진하는 이 프로그램은, 기존 경수로뿐만 아니라 비경수로 혁신 설계를 모두 포괄하는 새로운 인허가 규정을 제정하고자 하는 것으로, 신형원자로 인허가를 적기에 효과적으로 제공하자는 데 그 목적이 있다. 기존의 10 CFR 50은 제 I~II 세대 원자로의 인허가 규정이고, 10 CFR 52는 제 III/III+ 세대 원자로의 인허가 규정인 반면, 새롭게 개발되는 10 CFR 53은 제 IV 세대 신형원자로의 인허가 및 규제 기준에 해당한다. 신형원자로 인허가 규제 체계가 완전히 탈바꿈하고 있음을 볼 수 있다.

기존 대형 LWR 중심 규제의 한계성을 인식하고 새로운 규제 수요에 맞게 인허가를 현대화하는 것은, 앞으로 예상되는 신형원자로 인허가 현안들을 조기에 체계적으로 해결하고자 하는 의지를 담고 있다. 즉, 신형원자로 인허가 체계를 SMR 개발 속도에 맞추어 개발자의 기술측면, 규제측면의 난제들을 조기에 해결하고자 하는 것이다.

둘째 변화는, 새로운 안전기준(F-C target)과 규제방법론(TI-RIPB)을 제시하고 있다는 점이다. 새로운 안전기준은 사고발생빈도(Frequency)와 사고결말(Consequence), 즉 리스크 정보에 기반하고 있어 리스크 정보 규제라고도 한다. 새로운 규제방법론, TI-RIPB 방법론(Technology-Inclusive, Risk-Informed, Performance-Based Methodology)은 모든

혁신 설계기술에 균형 있게 안전기준을 적용하고, 기존 성능기반 규제를 보완해 설계 단계에서부터 신형원자로의 안전성 분석 및 평가를 효율적, 효과적으로 수행하고자 개발되었다. 개발자와 규제가 함께 개발한 TI-RIPB 규제방법 혹은 설계방법론의 자세한 사용지침은, 작년 2020년 6월에 개발 완료되어 RG 1.233으로 발간되었다[6].

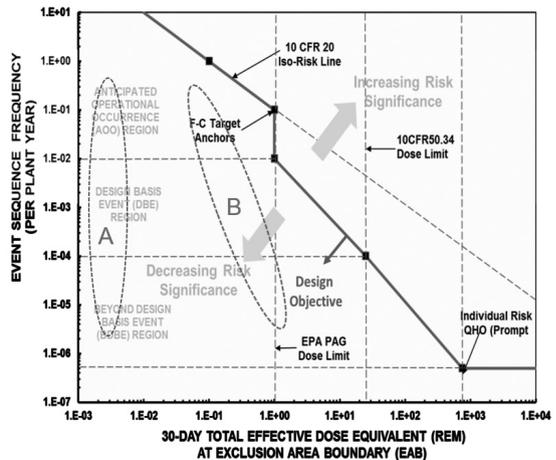


[그림 7] 새로운 규제방법론(TI-RIPB)과 인허가현대화 프로젝트

[그림 7]은 TI-RIPB 규제 개념을 보여준다. 일반적으로 신형원자로 개발자가 인허가를 신청하기 위해 가장 중요한 것은 안전성분석보고서(SAR)를 포함한 신청서류를 개발해, 제출하는 것이다. SAR의 핵심 내용은 안전성 분석의 대상이 되는 과도(AOO), 설계기준사고(DBA), 설계기준초과사고(Beyond DBA)들을 선정, 평가하고, 그 사고들이 안전기준을 만족한다는 규제요건 준수여부를 확인하는 것이다. 이러한 프로세스를 인허가기준사건(Licensing Basis Event)의 선정과 평가라 하며, 사고분석이 완료되고 나면, 각 사고를 대처하는 안전설비, 즉 구조물, 계통, 기기(SSCs, Structures, Systems, Components)의 안전등급을 분류하고, SSC의

성능관리, 품질보증, Tech. Spec., 검사방법, 운전 및 보수 등 다양한 인허가 규제문서들을 생산하게 된다.

최근, 미국 신형원자로 개발 과정에서는 6개의 대표적인 SMR 설계에 대해 TI-RIPB 방법론을 적용하여, 즉 RG 1.233 사용지침에 따라 안전성분석보고서를 개발하는 프로젝트를 수행한 바 있다. 이러한 RG 1.233의 시범적용 프로젝트를 인허가현대화 프로젝트(LMP)라고 하며, 개발자 주도로 추진되었고, 거의 마무리 단계에 와있다. 프로젝트의 결과는 상당히 만족스러운 것으로 알려져 있으며, 최종적으로 신형원자로의 인허가 신청이 가능한 단계에 와있음을 말해주고 있다.



[그림 8] 신형원자로의 새로운 안전기준(F-C Target)

[그림 8]은 새로운 안전기준(혹은 설계기준)을 보여준다. 과도 및 사고의 안전성분석에 사용되는 안전기준으로 y축은 사건의 발생빈도(F)이며, x축은 사고결말(C)인 피폭선량이고, 가운

데 실선은 설계목표인 기준이 된다. 사건의 발생빈도에 따라, 과도운전(AOOs), 설계기준사건(DBEs), 설계기준초과사건(Beyond DBEs)으로 분류할 수 있으며, 사고 분석결과에 대해 설계기준(F-C target)의 만족여부를 쉽게 확인할 수 있다. 이러한 F-C plot은 기존 안전기준들이 서로 다른 사고에 대해 서로 다른 규정으로 서로 다르게 기준을 제시하고 있는 것을, 하나의 공통기준 그래프로 깔끔하게 개발, 정리한 것이다. 리스크 관점에서 새롭게 제시한 이 설계기준 그래프는 안전성 분석을 수행하는 개발자뿐만 아니라 안전성을 확인해야하는 규제자에게도 매우 유용하며, 편리한 장점을 가지고 있다.

한 예로, A, B 신형원자로의 안전성 분석결과가 그림에서와 같이 동그라미 A와 B에 분포하게 된다면, A설계가 같은 빈도 사건들에 대해 B 설계보다 더 적은 사고선량을 보여준다. 두 설계가 모두 설계기준을 만족하지만, A설계가 더 많은 안전여유도를 확보하고 있으므로, 규제에서는 A설계에 더 인센티브를 줄 수 있다. 이러한 규제 방법을 결과 중심의 규제(Consequence-oriented Regulation)라고 하며, 이를 통해 개발자는 더 안전한 원자로를 개발하려고 노력하게 된다. 누가 더 안전하고 경제적인 원자로를 개발하느냐가 시장 경쟁력에 있어 핵심 요소임은 더 강조할 필요가 없을 것이다.

〈표 3〉은 미국의 신형원자로 인허가 체계를 새롭게 구축하기 위한 다양한 이행조치 프로그램(Implementation Action Plan)들의 목록

을 보여준다. 10 CFR Part 53 개발부터, LMP, GDC 개발, DiD 적절성 평가, 사고해석용 전산 코드개발, 산업기준 및 표준의 준용, AMP 가이드 개발, 등등 많은 프로그램들이 진행 중에 있다. 본 기고에서 극히 일부만 소개했지만, 생각보다 빠른 속도로 새로운 인허가 체계가 구축되어가고 있음을 인지할 필요가 있다. 그리고 다소 늦은 감이 있지만, 국내 혁신 원자로 개발 과정에서 이러한 선진 프로그램들을 심도 있게, 지속적으로 파악, 참조할 필요가 있다.

〈표 3〉 미국 신형원자로 인허가 개발 이행프로그램 목록

| Titles of Implementation Action Plan (IAP) | |
|--|---|
| IAP 1 | Proposed 10 CFR Part 53 Rulemaking |
| IAP 2 | Industry-led Licensing Modernization Project (LMP) |
| IAP 3 | Selection and Evaluation of Licensing Basis Events (LBEs) |
| IAP 4 | Safety Classification and Performance Criteria of SSCs |
| IAP 5 | RIPB Evaluation of DiD Adequacy |
| IAP 6 | AR General Design Criteria (GDC) and PDC |
| IAP 7 | TICAP and ARCAP Development |
| IAP 8 | Computer Codes and Review Tool Development |
| IAP 9 | Industrial Codes and Standards (NRC Regulatory Forum) |
| IAP 10 | Probabilistic Risk Assessment (PRA) Approach |
| IAP 11 | Advanced Manufacturing Technology (AMP) Application Guide |
| IAP 12 | Fuel Qualification Guideline (HALEU, TRISO, ...) |
| IAP 13 | Generic Environmental Impact (GEI) Statement for ARs |
| IAP 14 | Policy, Licensing, and Key Technical Issue Resolutions |
| | |

4. 도전과 과제, 규제 현안들

소형모듈원자로 개발자들은 개발단계에서 규제기관에 많은 질문들을 한다. SMR의 인허가를 위해 원형로(Prototype Reactor) 건설은 필요한가, 오지마을이나 산업단지 근처에 설치할 수 있는가, 인허가 서류를 간소화할 수는 없는가, 비상계획구역을 줄일 수는 없나, 격납건물은 꼭

필요한가, 자동/무인운전을 하면 운전원을 줄일 수 있다, 다수모듈원자로는 어떻게 운영허가를 주나, 전력생산 이외에 열공급 목적의 원자로는 어떻게 허가를 받나, 등등, 기존 설계, 제작, 운전 방식과 다른 혁신적인 개념들에 대해 사전에 인허가 혹은 규제방법을 알고자 한다. 그리고 설계 개발 프로세스에 이를 반영하고자 한다. 이러한 수많은 질문들이 곧 인허가 혹은 규제 쟁점 현안들이 된다.

〈표 4〉는 지난 10여년간 제기되고, 논의되고, 해결방향을 찾아온 인허가 현안들의 목록을 보여주고 있다. 다수모듈에 대한 인허가 방안 등 인허가 절차와 관련된 현안(Licensing Process Issues), 격납건물 대신에 격납용기를 채택하는 등 설계와 관련된 현안(Design Issues), 소형/자동 원전의 운전원 축소 등 운영과 관련된 현안(Operational Issues), 그리고 최근 관심이 많아진 마이크로 원자로에 관련된 현안들을 보여주고 있다. 개별적인 현안들의 해결과정은 매우 전문적이고 긴 시간이 소요되므로 국내 개발자, 규제자들이 지속적으로 관심을 가질 필요가 있다. 본 논고에서는 개별 현안들에 대한 소개보다는, 이러한 현안들이 제기되었을 때, 현재의 인허가 제도, 절차 하에서 어떻게 해결할 수 있는지 하나의 사례를 소개하고자 한다.

바로, 현재 규제요건의 일부 혹은 전부를 적용할 수 없을 경우에 적용 면제를 요청(Exemption Request)하는 방법이다. 새로운 혁신 설계로 인해 현행 규제요건을 적용하기에

〈표 4〉 미국 신청원자로 인허가 및 규제 현안 목록

| | |
|-----------------------------|--|
| Licensing Process Issues | 1. License for Prototype Reactors (no requirement) |
| | 2. License Structure for Multi-Module Facilities (license each module) |
| | 3. Manufacturing License Requirements for Future Reactors |
| Design Issues | 1. Functional Containment Performance Criteria for non-LWRs |
| | 2. Implementation of Defense-in-Depth (DiD) Philosophy for ARs |
| | 3. Use of Probabilistic Risk Assessment in Licensing Process for SMRs |
| | 4. Appropriate Source Term, Dose Calculations, and Siting for SMRs |
| | 5. Key Component and System Design Issues for SMRs (e.g., Reactor pool) |
| Operational Issues | 1. Appropriate Requirements for Operator Staffing for Small or Multi-Module |
| | 2. Operational Programs for Small or Multi-Module Facilities |
| | 3. Installation of Reactor Modules During Operation of Multi-Module Facilities |
| | 4. Industrial Facilities using Nuclear-Generated Process Heat |
| | 5. Security and Safeguards Requirements for SMRs |
| | 6. Aircraft Impact Assessments for SMRs |
| | 7. Offsite Emergency Planning Requirements for SMRs |
| Financial Issues | 1. Annual Fee for Multi-Module Facilities (variable annual fees structure) |
| | 2. Insurance and Liability for SMRs |
| | 3. Decommissioning Funding Assurance for SMRs |
| Concerns for Micro-Reactors | 1. Population-related Siting considerations, Environmental considerations |
| | 2. Emergency Preparedness (EP) |
| | 3. Staffing, Training, Qualification Requirements, Auto and Remote Operations |
| | 4. Regulatory Oversight, Manufacturing licenses and Transportation |
| | 5. Security Requirements, Aircraft Impact Assessment, ... |

한계가 있을 경우, 개발자는 타당한 근거를 제시해 규제적용 면제를 요청할 수 있다. 최근 미국 신청원자로 인허가 심사에서 중요하게 활용되고 있는 절차로서, 국내 ‘원자로시설등의 기술기준에 관한 규칙’에서도 관련 규정이 있다. 다만 국내의 경우 해당 조문을 활용한 경험은 거의 없는 실정이다.

NuScale의 경우, 설계인증심사 과정에서 17개 적용 면제를 요청했으며, 전체 목록은 〈표 5〉에서 볼 수 있다. 일반설계기준(GDC, General Design Criteria)과 관련된 내용이 7개 있는데, 이는 대부분 기존 안전설비와 다른 설계, 즉 피동안전계통 설계로 인해 발생하는 항목들이다. 별도로 적용 면제를 위한 타당한 기술적 근거와 GDC를 수정한 원칙설계기준(PDC, Principal Design Criteria)을 제시하고 있다.

적용면제 요청에 대한 NRC의 심사는 기본

적으로 기존 규제요건의 목적, 취지를 유지하는 범위 내에서 심사, 승인해 주고 있다. 예를 들면, NuScale은 비상노심냉각계통의 평가모델(App.K ECCS Evaluation Model) 적용 면제를 요청하고 있는데, 이는 대형 LOCA가 배제된 일체형 설계에서 일부 해석모델을 적용할 수 없는 경우이기 때문이다. 이를 적용하지 않아도 평가 모델에 관한 규정의 원래 목적, 취지를 달성할 수 있는 가 관점에서 심사를 하며, 즉, App.K 평가모델은 LOCA 해석 결과가 보수적으로 생산되도록 하는 것이 본래 규정의 목적이므로, 적용 면제해도 그 목적을 달성할 수 있어, NRC는 면제 요청을 승인하고 있다. 이러한 심사 절차는 국내 혁신 SMR 개발 과정에서도 현재 기술기준을 적용할 수 없는 경우가 발생할 수 있으므로, 개발자, 규제자, 모두 심도 있게 참고해 불만한 유용한 절차라고 생각된다.

〈표 5〉 NuScale 원자로의 적용면제요청 항목(17개)

| Exemption Requirements (10 CFR 50) | |
|------------------------------------|---|
| 1 | 46a and 34(f)(2)(vi) Reactor Coolant System Venting (RCSV) |
| 2 | 44 Combustible Gas Control (CGC) |
| 3 | 62(c)(1) Reduction of Risk from Anticipated Transients Without Scram (ATWS) |
| 4 | App. A GDC 17 Electric Power Systems (EPS) |
| 5 | App. A GDC 33 Reactor Coolant Makeup (RCM) |
| 6 | App. A GDC 52 Containment Leakage Rate Testing (ILRT) |
| 7 | App. A GDC 40 Testing of Containment Heat Removal System |
| 8 | App. A GDC 55, 56, and 57 Containment Isolation |
| 9 | 34(f)(2)(xiv)(E) Containment Evacuation System Isolation |
| 10 | App. K Emergency Core Cooling System Evaluation Model (ECCS EM) |
| 11 | 46, Fuel Rod Cladding Material |
| 12 | App. A GDC 27, Combined Reactivity Control Systems Capability |
| 13 | 34(f)(2)(xx) Power Supplies for Pzr Relief Vlys, Block Vlys, and Level Indicators |
| 14 | 34(f)(2)(xiii) Pressurizer Heater Power Supplies |
| 15 | 34(f)(2)(viii) Post-Accident Sampling System (PASS) |
| 16 | App. A GDC 19 Control Room |
| 17 | 54(m) Control Room Staffing |

맺는 말

최근 전 세계적으로 원자력 에너지를 탄소중립에너지(Carbon-free energy)의 하나로 인식하기 시작하고 있는 것 같다. 원자력 선진국들을 중심으로 SMR 개발과 인허가 수요가 급증하고 있는 것이 그 좋은 증거가 아닐까한다. 국내 혁신 SMR 개발과 관련해, 다시 한 번, 현재 개발되고 있는 글로벌 SMR은 상용화를 목표로 하고 있다는 점을 강조하고 싶다. 상용화라는 목표를 달성하기 위해서는 반드시 인허가 획득이 필수적이다. 이것이, 혁신 SMR 개발계획단계에서부터 설계기술개발 전략과 더불어, 인허가 획득 전략, 상용화 전략을 함께 고민해야 할 이유일 것이다. **KIIF**

참고문헌

- [1] IAEA ARIS 2020 Edition, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, Sep. 2020.
- [2] OECD/NEA, Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities, April 2021.
- [3] USNRC Documents published on website, <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors>
- [4] USNRC, NRC Vision and Strategy: Safely Achieving Effective and Efficient Non-LWR Mission Readiness, Dec. 2016.
- [5] USDOE, Vision and Strategy for the Development and Deployment of Advanced Reactors, Jan. 2017.
- [6] RG 1.233, Guidance for a Technology-Inclusive, Risk-Informed, and Performance-Based (TI-RIPB) Methodology to Inform the Licensing Basis and Content of Applications for Licenses, Certifications, and Approvals for Non-LWRs, June 2020.