



원전 안전성 향상 및 신개념 안전 연구를 위한 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구의 성과와 전망



강경호

한국원자력연구원 책임연구원/과제책임자

- 서울대학교 원자핵공학 학사, 석사
- 한국과학기술원 원자력 및 양자공학 박사
- 한국연구재단 국책연구본부 원자력단 기획전문위원
- 과학기술연합대학원대학교(UST) 전임교수
- 한국원자력연구원 아틀라스 국내표준문제 연구 책임자
- 한국원자력연구원 OECD/NEA 아틀라스 국제 공동연구 책임자

들어가는 글

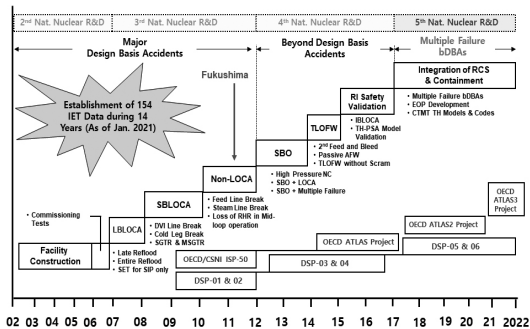
한국원자력연구원은 세계 3대 규모의 대형 열수력종합실험 실증 시설인 아틀라스(ATLAS, Advanced Thermal-Hydraulic Test Loop for Accident Simulation)를 운영하고 있다. 아틀라스는 원자력발전소의 열수력 안전 성능을 방사선의 위험 없이 전기 가열봉을 이용하여 실제 원자력발전소와 동일한 압력·온도 조건에서 실험적으로 검증할 수 있는 시설로서, 참조 원전인 APR1400을 높이 대비 1/2, 체적 대비 1/288로 축소 모의한 실험 시설이다. 이를 통해 APR1400뿐만 아니라 한국표준형원전인 OPR1000과 제3+세대 원전인 APR+의 다양한 과도 상태와 사고 조건도 모의할 수 있다. [그림 1]은 아틀라스 실험 시설의 전경을 보여준다.

한국원자력연구원은 2006년에 아틀라스의 시운전을 성공적으로 완료한 후 2007년부터 현



[그림 1] 아틀라스 실험 시설의 전경

재까지 아틀라스를 활용하여 경수로의 안전성 강화를 위한 연구를 활발하게 추진하고 있다. 2021년 1월 기준으로 14년 동안 총 154개의 열수력 종합효과실험 데이터베이스를 구축하여 규제기관과 산업계 등 국내외 원자력 유관기관의 안전해석 기술 발전에 크게 이바지하고 있다. [그림 2]는 아틀라스를 활용한 연구 개발 이력을 보여준다.



[그림 2] 아틀라스를 활용한 연구개발 이력

아틀라스 실험연구의 고유 특성 및 주요 성과

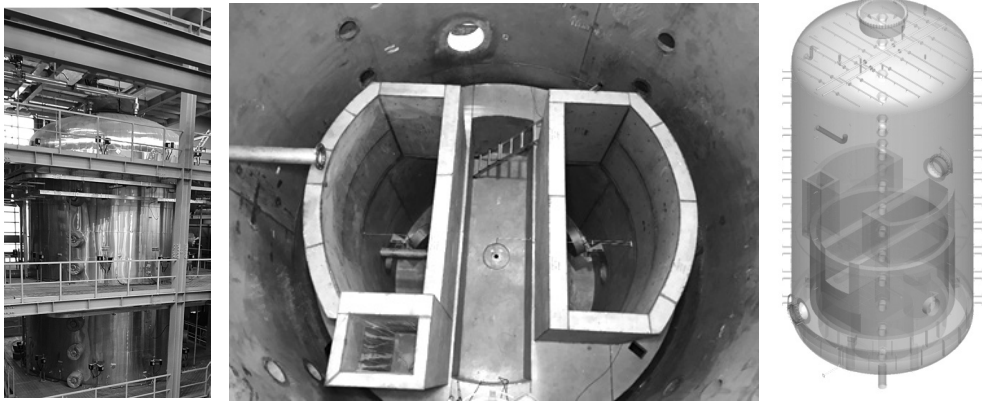
아틀라스를 활용한 열수력 종합효과실험의 목적은 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, 원전의 가상사고 시 주요 기기에서 발생하는 열수력 현상에 대한 이해도를 넓히고 안전계통의 유효성을 검증함으로써 경수로의 안전성 실증·향상 및 가동원전의 안전현안 해결에 기여한다. 둘째, 원전의 설계가 고도화됨에 따라 원전의 경제성과 안전성을 높이기 위해 도입되는 신(新)안전계통의 성능 검증과 설계 최적화에 직접 활용되며 궁극적으로 새로운 안전개념의 인허가 과정에 기여한다. 셋째, 안전해석에 사용되는 전산 프로그램의 정확도를 종합적으로 검증하고 성능 개선을 위한 기술적인 토대를 제공함으로써 안전해석 방법론의 신뢰도 제고에 기여한다.

한국원자력연구원은 아틀라스를 활용한 연구성과를 제고하고자 아틀라스 실험장치의 계측 성능을 고도화하고 모의실험 범위를 확장하기 위해 노력해 왔다. 이를 통해 구축한 아틀라스

실험의 고유 특성은 다음과 같이 정리할 수 있다.

① 세계 최초로 원자로냉각재계통과 격납건물을 연계하여 모의할 수 있는 격납건물 모의시설인 큐브(CUBE, Containment Utility for Best-estimate Evaluation)를 제작하여 아틀라스와 연결하였다. 큐브 내부에는 APR1400 격납건물의 부격실을 축소 모의하여 설치하였고 운전 압력은 최대 5기압으로 제작하여 사고 시 격납건물 내부에서 발생하는 다차원 열수력 현상을 원형에 가깝게 모의할 수 있게 되었다. 아틀라스-큐브 연계 실험 자료는 격납건물 안전계통의 유효성 검증 및 국내 고유 개발 격납건물 해석 코드의 성능 검증과 개선에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. [그림 3]은 큐브의 전경과 내부 격실을 보여준다.

② 후쿠시마 원전 사고 이후 전원이 완전히 상실되는 극한재해가 발생하는 경우에도 원자력 발전소를 안전하게 유지할 수 있는 신안전계통을 도입하려는 노력이 전 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다. 가장 대표적인 신안전계통으로 전원을 공급하지 않고 중력과 자연대류 등 자연력에 의해 구동되는 피동안전계통을 들 수 있다. 아틀라스 실험 설비에는 국내 원자력계가 개발한 대표적인 피동안전계통인 피동보조급수계통(PAFS, Passive Auxiliary Feedwater System), 피동비상노심냉각계통(PECCS, Passive Emergency Core Cooling System) 및 하이브리드 안전주입탱크(H-SIT, Hybrid



[그림 3] 큐브의 전경과 내부 격실 및 투시 개념도

Safety Injection Tank)가 설치되어 있어서 피동안전계통의 성능을 검증하고 설계를 최적화하기 위한 열수력 종합효과실험을 수행할 수 있다.

③ 원자력발전소의 주요 기기에서 발생하는 다차원 열수력 현상의 정확한 예측은 사고의 진행 경과를 파악하고 사고가 악화하는 상황을 방지하는 데 매우 중요하다. 아틀라스 실험 설비는 주요 기기인 원자로용기, 고온관, 저온관, 증기 발생기 및 격납건물 내부의 다차원 열수력 현상을 분석하기 위한 계측기기가 설치되어 있어서 안전해석코드의 다차원 열수력 모델을 검증할 실험데이터를 생산할 수 있다.

④ 원자력발전소는 사고 발생 시 원자로 노심을 냉각시키기 위해 안전주입계통을 갖추고 있다. APR1400에는 원자로용기직접주입(DVI, Direct Vessel Injection) 방식의 안전주입계통이 설치되어 있으며 OPR1000에는 저온관주입(CLI, Cold Leg Injection) 방식의 안전주입계

통이 설치되어 있다. 아틀라스 실험 설비에는 원자로용기직접주입 방식과 저온관주입 방식의 안전주입계통이 모두 설치되어 있어서 다양한 원전의 안전현안을 해결할 수 있는 장점이 있다.

한국원자력연구원은 지난 14년 동안 아틀라스를 활용한 안전연구를 수행하여 국내 원전의 안전성 실증·향상 및 안전해석기술을 고도화하고자 노력하였으며 다음과 같은 주요 성과를 일구어냈다.

① 4계열 비상노심냉각계통에 대한 대형냉각재상실사고 재관수 실험을 수행하여 APR1400의 미국 규제기관(US NRC) 인허가 과정을 지원하여 표준설계 인가와 설계인증서 획득에 기여하였다.

② 한빛 3호기 제어봉 구동장치 파손사고 실증실험을 수행하여 안전현안을 조기에 해결하는 데 기여하였으며 후쿠시마 원전 사고 이후 강화된 안전 요건을 만족시키기 위해 설계기준 초과 다중고장사고 안전성 평가를 수행하여 국



내 원전의 안전성을 입증하였다.

③ APR+의 피동보조급수계통의 성능 검증 실험을 수행하여 인허가 과정을 지원하였으며 피동노심냉각계통 및 하이브리드 안전주입탱크에 대한 실증 실험을 수행하여 고압사고를 대비하기 위해 개발한 피동안전계통의 성능을 검증하였다.

④ 국내 원자력계가 독자 개발한 SPACE 코드를 검증하기 위한 실험데이터베이스를 생산함으로써 SPACE 코드의 인허가 과정을 지원하고 성능 개선에 기여하였다.

⑤ 국내 산학연 17개 원자력 유관 기관이 참여하는 ATLAS 국내표준문제를 6차례 주관하고 국내 최초로 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구를 3차례 단독으로 주관함으로써 안전해석방법론의 신뢰도 향상 및 안전해석 인력 양성에 기여하고 국내 열수력안전연구의 국제적 리더십을 제고하였으며 국내 원전의 수출 경쟁력 향상에 기여하였다.

OECD/NEA ATLAS 국제공동연구의

현황 및 주요 성과

한국원자력연구원은 안전해석기술을 향상하기 위하여 아틀라스를 활용한 국제 협력 연구를 주관하여 2009년부터 2011년까지 경제협력 개발기구/원자력에너지기구(OECD/NEA) 원자력시설안전위원회(CSNI)가 후원하는 50번째 국제표준문제(ISP-50, 50th International

Standard Problem)를 성공적으로 완료하였다. 이 프로그램은 국외 안전해석 전문가들에게 아틀라스의 우수성을 알리는 계기가 되었으며, 이를 통해 2011년 후쿠시마 원전 사고 이후 아틀라스를 활용한 국제공동연구의 추진 필요성에 대해 국내외 안전연구 전문가들 사이에 공감대가 형성되었다.

OECD/NEA ATLAS 국제공동연구는 한국원자력연구원의 아틀라스 실험 설비를 활용하여 경수로의 안전성 평가와 안전해석코드의 성능 검증·개선을 위해 수행하는 NEA 회원국 중심의 국제공동연구이다.

제1차 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구는 2014년 4월에 착수하여 2017년 3월에 성공적으로 완료하였으며 제2차 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구는 2017년 10월 착수하여 2020년 12월에 성공적으로 완료하였다. 두 차례 국제공동연구의 성공적인 완료를 계기로 경수로 안전현안 해결과 안전해석기술의 고도화를 위한 후속 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구의 지속적인 추진에 대해 참여기관들 사이에 강한 공감대가 형성되어 제3차 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구를 2021년 1월에 착수하였다. 제3차 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구는 2024년 12월까지 4년 동안 진행되며 12개국 22개 원자력 유관기관이 연구에 참여하고 있다. 한국원자력연구원은 주관기관으로서 아틀라스 연구시설을 이용해 생산할 예정인 10종의 실험 자료를 참여기관과 공유하며, 실험 결과를 분석하고

해석 방법을 정립하는 등 공동연구 전반에서 주도적인 역할을 수행한다.

OECD/NEA ATLAS 국제공동연구 이전에 수행된 OECD/NEA 국제공동연구는 설계기준사고(DBA, Design Basis Accident)를 주된 모의 대상으로 하였으나 2011년 후쿠시마 원전 사고 이후 경수로의 안전성 강화를 위해 다중고장 고위험 설계기준초과사고(bDBA, beyond DBA) 및 피동안전계통에 대한 열수력 종합효과실험의 필요성이 증대하였다. 이러한 연구 배경을 기반으로 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구는 다음과 같은 목적을 이루기 위해 수행된다.

① 원자로냉각재계통-격납건물 연계 열수력 종합효과실험을 수행하여 안전해석 영역 확장 및 격납건물 안전계통의 유효성 검증을 통해 원자력발전소의 심층방호 능력을 강화한다.

② 경수로의 다중고장사고(혹은 설계확장조건, DEC, Design Extension Condition)에서 발생하는 물리적 현상에 대한 이해 기반을 확대하고 중형냉각재상실사고 안전성을 정밀하게 평가하여 경수로 안전현안의 해결에 기여한다.

③ 구동력이 작은 피동안전계통의 냉각 특성 및 복잡한 다차원 이상유동 물리현상에 대한 안전해석코드의 예측 성능을 검증하고 개선하는데 기여한다.

④ 유사 대형시설에 대한 대응실험을 수행하여 실험장치와 실제 원전의 규모 차이로 인해 발생하는 현상에 대한 안전현안(스케일링 안전현안)을 해결하여 안전해석 방법론의 신뢰도를

제고한다.

한국원자력연구원은 이러한 연구 목적을 달성하기 위하여 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구 프로젝트 기간 동안 아틀라스를 활용한 열수력 종합효과실험 데이터베이스를 구축하였다. 1, 2차 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구에서는 각각 8종의 실험 데이터베이스를 생산하였으며 3차 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구에서는 10종의 실험 데이터베이스를 구축할 예정이다. <표 1>에서 <표 3>은 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구의 실험항목을 보여준다.

<표 1> 제1차 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구의 실험항목

Topics	Number of tests	Remarks
A1-Prolonged SBO - Asymmetric 2 nd cooling - Asymmetric passive 2 nd cooling	1 1	asymmetric FW supply asymmetric passive FW supply (PAFS)
A2-SBLOCA during SBO - SBO+RCP seal failure - SBO+SGTR	1 1	RCP seal failure during SBO with PAFS SGTR during SBO
A3-TLOFW - 1ry & 2nd bleed + 1ry feed	1	with additional failure; half of POSRV stuck open and partial failure of SIP
A4-MBLOCA - 17% IBLOCA (IB-CL-03, LSTF)	1	CT for LSTF SBLOCA addressing scaling issues
A5-Open items - 1% SBLOCA (SB-CL-32, LSTF) - 13% IBLOCA (IB-CL-05, LSTF)	1 1	CT for LSTF SBLOCA addressing scaling issues CT for LSTF IBLOCA addressing scaling issues
Total	8	

<표 2> 제2차 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구의 실험항목

Topics	Number of tests	Remarks
B1-SBLOCA - SBLOCA w/o SIP under PAFS operation	1	Resolving the safety issues
B2-Passive Core Makeup - SBO with Hybrid SIT - SBLOCA with PECCS	1 1	Condensation model, w and w/o nitrogen
B3-IBLOCA - PZR Surge Line Break - DVI Line Break	1 1	Effect of break position and ECC injection Cliff Edge Effect
B4-Design Extension Conditions - SLB with SGTR - Shutdown Coolability w/o RHRS	1 1	Long-term core PCT behavior during multiple failure accident Effect of reflux condensation, accident sequence modeling
B5-Counterpart Test - Counterpart Test of LSTF SB-PV-07 (1% RPV top break SBLOCA)	1	Addressing the scaling issue
Total	8	



[그림 4] OECD/NEA ATLAS 국제공동연구 진도점검회의 참석자 모습

〈표 3〉 제3차 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구의 실험항목

Topics	Number of tests	Remarks
C1-RCS-CTMT Integrated IET - SLB with ATLAS-CUBE - LOCA with ATLAS-CUBE	1 1	Interactive phenomena between RCS and containment (CTMT). Evaluation of multi-D phenomena inside the containment and cooling performance of spray system
C2-Passive Safety Systems - SBLOCA with PECCS - IBLOCA with PECCS - SLB with PAFS	1 1 1	Validation for performance of passive safety systems and related thermal-hydraulic phenomena
C3-Natural Circulation - Asymmetric Natural Circulation	1	Effect of asymmetric natural circulation on cooldown
C4-Design Extension Conditions - SBLOCA under SBO Condition - Total Loss of Heat Sink	1 1	Evaluation of the accident management strategy under the multiple failure condition; Effectiveness of PAFS on a shutdown operation
C5-Open Test - Counterpart Test, etc.	2	Addressing the scaling issue or resolution of safety issues
Total	10	

OECD/NEA 국제공동연구는 통상 연 2회 진도점검회의(Program Review Group meeting)를 개최하여 프로젝트의 진행 상황을 점검하고 기술적인 논의를 진행한다. OECD/NEA ATLAS 국제공동연구에서도 연 2회 진도점검회의를 성공적으로 개최하여 프로젝트의 세부 사항과 진행 방향을 결정하고 실험 결과와

해석 결과에 대한 기술 토의를 활발하게 진행하였다. [그림 4]는 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구 진도점검회의에 참석한 분들의 모습이다. 제3차 국제공동연구의 착수회의는 2021년 4월 20일부터 22일까지 3일 동안 개최되었으며, 코로나19로 인해 화상회의로 진행되었다.

한국원자력연구원은 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구를 성공적으로 운영하고 실험 결과 분석 및 해석 활동을 강화하기 위하여 국내 주요 원자력 기관들이 참여하는 국내 컨소시엄을 결성하였다. 특히 제3차 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구의 국내 컨소시엄에는 한국원자력안전기술원, 한국수력원자력(주) 중앙연구원, 한국전력기술(주), 한국원자력연료(주), 두산중공업(주) 등 국내 6개 원자력 기관이 참여함으로써 ATLAS 국제공동연구의 성공 가능성과 국내 열



[그림 5] 국내 컨소시엄 협약식 단체사진

수력 안전해석 연구의 국제적인 위상을 제고하기 위한 기반을 마련하였다. 한국원자력연구원은 국내 컨소시엄 참여 기관 대표자들이 협약서에 서명하는 협약식을 2021년 4월 7일에 한국원자력연구원 정보과학동에서 개최하였다. 국내 컨소시엄 참여 기관들은 참여 분담금을 지원하고 해석 활동에 참여함으로써 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구의 운영에 기여할 것이다. 국내 컨소시엄을 운영하여 국내 원자력 유관기관 간 협력을 강화하고 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구의 수행에 더욱 박차를 가함으로써, 우리나라는 세계 원전 안전연구를 선도하고 국내 원전의 안전성 향상 및 기술 경쟁력 강화에 크게 기여할 것으로 판단된다.

맺는 말

한국원자력연구원은 세계 3대 규모의 열수력 종합효과 실험 시설인 아틀라스를 활용하여 국내 및 국제 협력 프로그램을 비롯한 안전연구를 활발하게 수행하고 있다. 가동원전의 설계기준 사고와 다중고장사고에 대한 정밀한 안전성 평가를 통해 중대사고 진입을 실효적으로 방지할 수 있는 안전기준을 제시하고 리스크 저감을 위한 사고관리전략을 최적화하기 위한 기술을 개발할 것이다. 세계 최초로 구축한 원자로냉각재 계통-격납건물 연계 실험 인프라를 활용하여 격납건물 과압 방지 성능을 평가하기 위한 연계 해석체계를 검증함으로써 국내 원전의 심층방호 능력을 강화하기 위해 노력할 것이다.



후쿠시마 원전 사고 이후 강화된 안전기준을 만족하기 위해서는 가상원전 개발을 통한 사고의 정밀한 예측이 요구된다. 이를 위해 아틀라스를 이용하여 가상원전을 개발하기 위한 요소 기술을 검증하는 데 활용되는 실험 데이터베이스를 구축할 예정이다. 아틀라스의 주요 장점인 다차원 열수력종합효과실험 데이터베이스는 다차원-다분야 해석 기술을 검증하는 데 유용하게 활용될 것이다.

국내 원자력산업계는 국내 원전의 해외수출 동력을 확보하기 위하여 피동안전계통을 도입한 수출형 원전을 개발하기 위해 노력하고 있다. 아틀라스는 국내에서 개발한 피동안전계통의 성능을 검증하고 설계를 최적화하는 데 이미 성공적으로 활용된 바 있으며 수출형 원전의 피동/능동 조합형 안전계통의 성능 검증에도 기여할 것이다.

한국원자력연구원은 국내 협력 프로그램으로 6차례의 아틀라스 국내표준문제를 주관하였다. 아틀라스 국내표준문제는 산학연을 망라한 국내 안전해석 전문가들이 참여하여 기술 교류와 정보 공유의 장을 제공함으로써 국내 안전해석 기술의 발전에 기여하고 있다. 특히 신진 안전해석 인력을 양성하는 데 기여함으로써 세대 간, 기관 간에 기술을 전수하는 가교 역할을 하

고 있다. 아틀라스 국내표준문제 수행을 통한 국내 협력 연구의 성과는 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구의 국내 컨소시엄 운영으로 더 큰 결실을 보고 있다.

OECD/NEA ATLAS 국제공동연구는 실제 원자력발전소 사고 조건의 온도와 압력을 온전하게 모의할 수 있는 유일한 국제공동연구이다. 제3차 OECD/NEA ATLAS 국제공동연구에서는 아틀라스 실험 시설의 장점인 피동안전계통을 활용한 연구와 다차원 열수력 현상을 모의하는 실험과 더불어 세계 최초로 원자로냉각재계통과 격납건물을 연계한 종합효과실험을 수행할 예정이다. 한국원자력연구원은 이 실험을 성공적으로 수행함으로써 안전해석의 영역을 확장하고 안전해석 결과의 신뢰도를 높이는 연구를 선도할 것이다.

아틀라스는 한국원자력연구원이 설계, 제작하고 운영하는 열수력종합효과 실험 시설이지만 국내 원자력 유관기관들의 협력과 지원을 토대로 성장하고 있는 안전연구 시설이다. 한국원자력연구원 아틀라스 연구팀은 국내외 안전연구 전문가들과 활발한 협력 연구를 수행함으로써 아틀라스 실험 시설이 국내외 원전의 안전성 향상에 실질적으로 기여할 수 있도록 최선을 다할 것이다. **KIIF**