국내외 소형 중성자원 개발과 활용 현황

이동원
한국원자력연구원 핵물리응용연구부장

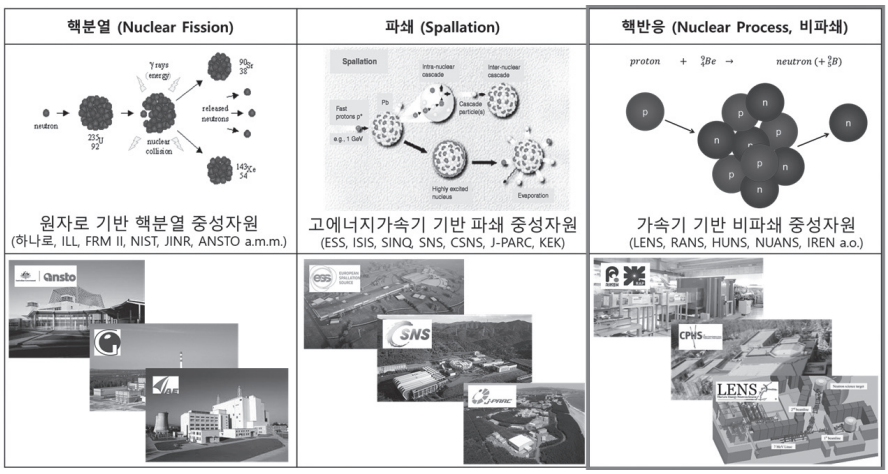
- KAIST 원자력 및 양자공학 학사, 석사, 박사
- 前 MIT 원자력공학과 방문연구원
- 現 한국원자력학회 양자공학 및 핵융합기술연구부회장
- 現 한국원자력학회 편집위원

1. 들어가는 글

중성자는 양성자, 전자와 함께 원자핵을 이루는 물질이며, 양성자, 전자와 달리 전하가 없는 중성으로 원자핵과 반응한다. 대부분의 원소에 대해 산란단면적이 작기 때문에 투과력이 높으며, 원자핵의 파괴나 물질의 내부구조를 파악하고 미시적인 물질세계를 연구하는 데 이용되고 있다.

일반적으로 중성자는 연구용 원자로를 통해 우라늄 원자핵을 쪼개어(핵분열) 대량으로 생산하고 있다. 가벼운 원자들의 결합(핵융합) 반응을 통해 생산하기도 하고, 고에너지 가속기를 이용해 표적 물질의 원자핵을 쪼개는(핵파쇄) 방법으로 생산하기도 한다.

그러나 최근 연구로 운영에 대한 규제 강화와



[그림 1] 중성자 생산 방법과 시설

신규 연구로 건설 위축, 시험 대상물 반출입 규제 등으로 중성자 이용이 제한되고 있어 대책이 요구된다. 한편으로는 중성자 이용 분야의 확대로 산업 현장에서 직접 중성자를 이용하거나 다양한 시험에 활용하려는 수요가 증가하고 있으며, 가속기 기술의 급속한 발달과 더불어 중성자원의 소형화, 현장화 개발에 대한 관심이 빠르게 증가하고 있다.

국내에서도 이러한 소형 중성자원(CANS, Compact Accelerator-based Neutron Source)의 개발과 활용이 점차 증가하면서, 관련 전문가들의 교류도 활발해지고 있다. 본 글에서는 2016년에 개최되어 올해로 3회째를 맞이한 '소형 중성자원 개발과 활용' 워크숍에서 발표된 자료를 중심으로 관련한 국내외 현황을 소개하고자 한다.

2. 중성자과학 연구를 위한 중성자원의 변화 움직임

2.1. 연구로를 활용한 중성자 연구 확대

서구 선진국에서는 1950년대부터 1980년대까지 대량의 중성자를 손쉽게 얻기 위해 고농축 우라늄 핵연료를 사용하는 고중성자속 연구용 원자로를 건설하여 다양한 중성자 연구를 선도해 왔다. 이 시기 'Atoms for Peace'라는 미국의 정책과 원조로 TRIGA 연구로가 전 세계에 보급되어 동위원소 생산, 중성자방사화 분석, 원자로 물리, 중성자 산란과 영상, 핵물리, 입자물리 등 다양한 연구 수행의 발판이 되었다.

이즈음 우리나라에서도 서울 공릉동에 TRIGA Mark-II(1962년, 200kW)와 Mark-III(1972년, 2MW)를 1994년까지 가동하였고, 1985년 대전 하나로(HANARO, 열출력 30MW)의 건설이 추진되었다. 하나로는 10년에 걸친 건설과 1995년 최초 임계 후 2005년까지 10년간 장기간의 출력상승 시험과 운전을 통해 전출력 일상운전에 도달한 바 있다. 2014년 운전정지 전까지 국내 중성자 연구와 동위원소 공급을 선도하며, 세계적 수준의 연구 성과와 국내외 이용자를 지속적으로 확대해 왔다. 최근 재가동에 성공하고 100주기 운전을 달성함에 따라, 이용자와 중성자 연구의 빠른 회복이 기대되고 있다.

2.2. 가속기 기반의 파쇄 중성자원 건설과 활용

중성자 연구를 위한 연구로 이용과 더불어 가속기 기반의 파쇄 중성자원 건설과 활용이 추진되었다. 1960년대 일본 동북대학에서 가속기를 이용한 파쇄 핵반응으로 다량의 중성자를 생산하는 개념이 제시된 이후, 일본(KEK/KINS)과 영국(RAL/ISIS), 미국(LANL/LANSCE)을 중심으로 그에 관한 많은 경험을 축적하였다. 현재 미국 ORNL/SNS(Spallation Neutron Source), 일본 J-PARC/MLF(Japan Proton Accelerator Research Complex 내의 Materials-Life Science Facility)가 가동 중이고, 유럽 ESS(European Spallation Source)가 스웨덴 룬드에서 2021년 가동을 목표로 건설되고 있다. 또한, 중국은 최근 막대한 자

금 투입과 원자력 관련 기관들의 협력을 통해 CSNS(China Spallation Neutron Source)를 홍콩과 인접한 둥관 지역에 2019년 완공하여 초기 가동 상태에 있다.

파쇄 중성자원은 강력한 선원으로 과학·산업·국방 분야에서 핵심 역할을 수행하고 있지만, 가속기 시설 건설에 2.5조~3조 원(2억~2.5억 달러), 중성자 산란장치와 부대시설 건설에 1조 원 안팎의 막대한 건설비가 들고 운영에 많은 비용이 지속적으로 투입되어야 하므로, 건설·운영·활용에 큰 부담이 되고 있다. 일본 J-PARC의 경우 현재 설계출력의 50% 수준인 500kW 출력으로 운전 중인데도 3주간 운영비가 인근 연구로 JRR-3M의 연간 운영비를 웃도는 것으로 알려졌다.

2.3. 가속기 기반 소형 중성자원의 대두

최근에는 그간의 경험을 바탕으로 저비용, 저에너지 가속기를 이용한 비파쇄 소형 중성자원이 제안되고 있다. 유럽에서는 ESS의 건설에도 불구하고, 각국의 자체적인 내부 연구개발과 산업 현장 수요, 차세대 연구진 양성 등의 대응에 어려움을 겪기 시작하였고, 노후화에 따른 연구로 폐쇄, 규제 강화에 따른 신규 건설이나 수명 연장의 어려움에 대응하기 위해 사전 준비와 제안이 진행되고 있다.

특히, 독일, 프랑스, 헝가리, 이탈리아 등에서는 중성자 선원의 실용적 가능성, 비용 대비 효과, 운영과 규제관리 등 다양한 측면이 검토되고 있으며, 실제적인 대안으로 가속기 기반의 소형 중성자원이 유력하게 고려되고 있다. 특히, 추가 개발을 요구하기보다는 기술이 검증된 가속기를 이용하여 비파쇄 영역에서 중형 연구로를 대치할 수 있는 수준의 중성자속(neutron flux)을 공급할 수 있으며, 3,000~5,000억 원 범위의 적절한 비용으로 건설할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

3. 국내외 소형 중성자원 개발 및 활용 현황

3.1. 국제 현황

가장 주도적으로 제안하고 있는 곳은 고휘도 중성자원 구축 사업(HBS, High Brilliant Source)을 기획 중인 독일이다. 뮌헨에 가동 중인 고성능 연구로 FRM-II를 제외한 모든 노후 연구로의 가동이 정지되거나 폐쇄되면서 Juelich 연구소를 중심으로 선제적으로 국가 수준의 중성자원과 연구 지속성을 확보하고자 노력하고 있다. 연구로 수준의 중성자속 공급을 위한 가속기 기반 중성자원 개념 설계 및 타당성 연구를 진행하였고, 이를 통해 길이 75m, 출력 70MeV/100mA, 펄스 구동 방식의 선형가속기를 이용하는 개념을 제시하였다. 3개의 빔 인출 채널을 이용한 중성자 생산, 해석을 기반으로 한 표적시스템(TMRS, Target-Moderator-Reflector-Shield system) 설계와 다양한 중성자 스펙트럼 생산 가능성 확인 등 궁극적으로 연구용 원자로 수준의 다양한 에너지 대역의 중

성자 공급을 목표로 하고 있다.

프랑스에서도 독일처럼 자국 내 중성자 빈곤(neutron hungry)을 해결하는 방안을 찾고 있으며, 가속기 기반 중성자원과 연구시설(SONATE)을 제안하고 있다. 현재 SONATE 사업은 기본 개념 수립과 검증 단계에 있으며, 이와 관련해 기존 LLB/Orphee 연구로가 제공한 수준의 중성자 선속과 밝기를 중성자 산란장치에 제공한다는 목표와 파쇄 중성자원 개발 경험을 바탕으로 선형양성자가속기와 Be 표적을 후보로 선정하였으며, 소형 가속기를 이용해 다양한 검증을 진행하고 있다.

일본의 경우, 연구로는 물론 고에너지물리연구기구(KEK) KENS 시설과 J-PARC/MLF에 이르는 세계 최고 수준의 중성자 선원을 갖추고 있으며, 중성자를 이용한 다양한 연구개발과 신기술 개척 등 전 분야에서 선도적인 역할을 하고 있다. 일본은 미국 인디애나주립대학의 LENS(Low Energy Neutron Source) 그룹과 함께 UCANS(Union for CANS)를 창립할 정도로 소형 중성자원 분야에서도 선도적인 역할을 해 왔다. EU와 달리 중성자산란 연구에는 아직은 소극적이나, 파쇄 중성자원을 지원하기 위해 소형 중성자선원을 활용한 다양한 핵물리 연구, 중성자산란 이용, 감속재 등 공학적 이용 연구를 60년 이상 수행해 왔다. 최근에는 세계에서 가장 높은 수준인 BNCT(붕소중성자포획치료) 개발을 여러 대학과 연구소에서 진행 중이고, 소형 중성자원 자체의 산업적 이용과 노후 교각, 터널 등 사회 간접 자본의 비파괴 검사에 활용하는 연구도 적극적으로 추진하고 있다.

중국의 경우, 많은 연구로와 최근 건설이 완료된 CSNS를 이용해 중성자산란 관련 연구를 진행하였고, 소형 중성자원 연구개발도 여러 지역과 기관에서 다양하게 수행한 것으로 보인다. 최근에는 국제적 추세에 맞추어 CCANS(China CANS)를 결성하고, 긴밀한 인적, 기술적 교류 네트워크와 연구개발 분야를 조율하고 있다. 최근 몇 년 사이 관련 논문이나 워크숍이 급증하는 것을 보면, 많은 인적 자원과 방대한 국토에서의 다양한 수요를 통해 향후 20년 이내에 이 분야에서도 세계를 선도할 것으로 예상된다.

미국의 경우, 파쇄 중성자원이나 연구로를 이용한 전통적 중성자 연구 이외에 가속기 기반의 중성자원으로서 이온원을 직접 이용하는 중수소-중수소 혹은 중수소-삼중수소 핵융합반응을 이용하는 중성자원을 산업화에 직접 적용하는 현상이 두드러진다. Phoenix(Phoenix Nuclear Labs)사에서는 이러한 핵융합 고속 중성자 발생장치를 사용하여 국방 분야에 중성자영상 비파괴검사 장치를 납품하고 있으며, 현재는 상업적인 중성자영상 서비스도 제공하고 있다. 또한, 저농축 우라늄 표적에서 생성되는 열중성자를 기반으로 의료용 동위원소인 Mo-99를 생산하는 설비를 SHINE Medical Technologies와 함께 구축하고, 2021년 공급을 목표로 실증작업을 진행하고 있다. 저선량 선원을 이용한 폭발물 탐지 및 보안 검색 장치

도 개발하고 있으며, 최근에는 DOE를 통해 Cf-252를 사용하지 않는 핵연료 농축도 검사장비를 개발해 공급하는 것으로 알려졌다.

3.2. 국내 현황

국내에서는 반세기 이상 하나로의 운영과 이용 경험을 바탕으로 동위원소, 중성자 과학, 방사화분석, 반도체 핵변환 도핑, 재료조사시험 등의 전문성을 확보하고 있으며, 경주 양성자가속기, 정읍 사이클로트론 및 핵융합 소형 고속중성자 발생 장치들을 시작으로 중성자 이용 연구가 활발해지고 있다. 또한 포항가속기연구소, 한국원자력의학원, BNCT를 시작한 다원시스 그룹까지 중성자 관련 연구와 전문가 간 정보 교류도 점차 확대되고 있다.

전북 정읍에 있는 한국원자력연구원 첨단방사연구소에서는 2020년부터 가동 중인 30MeV 사이클로트론을 기반으로 10^{12}n/s 이상 수준의 중성자 생산을 목표로, 표적시스템(TMRS) 개발, 생성된 넓은 에너지 영역(30MeV에서부터 수 meV까지)의 중성자 스펙트럼 측정, 생산 중성자의 산업적 이용 실증이라 할 수 있는 열중성자를 이용한 영상화 기술 개발을 2023년 완료 목표로 추진하고 있다.

경주양성자가속기사업단에서는 100MeV 양성자 선형가속기의 끝단에 1kW 용량의 중성자 선원을 개발하여 최근 산업체의 뜨거운 이슈인 반도체 소자의 지표면 방사선 조사 효과, 특히 고에너지 중성자 장에 의한 반도체 소자 작동오류 시험에 이용하는 사업을 추진하고 있다. 경주에서는 이미 오랫동안 이러한 수요에 약식 시설로 중성자 조사시험 기술을 지원하였으나 빠르게 증가하는 산업체의 이용 수요, 크게 높아진 정량적, 실시간 선량측정(dosimetry) 등 고급 기술 지원 요구 등을 반영하여 본격적인 중성자 선원과 측정 기술 개발을 추진하고 있다.

포항가속기연구소에서는 전자가속기를 이용한 중성자원을 활용한 바 있으며, 최근에는 시설 폐쇄에 따른 신규 시설 구축을 도모하고 있다. 또한 펄스 중성자 선원 특성을 이용한 Bragg-edge 중성자 영상 기술 개발과 동위원소 생산 등을 목표로 관련 사업을 추진하고 있다.

최근 다원시스 콘소시엄에서는 국제 추세에 맞춰 BNCT를 본격적으로 개발하고 있으며, 국제적 프로토콜(protocol)인 “1시간 1회 조사로 환자에게 필요한 중성자 조사 완료”라는 목표를 달성하기 위하여 신뢰성 높고 안정적인 고중성자속(high flux neutron beam) 선원 개발을 추진하고 있다. 임상은 다원메닥스에서 담당하며, 다원시스에서는 10MeV 선형가속기 기반의 BNCT를 개발하고 있다. 한국원자력의학원에서도 최근 정전형가속기로서 탄뎀가속기를 이용한 BNCT 개발에 착수하였다.

4. 국내외 소형 중성자원 협의체 활동

UCANS는 파쇄 중성자원 국제 협의체인 ICANS(International Collaboration on

Advanced Neutron Source)에서 2010년 분리된 후 2011년 중국 베이징에서 1차 회의를 시작으로 연 1회 정기적으로 워크숍을 개최하고 있으며, 2021년 10차 회의는 일본에서 개최할 예정이었으나, 코로나19 상황으로 화상회의로 진행하였다. 회의에서는 시차를 고려해 4일간 대륙별로 돌아가며 총 24편의 논문이 발표되었다. 앞서 소개한 국제적인 현황도 대부분 UCANS 회의 및 개인 연락을 통해 입수하고 있으며, 최근 창립한 중국의 CCANS, 일본의 JCANS, 한국의 KCANS 간 양자 혹은 삼자 협력도 논의하고 있다.

최근 BNCT 개발이 활발해지면서 소형 중성자원 개발과 활용 요구에 맞춰, IAEA에서도 비파쇄 중성자원 자문회의와 기술회의를 2018년과 2019년 연이어 개최하였으며 이를 통해 국제 현황을 청취하고, 연구로 이외의 중성자원 보급에 관심을 보이고 있다. 또한, EU에서는 기관별로 독자적으로 UCANS에 참여해 왔으나, 2020년 LENS(League of advanced European Neutron Source)가 결성되고 공식적인 사업 추진을 위하여 ELENA(European Low Energy accelerator-based Neutron Source)가 출범함에 따라 독일의 HBS 사업이나 프랑스의 SONATE 사업이 탄력을 받을 것으로 기대된다.

국내 KCANS는 개별적인 UCANS 참여와 신규 중성자원 개발, BNCT의 시작에 따라, 관련 전문가들의 협력을 도모하기 위해 시작되었다. 2016년 추계원자력학회부터 '방사선 이용 및 기기 연구부회'와 '핵융합기술 연구부회'공동으로 '소형 중성자원 개발과 이용'워크숍을 개최하였고, 올해 3차 워크숍을 개최하면서 상호 협력과 정보 교류를 지속하고 있다.

특히, 관련 국내외 현황을 정리한 기술현황보고서[1][2]나 과제 제안을 위한 정책보고서[3]를 발간하여 심도 있는 선원별 개발 현황 등을 회원들에게 배포하고 있다. 또한 선원 자체의 개발뿐 아니라 그 목적에 맞는 이용에도 중점을 두고 있으며, 워크숍이 열릴 때마다 이용자들을 초청해 선원 개발자와의 교류를 지원하고 있다. BNCT의 의학적 요구사항, 반도체 시험분석평가에 필요한 빔 요건 등이 그 예이다.

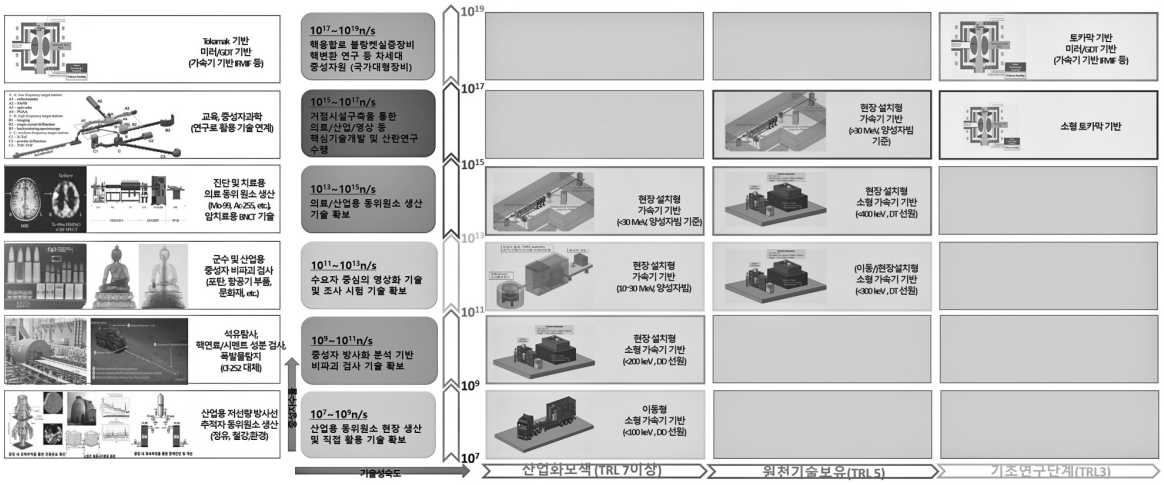
5. 나가는 글 (제언)

세계적으로 연구로와 파쇄중성자원 운영을 통해 확보한 중성자 생산과 이용 기술을 토대로, 현장 수요에 대응하기 위한 가속기 기반 소형 중성자원의 개발이 점차 증가하고 있다. 국내에서도 다양한 가속기를 이용한 중성자원 개발이나 이용, BNCT와 같이 가속기 자체의 구축을

1) 이창희 외, 현장 가동형 중성자 래디오그라피 시스템 기술개발 방안 연구, KAERI/RR-4015/2015
2) 이동원 외, 가속기 기반 비파쇄 소형 중성자원 개발 및 활용 현황, KAERI/AR-1278/2020
3) 채종서 외, 소형 중성자선원 개발과 응용/산업화 전략마련을 위한 국내외 현황 분석 (2020.11)

포함한 개발이 이루어지고 있으며, 핵융합 이온원 기반 소형 중성자 발생 장치의 산업화도 원천기술 확보 이후 추진하고 있으므로 어느 정도 국제적 추세를 따라갈 기반은 충분한 것으로 보인다.

또한 UCANS를 중심으로 나라별 CANS가 하나둘씩 구성되고 있고, IAEA도 비파쇄 중성자원에 대한 역할을 요구[4]하고 있으며, EU 역내 중성자 협의체 구성이 완료됨에 따라, 소형 중성자원의 구축과 이용이 더욱 속도를 낼 것으로 보인다. 국내에서도 KCANS를 중심으로 한 협의체 구성과 기술 교류가 지속되고 있고, 기존 시설을 이용한 중성자 생산이 진행되고 있어, 중성자 현장 이용과 활용 확대, 산업화로 이어지는 고리를 찾는 노력이 곧 결실을 볼 것으로 보인다. KAIF



[그림 2] 수율별 중성자 활용 분야 및 중성자원 예시

4) IAEA TECDOC series, Compact Accelerator based Neutron Sources (CANS), 2021