

사용후핵연료 캐스크(운반/저장용기) 국산화를 위한 노력 : 미국 TMI 원전용 저장용기 수출의 의미



차요섭

두산중공업 CASK설계팀 차장

- 한양대학교 기계공학 학사
- 두산중공업 원자로설계팀 과장
- 두산중공업 CASK설계팀 차장

국내 사용후핵연료 관리 현황

1978년 가압경수로형 고리 1호기 상업운전을 시작으로 현재 국내에는 가압경수로형 원전 26기, 가압중수로형 원전 4기가 건설되어 운영 중이며, 설계수명 30년을 끝으로 고리 1호기가 영구정지(2017년 6월)된 것을 시작으로 국내에서도 안전한 원전해체사업을 위한 준비가 진행되고 있다.

원자력 관계자가 아닌 일반 국민들의 경우 해체작업은 단순히 안전하게 착수하면 되는 것으로만 알고 있으나, 해체를 위해서는 선제적으로 습식저장조에 보관되어 있는 사용후핵연료를 별도의 시설(발전소 내 임시건식저장시설)로 이송하고 보관해야 한다는 사실에 대해서 인지하지 못하고 있다.

월성의 가압중수로형 원전 4기에서 발생한 사용후핵연료는 이미 발전소 내 건식저장시설을

〈표 1〉 경수로형 원전 사용후핵연료 저장 현황

2020년 12월 기준

발전소	습식저장		포화 예상 연도
	용량	저장량	
고리	8,038	6,599	2031년
새울	1,560	296	2065년
월성	1,046	520	2042년
한빛	9,017	6,566	2029년
한울	7,066	6,072	2030년

건설하여 저장, 운영 중에 있으나, 정작 해체를 앞두고 있는 고리 1호기의 사용후핵연료 485다발은 현재도 고리 1호기 습식저장조에 저장되어 있는 실정이다.

또한 위 표와 같이 안전하고 효율적인 원전의 운영을 위해서도 습식저장조가 포화되지 않도록 저장량을 관리해야 한다. 현재 정상운전 중인 발전소의 습식저장 용량을 고려하면 한빛의 경우 사용후핵연료 포화 예상연도는 2029년으로서 건식저장시설의 건설 및 운영이 시급한 과제로 다가와 있다.

〈표 2〉 국내 원전 운영허가 기간 종료 연도

2017~2040년

발전소	1호기	2호기	3호기	4호기
고리	2017	2023	2025	2026
한빛	2026	2027	2035	2036
한울	2028	2029	2038	2039

또한 향후 10년 내 운전정지가 도래되는 가압 경수로형 원전 8기에 대해서도 원전해체가 진행되어야 할 것이고, 이러한 해체사업을 진행하기 위한 선결 조건인 사용후핵연료의 건식저장 사업은 이제 국내 원전 산업계의 더 이상 미룰 수 없는 필연적인 과제가 되었다.

두산중공업 캐스크 국산화

두산중공업은 국내 사용후핵연료 건식저장 사업의 본격적인 참여를 대비하여 이미 확보된 캐스크 제작 기술에 만족하지 않고, 설계기술 및 인허가 취득을 위한 캐스크 설계 국산화를 2014년부터 추진하였다.

1. 배경

두산중공업은 국내 사용후핵연료 습식저장대 (Fuel Rack)는 물론 발전소 소내 운반용 캐스크를 제작해왔다.

1990년 KSC-4를 시작으로 현재 고리, 한빛, 한울 발전소에서 소내 운반용으로 사용되고 있는 KN-12 캐스크를 제작, 공급하였다.

이러한 국내 캐스크 제작 경험 및 기술력을 인

정받아 2007년에는 일본의 운반저장 겸용용기를 수주하였다.

〈표 3〉 국내/외 캐스크 제작 경험

Model	제작 연도	수량	저장 용량
KSC-4 [고리]	1990	1	4 PWR
KN-12 [고리]	2002	2	12 PWR
KN-12 [한빛/한울]	2007	3	12 PWR
TEPCO Cask [일본]	2014	12	69 BWR

그러나 캐스크 제작 기술은 보유하고 있지만, 캐스크 설계 기술을 확보하지 않는 한, 경험 많은 해외 캐스크 설계사에게 기술적으로 종속될 수밖에 없으며, 국내 건식저장사업이 본격화되기 전에 해외 캐스크 설계사와 경쟁하기 위해서는 국산화 모델 개발 및 인허가 획득, 운영 기술 확보 등 설계기술 역량이 반드시 필요함에 따라 전략적으로 캐스크 설계 기술 확보를 추진하게 되었다.

2. 국산화 추진 내용

두산중공업은 캐스크 설계기술 확보를 위해 2014년부터 해외 캐스크 설계사들(Holtec, Orano, GNS, ENSA, NAC 등)에게 캐스크 기술전수 및 사업협력을 제의하였다. 그 결과 미국에서 초창기부터 건식저장사업에 참여하여 다양한 캐스크 상용모델과 우수한 캐스크 설계 기술 및 경험을 보유한 NAC International社와 2015년 8월 기술협력 계약을 체결하였다.

두산중공업은 NAC의 설계, 인허가 기술 문서를 연구하면서 국내에서 발생한 사용후핵연료에 최적화된 건식저장시스템 모델 개발 및 설계 국산화를 목표로 18개월 동안(2016년 5월~2017년 10월) 설계&해석(구조, 열, 임계, 차폐) 분야별 인력(6명)을 미국 NAC에 파견하였다. NAC 엔지니어와 협업을 통해 캐스크 설계 및 해석 기술을 전수받았으며, 국내 사용후핵연료 사양에 최적화된 국산화 캐스크 모델 DOOSAN DSS-21(금속저장용기 시스템)개발을 2017년 12월에 성공적으로 완료하고 국내로 복귀하였다.

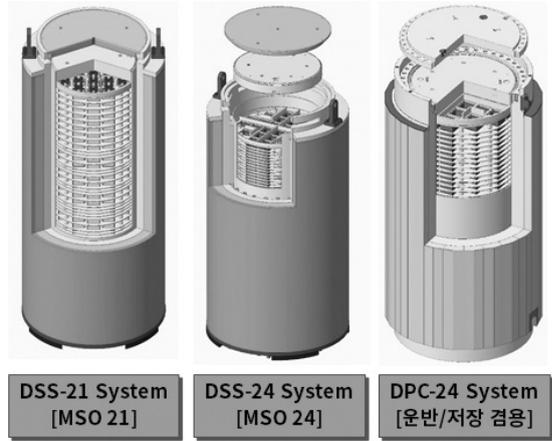


[그림 1] DOOSAN DSS-21 금속저장시스템

3. 다양한 모델 개발 및 검증

두산중공업은 국산화 캐스크 모델 개발 과정에서 확보된 설계 및 해석 기술을 바탕으로 2018년부터 국내 건식저장사업에 적용 가능한 다양한 국산화 캐스크 모델의 자체 개발을 추진하였다.

저장용량을 21다발에서 24다발로 증가시킨 DSS-24와 사용후핵연료 운반/저장 기능을 동시에 갖춘 겸용용기 DPC -24도 개발하였다.



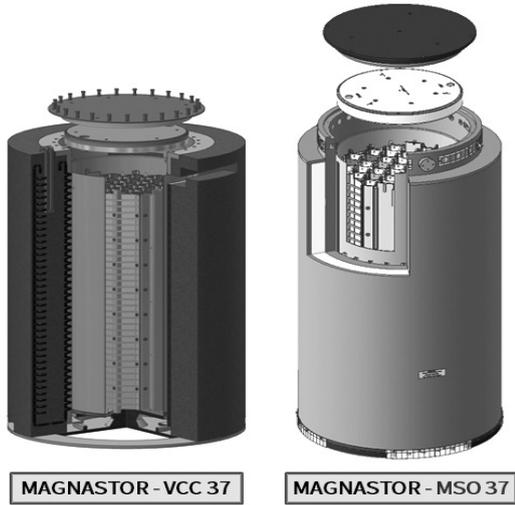
[그림 2] 두산중공업 자체 개발 캐스크 모델

두산중공업은 캐스크 모델 자체 개발에만 그치지 않고, 미국에서 NRC 인허가를 획득한 NAC의 MAGNASTOR VCC-37 저장용기를 기반으로 개발된 두산중공업 고유 모델인 금속저장용기(MSO, Metal Storage Overpack)의 설계 안전성을 입증하기 위해 금속저장용기 모델(MSO-37)을 2019년 12월 미국 NRC에 인허가를 신청하였다.

MSO-37 금속저장용기는 2020년 인허가 기관의 질의 및 답변을 완료하였고 2021년 6월경 미국 NRC로부터 저장용기 인허가 승인을 기대하고 있다.

또한 두산중공업은 국내 건식저장 초도사업이 예상되는 고리 1호기 사용후핵연료를 기준으로 최적의 금속저장시스템 상세설계를 수행하고 있다.

32다발 저장용량의 금속저장시스템으로서 핵연료건물 내에서 운반용기를 사용하여 사용후



[그림 3] 미국 NRC 인허가 신청 모델
 *VCC : Vertical Concrete Cask
 **MSO : Metal Storage Overpack

핵연료를 인출, 건식저장시설로 운반하는 타입이며 2021년 말까지 상세설계를 완료하고 국내 저장용기 설계 인허가 신청을 계획하고 있다.



[그림 4] DOOSAN DSS-32 금속저장시스템

4. 제작성 및 생산성 검토

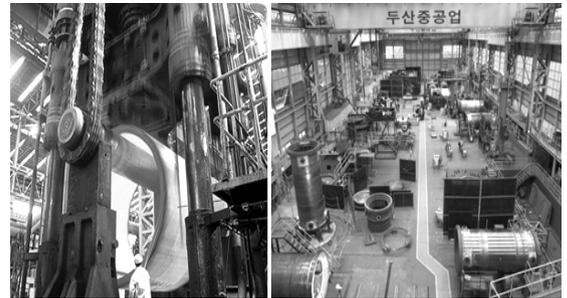
두산중공업은 이렇게 다양한 캐스크 모델을 개발하면서도 기본 설계와 해석 평가에만 집중하지 않고, 상세 제작설계를 수행하여 즉시 상용

화 및 제작 가능한 캐스크 설계가 되도록 완성도를 높여왔다.

40여 년간 축적된 원전 주기기 제작 기술과 원자력 품질보증시스템을 적용하여 재료 선정부터 절단, 가공, 제관, 용접, 검사, 시험, 포장, 운송, 설치, 운용 등 캐스크 제작 및 운용 전체 공정에서 설계 최적화를 적용하였다.

또한 국내 건식저장사업에서 저장용기의 본격적인 대량 생산이 요구됨에 따라 최적의 제작공정 및 생산라인을 구축하고 최신 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 연간 생산물량을 평가하였다.

평가 결과 두산중공업 캐스크 공장 1개 생산라인에서 자재 투입 후 10개월 만에 저장용기 1세트가 완성되며, 이후 연간 30세트의 저장용기를 제작 및 공급 가능한 것을 확인하였다.

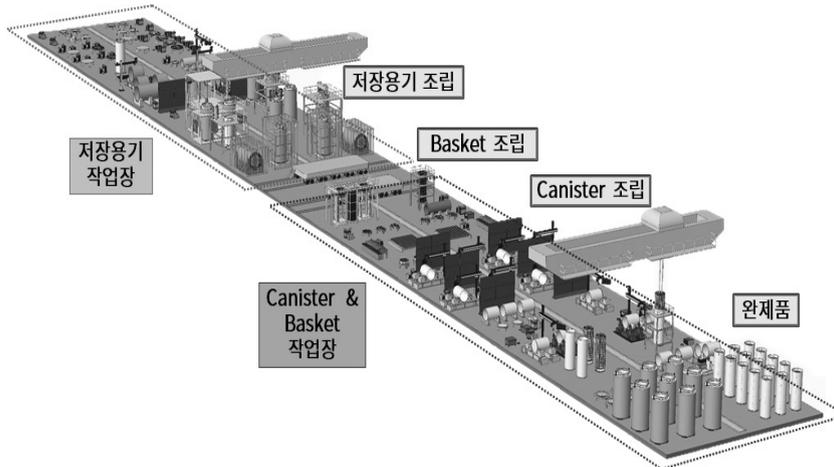


[그림 6] 두산중공업 단조 및 캐스크 공장 전경

특히 일체형 단조재를 적용한 금속저장용기 설계는 제작기간 단축 및 안정적인 품질 관리를 가능하게 하였다.

두산중공업의 제작성과 생산성 검토 결과는 실제 제품 제작을 통한 검증으로 이어졌다.

2019년 KORAD-21 원형 시험용기 제작을 한



[그림 5] 두산중공업 캐스크 공장 생산 라인

국원자력연구원으로부터 수주하여 KORAD-21 운반용기 제작설계 및 실제품 제작을 수행하였다. 사용후핵연료 운반시험을 위한 용기이므로 실제 품 크기 및 동일한 설계 형상, 제작 공정을 적용하여 제작하였으며, 디스크 타입의 바스켓(내부구조물)과 캐니스터의 제작성 검증을 완료하였고 Fuel Tube와 중성자차폐체의 제작 및 시공성을 확인할 수 있었다.

또한 캐스크 용기에만 국한하지 않고 발전소

현지에서의 캐스크 운영과 보조장비 사양 검토도 수행하였다.

두산중공업은 2019년에 고리 발전소 KN-12 소내 운반용기 지지대와 운반트레일러 교체 공사를 수주하여 핵연료 건물로부터 사용후 핵연료를 인출, 저장시설로 이송하기 위해 필요한 보조장비의 신규 제작, 공급을 수행하였다. KN-12 운반용기 중량 (핵연료 장전시 72.5톤) 대비 두산중공업의 운반용기(110톤)는 약 1.5 배 무겁기 때문에 추후 건식저장사업에 적용할 운반용기 지지대 설계와 운반트레일러 사양 선정, 현장 운용에 도움이 되는 실질적인 경험을 축적하였다.

5. 향후 개발 계획

두산중공업은 해체 예정인 고리 1,2호기 사용후핵연료를 대상으로 발전소 핵연료건물 크레인 허용 중량을 만족하면서도 저장용량을 증대



[그림 7] KORAD-21 원형 시험용기 제작



[그림 8] 고리 운반트레일러(모듈 타입) 하중시험

시킨 금속저장시스템(DSS-32) 상세설계 개발을 진행하고 있으며, 또한 사용후핵연료 인출, 장전, 운반에 소요되는 보조장비 사양을 선정하고 건식저장시설과 연계된 상세 운영절차를 수립하여 캐스크 설계 최적화뿐만 아니라 캐스크 운영의 안전성, 효율성을 확보해 나갈 예정이다.

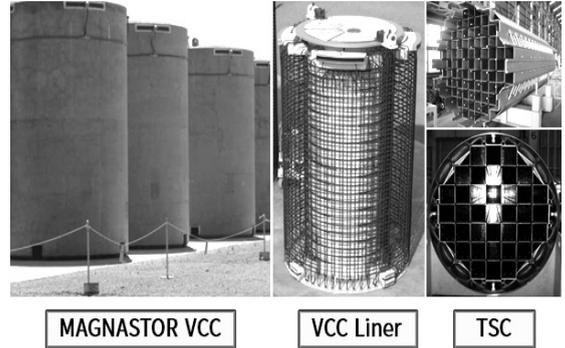
미국 TMI 저장용기 수출

두산중공업은 캐스크 설계 국산화는 물론 제작 기술 실증에도 지속적인 노력을 기울였다.

2019년 8월 두산중공업은 캐스크 기술협력사인 NAC로부터 해체 예정인 미국 TMI 발전소에 사용될 MAGNASTOR 건식저장시스템의 주요 기기(VCC Liner&TSC)를 공급하는 사업을 수주하였다.

VCC Liner는 기존 미국 내 NAC Supply Chain을 활용해 제작해왔었고, TSC는 NAC의 모회사인 일본 히타치조센에서 제작해오던 기기였다.

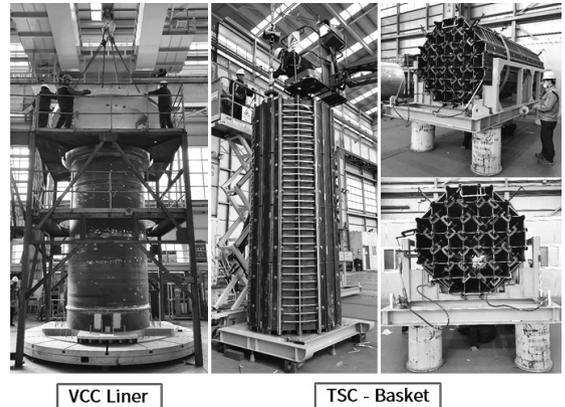
두산중공업은 초도품 제작임에도 불구하고



[그림 9] NAC 건식저장시스템 MAGNASTOR

*VCC : Vertical Concrete Cask
**TSC : Transportable Storage Canister

완벽한 원자력품질보증시스템과 캐스크 제작 기술을 적용하여 NAC와 TMI발전소 운영사(Exelon)에서 요구하는 품질 및 납기를 만족시키면서, VCC Liner(5세트)와 TSC(2세트)를 동시에 제작하여 공급하였다.



[그림 10] 두산중공업 VCC Liner&TSC 제작

특히, 완벽한 품질관리와 숙련된 제관, 용접기술, 자동화된 가공, 금형 설비 등 기존 일본에서도 적용하지 못한 제작기술을 적용하여 안정적인 품질로 제품을 생산하고 있는 두산중공업의

제작 시스템에 NAC와 고객사(Exelon)는 매우 만족해하였다.

앞으로 NAC와 두산중공업은 지속적인 캐스크 제작, 수출을 위해 Long-term Agreement를 체결하고 미국 내 건식저장용기 공급 물량을 추가로 수주하여 해외 캐스크 시장에서 두산중공업의 캐스크 제작 능력을 더욱 확고히 인식시킬 수 있도록 역량을 집중할 계획이다.

현재 건식저장용기 글로벌 시장에서 가장 경쟁이 치열한 미국 시장에 저장용기를 제작, 공급하였다는 것은 두산중공업의 캐스크 제작기술 및 능력이 세계적으로 인정받았다는 근거로 볼 수 있겠다.

국내 캐스크 사업 준비

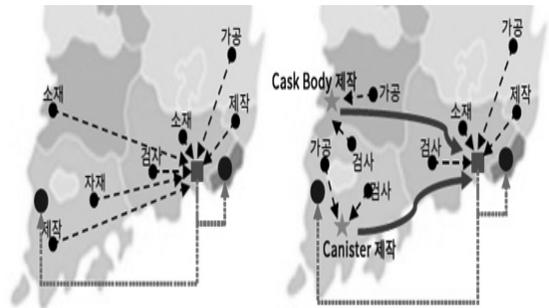
작년 12월 말 저장용기 인허가 규정이 포함된 원자력안전법이 개정되어, 2021년 6월 시행을 앞두고 있으며 하위 법령 및 규제지침도 법 시행에 맞춰 공표될 예정이다.

사용후핵연료 건식저장용기 설계 인허가 규정이 신설됨에 따라 캐스크 설계사에서 직접 국내 건식저장사업을 위한 저장용기 설계 인허가 신청이 가능하게 되었다.

두산중공업은 국내 건식저장 초도사업이 예상되는 고리 1호기 사용후핵연료 기준의 금속저장시스템(32다발 저장용량)의 상세설계를 2021년 말까지 완료하고 국내 저장용기 설계 인허가를 신청할 계획이다.

캐스크는 기기 특성상 소재/부품, 가공/제관/용접, 검사, 포장/운송, Site 취급 설비 등 여러 제작 공정에서 중소기업이 수행하는 원가 비중이 전체 매출액 대비 약 80%를 차지하는 중소기업 활용도가 높은 산업이다.

따라서 두산중공업은 대량생산, 조립 설비를 구축하면서 기존 중소기업 Supply Chain은 물론 발전소 인근 지역별 Supply Chain도 신규 발굴, 활용하여 국내 건식저장사업이 원자력 산업 생태계 유지 및 발전의 기회가 될 수 있도록 준비하고 있다.



[그림 11] 지역별 Supply Chain 활용 계획

두산중공업은 향후 설계 인허가 승인을 획득한 검증된 건식저장용기 시스템을 바탕으로 품질보증 및 제작기술, 대량 생산능력을 더욱 개선, 발전시켜 국내 건식저장사업에 안정적으로 캐스크를 제작, 공급하기 위해 만반의 준비를 하고 있다.

맺음말

사용후핵연료 관리 분야는 소내 임시저장, 중

간저장, 영구 처분으로 이어지는 장기간에 걸친 사업 특성과 경제성 및 안전성을 고려할 때 국내 기술 자립이 무엇보다 중요하다.

그리고 현재 정체된 국내 원전 산업 생태계를 유지하기 위해서도 국내 업체 중심의 사업구조 확보와 사업수행이 요구된다.

국내에서 처음으로 추진되는 경수로형 사용후핵연료 건식저장사업이므로 발전소 인근 지역 주민들의 수용성이 충분히 고려되어야 한다. 이를 위해 지역 중소기업의 사업 참여를 유도하는 사업계획을 수립하고 안전성이 충분히 검증된 저장용기 설계를 채택해야 한다.

설계뿐만 아니라 제작 분야에서도 원전 주기 제작에 준하는 수준의 품질보증시스템과 최신의 캐스크 제작기술을 적용하고, 이를 국내 Supply Chain 협력업체에 기술 전수하여 국내

원전 산업계의 건전한 육성과 상생을 도모해야 한다.

앞서 언급된 국내 원전 사용후핵연료 저장 포화(2029년) 및 해체 시점, 캐스크 설계/인허가/제작기간(6~7년)을 고려할 때 적시에 캐스크를 공급하기 위해서는 조속한 건식저장사업 착수가 요구되며,

추가적으로 시스템의 안전성을 확인하고, 고객의 시스템 운영 교육 등을 위해서 본격적인 사업 착수 전 최소 수량의 캐스크를 미리 제작하고, 운영하기 위해 캐스크 시범 사업을 추진하여 국내 업체들의 제작역량을 사전에 확보하고, 고객의 운영 기술과 절차를 확립한다면, 안전하고 효율적인 건식저장사업 수행을 기대할 수 있을 것으로 생각된다. **KAIF**



[그림 12] 두산중공업 창원공장 전경