

연소도효과를 적용한 사용후연료 용기의 책임계해석 국외 기술개발 현황분석

김태만, 조천형, 이대기

한국수력원자력(주) 원자력발전기술원, 대전광역시 유성구 장동 25-1

tmkim@khnp.co.kr

1. 서론

현재 사용후연료의 건식저장시설과 운반/저장용기의 책임계안전성 평가는 신연료의 핵종구성과 농축도를 기준으로 임계도 해석을 수행하고 있으며, 이는 원자로에서 인출된 후 임시/중간저장시설에 저장 될 때의 핵종구성 및 농축도와는 상당한 차이를 가진다[1]. 이에 최근에는 원자로에서 조사 현상에 의한 핵연료집합체의 핵종구성 변화에 따른 반응도 감소현상(연소도효과, Burnup Credit, BUC)을 반영하여 책임계안전성을 평가하는 연구가 국제적으로 활발히 진행되고 있다[2]. 우리나라에서도 2000년대 초반부터 연소도효과에 대한 기반기술 수준의 연구가 진행되었으나, 사용후연료의 운반/저장용기 설계 분야에서 적용된 사례는 없으며, 인허가 측면에서의 안전성 및 실제 적용에 따른 효용성의 평가는 아직도 많은 연구가 필요한 실정이다[3]. 따라서, 외국의 선진국가들의 연소도효과를 적용한 임계도해석의 기술개발 현황을 조사/분석하고 이를 통하여 국내에서 적용 가능한 연구 개발 범위를 설정하고, 향후에 개발되어 사용될 운반 및 저장용기의 최적화설계에 활용하고자 한다.

2. 본론

2.1 미국의 현황

현재 미국(NRC)의 경우, 습식저장시설에 대해서는 Actinide와 핵분열생성물(F·P)을 규정하였으나, 건식저장시설과 운반용기에는 아직 Actinide만을 적용하는 개념을 승인하였으며, 다양한 정부 관계 연구기관과 산업체가 연계하여 활발히 적용기술 연구를 진행하고 인허가 기관에 검토 및 적용승인을 요청하고 있다. 특히, 원전에서 배출된 사용후연료의 초기농축도, 연소이력자료와 Actinide만을 고려한 용기의 장전곡선을 활용하여 비교평가하고, 고용량의 운반/저장용기에 대량의 사용후연료를 적용하는데 필요한 추가적 부반응도를 도출하였으며, 주요 F·P(^{95}Mo , ^{99}Tc , ^{101}Ru , ^{103}Rh , ^{109}Ag , ^{133}Cs , ^{147}Sm , ^{149}Sm , ^{150}Sm , ^{151}Sm , ^{152}Sm , ^{143}Nd , ^{145}Nd , ^{151}Eu , ^{153}Eu , ^{155}Gd)와 Minor Actinides(^{236}U , ^{237}Np , ^{243}Am)를 포함한 효과적 핵종 적용방안을 제시하고 있다[4][5].

2.2 프랑스의 현황

현재 프랑스는 연소도효과 적용에 대하여 운반용기에 대해서는 Actinide만을 고려하여 이행하고 있으며, F·P에 대한 고려는 연구를 진행중에 있다. 건식저장시설의 적용에 대한 연구는 아직 진행되고 있지 않으나, 가능성에 대한 검토를 잠정적으로 고려하고 있다.

현재 연료의 초기농축도와 연소도의 증가 및 사용후연료의 저장용량의 감소를 목적으로 연소도효과를 적용한 임계평가에 대한 연구결과를 발표하였다. 운반용기에 대한 연소도효과의 적용방법에 관한 연구는 프랑스의 CEA/Sacaly에서 개발하였다. 평가에 활용된 주요 분열성핵종으로는 ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu 로 결정되었고, 주요 Minor Actinide 핵종으로는 ^{240}Pu , ^{241}Am , ^{236}U , ^{242}Pu , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{243}Am 이 적용되었다. 또한 주요 F·P는 ^{95}Mo , ^{99}Tc , ^{101}Ru , ^{103}Rh , ^{109}Ag , ^{135}Cs , ^{133}Cs , ^{147}Sm , ^{149}Sm , ^{150}Sm , ^{151}Sm , ^{152}Sm , ^{143}Nd , ^{145}Nd , ^{153}Eu , ^{155}Gd 의 총 16개 핵종을 적용하였다[6].

2.3 독일의 현황

현재 독일은 세계에서 유일하게 Actinide와 F·P까지 고려할수 있는 개념을 인정한 국가이며, 건식저장시설과 운반용기에 Actinide를 고려한 연소도효과를 적용하고 있다. 특히, 연소도효과의 적용은 임계안전성 평가의 복잡성을 야기하므로 독일은 사용후연료 Cask의 연소도효과의 적용에 대하여 다음과 같은 기본지침을 설정하여 이행할 것을 규정하고 있다[7].

▶ 연소도효과의 활용/이행

독일에서는 운반/저장용기의 인허가와 관리는 다양한 기관이 관계하고 있다. 우선 감독기관으로부터 운반용기의 설계승인과 운반승인을 받아야 하며, 관리기관으로부터 저장시설의 건

설승인을 받아야 한다. 특히, 관련 관리기관은 용기장전에 관여할 수 있다.

▶ 연소도효과의 적용절차

상용원전의 운전/연소이력과 사용후연료의 조성/구조에 기초하여 주요관심 핵종의 조성을 결정하게 된다. 이후, 결정된 핵종을 바탕으로 유효증배계수를 평가한다.

▶ 장전곡선의 표준적용

핵연료의 초기농축도와 연소이력을 바탕으로 사용후연료의 용기장전곡선을 도출하여, 용기의 잠정적용량을 산출하는 기초자료로 활용한다.

3. 결론

국내 연소도효과 적용 관련기술 개발시 Actinide에 대한 고려는 필수적인 것으로 판단되며, 더불어 F·P를 고려할 경우는 국내 실증실험이 힘든 여건이므로 국외 전문기관의 자료와 상호비교를 통해 그 타당성과 신뢰성을 입증해야 할 것으로 판단된다. 연소도효과에 대한 정량적 평가에서는 [표 1]에 나타난 바와 같이, 미국의 경우 최고 30%의 운반/저장용량을 증가시킬 수 있음을 보여주었다. 특히, 운반의 경우 운반횡수를 감소함으로써 비용절감(경제적 효과)을 기대할 수 있을 것이다. 하지만, 이는 핵연료 안전성 측면만 고려한 것으로 연소도효과의 실질적 효용성을 예측하기 위해서는 그 외의 안전성 측면(구조적/열적 건전성)에 대한 기술기준 만족여부와 엔지니어링 측면(바스켓의 제작성 등)을 고려한 종합적 평가가 이루어져야 하며, 이를 통하여 관련 선진기술을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 김종경 외, 방사성폐기물 규제기술 개발 - 경수로 사용후핵연료 건식저장 시설 안전성 해석 방법에 관한 연구, KINS/HR-782 (2007)
- [2] IAEA, Advances in Applications of Burnup Credit to Enhance Spent Fuel Transportation, Storage, Reprocessing and Disposition, IAEA-TECDOC-1547 (2007)
- [3] 이대기 외, 사용후연료 건식저장 기술개발, KHNP-NETEC (2008)
- [4] Dale Lancaster, 2005 Status and future of BUC in the USA (2005)
- [5] J. C. Wagner, Evaluation of BUC for Accommodating PWR Spent Fuel in High-capacity Cask Design, ICNC2003 (2003)
- [6] A.Barreau, Recent Advances in French Validation Program and Derivation of the Acceptance criteria for UOX Fuel, IAEA-TECDOC-1547 (2007)
- [7] D. Winterhagen, A Burn-up Credit concept for CASTOR® Transport and Storage Casks with PWR Spent Fuel, IAEA-TECDOC-1547 (2007)

[표 1] 국외 연소도효과 관련 적용 및 연구 현황

국가	연소도효과 적용범위 (PWR원전대상)			연구단계 / 적용에 따른 예상증량	관련규정
	습식	건식	운반용기		
미국	Actinide +FP 적용승인/이행	Actinide 적용승인	Actinide 적용승인 Actinide +FP 적용 연구 개발 중	<ul style="list-style-type: none"> • DOE/EPRI 등 연구협력체 구성하여 연소도적용기술 연구 진행 중 • Holtec 등 사업체 중심으로 연소도효과 적용 운반/저장 용기 개발 중 • 최대 30% 수용량증가예상 	<ul style="list-style-type: none"> • 10CFR72 • NUREG-1536 • NUREG -1617 • ANSI/ANS-57.9 • ANSI/ANS-8.17 • ISG-8 Rev.2
프랑스	미적용	미적용	Actinide 적용승인 Actinide +FP 적용 연구개발중	<ul style="list-style-type: none"> • CEA/IRSN/ AREVA에서 기술연구(코드 개발) 	
독일	Actinide +FP 적용승인/이행	Actinide 적용승인/이행 Actinide +FP 적용승인	Actinide 적용승인/이행 Actinide +FP 적용승인	<ul style="list-style-type: none"> • GNS 등에서 운반/저장용기 위주의 연구진행 • BFS등에서 처분과 관련된 연소도적용 연구진행 	<ul style="list-style-type: none"> • DIN 25471(습식) • DIN 25712 (운반/저장)