

원자력 발전과 핵연료 서비스

Nuclear Power Production and Nuclear Fuel Service



글 / 朴 晋 永

(Park, Jin Young)

원자력발전기술사,

공조냉동기계기술사, 공학박사,

한전원자력연료(주) 핵연료서비스팀.

E-mail: jypark@mail.knfc.co.kr

The importance of nuclear fuel service for the more safe nuclear power production is discussed. Technology related to failed W-14x14, 16x16, 17x17 and W-CE fuels repair, under water visual inspection and fuel rod oxide layer thickness measurement has been performed in Korea. More detailed pool side examination technology is going to be developed to investigate the cause of fuel failure and collect data to be used for advanced fuel development.

1. 원자력 발전과 안전성

1.1 원자력 발전

인류가 사용하고 있는 모든 에너지원은 그 나름대로 장단점이 있다. 원자력발전의 장점은 높은 발열밀도, 저렴한 연료비 그리고 연소폐기물의 양이 적다는 것이고, 단점은 핵연료가 연소되면서 발생하는 방사성물질이다. 독일이나 스웨덴과 같은 나라들은 방사성물질 때문에 원자력발전을 억제하고 미국, 프랑스, 일본, 중국 등의 나라들은 경제적인 장점 때문에 원자력발전(약칭, 원전)에 비중을 높이고 있다. 에너지 자원이 부족한 우리나라는 대량의 값싼 에너지원의 장기적 확보와 에너지원의 다각화를 추구하여 원자력을 주축으로 석탄, 석유, 천연가스 및 수력으로 발전하고 있다.

1.2 원자력 발전계통

전세계적으로 다양한 원자로에 다양한 연료가 연소되고 있다. 국내에서는 미국 Westinghouse (약칭, WH)사와 W-CE사가 개발한 가압경수로(약칭, PWR) 원자력발전소(약칭, 원전)와 캐나다에서 개발된 가압중수로(약칭, CANDU) 원전이 가동되고 있다. 원전에서는 원자로에서 핵연료의 핵반응 열로 물을 고온(350°C)으로 가열한 다음 증기발생기에서 고온 고압의 증기를 발생시켜

스팀터빈을 돌려서 발전한다. 여기서, 원자로와 열교환기의 1차측과 가압기 및 순환펌프로 폐쇄회로의 1차 냉각계통을 형성하며, 열교환기의 2차 측과 스팀터빈 그리고 응축기와 순환펌프로 폐쇄회로의 2차 냉각계통을 형성하고, 2차 냉각계통의 응축기는 3차 냉각계통을 통해 바다물로 냉각한다.

1.3 원자력발전과 안전성

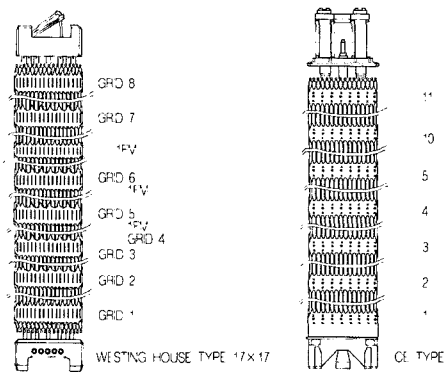
핵분열로 생성된 대부분의 방사성물질은 UO_2 소결체의 조직 속의 화합물이 되고, 일부가 소결체에서 누설되지만 피복관에 밀봉된 상태로 격리된다. 피복관의 손상으로 방사성물질이 1차 냉각계통에 누출되면 필터로 걸러진다. 1차 냉각계통의 배관이나 설비도 파손되어 방사성물질이 누출되면 철판과 철근콘크리트의 이중 벽의 돔 속에서 격리되어 필터로 걸러진다. 1차 냉각계통의 증기발생기 세관이 손상되어 방사성이 2차 냉각계통으로 누설되면 폐쇄된 회로 내에서 필터로 걸러진다. 이와 같이 원전은 다중방호개념으로 방사성물질을 밀봉, 격리 및 필터로 걸러냄으로서 원전의 안전성을 확보하고 있다.

2. 핵연료서비스와 필요성

2.1 국내에서 사용되는 핵연료

한전원자력연료(주)(약칭, 한연주)가 PWR연료

(〈그림 1〉 참조) 4 종류와 CANDU연료를 생산하여 국내 소모분 전량을 공급하고 있다. 한연주는 실수요자인 한국수력원자력(주)(약칭, 한수원)으로부터 공급받은 농축 UF₆(약 4.5%의 U-235)를 변환시켜 이산화우라늄(UO₂) 소결체를 만들어서 Zircaloy 피복관으로 밀봉한 연료봉들을 수백 개씩 엮어서 PWR형 연료집합체(〈표 1〉 참조)로 생산하고 있다. PWR원전에서는 12개월, 15개월 혹은 18개월 주기로 약 3분의 1 정도를 새연료로 교체하며 발전한다. CANDU원전에서는 이산화우라늄으로 만든 다발형태의 연료로 발전하면서 매일 제일 많이 연소된 연료 18개를 교체한다.



〈그림 1〉 Westinghouse형 및 W-CE사형 핵연료집합체

〈표 1〉 국내에서 사용중인 연료집합체와 연료봉

원전	연료봉 배열	집합체 길이	집합체당 연료봉	노심에 정전된 연료집합체 수	노심에 정전된 연료봉 수
고리 1호기	4각 14×14	4,062mm	179 개	121 개	21,659 개
고리 2호기	4각 16×16	4,058mm	235 개	121 개	28,435 개
고리 3,4호기					
영광 1,2호기	4각 17×17	4,063mm	264 개	157 개	41,448 개
울진 1,2호기					
영광 3,4,5,6호기	4각 16×16	4,528mm	236 개	177 개	41,772 개
울진 3,4,5,6호기					
월성 1,2,3,4호기	원기둥 37	495mm	37 개	360×12 개	159,840 개

2.2 연료손상

새로운 연료를 개발하면 철저한 연소성능시험을 거쳐서 건전성을 확인한 다음 대량으로 생산하여 공급한다. 그러나, 원자로에 몇 만 개의 연료봉들이 장전되어 연소되다보니 이런 저런 이유로 연료

손상이 발생하고 있다. 지금 150여기가 가동되고 있는 미국에서 발생한 연료손상의 통계(〈표 2〉)를 보아도 각 원전마다 매해 한 개 꼴로 연료가 손상되고 있다. 12기의 PWR원전을 가동하고 있는 우리나라에서도 연료손상은 발생한다.

2.3 연료손상의 원인

연료의 손상의 원인과 형태(〈표 2〉)는 매우 다양하다. 열수력적 진동으로 연료봉을 엮어주는 그리드 스프링과 연료봉의 마찰로 연료손상이 많이 발생하고, 이물질에 의한 연료손상도 계속 발생하고 있다. 최근에는 주로 고연소도의 개량연료에서 예상치 못한 손상이 발생하고 있다. 연료가 복합적인 원인으로 손상되는 경우가 허다하므로 그 근본 원인이 밝혀지지 않는 경우도 허다하다.

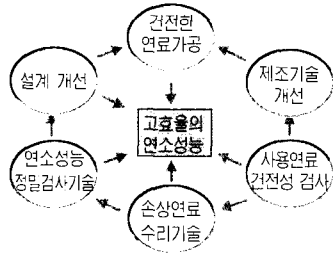
〈표 2〉 핵연료 손상과 그 원인 (미국내 1991-1995 5년간 통계)

구분	손상 원인	발생빈도	비고
원전 운전	냉각수와 함께 고속으로 흐르는 이물질	167(21.9%)	
	냉각수의 화학적 불순물(Crud)	10(1.3%)	
원자로구조	냉각수 비정상 유동에 의한 연료봉 손상	0(0.0%)	과거에 발생
	냉각수의 비정상 유동에 의한 진동	1(0.1%)	과거, 빈번
설계	그리드 스프링에 의한 연료봉 파손	287(37.7%)	최근, 증가
	피복관의 방사선조사 성장과 Creep Collapse	1(0.1%)	
	연료봉 내 잔존수분에 의한 피복관의 수소화	23(3.0%)	
제조	봉단마개, 피복관, 구조제의 자재나 용접 불량	31(4.1%)	간혹 대량발생
	원료 운송중 충격 및 취급 부주의	7(0.9%)	
원인 불명	검사결과 원인 불명	156(20.5%)	
	검사를 수행하지 않음	78(10.2%)	
합 계		761(100%)	

2.4 핵연료서비스 기술의 필요성

한 개의 연료봉이라도 피복관이 손상되어 1차 계통의 냉각수가 방사성물질로 오염되면 위험성과 경제성을 제고하기 위해 조기에 연료의 손상을 검색하는 건전성검사기술이나, 다 연소되지 않은 손상연료의 연료수리기술이나, 보다 고효율의 건전한 연료를 개발하기 위한 연소성능의 정밀검사기술과 같은 핵연료서비스 기술이 필요하다. 핵연료와 관

련하여 탐광, 정련, 제조, 설계, 연소중 기술지원, 사용연료건전성검사, 손상연료수리, 노내연소성능 검사, 폐기연료의 저장, 재처리 및 처분 등의 전반적인 기술지원 업무를 핵연료서비스라고 한다. 여기에서는, CANDU형 연료는 구조가 간단하고 저렴하며 손상률도 낮아서 수리나 검사할 일도 적으므로, 사용중인 PWR형 연료에 대한 핵연료서비스(그림 2)를 대상으로 한다.



〈그림 2〉 핵연료서비스 기술의 연계도

2.4 핵연료의 방사선과 방호

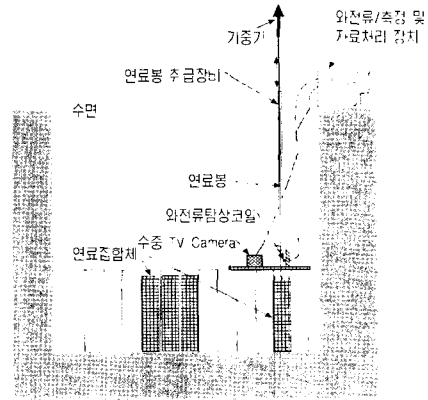
원전에서 연소된 사용연료집합체는 높은 방사능을 띠므로 잘나에 쬐여도 생명에 위협을 준다. 고방사능물질을 취급할 수 있는 조사후시험실(PIE)을 사용하기도 하나 고비용과 대상 연료를 재사용할 수 없는 한계가 있다. 수면 밑에 3.4m 이상의 거리에서는 방사능준위는 약 10⁸ 분의 1로 차폐되어 원자로에서 방금 인출된 연료라도 안전하게 취급할 수 있으므로 원전의 사용연료저장조에서 연료의 수리와 손상원인 분석과 연소성능을 검사(Pool Side Inspection)한다(참조 〈그림 3〉).

3. 핵연료 검사

3.1 사용연료의 건전성검사

한수원은 원전의 운전 중에 냉각수의 방사능을 분석하여 가동중인 원자로의 연료 손상여부를 판정하고, 연료를 교체할 때 수중 TV Camera로 육안검사를 하여 외관상의 건전성을 확인하고, 초음파탐상으로 손상된 연료봉을 검색한다. 한연주는 정밀육안검사기술을 보유하고 있으며, 한기공은 흡

입누설검사장비로 손상연료집합체의 검색기술을 보유하고 한수원을 지원하고 있다.



〈그림 3〉 연료봉 피복관 산화피막 측정 개략도

3.2 연소성능 정밀검사

PWR형 연료집합체는 연료봉 하나만이라도 손상이 되면 가능한 한 조속히 격리시켜 손상원인을 검사하여 손상의 재발을 방지하여야 한다. 보다 건전한 고출력, 고연소도 연료를 개발하기 위해서는 피복재의 산화피막과 Crud의 두께, 연료봉의 찌그러짐, 휨과 성장, 집합체의 구조와 제원 변화, 부품의 재질과 특성 변화 등의 연소성능을 검사하여 설계와 제조에 반영하여야 한다.

핵연료 국산화 과정에서 제조는 물론 설계 기술도 외국 산업체에 의존하여 기술료를 지불하여왔다. 근래에 세계적인 원자력산업체들이 통폐합되면서 기술경쟁력이 부족한 우리는 위협이 예상되므로 조속한 기술자립이 필요하다. 이에 따라 한연주는 개량연료를 개발하면서 연소성능을 검증하기 위한 정밀육안(표 3) 원전 현장 핵연료 정밀성능검사

검사부위	검사 대상	적용 기술	비고
연료봉	연료봉 정밀육안검사	수중 Hi-Mag, Color TV	기술자립
	산화피막과 crud 두께	외전류탐상	
	연료봉 휨, 직경, 길이, 피복관 마모 등	Hi-Mag, color TV, LVDT, UT, ECT, MT, VT 등 비파괴검사기술	개발중
연료 집합체	각 부품의 기능 상태, 집합체 길이, 휨, 비틀림	Hi-Mag, color TV, Fiber scope, Load cell, Profilometry 등	개발중
방사능	연소도, crud	γ-ray spectrometer, 화학분석 + γ-ray spectrometer	개발중

검사기술을 개발하고, 2001년 7월에는 W-CE형 연료봉 산화피막 두께를 W-Atom사와 함께 성공적으로 측정(〈그림 3〉)한 바 있다. 추후, 연료집합체의 연소성능 검사, 연료봉의 연소성능, 연료부품의 연소성능 및 손상연료의 손상원인분석 등을 시험할 수 있는 정밀검사기술(〈표 3〉)을 개발할 예정이다.

4. 핵연료 수리

4.1 핵연료수리기술의 필요성

PWR연료의 가격은 약 4억원이다. PWR연료는 주기기간이 지나면 3분의 1이 교체되는데, 1주기만 연소된 연료 1개가 손상될 경우, 원자로 내 대칭위치의 연료 3개도 동반 폐기되어 약 10억원의 손실이 예상된다. 이 때, 원자로에 가연성우라늄과 함께 열출력량이 줄어들어 주기 길이가 7일이나 줄어들어 약 70억원(원전의 일일 전기생산가가 약 10억원)의 손실이 발생한다. 연료 두개가 손상되면 약 100억원의 손실이 예상된다. 그리고, 손상연료의 잔여 연소도를 이용하지 못하여 폐기연료의 처리비용도 증가한다.

4.2 손상 연료 수리기술 국산화

1970년에 고리 1호기를 착공한 이래로 원자력기술은 괄목할 정도로 국산화되었으나, 손상연료수리기술은 뒷전으로 밀려서, 손상되는 연료를 따로 모아서 외국사에 발주하여 두 번 수리(1985년도에 17개, 1991년에는 11개)하였다. 한연주는 1994년부터 핵연료서비스팀을 구성하고 핵연료서비스기술 확보를 착수하였다. 1995년에 W-CE형 연료 2개가 손상되자 한수원은 W-CE형연료수리장비를 수입하였고, 한연주는 W-CE사에서 손상연료를 수리(〈그림 4〉)하는 훈련을 받고, W-CE사와 공동으로 수리하면서 W-CE형연료수리기술을 확보하였다.

1998년, 2개의 WH형연료가 손상되자 한연주는 WH사로부터 연료수리장비를 임대하고 공동으로

수리하면서 WH형연료수리기술을 습득하였다. 한연주는 한수원의 PWR연료수리기술국산화 과제에 참여, WH-17×17형 연료수리장비를 확보하여 2000년에 4개의 손상연료를 수리하고, WH-14×14형연료와 WH-16×16형연료 수리장비도 개발하여 사용하고 있다.

4.3 수리기술의 활용

한연주는 연료수리기술을 확보함으로써 손상연료를 적시에 수리하여 재사용하게 함으로서 이와 같은 막대한 경제적 손실을 막고, 원전의 안전운전을 기하여 연료공급자로서 고객인 한수원을 만족시키고 있다. 또한, 국내 기술진이 저렴한 비용으로 수행함으로써 막대한 외화유출을 막고, 추후에는 국외 용역에도 참여하여 외화획득에도 기여할 것이다.

4.4 가압중수로형 연료

국내에서 가동되고 있는 4기의 CANDU형 원전은 캐나다에서 개발한 CANDU형이다. CANDU형 원전에서 사용되고 있는 연료는 그 구조가 간단하고 값이 저렴(2백만원대)하며 손상률도 매우 적어서 원자로 가동 중에도 손상이 확인되면 즉각 신연료와 교체하여 폐기하고 있다.

5. 결론

기술의 발전으로 사고의 가능성이 거의 해결되었지만, 연료손상은 발생하고 있다. 만일의 사태를 미연에 방지하기 위하여 사용연료의 건전성검사기술은 필수적이다. 손상연료를 적시에 수리하는 수리기술도 경제성만으로 따질 수는 없을 정도로 중요하다. 추후에 이들 기술을 활용하여 원자로 제어봉의 탐상에도 활용하고, 더 나아가서는 원전의 주요부품의 검사, 시험, 탐상 및 측정과 그 해석에도 활용하게 될 것이다.

(원고 접수일 2001. 9. 10)