핵연료 비파괴검사 기술

Non-Destructive Testing Technologies Being Applied to Nuclear Fuel

신중철 (한전원자력연료 튜브생산처장)
Jung-Cheol Shin (Email: jcshin@knfc.co.kr)

1. 서 론

우리나라의 원자력발전 비중은 세계 원전 운영국 중에서 프랑스에 이어 두 번째로 높다. 1978년 고리1호기 상업운전을 시작으로 꾸준히 성장하여 현재 23기의 원전이 운영되고 있고, 신월성 2호기, 신고리 3, 4호기가 가동을 앞두고 시운전 중에 있다. 또한, 신한울 1, 2호기가 건설중이며, 신고리 5, 6호기 및 신한울 3, 4호기가 건설 계획중이므로 2024년까지 9기가 추가되어 총 32기가 운영될 계획이다[1]. 이에 추가하여, UAE에서 건설중인 원전 4개 호기가 2017년부터 매년 1개 호기씩 가동에 들어가는데 발전소 운영을 우리나라가 지원하게 되어 있어, 국내 원자력산업은 지속적으로 발전해 나갈 전망이다. 2011년 3월 11일 일본 후쿠시마 원전 사고 이후 원자력 이용에 있어 안전상의 문제점들이 많이 제기되어, 국제적으로 태양열, 풍력, 조력 등 신재생 에너지 개발에 관심이 증대되고 있지만, 현재의 에너지 활용 기술로는 원자력을 대체하는데 많은 한계가 있으므로, 원자력의 안전성을 더욱 강화하면서 원전 건설을 계속 추진해 나갈 것으로 보인다. 표 1은 후쿠시마 원전 사고 이후, 일부 국가에서는 원전 이용을 중단하였으나, 전 세계적으로 사고 이전과 비교하여 원전 의존도는 큰 차이가 없음을 보여준다[2].

핵연료는 원자로 안에 장전되어 핵분열을 연속적으로 일으켜 에너지를 방출하는 원전 연료로써 원전이 존재하는 한, 지속적으로 공급되어야 한다. 이러한 현실에서 우리나라를 포함한 원자력 선진국들은 안전하고 효율 높은 핵연료 개발과 경쟁력 있는 핵연료 제조·검사공정 개발 관련 기

술 선점을 위해 많은 투자와 치열한 경쟁을 벌이고 있다. 이와 더불어 원전 수명이 종료되는 발전소가 늘어남에 따라 사용후핵연료 장기저장기술 확보 또한 중요한 연구과제로 부각되고 있다. 본 강좌에서는 이러한 과정 즉, 핵연료 개발과 제조, 원자로내 연소과정을 거쳐 저장 처분될 때까지 전(全) 핵연료 주기 과정에 적용되는 비파괴검사 기술과 연구 개발중인 기술 동향을 소개한다.

표 1 후쿠시마 원전사고 전후 세계원전현황 비교

구 분	운영중	건설중	계획중	합 계
사고前	437기 (373,966MW)	60기 (61,759MW)	158기 (176,773MW)	655기 (981,643MW)
사고後 (‘13.7.1 기준)	432기 (371,870MW)	68기 (71,226MW)	162기 (183,025MW)	662기 (984,871MW)
차 이	Δ5기 (Δ2,096MW)	+8기 (9,467MW)	+4기 (6,252MW)	+7기 (3,228MW)

2. 핵연료 개발·제조·연소·저장

핵연료(Nuclear fuel)는 저농축우라늄을 세라믹 소결체로 가공하여 지르코늄합금 피복관내에 밀봉한 핵연료봉 약 200여개를 한 다발로 묶어 핵연료집합체로 구성된다. 한국표준형 원전으로 통칭되는 OPR-1000(optimized power reactor-1000MW급)과 그 후속 원전으로 신고리3, 4호기와 UAE에 수출한 APR-1400(advanced power reactor-1400MW급)에는 PLUS7™형 핵연료 집합체 177다발과 241다발이 각각 장전되어 3주기(약 54개월)동안 연소된다. PLUS7™형 핵연료 집합체는 그림 1과 같이 16×16 격자배열로 236개의 연료봉과 12개의 지지격자, 4개의 안내관과 1개의 계

품번	품명	품번	품명
1	상단고정체	4	보호지지격자
2	상단지지격자	5	하단고정체
3	중간지지격자	6	연료봉

구분	PLUS7	AP1000
설계·제작	KEPCO NF	WH*
집합체 배열	16x16	17x17
연료봉수	236	264
집합체 전장(mm)	4,528	4799
집합체 폭(mm)	207	214
연료봉 길이(mm)	4,094	4583
연료봉 외경(mm)	9.5	9.5
피복관 재질	Zirlo	Ziro
피복관 두께(mm)	0.57	0.57

WH* ; 미국, Westinghouse

그림 1 PLUS7형 핵연료 집합체 구성 및 주요 제원

측관으로 구성되어 있으며, 상단과 하단에 상단 고정체와 하단 고정체가 각각 부착된다[3].

국내 핵연료 개발은 핵연료 설계·제조를 주관하는 한전원자력연료(KEPCO NF)에서 수행하는데, 보다 안전하면서 열적성능이 우수한 연료 개발에 목적을 둔다. 그러기 위해서는 원자로의 고온고압 고방사선환경에서 기계적 건전성을 유지하면서 열적성능을 보증할 수 있음을 입증해야 한다. 이를 위해, 여러 설계 후보군의 핵연료 모형을 만들어 노외실증시험(out-of-pile test)을 거쳐, 가장 우수한 모형을 선정하고 시범집합체(lead test assembly)를 제조하여 노내 연소 성능시험(in-reactor fuel performance test)을 수행한다[4]. 이 과정에 여러 종류의 비파괴검사가 적용된다.

핵연료 제조는 재변환, 소결, 부품제조, 연료봉 용접, 집합체 조립 등 5공정으로 구성된다. 먼저 육불화우라늄(UF₆)을 재변환 공정에서 이산화우라늄(UO₂)분말로 변환시킨 후, 소결공정에서 담배 필터 크기의 원통형으로 압축 성형하여 소결체를 만든다. 소결체는 연료봉 용접공정에서 지르코늄합금 튜브에 장입되고 양쪽 끝단을 봉단마개로 용접하여 밀봉하면 연료봉이 된다. 집합체 조립공정에서는 부품제조공정에서 만들어진 지지격자와 안내관을 이용하여 골격체를 만든 후, 골격체내에 연료봉을 장입하고 상·하단 고정체를 조립하면 최종 핵연료 집합체가 완성된다. 이러

한 제조과정중 품질검사를 위해 여러 종류의 비파괴검사가 수행된다[5].

완성된 핵연료는 운송중 충격방지를 위해 엄격한 이송조건으로 원자력발전소로 운송되어 원자로에 장전·연소된다. 약 54개월의 연소과정에서 아주 드물게 핵연료에 손상이 발생되는데, 핵연료 손상이란 핵연료 피복관의 결함으로 연료봉 내에 간헐 있어야 될 핵분열성 물질이 원자로 1차 계통에 흘러 들어가는 것을 의미하며, 주기적으로 수행하는 1차 냉각수 방사능 농도 검사에서 핵연료 손상이 감지된다. 1차 계통은 2, 3차 계통과 완전히 밀폐되어 방사능 외부 유출과는 무관함으로 일반적으로 원전 운전은 정상적으로 수행되고 발전을 정지하는 계획정비기간 동안 손상핵연료를 찾아서 정상연료로 교체한다[6]. 이러한 손상핵연료를 찾는 과정에서도 비파괴검사가 적용된다.

원자로에서 연소를 마친 핵연료는 발전소내 사용후핵연료저장조(spent fuel pool) 수중에서 20~30년 이상 저장된 후, 사용후핵연료저장조의 공간 확보 또는 원전 수명의 종료후 폐로하기 위하여 사용후핵연료를 장기 저장조로 이동시키는데, 이 과정에서도 사용후핵연료의 건전성 입증을 위해 비파괴검사가 적용된다.

3. 핵연료 개발 과정에서 비파괴검사

신규 개발된 핵연료의 최종 검증은 노내 연소 성능검사에서 확인된다. 사용연료와 동일한 조건으로 시범집합체를 통상 4다발 제조하여 사용원전에 장입한 후, 3주기 동안 연소시키면서 매 주기별 설계 예측치대로 기계적 건전성을 유지하면서 안전하게 연소하는지 성능검사를 수행한다[4]. 사용후핵연료는 고방사선을 방출하기 때문에 그림 2(a)와 같이 모든 검사는 사용후연료저장조 수심 약 10 m위치에서 이루어진다. 따라서 모든 장비는 방수와 내방사성 재료로 설계되고, 카메라로 영상을 보면서 원격 제어한다. 그 중 가장 대표적인 검사가 와전류를 이용한 연료봉 피복관의 마모 및 부식상태를 평가하는 것이다. 마모검사는 수백 kHz대의 주파수를 사용한 원형 프로브(encircling probe)를 이용하고, 마모 형상을 평가하기 위해 MRPC(motor rotated pancake coil)를 사용한다(그림 2(b) 참조). 최근 미국전력연구원(EPRI)에서는 MRPC대신 array probe로 대체하는

(a)

(b)

(c)

(d)

그림 2 노내 연소 성능검사 : (a)전체 검사 장면, (b)연료봉 와전류검사 결함 및 마모 평가, (c) 연료봉 산화막 두께 측정용 와전류검사 장비 교정, (d) 연료봉 산화막 두께 측정 와전류검사 결과

연구를 했는데, 검사 환경이 수심 10 m지점에서 원격으로 수행해야 되는 여러 제한으로 상용화에 어려움을 겪고 있다[7]. 연료봉 부식 두께는 지르코늄 합금 피복관 외면에 산화된 ZrO_2 의 두께를 마이크로(μm) 단위까지 아주 정밀하게 측정한다. 피복관의 두께가 0.57 mm로 얇고, 부식 두께도 보통 50 μm 이하이므로 수 MHz대의 프로브형(probe type) 와전류 센서를 이용하여 lift-off 원리로 측정된다(그림 2(c, d) 참조). 최근에는 핵연료가 고연소도화 되면서 연료봉 표면에 침식되는 크러드가 부식 두께 측정에 영향을 미치는 경우가 발생하여, 20여개 주파수 이상의 다중 주파수를 이용한 와전류검사법을 개발하고 있다[8,9]. 연료봉을 지지하고 있는 지지격자도 방사선 조사가 되면 재료가 취화되는 현상이 생겨, 지지격자의 취화정도를 평가하기 위해서 와전류를 이용한 전도도 측정이 수행된다. 그 외 핵연료의 외형적 변화 즉, 핵연료 집합체의 길이 성장 및 비틀림·휨 정도를 평가하기 위해 수중카메라를 이용한 vision에 의한 형상 변형 평가와 LVDT를 이용한 길이 측정이 원격으로 이루어진다[10].

이러한 모든 검사 요건과 제한치 및 검사 결과는 핵연료 설계서에 기술되며 개발한 핵연료의 상용화 인허가 자료에 포함된다.

4. 핵연료 제조공정에서 비파괴검사

핵연료는 설계에서 제공되는 도면과 시방서에 따라 제조된다. 핵연료의 구성품중 가장 중요한 부품중의 하나는 지르코늄 합금으로 만들어지는 피복관이다. 피복관 제조공정에서는 원재료인 TREX를 냉간 필거링과 특수 열처리를 3단계에 걸쳐 수행하여 외경과 두께를 점차 줄여 직경 9.5 mm, 두께 0.57 mm, 길이 4 m의 가늘고 긴 튜브를 만들어 낸다(그림 3,4). 생산된 피복관 전량은 최종 검사공정에서 초음파 및 와전류검사 장비를 이용하여 표면결함, 진원도(ovality), 벽 두께 및 금속 이물질 개재여부를 검사한다(그림 5)[5].

세계적으로 핵연료용 피복관을 생산하는 나라는 약 10여개 국이며, 우리나라는 한전원자력연료에서 국내 소요분 전량인 연간 약 1,000 km를 생산한다. 연간 4,000 km 이상을 생산하는 회사는 프랑스 Areva, 미국 Westinghouse, 러시아 TVEL이 있는데, 이들 각사의 공통 관심사는 피복관

(IAEA)의 보고에 따르면 세계적으로 가압경수로형 원전에서 핵연료 손상은 10^{-5} 수준인데[6], 우리나라의 경우는 이보다 10배나 낮은 10^{-6} 수준(연료봉 백만개당 약 2-4개 발생)으로 나타나고 있다.

운전중 발생된 손상연료 집합체는 계획예방정비기간 중 원자로에서 핵연료를 인출하는 과정에 비과피검사에서 누출시험(leak test)과 유사한 sipping test를 이용하여 손상연료 집합체를 검출한다(그림 7). 그 검출 원리는 원자로내 수심 25 m 위치에서 수심 10 m 위치까지 집합체를 올리면 1기압 정도의 수압 차이로 인해 손상연료 봉내에 갇혀 있던 핵분열성 가스가 누출되는데, 이를 흡입(sipping)하여 가스 성분을 분석하면 손상집합체를 구분해 낼 수 있다[10]. 손상집합체를 찾으면 다음 단계로 그 집합체에 포함되어 있는 손상연료봉을 검출해내어야 된다. 이 과정에서는 초음파검사 방법을 가장 많이 사용하고 있다. 손상연료봉은 정상 연료봉과 달리 원자로내 냉각수가 연료봉내에 주입되어있기 때문에 소결체와 피복관 공극에 헬륨가스 대신 물이 채워지므로 물이 들어있는 연료봉을 찾아내는 것인데, 수심 10m 대 주과수를 사용하는 pulse-echo방식의 발진과 수신 프로브를 갖는 초음파 센서를 이용한다(그림 8)[12]. 센서나 계측장비의 현대화로 검사시간 및 정밀도는 높아가고 있으나, 고방사선 수중 환경에서 4~5만개의 연료봉중 1~2개의 손상연료봉을 찾는다는 것은 여전히 많은 시간과 기술적 제한을 갖고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 최근 EPRI에서 Westinghouse와 공동으로 유도 초음파(guided-wave UT)방식으로 검사 장비를 개발하였으나 연료집합체에 장착하는 문제로 아직 상용화를 하지 못하고 있다[7].

그림 7 Sipping test

(a)

(b)

(c)

(d)

그림 8 손상 연료봉 검출 초음파검사 장비 : (a) 메뉴플레이트, (b) 콘트롤러, (c) 초음파 프로브, (d) PC모니터

손상연료봉을 검출하여 정상 연료봉으로 대체 수리를 한 후, 손상 원인을 규명하는 과정에서 비파괴검사는 필수적이다. 미세한 핀홀(pin hole)에 의한 손상인 경우에는 카메라를 이용한 vision 관독이 불가하므로, 손상연료봉은 와전류검사 방법으로 손상 위치 및 크기 정도를 관독해 낸다.

6. 중간건식저장을 위한 핵연료 비파괴검사

원자로에서 3주기 동안 연소를 마친 핵연료는 발전소내 사용후핵연료저장조(spent fuel pool) 수중에서 20~30년 이상 저장된 후, 연료 자체에서 열이 더 이상 발생하지 않는 시점이 되면, 사용후핵연료저장조의 활용 공간 확보와 또는 수명이 완료된 원전 폐로를 위해 사용후핵연료를 중간건식저장시설로 이동하는 것이 세계적인 사용후핵연료 처리 방식이다[13]. 우리나라는 아직 중간

건식저장시설이 없으므로, 현재 모든 사용후핵연료는 발전소내에서 임시 저장중이며 처분 방안을 모색중에 있다.

원자로에서 연소를 끝내고 인출된 사용후핵연료는 수십 년 동안 습식상태에서 보관된 후, 사용후핵연료 운반용기를 이용하여 불활성가스 분위기인 건식저장조로 이동된다. 이 과정에서 사용후핵연료의 건전성이 확인되는데, 그 목적은 장기간 습식상태에서 보관되는 동안 재료의 물성 변화가 발생되지 않았는지 조사하고, 운송 취급 시 연료의 기계적 건전성 보증과 건식환경에서 또 다시 수십 년 동안 연료를 안전하게 보관할 수 있는지 입증하는데 있다[13]. 이 과정에서도 비파괴검사 기술을 이용하기 위해, 초음파 또는 와전류를 이용한 피복관의 물성변화(산화 및 수소화) 측정, 중성자 계측기를 이용한 잔존 연소도 측정, 진공흡입장치(vacuum sipping unit)를 이용한 누출연료(leak fuel) 여부 검출 등 다양한 기술이 연구·개발되고 있다.

7. 결 론

일본 후쿠시마 원전사고 이후 원전 안전상의 문제점들이 다각적으로 제기되어 왔으나, 친환경, 경제성 등 원자력이 갖고 있는 여러 강점들로 인해, 원전 운영에 있어 안전을 더욱 강화시키면서 수요에 따라 점차 증대해나가는 것이 세계적인 원전 추세이다. 원전 연료로 사용되는 핵연료는 원전이 운영되는 한, 지속적으로 공급되어야 하므로 원자력 선진국들은 보다 안전하고 열적성능이 우수한 핵연료 개발에 많은 투자를 하고 있다. 새로운 핵연료 개발과 신뢰성 높은 핵연료 제조검사 공정구축, 운전중 핵연료의 건전성검사, 사용후핵연료의 장기저장 등 핵연료 연관 분야에 다양한 종류의 비파괴검사가 적용되고 있음을 볼 때, 국내 비파괴검사 전문가 및 관련업체에서 더 큰 관심을 갖고 연구 개발에 참여하기를 기대한다. 일부 원자력 선진국에서 독점하고 있는 핵연료관련 비파괴검사 원천기술을 확보하고, 국내의 우수한 IT 및 전자계측 인프라 기술과 융합하여 우리의 고유기술을 창조해 나가는데 본 강좌가 도움이 되었으면 한다.

그림 9 원자력발전소 사용후연료저장조

그림 10 사용후핵연료 건식저장시설

참고문헌

- [1] 지식경제부 공고 제2013-63호, 제6차 전력수급기본계획 (2013)
- [2] 산업통상자원부, 제2차 에너지기본계획 (2014)
- [3] 한전원자력연료, 한전원자력연료 30년사, (2012)
- [4] K. T. Kim, Y. G. Jang and J. I. Kim, "In-reactor performance of an advanced PWR fuel, PLUS, for OPR1000s in Korea," *Journal of Nuclear science of Technology*, Vol. 45, No. 8, pp. 836-849 (2008)
- [5] 김시환, "알기 쉬운 핵연료관리," 형설출판사, (2010)
- [6] International Atomic Energy Agency(IAEA), "Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors," IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-2.1, (2010)
- [7] Electric Power Research Institute(EPRI), "Non-destructive Evaluation: 16Th Annual EPRI NDE Issues Meeting Notes," (2006)
- [8] Electric Power Research Institute(EPRI), "Eddy Current Analysis in the Presence of Ferromagnetic Crud," (2003)
- [9] Electric Power Research Institute(EPRI), "Qualification of the Frequency-Scanning Eddy Current Technique for LWR Fuel Assembly Structural Components Under Simulated Poolside Conditions," (2013)
- [10] J. C. Shin, J. I. Kim and J. T. Kwon, "Poolside examination techniques applied for development of an advanced PWR fuel, PLUS7," *Proceedings of 18th International Conference on Nuclear Engineering*, ICONE18-29889, (2008)
- [11] Electric Power Research Institute(EPRI), "Fuel Reliability Monitoring and Failure Evaluation Handbook," (2010)
- [12] Electric Power Research Institute(EPRI), "EPRI Workshop on Poolside Fuel Inspection technologies and Enhancements," (2004)
- [13] D. Kook, J. Choi, J. Kim, Y. Kim, "Review of spent fuel integrity evaluation for dry storage," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 45 No. 1, pp. 115-124 (2013)
- [14] United States Nuclear Waste Review Board, "Evaluation of the Technical Basis for Extended Dry Storage and Transportation of Used Nuclear Fuel," (2010)