2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

5´5 부분 핵연료집합체의 유체유발진동시험장치 개발
Development of the Flow-induced Vibration Loop for a 5´5 Partial Fuel Assembly

강흥석, 윤경호, 김형규, 송기남, 정연호
대전광역시 유성구 덕진동 150 한국원자력연구소 핵연제조기술개발
hskang@nanum.kaeri.re.kr

요 약

5 개의 지지격자와 25 개의 모의 연료봉으로 구성된 5×5 부분 핵연료집합체의 유체유발진동 시험과 동일한 크기의 지지격자로 압력강하시험을 수행할 수 있는 유동 Loop 의 설계 특성과 구축 현황 그리고 향후 계획에 대하여 기술하였다. Loop 내 시험에 이용될 부분핵연료집합체는 길이 2.2 m, 직경 9.5 mm 인 모의 연료봉이 12.8 mm 의 피치로 배열되며 25 개의 연료봉 중에 2 개는 안내관으로 대체되어 삽입된다. 부분 핵연료집합체의 유동시험 조건은 온도 90 ℃ 이하, 압력 9 bar 이하, 최대 유속 10 m/s 정도인 물 분위기로서 참조한 웨스팅하우스의 시험장치보다 다소 엄격한 시험조건이 될 수 있도록 설계하였다. 시험 Loop 는 현재 가열장치가 내장된 저수조와 회전수를 조절할 수 있는 펌프 그리고 터빈형과 오리피스형의 유량계 등이 Loop 의 주 관과 연결되어 대략 80%의 공정률을 보이고 있다. 부분 핵연료집합체와 Test section 이 제작된 후인 2002 년 11 월이 되면 배관의 진동시험을 시작으로 본격적인 Loop 의 성능시험을 수행할 수 있다.

Abstract

It is a technical report described the design characteristics, the status of construction, and near-future plan on a water loop which will be used for a flow-induced vibration test with a 5×5 partial fuel assembly and for the pressure drop test with the same size spacer girds. The rods of 2.2 m tall and 9.5 mm diameter are diametrically arranged in 12.8 mm of the pitch. Two out of the 25 rods will be used as guide tubes. The test conditions of the loop, such as the water temperature of 90 ℃, the pressure of 9 bars and the maximum flow velocity of 10 m/s, are set up to be severer than the reference loop of Westinghouse. The reservoir being able to control the temperature of water, the pump with an inverter and two flow meters are connected to the main lines. Although the progress of the construction reaches to around 80 % so far, it can be possible to do a performance test in this November when the test section and a 5×5 partial fuel assembly are manufactured and performed the vibration tests in air.

1. 서론

한국원자력연구소 신형핵연료개발과제의 고성능지지격자구조기술개발과제는 경수로 핵연료집합체의 핵심구조부품인 지지격자를 독자적으로 개발하고 있다. 경수로 핵연료집합체의 지지격자는 핵분열하여 열을 발생시키는 핵연료봉을 지지하는 역할과 횡방향으로 가해지는 하중으로부터 핵연료집합체를 보호하는 역할을 담당한다. 핵연료봉은 길이가 약 3.7m이고 내경이 약 8.3 mm 그리고 외경이 약 9.5mm인 피복관과 피복관 내부에 3.3m 정도 장전된 길이 10mm인 우라늄소결체, 우라늄 소결체가 봉내부에서 움직이지 못하도록 적절한 하중을 가하는 코일 스프링, 그리고 피복관 양쪽을 막는 봉단마개로 구성된다. 하나의 핵연료집합체에는 보통 8개 ~ 11개의 지지격자가 사용된다. 하나의 지지격자에는 한변의 길이가 약 12.7 mm인 작은 공간(cell)이 적게는 196개, 많게는 289개 존재한다. 이러한 작은 공간에 스프링과 딤플이라는 돌출부가 만들어 지는데 핵연료봉은 그것들 사이에 끼워져 고정된다.

핵연료봉의 피복관은 핵분열로 생성되는 방사능 물질이 외부로 누출되는 것을 막는 일차 차폐재의 역할을 담당하기 때문에 원자로내의 가혹한 환경조건, 즉 300 °C가 넘는 온도, 혹독한 방사능 조건, 대기압의 150배에 이르는 압력, 그리고 6m/s 로 흐르는 물의 동압력, 등을 극복하고 수명기간(대략 3년)동안 건전성을 유지할 수 있어야 한다. 이러한 가혹한 운전 조건은 최근들어 더욱 악화되는 방향으로 나가고 있다. 이렇게 환경을 악화시키는 인자로 장주기운전, 저누출장전모형(low leakage loading pattern) 그리고 지지격자의 혼합날개 등을 꼽을 수 있다. 핵연료봉에 손상을 입히는 직접적인 원인으로 이물질에 의한 프레팅마멸과 냉각재의 유동에 기인한 프레팅마멸, 그리고 알수없는 원인 등을 들고 있다. 이러한 손상원인 중 다수를 점하는 프레팅 마멸에 의한 손상은 지지격자를 개량하는 방법으로 완화할 수 있다고 믿기 때문에 이에 대한 여러가지 방법이 제기 되고 있다. 이물질에 의한 손상확률은 이물질여과 기능을 갖는 지지격자를 최하단에 배치하는 방법으로 줄일 수 있다. ABB-CE사의 GUARDIAN 지지격자와 Westinghouse의 PROTECTIVE 지지격자는 이러한 목적으로 상용화된 지지격자라고 할 수 있겠다. 유체유발진동에 의한 프레팅마멸 현상은 그 원인이 밝혀지지 않았기 때문에 해결책을 명확히 제시하기 어렵다. 다만, 지지격자 스프링과 핵연료봉 사이에 틈이 발생하게 되면 마멸현상이 가속화되어 핵연료봉이 손상되는 것으로 알려져있기 때문에 가능한 추측과 경험을 바탕으로 지지격자 스프링과 핵연료봉 사이에 틈이 발생하지않도록 설계하고 있다.

이렇게 지지격자는 핵연료 구조부품으로서의 역할이 막중하기 때문에 기타 다른 부품에 비하여 경제적인 파급효과가 크지만 개발에 들어가는 시간과 비용의 투자가 만만하지않다. 지금까지 신형핵연료 지지격자를 개발하면서 당 분야는 개발되는 지지격자의 상대적인 우위비교를 위하여 많은 기계적인 시험을 수행하였다. 이러한 기계적 시험의 일환으로 지지격자로 지지된 연료봉의 진동시험을 수행하였다. 이러한 진동시험으로 지지격자 스프링과 딤플의 설계특성이 연료봉의 진동특성에 많은 영향을 미칠 수 있다는 증거를 얻었다[1 -3]. 이러한 진동시험은 단순히 연료봉을 지지하는 스프링과 딤플에 의한 진동 특성만을 파악하기 위한 것으로 지지격자의 열수력적인 특성, 예를 들어 스프링과 딤플의 수력적인 저항성, 혼합날개에 의한 유동패턴의 변화 및 압력 강하량, 등이 반영된 진동특성을 얻을 수는 없다.

따라서 냉각수와 연료봉이 연성(Coupling)된 진동특성을 얻을 수 있는 시험장치가 필요하다. 이러한 시험장치는 필수적으로 펌프로 물을 순환시키는 Loop 형태가 될 것이므로 유체에 의하여 유발된 진동 특성을 파악하는 목적 외에 일부 열수력 성능을 확인할 수 있도록 다기능성을 갖추고 있어야 한다. 본 보고서는 중장기 과제인 고성능지지격자구조기술개발 과제의 일환으로 원자력연구소내 핵연료시험시설에 구축 중인 핵연료봉과 지지격자가 연계된 유체유발진동특성시험 및 지지격자의 압력강하시험 등을 병행할 수 있는 유동 Loop의 설계사양과 지금까지의 제작 상황 그리고 앞으로의 계획 등에 대하여 기술하고자 한다.

2. 본론

(1) 구축중인 유동 Loop의 성능

구축중인 유동 Loop는 축류유동장에 놓인 단일 연료봉과 연료봉 집합체의 유체유발진동 연구를 수행할 목적으로 웨스팅하우스의 VISTA(Vibration Investigation on Small-Scale Test Assemblies) Loop를 참조하고 지금까지 진동시험을 수행한 모의 핵연료봉의 제원을 고려하여 Test section의 제원, 펌프의 성능 및 저수조의 크기 등을 결정하였다. 설계를 시작하기 전에 결정된 기본적인 사항은 다음과 같다.

(가) 대기압 비등점이하 저압상태의 물을 사용한다.

(나) 봉의 길이는 2.2m 이고 5×5 다발의 봉 집합체에 지지격자는 5개 배치한다.

(다) test section은 가시적인 관찰이 가능하도록 아크릴로 제작한다.

(라) 25개의 모의 연료봉 중 2개는 구조를 담당하는 안내관으로 할당하고, 나머지 23개의 연료봉 중 1~3개는 연료봉의 진동을 측정할 수 있도록 계측기를 장착한다.

(마) 길이 방향으로 5개가 배열되는 지지격자 전,후에 압력을 측정할 수 있도록 test section에 측정탭을 마련한다.

대기압 비등점 이하의 물을 사용한다는 것은 설계되는 Loop가 대기에 노출되는 Open Loop 이라는 의미를 갖는데 이런 Loop은 경제적인 측면과 기술적인 측면에서 제작을 용이하게 한다.

Test section의 길이는 지금까지 지지격자로 지지된 연료봉의 진동시험에 사용한 모의 연료봉의 길이를 수용할 수 있도록 함으로서 지금까지 연료봉 진동시험에 사용한 모의 연료봉과 지지격자의 제원 및 진동시험결과 등과 연계성을 가질 수 있도록 하였다. 구성되는 Loop의 설계특성은 다음의 표 1과 같다.

표 1 Loop 의 설계특성 비교

설계특성	FIVPET(원자력연구소)	VISTA(웨스팅하우스)
유량 (gpm)	~ 950 (600:최적)	100 ~ 400
유속 (m/s)	3.4 ~ 10	2.4 ~ 7.6
압력 (bar)	10	4.1 (60 psig)
온도 (℃)	90	21 ~ 27
펌프 head (m)	80	-
물탱크 용량 (m^3)	5.0	-

(2) 유동 Loop의 설계 현황

원자력연구소에서 구성중인 Loop는 영문으로 FIVPET (Flow-induced Vibration and Pressure Drop Experimental Test) Loop 이라고 명명하였다. 현재 구성 중인 Loop의 개략도를 도시하면 다음의 그림 1과 같다.

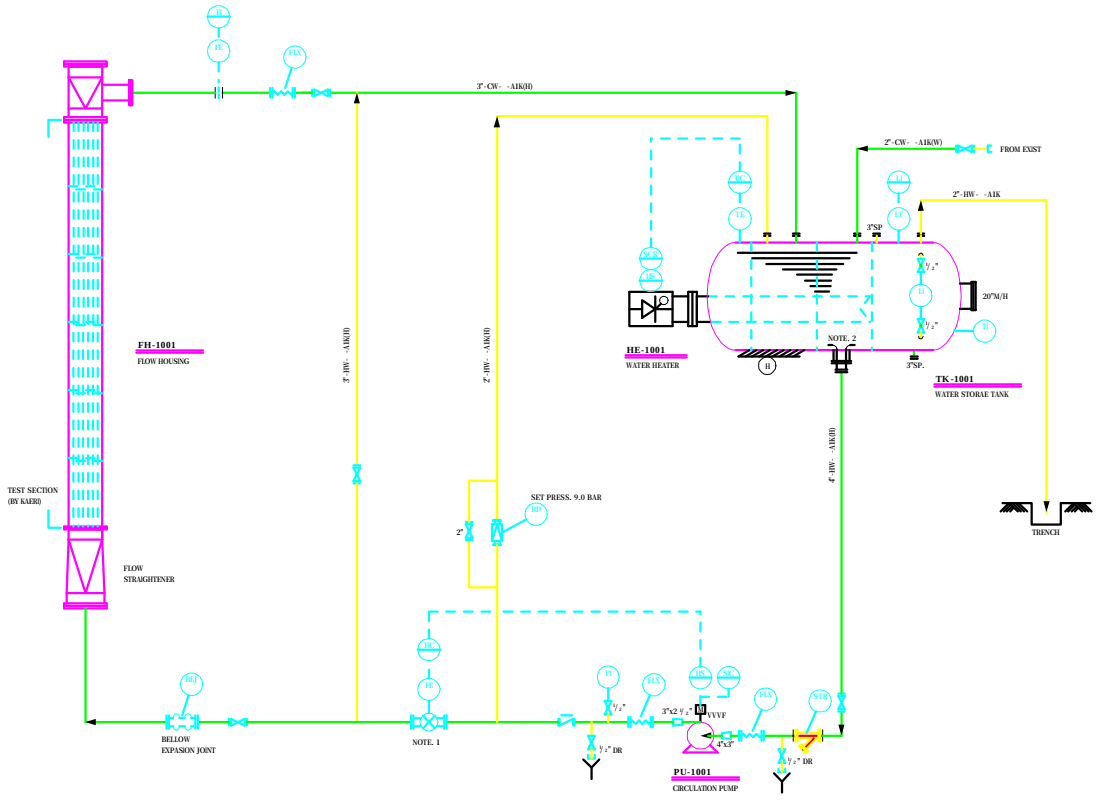


그림 1 FIVPET Loop 의 개략도

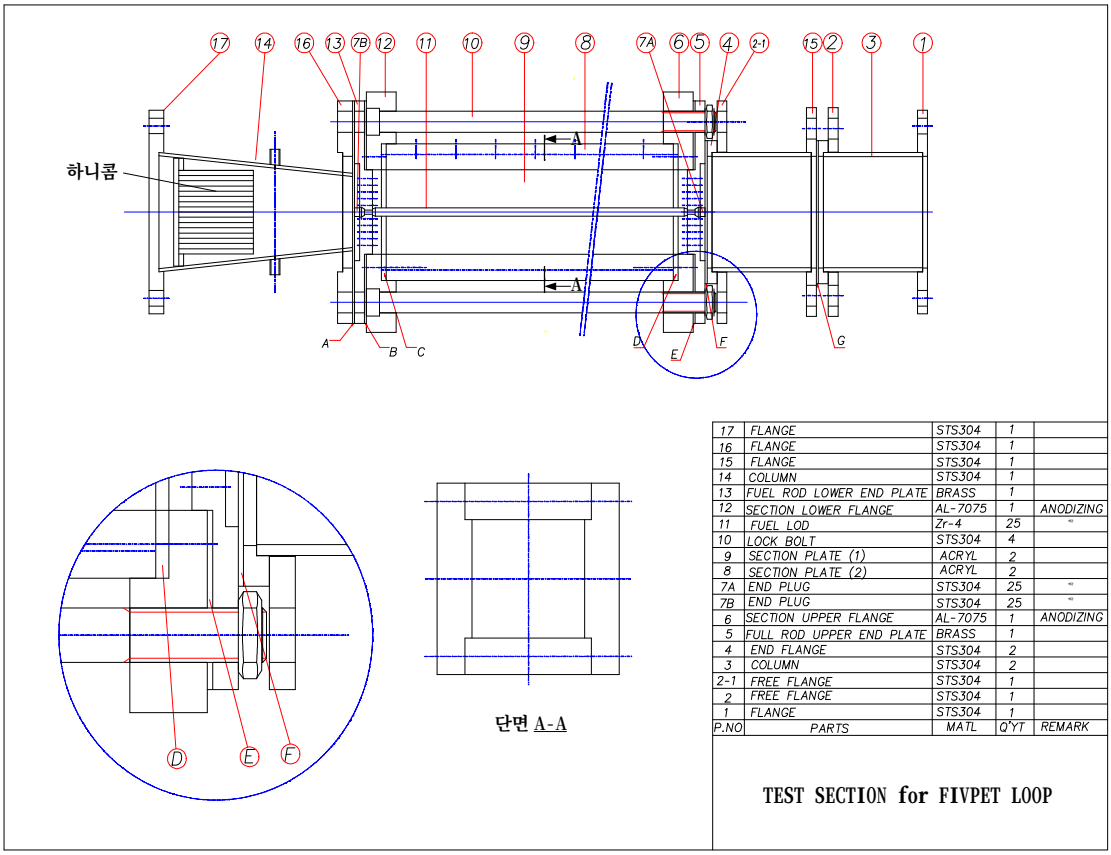
물탱크의 용량은 5 m^3로서 모든 부품을 스테인레스 강으로 제작하였다. 내부에 온도조절이 가능한 heater를 설치하여 순환용수의 온도를 조절할 수 있도록 하였다. 펌프가 작동하게 되면 펌프날개와 순환용수의 마찰에 의하여 용수의 온도가 어느정도 올라가게 되지만 Loop내를 순환하면서 일부열이 외부로 빠져나가기 때문에 순화용수의 온도가 Loop내 위치에 따라 일정하지않게 된다. 따라서 순환용수의 온도를 강제적으로 조절해야 하는데, 웨스팅하우스의 VISTA는 탱크내에 찬물을 열교환기와 같이 순환시켜서 순환수의 온도를 강제로 낮추도록 설계된 반면, 본 Loop는 탱크내에 온도조절 가능한 Heater를 설치하여 용수의 온도를 높이도록 설계한 것이다. 이렇게 한 것은 차거운 2차 순환수 관을 탱크내에 설치하는 것 보다 제작이 용이하기 때문이기도 하고, 가능한 범위에서 온도 효과를 확인할 수 있기를 기대하기 때문이다. 탱크의 용량은 웨스팅하우스의 VISTA보다 크도록 설계하여 탱크내로 회수되는 용수의 섭동이 탱크를 빠져나가 test section으로 들어가는 용수의 유동에 가능한 최소한도로 영향을 주도록하였다. 이러한 회수용수의 섭동의 영향은 탱크내에 설치한 지그재그형의 망을 통과하여 탱크내 출구에 도달하면서 상당히 감소할 것으로 믿고있다.

물탱크에서 나온 순환수는 펌프에 이르게 된다. 설치한 펌프는 원심펌프로서 펌프의

회전수를 조절할 수 있도록 인버터를 장착하였다. 올 초에 있었던 성능시험에서 구매한 펌프는 2.142 m^2/min ~ 3.897m^2/min 유량에서 83.04 m ~ 68.74 m head를 나타내었으며 이 때 펌프의 효율은 53 % ~ 58.6%로 나타났다.

펌프의 토출관에 연결된 주관은 5 인치(125 mm) 직경으로서 test section에 도달하기 전 두 개의 작은 순환관과 연결되는데, 첫 번째 가지관은 설정된 설계압력보다 Loop의 압력이 올라가는 경우 주 관을 보호하기 위한 장치(Rupture disc)가 있는 2 인치 관이며, 두 번째 관은 수동으로 유량을 조절하기 위한 3 인치 직경의 되먹임 관이다. 관내 유량을 측정하기 위한 터빈 타입의 유량계는 두 개의 가지관 사이에 연결된다.

Test section은 내부를 관찰할 수 있도록 투명한 아크릴로 만들어 질 예정이다. 취성이 큰 아크릴로 만들어 지기 때문에 압력에 견딜 수 있도록 특수하게 제작될 예정이다. 하부는 Loop의 원형관과 연결되고 상부는 사각 박스형인 Test section과 연결되기 때문에 원형의 흐름이 박스형으로 부드럽게 변할 수 있도록 천이 구간을 마련하였다. 벌집형의 유동분배기가 끼워지는 곳도 바로 이 구간이다. 시험에 사용될 5×5 부분 핵연료집합체는 두개의 안내관이 Test section의 상부와 하부에 나사로 고정되도록 설계되었다. 사용될 부분 핵연료집합체는 17×17 경수로핵연료집합체와 길이를 제외하고 동일한 제원을 갖는다. 다음의 그림 2 는 설계가 완성된 Test section의 전체 조립도이고, 그림 3은 5×5 부분 핵연료집합체의 3차원 모델이다.



P.NO	PARTS	MATL	Q'YT	REMARK
17	FLANGE	STS304	1	
16	FLANGE	STS304	1	
15	FLANGE	STS304	1	
14	COLUMN	STS304	1	
13	FUEL ROD LOWER END PLATE	BRASS	1	
12	SECTION LOWER FLANGE	AL-7075	1	ANODIZING
11	FUEL LOD	Zr-4	25	"
10	LOCK BOLT	STS304	4	
9	SECTION PLATE (1)	ACRYL	2	
8	SECTION PLATE (2)	ACRYL	2	
7A	END PLUG	STS304	25	"
7B	END PLUG	STS304	25	"
6	SECTION UPPER FLANGE	AL-7075	1	ANODIZING
5	FULL ROD UPPER END PLATE	BRASS	1	
4	END FLANGE	STS304	2	
3	COLUMN	STS304	2	
2-1	FREE FLANGE	STS304	1	
2	FREE FLANGE	STS304	1	
1	FLANGE	STS304	1	

TEST SECTION for FIVPET LOOP

그림 2 Test Section 의 전체 조립도면

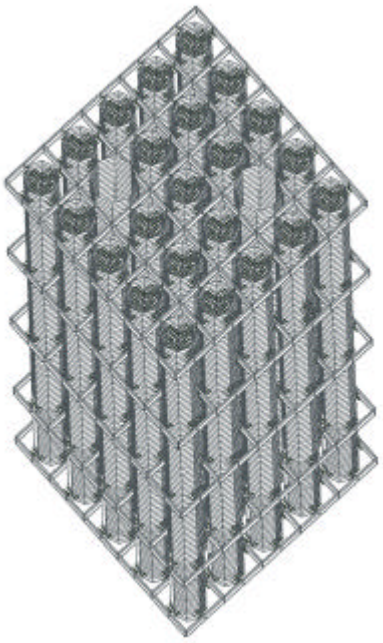


그림 3 부분 핵연료집합체

Test section에는 지지격자 위치의 상,하 각 2 곳에 압력계가 연결될 수 있도록 탭을 만들어 놓아서 진동시험과 별개로 지지격자의 수력적 특성시험을 수행할 수 있도록 하였다.

그림 3에 도시된 부분 핵연료집합체는 사전 제작 준비단계의 일환으로 안내관의 개수와 위치에 따른 진동특성을 파악하기 위하여 유한요소해석이 수행된 바 있고[4] 해석결과에 따라 안내관의 위치와 개수가 결정되었으며 결정된대로 실제 부분 핵연료집합체가 제작될 예정이다. 부분핵연료집합체는 원자력연료 주식회사에서 제작될 예정이며 유동시험 Loop에 장전되기 전 진동시험이 수행될 예정이다.

Test section의 상부는 Loop와 체결과 분리가 용이하도록 설계되었다. Loop의 상부는 test section이 체결 및 분리될 때 일정한 거리만큼 들려 올려지도록 Flexible을 설치하였다. Flexible을 지난 직 후 주관에는 오리피스형의 유량계가 설치되어 test section을 지난 용수의 유량을 측정하게된다. 유량계를 지난 회수관은 되먹임 가지관과 만난 후 저수조로 연결된다.

(3) 유동 Loop의 제작 현황 및 향후 계획

유동 Loop가 설치될 원자력연구소내 핵연료기술개발연구동은 6월말 완공 예정이었으나, 완공일이 다소 지연되고 있다. 2002년 8월 말 현재 저수조 및 펌프와 주 배관은 설치가 완료되었으며 현재 펌프의 인버터와 순환수의 유량, 그리고 저수조의 온도 등을 표시할 팬널의 설치 공사가 진행 중이다. 한편 test section은 수차례의 설계 변경이 이루어진 후 최종적으로 설계가 확정되어 제작 중에 있으며, 모의 연료봉에 들어가는 특수 가속도 센서의 구매도 완료된 상태이다. 부분 핵연료집합체는 한국원자력연료주식회사에서 제작될 예정이며, 부분 핵연료집합체에 끼워질 지지격자는 현재 인천의 모 회사에서 제작 중에 있다. 다음의 그림 4는 현재 설치된 펌프의 모습을 담은 사진이다.

그림 4 펌프와 주 배관의 연결 모습

전체적인 공정을 종합해 볼 때 10월 말경이면 Loop 자체의 성능시험을 수행할 수 있고, 부분핵연료 집합체는 공기중에서 진동 시험을

수행한 후인 11월 중순 이후에 Loop내에 장전될 수 있을 것으로 보이기 때문에 본격적인 Loop의 성능 시험은 그 이후가 되어야 가능할 것으로 판단된다.

3. 결론

지금까지 신형핵연료기술개발 대과제의 세부과제로 수행되고 있는 고성능지지격자 구조기술개발과제에서 부분 핵연료집합체의 유체유발진동시험 및 부분지지격자체의 압력강하량을 측정할 수 있는 시험 Loop인 FIVPET (Flow-induced vibration and pressure drop experiment test)의 설계특성과 시험조건, 그리고 구축현황을 소개하였다. 구축중인 Loop은 웨스팅하우스의 VISTA를 참조로 하였으나, 가능한 그보다 나은 시험조건을 구현할 수 있도록 노력하였다. 본 시험시설은 11월 즈음에 Loop 자체의 성능시험을 거친 후 보완작업을 마치면 부분핵연료집합체 및 지지격자의 성능시험에 본격적으로 투입될 수 있을 것으로 보인다. 현재 목표로 하는 시험기술을 확보한 후에는 장시간 내구성시험도 수행할 수 있도록 시험시설 및 측정장비를 보완할 예정이다. 이렇게 되면 경수로핵연료의 지지격자와 연계되는 작은 규모의 시험시설은 대부분 확보되기 때문에 향후 관련 연구 및 개발에 긍정적인 영향을 끼칠 것이며, 원자력 산업계의 관련 기술도 한단계 도약하는 계기가 될것으로 판단된다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었음

참고 문헌

[1] H.S. Kang, et. al., “Verification Test and Model Updating for a Nuclear Fuel Rod with Its Supporting Structure”, J. of the Korea Nuclear Society, Vol. 33, pp. 73~82, 2001.

[2] 한국원자력연구소 보고서 번호 KAERI/TR-2063/2002, “최적화 H형 및 새 이중판 지지격자로 지지된 모의 연료봉의 진동해석,” 2002년 3월.

[3] H.S.Kang, et. al., “A Study on the Vibrational Behavior of the Fuel Rods Continuously Supported by a Rotary and Bent Spring System, “Korea Sound and Vibration Society, pp. 454~460, May 1998.

[4] 강흥석외 4인, “5×5 부분 핵연료집합체의 유한요소 진동해석,” 2002년 춘계원자력학회, 조선대학교, 2002년 5월 23 ~ 24,