



KR0000273

KAERI/TR-1594/2000

**하나로 핵연료집합체
마모 감소를 위한 설계 개선**

**Design Improvement for Fretting-Wear Reduction
of HANARO Fuel Assembly**

2000. 6

한국원자력연구소

Please be aware that all of the Missing Pages in this document were originally blank pages

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2000년도 “연구로계통관리”과제의 기술보고서로 제출합니다.

2000 년 6 월

주저자 : 조 영 갑

공저자 : 채 희 택

류 정 수

김 학 노

요 약

1996년 12월 원자로에서 인출한 핵연료집합체에 대한 육안검사 과정에서, 다수의 핵연료집합체에서 기계적인 손상을 입은 부품들이 발견되었다. 주된 손상은 유동관 내에서 유체유발진동(FIV, Flow Induced Vibration)으로 인한 간격판과 봉단접합판의 마모 현상이었다.

원자로는 방사화되어 있고, 핵연료집합체 진동의 유발인자를 완전히 없애기 위한 계통의 변경은 현실적으로 매우 어렵기 때문에 핵연료 설계변경에 초점이 맞추어져 왔다. 따라서, 육안검사 결과에 대한 평가를 바탕으로 마모를 줄일 수 있는 다양한 설계 변경 방안들이 도출되었으며, 설계 변경된 부품의 성능시험, AECL에 있는 단일유로 시험시설에서의 핵연료집합체의 진동 시험과 내구성 시험 등을 거쳐 설계 변경 방안의 타당성이 확인되었다. 1차 설계 변경 내용에 따라 제작된 핵연료집합체를 노심에 장전한 후, 계속된 육안검사 결과를 바탕으로 추가적인 설계 변경이 진행되었다.

1차 설계 변경 효과로서, 36봉 핵연료집합체의 경우는 주요 마모 부위인 간격판의 마모가 현저하게 감소되어 마모손상까지의 기간이 약 60% 연장되었다. 18봉 핵연료집합체의 경우는 현재까지 손상된 개량 핵연료집합체가 2개뿐이므로 통계적 자료가 부족하여 마모수명 연장 여부를 판단할 수 없으나, 주요 마모 부위인 하부 봉단접합판 slot의 마모율은 절반 정도로 줄어들었다. 2차 설계 변경은 핵연료집합체의 마모 취약 부위인 간격판 모서리와 하부 봉단접합판을 강화하는 방향으로 이루어져 마모 설계수명에 대한 요구 조건을 만족시킬 것으로 기대된다.

이 보고서에서는 마모 현상을 줄이기 위하여 수행한 하나로 핵연료집합체에 대한 설계 변경과 성능 시험에 대해 기술하고, 노심에 장전된 핵연료집합체의 육안 검사 결과를 바탕으로 기존 핵연료집합체와 설계 변경 핵연료집합체의 마모 현상에 대한 설계 개선 효과를 정량적으로 비교 평가하였다.

Abstract

In the course of the visual inspection of the fuel assemblies un-loaded from the reactor core in December 1996, it was observed that many of fuel assemblies had mechanical damages on some components. The major damage was the fretting-wear on spacer plates and endplates due to the flow induced vibration of the fuel assembly in the flow tube.

Since the reactor is activated and the system modification for complete removal of the driving factors of the vibration of fuel assemblies is practically very difficult, the focus has been on the design change of the fuel assemblies. Consequently, various design changes were proposed to strengthen the wear resistance of the components based on the evaluation of the visual inspection results. The validity of the proposals was verified through the performance tests for the modified components, and the vibration test and endurance test for the fuel assemblies using the single-channel test rig(SCTR) in AECL. The subsequent design changes were additionally proposed based on the visual inspections for the fuel assemblies that had been fabricated according to the first design change and loaded in the core.

As the effects of the first design change, the fretting-wear of spacer plates was remarkably reduced and the period until fretting-wear damage was extended by 60% for the first modified 36-rod fuel assembly. It is too early to say the endurance life time for the first modified 18-rod fuel assembly because of insufficient statistical data of only two bundles damaged, but the fretting-wear at the bottom endplate slot was reduced to about 50%. The second modified fuel assemblies, that were not loaded into the core yet, are expected to meet the design requirements for the core residence time due to strengthening the weak parts from the fretting-wear point of view.

This report describes design changes and tests for fuel assemblies of HANARO to reduce the fretting-wear, and estimates the effects of design improvement quantitatively compared with the original fuel assemblies through the visual inspections of the fuel assemblies loaded in the reactor.

목 차

제출문	i
요약	ii
Abstract	iii
목차	iv
표 목차	v
그림 목차	vi
1. 서론	1
2. 핵연료집합체 설계 변경 및 성능 시험	2
2.1 하나로 핵연료집합체	2
2.2 핵연료집합체의 주요 기계적 손상	2
2.2.1 36봉 핵연료집합체	2
2.2.2 18봉 핵연료집합체	3
2.3 1차 설계 변경	3
2.3.1 36봉 핵연료집합체	3
2.3.2 18봉 핵연료집합체	6
2.4 성능 시험	8
2.4.1 내구성 시험	8
2.4.2 진동 시험	9
2.5 2차 설계 변경	11
2.5.1 36봉 핵연료집합체	11
2.5.2 18봉 핵연료집합체	13
3.0 설계 변경 효과	15
3.1 36봉 핵연료집합체	15
3.2 18봉 개량 핵연료집합체	15
4. 결론	17
5. 참고 문헌	18
표	19
그림	25
부록: 36봉 핵연료집합체의 육각 모서리봉 이동에 따른 열적 여유도 영향	42

표 목 차

표 1. 36봉/18봉 핵연료집합체에 공통 적용되는 설계 변경 내용	19
표 2. 36봉 핵연료집합체에만 적용되는 설계 변경 내용	20
표 3. 18봉 핵연료집합체에만 적용되는 설계 변경 내용	21
표 4. 유량변동에 따른 개량 36봉 핵연료집합체 결쇠머리의 지배주파수 및 변위 RMS 값	22
표 5. 유량변동에 따른 개량 18봉 핵연료집합체 결쇠머리의 지배주파수 및 변위 RMS 값	22
표 6. 핵연료집합체 설계도면 개정 현황	23
표 7. 36봉 핵연료집합체의 간격판 마모 손상에 대한 설계 변경 효과	24
표 8. 18봉 핵연료집합체의 하부봉단접합판 slot의 마모 손상에 대한 설계 변경 효과	24

그림 목 차

그림 1. 개량 36봉 핵연료집합체	25
그림 2. 개량 18봉 핵연료집합체	26
그림 3. 36봉 핵연료집합체의 대표적인 마모 손상 부위	27
그림 4. 18봉 핵연료집합체의 대표적인 마모 손상 부위	28
그림 5. 핵연료집합체의 기타 손상	29
그림 6. 설계 변경 전 36봉 핵연료집합체 상부	30
그림 7. 36봉 핵연료집합체 상부 - 1차 설계 변경	30
그림 8. 설계 변경 전 36봉 핵연료집합체 하부	30
그림 9. 36봉 핵연료집합체 하부 - 1차 설계 변경	31
그림 10. 중앙지지봉 하단부	32
그림 11. 하부 유도체(Bottom Guide)	32
그림 12. 36봉 핵연료집합체 간격판 모서리 - 1차 설계 변경	33
그림 13. 설계 변경 전 18봉 핵연료집합체 상부	34
그림 14. 18봉 핵연료집합체 상부 - 1차 설계 변경	34
그림 15. 설계 변경 전 18봉 핵연료집합체 하부	35
그림 16. 18봉 핵연료집합체 하부 - 1차 설계 변경	35
그림 17. 18봉 핵연료집합체 간격판과 간격판의 조립개념 설계 변경	36
그림 18. 36봉 핵연료집합체 상부 - 2차 설계 변경	37
그림 19. 36봉 핵연료집합체 하부 - 2차 설계 변경	37
그림 20. 36봉 핵연료집합체의 Guide Arm과 BEP Slot 결합 방법	38
그림 21. 36봉 핵연료집합체 간격판 모서리 - 2차 설계 변경	39
그림 22. 18봉 핵연료집합체 상부 - 2차 설계 변경	40
그림 23. 18봉 핵연료집합체 하부 - 2차 설계 변경	40
그림 24. 18봉 핵연료집합체 하부봉단접합판(BEP)의 설계 변경	41
그림 25. 18봉 핵연료집합체의 Guide Arm과 BEP Slot 결합 방법	41

1. 서론

1996년 12월, 3주기 노심의 핵연료집합체에 대해 육안 검사를 실시한 결과, 다수의 핵연료가 기계적인 손상을 입은 것이 발견되었다. 손상 부위는 주로 간격판, 봉단접합판 및 중앙지지봉 등으로 핵연료집합체를 구성하는 부품들이 유동관 내에서 유체유발진동(FIV, Flow Induced Vibration)에 의해 마모로 손상을 입은 것으로 평가되었다[1,2]. 평가 결과를 바탕으로 핵연료집합체 구성 부품의 마모를 완화시킬 수 있는 방향으로 핵연료 제작사인 AECL과 공동으로 1차 설계 변경 방안을 도출하였으며, 진동 시험과 내구성 시험을 거쳐 설계 변경 내용을 확정하였다[3,4]. 1차 설계 변경에서는 유동관 안에서 핵연료집합체의 진동을 억제하고 봉단접합판과 간격판의 내마모성을 키우도록 설계 변경이 이루어졌다. 1차 설계 개량된 핵연료집합체의 도입에 따라, 36봉 핵연료집합체는 6주기 8차 핵연료집합체 검사(1998. 6. 15)부터, 18봉 핵연료집합체는 6주기 19차 핵연료집합체 검사(1999. 4. 19)부터 손상 핵연료집합체 대신에 교체 장전하였다. 이후 개량 핵연료집합체에 대한 육안 검사 결과를 바탕으로 2차 설계 변경안을 도출하였다. 2차 설계 변경은 핵연료집합체의 마모 손상 취약부 즉, 36봉 핵연료집합체의 경우 간격판 모서리와 18봉 핵연료집합체의 경우 하부봉단접합판 guide arm slot의 보강에 중점을 두었다. 2차 설계 변경 내용이 반영 제작된 36봉 핵연료집합체는 2000년 6월에 하나로에 입고되었으며, 설계개선 효과를 보다 우선적으로 알기 위하여 노심에 새 핵연료를 장전할 때 2차 설계 변경된 핵연료집합체가 장전될 예정이다. 그리고, 2차 설계 변경 내용이 반영된 18봉 핵연료집합체는 2000년 후반에 제작될 예정이다.

이 보고서에서는 그 동안 수행되었던 핵연료 설계 변경 배경과 내용을 기술하고, 현재까지 핵연료 육안 검사를 통해 나타난 설계 변경 효과를 기술하였다. 보고서의 2장에서는 핵연료집합체 설계 변경 및 성능 시험에 대하여 기술하고, 3장에서는 설계 변경 효과에 대하여, 4장에서는 결론을 기술하였다.

2. 핵연료집합체 설계 변경 및 성능 시험

2.1 하나로 핵연료집합체

하나로 핵연료집합체에는 36봉 핵연료집합체와 18봉 핵연료집합체가 있으며 개략적인 형상은 각각 그림 1 및 그림 2와 같다. 36봉 핵연료집합체는 노심의 육각형 유동관 내부에 장전되고, 18봉 핵연료집합체는 원통형 유동관 내부와 외부 노심의 원통형 유동관 내부에 장전된다. 핵연료집합체는 핵연료봉(fuel rod), 상부봉단접합판(TEP, Top Endplate), 하부봉단접합판(BEP, Bottom Endplate), 중앙지지봉(central rod), 3개의 간격판(spacer plate), 4개의 간격관(spacer tube), 상부유도체(top guide), 하부유도체(bottom guide), 스프링(spring), 걸쇠머리(grapple head) 및 걸쇠머리 잠금쇠(grapple head lock) 등으로 구성되어 있다.

핵연료봉 사이의 간격은 집합체 상·하부에 각각 위치한 봉단접합판 및 3개의 간격판에 의해 유지되며, 이 봉단접합판에 의해 핵연료봉이 36봉 또는 18봉 핵연료집합체 배열 형태를 이루고 있다. 핵연료봉의 하부봉단마개(bottom end plug)는 하부봉단접합판에 움직이지 않도록 고정되어 있으나, 상부봉단마개(top end plug)는 핵연료봉 상호간의 연소도 차이에 따른 축방향 팽창 차이를 고려하여 각 핵연료봉이 상부봉단접합판에 미끄러질 수 있도록 끼워져 있다. 36봉 핵연료집합체는 봉과 봉사이의 간격이 12 mm인 삼각형 배열을 하고 있다. 18봉 핵연료집합체의 경우에는 집합체가 원형 배열을 이루고 그 외 다른 기능은 36봉 핵연료집합체와 거의 동일하다. 핵연료집합체 하단의 중앙지지봉 끝부분(rod tip)은 유동관 하부에 있는 잠금장치(spider)와 결합된다.

2.2 핵연료집합체의 주요 기계적 손상

2.2.1 36봉 핵연료집합체

핵연료 육안 검사를 통하여 발견된 36봉 핵연료집합체의 주요 기계적인 손상은 다음과 같으며 그림 3과 그림 5에 도시되어 있다.

- 간격판 마모 및 절단
- 상·하부봉단접합판의 마모
- 하부봉단접합판의 guide arm slot 마모 확장
- 봉단마개 부분의 팽윤

- Guide arm tip 마모
- Grapple head lock과 top guide 사이의 gap
- Top spring 절단

2.2.2 18봉 핵연료집합체

핵연료 육안 검사를 통하여 발견된 18봉 핵연료집합체의 주요 기계적인 손상은 다음과 같으며 그림 4와 그림 5에 도시되어 있다.

- 하부봉단접합판 guide arm slot의 확장 및 경계층 절단
- 간격판 마모, 경사 및 핵연료봉 fin 깎임
- 상부봉단마개의 봉단접합판 위로 돌출
- 봉단마개 부분의 팽윤
- 봉단접합판의 마모
- Grapple head lock과 top guide 사이의 gap
- Top guide spring 휨

2.3 1차 설계 변경

2.3.1 36봉 핵연료집합체

현재까지 핵연료 육안검사를 통해 밝혀진 36봉 핵연료집합체의 주된 손상 원인은 간격판의 육각 모서리가 유동관과 접촉하여 마모로 절단되는 것이다. 이 점을 해결하기 위하여 집합체를 구성하는 여러 부품들에 대한 상세 설계 내용을 변경하였다. 36봉 핵연료집합체의 설계 변경 내용들은 표 1과 표 2에서 기존의 핵연료 설계 내용과 비교 요약되어 있으며, 중요한 설계 변경 내용을 아래에 기술한다.

2.3.1.1 봉단접합판

봉단접합판은 다른 집합체 부품과 함께 핵연료봉들을 지지하여 집합체의 골격을 유지시킨다. 36봉 핵연료집합체 봉단접합판의 두께는 8 mm이고, 재료는 6061-T6형 알루미늄 (ASTM B-209-88)이다. 36봉 핵연료집합체의 봉단접합판은 면과 면사이의 거리가 73.8 mm인 육각형 모양이다. 핵연료봉의 하부봉단마개는

하부봉단접합관에 고정되며, 상부봉단접합관은 출력분포의 차이에 따라 수반되는 비균질 축방향 성장에 기인하는 차등 열팽창을 허용하기 위해 상부봉단마개와 용접되지 않는다.

설계 변경에서는 핵연료봉의 하부봉단마개와 하부봉단접합관의 결합 방법을 용접에서 기계적인 체결로 변경함으로써 용접열이 식으면서 생기는 하부봉단접합관의 수축 현상을 방지하였다. 상·하부봉단접합관은 핵연료집합체의 진동에 의한 기계적인 마모 현상을 완화시키기 위하여 표면에 산화피막을 입혀 표면강도를 높이고 유동관과의 접촉 면적을 크게 하였다. 또한 핵연료집합체의 장전 방향을 장전시에 수조 위에서 확인할 수 있도록 마모 패드(wear pad)가 위치하는 모서리를 3개에서 4개로 변경하였다. 그림 6, 그림 7, 그림 8 및 그림 9는 설계 변경 전후에 대한 36봉 핵연료집합체의 상부와 하부를 각각 보여주고 있다.

2.3.1.2 중앙지지봉

중앙지지봉은 지르칼로이-4(ASTM B 351-85 Grade R60804) 합금봉으로 만들어진다. 이 봉의 기능은 핵연료봉을 집합체 형태로 구성/유지시키고 핵연료 집합체가 원자로에 장전되거나 저장/취급 중일 때 핵연료집합체를 지지하는 것이다. 중앙지지봉 상단은 결쇠머리와 결합되며, 하단은 하단 잠금쇠 부분(bottom locking section)이 결합된 봉 끝 부분과 결합된다. 이 봉 끝 부분은 핵연료집합체를 고정하기 위하여 유동관 내부에 있는 잠금장치와 결합된다.

핵연료 장전시에 유동관 내부의 잠금장치와 닿아서 손상을 받을 수 있는 가능성을 제거하기 위하여 봉 끝에 있는 날개 하부의 각도를 그림 10과 같이 45°에서 90°로 설계 변경하였고 봉 끝의 구형 모따기를 반경 1 mm에서 반경 2 mm로 변경하였다.

2.3.1.3 하단 잠금쇠 부분

이 부분은 부싱(bushing), 스프링 및 유도체로 이루어져 있다. 스프링 재료는 인코넬(Inconel) X-750(ASTM B166-86 UNS 6690)이며, 유도체와 하부봉단접합관과 결합되는 부싱 사이에 위치한다. 유도체는 지르칼로이-4로 제조되며, 스프링을 지지하는 역할을 한다. 유도체 중심에 용접되는 3개의 guide arm은 핵연료집합체가 유동관 내에 장전될 때 이를 유도하는 역할을 한다. 이러한 guide arm 끝 부분은 하부봉단접합관의 슬롯(slot)과 결합되며, 이로써 유도체와 봉단접합관 사이의 회전운동을 억제한다. 부싱은 지르칼로이-4로 제조되며, 하부봉단접

합관 중앙에 결합되며 스프링과 봉단접합관의 접촉을 방지해 주는 역할을 한다. 하부스프링은 핵연료집합체의 구조적인 틀을 유지시키고 유동관에 장전시 복원력에 의해 집합체를 잡아 준다.

설계 변경에서는 스프링의 강성을 기존의 값보다 두 배로 증가시켜 장전 상태에서 유동관과의 체결력을 크게 하였다. 또한 유동관 하부의 스파이더 핀과 하부유도체의 정렬 상태를 확실히 하기 위하여 그림 11에서 보는 바와 같이 하부유도체의 바닥에 톱니 모양 대신에 알루미늄 링(aluminum seating ring)을 부착하여 장전시에 정렬된 상태로 유동관 spider pin이 알루미늄 링을 파고 들어가서 회전운동을 억제하도록 하였다. 그림 10과 그림 11은 1차 설계 변경 이전과 이후에 대한 36봉 핵연료집합체의 하부 모습을 비교하고 있다.

2.3.1.4 간격판

핵연료봉들 사이에 적절한 간격을 유지시키기 위하여 핵연료집합체에 3개의 간격판이 삽입된다. 간격판은 6061-T6 형 알루미늄으로 제조되며, 육각형에서 마주 보는 면사이의 치수는 73.8 mm, 두께는 5 mm이다. 핵연료봉이 위치할 36개의 구멍 직경은 10.45 mm이며, 각 구멍의 양쪽 끝은 테이퍼(taper)가 있도록 가공되어 있다. 핵연료집합체에서 간격판 사이를 일정하게 유지하기 위하여 중앙 지지봉에 4개의 간격판(spacer tube)이 있다.

핵연료집합체가 노심에 장전된 상태에서 유체유발진동에 의해 간격판 모서리가 마모로 절단됨에 따라 이를 완화시키기 위하여 그림 12와 같이 마모 패드(wear pad)의 위쪽 모따기를 삭제함으로써 마모 패드와 유동관과의 접촉 면적을 증가시켰다. 또한 측면 중앙에 있는 cantilever arm 내부에 있는 물구멍의 크기를 줄여 기계적 강도를 높였다.

2.3.1.5 결쇠머리 및 결쇠머리 잠금쇠

결쇠머리 및 결쇠머리 잠금쇠는 지르칼로이-4로 만들어지고 결쇠머리는 중앙지지봉의 상단과 결합되며 결쇠머리 상부는 핵연료집합체 취급장치와 부합되도록 설계되어 있다. 이와 관련하여, 핵연료 취급공구의 설계 변경의 유동성에 대비하여 결쇠머리에 반경 방향으로 구멍을 마련하였다.

상부 스프링은 결쇠머리 잠금쇠 아래에 있는 상부유도체에 접합되어 있으며 유동관과 접촉하여 핵연료집합체의 진동을 완화시켜 준다. 상부 스프링의 수를 그림 6과 그림 7에서 보는 바와 같이 기존의 2개에서 3개로 늘려 120도 간격으

로 배치함으로써 유동관 안에서의 핵연료집합체의 균형도를 증가시켰다. 또한, 상부 스프링이 핵연료봉의 상단 마개와 결합되어 있었던 것을 핵연료봉과의 간섭 현상을 배제하기 위하여 상부 유도체에 연결되도록 하였다.

2.3.2 18봉 핵연료집합체

현재까지의 핵연료 육안검사를 통해 밝혀진 18봉 핵연료집합체의 주된 손상 원인은 하부유도체의 guide arm에 의해 하부봉단접합판 슬롯(slot)의 왼쪽 경계층이 마모로 떨어져 나가는 것이었다. 이와 같은 현상은 유동관과 핵연료가 원통형이므로 핵연료집합체가 장전된 상태에서 원주 방향의 회전력을 받으면 힘이 하부봉단접합판 슬롯에 집중되기 때문인 것으로 판단하였다. 이 점을 해결하기 위하여 하부봉단접합판의 형상을 변경시키고 핵연료집합체가 뒤틀림에 대해 견고하도록 간격판, 간격판 및 봉단접합판을 일체형으로 결합하였다. 18봉 핵연료집합체의 설계 변경 내용들은 표 1과 표 3에서 기존의 핵연료 설계 내용과 비교 요약되어 있으며, 중요한 설계 변경 내용을 아래에 기술한다.

2.3.2.1 봉단접합판

18봉 핵연료집합체 봉단접합판은 직경이 59.4 mm인 원형이며, 두께 및 재료는 36봉 핵연료집합체 봉단접합판과 동일하고, 18개의 봉단마개와 결합되는 지름 5 mm의 구멍 18개가 이 두개의 동심원상에 일정한 간격으로 배열되어 있다.

설계 변경에서는 36봉 핵연료집합체와 같이 핵연료봉의 하부봉단마개와 하부봉단접합판의 결합 방법을 용접에서 기계적인 체결로 변경함으로써 용접열이 식으면서 생기는 하부봉단접합판의 수축 현상을 방지하였다. 상 하부봉단접합판은 핵연료집합체의 진동에 의한 기계적인 마모 현상을 완화시키기 위하여 표면에 산화 피막을 입혀 강도를 높이고 유동관과의 접촉 면적을 크게 하였다. 또한 마모 패드(wear pad)가 하부유도체의 guide arm에 의해 깎여 나가는 현상을 방지하기 위하여 guide arm이 마모 패드의 중간에 위치하도록 하였다. 그림 13, 그림 14, 그림 15 및 그림 16은 설계 변경 전후에 대한 18봉 핵연료집합체의 상부와 하부를 각각 보여주고 있다.

2.3.2.2 중앙지지봉

36봉 핵연료집합체와 같이 핵연료 장전시에 유동관 내부의 잠금장치와

닿아서 손상을 받을 수 있는 가능성을 제거하기 위하여 봉 끝에 있는 날개 하부의 각도를 그림 10과 같이 45° 에서 90° 로 설계 변경하였고 봉 끝의 구형 모따기를 반경 1 mm에서 반경 2 mm로 변경하였다.

2.3.2.3 하단 잠금쇠 부분

하부스프링의 강성을 기존의 값보다 두 배로 증가시켜 장전 상태에서 유동관과의 체결력을 크게 하였다. 하부유도체 중심에 용접되는 3개의 guide arm은 핵연료집합체가 유동관 내에 장전될 때 이를 유도하는 역할을 한다. 이러한 guide arm 끝 부분은 봉단접합판의 슬롯과 틈이 없이 결합되도록 하였으며, 이로써 유도체와 봉단접합판 사이의 회전운동을 억제한다. 36봉 핵연료집합체와는 달리 18봉 핵연료집합체는 유동관 하부의 스파이더 핀과 하부 유도체의 정렬이 문제가 되지 않았으므로 그림 15와 그림 16에서 보는 바와 같이 틈니 형태를 유지하고 있다.

2.3.2.4 간격판

핵연료집합체에서는 간격판 사이를 일정하게 유지하기 위하여 중앙지지봉에 4개의 간격판이 있다. 36봉 핵연료집합체와는 달리 18봉 핵연료집합체 전체가 원형 유동관 내부에서 비틀림이 생길 수 있고 이것이 기존 핵연료의 마모현상의 한 원인이었다. 기존의 핵연료집합체에서는 그림 17의 설계 변경 전에서 보는 바와 같이, 상부봉단접합판(TEP), 상부부싱(top bushing), 상부간격판(TSP, Top Spacer Plate), 중간간격판(MSP, Middle Spacer Plate), 하부간격판(BSP, Bottom Spacer Plate), 하부부싱(bottom bushing), 하부봉단접합판(BEP) 및 4개의 간격판이 각각 독립적으로 움직일 수 있었다. 개량된 18봉 핵연료집합체에서는 집합체 전체의 비틀림 강성을 증가시키기 위하여 그림 17의 1차 설계 변경에서 보는 바와 같이 간격판과 간격판을 서로 억지끼워맞춤(interference fit)으로 결합하였다. 봉단접합판과 연결되는 간격판은 부싱과 억지끼워맞춤으로 결합하고 이 부싱은 봉단접합판과 슬롯 형태로 조립되도록 하여 완전한 일체가 되도록 하였다.

2.3.2.5 결쇠머리 및 결쇠머리 잠금쇠

결쇠머리 및 결쇠머리 잠금쇠는 지르칼로이-4로 만들어지고 결쇠머리는 중앙지지봉의 상단과 결합되며 결쇠머리 상부는 핵연료집합체 취급장치와 부합

되도록 설계되어 있다. 이와 관련하여, 핵연료 취급공구의 설계 변경의 유동성에 대비하여 결쇠머리에 반경 방향으로 구멍을 마련하였다.

결쇠머리 잠금쇠 아래에 있는 상부유도체에는 3개의 상부스프링이 120도 간격으로 접합되어 있으며 스프링들은 유동관과 접촉하여 핵연료집합체의 진동을 완화시켜 준다. 기존 집합체의 경우에 그림 13과 같이 3개의 상부스프링이 핵연료봉의 상단 마개와 결합되어 있었던 것을 그림 14와 같이 상부유도체에 연결되도록 하였다. 18봉 핵연료집합체의 경우 결쇠머리 잠금쇠와 상부유도체 사이에 재질이 스테인레스 스틸로 된 thrust bearing을 삽입하였다. 이 베어링은 핵연료 집합체를 노심에 장전 인출하는 과정에서 잠금쇠와 상부유도체 사이의 회전 마찰력을 감소시켜 집합체의 뒤틀림 현상을 방지하기 위하여 추가하였다.

2.4 성능 시험

2.4.1 내구성 시험

2.4.1.1 36봉 핵연료집합체[5]

내구성시험은 설계유량(19.6 kg/s)의 110%인 유량과 설계 압력강하 조건에서 가능한 한 하나로 노심의 수력학적 조건을 모사시킨 AECL의 단일유로 시험시설(SCTR : Single Channel Test Rig)을 이용하여 수행되었다. SCTR의 구조는 실제 원자로의 하부 그리드 구조와 동일하고, 유동관도 실제 유동관과 구조와 재질이 동일하였다.

내구성시험 전에 핵연료를 구성하고 있는 부품들의 표면에 있는 흠집(scratch)을 기록하였다. 개량 36봉 핵연료집합체에 대해서는 40일간 내구성시험이 진행되었다. 이 때, 24시간마다 진동 폭을 관찰하였고 내구성시험 시작 후 9일, 15일, 22일, 29일 및 40일에 시험설비를 해체하여 마모(wear)에 대한 육안검사, 사진기록 및 마모검사를 수행하였다. 육안검사는 특히 각 부품들이 접촉되어 마모가 발생할 것으로 예상되는 부분에 유의하여 수행되었으며, 유동관 및 유동관 편 내부의 검사는 보어스코우프(bore scope)를 사용하여 수행하였다. 육안검사후 마모검사는 3개의 간격판, 2개의 봉단접합판 및 하부유도체 guide arm 등에 대하여 수행되었다.

가장 큰 마모현상은 하부봉단접합판에서 발생하였으나 간격판이 더 취약하므로 대표되는 하부 간격판에 대하여 마모 손상을 평가가 집중적으로 수행되었다. 허용 마모기준으로는 360일 운전후 마모로 인하여 제거된 깊이가 봉단접합판과

간격판 중에 가장 얇은 곳의 두께(0.62 mm)의 3/4(0.46 mm)를 초과해서는 안 되는 기준을 적용하였다. 내구성 시험후 매우 보수적인 마모 손상을 평가를 수행하여 360일 운전후 예측된 간격판의 마모 깊이는 0.27 mm로서, 가장 얇은 두께의 3/4(0.46 mm)보다 작아 허용기준을 만족하였으므로, 개량 36봉 핵연료집합체가 원자로에서 사용될 때의 마모는 허용기준 내에 있을 것으로 예상되었다.

2.4.1.2 18봉 핵연료집합체[6]

개량 18봉 핵연료집합체의 내구성시험은 설계유량(12.7 kg/s)의 110%인 유량과 설계 압력강하 조건에서 SCTR을 이용하여 완료되었다. SCTR의 구조는 실제 원자로의 하부 그리드 구조와 동일하고, 유동관도 실제 원형 유동관과 구조와 재질이 동일하다.

개량 18봉 핵연료집합체에 대해서도 36봉 핵연료집합체와 같이 40일간 내구성 시험이 진행되었다. 이 때 24시간마다 진동 폭을 관찰하였고 내구성시험 시작 후 10일, 22일, 30일 및 40일에 시험설비를 해체하여 마모에 대한 육안검사, 사진 기록 및 마모검사를 수행하였다. 육안검사는 특히 각 부품들이 접촉되어 마모가 발생할 것으로 예상되는 부분에 유의하여 수행되었으며, 유동관 및 유동관 편 내부의 검사는 보어스코우프를 사용하여 수행하였다. 육안검사후 마모검사는 3개의 간격판, 2개의 봉단접합판 및 하부유도체 guide arm 등에 대하여 수행되었다.

가장 큰 마모현상은 하부유도체 guide arm과 접하는 하부봉단접합판에서 발생하였으며, 간격판의 마모는 측정할 수 없을 정도로 작았다. 하부봉단접합판 및 간격판에서 가장 마모가 큰 곳을 각각 택하여 마모 깊이를 측정된 후, 마모 손상을 평가가 집중적으로 수행되었다. 허용마모기준으로는 360일 운전후 마모로 인하여 제거된 깊이가 봉단접합판과 간격판 중에서 가장 얇은 곳의 두께(0.9 mm)를 기준으로 3/4(0.675 mm)을 초과해서는 안 되는 기준을 적용하였다. 매우 보수적인 마모 손상을 평가를 통하여 360일 운전후 예측된 마모 깊이가 하부봉단접합판의 slot에서 0.32 mm이며, 간격판에서 0.09 mm로 허용기준인 0.675 mm보다 작아 마모평가 기준을 만족하였으므로, 개량 18봉 핵연료집합체가 원자로에서 사용될 때의 마모는 허용기준 내에 있을 것으로 예상되었다.

2.4.2 진동 시험

진동시험은 원자로의 유동관 하부 구조와 유동관을 모사하는 AECL의 단일유로 시험시설에서 수행되었다. 진동시험은 핵연료집합체의 진동의 정도를 정

성적으로 판단하는 단계, 그것을 정량적으로 측정하는 단계 등 두 단계로 나뉘어 진행되었다. 유동조건하의 진동시험에서는 각각의 핵연료집합체에 대하여 설계유량의 0, 10%, 35%, 60%, 80%, 90%, 100%, 110% 및 120% 유동 조건에서 유체유동에 의한 진동을 측정하는 시험으로 구성되어 있다.

2.4.2.1 36봉 핵연료집합체[7]

단일유로 시험시설의 투명한 외부관 안에 유동관과 핵연료집합체를 장전하고 수행한 1단계 시험은 설계유량조건에서 심각한 진동이나 회전 운동이 발견되지 않았다.

2 단계 시험에서는 핵연료집합체를 실제의 유동관 내부에 장전하고 핵연료집합체 및 유동관의 진동을 레이저 진동측정기, 가속도계 및 proximity probe를 사용하여 진동을 측정하였다. 진동시험 결과에 의하면 유동에 따른 심각한 진동이나 운동이 관측되지 않았다. 시험유량 변동의 전체 범위에 대해 결쇠머리의 지배주파수는 표 4에서와 같이 X 방향으로 17.7 Hz(15.5~21.7 Hz), Y 방향으로 19.2 Hz(18.7~19.3 Hz)이었다. 이들 주파수는 모달시험(modal test)의 기본 휨모멘트 주파수와 거의 일치하며 1993년도 기존 핵연료 집합체에 대한 진동시험에서 얻은 주파수와는 약 1 Hz 차이 이내에 있었다. 표 4에서 보여준 개량 36봉 핵연료집합체 결쇠머리의 진동 폭과 관련 주파수는 유속의 함수가 되며 X와 Y 방향에 대해 각각 14.6~23.4 Hz 및 15.0~23.4 Hz 주파수 영역에서의 변위 RMS 값을 구하였으며, 변위 RMS 값이 설계유량에서 X 방향, 25 μm 와 Y방향, 32 μm 로 작음을 볼 때 개량 36봉 핵연료집합체의 진동은 매우 작음을 알 수 있었다.

2.4.2.2 18봉 핵연료집합체[8]

개량 18봉 핵연료집합체에 대한 진동시험이 원자로의 유동관하부 구조와 유동관을 모사하는 AECL의 단일유로 시험시설에서 완료되었다. 진동시험은 핵연료집합체의 진동의 정도를 정성적으로 판단하는 단계, 그것을 정량적으로 측정하는 단계 등 두 단계로 나뉘어 진행되었다.

단일수로 시험시설의 투명한 외부관 안에 원형 유동관과 핵연료집합체를 장전하고 수행한 1단계 시험은 36봉 핵연료집합체에서와 같이 설계유량조건에서 심각한 진동이나 회전 운동이 발견되지 않았다.

2 단계 시험에서는 핵연료집합체를 실제의 유동관 내부에 장전하고 핵연료집합체 및 유동관의 진동을 레이저 진동측정기, 가속도계 및 proximity probe를 사

용하여 진동을 측정하였다. 진동시험 결과에 의하면 유동에 따른 심각한 진동이나 운동이 관측되지 않았다. 시험유량 변동의 전체 범위에 대해 걸쇠머리의 지배 주파수는 표 5에서와 같이 X 방향으로 17.5 ± 0.2 Hz, Y 방향으로 18.2 ± 0.5 였다. 이들 주파수는 모달시험의 기본 휨모멘트 주파수와 거의 일치하며 기존 핵연료 집합체에 대한 1993년도의 진동시험에서 얻은 주파수와는 약 1 Hz 차이 이내에 있음을 알 수 있었다. 표 5에서 보여준 개량 18봉 핵연료집합체 걸쇠머리의 진동 폭과 관련 주파수는 유속의 함수가 되며 X와 Y 방향에 대해 각각 15.0~23.4 Hz 주파수 영역에서의 변위 RMS 값을 구하였으며, 변위 RMS 값이 설계유량에서 X 방향, 40 μm 와 Y방향, 56 μm 로 작음을 볼 때 개량 18봉 핵연료집합체의 진동은 매우 작음을 알 수 있었다.

2.5 2차 설계 변경

2.5.1 36봉 핵연료집합체

1차 설계 변경을 통하여 유체유발진동에 의한 간격판의 마모 현상은 상당히 완화되었다. 이러한 설계 변경 효과에 대해서는 3장에서 자세히 기술할 것이다. 설계 변경된 개량 핵연료를 노심에 충전한 이후 이들 핵연료의 마모 거동을 육안검사를 통하여 확인하였다. 이러한 검사 결과를 바탕으로 부족한 부분에 대한 추가 설계 변경을 수행하였다. 36봉 핵연료집합체의 2차 설계 변경 내용들은 표 1과 표 2에서 기존 핵연료의 설계 내용, 1차 변경 내용과 비교 요약되어 있으며, 중요한 설계 변경 내용을 아래에 기술한다. 그림 18과 그림 19에서 2차 설계 변경된 36봉 핵연료집합체의 상부와 하부를 각각 보여주고 있다. 또한, 자세한 설계 변경 내용은 핵연료 설계도면의 개정 이력표에 있으며, 표 6에 현재까지의 설계도면 개정 현황을 정리하였다.

2.5.1.1 봉단접합판

유동관 안에서 하부봉단접합판을 잡아 고정시키는 부분은 하부 유도체의 guide arm이다. 그러므로 guide arm과 하부봉단접합판의 slot의 완전한 면접촉을 유지시키는 것이 중요한 설계 의도 중 하나였다. 2차 설계 변경에서는 그림 20과 같이 핵연료집합체의 회전 운동에 대한 저항성을 키우기 위하여 guide arm과 slot의 형상을 'V' 형에서 'U' 형으로 바꾸고 체결 부위인 guide arm 끝단의

굵기를 증가시켰다. 또한 하부봉단접합판의 경우 장전 방향을 확인하기 위해 부착된 추가 마모 패드가 필요 없으므로 보다 평탄한 유동 분포를 얻기 위하여 이를 삭제하였다(그림 19 참조). 6개의 모서리봉의 경우 간격판의 모서리 마모 패드 두께를 증가시키기 위하여 핵연료봉을 0.4 mm씩 중심부로 이동하였으므로 해당하는 만큼 모서리 구멍의 위치를 이동시켰다.

2.5.1.2 간격판

36봉 핵연료집합체에서 마모 손상이 집중된 부분이 간격판 모서리의 마모 절단이므로 이 부분의 보강에 역점을 두었다. 그림 21의 section E-E 및 section F-F에서 보는 바와 같이 모서리의 두께를 키우기 위하여 모서리 구멍의 크기를 $\Phi 10.45$ mm에서 $\Phi 10.15$ mm로 줄였고, 구멍 위치를 중심 쪽으로 0.4 mm 이동시켰다. 이로써 가장 얇은 부위(그림 21의 section F-F)의 두께가 0.51 mm에서 1.0 mm로 약 2배 증가되었다. 이와 함께 간격판이 핵연료 취급 중에 구조물에 걸리는 것을 방지하기 위하여 마모 패드의 위 부분은 설계변경 이전처럼 모따기를 하였고, 이 때 유동관과의 접촉 면적을 유지하기 위하여 상하 모따기 각도를 30도에서 45도로 증가시켰다. 이러한 변경의 결과로 모서리 단면적이 2배 이상 증가되어 마모와 강도 측면에서 월등히 좋은 구조가 되었다. 또한 모서리 구멍 주위의 작은 냉각 구멍들도 가능한 같은 유로 면적을 유지하도록 크기를 조정하였다. 모서리봉의 위치 이동으로 해당 부분의 부수로 형상이 달라짐에 따라 노심의 열수력적 안전성에 미치는 영향을 평가하였다. 평가 결과, 부록 A와 같이 노심의 열적 여유도에 대한 제한치를 모두 만족함을 확인하였다.

2.5.1.3 상부 스프링

상부 스프링은 1차 설계 변경에서 핵연료봉과의 간섭 현상을 배제하기 위하여 상부유도체에 연결하였으나 스프링이 절단되거나 핵연료 취급 중에 휘는 현상이 발생하여 그림 18에서 보는 바와 같이 원래의 설계개념(그림 6)대로 핵연료봉의 상부봉단마개와 결합시켰다. 단, 스프링의 강성을 증가시키기 위하여 길이를 줄여 끝단이 상부봉단접합판의 아래에 닿도록 하고, 연결 고리의 내경을 줄여 흔들림을 방지하였다.

2.5.1.4 결쇠머리 잠금쇠

18봉 핵연료집합체의 1차 설계 변경에서와 같이 결쇠머리 잠금쇠와 상부

유도체 사이에 thrust bearing을 추가하였으나, bearing ball에 변형이 있을 경우 걸쇠머리 잠금쇠와 상부유도체 사이의 회전 마찰력이 증가될 것이 우려되어, 재질이 Waukesha 88로 된 thrust washer로 변경하였고, 시험결과 thrust washer의 회전 마찰력이 thrust bearing의 경우보다 더 작음이 입증되었다.

2.5.2 18봉 핵연료집합체

설계 변경된 개량 핵연료를 노심에 장전한 이후 이들 핵연료의 마모 거동을 육안검사를 통하여 확인하였다. 이러한 검사 결과를 바탕으로 부족한 부분에 대한 추가 설계 변경을 수행하였다. 18봉 핵연료집합체의 2차 설계 변경 내용들은 표 1과 표 3에서 기존 핵연료의 설계 내용, 1차 변경 내용과 비교 요약되어 있으며, 중요한 설계 변경 내용을 아래에 기술한다. 그림 22와 그림 23에서 2차 설계 변경된 18봉 핵연료집합체의 상부와 하부를 보여주고 있다.

2.5.2.1 봉단접합판

육안검사를 통하여 1차 설계 개량된 핵연료집합체의 하부봉단접합판 guide arm slot의 마모 현상이 여전히 심하게 발생함을 확인하였다. 마모 원인에 대한 검토 결과, 간격판과 간격판을 한 몸체로 연결함에 따라 집합체의 회전 운동에 대한 응력이 slot에 집중되어 발생한 것으로 평가되었다. 하부봉단접합판에서 보다 균일한 유동 분포를 얻기 위하여 하부봉단접합판의 마모 패드를 그림 24와 같이 6개 부분으로 나누고 guide arm slot의 위치를 봉 위치에서 봉 사이로 옮겼다. 또한 36봉 핵연료집합체와 같이 회전 운동에 대한 저항성을 키우기 위하여 그림 25와 같이 guide arm과 slot의 형상을 'V' 형에서 'U' 형으로 바꾸고 체결 부위인 guide arm 끝단의 굽기를 증가시켰다.

상부봉단접합판의 경우 상부스프링이 핵연료봉의 상부봉단마개에 연결되므로 하부봉단접합판과 형상을 달리하여 그림 22에서 보는 바와 같이 설계 변경전의 모양(그림 13)으로 환원하였다.

2.5.2.2 간격판 및 간격판

2.5.2.1에서 설명한 바와 같이 집합체의 회전 운동에 대한 응력이 guide arm slot에 집중되어 하부봉단접합판의 slot 마모 문제가 완전히 해결되지 않았다. 따라서, 설계 변경 이전에 있었던 장전시의 집합체 비틀림 현상은 걸쇠머리 잠금쇠와 상부유도체 사이에 thrust washer를 삽입하여 회전 마찰력을 줄여서 해

결하였으므로, 간격판 및 간격판의 조립개념은 1차 설계 변경에서 3개의 간격판과 4개의 간격판이 한 몸체로 연결되었던 것을 2차 설계 변경에서는 부분 일체형으로 나누어 하부봉단접합판의 guide arm slot에 응력이 집중되는 방지하면서 그림 4와 같은 간격판의 기울어짐 현상이 없도록 하였다. 그림 17은 설계 변경전부터 2차 설계 변경까지의 간격판 및 간격판의 조립 개념을 비교하여 보여주고 있다.

2.5.2.3 상부스포링

36봉 핵연료집합체와 마찬가지로 그림 22와 같이 스프링의 한 끝단을 원래의 설계개념(그림 13)대로 핵연료봉의 상부봉단마개와 결합시켰다. 단, 스프링의 강성을 증가시키기 위하여 길이를 줄여 끝단이 상부봉단접합판의 아래에 닿도록 하고, 연결 고리의 내경을 줄여 흔들림을 방지하였다.

2.5.2.4 결쇠머리 잠금쇠

핵연료 장전시에 비틀림을 방지하기 위하여 결쇠머리 잠금쇠와 상부유도체 사이에 삽입되었던 thrust bearing의 bearing ball에 변형이 있을 경우 결쇠머리 잠금쇠와 상부유도체 사이의 회전 마찰력이 증가될 것이 우려되어, 재질이 Waukesha 88로 된 thrust washer로 변경하였고, 시험결과 thrust washer의 회전 마찰력이 thrust bearing의 경우보다 더 작음이 입증되었다.

2.5.2.5 하단 잠금쇠 부분

그림 16과 같이 1차 설계 변경 때까지 유지되었던 하단 잠금쇠 부분의 톱니 형상은 유동관 하부의 스파이더 핀과 하부유도체의 톱니가 설계의도와는 달리 서로 top-to-top으로 만나는 경우가 있음을 발견하고, 이를 해결하기 위하여 36봉 핵연료집합체와 같이 톱니 모양 대신에 하부유도체의 바닥에 알루미늄 링(aluminum seating ring)을 부착하여(그림 11 및 그림 23 참조) 장전시에 정렬된 상태로 유동관 spider pin이 알루미늄 링을 파고 들어가서 회전운동을 억제하도록 하였다.

3.0 설계 변경 효과

3.1 36봉 핵연료집합체

표 7에서는 현재까지 손상된 핵연료집합체의 간격판 마모 진행 상태를 기존 핵연료집합체와 1차 개량 핵연료집합체에 대하여 비교하였다. 비교 대상은 간격판 마모 마크가 5개 이상 되는 시점과 심한 마모가 나타난 시점, 그리고 절단되기까지의 1차 펌프 운전 일수를 기준으로 하였다. 42개의 기존 손상 핵연료집합체에 대한 각각의 평균 운전 일수는 38일, 65일과 115일이었으며, 16개의 개량 손상 핵연료집합체와 현재 노심에 장전되어 있는 11개의 개량 핵연료집합체에 대한 것은 각각 49일, 94일 및 183일이었다. 간격판 마모 절단까지의 펌프 운전 일수가 개량 핵연료집합체에서 68일 정도(60%) 증가하였으므로 마모 현상을 완화시키도록 설계 변경한 1차 개량 핵연료집합체는 기존 핵연료집합체보다 마모율이 상당히 줄어들었다. 또한 기존 핵연료집합체에서 간격판 모서리가 절단되기까지 최단기간과 최장기간은 52일과 196일이었는데 비하여 1차 개량 핵연료집합체는 115일과 243일로 기존 핵연료집합체보다 63일과 47일 증가하였다. 그러나 핵연료 설계 사양서[9]에 제시된 전출력 운전 상태로 180일 이상을 노심에서 견디는 요건을 충족시키기 위해서는 절단되기까지의 최단 기간과 평균 운전 기간을 더 연장시켜야 한다.

현재 2차 설계 변경 내용이 반영 제작된 핵연료집합체는 2000년 6월에 하나로에 입고되어 이후 손상되는 핵연료집합체와 교체 장전할 예정이다. 그러므로 2차 설계 개량 핵연료집합체의 마모 특성 및 설계 변경 효과는 더 많은 육안검사 자료가 축적되어야 한다. 그러나 2차 설계 변경에서는 간격판 corner hole 직경을 줄이고 모서리봉 위치를 중심 방향으로 이동하여 취약 부위 두께를 약 2배 증가시켰으므로 노심 장전 기간에 대한 설계 요건을 만족시킬 수 있을 것으로 예상된다.

3.2 18봉 개량 핵연료집합체

현재 노심(7주기 6차 노심)에 장전된 18봉 핵연료집합체 12개중에 10개가 1차 개량 핵연료집합체이고 현재까지 손상된 개량 핵연료집합체는 2개이다. 이들은 하부봉단접합판의 guide arm slot이 한쪽으로 마모가 심하여 마모 패드 뒤쪽

웹이 끊어진 경우이며 이들의 펌프 운전 일수는 각각 113일과 169일이다. 18봉 개량 핵연료집합체의 경우, 손상 핵연료집합체가 2개뿐이어서 육안 검사의 통계적 자료의 부족으로 설계 변경의 영향을 단언하기는 어렵다. 그러나 노심에 장전되어 있는 개량 핵연료집합체의 마모 자료를 함께 평가하면 표 8과 같이 slot에서의 마모와 심한 마모 발생 시점이 기존 핵연료집합체보다 2배 이상 증가하였으며 140일 이상 운전된 다른 4개의 개량 핵연료집합체들은 건전한 상태를 유지하고 있다. 또한 기존 핵연료집합체에서와 같이 30~40일 정도의 단기간에 손상된 핵연료집합체는 없었다.

18봉 핵연료집합체 역시 2차 설계 변경에서 하부봉단접합판 slot의 마모를 완화시키기 위하여 slot과 guide arm 형상을 'U'형으로 바꾸고 간격판 몸체를 4개로 분리하고 하부봉단접합판의 형상을 변경하였으므로 보다 향상된 마모 특성을 보일 것으로 기대된다. 2차 설계 변경 핵연료집합체는 2000년 하반기에 제작될 예정이므로 노심에는 2001년 초에 장전될 것이다.

4. 결 론

1996년 12월 발견된 핵연료집합체에 대한 기계적인 손상은 주로 간격판과 봉단접합판의 마모 현상이었고, 이를 해결하기 위한 다양한 설계 변경이 계속되어 오고 있다. 육안검사 결과에 대한 평가를 바탕으로 마모를 줄일 수 있는 다양한 설계 변경 방안들이 도출되었으며, 설계 변경된 부품의 성능시험, AECL에 있는 단일유로 시험시설을 이용한 핵연료집합체의 진동 시험과 내구성 시험 등을 수행되어 설계 변경 방안의 타당성이 확인되었다. 1차 설계 변경 내용에 따라 제작된 핵연료집합체를 노심에 장전한 후, 계속된 육안검사 결과를 바탕으로 추가적인 설계 변경이 진행되었다.

설계 변경된 핵연료집합체를 노심에서 운전한 후 육안검사 결과에 근거하여 설계개선 효과를 분석한 결과, 1차 설계 변경후 36봉 핵연료집합체의 경우는 마모 손상까지의 기간이 약 60% 연장되어 간격판의 마모가 현저하게 감소되었음을 알 수 있었다. 18봉 핵연료집합체의 경우는 현재까지 손상된 개량 핵연료집합체가 2개뿐이므로 마모수명 연장 여부를 판단할 수 있는 통계적 자료가 부족하나, 하부봉단접합판의 마모율은 절반 정도로 줄어들었다. 2차 설계 변경은 핵연료집합체의 마모 취약 부위인 간격판 모서리와 하부봉단접합판을 강화하는 방향으로 이루어졌으므로 마모 설계수명에 대한 요구 조건을 만족시킬 것으로 기대된다.

5. 참고 문헌

- [1] 임인철, 채희택, "핵연료 검사 Video 정밀 관찰 결과 요약", 내부통신문, HAN-RT-CR-97-016, 1997. 2.
- [2] 채희택, 임경환, 김학노, "하나로 핵연료집합체 육안 검사 및 마모 현상 평가", KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1347/99, 1999. 6.
- [3] I.E.Oldaker, J.L.Gerardi, "Design Change Proposals for HANARO Fuel", Technical Document, 37-37000-TD-001, Rev.1, AECL, 1998. 2.
- [4] J.L.Gerardi, "HANARO 18-Element Driver Fuel Design Change Proposals", Technical Document, 37-37000-TD-008, Rev.0, AECL, 1998. 9.
- [5] V.P. Janzen, N.J. Fisher, T.G. Whan and J.H. Tromp, "HANARO 36-Element Fuel Endurance Report", Test Report, 37-37000-TR-005, AECL, 1998. 6.
- [6] V.P. Janzen, N.J. Fisher, T.G. Whan and J.H. Tromp, "HANARO 18-Element Fuel Endurance Test", Test Report, 37-37000-TR-007, Rev.0, AECL, 1998. 11.
- [7] V.P. Janzen, B.A.W. Smith, T.G. Whan and J.H. Tromp, "HANARO 36-Element Fuel Modal and Vibrational Tests", Test Report, 37-37000-TR-006, Rev.0, AECL, 1998. 8.
- [8] V.P. Janzen, B.A.W. Smith, T.G. Whan and J.H. Tromp, "HANARO 18-Element Fuel Modal and Vibrational Tests", Test Report, 37-37000-TR-008, Rev.0, AECL, 1998. 12.
- [9] P. Tume, S. Palleck, "HANARO Driver Fuel Assemblies", Technical Specification, 37-37000-TS-002, Rev.1, AECL, 1999. 11.

표 1. 36봉/18봉 핵연료집합체에 공통 적용되는 설계 변경 내용

설계 항목	기존 핵연료집합체	설계개량 핵연료집합체		비고
		1차 설계 변경	2차 설계 변경	
1. 핵연료봉				동일
2. Bottom spring rate	4.44 N/mm	8 N/mm		장전상태에서 복원력증가로 진동 억제
3. Bottom endplate				
1) anodizing 처리	처리 안함	anodizing 처리		표면의 anodizing 처리로 접촉면의 강도 증가
2) 핵연료봉과 체결 방법	용접	기계적인 체결		용접열에 의한 BEP 수축 현상 방지
3) 유동관과의 접촉면 증가	wear pad의 위쪽 모서리를 깎아냄	깎아내지 않음		wear pad 접촉면적 증가로 마모 진행을 완화
4) BEP slot과 하부 유도체 arm의 접촉	불완전 접촉	완전한 면접촉		BEP slot의 내마모성 증가
4. 상부유도체				
1) Top spring 길이 축소	spring 끝단이 핵연료봉의 상부 봉단마개에 연결	spring 끝단을 결쇠머리에 연결	spring 끝단이 TEP하부에 닿도록 길이 축소	spring 강도 증가
2) Thrust washer	결쇠머리와 면접촉	18봉 핵연료집합체: thrust bearing 삽입 36봉 핵연료집합체: bottom guide 톱니 대신 aluminum seating ring을 끼움	36봉/18봉 핵연료집합체: thrust washer로 변경 18봉 핵연료집합체: bottom guide 톱니 대신 aluminum seating ring을 끼움	장전시 비틀림 방지
5. 하부 aluminum seating ring	bottom guide 톱니로 유동관의 spider pin과 연결	bottom guide 톱니 대신 aluminum seating ring을 끼움		핵연료 장전시 톱니로 인한 정렬상태 틀어짐을 방지

표 2. 36봉 핵연료집합체에만 적용되는 설계 변경 내용

설계 항목	기존 핵연료집합체	설계개량 핵연료집합체		비고
		1차 설계 변경	2차 설계 변경	
1. Spacer plate				
1) 접촉면 증가	wear pad의 위·아래에 chamfer	wear pad의 위 chamfer 삭제	상하 chamfer angle 변경	wear pad, hole 내부 접촉면적 증가로 마모 진행을 완화
2) corner hole	ID 10.45 mm		0.4 mm 이동 Cooling holes 크기 변경	corner web의 두께 증가
3) cantilever arm의 구멍 크기 축소	면적: 6.9 mm ²	면적 : 3.14 mm ²		접촉면의 중간 cantilever arm의 강도 증가
2. Top spring	2개	3개		핵연료와 유동관의 동심도 유지
3. Endplate 형상 변경	wear pad 부착 모서리 3개	BEP/TEP wear pad 부착 모서리 4개	BEP wear pad 부착 모서리 3개 Corner hole 0.4 mm 이동	BEP에서 평탄한 유동 분포

표 3. 18봉 핵연료집합체에만 적용되는 설계 변경 내용

설계 항목	기존 핵연료집합체	설계개량 핵연료집합체		비고
		1차 설계변경	2차 설계변경	
1. Endplate 형상 변경	Guide arm slot 경계층이 얇음 (마모패드 6개)	Guide arm slot 경계층 강화 (마모패드 3개)	봉 사이로 slot이동 (마모패드 6개)	BEP slot의 내마모성 증가 BEP에서 평탄한 유동 분포
2. Interference Fit	Spacer, Endplate, Spacer tube 분리 결합	Interference fit으로 한 몸체로 결합	4개 부분으로 분리	BEP slot 응력집중방지

표 4. 유량변동에 따른 개량 36봉 핵연료집합체 결쇠머리의 지배주파수 및 변위 RMS 값

Flow Rate (l/s)	X-Direction		Y-Direction	
	Dominant Freq.(Hz)	Displacement (μm RMS)	Dominant Freq.(Hz)	Displacement (μm RMS)
0.0	19.36	2.1	19.31	8.9
2.0	17.32	41.1	18.72	85.5
6.9	17.48	34.0	19.31	45.8
11.8	17.31	32.3	18.70	38.2
15.7	15.71	30.3	19.32	40.3
17.6	17.47	35.0	19.32	38.0
19.6	15.49	24.9	19.32	32.4
21.6	17.32	28.7	19.18	45.2
23.5	21.69	28.6	19.30	34.4

표 5. 유량변동에 따른 개량 18봉 핵연료집합체 결쇠머리의 지배주파수 및 변위 RMS 값

Flow Rate (l/s)	X-Direction		Y-Direction	
	Dominant Freq.(Hz)	Displacement (μm RMS)	Dominant Freq.(Hz)	Displacement (μm RMS)
4.4	17.51	39.0	17.70/18.69	61.0
7.6	17.49	33.8	17.71/18.71	43.3
10.2	17.51	35.6	17.69/18.71	52.4
11.4	17.50	36.7	18.50	55.8
12.7	17.31	39.9	18.71	55.9
14.0	17.48	42.7	17.69	56.5
15.2	17.49	47.6	17.70/18.50	60.8

표 6. 핵연료집합체 설계도면 개정 현황

DWG NO./TITLE 37-37000-	REV	계약번호 KAERI 승인	58-95016 1998 공급분	58-96032 1999.6. 공급분	58-96032 1999.12. 공급분	58-98013 2000.6. 공급분	58-98013 2000.10. 공급분
101, 36-GA	R2	98-05-22	✓				
101, 36-GA	R4	99-04-21		✓			
101, 36-GA	R5	(99-11-01)			✓		
101, 36-GA	R6	00-01-14				✓	✓ (개정 예정)
102, 18-GA	R4	98-11-13	✓				
102, 18-GA	R6	99-04-12		✓			
102, 18-GA	R7	99-08-25			✓		
102, 18-GA	R8	00-04-12					✓ (개정 예정)
103, Standard Core	R2	98-05-22	✓	✓	✓	✓	✓
104, 36-Endplate	R2	98-05-22	✓				
104, 36-Endplate	R4	99-04-21		✓	✓		
104, 36-Endplate	R5	00-01-12				✓	✓ (개정 예정)
105, 18-Endplate	R3	98-11-03	✓				
105, 18-Endplate	R4	99-04-12		✓	✓		VOID
108, 36-Bottom Guide	R2	98-05-22	✓				
108, 36-Bottom Guide	R4	99-04-12		✓			
108, 36-Bottom Guide	R5	99-09-13			✓		
108, 36-Bottom Guide	R6	00-01-14				✓	✓ (개정 예정)
109, 18-Bottom Guide	R3	98-11-03	✓				
109, 18-Bottom Guide	R5	99-04-21		✓	✓		
109, 18-Bottom Guide	R6	00-04-12					✓ (개정 예정)
115, 36-Reduced Core	R2	98-05-22	✓	✓	✓	✓	✓
116, 36-Top Guide	R2	98-05-22	✓				
116, 36-Top Guide	R4	99-05-26					
116, 36-Top Guide	R5	99-05-26		✓	✓	✓	✓
117, 18-Top Guide	R3	98-11-03	✓				
117, 18-Top Guide	R5	99-04-21		✓			
117, 18-Top Guide	R6	99-09-29			✓	✓	✓
118, 36-Spacer Plate	R2	98-05-22	✓				
118, 36-Spacer Plate	R4	99-04-21		✓	✓		
118, 36-Spacer Plate	R5	00-01-12				✓	
118, 36-Spacer Plate	R6	00-04-12				✓	✓
119, 18-Spacer Plate	R3	98-11-03	✓				
119, 18-Spacer Plate	R4	99-04-12		✓	✓	✓	✓
122, Hardware Detail	R4	98-11-13	✓				
122, Hardware Detail	R6	99-04-21		✓			
122, Hardware Detail	R7	99-08-25			✓		
122, Hardware Detail	R8	00-01-28				✓	
122, Hardware Detail	R9	00-04-12					✓ (개정 예정)
123, 18-Spacer Assembly	R1	98-11-18	✓	✓	✓		VOID
142, 18-Top Endplate	R0	00-04-12					✓
143, 18-Bottom Endplate	R0	00-04-12					✓ (개정 예정)

표 7. 36봉 핵연료집합체의 간격판 마모 손상에 대한 설계 변경 효과

핵연료집합체	간격판 마모 소요기간 [일] (평균 펄프 운전 일수 기준)		간격판 마모 절단 소요 기간 [일]		비 고
	마모 (5개 이상)	심한 마모	마모 절단	최단 기간 최장 기간	
기존 핵연료집합체	38	65	115	52 196	42개 손상 핵연료를 기준
1차 설계 변경 핵연료집합체	49	94	183	115 243	16개 손상 핵연료와 11개 노심 장전 핵연료 기준

표 8. 18봉 핵연료집합체의 하부 봉단접합판 slot의 마모 손상에 대한 설계 변경 효과

핵연료집합체	하부 봉단접합판 slot 마모 소요기간 [일] (평균 펄프 운전 일수 기준)		slot 경계층 마모 절단 소요 기간 [일]		비 고
	마모	심한 마모	경계층 절단	최단 기간 최장 기간	
기존 핵연료집합체	33	59	144	30 390	25개 손상 핵연료를 기준
1차 설계 변경 핵연료집합체	80	121	141	113 169	2개 손상 핵연료와 7개 노심 장전 핵연료 기준

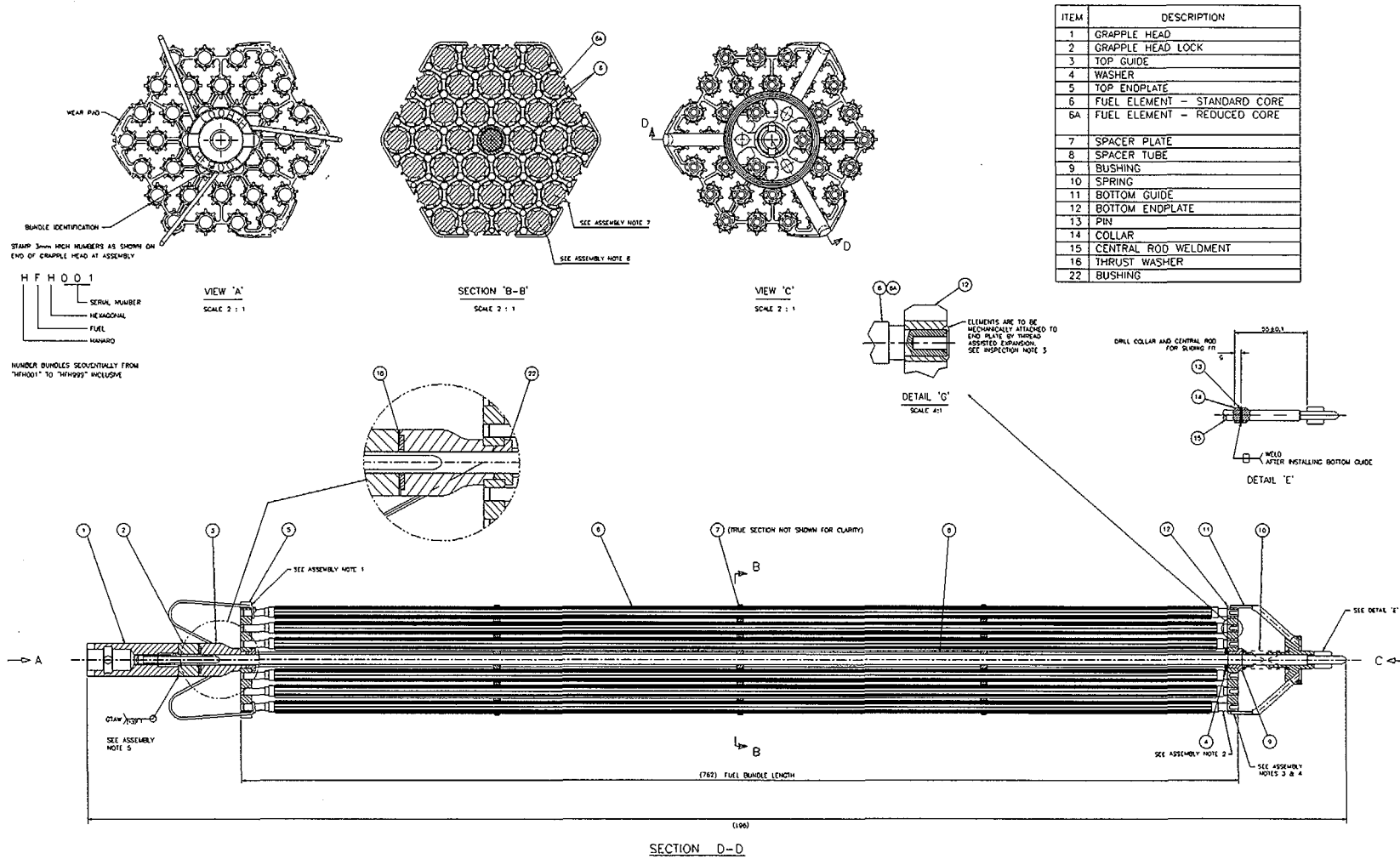


그림 1. 개량 36봉 핵연료집합체

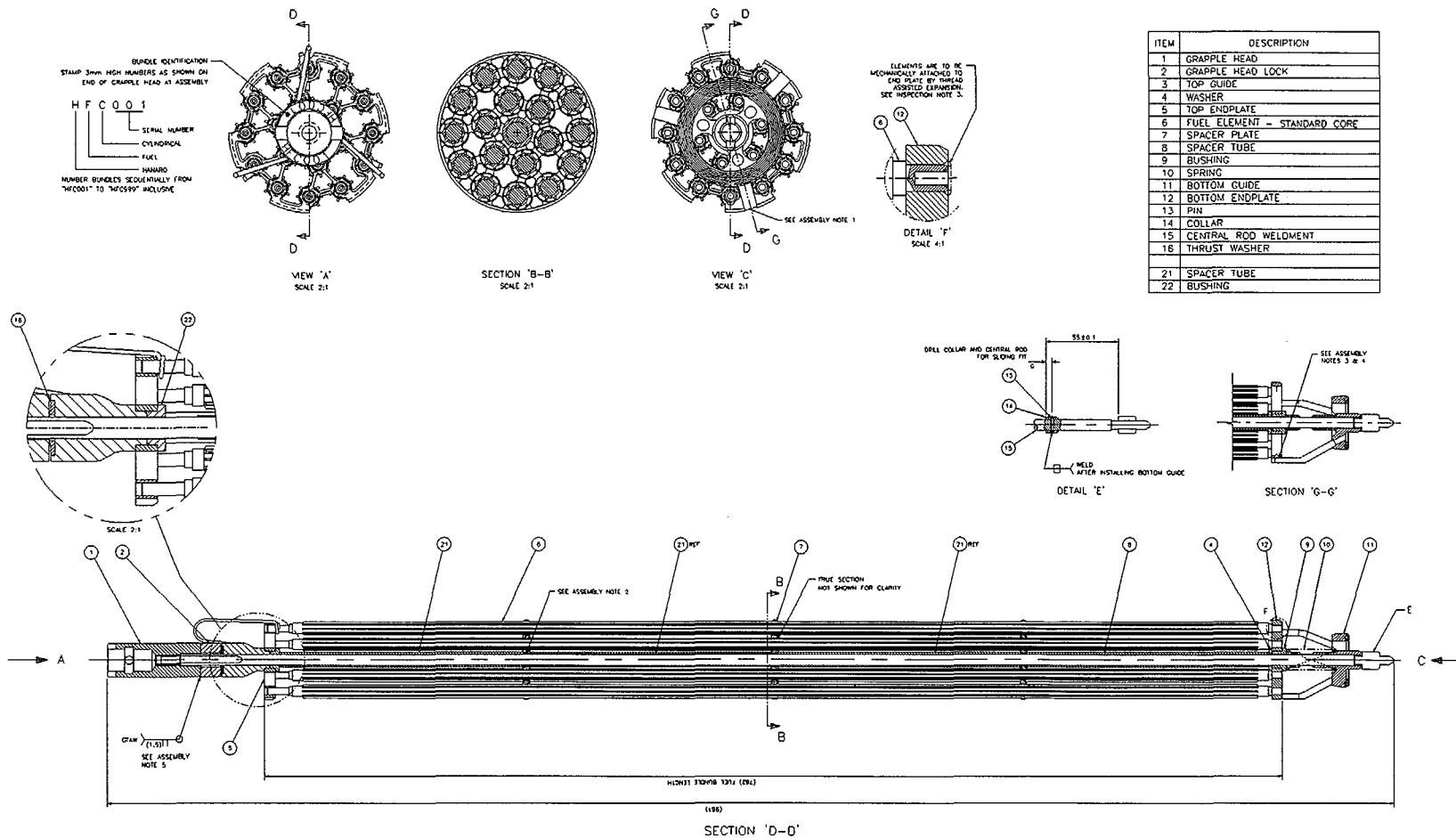
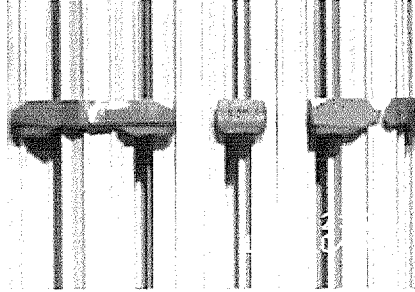
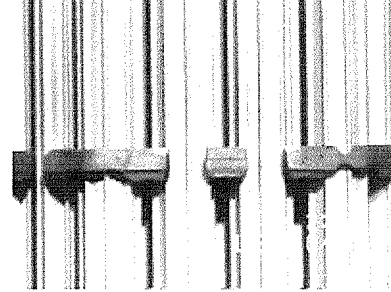


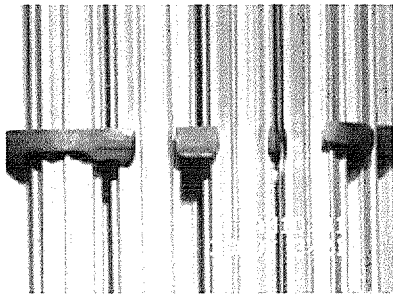
그림 2. 개량 18봉 육연료집합체



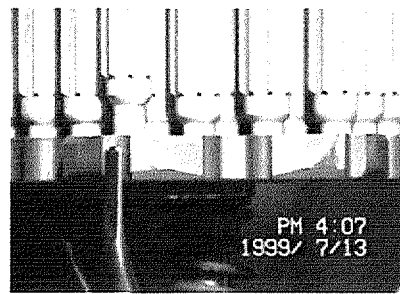
1) 간격판 모서리 마모



2) 간격판 모서리 절단

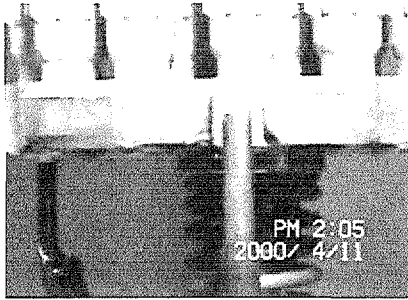


3) 마모 절단 후 조각 이탈

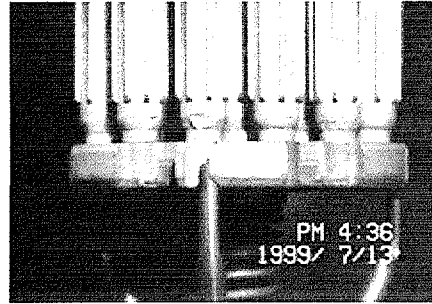


4) 하부 봉단접합판 slot 마모

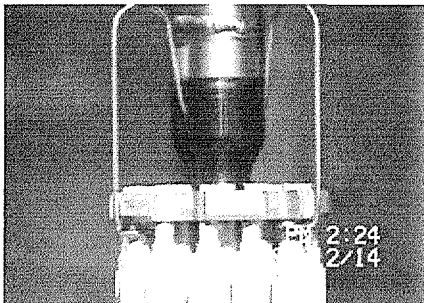
그림 3. 36봉 핵연료집합체의 대표적인 마모 손상 부위



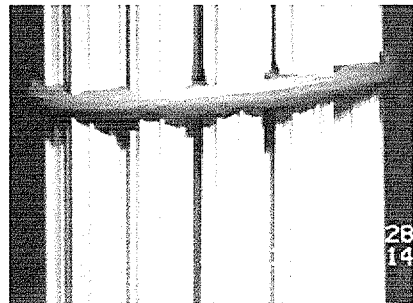
1) 하부 봉단접합판 slot 마모



2) slot 왼쪽 경계층 절단

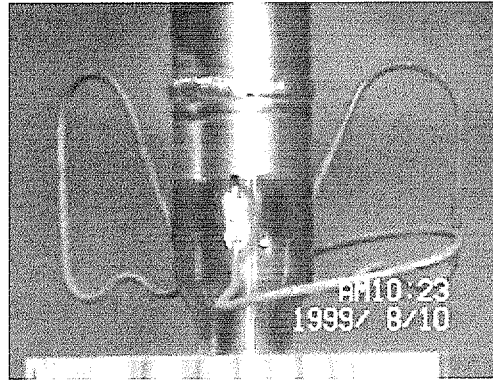


3) 상부봉단마개 돌출

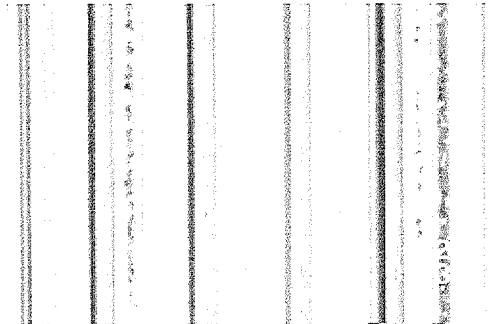


4) 간격판 경사 및 편 마모

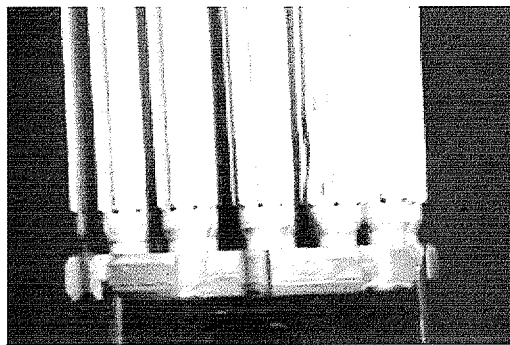
그림 4. 18봉 핵연료집합체의 대표적인 마모 손상 부위



1) 상부스프링 절단



2) 핵연료봉 표면 얼룩



3) 하부 봉단마개 부위 팽윤

그림 5. 핵연료집합체의 기타 손상

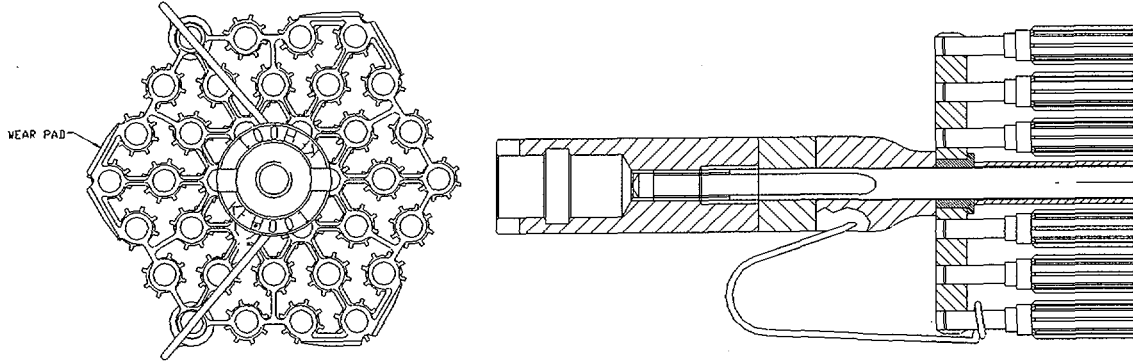


그림 6. 설계변경전 36봉 핵연료집합체 상부

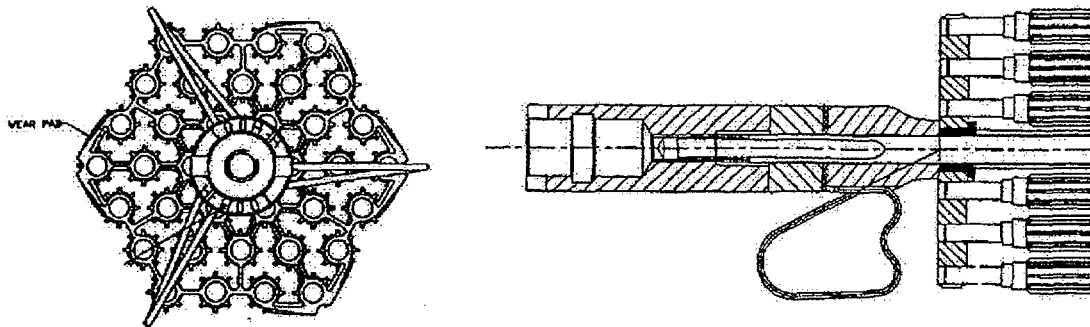


그림 7. 36봉 핵연료집합체 상부 - 1차 설계변경

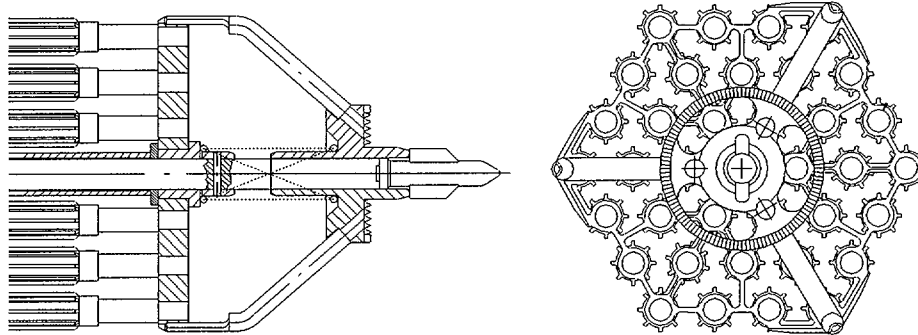


그림 8. 설계변경전 36봉 핵연료집합체 하부

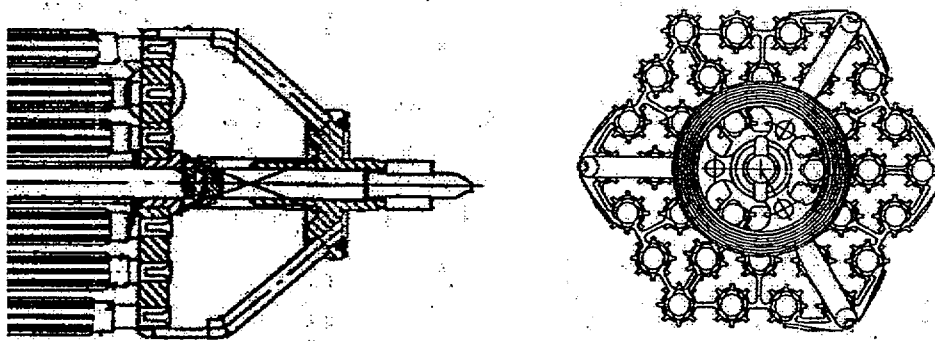


그림 9. 36봉 핵연료집합체 하부 - 1차 설계변경

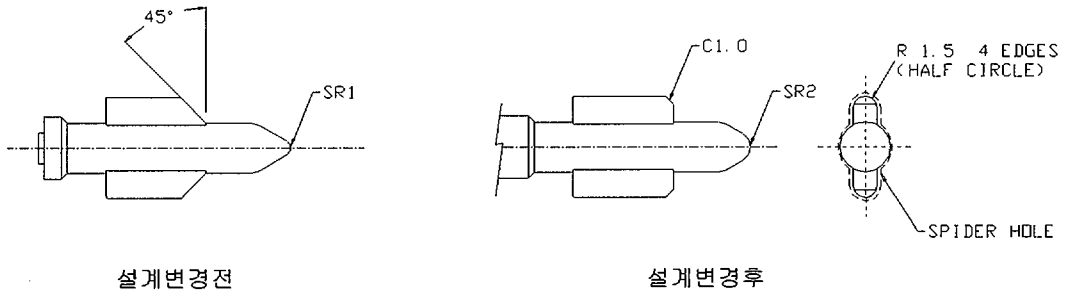


그림 10. 중앙지지봉 하단부

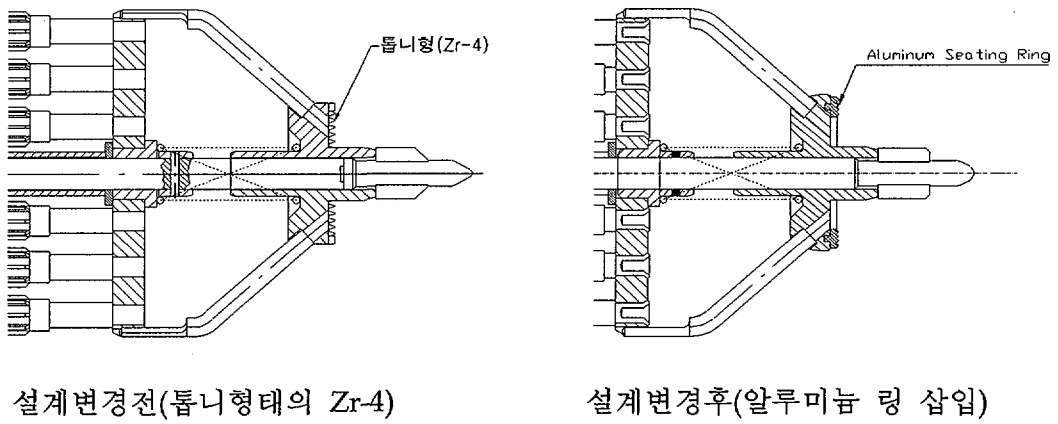
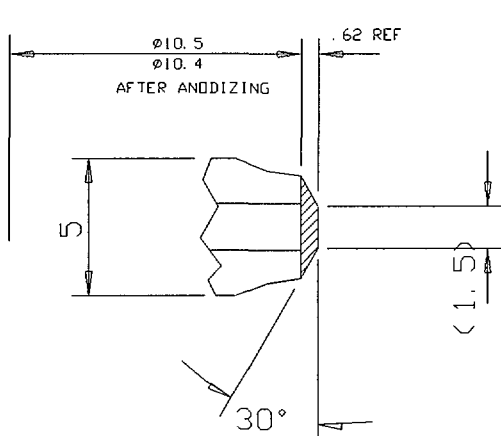
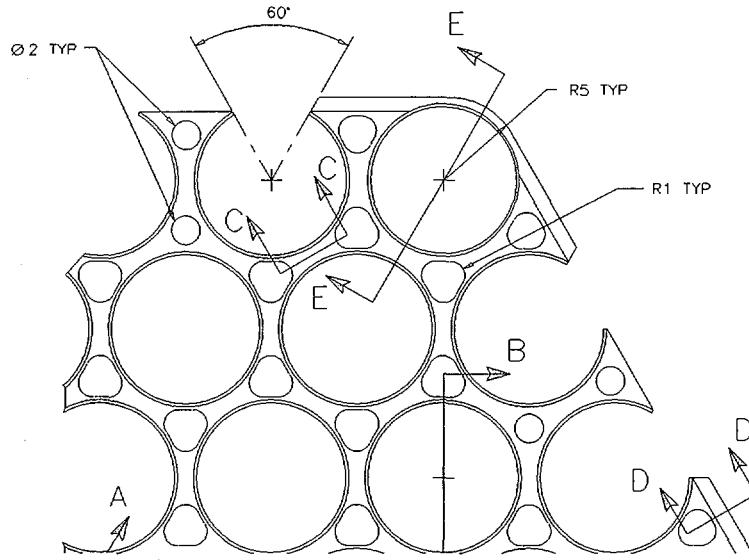
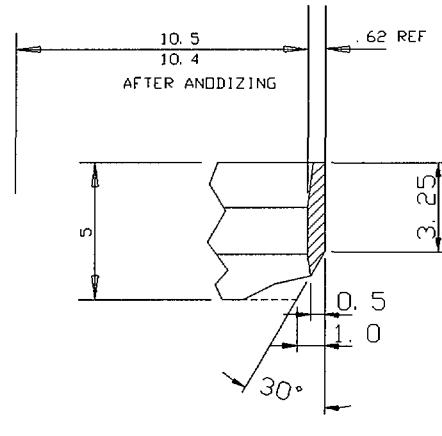


그림 11. 하부 유도체(Bottom Guide)



SECTION E-E, AREA = 1.68

설계변경전



SECTION E-E, AREA = 2.12

1차 설계변경

그림 12. 36봉 핵연료집합체 간격판 모서리 - 1차 설계변경

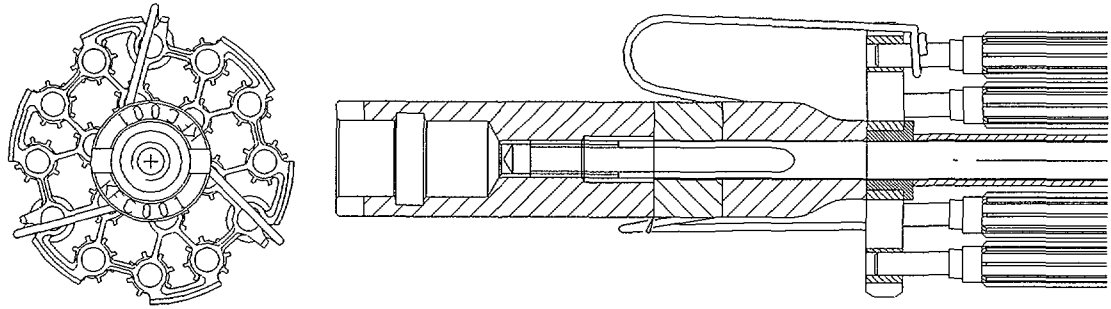


그림 13. 설계변경전 18봉 핵연료집합체 상부

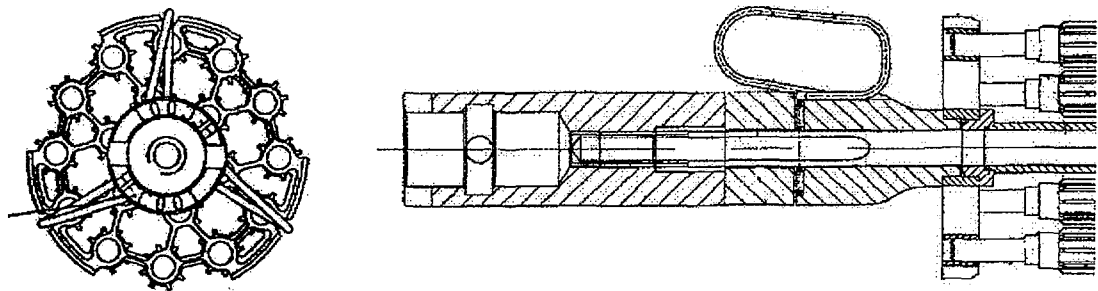


그림 14. 18봉 핵연료집합체 상부 - 1차 설계변경

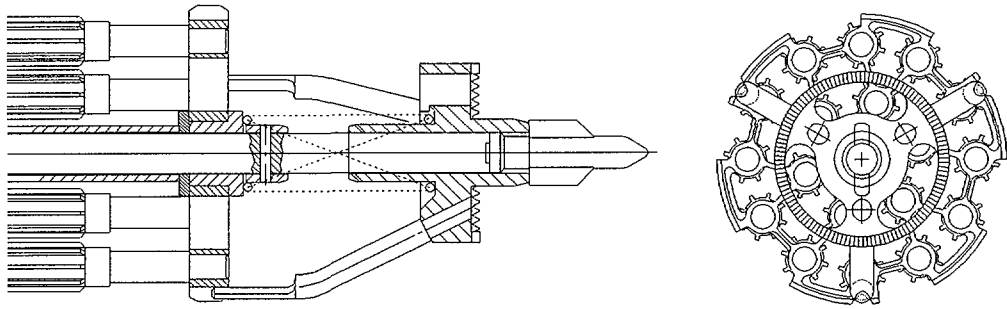


그림 15. 설계변경전 18봉 핵연료집합체 하부

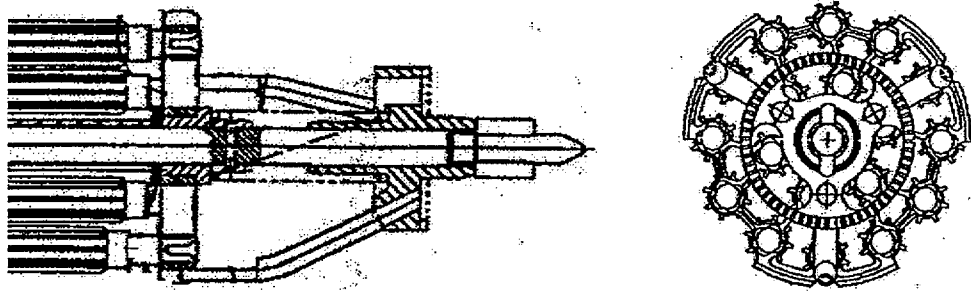
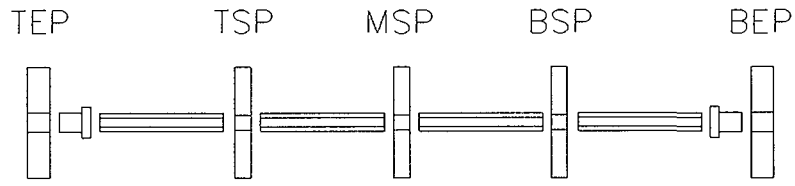
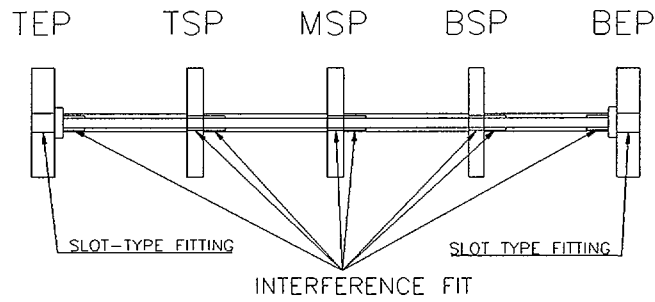


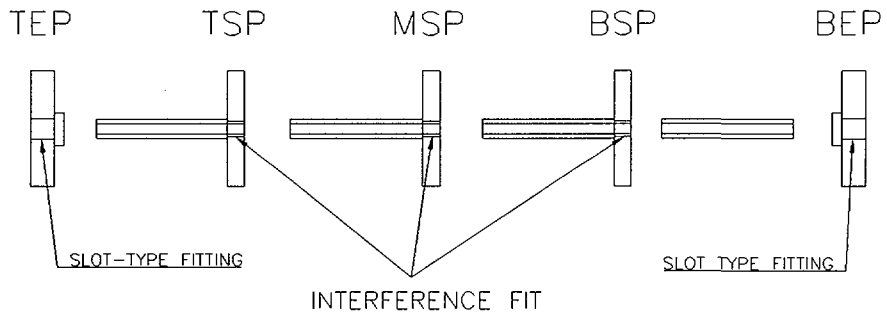
그림 16. 18봉 핵연료집합체 하부 - 1차 설계변경



설계변경전(분리형)



1차 설계변경(일체형)



2차 설계변경(부분 일체형)

그림 17. 18봉 핵연료집합체 간격판과 간격판의 조립개념 설계변경

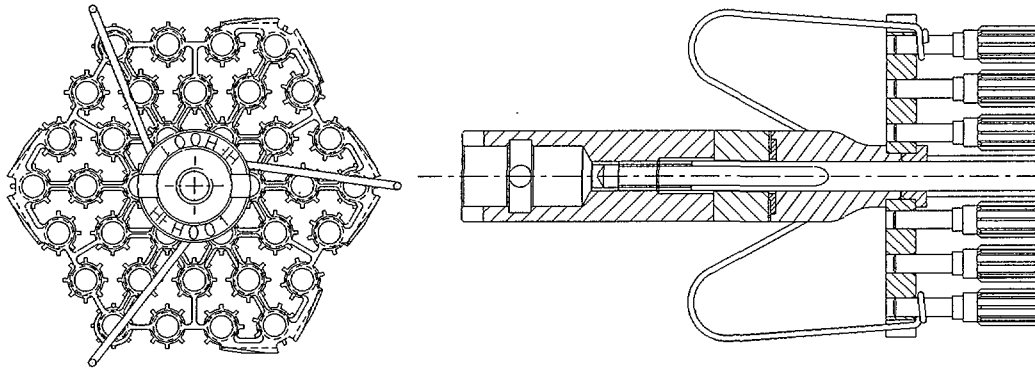


그림 18. 36봉 핵연료집합체 상부 - 2차 설계변경

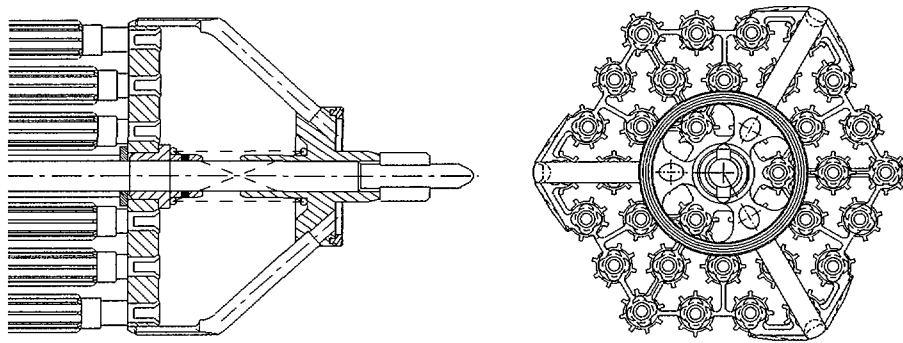
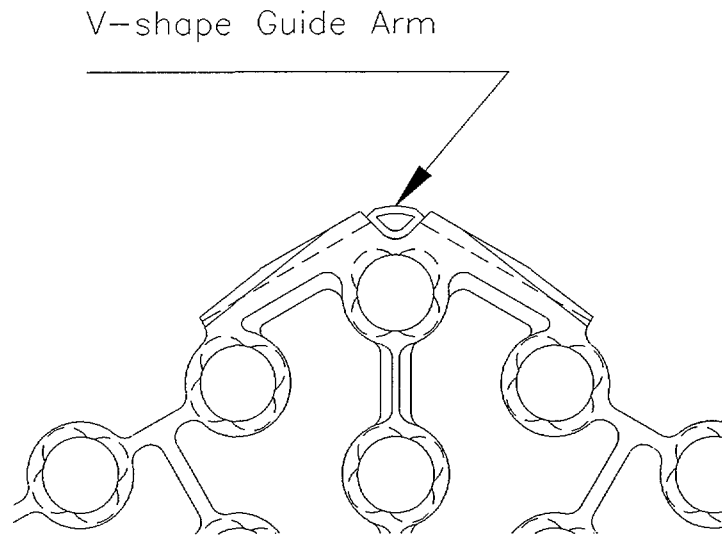
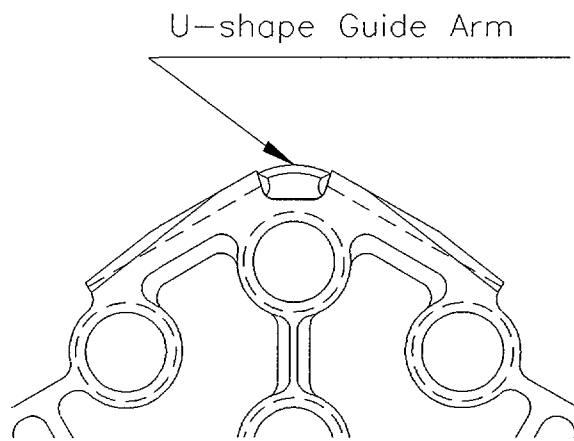


그림 19. 36봉 핵연료집합체 하부 - 2차 설계변경

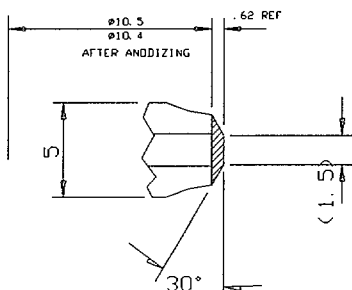
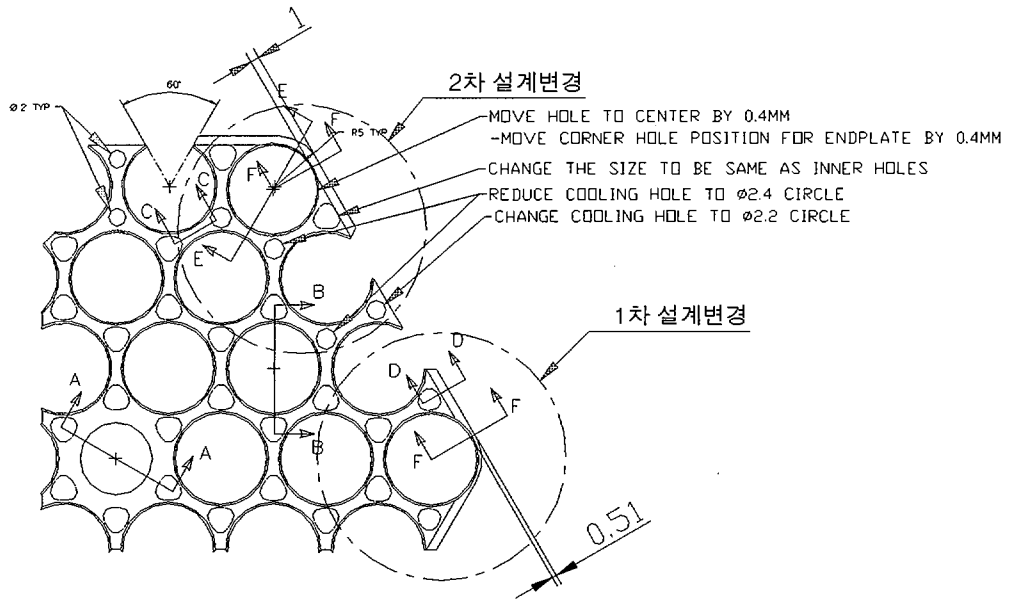


설계변경전(V형 접촉)



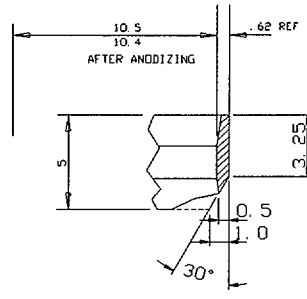
2차 설계변경(U형 접촉)

그림 20. 36봉 핵연료집합체의 Guide Arm과 BEP Slot 결합 방법



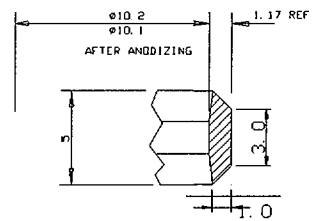
설계변경전

SECTION E-E, AREA = 1.68



1차 설계변경

SECTION E-E, AREA = 2.12



2차 설계변경

SECTION E-E, AREA = 4.49

그림 21. 36봉 핵연료집합체 간격판 모서리 - 2차 설계변경

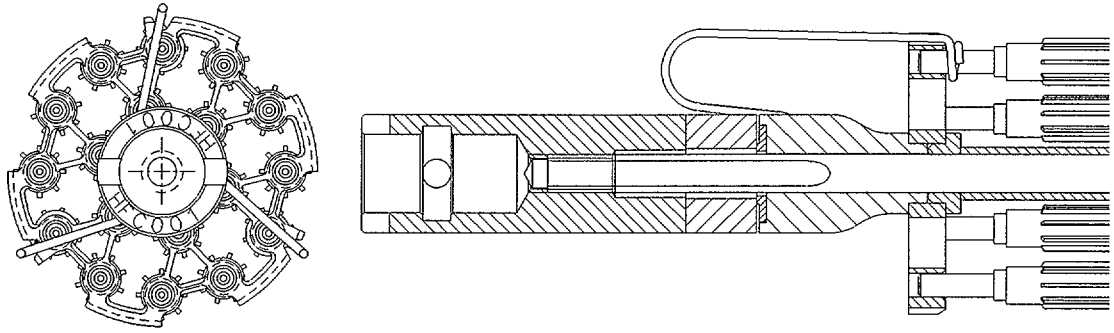


그림 22. 18봉 핵연료집합체 상부 - 2차 설계변경

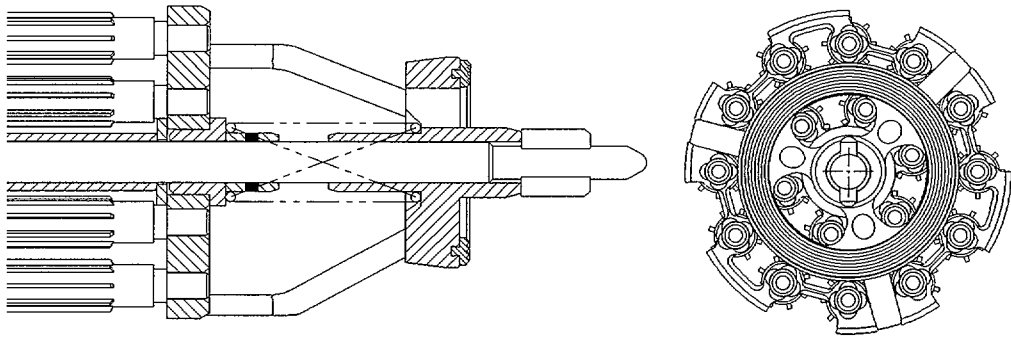


그림 23. 18봉 핵연료집합체 하부 - 2차 설계변경

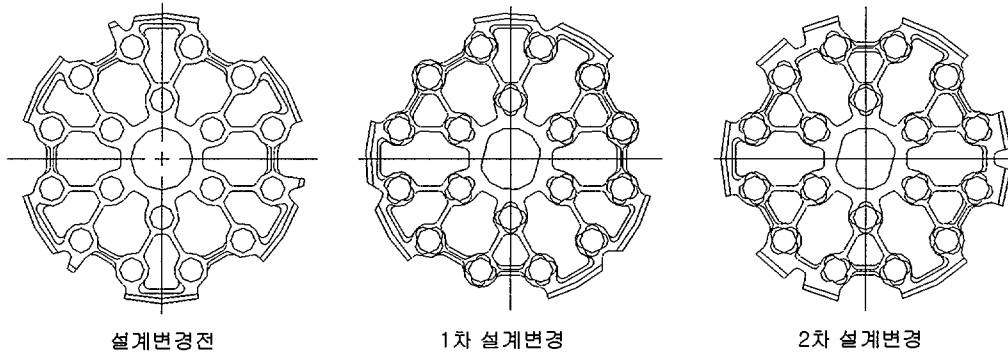


그림 24. 18봉 핵연료집합체 하부봉단접합판(BEP)의 설계 변경

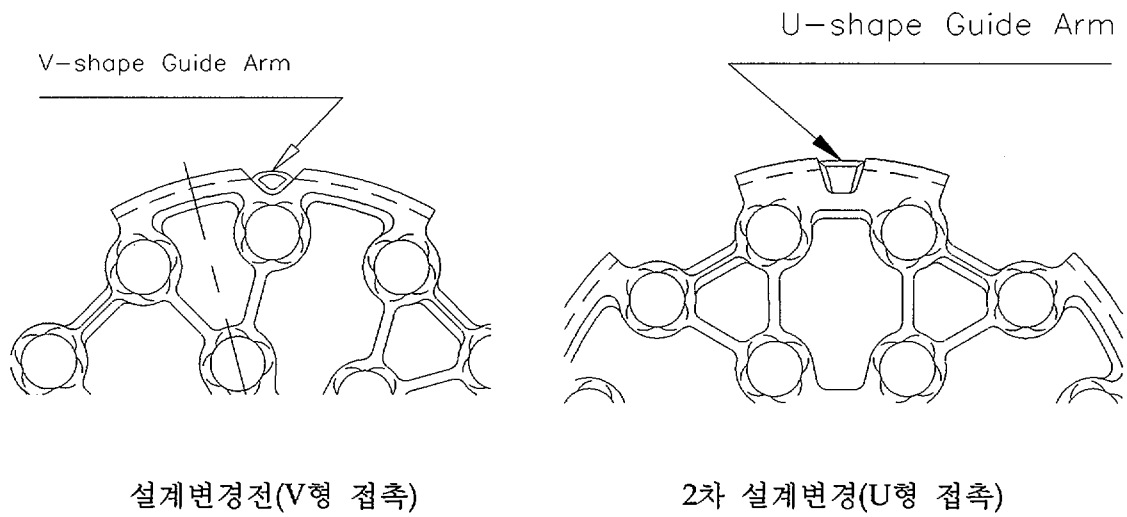


그림 25. 18봉 핵연료집합체의 Guide Arm과 BEP Slot 결합 방법

부 록

36봉 핵연료집합체의 육각 모서리봉 이동에 따른 열적 여유도 영향

A1. 개 요

36봉 핵연료집합체에서 기계적인 마모에 가장 취약한 부위는 간격판 모서리로 이 부위가 마모 절단되는 것이다. 현재 간격판 모서리의 얇은 web을 보강하기 위하여 corner hole을 안쪽으로 이동하는 안을 고려하고 있다. 이 메모에서는 설계 변경안을 확정하기 전에 간격판 corner hole 이동으로 모서리봉도 위치가 바뀌므로 이로 인한 노심의 열적 여유도 영향을 평가하였다.

A2. 설계 변경안

간격판 corner hole 이동과 관련한 설계 변경안은 다음과 같으며 그림 A-1에 도시되어 있다[1].

- 간격판 corner hole을 중심 방향으로 0.4 mm 이동
: 이 경우 가장 얇은 corner web의 두께가 0.66 mm에서 1.0 mm로 증가.
- 동일한 유로 면적을 유지하기 위하여 작은 cooling hole들의 크기를 조절.

A3. 열적 여유도 영향 평가

A3.1 부수로 유로 면적 변화

간격판 corner hole 위치가 바뀔에 따라 6개의 모서리 봉 위치도 0.4 mm 중심 방향으로 이동하게 된다. 특히 그림 A-1에서 고온 부수로에 해당하는 corner subchannel의 유로 면적이 증가한다.

A3.2 간격판 압력손실계수의 변화

기존의 부수로 해석 결과 각 부수로별로 유속 분포를 결정하는데 간격판의 영향이 큰 것으로 나타났다. Corner web의 두께가 증가함에 따라 corner subchannel의 유로 차단을 크게 하고 압력손실계수를 증가시켜 간격판 후단의 유속이 감소하게 된다. 그러므로 간격판에서의 압력손실을 유지시키는 조건에서 유로차단비에 따라 서로 다른 부수로 압력손실계수를 도출하였다[2]. 새로운 간격판의 부수로별 압력손실계수는 표 A-1과 같다.

A3.3 열적 여유도 영향 평가

1) 부수로별 유속 분포

기존 핵연료집합체와 corner봉 이동 핵연료집합체의 부수로별 유속 분포를 그림 A-2에 비교 도시하였다. 간격판 corner web 두께 증가로 corner 부수로에서의 유속이 전체적으로 기존 핵연료보다 감소하였으며 CHF가 최소가 되는 지점의 유속은 5.86 m/s에서 5.44 m/s로 약간 감소하였다.

2) 열적 여유도 평가 결과

정상 상태와 사고 상태 노심에 대한 평가 결과는 표 A-2에 실려 있다. 핵연료 중심온도는 여유도가 크므로 MCHFR과 ΔT_{ONB} 에 대하여 기존 핵연료와 비교하였다. 비교 결과 임계열속비가 최소가 되는 사고인 펌프축 고착 사고의 경우 MCHFR이 2.21에서 2.17로 약간 감소하였으며 정상상태 ΔT_{ONB} 는 19.8℃에서 20.9℃로 증가하였다.

A4. 결론

36봉 핵연료집합체의 간격판에서 기계적인 마모에 가장 취약한 부위는 모서리 web으로 이 부분의 두께를 키우기 위하여 corner hole을 중심 방향으로 0.4mm 이동하는 것을 고려하고 있다. 이 경우 6개의 모서리 핵연료봉 위치가 바뀌므로 이로 인해 노심의 열적 여유도에 미치는 영향을 평가하였다. 평가 결과 MCHFR는 2% 정도 감소하고 ΔT_{ONB} 는 5% 증가하였으며 설계 한계값을 모두 만족하므로 설계 변경에 문제가 없을 것으로 판단한다. 또한 36봉 핵연료의 간격판과 하부봉단접합판의 압력손실계수가 수정되었으므로 추후 노심의 열적 여유

도 평가에는 수정된 값이 적용되어야 한다.

참고문헌

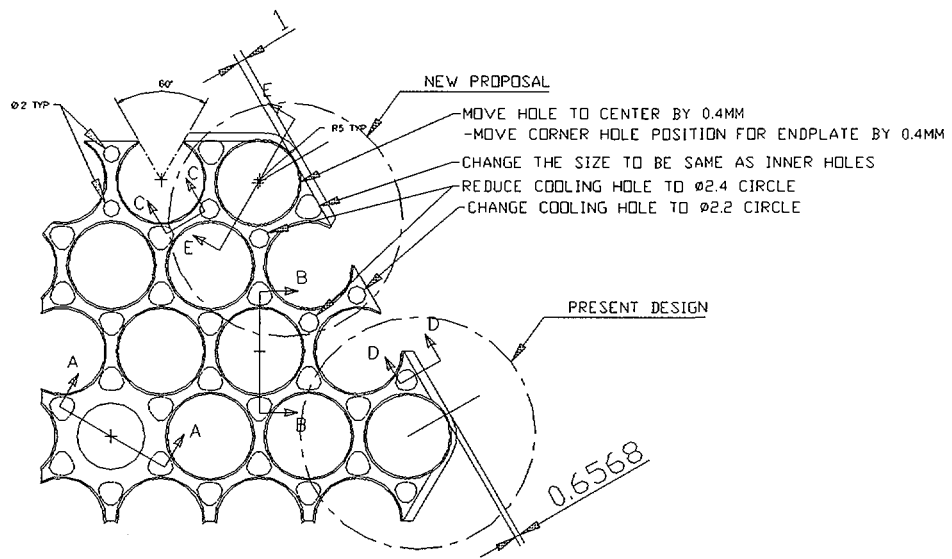
- [1] Y.G.Cho, H.T.Chae, "Design change proposal for fuel of the first shipment of 2000", Correspondence, HAN-RS-CR-99-049, 1999.11.26.
- [2] 채희택, 이기홍, "하나로 노심의 열수력 해석을 위한 기본 자료 생산 및 압력손실 계수 평가" 기술보고서, KAERI/TR-1344/99, 1999.6.

표 A-1. 36봉 핵연료집합체 간격판의 부수로별 기하학적 데이터 및 압력손실계수

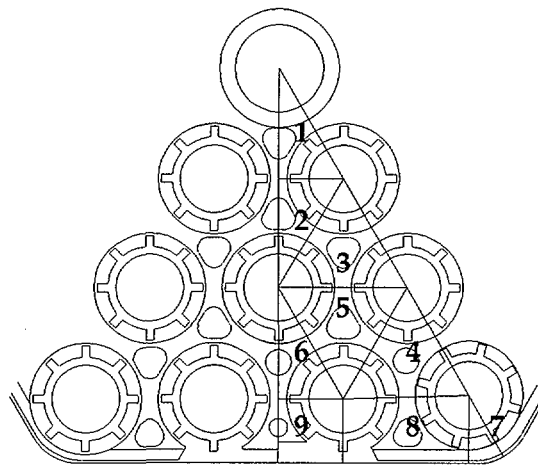
Parameters			Subchannel Number									Channel Average
			Sub-1	Sub-2	Sub-3	Sub-4	Sub-5	Sub-6	Sub-7	Sub-8	Sub-9	
Fuel Region	기존 핵연료	A _f	13.97	17.47	34.93	34.93	34.93	17.47	5.90	44.85	22.43	2722.5
		De	5.73	6.81	6.81	6.81	6.81	6.81	3.42	5.52	5.52	6.152
	설계 변경 핵연료	A _f	13.97	17.47	34.93	32.86	34.93	17.47	7.14	45.69	22.43	2714.4
		De	5.73	6.81	6.81	6.40	6.81	6.81	4.14	5.62	5.52	6.134
Spacer	기존 핵연료	A _f	8.60	11.18	22.36	22.36	22.36	11.18	4.15	26.74	16.39	1743.9
		De	2.01	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.32	1.70	2.33	
		K _{SP,i}	1.0471	0.9185	0.9185	0.9185	0.9185	0.9185	0.6288	1.1564	0.5134	0.9118
	설계 변경 핵연료	A _f	8.60	11.18	22.36	19.18	22.36	9.99	3.25	27.01	16.82	1689.0
		De	2.01	1.92	1.92	1.65	1.92	1.72	1.03	1.71	2.34	
		K _{SP,i}	1.0432	0.9151	0.9124	1.2253	0.9151	1.2939	1.7507	1.1805	0.4426	1.001
Bottom Endplate (BEP)	기존 핵연료	A _f	4.14	16.56	33.11	38.11	43.11	17.11	1.90	21.22	25.27	2406.2
		De	4.28	6.31	7.79	10.89	15.68	5.31	1.17	3.74	7.22	
		K _{SP,i}	0.5550	0.1528	0.1547	0.2135	0.2686	0.1433	0.5484	0.4015	0.2058	0.2635
	설계 변경 핵연료	A _f	4.14	16.56	33.11	38.11	43.11	17.11	2.47	21.22	25.27	2406.2
		De	4.28	6.31	7.79	10.89	15.68	5.31	1.52	3.74	7.22	
		K _{SP,i}	0.5503	0.1515	0.1534	0.2428	0.2663	0.1421	0.4824	0.4049	0.2040	0.2635

표 A-2. 36봉 핵연료집합체에 대한 열적 여유도 평가 결과

적용 운전조건	설계 변수	제한치	핵연료집합체	
			기존 핵연료	설계 변경 핵연료
정상 상태	ΔT_{ONB} (°C)	12.7	19.8	20.9
	MCHFR	-	3.74	3.58
펌프축 고착사고	MCHFR	1.92	2.21	2.17

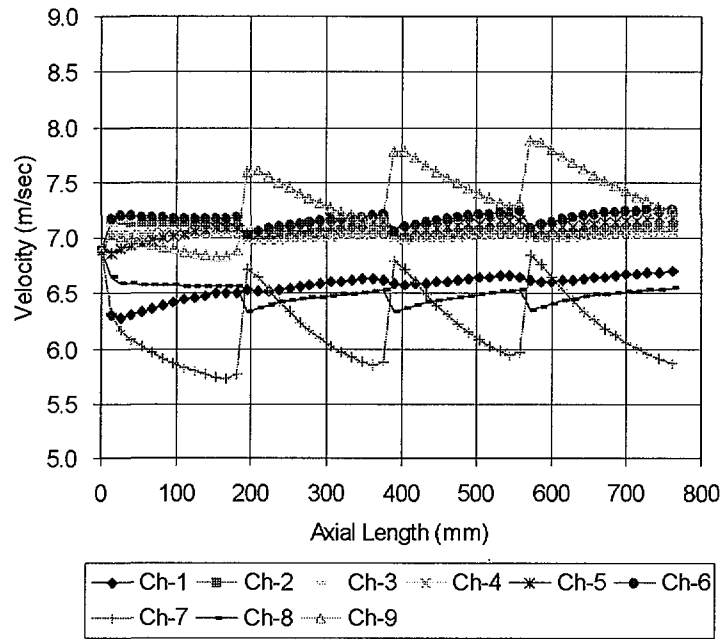


1) 간격판 설계 변경안

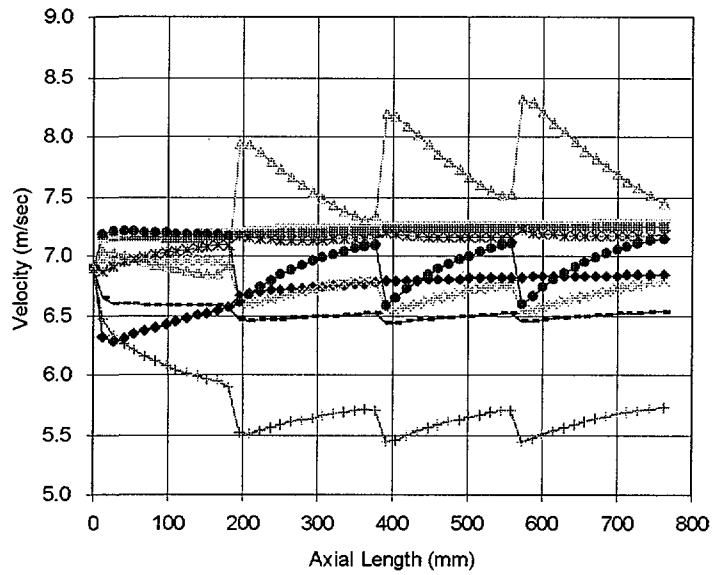


2) 부수로 해석 모델

그림 A-1. 36봉 핵연료집합체의 간격판에 대한 설계 변경 내용



1) 기존 핵연료집합체



2) 0.4mm 이동 설계 변경 핵연료집합체

그림 A-2. 각 부수로별 유속 분포에 대한 비교

서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호		위탁기관보고서번호		표준보고서번호	
KAERI/TR-1594/2000					
제 목 / 부 제		하나로 핵연료집합체 마모 감소를 위한 설계 개선			
연구책임자 및 부서명 (TR, AR인 경우 주저자)		조 영 갑 / 하나로운영팀			
연구자 및 부서명		채희택, 류정수, 김학노 / 하나로운영팀			
출 판 지	대 전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2000. 6.
페 이 지	48 p.	도 표	있음(V), 없음()	크기	29x21 cm
참고사항					
비밀여부	공개(), 대외비(V), _ 급비밀		보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관			계약 번호		
초록 (15-20줄내외)					
<p>1996년 12월 원자로에서 인출한 핵연료집합체에 대한 육안검사 과정에서, 다수의 핵연료집합체에서 기계적인 손상을 입은 부품들이 발견되었다. 주된 손상은 유동관 내에서 유체유발진동(FIV, Flow Induced Vibration)으로 인한 간격판과 봉단접합판의 마모 현상이었다.</p> <p>원자로는 방사화되어 있고, 핵연료집합체 진동의 유발인자를 완전히 없애기 위한 계통의 변경은 현실적으로 매우 어렵기 때문에 핵연료 설계변경에 초점이 맞추어져 왔다. 따라서, 육안검사 결과에 대한 평가를 바탕으로 마모를 줄일 수 있는 다양한 설계 변경 방안들이 도출되었으며, 설계 변경된 부품의 성능시험, AECL에 있는 단일 유로 시험시설에서의 핵연료집합체의 진동 시험과 내구성 시험 등을 거쳐 설계 변경 방안의 타당성이 확인되었다. 1차 설계 변경 내용에 따라 제작된 핵연료집합체를 노심에 장전한 후, 계속된 육안검사 결과를 바탕으로 추가적인 설계 변경이 진행되었다.</p> <p>1차 설계 변경 효과로서, 36봉 핵연료집합체의 경우는 주요 마모 부위인 간격판의 마모가 현저하게 감소되어 마모손상까지의 기간이 약 60% 연장되었다. 18봉 핵연료 집합체의 경우는 현재까지 손상된 개량 핵연료집합체가 2개뿐이므로 통계적 자료가 부족하여 마모수명 연장 여부를 판단할 수 없으나, 주요 마모 부위인 하부 봉단접합 판 slot의 마모율은 절반 정도로 줄어들었다. 2차 설계 변경은 핵연료집합체의 마모 취약 부위인 간격판 모서리와 하부 봉단접합판을 강화하는 방향으로 이루어져 마모 설계수명에 대한 요구 조건을 만족시킬 것으로 기대된다.</p> <p>이 보고서에서는 마모 현상을 줄이기 위하여 수행한 하나로 핵연료집합체에 대한 설계 변경과 성능 시험에 대해 기술하고, 노심에 장전된 핵연료집합체의 육안 검사 결과를 바탕으로 기존 핵연료집합체와 설계 변경 핵연료집합체의 마모 현상에 대한 설계 개선 효과를 정량적으로 비교 평가하였다.</p>					
주제명키워드 (10단어내외)		하나로, 핵연료집합체, 설계 변경, 마모, 내구성, 진동, 육안검사, 간격판			

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	
KAERI/TR-1594/2000					
Title/ Subtitle		Design Improvement for Fretting-Wear Reduction of HANARO Fuel Assembly			
Project Manager and Department (or Main author)		Yeong-Garp Cho / HANARO Operation Team			
Researcher and Department		H.T. Chae, J.S. Ryu, H.R. Kim / HANARO Operation Team			
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI	Publication Date	2000. 6.
Page	48 p.	Fig. & Tab.	Yes(V), No ()	Size	29x21 cm.
Note					
Classified	Open(), Restricted(V), ___ Class Document		Report Type	Technical Report	
Sponsoring Org.			Contract No.		
Abstract(15-20 Lines)					
<p>In the course of the visual inspection of the fuel assemblies un-loaded from the reactor core in December 1996, it was observed that many of fuel assemblies had mechanical damages on some components. The major damage was the fretting-wear on spacer plates and endplates due to the flow induced vibration of the fuel assembly in the flow tube.</p> <p>Since the reactor is activated and the system modification for complete removal of the driving factors of the vibration of fuel assemblies is practically very difficult, the focus has been on the design change of the fuel assemblies. Consequently, various design changes were proposed to strengthen the wear resistance of the components based on the evaluation of the visual inspection results. The validity of the proposals was verified through the performance tests for the modified components, and the vibration test and endurance test for the fuel assemblies using the single-channel test rig(SCTR) in AECL. The subsequent design changes were additionally proposed based on the visual inspections for the fuel assemblies that had been fabricated according to the first design change and loaded in the core.</p> <p>As the effects of the first design change, the fretting-wear of spacer plates was remarkably reduced and the period until fretting-wear damage was extended by 60% for the first modified 36-rod fuel assembly. It is too early to say the endurance life time for the first modified 18-rod fuel assembly because of insufficient statistical data of only two bundles damaged, but the fretting-wear at the bottom endplate slot was reduced to about 50%. The second modified fuel assemblies, that were not loaded into the core yet, are expected to meet the design requirements for the core residence time due to strengthening the weak parts from the fretting-wear point of view.</p> <p>This report describes design changes and tests for fuel assemblies of HANARO to reduce the fretting-wear, and estimates the effects of design improvement quantitatively compared with the original fuel assemblies through the visual inspections of the fuel assemblies loaded in the reactor.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		HANARO, Fuel Assemblies, Design Change, Wear, Endurance, Vibration, Visual Inspection, Spacer Plate			