

KAERI/TR-2909/2005

수출전력형연구로 튜브형 핵연료집합체의
개념설계

The Conceptual Design for Tubular Fuel Assemblies of
an Advanced Research Reactor

KAERI

2005. 5.

한국원자력연구소

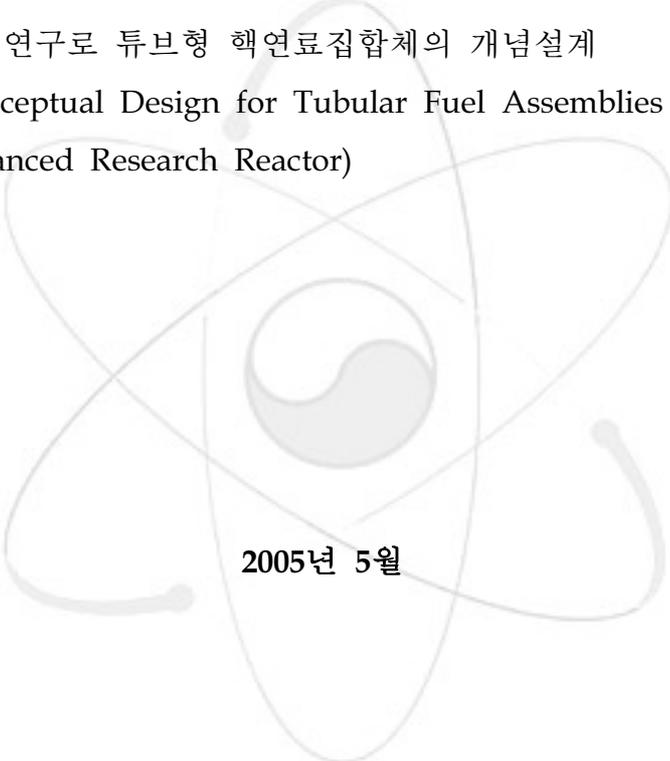
Korea Atomic Energy Research Institute

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2004년도 “수출전략형연구로 계통설계해석” 과제의 기술보고서로 제출합니다.

제목: 수출전략형연구로 튜브형 핵연료집합체의 개념설계
(The Conceptual Design for Tubular Fuel Assemblies of
an Advanced Research Reactor)



2005년 5월

주 저 자 : 류 정 수 (하나로운영부)

공 저 자 : 단 호 진 (하나로운영부)

조 영 갑 (하나로운영부)

윤 두 병 (하나로운영부)

박 철 (하나로운영부)

요 약 문

2002년부터 수출전략형연구로의 설계를 수행하고 있으며, 최종목적은 안전성과 경제성이 우수한 고유의 연구로 모델을 새로 설계하는 것이다. 본 연구에서는 수출전략형연구로의 튜브형 핵연료집합체를 개선하기 위하여 개념연구를 수행하였다. 상부 가이드의 단면 형상을 개선하는 형상 최적설계를 수행하였으며, 곡판 핵연료와 stiffener를 연결하는 스웨징(swaging) 공정을 개발하였다. 또한 핵연료 곡판의 개수 및 치수를 변경하여 표준 및 감축 핵연료집합체의 관련 부품을 설계하였다. 상부 가이드는 냉각수 유동에 의한 핵연료집합체의 진동을 최소화할 수 있는 구조로 설계되어야 하며, 구조적으로 건전하여 피로 또는 항복에 의한 파괴의 가능성이 없어야 한다. 이를 위하여 상부 가이드에 대한 형상 최적설계를 수행하여 설계에 반영하였다. 핵연료집합체의 제작 가능성을 확인하기 위하여 스웨징 공정 절차를 개발하고 결합 정도를 평가하기 위하여 시험을 수행하였다. 곡판 핵연료와 stiffener의 연결부에 대한 접선방향 인장시험과 축방향 압축시험을 수행한 결과로 결합부가 구조적으로 건전하여 개발된 스웨징 공정이 핵연료집합체의 제작에 이용될 수 있음을 확인하였다. 곡판 핵연료의 개수 및 치수의 변경으로 핵연료집합체의 단면 직경이 약간 커졌으며 중심축의 직경은 가늘어졌다. 이를 반영하여 상·하부 가이드, 상부 가이드 덮개, 스프링 및 스프링 덮개 그리고 receptacle 등의 재설계를 수행하여 새로운 핵연료집합체에 대한 개념설계를 완료하였다. 향후 하나로의 설계와 운전경험을 바탕으로, 튜브형 표준 및 감축 핵연료집합체에 대하여 다양한 시험과 해석을 수행하여 모델의 타당성을 지속적으로 검증할 예정이다.

ABSTRACT

An Advanced Research Reactor (ARR) is being designed by KAERI since 2002. The final goal of the project is to develop a new and unique research reactor model which is superior in safety and economical aspects. In this work, the conceptual design for tubular fuel assemblies was carried out to enhance the previous model. The shape optimization of the cross section of the top guide was performed, and the swaging procedure in connecting fuel plates and stiffeners was developed. Moreover to reflect changes in number and size of fuel plates, related parts of the standard and the reduced fuel assemblies were redesigned. The top guide should suppress the vibration of the fuel assembly due to coolant and resist against material failures owing to fatigue and yield. In order to gain these design requirements, we have optimized the section profile of the top guide. To confirm manufacturing aspects, the swaging procedure was developed and its performance was tested. The results of tangential tensile test and axial compression test guaranteed that the fixing state between fuel plates and stiffeners is firm enough to hold each other. In addition, due to changes in number and size of fuel plates, the outer cross section of the fuel assembly was expanded and the diameter of the spacer tube was reduced. Reflecting these design changes, top/bottom guide, top guide cover, spring, spring cover, and receptacle were readjusted. Based on the technical experiences on the design and operation of the HANARO, the tubular standard and reduced fuel assemblies will be verified by performing various tests and analysis.

목 차

제 출 문	i
요 약 문	ii
Abstract	iii
목 차	iv
표 목 차	v
그림목차	vi
1. 서론	1
2. 상부 가이드의 형상 최적설계	2
2.1 최적설계 목적	2
2.2 단면 형상	4
2.3 수치 해석 및 최적설계 결과	5
3. 스웨징(swaging) 공정 개발 및 시험	7
3.1 스웨징 공정 개발	7
3.2 스웨징 시험편의 인장 및 압축 시험	12
4. 튜브형 핵연료집합체의 개념설계	16
4.1 표준 핵연료집합체의 단면	16
4.2 감축 핵연료집합체의 단면	16
4.3 표준 핵연료집합체의 상부 및 하부 고정장치의 개념설계	20
4.4 감축 핵연료집합체의 상부 및 하부 고정장치의 개념설계	34
4.5 스프링 설계	44
4.6 노심 구조와의 연계	44
4.6 표준 및 감축 핵연료집합체의 개념설계 도면	46
5. 결 론	49
6. 참고 문헌	51

표 목 차

표 2-1	25°C에서 Al 6061-T6의 기계적 성질	4
표 2-2	상부 가이드의 형상 최적설계 결과	5
표 4-1	핵연료 치수 및 개수 변경 목록 (단위: mm)	17
표 4-2	핵연료집합체 단면 배열 치수표	19
표 4-3	핵연료집합체의 부품 재료	21
표 4-4	상부 스프링 설계	44



그림목차

그림 2-1	Modified Goodman 선도	4
그림 2-2	상부 가이드의 단면 설계변수의 정의	5
그림 3-1	스웨징을 위한 stiffener의 홈 가공	9
그림 3-2	스웨징 치구	9
그림 3-3	스웨징 공구의 경로 단면	10
그림 3-4	곡판 핵연료 스웨징 가공 모습 (I)	10
그림 3-5	곡판 핵연료 스웨징 가공 모습 (II)	11
그림 3-6	스웨징 가공후 결합된 곡판 핵연료와 stiffener	11
그림 3-7	인장 및 압축 시험을 위한 시편	13
그림 3-8	접선방향 인장시험을 위한 지그	13
그림 3-9	접선방향 인장시험 모습	14
그림 3-10	축방향 압축시험을 위한 지그	14
그림 3-11	축방향 압축시험 모습	15
그림 4-1	설계 변경된 핵연료집합체의 단면	18
그림 4-2	곡판 핵연료	22
그림 4-3	표준 핵연료집합체의 stiffener	23
그림 4-4	표준 및 감축 핵연료집합체의 spacer tube	24
그림 4-5	표준 핵연료집합체의 곡판 핵연료, stiffener, spacer tube 및 central rod의 조립도	25
그림 4-6	표준 핵연료집합체의 상부 고정장치	26
그림 4-7	표준 핵연료집합체의 상부 가이드덮개	27
그림 4-8	표준 핵연료집합체의 상부 가이드와 상부 가이드롤러	27
그림 4-9	표준 및 감축 핵연료집합체의 grapple head	28
그림 4-10	표준 및 감축 핵연료집합체의 spring cover	28

그림 4-11 표준 핵연료집합체의 하부 고정장치	29
그림 4-12 표준 핵연료집합체의 bottom guide	30
그림 4-13 표준 핵연료집합체의 receptacle	30
그림 4-14 표준 핵연료집합체의 spider	31
그림 4-15 표준 및 감축 핵연료집합체의 central rod tip	31
그림 4-16 표준 핵연료집합체의 형상	32
그림 4-17 표준 핵연료집합체와 receptacle의 형상	33
그림 4-18 감축 핵연료집합체의 stiffener	35
그림 4-19 감축 핵연료집합체의 곡판 핵연료, stiffener, spacer tube 및 central rod의 조립도	36
그림 4-20 감축 핵연료집합체의 상부 고정장치	37
그림 4-21 감축 핵연료집합체의 상부 가이드덮개	38
그림 4-22 감축 핵연료집합체의 상부 가이드와 상부 가이드롤러	38
그림 4-23 감축 핵연료집합체의 하부 고정장치	39
그림 4-24 감축 핵연료집합체의 bottom guide	40
그림 4-25 감축 핵연료집합체의 spider	40
그림 4-26 감축 핵연료집합체의 유동관	41
그림 4-27 감축 핵연료집합체의 형상	42
그림 4-28 감축 핵연료집합체와 유동관의 형상	43
그림 4-29 노심 구조의 개념설계 (평면도)	45
그림 4-30 노심 구조의 개념설계 (정면도)	46

1. 서론

안전성과 경제성이 우수한 고유의 연구로 모델을 새로 설계하기 위해서, 2002년부터 핵연료집합체, 노심구조 및 원자로구조물을 포함하여 새로운 연구로의 계통에 대한 설계 및 해석을 수행하고 있으며, 첫 단계로 튜브형 핵연료집합체의 개념설계를 수행하였다.

핵연료집합체의 형상은 제어봉 및 구동 장치, 장전 방식, 노심 구조 등의 기계적인 측면과 핵설계 측면에서의 노심 성능 및 안정성, 경제적인 측면 등 여러 면을 고려하여 설계하여야 한다. 1차년도 연구에서 핵연료의 형태로는 튜브 곡판형[1]을 선정하였고, 이를 이용한 표준 핵연료집합체를 구성하는 방법에 대하여 잠금장치를 포함하여 개념설계를 수행하였다[2~6]. 핵연료집합체의 주요 구성 요소인 상부 가이드는 냉각수 유동에 의한 핵연료집합체의 진동을 최소화할 수 있는 구조로 설계되어야 하며, 피로 또는 항복에 의한 파괴의 가능성이 없어야 한다. 이를 위하여 상부 가이드 날개 단면에 대한 형상 최적화를 수행하였다[6].

개념설계된 튜브형 핵연료집합체에 대하여 설계를 검토하고, 각종 시험을 수행하기 위하여 시제품을 제작하였다. 개념설계를 확정하기 위하여 제작된 시제품을 사용하여 잠금장치의 회전저항을 측정하고 진동 특성을 파악하여 그 결과를 개념설계에 반영하고 있다[4]. 또한, 시제품을 제작하는 과정에서 필요한 제작 공정을 개발하여, 향후 개념설계를 구체적으로 실현하는데 필요한 생산 기술을 축적하고 있다. 시제품 제작을 위하여 부품 제작을 위한 기술시방서를 작성하였으며, 곡판 핵연료와 stiffener를 고정·연결하는 스웨징 공정 절차 개발 및 시제품 제작에 대한 기술시방서를 작성하여 표준형 핵연료집합체의 시제품 제작에 적용하였다[7,8]. 개발된 스웨징 공정에 의한 결합 정도를 평가하기 위하여 접선방향 인장시험과 축방향 압축시험을 수행하였고, 그 결과로부터 개발된 공정은 핵연료집합체의 제작에 사용할 수 있음을 확인하였다.

튜브형 핵연료집합체 설계 및 치수에 대한 연구 결과를 반영하여 표준형 및 감축형 핵연료집합체의 상·하부 가이드를 포함한 여러 부속 요소의 설계를 개선하였다. 핵연료의 치수 및 개수가 증가하여 알루미늄 블록의 내경이 약간 더 커졌으며 spacer tube가 더 늘어졌다. 이에 따라 상·하부 가이드, 상부 가이드 덮개, 스프링 및 스프링 덮개 그리고 receptacle등을 순차적으로 설계 변경하여 도면을 개정하였다.

향후 설계 변경된 튜브형 핵연료집합체의 기초 모델에 대한 다양한 시험과 해석을 수행하고, 연구로 설계 경험자 및 연구로 사용자들의 의견을 반영하여 지속적으로 설계를 개선해 나갈 예정이다.

2. 상부 가이드의 형상 최적설계

2.1 최적설계 목적

그림 4-6과 그림 4-20은 표준 및 감축 핵연료집합체의 상부 모습을 보여주고 있으며, 주요 부품인 상부 가이드는 그림 4-8과 그림 4-22에 나타나 있다. 각각 표준 및 감축형 핵연료집합체의 상부 가이드에는 상부 가이드롤러가 끝단에 조립되어 있다. 상부 가이드의 하단에 곡판 핵연료와 stiffener 집합체, 그리고 그 중심을 통과하는 spacer tube가 결합되고 상부 가이드덮개가 상부 가이드의 상부를 덮는다. 표준 핵연료집합체는 알루미늄 블록의 노심에, 감축 핵연료집합체는 지르칼로이(Zr-4)의 유동관에 장전된다. 상부 가이드는 장전 과정에서 상부 핵연료집합체를 지지하며, 장전후 원자로 가동 중에는 냉각수에 의한 유체유발진동으로부터 핵연료집합체를 지지해야 한다. 알루미늄 블록 노심과 유동관 내부는 핵연료집합체와의 직접적인 마찰로 인한 마모를 방지할 필요가 있게 된다. 따라서 제1차 개념설계에서는 상부 가이드가 스프링 역할을 하여 유체유발진동으로 인한 핵연료집합체의 진동을 흡수할 수 있도록 설계하여 마모에 대비하였다[1]. 제2차 개념설계에서는 핵연료집합체의 상부를 견고하게 지지할 수 있도록 상부 가이드의 단면 형상에 대한 최적설계를 수행하였고, 그 결과를 핵연료집합체의 설계에 반영하였다.

상부 가이드는 상부 가이드롤러를 통하여 유동관으로부터 지지력을 전달받는다. 이 지지력을 최대화하는 최적설계를 수행하여 유체유발진동으로부터 유동관에 장착된 핵연료집합체를 보호하고자 하였다. 즉 최적설계의 목적함수로 외팔보 형태를 따른 상부 가이드의 굽힘 강성을 증가시키는 것이다. 이렇게 함으로써 첫째, 정적평형 상태에서 추가적인 동적 하중이 가해지더라도 핵연료집합체와 유동관의 접촉을 막을 수 있다. 둘째, 핵연료집합체의 지지부를 견고하게 고정하며, 저차 진동 모드의 고유 진동수를 높일 수 있다. 핵연료집합체의 저차 보-모드는 국부적인 셀-모드보다 구조물의 동적 거동에 큰 영향을 주며, 일반적으로 고유진동수가 높은 경우 구조 강성이 커진다. 따라서 지지력을 목적함수로 하여 진동 특성을 개선할 수 있다.

핵연료집합체를 유동관에 장전할 때 상부 가이드롤러가 미끄러져 들어가면서 상부 가이드는 초기 변형을 받게 된다. 초기 변형에서 발생한 평균 응력을 갖는 재료의 피로 평가를 수행하기 위하여 그림 2-1의 수정된 Goodman 선도를 이용하였다[9]. 또한 그림 2-1의 Goodman 선도를 이용하면 재료의 항복까지 동시에 고려할 수 있다. 평균 응력 S_m 과 변동 응력 S_a 가 실선 안에 위치하면 재료가 피로와 항복에 의한 파괴로부터 안전하다. 그림 2-1에서 평균 응력은 인장과 압축에 대하여 대칭이 아니며, 인장을 받는 부분이 피로에 취약함을 알 수 있다[9,10]. 그런데 Goodman 선도를 이용하기 위해서는 3차원 다중 응력결과로부터 1차원 등가 응력의 특성을 얻어낼 필요가 있다. 대표적으로 쓰이는 등가 응력은

von-Mises 응력과 합응력이다. 초기 응력 상태를 갖는 재료의 피로해석을 위해서 평균 응력으로는 인장 및 압축 특성을 반영할 수 있는 합응력을 이용하였고, 평균 응력에 가해지는 변동 응력으로는 von Mises 등가 응력을 이용하였다. 평균 등가 응력 S_m 은 주응력 S_H 의 합으로 다음과 같이 정의된다[10].

$$S_m = S_{F1} + S_{F2} + S_{F3} \quad (2-1)$$

그리고 피로해석을 위한 변동응력 S_a 는 modified Goodman 식으로부터 구할 수 있다.

피로 및 항복에 대한 제한 조건을 고려하기 위하여, 피로에 의한 추가 변형 가능량 δ_F 와 항복에 의한 추가 변형 가능량 δ_Y 를 정의하였다. 평균 등가응력과 변동응력을 이용하여 피로 조건에 대한 추가 변형 가능량 δ_F 을 다음과 같이 정의하였다.

$$\delta_F = \frac{S_a}{S} = \frac{S_F}{S} \times \left(1 - \frac{S_m}{S_U}\right) \quad (2-2)$$

단, \bar{S} 는 von-Mises 등가 응력으로 정의된다. S_F 와 S_U 는 각각 피로 강도와 최대 인장 강도로 표 2-1에 상부 가이드의 재료 Al 6061의 물성이 정리되어 있다.

$$\bar{S} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(S_{F1} - S_{F2})^2 + (S_{F2} - S_{F3})^2 + (S_{F3} - S_{F1})^2} \quad (2-3)$$

항복에 대한 추가 변형 가능량 δ_Y 은 피로 조건과 마찬가지로 선형 해석 성질을 이용하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\delta_Y = \frac{S_Y}{S} - 1 \quad (2-4)$$

단, S_Y 는 항복 강도로 표 2-1에 사용된 재료의 물성을 정리하였다. 식 (2-2)와 (2-4)는 현재 변위를 기준으로 피로나 항복이 발생하지 않으면서 어느 정도의 추가 변동이 허용되는지를 나타내는 지표이다. $\delta=1$ 인 경우 초기 변형만큼의 추가 변형을 할 수 있다. 따라서 δ 가 클수록 대상 구조는 추가 변위에 대한 용통성을 가진다고 할 수 있다. 또한 δ_F 와 δ_Y 는 초기 거동을 기준으로 정의된 표현으로 동등하게 비교할 수 있으며, 두 제한 조건 중에 작은 값이 거동의 한계를 규정한다. 따라서 지지부에 작용하는 반력을 극대화하여 핵연료 집합체를 견고하게 지지하도록 다음과 같은 최적설계 문제를 구성하였다[11].

$$\begin{aligned} & \max R \\ \text{s.t. } & \min(\delta_F, \delta_Y) > \delta_0 \end{aligned} \quad (2-5)$$

단, R 은 지지부에서의 반력이고 δ_0 는 정규화 조건의 설계 하한선을 의미한다.

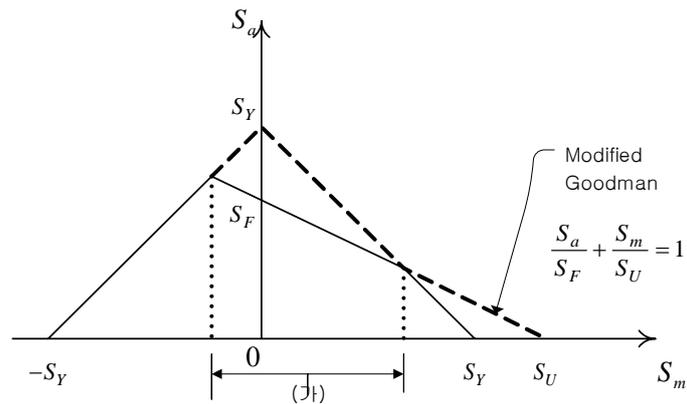


그림 2-1 Modified Goodman 선도

표 2-1 25°C에서 Al 6061-T6의 기계적 성질

Elastic modulus E (MPa)	66200
Poisson's ratio ν	0.33
Fatigue strength S_F (MPa)	95
Yield strength S_Y (MPa)	241
Ultimate tensile strength S_U (MPa)	262

2.2 단면 형상

그림 2-2에는 상부 가이드의 단면 형상 설계를 위하여 정의된 설계 변수가 표시되어 있다. 단면 형상은 벨기에, BR2 원자로에서 사용하고 있는 핵연료집합체의 상부 가이드와 유사한 제1차 개념설계안을 개선하기 위하여 정의된 것이다. 1차원 등가 응력 관점에서 압축과 인장이 중요한 영역을 C와 T로 표시하였다. 앞 절에 정의된 평균 등가 응력은 인장과 압축을 구별할 수 있으며, 최적설계 과정에서 제한 조건을 평가할 때 사용할 수 있다. 그림 2-2에 단면 형상을 정의하는 매개변수 x_1, x_2, x_3, y_1 이 나타나 있다. 이 매개변수들을 최적설계의 설계변수로 정하였다. 그림 2-2에 최적설계 전후의 치수(mm)가 나타나 있다. 여기서 괄호속의 치수는 설계변경전의 치수이다.

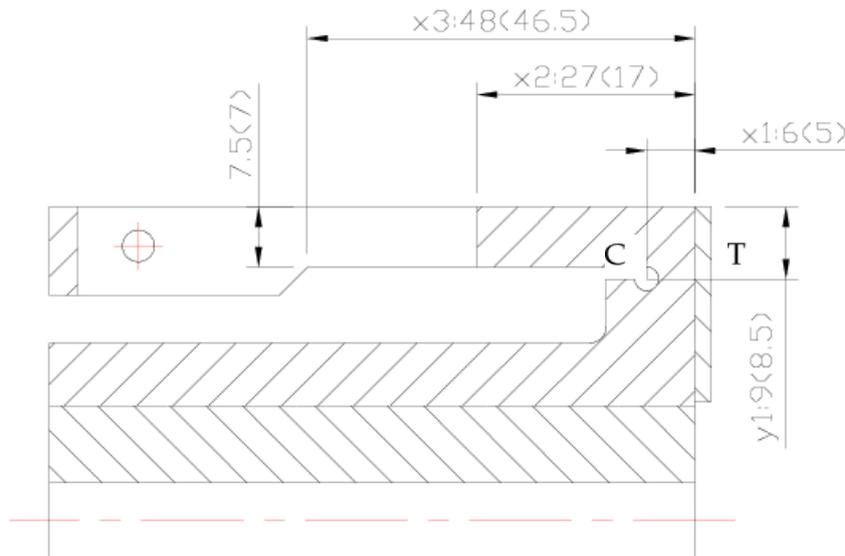


그림 2-2 상부 가이드의 단면 설계변수의 정의

2.3 수치 해석 및 최적설계 결과

상부 가이드 형상이 나타나 있는 그림 4-8과 그림 4-22에 대하여 가이드의 날개 3개중에 1개에 대하여 최적설계를 위한 수치해석을 수행하였다. 유한요소 모델링을 위하여 한개의 가이드의 반경방향 대칭 조건을 이용하여 그림 2-2의 상부 가이드의 1/2 날개만을 대상으로 유한요소 모델링을 수행하였다. 이때 단면의 하부는 고정하고 단면은 1/2 대칭 조건을 적용하였다. 상부 가이드롤러가 결합되는 곳에 변위 1mm를 가해서 핵연료집합체가 장전되었을 때의 초기 변형을 모사하였고, 그 지점에서의 반력을 목적함수로 하여 최적 설계를 수행하였다. 최적설계의 각 축차과정에서 유한요소 모델은 설계변수의 변경을 반영하여 sweep 방법으로 자동 생성하였다.

표 2-2 상부 가이드의 형상 최적설계 결과

	1차 개념설계안	최적설계
지지력	50 N	76 N
δ_F	0.43	0.52
δ_Y	0.40	0.43
x1	5.0 mm	6.0 mm
x2	17.0 mm	27.0 mm
x3	46.5 mm	48.0 mm
y1	8.5 mm	9.0 mm

상부 가이드의 형상 최적설계 결과가 표 2-2에 정리되어 있고, 그림 2-2에 설계 변수와 함께 최적설계 후 치수와 괄호 속에 제1차 개념설계안의 치수를 병기하였다. 기존 설계에서는 핵연료집합체가 유동관에 삽입되었을 때 상부 가이드 날개 하나가 50N 정도를 지지하는 것에 반하여 최적설계 후에는 76N을 지지할 수 있으므로 목적함수가 크게 개선되었음을 알 수 있다. 그러나 피로 및 항복에 대한 제한 조건은 설계 변수를 0.05mm 수준에서 이산화하면서 미소하게 악화되었다. 추가 변형량 δ_F 와 δ_Y 으로 치환된 각 제한 조건은 초기 설계의 경우 다음과 같다.

$$\delta = \min(\delta_F, \delta_Y) = 0.43 \quad (6)$$

이것은 상부 가이드롤러부분이 초기 변형(1mm)과 추가적으로 $0.43 \times 1\text{mm} = 0.43\text{mm}$ 의 변형을 허용하여 최종 1.43mm까지 상부 가이드의 재료에 피로 및 항복 파괴의 위험 없이 변형될 수 있음을 의미한다. 이에 반해 형상 최적설계 후 재료는 초기 변형과 추가 허용 변형을 추가하면 1.40mm까지 변형될 수 있다. 따라서 재료의 파괴에 대해서 초기 설계보다 0.03mm의 허용 변동이 악화되었다. 추가 허용 변위는 피로 파괴의 제한 조건으로부터 결정되었으며, 유체유발진동에 의해 발생하는 변위가 허용 변동 범위 내에 있을 경우 무한 피로 주기를 갖는다.

최적설계로부터 얻은 상부 가이드는 핵연료집합체를 최적설계 전보다 견고하게 지지하게 되었다. 이것은 핵연료집합체의 진동 특성에 영향을 주어 저차 모드의 고유진동수가 높아질 것으로 판단된다. 향후 상부 가이드의 변화로 인한 핵연료집합체의 내진과 유체유발진동으로 인한 동적 거동에 대한 연구를 계속 수행할 예정이다.

3. 스웨징(swaging) 공정 개발 및 시험

3.1 스웨징 공정 개발

개념설계를 위한 장·탈착 시험, 회전저항 시험 및 진동시험[4,5]을 수행하고 곡판 핵연료 stiffener 집합체를 비롯한 상하부 고정 장치에 대한 2차원 및 3차원 부품설계를 수행하였다. 핵연료집합체 및 핵연료 채널의 개념설계를 보다 구체화하기 위하여 표준 핵연료 집합체의 시제품을 제작하였다. 제작 공정 개발과 시제품 제작은 개발 제품의 기능 및 오류를 파악하고 설계의 완성도를 높이는데 필요하다. 표준형 핵연료집합체의 시제품 제작을 위하여 부품 제작을 위한 기술시방서[7]를 작성하였으며, 곡판 핵연료와 stiffener를 고정·연결하는 스웨징 공정 개발 및 시제품 제작에 대한 기술시방서[8]를 작성하고, 표준형 핵연료집합체의 시제품 제작 공정을 개발하였다. 곡판 핵연료와 stiffener 사이의 결합 강도를 평가하기 위하여 접선방향 인장시험과 축방향 압축시험을 수행하였다.

스웨징(swaging) 공정 개발을 위하여 적용된 표준형 핵연료집합체에 대한 상세도면은 아래와 같다.

- (1) ARR-ME-DW-036-GA-06-01, Rev.P0, ARR Fuel Plates & Stiffener Assembly
- (2) ARR-ME-DW-036-DD-07-01, Rev.P0, Stiffener
- (3) ARR-ME-DW-036-DD-08-01, Rev.P0, Fuel Plate
- (4) ARR-ME-DW-036-DD-09-01, Rev.P0, Fuel Plate

곡판 핵연료와 stiffener 사이를 결합하는 스웨징 공정은 stiffener에 홈을 가공하고, 곡판 핵연료를 stiffener에 장착한 후 스웨징을 하는 순서로 진행된다. Stiffener에 홈을 가공하기 위하여 수직형 머시닝센터를 사용하였고, 밀링머신에 스웨징 공구를 장착하여 스웨징 작업을 하였다. 위의 도면으로부터 스웨징 작업과 인장 및 압축시험을 위한 지그를 개발하여 각 절차에 사용하였다.

(가) Stiffener 홈 가공

- (1) 수직형 머시닝센터 장비에 수직 및 평면도가 0.05mm 이내가 되도록 stiffener를 고정한다.
- (2) 수직형 머시닝센터에 공구를 장착한 후 그림 3-1과 같이 깊이 1.0mm, 폭 0.3mm로 홈을 가공한다.
- (3) 가공 후 stiffener 3개와 곡판 핵연료 15개를 초음파 세척한다.

(나) 스웨징 공정

- (1) 밀링머신 장비에 그림 3-2의 스웨징 치구를 수직 및 평면도가 0.05mm 이내가 되도록 고정한다.
- (2) 스웨징 치구에 stiffener 3개를 120° 간격으로 고정한다.
- (3) Stiffener에 가장 안쪽의 곡판 핵연료(R17) 3개를 조립한다.
- (4) 밀링머신에 스웨징 공구를 치구와 수직방향으로 0.05mm 까지 장착한다.
- (5) 스웨징용 공구의 롤러 간 간격을 5.0mm로 조절한다.
- (6) 스웨징 치구에 stiffener를 0°방향으로 고정하고, 스웨징 공구를 전진하여 스웨징 작업을 한다.
- (7) 120°와 240°의 stiffener에 대해서도 마찬가지로 스웨징 치구와 stiffener를 고정하고, 스웨징 공구를 전진하여 스웨징 작업을 한다. 그림 3-3에 스웨징 공구의 위치가 표시되어 있다. 그림 3-4와 그림 3-5는 공구가 이동하면서 곡판 핵연료 스웨징하는 모습을 보여준다.
- (8) 위의 (3)에서 (7)번까지의 과정을 외각 곡판 핵연료(R20.9, 24.8, 28.7, 32.6, 36.5)에 대하여 각각 곡판 핵연료를 3개씩 조립하고, 0°, 120°, 240°의 stiffener에 대하여 스웨징 작업을 순차적으로 반복한다.
- (9) 스웨징 작업을 마친 후 스웨징 치구에서 제품을 분리한 후 초음파 세척을 한다. 스웨징 작업을 마친 곡판 핵연료와 stiffener 집합체의 형상이 그림 3-6에 나타나 있다.
- (10) 완료된 제품을 육안 검사하여 결합 정도를 확인한다.

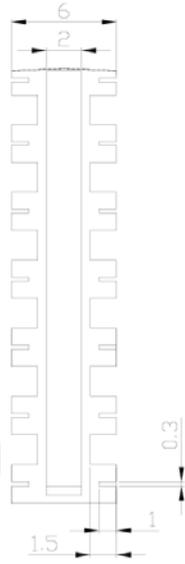


그림 3-1 스웨징을 위한 stiffener의 홈 가공



그림 3-2 스웨징 치구

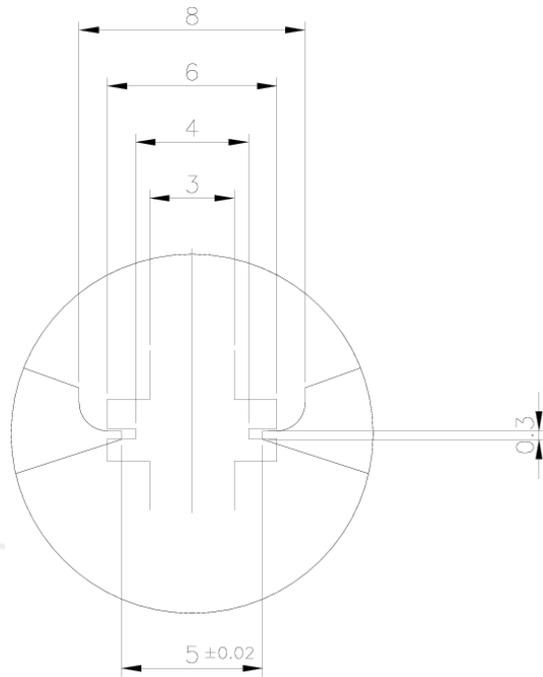


그림 3-3 스웨징 공구의 경로 단면



그림 3-4 곡판 핵연료 스웨징 가공 모습 (I)



그림 3-5 곡판 핵연료 스웨징 가공 모습 (II)

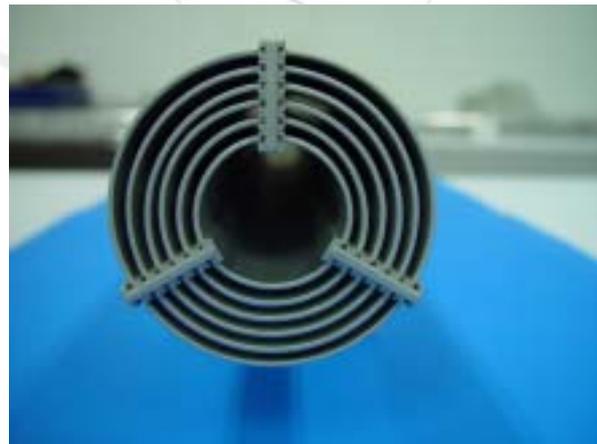


그림 3-6 스웨징 공정으로 결합된 곡판 핵연료와 stiffener

3.2 스웨징 시험편의 인장 및 압축 시험

곡판 핵연료와 stiffener 간의 조립을 위하여 스웨징 공정을 개발하였다. 이 공정을 핵연료집합체의 제작에 이용하기 위해서는 그 결합 강도가 충분하여야 한다. 이를 확인하기 위하여 인장 및 압축 시험을 수행하였다. 접선방향 인장시험은 곡판의 접선방향으로 시험편을 당겨서 곡판 핵연료와 stiffener 사이의 결합 정도를 측정하였다. 그리고 축방향 시험을 위하여 시험편을 축방향으로 인장하려 하였으나 지그의 특성상 인장이 쉽지 않아 이를 압축시험으로 대체하여 stiffener와 곡판 핵연료 사이에 견딜 수 있는 축방향 하중을 측정하였다. 인장 및 압축 시험을 위하여 시험 전용 지그를 설계하였으며, 지그에 고정된 시험편을 만능재료 시험기에 장착하여 최대 지지 하중과 파단 하중을 얻었다. 인장 및 압축 시험은 시험 공구의 이동 속도 2mm/min으로 2회씩 수행되었다.

(가) 접선방향 인장시험

- (1) 곡판 핵연료와 stiffener가 결합된 길이 100mm의 시험편을 그림 3-7과 같이 제작한다.
- (2) 시험편에 인장 시험용 지그(jig)를 그림 3-8과 같이 조립한다.
- (3) 인장 시험용 지그를 만능재료시험기에 그림 3-9와 같이 고정한 후 접선방향 인장 시험을 실시한다.

(나) 축방향 압축시험

- (1) 곡판 핵연료와 stiffener가 결합된 길이 100mm의 시험편을 그림 3-7과 같이 제작한다.
- (2) 시험편에 압축 시험용 지그를 그림 3-10과 같이 조립한다.
- (3) 압축 시험용 지그를 만능재료시험기에 그림 3-11과 같이 고정한 후 축방향 압축 시험을 실시한다.

그림 3-9에 나타나 있는 접선방향 인장시험에서는 100mm 시험편에 대하여 최대 인장 하중이 130kgf이었으며, 곡판의 양단에 stiffener가 결합된 실제 핵연료 길이(710mm)에 대하여 이를 환산하면 약 $130 \times 7.1 \times 2 = 1850 \text{kgf}$ 의 인장하중을 견디는 것으로 나타났다. 그림 3-11에 나타나 있는 축 방향 압축 시험 결과에서는 100mm 시험편에 대하여 최대 지지 하중이 255kgf이었고, 곡판의 양단에 stiffener가 결합된 실제 핵연료 길이(710mm)에 대하여 이를 환산하면 약 $255 \times 7.1 \times 2 = 3620 \text{kgf}$ 를 견딜 수 있는 것으로 나타났다.

이 시험 결과로부터 개발된 스웨징 공정은 곡판 핵연료와 stiffener 사이를 매우 견고하게 결합함을 확인할 수 있었다. 따라서 유체유발진동과 같은 외부 하중이 핵연료집합체에 가해지더라도 개발된 스웨징 공정에 의한 결합은 구조적으로 건전하게 유지될 것으로 예상된다.

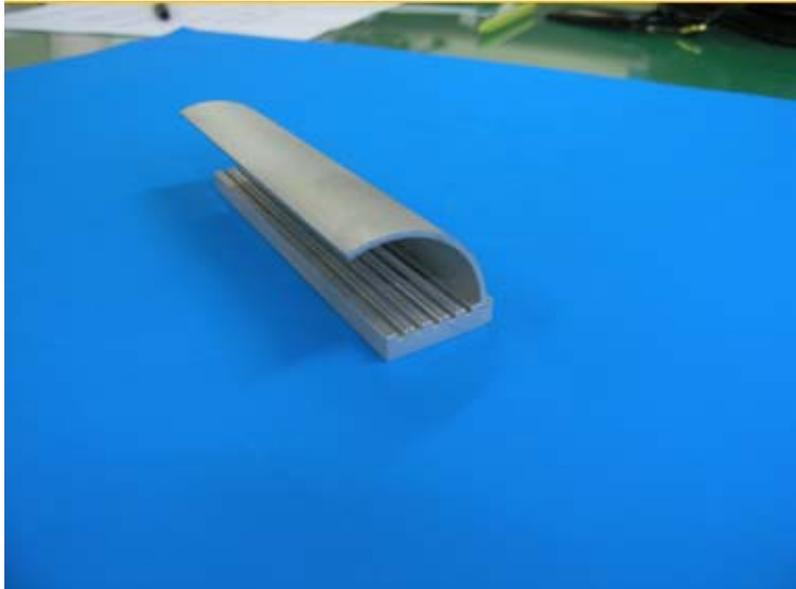


그림 3-7 인장 및 압축 시험을 위한 시편



그림 3-8 접선방향 인장시험을 위한 지그

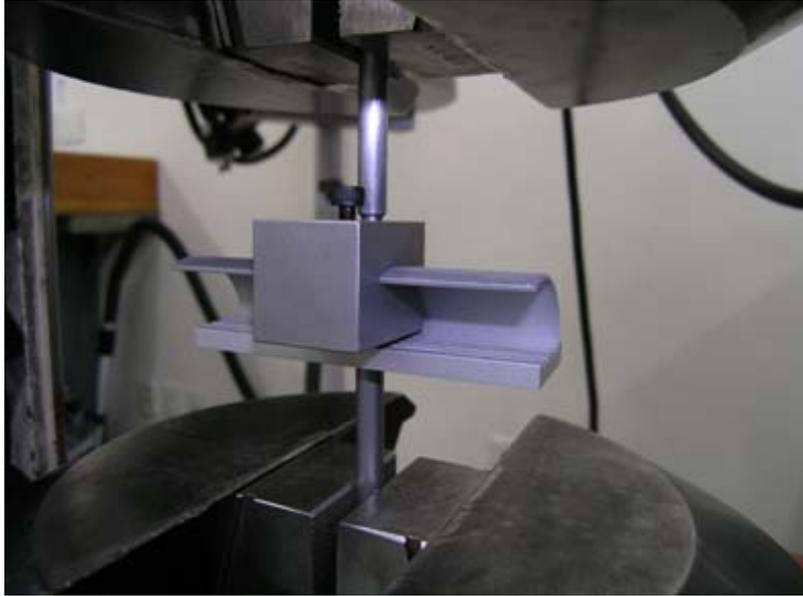


그림 3-9 접선방향 인장시험 모습

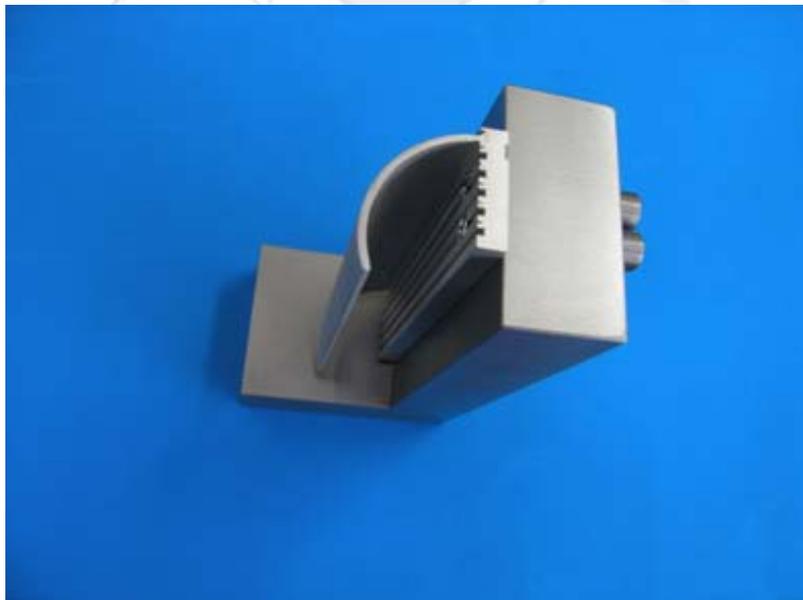


그림 3-10 축방향 압축시험을 위한 지그



그림 3-11 축방향 압축시험 모습



4. 튜브형 핵연료집합체의 개념설계

4.1 표준 핵연료집합체의 단면

그림 4-1에 곡판 핵연료와 stiffener를 사용한 표준 및 감축 핵연료집합체의 단면이 나타나 있다. 그림 4-16은 표준 핵연료집합체를 보여주고 있다. 표준 및 감축 핵연료집합체의 핵연료 심재의 길이는 700mm이고, 심재의 상하에 길이 5mm의 피복재(cladding)가 더해져서 곡판 핵연료의 길이는 710mm가 된다.

표준 핵연료집합체의 주요 치수 변경은 표 4-1과 표 4-2에 정리되어 있다. 그림 4-1 (가)와 같이 핵연료 곡판(curved plate)의 수가 6개에서 7개로 변경되었다. 곡률반경이 다른 곡판 핵연료들은 120° 간격으로 배치된 3개의 stiffener에 의해서 지지되며 총 $7 \times 3 = 21$ 개의 핵연료 곡판이 사용되었다. 핵연료 심재(fuel meat)의 두께는 0.6mm에서 0.65mm로 두꺼워졌으며, 핵연료 심재의 양쪽 면에 각각 0.4mm 두께의 피복재가 더해져서 곡판 핵연료 하나의 총 두께는 1.45mm가 된다. 곡판 핵연료 사이, 냉각수 유로의 폭은 2.5mm에서 2.6mm로 넓어졌다.

곡판 핵연료의 개수 및 치수 변경을 반영하여 곡판 핵연료와 stiffener 집합체의 단면을 재설계하였다. 핵연료 심재의 설계 변경을 반영하여 3차원 형상을 solid edge로 작성하였고, 이를 그림 4-2에서 그림 4-5까지 나타내었다. 그림 4-2는 곡판 핵연료(curved fuel plate)를 나타내며, 핵연료 심재의 길이(700mm) 및 심재(0.65mm)와 피복재(0.4mm)의 두께를 반영하였다. 곡판 핵연료의 상·하단에는 5mm의 피복재가, stiffener에 고정되는 좌·우 양단에는 3mm의 피복재가 붙는다. 곡판 핵연료를 고정하기 위한 stiffener의 홈은 1.5mm로, stiffener에 의해 스웨징(swaging)되는 핵연료 피복재는 1.5mm이다. 그림 4-3에서 보여주는 stiffener와 그림 4-4의 spacer tube는 제작성을 고려하여 분리형으로 설계되었다. Spacer tube는 하나로 핵연료집합체와 같이 4부분으로 등분하여 central rod에 반경 0.1mm 공차로 끼워 핵연료집합체를 지지할 수 있도록 설계하였다. 핵연료집합체의 하부에 위치하는 spacer tube는 유동박리 및 재순환유동의 영향을 최소화하기 위하여 그림 4-4 (나)와 같이 유동의 흐름을 방해하지 않도록 경사지게 설계하였다. 곡판 핵연료 및 stiffener 집합체를 그림 4-5에 나타내었다. 곡판 핵연료와 stiffener의 결합은 앞의 제3절에서 기술한 스웨징 공정을 이용한다.

4.2 감축 핵연료집합체의 단면

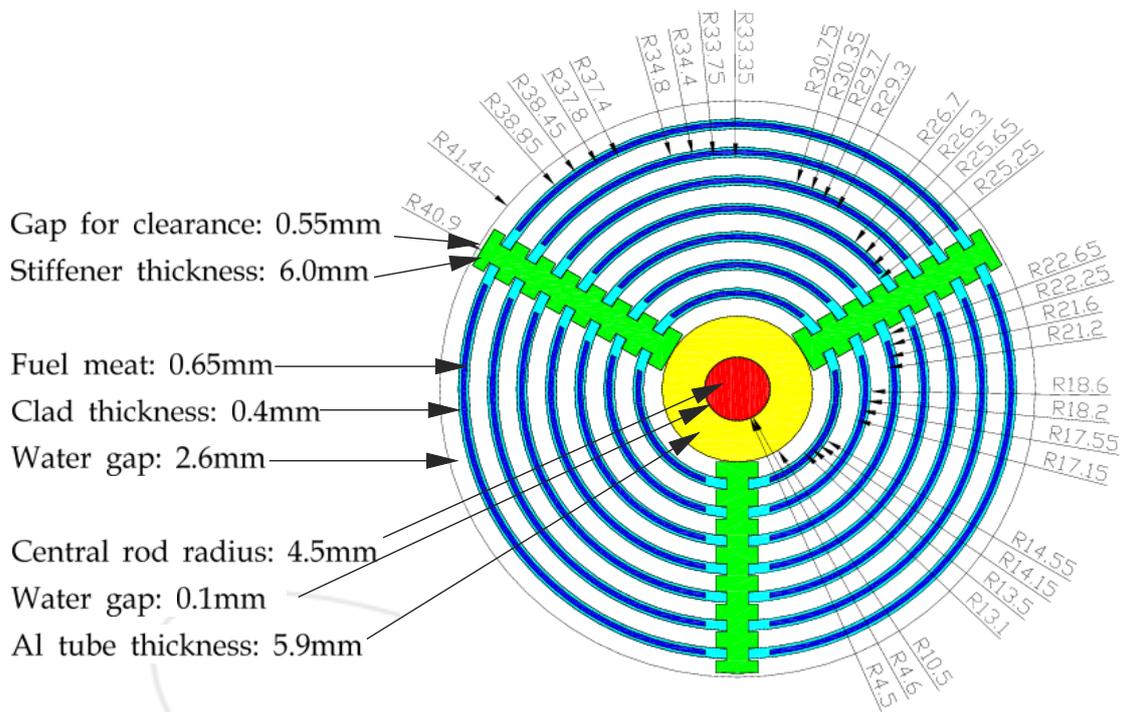
감축 핵연료집합체의 주요 치수 변경은 표 4-1과 표 4-2에 정리되어 있다. 그림 4-1 (나)의 감축 핵연료집합체의 경우 핵연료 곡판의 수를 4개에서 5개로 증가시켰고, 기존에 유

동관·정지봉·제어봉과의 연관 문제를 고려하여 핵연료집합체에 대한 개념 설계를 완료하였다. 곡률반경이 다른 곡판 핵연료들은 120° 간격으로 배치된 3개의 stiffener에 의해서 지지되며 총 5x3=15개의 핵연료 곡판이 사용되었다. 표준 핵연료집합체와 마찬가지로 감축 핵연료집합체의 핵연료 심재의 두께도 0.6mm에서 0.65mm으로 두꺼워졌다. 곡판 핵연료 간, 유량 채널의 냉각수 폭은 2.5mm에서 2.6mm로 넓어졌다. 감축 핵연료집합체는 1.25mm 두께의 유동관(Zr-4) 안에 장전되고, 유동관은 하프늄의 정지봉이나 제어봉이 감싸게 된다.

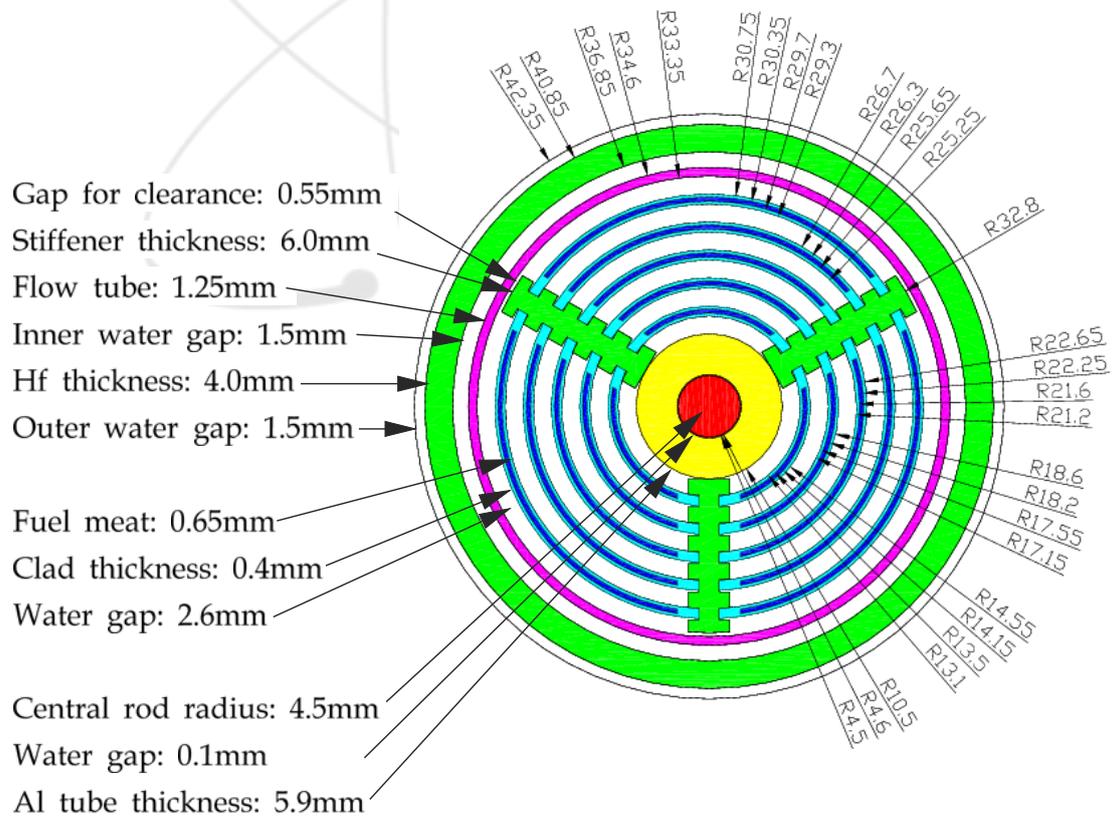
각각 5mm 길이의 상·하단의 피복재를 포함한 곡판 핵연료의 전체 길이는 710mm로서 그림 4-2의 표준 핵연료집합체의 핵연료와 같으며 심재의 길이는 700mm이다. 핵연료 심재의 두께는 0.65mm으로 각각 0.4mm 두께의 양쪽 피복재를 합하면 곡판 핵연료의 총 두께는 1.45mm가 된다. 또한 곡판 핵연료의 좌·우 양단, stiffener에 고정되는 부분은 3mm 피복재로 설계하였다. 곡판 핵연료를 고정하기 위한 stiffener의 홈은 1.5mm로, stiffener에 의해 스웨징(swaging)되는 핵연료 피복재는 1.5mm 정도이다. 곡판의 개수가 5개인 것을 반영하여 그림 4-1의 (나)와 같이 감축 핵연료집합체의 단면을 설계하였으며, 그림 4-18 에는 감축 핵연료집합체의 stiffener가 나타나 있다. 그림 4-4의 spacer tube는 표준과 감축 핵연료집합체에 공통으로 사용된다. Spacer tube는 하나로 핵연료집합체와 같이 4부분으로 등분하여 central rod에 반경 0.1mm공차로 끼워 지지할 수 있도록 설계하였다. 그림 4-19 에 곡판 핵연료와 stiffener를 결합하고 중심축에 spacer tube 및 central rod를 조립한 그림을 나타내었다. 앞의 제 3절에서 기술한 개발된 스웨징 절차에 따라, 곡판 핵연료는 stiffener의 홈에 맞추어 조립된 후 스웨징 방법으로 고정된다.

표 4-1 핵연료 치수 및 개수 변경 목록 (단위: mm)

	표준 핵연료집합체		감축 핵연료집합체	
	변경전	변경후	변경전	변경후
핵연료 판 개수(개수)	6	7	4	5
핵연료심 두께	0.6	0.65	0.6	0.65
냉각수로의 폭	2.5	2.6	2.5	2.6
장전 채널(유동관) 내경	80.2	82.9	82.6(64.6)	84.7(66.7)
spacer tube 외경	29	21	29	21
central rod와 spacer tube사이 간격	1.0	0.1	1.0	0.1
stiffener끝단과 유동관 사이의 간격	0.5	0.55	0.5	0.55



(가) 표준 핵연료집합체



(나) 감축 핵연료집합체

그림 4-1 설계 변경된 핵연료집합체 단면

표 4-2 핵연료집합체 단면 배열 치수표

Standard Fuel			Reduced Fuel (Including Hf tube)		
	width	radius		width	radius
Cent. rod	4.5	4.5	Cent. rod	4.5	4.5
clearance	0.1	4.6	clearance	0.1	4.6
Spacer			Spacer		
tube	5.9	10.5	tube	5.9	10.5
cool	2.6	13.1	cool	2.6	13.1
iclad	0.4	13.5	iclad	0.4	13.5
1 fuel	0.65	14.15	1 fuel	0.65	14.15
oclad	0.4	14.55	oclad	0.4	14.55
cool	2.6	17.15	cool	2.6	17.15
iclad	0.4	17.55	iclad	0.4	17.55
2 fuel	0.65	18.20	2 fuel	0.65	18.20
oclad	0.4	18.60	oclad	0.4	18.60
cool	2.6	21.20	cool	2.6	21.20
iclad	0.4	21.60	iclad	0.4	21.60
3 fuel	0.65	22.25	3 fuel	0.65	22.25
oclad	0.4	22.65	oclad	0.4	22.65
cool	2.6	25.25	cool	2.6	25.25
iclad	0.4	25.65	iclad	0.4	25.65
4 fuel	0.65	26.30	4 fuel	0.65	26.30
oclad	0.4	26.70	oclad	0.4	26.70
cool	2.6	29.30	cool	2.6	29.30
iclad	0.4	29.70	iclad	0.4	29.70
5 fuel	0.65	30.35	5 fuel	0.65	30.35
oclad	0.4	30.75	oclad	0.4	30.75
cool	2.6	33.35	cool	2.6	33.35
iclad	0.4	33.75	iclad	0.4	33.75
6 fuel	0.65	34.40	flow tube	1.25	34.60
oclad	0.4	34.80	water	2.25	36.85
cool	2.6	37.40	Hf	4.0	40.85
iclad	0.4	37.80	water	1.5	42.35
7 fuel	0.65	38.45			
oclad	0.4	38.85			
cool	2.6	41.45			

4.3 표준 핵연료집합체의 상부 및 하부 고정장치의 개념설계

제1차 표준 핵연료집합체의 개념설계를 기반으로, 상부 가이드에 대한 최적설계 결과와 곡판 핵연료의 개수 및 치수 변경을 반영하여 그림 4-6과 그림 4-11의 상부 및 하부 고정장치에 대한 설계를 수행하였다.

핵연료 채널이 있는 원자로 노심 구조물에 핵연료집합체를 장전하여 원자로를 운전하면, 냉각수에 의한 유체유발진동이 발생하여 노심 구조물과 핵연료집합체 사이의 접촉부에서 마모가 진행될 가능성이 있다. 따라서 상부 고정장치에 상부 가이드롤러를 도입하여 접촉면의 마모를 줄일 수 있도록 개념설계를 수행하였다. 제 2절에서 제시한 것과 같이 상부 가이드가 핵연료집합체를 견고하게 지지하면서, 핵연료집합체의 동적 거동을 개선할 수 있도록 상부 가이드에 대한 형상 최적설계를 수행하였다. 또한 최적설계 과정에서 상부 가이드의 모재가 피로 및 항복에 의해서 파괴되지 않도록 하였다. 그림 4-8에 형상 최적설계의 결과를 반영하여 설계된 표준 핵연료집합체의 상부 가이드가 나타나 있다. 앞의 표 4-1에 따라 핵연료 개수와 치수가 변경되면서 spacer tube의 외경이 29mm에서 21mm로 줄어들었고 노심의 핵연료 채널의 내경은 80.2mm에서 82.9mm로 커졌다. 핵연료 채널과 spacer tube의 치수 변경은 핵연료집합체 상·하부의 설계에 직접적인 영향을 미치게 되었다. 따라서 상부 가이드의 중앙부의 외경은 spacer tube의 영향으로 기존 29mm에서 현재 21mm가 되었다. 노심의 핵연료 채널의 내경을 고려하여 상부 가이드의 각 날개의 너비를 조절하였다. 그림 4-7의 상부 가이드덮개는 스프링을 위한 공간 확보와 그림 4-9의 grapple head, 상부 가이드를 고려하여 중심부 외경이 기존 29mm에서 현재 25mm가 되었다. 상부 가이드덮개와 그림 4-10의 spring cover 사이의 스프링을 위한 공간 지름은 기존 21mm에서 19mm로 변경되었다.

Spacer tube의 외경 변화에 따라 그림 4-12의 bottom guide의 중앙부 외경은 20mm에서 18mm로 변경되었고, 노심의 핵연료 채널의 내경을 고려하여 중심축에서 날개의 최외각 부분까지의 폭을 40.9mm로 조절하였다. 그림 4-14의 spider는 기존 개념설계 모델과 동일하며, 핵연료집합체 하단부에 위치하여 그림 4-15의 central rod tip과 결합되도록 하였다. 그림 4-13에서 보는 것과 같이 receptacle cup과 flow straightener를 일체형으로 설계하였고, 냉각수 유입 경로는 요철 없는 직선이 유지되도록 설계하였다. 그림 4-11에 표준 핵연료집합체가 하부 고정장치에 결합된 모습이 나타나 있다.

그림 4-16에 표준 핵연료집합체의 3차원 형상이, 그림 4-17에 핵연료집합체가 receptacle에 장전되어있는 형상이 구체적으로 나타나 있다. 표준 핵연료집합체의 receptacle cup은 노심의 하부 격자판에 용접으로 결합된다. 핵연료집합체의 구성 부품 목록은 표 4-3에 정리하였다.

표 4-3 핵연료집합체의 부품 재료

조립품	단품	재질
Top guide assembly	Grapple head	Zr-4
	Thrust washer	Waukesha88
	Spring cover	Zr-4
	Spring	Inconel X-750
	Spring pin	SS 304
	Top guide cover	Zr-4
	Top guide	Al 6061
	Top guide roller	SS 304
	Top guide roller: Pin	SS 304
	Top guide roller: Ring	SS 304
Central rod assembly	Central rod	Zr-4
	Central rod tip	Zr-4
	Stopper	Zr-4
	Spring pin	SS 304
Fuel plate & stiffener assembly	Fuel meat	U-7Mo / U ₃ Si ₂
	Cladding	Al 1060
	Stiffener	Al 6061
	Spacer tube	Al 6061
Bottom guide assembly	Bottom guide	Al 6061
Receptacle assembly	Receptacle	SS 304
	Spider	Zr-4
	Flow tube	Zr-4
	Flow straightener	SS 304



그림 4-2 곡판 핵연료

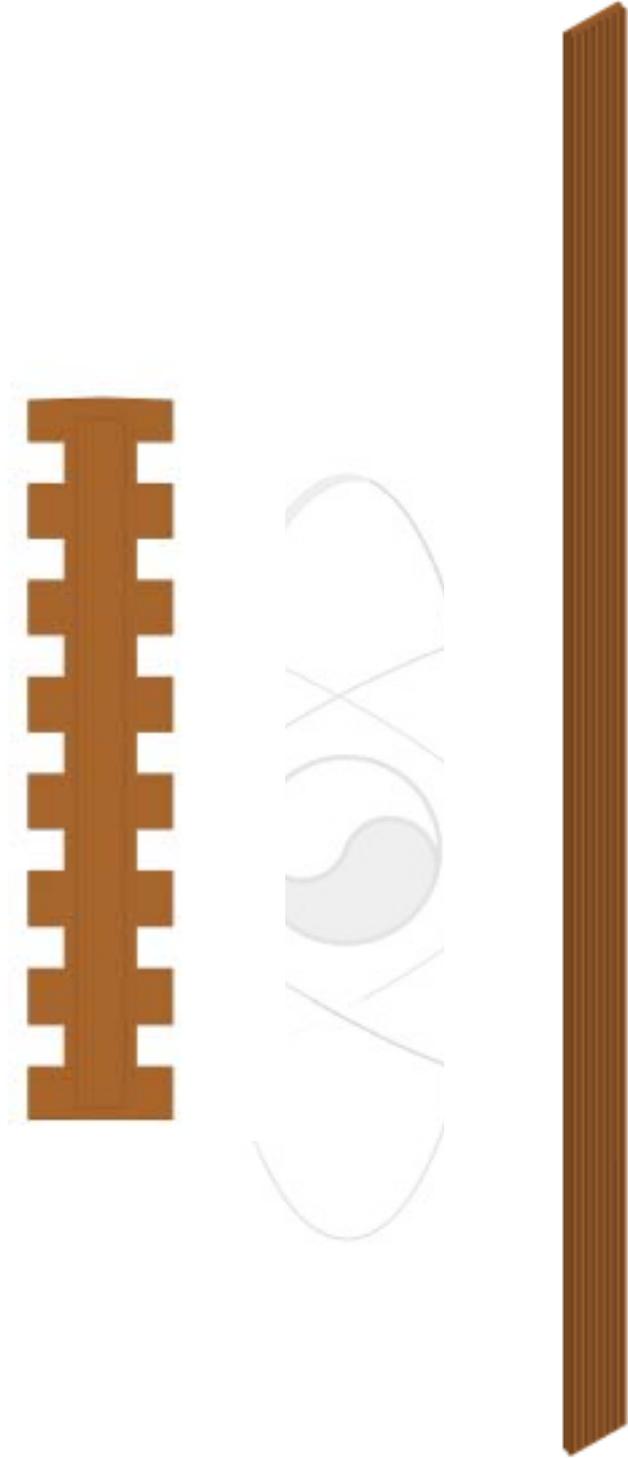
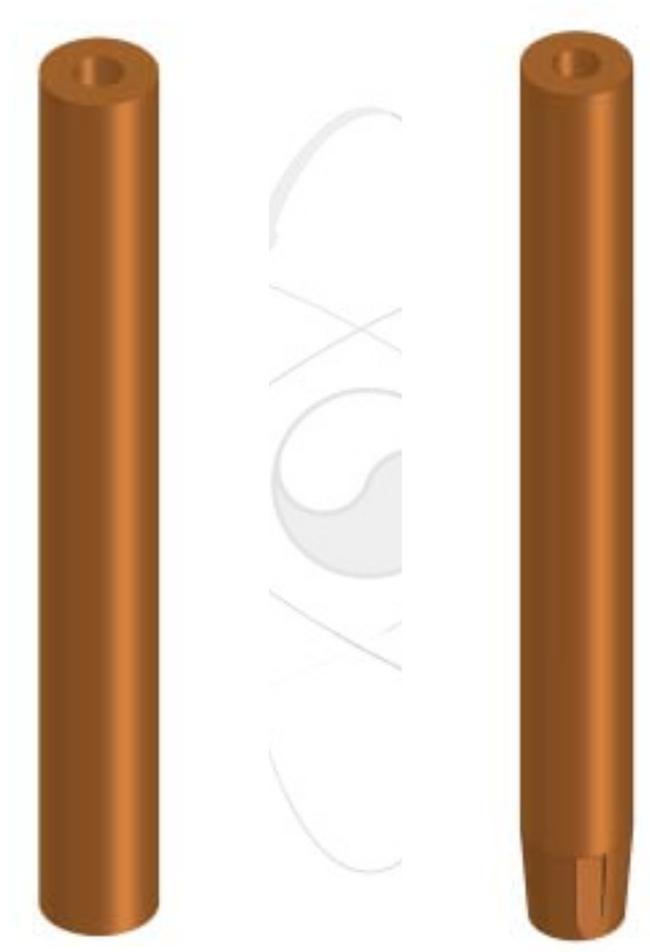


그림 4-3 표준 핵연료집합체의 stiffener



(가) Spacer tube

(나) Bottom spacer tube

그림 4-4 표준 및 감축 핵연료집합체의 spacer tube

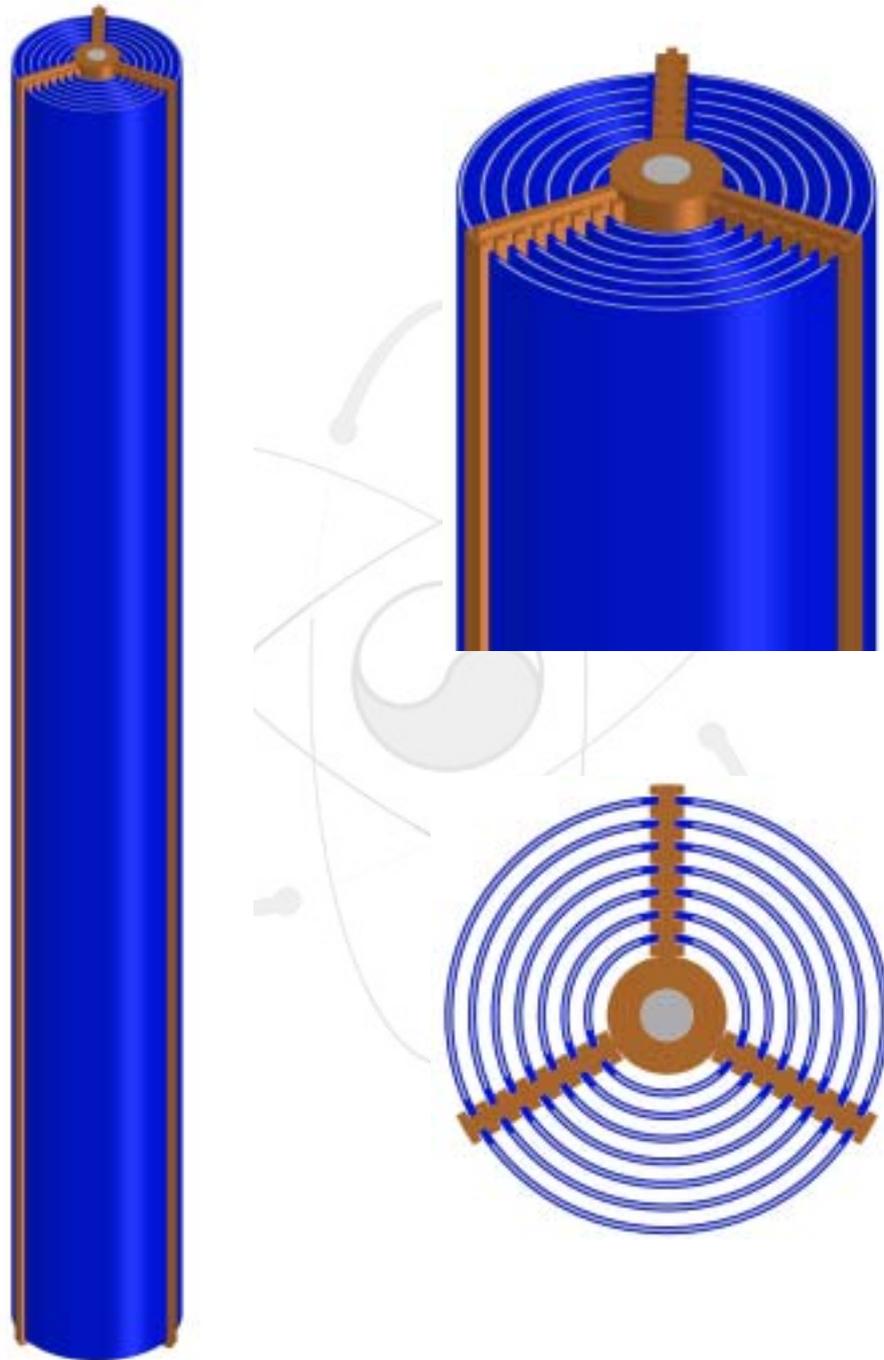


그림 4-5 표준 핵연료집합체의 곡판 핵연료, stiffener, spacer tube 및 central rod의 조립도

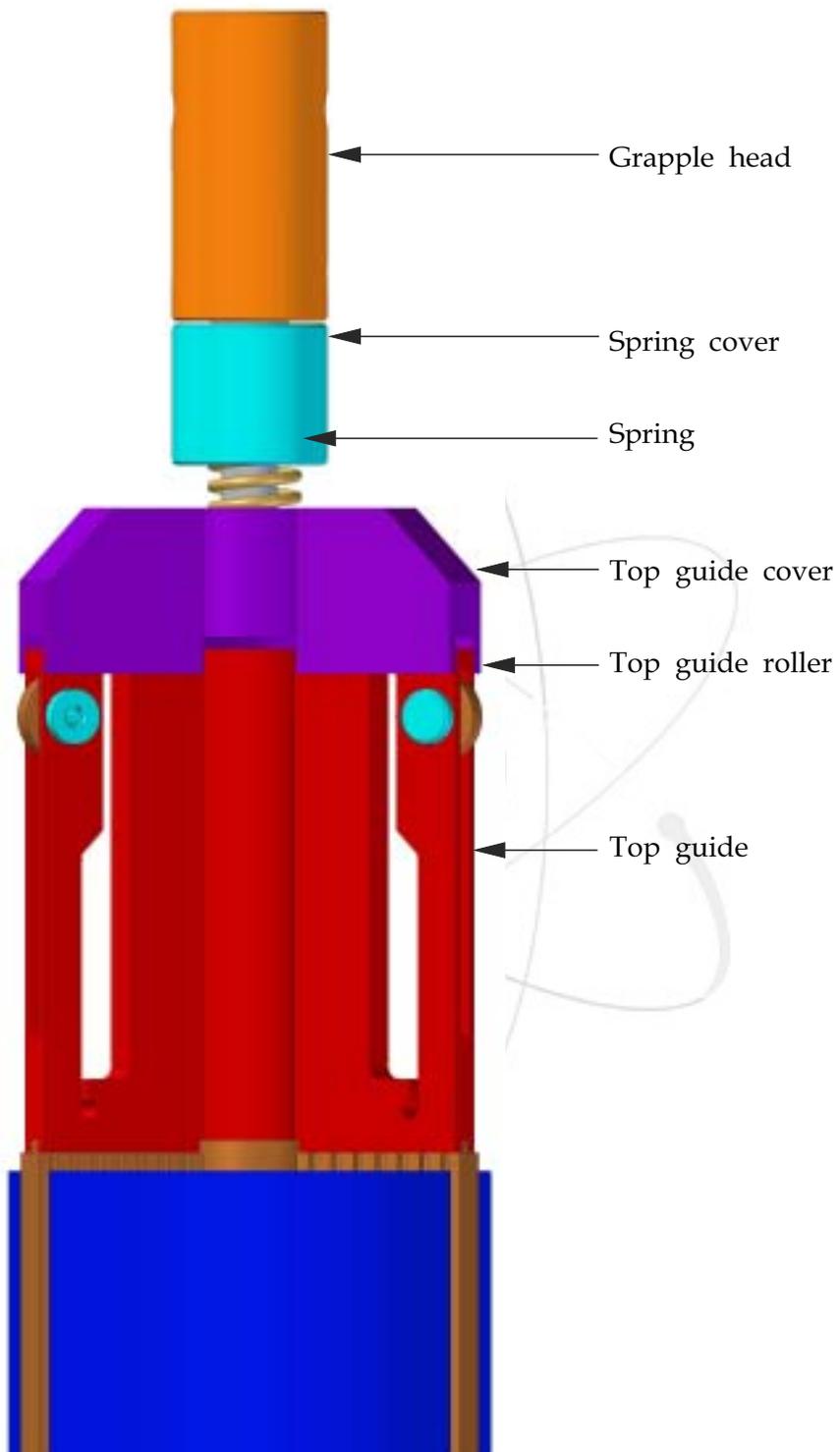


그림 4-6 표준 핵연료집합체의 상부 고정장치

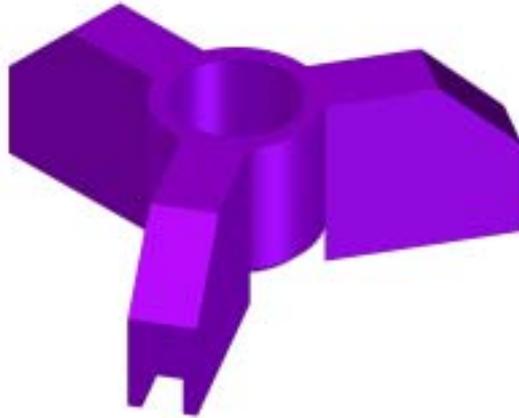


그림 4-7 표준 핵연료집합체의 상부 가이드덮개

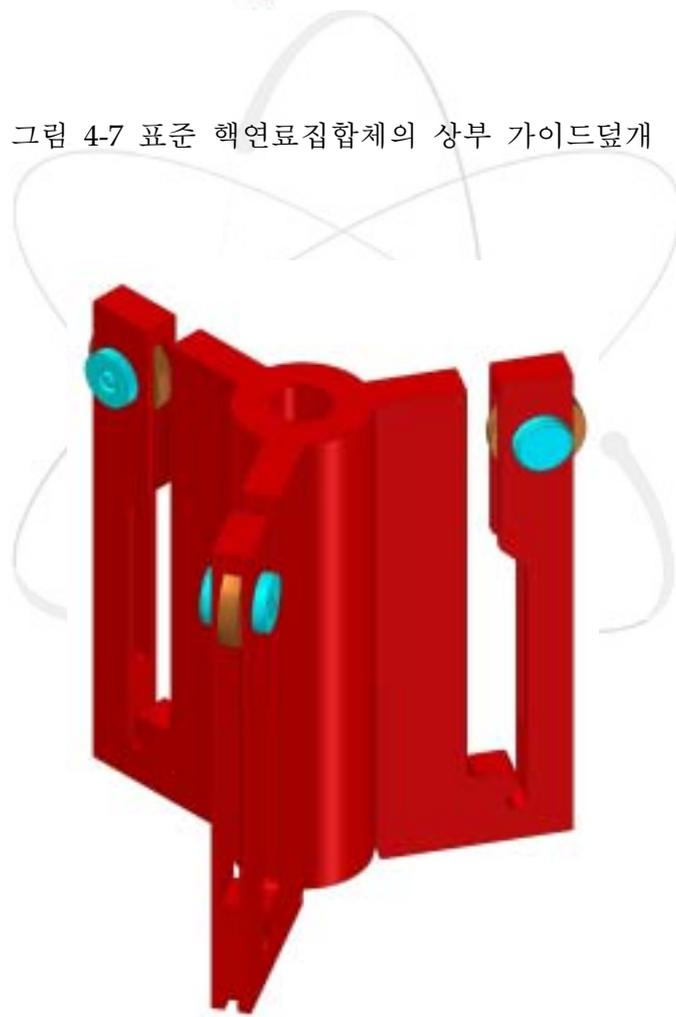


그림 4-8 표준 핵연료집합체의 상부 가이드와 상부 가이드롤러

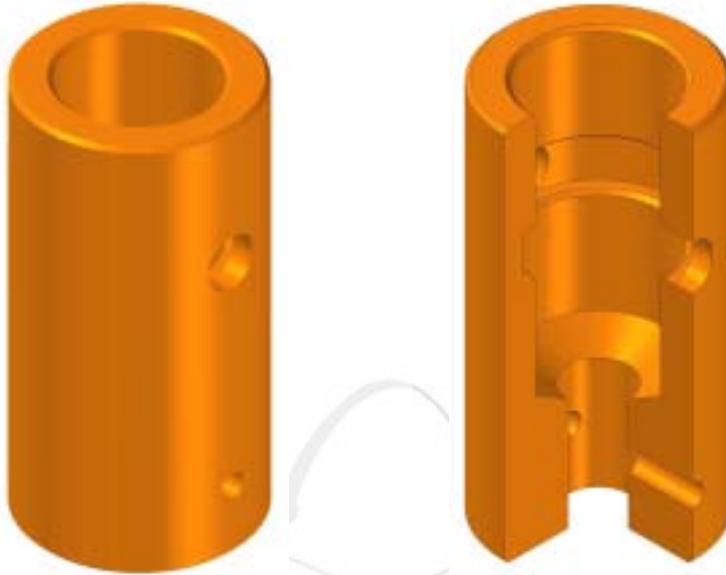


그림 4-9 표준 및 감축 핵연료집합체의 grapple head

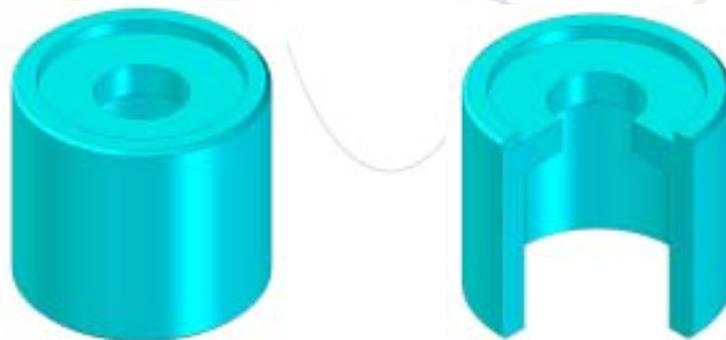


그림 4-10 표준 및 감축 핵연료집합체의 spring cover

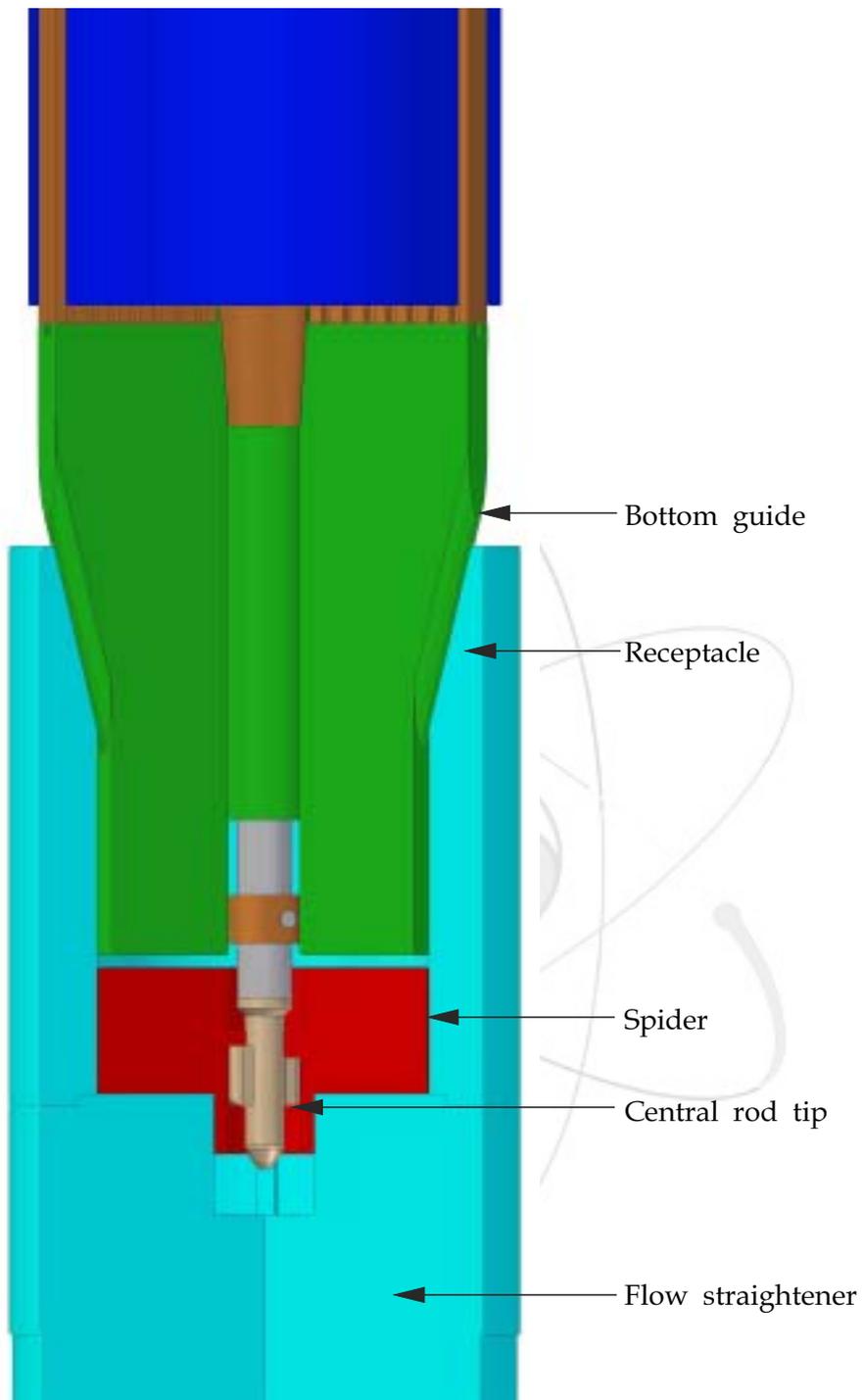


그림 4-11 표준 핵연료집합체의 하부 고정장치



그림 4-12 표준 핵연료집합체의 bottom guide

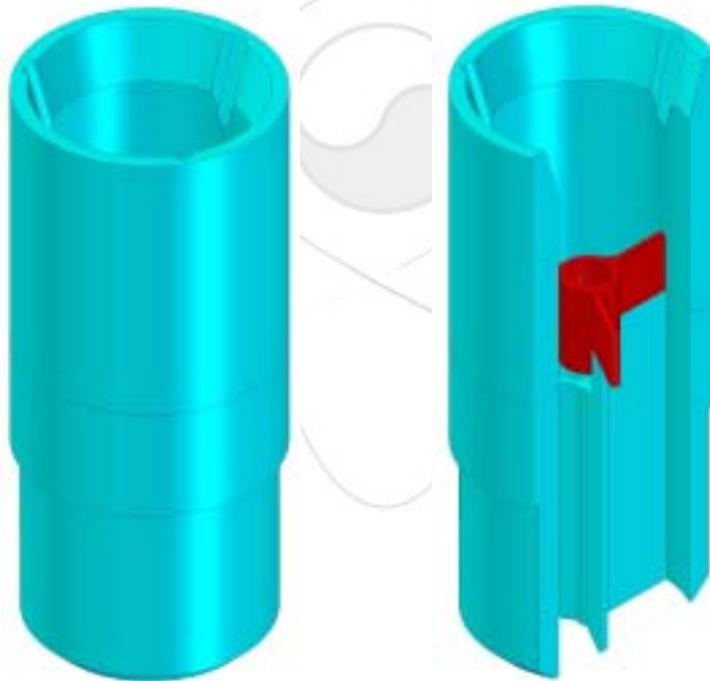


그림 4-13 표준 핵연료집합체의 receptacle

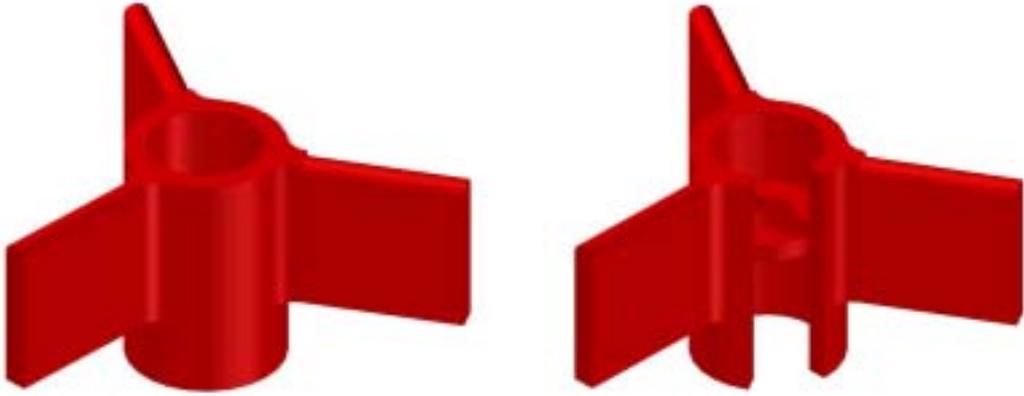


그림 4-14 표준 핵연료집합체의 spider



그림 4-15 표준 및 감축 핵연료집합체의 central rod tip

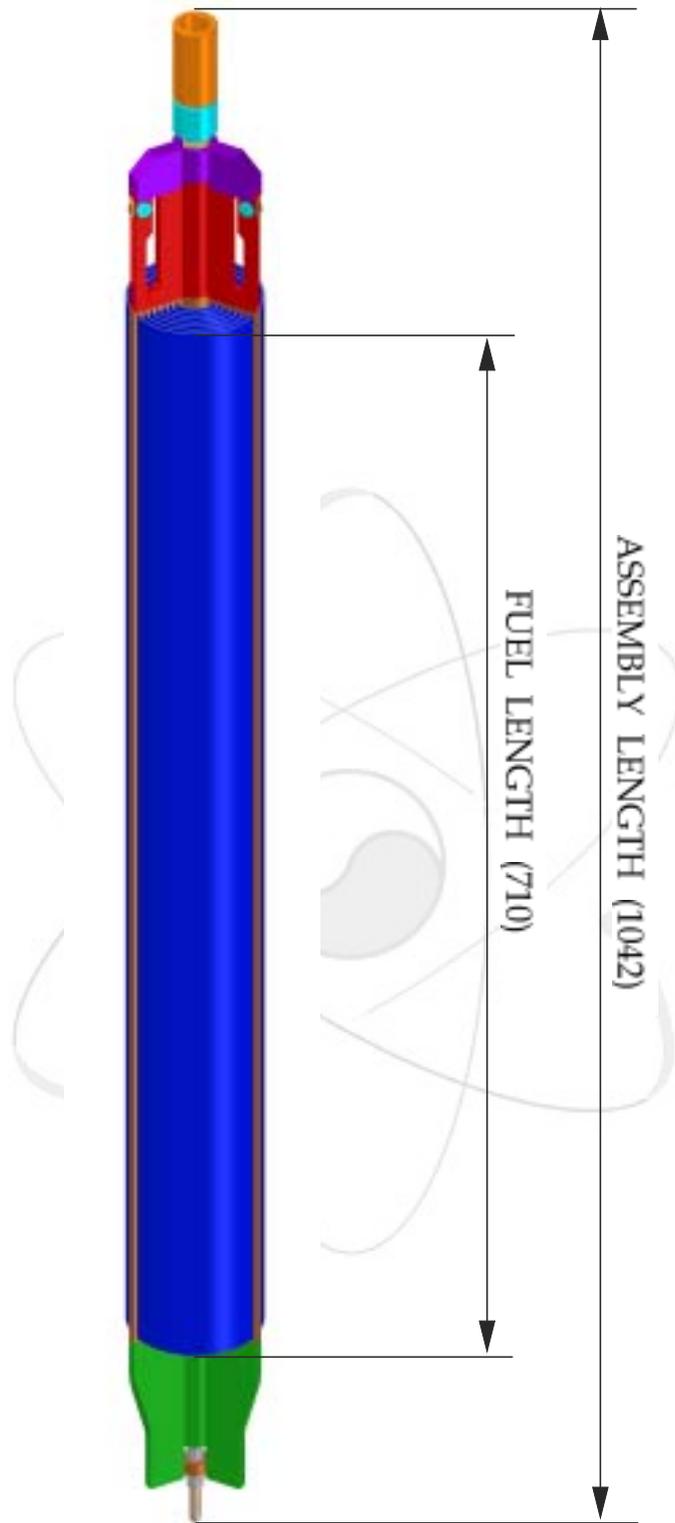


그림 4-16 표준 핵연료집합체의 형상

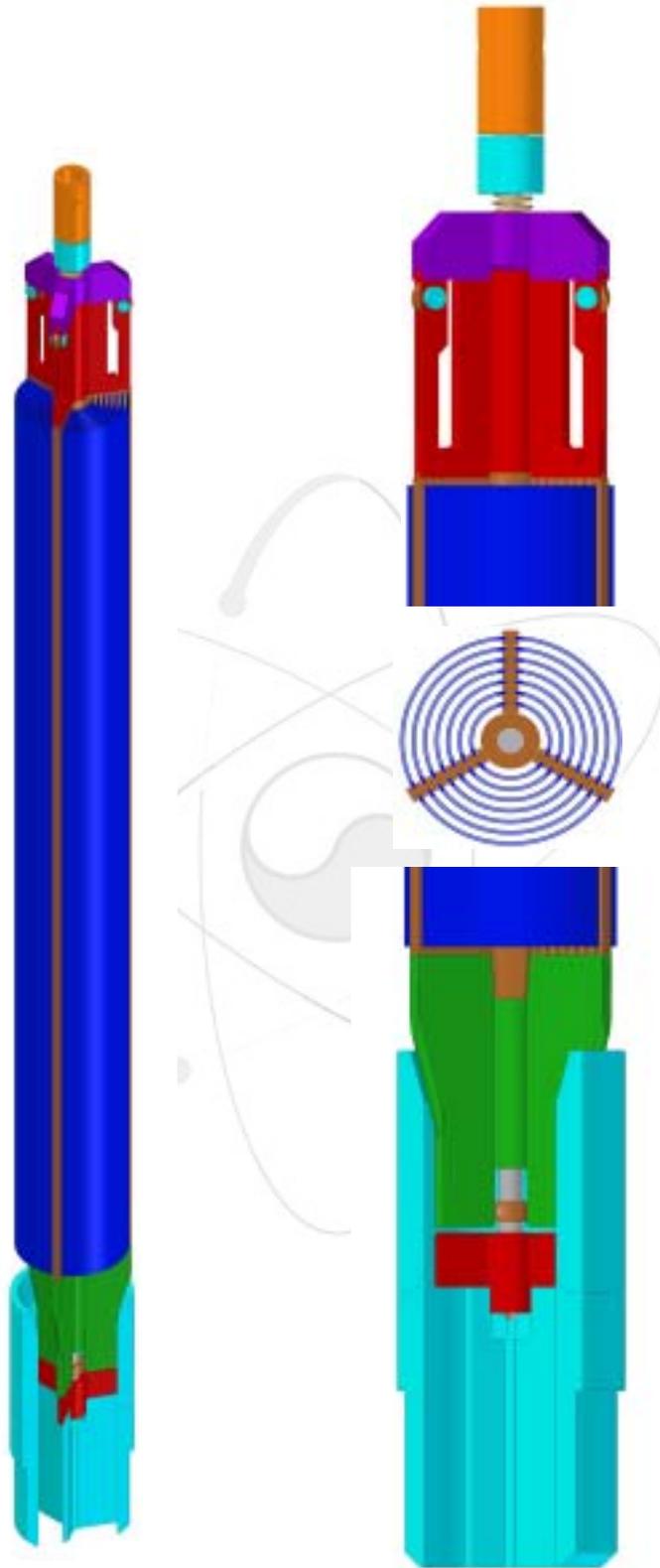


그림 4-17 표준 핵연료집합체와 receptacle의 형상

4.4 감축 핵연료집합체의 상부 및 하부 고정장치의 개념설계

제1차 표준 핵연료집합체의 개념설계를 기반으로, 상부 가이드에 대한 최적설계 결과와 곡판 핵연료의 개수 및 치수 변경을 반영하여 그림 4-20과 그림 4-23의 감축 핵연료집합체의 상부 및 하부 고정장치에 대한 설계를 수행하였다.

표준 핵연료집합체와 동일한 개념으로 상부 고정장치의 상부 가이드롤러를 도입하여 접촉면의 마모를 줄일 수 있도록 하였다. 제 2절에서 제시한 것과 같이 상부 가이드가 핵연료집합체를 견고하게 지지할 수 있도록 상부 가이드에 대한 형상 최적설계를 수행하였다. 최적설계 과정에서 상부 가이드의 모재가 피로 및 항복에 의해서 파괴되지 않도록 하였다. 그림 4-22에 형상 최적설계의 결과를 반영하여 설계된 감축 핵연료집합체의 상부 가이드가 나타나 있다. 앞의 표 4-1과 표 4-2에 따라 핵연료 개수와 치수가 변경되면서 spacer tube의 외경이 29mm에서 21mm로 줄어들었고 유동관의 내경은 64.6mm에서 66.7mm로 커졌다. 유동관과 spacer tube의 치수 변경은 감축 핵연료집합체 상·하부의 설계에 직접적인 영향을 미치게 되었다. 따라서 상부 가이드의 중앙부의 외경은 spacer tube의 영향으로 기존 29mm에서 현재 21mm가 되었다. 유동관의 내경을 고려하여 상부 가이드의 각 날개의 너비를 조절하였다. 그림 4-21의 상부 가이드덮개는 스프링을 위한 공간 확보와 그림 4-9의 grapple head, 상부 가이드를 고려하여 중심부 외경이 기존 29mm에서 현재 25mm가 되었다. 상부 가이드덮개와 그림 4-10의 spring cover 사이, 스프링을 위한 공간의 지름은 기존 21mm에서 19mm로 변경되었다.

Spacer tube의 외경 변화에 따라 그림 4-24의 bottom guide의 중앙부 외경은 20mm에서 18mm로 변경되었다. 또한 유동관의 내경을 고려하여 중심축에서 날개의 최외각 부분까지의 폭을 32.8mm로 조절하였다. 그림 4-25의 spider는 날개의 너비를 제외하고는 표준 핵연료집합체의 것과 동일하며, 핵연료집합체 하단부에 위치하여 그림 4-15의 central rod tip과 결합되도록 하였다. 그림 4-26에서 보는 것과 같이 receptacle cup과 flow straightener는 표준 핵연료집합체와는 다르게 유동관에 spider와 flow straightener를 일체형으로 제작하여 나사가 있는 receptacle cup에 장착되도록 설계되었으며, 냉각수 유입 경로는 요철 없는 직선이 유지되도록 설계하였다. 그림 4-23에 핵연료집합체가 유동관의 하부 고정장치에 결합된 모습이 나타나 있다. 또한 그림 4-26의 유동관의 하단에는 나사산이 파여 있다. 이것은 표준 핵연료집합체의 receptacle cup 부분이 노심의 하부 격자판에 용접으로 결합되는 것과는 다르게 노심의 하부 격자판에 나사 방식으로 결합되어 유동관의 손상 등에 대비하여 교체할 수 있게 한 것이다.

그림 4-27에 감축 핵연료집합체의 3차원 형상이, 그림 4-28에 핵연료집합체가 유동관에 장착되어 있는 모습이 종합적으로 나타나 있다. 핵연료집합체의 구성 부품 목록은 표 4-3에 정리되었다.

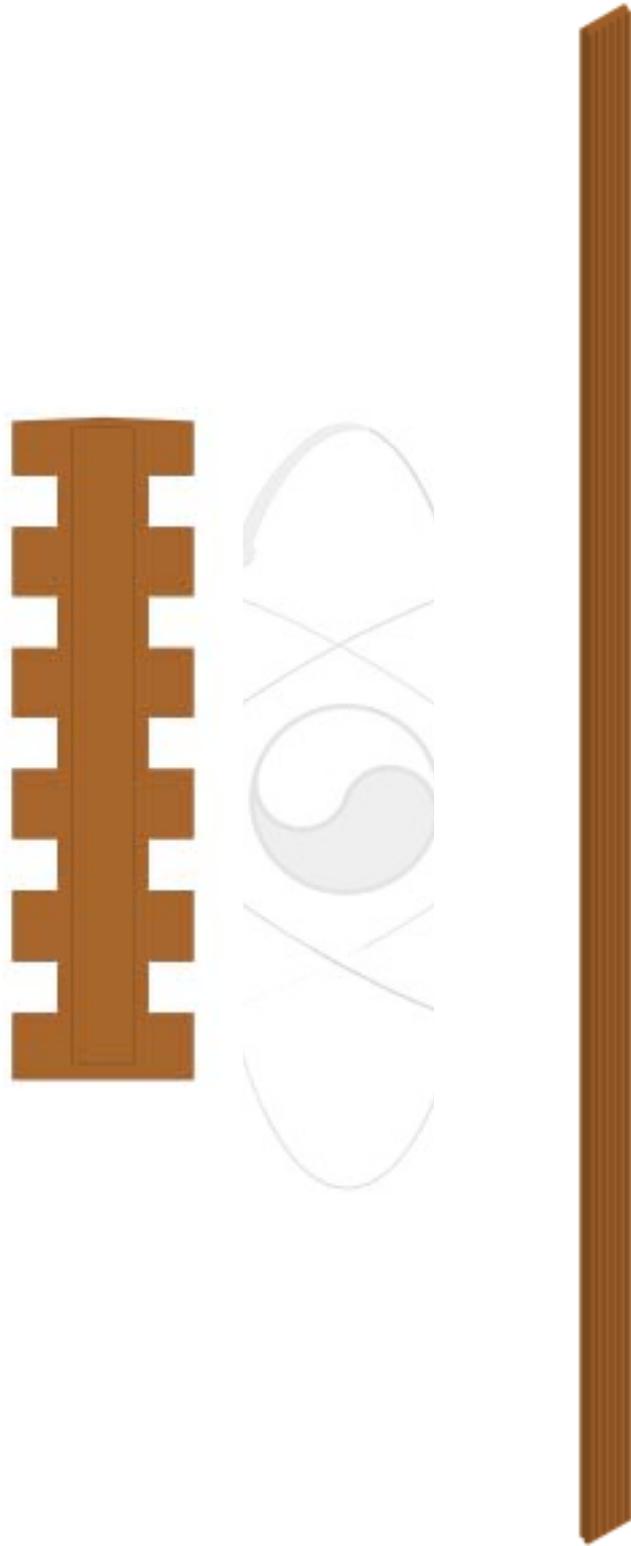


그림 4-18 감축 핵연료집합체의 stiffener

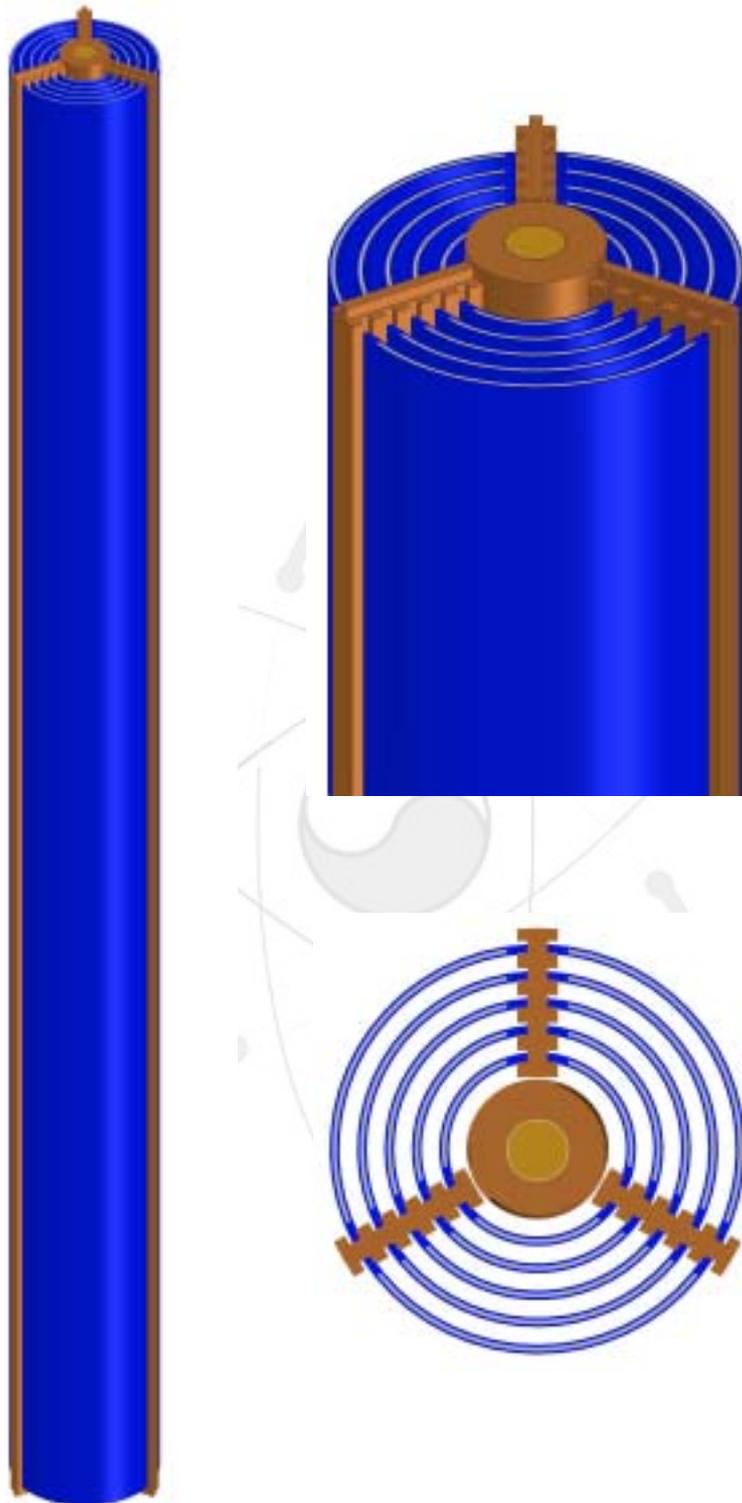


그림 4-19 감축 핵연료집합체의 곡판 핵연료, stiffener, spacer tube 및 central rod
의 조립도

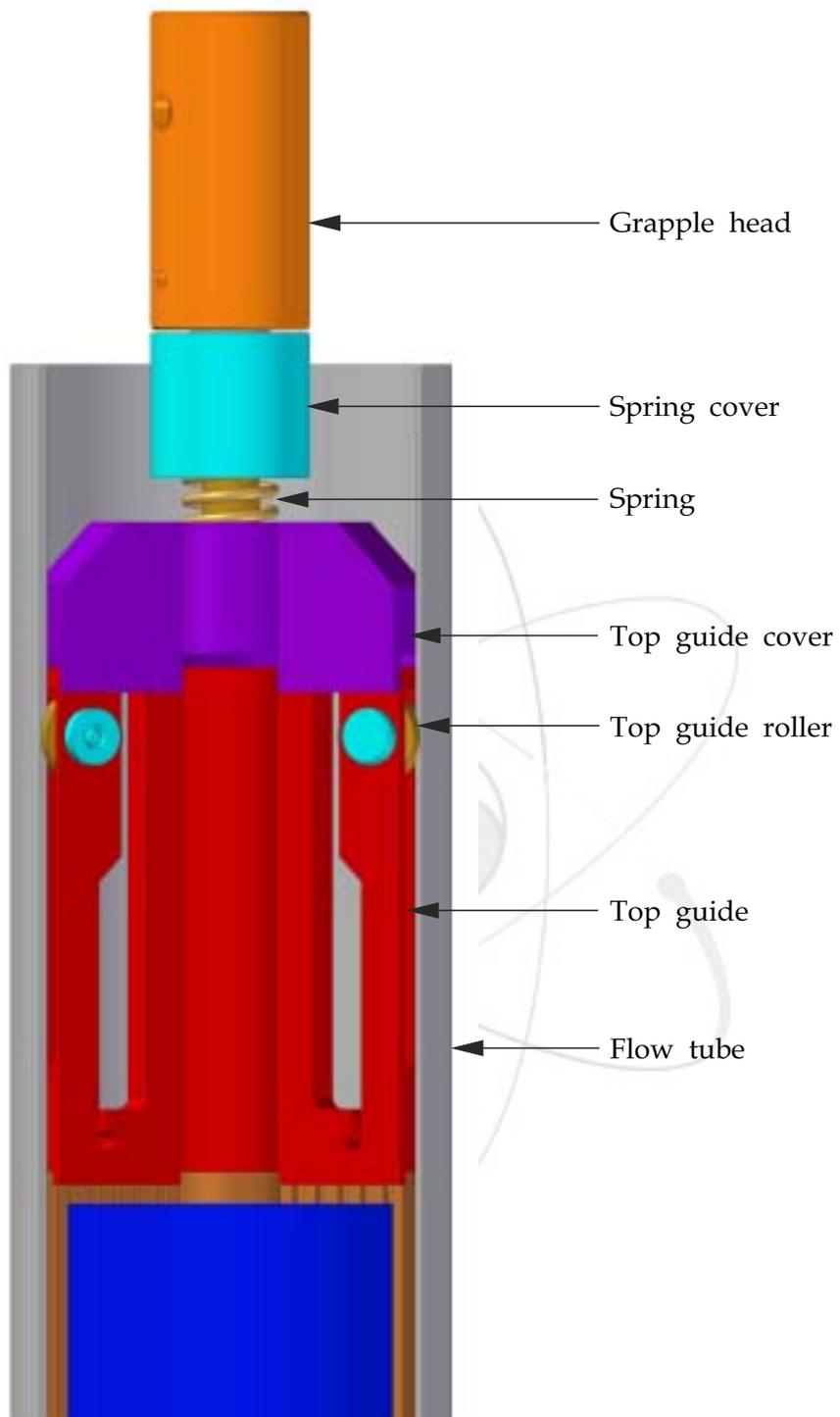


그림 4-20 감축 핵연료집합체의 상부 고정장치

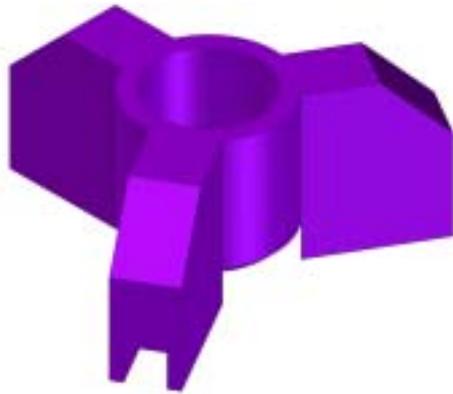


그림 4-21 감축 핵연료집합체의 상부 가이드덮개

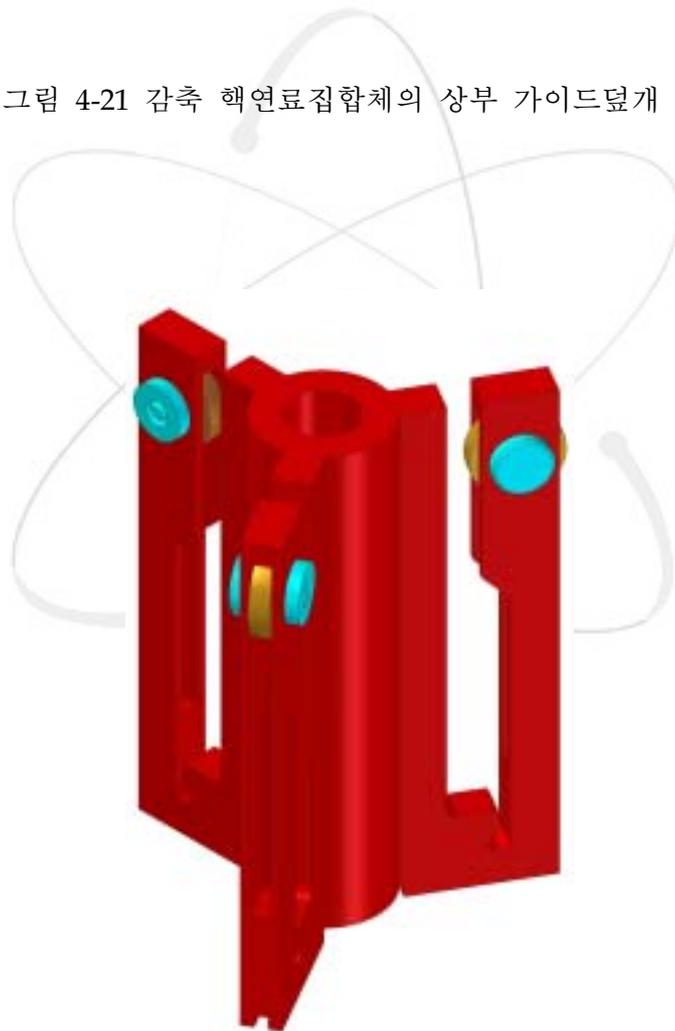


그림 4-22 감축 핵연료집합체의 상부 가이드와 상부 가이드롤러

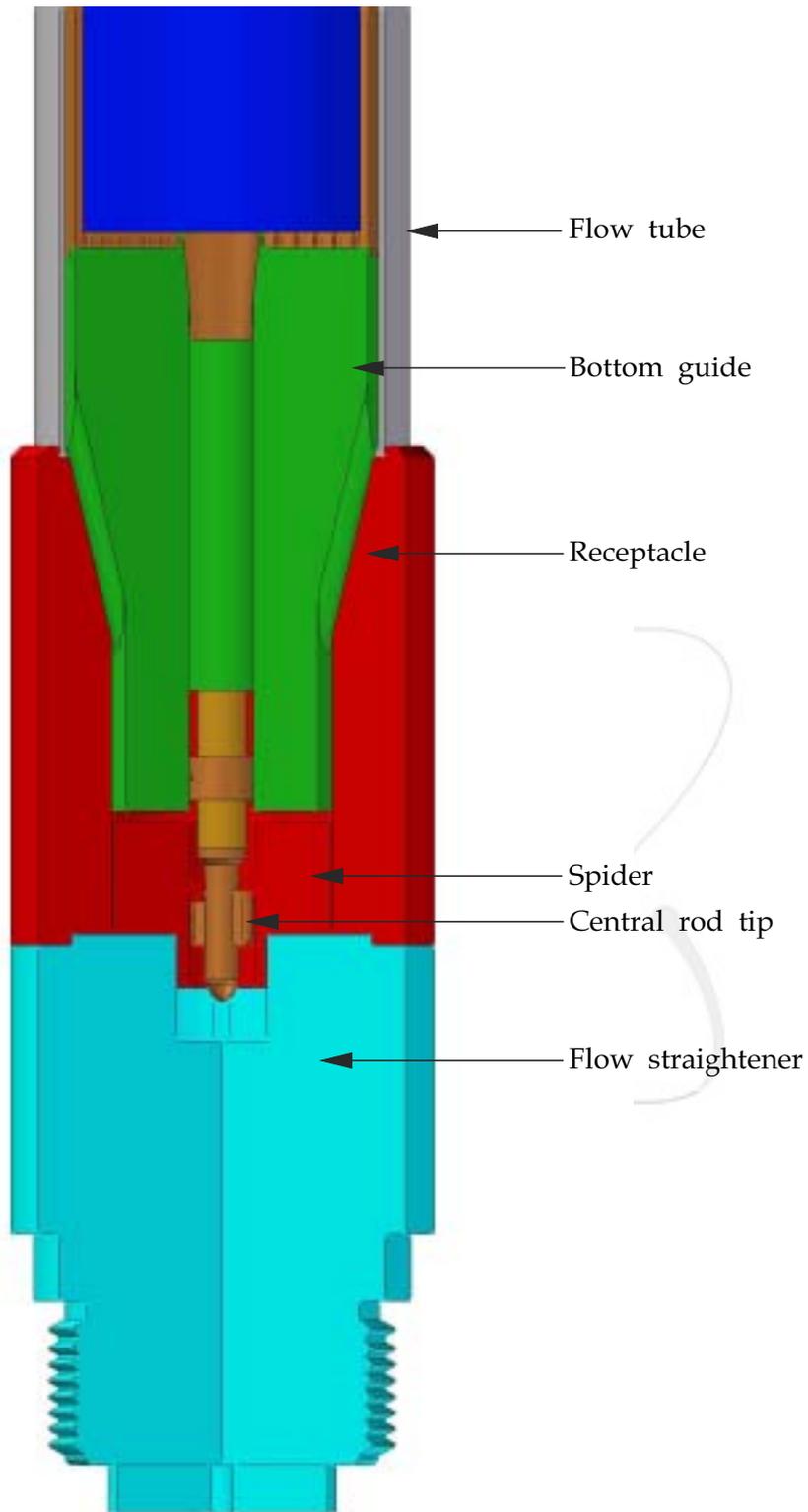


그림 4-23 감축 핵연료집합체의 하부 고정장치



그림 4-24 감축 핵연료집합체의 bottom guide



그림 4-25 감축 핵연료집합체의 spider

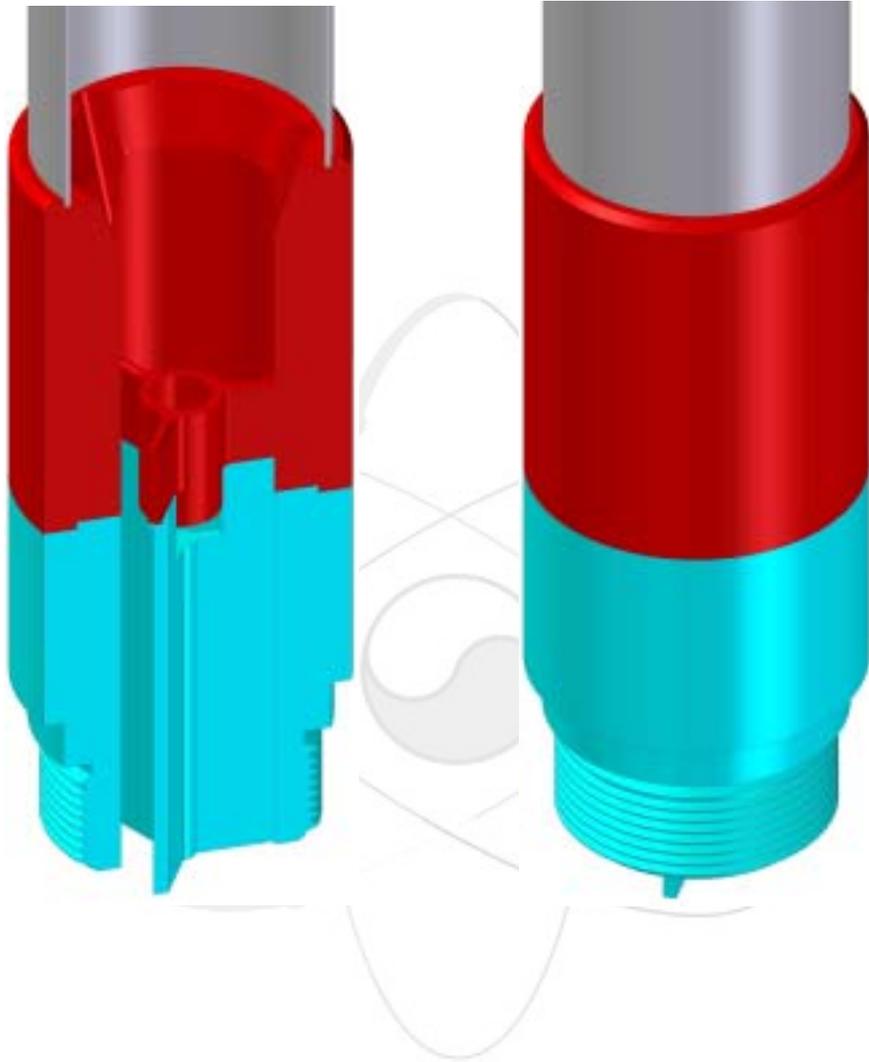


그림 4-26 감축 핵연료집합체의 유동관

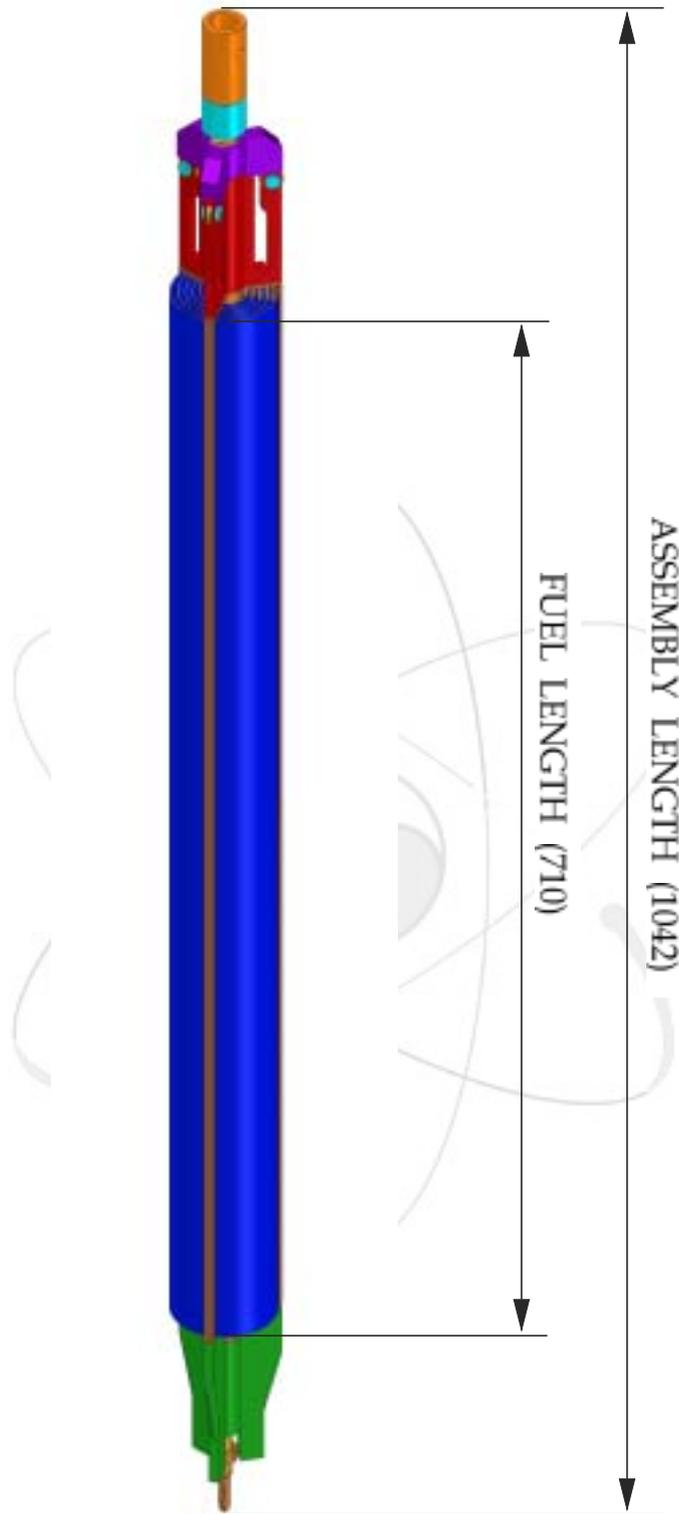


그림 4-27 감축 핵연료집합체의 형상

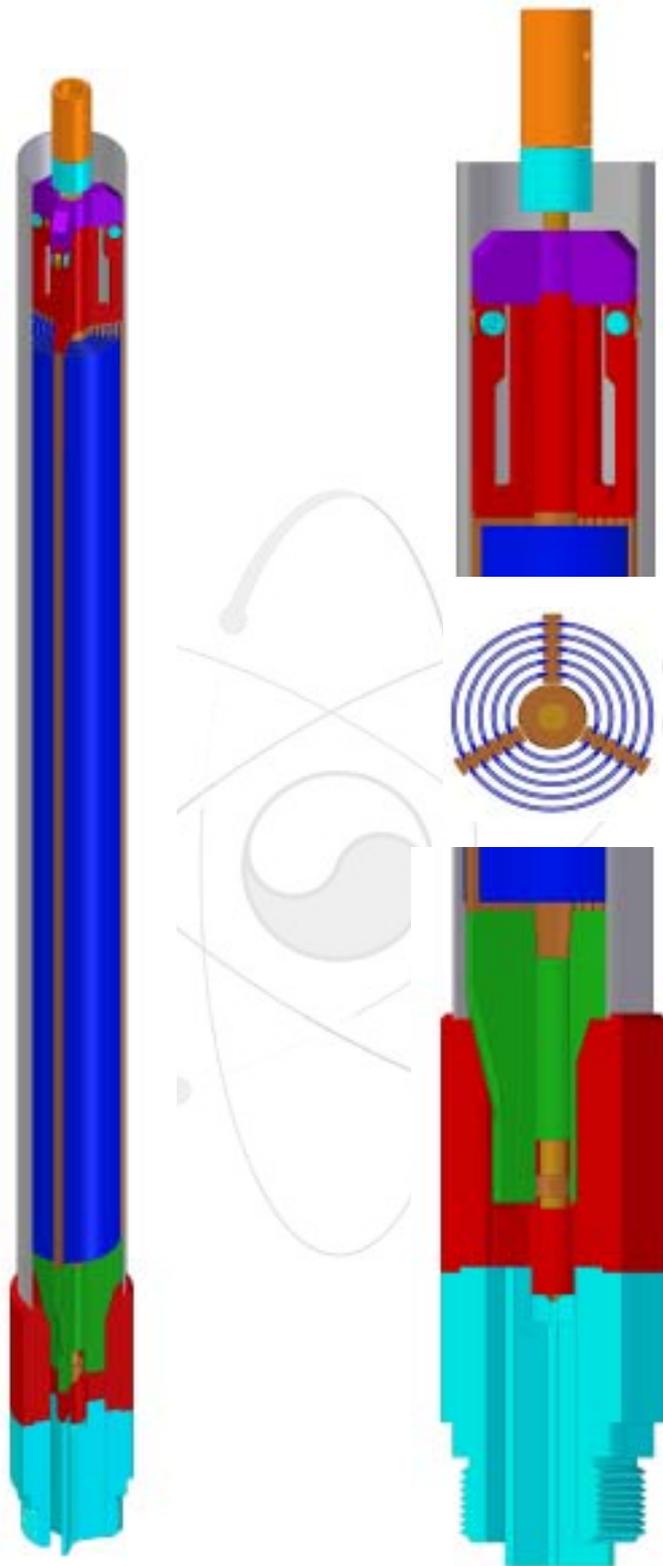


그림 4-28 감축 핵연료집합체와 유동관의 형상

4.5 스프링 설계

핵연료의 설계 변경으로 인하여 표준 및 감축 핵연료집합체에 사용되는 스프링의 설치를 위한 공간이 줄어들었다. 또한 제1차년도에서 설계된 스프링의 장전 압축력은 14kgf로 하나로 핵연료집합체에 사용된 스프링의 압축력(30kgf)에 비해 약하였다. 스프링을 위한 공간 변경과 보다 강한 압축력을 얻기 위하여 스프링을 재설계하였고, 표 4-4에 변경 사항을 정리하였다.

표 4-4 상부 스프링 설계

	변경전	변경후
Spring rate k	7 - 9 N/mm	13 N/mm
Install load	14 kgf	26 kgf
Wire diameter	2.33 ±0.05mm	2.5 mm
Outer diameter of coils	19.8 ±0.2mm	17.3 mm
Active Number of coils	6.5	6.5 (동일)

4.6 노심 구조와의 연계

노심은 반사체용기(reflector vessel) 안쪽에 직사각형 형태로 설계되었다. 노심은 핵연료 채널용 구멍이 뚫린 알루미늄 블록과 제어봉·정지봉의 수 만큼에 해당하는 원형 유동관(cylindrical flow tube)으로 구성된다. 하나로의 육각 유동관은 설치 및 제거과정에서 기계적인 고착이 발생하기 쉽다. 원자로 설치 시에는 유동관 가까이 접근할 수 있기 때문에 사람의 손 감각으로 설치·해체할 수 있으나, 원자로 가동 후에는 보수를 위해 먼 거리에서 작업을 하므로 설치 당시보다는 설치 및 해체 작업이 훨씬 어렵다. 이러한 경험을 반영하여 핵연료 채널 및 유동관을 원형으로 설계하였다[1]. 표준 핵연료집합체는 유동관 없이 알루미늄 블록에 뚫린 구멍에 직접 장전되고, 감축 핵연료집합체는 지르코늄으로 된 원형 유동관이 설치된 곳에 장전되는 방식으로 설계하였다. 원형 유동관은 제어봉 및 정지봉의 가이드 역할을 할 뿐만 아니라 핵연료와 직접 닿지 않도록 하는 기능을 하므로 제어봉·정지봉이 있는 곳에는 반드시 필요하다. 그림 4-29와 그림 4-30에 핵연료집합체가 노심에 장전되어 있는 개념도가 나타나 있다. 그림 4-29의 평면도에는 6개의 감축 핵연료집합체와 17개의 표준 핵연료집합체가 장전된 모습이 나타나 있다. 그림 4-30은 알루미늄 블록, 상부 격자판, 원형 유동관 및 핵연료집합체가 조립된 노심 구조의 정면도를 보여주고 있다. 상부 격자판은 표준 핵연료집합체와의 마찰로 마모가 일어날 수 있으므로 필요시 교체할 수 있도록 하였다. 그리고 감축 핵연료집합체를 위한 유동관은 노심과 나사 결합을 하여 마모 등의 손상에 대비하여 교체할 수 있도록 하였다.

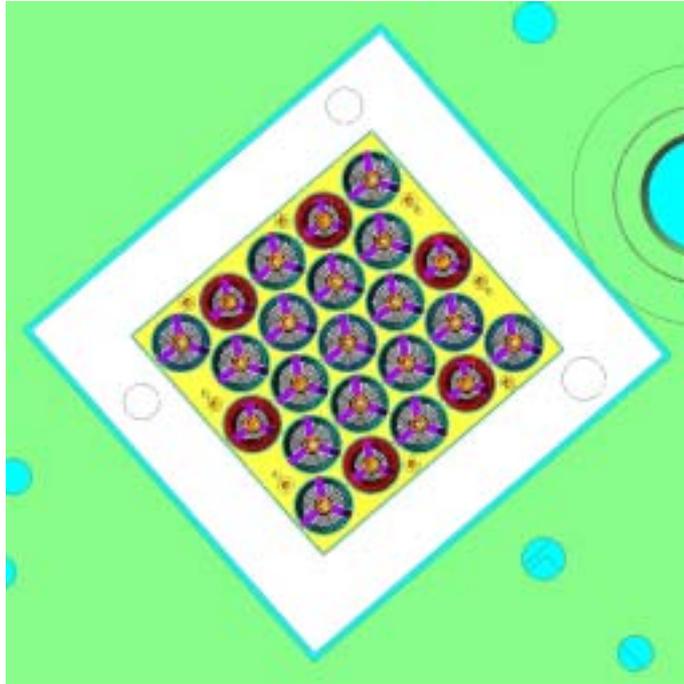


그림 4-29 노심 구조의 개념설계 (평면도)

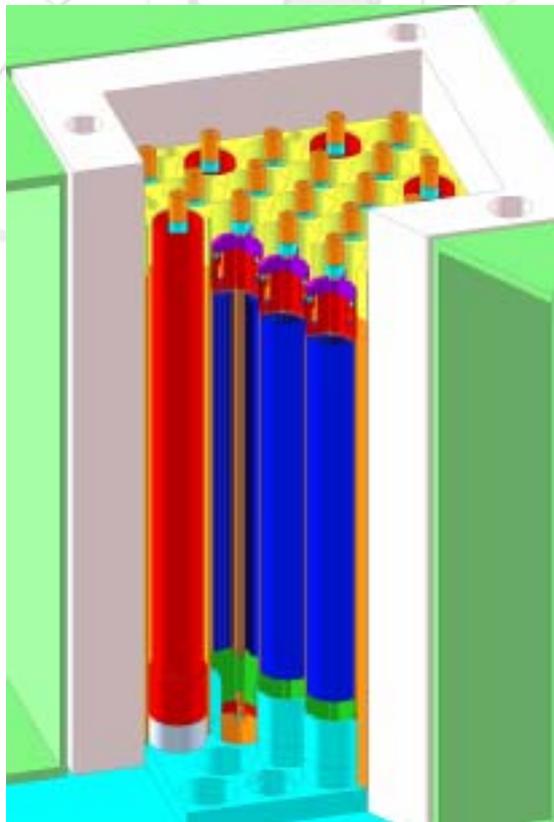


그림 4-30 노심 구조의 개념설계 (정면도)

4.7 표준 및 감축 핵연료집합체의 개념설계 도면

제1차년도 개념설계를 바탕으로 핵연료 개수 및 치수 변경, 상부 가이드의 설계 변경 등의 추가 연구를 반영하여 개념설계를 수행하였다. 또한 시제품 제작과정에서 부품 제작과 스웨징 등의 공정을 개발하여 개념설계에 반영하였다. 표준 및 감축 핵연료집합체를 위하여 2차원 도면뿐만 아니라 3차원으로 각 부품의 도면을 작성하여 부품간의 설계 간섭 사항을 확인할 수 있었다.

다음은 표준 핵연료집합체의 AutoCAD 상세 도면의 목록이다.

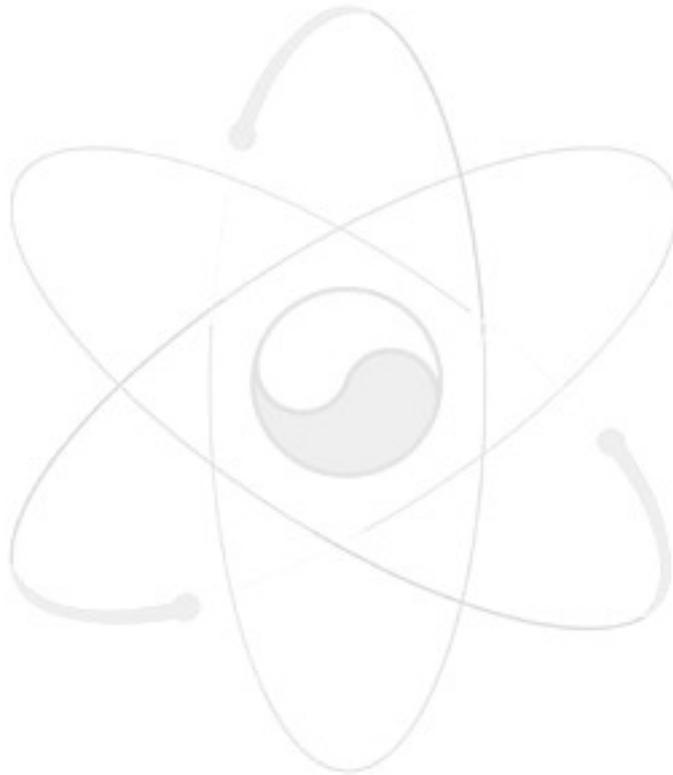
- 1) ARR-ME-DW-312-GA-003-01, Rev.P1, Standard Fuel, Channel Assembly
- 2) ARR-ME-DW-312-GA-003-02, Rev.P1, Standard Fuel, Channel Assembly
- 3) ARR-ME-DW-312-GA-003-03, Rev.P1, Standard Fuel, Channel Assembly
- 4) ARR-ME-DW-371-GA-01-01, Rev.P1, Standard Fuel, General Assembly
- 5) ARR-ME-DW-371-GA-02-01, Rev.P1, Standard Fuel, Spacer Tube Assembly
- 6) ARR-ME-DW-371-DD-03-01, Rev.P1, Standard Fuel, Spacer Tube - 1, 2
- 7) ARR-ME-DW-371-GA-04-01, Rev.P1, Standard Fuel, Central Rod Assembly
- 8) ARR-ME-DW-371-DD-05-01, Rev.P1, Standard Fuel, Central Rod, Rod Tip, Stopper
- 9) ARR-ME-DW-371-GA-06-01, Rev.P1, Standard Fuel, Fuel Plate & Stiffener Assembly
- 10) ARR-ME-DW-371-DD-07-01, Rev.P1, Standard Fuel, Stiffener
- 11) ARR-ME-DW-371-DD-08-01, Rev.P1, Standard Fuel, Fuel Plate
- 12) ARR-ME-DW-371-DD-08-02, Rev.P1, Standard Fuel, Fuel Plate
- 13) ARR-ME-DW-371-DD-09-01, Rev.P1, Standard Fuel, Spring Cover, Thrust Washer, Grapple Head
- 14) ARR-ME-DW-371-DD-10-01, Rev.P1, Standard Fuel, Top Guide Cover
- 15) ARR-ME-DW-371-GA-11-01, Rev.P1, Standard Fuel, Top Guide Assembly
- 16) ARR-ME-DW-371-DD-12-01, Rev.P1, Standard Fuel, Top Guide, Top Guide Roller, etc.
- 17) ARR-ME-DW-371-DD-13-01, Rev.P1, Standard Fuel, Bottom Guide

- 18) ARR-ME-DW-371-DD-14-01, Rev.P1, Standard Fuel, Spring
- 19) ARR-ME-DW-312-GA-018-01, Rev.P1, Standard Fuel, Receptacle Assembly
- 20) ARR-ME-DW-312-DD-019-01, Rev.P1, Standard Fuel, Receptacle-1, Spider
- 21) ARR-ME-DW-312-DD-020-01, Rev.P1, Standard Fuel, Receptacle-2

다음은 감축 핵연료집합체에 대한 AutoCAD 상세 도면의 목록이다.

- 1) ARR-ME-DW-312-GA-004-01, Rev.P1, Reduced Fuel, Channel Assembly
- 2) ARR-ME-DW-312-GA-004-02, Rev.P1, Reduced Fuel, Channel Assembly
- 3) ARR-ME-DW-312-GA-004-03, Rev.P1, Reduced Fuel, Channel Assembly
- 4) ARR-ME-DW-312-GA-004-04, Rev.P1, Reduced Fuel, Spring Washer
- 5) ARR-ME-DW-372-GA-01-01, Rev.P1, Reduced Fuel, General Assembly
- 6) ARR-ME-DW-372-GA-02-01, Rev.P1, Reduced Fuel, Spacer Tube Assembly
- 7) ARR-ME-DW-372-DD-03-01, Rev.P1, Reduced Fuel, Spacer Tube - 1, 2
- 8) ARR-ME-DW-372-GA-04-01, Rev.P1, Reduced Fuel, Central Rod Assembly
- 9) ARR-ME-DW-372-DD-05-01, Rev.P1, Reduced Fuel, Central Rod, Rod Tip, Stopper
- 10) ARR-ME-DW-372-GA-06-01, Rev.P1, Reduced Fuel, Fuel Plate & Stiffener Assembly
- 11) ARR-ME-DW-372-DD-07-01, Rev.P1, Reduced Fuel, Fuel Plate
- 12) ARR-ME-DW-372-DD-08-01, Rev.P1, Reduced Fuel, Stiffener
- 13) ARR-ME-DW-372-DD-09-01, Rev.P1, Reduced Fuel, Spring Cover, Thrust Washer, Grapple Head
- 14) ARR-ME-DW-372-DD-10-01, Rev.P1, Reduced Fuel, Top Guide Cover
- 15) ARR-ME-DW-372-GA-11-01, Rev.P1, Reduced Fuel, Top Guide Assembly
- 16) ARR-ME-DW-372-DD-12-01, Rev.P1, Reduced Fuel, Top Guide, Top Guide Roller, etc.
- 17) ARR-ME-DW-372-DD-13-01, Rev.P1, Reduced Fuel, Bottom Guide
- 18) ARR-ME-DW-372-DD-14-01, Rev.P1, Reduced Fuel, Spring

- 19) ARR-ME-DW-312-GA-030-01, Rev.P1, Reduced Fuel, Flow Tube Assembly
- 20) ARR-ME-DW-312-DD-031-01, Rev.P1, Reduced Fuel, Flow Tube Adapter, Spider
- 21) ARR-ME-DW-312-DD-032-01, Rev.P1, Reduced Fuel, Receptacle
- 22) ARR-ME-DW-312-DD-033-01, Rev.P1, Reduced Fuel, Flow Tube



5. 결 론

튜브형 핵연료집합체에 대한 설계 변경 및 개선에 대한 연구를 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 표준 및 감축 핵연료집합체의 곡판 핵연료의 개수 및 치수가 변경되었다. 표준 핵연료집합체의 곡판 핵연료의 수는 6개에서 7개로 늘었으며, 감축 핵연료집합체의 곡판 핵연료는 4개에서 5개로 변경하였다. 곡판 핵연료의 단면과 길이, 냉각수 유로의 폭은 표준과 감축 핵연료집합체가 같은 치수를 갖도록 설계하였다. 핵연료 심재의 두께는 기존 0.6mm에서 0.65mm가 되었으며, 양면에 피복 0.4mm를 두어 총 곡판 핵연료의 두께는 1.45mm가 되었다. 핵연료 심재의 길이는 700mm이고, 상·하단에 피복을 각각 5mm 길이로 두어 곡판 핵연료의 길이는 총 710mm가 되었다. 곡판 핵연료가 stiffener와 결합되는 양단에는 3mm의 피복을 설계했고, 이중 1.5mm가 stiffener의 홈에 결합된다. 냉각수 유로의 폭은 기존 2.5mm에서 2.6mm로 넓게 하여 열전달 능력을 증가시켰다.
- (2) 곡판 핵연료의 개수 및 치수 변경으로 외곽 핵연료 곡판의 직경이 커졌고 중앙부 spacer tube의 외경은 줄어들었다. 이를 반영하여 표준·감축 핵연료집합체의 상·하부 가이드를 포함한 여러 부품 요소의 설계를 개선하였다. Spacer tube의 직경 감소는 상·하부 가이드 및 부속 부품의 중앙부 직경의 감소로 이어졌다. 또한 전체 외경이 조금 커진 것을 반영하여 각 부품의 날개 너비를 조절하였고, 냉각수 유입로가 직선이 유지되도록 receptacle설계를 변경하여 원활한 유동의 흐름을 도모하였다. 한편 단면 외경의 증가로 핵연료집합체가 장착될 노심 채널의 내경도 커지게 되었다.
- (3) 상부 가이드는 냉각수의 유동으로 인한 핵연료집합체의 진동을 최소화할 수 있는 구조로 설계되어야 하며, 구조적으로 건전하여 피로파괴 또는 항복에 의한 파괴의 가능성이 없어야 한다. 이를 위해서 상부 가이드에 대한 형상 최적설계를 수행하였다. 최적설계 결과 상부 가이드의 지지력이 증가하여 핵연료집합체를 보다 견고하게 지지할 수 있게 되었다. 이것은 핵연료집합체의 동적 거동에도 긍정적인 영향을 줄 것으로 판단되며, 이에 대하여 향후 엄밀한 해석을 수행할 예정이다.
- (4) 핵연료집합체의 생산 기술을 확보하기 위하여 스웨징 공정 절차를 개발하고 시제품 제작 및 시험을 완료하였다. 스웨징 공정을 통해 고정된 곡판 핵연료와 stiffener의 연결부에 대한 접선방향 인장시험과 축방향 압축시험을 수행한 결과, 개발된 스웨징 공정에 의한 결합은 매우 견고한 것을 확인하였다. 따라서 유체유

발진동과 같은 외부 하중이 가해지더라도 개발된 스웨이징 공정에 의한 결합부는 구조적으로 건전하게 유지될 것으로 예상된다.

- (5) 표준 핵연료집합체의 receptacle cup은 노심의 하부 격자판에 용접으로 접합되고, 감축 핵연료집합체의 유동관은 노심의 하부 격자판과 나사 결합을 하도록 설계하였다. 노심의 상부 격자판은 표준 핵연료집합체와의 마찰로 마모가 일어났을 때 필요시 교체할 수 있도록 설계하였으나, 감축 핵연료집합체의 장전 채널은 정지봉 및 제어봉의 운전 경로로 인하여 상부 격자판의 교체에 영향을 받지 않는다. 따라서 필요시 감축 핵연료집합체의 유동관 전체를 교체할 수 있도록 하부 격자판과의 나사결합 방식을 채택하였다. 냉각수 유입로의 경우 표준 및 감축 핵연료집합체 모두 요철 없는 직선을 유지하도록 하여 압력 손실을 줄였고, flow straightener를 설계하여 냉각수의 와류 현상을 줄이도록 설계하였다.
- (6) 튜브형 표준 및 감축 핵연료집합체의 개념설계를 완료하였다. 향후 설계 변경된 튜브형 핵연료집합체의 기초 모델에 대한 다양한 시험과 해석을 수행하고, 연구로 설계 경험자 및 연구로 사용자들의 의견을 반영하여 지속적으로 설계를 개선해 나갈 예정이다.

6. 참고문헌

- [1] 류정수, 조영갑, 윤두병, 박철, "수출전략형연구로 설계: 핵연료집합체 및 원자로 구조물 개념설계," 기술보고서, KAERI/TR-2661/2004, 한국원자력연구소, 2004
- [2] 류정수, 조영갑, 윤두병, 단호진, 채희택, 박철, "The conceptual design for a fuel assembly of a new research reactor," Americas Nuclear Energy Symposium (ANES) 2004, American Nuclear Society, 2004
- [3] 류정수, 조영갑, 윤두병, 단호진, 채희택, 박철, "새연구로 핵연료집합체에 대한 개념설계," 한국원자력학회 추계학술발표대회, 2004
- [4] 류정수, 윤두병, 조영갑, 박철, "수출전략형연구로 핵연료집합체의 개념설계를 위한 잠금장치의 시험," 기술보고서, KAERI/TR-2629/2003, 한국원자력연구소, 2003
- [5] 류정수, 윤두병, "수출전략형 핵연료 잠금장치의 회전저항 및 진동 시험 절차서," 시험절차서, ARR-ME-RD-TR-038-001, Rev. 0, 2003. 9. 17.
- [6] 단호진, 류정수, "Design of the top guide of the fuel assembly for a new research reactor," 한국원자력학회 추계학술발표대회, 2004
- [7] 류정수, "수출전략형 곡면핵연료와 stiffener의 스웨징 공정개발 및 시제품 제작," 기술시방서, ARR-ME-DD-SP-036-03-004, 2003. 12. 12.
- [8] 류정수, "ARR Fuel Plates 및 stiffener 집합체 시제품 제작," 기술시방서, ARR-ME-DD-SP-036-03-003, 2003. 12. 8.
- [9] Zahavi, E., and Torbilo, V., *Fatigue design; life expectancy of machine parts*, A Solomon Press Book, 1996
- [10] Suresh, S., *Fatigue of materials*, Cambridge university Press, Great Britain, 1994
- [11] Haug, E. J. and Arora, J. S., *Applied optimal design; mechanical and structural systems*, John Wiley & Sons, 1979

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-2909/2005					
제목/부제	수출전략형연구로 튜브형 핵연료집합체의 개념설계				
연구책임자 및 부서명 (TR, AR인 경우 주저자)	류정수 / 하나로운영부				
연구자 및 부서명	단호진, 조영갑, 윤두병, 박철 / 하나로운영부				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년월	2005. 5.
페이지	51p.	도표	있음(V), 없음()	크기	29 Cm.
참고사항					
비밀여부	공개(V), 대외비(), _ 급비밀		보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관			계약번호		
초록 (15-20줄내외)					
<p>2002년부터 수출전략형연구로의 설계를 수행하고 있으며, 최종목적은 안전성과 경제성이 우수한 고유의 연구로 모델을 새로 설계하는 것이다. 본 연구에서는 수출전략형연구로의 튜브형 핵연료집합체를 개선하기 위하여 개념연구를 수행하였다. 상부 가이드의 단면 형상을 개선하는 형상 최적설계를 수행하였으며, 곡판 핵연료와 stiffener를 연결하는 스웨징(swaging) 공정을 개발하였다. 또한 핵연료 곡판의 개수 및 치수를 변경하여 표준 및 감축 핵연료집합체의 관련 부품을 설계하였다. 상부 가이드는 냉각수 유동에 의한 핵연료집합체의 진동을 최소화할 수 있는 구조로 설계되어야 하며, 구조적으로 건전하여 피로 또는 항복에 의한 파괴의 가능성이 없어야 한다. 이를 위하여 상부 가이드에 대한 형상 최적설계를 수행하여 설계에 반영하였다. 핵연료집합체의 제작 가능성을 확인하기 위하여 스웨징 공정 절차를 개발하고 결합 정도를 평가하기 위하여 시험을 수행하였다. 곡판 핵연료와 stiffener의 연결부에 대한 접선방향 인장시험과 축방향 압축시험을 수행한 결과로 결합부가 구조적으로 건전하여 개발된 스웨징 공정이 핵연료집합체의 제작에 이용될 수 있음을 확인하였다. 곡판 핵연료의 개수 및 치수의 변경으로 핵연료집합체의 단면 직경이 약간 커졌으며 중심축의 직경은 가늘어졌다. 이를 반영하여 상·하부 가이드, 상부 가이드 덮개, 스프링 및 스프링 덮개 그리고 receptacle 등의 재설계를 수행하여 새로운 핵연료집합체에 대한 개념설계를 완료하였다. 향후 하나로 설계와 운전경험을 바탕으로, 튜브형 표준 및 감축 핵연료집합체에 대하여 다양한 시험과 해석을 수행하여 모델의 타당성을 지속적으로 검증할 예정이다.</p>					
주제명키워드 (10단어내외)	수출전략형연구로, 튜브형 핵연료집합체, 개념설계, 표준 및 감축 핵연료집합체, 스웨징 절차, 상부 가이드 설계				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	
KAERI/TR-2909/2005					
Title/ Subtitle		The Conceptual Design for Tubular Fuel Assemblies of an Advanced Research Reactor			
Project Manager and Department (or Main Author)		Jeong-Soo Ryu / HANARO Management Division			
Researcher and Department		Ho-Jin Dan / HANARO Management Division Yeong-Garp Cho / HANARO Management Division Doo-Byung Yoon / HANARO Management Division Cheol Park / HANARO Management Division			
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI	Publication Date	2005. 5.
Page	51 p.	Fig. & Tab.	Yes(V), No ()	Size	29 Cm.
Note					
Classified	Open(V), Restricted(), ___ Class Document		Report Type	Technical Report	
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract(15-20 Lines)					
<p>An Advanced Research Reactor(ARR) is being designed by KAERI since 2002. The final goal of the project is to develop a new and unique research reactor model which is superior in safety and economical aspects. In this work, the conceptual design for tubular fuel assemblies was carried out to enhance the previous model. The shape optimization of the cross section of the top guide was performed, and the swaging procedure in connecting fuel plates and stiffeners was developed. Moreover to reflect changes in number and size of fuel plates, related parts of the standard and the reduced fuel assemblies were redesigned. The top guide should suppress the vibration of the fuel assembly due to coolant and resist against material failures owing to fatigue and yield. In order to gain these design requirements, we have optimized the section profile of the top guide. To confirm manufacturing aspects, the swaging procedure was developed and its performance was tested. The results of tangential tensile test and axial compression test guaranteed that the fixing state between fuel plates and stiffeners is firm enough to hold each other. In addition, due to changes in number and size of fuel plates, the outer cross section of the fuel assembly was expanded and the diameter of the spacer tube was reduced. Reflecting these design changes, top/bottom guide, top guide cover, spring, spring cover, and receptacle were readjusted. Based on the technical experiences on the design and operation of the HANARO, the standard and the reduced fuel assemblies will be verified by performing various tests and analysis.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		Advanced Research Reactor, Tubular Fuel Assembly, Conceptual Design, Standard and Reduced Fuel Assemblies, Swaging Procedure, Top Guide Design			