

신형핵연료 지지격자 형상개발 및 성능평가 현황

Status on the Shape Design and Performance Evaluation of the Spacer Grid
for the Advanced LWR Fuel

송기남, 윤경호, 강홍석, 김형규, 오동석, 권태현, 정연호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

한국원자력연구소는 1997년 이래로 14종의 지지격자 및 혼합날개 고유형상을 고안하여 미국 및 대한민국에 특허를 출원하였고 2002년 9월 현재 6종의 고유형상에 대하여 미국 및 대한민국 특허를 획득하였다. 본 논문에서는 한국원자력연구소에서 고안하여 특허를 취득한 고유 지지격자 형상들의 특징들을 소개하고 성능비교시험을 거쳐서 선정된 지지격자 형상 2종에 대하여 기계/구조적 성능을 극대화하기 위해 스프링 형상개선 및 시험/해석 수행결과를 정리한 것이다. 선정된 지지격자 형상 2종에 대하여 곧 산업체 주관으로 상용화대비시험을 수행할 예정이다.

Abstract

KAERI has contrived 14 kinds of spacer grid shapes of its own since 1997 and applied for Korean and US patents. To date, KAERI has obtained US and Korean patents for 6 kinds of spacer grid shapes among them. In this study, design features and key concepts of the KAERI designed spacer grids were described and also mechanical test/analysis results on the two effective candidates of the spacer grid were summarized. The two candidates are planned to test for verifying their performances in KNFC's charge.

1. 서론

경수로용 핵연료집합체는 그림 1과 같이 상·하단고정체 각 1개, 7~11개의 지지격자체, 여러[웨스팅하우스(이하 W로 표기)형 발전소용 핵연료의 경우 16~24개; ABB-CE형 발전소용 핵연료의 경우 4개]개의 안내관 그리고 1개의 계측관 등으로 구성된 골격체와 지지격자체 격자내의 스프링 및 덤플에 의해 지지되고 있는 다수(179~264개)의 연료봉으로 구성되어 있다. 지지격자체의 기능은 크게 기계/구조적인 기능과 열수력적 기능으로 나누어지고 있는데, 전자의 기능은 핵연료 수명기간 내내 원자로심내의 운전조건하에서 연료봉이 종방향 및 횡방향의 정위치에 있도록 견견하게 지지하면서 냉각수 수로를 형성해주고, 또한 핵연료집합체 측면에 가해지는 여러 하중으로부터 연료봉을 보호하면서 비상시에 원자로의 긴급 냉각구조를 유지할 수 있도록 충분한 구조적 강도를 갖는 것이며, 후자의 기능은 연료봉내의 UO_2 소결체로부터 발생된 열을 효과적으로 냉각수로 전달하기 위해 연료봉 수로를 따라 흐르는 냉각수에 난류를 유발시키고 혼합하는 것이다. 이러한 기능을 갖고 있는 지지격자는 핵연료 성능과 매우 밀접하게 관련되어 있어서 외국의 핵연료 vendor들은 신연료 개발 및 상용화시에 핵연료 견견성 및 열적 성능을 향상시킨 새로운 지지격자 형상을 제시하여 신연료의 특징으로 주창하고 있다.

본 연구에서는 국내외의 핵연료 지지격자 개발 현황을 정리하였고 아울러 한국원자력연구소(KAERI)가 1997년이래 독자적으로 고안하여 미국 및 대한민국에 특허를 취득한 6종의 지지격자 형상들의 특징들을 소개하고, 성능비교시험을 거쳐서 선정된 지지격자 형상 2종에 대하여 기계/구조적 성능을 극대화하기 위해 스프링 형상개선 및 시험/해석 수행결과를 정리한 것이다.

2. 국내외 핵연료 개발현황

1) 국외의 개발현황

BNFL(WH)사는 OFA 지르칼로이 지지격자체를 바탕으로 1980년대에 기계적/열수력적 기능 향상시키기 위해 대각선 방향의 스프링 사용, "Window 사용/폐기", 혼합날개 형상개선, 격자판 재질의 변경 등을 통하여 VANTAGE 5(Zircaloy-4사용), VANTAGE 5H(Improved Zircaloy 사용), VANTAGE+, Performance+(ZIRLO 사용) 연료용 지지격자를 지속적으로 개발하였고 1997년부터는 지지격자 혼합날개 형상개선 및 스프링/덤프형상 개선으로 VANTAGE 5H 대비 열적성능 17% 증가 및 유동기인 핵연료 진동에 의한 연료봉의 프레팅마모 손상을 감소시키는 RFA 연료를 개발하여 상용공급중에 있다. 또한 BNFL(ABB-CE)사는 TURBO 연료용 지지격자체를 개발하였는데 주요특징은 유동혼합장치와 스프링에 있다. 즉, 유동혼합장치는 스트랩 상부의 돌출부에 지지되어있어 쉽게 손상되지 않으며 swirl 유동이 생성되는 형상을 가지고 있는데 CHF 시험결과를 보면 자사의 기존 연료(System80 연료)에 비해 열적성능이 최소한 10% 이상 증가하는 것으로 보고되어 있다. 외팔보 형상의 스프링에서 I형 스프링으로 전환하여 연료봉 장전시 표면 손상을 줄이고 프레팅마모에 의한 연료봉 파손 가능성도 감소시켰다. 한편 지지격자의 용접방법은 기존 TIG 용접에서 Laser 용접으로 변경하고 용접 Bead 크기도 작게 하였으며 지지격자 제조시 압연방향을 조절하여 조사성장을 줄여서 고연소용 지지격자체를 지향하고 있다. 한편 BNFL사는 1989년부터 한전원전연료(주)와 공동으로 한국표준원전

형 개량연료개발에 참여하여 면접촉 형상의 스프링 및 덤플(KAERI에서 수행하는 고성능 지지격자 구조기술개발과제에서 이미 1997년에 고안하여 2000년에 대한민국 및 미국에 특허가 등록된 지지격자에 동일한 개념이 적용되었음.) 및 혼합날개에 있는 지지격자를 사용한 연료(PLUS 7™)를 개발하여 시범집합체 4다발을 2002. 3.에 제작하고 노내시험을 거쳐서 2006년부터 상용공급을 목표로 하고 있는데[1] BNFL사가 개발된 원천기술에 대한 소유권을 소유하고 한전원전연료(주)는 제한적인 실시권만을 갖고 있는 것으로 알려져 있다.

Framatome-ANP사는 지지격자체 구조강도를 증강시키고 유동혼합장치와 아치(Arch)형의 스프링을 채택한 FOCUS 지지격자를 개발하여 상용화(Siemens/KWU사)하고 있으며, 이중판 노즐형 지지격자 개념인 HTP 지지격자를 개발하여 상용화(SPC사)하고 있으며, AFA, AFA-2G 연료를 개발하여 상용화(Fragema사)하였고 근래에 AFA-2G 연료에 비해 열적여유도를 15% 향상시키고 M5재질로 격자판을 제조하고 Inconel 재질을 지지격자 스프링으로 사용하는(Bimetallic 지지격자) 지지격자체가 사용된 AFA-3G 신연료를 개발하여 상용공급하고 있다. 또한 최근에는 핵연료 신뢰성과 안전성을 향상시킨 ALLIANCE™ 연료를 개발하고 있는 것으로 알려졌다.

근래까지 외국의 핵연료 vendor들이 경수로용 핵연료를 지속적으로 개발하여 상용화하고 있으며 개발된 핵연료의 지지격자에 대한 특징은 표 1과 같다.

2) 국내의 개발현황

지지격자 및 혼합날개 개발과 관련하여 KAERI는 지난 1986년 이래로 10여년 이상의 핵연료 설계경험과 핵연료 설계/제조 연계업무경험을 바탕으로 1996년에 지지격자체의 기계/구조적 및 열수력적 특성 연구 및 개발방안을 도출하였으며 이와 관련한 연구 특히, 원천기술을 확보하기 위한 연구를 1997년 7월부터 본격적으로 수행하고 있다. 한국 원자력연구소에서는 본 과제 1, 2단계를 통하여 고안된 지지격자 및 혼합날개 고유모형 14종에 대한 산업재산권을 확보하기 위해 국내·외에 특허를 출원하였으며 2002년 9월 현재 지지격자 고유모형 6종에 대하여 대한민국 및 미국으로부터 산업재산권을 확보하고 있다. 또한 고안된 지지격자 형상의 기계/구조적 및 열수력적 특성을 파악하고 개선점을 도출하기 위해 성능파악에 중요한 지지격자 고유형상 5종과 현재 상용으로 사용중인 지지격자 2종, 그리고 상용으로 개발중인 지지격자 1종에 대한 시편(지지격자판, 5x5형 부분격자체)을 제작하여 기계/구조적 성능비교시험과 열수력적 성능비교시험 수행 및 분석을 통해서 성능이 우수하고 산업재산권 확보가 유리한 지지격자 고유형상 2종을 최종형상으로 선정하여 산업체(KNFC)가 주관하는 상용화 대비시험과 연구소가 주관하는 노외 성능시험을 준비중에 있다. 근래까지 국내의 핵연료 설계/제조 및 지지격자에 대한 연구 개발 현황을 살펴보면 표 2와 같다.

3. 산업재산권을 획득한 고안한 지지격자의 특징

1) 이중판 노즐형 지지격자

지금까지 개발된 지지격자의 냉각재 혼합기능은 지지격자체의 상부에 “혼합날개” 혹은 “베인” 이라 부르는 냉각재 혼합용 날개를 부착하여 종방향으로 흐르는 냉각재에

횡방향 흐름을 부가적으로 갖게 함으로서 냉각재 채널(Channel: 수로)간 혹은 낮은 온도 구역과 높은 온도 구역의 냉각재가 섞이게 하는 방법(WH사에서 선도함)과 지지격자판을 두 겹으로 만들고 판과 판 사이에 공간을 형성시켜서 유로 통로를 만들되 이 통로의 입구와 출구를 길이 방향으로 기울여서 통로를 통과한 냉각재가 기울어진 각도만큼 회전하는 회전유동을 만들어 열전달을 향상시키는 방법(SPC사에서 선도함)이 있다. 그런데 SPC사의 개념인 이중판 구조에 의한 유로통로형 혼합기는 핵연료집합체내 낮은 온도 구역과 높은 온도 구역에 있는 냉각재를 섞기 때문에 원자로내 전체적인 열효율을 증가시켜서 핵연료봉이 국부적으로 과열되어 발생하는 핵 비등 이탈 등을 방지하는 역할을 제공하고 선접촉으로 지지된 연료봉의 진동이 작게 발생함으로서 유체유발진동에 의한 핵연료봉 프레팅마멸 손상을 발생시킬 우려가 적다. 그러나 노즐단면적의 차이가 크지 않고 노즐방향만을 바꿔주기 때문에 냉각수 혼합능력을 향상시킬 필요가 있다.

이러한 단점을 극복하고자 고안된 것이 그림 2와 3의 이중판 노즐형 냉각재 혼합 지지격자로서 원리상으로는 SPC사의 HTP 지지격자와 유사하다. 그러나 연료봉을 지지하는 증양부위의 단면적이 입구/출구 노즐의 단면적보다 크게 설계됨으로서 노즐을 통해 흐르는 유체의 정압(static pressure)이 노즐 입구나 출구부위보다 증양부위에서 더 커지게 되어(베르누이 정리) 궁극적으로 노즐속으로 유체가 흐를 때 스프링을 연료봉쪽으로 더 밀어내게 되어서 유동력에 의한 스프링력의 추가적인 보강을 이루게 하는 것이 특징이다. 이중판 노즐형 지지격자는 1997년 증반에 고안되었고 우리나라 핵연료 구조부품개발 역사상 처음으로 2000년 10월에 미국특허를 획득[2]하였고 대한민국 특허도 등록되어 있다[3].

2) H형 스프링 부착 지지격자

종래의 대다수 지지격자에서 지지격자 스프링 및 덤플은 점 접촉이나 작은 선 접촉의 비등각(non-conformal) 접촉으로 연료봉을 지지하고 있었다. 이에 비하여 KAERI에서 1997년 증반에 고안한 "H형 스프링이 부착된 지지격자"(그림 4 참조)는 지지격자 스프링 및 덤플이 그림 5에서 보듯이 연료봉을 감싸는 형태의 등각(conformal)이 되도록 하였다. 연료봉과 지지격자 스프링 및 덤플의 접촉부위가 면접촉이 되면 연료봉과의 접촉면적이 넓어지게 되고 지지격자 스프링 및 덤플 접촉부와 연료봉 접촉부에서 접촉응력의 첨두치(peak value) 크기가 크게 감소될 수 있으며 연료봉을 넓은 면적에서 지지함으로써 유체유발진동에 의해 연료봉이 축방향 및 횡방향으로의 미소한 흔들림으로 인한 연료봉과 지지부 간의 상대운동을 감소시켜 연료봉의 프레팅마멸 손상 가능성을 억제할 수 있다. 또한 종래의 지지격자는 외부에서 작용하는 임의의 방향으로부터의 하중에 불안정한 지지 구조를 이루고 있어(점접촉 및 작은 선접촉) 건전한 지지상태를 상실할 가능성이 있다. 그러나 H형 스프링은 스프링 지지점에서의 반력을 분산시킬 수 있는 이중 아치(Arch) 형상의 다리를 갖도록 하여 안정적인 연료봉의 지지를 기하고 스프링의 탄성 거동 허용범위를 확장시켜 원자로의 운전 중 변화하는 지지조건에서도 연료집합체의 수명기간 동안 건전한 연료봉의 지지를 가능케 하기 위한 것이다. H형 스프링 부착 지지격자는 2000년 12월에 우리나라 핵연료 구조부품 개발 역사상 2번째로 미국특허를 획득하였고[4] 2001년 12월에 국내특허도 등록되었다[5].

3) 회전유동형 날개부착 지지격자

그림 6은 회전유동형 날개부착 지지격자의 형상을 개략적으로 도시한 것으로 1997년 말에 고안되었다. 그림 6에서 보듯이 가로와 세로로 배열되는 복수의 격자판을 조립에 의해 구성되는 회전유동형 지지격자는 격자판의 상단에 4개의 바람개비 형태로 절곡된 날개를 가진 회전유동 발생장치를 구비하고 격자판의 중간에 한쪽 끝 부분만 부착되는 외팔보 형태의 스프링이 구비되어 있으며 격자판의 상하단에 부착된 덩플이 구비되어 있다. 지지격자 스프링 및 덩플의 형상은 연료봉을 감쌀 수 있도록 즉, 등각의 접촉이 되도록 구현되었고 아울러 스프링의 끝단에는 냉각수를 회절시킬 수 있는 날개가 부가적으로 붙어 있어서 냉각수를 회절시킬 뿐만 아니라 냉각수 회절시에 유동력에 의해서 스프링을 연료봉쪽으로 밀게 되어서 부가적으로 스프링력이 보강되는 효과가 있다. 회전유동형 날개부착 지지격자는 우리나라 핵연료 구조부품개발 역사상 세 번째로 2001년 5월에 미국에 특허가 등록[6]되었으며 대한민국 특허도 등록되어 있다[7].

4) 덩플형 베인과 다중스프링이 부착된 지지격자

덩플형 베인과 다중스프링이 부착된 지지격자는 1999년 초에 고안되었다. 이 지지격자는 그림 7과 같이 지지격자 내부에 축방향으로 엇갈리도록 배열한 돌출 베인이 냉각수의 혼합을 강화시켜 열적 여유도를 제고시킬 수 있으며, 이 돌출 베인들의 상·하에 각 세 개씩의 스프링들이 돌출되어 있다. 세 개의 스프링 중에서 중간에 있는 주스프링은 연료봉을 일차적으로 지지(점접촉 형상)하는 기능을 가지며 주스프링의 상·하에 위치한 부스프링들은 연료봉을 감싸고 있는 형상으로 연료봉을 지지함으로써 연료봉과 지지부와의 접촉응력을 분산시켜 접촉면에서 접촉응력의 첨두치를 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 주스프링이 연료봉을 지지하는 기능이 약화되었을 때 연료봉의 지지를 대신할 수 있도록 하였다. 또한 이들 주스프링 및 부스프링들을 스트립에서 일정한 각도로 경사지게 함으로써 동일한 높이에서 냉각수의 유로면적 감소를 줄이고 다중스프링 및 베인들이 같은 방향으로 돌출되도록 하여 지지격자에 의한 압력손실이 되도록 작아지도록 고안하였다. 덩플형 베인과 다중스프링이 부착된 지지격자는 2001년 8월에 우리나라 핵연료 구조부품개발 역사상 네 번째로 미국에 특허가 등록[8]되었으며 대한민국 특허도 등록되어 있다[9].

5) 회전유동발생날개가 부착된 덕트형 지지격자

회전유동발생날개가 부착된 덕트형 지지격자는 1999년 초에 고안되었다. 이 지지격자는 그림 8과 같이 팔각형 덕트 형태의 단위격자를 좌우로 배열하고 서로 이웃하는 단위격자 상·하단에서 line 용접한 것이다. 격자체 상부에는 서로 높이가 다른 한 쌍의 일체형 회전유동 발생날개가 형성되어 있으며 이 날개는 축방향을 따라 진행되는 부수로 내의 냉각재를 회전시키며 냉각재를 혼합시킨다. 격자체 벽면에는 길이 방향으로 폭이 좁고 긴 절개부위(slot)가 존재하며, 그 절개부위 사이의 띠는 덕트 중심 방향으로 휘어져 삽입된 봉을 고정시키는 스프링 역할을 한다. 기존 격자판형 지지격자는 격자판의 교차점이 유속이 가장 빠른 부수로의 중앙을 가로질러 가는데 반해 덕트형 지지격자는 중앙부분을 유동이 자유로운 사각 덕트 형태의 수로를 형성함에 따라 기존 격자체에 비해 수력 저항이 작다. 또한 지지격자 상부에 위치한 회전유동 발생날개는 부수로 내에서 축

방향을 따라 높이가 서로 다르게 함으로서 날개에서의 수력저항도 기존의 동일한 높이에 존재하는 지지격자에 비해 낮으며 날개가 격자체 방 외부에 존재시킴으로서 연료봉 장입 시 연료봉과 날개가 접촉할 가능성을 줄임으로서 핵연료 조립 시 봉과 날개의 접촉에 의한 연료봉 손상을 최소화 시켰다. 회전유동발생날개가 부착된 덕트형 지지격자는 2002년 5월에 우리나라 핵연료 구조부품개발 역사상 다섯 번째로 미국에 특허가 등록[10]되었으며 대한민국 특허도 등록되어 있다[11].

6) 바가지형 혼합날개 지지격자

바가지형 지지격자는 혼합날개 구실을 하면서 핵연료봉을 지지하는 역할을 수행하는 스프링의 형상이 바가지와 유사하여 바가지(Dipper)형 지지격자로 명명된 것으로서(그림 9 참조) 1999년 초에 고안되었다. 바가지형 혼합날개 지지격자는 전형적인 지지격자의 지지기구와 달리 지지격자 상,하 두 곳에서 4개씩의 스프링, 즉, 단일 지지격자 당 총 8개의 스프링으로 핵연료봉을 지지하도록 설계되었다. 이러한 8개의 스프링은 핵연료봉의 원주방향으로 각기 다른 여덟(8) 곳에서 접촉하는 독특한 지지방식을 채택하고 있다. 냉각수는 지지격자 하부로부터 상부로 흐르면서 셀 내,외에서 자연스럽게 횡류를 발생시키도록, 상, 하부에 날개(Dipper)를 엇갈리게 배치하였다.

바가지형 혼합날개 지지격자는 2002년 7월에 우리나라 핵연료 구조부품개발 역사상 여섯 번째로 미국에 특허가 등록[12]되었으며 대한민국 특허도 등록되어 있다[13].

4. 최종 후보로 선정된 지지격자

KAERI에서 고안한 5종의 고유 지지격자(H형 스프링 부착 지지격자, 회전유동형 날개부착 지지격자, 이중판 노즐형 지지격자, 다중스프링부착 지지격자, 바가지형 지지격자)와 참조용 지지격자 2종(상용으로 사용되는 지지격자와 상용으로 개발중인 지지격자 등) 등 총 7종에 대하여 스프링 격자판 및 5x5형 부분격자체 시편을 제작하여 스프링의 하중-변위 특성, 프레팅마멸 특성, 연료봉 지지/진동 특성, 부분격자체에 대한 정적 및 동적 충격특성을 비교하기 위한 시험을 수행한 결과 H형 스프링 부착 지지격자 및 이중판 노즐형 지지격자가 참조용 지지격자에 비해 성능이 우수하고 산업재산권 등의 원천기술을 확보가 용이할 것으로 판단하여 최종후보 지지격자 형상으로 선정하였다. 그런데 최종형상으로 선정된 지지격자들은 모두 개념적인 관점에서 고안되었으므로 성능을 극대화시키기 위해 형상을 개선할 필요가 있었다. 따라서 성능극대화를 위한 과정과 시험결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 최적화 H형 스프링 부착 지지격자

H형 스프링 부착 지지격자에 대한 지지격자 스프링 및 덤플의 특성시험, 연료봉 지지 진동특성시험 그리고 프레팅마멸시험을 수행한 결과 스프링의 강성을 연하게 하고 지지격자 스프링의 탄성변형 영역을 종전보다 확장할 필요가 있었다. 또한 연료봉이 격자 내에 장입되어 지지격자 스프링을 변형시킬 때 지지격자 스프링에서 비틀림의 발생을 최소화하고 단순 굽힘이 주로 작용하도록 함으로서 연료봉 장입전의 초기 접촉형상이 그대로 유지하게 할 필요가 있었다. 그리고 지지격자 스프링 및 덤플과 연료봉의 접촉면에

대한 접촉해석을 수행한 결과 실질적인 접촉면적을 넓히고 접촉응력의 첨두치를 최소화할 필요가 있었다[14]. 이러한 개선요구사항을 수용하기 위해 형상개선설계를 수행하여 그림 10과 같은 형상의 지지격자 스프링 형상을 고안하게 되었고 최적화된 형상의 지지격자체는 국내 및 미국에 특허를 출원하였다[15, 16].

2) 새이중판 노즐형 지지격자

이중판 노즐형 지지격자에 대한 스프링특성시험, 연료봉지지 진동특성시험 그리고 프레팅마멸시험을 수행한 결과 스프링의 강성을 연하게 할 필요가 있었다. 또한 연료봉이 격자내에 장입되어 스프링을 변형시킬 때 연료봉과 스프링의 접촉길이를 증가시킬 필요가 있었으며 유동장 해석 결과 지지격자 상부에서 냉각수의 혼합을 촉진시키도록 노즐형상과 혼합날개를 부착할 필요가 있었다[14]. 이러한 요구사항을 반영하기 위해 접촉해석/유한요소해석, 시편에 대한 성능시험 등을 통해 격자판 형상을 그림 11과 같이 확정하였다. 확정된 형상의 지지격자는 국내 및 미국에 특허를 출원하였다[17, 18].

3) 성능시험결과

가) 스프링 특성시험

최적화 H형 스프링(Opt. H), 새이중판 노즐형 지지격자 스프링(New Doublet) 및 참조용 지지격자 스프링(KAPD)의 스프링 특성시험결과를 비교한 것이 그림 12에 도시되어 있다. 그림 12에서 보면 최적화 H형 스프링의 강성 및 최대하중은 적절하며 스프링의 탄성한계가 참조용 지지격자보다 커서 연료봉 지지관점에서 우수할 것으로 사료되고 있으며 수정된 이중판 노즐형 지지격자는 스프링 강성 및 탄성영역이 연료봉 지지에 우수할 것으로 예상된다.

나) 프레팅마멸시험

최적화 H형 스프링, 새이중판 노즐형 지지격자 스프링 및 참조용 지지격자 스프링에서 연료봉 프레팅마멸 특성시험 결과를 비교한 것이 그림 13에 도시되어 있다. 그림 13에서 보면 최적화 H형 스프링은 격자에서의 연료봉 지지조건(5 N, 0 N 및 Gap 발생시) 모두에서 참조용 지지격자에 비해 백중우세이며 새 이중판 노즐형 지지격자는 참조용 지지격자에 비해 절대우세한 성능을 지닌 것으로 나타났다.

5. 결론

핵연료집합체 기계/구조적 설계 및 열수력적 설계경험 그리고 핵연료 설계/제조 연계경험을 바탕으로 KAERI에서 독자적으로 고안한 14종의 지지격자 중에서 2002년 9월 현재 미국 및 대한민국으로부터 6종의 지지격자가 특허를 획득하였다. 특성비교시험을 거쳐서 성능이 우수한 지지격자 형상 2종을 선정하고 특성을 극대화시키기 위한 형상개선 및 형상개선된 지지격자 스프링에 대한 특성시험을 수행한 결과 형상개선된 지지격자 스프링의 스프링 특성 및 프레팅마멸특성이 참조용 지지격자 스프링보다 우수한 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업중 “경수로용신형핵연료개발”(대과제) “고성능지지격자구조기술개발”(세부과제)에서 과제업무의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. K. T. Kim, "PLUS 7TM Advanced Fuel Assembly Development Program for KSNPs and APR 1400," Proceedings of the 17th KAIF/KNS Annual Conference, April 2002.
2. H. S. Kang *et al.*, "Grid with Nozzle-type Coolant Deflecting Channels for Use in Nuclear Reactor Fuel Assemblies," US Patent 6,130,927.
3. 강홍석외 7인, "원자로의 핵연료집합체 이중판노즐형 냉각재 혼합 지지격자," 대한민국특허 제 0265027호.
4. K. H. Yoon *et al.*, "Spacer Grid with H-spring for Fuel Rods Use in Nuclear Reactor Fuel Assembly," US Patent 6,167,105.
5. 윤경호외 8인, "프레팅 마모 억제를 위한 H형 스프링이 부착된 지지격자체," 대한민국 특허 제 0318233호.
6. T. H. Chun *et al.*, "Fuel Assembly Spacer Grid with Swirl Deflectors and Hydraulic Pressure Springs," US Patent 6,236,702.
7. 권태현외 8인, "회전유동발생장치를 가진 핵연료집합체 지지격자," 대한민국 특허 제 0287278호.
8. K. H. Yoon *et al.*, "Spacer Grid with Multi-springs and Dimple Vanes for Nuclear Fuel Assemblies," US Patent 6,278,759 B1.
9. 윤경호외 8인, "냉각수 혼합을 위한 딴플형 베인과 다중스프링이 부착된 지지격자체," 대한민국 특허 제 0330358호.
10. D. S. Oh *et al.*, "Duct-type Spacer Grid with Swirl Flow Vanes for Nuclear Fuel Assemblies," US Patent 6,393,087 B1.
11. 오동석외 8인, "회전유동발생날개가 부착된 덕트형 핵연료집합체 지지격자," 대한민국 특허 제 0330355호.
12. H. S. Kang *et al.*, "Nuclear Fuel Spacer Grid with Dipper Vanes," US Patent 6,421,407 B1.
13. 강홍석외 8인, "핵연료 집합체의 바가지형 혼합날개 지지격자," 대한민국 특허 제 0330354호.
14. 송기남, "신형 지지격자에 대한 기계/구조적 성능비교시험," 한국원자력학회 2001 춘계 학술대회.
15. K. H. Yoon *et al.*, "Spacer Grid for Nuclear Reactor Fuel Assemblies with Grid Springs Maintaining Conformal Contact with Fuel Rods and Enlarged Elastic Range," 미국특허출원 10/010526.
16. 윤경호외 7인, "연료봉 접촉면적과 스프링 탄성영역을 확장하는 격자스프링이 부착된 지지격자체," 대한민국 특허출원 제2001-20851호.

17. H. S. Kang *et al.*, "Double Strip Mixing Grid for a Nuclear Fuel Assembly," 미국 특허출원 09/862383.

18. 강홍석외 7인, "핵연료집합체의 이중판 냉각재 혼합 지지격자체," 대한민국 특허출원 제2001-14474호.

표1. 해외의 지지격자 개발현황

핵연료 vendor		핵연료 Brand (상용화 연도)	지지격자 관련 주요 특징
2001. 이후	2001. 이전		
BNFL	WH	<ul style="list-style-type: none"> · STD (1973) · OFA (1977) · Vantage 5 (1983) · Vantage 5H (1987) · Vantage+ (1987) · Performance+ (1992) · RFA (1998) · NGF (개발중) 	<ul style="list-style-type: none"> - Inconel Grid. - Vertical Grid Spring, Zry-4 Grid, Mixing Vane 사용. - 유동혼합기(IFM) 채택. - Inclined Grid Spring, Improved Zry. 사용, LPD(저압력 강하) Grid, Grid Spring Window, Chamfered edge strap. - 지지격자 배열 방향을 수정함(Rotation). - ZIRLO™ Grid. - Closed Grid Spring Window, Longer Vane, Smaller Weld Cutouts, Symmetric Vane Pattern. - RFA 대비 5% 열적성능 향상, 혼합날개 형상/배열 최적화, 지지격자 스프링/덤플 형상 최적화.
	ABB-CE	<ul style="list-style-type: none"> · C-80 · Turbo (1998) 	<ul style="list-style-type: none"> - Wavy strap(Zry-4), 외팔보 스프링, No Mixing Vane. - Straight Strap, I형 스프링, Transverse Stamping, Side-supported Mixing Vane.
Framatome -ANP	Siemens/ KWU	<ul style="list-style-type: none"> · Bi-metallic (1975) · FOCUS (1992) · FOCUS X5 (개발중) 	<ul style="list-style-type: none"> - Zry-4 Grid w/o Vanes, Zry-4 Strap, Inconel Spring. - Advanced Zry-4 Grid with Split-vanes, IFM 채택, Optimization of Spacer Corner Design, Arch형 스프링. - Strap 교차부 형상 개선, 부식 최적화 재료 사용, 연료봉 프레팅 저항성 증가를 위해 최하단 지지격자를 HMP (Doublet Nozzle형의 일종임) 사용.
	SPC	<ul style="list-style-type: none"> · Bi-metallic · HTP (1988) · HTP X5 (개발중) 	<ul style="list-style-type: none"> - Zry-4 Grid w/o Vanes, Zry-4 Strap, Inconel Spring. - Doublet Nozzle 형 Grid, Low Sn Zry-4 사용, IFM 채택. - Strap 교차부 형상 개선, 부식 최적화 재료 사용.
	Fragema	<ul style="list-style-type: none"> · AFA (1985) · AFA-2G (1992) · AFA-3G (1998) · ALLIANCE™ (2003) 	<ul style="list-style-type: none"> - Zry-4 Grid, Mixing Vane 사용. - AFA Grid with Reduced Pressure Drop (Strap 높이 감소 및 두께 약간 증가), 외부 Strap에 Guide Vane 채택, Bi-metallic Grid. - Bi-metallic Spring, Widened recrystallized Zry-4로 제조된 Grid 및 MSMG* 채택, Coner Grid에 hang-up 방지 기능. - AFA-3G 대비 10% 이상 열적성능 향상, 최상/하단에 Bi-metallic(MS™/Inconel) Grid 채택, MS™를 사용한 high mono-metallic Grid 및 MSMG 채택.

* MSMG; Mid Span Mixing Grid(IFM과 유사개념임)

표2. 국내의 지지격자 개발현황

핵연료 관련기관		핵연료 Brand (설계/제조 연도)	지지격자 관련 주요 사항
1997. 이후	1997.이전		
KAERI	KAERI	<ul style="list-style-type: none"> • JDFA or KOFA (1987) • KSNP (1989) • INGLE (1995) • 신형 지지격자 개발 연구(1997-) 	<ul style="list-style-type: none"> - Siemens/KWU사와 WH형 발전소용 핵연료 공동설계/독자설계 (Zry-4 Grid with Vanes, Zry-4 Strap, Inconel Spring) - ABB-CE사와 영광 3&4호기용 핵연료 공동설계/독자설계 (Wavy Strip(Zry-4), 외팔보 스프링, No Mixing Vane) - SPC사와 협력하여 HTP연료에 근간을 둔 INGLE 개념설계 - 지지격자 고유형상 14종 고안 및 국내/미국에 특허출원, 2000/2002년에 고유형상 6종 미국특허/한국특허 획득 (면접촉 형상의 스프링/덤플, 노즐형 지지격자, 회전유동날개, 다중스프링 부착 지지격자, Dipper형 지지격자, 팔각 덕트형 지지격자 등) - 지지격자 기계/구조적 기초시험시설 구축 (스프링 하중-변위 특성, 스프링 피로특성(살은), 연료봉 지지/진동특성, 격자체 좌굴 및 진자식 충격특성, 격자판/격자체 단위 프레팅 특성, FIV 특성시험 등) - 지지격자 기계/구조적 특성해석 모델 연구
KEPCO-NFC	KNFC	<ul style="list-style-type: none"> • JDFA or KOFA (1991) • Vantage 5H (1996) • KSNP 연료 (1998) • PLUS7™ (2002) • NGF (개발중) 	<ul style="list-style-type: none"> - KOFA 제조 (지지격자 Strip을 수입하여 격자체 제조) - Vantage 5H 연료 제조(격자판 국내 생산 및 격자체 제조) - KSNP 연료 제조(격자판 국내 생산 및 격자체 제조) - BNFL과 공동으로 개발, LTA 4다발 제조 (면접촉 형상의 스프링/덤플, Mixing Vane 사용, ZIRLO 사용, IFM 채택) - BNFL과 공동으로 개발 중.

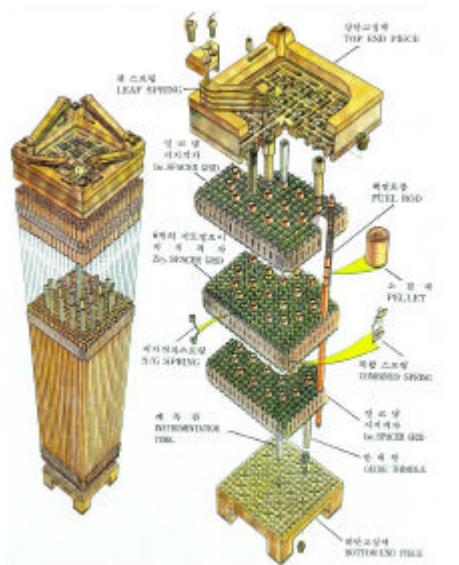


그림 1 17x17형 핵연료집합체 개략도

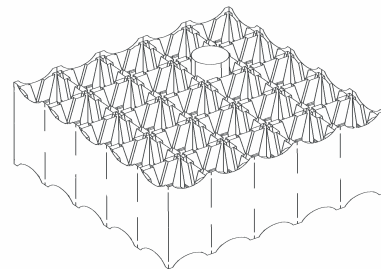


그림 2 이중판 노즐형 지지격자 (격자체 5x5형 부분형상)

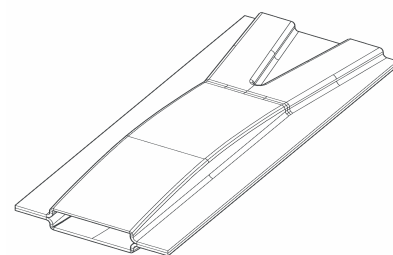


그림 3 이중판 노즐형 지지격자 단말동로

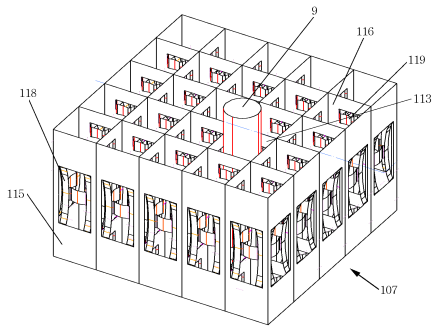


그림 4 H형 스프링 부착 지지격자체
(격자체 5x5형 부분형상)

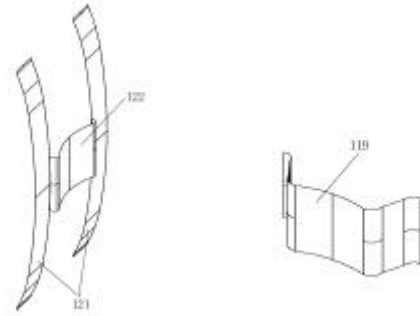


그림5 H형 스프링 부착 지지격자 스프링
및 뒤편의 면접촉 형상

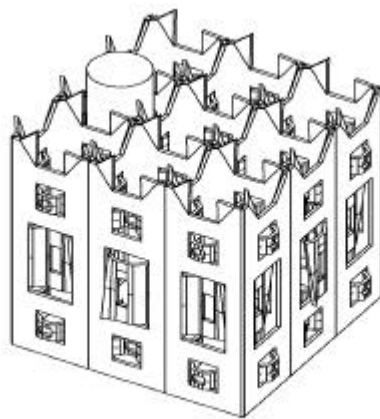


그림 6 회전유동형 날개부착 지지격자
(격자체 3x3형 부분형상)

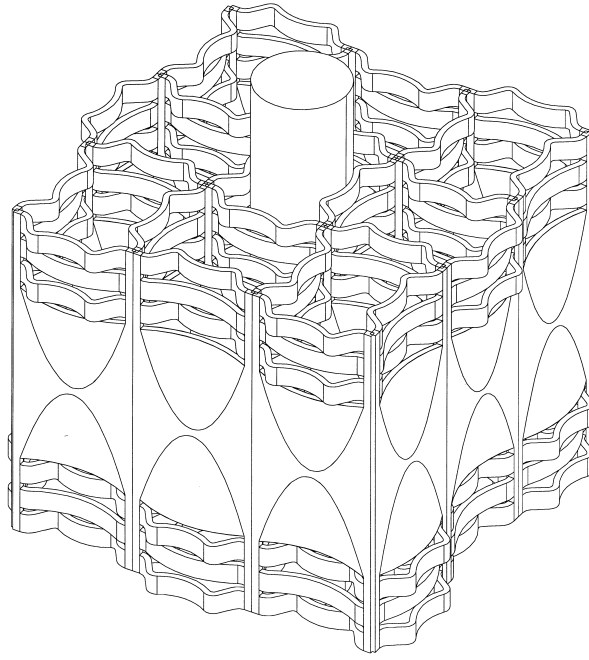


그림 7 립플형 베인과 다중스포링이 부착된 지지격자
(격자체 5x5형 부분형상)

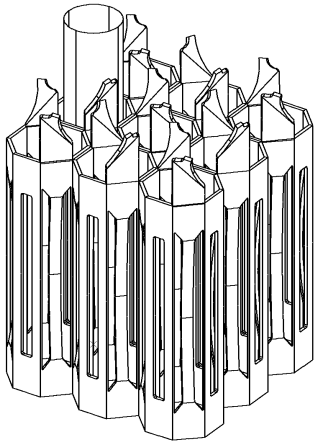


그림 8 막트형 지지격자

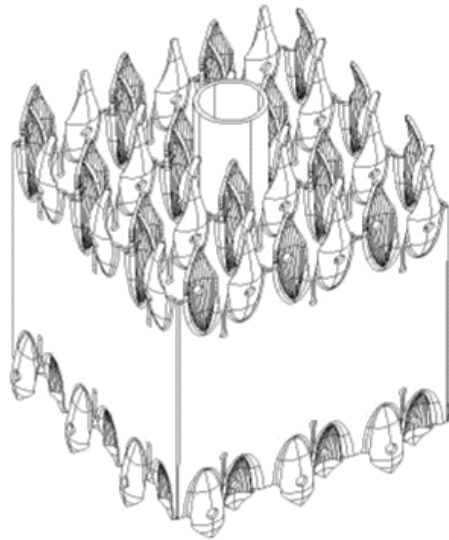


그림 9 바가지형 혼합날개 지지격자

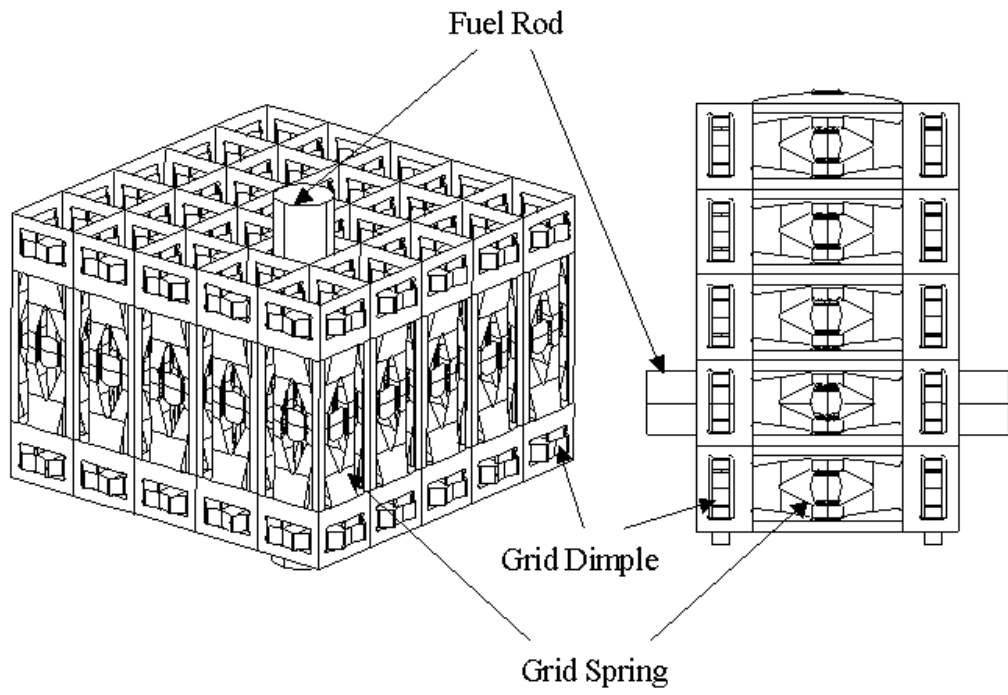


그림 10 최적화 H형 스프링 부착 지지격자



그림 11 새이종판 노즐형 지지격자 스프링 형상

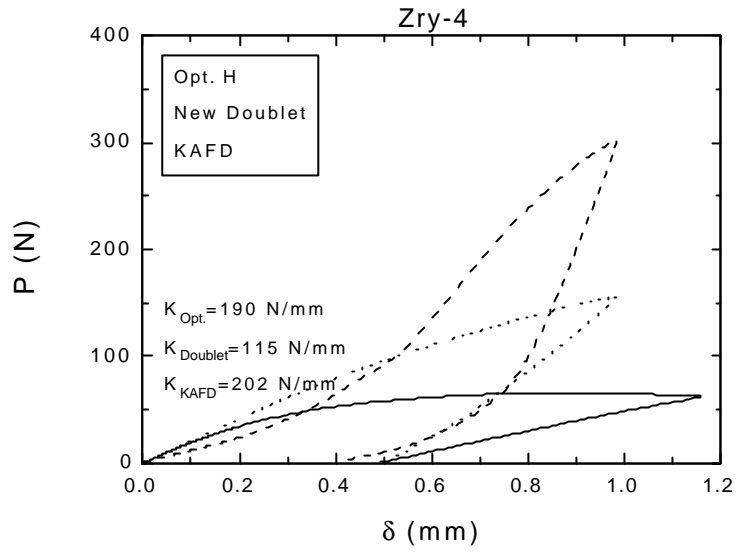


그림 12 스프링의 하중-변위 특성곡선

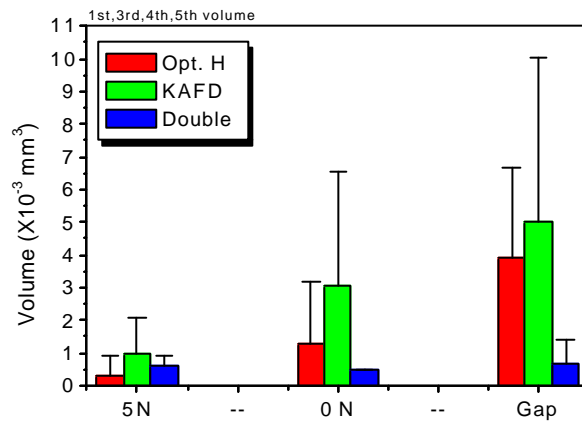


그림 13 격자 단위 프레팅마멸시험 결과