

경수로용 신형핵연료 지지격자 연구개발 현황

R&D Status on the Spacer Grid for the Advanced LWR Fuel

송기남, 윤경호, 강홍석, 김형규, 정연호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

핵연료집합체 기계설계 및 열수력설계 경험을 바탕으로 하고 외국의 최신 개량핵연료에 대한 특징과 국외 특허자료를 면밀히 검토하여 14종의 지지격자 고유형상을 고안하였다. 그 중에서 5종의 지지격자 형상들에 대한 기계/구조적 시험을 통하여 성능을 비교/평가한 뒤 선정된 2종의 유력후보 지지격자에 대하여 상세성능시험과 해석을 거쳐서 발견된 미비점을 보완하여 기계/구조적 관점에서 신형핵연료용 지지격자의 최종 유력후보 형상 2종을 확정하였다.

Abstract

Based on the fuel assembly mechanical/thermal-hydraulic design experience and scrutinizing the design features on the foreign advanced nuclear fuel and the foreign patents of the spacer grid, 14 kinds of spacer grid candidates are conceptually derived since 1997. Among the candidates the mechanical/structural performance on the five candidates was evaluated by the screening test. As a result of the screening test, two kinds of spacer grids are finally selected to be the leading candidates in order to investigate the mechanical/structural performance in detail. Through the detailed analysis and the mechanical/structural test for checking the performance of the selected leading candidates and by the tuning of the spacer grid's dimensions for maximizing the performance, final shapes of the two kinds of spacer grids are finally settled.

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.

외국의 핵연료 vendor들이 신연료 개발시에 지지격자 형상을 개량한 사례들을 살펴보면 다음과 같다[1]. 냉각성능 개선과 관련된 사항으로, 초창기에는 지지격자체 상단부에서 냉각수의 혼합에 특별한 고려가 없던 평범한 지지격자체를 사용하다가 냉각성능 향상에 대한 요구를 수용하기 위해 지지격자체 윗부분에서 냉각수의 혼합을 촉진시키려는 시도가 추진되었다. 외국의 대다수 핵연료 vendor들은 지지격자체 상단에 혼합날개를 부착하여 냉각수의 혼합을 촉진시키려 하였는데 혼합날개의 형상 및 부착위치는 핵연료 회사별로 다를 수 있다. 또한 핵연료집합체 상반부의 지지격자들 사이에 냉각수 혼합을 촉진시키는 중간 혼합격자(Intermediate flow Mixers; IFM)가 1983년 W사의 VANTAGE 5 연료에 도입된 이래 근래에는 여러 핵연료 회사의 최신 핵연료에 IFM이 사용되고 있다. 한편 SPC(Siemens Power Corporation)사는 두 개의 얇은 지지격자판 사이에 노즐형 수로가 형성될 수 있도록 고안한 HTP 지지격자를 도입하여 냉각수의 혼합을 촉진시키고 있으며 아울러 연료봉 지지면적을 증대시켜서 연료봉 진동 및 프레팅마멸에 의한 연료봉의 손상요인을 경감시킬 수 있도록 하였다. 기계적 요인에 의한 연료봉의 손상요인을 감소시키려는 시도로는 단순히 연료봉을 지지하는 기능으로 있던 지지격자 스프링과 덤플의 형상을 변경하여 연료봉과의 접촉면적이 증가하도록 하여 접촉면에서 연료봉의 국부 침투 응력치가 감소할 수 있도록 하거나 지지격자 스프링과 지지격자판

기저부의 가공방법을 다르게 하여 증성자 조사에 따른 조사 성장량의 차이로 인하여 지지격자 스프링이 연료봉을 지속적으로 지지할 수 있도록 하여 연료봉의 손상요인을 줄이려 하는 등의 개선이 시도되고 있다.

그 동안에 국내에 축적된 지지격자체 개발기술을 살펴보면 1986년에 한국원자력연구소(이하 "KAERI"로 지칭)와 Siemens/KWU사가 공동 설계한 KOPA(KOrean Fuel Assembly) 연료가 1989년부터 국내의 W형 발전소(고리 2호기)에 처음으로 공급된 이래 KAERI와 ABB-CE사가 공동 설계한 핵연료가 1994년부터 국내의 ABB-CE형 발전소(영광 3,4호기)에 공급되었다. 또한 1998년부터 한전 원전연료주식회사(이하 "KNPC"로 지칭)에서는 W사와 함께 W사의 개량연료인 VANTAGE 5H연료 부품을 국내에서 제조하여 국내의 W형 발전소에 공급하고 있으며 1999년 4월부터는 국내에 있는 ABB-CE형 발전소용 개량핵연료를, 2001년 8월부터는 국내에 있는 W형 발전소용 개량핵연료를 W사와 공동으로 개발하고 있는데 2002년 3월 현재 ABB-CE형 발전소용 개량핵연료(PLUS7으로 지칭)가 가시화 되고 있다. 여기서 공동설계는 지지격자를 비롯한 핵연료부품에 대한 통상설계 및 제조관련 기술을 공고화하여 1999년말 시점에서 외국과 비견할 정도로 크게 성장한 반면이 있으나 지지격자를 독자적으로 고안하고 설계/분석하는 개발기술은 크게 확보하지 못한 면이 있었으며 공동연구는 공동설계보다 진일보하여 개발기술을 어느 정도 확보할 수 있는 여건이 되고 있으나 개발된 결과물에 대한 기술소유권을 완전히 확보하지 못하는 면이 있을 수 있다. 그런데 KAERI에서는 1986년 이래의 핵연료 기계설계 경험 및 설계/제조연계 경험을 바탕으로 하고 1997년부터 외국의 최신 개량핵연료에 대한 특징과 국외 특허자료를 면밀히 검토하여 2002년 3월 현재 기계/구조적 및 열수력적 성능관점에서 성능향상이 예상되는 독자적인 지지격자 모형 14종을 고안하여 국내·외에 각각 14건의 특허를 출원하였는데 2002년도 3월 현재 4종의 지지격자 고유형상에 대하여 핵연료 구조부품으로는 우리 나라에서 처음으로 미국특허 4건, 국내특허 4건, 국내실용신안 1건이 등록되어서 우리가 고안한 지지격자 형상의 독창성이 점차적으로 국내·외에서 인정을 받고 있다.

본 논문에서는 KAERI에서 고안한 14종의 지지격자 형상 중에서 미국특허가 등록된 지지격자 형상 4종에 대한 주요 특징을 기술하였다 또한 본 논문에서는 지지격자 형상 5종에 대한 성능비교시험을 거쳐서 선정된 2종의 지지격자 유력형상에 대한 상세 성능시험 및 해석을 거치고 성능미비점을 보완하기 위한 형상수정 등을 거쳐서 기계/구조적 관점에서 최종 유력후보 지지격자 형상 2종을 확정하여 주요 특징을 기술하였다.

2. 지지격자 고유 후보모형들에 대한 특징

2.1 개요

본 절에서는 KAERI에서 고안한 14종의 지지격자 중에서 미국특허가 등록된 지지격자 4종에 대한 주요 특징을 기술하였고 상세성능시험 및 해석, 형상최적설계 등을 통해 확정된 지지격자 최종 유력후보 형상 2종의 주요 특징을 기술하였다.

2.2 미국특허가 등록된 지지격자

2.2.1 H형 스프링 부착 지지격자

총래의 대다수 지지격자에서 지지격자 스프링 및 덤플은 점 접촉이나 작은 선 접촉의 비등각(non-conformal) 접촉으로 연료봉을 지지하고 있었다. 이에 비하여 KAERI에서 1997년 중반에 고안하여 1997년 12월에 특허출원한 “H형 스프링이 부착된 지지격자”(그림 2 참조)는 지지격자 스프링 및 덤플이 그림 3에서 보듯이 연료봉을 감싸는 형태의 등각(conformal)의 면접촉형상(Contacted Contact Shape)이 되도록 고안되었다. 연료봉과 지지격자 스프링 및 덤플의 접촉을 면접촉형상이 되게 함으로서 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 지지부간의 상대운동을 감소시켜 연료봉의 프레팅마멸 손상 가능성을 억제할 수 있다. 또한 총래의 지지격자는 외부에서 작용하는 임의의 방향으로부터의 하중에 불안정한 지지 구조를 이루고 있어(점접촉 및 작은 선접촉) 견전한 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 견전한 연료봉의 지지를 가능케 하기 위한 것이다. H형 스프링 부착 지지격자는 2000년 10월에 미국특허가 등록되었고[2] 2001년 12월에 국내특허도 등록되었다[3].

2.2.2 이중판 노즐형 지지격자

지금까지 개발된 지지격자의 냉각재 혼합기능은 지지격자는 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(W사에서 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 혼합날개를 이용한 지지격자체는 냉각재를 섞어서 원자로의 열 효율을 높이는 장점이 있지만 냉각재를 섞기 위해 발생시킨 횡방향 유동에 의하여 연료봉이 지지격자내에서 흔들리는 이른바 유체유발진동(Fluid Induced Vibration: FIV) 현상을 유발하게 된다. 냉각재의 횡방향 유동으로 야기된 유체유발진동은 연료봉과 격자 수로 사이에 빠르고 주기적인 간섭을 발생시키고 결국은 연료봉과 지지격자체와의 접촉부위(스프링 혹은 덤플)에서 연료봉이 손상될 수 있는 이른바 유체유발진동에 의한 연료봉 프레팅마멸 손상원인이 될 수도 있다. 결국 혼합날개의 작용이 강력할 수록 냉각재의 혼합력이 강력하여져서 원자로의 열효율을 높이는 장점이 있는 반면에 이에 비례하여 연료봉의 진동 진폭도 커지고 이에 따라 핵연료봉의 손상 발생 가능성도 증가할 수 있다. 한편 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 바뀔때문에 냉각수 혼합능력을 향상시킬 필요가 있다.

이러한 단점을 극복하고자 고안된 것이 그림 4와 5의 이중판 노즐형 냉각재 혼합 지지격자로서 원리상으로는 SPC사의 HTP 지지격자와 유사하다. 이중판 노즐형 지지격자의 원리는 낮은 온도 영역의 냉각재를 끌어다가 높은 온도 영역 쪽으로 노즐과 같이 빠르게 분사시키거나, 혹은 반대로 높은 온도 영역의 냉각재를 끌어다가 낮은 온도 영역으로 빠른 속도로 분사시키는 방법으로 핵연료집합체내 냉각재를 섞어서 전체적인 열효율을 향상시키게 된다. 또한 연료봉을 지지하는 중앙부위의 단면적이 입구/출구 노즐의 단면적보다 크게 설계됨으로서 노즐을 통해 흐르는 유체의 정압(static pressure)이 노즐 입구나 출구부위보다 중앙부위에서 더 커지게 되어(베르누이 정리) 궁극적으로 노즐속으로 유체가 흐를 때 스프링을 연료봉쪽으로 더 밀어내게 되어서 유동력에 의한 스프링력의 추가적인 보장을 이루게 하는 것이 특징이다. 이중판 노즐형 지지격자는 미국과 대한민국에 특허가 등록되어 있다[4.5].

2.2.3 회전유동형 날개부착 지지격자

그림 6은 회전유동형 날개부착 지지격자의 형상을 개략적으로 도시한 것으로 1997

년 말에 고안하여 1998년 2월에 특허가 출원되었다. 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 보장되는 효과가 있다. 회전유동형 날개부착 지지격자는 미국과 대한민국에 특허가 등록되어 있다[6,7].

2.2.4 덩플형 베인과 다중스프링이 부착된 지지격자

덩플형 베인과 다중스프링이 부착된 지지격자는 1999년 초에 고안되어 1999년 7월에 특허가 출원되었다. 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(점접촉형상)하는 기능을 가지며 주스프링의 상·하에 위치한 부스프링들은 연료봉을 감싸고 있는 형상으로 연료봉을 지지함으로써 연료봉과 지지부와의 접촉응력을 분산시켜 접촉면에서 접촉응력의 첨두치를 감소시킬 수 있을 뿐 만 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 미국특허가 등록되었다.

2.3 최종 유력후보 지지격자

2.3.1 최적화 H형 스프링 부착 지지격자

2.2.1절의 H형 스프링 부착 지지격자에 대한 지지격자 스프링 및 덩플의 특성시험, 연료봉지지 진동특성시험 그리고 프레팅마멸시험을 수행한 결과[1] 스프링의 강성을 연하게 하고 지지격자 스프링의 탄성변형 영역을 종전보다 확장할 필요가 있었다. 또한 연료봉이 격자내에 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 덩플과 연료봉

의 접촉면에 대한 접촉해석을 수행한 결과[9] 실질적인 접촉면적을 넓히고 접촉응력의 첨두치를 최소화할 필요가 있었다. 이러한 개선요구사항을 수용하기 위해 형상개선설계를 수행하여 그림 8와 같은 형상의 지지격자 스프링 형상을 고안하게 되었고 최적화된 형상의 지지격자체는 국내 및 미국에 특허를 출원하였다[10,11,12].

2.3.2 수정된 이중판 노즐형 지지격자

2.2.2절의 이중판 노즐형 지지격자에 대한 스프링특성시험, 연료봉지지 진동특성시험 그리고 프레팅마멸시험을 수행한 결과[1] 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. 이러한 요구사항을 반영하기 위해 접촉해석/유한요소해석, 시편에대한 성능시험 등을 통해 격자판 형상을 그림 9과 같이 확정하였다[12]. 확정된 형상의 지지격자체는 국내 및 미국에 특허를 출원하였다[13,14].

3. 결론

핵연료집합체 기계/구조적 설계 및 열수력적 설계경험 그리고 핵연료 설계/제조 연계경험을 바탕으로 하고 외국의 새로운 핵연료 특징 및 특허자료들을 면밀히 검토하여 특허분쟁이 되지 않을 것으로 기대되는 경수로용 핵연료 지지격자 형상 14종을 독자적으로 고안하였다. 고안된 지지격자 형상 중에서 기계/구조적 관점에서 중요한 5종의 지지격자 형상에 대한 기계/구조적 성능비교시험을 통해 선정된 2종의 유력후보 지지격자에 대한 상세성능시험 결과를 분석하고 발견된 성능미비점을 보완하는 과정을 거쳐서 기계/구조적 관점의 최종 유력후보 지지격자 2종의 형상을 확정하였다. 앞으로는 확정된 최종 유력후보 지지격자 형상 2종에 시편(스프링 시편, 8x8형 및 full array 격자체 시편)대한 노외성능시험을 수행할 예정이다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. 송기남, “신형 지지격자에 대한 기계/구조적 성능비교시험,” 한국원자력학회 2001 춘계 학술대회.

- 2 K. H. Yoon *et al.*, "Spacer Grid with H-spring for Fuel Rods Use in Nuclear Reactor Fuel Assembly," US Patent 6,167,105.
- 3 윤경호외 8인, "프레팅 마모 억제를 위한 H형 스프링이 부착된 지지격자체," 대한민국 특허 제 0318233호.
- 4 강홍석외 7인, "원자로의 핵연료집합체 이중판노즐형 냉각재 혼합 지지격자," 대한민국특허 제 0265027호.
- 5 H. S. Kang *et al.*, "Grid with Nozzle-type Coolant Deflecting Channels for Use in Nuclear Reactor Fuel Assemblies," US Patent 6,130,927.
- 6 권태현외 8인, "회전유동발생장치를 가진 핵연료집합체 지지격자," 대한민국 특허 제 0287278호.
- 7 T. H. Chun *et al.*, "Fuel Assembly Spacer Grid with Swirl Deflectors and Hydraulic Pressure Springs," US Patent 6,236,702.
- 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 K. H. Yoon *et al.*, "Shape Optimization of a Spacer Grid Spring Structure," J of the KNS, Vol. 33, October, 2001.
- 10 윤경호외 7인, "연료봉 접촉면적과 스프링 탄성영역을 확장하는 격자스프링이 부착된 지지격자체," 대한민국 특허출원 제2001-20851호.
- 11 윤경호외 7인, "연료봉 접촉면적 및 스프링 탄성영역을 확장하는 스프링이 부착된 지지격자체," 대한민국실용신안 등록 248744
- 12 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.
- 13 강홍석외 7인, "핵연료집합체의 이중판 냉각재 혼합 지지격자체," 대한민국 특허출원 제2001-14474호.
- 14 H. S. Kang *et al.*, "Double Strip Mixing Grid for a Nuclear Fuel Assembly," 미국 특허출원 09/862383.

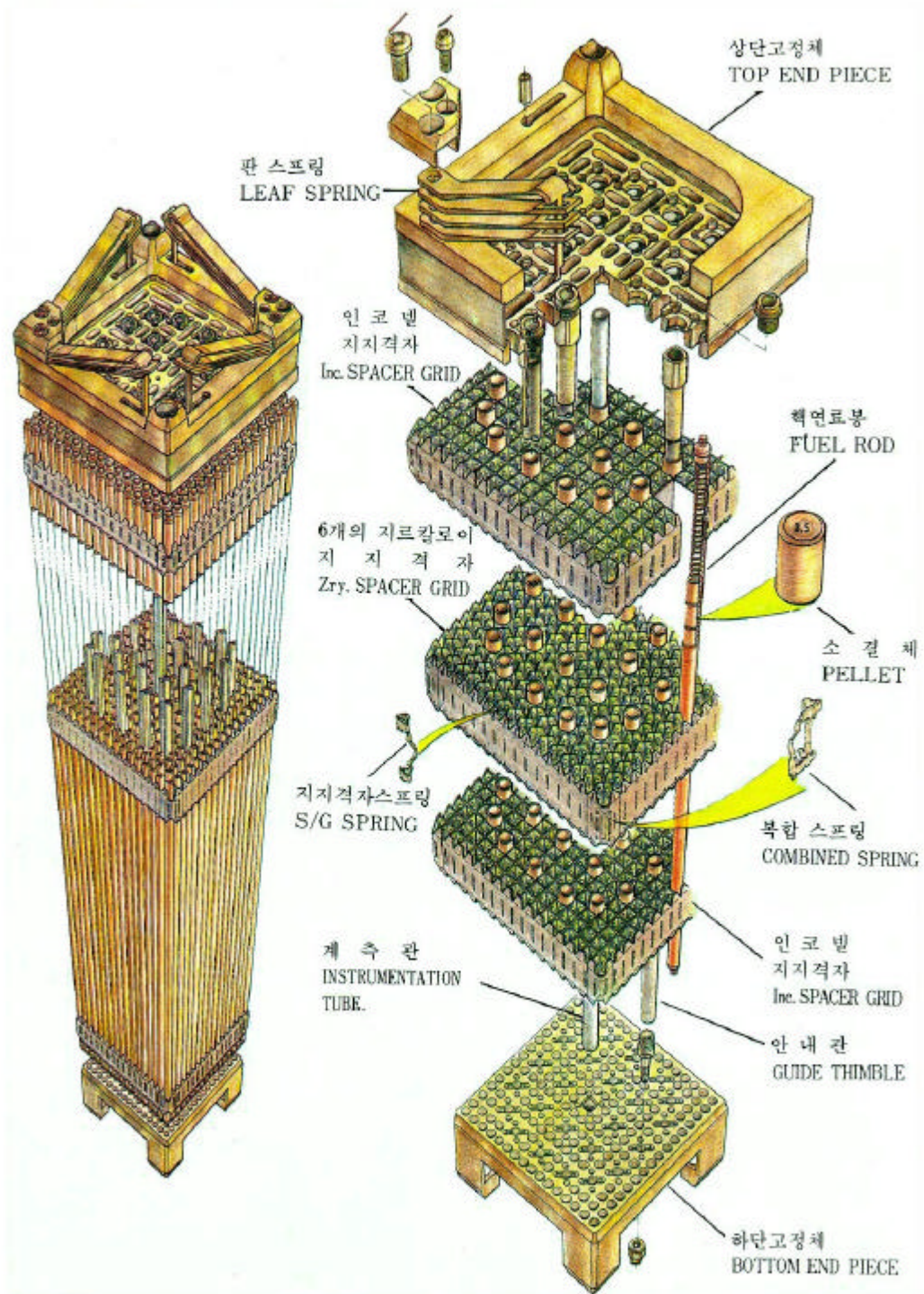


그림 1 17x17형 핵연료집합체 개략도

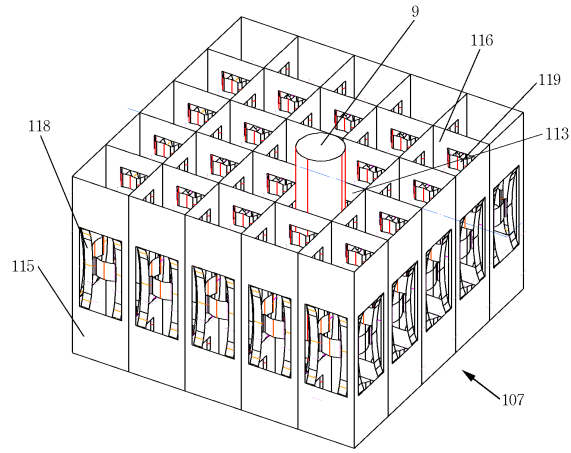


그림 2 H형 스프링 부착 지지격자체
(격자체 5x5형 부분형상)

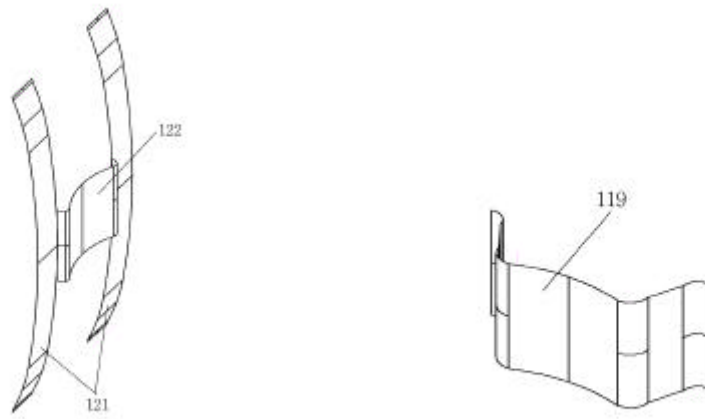


그림 3 H형 스프링 부착 지지격자의 스프링 및 댐퍼 형상

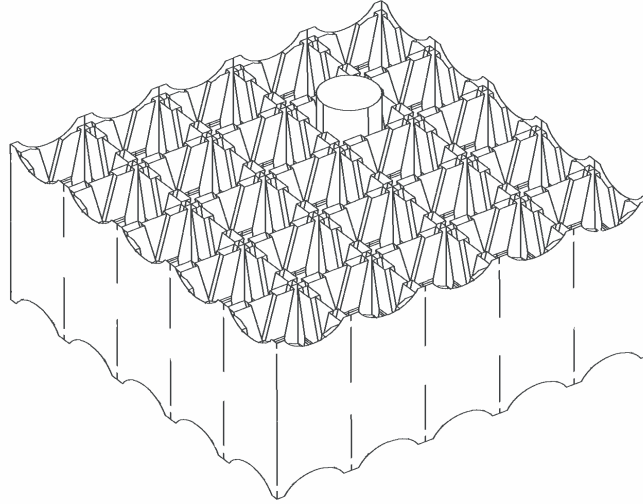


그림 4 이중판 노즐형 지지격자(격자체 5x5형 부분형상)

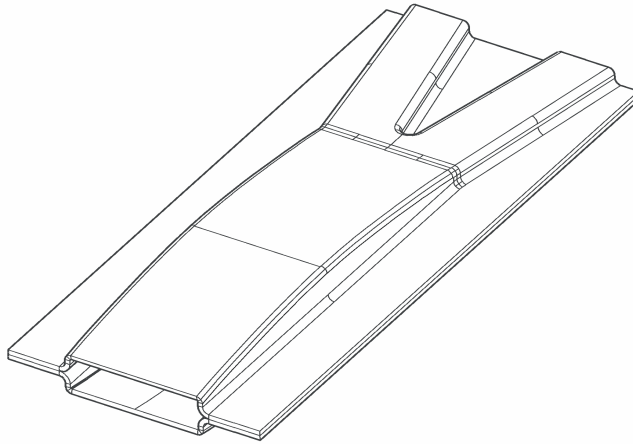


그림 5 이중판 노즐형 지지격자 단일통로

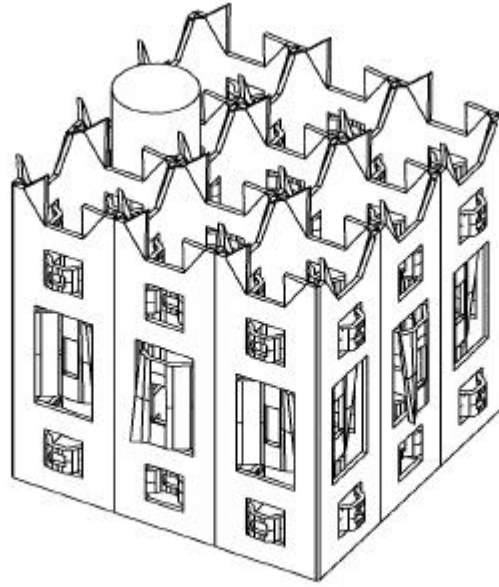


그림 6 회전유동형 날개부착 지지격자(격자체 3x3형 부분형상)

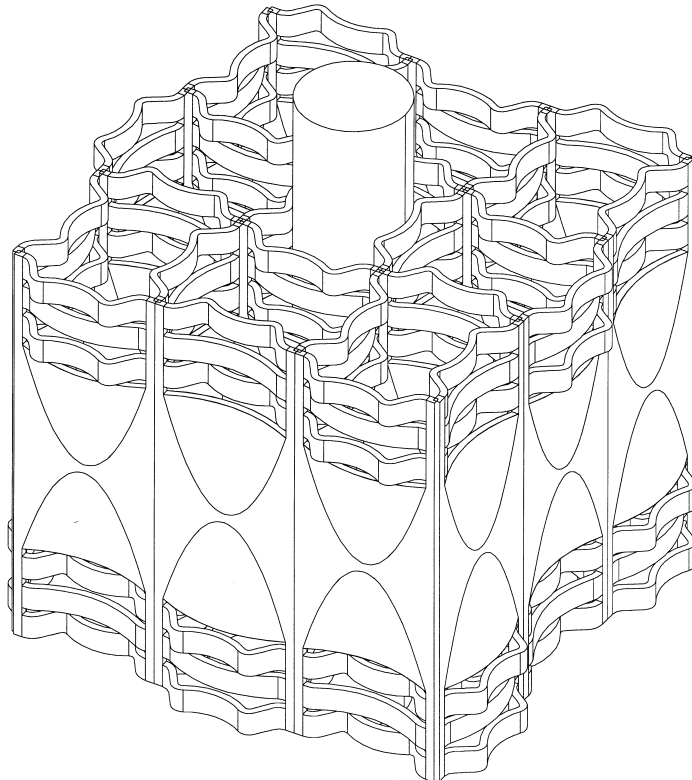


그림 7 딥플렉스 베인과 다중스프링이 부착된 지지격자 (격자체 5x5형 부분형상)

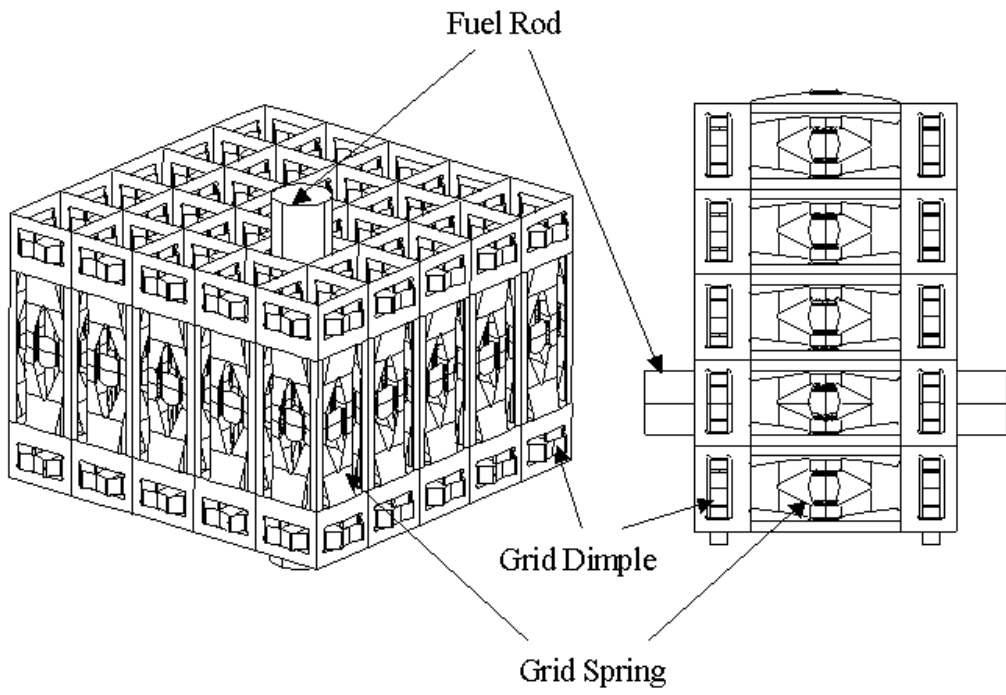


그림 8 최적화 H형 스프링 부착 지지격자



그림 9 새이종판 노즐형 지지격자의 판형상