

# 경수로 핵연료 지지격자체 구조설계에 대한 소고

송기남<sup>†</sup>

## Structural Design Considerations on the Spacer Grid Assembly of PWR Nuclear Fuel

Kee-nam Song<sup>†</sup>

(Received 30 JUL 2011, Accepted 12 AUG 2011)

### ABSTRACT

A spacer grid, which supports nuclear fuel rods laterally and vertically with a friction grip, is one of the most important structural components in a PWR fuel. The form of grid strap and supporting parts such as grid spring and dimple is known to be closely related with the mechanical/structural performance of spacer grid and nuclear fuel assembly. In this study, reviewing various research results for enhancing the performance of the spacer grid, some structural design considerations and research directions on the spacer grid assembly are suggested for further study.

**Key Words :** Spacer Grid Assembly(지지격자체), PWR(경수로), Nuclear Fuel Assembly(핵연료집합체), Impact Strength(충격강도), Fretting Wear(프레팅 마모), FIV(유동기인진동), Fuel Rod Support Integrity(연료봉 지지건전성), Fuel Rod(핵연료봉)

### 1. 서론

가압 경수형 원자력발전소(Pressurized Light Water Reactor; PLWR)에서 열을 생산하는 열원인 핵연료집합체의 전형적인 형상 및 구조는 Fig. 1에 나타나 있다. 한국표준원전에 사용되는 핵연료집합체(Fig. 1 참조)는 가로, 세로 길이가 각각 약 200mm, 높이 약 4,000mm 정도의 제원을 갖고 있으며 골격체와 수백개의 연료봉으로 구성되어 있다. 골격체는 하단에 많은 유로구멍이 뚫려있는 하단고정체(Bottom end piece) 1개, 상단에 코일형 홀다운스프링 집합체(Holddown spring assembly) 4세트 및 상단고정체(Top end piece) 1개, 상단고정체와 하단고정체를 연결하면서 원자로 제어시나 긴급정지시에 제어봉 삽입경로인 4개의 안내관(Guide tube) 및 운전중에 원자로 상태를 계측하기 위

한 계측기의 삽입경로인 계측관(Instrumentation tube) 1개 그리고 상단고정체와 하단고정체 사이에 적당한 간격으로 배치되어 안내관에 고정/부착된 10 여개 이상의 지지격자체(Spacer grid assembly)로 구성되어 있다. 질칼로이 피복관(Cladding tube)속에 원자력발전의 열원인  $UO_2$  펠릿들이 장입되어 있는 핵연료봉은 매우 유연한 구조물로서(세장비가 약 380 이상) 지지격자체의 격자(cell)에 삽입되며 골격체 축방향으로 적당한 간격으로 배치된 여러 지지격자체에 의해서 매달려 지지되고 있다<sup>1)</sup>.

지지격자체는 본래 원자로심내 공간의 정해진 위치에 핵연료봉을 고정하고 지지하기 위한 구조물이다. 전형적인 지지격자체 형상 및 구조는 Fig. 2에서 보듯이 홈(slit)이 있는 지지격자판들이 가로, 세로로 엇갈리게 끼워져 조립되고 엇갈린 지지격자판들의 교차부위 상단은 점용접(spot welding)되고 있는데 예전의 TIG 용접에 비해 용접비드 크기(직경)가 작고 깊은 용입부를 갖는 레이저 빔 용접에 의한 점용접이 근래에

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국원자력연구원

E-mail : knsong@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-2254 FAX : (042)868-2066

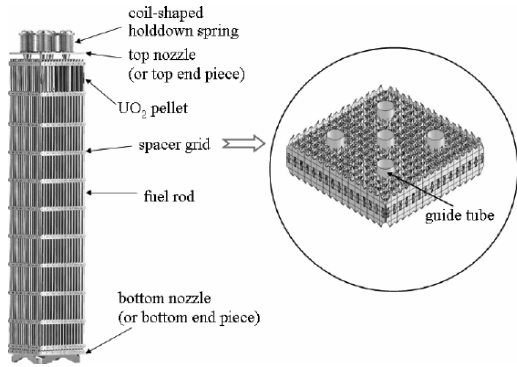


Fig. 1 Nuclear fuel assembly

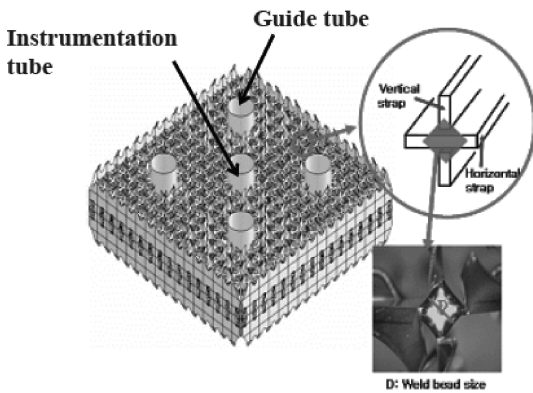


Fig. 2 Spacer grid assembly

널리 이용되고 있다. 지지격자체의 기계/구조적 핵심 기능은 핵연료집합체가 원자로심내에 장전되어 있는 기간(보통 3-5년)동안 연료봉을 견전하게 지지하는 기계적 기능과 핵연료집합체의 측면에 가해질 수 있는 여러 하중(예를 들면 사고시의 하중이나 지진하중 등)으로부터 연료봉을 보호하는 구조적 기능으로 나누어진다<sup>1)</sup>.

본 연구에서는 경수로 핵연료집합체의 성능 및 견전성 향상을 위해 그동안 수행되어온 지지격자체 기계 및 구조 설계/해석 관련 연구결과들을 검토하여 정리하였고 설계/해석의 신뢰성 향상을 위해 향후 보완 연구되어야할 연구방향을 제시하였다.

## 2. 지지격자체 기계/구조적 설계요구사항

### 2.1 기계적 설계요구사항

핵연료봉은 Fig. 3에서 보듯이 지지격자체의 격자 내에 위치해 있는 지지격자 스프링의 지지반력에 의

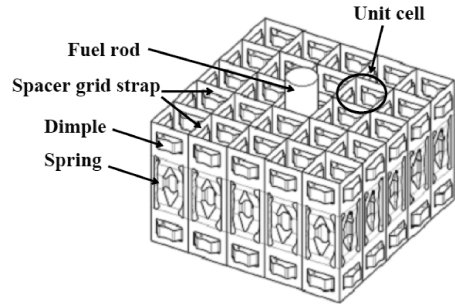


Fig. 3 Fuel rod support in the spacer grid cell

한 마찰력으로 지지되고 있는데 지지격자체의 기계적 설계요건은 핵연료봉이 견전하게 지지되도록 하는 것이다. 부연하여 상세히 설명하면 핵연료집합체가 원자로심내에 장전되어 있는 기간 동안 일어나는 여러 현상, 예를 들면 핵연료봉의 열팽창 및 중성자 조사에 의한 성장(Neutron irradiation growth), 크립 및 팽윤(swelling) 등에 의한 핵연료봉의 직경 변화, 지지격자의 열팽창으로 인한 격자 크기 증가에 의한 핵연료봉 지지반력 감소 그리고 냉각수 유동유발에 의한 지속적인 핵연료봉 유동기진동(Flow-induced Vibration; FIV)과 그로인해 야기될 수 있는 핵연료봉과 지지부위간의 상대 변위 운동에 의한 핵연료봉 프레팅 마모(핵연료봉 피복관의 두께 감소 및 궁극적으로 천공으로까지도 이어짐) 등등에 의해서도 핵연료봉이 견전하게 지지되도록 하는 것이 기계적 설계요구사항이다. 피복관 두께감소의 심화(설계기준 위배) 혹은 피복관 천공(연료 손상)이 발생할 경우 이는 핵연료봉의 내구성(좌굴강도) 저하 및 혹은 방사능 물질의 냉각수로 누출 등이 발생하여 원자로 운전 관련 안전기준을 위배하는 요인이 된다.

### 2.2 구조적 설계요구사항

핵연료집합체는 원자로 상/하부 노심판에 위치한 정렬핀(Alignment pin)에 끼워져 고정되어 수직으로 세워져 있다. 그런데 지진 발생시 상/하부 노심판에 가해지는 변위, 속도 또는 가속도 등으로 인하여 인접한 핵연료집합체들과 혹은 원자로심 벽면과 충돌하고 그 충격력이 핵연료집합체에 측면에 전달될 수 있다. 지지격자체의 측면 충격저항능력이 충분하지 않을 경우 충격력으로 인한 안내관/계측관의 변형 혹은 위치변경이 발생할 수 있고 이로 인하여 원자로를 제어하는 장치들이 핵연료집합체로의 삽입에 지장을 받

을 수 있다. 즉, 핵연료집합체 측면에서 가해지는 여러 하중으로부터 핵연료봉을 보호하면서 원자로 긴급 정지가 가능하도록 하기 위해 구조설계관점에서 지지격자체는 충분한 횡방향 충격저항능력을 갖추도록 설계되어야 한다<sup>1)</sup>.

### 3. 지지격자체 기계/구조적 설계연구 현황

#### 3.1 기계적 설계 관점

기계적 설계관점에서 수행되어온 지지격자 연구개발 동향을 살펴보면 원자로심에 핵연료가 장전되어 있는 기간 동안 지지격자 스프링의 핵연료봉 초기 지지반력이 쉽게 저하되지 않도록 하는 스프링 형상설계와 핵연료봉을 지지하는 지지부위(스프링 및 덤플)의 접촉면 형상이 넓고 길게 유지되는 방향으로 연구개발이 진행되어 왔다. Fig. 4는 여러 형태의 지지격자 스프링 형상을 나타낸 것이다.

스프링 형상설계관점에서는 스프링의 높이와 길이가 제한된 격자공간에 위치해야만 하는 설계상의 제약으로 인하여 형상설계에 어려움이 있으나 주로 스프링의 탄성한계를 늘리고 소성변형량을 줄일 수 있는 방향으로 스프링 형상에 대한 설계개선이 이루어졌다. 스프링 형상개선은 주로 직관에 의해 형상이 고안되었으며<sup>2-8)</sup> 일부에서는 추가적으로 고안된 형상에 대한 체계적인 최적설계 및 해석/실험에 의한 검증이<sup>9-11)</sup> 이루어졌다. 최근 최적설계 기법과 관련 프로그램의 발달로 인하여 체계적인 최적설계에 의한 스프링 설계가 가능하므로 이 분야는 유망한 연구분야로 판단된다.

핵연료봉을 지지하는 지지부위의 접촉면 형상을 개선하는 관점에서는 핵연료봉과 접촉하는 지지부위의 면적(혹은 길이)을 넓게(혹은 길게) 설계하는 방향으로 설계개선이 이루어졌는데 이는 접촉부위에서 접촉응력의 분포가 되도록 균일해지고 침투응력 값이

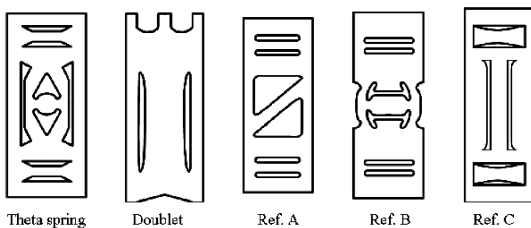


Fig. 4 Various spring shapes

낮아지도록 함으로서 핵연료봉의 프레팅 마모 손상 가능성을 낮추자는 개념에 근거한 것이다<sup>7,8)</sup>. 접촉면 형상개선도 주로 직관에 의한 형상이 고안되었으며 일부에서는 추가적으로 고안된 형상에 대한 체계적인 최적설계 및 해석/실험에 의한 검증이<sup>9-11)</sup> 이루어졌다. 핵연료봉이 격자내에 삽입될 때 스프링이 변형되면서 직관에 의해 고안된 접촉형상이 지속적으로 유지되지 않을 수 있었으나 최근에 체계적인 최적설계/해석기법을 적용하여 초기 접촉형상을 유지할 수 있도록 하는 설계/해석 기법의 개발이 보고되어서<sup>11-13)</sup> 이 방법은 지지격자 스프링 설계/해석에서 유용한 기법으로 보인다.

한편 핵연료봉의 FIV에 의해서 핵연료봉과 지지부위 사이에서 반복적이고 장기간에 걸쳐서 진행되는 상대 변위 운동으로 인하여 야기된 핵연료봉 표면의 프레팅 마모를 좀 더 적게 발생시키기 위해 핵연료봉과 지지부위 사이의 상대 변위 운동을 감소시키는 방향으로 지지격자체 설계개선 및 연구/개발이 수행되었다<sup>14-21)</sup>. 이는 상용화되고 있는 대부분의 지지격자체는 핵연료봉을 지지하기 위한 지지부(스프링 혹은 덤플)가 Fig. 3에서 보듯이 지지격자체를 구성하는 지지격자판에 성형되어 있는 (Fig. 4 참조) 즉, 고정형 핵연료봉 지지부로 구성된 지지격자체 구조인데 지지격자체 조립성 및 제작성이 용이하기 때문에 근래까지의

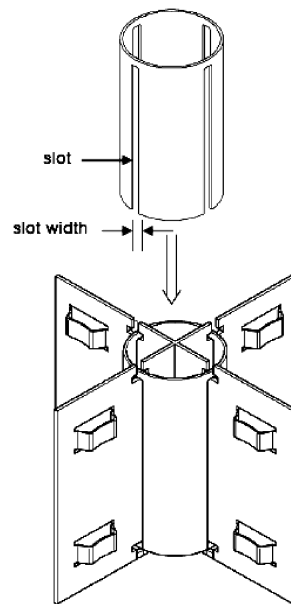


Fig. 5 Spacer grid with an insertable support

거의 모든 상용 핵연료집합체에 사용되어 왔다<sup>2,8)</sup>. 반면 핵연료봉이 FIV에 의해서 진동할 때 핵연료봉 지지부와 핵연료봉이 고착된 상태로 같이 움직이게 되면(진동이 심해지면 고착된 상태에서 벗어나 작은 상대 변위 운동 정도는 일어날 수 있겠으나) 핵연료봉과 핵연료봉 지지부 사이에서는 고착되거나 비교적 작은 상대 변위 운동으로 인해 핵연료봉 표면에서의 프레팅 마모가 적게 발생할 것이다. 이러한 관점에서의 핵연료봉 지지부를 갖는 지지격자체 형상들<sup>14,16,21)</sup>, 즉 격자내에서 핵연료봉 지지부가 상하 방향으로 움직임이 가능한 지지부 형상을 갖는 지지격자체 형상들이 고안되고 일부 형상에 대해 설계특성해석이 수행되었다<sup>15)</sup>. Fig. 5는 이러한 핵연료봉 지지부를 갖는 지지격자체 형상의 한 예를 나타낸 것이다.

### 3.2 구조적 설계 관점

그동안 수행된 지지격자체 횡방향 충격강도 향상을 위한 연구/개발 현황을 살펴보면 지지격자체를 구성하는 지지격자판의 두께 및 높이를 증가시켜서 충격강도를 향상시키려는 전형적인 방안과<sup>2)</sup> 지지격자판 형상을 개선하여 충격강도를 향상시키려는 시도<sup>22,23)</sup> 그리고 지지격자체 용접부위에 대한 용접방법 즉 제조방법을 개선하여 충격강도를 향상시키려는 시도<sup>24,25)</sup> 등이 있다.

지지격자체를 구성하는 지지격자판의 두께나 높이는 전통적으로 지지격자체의 횡방향 충격강도를 향상시키는 주요 설계변수로 사용되어 왔다<sup>2)</sup>. 지지격자체의 횡방향 충격강도는 지지격자판의 두께 변화에 3차 함수관계를 갖고 있는 것으로 알려져 있고<sup>26,27)</sup> 따라서 지지격자판의 두께 증가는 지지격자체 횡방향 충격강도를 향상시킬 수 있는 주요 설계변수 중에 하나이었다. 한편 지지격자판의 높이 변화에 따른 지지격자체의 횡방향 충격강도의 변화는 선형적인 관계를 갖는 것으로 알려져 있고<sup>27)</sup> 따라서 지지격자판의 높이 증가는 지지격자체 횡방향 충격강도를 향상시킬 수 있는 주요 설계변수 중에 하나이었다. 그러나 지지격자판의 두께나 높이가 증가하게 되면 지지격자체 제조용 질감로이 원자재 소요량도 증가하여 제조원가가 상승할 뿐만 아니라 원자로심내를 흐르는 냉각수의 수두 손실을 증가시키는 원인이 되어 원자로 냉각수 펌프의 부하를 증가시켜서 원자로의 전력생산 경제성을 낮추게 된다. 또한 사용후 핵연료의 양 및 부피도 증가시키는 단점이 있다.

지지격자판의 두께나 높이를 증가시키지 않으면서 지지격자판 형상을 개선하여 충격강도를 향상시키려는 시도로서 지지격자판에 성형된 딴플 및 스프링의 위치에 따라 지지격자체 횡방향 충격강도가 다를 수 있고 이들의 위치를 최적화할 경우 지지격자 횡방향 충격강도가 상당히 향상될 수 있음이 보고되었다<sup>22,23)</sup>. 이 방안은 지지격자판 전체 높이와 두께가 고정되어 있기 때문에 지지격자체를 제조하기 위한 원자재 소요량이 증가하지 않으며 또한 원자로심내에서 냉각수의 수두 손실이 거의 증가하지 않으면서도 지지격자체 횡방향 충격강도를 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 또한 사용후 핵연료의 양과 부피를 증가시키지 않으면서 지지격자체 충격강도를 향상시킬 수 있는 방법이다.

지지격자체 용접부위에 대한 용접방법 즉 제조방법을 개선하여 충격강도를 향상시키려는 시도는 지지격자체 횡방향 충격강도가 지지격자체를 구성하고 있는 지지격자판의 높이, 보다 정확하게 표현하면 하중을 전달할 수 있는 유효높이와 깊은 관련이 있다는 사실에 근거한 것이다<sup>26,27)</sup>. 지지격자판에서 임계좌굴 하중은 판의 관성모멘트에 비례하는데 Fig. 6는 스프링 및 딴플이 성형되어 있지 않고 slit 만 형성된 지지격자판에서 충격하중을 전달하는 하중 경로를 도시한 것이다. Fig. 6과 같은 형상의 판에서 판의 임계좌굴 하중( $P_{cr}$ )은 판의 탄성물성치( $E$ ), 판의 길이( $L$ ), 판의 두께( $t$ ) 및 판의 유효높이( $B_e$ ) 등과는 아래의 식 (1)과 같이 관련이 있다. 여기서  $B_e$ 는 충격하중이 전달될 수 있는 경로인 판의 유효높이로서 판의 전체 높이( $B_1 + G + B_2$ )보다 작은 값이다.

$$P_{cr} \propto \frac{EL}{L^2} \propto B_e \cdot t^3 \quad (1)$$

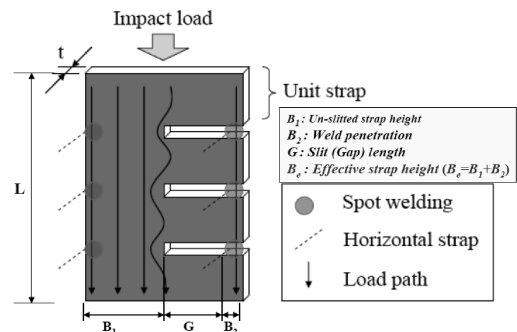


Fig. 6 Effective height for a grid strap

지지격자체의 횡방향 충격강도는 지지격자판의 유효높이에 선형적으로 비례하고 있음이 실험과 해석을 통한 연구에서 보고되었다<sup>26,29)</sup>. 지지격자판 전체 높이와 두께를 증가시키지 않으면서 유효높이를 증가시킬 수 있는 효과적인 방법으로는 지지격자체 용접방법을 전통적인 점용접(spot welding)에서 선용접(line welding)으로 변경하는 것이다. 부연하여 설명하면 지지격자판들을 조립한 후 용접할 때 기존의 점용접 방법 대신에 지지격자판 교차부의 slit을 따라 선용접(line welding)하는 것이다. 지지격자판 교차부의 slit을 따라 선용접하는 용접방법은 근래 레이저 빔 용접으로 지지격자체를 용접하게 됨에 따라 용이하게 수행될 수 있게 되었다. Fig. 7은 레이저 빔의 방향을 기울여 줌으로서 교차부의 slit을 따라 선용접하는 기술을 나타낸 것으로 이 기술은 자동화 및 고품질 용접이 가능하며 또한 설계자의 용도에 따라 교차부위의 slit 일부분 혹은 전체까지 용이하고 신속하게 용접할 수 있다<sup>24,25)</sup>. Fig. 8은 교차부위에 점용접과 선용접으로 접합된 양상을 나타낸 것이다. 교차부위의 slit을 따라 용접할 경우 기존 상용 지지격자에서 점용접한 경우에 비해 횡방향 충격강도가 약 2배 이상 향상되는 것

으로 알려져 있고 또한 용접비드의 직경(Fig. 2 참조)이 점용접에 비해 작아질 수 있고<sup>26,27)</sup> 냉각수 유동막음 면적이 점용접에 비해 작아져서 냉각수의 수두 손실을 감소시키게 되어 원자로 냉각수 펌프의 부하를 감소시켜서 궁극적으로 원자로의 전력생산 경제성을 높이게 된다. 또한 사용후 핵연료의 양과 부피를 증가시키지 않으면서 지지격자체 충격강도를 향상시킬 수 있는 방법이다.

한편 상용화되고 있는 대부분의 지지격자체는 지지격자체 상단에 냉각수 혼합을 위한 혼합날개가 부착되어 있는데 혼합날개가 지지격자판들이 조립되는 slit 위에 부착된 경우에 지지격자체의 횡방향 충격강도에 영향을 준다고 보고되었다<sup>29,30)</sup>.

### 4. 지지격자체 성능 평가의 신뢰성 향상을 위한 제안

#### 4.1 설계/해석 기술

그동안 수행된 연구결과와 설계경험에 비추어 지지격자 스프링 및 지지격자체 구조의 성능을 좀 더 신뢰할 수 있게 해석하고 그 결과를 설계에 반영하기 위해서는 다음과 같은 사항이 보완되어 후속 연구가 수행되어야 할 것이다.

지지격자체를 구성하고 제조에 사용된 질칼로이 격자판 판재에 대한 물성치 데이터베이스(DB)가 확보되어야 한다. 이 DB는 지지격자 스프링의 특성에 대한 해석 및 시험 결과와 비교/검증에 사용된다. 즉, 격자판 단위에서 수행되는 지지격자 스프링 특성(격자판 단위 및 단일 격자 단위 프레팅 마모시험, 스프링 형상 및 접촉면 설계 등에 이용)과 지지격자체에 핵연료봉을 삽입할 경우 수행하는 지지격자 스프링 특성(지지격자체에 핵연료봉이 장전된 상태에서 핵연료봉을 실제로 지지하는 스프링 특성을 의미하며 In-Grid Spring Test를 통해 얻음. 핵연료집합체 단위 프레팅 마모시험, 핵연료집합체 단위 기계/구조시험 및 유체-고체 연성을 고려한 핵연료집합체의 특성 분석 등에 사용)을 해석 및 시험 결과와 비교하여 해석모델의 신뢰도를 높이고 해석기술을 보완/개선하는데 이용될 수 있다. 근래까지 저자의 주도로 수행한 연구/개발과제의 해석시에 물성치는 내부 실험실에서 인장시험편으로부터 추출한 값을 사용하였으나 Material handbook에서 얻은 값과 다소 차이가 있어서 해석의 입력값 사

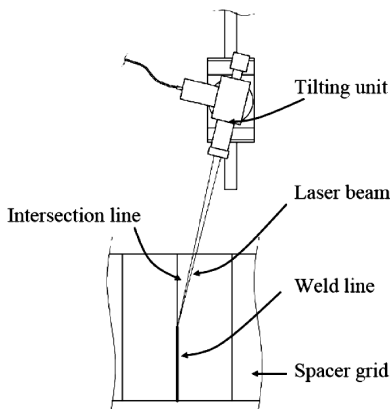


Fig. 7 New laser welding technique with tilting unit

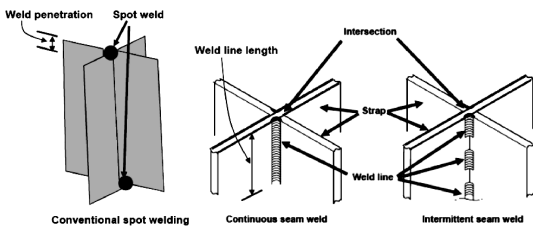


Fig. 8 Weld bead for spot welding and line welding

용시 고심을 한 적이 있었다.

지지격자체 제조시에 용접이 사용되고 있는데 용접부와 열영향부 그리고 판재 모재 부위에 대한 물성치 DB의 확보가 필요하다. 이 DB는 지지격자체의 횡방향 충격강도를 해석적으로 평가할 때 지지격자체 횡방향 충격강도 시험결과와의 비교를 통해 해석모델의 검증과 연구의 신뢰도를 높이는데 이용될 수 있다. 근래까지 저자의 주도로 수행한 연구/개발 과제의 지지격자체 횡방향 충격강도 해석모델에서 횡방향 충격강도를 평가할 때, 이러한 DB의 부재로 모재에서 얻은 물성치만을 사용하였기에 좀더 신뢰성 있는 해석 결과를 얻기보다는 지지격자 구조, 형상 및 제조 방법 등에 따른 횡방향 충격강도의 개선 경향 정도만을 파악할 수 있었다.

## 4.2 지지격자체 구조 시험 기술

지지격자체 횡방향 충격강도 시험과 관련하여, 사용하는 충격시험기와 시험방법에 따라 핵연료 vendor들의 횡방향 충격강도 값이 서로 상이하며 각 핵연료 vendor들은 그들이 자체적으로 얻은 충격강도 값들을 그들의 핵연료집합체 동적거동해석 및 지진해석 모델에 사용하고 있는 것으로 알려져 있다. 우리의 원자력 관련 설계/해석 기술 중에 일부는 독자적으로 확립한 것이 아니라 외국 선진기술과 협력하여 도입 혹은 습득한 것이고 시험기술 및 시험기는 국내에서 독자적으로 제작하여 확보한 것이기에, 특히 핵연료집합체 동적거동해석 혹은 지진해석 모델의 신뢰성 확보에는 제약이 될 수 있다. 따라서 우리의 지지격자체 횡방향 충격강도 시험기술의 검증과 검증된 시험기술에서 얻은 DB를 해석모델에 적절하게 적용하는 것이 향후 필요한 연구분야로 보인다.

## 5. 결론

경수로 핵연료집합체의 성능 및 건전성 향상을 위해 그동안 진행되어온 지지격자체 기계 및 구조 설계/해석 관련 연구결과들을 검토하여 정리하였고 설계/해석의 신뢰성 향상을 위해 연구되어야 할 방향을 제시하였다.

1. 지지격자체의 기계적 설계요구사항을 맞추기 위한 설계개선 연구로 지지격자 스프링 형상 개선, 핵연료봉과 접촉하는 지지부위 형상 개선 등에 많은 연구 개발이 수행되었으며 최적설계기법 및 해석 software

의 발달로 인하여 체계적이고 해석적인 설계개선 절차가 점차 가능해지고 있다.

2. 지지격자체의 구조적 설계요구사항을 맞추기 위한 설계개선 연구로서 핵연료봉 지지부위의 형상 및 위치에 대한 체계적인 최적설계가 가능해 보인다. 또한 새로운 지지격자체 용접기법의 도입은 지지격자체 횡방향 충격강도를 획기적으로 향상시킬 수 있는 방법이며 이들은 지지격자 제조에 소요되는 재료를 증가시키지 않고 또한 원전운영의 경제성을 높일 수 있는 방안으로 보인다.

3. 지지격자체 제조에 사용된 판재 및 용접부에 대한 물성치 확보는 해석모델의 신뢰도 제고에 중요한 DB로서 향후 연구에서 확보해야할 자료이다.

4. 우리의 지지격자체 횡방향 충격강도 시험기술의 검증은 핵연료집합체 동적거동해석 및 지진해석 모델의 신뢰성 확보에 필요한 연구이다.

## 후 기

본 연구는 1997년부터 10년간 수행된 과학기술부의 원자력연구개발사업인 경수로용 신형핵연료기술개발(대과제) 고성능 지지격자 기술 개발(세부과제)과 한국원자력연구원 자체연구사업의 일환으로 수행되었음.

## 참고문헌

1. Kunz, H. J. and Song, K-N, 1987, *Fuel assembly mechanical design*, Siemens/KWU Work-Report U6 312/87/e326.
2. Kim, H-K et al., 1997, *Analysis report on the spacer grid US patent registered in USA*, KAERI/TR-867/97.
3. Lynne E. Weiland and Beryl H. Parks, 1987, "Nuclear reactor spacer grid", US Pat. 4,702,881.
4. William J. Bryan, 1991, "Fuel assembly support grid", US Pat. 5,139,736.
5. William J. Bryan, 1992, "Fuel rod capturing grid spring and arch", US Pat. 5,243,635.
6. Edmund E. DeMario, Raymond F. Boyle, and Peter J. Kuchirka, 1987, "Nuclear fuel grid spring and dimple structures", US Pat. 4,803,043.
7. Kang, H-S et al., 1998, "Grid with nozzle-type coolant deflecting channels for use in nuclear reactor fuel assemblies", US Pat. 6,130,927.
8. Yoon, K\_H et al., 2004, "Spacer grid for nuclear

- reactor fuel assemblies with grid springs maintaining conformal contact with fuel rods and enlarged elastic range”, US Pat. 6,707,872 B2.
9. Lee, H-A et al., 2007, “Design of a nuclear fuel spacer grid considering impact and wear”, *Trans. A of KSME*, Vol. 31, No. 10, pp. 1000-1009.
  10. Kim, D-W et al., 2007, “Nonlinear response structural optimization of a spacer grid spring for a nuclear fuel rod using the equivalent loads”, *Trans. A of KSME*, Vol. 31, No. 12, pp. 1165-1172.
  11. Shin, M-K et al., 2008, “Optimization of a nuclear fuel spacer grid spring using homology constraints”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, pp. 2624-2634.
  12. Shin, M-K et al., 2007, “Optimization of a nuclear fuel spacer grid spring using homology constraints”, *NProc. 15th Int. Conf. on Nucl. Eng., ICONE 15-10366*.
  13. Park, G-J, 2008, “Topology design and manufacturing of a grid strap to enhance the impact strength of a grid assembly, KAERI/CM-1079/2008.
  14. Song, K-N, 2010, Korea Patent # 10-0967119.
  15. Song, K-N and Lee, S-H, 2010, “Spacer Grid Assembly with Sliding Fuel Rod Support”, *Trans. A of KSME*, Vol. 34, No. 7, pp. 843~850.
  16. Song, K-N, 2010, Korea Patent No. 10-0967119.
  17. Song, K-N, 2010, Korea Patent No. 10-0999871.
  18. Song, K-N, 2010, Korea Patent No. 10-0981669.
  19. Song, K-N, Korea Patent Application 2009-0067020.
  20. Song, K-N, Korea Patent Application 2009-0068838.
  21. Song, K-N, Korea Patent Application 2009-0068839.
  22. Lee, S-H, Song, K-N, and Kim, J-Y, 2007, “Design improvement of an OPT-H type nuclear fuel rod support grid using an axiomatic design and an optimization”, *J. of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, pp. 1191-1195.
  23. Lee, S-B, Song, K-N, and Kim, Y-W, 2008, “Parametric study for a dimple location in a spacer grid under the critical impact load”, *J. of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, pp. 2024-2029.
  24. Song, K-N and Kim, S-S, 2007, “Determination of optimum welding parameters for a laser welded spacer grid assembly for PWRs”, *J. of Laser Micro/Nanoengineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 95-99.
  25. Song, K-N and Kim, S-S, 2007, Korea Patent # 770944.
  26. Song, K-N, Lee, S-B, and Lee, H-A, 2010, “New spacer grid to enhance the mechanical/structural performance”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 47, No. 3, pp. 295-303.
  27. Song, K-N et al., 2010, “Study on the Lateral Dynamic Crush Strength of a Spacer Grid Assembly for a LWR Nuclear Fuel Assembly”, *Trans. A of KSME*, Vol. 34, No. 9, pp. 1175-1183.
  28. Song, K-N and Lee, S-B, 2007, “Analysis of impact strength due to the variation of weld length for the nuclear spacer grid assembly”, *Proc. of KSME Fall Meeting*, PyeongChang, Korea.
  29. Song, K-N and Lee, S-B, 2009, “Analysis of crush strength test results for a spacer grid assembly of a LWR nuclear fuel assembly”, *Proc. of KSME Spring Meeting*, Seoul, Korea.
  30. Lee, S-B and Song, K-N, 2007, “The evaluation of impact strength of IFM support grid and its experimental verification”, *Proc. of KNS Fall Meeting*, PyeongChang, Korea.