

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.7.843

삽입 및 이동 가능한 연료봉 지지부의 지지격자 형상[§]

송기남^{*†} · 이상훈^{*}

* 한국원자력연구원

Spacer Grid Assembly with Sliding Fuel Rod Support

Kee Nam Song^{*†} and Sang Hoon Lee^{*}

* Korea Atomic Energy Research Institute

(Received December 23, 2009 ; Revised May 3, 2010 ; Accepted May 5, 2010)

Key Words: Sliding Fuel Rod Support(이동 가능한 연료봉 지지부), Nuclear Fuel Assembly(핵연료집합체), Spacer Grid Assembly(지지격자체), Fretting Wear(프레팅 마모), Flow-induced Vibration(유동기인진동), Fuel Rod(연료봉), Fuel Rod Support Integrity(연료봉 지지건전성), PWR(가압경수로)

초록: 지지격자체는 경수로 핵연료집합체의 가장 중요한 핵심 구조부품이다. 지지격자체 설계시의 고려사항은 원자로 운전중에 연료봉의 지지건전성을 유지하도록 하는 것이다. 본 연구에서는 연료봉이 유동기인진동에 의해서 진동할 때 연료봉과 연료봉 지지부 사이에서 상대변위를 완화해 줌으로서 연료봉의 프레팅 마모 손상 가능성을 감소시킬 수 있는 이동 가능한 연료봉 지지부로 구성된 새로운 지지격자체 형상을 제안하였다. 아울러 제안된 이동 가능 지지부의 연료봉 지지특성을 유한요소해석을 통해 분석하였다.

Abstract: A spacer grid assembly is one of the most important structural components of the nuclear fuel assembly of a Pressurized Water Reactor (PWR). A primary design requirement is that the fuel rod integrity be maintained by the spacer grid assembly during the operation of the reactor. In this study, we suggested a new spacer grid assembly having a fuel rod support, which is capable of sliding when the fuel rod vibrates due to flow-induced vibrations in the reactor. By adjusting the relative displacement between the fuel rod and its support, the proposed design will help in reducing fuel rod fretting damage.

1. 서론

가압경수형 원자력발전소(Pressurized Water Reactor; PWR)에서 열을 생산하는 열원인 핵연료 집합체의 전형적인 형상 및 구조는 Fig. 1에 나타나 있다. 이 핵연료집합체는 가로, 세로 길이가 약 200 mm, 높이 약 4,000 mm 정도의 제원을 갖으며 골격체와 수백개의 연료봉으로 구성되어 있다. 골격체는 하단에 많은 유로구멍이 뚫려있는 하단고정체(Bottom end piece) 1개, 상단에 홀다운 스프링집합체(Holddown spring assembly) 4세트 및 상단고정체(Top end piece) 1개, 상단고정체와 하단고정체를 연결하면서 원자로 제어시나 긴급정지시에 제어봉 삽입경로를 제공하는 4개의 안내

관(Guide tube) 및 운전중에 원자로 상태를 계측하기 위한 계측기의 삽입경로를 제공하는 계측관(Instrumentation tube) 1개 그리고 상단고정체와 하단 고정체 사이에 적당한 간격으로 배치되어 안내관에 고정/부착된 10여개 이상의 지지격자체(Spacer grid assembly)로 구성되어 있다. Zircaloy 피복관(cladding tube) 속에 원자력발전의 열원인 UO₂ 펠릿들이 장입되어 밀봉된 형태인 연료봉은 세장비가 약 380 이상으로 매우 유연한 구조물이다. 연료봉은 지지격자체의 격자(cell)에 삽입되며 골격체 축방향으로 적당한 간격으로 배치된 여러 지지격자체에 의해서 매달려 지지되고 있다.

지지격자체는 본래 연료봉을 원자로심내의 공간 정해진 위치에 고정하고 지지하기 위한 구조물인데 Fig. 2에서 보듯이 홈이 있는 지지격자판들이 가로, 세로로 엇갈리게 끼워져 조립되고 엇갈린 지지격자판들의 교차부위는 용접되어 있다. 지지격자체의 기

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 추계학술대회 (2009. 11. 4.-6., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author. knsong@kaeri.re.kr

계/구조적 핵심기능은 핵연료집합체가 원자로심내에 장전되어 있는 기간(보통 3-5년)동안 연료봉을 견고하게 지지하는 기계적 기능과 핵연료집합체 측면에서 가해질 수 있는 여러 하중(예를 들면 사고시의 하중이나 지진하중 등)으로부터 연료봉을 보호하는 구조적 기능으로 나뉘어 진다. 따라서 지지격자체의 새로운 형상 및 구조를 고안하고 개발할 때에는 대체적으로 위의 기계/구조적 기능을 만족시키면서 또한 지지격자체의 성능을 향상시키는데 초점이 맞추어져 있다.

원자로심내에 오랜 기간동안 장전되어 있는 핵연료집합체는 노심내를 흐르는 냉각수 유동에 의해 영향을 받고 있는데 특히 지지격자체에 의해 지지된 연료봉은 냉각수 유동, 열팽창, 중성자 조사(Neutron irradiation)에 의해서 연료봉의 초기 지지력이 저하됨으로 인하여 쉽게 유동기인진동(Flow-induced vibration)이 발생할 수 있는 상황에 처하게 된다. 연료봉이 진동하게 되면 연료봉 지지부위에서 연료봉과 연료봉 지지부 간의 반복적이고 장기간 진행되는 상대 변위 운동으로 인하여 연료봉 표면(Zircaloy 피복관)에 프레팅 마모가 일어나고 심하면 피복관 두께감소의 심화 혹은 피복관 천공과 같은 연료봉 손상이 발생할 수 있는데 이는 연료봉의 내구성 저하 혹은 방사능 물질의 냉각수로의 누출 등이 발생하여 원자로 운전 관련 안전기준을 위배할 수 있다. 따라서 기계적 관점에서 지지격자의 성능을 향상시키기 위해 여러 연구자 및 핵연료 개발자들이 프레팅 마모 손상을 감소할 수 있는 연료봉 지지부 형상을 개발하는 방향으로 연구하여 왔다.⁽¹⁻¹⁴⁾ 이들 연구방향을 살펴보면 연료봉을 지지하는 지지부와 연료봉과의 접촉부 면적 및 접촉길이를 증가시킴으로서 접촉부의 점두 접촉 응력을 줄이는 방향으로 연구되어 왔다.

한편 구조적 관점에서 지지격자체의 성능을 개선하기 위한 연구로는 지지격자체의 횡방향 충격 특성을 향상시키기 위한 노력으로 연구가 진행되어 왔다. 연구방향을 살펴보면 지지격자체를 구성하는 지지격자관의 두께 및 높이를 증가시키는 방안과 지지격자관 형상을 개선하는 방안 그리고 지지격자체 용접부위에 대한 용접방법을 개선하는 방안 등이 연구되어 왔다.⁽¹⁵⁻²³⁾ 그런데 지지격자관의 두께 및 높이를 증가시키는 방안은 지지격자체 제조에 소요되는 지지격자관(spacer grid strap) 원자재 소요량을 증가시킬 뿐만 아니라 냉

각수 유동 저항을 증가시켜서 홀다운스프링집합체의 부하 및 원자로 압력펌프의 부하를 증가시키게 되는 단점이 있어서 근래에는 시도되고 있지 않고 있다. 한편 지지격자관 형상을 개선하거나^(15,17,18) 지지격자체 용접방법을 개선하는 등의 연구가^(19,20,23) 근래에 수행되어 좋은 결과를 얻은 것으로 알려져 있다.

그동안 개발되어 상용화된 대부분의 경수로 핵연료집합체에서는 Fig. 3에서와 같이 연료봉 지지

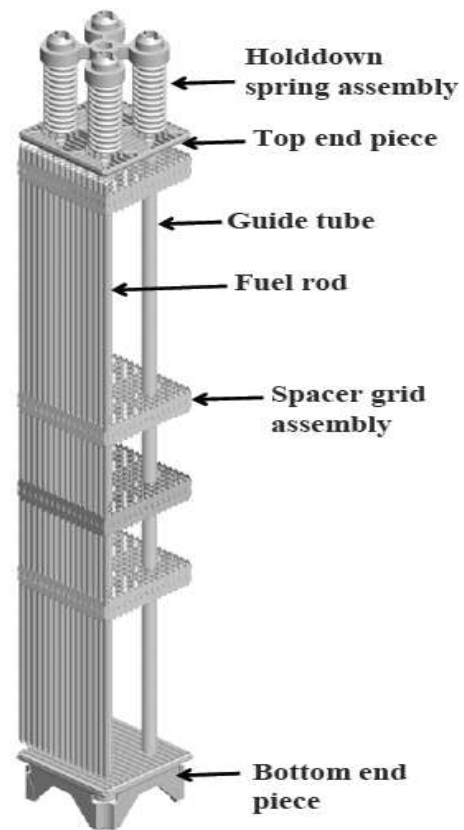


Fig. 1 Fuel assembly

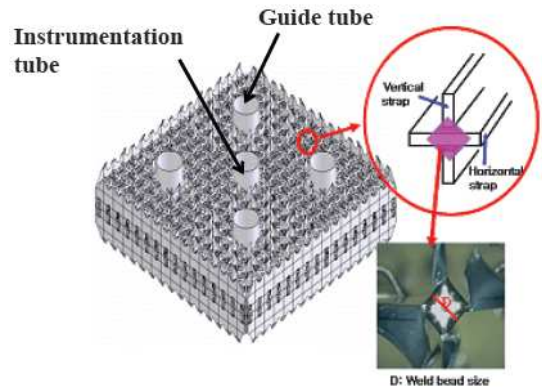


Fig. 2 Spacer grid assembly

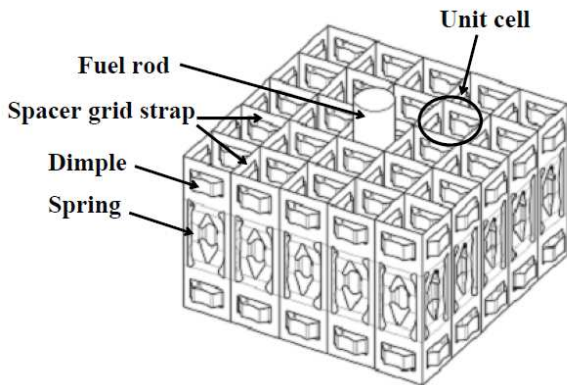


Fig. 3 Spacer grid assembly with fixed fuel rod supports

부(스프링 및 딥플)가 성형된 지지격자판들을 가로/세로로 엇갈리게 조립한 뒤 교차부위를 용접한, 즉 고정형 연료봉 지지부를 갖는 지지격자체를 사용하고 있었다. 고정형 연료봉 지지부를 갖는 지지격자체는 지지격자판 설계 및 제조 관점과 지지격자체의 연료봉 지지성능 관점에서 여러 가지 한계가 있어서 본 연구에서는 연료봉 지지부가 별개의 부품으로 제작되어 지지격자체에 삽입되는 즉, 삽입 및 이동 가능한 연료봉 지지부로 구성된 지지격자체 형상을 제안하고 그 특성을 분석하였다.

2. 통상적인 지지격자체 형상

2.1 통상적인 지지격자체 구조

상용화되고 있는 대부분의 지지격자체는 연료봉을 지지하기 위한 지지부(스프링 혹은 딥플)가 Fig. 3에서 보듯이(전체형상의 일부분을 표시함) 지지격자체를 구성하는 지지격자판에 성형되어 있다. 이와같이 연료봉 지지부가 지지격자판에 성형된 즉, 고정형 연료봉 지지부로 구성된 지지격자체 구조는 지지격자체 조립성 및 제작성이 용이하기 때문에 근래까지의 거의 모든 상용 핵연료집합체에 사용되어 왔다.⁽¹⁻⁸⁾

2.2 통상적인 지지격자체의 단점

고정형 연료봉 지지부를 갖는 지지격자체는 기계/구조적인 설계, 제조 및 성능상의 관점에서 다음과 같은 여러 가지 제약이 있다.

첫째, 비교적 좁은 단위격자(unit cell)의 공간에서 연료봉을 지지하는 지지부가 형성되어야 하기 때문에 연료봉 지지부 설계공간에 대한 제약이

따른다. 즉, 스프링 및 딥플의 높이가 제한받음으로서 연료봉 지지부의 지지특성을 향상시키는 데 한계가 되어 왔다. 단위격자 공간에 연료봉이 삽입되면 단위격자에 있는 스프링은 변형되어 연료봉을 초기 스프링력으로 지지하게 된다. 그러나 장시간(보통 3-5년)에 걸쳐 발생하는 원자로심 내의 운전조건의 변화로 인해 초기 스프링력은 이완되거나 손실될 수 있기 때문에 가능한 한 초기 스프링력은 탄성영역에 있도록 설계되는 것이 바람직한 것으로 알려져 있다.⁽²¹⁾ 또한 여러 개의 지지격자체로 지지되고 있는 연료봉이 길이방향으로 팽창 혹은 성장할 경우 스프링력이 너무 크면 연료봉의 길이방향 팽창 및 성장이 억제되어 연료봉에 휨 혹은 좌굴 등이 발생하여서 인접 연료봉과의 간격(냉각수 수로)이 좁아지거나 인접 연료봉과 접촉하는 현상이 일어나 냉각수 수로 간격이 감소하거나 단히게 되어 열전달 성능이 감소하게 될 수 있으므로 스프링의 강성(stiffness)이 너무 크지 않도록 설계되어야 하는 것이 요구되고 있다. 그런데 고정형 연료봉 지지부를 갖는 통상적인 지지격자체에서는 좁은 설계공간으로 인하여 앞에서 언급한 바람직한 설계를 구현하는데 제약이 되고 있다.

둘째, 지지격자판 제조용 정밀 금형설계 및 지지격자판 제조에 제약이 있다. 부연하여 설명하면 Fig. 3에서 보듯이 지지격자판의 단위격자에서는 좁은 설계공간에 스프링 및 딥플과 같은 복잡한 형상의 연료봉 지지부가 성형되어야 하므로 정밀한 금형설계가 요구될 뿐만 아니라 지지격자판 성형시에 소성변형 부위에서 종종 크랙이나 chip에 의한 흠이 발생하는 등 제조불량이 발생하고 있다.

셋째, 원자로심내를 흐르는 축류 및 횡류의 냉각수 유동에 의해 연료봉에서 유동기인진동이 발생할 수 있는데 고정형 연료봉 지지부를 갖는 지지격자체에서는 연료봉의 유동기인진동으로 연료봉과 연료봉 지지부 사이의 상대 변위가 용이하게 발생함으로 인하여 연료봉의 프레팅 마모가 용이하게 일어날 수 있다.

넷째, 구조강도 관점에서 측면 충격저항이 상대적으로 취약할 수 있다. 즉, 고정형 연료봉 지지부를 갖는 통상적인 지지격자체는 Fig. 3에서 보듯이 각각의 지지격자판 높이 방향으로 연료봉 지지부를 형성하기 위해 slot이 형성되어 있어서

지지격자판 측면에서 충격이 가해질 경우 충격력에 지탱할 수 있는 유효 strap 높이^(17,19,20,23)를 증가시키는데 한계가 있기 때문에 지지격자판 측면 충격강도를 증가시키는데 제약이 있다.

3. 삽입형 지지부의 지지격자 형상

3.1 Siemens/KWU사의 삽입형 지지부 지지격자 삽입형 스프링을 사용한 상용 지지격자체는 1980년대 중반에 Siemens/KWU사에서 개발한 핵 연료에 처음 선보인 것으로 알려져 있다.⁽²⁴⁾

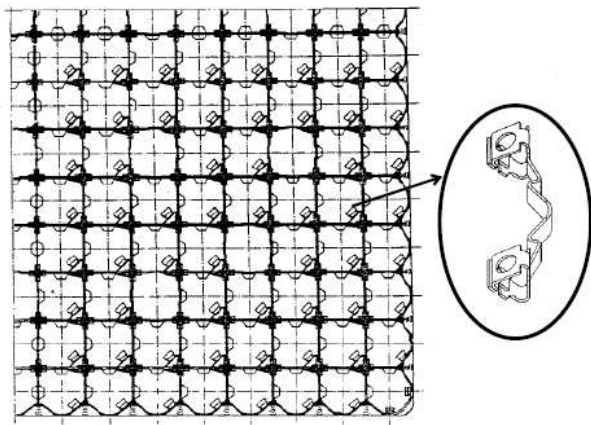


Fig. 4 Spacer grid assembly of Siemens/KWU

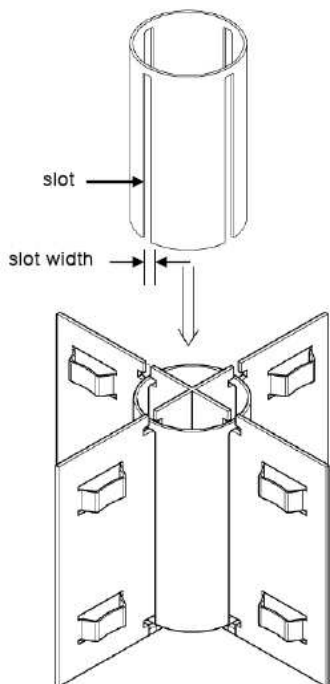


Fig. 5 Spacer grid with a insertable support

Siemens/KWU의 삽입형 스프링은 Fig. 4에서 보듯이 별도의 스프링 집합체를 제작하여 지지격자체의 교차부위에 있는 공간(홈)에 끼워 넣게 한 것이었다. 이 스프링은 통상적인 고정형 지지부를 갖는 지지격자체의 스프링보다 스프링 설계공간이 넓고 크기 때문에 스프링의 강성을 연(soft)하게 할 수 있는 장점을 갖고 있으나 스프링을 수용하기 위해 지지격자판에 별도의 홈이 형성되어 있어서(이 홈으로 스프링을 삽입하고 격자판들을 조립한 뒤 지지격자체를 제조함) 지지격자체의 측면 충격강도가 향상되지 않을 뿐만 아니라 지지격자체의 제조/생산성에 있어서 단점이 있는 것으로 알려져 있다.

3.2 새로운 삽입형 지지부 지지격자체 제안

앞에서 논의한 바와 같이 연료봉이 유동기인진동에 의해 진동하게 되면 고정형 연료봉 지지부의 지지격자체에서는 연료봉과 연료봉 지지부 사이에서 발생한 상대 변위로 인하여 연료봉 표면에서 프레팅 마모가 발생할 것이다. 반면 연료봉이 유동기인진동에 의해서 진동할 때 연료봉 지지부가 연료봉과 고착된 상태로 같이 움직이게 되면 즉, 연료봉 지지부도 연료봉을 지지된 상태로 같이 움직이게 되면 연료봉과 연료봉 지지부 사이에서는 상대 변위가 적게 발생되고 따라서 연료봉 표면에서는 프레팅 마모가 덜 발생할 것이다. 이러한 관점에서 본 연구자는 다음과 같은 삽입 및 이동가능한 연료봉 지지부를 갖는 지지격자체 형상을 제안하였다.⁽²⁵⁻³³⁾

Fig. 5는 지지격자체를 구성하는 가로, 세로의 지지격자판 교차부에 연료봉을 지지할 수 있는 별도의 지지부를 삽입한 형태의 새로운 지지격자체 형상을 나타낸 것이다. 여기서 지지격자판에 형성된 딥플은 필요에 따라 생략할 수 있다. 이 지지부는 tube를 적절한 길이로 절단하고 지지격자체의 교차부에 삽입하기 위해 원주방향 90도 간격으로 끼워진 지지격자판 높이 보다 긴 slot을 가공한 형태이다. 이 지지부를 지지격자체 교차부에 삽입한 후 slot 하단부를 용접 등과 같은 방법으로 밀봉/접합함으로써 지지부가 지지격자체로부터 분리되지 않도록 한 것이며, slot 길이가 끼워진 지지격자판 높이보다 길기 때문에 이 지지부는 연료봉의 유동기인진동시에 연료봉을 지지하고 고착된 상태에서 연료봉과 같이 움직임

로서 연료봉과 연료봉 지지부 사이의 상대 변위가 적게 발생토록 고안된 것으로 연료봉의 프레팅 마모 손상을 크게 완화시킬 것으로 기대된다.

이 지지부에서는 지지부 강성을 조절하기 위해 지지부의 두께를 조절하거나 지지부에 형성된 홈의 길이 및 너비를 조절할 수 있는데 이에 대해서는 뒤에서 다시 논의할 것이다. 또한 이 지지격자체를 구성하는 지지격자판에는 통상적인 고정형 지지부로 구성된 지지격자체의 지지격자판과는 다르게 스프링이 형성되어 있지 않아서 실질적으로 측면 충격강도에 대한 지지격자판의 유효높이를 높일 수 있고 따라서 지지격자체의 측면 충격강도를 크게 향상시킬 수 있다. 게다가 지지격자판에 스프링(필요시 딥플 생략 가능)이 형성되어 있지 않아서 지지격자판 제조용 금형설계가 상대적으로 단순해질 뿐만 아니라 지지격자판 제조 불량이 줄어드는 즉, 지지격자체 제조/생산성 관점에서의 장점이 있다.

3.3 새로운 삽입형 지지부의 특성 해석

앞의 3.2절에서 언급한 새로운 지지격자체 중에서 삽입 및 이동 가능한 연료봉 지지부의 스프링 특성을 ABAQUS⁽³⁴⁾를 이용한 유한요소해석을 통해 분석하였다. 유한요소모델은 대칭성을 고려하여 연료봉 및 연료봉 지지부 모두 원주방향으로 1/4 부분만을 모델링하였다. 유한요소해석 모델에서 연료봉 및 연료봉 지지부는 모두 shell 요소 S4를 사용하였으며 full integration 기법을 사용하였다. Figure 6은 유한요소해석 모델과 경계조건을 나타낸 것으로 연료봉에 변위를 부과한 뒤 반력을 구하여 연료봉 지지부의 하중-변위 (F-u) 선도를 도출하였다. Table 1은 유한요소모델에 사용된 연료봉 및 연료봉 지지부의 치수를 나타낸 것으로 연료봉 지지부의 두께는 통상적인 지지격자판의 두께와 동일한 경우(0.457 mm)와 상용으로 공급되는 얇은 지지격자판 두께(0.35 mm) 등 2가지 경우의 치수를 사용하였다.

Figures 7 및 8은 각각 연료봉 지지부의 두께가 0.35 mm와 0.457 mm인 경우(두 경우 모두 slot 폭이 0.6 mm임)에 연료봉 지지부가 0.3 mm 까지 변형될 때의 하중-변위 선도를 나타낸 것이다. Figures 7과 8에서 보면 연료봉 지지부가 0.3 mm까지 변형될 때 연료봉 지지부의 두께가 0.457 mm 인 경우에 스프링력은 886.8 N으로 연료봉 지지부의 두께가 0.35 mm인 경우의 스프링력 596.7 N보다 상당히 크

Table 1 Geometric data

	Fuel rod cladding	Fuel rod support
Outer diameter (mm)	16.0	8.825
Thickness (mm)	1.08	0.35 0.457
Slot length (mm)	-	33.28

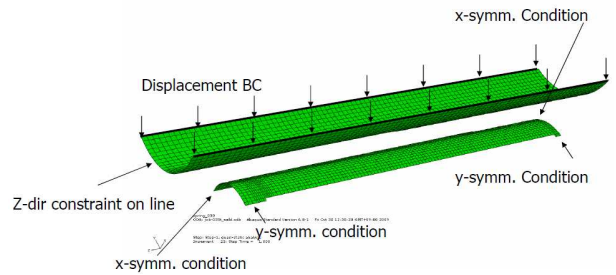


Fig. 6 Finite element model and boundary condition

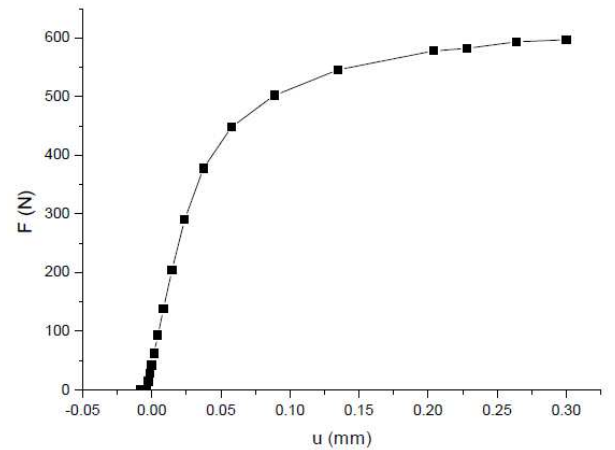


Fig. 7 Force-deflection curve (0.35 mm of strap thickness and 0.6 mm of slot width)

다. 따라서 연료봉 지지부의 두께를 0.457 mm로 사용하는 것은 다른 설계변수들을 많이 조정하지 않는 한 설계상의 스프링 요구하중을 넘길 것으로 판단된다.

한편 연료봉 지지부의 두께가 0.35 mm일 때 slot 너비를 증가시킨 경우에 하중-변위 선도의 변화를 분석하였다. Figures 9와 10은 연료봉 지지부에서 slot 너비가 각각 1.356 mm 및 2.028 mm인 경우에 하중-변위 선도를 나타낸 것이다. Figures 9와 10에서 보듯이 slot의 너비를 조정함으로써 연료봉 지지력이 크게 변하고 있음을 알 수 있다. Table 2는 연료봉 지지부가 0.3 mm 변

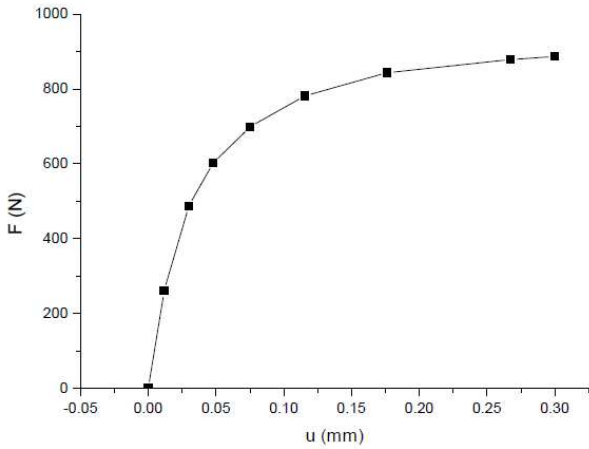


Fig. 8 Force-deflection curve (0.457 mm of strap thickness and 0.6 mm of slot width)

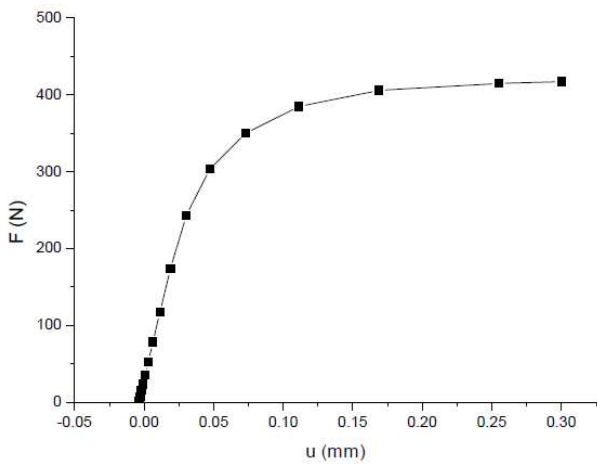


Fig. 9 Force-deflection curve (0.35 mm of strap thickness and 1.356 mm of slot width)

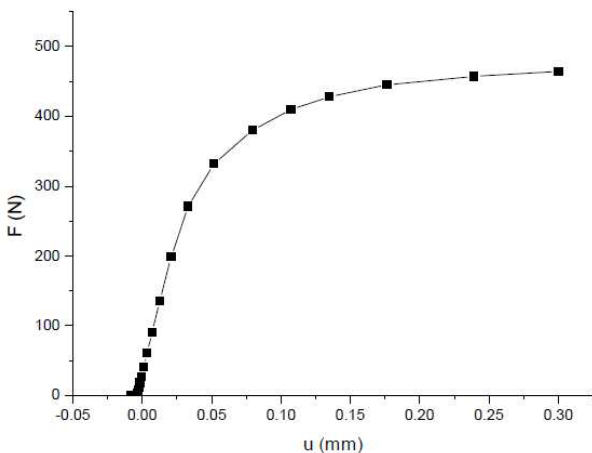


Fig. 10 Force-deflection curve (0.35 mm of strap thickness and 2.028 mm of slot width)

형되었을 때 연료봉 지지부 두께 및 slot 너비에 따른 스프링력과 탄성계수를 비교한 것이다. Table 2에서 보면 slot 너비가 0.6 mm인 경우 최

Table 2 Maximum spring force and elastic constant

Thickness of fuel rod support (mm)	slot width (mm)	Maximum spring force (N)	Elastic constant (N/mm)
0.457	0.6	886.8	21946
0.35	0.6	596.7	14083
	1.356	464.7	9533
	2.028	417.0	8027

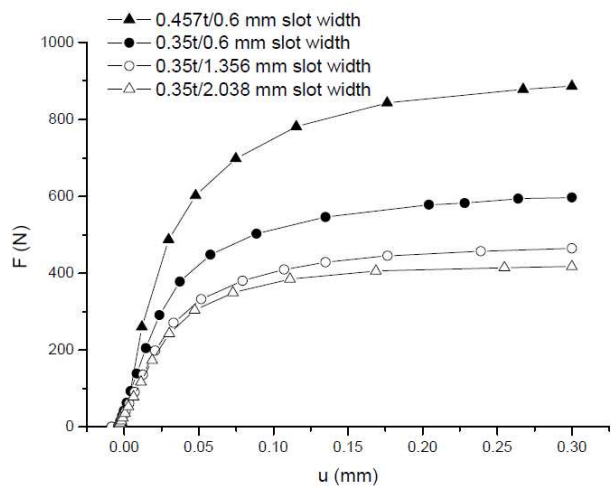


Fig. 11 Overlapped force-deflection curves

대 스프링력 및 탄성계수는 596.7 N, 14083 N/mm이었으나 slot 너비가 1.356 mm인 경우의 최대 스프링력 및 탄성계수는 464.7 N, 9533 N/mm이었고 slot 너비가 2.028 mm인 경우의 최대 스프링력 및 탄성계수는 417.0 N, 8027 N/mm으로 점차 줄어들고 있다. 따라서 연료봉 지지력에 대한 설계인자로서 연료봉 지지부의 두께뿐만 아니라 slot의 너비도 상당히 유효한 설계인자임을 확인할 수 있다. 따라서 연료봉 지지력에 대한 설계요구사항을 맞추기 위해서는 먼저 연료봉 지지부 두께를 정한 뒤에 slot의 너비나 길이 등과 같은 보조 설계인자를 조정해야 될 것으로 보인다.

Figure 11은 Figs.7-10의 하중-변위 선도를 모두 겹쳐서 나타낸 것이다. Figure 11에서 보면 연료봉 지지부 두께가 0.35 mm인 경우 slot 너비를 증가시키면 점차 최대 스프링력이 점차 줄어들고 있음을 보여주고 있다.

4. 결론

(1) 고정형 연료봉 지지부로 이루어진 통상적인

지지격자체 형상에 비해 연료봉 지지건전성이 향상되고 지지격자체의 측면 충격강도를 향상시킬 수 있는 삽입 및 이동 가능한 연료봉 지지부로 이루어진 지지격자체 형상을 제안하였다.

(2) 연료봉 지지부 두께는 연료봉 지지부의 특성을 크게 변화시킬 수 있는 주요 설계변수이다.

(3) slot의 너비는 연료봉 지지부 특성을 변화시키며 설계요구조건을 맞추기 위한 보조 설계변수이다.

후 기

본 연구는 한국원자력연구원의 자체연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

(1) Lynne E. Weiland and Beryl H. Parks, 1987, "Nuclear Reactor Spacer Grid," US Pat. 4,702,881.

(2) Claude Feutrel, 1980, "Space Grate For Fuel Elements of Nuclear Reactors," US Pat. 4,396,573.

(3) William J. Bryan, 1991, "Fuel Assembly Support Grid," US Pat. 5,139,736.

(4) Peter P. King, John F. Patterson, Jack Yates, and Charles A. Brown, 1986, "Grid Spacer and Method of Making Same," US Pat. 5,139,736.

(5) William J. Bryan, 1992, "Fuel Rod Capturing Grid Spring and Arch," US Pat. 5,243,635.

(6) John F. Patterson, Wayne A. VonOlnhausen, and Jack Yates, 1987, "Mixing grid," US Pat. 4,726,926.

(7) Kang, H. S., Song, K. N., Yoon, K. H., Jung, Y. H., Chun, T. H., Oh, D. S., In, W. K., and Bang, J. G., 1998, "Grid with Nozzle-Type Coolant Deflecting Channels for Use in Nuclear Reactor Fuel Assemblies," US Pat. 6,130,927.

(8) Yoon, K. H., Kang, H. S., Kim, H. K., Song, K. N., Jung, Y. H., Chun, T. H., Oh, D. S., In, W. K., and Park, G. J., 2004, "Spacer Grid for Nuclear Reactor Fuel Assemblies with Grid Springs Maintaining Conformal Contact with Fuel Rods and Enlaeged Elastic Range," UC Pat. 6,707,872 B2.

(9) Edmund E. DeMario, Raymond F. Boyle, and Pwter J. Kuchirka, 1987, "Nuclear Fuel Grid Spring and Dimple Structures," US Pat. 4,803,043.

(10) Yoon, K. H., Kim, H. K., Kang, H. S., and

Song, K. N., 2001, "Shape Optimization of the H-Shape Spacer Grid Spring Structure," *J. of Korean Nuclear Society*, Vol. 33, No. 5, pp. 547~555.

(11) Song, K. N., Kang, B. S., Choi, S. K., Yoon, K. H., and Park, G. J., 2002, "Design of a Nuclear Fuel Rod Support Grid Using Axiomatic Design," *Trans. A of KSME*, Vol. 26, No. 8, pp. 1623~1630.

(12) Song, K. N., Yoon, K. H., Kang, H. S., and Lee, K. H., 2005, "Mechanical/Structural Tests of Robust Spacer Grid Shapes for PWR Fuels," *J. of Korean Society of Pressure Vessel and Piping*, Vol. 1, No. 1, pp. 99~105.

(13) Song, K. N., Yoon, K. H., Kim, J. Y., and Lee, K. H., 2006, "Performance Evaluation of Spacer Grid Shapes Native to Korea for PWR Fuels," *J. of Korean Society of Pressure Vessel and Piping*, Vol. 2, No. 2, pp. 39~44.

(14) Lee, H. A., Kim, C. K., Song, K. N., and Park, G. J., 2007, "Design of a Nuclear Fuel Spacer Grid Considering Impact and Wear," *Trans. A of KSME*, Vol. 31, No. 10, pp. 1000~1009.

(15) Kim, D. W., Lee, H. A., Song, K. N., Kim, Y. I., and Park, G. J., 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.

(16) Song, K. N., Lee, K. H., and Chung, I. S., 2008, "Comparison of Wear Resistance for Various Spacer Grid Spring Shapes," *J. of Korean Society of Pressure Vessel and Piping*, Vol. 4, No. 1, pp. 1~7.

(17) 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.

(18) Park, K. J., Kang, B. S., Song, K. N., and Park, G. J., 2003, "Design of a Spacer Grid Using Axiomatic Design," *J. of Nuclear Science and Technology*, Vol. 40, No. 12, pp. 989~997.

(19) 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.
- (20) 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.
- (21) Song, K. N., Lee, S. B., and Lee, S. H., 2007, "Performance Evaluation of New Spacer Grid Shapes for PWRs," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 39, No. 6, pp. 737~746.
- (22) Shin, M. K., Lee, H. A., Lee, J. J., Song, K. N., and Park, G. J., 2008, "Optimization of a Nuclear Fuel Spacer Grid Spring Using Homology Constraints," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, pp. 2624~2634.
- (23) Song, K. N. and Kim, S. S., Lee, S. H., and Lee, S. B., 2009, "Laser Welding Unit for Intersection Line Welding of Spacer Grid Inner Straps and Its Application," *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 11~17.
- (24) Kunz, H. J. and Song, K. N., 1987, Fuel Assembly Mechanical Design Manual, Siemens/KWU Work-Report U6 312/87/e326.
- (25) Song, K. N., Korea Patent Application 2009-0006230.
- (26) Song, K. N. and Lee, S. H., 2009, "Suggestion Spacer Grid Assembly With Sliding Fuel Rod Supports," Proc. of KSME Fall Meeting, Yongpeong, Korea.
- (27) Song, K. N., Korea Patent Application 2009-0068836.
- (28) Song, K. N., Korea Patent Application 2009-0068839.
- (29) Song, K. N., Korea Patent Application 2009-0068838.
- (30) Song, K. N., Korea Patent Application 2009-0067020.
- (31) Song, K. N., Korea Patent Application 2009-0006229.
- (32) Song, K. N., Korea Patent Application 2009-0006228.
- (34) ABAQUS/Standard Version 6.8 User's Manual, 2009, H.K.S., USA.