

전산 유체해석 및 비선형 응력해석을 통한
지지격자 외부격자판의 형상최적화

Shape Optimization of a Outer Strap for PWR Spacer Grid
Considered Computational Fluid and Non-linear Stress Analysis

윤경호, 인왕기, 김우곤, 강홍석, 송기남, 정연호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

기계적 및 열수력적 성능이 제고된 지지격자를 위한 외부격자판의 형상최적화를 전산 유체해석 및 비선형 응력해석을 통해 수행하였다. 복합 유동혼합 날개를 갖는 부수로에 서의 유동해석을 위해 상용 전산 유체해석 코드인 CFX를 사용하였다. 복합 유동혼합 날 개는 주날개 및 부날개 두 쌍으로 구성되었고, 이들 유동혼합 날개를 통해 냉각수의 혼 합을 최대로 하기 위해 그 크기와 각도를 최적화하였다. 와류 및 횡류 혼합인자들은 집 합체에서의 속도분포로부터 평가하였다. 또한 외부격자판에 형성될 스프링의 연료봉 지 지거동을 평가하기 위한 비선형 응력해석을 상용 유한요소 해석코드를 사용하여 수행하 였다. 외부격자판을 위한 스프링의 형상을 연료봉과 등각의 면접촉 형상을 유지할 수 있 으며, 단일 셀의 폭이 모서리와 같이 좁은 영역에서도 이러한 형상을 구현할 수 있는 외 부격자판의 형상을 도출하였다.

Abstract

A computational fluid dynamics (CFD) analysis was performed to propose an optimal design of hybrid vane in a nuclear fuel bundle. The hybrid vane consists of two sets of primary and secondary vanes. To maximize the coolant mixing by the hybrid vane, its size and vane angle must be optimized. The vane angle, defined as the angle bent from the axial flow direction, changed from 30° to 40° and from 0° to 45° for the primary and secondary vanes, respectively. Effect of the secondary vane width was examined for three sizes. The swirl and cross flow mixing factors were estimated from the predicted velocity distributions in the fuel bundle. The optimal vane angles are judged to be 40° and 35° for the primary and secondary vanes, respectively. The secondary vane width should be rather small to increase the cross flow mixing but not to significantly reduce the swirl mixing. The non-linear stress analysis of a spacer grid spring is performed for predicting the characteristic behavior under the actual boundary condition by finite element method. According to these analysis results, the outer strap for high performance spacer grid is developed for advanced PWR fuel assembly.

1. 서론

지지격자는 경수로용 핵연료 구성부품 중 하나로서 직경에 비해 그 길이가 비교적 큰 연료봉을 지지하는 기능을 갖는다. 본 논문에서는 지지격자를 구성하기 위한 격자판 중에서도 외부격자판의 형상최적화를 위해서 열수력적 관점인 원자로 노심에서 냉각수의 전산 유체해석과 기계/구조적 관점에서의 연료봉을 그 수명말까지 건전하게 유지하기 위한 비선형 응력해석 결과를 이용하였다. 종래 지지격자에 형성된 날개는 전체 지지격자의 대각선을 기준으로 유동패턴이 형성되도록 하였는데 이는 지지격자 부수로 상에서의 비대칭 유동혼합을 이루게 되어 있다. 이러한 비대칭 유동패턴은 열적 여유도 감소를 나타내게 되어 핵연료의 경제성을 제고할 수 없게 된다. 따라서 이러한 비대칭 유동패턴을 하나의 지지격자를 기준으로 할 때 두 개의 대각선을 기준으로 유동패턴을 이루게 하여 인접 핵연료와의 냉각수 혼합효과를 극대화할 수 있도록 외부격자판의 날개 형상을 최적화하였다. 전산 유체해석은 네 개의 연료봉으로 구성된 부수로(subchannel)에서 내부격자판의 상부에 위치한 유동 혼합날개를 모델링하고 이를 상용 전산 유체해석 코드인 CFX⁽¹⁾를 사용하여 냉각수의 유동을 해석하였다.

또한 기계/구조적 관점에서는 지지격자 스프링과 연료봉 간의 접촉을 등각의 면접촉을 이루도록 하여 프레팅 마멸저항성을 제고한 내부격자판을 위한 면접촉 스프링의 형상을 외부격자판을 위한 스프링에도 적용코자 하였다. 그러나 이와 같은 이중의 단순보 형상을 갖는 면접촉 스프링은 단일 셀의 폭이 좁은 모서리와 같은 셀에서는 이를 적용하기가 어렵게 된다. 따라서 이러한 모서리 셀에서도 등각의 면접촉 스프링 형상을 구현할 수 있도록 스프링의 형상을 단일 단순보 형상을 가짐과 동시에 연료봉과 접촉하는 지지부의 형상은 등각의 면접촉 형상을 이루도록 지지격자 스프링의 형상을 설계하였다. 또한 연료봉 지지 관점에서 외부스프링은 핵연료의 취급 및 이송 시나 사고조건 하에서 내부스프링보다 강성이 제고된 형상을 갖도록 설계하여야 하므로, 지지격자 스프링의 비선형 응력해석을 통해 스프링 지지부의 형상을 최적화하였다. 지지격자 스프링의 비선형 응력해석을 위해서는 스프링이 기하학적 형상에 비해 그 변위가 크므로 기하학적 비선형성 및 대변형(large deformation)으로 인해 재료의 항복강도 이상의 응력이 발생하게 되므로 재료의 탄·소성 물성을 적용하여 상용 유한요소 해석코드인 ABAQUS⁽²⁾를 사용하였다.

본 논문에서는 이들 열수력적 및 기계적 관점에서의 전산해석을 통해 성능이 제고된 외부격자판의 형상을 도출하고자 하였다.

2. 전산 유체해석

2.1 복합 유동혼합 날개

복합 유동혼합 날개는 Fig. 1과 같이 지지격자의 각 교차점에 4개의 전향날개로 구성된다. 2개씩 동일한 형상의 두 쌍의 주 혼합날개(primary vane)와 부 혼합날개(secondary vane)로 이루어져 있다. 사다리 모양의 지지대가 있고 지지대의 양쪽 경사면을 중심으로 전향날개가 동일한 방향으로 부수로 안쪽으로 구부러져 있다. 단면적이 넓은 날개가 주 혼합날개이며 상대적으로 크기가 작은 날개는 부 혼합날개이다. 주 혼합날개는 경사지게 구부러져 부수로 내부의 선회유동과 인접한 부수로 사이의 횡류를 동시에 발생시키기 위한 것이며 부 혼합날개는 주 혼합날개에 의한 유동혼합을 보다 증가시키기 위한 형상이다.

주 혼합날개 지지대의 폭은 보다 강력한 혼합유동을 유도하고 안정된 전향날개의 지지를 위해 연료봉 간격과 동일하며 지지대의 높이와 전향날개의 길이는 지지격자의 하류 먼 곳까지 유동혼합이 유지되도록 결정하였다. 지지격자의 조립 시 서로 간섭이 발생하지 않는 주 혼합날개의 최대 구부림 각도는 40° 이다. 부 혼합날개는 보조적인 유동혼합의 증진장치이므로 주 혼합날개보다 다소 작게 설계하였고 날개의 구부림 각도와 날개 지지대의 폭은 중요한 형상 최적화 인자이다. 따라서 이 연구에서는 주 혼합날개의 구부림 각도는 물론이고 부 혼합날개의 구부림 각도와 지지대의 폭의 영향을 분석하였다.

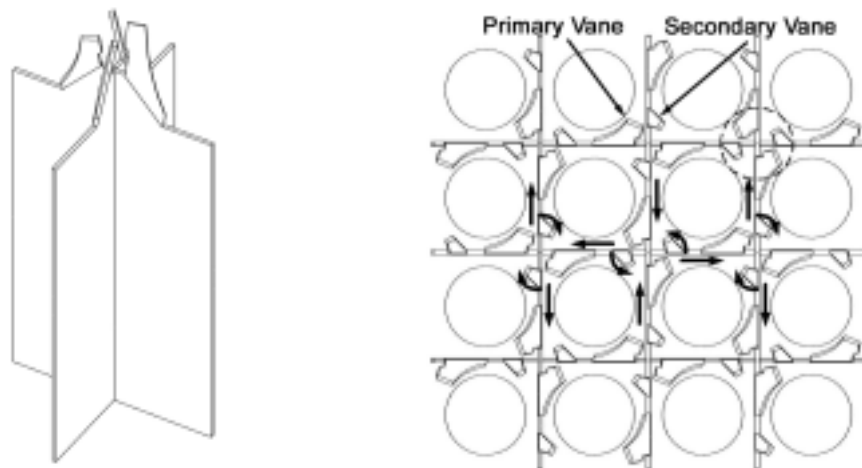


Fig. 1 복합 유동혼합 날개의 핵연료다발 지지격자 및 부수로 유동혼합의 개략도

2.2 수치해석 모델 및 경계조건

효율적인 수치해석을 위해 부수로 유동의 대칭성을 고려하여 한 개의 지지격자를 포함하는 단일 부수로를 수치해석 영역으로 설정하였다. 즉, 핵연료다발 지지격자의 상류 30 mm 지점으로부터 다음 지지격자 이전까지를 전체 수치해석 모델 영역으로 선정하

였다. 연료봉의 지지를 위한 지지격자의 돌출부(스프링, 덤플 등)들은 지지격자의 하류 유동에 미치는 영향이 크지 않으므로 여기서는 수치해석 모델의 단순성을 위해 무시⁽³⁾하였다. 지지격자의 판과 혼합날개의 두께도 무시하였다. 연료봉의 직경(D)은 9.5 mm이고 봉 간격(P)은 12.85 mm이다. Fig. 2는 복합 유동혼합 날개가 있는 지지격자의 수치해석 모델을 나타낸다.

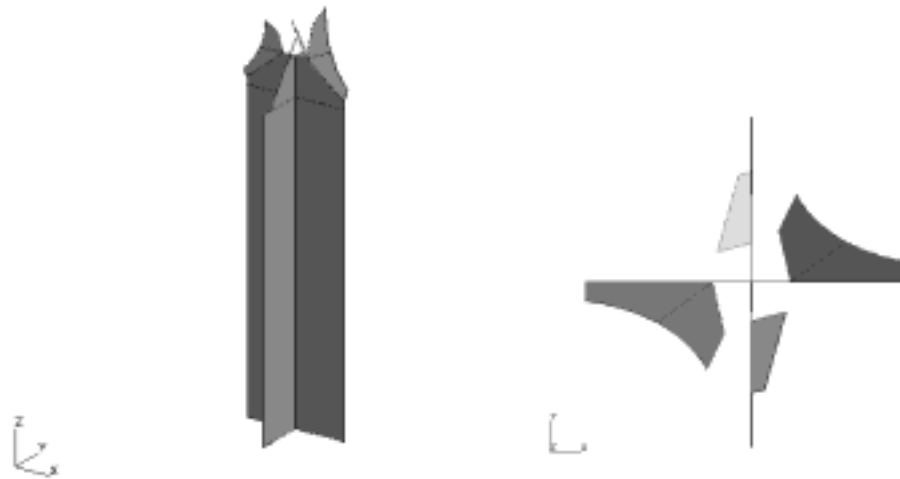


Fig. 2 복합 유동혼합 날개가 있는 지지격자의 수치해석 모델

수치해석 모델은 120개의 다중블록으로 구성된 3차원 정렬격자(structured grid) 모델이다. 다양한 전산격자에 대한 수치해석 시험결과 최적의 격자수는 부수로 단면의 수평/수직 중심선에 각각 32개, 연료봉 사이(gap)에는 20개이며 축방향으로는 200개이다. 3차원 수치해석 모델의 전체 셀 개수는 206,000개이다. Fig. 3은 지지격자 부분과 부수로 단면에서의 셀 형태를 보여주고 있다.

수치해석 모델의 입구경계에서는 균일유동 조건을 가정하고 출구경계에서는 일정 압력 조건을 설정하였다. 입구경계의 균일유동 조건은 완전발달유동 조건의 결과와 지지격자의 하류에서 큰 차이를 나타내지 않았다. 부수로 측면경계에서는 인접 부수로 사이의 횡류혼합을 고려한 특별한 연속 경계조건을 설정하였다. 즉 핵연료다발의 부수로 배열과 유동혼합 날개에 의한 횡류 방향을 고려하여 두 개의 부수로 측면경계가 각각 연결된 조건으로 한쪽에서 나온 유체는 다른 한쪽으로 들어가게 된다. 연료봉과 지지격자 표면에서는 미끄럼 방지(no-slip) 조건을 사용하였다.

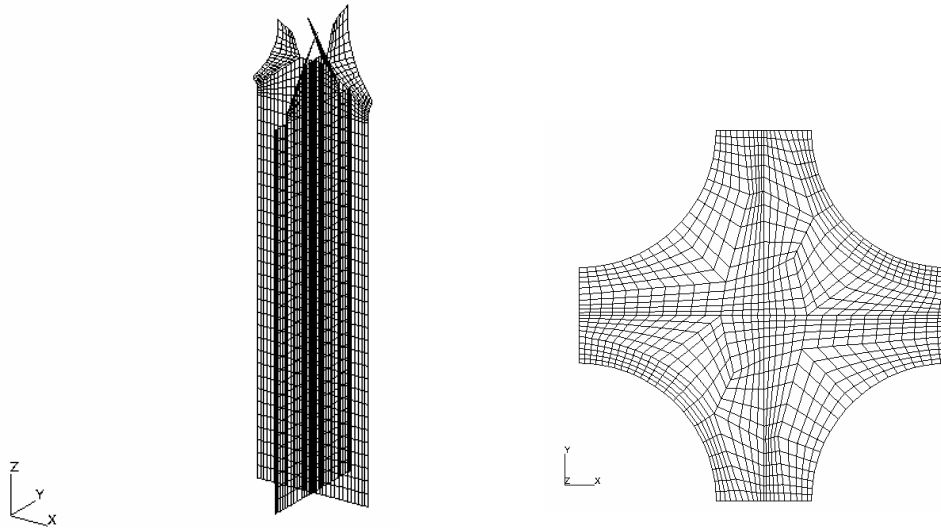


Fig. 3

2.3

가

3

CFD

CFX-4

Lauder Spalding

(4)

(algebraic multi-grid)

(under-relaxation)

(residual)

0.05% 가

7000

HP 9000 C200 C180

(V_{bulk})

7.0 m/s ($Re=87000$)

(D_n) 12.5 mm

(1)

가 40°

30° , 35° , 40°

(2) 0° (가

), 20° - 45°

(w)

(

X2)

($w=w_0$)

($w=1.2w_0$)

($w=0.8w_0$) 세 가지의 경우에 대해 수치계산을 각각 수행하였다.

2.4 해석결과

복합 유동혼합 날개가 있는 지지격자의 하류에서 예측된 부수로 단면의 속도벡터는 Fig. 4와 같다. 복합 유동혼합 날개는 지지격자 가까이서($z=2D_h$) 부수로 내부에 타원형의 선회유동을 발생시키고 인접한 부수로 사이에도 많은 횡류를 발생시키는 것으로 나타났다. 하류로 갈수록 횡류는 급격히 감소하고 선회유동도 서서히 감소하는 것을 알 수 있다. 지지격자의 하류 $z=5D_h$ 이후에는 선회유동이 동심원 형태로 바뀌고 크기도 감소하였다. 횡류는 보다 빠르게 감소하여 지지격자의 하류 $z=10D_h$ 이후에는 매우 미미한 것으로 나타났다. 지지격자로부터 다소 멀리 떨어진 $z=20D_h$ 이후에는 선회유동도 크게 감소하여 축방향 중심의 유동형태로 변하는 것을 알 수 있다.

특히, 지지격자의 하류 $z=5D_h$ 의 부수로 측면경계의 일부분에서 횡류속도의 방향이 바뀌는 것이 예측되었다. 이것은 주 혼합날개가 연료봉 쪽으로 경사지게 구부러져 부수로 측면경계의 한 쪽으로 횡류가 크게 발생하기 때문이다. 그러나 선회유동의 방향은 동일하게 유지되는 것으로 나타났다. 이러한 횡류속도의 반전현상이 횡류를 급격히 감소시키는 것으로 판단된다. 따라서 향후에는 횡류속도의 반전현상을 줄이고 선회유동도 증가시킬 수 있는 방안이 필요하다.

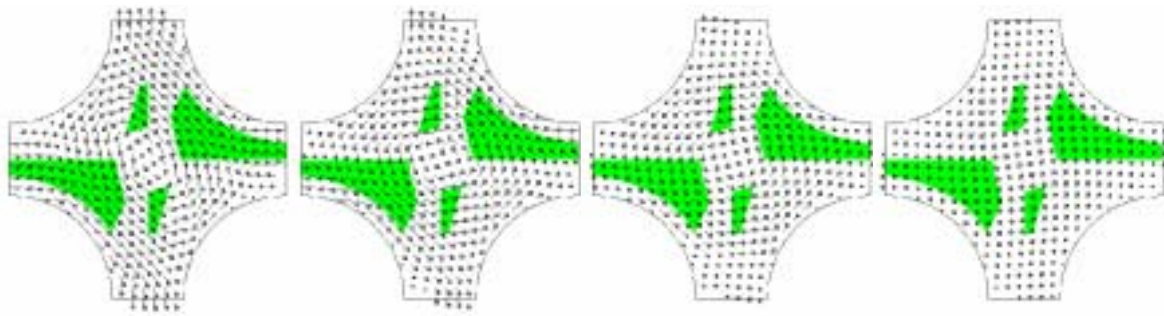


Fig. 4 지지격자 하류에서의 부수로 속도벡터($q_1=40^\circ$, $q_2=35^\circ$, $w=0.8w_0$);
(왼쪽부터) $z=2D_h$, $5D_h$, $10D_h$, 및 $20D_h$

복합 유동혼합 날개가 있는 지지격자의 하류에서 속도분포의 변화는 Fig. 5와 같이 예측되었다. 축 방향의 속도(V_{axial})와 종방향의 속도($V_{lateral}$)는 각각 부수로 중심선을 따른 주 유동방향과 수직방향의 속도를 나타내며, 횡류속도(V_{cross})는 연료봉 사이에서 인접한 부수로를 향한 수직방향 속도를 나타낸다. 축방향의 속도분포는 지지격자 가까이서 변화가 크게 나타났으며 하류로 갈수록 부수로의 중앙($x=0$)에서 속도가 증가하는 것

을 알 수 있다. 지지격자의 하류 $z=30D_h$ 이후에는 포물선 형태의 완전발달 속도분포를 보이고 있다. 종방향의 속도는 부수로 중앙을 기준으로 방향이 반대인 대칭적인 분포를 보이고 있다. 이는 복합 유동혼합 날개에 의해 부수로 내부에 회전유동이 발생되기 때문이다. 지지격자의 하류로 갈수록 종방향의 속도크기는 점차 감소하는데 이는 선회유동의 강도가 감소하는 것을 의미한다. 한편, 횡류속도의 분포로부터 지지격자의 가까이서($z < 5D_h$) 인접한 부수로와 횡류가 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 양(+)의 횡류속도는 인접한 부수로에서 유입되는 속도를 나타낸다. 지지격자의 하류 $z=5D_h$ 에서 횡류의 방향이 바뀌기 시작하여 $z=15D_h$ 이후에는 방향이 완전히 바뀌는 '속도반전' 현상을 확인할 수 있다.

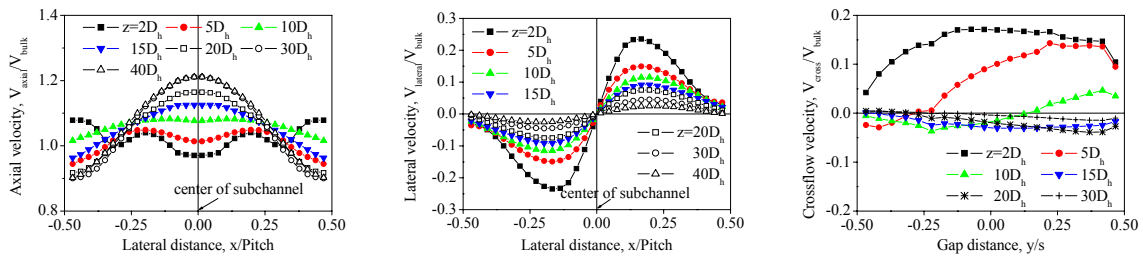


Fig. 5 지지격자 하류에서의 부수로 속도분포($q_1=40^\circ$, $q_2=35^\circ$, $w=0.8w_0$)

3. 스프링의 비선형 응력해석

3.1 지지격자 스프링

지지격자 스프링은 연료봉을 수명말까지 건전하게 지지하는 기능을 갖고 있다. 이러한 지지관점에서 보면 외부격자판에 형성되는 스프링은 내부격자판에 형성되는 스프링과 달리 핵연료의 수송 및 취급 시에 내부판에 형성된 스프링보다는 과도한 하중을 받을 수 있다. 따라서 이러한 이상조건 하에서 받게 되는 과도한 하중에도 그 기능을 상실하지 않기 위해서는 내부스프링보다 큰 스프링 강성을 갖게 할 필요가 있다. 또한 과도한 하중에 놓이더라도 지지력을 잃지 않고 최대 지지하중을 유지하도록 설계되어야 한다.

한편 핵연료의 장전 및 인출 시 인접한 핵연료와의 간섭을 방지하기 위해 외부판의 모서리 형상을 둥글게 하였다. 이러한 모서리 형상은 모서리 셀의 폭을 감소시켜 내부스프링과 같은 이중 단순보 형상의 스프링을 형성할 수가 없게 된다. 이렇게 좁은 모서리 셀에서도 연료봉과의 접촉을 내부스프링에서 구현한 접촉형상을 유지하면서 지지성능에 대한 요구조건을 만족하기 위해서 단일 단순보 형상으로 설계하였다. 이 스프링의 지지거동은 스프링의 곡률, 폭 및 모재와의 굽힘 각도에 의해 지지성능이 달라지므로 상

용 유한요소 코드를 사용하여 지지성능을 검토하고, 지지성능에 영향을 미치는 인자들과 지지성능과의 관계를 평가하여 최적의 스프링 형상을 설계하고자 하였다.

3.2 외부스프링의 기하학적 형상 및 재료의 물성

외부격자판에 형성된 스프링의 탄소성 응력해석을 수행하기 위해 외부격자판의 단일 셀(Fig. 6 참조)을 사용하였다. 외형 치수는 12.85 X 40 mm이고, 판재의 두께는 0.66 mm 이다.

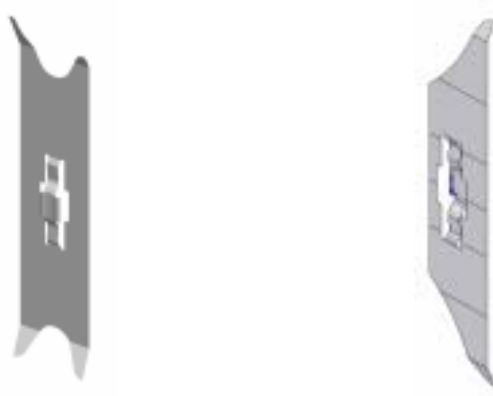


Fig. 6 외부격자판을 위한 스프링 형상 개략도

Table 1 인장시험을 통한 지르칼로이-4 판재의 응력-변형률 데이터

Material	elastic	plastic	
		stress (MPa)	strain
Zry-4	E : 108.3 GPa σ_Y : 379.5 MPa v : 0.294	379.47	0.0
		419.95	0.01152
		472.67	0.03644
		505.58	0.06471
		529.21	0.09787
		579.01	0.20827
		595.46	0.27052

판재의 재질은 지르칼로이-4로 재료의 탄성계수는 108.3 GPa, 항복응력은 344.3 MPa, 그리고 포아송비는 0.294로 하였다. 스프링의 거동은 재료의 항복응력 이상으로 변위가 가해질 수 있으므로 해석을 탄성영역에서만 아니라 소성영역에까지 확장할 필요가 있다. 따라서 재료의 탄 소성 물성을 구하기 위해 ASTM⁽⁵⁾에 따른 인장시험편을 제조하여 이 규격에서 정하는 인장시험 절차에 따라 시험한 항복응력 이후의 응력-변형률 데이터를 해석에 적용하였다. 시험을 통해 얻은 해석에 적용된 지르칼로이-4의 물성을 Table 1

및 Fig. 7에 나타내었다. 이 인장시험은 상온에서 수행하였으며, 크로스헤드의 이송속도는 3 mm/min으로 하였고, 100 %의 신장계 (extensometer)를 사용하였다. 시험은 동일시편 4개를 시험하여 이의 평균값을 해석에 적용하였다.

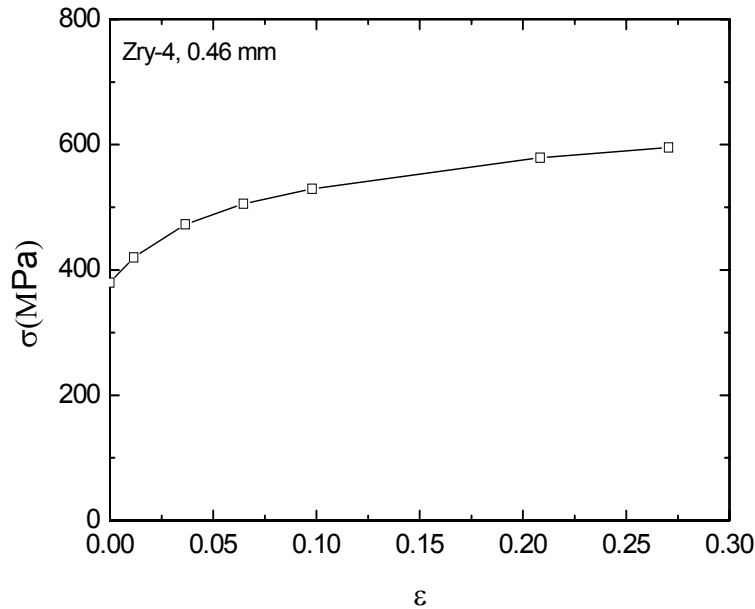


Fig. 7 지르칼로이-4 판재의 응력-변형률 선도

3.3 유한요소 모델 및 경계조건

지지격자 스프링의 특성거동 해석을 위한 유한요소 모델을 I-DEAS⁽⁶⁾를 사용하여 작성하였다. 구조물은 유한 막 변형률과 임의방향의 대회전을 고려하여 대변형 해석에 아주 유효하다고 알려진 4절점 쉘요소를 사용하였고, 연료봉은 스프링에 비해 강성이 상대적으로 크므로 강체요소를 사용하고 이 강체요소의 중앙절점에 변위를 정의하였다. 이렇게 작성한 유한요소 모델을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8의 유한요소 모델에 사용된 절점의 수는 1,261개이며, 요소의 수는 1,124 개이다. 응력해석에 적용한 경계조건은 끝단 (end edge)은 고정하였고, 이 끝단으로부터 안쪽으로 폭 0.4mm가 시편고정치구에 고정되게 되므로 치구단 (fixture edge)은 회전방향 (rot-z) 자유도를 제외한 모든 자유도를 구속하였다. 하중은 강체로 모델링한 연료봉의 참조절점 (reference node)에 연직방향의 변위를 가하였으며, 이 참조절점에서의 반력 (reaction force)을 구해 하중 대 변위의 스프링 특성거동을 해석⁽⁷⁾하였다.

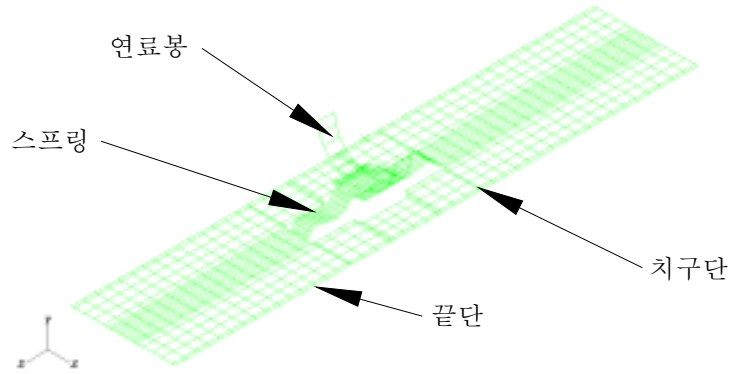


Fig. 8 외부격자판을 위한 지지격자 스프링의 유한요소 해석모델

3.3 응력해석 결과

앞서 기술하였듯이 지지격자를 구성하기 위한 외부격자판은 내부격자판과는 달리 스프링과 흐름유도 베인 만을 성형한다. 여기서 지지격자 스프링은 내부격자판의 스프링보다는 그 강성이 커야하며 본 해석에서는 Fig. 9와 같이 내부의 약 2배인 400 N/mm를 얻었다. 이 스프링은 연료봉에 의해 과도한 변위가 발생하여도 내부격자판에 사용된 스프링과 같이 그 지지력이 감소하는 것이 아니라 최대하중을 유지하는 특성을 가짐을 발견하였다. 또한 연료봉과의 접촉에 의한 마멸저항성을 제고하기 위한 등각의 면접촉 형상을 유지할 수 있도록 등각의 면접촉 형상을 갖는 단일 단순보 형상으로 하여 외부격자판 끼리 연결되는 모서리 부분에서도 이러한 스프링 형상을 구현하였다.

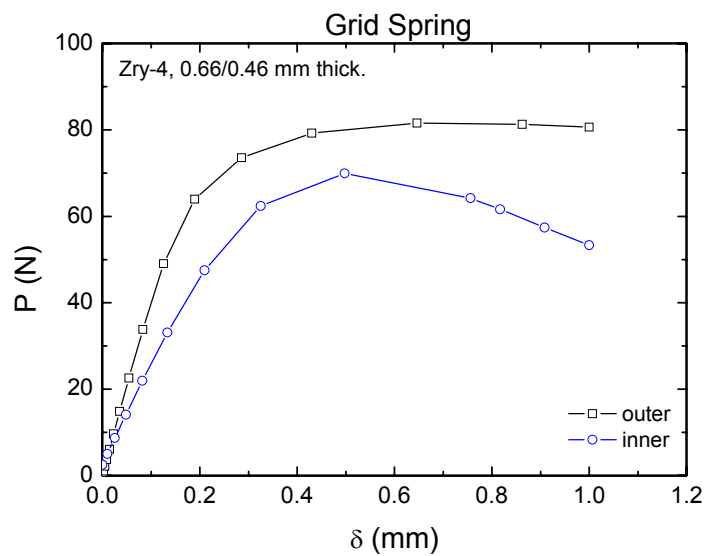


Fig. 9 유한요소법에 의한 내부 및 외부스프링의 특성해석 결과

4. 결과 및 고찰

전산 유체해석을 통해 부수로에서의 속도벡터를 구하였다. 주날개와 부날개 각 2쌍으로 구성된 부수로에서의 유동은 인접한 부수로로 많은 횡류를 발생시키며, 이러한 횡류강도를 저해하지 않도록 외부격자판에 형성되는 흐름유도 베인과 안내 탭을 엇갈리게 배치하여 횡류강도가 인접한 핵연료에서도 저해하지 않을 수 있었다. 그러나 지지격자 하류 $z=5D_h$ 이후 횡류의 방향이 반전되는 현상이 나타났으며, 이러한 횡류속도의 반전현상을 줄이고 선회유동을 증가시킬 수 있는 방안이 필요한 것으로 나타났다.

연료봉 지지측면에서 외부스프링의 강성을 내부스프링에 비해 약 2배 정도 크면서도 모서리 셀과 같이 셀의 폭이 좁은 영역에서도 면접촉을 가능하게 하는 스프링의 형상을 비선형 응력해석을 통해 도출할 수 있었다. 이러한 외부스프링의 형상은 내부스프링에 비해 큰 최대 지지력과 유동 차단면적이 작아 지지격자의 압력강하 측면에서는 유리하나 연료봉과의 접촉에 의한 마멸관점에서는 시험을 통해 그 성능을 검증할 필요가 있는 것으로 보인다.

5. 결론

전산 유체해석과 비선형 응력해석을 통해 격자체를 구성하기 위한 외부격자판을 설계하였다. 외부판의 상부에 형성된 흐름유도 베인과 안내탭의 배열을 전산 유체해석 결과를 적용하여 내부판에 형성된 복합 유동날개에 의해 발생된 횡류강도(cross flow intensity)를 저해하지 않도록 흐름유도 베인과 안내탭의 배열을 엇갈리게 하였다. 또한 지지격자 스프링의 비선형 응력해석을 통해 외부스프링의 설계요구조건에 부합하는 형상을 도출하여 외부판의 모서리 셀에서도 내부스프링과 동일한 면접촉 스프링 형상을 구현할 수 있었고, 스프링의 곡률과 굽힘 각도와 같은 지지거동에 영향을 미치는 설계변수들의 값을 전산해석을 통해 최적화하였다.

이러한 방법을 통해 성능이 제고된 지지격자를 도출하기 위해 개념설계를 실제 3차원 모델링을 통해 성능을 검증할 수 있음으로써 시험적 방법에 의존하는 것에 비해 그 실현성 및 경제성을 향상시킬 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업 중 “경수로용 신형핵연료개발” (대과제) “고성능지지격자 구조기술개발” (세부과제)에서 과제업무의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. AEA Technology, "CFX-4.3: Solver," Oxfordshire, UK, 2000.
2. ABAQUS/standard Users' Manual, Ver. 6.2, ABAQUS Inc., 2001.
3. In W. K., Oh D. S. and Chun T. H., "Flow analysis for optimal design of mixing vane in a PWR fuel assembly", J. of KNS, 33(3), pp. 327-33, 2001.
4. Launder B. E. and Spalding D. B., "The numerical computation of turbulent flows," Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3, 269, 1974.
5. ASTM E8M-99, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 1999.
6. I-DEAS Users' Manual, Ver. 8m3, Structural Dynamics Research Corporation, 2000.
7. S.P. Heo et al., "Predicting the Characteristic Curve of a Spacer Grid Spring by FE Analysis", 6th ICCST, Paper No.12, Czech, 2002.