

판형 홀다운스프링의 강성도해석 모델 개발

송기남

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

서정민, 이진석

한국원전연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

유한요소법을 이용하여 경수로형 핵연료집합체에서 냉각수 유동에 의한 수직 상승력으로 부터 핵연료를 지지하는 판형 HDS의 강성도를 수치해석적으로 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. I-DEAS code의 8 node brick element를 사용하고 판스프링들간의 간섭 부위에 접촉요소를 사용한 유한요소 모델링 및 해석기법으로 평가한 탄성강성도가 변형 에너지법에 근거하여 유도된 탄성강성도 평가식으로부터 얻은 결과와 잘 일치하고 있어서 제안된 유한요소 모델링 및 해석기법은 판형 HDS의 거동 분석에 유용하게 이용될 수 있다.

1. 서 론

경수로용 핵연료집합체 최상단에 부착되어 있는 홀다운스프링(HDS)은 핵연료가 노심 내에서 연소되는 수명기간 동안에 중성자 조사에의한 핵연료의 축방향 성장을 수용하고 핵연료집합체 구조물과 노심구조물간의 축방향 열팽창 차이등을 수용할 뿐 만 아니라 원자로 운전중에 노심내에서 핵연료에 작용하는 부력 및 냉각수 유동에의한 수직 상승력으로부터 핵연료집합체가 하부노심판으로부터 들어 올려지는 것을 방지하는 기능을 갖고 있다¹⁾. 만일 HDS의 스프링력이 충분하지 못하여 핵연료집합체가 하부노심판으로부터 들어 올려졌다 낙하할 경우 그 충격량으로 핵연료의 연료봉들이 낙하함으로써 연료봉을 손상시킬 가능성이 증대될 뿐 만 아니라 핵연료집합체 구조물의 구조적 건전성을 저해할 수 있다. 따라서 HDS는 핵연료 수명기간 동안 내내 충분한 스프링력을 갖추어서 핵연료 집합체의 수직 상승력을 억제할 수 있고 또한 핵연료집합체 구조물의 축방향 성장 및 축방향 열팽창을 수용하며 노심내에서 빈번하게 발생하는 하중하에서도 HDS에서 소성변

형이 적게 발생하도록 하기 위해서는 HDS가 좋은 탄성거동을 갖도록 설계되어야 한다.²⁾

웨스팅하우스(W)형 경수로에 장전되는 핵연료집합체의 최상단에는 판의 너비는 일정 하되 두께가 균일하게 감소하는 두께감소 판형 HDS(TT-HDS)와 판의 두께는 일정하되 너비가 균일하게 감소하는 너비감소 판형 HDS(TW-HDS)등이 널리 사용되고 있다.³⁾ 판형 HDS에서 스프링의 탄성강성도 특성은 스프링의 성능을 평가할 때에 우선적으로 고려해야 하는 일차적인 요소이다. 그러나 그동안 외국의 선진 핵연료 설계/제조사들은 판스프링의 형상이 복잡하기 때문에 판형 HDS의 특성을 해석적으로 평가하기 보다는 주로 스프링 특성 시험결과에 근거하여 생산된 경험식을 이용하거나 양산용 스프링에 대한 특성시험을 수행하여 얻은 결과를 최종설계에서 홀다운력을 평가하는데에 사용하고 있다.^{2,3)} 그런데 근래에 판형 HDS의 특성을 상업용 code를 이용하여 수치해석적으로 평가하려는 연구가^{2,4)} 수행되었으며 또한 이론적으로 탄성강성도를 평가하는 방법들이 제시됨에 따라^{3,5,6)} 판형 HDS의 각 설계변수들에서 탄성강성도 민감도 분석이 가능해졌다.

본 연구에서는 수치적으로 판형 HDS의 탄성강성도 및 거동을 평가할 수 있도록 접촉요소를 사용한 유한요소 모델링 및 해석기법을 제안하였고 판형 HDS의 특성시험 결과들과 잘 일치하고 있어서 그 유용성이 입증된 탄성강성도 평가식으로부터의 결과와 비교하여 제안된 유한요소 모델링 및 해석기법을 검증하였다.

2. 유한요소 해석

2.1 해석 모델

핵연료집합체에 사용되고 있는 판형 HDS는 판의 너비가 변하거나 두께가 변하는 긴보(Beam)형태의 판을 스프링 형상대로 굽히거나 기계가공한 판스프링들이 여러개 조합되어 있는 형상으로 각각의 판스프링들은 기저부위에서 보울트로 체결되어 있다. 이러한 형상의 판형 HDS를 유한요소법으로 모델링할 때 HDS의 기하학적인 형상을 모델링하는데에는 큰 어려움이 없으나 HDS의 탄성강성도와 같은 특성을 수치해석적으로 평가하기 위해서는 적절한 유한요소를 선택하고 아울러 판스프링들간의 간섭부위에 대한 모델링 기법등에 세심한 주의가 필요하다. 본 연구에서는 판스프링들의 간섭부위에 접촉요소를 사용하고 3차원 8 node brick element를 사용한 유한요소 모델링 및 해석기법을 제안하였다. 그림 1과 2는 I-DEAS code를 이용한 14x14형 TT-HDS 및 TW-HDS의 유한요소 모델을 나타낸 것이다.

2.2 하중 및 경계조건

유한요소해석에서 하중은 최상단 판스프링의 상단에 작용하도록 하였는데 판형 HDS

의 거동이 탄성영역내에 있도록 미리 결정된 선하중(line load)이 작용하도록 하였다. 또한 보울트로 체결된 판스프링들의 기저부위에서는 모든 변위가 구속되는 완전고정조건을 가정하였고 판스프링 기저부위와 판스프링 끝단의 반력작용점 부위에서 판스프링들간의 접촉부위는 면 대 면 접촉(surface to surface contact)조건을 사용하였다. KOFA형 TT-HDS의 유한요소해석에서는 Inconel-718의 재료물성치를 사용하였고 TW-HDS의 설계시편에 대한 유한요소해석에서는 Aluminum의 재료물성치를 사용하였다.

3.3 해석결과

국내 원자력 발전소에 사용되고 있는 14x14형 및 17x17형 KOFA TT-HDS와 KOFA형 TT-HDS의 설계공간내에 있도록 고안된 TW-HDS 설계시편의 유한요소모델(그림 1 및 그림 2 참조, 17x17형은 도시하지 않았음)에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 표 1~4는 참고문헌^{5,6)}에 표기된 TT-HDS 및 TW-HDS에서의 설계치수값 들을 나타낸 것이며 그림 3과 4는 그림 1과 2의 HDS 유한요소 해석모델의 하중작용후에 변형된 모습을 나타낸 것이다. 판형 HDS의 탄성강성도는 해석에 사용한 선하중과 유한요소해석에서 구한 변위결과를 이용하여 하중-변위 관계식($F=k \cdot \delta$)을 이용하여 탄성강성도(k)를 구한다. 표 5에서는 KOFA형 TT-HDS의 설계치수들을 사용하여 구한 유한요소해석 결과와 TW-HDS 설계시편의 치수를 사용하여 구한 유한요소해석 결과 그리고 탄성강성도 평가식으로 부터 평가한 탄성강성도를 나타낸 것이다.

3. 해석결과 고찰

표 5에서 보듯이 그림 1과 2의 유한요소모델에 대한 유한요소해석에서 얻은 탄성강성도는 KOFA형 TT-HDS의 경우 14x14형 및 17x17형에서 각각 186.77 N/mm, 140.45 N/mm로 TT-HDS의 탄성강성도 평가식⁵⁾으로 부터 평가한 값과 각각 4.65 %, 5.82 % 범위내로 잘 일치하고 있다. 또한 KOFA형 TW-HDS 설계시편의 경우 유한요소해석에서 얻은 탄성강성도는 14x14형 및 17x17형에서 각각 26.52 N/mm, 21.00 N/mm로 TW-HDS의 탄성강성도 평가식³⁾으로 부터 평가한 값과 각각 5.01%, 5.06% 범위내로 잘 일치하고 있다

4. 결론

여러개의 판스프링들이 조합되어 구성된 판형 HDS의 탄성강성도를 수치해석적으로 평가할 수 있도록 접촉요소를 사용한 유한요소 모델링 및 해석기법을 제안하여 KOFA형

TT-HDS 및 TW-HDS 등에 대하여 유한요소해석을 수행한 결과, 탄성강성도 평가식으로 부터 얻은 탄성강성도와 약 5%범위내로 잘 일치하고 있었다. 따라서 본 연구에서 제안한 유한요소 모델링 및 해석기법은 판형 HDS의 탄성강성도 평가는 물론 판형 HDS의 탄·소성 거동을 분석하는 모델에도 적절하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Song and Kunz, 1987, "Fuel Assembly Mechanical Design Manual,"Erlangen, KWU Work Report, U6 312/87/e326.
2. Yim J. S. et al., "A Characteristic Analysis on the Holddown Spring of the Fuel Assembly," *Journal of the Korean Nuclear Society*, Vol.27, No.5, pp.803~810. (1995)
3. Song K. N et al., "A Characteristic Analysis on the Elastic stiffness of the Tapered-width Leaf Type Holddown Spring Assembly Designed in KOFA's Design Space," *Journal of the Korean Nuclear Society*, Vol.28, No.6. pp. 583~593. (1996)
4. Kim H. K. et al., "A Study on the Characteristic Analysis of Superposed Leaf Springs with Geometric and Material Nonlinearities," *Journal of the KSME*, Vol. 14, No.1, pp.12~22. (1990)
5. Song K. N. et al., "An Elastic Stiffness Analysis on the TT-HDS ," *Proc. of the KNS Autumn Meeting(II)*, pp.487~493. (1996)
6. Song K. N. et al., "Elastic Stiffness Analysys of Leaf Type Holddown Spring Assemblies," *Journal of the Korean Nuclear Society* , Vol.27, No.5, pp.760~766. (1995)

Table 1. Dimensional data of the 14x14 type KOFA TT-HDS

unit : (mm or degree)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	α_0	R_0	L_0	w_0	t	a	b	c	R_1	R_2	α_2	R_4	w_1	w_2	l_0	d	e
Leaf #1	33.0	17.1	81.0	19.0	4.3	86.7	93.85	0.	12.0	7.15	33.	0.	2.15	0.	0.	0.	0.
Leaf #2	29.0	22.4	77.0	19.0	4.3	86.7	93.85	0.	12.0	0.	0.	0.	2.15	5.2	0.	2.	2.
Leaf #3	29.0	27.4	75.0	19.0	4.3	86.7	93.85	0.	12.0	0.	0.	0.	2.15	5.2	0.	2.	2.

Table 2. Dimensional data of the 17x17 type KOFA TT-HDS

unit : (mm or degree)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	α_0	R_0	L_0	w_0	t	a	b	c	R_1	R_2	α_2	R_4	w_1	w_2	l_0	d	e
Leaf #1	30.0	17.1	97.0	19.0	4.3	104.	111.15	0.	12.0	7.15	30.	0.	2.15	0.	0.	0.	0.
Leaf #2	28.33	21.9	92.0	19.0	4.3	104.	111.15	0.	12.0	0.	0.	0.	2.15	5.2	0.	2.	2.
Leaf #3	28.33	27.4	88.5	19.0	4.3	104.	111.15	0.	12.0	0.	0.	0.	2.15	5.2	0.	2.	2.
Leaf #4	28.33	32.4	86.5	19.0	4.3	104.	111.15	0.	12.0	0.	0.	0.	2.15	5.2	0.	2.	2.

Table 3. Dimensional data of the TW-HDS designed in the 14x14 type KOFA design space

unit : (mm or degree)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	α_0	R_0	L_0	w_0	t	a	b	c	R_1	R_2	α_2	R_4	w_1	w_2	l_0	d	e
Leaf #1	33.	16.5	85.0	20.0	3.0	9.21	7.75	16.96	0.	6.5	33.	5.0	10.	0.	40.	0.	0.
Leaf #2	28.5	21.5	79.0	20.0	3.0	9.46	7.40	16.86	0.	0.	0.	5.0	10.	5.2	37.	11.	15.
Leaf #3	28.5	25.5	77.0	20.0	3.0	9.29	7.40	16.69	0.	0.	0.	5.0	10.	5.2	36.	11.	15.

Table 4. Dimensional data of the TW-HDS designed in the 17x17 type KOFA design space

unit : (mm or degree)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	α_0	R_0	L_0	w_0	t	a	b	c	R_1	R_2	α_2	R_4	w_1	w_2	l_0	d	e
Leaf #1	30.	16.5	103.	20.	3.0	8.72	7.50	16.22	0.	6.5	30.	5.0	10.	0.	49.	0.	0.
Leaf #2	26.5	21.5	97.	20.	3.0	9.61	7.26	16.87	0.	0.	0.	5.0	10.	5.2	46.	11.	15.
Leaf #3	26.5	25.5	95.	20.	3.0	9.61	7.27	16.88	0.	0.	0.	5.0	10.	5.2	45.	11.	15.
Leaf #4	26.5	29.5	93.	20.	3.0	9.62	7.26	16.88	0.	0.	0.	5.0	10.	5.2	44.	11.	15.

Table 5 Comparison of the Elastic Stiffness of the TT-HDS and TW-HDS

		Elastic Stiffness (N/mm)		
		Analytic (A)	FEM (B)	Percentage Ratio $(1 - \frac{B}{A}) \cdot 100$ %
TT-HDS	14x14 Type	195.884	186.77	4.65
	17x17 Type	149.127	140.45	5.82
TW-HDS	14x14 Type	27.921	26.52	5.01
	17x17 Type	22.121	21.00	5.06

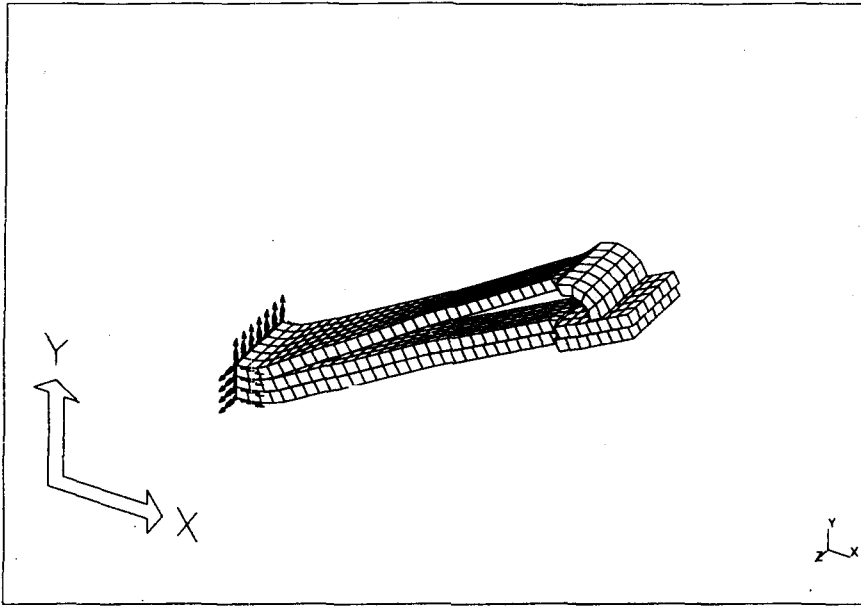


Fig. 1 Finite Element Model of 14x14 type TW-HDS

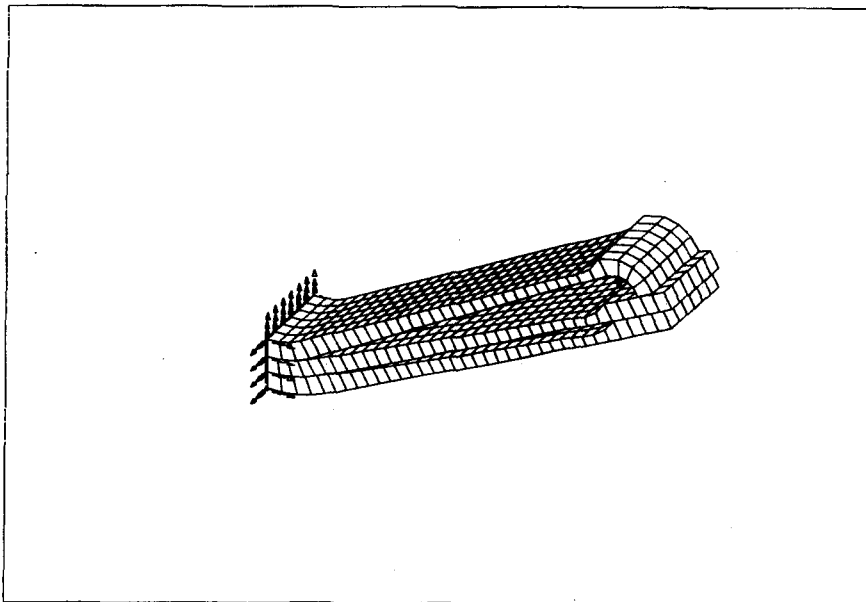


Fig. 2 Finite Element Model of 14x14 type TT-HDS

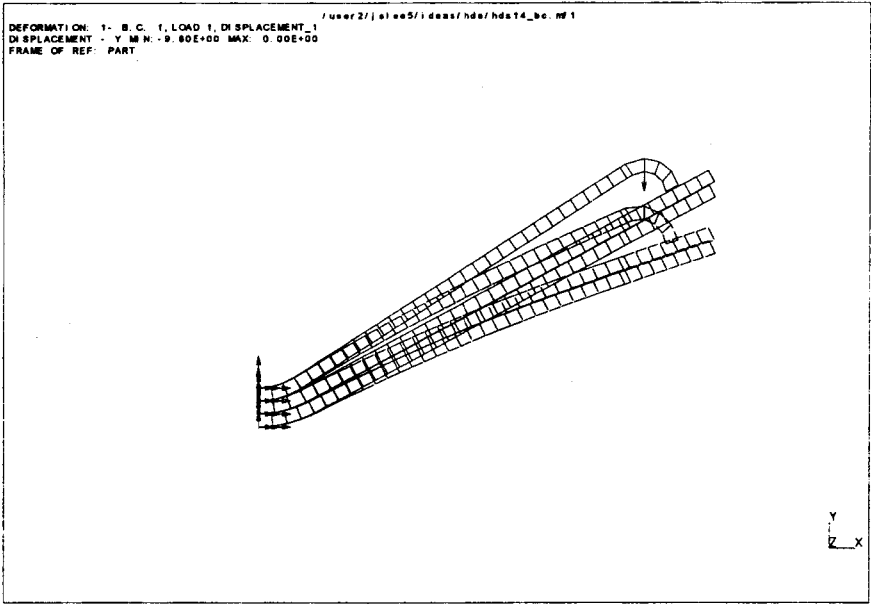


Fig. 3 Deformed Shape of 14x14 type TW-HDS Model

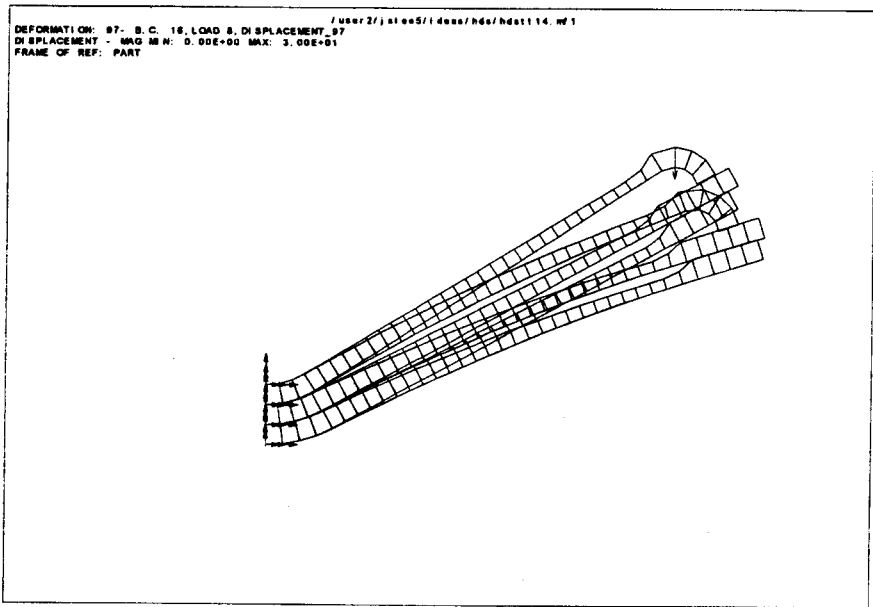


Fig. 4 Deformed Shape of 14x14 type TT-HDS Model