

두께감소 판형 홀다운스프링 집합체의 탄성강성도 해석

송기남, 이진석, 서정민, 서금석

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

장홍순

한국원전연료주식회사

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

판(leaf)의 너비가 일정하고 두께가 균일하게 감소하는 두께감소 홀다운스프링 집합체(Tapered-Thickness Holddown spring Assembly ; TT-HDS)에서 단순 보 이론과 Castigliano의 정리를 이용하여 TT-HDS의 탄성강성도를 해석적으로 구할 수 있도록 종래에 유도되었던 탄성강성도 평가식을 수정하고 확장하였으며 TT-HDS의 기하학적 설계자료를 이용하여 탄성강성도를 평가하였다. 아울러 ANSYS code의 접촉요소를 이용하여 TT-HDS를 유한요소 모델링하여 탄성강성도를 수치적으로 평가하였다. 평가 결과 전단력 및 축력이 TT-HDS의 탄성강성도에 미치는 영향은 약 0.09~0.16% 정도로서 TT-HDS의 탄성강성도는 주로 굽힘모멘트에 의해 지배되고 있음이 확인되었다. 또한 접촉요소로 유한요소 모델링하여 평가한 결과는 확장된 평가식으로 평가한 탄성강성도와 매우 잘 일치하고 있음을 발견하였다.

I. 서론

경수로용 핵연료 집합체의 최상단에 부착되어 있는 HDS는 핵연료가 노심내에서 연소되는 수명기간 동안에 냉각수 유동에 의해 핵연료 집합체에 가해지는 수직항력으로 부터 핵연료를 지지하고 원자로 구조물과 핵연료 구조물간의 열팽창 차이 그리고 중성자 조사에 의한 핵연료 집합체의 축방향 성장등을 수용하는 기능을 갖고 있다. 이러한 HDS의 기능을 핵연료 수명기간 동안 내내 유지하기 위해서 HDS는 충분한 강성도와 복원력을 갖추도록 설계되어야 한다.¹⁾ 특히 노심내에서 빈번하게 발생하는 반복적인 하중하에서도 HDS에 소성변형이 적게 발생하도록 하기 위해서는 HDS이 좋은 탄성거동을 갖도록 설계되어야 한다.²⁾

국내에서 가동 중인 W형 발전소에 공급되고 있는 핵연료에는 TT-HDS이 장착되고 있다. TT-HDS는 얇고 길게 기계가공하고 설계 형상대로 굽혀서 만든 판스프링들을 홀다운력 설계 요구조건에 따라 보통 2~4개 조립하여 1set이 되도록 한 것으로서 한 개의 핵연료 집합체에는 4set의 HDS들이 장착되어 있다. 판형 HDS는 coil형 HDS보다 스프링 설치공간이 적게 필요하고 작은 변위에서도 큰 스프링력을 갖는 장점이 있는 반면에 판스프링들을 설계 형상대로 기계가공하는 것이 비교적 난이하며 스프링의 특성을 설계변수들로써 예측하는 것이 어려운 것으로 알려져 있다.²⁾

TT-HDS의 특성인 탄성강성도를 설계변수들로 정확하게 예측하는 것이 어렵기 때문에 미국의 웨스팅하우스(W)사 및 독일의 Siemens/KWU사 등의 핵연료 제조/설계회사들은 나름대로의 평가방법을 고안하여서 홀다운력의 초기 평가시와 스프링의 특성을 평가할 때에 사용되어 왔으나 양산용 TT-HDS의 특성시험 결과와는 상당한 오차가 있는 것으로 알려져 있다.³⁾ 따라서 이들 회사는 모두 양산용 TT-HDS 제품들에 대한

특성시험 결과를 설계 단계에서 홀다운력 평가에 이용하고 있다. 한편 1986년 이래 국내의 W형 발전소에 공급되는 핵연료를 국내에서 설계하고 제조한 이래 국산 TT-HDS의 특성을 신뢰할 만하게 평가하려는 노력이 경주되어 왔는데 그동안의 연구 성과를 살펴보면 다음과 같다. ADINA code를 이용한 유한요소해석을 통하여 TT-HDS의 특성해석을⁴⁾ 비롯하여 단순 보 이론과 굽힘모우멘트에 의한 스트레인 에너지에 근거하여 TT-HDS의 탄성강성도를 예측할 수 있는 방법을 개발하고 이 방법으로 얻은 탄성강성도가 특성시험에서 얻은 값들과 잘 일치하고 있음을 보였으며^{5,6)} 근래에는 ANSYS code의 접촉요소를 사용한 대변형 해석을 통해서 HDS의 특성해석과 최적설계를 수행하였다.²⁾

본 연구에서는 TT-HDS에 대하여 단순 보의 굽힘모우멘트, 전단력 및 축력 등에 의한 모든 스트레인 에너지를 고려할 수 있도록 종래에 유도되었던 TT-HDS의 탄성강성도식을^{5,6)} 수정하고 확장하였으며 아울러 확장된 식과 여러 TT-HDS의 설계치수들을 이용하여 탄성강성도들을 평가하고 분석하였다. 또한 ANSYS code의 접촉요소를 사용하여 TT-HDS를 유한요소 모델링하고, 유한요소해석을 수행하여 평가한 탄성강성도 와도 비교/검토하였다.

II. 탄성강성도 평가식의 확장

II.1 각 판스프링에서 굽힘모우멘트, 전단력, 축력

그림 1은 TT-HDS의 형상을 나타낸 것이며 그림 2는 설계변수들을 나타낸 것이다. 판스프링에서 굽힘모우멘트, 전단력, 축력에 의한 스트레인 에너지를 구하기 위해 해석 편의상 각 판스프링을 4~5개의 영역으로 나누었다. 각 영역에서 굽힘모우멘트, 전단력, 축력 그리고 2차 판성 모우멘트는 그림 2,3,4의 자유도에서 평형조건을 이용하여 구할수 있다.

II.2 각 판스프링에서 전체 스트레인 에너지

TT-HDS에서 각 판스프링들 간에 작용하는 마찰력을 무시하였을 때 반력 작용점에 수직력만이 존재한다고 가정할 수 있으며 이 경우 각 판스프링에서 전체 스트레인 에너지는 그림 2에 표시된 각 영역에서의 굽힘모우멘트, 전단력, 그리고 축력에 의한 스트레인 에너지들을 합산하여 다음과 같이 표시된다.⁷⁾

$$U_n = \sum_{i=1}^V \left\{ \int \frac{M_i^2}{2E_i I_i} ds + \int \frac{P_i^2}{2A_i E_i} ds + \int \frac{\tau^2}{2G_i} dV \right\} \quad \text{----- (1)}$$

where,

U_n : n번째 판스프링에서 전체 스트레인 에너지

M_i : 각 영역에서 굽힘모우멘트

E_i : 재료의 탄성계수

A_i : 단면적

P_i : 단면에서 축력

G_i : 횡탄성계수(shear modulus)

I_i : 2차 판성 모우멘트

τ : 전단응력(shear stress)

여기서 직사각형 단면을 갖는 보에서 전단력에 의한 전단응력의 분포는 평면응력인 경우에 평행방정식을 풀면 다음과 같이 표시된다.⁸⁾

$$\tau = \frac{V_i}{2I_i} \left[\left(\frac{t_x}{2} \right)^2 - y_i^2 \right] \quad \text{----- (2)}$$

where,

t_x : 단면의 두께

y_i : 중립축(natural axis)에서 거리

II.3 하중에 의한 변위

하중(F) 작용점과 반력(F_R) 작용점에서의 변위는 Castigliano의 정리를⁹⁾ 이용하면 다음과 같이 표시된다.

II.3.1 최상단 판스프링

$$\delta_{1F} = \frac{\partial U}{\partial F} = AA_1 F - AB_1 F_R \quad \text{----- (3)}$$

$$\delta_{1F_R} = \frac{\partial U}{\partial F_R} = -AB_1 F + BB_1 F_R \quad \text{----- (4)}$$

II.3.2 하단 판스프링

$$\delta_{2F_R} = \frac{\partial U_2}{\partial F_R} = BB_2 (F_R - F_{R2}) \quad , \text{ for the 2nd leaf} \quad \text{----- (5-a)}$$

$$\delta_{3F_{R2}} = \frac{\partial U_3}{\partial F_{R2}} = BB_3 (F_{R2} - F_{R3}) \quad , \text{ for the 3rd leaf} \quad \text{----- (5-b)}$$

$$\delta_{4F_{R3}} = \frac{\partial U_4}{\partial F_{R3}} = BB_4 F_{R3} \quad , \text{ for the 4th leaf} \quad \text{----- (5-c)}$$

AA₁, AB₁, BB₁, BB₂, BB₃ 및 BB₄는 그림 2, 3에 있는 설계변수들의 함수로 표현되며 F_R, F_{R2}, 및 F_{R3}은 각 판스프링의 반력 작용점에서 반력을 나타낸다.

II.4 각 판스프링에서 수직변위에 대한 구속조건

TT-HDS가 외력(F)을 받아 변형될 때 반력 작용점에서 각 판스프링들이 수직 변위는 다음과 같이 구속된다.

$$\delta_{1F_R} = -\delta_{2F_R} \quad , \text{ for the top and 2nd leaf} \quad \text{----- (6-a)}$$

$$\delta_{2F_R} = \delta_{3F_{R2}} \quad , \text{ for the 2nd and 3rd leaf} \quad \text{----- (6-b)}$$

$$\delta_{3F_{R2}} = \delta_{4F_{R3}} \quad , \text{ for the 3rd and 4th leaf} \quad \text{----- (6-c)}$$

II.5 TT-HDS의 탄성강성도식

TT-HDS에서 탄성강성도(K_{ass})는 식(5-a),(5-b),(5-c)의 변위식과 식(6-a),(6-b),(6-c)의 변위 구속조건을 이용하여 정리하면 다음과 같이 표시된다.

$$K_{ass} = \frac{1}{\delta_{1F}} = \frac{1}{AA_1 - \frac{AB_1^2}{BB_1 + \sum_{i=2}^4 \frac{1}{BB_i}}} \quad \text{----- (7)}$$

III. W사의 평가방법

W사는 TT-HDS 특성시험 결과를 토대로 하여 TT-HDS를 구성하는 각 판스프링의 탄성강성도를 평가할 수 있는 다음과 같은 경험식을 개발하였다.

최상단 판스프링

$$K = \frac{Ebh^3}{6.5424[L + (7.684h - 0.491)h]^3}$$

하단 판스프링

$$K = \frac{Ebh^3}{6.5424[L(0.105R + 0.910)]^3}$$

IV. 계산결과 및 토의

TT-HDS의 탄성강성도를 해석적으로 구하기 위해 단순 보 이론과 굽힘모멘트, 전단력 및 축력에 의한 모든 스트레인 에너지를 고려하고 그리고 Castigliano의 정리등을 이용하여 종래의 TT-HDS 탄성강성도 평가식⁵⁶⁾을 수정하고 확장하였다. 확장된 탄성강성도식을 살펴보면 굽힘모멘트만을 고려하였던 종래의 식과는 식의 계수인 AA_1 , AB_1 , BB_1 및 BB_2 의 표현식만 다를 뿐 식의 구조나 형태가 동일한데 이는 적용된 이론과 방법이 동일하기 때문이다. 식(7)의 각 계수들은 설계치수들의 복잡한 함수 형태로 표현되어 있기 때문에 본 연구에서는 FORTRAN5로 작성된 프로그램을 이용하여 각 계수들 및 탄성강성도를 계산하였다.

표 1은 국산 KOFA형 TT-HDS 및 W형 TT-HDS에서 굽힘모멘트, 전단력, 축력등이 탄성강성도에 미치는 영향을 비교/분석한 것이다. 표 1에서 보듯이 전단력 및 축력이 TT-HDS의 탄성강성도에 미치는 영향은 전체 탄성강성도의 0.16% 미만으로 매우 작으며 TT-HDS의 탄성강성도는 주로 굽힘모멘트에 기인함을 알 수 있다.

표 2는 본 연구에서 확장한 탄성강성도식과 W사의 경험식으로 평가한 탄성강성도를 비교/분석한 것이다. 굽힘모멘트만을 고려한 참고문헌⁵⁶⁾에서의 탄성강성도식으로 부터 평가한 탄성강성도가 KOFA형 TT-HDS 특성시험결과와 매우 잘 일치하기 때문에 표 2에서는 확장한 탄성강성도식으로 평가한 탄성강성도를 기준으로 비교/분석하였다. 표 2에서 볼 때 확장한 탄성강성도식으로 평가한 탄성강성도는 TT-HDS의 제조업체와 무관하게 적용할 수 있는 일반적인 식인 반면 W사의 경험식은 자사 이외에서 제조한 TT-HDS에 대하여는 적용하기가 곤란함을 알 수 있다.

그림 5는 14x14형 KOFA TT-HDS에 대하여 ANSYS code¹⁰⁾의 접촉요소를 사용하여 유한요소 모델링한 것을 나타내고 있는데 이 유한요소모델에 대하여 해석한 결과와 확장한 탄성강성도식으로 평가한 결과와 잘 일치하고 있어서 그림 5와 같은 모델 및 해석 기법이 TT-HDS의 탄성강성도 해석에 이용될 수 있다.

V. 결론

단순 보 이론과 굽힘모멘트, 전단력 및 축력등에 의한 모든 스트레인 에너지를 이용하여 TT-HDS의 탄성강성도를 평가할 수 있도록 종래의 방법을 확장하여 식을 유도하였고 여러 TT-HDS에 대하여 탄성강성도를 평가한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 확장된 탄성강성도식은 종래의 식과 계수들의 표현 형태만 다를 뿐 식의 구조나 형태가 동일하다.
2. 전단력 및 축력이 TT-HDS의 탄성강성도에 미치는 영향은 약 0.16%미만으로 무시할 수 있으며 탄성강성도의 대부분은 굽힘모멘트에 기인한다.
3. 확장된 탄성강성도 평가식은 TT-HDS 제조업체와 무관하게 적용될 수 있는 일반적인 식이다
4. ANSYS code의 접촉요소를 사용한 TT-HDS의 유한요소 모델링 및 해석 기법은 TT-HDS의 탄성강성도 평가에 이용될 수 있다

참 고 문 헌

1. Song and Kunz, 1987, "Fuel Assembly Mechanical Design Manual," Erlangen, KWU Work Report, U6 312/87/e326.
2. 임정식의 1인, 1995, "핵연료집합체 Holddown spring 특성해석," 원자력학회지, Vol.27, No.5, pp803-810.
3. Song K.N., April, 1996, "Analysis of Elastic Stiffness for the Leaf Type Holddown Spring Assembly with Uniformly Tapered-thickness Considering the Point of Taper Runout," KAERI/TR-650/96.
4. 김형구의 3인, 1990, "기하학적, 재료적 비선형성을 갖는 중첩된 판 스프링의 특성해석에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제14권, 제1호, pp. 12-22.

5. Song K.N. et al., 1991, "Leaf형 holddown spring 집합체의 강도해석," KAERI/TR-209/91.
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.
7. S. H. Crandall etc., 1972, "An Introduction to the Mechanics of Solids," 2nd ed. McGraw-Hill, Tokyo, pp. 545-550.
8. *ibid*, pp. 432-443.
9. *ibid*, pp. 108-119.
10. ANSYS User's Manual for Revision 5.0, Swanson Analysis Systems, Inc.,1992.

Table 1. Effects of Bending Moment, Shear and Axial Force on the Elastic Stiffness of TT-HDS

		In the case of only considering the bending moment, (N/mm) (A)	In the case of considering the bending moment, shear and axial force, (N/mm) (B)	(A-B)/B x100 (%)
KOFA	14x14 (3 leave)	199.024	198.727	0.149
	17x17 (4 leave)	150.945	150.792	0.101
KWU	17x17 (4 leave)	151.813	151.657	0.103
W	14x14 (2 leave)	138.387	138.169	0.158
	16x16 (2 leave)	104.901	104.766	0.129
	16x16 (3 leave)	158.414	158.203	0.133
	17x17 (3 leave)	100.697	100.598	0.098

Table 2. Comparisons of the Elastic Stiffness from W Formulas and Present Study

		W Formulas (N/mm) (A)	Present Study (N/mm) (B)	(A-B)/B x100 (%)
KOFA	14x14 (3 leave)	298.696	198.727	50.305
	17x17 (4 leave)	246.171	150.792	63.252
KWU	17x17 (4 leave)	243.483	151.657	63.548
W	14x14 (2 leave)	139.790	138.169	1.173
	16x16 (2 leave)	105.140	104.766	0.357
	16x16 (3 leave)	164.566	158.203	4.022
	17x17 (3 leave)	102.887	100.598	2.276

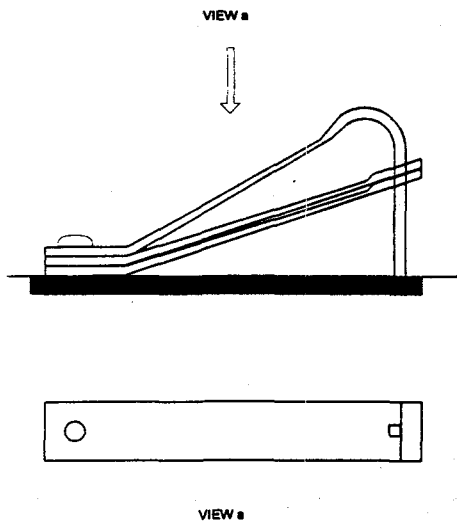


Fig. 1 Leaf type holddown spring assembly with tapered thickness (TT-HDS)

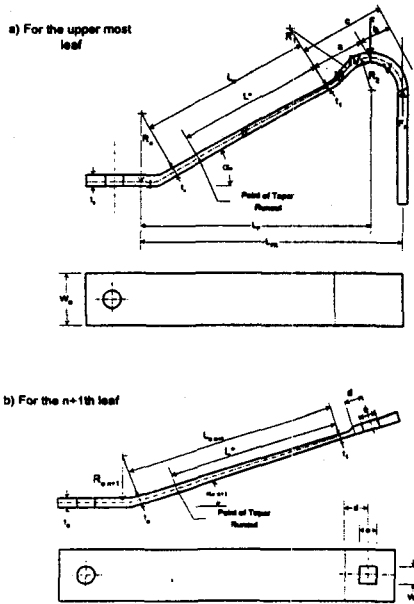


Fig. 2 Design variables for each leaf of TT-HDS

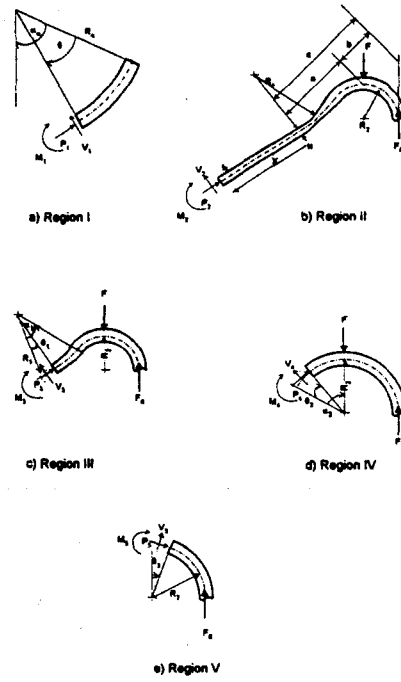


Fig. 3 Free body diagram in each region for upper most leaf of TT-HDS

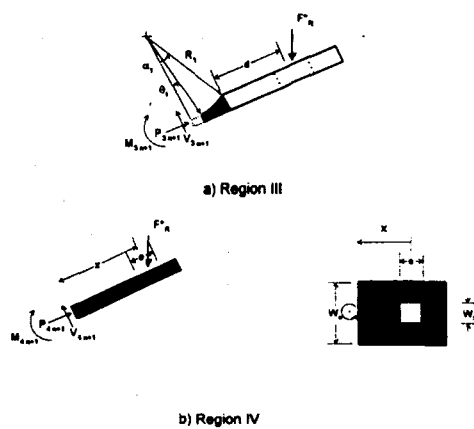


Fig. 4 Free body diagram in region III & IV for n+1th leaf of TT-HDS

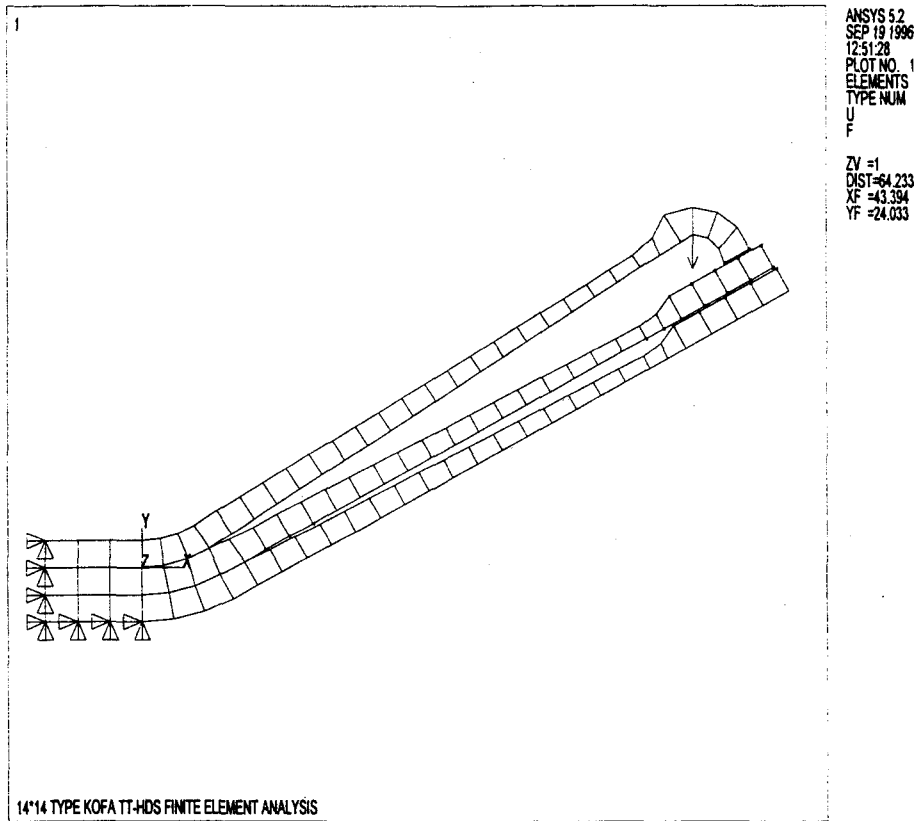


FIG.5 Finite element model of 14×14 type KOFA TT-HDS