2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART 제어봉구동장치의 동특성해석을 위한 반복단면을 갖는 불연속 보의 등가휨강성

Equivalent Bending Stiffness of Discontinuous Beam with Periodic Cross Sections for Dynamic Analysis of SMART CEDM

김동옥, 김종인, 김지호, 허형, 박진석

한국원자력연구소 동력로기술개발팀
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

본 연구에서는 반복단면 불연속 보의 등가휨강성을 유도하고 유한요소법을 이용한 동특성 해석을 통해 유용성을 검증하였다. 유한요소법을 이용해 가늘고 긴 구조물의 동특성을 해석하는 경우 일반적으로 보요소로 이루어진 유한요소 모델을 사용한다. 그러나 구조물에 불연속점이 매우 많은 경우 모델을 구성하는 절점과 자유도의 수가 증가하므로 해석의 효율이 떨어지게 된다. 특히 일체형원자로 SMART 의 제어봉구동장치를 구성하는 부품 중 하나인 선형펄스모터 가동자는 보의 형상을 하고 있지만 반복되는 단면형상으로 인해 매우 많은 불연속점을 갖고 있어 간단한 모델을 구성하기 곤란하다. 본 연구에서는 매우 많은 불연속점을 갖는 반복단면 보의 등가휨강성 계산을 위한 일반적이고 매우 간편한 수식을 유도하였다. 또한 SMART 제어봉구동장치 가동자와 유사한 구조물의 유한요소 해석을 통해 등가휨강성의 유용성을 검증하였다. 등가휨강성을 이용하면 매우 단순한 형태의 유한요소 모델을 구성할 수 있으며 또한 해석적인 방법으로 반복단면을 갖는 불연속 보의 고유진동수 및 진동모드형을 구할 수 있다.

Abstract

Equivalent bending stiffness of discontinuous beam with periodic cross sections is derived and its usability is verified by finite element analysis for natural frequency. It is general to use FE analysis with beam model for dynamic analysis of slender structures. The analysis efficiency is very low, however, if the beam structure has many discontinuous cross sections. The degree of freedom of FE model of the structure with many discontinuous points is very large. The mover of linear pulse motor type CEDM of SMART is a beam structure with many periodically repeated cross sections and its FE model is very complex due to the discontinuity between sections. The equivalent bending stiffness of this paper makes it possible to build simple FE model of the beam structure with many periodically repeated cross sections. The equation driven for the equivalent bending stiffness is very simple and useful as the results of example study show.

1. 서 론

본 연구소에서 개발중인 일체형원자로 SMART 에는 49 개의 제어봉구동장치가 장착된다. 현재 개발중인 제어봉구동장치는 선형펄스모터를 사용하므로 매우 가늘고 긴 형상을 하고 있다. 제어봉구동장치는 그 형상의 특징으로 인해 횡 방향 동하중에 대해 구조적으로 매우 취약하므로 초기 설계단계에서부터 발생 가능한 문제점을 예측하고 문제해결을 위한 최적의 설계조건을 도출하여야 한다. 특히 지진하중 하에서도 높은 안전성을 확보하도록 규정하고 있는 규제요건을 만족하기 위해서도 횡 방향 동하중에 대한 정확한 응답특성을 구하는 것은 매우 중요하다. 또한 제어봉구동장치를 비롯한 다양한 기기 들을 작은 공간에 배치하고 구성해야 하는 일체형원자로의 특징상 제어봉구동장치와 기타 기기 들간의 상호작용 역시 설계에서 고려해야 할 중요한 사항이다.

유한요소법은 구조물의 동특성을 구하기 위해 현재 널리 사용되는 방법으로 해석모델의 조밀성에 따라 해석의 정확도가 보장되는 매우 신뢰도 높은 해석방법이다. 그러나 지나치게 조밀한 해석모델을 사용할 경우 해석에 소요되는 비용이라 할 수 있는 해석시간과 컴퓨터의 메모리 용량이 심각히 증가하는 단점을 갖고 있다. 그러므로 결과의 질과 해석비용이라는 두 가지 측면을 모두 고려하여 해석모델을 구성해야 한다. 즉 가능한 한 단순하면서도 높은 정확도로 결과를 얻을 수 있는 유한요소모델을 구성해야 한다는 것이다.

선형펄스모터형 제어봉구동장치는 가늘고 긴 파이프 형태의 여러 부품들이 동심원형태로 배치 조립되며 부품들 사이의 공간은 원자로의 일차냉각수인 물로 채워진다[1,2]. 그러므로 여러 개의 보요소와 부가질량을 조합하여 제어봉구동장치의 유한요소모델을 구성할 수 있다. 그러나 제어봉구동장치를 구성하는 부품 중 선형펄스모터의 가동자는 균일하지 못한 단면을 갖고 있으므로 보요소로 모델링하는 과정이 단순하지 않다. 본 논문의 목적은 불연속단면을 갖는 가동자를 균일단면을 갖는 등가의 보요소로 모델링하는 과정에 사용할 가동자의 등가휨강성을 유도하고 그 유용성을 검증하는 것이다[3].

2. 등가휨강성 유도

2.1 선형펄스모터 가동자

SMART 제어봉구동장치에서 채택하고 있는 선형펄스모터의 가동자의 형상은 그림 1 과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 가동자는 두 가지 단면형상이 반복되는 불연속단면을 가지므로 탄성계수와 면적모멘트의 곱으로 표현되는 균일단면 보의 휨강성인 EI 를 직접사용할 수 없다. 그림 2 는 가동자의 두가지 단면을 나타낸 것이다. 선형펄스모터의 가동자는 불연속단면을 갖고 있지만 총 길이가 매우 길고 두가지 단면의 반복이라는 규칙성을 갖고 있으므로 균일 단면을 갖는 등가의 보로 가정할 수 있다. 등가의 보로 가정하는 경우 가장 먼저 구해야 할 것이 등가휨강성 EI_{eq} 이다. 여기서 I_{eq} 는 단면 A 와 B 의 면적모멘트 I_A 와 I_B 의 함수로 표현될 것이다. 그림 2 에 보인 단면의 경우 I_A 와 I_B 는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$I_A = \frac{p}{4}(R_o^4 - R_i^4) \qquad (1)$$

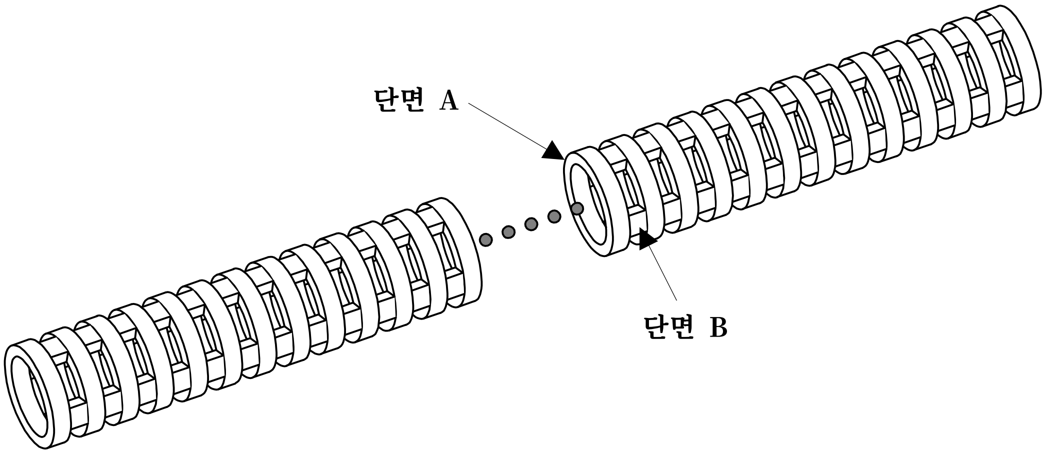

그림 1. 선형펄스모터 가동자

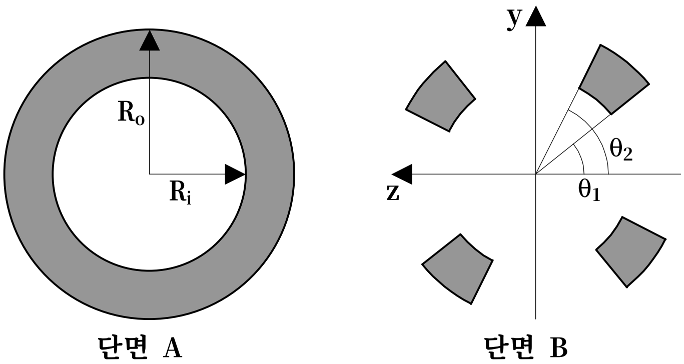

그림 2. 선형펄스모터 가동자 단면형상

$$I_B = \frac{1}{2}(R_o^4 - R_i^4)(q_2 - q_1) \tag{2}$$

각 단면의 면적은 다음과 같다.

$$A_A = p\,(R_o^2 - R_i^2) \tag{3}$$

$$A_B = 2(R_o^2 - R_i^2)(q_2 - q_1) \tag{4}$$

다음절에서는 반복되는 단면형상을 갖는 보의 등가휨강성을 유도하였다.

2.2 불연속단면 외팔보의 처짐각과 처짐량

단면형상이 불연속인 보의 등가휨강성을 구하기 위해 그림 3 과 같은 불연속단면을 갖는 외팔보의 자유단에 모멘트 M 이 가해진 경우 고정단으로부터의 거리 x 에서의 처짐각과 변위에 대한 해석해를 먼저 구한다. 그림 3 은 q 개의 단면형상을 갖는 외팔보를 그린 것으로 총 길이는 L 이고 각 단면에 해당하는

길이는 L_p, 각 단면의 면적모멘트는 I_p이다. 그림에서 x 는 각 단면에서 정의되는 국소좌표계이다. 각 단면에서 재료의 탄성계수 E 는 동일하다고 가정하였다.

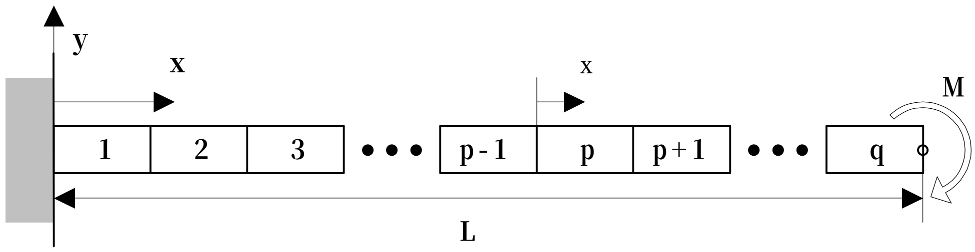

그림 3. 불균일단면 외팔보

자유단에 모멘트 M 이 가해지는 경우 임의의 위치 x 에서의 외팔보의 처짐각 $q(x)$와 처짐량 $y(x)$은 다음과 같이 구할 수 있다[4].

$$q(x) = \int_0^x \frac{M}{EI(x)} dx \tag{5}$$

$$y(x) = \int_0^x q(x) dx \tag{6}$$

단면이 불연속인 점을 고려해서 식(5)를 전개하여 $q(x)$를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} q(x) &= \frac{M}{E}\left(\int_0^{L_1} \frac{1}{I_1} dx + \int_{L_1}^{L_1+L_2} \frac{1}{I_2} dx + \mathrm{K} + \int_{L_1+\mathrm{K}+L_{p-1}}^{x} \frac{1}{I_p} dx \right) \\ &= \frac{M}{E}\left[\sum_{i=1}^{p-1} \frac{L_i}{I_i} + \frac{1}{I_p}\left(x - \sum_{i=1}^{p-1} L_i \right) \right] \end{aligned} \tag{7}$$

국소좌표계를 사용해서 위식을 다시 쓰면 p 번째 단면에서 좌표 x 에서의 처짐각은 식(8)로 표현할 수 있다.

$$q(p,x) = \frac{M}{E}\left(\sum_{i=1}^{p-1} \frac{L_i}{I_i} + \frac{x}{I_p} \right) \tag{8}$$

여기서 정수 p 는 번째 단면을 뜻하는 것이며 좌표계간에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$x = x - \sum_{i=1}^{p-1} L_i \tag{9}$$

식(7)을 식(6)에 대입하면 위치 x 에서의 처짐량 $y(x)$는 다음과 같이 표현된다.

$$y(x) = \frac{M}{E} \int_0^x \left[\sum_{i=1}^{p-1} \frac{L_i}{I_i} + \frac{1}{I_p}\left(x - \sum_{i=1}^{p-1} L_i \right) \right] dx \tag{10}$$

국부좌표계를 적용하여 위식을 전개하고 p 번째 단면에서 정의된 좌표 x 에서의 처짐량을 구한다.

$$\begin{aligned} y(p,x) &= \frac{M}{E}\left[\sum_{k=1}^{p-1}\int_0^{L_k}\left(\sum_{i=1}^{k-1}\frac{L_i}{I_i}+\frac{x}{I_k}\right)dx+\int_0^{x}\left(\sum_{i=1}^{p-1}\frac{L_i}{I_i}+\frac{x}{I_p}\right)dx\right] \\ &= \frac{M}{E}\left[\sum_{k=1}^{p-1}\left(\sum_{i=1}^{k-1}\frac{L_iL_k}{I_i}+\frac{L_k^2}{2I_k}\right)+\sum_{i=1}^{p-1}\frac{L_i}{I_i}x+\frac{1}{2I_p}x^2\right] \end{aligned} \tag{11}$$

외팔보 끝단에서의 처짐각과 처짐량을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} q_q = q(q,L_q) &= \frac{M}{E}\left(\sum_{i=1}^{q-1}\frac{L_i}{I_i}+\frac{L_q}{I_q}\right) \\ &= \frac{M}{E}\sum_{i=1}^{q}\frac{L_i}{I_i} \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} y_q = y(q,L_q) &= \frac{M}{E}\left[\sum_{k=1}^{q-1}\left(\sum_{i=1}^{k-1}\frac{L_iL_k}{I_i}+\frac{L_k^2}{2I_k}\right)+\sum_{i=1}^{q-1}\frac{L_iL_q}{I_i}+\frac{L_q^2}{2I_q}\right] \\ &= \frac{M}{E}\sum_{k=1}^{q}\left(\sum_{i=1}^{k-1}\frac{L_iL_k}{I_i}+\frac{L_k^2}{2I_k}\right) \end{aligned} \tag{13}$$

2.3 불연속 반복단면 외팔보의 처짐각과 처짐량

선형펄스모터의 가동자는 두가지 단면이 반복되는 형상을 하고있다. 앞에서 구한 불연속단면 외팔보의 처짐각과 처짐량을 구하는 식에 다음과 같은 조건을 부가하여 불연속 반복단면 외팔보의 처짐각과 처짐량을 끝단에서 구한다.

$$L_{2n-1} = L_A,\ L_{2n} = L_B \qquad n = 1, 2, 3,\Lambda \tag{14}$$

$$I_{2n-1} = I_A,\ I_{2n} = I_B \qquad n = 1, 2, 3,\Lambda \tag{15}$$

두가지 단면이 반복되는 경우 끝단에서의 처짐각과 처짐량을 나타내는 식은 총 단면의 수가 짝수인지 홀수인지에 따라 다른 형태를 갖는다. 먼저 단면의 총수가 짝수인 경우를 고려한다. 아래에서 m 은 양의 정수이다.

경우 1 : $q = 2m$

$$q_q = \frac{M}{E}\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{L_A}{I_A}+\frac{L_B}{I_B}\right) = \frac{M}{E}m\left(\frac{L_A}{I_A}+\frac{L_B}{I_B}\right) \tag{16}$$

$$
\begin{aligned}
y_q &= \frac{M}{E}\left[\sum_{k=1}^{2m}\left(\sum_{i=1}^{k-1}\frac{L_i}{I_i}\right)L_k + \frac{m}{2}\left(\frac{L_A^2}{I_A}+\frac{L_B^2}{I_B}\right)\right] \\
&= \frac{M}{E}\left[\frac{m^2(L_A+L_B)}{2}\left(\frac{L_A}{I_A}+\frac{L_B}{I_B}\right)+\frac{m}{2}L_A L_B\left(\frac{1}{I_A}-\frac{1}{I_B}\right)\right]
\end{aligned}
\tag{17}
$$

모든 단면의 길이가 동일하다(식(18))고 하면 위 식은 식(19), 식(20)과 같이 정리된다.

$$
L_A = L_B = \frac{L}{q} = \frac{L}{2m} \tag{18}
$$

$$
q_q = \frac{ML}{E}\frac{I_A+I_B}{2I_A I_B} \tag{19}
$$

$$
y_q = \frac{ML^2}{2E}\left(\frac{I_A+I_B}{2I_A I_B}-\frac{I_A-I_B}{4mI_A I_B}\right) \tag{20}
$$

다음은 단면의 총 수가 홀수인 경우를 정리한 것이다. 여기서 m 은 양의 정수이다.

경우 2 : $q = 2m-1$

$$
q_q = \frac{M}{E}\left[\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{L_A}{I_A}+\frac{L_B}{I_B}\right)-\frac{L_B}{I_B}\right] = \frac{M}{E}\left[m\left(\frac{L_A}{I_A}+\frac{L_B}{I_B}\right)-\frac{L_B}{I_B}\right] \tag{21}
$$

$$
\begin{aligned}
y_q &= \frac{M}{E}\left[\sum_{k=1}^{2m-1}\left(\sum_{i=1}^{k-1}\frac{L_i}{I_i}\right)L_k + \frac{m}{2}\left(\frac{L_A^2}{I_A}+\frac{L_B^2}{I_B}\right)-\frac{L_A^2}{2I_A}\right] \\
&= \frac{M}{E}\left[\frac{m^2(L_A+L_B)}{2}\left(\frac{L_A}{I_A}+\frac{L_B}{I_B}\right)+\frac{m}{2}L_A L_B\left(\frac{1}{I_A}-\frac{1}{I_B}\right)\right] \\
&\quad -\frac{M}{E}\left[m\left(\frac{L_A}{I_A}+\frac{L_B}{I_B}\right)L_B-\frac{L_B^2}{2I_B}\right]
\end{aligned}
\tag{22}
$$

모든 단면의 길이가 동일하다(식(28))고 하면 위 식은 식(24), 식(25)과 같이 정리된다.

$$
L_A = L_B = \frac{L}{q} = \frac{L}{2m-1} \tag{23}
$$

$$
q_q = \frac{ML}{E}\left[\frac{m}{2m-1}\frac{I_A+I_B}{I_A I_B}-\frac{1}{(2m-1)I_B}\right] \tag{24}
$$

$$
y_q = \frac{ML^2}{2E}\left[\frac{2m^2}{(2m-1)^2}\frac{I_A+I_B}{I_A I_B}-\frac{m}{(2m-1)^2}\frac{3I_A+I_B}{I_A I_B}+\frac{1}{(2m-1)^2 I_B}\right] \tag{25}
$$

2.4 불연속 반복단면보의 등가휨강성

위에서 구한 불연속 반복단면 외팔보의 처짐각 식(19), 식(24)과 처짐량 식(20), 식(25)에 단면의 수가 무한히 많다는 가정을 적용하면 불연속 반복단면보의 등가휨강성을 구할 수 있다.

$$\lim_{m\to\infty} q_q = \frac{ML}{E}\frac{I_A + I_B}{2I_A I_B} = \frac{ML}{EI_{eq}} \tag{26}$$

$$\lim_{m\to\infty} y_p = \frac{ML^2}{2E}\frac{I_A + I_B}{2I_A I_B} = \frac{ML^2}{2EI_{eq}} \tag{27}$$

이러한 결과는 단면의 총수가 짝수든 홀수든 관계없이 동일하다. 등가휨강성 EI_{eq} 에서 단면의 등가면적모멘트 I_{eq} 는 다음과 같다.

$$I_{eq} = \frac{2I_A I_B}{I_A + I_B} \tag{28}$$

식(28)은 동일한 길이를 갖는 두 가지 단면이 무한히 반복되는 외팔보의 등가면적모멘트로 모멘트를 받는 외팔보의 처짐에 관한 해석해로부터 유도한 것이다. 선형펄스모터 가동자 역시 두 가지 단면의 반복으로 이루어져 있고 단면의 개수역시 매우 크므로 여기서 구한 결과를 응용할 수 있다.

3. 등가휨강성의 검증

3.1 해석모델

제 2 장에서 유도한 불연속 반복단면 보의 등가휨강성의 유용성을 검증하기 위해 ABAQUS 를 이용한 유한요소해석을 수행하였다. 총 길이가 2m 인 외팔보의 굽힘진동과 종방향진동에서의 고유진동수를 구하였다. 해석은 단면의 수를 달리하면서 구성한 총 17 개 모델에 대하여 수행하였으며 단면 수 증가에 따라 등가면적모멘트를 사용한 해석결과에 수렴함을 보이기 위해 등가모델에 대한 해석역시 수행하였다. 해석에 사용된 단면의 형상은 그림 2 에 보인 형태이다. 각 단면에 대한 정보를 표 1 에 정리하였다. 등가모델의 면적모멘트는 식(28)로 구하였으며 단면적은 평균면적으로 하였다.

표 1. 단면 정보

	E (GPa)	r (kg/m^3)	R_i (m)	R_o (m)	A (m^2)	I (m^4)
단면 A	210	7800	0.08	0.10	2.830×10^{-3}	2.900×10^{-6}
단면 B	210	7800	0.08	0.10	0.566×10^{-3}	0.580×10^{-6}
등가단면	210	7800	•	•	1.698×10^{-3}	0.967×10^{-6}

해석을 위해 구성한 각 유한요소모델에서 단면의 총 수를 홀수가 되도록 제한하여 첫번째 단면과 마지막 단면이 항상 단면 A 가 되도록 하였다. 각 모델의 총 요소수 및 절점수를 약 100 개 내외가 되도록 고정하여 각 해석에서 절점수에 따른 결과의 정확도를 일정하게 유지하였다. 유한요소 모델의 단면 개수, 절점 개수, 요소 개수에 관한 내용을 표 2 에 정리하였다.

표 2. 유한요소모델 정보

모델	단면	절점	요소	모델	단면	절점	요소
1	3	100	99	10	21	106	105
2	5	101	100	11	23	93	92
3	7	99	98	12	25	101	100
4	9	100	99	13	27	109	108
5	11	100	99	14	33	100	99
6	13	105	104	15	35	106	105
7	15	106	105	16	51	103	102
8	17	103	102	17	99	100	99
9	19	96	95	등가모델	1	102	101

3.2 해석결과

그림 4 는 단면의 수에 따른 고유진동수를 그린 것으로 굽힘진동(bending vibration)과 종방향진동(longitudinal vibration)에 대한 결과이다. 그림에서 가로축은 단면의 총 수이고 세로축은 고유진동수이다. 그림 4(a)는 굽힘진동의 고유진동수이고 그림 4(b)는 종방향진동의 고유진동수 해석결과이다. 표 3 은 해석에서 구한 외팔보의 고유진동수를 정리한 것이다.

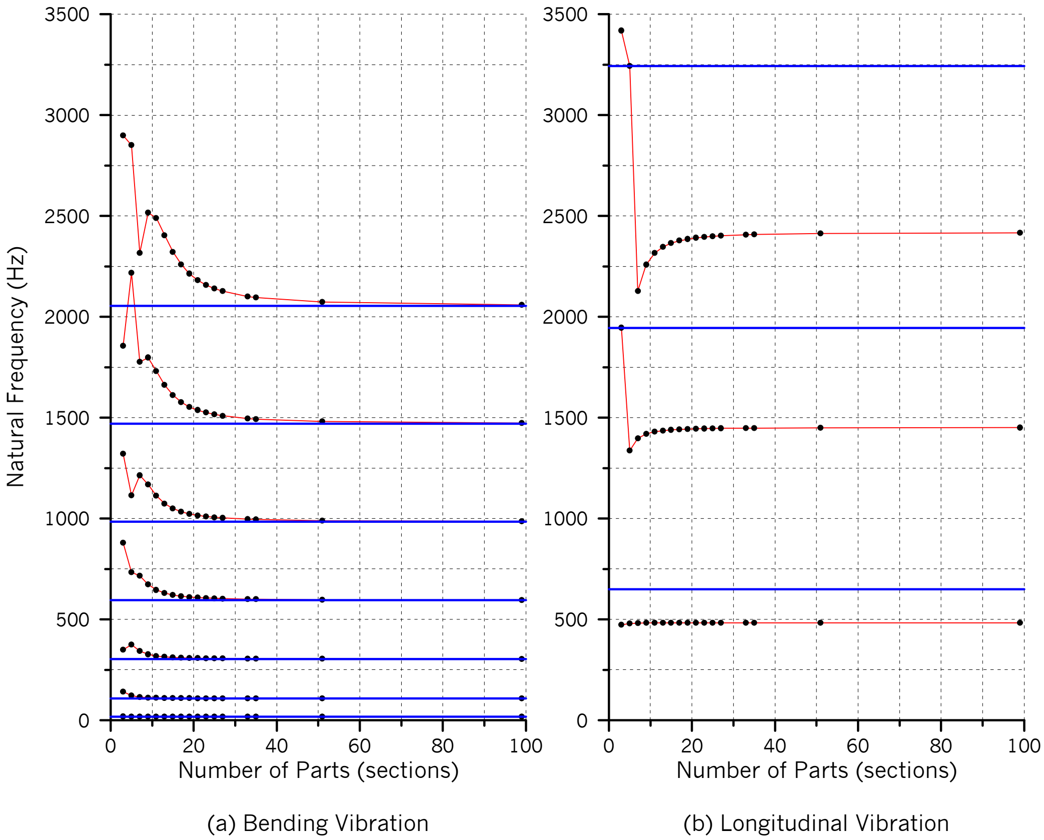

그림 4. 단면의 수에 따른 불연속 반복단면 외팔보의 고유진동수
-●-:단면수에 따른 고유진동수; — :등가모델의 고유진동수

표 3. 단면의 수에 따른 불연속 반복단면 외팔보의 고유진동수

모델 (단면수)	Bending Mode (Hz)							Longitudinal Mode (Hz)		
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3
1(3)	18.561	141.85	349.58	879.63	1320.9	1856.0	2898.8	473.06	1945.8	3418.5
2(5)	17.738	121.95	374.68	733.35	1115.3	2217.5	2850.6	479.83	1336.3	3243.0
3(7)	17.529	114.92	342.73	716.88	1214.0	1777.0	2316.5	481.61	1397.0	2128.1
4(9)	17.445	112.27	326.27	672.59	1169.1	1798.3	2516.7	482.34	1419.2	2258.3
5(11)	17.403	110.99	318.31	645.36	1112.3	1731.3	2489.3	482.70	1429.8	2316.0
6(13)	17.380	110.27	313.96	629.94	1073.7	1661.8	2403.5	482.91	1435.8	2346.8
7(15)	17.365	109.83	311.33	620.67	1049.3	1611.4	2321.3	483.04	1439.5	2365.3
8(17)	17.355	109.54	309.62	614.71	1033.6	1577.1	2258.7	483.13	1441.9	2377.3
9(19)	17.348	109.34	308.45	610.66	1022.9	1553.6	2213.8	483.19	1443.6	2385.5
10(21)	17.343	109.19	307.60	607.78	1015.4	1537.1	2181.6	483.23	1444.8	2391.4
11(23)	17.339	109.08	306.97	605.65	1009.9	1525.0	2158.0	483.27	1445.8	2395.8
12(25)	17.336	109.00	306.5	604.04	1005.8	1516.0	2140.4	483.29	1446.5	2399.1
13(27)	17.334	108.93	306.12	602.79	1002.6	1509.0	2126.9	483.31	1447.0	2401.8
14(33)	17.329	108.80	305.38	600.35	996.38	1495.7	2101.1	483.35	1448.1	2406.9
15(35)	17.328	108.77	305.22	599.8	995.02	1492.8	2095.6	483.36	1448.3	2408.1
16(51)	17.324	108.65	304.53	597.54	989.37	1480.8	2072.9	483.40	1449.4	2412.9
17(99)	17.321	108.57	304.08	596.08	985.78	1473.3	2059.0	483.42	1450.1	2416.0
등가모델	17.323	108.56	303.97	595.66	984.67	1470.9	2054.4	648.59	1945.8	3243.0

3.3 결과분석

그림 4(a)와 표 3 에서 알 수 있듯이 굽힘진동의 경우 단면의 수가 증가함에 따라 각 굽힘진동모드의 고유진동수는 지수함수 형태로 감소하여 등가모델의 고유진동수에 수렴하고 있다. 단면의 수가 50 개 이상이면 최소한 7 번째 굽힘모드까지는 등가모델을 이용한 해석결과의 오차가 1%이하가 된다.

그림 4(a)에 보인 결과에서 특이한 점은 단면의 수가 적은 경우 몇몇 모드의 진동수는 지수함수 형태를 갖는 수렴경향에서 벗어난다는 것이다. 그러나 이처럼 경향을 벗어나는 것 역시 일정한 경향을 갖고 있다. 이는 단면의 배열과 모드형상을 함께 고려하면 쉽게 파악할 수 있다. 경향에서 벗어나는 고유진동수의 경우 그 모드형상을 보면 대부분의 변형이 면적모멘트 값이 작은 단면 B 에서 발생하고 있다. 즉 상대적으로 강성이 작은 부분에 변형이 집중됨으로써 보다 적은 에너지로도 유사한 형태의 진동모드가 형성된다는 것이다. 단면의 반복성을 생각해 볼 때 단면의 수가 증가할수록 고차모드에서 이러한 현상이 일어날 것을 예측할 수 있다. 실제로 5 개의 단면으로 이루어진 모델에서 다섯번째 모드가 경향에서 어긋나는 반면 7 개의 단면으로 이루어진 모델의 경우 7 번째 모드에서 동일한 현상이 발생하고 있음을 그림 4(a)에서 확인할 수 있다.

그림 4(b)를 보면 굽힘진동의 경우와 달리 종방향진동의 경우 등가모델의 결과가 매우 부정확함을 확인할 수 있다. 이는 등가모델의 단면적이 실제 모델의 종방향진동을 기술함에 있어서 적합하지 못하기 때문이라 할 수 있다. 보의 종방향진동에 영향을 미치는 종방향강성은 단면적에 비례하므로 종방향진동에 해석을 정확히 기술하기 위해서는 등가모델의 단면적은 식(29)와 같은 형태가 되어야 한다[3].

$$A_{eq} = \frac{2A_A A_B}{A_A + A_B} \quad (29)$$

또 식(29)의 등가단면적을 사용할 경우 등가모델의 총 질량이 실제모델과 달라지는 것을 보완하기 위해 등가모델의 재료밀도를 보정해야 할 것이다. 그러나 선형펄스모터형 제어봉구동장치의 가동자를 해석하는데 있어서 종방향진동은 중요하지 않으므로 등가모델을 사용했을 때 종방향진동의 부정확성은 문제가 되지 않는다. 본 논문에서는 이러한 이유로 등가모델의 단면적을 단순 평균면적으로 사용할 것을 추천한다. 평균면적은 식(30)으로 구한다.

$$A_{eq} = \frac{A_A + A_B}{2} \quad (30)$$

식(30)의 평균면적을 사용함으로써 등가모델의 재료밀도를 보정할 필요가 없다는 것은 본 논문에서 추천하는 등가모델 구성작업을 보다 간편하게 해주는 한 장점이라 하겠다.

종방향진동에 대한 등가모델의 부정확성을 떠나서 그림 4(b)에 나타난 실제모델의 해석결과를 보면 굽힘진동과는 다른 수렴특성을 갖고 있는 것을 볼 수 있다. 전반적인 수렴특성은 단면의 수가 증가함에 따라 각 모드의 고유진동수가 증가하면서 특정 값에 수렴하고 있다는 것이다. 그리고 굽힘진동의 경와 유사하게 저차 모드에서 경향을 벗어나는 모드가 있다. 이 역시 굽힘진동에서의 분석과 동일한 논리로 설명할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 불연속 반복단면 외팔보의 굽힘진동을 효율적으로 해석하기 위한 등가모델의 구성에 대해 기술하였다. 또한 유도된 등가면적모멘트를 사용해 구성한 등가모델의 해석결과가 매우 유용함을 보였다. 그러므로 식(28)로 표현된 등가면적모멘트를 사용하면 선형펄스모터형 제어봉구동장치 가동자의 진동특성를 기술하는 등가의 유한요소모델을 간단히 구성할 수 있으며 매우 정확한 결과를 얻을 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 설계도면, SMART-CD-DW620-00, Rev.00, CEDM 집합체 도면

[2] 설계도면, SMART-CD-DW620-02, Rev.00, 선형펄스모터 집합체

[3] 설계계산서, SMART-CD-CA620-05, Rev.00, 선형펄스모터형 제어봉구동장치 가동자의 등가강성

[4] Gere & Timoshenko, “Mechanics of Materials,” Second Edition.