탄소나노튜브의 비선형 유체유발 불안정성 연구

Flow-induced Instability of Carbon Nanotubes with Nonlinear Effect

송오섭†. 최종운*. 김성균**

Ohseop Song, Jongwoon Choi and Sung-Kyun Kim

1. 서 론

탄소나노튜브(Carbon NanoTube ; 이하 CNT)는 그 우수한 전기적, 기계적, 물리적, 화학적 특성 때문에 나 노전기기계, 나노파이프, 나노센서, 나노작동기, 나노복 합재료 등을 위한 요소로서 크게 각광받고 있다. CNT는 완벽한 중공 실린더 구조와 우수한 기계적 특성으로 인 하여 가스 저장을 위한 나노 컨테이너와 유체를 수송하 는 나노파이프로서 사용될 수 있는 가능성이 있다. 특히, 나노파이프는 내부를 흐르는 유동 유체의 속도에 따라 그 거동 특성이 크게 달라지므로 이에 대한 연구가 필수 적이다.

Timoshenko 보 이론에 기초한 외팔 보 CNT의 유체유발 플러터 불안정성에 대한 연 구⁽¹⁾와 CNT의 경계조건이 불안정성에 미치는 영향이 연구되었다⁽²⁾. 그러나 아직까지 비선형 성을 고려한 연구는 Euler 보 이론에 기초한 연구가 전부이며 따라서 본 논문에서는 비선형 성을 고려한 Timoshenko 보 이론에 기초하고

 * 송오섭; 정회원 충남대학교

 E-mail: songos@cnu.ac.kr

 Tel: 042-821-5650, Fax: 042-822-5642

- * 특허청
- ** 한국원지력연구원

박판 보로 모델링한 CNT의 여러 경계조건에 따른 유체유발 불안정성에 대한 연구를 수행하 였다. 본 연구결과는 선형 연구결과와 비교하 였다.

2. 구조모델링

2.1 변위장

$$u(s,z,t) = u_0(z,t), \quad v(s,z,t) = v_0(z,t),$$

$$w(s,z,n,t) = \theta_Y(z,t) \left[X(s) + n \frac{dY}{ds} \right] + \theta_X(z,t) \left[Y(s) - n \frac{dX}{ds} \right]$$
(1)

2.2 비선형 변형율-변위 관계식

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \Big(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{r,i} u_{r,j} \Big)$$
(2)

$$\begin{split} \varepsilon_{zz} &= \varepsilon_{zz}^{0} + n\varepsilon_{zz}^{n} \\ &= w_{0}^{\prime} + y\theta_{x}^{\prime} + x\theta_{y}^{\prime} + \frac{1}{2}\left(u_{0}^{\prime 2} + v_{0}^{\prime 2}\right) + n\left(\frac{dy}{ds}\theta_{y}^{\prime} - \frac{dx}{ds}\theta_{x}^{\prime}\right) \\ \gamma_{sz} &= \gamma_{sz}^{0} = \theta_{y}\frac{dx}{ds} + \theta_{x}\frac{dy}{ds} + u_{0}^{\prime}\frac{dx}{ds} + v_{0}^{\prime}\frac{dy}{ds} \\ \gamma_{nz} &= \left(\theta_{y} + u_{0}^{\prime}\right)\frac{dy}{ds} - \left(\theta_{y} + v_{0}^{\prime}\right)\frac{dx}{ds} \end{split}$$

2.3 지배방정식

Equations of motion

$$\delta u_{0} : \frac{3}{2} a_{11} u_{0}^{\prime 2} u_{0}^{\prime \prime} + a_{44} (u_{0}^{\prime \prime} + \theta_{Y}^{\prime})$$

$$= b_{i} \ddot{u}_{0} + m_{f} \ddot{u}_{0} + 2m_{f} U \dot{u}_{0}^{\prime} + m_{f} U^{2} u_{0}^{\prime \prime}$$

$$\delta \theta_{Y} : a_{22} \theta_{Y}^{\prime \prime} - a_{44} (u_{0}^{\prime} + \theta_{Y}) = (b_{5} + b_{15}) \ddot{\theta}_{Y}$$
(3)

Boundary conditions

a) 단순지지 :

$$at z = 0 and L ; u_0 = a_{22}\theta_Y' = 0$$

b) 고정 :
 $at z = 0 and L ; u_0 = \theta_Y = 0$
c) 외팔보 :
 $at z = 0 ; u_0 = \theta_Y = 0,$
 $at z = L ; \frac{1}{2}a_{11}u_0'^3 + a_{44}(u_0' + \theta_Y) = 0, a_{22}\theta_Y' = 0$

3. 수치해석

3.1 무차원화

$$\begin{split} \xi &= \frac{z}{L}, \quad \overline{\eta}(\xi, T) = \frac{u_0(z, t)}{L}, \quad \overline{\theta_Y}(\xi, T) = \theta_Y(z, t), \quad \beta = \frac{m_f}{b_1 + m_f} \\ \overline{u} &= \sqrt{\frac{m_f L^2}{a_{22}}} \quad U, \quad \sigma = \frac{a_{22}}{a_{44}L^2}, \quad T = \sqrt{\frac{a_{22}}{b_1 + m_f}} \frac{t}{L^2}, \\ \gamma &= \left(\frac{b_5 + b_{15}}{b_1 + m_f}\right) \frac{1}{L^2}, \quad v = \frac{a_{11}}{a_{44}} \end{split}$$

3.2 무차원 지배방정식

운동방정식

$$\frac{3}{2}\nu\overline{\eta}'^2\overline{\eta}'' + \overline{\eta}'' + \overline{\theta}_{\gamma}' = \sigma\overline{\eta} + 2\sigma\overline{u}\beta^{\frac{1}{2}}\overline{\eta}' + \sigma\overline{u}^2\overline{\eta}''$$
$$\sigma\overline{\theta}_{\gamma}'' - \overline{\theta}_{\gamma} - \overline{\eta}' = \sigma\gamma\overline{\theta}_{\gamma}$$
(4)

a) 단순지지 :

$$at \xi = 0 \text{ and } 1; \overline{\eta} = \sigma \overline{\theta}'_Y = 0$$

b) 고정 :
 $at \xi = 0 \text{ and } 1; \overline{\eta} = \overline{\theta}_Y = 0$
c) 외팔 보 :
 $at \xi = 0; \overline{\eta} = \overline{\theta}_Y = 0,$
 $at \xi = 1; \frac{1}{2} v \overline{\eta}'^3 + \overline{\eta}' + \overline{\theta}_Y = 0, \ \sigma \overline{\theta}'_Y = 0$

4. 결과



Fig. 1 Variation of the Im part of dimensionless eigenvalue with fluid velocity in the case of S-S BC ($L/2R_{out} = 10, R_{in}/R_{out} = 0.5$)

Table 1 Variation of linear and nonlinear relativecritical flow velocity $\bar{U}_{rel,cr}$ with various BCs

$$(R_{in} / R_{out} = 0.5, R_{out} = 0.68nm, L / 2R_{out} = 10, \text{ fixed})$$

Boundary Condition	Ureler		
	Linear	Nonlinear	
Simply Supported	3.109 (1st), 6.035 (2nd)	q 0	3.109 (1st) 6.035 (2nd)
		q 1	5.992 (1st, 2nd)
		q <mark>2</mark>	6.008 (1st, 2nd)
		q 3	7.878 (1st)
Clamped	6.170 (1st)	q <mark>0</mark>	6.170 (1st)
		q 1	6.170 (1st)
Cantilever	4.673 (2nd)	q <mark>0</mark>	4.673 (2nd)
		q 1	1.547 (2nd)

참고문헌

1. Choi, J. W., Gil, B. R., Song, O. S.: Flowinduced Vibration of Carbon Nanotubes Conveying Fluid. Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering **18**, 654-662 (2008)

2. Choi, J. W., Song, O. S.: Effect of Boundary Conditions on the Stability Characteristics of Nanopipes. Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering **18**, 1057-1064 (2008)