

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์

1. Panumas Suybangdum and Pruittikorn Smithmaitrie. 2006. Analysis of Piezoelectric Actuator Locations for Generating Traveling Wave on an Ultrasonic Curvilinear Motor. The 2 nd Regional Conference on Artificial Lift and Robotics. 14-15 July, 2006, Songkhla, Thailand. Page 53-57.
2. ภาณุมาศ สุขบางคำ, พฤทธิกร สมิตไมตรี, เจริญยุทธ เดชวายุกุล และ ศุภสรโรช หมั่นสิทธิ์. การศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้งด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20, 18-20 ตุลาคม 2549. บทคัดย่อ หน้า 225-226.

Analysis of Piezoelectric Actuator Locations for Generating Traveling Wave on an Ultrasonic Curvilinear Motor

Panumas Suybangdum* and Pruittikorn Smithmaitrie

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,
Hat Yai, Songkla 90112 Thailand, Tel: 66-74-287-035, Fax: 66-74-212-893, *Email: s4712023@psu.ac.th

Abstract

The major purpose of this study is to investigate travelling wave phenomenon of the ultrasonic curvilinear motors. There are two piezoelectric actuator patterns in the case study. The ultrasonic motor system consists of a rotor and a stator. Piezoelectric actuators are bonded with the stator. Two groups of piezoelectric actuators are excited by electrical harmonic excitations. The harmonic excitations generate vibration on the curve beam which influences the travelling wave. This study intends to analyze the vibration characteristic by using finite element method. And the result shows that the wave amplitude in the middle section of the stator is lower than the wave amplitude near the stator supports because the bonded actuators increase the stator stiffness in the middle section. The characteristic of the generated travelling wave yields important information for designing the piezoelectric actuator location.

Keywords: Piezoelectric actuator, Ultrasonic motor, Traveling wave.

1. Introduction

Ultrasonic motors can be classified as rotary [1-6] or linear motors [3-4,6-8]. An ultrasonic motor system usually consists of a stator and a rotor. In this study, the characteristic of stator is similar to a curve beam. The stator drives and guides a rotor along its curve to any specific angular position by using traveling wave as illustrated in Figure 1.

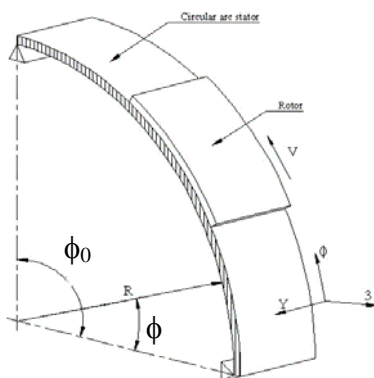


Figure 1. Schematic diagram of the curvilinear arc motor.

The traveling wave is generated by the piezoelectric actuator patches bonded with the stator. The electrical excitation is applied on piezoelectric actuators. It induces deformation on piezoelectric actuator [10,12-13,18]. If the piezoelectric actuators on the stator are placed in the suitable location and excited by appropriate harmonic signals, then the traveling wave can be generated [13]. The traveling waves create the driving force to the rotor. There are many applications of ultrasonic motors for examples, ultrasonic rotary motors can be used to control focusing of camera lens [1-2]; curvilinear arc motors can be used as camera orientation devices or driving robotic joints. The characteristic of traveling waves that generated on the ultrasonic curvilinear motor is similar to that occurred on the finite length media. However, the actuator locations and number of actuator patches on the finite length media has not been thoroughly investigated [13,18].

2. Design and Modeling of Ultrasonic Curvilinear Motor

The traveling wave on the stator occurs when the bonded piezoelectric actuators are induced by the electrical harmonic excitations [18]. The dimensions of the arc stator are arc radius $R = 60$ mm; arc width $b = 9$ mm; arc thickness $h = 1$ mm; arc angle $\phi_0 = \pi/2$. Lead-Zirconate-Titanate (PZT), the piezoelectric material, is used as the actuator with the thickness h^a of 0.5 mm.

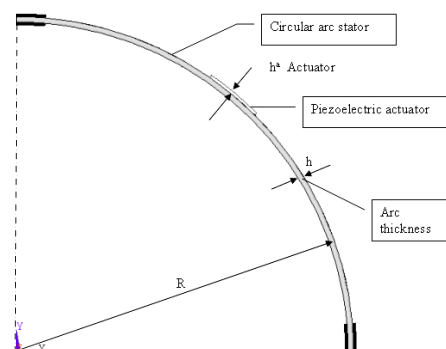


Figure 2. Schematic diagram of the curvilinear ultrasonic stator.

The length of an actuator patch is $\lambda/2$ which is a half of wave length, λ . There are two groups of actuators, one is on the top surface of the stator and another is under the bottom surface of the stator. The top and bottom actuators are excited by a pair of electrical signals $A\cos(\omega t)$ and $A\sin(\omega t)$ respectively, where A is the signal amplitude; ω is the driving frequency and t is the time. The good traveling wave must be moving in one direction with consistency in the wave amplitude. However, the traveling wave reflects when it hits the boundary of the stator. This distorts the propagation of the wave. Accordingly, segments of damping material are added on the structure between the rigid supports and the stator to prevent the wave reflection. There are two actuator patterns studied in this research as illustrated in Figures 3 and 4, respectively. The actuator pattern 1, Figure 3, is that the piezoelectric actuators are bonded in the middle section of the curve stator. The actuator pattern 2, Figure 4, the piezoelectric actuators are bonded near the stator supports.

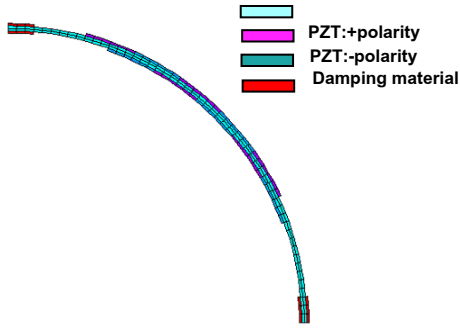


Figure 3. The actuator pattern 1:
Located in the middle section of the stator.

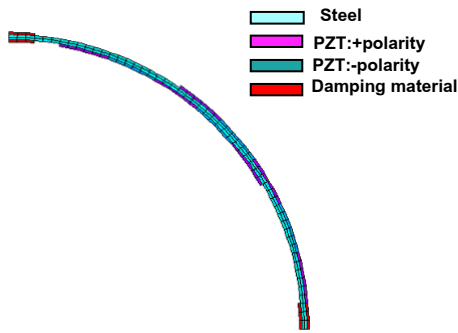


Figure 4. The actuator pattern 2:
Located near the supports of the stator.

In the analysis, an arbitrary segmented piezoelectric actuator patch is defined from ϕ_1 to ϕ_2 in the ϕ -direction and from y_1 to y_2 in the y -direction as illustrated Figure 5.

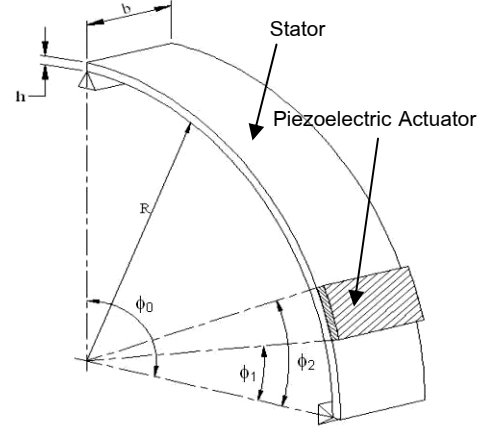


Figure 5. Coordinate system of the arc stator.

When the electrical excitation induces the piezoelectric actuator, the actuation membrane forces $N_{\phi\phi}^c$ and bending moment $M_{\phi\phi}^c$ are generated. They can be defined and included into equations of motion of the system as follows [13],

$$-\frac{\partial(N_{11}A_2)}{\partial\alpha_1} - \frac{\partial(N_{21}A_1)}{\partial\alpha_2} - N_{12}\frac{\partial A_1}{\partial\alpha_2} + N_{22}\frac{\partial A_2}{\partial\alpha_1} - A_1A_2\frac{Q_{13}}{R_1} + A_1A_2\rho h\ddot{u}_1 = A_1A_2q_1 \quad (1)$$

$$-\frac{\partial(N_{12}A_2)}{\partial\alpha_1} - \frac{\partial(N_{22}A_1)}{\partial\alpha_2} - N_{21}\frac{\partial A_2}{\partial\alpha_1} + N_{11}\frac{\partial A_1}{\partial\alpha_2} - A_1A_2\frac{Q_{23}}{R_2} + A_1A_2\rho h\ddot{u}_2 = A_1A_2q_2 \quad (2)$$

$$-\frac{\partial(Q_{13}A_2)}{\partial\alpha_1} - \frac{\partial(Q_{23})}{\partial\alpha_2} + A_1A_2\left(\frac{N_{11}}{R_1} + \frac{N_{22}}{R_2}\right) + A_1A_2\rho h\ddot{u} = A_1A_2q_3 \quad (3)$$

where Q_{13} and Q_{23} are defined as equations (4) and (5) respectively,

$$\frac{\partial(M_{11}A_2)}{\partial\alpha_1} + \frac{\partial(M_{21}A_1)}{\partial\alpha_2} + M_{12}\frac{\partial A_1}{\partial\alpha_2} \quad (4)$$

$$M_{22}\frac{\partial A_2}{\partial\alpha_1} - Q_{13}A_1A_2 = 0$$

$$\frac{\partial(M_{12}A_2)}{\partial\alpha_1} + \frac{\partial(M_{22}A_2)}{\partial\alpha_2} + M_{21}\frac{\partial A_2}{\partial\alpha_1} \quad (5)$$

$$M_{11}\frac{\partial A_1}{\partial\alpha_2} - Q_{23}A_1A_2 = 0$$

It is assumed that the stator is a thin beam. That is, the ratio of the arc thickness to the arc length is very small. Lamé's parameters A_1 , A_2 and Radii of Curvature R_1 , R_2 are defined by the infinitesimal displacement as

$$(ds)^2 = (Rd\theta)^2 + (dy)^2, \quad (6)$$

Accordingly from equation (6), $A_1 = R$, $A_2 = 1$, and $R_1=R$, $R_2=\infty$. Substituting Lamé's Parameters and Radii of Curvatures into Love's equation where the first direction is in the ϕ -direction and the second direction is in the y -direction (depth direction). However, the y -direction is neglected because it assumed that there is no deflection in the y -direction. The thin shell theory is applied to define the system equations. Hence, the equation of motion in the ϕ -direction and 3-direction are defined as follows

$$-\frac{\partial N_{\phi\phi}}{\partial\phi} - Q_{\phi 3} + R\rho h \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial t^2} = Rq_\phi, \quad (7)$$

$$-\frac{\partial Q_{\phi 3}}{\partial\phi} + N_{\phi\phi} + R\rho h \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} = Rq_3, \quad (8)$$

$$Q_{\phi 3} = \frac{1}{R} \frac{\partial M_{\phi\phi}}{\partial\phi} \quad (9)$$

where $N_{\phi\phi}$ is the membrane force; ρ is the mass density; $M_{\phi\phi}$ is the bending moment; q_i is the external force; h is the shell thickness; R is the radius and u_i is the displacement in the i -direction. The membrane force and bending moment are functions of membrane strains s_{ij}^0 and bending strains k_{ij} defined as [13].

$$N_{\phi\phi} = K(s_{\phi\phi}^0 + \mu s_{yy}^0), M_{\phi\phi} = D(k_{\phi\phi} + \mu k_{yy}) \quad (10, 11)$$

where $K = Yh/(1-\mu^2)$ is the membrane stiffness; $D = Yh^3/\{12(1-\mu^2)\}$ is the bending stiffness; Y is Young's modulus; and μ is Poisson's ratio. The strain-displacement relationships of the thin arc stator are

$$s_{yy}^0 = 0, \quad s_{\phi\phi}^0 = \frac{1}{R} \left(\frac{\partial u_\phi}{\partial\phi} + \frac{u_3}{R} \right) \quad (12, 13)$$

$$k_{yy} = 0, \quad k_{\phi\phi} = \frac{1}{R} \frac{\partial\beta_\phi}{\partial\phi} \quad (14, 15)$$

and the rotation angle $\beta = 1/R\{u_\phi - \partial u_3/\partial\phi\}$. Substituting equations (9-15) into equations (7) and (8) yields the equations of motion in the ϕ - and 3-directions, respectively, as

$$\frac{D}{R^4} \left(\frac{\partial^2 u_\phi}{\partial\phi^2} - \frac{\partial^3 u_3}{\partial\phi^3} \right) + \frac{K}{R^2} \left(\frac{\partial^2 u_\phi}{\partial\phi^2} + \frac{\partial u_3}{\partial\phi} \right) + q_\phi = \rho h \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial t^2} \quad (16)$$

$$\frac{D}{R^4} \left(\frac{\partial^3 u_\phi}{\partial\phi^3} - \frac{\partial^4 u_3}{\partial\phi^4} \right) - \frac{K}{R^2} \left(\frac{\partial u_\phi}{\partial\phi} + u_3 \right) + q_3 = \rho h \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} \quad (17)$$

3. Finite Element Analysis

There are two designs of the actuator patterns as previously discussed, Figures 3 and 4. The stator width b is 9 mm. The arc thickness h is 1 mm. The arc angle ϕ_0 is $\pi/2$. And the arc radius R is 60 mm. The type of piezoelectric material is PZT-4 with the actuator thickness h^a of 0.5 mm. The stator is made of steel and bonded with damping material at boundaries to prevent the wave reflection. The electrical excitations are $10\cos(\omega t)$ for actuators on the top surface and $10\sin(\omega t)$ for the bottom actuators. The excitation frequency is varied to determine the operating frequency that generates the traveling wave.

4. Evaluation of Stator Characteristic

Dynamic behavior and harmonic characteristics of the ultrasonic curvilinear stator system are evaluated by using the analytical and finite element techniques. Natural frequencies are evaluated first, followed by forced harmonic responses and driving characteristics at various excitation frequencies to determine the operating frequency generating traveling wave.

Natural frequency

From Table 1, comparing the analytical data (the 1st column) and the finite element results (the 2nd column) of the circular arc stator shows that they are well compared for both Pattern 1 and Pattern 2.

Table 1. The natural frequency of the arc stator.

Mode (k)	Natural Frequency (Hz)			
	Analytical		ANSYS (modified support)	
	Pattern 1	Pattern 2	Pattern 1	Pattern 2
2	113.2	113.2	1664.9	1653
3	2667.7	2667.7	3109	3295
4	5069.1	5069.1	6278	6250
5	7916.3	7916.3	8490	8890
6	11652	11652	13502	13601
7	15813	15813	18631	18571
8	20871	20871	23241	22631
9	26349	26349	29479	29919
10	32726	32726	36018	36739
11	39520	39520	42777	43350

Harmonic analysis

The harmonic responses of the curvilinear arc stators are studied by using finite element models. The stator system is subjected to sinusoidal electrical excitations with amplitude of 10V with the excitation frequency varied from 0 to 60000 Hz. The transverse displacement response of the mid-span node at the angle of $\pi/4$ is investigated and reported. Figure 6 shows the frequency response of the arc stator with the actuator pattern 1. And Figure 7 shows the frequency response of the system with the actuator pattern 2. Comparing Figures 6 and 7, it reveals that the stator with the actuator pattern 1 has the system stiffness higher than the stator with the actuator pattern 2. Additionally, the harmonic analysis results (Figures 6 and 7) suggest that the amplitudes of the mid-span node are large when the system excited in the neighborhood of the natural frequency. However,

the harmonic frequency responses do not reveal what frequency range that yields the traveling wave.

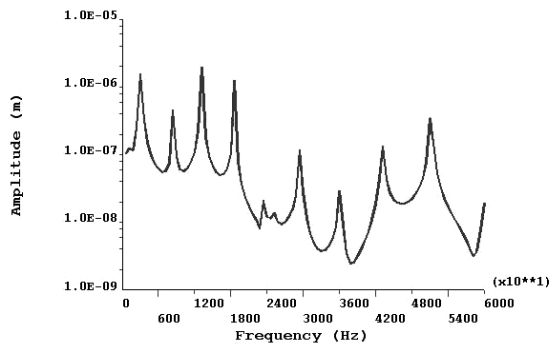


Figure 6. Harmonic response of the stator with the actuator pattern 1.

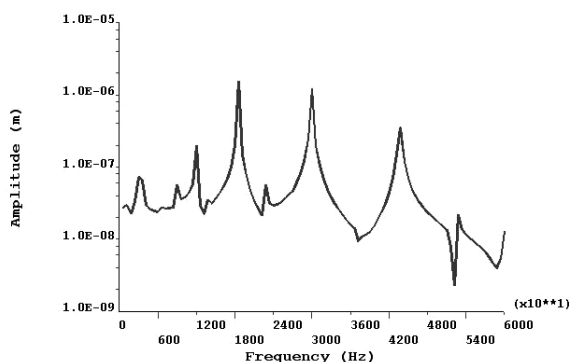


Figure 7. Harmonic response of the stator with the actuator pattern 2.

Wave Propagation

Based on the change of deformations shape in time domain, the stator with the actuator pattern 1 generates the traveling waves at the operating frequencies of 16550 Hz (Figure 8). The traveling wave characteristic shows that the wave amplitude in the middle section of the stator is lower than the wave amplitude closed to the stator supports. This is because the bonded actuators increase the local stiffness in the middle span.

For the stator with the actuator pattern 2, the stator system responses to the excitation of 16005 Hz that yields the traveling wave (Figure 9). The waves travel with less fluctuation compared with the pattern 1. And it gives the higher wave amplitude at the mid-span node because of the decreasing stator stiffness in the middle of stator.

Based on the finite element results, the operating frequency of the stator with the actuator pattern 1 is higher than that of the stator with the actuator pattern 2. This is because the location of actuators increasing the overall stiffness of the stator. Thus, it lessens wave amplitude in the mid-span.

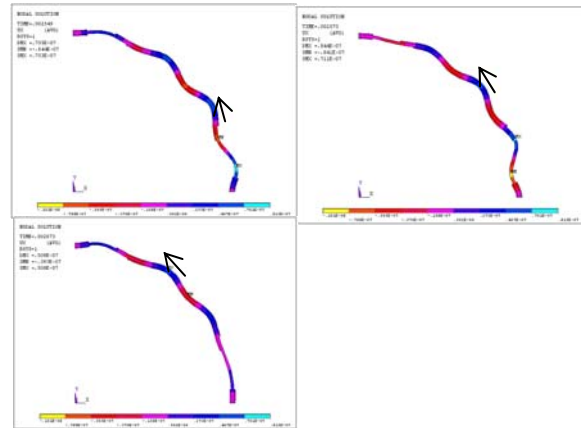


Figure 8. The response of the stator with the actuator pattern 1 at the operating frequency of 16550 Hz.

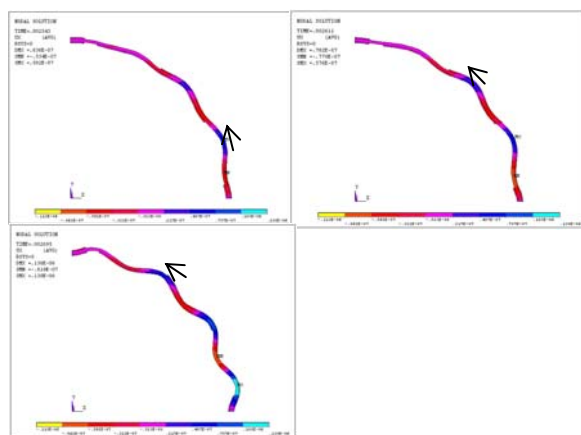


Figure 9. The response of the stator with the actuator pattern 2 at the operating frequency of 16005 Hz.

5. Conclusions

The results of these two actuator patterns on the ultrasonic curvilinear motor show the phenomenon of traveling wave responses. The operating frequency of the stator with the actuator pattern 1 is higher than that of the stator with the actuator pattern 2. This is because the location of actuators in the pattern 1 increases the stiffness at the middle span more than actuators in the pattern 2 dose. In the other hand, the piezoelectric actuator pattern 2 gives the higher wave amplitude in the middle span because it has less local stiffness. These two designs represent the effect of actuator location on the traveling wave response. This is an essential issue for design and selection of the piezoelectric actuator locations on the ultrasonic curvilinear motors.

References

- [1] Shyh-Shiuh L., Bar-Cohen Y. and W. Grandia, "Rotary Ultrasonic Motor Actuated By Traveling Fluxural Wave. Smart Structures and Integrated Systems", San Diego, CA, 3-6 March, 1997, pp. 912-917
- [2] Bar-Cohen Y., X. Bao and W. Grandia, "Rotary Ultrasonic Motor Actuated By Traveling Fluxural Wave", Proceedings of SPIE's 6th Annual

- International Symposium on Smart Structures and Materials, 1-5 March, 1999, pp. 698-704
- [3] S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa and N. Nakamura, *Ultrasonic Motors Theory and Applications*, Clarendon Press, Oxford, UK., 1993.
- [4] T. Sashida and T. Kenjo, *An Introduction to Ultrasonic Motors*, Clarendon Press, Oxford., 1993.
- [5] J.B. Dabney and T.L. Haraman, "Model-Based Control of Piezoelectric Ultrasonic Motors for Space Robotic Application", *ISSO Annual Report*, 2002, pp 76-79.
- [6] K. Uchino, "Piezoelectric Actuator and Ultrasonic Motors", Kluwer Academic Publishers, Boston., 1996.
- [7] T. Hemsel, J. Wallaschek, "Survey of the present state of the art of piezoelectric linear motors", *Ultrasonics* 38, 2000, pp. 37-40.
- [8] M. Hermann, W. Schinkothe (IKFF), "Piezoelectric traveling wave motors generating direct linear motion", *Conference Proceeding*, Bremen 26, 28 June 1996, pp. 200-203.
- [9] G. Bal and E. Berkiroglu, "Servo speed control of traveling-wave ultrasonic motor using digital signal processor", *Sensors and Actuators, A* 109, 2004, pp. 212-219.
- [10] F. Giraud, B. Semail, Member, IEEE, Jean-Thierry Audren, "Analysis and phase control of a piezoelectric traveling-wave ultrasonic motor for haptic stick application", *IEEE Transaction on industry applications*, VOL. 40 No 6, November/December 2004, pp1541-1549
- [11] G. Kandare, J. Wallaschek, "Derivation and validation of a mathematical model for traveling wave ultrasonic motors", *Smart Materials and Structures* 11, 2002, pp. 565-574.
- [12] D. Sun, J. Liu, X. Ai, "Modeling and performance evaluation of traveling-wave piezoelectric ultrasonic motors with analytical method", *Sensor and Actuators, A* 100, 2002, pp. 84-93.
- [13] P. Smithmaitrie, H.S. Tzou, "Electro-dynamics, micro-actuation and design of arc stators in an ultrasonic curvilinear motor", *Journal of Sound and Vibration* 284, 2005, pp. 635-650.
- [14] Y. Roh, S. Lee, W. Han., 2001, Design and fabrication of a new traveling wave-type ultrasonic linear motor, *Sensors and Actuators, A* 94, 2001, pp. 205-210.
- [15] W. Soedel, *Vibrations of Shells and Plate*, New York: Marcel Dekker, Inc., 1993.
- [16] A. Richter, M. Pustka, P. Rydlo and M. Kolar, "Ultrasonic piezoceramic motor the computation of traveling wave velocity by PWM modulation with higher harmonic suppression", *Ceramics International*, 30, 2004, pp. 1857-1861.
- [17] H.S. Tzou, *Piezoelectric Shell (Distributed Sensing and Control of Continua)*, Kluwer Academic, Boston/Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [18] P. Smithmaitrie, H.S. Tzou, "Micro-control of actuator patches laminated on hemispherical shells", *Journal of Sound and Vibration* 277, 2004, pp. 691-710.
- [19] H.S. Tzou, P. Smithmaitrie, J.H. Ding, "Micro-sensor electromechanics and distributed signal analysis of piezo (electric) elastic spherical shells", *Mechanical System and Signal Processing*, 16 (2-3), 2002, pp. 185-199.
- [20] A. Frangi, A. Corigliano, M. Binci, P. Faure, "Finite element modeling of a rotating piezoelectric ultrasonic motor", *Ultrasonics* 43, 2005, pp. 747-755.

การศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้ง ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

A Study of Vibration Characteristic of Curvilinear Ultrasonic Motors By Using Finite Element Method

ภาณุมาศ สุยบางดุม*, พฤทธิกร สมิตไมตรี, เจริญยุทธ เดชวายุกุล และ ศุภสรุช หมื่นสิทธิ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

โทรศัพท์ (074) 287-035 โทรสาร (074) 212-893 *Email s4712023@psu.ac.th

Panamas Suybangdum*, Pruittikorn Smithmaitrie, Charoenyut Dechwayukul and Supasarote Muensit

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkla 90112, Tel
(074)287-035, Fax : (074)212893, *Email : s4712023@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้งด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มอเตอร์อัลตราโซนิคมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญสองส่วนคือ สเตเตอร์ และ โรเตอร์ โดยในกรณีศึกษาที่สเตเตอร์มีลักษณะเป็นคานโค้งทำหน้าที่ขับโรเตอร์ให้เคลื่อนที่ตามแนวของคานโดยอาศัยคลื่นเคลื่อนที่ คลื่นเคลื่อนที่ที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของคานเมื่อถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณแบบฮาร์โมนิก โดยทั่วไปวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ถูกใช้เป็นตัวทำงานที่กระตุ้นให้เกิดแรงแบบฮาร์โมนิกในมอเตอร์อัลตราโซนิค แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสเตเตอร์ถูกศึกษาเกี่ยวกับการแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ และการตอบสนองเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแรงฮาร์โมนิกจากตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริก โดยจากผลการศึกษาพบว่าจำนวนเอลิเมนต์มีผลต่อความสูงของคลื่นเคลื่อนที่และความถี่ที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่ ผลการคำนวณค่าความสูงและความถี่ของคลื่นเคลื่อนที่จะลู่เข้าเมื่อจำนวนเอลิเมนต์ที่แบ่งมีค่ามากขึ้น นอกเหนือจากนี้วัสดุดูดซับการสั่นสะเทือน ถูกเพิ่มเข้าไปในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าการสะท้อนของคลื่นเคลื่อนที่เมื่อกระทบกับจุดรองรับมีน้อยและทำให้คลื่นเคลื่อนที่ที่เกิดบนสเตเตอร์มีเสถียรภาพมากขึ้น ดังนั้นวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนจึงมีความสำคัญต่อการออกแบบมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้ง

Abstract

The purpose of this research is to study vibration characteristic of curvilinear ultrasonic motors by using finite element method. An ultrasonic motor system consists of a rotor and a stator. The stator drives and guides a rotor along the curve beam to any specific angular position by using traveling wave. In this study, the stator is similar to a curve beam. The traveling wave is generated by piezoelectric actuators on the curve beam which is excited by the harmonic signal. The number of model elements and the stator response are investigated. The simulation results

show that the number of elements have an effect on the wave amplitude and operating frequency of the traveling wave. The calculated results of the amplitude and operating frequency are convergence as the number of elements increase. Furthermore, the damping material is included into the model to decrease the wave reflection. The result shows that the traveling wave is less reflected when it reaches the boundary. Therefore, the wave travels more stably. Accordingly, the damping material is very important in the design of ultrasonic curvilinear motors.

1. บทนำ

อัลตราโซนิคมอเตอร์สามารถแบ่งออกได้สองรูปแบบด้วยกันคือ อัลตราโซนิคมอเตอร์ที่มีการเคลื่อนที่ในลักษณะเส้นตรง (linear motor) [1-4] และแบบหมุน (rotary motor) [4-7] โดยปกติแล้วอัลตราโซนิคมอเตอร์มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญสองส่วนด้วยกันคือ สเตเตอร์ (stator) และโรเตอร์ (rotor) ซึ่งกรณีศึกษาที่สเตเตอร์มีลักษณะเป็นคานโค้งทำหน้าที่ขับให้โรเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ตามแนวของคาน โดยอาศัยคลื่นเคลื่อนที่ (traveling wave) การเกิดคลื่นเคลื่อนที่นี้จะอาศัยตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกติดบนคานโค้ง ที่ถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณทางไฟฟ้าส่งผลให้มีแรงไปกระทำต่อสเตเตอร์ทำให้เกิดการสั่นเกิดขึ้น เนื่องจากตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกมีคุณสมบัติคือ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากไฟฟ้าก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด ดังนั้นเมื่อนำไปติดบนคานโค้งในรูปแบบที่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ และกระตุ้นด้วยสัญญาณทางไฟฟ้าฮาร์โมนิกทำให้คานเกิดการสั่นสะเทือนส่งผลให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่ขึ้น

อัลตราโซนิคมอเตอร์สามารถนำมาใช้เป็นตัวทำงานในอุปกรณ์สมัยใหม่ เช่น ควบคุมการเคลื่อนที่ของเลนส์ในกล้องถ่ายรูป ซึ่งส่วนใหญ่ประยุกต์ใช้งานจากอัลตราโซนิคมอเตอร์ทั้งสองรูปแบบที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่ในปัจจุบันยังมีงานอีกเป็นจำนวนมากที่ต้องการการเคลื่อนที่ในแนวเชิงเส้นโค้ง [8-9] เช่นการปรับองศาของกล้องจับภาพ

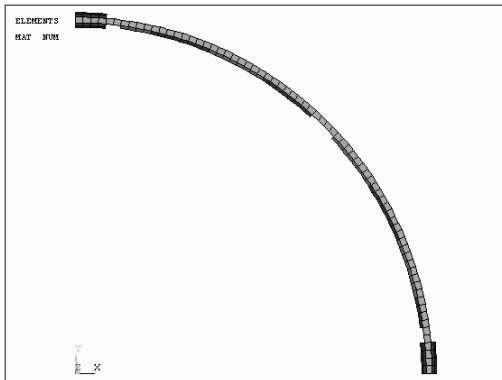
หรือข้อต่อของหุ่นยนต์ ลักษณะของคลื่นที่เกิดในอัลตราโซนิคมอเตอร์เชิงเส้นโค้งเป็นแบบเดียวกับคลื่นที่เกิดขึ้นกับคานโค้งหรือวัสดุที่มีขอบเขตจำกัดอื่นๆ แต่ยังไม่มีการศึกษาถึงพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้งเมื่อจำนวนเอลิเมนต์บนสเตเตอร์เปลี่ยนไปและผลของการจัดวางวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนต่อคลื่นเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นบนสเตเตอร์

2. แบบจำลองสเตเตอร์ของอัลตราโซนิคมอเตอร์เชิงเส้นโค้ง

งานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วนคือ 1) ศึกษาผลของการแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ต่อการเกิดคลื่นเคลื่อนที่ และ 2) ศึกษาผลของตำแหน่งการจัดวางวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนบนสเตเตอร์ต่อพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้ง

2.1 การแบ่งเอลิเมนต์

รูปที่ 1 แสดงลักษณะการจัดวางตัวทำงานบนสเตเตอร์ที่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ได้ คลื่นจะเคลื่อนที่สม่ำเสมอตลอดคานโค้งและการเกิดคลื่นบนคานโค้งเกิดจากการติดตัวทำงานถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดแรงและโมเมนต์ดัดบนคานโค้ง



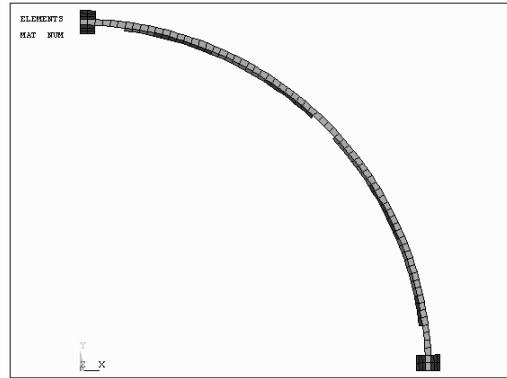
รูปที่ 1 แสดงลักษณะการจัดวางตัวทำงานบนสเตเตอร์ที่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่

กรณีศึกษานี้คานโค้งมีรัศมีของคานโค้ง $R=60$ mm, กว้าง $b=9$ mm, และหนา $h=1$ mm โดยที่คานโค้งมีมุมเปิด $\phi_0=\pi/2$ และใช้ตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกชนิด Lead Zirconate Titanate (PZT) ที่มีความหนา $h^i=0.5$ mm ตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกที่ติดบนคานโค้งมีขนาดความยาว $\lambda/2$ หรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น เมื่อ λ คือความยาวคลื่น จากนั้นกระตุ้นด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า $A\cos(\omega t)$ และ $A\sin(\omega t)$ บนตัวทำงานตามลำดับ เมื่อ A คือขนาดของแอมพลิจูด และ ω คือความถี่ทำงาน, t คือเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4

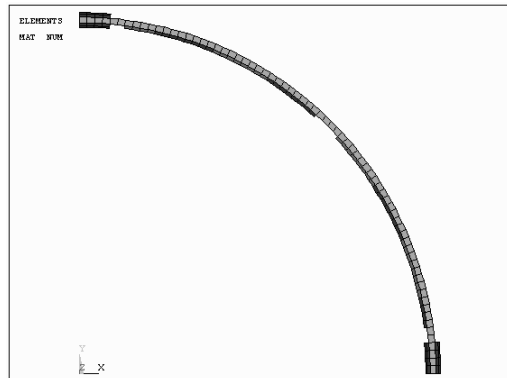
2.2 การจัดวางวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือน (Damping material)

การศึกษาการจัดวางวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนบนสเตเตอร์ มีสองรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ตามลำดับ ซึ่งรูปแบบทั้งสองสามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ที่เหมาะสมบนคานโค้งได้ โดยการติดตัวทำงานทั้งสองรูปแบบปริมาตรของวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนเท่ากันแต่

ความยาวไม่เท่ากัน ส่วนขนาดของคานโค้งและตัวทำงานมีขนาดเท่ากันกับรูปแบบที่ 1

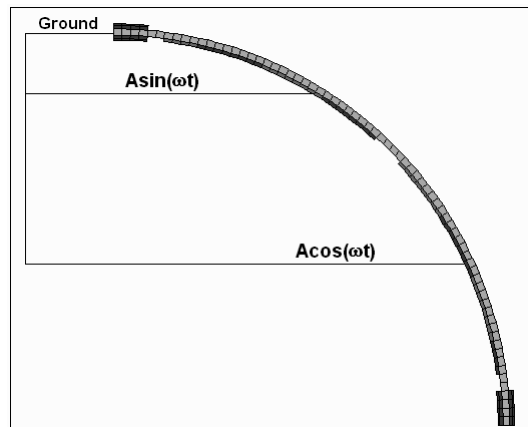


รูปที่ 2 แสดงลักษณะการติดวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนแบบสั้น



รูปที่ 3 แสดงลักษณะการติดวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนแบบยาว

จากนั้นกระตุ้นด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า $A\cos(\omega t)$ และ $A\sin(\omega t)$ บนตัวทำงานดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงลักษณะการกระตุ้นสัญญาณไฟฟ้าบนตัวทำงานของรูปแบบที่ 2 และรูปแบบที่ 3

อย่างไรก็ตามเมื่อกระตุ้นตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกด้วยสัญญาณทางไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรง $N^c \phi$ (Membrane Force) และโมเมนต์ดัด $M^c \phi$ (Bending Moment) การหาค่าของแรงและโมเมนต์ดังกล่าว

สามารถใช้สมการของเลฟ (Love's Equation) หาสมการการเคลื่อนที่ของระบบได้ ดังสมการ

$$-\frac{\partial(N_{11}A_2)}{\partial\alpha_1} - \frac{\partial(N_{21}A_1)}{\partial\alpha_2} - N_{12}\frac{\partial A_1}{\partial\alpha_2} + N_{22}\frac{\partial A_2}{\partial\alpha_1} - A_1A_2\frac{Q_{13}}{R_1} + A_1A_2\rho h\ddot{u}_1 = A_1A_2q_1 \quad (1)$$

$$-\frac{\partial(N_{12}A_2)}{\partial\alpha_1} - \frac{\partial(N_{22}A_1)}{\partial\alpha_2} - N_{21}\frac{\partial A_2}{\partial\alpha_1} + N_{11}\frac{\partial A_1}{\partial\alpha_2} + A_1A_2\frac{Q_{23}}{R_2} + A_1A_2\rho h\ddot{u}_2 = A_1A_2q_2 \quad (2)$$

$$-\frac{\partial(Q_{13}A_2)}{\partial\alpha_1} - \frac{\partial(Q_{23})}{\partial\alpha_2} + A_1A_2\left(\frac{N_{11}}{R_1} + \frac{N_{22}}{R_2}\right) + A_1A_2\rho h\ddot{u}_3 = A_1A_2q_3 \quad (3)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของวัสดุ, q_i คือแรงภายนอก, Q_{13} และ Q_{23} สามารถหาได้จากสมการที่ 4 และสมการที่ 5 ตามลำดับ

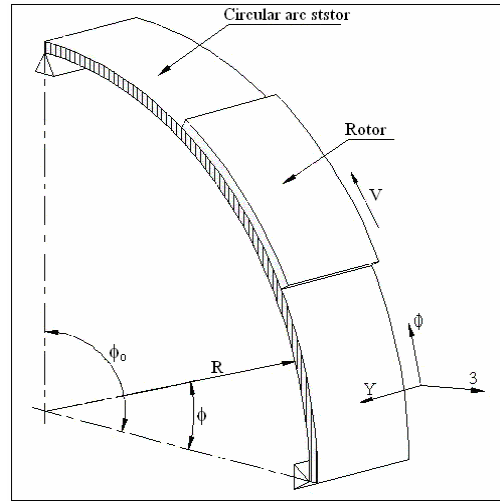
$$\frac{\partial(M_{11}A_2)}{\partial\alpha_1} + \frac{\partial(M_{21}A_1)}{\partial\alpha_2} + M_{12}\frac{\partial A_1}{\partial\alpha_2} - M_{22}\frac{\partial A_2}{\partial\alpha_1} - Q_{13}A_1A_2 = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(M_{12}A_2)}{\partial\alpha_1} + \frac{\partial(M_{22}A_2)}{\partial\alpha_2} + M_{21}\frac{\partial A_2}{\partial\alpha_1} - M_{11}\frac{\partial A_1}{\partial\alpha_2} - Q_{23}A_1A_2 = 0 \quad (5)$$

กรณีศึกษาที่สมมติให้สเตเตอร์มีลักษณะเป็นคานที่มีควมหนาแน่นมาก (Thin beam) เมื่อนำความกว้างของคานเทียบกับรัศมีความโค้งมีค่าน้อยมากจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในทิศทางของ y เนื่องจากความค้ำและความค้ำเนินที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับศูนย์รวมถึงการยึดหดในแนวแกน y ก็มีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย และสามารถหาค่า A_1 , A_2 และ R_1 , R_2 ได้จากสมการของ infinitesimal displacement,

$$(ds)^2 = (Rd\theta)^2 + (dy)^2 \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) จะได้ Lamé's Parameter $A_1=R$, $A_2=1$, และ Radii of Curvature $R_1=R$, $R_2=\infty$ จากนั้นนำค่า Lamé's Parameter และ Radii of Curvature แทนลงในสมการของเลฟ (Love's Equation) โดยเปลี่ยนทิศทาง 1 ไปเป็นทิศทาง ϕ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงไต่อะแกรนระบบของคานโค้ง

ทำให้สมการการเคลื่อนที่ของระบบลดรูปลงเหลือ

$$\frac{\partial(N_{\phi\phi})}{\partial\phi} + Q_{\phi 3} + Rq_{\phi} = R\rho h\frac{\partial^2 u_{\phi}}{\partial t^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q_{\phi 3}}{\partial\phi} - (N_{\phi\phi}) + Rq_3 = R\rho h\frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} \quad (8)$$

$$Q_{\phi 3} = \frac{1}{R}\frac{\partial(M_{\phi\phi})}{\partial\phi} \quad (9)$$

เมื่อ $N_{\phi\phi}$ คือ แรงกระทำ, $M_{\phi\phi}$ คือโมเมนต์ดัด, $Q_{\phi 3}$ คือความค้ำเนิน จากนั้นแทนค่า $N_{\phi\phi}$, $M_{\phi\phi}$ และ $Q_{\phi 3}$ แทนในสมการที่ (7) ถึงสมการที่ (9) จะได้สมการการเคลื่อนที่ของระบบในทิศทางของ ϕ และทิศทาง 3 ตามลำดับ

$$\frac{D}{R^4}\left(\frac{\partial^2 u_{\phi}}{\partial\phi^2} - \frac{\partial^3 u_3}{\partial\phi^3}\right) + \frac{K}{R^2}\left(\frac{\partial^2 u_{\phi}}{\partial\phi^2} + \frac{\partial u_3}{\partial\phi}\right) + q_{\phi} = \rho h\frac{\partial^2 u_{\phi}}{\partial t^2} \quad (10)$$

$$\frac{D}{R^4}\left(\frac{\partial^3 u_{\phi}}{\partial\phi^3} - \frac{\partial^4 u_3}{\partial\phi^4}\right) - \frac{K}{R^2}\left(\frac{\partial u_{\phi}}{\partial\phi} + u_3\right) + q_3 = \rho h\frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} \quad (11)$$

$$+ q_3 = \rho h\frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2}$$

การหาค่าความถี่ธรรมชาติ (f_k) และ mode shape (u_{ij}) สามารถหาได้จากสมการ ; [Smithmaitrie,2004]

กรณีเมื่อ $k = 2,4,6,\dots$

$$f_k = \frac{k^2\pi^2}{2\pi(R\phi_0)^2} \left[\frac{\left(1 - \left(\frac{\phi_0}{k\pi}\right)^2\right)^2}{1 + 3\left(\frac{\phi_0}{k\pi}\right)^2} \right]^{1/2} \sqrt{\frac{YI}{\rho hb}}; k = 2,4,6 \quad (12)$$

$$U_{\phi k} = \frac{\phi_0}{k\pi} \left[1 - \cos\left(\frac{k\pi\phi}{\phi_0}\right) \right]; k = 2,4,6 \quad (13)$$

$$U_{3k} = -\sin\left(\frac{k\pi\phi}{\phi_0}\right); k = 2,4,6 \quad (14)$$

กรณีเมื่อ $k = 1, 3, 5, \dots$

$$f_k = \frac{k^2 \pi^2}{2\pi(R\phi_o)} \left[\frac{I - (\phi_o/k\pi)^2}{I + \frac{1}{k^2} + 2\left(\frac{\phi_o}{k\pi}\right)^2} \right]^{1/2} \sqrt{\frac{YI}{\rho h b}}; k = 3, 5, 7 \quad (15)$$

$$U_{\phi k} = -\frac{\phi_o}{k\pi} \left[\cos\left(\frac{k\pi\phi}{\phi_o}\right) - \frac{1}{\pi^3} \cos\left(\frac{\pi\phi}{\phi_o}\right) \right]; k = 3, 5, 7 \quad (16)$$

$$U_{3k} = -\sin\left(\frac{k\pi\phi}{\phi_o}\right) + \frac{1}{k} \sin\left(\frac{\pi\phi}{\phi_o}\right); k = 3, 5, 7 \quad (17)$$

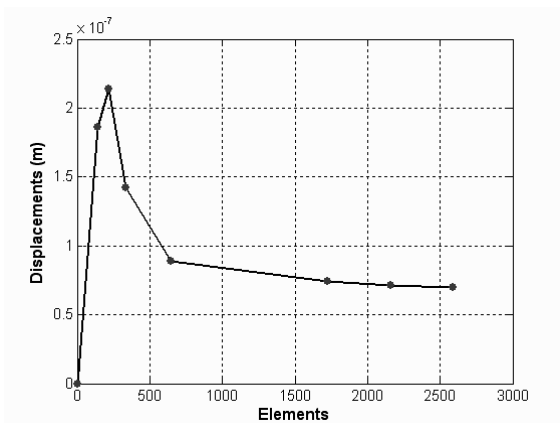
เมื่อ k = โหมดของการสั่น (mode number)

ϕ = ตำแหน่งเชิงมุม (angular position)

ϕ_o = มุมเปิดทั้งหมดของคานโค้ง (opening angle of the arc)

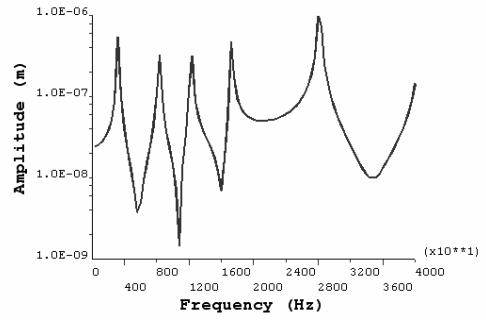
3. ผลการคำนวณ

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าหากจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองมีน้อย ค่าความสูงของคลื่นจะมีค่าน้อยและเมื่อจำนวนเอลิเมนต์เพิ่มขึ้นค่าความสูงของคลื่นจะลู่เข้าที่จำนวนเอลิเมนต์ประมาณ 1700 เอลิเมนต์ และต่อจากนี้เมื่อเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์ขึ้นอีกความสูงของคลื่นจะมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก

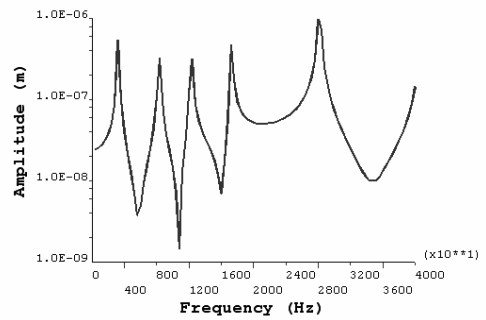


รูปที่ 6 แสดงจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองกับความสูงของคลื่นเคลื่อนที่

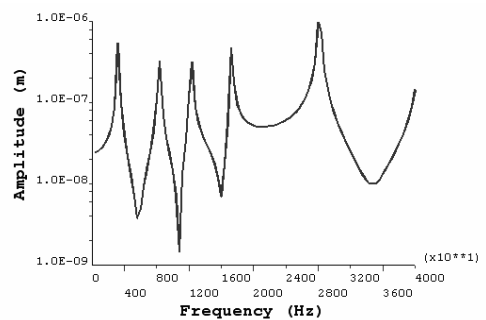
จากรูปที่ 7 ถึงรูปที่ 9 การตอบสนองต่อความถี่ไม่มีความแตกต่างกัน โดยเฉพาะกราฟรูปที่ 7 ซึ่งไม่ได้ติดตั้งวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนก็มีลักษณะเหมือนกันกับรูปที่ 8 และรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งการจัดวางวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือน (Damping material) ไม่มีผลต่อการตอบสนองของสเตเตอร์ของมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้ง แต่จากการสังเกตพฤติกรรมของคลื่นที่เกิดขึ้นพบว่าหากไม่ติดตั้งวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนบนสเตเตอร์จะทำให้คลื่นเคลื่อนที่เสียรูปได้เมื่อเคลื่อนที่มาถึงบริเวณจุดรองรับซึ่งเกิดจากการสะท้อนกลับของคลื่นลูกก่อนหน้าเป็นผลให้คลื่นที่ตามมาเสียรูปได้



รูปที่ 7 แสดงการตอบสนองต่อความถี่กรณีไม่ติดตั้งวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนบนสเตเตอร์



รูปที่ 8 แสดงการตอบสนองต่อความถี่ของรูปแบบกรณีติดตั้งวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนแบบสั้น



รูปที่ 9 แสดงการตอบสนองต่อความถี่ของรูปแบบกรณีติดตั้งวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนแบบยาว

4. สรุป

จากผลของการจำลองแบบสเตเตอร์ของมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้งสรุปได้ว่า ผลการคำนวณค่าความสูงและความถี่ของคลื่นเคลื่อนที่จะลู่เข้าเมื่อจำนวนเอลิเมนต์ที่แบ่งมีค่ามากขึ้น นอกเหนือจากนี้วัสดุดูดซับการสั่นสะเทือน (Damping material) ที่ถูกเพิ่มเข้าไปในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าทำให้การสะท้อนของคลื่นเคลื่อนที่เมื่อกระทบกับจุดรองรับมีน้อยและทำให้คลื่นที่เกิดบนสเตเตอร์มีเสถียรภาพมากขึ้น แต่ขนาดความยาวของวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือนไม่ส่งผลกระทบต่อคลื่นเคลื่อนที่และค่าความแข็งตั้ง (Stiffness) ของสเตเตอร์ของมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้ง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ รวมถึงสถานที่ที่ใช้ในการทำวิจัยและขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hemsell, T., and Wallaschek, J., 2000. Survey of the present state of the art of piezoelectric linear motors. *Ultrasonics* 38 (2000), pp. 37-40.
- [2] Hermann, M., and Schinkothe, W(IKFF)., 1999. Piezoelectric traveling wave motors generating direct linear motion. Conference Proceeding, Bremen 26, 28 June 1996, pp. 200-203
- [3] Yongrae, R., Susung, L., and Wooseok, H., 2001. Design and fabrication of a new traveling wave-type ultrasonic linear motor. *Sensors and Actuators A* 94 (2001), pp. 205-210.
- [4] Ueha, S., Tomikawa, Y., Kurosawa, M., and Nakamura, N., 1993. *Ultrasonic Motors Theory and Applications*. Clarendon Press, Oxford, UK.
- [5] Sashida, T., and Kenjo, T., 1993. *An Introduction to Ultrasonic Motors*. Clarendon Press, Oxford.
- [6] Lih, S.S., Bar-Cohen, Y., and Grandia, W., 1997. Rotary Ultrasonic Motor Actuated By Traveling Fluxural Wave. *Smart Structures and Integrated Systems*, San Diego, CA, 3-6 March, pp. 912-917
- [7] Bar-Cohen, Y., Bao, X., and Grandia, W., 1999. Rotary Ultrasonic Motors Actuated By Traveling Flexural Wave. *Proceedings of SPIE's 6th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, 1-5 March, pp. 698-704
- [8] Smithmaitrie, P., and Tzou, H.S., 2005. Electro-dynamics, micro-actuation and design of arc stators in an ultrasonic curvilinear motor. *Journal of Sound and Vibration* 284 (2005), pp. 635-650.
- [9] Soedel, W., 1993. *Vibrations of Shells and Plate*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- [10] Uchino, K., 1997. *Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [11] Tzou, H.S., 1993. *Piezoelectric Shell (Distributed Sensing and Control of Continua)*. Kluwer Academic, Boston/Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- [12] Frangi, A., Corigliano, A., Binci, M., and Faure, P., 2005. Finite element modeling of a rotating piezoelectric ultrasonic motor. *Ultrasonics* 43 (2005), pp. 747-755.
- [13] Sun, D., Liu, J., and Ai, X., 2002. Modeling and performance evaluation of traveling-wave piezoelectric ultrasonic motors with analytical method. *Sensor and Actuators A* 100 (2002), pp. 84-93.