การวิเคราะห์และทดสอบชิ้นส่วนกันการกระแทกสำหรับบรรจุภัณฑ์

Analysis and Test of Cushion in Shipping Packages

ศรัทธา เกาะไพศาลสุขวัฒนา นครินทร์ จักร์เพ็ชร
นพพร ฉายแก้ว นิวัฒน์ ครุวรรณ และ ฐิติมา จินตนาวัน
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พญาไท กรุงเทพมหานคร 10330
โทร 0-22186639 โทรสาร 0-22522889 E-mail: thitima.j@chula.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการใช้ชิ้นส่วนกันการกระแทกอย่างแพร่หลายในการขนส่งสินค้าที่เปราะบางและแตกง่าย เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดจากแรงประเภท Shock และ Vibration ที่ส่งผ่านไปยังผลิตภัณฑ์ บทความนี้เกี่ยวข้องกับการออกแบบชิ้นส่วนกันการกระแทกสำหรับระบบบรรจุภัณฑ์ที่รับแรงประเภท Shock ขณะมีการขนส่ง โดยจะนำเสนอการศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของชิ้นส่วนกันการกระแทก ได้แก่ ค่า Stiffness coefficient k และ Damping ratio ζ รวมถึงมวลรวมผลิตภัณฑ์ ที่มีต่อค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ ในการศึกษาเราจำลองระบบบรรจุภัณฑ์ด้วยระบบ Mass-spring-damper อย่างง่ายที่รับ Impulsive load ความเข้าใจเกี่ยวกับผลการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์นี้ จะนำไปสู่การเลือกออกแบบชิ้นส่วนกันการกระแทกได้เหมาะสมต่อไป และเพื่อยืนยันผลการศึกษาทางทฤษฎี เราได้ทดสอบวัสดุกันการกระแทก (Cushioning material) สำหรับบรรจุภัณฑ์ ชนิดโฟมโพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่มีความหนาขนาดต่างๆกัน เพื่อหา Dynamic Cushioning Curve และนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบเชิงคุณภาพกับผลการศึกษาทางทฤษฎี

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อค่าความเร่งสูงสุดของผลิตภัณฑ์ พบว่าเมื่อเพิ่มค่า k หรือในเชิงกายภาพเมื่อวัสดุกันกระแทกมีความแข็งมากขึ้น ความเร่งสูงสุดจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้เมื่อเพิ่มมวลรวมของผลิตภัณฑ์ ค่าความเร่งสูงสุดจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากด้วยมวลที่เพิ่มขึ้น ความถี่ธรรมชาติของระบบจะลดลง ส่งผลให้ขนาดความเร่งซึ่งแปรผันตามความถี่ธรรมชาติลดลงไปด้วย และการปรับเปลี่ยนค่า Damping ratio ζ พบว่า ค่า ζ ประมาณ 0.25 จะให้ผลค่าความเร่งสูงสุดที่ต่ำที่สุด ท้ายสุดจากผลการทดสอบหา Dynamic Cushioning Curve สำหรับโฟมขนาดต่างๆ พบว่าการเพิ่มความหนาโฟมซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งของวัสดุลดลง และค่า Damping เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความเร่งสูงสุดลดลง และการเพิ่มมวลของผลิตภัณฑ์จะทำให้ค่าความเร่งสูงสุดลดลงเช่นกัน ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องเชิงคุณลักษณะกับผลวิเคราะห์ทางทฤษฎี

Abstract

Product fragility due to shock or vibration load can be occurred during the transportation. This paper mainly focuses on a cushioning design for shock isolation in shipping packages. The objective is to analytically investigate effects of cushion parameters such as stiffness and damping as well as product inertia on the maximum acceleration of the product. The package including the cushion is modeled as a single degree-of-freedom mass-spring-damper system subjected to an impulsive load. For the parametric study, closed-form maximum acceleration is derived in terms of mass m, stiffness k and damping ratio ζ. Moreover experimental tests to determine *Dynamic Cushioning Curve* for low-density polyethylene (LDPE) cushions with different thickness are performed. The test results are qualitatively compared with the analytical results.

The parametric investigation reveals that an increase in stiffness coefficient of the cushion results in a higher maximum acceleration of the product. This is because stiffer springs cause smaller deflection and hence resulting in a larger inertia force of the package. In addition, the maximum acceleration is decreased as the mass is increased. With increased mass, the natural frequency is decreased. The acceleration amplitude, which is proportional to the natural frequency, is hence decreased, provided the same initial velocity due to the same drop height. Moreover the optimum value of damping ratio for the lowest maximum acceleration is 0.25. The test results show that a thicker foam or a softening foam with higher damping better isolates the shock, and hence yields a lower maximum acceleration. Both analytical and experimental results qualitatively agree well.

Keywords: Vibration; Cushion; Packages; Design.

1. Introduction

การออกแบบระบบบรรจุภัณฑ์เพื่อรองรับการกระแทกขณะขนส่ง แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนหลัก [1] กล่าวคือ 1) การพิจารณาถึง Fragility ของผลิตภัณฑ์ 2) การพิจารณาถึง Condition ของผลิตภัณฑ์ และ 3) การออกแบบชนิดและขนาดของ Cushion โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดโดยสรุปดังนี้

1.1 การพิจารณาถึง Fragility ของผลิตภัณฑ์

ในขั้นตอนแรกนี้ ผู้ออกแบบจะต้องพิจารณาหาปริมาณสูงสุดของ Mechanical shock ที่กระทำต่อผลิตภัณฑ์และผลิตภัณฑ์นั้น สามารถทนอยู่ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย ปริมาณ Shock สูงสุดนี้จะระบุในเทอมของ “Fragility” หรือเรียกง่ายๆ “g-factor” โดยค่า g-factor นี้ปรกติและจะแสดงอยู่ในหน่วยของความเร่ง “g’s” โดย 1 g = 9.81 m/s^2 ค่าดังกล่าวจะระบุถึงค่าความความเร่งสูงสุด ที่ผลิตภัณฑ์นั้นทนอยู่ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย นั่นก็คือผลิตภัณฑ์ที่มีความเปราะมากจะมีค่า g-factor ที่ต่ำ ดังนั้น การออกแบบชิ้นส่วนรับแรงควรจะช่วยลดแรงกระแทกที่จะส่งผ่านไปยังผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ค่าความเร่งจริงที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์น้อยกว่า ค่า g-factor ของผลิตภัณฑ์นั้น เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้น และ ไม่ออกแบบชิ้นส่วนเพื่อลดแรงกระแทกเกินความจำเป็น หรือออกแบบ Cushion ที่มีความหนามากเกินไปเพราะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่าย ค่า g-factor ของผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งๆ จะได้มาจากการทดสอบตามมาตราฐาน ASTM 3332 [2] ซึ่งอยู่นอกเหนือขอบเขตการศึกษานี้

1.2 การพิจารณาถึง Condition ของผลิตภัณฑ์

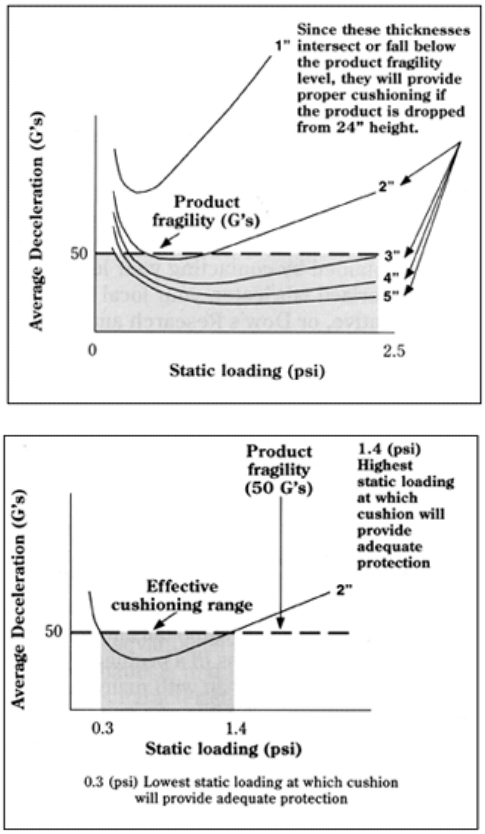
ขั้นตอนต่อมา พิจารณาสภาวะแวดล้อมต่างๆที่ผลิตภัณฑ์จะได้รับในการขนย้าย ตัวอย่างเช่น ระดับความสูงของผลิตภัณฑ์ที่อาจจะตกลงมา ซึ่งการกำหนดความสูงจะเป็นเท่าไหร่นั้นเราพิจารณาร่วมกับน้ำหนักของผลิตภัณฑ์และวิธีการขนส่ง

1.3 การออกแบบชนิดและขนาดของ Cushion ที่ต้องการ

เมื่อทราบถึงค่า g-factor และระดับความสูงแล้วขั้นตอนต่อไปคือเลือกออกแบบชนิดและขนาดของ Cushion ที่เหมาะสมที่จะป้องกันผลิตภัณฑ์ได้ การออกแบบนั้นจะเราพิจารณา Load เพื่อหา ชนิด ขนาด และ ความหนาของ Cushion ที่ป้องกันตัวผลิตภัณฑ์ได้ และมีค่าใช้จ่ายที่เหมาะสม ในการคำนวณการรองรับ เราจำเป็นที่จะต้องเข้าใจ “Dynamic Cushioning Curve” ดังแสดงในรูปที่ 1

Dynamic Cushioning Curve เป็นกราฟที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของ Static load (psi) กับ Deceleration (g’s) ของวัตถุ ซึ่งเกิดจากการที่ปล่อยวัตถุที่เราทราบน้ำหนัก ลงบนตัวอย่างของ Cushion จากความสูงที่เรากำหนด แล้วทำการวัดค่าแรงกระแทกที่เกิดจากก้อนน้ำหนักตกกระทบกับ Cushion โดยค่าที่วัดได้จะเป็นค่าความหน่วง Deceleration (g’s) ซึ่งอ่านค่าได้จาก Accelerometer ที่ติดตั้งบนก้อนน้ำหนักนั้น

จากตัวอย่าง Dynamic Cushioning Curve ในรูปที่ 1 ถ้าผลิตภัณฑ์มีระดับของ g-factor อยู่ที่ระดับ 50 g’s ระบุด้วยเส้น Fragility ซึ่งขนานกับแกนนอนในรูปที่ 1 เราจะแบ่งการพิจารณากราฟออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ส่วนที่อยู่ต่ำกว่าเส้น Fragility ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งก็คือบริเวณที่ผลิตภัณฑ์จะไม่เกิดความเสียหายเมื่อได้รับ Shock ในช่วงนี้ และ 2) ส่วนที่อยู่เหนือเส้น Fragility ขึ้นไป ซึ่งระดับของ Shock มีมากเพียงพอที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหายได้



รูปที่ 1 ตัวอย่าง Dynamic cushioning Curve [1]

ในกรณีนี้หากพิจารณาในรูปที่ 1 Cushion ที่มีความหนา 1 นิ้ว จะไม่สามารถป้องกันผลิตภัณฑ์ได้ เพราะว่า Cushioning curve ทั้งเส้นนั้นอยู่เหนือเส้น Fragility โดยตลอดทั้งกราฟ นั่นก็คืออยู่ในบริเวณที่จะเกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ เมื่อพิจารณา Cushion ที่มีความหนา 2 นิ้วขึ้นไป บางส่วนของ Cushioning curves จะตกอยู่ในเขตที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหาย ซึ่งสามารถใช้ในการออกแบบได้ แต่ในการออกแบบนั้น เราจะเลือกให้ได้ขนาดของ Cushion ที่มีความหนาน้อยที่สุดเพื่อลดค่าใช้จ่ายได้ ซึ่งในกรณีนี้ความหนาที่ 2 นิ้ว น่าจะเหมาะสมที่สุดในเชิงพาณิชย์

เมื่อเราพิจารณาเลือกความหนาแล้ว เราจะพิจารณาหาค่า Static loading หรือน้ำหนักที่กระทำบนชิ้นรองต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และ Bearing area ต่อไป จากรูปที่ 1(b) Cushion ขนาด 2 นิ้ว สามารถรับ Static load ในช่วง 0.3 psi ถึง 1.4 psi (Cushioning range) แล้วไม่เกิดความเสียหาย กล่าวคือความเร่งที่เกิดมีค่า 50 g’s หรือต่ำกว่า จุดที่เลือกใช้ในการออกแบบ คือ จุดที่มีค่า Static load มากที่สุดที่อยู่ใน Cushioning range ในตัวอย่างนี้ คือ 1.4 psi เนื่องจากจะใช้วัสดุสำหรับการทำชิ้นส่วนรองรับการกระแทกน้อยที่สุด การหา Bearing Area

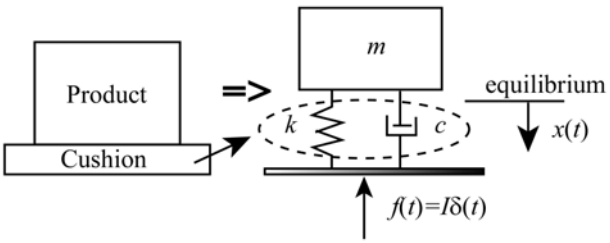
สามารถคำนวณได้โดยนำค่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์หารด้วย Static loading ที่เราเลือก เช่น ถ้าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ คือ 60 ปอนด์ ที่ Static loading 0.3 psi จะได้พื้นที่รับแรง 200 ตารางนิ้ว และที่ 1.4 psi จะได้พื้นที่รับแรง 43 ตารางนิ้ว ซึ่งจะลดขนาดของพื้นที่รับแรงไปได้ถึง 78.5% ทำให้ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายมากขึ้น

นอกจากทั้งสามขั้นตอนที่กล่าวมาแล้ว ในการออกแบบเรายังต้องคำนึงถึง Compressive creep Cushion buckling และ Extreme temperature effect อีกด้วย [1]

จากข้อมูลในการออกแบบที่กล่าวเบื้องต้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จะนำเสนอการศึกษาผลการจำลองการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของชิ้นส่วนกันการกระแทก ได้แก่ ค่า Stiffness coefficient k และ Damping ratio ζ รวมถึงมวลรวมผลิตภัณฑ์ ที่มีต่อค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ ความเข้าใจเกี่ยวกับผลการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์นี้ จะนำไปสู่การเลือกออกแบบชิ้นส่วนกันการกระแทกได้เหมาะสมต่อไป และเพื่อยืนยันผลการศึกษาทางทฤษฎี เราได้ทดสอบวัสดุกันการกระแทก (Cushioning material) สำหรับบรรจุภัณฑ์ ชนิดโฟมโพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่มีความหนาขนาดต่างๆ กัน เพื่อหา Dynamic Cushioning Curve และนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบเชิงคุณภาพกับผลการศึกษาทางทฤษฎี

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในหัวข้อนี้ เราจะจำลองการเคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์เมื่อรับแรงกระแทกแบบ Impulsive force โดยจะพิจารณาการเคลื่อนที่ในเชิงความเร่ง หรือ G's ซึ่งเป็นค่าที่ระบุถึงขีดความเสียหายของผลิตภัณฑ์ตามที่กล่าวมาแล้ว การจำลองนี้เราพิจารณาหาค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นกับระบบเมื่อสมมติแรงกระทำเนื่องจากการตกกระแทกเป็น Perfect impulse และจะศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของชิ้นส่วนรองรับการกระแทกได้แก่ ค่า Stiffness coefficient ค่า Damping coefficient และมวลรวมของระบบ ต่อความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นหลังจากเกิดการกระแทก



รูปที่ 2 แบบจำลองของระบบบรรจุภัณฑ์ขณะกระแทกพื้น

เราจำลองระบบบรรจุภัณฑ์ด้วยระบบ Mass-spring-damper อย่างง่ายๆ ดังแสดงในรูปที่ 2 สปริงและ Damper มีค่า Stiffness coefficient k และ damping coefficient c โดยค่า k และ c ขึ้นอยู่กับชนิด และขนาดของชิ้นส่วนรองรับการกระแทก หรือโฟมที่ใช้ในบรรจุภัณฑ์ เมื่อเกิดการกระแทก สมมติให้แรงที่เกิดจากแรงกระแทกมีลักษณะเป็น Impulsive load นอกจากนี้เราจะพิจารณาการเคลื่อนที่ในแนวแกน x เพียงอย่างเดียว ดังในรูปที่ 2 โดยไม่คิดผลของการหมุนหรือการเคลื่อนที่ในแนวแกนอื่น ดังนั้นสมการอธิบายการเคลื่อนที่ หรือ Equation of motion ของแบบจำลองดังกล่าว คือ

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = I\delta(t) \tag{1}$$

เมื่อ I คือขนาดของ Impulse ขณะเกิดการกระแทก $\delta(t)$ คือ Dirac-delta function มีค่าดังนี้ $\delta(t) = 0; \quad t \neq 0$ และ $\int_{t_{0^-}}^{t_{0^+}} \delta(t)dt = 1$

ในกรณีนี้ ขนาดของ Impulse สัมพันธ์กับความเร็วเริ่มต้น v_0 เมื่อเกิดการกระแทก และระยะที่ปล่อยวัสดุให้ตก h ดังนี้

$$v_0 = \frac{I}{m} = \sqrt{2gh} \tag{2}$$

หลังจากเกิดการกระแทก ระบบตอบสนองกับระยะขจัดเริ่มต้น $x_0 = \frac{-mg}{k}$ และความเร็วเริ่มต้น v_0 แบบ Free response ด้วยการเคลื่อนที่ $x(t)$ ความเร็ว $\dot{x}(t)$ และ ความเร่ง $\ddot{x}(t)$ ดังนี้

$$\begin{aligned} x(t) &= e^{-\zeta\omega_n t}(A\sin\omega_d t + B\cos\omega_d t) \\ &= Ce^{-\zeta\omega_n t}\cos(\omega_d t - \psi) \end{aligned} \tag{3}$$

$$\dot{x}(t) = -\omega_n Ce^{-\zeta\omega_n t}\sin(\omega_d t - \psi + \varepsilon) \tag{4}$$

$$\ddot{x}(t) = -\omega_n^2 Ce^{-\zeta\omega_n t}\cos(\omega_d t - \psi + 2\varepsilon) \tag{5}$$

เมื่อ

$$\omega_n = \sqrt{k/m}, \quad \zeta = \frac{c}{2m\omega_n}, \quad \omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

$$A = \frac{\sqrt{2gh}}{\omega_d} - \frac{\zeta g}{\omega_n^2\sqrt{1-\zeta^2}} \ , \ B = \frac{-g}{\omega_n^2}$$

$$C = \sqrt{A^2 + B^2} \ , \ \psi = \tan^{-1}\left(\frac{A}{B}\right), \ \sin\varepsilon = \zeta$$

เราพิจารณาหาค่าความเร่งสูงสุด a_{max} จาก $\dddot{x}(t) = 0$ ได้ดังนี้

$$a_{\max} = -\omega_n^2 C\sqrt{1-\zeta^2}\,\exp\left[\frac{(3\varepsilon-\psi)\xi}{(1-\xi^2)^{1/2}}\right]; for\,\varepsilon<\psi/3 \text{ or } \xi<\sin\left(\frac{\psi}{3}\right)$$

$$= -\omega_n^2 C\cos(-\psi+2\varepsilon); \qquad for\,\varepsilon>\psi/3 \text{ or } \xi>\sin\left(\frac{\psi}{3}\right) \quad (6)$$

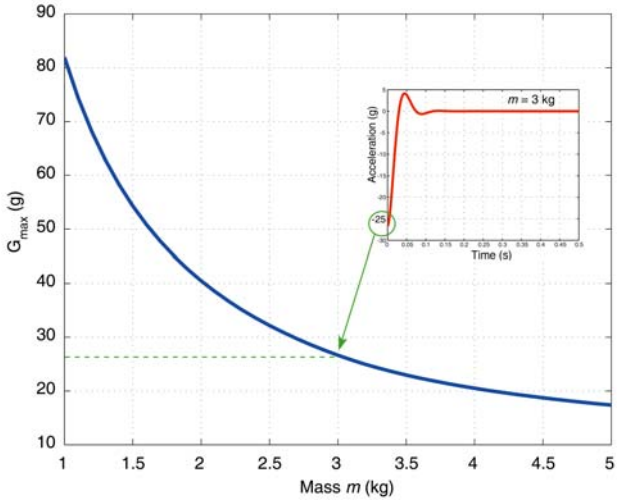
3. ผลการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่อค่าความเร่งสูงสุด

เมื่อปรับเปลี่ยนค่า m k และ ζ ของระบบตามลำดับจะส่งผลให้ a_{max} หรือ G_{max} เปลี่ยนไป ดังแสดงในรูปที่ 3 เมื่อค่า G_{max} แสดงในหน่วยของ g โดย 1g = 9.81 m/s^2 ผลการเปลี่ยนค่า m k และ c ต่อค่า G_{max} สามารถอภิปรายได้ดังนี้

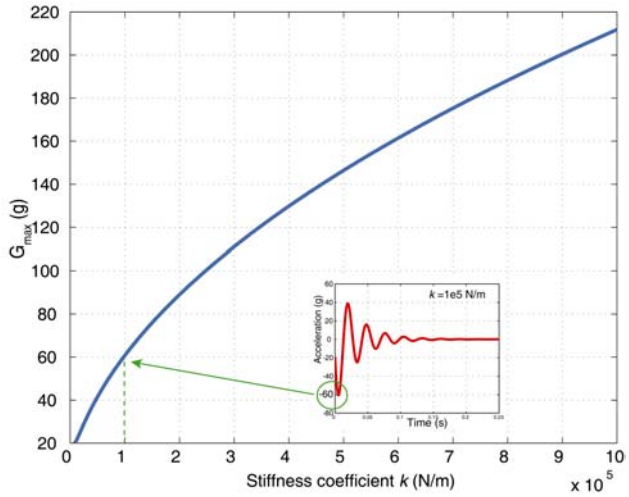
จากรูปที่ 3(ก) จะเห็นว่า ค่า G_{max} จะลดลงเมื่อมวลมีค่ามากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้ เพราะในการจำลองการกระแทกนี้ เมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์ที่ตกจากระดับความสูงที่คงที่จะส่งผลให้ความเร็วต้นตกกระทบมีค่าคงที่ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (2) และด้วยมวลที่เพิ่มขึ้น ความถี่ธรรมชาติของระบบจะลดลง ส่งผลให้ขนาดความเร่งซึ่งแปรผันตามความถี่ธรรมชาติลดลงไปด้วย ในเชิงกายภาพวัตถุที่มีมวลมาก เมื่อตกกระทบพื้นจากระดับความสูงค่าหนึ่ง เนื่องจากมวลหรือความเฉื่อยที่สูงกว่า จะเกิดขนาดความเร่งของการสั่นหลังตกกระทบต่ำกว่าวัตถุที่มีมวลน้อย

จากรูปที่ 3(ข) เมื่อค่า k เพิ่มขึ้น ค่า G_{max} จะมีค่ามากขึ้น เพราะเมื่อค่า k เพิ่มขึ้น หมายถึงสปริงมีวามแข็งมากขึ้น และยุบตัวได้น้อยลง ส่งผลให้แรงที่ถ่ายไปสู่ผลิตภัณฑ์มีค่ามากขึ้น ดังนั้น G_{max} จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตาม เมื่อมาพิจารณาคุณสมบัติของชิ้นส่วนรองรับการกระแทก เช่น โฟม จะพบว่าการเพิ่มความหนาของโฟม เป็นการลดความแข็งของโฟม หรือลดค่า k ลง ดังนั้นการเพิ่มความหนาของโฟมจึงทำให้ค่า G_{max} ลดลง

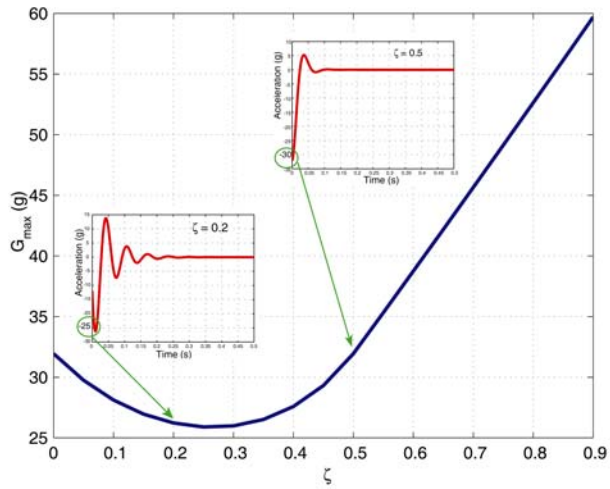
เมื่อพิจารณาผลการเปลี่ยนค่า ζ ดังรูปที่ 3(ค) เราสามารถแบ่งกราฟออกเป็นสามช่วง ช่วงแรก ที่ค่า ζ น้อยๆ กล่าวคือ ζ < 0.25 ในช่วงนี้เมื่อค่า ζ เพิ่มขึ้น ค่าความเร่งสูงสุดลดลง และจะลดลงต่ำสุดที่ค่า ζ ประมาณ 0.25 ช่วงที่สอง คือ 0.25 < ζ < 0.5 ค่าความเร่งสูงสุดจะมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่า ζ และช่วงที่สาม เมื่อ ζ > 0.5 ค่า G_{max} จะแปรผันตรงกับค่า ζ จากภาพประกอบของ Acceleration response ในรูปที่ 3(ค) พบว่า ช่วงที่ ζ น้อยๆ Acceleration response จะมีลักษณะ Overshoot และมีค่า Setting time มาก อีกทั้ง G_{max} ไม่ได้เกิดในจังหวะกระแทกทันที (t = 0 s) เมื่อค่า Damping ratio มากขึ้น ลักษณะ Overshoot และ Setting time ใน Acceleration response กลับลดลง อีกทั้งความเร่งสูงสุดเกิด ณ เวลาเข้าใกล้ศูนย์มากขึ้น และเมื่อ ζ > 0.5 ค่า G_{max} จะเกิดที่เวลา t = 0 s หรือทันทีขณะกระแทก กรณีนี้ค่า G_{max} จะมีค่ามากกว่าค่า G_{max} ในกรณีที่มี ζ น้อย เมื่อมาพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุรองรับการกระแทก หรือ โฟม จะพบว่าการเพิ่มความหนาของโฟม เท่ากับเป็นการเพิ่มค่า damping c และลดค่าความแข็ง k ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสองมีผลต่อค่า Damping ratio ζ ดังนั้นในการออกแบบเราจะพิจารณาเลือกใช้โฟมเพื่อให้มีค่า ζ ประมาณ 0.25



(ก) เปลี่ยนค่ามวล



(ข) เปลี่ยนค่า Stiffness coefficient k

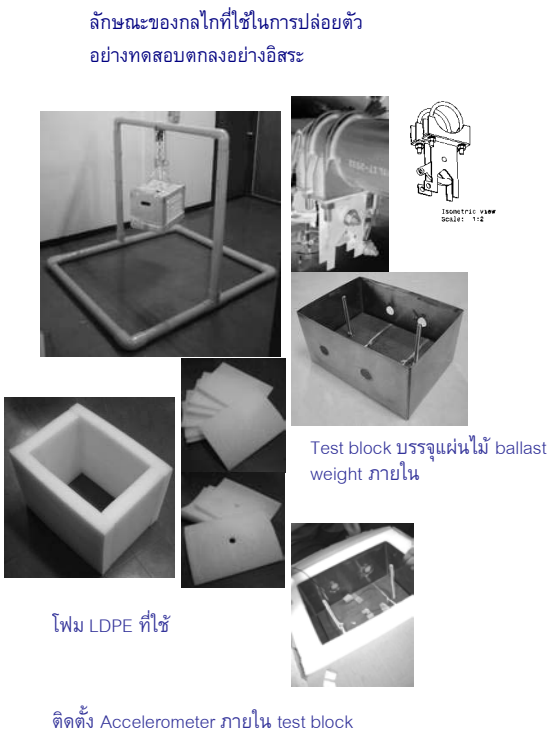


(ค) เปลี่ยนค่า Damping ratio ζ

รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

4. การทดสอบหา Dynamic Cushioning Curve

รูปที่ 4 แสดงการติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดสอบเพื่อหา Dynamic Cushioning Curve ของโฟมกันกระแทกตัวอย่าง การทดสอบนี้อ้างอิงจากมาตราฐาน ASTM D 4168 [3] ในหัวข้อ Standard Test Methods for Transmitted Shock Characteristics of Foam-in-Place Cushioning Material ซึ่งกล่าวถึงการทดสอบเพื่อหา Dynamic Cushioning Curve ของวัสดุกันกระแทกโดยวิธี Free-fall package drop test

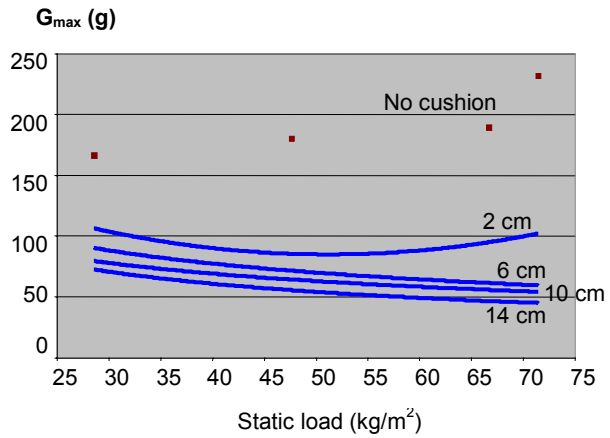


รูปที่ 4 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบเพื่อหา Dynamic cushioning curve

ในการทดสอบเรานำผลิตภัณฑ์จำลองซึ่งประกอบด้วย Test block และ Ballast weight ที่ปรับเปลี่ยนน้ำหนักได้ในช่วง 1.8 - 4.5 kg มาบรรจุใส่กล่องกระดาษ โดยมีชิ้นส่วนรองรับการกระแทก (Cushion) ในที่นี้เลือกใช้โฟมชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) บรรจุอยู่ภายในกล่องทั้ง 6 ด้าน โดยด้านล่างจะปรับเปลี่ยนความหนาของโฟมเป็น 2 ซม 6 ซม 10 ซม และ 14 ซม ตามลำดับ ทั้งนี้เราติดตั้ง Accelerometer ที่บริเวณกึ่งกลางของผิวด้านบนของผลิตภัณฑ์จำลองเพื่อวัดความเร่งของระบบ ดังรูปที่ 4 หลังจากนั้นเรานำบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการทดสอบมาแขวนบนชุดอุปกรณ์กลไกปล่อย โดยปรับระดับความสูงตามต้องการ และทำการปล่อยบรรจุภัณฑ์ให้ตกแบบอิสระ พร้อมทั้งบันทึกค่าความเร่งสูงสุดจาก Accelerometer หลังจากบรรจุภัณฑ์ตกกระแทกพื้น

รูปที่ 5 แสดงถึงกราฟ Dynamic cushioning curve หรือค่าความเร่งสูงสุด G_{max} เมื่อเปลี่ยนค่า Static load สำหรับความหนาโฟมขนาดต่างๆ ผลที่แสดงในรูปที่ 5 เกิดจากการเฉลี่ยผลการทดสอบในแต่ละชุด จำนวน 3 ครั้ง เมื่อพิจารณาผลทดสอบที่ได้ กราฟแต่ละเส้นแสดงถึงค่าความเร่งสูงสุด G_{max} ที่เกิดจากชิ้นส่วนรองรับแรงกระแทกหรือโฟม ส่งถ่ายแรงกระแทกมาถึงผลิตภัณฑ์ เมื่อนำผลการทดสอบนี้มาเปรียบเทียบเชิงคุณภาพกับผลทางทฤษฎี พบว่ามีประเด็นอภิปรายหลายประการ ดังนี้

เมื่อเพิ่มความหนาของโฟม ส่งผลให้ค่า Dynamic cushioning curve มีลักษณะต่ำลง หรือค่า G_{max} ลดลง ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ในหัวข้อที่ 3 นั้น การเพิ่มความหนาของ Cushion ก็คือ การลดค่าความแข็ง k และเพิ่มค่า Damping c ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทพลังงานออกจากระบบของ Cushion ดีขึ้น จึงส่งผลให้ค่า G_{max} ลดลง



รูปที่ 5 Dynamic cushioning curve สำหรับโฟมความหนาต่างๆ

ในรูปที่ 5 ที่ความหนาโฟมเท่ากับ 2 เซนติเมตร กราฟของค่า G_{max} มีลักษณะที่ลดต่ำลงแล้วโค้งขึ้น ซึ่งแตกต่างกับผลทางทฤษฎีที่ว่าเมื่อ เพิ่มมวลแล้ว ค่า G_{max} ควรจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีสมมติฐานหลายประการ อาทิเช่น แรงที่กระทำต่อผลิตภัณฑ์เป็น Perfect impulse และคุณสมบัติของ Cushion เป็น Linear spring และ Linear damper กล่าวคือค่า Stiffness coefficient k และค่า Damping coefficient c มีค่าคงที่ สำหรับโฟมชนิดและความหนาหนึ่ง เป็นต้น ในการทดลองจริงแรงที่เกิดจากการตกกระทบนั้น อาจไม่ได้เป็น Perfect impulse ดังกล่าว หากพิจารณาช่วงแรกของกราฟสำหรับความหนาโฟม 2 เซนติเมตร คือช่วงที่มวลทดสอบหรือ Static load ไม่มาก กราฟมีแนวโน้มคล้ายผลทางทฤษฎี คือค่า G_{max} ลดลงเมื่อเพิ่ม Static load นั่นน่าจะเป็นผลมาจากในช่วงแรกที่มวลน้อยนั้น เวลาในการตกกระทบจะสั้น จึงทำให้ Impulse ที่เกิดมีค่าใกล้เคียง Perfect impulse มากกว่า จึงส่งผลให้ผลการทดลองมีแนวโน้มคล้ายในทฤษฎี หลังจากนั้น เมื่อเพิ่มมวลของตัวอย่างทดสอบมากขึ้นเรื่อยๆ กราฟสำหรับโฟมความหนา 2 เซนติเมตร มีแนวโน้มที่ต่ำสุดที่ Static load ประมาณ 47 kg/m^2 หลังจากนั้นมีลักษณะที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้น่าจะมาจากเมื่อมวลเพิ่มขึ้น ทำให้ช่วงเวลาของการกระแทกและสัมผัสพื้นมากขึ้น จึงเป็นผลให้การกระแทกเบี่ยงเบนไปจากการเป็น Perfect impulse อีกสาเหตุของความแตกต่าง น่าจะมาจากการที่ Cushion ไม่ได้ประพฤติตัวเป็น Linear spring และ Linear damping ในทางปฏิบัติ กล่าวคือ ค่า k และ c มีค่าไม่คงที่ แต่กลับเปลี่ยนแปลง

ไปตามความถี่ของการสั่น ทั้งนี้ยังมีผลของ Creep เนื่องจากคุณสมบัติของ Cushion มีลักษณะเป็น Viscoelastic material มากกว่า

สุดท้ายเมื่อความหนาของ Cushion มากขึ้นกล่าวคือที่ความหนา 6 10 และ 14 cm ผลของค่า G_{max} มีแนวโน้มที่ลดลงต่อเนื่องเมื่อเพิ่มมวลของตัวอย่างทดลอง ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลทางทฤษฎี

5. สรุป

ในบทความนี้เราศึกษาผลการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของชิ้นส่วนกันการกระแทก ได้แก่ ค่า Stiffness coefficient k และ Damping ratio ζ รวมถึงมวลรวมผลิตภัณฑ์ ที่มีต่อค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ โดยจำลองระบบบรรจุภัณฑ์ด้วยระบบ Mass-spring-damper อย่างง่ายที่รับ Impulsive load ถึงแม้ข้อสมมติในการจำลองจะมีข้อจำกัดที่ทำให้แบบจำลองไม่ตรงกับระบบจริงทั้งหมด แต่การศึกษาดังกล่าวจะช่วยให้เกิดความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับผลการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งจะนำไปสู่การเลือกออกแบบชิ้นส่วนกันการกระแทกได้เหมาะสมต่อไป

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อค่าความเร่งสูงสุดของผลิตภัณฑ์ พบว่าเมื่อเพิ่มค่า Stiffness coefficient k ของ Cushion หรือในเชิงกายภาพเมื่อวัสดุกันกระแทกมีความแข็งมากขึ้น ความเร่งสูงสุดจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เพราะสปริงที่มีความแข็งมากขึ้น จะยุบตัวได้น้อยลง ส่งผลให้ค่าแรงที่ส่งถ่ายไปสู่ผลิตภัณฑ์สูงขึ้น และเมื่อเพิ่มมวลรวมของผลิตภัณฑ์ ค่าความเร่งสูงสุดจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากด้วยมวลที่เพิ่มขึ้น ความถี่ธรรมชาติของระบบจะลดลง ซึ่งส่งผลให้ขนาดความเร่งซึ่งแปรผันตามความถี่ธรรมชาติลดลงไปด้วย และการปรับเปลี่ยนค่า Damping ratio ζ พบว่า ค่า ζ ประมาณ 0.25 จะให้ผลค่าความเร่งสูงสุดที่ต่ำที่สุด

ผลการทดสอบหา Dynamic Cushioning Curve สำหรับโฟมขนาดต่างๆ พบว่าการเพิ่มความหนาโฟมซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งของวัสดุลดลง และค่า Damping เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความเร่งสูงสุดลดลง และการเพิ่มมวลของผลิตภัณฑ์จะทำให้ค่าความเร่งสูงสุดลดลงเช่นกัน ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องเชิงคุณลักษณะกับผลวิเคราะห์ทางทฤษฎี

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท Fabrinet Co., Ltd. ที่อนุเคราะห์สถานที่ทดสอบ และกรุณาให้ยืมอุปกรณ์ Accelerometer ในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

[1] http://www.dow.com.

[2] *ASTM D 3332-99: Standard Test Methods for Mechanical-Shock Fragility of Products, Using Shock Machines*, ASTM International, June 1999.

[3] *ASTM D 4168-95: Standard Test Methods for Transmitted Shock of Foam-in-Place Cushioning Materials*, ASTM International, June 1995.