

Comportamiento de barreras de Cristales de Sonido con dispersores resonantes



V. Romero-García^{1(*)}; A. Krynkin²; L.M. Garcia-Raffi³

¹Centro de tecnologías físicas, UPV, España

²School of Computing, Science & Engineering, University of Salford, UK

³Instituto Universitario de Matemática Pura y Aplicada, UPV, España

virogar1@upvnet.upv.es

PACS: 43.35Cg; 63.20D; 63.20Pw

Resumen

En los últimos años ha habido un gran interés en el diseño de sistemas para el control de ruido. En este trabajo se muestran resultados experimentales y simulaciones numéricas para el estudio de las propiedades de atenuación de los Cristales de Sonido (CS). Se propone el uso de dispersores de baja densidad en forma de U que pueden soportar resonancias relacionadas con las propiedades físicas del material, así como resonancias debidas a la forma geométrica del dispersor. Las resonancias observadas en este trabajo, producen una mejora de las posibilidades de los Cristales de Sonido como barreras acústicas en el régimen de bajas frecuencias. Las simulaciones numéricas basadas en el Método de los Elementos Finitos (MEF) muestran una gran similitud con los resultados experimentales.

Abstract

During the last few years there has been increasing interest in designing devices for controlling noise. In this work experimental data and numerical simulations are presented for the noise attenuation provided by Sonic Crystals (SC). The proposed SC is formed by elongated U-profile frames made of soft material. The single scatterer of that type may support resonances related to the material physical parameters and resonant cavity. The observed resonance effects give clear enhancement of the SC noise attenuation capability at the low frequency regime. Numerical simulations based on Finite Elements Method (FEM) show a good agreement with experimental results.

(*) Best paper EURONOISE 2009

1. Introducción

El problema de la dispersión múltiple en medios que contienen muchos dispersores ha sido estudiado desde hace muchos años. Cuando los dispersores están periódicamente distribuidos en el medio transmisor aparecen propiedades físicas muy interesantes. En este caso el proceso de dispersión múltiple da lugar al fenómeno de los denominados Band Gaps (BG) que son rangos de frecuencias en los que la onda no se transmite a través del sistema periódico.

En el caso de la propagación de ondas acústicas, el estudio de los materiales que presentan BG ha recibido una atención creciente en los últimos años tanto teórica como experimentalmente¹⁻³. Para el rango de frecuencias audibles, estos sistemas son conocidos como Cristales de Sonido (CS)^{4,5}. Análogamente a los Cristales Fotónicos, los CS han sido ampliamente estudiados para obtener BG acústicos a través de los cuales la propagación de sonido está prohibida.

Las propiedades acústicas de los CS pueden utilizarse para el desarrollo tecnológico de sistemas contra la contaminación acústica⁶. Además de la presencia de los BG, la atenuación acústica de CS puede ser mejorada usando dispersores con propiedades acústicas añadidas, como por ejemplo resonadores^{7,8} o absorbentes⁹ acústicos. Otras posibilidades incluyen usar dispersores con diferentes formas geométricas¹⁰ o variando la posición de los dispersores para cambiar las propiedades de la red periódica¹¹.

Teniendo en cuenta los materiales del dispersor y del medio transmisor, los CS pueden clasificarse como: “sólido/sólido”, “sólido/fluido” y “fluido/fluido”. En este trabajo estamos interesados en el estudio del modelo “sólido/fluido”, concretamente en el caso de dispersores sólidos dispuestos en un medio transmisor fluido. Existe mucha literatura que muestra resultados teóricos y experimentales dirigidos a CS con dispersores rígidos en un medio fluido, donde el contraste entre las propiedades físicas de la fase sólida y la fluida es muy grande. Un ejemplo típico es el sistema con componentes hechos de metal (material rígido) dispuestos en aire^{4,5}. Por el contrario, en el caso concreto de componentes sólidos hechos de material de baja densidad en un medio fluido, el contraste entre la fase sólida y la fluida, se reduce, lo cual se traduce en una interacción entre las ondas acústicas y las ondas propagándose en el propio material. Esta interacción puede aumentar potencialmente el efecto de los BG. Algunos autores han demostrado que en este tipo de material “sólido/fluido” puede aparecer localización del sonido e incluso ondas superficiales.

El objeto de este trabajo es investigar la propagación de ondas acústicas en CS formados por materiales de baja densidad que presentan una cavidad que soporta resonancias acústicas. Por otra parte la interacción entre el campo acústico y las propiedades elásticas del material de baja densidad introduce nuevos picos de atenuación en el rango de las bajas frecuencias.

En este artículo se estudia un material reciclado, Polietileno de Baja Densidad con celda cerrada^a, que denominaremos como Foam PEBD. Este material se utiliza habitualmente en la industria del embalaje como material anti-vibraciones. Sus principales propiedades físicas y acústicas se presentan en la sección 2. En la sección 3 introducimos la formulación del modelo elasto-acústico implementado mediante el software comercial COMSOL 3.4. Los resultados numéricos, basados en el método de los elementos finitos, muestran una gran similitud entre el Insertion Loss (IL) experimental obtenido para un dispersor aislado de Foam PEBD. Finalmente, en la sección 4, analizamos experimentalmente la propagación de sonido en una red de celda unidad triangular con parámetro de red $a=12.7$ cm.

2. Descripción del material

Los Foams se dividen principalmente en dos grupos, de celda abierta y de celda cerrada. Los primeros se pueden analizar teóricamente como un material poroelástico, sin embargo, Aygun y Attenborough¹³ demostraron que los foams de celda cerrada no pueden ser considerados como un material poroelástico. Las diferencias en las propiedades acústicas entre los de celda abierta y cerrada, aparecen como resultado de la diferente estructura de celda más que por las diferencias en

otros parámetros físicos. Por otra parte, Grenestedt¹⁴ ha demostrado analítica y numéricamente que el comportamiento mecánico de los polímeros de celda cerrada puede estudiarse considerando al material como un medio elástico efectivo.

Cuando un foam es comprimido, exhibe una zona inicial de comportamiento elástico seguida de una zona plana en la cual la fuerza requerida para comprimir el material permanece constante¹⁵. Nosotros supondremos en este trabajo que el Foam PEBD se comporta como un medio elástico cuando se excita con las frecuencias acústicas que trabajamos. Entonces, Foam PEBD puede considerarse como un material de baja densidad.

Tabla 1: Propiedades físicas de la espuma de Polietileno de Baja Densidad.

Foam PEBD	
Densidad (kg/m ³)	50
Modulo de Young (10 ⁹ Pa)	0.095
Coefficiente de Poisson	0.32

En la Figura 2 se puede ver la forma geométrica de los perfiles U que vamos a analizar como dispersor acústico. Este dispersor tiene 2 m de longitud y las principales propiedades del material se muestran en la Tabla 1. Además del material de baja densidad el dispersor está caracterizado por una forma geométrica característica que puede introducir las denominadas resonancias de cavidad.

La impedancia acústica y el coeficiente de absorción del Foam PEBD han sido analizados en trabajos anteriores¹⁶. Siguiendo la metodología estándar para la medida de las propiedades acústicas¹⁷, los coeficientes de reflexión y de absorción del Foam PEBD han sido obtenidos mediante el método de la función de transferencia. En esta técnica, el coeficiente de reflexión complejo se obtiene a partir de la expresión:

$$R_c = \frac{H_{12} - e^{iks}}{e^{-iks} - H_{12}} e^{i2kl}, \quad (1)$$

Donde H_{12} es la función acústica de transferencia medida en las posiciones de los dos micrófonos, l es la distancia entre la posición del primer micrófono y la muestra y s es la distancia entre los dos micrófonos. Usando la ecuación (1), el coeficiente de absorción α se define por

^a La denominación del material en inglés es: Low Density Polyethylene Foam with open-cell.

$$\alpha = 1 - |R_c|^2. \quad (2)$$

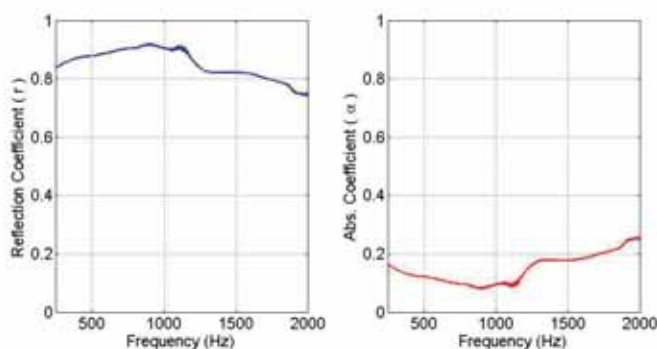


Figura 1: Coeficientes de absorción y reflexión medidos para el Foam PEBD. El espesor de la muestra es 1.3 cm.

Los coeficientes de absorción y reflexión de Foam PEBD se representan en la Figura 1. Los resultados obtenidos para la muestra rectangular de espesor 1.3 cm, son similares a aquellos que han sido obtenidos en trabajos posteriores¹⁶. Nótese que de acuerdo con nuestros resultados experimentales las propiedades acústicas del Foam PEBD no son sensibles a pequeñas variaciones de la anchura de la muestra.

A partir de las gráficas mostradas en la Figura 1, podemos observar que en el rango de frecuencias estudiado, el sonido es efectivamente reflejado por el Foam PEBD. Desde el punto de vista acústico estos resultados demuestran que este material puede ser considerado como un material rígido para este rango de frecuencias. Sin embargo, la baja densidad que presenta, puede resultar en vibraciones estructurales de la muestra elástica.

3. Modelización del comportamiento acústico-elástico de un dispersor aislado

En esta sección las ecuaciones de gobierno de la propagación de ondas son introducidas para el caso de dependencia armónica temporal. Consideramos un medio elástico B sumergido en un medio fluido A.

La ecuación de ondas para un medio elástico B es,

$$-\rho_B \omega^2 u_i = \left\{ \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \right\}, \quad (3)$$

donde u_i es la i -ésima componente del vector desplazamiento $\mathbf{u}(\mathbf{r})$, ω es la frecuencia angular y σ_{ij} es la relación tensión-... dada por

$$\sigma_{ij} = \lambda_B u_{ll} \delta_{ij} + \mu_B u_{ij},$$

$$u_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

con λ_B y μ_B son los coeficientes de Lamé y ρ_B es la densidad del material elástico. La velocidad transversal y longitudinal del material B se obtienen a partir de:

$$c_l = \sqrt{\frac{\lambda_B + 2\mu_B}{\rho_B}}, \quad c_t = \sqrt{\frac{\mu_B}{\rho_B}}, \quad (4)$$

donde los coeficientes de Lamé son definidos a partir del modulo de Young y del coeficiente de Poisson.

La ecuación para ondas acústicas en el medio fluido A, es

$$-\frac{\omega^2}{c_A^2} p = \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho_A} \nabla p \right), \quad (5)$$

donde p es la presión acústica, ρ_A es la densidad y c_A es la velocidad del sonido en el medio A.

Las soluciones de las ecuaciones (3) y (5) deben satisfacer condiciones de continuidad, es decir,

$$\frac{\partial p}{\partial n} \Big|_{\partial B} = \rho_A \omega^2 \bar{u} \bar{n}, \quad (6)$$

$$\sigma_{ij} n_j \Big|_{\partial B} = -p n_i, \quad (7)$$

donde ∂B es la frontera del medio B que puede presentar una forma geométrica compleja, véase Figura 2.

Para resolver el anterior problema elasto-acústico utilizamos un programa de elementos finitos, COMSOL 3.4.

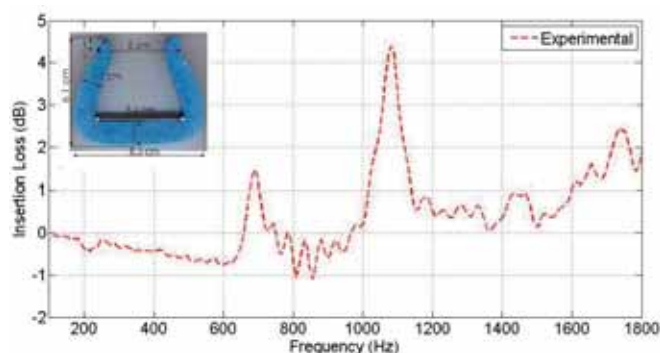


Figura 2: Insertion Loss experimental de un dispersor aislado. Línea discontinua roja representa los datos experimentales. La fotografía adjunta ilustra una vista transversal de los perfiles U.

4. Respuesta en frecuencia de un dispersor aislado

Analicemos primero los resultados experimentales para la respuesta en frecuencia de un dispersor aislado. Experimentalmente hemos medido, para incidencia de una onda plana perpendicular al eje principal del dispersor (definido como eje z), el Insertion Loss (IL) que se define como la diferencia de niveles acústicos medidos en el mismo punto con y sin muestra. Todos los experimentos se han realizado en una cámara anecoica de tamaño $8 \times 6 \times 3$ m.

Nótese que en este trabajo estamos interesados en analizar el rango de bajas frecuencias. La cota superior de este intervalo corresponde con la primera frecuencia Bragg de valor 1545 Hz. Esta frecuencia se definirá en la sección 5 para una red periódica triangular de dispersores con parámetro de red $a=12.7$ cm.

En la Figura 2 podemos observar los datos experimentales obtenidos para un dispersor de Foam PEDB con la forma geométrica comercial mostrada en la fotografía adjunta también en la Figura 2. Los picos de atenuación que se obtienen alrededor de 700 y 1000 Hz de denominarán a partir de ahora como primer y segundo pico de atenuación respectivamente.

La naturaleza de ambos picos puede entenderse analizando el problema de valores propios y el problema de dispersión para geometrías básicas como son varillas y perfiles U. En las siguientes dos subsecciones tanto el problema de valores propios como el problema de dispersión son estudiados para una varilla elástica rectangular y a un perfil U formado por la combinación de varias varillas elásticas.

A. Varilla elástica rectangular

Consideremos el problema de valores propios para una varilla elástica de Foam PEDB (véase Tabla 1), de 5.75 cm de longitud y 1 cm de espesor. Un extremo de la varilla se considera fijo, mientras que el resto de la varilla es libre (Véase Figura 3a).

El análisis de frecuencias propias por MEF, muestra que la primera solución aparece a 641 Hz. En la Figura 3c, podemos ver los desplazamientos de una varilla elástica rectangular correspondientes a los cuatro primeros modos de vibración, encontrados a 641 Hz, 3570 Hz, 6090 Hz and 8722 Hz. La primera solución de baja frecuencia es de particular interés para este trabajo ya que se encuentra antes de la frecuencia Bragg.

A continuación consideramos el problema de dispersión para una varilla elástica. Debemos analizar si mediante una onda acústica incidente sobre la varilla podemos excitar este primer modo de vibración. Utilizando el modelo acús-

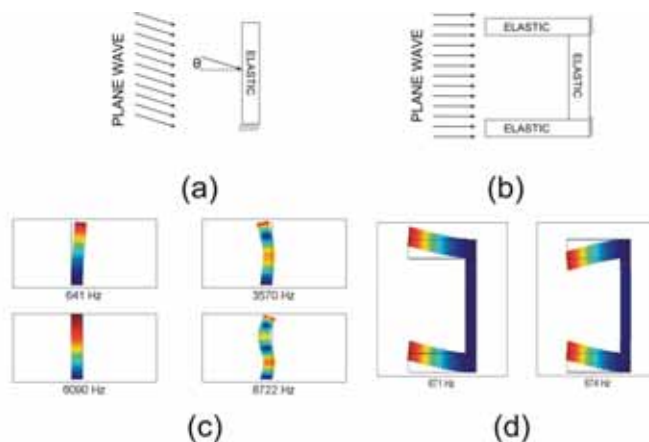


Figura 3: Modelización de las resonancias de un perfil U. (a) Problema de dispersión para una varilla elástica; (b) Problema de dispersión para el perfil U; (c) Desplazamientos de la varilla elástica rectangular debido a los cuatro primeros valores propios; (d) Desplazamiento de el perfil U debido a los dos primeros valores propios.

tico-elástico definido en la Sección 2 junto con las condiciones de radiación y una onda plana incidente, podemos calcular la respuesta en frecuencia de la varilla elástica rectangular. Los resultados son calculados en términos del IL para varios ángulos de incidencia θ de la onda acústica incidente (véase Figura 3a para la definición del ángulo de incidencia).

En la Figura 4, podemos ver la dependencia de la respuesta en frecuencia de la varilla elástica rectangular con el ángulo de incidencia. Las gráficas muestran la presencia de la resonancia relacionada con el primer valor propio mostrado en la Figura 3c.

B. Perfiles U como dispersores elásticos

A continuación consideramos el perfil U hecho por dos varillas elásticas rectangulares fijas por sus bases elásticas (véase Figura 3b). El tamaño del dispersor elástico propuesto en este apartado, es similar al tamaño del perfil comercial real mencionado anteriormente, véase fotografía adjunta en Figura 2.

El correspondiente problema de valores propios es analizado utilizando MEF. Los resultados se muestran en la Figura 3d. Podemos observar que el primer valor propio aparece a 671 y 674 Hz. De hecho, estos dos valores están relacionados con el primer pico de atenuación experimental que observábamos en la Figura 2. El siguiente conjunto de valores propios no se considera en este trabajo dado que aparecen en rangos de frecuencias que son superiores a la frecuencia Bragg. Como sucedía con el caso de la varilla elástica rectangular, el presente valor propio se asocia con las resonancias que pueden observarse en el problema de dispersión para el perfil U, véase Figura 5.

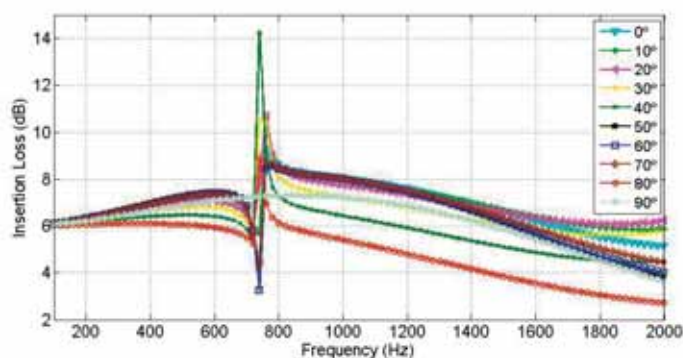


Figura 4: Dependencia de la resonancia excitada en una varilla elástica rectangular por una onda acústica plana con el ángulo de incidencia θ . Cada línea representa un ángulo de incidencia desde 0 a 90 grados, donde 0 grados corresponde a la dirección perpendicular de la onda plana al lado largo de la varilla elástica rectangular; véase Figure 3(a).

Como podría esperarse, el primer pico de atenuación en la Figura 5 corresponde con la resonancia de la varilla elástica rectangular excitado por la onda incidente y reflejada. En la gráfica adjunta en la Figura 5 se puede observar una ampliación del rango de frecuencias donde se muestra la resonancia actual del perfil U.

Con el objetivo de analizar el segundo pico de atenuación, evaluamos el IL de un perfil U absolutamente rígido, mostrado en la Figura 5 con una línea continua negra. Puede observarse que solo un pico aparece alrededor de 1200 Hz. Este pico se relaciona con la resonancia de la cavidad.

Siguiendo los resultados obtenidos anteriormente¹⁸ podemos esperar que la resonancia de la cavidad de un perfil U elástico aparece a una frecuencia inferior que la correspondiente a un perfil U rígido. Esto puede verse en la Figura 5 donde los picos de atenuación relacionados con las líneas coloreadas (es decir, perfiles U elásticos) son siempre menores que el pico que presenta la línea negra (perfil U rígido).

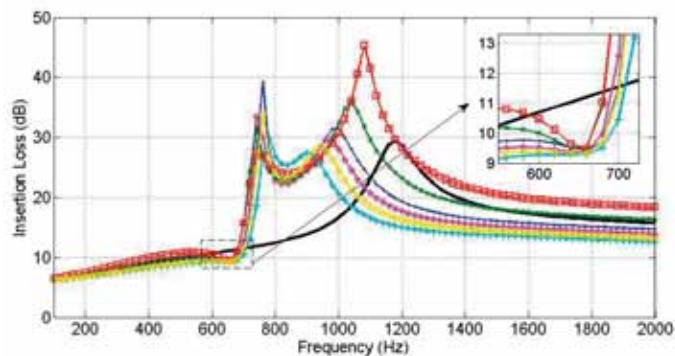


Figura 5: Insertion Loss de un dispersor aislado. Cerrando/abriendo la abertura, los brazos son inclinados negativamente/positivamente respecto a la posición perpendicular. Líneas coloreadas representan la dependencia del IL de un dispersor aislado con el tamaño de la apertura del resonador. La línea negra ilustra el IL para el perfil U rígido con brazos perpendiculares a la base. La figura adjunta muestra una ampliación de frecuencias donde aparece la resonancia.

La dependencia del primer y del segundo pico de atenuación pueden analizarse en función del tamaño de la cavidad. En la Figura 5 podemos observar que el primer pico permanece constante para las diversas formas de la cavidad. Sin embargo, el segundo pico cambia significativamente. Con la variación de la forma de la cavidad, el pico de atenuación varía de altas a bajas frecuencias.

C. Perfiles U de Foam PEBD como dispersor

En esta subsección comparamos los resultados experimentales y numéricos del problema de dispersión de la geometría real del perfil U de Foam PEBD. La gráfica adjunta en la Figura 6 muestra un corte transversal de la geometría de un perfil U que se ha generado para las simulaciones numéricas.

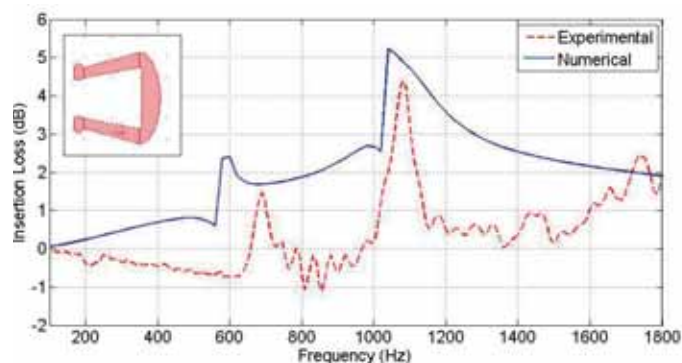


Figura 6: Insertion Loss de un dispersor aislado. La línea azul representa los resultados numéricos. La línea discontinua roja representa los datos experimentales. Gráfica adjunta muestra la sección transversal del perfil U modelado numéricamente.

Exactamente igual que anteriormente se asume que el material es elástico con las propiedades mostradas en la Tabla 1. En la Figura 6 podemos ver la presencia de las resonancias elásticas de la varilla y de la cavidad. La pequeña discrepancia observada entre los datos experimentales y numéricos puede reducirse utilizando una geometría más precisa del perfil U y mejorando la precisión del modelo numérico.

5. Estructuras periódicas de perfiles U

Uno de los principales problemas de los CS como sistemas atenuantes es la dependencia de los picos de atenuación con el ángulo de incidencia de la onda. Los dispersores analizados en este trabajo pueden ser usados tanto para mejorar las propiedades acústicas de los CS en el rango de bajas frecuencias (es decir, por debajo del primer BG) como para eliminar la dependencia angular de la atenuación. Dado que los picos de atenuación observados para los perfiles de Foam PEBD aparecen por las resonancias de la cavidad y de las varillas elásticas cuadradas, los picos de atenuación que aparecen en el espectro, deben ser independientes de la dirección de incidencia de la onda.

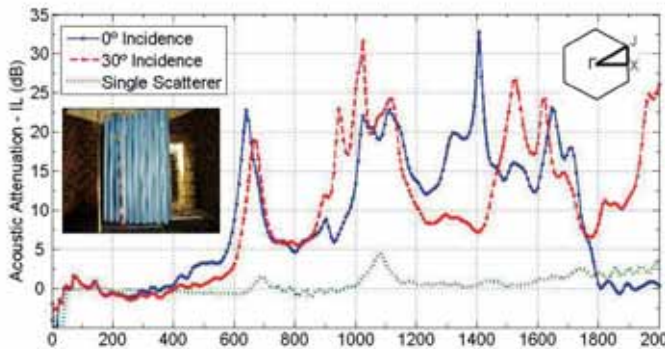


Figura 7: Datos experimentales para el Insertion Loss (IL) de una red triangular de dispersores (6 filas y 10 columnas). Línea azul representa el IL para la onda incidente en la dirección ΓJ (0°). Línea discontinua roja representa el IL para la onda incidente en la dirección $G X$ (30°). Línea verde punteada representa el IL para un dispersor aislado. La fotografía adjunta representa la configuración experimental utilizada.

Construimos un CS formando una red triangular con parámetro de red $a=12.7$ cm. La estructura periódica consta de 60 perfiles U hechos de Foam PEDB distribuidos en 6 filas de 10 dispersores cada una, véase la Figura 7 para observar la configuración experimental.

El IL es medido en las direcciones principales de simetría del CS (es decir, dirección ΓJ (0°) y dirección $G X$ (30°)). El receptor (micrófono) se posiciona en el eje de simetría del cristal a 1 m de distancia desde la última columna del CS.

En la Figura 7 podemos observar los picos de atenuación relacionados con las resonancias elásticas y de cavidad de un dispersor aislado así como los picos de atenuación relacionados con la periodicidad del cristal. También podemos observar que estos picos de atenuación relacionados con las diversas resonancias no dependen de la dirección de incidencia de la onda incidente. Sin embargo, los picos correspondientes a la periodicidad del cristal son fuertemente dependientes del ángulo de incidencia de la onda incidente.

6. Conclusiones

Dispersores con propiedades acústicas añadidas son analizados numéricamente y experimentalmente en este trabajo. Resonadores de baja densidad hechos de Foam PEDB con una cavidad, muestran propiedades mecánicas y acústicas las cuales pueden mejorar la capacidad de atenuación acústica de los CS para bajas frecuencias. Los dispersores analizados en el trabajo introducen dos picos de resonancia a bajas frecuencias. El primer pico se produce por una resonancia elástica la cual es el resultado de la interacción del campo acústico con las propiedades elásticas del Foam PEDB. El segundo pico se produce por la resonancia de la cavidad del dispersor. Varias combinaciones de dispersores de Foam PEDB con diferentes tamaños pueden ser usados para atenuar un amplio rango de frecuencias. Estos resultados abren una nueva perspectiva para el diseño de CS como una barrera acústica.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de la Dra. O. Umnova por sus comentarios constructivos del trabajo. V. Romero-García agradece a la University of Salford la oportunidad que le ha dado para desarrollar parte de este trabajo utilizando sus instalaciones. Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Cultura y por los fondos FEDER, proyecto MAT2006-03097

Referencias

- 1 Kushwaha, M.; Halevi, P.; Martínez, G.; Dobrzynski, L. & Djafari-Rouhani, B. Theory of acoustic band structure of periodic elastic composites, *Phys. Rev. B*, **49**, pp. 2313-2322, (1994).
- 2 Kafesaki, M. & Economou, E. Multiple Scattering theory for three-dimensional periodic acoustic composites, *Phys. Rev. B*, **60**, pp. 11993, (1999).
- 3 C.M. Linton and P. McIver, Handbook of mathematical techniques for wave/structure interactions, Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, (2001).
- 4 R. Martínez-Sala, J. Sancho, J.V. Sánchez, V. Gómez, J. Llinares and F. Meseguer, Sound Attenuation by sculpture, *Nature*, **378**, pp. 241, (1995).
- 5 M. Kushwaha, Stop-bands for periodic metallic rods: Sculptures that can filter the noise *Appl. Phys. Lett.*, **70**, pp. 3218, (1997).
- 6 J.V. Sánchez-Pérez, C. Rubio, R. Martínez-Sala, R. Sánchez-Grandia and V. Gómez, Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers, *Appl. Phys. Lett.*, **81**, pp. 5240, (2002).
- 7 Z. Liu, X. Zhang, Y. Mao, Y. Zhu, Z. Yang, C. Chan and P. Sheng, Locally Resonant Sonic Materials, *Science*, **289**, pp. 1734, (2000).
- 8 A.B. Movchan and S. Guenneau, Split-ring resonators and localized modes, *Phys. Rev. B*, **70**, pp. 125116, (2004)
- 9 O. Umnova K. Attenborough and C.M. Linton, Effects of porous covering on sound attenuation by periodic arrays of cylinders, *J. Acoust. Soc. Am.*, **119**, pp. 278-284, (2006).
- 10 LU TianJian, GAO GuoQin, MA ShouLin, JIN Feng and T. Kim, Acoustic band gaps in two-dimensional square arrays of semi-hollow circular cylinders, *Sci. China Ser. E-Tech Sci*, **52**, pp. 303-312, (2009).
- 11 V. Romero-García, J.V. Sánchez-Pérez, L.M. Garcia-Raffi, J.M. Herrero, S. García-Nieto, X. Blasco, Hole distribution in phononic crystals: Design and optimization, *J. Acoust. Soc. Am.*, **125** (6), pp. 3774-3783, (2009).

- 12 M. Torres, F.R. Montero de Espinosa, D. García-Pablos and N. Garcia, Sonic Band Gaps in Finite Elastic Media: Surface States and Localization Phenomena in Linear and Point Defects, *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 15, pp. 3054-3057, (1999).
- 13 H. Aygun and K. Attenborough, Sound absorption by clamped poroelastic plates, *J. Acoust. Soc. Am.*, **124** (3), pp. 1550-1556, (2008).
- 14 J.L. Grenestedt, Effective elastic behavior of some models for 'perfect' cellular solids, *International Journal of Solids and Structures*, **36**, pp. 1471-1501, (1999).
- 15 P.F. Soto, M. Herráez, A. González and J.A. de Saja, Acoustic Impedance and Absorption Coefficient Measurements of Porous Materials used in the Automotive Industry, *Polymer Testing*, **13**, pp.77-88, (1994).
- 16 M.K. Nielsen, R.D. Krieg and H.L. Schreyer, A constructive theory for rigid polyurethane foam, *Polymer engineering and science*, **35** (5), pp. 387-394, (1995).
- 17 J.Y. Chung and D.A. Blaster, Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory, *J. Acoust. Soc. Am.*, **68** (3), pp. 907-913, (1980). J.Y. Chung and D.A. Blaster, Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. II. Experiment, *J. Acoust. Soc. Am.*, **68** (3), pp. 914-921, (1980).
- 18 A.N. Norris and G. Wickham, Elastic Helmholtz resonators, *J. Acoust. Soc. Am.*, **93** (2), (1993).

Ingeniería para el Control del Ruido

Servicios personalizados de Vibroacústica

Ingeniería especializada

Dominamos la ciencia del silencio

Servicios únicos en acústica y vibraciones

Tecnología líder

Capacidad de adaptación

Actuación en todos los sectores

www.icrsl.com

E-mail: icr@icrsl.com

Tel/Fax. +34 93 428 63 39

ICR

Ingeniería para el Control del Ruido



productos diseñados y
fabricados por especialistas
en ruido y vibraciones



Pantallas acústicas para infraestructuras.
Silenzia drA



Revestimientos fonoabsorbentes de túneles.
Silenzia drA / T



Sistemas antivibratorios para superestructura
de vía. Silenzia drV