

AKUSTİK İLETİM KAYBI HESABININ SANAL YÖNTEMLE YAPILMASI, ANALİTİK HESAP İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Deniz Yazgaç* , Artun Bötke*

*HEXAGON STUDIO, KOCAELİ

ÖZET

Bu çalışmada bir genişleme odasındaki iletim kaybı sanal ve analitik yöntemler kullanılarak hesaplanıp karşılaştırılacaktır. Hesap yöntemi olarak ses basınç farkı metodu ve dört kutup metodundan bahsedilecektir. Bilinen analitik modellerle doğruluk gösterildikten sonra gerçek bir problemin dört kutup metoduyla ele alınışından bahsedilecektir.

Anahtar kelimeler: İletim Kaybı, Genişleme Odası, Dört Kutup Metodu, Ses Basınç Farkı Metodu

ACOUSTIC TRANSMISSION LOSS CALCULATION WITH VIRTUAL METHOD AND COMPARISON WITH ANALYTICAL CALCULATION

ABSTRACT

In this paper, acoustic transmission loss calculation is performed with virtual method and compared with analytical calculations. As calculation methods, sound pressure difference method and four pole method are mentioned. After getting good correlation with well-known analytical models, a real case is handled with four pole method.

Keywords: Transmission Loss, Four Pole Method, Sound Pressure Difference Method

1. GİRİŞ

Bir ortamdaki ses dalgalarının yayılımının incelenmesi ve bu yayılımın kontrol edilmesi, akustiğin ilgilendiği ana konulardan biridir. Otomotiv sektöründe sesin hava yoluyla yayılımının kontrolü (akustik filtreleme) doğrudan araç içindeki ses ve titreşimi etkilediğinden, üzerinde durulması gereken önemli bir NVH (Noise, Vibration & Harshness) problemidir. Egzoz sistemlerinde bulunan genişleme odaları ise motordan çıkan yüksek basınçlı gazın neden olduğu ses basınç düzeyinin (SPL) azaltılmasını sağlar. Genişleme odasındaki iletim kaybını (TL) düzgün hesaplayarak egzoz kaynaklı hava yollu ses kontrol altına alınabilir. Bu hesabın sanal ve analitik yöntemler kullanılarak yapılması, araca özel egzoz tasarımı ve akustik kontrol için önem arz etmektedir. Bu çalışmada bir genişleme odasındaki iletim kaybı sanal ve analitik yöntemler kullanılarak hesaplanıp karşılaştırılacaktır. Kullanılacak sanal yöntem, üç boyutlu sonlu elemanlar analizidir (FEA). Böylece sistem karmaşıklıklaça iletim kaybı

hesaplamanın zorlaştığı analitik yöntem ile düzeneğini kurmak için yüksek maliyet gerektiren deneysel yöntem yerine, belirli bir frekans aralığında geçerli olan bir sanal yöntem elde edilmiş olacaktır.

2. LİTERATÜR

Literatürde konu hakkında çeşitli çalışmalar yapılmıştır. M.B. Xu [1] ve T. Kar [2] fenomeni sadece analitik olarak incelemişlerdir. R. Kirby [3] ise birkaç farklı model kullanarak analitik hesaplamayı geliştirmiş ve modelini deneysel olarak da doğrulamıştır. Y. Aurégan [4] benzer bir süreç ile susturuculardaki düşük frekanslı ses yayılımına etki eden çeşitli faktörleri irdelemiştir. F.D. Denia [5] iki boyutlu aksel simetriye sahip bir susturucu modeli kullanarak analitik ve sanal yöntemlerle durumu ve olası faktörleri incelemiştir. S. Bilawchuk [6] iletim kaybını üç farklı ölçüm metodu kullanarak FEA ve sınır elemanları metodu (BEM) yardımıyla hesaplamış, bu hesapları birbirleriyle karşılaştırmıştır. C. Farhat [7] ve I. Harari [8] FEA'da iletim kaybı hesabını kolaylaştıran Galerkin metodu üzerinde durmuşlardır. T. Koike [9], R.

Tezaur [10] ve F.C. Lee [11] dalga yayılımını üç boyutlu inceleyen modeller geliştirmişlerdir. O.Z. Mehdizadeh [12] susturucularda iletim kaybını hesaplamak için üç boyutlu bir FEA yaklaşımı geliştirmiş ve deneysel metotla sonuçlarını doğrulamıştır.

3. TEORİ

3.1 Ses Basınç Farkı Metodu

Ses dalgasının yayılımını, bulunduğu ortamın özellikleri doğrudan etkiler. Bu yüzden bir ses dalgası; kesiti, malzeme özelliği veya sıcaklığı farklı olan bir ortama geçiş yaptığında ses enerjisinin bir kısmı kaynağa doğru geri döndüğünden, ilerlemeye devam eden dalganın enerjisi kayba uğrar. Oluşan iletim kaybı (TL – transmission loss), teorik olarak yoluna devam eden dalganın ses gücünün, başlangıçtaki ses gücüne oranıdır ve matematiksel olarak (1)'deki gibi ifade edilir.

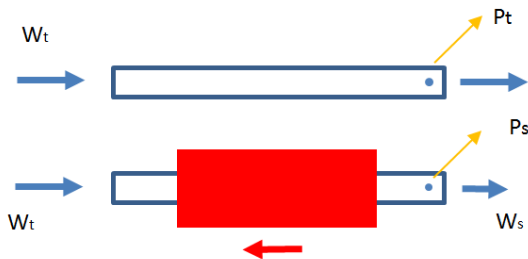
$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{W_t}{W_s} \right) \quad (1)$$

Bu denklemde W_t iletilen ses gücünü, W_s başlangıçtaki ses gücünü sembolize eder (Şekil.1). Akustik dalga gücü; düzlemsel dalgaların baskın olduğu düşük frekans bölgesinde, ses basıncı ile partikül hızının aynı fazda olmasından dolayı, (2)'deki gibi ses basıncı üzerinden belirlenebilir olduğundan TL denklemi, (3)'e dönüşür. Bu denklemlerde p ses basıncını, A (borunun) kesit alanını ve Z empedansı ifade eder.

$$W_t = \frac{p^2 A_t}{Z_t} \quad (2)$$

$$TL = 20 \log_{10} \left(\frac{p_t}{p_s} \right) \quad (3)$$

Genişleme odasının giriş bölümünde iletilen ve geri dönen ses dalgaları bir arada bulunduğu ve ses basıncı skaler bir büyüklük olduğundan, ses basıncı doğrudan ölçülemez.



Şekil 1. Ses basınç farkı metodu

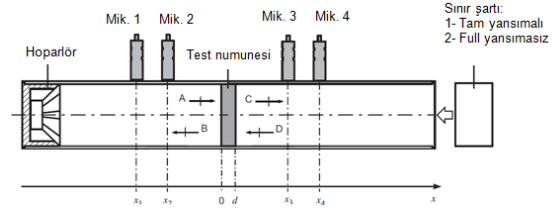
Bu yüzden literatürde, giden ve gelen dalgayı ayırklaştırmak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan biri olan ses basınç farkı metodunda

(geleneksel metot-traditional method) önce, genişleme odasının giriş ve çıkış bölümleriyle aynı çapa sahip olan düz bir boruda ses basınç düzeyi (SPL) ölçümü yapılır [6]. Ardından SPL ölçümü, aynı uzunluğa sahip olan genişleme odasında yapılır. İki ölçüm arasındaki fark, iletim kaybını (transmission loss) verir. Bu metot, analitik olarak sadece iki boyutlu bölgelerde (düzlemsel dalga) geçerlidir. Bundan dolayı hesabın bir üst frekans limiti bulunmaktadır. Bu frekans; c , ortamdaki ses hızı ve d , en büyük kesit çapı olmak üzere (4) yardımıyla bulunur [13].

$$f_{upper} = \frac{0.586 c}{d} \cong \frac{c}{2d} \quad (4)$$

3.2 Dört Kutup Metodu [13, 14]

Empedans tüpü ölçümlerinde algoritma olarak kullanılan dört kutup metodu, giden ve gelen dalganın ayırklaştırılmasında kullanılmaktadır. Kullanılan dört adet mikrofona ile tüp içinde hareket eden düzlemsel dalganın giden ve gelen dalga olarak ayrılması mümkün olmaktadır.



Şekil 2. Ses basınç farkı metodu

Gerçek şartlar altında, akustik yutum ve yansıtma yönelik olarak kullanılan sünger malzemelerin testleri yapılmaktadır. Ancak teknik olarak test numunesi yerine akustik filtre olarak tanımlanan; rezonatör, egzoz, genişleme odası gibi yapıların testi mümkündür.

Empedans tüpünde önemli olan, test numunesi öncesindeki ve sonrasındaki giden ve gelen dalgaların (A,B,C,D) ayırklaştırılmasıdır (Şekil.2). Bu veriler kullanılarak yine numune öncesi ($x=0$) ve sonrasındaki ($x=d$) ses basıncı ve partikül hızı belirlenebilmektedir. Denklemlerin çözümlenebilmesi için iki ayrı sınır şartında test yapmak gereklidir (5).

$$\begin{bmatrix} P_1 & P_2 \\ V_1 & V_2 \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_1 & P_2 \\ V_1 & V_2 \end{bmatrix}_{x=d} \quad (5)$$

Burada herhangi bir sınır olmamakla beraber sözü edilen iki ayrı sınır şartının empedansı birbirinden ne kadar farklı ise o oranda doğru sonuçlar elde edilir. Benzer sınır şartı, matris hesabında numerik stabilite problemleri doğurabilir.

Benzer bir kurgu ile sözü edilen test düzeneği, sanal olarak bilgisayar ortamında kurgulanabilir ve sayısal olarak iletim kaybının hesabını mümkün kılar.

4. ANALİZ

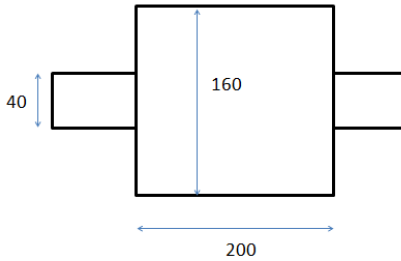
4.1 Ses Basıncı Farkı Metodu (SBFM)

Çalışmanın ana konusu olan sanal metotta iletim kaybı, oluşturulan üç boyutlu FE modeliyle hesaplanmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken hususlardan biri, havanın giriş ve çıkış yüzeylerine sesin geri dönmemesini sağlayan (anekoik) özellikte elemanlar tanımlanmasıdır. Böylece analiz sınır koşulu olarak testin anekoik odada gerçekleştiği varsayımı yapılır. Bu yaklaşım ile sistemin girişine her zaman aynı ses gücü uygulanmasından dolayı fark yaratan akustik filtrenin karakterizasyonu, sadece çıkış ses gücü karşılaştırılarak ve düzlemsel dalga kabulü yapılarak bu karşılaştırmanın ses basıncı üzerinden yapılabileceği argümanına bağlıdır.

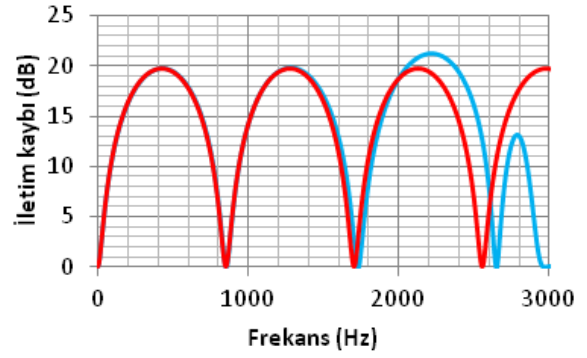
Analiz modeli Hypermesh programında, tamamı hava özelliği tanımlanmış CHEXA elemanlarla oluşturulmuştur. Genişleme odasının giriş ve çıkış yüzeylerine, anekoik özellik verme amacıyla CAABSF elemanlar eklenmiştir. Bu elemanların empedans değerleri, CHEXA elemanında kullanılan empedans değerleri ile eşitlenir, böylece yansız bir sınır şartı elde edilmiş olur. Analizde, genişleme odasının giriş bölümünde ve dairesel kesitin merkezinde olan bir noktaya ASCRCE kartı ile 0-1000 Hz aralığında 1 mW'lık birim ses gücü verilmiştir. Optistruct programında oluşturulan analiz sonrasında, çıkış bölümünde yine merkezde olan bir noktadan basınç ölçümü alınmıştır.

Yaklaşımı doğrulamak için analitik olarak çözümü bilinen bir genişleme odası üzerinden hesap gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).

Genişleme odasının verilen boyutlarıyla ve üst frekans limitleri(4) kullanılarak yapılan hesapta, düzlemsel dalgaların 1000 Hz civarına kadar etkin olduğu gözlenebilir. Şekil 4'te görüldüğü gibi 1000 Hz değerinden sonra analitik ve geleneksel yöntem ile yapılan hesapların giderek daha farklı sonuçlar gösterdiği gözlenmiştir.



Şekil 3. Doğrulama amacıyla kullanılan analitik model

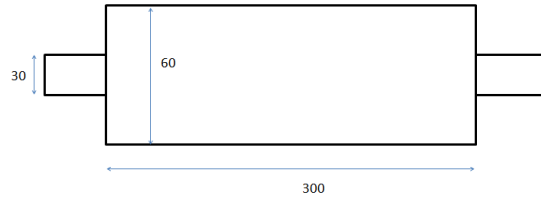


Şekil 4. Genişleme odasının ses basınç farkı metodu (mavi) ve analitik yöntem (kırmızı) ile hesabı

4.2 Dört Kutup Metodu

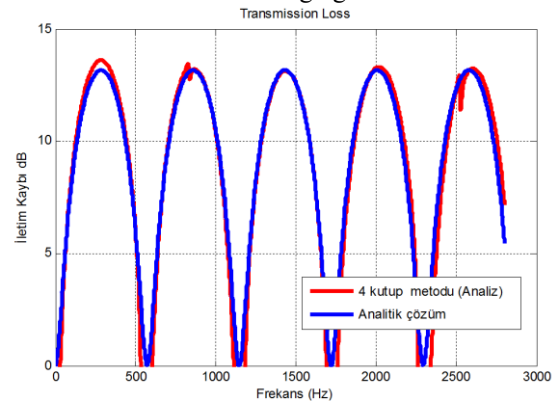
Bu yöntemin de analiz ortamındaki kurgusu tamamıyla SBFM'ye benzemektedir fakat giden ve gelen dalgaların ayrıştırılması için 4 adet mikrofon kullanılmaktadır. Ayrıca iki farklı sınır şartı sağlayabilmek adına, SBFM yönteminde kullanılan tam yansız sınır şartı yanında tam yansız sınır şartıyla da analiz yapılmaktadır.

Hesabın yapılması için öncelikle sanal mikrofonlardan alınan sonuçlar MATLAB ortamına transfer edilir. MATLAB ortamında yapılan analizler ile iletim kaybı değeri frekans düzleminde hesap edilebilir. Yaklaşımı doğrulamak için analitik olarak çözümü bilinen bir genişleme odası üzerinden hesap gerçekleştirilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Doğrulama amacıyla kullanılan analitik model

Genişleme odasının verilen boyutlarıyla ve (4) kullanılarak yapılan hesapta, düzlemsel dalgaların 2800 Hz civarına kadar etkin olduğu gözlenebilir.

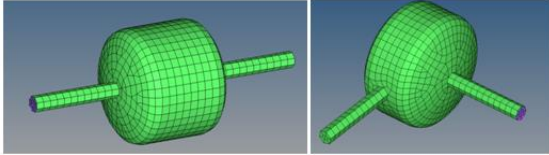


Şekil 6. Genişleme odasının dört kutup metodu (kırmızı) ve analitik yöntem (mavi) ile hesabı

4.3 Dört Kutup Metodu'nun Kompresör Susturucusu Tasarımında Kullanılması

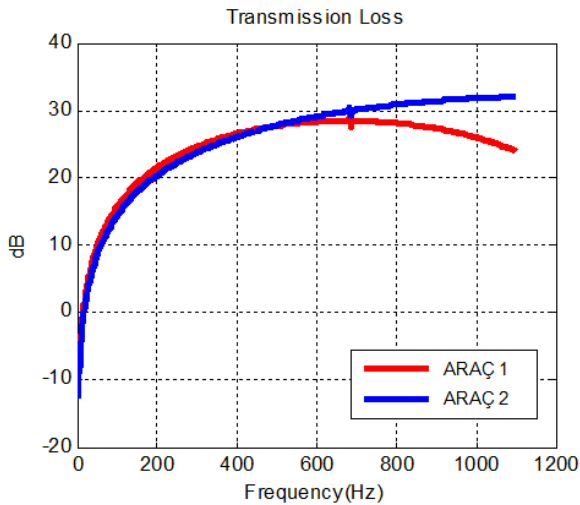
Otobüslerin gerek kapı ve fren mekanizması, gerekse süspansiyon mekanizması için basınçlı hava ihtiyacı bulunmaktadır. Bu ihtiyaç, motor üstünde bulunan bir kompresör ile sağlanmaktadır. Kompresör sonrasındaki basınçlı hatta ortaya çıkabilecek ani basınç değişimlerini engellemek için kompresör çıkışında genişleme odaları kullanılmaktadır. Kabaca söylemek gerekirse, genişleme odalarında hacim arttıkça iletim kaybının artması, bilinen bir gerçektir. Buna ek olarak, kompresör hattının sonrasında yer alacak yüksek hacimli bir genişleme odası, kompresörün aşırı çalışmasına ve ömrünün çabuk tükenmesine sebep olmaktadır. Bu sebeple bu hacmin optimize edilmesi çok önemlidir.

Şekil 7'de iki ayrı genişleme odası gösterilmektedir. Solda 2 lt hacimli düz (araç-1'de kullanılan), sağda ise 1.6 lt hacimli (araç-2'de kullanılan) ve 90° ani dönüşe sahip bir genişleme odası bulunmaktadır. Yapılan iletim kaybı analizlerinde (Şekil 8) 1.6 lt hacme sahip genişleme odasının özellikle yüksek frekanslarda daha etkin çalıştığı, düşük frekanslarda da 2 lt hacme sahip genişleme odası ile neredeyse aynı etkinliğe sahip olduğu gözlenmiştir.



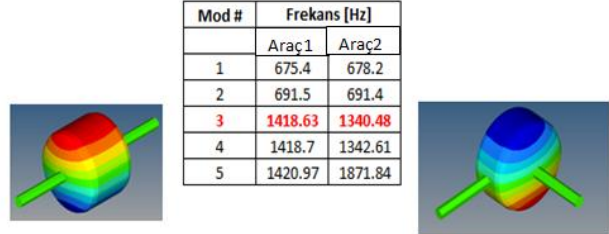
Şekil 7. Solda: Araç-1 genişleme odası Sağda: Araç-2 genişleme odası

Böylece daha düşük bir hacim kullanılarak hem kompresör ömrü arttırılmıştır hem de daha yüksek iletim kaybı değerleri elde edilmiştir. Kompresörün daha az çalışması yakıt tüketimini de doğrudan etkilemektedir.



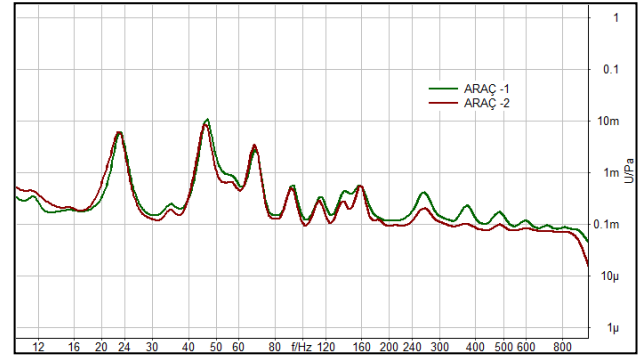
Şekil 8. Araç-1 ve araç-2'de kullanılan genişleme odalarının dört kutup yöntemiyle iletim kaybı analizi

Analizler iki genişleme odasının düzlemsel dalga limitlerine kadar gerçekleştirilmiştir. Aslında düzlemsel dalga limitini bir modal analizle de belirlemek mümkündür. Modal analiz sonuçlarında, mod şeklinin düzlemsel formda olmadığı ilk modun frekansı, düzlemsel dalga limitidir. Şekil 9'da hem doğal frekans sonuçları hem de düzlemsel formda olmayan ilk modlar gösterilmiştir.



Şekil 9. Genişleme odalarının kavite modları ve düzlemsel dalga limitleri

Şekil 10'da Araç-1 ve Araç-2 genişleme odasının çıkışına takılan basınç ölçüm sensöründen alınan sinyallerin, frekans spektrumundaki içeriği gözlenebilir. Şekil-10'da özellikle yüksek frekanslarda Araç-2 genişleme odasının daha etkin bir sönümlenme sağladığı gözlenmektedir. Ancak düşük frekanslarda Araç-1 genişleme odası daha iyi sonuçlar sergilemektedir.



Şekil 10. Genişleme odalarının çıkış basıncının frekans spektrumu

5. SONUÇ

Bu çalışmada, akustik filtre elemanlarının iletim kaybı değerlerinin sayısal olarak hesap edilebilmesi için SBFM ve dört kutup metodundan bahsedilmiş ve sonrasında bir genişleme odası optimizasyon çalışması yapılmıştır. Analizler Optistruct ortamında yapılmış ve MATLAB ortamında geliştirilen algoritma ile sonuca gidilmiştir.

Çalışmada bahsedilen yöntemlerin belli sınırları bulunmaktadır:

- Sadece reaktif özelliklere sahip akustik filtreler analiz edilebilmektedir.

- Analizin bir üst frekans limiti bulunmaktadır ve bu limit üstünde analiz sonuçları doğru değildir.
- Akustik filtre içinde akış bulunmamaktadır. Egzoz gibi sistemlerde akışla beraber iletim kaybı değeri değişkenlik gösterir.
- Akış bulunmadığından akış kaynaklı gürültüler analiz edilememektedir.

İleride soğurgan (absorbitive) tip akustik filtrelerinin de modellenmesi araştırılacaktır. CAABSF elemanı, kullanılan akustik izolasyon malzemesinin empedans değeri bilindiğinde kullanılabilir bir elemandır ve ses yutumu, sözü edilen akustik izolasyon malzemesinin empedans tüpü sonuçlarıyla ortaya çıkarılabilir ve CAABSF ile analiz ortamına aktarılabilir.

Empedans tüpü geliştirme faaliyetleri devam etmektedir. İleride farklı sistemlerin modellenerek analizi ve bu analiz sonuçlarının testler ile doğrulanması ile daha karmaşık sistemlerin değerlendirilmesi mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

1. M.B. Wu, A. Selamet, I.J. Lee, N.T. Huff " **Sound Attenuation in Dissipative Expansion Chambers** ", Journal of Sound and Vibration, issue 272 (2004), pp. 1125-1133.
2. T. Kar, M.L. Munjal " **Generalized Analysis of a Muffler with Any Number of Interacting Ducts** ", Journal of Sound and Vibration, issue 285 (2005), pp. 585-596.
3. R. Kirby, " **Simplified Techniques for Predicting the Transmission Loss of a Circular Dissipative Silencer** ", Journal of Sound and Vibration, issue 243-3 (2001), pp. 403-426.
4. Y. Aurégan, A. Debray, R. Starobinski, " **Low Frequency Sound Propagation in a Coaxial Cylindrical Duct: Application to Sudden Area Expansions and to Dissipative Silencers** ", Journal of Sound and Vibration, issue 243-3 (2001), pp. 461-473.
5. F.D. Denia, A. Selamet, F.J. Fuenmayor, R. Kirby " **Acoustic Attenuation Performance of Perforated Dissipative Mufflers with Empty Inlet/Outlet Extensions** ", Journal of Sound and Vibration, issue 302 (2007), pp. 1000-1017.
6. S. Bilawchuk, K.R. Fyfe " **Comparison and Implementation of the Various Numerical Methods Used for Calculating Transmission Loss in Silencer Systems** ", Applied Acoustics, issue 64 (2003), pp. 903-916.
7. C. Farhat, P. Wiedemann-Goiran, R. Tezaur, " **A Discontinuous Galerkin Method with Plane Waves and Lagrange Multipliers for the Solution of Short Wave Exterior Helmholtz Problems on Unstructured Meshes**", Wave Motion, issue 39 (2004), pp. 307-317.
8. I. Harari, F. Magoules " **Numerical Investigations of Stabilized Finite Element Computations for Acoustics** ", Wave Motion, issue 39 (2004), pp. 339-349.
9. T. Koike, H. Wada, T. Kobayashi., " **Modeling of the Human Middle Ear Using the Finite Element Method** ", Journal of Acoustic Society of America, issue 111-3 (2002), pp. 1306-1317.
10. R. Tezaur, A. Macedo, C. Farhat, R. Djellouli " **Three-Dimensional Finite Element Calculations in Acoustic Scattering Using Arbitrarily Shaped Convex Artificial Boundary** ", International Journal of Numerical Methods of Engineering, issue 53 (2002), pp. 1461-1476.
11. F.C. Lee, W.H. Chen, " **On the Acoustic Absorption of Multi-Layer Absorbers with Different Inner Structures** ", Journal of Sound and Vibration, issue 259-4 (2003), pp. 761-777.
12. O.Z. Mehdizadeh, M. Paraschivoiu, " **A Three-Dimensional Finite Element Approach for Predicting the Transmission Loss in Mufflers and Silencers with No Mean Flow** ", Applied Acoustics, issue 66 (2005), pp. 902-918
13. ASTM, " **Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using A Tube, Two Microphones and A Digital Frequency Analysis System**" 2006
14. Bruel Kjaer, " **Transmission Loss Measurements in a Standing Wave Tube**" 2007

