

9.Ulusal Akustik Kongresi
ODTÜ Kültür ve Kongre Merkezi, Ankara
26-27 Mayıs 2011

HYDROFLOWN: MEMS SUALTI AKUSTİK VEKTÖR ALGILAYICISI

M. Berke Gür¹, Tuncay Akal², Hans-Elias de Bree³

¹Bahçeşehir Üniversitesi, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye
Tel: 212 381 05 56, e-posta: berke.gur@bahcesehir.edu.tr

²SUASIS Sualti Sistemleri, Kocaeli, Türkiye
Tel: 262 354 27 73 e-posta: tuakal@suasis.com

³Microflown Technologies, Arnhem, Hollanda
e-posta: deBree@Microflown.com

ÖZET

Akustik alan, hidrofonlar ile ölçülen skaler basıncın yanı sıra, yönsellik içeren ve akustik vektör algılayıcılar ile ölçülebilen partikül hızı değişkeni ile de tanımlanabilir. Partikül hızı, içerdiği yönsellik sayesinde (basınç ölçümlerine kıyasla) akustik alan hakkında daha fazla bilgi içerir ve gürültülü ortamlarda daha hasas ölçümler yapmaya olanak sağlar. Avrupa Komisyonu tarafından desteklenen Hydroflown projesi kapsamında sualtında çalışabilen mikro-elektromekanik akustik vektör algılayıcı geliştirilmektedir. Bu bildiri, Hydroflown vektör algılayıcılarının geliştirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar ve bazı deneyler anlatılmaktadır. Bu deneyler sonucunda, mevcut kılıf tasarımı ile algılayıcının 300 Hz altında yüksek hassasiyet ile partikül hızını ölçtüğü gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sualti akustiği, partikül hızı, MEM algılayıcılar, akustik vektör algılayıcı, durağan dalga tübü

HYDROFLOWN: A MEMS BASED UNDERWATER ACOUSTIC VECTOR SENSOR

ABSTRACT

The acoustic field is described by the scalar pressure and vectorial particle velocity variables. Due to the directional information contained in the particle velocity variable, a more complete picture of the acoustic field can be obtained using vector sensors capable of measuring the particle velocity. As a part of the Hydroflown project supported by European Commission, a MEMS based acoustic vector sensor is being developed. The purpose of this publication is to provide information regarding the progress made in the development of the Hydroflown vector sensor. With the current packaging, measurements indicate that the Hydroflown sensor is sensitive to the particle velocity, in particular, at low frequencies below 300 Hz.

Keywords: *Underwater acoustics, particle velocity, MEMS sensor, acoustic vector sensor, standing wave tube.*

1. GİRİŞ

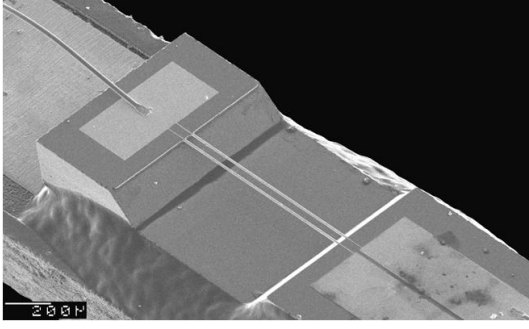
Akustik alan, iki değişken ile temsil edilmektedir. Bunlar skaler akustik basınç (p) ve yönsellik içeren akustik partikül hızıdır (v) [1]. Bu değişken birbirinden bağımsız olmamakla birlikte, aralarındaki ilişki, akustik dalga iletiminin yapıldığı ortama, ortamın sınır koşullarına ve eğer varsa, ortamdaki akustik kaynakların özelliklerine göre değişiklik gösterir. Bu sebeple, genel anlamda akustik alanın tam olarak ifade edilebilmesi için, her iki değişkenin de ölçülmesi gerekir. Skalar bir değişken olan basınç, hidrofonlar ile ölçülür. Bazı özel akustik alanlarda partikül hızı basınç ölçümlerinden tahmin edilebilir. Ancak, her zaman sağlanması mümkün olmayan bu özel durumlar haricinde, yönsellik bilgisi içeren akustik partikül hızını ayrıca ölçmek gerekir. Partikül hızı ölçümleri, basınca göre daha zordur ve bu ölçümler için özel olarak tasarlanmış algılayıcılar gerekmektedir.

Sualtı akustiğinde partikül hızı ölçümleri, genellikle sualtında çalışmaya uyarlanmış ivmeölçerler veya basınç gardyanını ölçen hidrofonlar ile yapılmaktadır [2]. Kartezyen koordinat sistemindeki her yönde bir partikül hızı algılayıcısı ve basıncı ölçmek için bir hidrofonu birleştiren algılayıcılar akustik vektör algılayıcısı (AVA) olarak adlandırılmaktadır. Özellikle A.B.D. donanması tarafından yaygın olarak Wilcoxon [3] firması tarafından üretilen ivmeölçerli AVA'lar kullanılmaktadır. Çin'de ivmeölçerlerin temel çalışma prensiplerine benzer mikro-elektromekanik (MEM) AVA geliştirilmektedir [4]. İvmeölçerlere alternatif olarak, Hollanda merkezli Microflown Technologies şirketi tarafından havada çalışan MEM AVA geliştirilmiştir [5], [6]. Bu algılayıcı, akustik dalgacığın, algılayıcının ısıtılmış yüzeyleri üzerinden geçerken sebep olduğu akışın yarattığı sıcaklık farkından akustik partikül hızını ölçerek çalışmaktadır. Benzer prensiplerle sualtı ortamında akustik partikül hızını ölçebilen Hydroflown algılayıcısı, Avrupa Komisyonu tarafından Eurostars Eureka Programı tarafından 2009-2012 yılları arasında desteklenen bir proje kapsamında geliştirilmektedir.

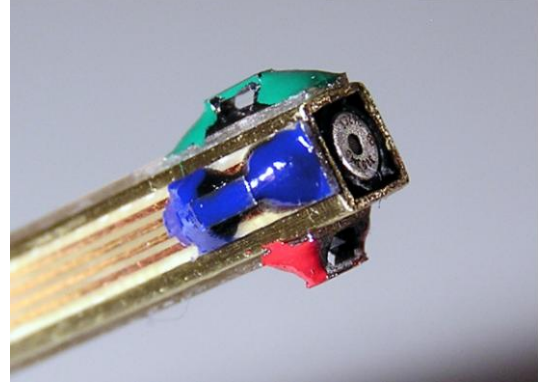
AVA'ların, hidrofonlar ile yapılan ölçümlere göre akustik alan hakkında çok daha fazla bilgi vermesi sebebi ile, partikül hızı ölçümü yapabilen sistemlerde kullanılmak üzere özel işaret işleme yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlar arasında en dikkat çekenleri AVA'lara özel geliştirilen kaynak yön tespit yöntemleridir. Bu yöntemler genellikle, hidrofonlar için geliştirilen ve yaygın olarak kullanılmakta olan yöntemlere göre çok daha düşük hata veya belirsizlik payına sahiptirler [7]. Ayrıca, daha az algılayıcı kullanan ve kısa anten açıklığına sahip sistemler AVA sistemleri ile, sadece hidrofon kullanan sistemlerle benzer sonuçlar alınabilmektedir [8], [9].

2. HYDROFLOWN ALGILAYICISI

Hydroflown algılayıcısı, yapısı ve çalışma prensipleri itibarı ile, havada çalışan Microflown algılayıcısı ile benzerdir. Ancak Hydroflown, sualtında ilerleyen bir akustik dalgacığın partikül hızı değişkenini ölçmek için tasarlanmıştır. Algılayıcının ana yapısında, iki adet birbirlerine çok yakın ve ince Platin tel dirençler bulunmaktadır (Şekil 1.a). Teller 200 ile 400°C arasında bir sıcaklığa kadar ısıtılmaktadır. Algılayıcının partikül hızına hassasiyeti, tellerin sıcaklığı ile orantılıdır.



(a)



(b)

Şekil 1. (a) Taramalı Elektron Mikroskobu ile elde edilen havada çalışan Microflow algılayıcısının Platin tel dirençlerinin görüntüsü, (b) birbirlerine dik açılarla yerleştirilen üç Hydroflown algılayıcısı ve ortada durağan basınç algılayıcısı ile oluşturulan sualtı AVA (dış kılıf yerleştirilmeden önce).

3. ÖLÇÜMLER

Analizler sonucu geliştirilen prototip Hydroflown algılayıcısının temel özelliklerini ölçmek ve çeşitli uygulamalarda kullanılabilirliğini sınamak amacı ile laboratuvar ortamında durağan dalga tübü deneyleri yapılmıştır.

Hydroflown algılayıcısının akustik alan değişkenlerine olan hassasiyeti durağan dalga tübü ölçümleri (Şekil 2) ile belirlenmiştir. Bu amaç doğrultusunda kullanılan durağan dalga tübü, 1 m. uzunluğunda ve 10 cm iç çapı olan çelik borudan imal edilmiştir. Borunun duvarlarının et kalınlığı, duvarların, boru içindeki dalga ile etkileşerek durağan dalga oluşumu engellemesini önleyecek kalınlıkta seçilmiştir. Tübün alt yüzeyine yüzeyel bir basınç kaynağı yerleştirilmiş, üst yüzey ise havaya açık bırakılmıştır.



Şekil 2. Hassasiyet ölçümlerinde kullanılan durağan dalga tübü deney düzeneği.

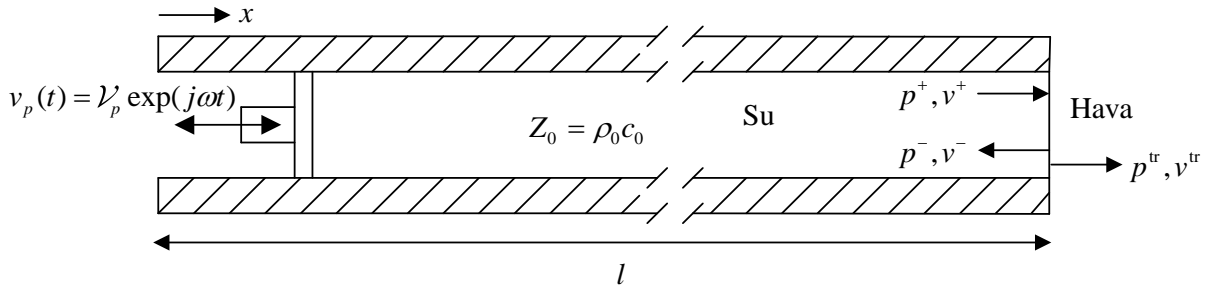
Durağan dalga túbünün içerisine kalibre edilmiş bir hidrofön ve ölçüm yapılan Hydroflown algılayıcısı yerleştirilmiştir. Şekil 3'te şematik olarak gösterilen durağan dalga túbü içinde oluşan akustik alan için basınç genliği

$$P(x) = P_0 \cdot \frac{\sin(k(l-x))}{\sin(kl)}, \quad (1)$$

partikül hızı genliği ise,

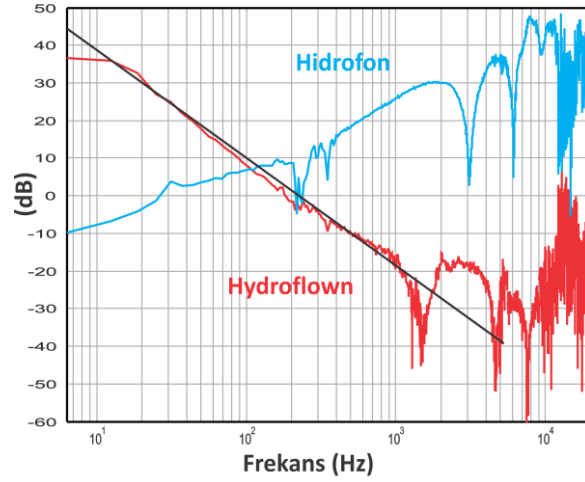
$$V(x) = \frac{P_0}{jZ_0} \cdot \frac{\cos(k(l-x))}{\sin(kl)}, \quad (2)$$

denklemlerin ile bulunur [10]. Burada, $j = \sqrt{-1}$, x túbün içerisinde, kaynaktan açık uca doğru ölçülen uzaklık, $k = \omega/c_0$ dalga sayısı, P_0 akustik kaynağın yüzeyindeki basınç genliği, Z_0 túbün içindeki sıvının karakteristik empedansıdır. Denklem (1) ve (2)'den görüleceği üzere, akustik basınç ile partikül hızı arasında $\pi/2$ faz farkı mevcuttur.



Şekil 3. Durağan dalga túbü denklemlerinin türetilmesinde kullanılan değişken ve parametreler.

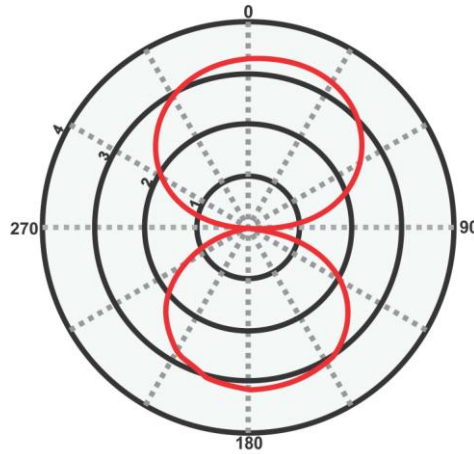
Túbün içerisinde oluşan akustik alanın yukarıda verilen teorik çözümü ile deneysel ölçümlerin karşılaştırılması ile algılayıcının partikül hızına duyarlı, akustik basınca ise duyarsız olduğu gözlemlenmiştir. Bir sonraki aşamada, algılayıcının akustik partikül hızına hassasiyeti ölçülmüştür. Bu amaç için, üst yüzeyde su-hava arayüzünde elde edilen basınç salınım sınır koşulunun akustik özelliklerinden faydalanılmıştır. Açık olan üst yüzede, su-hava arayüzüne çok yakın bir noktaya havada partikül hızı ölçümü yapabilen, kalibre edilmiş Microflown algılayıcısı yerleştirilmiştir. Bu algılayıcının partikül hızı ölçümleri referans olarak alınmış ve Hydroflown algılayıcısının akustik partikül hızına olan hassasiyeti ölçülmüştür. Hydroflown'ın frekansa göre değişen hassasiyet ölçüm sonuçları Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Hydroflown'un durağan dalga tübü ile elde edilen hassasiyet ölçümleri.

Şekil 4'te görüleceği üzere, mevcut kılıf tasarımı ile Hydroflown algılayıcısının partikül hızına olan hassasiyeti, frekans ile beraber azalmaktadır. Bu sebeple, daha sonra açıklanan deneyler, 300 Hz'ten düşük frekanslarda yapılmıştır.

Yine durağan dalga tübü içerisinde, Hydroflown algılayıcısının 360 derece döndürülmesi sağlanmış ve bu sayede algılayıcının yönsel hassasiyeti ölçülmüştür. Bir partikül hızı algılayıcısından beklendiği üzere, Hydroflown algılayıcısı ön ve arka cepheden gelen akustik dalgacıkları ölçebilirken, yan profilden gelen dalgacıklara karşı ise duyarsızdır. Bu sebeple, Şekil 5'te gösterilen '8' şeklinde bir yönsellik fonksiyonuna sahiptir.



Şekil 5. Hydroflown algılayıcısının durağan dalga tübünde elde edilen yönsel hassasiyet ölçümleri sonuçları.

SONUÇ

Durağan dalga tübü deneyleri sonucunda, mevcut kılıf ile Hydroflown algılayıcısının en hassas olduğu frekans aralığının 300 Hz'e kadar olduğu belirlenmiştir. Daha sonradan yapılan ek ölçümlerde, kılıfın içindeki yağın basıncının yükseltilmesi ile çalışma frekans aralığının genişlediği gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda, algılayıcının çalışma frekans aralığını yükseltilmesine olanak sağlayacak olan kılıf tasarım çalışmaları devam etmektedir.

AVA'lar ile oluşturulan sistemler, hidrofonlar ile oluşturulan sistemlere eşdeğer performansı, çok daha az algılayıcı kullanılan, daha küçük boyutlu ve hafif sistemler ile sağlayabilmektedir. AVA'larının ayarlanabilen yönel hassasiyetleri sebebi ile, gerek yönsellik içermeyen (izotropik), gerekse noktasal kaynaklardan yayılan yönel gürültüye karşı daha yüksek kalitede ölçümler yapılmasına olanak sağlamaktadırlar. İvmeölçerli AVA'ları ile karşılaştırıldığında, Hydroflown algılayıcısı ile oluşturulan AVA çok daha küçük boyutlarda üretilebilmektedir. Bu sebeple, Hydroflown AVA'ları ile noktasal ölçüm varsayımı daha doğru olarak sağlanmaktadır. Buna ilaveten, ivmeölçerlerde ve diğer mekanik partikül hızı ölçen algılayıcıların tasarımında önemli bir sınırlayıcı etken olan rezonans, Hydroflown algılayıcısında görülmemektedir.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan çekili dizinler algılayıcı olarak hidrofon kullanmaktadır ve sadece ölçüm modülleri bile 250 m'yi bulabilmektedir. Bu sebepten, çekme kapasitesi sınırlı insansız sualtı araçlarında kullanılmaları mümkün değildir. Yönsellik bilgisi içeren partikül hızını ölçebilmeleri ve MEM algılayıcılar olmaları sebebi ile, hidrofonlardan oluşan çekili dizinlere kıyasla, Hydroflown'lardan çok daha ince ve kısa dizinler yapmak mümkündür. Ayrıca, hidrofon dizinlerinin yaşadığı iskele-sancak belirsizliği sorunu, partikül hızı ölçümü yapabilen dizinlerde söz konusu değildir. Hydroflown algılayıcısının en önemli uygulama alanlarından birisinin, ince çekili dizinler olacağı öngörülmektedir. Bu doğrultuda, AVA dizinleri için işaret işleme ve hüzme oluşturma yöntemleri üzerindeki araştırmalar devam etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Ziomek, L. J. Fundamentals of Acoustic Field Theory and Space-Time Signal Processing, CRC Press, ISBN: 0-8493-9455-4, 1995 (s. 25-37).
- [2] Sherman, C. H. ve Butler, J. L. Transducers and Arrays for Underwater Sound, Springer, ISBN: 978-0387-32940-6, 2007 (s. 175-195).
- [3] Shipps, J. C. ve Abraham, B. M. The use of vector sensors for underwater port and waterway security, Sensor for Industry Conference, s. 41-44, 2004.
- [4] Zhang, W. D. vd. Research of DOA estimation based on single MEMS vector hydrophone, Sensors, cilt:9, s. 6823-6834, 2009.
- [5] de Bree, H.-E. The Microflown: An acoustic particle velocity sensor, Acoustics Australia cilt: 31, s. 91-94, 2003.
- [6] de Bree, H.-E. vd. The Microflown; a novel device measuring acoustical flow, Sensors and Actuators: A, Physical. cilt: SNA054/1-3, s. 552-557, 1996.
- [7] Miron, S. vd. Quaternion-MUSIC for vector-sensor array processing, IEEE Trans. Sign. Proc., cilt: 54, no: 4, s. 1218-1229.
- [8] Nehorai, A. ve Paldi, E. Acoustic vector-sensor array processing, IEEE Trans. Sign. Proc., cilt: 42, no: 9, s. 2481-2491.
- [9] Cray, B. A. ve Nuttall, A. H. Directivity factors for linear arrays of velocity sensors, J. Acoust. Soc. Am., cilt: 110, no:1, s. 324-331.
- [10] Blackstock, D. T. Fundamentals of Physical Acoustics, Wiley, ISBN: 0-471-31979-1, 2000 (s. 130-144).

TEŞEKKÜR

Yazarlar, Hydroflown projesini destekleyen Avrupa Komisyonu Eurostars Eureka Programı'na teşekkürlerini sunarlar.