

SESİN GÜCÜ

Ses dalgaları, termoakustik motor ve soğutucu gibi makinelerdeki piston ve krankların yerini alabilir...

* Steven L. Garrett, Scott Backhaus
Çeviri: Serpil Yıldız

2000 yılı Şubat ayında, Ulusal Mühendislik Akademisi Jüri Heyeti 20. yüzyılın en büyük mühendislik başarılarının sıralama sonuçlarını duyurdu. İkincilik ve onunculuk çok başarılı iki ısı motoruna verilmişti. Bunlardan biri bir otomobilin iç yanmalı motoru, diğeryse hem soğutucu hem de klimalarda kullanılan, tersine çalışan ısı motoruydu. Ancak, modern teknolojinin önemseydiği bu iki ürünün, hava kirliliğine yol açmak, sera gazları çıkarmak ve dünyayı koruyan ozon tabakasını aşındırmak gibi, pek de gurur verici olmayan ortak özellikleri de vardı.

20 yılı aşkın bir süredir, araştırmacılar çevreye yönelik tehlikeleri azaltmaya ya da bütünüyle yok etmeye yardımcı olabilecek, yeni sınıf motorlar ve soğutucular geliştirmeye çalışıyorlar. "Termoakustik" özellikli bu cihazlar, devirli makinelerin özelliği olan shaft gücü yerine ses gücünü üretir ya

da soğururlar. Doğasındaki mekanik basitlik nedeniyle, böyle bir donanım, bir gün belki de ısıtma, soğutma ve sıcak su elde etmede kullanılan elektriğin evlerde üretilmesini sağlayacaktır.

Bu makineler nasıl çalışır? Kısaca, bir termoakustik motor, bir yüksek sıcaklık kaynağından gelen ısıyı akustik güce dönüştürerek fazla ısıyı da düşük sıcaklıklı bir kanala atar. Termoakustik soğutucunun yaptığı, bunun tersidir; akustik gücü, ısıyı soğuk bir kaynaktan bir sıcak kanala pompalamakta kullanır. Bu cihazlar, termodinamik iş akışkanı olarak soy gazları kullandıklarında en iyi performansı verirler. Soy gazlar, soğutmada yıllarca kullanılmış kimyasallardan farklı olarak, hem zehirsiz hem de çevre dostudurlar. Termoakustik bir başka cazip özelliği de motorun bir soğutucuya kolayca bağlanabilmesi ve sonuç olarak bütün parçaları hareketsiz

Cam üfleyiciler, bir kabın ucuna uygulanan ısının onu bir termoakustik motora dönüştürdüğünün farkında olmadan, zaman zaman ellerindeki işlerin aniden yaydığı sesleri duyabilirler. Bu olgu ilk kez ısıyla ses arasındaki ilişkinin kabul gördüğü 1850 yılında bilimsel literatürde yer aldı. Ancak akustik dalganın da soğutma yapabildiği, bilim insanları son zamanlara kadar, bütünüyle anlamamıştı.

olan ısı-güçlü bir soğutucunun oluşturulabilmesidir.

Şimdilik, yalnızca laboratuvarlarda bulunan bu tür termoakustik soğutucuların prototipleri Uzay Mekiği'nde ve Amerikan Deniz Kuvvetleri'ne ait bir savaş gemisinde kullanıldı. Ayrıca yakın zamanlarda güçlü bir termoakustik motor, doğal gazı, ticari ölçekte sıvılaştırarak yeteneğe sahip olduğunu kanıtladı.

Ses ve Sıcak Hava

Sıcaklık ve sesin etkileşmesi akustikçilerin, havadaki ses hızının Newton tarafından yapılmış ilk hesaplamalarının Laplace tarafından düzeltildiği 1816'dan beri ilgisini çekmektedir. Newton, bir gaz içindeki ses dalgasının genişleme ve sıkışmalarının, sıcaklığı etkilemeksizin gerçekleştiğini varsaymıştı. Laplace, gerçekte varolan küçük sıcaklık değişimlerini de hesaba kattı ve böylelikle sesin havadaki gerçek hızının, Newton'un hesapladığından %18 daha fazla olduğunu gösterdi.

Bu tür termal etkiler 19. yüzyıl cam üfleyicilerinin neden zaman zaman, ısıttıkları kaplardan yayılan sesler duyduklarını açıklar. Aslında bu olgu, termoakustikğin ilginç bazı pratik sonuçları olabileceğinin de işaretidir. Ancak bunun tam tersi olan etkinin, yani tıpkı sıcaklık farkının ses yaratabilmesi gibi, sesin de sıcaklık farkı yaratabileceğinin farkedilmesi, yüzyıldan fazla zaman aldı. Akustik soğutmanın nasıl ortaya çıktığını anlamak, aslında çok da zor değil.

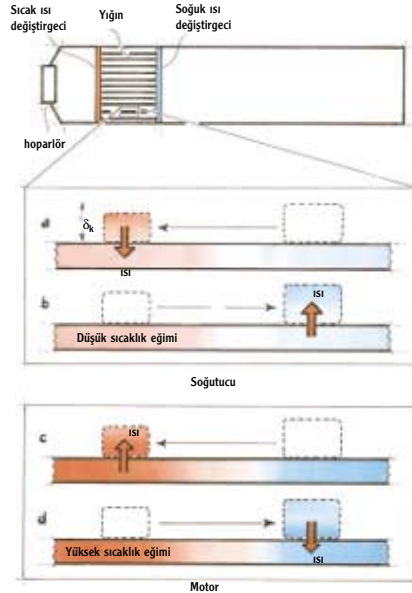
Bir akustik dalganın, başlangıçta belli bir ortalama basınç ve sıcaklığa sahip bulunan bir gazı uyardığını düşünelim. Herhangi bir noktada basınç arttıkça, sıcaklık da yükselecektir; tabii ki, bu artışın yeterince hızlı olduğu ve ısının kaçmaya vakit bulamadığı varsayımıyla. Akustik sıkıştırımlara paralel olarak oluşan sıcaklık değişimleri, basınç iniş-cıkışlarının büyüklüğüne bağlıdır. Normal bir konuşmadaki görelî

basınç değişimleri yaklaşık olarak milyonda bir mertebesinde (bu oran ses basınç seviyelerinde yaklaşık 74 dB'e karşılık gelir), ve sıcaklıktaki değişim Santigrad derecenin sadece onbinde biri kadardır. Acı duyma eşiğindeki (120 dB) sesler için bile, sıcaklık yukarıya ya da aşağıya doğru sadece yaklaşık 0.02 °C genlikle titreşir.

Çoğu soğutucu ve klima, ısıyı daha büyük sıcaklık farkları (genellikle 20 derece ya da daha fazla) üzerinden pompalamak zorundadır. Dolayısıyla tipik ses dalgalarının neden olduğu sıcaklık salınımları, bunlardan yararlanmaya olanak tanımayacak ölçüde küçüktürler. Daha büyük sıcaklık aralıklarıyla çalışabilmek için, gazın katı bir malzemeyle temas ettirilmesi gerekir. Katıların birim hacimdeki ısı kapasiteleri gazlardan çok daha yüksektir. Bu nedenle önemli bir sıcaklık değişimine uğramaksızın, önemli miktarda ısı alışverişinde bulunabilirler. Ses dalgası taşıyan bir gaz, katı bir yüzeyin yanına yerleştirilirse katı, kendi sıcaklığını sabit tutarak, sıkıştırma ısını soğurma eğiliminde olacaktır. Bunun tersi de doğrudur; gaz genişlediğinde, katı, sıcaklığında azalma olmaksızın, ısıyı bırakır, gazın fazla soğumasını engeller.

Bitişikteki bir katıdan gelen ya da bu katıya yönelen ısının difüzyon yapabileceği mesafe "termal nüfuz derinliği" olarak adlandırılır. Büyüklüğü, iletilen ses dalgasının geçiş frekansına ve gazın özelliklerine bağlıdır. Tipik termoakustik cihazlarda, havadaki sesin iletilebilir frekanslardaki dalgaları için, termal nüfuz derinliği milimetrenin onda biri kadardır. Bu yüzden, ısı değişimini en iyi şekilde kullanan bir termoakustik motor ya da soğutucunun tasarımında, genişliği yaklaşık olarak bu boyutun iki katı olan ve içinde yüksek genlikli bir ses dalgasının yayılabileceği büyüklükte boşluklara sahip bir katının bulunması gerekir. Çok sayıda tabaka içeren gözenekli katı (çoğunlukla, soğutucular için silindirik şekli verilmiş yumuşak plastik, ya da motorlar için paslanmaz çelik) adeta bir tabaka yığımına benzediği için, "yığın" olarak adlandırılır.

Akustik olarak zorlanan bir gazın yığına girmesiyle basınç, sıcaklık ve konumun hepsi zamanla titreşir. Gaz bir tüp içindeyse, ses ileri-geri yansıyarak durağan bir akustik dalga oluştu-



Termoakustik cihaz temelde, gazın içinden geçebileceği çok sayıda açık kanallı olan gözenekli bir katıdan oluşan "yığını" içeren, gaz dolu bir tüptür. Örneğin bir hoparlörle oluşturulan rezonans ses dalgaları, gazı yığın içindeki boşluklarda ileri geri hareket ettirir. Yığın boyunca oluşan sıcaklık eğimi düşükse (ortada), bir kenara doğru kayan gaz (a) sıkışır ısınır ve bu yüzden, kalınlığı yaklaşık olarak termal nüfuz derinliğinde (δk) bir gaz paketi yığına ısı bırakır. Aynı gaz daha sonra diğer yöne kaydığına (b), ısı soğuracak kadar genişler ve soğur. Tek paket ısıyı kısa bir mesafe taşır. Ancak, gazı oluşturan çok sayıda paket, ısıyı soğuk bir bölgeden sıcak bir bölgeye aktaran bir 'kova zinciri' oluşturur. Eğer yığın boyunca oluşan sıcaklık eğimi yeterince büyütülebilirse, aynı cihaz bir termoakustik motora dönüştürülebilir (altta). Bu durumda ses de bir gaz paketini sıkıştırıp ısıtabilir (c), fakat hâlâ yığından daha soğuktur ve ısıyı soğurur. Bu gaz paketi öteki uca kayıp da genişlediğinde (d), soğur ama yığından daha sıcak kalır ve böylece ısı bırakır. Paket termal olarak yüksek basınçta genişleyip düşük basınçta sıkışır ve ileri geri yankılanan ses dalgalarının basınç salınımlarını büyütürerek ısı enerjisini akustik enerjiye dönüştürür.

rur. Bu durumda basınç, yerdeğiştirmeyle aynı fazda olacak, yani, en yüksek ya da en düşük değerine, gazın titreşim hareketinin en fazla olduğu anda ulaşacaktır.

En basit şekliyle, kapalı bir tüp, gözenekli bir yığın ve bir akustik enerji kaynağından oluşan bir termoakustik soğutucuda bu basit ilişkiden nasıl yararlanılabileceğini düşünün. Küçük bir miktar gazın oluşturduğu gaz paketi bir tarafa, diyelim ki sol tarafa hareket ederken, basınçtaki artışla beraber ısınarak bir an durur ve sonra yönünü değiştirir. Bu hareketinin sonuna doğru sıcak gaz, ısıyı biraz daha soğuk olan yığın içine bırakır. Sonraki yarı-çevrimde, gaz paketi sağa doğru hareket eder ve genişler. En sağ uca ulaştığında paket, yığın kendisine bitişik bölümünden daha soğuk olacak

ve yığından ısı alacaktır. Sonuç olarak, yığının sol tarafı sağ tarafından daha sıcak olduğunda bile, paket sağdan sola ısı pompalayacaktır.

Bir gaz paketi için hareketin genliği çok küçüktür, ama net etki gaz paketlerinin bir kova dizisi gibi sıralanmasından elde edilir: Titreşmekte olan gaz paketi hemen arkasındaki paketten ısıyı alır ve ısı kaybına uğramaksızın önündekine aktarır. Isı ve bu ısıyı termoakustik olarak hareket ettirmek için yapılan iş, araba radyatörlerindeki benzer şekilde, bir sıcak ısı değiştirgeci sayesinde yığının bir ucundan çıkar. Yığının öteki ucuna yerleştirilmiş olan bir soğuk ısı değiştirgeci, kimi dış ısı yüklerine karşı faydalı bir soğutma sağlar.

Bu soğutma işlemi, termoakustik bir motor yapmak için, kolayca tersine çevrilebilir. Bunun için sadece, ısıyı yığının sıcak ucunda uygulayıp soğuk ucundan almak suretiyle sıcaklık eğimini dikleştirmek yeterlidir. Şimdi gaz paketi sola hareket ettiğinde, basıncı ve sıcaklığı daha önce de olduğu gibi artacak, fakat yığın bu noktada hâlâ daha sıcak olacaktır. Böylece ısı yığından gaza geçecek ve gaz basıncı en yüksek değerine ulaşırken gazın termal olarak genişmesine yol açacaktır. Tersine, paket sağa doğru yer değiştirdiğinde genişler ve soğur; ama yığın burada hâlâ daha soğuktur. Dolayısıyla ısı gazdan katıya geçer ve basınç en düşük değerine ulaşırken termal büzölmeye yol açar. Bu yolla, yığına uygulanan sıcaklık değişimi, ısıyı gazın içine ve dışına doğru güdümler yaparak gazın çevresi üzerinde iş yapmasına yol açar ve akustik salınımların genliğini büyütür. Hedeflenen dik sıcaklık eğiminin devamlılığı için elektrik ısıtıcısı, yoğunlaştırılmış güneş ışınları ya da alev gibi bir dış güç kaynağına gerek vardır. İlk kez 1850'de yayınlandığı gibi, bu durum, bir yığın görevi yapan cam bir tüpün çeperlerini yüksek bir sıcaklık eğimi yaratacak şekilde ısıttıklarında, cam üfleyicilerinin bazen neden kendiliğinden oluşan sesler duyduklarını da açıklar.

Bu "şarkıcı tüp" etkisinin kolayca ortaya çıkışı, Pennsylvania Eyalet Üniversitesi Lisansüstü Akustik Programı'nda yüksek lisans öğrencisi Reh-lin Chen'in, sadece üç parçadan oluşan termoakustik bir motor yapmasına ön-

Basit termoakustik motor, bilinen malzemelerden yapılabilir.

Küçük bir test tüpü, bir ısıtıcı kablo ve otomotiv sanayiinin katalitik dönüştürücülerinde kullanılan gözenekli seramikten bir fiş, yaklaşık 1 watt'lık bir akustik güç üretebilir.



Fişin bir ucu parabolik bir aynanın odağına yerleştirilirse, güneş enerjisi de bu prototipi çalıştırabilir.

cülük etmiştir. Bu motordaki yığın, normalde otomotiv sektöründe katalitik dönüştürücüler için de kullanılan gözenekli seramikten yapılmış bir fişten ibarettir. Fişin bir ucuna bağlı olan ısıtıcı kablodan geçen elektrik akımı, bir sıcaklık eğimi yaratır. Isıya dayanıklı camdan yapılmış bir test tüpü, küçük bir org borusu gibi davranır ve durağan bir ses dalgası oluşturur. Yığının soğuk ucu test tüpünün ağzına doğru baktığından, soğuk ısı değişirgeci gerekli değildir; tüpün açık ucundan girip çıkan hava akımı yeterli soğutmaya sağlar. Chen'in motoru, basitliğine karşın, rahatsız edici düzeyde ses üretme yeteneğine de sahiptir.

Bu tür termoakustik motorların en çarpıcı özelliklerinden biri hareketli parçalarının olmayışıdır. Kovuğun ve yığının; sıkıştırma, genişleme, yer değiştirme ve ısı aktarımının doğru zamanlarda olmasını zorlayacak olan temel fizikten başka hiçbir şeye gereksinim duymazlar. Arabalarımızdaki iç yanmalı motorlar da, güç döngüsünün emiş, sıkıştırma, genişleme ve atmadan oluşan evrelerinin birbirlerini çok düzgün bir şekilde izleme zorunluluklarından dolayı, kusursuz zamanlamaya gerek duyarlar. Ancak, konvansiyonel otomobil motorlarında gerekli evrelendirmeyi sağlayabilmek için silindir başına, başlıbaşına birer düzenek içeren en az iki subap bulunur. Bu fark termoakustik cihazları konvansiyonel motorlar ve soğutuculardan daha basit ve potansiyel olarak çok daha güvenilir yapar; çünkü subapların, piston bileziklerinin, krank millerinin, bağlantı çubuklarının ve benzer elemanların uğradığı aşınma bunlarda söz konusu değildir. Böylece termoakustik cihazların yağlanmasına gerek kalmaz.

Pistonsuz motorların yüksek güç seviyeleri elde edebilmesi konu hak-

kında bilgisi olmayanlar için şaşırtıcı olabilir. Termoakustik cihazlar bu usulü, akustik rezonansı, küçük gaz hareketlerinden büyük basınç titreşimleri elde etmek amacıyla işleterek gösterirler. Bir ucuna hoparlör takılmış kapalı bir tüpü (bir akustik rezonatör) gözünüzün önüne getirin. Hoparlörün titreşim hareketi akustik enerji pompalar, bu enerji tüp boyunca ses hızıyla yol alır, tüpün uzak ucundan yansır ve kaynağa doğru geri fırlar. Uyarılma frekansı tümüyle uygunsa, hoparlörün enjekte ettiği bir sonraki enerji artışı, akustik dalganın yansıyan kısmıyla buluşur.

Rezonan dalgadaki basınç salınımları, döngü boyunca eklenen enerji, ya istenen işin üretilmesi ya da sürtünme nedeniyle harcanan enerjiye tam olarak eşit hale gelinceye kadar büyür.

Bir silindir içindeki bir miktar gazı sıkıştıran pistonun hareketi düşünüldüğünde, bu büyümenin sonucu kolayca anlaşılabilir. Gaz hacminin ilk uzunluğu, diyelim 20 cm ise ve piston yavaşça içeriye doğru 1 cm hareket ederse, piston çevresinden sızıntı olmadığı varsayımıyla, gazın basıncı % 5 oranında artacaktır.

Şüphesiz, böylesine küçük mesafelerle hareket eden bir salınımlı akustik kaynak, yağlanmış bir silindir ve içinde hareket eden conta bileziklere sahip bir pistonu gerek duymayacaktır, ki bu da, konvansiyonel soğutma kompresörlerinde ve iç yanmalı motorlarda bulunan bütün problem yaratıcı elemanları saf dışı eder. Örneğin metal körük benzeri esnek contalar yeterli olur. Bu tür sızdırmaz contalar yağlanmak zorunda değildir ve pistonla, pistonun içine sıkı sıkıya oturduğu silindir arasındaki olası gaz sızıntılarını önlemek için gerekli olan düşük toleranslı imalata gerek duymaz.

Stereo Soğutucu

Termoakustik makinelerde bulunan donanımın basitliği en iyi şekilde, somut bir örneğin incelenmesiyle takdir edilebilir. 1990'ların ortalarında, California Monterey'deki Denizcilik Okulu'nda, bir NASA projesi kapsamında, Uzay Mekiği için iki termoakustik soğutucu geliştirildi. Bunlardan biri elektronik elemanları soğutmak, diğeri ise, biyomedikal deneylerde kullanılmak üzere astronotlardan alınan kan ve idrar örneklerinin saklanması için kullanılan soğutucu-dondurucu birimin yerini almak üzere tasarlanmıştı. "Termoakustik yaşam bilimleri soğutucusu" diye adlandırılan bu soğutucu laboratuvar da iyi sonuçlar verdi; ancak NASA'nın desteği, görünüşte kaynak yokluğu nedeniyle beklenmedik şekilde sona erdi. Proje o sıralarda çok iyi gittiği için bu gelişme oldukça şaşırtıcıydı. Ancak 6 ay sonra, NASA Yaşam Bilimleri Bölümü'ndeki program yöneticilerinin, Houston'daki Johnson Uzay Uçuş Merkezi'nde komisyon payları ve rüşvet üzerine sürdürülen, çekişmeli bir FBI soruşturmasına karışmış oldukları keşfedildi. Bu yöneticiler, belli ki kaydedilen teknik ilerlemeyi değerlendirmekten çok, başka şeylerle meşgulüydüler. Neyse ki, Amerikan Deniz Kuvvetleri benzer bir soğutucu gereksinimi içindeydi ve çabaların desteklenmesini üstlendi.

Bu soğutucu başlangıçta uzayın talepkar koşullarında çalışmak üzere tasarlanmış olduğu için, hoparlörlerden birinin devre dışı kalması halinde, yedeklemeyi sağlayacak bir stereo-konfigurasyon seçilmişti. Bu iki hoparlör ses üretimi için genelde kullanılanlara benzer; ancak çok daha güçlüdürler ve sınırlı bir frekans aralığı üzerinde çalışırlar. Bu hoparlörlerin oynak parçaları, küçük metal körüklerle, U biçimli durağan bir rezonans kovuğa bağlıdır.

U tüpü, herbirinin iki ucunda ufak araba radyatörlerine benzeyen iki adet su dolu ısı değişirgeci bulunan, iki ayrı yığın içerir. Bu ısı değişirgeçlerinden ikisi atık ısıyı uzaklaştırırken diğeri ikisi soğutmaya sağlar. "Yaşam bilimleri soğutucusu"ndan gelen serin su, USS Deyo adlı savaş gemisinde bulunan radar elektronığının katmanları arasında dolaştırıldı. Deniz denemelerinde ulaşılan en büyük soğutma ka-

pasitesi, sadece 200 Watt'lık ses gücünün kullanımıyla, 400 Watt'ın üzerine çıktı. Soğutucu, çalışılabilecek en düşük işletim sıcaklığında (4 °C), aynı sıcaklık aralığında çalışan ideal bir soğutucunun % 17'si verimlilikle çalıştı. Soğutucunun kendisi, üst verimlilik sınırının % 26'sına ulaştıysa da ısı değiştiricilerinin verimsizliği, yararlı soğutmayı % 17 değerine düşürmüştü.

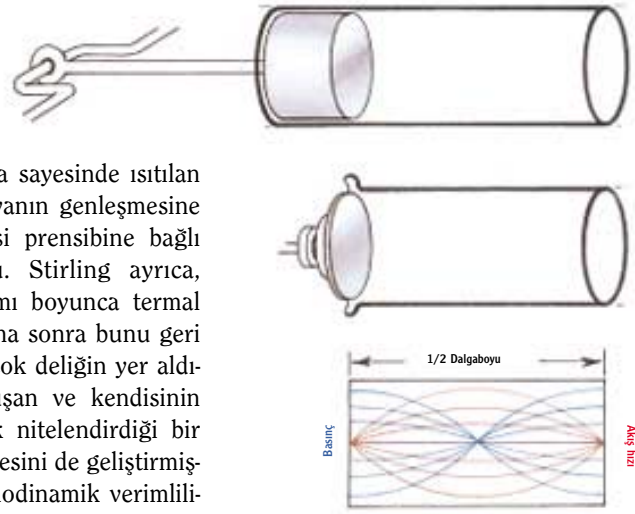
Küçük bazı değişikliklerle bu performans artırılabilir olsa da, bu tür termoakustik soğutucuların gaz ve yığın arasındaki ısı akış şekliyle kaynaklanan bir verimlilik iç sınırı daima olacaktır. Ancak kısa bir süre önce, Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'ndan araştırmacılar, tuhaf bir raslantıyla tam da Laplace'ın ses hızını doğru olarak hesapladığı 1816 yılında İskoçya Kilisesi Papazı Robert Stirling'in patentini aldığı eski bir tekniği kullanarak, termoakustik motorların bu aşılmaz görünen engeli aşmalarını sağlayan yeni bir tekniği ortaya koydular.

Geleceğe Dönüş

Papaz Robert Stirling boş zamanlarında, hâlâ kendi adını taşıyan, hayli etkileyici bir tür sıcak hava motorunu tasarlamış, yapmış ve göstermişti. Onun bu buluşu, dönemin buharlı makinelerinden farklı olarak, patlama riski olan bir kazan içermiyordu. Stirling motoru, bir ısı değiştirgeciyle gerçek-

leştirilen dış yanma sayesinde ısıtılan bir silindirdeki havanın genişlemesine ve yer değiştirmesine prensibine bağlı olarak çalışıyordu. Stirling ayrıca, döngünün bir kısmı boyunca termal enerji biriktirip daha sonra bunu geri veren, içinde pek çok deliğin yer aldığı bir katıdan oluşan ve kendisinin "ekonomik" olarak nitelendirdiği bir rejeneratör düşüncesini de geliştirmişti. Bu eleman termodinamik verimliliği, etkileyici seviyelere yükseltmişti. Fakat Stirling motorunun mekanik karmaşıklığı, iki ısı değiştirgeci gerektirmeyen yüksek basınçlı buhar ve iç yanmalı motor çeşitlerinde karşılaşıldan daha fazlaydı ve bu durum, motorun yaygın kullanımını sınırladı.

Los Alamos'lu araştırmacılar Fizik Profesörü Peter Ceperley'in teorik olarak tasarlamış olduğu "gezgin dalgalı" pistonsuz Stirling motorunu inceleyerek, istenen verimi sağlayamaya çağı sonucuna vardılar. Bu nedenle de akustik motor ve soğutucular için "durağan dalga" kullanımına yöneldiler. Yıllar sonra, araştırmacılar, probleme yeniden bakarak, rejeneratörün, gaz basıncı salınımı ve gaz hızı salınımının çarpımıyla orantılı bir akustik güç ürettiğini anladılar. Rejeneratörde kaybedilen güç, salınma hızının karesiyle orantılıdır. Bu kayıp, bir elektrik dirençte kaybedilen gücün (ki bu da içinden geçen akımın karesiyle orantılıdır) bir benzeridir.



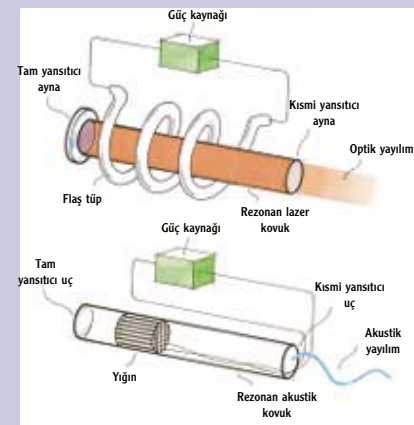
Bir silindirin içindeki gaz basıncı, bir piston silindirin içine doğru yavaşça hareket ettirildiğinde, hacimdeki azalmayla ters orantılı olarak artar (üstte). Örneğin 20 cm'lik bir silindir içindeki 1cm'lik yer değiştirme, basıncı % 5 artırır. Ama eğer piston, kovuğun rezonans frekansında ileri geri hareket ediyorsa, esnek kövrüklerin ayak uydurabileceği kadar küçük olan 50 mikrometrelilik hareketler aynı pik basınca yol açacaktır (ortada). Gazın ileri geri salınımı sırasında durağan dalga en yüksek basınçlarını, silindirin iki ucunda oluşturur; oysa, kapalı bir tüpte gazın hızı bu noktalarda daima sıfırdır.

Sık karşılaşılan örneğin, bir iletim hattındaki kablo direncinden kaynaklanan kayıplar, elektrik mühendislerini, uzun bir süre önce, basit bir çözüm bulmaya yöneltmişti: Voltajı artırıp akımı azaltarak, iletilen güce eşit olan bu iki değişkenin çarpımını sabit tutmak. Böylece, salınımlı basınç çok büyük ve akış hızı çok küçük hale getirilerek çarpımlarından elde edilecek değer sabit tutulabilirse, ürettiği güçte azalma olmaksızın rejeneratörün verimliliği artırılabilir.

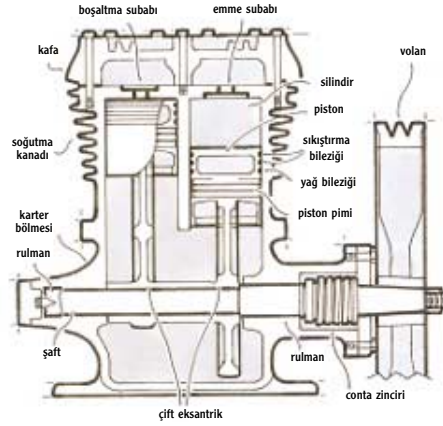
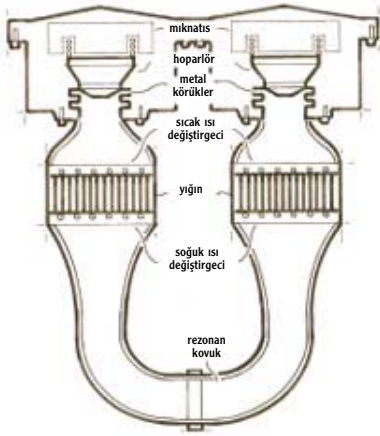
Bu zorunluluklar, gaz hareketine karşı yüksek oranlı basınç elde etmenin bir yolu olarak, çoğunlukla tipik termoakustik motorlarda kullanılan akustik durağan dalgalara geri dönüşmesini sağladı. Gaz akış hızının en aza indirgenmesi, ısının gaz ve katı arasında en verimli şekilde iletilmesini minik gözencikleriyle sağlayan rejeneratör içindeki viskoz kayıpların üstesinden gelmesini sağlar. Ama normal bir yığın yerine rejeneratör kullanmak, ısı aktarımının zamanlamasını önemli bir biçimde değiştirir: Salınmakta olan gazın, ısı değişimi gerçekleşmeden önce yer değiştirmek için zamanı yoktur. Bu yüzden sorun sadece, yığını bir rejeneratörle değiştirmekten ibaret değildi. Gerek duyulan cihaz, durağan dalganın özelliklerinden bazılarını (yüksek basınç ve düşük akış hızı) üretirken, gezgin bir dalganın özelliklerinden bazılarını da (basıncın yerdeğiştirmeye değil de, hızla eşzamanlı

Akustik Lazer

Hem sözlük, hem mecazi anlamıyla sahip oldukları yalınlık, termoakustik cihazların lazerle benzeştirilmelerinin nedeni. Isıtılmış bir yığın boyunca "dengesizliğin" (non-equilibrium) korunmuş olması, bir lazer malzemesinde elektron enerji seviyelerindeki tersine dönmüş yığılmalara benzer. Test tüpü, bir akustik rezonatör işlevi görür; ki bu da bir lazer kovuğu gibi, durağan dalganın ileri-geri salınan enerji karşısında genlik kazanmasına yol açar. Test tüpünün açık tarafı, lazerin çıkış kısmında gümüşle kısmen kaplanmış bir yarı-aynanın yaptığı görevi yapar. Her ikisi de, rezonans kavite içinde depolanmış olan enerjinin bir kısmının çevreye yayılmasını sağlar. Chen'in "akustik lazer"inin yalnızca yaklaşık bir watt'lık ses gücü üretmesine karşın, doğal gaz yakılarak ısıtılan benzer bir cihaz 10 kW'dan fazla üretir: gerçekten güçlü bir lazer!



Termoakustik motorlar, her iki tip cihazın da rezonans kovuklarında oluşturulan durağan dalgaları geliştirmeleri bakımından optik lazerlere benzerler. Örneğin bir yakut lazerinde (üstte) enerji ilavesi, elektron enerji seviyelerinin tersine yığılmasına neden olan bir flaş tüpü aracılığıyla yapılır. Bunun bir termoakustik benzerinde (altta) enerji kovuğa, dengesiz bir sıcaklık dağılımı oluşturan ısıtılmış bir yığın kullanılarak enjekte edilir.



Radar elektronijinin soğutulmasında kullanılan termoakustik soğutucunun iç işleyişi görece basittir. Bir çift hoparlör, gazı, su sirküle eden ısı değiştiriciler eklenmiş iki gözenekli yığının içinden geçmeye zorlar. Aşınmaya yatkın hareketli parçalar içeren mekanik kompresörler de dahil olmak üzere, konvansiyonel soğutucular (sağda), çok daha fazla sayıda elemana gerek duyarlar.

olarak artıp azalması) sahip olmak zorundaydı. Böyle bir melez, temelde uzun bir tüpten oluşan bir durağan dalga kovuğunun, çift boyunlu bir Helmholtz rezonatörüyle eşleştirilmesiyle tasarlanabildi. Burada, boyunlardan biri gaz akışına açıktır, öteki de rejeneratör ve ısı değiştiricilerini içerir. Açık geçiş, açıldıktan sonra ağzına üflenen bir soda şişesi gibi davranır. Şişenin boynundaki hava kütlesi ve altında hapsedilmiş gazın oynaklığı, tıpkı katı bir kütle ve sarımlı bir yayın yaptığı gibi, salınımları destekler. Helmholtz bu tekniği, rezonatörün doğal frekansına yakın dar bir frekans aralığındaki sesleri yükseltmek için geliştirdi. Yükseltme miktarı, rezonatör frekansıyla, boyuna çarpan sesin frekansının ne denli yakın bir uyum içinde olduklarına bağlıdır.

Termoakustik Stirling motorunda, Helmholtz rezonatörünün doğal frekansı işletme frekansından bir hayli büyüktür. Bu yüzden Helmholtz rezonatörü içindeki basınç değişimi, durağan dalga rezonatörünün basınç değişiminden yalnızca % 10 daha büyüktür. Az olmasına karşın bu fark, tıpkı gezgin bir akustik dalgada oldu-

ğu gibi, değişen basınçla eşzamanlı olarak seyreden akış sırasında basıncın her artıp azalmasıyla, rejeneratörden bir miktar gaz geçişini sağlamak için yeterlidir.

Böylece, Ceperley'in durağan dalgalı Stirling motorunun temel problemi çözülmüştü. Ancak motorun beklentilere kıyasla verimsiz çalıştığının farkedilmesi hayal kırıklığına neden olmuştu. İki boyunlu Helmholtz rezonatöründeki dairesel geometri, gazın döngü etrafında sürekli dolaşımıyla rejeneratörün sıcak ve soğuk uçlarını kısa devre yapmasına ve büyük miktarda ısı kaybına yol açmasına olanak veriyordu ki, bu da problemin ta kendisiydi.

Bir kez neyin yanlış olduğunu anladıncaya, problemi düzeltmek kolaydı. Bir çözüm, Ceperley'in dairesel tasarımı için yıllar önce önermiş olduğu gibi, akustik dalgaları geçiren ama gazın sürekli akışını engelleyen esnek bir zarın eklenmesi olabilirdi. Ancak bu tür zarlarla edinilen önceki deneyimler uzun süre dayanabilecek, yeterince sağlam bir tasarım geliştirilmesinin zor olacağı kanısını vermişti. Böylece zar yerine, çevrimde, sadece sızın-

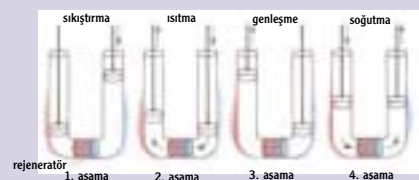
mayı önleyecek miktarda bir arka basıncı yaratmak için, bir yöndeki akışın diğer yöndekinden daha kolay olmasını sağlayan asimetric açıklıklardan oluşan bir jet pompası eklendi. Verimliliği belirgin şekilde artan motor en iyi durumda, teorik olarak hesaplanmış en yüksek verimliliğin % 42'siyle çalışıyordu. Bu oran, daha önce yapılmış termoakustik motorların elde etmiş olduğundan % 40 daha iyiydi ve bu haliyle bile modern iç yanmalı motorların sunabildiği verimlilikle rekabet edebilirdi.

Sonraki Yarışma

Termoakustik motorlar ve soğutucular birkaç yıl öncesinden beri zaten, basitlikleri, yağlama ve kaygan conta gerektirmemeleri, çevresel açıdan zararsız akışkan kullanmaları gibi özelliklerinin, daha düşük olan verimliliklerini fazlasıyla telafi ettiği uzmanlık uygulamaları için dikkate alınır hale gelmişlerdi. Tek frekanslı hoparlörler ve alternatif hareketli elektrik jeneratörleri gibi yüksek-güçlü cihazların tasarımında yaşanan diğer gelişmelerle birleşen bu son önemli gelişme, termoakustik, çok yakın bir zamanda, melez elektrik araçlarına güç kaynağı sağlamanın, güneş enerjisi depolamanın, yiyecekleri soğutmanın, binaları havalandırmanın, endüstriyel gazları sıvılaştırmanın ve henüz hayal edilemeyen diğer pek çok etkinliğin çevresel açıdan cazip bir yöntemi olarak ortaya çıkabileceğini gösteriyor.

2009'da Ulusal Mühendislik Akademisi büyük olasılıkla, 21. yüzyılın en iyi teknolojik başarılarını belirlemek üzere bir uzman jüri heyetini yeniden toplayacak. Henüz doğmamış olan torunlarımızın o listede göreceği makineler arasında, bir yandan gezegenin korunmasına yardım ederken diğer yandan herkesin yaşam standardını yükseltmeyi vaadeden termoakustik cihazların da bulunacağını umuyoruz. Bu makaleyi yazan araştırmacıların da içinde bulunduğu bir grup meraklı fizikçi ve mühendis, akustik motorları ve soğutucuları bu geleceğin parçası yapmak için, 20 yıldır yoğun bir şekilde çalışmakta. En son başarılar elbette cesaret verici, ancak yapılacak daha çok iş var.

Stirling döngüsü basınç ve hacimde değişimlerin özelliklerini ortaya koyan dört ayrı aşama içerir: sıkıştırma, ısıtma, genişleme ve soğutma. Basit olarak, iki pistonlu Stirling motorunda, sıkıştırma aşamasında (1) bir piston sabit tutulurken, diğeri içeri doğru hareket ederek sıkıştırma ısısını bitişik soğuk haznenin içine aktarır. Sonraki aşamada (2) her iki piston da eşzamanlı hareket ederek soğuk gazı, bir önceki döngünün son aşamasında ısınmış olan gözenekli rejeneratör boyunca ilerlemeye zorlar. Böylece sabit-hacimli rejeneratif ısınma sağlanır. 3. aşamada (3) sıcak haznenin gelen ısı, komşu pistonu dışarıya doğru hareket ettirmeye zorlayan gazın termal olarak genişlemesine neden olur. Sonunda (4) her iki piston, ısınan gazın sabit-hacimli rejeneratif soğutma oluşturması için birlikte hareket eder.



**"The Power of Sound" American Scientist, Kasım - Aralık 2000