

HANGSZEREK A »SEMMIBŐL«

Nagy Anett, Radnóti Miklós Kísérleti Gimnázium, Szeged
Papp Katalin, SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék, Szeged

Öveges tanár úr kísérleteivel egyetemista koromban találkoztam először. Akkor kaptam kedvet az otthoni kísérletezéshez, és azóta keresem azokat a kísérleteket, amelyekhez csak hétköznapi, mindenki számára hozzáférhető eszközök kellenek. A következőkben Öveges tanár úr emléke előtt tisztelve olyan egyszerű kísérletek leírása található, amelyek segítségével akár kis koncertet is adhatunk. A végkorrekciós tényező meghatározása egy látszólag egyszerű mérés, azonban nagyon jól használható komolyabb összefüggések meghatározására, fizikai és matematikai fogalmak elmélyítésére.

Elméleti háttér

Poharakkal, csövekkel, üvegekkel zenei előképzettség nélkül is bármelyik osztály adhat szórakoztató koncertet. Annyit kell mindösszesen tudnunk, hogy a természetes (dúr) hangskála hangjainak frekvenciái – dótól dó'-ig olyan arányban nőnek, mint a következő számsor: 24, 27, 30, 32, 36, 40, 45, 48. Ez azt jelenti, hogy ha a házi készítésű hangszeren egy teljes oktávnyi hangot szeretnénk megszólaltatni, akkor a kiinduló (alaphanghoz) képest az oktávon belüli többi egész hanghoz tartozó f frekvenciákat a következő törtek segítségével kaphatjuk meg:

$$f, \frac{27}{24}f, \frac{30}{24}f, \frac{32}{24}f, \frac{36}{24}f, \frac{40}{24}f, \frac{45}{24}f, \frac{48}{24}f$$

A rezgés során létrejövő legerősebb alprezgés hullámhossza a rezgő levegő vagy vízoszlop hosszával arányos [1]. Mivel egy hullám f frekvenciája és λ hullámhossza egymással fordítottan arányos mennyiségek, az előbbieken alapján egy adott l hosszúsághoz tartozó kezdő hanghoz képest a többi hosszát az

1. ábra. A zene-csövek



előbbi törtek reciprokaként kaphatjuk meg (a törteket egyszerűsítettem):

$$l, \frac{8}{9}l, \frac{4}{5}l, \frac{3}{4}l, \frac{2}{3}l, \frac{3}{5}l, \frac{8}{15}l, \frac{1}{2}l$$

Házi hangszerek

Zene-csövek

A diákok között legnépszerűbb „hangszer” a zene-cső (1. ábra). Megszólaltatása senkinek sem jelenthet gondot, és már elsőre is biztosan sikerül. Vékony műanyag csöveket megfelelő hosszúságúra vágva egy olyan hangszeret kaphatunk, amellyel zenélhetünk, ha a tenyerünkhez ütögetjük a cső egyik száját. A csőben levő levegő ekkor rezgésbe jön és a cső hosszától függően különböző hangokat hallhatunk. A csövek oldalára érdemes ráírni a csőhöz tartozó adott hangot, illetve kisebbek számára érdemes színekkel is használni. Így ezzel a hangszerrel akár egy óvodás csoporttal is zenélhetünk, ha kivetítjük a színekkel kódolt hangsort és rámutatunk a soron következő színre.

hang	frekvencia (Hz)	hossz (cm)
C	262	32,3
C#	277	30,5
D	294	28,8
D#	311	27,1
E	330	25,6
F	349	24,1
F#	370	22,7
G	392	21,4
G#	416	20,2
A	440	19,0
H	466	17,9
B	494	16,9
C'	523	15,9
C'#	554	15,0
D'	587	14,1
D'##	622	13,3
E'	659	12,5
F'	698	11,8
F'##	740	11,1
G'	784	10,5
G'##	831	9,8
A'	880	9,4
H'	892	9,2
C''	1046	7,9



2. ábra. Koncert zene-csővekkel

A zenecsöveket 20 mm külső és 16 mm-es belső átmérőjű, vízvezeték-szereléshez használt műanyag csövekből készítettem, de más csövek is alkalmasak a „zenélésre” (2. ábra). Ezek viszonylag olcsón beszerezhetők, általában 2 m-es hosszúságban, amelyből egy nyolc hangból álló hangsor kivágható. A 20 mm-es műanyag csőből készített hangsorban a megfelelő hangokhoz tartozó csőhosszakat mutatja az 1. táblázat [2].

Néhány egyszerű dallam a gyakorláshoz

A *Boci-boci tarka* előadásához C-től C'-ig az egész hangokra van szükségünk. A dallam a következő hangokból áll:

C	E	C	E	G	G	C	E	C	E	G	G
C'	H	A	G	F	A	G	F	E	D	C	C

A *Hull a pelyhes fehér hó* transzponált dallama a következő:

C	C	G	G	A	A	G	F	F	E	E	D	D	C
C	C	G	G	A	A	G	F	F	E	E	D	D	C
G	G	F	F	E	E	D	G	G	F	F	E	E	D
C	C	G	G	A	A	G	F	F	E	E	D	D	C

Pohár-zene

Tegyünk egymás mellé egyforma üvegpoharakat és töltsük meg különböző magasságig vízzel (3. ábra)! Egyik kezünkkel fogjuk le a poharat a talpánál. Nedves ujjunkat végighúzva a pohár peremén, a pohár fala rezgésbe jön és hang keletkezik. Az ujjunk ugyanis hol megtapad, hol megcsúszik a pohár peremén, ezzel rezgésbe hozva a pohár falát. Minden testhez tartozik egy sajátfrekvencia, amelyen rezeg, ha magára hagyjuk. A poharakba töltött különböző magasságú vízoszlopok különbözőképpen módosítják a pohár sajátfrekvenciáját, így különböző magasságú hangokat hallunk. Egy elektronikus hangolóval, vagy énekkaros diákok segítségével néhány perc alatt összeállít-



3. ábra. Hangsor poharakból

ható egy hangsor a poharakból. Egy kis gyakorlással pedig egy-egy dalt is előadhatunk a segítségükkel. A kísérlet alkalmat ad egy kis tudománytörténeti emlékezésre, ugyanis hasonló elven működik az üvegharmonika névű régi hangszer.

Benjamin Franklin angliai látogatása során találkozott egy zenésszel, aki vízzel töltött különböző poharakat egymás mellé téve úgy „zenélt”, hogy végighúzta a poharak peremén a nedves ujját. Miután hazatért, 1761-ben készített egy zenélő eszközt, az üvegharmonikát (4. ábra), amely közös tengelyre felfűzött üveg-edényekből állt. A hangszer pedállal forgatta, mint a régi varrógépeket, és nedves ujjal szólaltatta meg. A hangszer elkészültekor ezt írta egyik barátjának, a torinói *Beccaria* professzornak. „Talán némi örömet tudok szerezni önnek, hiszen hazája a zene országa. 32 üveg félgömb felhasználásával új hangszeret készítettem. Úgy érzem, valamicskével gazdagítottam ezzel a legbűbajosabb tudományt, a muzsikát, amelynek mindannyian rabjai vagyunk. Hangszerem szava édes a fülnek, egyaránt zeng halkán és erősen, s ha egyszer behangoltuk, megtartja pontosságát. Az ön országának tiszteletére olasz nevet adtam találmányomnak, úgy hívják: armonica.” [3]

Az üveg-edényeket nagyság szerint fűzte egymásba és színes festékekkel jelölte a különböző hangokat. Az

4. ábra. Benjamin Franklin üvegharmonikán játszik. Az általa készített üvegharmonika.





5. ábra. Mozart utolsó kamarazeneje, a többek között üvegharmonikára is íródott KV 617-es *Adagio és Rondo* kottájának kézírata (részlet)

üvegharmonikán nagy nyilvánosság előtt először a bécsi udvarban játszott *Mária Terézia és József* trónörökös jelenlétében *Marianna Davies* művésznő, aki ezek után *Marie Antoinette* francia királynőnek is adott leckéket. A hangszer nagyon népszerűvé vált, ezrével gyártották abban az időben. Az üvegharmonika számos zeneszerzőt is megihletett, például *Mozart* is komponált egy darabot – *Adagio és Rondo* KV 617 (5. ábra) – és 1815-ben *Beethoven* egy melodráájában a narrátor elbeszélése alá komponált zenét üvegharmonikára.

A korabeli történetírók szerint az üvegharmonikán rendszeresen játszó zenészek egy része arról számolt be, hogy érzelmileg lehangolja őket a hangszer. Úgy gondolták, hogy a hangszerben keltett rezgések az ujjakon keresztül bejutnak a szervezetükbe és rosszkedvet gerjesztenek. A vizsgálatok inkább ólommérgezéssel magyarázták a zenészek lehangoltságát. A hangszer üveg félgömbjei ólmot is tartalmaztak, így elképzelhető, hogy a hangszerből jutott nagyobb mennyiségű ólom a szervezetükbe. Mivel azonban a 18. században igen elterjedt volt az ólom használata, így az ólom számos más forrásból is bejuthatott a zenészek testébe [4].

Az üvegharmonika azóta is meg-megjelenik a koncerttermekben, ebben az évben is jó néhány hazai koncerten találkozhattak a hangszer különleges hangjával az érdeklődők.

Befőttes üveg mint hangszer

A poharak mellett befőttes üvegekkel is zenélhetünk. Vegyünk 8 darab egyforma befőttes üveget és töltsük meg azokat különböző magasságig vízzel. Valamilyen pálcával, kanállal üssünk rá az üvegekre. Azt vehetjük észre, hogy minél magasabb a vízszint az üvegben, annál mélyebb hangot hallunk. A jelenség magyarázata hasonló a pohár-zenében leírtakhoz: ahogy ráütünk az üvegre, abban rezgéseket keltünk, az üveg a sajátfrekvenciájának megfelelően rezgésbe jön. Az üveg fala érintkezik az üvegbe töltött vízszinttel, így az is rezgésbe jön és módosítja az üveg

sajátfrekvenciáját. Ezért hallunk különböző magasságú hangokat különböző magasságig vízzel töltött üvegek megütésekor. A megfelelő hangsor összeállításához a megfelelő vízszint-magasságokat kell megkeresnünk, akár hallás útján vagy egy gitárhangoló segítségével.

Hagyományos 1 literes befőttes üvegeknél a következő *h* magasságokig érdemes tölteni az üvegeket vízzel. Sajnos nagyon különböző befőttesüvegeket találhatunk a boltokban – így érdemes inkább saját üvegeinket hallás útján behangolni –, ezért a természetes skála hangjaihoz rendelhető vízszint-magasságok inkább közelítő értékek:

hang	dó	ré	mi	fá	szó	lá	ti	dó'
<i>h</i> (cm)	10	8,9	8	7,5	6,7	6	5,3	5

Hangsor üvegekből

Egy másik egyszerű és olcsó hangszer a műanyag üdítős palack (vagy a sörös üveg, 6. ábra). Fél literes egyforma üdítős üvegekbe különböző magasságú vízszintet töltve szintén készíthetünk hangsort. Az üveg szája felett elfújva a levegőt, a palackban levő levegő rezgésbe jön és a vízszintnek megfelelően hangot ad. A palack megszólaltatásához kell egy kis gyakorlás, de ha valaki egyszer megérezte a kézben tartott palack rezgését, utána már nagyon könnyen előidézhetheti a megfelelő hangot.

Érdekes felhívni a diákok figyelmét arra, hogy míg a poharas kísérletben a magasabb vízszint mélyebb hangot eredményezett, addig ebben a kísérletben annak a palacknak lesz mélyebb a hangja, amelyben alacsonyabb a víz szintje. Ennek a látszólagos ellentmondásnak az a magyarázata, hogy a poharak és a befőttes üvegek esetében az üveg fala a vízszintet hozza rezgésbe, amikor átfújunk az üveg szája felett, akkor közvetlenül az üvegben található levegőoszlop jön rezgésbe. Minél nagyobb a levegőoszlop magassága – vagyis minél kevesebb víz van az üvegben –, annál mélyebb lesz a megszólaltatott hang.

6. ábra. Hangsor sörös üvegekből



A palack nagy előnye a poharakkal szemben, hogy sokkal könnyebb behangolni, törhetetlen, és akár egy egész osztály részt vehet vele egy koncerten (7. ábra). Gitárhangelővel igen gyorsan összeállítható egy hangsor, és ha az üvegeken alkoholos filctollal megjelöljük a vízszintet a későbbiekben nagyon könnyen feltölthető és beállítható. Mivel egy adott hangmagassághoz tartozó vízszint függ a palack paramétereitől, így nem adható meg egy univerzális hangmagasság-vízoszlop táblázat. Ha nem érzünk elég önbizalmat magunkban a palackok behangolásához, kérjünk segítséget zeneileg képzett diákoktól vagy az iskola énektanárától. A vízoszlopszintek meghatározása csak néhány percet vesz igénybe, így nem jelenthet megterhelést annak, akit megkértünk.



7. ábra. Koncert üdítő üvegekkel a 10. B-vel

Pille-palackos ütőhangszer

A műanyag csöveket a befőttes üvegekhez hasonlóan is használhatjuk hangszerként. Másfél literes palackokat töltünk meg különböző magasságokig vízzel és szájuknál fogva kössük fel őket sorban egy hosszú lécre. Kezdjük azzal, amelyikben a legtöbb víz van – ez lesz a legmélyebb hangú – és fejezzük be a legkevésbé vizet tartalmazóval. A hangszer megszólaltatásához üssünk rá valamivel a lécről lelógó palackok oldalára. Az így kapott hangszer a befőttes üveghez képest tompább hangot ad, de nagy előnye, hogy törhetetlen, ha pedig elreped, akkor sem balesetveszélyes. A természetes skála hangjaihoz rendelhető b vízoszlop-magasságok:

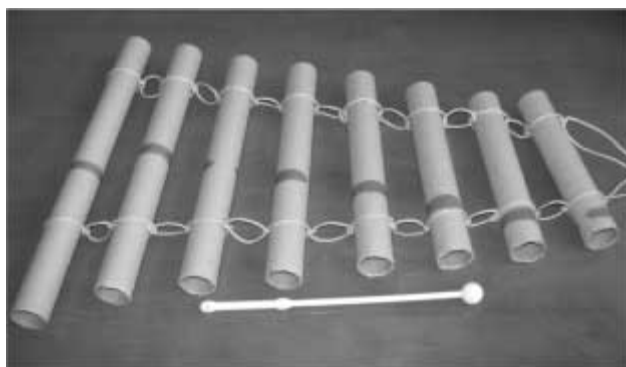
hangok	dó	ré	mi	fá	szó	lá	ti	dó'
b (cm)	30	26,7	24	22,5	20	18	16	15

Papírhenger-xilofon

Alufólia vagy folpack (esetleg papírtörölő) papírhengeréből egyszerűen készíthetünk xilofont (8. ábra). Vegyünk 8 egyforma papírhengert és vágjunk le a végeikből úgy, hogy a természetes skála hangjaihoz a következő hosszúságú csöveket kapjuk:

hangok	dó	ré	mi	fá	szó	lá	ti	dó'
b (cm)	30	26,7	24	22,5	20	18	16	15

8. ábra. Alufólia papírhengeréből készült xilofon



Tegyük a hengereket egymástól 2 cm távolságra! Egy zsinór segítségével rögzítsük egymáshoz a hengereket úgy, hogy a zsinórt áthurkoljuk a hengereken. Az így elkészült xilofonon egy műanyag bot segítségével játszhatunk [5].

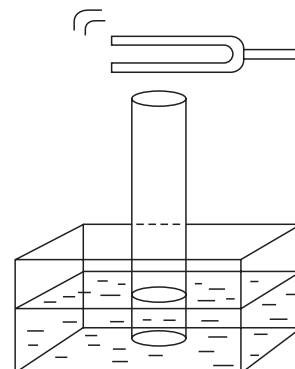
Egy kísérleti feladat üvegcsövekkel

A hang terjedési sebességének és a végkorrekciónak mérése üvegcsövek segítségével

1998-ban az OKTV kísérleti fordulójában a diákok a hang terjedési sebességét mérték üvegcső-rezonátor segítségével. Hangforrásként egy telefonkagylót használtak, ami a számítógéppel megvalósított jelgenerátorhoz volt kapcsolva. A számítógépes programban a diákok a hang frekvenciáját és amplitúdóját változtathatták. A hang terjedési sebességének meghatározása után a diákoknak össze kellett hasonlítaniuk a tényleges frekvenciához elméletileg adódó rezonanciahosszat a mért értékekkel, és olyan korrekciós eljárást kellett keresniük, amelynek figyelembevételével a mért adatokból közvetlenül megkapható a terjedési sebesség helyes értéke [6].

Ez a kísérlet nagyon egyszerűen elvégezhető egy üvegedény, különböző átmérőjű üveg- és műanyag csövek segítségével. Az üvegcsövet egyik kezünkkel tartva helyezzük az üvegedénybe. A cső felső szájához helyezünk egy rezgő hangvillát és az üvegcső mozgásával keressük meg a rezonancia helyét (9. ábra). A rezonáló levegőoszlop, vagyis a vízből kiemelkedő csőhossz mérésével a hang terjedési sebessége számolható.

9. ábra. Kísérleti elrendezés a hangsebesség méréséhez



A rezonáló levegőoszlop hossza különböző átmérőjű üvegcsövek és különböző frekvenciájú hangvillák segítségével elvégzett kísérletekben

$f(\text{Hz})$	üvegcső belső átmérője (cm)							
	1,6	2,2	2,4	2,7	3,4	3,7	4,2	4,9
	a rezonáló levegőoszlop hossza és annak szórása (cm)							
256	33,6 (0,16)	33,2 (0,13)	32,9 (0,10)	32,8 (0,08)	32,6 (0,10)	32,4 (0,10)	32,2 (0,08)	31,6 (0,06)
320	26,6 (0,08)	26,3 (0,10)	25,9 (0,08)	25,7 (0,08)	25,5 (0,06)	25,4 (0,08)	25,3 (0,16)	24,9 (0,08)
384	21,9 (0,08)	21,8 (0,10)	21,6 (0,05)	21,5 (0,08)	21,2 (0,15)	21,0 (0,13)	20,8 (0,10)	20,2 (0,06)
440	19,1 (0,06)	18,9 (0,10)	18,7 (0,10)	18,5 (0,08)	18,4 (0,13)	18,3 (0,13)	18,1 (0,08)	17,8 (0,10)
512	16,2 (0,10)	16,1 (0,06)	16,0 (0,08)	15,9 (0,05)	15,7 (0,06)	15,5 (0,08)	15,3 (0,08)	15,0 (0,08)
640	13,1 (0,05)	12,8 (0,10)	12,6 (0,06)	12,4 (0,05)	12,2 (0,10)	12,1 (0,08)	12,0 (0,10)	11,6 (0,06)
798	10,7 (0,08)	10,3 (0,06)	10,2 (0,05)	10,1 (0,05)	9,9 (0,05)	9,9 (0,05)	9,7 (0,00)	9,3 (0,10)
1024	7,7 (0,10)	7,5 (0,08)	7,4 (0,13)	7,3 (0,08)	7,0 (0,13)	6,9 (0,08)	6,7 (0,10)	6,1 (0,10)

Az üvegcső egyik végén zárt, a másik végén nyitott rezonátorként alkalmazható. Ekkor a levegőoszlop sajátrezgését a csővégekről visszavert hullámok interferenciája alakítja ki, pontosabban arra a frekvenciára rezonál a cső, amelyen ezeknek a hullámoknak a fáziskülönbsége adott helyen állandó. Ahol a cső impedanciája igen nagy (zárt csővég) a nyomáshullám 0 fázisugrással, ahol nulla (nyitott csővég) π fázisugrással verődik vissza, mégpedig 100%-ban. Így a rezonátor energiája állandó maradna, ha a belső veszteségek apránként nem emésztenék fel. Mindez azt is jelenti, hogy csőben rezonáló levegőoszlop rezgéseit kívülről nem lehetne hallani – energia a csőből nem lépne ki. Fülünket a cső nyitott végének közelében tartva azonban meggyőződhetünk arról, hogy ez nincsen így: a cső vízből kiálló részének hosszát változtatgatva, könnyen találunk olyan csőhosszat, amelynél a cső jól hallhatóan zeng (rezonál). Ez azt is jelenti, hogy a cső a nyitott végén sugároz, vagyis a nyitott végen bekövetkező fázisugrás mégsem lehet π . Ekkor azonban a rezonáló levegőoszlop hossza nem lehet pontosan $\lambda/4$ páratlan számú többszöröse, hanem kisebb annál, mert a fázisugrás kisebb mint π .

Az, hogy a nyitott végén bekövetkező fázisugrás mennyire különbözik π -től, s így a kialakuló állóhullámképnek a nyitott vég fele eső duzzadóhelye mennyivel esne a csővön kívülre, az a nyitott végén bekövetkező impedanciaugrástól, tehát a szabad tér és a cső impedanciájának viszonyától függ: minél nagyobb a cső keresztmetszete, annál kisebb az impedanciája. A kisebb impedanciaugrás kisebb fázisugrást eredményez, így nagyobb csőkeresztmetszetenél nagyobb „kilógás” várható.

Az elméleti esetben – amikor a csőhossz $(2k+1)\lambda/4$ alakú – a rezonátorcső hosszának megméréseivel a hang terjedési sebessége könnyen meghatározható:

$$c = \lambda f = \frac{4l}{2k+1} f.$$

Ha l helyett (az állóhullámkép hossza a duzzadóhelytől csomópontig) kisebb értékkel számolunk (a rezonátorcső hosszával) a sebességre a ténylegesnél ki-

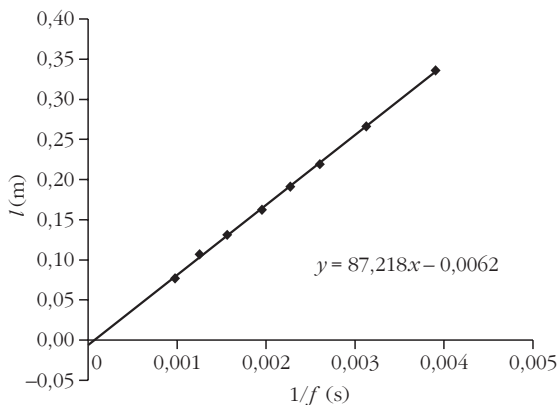
sebb értéket kapunk. A 2. táblázat a különböző átmérőjű csövekkel végzett méréseink eredményeit tartalmazza.

A 2. táblázat adataiból jól látható, hogy egy adott átmérőjű üvegcső esetén a frekvencia növelésével a rezonáló levegőoszlop hossza, így a hullámhossz csökken, mivel a frekvencia és a hullámhossz között fordított arányosság van, ha a terjedési sebesség állandó. Mivel a kísérlet közben a hőmérséklet közel állandónak tekinthető, és a levegő összetételét sem változtattuk meg, a terjedési sebességet állandónak tételezhetjük fel. Ha az adott átmérőjű csőnél a különböző frekvenciák esetén kapott levegőoszlophosszakból terjedési sebességet számolunk, a kapott sebességértékek a valóságosnál kisebbnek adódnak. Ezt az eltérést nagyobb átmérőjű csöveknél nagyobb-nak találtuk. A 3. táblázatban a különböző átmérőjű üvegcsövekkel végzett kísérleteink eredményeit foglaltuk össze. Ha a csőhosszakot a frekvenciaértékek reciprokainak függvényében ábrázoljuk, olyan lineáris függvényeket kapunk, melyek nem az origóban metszik a függőleges tengelyt, hanem attól $-b$ méterre. A legkisebb és a legnagyobb átmérőjű csövekkel végzett kísérletekhez tartozó grafikonok a 10. és 11. ábrán láthatók.

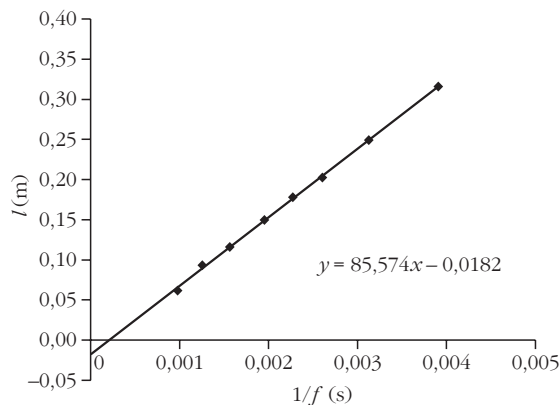
3. táblázat

Különböző d átmérőjű üvegcsövek esetén kapott egyenesek meredekségéből számolt c terjedési sebességek és b/d korrekciós tényezők

d (m)	c (m/s)	b/d
0,016	348,872	0,387
0,022	348,008	0,377
0,024	344,960	0,367
0,027	344,104	0,359
0,034	344,864	0,356
0,037	343,800	0,346
0,042	343,568	0,345
0,059	342,296	0,309



10. ábra. A $d = 1,6$ cm átmérőjű cső rezonanciagörbéje



11. ábra. A $d = 5,9$ cm belső átmérőjű cső rezonanciagörbéje

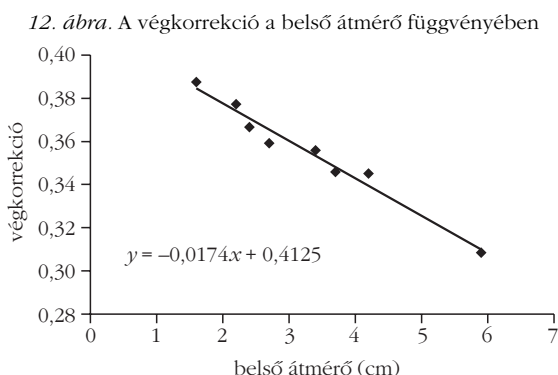
A különböző átmérőjű csövek esetében kapott egyenesek meredekségeiből számolt c terjedési sebességeket és a b/d végkorrekciókat a 3. táblázatban foglaltuk össze. Az adatokból látható, hogy a kapott értékekre illesztett egyenesek meredekségéből számított terjedési sebességek átlaga igen jól megközelíti a hang terjedési sebességének elfogadott értékét. A táblázat utolsó oszlopában a számolt végkorrekciós értékeket tüntettük fel. A kapott értékek jól megközelítik a szakirodalomban elfogadott 0,3–0,4 közötti értéket. A végkorrekció az átmérő növekedésével – kísérleti eredményeink alapján – enyhe monoton csökkenést mutat (12. ábra).

Van azonban más lehetőség is a korrekciós tényező meghatározására. Ha a rezonáló levegőoszlop hosszát egy adott frekvencián a csövek belső átmérőinek függvényében ábrázoljuk, akkor egy olyan süllyedő egyenest kapunk, amelynek meredeksége a korrekciós tényező értékével egyezik meg, és az adott frekvenciához tartozó, elméletileg megállapított effektív hosszánál metszi a tengelyt. Mivel $l_{\text{eff}} = l + x d$, ezért:

$$l = l_{\text{eff}} - x d = \frac{\lambda}{4} - x d = \frac{c}{4f} - x d.$$

A különböző frekvenciákon mért rezonancia-hosszakat a belső átmérő függvényében ábrázoltuk, a grafikonok a meredekségeit (a korrekciós tényező -1 -szeresét) és a tengelymetszetekből számolt terjedési sebességeket a 4. táblázatban gyűjtöttük össze.

Az eredmények nagyon jól megközelítik azokat az értékeket, amelyeket az adott belső átmérők esetében a rezonanciahossznak a frekvencia reciprokától való függésének vizsgálatakor kaptunk (2. táblázat).



12. ábra. A végkorrekció a belső átmérő függvényében

A kísérletet különböző átmérőjű műanyag csövekkel is elvégeztük. A mérési eredményeket, az 5. táblázat tartalmazza. (A rezonanciahosszakat a frekvencia reciprokainak függvényében ábrázoltuk.) Érdekes, hogy műanyag csövek esetében a korrekciós tényező értéke nagyobb volt, míg a terjedési sebesség értéke kisebbnek adódott. Az üveg- és műanyag csövekkel elvégzett kísérletek eredményeinek különbözősége azonban nem meglepő, hiszen ezen anyagok rugalmassági tulajdonságai eltérnek egymástól.

A rezonanciahely közvetlen közelében – a csőhosszat igen finoman növelve – feltűnő, hogy maximális intenzitást bevezető viszonylag gyors erősödést egy igen gyorsan bekövetkező elhalkulás követi,

4. táblázat

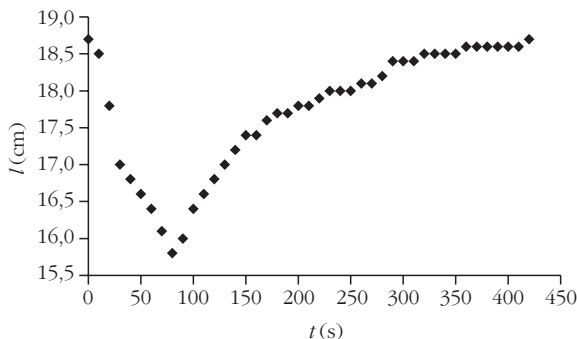
Különböző frekvenciákon végzett mérések eredményeiből készített grafikonokról meghatározott a meredekség és c terjedésssebesség-értékek

f (Hz)	a	c (m/s)
256	-0,4419	349,184
320	-0,3894	345,216
384	-0,4076	347,136
440	-0,3001	342,496
512	-0,3222	343,245
640	-0,3428	344,576
798	-0,304	350,8
1024	-0,375	339,148

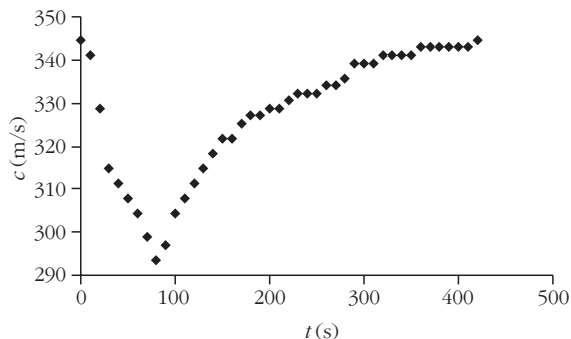
5. táblázat

Különböző d átmérőjű műanyag csövek esetén kapott c terjedési sebességek és az ebből kapott b/d korrekciós tényező értékek

d (cm)	c (m/s)	b/d
1,16	321,5	0,41
1,52	327,0	0,41
1,98	335,6	0,40
2,84	320,2	0,36
3,64	319,5	0,45
4,64	315,5	0,45
5,97	314,0	0,42



13. ábra. A rezonanciahossz változása az idő függvényében a pezsgőtablettából felszabaduló szén-dioxid hatására ($d = 2,4 \text{ cm}$, $f = 440 \text{ Hz}$)



14. ábra. A hang terjedési sebessége a gázoszlopban az idő függvényében, a pezsgőtablettából felszabaduló szén-dioxid hatására

amelyben az észlelhető intenzitás jóval a rezonanciától távoli helyzet intenzitása alá esik, majd csak ezt követően áll vissza arra az értékre, ami a rezonanciától mentes helyzetekre jellemző. Ennek magyarázata abban rejlik, hogy amikor a csőben uralkodó intenzitásviszonyokra a csővön kívüli észlelésből következtünk, lényegében nem azt vizsgáljuk, amire kíváncsiak vagyunk. A csővön kívül észlelt intenzitás nemcsak attól függ, hogy magában a csőben milyen intenzitásviszonyok uralkodnak, hanem, hogy a belépő és kilépő hullám milyen fázisban találkozik. A rezonanciahelyet átlépve a rezonátor fázisa π -t ugrik, így ha a kilépő hullám korábban erősítést adott a belépővel, akkor a váltás után nem meglepő a gyengítés. Mindez azt is jelenti, hogy a kívül észlelt intenzitásmaximum nem szükségképpen esik egybe a belül tapasztalt amplitúdómaximummal, ez a maximum és a minimum hely közé esik. Ezek alapján rezonanciahelyezten azt értjük, amikor az amplitúdó a csővön belül a legnagyobb, vagyis amikor a cső szájánál kifelé haladó hullám visszaverődés után pontosan azonos fázisban találkozik a cső szájánál éppen belépő külső hullámmal. Az előbbieken alapján ez a helyzet a csővön kívül intenzitásészlelés alapján pontosan meg sem kereshető, de az egymáshoz közel eső minimum- és maximumhelyek együttes figyelembevételével kisebb hibával határozható meg, mint csupán a maximumok megfigyelésével.

A hang terjedési sebességének és a hőmérsékletnek, illetve a közeg anyagi minőségének a kapcsolata

A hang terjedési sebességét, így a rezonáló levegőoszlop hosszát befolyásolja a levegő hőmérséklete. Kísérletileg ezt a jelenséget is vizsgálhatjuk az előbbi egyszerű kísérleti elrendezéssel. Tegyük egy vízen úszó gyertyát a víz felszínére, és az üvegcsövet helyezzük úgy a vízbe, hogy a gyertya a csővön belül legyen. Ha egy hangvillával megkeressük a rezonancia helyét, akkor – leolvasva a rezonáló cső hosszát – megkaphatjuk a hang terjedési sebességét a megemelt hőmérsékleten. A kísérletet 440 Hz-es hangvillával és 4 cm-es belső átmérőjű csővel elvégezve a rezonáló levegőoszlop hosszára 18,9 cm helyett 19,6 cm-t kaptunk, amiből terjedési sebességre korrekció nélkül 345 m/s-ot, korrekcióval 350 m/s-ot kaptunk.

A kísérlet arra is jól használható, hogy egyszerű eszközökkel demonstráljuk: a hang terjedési sebessége különböző gázokban különböző. Ha egy pezsgőtablettát dobunk a vízzel teli tárolóedénybe, és biztosítjuk, hogy a pezsgőtabletta mindvégig a vízben úszva a csőben maradjon, akkor a felette levő levegőoszlopban szén-dioxid molekulák is lesznek. Ezáltal megváltozik a hang terjedési sebessége. Ezt a kísérletet 3 cm-es belső átmérőjű üvegcsővel és 440 Hz frekvenciájú hangvillával végeztük el. Egy metronóm hangjára figyelve a pezsgőtabletta vízbe dobásától kezdődően 10 másodpercenként megmértük a rezonáló levegőoszlop hosszát.

Ha a rezonáló gázoszlop hosszát, illetve az ebből számolt terjedési sebességet az eltelt idő függvényében ábrázoljuk (13. és 14. ábra), látható, hogy a pezsgőtabletta oldódásával a rezonanciahossz megváltozik.

A 13. ábrán jól látszik, hogy a pezsgőtabletta oldódása során egyre csökkent a rezonáló gázoszlop hossza, amely a bedobástól számítva a 80. másodperc körül volt a legkisebb. Ekkor lehetett a szén-dioxid mennyisége a legnagyobb a csőben található levegőoszlopban. Ezután a gázoszlop hossza ismét nőtt, míg a 7. perc végére az eredeti rezonanciahosszat mértük. A kapott terjedési sebességek legkisebb értéke 294 m/s, ami a szén-dioxid megnövekedett mennyiségének hatásával magyarázható (14. ábra). Ezzel az egyszerű kísérlettel tehát jól demonstrálható, hogy a hang terjedési sebessége függ annak a közegnek az összetételétől, amelyben terjed.

15. ábra. A Tavaszi szél vizet áraszt a Tavaszi Fesztiválon



Összefoglalás

2008 tavaszán osztályommal felléptünk a gimnáziumunkban a Tavaszi Kulturális Fesztiválon, ahol üvegekkel, poharakkal és csövekkel adtuk elő a *Tavaszi szél vizet áraszt* című népdalt különböző „hangszereken” (15. ábra). A nagy „sikerre” való tekintettel házi hangszereinkkel (és egy másik osztállyal) az Arany János Tehetséggondozó Program szegedi konferenciáját nyitottuk meg.

Kísérletezni mindig élmény, tanárnak, diáknak egyaránt. A hétköznapi eszközök nagy előnye, hogy a kísérleteket otthon is megismételhetjük, továbbfejleszthetjük.

Az előbbi kísérletek további nagy előnye, hogy mi-közben a fizikával foglalkozunk, csapatot is építünk és jól is szórakozunk. Ezért mindenkinek jó szívvel ajánlom, hogy próbálják ki ezeket a hangszereket a „semmiből”.

Irodalom

1. Öveges J.: *Az élő fizika*. Aranyhal Könyvkiadó, Budapest, 1999.
2. <http://www.stevespanglerscience.com/product/1185>
3. http://www.pbs.org/benfranklin/l3_inquiring_glass.html
4. http://www.sk-szeged.hu/statikus_html/kiallitas/franklin/talalmany.html
5. Tit T.: *Tom Tit második száz kísérlete és produkciója*. Athenaeum, Budapest, 1904.
6. Gecső E. (szerk.): *Országos Középiskolai Tanulmányi Verseny fizikából, 1994–1998*. OKSZ, Budapest, 1999, 43–49.

A XXXII. ORSZÁGOS ÁLTALÁNOS ISKOLAI FIZIKATANÁRI ANKÉT ÉS ESZKÖZKIÁLLÍTÁS

A 800 éves Gyula Magyarország délkeleti régiójában fekszik, jelképe a 600 éves téglavár a Várszínházzal. A Várfürdő vize értékes kincse a városnak. A Petőfi tér hajdanán a város főtere volt, itt van a város első artézi kútja. A Városház utcában található a smaragd zöld üveggömb Világóra. A kaszkádmedence, a vízkapu, az anamorfozis-kép a nap valamennyi szakaszában varázslatos látványossága a Kossuth térnek. A város megújult parkjai, terei, főutcai mediterrán hangulatot varázsolnak az alföldi városba.

Ebbe a mediterrán hangulatba csöppentek bele azok a kollégák, akik résztvevői voltak 2008. június 23. és 26. között a XXXII. Országos Általános Iskolai Fizikatanári Ankét és Eszközkiállításnak, amelynek Gyula városa, közelebbről az Erkel Ferenc Gimnázium és Kollégium adott otthont.

Vasárnap délután a regisztráció és elhelyezkedés után *Márki-Zay Lajos* tanár úr vezetésével ismerkedtünk a várossal. Az Erkel ház megtekintése után ellátogattunk Gyulaváriba, *Bay Zoltán* szülőhelyére. A szülőház helyén lévő családi ház oldalán elhelyezett emléktábla előtt fejet hajtottunk. A Holdról radarvisszhangot detektáló *Bay Zoltán* jelentős alakja volt a huszadik század kísérleti fizikájának.

A gyulai Várban a Reneszánsz Vármúzeum megtekintését sem hagytuk ki. A közös vacsora után az esti Gyula fényeit csodálhattuk.

Humor a kortárs irodalomban – a *Bárka* irodalmi folyóirat bemutatkozó estjét sokan választották vasárnap esti szórakozásként. *Elek Tibor* főszerkesztő, *Kiss László* gimnáziumi tanár, *Kiss Ottó* író, *Asztalos János* költő napjaink költészetéből olvastak fel szemelvényeket. A vasárnap estét lézer show zárta, amelyet *Pál Zoltán* fizikatanár mutatott be. A 3–4 perces zenés előadások, valamint a piros, zöld, kék és sárga színek varázsa élményt jelentett mindenkinek.

Június 23-án kezdődött az ankét hivatalos része. Az Erkel Ferenc Zeneiskola dísztermében *Pataki Attila* vezetésével zenei előadás köszöntötte a résztvevőket.

Az elnökségben helyet foglaló vendégek: *Arató Gergely*, az Oktatási és Kulturális Minisztérium államtitkára, *Erdmann Gyula* alpolgármester, *Kádár György*, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat főtitkára, *Szabó Gábor* akadémikus, egyetemi tanár; *Kerecsényi Miklós*, az Erkel Ferenc Gimnázium igazgatója és *Kiss Gyula*, az ELFT Általános Iskolai Oktatási Szakcsoportjának elnöke.

Az ankétot *Kiss Gyula* nyitotta meg, üdvözölve a megjelent kollégákat, vendégeket, és a házigazdákat. A hagyománynak megfelelően a Mikola Sándor-díj és az Öveges Érem átadása következett.

A Mikola Sándor-díjat az idén az ELFT *Szelecz László*nak ítélte oda, kísérletező tevékenysége elismeréséül. *Szelecz László* 1988 óta dolgozik Győr-Ménfőcsanak-Sopron megyében a péri általános iskolában. 1997 óta szervezője az Ifjú Fizikusok Találkozójának. Lelkiismeretes munkájának is köszönhetően tanítványai a különböző fizikaversenyeken igen eredményesen szerepelnek.

Az Öveges József Országos Fizikaverseny győztesét és felkészítő tanárát megillető Öveges Éremt ebben az évben *Bolgár Dániel* pécsi tanulónak és tanárának, *Sebestyén Klárának* adhatta át *Arató Gergely* Oktatási államtitkár.

Az érdemi munka *Arató Gergely* államtitkár *Új tudás-műveltség mindenkinek* című előadásával kezdődött. Beszélt az uniós fejlődési forrásokról, a hátrányos helyzetű gyermekek óvodához jutásának szükségességéről, az integráció kérdésének fontosságáról. Kiemelten szólt az oktatás tartalmi fejlesztéséről, a kooperatív oktatásról és a nyelvoktatásról. Hangsúlyozta a természettudományos oktatás fontosságát, annak megerősítését, amelyet nem kizárólag egy in-