

Orgonasípok akusztikai paramétereinek meghatározása numerikus technikákkal

Rucz Péter

Konzulens: dr. Augusztinovicz Fülöp, dr. Fiala Péter

Budapesti Muszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Híradástechnika Tanszék

`ruste@sch.bme.hu`

Végzős konferencia 2009.

Kivonat

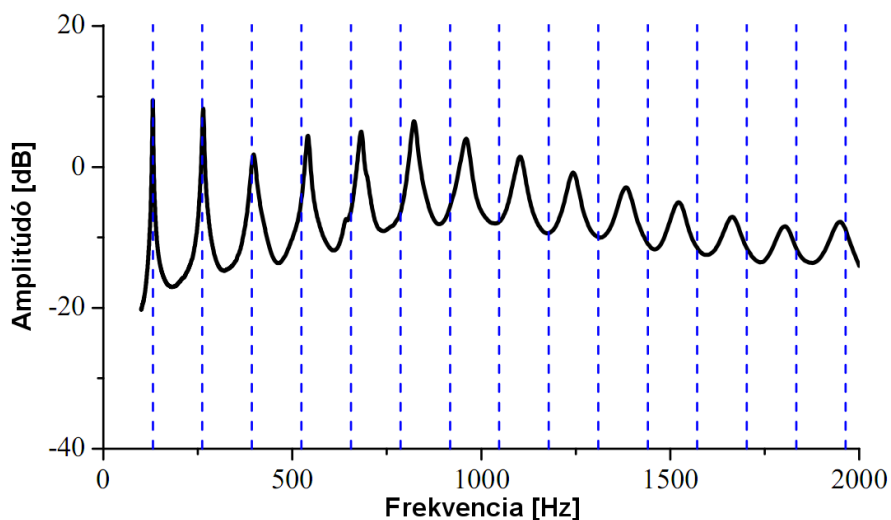
Az orgonasípok geometriai skálázása illetve hangolása máig a XIX. században lefektetett ökölszabályok szerint történik. A numerikus technikák alkalmazásának célja a sípok modellezésére, hogy a szimulációk eredményeire hagyatkozva felgyorsíthatóak legyenek ezek az eljárások. Munkámban megmutatom, hogy hogyan modellezhető ez az akusztikai probléma különféle numerikus eszközökkel. Saját fejlesztésű és kereskedelmi szoftverekkel implementálva bemutatom az egyes módszerek tulajdonságait, végül egymással és mérési adatokkal vetem össze a szimulációk eredményeit.

1. A probléma megfogalmazása

A hangkeltési folyamat az orgonasípok esetében komplex fizikai mechanizmus. A sípot áramló levegő szólaltatja meg, ami a síp lábrészébe érkezve a síp szájánál egy oszcilláló légnyelvet alakít ki, amely gerjeszti a síptestben rezgő levegőoszlopot. Így áramlástan és akusztikai csatolt problémával szembesülünk, melynek a leírásához szintén csatolt, nemlineáris modellre lenne szükség.

A hangzásról ennek ellenére fontos információkat nyerhetünk, ha az orgonasípot pusztán akusztikai rezonátornak tekintjük. Ezzel az egyszerűsítéssel a tranziens jelenségek nem vehetők figyelembe, állandósult spektrumok vizsgálatára szorítkozunk. Így a számítás végezhető a frekvenciatartományban. A következő problémára keressük a megoldást: a síp szabad hangtérben helyezkedik el, és a közelében elhelyezett forrás gerjeszti. Feladatunk a kialakuló hangtér számítása a rezonátor belsejében, illetve annak környezetében. Ezzel meghatározhatjuk a síp átviteli függvényét. Tipikus síp átviteli függvénye látható az 1. ábrán. Az átviteli függvényből megállapítható:

- A síp alaphfrekvenciája, ami meghatározza a síp zenei alaphangját.
- Az egyes felharmonikusok frekvenciái, amelyek jellemzően nem az alaphfrekvencia egész számú többszörösei, hanem valamennyivel eltolt értékek. Ezt a jelenséget hívjuk nyúlásnak.
- A harmonikusokhoz tartozó jósági tényezők értékei. Jellemzően a nagyobb frekvenciájú harmonikusokhoz egyre kisebb jósági tényező tartozik, a rezonanciacsúcsok egyre kevésbé élesek.
- A síp vágási frekvenciája, amely felett a spektrum szabálytalanná válik a megjelenő keresztirányú módusok miatt.

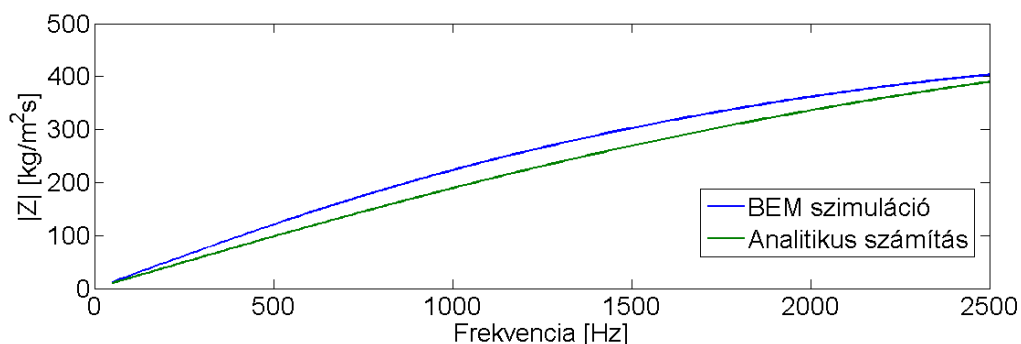


1. ábra. Tipikus orgonasíp átviteli függvény

2. Numerikus technikák

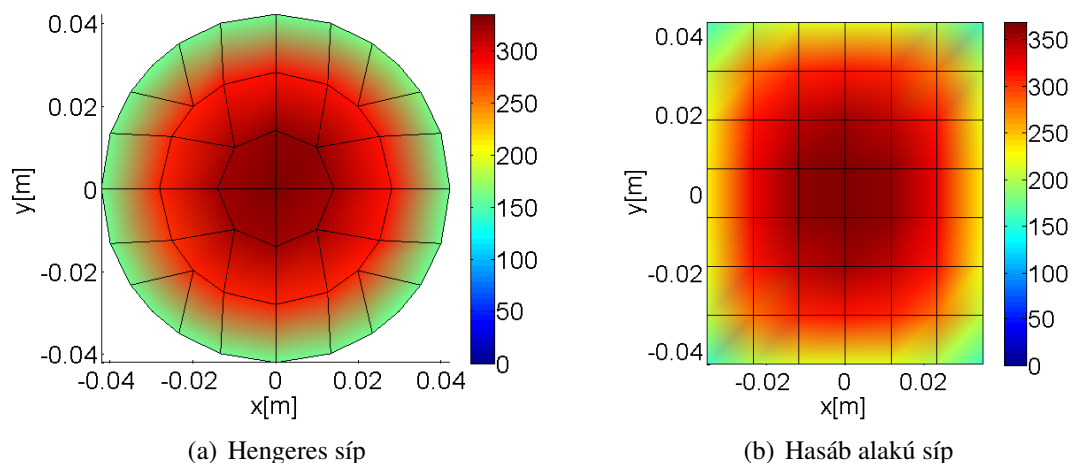
Az orgonahang fent ismertett jellemzőire az ad magyarázatot, hogy a sípban rezgő légoszlop és a külső tér között a síp nyitott részeinél csatolás jön létre. Ez azt jelenti, hogy a síp nyitott végénél és a szájánál frekvenciafüggő specifikus impedancia zárja le a rezonátort.

A rezgő levegőoszlop sajátfrekvenciáit analitikus módon is meghatározhatjuk. Az analitikus számításokkal azonban - mai tudásunk szerint - nem vehetők figyelembe megfelelő pontossággal a sípot lezáró impedanciák. Léteznek ugyan analitikus formulák közelítő számításokra (lásd pl. [Beranek 1986]), azonban ezekkel nem írható le, hogy a lezáró impedanciák nem csak frekvenciafüggők, hanem a síp keresztmetszete mentén is változó értékűek. Az analitikus és szimulációval számított impedanciaértékek a 2., a keresztmetszet menti impedanciaeloszlás pedig a 3. ábrán láthatóak.



2. ábra. Szimulált és analitikusan számított impedanciaértékek összehasonlítása

Lehetséges a numerikus (FEM) modellt analitikus képletekből számított peremfeltételekkel kiegészíteni, ezek a számítások viszont nem vezettek kielégítő eredményre (lásd [Szoliva 2005]). A továbbiakban a probléma numerikus megoldásait tárgyalom.



3. ábra. A lezáró impedanciák eloszlása 1 kHz-en, BEM szimulációval

Csatolatlan indirekt peremelem módszer (Indirekt BEM)

Ezzel a módszerrel meghatározható egy lesugárzási probléma külső és belső tere is (lásd [Coyette and Van de Peer 1997]). A külső és belső tér közötti kapcsolatot, és ezzel a kialakuló hangtér folytonosságát a síp szabad éleire felírt zérus nyomásugrás peremfeltétel határozza meg. A síp geometriai hálóját (mesh-e) ekkor felületi geometriaként adott, a térjellemzők összefüggéseit leíró mátrixok pedig frekvenciafüggő sűrű mátrixok, vagyis minden tesztfrekvencián újra kell őket számolnunk. A csatolatlan indirekt peremelem módszerrel történő számításokat az LMS Sysnoise szoftverrel végeztem el.

Csatolt végelem / peremelem módszer (Csatolt FEM / BEM)

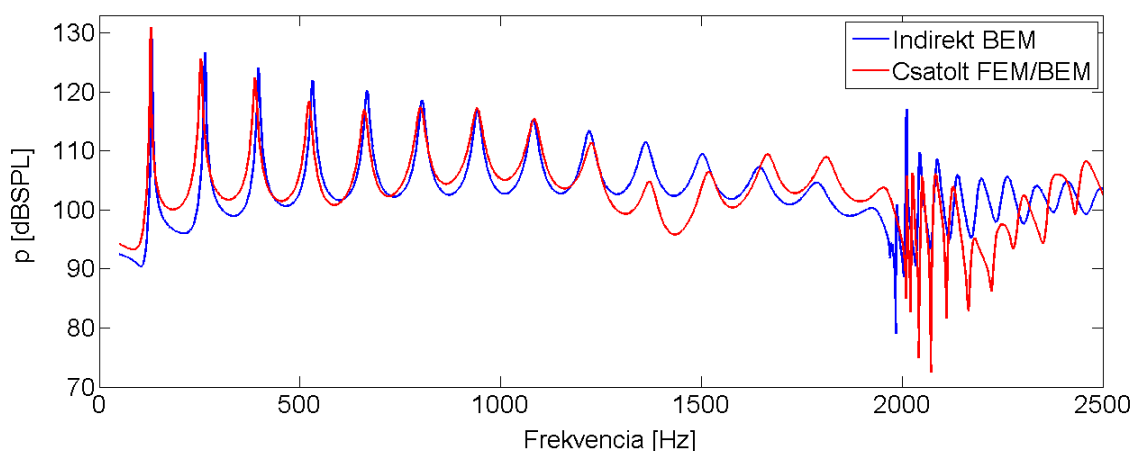
Az eljárás lényege, hogy a sípban rezgő levegőoszlopot végelem módszerrel modellezzük, a külső tér hatását pedig úgy vesszük figyelembe, hogy direkt peremelem módszerrel meghatározzuk a lesugárzott tér jellemzői (nyomás és részecskesebesség) közötti összefüggéseket. A csatolás úgy jön létre, hogy a végelem modellben impedancia-peremfeltételként alkalmazzuk a peremelem módszer eredményeit. A síp geometriája ekkor térfogati modellel adott, ami nagyobb leíró mátrixokat eredményez, mint az indirekt módszer esetében. Ezek a mátrixok azonban frekvenciafüggetlen ritka mátrixok. A csatolást leíró mátrixok pedig frekvenciafüggő sűrű mátrixok, viszont interpolációval számíthatóak, mivel a frekvencia függvényében lassan változnak. A számításokat saját fejlesztésű Matlab nyelven írt programmal, valamint az AcouFEM toolbox felhasználásával futtattam.

3. Eredmények

A 3. táblázatban összefoglalva láthatóak egy C alaphangú fa orgonasípról készült szimuláció eredményei, összehasonlítva mért értékekkel. A síp pontos méreteit, valamint a mérési eredményeket [Fontestad 2008]-ból vettem. Látható, hogy az egyes harmonikusok frekvenciáira az indirekt BEM modell esetében 2%, a csatolt modell esetében pedig 3% körüli a legnagyobb eltérés. A 4. ábrán grafikonformában láthatóak a két szimulációs módszerrel számított spektrumok.

C-fasíp	Mérés		Indirekt BEM		Csatolt FEM/BEM	
Harmonikus	Frek. [Hz]	Nyúlás	Frek. [Hz]	Nyúlás	Frek. [Hz]	Nyúlás
1. (Alaphang)	129,87	1,000	131	1,000	128	1,000
2. (Oktáv)	261,76	2,016	263	2,008	253	1,977
3.	396,45	3,053	397	3,031	388	3,031
4.	536,98	4,135	531	4,053	522	4,078
5.	677,62	5,218	667	5,092	660	5,156
Vágás [Hz]	1987		1987		2008	

1. táblázat. Mérési és szimulációs eredmények összehasonlítása C-fasípra



4. ábra. A síp szájánál kialakuló hangnyomás spektruma

4. Összefoglalás és kitekintés

Munkámban megmutattam, hogy az orgonasípok modellezésére alkalmasak a numerikus akusztikai eljárások. Egyszerű geometriai modell esetén is jól közelíthetőek a hangzás egyes paraméterei. További munkám célja a numerikus modell kiegészítése fizikai modellel, amely lehetővé teszi például a transziens jelenségek szimulációját; valamint ennek keretében újabb numerikus technikák (pl. PML – Perfectly Matched Layer) elsajátítása és implementálása.

Irodalomjegyzék

- Beranek, L. L. (1986). *Acoustics*. Acoustical Society of America.
- Coyette, J. P. and Van de Peer, J. (1997). Acoustic boundary elements. In Sas, P., editor, *Advanced Techniques in Applied and Numerical Acoustics*, chapter VII. Katholieke Universiteit Leuven.
- Fontestad, E. E. (2008). Innovative method for the development of optimal scaling of the depth and width of wooden organ pipes. Master's thesis, Universidad Politécnica de Valencia.
- Szoliva, G. (2005). Nyitott orgona ajaksípok hangolási módszereinek hatása a hangkeltésre. Master's thesis, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.