

Brinkman Penalization Method를 통한 복잡한 3D 형상 주위의 음향 전파 연구

이 소 현,¹ 이 진 범,² 김 종 옥,² 문 영 준^{*1}

¹고려대학교 기계공학과,

²LG전자 모니터 연구소

COMPUTATION OF SOUND SCATTERING IN 3D COMPLEX GEOMETRY BY BRINKMAN PENALIZATION METHOD

S.H. Lee,¹ J.B. Lee,² J.U. Kim² and Y.J. Moon^{*1}

¹Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.

²LG Electronics

Sound scattering in 3D complex geometry is difficult to model with body-fitted grid. Thus Brinkman Penalization method is used to compute sound scattering in 3D complex geometry. Sound propagation of monitor/TV is studied. The sound field for monitor/TV is simulated by applying Brinkman Penalization method to Linearized Euler Equation. Solid Structure and ambient air are represented as penalty terms in Linearized Euler Equation.

Key Words : Brinkman Penalization method, 선형오일러 방정식(Linearized Euler Equation), 모니터 TV(Monitor TV), 복잡한 3차원 형상(Complex three dimensional geometry),

1. 서 론

복잡한 형상의 물체에 대한 음향 산란의 수치해석적인 재현은 공력음향분야의 중요한 문제이다. 터보기계나 항공기의 날개 끝단에서의 소음 문제[1,2] 등이 주로 그러한 문제의 범주에 들어간다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 쓰이는 기법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 형상에 맞춰서 격자를 구성하는 경계고정기법(body-fitted method)과 어느 정도 형상의 경계에 구속되지 않고 격자를 구성할 수 있는 가상경계기법(immersed boundary method)이 있다.

가상경계기법은 격자를 구성하는 작업이 경계고정기법에 비해 훨씬 간단하기 때문에 매우 복잡한 형상에 대한 계산을 수행하기에 유리하다. 가상경계기법에 대한 연구로는 Peskin

[3]의 immersed boundary method 에 대한 연구가 있으며 Seo, J.H.[4]은 저마하수 유동에서의 복잡한 형상에 대한 음향산란 연구에 immersed boundary method를 적용하였다.

현재 시도되고 있는 다양한 가상경계기법의 기원이라고 할 수 있는 Brinkman Penalization 기법[5]은 다공성 물질(porous media)을 통과하는 유체의 유동을 파악하기 위해 고안된 기법이다. Brinkman Penalization 기법은 지배방정식 내에 공극률(porosity)에 의한 항을 적용함으로써 고체영역도 유체영역과 마찬가지로 해석할 수 있게 해준다. 유속에 비례하고 물체의 투과율(permeability)에 반비례하는 항을 추가하여 유체영역의 지배방정식을 푸는 과정에서 고체 물질에 대한 모사를 가능하게 한 것이다.

하지만 Brinkman Penalization 기법은 고체 경계에서 정확성을 보장받기 위해서는 격자가 많이 필요하다는 점과 고체와 유체의 경계에서 활조건(slip condition)을 주기가 어렵다는 단점이 있다.

현재 압축성 유동 해석[6] 및 공력소음 해석에서의 Brinkman penalization 기법의 적용[7,8]은 비교적 많이 시도되었으나, 평균유량이 없이 인위적인 음원(speaker sound)만 존재

Received: December 20, 2012, Revised: October 26, 2012,

Accepted: October 29, 2012.

* Corresponding author, E-mail: yjmoon@korea.ac.kr

DOI http://dx.doi.org/10.6112/ksce.2012.17.4.103

© KSCFE 2012

하는 상태의 음향장을 해석하는 시도는 2차원에 국한된 상황 [9]이다.

본 연구에서는 Brinkman Penalization 기법을 선형오일러 방정식(Linearized Euler Equation)에 적용하여 유동장 해석을 거치지 않고 바로 음향장을 해석하고자 한다. 평균유량(mean flow)이 없는 상황에서 음원(source)을 적용하여 복잡한 3차원 형상 주위의 음향의 전파(acoustic propagation)를 모사하고 기법의 타당성을 검증하는 것이 본 연구의 목표이다. 따라서 실험 데이터와의 비교 검증 후 이 기법을 적용하여 모니터 TV 주위의 음향장을 해석해보므로써 우리의 생활과 밀접한 문제의 해결을 도모한다.

최근 모니터 TV는 미학적인 측면을 고려하여 기존의 전면 지향적인 음향 전달 구조에서 하면으로 음향을 전달하는 구조로 바뀌어 가고 있다. 이 구조는 전면 지향에 비해 음향의 확산을 방해해 음질을 저해하는 문제가 발생되고 있다. 이 문제를 해결하기 위해서는 음향장에 대한 정확한 해석이 필요하다. 모니터 TV가 사용되는 환경은 외부의 공기 유동이 미미하고, 유동소음이 아닌 인위적인 음원(스피커)을 통해 음향을 발생시키기 때문에 Brinkman Penalization 기법을 적용한 선형 오일러 방정식을 통해 해석하기에 적합하다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

균일한 평균 속도를 가지는 유동장 내에서의 Linearized Euler Equation 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial p'}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho' U_j + \rho_0 u'_j) \\ \frac{\partial u'_j}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x_j}(u'_j U_j) - \frac{\partial p'}{\partial x_j} - (u'_j + \frac{\rho'}{\rho_0} U_j) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \\ \frac{\partial p'}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x_j}(U_j p' + \gamma P u'_j) - (\gamma - 1)(p' \frac{\partial U_j}{\partial x_j} - u'_j \frac{\partial P}{\partial x_j}) \end{aligned} \quad (1)$$

ρ_0, U_i, V, P 는 층류 혹은 난류 유동에서의 유동장을 나타내고, ρ', u'_i 와 p' 는 각각 유동장의 주변 밀도와 음속 c_0 , 그리고 기준 압력 $\rho_0 c_0^2$ 로 무차원화된 섭동 변수들이다. 경계고정기법을 사용하면 식 (1)에 의해서 음향장을 직접 풀 수 있으며, 활조건은 고체와 유체의 경계에서 명시적(Explicit) 으 로 주어지게 된다.

2차원에서 Brinkman Penalization method를 적용하여 운동량 방정식에서는 가중 항을 더해서 고체와 유체의 경계에서 활 조건을 주고, 연속 방정식과 에너지 보존 식을 투과율로 조정 한 결과는 시도되었다.[4] 현재의 Brinkman Penalization method

에서는 가중항(penalty term)을 연속방정식과 에너지 보존 식에 적용함으로써 유체 내에 있는 투과 불가능한 고체를 표현 하게 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho'}{\partial t} &= -\frac{1}{\epsilon} \left[\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho' U_j + \rho_0 u'_j) \right] \\ \frac{\partial u'_j}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x_j}(u'_j U_j) - \frac{\partial p'}{\partial x_j} - (u'_j + \frac{\rho'}{\rho_0} U_j) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \\ \frac{\partial p'}{\partial t} &= -\frac{1}{\epsilon} \left[\frac{\partial}{\partial x_j}(U_j p' + \gamma P u'_j) - (\gamma - 1)(p' \frac{\partial U_j}{\partial x_j} - u'_j \frac{\partial P}{\partial x_j}) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

ϵ 는 공극률(porosity)을 나타내며, 고체와 유체에서 각각 다 른 공극률과 투과율이 주어짐으로써 유동장 내에서의 음향장 해석이 가능해진다. Brinkman penalization을 적용해서 유동장 혹은 음향장을 해석하고자 하는 경우 고체영역은 공극률 (porosity)과 투과율이 0에 가까운 숫자로 주어지게 되고, 유체 영역은 공극률은 1이 주어지고, 투과율은 무한대에 가까운 매 우 큰 숫자로 주어진다.

본 연구에서는 모니터 TV를 사용하는 환경은 실내이고 유 동에 의한 영향이 미미하기 때문에 평균속도가 없다고 가정 하고 수치해석을 수행하였다. 그 결과 본 연구에서 이용된 지 배방정식은 최종적으로 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho'}{\partial t} &= -\frac{\rho_0}{\epsilon} \left(\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial u'}{\partial t} &= -\frac{\partial p'}{\partial x} \\ \frac{\partial v'}{\partial t} &= -\frac{\partial p'}{\partial y} \\ \frac{\partial w'}{\partial t} &= -\frac{\partial p'}{\partial z} \\ \frac{\partial p'}{\partial t} &= -\frac{\gamma P}{\epsilon} \left(\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 음원의 적용

음원항 (source term)은 지배방정식에 적용하지 않고 음원 으 로 작용하는 부분(스피커)에서 직접 ρ', u', v', w', p' 항 값 을 매 시간마다 직접 지정했다. 음원으로 작용하는 부분은 스피커의 반지름과 같은 반지름(0.5cm)을 가지는 반구모양의 영역으로 지정하였다. 이 영역에서 ρ' 와 p' 는 계산을 수행하 는 주파수의 사인 곡선으로 매 시간 값을 지정했다. 실제 스피 커에서는 재생되는 음원은 서로 약간의 위상차가 있을 가 능성이 높지만 본 연구에서는 이상적으로 음원이 재생되는 경우를 가정하여 ρ' 와 p' 값은 균일하게 지정하였다(Fig. 1).

모니터 TV에서 실제로 사용되는 스피커는 스피커 뒷면은 판으로 막혀 있어 재생되는 음향의 대부분이 스피커 전면으

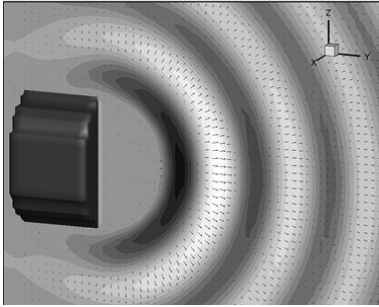


Fig. 1 Sound field near speaker

로 전파되는 구조이다. 따라서 이러한 스피커의 음향 지향을 수치해석상으로 최대한 모사하기 위해 스피커의 전면 방향으로의 섭동 속도 u' 는 ρ' 와 p' 의 값에 스피커 중심과의 거리 차를 곱한 값을 지정하고 그 외의 방향의 섭동 속도는 0을 지정하였다. 그 결과 주로 스피커의 전면으로 음향의 전파가 일어나게 된다. 또한 스피커의 중심에서 멀어질수록 섭동 속도가 커지므로 스피커 중심근처에서 발생한 음파가 스피커 중심에서 멀리 위치한 곳에서 발생한 음파보다 빨리 전파되어 이를 간섭하는 현상을 방지할 수 있다.

스피커 음원의 모사를 위해 지정한 값은 다음의 식과 같다.

$$[\rho', u', v', w, p'] = [\sin(2\pi ft), 0, d \sin(2\pi ft), 0, \sin(2\pi ft)] \quad (4)$$

여기서 d 는 스피커의 중심으로부터의 거리이며, f 는 주파수, t 는 시간을 나타낸다. 식에 나타난 변수들은 모두 무차원화된 값이다. d 는 모니터와 소비자와의 거리를 고려하여 정한 기준 길이(10 cm)로 무차원화 하였으며, f 는 음속 c_0 를 기준 길이로 나눈 기준 주파수로 무차원화 된 값이며, t 는 기준 주파수의 역수를 기준 시간으로 하여 무차원화 한 값이다.

2.3 공간 이산화 및 시간 전진 기법

소음장을 나타내는 음향변수들은 대개 매우 작은 값이며 소음장을 모사하는 데는 이 음향변수들의 감쇠 및 산란의 관계가 매우 중요하므로 수치해석기법의 신중한 선택은 소음장의 성공적인 예측에 매우 중요하다. 일반적으로 현재까지 전산유체역학에 널리 사용되어 오던 수치해석 기법들은 이러한 음향변수들의 감쇠 및 산란 관계를 적절히 만족시키지 못하는 경우가 많았기 때문에 전산공력음향학은 새로운 고차, 고해상도의 수치해석 기법의 개발을 촉진시켜 왔다. 오늘날에는 여러 가지 고차, 고해상도의 수치해석 기법이 알려져 있으며, 비단 직접수치모사 방법뿐 아니라 전산공력음향학문제를 해석할 때에는 고차의 수치해석 기법을 적용하는 것이 선호되

고 있다.

전산공력음향학에서 가장 널리 사용되고 있는 고차의 수치해석 기법은 Tam[10]이 제안한 DRP(Dispersion Relation Preserving) scheme 이다. 이 기법은 7점의 스텐실(numerical stencil)을 사용하는 외재적 유한차분법으로 주파수 영역에서 최적화된 계수를 사용하기 때문에 그 정확도가 매우 뛰어나다. DRP Scheme 은 직접수치모사 방법, 선형화된 오일러 방정식의 해법(Linearized Euler Equation)등 여러 전산공력음향학 문제에 적용되고 있으며, 많은 성공 사례를 보이고 있다. 그러나 이 기법은 7점의 스텐실을 사용하기 때문에 경계에서의 처리가 까다롭고, 수치해석의 결과가 쉽게 불안정해 지는 등의 어려움이 있다.

본 연구에서는 고차, 고해상도의 수치해석 기법으로 Lele [11]가 제안한 컴팩트 유한 차분법(Compact finite difference scheme)을 공간 이산화 기법으로 사용하였다. 본 연구에서 사용한 컴팩트 유한 차분법은 6차의 정확도를 가지는 삼중 대각 행렬 형태의 컴팩트 중심 유한 차분법(sixth-order tri-diagonal form central compact scheme)이다. 이 기법은 유한 차분값을 공간에 대해 내재적으로 계산하기 때문에 6차의 정확도를 가지면서도 단지 5점의 스텐실만을 사용한다. 또한 경계 부분에서는 차수를 감소시켜 스텐실을 줄이는 방법을 사용하여 경계처리의 어려움을 해소할 수 있다. 경계에서 차수를 줄더라도 내재적 방법을 사용하기 때문에 실제 정확도는 크게 감소하지 않는다. 이 기법은 비교적 안정적이면서도 적용이 용이하여 최근 들어 직접수치모사 방법을 중심으로 많은 문제들이 사용되고 있다.

시간 전진 기법은 4차 룽게-쿠타기법(4th stage Runge-Kutta method)을 이용했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석 방법 검증

수치해석 방법을 검증하기 위하여 단순한 형상에 대한 음향장 계산을 수행하였다. 경계조건은 ETA(Energy Transfer Annihilation) 경계조건을 비반사 경계조건으로 적용하였다[12]. 기법은 일정한 비율로 스트레칭 된 격자를 버퍼 영역 내에 분포시켜 수치적 감쇠에 의한 음향파의 소멸을 유도하며 공간 필터링을 적용하여 격자의 스트레칭에 의한 음향장 내의 산란(dispersion) 에러를 배제한다. 버퍼 영역 내에서의 격자 분포는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta x_2 = C_H \Delta x_1 \quad (5)$$

여기서, C_H 는 격자 스트레칭 비율이고, Δx_2 는 새롭게 생성

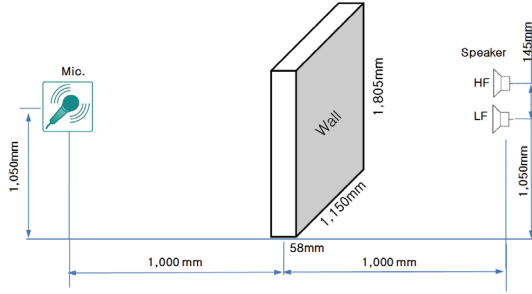


Fig. 2 Experimental setup

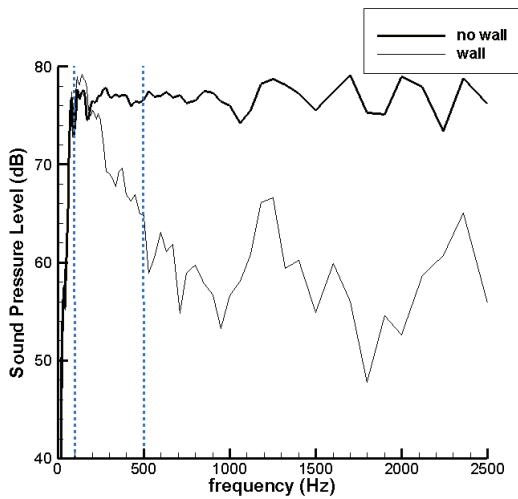


Fig. 3 Sound spectra measured by a microphone located 2m away from low frequency speaker

될 격자와의 간격이고, Δx_1 는 인접한 격자의 간격이다.

스피커 앞에 장애물이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 수치해석적인 음향장 계산을 수행하였으며, 이를 스피커에서 음원을 재생하고 한 점에서 음압을 측정된 실험데이터와 비교하였다. Fig. 2는 실험데이터를 얻기 위한 조건을 나타낸 그림이다. 장애물은 1050 mm × 1805 mm × 58 mm의 네모난 벽이다. Fig. 2에서 Mic.로 표시된 부분이 음압을 측정된 위치이다.

Fig. 3의 실험데이터를 살펴보면 1,000 Hz 이상의 고주파수에서는 실험데이터가 매우 불규칙하게 나타나 신뢰할 수 없다. 따라서 비교적 실험데이터를 신뢰할 수 있는 1,000 Hz 이하의 저주파수 구간에서의 실험결과를 수치해석 결과와 비교하였다. 1,000 Hz 이하의 저주파수 구간을 살펴보면, 대략 200 Hz 이하의 주파수에서는 장애물의 유무가 음압의 전파에 영향을 미치지 않고, 그 이상의 주파수에서는 장애물의 유무가 음압의 전파에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 장애물의 유무가 음압의 전파에 영향을 미치는 주파수와 그렇지 못

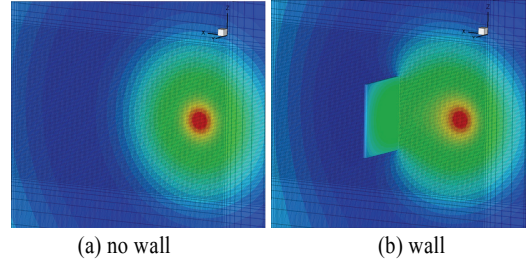


Fig. 4 Acoustic field at 100Hz

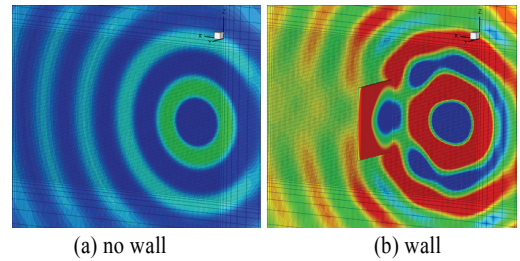


Fig. 5 Acoustic field at 500Hz

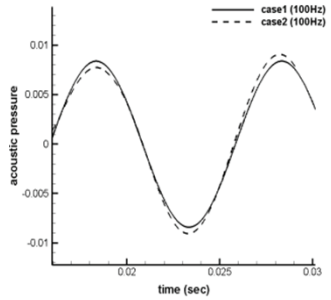
한 주파수를 각각 선정하여 수치해석결과와 실험데이터를 비교하고자 100 Hz 와 500 Hz의 음원에 대해 수치해석을 수행하였다. 실험결과에서 100 Hz에서는 장애물의 유무에 따른 음압의 차이가 거의 미미하여 두 경우 모두 음압이 74 dB 정도로 나타났다. 500 Hz에서는 장애물이 있는 경우의 음압은 76.6 dB이고, 장애물이 없는 경우의 음압은 64.9 dB 였다. SPL(Sound Pressure Level)의 정의는 식 (6)와 같다. 따라서 이를 통해 500 Hz에서 장애물이 있는 경우와 없는 경우의 압력 섭동의 진폭의 비를 계산할 수 있다. 계산 결과 장애물이 없는 경우의 진폭이 장애물이 있는 경우에 비해 3.4배였다.

$$SPL = 20 \log \frac{p'_{rms}}{p'_{ref}} [dB] \tag{6}$$

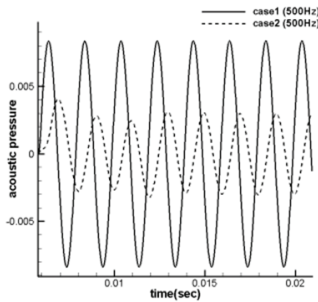
$$p'_{ref} = 2 \times 10^{-5} [Pa]$$

Brinkman Penalization 방법을 이용하여 이를 모사한 경우 100 Hz에서는 실험데이터와 마찬가지로 음압이 거의 차이나지 않았으며 500 Hz에서는 음압비는 3.0이었다. 따라서 Brinkman Penalization 방법을 선형 오일러 방정식(Linearized Euler equation)에 적용한 수치해석 기법은 실제 음향장을 모사하기에 타당하다.

Fig. 4 는 음원에서 100 Hz를 재생했을 때 장애물이 없을 때와 있을 때의 음향장을 수치적으로 모사한 결과 얻은 음향장이다. Fig. 5 는 500 Hz의 음원을 재생했을 때 장애물이 없



(a) source frequency 100Hz



(b) source frequency 500Hz

Fig. 6 Sound pressure signals determined at the microphone location by case1 (with wall) and case2(without wall)

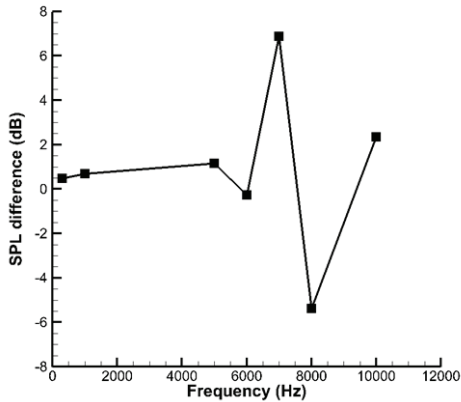


Fig. 7 Sound pressure Level difference

는 경우와 있는 경의 음향장을 각각 수치적으로 모사한 결과이다. Fig. 6은 수치해석적으로 모사한 음압을 시간에 따라 나타낸 것이다.

3.2 주파수의 개구율 변화에 대한 특성 분석

베젤(bezel: 모니터 주변의 테두리) 개구율이 음압의 전파에 미치는 영향을 파악하기 위해서 1단의 베젤을 설치했을

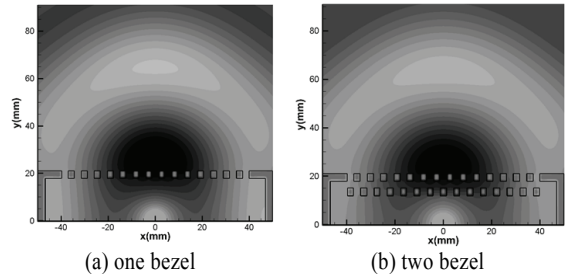


Fig. 8 Acoustic field at 5000 Hz

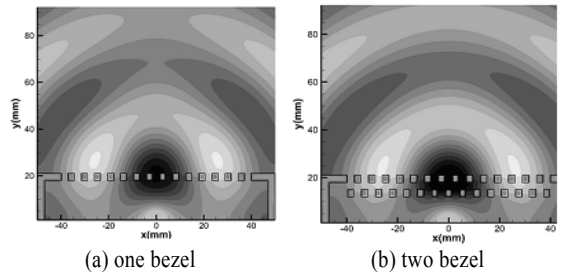


Fig. 9 Acoustic field at 8,000 Hz

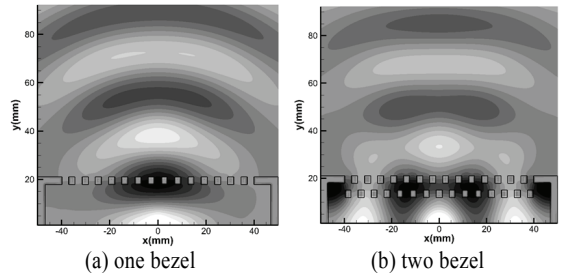


Fig. 10 Acoustic field at 10,000 Hz

때와 비교해 2단의 베젤을 설치했을 시의 음압의 감소를 주파수별로 모사해보았다. 계산은 2차원 계산 영역에서 수행하였다. 음원(스피커)에서 사인곡선을 발생시키고 음원으로부터 100 mm 떨어진 점 (0 mm, 1000 mm) 에서 음압을 측정하였다. 그 결과는 아래의 Fig. 7과 같다. Fig. 7은 가로 축의 주파수를 로그 단위로 나타내었다. 음압 차의 경향성을 보면 5,000 Hz까지는 주파수가 증가함에 따라 음압 차가 선형적으로 증가하고 그 이후에는 이러한 경향성이 적용되지 않음을 확인할 수 있다.

2단의 베젤을 설치했을 때 음향장을 살펴보면 5000 Hz까지의 저주파수에서는 산란효과에 의한 방향성의 변화가 크게 나타나지 않았다(Fig. 8 참조). 하지만 6,000 Hz이상의 고주파수에서는 산란효과에 의한 방향성의 변화가 크게 나타났다.

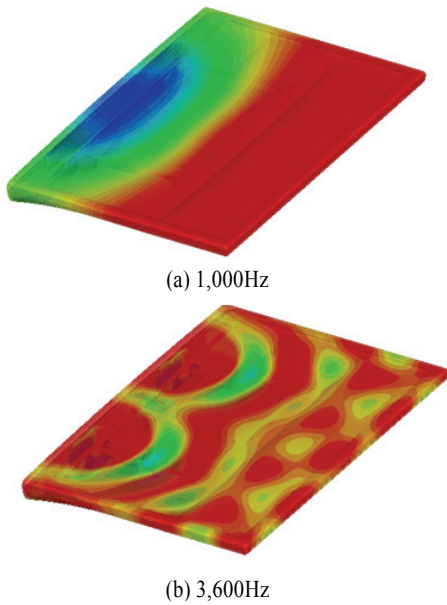


Fig. 11 Instantaneous pressure fluctuation

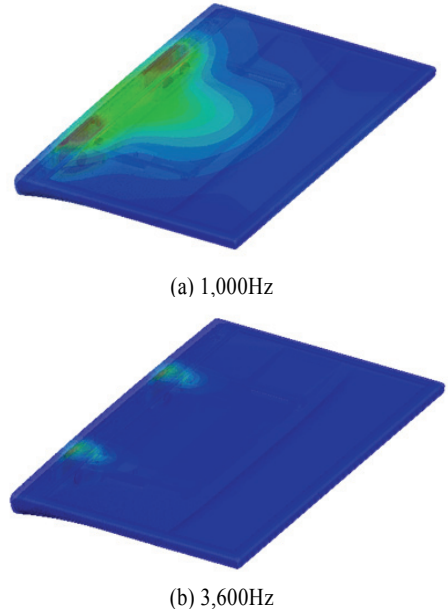


Fig. 12 P_{rms} on Monitor TV surface

Fig. 9을 보면 8,000 Hz에서는 2단 베젤을 설치함으로써 중앙부분에서의 음압이 오히려 1단 베젤을 설치했을 때보다 크게 나타났음을 확인할 수 있다. Fig. 10의 10,000 Hz의 음향장을 살펴보면 중앙부분에서 2단 베젤을 설치했을 때 음압이 감소했지만 중앙이 아닌 모니터 가장자리근처의 음향은 2단 베젤의 설치로 인해 오히려 음압이 증가한 부분이 있음을 확인할 수 있다.

3.3 모니터/TV 강체의 구조진동

모니터/TV에서 볼륨을 크게 해서 스피커로 소리를 재생하는 경우 모니터의 구조적인 진동으로 인해서 음질이 저하되는 현상이 일어난다. 구조적인 진동을 일으키는 주요부위를 파악하기 위해서 전체 모니터/TV 형상의 내부에서의 음향장을 계산하였다. 모니터/TV 형상은 상용프로그램 ICEM(v12.0)을 이용하여 형상에 대한 비정렬 격자를 입힌 후 이를 Tecplot 프로그램(Tecplot360 2011)으로 직교 좌표계 격자(Cartesian grid)에 보간했다.

주파수 1,000 Hz에서의 음향장을 계산한 결과의 순간적인 음압값은 Fig. 11과 같다. 고주파수인 3,600Hz에서 모니터 구조 내부의 산란이 일어남을 알 수 있다. 하지만 순간적인 압력변동 값만으로는 어느 부분이 구조진동을 유발하는 주요 부위인지 파악할 수 없기 때문에 P_s 값을 이용해서 이를 파악했다. 이는 Fig. 12에 나타나 있다. Fig. 12를 보면 저주파수인 1,000Hz에서 구조진동이 일어날 가능성이 높음을 유추할

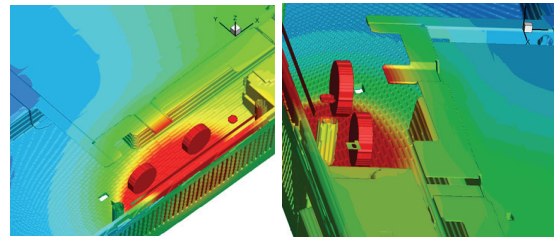


Fig. 13 Protruded internal structure in Monitor/TV of 1,000 Hz

수 있다.

주파수 1,000 Hz에서의 구조진동을 일으키는 주요 부위를 찾아보았다. 그 결과 스피커 근처의 체결부위에서 높은 음압이 관찰되었으며 모니터/TV를 지지하는 가운데 지지대주위에서도 높은 음압이 관찰되었다. 또한 모니터 내부의 구조물중 스피커 근처 돌출된 부분에서도 높은 음압이 관찰되었다(Fig. 13 참조). 이러한 부분들의 구조를 개선한다면 구조진동으로 인한 음질 저하를 어느 정도 완화시킬 수 있을 것이다.

4. 결 론

선형오일러 방정식에 Brinkman penalization 기법을 적용하여 복잡한 삼차원 형상에 대한 음향의 산란을 모사하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 평균속도가 없고, 음원에서 발생하는 소리만 전파되는 유동장에서 선형 오일러 방정식에 Brinkman penalization method를 결합하여 복잡한 형상에 대한 음향장을 모사했다.

(2) 베젤 설치가 모니터/TV의 음향장에 미치는 효과를 주파수별로 관찰하였다.

(3) 모니터/TV에서 문제가 되고 있는 구조 진동의 문제 해결을 위해 전체 모니터/TV 형상 내부의 음향장을 수치적으로 재현했다.

후 기

본 연구는 (주) LG 전자의 산학 협력 과제와 지원 및 KISTI 슈퍼컴퓨팅 센터 전략과제(과제번호: KSC-2011-C1-26)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 2008, Jeong, Y.E., Moon, Y.J., "Unsteady Aerodynamics of Flat Plate with Porous Trailing-edge," *5th National Congress on Fluids Engineering*, pp.134-137.
- [2] 2010, Kim, J.R. , "Computational study of broadband noise around leading-edge slat," Master theses, Korea University
- [3] 2002, Peskin C. S., "The immersed boundary method," *Acta Numerica*, pp.1-39.
- [4] 2011, Seo, J. H., Mittal, R., "A high-order immersed boundary method for acoustic wave scattering and low-Mach number flow-induced sound in complex geometries," *Journal of Computational Physics*, Vol.230, pp.1000-1019.
- [5] 1947, Brinkman, H. C., "On the Permeability of Media Consisting of Closely Packed Porous Particles," *Applied Scientific Research*, Vol.A1, pp.81-86.
- [6] 2007, Liu, Q. and Vasilyev, O.V., "A Brinkman Penalization method for compressible flows in complex geometries," *Journal of Computational Physics*, Vol.227, pp.946-966.
- [7] 2010, Lee, S.H., Kim, J.R., Bae, Y.M., Jo, Y.W., Moon, Y.J., "Computation of Slat Noise by a LES/LPCE Hybrid Method with Brinkman Penalization," *16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, AIAA 2010-3839, Stockholm, Sweden.
- [8] 2010, Kim, H.Y., Bae, Y.M., Moon, Y.J., "Study of the Aerodynamics/Aeroacoustics of an Axial-Flow Fan: Experimental Validation of a LES/LPCE/Brinkman Penalization Method," *16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, AIAA 2010-3869, Stockholm, Sweden.
- [9] 2010, Bae, Y.M. and Moon, Y.J. , "Brinkman Penalization Method for Computation of Acoustic Scattering from Complex Geometry," *16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, AIAA 2010-3839 Stockholm, Sweden.
- [10] 1993, Tam, C.K. and Webb, J.C., "Dispersion-Relation-Preserving Finite Difference Schemes for Computational Acoustics," *Journal of Computational Physics*, Vol.107, pp.262-281.
- [11] 1992, Lele, S.K., "Compact Finite Difference Schemes with Spectra-like Resolution," *Journal of Computational Physics*, Vol.103, pp.16-42.
- [12] 2003, Edgar N.B. and Visbal M.R., "A General Buffer Zone-Type Non-Reflecting Boundary Condition for Computational Aeroacoustics," *9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit*, AIAA 2003-3300.