

# 라이너가 있는 덕트의 소음방사 특성에 관한 수치적 연구

## A Numerical Study of Radiation Effect from Ducted Fans with Liners

임창우\* · 정철웅\*\* · 이수갑\*\*\*

ChangWoo Lim, Cheolung Cheong and Soogab Lee

**Key Words** : Ducted fan, Engine inlet, Computational Aeroacoustics(CAA), DRP, Liner, Kirchhoff Surface Integral

### ABSTRACT

Over the last few decades, noise has played a major role in the development of aircraft engines. The dominant noise is generated by the wake interactions of fan and downstream stator. Engine inlet and exhaust ducts are being fitted with liner materials that aid in damping fan related noise. In this paper, the radiation of duct internal noise from duct open ends with liners is studied via numerical methods. The linearized Euler's equations in generalized curvilinear coordinates are solved by the DRP scheme. The far field sound pressure levels are computed by the Kirchhoff integration method. Through comparison of sound directivity from bell-mouth duct with and without liners, it is shown that radiation from engine inlet is affected by liner effects or a soft wall boundary condition.

### 1. 서론

항공기 엔진 덕트 내부에서 발생하는 소음원으로는 운송체 엔진의 압축기(compressor), 로터/스테이터(rotor/stator), 팬(fan), 연소작용에 의한 것들이 있다. 이런 소음원들에 의해서 발생하는 음향파는 엔진 덕트를 통해서 공기중으로 전파된다. 전파해가는 소음의 방향성(directivity pattern)은 산(node, high intensity)과 골(node, region of relative silence)로 특징지어지는데, 이는 엔진 덕트의 끝단에서 음향파가 굴절(refraction)되기 때문이다. 두께가 없는 평판 덕트로부터 전파해가는 음향파에 관해서는 Wiener-Hopf나 다른 방법들을 사용한 이론적 접근방법들이 많이 연구되었다. 최근에는 수치기법의 발달에 따라 덕트안의 소음원으로부터 소음전파 뿐만 아니라 덕트 내부에 라이너(liner)와 같은 흡음 물질을 붙였을 때 소음전파 특성을 수치적으로 연구하고 있다. 하

지만 결과론적 기술이 주를 이루고 그에 대한 기본적인 미커니즘(Mechanism)에 대한 규명은 부족한 실정이다. 본 논문에서는 덕트 내부 소음이 덕트 밖으로 전파할 때 덕트 내부에 라이너(liner)가 있을 때와 없을 때를 수치적으로 모사 함으로써 그 물리적 메커니즘을 밝히고자 한다.

유동장과 음향장을 동시에 수치해석하기 위해서는 소음원에서 음향장까지 소산(dispersion)과 감쇄(dissipation)를 최소로 하는 수치기법을 필요로 하며, 그런 요구를 만족시키는 많은 차분기법들이 연구되어 발표되었다. 본 논문에서는 Tam, Webb이 제안한 Dispersion Relation Preserving Scheme (이하 DRP)기법을 사용하였다.

본 논문의 목적은 라이너(liner)와 같은 임피던스 경계 조건이 포함된 복잡한 기하학적 형상을 가지는 덕트를 수치적으로 해석하고 그 물리적 메커니즘을 파악하는 것이다. 덕트는 벨마우스(Bellmouth) 덕트를 사용하였다. 전산공력음향학에 의한 수치계산 영역은 덕트 내부와 덕트 입구 근접장으로 이루어진다. 덕트 내부에서의 음원은 원통형 덕트나 2차원 평판 덕트의 음향 특성해(acoustic eigenfunction)들의 조합이나 단일 특성해를 이용하여 발생시킨다. 일반곡선좌표계 (Generalized Coordinate System)에서 선형화된 Euler 방정식을 DRP 기법 (Dispersion Relation Scheme)을 이용하여 유한 차분하

\* 서울대학교 공력소음 및 소음제어연구실  
E-mail : glider20@snu.ac.kr  
Tel : (02) 880-7545, Fax : (02) 875-4360

\*\* 서울대학교 공력소음 및 소음제어연구실

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

었다. 원방의 음압레벨(Sound Pressure Level)은 키르호프 면적분(Kirchhoff Surface Integral) 방법을 이용하여 계산하였다. 계산 영역의 원방에서는 방사경계조건을 적용하였으며 덕트 안쪽의 소음발생 메카니즘은 무한 덕트 이론(Infinite duct theory)로 부터 유도하였다. 덕트의 벽면 경계조건으로는 가상점 개념을 이용한 벽면 경계조건을 적용하였다. 다음의 각 절에서 지배방정식, 선형 덕트 음향이론, 수치기법, 경계조건, 및 Kirchhoff 적분방법에 대해서 간략히 설명하고 7절에서는 라이너가 있는 경우와 없는 경우 벨마우스(Bellmouth) 덕트의 모드별 소음의 전파특성에 대한 수치 결과와 분석을 수행하였다. 8절에서 결론을 내렸다.

## 2. 지배방정식

일반 곡면 좌표계에서 2차원, 선형, 압축성 Euler 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \hat{D}}{\partial t} = -R(\hat{D}) + S, \quad (1)$$

$$\text{여기서, } R(\hat{D}) = \frac{\partial \hat{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial \eta}.$$

$$\hat{D} = \frac{1}{J} [\rho \ u \ v \ p]^T, \quad (2)$$

$$\hat{E} = \frac{1}{J} [\xi_x E + \xi_y F],$$

$$\hat{F} = \frac{1}{J} [\eta_x E + \eta_y F].$$

$$E = \begin{bmatrix} M_0 \rho + u \\ M_0 u + p \\ M_0 v \\ M_0 p + u \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} v \\ 0 \\ p \\ v \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ S_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 밀도( $\rho$ ), 압력( $p$ ), 속도( $u, v$ )는 미소 섭동량을 나타내고 자유흐름의 값은 첨자 0을 사용하여 나타내었다. 각각 길이는  $R$ , 속도는  $a_0$ (ambient sound speed), 시간은  $R/a_0$ , 밀도는  $\rho_0$ , 압력은  $\rho_0 a_0^2$ 로 무차원화 하였다.

## 3. 수치적 방법

공간차분법으로 Tam과 Webb이 제안한 DRP 기법을 이용하였고 시간 적분법으로는 Adams-Bashford 적분법을 기본으로 최적화된 4단계 적분법을 사용하였다. 공간과 시간에 대한 일차미분을 차분하여, Fourier-Laplace 변환을 하면 유효파수(effective wave number)와 유효각속도(effective angular velocity)가 다음과 같이 된다.

$$\bar{a} = \frac{-i}{\Delta x} \sum_{j=-L}^L a_j e^{i \cdot a \Delta x} \quad \text{and} \quad \bar{\omega} = \frac{i(e^{-i \cdot \omega \Delta t} - 1)}{\Delta t \sum_{j=0}^M b_j e^{i \cdot j \omega \Delta t}} \quad (4)$$

유한차분식의 계수들은 Taylor 전개를 통하여 하나의 변수로 나타내고, 이 나머지 변수를 아래 오차 적분식을 최소화 함으로써 결정할 수 있다.

$$\min E_1 = \min \int_{-\epsilon}^{\epsilon} |a \Delta x - \bar{a} \Delta x| |d(a \Delta x)| \quad (5)$$

시간적분법으로는 4단계 외재적 적분법 즉 3차의 정확도를 가지고 Tator Series를 이용하여 하나의 변수를 사용하여 적분계수들을 표현한 다음에 나머지 변수를 공간에서와 마찬가지로 유효각속도와 원래 편미분방정식의 각속도의 차이를 최소화함으로써 결정할 수 있다. (1)-(3)식의 모든 항들을 차분화하면, 아래와 같은  $O(\Delta t^2, \Delta x^{N+M-2})$ 의 DRP 기법을 얻을 수 있다.

$$\hat{D}_{l,m}^{n+1} = \hat{D}_{l,m}^n + \Delta t \sum_{j=0}^3 b_j R_{l,m}^{n-j} \quad (6)$$

여기서

$$R_{l,m}^n = \frac{-1}{\Delta \xi} \sum_{j=-N}^M a_j \hat{E}_{l+1,m}^n - \frac{1}{\Delta \eta} \sum_{j=-N}^M a_j \hat{F}_{l,m+1}^n$$

식 (6)에서  $l$  과  $m$  은 공간지표이고  $n$  은 시간을 가리키는 지표이다.  $N=M$  이면 중앙차분식이 되고,  $N=0$  이면 완전전방차분식,  $M=0$  완전후방차분식이 된다. 모든 수치계산은 7개의 격자점을 이용하는 4차 정확도의 수치기법을 사용한다. 즉  $N+M=6$ 을 만족한다.

## 4. 경계조건

### 4.1 원방경계조건

원방경계조건으로는 Tam과 Dong이 제안한 경계조건을 적용하였다. 선형화된 Euler 방정식은 엔트로피파(Entropy Wave), 와류파(Vorticity Wave), 음향파(Acoustic Wave)의 세 가지 파를 지원한다. 엔트로피파는 밀도만의 변화를 수반한 것이며 자유류 흐름을 따라 전파된다. 와류파는 속도만의 변화를 수반한 것이며 엔트로피파와 마찬가지로 자유류 흐름을 따라 이동한다. 음향파는 밀도, 속도, 압력 등 모든 변수들의 변화를 수반한 것이며 음속으로 모든 방향으로 전파된다. 원방에서 선형화된 Euler 방정식을 만족시키는 이 세 가지 파동의 점근해를 구하여 이 점근해(Asymptotic Solution)가 만족시키

는 편미분방정식을 각각 다시 구하여 원방에서의 경계조건식으로 사용한다.

$$\left( \frac{1}{V(\theta)} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \right) \begin{bmatrix} \rho \\ u \\ v \\ p \end{bmatrix} = o + O(r^{-5/2}) \quad (7)$$

원방경계에서 자유류가 유출되는 곳에서는 위의 세 가지 파가 모두 통과하게 되므로 다음과 같은 외부류경계조건(Outflow Boundary Condition)을 사용한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + u_0 \frac{\partial \rho}{\partial x} &= \frac{1}{a_0^2} \left( \frac{\partial p}{\partial t} + u_0 \frac{\partial p}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u_0 \frac{\partial u}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u_0 \frac{\partial v}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u_0 \frac{\partial w}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} \\ \frac{1}{V(\theta)} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{p}{2r} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,  $V(\theta)$ 는  $\theta$ 방향의 유효 전파 속도이다.

## 4.2 임피던스 벽면경계조건

임피던스는 표면에 수직한 속도성분  $V_n$ (표면방향의 양)과 음압  $p$ 의 비로 정의되며 다음과 같이 표현된다.

$$Z = p / V_n \quad (9)$$

임피던스는 복소수양( $Z = R' + iX'$ )으로 음향적으로 다루어지는 표면에 의해 음파가 반사될 때 음의 크기와 위상변화를 나타낸다. 본 연구에서도 임피던스 계산을 위해 Delany와 Bazley의 실험식을 사용하였으며(ref.13참조), 공기의 특성 임피던스( $\rho_0 c$ )로 정상화한 임피던스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.  $Z / \rho_0 c = R + iX$ . 이는 주로 주파수 영역에서 계산되어 지나, Tam과 Auriault는 임피던스를 갖는 벽면 경계에서 주파수 영역에서 계산되는 것과 동등한 시간 영역 임피던스 경계조건을 제한하였다.

양의 정상화된 임피던스의 감용저항(reactance)  $X$ 에 대해, 표면에서 단일 주파수의 시간 영역 경계 조건은 다음과 같다.

$$p = -RV - \frac{X}{\omega} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (10)$$

$V$ 는 좌표계의 속도벡터를 나타낸다. ( $V = -V_n$ )

위의 식(10)을 운동량 방정식에 적용하여 정리하면 다음과 같이 벽면에 수직한 속도성분에 대한 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{w}{X} ((\xi_x + \xi_y)p - R(\xi_x v + \xi_y u)) + \xi_x^2 M_0 \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ + \xi_x \xi_y M_0 \frac{\partial v}{\partial \xi + \xi_x} \eta_x M_0 \frac{\partial u}{\partial \eta} + \xi_y \eta_x M_0 \frac{\partial v}{\partial \eta} \\ + (\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial p}{\partial \xi} + (\eta_x \xi_x + \eta_y \xi_y) \frac{\partial p}{\partial \eta} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

위 식을 사용하여 가상점(Ghost point)에 가상값을 이용하는 벽면경계조건을 적용하였다. 이는 벽면 격자 뒤에 가상의 격자를 두어 벽면에서 다음 시간의 속도를 경계조건에서 줄 때 그 값을 만족하도록 가상 격자계에서 압력값을 구하여 사용하는 것이다.

## 4.3 덕트 내부 경계조건

덕트 내부의 경계조건은 두 가지 기능을 수행해야 한다. 첫 번째는 덕트 내부에서 음향파를 생성해야하고 두 번째로는 덕트 입구에서 반사해오는 음향파를 흡수해야 한다. 덕트 내부에서 압력은 다음과 같이 입사파와 반사파의 합으로 표현할 수 있다.

$$p = p_{in} + p_{re} \quad (12)$$

덕트 음향 이론에 의하면 단일 각속도( $\omega$ )를 가지는 음향파의 반사파는 다음과 같은 형태를 취한다.

$$p_{re} = \sum_{m,n} p_{m,n} J_m(\lambda_{m,n} r) e^{i(k_{m,n} x + m\theta - \omega t)} \quad (13)$$

여기서  $\lambda_{m,n}$ 은 다음식을 만족한다.

$$J_m'(\lambda_{m,n} R) = 0 \quad (14)$$

$R$ 은 덕트의 반지름이고 축방향의 파동수(wave number)는 소산관계(Dispersion Relation)에 의해서 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{k_{m,n}}{\omega} = \frac{1}{1 - M_0^2} \left[ -M_0 \pm \sqrt{1 - (1 - M_0^2) \left( \frac{\lambda_{m,n}}{\omega} \right)^2} \right] \quad (15)$$

(13)식을 이용하여 (12)식을  $x$ 와  $t$ 에 관해서 미분하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p_{in}}{\partial x} + i \sum_{m,n} p_{m,n} J_m(\lambda_{m,n} r) k_{m,n} e^{i(k_{m,n} x + n\theta - \omega t)} \quad (16)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial p_{in}}{\partial t} - i\omega p_{re} \quad (17)$$

다음에 (15)식을  $(1 - M_0^2)(\lambda_{m,n}/\omega)^2$ 에 대해서 Taylor 전개를 하여 (16), (17)식에 대입하고  $p_{re}$ 를 소거하면 다음과 같은 덕트내부의 경계조건식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + (M_0 - 1) \frac{\partial p}{\partial x} = \partial \frac{p_{in}}{\partial t} + (M_0 - 1) \frac{\partial p_{in}}{\partial x} \quad (18)$$

## 5. 임피던스 벽면경계조건 검증

시간영역에서 임피던스 경계조건 식 (10)의 유효성을 검증하기 위해서 CAA를 이용한 수치적 해와 이론적 해를 비교하였다.

먼저 flow resistivity  $\sigma=200kNs/m^4$  (grass covered surface와 등가)인 흡음표면(absorbing surface)위에서 단일 주파수로 방사하는 음압장을 고려해 보자. (Fig. 1 참고)

속도  $v$ 와 음압  $p$ 는 가상점(Ghost point)를 제외하고 식 (6)에 의해 다음 시간으로 갱신(update)된다.

Fig. 2는 시간영역에서의 임피던스 효과를 고려한 수치해석 결과와 주파수 영역에서의 이론적 해를 비교한 것이다. 이 두 결과를 통해 위의 임피던스 경계조건을 시간영역 해가 정확함을 알 수 있다.

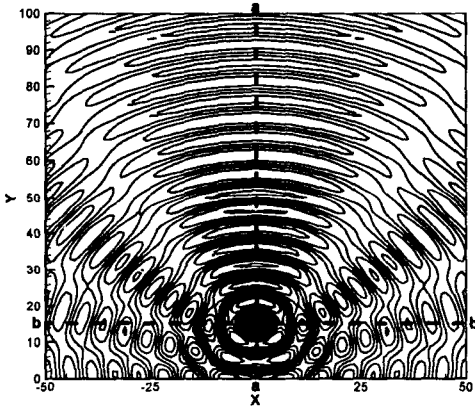


Fig. 1 Reflected sound field with absorbing surface defined by  $\sigma=200kNs/m^4$

## 6. Kirchhoff Method

원방의 음압레벨(Sound Pressure Level)은 근접장 폐곡선 위의 음향해를 적분하는 키르호프 적분 방법(Kirchhoff Integration Method)으로 계산할 수 있다. 키르호프 적분면과 원방 사이의 공간을 일정한 자유류가 흐르는 곳으로 가정한다면 음압에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + u_0 \frac{\partial}{\partial x}\right)^2 - a_0^2 \nabla^2 p = 0 \quad (19)$$

$(x, y, z)$ 를 원방에서의 위치,  $(x', y', z')$ 를 키르호프 면

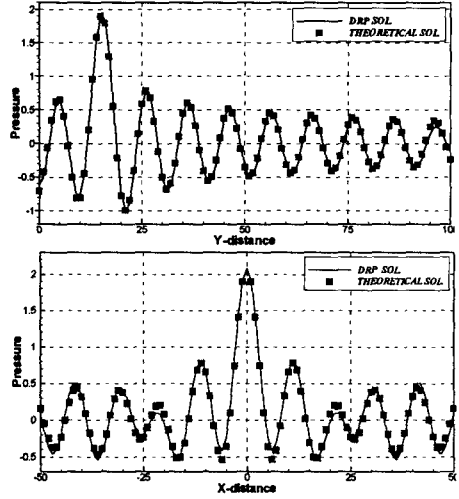


Fig. 2 Spatial pressure distribution of line a-a & b-b in fig. 1 ; —, Time domain solution by DRP scheme; ■—■, Frequency domain solution by theoretical theory

에서의 점이라고 가정하고, Prandtl-Glauert 변환을 도입하면,

$$(x_0, y_0, z_0) = (x, \beta y, \beta z) \quad (20)$$

여기서  $\beta^2=1-M_0^2$  이고, 변환된 공간에서 원방의 점과 키르호프 면의 점과의 거리는 다음식과 같이 표현된다.

$$r_0 = [(x-x')^2 + \beta^2(y-y')^2 + \beta^2(z-z')^2]^{1/2} \quad (21)$$

Green 함수를 이용하여 원방의 음향파를 다음과 같은 면적분으로 표현할 수 있다.

$$p(x, yz, t) = -\frac{1}{4\pi} \int_S \left[ \frac{p}{r_0^2} \frac{\partial r_0}{\partial n_0} + \frac{1}{r_0} \frac{\partial p}{\partial n_0} + \frac{1}{a_0 r_0 \beta^2} \frac{\partial p}{\partial t} \left( \frac{\partial r_0}{\partial n_0} - M_0 \frac{\partial x'}{\partial n_0} \right) \right] ds \quad (22)$$

$n_0$ 는 면  $S$  에 수직인 방향이고  $\tau$ 는 지연시간(retarded time)이다.

## 7. 수치결과와 분석

라이너가 있는 벨마우스 덕트에 대하여 음향파 모드에서 수치모사 하였다. 덕트의 안쪽 반지름  $R$ 이 길이

의 무차원 변수이고, 자유류 속도는 0일 때 계산을 수행하였다. Fig. 3은 계산영역의 개략도와 경계조건 등을 나타낸 것이다. 원방 경계는 약 덕트 반지름의 2.5배 정도이고, 키르호프 면은 원방경계로부터 35 번째 격자면으로 선택하였다. 최소의 격자 크기는 약 0.01정도이고 시간간격은 0.0004으로 계산하였다.

덕트 안쪽 경계에서 입사하는 음향파는 식 (23)과 같다.

여기서  $m$ 은 원주방향,  $n$ 은 반지름 방향의 모드 수를 나타내고, 각속도는 10.3으로 선택하였으며 각각의 모드( $m=0, n=0,1,2,3$ )에 대해서 수치해석을 하였다. 입사하는 음향파의 진폭을  $10^{-4}$ 으로 선택했는데 117dB에 해당하는 음압이다.

$$\begin{bmatrix} \rho \\ u \\ v \\ w \\ p \end{bmatrix} = \epsilon Re \left[ \begin{array}{c} \frac{J_m(\mu_{mn}r)}{(\omega^2 - \mu_{mn}^2)^2} J_m(\mu_{mn}r) \\ -\frac{i\mu_{mn}}{\omega} J_m(\mu_{mn}r) \\ \frac{\mu_{mn}}{\omega} J_m(\mu_{mn}r) \\ J_m(\mu_{mn}r) \end{array} \right] \times e^{i[(\omega^2 - \mu_{mn}^2)^{1/2}z + m\theta - \omega t]} \quad (23)$$

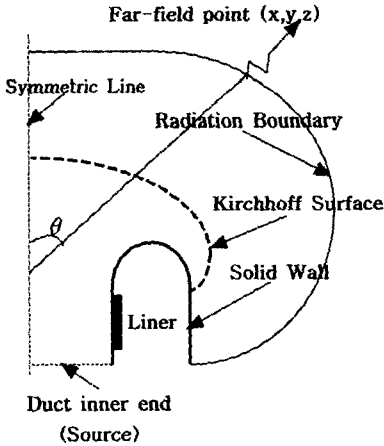


Fig. 3 Computation Field, Boundary Conditions and Bellmouth Duct Geometry

Fig. 4는 근접장의 압력분포를 모드별로 나타내고 있다. 단절주파수(cut-off frequency)에 가까워질수록 덕트 입구에서 반사되는 압력이 커져 덕트 밖으로 전파되는 압력이 점점 작아지는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 5는 (0,2)모드의 음향파가 라이너(liner)에 의한

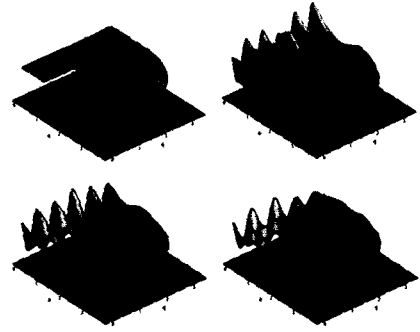


Fig. 4 Acoustic pressure distribution in the near field of bellmouth duct with no liner

흡음 효과를 시각적으로 보여주고 있다.

전산공력음향학에서는 해석대상인 음향파의 성질로 인하여 고차의 수치기법을 사용해야만 한다. 하지만 고차의 수치기법은 복잡한 모양의 물체의 해석을 위해서 격자의 변환을 하면 격자의 변환 과정중의 오차와 자코비언(Jacobian)의 급격한 변화로 인하여 수치적인 오차와 불안정성을 가지게 된다. 덕트 모양의 물체에 대한 해석에 있어서도 덕트 끝단 부분의 곡면이 심한 곳에서 급격한 자코비언의 변화를 가지게 되고 이곳에서 수치적인 오차가 발생한다. 본 연구에서는 그런 수치적인 오차와 불안정성을 보완하기 위한

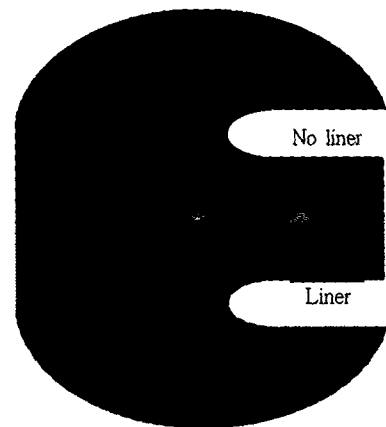
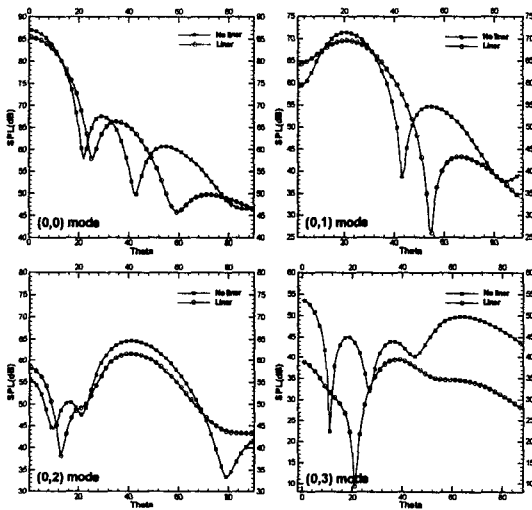


Fig. 5 Acoustic pressure with and without liner for the Bellmouth Engine Inlet (Ranging from black to white as the amplitude increases)

여 인조의 수치 감쇄항을 도입하였고 수치 감쇄항의 계수를 자코비언과 같은 분포를 가지게 만들어 수치 적인 안정성을 얻을 수 있었다.

Fig. 6은 라이너가 있을 때와 없을 때의 벨마우스 덕트 원방의 음압레벨을 키르호프 적분을 이용하여 50R 떨어진 원 위의 점을 1도 간격으로 각 모드별로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 라이너(liner)의 흡음 특성으로 인해 음의 크기와 위상의 변화가 발생하고 있음을 알 수 있다. 특히 흡음 특성은 축 방향보다 큰 각( $\theta$ )에서 증가하며, (0,3)모드에서 음향파 크기의 감소가 두드러지게 나타남을 알 수 있다.



따라서 라이너의 사용은 원음장(far-field)에서 상당한 음향에너지의 저감을 발생시키고 있음을 알 수 있다.

## 8. 결론

본 논문에서는 CAA 수치기법을 이용하여 라이너가 있는 벨마우스 덕트의 소음방사 특성을 수치모사 하였다. 여러 가지 모드의 원방 음압레벨을 구하기 위해 키르호프 면적분(Kirchhoff Surface Integral) 방법을 이용하여 계산하였다. 라이너(liner)에 의한 흡음 특성은 원음장에서 상당한 음향에너지의 저감을 발생시키며, 특히 축 방향보다 각( $\theta$ )이 큰 곳에서 증가하며, 고차의 모드에서 크게 영향을 받는다.

## 참고 문헌

- (1) Tyler, J.M. and Sofrin, T.G., 1962, "Axial flow compressor noise studies", SAE Transaction, Vol. 70, pp309-332,
- (2) Mani, R, 1973, "Refraction of acoustic duct waveguide modes by exhaust jets", Quarterly of Appl. Math., Vol. 30, Jan. pp. 501-519.
- (3) Savkar, S.D., 1975, "Radiation of cylindrical duct acoustics modes with flow mismatch", Journal of Sound and Vibration, Vol. 42, No. 3, pp. 363-386.
- (4) Eversman, W., 1991, "Theoretical models for duct acoustic propagation and radiation", NASA Reference Publication 1258, Vol. 2., 101.
- (5) Dong, T.Z., Shih S.H., Mankbadi, R.R., Povinelli, L.A., "A Numerical Study of Duct Geometry Effect on Radiation of Engine Internal Noise", AIAA-97-1604
- (6) D. Ait-Ali-Yahia, D. Stanescu, W.G. Habashi, and M.P. Robichaud, "Axisymmetric Computations of Fan Noise Radiation from Turbofan Inlets," AIAA 99-0483
- (7) Tam, C.K.W., "Influence of Nozzle Geometry on the Noise of High-Speed Jets", AIAA-98-2255.
- (8) Tam, C.K.W., Webb, J.C., 1994, "Dispersion Relation Preserving Finite Difference Schemes in Computational Aeroacoustics", Thoret. Comput. Fluid Dynamics, Vol. 6, pp. 303-322.
- (9) Tam, C.K.W. and Dong, T.Z., 1996, "Radiation and Outflow Boundary Conditions for Direct Computation of Acoustics and Flow Disturbance in a Nonuniform Mean Flow", J. Comput. Acoustics, Vol. 4, No. 2.
- (10) Delany, M. E. and Bazley, E. N. 1970, "Acoustical properties of fibrous absorbent materials", Applied Acoustics, Vol.3, pp105-116
- (11) Tam, C. K. W. and Auriault, L. 1996, "Time-domain impedance boundary conditions for computational aeroacoustics", AIAA, Vol.34, pp917-923
- (12) 정철웅, 이수갑, 2000, "덕트의 기하학적 모양이 소음 전파에 미치는 영향에 대한 수치적 연구", 소음진동학회 춘계학술대회.
- (13) 임창우, 정철웅, 이수갑, 2001, "방음벽 성능 예측을 위한 시간영역 수치해석의 개발", 소음진동학회 춘계학술대회.