

하이브리드 방법을 이용한 라이너가 있는 덕트 내 비선형 음향 전파의 효과적 계산

Efficient computation of nonlinear acoustic wave propagation in lined duct using hybrid method

김대환* · 정철웅†
D. Kim, C. Cheong

1. 서론

실제 산업현장에서 자주 경험할 수 있는 유동소음 문제는 내부유동 환경에서 일어난다. 외부 유동 소음문제와 비교하여 내부 유동소음을 효과적으로 정확히 예측을 위해서는 다음 몇 가지 중요한 사항을 고려해야 한다. 첫째, 내부유동 소음을 예측하는데 외부 유동 소음 문제와는 달리 내부 벽면과의 간섭을 고려해야 한다. 둘째, 내부 유동과 음파의 상호작용과 비선형 전파 현상을 좀 더 정확히 묘사해야 한다. 셋째, 흡음재나 소음기와 같은 소음제어기구에 대한 적절한 수치적 모델이 필요하다.

본 연구에서는 내부유동소음 예측을 위한 기초연구로서 흡음재 모델링을 위한 광대역 시간영역 임피던스 모델의 결과를 기초로 비선형 음파의 전파 특성을 포함한 하이브리드 방법을 제시하고자 한다.

NASA의 CT57 Liner 모델을 수치적으로 모델링함으로써 임피던스 경계조건 모델의 타당성을 확보하였다. 또한 하이브리드 방법을 이용한 비선형 음향전파 결과와 비선형 수치해석 결과를 비교함으로써 제시한 방법의 타당성을 확보하였다.

2. 본론

2.1 수치기법

(1) 시간영역 임피던스 모델링

주파수영역에서의 일반적인 임피던스 경계조건은 아래와 같이 표현된다.

$$i\omega\hat{p}(\omega, \mathbf{x}) + \mathbf{V}_0(\mathbf{x}) \cdot \nabla \hat{p}(\omega, \mathbf{x}) - \mathbf{n} \cdot [\mathbf{n} \cdot \nabla \mathbf{V}_0(\mathbf{x})] \hat{p}(\omega, \mathbf{x}) = -[i\omega Z(\omega)] \mathbf{n} \cdot \hat{v}(\omega, \mathbf{x}) \quad (1)$$

유입유동 이 없는 경우는 주파수영역 임피던스 경계

조건은 $\hat{p}(\omega, \mathbf{x}) = -Z(\omega) \hat{v}(\omega, \mathbf{x})$ 와 같다.

Ozyoruk(1998)의 z-transform 을 이용한 시간영역 임피던스(Z) 모델을 사용하였다. z-domain 에서의 임피던스 모델은 아래와와 같다.

$$Z(z) = \left[a_0 + \sum_{l=1}^4 a_l z^{-l} \right] / \left[1 + \sum_{k=1}^3 b_k z^{-k} \right] \quad (2)$$

최종적인 시간영역에서의 임피던스 경계조건은 다음과 같다.

$$p^n = b_1 p^{n-1} + b_2 p^{n-2} + b_3 p^{n-3} - (a_0 v^n + a_1 v^{n-1} + a_2 v^{n-2} + a_3 v^{n-3} + a_4 v^{n-4}) \quad (3)$$

(2) 지배방정식 및 이산화 기법

해석에 사용된 덕트 모델은 Fig 1 과 같으며 NASA의 CT57Liner 를 적용하였다. 덕트의 지름 D는 50.8mm 이다. 수치모델 검증에 위해 지배방정식으로 선형 오일러 방정식(linear Euler equation)을 사용하였고 비선형 해석을 위해 비선형 오일러 방정식(nonlinear Euler equation)을 사용하였다. 덕트 입/출구에 무반사 경계조건으로 Hu(2001)의 perfectly matched layer(PML) 조건을 사용하였다. 이산화 기법으로 Tam의 DRP 를 사용하였다. 시간적분은 Adams-Bashford 기법을 사용하였다.

2.2 수치해석결과

(1) 수치 모델 검증

입사 파의 크기를 140dB 로 고정하고 500Hz 부터 3000Hz 까지 500Hz 간격으로 덕트를 가진하고 그 결과를 실험값과 비교를 통해서 현재 수치 모델을 검증하였다. 분석을 위한 음압은 벽면에서의 값을 사용하였으며 결과는 Fig. 2 에서 제시하였다. Fig 2 에서 보는 바와 같이 라이너(liner)에 의해 초기 음압 레벨이 감소하는 것을 확인할 수 있으며 그 경향이 실험과 수치 해석 결과가 동일한 것으로 볼 때 적용한 시간영역 임피던스 경계조건이 합당함을 알 수 있다.

(2) 비선형 해석 결과

비선형성이 나타나도록 154dB 의 입사 파를 가진

† 교신저자; 부산대학교 기계공학부

E-mail : ccheong@pusan.ac.kr

Tel : (051)510-3205, Fax : (051) 514-7640

* 부산대학교 대학원 기계공학부

하였으며 가진 주파수는 250Hz 이다. 비선형 해석결과, Fig 3(실선)에서 보는 바와 같이 가진 주파수의 하모닉 성분, 500Hz 가 생성되는 것을 확인할 수 있다.

(3) 하이브리드 방법을 이용한 비선형 해석

라이너가 없는 덕트 내의 SPL 은 Fig 3 에서 점선으로 표시하였다. 제시한 하이브리드 방법은 라이너가 있는 덕트 내 선형결과에 liner 없는 덕트 내의 비선형결과에 영향을 고려하는 방법이다. 제시한 방법에 따라 NASA 의 500Hz 에 대한 실험결과에 liner 가 없는 덕트의 비선형 전파효과고려한 결과를 Fig 3 에서 ○ 사용하여 표시하였다.. Fig 3 에서 보는 바와 같이 시간영역 비선형 수치 해석 결과와 하이브리드 방법을 이용한 결과가 합당한 일치성을 보이는 것을 확인할 수 있다.

3. 본 론

실제 라이너(Liner)를 통해 소음흡음 정도를 시간영역 광대역 임피던스 모델을 통해서 수치적인 방법으로 예측하였으며 실험결과와의 비교 검증을 통해 수치 모델의 타당성을 확보하였다. 또한 하이브리드 방법을 통해 효과적으로 라이너(Liner)를 포함한 덕트의 비선형 음파 전파 특성을 예측하였다. 이러한 결과를 바탕으로 비선형 전파 특성을 띄는 내부 유동소음 문제에 하이브리드 방법을 적용함으로써 정확하고 효과적인 소음예측이 가능할 것이라 사료된다.

후 기

이 논문은 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R01-2007-000-10207-0)

Figures

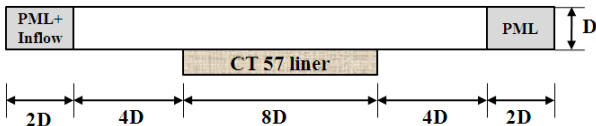


Fig 1. Schematic of the lined duct.

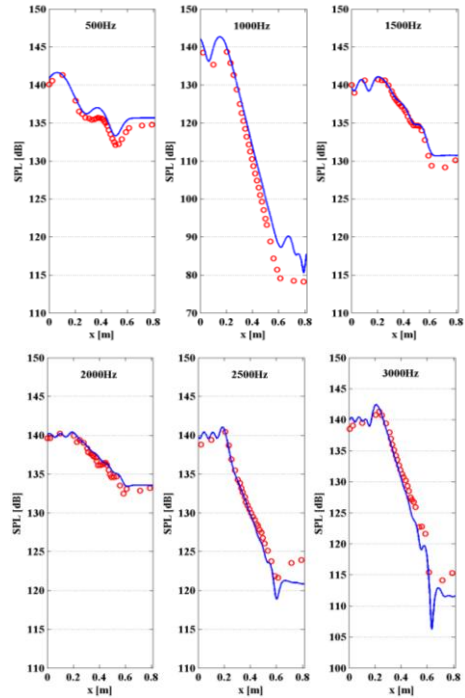


Fig 2. SPL results from liner simulation (line: simulation, circle: NASA experiment).

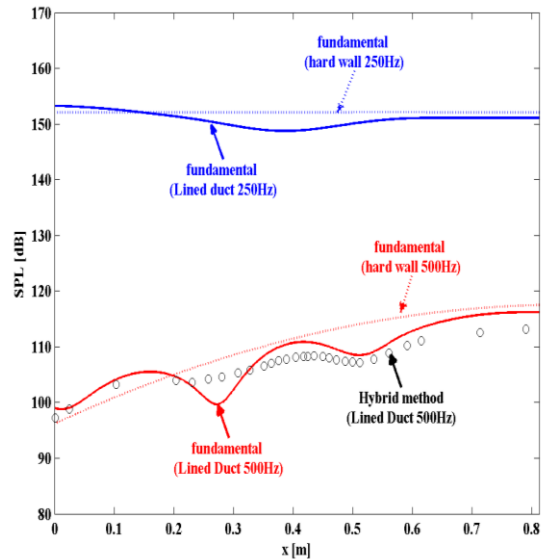


Fig 3. Comparison of SPL results from nonlinear simulation and hybrid method (line: nonlinear simulation, circle: hybrid method, dot line: analytic solution in hard wall duct).