

# 효율적인 음향 윈도우 설계를 위한 2차원 유한요소법 기반의 과도 해석

## 2-Dimensional FEM Based Transient Analysis for an Efficient Design of Acoustic Windows

김 유 창\*. 김 석 구\*. 윤 석 왕\*\*. 이 영 관\*\*\*.  
조 미 숙\*\*\*. 신 구 균\*\*\*\*. 구 자 춘†

Y. C. Kim, S. K. Kim, S. W. Yoon, Y. Lee, M. S. Cho, Ku-Kyun Shin and J. C. Koo

(2009년 3월 11일 접수 ; 2009년 6월 9일 심사완료)

**Key Words** : FEM(유한요소법), Acoustic Transient Analysis(음향 과도해석), Sonar(수중음파탐지기)

### ABSTRACT

The efficiency of active sonar that is used underwater observation equipment is important for obtain the information of topography and trace for the objects. Sound wave transmitted from sonar are distorted by acoustic window which is to protect sonar. Making various sonar dome is impossible for experiment, because consumed unnecessary time and expense. So, the purpose of this study is to simulate and analyze the acoustic window propagated sound wave from sonar for designing model reduced insertion loss. Simulation is performed by transient analysis and fluid-structure interaction analysis. As a result, this study will give a opportunity for efficient design of sonar dome without high cost and time consumption.

### 1. 서 론

수중 물체를 탐지하기 위하여 수상함은 선체 고정형 능동 소나(sonar, sound navigation ranging)를 탑재하여 운용한다. 수상함이 고속으로 운항하면서 능동 소나를 운용할 경우, 음향 센서를 보호하기 위하여 사용되는 소나돔 주위의 유동에 의한 유동 유 기 자체 소음과 선체로부터 소나돔에 전달되는 구조전달 자체소음 등으로 인해 능동소나의 탐지성은 현저히 저하될 수 있다. 원활한 수중 활동을 위해서는 소나돔 주위의 유체 유동 소음 및 구조 전

달 자체 소음 등을 차단하여야 하며, 소나에서 신호 발생 시 돔 내·외부의 음향장(acoustic field)이 형성되는 것을 확인함으로써 올바른 설계를 착안해 낼 수 있을 것이다. 단순한 물리적 실험만으로는 음향장이 형성되는 과정 및 모습을 육안으로 확인 할 수 없을 뿐만 아니라 비용 등 제작환경에도 많은 장애가 잇따르게 된다. 이에 컴퓨터상에 시뮬레이션의 필요성이 요구되었으며 올바른 시뮬레이션과 검증된 결과를 얻기 위해 적절한 해석기법을 요구하게 되었다. 이러한 문제의 접근 방법으로는 유한요소법(finite element method, 이하 FEM)<sup>(1)</sup>과 경계요소법(boundary element method)<sup>(2)</sup> 등을 통해 유체를 모델링하고 일반적인 접근 방법에 따라 구조물을 유한요소(finite Element)로 모델링한 후 적절히 결합하는 방법을 사용한다. 이 연구에서는 범용 FEM 구조 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였는데 구조해석에 있어 널리

† 교신저자; 정회원, 성균관대학교 기계공학과

E-mail : jckoo@skku.edu

Tel : (031)290-7454, Fax : (031)290-5849

\* 성균관대학교 기계공학과

\*\* 성균관대학교 물리학과

\*\*\* 성균관대학교 화학공학과

\*\*\*\*국방과학연구소

검증된 프로그램일 뿐만 아니라 최근 구조해석을 포함한 다양한 패키지와 음향해석의 필수적인 코드들이 지원되어 이 연구에 적합성이 부여되었다. 이 FEM 해석틀의 장점으로는 FEM 모델을 비교적 쉽게 생성할 수 있고 수정이 용이할 뿐만 아니라 각각의 요소에 대해 서로 다른 지배방정식이 적용되기에 서로 다른 물질로 구성된 물체도 해석이 용이하다는 이점이 있다.

이 연구에서는 이러한 이점들을 이용하여 소나 보호 윈도우의 음향 해석을 기존 다양한 기법들과 새로운 방법들을 병행하여 시도해가며 시뮬레이션을 수행하였으며 이에 구체적인 실험과정을 설명하고 시뮬레이션을 적용시켜가는 일련의 과정들과 문제 해결과정을 살펴본 후, 최종적으로 실험 모델에 대한 검증을 거쳐 실제 사용되는 일반적인 소나 모델을 추정하여 이를 확장 적용시켜 보았다.

## 2. 실험 모델에 대한 FEM해석

### 2.1 Modeling

실제 소나 모델의 적용에 앞서 Fig. 1과 같은 개념도를 가지고 간단한 형태의 사각 수조모델을 만들어 소나역할을 대신하는 transmitter에서 음압을 발생시킨 뒤 돔 역할을 하는 음향윈도우를 투과한 지점에서의 삽입 손실을 체크하는 실험을 진행 한 후 이를 시뮬레이션을 수행한 결과값과 비교하였다. 여기서 음향윈도우는 일반적으로 사용하는 GRP (glass-reinforced plastic) 재질의 윈도우와 이 연구와 병행하여 진행된 연구의 일부 중 고분자 재료 polyurethane(이하 PU)을 복합시켜 만든 윈도우를 이용하였다. 고분자 물질인 PU는 화학적 특성이 우수하여 음향 분야에 자주 사용될 뿐만 아니라, 특히 이 연구에서는 기존 GRP 재질과의 임피던스 매칭 효과를 통한 삽입 손실 감소<sup>(3)</sup>를 위해 적합한 재질로 사용되었다.

#### (1) Model의 가정

- 실험 수조를 둘러싸고 있는 사면은 반사율이 0으로 가정.
- 실험에 사용된 주파수범위는 25~40 kHz
- 소나에서 발생된 음압이 음향 윈도우까지 전달되는 과정을 한쪽 면을 통해 바라보며 2차원 형상

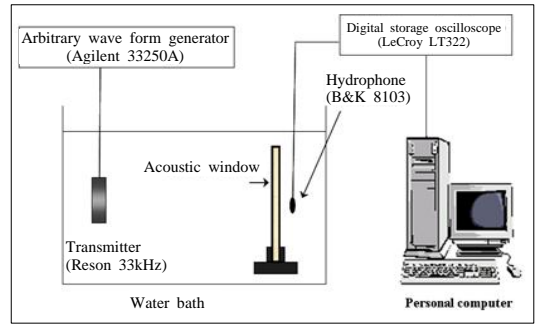


Fig. 1 A concept of the experiment model

으로 모델을 형성.

- 실험에 사용된 매질은 GRP로 제작된 단일 층 윈도우와 GRP에 PU를 복합시켜 만든 GRP+PU 재질 윈도우 두 가지의 경우를 구분하여 실험을 한 후 시뮬레이션을 수행.

#### (2) Modeling

음압 발생장치인 소스와 돔 역할의 윈도우는 고체로, 수조 속의 물은 유체로 지정하고 이러한 고체와 유체가 접합하는 부위에 FSI(fluid-structure interface) 경계조건을 적용시킴으로서 유체와 고체 간의 하중 및 변위전달이 상호 가능하게 하였다. FEM 모델에 있어 그 값의 신뢰성은 element의 생성 즉 meshing 작업에 크게 의존함에 이에 비중을 두고 연구를 진행하였다. 면의 element 생성에 삼각형구조의 mesh 형상은 굴곡이 많거나 복잡한 가장자리 형상, 접합부 등에서 유한요소 모델을 생성할 때 효과적이고 사각형 구조의 경우 mesh가 조직적으로 짜임새 있게 구성이 가능하여 해석결과도 보다 신뢰성이 높다고 통상적으로 알려져 있다. 이 연구에서는 모델이 간단하기에 보다 신뢰성 있는 결과를 기대할 수 있는 사각형 구조의 mesh를 사용하였다. Mesh의 크기를 결정함에 있어 가장 큰 요인은 전달되는 주파수의 크기와 윈도우 매질의 두께 되겠다. 실험에서 사용된 주파수는 25~40 kHz 범위로 기본적인 물리공식

$$\lambda = c/f \tag{1}$$

(c는 매질에서의 음속, 수중 음속 1402 m/s 사용) 식 (1)로부터 파장의 길이가 계산 될 수 있었다. 이에 한파장의 길이는 약 35 mm (f=40 kHz)에서 56

mm ( $f=25$  kHz)에 이르는 것을 확인 할 수 있었다. 이를 기준으로 하여 최단파장에 따른 element 수와 매질 두께, 접합부 표현 등을 고려하여 1 mm 사이의 mesh로 유한요소 모델을 형성하였다.

### (3) Simulation

앞에서 고려된 mesh 크기를 가지고 해당 주파수

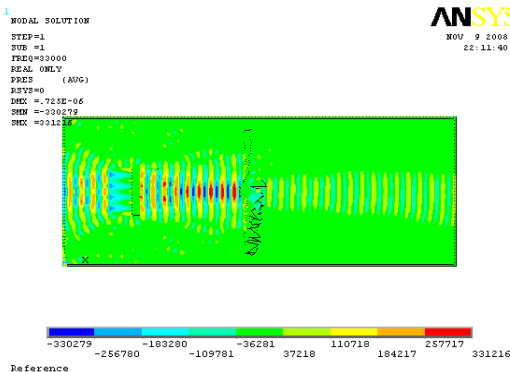


Fig. 2 A contour by steady-state analysis

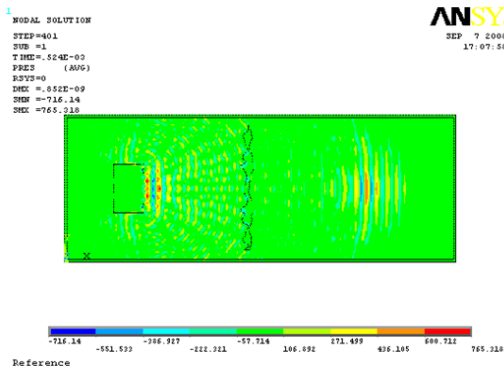


Fig. 3 A contour by transient analysis

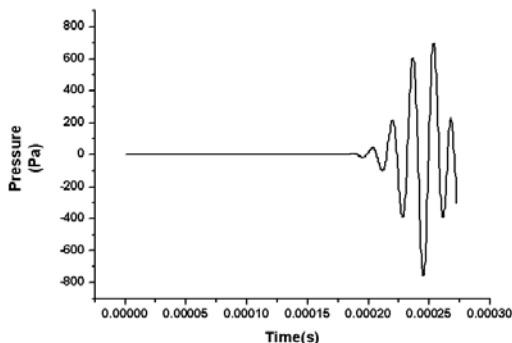


Fig. 4 A time-history graph by transient analysis

(25~40 kHz)에 따라 각각 시뮬레이션을 진행하였다. 이때, 유체-구조 상호간 연성 해석을 위해 FSI (fluid structure interface) 경계조건을 이용하여 해석을 시도하였다<sup>(3)</sup>. 시뮬레이션은 정상상태를 확인하기 위한 일반적인 하모닉 해석과 시간에 따른 이력 해석을 위한 과도상태의 해석 두 가지 경우를 수행하였다. 하모닉 해석을 수행한 결과 형성된 음향장에 대한 contour 그림은 Fig. 2와 같았고 단일 파장을 발생시켰을 때 음향 윈도우 뒤쪽 한 지점에서의 과도해석 결과 음향장 형성은 Fig. 3과 같았으며 이때 확인된 음압에 대한 그래프는 Fig. 4와 같았다. 이를 통해 음압이 해당 지점까지 도달하는 시간을 알 수 있으며 매질을 변화시켜 가면서 시뮬레이션 할 때 각각의 음압을 체크하여 손실을 비교할 수 있었고 이 값을 가지고 실험값과 비교를 하였다.

## 2.2 시뮬레이션 적용기법

### (1) Fluid-Structure Interface 경계조건

앞에서 언급되었던 유체-구조 상호 해석은 유체와 고체간의 연성해석이 이루어지도록 하기위하여 제안되었다. 상호간 신호전달은 효과적으로 표현하기 위하여 유체를 고체와 같이 구조가 있는 상태로 정의하여, 즉 반(反) 유체 상태의 옵션을 설정하여 일반 유체와 고체사이에 삽입 후 결과를 확인한 결과 변위와 음압이 정상적으로 전달되는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 FSI 경계 조건의 삽입이 서로 상태가 다른 두 영역간의 연성이 가능하도록 하는 ANSYS 해석 툴의 multi physics 해석 방법이 되겠다.

### (2) Mesh와 주파수

FEM 모델에서 파장의 전달 또는 음압의 전달을 표현하는 데는 주파수, 매질의 두께와 접합부에 따른 mesh 크기의 영향이 큰 변수로 작용한다. 이 연구에 사용된 주파수는 25 ~ 40 kHz 범위로 물속에서의 파장 길이로 볼 때 35~56 mm 범위에 있다는 것을 앞 절에서 확인하였다. 이에 첫 번째 시뮬레이션에서 초기 파장만 고려하여 최단파장의 1/7이 되는 5 mm 사이즈의 mesh를 형성하여 유한요소 모델을 만들었을 때 단일 층 윈도우의 경우 Fig. 5와 같이 평균오차 5% 이내로 거의 일치하였으나, 복합층의 경우 Fig. 6과 같이 상이한 결과가 도출되었다. 이는 두 매질 간에 접합부에 의한 전달 효과를

충분히 표현하지 못한 결과로 유추하여, 보다 작은 mesh 크기 2 mm, 1 mm를 가지고 두 번째, 세 번째 시뮬레이션을 수행한 결과 각각 Figs. 7, 8과 같이 실험값에 점점 일치해가는 경향을 보이는 것을 확인하였다. 그 이하의 mesh size에서는 element수의 급격한 증가로 인한 시스템의 한계로 시뮬레이션에 무리가 있었으나 앞선 결과를 통해 추론해 볼 때, 오차가 더욱 줄어들 것이라고 판단된다.

### 2.3 시뮬레이션 결과 비교

실제 실험을 통해 transmitter로부터 수신 받은 시간영역 신호를 디지털 오실로스코프를 이용하여 FFT를 수행한 후 다음과 같은 식을 이용하여 삽입 손실 값을 구하였다.

$$IL = -20 \log_{10} \frac{|P_{tr}|}{|P_{ref}|} \quad (2)$$

$|P_{tr}|$ 은 윈도우 시편 통과후의 결과 값이 되겠고  $|P_{ref}|$ 의 경우 통과 전 기준 값이 되겠다. Figs. 5~8은 이에 따른 결과 그래프들이 되겠다.

### 3. 확장된 Sonar Model의 적용

앞에서의 실험을 통한 검증이 완료된 후 실제 소나 모델을 추정하여 이를 확장 적용 시켰다. 형상은 해수면과 평행하게 자른 2차원 단면을 모델링 하였으며 비교적 단순한 형태이나 굴곡이 많아 mesh 형상과 크기 설정에 보다 신중하였다. Fig. 9가 소나 시스템의 일반적인 형상이 되겠으며 내부 원이 소나가 되겠고 최외각 경계선은 무한 유체 요소 즉 흡음률이 100%인 반사가 없는 영역이 되며 내부 GRP+PU라 표시된 frame 영역이 소나 돔 (sonar dome)이 되고 그 외의 부분은 물의 영역이

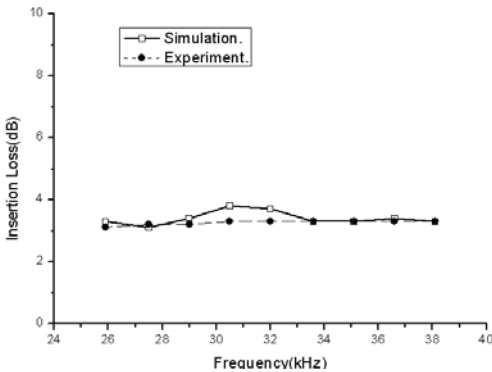


Fig. 5 A comparison graph at single layer (mesh size 5 mm)

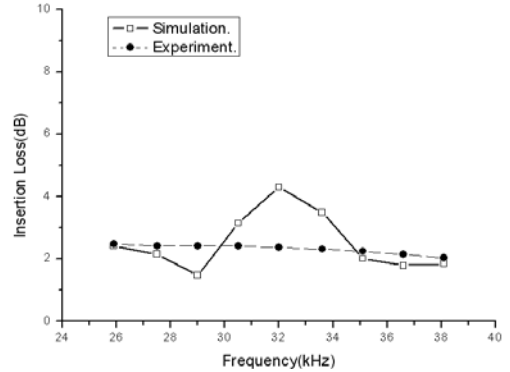


Fig. 7 A comparison graph at double layers (mesh size 2 mm)

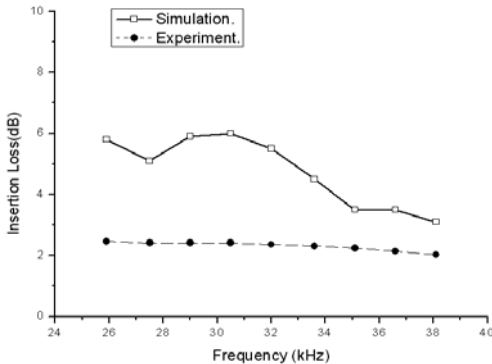


Fig. 6 A comparison graph at double layers (mesh size 5 mm)

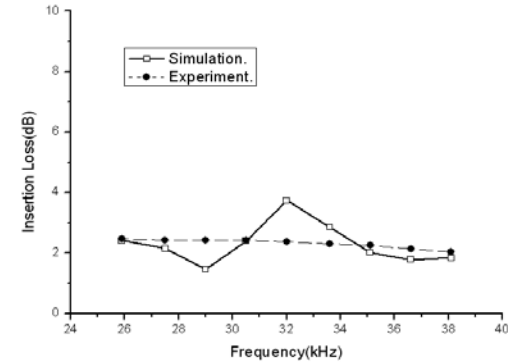


Fig. 8 A comparison graph at double layers (mesh size 1 mm)

되겠다.

### 3.1 Modeling

실제 소나에서 발생하는 주파수 범위에서 앞의 실험과 마찬가지로 관심주파수와 윈도우의 두께와 접합부를 고려한 적절한 mesh 크기를 형성하였다. 비교적 mesh의 영향이 작은 유체부분은 주파수에 따라 1/10크기의 mesh를 생성하였고 돔 역할의 고체 윈도우 부분은 그 두께를 우선 고려하여 mesh 크기를 형성하게 되었다. 그 외 경계조건 및 재질에 대한 물성치 정보 등은 앞선 실험에서 사용했던 결과와 동일하게 사용하였다.

### 3.2 결과해석

Simulation 수행결과 정상상태에서의 음향장 해석 contour는 Fig. 10에서 보는 바와 같았으며 소나에서 파장을 발생시켜 0.8 ms 시간이 경과한 후 한 지점에서의 시간 이력을 고찰한 결과, 즉 과도상태에서의

해석결과에 대한 contour 그림은 Fig. 11과 같았다. 반사파의 표현과 음압이 집중되는 현상을 통하여 음향특성을 확인할 수 있게 되겠으며 이때 소나 돔의 일그러짐 현상은 상대적인 변위를 과장되게 표현하는 프로그램 특성에 기인한 것이 되겠다. 추가로 소

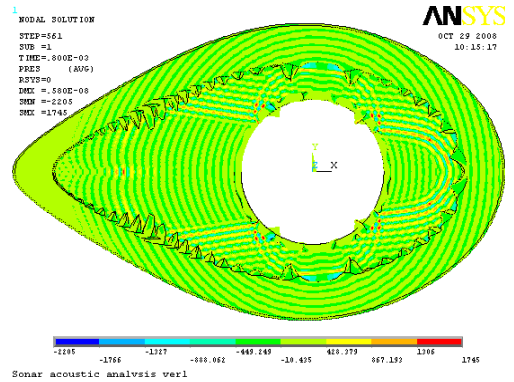


Fig. 11 A result of transient analysis

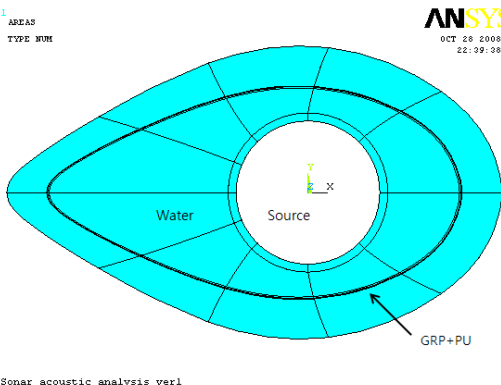


Fig. 9 The real sonar shape

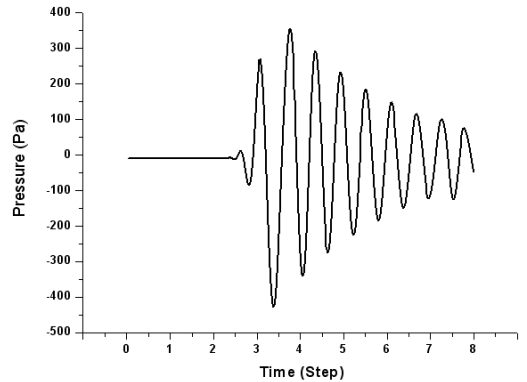


Fig. 12 A reference signal graph

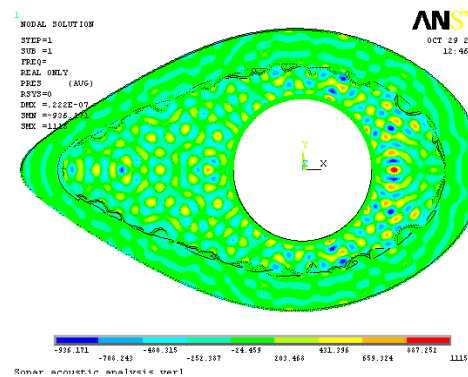


Fig. 10 A result of steady-state analysis

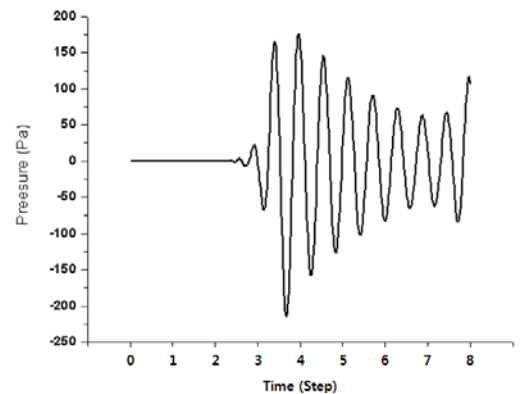


Fig. 13 A signal graph through the window

나 돔 투과후의 삽입손실을 알아보기 위해 소나 돔이 존재할 경우와 와 존재하지 않을 경우의 신호를 동일한 위치에서 확인하였으며 그 결과 Figs. 12, 13 과 같이 확인 할 수 있었다. 삽입 손실의 크기를 계산하게 되면 약 5 dB 정도의 손실이 발생하는 것을 확인할 수 있게 되겠는데 이는 실제 소나 돔의 크기와 두께를 고려한 결과가 되겠다.

#### 4. 결 론

이 연구를 통하여 컴퓨터를 이용한 유한요소 모델 해석을 통하여 수중 음향 장치 소나의 보호를 위한 소나 돔의 설계의 기반이 되는 시뮬레이션 환경을 구성하고 이를 통한 음향장이 형성 되는 모습을 살펴보았다. 음향 해석 및 유체-구조 상호간 연성해석에 대한 패키지가 다소 부족하였던 프로그램의 한계점을 극복해나가는 과정에서 FSI 경계조건과 meshing 방법, 과도 해석 등 여러 기법들을 사용하여 시뮬레이션이 수행되는 것을 확인하였다. 이로써 실제 고비용이 소모되는 실험환경의 구축이 없이도 소나 돔의 재질 및 수중 환경, 발생 주파수 등의 구체적인 정보만으로도 시뮬레이션을 통하여 보다 효율적인 음향 윈도우 설계가 가능해 질 수 있도록 기대해 볼 수 있게 되었다.

#### 후 기

이 연구는 국방과학연구소의 지원으로 이루어졌다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Everstine, G. C, 1997, "Finite Element Formulations of Structural Acoustic Problems," Computers & Structure, Vol. 65, No. 3, pp. 307~321.
- (2) Everstine, G. C. and Henderson, F. M., 1990, "Coupled Finite Element/Boundary Element Approach for Fluid-structure Interaction," J.Acoust, Soc. Am., Vol. 87, No. 5, pp. 1938~1947.
- (3) Mikeska, E. E. and Behrens, J. A., 1976, "Evaluation of Transducer Window Materials," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 59, No. 6, pp. 1294~1298.
- (4) Hong, J. S. and Shin, K. K, 1997, "Applications of General-purpose Packages for Fluid-structure Interaction Problems," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 7, No. 4, pp. 571~578.
- (5) Jung, W. J., Han, S. J., Kim, W. H., Shin, K. K., Jeon, J. J., 2006, "A Study on the Measurement and Analysis Method for the Acoustic Transmission Loss of the Material for the Acoustic Window of Sonar Dome," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 729~738.
- (6) Ansys User's Manual, Release 10, ANSYS Inc., 2006.