

고체음원의 출력 예측방법에 대한 연구

°김상렬*, 김재승**, 김현실**, 강현주**

A Method to determine structureborne noise levels from machineries

°Sang-Ryul Kim, Jae-Seung Kim, Hyun-Sil Kim, and Hyun-Ju Kang

Abstract

It is well known that Statistical Energy Analysis(SEA) is one of very attractive analytical methods to solve shipboard noise problems. With reasonable successes, many applications of SEA to shipboard noise prediction have been reported. However when one wishes to obtain theoretical predictions by using SEA in practical systems, he will find difficulty in modeling of source systems, that is, foundations where to place main engine, generator, compressor, and so on. Also, he will find that it is hard to determine the amount of power flow from machinery to structures.

In this paper, SEA of a simple foundation model was carried out using the estimated amount of power flow from source; the estimated mobility method. The comparison between the estimated and measured results is presented. That comparison shows a method to get structure-borne noise power from the combination of machinery and foundation. This prediction method gave a good result for a air-compressor mounted on a model foundation. The method is expected to give a reasonable power output in practical problems

1. 서 론

대부분의 대형구조물에는 자체 구동력을 가진 기계류가 내부에 설치되어 있으며 해당 기계류의 구동은 소음/진동을 유발한다. 특히 가청주파수내의 진동인 고체음(Structure borne Noise)은 장비의 마운팅 부위에서 받침대를 통하여 진동에너지의 형태로 구조물에 유입되는데 장비가 설치된 공간 혹은 인접 공간에서 문제시 되는 공기음(Air borne Noise)과는 달리 기계류로부터 멀리 떨어진 지점까지 전달되어 구조물 전체에 소음을 발생시킨다.

고체음에 의한 구조물내의 소음을 줄이기 위해

서는 고체음의 발생에 관한 메커니즘의 이해와 함께 구조물에 유입된 고체음의 거동을 살펴보아야 한다. 이를 위하여 구조해석시 일반적으로 사용하고 있는 유한요소법이나 경계요소법등을 고려해 볼 수 있으나 이들 방법은 구조물의 저차진동이 대상인 구조진동 해석에는 유효하나 고체음의 경우와 같은 고차진동모드해석에는 실용성이 떨어지게 된다.

통계적에너지해석법(Statistical Energy Analysis: SEA)[1]은 고차진동모드의 해석에 적합하도록 고안된 해석기법으로서 고체음 전달의 해석에 매우 유용한 것으로 알려져 있다. 본 방법은 1950년대에 처음 소개된 이래 고체음 해석에 활발히 적용되어 현재에는 선박, 기계, 자동차, 철도차량, 항공기 분야는 물론 건축물의 소음 해석에도 응용사례가 발표되고 있다.[2]

* 한국기계연구원 구조시스템연구부

** 정희원, 한국기계연구원 구조시스템연구부

한편, SEA를 실제 문제에 적용하기 위해서는 외부로부터의 기진력에 해당하는 에너지 유입을 정의할 필요가 있다. 공기음의 경우, 이는 소음원의 음향출력을 나타내며 대부분의 경우 소음원 자체의 특성만으로 주어지며 계측방법이 국제적으로 표준화되어 있다.[3]

고체음 출력은 일반적으로 장비마운트 지점에서의 자유진동레벨이 사용되고 있으나 이의 계측에 관하여는 현재까지 국제적 표준화가 이루어지지 못하고 있으며 아직까지도 고체음출력의 정량적 표현 기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는 상태이다.[4] 이와같은 이유는 고체음 출력이 장비 자체뿐 아니라 설치환경에 의해 영향을 받고 있기 때문이다. 예를 들어, 강성이 무한대인 지지구조를 사용하고 있다면 장비와 구조물의 연결점에서는 변위가 없으므로 고체음에너지는 구조물내에 전혀 유입되지 않아 구조물에 설치되는 모든 장비의 고체음 출력은 0이 되어 이 경우 고체음 출력은 전적으로 설치환경에 의해 결정된다. 그러나, 실제 구조물에서 이와같은 성질을 갖는 지지구조물은 구현할 수 없으므로 장비 설치부위의 구조물은 장비의 영향으로 진동을 하게 되며, 이 진동이 곧 구조를 타고 구조물내에 전달되어 구조물 전체에 고체음을 발생시키게 된다. 따라서, 장비의 고체음출력은 장비 자체만의 특성으로 결정될 수 없으며 소음원 장비는 물론 구조물 자체의 강성, 특히 지지구조 부근의 강성에 의해 결정됨을 짐작할 수 있다. 즉, 고체음출력은 공기음출력과는 달리 장비의 자유진동레벨 및 지지점에서의 모빌리티와 지지구조의 모빌리티등 여러 가지 인자에 의해 영향을 받게 된다.

본 논문에서는 구조물내로 유입되는 고체음원의 출력을 예측하는 방법에 있어서 지지구조의 모빌리티추정법을 제시하였다. 또한 단순모델에 대한 실험을 통하여 SEA의 적용시 실질적인 문제로 대두되는 고체음 출력의 적용방법과 그 계산결과를 비교·검토하여 제시된 방법의 유용성 및 타당성을 검증하고자 한다.

2. 모빌리티 추정

2.1 개요

구조물의 모빌리티(mobility)는 힘(F)과 속도(v)의 비로서 다음과 같이 정의된다. 이때, 힘과 속도 양자는 모두 크기와 위상을 갖는 복소수 형태로

주어져야 한다. 마찬가지로 모멘트 모빌리티는 모멘트(W)와 회전속도(w)와의 비로 정의된다.

$$M = \frac{v}{F}, M_{\phi} = \frac{w}{W} \quad (2.1)$$

특히, 외력의 작용점과 구조물의 반응점이 동일하고 F 가 작용하는 면적이 파장과 비교하여 작으며 또한 v 를 F 가 작용하는 면적에 대하여 평균값을 취할 경우 가진점 모빌리티라고 부른다.

무한보와 무한평판의 가진점 모빌리티는 특성 모빌리티라고도 불리우며 비교적 용이하게 계산할 수 있다. 이들의 계산과정은 여러 문헌에 소개되어 있다.[5] 그러나, 유한구조물의 경우에는 2.2절에 나타나 있듯이 가진점과 응답점의 위치에 따라 큰 변동을 보이며 주파수에 따라서도 공진주파수의 영향으로 인하여 복잡한 형태로 표시된다. 더구나, 공진주파수의 해석 자체도 유한요소법등을 이용하여야 가능하다.

유한요소법은 저차진동형에 대하여 비교적 용이하게 공진주파수의 계산에 사용될 수 있으나, 고주파수대에서는 계산시간이 기하급수적으로 증가하여 실질적인 결과를 얻을 수 없다. 그러나, 고주파수로 갈수록 공진점이 조밀하게 되어 개개 진동형의 특성보다는 평균적 개념에서의 공진특성에 지배된다는 사실을 이용하여 모드밀도, 평균제곱속도등 평균개념을 도입할 수 있는데 이와같이 모드밀도가 조밀한 고주파수대에 대하여 구한 평균개념에서의 모빌리티는 무한구조물의 그것과 동일함이 알려져 있다.[6] 평균개념은 고체음의 해석에도 그대로 이용되어 구조물의 어느 특정 부위에서 진동을 다루기보다는 SEA해석에서와 같이 세부시스템으로 정의된 부분구조물 전체의 평균 진동속도로 대표하는 등 매우 랜덤한 현상을 갖는 고체음의 표시에 매우 유용하게 사용되고 있다.

2.2 모빌리티 실험

모빌리티 추정을 위한 실험은 Fig. 2.1에 보인 지지구조의 단순모델 시편에 대하여 수행하였다. 실험모델의 형태는 가진된 source plate와 응답계측이 이루어진 body plate등 plate 구조로 이루어졌다. 또한, 모두 2개의 모델을 제작하여 실험을 수행하였으며 이들의 구분은 고체음 전달과 밀접한 관련이 예상되는 source plate의 두께에 따라 이루어졌다. 즉, source plate의 두께를 2mm와 5mm로 하는 2가지 종류의 모델을 선택하였으며,

이후 두 model은 각각 model 1, model 2라고 표시하였다.

2.2.1 계측 결과 및 모빌리티 추정

모빌리티는 가진기와 임피던스헤드를 이용하여 세 지점에서 계측되었고 Fig. 2.2에 그 위치를 표시하였다. Fig. 2.2은 Fig. 2.1의 실험모델을 상부에서 본 형태로 계측위치 pt.1은 두 이웃하는 면이 다른 plate에 연결되어있지 않은 free edge에 위치하며 pt.2는 그 대각선쪽의 corner이다. pt.3는 source plate의 중앙에 위치한다. 이후 pt.1 ,pt.2 ,pt.3을 각각 free edge, corner, center라 구분하였다.

Fig. 2.3는 model 1의 모빌리티 측정결과를 나타낸다. 그림에서 세 측정지점에서의 모빌리티는 각각 그 경향이 다름을 보이고 있다. 특히 저주파수대에서 큰 차이를 보이며 대체적으로 free edge에서 가장 큰 모빌리티를 corner에서 가장 작은 값을 갖고 있다. 동시에 주파수에 따른 모빌리티의 크기는 주파수가 증가함에 따라 점차 증가하다가 특정주파수에서 피크를 보이고 1000Hz이상에서는 측정위치에 관계없이 많은 피크들과 함께 일정한 평균레벨을 보인다. 그 특정주파수는 측정위치에 따라 서로 다르며 그 피크를 발생하는 특정주파수의 갯수 역시 측정위치에 따라 다르나 공통적인 특징은 95Hz 부근에서 첫 피크가 발생하고 있다는 점이다. 이는 모델의 공진 주파수와 연관되어 설명할 수 있다. 즉, 본 모델에서 주위 경계조건을 고려한 source plate의 첫 고유진동수는 약 95Hz로서 본 피크는 여기에 속하는 것이다.

model 2에 대한 모빌리티 측정결과에서도 같은 결과를 얻었는데 source plate의 첫 국부 고유진동수가 150Hz 부근에서 더욱 뚜렷이 나타나고 있음을 Fig. 2.4에서 알 수 있다.

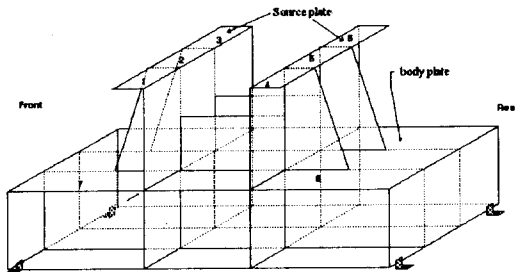


Fig. 2.1 Experimental model of a foundation.

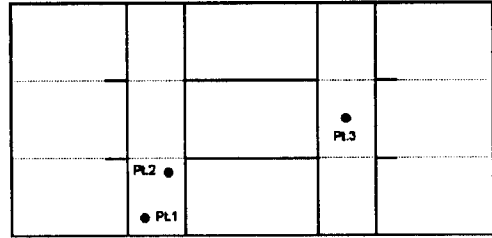


Fig. 2.2 Positions for mobility measurement.

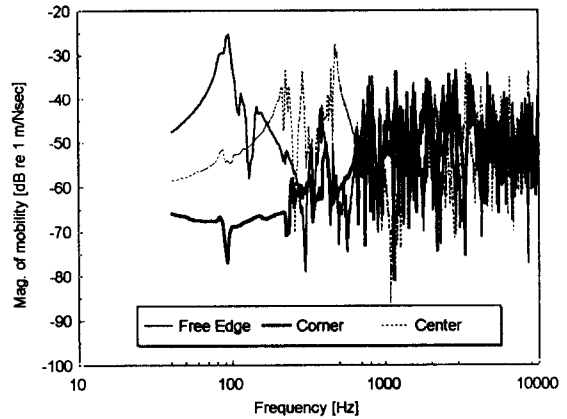


Fig. 2.3 Measured mobility of model 1.

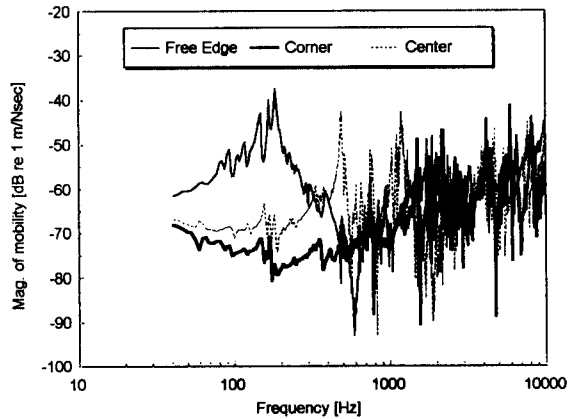


Fig. 2.4 Measured mobility of model 2.

Fig. 2.5에는 각 측정위치에서 model 1과 model 2를 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 각 측정위치에서의 모빌리티는 model 1과 model 2의 경우 수많은 피크들로 구성되어 있으나 뚜렷한 차

이점은 model 1의 경우가 model 2의 경우에 비해 더 큰 모빌리티를 가진다. 이로부터 가진점(측정지점)에서의 판의 두께에 따라 그 점에서의 모빌리티가 결정되며 또한 얇은 판일수록 모빌리티는 증가함을 유추할 수 있다.

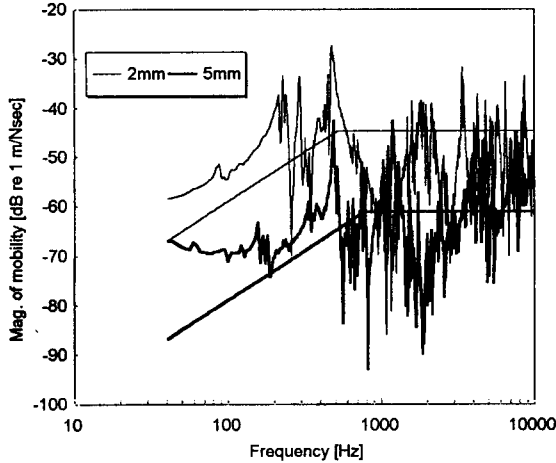


Fig. 2.5 Mobilities at position 'center'.

한편, 그림에서 직선으로 표시한 것은 저주파수에서는 가진점이 존재하는 국부부재인 가진평판의 강성으로부터 고주파수에 대하여는 2.1절에서 언급된 반무한평판의 모빌리티를 사용하여 약식계산을 수행한 결과를 나타낸다. 강성의 계산 수행시에는 다음절에서 기술한 바와 같이 유한요소해석 프로그램 ANSYS를 이용하여 구하였다. 그림으로부터 모빌리티는 이와같은 약식계산에 의하여 초기 추정식으로 실용적 견지에서 사용할 수 있음을 생각할 수 있다.

2.2.2 이론적 계산결과

모빌리티의 이론적 계산은 앞의 실험모델에 대하여 ANSYS를 이용하여 수치계산을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 2.7에 보였다. 그림으로부터 이론적 계산결과와 실험결과가 주파수에 따른 변화가 비교적 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 개개의 피크값의 크기는 큰 차이를 보이고 있는 데, 이와같은 이유는 댐핑성분의 부정확성에서 기인한 것으로 추정된다.

이와같은 이론적 해석은 유한요소 해석에 소요되는 계산시간과 메모리의 제약으로 인하여 일반적으로 저주파수에 대하여만 실용성이 있다. 본 경

우에 있어서도 이러한 제약조건 때문에 해석의 상한 주파수를 300Hz로 제한하였으며 이때 공진모드의 수는 모두 80개를 사용하였다. 본 해석은 IIP WS C110기종을 사용하였으며 해석에 소요된 계산시간은 약 10시간 이상이었다. 실제 구조물에 대하여 상한 가칭주파수까지 모빌리티를 계산하기란 실용적 견지에서 거의 불가능 할 뿐 아니라 유한요소의 분할도 매우 작게 하여야 한다는 제약이 뒤따른다. 따라서, 엄밀해석에 의하기 보다는 모빌리티의 특성을 이용해 앞절에서 언급된 바와 같이 비교적 간단한 계산식에 의해 모빌리티를 구하는 것이 실용적 견지에서 유리한 경우가 많다.

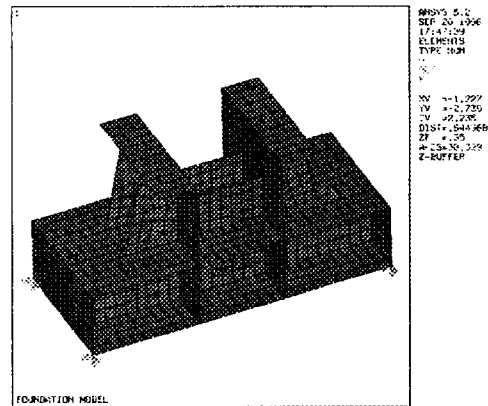


Fig. 2.6 FEM model of the foundation.

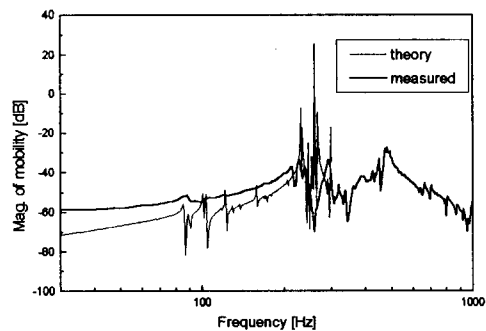


Fig. 2.7 FEM and measured mobility.
(Free edge, Model 1).

3. 고체음 계측 및 SEA 해석

3.1 고체음 계측 실험장치

앞에서 기술된 모델리티의 약식계산의 유용성을 실제 임의의 source에서 확인하기 위하여 공기압축기를 source로 사용하여 모델의 진동레벨을 계측하는 실험을 수행하였다.

공기압축기의 체결형상은 전방(front)에 하나, 후방(rear)에 두 개의 체결장치가 있으며 이 체결장치를 통해 모델의 source plate위에 고정되도록 하였다(Fig. 3.1~2참조).

실험은 체결위치가 Fig. 3.1에 있는 것과 같이 source plate에 연결된 wall plate 가까이 체결(mounting near the wall)한 경우와 Fig. 3.2에 있는 것과 같이 가능한 모델의 중앙에서 떨어진 곳에 공기압축기의 체결위치를 정한(mounting at the free edge) 경우로 나누어 수행되었다. Fig. 3.1~2에서 검은 점은 체결위치를 나타낸다. 계측은 Fig. 2.1에 보인 각 측정 plate에서 임의의 3지점 진동레벨을 가속도계를 사용하여 측정하였고 이 3지점의 진동레벨평균을 그 plate에서의 평균진동레벨로 취하여 비교하였다.

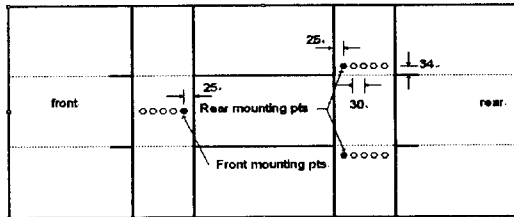


Fig. 3.1 Position of the mountings.
(Mounting near the wall)

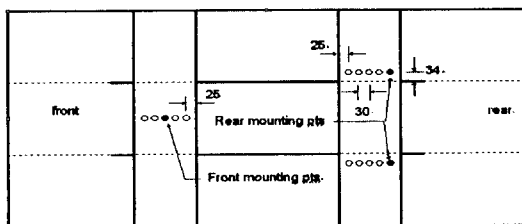


Fig. 3.2 Position of the mountings
(Mounting at the free edge).

한편, 실험시에 공기압축기는 일정한 조건하에 존재하도록 하기 위해 공기압축기의 내부압력이

일정하도록 공기유출밸브를 열어두어 공기압축기의 내부압력이 같도록 하였다.

3.2 SEA 해석

source plate가 5mm인 model 2에 대하여 킵프 레서가 작동할 때 지지구조 모델의 진동레벨을 계측결과와 SEA 프로그램을 사용한 해석결과의 비교를 수행하였다.

SEA 모델은 Fig. 2.6과 동일하고 평판요소는 모두 54개로 구성하였으며 해석시 면내진동 모드를 고려하였다. 지지구조에 입력되는 고체음 출력은 공기압축기에 지지대가 설치되어 있는 점에서의 가속도 계측과 2.2에서 언급된 바 있는 단순계산식을 이용하여 구한 모델리티를 이용하였다.

계측과 해석결과를 Fig. 3.3부터 Fig. 3.5에 비교하였으며 그림에서 평판의 번호는 Fig. 2.2에 보인 것과 동일하다. 그림에서 보면 저주파수에서는 큰차이를 보이나 고주파수에서는 그차이가 크지 않음을 알 수 있다. 이와같은 경향은 SEA의 해석결과와 고주파수대에서 잘 맞는다는 일반적인 성질에서 기인하고 있는 것으로 생각된다. 본 비교로부터 본 연구에서 제시한 모델리티 추정법을 이용한 고체음의 출력 추정방법은 실용적으로 사용될 수 있을 것으로 믿어진다.

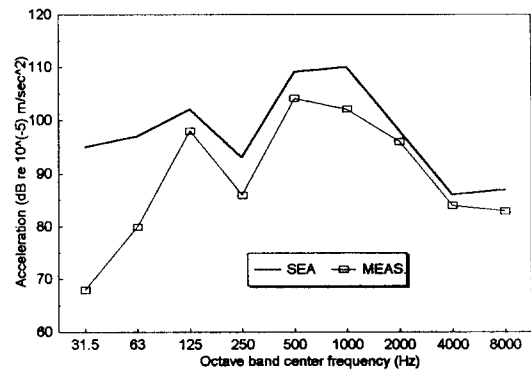


Fig. 3.3 Acceleration of body plate #7 due to compressor. (Mounted near vertical plates)

참고문헌

- [1] *Statistical Energy Analysis of Dynamical Systems : Theory and Applications*, R.H. Lyon, The M.I.T. Press, 1975.
- [2] *Statistical Energy Analysis*, K.H. Hsu, D.J. Nefske and A. Akay, NCA-Vol.3, ASME, 1987.
- [3] "Acoustics - determination of sound power level of noise sources - guidelines for the use of basic standards and for the preparation of noise test codes", ISO 3740, 1980.
- [4] R.A. Fulford and B.M. Gibbs, "Towards a Generalization of the Structural Characteristics of Machines as Structure-Borne Sound Sources", Proc. of 4th International Congress on Sound and Vibration, St. Petersburg, June, 1996.
- [5] "대형구조시스템 최적화 및 성능평가기술 개발 - 세부과제 II : 고체음 차단을 위한 구조최적화 기술 개발", UCN040-223-M, 한국기계연구원, 1995. 4.
- [6] *Structure-Borne Sound*, L. Cremer, M. Heckl, and E.E. Ungar, Springer-Verlag, 1988.
- [7] "Structure-Borne Sound Transmission from Machinery to Foundation", B. Peterson and J. Plunt, Report 80-19, Dept. of Building Acoustics, Chalmers Univ. of Tech., Sweden, Oct., 1980.
- [8] J. Tratch Jr., "Vibration Transmission through Machinery Foundation and Ship Bottom Structure", Mech. Engr. Thesis, Dept. of Mech. Engineering, M.I.T., 1985.

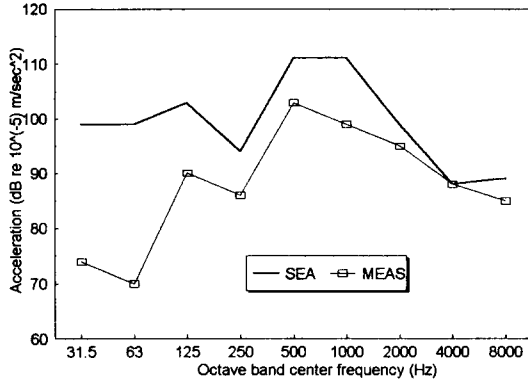


Fig. 3.4 Acceleration of body plate #8 due to compressor. (Mounted near vertical plates)

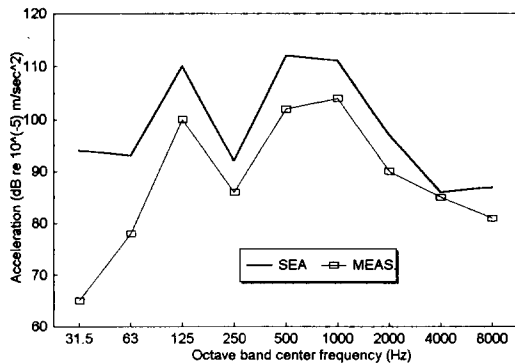


Fig. 3.5 Acceleration of body plate #7 due to compressor. (Mounted near free edge)

4. 결 언

SEA 등 고체음 해석시 문제로 대두되는 장비의 고체음 출력을 규명하기 위하여 지지구조의 모빌리티 해석과 관련된 연구를 수행하였으며 지지구조의 모델실험을 통하여 모빌리티 예측을 위한 단순계산식을 제안하였다. 제안된 모빌리티의 추정식으로부터 모델실험에 사용된 지지구조에 대하여 예측된 고체음 출력을 이용하여 고체음의 예측결과 대체로 만족스러운 결과를 얻어 그 유용성을 확인할 수 있었다.