

천공 다층 복합 바닥재의 모델링 및 성능평가

Modeling and Performance Evaluation of Multi-layer Composite Floor Plates with Holes

유홍희*·이창근**·유홍걸**·주영준***·조정은***

Hong Hee Yoo, Chang-Geun Lee, Hong-Geol Yoo, Young-Jun Joo, Jung-Eun Cho

Key Words : Modeling (모델링), Performance Evaluation (성능평가), Composite (복합), Floor Plate (바닥재), Hole (천공), Thermal Deformation (열변형), Impact Analysis (충격 해석), Noise (소음), Performance Index (성능 지수)

ABSTRACT

Pleasantness or quietness becomes one of the most important factors for residential designs recently. Especially for apartments, the noise generated by falling objects becomes a sensitive issue these days. To overcome the problem of the impact noise in apartments, the floor design has been changed. To reduce the transmissibility of the noise, composite floor structures are devised and implemented for the construction of apartments. In this paper, the noise reduction performance of a composite floor plate with holes is analyzed. Computational modelings for the structures are developed and its performance is evaluated by using the finite element method. The results show that the noise can be well reduced with the multi-layer composite floor plates with holes.

1. 서론

최근 주거 환경의 쾌적성은 주택이 지녀야 하는 가장 중요한 특성으로 부각되고 있다. 그 중에서도 환경소음에 대한 고려는 주택의 설계에서 가장 중요한 요소중 하나로 부각되어왔으며 특히 아파트와 같이 여러 세대가 서로 인접하여 주거하는 공동 주택에서는 주거 공간 간에 소음의 차단이 매우 중요한 설계요건이 된다.

주거공간 간 소음의 전달과 관련하여 가장 많은 문제들을 일으킬 수 있는 부분은 바닥 부분이다. 주거공간에서 거주자의 이동에 따른 소음과 물건 낙하로 인한 소음, 그리고 미성년자들이 뛰어노는 일에 의해서 발생하는 소음 등 대부분의 소음은 바닥을 통해 하단부로 전달되며 그 정도가 심할 경우는 민원까지 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 최근에 다양한 바닥재들이 여러 가지 형태로 개발되고 있다. 그중 가장 대표적인 바닥재로는 합성 플라스틱과 같은 인공 재료를 사용하는 바닥재로부터 나무와 같은 천연재료까지 여러가지 소재들이 사용되고 있다. 이들은 각각 가격의 저렴성과 자연친화성과 같은 장점을 갖고 있어 각각 그 용도와 사용자의 필요에 맞게 사용되고 있다. 이러한 단일재료들의 사용은 그러나 복합적인 필요성을 만족시키지 못하므로 최근에는 이들을 복합한 형태의 소재들이 사용되기 시작하고 있다. 예를들어 플라스틱과 나무를 조합하여 제작한 복합 소재가 그러한 대표적 예제이다.

본 논문에서는 최근 이와 같이 등장하고 있는 복합층을 갖는 바닥재의 주요설계 특성들을 분석하기 위한 방법론을 제시하고자 한다. 특별히 충격에 의해 발생하는 소음특성에 그 연구의 초점을 맞추었으며 이와 더불어 열변형 특성도 함께 분석하였다. 열변형 특성에 대한 분석은 바닥재가 설치되는 주거공간이 계절에 따라 냉난방 등의 온도 변화로 열변형을 일으키게 되어 이 특성이 실제 바닥재의 시공 시 중요한 요소가 되기 때문이다. 따라서 바닥재의 설계 시 충격에 의해 발생하는 소음 특성은 물론 열변형 특성을 동시에 고려하여 두 특성이 설계자의 요구조건을 동시에 만족시킬 수 있도록 설계가 되어야 하는 것이다. 이렇게 다분야의 원리를 동시에 고려하는 설계방법론은⁽¹⁾ 최근들어 제품설계의 고급화와 발맞추어 세계적인 추세로 자리를 잡아가고 있다.

설계에 있어서 무엇을 설계변수들로 정하는가 하는 점은 매우 중요한 요소이다. 복합구조물로 구성된 바닥재 개발 관련하여 국내 산업체에서는 구성요소들의 재료의 변화와 그 기하학적 제원의 변화까지 여러 가지 설계 변수를 선정하고 그에 의한 설계 특성의 변화에 대한 연구를 진행하여 왔다. 특별히 최근에는 국내 산업체에 의해 다층 구성요소 중 한층에 천공을 집어넣는 방법을 제안하고 이 방법에 대한 특허를 국내외에 출원중에 있다. 본 연구에서는 천공과 관련된 제원 즉 천공 크기 및 간격의 변화가 복합 바닥재의 열변형 및 충격소음 특성에 미치는 영향에 관해 분석하고 그 결과를 제시하였다. 즉 가장 적절한 천공 크기와 간격을 찾아내기 위한 모델링 및 해석 방법론을 제시하고 이를 통해서 얻어진 결과를 설계결과로 제시하는데 연구의 목적을 두고 있다. 본 연구의 결과는 또한 타당성을 검증을 위하여 실험결과와 비교하여 기술하였다.

* 한양대학교 기계공학부

E-mail : hhyoo@hanyang.ac.kr Tel : (02) 2290-0446

** ㈜우진물산

*** 한양대학교 기계설계학과 대학원

2. 바닥재 복합구조 유한요소 모델링

본 장에서는 Fig.1에 보여주는 바닥재 시스템에 대한 해석을 수행하기 위하여 유한요소 모델링을 수행하는 내용을 기술하려고 한다.

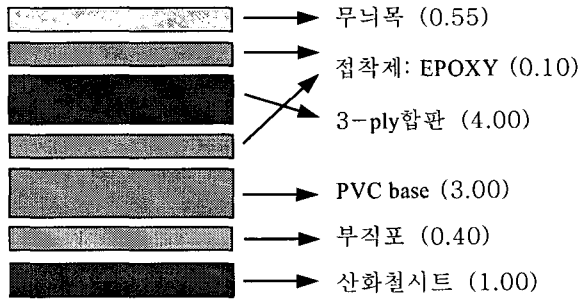


Fig. 1 Constitutions of a composite floor plate

그림에서 보여주듯이 본 연구에서 다루려고 하는 바닥재는 기본적으로 다섯 층으로 구성되어 있다. 가장 상층에는 무늬목이 위치하고 그 다음에는 합판 그 다음에는 PVC 층 그 다음에는 부직포 층 그리고 가장 하단에는 산화철시트 층이 위치한다. 무늬목과 합판 그리고 합판과 PVC 층 사이에는 접착재가 존재하므로 이들까지 고려한다면 이는 총 7개의 층으로 구성되어 있는 것이다. 그림에는 또 각 층의 높이가 (단위는 mm) 표기되어 있다

Table 1 재료 물성치

		영률 (GPa)	포아송비	밀도 (kg/m ³)	열팽창계수 (E-5)
무늬목		5.3635	0.1	645	-0.2272
Epoxy		22.5	0.25	1920	3.6
합판	중	1.079	0.1	665	-1.30
	형	1.079			-2.30
PVC	중	0.49567	0.2	1835	2.6508
	형	0.49040			-0.95230
부직포	중	0.033627551	0.2	2.5	-7.80
	형	0.042534014			3.50
산화철	중	0.012634625	0.3	2.0	N/A
	형	0.008667560			N/A

Table 1은 여기 사용된 각 재료들의 물성치들을 나타내고 있으며 이들 물성치의 값을 정확히 확보하는 것은 해석결과의 정확성에 결정적 영향을 미친다. 이들 물성치 중에서 가장 중요한 요소는 영률과 열팽창계수이며 이는 그 값들이 열변형과 충격해석에 큰 영향을 미치기 때문이다. 특히 영률은 종방향과 횡방향이 다른 값을 갖는데 이는 이들의 성형 시 롤러가 움직인 방향의 값이 더 큰 것에서 유래하며 이들 값은 Instron4465를 이용하여 실험적으로 측정되었다. 유한요소해석을 하기 위한 모델링은 해석결과의 정확성과 신뢰성에 결정적인 영향을 준다. 따라서 본 연구에서는 전문적 소프트웨어인 FEMAP 을⁽²⁾ 이용하여 모델링을 수행하였으며 Fig. 2는 그 결과 얻어진 유한요소 모델의 형상을 보여준다.

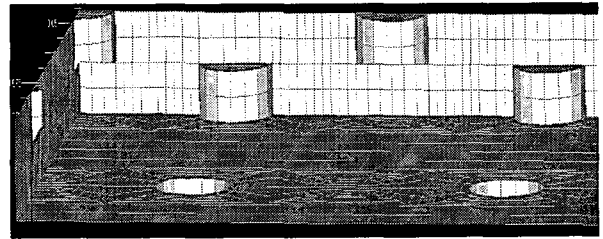


Fig. 2 Finite element meshes of a composite floor plate

이 모델링 그림에서 보는 바와 같이 천공은 PVC 층에 존재하며 천공의 형상이 작으므로 이를 모델링에 고려하기 위해서는 자연스럽게 천공 주변에 많은 유한요소 절점이 존재하게 된다. 여기서 사용된 유한요소는 Solid 요소와 Shell 요소이다. 길이 900mm 폭 90mm 의 바닥재 한 조각을 FEMAP 을 이용하여 모델링 하였을 때 생겨나는 요소의 총 수를 Table 2 에 나타내었다. 천공의 크기와는 상관없으나 간격이 작아질수록 요소의 수가 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

Table 2 요소 수

천공지름	천공간격		
	22.5	18	15
No hole	17600	25344	34496
φ 7	17664	27600	39744
φ 9	17664	27600	39744
φ 11	17664	27600	39744

3. 유한요소 해석

전 장에서 소개된 재료 물성치와 제원 그리고 유한요소 모델을 이용하여 우선 열변형 해석을 수행하였다. 여기서 발생하는 열 변형은 다층 복합구조를 구성하는 층재료간 열 팽창 계수가 다름으로 해서 발생하는 것이며 층간 재료간 팽창률의 차이는 굽힘방향 변형을 초래하게 되는데 이는 바이 메탈의 원리와 동일하다. 이러한 열변형은 바닥재를 시공한 후 온도변화에 의해 발생하여 바닥재가 바닥에 고정되지 않고 일어나는 현상을 일으키게 되어 그 정도가 심하게 되면 바닥재로서의 본연의 역할을 제대로 하지 못하게 한다. 따라서 설계시 온도변화에 따른 열변형의 양을 분석하고 이것이 발생하지 않게 하거나 최소화내지는 적정량 이하로 억제하도록 설계변수의 값을 조절하여야 한다. 이것이 열변형을 고려한 설계에서 핵심을 이루는 내용이다.

열변형 해석은 유한요소 해석을 위한 전문 프로그램인 NASTRAN 을⁽³⁾ 이용 수행되었으며 해석조건에 대한 정확성을 고려하여 4분의 1 모델을 사용하였다. 해석조건은 섭씨 30도에서 100도까지 70도의 온도 상승을 받았을 때의 변형량을 측정하였다. Fig. 3은 열변형을 받아 굽힘변형이 발생한 유한요소모델의 결과를 보여주고 있다. Table 3은 천공의 크기와 천공간격의 변화에 따른 열 변형량을 보여주고 있다. 이 표가 나타내듯이 천공이 없을 때에 비하여 천공을 했을 때는 열변형량이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 천공의 크기가 증가하고 천공간격이 감소할수록 열변형량이 감소하는 것을 알 수 있으며 천공간격 15mm, 천공크기 11mm 일 때는 천공이 존재하지 않는 모델에 비하여 무려 그 열변형량이 5분의 1 이하로 감소하는 것을 보여준다. 이러한 결과는 천공이 많아질수록 그리고 그 크기가 커질수록 열변형의 효과를 천공들이 흡수한다는 것을 보여주는 것이다. 그러나 천공이 지나치게 많아지면 바닥재 전체의 강도가 지나치게 감소할 것이므로 그러한 현상이 발생하지 않는 범위내에서 천공의 크기와 간격을 결정하여야 할 것이다.

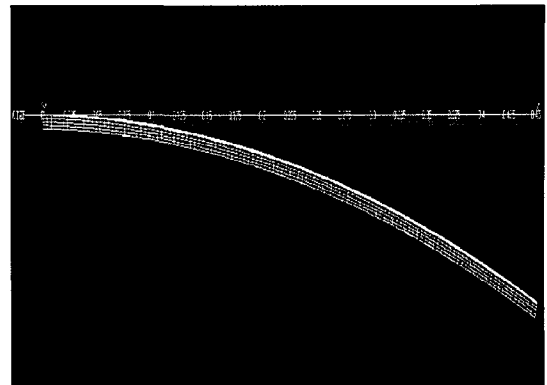


Fig. 3 Thermal deflection of a composite floor plate

Table 3 열 변형량

(Unit:mm)

천공지름	천공간격		
	22.5	18	15
No hole	16.81	16.81	16.81
φ 7	14.74	13.62	12.14
φ 9	13.69	11.43	8.59
φ 11	11.70	8.29	3.13

음향 및 소음 해석은 일정 크기를 갖는 음원의 존재를 가정하고 주변 조건에 따른 음의 밀도를 분석하는 형태로 이루어진다. 이 때 주변환경이란 음 밀도에 영향을 미칠 수 있는 차음재의 설치와 같은 내용을 의미한다. 이러한 내용에 대한 해석 방법은 많은 연구가 이루어져 왔으며 해석을 위한 소프트웨어도 여러 가지가 존재한다. 그러나 음원 자체의 발생과 관련된 연구는 아직도 그 연구가 성숙기에 이루지 못한 형편이다. 즉, 두 물체가 충돌함으로써 어떤 크기의 소음이 각 주파수별로 얼마만큼 발생하는가 하는 것에 대한 연구는 매우 미진한 형편이다.

본 연구에서는 주거 공간에서 흔히 발생하는 물체의 낙하 충돌 시 발생하는 소음을 저감하기 위한 설계와 관련된 해석방안 및 결과를 제시하려 한다. 물체 충돌에 의해 발생하는 소음의 해석은 바닥재 자체의 물성이나 형태뿐 아니라 바닥재의 경계조건에도 영향을 받으며 매우 복잡한 경로로 분석되어야 한다. 따라서 이에 대한 정형화된 정확한 해석결과를 얻기 위한 방안을 제시하는 것은 매우

어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 충돌에 의해 발생하는 소음의 정도를 예측하기 위하여 우선 충돌 해석을 통해 바닥재 하부에 전달되는 힘을 시간에 대해 구한 후 그 결과를 이용해 발생하는 소음을 예측하기 위한 한 방안을 제시하였다. 이 방안은 엄밀하게 주파수별 소음의 밀도를 제시할 수는 없으나 충격에 의해 발생하는 반발력과 소음 크기간에 존재하는 것으로 알려진 실험적 사실들로부터 소음 정도를 지수로 정의하여 이를 설계를 위해 사용하는 것이다. 이 방안은 복잡한 역학적 관계를 단순화하여 소음저감을 위한 설계를 위해 유용하게 사용될 수 있다는 점에서 그 실용적인 가치가 높다고 판단되어진다.

Fig.4 는 충돌 해석에 사용되는 모델의 형태를 보여준다. 그림이 보여주듯이 충돌 해석은 구형 물체가 일정속도로 지반에 고정된 바닥재 평판에 충돌할 때 발생하는 현상을 해석하는 것이다. 이때 구형 물체의 질량과 그 속도는 두 가지로 주어 지는데 그 하나는 경량충격이라 불리우고 다른 하나는 중량충격이라 불리운다. 경량충돌 시 물체의 질량은 0.5kg, 그 속도는 0.8m/s 이며 중량충격의 경우 물체의 질량은 7.3kg 그리고 속도는 4m/s 이다. 이 내용은 바닥충격음 차단성능 측정을 위해 제정된 KS F 2810-1 및 2810-2 의 조건에 상응하는 값들이다.

충돌 해석에 사용된 해석 프로그램은 LS-DYNA 로⁽⁴⁾ 이 프로그램은 특별히 비선형 충돌 해석에 강점을 갖고 있는 것으로 알려져 이 분야 엔지니어들에 의해 널리 사용되고 있다. Fig.5 는 충돌해석에서 얻어진 대표적인 해석결과로서 응력 분포를 보여주는 그림이다. 그림에서 충돌은 중앙 두 천공들 사이에 가해지게 되며 그림에서 보듯이 충돌이 발생하는 부분은 커다란 응력이 발생하나 응력의 크기는 충돌이 발생하는 지점으로부터 멀어질수록 급속히 약화된다. 이는 Saint Vernant 원리에 의해서 잘 알려진 결과이다. 그런데 충돌 해석은 비선형 해석이며 사용되는 유한요소모델의 자유도 수도 매우 높으므로 이 해석에 소요되는 전산 사용시간은 현재 가장 좋은 Workstation 을 이용하더라도 보통 수일이 소요된다. 따라서 Saint Vernant 원리에 근거하여 모델을 충돌이 발생하는 부분으로 축소하여 해석하는 것이 매우 유용하며 이렇게 함으로써 해석의 실질적 정확도를 훼손하지 않고도 (이는 소음과 관련하여 특히 성립하는데) 계산에 소요되는 시간을 대폭 절감할 수 있었다.

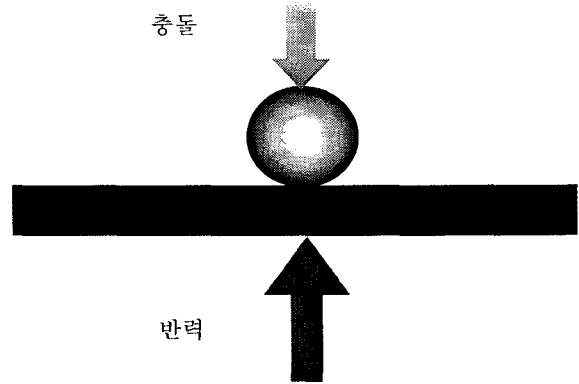


Fig. 4 Impact analysis model between a ball and a composite floor plate

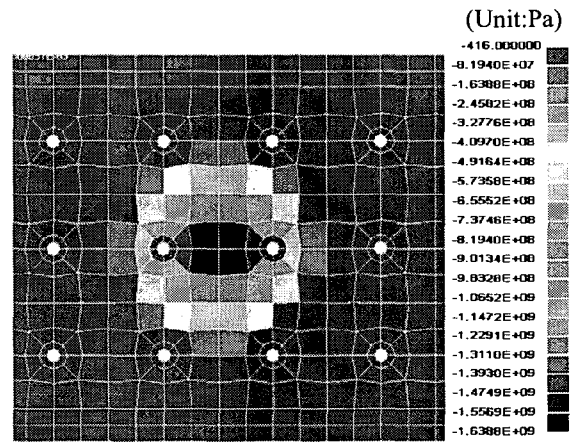


Fig. 5 Stress distribution obtained by the impact analysis

구형 물체와 바닥재 평판의 충돌해석을 통해서 바닥재의 하부지반으로 전달되는 힘을 구한 후 이 결과를 이용하여 소음의 크기를 추정하였다. 충돌 시 발생하는 힘은 바닥으로 전달되는 힘을 합하여 구하였으며 소음크기의 추정을 위하여 충돌과 관련하여 알려진 다음의 두 가지 사실을 이용하였다 첫째 소음은 충돌에 의해 발생하여 하부로 전달되는 힘의 최대크기가 클수록 크게 발생한다. 둘째, 소음의 크기는 발생하는 주파수의 크기가 클수록 크다. 이 두 가지 사실에 근거하여서 소음지수를 다음과 같이 정의하였다.

$$P_N = \frac{R_{max}}{T_{max}}$$

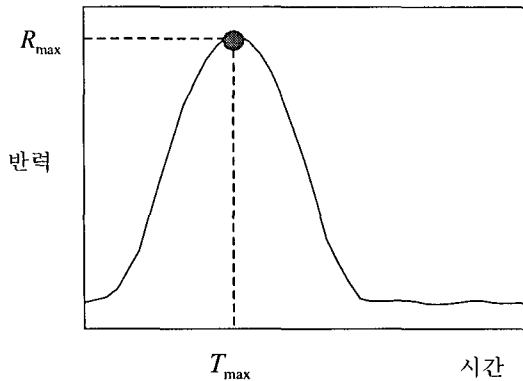


Fig. 6 Typical reaction force versus time

여기서 R_{max} 는 반력의 최대크기를 나타내며 T_{max} 는 반력이 최대크기까지 도달하는데 걸린 시간을 나타낸다. Fig.6 은 구형물체와 바닥재 평판 충돌 시 바닥으로 전달되는 힘의 합을 시간에 대해 그린 대표적인 그림이다. 여기서 정의된 소음지수는 앞에 언급한 두가지 사실들을 정성적으로 반영하여 얻어진 값이며 T_{max} 가 작을수록 고주파가 발생할 것이라는 사실을 고려하였다.

Table 4 는 경량충격의 경우 천공의 지름크기 및 간격의 변화에 따라서 구해진 소음지수 값들을 나타내고 있다. 이 표들에서 보듯이 소음지수는 천공의 지름크기가 커질수록 그리고 천공의 간격이 좁아질수록 낮아지는 것을 관찰할 수 있다. 이 해석 결과를 통해서 제시된 형태의 다층 복합구조를 갖는 바닥재의 천공의 지름 및 간격의 변화에 의한 열변형 특성 및 충격소음 특성을 조사하였으며, 이 과정을 통해서 설계변수인 천공 지름 및 간격의 값은 두 조건을 모두 적절히 만족시키는 천공지름 11mm 그리고 천공간격 15mm 에서 결정하는 것이 좋다는 결론을 얻을 수 있었다.

Table 4 경량충격 소음지수 ($\times 10^3$)

천공지름	천공간격		
	22.5	18	15
No hole	1954	1940	1979
ϕ 7	1787	1783	1775
ϕ 9	1750	1711	1642
ϕ 11	1660	1564	1319

Table 5 산화철시트 제외 경량충격소음지수($\times 10^3$)

천공지름	천공간격		
	22.5	18	15
No hole	4777	4759	4896
ϕ 7	4000	3997	4104
ϕ 9	3757	3567	3714
ϕ 11	3403	3204	3160

Table 6 바닥재종류에 따른 충격실험결과

	경량충격	중량충격
기존바닥구조(150mm)	70	60
온돌마루	65	60
나무와돌	65	60
천공바닥재(지름 7, 간격 22.5)	60	55
천공바닥재(지름 9, 간격 18)	60	55

Table 5 는 산화철 시트를 제외한 경량충격에 의한 소음지수 해석결과이다. 산화철 시트는 원래 그 부착 목적이 차음효과를 위해 존재하지만 이 결과가 보여주듯이 충격소음의 발생을 억제하는 역할도 한다는 것을 명확히 알 수 있다. Table 4 와 비교해보면 동일한 재원을 사용할 때에 산화철 시트는 그 소음지수를 적어도 40% 정도 낮출 수 있는 것을 보여준다.

Table 6 은 여러 종류의 바닥재에 대해 실시한 충격실험결과를⁽⁵⁾ 보여주고 있으며 이 결과는 국내 및 일본 건축학회에서 사용하고 있는 기준 L 곡선에 의한 결과이다. 이 결과는 다른 바닥재들에 비해서 개발된 천공 바닥재의 소음저감 능력에 대한 우수성을 보여주고 있다. 이 결과는 또한 본 연구에서 제시하고 있는 해석 모델에 의한 결과와 비교적 잘 일치하고 있는 것을 보여준다. 표에 나타나는 두 천공 바닥재에 의한 실험 결과는 Table 4 에 나타나는 해석결과와 그 경향을 같이 하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구를 통해서

해석에서 가장 훌륭한 성능을 보여준 천공간격 15 천공지름 11 의 제원을 선택하여 제품 설계를 수행하고 이에 대한 성능 시험을 수행하고 있다.

본 논문에서 제시한 충격소음 측정을 위한 해석적 모델은 앞으로 실험없이 설계를 위하여 실제 제품의 실험을 위한 제작 회수를 줄임으로서 개발 비용을 대폭 절약하며 사용될 수 있을 것이다. 이러한 결과는 다기능 고급제품의 설계를 통해 높은 부가가치를 창출하기 위한 제품개발 비용 및 기간 단축에 큰 기여를 할 수 있다는 점에서 큰 의미를 갖는다고 하겠다.

4. 결 론

본 연구에서는 최근 내장용 바닥재로 널리 사용되고 있는 다층 복합 바닥재의 천공에 의한 열변형 및 충격소음 특성변화를 해석적으로 구하기 위한 모델링 방법을 제시하고 해석결과를 제시하였다. 이 해석결과는 시험결과와 비교를 통하여 그 결과의 정확성 및 신뢰성을 검증하였으며 이를 통해 앞으로 개발 시 실제제품의 제작회수를 줄여서 개발비용 및 기간을 단축할 수 있는 방안을 제시하였다. 이러한 연구결과는 다기능 고 부가가치 제품의 설계를 추구하고 있는 국내 산업체의 제품 개발비용 및 기간 단축에 큰 기여를 할 수 있다는 점에서 중요한 의미를 갖는다고 하겠다. 앞으로 이러한 연구는 더 발전된 설계방법론 즉 최적화 기법의 채용 등을 통해서 더욱 자동화되고 효율적인 방법의 개발로 발전되어 나갈 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 ㈜우진물산 및 한국과학재단지정 한양대학교 최적설계신기술연구센터의 연구비지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Song , J. O., "Applying Design Optimization in Industry Environment - Challenges and Perspective," Proceedings of International Conference on Design and Optimization, Vol.1, pp.77-94, 2002.

(2) FEMAP Version 7.0 User's Manual, Structural Dynamics Research Corp, 2000.

(3) MSC/NASTRAN 70.5 User's Manual, MacNeal-Schwendler Corp., 1998.

(4) LS-DYNA Version 960 User's Manual, Livermore Software Technology Corp., 2001.

(5) "대우건설기술연구소 바닥충격음 차단성능 의뢰시험 성적서," ㈜우진물산, 2002.