



강건 소음 설계를 위한 시스템적 접근 방법

- 드럼세탁기 적용 사례 -

위 훈*

(삼성전자 생활가전사업부)

1. 머리말

국내 시장에서 일반적인 형태의 세탁기는 세탁물의 투입구가 위에 있는 전자동 방식과 최근 급격히 시장이 커지고 있는 드럼 방식이 있다. 두 방식 모두 내부적으로 모터, 세탁조, 배수펌프, 헨가 스프링과 댐퍼 등의 여러 부품들이 한정된 공간에 치밀하게 조립되어 있으며, 이로 인한 다양한 소음원과 전달 경로의 복잡성은 디자인, 재료비, 회전속도 등 기타 다른 설계 요구조건과 맞물려 정숙한 제품 설계에 있어서 난이도를 증가시키는 요인이다. 일반적으로 세탁기 제품에서 가장 큰 소음을 유발하는 운전조건은 최고 속도로 회전하는 탈수 운전 구간으로서 제품 소음 수준을 판별하는 기준이 되고 있다.

일반적으로 제품의 소음 수준은 그 제품의 품질 수준을 판단하는 기준으로 인식되고 있기 때문에 각 제조사마다 소음 저감을 위한 다양한 대책을 강구하고 있는 실정이다. 지금까지의 문헌에서는 주로 각 부품단위의 소음원에 대한 개별적인 분석을 통하여 부품 소음 저감에 관한 연구 내용이 소개되어 있으며, 이러한 부품 단위에서 축적된 개별적인 소음저감 기술의 성과는 최근 모델링에 기반한 시스템 단위의 소음 설계 접근방식으로 확장되고 있다. 즉, 제품의 상세설계 단계 이전의 구상설계 단계에서 최상위 시스템 수준의 소음 개발요구사항을 각 부품 단위로 할당 전개하여 시스템 단위의 소음 요구 수준을 달성하는 접근 방식이다. 시스템 총 소음에 기여도가 작은 부품이나 전달 경로에 대한 소음저감 작업은 시스템 관점에서 개발자원의 낭

비를 초래하므로 개발과정에서의 자원 투입 최소화과 기간 단축을 위해서는 구상 설계(preliminary design) 이전 단계에서 기여도가 큰 소음원과 그 전달 경로가 정량적으로 파악되어야 하며 아울러 적절한 저감대책도 수립되어야 한다. 따라서 제품 또는 시스템 단위의 소음 요구 사양이 결정되면서 즉각적으로 각 부품 단위의 소음 요구 조건을 결정할 수 있도록 하는 수단의 강구가 중요하다.

이 글에서는 드럼세탁기의 소음 설계에 있어서 제품 단위의 소음 요구 사양으로부터 각 부품 단위의 소음 개발 사양으로 전개되는 시스템적 접근 방식의 설계 수순을 소개하고자 한다. 이를 위하여 첫째로 각 소음원과 다양한 방식의 에너지 전달 경로 파악을 위한 기능별 시스템 분석(functional system decomposition)이 제시하고, 둘째로 다양한 전달경로를 통해 소음원과 수음원 간의 전달 함수를 도출하였다. 그리고 스프레드 시트를 이용하여 각 요소간의 구조적 상관 관계를 계산하여 상관 관계를 추적하기 위한 프로그램을 작성하였고, 제시된 방법에 대한 적용 사례를 기술하였다.

2. 시스템 분해

하나의 시스템은 그것을 이루고 있는 각 요소들과 그 상호 연결 구조의 파악을 위하여 물리적인 연결관계나 기능적인 관계 등의 기준에 따라 분해(decomposition)될 수 있다. 그 중 기능 분해(functional decomposition)는 각 구성 요소들이 기능 역할에 따라 분류되어 요소간의 상

* E-mail : hoon.wee@samsung.com / (031) 218-5058

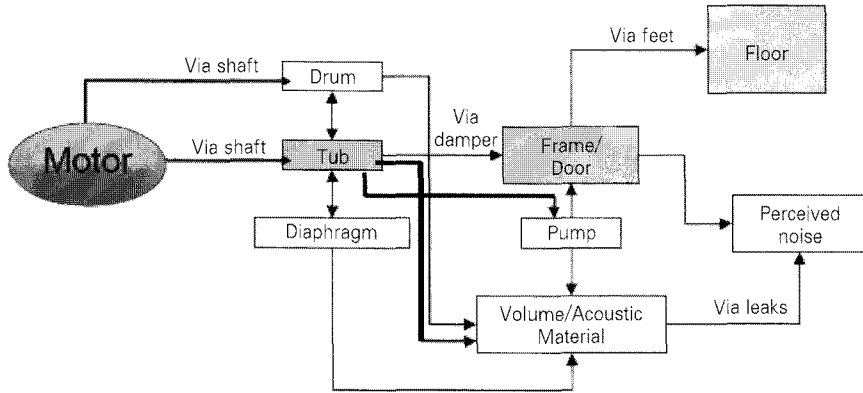
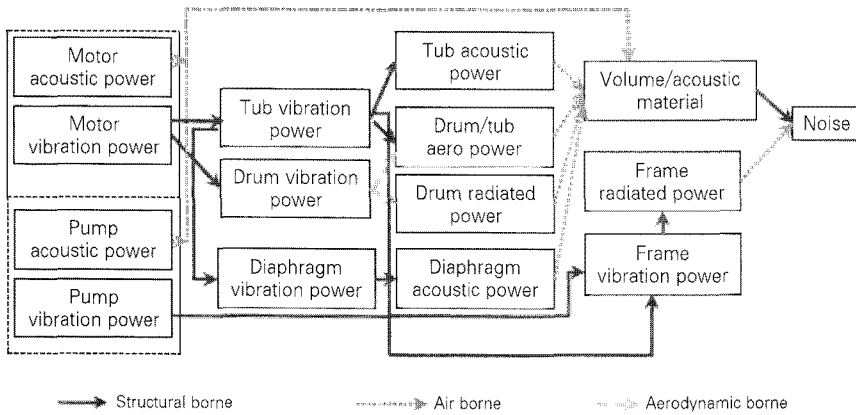


그림 1 드럼세탁기 기능 분해도



→ Structural borne - - - - - Air borne ····· Aerodynamic borne

그림 2 소음 전달 경로에 따른 분해도(decomposition)

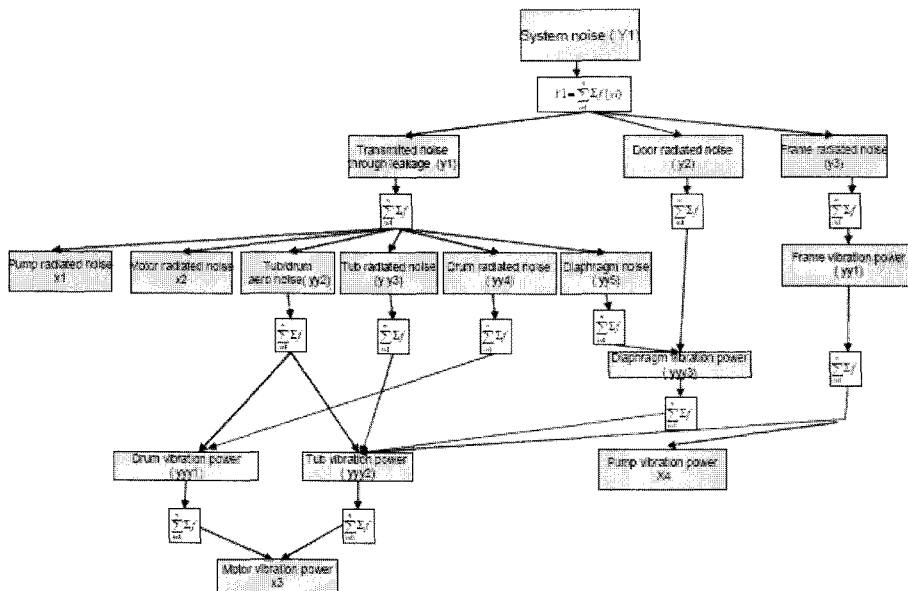


그림 3 소음 요구 사양 전개 연관도

소음·진동 측정기기용 부품의 소음

호 작용 방식과 입출력 관계들을 정의하며 추가 분석 작업을 위한 기반이 된다.

드럼세탁기의 경우 기능 분해도는 그림 1과 같으며, 주요 구성 요소와 그 연결 구조를 보여준다. 구동 모터는 축(shaft)을 통하여 세탁물을 담아 회전운동을 발생하는 회전조(drum)와 연결된다. 회전조 외부의 세탁조(tub)는 베어링을 통하여 축을 지지하는 회전운동의 하우징 역할을 하며 동시에 세탁물을 포함한 회전조와 세탁수를 포함한다. 상기의 모터, 회전조, 세탁조가 이루는 서브시스템(subsystem)은 외장프레임(frame)의 상부에서 스프링에 의하여 현가되고 하부에서는 댐퍼(damper)와 연결된다. 세탁조 내부의 세탁수 유출 방지를 위한 고무 재질의 다이어프램(diaphragm)은 세탁조와 도어(door)가 설치된 전면 판넬을 연결한다. 배수 펌프는 외장 프레임의 하부에 취부된다. 기타 급배수 호스와 밸브 등의 부품은 소음 기여도가 낮은 것으로 파악되어 이 내용에서는 제외하기로 한다.

전체 시스템에서 소음 발생의 메커니즘을 이해하기 위하여 그림 2에 시스템 기능도를 도시하였다. 모터와 배수펌프는 두 가지 측면에서 소음 발생에 기여도가 있는 것으로 파악된다. 즉, 모터와 펌프의 부품 자체의 방사 소음이 외장 프레임으로 투과되는 소음이 있으며 또한 한편으로 각각의 구조 진동이 취부된 마운트를 통하여 다른 부품 요소로 전달된다. 취부점에서의 임피던스에 따라 전달된 진동 파워는 전 시스템으로 전파하여 공진 모드를 가진다. 소음 전달 경로에는 세 가지를 생각할 수 있으며 기존의 공기 기인(airborne)과 구조기인(structure borne) 소음 이외에 세탁조와 회전조의 상대적인 운동으로 인한 난류 발생에 기인한 공력유동(aerodynamic) 소음을 주요한 소음원으로서 별도 분류할 수 있다. 공력유동소음은 회전속도가 증가하는 제품 추세에 따라 더욱 중요해지고 있다.

일단 물리적 연결 구조 및 기능적 분해도가 작성된 이후에는 그림 3과 같이 목표로 하는 소음 사양에 대한 각 부품간의 연관도를 작성할 수 있다. 이 각 부품간의 계층적 연관도는 시스템과 서브 시스템 그리고 각 부품간의 진동, 소음 파워의 흐름을 명확히 보여준다. 각 요소에서의 입출력 파워는 해석적이나 실험적, 또는 경험적으로 구할 수 있으며, 이 단계에 이르러 각 요소의 특성을 명확히 정의함으로써 시스템의 복잡성을 상당히 감

소시킬 수 있다.

특히 각 요소간의 전달함수를 도출함으로써 상위 수준에서 하위 수준으로의 요구 사양 '할당' 또는 하위 수준에서 상위 수준으로의 '유효성 검증'이 가능하게 된다. 각 요소간의 상호 전달 함수를 도출하는 것은 개발 과정에서 뿐만이 아니라 제품 개발 이후 품질 문제 발생시에도 매우 중요하며, 이러한 사후 문제에 있어서도 시스템에 내재된 다양한 변수 추적을 가능하게 하여 효과적인 문제 원인 분석(root cause analysis) 및 대책 수립에 유용하게 사용할 수 있다.

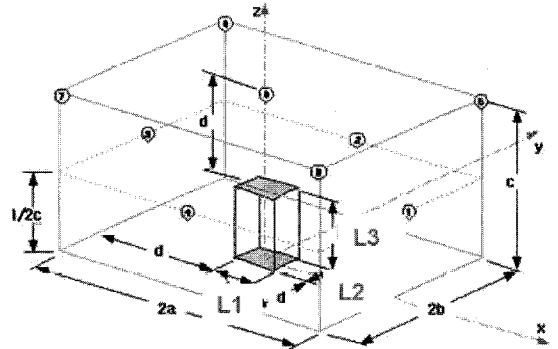
3. 소음원 측정 및 전달 함수 도출

3.1 제품 소음 측정 규격

음향파워 측정방법을 규정한 ISO3745 규격을 참조하여 그림 4와 같이 무향실에서 드럼 세탁기의 음향 파워를 측정하였다.

3.2 공기 기인 소음원 측정

개별적인 부품 단위의 소음을 측정하기 위하여 해당 부품을 시스템에서 분리하여 별도의 측정 장치를 제작하였으며, 이 과정에서의 주안점은 시스템 운전시의 부하 조건을 동일하게 부여하면서 다른 요소의 영향을 분리(decouple)시키는데 있다. 예를 들면, 배수 펌프는 외



L1: Washing machine width.

$$2a=L1+2.$$

L2: Washing machine depth.

$$2b=L2+2.$$

Unit: meter(m).

L3: Washing machine height.

$$2c=L3+1..$$

그림 4 드럼세탁기 음향 파워 측정

장 프레임의 하부에 브라켓으로 취부되어 외장 프레임으로의 진동 파워 전달을 통하여 구조 기인 소음을 동시에 유발하므로 측정시에는 매우 유연한 마운트 구조의 방안을 적용하여 공기 기인 소음 성분만을 측정할 수 있도록 하였다.

3.3 공력유동 소음 측정

세탁조의 내부는 일반적으로 불규칙한 요철 구조로 되어 있으며, 회전조 역시 불균일한 표면 형상을 가지고 있다. 내부 회전조가 고속 회전하는 탈수 운전시에는 세탁도와 회전조의 이러한 형상에 의하여 상당한 유동압 변동을 유발하며 이는 심각한 수준의 유동 소음 발생의 원인이 된다. 그러나 이러한 유동 소음을 직접적으로 측정할 수 있는 방법을 찾기 어려운 관계로 간접적인 방법을 이용하였다. 내부 회전조를 동일한 관성을 가지는 등가의 축으로 대체하여 구동 모터에 동일한 부하를 부여하면서 운전하였다. 이때 측정된 소음은 유동 소음 성분이 제거된 소음이며 원래의 유동소음을 포함하여 측정된 소음에서 차감하는 방식으로 유동소음(파워)의 기여도를 파악할 수 있다.

3.4 구조 진동 입력 파워 측정

앞서 기술한 바와 같이 전체 시스템 구조에 전과되는 모터와 펌프의 가진력은 다른 요소들에 대한 구조 입력 파워로 간주할 수 있다. 이를 정량화하기 위하여 FRF 기반의 접근 방법을 적용하였다. 응답의 FRF와 파워 스펙트럼을 알고 있는 경우 입력 파워는 식 (1)로부터 구할 수 있다.

$$p_j(\omega) = \frac{\{G_{uu}\}_{j,j}}{2\omega \text{Im}[\{H\}_{j,j}]} \quad (1)$$

위 식에서 $\{G_{uu}\}_{j,j}$ 가속도 응답의 스펙트럼이고, $\{H\}_{j,j}$ 는 주파수 응답함수의 제곱 항이다. 첨자 j 는 가진력 항의 방향을, p_j 는 해당하는 입력파워를 나타낸다. 시험 장치에서 모터 마운트, 모터와 축 연결부, 펌프와 프레임 연결부 등에 대한 주파수 응답함수(입력 임피던스)를 측정하고, 실제 운전 조건에서의 각 방향의 진동 신호(가속도)를 측정한 절대값을 취하여 입력 파워를 측정할 수 있다.

3.5 구조 진동에너지 측정

각 서브 시스템 구조의 진동에너지와 표면 속도와 관계는 다음 식 (2)로부터 구한다.

$$E = mv^2 \quad (2)$$

위 식에서 m 은 서브시스템의 등가 질량에 해당하고 v 는 표면 속도이다. 식 (2)는 모든 진동 에너지가 각 공진모드에 포함되어 있다는 가정에 기반한다. 즉, 포텐셜 에너지와 운동에너지의 양은 동일하며 총 에너지는 운동에너지의 두 배이다. 만약 모드 밀도(modal density)가 낮으면 이 가정의 정확도는 감소하지만 다행스럽게도 본 문제에서는 경험적으로 세탁조와 회전조의 소음 방사 효율이 낮기 때문에 이들의 구조진동 에너지의 기여도는 그다지 중요하지 하지는 않다. 따라서 주 관심사는 진동보다는 여타 소음의 측면에 두기로 한다.

4. 시스템 소음 계산 도구의 구현 및 고찰

설계 과정에서 시스템 수준의 요구사항 할당은 전체 시스템 수준에서의 소음 설계 목표를 달성하기 위하여 각 소음원과 전달 경로에 허용되는 에너지 수준을 결정하는 것이다. 그림 5와 같이 주요 소음원과 전달경로를 나열하는 스프레드 시트를 작성하였으며, 보다 중요한 점은 이 시트를 통하여 요구 사양을 전개를 수행할 수 있다는 점이다. 시스템의 총 파워는 기능 전개도에 도시된 각 부품과 서브시스템 단위의 각 기여 파워의 합계에 의하여 계산된다. 기준(baseline) 파워는 현 제품 수

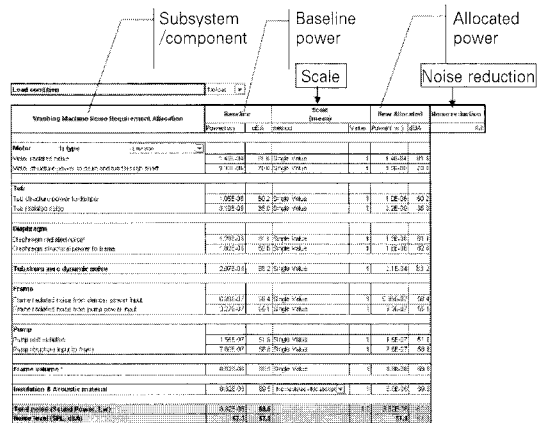


그림 5 시스템 소음 계산 도구

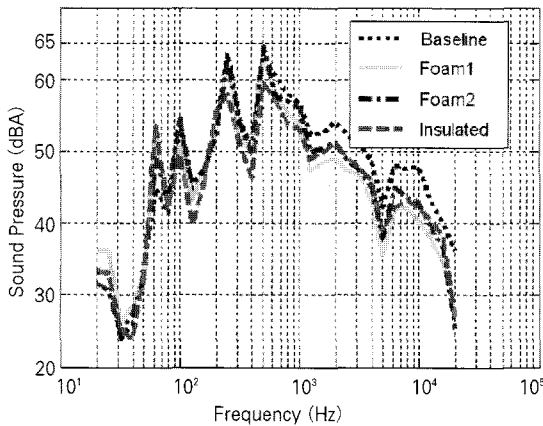


그림 6 흡차음 재질에 따른 시스템 영향도 평가

준의 음향 및 진동 파워를 나타낸다. 스프레드 시트의 각 항은 동일 파일 내에 존재하는 다른 데이터 시트에 1/3 옥타브 대역(1/3 octave band) 형식으로 정리된 각 측정 데이터와 연계되어 있다. 할당(allocated)된 파워는 새롭게 적용된 부품 등에 의하여 설계 변경(소음 저감 등) 후의 결과를 나타낸다. 따라서 새롭게 정의된 시스템 목표 소음의 달성하기 위한 각 부품 항목의 특성치 변경을 통하여 각 부품 단위의 목표 소음 수준을 결정하고, 다시 각 부품 단위의 수정된 결과는 변경된 시스템 소음으로 확인할 수 있다.

이 도구는 따라서 다양한 부품들의 특성 데이터베이스를 구축을 통하여 다른 부품 선택시 시스템 수준에 대한 영향도를 즉각적으로 계산함으로써 시스템의 구상 설계(conceptual design)를 수행할 수 있다. 예를 들면, 여러 종류의 모터들에 대한 데이터베이스를 구축한 후 특정 모터의 선택에 따른 시스템 수준의 영향도를 평가할 수 있다. 또한 각종 흡음 및 차음 재료의 특성 데이터를 구축하여 각 재료의 적용에 따른 시스템 소음과 다른 요구사항(재료비 등) 간에서 최적의 사양을 결정할 수 있는 도구로 활용 가능하다. 그림 6은 이 내용에서 고려한 흡음재들의 영향도 예측 결과를 제시하고 있으며, 흡음재 및 차음 설계가 적용되지 않은 현 수준(baseline)과 순차적으로 적용된 흡차음 처리에 관한 시스템 수준에의 영향을 나타낸다.

또한 이 도구는 계층적으로 구조화된 모델 내에서 특정 인자 변화에 대한 영향도 추적이 가능하므로 시스템 차원의 문제발생시 원인분석(root cause analysis)의

Washing Machine Noise Requirement Allocation		Baseline	Scale (mean)	Now Allocated	Noise reduction		
		Power(w)	dBA (method)	Power (w)	dBA		
Motor							
51 type	Elvicon	1.45E-04	81.6	5.9E-05	77.6	4.0	
Motor related noise		1.45E-04	81.6 (Single Value)	0.4	5.9E-05	77.6	4.5
Motor structure power to drum and tub through shaft		9.93E-05	70.9 (Single Value)	1	9.9E-06	70.0	0.0
Tub							
		3.19E-09	35.0	3.2E-09	35.0	0.0	
Tub structure power to damper		1.00E-03	90.2 (Single Value)	1	1.0E-03	90.2	0.0
Tub radiated noise		3.19E-09	35.0 (Single Value)	1	3.2E-09	35.0	0.0
Bladder pump							
		1.26E-06	61.1	1.2E-06	61.1	0.0	
Diaphragm radiated noise*		1.26E-06	61.1 (Single Value)	1	1.3E-06	61.1	0.0
Diaphragm structure M power to frame		1.00E-03	90.2 (Single Value)	1	1.0E-03	90.2	0.0
Tub/shaft							
zero dynamic noise		2.07E-04	63.2 (Single Value)	0.5	1.0E-04	60.1	3.5
Frame							
		1.24E-08	51.3	1.3E-08	51.3	0.0	
Frame radiated noise from damper cover head		0.99E-07	58.4 (Single Value)	1	6.9E-07	64.4	0.0
Frame radiated noise from pump power input		3.27E-07	55.1 (Single Value)	1	3.3E-07	55.1	0.0
Pump							
		1.29E-07	51.9	1.6E-07	51.9	0.0	
Pump shell radiated noise		1.09E-07	51.8 (Single Value)	1	1.6E-07	51.9	0.0
Pump drive radiated noise to frame		7.60E-07	58.8 (Single Value)	1	7.6E-07	58.8	0.0
Frame volume		0.00E-00	69.8 (Single Value)	1	3.1E-06	14.9	4.5
Insulation & Acoustic material							
		0.00E-00	69.8 (To assumed volume)	1	2.0E-06	63.5	6.9
Total noise (Sound Power, Lw)							
		2.00E-06	68.3	0.3	2.0E-06	68.5	0.0
Noise level (dBA)							
		62.3	62.3	62.3	62.3	0.0	

그림 7 적용 예 : 모터와 유동소음 저감에 의한 시스템 소음 개선

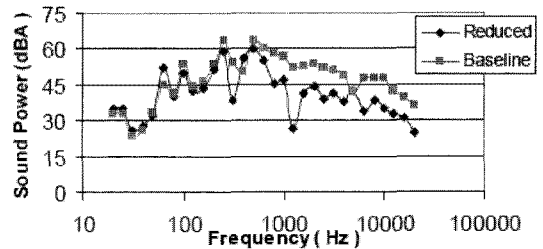


그림 8 모터 및 유동소음 저감에 따른 시스템 소음 개선(스펙트럼)

수단으로 활용할 수 있다. 예를 들면 그림 7과 같이 모터의 입력파워의 변동이 세탁조, 다이어프램, 외장프레임 등으로 전파되어 어떤 영향을 미치는지 파악이 가능하다.

소음 요구사항의 할당에 있어서 가장 중요한 사항은 각 소음원과 전달 경로의 기여도에 따른 우선순위를 결정하는 것이며, 이를 통하여 가장 효과적인 소음 저감 대책의 도출이 가능하다. 하나의 예로서 시스템 차원에서 약 6 dBA의 소음저감 요구가 발생하였을 때에는 본 도구의 계산을 통하여 모터 소음과 공력유동 소음이 각각 40%(4 dBA)와 50%(3 dBA)로 저감되어야 하며 동시에 외장 프레임에 흡음처리가 필요함을 알 수 있다. 반대로 모터와 공력유동소음이 각각 3 dBA와 4 dBA 저감되었다면 시스템 수준의 총 소음 저감은 4 dBA에 불과함을 예측할 수 있다. 이 경우에는 유동소음이 모터 소음보다 기여도가 크지만 주파수 성분을 고려하여 흡음처리를 하는 경우에는 모터 소음 저감 쪽이 더 효과적임을 알 수 있는데, 이는 그림 8에서와



같이 모터 소음 성분이 상대적으로 고주파에 존재하기 때문이다.

5. 맺음말

이 내용은 드럼세탁기 소음설계의 예를 통하여 제품 개발 초기 단계에서 상위의 시스템 수준의 개발 요구 사양을 하위 부품 단위로 전개하여 각 부품의 소음 사양을 조기에 결정하는 시스템적인 접근 방법을 소개하였다. 이를 위하여 각 소음원과 전달 경로에 관한 실험적인 특성 파악과 정량화 작업을 수행하였다. 음향 및 진동 파워로 정량화된 각 부품 단위의 소음 기여도는 스프레드 시트에 데이터베이스화 하여 각 부품의 설계 변경이 상위 시스템 소음특성에 어떠한 영향을 미치는지 정량적인 예측이 가능함을 보였다. 또한 이미 개발된 제품의 문제 해결에 있어서도 전달함수로 정의된 각 인자의 영향도 분석을 통하여 체계적인 원인 분석 도구로 활용 가능함을 제시하였다.

이 내용에서 제시된 개념을 실제 제품 개발에 확장 적용할 경우 체계적인 부품 단위의 개발 사양 도출을 통하여 개발 기간 단축 및 효과적인 자원 활용 등을 기대할 수 있을 것이다. ▲

참고문헌

- (1) Sanchez, B. and Liado, J., 2006, "Sound Power Emission of a Washing Machine Cabinet", The Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 119, No. 5, p. 3386.
- (2) Sanchez, B. and Liado, J., 2002, "Characterization of the Noise Emitted by a Washing-machine Due to the Pump", Paris, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 112, No. 5, p. 2372.
- (3) Conrad, D. C., 1994, "The Fundamentals of Automatic Washing Machine Design Based upon Dynamic Constrain", Ph.D. Thesis. University of Michigan.
- (4) Turkay, O. S. and Kiray, B., 1995, "Formulation and Implementation of Parametric Optimization of a Washing Machine Suspension System", Mechanical System and Signal Processing, Vol. 9, No. 4, pp. 359~377.
- (5) Bae, S., Lee, J. M. and Kang, Y.J., et al., 2002, "Dynamic Analysis of an Automatic Washing Machine with Hydraulic Balancer", Journal of Sound & Vibration, Vol. 257, No. 1, pp. 3~18.
- (6) Mori, T. and Tokaoka, A., 2005, "Achieving a Vehicle Level Sound Quality Target by a Cascade to System Level Noise and Vibration Targets", SAE 2005 Noise and Vibration, 2005-01-2394.
- (7) Lyon, R., 1975, "Statistical Energy Analysis of Dynamic System: Theory and Applications. The MIT press.

특정 기원기 및 소음파 소음

학회 간행물 CD-ROM(DVD) 보급

우리 학회는 학술정보 데이터베이스 전문 구축업체인 한국학술정보와 제휴하여 우리 학회가 창립이후 지금까지 발행에 온 모든 간행물에 수록된 주옥같은 자료 모두를 검색기능이 탑재된 CD-ROM(DVD)으로 제작하여 **회원 여러분께 특별가격으로** 공급하고 있습니다.

수록내용 : 학회지(소음진동), 논문집(월간-한국학술진흥재단 등재 학술지), 각종 세미나 자료집, 춘/추계 학술대회논문집, 소음진동 편람 등 학회 창립 이후 우리 학회의 모든 간행물 총 망라.(계속 업데이트 중)

가격 : 1SET에 100,000원이며 자세한 문의는 학회사무국으로 문의해 주시기 바랍니다.

TEL : (02)3474-8002,3 / E-mail : ksnve@ksnve.or.kr

K S N V E 한국소음진동학회