

통계적 에너지법(SEA)을 이용한 굴삭기 외부 소음 해석

Exterior noise prediction of excavators using SEA

윤상돈† · 강종민* · 전범석** · 김혜연***

Sangdon Youn, Jongmin Kang, Beomseok Jeon and Hyeeyun Kim

1. 서론

최근 친환경 및 인간 중심의 세계적인 추세에 따라, 건설장비의 규제도 강화되어 가고 있다. 유럽뿐만 아니라, 최근 국내에서도 소음 규제가 발효되어 시행되고 있으며, 미국의 배기 규제 또한 강화되어 가고 있는 실정이다.

이러한 규제를 만족하는 장비개발을 위해, 건설장비 업체에서는 많은 비용 및 시간을 투자하고 있으며, 특히, 냉각과 소음은 상호 의존적이면서, 통상 반비례 관계에 있어, 제품 개발단계에서 최적점을 찾기 위해 많은 시행착오를 겪고 있다. 또한, Prototype 제작 후, 냉각/소음 시험을 통한 개선 작업이 주로 이루어지고 있어, 많은 비용과 시간을 필요로 하고 있다. 이와 같은 비용 및 시간을 줄이기 위하여, Prototype 제작 전 단계인 개념설계 단계에서 Simulation 을 통하여 새로운 장비의 냉각/소음을 검증할 수 있는 방법 및 Process 를 고찰해 보았다.

본 논문에서는, 고찰한 process 가운데 소음 해석 분야에 한한 것이며, 굴삭기의 외부 소음해석을 위하여 통계적 에너지법(SEA)을 적용하였으며, 시험을 통하여 이를 검증해 보았다. 통계적 에너지법(SEA)을 적용하기 위해 상용 S/W 인 VA one 을 사용하였다. 또한, 한국기계연구원(KIMM)과 함께 음향특성데이터 확보를 위한 시험을 진행하여, 현재 사용 중인 소재에 대한 투과손실(TL) 및 흡음률 데이터를 확보하였으며, Inverse Source Calculation(ISC) 기법을 적용하여 굴삭기의 엔진 룸 내부의 소음원들을 모델링하였다. 본 논문에서는 구조기인 소음은 배제한 공기기인 소음만 고려하였다.

2. 굴삭기의 SEA 모델링

2.1 SEA 기본 방정식

SEA 는 에너지 보존법칙에 기초한, 하부시스템(Subsystem) 사이의 에너지 전달 및 손실을 계산함으로써, 기본적으로 시스템을 이루고 있는 개별적인 부품보다는 시스템 전체의 소음/진동 해석에 주로 적용하며 매우 실용적인 해석법이다. 주요 변수로는 모드수(mode count, N), 감쇠손실계수(damping loss factor, DLF, η) 그리고, 연성손실계수(coupling loss factor, CLF, η_{12})가 있으며, 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\{E\} = \frac{1}{\omega} [\eta]^{-1} \{\Pi\} \quad (1)$$

여기서, $\{E\}$: Vector of energies
 $[\eta]$: Matrix of loss factors
 $\{\Pi\}$: Vector of power input

그리고, 두 하부시스템 사이의 파워 평형 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Pi_{1,in} &= \Pi_{1,diss} + \Pi_{12} = 2\pi f (\eta_1 + \eta_{12}) E_1 - 2\pi f \eta_{21} E_2 \\ \Pi_{2,in} &= \Pi_{2,diss} + \Pi_{21} = -2\pi f \eta_{12} E_1 + 2\pi f (\eta_2 + \eta_{21}) E_2 \end{aligned} \quad (2)$$

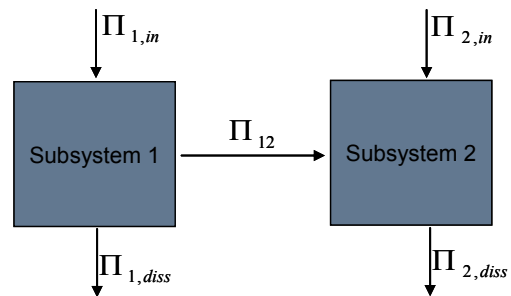


Fig.1 Power balance of a two-subsystem SEA model

† 교신저자; 불보건설기계(주), VPD
 E-mail : sangdon.youn@volvo.com
 Tel : (055) 260-7854, Fax : (055) 260-7080
 * 정회원, 불보건설기계(주), VPD
 ** 정회원, 불보건설기계(주), Verification & Validation
 *** 불보건설기계(주), Test & Proto Operations

Test Cases	Name	Material	t (mm)	STC [dB]
1	St_P_1.6	Steel	1.6	37
2	St_P_2.3	Steel	2.3	38
3	St_P_4.5	Steel	4.5	34
4	FRP_P_4	FRP	4	31

Table 1 Transmission Loss from KIMM

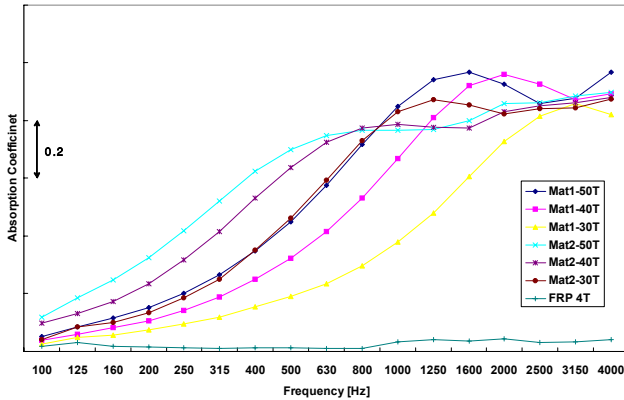


Fig. 2 Absorption Coefficients from KIMM

2.2 음향 특성 데이터

본 논문에서는 한국기계연구원(KIMM)을 통해, 현재 사용 중인 소재에 대한 투과손실(TL)과 흡음재의 흡음률 데이터를 Table 1 과 Fig. 2 와 같이 확보하였으며, 굴삭기 SEA 모델에 입력 파라미터로 활용되었다.

2.3 소음원 모델링

시험을 통한 Inverse Source Calculation 기법을 적용하여, 굴삭기 엔진룸 내부에 있는 소음원들을 모델링하였다. 본 논문에서는, 엔진룸 내부의 소음원들을 14 개의 단극음원(monopole)으로 가정하고 28 개의 측정점을 구성하여 각 단극음원들의 음향 파워값을 계산하였으며, 이 값들은 굴삭기 SEA 모델에 입력파워로 활용되었다.

3. 해석 결과 및 검증

앞 절에서 구성된 굴삭기의 SEA 모델로부터 외부 소음 해석을 수행하였으며, 시험을 통하여 해석결과의 검증에 하였다. 먼저, 외부 방사 파워 스펙트럼의 비교결과, Fig. 3 에서와 같이 315Hz 이상 영역에서 좋은 상관 관계(correlation)을 보여주고 있다. 또한, 개구부(open-hole)의 개폐와 흡음재의 탈,부착에 따른 외부 소음에 대한 기여도 예측도 Fig. 4 와 Fig. 5 에서와 같이 좋은 상관 관계를 가지는 것을 알 수 있었다.

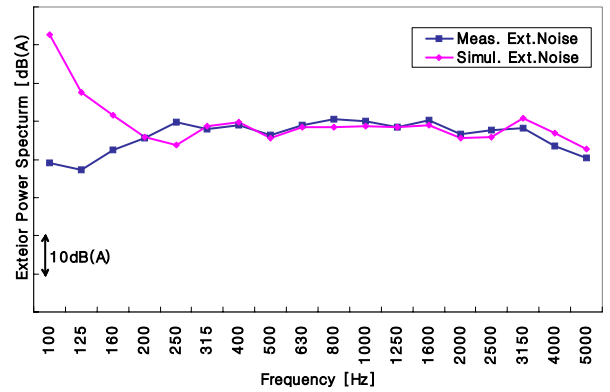


Fig. 3 Exterior Sound Power Spectrum

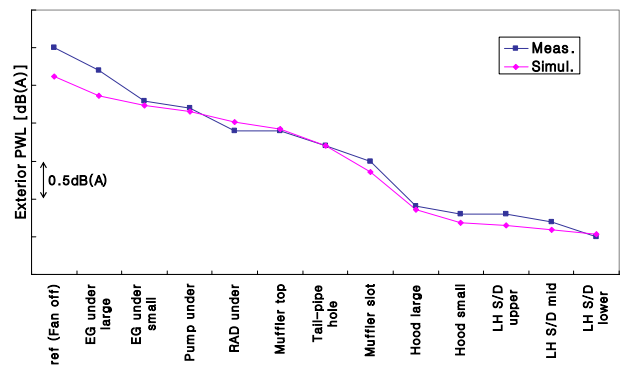


Fig. 4 Open-hole Effect

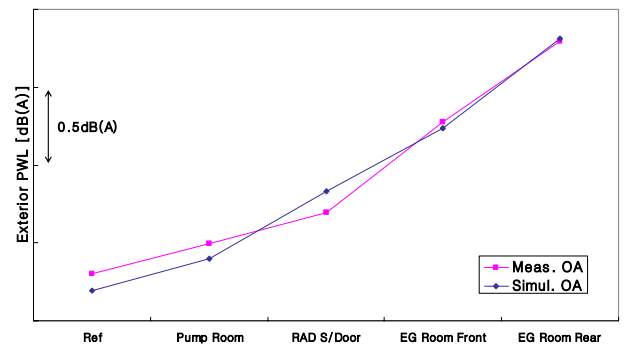


Fig. 5 Absorption Material Effect

4. 결론

이번 과제를 통하여, 굴삭기의 외부 소음 예측을 위하여 SEA 방법을 적용하였으며, 좋은 상관 관계를 보여 주었다. 또한, 개념 설계단계에서 새로 개발될 장비의 소음 성능을 검증할 수 있는 방법 및 tool 이 개발되었다.

하지만, 통계적 에너지법(SEA)는 저주파 대역에 대한 단점을 가지고 있으며, 향후 이 단점을 보완하기 위한 대책이 필요하다.