

승용차량용 연료탱크 슬로싱 현상에 대한 실험적 고찰 및 평가 방법에 대한 연구

Experimental Study and Evaluation Method for Sloshing Noise of Fuel Tank on Passenger Vehicle

안 세 진†·윤 성 호*
Sejin Ahn and Seongho Yoon

(Received March 18, 2014 ; Revised May 15, 2014 ; Accepted May 22, 2014)

Key Words : Slosh Noise(슬로싱 소음), Passenger Vehicle(승용차량), Fuel Tank(연료탱크), Structure-borne Noise(구조기인 소음), Air-borne Noise (공기기인 소음)

ABSTRACT

The signal patterns of slosh noise produced by the fuel tank of a passenger vehicle are characterized by analyzing vehicle interior noise, fuel tank vibration, and near-field noise radiated from the fuel tank. This paper also shows the noise transfer path analysis results performed from the fuel tank to the vehicle inside. On top of them, physical index is described, demonstrating a good correlation with subjective feeling of slosh noise. It is essential to identify the main noise transfer paths for re-designing of the fuel tank system aiming at reducing slosh noise and also helpful to apply physical index in evaluating and reducing this noise. It is found that structure-borne path is the main root of slosh noise and a value reveals a good correlation with subjective feeling.

1. 서 론

자유표면(free surface)을 가지는 유체를 담고 있는 용기(container)가 가속(acceleration) 또는 감속(deceleration)할 때 유체요동(fluid oscillation) 또는 슬로싱 현상이 발생한다. 특히 용기의 가속과 감속하는 주기가 용기 속 유체의 특성에 의해 결정되는 유체의 고유 주기(natural period)와 일치할 경우에는 유체의 유동으로 인해 용기의 벽에 강력한 구조적 하중이 발생하게 된다⁽¹⁾. 이러한 유체와 구조물 간의 상호작용(fluid-structure interaction)에 대한 연구는 항공기(aerospace vehicles)뿐만 아니라 각종

선박의 조정성능(control)과 안전성능(safety)을 향상하기 위해 연구되어왔다⁽²⁻⁴⁾.

그런데 최근에는 일반 승용차의 연료탱크 용량이 증대됨에 따라 연료와 연료탱크 사이의 상호작용에 의한 슬로싱 현상과 이로 인해 발생하는 노이즈를 저감하기 위한 연구에 관심이 집중되고 있다^(5,6). 특히 최근에 차량 소음진동 저감에 대한 기술이 크게 발전한 덕택에 엔진 소음, 타이어 소음, 윈드 소음 등과 같은 자동차에서의 주요한 소음들이 크게 감소됨에 따라 연료탱크의 슬로싱 노이즈 감소에 대한 소비자들의 요구는 점점 높아지고 있다.

이러한 소비자들의 요구를 충족하기 위해 차량용 연료탱크 개발자는 한정된 공간에서 최대의 연료를

† Corresponding Author ; Member, Uiduk University
E-mail : sjahn@uu.ac.kr
Tel : +82-54-760-1668, Fax : +82-54-760-1199
* Member, Technical center of Renault Samsung Motor Company

‡ Recommended by Editor SungSoo Na

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

담기 위한 형상 최적설계뿐만 아니라 슬로싱 현상을 최소화하기 위한 설계변수들도 함께 고려하여야 한다. 기존의 연구에서는 연료탱크 내에 격벽(baffle)을 설치하는 것이 슬로싱 현상을 개선하는데 있어서 매우 효과적임을 다양한 시뮬레이션뿐만 아니라 실험을 통하여 증명하였다⁽¹⁻⁵⁾.

최근에는 플라스틱 성형기술이 발달함으로써 차량용 연료탱크를 한 번에 일체로 성형하여 제작하는 방법이 도입되고 있는데, 기존의 조립식으로 제작하는 방법에 비해 복잡하고 다양한 격벽을 설치하는데 있어서 불리하게 되었다. 그래서 최소한의 격벽으로 슬로싱을 저감할 수 있는 최적설계 시뮬레이션 기법들이 개발되었을 뿐만 아니라 실험적 방법으로 슬로싱 현상을 검증하기 위한 각종 장치와 실험 기법들이 개발되었다^(1,5). Stefan⁽⁴⁾은 FDM(finite difference method) 기법으로 차량용 가솔린 연료탱크의 슬로싱 현상을 시뮬레이션 하였다. 이 연구에서는 채워진 연료의 양이 증가할수록 유동의 고유진동수는 다소 낮아지는 것을 보였다. Hakan과 Erdem⁽¹⁾은 유체가 담긴 92×62×46 cm 크기의 직육면체의 용기를 좌우로 왕복가진 하였을 때, 담긴 유체의 유량이 증가할수록 용기 벽면에 발생하는 최대 압력은 유량에 비례하여 증가하는 것을 보였다.

승용차량에서의 슬로싱에 대한 연구는 유체탱크 내부의 압력변동 현상에 주목한 기존의 연구와는 달리 연료탱크의 슬로싱에 의한 진동과 소음이 차실 내로 유입되는 현상에 더욱 주목할 필요가 있다⁽⁷⁾. 이 연구에서는 일반 승용차량의 연료탱크와 차실 내에서 측정된 슬로싱 진동과 슬로싱 노이즈의 신호특성을 분석하고, 연료탱크에서 발생한 슬로싱 현상이 차실 내로 유입되는 주된 전달경로가 공기기인소음(airborne noise)인지 구조기인소음(structure-borne noise)인지를 분석하였다. 그리고 차실 내의 운전자 오른쪽 귀 위치에서 측정된 여러 가지 슬로싱 노이즈에 대하여 신호분석을 실시하였으며, 운전자의 주관적인 느낌과 상관성이 높은 객관적이고 정량적인 수치(index)를 개발하였다.

2. 슬로싱 노이즈 분석

액체 연료탱크를 탑재하고 있는 일반 승용차는 가속 또는 감속할 때 액체연료의 유동으로 인해 슬

로싱 현상이 발생한다. 슬로싱 현상은 유동하는 연료가 연료탱크의 벽을 때리는 히팅(hitting) 현상과 유체가 튀겨져 나오면서 유체끼리 부딪치는 스프래싱(splashing) 현상으로 나눌 수 있다. 이 논문에서는 플라스틱 연료탱크를 탑재한 중형세단 차량 2대에 대하여 슬로싱 진동과 소음을 측정하여 신호비교 및 신호분석을 실시하였다.

2.1 실험방법

약 3/4의 연료를 채운 승용차량을 일정한 속도로 유지한 후 브레이크 페달을 적절히 조작하여 여러 가지 감속(deceleration)으로 차량이 정지할 때 발생하는 슬로싱 현상을 재현하는 실험을 실시하였다. 즉 브레이크를 작동하기 직전의 속도와 브레이크를 작동하여 차량이 감속하는 정도를 변수로 하여 다양한 슬로싱 현상을 재현하였다. 이러한 방법으로 실험을 실시한 이유는 연료탱크의 형상적인 특성에 따라 최대 슬로싱 노이즈를 발생시키는 차량의 감속도는 달라지기 때문이다. 그리고 슬로싱 노이즈가 가장 크게 되는 연료의 양 또한 연료탱크 형상 등의 다양한 변수에 의해 달라지지만, 여러 번의 실험을 통해 연료를 3/4 정도 채운 상태에서 슬로싱 노이즈가 커지는 것이 대체적인 현상임을 확인하였다.

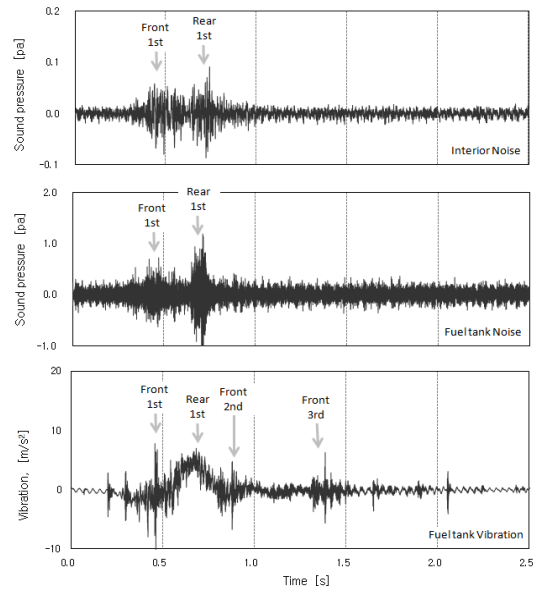
이 연구에서는 각각의 시험차량마다 다양한 속도와 감속도로 운행 및 정지를 반복하는 동안에 슬로싱에 의해 발생하는 연료탱크 전면의 진동과 연료탱크의 근접소음, 그리고 차량 내부의 실내 소음을 측정하였다. 여기서 차량이 감속하여 정지하는 동안 발생하는 차체의 저주파 성분 가속도를 측정하기 위하여 스트레인(stain) 타입의 가속도계를 사용하였다.

2.2 신호특성 분석

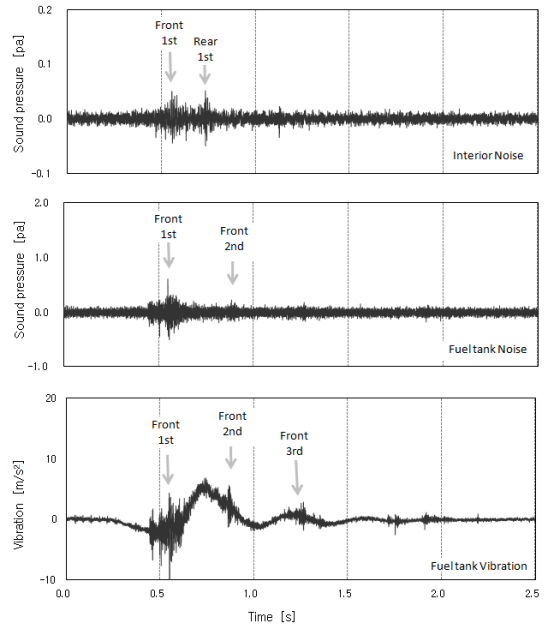
Fig. 1은 슬로싱을 재현한 시험차량 중에 슬로싱 현상이 가장 큰 경우와 가장 작은 차량의 연료탱크 전면의 진동과 근접소음 그리고 실내소음을 동시에 측정된 2.5초 동안의 신호를 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 소음 신호는 50 Hz 미만의 저주파 성분을 필터링하여 제거하고 A-weighting을 적용한 시간신호를 나타낸 것이다. 먼저 연료탱크 전면에 장착한 가속도계에서 측정된 진동신호를 살펴보면, 차량이 정지하는 순간에 타이어와 현가장치의 특성에 의존적인 저주파 차체진동이 두 대의 시험차량에서

동일하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 차체가 처음 으음의 방향으로 진동하는 동안 유체가 연료탱크 전면의 벽에 부딪치면서 첫 번째 슬로싱 현상이 발생하고, 이어서 다음의 슬로싱 현상이 연속하여 일정한 시간간격을 두고 발생하는 것을 Fig. 1에서 진동신호의 변화로부터 알 수 있다. 그리고 연료탱크 후면 벽과 부딪치면서 발생하는 슬로싱 현상은 전면 벽에 장착된 가속도 센서에서는 미약하게 보이는 진동신호로 확인되고 있음을 알 수 있다. 연료탱크 진동과 동시에 측정된 근접 방사소음과 실내소음을 비교 관찰하면, Vehicle #1의 방사소음의 경우에는 연료탱크 전면 벽의 첫 번째 슬로싱과 바로 이어지는 후면 벽의 슬로싱 현상이 소음으로 방사되고 있음을 연료탱크 근접소음 신호로부터 알 수 있다. 그리고 실내소음의 경우에서도 근접 방사소음의 경우와 유사하게 전면 벽 및 후면 벽의 슬로싱 현상이 실내로 전파되었음을 알 수 있다. 그런데 두 번째 이후의 전면 벽의 슬로싱은 근접소음으로 방사되지도 않을 뿐만 아니라 실내로도 전파되지 않았거나 매우 미약함을 Fig. 1(a)로부터 알 수 있다. Vehicle #2의 경우를 살펴보면 첫 번째 전면 벽의 슬로싱이 근접 방사소음과 실내소음으로 나타나는 것을 Fig. 1(b)로부터 알 수 있으나, 후면 벽의 슬로싱은 근접 방사소음으로 나타나지 않고 실내소음에서는 전면 벽의 슬로싱과 거의 유사한 크기로 발생되고 있음을 알 수 있다. 시험차량 두 대의 전면 벽 진동 신호를 비교하여 보면, Vehicle #2의 경우는 Vehicle #1의 경우에 비해 슬로싱이 더 많이 반복되고 있으나 그 크기는 작고, 실내에서 발생하는 소음신호의 크기도 작음을 알 수 있다. 두 대의 시험차량에 대한 연료탱크 전면 슬로싱의 주기는 슬로싱이 반복되면서 약간의 차이는 있으나 평균적으로 Vehicle #1의 경우는 대략 0.45초이고, Vehicle #2의 경우는 대략 0.35초 정도이다.

앞에서 측정된 슬로싱 신호들의 주파수 특성을 해석하기 위해 각각의 신호들에 대하여 첫 번째 슬로싱이 발생하는 시점부터 1.5초 동안의 신호에 대한 auto-spectrum을 Fig. 2에 나타내었다. 슬로싱 신호는 특정한 주파수 특성을 가지기 보다는 넓은 범위(broad band)의 주파수 특성을 가지며 고주파수가 될수록 소음 레벨이 감소하는 경향이 있었다. Fig. 2를 보면 연료탱크의 방사소음은 주파수에 변화에 따



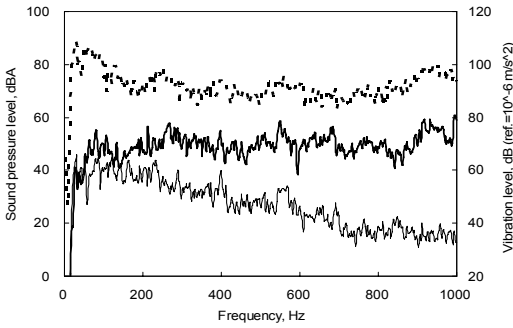
(a) Test vehicle #1: high level slosh noise



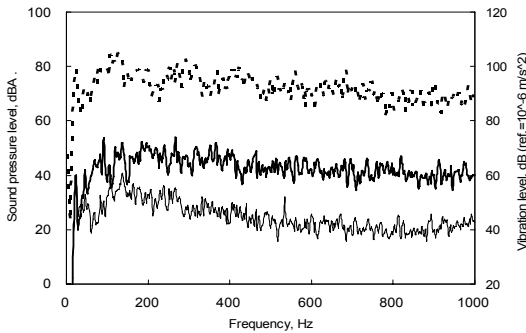
(b) Test vehicle #2: low level slosh noise

Fig. 1 Comparison of synchronized time signals(top: A-weighted interior noise, middle: A-weighted fuel tank noise, bottom: fuel tank vibration)

른 소음수준의 변화가 작은 반면에 실내소음의 경우에는 주파수가 증가할수록 소음의 크기가 큰 폭으로 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 연료



(a) Test vehicle #1: high level slosh noise



(b) Test vehicle #2: low level slosh noise

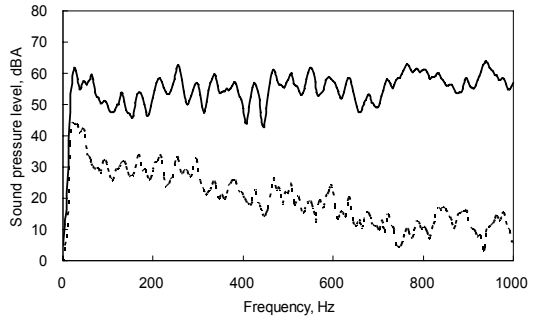
Fig. 2 Comparison of sloshing signal spectra(dot line: fuel tank vibration, thick solid line: radiation noise, thin solid line: interior noise)

탱크에서 발생한 슬로싱 현상이 실내로 전파되는 과정에서 고주파의 진동과 소음이 진동감쇠뿐만 아니라 흡차음의 효과로 인해 감소되기 때문인 것으로 판단되어 진다.

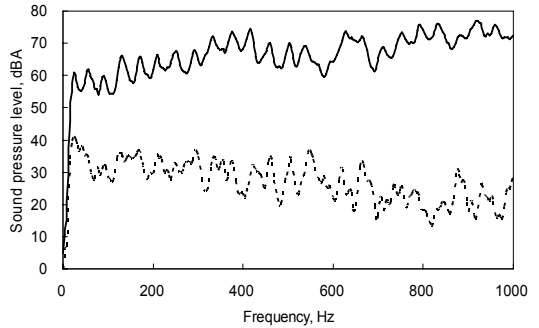
2.3 전달특성 분석

일반 승용차의 연료탱크에서 발생한 슬로싱 현상이 실내로 전달되는 경로에 대한 연구는 승용차의 슬로싱 노이즈를 개선하기 위해서 매우 중요하다. 앞에서 살펴 본 바와 같이 슬로싱은 연료탱크의 진동을 발생시킬 뿐만 아니라 방사소음도 함께 유발시킨다. 연료탱크의 슬로싱 진동이 탱크-차체 고정 마운트를 통해 차체를 가진하여 발생하는 실내소음은 구조전달소음(structural borne path)이라하고, 이와는 달리 연료탱크 근접 방사소음이 공기를 매개로 하여 실내로 유입되는 경우를 공기전달소음(airborne path)이라 한다.

이 논문에서는 구조전달소음과 공기전달소음의



(a) Test vehicle #1



(b) Test vehicle #2

Fig. 3 Sound level comparison radiated from sound speaker(solid line: exterior noise near fuel tank, dot line: interior noise near driver's left ear)

정도를 알아보기 위하여 연료탱크 근처에 스피커에서 발생시킨 20~1,000 Hz의 랜덤소음이 실내로 얼마나 유입되는지를 알아보는 시험을 실시하였으며, 측정 결과는 Fig. 3과 같다. 즉 연료탱크 위치에서 발생한 소음이 실내로 유입되면서 감소되는 양을 소음감소율(noise reduction rate)이라 하고 식 (1)과 같이 실험적으로 구하였다. 그리고 슬로싱 현상이 발생하는 실제 상황에서 측정된 근접 방사소음과 실내소음의 차이를 소음차이율(noise gap rate)이라고 정의하고 식 (2)와 같이 구하였다.

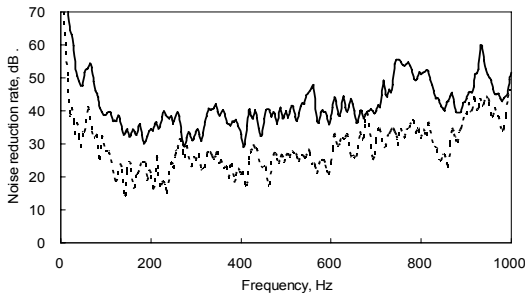
$$\text{Noise reduction rate (dB)} = P_f(\text{dB}) - P_d(\text{dB}), \quad (1)$$

when using sound speaker

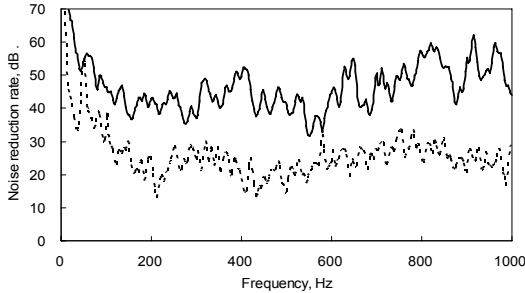
$$\text{Noise gap rate (dB)} = P_f(\text{dB}) - P_d(\text{dB}), \quad (2)$$

when slosh happening

여기서 P_f 는 연료탱크 근접 방사소음 스펙트럼이고,



(a) Test vehicle #1



(b) Test vehicle #2

Fig. 4 Comparison between noise reduction rate and noise gap rate(solid line: noise reduction rate, dot line: noise gap rate)

Table 1 Characteristics and subjective ratings of seven test vehicles

VIN	Fuel type	Engine size	Sub. rating
V#1	Diesel	2000cc	5.5
V#2	Gasoline	2000cc	6.5
V#3	Gasoline	2000cc	6.5
V#4	Gasoline	2000cc	6.5
V#5	Gasoline	1800cc	7
V#6	Diesel	2000cc	6
V#7	Gasoline	1500cc	7.5

P_d 는 실내의 운전자 귀 위치에서 측정된 소음의 스펙트럼을 의미한다. 만약 슬로싱의 소음차이율이 공기 전달되는 과정에서 감소하는 소음감소율보다 작다면 구조전달소음이 있음을 의미하고 구조전달소음의 정도가 클수록 그 차이는 커진다는 예측이 가능하다. 두 대의 시험차량에 대한 소음차이율과 소음감소율을 비교하고 있는 Fig. 4로부터 슬로싱이 실내소음으로 전달되는 것은 대부분이 구조전달소음임을 알 수 있다⁽⁷⁾.

3. 슬로싱 노이즈의 정량적 지표

3.1 주관평가와 정량적 지표

앞 절의 Fig. 1에서 살펴 본 바와 같이 슬로싱 노이즈의 신호패턴은 유체 충돌(hitting)과 스프래싱(splashing)의 과도(transient)신호의 형태를 나타낸다. 그리고 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 특정한 주파수를 가지기 보다는 넓은 범위(broad band)의 주파수를 가지며 고주파가 될 수록 에너지가 감소하는 특성이 있는 것을 확인하였다. 이와 같이 넓은 범위의 주파수를 가지는 과도신호의 정량적인 값을 결정하는 방법은 매우 다양하며, 과도신호의 특성에 따라 알맞은 정량적 수치를 도출하여야 한다.

이 논문에서는 슬로싱 노이즈의 일반화된 정량적 지표값을 도출하기 위하여 여러 가지 슬로싱 노이즈에 대하여 주관적 평가를 실시하였다. 그리고 주관적 평가 결과와 상관성이 높은 정량적인 물리량을 슬로싱 노이즈의 정량적 지표로 제안하였다.

Table 1과 같은 제원을 가지는 7대의 시험차량에 대하여 완성차 업체에서 10년 이상의 경험을 보유한 노이즈 전문평가 요원이 평가한 평가값을 제원과 함께 Table 1에 나타내었다. 이때 평가법은 SAE J1441을 응용하여 최하등급(lowest rating)은 “1”로 하고 최상등급(highest rating)은 “10”으로 하였으며, “6”등급을 기준으로 슬로싱 노이즈에 대한 개선이 필요하다는 판단의 기준으로 삼았다⁽⁸⁾. 즉 “6”보다 낮은 등급은 소비자의 불만으로 인해 개선을 필요할 수준이고 “7”등급은 민감한 소비자는 슬로싱 노이즈를 감지할 수 있으나 불만을 나타내지 않는 정도를 의미한다. 평가시험 모드는 전문평가요원이 다양한 속도와 감속도로 운전하면서 슬로싱 노이즈가 최대가 될 때 관능평가를 실시하고 동시에 슬로싱 신호도 함께 기록하였다.

3.2 주관평가와 정량적 지표값의 상관도

신호의 정량적인 크기를 나타낼 때 가장 일반적으로 사용되는 것은 r.m.s.(root mean square)이고, 뾰족한(peaky) 신호가 영향을 크게 미치는 경우에는 r.m.q.(root mean quad)값을 사용하기도 한다. 디지털 데이터로부터 r.m.s.와 r.m.q.를 구하는 수식은 다음과 같다.

$$r.m.s. = \left[\frac{1}{N} \sum p^2(i) \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$r.m.q. = \left[\frac{1}{N} \sum p^4(i) \right]^{1/4} \quad (4)$$

여기서, N 은 디지털 시간 데이터의 총 개수이고 $p(i)$ 는 시간 데이터 i 번째의 음압 값을 의미한다. 그런데 차량에서 슬로싱 노이즈가 발생하는 동안에 엔진의 폭발 성분에 의한 저주파 소음이 함께 기록된 시간 데이터의 r.m.s.와 r.m.q.는 슬로싱 노이즈와 상관이 없는 엔진소리로 인해 슬로싱 노이즈의 크기는 실제와는 달리 왜곡되어 계산되어 질 수 있다. 그래서 이 논문에서는 A-weighted r.m.s.와 A-weighted r.m.q.를 도입하여 엔진소리를 저주파 차단필터로 제거하여 객관적인 지표값으로 나타내어 보았다. 이에 대한 수식은 다음과 같다.

$$r.m.s.(A) = \left[\frac{1}{N} \sum p_A^2(i) \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$r.m.q.(A) = \left[\frac{1}{N} \sum p_A^4(i) \right]^{1/4} \quad (6)$$

여기서, $p_A(i)$ 는 A-weighting이 적용된 시간 신호에서 i 번째 음압을 의미한다. 평가 차량 7대에 대하여 위의 방법으로 구한 4가지의 일반적 정량지표 (r.m.s., r.m.s.[A], r.m.q., and r.m.q.[A])로 구한 슬로싱 노이즈의 값을 Table 2에 나타내었다. 앞의 정량지표를 구하기 위한 누적 시간의 길이는 과도신호의 슬로싱이 발생하여 사라지는 구간을 포함하는 4초간으로 하였다. Table 1의 주관평가 결과와 Table 2의 일반적 정량지표값과의 상관도를 결정하기 위하여 각각에 대하여 결정계수 R^2 (coefficient of determination)를 식 (7)과 같이 구하였다.

$$R^2 = \left\{ \frac{1}{N} \times \sum [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})] / (\sigma_x - \sigma_y) \right\}^2 \quad (7)$$

여기서, N 은 평가차량의 숫자에 해당하며, \bar{x} 는 주관평가의 평균값을 의미하며 x_i 는 각각의 주관평가 결과값이다. 그리고 \bar{y} 는 일반적 정량지표의 평균값이고 y_i 는 x_i 에 대응하는 정량지표값을 의미한다. σ_x 와 σ_y 는 주관평가와 정량지표의 표준편차이다. 평가차량 7대에 대한 슬로싱 노이즈의 주관평가와 다

Table 2 General objective indexes of slosh noise and their coefficient of determination

VIN	r.m.s. (dB)	r.m.s. (dBA)	r.m.q. (dB)	r.m.q. (dBA)
V#1	89.1	53.0	94.8	59.0
V#2	78.2	46.3	81.9	53.2
V#3	86.2	49.3	88.8	54.3
V#4	83.4	48.1	86.9	53.7
V#5	80.9	46.1	86.1	50.0
V#6	91.8	54.1	93.3	57.5
V#7	84.3	45.7	91.7	51.5
R^2	0.135	0.528	0.029	0.71

양한 정량적지표값들 사이의 결정계수를 Table 2의 마지막 줄에 나타내었다. 슬로싱 노이즈 신호에 A-weighting을 적용한 것이 그렇지 않은 것에 비하여 결정계수는 크게 향상되는 것을 알 수 있으며, r.m.q.(A)가 r.m.s.(A)에 비하여 주관평가 결과와 더욱 높은 상관성을 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 슬로싱 노이즈의 피크성 과도음압 신호가 주관평가에 주요한 영향을 미치지 때문으로 판단된다.

이 논문에서는 승용차량의 슬로싱 노이즈의 주관평가와 상관성이 더욱 향상된 객관적 인덱스를 개발하기 위해 LAF(A-weighted fast time-weighted sound level)값을 도입하였다⁹⁾. LAF는 사운드레벨메터(sound level meter)를 이용하여 임의의 소리를 측정하는 방법 중에 한가지로써 충분히 짧은 시간간격의 A-weighted SPL에 대하여 exponential time average를 적용하여 구할 수 있다. Exponential time average 구할 때의 가중값(weighting value)은

$$w_e(t) = e^{-t/T} \quad (8)$$

로 구한다. 여기서 T 는 시정수(time constant)를 의미하는데 표준에서는 0.125초일 때 “fast”라하고 1.0초일 때 “slow”라고 한다. 이 논문에서는 짧은 시간에 변화하는 슬로싱 노이즈의 특성을 고려하여 “fast”로 결정하였다. 그리고 위 식에서 t 는 시정수의 첫 샘플에서 현재 측정 중인 샘플 사이에 지나간 시간을 의미한다. Fig. 5에서는 실내에서 측정한 슬로싱 노이즈의 신호와 10 ms간격으로 계산한 값을 예시하고 있다. 이 논문에서는 슬로싱 노이즈가 발생하는 동안에 계산된 값의 최대값을 정량적 지표값

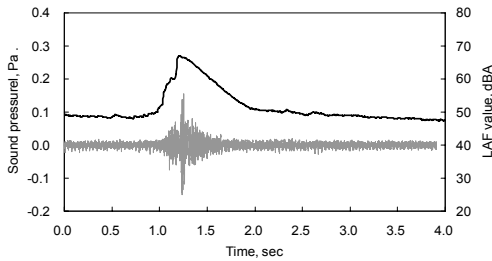


Fig. 5 Value and time signal of slosh noise(thick line: value, thin gray line: Sound pressure)

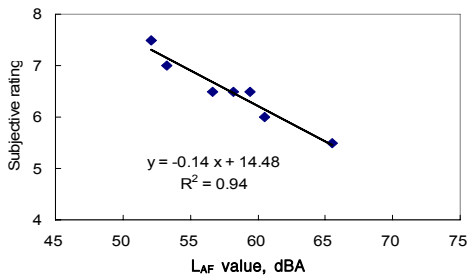


Fig. 6 Correlation between L_{AF} value and subjective rating and its regression line

으로 하여 7대의 평가차량 대한 주관평가 결과와의 상관성을 분석하여 Fig. 6에 나타내었다. 최대 값과 주관평가 결과 사이의 결정계수는 0.94로 나타났으며, 이것은 앞 절에서 구한 일반적 정량지표값에 비하여 크게 향상된 것이다.

4. 결 론

이 논문에서는 슬로싱 노이즈가 발생하는 승용차량에서 연료탱크 전면 벽의 진동과 근접 방사소음 및 차실 내부의 소음 측정하여 슬로싱 노이즈의 신호특성을 분석하였다. 그리고 차량 실내에서 측정된 소음신호에 대하여 다양한 정량적인 지표값을 구하여 차량에 탑승한 소음전문 평가자의 감성적 평가와의 상관성에 대한 분석도 실시하였다. 액체 연료가 연료탱크의 전면과 후면 벽을 처음으로 충격하면서 발생하는 주(major) 슬로싱 현상과 이어지는 충격으로 인해 발생하는 부(minor) 슬로싱 현상이 연료탱크의 진동 신호에서 확인 되었고, 주 슬로싱에 의한 소음이 슬로싱 노이즈의 주된 성분임을 확인할 수 있었다. 슬로싱 소음의 스펙트럼으로부터 슬로싱 노이즈

의 주된 주파수 성분은 500 Hz이내이고, 1 kHz 이하의 저주파 필터링한 신호를 재생하여 들었을 때 실제와 거의 유사한 음색을 유지하는 것을 확인하였다.

연료탱크에서 발생한 슬로싱 현상은 구조전달경로를 통하여 실내로 유입되는 양이 대부분임을 노이즈감소율과 노이즈차이율을 비교함으로써 확인되었다. 이 논문에서는 슬로싱 노이즈의 주관적인 평가와 상관성이 높은 객관적인 인덱스를 개발하기 위해 L_{AF} 값을 도입하였으며, 일반적인 정량지표에 비해 크게 향상된 상관도를 가짐을 7대의 평가차량에서 확인하였다.

References

- (1) Hakan, A. and Erdem, U., 2005, Experimental Investigation of Pressure Distribution on a Rectangular Tank due to the Liquid Sloshing, *Ocean Engineering*, Vol. 32, No. 11-12, pp. 1503~1516.
- (2) Panigrahy, P. K., Saha, U. K. and Maity, D., 2009, Experimental Studies on Sloshing Behavior due to Horizontal Movement of Liquids in Baffled Tanks, *Ocean Engineering*, Vol. 36, No. 3-4, pp. 213~222.
- (3) Eswaran, M., Saha, U. K. and Maity, D., 2009, Effect of Baffles on a Partially Filled Cubic Tank: Numerical Simulation and Experimental Validation, *Computers and Structures*, Vol. 87, No. 3-4, pp. 198~205.
- (4) Stefan aus der Wiesche, 2003, Computational Slosh Dynamics: Theory and Industrial Application, *Computational Mechanics*, Vol. 30, pp. 374~387.
- (5) Stefan aus der Wiesche, 2006, Noise due to Sloshing within Automotive Fuel Tanks, *Forsch Ingenieurwes*, Vol. 70, pp. 13~24.
- (6) IU, H. S., Cleghorn, W. L. and Mills, J. K., 2004, Design and Analysis of Fuel Tank Baffles to Reduce the Noise Generated from Fuel Sloshing, *SAE Technical Paper 2004-01-0403*, doi:10.4271/2004-01-0403.
- (7) Cha, H. B. and Yoon, S. H., 2007, Sensitivity Analysis Using TPA for Slosh Noise of Fuel Tank, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 766~770.
- (8) SAE J1441:1998(R2007), Subjective Rating Scale for Vehicle Handling, *SAE International Surface Vehicle*

Recommended Practice.

(9) International Standard IEC 61672-1:2002, Sound Level Meters - Part 1 Specifications, Geneva, Switzerland.



Se-Jin Ahn received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees from Pusan National University in 1994, 1996, and 2003, respectively. Dr.Ahn is currently a professor at the department of energy & electricity in Uiduk

University. His research interest is in human vibration.



Seongho Yoon graduated from the Korea University in 1986 and 1988 with the degree of BSc and MSc in Mechanical Engineering. In 1994 he went on to study inverse problems in acoustics for the degree of Ph.D. in the

Institute of Sound and Vibration Research at the University of Southampton in England. He is now working for Technical Center of Renault Samsung Motor Company.