

자동차 주행 가속 차실 소음의 주관적 음질 평가

강상욱* · 이장무**

Subjective Evaluation of Sound Quality in Vehicle Passenger Compartment during Acceleration

S. W. Kang and J. M. Lee

Key Words : Sound Quality(음질), Subjective Assessment(주관적 평가), Interior Noise(차실 소음)

Abstract

Sound quality engineering in automobile noise applications has become more and more important under the current quiet driving condition that the interior noise level is below 65 dBA, because various noise components masked under high noise level can be audible in quieter driving situation. Many researches have been carried out for subjective and objective assessments on automobile sounds and noises. In particular, the interior sound quality has been one of research fields that can give high-quality feature to automobile products. Although many works related to the interior sound quality have been progressed or completed in foreign countries, limited research results are presented in the country. In the study, as a base step necessary to objective assessments on car interior noises, subjective assessments are performed with 20 subjects. For this purpose, perceptual adjectives suitable to the assessment of acceleration noises are selected as assessment scales through questionnaire procedures using 35 subjects. Mean values and standard deviations are calculated for noises created through digital filtering of acceleration noises measured. In addition, the correlation analysis and the factor analysis are carried out to investigate the dependence of the assessment scales selected.

기호설명

m : 평균

σ : 표준편차

Z : Wilcoxon test Z value

F : 공분산 분석 결과 값(ANOVA value)

1. 서론

최근의 차량의 경량화, 고출력화, 고급화 추세에 따라 자동차와 관련된 여러 가지 타입의 소음 음질에 관한 주관적/객관적 평가 방법에 대한 많은 연구가 활발히 진행되어지고 있다. 주 소음원인 엔진의 소음 음질 향상을 위한 엔진 마운팅 및 차체 설계 변경에 대한 연구⁽¹⁻³⁾, 자동차 문닫이음의 음질 및 기구학적 소음 발생 매커니즘과의

상관성 연구⁽⁴⁻⁶⁾, 다양한 운전 상황 하에서의 실내 소음을 객관적으로 평가하기 위한 연구⁽⁷⁻¹¹⁾, 자동차 출발음^(12, 13), 및 파워 윈도우 소음^(14, 15) 등에 관한 연구들이 그 주류를 이루고 있다.

자동차 실내 소음은 구매자의 수요에 영향을 주는 중요한 변수로 부가되었다. 세계적인 자동차 메이커의 경우, 차량의 주행시 주 운전 회전수에서 65dB 이하의 소음수준을 보장하는 기술력의 확보단계에 이르렀으며, 보다 조용한 운전 조건 아래에서 그동안 마스킹되었던 다른 소음 요소들이 운전자의 인식 레벨에 포함되게 되었다⁽⁹⁾. 이러한 소음 요소들은 전체 소음 레벨에는 큰 영향을 주지 않으나, 운전자의 주관적 인지에는 상당한 영향을 주게 된다.

소음 스펙트럼의 주파수 특성을 바꿈으로써 특정 차량의 소음 음질 특성을 변경하는 연구는 차체 진동특성과 차실 음향모드 특성 및 음향-구조 연성 특성 파악을 통한 소음 저감 연구와 밀접한

* 한성대학교 기계시스템공학과

** 서울대학교 기계설계학과

관련을 가지고 있다. 차체 진동 특성 또는 차실 음향 특성을 변경하는 방법에 의해 소음 스펙트럼 특성을 바꾸고 동시에 주행 실험을 통해 원하는 음질 확보의 여부를 판단하는 일련의 작업은 많은 시간과 경비가 필요하다. 본 논문에서는 이러한 난점을 극복하기 위한 방안으로 최근의 급속히 진전되고 있는 디지털 필터링 기술을 이용한 일종의 ‘가상 음질 분석법’이 수행되어졌다. 가상 음질 분석법은 ‘(1) 음질 개선 차량에 대한 소음 데이터 확보 (2) 필터링을 통한 다양한 소음 데이터 확보 (3) 주관적 인지성향과 소음 인자와의 상관성 규명 (4) 목표 소음 데이터 설정 (5) 변경 대상 스펙트럼 인자와 설계변경 요소와의 상관성 규명 (6) 관련 설계요소 변경 (7) 주행 시험을 통한 검증’의 6 단계를 통하여 일단락되어진다. 주행가속소음 음질 설계를 위한 이러한 방법의 연구는, 차체 설계 초기단계에서부터 전통적으로 이루어진 소음/진동 저감 설계 연구에 가상 음질 설계 기술을 추가함으로써 소음/진동 레벨과 음질이라는 두 가지 측면을 동시에 고려하는 것을 용이하게 할 것이다. 본 논문에서는 위에서 제시된 음질분석법의 6 단계 중 세 번째 단계까지 만을 다루기로 한다.

2. 연구대상차량의 주행소음 시험

2.1 개요

본 연구의 목표는 부밍 주파수 구간 내에서의 설계변경에 의한 자동차 가속 주행 소음 음질 개선이다. 그래서 220 Hz 이상의 주파수 성분은 주관심 대상에서 제외된다. 그리고 운전자의 운전 형태에 따라 주행소음은 다양하게 형성되므로, 일반적인 주행가속 소음 평가 방법 중의 하나인 ‘WOT(Wide Open Throttle)’ 방법에 의해 측정되어진 주행소음을 평가 표준 소음으로 채택하였다. 소음 측정 장비인 Dummy Head(Head Acoustics 사)를 차량에 탑재하여 조수석 위치에서의 주행 소음을 측정하였다(Fig. 1 참조).



Fig. 1 Dummy Head installed at assistant driver seat.

2.2 주행소음 분석

Fig. 2는 조수석(오른쪽 귀)에서 측정된 주행 소

음의 rpm 별 스펙트럼 형상을 보여주는 3 차원 스펙트럼 맵(3D Spectrum Map)이다.

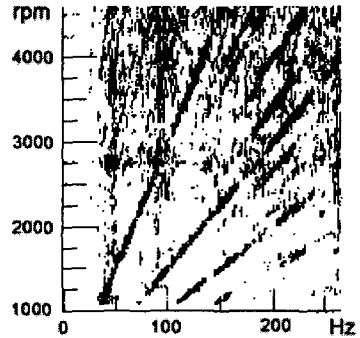


Fig. 2 Spectrum of the acceleration noise measured.

본 주행소음의 스펙트럼 특징은 다음과 같이 요약된다. (1) 엔진 2 차 오더 성분이 매우 지배적이며, 특히 2 차 오더 성분이 구조 공진 주파수와 만나는 지역에서는 큰 소음레벨을 가진다. (2) rpm의 변화와 무관하게 특정 주파수 구간에서는 구조 공진 소음이 발생하고 있다. 중심주파수가 약 40Hz와 80Hz인 구간에서 저주파수 구조 기인 부임 소음이 유발되고 있다.

3. 주행가속 소음의 주관적 평가

3.1 감성형용사의 선택

본 연구에서는 의미 미분법에 기초하여 가속 주행소음이 가지고 있는 감성적인 측면을 측정하기 위하여, 먼저 자동차 주행가속 소음을 표현하는데 적당한 감성 형용사들을 두 가지 방법의 설문조사를 통하여 추출하였다. 지금까지 일반적인 소리에 대한 객관식 설문조사에서는 전남대 국문학과 교수가 우리나라 국민들의 소리에 대한 감성 수준을 고려해 통계적으로 추출한 감성 어휘들이 사용되어져 왔다. 그러나 이들 어휘들은 일반적인 소리를 표현하는 감성 어휘이므로 자동차 주행소음을 표현하는데 있어서 적당한 새로운 형용사를 추가적으로 보완하는 것이 필요하다. 그래서, 녹음한 실제 주행 소음을 들려주면서, “듣고 있는 소음을 표현(평가)하는데 적절한 감성 형용사들을 나열하십시오”라는 질문을 가진 주관적 설문조사가 먼저 시행되어졌다. 이러한 주관적 설문 조사에서 상위 랭크된 감성 형용사들을 전남대 국문학과 교수가 수집한 감성 형용사들에 포함시켜서 최종 수집된 30 개의 전체 감성 형용사들로부터 주행소음 평가에 적절하다고 생각되는 감성 형용사 5 개를 선택하게 하는 객관식 설문조사가 수행되어졌다(Fig. 3 참조).

20 세에서 35 세 사이의 건강한 청력을 가지고 있는 남성 35 을 대상으로 Fig. 3 의 객관식 설문조사를 행하였다. 설문 결과에서 상위 랭크된 감성 형용사들을 대상으로 하여 비슷한 성격의 감성 척도들은 하나의 대표 형용사로 압축하여(예를 들면, 힘찬, 강력한, 강한 등의 척도들은 강력함으로 압축), 강력함, 중후함, 경쾌함, 안정감, 고급감 등의 5 가지가 선별되어졌다. 그리고, 선정된 감성 척도와는 별개로 평가음에 대한 선호 경향을 알아보기 위해, 이미 선별된 5 개의 형용사보다 한단계 높은 수준의 감성표현 척도로 '선호도'라는 복합적인 감성척도를 추가하였다.

질문	지금 듣고 있는 주행가속소음에 대해 당신이 느끼는 감정을 표현하는데 가장 적합한 형용사들을 선택하십시오.				
밝은	조잡스러운	고급스러운	깊이있는	명쾌한	
우렁찬	박력있는	중후한	강력한	급속성의	
단조로운	시원한	부드러운	웅장한	경쾌한	
매끄러운	맑은	온화한	조화로운	깊이있는	
조용한	덜덜거리는	여린	힘찬	투박한	
빈약한	속도감있는	스무스한	거슬리는	잡스러운	
안정된	가벼운	날렵한	강한	

Fig. 3 Objective questionnaire for selecting sense adjectives

3.2 필터링을 통한 평가 대상 소음 수집

본 음질 평가에서는 2 개의 평가 대상음을 기준음과 비교하는 상대적인 평가 방식이 적용되었다. 먼저 주행시험에서 측정된 원 소음(original sound)을 디지털 필터링하여 두개의 소음을 생성시켰다. 첫번째 생성 소음은 원소음에서 100Hz 이하의 부밍소음과 엔진 2 차오더를 제거한 것이고, 두번째 생성 소음은 단지 100Hz 이하의 부밍 소음만을 제거한 것이다. 원소음과 필터링에 의해 생성된 소음 중에서 기준음은 첫번째 생성 소음(엔진 2 차오더 성분과 부밍 소음이 제거)으로 정한다. 그리고, 기준음에 엔진 2 차 오더 성분을 추가한 것을 평가음(1)으로, 엔진 2 차오더와 100Hz 이하의 부밍소음이 존재하는 원 소음을 평가음(2)로 정하였다 (Table 1 참조).

Table 1 Spectrum feature of the base noise and the two noises to be compared with it.

소음 종류	스펙트럼 특성
기준음	원소음에서 부밍소음과 엔진 2 차오더 제거
평가음(1)	기준음에서 엔진 2 차오더 추가
평가음(2)	기준음에서 부밍소음과 엔진 2 차오더 추가

본 논문에서는 생략되었지만, 해당 차량에 대한 연성해석 결과에 의해, 40Hz 부근의 부밍 소음은 뒤 창문(rear window)과 차실 1 차 음향 모드와의

연성에 의해, 80Hz 부근의 부밍 소음은 루프(roof metal sheet)와 차실 1 차 음향 모드와의 연성에 의해 발생한 차체-차실 연성 소음인 것으로 밝혀졌다.

3.3 기초 통계분석

위에서 선정된 6 가지 감성 척도를 가지고 2 가지 평가음에 대해 주관적 음질 평가를 실시하였다. 평가 점수 구간은 (-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3)을 사용하였으며, 평가원은 운전경력자 9 명과 무 경력자 11 명으로 총 20 명으로 구성되었다. 운전 경력의 유무가 점수 분포에 특별한 영향을 미치는지를 조사하기 위하여, '공분산분석(ANOVA)'을 수행하였으며, 기초통계 분석 자료로써 각각의 감성 척도에 대하여 평가원이 부가한 점수에 대한 평균과 표준편차도 계산되어졌다. 그리고, 평가원들이 특정 감성 척도에 대하여 일률적으로 점수를 매기고 있는지를 알아보고 동시에 평균 값의 신뢰성을 조사하기 위하여 'Wilcoxon test'를 수행하였다.

Table 2 Mean, Standard deviation, Wilcoxon test, ANOVA results

평가음	평균/표준편차/Wilcoxon test/ANOVA						
	강력함	중후함	경쾌함	안정감	고급감	선호도	
(1)	<i>m</i>	-0.08	1.50	-0.55	0.76	1.08	1.15
	σ	0.99	0.75	0.81	0.90	0.99	1.62
	<i>Z</i>	0.31	3.72	2.51	2.82	3.20	2.48
	<i>F</i>	0.08	2.65	1.22	0.09	0.08	3.89
(2)	<i>m</i>	-0.89	0.39	-1.92	-0.22	-0.25	-1.65
	σ	1.73	1.54	0.91	1.64	1.57	1.44
	<i>Z</i>	1.98	0.97	3.72	0.72	1.09	3.34
	<i>F</i>	1.88	1.26	0.01	1.10	0.04	2.47

3.3.1 공분산분석 (운전 경력 유무 관련)

Table 2 에서 계산된 각각의 평가음 및 평가척도에 대한 공분산 분석 결과 *F* 를 보면, 어떠한 결과도 신뢰도 95%에 대한 평가 기준치인 $F_{\alpha} = 4.45$ 보다 높지 않다. 그래서 운전 경력의 유무는 주관적 인지 성향에 별다른 영향을 주지 않는다는 결론을 내릴 수 있다.

3.3.2 평균, 표준 편차 및 Wilcoxon test

Table 2 에서 각각의 감성척도에 대한 평균을 살펴보면, 평가음(1)은 중후함, 안정감, 고급감 및 선호도에 있어서는 양(+) 점수를 얻었으며, 강력함과 경쾌함에 있어서는 음(-)의 점수를 얻었다. 평가음(2)는 중후함을 제외한 모든 척도에서 음(-)의 점수를 얻었다. 이러한 사실로 미루어 보아 주행소음 중 엔진 2 차 오더 추가는 강력함과 경쾌함을 줄인다고 생각할 수 있으며, 엔진 2 차 오더와 부밍 소음의 동시 추가는 중후함을 제외한 모든 감

성척도를 좋지 않게 평가하도록 한다고 할 수 있겠다. 그러나, 이러한 잠정 결론은 각각의 평균값 자체의 신뢰성을 고려치 않은 결론이므로 평균의 신뢰성을 검증하기 위한 추가적인 통계 분석이 요구되어진다. 그래서 각 평균에 대한 Wilcoxon test가 수행되어졌다. Wilcoxon test는 평가원들이 특정 감성척도에 대해서 얼마나 같은 방향(긍정 또는 부정적으로)으로 평가했는지를 보여주는 통계 분석 기법이다. 평균값이 신뢰도 95% 이상을 가지기 위해서는 $Z > Z_{ref}^{95\%}$ ($Z_{ref}^{95\%} = 1.96$)을 만족해야 한다. 이러한 관점에서 Table 2를 보면, 평가음(1)의 경우는 강력함을 제외한 나머지 감성 척도들의 평균값들은 95%의 신뢰도를 가진다고 생각할 수 있다. 그래서 강력함에 대한 위에서 내린 결론은 95% 이상의 신뢰도를 가진다고 말할 수 있을 것이다. 평가음(2)의 경우는 '선호도', '강력함', '경쾌함'에 대한 평균값들만이 통계적 의미를 가진다고 말할 수 있다. 평균과 Wilcoxon test를 동시에 고려하여 본 주관적 평가에 대한 결론을 내리면 Table 3으로 정리될 수 있다.

Table 3 Effect on subjective perception of spectrum components

주파수 특성	주관적 인지에 미치는 영향
엔진 2 차오더	1. 강력함 과는 무관 2. 선호도, 중후함, 안정감, 고급감 증대 3. 경쾌함 감소
엔진 2 차오더 + 부밍소음	1. 선호도, 강력함, 경쾌함 감소 2. 중후함, 안정감, 고급감 과는 무관

Table 3에서 엔진 2 차 오더 성분은 강력함이라는 인간의 감성에 영향을 주지 않거나 오히려 강력함을 감소시키는 결론이 나왔다. 이는 기존의 외국 논문에서 엔진 2 차 오더 성분이 강력함의 상승에 영향을 준다는 내용과는 상당히 상반되는 내용으로서, 한국인과 외국인의 강력함에 대한 인지 성향의 차이로 인해 발생했을 것으로 예상된다.

3.4 평가음에 대한 상관계수 분석 및 요인 분석

본 절에서는 주관적 평가에서 사용된 6개의 감성 척도들이 어느 정도의 독립성 또는 종속성을 가지는지에 대한 확인을 위해 상관계수 분석과 요인분석(Factor Analysis)이 수행되어진다. 일반적으로 상관계수 분석에서 상관계수 R 값이 $|R| > 0.7$ 을 만족하면 감성 척도들간의 높은 상관 관계가 존재하는 것이며, $0.3 < |R| < 0.7$ 이면 보통의 상관 관계가 존재하는 것이다. 그리고 인자 분석 결과가 통계적 의미를 갖기 위해서는 $KMO > KMO_{ref}$ ($KMO_{ref} = 0.5$)을 만족해야 한다.

3.4.1 평가음(1) (Comparison Noise 1)

평가음(1)은 기준음에 엔진 2 차오더를 추가한 소음이다. 평가음(1)에 대한 상관관계 분석 결과는 Table 4에서 보여진다. 모든 상관 계수들의 절대값이 0.7 이하에 있으므로 감성척도들 간에 높은 상관관계가 존재한다고 말할 수 없다. 그러나, 상관 계수들 간의 상대적인 크기를 고려해보면 선호도와 가장 큰 상관관계($R = 0.65$)를 갖는 감성척도는 안정감이며, 중후함과 고급감은 선호도와는 별로 큰 상관관계를 갖지 않는다.

Table 4 Correlation Analysis of Comparison Noise 1.

	강력함	중후함	경쾌함	안정감	고급감	선호도
강력함						
중후함	0.34					
경쾌함	0.22	-0.44				
안정감	0.08	0.47	-0.24			
고급감	-0.12	0.24	0.07	0.66		
선호도	0.12	0.30	-0.12	0.65	0.31	

이제 Table 5의 인자분석 결과를 살펴보면, 본 평가에 사용된 5개의 1차 감성척도는 3개의 인자들로 압축될 수 있음을 확인할 수 있다(KMO 값이 상당히 낮기 때문에 분석의 신뢰성은 떨어짐). 제 1 인자에는 안정감과 고급감이 속하며, 제 2 인자에는 경쾌함이, 제 3 인자에는 강력함이 속한다. 그리고 중후함은 어느 인자에 속하는지에 대해서는 특별히 말할 수 없다. 그래서, 서로 종속성을 가지고 있는 5개의 감성 척도를 3개의 독립적인 감성 척도로 압축하여 평가음(1)에 대해 재평가하는 것이 보다 신뢰 있는 통계 분석을 가능케 할 것이라는 결론을 내릴 수 있다.

Table 5 Factor Analysis of Comparison Noise 1 (KMO: 0.29)

	강력함	중후함	경쾌함	안정감	고급감
제 1 인자	-0.06	0.45	-0.02	<u>0.83</u>	<u>0.73</u>
제 2 인자	-0.11	0.52	<u>-0.95</u>	0.33	0.03
제 3 인자	<u>0.97</u>	0.53	0.11	0.13	-0.17

3.4.2 평가음(2) (Comparison Noise 2)

Table 6은 평가음(2)에 대한 상관계수 분석 결과를 보여준다. 선호도와 높은 상관관계를 가지는 감성척도는 강력함이다. 즉, 평가음(2)가 기준음에 비해 낮은 선호도($m = -1.65$)를 가지게 된 1차적인 원인은 강력함의 감소($m = -0.89, Z = 1.98$)에서 발생했다고 볼 수 있다(Table 2 참조). 비록 경쾌함이 강력함에 비해 더 큰 감소($m = -1.92, Z = 3.72$)를 보이지만, 경쾌함은 선호도와는 낮은 상관관계($R = 0.20$)를 가지므로 선호도에는 큰 영향을 주지 못하는 감성척도로 생각할 수 있다.

Table 7 은 평가음(2)에 대한 인자분석 결과를 보여준다. 여기서 5 개의 감성 척도들은 서로 종속성을 가지고 있으며, 독립적인 2 개의 인자로 압축될 수 있음을 보여준다. 제 1 인자에는 강력함이 속하며, 제 2 인자에는 경쾌함, 안정감, 고급감이 속한다. 평가음(1)의 경우와 마찬가지로 중후함은 제 1 인자 또는 제 2 인자에도 속할 수 있는 모호성을 가지고 있다. 평가음(1)의 결과와 비교해볼 때 특이한 내용은 경쾌함이 안정감과 고급감과 같은 인자에 속해 졌다는 사실이다. 이는 평가음(2)가 100Hz 이하의 부밍 소음을 가지고 있음으로 인해 경쾌함은 물론 안정감과 고급감을 동시에 저하시켰기 때문이다.

Table 6 Correlation Analysis of Comparison Noise 2.

	강력함	중후함	경쾌함	안정감	고급감	선호도
강력함						
중후함	0.57					
경쾌함	0.45	0.23				
안정감	0.16	0.39	0.44			
고급감	0.45	0.72	0.46	0.74		
선호도	0.65	0.42	0.20	0.05	0.26	

Table 7 Factor Analysis of Comparison Noise 2 (KMO: 0.66)

	강력함	중후함	경쾌함	안정감	고급감
제 1 인자	0.91	0.55	0.27	-0.05	0.28
제 2 인자	0.24	0.56	0.60	0.92	0.88

4. 결론

본 논문에서는 자동차 주행소음 평가를 위한 감성 형용사 추출 작업이 이루어졌으며, 스펙트럼 필터링을 통해 생성한 2 가지 주행 소음에 대한 주관적 평가 및 통계 분석이 수행되어졌다. 통계 분석 결과에 의하면, 엔진 2 차 오더 성분은 강력함에는 거의 영향을 주지 않으며, 오히려 중후함의 상승에 가장 큰 영향을 주며 안정감과 고급감의 상승에도 정(+)의 영향을 줄을 확인할 수 있었다. 엔진 2 차 오더 및 100Hz 이하의 부밍 소음이 동시에 존재 할 때에는, 과도한 저주파수 성분의 존재와 엔진 2 차 오더가 부밍 소음 주파수 구간(40Hz 및 80Hz 부근)과 만나는 영역에서의 갑작스러운 소음 레벨의 상승때문에, 대부분의 평가원들이 강력함과 경쾌함이 감소한다고 인지했다. 마지막으로 인자 분석 결과를 보면, 평가 대상 소음의 종류에 따라 추출되는 독립적인 인자들이 다른 양상을 보임을 확인할 수 있었다. 그러나 평가음에 상관없이 안정감과 고급감은 하나의 인자로 압축될 수 있음이 확인되었다.

- (1) Sasaki, Y., et al., 1981, "Research into the Reduction of Engine Noise during Acceleration," Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, vol. 18, No. 1, pp. 69~75.
- (2) B. Chapnik and B. Howe, 1997, "Engine Sound Quality in Sub-Compact Economy Vehicles: A Comparative Case Study," SAE Paper 971977.
- (3) Schiffbanker, H. et al., 1991, "Development and Application of an Evaluation Technique to Access the Subjective Character of Engine Noise," SAE Paper 911081.
- (4) D. E. Malen and R. A. Scott, 1993, "Improving Automobile Door-Closing Sound For Customer Preference," Journal of Noise Control Engineering," Vol. 41, No., 1, pp. 261~271.
- (5) K. Kanie, et al., 1987, "Vehicle Door Design Based on Sounds and Noise Control," JSAE Review, Vol. 8, pp. 32-37.
- (6) K. Genuit and R. Sottek, 1995, "Objective and Subjective Analysis of the Sound of Door Slamming," Inter-noise 95, pp.921~926.
- (7) I. Hirano et al., 1994, "Subjective Evaluation of Car Interior Noise in a Consecutive Series of Driving Situations," Inter-noise 94, pp. 897~900.
- (8) R. Bisping et al., 1997, "A Standardized Scale for the Assessment of Car Interior Sound Quality," 1997 SAE Paper 971976.
- (9) J. bavonese and G. Gibian, 1985, "Experiment Determination of the Smallest Perceivable Changes in Octave Bands of Automobile Interior Noise," SAE Paper 850980.
- (10) Tsuge, K., et al., 1985, "A Study of Noise in vehicle Passenger Compartment during Acceleration," Surface Vehicle Noise and Vibration Conference Preceeding (May, 1985), pp. 27~34.
- (11) T. Hashimoto and S. Hatano, 1995, "Quantification of Booming Nature of Sound, Part 1: Objective Measure for Estimating Booming Sound," Inter-noise, pp. 947~950.
- (12) R. A. Hartman et al., 1988, "Starter Motor Cranking Sound-Correlation of Objective Noise Measurements to Subjective Jury Ratings," SAE Paper 88080.
- (13) H. Kang, 1995, "The Study of DC Motor Noise and Vibration," SAE Paper 951350.
- (14) J. N. Penfold, 1997, "Power Window Sound Quality-A Case Study," SAE Paper 972017.
- (15) N. C. Otto and G. H. Wakefield, 1994, "A subjective Evaluation and Analysis of Automotive Starter Sounds," Journal of Noise Control Engineering, Vol. 41, No. 3, pp. 377~382.
- (16) K. Genuit, 1994, "Sound Engineering of Vehicle Noise," Inter-noise 94, pp. 875~880.