

승용차 디젤 엔진 소음에 대한 음질 평가 기법 연구

Study on the Sound Quality Evaluation Method for the Vehicle Diesel Engine Noise

권요섭†·김찬묵*·김기창**·김진택***

Jo-Seph Kwon, Chan-Mook Kim, Ki-Chang Kim and Jin-Taek Kim

(2011년 4월 15일 접수 ; 2011년 9월 6일 심사완료)

Key Words : Sound Quality(음질), Auditory Response(청각반응), Human Auditory Organs(인간청각기관), Sound Package(흡차음재), Insulation(흡음), Absorption(차음), Articulation Index(대화명료도 지수)

ABSTRACT

The brand sound of vehicle diesel engine is recently one of the important advantage strategies in the automotive company. Because various noise components masked under high frequency level can be audible in quieter driving situation. Many researches have been carried out for subjective and objective assessments on vehicle sounds and noises. In particular, the interior sound quality has been one of research fields that can give high quality feature to vehicle products. Vehicle interior noise above 500 Hz is usually controlled by sound package parts. The materials and geometries of sound package parts directly affect on this high frequency noise. This paper describes the sound quality evaluation method for the vehicle diesel engine noise to establish objective criteria for sound quality assessment. Considering the sensitivity of human hearing to impulsive sounds such as diesel noise, the human auditory mechanism was simulated by introducing temporal masking in the time domain. Furthermore, each of the human auditory organs was simulated by computer codes, providing reasonable analytical explanations of typical human hearing responses to diesel noise. This method finally provides the sound quality index of vehicle diesel engine noise that includes high frequency intermittent offensive sounds caused by impacting excitations of combustion and piston slap.

1. 서론

최근 자동차 개발 동향은 엔진 고효율에 의한 차실내 소음 저감에 대한 연구와 더불어 음질(sound

quality)의 차별화된 브랜드 이미지 개발을 위해 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 하이브리드 차량 및 전기자동차 개발에 따라 소리가 기대치보다 작을 경우 차가 힘이 없거나 성능이 떨어진다는 인상을 줄 수 있어 소비자의 주관적 평가를 대응할만 한 객관적 음질 평가 기법에 대한 연구가 요구된다⁽¹⁾.

종래 기술에서는 스포츠 쿠페 차량의 배기계 음질 튜닝, 중소형 SUV(sport utility vehicle) 차량의 액슬 기어에 대한 화인 소음(whine noise) 개선을 위한 객관적인 음질 평가 기준 연구, 승용차의 고급감 음질을 개발하기 위한 통계적인 상관성 분석 기법과 다중회귀분석 기법에 대한 연구가 수행되었으

† 교신저자; 정회원, 국민대학교 자동차공학전문대학원
E-mail : noisecenter@hanmail.net

Tel : (031)948-8535, Fax : (031)948-8539

* 정회원, 국민대학교 자동차공학전문대학원

** 정회원, 현대자동차 차량해석팀

*** 전북대학교 기계항공시스템공학부

이 논문의 일부는 2010년 추계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

나, 승용 디젤 엔진 차량에 대한 체계적인 음질 분석 기법에 대한 연구는 미흡하였다⁽²⁻⁴⁾.

승용 디젤 엔진 차량의 음질 기여인자에 대한 분석을 위하여 차량 분해를 통한 부품 비교 분석을 실시하였다. 검토 결과 차량 불용홀에 대한 플러그 적용유무, 와이어 그로멧 홀 축소 등과 같은 씰링 구조에 의한 소음 차이가 있었으며, 엔진룸, 플로워, 언더커버와 같은 흡차음재의 재질 및 두께 차이에 따라 승용 디젤 차량의 특유음 개발에 기여도가 큰 것으로 분석되었다. 체계적인 음질 평가 기술개발을 위해서 청감과 연계한 연구 필요성이 부각되고 있다.

이 연구에서는 승용 디젤 차량의 음질 평가 프로세스 구축을 위하여 인간 청각 모델을 기초로 하는 객관적인 평가 기준에 대한 연구를 수행하고자 한다. 이후 승용 디젤 차량의 음질 인덱스를 구축하고, 소음원의 차량 실내 소음에 대한 기여도를 파악하기 위한 소음 전달 경로 분석법(noise transfer path analysis) 또는 전달계 기여도 분석(transfer system contribution analysis)을 수행할 예정이며, 흡차음재 최적화를 통한 실차 평가 검증 과정에 대해 지속적으로 연구를 진행하고자 한다. 이 연구의 효과로 귀에 거슬리는 디젤 엔진 소리를 어떻게 평가할 것인가와 이들 소리의 음질을 어떻게 개선할 것인가에 대한 두 가지 문제에 명확한 방법을 제시하는 객관적 지수를 제공 가능하며, 음질의 수치화 도구로 사용하여 디젤 음질 개선 프로세스에 기여할 것으로 예상된다.

Fig. 1은 승용 디젤 엔진의 음질 평가 프로세스에 대한 로드맵을 도시하고 있다. 이 논문에서는 인간 청각 모델링 연구를 기초로 하여 객관적인 평가 기준에

대한 선행 연구 결과를 정리하고자 한다.

2. 음질 평가 프로세스

소리에 대한 느낌을 객관적으로 표현하기 위한 많은 음질 인자들이 개발되었으며, 대표적인 4가지는 라우드니스(loudness), 샤프니스(sharpness), 러프니스(roughness), 변동강도(fluctuation strength)를 들 수 있다.

인간의 인식의 변화는 Fig. 2와 같이 용모의 화학 반응에서 나타난 일차 지연 시스템을 통하여 해석적으로 설명될 수 있다. 그림은 세 개의 부분으로 이루어지는데 하단의 그림은 가속시의 엔진 속도 변화, 상단의 그림은 자유도 1의 충격반응 급수로 시뮬레이션 된 충격 디젤 연소 소음, 그리고 중간의 그림은 음질 평가 시스템에 있어서의 인간 청각 모델의

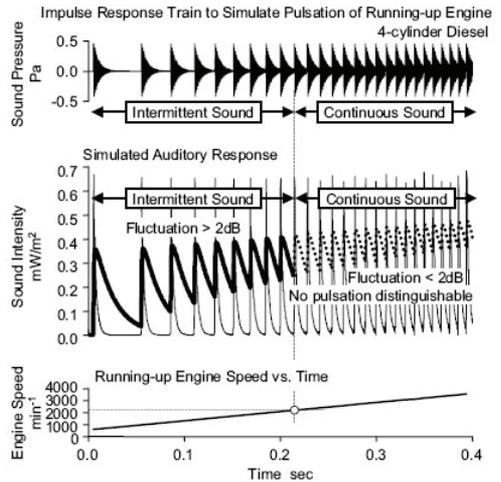


Fig. 2 Impulse response of diesel engine

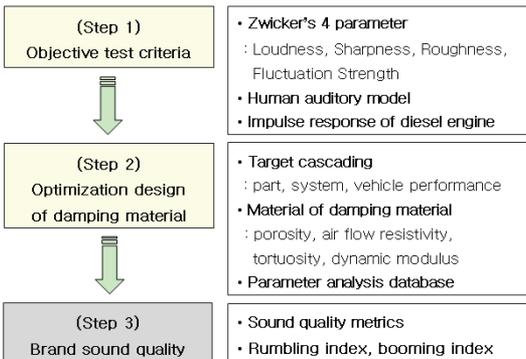


Fig. 1 Roadmap of sound quality process

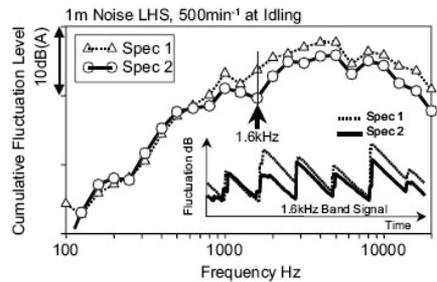


Fig. 3 Test result of diesel sound quality

출력을 보여준다. Fig. 3은 실린더를 갖는 디젤 엔진의 피스톤 슬랩(piston slap)을 조정된 경우의 음질 평가 결과의 한 예를 보여준다. 피스톤 슬랩은 실린더와 피스톤 간극이 클 때 피스톤이 실린더 벽을 때리는 현상이다.

음질 평가를 위한 표준화의 필수 항목은 측정기기 선정과 시험환경, 음질 분석 방법 등 다양한 항목들이 존재하며, 차량의 최적 실내 음질을 평가할 수 있는 표준화 규격이 완성되어야 한다.

2.1 디젤 소음의 음향 특성

디젤 엔진의 가속소음 수준은 가솔린 엔진 대비 저속 및 중속 범위에서 3~6 dB 정도 불리한 수준으로 분석된다. 이는 디젤의 충격 연소 소음이 디젤 엔진의 압축-점화 연소 시스템의 연소 압력의 높은 증가율에 기인한다. 나아가 디젤 엔진의 주요 운동 요소들은 높은 부하에 대비하여 상대적으로 무겁게 제작되며 이는 연소 소음에 비하여 높은 수준의 기계적 소음을 발생시킨다. 기계적 충격 및 연소 압력과 같은 충격적 힘의 요소들은 Fig. 4와 같이 디젤 소음에서 충격적인 간헐적 파형을 생성한다.

승용 디젤 엔진의 연소음은 공기의 유동 소음, 직접 연소음 및 간접 연소음으로 구분할 수 있다. 배기가스 개발목표인 EURO 5 수준을 만족하면서 연비손실 없이 연소음 개발을 위하여 최적화 맵에 대한 대상평가를 실시한다.

2.2 인간 청각 기능의 모델링

인간 청각 시스템은 시간 및 주파수 도메인에 들어오는 소리를 인지하는 감각적 능력을 가진다. 이 연구에서의 음질 평가 프로세스에서는 디젤 소음과 같은 충격파에 의한 순간적인 자극을 감지하는 인간 청각 메커니즘의 모델을 디자인 하였다.

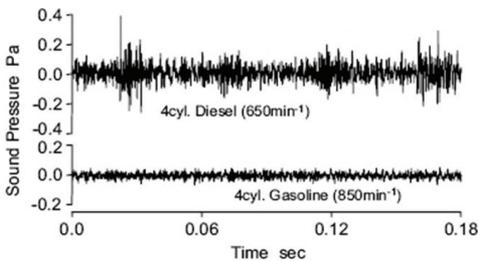


Fig. 4 Impact wave pattern of diesel engine

음질 평가 시스템은 직관적으로 이해 가능한 분석 결과를 제공하는 분석 소프트웨어 도구로 이루어지며, 기본적 특성 및 기능은 다음과 같다.

음질 패널 시험을 위한 데이터 기록 및 PC 기반 데이터 수집에 있어서의 높은 신뢰성, 귀의 달팽이관에 의한 개별적으로 지각된 각각의 주파수 밴드에 있는 시간 도메인 소리 분석, 달팽이관 내의 용모 세포의 적절한 지연에 따른 일시적 마스킹 효과, 인간의 감각 기관에 해를 줄 수 있는 음향 신호의 변동 강도의 수리적 정의, 중간 주파수에 있어서의 지연 신호에 대한 인간의 선택에 일치하는 특정 스펙트럼 부하, 디젤 음향에 대한 인간의 느낌을 1~10 단계의 크기로 나타내는 객관적 음질 지수를 들 수 있다.

이 연구에서는 인간의 청각 모델을 기초로 한 생리학적 보고서에 근거하여 승용 디젤 엔진 음원으로부터 이도 입구, 중이, 소골, 기저막, 용모의 전달계를 통하여 음질을 평가하게 되는 뇌의 신경 조직의 기능에 대하여 분석하였다.

(1) 의성어와 인간청각 상관성

인간 청각 시스템은 저속에서의 간헐적 디젤 소음을 인식할 수 있는데 이는 의성어 “갈-갈”로서 표현될 수 있다. 또한, 인간의 인식은 고속에서의 디젤 소음을 “가-야”라 바꿀 수 있다. 이러한 인식의 변화 현상은 흥미로운 것으로 이는 인간의 신체적 현상이 아닌 감각에 기인한다.

의성의 사용에 있어서 사람들은 소리의 느낌을 표현하기 위하여 많은 의성어를 만들어냈다. 예를 들면, “카라-카라” 또는 “갈-갈”과 같은 의성어는 디젤 소리를 나타내는데 적당하다. 단어의 시작에서 자음과 모음의 쌍을 이루는 것은 디젤 소리의 주파수 범위를 흉내 내거나 묘사하는 것으로 “칼”은 고주파를 “강”은 중간 주파수, 그리고 “쿵”은 저주파를 나타낸다. 단어의 끝부분에서 표현되는 의성어는 “-니”로 끝나는 단어로서 디젤 소리가 이어지는 상태를 나타내는데 “칸”은 크게 요동하는 소리, “카-안”은 커다란 주기를 가지고 크게 요동하는 소리를 나타낸다. 또한, 단어의 첫 번째 철자를 달리하여 “칸” 이나 “간”으로 표시되는 것은 공명음이나 무딘 소리를 나타내며 “칸”이 단일 음조를 나타낸다면 “간”은 서로 다른 주파수로 이루어진 다양한 음

조를 표현한다. 의성어 “카-타” 또는 “카-탄”은 짧은 주기 동안에 순차적으로 발생하는 연속음을 나타낸다⁵⁾.

(2) 인간 청각 기관의 기능

음원으로부터 발생한 소리는 인간의 귀에 도달할 때까지 머리에 부딪히거나 가슴 부분으로부터 반사가 이루어진다. 소리가 귀에 다다르면 소리는 바깥 귀를 거쳐 이도에 이르게 된다. 이도의 입구에 도달한 소리는 귓바퀴 공간의 공명의 영향을 받는다. 소리의 주파수 성분은 소리가 이동되면서 바뀌며 이 과정에서 “머리 관련 전달 함수”가 주파수 영역에서 정의되는데 이는 음원에 대한 이도 입구에서의 음향 스펙트럼의 비율로서 결정된다^{6,7)}.

이도 입구에 도달한 소리는 외이도를 통하여 중이(고막)까지 도달하는데 공기를 포함하는 크기에 따른 공명 특성을 보인다. 소리, 즉 순환적 공기 밀도 변화는 소골의 진동으로 바뀌며 이는 최종적으로 달팽이관에 도달한다. “중이의 전달 함수”는 이 과정의 주파수 성분의 변화 비율에 의하여 정의 된다.

달팽이관의 기저관은 그 진동으로부터 두 가지 정보를 지각하는데 주파수 성분과 이들 성분의 개별적인 시간 변동을 의미한다. 기저막은 Fig. 5에서와 같이 인간의 귀가 갖는 내재된 놀라운 자연적인 스펙트럼 분석기라 할 수 있다. 주파수의 구분은 이 기저막에 의하여 이루어지며 이는 주파수에 대하여 길이 방향으로 분포되는 공명의 연속이라 할 수 있고 고주파 진동을 갖는 이도 공명에 근접하는 부분이 된다.

기저막의 진동은 Fig. 6에서와 같이 달팽이관 기저막에 붙어있는 용모를 변형 시키며 전기적인 이온 생성을 위하여 용모에 화학적 반응을 일으킨다. 이를 통하여 기계적 진동은 전기적 신호로 바뀌며 이는 뇌로 향하는 신경 섬유로 전해진다. 이러한 화학적 반응의 반응 속도가 신호(진동)의 시작에서 강하게 나타나며 진동이 멈추기까지 약하게 나타난다.

신경 섬유에 일정 수준의 전류가 발생되며 최종적으로 뇌에 전달되면 이는 소리의 특성이 갖는 정보로서 인지된다. Fig. 7은 전기적 신경신호가 충격파로 이루어지며, 이러한 충격파의 수는 유입되는 신호의 진폭과 관계됨을 나타내고 있다. 이는 인간 청각 기관의 대수적 민감성을 규정하며, 20 dB 이하 범위에서 비선형 강화 함수가 존재함을 인식한다.

신경 섬유내의 전류는 달팽이관 핵을 통하여 뇌의 중심 청각 피질로 전해진다. 뇌에서의 소리의 인지 및 지각에 따라 유입 신호의 정보는 음질로 규정되며 이들은 개인의 경험, 선호, 그리고 임의적 선택 등에 따라 결정된다.

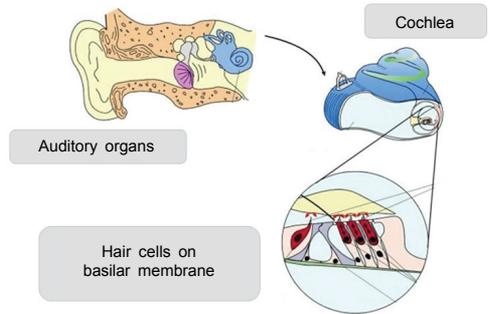


Fig. 6 Villi of basilar membrane

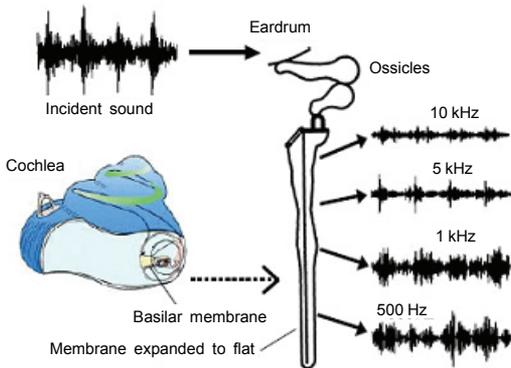


Fig. 5 Basilar membrane of the cochlea

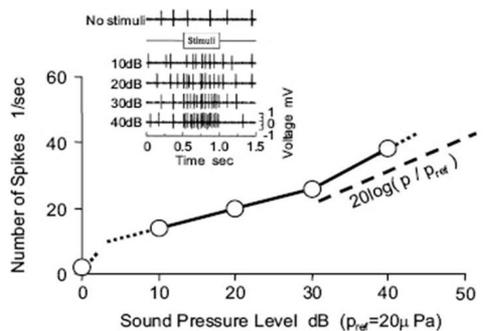


Fig. 7 Response of auditory nerve fiber

(3) 인간 청각 기능

일반적 용도의 A-가중 필터링은 소리가 트럭 또는 버스로부터 달팽이관으로 전해지는 경우의 주파수 특성 변화를 평가하기 위하여 적용된다.

A HATS, 즉 “Head and Torso Simulator”는 Fig. 8과 같이 높은 신뢰성을 갖는 두 귀용 데이터 기록에 적용된다. 이러한 데이터 저장은 음원 위치에 대한 주관적으로 인지 가능한 정보로 유지되며 이러한 이유로 본래의 음향의 상황은 이러한 신뢰성 있는 시스템으로 재현되어진다. 이 연구에서는 일반적인 PC의 소리 형식인 “.wav”로 저장된 데이터베이스의 음향 데이터를 이용하여 PC의 재생을 거쳐 샘플 음향의 SQ의 평가 시험을 수행하였다.

기저막은 각각의 주파수 성분을 필터링하여 진동 신호에 따른 구분을 수행하고 앞의 Fig. 6에서 보인 바와 같이 기저막의 용모를 거쳐 각 주파수 밴드의 진동 진폭의 시간 변동을 감지한다. 일반적으로 제삼 옥타브 밴드패스 방법은 기저막의 필터링 함수를 재현하기 위하여 적용된다. 그러므로 각 제삼 옥타브 밴드 신호의 병렬처리 프로그램은 음질 평가 시스템에 코딩되어진다.

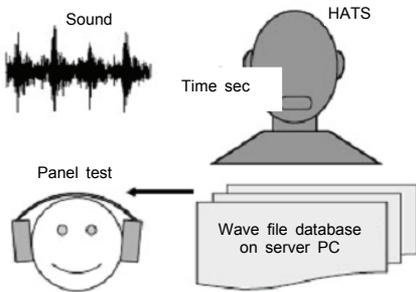


Fig. 8 Simulator of HATS

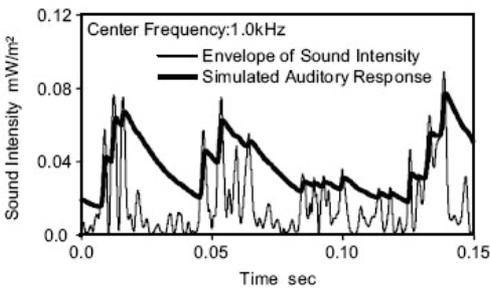


Fig. 9 Simulated auditory response

용모에서의 화학 반응 속도는 일차 지연 시스템의 반응으로 모델링되고, Fig. 9와 같이 멈춤 신호에 민감하지는 않지만 발생하는 신호에 반응을 보인다.

이러한 음질 평가 방법에 있어서 인간 감수성에 관계된 디젤 변동 소음은 다음과 같이 정의된다. 먼저, 지역 최소값(V_{min})에서 시작되는 반응 신호는 “a” 초와 “b” dB로 정의되는 타원 영역을 초과하는 지역 최대값(V_{max})을 찾기 위하여 추적된다. 여기서 “변동강도”는 V_{max}/V_{min} 의 비율로 정의된다. 다음 단계로서 이러한 모든 “변동강도” 값은 엔진 회전 한 주기(cycle) 동안 누적되는데 이는 두 회전 길이를 나타낸다. 이 연구에서는 각 주파수 밴드에 있어서의 총 변동 강도를 나타내는 누적변동강도 (CFS : cumulated fluctuation strength)를 식 (1)과 같이 수식화하여 정의하였으며, Fig. 10과 같이 상관성을 분석하였다.

$$CFS(f_i) = \sum_{k=1}^n FS(k) = \sum_{k=1}^n \left(\frac{V_{max}(k)}{V_{min}(k)} \right) \quad (1)$$

여기에서 f_i 는 1/3 옥타브 밴드 주파수이며, i 는 밴드 번호를 나타낸다.

다양한 종류의 인간의 음향 인식 및 인지는 청각 신경 신호가 여러 신경 조직을 거쳐 최종적으로 뇌의 중추 청각 피질로 전해지는 것으로 이루어진다.

거친 소리 인지를 위하여 개별 주파수 밴드에서의 누적변동수준(CFL : cumulated fluctuation level)은 평균값 $CFS(f_i)$ 를 얻기 위하여 수백 사이클 이상에 걸쳐 구해진다.

편안한 소리의 인식을 위한 추가적인 평가는 Fig. 11과 같이 A-가중치 $WA(f_i)$ 및 $WS(f_i)$ 를 적용하여 실행된다. 마지막으로 누적 변동 수준에 있어서는

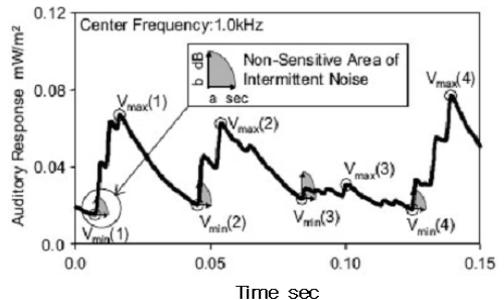


Fig. 10 Cumulated fluctuation strength

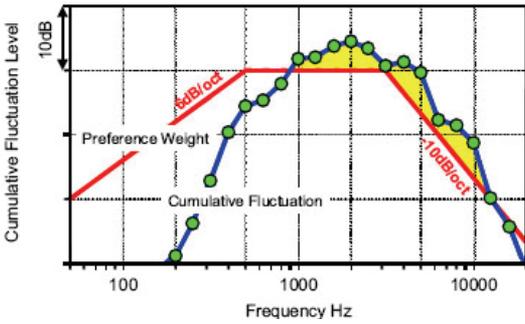


Fig. 11 Preference of sound awareness

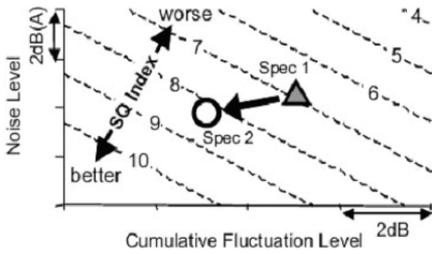


Fig. 12 Test chart of sound quality

식 (2)에서와 같이 전체 주파수 범위에 대한 적분을 통하여 구해진다. $CFL(f_i)$ 는 1/3 옥타브 밴드 주파수에서의 누적변동수준이며, CFL_{OA} 는 전체 주파수 영역에서의 누적변동수준이다.

$$CFL(f_i) = 10 \log \overline{CFSS(f_i)} + WA(f_i) - ES(f_i)$$

$$CFL_{OA} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^{80} 10^{CFL(f_i)/10} \right] \quad (2)$$

이 연구의 음질 평가 프로세스에서는 Fig. 11과 같이 사다리꼴 가중 곡선을 제안하였다. 이러한 사다리꼴 곡선은 일상에서 발생하는 다양한 소리의 평균 주파수 스펙트럼을 나타낼 수 있기 때문에 거친 소리에 대한 인간의 감수성을 나타내는데 있어서 효율적이다.

이는 인간의 감지 시스템이 이러한 사다리꼴 영역을 벗어나는 누적 변동의 소리를 “소음” 또는 “위험한 상태”로 인지하기 때문이다.

(4) 음질 평가

이 연구에서의 음질 지수는 Fig. 12와 같이 수직축에 소음 수준을 그리고, 수평축에 누적 변동의 두 가지 변수를 사용하는 1~10까지의 10단계 크기를

적용하였다.

큰 음질 지수 값은 적은 변동을 나타내며 조용한 소리를 의미한다. 이러한 지수는 디젤 음향의 객관적 평가를 이룰 수 있게 한다.

3. 결론

이 논문에서는 승용 디젤 엔진 차량의 음질 평가 프로세스 구축을 위하여 로드맵을 작성하였으며, 다음과 같은 선행 연구를 진행하였다.

이 연구에서는 디젤 소음과 같은 충격파에 의한 순간적인 자극을 감지하는 인간 청각 메커니즘의 모델을 디자인 하였다. 인간 청각 모델을 기초로 하는 객관적인 평가 기준에 대한 연구를 수행하였으며, 음질 평가 프로세스 구축을 위한 기초를 마련하였다.

음질 평가 방법에 있어서 인간 감수성에 관계된 디젤 변동 소음을 정의하였으며, 인간의 감수성을 표현하기 위하여 사다리꼴 가중곡선을 제안하였다.

향후 이 연구의 결과를 기반으로 승용 디젤 엔진 차량의 음질 기여인자에 대한 분석을 통하여, 시스템과 완성차 성능간 상관관계 분석을 통하여 NVH 메뉴가이드에 대한 틀을 마련하고자 한다.

참고 문헌

(1) Jo, B. O., Lee, S. K., Park, D. C. and Lee, M. S., 2006, New Development of Two-dimensional Sound Quality Index for Brand Sound in Passenger Cars, Transactions of the Korean Society of Noise and Vibration Engineering, Vol. 6, No. 5, pp. 457-469.

(2) Kang, K. T., 2008, Trend of Vehicle Sound Quality Development, Auto Journal, April.

(3) Lim, J. T., Lee, S. K., Jo, Y. K. and Kim, J. Y., 2007, Development of Sound Quality Index of a SUV Axle for Evaluation of Enhancement of Sound Quality Based on Human Sensibility, Transactions of the Korean Society of Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 298-309.

(4) Choi, J. M., Jun, I. K., Lee, S. C., Maeng, J. Y., Kim, J. S. and Youn, H. J., 2004, Development of Database for the Relation between Boot's

Parameters and Acoustic Performance based on RSM, Proceedings of the KSAE 2004 Spring Annual Conference, pp. 1218~1224.

(5) Park, K. H., Kim, Y. H., Jung, S. K. and Rho, S. Y., 1998, Speech Feature Extraction Using Auditory Model, Proceedings of the KIEE 1998 Autumn Annual Conference, pp. 2259~2261.

(6) Shin, D. K., Shin, J. I., Lee, J. H., Han, D. J., and Park, S. H., 2000, A Study on Pitch Detection

using Cochlear Model on Cochannel Speech, Transactions of the Korean Institute Electrical Engineers, Vol. 49D, No. 6, pp. 330~333.

(7) Kwon, B. S., Kim, M. J., Lee, T. J., Jang, D. Y. and Kang, K. O., 2008, Efficient Representation Method of Spatial Cues of Audio Coding, Proceedings of the KSBE 2008 Winter Annual Conference, pp. 183~186.