

자동차 주행 실내음의 화성학적 분석

Musical Harmonic Theory Analysis of Automotive Interior Noise

윤태건† · 박동철* · 원광민* · 임윤수*
Yun Taekun, Park Dongchul, Won Kwangmin, Im Yunsoo

1. 서 론

자동차에서 발생하는 소리의 70% 이상은 엔진 소리에서 기인한다. 따라서 엔진소리가 좋고 나쁨에 따라 차량 전체의 소리를 좌우하기 때문에 많은 자동차 회사들이 엔진 소리를 제어하기 위해 많은 노력과 투자를 진행하고 있다. 자동차 엔진소리는 폭발에 의해 발생하는 오더 성분이 발생하는 소리가 주를 이루고 있으며 이러한 소리는 4 기통, 6 기통 등 기통에 따라 소리의 구성도 많이 달라지게 된다. 오더 성분에 의해 발생하는 소리는 음악적으로 볼 때 배음과 밀접한 관계를 가지고 있으며 오더 배치는 음악에서 기본음으로부터 시작되는 배음과 같은 이치를 갖는다. 이와 같은 연구는 2003 년 FEV 에 의해 엔진 기통수에 따른 어울림 정도를 분석하여 엔진의 오더가 음악과 아주 밀접한 관계를 지닌다는 연구 결과가 보고된 바 있다.⁽¹⁾

이러한 원리를 통하여 본 논문에서는 6 기통 엔진이 탑재된 차량의 실내소음을 화성학 관점에서 분석하고, 같은 계열의 소리를 합산하여 어울림 정도의 수준 분석 및 더 나아가 화음개념을 도입하여 화성학적으로 완전 1 도, 4 도, 5 도로 완전음정에 속하지만, 1, 4, 5 도가 함께 공존할 경우 긴장감을 느끼게 되는 화음과 차량에서 발생하는 조건과 문제점을 분석하고 차량간 비교를 통하여 화성학적으로 유리한 자동차 실내소음의 방향을 제시한다.

2. 본 론

2.1 엔진소리와 화성학의 연관성

자동차의 엔진소리는 배음구조를 가지고 있으며 이는 음악에서의 화성학과 밀접한 관계를 지니고 있다.

(1) 배음의 구성⁽²⁾

자연의 음에는 배음이라는 현상이 있다. 어느 한 음을 울리면 그 발음체가 진동하는데 진동함과 동시에 1/2도 동시에 진동하고 또한 1/3, 1/4, 1/5, ... 등도 동시에 진동하는 것이다. 1/2의 발음체에서는 두배의 진동수로 된 음이 나오고 1/3의 발음체에서는 3배의 진동수의 음이 각각 나온다. 이처럼 2배, 3배, ... 등으로 울리는 음을 배음(overtone)이라 하는데 이 배음의 순서를 적으면 Fig.1과 같다. 이중 x표한 음은 기보된 음과 정확하게 맞지 않는 음들이다. 배음은 숫자가 기입한 대로 제 1배음, 제 2배음, ... 등으로 부르며 우리가 들어서 뚜렷한 음높이로 인식되는 소리는 물론 제 1배음이다. 제 1배음은 진폭이 가장 넓기 때문에 가장 크게 울리며 따라서 우리는 이 음을 고유한 음, 기본음(Fundamental)으로 듣게 되는 것이다. 즉, 제 1배음을 울리면 제 2배음 이하의 모든 배음이 동시에 울리고 있는 것이다.

기본음이 다(C2, 65.4Hz)음일 때 발생하는 배음은 Table.1과 같은 Hz 구조를 가지고 있다.



Fig.1 기본음 배음의 악보 표시

† 교신저자: 정희원, 현대자동차
 E-mail : tk-yun@hyundai.com
 Tel : 031-368-9048, Fax : 031-368-1381
 * 현대자동차

Table 1 기본음 다(C2)음과 배음의 주파수

Overtone	Hz	Overtone	Hz
Fundamental	65.4	5 배음	327
2 배음	130.8	6 배음	392.4
3 배음	196.8	7 배음	457.8
4 배음	261.6	8 배음	523.2

(2) 음정(Interval)

두 음 사이의 간격을 음정이라 하며, 두 음의 거리를 재는 단위는 반음이 되고 반음의 수에 따라서 일곱개의 원음(음계를 구성하는 음)을 기준으로 하여 도(度)라고 부른다. 두 개의 같은 음은 1 도가 되고 음의 간격이 한자리씩 멀어짐에 따라 2 도, 3 도, ... 등으로 부르며 음에 변화표가 붙어도 도수는 같다.

예를 들어 기본음이 다(C)음일 때 각각 네개의 완전음정(1, 4, 5, 7 도)과 장음정(2, 3, 6, 7 도)이 포함되어 있으며 이는 Fig.2 에 나타내었다.

완전음정은 배음열에서 네번째 음까지에 생기는 자연음정이고 장음정은 화성적 첨가 되는 다섯번째 음열이 첨가된 음정이다.

모든 음정은 그 음정을 만드는 두 음이 동시에 울렸을 때의 어울림의 정도에 따라 어울림 음정과 안 어울림 음정으로 나눈다. 또한 어울림 음정은 완전 어울림 음정(이하 완전 음정)과 불완전 어울림 음정으로 나눈다. 어울림에 해당되는 음정은 Fig.3 에 나타내었다. 완전 4 도는 음향학적으로 완전 어울림 음정이나 음악적으로는 그리 좋지 못한 울림을 갖는다. (어울림은 협화라는 단어로도 쓰인다)

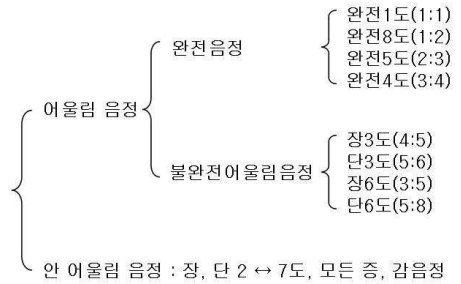
(3) 조와 조성

어떤 음을 으뜸음으로 정하여 어떤 음계를 사용하는 것은 악곡의 성질에 따라서 달라지며 그 으뜸음과 음계의 관계를 조(Key), 그 성질을 조성이라 하며 그에 해당하는 울림표는 Fig.4 에 나타내었다. 이때 영문 대문자는 장조, 소문자는 단조를 표현한다.

어떤 조를 중심으로 위로 5 도 관계와 아래로 5 도 관계에 있는 조를 근친조(Dominant-key)라 한다. 예를 들어 다(C)장조 - 사(G), 마(F) 장도와 같은 것이다.



Fig.2 완전음정과 장음정의 구분



* (괄호안의 숫자는 진동수의 비를 나타낸 것)

Fig.3 어울림 정도에 따른 음정



Fig.4 울림표 계통

(4) 화성과 화성

높이가 다른 두개 이상의 음이 동시에 울릴 때 이를 화음(Chord)이라고 하며, 이 법칙에 따라서 연결된 화음을 화성(Harmony)이라고 한다. 보통 3 도 간격으로 쌓아 올려진 세개의 음이 화성학에서 다루어지는 화음이며 이는 자연배음을 근원으로 해서 만들어진다.

2.2 기통 엔진소리의 화성학 분석

(1) 6 기통 엔진소리의 배음 구성

6 기통 엔진의 경우 3 오더 성분을 중심으로 배음이 이루어진다. 이는 음악적으로 볼 때 3 오더의 1/2 값인 1.5 오더 성분으로부터 시작되는 것과 같다. 6 기통 엔진 소리의 rpm 변화에 따른 배음을 Fig.5 에 나타내었다. 이 때 rpm 이 변화함에 따라 기본 1.5 오더 성분의 함께 변화하며 배음이 이동하기 때문에 배음의 경우 모든 영역에서 배음의 이론이 적용된다. 이와 같이 자동차 엔진소리는 음악적으로 아주 밀접한 관계를 가지고 있다.⁽³⁾

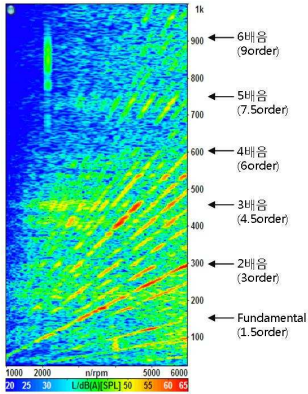


Fig.5 6기통 엔진의 배음 구조 예시

Table 2 5880rpm 에서의 6기통 엔진소리 Hz 분석

Order	Hz	Key	Order	Hz	Key
1	98	G2	6	588	D5
1.5	156	D3	6.5	635	D5#>E5
2	196	G3	7	686	E5<F5
2.5	245	B3	7.5	732	F#5
3	294	D4	8	784	G5
3.5	343	E4<F4	8.5	820	G5#
4	392	G4	9	882	A5
4.5	441	A4	9.5	928	A5#
5	491	B4	10	965	B5
5.5	542	C5<C5#	10.5	1039	C6#

(2) 특정 rpm 에서의 6기통 엔진소리 분석
 2.2.(1)에서 언급되었듯이 배음의 원리는 모든 rpm 영역에서 동일하게 적용된다. 이를 보다 음악적 영역으로 보기 위해 특정 rpm (5,880rpm)에서 분석을 실시했다. Table.2 에 각 오더별 Hz 와 그에 따른 조를 나타내었고, 피아노 건반에 해당되는 부분을 Fig.6 에 표시하였다.

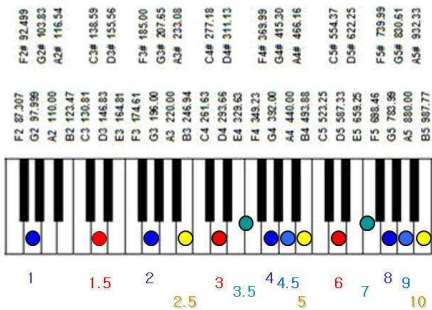


Fig.6 5880rpm 에서의 엔진오더 분포표

Table 3 6 실린더 엔진소리의 오더별 어울림 정도

어울림정도	Key	음정	order
완전 음정	D	1도(8도)	1.5, 3, 6, 12
	G	4도	1, 2, 4, 8
	A	5도	4.5, 9
불완전 어울림 음정	-	장3도	-
	F#	단3도	7.5
	-	장6도	-
안 어울림 음정	B	단6도	2.5, 5, 10
	-	기타	3.5, 5.5, 6.5, 8.5, 9.5, 10.5

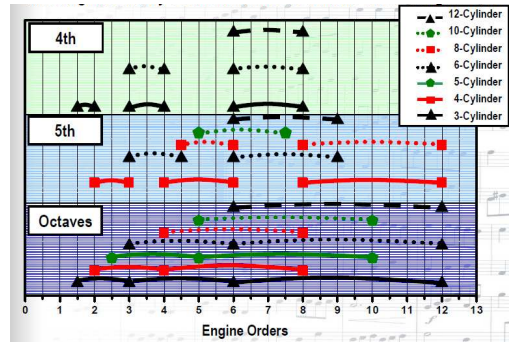


Fig.6 엔진 기통별 4도 5도 분포표(FEV 자료)

(3) 6기통 엔진의 오더별 음정 분석

2.2.1 분석된 배음과 화성학 이론에 따라 6기통 엔진소리의 오더별 음정과 어울림 정도는 Table.3 에 나타내었다. 표에서 보는 것과 같이 1.5 오더의 1, 2, 4, 8... 등 2의 자승 배음계열의 오더는 1도(또는 8도), 1오더의 2의 자승 배음계열의 오더는 4도, 4.5 오더의 2의 자승 배음계열의 오더는 5도로 완전 음정계열에 속하며, 나머지 오더는 불완전 하거나 어울리지 않는 음정에 속한다.

이와 같은 분석은 이미 FEV 에서 연구를 통해 엔진의 기통 수에 따른 4도와 5도의 연관성은 밝혀진 바 있다.

2.3 차량 소리의 분석

6기통 엔진이 탑재된 차량들의 어울림 정도를 분석하기 위해 Table.4 와 같이 A, B, C 사의 주행시 실내소음을 측정하였다. 이때 실내소음 데이터는 급가속을 실시한 데이터의 1,000~6,000 rpm 대역, 운전자의 우측 귀에 해당하는 정보를 사용하였다. Fig.8 에 3개 차량의 시간별 FFT 에 대한 정보를 나타내었다.

Table 4 6 기통 엔진이 탑재된 차량

구분	엔진	형태	초	변속기
A 사	3.8 리터 GDI	V6	11.3s	자동 8 속
B 사	3.5 리터 Twin Turbo	I6	9.1s	자동 8 속
C 사	3.5 리터	V6	13.3s	자동 7 속

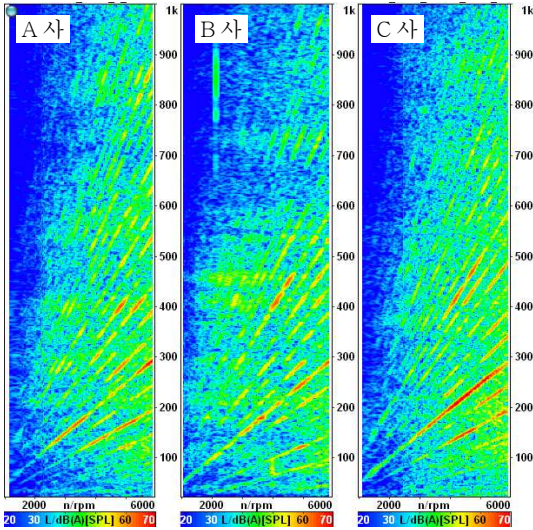


Fig.8 차량 FFT-time 그래프

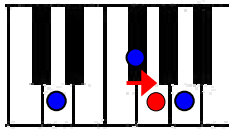


Fig.9 일반 3 도(D major) 화음(청색)과 서스텐디스(Dsus4) 화음(적색)

(1) 엔진소리의 음정 분석

자동차의 엔진소리는 여러 오더가 존재하지만, 본 논문에서는 화성학 관점에서 소리를 분석하였으며, Table.3 에 표기한 완전 음정 계열(5,880rpm 일 때 D, G, A key 배열, 이하 D, G, A)에 한하여 분석을 실시하였다.

6 기통 엔진의 경우 3 오더(1.5 오더의 배수)에 의한 엔진소리가 주를 이룬다. 따라서 엔진소리에서 중심되는 소리는 D 계열의 소리이다. 이 때 1.5, 3. 6 오더는 Hz 는 다르지만 같은 D 계열의 소리로 화성학적으로 볼 때 같은 성질을 가지고 있어 따로 분석하지 않고 같은 계열의 성분들을 합하여 분석을 실시하였으며, 해당오더는 1000Hz 미만의 1~10 오더성분으로 한정하였다.

(2) Suspended 코드 의 발생

D 를 기본으로 G, A 는 완전 음정으로 화성학적으로 안정되어 있으나 G 와 A 가 동시 발생할 경우에는 안 어울림 음정이 발생하게 된다. 이는 D 를 기본으로는 안정되어 있으나 G 와 A 는 안정되지 못하기 때문이다.

이 때 D, G, A 가 동시 발생할 경우에는 sus4 라는 화음이 발생되는데, 일반적인 (Major) 3 도 화음에서 중간음이 반음 올라간 화음으로 (Fig.9 에 표시) 서스펜디드 (suspended) 코드는 ‘ 긴장되다’ 라는 뜻의 ‘ suspense’ 에서 유래 되었다. 이는, 코드 구성음 중 증양에서 코드 톤을 결정짓는 3 도음이 없기 때문에 불안하고 긴장된 느낌을 생성하게 된다.

(3) 차량 실내소음의 DGA 코드 분석

이렇게 정리된 실내에서 들리는 엔진 사운드는 D 계열을 중심으로 G 및 A 의 소리의 크기에 따라 실내사운드를 분석(이하 이 분석방법을 DGA 코드 분석이라 칭함)할 수 있다. Fig. 10 에는 A 사 자동차의 실내 소음을, Fig. 11, 12 에는 경쟁사의 실내소음을 DGA 코드 분석하여 나타내었다. 가로축은 rpm 변동이고, 세로축은 각 계열들의 소리 크기 (dBA)를 합한 값이다. 이 때 흑색은 D, 적색은 G, 청색은 A 의 값을 의미하며, Table.3 에서 제시한 각 Key 들의 합산 값이다.

Fig.10 을 볼 때 A 사 차량의 실내소음은 1000~ 1400rpm 영역에서 A 가 D 보다 더 큰 소리를 발생하며 6 기통 엔진의 고유한 특성을 방해하고 있다. 1400~2300rpm 영역에서는 D, G, A 가 같은 크기를 유지하여 2.3.2 에서 언급한 sus4 의 화음이 발생, 차량 실내소음의 긴장감의 느낌이 발생할 수 있다. 또한, 4000~6000rpm 영역에서는 G 가 중심소리인 D 보다 더 크게 인지되어 6 기통의 독특한 소리를 해치는 것은 물론 일부 영역에서는 D 보다 G 가 더 큰 소리를 발생시켜 일부 sus4 의 화음이 발생할 수 있다.

전체적으로 볼 때 A 사의 차량은 저속, 고속 rpm 구간에서는 6 기통의 독특한 소리의 저하, sus4 화음 발생으로 인한 긴장감이 발생할 수 있는 구조이다.

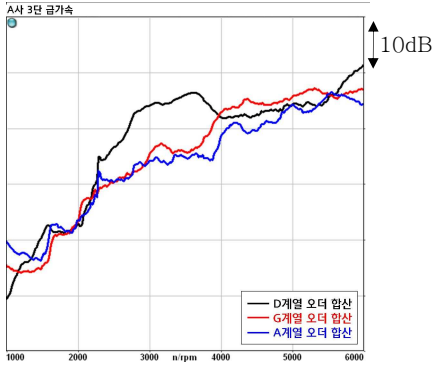


Fig.10 A사 차량 실내소음 DGA 코드 분석

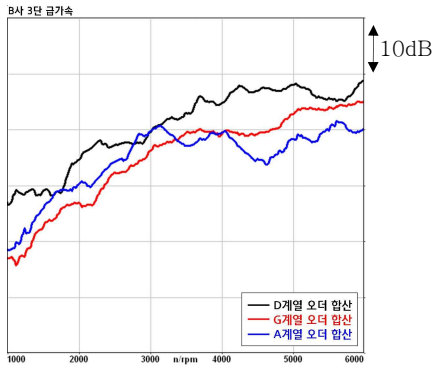


Fig.11 B사 차량 실내소음 DGA 코드 분석

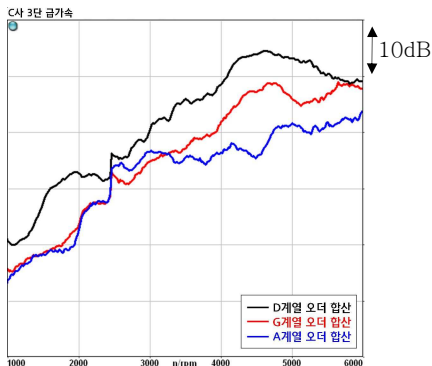


Fig.12 C사 차량 실내소음 DGA 코드 분석

B, C사 차량의 경우 전체적으로 D가 소리를 이끌어가고 있으며 일부 영역에서 sus4의 형태가 나타날 수 있으나 전체적으로 볼 때 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

이와 같은 현상은 Fig. 13, 14에 Balance Curve로 자세하게 나타내었다. Fig.13의 경우 G에서 D계열을 뺀 값으로 그 수치가 높을수록 G의 크기가 더 크다는 의미이며,

Fig.14의 경우 A에서 D를 뺀 값으로 그 수치가 높을수록 A의 크기가 더 크다는 의미이다. 가로축은 rpm 변동이고, 세로축은 각 계열들간의 의 소리 크기의 차이(dB)값이다. 이때 흑색은 A사, 적색은 B사, 청색은 C사의 차량이다. Balance curve의 경우 수치가 높을수록 6기통 특유의 소리가 방해될 수 있다.

Fig.12, 13로 볼 때, B사의 실내소리는 전반적으로 저 rpm 영역에서 D와 A의 조합, 고속 rpm 영역에서 D와 G의 조합으로 화성학적으로 무난한 것을 볼 수 있다. 또한 3500rpm을 기점으로 D/A 조합에서 D/G 조합으로 넘어가 급가속시에 자연스러운 소리의 변화도 예상된다.

C사의 경우 2500rpm 영역에서 잠시 sus4 화음이 발생할 수 있으나 전반적으로 무난한 화성학적인 구조를 띄고 있다. 그러나 B사의 차량과는 달리 소리의 변화가 단조로울 수 있다고 판단된다.

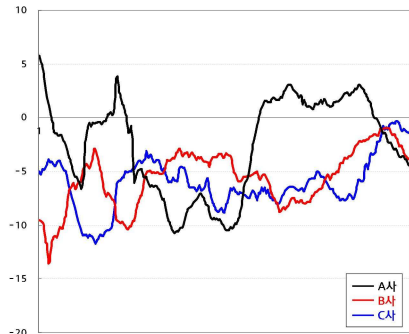


Fig.13 DGA 분석(D-G Balance Curve)

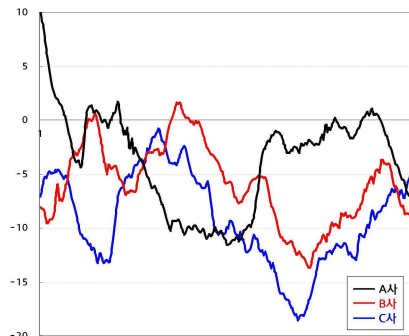


Fig.13 DGA 분석(D-A Balance Curve)

(4) 6 기통 엔진사운드 개선 방향

2.3 에서 A, B, C 사의 6 기통 엔진이 탑재된 차량의 실내소음을 비교 분석하였다. A 사 차량의 경우 B, C 사 차량대비 D 가 부족하여 (G, A 가 크거나) 6 기통 엔진의 독특한 소리를 발생시키지 못하고 있다. 이에 화성학적 관점에서 보다 나은 소리를 위해 A 사 차량의 실내소리의 개선을 위해 아래와 같이 제안한다.

1. 저속, 고속 rpm 영역에서 D 성분(특히 3 오더 성분) 타 order 에 비해 음량 증대
2. 전 영역 G 성분(특히 2 오더) 저감(I6, V6 차이점 확인 및 분석 필요)
3. 전반적으로 G 크기가 A 의 소리를 방해하지 않는 수준의 크기 유지
4. 전반적으로 A 크기가 D 의 소리를 방해하지 않는 수준의 크기 유지
5. 400Hz 대역 공진 제거(공진으로 인한 4.5 오더 성분 증가)
6. 능동제어 기술을 이용한 메인 성분(D) 증대

3. 이석원, 음향음향학, 심설당, 음악학연구소, 2003.

4. Zwicker E. and H. Fastl,“ Pschoacoutics, Facts and Models.” , Springer-Verlag, Berlin, 1990.

3. 결 론

본 연구를 통하여 6 기통 엔진이 탑재된 차량의 실내소음을 DGA 코드 분석 방법을 제안 하였으며, 차량의 급가속시에 발생하는 실내소음을 화성학적으로 분석하였다. 결과적으로 A 사 차량의 경우 B, C 사 대비 저속, 고속 운행 시에 6 기통 특유의 소리 저감, sus4 화음 발생으로 인해 긴장감이 발생하는 소리가 발생하는 것을 알 수 있었다.

이와 같은 분석을 통하여 6 기통 엔진(8 기통 엔진의 경우 일부 변형하여 적용 가능)이 탑재된 차량에 대하여 화성학적으로 유리한 소리를 분석할 수 있으며, 사용된 DGA 코드 분석을 통하여 음악적으로 유리한 사운드를 제시하여 개발될 차량에 적용할 수 있을 것으로 판단한다.

참고문헌

1. Norbert W. Alt, Stephan Jochum, FEV Motorentchnik, Sound Design Under the Aspects of Musical Harmonic Theory, SAE 2003-01-1508,
2. 백병동, 화성학(증보판), 도서출판 수문당, 1976