고속철도KTX(Korea Train Express)의 역구내진입 제동시 브레이크슈 사이의 마찰소음에 관한 연구

Study on the Squeal Noise Between the Barake Shoes of the High Speed Railway(KTX)

배원식* 정인수** 이동훈** 유원희**

Bae, Won-Sik Chung, In-Soo Lee, Dong-Hoon Yu, Won-Hee

ABSTRACT

The noises which occurs from the rolling stock can be divided largely into three classes and they are Rolling noise, Traction noise and Aerodynamic noise. In the event of braking the rolling stock which enter into the station, Brake shoes cause Fraction noise (braking noise) and excessive braking noise makes passengers and operators uncomfortable. This study is to reduce squeal noise and minimize displeasure by measuring the braking noise and defining the major noise sources and noise mechanism,

1. 서 론

환경(環境)이라는 단어를 국어사전에 찾아보면 "생활체를 둘러싸고 직접 간접으로 영향을 주는 자연, 또는 사회의 조건이나 형편"으로 표현 된다. 각종 미디어(media)를 접하여 보면 해마다 환경에 대한 분쟁 과 민원발생도 증가하는 추세를 보이고 있는 실정이고, 2006년 환경부 시도별 소음, 진동 관리시책 평가 결과 발생원별 민원발생 현황에 따르면 교통에 의한 증가율이 전년대비 3.9% 증가하는 것으로 나타났다. 이런 결과에 미루어 볼 때 환경(소음대책)의 중요성은 날이 갈수록 점차 확대 추세를 보이고 있다. 환경오염에는 크게 대기, 토양, 수질, 소음으로 분류 할 수 있으며 철도차량에서 발생되는 소음은 크게 전동소음(Rolling noise), 동력소음(Traction noise), 공력소음(Aerodynamic noise) 등 3가지로 분류 할 수 있다. 본 논문에서 다루고자 하는 소음은 고속철도(KTX)의 역구내진입 제동시 브레이크슈 사이의 마찰소음(제동소음)이다. 제동소음은 전동소음에 포함되어 있는데, 제동소음의 과다로 승강장(platfonm)에 철도이용 고객 및 역사 근무자에게 불쾌감(스트레스)을 유발, 일시적·영구적인 난청을 일으킬 뿐만 아니라 순환계, 호흡계, 소화계 등에도 영향을 미친다. 제동소음을 감소시키기 위해 고속철도(KTX)의 역사 진입 제동시 발생하는 제동소음을 계측하여 현황을 파악하고, 주요 소음원 및 발생 메커니즘을 규명함으로서 불쾌감 및 정신과 건강에 많은 영향을 미치는 스퀼소음을 최소화 하여 차량의 소음저감대책 과 서비스질의 향상에 도움을 주고자 한다.

* 서울산업대학교 철도전문대학원 철도차량시스템 공학과 한국철도공사 충남지사 일반차량팀(학생회원)

E-mail : bws69@ hanmail.net

TEL : (041)629-2439 FAX : (041)566-7784 휴대전화 : 016-427-5358

** 한국철도공사 철도연구개발센터 센터장

** 서울산업대학교 기계공학과 교수

** 한국철도기술연구원 철도시스템 안전연구본부장

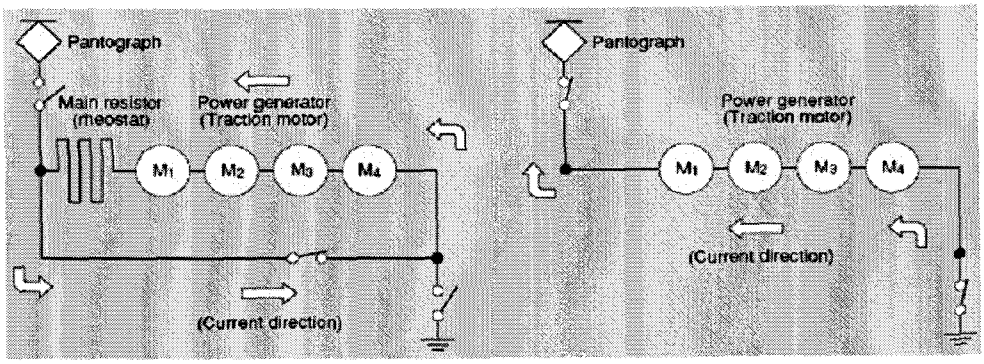
2.제동소음

2.1 철도차량의 제동시스템

철도차량의 제동시스템은 1)전기제동(electric braking) 방식과 2)마찰제동(friction braking) 방식 및 3)공기역학제동(aerodynamic braking)을 포함하는 기타 제동 방식의 세가지로 나누어 생각할 수 있다. 철도차량에서는 이 세가지 형식의 제동방법을 필요에 따라 서로 보완적으로 사용하고 있다.

2.1.1 전기제동

동적제동(dynamic braking)이라고도 부르는 전기제동은 차량의 추진에 사용하는 추진모터를 이용하여 제동하는 방법을 말한다. 즉, 평시에는 추진력을 발생하는 주추진모터가 제동시에는 바퀴의 회전 관성력을 이용해 전기를 발생시키는 발전기로 작용하여 제동력을 발생시키는 원리를 이용한 것이다.
전기제동은 다시 발전기에서 생산된 전기를 어떻게 처리하느냐에 따라 저항제동(rheostatic braking)과 회생제동(regenerative braking)으로 분류된다. 그림 2.1에 보인 바와 같이 저항제동이란 생산된 전기를 차량에서 자체적으로 소비시키는 것이고 회생제동은 생산된 전기를 판토그라프를 통해 다른 철도차량이 추진동력 등으로 사용할 수 있도록 전차선에 다시 공급하는 방식이다.

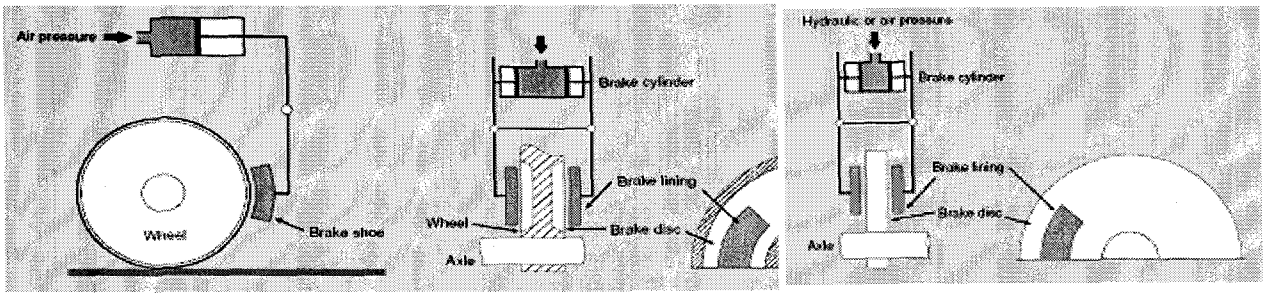


(a) 저항제동 (b) 회생제동

그림 2.1 전기제동

2.1.2. 마찰제동

마찰제동은 다시 제동에 필요한 마찰력을 차륜의 답면 혹은 측면이나 별도의 디스크를 사용해 얻고 있는가에 따라 그림 2.2에서와 같이 답면제동(tread braking), 차륜제동(wheel braking) 및 디스크제동(disk braking)으로 나누어 생각할 수 있다. 본 제동방식은 가장 오랫동안 사용되어온 제동방식으로 신뢰도가 높아 차량의 안전을 위해 어떤 형태로든 반드시 채택하고 있는 제동방식이다.



답면제동과 차륜제동 디스크제동

그림 2.2 마찰제동

2.1.3. 기타 제동 방식

상기한 두가지 제동방식보다는 사용빈도가 낮으나 이 밖의 제동방식으로 공기역학 제동과 와전류제동(eddy current electromagnetic braking)을 들 수 있다. 그림 2.3에 보인 와전류 제동은 궤도 표면에 와전류를 발생시켜 추진력과 반대방향으로 형성되는 자기력을 제동력으로 이용하는 방법이다.

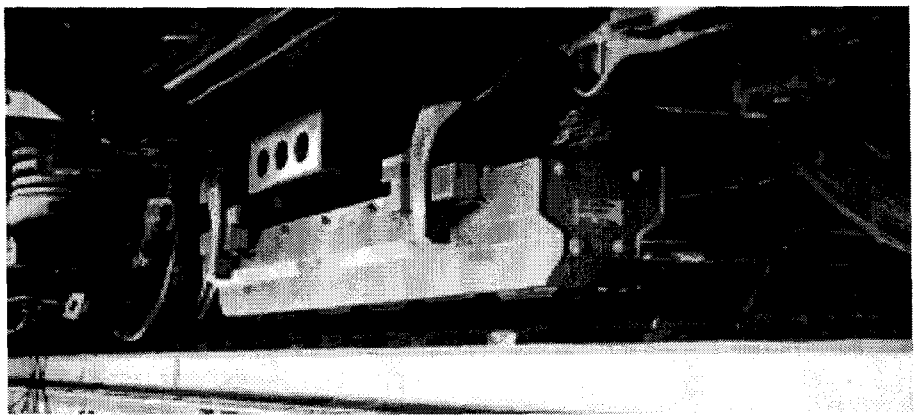


그림 2.3 와전류 제동장치

공기역학제동이란 비행기와 같이 고속으로 진행하는 운동체를 정지시킬 때 사용하는 것으로 제동시 공기저항이 큰 물체를 노출시킴으로서 제동력을 얻는 방법이다. 대표적인 공기역학제동은 우주왕복선 착륙시 꼬리부분에서 펼쳐지는 파라슈트를 들 수 있다. 와전류 제동과 함께 본 제동방식의 장점은 앞에서 기술한 전기제동이나 마찰제동과는 달리 차륜과 궤도사이의 마찰력과 무관하게 제동력을 조절할 수 있다는 점이다.

2.2 KTX열차의 제동시스템

KTX열차의 제동시스템 설계는 UIC 등 철도 관련 규정과 운행조건으로부터 요구되는 제동력, 제동거리 등 각종 요구조건을 가장 효과적으로 만족시킬 수 있도록 앞에서 언급한 제동방식의 조합을 결정하고 각 제동장치의 특성을 고려하여 제동분담력을 결정하여야 한다. 그림 2.4는 속도의 변화에 따르는 각 제동장치의 제동분담력을 보여주는 예이다. 일반적으로 작은 제동력이 요구될 때에는 동적 제동장치를 사용하고 있으며 전기 제동력의 한계를 넘어설 때나 진행속도가 작을 때에는 마찰 제동장치를 단독적으로 혹은 다른 제동장치와 함께 사용하게 되며 이 때 제동소음이 크게 나타날 수 있다.

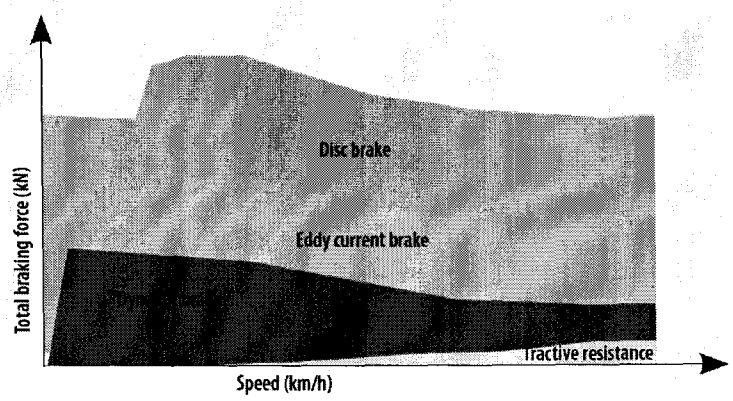


그림 2.4 제동장치의 제동분담력 곡선

그림 2.5 및 2.6은 KTX 차량의 대표적 마찰 제동장치인 디스크 제동장치의 예로서 KTX 에 사용된 모습을 보여주고 있다. 그리고 그림 2.6과 2.7은 각각 디스크 제동장치 블럭과 패드가 장착된 캘리퍼의 모습이다. 그림 2.8는 KTX의 패드 모습을 보여주고 있다.

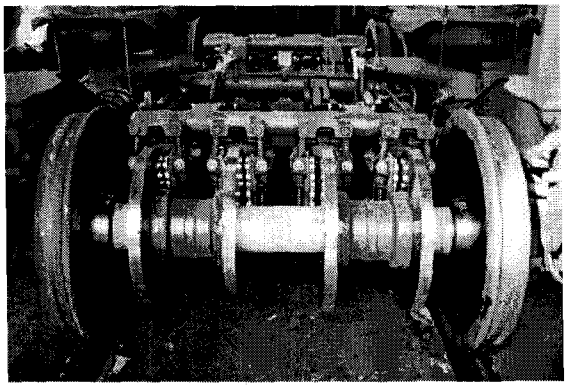


그림 2.5 KTX의 객차 대차 디스크 제동장치

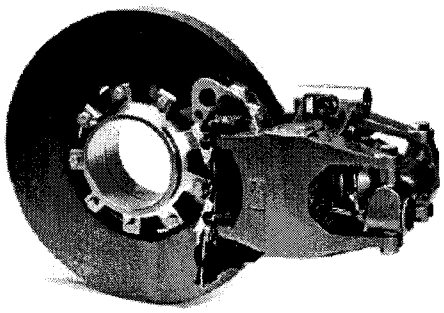


그림 2.6 디스크 제동장치 상세

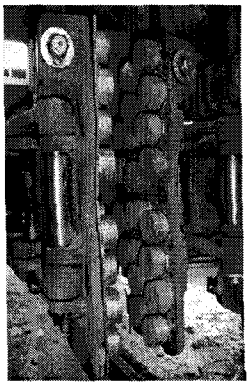


그림 2.7 KTX의 캘리퍼와 브레이크 패드

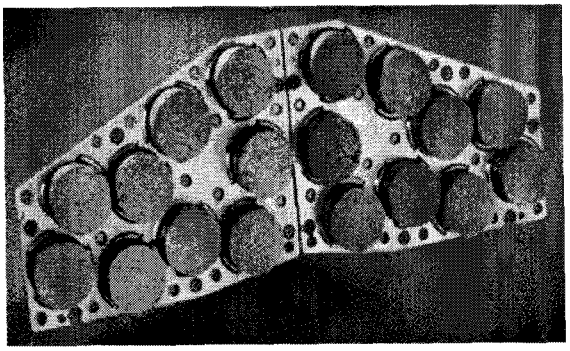


그림 2.8 KTX용 브레이크 패드

KTX 차량에서는 동력차 및 동력객차에서는 전기제동과 답면제동 방식을 채택하고 있다. 디스크 제동 시스템은 객차 대차에서 사용하고 있는데 객차 대차의 한 윤축에는 그림 2.5에서와 같이 각각 4개의 제동용 디스크가 부착되어 있다. 또한, 각 제동 디스크와 쌍을 이루는 캘리퍼에는 그림 2.7과 2.8에서와 같이 금속 소결재의 브레이크 패드 네쌍이 장착되어 있다. KTX 차량에는 모두 17개의 객차 대차가 있고 각 대차에는 2개의 윤축이 있으므로 모두 136개의 제동디스크와 544개의 브레이크 패드로 디스크 제동 시스템이 구성되어 있다. 따라서, KTX 차량에서 디스크 제동장치는 열차의 전 길이방향에 걸쳐 설치되어 있는 관계로 일단 제동 디스크에서 소음이 발생하면 차량의 전 길이방향에 걸쳐 나타나게 되는 특징이 있다.

2.3 제동소음의 종류

지금까지 제동소음에 관한 연구는 대부분 자동차와 관련하여 이루어져 왔다. 표 2.1는 자동차의 제동소음 분류시 사용되는 용어와 해당 소음의 발생 주파수를 도표화한 것이다. 이 들 여러가지 제동소음 성분 중 특히 불쾌감을 유발하는소음성분은 스퀼소음으로 정확한 정의를 내리기는 어려우나 일반적으로 1 kHz 이상에서 발생하는 소음을 말한다. 스퀼소음은 다시 1~3 kHz의 저주파수 스퀼과 4~16 kHz의 높은 주파수를 갖는 고주파수 스퀼로 나뉘어지며, 고주파수 스퀼소음은 일반적으로 디스크와 패드의 마찰특성에 지배적으로 영향을 받는 반면에 저주파수 스퀼소음은 마찰특성 이외에도 캘리퍼, 현가장치 등 제동시스템의 구조적인 동적특성에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다.

표2.1 제동소음의분류

10(HZ)	Pulsation, Judder, Roughness, Slap
↕	Boom, Grind, Grunt
100	Hum, Groan
↕	Moan
1000	
↕	Squeal, Squelch, Wire Brush
10,000	

3.실차 소음 계측

3.1 개요

현재 운행 중인 KTX의 제동소음 특성을 파악하기 위해서 실차에 대한 계측을 수행하였다. 계측은 광명, 천안아산, 대전 및 동대구역 등 모두 4개 역에서 수행되었으며 정차하기 위해 역사에 진입하는 상/하행선 열차에 대하여 이루어졌다.

3.2 계측시스템

제동소음 측정은 그림 3.1과 같이 1개의 광전자 센서 속도 계측시스템과 3채널 소음 계측 시스템을 이용하여 수행되었다. 3채널의 소음신호는 동시 계측을 위하여 테이프 레코더에 기록하였으며, 이 자료를 재생하여 필요에 따라 신호를 분석하였다. 다음은 계측에 사용된 센서와 주요장비의 제원을 정리한 것이고 그림 3.1과 3.2는 실제 사용된 계측시스템의 사진을 보여주고 있다.

- Microphone: B&K Type 4189, 1/2'' free field, Prepolarized, 6Hz - 20,000Hz
- Microphone Preamplifier: B&K Type 2669, 1/2"
- Dual Microphone Supply: B&K Type 5935
- 4-Channel Microphone Conditioning Amplifier: B&K NEXUS Type 2690
- Photo Sensor: Autonics BA2M-DDT
- Data Acqusition System: NI USB-9215
- DAT Recorder: Sony PC208Ax

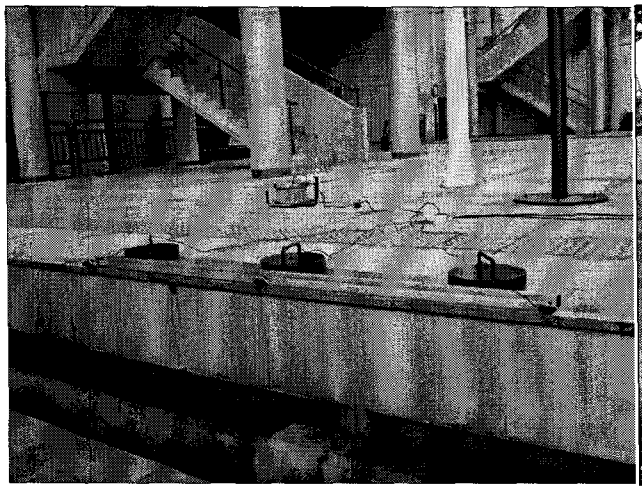


그림 3.1 차량 진입속도 계측시스템 사진

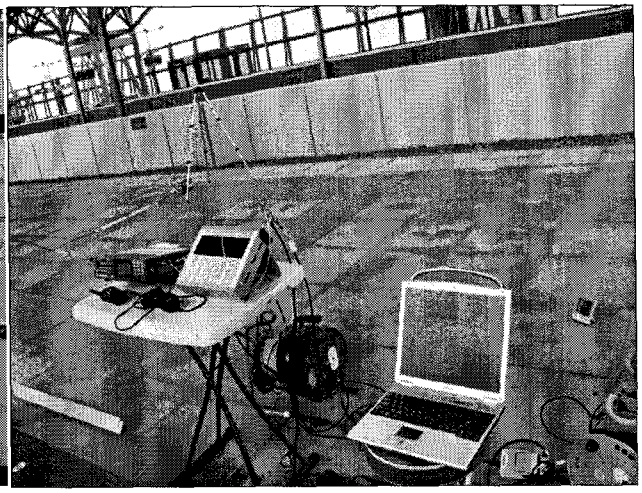


그림 3.2 제동소음 계측시스템 사진

3.3 계측위치

역사내 제동소음은 ISO 규정과 열차승객의 이동 등 플랫폼의 제반 환경을 고려하여 열차 길이방향으로 3곳[Location 1 : 2-3 (17-16)호차출구 중간,Location 2 : 4-5 (15-14)호차출구 중간,Location 3 : 9 (10)호차 중간 *괄호 안의 번호는 상행선의 경우임.]에 마이크로폰(Microphone Location)을 설치(열차의 중앙으로부터 3 m 떨어져 있고 플랫폼 지면에서 높이는 1.4 m이다.)하여 측정하였다. 한편, 열차 진입속도를 계측하기 위하여 열차 정지시 후방 동력차의 앞부분 위치에 광전자센서를 설치하고 전방 동력차가 역사내로 진입할 때 속도를 측정하였다.

4. 계측결과 분석

4개의 역사, 총 85편성 열차에 대하여 계측한 제동소음의 중요 계측결과(제동시간, 진입속도, 제동소음의 분포)를 표 4.1에 요약하였다. 표에서 제동시간은 열차의 선두부가 계측 마이크로폰을 통과하여 완전히 정지할 때까지 걸린 시간을 나타낸다. 측정결과는 역사별, 마이크로폰 위치별, 계측시간별로 다르나 대략적으로 제동시간은 약 50 초 내외, 진입속도는 32 ~83 km/h, 제동소음은 85 ~ 112 dB(A)의 분포를 가지는 것으로 측정되었다.

표 4.1 계측결과 요약(제동시간, 진입속도, 제동소음)

역사별	행선별	제동시간 (초)	진입속도 (km/h)	제동소음(L_{pAFmax}, dB(A))		
				위치 1	위치 2	위치 3
대전역	상행선	31.0~58.0	44.1~83.1	91.6~108.7	86.0~108.6	86.1~103.9
	하행선	30.1~57.2	56.2~79.6	91.3~107.6	90.9~105.8	91.0~106.0
광명역	상행선	43.4~59.1	36.6~58.5	94.1~111.6	90.9~104.0	90.7~99.5
	하행선	44.1~61.5	49.5~71.7	90.7~110.2	90.6~105.7	83.2~101.3
천안아산역	상행선	43.4~60.9	45.2~60.8	90.7~100.2	89.7~100.3	90.9~99.0
	하행선	41.9~57.1	43.2~63.1	92.7~111.6	89.3~105.5	85.4~97.3
동대구역	상행선	33.6~50.3	46.4~69.8	91.3~107.5	92.4~107.3	90.7~107.2
	하행선	41.2~57.8	31.5~70.6	95.0~106.7	92.7~104.8	85.2~98.3

제동소음 레벨이 크게 나타나고 있는 경우는 대부분 진입 초반부에서 최대값이 나타나는 경우인데 이러한 이유는 진입시 상대적으로 급격히 감속시키는 데에 원인이 있을 것으로 추정하고 있다. 마찬가지로 진입 후반부에서 발생하는 경우에도 높은 제동소음이 나타나고 있는데 이의 원인도 동일할 것으로 짐작된다. 그러나, 이와같은 결론 즉 급격한 감속이 높은 제동소음을 유발한다는 사실을 확인하기 위해서는 더 많은 계측이 필요하다.

표 4.2은 각 역사별 제동소음의 최대소음 발생 경향을 정리한 것이며, 그림 4.1은 계측 위치별 최대소음레벨의 히스토그램을 보여주고 있는데 이로부터 열차의 중앙부에서 약간 낮은 소음레벨이 나타나고 있음을 알 수 있다.

표 4.2 계측결과 요약(제동소음 발생경향)

역사명	상행/하행	최대소음 경향	
		발생시기	높은 레벨 발생시기
대전역	상행선	전/중/후반부 골고루	고른 분포
	하행선	전반부 50% 이상	전반부 정차시
광명역	상행선	전반부 50% 이상	전반부 정차시
	하행선	대부분 중/후반부	전반부 정차시
천안아산역	상행선	전반부 50%	고른 분포
	하행선		
동대구역	상행선	전반부 50% 이상	전반부 정차시
	하행선	중/후반부 50% 이상	전반부 정차시

그림 4.2은 계측된 제동소음의 등가소음에 대하여 최대소음을 나타낸 것으로 등가소음과 제동소음간의 선형적 관계를 살펴 볼 수 있다. 따라서 환경소음에서 다루는 등가소음의 경향을 최대소음의 분석결과로부터 쉽게 유추할 수 있다. 그림 4.3~4.4는 차량 진입속도와 제동시간에 따른 제동소음의 최대값을 모든 측정결과에 대하여 나타내고 있다. 그림에서 측정결과의 산포가 매우 커 뚜렷한 경향을 밝혀내기에는 다소 어려움이 있다. 이는 역사별, 측정시간대별로 측정된 제동소음의 변화 추이가 서로 다른데 원인이 있는 것으로 추측된다.

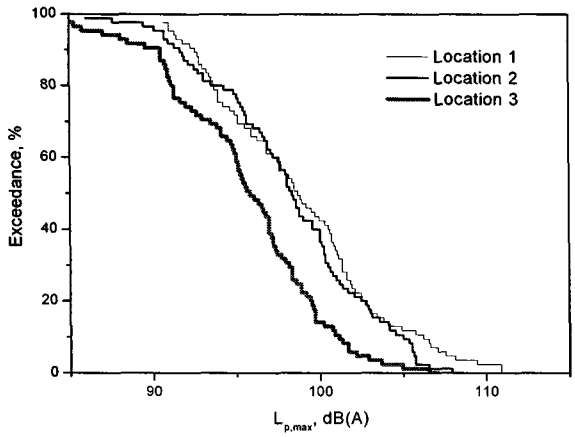


그림 4.1 계측위치별 최대소음의 히스토그램

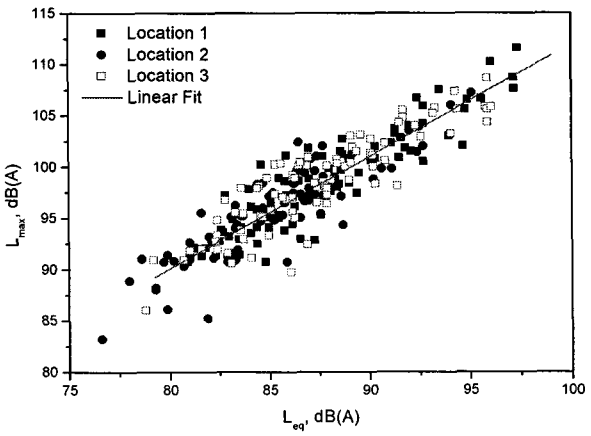


그림 4.2 최대소음과 등가소음간의 관계

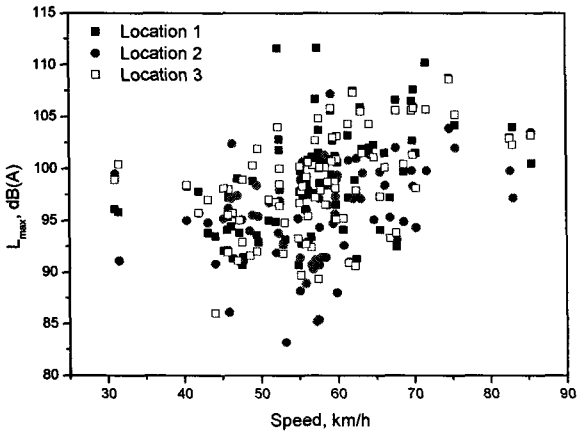


그림 4.3 차량 진입속도에 따른 제동소음 변화

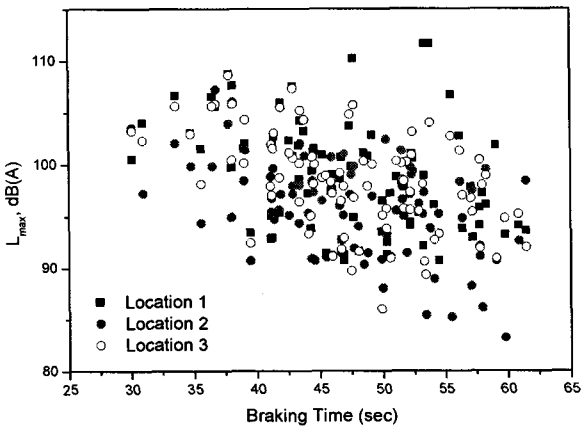


그림 4.4 차량 정지시간에 따른 제동소음 변화

5.결론

계측자료를 분석한 결과에 따르면 KTX의 최대 제동소음은 약 85dB(A)부터 110dB(A)까지, 정차시간은 약 30초에서 60초까지, 그리고 진입속도는 약 30 km/h부터 80 km/h까지 넓은 범위에 걸쳐 있는 것으로 나타났다. 진입속도 및 정차시간과 제동소음과의 관계는 각 역사에 걸쳐 조금씩 다르게 나타났으나 일반적인 경향은 진입속도가 높을수록 정차시간이 짧을수록 제동소음이 높아지는 경향을 보였다. 또한, 최대 소음이 발생하는 순간은 계측위치에 따라 약간의 차이가 있었으나 전체 정차시간을 삼등분하였을 때 대부분의 경우 진입초기 혹은 정차 후반부에서 거의 동일한 빈도로 나타나고 있다.
한편, 제동소음 저감방안 수립시 중요한 단서가 되는 제동소음의 주파수 특성은 모든 계측자료를 1/3옥타브 분석한 결과 다음의 세가지로 요약되었다.

(1) 10 kHz 및 12.5 kHz 밴드대의 높은 주파수 성분 [간혹 8 kHz대의 성분이 나타나기도 한다]
(2) 4 kHz 및 5 kHz 밴드대의 성분 [가장 심한 불쾌감을 유발하고 있다]
(3) 약 200 Hz를 기본 주파수로 하는 2 kHz 이하의 조화성분
이세가지 성분중 (1)의 10 kHz 부근에서 발생하는 소음은 크기가 제일 크게 나타나더라도 높은 주파수로 인해 불쾌감을 유발하는 정도가 낮을 것으로 판단된다.
(2)의 4 · 5 kHz의 성분은 조금만 높아도 곧 불쾌감을 유발시킬 수 있는 주파수 대로서 제동소음 저감을 위해 가장 우선적으로 처리가 필요한 성분에 해당.
(3)의 성분도 4 · 5 kHz 밴드대의 성분이 약할 경우 매우 큰 소음도를 나타날 가능성이 있다. 그러나 (1)이나 (2)의 소음 성분이 제동디스크와 패드 간에 나타나는 전형적인 스퀼소음인 반면 이 소음성분은 발생 주파수 등 그 특성을 고려할 때에 마찰력에 의해 차체 등 제동시스템 부근에의 구조가 가진되어 이차적으로 나타나는 구조물의 진동과 관련되었을 가능성이 높은 것으로 추정된다.

참고문헌

(1) 한국철도공사 "고속차량 제동시 소음저감 방안 연구 보고서" 2006. 12.
(2) 윤광수, "저주파 디스크 브레이크 스퀼음의 저감" (Identification of Characteristics of Brake Components Using NASTRAN)
(3) 이동훈, "공학도를 위한 소음공학 (이론과 실무) "
(4) 이찬우, 김재철, 조준호, "KTX 열차 운전 모드에 따른 정차소음 특성 " ,한국철도학회