

고속열차의 객실 소음에 미치는 머드플랩의 영향에 관한 연구

A Study on the Effect of Mud-flap on the Cabin Noise in KTX

서승일[†] · 최성훈* · 정인수[‡]

Sung-Il Seo · Seong-Hun Choi · In-Soo Chung

Abstract

In the early stage of operation of KTX, passengers complained of the excessive cabin noise as the passes the tunnel. The noise is caused partly by wheel-rail contact and partly by airflow around the carbody. In this study, to reduce the cabin noise, the effect of the mud-flaps located between the cars is investigated. A series of tests was conducted to clarify the influences of the type and length of mud-flap, and train speed on the cabin noise. The optimum length of mud-flap was found. The shedding vortices around the mud-flap is thought to be the cause of the aerodynamic noise. Strouhal number and the resonant shedding frequency around the mud-flap correlated well with the cabin noise level.

Keywords : aerodynamic noise(공력 소음), cabin(객실), high speed train(고속열차), mud-flap(머드플랩), tunnel(터널), Strouhal number(스트루할 수), vortex shedding(와류 유출)

1. 서론

고속열차의 개통 초기에 객실에서 느껴지는 소음이 과도하여 승객들의 불만을 초래한 사례가 있었다. 특히 터널 주행 시에는 객실에서 소음이 과도하게 감지되어 승객들이 고통을 호소하였고, 이에 따라 언론에서는 고속열차의 소음 문제를 집중적으로 보도하여 고속열차의 유용성을 반감시킨 대표적 사례가 되었다. 이 사례 이후에 고속열차 객실 소음에 대한 다양한 연구가 진행되었고, 소음의 원인에 대한 분석이 시도되었다[1,2]. 그런데 객실의 소음은 휠-레일의 상호작용에 의한 전동음과 동력장치로부터의 소음, 구조 진동에 기인한 구조음, 공력소음 등 다양한 요인에 의해 발생하므로, 정확한 규명에 많은 어려움이 따르게 된다. 특히 터널 내에서는 급격한 압력 변화와 유속의 증가, 터널 벽에 의한 음의 반사, 슬라브 도상의 진동에 따른 구조음 등의 효과가 조합되어 나타나므로 객실 소음 증가의 원인을 분석하는 데 있어서 어려움이 더 많다.

현재까지의 연구 결과에 따르면 터널 내 고속열차 객실 소음의 원인은 일차적으로 고속열차가 동일 속도로 자갈 도상의 터널을 주행하느냐 슬라브 도상의 터널을 주행하느냐에 따라 소음 수준의 차이를 보이고 있으므로, 궤도의 구조상의 차이에 있음을 확인시켜 주었다[1]. 또한 알루미늄 압출재를 사용한 한국형 고속열차 KHST와 스틸 차체를 적용한 KTX가 터널주행 시에 소음 수준의 차이를 보이고 있으므로, 차체의 투과손실의 차이도 중요한 원인으로 지목될 수 있다. 그러나 현재의 터널 구조를 변경하는 문제와 고속열차의 차체 구조를 변경하는 문제는 비용 측면에서 현실성이 부족한 대안이 될 수밖에 없다. 터널에서의 객실 소음의 또다른 원인은 공력소음을 들 수 있다. 차체 표면 주위의 공기 유동은 소음을 발생하게 되고, 고속에서 공기 유동에 의한 공력소음은 객실 소음의 지배적인 요인이 될 수 있다. 고속열차의 전두부는 공력 저항을 감소시키기 위해 유선형을 기반으로 다양한 유동해석과 풍동시험을 거쳐 설계되었으나, 객차와 객차 사이의 연결 부분은 불연속 단면을 이루어서 매끄러운 공기의 흐름을 저해하므로, 저항의 증가는 물론 공력소음의 원인으로 지목될 수 있다. 특히 표면에서 발생하는 와류는 공력 소음 증가의 직접적인 원인이 되므로 정밀한 검토가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 차체 표면에서 와류 발생에 기

[†] 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원, 기촌철도기술개발사업단, 단장
E-mail : siseo@krii.re.kr

TEL : (031)460-5623 FAX : (031)460-5699

* 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단, 선임연구원

[‡] 한국철도공사, 고속차량개발팀, 팀장

여할 수 있는, 객차 연결부의 한 부분을 구성하는 머드플랩(mud-flap)에 주목하여 객실 소음과의 연관성을 검토하고자 하였으며, 객실 소음의 감소를 위해 가장 효과적인 머드플랩의 형상이 무엇인지 찾고자 시도하였다. 머드플랩의 변경에 의해 객실 소음의 감소가 가능하다면 다른 대책에 비해 극히 적은 비용으로 시공이 가능하기 때문에 가장 경제적이고 현실적인 대책이 될 수 있다.

2. 머드플랩의 변경 효과에 대한 계측

머드플랩 형상 변경에 의한 객실소음 변화를 평가하기 위해 고속열차 KTX 2호에 대하여 머드플랩을 변경하여 소음 측정 시험을 수행하였다. 1호차에서 9호차까지의 머드플랩은 기존의 폭 80mm의 머드플랩이고 10호차부터 18호차까지는 폭을 200mm로 변경한 머드플랩을 부착하여 8호차와 11호차에서 소음 계측을 실시하였다. 8호차와 11호차 객실의 중앙의 1.2m 높이에 마이크로폰을 설치하여 레코더를 이용해 소음 신호를 측정하고, Matlab을 이용하여 분석 하였다. 소음신호는 20.48kHz의 샘플링 주파수로 받았고, 다음 식 (1)에 의하여 등가소음도를 계산하였다.

$$L_{eq,T} = 20 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left(\frac{p_A(t)}{p_0} \right) dt \right] \quad (1)$$

여기서, $p_0 = 2 \times 10^{-5} Pa$

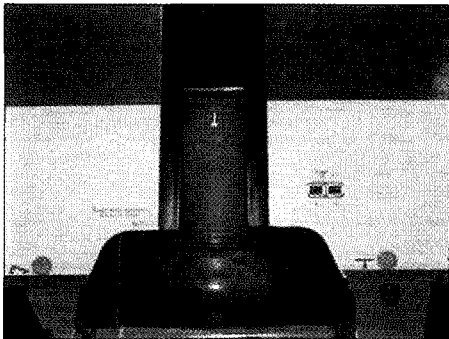
$L_{eq,T}$ = 등가소음도

T = 등가소음을 구하기 위한 시간 간격

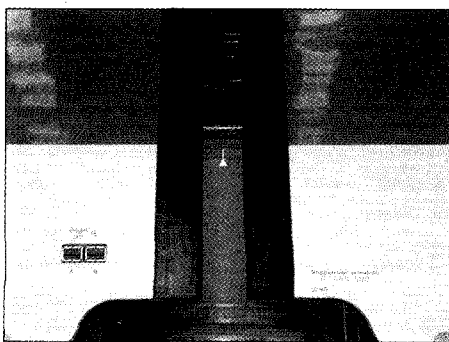
t_0 = 측정 시간

표 1에서는 상행선에서 주요 터널 통과시의 등가소음을 평균 통과속도와 함께 정리하였다. 그림 2~3은 하행선 주행 시에 주요 터널에서 객실 소음을 시간에 따라 나타낸 것이다. 특히 그림 3은 경부고속선에서 길이가 가장 길고 슬래브 도상인 황학터널(10km)을 통과하는 중의 객실 소음을 비교한 것이다. 표 1을 보면 주행 속도에 따라, 가속 정도에 따라 차이는 있으나 머드플랩을 변경한 경우(11호차)가 기존의 머드플랩을 설치한 경우(8호차)보다 소음이 저감됨을 확인할 수 있다. 참고로, 표 1의 마지막 칸에 제시된 소음수준은 머드플랩 변경의 효과를 확인하기 전에 11호차에 기존 머드플랩을 적용한 경우의 소음을 8호차와 비교하기 위해 제시한 것이다. 기존 머드플랩 적용 시에 8호차와 11호차의 소음 계측 결과는 1dB 전후의 오차를 보이고 있으며, 이는 외기 조건, 열차의 속도, 탑승 계측요원, 출입문 개폐상황 등의 차이를 고려할 때, 허용할 수 있는 오차이다. 동일 머드플랩 조건에서 8호차와 11호차의 소음수준 차이는 없는 것으로 판단된다.

그림 2~3의 결과로도 머드플랩의 변경 효과를 확인할 수 있다. 그림 2를 보면 머드플랩의 효과는 터널에서 뿐만아니라 개활지에서 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 또한 소음저감 효과는 자갈 도상 궤도(고등, 운주 터널)뿐만 아니라 슬래



(a) 변경전



(b) 변경후

그림 1. 머드플랩의 변경 전후 형상

표 1. 터널 주행 중 객실 소음 비교

터널명	서울→동대구			
	8호(dBA)	11호(dBA)	속도(km/h)	11호(기준)
왕림터널	71.3	67.2	260	
서봉1터널	72.6	68.4	260	
고등터널	71.7	67.3	280	
운주터널	72.5	67.6	280	72.0
심중터널	72.2	68.5	295	70.7
상봉2터널	71.6	69	300	70.7
오탄터널	70.8	66.6	265	
영동터널	70.4	67	265	71.6
화신5터널	74.6	71.2	255	73.8
황학터널	75.6	73.3	265	76.6
북삼1터널	71.8	67.6	260	69.7

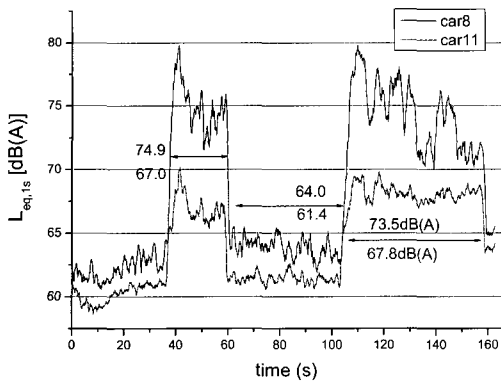


그림 2. 하행선 고등터널, 운주터널 구간 실내소음

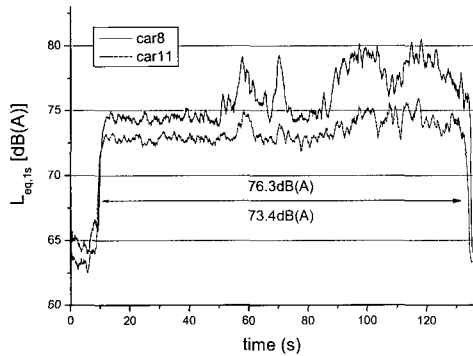


그림 3. 하행선 황학터널구간 실내소음

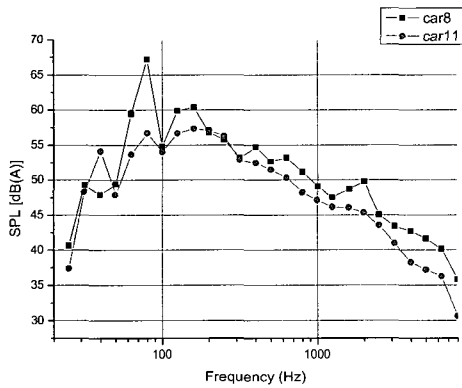


그림 4. 운주터널(그림 6.2의 110~120초) 내에서의 소음 스펙트럼 비교

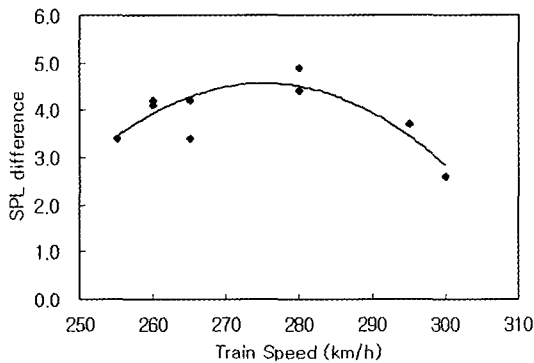


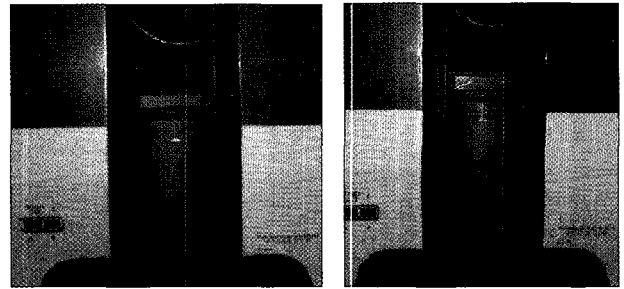
그림 5. 속도에 따른 객실 소음 변화

브 도상 궤도(황학터널)에서도 나타남을 알 수 있다. 그림 4는 운주터널에서 피크치를 보이는 순간의 소음에 대해서 주파수 분석을 한 결과인데, 머드플랩 형상 변경으로 전 주파수 대역에서 소음이 저감하는 것을 확인할 수 있으며, 특히 터널 내 소음의 주요 성분인 중심주파수 80Hz의 성분이 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있다.

그림 5는 표 1의 결과를 다시 정리하여 머드플랩 변경 전후의 소음수준 차이를 속도에 따라 나타낸 것이다. 그림 5를 보면 머드플랩의 효과는 모든 속도 영역에 따라 동일한 것이 아니고 특정 속도 영역에서 더 효과가 있음을 알 수 있다.

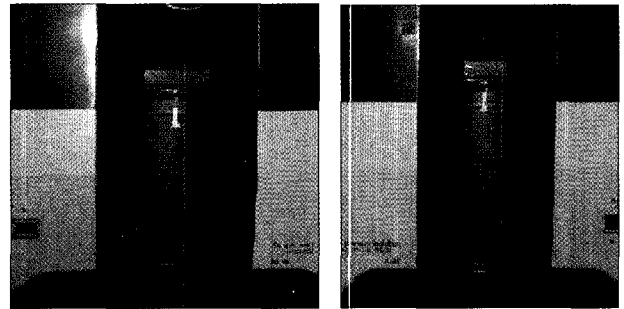
3. 최적 머드플랩 형상의 결정

머드플랩의 변경 효과를 시험을 통해 확인한 후, 실제 열차



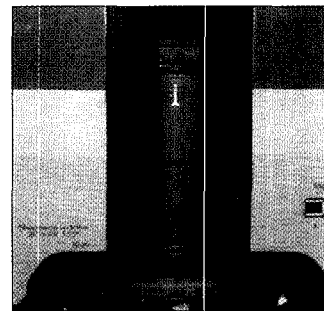
(a) Type A

(b) Type B



(c) Type C

(d) Type D



(e) Type E

그림 6. 머드플랩 변경안

에 적용하기 위해 최적의 형상을 찾는 시험을 다시 실시하였다. 머드플랩의 길이가 길게 되면 관절대차 상부의 공간을 가로막아 작업자들의 활동을 방해하기 때문에 유지보수 측면에서 비효율성이 존재한다. 따라서 소음 저감 측면과 유지보수 측면을 고려한 머드플랩 형상의 결정이 필요하다. 이를 위해 표 2와 같이 5가지의 머드플랩 형상 변경안에 대해 반복 시험을 실시하였다. KTX 2호차에서 선두 객차의 갱웨이부터 차례로 머드플랩을 변경하여 설치하였다.

표 2의 Type A의 경우, 측면의 머드플랩은 기존 머드플랩의 길이와 동일하나, 지붕위의 머드플랩은 기존의 머드플랩에서 길이를 215mm 연장하였다. Type B는 기존의 머드플랩이고 Type C는 기존의 머드플랩에서 길이를 180mm로 연장한 것이다. Type D는 기존의 머드플랩의 재질보다 경화된 재질의 머드플랩을 200mm로 연장한 것이고, Type E는 기존의 머드플랩의 길이를 200mm로 연장한 것이다. 그림 6은 표 2의 각 경우에 대한 실제 사진이다.

각각의 머드플랩의 영향을 비교하기 위하여 광명→동대구 구간을 왕복하면서 간이소음계를 이용하여 표 2의 해당 객실에서 소음을 측정하였다. 측정한 결과는 그림 7에 나타나 있는데, 기존의 머드플랩이 설치된 객실 6호를 제외하고 상호 비교하였다. 그림 7에 따르면 객실 8호에서 소음 수준이 가장

표 2. 머드플랩 변경 형태 및 위치

Type	Profile	Gangway	객실	측정위치
A	80+215cap	1~3	1~4	2호
B	80	4~5	4~6	6호
C	180	6~9	6~10	8호
D	200 (hard)	10~13	10~14	11호
E	200	14~17	14~18	17호

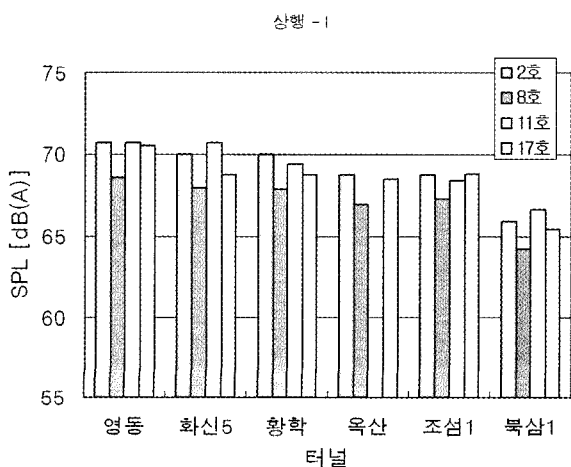


그림 7. 머드플랩 변경에 따른 실내 소음 비교

낮게 나타남을 알 수 있다. 객실 8호의 전후 머드플랩은 기존의 머드플랩의 길이를 180mm로 늘인 것으로서 소음 저감 효과가 최대이면서, 작업자가 관절대차 상부의 갱웨이 공간에 접근할 수 있을 정도의 틈새는 제공할 수 있으므로 머드플랩 변경을 위한 최적 안으로 선정하였다.

참고로, 머드플랩을 변경하기 이전에 각 객실간의 소음 차이는 1dB 이하이며 계속한 결과는 다음의 표 3과 같다.

5. 머드플랩 효과에 대한 공기역학적인 분석

객실에서 소음을 측정한 결과에 따르면 머드플랩의 길이 변경에 따라 소음 저감 효과가 확인되었고, 소음 저감 효과는 열차의 주행속도와 머드플랩의 길이에 따라 달라지고 있다. 이러한 현상은 공기역학적인 측면에서 분석될 수 있다. 즉, 그림 8과 같이 점성유체에서 유동장이 형성될 때, 탄성체인 머드플랩의 끝단에서 와류(vortex)가 형성되어 표면에서 분리되어(shedding) 간다. 표면에서 분리되는 와류는 공력소음을 유발하면서 객실에 까지 전달된다. 와류의 분리는 보통 Strouhal Number를 통해서 판정하게 된다. 통상 유동장에서 Reynolds Number가 일정한 한도를 넘으면, 와류가 분리되는데, 이때 다음 식 (2)으로 정의되는 Strouhal Number가 일정하다고 알려져 있다[3,4].

$$S_t = f \frac{L}{V} \quad (2)$$

여기서, S_t = Strouhal Number

f = 와류가 분리되는 주파수

L = 특성 길이(characteristic length)

V = 유속

와류는 물체에서 주기적으로 분리되면서 공기소음을 유발하는데, 탄성체의 경우에는 구조를 가진시켜 구조소음도 유발하게 된다. 머드플랩의 경우에도 와류 분리에 의한 기진력



그림 8. 머드플랩 주위 유동장

표 3. 머드플랩 변경 형태 및 위치

객실	2호	8호	11호	17호
소음	71.5	72.5	72.0	71.7

이 탄성체인 머드플랩을 진동시켜 공기소음과 구조소음이 유발된다고 추정된다. 머드플랩의 형상 변경에 따라 유동장도 변경되지만, 머드플랩의 응답도 변경되므로 형상에 따른 소음 특성의 변화가 나타나게 된다.

참고로 원형 또는 사각 단면의 실린더에서 와류가 분리되는 Strouhal Number가 0.2 전후임을 감안하고[5], 갱웨이에서 머드플랩을 포함한 구조물의 특성길이를 200mm로 추정하고, 열차 주행에 의한 유속이 280km/h(=78m/s)라고 가정하면, 기진력의 진동수는 식 (2)을 변형하여 다음과 같이 계산된다.

$$f = S_t \frac{V}{L} = 0.2 \times \frac{78}{0.2} = 78 \text{ Hz} \quad (3)$$

식 (3)의 결과는 그림 4에서 최대치를 보여주는 80Hz 성분의 소음이 감소되는 현상을 부분적으로 설명해 준다.

머드플랩의 효과가 머드플랩의 길이 및 열차 주행 속도에 따라 변화한다는 예측 결과는 Strouhal Number에 따른 와류 발생과 와류 기진력에 의한 머드플랩 구조의 진동응답이 변화되기 때문으로 설명될 수 있다. 특히, 와류의 주파수가 머드플랩 구조와 공진을 일으키는 경우에는 구조소음이 더욱 증폭되어 공기소음의 효과와 함께 소음 증가의 원인으로 지목될 수 있다.

6. 결론

터널에서 고속 주행하는 KTX의 객실내 소음은 차륜과 레일의 접촉에 의해서 발생하는 소음과 열차 주위의 공기유동에서 발생하는 공력소음에 주로 기인한다. 열차간의 머드플랩은 공력소음을 저감시키는데에 효과 있음을 시험을 통해서 알 수 있었다. 머드플랩의 효과는 열차의 속도에 따라, 형상에

따라 달라짐을 시험을 통해 확인할 수 있었고, 소음 저감 효과는 머드플랩 길이의 변경에 따라 극대화시킬 수 있음도 알 수 있었다. 머드플랩이 공력소음에 미치는 효과는 와류의 분리를 판정할 수 있는 Strouhal Number 및 와류에 의한 공기소음과 머드플랩의 구조응답에 의해 설명될 수 있음을 알 수 있었다. 머드플랩과 공력소음과의 연관성을 명확히 규명하기 위해서는 머드플랩 주위의 정밀한 유동장 해석과 공력소음 예측, 머드플랩의 탄성효과에 따른 공탄성(acroelasticity) 해석이 필요하다.

후 기

본 연구는 한국철도공사에서 지원한 연구과제의 일부임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

1. 이찬우, 김재철 (2005), "터널 구조에 따른 KTX 고속차량 차내 소음 특성", 한국정밀공학회 05 춘계학술대회 논문집, pp.341-344.
2. 최성훈, 김재철, 이찬우, 조준호 (2004), "터널주행시의 고속전철의 실내 소음", 한국철도학회 04 춘계학술대회 논문집, pp.670-674.
3. 서용권, 문종춘 (1993), "보텍스 shedding에 의한 얇은 직사각형통 내에서의 유동특성", 대한기계학회논문집, 제17권, 제8호, pp.2112-2130.
4. 허대녕, 유승필, 이덕주, 이두용 (2001), "직사각형 공동의 소음 제어에 대한 수치적 연구", 한국소음진동공학회 2001년도 추계학술발표대회논문집, pp.1189-1196.
5. 정영중, 조상현, 상신형, 최해천 (1998), "층류유동에서 사각실린더 주위의 와류shedding과 공진현상에 관한 수치적 연구", 대한기계학회논문집 B권, 제22권, 제5호, pp.573-583.