

열차풍에 의한 고속선 자갈비산현상 연구

A Study on the Ballast-flying Phenomena by Strong Wind Induced by High-speed Train

권역빈¹ · 박춘수²

Hyeok-Bin Kwon · Choon-Soo Park

Abstract

The mechanism of ballast-flying phenomena by strong wind induced by high-speed trains has extensively been investigated by conducting wind tunnel test and field-measuring of wind velocity in the vicinity of the track. The ballast gathered from the Seoul-Busan high-speed railway track has been classified by mass and shape to find relationship between those properties and the characteristic of movement in high wind and 16-channel Kiel-probe array has been used to examine the detailed flow structure above the surface of the track. The probability of ballast-flying during the passage of the high-speed train has been assessed comparing the results from wind tunnel test and that from field-measuring. The results shows that when the G7 train as well as the KTX train runs at 300km/h, about 25m/s wind gust is induced just above the tie and the probability for small ballast under 50g to fly is about 50% when it is on the tie. If the G7 train runs at 350km/h, the wind gust just above the tie increases to 30m/s, therefore radical countermeasure seems to be needed.

Keywords : Ballast-flying Phenomena(자갈비산 현상), KTX train(KTX 차량), G7 train(G7 차량), Wind Tunnel Test(풍동시험), Train Gust(열차풍), Aerodynamics(공기역학)

1. 서론

철도차량의 고속주행 시 유도상 궤도에서 나타나는 자갈비산 현상은 차량과 시설의 파손을 야기할 뿐 아니라 승강장과 선로주변의 인명 및 시설의 안전에도 큰 위협요소가 될 수 있다. 이러한 자갈비산의 원인으로서 ①고속주행 시 차체하부에서 발생하는 열차풍과 ②겨울철 강설 시 차량에 달라붙었다 떨어지는 얼음덩어리(설빙)의 두 가지를 들 수 있다[1]. Fig. 1에는 자갈비산의 원인과 피해를 보여주고 있다[2].

열차풍은 차량 표면에 형성되는 경계층으로 인해 유도되는 난류유동으로서 특히 차량 하부에서는 대차 및 차량 연결부의 복잡한 형상으로 인하여 차량 측면 및 상부보다 훨씬 더 강하게 형성되는 특징이 있다. 200~300km/h의 속도로 주행하는 고속철도차량의 하부와 도상 표면 사이에는

통상적으로 풍속 30~50m/s 정도의 열차풍이 발생하게 되는데, 이러한 열차풍으로 인하여 표층 중 가벼운 자갈이 구르다가 다른 자갈이나 침목 등에 부딪쳐 튀어 오르게 된다.

자갈비산의 또 다른 원인인 설빙낙하 현상은 겨울철 적설지에서 나타나는 현상으로서 열차풍에 의한 자갈비산현

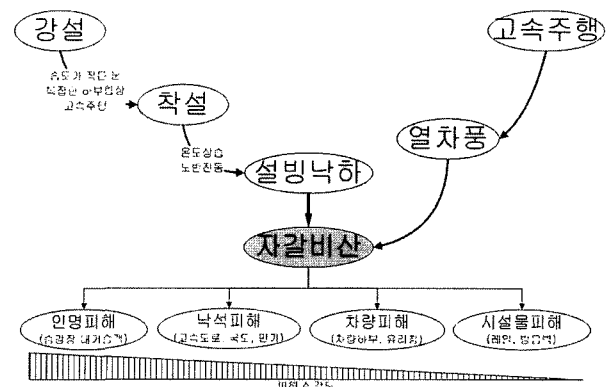


Fig. 1. Event Tree of Ballast-flying Phenomena

1 정회원, 한국철도기술연구원 철도안전연구시험센터

2 정회원, 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단

상보다 그 메커니즘이 좀 더 복잡하다. 눈이 쌓인 선로를 열차가 고속으로 주행할 때 눈은 차량하부의 열차풍에 의하여 날리게 되며 이때 날린 눈은 차체하부에 유동이 정체되는 곳에 착설하게 된다. 착설이 된 눈은 풍압에 의해 다져지거나 외부온도의 변화에 따라 얼고 녹기를 반복함으로써 단단하게 뭉쳐지게 되는데, 이렇게 단단하게 뭉쳐진 눈덩이 혹은 얼음덩이가 온도변화나 무게에 의해 떨어지면서 선로 변의 자갈과 충돌하여 자갈을 비산시키게 된다.

이상의 원인에 의해서 비산된 자갈이 차체 하부에 충돌하게 되면 열차속도에 해당하는 속도로 가속되어 커다란 운동 에너지를 얻게 되고, 이 자갈은 선로주변으로 고속으로 비산하거나 도상의 또 다른 도상자갈과 충돌하여 순간적으로 다량의 자갈의 연쇄적인 비산을 야기하여 차량과 궤도 및 선로주변의 인명과 시설에 각종 피해를 야기하게 된다.

먼저 자갈비산의 피해 중 심각도가 가장 큰 것은 인명피해로서, 열차가 선로 위를 고속으로 주행하거나 정거장을 고속으로 통과할 때에는 항상 자갈비산의 위험이 상존하므로 고속 주행 시 선로 내 작업을 금하고 열차가 고속으로 통과하는 정거장에서는 별도의 자갈비산 방지대책이 필요하다.

두 번째로 열차가 교량구간을 통과할 때 자갈이 비산되어 교량 아래로 떨어지게 되면 주위 도로나 민가에 피해를 줄 수가 있으며, 특히 고속도로에서 고속주행하는 자동차에 직접 충돌할 경우, 대형 도로교통사고로 이어질 수 있으므로 비산된 자갈이 교량 아래로 떨어지지 않도록 대책을 세우는 것이 필요하다.

세 번째로 철도차량에 대한 피해를 들 수 있겠는데, 비산된 자갈이 차체하부와 충돌하여 차체 및 각종 기기들을 파손시킴으로 인하여 차량의 유지보수비용의 증가 및 차량수명의 단축을 유발할 수 있으며, 비산된 자갈이 터널 벽면이나 방음벽 벽면에 반사되어 유리창과 차체 지붕까지 손상시킬 수도 있다.

마지막으로 각종 철도시설물에 대한 피해가 야기될 수 있는데, 비산된 자갈이 방음벽 등 궤도 주변 시설물에 직접 피해를 입히는 경우뿐만 아니라 자갈이 레일위로 올라간 상태에서 열차가 통과하게 되어 초래되는 레일두부의 손상과 차륜의 균열도 포함된다. 이러한 차륜과 레일의 손상은 열차의 주행안정성을 저하시키고 각 용품에 대한 수명을 단축시킬 뿐 아니라, 레일의 보수를 단축시키기 때문에 유지보수 비용을 증가시키는 원인이 되기도 한다.

2004년 4월 고속철도의 개통과 더불어 경부고속철도는 향후 몇 년 간 예상치 못한 위험요소에 의해 안전이 위협받을 수 있으며, 자갈비산 문제도 이러한 위험요소의 하나로

부각되고 있다. 특히, 열차누적통과량이 증가함에 따라 자갈의 파손이 지속되므로 열차풍에 의한 자갈비산현상은 점차 더 심해질 것으로 예상되므로 이에 대한 충분한 연구와 합리적인 대책의 마련이 필요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 고속선에서 빈번히 발생하고 있는 자갈비산의 메커니즘을 밝히기 위해서 풍동시험과 열차풍 현장계측시험을 수행하였다. 풍동시험은 경부고속선 현장에서 채취한 1000여개의 자갈을 대상으로 풍속과 자갈의 비산특성의 관계를 고찰하였고, 현장시험에서는 KTX차량 및 G7차량 통과 시 차체하부에 형성되는 열차풍의 속도를 측정하였다.

2. 풍동시험

경부고속철도 본선에 도포된 자갈을 질량 및 형상을 기준으로 하여 통계적으로 분류하였으며, 분류된 자갈들을 풍동 내부에 놓고, 풍속을 높여가면서 유속에 대한 질량 및 형상별 자갈의 비산 특성을 살펴보았다. 또한 풍동 내부에 철도 침목의 모형을 놓고, 그 사이에 자갈을 적층시킨 후 풍속을 높여가면서 적층된 자갈의 거동을 관찰하였다. 상기의 실험 결과들을 바탕으로 자갈비산 특성을 규명하고자 하였다.

2.1 자갈의 형상 및 질량의 통계적 분석

자갈비산 시험을 위하여 실제 경부고속철도 본선에 도포된 자갈을 약 1000여 개 채취하였다. 이 중 330개의 자갈에 대해 Table 1에 나타난 분류기준을 바탕으로 형상 및 질량별로 분석하였다.

형상 별 자갈의 개수를 살펴보면, C 타입과 B 타입이 각각 44%와 40%로 대부분을 차지한다. 자갈의 질량은 최소 17g에서 최대 200g까지 나타났다. 이 중 C 타입은 평균질량이 가장 크며, A 타입은 가장 작은 평균질량을 가진다. 자갈의 형상 별 무게 분포를 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1. Classification of Ballast Shape

분류	형상 정의	공력 특성	그림
A 타입	납작한 형태	자갈의 자세에 따라 공력 특성이 크게 변함	
B 타입	반구 형태 (큰 면이 존재)	자갈의 자세에 따라 공력 특성이 변함	
C 타입	둥근 형태	자갈의 자세에 따라 공력 특성의 변화 미미	

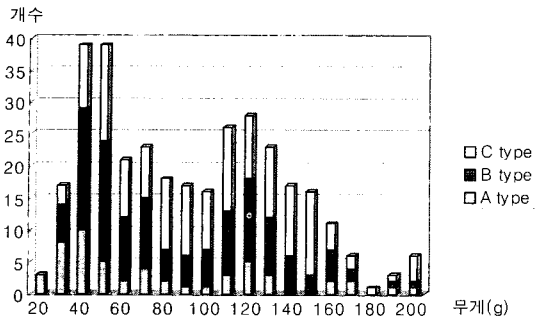


Fig. 2. Mass and Shape of Ballast

2.2 평판에서의 자갈비산 풍동시험

자갈의 질량 및 형상에 따른 자갈비산 특성을 살펴보기 위해 풍동바닥에 자갈을 놓고 풍속을 높여가며 자갈의 움직임을 관찰하였다. 시험에 사용된 풍동은 서울대학교 기계항공공학부의 중형 아음속 풍동으로서 시험부의 크기는 1.35m(W)×0.95m(H)×2m(L)이며, 최고유속은 약 50m/s이다. 자갈이 풍동 내부에 유입될 위험을 막기 위하여 시험시 최고 유속은 35m/s로 하였고, 유동의 하류 쪽에 약 40cm 높이의 스크란을 설치하였다. 자갈의 무게와 형상 별로 12

가지 시험조건에 대하여 풍향에 직각이 되도록 1열로 놓아 개별적인 자갈의 비산 특성을 알 수 있도록 하였다. 시험 전 후에 자갈이 풍동 바닥 내에 놓여진 모습은 Fig. 3과 같다.

최초로 자갈이 움직이기 시작하는 풍속(채운 점)과 모든 자갈이 움직였을 때의 풍속(빈 점)을 각 조건에 대해 Fig. 4에 나타내었다. 자갈이 움직이기 시작하는 풍속에 대하여 회귀곡선을 그려본 결과(실선) 평균적으로 20m/s를 약간 상회하는 풍속에서 자갈이 최초로 이동을 시작함을 확인하였다.

시험풍속 35m/s 이내에서는 모든 시험 조건에서 모든 자갈이 이동하지는 않았지만, C type의 경우 0~50g 및 50~100g의 질량을 갖는 자갈들이 최대풍속보다 낮은 26.9m/s와 29.9m/s에서 모두 이동함을 알 수 있었다. 본 시험의 결과를 바탕으로 유추해볼 때, 실제 모든 자갈들이 움직이는 풍속은 대략 점선으로 표시된 범위 내에 존재할 것으로 예상된다.

풍속에 대해 질량 및 형상에 따른 자갈의 이동율(=이동한 자갈수/전체 자갈수)을 각각 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5에서 자갈의 질량이 작을수록 낮은 풍속에서 이동율이 높으며, 클수록 높은 속도에서 이동을 시작함을 알 수 있다.

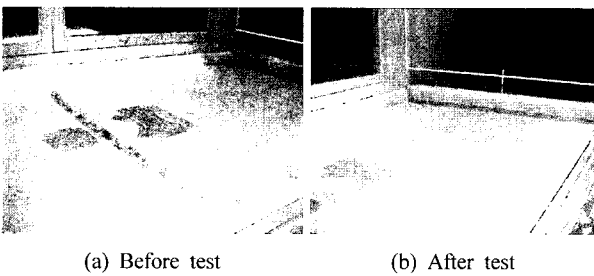


Fig. 3. Ballast in Wind Tunnel

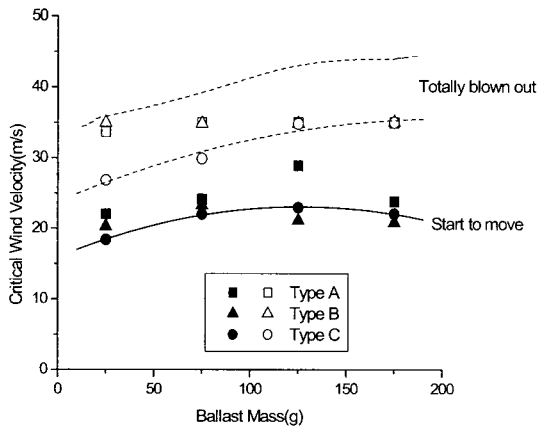


Fig. 4. Critical wind velocity of ballast-moving

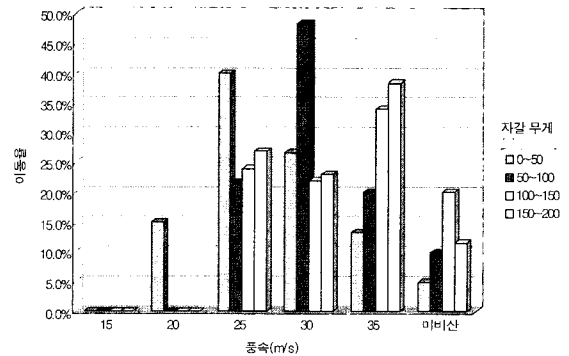


Fig. 5. Moving Ratio Relative to Ballast Mass

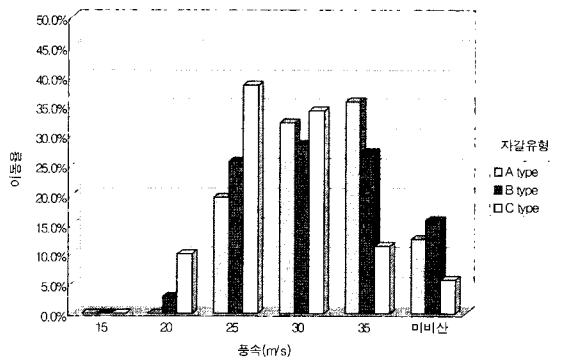


Fig. 6. Moving Ratio Relative to Ballast Shape

자갈 형상과 자갈의 거동 사이의 상관 관계를 나타낸 Fig. 6을 살펴보면, 각 형상별 최대 이동율은 A type의 경우 30~35m/s에서, C type은 가장 낮은 20~25m/s에서, 마지막으로 중간형태인 B type은 25~30m/s의 속도에서 나타났다.

본 시험의 결과로 볼때, 평판에 놓인 조건 하에서 자갈이 움직이기 시작하는 풍속은 약 20~40m/s 정도로 나타났으며, 자갈의 질량이 작을수록 그리고 원형에 가까울수록 자갈비산이 시작하는 풍속이 낮아지는 경향을 보임을 알 수 있다.

2.3 적층시의 자갈비산 풍동시험

실제 선로 상에서 적층된 자갈의 비산 현상을 모사하기 위하여 풍동 내에 자갈을 적층하고 비산특성을 살펴보았다. 이 때 Fig. 7과 같이 풍동 내에 두 개의 침목을 75cm 간격으로 설치하고, 경부고속선에서 채취한 약 1000개의 자갈을 약 5cm의 두께로 적층하였다.

첫 번째 침목모형 위에 1열로 자갈을 올려놓은 상태에서 풍속을 서서히 증가시켜가면서 자갈비산 현상을 관찰하였다. 앞선 평판에서의 시험에서와 같이 침목모형 위에 위치한 자갈들은 풍속이 20m/s에서 이동을 시작하였으며, 적층

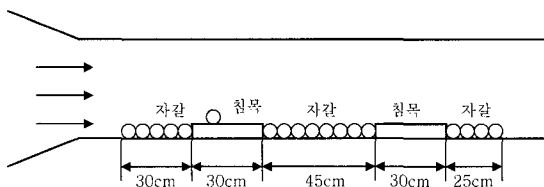


Fig. 7. Ballast Track Model in Wind Tunnel

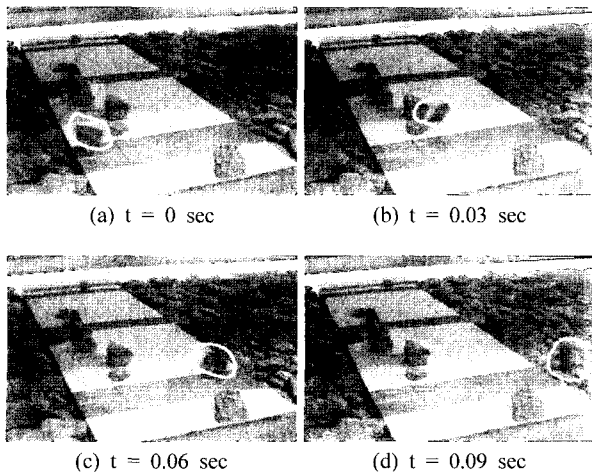


Fig. 8. Ballast-flying Phenomena(Wind Velocity=33m/s)

된 자갈은 풍속이 약 33m/s에 도달했을 때 처음으로 비산하는 것이 관찰되었다.

Fig. 8은 자갈이 비산하는 장면을 나타내었다. Fig. 8(a)의 원 안에 나타나 있는 자갈은 침목 바로 앞에서 순간적으로 솟아오른 모습이며, 약 0.09sec 이후에는 침목 밖으로 날아가는 것을 볼 수 있다.(Fig. 8(b), (c), (d)) 침목의 길이 30cm를 감안하면 자갈이 비산하는 속도는 33m/s로서 자갈의 비산속도는 풍속과 거의 동일한 것으로 나타났다.

3. 차체하부 유동장 계측 시험

자갈비산의 기본적인 유동조건을 조사하고, 현장시험을 위한 차체하부 유동계측시스템을 개발하여 경부고속선 본선에서 G7차량과 KTX 차량에 대해 차체하부 유동장 측정 시험을 실시하였다.

3.1 시험장비

차체하부 유동장 측정을 위하여 Kiel Probe(Fig. 9)를 이용하여 Array를 구성하였다. Kiel Probe는 Probe에 수직인 유동 뿐 아니라 15° 정도 기울어져 들어오는 유동에 대해서도 유동의 절대유속을 측정할 수 있다. 본 시스템은 총 16개의 Probe로 구성되어 있는데, 세로방향 6개의 전압(Total Pressure) Probe(#1~#6)와 가로방향 10개의 전압(Total Pressure) Probe(#3, #7~#15), 그리고 공통으로 사용되는 정압(Static Pressure) Probe 1개(#16)로 구성되어 있다(Fig. 10).

Kiel-Probe Array를 통해 전달되는 물리적인 압력을 전기적인 신호로 변환하기 위해 여러 채널의 압력을 동시에 읽어 전송할 수 있는 Multi-channel Pressure Scanning System을 이용하였다. 본 연구에서 사용된 Pressure Scanning System은 미국 Pressure Systems 사(社)의 9016 System으로서 16개 채널에서 초당 100회의 속도로 압력을 감지하여 전기적 신호로 변환할 수 있으며, 전기적 신호로 변환된 압력값

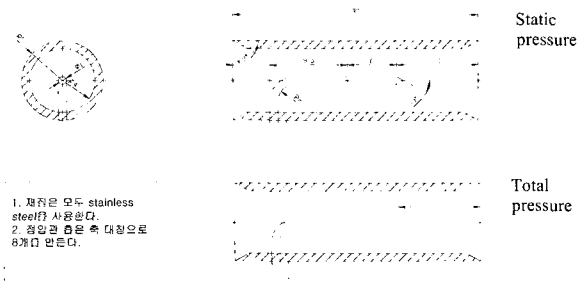


Fig. 9. Kiel Probe

은 TCP/IP 신호를 통해 Data 획득 시스템으로 전송되도록 설계되어 있다. Kiel-Probe Array와 공압튜브로 연결된 9016 System의 사진은 Fig. 11에 나타나 있다.

9016 System은 Ethernet 기반의 TCP/IP Protocol을 사용하기 때문에 Lan card를 탑재한 PC에 연결하는 것으로 간단하게 측정시스템을 구성할 수 있다.

본 연구에서는 9016 system에 번들로 제공되는 소프트웨어를 이용하여 데이터를 획득하였으며, 획득된 데이터는 시간과 각 채널에서의 압력값이 텍스트 파일 형식으로 저장된다. 본 시스템에 의해 측정된 압력을 속도로 변환하는 방법은 아래 식 (1)과 같다.

$$U_i = \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_i - P_s)} \quad (1)$$

위 식에서 U_i 는 각 측정 지점에서의 유속이며, P_i Kiel-

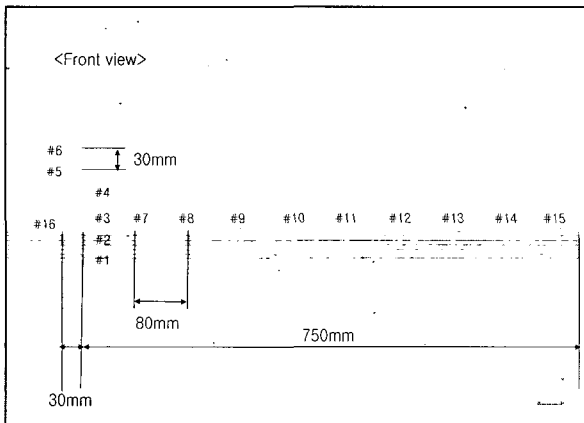


Fig. 10. Measuring Points of Kiel-Probe Array

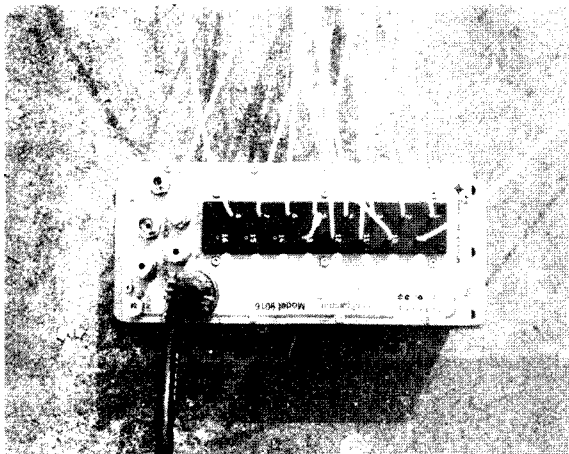


Fig. 11. Multi-channel Pressure Scanning System

Probe에서 측정된 전압(Total Pressure), P_s 는 공통으로 측정된 정압(Static Pressure)이다. 그리고, ρ 는 대기의 밀도를 나타낸다.

본 시험에서는 디지털 캠코더를 이용하여 통과열차의 속도를 측정하였다. 즉, 디지털 카메라를 이용하여 열차통과시 동화상을 기록한 다음 전두부와 후미부가 통과하는 시점의 프레임은 육안으로 판별하여 속도를 계산한다. 아래 식 (2)에는 식별된 프레임의 수를 이용하여 열차속도를 계산하는 식을 나타내었다.

$$U_{train} = \frac{L_{train}}{(N_{tail} - N_{nose}) / SFN} \times 3.6 \quad (2)$$

위 식에서 L_{train} 은 차량의 길이(m), N_{tail} 과 N_{nose} 는 각각 후미부와 전두부가 통과하는 시점에서의 프레임 수이며, SFN은 디지털 캠코더의 초당 프레임수다. 위 계산식에 의한 열차속도의 단위는 km/h이다.

아래 Fig. 12는 측정지점을 지나고 있는 열차의 정지화상을 동화상에서 캡처한 화면이다. 전두부와 후미부 통과시 프레임 수는 각각 297과 439이며, 이를 식 (2)에 대입하면 295.18km/h의 통과속도를 얻을 수 있다.

3.2 시험조건

실제 선로 상에 발생하는 열차풍의 유속을 측정하기 위하여 Kiel-Probe Array를 이용한 현장계측시험을 실시하였다. 현장계측 장소는 경부고속철도 천안~대전 시험구간 중 고등터널 남쪽의 약 500m 토공구간의 중간에 위치한 지점으로서(KP 109km) 터널에 의한 유동장의 간섭현상이 없는 지점을 택하여 실시하였다. Fig. 13에는 T2(상행) 선로 내에 설치된 Kiel-Probe Array의 모습이 나타나 있다.

Table 2에는 시험조건을 나타내었다. 2월과 7월에 하루씩 총 9회의 측정을 실시하였으며, KTX차량이 7회, G7 차량이 2회 측정되었다.



(a) Nose Passage(#297)

(b) Tail Passage(#439)

Fig. 12. Captured Image of KTX Train(SFN=30)

3.3 시험결과

열차의 전두부의 끝단은 유동이 정체되는 정체점(Stagnation point)으로서 전압에 해당하는 고압의 압력을 갖게 되며, 이에 따라 전두부 주위에도 고압의 영역이 형성되게 된다. 따라서 열차전두부가 통과할 때에는 갑작스런 압력의 상승(Pressure pulse)이 나타나게 되며, 이를 통해 정확히 열차 전두부의 통과시점을 알 수 있게 된다. 열차 후미부의 통과 시에도 급작스런 압력의 변동을 겪게 되는데, 후미부의 경우에는 전두부와 반대로 압력이 급격히 감소하였다가 증가한 후 대기압으로 감소하며, 후미부 주위는 강한 난류유동장이기 때문에 압력이 안정되기까지 보다 긴 시간이 소요된다는 차이점이 있다.

Fig. 14에는 열차 통과 시 전압(Total Pressure)과 정압(Static Pressure)의 압력변동을 나타내고 있는데, 앞에서 기술한 전두부 및 후미부 통과 시의 압력변동 특성이 잘 나타나 있는 것을 알 수 있다. 또한, 전두부 통과 시점에는 전압과 정

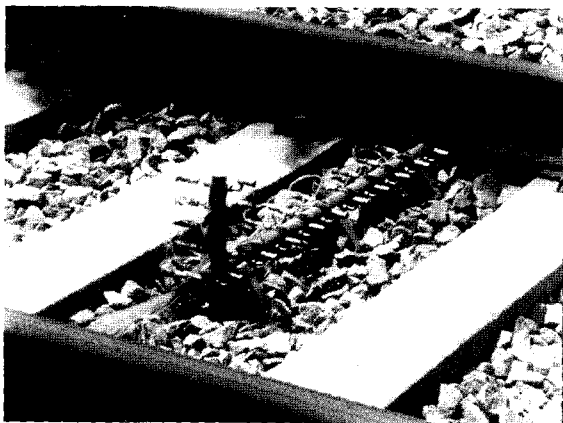


Fig. 13. Kiel-Probe Array Installed in Seoul-Busan High-speed Line(KP=109km)

Table 2. Test Conditions

ID	date	time	train type	train length (m)	time of passing (sec)	train speed (km/h)
01	04/2/14	오전 10:59	KTX	388.104	5.50	253.82
02	04/2/14	오후 01:33	KTX	388.104	5.10	273.96
03	04/2/14	오후 02:40	KTX	388.104	4.83	289.07
04	04/2/14	오후 03:00	G7	145.170	2.46	212.31
05	04/7/29	오전 10:35	KTX	388.104	4.80	291.08
06	04/7/29	오전 10:50	KTX	388.104	4.73	295.18
07	04/7/29	오전 11:09	KTX	388.104	5.00	279.43
08	04/7/29	오전 11:24	G7	145.170	1.80	290.34
09	04/7/29	오전 11:38	KTX	388.104	4.73	295.18

압의 차이가 거의 없다가 열차 통과 중에는 큰 차이를 보이고, 후미부 통과 직후에는 점점 차이가 줄어드는 것을 볼 수 있는데, 이를 통해서 열차풍이 전두부가 통과한 후 발생하기 시작하여 열차 통과 중에 가장 강하게 발생하며, 후미부 통과 후에 점점 감소한다는 것을 예상할 수 있다.

아래 Fig. 15에는 열차통과 시 측정된 전압과 정압을 식 (1)에 대입하여 계산된 차체하부 열차풍의 이력을 나타내고 있다. 앞서 압력변동의 분석을 통해 예상한 바와 같이 전두부 진입과 함께 유속이 증가하기 시작하여 일정 시점 이후 강한 열차풍이 지속되다가 후미부가 통과하는 시점부터 유속이 감소한다. 이처럼 열차풍의 발생과 소멸이 열차의 통과 시점과 일정한 시차를 갖는 것은 공기가 갖는 점성과 난류유동장의 특성으로 설명할 수 있다.

열차가 주행하는 것은 차체하부로 열차속도에 해당하는 유동이 유입하는 것으로 볼 수 있는데, 이 때 전두부 부근에서 형성되기 시작한 층류경계층이 열차바닥면에서 길이방

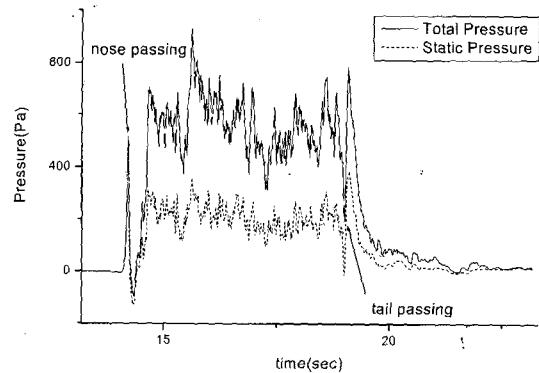


Fig. 14. Pressure Fluctuation During Train Passage(KTX train, 291km/h)

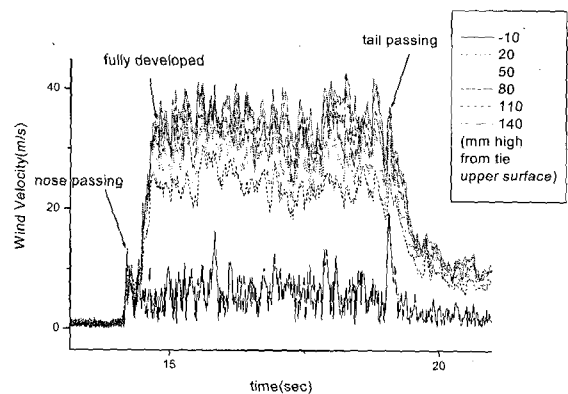


Fig. 15. Wind Velocity Fluctuation During Train Passage(KTX train, 291km/h)

향을 따라 진행하면서 점점 더 두꺼워지다가 일정 거리 이후에서 난류유동장으로 완전전개(fully developed)되면 지면 가까이에도 큰 영향을 미치게 되는데, 이것을 정지좌표계의 관점에서 보면 지면 근처에서 유속이 점점 더 가속되는 것으로 나타나는 것이다.

본 연구에서 수행한 9번의 측정데이터 모두 이러한 유동의 전개과정을 보여주고 있는데, 각 경우별로 유동이 전개되는 시점을 전두부에서의 위치로 환산하여 아래 Table 3에 나타내었다.

아래 Table에서 속도가 현저히 낮은 212.31km/h에서 G7 차량에 대해 측정된 완전전개 위치는 10.58m로서 대략 동력차의 중간 쯤에 해당하는 것으로 나타났다. 그러나, 나머지 250~300km/h에 해당하는 속도 대역에서는 유동이 완전전개되는 위치가 25m~50m까지 비교적 넓은 영역에 분포되어 있다. 다시 말하면, 열차풍은 2번째 차량 후반부부터 3번째 차량 전반부 사이에서 완전히 전개되어 후미부 통과 직전까지 일정속도를 평균적으로 유지한다고 볼 수 있겠다. 차체 하부에 발생하는 열차풍의 생성 원인은 열차 바닥면에 형성된 경계층과 대차부의 공동형상에서의 유동교란이라고 볼 수 있으며, 유동이 완전히 전개되는 지점이 전두부와 멀리 떨어진 지점인 것으로 보아 전두부의 형상이 미치는 영향은 미미할 것으로 판단된다.

한편 250km/h 이상의 속도영역에서 열차속도와 전개위치의 연관성이 나타나지 않고, 전개위치가 넓은 영역에 분포하는 이유는 난류유동의 비선형적인 특성에서 기인하는 것으로 보인다.

측정위치에 따른 차체하부 열차풍의 강도를 살펴보기 위하여 열차풍의 크기를 아래 식 (3)과 같이 열차풍 평균유속(Average Wind Velocity of Train Gust)을 정의하였다.

$$\bar{U} = \int_{t_{fully\ developed}}^{t_{tail\ passing}} \frac{U(t)}{t_{tail\ passing} - t_{fully\ developed}} dt \frac{300}{U_{train}} \quad (3)$$

위 식에서 $t_{tail\ passing}$ 과 $t_{fully\ developed}$ 는 각각 후미부가 통과하는 시간과 유동이 완전전개되는 시간이며, U_{train} 은 열차속도(km/h)이다. 따라서 위 식에서 계산된 열차풍 평균유속은 유동이 완전전개된 시점부터 후미부가 통과하는 시점까지의 평균유속을 열차속도 300km/h일 때의 값으로 정규화한 것을 의미한다.

위의 식 (3)을 이용하여 계산한 열차풍 평균유속(\bar{U})을 높이방향과 폭방향에 대하여 각각 아래 Fig. 16과 Fig. 17에 나타내었다. 먼저, 높이방향에 대한 평균유속의 분포를 살펴보면(Fig. 16), 가장 높은 측정위치인 침목상면 150mm 지점에서는 40m/s 가량의 평균유속을 나타내었으며, 지면에 가까워질수록 유속이 점차 감소하다가 침목 상면 근처에서는 20m/s 근처까지 떨어졌으며, 침목상면 아래 10mm 지점에

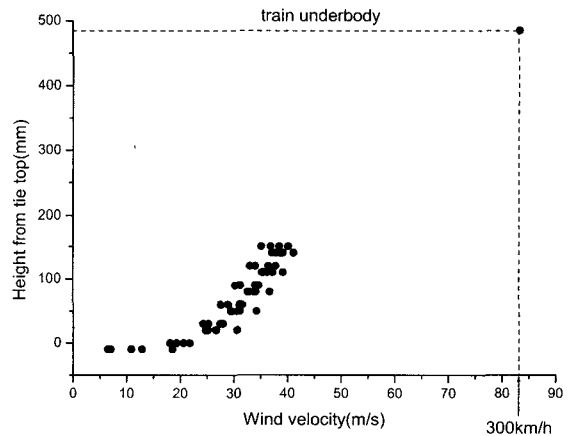


Fig. 16. Vertical Distribution of Average Wind Velocity of Train Gust

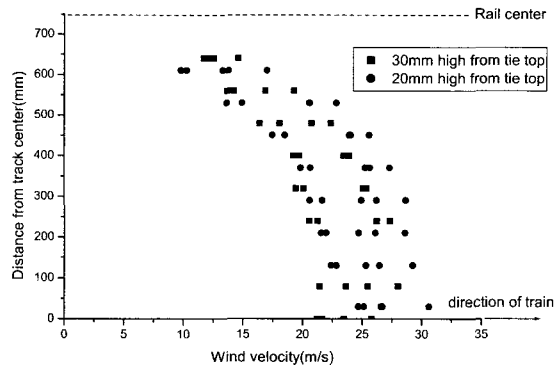


Fig. 17. Horizontal Distribution of Average Wind Velocity of Train Gust

Table 3. Location of Fully Development(From Nose End)

train type	train length(m)	train speed (km/h)	Location of Fully development(m)
G7	145.17	212.31	10.58
		290.34	25.81
KTX	388.104	253.82	28.09
		273.96	50.23
		279.43	45.11
		289.07	37.23
		291.08	40.83
		295.18	29.52
		295.18	49.02

서는 최저 6.5m/s로 크게 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 자갈면이 침목면보다 아래에 있을 경우 침목의 차폐효과로 인하여 자갈면에 작용하는 열차풍의 영향이 크게 감소하는 것을 알 수 있었고, 열차풍에 의한 자갈의 비산을 저감하기 위해서는 자갈면을 낮추거나 침목을 높여 자갈면에 작용하는 열차풍의 크기를 줄이는 것이 효과적인 대책이 될 수 있음을 알 수 있다.

다음으로 폭방향에 따른 평균유속의 분포를 살펴보면 (Fig. 17), 궤도 중심부에서 20~30m/s의 평균유속을 나타내었으며, 레일과 가까울수록 평균유속이 감소하여 레일면 75mm 부근에서는 거의 10m/s까지 감소하는 것으로 나타났다. 측정높이의 차이가 크지 않았으므로(20mm, 30mm), 이에 따른 차이는 크게 나타나지 않았다. 따라서, 자갈비산의 발생가능성은 궤도 중심에서 가장 높다고 볼 수 있으며, 자갈면의 관리 및 침목형상의 변경 시에는 궤도중심부에 우선적으로 적용하여야 할 것이다.

풍동시험을 통해 조사된 자갈의 유동 내 거동특성과 본 시험에서 측정된 침목 위 열차풍 평균유속의 크기를 바탕으로 자갈의 비산확률을 조사하였다. 아래 자갈의 비산확률을 정량적으로 평가하기 위해 정의한 자갈비산확률계수(BFPF, Ballast-Flying Probability Factor)의 식을 나타내고 있다.

- i) $V_{track} < V_{min}$, $BFPF=0$
- ii) $V_{track} > V_{max}$, $BFPF=1$
- iii) $V_{min} < V_{track} < V_{max}$,

$$BFPF = \int_{m_1}^{m_2} \frac{V_{track} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \frac{dm}{m_2 - m_1} \quad (4)$$

위 식에서 V_{max} 와 V_{min} 은 질량별로 자갈이 이동하기 시작하는 최대유속과 최소유속을 나타내며, V_{track} 은 선로표면 근처에서의 열차풍 평균유속을 나타낸다. 비산확률계수는 V_{track} 이 V_{min} 보다 작을 경우에는 자갈이동이 일어나지 않으므로 자갈비산이 일어날 가능성이 없다고 보고 BFPF를 0으로 생각할 수 있다. 또한 V_{track} 이 V_{max} 보다 클 경우에는 모든 자갈이 이동한다고 볼 수 있으므로 BFPF를 1로 생각할 수 있다. V_{track} 이 V_{min} 과 V_{max} 사이에 있을 경우에는 속도에 1차 근사한다고 가정하여 식 (4)에 의해 계산하도록 하였다. 또한 위 식에서는 자갈의 비산속도가 질량별로 이동시작속도가 다르기 때문에 정해진 질량구간에 대해 적분하도록 하였다.

Fig. 18에서는 풍동시험을 통해 측정된 자갈이동 최대, 최소유속과 현장시험을 통해 측정된 열차풍 평균유속을 함께 나타내었다. 아래 그림에서 두 개의 실선은 각각 자갈이동의 최소유속(V_{max})과 최대유속(V_{min})에 해당하며, 실선 사이의 영역에 대해 열차풍 평균유속보다 낮은 영역의 비율이

식 (4)에서 정의하는 비산확률계수(BFPF)에 해당하게 된다. 열차속도 300km/h에 해당하는 열차풍의 평균유속 25m/s를 V_{track} 으로 가정할 때, 모든 질량의 자갈에서 비산확률이 있는 것으로 나타났으며, 특히 질량이 작을수록 V_{max} 와 V_{min} 이 작으므로 자갈비산의 확률이 높은 것을 알 수 있다. 열차속도 350km/h에서는 열차풍 평균유속이 약 29.2m/s에 해당하는데, 이 경우 자갈비산의 확률이 크게 높아지는 것을 예상할 수 있다.

Table 4에서는 앞에서 정의한 식 (4)를 이용하여 계산된 비산확률계수를 나타내었다. 먼저 열차속도 300km/h에서의 각 질량구간 별 비산확률을 살펴보면, 0~50g의 자갈이 39.8%의 가장 높은 비산확률을 보여주고 있으며, 나머지 질량대에서는 10~20% 대의 자갈비산확률을 보여주고 있다.

열차속도가 350km/h로 증가할 경우에는 앞의 Fig. 18에서 예상한 바와 같이 자갈비산확률이 크게 증가함을 알 수 있는데, 열차속도 300km/h에서 전 구간 평균 24.2%였던 자갈비산확률계수(BFPF)가 열차속도가 350km/h로 불과 16.6% 증가할 경우에도 자갈비산확률계수는 46.1%로 두 배 가까이 증가함을 알 수 있다.

따라서, 자갈비산현상은 고속선의 신규고속차량 투입 및 기존선의 고속화 시에 급격히 심화될 가능성이 크므로, 사

Table 4. Ballast-flying Probability Factor(BFPF) Relative to Train Speed and Ballast Mass

Ballast mass (g)	Train speed (km/h)				
	0~50	50~100	100~150	150~200	Total
300	39.8%	19.7%	11.5%	14.7%	24.2%
350	64.3%	43.3%	32.8%	33.6%	46.1%

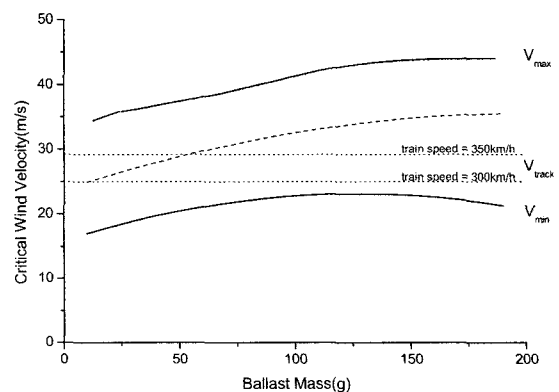


Fig. 18. Probability of Ballast-flying Relative to Train Speed and Ballast Mass

전에 이를 검증하고 대책을 마련하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 고속선에서 나타나는 자갈비산현상의 메커니즘을 규명하기 위하여 현장의 자갈을 채취하여 형상과 질량을 통계적으로 분석하였으며, 풍동시험을 이용하여 다양한 조건에서의 자갈비산현상을 관찰하였다. 또한, 경부고속선에서 Kiel-Probe Array를 이용하여 KTX차량과 G7차량 통과 시 발생하는 차체하부 유동장을 측정하였다.

본 연구를 통해서 도출한 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 풍동 내 평판에 놓인 조건 하에서 자갈이 움직이기 시작하는 풍속은 최소 20m/s 내외, 최대 약 25~45m/s 정도로 나타났다. 적층된 자갈의 경우에는 33m/s에서 최초의 자갈비산이 발견되었다.
- (2) 자갈의 질량(크기)과 형상에 따라 유동 내 비산특성이 달라지는 것으로 나타났으며, 자갈의 질량이 작을수록 그리고 원형에 가까울수록 비산시작 풍속이 더 낮게 나타났다.
- (3) 차체하부 열차풍의 형성에는 전두부보다 차체하부 대차부의 공동이 더 크게 기여하고 있으며, 두 번째 열차와 세 번째 열차 사이에서 차체하부 열차풍이 최고속도 영역에 이른 후 후미부에 이르기까지 일정하게 유지된다.
- (4) 300km/h 주행 시 침목 상면에서 150mm 지점에는 40m/s의 높은 유속을 나타내었으며, 침목 상면 바로 위 높이에 서도 20m/s이상의 평균유속을 나타내었다. 따라서 침목 상면보다 같거나 높은 위치에 자갈이 놓여있을 경우에는 열차풍에 의해 자갈이 비산할 가능성이 매우 높을 것으로 추정된다.
- (5) 자갈면이 침목면보다 아래에 있을 경우 자갈면에 작용하는 열차풍의 영향이 크게 감소하였으며, 자갈면을 낮추거나 침목을 높여 자갈면에 작용하는 열차풍의 크기를 줄이는 것이 효과적인 대책이 될 수 있다.
- (6) 고속철도차량 통과 시 선로중심에서 열차풍이 가장 크며, 레일주위에서는 열차풍이 최고풍속의 절반 이하로

감소하였다. 따라서, 시설물에 자갈비산대책을 적용 시 궤도중심부에 우선적으로 적용하여야 한다.

- (7) 열차속도가 350km/h로 증가할 경우 300km/h에 비해 자갈비산확률이 두 배 가까이 증가하므로, 고속선의 신규 고속차량 투입 및 기존선의 고속화 시 사전에 자갈비산에 대한 안전성을 검증하고 대책을 마련하는 것이 필요 하다.

후 기

본 논문은 2004년도 건설교통부에서 고속철도기술개발사업으로 지원된 “고속철도시스템 신뢰성 및 운영효율화 기술개발” 과제 연구결과의 일부임을 밝히며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. M. Yhshida, M. Uchida, N. Yaguchi, N. Mifune, “Counter-measures for Ballast-flying Phenomena Caused by High-speed Trains,” RTRI Report Vol.6, No.6, 1992. 6
2. 철도청, 고속선 설빙피해 방지대책 연구, 2004
3. 한국고속철도공단, 시운전시 궤도 노반 시설물의 성능검증, 2003
4. 건설교통부, 고속철도시스템 신뢰성 및 운영효율화 기술개발 1차년도 보고서, 2003
5. 건설교통부, 고속철도시스템 신뢰성 및 운영효율화 기술개발 2차년도 보고서, 2004
6. E. Wilemsen, 1997, “High Reynolds number wind tunnel experiments on trains”, Journal of Wind Eng. and Ind. Aerodynamics, 69-71 pp.437-447
7. Peters, J-L, “Aerodynamics of very high speed trains and maglev vehicles: State of the art and future potential,” Int. J. of Vehicle Design, Special Publication Sp3, 1983
8. 권혁빈, 박춘수, 강형민, 이동호, 이도형, “풍동실험을 통한 철도 노반상 자갈의 비산 특성 연구”, 항공우주학회 2003년도 추계학술발표회 논문집(1), pp.728-731, 2003
9. 권혁빈, 박춘수, 강형민, 이동호, “자갈비산 메커니즘 규명을 위한 고속철도차량 하부 유동장 수치 해석 및 시험”, 한국철도학회 2003년도 추계학술대회 논문집(III), pp.275-280, 2003
10. 김종용, 권혁빈, 김태운, 구요천, 이동호, “자갈비산 방지를 위한 하부유동장 해석 및 Heighter 설치의 타당성 검토” 한국철도학회 2004년도 추계학술대회 논문집, 2004