

## 자갈비산 메커니즘 연구를 위한 고속철도차량 하부유동 계측

권혁빈\*, 박춘수, 남성원, 고태환(한국철도기술연구원)

### Track Measurements of Strong Wind under High-speed Train to Investigate Ballast-flying Mechanism

H. B. Kwon, C. S. Park, S. W. Nam, T. H. Ko(Korea Railroad Research Institute)

#### ABSTRACT

To investigate the mechanism of ballast-flying phenomena by strong wind induced by high-speed trains, wind velocity in the vicinity of the track has been measured using 16-channel Kiel-probe array and detailed flow structure near the surface of the track has been analyzed. The position at which the underflow fully develop has been examined in order to assess the driving force of the turbulent flow under train and the results yields that the turbulent flow owing to the cavity of the inter-car as well as the friction force at the underbody of the train is the main reason of the strong wind under high-speed train. The preceding wind tunnel test results has been introduced to assess the probability of ballast-flying during the passage of the high-speed train by comparing the results 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 more radical countermeasure seems to be needed.

**Key Words** : Ballast-flying Phenomena(자갈비산 현상), Turbulent Flow(난류 유동), KTX train(KTX 차량), G7 train(G7 차량), Train Gust(열차풍), Aerodynamics(공기역학)

#### 1. 서론

300km/h 이상의 고속으로 주행하는 고속철도차량 주위에는 차체 표면에서 형성되는 경계층으로 인한 강한 난류유동, 즉 열차풍이 발생하여 선로 주위의 인명, 시설물에 큰 영향을 미치며, 특히 차체하부에 형성되는 강한 바람은 도상자갈을 비산시켜 선로 주위의 인명의 안전을 위협하고, 차체 및 시설물에 지속적인 손상을 일으킬 수 있다.

열차풍은 차량 표면에 형성되는 경계층에 의해 유도되는 난류유동으로서 특히 차량 하부에서는 대차 및 차량연결부의 복잡한 형상으로 인하여 차량 측면 및 상부보다 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. 이러한 비산자갈이 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.

개통 1년이 경과한 경부고속철도에서는 그동안 운행안전을 위협할 수 있는 여러 가지 위험요소가 드러나고 있으며, 자갈비산에 의한 피해도 간간히 나타나고 있는 실정이다. 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 이러한 자갈비산의 메커니즘을 밝히기 위하여 실제 선로 상에서의 유동장 계측시험을 통해 고속철도차량 통과 시 발생하는 열차풍의 크기와 속도분포 등을 연구하였다.

## 2. 시험장비 및 시험조건

### 2.1 시험장비

차체하부 유동장 측정을 위하여 Kiel Probe(Fig. 1)를 이용하여 Array를 구성하였다. Kiel Probe는 Probe에 수직한 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.

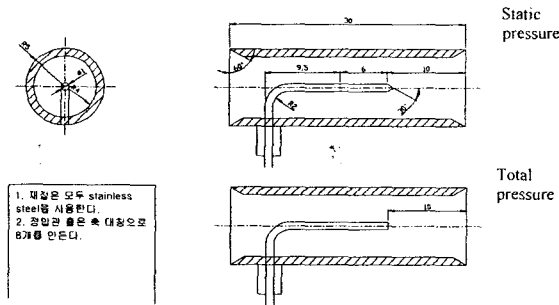


Fig. 1 Kiel Probe

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 압력값은 TCP/IP 신호를 통해 Data 획득 시스템으로 전송되도록 설계되어 있다.

본 연구에서는 9016 system에 번들로 제공되는 소프트웨어를 이용하여 데이터를 획득하였으며, 획득된 데이터는 시간과 각 채널에서의 압력값이 텍스트 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,  $P_i$ 는 Kiel-Probe에서 측정된 전압(Total Pressure),  $P_s$ 는 공통으로 측정된 정압(Static Pressure)이다. 그리고,  $\rho$ 는 대기의 밀도를 나타낸다.

### 2.2 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. 아래 Fig. 2에는 T2(상행) 선로 내에 설치된 Kiel-Probe Array의 모습이 나타나 있다.

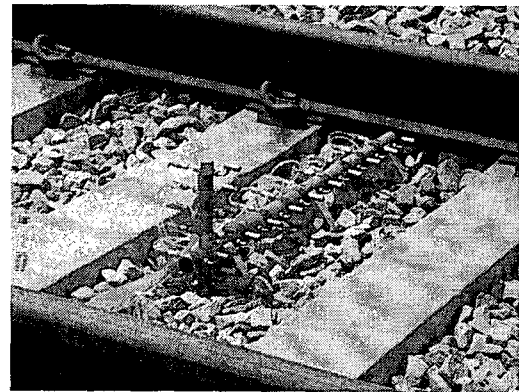


Fig. 2. Kiel-Probe Array Installed in Seoul-Busan High-speed Line(Kilo Post=109km)

아래 Table 1에는 시험조건을 나타내었다. 2월과 7월에 하루씩 총 9회의 측정을 실시하였으며, KTX 차량이 7회, G7 차량이 2회 측정되었다.

Table 1 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

### 3. 시험결과

#### 3.1 차체하부 압력변동 및 열차풍

Fig. 3에는 열차 통과 시 전압(Total Pressure)과 정압(Static Pressure)의 압력변동을 나타내고 있는데, 전두부 및 후미부 통과 시의 급격한 압력변동의 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 전두부 통과 시점에는 전압과 정압의 차이가 거의 없다가 열차 통과 중에는 큰 차이를 보이고, 후미부 통과 직후에는 점점 차이가 줄어들어 가는 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.

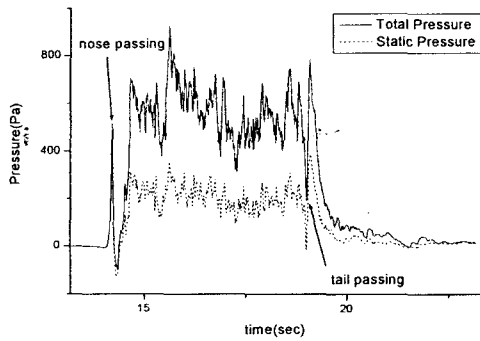


Fig. 3 Pressure Fluctuation During Train Passage(KTX train, 291km/h)

아래 Fig. 4에는 열차통과 시 측정된 전압과 정압을 식 (1)에 대입하여 계산된 차체하부 열차풍의 이력을 나타내고 있다. 전두부 진입과 함께 유속이 증가하기 시작하여 일정 시점 이후 강한 열차풍이 지속되다가 후미부가 통과하는 시점부터 유속이 감소한다. 열차풍의 발생과 소멸이 열차의 통과 시점과 일정한 시차를 갖는 것은 공기가 갖는 점성과 난류 유동장의 영향으로 보인다.

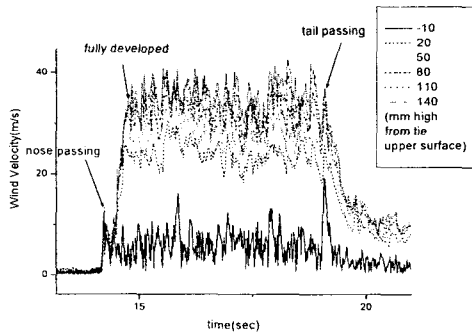


Fig. 4 Wind Velocity Fluctuation During Train Passage (KTX train, 291km/h)

본 연구에서 수행한 9번의 측정데이터 모두 이러한 유동의 전개과정을 보여주고 있는데, 속도가 현저히 낮은 212.31km/h에서 G7차량에 대해 측정된 완전전개 위치는 10.58m로서 대략 동력차의 중간 쯤에 해당하였으며, 250~300km/h에 해당하는 속도 대역에서는 유동이 완전전개되는 위치가 25m~50m까지 비교적 넓은 영역에 분포되어 있었다. 유동이 완전히 전개되는 지점이 전두부와 멀리 떨어진 지점인 것으로 보아 전두부의 형상이 미치는 영향은 미미할 것으로 판단되며, 전개위치가 넓은 영역에 분포하는 이유는 난류유동의 비선형적인 특성에서 기인하는 것으로 보인다.

#### 3.2 측정위치별 열차풍 강도

측정위치에 따른 차체하부 열차풍의 강도를 살펴보기 위하여 열차풍의 크기를 아래 식 (2)와 같이 열차풍 평균유속(average wind velocity of train gust)을 정의하였다.

$$\bar{U} = \int_{t_{fully\ developed}}^{t_{tail\ passing}} \frac{U(t)}{t_{tail\ passing} - t_{fully\ developed}} dt \frac{300}{U_{train}} \quad (2)$$

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(2)를 이용하여 계산한 열차풍 평균유속( $\bar{U}$ )을 높이방향과 폭방향에 대하여 각각 아래 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 먼저, 높이방향에 대한 평균유속의 분포를 살펴보면(Fig. 5), 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 지점에서는 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. 6), 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 레도 중심에서 가장 높다고 볼 수 있으며, 자갈면의 관리 및 침묵형상의 변경 시에는 레도중심부에 우선적으로 적용하여야 할 것이다.

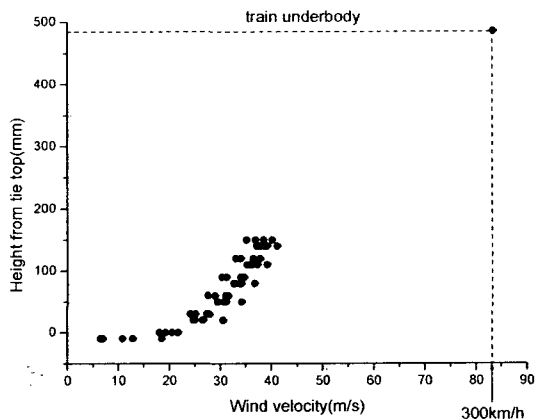


Fig. 5 Vertical Distribution of Average Wind Velocity of Train Gust

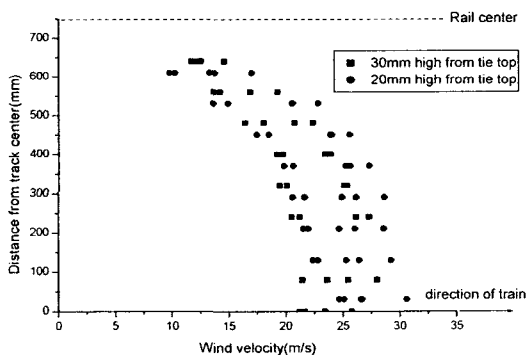


Fig. 6 Horizontal Distribution of Average Wind Velocity of Train Gust

### 3.3 자갈비산 확률

풍동시험을 통해 조사된 자갈의 유동 내 거동특성과 본 시험에서 측정된 침묵 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)  $V_{min} < V_{track} < V_{max}$ ,

$$BFPF = \int_{m_1}^{m_2} \frac{V_{track} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \frac{dm}{m_2 - m_1} \quad (3)$$

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. 7에서는 풍동시험을 통해 측정된 자갈이동 최대, 최소유속[5]과 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 위 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.

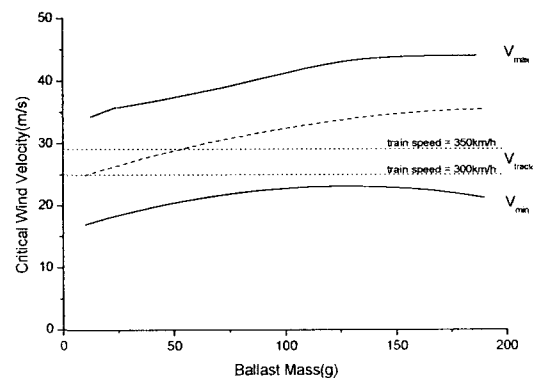


Fig. 7 Probability of Ballast-flying Relative to Train Speed and Ballast Mass

Table 4에서는 앞에서 정의한 식(3)을 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. 7에서 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, 사전에 이를 검증하고 대책을 마련하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

- 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.
- 고속철도차량 통과 시 선로중심에서 열차풍이 가장 크며, 레일주위에서는 열차풍이 최고풍속의 절반 이하로 감소하였다. 따라서, 시설물에 자갈비산 대책을 적용 시 궤도중심부에 우선적으로 적용하여야 한다.
- 열차속도가 350km/h로 증가할 경우 300km/h에 비해 자갈비산확률이 두 배 가까이 증가하므로, 고속선의 신규고속차량 투입 및 기존선의 고속화 시 사전에 자갈비산에 대한 안전성을 검증하고 대책을 마련하는 것이 필요하다.

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

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

#### 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 결론은 다음과 같다.

- 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.
- 300km/h 주행 시 침목 상면에서 150mm 지점에는 40m/s의 높은 유속을 나타내었으며, 침목 상면 바로 위 높이에서도 20m/s이상의 평균유속을 나타내었다. 따라서 침목 상면보다 같거나 높은 위치에 자갈이 놓여있을 경우에는 열차풍에 의해 자갈이 비산할 가능성이 매우 높을 것으로 추정된다.

#### 후기

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

#### 참고문헌

1. Yhshida, M., Uchida, M., Yaguchi, N., Mifune, N., "Countermeasures for Ballast-flying Phenomena Caused by High-speed Trains," RTRI Report Vol.6, No.6, 1992. 6
2. 건설교통부, 고속철도시스템 신뢰성 및 운영효율화 기술개발 1차년도 보고서, 2003
3. 건설교통부, 고속철도시스템 신뢰성 및 운영효율화 기술개발 2차년도 보고서, 2004
4. Wilemsen, E., 1997, "High Reynolds number wind tunnel experiments on trains", Journal of Wind Eng. and Ind. Aerodynamics, 69-71 pp437-447
5. 권혁빈, 박춘수, 강형민, 이동호, 이도형, 풍동실험을 통한 철도 노반상 자갈의 비산 특성 연구? 항공우주학회 2003년도 추계학술발표회 논문집 (1), pp.728-731, 2003
6. 김종용, 권혁빈, 김태윤, 구요천, 이동호, 자갈비산 방지를 위한 하부유동장 해석 및 Heighter 설치의 타당성 검토" 한국철도학회 2004년도 추계학술대회 논문집, 2004
7. 권혁빈, 박춘수, 열차풍에 의한 고속선 자갈비산 현상 연구" 한국철도학회논문집 제8권 제1호 pp.6-14, 2005