

하이터를 이용한 하부 열차풍 감소에 대한 연구

A Study of Reduction of Underbody Train Gust by a Heightener

구요천*

김종용*

윤수환*

노주현*

이동호**

권혁빈***

Ku, Yo-Cheon Kim, Jong-Yong Yun, Su-Hwan
Rho, Joo-Hyun Lee, Dong-Ho Kwon, Hyeok-Bin

Abstract

The ballast-flying, induced by strong underbody train gust, may damage train underbody, wheel and even cause the safety problems. For this reason, a heightener is being used to prevent the ballast-flying phenomenon through underbody flow reduction. In this research, flow field around a heightener is numerically simulated. And the parametric study of various heightener shapes is performed to find out more effective heightener shape. Also the ballast-flying probabilities are calculated for various ballast types and train speeds.

1. 서 론

고속으로 주행하는 열차 하부에는 강한 열차풍이 유도된다. 이 열차풍으로 인해 선로의 자갈이 비산하는 현상이 발생하며, 비산된 자갈은 열차 하부 구조물 손상이나 선로 주변의 인명 피해 등을 유발하는 요인이 된다. 이러한 자갈비산 현상을 방지하기 위해 자갈 네트나 자갈 펜스 등의 다양한 방법들이 시도되고 있다.[1,2] 침목 위에 설치되는 구조물인 하이터 또한 자갈비산 방지를 위한 대책 가운데 하나이다. 하이터는 본래 낙하하는 설빙을 방지하기 위해 고안된 장치이나, 방풍벽의 역할을 하여 하부 열차풍을 감소시켜줄 수 있을 것으로 기대된다.[3]

본 연구에서는 이러한 하이터 주위의 공력 특성을 살펴보고 하부 유동 감소에 보다 효과적인 하이터 형상을 찾아보기 위해 하이터 높이와 폭, 하이터의 단면 형상, 열차 속도 등을 변화시키면서 열차 하부에 대한 수치해석을 수행하였다. 이러한 해석 결과를 이용해 하부 유동 감소량을 비교함으로써 하부 유동과 밀접한 하이터의 형상 파라미터를 찾아보았으며, 하이터 단면 형상에 의한 하부 유동 감소 효과도 비교해 보았다. 또한 수치해석 결과를 바탕으로 자갈의 종류 및 열차 속도에 따른 비산확률을 구함으로써 자갈비산의 위험성을 정량화하였다. 이를 위해 권혁빈[4,5] 등이 실험을 통해 구한 자갈비산 최소/최대 임계속도를 자갈의 종류에 따라 세분화하였고, 자갈비산 확률분포는 자갈비산 확률계수(BFPP)를 이용하여 계산하였다. [6]

* 서울대학교 기계항공공학부, 정회원

** 서울대학교 기계항공공학부 교수, 정회원

*** 한국철도기술연구원 철도시스템안전연구본부 시스템인터페이스연구팀 선임연구원, 정회원

2. 하이터 주위의 공력특성

2.1 격자 및 경계조건

Fig. 1은 하이터 주위의 유동 특성을 알아보기 위해 구성한 격자 및 경계조건이다. 침목은 실제 침목 형상을 그대로 사용하였고, 하이터의 높이는 50 mm이고 폭은 100 mm이다. 바닥 면은 노반을 나타내고, 윗면은 주행하는 열차 하부를 나타내므로 moving wall 경계조건을 사용하였으며, 속도는 고속열차의 주행속도와 같은 300 km/h로 가정하였다. 해석 영역 좌우는 동일한 형상이 침목의 수만큼 분포하므로 좌우 경계면에 대해서는 주기조건이 부여되었다. 침목과 하이터의 모서리 부분은 수직에 가깝게 꺾인 형상이며 가장 복잡한 유동패턴이 나타날 것으로 예상되므로 보다 정확한 해석을 위해 격자를 집중하여 배치하였다.[7,8]

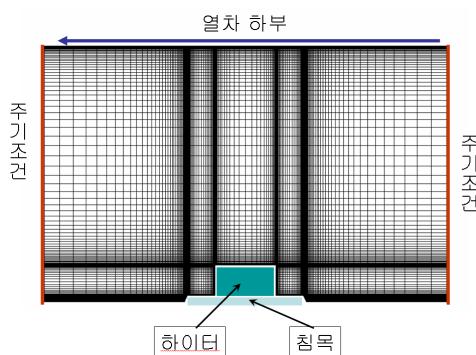


Fig. 1 Grid System and Boundary Condition

2.2 하이터 주위의 공력특성

Fig. 2와 Fig. 3은 속도 300 km/h, 침목 폭의 0.5배, 높이 5 cm인 하이터에 대해 침목 및 하이터 주위의 압력분포와 속도분포 및 유선을 나타낸 그림이다.

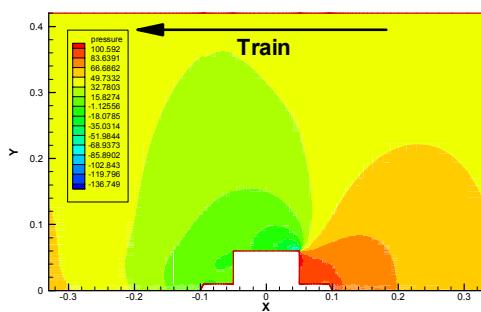


Fig. 2 Pressure Contour

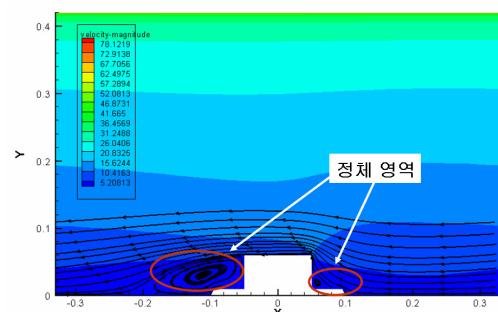


Fig. 3 Velocity Contour and Streamline

Fig. 3과 Fig. 4를 보면 하이터의 앞쪽(열차가 진행해오는 방향)에 고압영역이 발생함을 볼 수 있다. 이는 하이터에 의해 막히면서 속도가 감소되어 나타나는 현상이다. 또한 하이터의 뒤쪽(열차가 진행해가는 방향)에는 저압영역이 발생하게 되는데 이는 유동 박리에 의한 현상이며 앞쪽의 정체영역보다 그 크기가 더욱 큰 것을 볼 수 있다.

3. 하이터에 의한 하부 유동 감소

다음으로 하이터의 높이, 폭 및 하이터 단면 형상에 대한 영향을 분석하기 위한 수치해석을 수행하였다. 하이터의 높이(H)에 대해 5가지(1 cm, 3 cm, 5 cm, 7 cm, 9 cm), 하이터의 폭(W)에 대해 4가지(침목 폭의 0.25배, 0.5배, 0.75배, 1배), 열차 주행속도(V)에 대해 3가지(250 km/h, 300 km/h, 350 km/h) 조건을 각각 부여하여 해석을 수행하였다. 유동속도는 바닥 면으로부터 1, 2, 3, 4, 5cm 지점에서의 유동속도 평균을 구하여 비교해보았으며 각각의 위치는 Fig. 4에 표시하였다.

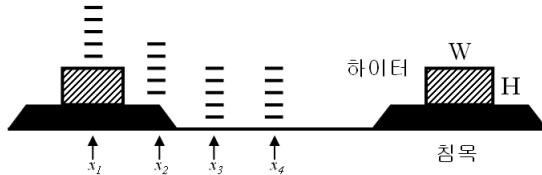


Fig. 4 Comparing Positions

3.1 하이터 높이에 따른 유동 속도 비교

Fig. 5는 하이터 높이에 따른 하부 유동 속도를 비교한 그림이다. 하이터의 높이가 0인 경우, 즉 하이터가 설치되지 않은 경우에는 하부에서의 유속이 자갈비산 임계속도[4,5]인 25 m/s를 초과하지만, 하이터의 높이가 증가할수록 하부 유동 평균 속도가 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. x_2 , x_3 , x_4 의 위치는 하이터 앞/뒤의 박리영역에 포함되므로 하부유동이 크게 감소하며, x_1 의 위치는 하이터에 의한 박리효과를 기대하기 힘든 영역으로 다른 지점에 비해 큰 하부 유속을 보인다.

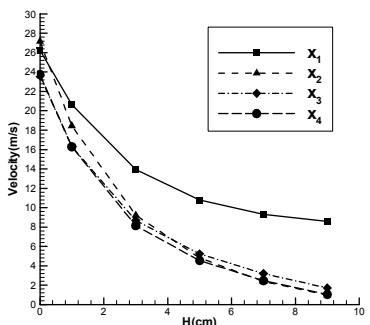


Fig. 5 Underbody Flow Velocity
vs H

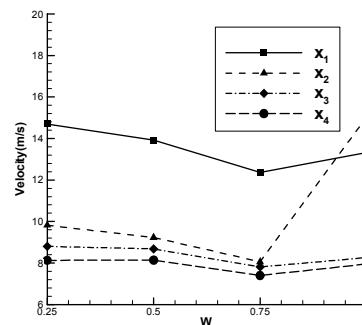


Fig. 6 Underbody Flow Velocity
vs W

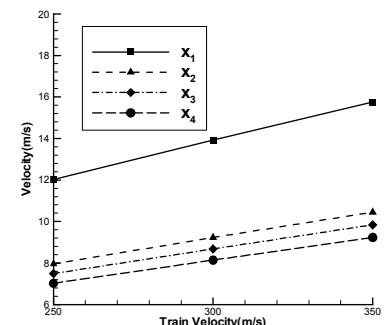


Fig. 7 Underbody Flow Velocity
vs V

3.2 하이터 폭에 따른 유동 속도 비교

Fig. 6은 하이터의 폭에 따른 하부 유동 속도를 비교한 그림이다. 하이터의 폭이 증가함에 따라 대체로 하부 유동속도가 감소하지만 하이터의 높이에 비해 그다지 큰 효과를 주지는 못한다. 하이터와 침목의 폭이 같은 경우($W=1$), x_2 지점에서는 급격히 증가하는 현상을 보이는데 이는 하이터 앞쪽에서 급격한 가속영역이 발생함에 따라 나타나는 현상이다. 또한 하이터의 폭이 침목과 같은 경우 모든 영역에서 소폭 상승이 발생하므로 하이터의 폭은 침목의 폭보다 약간 작게 설정해주는 것이 좋을 것으로 예상된다.

3.3 열차 속도에 따른 유동 속도 비교

열차 주행속도에 따른 각 지점에서의 평균 유속은 Fig. 7과 같다. 열차의 속도가 증가함에 따라 선형적으로 하부 유동속도가 증가하며 Fig. 5, Fig. 6과 마찬가지로 x_1 지점, 즉 하이터 윗면에서 다른 지점에 비해 큰 하부 유동을 확인할 수 있다.

4. 하이터 형상에 대한 고찰

다음으로 하이터의 단면 형상에 따른 공력 특성 변화를 분석해 보고자 다양한 형태의 단면 형상을 갖는 하이터에 대한 수치해석을 수행하였다. 또한 선로가 복선일 경우 열차가 항상 한쪽 방향으로만 주행하게 되므로 좌우 비대칭 형태의 하이터가 보다 효과적일 수도 있기 때문에 이러한 형상의 하이터에 대한 분석도 함께 수행하였다.

Fig. 8은 본 연구에서 비교해보고자 하는 하이터의 단면 형상들을 나타낸 그림이며, Table 1은 하이터 형상 별로 하부 유동 속도를 비교한 표이다. Base는 앞에서 해석한 직사각형 형태의 단면을 갖는 하이터이며 Type #1~Type #4는 Base 형상과 비교하기 위해 고안한 단면 형상들이다.

Type #1과 Type #2는 좌우 대칭형태의 하이터 형상이다. Type #1과 같은 삼각형 형태의 하이터는 하이터 위에 자갈이 올라올 가능성을 배제할 수 있는 형태이고, Type #2와 같은 형상은 Base 형상에서 옆면을 역삼각형 형태로 기울여줌으로써 비산된 자갈이 하이터에 부딪힌 후 위쪽으로 튀어 오르는 것을 방지하기 위한 형상으로, 두 가지 모두 Base 형상에 비해 향상된 결과를 보인다.

Type #3~Type #4는 직사각형 형태의 하이터에 약간의 변형을 주어 좌우 비대칭 형상을 만들어준 것으로 열차의 주행 방향에 따라 어떤 차이가 있는지를 알아보기 위한 형상이다. 두 경우 모두 주행 방향에 따라 상반된 결과를 보이고 있으며, 열차가 진행해오는 방향 쪽을 높이거나 그 방향으로 기울여준 형태가 하부 유동 감소에 유리함을 볼 수 있다.

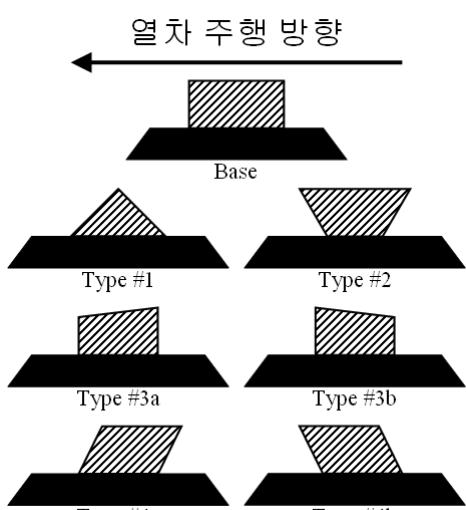


Fig. 8 Heighter Cross-Sections

Table 1 Comparison of Underbody Flow with Various Heighter Types

Type	x_1	x_2	x_3	x_4	Avg.
	100%	100%	100%	100%	100%
	109%	120%	98%	96%	106%
	97.5%	96.5%	98%	98%	97.5%
	92%	92%	89%	105%	94.5%
	117%	140%	116%	122%	124%
	95%	80%	97%	102%	93.5%
	108%	114%	101%	99%	106%

이상의 결과를 종합해볼 때, 단선 선로의 경우에는 Type #1이나 Type #2 형상을 기본형으로 하여 보다 구체적인 설계를 통해 성능이 좋은 하이터 형상을 얻을 수 있을 것으로 예상되며, 복선

선로의 경우 Type #3a나 Type #4a처럼 방향성을 고려한 하이터 형상을 사용하는 것이 효과적일 것으로 예상된다.

5. 자갈비산 임계속도 및 확률계수

자갈비산 임계속도를 결정하기 위해 철도기술연구원에서 수행했던 풍동실험 결과를 이용하였다.[4,5] 이 실험에서는 자갈을 형상에 따라 3가지로 분류하였다. Type A는 등근 형태로 유동의 방향에 따라 공력특성이 큰 차이가 없는 형상이고 Type C는 유동의 방향에 따라 민감하게 반응하는 형상이며 Type B는 그 중간 형상이다.

이렇게 분류한 자갈에 대해 풍동실험을 실시한 결과는 Fig. 9와 같다. 여기서 검은색 심볼은 자갈이 최초로 이동하기 시작하는 유동 속도이고 흰색 심볼은 모든 자갈이 날리는 속도이다. 이 실험결과를 바탕으로 자갈의 유형과 무게별 임계속도를 산출한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2에서 V_{\min} 과 V_{\max} 는 질량별로 자갈이 이동하기 시작하는 자갈비산 최소 임계속도와 자갈이 모두 날리는 자갈비산 최대 임계속도를 나타내며 m_1, m_2, m_3, m_4 는 자갈을 질량 별로 분류한 것으로 각각 0~50g, 50~100g, 100~150g, 150~200g을 나타낸다.

Table 2 Critical Velocity of Ballast-Flying(m/s)

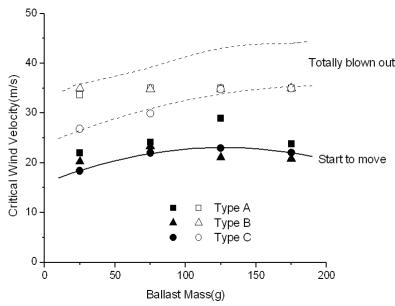


Fig. 9 Minimum and Maximum Velocity of Ballast-Flying

Type	Shape	V	m_1	m_2	m_3	m_4
A		V_{\min}	22.5	24	28	23
		V_{\max}	34	34.5	34	34
B		V_{\min}	20	22	20	20
		V_{\max}	35	34	34	34
C		V_{\min}	18	21	21	20
		V_{\max}	26.5	29	34	34

유동에 민감한 Type C의 자갈이 가장 낮은 속도에서 비산을 시작하며 Type A가 가장 높은 속도에 비산을 시작한다. 전체적으로는 약 20 m/s 근처에서 자갈비산이 시작되며 34.5 m/s 이상이 되면 모든 자갈이 날리는 것을 확인할 수 있다.

자갈 질량별로 비산확률을 구하기 위해 식(1)을 이용하였다.[8]

$$BFPF = \begin{cases} 0 & (V < V_{\min}) \\ \int_{m_1}^{m_2} \frac{V - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} \frac{dm}{m_2 - m_1} & (V_{\min} < V < V_{\max}) \\ 1 & (V_{\max} < V) \end{cases} \quad (1)$$

식(1)에서 V 는 선로표면 근처에서의 열차풍 평균유속을 나타낸다. V 가 V_{\min} 보다 작을 경우에는 자갈비산이 일어날 가능성이 없다고 볼 수 있으므로 $BFPF=0$ 으로 생각할 수 있다. 또한 V 가 V_{\max} 보다 클 경우에는 모든 자갈이 이동한다고 볼 수 있으므로 $BFPF=1$ 로 생각할 수 있다. V 가 V_{\min} 과 V_{\max} 사이에 있을 경우에는 속도에 1차 근사한다고 가정하여 식 (1)에 의해 계산하도록 하였다.

6. 자갈비산 확률

6.1 하이터를 설치하지 않은 경우의 자갈 비산 확률

하이터가 설치되지 않은 경우 열차의 주행속도 및 자갈 종류에 따른 자갈비산 확률은 Fig. 10~12와 같다.

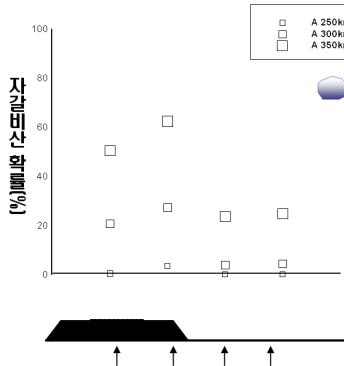


Fig. 10 BFPF vs Train Speed(Type A)

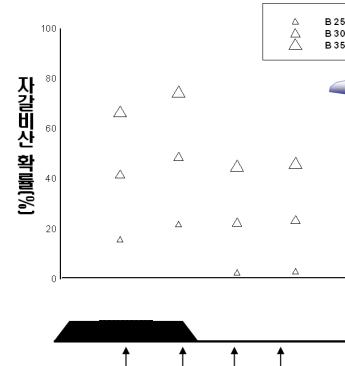


Fig. 11 BFPF vs Train Speed(Type B)

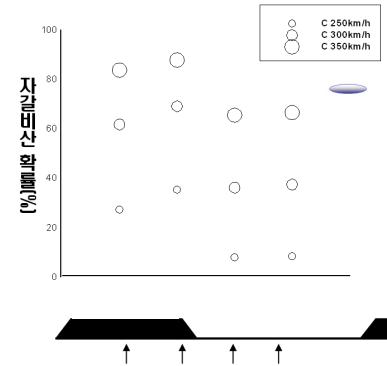


Fig. 12 BFPF vs Train Speed(Type C)

열차의 주행속도가 증가할수록 모든 자갈에 대해 비산확률이 증가하며 유동에 민감한 형태인 Type C가 다른 자갈에 비해 큰 비산확률을 보이고 있다. 특히 열차의 주행속도가 350 km/h에 이르게 되면 침목 위에서 80% 이상의 매우 높은 자갈비산 확률을 갖게 된다.

6.2 하이터를 설치한 경우의 자갈 비산 확률

본 절에서는 열차 속도가 가장 빠른 350km/h에 대한 결과만 제시하였다. Fig. 13~15는 하이터의 폭에 따른 자갈비산 확률이며, 열차 주행속도는 350 km/h, 하이터 높이는 1 cm이다. 열차 주행속도가 350 km/h인 경우 Type A의 경우에는 거의 모든 지점에서 자갈비산 확률이 사라지게 된다. Type B나 C의 경우 약간의 자갈비산 확률을 갖지만 하이터가 없는 경우에 비하면 크게 감소된 값이다.

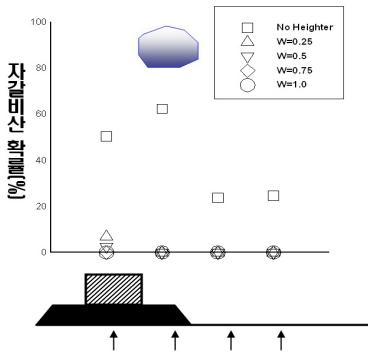


Fig. 13 BFPF vs W (350km/h, Type A)

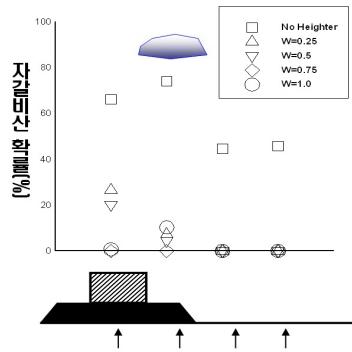


Fig. 14 BFPF vs W (350km/h, Type B)

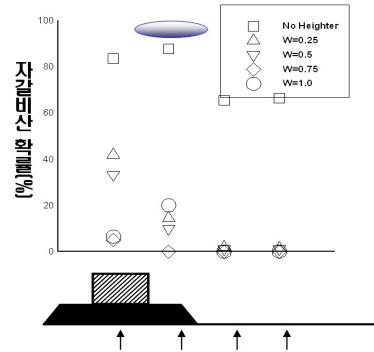


Fig. 15 BFPF vs W (350km/h, Type C)

특히 하이터 윗면을 제외한 부분에서는 50~60% 이상의 감소량을 보이므로 하이터에 의한 자

갈비산 방지 효과가 크다고 할 수 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 하이터 단면 형상과 하부 유동의 관계를 규명하기 위해 고속 열차 하부 영역에 대한 수치해석을 수행하였다. 이를 통해 하이터가 방풍벽과 같은 역할을 하여 하이터 앞/뒤쪽에 정체영역과 박리영역이 발생함으로써 하부 유동 속도가 감소함을 확인하였다. 이러한 하부 유동 속도의 감소는 하이터의 높이가 높아질수록 더욱 증가하게 되며, 하이터의 폭에 비해 하이터의 높이가 하부 유동과 더욱 밀접한 관계를 갖는다. 또한 열차의 주행속도가 증가함에 따라 하부 유동 속도도 선형적으로 증가하게 된다. 다음으로 다양한 하이터 단면 형상에 대해 해석한 결과, 기존의 형상에 비해 하부 유동 감소에 더욱 효과적인 단면 형상을 찾을 수 있었으며, 특히 비대칭 형상을 갖는 하이터의 경우 열차 주행 방향에 따라 유동 특성이 상반된 결과를 보였다.

또한 자갈비산의 위험성을 확률로써 제시하였으며, 그 결과 열차의 주행속도에 따라 자갈비산 확률이 급격히 증가하여 350 km/h의 속도로 주행하는 경우 최대 87%에 이르는 높은 비산확률을 가짐을 확인하였다. 특히 침목이나 하이터 윗면은 유속이 가장 빠르고 다른 자갈과의 마찰이나 적층효과를 기대하기 힘든 지점이기 때문에 이 지점에 자갈이 올라와 있는 경우 매우 위험할 것으로 예상된다. 하이터를 설치하게 되면 자갈비산확률은 급격히 감소하며, 350 km/h의 속도로 주행하는 경우에도 자갈비산 확률이 20% 이하로 감소하게 된다.

후 기

본 연구는 2004년도 건설교통부에서 실행한 고속철도 기술개발 사업의 기술개발 결과 중 일부임을 밝힙니다.

참 고 문 현

1. M. Yhshida, M. Uchida, N. Yaguchi, N. Mifune, 1992, "Countermeasures for Ballast-flying Phenomena Caused by High-speed Trains," RTRI Report Vol.6, No.6
2. 권혁빈, 남성원, 김대상, 이일화, 한진석, 2004, "고속철도 설빙 낙하에 의한 자갈비산 방지 대책 연구", 한국철도학회 04춘계학술대회논문집, pp.171-171
3. 김종용, 권혁빈, 김태윤, 구요천, 이동호, 2004, "자갈비산 방지를 위한 침목 하부유동장 해석 및 Heighter 설치의 타당성 검토", 한국철도학회 추계 학술대회 논문집, pp.209-209
4. 권혁빈, 박춘수, 강형민, 이동호, 2003, "자갈비산 메커니즘 규명을 위한 고속철도차량 하부 유동장 수치해석 및 시험", 한국철도학회 추계 학술대회 논문집, pp.275-280
5. 권혁빈, 박춘수, 강형민, 이동호, 이도형, 2003, "풍동실험을 통한 철도 노반상 자갈의 비산 특성 연구", 한국항공우주학회 추계 학술대회 논문집, pp.728-731
6. 권혁빈, 박춘수, 2005, "열차풍에 의한 고속선 자갈비산현상 연구", 한국철도학회논문집, 제8 권 1호, pp.6-14
7. 건설교통부, 2003, "고속철도시스템 신뢰성 및 운영효율화 기술개발(1차년도 연차보고서)", pp.495-536
8. 건설교통부, 2004, "고속철도시스템 신뢰성 및 운영효율화 기술개발(2차년도 연차보고서)", pp.353-392