

# 선로상 돌풍 감소를 위한 높임침목형상의 공력특성 평가

## Aerodynamic Characteristics of Heighter Shapes for a Tract Gust Reduction

노주현\* · 김종용\* · 구요천\* · 윤수환\* · 권역빈\*\* · 이동호†

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

**Abstract** The ballast-flying, induced by strong underbody flow of high-speed train, can damage train underbody, wheel and even cause the safety problems. For this reason, a heighter is being used to prevent ballast-flying through underbody flow reduction. In this research, flow field around a heighter is numerically simulated. And the parametric study of various heighter geometries is performed to find out more effective heighter shape. Through these numerical studies, the relation between the heighter shape and underbody flow is found out. Also new heighter shapes are numerically investigated and their performances of underbody flow reduction are verified.

**Keywords** : High speed train, Ballast-flying, Simulation, Prevention technique, Aerodynamic characteristics, Heighter

**요 지** 차륜이나 기타 궤도주변의 구조물에 동에 충돌하여 유해를 초래할 수 있는 자갈비산 현상은 고속으로 달리는 열차의 하부에 유도되는 돌풍에 의해 발생 가능하다. 자갈비산을 방지하기 위한 방법의 하나로 선로상의 자갈표면 유속을 감소시키는 높임침목이 사용되고 있다. 본 연구에서는 다양한 높임침목의 형상에 대하여 전산해석을 이용하여 그 공력특성을 분석하였다. 높임침목의 높이가 높아질수록 유도되는 유속은 감소하였으며 폭의 변화는 큰 영향을 없음을 확인하였다. 또한 높임침목의 형상 변화에 따라 자갈궤도면에 유도되는 유속을 검토하여 유동방향에 대하여 뾰족하고 각진 높임침목 형상이 효과적임을 알 수 있었다.

**주 요 어** : 고속열차, 자갈비산, 전산해석, 비산방지기술, 공력특성, 높임침목

### 1. 서 론

2004년 4월 KTX의 개통에 힘입어 국내에도 300km/h급의 고속 열차 시대가 도래하였으며 국내 기술로 개발하고 있는 분산형 고속열차는 주행 속도 350km/h를 목표로 연구되고 있다. 하지만 이러한 고속 주행은 여러 가지 문제들을 발생시키고 있다. 터널 통과 시 발생하는 미기압파 및 주행 소음, 열차가 통과하는 플랫폼에서의 열차풍 등이 그 예이며 고속 주행에 따른 강한 하부 유동에 의해 발생하는 자갈비산 현상도 열차 하부 구조물이나 역사의 시설물 파괴 및 선로 주위의 안전사고를 유발하는 요인이 될 수 있다[1-4].

이러한 자갈비산 피해를 방지하기 위하여 기존의 연구결과로는 자갈 네트, 자갈 스크린, 자갈 펜스 및 합성수지 살포 등의 방법으로 노반의 자갈을 고정하거나 레일위의 자갈을 걷어내는 보호구나 날림판 등이 있으며 침목 위에 설치하는 구조물인 높임침목 또한 이러한 방지대책 가운데 하나이다[5-8].

높임침목은 일본의 경우 현재 약 10cm 가량의 높이로 사용되고 있으며 재료는 고무재로 비교적 고가이지만 궤도 보수에 지장을 주지 않고 작업 시마다 분리하지 않아도 되는 장점이 있으며 빙과 낙하에 대해서도 효과적인 것으로 예상된다.

이 높임침목 방법은 기존의 선로를 대상으로 하며 도상 어깨부에는 다른 대책 공법을 병용하기도 한다. 또한 분기기의 포인트 부 등의 도상자갈을 피복하는 방법이 적당하지 않는 지점에서는 매우 유효하다.[9,10] 높임침목의 원리는 침목 위에 설치되어 방풍벽과 같은 역할을 수행함으로써 고속으로 주행하는 열차에 의해 유도되는 선로상의 유

\* 책임저자 : 정회원, 서울대학교 기계항공공학부 교수, 항공우주신기술연구소

E-mail : donghlee@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7386 FAX : (02)882-7927

† 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 정회원, 한국철도기술연구원

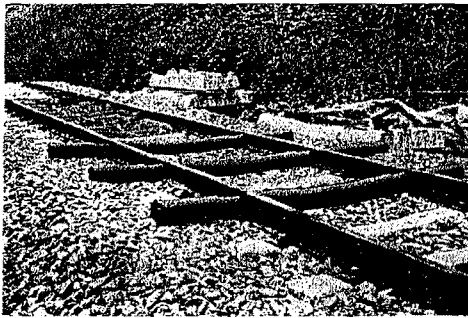


Fig. 1. Heighter

동 속도를 감소시켜주는 동시에 비산하는 자갈을 직접 막아주기도 한다. 하지만 이러한 고가의 높임침목을 전 구간에 걸쳐 사용하기에는 막대한 예산이 소요되기 때문에 자갈비산의 위험성이 높거나 큰 피해가 우려되는 지점에 선택적으로 사용하는 것이 효과적이다. 또한 높임침목의 형상이나 열차 속도를 고려하여 효율적으로 설치해야 하며 이를 위해서는 높임침목의 공력 특성에 대한 체계적인 연구가 요구된다[5,6].

본 연구에서는 높임침목의 형태에 따른 공력 특성 변화를 살펴보기 위해 높임침목의 높이, 폭 및 열차의 주행속도를 변화시켜가면서 해석을 수행하였다. 또한 높임침목의 단면 형상도 직사각형 형상이 아닌 다른 형상들에 대한 수치해석을 수행하여 기존의 형상과 비교해보았다. 이러한 과정을 통해 높임침목 주위의 유동 특성을 예상하고 하부 유동 감소량을 비교함으로써 높임침목 형상과 선로상 유속 감소에 대한 상관성을 검토하였다.

## 2. 높임침목 주위의 공력특성

### 2.1 격자 및 경계조건

높임침목 주위의 유동 특성을 알아보기 위해 구성된 격자 및 경계조건은 Fig. 2와 같다. 침목에서 열차 하부까지의 높이는 418mm, 침목의 폭은 190mm, 침목과 침목 사이 간격은 470mm이고, 자갈에서 침목까지의 높이는 10mm가 되도록 구성하였으며, 높임침목의 높이는 50mm이고 폭은 100mm이다. 격자는 gambit 프로그램을 이용하여 구성하였고 바닥 면은 노반을 나타내며 바닥 면 가운데 사다리꼴 모양으로 솟아있는 부분이 침목에 해당되고 그 위에 높임침목이 설치되어 있는 형태이다.

윗면은 주행하는 열차 하부를 나타내므로 moving wall 경계조건을 사용하였으며, 속도는 300 km/h (=83.3 m/s)로 가정하였다. 해석 영역 내부의 격자 경계면에는 interior 경계조건을 부여하여 유동이 자유롭게 출입하도록 하였으며, 해석 영역 좌우에 동일한 형상이 침목의 수만큼 분포하므로 좌

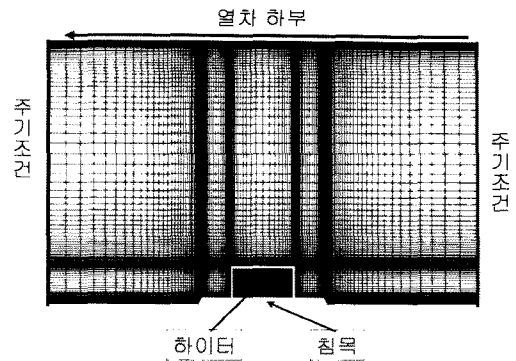


Fig. 2. Grid System and boundary Condition

우 경계면에 대해서는 주기조건이 부여되었다. 침목과 높임침목의 모서리 부분은 수직에 가깝게 깎인 형상이며 가장 복잡한 유동패턴이 나타날 것으로 예상되므로 보다 정확한 해석을 위해 격자를 집중하여 배치하였다. 총 격자수는 15,900개이며 정렬 격자를 사용하였으며 수치해석은 상용프로그램인 Fluent를 사용하였다. 실제 선로상의 유동은 매우 복잡한 3차원 비정상유동이지만 본 연구에서는 높임침목의 다양한 형상 변화에 따른 공력특성 평가를 위해 2차원 정상상태 해석만을 수행하여 효율적으로 그 차이점을 비교하였다.

### 2.2 높임침목 주위의 유동 특성

우선 높임침목 주위 유동의 공력 특성을 살펴보기 위해 열차가 300km/h의 속도로 주행하는 경우 폭이 침목의 0.5배이고 높이가 5cm인 높임침목에 대한 수치해석을 수행하였으며, Fig. 3과 Fig. 4에 침목 및 높임침목 주위의 압력분포와 속도분포 및 유선을 도시하였다. Fig. 3과 Fig. 4에서 높임침목의 앞쪽(열차가 진행해오는 방향)에 고압영역이 발생함을 볼 수 있다. 이는 하부 유동이 높임침목에 의해 막히면서 속도가 감소되어 나타나는 현상이다. 또한 높임침목의 뒤쪽(열차가 진행해가는 방향)에는 저압영역이 발생하게 되는데 이는 유동 박리에 의한 현상이며 앞쪽의 정체영역보다 그 크기가 더욱 큰 것을 볼 수 있다.

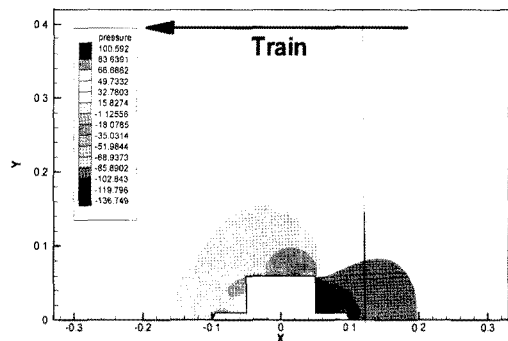


Fig. 3. Pressure Contour

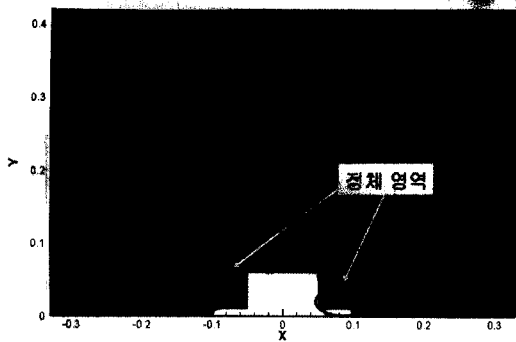


Fig. 4. Velocity Contour and Streamline

이와 같이 높임침목의 앞/뒤쪽에 정체영역이 발생하여 하부 유동속도가 급격히 줄어들기 때문에 자갈비산의 위험성이 그만큼 낮아지게 되며, 이러한 특성은 높임침목의 높이나 폭, 단면 형상 등에 따라 달라질 것으로 예상된다.

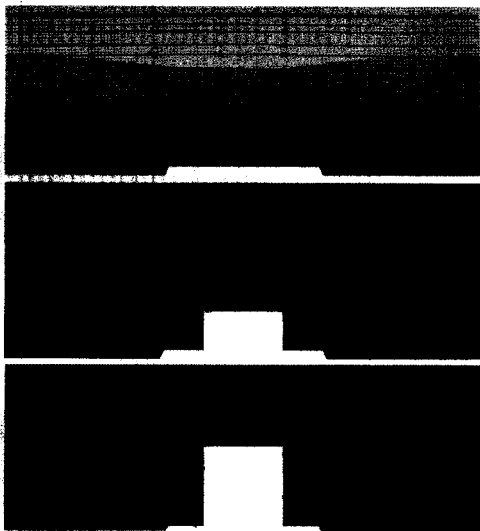


Fig. 5. Streamlines around a Heighter (0, 5, 10 cm)

다음으로 높임침목의 높이에 대한 하부 유동 특성을 살펴보기 위해 높임침목 높이를 변화시키면서 수치해석을 수행하였다. Fig. 5는 높임침목을 설치 않은 경우와 높이가 50mm, 100mm인 높임침목을 설치한 경우의 속도분포와 유선을 나타낸 그림이다.

높임침목의 높이가 높아질수록 높임침목 앞/뒤의 정체/박리 영역이 크게 확장되며, 특히 높임침목의 높이가 10 cm 이상이 되면 높임침목 앞/뒤의 박리영역이 자갈면 전체를 감싸게 된다. 따라서 높임침목과 높임침목 사이가 Cavity 유동과 같은 형태가 되어 유동이 정체되는 현상이 발생한다. 이 경우 하부에 유도되는 유동이 자갈면에 직접 영향을 주지 못하기 때문에 자갈비산의 위험이 크게 감소할 것으로 예상된다. 하지만 과도한 Cavity 유동은 자갈비

산 현상에 역효과가 있을 수 있으므로 실제 차량 실험을 통한 추가적인 연구가 필요할 것으로 예상된다.

### 3. 높임침목에 의한 선로상 유속 감소

높임침목의 높이, 폭 및 높임침목 단면 형상에 대한 영향을 분석하기 위한 수치해석을 수행하였다. 높임침목의 높이(H)에 대해 5가지(1cm, 3cm, 5cm, 7cm, 9cm), 높임침목의 폭(W)에 대해 4가지(침목 폭의 0.25배, 0.5배, 0.75배, 1 배), 열차 주행속도(V)에 대해 3가지(250km/h, 300km/h, 350km/h) 조건을 각각 부여하여 해석을 수행하였다.

유동속도는 바닥 면으로부터 1, 2, 3, 4, 5cm 지점에서의 유동속도 평균을 구하여 비교해보았으며 각각의 위치는 Fig. 6에 표시하였다.



Fig. 6. Positions of Numerical Analysis

#### 3.1 높임침목 높이에 따른 유동 속도 비교

우선 높임침목 높이에 따른 선로상 유속을 비교해보았다. 주행속도는 300km/h, 높임침목의 폭은 침목 폭의 0.5배로 고정시키고 높임침목의 높이를 변화시키면서 해석한 결과는 Fig. 7과 같다.

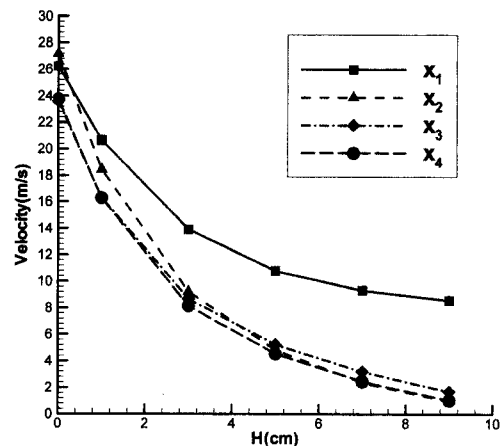


Fig. 7. Underbody Flow Velocity vs H

높임침목의 높이가 0인 경우, 즉 높임침목이 설치되지 않은 경우에는 하부에서의 유속이 자갈비산 임계속도

[9,10]인 25m/s를 초과하므로 자갈비산이 충분히 일어날 수 있는 가능성을 확인할 수 있다.

하지만 높임침목의 높이가 증가할수록 선로상 유동의 평균 속도가 크게 감소하며, 특히  $x_2, x_3, x_4$ 의 위치에서는 박리영역의 확장에 따라 선로상 유속이 급격히 감소하는 현상을 보인다.  $x_1$ 의 위치는 높임침목에 의한 박리효과를 기대하기 힘든 영역이며, 하부 유속 또한 다른 지점들에 비해 크게 나타난다. 따라서 높임침목 위에 자갈이 올라오게 되면 다른 위치에 있는 자갈에 비해 하부 유동의 영향을 더욱 크게 받을 것으로 예상된다.

### 3.2 높임침목 폭에 따른 유동 속도 비교

높임침목의 폭에 따른 유동 속도를 비교하기 위해 열차 주행속도 300km/h, 높임침목 높이 3cm의 경우에 대해 높임침목의 폭을 침목 폭의 0.25배, 0.5배, 0.75배 1배로 바꾸어주면서 선로상의 유속을 해석하였으며 그 결과는 Fig. 8과 같다. 높임침목의 폭이 증가함에 따라 대체로 하부 유동 속도가 감소하지만 높임침목의 높이에 비해 그다지 큰 효과를 주지는 못한다.

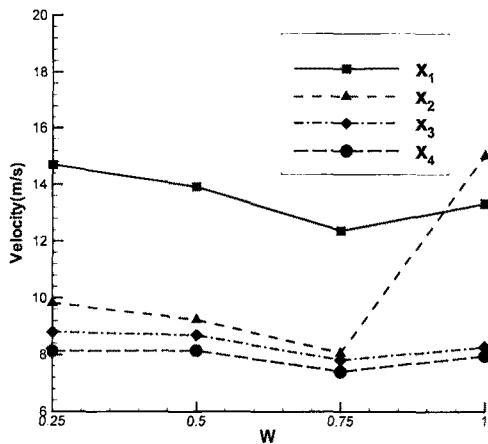


Fig. 8. Underbody Flow Velocity vs W

높임침목과 침목의 폭이 같은 경우(W=1)에  $x_2$  지점에서는 급격히 증가하는 현상을 보이는데 이는 높임침목 앞에서 급격한 가속영역이 발생함에 따라 나타나는 현상이다. 또한 높임침목의 폭이 침목과 같은 경우 모든 영역에서 소폭 상승이 발생하므로 높임침목의 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. 9와 같다. 열차의 속도가 증가함에 따라 선형적으로 하부 유동속도가 증가하며 Fig. 7, Fig. 8과 마찬가지로  $x_1$  지점,

즉 높임침목 윗면에서는 다른 지점에 비해 선로상의 유속이 빠름을 확인할 수 있다.

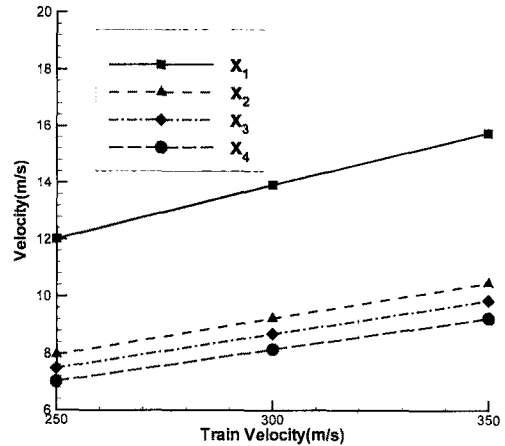


Fig. 9. Underbody Flow Velocity vs V

## 4. 높임침목 형상에 대한 고찰

앞에서는 직사각형 단면을 갖는 높임침목의 형상에 대해서만 고려하였고, 이렇게 단순한 높임침목 형상을 이용함으로써 높임침목의 높이 및 폭에 의한 공력 특성을 보다 쉽게 분석해볼 수 있었다.

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

Fig. 10은 본 연구에서 비교해보고자 하는 높임침목의 단면 형상들을 나타낸 그림이다. Base는 앞에서 해석한 직사각형 형태의 단면을 갖는 높임침목이며 Type #1~Type #4는 Base 형상과 비교하기 위해 고안한 단면 형상들이다.

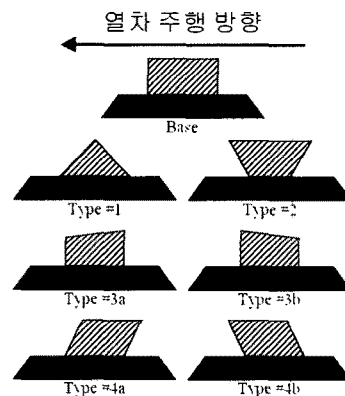



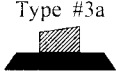

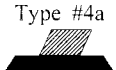



Fig. 10. Heighter Cross-Sections

Type #1과 Type #2는 좌우 대칭형태의 높임침목 형상이다. Type #1과 같은 삼각형 형태는 높임침목 위에 자갈이 올라갈 가능성을 감소시킬 수 있으며 단면적도 최소인 형태이다. Type #2와 같은 형상은 Base 형상에서 옆면을 역삼각형 형태로 기울여줌으로써 비산된 자갈이 높임침목에 부딪힌 후 위쪽으로 튀어 오르는 것을 방지하기 위한 형상이다. Type #3~Type #4는 직사각형 형태의 높임침목에 약간의 변형을 주어 좌우 비대칭 형상을 만들어준 것으로 열차의 주행 방향에 따라 어떤 차이가 있는지를 알아보기 위한 형상이다.

각각의 높임침목 형상에 대해 수치해석을 수행하여 평균 유동 속도를 비교한 결과는 Table 1과 같다. Table 1에서  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$ 의 위치는 Fig. 6에 표시된 바와 같으며, 각 위치에서 Base 형상의 하부 유동 속도를 100%로 하여 비교하였다.

Table 1. Aerodynamic comparison with Highter shapes

Type	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	Avg.
Base 	100%	100%	100%	100%	100%
Type #1 	99.5%	109%	87%	84%	94.9%
Type #2 	97.5%	96.5%	98%	98%	97.5%
Type #3a 	92%	92%	89%	105%	94.5%
Type #3b 	117%	140%	116%	122%	124%
Type #4a 	95%	80%	97%	102%	93.5%
Type #4b 	108%	114%	101%	99%	106%

각 위치에서의 평균 하부 유동 속도 및 증감률을 보면 Type #1, Type #2, Type #3a, Type #4a가 Base 형상에 비해 향상된 결과를 보이고 있고 Type #3b, Type #4b는 하부 유동속도가 오히려 증가하는 결과를 보인다. 하지만 모든 경우에 대해 하부 유동 평균속도는 10m/s 내외로 자갈비산 임계속도인 25m/s보다는 낮은 결과를 보인다.

Type #1은  $x_2$ 를 제외한 나머지 세 지점에서 하부 유속이 감소하는 결과를 보이고 있고 특히 자갈면 상에서의 속도( $x_3$ ,  $x_4$ )가 크게 감소하여 더욱 그 효과가 기대된다. 또한 형

상 자체도 자갈이 높임침목 위에 놓이기 힘든 형상이어서 향후 응용 가능성이 높다고 할 수 있겠다. 다만  $x_2$ 지점, 즉 침목 앞부분에서의 속도가 증가하기 때문에 이 지점에 대한 보완책이 필요하다.

Type #2는 평균 유동 감소폭은 Type #1에 비해 작지만 전 영역에서 고른 감소폭을 보이고 있다.

Type #3과 Type #4는 방향성에 따라 그 차이가 극명히 드러난다. Type #3a나 Type #4a처럼 열차가 진행해오는 방향 쪽의 높이를 높이거나 그 방향 쪽으로 기울이는 경우 하부 유동 특성이 좋아지지만 반대의 경우에는 하부 유동속도가 크게 증가하게 된다. Type #3a의 경우에는  $x_4$ 를 제외한 영역에서는 10% 가량의 하부 유동속도 감소 효과를 보이므로 Type #1과 마찬가지로 응용 가능성이 높다고 할 수 있겠다. Type #4a는 평균 유동 감소폭은 가장 크지만  $x_2$ 지점에서의 감소폭에 의한 결과이며 다른 지점에서의 감소폭은 그리 크지 않은 편이다.  $x_2$ 지점에서의 큰 유동 감소는 형상에 의한 박리효과로 추정된다. Type #3b와 Type #4b는 각각 24%와 6% 하부 유동이 증가하는 특성을 보이므로 자갈 비산 방지용으로는 오히려 기본형상에 비해 성능이 떨어진다고 볼 수 있다.

이상의 결과를 종합해볼 때, 단선 선로의 경우에는 Type #1이나 Type #2 형상을 기본형으로 하여 보다 구체적인 설계를 통해 성능이 좋은 높임침목 형상을 얻을 수 있을 것으로 예상되며, 복선 선로의 경우 Type #3a나 Type #4a처럼 방향성을 고려한 높임침목 형상을 사용하는 것이 효과적일 것으로 예상된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 높임침목 단면 형상 변화와 선로상의 유동 특성 관계를 규명하기 위해 고속 열차 하부 영역에 대한 수치해석을 수행하였다. 이를 통해 높임침목이 방풍벽과 같은 역할을 하여 높임침목 앞/뒤쪽에 정체영역과 박리영역을 발생시킴으로써 선로상의 돌풍 속도를 감소시킴을 확인하였다.

이것은 자갈비산 현상의 주요 인자인 하부 평균 유동속도를 감소시켜 자갈비산 위험도 감소를 예상할 수 있다.

열차의 주행속도가 증가함에 따라 하부 유동 속도도 선형적으로 증가하게 된다. 이러한 경우 유동 속도의 감소는 높임침목의 높이가 높아질수록 더욱 증가하게 되며, 높임침목의 폭에 비해 높임침목의 높이가 하부 유동과 더욱 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

다양한 높임침목 단면 형상에 대해 해석한 결과, 기존의 형상에 비해 하부 유동 감소에 더욱 효과적인 단면 형상을

찾을 수 있었으며 특히 대칭 형상 가운데는 날카로운 삼각형 단면 형상을 갖는 높임침목이 단면적이 작으면서도 가장 효과적임을 알 수 있었다. 비대칭 단면 형상을 갖는 높임침목의 경우 열차 주행방향에 따라 상반된 특성을 보임으로써 복선 선로 적용 시 열차 주행방향을 고려한 높임침목 설치의 필요성을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 서울대학교 “차세대 기계항공시스템 창의설계 인력양성사업단” 및 건설교통부 “미래철도기술개발사업”의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부, 2003, “고속철도시스템 신뢰성 및 운영효율화 기술개발(1차년도 연차보고서)”, pp.495-536.
2. 건설교통부, 2004, “고속철도시스템 신뢰성 및 운영효율화 기술개발(2차년도 연차보고서)”, pp.353-392.
3. 권혁빈, 남성원, 김대상, 이일화, 한진석, 2004, “고속철도 설비 낙하에 의한 자갈비산 방지대책 연구”, 한국철도학회 04춘계학술대회논문집, pp.171-171.
4. 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.
5. 권혁빈, 박춘수, 2005, “열차풍에 의한 고속선 자갈비산현상 연구”, 한국철도학회논문집, 제8권 1호, pp.6-14.
6. 김종용, 권혁빈, 김태윤, 구요천, 이동호, 2004, “자갈비산 방지를 위한 침목 하부유동장 해석 및 Heighter 설치의 타당성 검토”, 한국철도학회 추계 학술대회 논문집, pp.209-209.
7. 구요천, 김종용, 윤수환, 노주현, 이동호, 권혁빈, 2005, “하이터를 이용한 하부 열차풍 감소에 대한 연구”, 한국철도학회 추계 학술대회 논문집, pp.1241-1247.
8. 노주현, 김덕영, 구요천, 윤수환, 권혁빈, 이동호, 2006, “선로상 이물질 제거를 위한 자갈날림판 유동특성 연구”, 한국철도학회 추계 학술대회 논문집, pp.414-419.
9. 권혁빈, 박춘수, 강형민, 이동호, 2003, “자갈비산 메커니즘 규명을 위한 고속철도차량 하부 유동장 수치해석 및 시험”, 한국철도학회 추계 학술대회 논문집, pp.275-280.
10. 권혁빈, 박춘수, 강형민, 이동호, 이도형, 2003, “풍동실험을 통한 철도 노반상 자갈의 비산 특성 연구”, 한국항공우주학회 추계 학술대회 논문집, pp.728-731, pp.12-18.

접수일(2008년 5월 29일), 수정일(2009년 2월 13일),  
게재확정일(2009년 2월 17일)