

자갈비산 메커니즘 규명을 위한 고속철도차량 하부 유동장 수치 해석 및 시험

Substructure flow analysis and experiments of high speed train for researching the mechanism of ballast dispersion

권혁빈* 박춘수** 강형민*** 이동호**** 이도형*****
Kwon, Hyeok-Bin Park, Choon-Soo Kang, Hyung-Min Lee, Dong-Ho Lee, Do-Hyung

Abstract

The Korean high speed train is designed to run at very high speed such as 350km/h. At this time, ballast in roadbed is dispersed by high speed air flow and this hits the substructure of the train. It becomes the factor of damaging the train. To investigate the main factor and possibility of ballast dispersion, the substructure flow is measured by Kiel-Probe Array System at G7 train experiment. And the wind tunnel experiment is performed with ballast in our research. Also CFD analysis is performed by assuming that the flow field is 2D and using simple shaped cross-tie and flat substructure of the train. By comparing the experimental results and CFD analysis, the accuracy of the analysis is checked. They will become the basic research data for the analysis and optimization of train substructure to prevent the ballast dispersion.

1. 서 론

철도차량의 고속화와 더불어 대두되는 제반 공기역학적 문제 중 철도차량의 고속주행에 의해 비산(飛散)된 도상 자갈은 차체하부에 부착되는 각종 기기들과 휠, 차축 등에 손상을 입혀 차체의 신뢰성을 떨어뜨릴 수 있다. 심할 경우에는 열차의 탈선을 유발하여 대형 사고로까지 이어질 수 있다는 점에서 그 심각성이 매우 크다고 할 수 있다. 이러한 자갈비산의 원인으로는 차체하부에 형성되는 열차풍 등 공기역학적인 원인이 주된 것으로 알려져 있으나[1], 아직 정확한 원인과 그와 관련된 메커니즘이 상세히 연구되지는 못하였다.

본 연구에서는 공기역학적 관점에서 실험과 수치해석을 통해 자갈비산의 원인과 메커니즘을 규명하고자 하였다. 이를 위해 실제 고속으로 주행하는 G7 시제차량에 대한 현장실험을 위해 차체하부 유동계측시스템을 개발하였으며, 이를 이용하여 실제의 열차 하부에서의 열차풍을 계측하였다. 또한 풍동실험을 통하여 자갈비산을 위한 기본적인 유동조건을 조사하였다. 마지막으로 단순화된 차량하부 형상에 대한 유동장 해석을 실시하여 자갈비산의 원인을 규명하고자 하였다.

- * 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 공기유동연구그룹 선임연구원, 정회원
- ** 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단 신뢰성 평가팀 책임연구원, 정회원
- *** 서울대학교 기계항공공학부 박사 과정, 비회원
- **** 서울대학교 기계항공공학부 교수, 정회원
- ***** 한양대학교 기계공학부 교수, 비회원

2. 차체하부 유동장 계측시스템 개발 및 현장 실험

철도차량의 고속주행 시 차량 하부에서는 노반의 상태 및 하부 구조물에 의해 굉장히 복잡한 유동 현상이 일어나게 된다. 따라서 모든 조건을 고려한 풍동 실험 및 수치 해석은 그 한계점이 있다. 따라서 실제 주행하는 철도 차량에 대한 현장 실험을 통하여 하부에서의 열차풍을 계측하고, 이를 풍동 실험 및 수치 해석의 기초적인 자료로 삼고자 하였다.

2.1 유동장 계측시스템

실제 차량의 하부에서 발생하는 열차풍을 측정하기 위하여 차체하부 유동계측시스템을 개발하였다. 본 시스템은 Kiel-Probe Array System과 Multi-channel Pressure Scanning System으로 구성되어 있다. 일반적인 유속측정용 probe는 유동의 방향이 일정할 경우에만 사용가능하며, probe가 유동과 정렬되지 않는 경우에는 유동의 절대속도가 아닌 probe 방향의 속도 성분만이 측정된다. 따라서, 열차 하부의 유동처럼 유동의 방향이 조금씩 변화하는 경우에는 유동의 방향과 상관없이 유동의 속도를 측정할 수 있는 장비를 이용하여야 한다.

본 연구에서는 Kiel-Probe를 이용하여 유동의 절대유속을 측정할 수 있도록 하였다. 또한 Kiel Probe를 서포터에 가로, 세로 방향으로 부착하여 Array를 구성함으로써 차체 하부 유동장에 대하여 유속 뿐 아니라 가로, 세로 방향에 따른 유속의 분포까지 측정할 수 있도록 하였다. 이와 함께 측정되는 물리적인 압력을 전기적인 신호로 변환하기 위해 여러 채널의 압력을 동시에 읽어 전송할 수 있는 Multi-channel Pressure Scanning System을 이용하였다.

2.2 실험 조건

차체하부 유동장의 현장계측 실험 시 실험 조건은 다음과 같다. 우선 현장계측 장소는 경부고속철도 천안~대전 시험구간 중 고등터널 남쪽의 약 500m 토공구간의 중간에 위치한 지점으로서 (KP 109km) 터널 끝(KP 108.871km)에서 약 250m 떨어져 있으므로 터널에 의한 유동장의 간섭현상이 없는 지점을 택하여 실시하였다. 계측위치는 T2선로(상행) 상 침목 중앙 위 7cm 지점이며, 상, 하행 양방향으로 두 개의 Probe를 설치하였다. 또한 총 4회에 걸쳐 시험을 수행하였으며, 이때 대기온도는 29℃, 대기압은 101.85kPa, 습도는 45%였다. 각각의 실험에 대해 차체하부유동 실험 조건을 표 1에 나타내었다.

표 1. 차체하부유동 실험조건

시험번호	차종	방향	주행속도(km/h)	통과시간(sec)
1	G7 시제차량	상행	170	2.77
2	G7 시제차량	하행	230	2.05
3	G7 시제차량	상행	300	1.57
4	G7 시제차량	하행	250	1.89

2.3 실험 측정 결과

본 연구에서 개발한 차체하부 유동장 계측시스템을 이용하여 측정된 결과를 그림 1에 나타내었다. 그림에서 차량의 전두부가 계측위치를 통과할 때는 0sec이다. 속도에 관계없이 차량하부는 열차가 통과하는 직후부터 유속이 급격히 증가하며, 일정한 시간이 경과할 때까지 유속이 유지되다가 점차적으로 감소한다. 차량 통과 시 평균유속과 최고유속을 표 2에 나타내었다. 주행속도 300km/h일 경우 열차통과 중 평균유속은 28m/s, 최고유속은 35m/s에 이르렀다.

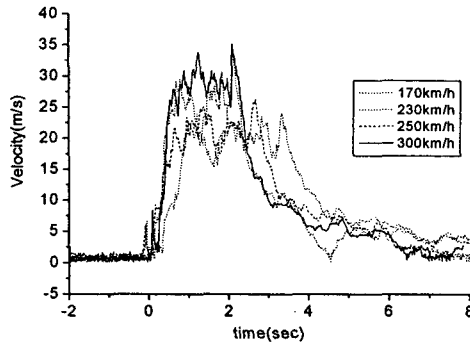


그림 1. G7 시제열차의 속도별 차체하부 유동장

표 2. 열차 통과 시 차체하부유동 계측결과

시험번호	최고유속(m/s)	평균유속(m/s)
1	24.05	20.07
2	33.12	25.97
3	35.20	28.83
4	26.30	20.98

3. 자갈 유형에 따른 이동을 측정 실험

3.1 자갈의 유형 분류

현장 실험을 통해 측정된 차체 하부에서의 속도 영역에서 자갈 비산 여부를 판별하고자 풍동 실험을 실시하였다. 이를 위해 실제 경부고속철도 본선에 도포된 자갈을 약 1000여 개 채취하여 이 중 330개의 자갈에 대해 자갈의 형상과 질량을 조사, 분석하였다.[8] 이 때 각각의 형상은 A type은 납작한 형태, B type은 반구 형태, C type은 둥근 구의 형태로 하여 분류하였다. 이렇게 분류된 자갈에 대하여 각각의 유형별로 평균질량 등을 정리하면 표 3과 같다.

표 3. 샘플자갈의 형상 분류 및 질량 통계

Type	전체	A 타입	B 타입	C 타입
개수	330 (100%)	53 (16%)	131 (40%)	146 (44%)
평균질량(g)	87.5	72.9	82.4	97.4
표준편차(g)	44.0	49.2	41.8	41.9

이러한 유형 별 분류 결과를 바탕으로 각 유형별 자갈비산 특성을 살펴보기 위해 풍동바닥에 자갈을 놓고 풍속을 높여가며 자갈의 움직임을 관찰하였다. 이 때 자갈의 형상별로 3가지, 그리고 0에서 200g까지 질량별로 50g씩 4가지의 영역으로 분류하여 총 12가지 조건에 대한 풍동 실험을 수행하였다. 또한 자갈들은 풍향에 직각이 되도록 1열로 놓아 서로간의 간섭이 없도록 하여 공기 유동이 각각의 자갈들에 미치는 힘과 비산 특성을 알 수 있도록 하였다. 시험에 사용된 풍동은 서울대학교 기계항공공학부의 중형 아음속 풍동으로서 시험부의 크기는 1.35m(W)×0.95m(H)×2m(L)이며, 최고유속은 약 50m/s이다.

3.2 실험 결과

풍속에 따라 질량 및 유형에 따른 자갈의 이동율(=이동한 자갈수/전체 자갈수)을 그림 2와 3에 각각 나타내었다. 그림 2에서 질량이 작을수록 낮은 풍속에서 이동율이 높으며, 질량이 클수록 높은 속도에서 이동을 시작한다는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 가장 많은 이동율을 나타내는 풍속에서도 동일하게 나타났다. 자갈의 질량이 0~50g인 경우 최대 이동율은 15~20m/s에서 나타났고, 50~100g일 때는 25~30m/s, 100~200g인 경우에는 30~35m/s에서 최대 이동율을 기록했다.

그림 3의 경우 자갈 형상과 자갈의 거동 사이에 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다. A type의 경우에는 30~35m/s에서 가장 큰 이동율을 기록하였다. C type의 경우 가장 낮은 20~25m/s의 속도에서 가장 큰 이동율을 기록하였으며 중간형태인 B type은 25~30m/s의 속도에서 가장 큰 이동율을 기록하였다. 결론적으로 자갈이 움직이기 시작하는 임계풍속은 약 20m/s~40m/s 정도로 나타났으며, 자갈의 질량이 작을수록 그리고 원형에 가까울수록 비산 시작 풍속이 더 낮아짐을 알 수 있다.

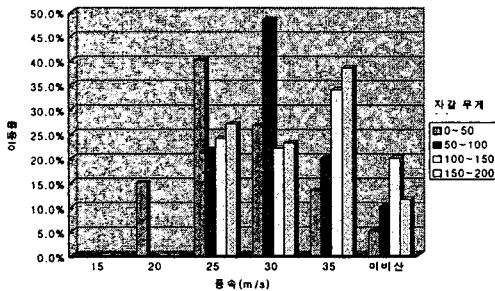


그림 2. 자갈 질량에 따른 이동율

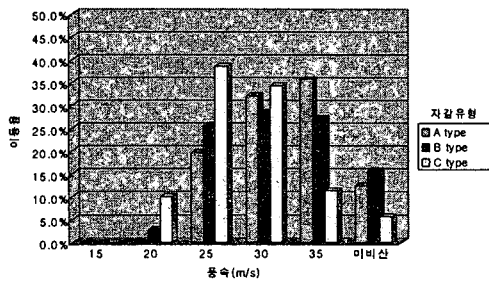


그림 3. 자갈 유형에 따른 이동율

본 연구에서 수행한 평판 위에 놓인 단독자갈의 시험은 자갈이 침목 위에 위치해 있을 때의 상황과 동일한 조건이라 할 수 있다. 따라서 실제 G7 차량의 주행 시 생기는 하부 영역에서의 평균 유속 및 최고 유속의 결과를 고려할 경우 자갈비산 가능성이 매우 높음을 알 수 있다. 또한 침목 위의 자갈이 초기 거동을 시작하게 되면 다른 자갈과 충돌하거나 강한 열차풍에 휩쓸리면서 차체 하부에 충돌하게 되는 원인이 될 수 있다. 따라서 본 실험을 통해서 산출된 자갈의 질량 및 형상에 대한 개략적인 비산 조건은 자갈비산 메커니즘 규명에 중요한 단서가 될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 차체하부 유동장 수치 해석

고속철도 차량의 경우 그 길이가 매우 길기 때문에 전유동장의 3차원 해석 시에는 많은 격자가 필요하다.[5] 계산 격자의 증가는 해석상의 어려움과 함께 계산 시간 증가의 원인이 된다. 이러한 문제점을 해결하고자 혼합차원기법에 의한 CFD 해석[6, 7] 등 많은 시도가 있어왔고 성공적으로 적용되었다. 그러나 열차 하부 유동장을 고려한 해석의 경우, 열차 하부 영역이 전체 유동장에 비해 매우 작기 때문에, 하부 유동의 정확한 해석을 위해서는 하부 영역에 매우 촘촘한 격자가 필요하게 되고, 이는 필연적으로 해석상의 어려움으로 이어지게 된다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고자 차량 전체가 아닌 열차 하부 영역만으로 유동장을 한정하여 2차원 해석을 수행하였다. 즉 열차 하부를 평평한 wall로 가정하고 정지한 바닥면에 대해 일정 속도로 움직이는 moving wall로 가정하여 해석을 수행하였다. 이 때 침목을 간단한 형상으로 가정하여, 침목이 열차 하부 유동에 어떤 영향을 미치는지를 해석하였다. 이렇게 함으로써

고속철도 차량의 객차 부분에서의 하부 유동이 어떻게 형성되는지를 고려하고자 하였다.

사용한 지배방정식은 2D Navier-Stokes' Equation을 이용하였으며, 비압축성 유동을 가정하여 계산을 수행하였다. 또한 250, 300, 350km/h의 세 가지 열차속도에 대하여 해석을 수행하였다. 이중 300km/h인 경우 해석영역 내 Cp분포 및 Velocity 분포는 그림 4 및 5와 같다.

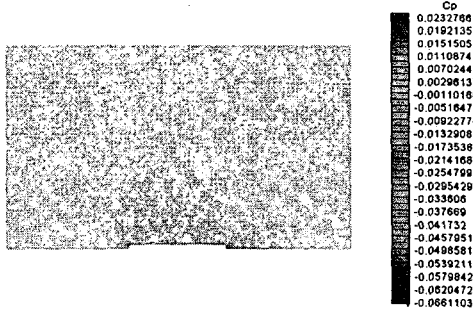


그림 4. Cp 분포(300km/h)

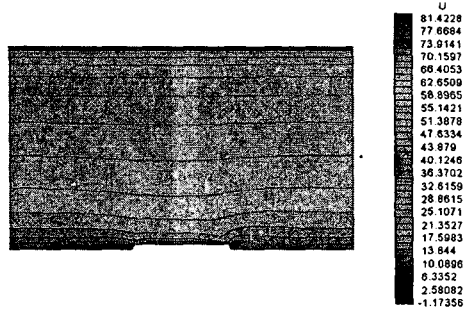


그림 5. Velocity 분포(300km/h)

그림 4에서 침목 오른쪽 부분에 비교적 고압의 영역이 생기고, 침목 위 부분에서는 저압의 영역이 생김을 확인할 수 있다. 이 때 대기압에 대해 상대적인 최고 압력과 최저 압력은 표 4와 같다. 그림에서 300km/h의 경우 차량 하부 진행 방향의 반대쪽 침목 부분(침목 오른쪽)에서는 아래에서 위로 약 153pa 정도의 압력을 받게 된다. 따라서 이 부근에 있는 자갈은 차량 하부의 유동에 의한 자갈의 1차 비산 시 더욱 더 비산할 수 있는 힘을 받을 수 있다. 또한 1차 비산된 자갈이 이 부분에 충돌할 경우, 그 충격량과 함께 상승압력에 의한 힘을 받게 되어 열차 하부에 충격을 가할 정도로 비산될 수 있다.

그림 5의 경우 열차의 높이 방향으로의 속도 v는 길이 방향으로의 속도 u에 비해 아주 미미하기 때문에 velocity profile을 표현함에 있어서 u만의 속도 profile로 표현하였다. 고속으로 주행하는 열차의 경우, 동압에 의해 자갈이 자갈끼리의 마찰력이나 자중을 이기고 비산될 수 있다. 특히 침목 위에 자갈이 있을 경우 비산될 확률이 높기 때문에 본 연구에서는 침목 위 부분에서의 동압 계산을 수행하였다. 각각의 속도별로 침목 위 부분에서의 속도 및 그에 따른 동압은 표 5와 같다.

표 4. 저압부 및 고압부 압력

열차속도	250km/h	300km/h	350km/h
저압부 (pa)	-51	-57	-83
고압부 (pa)	73	96	126

표 5. 침목 위에서의 속도 및 동압

열차속도	250km/h	300km/h	350km/h
유속(m/s)	9.7	12.0	14.2
동압(pa)	56.5	86.4	121

이 때 자갈의 비중은 대략 $2.5 \sim 2.65 \text{ g/cm}^3$ 이기 때문에 직경 0.05m인 구형의 자갈을 가정할 경우 자갈의 무게는 대략 163g~173g 정도가 되며 동압에 의해서 0.11~0.24N의 힘을 받게 된다. 자갈의 동마찰계수를 0.2 정도로 가정하면 약 56~123g 정도의 자갈이 굴러갈 수 있다. 따라서 크기에 비해 가볍거나 무게에 비해 유동에 대한 단면적이 넓은 자갈들은 충분히 굴러갈 수 있다. 또한 열차 하부에 돌출물이 있을 경우 돌출물에 의해 공기가 밀려남으로써 침목 위에서도 자갈이 굴러갈 수 있는 동압을 만들 수 있다. 이상에서 침목 위에 있는 자갈은 동압에 의해 노반 상에서 움직일 수 있고 다른 자갈이나 침목에 부딪히게 되면 그 충격량에 비산될 수 있다.

이와 함께 수치해석의 경우에도 단독자갈 풍동시험에서 자갈이 이동하였던 25~35m/s의 속도 영역이 차량 하부에 존재한다. 해석 영역을 단순화하여 실제 현상과는 어느 정도의 오차가 있지만, 2차원 해석의 경우에도 실제의 유동 특성을 어느 정도 반영하고 있음을 알 수 있다. 열차 하부 구조물의 형상 및 요철 등을 고려할 경우 더욱 정확한 실제 유동 특성을 해석할 수 있으며 실

험에서 동압을 측정하기 어려운 영역에 대해서도 비교적 신뢰할 수 있는 결과를 도출할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 자갈비산의 원인과 메커니즘을 규명하기 위하여 실험 및 수치해석을 수행하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론에 도달하였다. 첫째, 실제 주행하는 고속철도 차량에 대하여 차체 하부유속을 측정하기 위하여 차체하부 유동장 계측시스템을 개발하였으며, G7 시제차량에 대해서 현장시험을 실시하였다. 그 결과 차량 통과 시 하부 유속은 시속 300km/h 주행 시 평균 28m/s, 최고 35m/s로 나타났다. 이를 바탕으로 자갈의 비산 여부를 판별하기 위해 경부고속철도 본선에 도포된 자갈을 채집하여 조사한 결과, 자갈의 질량은 대체로 0~200g의 범위 내에 넓게 분포하는 것으로 나타났다. 이러한 자갈들을 풍동 내의 평판에 놓고 실험하였을 때, 자갈이 움직이기 시작하는 임계풍속은 약 20m/s~40m/s 정도로 나타남을 확인할 수 있었다. 따라서 G7차량이 300km/h 이상의 속도로 주행할 경우 자갈비산 가능성이 매우 큼을 알 수 있었다.

둘째, 2차원 수치해석 결과 풍동 실험 및 고속철도 차량에서의 현장 실험 결과와 같이 자갈을 충분히 비산시킬 정도의 속도인 20m/s~40m/s의 속도 영역이 존재함을 확인할 수 있었다. 따라서 단순화한 수치 해석으로도 자갈 비산 특성을 어느 정도는 반영함을 알 수 있다. 차량 하부 구조물의 요철이나 형상 등을 고려할 경우 더욱 정확한 해석이 가능할 것으로 기대되며, 실험을 통한 계측이 어려운 영역에 대해서도 신뢰할 수 있는 결과를 도출할 수 있음을 알 수 있다.

이러한 실험 및 수치 해석 결과를 바탕으로 G7 시제차량의 경우 고속 주행 시 자갈비산 가능성이 매우 큼을 확인할 수 있었다. 따라서 차량의 유지, 보수 및 안정성을 향상시키기 위해 차량 하부에서의 열차풍을 최소화할 통해 자갈비산을 방지할 수 있도록 하는 최적 설계가 필요하다. 상기의 실험 및 수치해석 결과들은 자갈비산 방지를 위한 열차 하부 유동 해석 및 최적 설계 연구에 있어서 기초적인 자료로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 2003년도 건설교통부에서 시행한 고속철도 기술개발 사업의 기술개발 결과중 일부임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

1. 한국철도기술연구원 (2000년), "시험선 구간 시운전에 따른 궤도 및 노반시설물의 성능검증 보고서"
2. E. Wilemsen (1997년), "High Reynolds number wind tunnel experiments on trains", Journal of Wind Eng. and Ind. Aerodynamics, 69-71 pp. 437-447
3. Peters, J-L (1983년), "Aerodynamics of very high speed trains and maglev vehicles: State of the art and future potential", Int. J. of Vehicle Design, Special Publication Sp3
4. G. V. Reklaitis (1983년), "Engineering Optimization: Methods and Applications"
5. 서울대학교 (1998년), "공력설계, 해석기술 및 전두부 개발 (2차년도 연차보고서)"
6. 서울대학교 (1999년), "공력설계, 해석기술 및 전두부 개발 (3차년도 연차보고서)"
7. 김태윤, 권혁빈, 이동호, 김문상 (2002년), "혼합차원기법을 이용한 고속열차의 터널 통과 시 발생하는 비정상 압축성 유동장의 수치해석", 한국항공우주학회지, vol 30(6), pp. 78-83
8. 권혁빈, 박춘수, 강형민, 이동호, "풍동실험을 통한 철도 노반상 자갈의 비산 특성 연구", 한국항공우주학회 추계 학술대회 발표 논문