〈 논문 〉

고속(KTX) 및 기존 철도차량의 열차풍 현상 비교 분석

김 동 현* · 장 용 준†

(2006년 9월 8일 접수, 2006년 12월 19일 심사완료)

The Comparative Analysis of Slipstream Phenomena by High-Speed and Traditional Train

Dong-Hyeon Kim and Yong-Jun Jang

Key Words: High-Speed Train(고속열차), Hot Wire(열선), Slipstream(열차풍), Streamline(유선형)

Abstract

A series of field tests were performed to develop aerodynamic characteristic evaluation method and countermeasure technology in conventional and high-speed railway. The strength of rolling stock-induced wind which affect the people and substructure in platform and nearby track were investigated. The slipstream of passing trains was measured by hot-wire array system. The speed of trains was 110 - 125km/h for conventional ones and 300km/h for high-speed ones. The streamlined shape trains cause about 50% smaller-scale slipstream compared to the non-streamlined ones.

1. 서 론

2004년 4월 국내에 고속전철이 도입된 이후 그 빠른 속도(300km/h)로 인하여 기존 열차운행에서는 경험치 못하였던 현상들이 나타나기 시작하면서, 고속전철의 주행으로 일어나는 공기역학적 문제점[1,2](열차풍, 미기압파 등)들에 관심이 집중되고 있다.

현재 우리나라 철도는 고속철도의 건설과 더불어 기존선의 고속화가 진행되고 있으며, 현재 개발중인 틸팅차량의 개발이 완료되어 상업운전이 시작되면 기존선에서도 180km/h 이상의 속도로 철도가 운행될 것으로 예상된다. 이처럼 기존선도 고속화되어감에 따라 열차통과시 선로구축물에 대한 공기역학적 효과는 매우 커질 것으로 예상되며, 이에 대한 정확한 평가, 분석을 통하여 현존하는 선로구축물에 대한 적절한 안전기준의 정비가 시급하다.

한편, 미연방철도국(Federal Railroad Administration, FRA)은 고속철도의 안전에 관한 연구의 일환으로서 1990년대 후반부터 240km/h의 고속철도 운행 중 선로변의 인명과 시설물, 역사 내 인명과 시설,[1] 인근 선로의 열차에 타고 있는 승객[2]에 미치는 공기역학적 영향에 대한 일련의 연구를 수행한 바 있다. 또한, 최근에 Sanz-Andres와 Santiago-Prowald[3]는 열차 풍압이 보행자에 미치는 영향에 대하여 연구하였고, 또한 선로주위 교통표지판에 미치는 풍압[4]에 대해서도 연구를 수행한 바 있다. Baker 와 Humphreys[5]는 풍동 실험을 통하여 측풍이 컨테이너 형태의 열차에 미치는 영향에 대하여 밝혔다. Kim 등[6]은 1차원적으로 고속열차(300km/h)의 열차풍을 계측하였다. 열차풍 강도는 열차로부터 0.5 - 1m 거리에서 약 3 - 20m/sec의 강도를 보였다.

국제철도연맹(International Union of Railways, UIC)이 발행하는 국제규격인 UIC Code 779-1[7]은 선로 인근에 설치된 방음·방풍벽, 건축물과 가건물, 선로를 감싸는 구조물 등 각종 선로변 구조물에 대해 열차통과시 가해지는 하중의 정의와

† 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원 환경화재연구팀
E-mail : jangyj@krri.re.kr
TEL : (031)460-5355 FAX : (031)460-5319
* 회원, 한국철도기술연구원 환경화재연구팀

그 계산법을 권고하고 있다.

본 연구에서는 Kim 등[6]에 의하여 개발된 승강장 및 선로변 현장 계측시스템을 개선 후 이를 이용해 기존선 승강장 및 고속선 선로변에서 열차통과로 인한 공기역학적 영향[7]에 대한 현장계측시험을 수행하였으며, Kim 등[6]에서 수행하지 못한 열차풍 단면적 분석 및 경계층에 대한 결과를 분석하였다. 이를 통하여 신축시설물에 대한 공기역학적 최적설계기술을 확보하고자 한다.

2. 시험조건

2.1 기존선 역사 승강장 시험

철도차량의 통과로 인해 발생하는 열차풍 계측을 위하여 경부선 통과역인 의왕역 플랫폼에 시험장치와 계측장비를 설치하고 현장계측시험을 실시하였다. 열차풍의 유속측정을 위한 Hot-Wire (TSI 8455, I-type) Probe Array는 Fig. 1와 같이 플랫폼 끝단으로부터의 거리(y)와 플랫폼 바닥면으로부터의 높이(z) 두 방향(2차원적 그물망식)으로 어레이를 구성하였는데, 지난해의 실험 결과[6]를 바탕으로 열차와의 거리를 0.5m 간격으로 하였으며, 열선사이의 간격은 열차방향으로 0.7m 간격을 갖도록 하였고, 경계층 두께를 예측하여 경계층 영향이 미약한 1.9m (y)까지 설정하였다. Fig. 1은 각 열선의 위치 및 번호를 나타내고 있으며, X방향은 열차가 정면으로 다가오는 방향이다.

플랫폼 바닥면으로부터는 0.7m의 간격을 두었으며, 열선 사이의 거리는 0.5m를 유지하여, 수직방향으로의 총길이가 2.2m가 되도록 하였다.

열차의 통과속도는 무궁화호의 경우 100 ~117 km/h 이고 새마을호의 경우 110 ~ 124 km/h의 속도를 보여주고 있다.

2.2 고속선 선로변 시험

고속철도차량(KTX)의 통과로 인해 발생하는 열차풍이 고속선 선로변에 미치는 영향을 조사하기 위하여 고속선 선로변에 시험장치를 설치하고 현장계측시험을 실시하였다.

Fig. 2는 상봉 터널앞 오송기지 방향 선로변에 설치된 Hot-Wire Probe Array를 나타낸 것이다. 열차풍의 유속측정을 위한 Hot-Wire Probe Array는 레일 끝단으로부터의 거리(y)와 레일 상면으로부터의 높이(z) 두 방향으로 어레이를 구성하였는데, 레일 끝단으로부터의 거리는 2.9m, 레일 상면으로부터의 높이는 각각 1.8m, 2.3m가 되도록 하

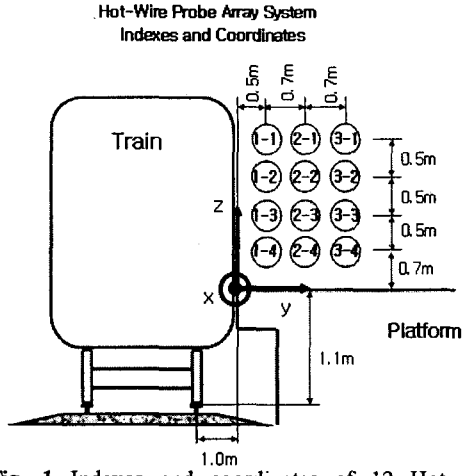

Fig. 1 Indexes and coordinates of 12 Hot wires for Mugungwha and Saemaul trains

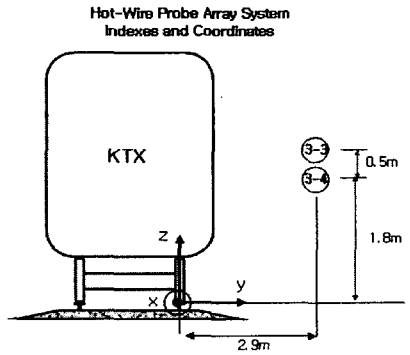

Fig. 2 Indexes and coordinates of 2 Hot wires for KTX trains

여 열차로부터의 상대적 위치에 따른 선로변 열차풍의 영향을 조사할 수 있도록 하였다.

계측에 시도된 KTX는 20량 1편성으로, 평균속도는 300km/h를 유지하고 있어 KTX의 표준 열차풍으로 여길수 있었다.

3. 시험결과

3.1 기존선 역사 승강장 열차풍

우선 Fig. 3의 무궁화호(115km/h) 절편형 8량 1편성의 경우를 보면 초속 20m/sec의 속도가 넘는 강풍이 열차 가까이 그리고 승강장 바닥 가까이 (열선의 위치 : 1-3, 1-4), 열차의 전두부 통과시 순간적으로 발생하는 것으로 나타났다. 반면 열

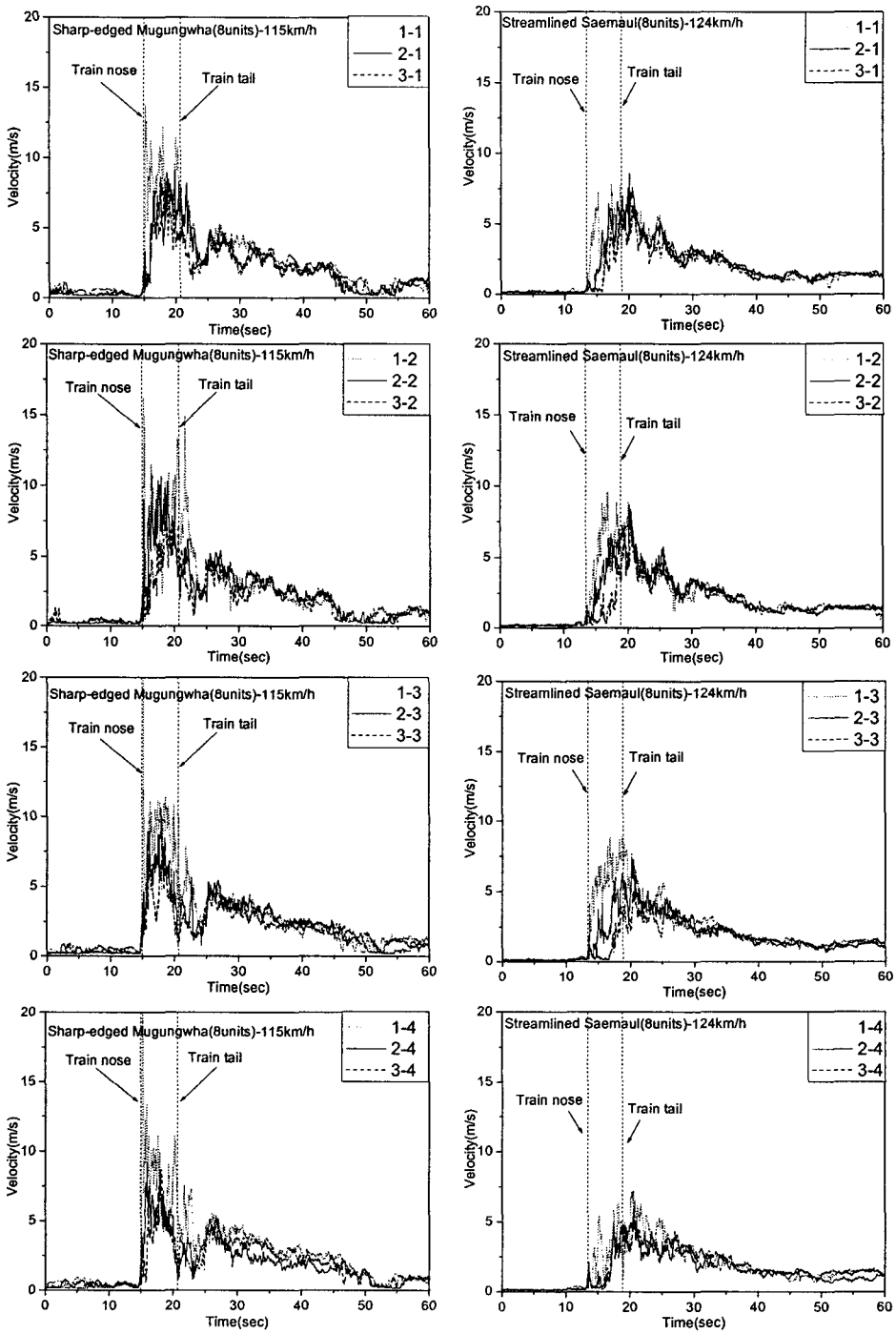

Fig. 3 Strength of slipstream for Mugungwha and Saemaul trains

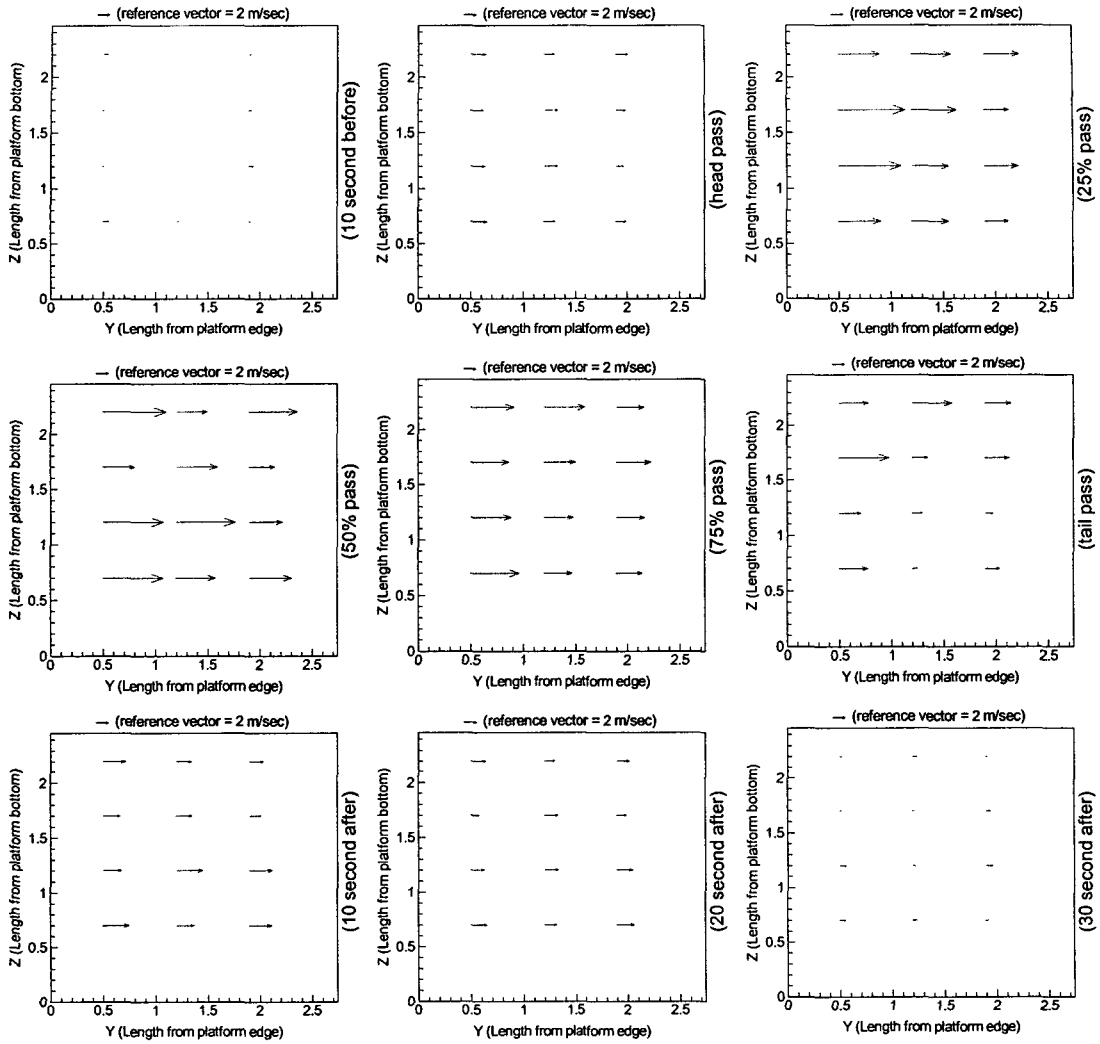

Fig. 4 Velocity vector of slipstream for Mugungwha train with sharp edge (Train velocity = 115km/h)

선위치 제2열(열선 위치 : 2-1, 2-2, 2-3, 2-4 : 열차로부터 1.2m)에서는 열차통과시 5 ~ 10 m/sec 범위내의 풍속이 존재하는 것으로 조사되어, 이곳은 비교적 안전지역으로 판단된다. 열선위치 제3열 (열선위치 : 3-1, 3-2, 3-3, 3-4)에서는 2 ~ 7m/sec의 풍속이 열차통과시 존재하는 것으로 나타나고 있다. 열차의 후미부가 빠져나갈때도 와류 등으로 인하여 강한 풍속(최고 15m/sec)이 발생(열선배열 번호 1-2)한다. 한편 이번 실험을 통하여 승강장 바닥으로부터 어느 지점에 강풍이 집중되는지가 밝혀졌다. 즉 열차통과시 가장높이 있는 계측센서의 위치(열선 위치 - 1행 : 1-1, 2-1, 3-1)에서 5 ~ 7m/sec의 평균 풍속이 발생하고, 열선 위치 2행(1-2, 2-2, 3-2)에서는 그것 보다 조금더 강한 6 ~ 8m/sec의 평균 풍속이 발생하고, 열선 위치 3행(1-3, 2-3, 3-3)에서는 더 증가된 평균 풍속 7 ~ 11m/sec를 보여주고 있다. 가장 낮은 곳에 위치한 열선 위치 4행(1-4, 2-4, 3-4)에서는 1행과 비슷한 평균 풍속(5 ~ 7m/sec)을 보여주고 있다.

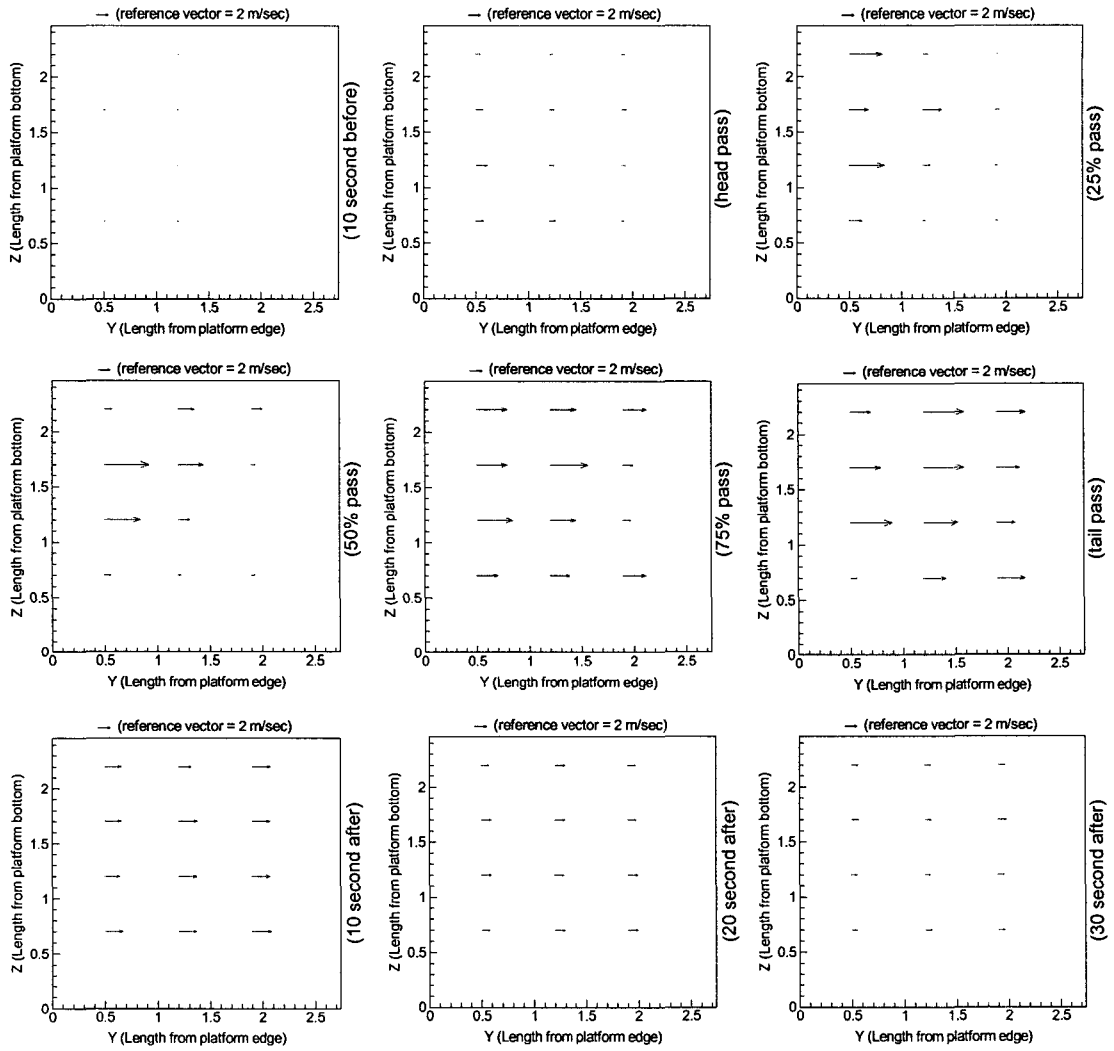

Fig. 5 Velocity vector of slipstream for Saemaul train with streamline shape (Train velocity = 124km/h)

열차가 지나간뒤 후류는 열차의 후미부에 의한 역류현상과 와류등으로 인하여 전지역에서 유동이 골고루 섞이는 현상이 발생하여 열선의 각 열 및 행에서 전반적으로 2.5 ~ 3m/sec의 평균 풍속이 존재하는 것으로 조사되었다.

새마을호(124km/h) 유선형 8량 1편성의 경우는, 먼저 열선의 위치 제1열(1-1, 1-2, 1-3, 1-4)에서는 2 ~ 7.5m/sec의 평균 풍속과 제2열(2-1, 2-2, 2-3, 2-4)에서는 1 ~ 6m/sec의 평균풍속을 그리고 제3열(3-1, 3-2, 3-3, 3-4)에서는 1 ~ 4m/sec의 평균 풍속이 발생되었다. 이는 무궁화호 절편형에 비하여 50 - 60% 정도의 속도가 줄어든 것이다.

한편, 열선의 위치 제2열과 제3열에 있는 열선에서는 열차통과시 얼마 동안은 열차풍이 미미하게 감지되었다. 즉 열선 제2열에서는 열차가 전두부로부터 약 25%가 진행하도록 열차풍이 미미하게 감지가 되었고, 열선 제3열에서는 열차가 전두부로부터 약 50% 정도 진행하도록 열차풍이 미미하게 감지가 되었다. 이는 열차로 인하여 발생되는 경계층이 아직 각각 제2열과 제3열까지

성장하지 못하였다는 것을 보여주고 있는 매우 흥미로운 실험 결과이며, 유선형이 절편형보다 작은 규모의 열차풍 유동 경계층을 발생시킨다는 중요한 증거가 되고 있다.

열선 유속계에서 얻어진 data를 그래프 형식이 아닌 벡터형식으로 표현하면 열차풍의 거동에 대한 더욱 깊은 이해를 얻는데 도움이된다.

Fig. 4은 무궁화호(속도 = 115km/h) 절편형 8량 1편성에 대한 열차풍을 벡터 선도로 나타낸 그림으로서 먼저 설명된 그래프의 data(Fig. 3)와 같은 data이다. 각각의 그림은 열차가 열선배열을 지나기 10초전, 열차의 전두부가 열선을 지날 때, 전두부로부터 열차 전장의 25%가 지날 때, 전두부로부터 열차 전장의 50%(열차의 절반이 열선을 지나는 시점)가 지날 때, 전두부로부터 열차 전장의 75%가 지날 때, 후미부가 열선을 지날 때, 후미부가 빠져나간후 10초후, 후미부가 빠져나간후 20초후, 후미부가 빠져나간후 30초 후에 열차풍의 순간적 크기를 나타낸 것이다.

열차가 지나기 10초전에는 거의 자연풍 (0.1 ~ 0.3m/sec)의 영향만 승강장에 있었다. 열차 전두부가 열선을 지날 때 열차면에 가장 가까운 곳(Fig. 1의 열선 위치 : 1-1, 1-2, 1-3, 1-4)에서는 2 ~ 2.5m/sec의 풍속이 생성되며, 열차로부터 멀어진 곳(열선 위치 3-1, 3-2, 3-3, 3-4)에서는 1.1 ~1.9 m/sec 가 생성된다. 그 차이가 1m/sec 이내 이며, 이는 다른 전두부 형상의 열차와 비교하여 볼때, 절편형과 같은 열차의 전두부에서는 열차풍 경계층이 순간적으로 두껍게 형성된다는 것을 의미한다.

한편 절편형의 경우 가장 강한 열차풍(약 22m/sec)은 전두부와 전두부로부터 열차 전장의 25%사이에서 생성되는 것으로 밝혀졌다. (또한 절편형 그래프 Fig. 3 참조).

열차의 후미부가 지난간후 20초가 경과하기까지 열차풍의 영향이 존재하는 것으로 나타났다. 10초 경과이후에는 2 ~ 4m/sec를, 20초이후에는 1.5 ~ 2.8m/sec를 보여 열차가 지나갈 때의 풍속의 약 10% ~ 40% 이상의 강도를 지닌 열차풍이 열차 지난후 20초내에 유지가 되는 것으로 조사가 되었다. 30초 이후에는 그 영향이 미미한 것으로 조사되었다.

Fig. 5는 새마을호 (속도 = 124km/h) 유선형 8량 1편성에 대한 열차풍의 벡터 선도로 나타낸 그림이다. 전두부가 열선을 지나갈 때 열차풍의 강도는 무궁화호 절편형에 비하여 40% ~ 60% 정도 줄어드는 것으로 조사가 되었다. 열차 전장의 25%가 지나갈 때는 앞서 지적한 바와 같이 열차풍의 유동 경계층이 충분히 발달되지 못하는 상황을 확연히 구별할 수 있다. 따라서 제3열에 있는 열선들이 유속의 변화를 잘 느끼지 못하게 된다. 즉, 열차에 근접한 위치(열선의 위치 : 1-1, 1-2, 1-3, 1-4)에서의 열차풍의 강도가 열차에서 가장 멀리 위치한(열선의 위치 : 3-1, 3-2, 3-3, 3-4) 열차풍에 비하여 크게는 16배까지 열차풍의 강도가 차이가 나는 것으로 조사되었다. 열차 전장의 50%가 지나갈 때도 아직 유동경계층이 열차로부터 1.2m 내외를 넘지 못하는 것으로 나타났다. 열차 전장의 75%가 지나갈 때는 유동 경계층이 계측 영역을 전부 점령하고 있는 것으로 나타났다. 후미부가 통과한 후 10초 경과할 시 새마을호의 후류의 세기는 무궁화호의 후류의 세기에 비하여 25% 정도 적었다. 그러나, 후미부 통과후 30초 정도가 경과할 시에는 비슷한 후류 강도를 보이면서 두 경우 모두 후류가 소멸되었다.

Fig. 6(a)는 무궁화호 절편형 열차 전두부 통과시부터 후미부가 빠져나갈 때까지의 열차풍을 평균한 속도의 세기를 나타낸 그림이고, Fig. 6(b)는 열차의 후미부가 빠져나간뒤 20초 동안의 평균 열차풍을 나타낸 그림이다. Fig. 6(a)의 열차 통과시에는 열차에 근접한 부근에서 열차풍 강도가 가장 강하고 열차에서 멀어질 수록 열차풍 세기가 감소 되는 것을 한눈에 알 수가 있다. 평균 열차풍 강도가 4.47 ~ 8.15m/sec의 범위에 놓여 있다.

계속하여 Fig. 7(a)와 (b)는 새마을호 유선형의 경우를 나타낸 그림이다. 본 실험에서 새마을호가 무궁화호보다 9km/h의 속도가 더 높았는데도 불구하고 열차 통과시 열차풍 평균 강도(1 ~ 5.5m/sec)가 무궁화호 절편형에 비하여 약 3m/sec가 감소된 열차풍을 보여주고 있다. 열차 통과시 절편형 보다 두께가 얇은 유동 경계층의 형성으로 강도가 높은 열차풍이 승강장을 많이 침입하지 못하는 것을 볼 수 있었다.

플랫폼 구조가 열차풍에 미치는 영향을 알아보기 위하여는 플랫폼 하단에서 발생하는 열차풍의 구조를 먼저 파악을 하여야 한다. 열차의 주행저항 중 열차 하부에서의 주행 저항이 상당한 부

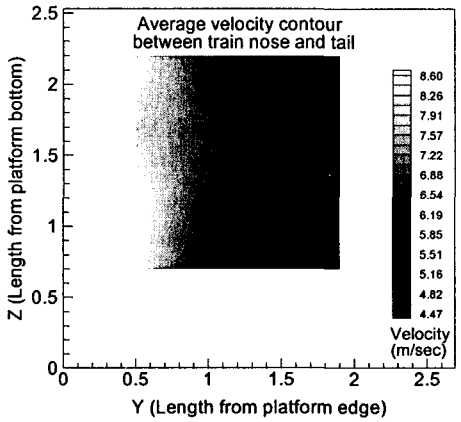

Fig. 6(a) Average velocity contour between train nose and tail (Mugungwha train)

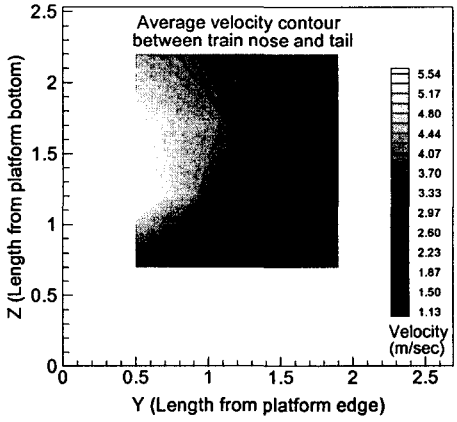

Fig. 7(a) Average velocity contour between train nose and tail (Saemaul train)

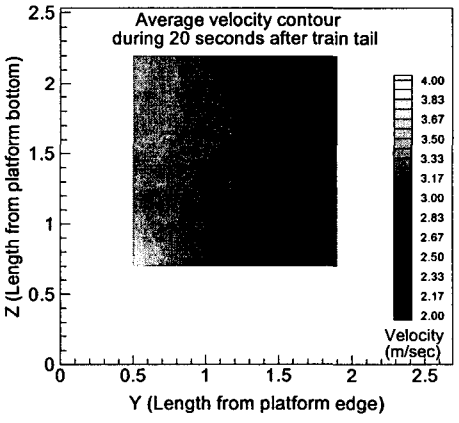

Fig. 6(b) Average velocity contour during 20 seconds after train tail (Mugungwha train)

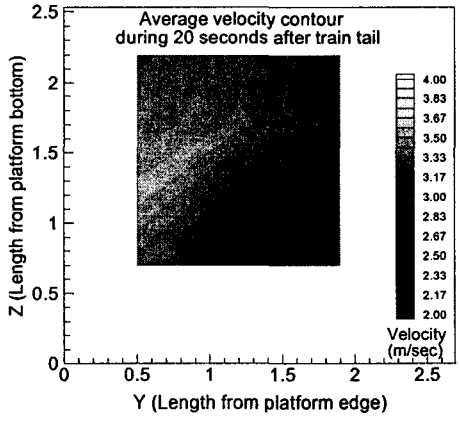

Fig. 7(b) Average velocity contour during 20 seconds after train tail (Saemaul train)

분을 차지하고 있으므로, 그곳에서의 열차풍 형태가 매우 복잡하리라고 판단되며, 차후에는 실험과 수치해석을 이용하여 이의 구조를 알아보아야 한다.

3.2 고속선 선로변 열차풍

상봉터널 오송기지앞 방향에서의 고속선 선로의 열차풍 계측 결과를 분석하기 위해 KTX 20량 1편성에 대한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

기존선 의왕역에서는 12개의 열선유속계를 이용하여 열차풍을 계측한 반면 고속선에서는 단 2개의 열선 유속계를 이용할 수 있었다. 그러나 의왕역의 계측 포인트와 동일한 위치 두곳(열선의 위치 : 3-3, 3-4)을 선정하여 각 열선에 대한 index를 붙여 결과 분석을 시도하였다. 이 그림에서 열선의 위치 3-3과 3-4는 의왕역에서의 계측 포인트 3-3과 3-4와 동일한 지점이다.

Fig. 8은 열선의 위치 3-3과 3-4에서 계측된 열차풍을 나타낸 것이다. 새마을호의 동일한 위치에서의 열차풍(Fig. 3)과 패턴이 비슷하게 보인다. 즉 경계층 유동이 충분히 성장이 되지 않아 고속전철이 통과하고 있는 동안에는 소규모의 열차풍만 감지할 수 있었고, 고속전철이 통과한 후에 강한 열차풍을 감지할 수 있었다. 이 위치에서 계측된 열차풍의 강도는 최고 13m/sec로 이는 새마을호(124km/h)의 경우(4.5m/sec)에 비하여 약 세

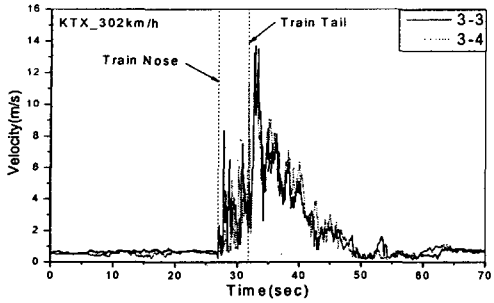

Fig. 8 Strength of slipstream for KTX train

배가 강한 것이다. KTX의 공력계수가 0.12-0.3 정도이고, 새마을호의 경우는 0.3 이상으로 추정되므로 공력계수보다 주행속도가 열차풍에 더욱 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다.

KTX의 후류도 강한 강도가 유지가 되고 있었으며 계측된 위치에서 3 ~ 8 m/sec의 풍속을 10여초 정도 유지하고 있었다.

4. 결 론

(1) 기존선 열차풍 현장계측시험

열차풍 계측결과 승강장내에서 가장 강한 열차풍을 일으킨 열차는 무궁화호 절편형이었으며, 새마을호의 경우는 절편형에 비하여 평균 40 - 60% 정도 열차풍 강도가 줄어들었다.

(2) 고속선(KTX) 선로변 열차풍 현장계측시험

KTX에 의하여 형성되는 열차풍은 기존의 열차에 의하여 형성되는 열차풍의 강도보다 강하다. 300km/h의 속도로 주행하고 있는 KTX로부터 2.9m 떨어진 곳에서 최고 13m/sec의 속도가 감지되었다. 선로변 작업자나 선로구축물에는 매우 주의하여야 할 강도이다.

KTX의 후미부가 통과하는 시점에서 가장 강한 열차풍이 발생을 하였으며, 열차가 통과한 이후에도 강도가 높은 열차풍이 약 20초동안 유지가 되었다.

(3) 본 연구에서는 현장실험을 통하여 약 25회의 열차 통과 시 각 열차풍 데이터를 저장하여 비교분석한 결과 본 논문에서 제시한 결과가 전형적(typical)인 결과로 판단되었다. 이 값은 엄밀히 따지면 앙상블 평균(ensemble average)은 아니다. 그러나 현장 실험을 통하여 앙상블 평균을 구한다는 것은 현실적으로 매우 어려운 작업이다. 주요 문헌에서도 열차풍 단면적에 대한 실험을 수행하여 발표한 연구가 드물기 때문에 본 연구는 열차풍 연구에서 중요한 참고 자료가 될 수 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 기본연구사업 중 '선로구축물 시스템 핵심기술 연구'과제의 지원에 의하여 수행된 결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Liao, S., Mosier, P., Kennedy, W. and Andrus, D., 1999, "The Aerodynamic Effects of High-Speed Trains on People and Property at Stations in the Northeast Corridor," DOT/FRA/ORD-99/12.

(2) Holmes, S. and Schroeder, M., 2002, "Aerodynamic Effects of High-Speed Passenger Trains on Other Trains," DOT/FRA/ORD-01/12.

(3) Sanz-Andres, A. and Santiago-Prowald, J., 2002, "Train-induced Pressure on Pedestrians," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 90, pp. 1007~1015.

(4) Sanz-Andres, A., Santiago-Prowald, J., Baker, C. and Quinn, A., 2003, "Vehicle-induced Loads on Traffic Sign Panels," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 91, pp. 925~942.

(5) Baker, C.J. and Humphreys, N.D., 1996, "Assessment of the Adequacy Various Wind Tunnel Techniques to Obtain Aerodynamic Data for Ground Vehicles in Cross Winds," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 60, pp. 49~68.

(6) Kim, Dong-Hyeon, Kwon, Hyeok-Bin, Kim, Do-Hoon, Kim, Moon-Hun and Song, Moon-Shuk, 2004, "An Experimental Study on the Aerodynamic Effects Generated by a Train Passing Rear by Platform," *Transaction of the KSME(B)*, Vol. 28, No. 6, pp. 734~739.

(7) UIC Code 779-1, 1996, "Effect of the Slipstream of Passing Trains on Structures Adjacent to the Track."