

강풍에 의한 열차탈선전복 방지 기술개발 현황



권혁빈
한국철도기술연구원



남성원
한국철도기술연구원



유원희
한국철도기술연구원

1. 서론

철도교량의 고가화, 세계적인 기상이변 등으로 철도차량이 강풍에 노출되는 빈도가 커지고, 고속철도의 개통, 기존철도의 고속화 및 철도차량의 경량화로 인하여 강풍 시 열차의 전복 및 탈선위험이 증가하고 있다. 강풍에 의한 차량전복은 주로 교량이나 높은 성토구간에서 고속주행 시 발생할 위험이 크기 때문에 대형 인명, 재산 피해로 연결될 가능성이 높으며, 국내 자연환경 및 철도시스템 특성에 검증되지 않은 현재의 운전규제는 안전확보에 실패하거나 과도한 영업손실을 초래할 우려가 있다. 따라서, 철도교통은 해마다 빈번히 발생하는 태풍과 해안선, 고가교량의 자연풍 등 강풍에 대한 운행안전을 확보하여 국가 기간 교통망으로서의 철도교통에 대한 국민들의 높은 기대치를 충족시켜야할 필요가 있다.

그동안 국내에서는 철도차량에 대한 강풍 시 전복위험

에 대한 위험평가기술의 개발이 이루어진 바가 없었으나, 2005년 10월 철도종합안전기술개발사업의 일환으로 시작된 ‘철도차량 탈선 안전성능 평가 및 사고방지 기술개발’ 과제에서 강풍에 의한 열차의 탈선전복위험에 대한 연구가 시작되었다.

2 강풍에 의한 철도사고 사례

2.1 일본의 강풍 사고 현황

일본에서는 1889년에서 1994년 106년의 기간 동안 강풍에 의한 철도차량의 전복 및 탈선 사고가 총 27건 발생한 것으로 나타났으며[1], 이는 평균 4년에 1회 정도의 빈도에 해당된다. 이 중 사상사고는 12건에 총사상자 422명이고 이 중 사망자 39명으로 나타났다. 태풍에 의한 사고보다 돌풍에 의한 사고가 더 빈발한 것으로 나타났으며,

(표-1) 일본 철도의 강풍에 의한 재해 (1889-1994)

발생 연월일	선명	역간	키로정	개요	편성 양수	탈선차	풍속 (m/s)	원인	사망자	부상자
1889. 9.11	東海道	沼津·原		新橋발 하행열차가 沼津역 발차 후 약리 지점에서 객차 압급차 6량 전복		객차 6		폭우	1	7
1899. 10.7	日鐵 본선 ^{a)}	矢板·野崎	87리 80	新橋川교량 주행중 1번째 차량 이하 전락(混227L)	18	객차 8 화차 10	28 추정	태풍	20 86*	45
1909. 4.7	東北	野内·浦町 ^{b)}	451 리40	기관차 2량부터 바람을 인해 객차 7량 전복 1량 탈선		객차 8	10.5	돌풍	1	32
1934. 9.21	東海道	草津·石山		속도 10km/h운전으로 新橋川교량 통과 중 3번째 차량 이하 9량이 탈선전복 (객차7L)	11	객차 9	50	室戸 태풍	11	216
1986. 12.25	山陰	銚子·餘部	188k 500m	회송열차가 余部교량을 약 55km/h로 통과중 기관차를 제외한 객차 7량 탈선 다리 아래로 낙하 (臨回窓9535L)	7	객차 7		돌풍	6	6

* 회사명, 선명, 역명, 역간은 사고당시의 것. 아래에 현재의 명칭을 나타낸다.

*: 부내 자료

a)일본철도본선=東北本선 b)五能선 c)弘南철도黑石선 d)大阪전기궤도=近畿 일본철도奈良선

e)磐田 f)愛知(御津) g) 선로변경에 따라 현존하지 않음 h)月岡

사고 당시의 측정 또는 추정풍속은 10m/s에서 55m/s로 다양하게 나타났다. 또한, 사고의 상당수가 교량이나 독에서 발생하였기 때문에 사상자가 발생한 사고의 비율이 44%에 달했다.

2.2 유럽의 강풍 사고 현황

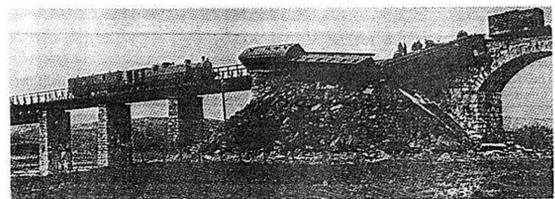
유럽에서 발생한 강풍에 의한 열차 탈선, 전복사고는 1903년 영국의 레벤 고가(Leven Viaduct)에서 발생한 여객열차 전복사고이다. 사고가 일어난 선로는 표준궤로서 당시 수마일 떨어진 지점에서 120mph(53m/s) 풍속이 측정된 강한 폭풍에 의해 고가교를 통과하는 여객열차를 전복시켰다. 사고 당시 30m/s의 풍속에서 경보를 알리게 되어있는 컵 풍속계가 설치되어 있었다.

1925년에는 아일랜드의 헵피에서 사고가 발생하였다. 사고가 발생한 지점은 개활지일 뿐만 아니라 고가와 아치교 사이에 위치한 좁은 독에서 발생하였으며, 현재의 풍공학자들이 보기에는 사고의 개연성이 매우 높은 곳이다. 독의 필요성은 알려지지 않았으나, 이 독으로 인하여 고가와

아치교 하부를 흐르는 공기까지 독의 표면을 따라 선로로 상승하게 하여 바람을 가속시키는 역할을 하고 있었다. 1990년 2월 27일 스위스에서 6량의 화물 차량이 모두 전복되는 사고가 발생하였다. 이 차량은 Oberalpsee 근처의 궤간이 1m인 헵개의 8m 제방에서 정지한 상태였으며, 약 14t에서 21.5t의 중량이었다. 이때의 풍속은 약 56m/s로 상당히 강한 바람이었다. 1997년 벨기에 Oostkerke에서는 EMU의 2량에 전복되는 사고가 발생하였다. 이때, 차량은 116Km/h의 속도로 큰 곡률반경을 가지는 선로의 제방을 주행하고 있었다. 2003년 이탈리아 Sarno 근처에서는 17량의 차량 중 10량이 전복하는 사고가 발생하였다. 이중 6량은 공차 상태였다.

(표-2) 유럽의 강풍에 의한 열차 전복, 탈선 사고

연도	국가	장소	궤도	풍속	차량피해	특이사항
1903	영국	Morecombe Bay Leven Viaduct	표준궤	53.6m/s	객차 전복	30m/s돌풍경보장치
1925	아일랜드	Owencarrow Viaduct	헵개		일부 차량 전복	고가교와 아치교 사이의 독의 지점에서 발생
1990. 2.27	스위스	Oberalpsee	헵개	56m/s	6량 모두 전복	8m 제방에서 정지한 상태
1997	벨기에	Oostkerke	미확인	미확인	2량 전복	곡선구간에서 116km/h로 주행시 켄트 부족 구간에서 발생
2003	이탈리아	sarno	미확인	미확인	17량중 10량 전복	10량 중 6량은 공차



(그림 1) Train blown over on Owencarrow Viaduct, Ireland, 1925

2.3 강풍에 의한 최근의 열차전복사례

강풍에 의한 철도사고 중 최근의 사례를 살펴보면 2005년 12월 25일에는 동경 서북방 290km 떨어진 야마카타현 쇼나이에서 아키타에서 니카타로 가던 6량 편성의 특급열차가 강풍으로 탈선 전복되어 5명이 사망하고 33명이 중경상을 입은 사고가 발생하였다. 사고 발생 지점인 JR 오에쓰선 모가미강 제 2교량은 해안에서 8km 지점에 해안선과 평행하게 놓인 간선철도 교량으로 평야지대에

위치하고 있어 동해에서 불어오는 강한 해풍에 직접 영향을 받게 되어 탈선의 위험이 높은 지역이다.

2006년 9월 17일 일본 규슈 미야자키 현에서는 최대 순간속 58m/s의 강풍을 동반한 태풍 산산에 의해 역 구내로 진입하던 5량의 특급열차가 탈선하여 전체 승객 30명 중 6명이 중상을 입었다. 2007년 2월 28일에는 중국 북서부 신장위구르 자치구 투르판에서 40m/s 이상의 황사폭풍에 의해 운행 중이던 5906호 야간열차의 19량 중 11량이 탈선하여 사망자 4명을 포함한 100여명의 사상자가 발생하였다. 반면, 지금까지 우리나라에서는 철도 개통 이후 강풍이 원인이 되어 발생한 탈선, 전복 사고는 보고된 바 없다. 그러나 세계적인 기상변화와 궤도와 차량 등 철도시스템의 변화에 대해 안전도를 평가하고 관리하여 현

재와 같은 수준의 안전도가 유지되도록 하여야 할 것이다.

3. 강풍에 의한 열차 탈선전복 연구 현황

3.1 일본

열차의 고속화, 차량의 경량화에 수반되어 전복한계풍속과 운전규제풍속과의 차(여유분)가 작아지고 있는 경향에 있고, 전복한계풍속의 평가의 정밀도, 여유분의 고려 방법 등 강풍시의 안전성에 대한 평가와 적절한 운전규제 방법이 과제로서 남아있다. 이러한 과제에 대하여 일본 철도종합기술연구소(RTRI)에서는 최근 운전한계풍속의 평가정밀도 향상, 경제적으로 효과적인 강풍대책의 구축, 강풍시의 열차의 주행안전성향상을 목적으로 하는 연구개발을 진행시켜왔다. 세부적인 연구 주제는 아래와 같다.

- 강풍에 의한 차량전복의 세부 모델
- 공기력의 평가(정상풍의 풍동시험)
- 공기력의 평가(실물대모형시험)
- 자연풍을 모사하여 실시한 풍동시험방법
- 강풍특성의 평가와 탄력적인 운전규제



〈그림 2〉 일본의 열차전복사례(2005년)



〈그림 3〉 일본의 열차전복사례(2006년)



〈그림 4〉 중국의 열차전복사례(2007년)

3.2 유럽의 강풍 안전기술

앞선 유럽의 사고사례를 살펴보면, 유럽 전역에서 사고의 건수가 그리 많지 않고, 그 중 상당수가 동역학적으로 불안정한 협궤열차에서 발생했다는 것을 알 수 있다. 특히 독일과 같이 철도운송의 규모가 큰 국가에서는 아직까진 한 번도 강풍에 의한 탈선사고가 발생하지 않았다. 그러나, 이들 나라에서도 강한 측풍을 열차운행의 주요 위협요소로서 인식하고 있고, 특히 최근 EC가 추진하고 있는 유럽 내 고속철도의 상호운행을 위해 개발되고 있는 기술규격인 TSI(Technical Specifications for Interoperability)에서도 측풍에 대한 안전평가 및 대책기술을 주요한 사항으로 취급하고 있으며, 이에 대한 연구를 상호 활발히 진행 중이다. 이는 철도기술의 발전에 따라 열차가 고속화,

경량화되면서 측풍에 대한 안전도가 점점 낮아지고 있으며, 현재의 강풍에 대한 위험도가 허용가능한 적정 수준인지를 주요한 환경의 변화가 있을 때마다 평가하여야 하기 때문이다.

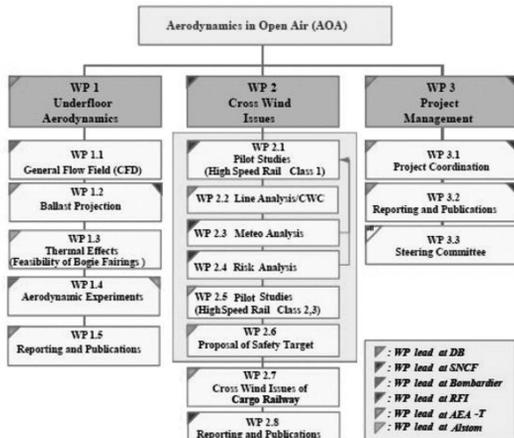
독일과 프랑스를 비롯한 유럽에서 고속철도를 운영하고 있거나 건설 중인 국가와 산업체가 공동으로 참여하고 있는 DeuFraKo Crosswind Project와 그 후속 연구인 DeuFrako Project - AOA의 주요 내용은 다음과 같다.

□ DeuFraKo Crosswind Project

- 독일과 프랑스의 열차상호운행을 위해 양국이 주도하는 DeuFraKo cooperation 의 연구테마 중 하나
- 고속열차의 운행 시 안전운행에 치명적인 영향을 줄 수 있는 측풍의 위험도를 평가하기 위한 방법론 및 규정의 개발
- 차량과 시설물에 대한 공통 방법론이 개발완료되었으며, TSI와 CEN 등의 규격에 반영 예정

□ DeuFraKo Project - Aerodynamics in Open Air(AOA)

- DeuFraKo Crosswind Project의 후속과제로서 기존의 측풍안전과 관련해서는 일부 대상에 대해 시범 적용을 하는 것을 목적으로 하고 있으며, 또다른 주제로서 차량하부 공기역학에 대한 두 가지 테마가 추가되었음



(그림 5) DeuFraKo Project - AOA의 주요 연구테마 및 참여기관

- 4개 주관기관과 5개 협력기관이 향후 총 470만 유로 투자 예정

위 그림에도 나타나 있듯이 2008년 10월에 종료된 AOA연구는 크게 자갈비산과 관련한 차량하부 공기역학과 측풍에 대한 안전평가 연구로 이루어져 있으며 13개의 세부 연구주제에 대하여 DB, SNCF, RFI 등 독일, 프랑스, 이탈리아의 철도운영사와 Bombardier, AEA-T, Alstom 등 세계 주요 철도차량 회사 및 컨설팅 회사가 참여하였다.

4. 국내의 강풍에 의한 열차탈선전복 관련 규정

4.1 고속선

우리나라의 경우에는 2004년 4월 고속철도의 개통과 더불어 선진적인 강풍안전대책이 도입되어 고속선 주변 10개 지점에서 측정된 기상정보를 통해 운전규제를 실시하는 METEO 설비를 운영하고 있다. 철도공사가 2010년 5월 31일 제정된 고속철도안전취급세칙에는 풍속 45m/s 이상에서 운행보류 또는 정지하도록 되어 있으며, 30m/s에서 45m/s까지는 단계적으로 170km/h에서 90km/h의 감속운행을 규정하고 있다. 고속선에서의 운전규제 기준 풍속은 지역별 조정계수가 적용된 CTC 현시 정보를 기준으로 하고 있는데, 평균 1.5의 조정계수를 적용하고 있기 때문에 실질적인 규제 풍속은 20m/s에서 30m/s로 볼 수 있다.

4.2 기존선

현재 기존선에서의 강풍과 관련된 운전규정은 2005년 1월 1일 제정되어 2010년 5월 31일 개정된 운전취급세칙에서 다루고 있다. 풍속이 20m/s를 초과하게 되면 역장이 관제사에게 사실을 보고하도록 되어 있으나, 실제로 규제가 시작되는 풍속은 25m/s로서 이 때에는 역장의 판단에 따라 열차의 출발 혹은 통과를 중지하도록 하고 있다.

그리고, 풍속이 30m/s 이상이 되었을 때는 관제사가 열차운전의 일시중지를 지시하도록 되어 있다. 그리고, 기관사는 폭풍우를 만났을 경우 상황에 따라 주의운전 혹은 대피하도록 하고 있다.

5. 강풍에 의한 열차탈선전복 방지 관련 연구현황

5.1 강풍에 대한 열차운행 안전 입증 방법론 연구

선로 변 자연풍의 정확한 예측은 측풍에 의한 열차 운행의 안전을 입증하기 위한 중요한 입력요소가 된다. 이를 이해하기 위하여 먼저, 측풍에 대한 열차운행 안전 입증의 절차를 그림 6에 나타내었다. 독일 DB와 프랑스 SNCF에서 개발된 이 방법론은 4개의 단계로 구성되어 있다.

□ Step 1: 차량별 허용가능 측풍 풍속의 결정

다물체 시뮬레이션(Multi-body simulation)을 이용하여 휠과 레일의 시간에 따른 접촉력을 주어진 돌풍시나리오에 대하여 계산한다. 돌풍에서 측정된 공력계수, 대차의 주요 특성, 선로 형상의 불균일 및 상부구조의 거동이 고려대상이 된다. 이러한 시뮬레이션의 결과들은 소위 말하는 특성바람곡선 (Characteristic Wind Curve, CWC)이다. 특성바람곡선은 특정한 차량에 대하여 휠-레일 접촉력이 특정 한계 이하로 떨어지는 허용 가능한 풍속이 차량 속도와 보상되지 않은 횡가속도의 함수로서 어떻게 변하는가를 기술하여 준다.

접촉력의 한계값들은 보수적인 방법으로 선택되는데, 이것은 철도공학 내에서는 보편적이다. 이러한 값들을 심각하게 초과하더라도 탈선이 즉각 일어나지는 않는다. 고속철도에서는 통계학 기반의 증명 혹은 컴퓨터를 이용한 방법들조차도 횡풍의 속도가 허용 가능한 값 이상에 있을 때에는 양적인 탈선확률의 산정에 사용될 수 없다.

□ Step 2: 선로 별 확률적 위험 평가

강풍 발생의 양적인 표현은 확률적 방법에 기반하여야 한다. 철도운영에 대한 다른 위험원들과의 비교를 가능하게 하기위하여, 측풍에 의한 탈선의 결과로서 발생하는 개인적 혹은 사회적 위험 위험들에 대한 양적인 평가가 바람직하다. 그러나 바람이 유발하는 탈선의 확률에 대한 지식이 부족하기 때문에 위험은 차량의 허용 가능한 풍속을 초과하는 빈도에 비례한다고 가정되어진다. 모든 안전 대책이 이러한 빈도에 직접적으로 영향을 미치지 때문에 이러한 단순화는 실질적인 적용에 유용하다.

한 차량의 CWC의 초과 빈도는 균질한 선로의 구간(전형적 길이: 100m)에 대해 다음과 같이 정량적으로 결정된다:

- CWC에 대한 국지적 허용 풍속의 결정
- 횡풍 풍속의 함수로서 강풍의 발생 확률의 결정. 이 단계에서 기상대로부터 얻거나 선로의 대표적인 측정 장소로부터 풍향을 포함한 통계적 바람 데이터를 생성한다. 선로 방향, 선로 상태(둔덕, 교량, 사면), 주변 지역의 표면 조도 및 선로에 인접한 구조물의 존재여부(특히, 방음벽과 건물)이 고려된다.
- 선두차에서 허용 가능한 풍속의 초과 빈도($f_{CWC, i}$) 추정. 열차운영과 강풍의 발생이 연관되어 있지 않다고 가정하면, 이러한 빈도는 구간 I에서 식 (1)을 이용하여 계산될 수 있다:

$$f_{CWC, i} = \frac{P_{train, i} \cdot P_{CWC, i}}{t_{gust}} \quad (1)$$

$$F_{CWC} = \sum_i f_{CWC, i} \quad (2)$$

$P_{train, i}$ 는 열차가 존재할 확률, $P_{CWC, i}$ 는 주어진 순간에 대하여 허용가능한 풍속을 초과하는 확률, t_{gust} 는 가정된 돌풍의 평균 지속시간을 의미한다. 식 (2)에 따라서 모든 구간에 대한 합을 취하면 주어진 열차·km에서의 전체 고속선 구간에 대한 F_{CWC} 가 계산된다.

□ Step 3: 위험 평가

측풍에 대한 철도의 위험 수준의 결정은 다음의 규칙을 따라야 한다: 한번 획득된 안전 수준은 노선의 건설, 운영의 변화의 결과로 인하여 낮아져서는 안 된다. 이러한 비교는 식 (2)의 F_{CWC} 에 근거하며, 두 메인 역들 사이를 운행하는 경량 선두차량의 백만 열차-킬로미터 당 수치로 계산된다. 개별 구간에 대해 국지적인 $f_{CWC,i}$ 값으로 안전목표를 정하지는 않는다.

□ Step 4: 안전 대책 수립

계획된 운영에 대해 계산된 초과 빈도 F_{CWC} 가 목표값을 초과할 경우, 대책이 마련되어 F_{CWC} 가 목표값보다 작도록 낮아져야 한다. 대책의 주된 유형은 아래와 같다:

- 열차의 감속(항구적 혹은 강풍 시 동안만)
- 방풍 대책(바람을 막을 벽이나 울타리)
- 차량의 변경(무게중심 낮추기, 공력성능 향상, 하중 추가)

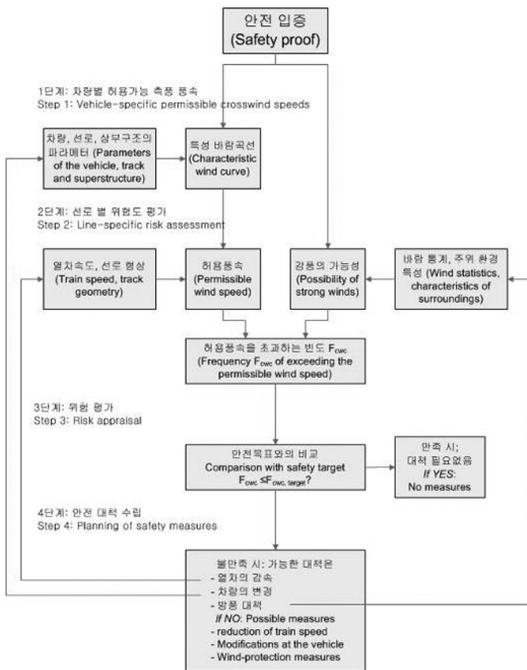
- 선로 형상의 향상

일반적으로 요구되는 안전 수준을 가장 경제적으로 달성할 수 있는 최적의 대책 조합이 사용된다.

5.2 강풍 취약개소 관리방안 연구

앞 절에서 도출된 강풍에 대한 열차운행 안전 입증 방법론은 해당 노선에 대한 위험도를 정량적으로 평가하여 열차운행의 안전을 확보하는 좋은 방안이나, 실제 운행 시에 발생할 수 있는 다양한 변수, 즉 국지적인 기상의 변화에 대한 능동적인 대처가 힘들다는 문제점이 있다. 따라서, 위험도 평가 또는 강풍에 대한 위험의 관리필요성이 명백한 고가교 등 위험구역에 대해서는 풍속계를 우선적으로 설치하여 집중적인 위험관리를 실시하는 것이 필요하다. 예를 들어 공항철도의 경우 영종대교 구간에 대해서는 기상통보 및 강풍표시기 제어시스템(WCCC)을 설치하여 사령실 뿐만 아니라 운전자가 육안으로 강풍경보를 식별하여 운전정지를 실시할 수 있도록 하고 있으며, 운전규제 풍속 기준도 25m/s 이상의 풍속 시에 열차 운전을 정지하도록 규정하고 있다(이외 구간은 30km/h).

강풍 취약개소 선정을 위해 먼저 기존 운행 중인 선로의 경우에는 기후조건 중대한 변화의 조짐이 보이지 않는다면 측풍에 대한 안전성을 확보하고 있다고 가정할 수 있을 것이다. 그러나 철도의 운행환경이 변화함에 따라 측풍에 대한 안전확보가 더 어려워질 수 있으므로 교량의 고가화, 열차 속도 및 중량의 변화, 기후변화 등 열차의 운행 조건에 중대한 변화가 생기는 여부를 지속적으로 모니터링하는 것이 필요한데, 특히 철도노선의 신설, 새로운 철도차량의 개발 시에는 이러한 변화의 모니터링이 필수적이다. 취약개소로 선정된 지점에는 풍속계를 설치하고 풍속을 실시간으로 지속적으로 모니터링하여 운행 중 규제 풍속에 도달하는지 여부를 파악하여야 한다. 풍속의 모니터링은 중앙에서 집중적으로 이루어지며, 규제풍속에 도달 시 서행 및 운지 등 운전규제를 즉각 실시 가능해야 하며, 현장에도 신호기를 설치하여 중앙지령에 의한 조치가



(그림 6) 측풍에 대한 열차운행 안전 입증 절차

실패할 경우에 대비해야 한다.

6. 결론

우리나라의 기후는 점차 아열대 기후로 변하고 있다. 이에 따라 태풍 및 돌풍과 같은 강풍의 출현이 점차 많아지고 있으며, 그 세기도 강해지고 있다. 이 시점에서 우리는 강풍에 의한 열차의 탈선전복 및 이로 인한 대형사고가 일어나지 않도록 만반의 준비를 갖추어야 한다. 강풍의 모니터링 및 강풍과 관련된 서양/정지 기준, 그리고 강풍 취약개소 관리방안 등이 철저히 구축되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 藤井 俊井, 強風災害防止に關する研究開發の現況と今後の展望, 鐵道總研報告, Vol.19, No. 10, 2005, 10
2. Schulte-Werning B., Gregoire R, Malfatti A and Matschke G., 2002, TRANSAERO – A European Initiative on Transient Aerodynamics for Railway System Optimisation, Springer.
3. Gautier P. E., Tielkes T., Sourget F., Allain E, Grab M., and Heine C., 2003, "Strong wind risks in railways : the DEUFRAKO crosswind program," The World Congress on Railway Research 2003, pp.463-475.
4. Fujii M., Fujii T., Muraishi H., 1995, "History of railway operational regulation under strong wind condition," RTRI Report, Vol.9, No.3, pp.43-48(In Japanese).
5. Kobayashi N. and Shimamura M., 2003, "Study of a Strong Wind Warning System," JR EAST Technical Review, No.2, pp.61-65.
6. Imai T., Fujii T., Tanemoto K, Shimamura T., Maeda T., Ishida H., and Hibino Y., 2002, "New train regulation method based on wind direction and velocity of natural wind against strong winds," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 90, pp.1601-1610.