

분기기 통과속도 제한규정에 대한 타당성 검토

Verification of the Reasonableness for the speed-limit regulation on the Turnout

정우진* 나성훈** 함영삼*** 문경호****
W. J. Chung S. H. Na Y. S. Ham K. H. Moon

ABSTRACT

The turnout system is typical railway facility to be in the way of conventional railway line's speed-up. The KNR(Korean National Railroad) has a speed limit regulation(130km/h) for the passing the turnout to guarantee a safety.

This research had been performed to confirm the propriety of this regulation by using experimental and analytical way before it was carried out. The reasonableness of the speed-limit regulation was judged base on the several experiments. It was proved that the regulation was not useless as it had been regarded and very important guide at least up to now.

1. 서론

철도청은 KTX(Korea train express)의 개통으로 촉발된 철도 현대화를 기존선의 고속화를 통해 완성시킨다는 취지 하에 2010년까지 기존선에 탈당차량 등을 투입하여 최고 주행속도를 200km/h까지 상향시킬 계획이다. 이런 기존선 고속화에 대한 노력은 승객들의 만족도 향상과 물류 운송량을 증가시켜 타 운송수단과의 경쟁력 제고에 큰 기여를 할 것으로 예상된다.

기존선의 속도향상을 저해하는 요인은 매우 다양하지만 분기기 통과속도 제한규정은 그중 가장 대표적 사례로 손꼽히고 있다. 현재 기존선 분기기의 직선측(through rail side) 최고 통과속도는 일반 선로의 차량 최고주행속도인 140km/h에 비하여 10km/h나 낮은 130km/h로 제한되어 있다. 이러한 제한 규정은 철도 선진국으로 분류되는 독일이나 프랑스에서는 찾아보기 힘든 것으로서 다만 JR(Japan Railway)이 우리나라와 같이 기존선 부설 분기기의 직선측 통과속도를 130km/h로 제한하고 있을 뿐이다. 그러나 JR은 분기기 통과 안정성을 우려하여 제한규정을 둔 것이 아니라 협궤사용에 따른 주행 안정성 확보 차원에서 모든 선로구간의 최고속도를 130km/h로 설정한 것이므로 우리와 같은 분기기 제한규정은 실제적으로 존재하지 않는다고 볼 수 있다.

이런 국외의 사정에 비추어 국내에서도 현재 분기기 직선측 통과속도 규정을 없애려는 논의가 최근까지 있었으나 각 나라마다 선로환경이 다르다는 점을 고려하지 않고 제한속도를 폐지하면 자칫 대형사고가 발생할 수 있기에 실행에 옮기지는 못하고 있다. 그러나 KTX의 운영효율을 높

* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 선임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 철도안전연구시험센터 선임연구원, 정회원
*** 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 책임연구원, 정회원
**** 한국철도기술연구원 교통핵심기술사업단 주임연구원, 정회원

이기 위해서는 고속전철과 기존선이 함께 운행되는 교행구간에서의 기존선 분기기 통과속도 향상이 필수적이어서 이에 대한 조속한 결론 도출이 시급한 상태이다.

본 연구에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위해 분기기 성능평가를 보다 객관적으로 할 수 있는 시험방법을 제안하였고 이를 이용하여 기존선에 부설된 분기기가 현재의 통과속도 제한규정 내에서 얼마나 안전한지를 척도로 표시할 수 있게 조치하였다.

2. 분기기 통과속도 제한요인 분석

분기기의 제한속도는 지금까지 일반 선로에 비해 낮게 설정되어있었다. 이런 속도제한 규정은 분기기 특유의 구조적 약점에 의하여 발생된다. 분기기의 구조적 약점을 일반레도와 비교하면 표 1과 같다.

표 1. 분기기의 구조적 약점

	구조적 약점
통과선측	<ul style="list-style-type: none"> ○ 텅레일의 단면이 일반레일에 작다. ○ 텅레일은 체결장치로 억제할 수 없다. ○ 텅레일을 전환하기 위한 장치가 별도로 필요하다. ○ 텅레일의 환승충격이 있다. ○ 분기기내에 많은 이음새가 있다. ○ 분기기 전단부로부터 리드부에 걸쳐 슬랙이 존재하며 이것이 레간블림으로 작용하여 차량 불안정을 야기 시킨다. ○ 가드레일 및 텅레일을 통과하는 차량에 배면횡압이 충격력으로 작용한다.
분기선측	<ul style="list-style-type: none"> ○ 캔트가 없다. ○ 리드곡선과 접속되는 곡선간의 직선길이가 짧다.

3. 기존선 부설 분기기 성능평가 실험

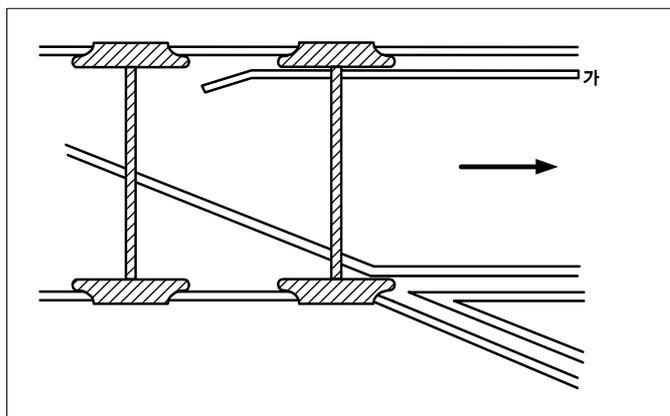


그림 1. 크로싱부 가드레일에 의한 차량 유도

분기기 성능평가 실험은 경부선 화명역 구내 본선에 설치된 60kg(H형 가드)탄성형 분기기를 대상으로 실시하였다. 그림 1과 같이 분기기 성능평가 실험을 실시하기 위해 가드레일 및 텅레일 탄성부에 각각 스트레인게이지, 변위 센서를 설치하였다. Data Acquisition System, Amp 그리고 filter를 사용하여 센서에서 발생하는 신호를 분석하였다. 차량이 가드레일에 의해 유도되는 정도의 척도인 유도량을 측정하기 위하여 고속 카메라를 설치하고 차량이 가드레일에 닿는 순간을 촬영하였다.

3.1 성능평가 항목 및 측정방법

(가) 가드에 작용하는 차륜 배면횡압

분기기는 비대칭형의 복잡한 형상을 가진 여러조각의 레일들로 구성되어 있으므로 일반 레일에서와 같이 간단히 차량의 주행 안정성을 측정할 수 없다. 일본 철도총연(RTRD)은 이러한 난점을 해결하고자 가드레일과 차륜이 충돌하는 길이, 즉 유도량을 측정하여 이를 안전도로 환산하는 방법을 제시한 바 있다.

본 연구에서도 상기한 방법을 통해 차량이 분기기를 통과할 때의 안정성을 측정하고자 하였다. 그러나 RTRI에서와 같이 모든 실험환경을 통제할 수 있는 시험선에서 실험이 이루어진 것이 아니라 일반 선로상에서 실험이 이루어졌으므로 차종, 주행속도 그리고 유도량별로 배면횡압을 일목요연하게 구할 수는 없었다. 대신 실험을 통해 구하기 힘든 각 실험인자들간의

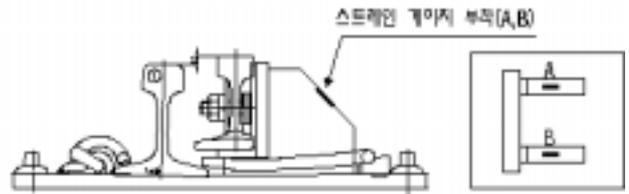


그림 2. 가드레일 센서설치 위치

조합결과들은 본 연구를 통해 개발된 전문 해석 프로그램으로 성공적으로 구할 수 있었다.

가드레일에 작용하는 배면횡압을 측정하기 위해 그림 2와 같이 상판에 설치된 가드레일 지지대에 스트레인게이지를 부착하여 열차통과시 응력을 측정하였다. 실제 측정에 앞서 사전검정을 하고 그 결과를 기록하였다. 사전검정 방법은 주레일과 가드레일간 사이에 횡압검정기를 넣고 3ton까지 재하하여 가드레일 각 위치에서 발생하는 스트레인 값을 얻는 방식으로 진행되었다.



그림 3. 가드레일 검정기 재하 모습

(나) 텅레일 탄성부 발생응력

탄성포인트는 텅레일을 쉽게 휘어지게 하는 것을 목적으로 텅레일 저부목을 줄인 삭감된 탄성부를 두고 있다. 차량이 주행하는 동안 텅레일은 휘어지지 않는 상태로 있어야 하지만, 이때 응력집중이 발생되기 쉬우므로 차량통과시 레일응력을 확인할 필요성이 있다.

그림 4와 같이 텅레일 탄성부저부 양쪽 측면에 스트레인게이지를 부착하여 레일의 응력을 측정하였다.

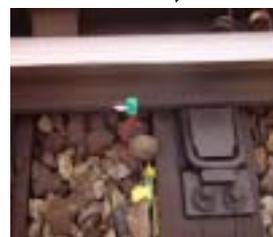
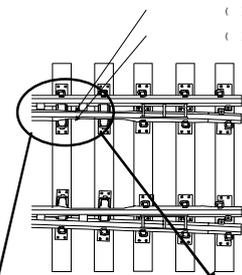


그림 4. 텅레일 탄성부 레일 측정 위치

(다) 유도량 측정

유도량을 측정하기 위해 그림 6과 같이 사진에 가드레일의 측면에 백색 페인트로 도포하였다. 또, 정확한 유도량의 발생위치를 측정하기 위해 주레일 측면에 30 cm 간격으로 눈금을 표시하였다. 차량이 가드레일과 접촉

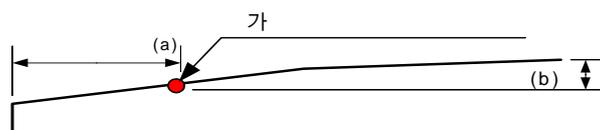


그림 5. 유도량 산출 방법

후 하측 부위에 흔적이 남으므로 이때 그 위치를 고속용 카메라로 촬영하면 유도량을 측정할 수 있다.

그림 7은 열차가 통과할 때, 차륜 배면이 가드레일에 접촉하면서 백색 페인트로 도포한 표면이 벗겨진 흔적이 남은 것을 촬영한 것이다.

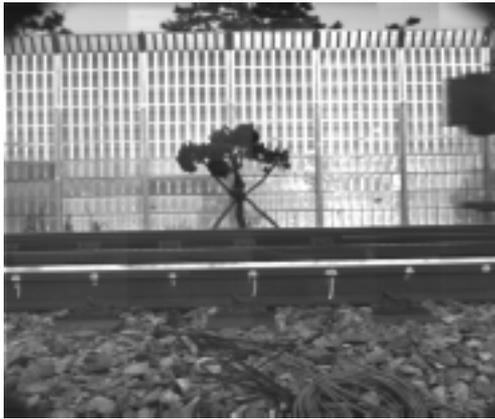


그림 6. 차륜접촉 전의 가드레일

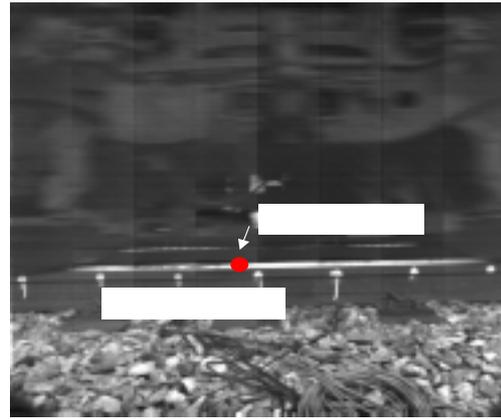


그림 7. 차륜접촉 후의 가드레일

3.2 성능평가 기준

분기기 성능평가 기준 및 그 이유에 대한 설명은 표 2에 정리된 것과 같다.

표 2. 분기기 성능평가 기준

평가항목	허용치	설 정 이 유
팅레일 탄성부 발생용력	1,400 [kg/cm ²]	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기본레일에 간접적으로 지지되어 있어 절손될 경우 중대한 사고의 원인이 됨 ○ 텅레일 탄성부의 양단저부 측면은 용력집중이 발생하기 쉬운 취약부위 ○ 일본의 경우 JIS E 1303(철도용 분기기류) 부속서 2에 명시되어 있는 인장강도의 하한치 8,000kgf/cm²에서 줄어든 형상을 고려하여 1,400kg/cm²을 피로한도의 목표치로 설정
가드레일 배면횡압	12 [ton]	<ul style="list-style-type: none"> ○ 차륜내면과 가드레일과의 접촉각 관계를 고려하고 차륜과 레일의 마찰계수를 0.3으로 설정하면 탈선허용한도는 Nadal의 식에 의해 약 2가 됨 ○ 국회의 실험결과 일반적으로 가드레일에 작용되는 배면횡압 최대치는 130km/h 기준 12 ton이었음 ○ 일본의 경우도 고속우등열차에 사용된 최대 정지용중(6.5 ton)를 기준으로 최대 횡압을 산출하여 여분을 포함하여 12 ton을 허용한도로 설정

4. 실험결과 분석

4.1 차량편성별 배면횡압 검토

차량이 분기기를 통과할 때 발생하는 배면횡압이 가장 크게 발생하는 지점을 찾고자 그림 8과 같이 용력센서를 부착시키고 차량편성이 지나갈 때마다 그 크기를 측정하였다. 용력은 가드레일 중앙부에 집중되는 경향을 보였는데 이것은 가드레일의 중앙부가 플랜지레이가 가장 작은 지점이고 이를 전후로 점차 선형적으로 커지는 기하학적 모습을 가지기 때문인 것으로 판단된다.

그림 9 ~ 10은 차량 편성이 통과할 때 센서를 통해 계측된 대표적 배면횡압을 가드레일의 길이별로 나타낸 것이다. 그림에서 차량은 가드 선단 거리 0 m 지점에서 시작하여 후단부 쪽을 향

하는 방향으로 통과되고 있다.

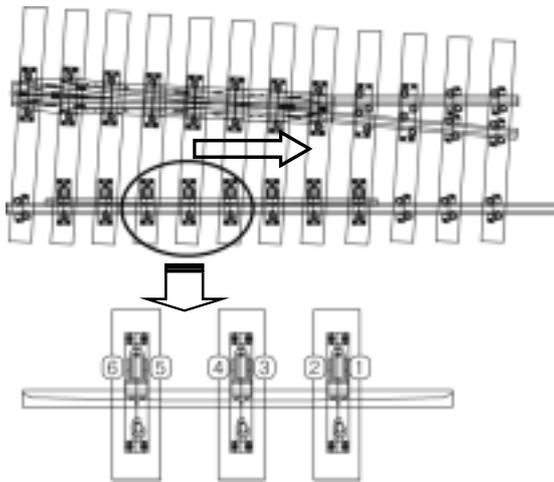


그림 8. 용력센서 부착위치

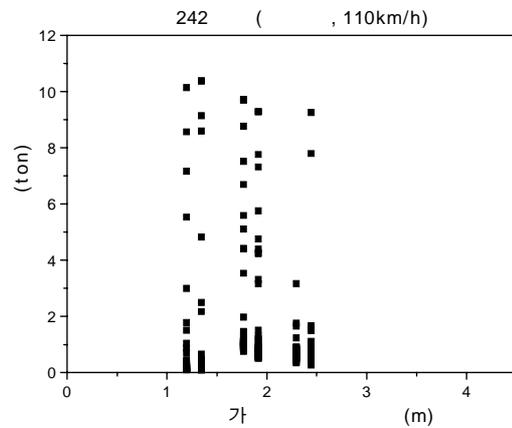


그림 9. 가드 길이별 배면횡압 분포

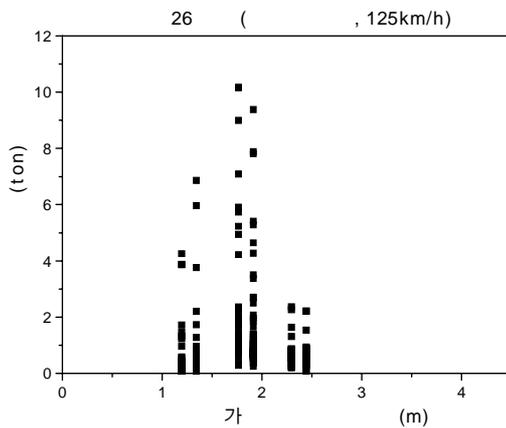


그림 10. 가드 길이별 배면횡압 분포

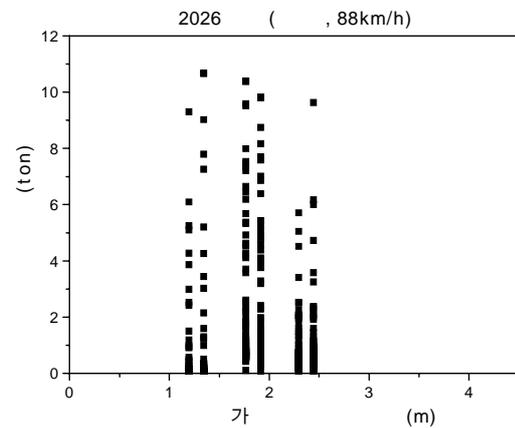


그림 11. 가드 길이별 배면횡압 분포

위의 결과들을 보면 차량 편성의 종류나 주행속도에 관계없이 대부분의 배면횡압이 가드레일의 즐랜지레이가 유도부 후단에서 발생하는 것을 알 수 있다. 구형 가드레일과 같이 유도부 후단이 비교적 가드레일 전방에 있는 경우는 반대로 배면횡압이 전방에 집중될 것으로 예상된다.

상기한 결과들은 보면 최대 배면횡압이 허용 한계치인 12 ton에 거의 육박해있음을 보여준다. 또한 편성이 길어질수록, 동일 차량이면 속도가 빨라질수록 그리고 일반 차량보다는 화차에서 배면횡압이 크게 발생하는 경향을 보였다.

그림 12 ~ 13은 단위 차량편성 당 유속에 발생하는 배면횡압을 도시한 것이다. 결과를 보면 화차는 전체 편성에 걸쳐 배면횡압이 크게 나타나는 현상을 보이고있으며 특히 기관차쪽과 화차편성 후반부에서 배면횡압이 크게 나왔다. 기관차는 견인을 하는 부분이고 축중이 무겁기 때문에 다른 차량 편성에서도 배면횡압이 크게 나오는 것을 볼 수 있다. 화차 역시 실험당시 열차상태인 것으로 판단되며 따라서 축중의 증가로 인해 배면횡압이 크게나온 것으로 판단된다. 그리고 장대편성 열차의 경우 편성후반부에서 점차 배면횡압이 커지는 것을 볼 수 있는데 이는 편성 후반부에서 "S"운동이 발생하는 과대전동현상에 기인한 것으로 보인다. 이런 현상은 장대편성 새마을 열차에서 두드러지게 나타난다. 전체적으로 볼 때 가드레일 길이별 작용력 검토에서와 같이 배면횡압의 크기가 10 ton을 넘어서는 경우를 자주 볼 수 있으며 이는 현재 분기기의 통과속도 허용한도가 얼마남지 않았음을 의미한다.

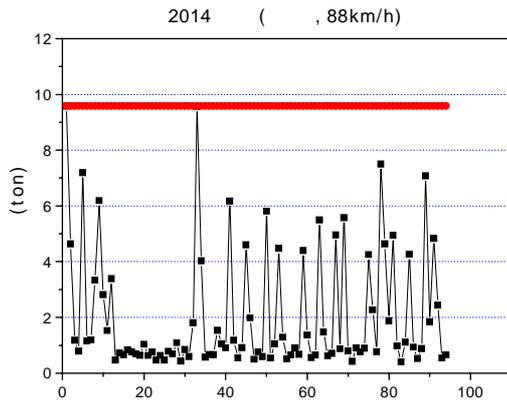


그림 12. 운속당 발생되는 배면횡압

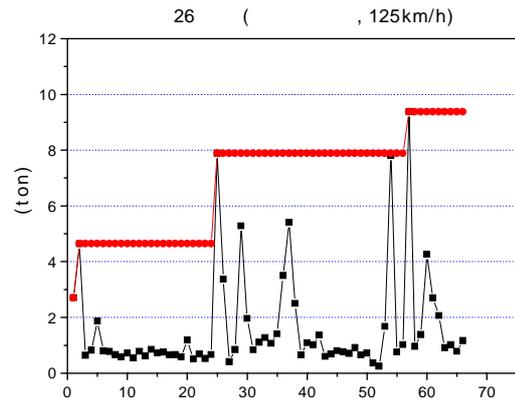


그림 13. 운속당 발생되는 배면횡압

4.2 주행속도별 배면횡압 검토

앞에서 살펴보았듯이 배면횡압과 관련된 인자들에는 차량의 편성정도, 축중, 차종 등 여러 가지가 있을 수 있다. 분기기 통과속도를 안정적으로 올리기 위해서는 배면횡압이 차량 주행속도와 어떤 관계가 있는지 알아야 한다. 그림 14는 주행속도에 따른 유도량의 변화를 나타내고 있다. 이 도표는 차종에 상관없이 유도량만을 변수로 설정하여 주행속도와의 관계를 유추해본 것으로서 주행속도가 증가되면 유도량도 함께 증가될 것이라는 일반적인 예상이 유효함을 보여주고 있다. 유도량은 그림 15의 결과에서 보는 바와 같이 배면횡압과 거의 선형적인 상관관계가 있다. 따라서 분기기 통과속도가 지금보다 증속된다면 유도량의 증가가 야기될 것이고 이것은 다시 배면횡압의 증가로 이어져 차량의 분기기 안전 통과를 보장할 수 없게 할 것이라는 사실을 쉽게 예상할 수 있게 해준다.

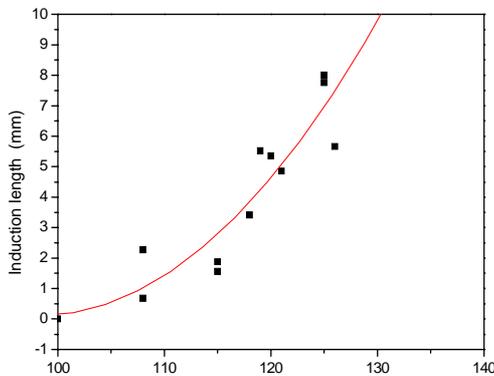


그림 14. 주행속도별 발생 유도량

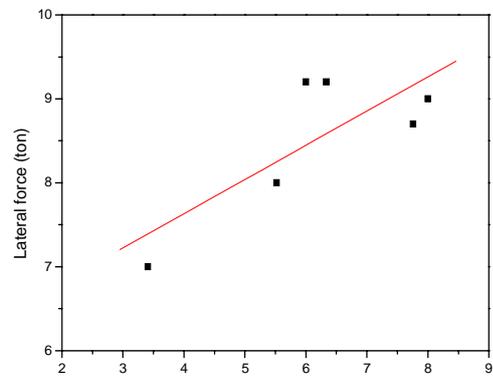


그림 15. 유도량과 배면횡압의 관계

4.3 탈선계수 분석

현재 각국에서는 다양한 방법을 통해 탈선계수를 정하고 있습니다. 국내에서는 잠정적으로 빈도 확률에 따른 탈선도를 차량 안전성을 평가하는 잠정기준으로 삼고있지만 아직 통일된 기준은 아직 없는 상황이며 상황에 따라 일본철도 및 구미의 기준을 준용하고 있다. 그림 16은 국내와 일본에서 사용 중인 탈선기준을 보여주고 있다. 그림 16을 보면 뒤여오르기 탈선의 경우는 탈선계수를 최대 10까지 허용하고 타오르기 탈선의 경우는 0.8까지를 허용기준으로 잡고있다. 뒤여오르기 탈선과 타오르기 탈선의 구분은 횡압이 작용한 시간을 가지고 구분하는데 분기기 통과시험에서 발생된 유도량으로부터 작용시간을 유도할 수 있으므로 본 실험에서 유용하게 사용되어질 수 있는 기준이라 판단된다. 본 논문에서는 이미 차량이 분기기를 통과하는 동안 탈선계수가 2이하로 설정

되어야 힘을 설명하였다. 여기서는 설정된 성능평가기준이 과연 타당한 값인지를 탈선계수 공식을 이용하여 증명하고자 한다.

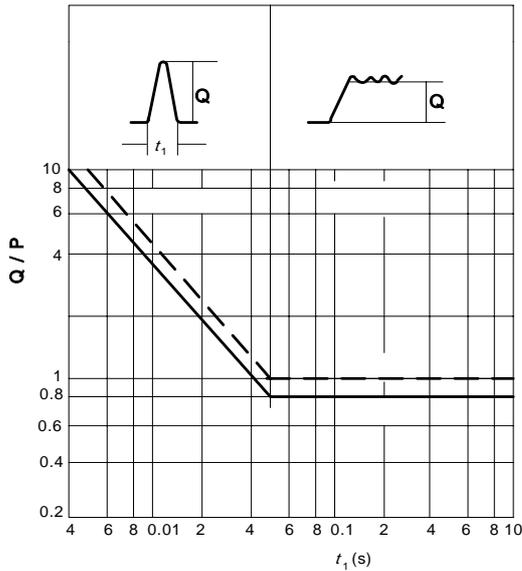


그림 16. 탈선계수와 허용치

를 나타내고 있다. 즉, 이 결과는 성능평가실험 중에 대상 분기기를 통과한 차량들이 평균 약 700mm의 거리에 걸쳐 배면횡압을 받았다는 것을 의미한다. 시험에 사용된 분기기를 통과한 차량들의 속도가 약 110km/h ~ 125km/h 정도이므로 윤속 1set 당 접촉길이를 지나가는 시간은 대략 0.02sec가 된다. 이 접촉지속시간을 그림 16에 대입해보면 한계 탈선계수는 2 정도가 된다. 이 결과를 통해 본 연구에서 제시하였던 탈선계수 허용한도가 실용적 범위 내에서도 타당한 설정치였다는 것을 다시 한번 확인할 수 있다.

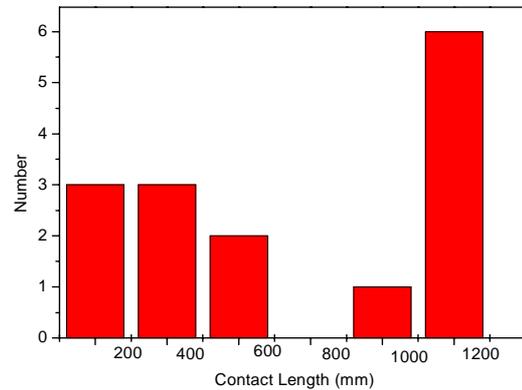


그림 17. 차륜/가드레일 접촉길이 분포도

먼저 성능평가 실험을 통해 얻어진 차륜/가드레일 접촉길이를 정리하여 그림 17과 같은 결과를 얻었다. 이 그래프의 X축은 차륜과 가드레일이 면접촉을 한 거리를 나타내고 있으며 Y축은 거리대역별 반복횟수를 나타내고 있다.

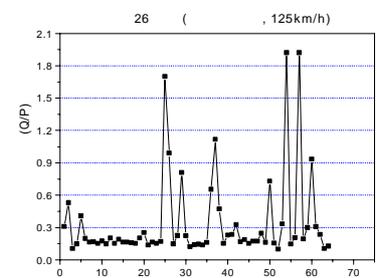
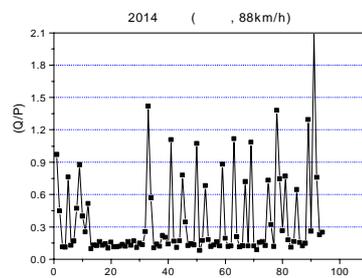
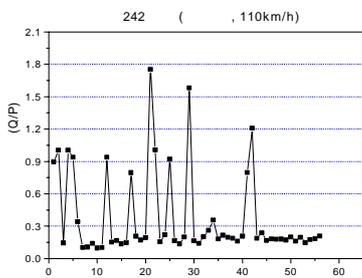
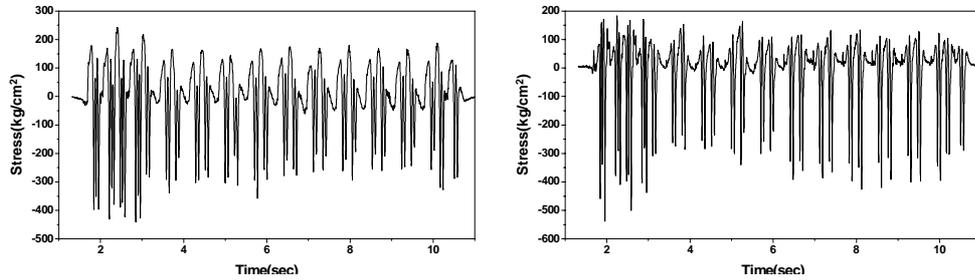


그림 18. 차속별 탈선계수 변화 그림 19. 차속별 탈선계수 변화 그림 20. 차속별 탈선계수 변화

실험 분기기를 통과한 차량들은 모두 다른 제원을 가지고 있다. 탈선계수는 횡압과 수직력의 비로 정의되므로 탈선계수를 파악하기 위하여 각 차종별 윤증을 파악한 후 이를 바탕으로 탈선계수를 계산한 대표적 결과가 그림 18 ~ 20에 나와있다. 이들 해석결과를 보면 탈선계수가 경우에 따라 허용치인 2를 넘어선 경우도 있었음을 알 수 있다. 그림 20에서와 같이 장대편성 새마을호는 편성 후반부에서 탈선계수가 점차 커지는 경향을 보였으며 이것은 편성된 차량들이 보이는 일반적인 경향이다. 기관차는 객차에 비해 무거운 축중을 가지고있음에도 불구하고 비례적으로 큰 배면횡압을 일으켜 탈선계수가 속도나 편성정도에 상관없이 큰 값을 가졌다. 화차는 전체 편성에 걸쳐 고르게 높은 탈선계수가 발생하였다. 탈선계수 산정시 통과 차량들이 모두 영차 상태일 것이라고 가정하였으므로 실제 탈선계수는 오히려 해석결과보다 더 높아질 가능성도 있다.

4.5 당레일 작용력 분석

3.2절에 언급한 것과 같은 방법으로 텡레일의 작용응력을 측정하였다. 분기기 탄성 포인트 텡레일 일부는 집중응력이 발생되기 쉬운 부분으로서 분기기 성능평가 기준에서 이미 설명한 바와 같이 재료의 인장강도를 고려하여 최대 1,400kg/cm²의 허용 응력을 한계치로 설정하였다. 텡레일의 내측과 외측에 응력센서를 설치하고 차량 통과직후의 최대 응력값을 검측하여 성능을 평가하였다.



(a) 내측 응력 측정값

(b) 외측 응력 측정값

그림 21. 텡레일 탄성부 발생응력 : 무궁화 (115km/h)

그림 21은 실험으로 측정된 대표적 응력신호들을 도시한 것이다. 표 3은 탄성포인트 텡레일 탄성부에 발생하는 최대 응력을 시험조건별로 정리한 것이다. 새마을의 경우 내측에서 571kg/cm²(130km/h)의 최대 응력이 발생하였고 새마을(디젤기관차)의 경우에는 외측에서 752kg/cm²가 발생하였다. 무궁화의 경우 외측에서 645kg/cm²(130km/h)의 최대 응력이 발생하였으며, 디젤동차(무궁화)의 경우 외측에서 410kg/cm²(100km/h), 화물열차는 외측에서 631kg/cm²(82km/h), 통일호의 경우 외측에서 514kg/cm²(100km/h)의 최대응력이 발생하였다.

상기한 모든 결과에서 허용응력을 넘는 사례는 찾을 수 없었고 대부분 허용 한도내 50%수준 이내에서 결정되었다. 따라서 텡레일 탄성부는 크로싱부에 대하여 분기기 통과속도 증속여유가 있는 편인 것으로 파악된다.

표 3. 차량별 최대응력값

열차종류	최대응력 (kg/cm ²)		열차속도(km/h)
	내측	외측	
새마을(8량)	495	467	115
	465	530	126
새마을(디젤기관차)	400	752	122
새마을(16량)	571	481	130
무궁화	447	616	108
	440	537	115
	446	525	120
	477	467	121
	444	645	130
무궁화(디젤동차)	364	410	100
화물열차	490	631	82
통일호	425	514	100

5. 결론

본 장에서 수행된 연구성과 및 연구결과들을 분석하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 분기기의 정량적 성능평가를 할 수 있는 시험평가 방법이 개발되었으며 시험결과들로부터 분기기의 한계성능을 예측할 수 있는 기준도 함께 제시되었다.
- 윤중이 무거운수록, 통과속도가 빠를수록 그리고 편성규모가 커질수록 배면횡압은 커졌으며 특히 화차와 기관차가 분기기를 통과할 때, 대부분의 경우, 가장 큰 배면횡압이 발생되었다.
- 배면횡압이 커질수록 주행 안전성을 나타내는 탈선계수의 크기는 비례적으로 증가한다.
- 본 연구에서 실시된 분기기 성능시험결과를 분석한 결과 탈선계수가 허용치인 2에 가깝고 배면횡압 역시 허용치(12 ton) 부근까지 높아지는 경우가 다수 포착되었다.
- 기존선 분기기 텅레일부에서는 아직 분기기 증속여유가 충분한 것으로 판단된다.
- 별도의 조치없이 기존선 분기기의 통과선속 통과속도를 높게 설정한다면 대형사고로 이어질 위험이 있다.
- 2010년까지 단계적으로 높아지는 철도청의 주행 최고속도 규정에 맞추어 기존선 분기기 통과선속 통과속도를 향상시키기 위해서는 기존의 분기기를 취약부위별로 반드시 개량시켜주어야 한다.

본 연구에서 수행된 분기기 성능평가 시험은 제약된 연구비용 및 기간으로 인해 일반적인 결론이 도출될 만큼의 충분한 양이 실시되지는 못하였다. 그러나 실험 대상이 된 기존선 분기기는 국철 부설 분기기 중 비교적 고급품에 속하는 60kg, 단상 포인트형 분기기였고, 유지보수 상태 역시 양호한 것이었으므로 이 실험 결과가 평균이하의 성능을 가진 분기기를 대상으로 한, 예외적 결과라고 생각되지는 않는다.

기존선 분기기의 열차 통과속도를 보다 확실하게 향상시키기 위해서는 분기기 시스템 개량에 관한 노력과 더불어 분기기 성능에 영향을 미치는 관련 규정(백개이지, 차륜 외면거리, 플랜지웨이 폭)들에 대한 전반적인 검토가 차량, 시설관련 전문가들과 함께 논의되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원(2003), “분기기 성능개선을 통한 기존선 속도향상 방안연구,” 한국철도기술연구원.
2. 한국철도기술연구원(2002), “기존선 분기기 구조개선,” 한국철도기술연구원.
3. Rao V. Dukkipati and Joseph R. Amyot(1988), “Computer-Aided Simulation in Railway Dynamics,” Academic Press.
4. 한국철도기술연구원(2000), “철도차량의 비선형 주행 동특성에 대한 기초연구,” 한국철도기술연구원.
5. 정우진, 신정렬(2001), “철도차량의 비선형 안정성에 영향을 미치는 인자 연구”, 춘계학술대회 논문집, 대한기계학회, pp. 513-518
6. Coenraad Esveld, “Modern Railway Track, MRT Production”, 2001
7. TRACK STANDARDS, union pacific railroad, 1999
8. 鬼憲治, “分岐器構造解析の研究”, 新路線 1997.12 pp.30-32
9. 한국철도기술연구원(1996), “대구-부산간 기존선 이용 고속철도차량의 주행속도 향상에 관한 연구,” 한국철도기술연구원
10. 서사범, “선로공학”, 삼과공, 1999
11. 이종득, “철도공학”, 노해출판사, 1993,
12. 須田征男 外, “新しい線路”, 日本鐵道施設協會, 1997
13. 工藤實, 阿久澤信夫, “新幹線分岐器の通り整正後の効果的な持続 方法の研究”, 新路線 1997.1 pp.17-19.
14. 笹川和裕, “分岐器ポイント部の鐵まくらぎ化工事”, 新路線, 1997.1 pp.40-4.

15. 手塚和彦, “脱線と走行安全性”, RM. 1996.5 pp.8-12
16. 鬼憲治, 小野利之, 宮石源基, 高井秀之, 藤澤憲三, “在來線分岐器の 分岐側通過速度向上”, RTRI report vol.4, No.6, 1990.6 pp.40-46.
17. 黒河内ひろし, “分岐器, レール伸縮継目の設計に関する基礎研究”, RTRI report No.799, 1972.3 pp.244-267
18. 湧井一, “新幹線車輛の走行性からみた長大吊橋の折れ角限度”