

현장측정을 통한 자갈도상궤도의 동적 거동 분석

A Study on the Dynamic Behaviors of Ballast Track using Field Test

박용걸[†] · 최정열^{*}

Yong-Gul Park · Jung-Youl Choi

Abstract

The major objective of this study is to investigate the dynamic behaviors of track due to the deterioration characteristics of ballast for servicing tracks by the field test. The durability of ballast plays an important role in the track behaviour. To estimate the deterioration characteristics of ballast, several tests have been carried out by several scholars. The deterioration characteristics of ballast is one of the most important factor in the dynamic behaviour of track and its life. In this paper abrasion/breakage characteristics of ballast is studied to predict the effect of physical ballast characteristics on ballast track. To reveal deterioration characteristics of ballast, the field test were carried out. The deterioration characteristics, studied in this paper, is applied to the dynamic behaviour of track in various conditions.

Keywords : Ballast(자갈도상), Wheel Load(윤중), Dynamics behavior(동적거동), Abrasion(마모), Size Distribution(입도분포)

1. 서론

자갈도상궤도는 초기 부설비용이 저렴하고 적절한 탄성을 유지하기 쉬우며 유지보수가 용이하다는 장점이 있어 철도의 시작부터 현재까지 오랫동안 사용되고 있는 궤도구조이다. 그러나 현재 국철 및 지하철의 경우 장기사용에 따라 자갈도상기능이 급격히 저하되고 연간 증가되고 있는 열차 운행 통과톤수로 인하여 장·단기적인 궤도유지관리에 문제점이 발생하고 있다.

따라서 본 연구에서는 궤도시설 전반에 대한 동적계측과 도상자갈 체가름시험 및 마모시험, 궤도구조해석을 통하여 자갈도상궤도의 상태 및 성능을 건전한 자갈도상의 목표 탄성계수와 비교하여 오염도를 추정함으로써 정성적으로 평가하고 취약요인을 분석 하고자 한다.

열차주행시 발생하는 레일과 침목의 변위, 윤중, 횡압에 대한 계측을 수행하여 자갈도상궤도의 탄성지지력을 평가

하고, 이를 기초로 취약요인을 분석하였다. 대상선로 전구간 중 비교적 급곡선인 지하철 선로를 중심으로 취약개소로 판단되는 곳을 포함하여 8개소에 대한 윤중, 횡압, 변위 등 정밀 궤도계측을 수행하였다.

또한 총 5개소에 해당하는 도상자갈시료를 채취하여 체가름시험과 마모시험을 통하여 도상자갈의 입도분포분석과 잔골재 함유율, 마모율 분석을 수행하였다.

2. 현장 측정

차량의 통과에 따른 자갈도상궤도의 동적거동에 대한 현장 계측을 수행하였다. 궤도의 윤중, 횡압, 변위 등을 측정하기 위하여 직선부, 곡선부, 급곡선부 및 교량구간에 대하여 각각 2개씩 총 8개소에서 궤도의 동적응답(Dynamic Response)을 측정하여 그 결과를 비교, 분석하였다.

2.1 현장측정 현황

측정대상구간의 궤도 상태를 파악하기 위한 현장측정으로 윤중 및 횡압측정, 그리고 도상자갈의 열화상태를 파악하기 위한 체가름 시험과 마모시험을 실시하였다.

[†] 책임저자 : 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 철도건설공학과 교수, 공학박사

E-mail : ygpark@snut.ac.kr

TEL : (02)970-6575 FAX : (02)978-6575

* (주)대한콘설타트 철도부 궤도팀 사원

2.2 계측시스템 구성방법

궤도에 대한 변위 및 윤중, 횡압은 스트레인게이지 및 변위계를 이용하여 측정하고 증폭기를 통해 증폭된 신호들을 DRA-101(Data Acquisition System)에 저장한 후, 오리진™ 프로그램을 이용하여 분석하였다. 측정항목에 대한 센서의 배치는 측정점을 표준화하여 측정하였다. 이 표준 측정점은 Fig. 1의 표준측정망에 나타내었다.

Fig. 1의 측정시스템으로 윤중, 횡압, 레일수직 및 횡변위, 침목수직변위 등을 측정하였다. 스트레인게이지 시스템의 개

Table 1. Block properties of test sections

구분	궤도조건	측정항목	비 고
A구간	곡선부 R=210, M=60 S=12, C=90	① 윤 중 ② 횡 압 ③ 변 위 ④ 체가름 시 험	터널
B구간	곡선부 R=300m, M=42 S=8, C=60		터널
C구간	직선부 L=624m		터널
D구간	곡선부 R=350, M=36 S=6, C=110,120		교량
E구간	곡선부 R=400, M=31 S=6, C=102,138		교량

*주) R : 곡선반경(m), M : 원곡선 중앙종거리(m), S : 슬랙(mm), C : 칸트(mm)

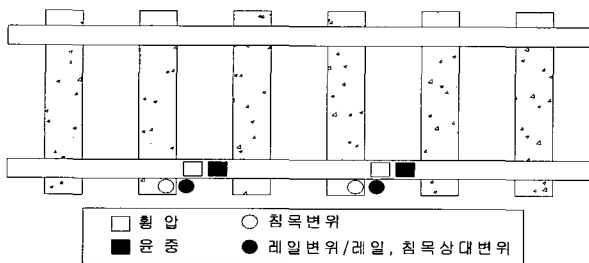


Fig. 1. Layout of Track Measured system

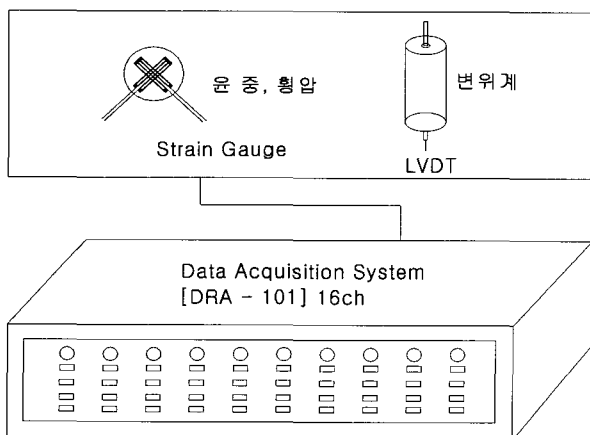


Fig. 2. Measured System

략적인 구성도는 Fig. 2와 같고, 게이지를 통해 측정되는 윤중 및 횡압관련 신호들은 Dynamic Strain Amplifier를 통해 증폭된 후 측정신호 저장장치인 DRA-101 내부로 저장된다.

측정 대상선로에서 사용되는 차량은 8량 편성으로 동력차와 객차의 조성은 6M2T(M : 동력차, T : 객차)를 기본으로 하고 있다. 현재 운행되고 있는 열차의 길이 및 대차중심간거리, 고정축간거리와 같은 차량의 제원은 Fig. 3 및 Table 2와 같다.

2.3 변위 측정 개요

궤도의 노후정도 및 현재상태를 파악하는 기초자료로서 레일의 수직변위와 침목 수직변위를 측정하여 이를 변수로 동적윤중에 대한 도상의 탄성지지력(도상탄성계수)을 추정

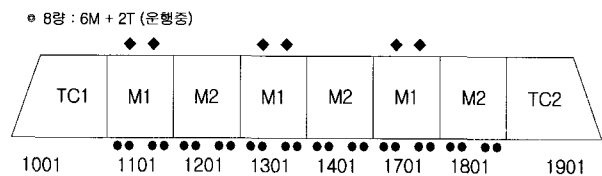


Fig. 3. Composition of the electric train

Table 2. Properties of the electric train

구 분 / 항 목	제 원	
차 종	통근형 직류 전동차	
전동차편성	8량(6M2T)	
승객정원	선두차 : 113명 중간차 : 124명	
자중(톤)	TC : 24.5, M1 : 35.2 M2 : 33.5, T : 25.7	
전기방식	가선전압	DC 1,500V
	전차선방식	카테나리식
열차성능	가속도	3.6km/h/s
	최대운전속도	80km/h
차 체	차체길이	17,500mm
	차체폭	2,750mm
대 차	고정축간거리	2,200mm



Fig. 4. Sight of the attachment of LVDT

하고자 하였다.

주행중인 열차에 의한 최대 동적하중에 대한 레일과 침목의 변위를 측정할 수 있으며, 현장에서의 변위계 부설전경은 Fig. 4와 같다.

2.4 윤중 및 횡압측정 개요

철도 및 지하철운행에서 기본적으로 고려할 사항으로 이동하는 열차와 선로간의 작용력을 들 수 있으며, 이러한 작용력에 의한 운행 안정성 확보가 필수적이다. 이 양자간의 작용력을 측정하는 것이 윤중과 횡압으로서, 윤중은 하나의 차륜에 의해 레일에 작용하는 수직차륜하중을 말하며 일반적으로 궤도에 작용하는 정적하중 뿐만 아니라, 열차주행 동안 시간에 따라 변화하는 동적하중의 영향도 포함하여 일컫는다. 윤중을 측정함으로써, 궤도에 작용하는 동적하중의 영향을 검토할 수 있을 뿐만 아니라, 공차하중 혹은 정적하중과의 관계로부터 궤도설계 시 고려된 충격력의 영향에 대한 적정성을 확인할 수 있으며, 다른 계측항목과 조합하여 레일강성, 궤도계수 등 초기 궤도설계 시 가정된 인자들과 함께 현재 궤도의 상태를 비교할 수 있다.

또한 주행열차에 의한 곡선부에서의 횡압을 측정함으로써 곡선궤도에 작용하는 횡방향 작용력을 파악할 수 있으며, 곡선궤도의 건전성 분석의 기초 자료로써 이용하게 된다.

주행하는 차량에 의해 레일과 궤도에 작용하는 윤중을 측

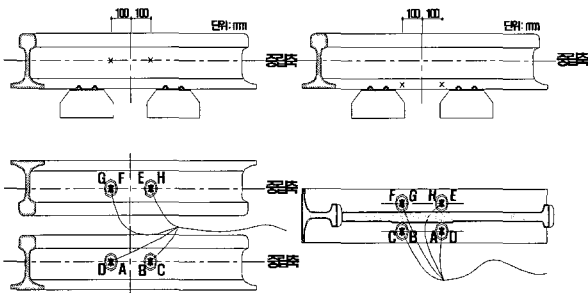


Fig. 5. Attachment of strain gages for the measurement of axial wheel load & lateral load



Fig. 6. Sight of the attachment of sensors

정하는 방법은 두가지로써 차량상에서 윤중을 측정하는 방법과 지상에서 측정하는 방법이 있다. 차량상에서 측정하면 차량주행에 따른 선로의 재하상태를 알 수 있으며, 지상에서 측정하면 측정지점을 통과하는 각 차량의 작용력의 상황을 알 수 있다.

일반적으로 윤중을 측정하는 방법으로는 지상에서 측정하는 방법이 이용되는데, 센서의 설치가 비교적 간편하고 정확한 하중값을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 궤도의 한 지점에서 주행하는 모든 열차의 윤중을 측정할 수 있는 장점이 있다.

윤중은 Fig. 5와 같이 침목중심에서 각각 10cm 떨어진 위치에서 레일북부의 중립축에 45°의 각도를 가지고 8방향으로 스트레인게이지를 부착하여 계측하며, 횡압은 레일저부의 중립축에 부착하여 측정한다.

그리고 Fig. 5와 같이 결선하여 단면 휨의 영향을 배제한 전단변형을 측정하여 동하중 상태의 윤중과 횡압으로 환산하며, 이 상태에서 내력형의 윤중검정기를 이용하여 4tonf(40kN)까지 재하하여 정하중 상태의 윤중 및 횡압으로서 이를 검정한다.

전단변형 측정에 의한 특징은 인접차륜의 파형이 완전히 분리되어 기록되고, 기준선의 판별이 용이하다는 것이다. 또한, 전단변형방식은 4-게이지법으로써 노이즈가 작고 비교적 깨끗한 기록이 얻어지는 장점이 있다.

본 연구에서는 스트레인 게이지(2Axis)를 이용하여 각 구간에서 운행열차에 의한 윤중 및 횡압을 측정하였으며 윤중 측정 시 지상측정법을 사용하였다. Fig. 6은 현장에서 레일에 윤중과 횡압 게이지를 부착한 그림이다. 모든 윤중과 횡압은 열차가 궤도상을 주행할 때 얻어지는 동적계측의 결과로서 측정하였다.

계측시 열차는 고속으로 주행하므로, 실제 발생한 윤중을 왜곡하거나 데이터의 손실이 발생하지 않도록 충분한 수집율(Sampling Rate : 50Hz, 100Hz)을 설정하였다. 그리고 발생한 윤중 이외의 노이즈 성분들은 주파수 분석을 통해 디지털 필터로 로우패스 필터링과 하이패스 필터링 처리를 함으로써 데이터의 신뢰성을 높였다. 레일에 부착한 스트레인 게이지를 통하여 직접 계측한 값은 변형률데이터로서 전단변형과 비례하여 발생한다. 전단변형은 역시 윤중 및 횡압과 비례하여 발생하므로 데이터 수집장비(Data Acquisition System)를 통하여 저장된 변형율과 발생한 윤중 및 횡압과의 선형 관계식을 도출한다. 먼저 Fig. 7과 같이 윤중 및 횡압게이지를 레일에 부착하고, 유압팩을 이용하여 Fig. 8과 같이 0tonf에서 4tonf까지 정적하중을 단계적으로 가압하여 이때 발생한 계측값을 기록한다. 오차발생과 선형 회귀식의 신뢰성을 고려하여 3회 이상 동일한 실험을 반복하였다.

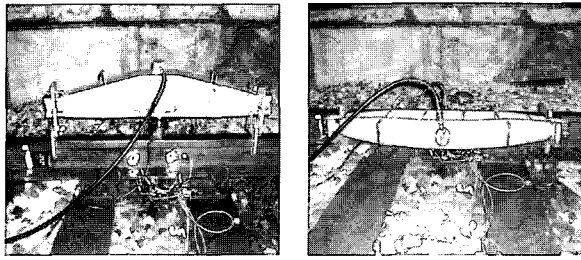
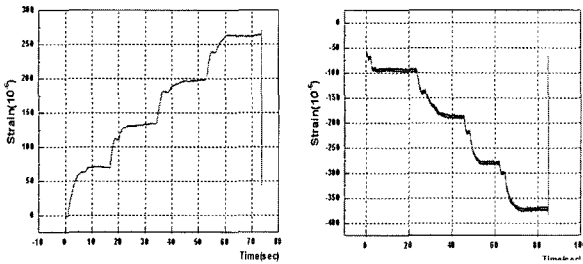


Fig. 7. View of the test of the load calibration



(a) 윤중검정 데이터 (b) 횡압검정 데이터

Fig. 8. Test result of the load calibration

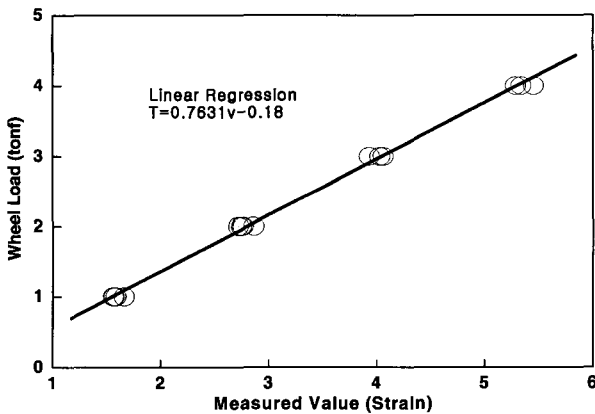


Fig. 9. Relationship between the measured results and the wheel load

여기서 얻은 발생변형율과 작용하중과의 관계에 대한 선형관계식은 선형회귀분석법(Linear Regression)을 이용하여 도출한다. Fig. 8은 재하시간 변화에 따른 정적작용하중을 도시한 그림이고, Fig. 9는 측정 변형율과 레일에 작용한 윤중의 선형회귀분석 그래프와 그 관계식이다.

이 선형관계식에 실제 측정된 변형율을 대입하여 열차 주행시 레일에 발생한 윤중 및 횡압을 하중단위(tonf)로서 산출한다.

2.5 도상자갈 채가름시험 및 마모시험

도상자갈의 세립화 및 내마모강도의 저하 등과 같은 노후

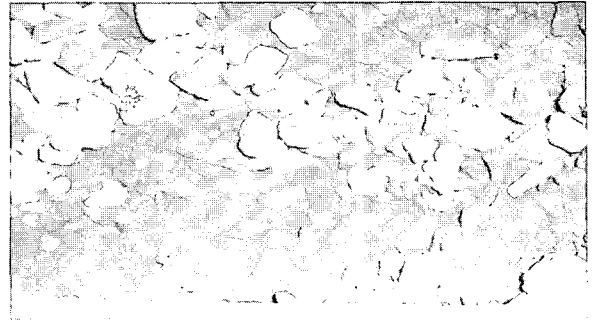


Fig. 10. Aspect of ballast on block C

화 현상은 도상강도의 저하 및 탄성소실을 유발하며 궤도구성품의 변형과 윤하중을 증가시켜 궤도의 수명을 단축시킬 우려가 있다. 따라서 궤도의 건전성 평가 및 그에 영향을 미치는 인자에 대한 분석으로 도상자갈의 상태와 윤하중의 동적변동을 즉 충격계수와와의 관계를 파악하였다.

도상자갈의 열화상태는 도상자갈의 입도분포와 내마모강도의 측정으로 파악될 수 있으며 이를 위하여 각 구간에서 자갈시료를 채취하여 체가름시험과 마모시험을 실시하였다. 각 구간에 대한 시료채취의 일례로 구간 C에 대한 도상자갈의 상태를 나타내면 Fig. 10과 같다.

각 시료는 도상하부에서 상부까지 1회 시험시 필요한 중량인 70kg을 일정 부피 내에서 채취하였다. 또한 각 시료 모두 궤도 직하부에서 열차통과하중을 지속적으로 받고 있는 자갈도상에서 채취하였으며 침목사이 및 레일아래까지 골고루 채취하였다. A 구간의 자갈도상은 침목하면까지 비교적 양호한 상태로 분포하고 있었으나 일정 깊이 이하에는 다소 심각한 상태로 파쇄된 입자가 있었으며 세립자에 의한 오염도 역시 심각한 수준인 것으로 관찰되었다. 또한 C 구간의 자갈도상은 침목하면부터 세립자와 미립자분으로 인하여 도상의 공극이 거의 다 채워져 도상이 불량한 상태였다. 침목하면 도상의 경우 거의 대부분의 도상자갈이 파쇄, 마모되었고 잔골재 성분들이 세립분과 같은 오염물질과 혼합되어 있는 상태로 관찰되었다. D 구간의 도상의 상태는 C 구간과 다소 유사한 것으로 관찰되었다.

3. 측정 결과 및 분석

3.1 윤중 측정결과

윤중의 측정은 승객 탑승으로 인한 자중증가를 고려하기 위하여 열차의 운행시간에 실시되었으므로, 정확한 승객의 수와 각 열차의 정적하중을 산정하기는 현실적으로 어렵다. 따라서 첫차 운행부터 막차 운행까지의 장기계측을 통한 공

차하중 및 혼잡시간대(Rush-Hour)에 발생하는 전체 윤중변동을 계측하였다. 또한 열차제원을 통해 파악 가능한 열차의 자중과 승객이 승차한 상태에서의 승객하중을 고려하여 정적하중을 산출하였다. 승객하중은 1인당 62kg을 기준으로 하였으며, 승차인원은 구간별 특성에 따라 비교적 승객이 많은 구간, 보통구간, 승객이 적은 구간 등 3개 구간으로 나누어 승차인원을 가정하여 정적 하중을 산출하였다. 구간별 승차인원 및 승객하중은 Table 3을 기준으로 하였다.

또한, 차량의 자중과 승차인원을 고려한 편성차량별 정적 윤중(P_{sta})은 Table 4와 같으며, Fig. 11은 계측에 의한 동적 윤중(P_{dyn})의 결과치와 이를 분석하여 산출한 각각의 윤중 및 충격계수(P_{dyn}/P_{sta})와 윤중변동율($(P_{dyn}-P_{sta})/P_{sta}$)을 정리한 대표적인 값들이다.

주행하는 열차에 의해 궤도에 작용하는 윤중은 열차 자중에 의한 정적하중 이외에 열차속도의 증감에 따라 발생하는 동적하중에 의한 충격력의 영향까지 포함되어 발생된다. 따라서 윤중의 측정값은 열차주행에 따른 동적하중이며, 열차의 정적하중과 비교하여 열차속도에 따른 궤도의 충격계수를 산출할 수 있다. 지하철 차량 1편성(8량)이 주행하는 경우 32개의 윤중에 의한 윤중이 발생하게 되는데 모든 축에서 발생한 주행속도에 따른 충격계수(P_{dyn}/P_{sta})는 Fig. 12와 같다.

Fig. 12는 모든 측정구간에서 추출한 충격계수를 속도에 따라 도시한 그림이다. 동일한 구간에서는 열차 주행속도의 편차가 크지 않으므로 일정 속도대에 집중분포하고 있다. 또한 속도증가에 따라 충격계수가 대체로 일정한 경향을 보이고 있으나, 대상선로에서의 대표적인 속도대역에서 비교적 높은 충격계수가 산출된 것으로 나타났다.

Fig. 13은 속도에 따른 윤중변동율을 나타내고 있다.

Table 3. The personnel & Passenger load

구 분	산정기준	적용인원		승객하중(톤)	
		선두차	중간차	선두차	중간차
승객 많은 구간	승차정원 적용	148명	160명	9.2	9.9
보통 구간	승차정원의 60% 적용	89명	96명	5.5	6.0
승객 적은 구간	만석 간주	54명	54명	3.3	3.3

Table 4. Static wheel loads of electric train (tonf)

구 분	1량	2량	3량	4량	5량	6량	7량	8량	평균
차량중량	24.5	35.2	33.5	35.2	33.5	35.2	33.5	24.5	31.9
승객중량	5.5	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	5.5	5.9
자 중	30	41.2	39.5	41.2	39.5	41.2	39.5	30	37.8
P_{sta} (자중×1/8)	3.75	5.15	4.94	5.15	4.94	5.15	4.94	3.75	4.31

윤중변동율은($P_{dyn}-P_{sta}$)/ P_{sta} 로 나타내며 이는 열차주행에 따른 윤중의 변동량을 정적윤중으로 나눈 값이다. 각 구간별로 측정된 동적 윤중과 정적 윤중을 분석하여 충격계수 및 윤중변동율을 산출해보면 속도증가에 따라 변화하나 그 편차는 크지 않음을 알 수 있다.

윤중변동율의 분포는 크게 2부류로 구분됨을 알 수 있는데 이러한 구분은 도상상태에 따른 동적하중의 증폭효과에서 기인한다. 이러한 윤중변동율 분포의 구분은 대상구간에 대한 체가름시험과 마모시험결과로부터 분석된 도상상태가 불량한 구간에서 다른 양호 구간보다 2배 이상 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 도상의 노후화 및 열화현상은 윤중의

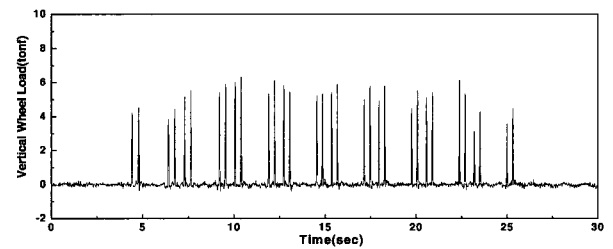


Fig. 11. An example of record of dynamic wheel load in field test

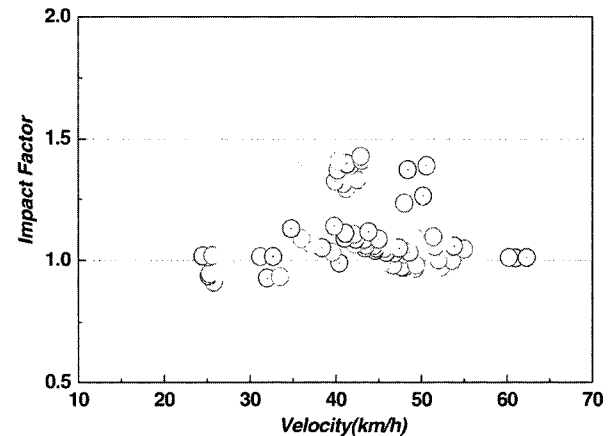


Fig. 12. Impact factor distributions with velocity

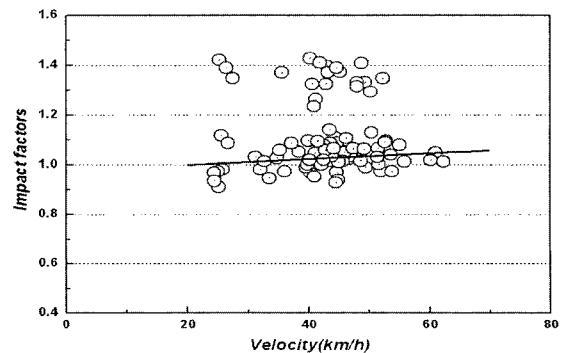


Fig. 13. Dynamic magnification factor distributions with velocity

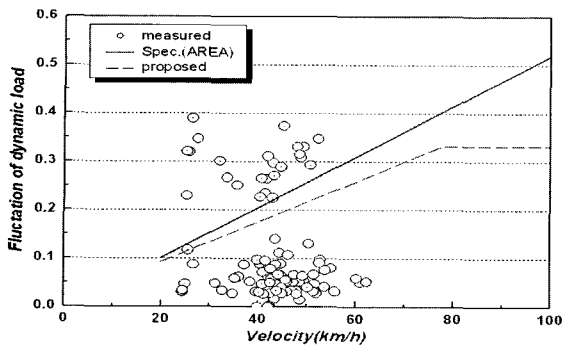


Fig. 14. Load fluctuations of wheel loads with velocity

변동효과를 크게 증폭시켜 큰 동적하중을 유발할 수 있음을 확인할 수 있다.

3.2 충격계수 산정

동적하중에 의한 충격계수는 국내의 경우 AREA에서 사용하는 산정하는 방법을 적용하고 있다. 이러한 계수적용결과와 타당성과 경향을 파악하기 위해 비교적 도상의 상태가 양호한 구간에서의 윤중 측정결과로부터 얻어진 충격계수와 윤중변동율을 이용하여 충격계수 산정식을 구하면 식 (1)과 같다. 궤도설계시 최고속도기준으로 안정성을 판단하게 되므로 40km/h 이하의 저속운행열차에 의한 충격계수는 의미가 낮다고 판단되는바 각 구간별로 측정된 윤중변동율 중 운행속도 40km/h 이상의 측정치만을 도식화하여 Fig. 15와 같이 나타내었다.

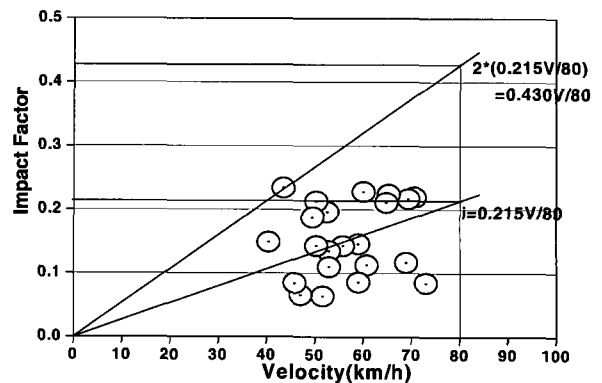
Fig. 15는 40km/h이상의 윤중변동율 표준편차의 평균값과 여기에 안전율을 고려한 표준편차값의 2σ를 취하여 충격계수의 값을 나타낸 것이며, 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$i = 1 + 0.430 \frac{V}{80} \quad (1)$$

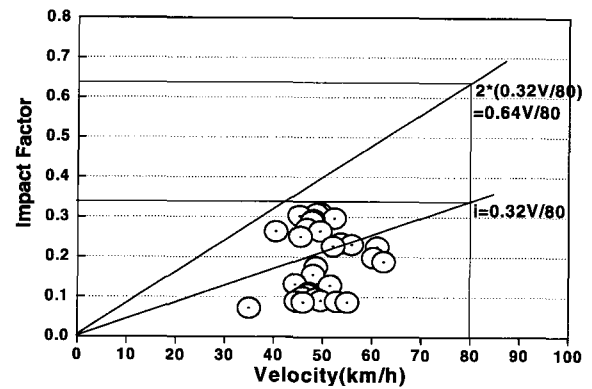
위 식은 측정대상선로의 최대 운행속도 80km/h를 기준으로 제시한 것이며, 미국철도나 일본철도에서 최대운행속도 100km/h를 기준으로 환산한 충격계수식은 다음과 같다.

$$i = 1 + 0.548 \frac{V}{100} \quad (2)$$

또한 도상 상태에 따른 윤중변동율의 경향을 파악하기 위해 비교적 도상의 상태가 불량한 구간에서의 윤중 측정결과로부터 얻어진 충격계수와 윤중변동율을 이용하여 운행속도 80km/h, 100km/h에 해당하는 충격계수 산정식을 구하면 각각 식 (3), 식 (4)와 같다.



(a) 도상양호구간



(b) 도상불량구간

Fig. 15. Results of Impact factor evaluation

$$i = 1 + 0.640 \frac{V}{80} \quad (3)$$

$$i = 1 + 0.80 \frac{V}{100} \quad (4)$$

이상의 결과로부터 양호한 도상의 경우 0.43V/80 정도의 궤도 충격계수값을 얻었으며 이는 일본에서 현재 적용중인 계수(정척레일 : 0.5V/100, 장대레일 : 0.3V/100) 및 미국 AREA에서 사용하고 있는 0.513V/100과 거의 유사한 값이나, 측정대상 선로 조건이 대부분 정척레일 구간이며 선로 상태가 비교적 양호한 구간에서의 데이터를 바탕으로 산정한 식이며, 해당구간의 속도대역이 그다지 높지 않음을 감안할 때 다소 높은 값이다. 또한 비교적 도상상태가 불량한 구간에서의 충격계수는 국내의 기준을 이보다 더 크게 상회하는 것으로 나타났으며 이는 도상노후화에 따른 동적하중 증폭효과에서 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 16은 국외의 일반구간 궤도충격계수와 측정 충격계수값과의 비교를 위한 그래프로서 국외의 충격계수는 각국의 궤도설계시 고려되는 설계충격계수이며, 불량개소의 충

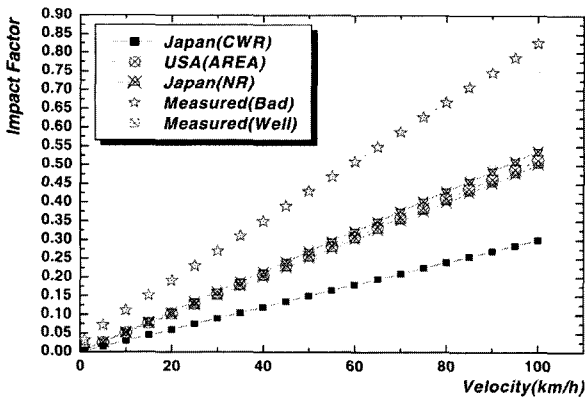


Fig. 16. Comparison of Impact factor for various regulations

격계수는 국외의 궤도충격계수를 비롯한 도상양호구간의 충격계수와 비교하여 2배 이상 크게 상회하는 것으로 나타나, 도상노후화 및 열화현상으로 인해 동적 운중효과가 크게 증폭되어 큰 충격계수를 유발한 것으로 분석된다.

3.3 체가름시험 및 마모시험 결과

본 연구에서 수행한 자갈도상 시료의 체가름시험 및 마모시험은 철도용품 표준규격 도상자갈규정(철도5610-10 58가)에 근거하여 KS F 2502(1997. 4. 1)에 의한 방법으로 각 시료당 3회의 체가름시험을 수행하여 각 체별 통과중량을 평균하여 결과를 산출하였다. 마모시험은 KS F 2508(1997. 04. 01)기준에 따라 LA 마모시험기로 수행하였다.

(1) 체가름시험결과

시험결과 Table 5에 나타난 바와 같이 구간별 시료 모두 50mm 이상의 큰 골재가 기준치 이상으로 포함되어 있었고, C 구간과 D 구간의 경우 세립화가 상당히 진행되어 있었다. A 구간의 경우는 도상자갈의 입도가 기준을 비교적 만족하고 있었지만 큰 골재를 기준치 이상으로 함유함, C, D 구간은 22.4mm이하의 잔골재를 30% 이상 포함하고 있어 세립화가 어느 정도 진행되어 있는 것으로 분석되었다. 특히 D 구간의 경우는 40mm 이하의 골재가 대부분(80%이상)이어서 도상의 파쇄로 인한 세립화 정도가 다소 심각한 것으로 판단되었다.

(2) 잔골재 시험결과

자갈 시료에 대한 잔골재 시험결과 Table 6과 같이 C, D 구간 시료에서 10mm이하 입자의 함유율이 약 10%에 이르는 것으로 나타났으며 이런 입자는 도상의 오염을 유발시킬 수 있는 불순물로서 도상자갈의 건전성에 불리한 영향을 미

Table 5. Results of the screen classification test

체의 호칭 (mm)	체별 통과중량의 백분율(%)			기준치
	A 구간	C 구간	D 구간	
22.4	20	39	38	0 ~ 5
31.5	55	66	73	5 ~ 35
40	85	82	87	30 ~ 65
50	100	100	100	60 ~ 100
63	100	100	100	100

Table 6. Test results of small aggregates

체의 호칭(mm)	체별 통과중량의 백분율(%)		
	A 구간	C 구간	D 구간
2.5	0	1	3
5	1	1	11
10	2	6	17
15	5	13	20
22.4 이상	30	40	25

Table 7. Test results of abrasion ratio

시료구분	A 구간	C 구간	D 구간	기준치
마모율(%)	13.2	9.6	10.7	25 이하

칠 것으로 판단된다.

22.4mm 이하의 잔골재 중, 특히 10mm 이하의 잔골재는 불순물로 볼 수 있으며 10mm의 범위(9.5mm~0.075mm)에 있을 경우 세립불순물이라 한다. 특히 D 구간 시료의 경우 10mm 범위의 골재량이 다른 시료의 경우보다 다소 높은 것으로 나타나 다른 구간의 시료보다 상대적으로 다량의 세립 불순물을 포함하고 있는 것으로 판단된다.

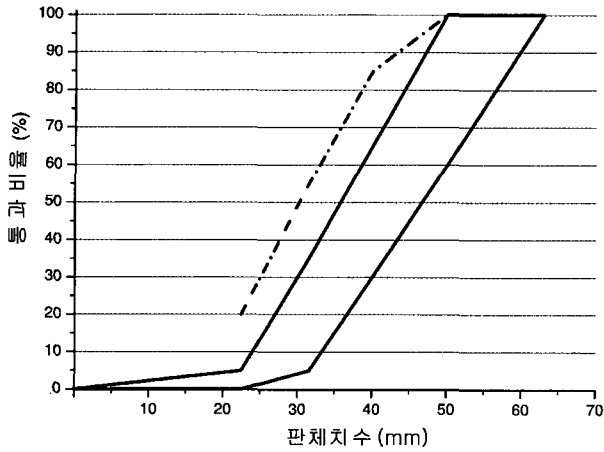
(3) 마모시험결과

마모시험결과를 보면 전체 시료 모두 기준치 이하의 분석 결과를 나타냄으로서 상태가 비교적 좋은 것으로 나타나 자갈의 내마모강도 약화는 현 수준에서는 심각한 수준이 아닌 것으로 분석되었다.

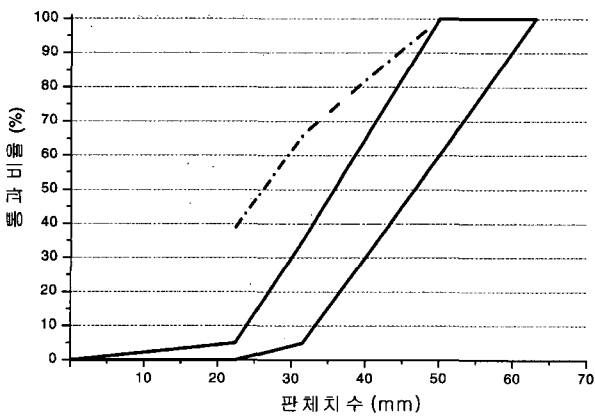
(4) 입도분포

각 구간에서 채취한 시료에 대한 입도분포로부터 자갈도상의 상태를 분석하였다. A 구간의 시료는 육안조사시 관찰된 상태보다 비교적 양호한 입도분포를 보이고 있으며, 입경이 40mm보다 큰 자갈이 45% 포함되어 있다. C 구간의 경우는 A 구간과 마찬가지로 입경이 40mm보다 큰 자갈이 35% 이상 포함되어 있는 반면 도상 분니도 많이 포함되어

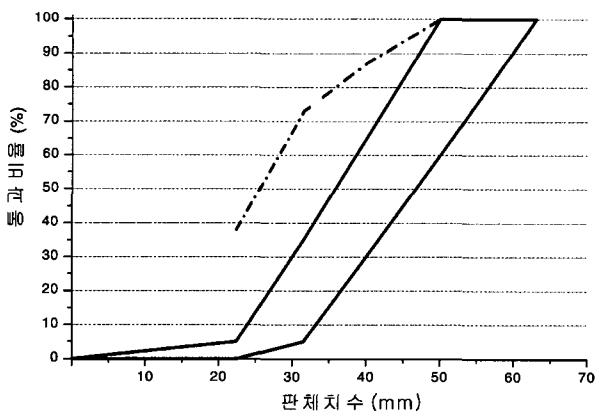
있었다. D 구간의 경우는 전반적으로 세립화가 진행되어 도상자갈이 파쇄됨으로 인해 입도분포가 기준을 만족하지 못하고 있다. 또한 마모율은 높지 않지만 불순물로 볼 수 있는 10mm 이하의 세립자를 15% 이상씩 포함하고 있는 것으로 나타났다.



(a) 시료 A의 입도분포곡선



(b) 시료 C의 입도분포곡선



(c) 시료 D의 입도분포곡선

Fig. 17. Results of the screen classification test

체가름시험 및 마모율 시험의 결과 대부분의 구간에서 열차운행하중을 비롯한 장기간의 사용으로 전반적인 세립화 및 성능저하 현상이 진행된 것으로 분석되며 향후 이로 인한 자갈도상의 내마모강도 약화의 가능성을 갖고 있는 것으로 판단된다. 또한 비록 현재의 마모율은 양호한 것으로 나타났으나 세립화 상태 및 입도 상태가 불량한 것으로 말미암아 이와 같은 상황이 지속될수록 세립화에 따른 도상강도 약화 현상 및 탄성소실 현상은 더욱 가속화 될 것으로 판단된다.

4. 도상탄성력평가

자갈도상의 성능평가를 수행하기 위하여 현장계측자료와 궤도구조해석을 통하여 자갈도상의 탄성계수를 추정하였다. 궤도구조의 성능을 평가하기 위해 Fig. 19와 같이 선형 스프링 모델로서 궤도구조를 구성하였다. 레일은 KS50 레일을 사용하였으며, 레일의 물성은 일반적인 범위 내에 있는 것으로, 침목은 강재로 거동한다고 보고 검토를 수행하였다. 레일패드의 스프링계수를 작게 하면 하중의 분산이 크고 운중변동을 작게 하여 충격하중을 저감할 수 있으므로 지지체를 보호한다. 또한 진동감쇠를 크게 하여 도상의 열화를 막고 구조물의 소음/진동을 억제하는 효과가 있으나, 패드자체의 내구성과 레일자체의 소음이 문제가 된다. 그러나 전체적으로 궤도파괴와 소음, 진동 저감의 측면에서는 패드의



Fig. 18. View of rail pad on the field test

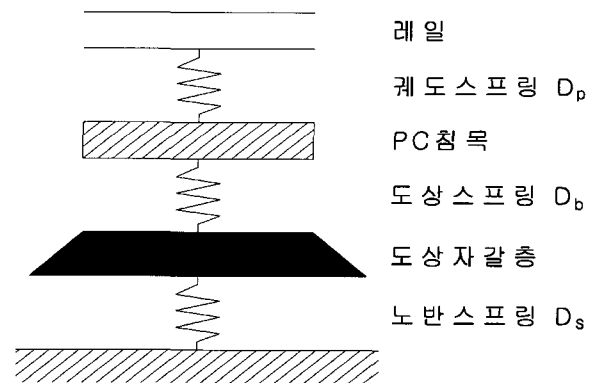


Fig. 19. Composition of Modulus of elasticity

스프링계수가 작은 것이 유리하다.

대상선로에서 가장 많이 사용하고 있는 레일패드는 콘크리트 침목상에서 대다수 사용되고 있는 팬드롤체결구와 조합된 E.V.A. 패드이다. Fig. 18은 측정대상선로의 PC 침목상에 부설되어 있는 레일패드를 나타내고 있다.

궤도의 선형스프링 모델에서 탄성지지력을 계산하기 위한 레일지점지지 탄성계수는 아래의 식과 같이 계산한다.

PC 침목의 경우

$$D_v = 1 / (1/D_p + 1/D_b + 1/D_s) \quad (5)$$

여기에서 D_p : 레일패드 스프링계수

D_b : 도상 탄성계수

D_s : 노반 탄성계수

노반 탄성계수는 흙구조물 표준에 준거한 도상내 노반의 압력분포 면적과 초기 지반반력 계수를 구하고, 식 (6)에 의해 산정한다. 이때 곡선부 등에서 캔트가 있는 경우에는 도상 두께에 캔트량을 가산한 것을 도상 두께로 고려하여 노반 압력의 분포 면적을 산정하는 것으로 한다. 노반의 탄성계수는 일반적으로 아래의 식을 이용하여 산출하게 되나, 대상선로의 고가구간이나 터널 및 지하구간은 콘크리트 인버터위에 도상이 부설되어 있으므로 노반의 탄성계수는 상당히 큰 값으로 가정할 수 있다.

$$D_s = K_s \cdot S_B / 2 \quad (6)$$

여기에서 K_s : 초기 지반 반력계수

$$K_s = 2 \times K75 = 2 \times K30 / 2.2 \quad (7)$$

S_B : 평균 노반 압력의 분포면적

현장계측을 통한 궤도의 동적응답을 바탕으로 도상의 탄성계수를 산정하기 위한 궤도구조해석에 사용되는 물성치

Table 8. Properties of Track Analysis

항 목	기호	물 성 치
윤중	W	측정치 사용
레일변위	y	측정치 사용
레일 (50kg)	단면2차모멘트	I_x 1,960cm ⁴
	단면계수	D_x 274cm ²
	탄성계수	E 2.1 × 10 ⁶ kgf/cm ²
레일패드 스프링계수	D_p	1,000tonf/cm
침목	간격	a 60cm
	유효지지면적	S_T 0.694m ²
도상 탄성계수	D_b	해석 결과로 산출
노반 탄성계수	D_s	상당히 큰 값으로 가정

는 Table 8과 같다.

4.1 궤도구조해석

구조해석 방법은 궤도역학이론에 의거하여 선형구조해석을 원칙으로 수행한다. 궤도 구조의 설계에 필요한 부재 작용력, 추정 변위량 등은 Fig. 20에 보인 흐름에 따라 산정한다.

상하 방향의 부재 작용력은 선형 구조해석인 탄성 미소변위 해석을 수행하여 산정한다. 대표적인 궤도 구조해석 방법으로는 Winkler의 연속 탄성 지지보 이론에 기초를 둔 모델이나 “Hoffmann-Zimmerman-굴월”에 의한 3연 모멘트법의 모델이 일반적이며, 골조 구조물의 해석법인 매트릭스 구조 해석법(매트릭스법, 유한요소법)등도 거론된다. 또한 상하 방향 부재 작용력의 산정은 1차륜분의 설계하중을 재하한 상태에서 구조해석을 하는 것으로 하고 하중열로서 평가할 필요가 있는 경우에는 각 하중에 의한 산정 결과를 종합시키는 것으로 한다. 레일 침하량 y는 아래의 식으로 계산하고 측정치와 비교하여 결과적으로 도상의 탄성계수를 추정한다. 레일침하량의 계산은 윤중이 침목사이 중앙부에 가해졌을 때의 침목변위를 측정하였다. 궤도를 연속탄성체 모델로 고려할 경우 윤중 W가 작용할 때 윤중 위치에서 x만큼 떨어진 위치에서의 레일 수직변위는 다음과 같다.

$$y = \frac{W}{8EI_x\beta^3} \phi_1(\beta x)$$

여기서, EI = 레일 휨강성(kgf/cm²), W = 윤중

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$$

k = 단위레일지지 스프링계수(kgf/cm²)

$$\phi_x(\beta x) = e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x)$$

윤중 작용위치 즉, x=0에서의 레일 변위 y는

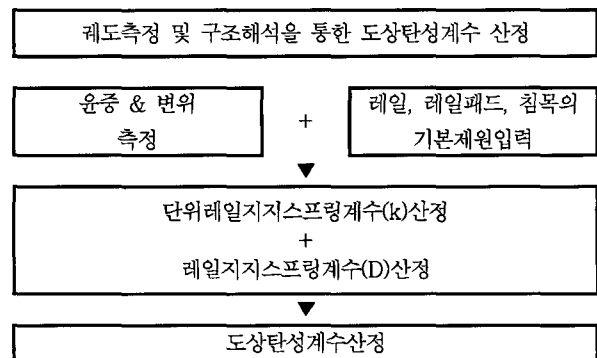


Fig. 20. Flow of Track Analysis

$$y = \frac{W}{8EI\beta^3} \tag{8}$$

$$\frac{W}{y} = 8EI\beta^3 \tag{9}$$

계측을 통하여 구한 실측 윤중 W_m 과 실측 레일변위 y_m 를 이용하여 등가의 스프링계수 k_m 을 구하면

$$\frac{W_m}{y_m} = k_m \tag{10}$$

식 (8)과 식 (9)는 등가이므로 이를 대입하여 단위 레일 지지스프링계수 k 를 구하면

$$k = 3\sqrt{\frac{k_m^4}{64EI}} \tag{11}$$

침목지지스프링계수 또는 도상탄성계수 D_b 는 아래의 과정을 거쳐 산출한다. k 와 레일지지스프링계수 D 와의 관계는 다음과 같으며,

$$k = \frac{D}{a} \tag{12}$$

여기서, a 는 침목간격(cm)

D 는 다음 식과 같으므로 식 (12)와 식 (13)을 이용하여 D_b 를 산출할 수가 있다.

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{D_p} + \frac{1}{D_b} \tag{13}$$

여기서,

D : 레일지지스프링계수(kgf/cm)

D_p : 레일패드스프링계수(kgf/cm)

D_b : 도상스프링계수(kgf/cm)

4.2 궤도구조해석 결과

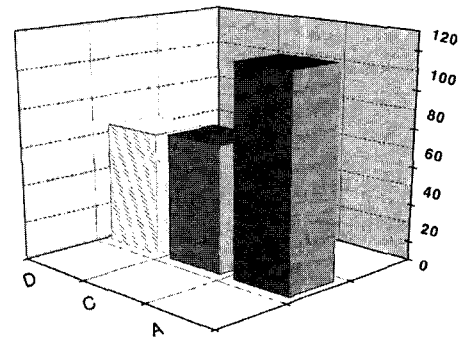
Table 9는 궤도구조해석 결과표로서 궤도 지지계수와 레일압력은 계산에 의한 값이며, 도상탄성계수는 레일패드스프링계수를 1,000 tonf/cm로 가정하여 궤도구조해석을 수행한 결과로부터 산출되었다. 따라서 궤도 해석모델의 구성요소 중에서 도상의 노후 정도만이 미지수로 남아있다. 현 상태의 도상자갈 노후정도 및 도상상태는 현장계측을 통하여 윤중과 레일의 변위를 측정하고, 이들 값을 근거로 도상의

Table 9. Result of Track Analysis I

위 치	윤 중	궤도 지지계수	레일변위	레일압력	도상 탄성계수
	kgf	kgf/cm ²	cm	kgf	MN/m
A구간 (곡선부)	9,200	1,714	0.0482	3,650	110
C구간 (직선부)	8,500	1,084	0.0628	3,373	67
D구간 (교량부)	7,800	1,048	0.0591	3,095	65

Table 10. Result of Track Analysis II

위 치	도상탄성계수						평 균
	(MN/m)						
A구간 (곡선부)	110	98	108	92	105	95	101
C구간 (직선부)	67	65	64	61	58	62	63
D구간 (교량부)	65	62	61	64	56	60	61



위치	도상탄성계수	비교	
A구간	110	곡선부	터널부
C구간	67	직선부	터널부
D구간	65	곡선부	교량부

Fig. 21. Modulus of ballast elasticity

탄성계수를 추정함으로써 판단할 수 있다.

Fig. 21은 측정개소에서의 도상탄성계수 중 대표적인 값에 대한 분석결과를 비교하여 보여주고 있다.

도상의 오염도 추정을 위해 수행한 윤중과 레일변위의 계측 결과를 바탕으로 궤도구조해석을 수행함으로써 도상 탄성계수를 도출하였다. 이 결과값을 이용하여 건전한 자갈도상의 도상 탄성계수와 상대비교를 통해 도상의 오염정도를 추정하였다. 도상의 오염도는 자갈의 마모 및 파쇄 등으로 인한 세립분이 도상에 얼마나 포함되어 있는가에 대한 지표이다. 1997년 3월 일본에서 출간된 “철도구조물 등 설계기

Table 11. A pollution level presumption

계측 위치			도상탄성 계수 (MN/m)	추정오염도	비 고
A구간	곡선부	터널	110	45%	비교적 양호한 구간
C구간	직선부	터널	67	67%	불량 구간
D구간	곡선부	교량	65	68%	불량 구간

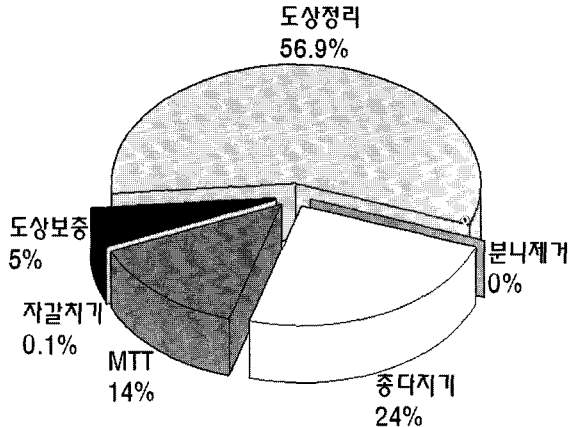


Fig. 22. A state of ballast repair

준·동해철, 궤도구조[유도상궤도](안)에 따르면 궤도구조 해석 시 도상의 탄성계수를 도상 두께에 관계없이 일률적으로 200MN/m으로 정하고 있다. 따라서 건전한 자갈도상의 목표 도상탄성계수는 대략 200MN/m정도로 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 운중 및 레일변위의 동적응답 계측결과를 바탕으로 수행한 궤도구조해석의 결과와 목표 도상 탄성계수(200MN/m)와의 비로써 계측지점의 도상오염도를 추정하여 Table 11에 나타내었다.

Table 11의 결과를 보면 A구간을 제외하고, 대부분의 구간이 60% 이상의 다소 심각한 오염상태에 있음을 알 수 있다. 특히, C구간은 현장조사 결과 침묵하면의 도상이 세립분으로 상당부분 채워짐으로써 일부 침묵하면에서 들뜸 현상이 발생하며, 그 결과 과도한 변위가 발생(침묵수직변위 : 3.20mm)한 것으로 조사되었다.

5. 도상작업 보수현황

도상작업에 대한 인원투입현황을 각 항목별로 세부 분석한 결과는 Fig. 22와 같다. 도상작업 중에서 가장 많은 인력이 투입되는 보수항목은 도상정리 작업으로서 약 57%를 차지하고 있다. 다음이 인력총다지기 작업으로 약 24% 정도의 보수인력이 투입되고 있다. MTT를 이용한 기계총다지기

작업은 14%로 그 다음을 따르고 있다. 그리고 자갈치기 작업 및 도상보충 작업은 거의 하고 있지 않음을 알 수 있었다.

이러한 결과로부터 도상전체의 갱환 없이 부분적인 도상정리와 다지기 작업은 지속적인 도상자체의 열화를 유발하며 하부도상에서부터 세립화 및 고결화가 진행되어 도상의 탄성력 저감을 초래할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결론

자갈도상궤도의 동적거동을 분석하기 위하여 현장측정자료와 궤도구조해석을 통하여 자갈도상의 탄성계수(탄성지력)를 추정하였으며, 체가름시험과 마모시험분석결과와 종합하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 운중변동율의 분포는 크게 2부류로 구분됨을 알 수 있으며 이와 같은 구분은 체가름시험과 마모시험결과로부터 분석된 도상상태가 불량한 구간에서 양호한 구간보다 2배 이상 크게 나타남을 알 수 있다.
- (2) 충격계수 분석결과, 측정구간 중 불량개소의 충격계수는 국외의 설계 충격계수를 비롯한 도상양호구간의 충격계수와 비교하여 2배 이상 크게 상회하는 것으로 나타났다.
- (3) 궤도의 동적응답에 따른 도상탄성계수는 65~110MN/m의 범위로 산출되었으며, 체가름시험 분석결과와 궤도구조해석의 결과가 비슷한 경향으로 나타났으며 도상 불량구간의 추정오염도는 건전한 자갈도상의 목표 탄성계수 대비 약 67%이상임을 알 수 있었다.
- (4) 도상작업 보수현황 분석결과, 도상 노후화 및 열화현상은 도상자갈을 완전히 교체하지 않고 부분적인 도상정리와 다지기 작업 등으로 장기간 사용함에 따른 노후화로 판단된다.

참고 문헌

1. 양재성 등, “궤도생력화를 위한 도상구조에 대한 연구”, 한국철도기술연구원, 연구보고서, 1999.
2. 정근영 등, “철도도상개량을 위한 기초연구”, 한국철도기술연구원, 연구보고서, 1998.
3. 민경주, 오지택, “궤도틀림의 표준편차를 이용한 궤도 품질의 평가에 관한 연구”, 대한토목학회 학술발표회.
4. 임남형, 황성호, 이지하, “도상작업 전, 후의 도상 횡저항력 변동에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 논문집, 2004.
5. 김대상, “도상자갈 입도분포에 따른 도상응력분포에 관한 수치해석적 연구”, 한국철도학회 추계학술대회, 2003.