장비작업에 의한 도상자갈의 마모 파쇄변화에 관한 분석

The analysis of ballast abrasion and fracture by Multiple Tie Tamper

이춘길* Lee, Choon-Kil 김관형** Kim, Kwan-Hyung

ABSTRACT

The ballast, one of track components, plays an essential role as intermedium in transmitting train load to subgrade safely, and the deterioration of ballast directly effects the growth of track irregularity. In this study, we determined the main factor of ballast deterioration was miniature of ballast gravel caused MTT(Multiple Tie Tamper) works and accumulated traffic loads. To estimate the deterioration characteristics of ballast, we carried out field test through track construction for test and the model test simulating the actual operation environment, have done a comparative analysis with the sample's result(crushing rate) of high-speed railroad running actually.

1. 서 론

합리적이고 경제적인 궤도의 유지보수를 위해서는 서로 이질적인 재료특성을 가진 궤도구성품(도상자갈, 레일, 침목, 체결구, 패드)의 보수주기 및 교환주기에 대한 통계적인 이력자료가 확보되어야 한다[1]. 본 연구에서는 고속선 도상자갈의 수명을 예측·평가하기 위한 선행조건으로 실내·외 실험을 실시하였다. 본 연구의 목적은 대형 장비다짐작업의 영향과 누적되는 열차통과하중을 도상열화의 주요요인으로 가정하고 이러한 요인들에 의해 발생되는 도상자갈의 파쇄특성을 분석하는 것이다. 이를 위해 시험용 궤도 부설을 통한 현장실험(실외 실측시험)과 실제의 운행환경을 모사한 모형실험(실내 모형실험)을 수행하였다. 또한, 실제 운행선상의 시료를 채취하여 세립화 정도를 파악하고 시료채취 구간의 보수이력데이터를 분석하여 실험결과값과 비교하였다.

2. 실외 실측실험

2.1 시험용 궤도의 부설

대형 장비다짐작업 횟수에 따른 도상자갈의 파쇄 특성분석을 위하여 경부고속선 영동보수기지 구내 측선(#14)에 시험선을 부설하였다. 그림 5와 같이 시험선 총 연장 25m에 침목 2정당 하나의 case로 총 5개의 시험틀을 구성하였으며, 도상의 깊이는 현 고속철도 설계기준인 침목하면으로부터 350mm로 하였다. 시험용 궤도의 부설을 위하여 사용된 자갈은 현재 고속선 유지보수시 사용되고 있는 도상 자갈과 동일한 재료이다. 시험용 궤도의 부설에 있어, 사전 현장레벨측량을 통하여 시험선의 부설높이를 확인하고 노반의 상면까지 도상을 굴착하였다. 차량통행 및 노반의 장기간 방치에 따라 일부의 노반 표면이 고르지 않을 수 있으므로 시험용 궤도를 부설하기 전에 노반 평탄작업 및 다짐작업을 시행하여 정확한 레벨이 확보되도록 노반을 정리하였다(그림 2).

E-mail: cklee@korail.com

TEL: (042)609-4934 FAX: (042)609-3720 * 코레일, 연구원 기술연구팀, 기술연구팀장, 정회원

^{*} 코레일, 연구원 기술연구팀, 선임연구원, 정회원

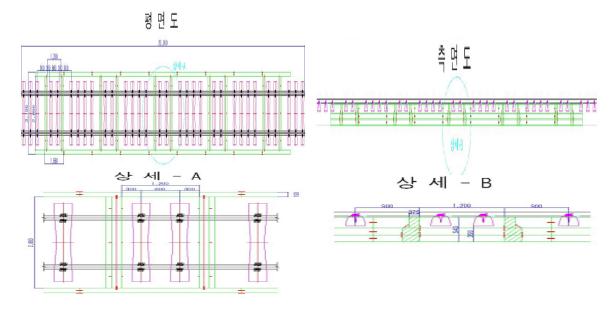


그림 1. 시험선 부설 개념도

도상과 노반 사이에 시트를 부설하여 노반입자의 혼입을 방지하였고, 시료의 섞임을 방지하기 위하여 설치한 각각의 5개 시험틀 내부에는 시료채취의 용이성을 위해 그림 3과 같이 시료채취망을 추가 설치하였다. 시험틀을 설치한 후에는 도상 진동다짐기를 이용하여 100mm두께의 각 층마다 자갈을 다지며 도상을 부설하였고 최종 궤광조립 후에는 선로의 선형정정, 다지기 및 도상안정화를 위하여 MTT와 DTS(동적궤도 안정기; Dynamic Track Stabilizer)작업을 실시하였다.



그림 2. 도상다짐작업

그림 3. 시험틀 설치

2.2 측정실험 및 결과 분석

시험용 궤도부설 후, MTT와 DTS장비를 사용하여 3회, 6회, 9회, 12회, 15회, 20회, 30회, 40회 각각의 도상다짐 및 궤도안정화 작업을 반복하였다. 실제 고속선에서 실시하는 유지보수 형태를 최대한 모사하기 위하여 MTT 1회+DTS 1회의 작업방식으로 총 40회를 실시하였으며, 실제와 동일한 다짐시간 및 다짐봉 진동주기(35Hz)를 사용하였다. 본 연구에서는 자갈도상의 압력분포를 "침목 중앙부의 1/3 구간에 도상 반력(Ballast Reaction)이 없는 상태에서 균일한 크기의 압력이 발생한다"고 가정하고, 침목의 중앙부를 제외한 유효지지부[2] 구간에서 시료의 교란을 최대한 방지하며 조심스럽게 샘플을 채취하였다.

체가름시험 결과, 그림 4과 같이 도상다짐작업 횟수의 증가와 함께 자갈 파쇄입자 비율은 회귀분석 결과 1차 함수의 형태로 선형적인 증가분포를 보였으며, 추세선을 이용한 함수식과의 결정계수(R², Coefficient of Correlation)도 0.9781로 1에 가까운 매우 높은 상관관계를 보였다. 여기서, 파쇄비율 (Crushing Rate)은 채취한 시료의 전체 중량에 대한 22.4mm체 통과시료 중량의 비를 백분율로 나타

낸 값이다.

KS F 2502 시험방법[3]에 근거하여 도상다짐작업 횟수별로 측정한 입도분포시험 결과, 그림 5와 같이 도상자갈의 입도는 다짐작업횟수의 증가에 따라 전 입자에 대해 점증적으로 기준을 벗어나는 결과를 보였다. 이는 도상다짐작업으로 인한 자갈입자의 파쇄가 모든 입자에 걸쳐 전체적으로 고르게 발생하며, 자갈입도의 변화로 인하여 도상의 지지력이 약화되고 도상의 수명이 단축될 수 있음을 의미한다.

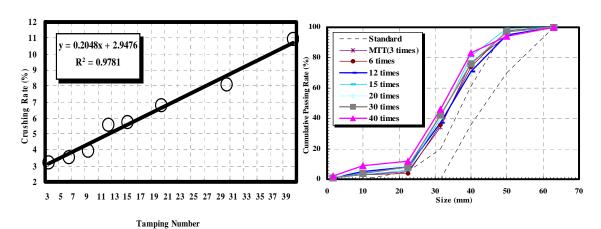


그림 4. 도상다짐작업 횟수별 파쇄입자비율 그림 5. 도상다짐작업 횟수별 입도분포시험결과

3. 실내 모형실험

3.1 실험 개요

누적통과톤수에 의한 도상자갈의 파쇄 특성을 분석하고자 실내 모형실험을 실시하였다. 실내 모형실험에서 실제 궤도 거동을 묘사하는 영역에 대한 개념도는 그림 6과 같으며, 그림 7에는 이동재하하중시험장비를 이용한 모형실험 전경을 보여주고 있다. 본 실험에 사용된 모형토조는 침목과 도상두께를 고려하여 $400 \times 600 \times 600 \times 600$ mm 크기로 제작하였으며, 하중재하판으로 사용된 침목조각은 현재 고속선에 사용되고 있는 PC침목을 거동 묘사영역에 맞추어 절단하여 사용하였다.

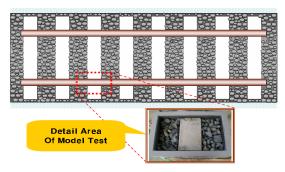


그림 6. 실내 모형실험의 개념도



그림 7. 실내 모형실험 전경

실내 모형실험의 가진 주파수는 "차량 운행에 따라 도상에 가해지는 압력은 각 차축의 영향이 별개로 작용하는 것이 아니라 여러 개의 차축으로 이루어진 대차(bogie) 단위의 영향이 지배적"이라는 가정하에 설정하였다[4]. 이러한 가정을 기초로 대차간 거리를 d, 열차주행속도를 V, 대차하중의 반복주기를 T라고 하면 가진주파수 f는 식(1)과 같이 산정할 수 있다.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{V}{d} \tag{1}$$

재하하중 산출을 위하여 차축의 배치조건을 KTX 기관차 형태로 가정하여 수행한 궤도해석 결과, 침목하면에 작용하는 압력은 0.276MPa, 침목유효지지부의 단위길이당 작용력은 82.94N/mm 이다. 위의 결과를 토대로 하여 실험용 토조의 폭 400mm에 해당하는 환산하중값(33.176kN)을 계산하였고, 반복하중(1, 10, 20, 30, 40, 50, 100만회)을 변수로 하여 실내 모형실험을 수행하였다.

3.2 실험결과 분석

반복하중별로 채취한 시료의 파쇄입자 비율과 입도분포시험 결과, 반복하중재하 횟수의 증가와 함께 도상자갈 파쇄입자 비율은 그림 8과 같이 1차 함수의 형태로 선형적인 증가분포를 보였으며, 추세선을 이용한 함수식과의 결정계수(R²)도 0.9323으로 1에 가까운 높은 상관관계를 보였다. 입도분포시험의 경우, 그림 9와 같이 하중재하횟수의 증가와 함께 점차적으로 입도기준을 벗어나는 결과를 보였으며, 그 변화는 40mm 입자크기에서 현저했다.

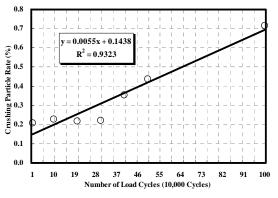


그림 8. 하중재하흿수별 파쇄입자비율

그림 9. 하중재해횟수별 입도분포시험 결과

4. 실험결과 검증

4.1 운행선 시료채취

실내·외 실험에서 얻은 연구결과의 정확도를 측정하기 위한 방법으로 실제 운행선상에서 채취한 시료의 도상자갈 파쇄입자 비율을 기준으로 실험모델식을 검증하였다. 시료채취구간 선정은 잦은 인력보수와 장비작업으로 인하여 도상자갈의 치환을 결정한 지점으로 선정하였으며, 시료채취구간은 경부고속선 하행(T1) 78.347km 지점이다. 실외 실측실험과 동일한 방법으로 시료를 채취하여 KS F 2502 시험방법에 근거하여 도상자갈 체가름시험을 수행하였으며, 시험결과 운행선 시료채취구간의 도상자갈 파쇄비율은 8.46%였다.

4.2 결과 검증

앞서 언급한 실내·외 실험 결과를 종합하여 도상자갈 세립화에 대한 파쇄입자 비율(F) 실험모델식을 다음의 식(2)에 나타내었으며, 변수 N_1 과 N_2 는 각각 MTT다짐작업 횟수와 반복하중재하 횟수 이다.

$$F = f_{Field\ Test} + f_{Model\ Test} \tag{2}$$

 $= [0.2048N_1 + 2.9476] + [0.0055N_2 + 0.1438]$

4.1절에서 언급한 운행선 샘플의 파쇄입자 비율(%) 결과값은 고속선 개통(2004년 4월) 초기부터 도상자갈치환이 이루어진 2008년 3월까지의 지난 4년간 MTT작업횟수와 누적통과톤수에서 기인한다. 이에 관련한 선로보수이력데이터 분석을 통해 산출해 낸 MTT투입횟수는 29회이며, 지난 4년간의 총 누적통과톤수는 약 86,865,000톤(2004년~2008년3월)이다. 3.1절에서 가진주파수 및 환산하중값 결정시 가정한 것과 같이 본 연구에서는 모든 통과톤수를 17톤 축중에 의해서 평가하고 KTX 기관차즉, 차축 4개(2개 대차)에 해당하는 통과톤수를 1개의 하중사이클로 가정하였다. 따라서, 샘플구간의총 누적통과톤수에 대한 환산하중 재하 횟수는 1,280,000회가 되며, 변수 $N_1(29$ 회)과 $N_2(128$ 만회) 값을 식(2)에 대입하면 9.73%의 결과값이 나온다.

결과적으로, 운행선에서 직접 채취한 시료의 도상자갈 파쇄비율값 8.46%는 실험모델식을 통해 산출해 낸 계산결과값(9.73%)과 비교하여 양호한 결과를 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 고속선 도상자갈의 주요 열화요인을 대형 장비다짐작업과 누적통과톤수로 가정하고 현장실험과 모형실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1. 실내 모형실험의 경우, 누적통과톤수의 증가에 따라 점차적으로 입도기준을 벗어났으며 파쇄입자비율도 1차 함수의 형태로 선형적인 증가 추세를 보였다.
- 2. 실외 실측실험의 경우, 도상다짐작업 횟수의 증가에 따른 자갈 파쇄입자 비율은 선형적인 증가분 포를 보였으며, 결정계수 0.9781로 매우 높은 데이터 상관관계를 보였다. 입도분포시험 결과, 도상자 갈의 입도는 다짐작업횟수의 증가에 따라 전 입자에 대해 점증적으로 기준을 벗어나는 결과를 보였으 며, 이는 자갈입도의 변화로 인하여 도상의 지지력이 약화되고 도상의 수명이 단축될 수 있음을 의미 한다. 보수작업 및 열차통과하중으로 인한 자갈 입도변화를 입도기준에 반영하여 보다 정밀한 품질관 리가 이루어져야 할 것이다.
- 3. 실제 운행선상의 시료를 채취하여 세립화 정도를 파악한 결과 22.4mm체를 통과하는 파쇄입자비율은 8.46%였다. 시료채취 구간의 보수이력데이터 분석을 통해 산출해 낸 각각의 변수 값 $(N_1=29$ 회, $N_2=128$ 만회)을 실험모델식에 대입하여 얻은 결과값은 9.73%로 양호한 결과를 나타냈다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하고 있는 2006년도 고속철도기술개발사업(R&D / 06-고속철도III-1)의 지원으로 이루어 졌습니다. 이에 관련기관에 감사드립니다.

참고문헌

- 1. 한국철도기술연구원(2000), "보선작업의 기계화 및 현대화 계획수립을 위한 연구", pp. 71~95.
- 2. 철도청(1998), "철도도상 개량을 위한 기초 연구", 한국철도기술연구원, 최종보고서, pp. 129~146.
- 3. KS F 2502(2005), "굵은 골재 및 잔골재의 체가름 시험 방법".
- 4. 정근영, 김현기, 이종득(1999), "도상자갈의 마모/파쇄 특성", 한국철도학회논문집, 제2권 제3호, pp.61~69.