

경부고속철도 토공부의 자갈도상에 대한 진동특성 연구

A Study on Dynamic characteristics in the Ballast gravel in Gyeongbu High Speed Railway

박준오*1)
Park, Jun-O

강태구**
Kang, Tae-Ku

홍원표***
Hong, Won-Pyo

ABSTRACT

The gravel ballast in the ballasted track has the function to not only transfer/scatter the train loads to subgrade through rail and sleeper but also elastically support the train loads. Because track irregularities results inevitably from the repetitive train loads, the track maintenance should be undertaken for correcting them. By analyzing the track maintenance history in the Gyeongbu high speed railway, this study tries to choose the local two spots in the railway in which the repair frequencies are maximum and relative small; to analyze their dynamic characteristics as well as grade; and to compare them with maintenance history. As the dynamic characteristics of track, the vertical displacement and vibrating acceleration of sleeper as well as acceleration of ballast are measured/analyzed. Furthermore, by collecting soil and gravel on the reinforced roadbed and undertaking ballast screening test, the size distributions are compared with grade distribution standards of high speed railway.

1. 서 론

유도상궤도에서의 자갈도상은 레일로부터 전달되는 열차의 하중을 침목을 거쳐 노반으로 분산시키는 역할과 함께 일정한 탄성적 기능을 발휘하는 궤도구조이다. 또한 유도상궤도는 열차의 반복하중에 기인한 궤도틀림이 발생할 수밖에 없는 특성을 갖고 있기 때문에 틀림복원을 위한 선로보수를 실시하게 된다. 이러한 궤도틀림의 원인은 열차의 통과톤수, 레일표면의 요철, 체결구의 탄성력, 자갈도상의 자갈입도와 다짐상태, 노반의 지지력 등에 따라 발생하게 되며, 이러한 조건에 따라 궤도틀림의 진전속도 또한 급격하거나 완만하게 틀림이 발생하게 된다.

본 연구에서는 경부고속선의 선로유지보수이력을 분석하여 짧은 구간에 국부적으로 보수가 많은 구간을 선정하고 이 구간에서 보수가 가장 많은 지점과 가장 적은 지점을 중심으로 궤도의 동특성과 입도를 분석하여 두 지점간의 궤도와 유지보수이력과의 관계를 비교하고자 하였다. 두 지점의 비교방법으로 궤도의 동특성은 침목의 수직변위와 진동가속도 및 도상의 진동가속도를 계측하여 분석하였고, 각 지점에 대하여 강화노반상면까지 자갈을 채취하여 체가름시험을 실시하여 자갈도상의 입도분포를 고속철도입도 분포기준과 비교하는 방법으로 실시하였다.

2. 자갈도상 진동특성 평가

2.1 대상구간 선정

고속선 1단계구간의 토공부를 대상으로 하는 자갈도상의 진동특성을 분석하기 위하여 첫 번째로 과거

* 코레일테크, 기업부설연구소, 부장
E-mail : railway@hanafos.com

TBL : (042)257-9486 (502) FAX : (042)257-9481

** 코레일, 시설기술단 선로관리팀, 부장

*** 코레일테크, 기업부설연구소, 대리

2007년 1월부터 2008년 11월까지의 선로유지보수자료를 입수하여 보수빈도를 분석하였고, 두 번째로 서론에서 언급하였듯이 비교적 짧은 거리에서 보수빈도의 차이가 큰 곳을 조사하는 방식으로 도상자갈평가구간을 선정하였다.

선정된 구간은 그림1과 같이 59K950~60K350의 400m구간으로 경기 화성시 양감면내에 위치하며 사창고가와 용소고가 사이에 있는 토공부로서 약 8.5m의 절토부와 약 12.1m의 성토부가 존재하는 구간이다. 이 구간은 곡선반경 R=8,000m, 종단선형은 -10%에서 60K127지점을 중심으로 반경 R=28,000m, L=70에 의하여 -5%로 변화하며, 캔트량은 115mm인 레도이다.

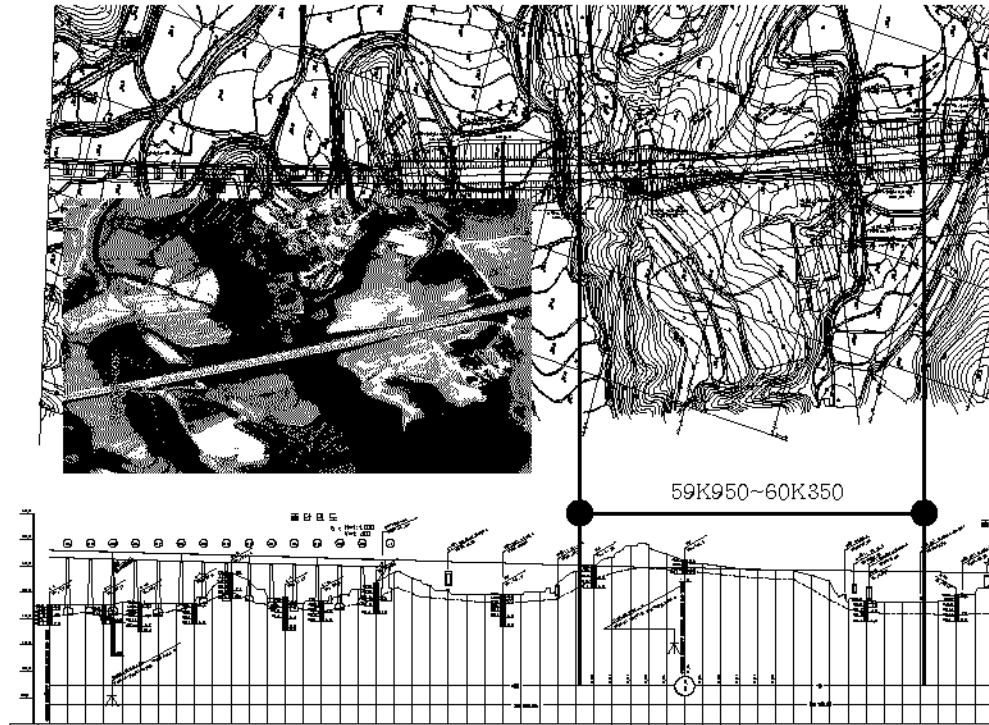


그림1. 시험대상구간 종평면도 및 위성사진

2.2 선로유지보수이력 분석

선로유지보수자료의 인력탐핑에 대하여 선로유지보수현황을 분석한 결과 그림2와 같이 60K180에서 23개월 동안 79회로 가장 많은 보수를 실시하였으며 60K170은 17회로 상대적으로 보수가 적은 것을 알 수 있었다. 두 지점 사이의 거리는 10m이며 보수횟수는 62회의 차이를 보이고 있다. 또한 60K224와 60K239에서도 각각 67회, 6회로 거리 15m에 61회의 큰 차이를 나타내고 있었다.

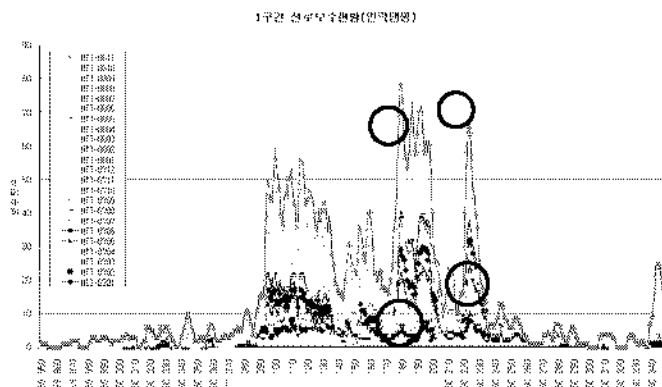
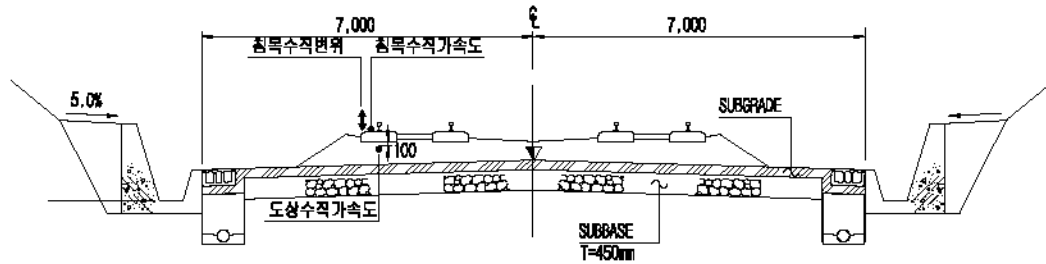


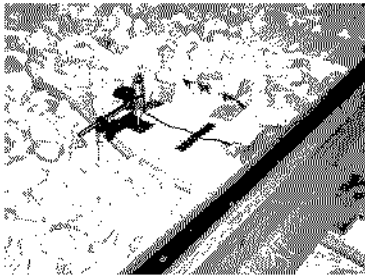
그림2. 하행선(T1) 선로유지보수이력 분석결과

2.3 궤도 동특성 계측 및 분석

선로유지보수이력 분석결과 T1에서 보수횟수가 상대적으로 적은 60K170지점과 보수횟수가 가장 많은 60K180지점에서의 궤도의 동특성을 분석하기 위하여 침목수직변위, 침목수직가속도, 도상수직가속도를 그림3과 같이 설치하여 KTX 열차통과시 측정을 실시하여 총 11대의 데이터를 획득하였다.



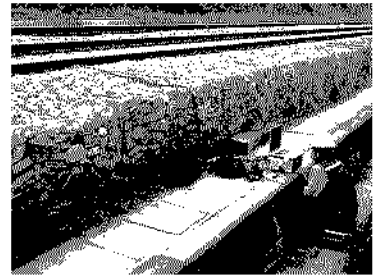
(a) 변위계 및 가속도계 설치도



(b) 침목수직변위계 및 가속도계



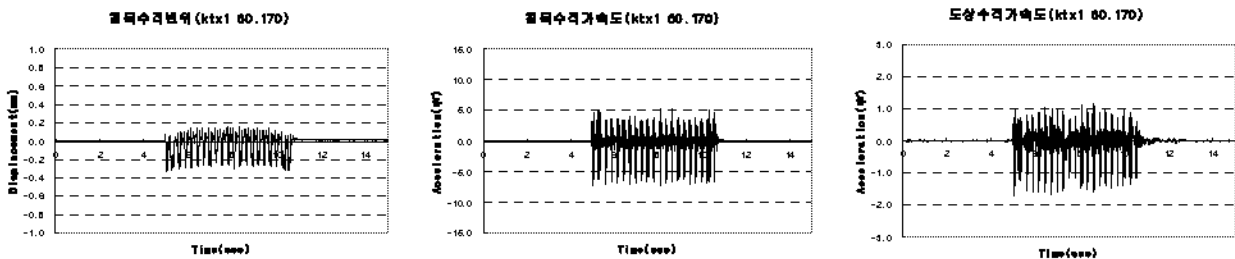
(c) 도상가속도계



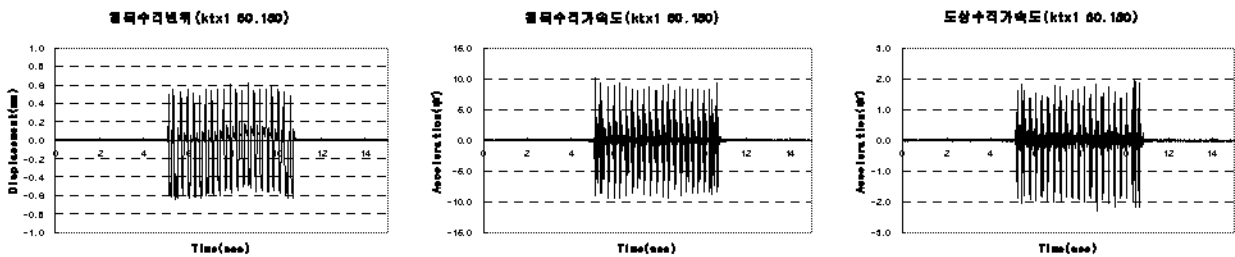
(d) 동적데이터 수집

그림3. 60K170과 60K180 궤도계측

KTX 11대의 계측데이터 중에서 그림4와 같이 첫 번째로 획득한 계측데이터의 예시이다. 60K170지점과 60K180지점에서 계측한 두 데이터를 비교하면 보수횟수가 상대적으로 적은 60K170지점이 작은 값을 나타내고 있다.



(a) 60K170 T1

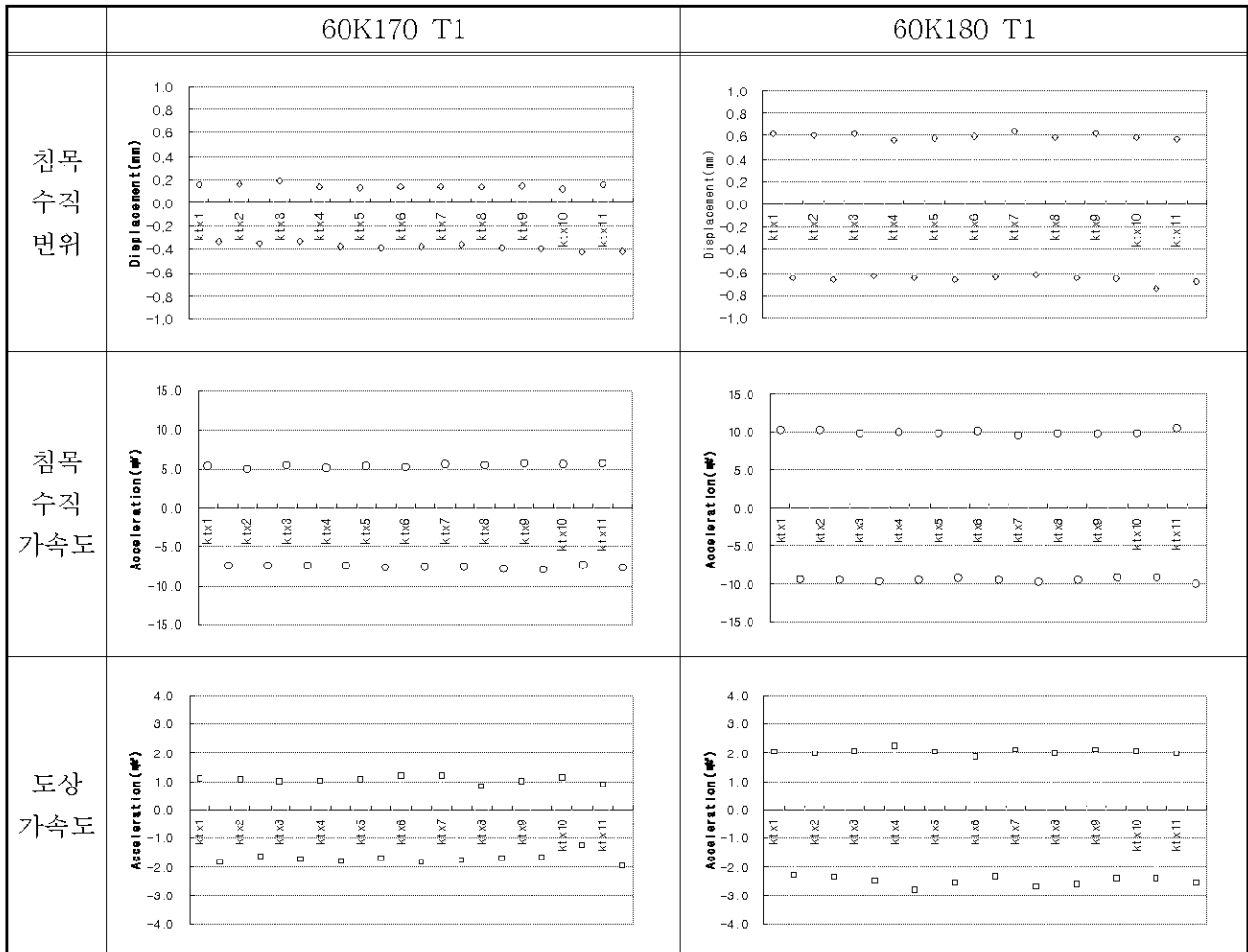


(b) 60K180 T1

그림4. KTX 측정결과 예시

계측 당시 KTX의 열차속도는 평균 270km/h이며 계측 3일전에 1종작업을 실시하였기 때문에 두 지점의 궤도선형은 대체로 비슷한 상태였을 것으로 추정된다. 계측데이터의 부호는 하향일 때 값을 ‘-’로 상향일 때 ‘+’로 측정하였으며 측정된 침목수직변위, 침목수직가속도, 도상수직가속도를 각각 비교하였다(도표1).

도표1. 두 지점의 계측 분석결과

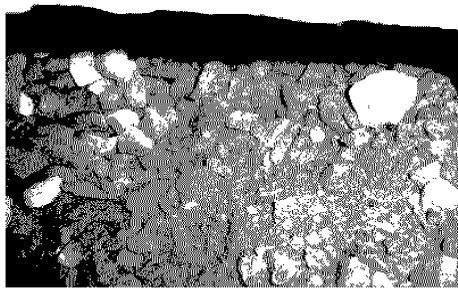


침목에 대한 수직변위 측정결과 60K170지점의 상향 최대값은 ktx3에서 0.19mm, 하향 최대값은 ktx10에서 -0.42mm로 측정되었으며, 60K180지점의 상향 최대값은 ktx7에서 0.64mm, 하향 최대값은 ktx10에서 -0.74mm로 측정되었다. 두 개소의 측정값을 비교하면 60K170지점에 비하여 60K180지점에서의 수직변위가 하향으로 0.2mm, 상향으로 0.4mm정도 더 큰 값이 측정되었으며, 변동폭 또한 1.25mm, 0.52mm로 60K180에서 2배 이상의 변화량을 나타내었다. 침목의 수직가속도에 대한 계측결과는 60K170지점의 최대값은 ktx9에서 7.92 $\frac{m}{s^2}$ 로 측정되었으며 60K180지점의 최대값은 ktx11에서 10.39 $\frac{m}{s^2}$ 로 측정되었고, 도상에 대한 수직가속도 측정결과 60K170지점의 최대값은 ktx11에서 2.00 $\frac{m}{s^2}$, 60K180지점은 ktx4에서 최대값 2.80 $\frac{m}{s^2}$ 로 측정되었다.

2.4 도상자갈 입도분석

동특성 계측을 실시한 T1 60K170과 60K180의 도상자갈 입도분포를 조사하기 위하여 그림5와 같이 도상자갈을 채취하였다. 시료는 침목 하면에서 분니층까지 1차 채취, 분니층에서 강화노반층까지 2차 채취로 구분하여 실시하였다. 또한 도상자갈의 분니층은 도표2와 같이 60K180에서는 침목하면으로부터 약 15cm, 60K170에서는 약 20cm 부터 측정되었으며 그림5(a),(c)와 같이 육안으로도 60K180에서 세립분이

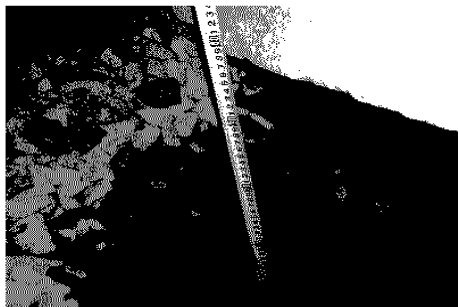
더 많고 단단한 것을 확인 할 수 있었다. 강화노반면에 대하여 자갈 채취한 두 지점에서의 횡단면을 레벨측량으로 확인한 결과 두 개소 모두 침목하면에서 40cm, 횡단경사 3%로 양호한 상태를 유지하고 있었다.



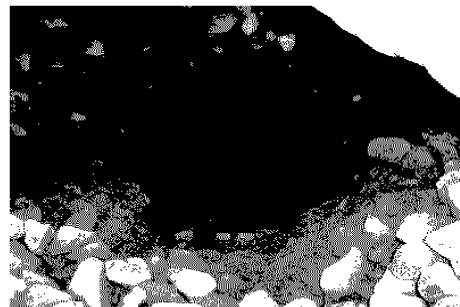
(a) 60K170 침목하면 20cm 지점



(b) 60K170 침목하면 40cm 지점



(c) 60K180 침목하면 15cm지점



(d) 60K180 침목하면 40cm지점

그림5. 60K170 및 60K180 도상자갈 채취

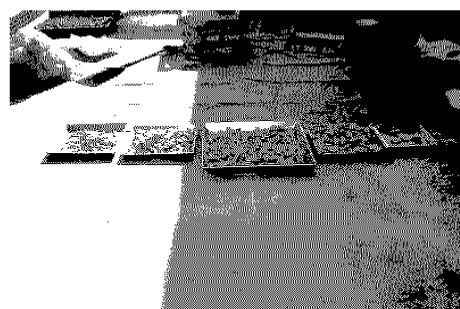
도표2. 강화노반 및 분니발생층 Level 측량결과

	60K170	60K180	비고
분니발생층	20cm(침목하면)	15cm(침목하면)	
강화노반층	40cm(침목하면)	40cm(침목하면)	

선정구간에서 채취한 도상자갈에 입도분포를 평가하기 위하여 그림6과 같이 체가름 분석을 실시하였다. 국내 고속철도 입도분포 기준은 그림7의 우측에 표로 표기하였고 좌측 그림의 점선범위에 해당한다. 60K180지점에서 채취한 자갈시료는 입경 40mm 누적통과량 80.4%, 입경 31.5mm 누적통과량 50.2%로 가장 크게 나타났으며 60K170지점에서 채취한 자갈시료는 입경 40mm 누적통과량 76.4%, 입경 31.5mm 누적통과량 40.7%로써 도표3으로 그 결과를 정리하였다. 참고적으로 그림7의 범례에서 '세척자갈-fianl'로 표기된 입도곡선은 도상자갈의 파쇄특성에 관한 모형실험에서 시험부설했던 자갈의 입도곡선으로 40mm 누적통과량이 고속철도입도분포기준의 범위에 근접하고 있는 것으로 발표되었다1). 체가름 분석결과 두 지점의 자갈은 고속철도 입도분포 기준을 벗어나 세립화된 입도분포로 분석되었다. 또한 토사의 혼입율은 60K180에서 22.31%, 60K170에서 19.93%로 선로정비지침(국토해양부 2007.12) 제179조 자갈치기 시행 기준값인 20%를 상회하거나 거의 근접하고 있었다.

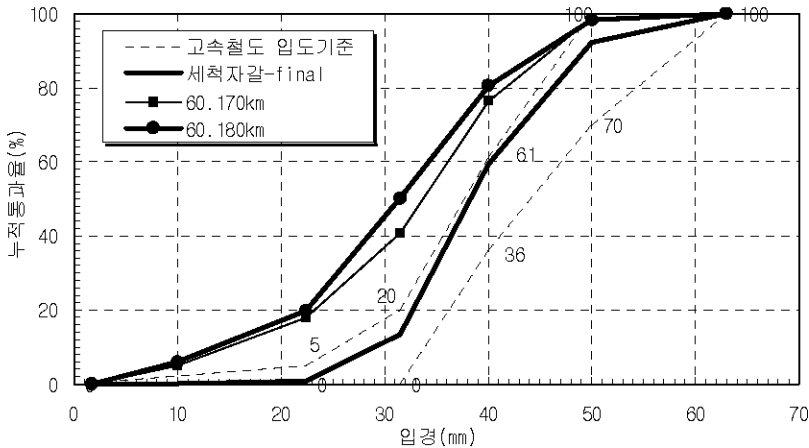


(a) 시료 계량



(b) 각체에 남은 양

그림6. 도상자갈 체가름 분석



골재입경	하한선	상한선
0.0	0	0
22.4	0	5
31.5	0	20
40.0	36	61
50.0	70	100
63.0	100	100

그림7. 1구간 60K170, 60K180 입도곡선

도표3. 두 지점의 체가름 시험결과

체 크기 (mm)	60K170지점 채취			60K180지점 채취		
	각 체에 남은 양 (g)	각 체에 남은 양의 누계 (g)	누적 통과율 (%)	각 체에 남은 양 (g)	각 체에 남은 양의 누계 (g)	누적 통과율 (%)
1.7	2,675	53,375	0.0	5,750	96,650	0.0
10	6,850	50,700	5.0	13,300	90,900	5.9
22.4	12,200	43,850	17.8	29,450	77,600	19.7
31.5	19,050	31,650	40.7	29,250	48,150	50.2
40	11,950	12,600	76.4	17,250	18,900	80.4
50	650	650	98.8	1,650	1,650	98.3
63	0	0	100.0	0	0	100.0
계	53,375			96,650		

※ 1.7mm체를 통과한 시료는 60K170지점 1,388g / 60K180지점 3,231g 임.

2.5 두 지점의 진동특성 및 입도분석 비교

앞에서의 계측결과에서 보수횟수가 많은 60K180지점의 침목 수직변위는 상하향으로 변위폭이 거의 일정하고 60K170에 비하여 침목수직변위, 침목수직가속도 및 도상가속도가 더 크게 발생하고 있었다. 또한 자갈도상층의 두께에서는 고속철도 설계기준에서는 침목하면 자갈도상층의 두께인 350mm로 규정하고 있으나 60K170과 60K180지점에서는 모두 400mm로 측정되었다. 그러나 두 지점에서 분니층이 각각 약 200mm, 약 250mm로 두껍고 견고하게 다져진 상태였다. 따라서 두 지점에서 체 기능을 갖는 도상자갈두께는 약 200mm, 약 150mm 정도이다. 두 지점에 대한 체가름 시험결과에서도 60K170지점의 입도분포와 토사혼입율이 상대적으로 양호한 것으로 분석되었다(도표4).

본래 자갈도상의 기능은 레일과 침목으로 전달되는 열차의 하중을 노반으로 고르게 전달함과 동시에 일정한 탄성력을 갖는 일종의 스프링 역할을 한다. 앞에서 실험한 두 지점에서는 전체 자갈도상층 두께는 만족하나 하부에 분니층이 형성되어 자갈도상의 탄성기능이 저하되고, 열차 주행시 도상에 충격과 진동을 유발시킴으로써 뜬침목과 궤도틀림을 발생시키며, 이에 대한 보수과정에서 자갈의 세립화가 가속되는 악순환이 진행되고 있다. 따라서 자갈도상의 탄성력 회복을 위한 자갈치기 등의 적절한 보수가 이루어져야 할 것이다.

도표4. 진동특성 및 도상자갈 결과 비교

구 분	60K170	60K180
인력탐핑 보수횟수	17/21 개월	74/21 개월
침목수직변위	0.19/-0.42 mm	0.64/-0.74 mm
침목수직가속도	7.92 %	10.39 %
도상수직가속도	2.00 %	2.80 %
분니층의 두께	20 cm	25 cm
도상자갈의 토사혼입율	19.93 %	22.31 %
도상자갈의 입도 (40mm/31.5mm통과량)	76.4 %/40.7 %	80.4 %/50.2 %

3. 결 론

본 연구에서는 경부고속선의 선로유지보수이력을 분석하여 짧은 구간에서 국부적으로 보수가 많은 구간을 선정하여 이 구간에서 보수가 가장 많은 지점과 가장 적은 지점을 중심으로 궤도의 동특성과 입도를 분석하여 두 지점간의 궤도와 유지보수이력과의 관계를 비교하고자 하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 선정구간의 인력탐핑에 대한 선로유지보수이력 자료를 토대로 근접한 거리에서 유지보수횟수가 상이한 두 지점에 대하여 궤도의 동특성을 분석한 결과 보수가 상대적으로 많은 지점에서 침목의 수직변위, 가속도 및 도상가속도가 더 큰 것으로 분석되었다.

2. 두 지점에 대한 도상자갈에 대한 입도분포를 조사하기 위한 자갈채취시 두 지점에서 세립화된 단단한 분니층을 확인하였고, 강화노반면에서 횡단면에 대한 레벨측량결과 횡단경사는 양호하였다. 채취한 자갈의 체가를 분석결과 고속철도 입도분포범위를 벗어나 세립화되어 있었고, 토사의 혼입율은 선로정비 지침의 자갈치기 시행 기준값을 상회하거나 거의 근접하고 있는 것으로 분석되었다.

이상의 결과는 고속선 토공부중 일부에서 궤도의 동특성분석과 도상자갈의 입도분석을 시행한 결과이므로 향후 보다 많은 구간을 선정하여 시험을 실시한다면 도상자갈의 진동특성과 유지보수와의 관계를 규명할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 이춘길, 김남홍, 우병구, 이성욱(2008), “고속선 도상자갈의 파쇄특성에 관한 연구”, 한국철도학회 논문집, 제11권 4호, pp.384-389
2. 김만철(2007), “경부고속선 자갈궤도의 진동에 영향을 미치는 인자에 대한 분석”, 한국철도학회 논문집, 제10권 5호, pp.463-472
3. 김대상, 권순섭, 이수형, 황선근, 박태순(2008), “도상 및 노반상태 평가를 통한 궤도유지보수작업의 적정성 연구”, 한국철도학회 논문집, 제11권 3호, pp.334-341
4. 정근영, 김현기, 이종득(1999), “도상자갈의 마모/파쇄 특성”, 한국철도학회 논문집, 제2권 3호, pp.61-69
5. 김대상(2006), “DEM을 이용한 자갈도상의 응력분포에 관한 연구”, 한국철도학회 논문집, 제9권 1호, pp.7-11
6. KS F 2508(2002), “로스엔젤레스 시험기에 의한 굵은 골재의 마모 시험 방법”.
7. KS F 2502(2005), “굵은 골재 및 잔골재의 체가름 시험 방법”.