

자갈도상의 노후화에 따른 궤도구조의 동적거동에 관한 연구(II)

A study on the Dynamic Behaviors of Track due to Deterioration characteristics of Ballast(II)

서수은* 박용걸** 최정열***
Seo, Su-Euen Park, Yong-Gul Choi, Jung-Youl

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.

1. 서론

자갈도상 궤도는 초기 부설비용이 저렴하고 적절한 탄성을 유지하기 쉬우며 유지보수가 용이하다는 장점이 있어서 철도의 시작부터 현재까지 널리 사용되고 있는 궤도구조이나 현재 국철 및 지하철의 경우 장기사용에 따라 자갈도상 기능이 급격히 저하되고 연간 점차 증가되는 열차 운행 통과톤수로 인하여 장기적인 궤도유지관리에 문제점이 발생하고 있어, 점차 이러한 문제들로 인하여 유지보수비용이 증가할 것으로 추정된다.

자갈도상궤도에서 자갈의 상태는 궤도의 안전도를 판단하는 결정적인 요인으로서 자갈이 노후(마모, 파쇄, 풍화, 고결)되어 충격흡수력, 마찰력 등의 기능이 상실될 경우 레일과 침목이 훼손되고 이는 바로 열차주행 조건의 악화로 연결되어 사용성 및 열차운행 안정성 측면에서 불리한 결과를 초래한다. 따라서 이러한 자갈도상이 노후화됨에 따라 발생하는 궤도구조의 동적거동의 특성을 파악하고자 현장계측을 통한 분석을 수행하였다.

* 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정, 정회원

** 서울산업대학교 철도전문대학원 교수, 정회원

*** 서울산업대학교 공학석사, (주)대한콘설탄트 철도부 사원, 일반회원

2. 궤도의 동적거동 계측수행

열차주행시 발생하는 레일과 침목의 변위, 가속도 및 운중, 횡압에 대한 계측을 수행하여 자갈도상궤도의 탄성지지력을 평가하고, 이를 기초로 취약요인을 분석하고자 하였다. 주행하는 열차에 의해 궤도에 작용하는 운중은 열차자중에 의한 정적하중 이외에 열차속도의 증감에 따라 발생하는 동적하중에 의한 충격력의 영향까지 포함되어 발생된다. 따라서 운중의 측정값은 열차속도에 따른 동적하중으로 간주할 수 있으며 열차의 정적하중과 비교하여 열차주행에 따른 궤도의 충격계수를 산출할 수 있다.



그림1 게이지부착전경

3. 궤도도상자갈의 상태평가 및 분석 (입도분석 및 마모시험)

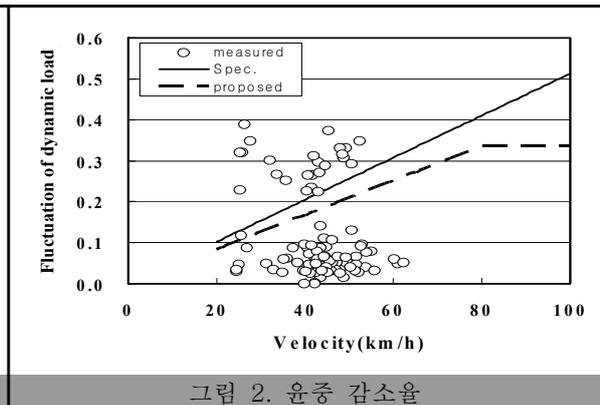
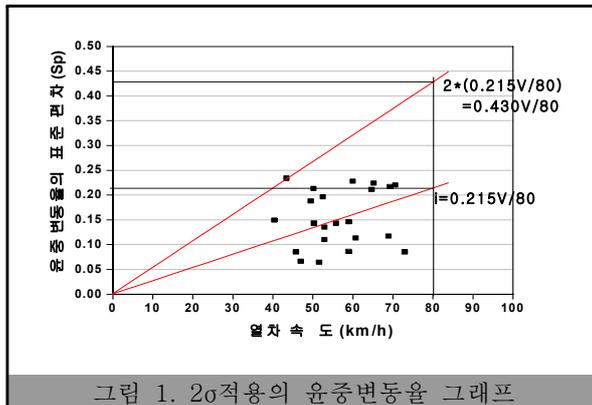
취약개소를 포함한 총 3개소에 대한 도상자갈을 채취하여 도상자갈의 열화상태를 파악하기 위하여 자갈의 입도분포 및 궤도 하부도상의 내마모(耐磨耗)강도 약화정도를 파악하기 위한 체가름시험과 마모시험을 수행하였다.

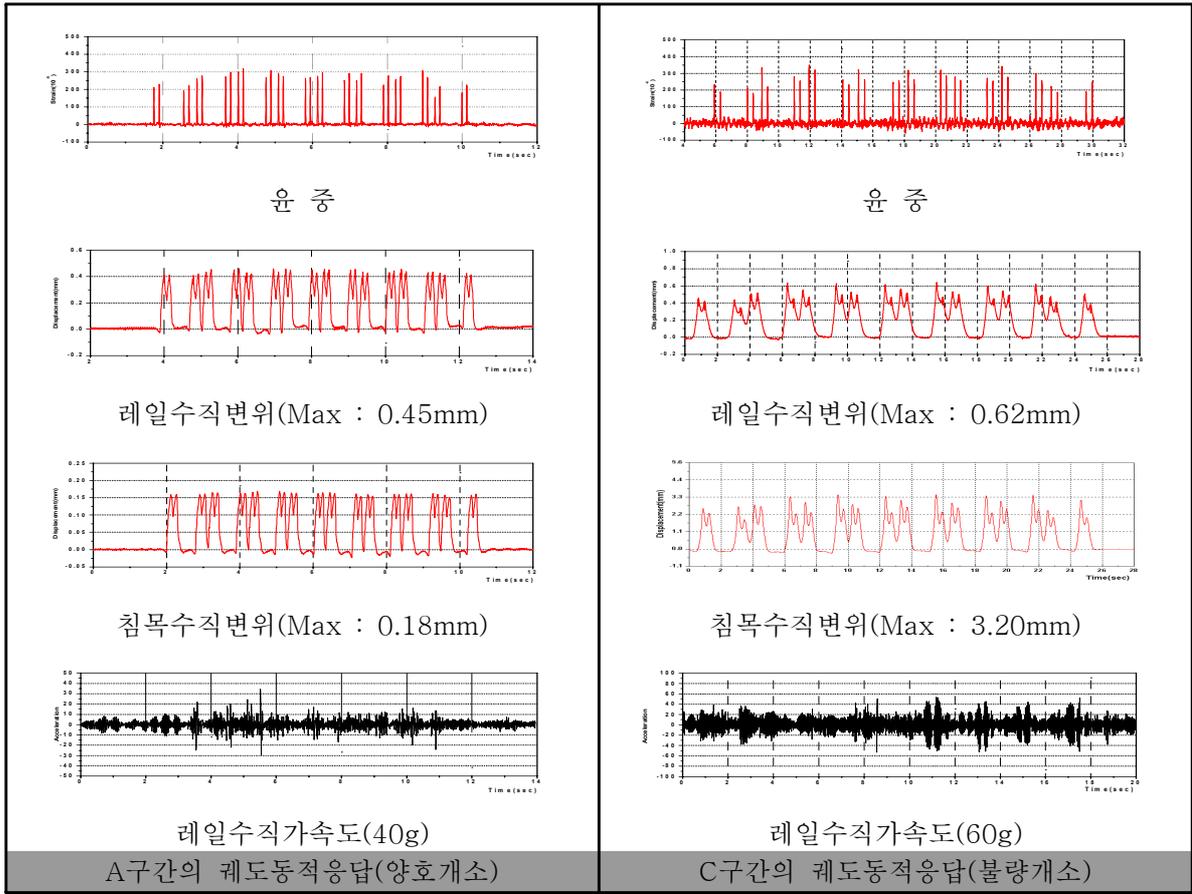
4. 분석결과

4.1 궤도의 동적거동 계측 분석결과

대상구간의 경우 0.43V/80 정도의 궤도충격계수값을 얻었으며 이는 일본에서 현재 적용중인 계수 및 미국 AREA에서 사용하고 있는 0.513V/100 와 거의 유사한 값이나 분석대상 선로조건이 대부분 정적레일 구간이며 속도대역이 그다지 높지 않음을 감안할 때 다소 높은 값이다.

대상구간의 운중감소율은 일본에서 제시하고 있는 A한도(통상의 사용상태의 한도값) 0.281 및 B한도(이상시 중국상태의 한도값) 0.375와 비교하여 볼 때 대체적으로 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 열차운행 평균속도대역(40~60km/h)에서 다소 많은 빈도의 값들이 A한도를 초과하는 것으로 나타났는데, 이러한 결과는 자갈도상궤도의 탄성력 저감에서 기인한 것으로 추정할 수 있으며 아울러 부분적으로 궤도상태가 불량한 것으로 판단된다. 또한 도상상태가 양호한 구간과 불량한 구간에서 수행한 현장측정을 통하여 대표적인 궤도동적응답을 비교한 결과 C구간(불량개소)에서의 계측값들이 A구간(양호개소)의 것을 다소 상회하는 것으로 나타나 자갈도상 상태에 따른 궤도의 동적응답의 특성을 파악 할 수 있었으며, 이는 육안조사 및 입도분포시험을 비롯한 궤도구조해석의 결과와 동일한 경향을 나타냄으로서 계측결과에 대한 타당성을 보여주고 있다. 또한 C구간의 침목수직변위가 과다하게 측정된 것은 도상세립화에 따른 뜬침목현상에서 기인한 것으로, 이러한 현상이 지속될수록 도상의 파괴 및 고결화는 가속화될 것으로 판단된다.





4.2 도상자갈의 체가름시험 및 마모시험분석결과

입도분석 결과 일부구간을 제외한 대부분의 구간에서 세립화가 진행되었으나, 마모율 분석 결과는 기준치를 만족하였다. 일부 고가교 구간의 경우에는 잔골재 비중이 높아 세립화된 토사가 고결화되어, 도상 탄성력이 감소되어 추후 교량구간에서 발생하는 열차하중을 도상에서 흡수하여 하부 구조로 분산시키는 자갈도상 본연의 기능이 약화될 가능성이 있는 것으로 판단된다.

4.2.1 시료채취 및 육안검사

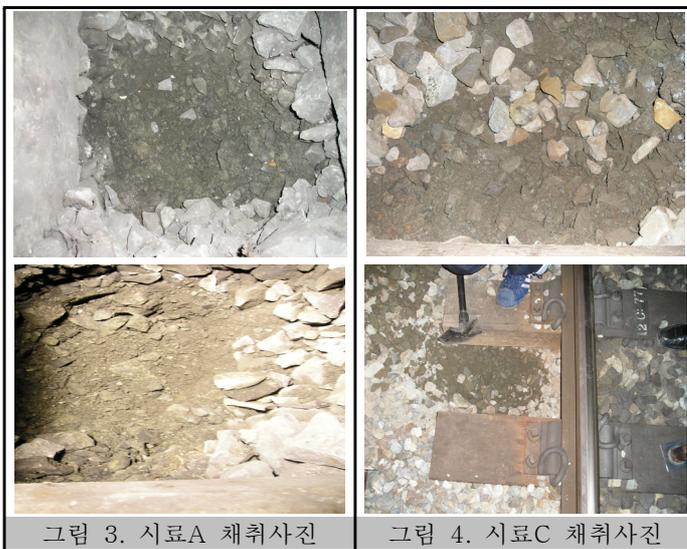


표 1. 체가름시험 시료채취 장소

시료 구분	채취장소	육안관찰상태
A	지하직선구간	양호
B	지하곡선구간	세립화
C	고가곡선구간	세립화

시료 A를 채취한 구간의 자갈도상은 침목하면까지 비교적 양호한 상태로 분포하고 있었으나 일정 깊이 이하에는 다소 심각한 상태의 파쇄된 입자가 있었으며 소립자에 의한 오염도 역시 심각한 수준인 것으로 육안조사 결과 분석되었다.

육안조사시 도상위로 다소 많은 미립자 흔적을 관찰할 수 있었던 구간에서 채취한 시료 B는 침목하면부터 세립자와 미립자분으로 인하여 도상의 공극이 거의 다 채워진 상태에서 도상 오염이 다소 심한 상태였다. 침목하면 도상의 경우 거의 대부분의 도상자갈이 파쇄, 마모되었고 이러한 잔골재 성분들이 세립자분과 같은 오염물질과 혼합되어 있는 상태로 관찰되었다. 따라서 이러한 상태가 유지된다면 도상은 조만간 거의 탄성을 소실하게 될 것으로 판단되었으며 일부는 이미 자갈도상의 기능을 상실한 것으로 관찰되었다.

4.2.2. 체가름시험 및 마모시험 결과

표 2. 체가름 시험 결과

체의 호칭 (mm)	체별 통과중량의 백분율(%)			기준치
	A	B	C	
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

표 3. 잔골재시험 결과

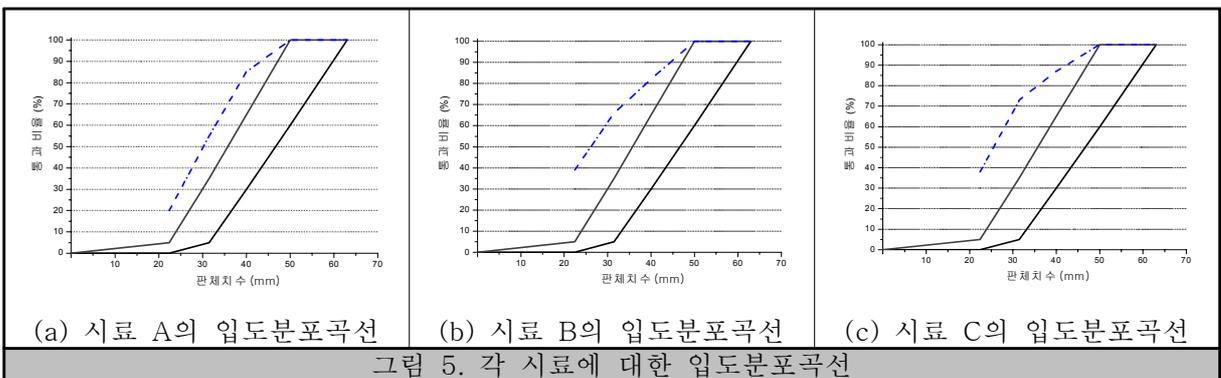
체의 호칭 (mm)	체를 통과중량의 백분율(%)		
	A	B	C
2.5	0	1	3
5	1	1	11
10	2	6	17
15	5	13	20
22.4 이상	30	40	25

표 4. 마모시험 결과

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

시료 모두 다 50mm 이상의 큰 골재가 기준치 이상으로 포함되어 있었고, B, C시료의 경우는 세립화가 상당히 진행되어 있었다. A 시료의 경우는 도상자갈의 입도가 기준을 비교적 만족하고 있었지만(큰 골재를 기준치 이상으로 함유함), B, C시료는 22.4mm이하의 잔골재를 30% 이상 포함하고 있어 세립화가 어느 정도 진행되어 있는 것으로 분석되었다. C시료의 경우는 40mm 이하의 골재가 대부분(80%이상)이어서, 도상의 파쇄로 인한 세립화 정도가 다소 심각한 것으로 판단되었다. 모든 자갈시료에 대한 잔골재 시험결과는 B, C시료의 경우에서 10mm이하 입자의 함유율이 4~14%에 이르는 것으로 나타났으며 이런 입자는 도상의 오염을 유발시킬 수 있는 불순물로서 도상자갈의 건전성에 불리한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이러한 잔골재 시험의 결과를 표 2.25와 같이 나타내었다. 10번체의 범위(9.5mm~0.075mm)에 있을 경우 세립불순물이라 한다. 특히 시료 C의 경우 10번체 범위의 골재량이 다른 시료의 경우보다 다소 높은 것으로 나타나 다른 구간의 시료보다 상대적으로 다량의 세립불순물을 포함하고 있는 것으로 판단된다.

마모시험 결과를 보면 B, C시료의 경우 전체 시료 모두 기준치 이하의 분석결과를 나타냄으로서 상태가 비교적 좋은 것으로 나타나 자갈의 내마모 강도의 약화는 현 수준에서는 심각한 수준이 아닌 것으로 분석되었다.



체가름 시험 및 마모율 시험의 결과로 보면 도상이 꾸준한 유지관리 하에서도 불구하고 열차운행하중을 비롯한 장기간의 사용으로 인해 전반적인 세립화 및 성능저하 현상이 진행된 것으로 분석되며 따라서 향후 이로인한 자갈도상의 내마모강도 약화의 가능성을 갖고 있는 것으로 판단된다. 또한 일부구간의 경우 주변여건상 자갈도상 궤도의 유지관리 측면에서 정기적이고 세심한 관리가 용이 하지 않은 유지관리상의 단점으로 인해 비록 현재의 마모율은 양호하나 세립화 상태 및 입도 상태는 불량한 것으로 판단되는 바 이와 같은 상황이 지속될수록 세립화에 따른 도상강도 약화현상 및 탄성소실 현상은 향후 더욱 가속화 될 것으로 판단된다. 또한 도상자갈을 클리닝하거나 갱환하지 않은 상태에서 도상자갈을 보충하게 되면 큰골재와 잔골재가 많이 분포하게 되어 입도분포가 흐트러지게 되는데 이러한 현상이 일부구간의 도상자갈에서 나타나는 바 자갈도상 유지관리의 어려운 현실을 반영하고 있는 것으로 분석되며 전체적으로 도상자갈의 노후화가 많이 진행되었음을 보여주고 있다.

5. 도상궤도의 상태 및 성능 평가

자갈도상의 성능평가를 수행하기 위하여 현장측정자료와 궤도구조해석을 통하여 자갈도상의 탄성계수를 추정하였으며 구조해석 방법은 궤도역학이론에 의거하여 선형구조해석을 수행하였다.

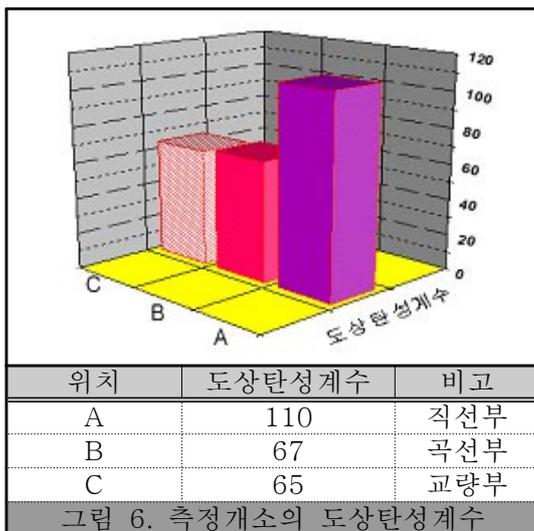
표 5. 해석물성치

항 목	기호	물 성 치	
윤층	W	측정치 사용	
레일변위	y	“	
레일 (50kg)	단면2차모멘트	I_x	1,960 cm ⁴
	단면계수	D_x	274 cm ²
	탄성계수	E	2.1×10^6 kgf/cm ²
레일패드 탄성계수	D_p	1,000 tf/cm	
침목	간격	a	58 cm
	유효지지면적	S_T	0.694 m ²
도상 탄성계수	D_b	해석결과로 산출	
노반 탄성계수	D_s	상당히 큰값으로 가정	

표 6. 구조해석 결과표

위치	윤층 (kgf)	궤도지지 계수 (kgf/cm ²)	레일변위 (cm)	레일압력 (kgf)	도상탄성 계수 (MN/m)
A	9200	1714	0.0482	3650	110
B	8500	1084	0.0628	3373	67
C	7800	1048	0.0591	3095	65

궤도 지지계수와 레일압력은 계산에 의한 값이며, 도상탄성계수는 레일패드의 탄성계수를 1,000tonf/cm로 가정하여 궤도구조해석을 수행한 결과로 부터 산출되었다.



각각의 윤층과 레일변위는 열차통과시 동적계측을 통하여 측정한 값이다. 이와 같이 현장계측을 통하여 윤층과 레일의 변위를 측정함으로써, 이들 값을 근거로 도상의 탄성계수를 추정하여 도상자갈의 노후정도 및 상태를 판단할 수 있다.

표 7. 50%이상의 자갈입자가 1.27cm 이상인 경우

입경범위	입자 형상	배수 상태	오염정도	탄성계수	
				kg/cm ²	MN/m
대다수 도상자갈의 입경이 1.91cm~3.8cm	각짐	건조	>20%	1,846	110.8
			10~20%	2,241	134.5
			<10%	2,637	158.2
1.91cm~3.8cm	완만	건조	>20%	1,292	77.5
			10~20%	1,569	94.1
			<10%	1,846	110.8

5.1 궤도의 측정 및 해석결과 분석

도상의 오염도 추정을 위해 수행한 윤층과 레일변위의 계측 결과를 바탕으로 궤도구조해석을 수행함으로써 도상 탄성계수를 도출하여 도상의 오염정도를 추정하였다. 또한 윤층 및 레일변위 계측 결과를 바탕으로한 궤도구조해석을 통해 도출된 도상탄성계수의 범위가 65~110MN/m로 분석되었

으며, 미공병단의 도상오염도 판단기준에 적용시킨 경우의 도상탄성계수는 77.5~110.8 MN/m의 범위에 분포함으로써 자갈도상의 추정 오염도가 해석결과와 대략 일치하는 것으로 분석되었다.

표 7.의 결과를 보면 도상자갈이 양호한 구간을 제외하고, 대부분의 구간이 20%이상의 다소 심각한 오염상태에 있음을 알 수 있다. 특히, C구간은 고가교 구간으로 현장조사결과 도상의 오염이 다소 심각하여 침목하면의 도상이 세립분으로 상당부분 채워진 구간으로 침목하면에서 들뜸 현상이 발생한 것으로 판단되며, 그 결과 과도한 변위가 발생(최대 3.20mm, 침목)한 것으로 분석되었다. 도상 탄성계수만으로 도상의 건전성을 판단하기는 어려우나, 체가름 시험 분석 결과와 거의 일치하는 결과를 보임으로써 자갈도상이 세립화가 전반적으로 진전되어 오염도가 심화된 상태임을 알 수 있었다. 또한 현재 상태로서는 비록 마모율이 양호한 것으로 나타났으나 측정된 대부분의 구간에서 입도분포율 역시 기준을 초과하는 등 추후 내마모강도 약화 가능성을 내포하고 있으며, 그에 따라 전체 궤도의 탄성지지력이 상당히 저하될 것으로 판단된다.

6. 결 론

자갈도상 궤도의 건전성 평가를 위하여 윤중 측정시험과 도상자갈 체가름시험 및 마모시험 등을 실시한 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 체가름 시험 및 마모율 시험의 결과 대부분 구간 도상에서 꾸준한 유지관리 하에서도 불구하고 열차운행하중을 비롯한 장기간의 사용으로 전반적인 세립화 및 성능저하 현상이 진행된 것으로 분석되었다.

2) 윤중 측정결과 자갈도상궤도의 도상상태가 불량한 경우 윤중의 동적증폭율 및 변동율이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 충격계수 산정식만으로는 이러한 도상상태에 따른 영향을 충분히 설명하지 못하고 있으며 이에 도상의 상태를 정량적으로 평가할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

3) 향후 대부분의 인근 자갈도상에서 노후화(세립화, 고결화 등)현상은 가속화되어 점차 유지보수비용의 증가뿐만 아니라 동적하중 증폭에 따른 궤도 및 구조물의 동적하중 부담율이 증가하여 구조물자체의 손상을 초래하게 될 가능성이 크므로 효율적인 자갈도상 유지관리 방안과 기존 자갈도상궤도의 생력화 방안이 필요할 것으로 판단된다.

4) 기존선의 대부분의 선로가 자갈도상인 만큼, 자갈도상이 갖는 궤도의 거동특성을 정확하게 파악하고 이를 효율적으로 유지보수하는 노력이 필요할 것으로 판단된다.

5) 대상궤도의 이러한 현상은 정기적인 유지보수하에서도 피할 수 없는 자갈도상의 근본적인 구조적 문제로 파악되며 이는 자갈도상유지관리의 어려운 현실을 반영하고 있는 것으로 분석된다.

7. 참고문헌

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 궤도품질의 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 추계 학술대회, 2003