

지하철 자갈도상 궤도의 충격계수 평가

Evaluation of Impact Factor on Ballast Track in Subway using Field Test

박균서* 손철수** 윤종경*** 최정열**** 박용길*****
Park, Kyun Seo Son, Chol Su Yun, Jong Kyeong Choi, Jung Youl Park, Yong Gul

ABSTRACT

This paper is presented the test results to evaluate the healthiness of the ballast in subway. The test includes the dynamic load test in servicing Line the screen classification test of aggregates and the wear test. From the results, the aspect and the property of the ballast are evaluated. The dynamic load tests the relationship between the deterioration of the ballast and the fluctuation of loads. The assesexplain sment of impact factor based on the field test results in a good property of test blocks is proposed.

key words : ballast track, dynamic load test, impact factor, load fluctuation

1. 서론

자갈도상궤도는 초기 부설비용이 저렴하고 적절한 탄성을 유지하기 쉬우며 유지보수가 용이하다는 장점이 있어 철도의 시작부터 현재까지 널리 사용되고 있는 궤도구조이다. 그러나 건설 후 대부분의 구간에서 공용년수가 20년 이상 경과한 현재의 자갈도상은 정기적인 유지관리에도 불구하고 일부 구간에서는 자갈도상 궤도구조의 근본적인 취약성에 의해 노후되고 기능이 저하되어 궤도의 유지관리 및 운행 안전성 확보에 대한 우려가 높아지고 있다. 자갈도상궤도에서 자갈의 상태는 궤도의 안전성에 영향을 미치는 중요한 인자로서 자갈의 노후화에 따라 충격흡수, 마찰 등의 기능이 상실할 경우 열차 주행조건의 악화와 궤도부담력 증대로 이어지므로 선로의 사용성 및 주행안전성에 매우 불리한 여건을 초래한다.

따라서 본 연구에서는 지하철 궤도에 대한 동적계측과 도상자갈 체가름시험 및 마모시험과 같은 건전성 분석평가를 통하여 자갈도상궤도의 상태 및 성능을 평가하고 취약요인을 분석하고자 하였다.

또한 열차 주행시 발생하는 윤중의 동적효과를 분석하여 자갈도상의 상태 와 충격의 영향을 비교하고 충격의 영향을 합리적으로 산정할 수 있는 식을 제안하였다.

2. 현장측정

2.1 현장측정 구간

현장시험은 열차 주행시 발생하는 윤중, 변위 및 충격의 영향, 도상자갈의 상태를 분석하기 위하여 수행되었다. 시험구간은 ○○지하철 ○호선의 시점에서 종점까지 취약개소로 판단되는 구간에 대하여 시험을 수행하였으며 각 구간의 궤도현황을 정리하여 나타내면 Table 1과 같다.

- * 부산교통공사 토목팀 대리, 정회원
E-mail : pgs1999@subway.busan.kr
- ** 부산교통공사 토목팀 차장, 정회원
- *** 부산교통공사 토목팀 주임, 정회원
- **** (주)대한콘설턴트 철도부 궤도팀 사원, 공학석사, 정회원
- ***** 서울산업대학교 철도전문대학원 교수, 정회원

Table. 1 Block properties of test sections

측정구간	측정항목	곡 선	궤도조건	비 고
구간 A	윤 중 변 위 입도분포 마모시험	곡 선 R=210m	M=60, S=12, C=90	터 널
구간 B		직 선 L=624m		터 널
구간 C		곡 선 R=350m	M=36, S=6, C=110,120	교 량

* 주) R : 곡선반경(m), M : 원곡선 중앙종거(m), S : 슬랙(mm), C : 캔트(mm)

2.2 도상자갈 체가름시험 및 마모시험

도상자갈의 세립화 및 내마모강도의 저하 등과 같은 노후화 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 충격계수와의 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 B, C에 대한 도상자갈의 상태를 나타내면 Fig 1과 같다.



(a) Block B



(b) Block C

Fig. 1 Aspect of ballast on Block B, C

각 시료는 도상하부에서 상부까지 모든 자갈시료를 포함하고 1회 시험시 필요한 중량인 70kg을 일정 부피 내에서 채취하였다. 또한 각 시료 모두 궤도 직하부에서 열차통과하중을 지속적으로 받고 있는 자갈도상에서 골고루 채취하였다. 육안조사결과, 구간 A의 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 구간 B의 자갈도상은 침목하면부터 세립자와 미립자 분으로 인하여 도상의 공극이 거의 다 채워져 도상이 다소 불량한 상태였다. 침목 직하부 도상의 경우 거의 대부분의 도상자갈이 파쇄, 마모되었고 잔골재 성분들이 세립분과 같은 오염물질과 혼합되어 있는 상태로 관찰되었다. 육안조사에 의한 구간 C의 도상의 상태는 구간 B와 유사한 경향이었으나 잔골재 성분이 다소 많고 습윤한 상태인 것으로 관찰되었다.

2.3 윤중측정

도상의 열화상태에 따라 영향을 크게 받는 윤하중의 영향을 파악하고자 열차하중에 의한 윤중측정을 수행하였다. 측정구간은 전철에 나타낸 바와 같다. 윤중에 의한 측정결과로부터 궤도에 작용하는 동적하중의 영향을 검토할 수 있을 뿐만 아니라, 정적하중과의 관계로부터 궤도 설계시 고려된 충격력의 영향에 대한 적정성을 확인할 수 있으며, 다른 계측항목과 조합하여 레일강성, 궤도계수 등 초기궤도설계 시 가정된 인자들과 함께 현재 궤도의 상태를 비교할 수 있다.

(1) 측정방법

윤중 측정은 센서 설치가 비교적 간편하고 정확한 하중값을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 궤도의 한 지점에서 주행하는 모든 열차의 윤중을 측정할 수 있는 지상측정법을 사용하였다. 윤중 측정을 위한 센서

는 Fig 2와 같이 침목중심에서 각 10cm 떨어진 위치에서 레일복부의 중립축에 45°의 각도로 레일의 양면에 각 2방향으로 모두 8개의 스트레인게이지를 부착하는 전단변형법으로 측정하였다. Fig 3은 센서 부착전경을 나타낸 것이다.

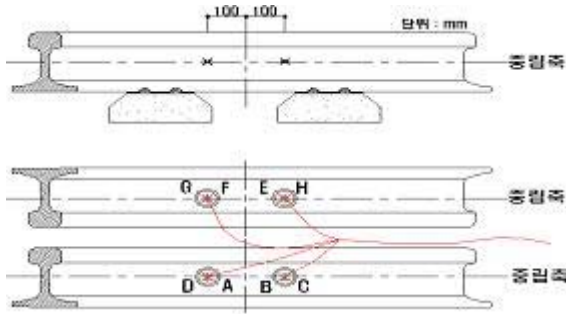


Fig. 2 Attachment of strain gauges for the measurement of axial wheel load



Fig. 3 Sight of the attachment of sensors

(2) 운중시험

레일에 부착한 스트레인게이지를 통하여 계측한 값은 변형률로써 전단변형과 비례하여 발생한다. 전단 변형은 운중에 비례하여 발생하므로 데이터 수집장비(Data Acquisition System)를 통하여 저장된 변형률과 발생한 운중 및 횡압과의 관계식을 구할 수 있다. 따라서 유압잭을 이용하여 0tonf에서 4tonf까지 정적하중을 단계적으로 가압하며 이때 발생한 계측값을 기록하며 오차발생과 선형회귀식의 신뢰성을 고려하여 3회 이상 동일한 실험을 반복하였다. Fig 4와 Fig 5는 운중검증기에 의한 시험전경과 가압시 센서의 응답을 나타낸 것이다.



Fig. 4 View of the test of the load calibration

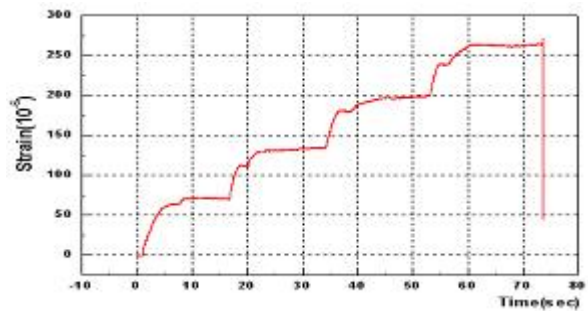


Fig. 5 Test result of the load calibration

(3) 운하중 검증

센서로부터 얻어진 레일의 발생 변형률과 작용하중과의 관계에 대한 선형관계식은 선형 회귀분석법 (Linear Regression)을 이용하여 구한다. 그 결과 얻어진 관계식은 Fig 6과 같다.

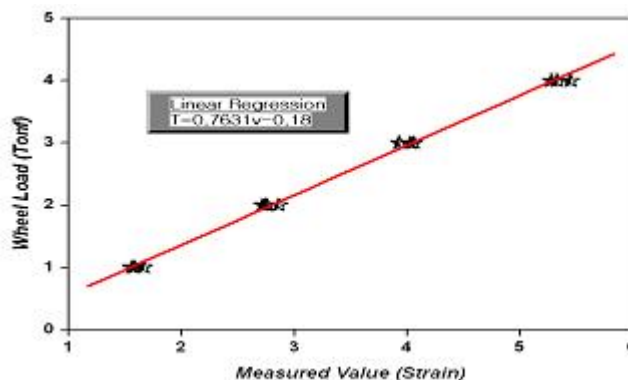


Fig. 6 Relationship between the measured results and the wheel load

2.4 변위 측정 개요

자갈도상의 노후정도 및 현재상태를 파악하는 기초자료로서 레일의 수직변위와 침목 수직변위를 측정하여 도상의 상태평가에 활용하고자 하였다. 주행중인 열차에 의한 최대 동적하중에 대한 레일과 침목의 변위를 측정할 수 있으며, 현장에서의 변위계 부설전경은 Fig 7과 같다.



Fig 7. Sight of the attachment of LVDT

2.5 측정 열차의 제원

본 연구대상구간의 운행 열차는 8량 편성으로 동력차와 객차의 조성은 6M2T(M : 동력차, T : 객차)를 기본으로 하고 있으며 차량의 제원을 간략히 요약하면 Table 2와 같다.

Table. 2 Properties of the electric train

구 분		제 원
차 중		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
	감속도	상용 : 3.6km/h/s, 비상 : 4.5km/h/s
	최대운전속도	80km/h
차 체	재질	STS 304
	연결면간거리	18,000mm
	차체길이, 차체폭	17,500mm, 2,750mm

3. 체가름시험 및 마모시험 결과

본 연구에서 수행한 자갈도상 시료의 체가름시험 및 마모시험은 철도용품 표준규격 도상자갈규정(철도 5610-10 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 3에 나타낸 바와 같이 구간별 시료 모두 50mm 이상의 큰 골재가 기준치 이상으로 포함되어 있었고, 구간 B와 구간 C의 경우 세립화가 상당히 진행되어 있었다. 구간 A의 경우는 도상자갈의 입도가 기준을 비교적 만족하고 있었지만(큰 골재를 기준치 이상으로 함유함), 구간 B, C는 22.4mm이하의 잔골재를 30% 이상 포함하고 있어 세립화가 어느 정도 진행되어 있는 것으로 분석되었다. 특히 구간 C의 경우는 40mm 이하의 골재가 대부분(80%이상)이어서 도상의 파쇄로 인한 세립화 정

도가 다소 심각한 것으로 판단되었다.

Table. 3 Results of the screen classification test

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

(2) 잔골재 시험결과

자갈 시료에 대한 잔골재 시험결과 Table 4와 같이 구간 B, C 시료에서 10mm이하 입자의 함유율이 약 10%에 이르는 것으로 나타났으며 이런 입자는 도상의 오염을 유발시킬 수 있는 불순물로서 도상자갈의 건전성에 불리한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

Table. 4 Test results of small aggregates

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

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 구간 C 시료의 경우 10mm 범위의 골재량이 다른 시료의 경우보다 다소 높은 것으로 나타나 다른 구간의 시료보다 상대적으로 다량의 세립불순물을 포함하고 있는 것으로 판단된다.

(3) 마모시험결과

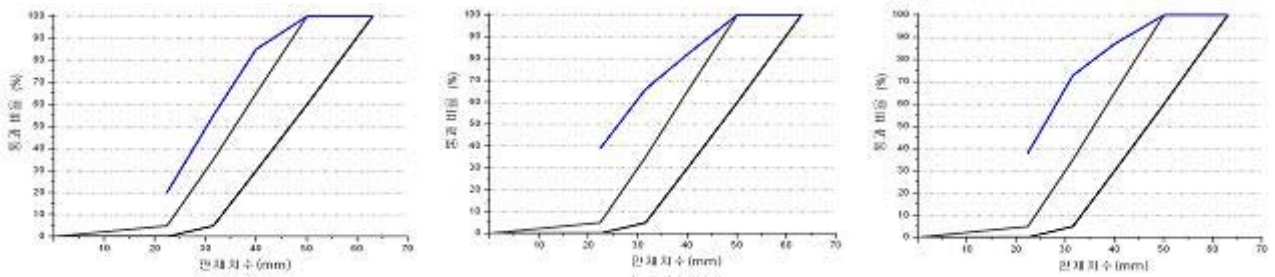
마모시험결과를 보면 전체 시료 모두 기준치 이하의 분석결과를 나타냄으로서 상태가 비교적 좋은 것으로 나타나 자갈의 내마모강도 약화는 현 수준에서는 심각한 수준이 아닌 것으로 분석되었다

Table. 5 Test results of abrasion ratio

시료구분	구간 1	구간 2	구간 3	기준치
마모율(%)	13.2	9.6	10.7	25 이하

(4) 입도분포

각 구간에서 채취한 시료에 대한 입도분포로부터 자갈도상의 상태를 분석하였다. 구간 A의 시료는 육안조사시 관찰된 상태보다 비교적 양호한 입도분포를 보이고 있으며, 입경이 40mm보다 큰 자갈이 45% 포함되어 있다. 구간 B의 경우는 구간 A와 마찬가지로 입경이 40mm보다 큰 자갈이 35% 이상 포함되어 있는 반면 도상 분니도 많이 포함되어 있었다. 구간 C의 경우는 전반적으로 세립화가 진행되어 도상 자갈이 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) 구간 A의 입도분포곡선 (b) 구간 B의 입도분포곡선 (c) 구간 C의 입도분포곡선

Fig 8. Results of the screen classification test

체가름시험 결과 대부분의 구간에서 열차운행하중을 비롯한 장기간의 사용으로 전반적인 세립화 현상이 진행된 것으로 분석되었다.

4. 운중측정결과 분석

4.1 정적 운중 산출

운중의 측정은 열차의 운행시간에 실시되었으므로, 정확한 승객의 수와 각 열차의 정적하중을 산정하기는 현실적으로 어려울 수 있으나 승객 탑승으로 인한 자중 증가를 고려하기 위하여 첫차 운행부터 막차 운행까지의 장기계측을 통하여 공차하중 및 혼잡시간대(Rush-Hour)대에 발생하는 동적운중을 계측하였다. 또한 열차제원을 통해 파악 가능한 열차의 자중과 승객이 승차한 상태에서의 승객하중을 고려하여 정적운중을 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.

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

차량의 자중과 승차인원을 고려한 편성차량에 대한 정적 운중(P_{sta})은 Table 6과 같다. Fig 9는 구간 A를 주행하는 열차에 따른 운중측정결과의 일례를 나타내며 이로부터 동적운중 및 충격계수, 운중변동율을 구하였다.

Table. 6 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
$P_{sta}/8$	3.75	5.15	4.94	5.15	4.94	5.15	4.94	3.75	5.09

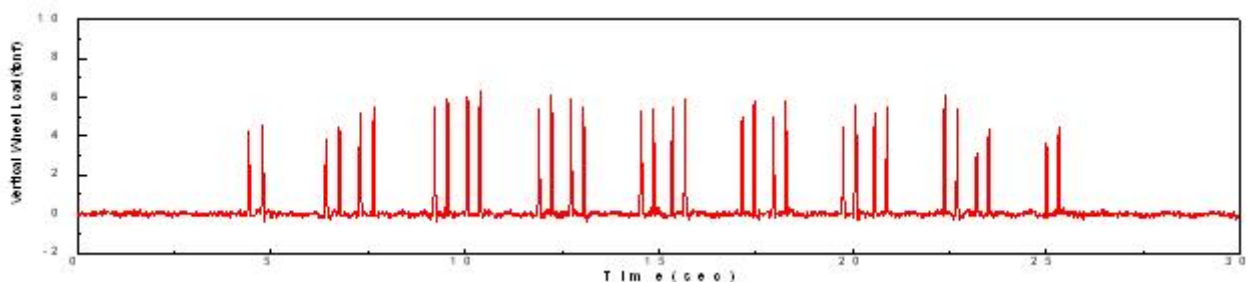


Fig. 9 An example of record of dynamic wheel load in field test

4.2 윤증을 이용한 궤도의 충격계수 산정

(1) 윤증 측정결과 분석

주행하는 열차에 의해 궤도에 작용하는 윤증은 열차 자중에 의한 정적윤증 이외에 열차속도의 증감에 따라 발생하는 동적윤증에 의한 충격력의 영향까지 포함되어 발생된다. 따라서 윤증의 측정값은 열차속도에 따른 동적하중으로 간주할 수 있으며 열차의 정적윤증과 비교하여 열차주행에 따른 궤도의 충격계수를 산출할 수 있다. 지하철 차량 1편성(8량)이 주행하는 경우 32개의 윤축에 의한 윤증이 발생하게 되는데 모든 축에서 발생한 주행속도에 따른 충격계수(P_{dyn}/P_{sta})를 속도별로 구분하여 나타내면 Fig 10과 같다.

이를 살펴보면 측정데이터 중 동적 증폭이 1.2 보다 큰 부류와 그렇지 않은 부류로 구별되는데 1.2보다 큰 부분은 구간 C에서 측정된 데이터로 일반적인 경우의 동적증폭의 경향과는 다른 것으로 판단된다. 따라서 이 부류의 데이터를 제외한 데이터에서 동적증폭의 경향을 보면 속도에 따라 다소 증가하는 경향을 볼 수 있으나 그 편차도 상당히 크을 알 수 있다.

Fig 11은 총 129개의 윤증 측정회수에 대해 구간별 윤증 빈도분포를 나타낸 것으로 그 결과를 보면 약 4tonf 범위의 윤증이 가장 많이 차지하고 있으며 그 다음 5tonf 범위의 윤증이 나타남을 알 수 있다. 이들 윤증의 평균값은 4.76tonf, 윤증측정값의 표준편차 $0.12P_{dyn}/P_{sta}$ 로서 약 4~5tonf 정도의 값을 나타냄을 알 수 있다.

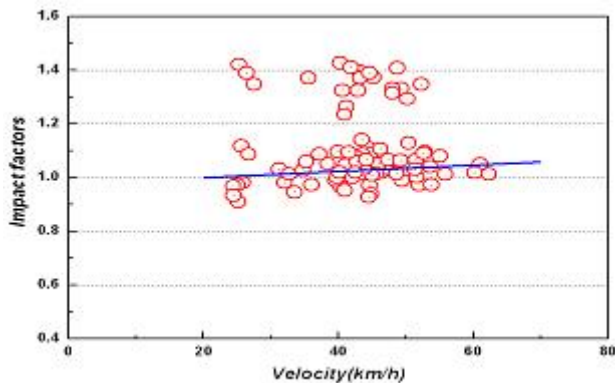


Fig. 10 Dynamic magnification factor distributions with velocity

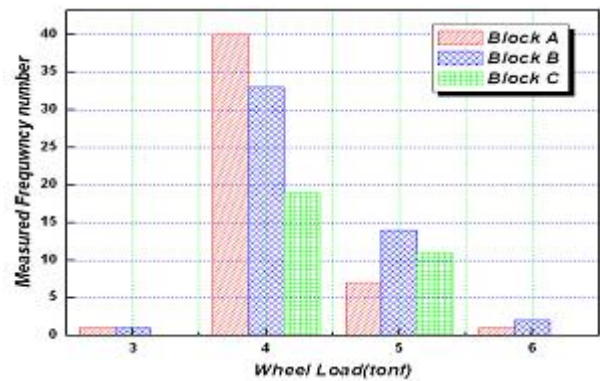


Fig. 11 Frequency of wheel loads

(2) 윤증변동율

Fig 12는 속도에 따른 윤증 변동율을 나타낸 것이다. 여기서 윤증 변동율은 $(P_{dyn}-P_{sta})/P_{sta}$ 로 나타내며 열차주행에 따른 동적윤증의 변동량을 정적윤증으로 나눈 값이다. 윤증변동율의 분포를 보면 속도는 크게 관계없이 2부류로 구분됨을 알 수 있는데 이 부류는 구간 A, B와 구간 C에 해당한다.

즉 윤증변동율은 체가름시험 결과로부터 분석된 도상상태가 불량한 구간 C에서 구간 A, B 보다 2배 이상 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 도상의 노후화 및 열화현상은 윤하중의 변동효과를 크게 증폭시켜 큰 동적하중을 유발할 수 있음을 확인할 수 있다.

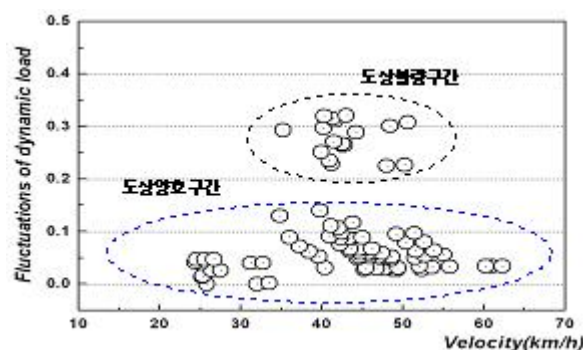


Fig. 12 Load fluctuations of wheel loads with velocity

(3) 충격계수

동적하중에 의한 충격계수는 국내의 경우 AREA에서 사용하는 산정하는 방법을 적용하고 있다. 이러한 계수적용결과 타당성과 경향을 파악하기 위해 비교적 도상의 상태가 양호한 구간에서의 운중 측정 결과로부터 얻어진 충격계수와 운중변동율을 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 운중변동율 중 운행속도 40km/h 이상의 측정치만을 도식화하여 Fig 13과 같이 나타내었다.

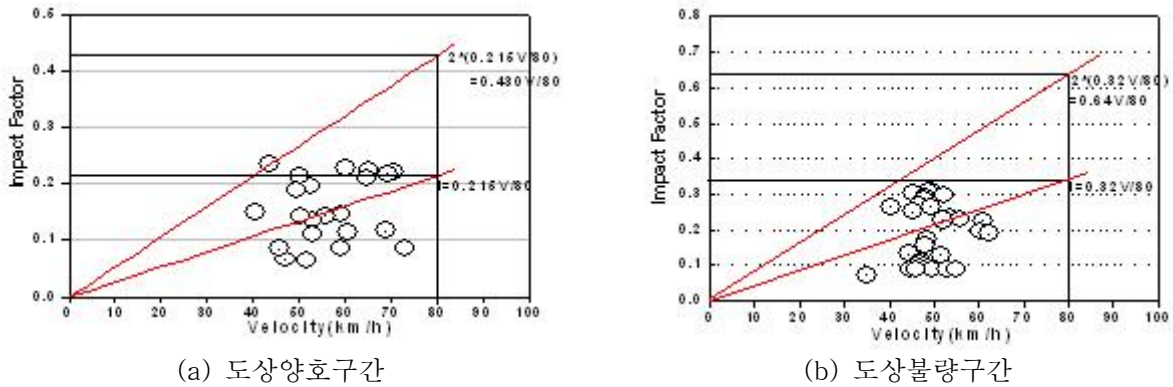


Fig 13. Results of Impact factor evaluation

Fig 13은 40km/h이상의 운중변동율 표준편차의 평균값과 여기에 안전율을 고려한 운중변동율의 표준편차값의 2σ를 취하여 충격계수의 값을 나타낸 것이며, 이를 식으로 표현하면 식(1)과 같다.

$$i = 1 + 0.430 \frac{V}{80} \quad (1) \qquad i = 1 + 0.548 \frac{V}{100} \quad (2)$$

식 (1)은 측정대상선로의 최대 운행속도 80km/h를 기준으로 제시한 것이며, 미국철도나 일본철도에서 최대운행속도 100km/h를 기준으로 환산한 충격계수식은 식(2)와 같다.

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

$$i = 1 + 0.640 \frac{V}{80} \quad (3) \qquad i = 1 + 0.80 \frac{V}{100} \quad (4)$$

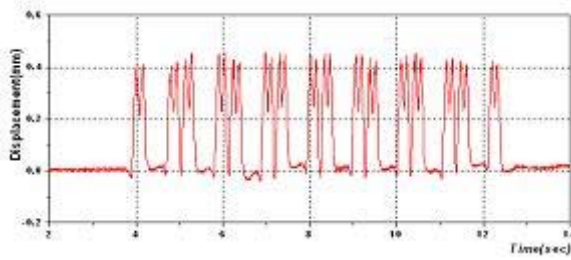
이상의 결과로부터 양호한 도상의 경우 1+0.43V/80 정도의 궤도 충격계수값을 얻었으며 이는 일본에서 현재 적용중인 계수(정척 : 1+0.5V/100, 장대 : 1+0.3V/100) 및 미국 AREA에서 사용하고 있는 1+0.513V/100과 거의 유사한 값이나, 측정대상 선로 조건이 대부분 정척레일 구간이며 선로상태가 비교적 양호한 구간에서의 데이터를 바탕으로 산정한 식이며, 해당구간의 속도대역이 그다지 높지 않음을 감안할 때 다소 높은 값이다.

또한 비교적 도상상태가 불량한 구간에서의 충격계수는 상기 전술한 국내의 기준을 크게 상회하는 것으로 나타났으며 이는 도상노후화에 따른 동적하중 증폭효과에서 기인한 것으로 판단된다. 그러나 통상적인 충격계수 산정방법을 이용하여 산정한 식(1)~(4)를 비롯한 설계기준의 산정식은 궤도상태가 불량한 것으로 추정되는 구간의 운중 동적효과를 충분히 설명하지 못하고 있다. 이러한 산정식은 속도가 증가할수록 점차 증가하여 실제 데이터보다 큰 편차를 나타낼 수 있는 것으로 분석되어 다소 비합리적인 식임을 알 수 있다. 따라서 운하중의 충격효과와 도상의 상태와의 상관관계를 짓기 위해서는 도상의 상태를 정량적으로 평가할 수 있는 방법에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

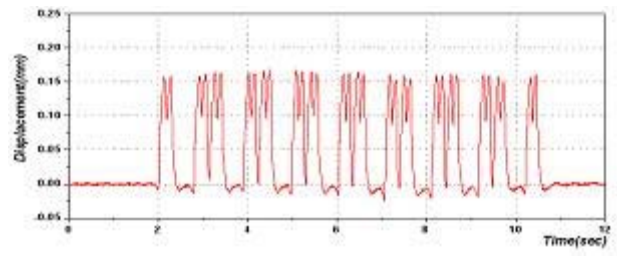
5. 변위측정결과 분석

도상상태가 양호한 구간과 불량한 구간에서 수행한 현장측정을 통하여 대표적인 궤도동적응답을 비교한 결과 Fig 14와 Fig 15에서 보이는 바와 같이 구간 C(불량개소)에서의 측정결과들이 구간 A(양호개소)의 것을 다소 상회하는 것으로 나타나 자갈도상 상태에 따른 궤도의 동적 변위응답의 특성을 파악할 수 있었으며, 이는 육안조사 및 입도분포시험 결과와 동일한 경향을 나타냄으로서 계측결과에 대한 타당성을 보여주고 있다.

또한 구간 C의 침목수직변위가 과다하게 측정된 것은 도상세립화에 따른 뜬침목 현상에서 기인한 것으로, 이러한 현상이 지속될수록 도상의 파괴 및 고결화는 가속화될 것으로 판단된다.

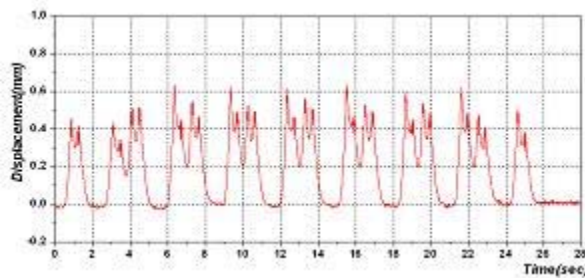


(a) 레일수직변위(Max : 0.45mm)

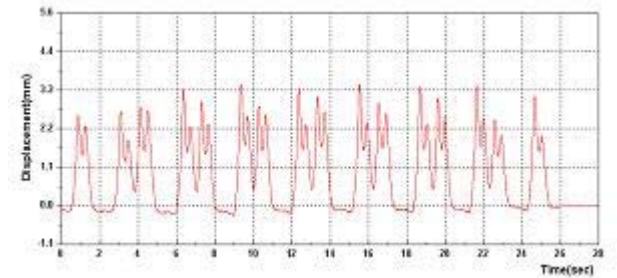


(b) 침목수직변위(Max : 0.18mm)

Fig 14. Dynamic displacement on Block A(Well condition)



(a) 레일수직변위(Max : 0.62mm)



(b) 침목수직변위(Max : 3.20mm)

Fig 15. Dynamic displacement on Block C(Bad condition)

6. 결 론

지하철 자갈도상 궤도의 건전성 평가를 위하여 현장측정을 통한 운중, 변위측정시험과 도상자갈 체가름시험 및 마모시험을 실시한 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 체가름 시험 결과 대부분 구간의 도상자갈에서 장기열차하중의 작용으로 전반적인 세립화 및 성능저하 현상이 진행된 것으로 분석되었다.
- 2) 운중시험 결과 도상자갈의 상태에 따라 크게 2부류로 구분되는 것으로 나타났으며 이와 같은 구분은 체가름시험 결과로부터 분석된 도상상태가 불량한 구간에서 양호한 구간보다 2배 이상 크게 나타남을 알 수 있다.
- 3) 자갈도상의 상태가 불량한 구간의 경우 양호한 구간에서보다 운중의 동적증폭율(충격량) 및 운중변동율이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 현재 국내에서 사용하고 있는 AREA의 충격계수 산정식은 이러한 영향을 충분히 설명하지 못하고 있으며 도상의 상태를 정량적으로 평가할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

6. 참고문헌

1. 양재성 등 “궤도생력화를 위한 도상구조에 대한 연구”, 한국철도기술연구원, 연구보고서, 1999
2. 정근영 등 “궤도도상개량을 위한 기초연구”, 한국철도기술연구원, 연구보고서, 1998
3. 민경주, 오지택 “궤도틀림의 표준편차를 이용한 궤도 품질의 평가에 관한 연구”, 대한토목학회 학술 발표회
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