

도상자갈의 마모/파쇄 특성

Breakage Characteristics of Ballast

정근영*¹, 김현기*², 이종득*³

Chung, Keun-Young, Kim, Hyun-Ki and Lee, Jong-Deuk

ABSTRACT

The durability of ballast plays an important role in track behaviour. To estimate the deterioration characteristics of ballast, several tests have been carried out by several scholars. The deterioration characteristics is very important factor in the behaviour of track and its life. In this paper, abrasion/breakage characteristics of ballast is studied to see the effect of physical ballast characteristics on ballast life. To reveal breakage characteristics of ballast, the ballast box test and the MTT field test were carried out. The breakage characteristics studied in this paper is applied to the ballast life prediction in various conditions, such as LA abrasion, annual tonnage, tamping number per year, etc

Keywords : Durability of Ballast, Track Behaviour, Breakage Characteristics of Ballast, Ballast Box Test, MTT Field Test, Ballast Life Prediction

1. 서론

자갈도상 궤도는 충격흡수의 효율성 궤도틀림 정정의 용이성 등의 면에서 장점을 갖지만, 침하 및 궤도틀림의 발생이라는 측면에서 지속적인 유지보수작업을 필요로 한다.

본 연구에서는 다양한 궤도의 점진적 파괴 메카니즘 특성 중에서 도상자갈의 마모/파쇄 특성을 중심으로 연구를 수행하였다. 사용중인 도상자갈은 마모/파쇄에 의해 도상내에 바람직하지 못한 세립자를 축적하게 되고, 이로 인한 배수불량, 도상 저항력의 저하, 충격흡수 불량 및 궤도틀림의 진전 가속화 등의 악영향을 미친다.

도상의 오염은 도상자갈의 마모/파쇄에 의한 것

외에도 다양한 원인에 의해 발생한다. 도상의 수명을 나타내는 지표로 사용되는 도상오염의 원인으로서는 자갈의 파손, 도상표면으로 부터의 유입, 침묵의 마손, 오염된 도상하부 및 보조도상으로부터의 침투, 노반입자의 유입 등이 있다. 일반적으로 차량운행 및 탬핑작업에 의한 자갈 파손이 큰 영향을 미치지만, 선로의 여건상 석탄과 같은 화물을 주로 운행하며 화차의 밀봉상태가 불량한 경우에 외부로부터 유입된 물질에 의해 도상의 수명이 저하될 위험성이 크다.

본 연구에서는 열차운행에 의한 도상자갈의 마모/파쇄 특성을 분석하기 위하여 실내 시험방법인 자갈상자시험(Ballast Box Test)을 시행하였으며, MTT작업에 의한 마모/파쇄량의 평가를 위한 현장 부설시험도 수행하였다. 시험결과를 바탕으로 LA 마모율 및 재하하중의 크기에 종속적인 마모파쇄량의 추정방법을 제시하였으며,

*1 정희원, 한국철도기술연구원, 선임연구원

*2 정희원, 한국철도기술연구원, 연구원

*3 정희원, 한국철도대학 시설토목과 교수

제시된 방법에 의하여 도상수명(Ballast Life)을 평가하였다. 도상자갈의 수명의 명확한 정의는 어려움이 있으나, 많은 양의 도상자갈의 물량과 작업노력을 필요로 하는 자갈치기 작업 혹은 도상갱환을 필요로 하는 시기로 정의하여 사용하고자 한다.

2. 도상에서 불순물의 영향과 마모/파쇄입자의 정의

도상의 오염을 야기하는 불순물은 입경에 따라 모래(sand)와 모래질 자갈(fine-gravel)로 이루어진 조립토와 실트(silt) 및 점토(clay) 입경의 세립토로 분류해서 생각할 수 있다. 자갈도상에 포함된 불순물의 악영향은 입자의 크기에 따라 다르게 나타난다.

모래 및 모래질 자갈의 불순물이 도상에 혼입된 경우에는 큰 자갈입자들이 여전히 도상의 기본뼈대를 이루고 있는 상황에서는 도상의 전단강도와 강성을 증가시켜 궤도의 안정성(stability)을 증가시키며 소성변형을 억제시켜 자갈치기 작업이 비교적 용이하지만, 동상저하능력의 저하, 불순물의 저장공간(Storage void)의 감소, 탄력성의 감소, 배수성저하, 탬핑시 입경별 입자분리(Segregation)가 발생하고 느슨한 도상구조를 형성하게 하여 작업후의 침하속도를 증가시키는 등의 유지보수비용을 증가시킨다.

실트 및 점토질이 도상에 혼입된 경우 도상의 간극을 줄이고 조립토와 결합되어 마모성 슬러리(abrasive slurry)를 형성시킨다. 점토성 입자는 홀로 마모성 슬러리가 형성되지 않지만, 실트성 입자는 홀로 마모성 슬러리를 형성한다. 또한, 건조시 고결화하여 MTT작업시 다짐봉이 도상 관통하는 것을 곤란하게 하며, 다지기 작업후에도 느슨한 상태로 남아 탬핑작업의 효과를 상실하게 한다. 이 이외에도 분니현상의 촉진, 습윤 상태에서의 입자간의 윤택작용에 의한 영구변형의 촉진, 자갈치기 작업에서 체가름이 곤란하도록 하므로 보선비용을 크게 증가시킨다. 따라서,

점토성 세립토의 함유량이 많은 경우에는 자갈치기 작업의 효과가 상실되는 경우가 많으므로 도상을 100% 갱환하기도 한다.

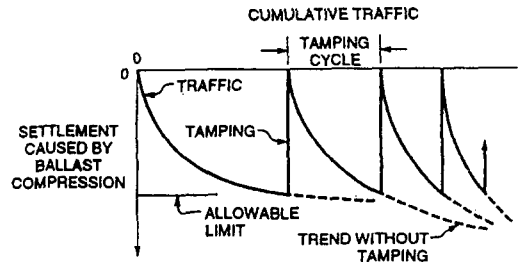


Fig. 1 도상오염이 심한 경우의 탬핑작업 후 침하특성

차량운행 혹은 MTT 작업시 큰 입경의 도상자갈의 입자는 파쇄된 이후에도 도상자갈 입도 분포의 입경범위를 만족하는 경우가 상당수 존재한다. 이러한 입자는 도상자갈의 기능수행에 있어서 악영향을 미치지 않으므로 새로이 마모파쇄량을 정의하여 사용하는 것이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 도상의 불순물을 정의함에 있어 선로정비규칙의 도상자갈 및 채움자갈의 입도범위를 만족하지 못하는 입자로 분류하였다. 즉, 도상자갈의 마모파쇄량의 평가에 있어서 LA 마모율의 평가에서와 동일한 입경 1.7 mm 이하의 입자를 마모입자로 정의하였으며, 파쇄입자는 1.7~10 mm의 입경범위를 갖는 입자로 정의하였다. 또한, 마모파쇄량은 마모량과 파쇄량의 합으로 표기하였다. 그러므로, 본 논문에서 언급하는 마모파쇄량은 엄밀한 의미에서는 도상의 불순물(Fouling Material)의 의미이다.

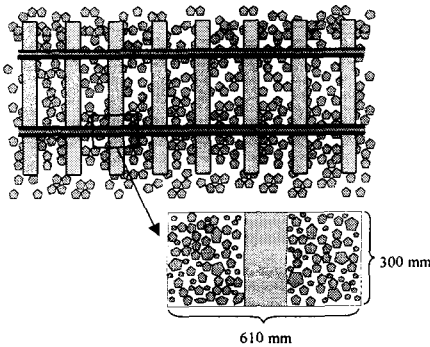
3. 차량운행 및 MTT작업에 의한 도상자갈의 마모/파쇄 특성

3.1 차량운행에 따른 마모/파쇄 시뮬레이션

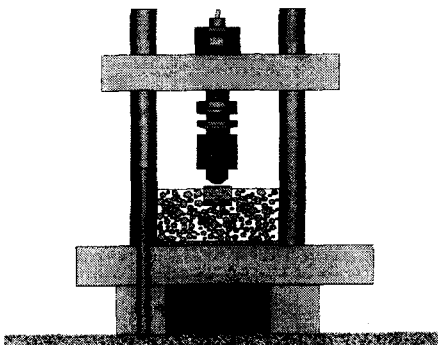
차량의 운행은 철도도상에 반복적인 진동을 유발하며, 마모/파쇄 입자를 생성시킨다. 미국의 FAST시험궤도에서 측정된 결과에 의하면 차량

주행시 궤도 각부에서의 각 차축의 영향은 차축 그룹에 의해 발생하는 응력변화에 비해 매우 작은 영향을 보여주었다. 이러한 시험결과로부터 궤도의 하부구조에서의 거동은 차축 2~4개의 통과시 하나의 하중이 재하되는 것과 동일한 것으로 취급할 수 있다. 차량의 통과에 의한 철도 도상의 침하 및 마모/파쇄의 특성을 분석하기 위한 실험으로 자갈상자시험(Ballast Box Test)이 University of Massachusetts에서 개발되었다. 본 연구에서도 자갈상자시험방법을 채택하여 차량 운행에 따른 도상자갈의 마모/파쇄 특성을 분석하고자 하였다.

자갈상자시험은 강재상자(Steel Box)에 도상자갈을 넣고 하중재하판인 침목조각(30 cm)에 반복하중을 가하여 도상자갈의 거동특성을 시험하는 방법이다(그림 2 참조).



(a) 자갈상자시험이 모형화하는 영역



(b) 피로시험기를 통한 반복하중의 재하

Fig. 2 자갈상자시험의 개념도

자갈상자는 300 mm × 600 mm의 면적을 갖도록 설계하였으며, 하중재하판으로 사용된 침목조각은 현재 사용되고 있는 PC 침목의 레일교차점 부근의 단면형상을 갖도록 제작하였으며, 스테인리스 판으로 표면을 감싸게 하여 침목의 마손은 억제하였다. 실내시험에 있어 도상자갈의 입도분포를 국유철도 입도분포곡선을 만족하도록 시료를 배합하여 사용하였으며, 노반의 영향을 표현하기 위하여 상자의 하부에 유연한 바닥부를 갖도록 하였다. 시험을 위하여 도상자갈을 300 mm 두께로 상자안에 채워넣고, 그 위에 침목조각을 얹은 후 침목조각 주변을 도상자갈로 둘러싼다. 이와 같은 시험준비가 끝난 후 자갈상자를 하중 프레임(Load Frame) 속에 넣어 연직방향의 반복적인 하중을 가한다. 이때 침목조각에 가해지는 하중은 궤도해석으로부터 결정될 수 있으며, 재하하중과 반복횟수와와의 관계로 통과 톤수를 산정한다.

작용하는 하중의 크기의 변화에 따른 도상자갈의 마모 및 파쇄량을 살펴보기 위하여 BBT하중(Ballast Box Test 재하하중)을 2톤, 3톤 및 4톤의 세 가지를 사용하였으며, 매 시험마다 30만 회의 반복하중을 가한 후 채분석을 하였다. 자갈상자시험의 가진 주파수 설정에 사용된 가정으로는 차량 운행에 따라 도상에 가해지는 압력은 각 차축의 영향이 별개로 작용하는 것이 아니라 여러 개의 차축으로 이루어진 대차(bogie) 단위의 영향이 지배적이라는 것이다. 이러한 가정을 기초로 대차간 거리를 d , 열차주행속력을 V , 대차하중의 반복주기를 T 라고 하면, 이들 변수간의 관계는 아래와 같다.

$$T = \frac{d}{V} \quad (1)$$

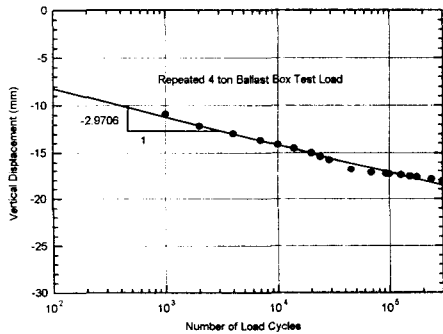
따라서, 가진주파수 f 는 아래와 같은 방정식에 결정된다.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{V}{d} \quad (2)$$

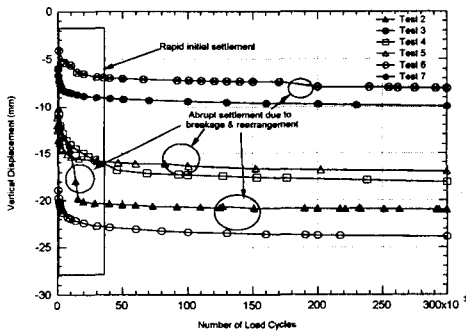
이러한 방법에 의해 결정된 가진 주파수는 차량조건 및 운행속도에 따라 상당한 편차를 보이며, 150 km/h의 속력으로 주행하는 열차의 경우

약 3.3~6.1 Hz의 주파수 범위를 갖지만, 본 연구에서 수행한 시험에 있어서는 모든 경우에 있어서 가진 주파수를 5 Hz로 설정하였다.

자갈상자 시험의 하중재하 초기에는 급격한 침하가 발생하며 이러한 침하특성은 매우 불규칙한 성향이 있었다. 침하량은 동일하중의 반복시 하중반복횟수의 로그값에 비례하는 경향(침하량 $\propto \log(N)$)이 있으며, 급격히 침하가 진행되는 경우에는 입자의 파쇄음이 들리는 경우가 많았다. 즉, 침하에 영향을 미치는 인자는 단순한 입자간의 마찰 및 재배열에 의한 영향이 많을 수도 있지만, 작용하는 하중에 자갈입자가 견디지 못하는 경우에 있어서 자갈입자의 파쇄 및 재배열과정에서 급격한 침하가 발생할 수 있음을 알 수 있었다.



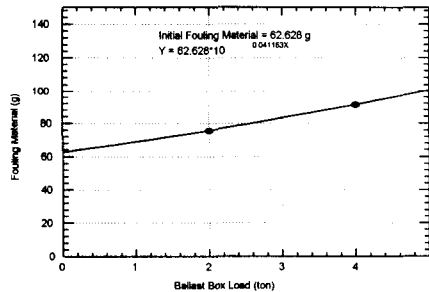
(a) 전형적인 침하곡선



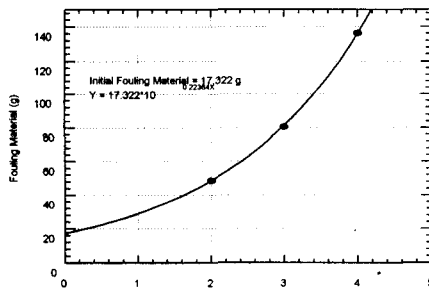
(b) 침하곡선들의 예

Fig. 3 반복하중에 의한 침하

반복하중재하 완료후 마모파쇄량의 산정을 위하여 시료에 대한 체가름 시험을 하였다. 체분석 결과를 그래프로 나타내면 마모/파쇄량은 재하하중의 크기에 종속적임을 알 수 있었다. 30만회 반복하중에 의한 마모파쇄량의 로그값은 작용하중의 크기와 비례하는 경향을 보였다. 또한, 시료의 LA 마모율에 따라 마모파쇄량의 증가량이 큰 차이를 보였다. 따라서, 품질이 다른 각 시료별로 시험결과를 그림4에 나타난 바와 같이 $F_{30만회} = C_1 10^{C_2 Q_{BBT}}$ 형식의 함수를 이용하여 추세선을 구하였으며, 체가름 결과에서 추정된 초기 불순물 양을 소거함으로써, 반복하중에 의해 발생한 불순물을 평가할 수 있다. 반복하중에 의해 발생한 마모파쇄량은 초기 불순물을 제외한 값이므로, $F_{30만회} = C_1 (10^{C_2 Q_{BBT}} - 1)$ 의 형태로 나타낼 수 있다.



(a) LA마모율 15.7 %, 압축강도 1,311 kg/cm²



(b) LA마모율 24.4 %, 압축강도 1,593 kg/cm²

Fig. 4 Ballast Box Test의 재하하중에 따른 마모파쇄입자의 생성량

3.2 임의의 LA 마모율 및 궤도부담력에 대한 마모파쇄량 추정

열차가 운행중인 선로에서의 통과 톤수에 따른 도상자갈의 마모/파쇄량의 산정을 위하여 침목하면에 작용하는 압력을 산정하였다. 압력의 산정은 해석적인 방법에 의하여 수행하였으며, 차량의 운행속도 V 는 120 km/h(국유철도 2급선 기준), 침목간격 a 는 62.5 cm, 침목의 유효지지면적(침목 1/2부의 유효지지면적 26 cm x 80 cm, Fig. 5) A 는 2,080 cm²으로 가정하였다. 도상 및 노반의 지지력은 개소마다 차이가 있을 수 있으나, 기존 경부선의 궤도구조 상태를 감안하여 궤도계수 k 를 200 kg/cm²으로 가정하였으며, 레일은 60 g레일(탄성계수 $E=2.1 \times 10^6$ kg/cm², 단면2차 모멘트 $I=3,090$ cm⁴)을 갖는 궤도를 대상으로 하였다. 또한, 충격계수 i 는 국유철도 PC 침목설계 시방서에 명시된 속력에 따른 충격계수 0.513V/100을 적용하였다. 2급선 설계조건인 L22하중과의 연계성을 위하여 축중을 22톤으로 산정하고, 차축의 배치조건은 디젤기관차 6,000호대로 가정할 때, 침목하면에 작용하는 압력은 각 윤중 Q 에 의한 압력 σ_i 의 총합으로 표현한다. 궤도해석 결과 작용응력은 3.13 kg/cm²이었으며, 침목의 유효지지부에서 단위길이당 작용력은 0.0814 ton/cm이며, 30 cm의 침목영역에서 행한 등가BBT하중(등가 Ballast Box Test 하중)은 2.44 ton이었다.

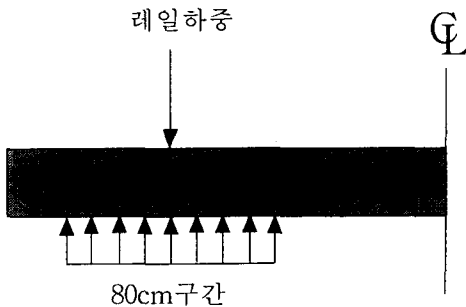


Fig. 5 침목 1/2영역의 유효지지 면적 가정

BBT시험결과로부터 등가 BBT하중 2.44 ton에 해당하는 운행하중 30만회에 대하여, LA마모율 15.7%인 자갈의 경우에는 마모파쇄량이 13.07g, LA 마모율 24.4%인 자갈의 경우에는 45.53 g으로 추정할 수 있다. 이 마모파쇄량을 침목 1개 영역의 값으로 환산하는 과정에서 침목의 유효 지지길이에 대한 보정을 위하여 아래와 같은 보정계수를 이용하였다.

$$f_1 = l / 30 \quad (3)$$

여기서, f_1 는 침목지지길이 보정계수이며, l 은 침목의 유효지지길이(cm)이다.

임의의 LA 마모율을 갖는 도상자갈의 마모파쇄량을 추정에 상기의 시험결과를 활용하고자 LA 마모율이 0 %인 도상자갈의 마모파쇄량은 0이라는 조건을 가하였다. 또한, 임의의 LA 마모율 X 에 대한 마모파쇄량을 Y 를 결정하기 위해 $Y = C_1 X^{C_2}$ 에 대해 회귀분석을 수행하였다(그림 6). 마모파쇄량의 추정결과 LA 마모율의 증가에 따라 마모파쇄량이 급격히 증가하는 결과를 보였다.

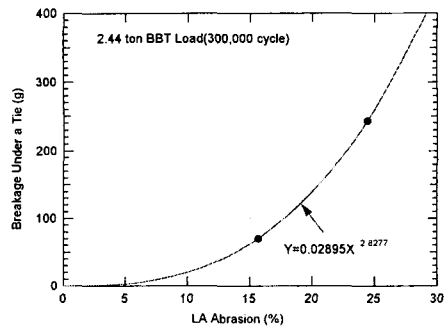


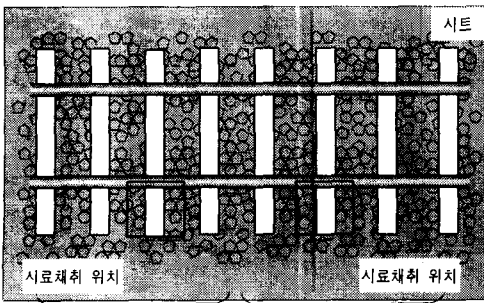
Fig. 6 등가 BBT하중 2.44 ton에 대한 마모파쇄량

3.3 현장시험에 의한 MTT작업 영향 평가

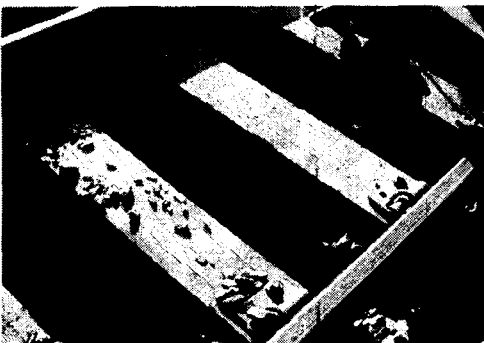
MTT 작업에 의한 도상자갈의 마모파손 특성을 규명하기 위한 현장시험을 수행하였다. 시험선로는 의왕역구내 1번 축선을 선정하여 시행하였으며, 해당선로의 기존 궤도를 철거한 후 노반

상면에 시트를 부설한 후 신폴 도상자갈의 살포 고르기 작업을 행하였다. 부설된 시험선로에서 MTT 장비를 투여하여 침목 4개 단위로 동일한 다지기 작업을 수행하였으며, 같은 종류의 석질을 갖는 자갈영역에 대하여 각각 2회, 6회 및 10회의 다지기 작업을 행하였다. 부설된 시험선로에 석질에 따른 마모/파쇄 특성을 파악하기 위하여 석질별로 동일한 작업조건을 부여하였다.

10 mm보다 큰 입자를 도상으로부터 제거하였으며, 시료의 채취작업중에 도상자갈의 사면붕괴를 방지하기 위하여 넓은 영역에 대한 굴착을 시행하였다.



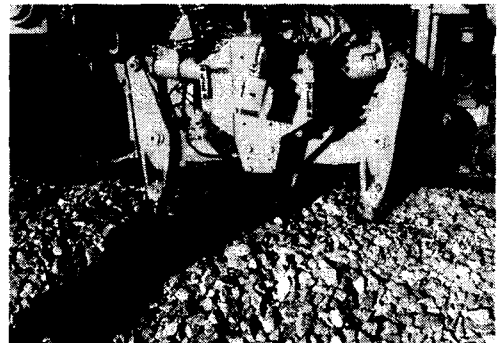
(a) 개념도



(b) 케도부설 광경

Fig.7 현장 케도부설 및 시료채취 위치

다지기 작업이 끝난 후 동일횟수의 다짐작업을 한 침목들중에서 중앙부 침목하부의 도상자갈을 채취하여, 10 mm미만의 입자들에 대한 체가름 작업을 하였다(그림 8). 시료채취 영역은 침목의 약 1/4영역이며, 시료의 교란을 최대한 방지하면서 조심스럽게 채취하였다. 우선적으로



(a) MTT 작업광경



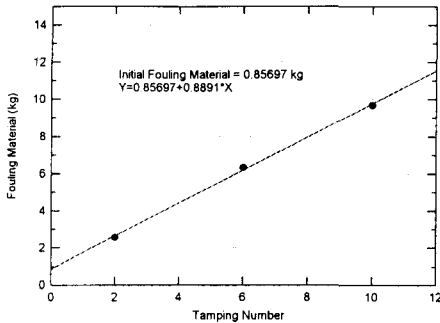
(b) 시료채취 광경

Fig. 8 MTT 작업과 시료채취

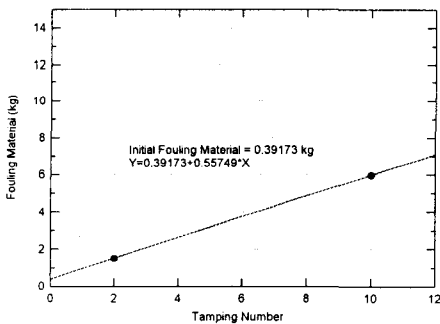
현장시험 결과 다짐작업의 횟수와 마모파쇄량과는 선형적인 경향을 보였으며, 압축강도보다는 LA 마모율에 종속적인 마모/파쇄 경향을 보여주고 있다. 하지만, 도상이 심하게 오염된 상황에서는 MTT 작업 횟수의 증가에 따른 마모파쇄 입자의 증가량이 완화될 수 있을 것이다.

LA 마모율이 0%일 때 마모파쇄량이 0이라는 조건과 시험결과를 이용하여 임의의 LA 마모율 X인 자갈의 1회 MTT작업에 의한 침목 1개영역

에서 발생하는 마모파쇄량은 $Y = C_1 X^{C_2}$ 형태의 방정식에 대해 회귀분석으로 추정하였다 (그림 9).



(a) LA 마모율 15.7 %, 압축강도 1,311 kg/cm²



(b) LA 마모율 10.5 %, 압축강도 1,821 kg/cm²

Fig. 9 MTT 작업횟수에 따른 침묵 1/4영역의 마모파쇄량

4. 석질 및 연간 MTT작업횟수에 따른 도상수명(Ballast Life)의 추정

도상자갈이 LA마모율 변화에 따른 도상수명의 변화특성을 살펴보기 위하여 경부선의 선로 조건을 적용하였다(그림 10). 경부선 수원-천안 선로를 기준으로 볼 때 1일당 편도열차수('98년 4월 6일 기준)가 여객 106회, 화물 32회이며, 경부선의 평균 열차견인량수('97년 기준)는 여객 9.3량, 화물 20.3량이다(철도청, 경영성적보고서,

1998). 그러면 통과 톤수는 다음과 같이 계산할 수 있다.

여객 : (기관차 132.0톤 + 객차 43.8톤 ×

평균 9.3량) × 106회 × 365일 ≃ 21 MGT

화물 : (기관차 132.0톤 + 화차 72.0톤 ×

평균 20.3량) × 32회 × 365일 ≃ 19 MGT

위와 같이 개략적으로 추정된 통과 톤수는 40 MGT이나, 열차가 항상 만차상태로 주행하는 것은 아니므로 계산값의 80 %를 취하여 32 MGT로 평가할 수 있을 것이다.

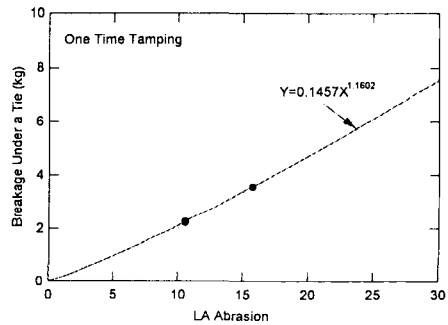


Fig. 10 침묵당 MTT 다지기 작업 1회에 따른 마모파쇄량의 추정치

실제 도상자갈을 열화시키는 요인은 단순한 통과 톤수에 의해 표시되는 수치가 아니라, 축중 혼합비율이 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 하지만, 문제의 단순화를 위하여 모든 통과 톤수를 22 톤 축중에 의해서 평가하고, 차축 4개(약 2개 대차)에 해당하는 통과 톤수를 1개의 하중사이클로 가정하였다. 이와 같은 조건하에서 경부선의 통과 톤수 추정값 32 MGT에 대한 총하중반복횟수는 약 363,637회가 된다. 연간 통과 톤수에 의한 마모파쇄 추정량은 BBT결과에 아래와 같은 하중사이클 보정계수를 적용함으로써 구할 수 있다.

$$f_2 = n / 300,000 \quad (4)$$

여기서, f_2 는 하중사이클 보정계수이고, n 은 해당선로의 등가하중사이클(회)이다.

도상수명의 산정에 있어서 토사혼입량의 허용치는 국유철도 선로정비규칙에 나타난 25 %를 이용하였으며, 도상자갈의 초기 토사혼입량 F_0 는 3 %, 토사의 연간 유입량 F_A (kg/년/침목)를 1.2로 가정하였다. 실내외 시험에서 체분석결과 모래입경의 최대치(4.75 mm)보다 작은 입경을 갖는 중량비율은 전체 마모파쇄량의 50 % 정도(BBT 시험 50.8 %, MTT 시험 57.2)이므로 간단히 마모파쇄량의 50%를 토사분으로 간주하였다. 1회 MTT당 침목 1개 구간에서의 토사증가량을 F_{MTT} (kg/횃수/침목), 연간 통과 톤수에 의한 마모파쇄량을 F_{GT} (kg/년/침목), 연간 침목당 도상자갈의 중량 W (kg/침목)인 선로의 연간 MTT작업 수행횃수가 N 회인 경우 도상수명 T 는 아래와 같은 식에 의해 산정될 수 있다(초기 궤도부설시 1회의 MTT 작업 가정).

$$T = \frac{(25 - F_0 - \frac{F_{MTT}}{W} \times 100) \times W}{(F_{MTT} \times N + F_{GT} + F_A) \times 100} \quad (5)$$

LA 마모율 20 %, 25 % 및 30 %의 품질을 갖는 도상자갈의 도상수명을 연간 MTT 작업횃수별로 추정하였다(그림 11). 분석결과 연간 MTT 작업횃수가 도상자갈의 수명단축에 큰 영향을 끼치므로 합리적인 궤도관리의 중요성을 재인식하였으며, 충격개소의 경우 도상자갈의 품질이 수명에 미치는 영향이 상대적으로 매우 크게 나타남을 알 수 있었다.

5. 결론

실내외 실험을 통하여 도상자갈의 마모파쇄 특성을 분석하고 도상수명의 추정을 한 결과 양질의 도상자갈일수록 현저하게 충격개소에서 수명이 증가함을 알 수 있었으며, 연간 MTT 작업이 도상수명에 큰 영향을 미침을 확인하였다. 따라서 유지보수비용의 저감을 위하여 MTT 장비의 최소투여를 위한 노력과 도상자갈의 규격 강화가 큰 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

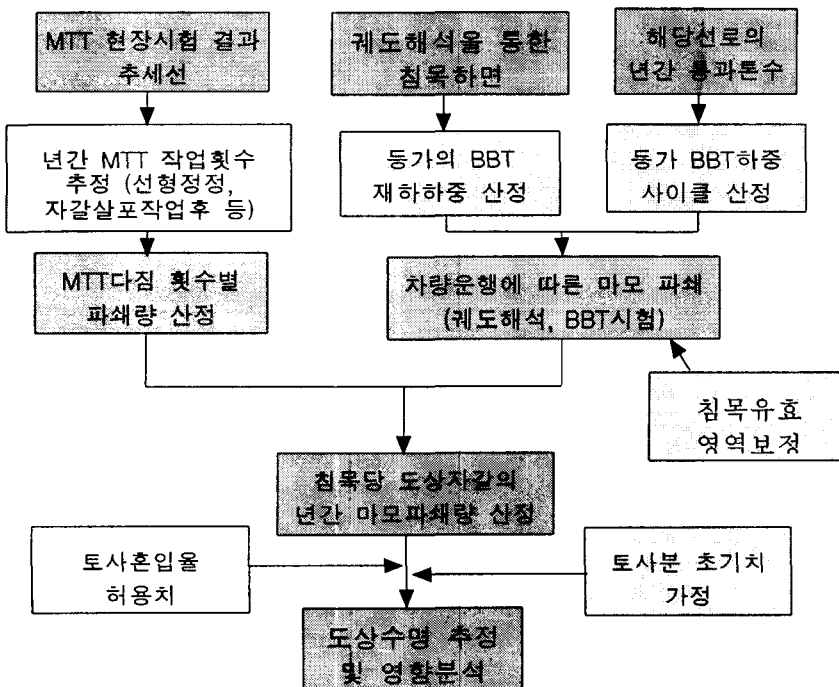
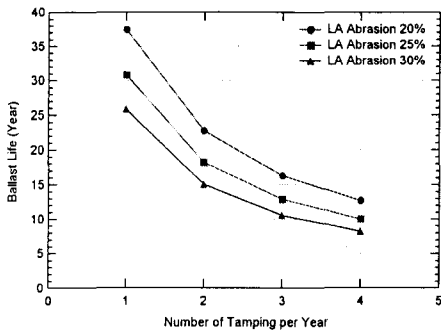
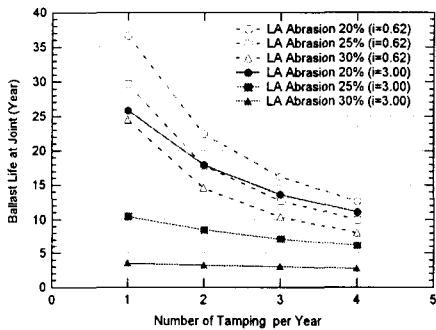


Fig. 11 도상수명 추정 개괄도



(a) 일반구간의 도상수명 (충격율 $\lambda = 0.62$)



(b) 충격개소의 도상수명

Fig. 12 도상수명(Ballast Life) 추정 결과

참고문헌

- [1] 한국철도기술연구원, 1998, "철도도상 개량을 위한 기초연구", 철도청, 12월
- [2] Selig, Ernest T. and Waters, John M., 1994, "Track Geotechnology and Substructure Management", Railway Geotechnical Consultant, 1994
- [3] Chrismer, Steven M. and Selig, Ernest T., 1994, "Mechanics-based Model to Predict Ballast Related Maintenance Timing and Costs", Report No. R-865, AAR Technical Center
- [4] Nagato, Hiroshi, Miyamoto, Hideo and Okawa, Katunori, 1996, "道床の細粒化状態評價に關する研究", 平成8年 鐵道連合シンポジウム(JRAIL '96), pp.337~340
- [5] Transportation Research Board, 1987, "Performance of Aggregates in Railroad and Other Track Performance Issues"
- [6] Chrismer, S. M., "Recent Developments in Predicting Ballast Life and Economics", Report No. R-700, AAR Technical Center
- [8] Profillidis, V. A., 1995, "Railway Engineering", Avebury Technical