

## 철도 밸러스트 선정 효율성에 대한 고찰 : 프랑스 채석장에 대한 사례연구

우 익\*

### Study on Effectiveness of Selection for Railway Ballast : Case Study on A Quarry in northern France

Ik Woo\*

**Abstract** The specification for selecting railway ballast in France is introduced in this study and the effectiveness of selection for railway ballast is studied for the case of a quarry located in northern France. The quality of railway ballast is, in general, estimated depending on the grain distribution and mainly of the resistance against abrasion. The resistance against abrasion is obtained by both Los Angeles abrasion test and Micro Deval test, which determine the ballast quality suitable whether for high speed railway or classical railway. This study analyzed the correlation between the abrasion index obtained from the abrasion tests for the aggregates sampled at three different stages among ballast production procedure at the quarry. A high correlation is determined between Los Angeles Abrasion index (LA) and Micro Deval index (MDA) and also between abrasion indices of different aggregates. Particularly, this correlation between the abrasion indices allows to estimate the quality of ballast at the final stage from the aggregates at the site in a quarry within the margin of error.

**Key words** Railway ballast, Los Angeles abrasion test, Micro Deval test, France, Quarry

**초 록** 이 연구는 프랑스에서 사용되는 철도 밸러스트를 선정하는 기준에 대하여 논하고, 프랑스 북부에 위치하고 있는 한 채석장을 대상으로 철도 밸러스트 선정 효율성에 대한 연구를 수행하였다. 철도 밸러스트의 품질은 대부분 입도분포와 마모 저항성으로 평가된다. 마모 저항성은 로스앤젤레스 마모 실험과 마이크로 드발 실험에 의해 평가되며, 고속철도와 일반철도용 밸러스트의 품질은 이들 두 마모 지수에 의해 결정된다. 이 연구는 채석장의 생산 과정에서 단계가 다른 3 종류의 골재를 채취하여, 각각에 대하여 마모 실험을 수행하여 획득한 마모 지수들의 상관관계를 분석하였다. 로스앤젤레스 마모 지수(LA)와 마이크로 드발 지수(MDA) 사이에는 높은 상관도를 보이고 있고, 단계별 골재들 사이의 마모 지수도 높은 상관도를 보이고 있다. 특히, 발파 직후 현장에서 채취한 골재의 마모 지수(LA 및 MDA)와 최종 생산 단계에서 채취한 골재의 마모 지수 사이의 상관관계를 이용하면, 현장에서 빠른 시일 내에 최종 골재의 품질을 큰 오차 없이 예측할 수 있어 작업 효율성이 증대할 것으로 기대된다.

**핵심어** 철도 밸러스트, 로스앤젤레스 마모실험, 마이크로 드발 실험, 프랑스, 채석장

**Received:** Dec. 4, 2015

**Revised:** Dec. 16, 2015

**Accepted:** Dec. 16, 2015

**\*Corresponding Author:** Ik Woo

(Tel) +82364691863, (Fax) +82634691861

(E-Mail) woo@kunsan.ac.kr

Dept. Coastal Construction Engineering, Kunsan National University, Daehakro 1170, Kunsan, Jeonbuk, Korea

## 1. 서 론

철도의 자갈도상에 사용되는 골재를 밸러스트(ballast)라고 일컬으며, 선박 평형수의 영어 표현인 밸러스트와 구분하기 위하여 종종 궤도 밸러스트(track ballast) 혹은 철도 밸러스트(railway ballast)로도 불린다. 철도 밸러스트는 노반과 침목사이에 설치되는 골재로 열차가 운행되면서 발생하는 동적 하중 충격과 소음을 레일 및 침

목 주위로 분산시키고 강우 시 배수가 원활하게 하고 노선에 식물의 성장을 막아주는 역할을 한다. 궤도 틀림이 발생하면 자갈도상은 콘크리트도상보다 보수가 용이하고, 벨러스트 설치비용이 상대적으로 저렴하기 때문에 오래전부터 열차 노선에 대부분 사용되어 왔다. 반면, 장기간 사용에 따른 벨러스트의 마모로 열차 운행 충격 흡수 능력이 감퇴하고, Paiva et al.(2015)가 언급하였듯이, 마모로 인한 암분이 벨러스트 사이의 공극을 메워 투수율이 저감될 수 있어 철도 벨러스트의 주기적인 교환이 필요하므로 콘크리트 도상과 달리 벨러스트 교체 비용이 소요된다. 초기 철도에는 산자갈 및 강자갈을 벨러스트로 사용하였으나, 자연 자갈의 공급 부족에 따른 품질 저하 문제가 대두되고 고속열차와 같은 큰 동적 하중을 흡수할만한 재질을 자연 자갈에서는 찾기 어렵기 때문에, 현재에는 경암 쇄석이 대부분 철도 벨러스트로 사용되고 있다. 열차의 운행에 따른 반동에 의한 열차 하부 피해를 방지하기 위하여 철도 벨러스트에 사용되는 골재의 크기 및 강도, 경도와 같은 규격은 노선의 종류에 따라 결정된다.

이러한 골재를 평가하기 위한 실험으로는 마모실험과 파쇄 저항정도를 측정하는 실험, 미끄럼저항 실험, 풍화에 대한 저항정도를 측정하는 실험 등이 있다. 미끄럼저항실험(skid resistance test)은 주로 도로용 골재에 적용되는 실험으로 PSV(Polishing Stone Value) 지수를 구하여 도로에 사용될 적절한 골재를 선정하는 방법이며, 극한 기후를 지나는 나라에서는 동결-융해 실험 및 황산마그네슘 용액을 이용한 실험과 같은 풍화에 대한 저항정도를 측정하는 실험을 실시하기도 한다. 마모실험

험과 파쇄도 실험은 철도의 침목 아래에 놓여 열차의 동적 하중을 지속적으로 받는 철도 벨러스트의 품질을 평가하는 데 주로 사용된다. 이 실험법 중, 로스앤젤레스 마모 실험(Los Angeles Abrasion Test)은 골재의 마모성과 파쇄 저항정도를 동시에 측정할 수 있는 실험법이며, 마이크로 드발(Micro Deval) 실험은 골재의 마모성을 측정하는 실험이다(Erichsen, 2011). 이 외에도 충격해머실험(Impact Hammer test)을 이용하여 골재의 파쇄 저항정도를 측정하기도 한다.

이 연구에서는 프랑스에서 사용되는 철도 벨러스트를 선정하는 규격(Norme Francaise, 1996, SNCF, 1995)에 대하여 논하고, 고속철도용 및 일반철도용 철도 벨러스트를 생산하는 프랑스 북부의 한 채석장을 대상으로 여러 생산 과정 중의 서로 다른 세 단계에서 채취한 골재에 대해 마모 실험을 수행하여 그 결과를 분석하였다. 이러한 과정을 통하여 철도 벨러스트 규격에 적합한 골재를 보다 효율적으로 선정할 수 있는 방안에 대해 논하고자 한다.

## 2. 채석장의 지질분포

채석장은 프랑스 북부 노르망디 지역에 위치하는 Vignat 채석장(Carriere de Vignat)으로, 대부분 규암으로 구성된 지질분포를 보이고 있으며, 사암과 사질암, 이암 등도 일부 분포하고 있다(Fig. 1). 이 지역에 분포하는 퇴적층은 Table 1에 상세히 기술되어 있다. 최하부에 위치한 퇴적층 Unit 1은 사암질 규암과 사암으로 이루어진 하부대와 운모가 풍부한 붉은색의 조립질 규암으로

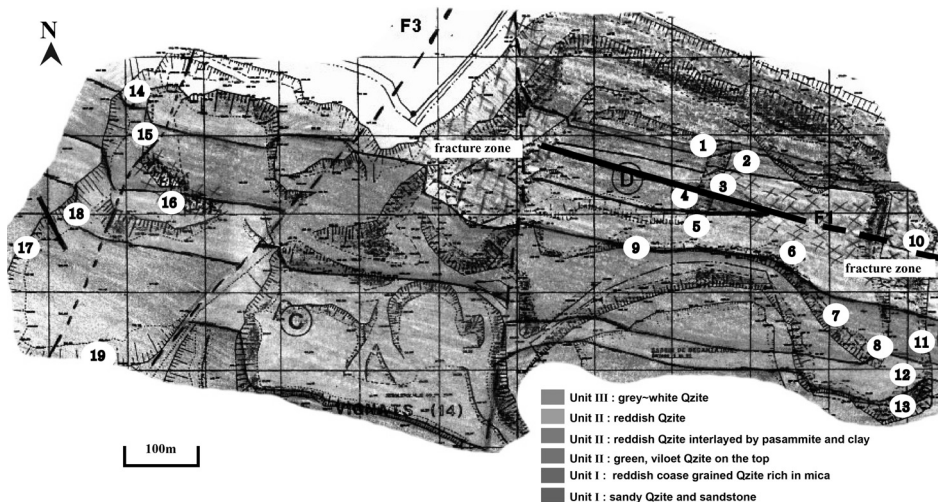


Fig. 1. Geological map including sampling locations of Vignat quarry, France (after Ouahabi et al., 1998)

**Table 1.** Lithological description and number of samples taken at the site (Sampling for the storage yard and the final stage being highlighted in bold type for sample no.) (after Ouahabi et al. 1998)

Lithological description	Unit	Sub Unit	Sample no.
gray quartzite with very fine grains with thick stratum	<b>III</b>	<b>III<sub>A</sub></b>	19
clear gray quartzite		<b>III<sub>B</sub></b>	17
White gray quartzite with interlayers of psammite and clay more and more rare towards the top	<b>II~III</b>	<b>III<sub>C</sub></b>	13, 18
Gray and reddish quartzite with well sorted medium grains with thin stratum	<b>II</b>	<b>II<sub>A</sub></b>	12, 16
Thick reddish quartzite with strong hematization in small stratum of medium grains, alternative with sandstone layered by psammite and clay, the thickness of stratum 20 to 50cm		<b>II<sub>B</sub></b>	8 7 15
Alternative layer of coarse quartzite, psammite and clay with thickness of 20-40cm		<b>II<sub>C</sub></b>	9
Greenish gray quartzite and violet towards top, composed of well sorted midium sized thick stratum of 1m - 1m50 thickness with intercalation of thin clay bed which is more frequent towards the top		<b>II<sub>D</sub></b>	6 5 14
Fault fractured zone	<b>I</b>	<b>I<sub>A</sub></b>	3, 4, 10, 11
reddish quartzite with coarse grains poorly sorted, rich in micas and very fractured		<b>I<sub>B</sub></b>	2
Various colored sandy quartzite (grey-reddish-violet) with aureole of weathering of feldspar		<b>I<sub>C</sub></b>	1
Sandstone and sandy quartzite with heterogenous granulometry			

이루어진 상부대로 구성되어 있다. Unit II 는 Unit I 상부에 분포하는 층으로 하부부터 녹색 내지 자주색 규암, 사질암과 이암이 층간에 협재하는 붉은색 규암 및 양호한 분급을 지닌 중립질 붉은색 규암으로 구성되어 있다. 퇴적층의 최상부에는 회색 내지 백색 규암으로 구성된

Unit III 가 분포하고 있다. 이 지역에는 습곡으로 형성된 5개의 단층이 채석장을 가로지르며 각기 다른 방향으로 분포해 있고, 단층대 주위에는 파쇄대가 형성되어 있다(Fig. 1의 fracture zone).

### 3. 철도 밸러스트 선정 규격

#### 3.1 골재의 외형

채석장에서 생산되는 골재는 콘크리트용 골재 및 도로 포장용 골재, 철도 밸러스트 등 생산되는 품질에 따라 여러 목적으로 사용될 수 있다. 채석장에서 골재를 생산할 때에는 골재를 사용하는 기관에서 정하는 규격에 적합한 특성을 지니도록 골재를 분류하여야 한다. 프랑스 고속열차인 TGV(Train à Grande Vitesse) 및 일반열차 선로에 사용되는 철도 밸러스트는 Fig. 2에 적합한 입도분포를 보여야 한다. 즉, Fig. 2의 입도분포에 따르면 대부분의 골재는 30 mm에서 50 mm의 크기를 지녀야 한다(Norme Francaise, 1996).

철도 밸러스트는 다면체의 모서리 각이 날카로운 상태의 형태를 지녀야하며, 골재의 장축과 폭의 비가 7에서 12 사이에 있어야 한다. 또한 밸러스트 골재에는 모래, 먼지, 진흙과 같은 이물질을 포함하지 않아야 한다. 즉, 1.6 mm 이하의 이물질은 전체 중량의 0.5%를 초과하면 안된다.

#### 3.2 역학적 특성

마모 시험은 골재의 품질을 결정하는 중요한 시험으로 여겨지고 있기 때문에(Erichsen, 2011), 밸러스트의 역학적 특성은 로스앤젤레스 시험과 마이크로 드발 시험과 같은 마모 시험에 의하여 결정된다(American Standard for Testing and Materials, 2006, 2006a, 2009, European Standard, 2003, 2007, Korean Standard, 2007).

로스앤젤레스 시험은 5 kg의 골재와 평균지름이 약 46.8 mm인 철구 11~12개(전체 철구의 질량은 4690~4860 g)를 시험기기인 강제 원통에 넣고 원통을 1,000 회 회전을 시킨 후 1.6 mm 혹은 1.7 mm 이하로 분쇄된 압편의 중량을 측정하여 초기 질량과의 백분율로 나

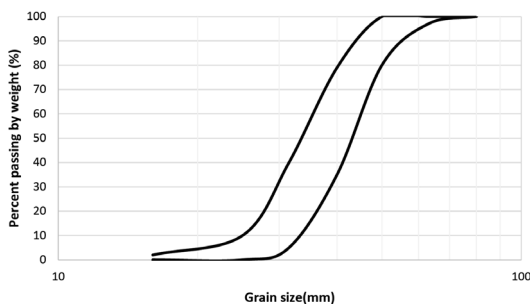


Fig. 2. Grain size distribution curve for railway ballast France

타낸다(식 (1)).

$$LA = \frac{m}{M} \times 100 \quad (1)$$

여기에서 M 은 초기 시료 질량, m은 1.6 mm 이하의 크기를 지닌 압편의 질량을 나타낸다.

마이크로 드발 시험은 주로 세립골재(10~14 mm)에 대하여 실험하지만, 철도 밸러스트에 대해서는 조립골재에 대하여 실험을 수행하며 그 결과도 양호하다(Rogers, 1998). SNCF(1994)에 의한 마이크로 드발 시험은 로스앤젤레스 시험기기보다 작은 강제 원통(외경 200 mm)을 사용한다. 10 kg의 골재와 2 liters의 물을 지름이 10±0.5 mm인 철구(철구의 총 무게는 5000 g ± 5 g)를 실험 원통에 넣은 후, 원통을 총 14,000 회 회전을 시킨 후 1.6 mm 체에 남는 골재의 중량을 측정하여 지수를 구한다. 즉,

$$MD = \frac{M - m'}{M} \times 100 \quad (2)$$

여기에서 M 은 초기 시료의 무게, m'은 1.6 mm 체에 남는 골재의 중량을 나타낸다.

이러한 마모 시험에서 얻어진 결과는 마모정도에 따라 고속철도 및 일반철도용 밸러스트로 구분된다(Norme Francaise, 1996). 즉, 고속철도용 밸러스트는

$$MD < 6, LA < 19 \text{ and } LA + 5MD < 44 \quad (3)$$

를 만족하여야 하고, 일반철도용 밸러스트는

$$MD < 8.5, LA < 22 \text{ and } LA + 2MD < 33 \quad (4)$$

을 만족하여야 한다.

## 4. 실내 실험 결과

#### 4.1 시료 채취

실내 실험을 위하여 골재 생산 공정 중 최초 단계에 있는 골재와, 분쇄 및 세척이 종료되어 일정 크기로 분류된 골재, 그리고 최종 단계의 골재 등 3종류의 골재 시료를 채취하였다.

채석장에서 골재를 생산하는 과정은 최초 사면 발파를 통하여 파쇄시킨 원석을 확보한 후, 원석을 분쇄기로 잘게 분쇄시키고 세척한 후, 크기가 6 mm ~ 150 mm 범위에 있는 골재가 야적된다. 야적된 골재를 생산 공

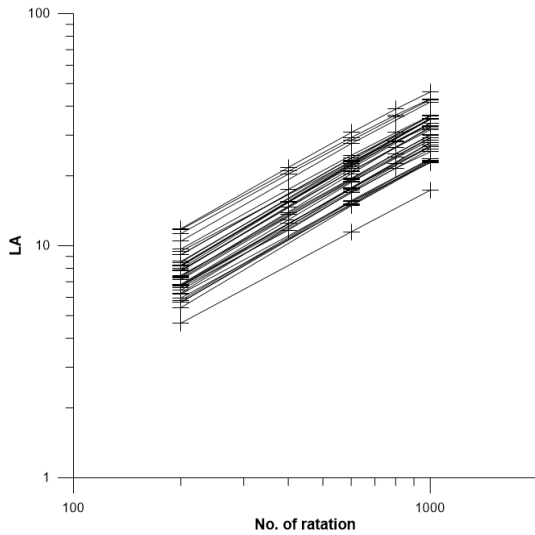


Fig. 3. Evolution of LA index by rotation of drum at Los Angeles test for the aggregates from the site

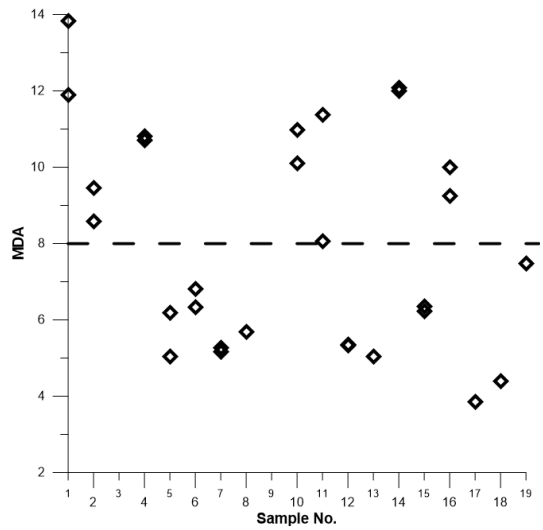


Fig. 4. Scattered graph of MDA index versus sample number

정에 따라 트럭이나 페이로더와 같은 장비로 체분류를 위하여 컨베이어 벨트로 이송된다. 골재들은 크기에 따라 분류되어 25~50 mm 크기의 골재는 철도 밸러스트로 사용되고, 그 이상의 골재는 일정크기로 다시 분쇄되고 그 이하 크기의 골재는 콘크리트용 골재 등으로 사용된다.

실내 실험을 위해 채취한 첫 번째 골재는 현장 사면 발파 후 법면 밑에 분포하는 철도 밸러스트 크기에 속하는 골재로, 총 19 곳에서 다양한 암상의 시료를 채취하였다(Fig. 1 및 Table 1에 숫자로 표기). 두 번째 시료는 야적장의 밸러스트로 철도 밸러스트 규격에 적합한 크기의 시료를 채취하였다. 세 번째 시료는 최종 생산 단계에 있는 완성된 철도 밸러스트에서 채취하였다.

**4.2 로스앤젤레스 실험 및 마이크로 드발 실험**

이 연구에서는 3 종류의 골재 시료 - 현장, 야적장, 최종 단계 -에 대하여 로스앤젤레스 실험과 마이크로 드발 실험을 수행하여, 골재 생산 초기단계에서부터 최종 단계에 이르기까지 골재의 특성 변화를 분석하였다.

**4.2.1 발파 현장 골재 시료**

발파 현장 19군데에서 10종류의 암석을 채취하여 로스앤젤레스 실험을 우선적으로 수행하였다. 10종류의 암석은 Fig. 1에 표기된 것처럼, 채석장에 분포하는 모든 암석을 대상으로 수행되었다. 로스앤젤레스 실험은

200, 400, 600, 800, 1000회의 회전을 한 후 각각의 결과를 구하여 회전에 따른 LA 지수의 변화를 살펴보았다. 회전 횟수와 LA 지수를 Fig. 3과 같이 모두 대수화한 후 선형회귀분석을 수행하여 다음과 같은 회귀식을 구하였다.

$$\log(LA) = a \log(rotation) + C \tag{5}$$

상기 식에서 a는 회귀직선의 기울기를 나타내는 항목으로 0.78~ 0.93의 범위를 보인다. C는 암종과 풍화상태에 따른 상수로 가장 불량한 암석인 Unit I의 사질암 경우에는 -0.84이며, Unit III에 속하는 가장 양질의 규암에 대해서는 -1.25이다.

1000회 회전한 후에 측정된 LA<sub>1000</sub>의 범위는 17과 47 사이에 있으며, 그 중 85%의 값은 27과 36 사이에 분포하고 있다.

현장 골재 시료에 대한 마이크로 드발 실험은 실험의 어려움으로 회전 회수를 달리하지 않고 14,000회의 회전을 수행하여 MDA 지수를 구하였다. 현장 골재 시료의 MDA 지수는 4~14의 범위를 보이며, 그중 6~12에 90% 이상 분포하고 있다. 특히, 시료별 MDA 값의 분포를 나타내는 Fig. 4에서 MDA 지수 8 이상에 해당하는 암석은 사질암 및 풍화가 진행된 암석으로 분류할 수 있다. 즉, 사암질로 이루어진 1번 시료와 운모가 풍부한 2번 시료, 단층대의 영향을 받은 3, 4, 10, 11, 14, 16번 시료가 여기에 속하는 암석으로 구분된다.

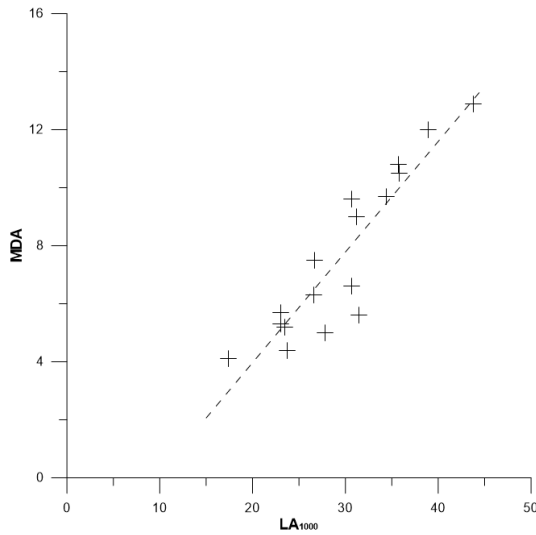


Fig. 5. Correlation between LA1000 and MDA

현장 골재 시료에 대한 로스앤젤레스 실험과 마이크로 드발 실험 결과를 시료별로 구분하여 연관성을 분석하였다(Fig. 5). 이들 지수에 대한 선형회귀분석을 수행한 결과, 결정계수  $r^2$ 이 0.83으로 높은 상관도를 보이며 다음과 같은 선형회귀식으로 표현된다.

$$MDA = 0.38 LA_{1000} - 3.65 \quad (6)$$

4.2.2 야적장 시료 및 최종 단계 시료

야적장 시료와 최종 단계의 시료는 작업 공정의 문제로 5개 압중에 국한하여 시료를 채취하였다. 즉, Fig. 1에 표시된 시료 채취 위치에서 Unit I에 해당하는 1번과 2번, Unit II에 해당하는 5번과 7번 그리고 Unit III의 18번에 해당하는 시료를 야적장 시료와 최종 단계 시료로 채취하여 실험을 수행하였다.

로스앤젤레스 실험을 현장 시료와 마찬가지로 야적장 시료와 최종 단계의 시료에 대하여서도 회전수를 달리 하며 그 변화 추이를 관찰하였다. Fig. 6에서 보여주는 것처럼, 야적장 시료와 최종 단계 시료에 대한 로스앤젤레스 실험기기의 원통 회전수와 LA 지수와의 관계는 현장 시료와 마찬가지로 양대수 그래프에서 선형적인 관계를 보이며, 그에 대한 선형회귀방정식은 상기의 식 (5)의 형식을 따른다. 야적장 시료와 최종 단계 시료에서 회귀직선의 기울기 a는 각각 0.96, 0.92이고, C는 각각 -1.52, -1.48로 결정되었다. 현장시료와 비교하면, 기울기는 유사한 값을 보이고 있으나, 절편값 C는 -공

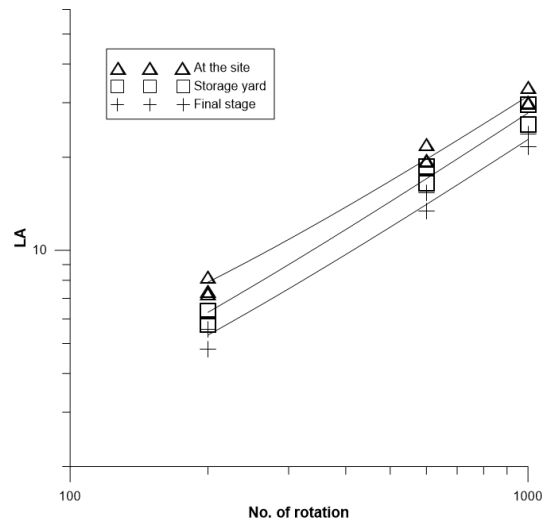


Fig. 6. Evolution of LA index by rotation of drum at Los Angeles test for aggregates from the site, from the storage yard and from the final stage

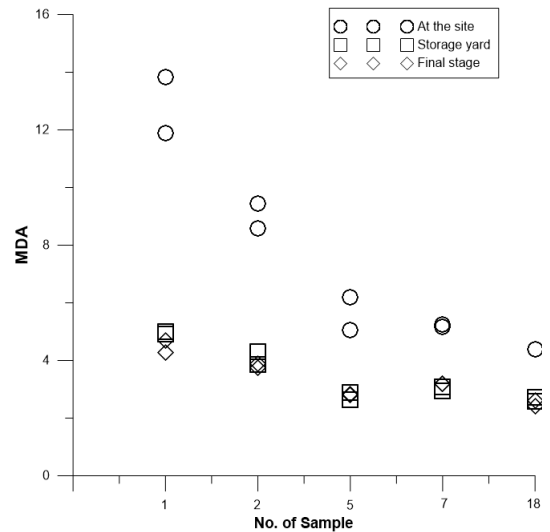


Fig. 7. Result of Micro Deval test on aggregates from the site, from the age yard and from the final stage

정단계에서 분쇄와 마모를 거치면서 시료의 LA 지수가 점차 감소되어 - 동일한 압석이라도 골재 생산 단계에 따라 좌우됨을 알 수 있다.

야적장 시료와 최종 단계 시료에 대하여 마이크로 드발 실험을 수행한 결과는 Fig. 7에 표시되어 있다. 이 그래프에서 볼 수 있듯이, Unit I과 같은 사질암 또는

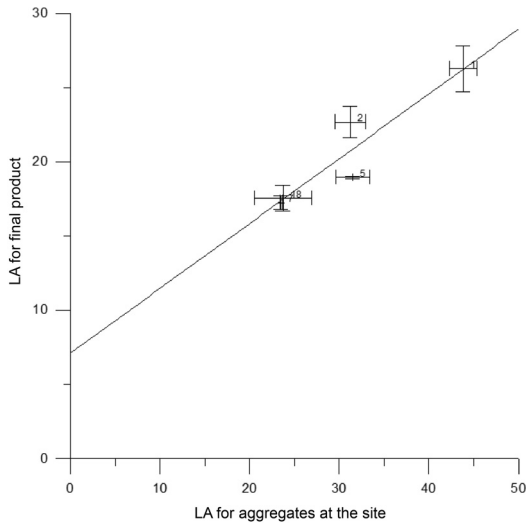


Fig. 8. Correlation between LA for aggregates at the site and at the final stage

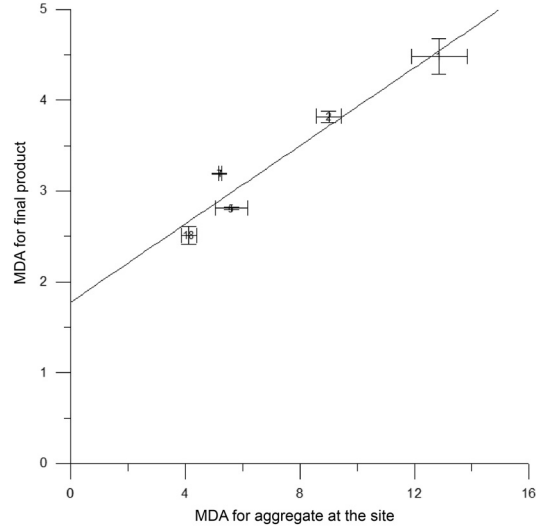


Fig. 9. Correlation between MDA for the aggregates at the site and at the final stage

풍화된 암석의 골재와 같이 골재의 품질이 불량하면 야적장 및 최종 단계 시료의 MDA 지수는 현장 시료의 MDA 지수와 크게 차이가 나는 반면, 골재의 품질이 양호해지면 그 차이가 점차적으로 감소하고 있다. 또한, 야적장 시료와 최종 단계 시료의 MDA 지수 값 사이에는 미비한 차이가 발생하고 있으며, 이는 야적장 시료와 최종 단계 시료의 역학적 특성의 차이가 아주 미비하다는 것을 나타내고 있다.

세 종류의 골재-현장, 야적장, 최종 단계-에 대한 실험 결과로 서로 다른 골재의 마모 지수(LA 지수 및 MDA 지수) 간의 상관관계를 구할 수 있다. 야적장과 최종 단계 골재의 마모 지수 값은 거의 유사하게 나타나므로 현장 골재와 최종 단계 골재의 마모지수 간 상관관계를 구하였다(Fig. 8). 두 종류 골재의 LA 지수에 대한 회귀 분석을 수행한 결과, 결정계수( $r^2$ )는 0.88로 높은 상관 정도를 보여주고 있으며, 다음과 같은 선형회귀식으로 표현된다.

$$LA_{final} = 0.4 LA_{site} + 7.1 \quad (7)$$

마이크로 드발 실험 결과에 의한 MDA 지수들 간의 선형회귀분석 결과(Fig. 9), 결정계수( $r^2$ )가 0.94 로 아주 높은 상관 정도를 보여주고 있으며 다음과 같은 선형 회귀식으로 표현된다.

$$MDA_{final} = 0.2 MDA_{site} + 1.8 \quad (8)$$

## 5. 결론

이 연구에서는 프랑스 고속철도 노선에 사용되는 철도 밸러스트의 규격을 소개하였고, 이를 바탕으로 프랑스의 한 채석장을 대상으로 여러 생산 공정에서 채취한 시료에 대하여 골재 선정 기준이 되는 실내 마모 실험-로스엔젤레스 실험과 마이크로 드발 실험-을 수행하여 그 결과를 분석하였다.

로스엔젤레스 시험 원통의 회전수에 대한 시료의 LA 지수 값의 상관성은 다음과 같은 회귀식으로 표현된다.

$$\log(LA) = a \log(rotation) + C$$

여기에서 기울기 a 는 0.78~0.93의 값의 범위를 지니고 있고, C는 재료의 특성에 좌우되는 값으로 골재의 마모 저항성이 좋으면 낮은 값을 지니게 된다. 이는 로스엔젤레스 실험은 회전수가 증가함에 따라 지숫값의 증가가 미약하게 감소한다는 것을 의미한다.

발파가 끝난 현장에서 채취한 골재의 마모 지수와 최종 단계 골재의 마모지수 간에는 높은 상관 정도를 보이는 선형관계를 지니고 있는 것으로 분석되었다. 즉, 이들의 관계는 다음과 같은 회귀식으로 표현된다.

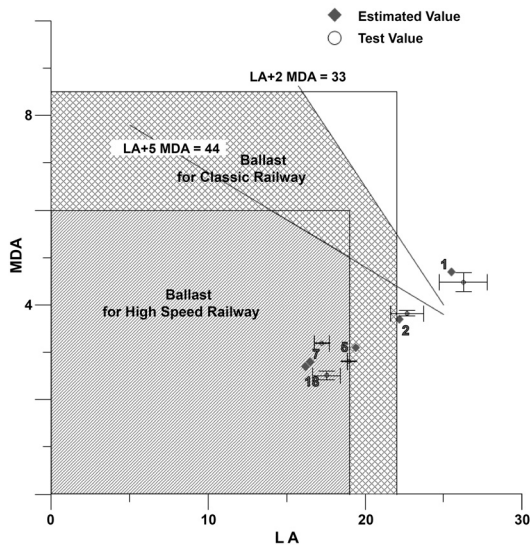


Fig. 10. Specification of the ballast for high speed railway and classic railway including estimated value corresponding to real data

$$LA_{final} = 0.4 LA_{site} + 7.1,$$

$$MDA_{final} = 0.2 MDA_{site} + 1.8$$

Fig. 10은 프랑스 고속철도용 밸러스트와 일반철도용 밸러스트의 규격을 LA 지수와 MDA 지수를 바탕으로 표시하고 있다. 실험 결과인 현장 골재의 마모 지수를 이용하여 산정한 최종 단계 골재의 마모 지수(Fig. 10의 붉은 마름모 기호)는 최종 단계의 골재의 실험 결과(Fig. 10의 빈 원 기호)와 비교할 때 오차가 크게 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 따라서, 이러한 상관관계를 이용함으로써, 복잡한 지질을 지니고 다양한 암석이 분포하는 채석장에서 최종 단계의 골재 품질을 야외의 암석으로부터 빠른 시일 내에 판정하고자 할 때 유용하게 사용될 수 있다.

이 연구 결과는 프랑스와는 다소 차이가 있을 수 있겠지만, 국내의 고속철도 및 일반철도용 밸러스트의 품질을 예측하고 선정하는 기준을 정립하는 데 유용한 자료로 사용될 것으로 사료된다.

## 사 사

이 논문은 한불 협력프로그램(ARIEL(Association for

Research with Industrial and Educational Links/KOSEF (Korean Science and Engineering Foundation)의 지원을 받아 수행되었음.

## References

1. American Society for Testing and Materials, 2006, Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine, ASTM Designation C131-06.
2. American Standard for Testing and Materials, 2006, Standard test method for resistance of fine aggregate to degradation by abrasion in the Micro-Deval apparatus, ASTM D7428-15.
3. American Society for Testing and Materials, 2009, Standard test method for resistance to degradation of large-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine, ASTM Designation C535-09.
4. Erichsen, E., Ulvik, A., Saevik, K., 2011, Mechanical degradation of aggregate by the Los Angeles-, the Micro-Deval and the Nordic test methods, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 44, Issue 3, pp. 333-337.
5. European Standard, 2003, Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 1 : determination of the resistance to wear(micro-Deval), EN 1097-1.
6. European Standard, 2006, Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 2: methods for the determination of resistance to fragmentation, EN-1097-2.
7. Korean Standard, 2007, Abrasion test method for coarse aggregate by the Los Angeles Tester, KS F 2508.
8. Norme Francaise, 1996, Railway fix equipment : Ballast and gravel for shovel-packing : Characteristics and specifications, NF F53-695.
9. Ouahabi, A. and Woo, I., 1998, Evaluation geologique et geotechnique des massifs rocheux pour la production de granulats routieres et ferroviaires, Memoire de Ceseco, Ecoles des Mines de Paris, 35 p.
10. Paiva, C., Ferreira, M., Ferreira, A., 2015, Ballast drainage in Brazilian railway infrastructure, Construction and Building Materials, No. 92, pp. 58-63.
11. Rogers, C., 1998, Canadian experience with the micro-Deval test for aggregates, In: Latham JP (ed) Advances in aggregates and armourstone evaluation, Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, Vol. 13, pp. 139-147.
12. SNCF, 1994, Direction of equipment ; VIG3 : Characterization of ballast (Mechanical tests), Study on abrasion test adapted for Micro Deval test, Proposition for the new classification of ballast.
13. SNCF 1995, Direction of equipment and management : Technical specification for aggregate supply used for the railway construction and management, ST N 590B.





**우 익**

1988년 연세대학교 지질학과 이학사  
1994년 연세대학교 지질학과 이학석사  
2003년 Ecole des Mines de Paris 지질  
공학 박사

Tel: 063-469-1863

E-mail: woo@kunsan.ac.kr

현재 군산대학교 해양건설학과 교수

---