J. Korean Soc. Environ. Eng., 38(8), 403~410, 2016
Original Paper
http://dx.doi.org/10.4491/KSEE.2016.38.8.403
ISSN 1225-5025, e-ISSN 2383-7810

# LCA기반 물질흐름분석 기법을 이용한 고속도로 건설에서의 총 자원요구량 산정

# Estimation of Total Material Requirement in Expressway Construction using Material Flow Analysis which is based on the Life Cycle Assessment

공찬휘 · 황용우† · 문진영* · 곽인호*
Chan-Hwi Kong · Yong-Woo Hwang† · Jin-Young Moon* · In-Ho Kwak*

인하대학교 환경공학과 · *인하대학교 대학원 환경안전융합전공
*Department of Environmental Engineering, Inha University*
**Program in ET & ST, Inha University Graduate School*

(Received July 3, 2015; Revised February 25, 2016; Accepted March 30, 2016)

**Abstract :** During expressway construction it has been input a lot of material, but it does not manage to estimate quantitatively. In this study, the total material requirement for construction of expressway, which separated direct material requirement and indirect material requirement each section was quantified by combining life cycle assessment (LCA) and material flow analysis (MFA). In the direct material requirement, sand 2.27E + 04 ton/km, limestone 1.02E + 04 ton/km and gravel 4.47E + 03 ton/km were required, in the indirect material requirement, gravel 2.75E + 04 ton/km, iron 9.80E + 03 ton/km and coal 9.74E + 03 ton/km were required. Material such as sand, limestone which has high direct material requirement is require of excess input prevention from construction site, and material such as iron, rare metals(chrome, nickel) and coal which has high indirect material requirement is require additional studies of resource management.
**Key Words :** *Total Material Requirement, Life Cycle Assessment, Expressway, Material Flow Analysis (MFA)*

**요약 :** 고속도로의 건설시 많은 자원이 투입되고 있으나 이를 정량적으로 산정하여 관리하고 있지 않다. 본 연구에서는 LCA기법을 MFA에 접목하여 고속도로의 건설시 투입되는 총 자원요구량을 구간별로 직접 자원요구량과 간접 자원요구량으로 구분하여 산정하였다. 그 결과 직접 자원요구량은 모래 2.27E + 04 ton/km, 석회암 1.02E + 04 ton/km 및 자갈 4.47E + 03 ton/km 순으로 나타났으며, 간접 자원요구량은 자갈 2.75E + 04 ton/km, 철 9.80E + 03 ton/km 및 석탄 9.74E + 03 ton/km 순으로 나타났다. 따라서 모래, 석회암 등과 같은 직접 자원요구량이 높은 자원들은 시공현장에서 과량투입 방지와 같은 자원관리가 필요할 것으로 판단되며, 철을 비롯한 희유금속(크롬, 니켈) 및 석탄과 같은 간접 자원요구량이 높은 자원들도 자원관리 측면의 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.
**주제어 :** 총 자원요구량, 전과정평가, 고속도로, 물질흐름분석

## 1. 서 론

최근 21세기에 들어서면서 자원의 무분별한 사용으로 인한 자원고갈의 문제가 중요한 국제적 이슈로 대두되고 있다. 특히 중국, 인도 등 거대한 인구를 가지고 있는 국가의 본격적인 경제개발로 인해 자원의 수요는 폭발적으로 증가하고 있다. 이에 따라 에너지, 철, 비철금속 및 희유금속 등 대부분의 자원에 있어 공급 부족이 발생하기 시작했으며, 자원보유국들의 자원보호주의 역시 그 강도가 커지고 있다. 이러한 세계 자원 확보 환경 속에서 선진국들과 거대 개발도상국들은 자원의 안정적 확보를 위해 자원전쟁이라고 할 만큼 치열한 경쟁을 벌이고 있는 상황이다.[1)]

우리나라 대부분의 산업은 자원의존도가 높다는 공통적인 특성을 지니고 있으며, 대부분의 자원을 수입에 의존하고 있는 실정이다. 특히, 희토류나 희귀금속은 국내의 주요 산업에서 꼭 필요한 자원임에도 불구하고 거의 전량을 수입에 의존하고 있어 자원수급에 문제가 발생할 경우 국내 산업에 심각한 타격이 올 수 있는 상황이다.[2)] 따라서 국내 산업이 국제 자원가격의 변동 및 자원고갈의 위기에 대응하기 위해서는 자원의 수급안정을 위한 자원관리체계 구축 및 자원효율성 향상을 위한 전략이 필요하다.

최근에는 전 세계적으로 지구온난화와 기후변화의 원인이 되는 온실가스의 발생을 줄이고자 노력하고 있으며, 건설산업은 이러한 온실가스 배출량의 주요 원인으로 인식되고 있다. 이에 따라 건설 산업의 LCA (Life Cycle Assessment) 및 온실가스 산정에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다.[3~5)] 그러나 자원관리 측면에서의 연구는 미미한 실정이기 때문에 지속적인 연구를 통해 구체적인 자원관리체계를 구축하는 것이 필요하다. 건설 산업 중 철도, 도로 등의 사회기반시설은 다량의 자원이 투입되고 있다. 도로업무편람에 따르면, 2020년까지 전국 간선도로망의 84%인 6,076 km(고속도로 5,953 km)를 재정비 및 확충하는 것으로 계획하고 있으며, 이 중 고속도로가 5,953 km(약 98%)를 차지한다.[6)] 또한, 곽 등의 연구에 따르면, 동일하게 고속도로와 국도를 1 km씩 건설 시 자원투입량은 고속도로가 월등히 높다.[7)]

따라서, 본 연구에서는 LCA 기법을 MFA (Material Flow

† Corresponding author E-mail: hwangyw@inha.ac.kr Tel: 032-860-7501 Fax: 032-863-4267

Analysis)에 접목하여 고속도로 시공 시 투입되는 건설 자재에 대한 직접 자원요구량은 물론 원료 채취단계에서부터 생산단계까지 투입되는 간접 자원요구량까지 산정하는 것을 목적으로 하였다.[8] 또한 이들의 합을 총 자원요구량(Total Material Requirement)으로 정의하여 향후 우리나라 도로 건설에 필요한 효율적인 자원관리체계에 기초자료를 제공하는데 그 목적을 두었다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구범위

본 연구에서는 대표적인 자원소비형 국가 인프라시설 중 고속도로를 평가 대상으로 선정하였으며, 현재 건설 중인 울산~포항 간 고속도로 중 포장도, 교량, 터널 구간을 포함하는 구간에 대하여 연구를 수행하였다. 울산~포항 간 고속도로 구간에 대한 개요를 Table 1에 나타내었다. 본 연구 대상인 고속도로는 포장도, 교량, 터널구간으로 분류되며 각 구간별로 공사내역이 달라진다. 포장도구간은 토공사, 배수 및 옹벽공사, 포장 및 부대공사로 시공되며, 교량구간은 교량공사 뿐만 아니라 토공사, 배수 및 옹벽공사, 포장 및 부대공사도 포함하여 시공한다. 터널구간도 교량구간과 동일하게 터널공사에 토공사, 배수 및 옹벽공사, 포장 및 부대공사를 포함하여 시공한다.

본 연구의 시스템 경계를 Fig. 1에 나타내었다. 고속도로를 시공하는데 투입되는 원료단계부터 시공단계까지를 포함하여 시스템 경계로 설정하였다. 운영단계의 경우 대상 시설을 유지하고 보수하기 위한 수선 및 교체공사가 필요하고 관리 등을 위한 유틸리티 등을 고려하여 평가해야 하지만 본 연구에서 대상으로 설정한 시설의 경우 현재 공사 중이기 때문에 운영단계에 대한 데이터 수집이 불가능하여 평가 범위에서 제외하였다. 해체 및 재활용단계의 경우 고속도로의 수명을 예상하고 그에 따라 발생하는 건설폐기물이나 재활용 자재 등을 산출하여 자원량을 산정해야 하지만 고려 변수가 너무 다양하고 정확도가 떨어져 본 연구의 평가 범위에서 제외하였다.[9,10] 시스템 경계 내의 고속도로 구간에 투입되는 건설자재 및 자원은 하위공정, 공사, 구간(일반도로, 교량, 터널)으로 구분하여 물질흐름분석(MFA)을 실시하였다.

Table 1. Summary of ulsan-pohang expressway construction

| Section | Details |
|---|---|
| Location | From Ulsan to Pohang |
| Scale | Total length 5.23 km, Width 11.7 m |
| | Paving road 1.49 km |
| | Bridge 0.24 km |
| | Tunnel 3.50 km |

### 2.2. 고속도로의 건설자재 분석

본 연구에서는 단가산출서와 설계내역서 분석을 통해 시공단계에서 투입된 건설자재의 종류 및 수량을 분석하였다. 본 연구대상인 고속도로의 투입 자재량 분석을 위해서는 실시설계내역서를 통해 공사(공종)별 하위단계를 파악하는 것이 우선시 되어야 한다. 실시설계내역서는 공사별로 구분이 되어 있으며 하위단계를 파악하면 일위대가 산근을 통해 투입된 자재량을 분석할 수 있다. 이렇게 분석된 자재들의 세부내역은 자재내역 목록으로 최종적으로 확인할 수 있다.

본 연구 대상인 고속도로의 공사별 하위공종은 최고 7단계에 걸쳐 구분할 수 있으나, 건설자재를 자원으로 산정하는 것이 본 연구의 주 목적이므로 하위공종을 2단계까지 구분하여 분석하였다. 일위대가 산근은 단계별로 실시하며, 기본적으로 식 (1)을 통해 공사별 투입자재량을 분석하였다. 이 외에 주요자재집계표, 공사별 수량집계표 등을 활용하여 주요 자재투입량을 파악하였다. 산출된 자재목록은 자재내역서를 통하여 정확한 자재명과 자재규격 등을 파악하여 정리하였다.[10]

$$IM_{con} = WR \times IM_{b.c} \quad (1)$$

Input $Material_{con}$ : 공사별 투입자재량(ton, $m^3$, m 등)
Work Rate : 작업량(unit)
Input $Material_{b.c}$ : 일위대가 상 자재 투입물량(ton, $m^3$, m 등 /unit)

산출된 자재량은 각 공사별로 합산하여 공사별 투입자재량으로 나타내었으며, 이를 전부 합산하여 고속도로에서의 총 투입자재량을 분석하였다.

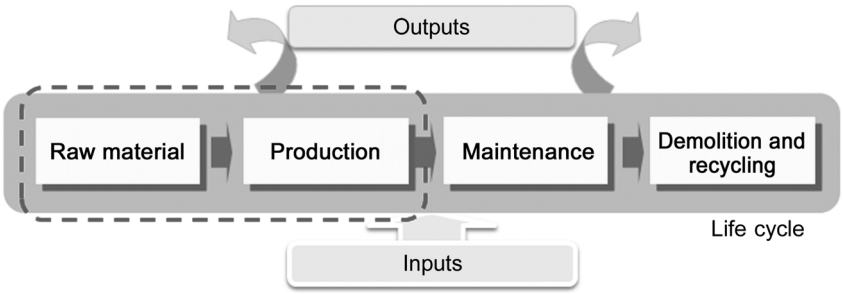


Fig. 1. System boundaries about expressway.

### 2.3. 총 자원요구량(Total Material Requirement) 산정

본 연구에서는 고속도로에 투입되는 자원량을 직접 자원요구량과 간접 자원요구량의 합계인 총 자원요구량(Total Material Requirement)으로 정의하여 산정하였다.

$$TMR = D.MR + ID.MR \quad (2)$$

Total Material Requirement: 총 자원요구량(ton/km)
Direct. Material Requirement: 고속도로에 투입되는 종류별 직접 자원요구량(ton/km)
Indirect. Material Requriement: 고속도로에 투입되는 종류별 간접 자원요구량(ton/km)

고속도로 건설시 투입되는 총 자원요구량은 식 (2)와 같이 직접 자원요구량과 간접 자원요구량의 합으로 산정하였다. 직접 자원요구량은 고속도로 건설시 투입되는 자재의 구성 성분을 천연자원으로 환산한 양을 의미하며, 간접 자원요구량은 해당 건설 자재를 제외한 그 자재를 생산하기까지 전과정에 걸쳐 투입된 모든 자원의 양을 정량적으로 산정한 것을 의미한다. 예를 들어 가장 많이 사용되는 레미콘의 경우, 배합비에 따라 양은 달라지지만, 구성성분(원료)은 시멘트, 모래, 자갈 등이며, 이는 직접 자원요구량에 해당된다. 그리고 레미콘 제조시 투입되는 모든 원부자재에 대해서 원료의 취득부터 생산까지 투입된 자원의 양은 간접 자원요구량에 해당된다. 본 연구에서는 고속도로를 포장도, 교량, 터널구간으로 구분하여 각 구간별로 기능단위를 1 km로 설정하고, 전체구간에서의 각 구간에 대한 백분율로 할당하여 전체 고속도로 1 km를 기능단위로 설정하였다. 구간별로 산정되는 결과를 동등하게 비교하기 위해서는 기능단위의 설정이 중요하며, 선정된 기능단위를 기준으로 총 자원요구량을 산정하였다. 또한 실시설계내역서는 크게 토공사, 배수 및 옹벽공사, 교량공사, 포장 및 부대공사 및 터널공사로 구분되어 있고 포장도, 교량, 터널구간으로 나누어져 있지 않기 때문에 각 구간별로 공사내역을 할당하여 자원량을 산정하였다.

### 2.4. 직접 자원요구량 산정

본 연구에서 직접 자원요구량을 산정하기 위해서 고속도로의 건설자재 분석을 통해 얻은 각 건설 자재에 대한 물질구성을 분석하였다. 투입되는 자재에 대한 물질구성은 건설자재별 생산업체 회사의 데이터 일부와 지식경제부 기술표준원에서 제공하는 국가표준인증종합정보센터[11]의 자료를 이용하였다. 건설자재의 물질구성에 따른 자원량 산정은 식 (3)을 통해 산정하였으며, 산정예시를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. The result of direct material requirement

| Construction materials | Quantities (ton) | Materials | Ratio (%) | Quantities (ton) |
|---|---|---|---|---|
| Bulk cement | 108.70 | MgO (magnesite) | 5.00 | 5.43 |
| | | $SO_3$ | 3.50 | 3.80 |
| | | Limestone | 91.50 | 99.45 |
| | | Total | 100.00 | 108.70 |

$$D.MR = CM \times CM_{ratio} \quad (3)$$

Direct. Material Requirement: 직접 자원요구량(ton/km)
Construction Material: 건설자재 투입물량(ton/km)
Construction Material ratio: 건설자재의 구성 물질비(%)

### 2.5. 간접 자원요구량 산정

본 연구에서 간접 자원요구량을 산정하기 위해 고속도로에 투입되는 건설자재별로 LCI DB (Life Cycle Inventory Database)를 연결하여 목록분석을 실시하였으며, LCI DB로는 스위스에서 제공하는 대표적인 ecoinvent DB[12]를 이용하였다. 간접 자원요구량은 식 (4)를 이용하여 산정하였다.

$$ID.MR = CM \times L.DB \quad (4)$$

Indirect. Mateiral Requirement: 간접 자원요구량(ton/km)
Construction Material: 건설자재 투입물량(ton/km)
Life cycle inventory. Data Base: 건설자재의 LCI DB목록(ton/ton)

## 3. 연구결과

### 3.1. 포장도구간의 총 자원요구량 산정 결과

본 연구에서 포장도구간은 고속도로를 구성하는 도로 시설 중 교량과 터널구간을 제외한 일반적인 포장도로를 의미한다. 포장도구간에 대한 공사별 할당율을 Fig. 2에 나타

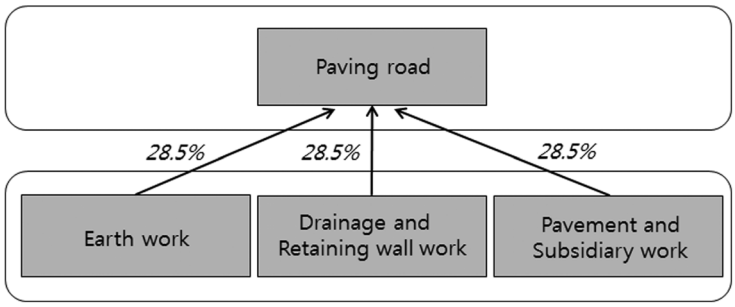


Fig. 2. Work rate about paving road section.

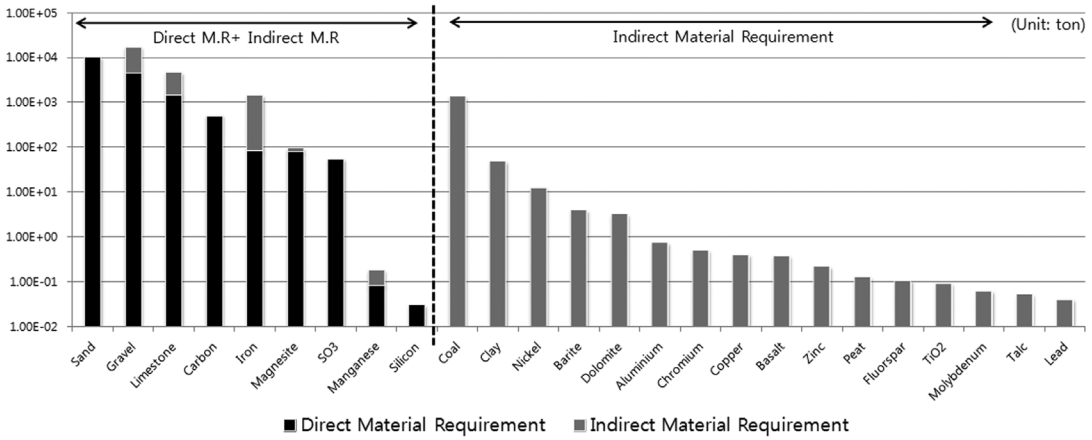


Fig. 3. Total material requirement of paving road section.

내었다. 포장도구간의 총 자원요구량은 고속도로 전체구간의 토공사, 배수 및 옹벽공사, 포장 및 부대공사 구간거리 28.5%에 해당하는 것으로 조사되었다.

직접 자원요구량은 고속도로 시공 시 투입되는 건설자재의 물질구성을 통해 자원으로 나타내었으며, 간접 자원요구량은 투입되는 물질별로 LCI DB를 연결하여 산정하였다. 간접 자원요구량은 LCI DB의 데이터에서 input 물질관련 부분만을 나타내었으며, 이는 고속도로 시공을 제외한 범위, 즉, 원료 채취 단계에서부터 도로 시공단계 전까지 투입되는 자원량을 의미한다. 기능단위로는 포장도 1 km 구간을 시공하는데 투입되는 자원의 양으로 산정하였다.

포장도구간 1 km의 시공 시 투입되는 총 자원요구량의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 직 · 간접적으로 동시에 투입되는 자원은 그래프에 중첩하여 나타내었고, 그 외에 순수한 간접 자원요구량은 정량순으로 나타내었다. 포장도구간 시공 시의 직접 자원요구량은 모래 1.01E + 04 ton/km, 자갈 4.45E + 03 ton/km 및 석회암 1.41E + 03 ton/km 순으로 나타났다. 간접 자원요구량의 경우 자갈 1.25E + 04 ton/km, 석회암 3.17E + 03 ton/km 순으로 나타났으며, 두 자원이 포장도구간에 투입되는 간접 자원요구량의 총 78.8%를 차지하는 것으로 나타났다.

포장도구간에 동시 투입되는 직접 자원요구량과 간접 자원요구량의 비율을 Table 3에 나타내었다. 자갈, 석회암, 철 및 망간의 경우 간접 자원요구량이 각각 73.8%, 69.2% 및 55.7%로 직접 자원요구량보다 더 많이 요구되는 것으로 나타났다.

Table 3. Direct material requirement and indirect material requirement ratio about paving road section

| Material | Weight (ton) | | Ratio (%) | |
|---|---|---|---|---|
| | Direct material requirement | Indirect material requirement | Direct material requirement | Indirect material requirement |
| Sand | 1.01E+04 | 2.22E-03 | 100.0 | 0.0 |
| Gravel | 4.45E+03 | 1.25E+04 | 26.2 | 73.8 |
| Limestone | 1.41E+03 | 3.17E+03 | 30.8 | 69.2 |
| Carbon | 4.84E+02 | 3.02E-03 | 100.0 | 0.0 |
| Iron | 8.22E+01 | 1.32E+03 | 5.8 | 94.2 |
| Magnesite | 7.72E+01 | 1.80E+01 | 81.1 | 18.9 |
| $SO_3$ | 5.41E+01 | 4.64E-08 | 100.0 | 0.0 |
| Manganese | 7.90E-02 | 9.95E-02 | 44.3 | 55.7 |
| Silicon | 2.96E-02 | 0.00E+00 | 100.0 | 0.0 |

### 3.2. 교량구간의 총 자원요구량 산정 결과

교량이란 하천, 호소, 강, 골짜기 및 해협 등을 통과하기 위하여 시공하는 토목 구조물로써 본 연구에서는 고속도로에 포함되어 있는 교량으로 선정하였다. 교량구간에 대한 공사별 할당율을 Fig. 4에 나타내었다. 교량구간의 총 자원요구량은 고속도로 전체구간의 교량공사 100%와 토공사, 배수 및 옹벽공사, 포장 및 부대공사 구간거리 4.7%에 해당하는 것으로 조사되었다.

기능단위로는 교량 1 km 구간을 시공하는데 투입되는

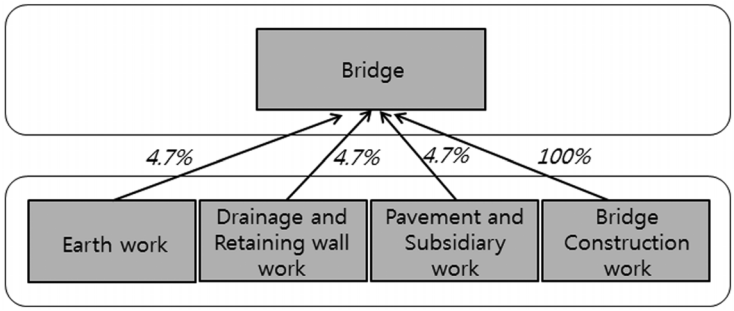


Fig. 4. Work rate about bridge section.

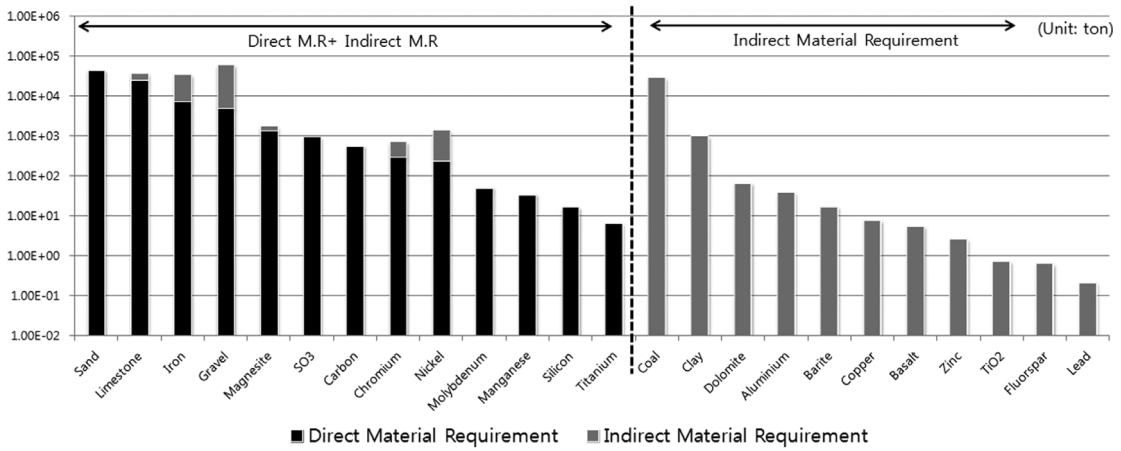


Fig. 5. Total material requirement of bridge section.

자원의 양으로 산정하였으며, 교량구간 1 km의 시공 시 투입되는 총 자원요구량의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 직·간접적으로 동시에 투입되는 자원은 그래프에 중첩하여 나타내었고, 그 외에 순수한 간접 자원요구량은 정량순으로 나타내었다. 교량구간 시공 시의 직접 자원요구량은 모래 4.28E+04 ton/km, 석회암 2.36E+04 ton/km 및 철 7.06E+03 ton/km 순으로 나타났다. 간접 자원요구량의 경우 자갈 5.32E+04 ton/km, 석탄 2.76E+04 ton/km 및 철 2.65E+04 ton/km 순으로 나타났으며, 일반도로에 비해 석탄과 철이 더 많이 투입되는 것으로 나타났다. 교량구간의 경우 포장도나 터널구간과 달리 제품 생산 시 무연탄 등을 이용해 생산하는 철강 제품인 이형·원형철강 등을 다량으로 소모하기 때문에 간접 자원요구량 중 석탄이 높게 나타났다. 따라서 철강제품 생산 시 투입되는 석탄의 자원관리가 필요하며, 철강제품 생산 시 석탄을 에너지원으로 사용하지 않는 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

교량구간에 동시 투입되는 직접 자원요구량과 간접 자원요구량의 비율을 Table 4에 나타내었다. 모래, 석회암, 마그네사이트 및 망간 등에서는 직접 자원요구량의 비율이 더 높은 것으로 나타나 교량구간 시공현장에서의 자원관리가 더 중요한 것으로 나타났다. 철, 자갈, 크롬 및 니켈의 경우는 간접 자원요구량에서 직접 자원요구량보다 더 많이 투입되는 것으로 나타났다. 특히 크롬, 니켈의 경우 희유금속으로 분류되어 전략적인 자원관리가 필요할 것으로 판단된다.

Table 4. Direct material requirement and indirect material requirement ratio about bridge section

| Material | Weight (ton) | | Ratio (%) | |
|---|---|---|---|---|
| | Direct material requirement | Indirect material requirement | Direct material requirement | Indirect material requirement |
| Sand | 4.28E+04 | 3.71E-02 | 100.0 | 0.0 |
| Limestone | 2.36E+04 | 1.23E+04 | 65.8 | 34.2 |
| Iron | 7.06E+03 | 2.65E+04 | 21.0 | 79.0 |
| Gravel | 4.79E+03 | 5.32E+04 | 8.3 | 91.7 |
| Magnesite | 1.29E+03 | 3.67E+02 | 77.9 | 22.1 |
| $SO_3$ | 9.04E+02 | 8.99E-08 | 100.0 | 0.0 |
| Carbon | 5.27E+02 | 1.04E-02 | 100.0 | 0.0 |
| Chromium | 2.84E+02 | 3.93E+02 | 42.0 | 58.0 |
| Nickel | 2.21E+02 | 1.12E+03 | 16.5% | 83.5 |
| Molybdenum | 4.74E+01 | 9.63E-01 | 98.0 | 2.0 |
| Manganese | 3.19E+01 | 1.14E+00 | 96.6 | 3.4 |
| Silicon | 1.59E+01 | 0.00E+00 | 100.0 | 0.0 |
| Titanium | 6.32E+00 | 0.00E+00 | 100.0 | 0.0 |

### 3.3. 터널구간의 총 자원요구량 산정 결과

터널이란 일반적으로 도로, 철도, 수로 등을 통과하기 위하여 땅속을 뚫은 통로를 의미하며, 본 연구에서는 고속도로에 포함되어 있는 터널구간으로 선정하였다. 터널구간에 대한 공사별 할당율을 Fig. 6에 나타내었다. 터널구간의 총

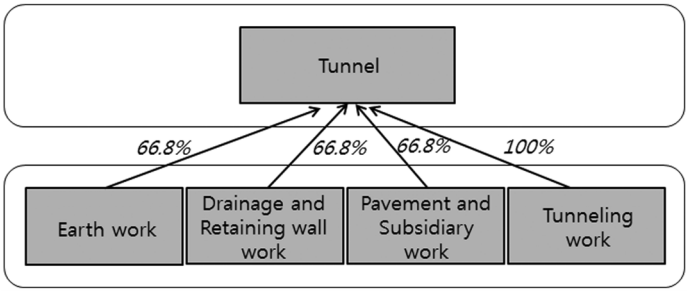


Fig. 6. Work rate about tunnel section.

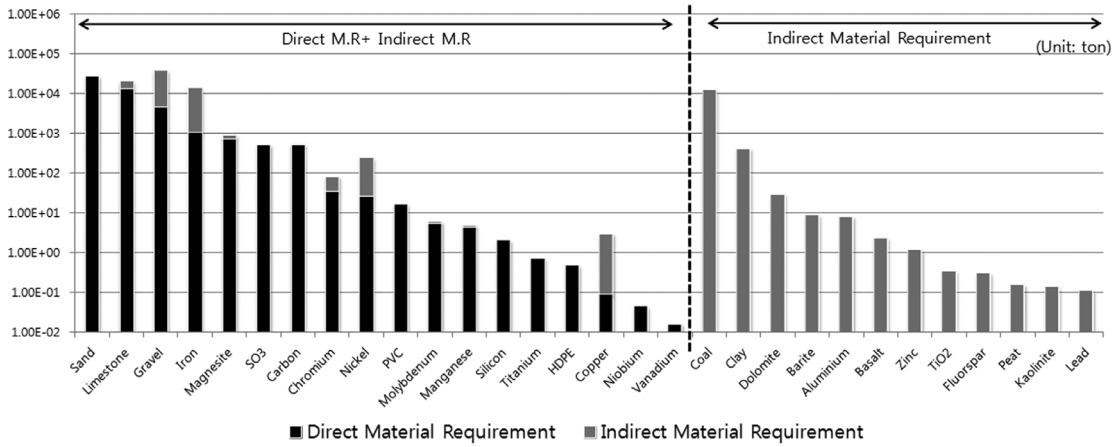


Fig. 7. Total material requirement of tunnel section.

Table 5. Direct material requirement and indirect material requirement ratio about tunnel section

| Material | Weight (ton) | | Ratio (%) | |
|---|---|---|---|---|
| | Direct material requirement | Indirect material requirement | Direct material requirement | Indirect material requirement |
| Sand | 2.67E+04 | 1.60E-02 | 100.0 | 0.0 |
| Limestone | 1.30E+04 | 6.90E+03 | 65.3 | 34.7 |
| Gravel | 4.45E+03 | 3.20E+04 | 12.2 | 87.8 |
| Iron | 1.02E+03 | 1.22E+04 | 7.7 | 92.3 |
| Magnesite | 7.09E+02 | 1.67E+02 | 80.9 | 19.1 |
| $SO_3$ | 4.96E+02 | 1.06E-07 | 100.0 | 0.0 |
| Carbon | 4.85E+02 | 5.77E-03 | 100.0 | 0.0 |
| Chromium | 3.26E+01 | 4.66E+01 | 41.1 | 58.9 |
| Nickel | 2.53E+01 | 2.09E+02 | 10.8 | 89.2 |
| PVC | 1.60E+01 | 0.00E+00 | 100.0 | 0.0 |
| Molybdenum | 5.30E+00 | 4.43E-01 | 92.3 | 7.7 |
| Manganese | 4.09E+00 | 5.04E-01 | 89.0 | 11.0 |
| Silicon | 1.96E+00 | 0.00E+00 | 100.0 | 0.0 |
| Titanium | 7.03E-01 | 0.00E+00 | 100.0 | 0.0 |
| High density polyethylene | 4.66E-01 | 0.00E+00 | 100.0 | 0.0 |
| Copper | 8.54E-02 | 2.81E+00 | 2.9 | 97.1 |
| Niobium | 4.34E-02 | 0.00E+00 | 100.0 | 0.0 |
| Vanadium | 1.57E-02 | 0.00E+00 | 100.0 | 0.0 |

자원요구량은 고속도로 전체구간의 터널공사 100%와 토공사, 배수 및 옹벽공사, 포장 및 부대공사 구간거리 66.8%에 해당하는 것으로 조사되었다.

기능단위로는 터널 1 km 구간을 시공하는데 투입되는 자원의 양으로 산정하였으며, 터널구간 1 km의 시공 시 투입되는 총 자원요구량의 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 직 · 간접적으로 동시에 투입되는 자원은 그래프에 중첩하여 나타내었고, 그 외에 순수한 간접 자원요구량은 정량순으로 나타내었다. 터널 시공 시의 직접 자원요구량은 모래 9.32E + 04 ton/km, 석회암 4.54E + 04 ton/km 및 자갈 1.56E + 04 ton/km 순으로 나타났다. 간접 자원요구량의 경우 자갈 3.20E + 04 ton/km, 철 1.22E + 04 ton/km 및 석탄 1.21E + 04 ton/km 순으로 나타났다.

터널구간에 동시 투입되는 직접 자원요구량과 간접 자원요구량의 비율을 Table 5에 나타내었다. 터널구간에서는 티타늄, 니오븀, 바나듐 및 몰리브덴과 같은 희유금속들이 간접 자원요구량보다 직접 자원요구량에서 더 많이 투입되고 있으며, PVC, HDPE와 같은 물질 또한 투입되고 있다.

### 3.4. 고속도로의 총 자원요구량 산정 결과

고속도로에 대한 구간별 할당율을 Fig. 8에 나타내었다. 고속도로의 총 자원요구량은 일반도로, 교량, 터널 구간 1 km에 대한 자원요구량을 각 구간별 백분율을 적용하여 기능단위인 고속도로 1 km를 시공하는데 투입되는 자원의 양으로

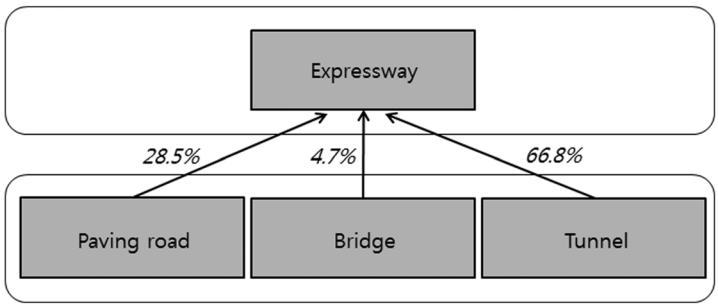


Fig. 8. Section rate about expressway.

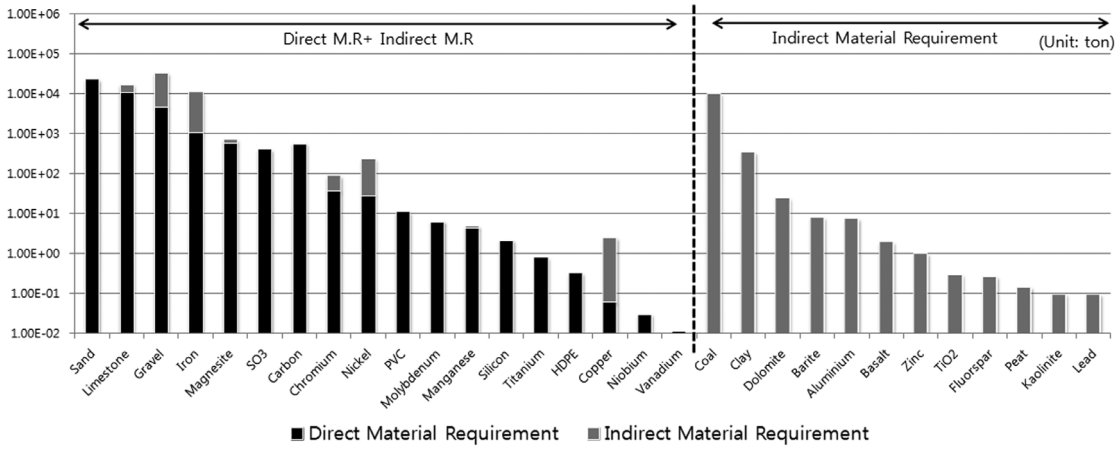


Fig. 9. Total material requirement of expressway.

산정하였다.

고속도로 1 km의 시공 시 투입되는 총 자원요구량의 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 직·간접적으로 동시에 투입되는 자원은 그래프에 중첩하여 나타내었고, 그 외에 순수한 간접 자원요구량은 정량순으로 나타내었다. 고속도로 시공 시의 직접 자원요구량은 모래 2.27E+04 ton/km, 석회암 1.02E+04 ton/km 및 자갈 4.47E+03 ton/km 순으로 나타났으며, 그 외에 철, 마그네사이트 및 탄소 등으로 나타났다. 간접 자원요구량의 경우 자갈 2.75E+04 ton/km, 철 9.80E+03 ton/km 및 석탄 9.74E+03 ton/km 순으로 나타났다. 석탄, 점토와 같은 직접 투입이 아닌 간접적으로 요구되는 자원의 경우는 각각 9.74E+03 ton/km, 3.30E+02 ton/km로 나타났으며, 이는 시멘트, 철근과 같은 건설자재를 생산하기 위한 원료부터 생산단계에서 소비되는 것으로 나타났다.

Table 6. Direct material requirement and indirect material requirement ratio about expressway

| Material | Weight (ton) | | Ratio (%) | |
|---|---|---|---|---|
| | Direct material requirement | Indirect material requirement | Direct material requirement | Indirect material requirement |
| Sand | 2.23E+04 | 1.31E-02 | 100.0 | 0.0 |
| Limestone | 1.02E+04 | 6.09E+03 | 62.6 | 37.4 |
| Gravel | 4.47E+03 | 2.75E+04 | 14.0 | 86.0 |
| Iron | 1.03E+03 | 9.80E+03 | 9.5 | 90.5 |
| Magnesite | 5.56E+02 | 1.34E+02 | 80.6 | 19.4 |
| $SO_3$ | 3.89E+02 | 2.42E-07 | 100.0 | 0.0 |
| Carbon | 5.18E+02 | 5.20E-03 | 100.0 | 0.0 |
| Chromium | 3.51E+01 | 4.97E+01 | 41.4 | 58.6 |
| Nickel | 2.72E+01 | 1.95E+02 | 12.2 | 87.8 |
| PVC | 1.07E+01 | 0.00E+00 | 100.0 | 0.0 |
| Molybdenum | 5.76E+00 | 3.55E-01 | 94.2 | 5.8 |
| Manganese | 4.25E+00 | 4.18E-01 | 91.0 | 9.0 |
| Silicon | 2.07E+00 | 0.00E+00 | 100.0 | 0.0 |
| Titanium | 7.66E-01 | 0.00E+00 | 100.0 | 0.0 |
| HDPE | 3.12E-01 | 0.00E+00 | 100.0 | 0.0 |
| Copper | 5.71E-02 | 2.34E+00 | 2.4 | 97.6 |
| Niobium | 2.90E-02 | 0.00E+00 | 100.0 | 0.0 |
| Vanadium | 1.05E-02 | 0.00E+00 | 100.0 | 0.0 |

고속도로에 동시 투입되는 직접 자원요구량과 간접 자원요구량의 비율을 Table 6에 나타내었다. 고속도로에서는 전체적으로 시공현장에 시멘트, 세골재, 아스콘 등의 건설자재들이 직접 대량 투입되기 때문에 이에 해당하는 자원인 모래, 석회암 및 마그네사이트 등이 각각 100.0%, 62.6% 및 80.6%로 간접 자원요구량에 비해 더 높은 것으로 나타났다. 직접 자원요구량이 높은 자원들은 시공현장에서 과량투입 방지와 같은 자원관리가 중요한 것으로 판단된다. 철을 비롯한 크롬, 니켈 및 구리와 같은 철, 비철, 희유금속들은 각각 90.5%, 58.6%, 87.8% 및 97.6%로 간접 자원요구량이 더 높은 것으로 나타났으며, 직접적으로 투입되는 자원량 외에 간접 자원요구량이 더 큰 자원에 대한 관리 및 연구가 지속적으로 수행될 필요가 있을 것으로 사료된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 고속도로를 포장도구간, 교량구간, 터널구간으로 구분하여 각 구간별로 MFA기법을 이용하여 총 자원요구량 산정을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

고속도로 시공에 사용되는 직접·간접 자원은 포장도, 교량, 터널구간에 따라 약간의 차이는 있었으나 세 구간 모두 자갈(1.70E+04 ton/km, 5.80E+04 ton/km, 3.65E+04 ton/km), 모래(1.01E+04 ton/km, 4.28E+04 ton/km, 2.67E+04 ton/km) 및 석회암(1.41E+03 ton/km, 3.59E+04 ton/km, 1.99E+04 ton/km) 등의 자원이 주로 사용되는 것으로 나타나 그 종류에 따른 사용량이 거의 유사한 경향을 나타내었다. 고속도로 건설에 있어서는 시공에 따른 직접적인 자원만이 투입되는 것이 아니고 채취·운반에 따른 별도의 간접자원 투입이 이루어지므로, 직접·간접 자원을 모두 고려하는 자원관리 측면의 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

KSEE

## References

1. Korea institute of geoscience and mineral resources, Resource overview(2010).
2. Koh, S.-M., Lee, G.-J. and Yu, B.-C., "Situation of domestic and foreign rare metal resources," In Proceedings of the annual joint conference, Petrological society of korea and mineralogical society of korea, Jeonju, May, pp. 27~28(2010).
3. Choi, D.-S., Lee, M.-E. and Cho, K.-H., "A study on environmental impact assessment in domestic construction industry using life cycle assessement," *J. KIAEBS*, pp. 46~56(2012).
4. Kim, J.-Y., Lee, S.-E. and Sohn, J.-Y., "An estimation of the energy consumption & $CO_2$ emission intensity during building construction," *The Architectural Inst. Korea*, **20**(10), 319~326(2004).
5. Kang, H. G., Kim, S. T., Kim, H. R., Park, T. K., An, S. S. and Lee, S. E., "Assessment of environment-friendly degree in road routes," *Korean Soc. Road Eng.*, **13**(1), 129~138(2011).
6. Minister of Land, Infrastructure and Transport, Road business guide.
7. Kwak, I.-H., Kim, K.-H., Wie, D.-H., Park, K.-H. and Hwang, Y.-W., "Calculation of Basic Unit of Carbon Emissions in Operation and Maintenance Stage of Road Infrastructure," *J. Korean Soc. Transp.*, **33**(3), 237~246(2015).
8. Cho, Y. T. and Choi, J. S., "Material Flow Analysis and its implication for sustainability policy," *Korea Environ. Inst.*, **5**(2), 1~26(2006).
9. Jo, "Development of damage factors in Life Cycle Impact Assessment using of fate and exposure analysis," Master's theses of Inha University(2004).
10. Hwang, Y. W., Park, K. H. and Seo, S. W., "Assessment of $CO_2$ emissions from road construction activities," *Korean Soc. Civil Eng.*, **20**(1), 113~121(2000).
11. Korean standards information center, http://www.standard.go.kr
12. Ecoinvent, http://www.ecoinvent.org