

전과정을 고려한 도로-철도 Modal Shift CO₂ 저감효과 분석 CO₂ Reduction Effect Analysis of Modal Shift from Road to Rail using Life Cycle Thinking

김초영* 이철규* 최요한* 이진모**†
Cho-Young Kim Cheul-Kyu Lee Yo-Han Choi Kun-Mo Lee

ABSTRACT

Modal Shift from road to rail has been adapted in several countries as one of effective ways of reducing CO₂ emissions caused by transport. Generally, effect analysis of CO₂ reduction toward modal shift is calculated mainly from use stage and less consideration from other stages of life cycle, even though, in some case of modal shift needs that new line construction or new vehicle manufacturing.

In this study, modal shift effect analysis is performed with considering construction, manufacturing vehicle and use stage. As a result we can get total CO₂ reduction effect using life cycle thinking and check the necessity of including other life cycle stage not only considering use stage. In conclusion, there is no CO₂ reduction effect if the reduction amount of CO₂ in use stage is not bigger than allocated annual amount of CO₂ in construction and manufacturing vehicle stage. According to this fact, analysing CO₂ reduction effect of Modal Shift should be considered not only the use stage.

1. 서론

Modal Shift는 여객 또는 화물을 장거리로 운송함에 있어, 수송모드(mode)를 도로에서 친환경운송 수단인 철도 또는 해운으로 전환(shift)하는 것을 말한다. Modal Shift는 교통부문 온실가스 저감활동에 큰 부분을 차지하고 있는 기술로서 이미 유럽이나 일본 등 여러 국가에서는 물류부문 Modal Shift 기술이 활발히 적용되고 있다. 이러한 Modal Shift CO₂ 저감효과를 산정할 때 기존에는 운행단계만을 고려하여 분석한 사례가 대다수이다. 그러나 Modal Shift 기술 적용 시, 신규노선의 건설이나 신규 운송수단의 제작이 필요할 경우 신규 노선의 건설에 따른 온실가스 배출량이나, 신규 운송수단 제작에 따른 온실가스 배출량에 대한 평가가 고려되어야 한다.

따라서 이 연구에서는, 여객부문 도로에서 철도로의 Modal Shift CO₂ 저감효과에 대하여 제작, 운행, 건설단계를 고려한 경우를 분석함으로써 전과정을 고려한 온실가스 저감효과를 예측하였다.

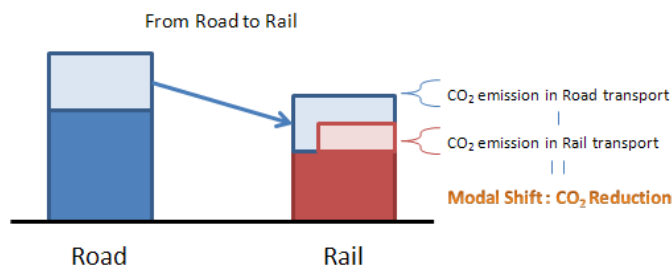


그림 2 도로에서 철도로의 Modal Shift 효과 개념

† 교신저자, 아주대학교, 환경건설교통공학부
E-mail : kunlee@ajou.ac.kr
* 한국철도기술연구원, 녹색교통물류연구본부
** 아주대학교, 환경건설교통공학부

2. 본론

2.1 연구배경

기존의 Modal Shift의 온실가스 저감효과를 분석한 사례를 보면 운행단계에서 각 수송모드의 온실가스 배출량의 차이를 통해 저감량을 예측하였다. 그러나 에너지 효율이 높은 차량을 제작·도입하거나 노선을 신설할 경우, 전과정적인 관점에서 차량제작과 노선건설의 온실가스 배출량을 고려해야 한다.

또한 여객부문 Modal Shift의 경우, 물류수송량 계획에 따라 물류전환량 예측이 가능한 물류부문 Modal Shift에 비하여 이동승객의 전환량과 기존수송수단 이용량의 증감 관계가 명확하지 않아 합리적인 온실가스 감축효과의 산정방법이 곤란하여 온실가스 감축량에 대한 정확한 예측이 어려운 실정이다.

이 연구에서는 고속철도차량 도입에 따른 도로에서 철도로의 Modal shift 효과를 예측하고자 차량의 제작, 신규노선의 건설, 차량의 운영을 포함하여 Modal Shift 시나리오를 작성하고 그 효과를 산정해보았다.

2.2 국·내외 Modal Shift CO₂ 저감효과 분석 사례

2.2.1 Maruti Suzuki 인도회사의 CDM사업

CDM사업 중 "Modal Shift from Road to Train for transportation of cars"의 Project Design Document(PDD)를 살펴보면 Maruti Suzuki사의 최종 완성된 차량의 제작공장에서 완제품 집결지까지의 수송에 대하여 기존의 도로수송에서 철도수송으로의 Modal Shift를 적용하고 있음을 알 수 있다. 자세한 내용은 다음과 같다.

- 1차: Manesar공장에서 도로를 통하여 완제품 집결지까지 이송하는 수송체계에서 공장과 집결지에 가장 근접해있는 철도역(Gurgaon역에서 Mundra까지 철도이용)을 활용하여 기존도로수송의 일부를 철도로 전환하여 철도노선의 신설이 없이 Modal Shift를 적용한다.
- 2차: 1차 사업에서는 가장 근접해있는 철도역을 활용하였다면, 2차 사업에서는 Manesar 공장 구내 철도를 설치하고 기존의 철도노선까지 직접 연결하고, 집결지까지도 마찬가지로 직접 철도노선을 신설하여 철도로 모든 수송체계를 전환한다.

이 CDM 사업의 PDD문서에 따르면 도로를 이용할 경우의 온실가스 배출량을 baseline으로 적용하고 철도를 이용할 경우의 온실가스 배출량이 프로젝트실행에 따른 배출량이 된다. 2차에서 철도노선의 신설에 따른 영향은 경제성분석에서 수송되는 완제품 차량 한 대당 비용에 투자비용으로 고려하여 반영하였다. 그 결과 10년의 CDM 사업기간동안 매년 200,000대의 차량 수송(고정)할 때, 매년 23,000 tCO₂e를 감축하여 총 230,000 tCO₂ eq의 온실가스 감축량이 예상되는 것으로 산정하였다.

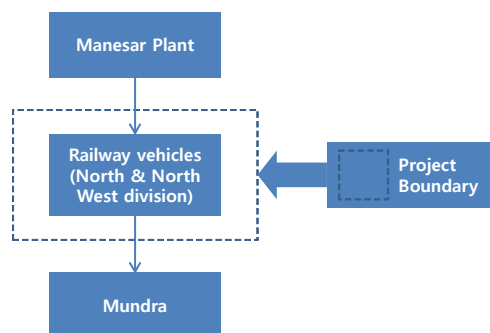


그림 3 Maruti Suzuki사 CDM사업의 시스템 경계

2.2.2 경인아라뱃길 CDM사업 온실가스저감량 산정사례

경인운하건설은 화물운송을 육로운송에서 저탄소 운송수단인 선박운송으로 전환함에 따라 수도권 물류체계의 개선, 굴포천 유역 홍수 피해 방지, CO₂ 배출량 저감 및 CDM 사업추진 등의 효과를 얻고자하는 사업이다. 이 사업은 인천항에서 김포터미널까지 화물의 수송을 도로를 이용한 육로운송에서 운하를 통한 수로운송으로 대체하는 사업으로서 baseline은 도로를 이용한 육로운송이 된다.

- 베이스라인 연간배출량(육로해상+해상운송 연간배출량)

$$BE_y = BE_{m,y} + BE_{R,y}$$

BE_y : 베이스라인 연간 배출량(tonCO₂e)

$BE_{m,y}$: 베이스라인 해상운송 연간 배출량(tonCO₂e)

$BE_{R,y}$: 베이스라인 육로운송 연간 배출량(tonCO₂e)

- 프로젝트 배출량(해상운송만 프로젝트 배출량 발생)

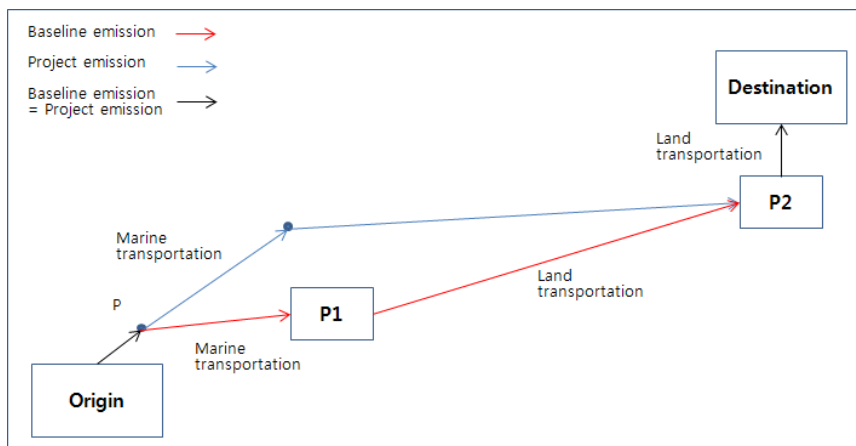
$$PE_y = PE_{m,y} + PE_{R,y}$$

PE_y : 프로젝트 연간 배출량(tonCO₂e)

- 프로젝트를 통한 온실가스감축량

$$Total\ CO_2\ reduction = BE_y - PE_y$$

Baseline 시나리오별 물동량 변화에 따른 연간 온실가스(CO₂e)배출량을 산정한 결과, 10년간 평균감축량: 6,955tCO₂e/년 평균값으로서 감축됨을 확인할 수 있다.



2.2.3 1.1.1. 일본 Modal Shift를 통한 CO₂저감량 분석사례

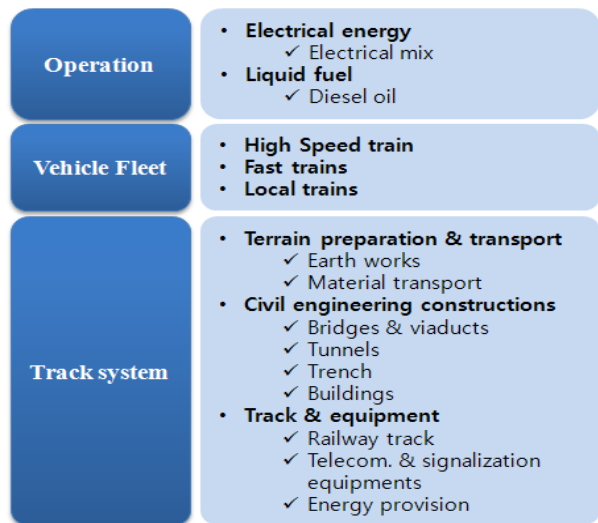
Yoji TAKAJACHI, 2005에서는 일본의 Modal Shift활성화를 위한 예산지원정책의 효과를 최대화하기 위한 연구로서, 2가지의 형태의 Modal Shift를 통한 CO₂ 저감량을 산정하였다. 첫 번째는 Kyusyu에서 Kanto로의 수송을 도로에서 해운으로 전환할 때 CO₂ 저감량 산정사례로 전환 전 5,816.4 tCO₂e/yr에서 전환후 2348.2 tCO₂e/yr로 연간 3,468.2tCO₂e/yr의 저감효과가 있음을 알 수 있으며 이는 수송수단에 따른 CO₂배출계수를 활용하여 산정하였다.

두 번째는 Funabashi에서 Hakata, Tosu까지 물류수송에 대하여 도로에서 철도로 수송수단을 전환하는 것이며, 이때, 706.9 tCO₂e/yr에서 211.5tCO₂e/yr로 연간 온실가스배출량이 저감되어 결과적으로 71.5%를 감축한 505.40 tCO₂e/yr의 감축효과가 있는 것으로 나타났으며 이 또한 수송수단에 따른 CO₂ 배출계수를 활용하여 산정하였다.

2.3 사례연구

2.3.1 시나리오설정

이 연구의 시나리오는 호남고속선사업의 내용을 기반으로 작성하였다. UIC의 고속철도노선 기반시설 탄소라벨 사전연구에 따르면, 운송 서비스는 열차 운영, 철도차량, 트랙 시스템 3가지의 구성요소로 나눌 수 있으며 이에 따라 시나리오를 구성하였다. Modal Shift 비율에 따른 전환교통량은 2010년 통계데이터를 기준으로 호남선을 이용하고 있는 철도승객을 1%, 4%, 10%, 20%, 50%, 60% 증가하였을 때 증가된 승객이 도로에서 100%이동되었다고 가정하였으며, 교통수단별 수송분담률(국토해양부 보도자료)를 반영하여 승객의 도로 교통량 전환 시 활용하였다. 각 요소별 유지보수는 데이터의 부족으로 제외하였다.



※ UIC, Carbon Footprint of High-Speed railway infrastructure(Pre-Study)

그림 5 운송 서비스의 구성요소 모델링

표 1 구성요소에 따른 시나리오 설정 및 세부 내용

| 구성요소 | 세부요소 | 내용 | | 비고 | |
|------|---------|--------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------|
| 차량제작 | 차량구성 | 20편성(10량 1편성, 373좌석, 42회/일 운영) | 1,600,500 kgCO ₂ e/train | 20편성 전량 제작 | |
| 노선건설 | 교량 | 111.7 km | 186,090 kgCO ₂ e/km-yr | 신규노선 건설 | |
| | 터널 | 49.12 km | 78,790 kgCO ₂ e/km-yr | | |
| | 트랙 | 230.9 km | 21,930 kgCO ₂ e/km-yr | | |
| | 전력 시스템 | 230.9 km | 2,460 kgCO ₂ e/km-yr | | |
| | 통신 & 신호 | 230.9 km | 1,040 kgCO ₂ e/km-yr | | |
| 차량운영 | 철도 | 철도승객 1인 이동거리 | 300 km | | |
| | | 철도승객 증가 비율 | 1%, 4%, 10%, 20%, 50%, 60% | | |
| | | 배출량원단위 | 26.9 gCO ₂ e/인km | | |
| | 도로 | 도로 교통량 전환 비율 | 승용차:버스=2:1 | | 승용차:4인, 버스:45인 |
| | | 배출량 원단위 | 승용차 계 163.1 gCO ₂ e/인km | 승합차 계 61.3 gCO ₂ e/인km | |

표 2 2007년 교통수단별 에너지 소비 및 온실가스 배출 산정결과 요약

| 구분 | | | 총수송규모 | | 에너지소비 | | 온실가스 배출 | |
|----|------|-----------|------------------|-------------|------------------|--------------|----------------------|------------------------|
| | | | | | 에너지소비량 | 원단위 | 온실가스배출량 | 원단위 |
| | | | 백만인km | % | 십억kcal | kcal/인km | 천 톤CO ₂ e | gCO ₂ e/인km |
| 도로 | 승용차 | 자가용(일반형) | 157,064.1 | 26.3 | 86350.5 | 549.8 | 25,420.3 | 161.8 |
| | | 자가용(다목적형) | 77540.8 | 13.0 | 41,714.4 | 538.0 | 12,854.1 | 165.8 |
| | | 계 | 234,604.9 | 39.3 | 128,064.9 | 545.9 | 38,274.4 | 163.1 |
| | 승합차 | 자가용 | 189,574.9 | 31.7 | 20,105.9 | 106.1 | 6,069.5 | 32.0 |
| | | 전세버스 | 43,238.9 | 7.2 | 4,022.5 | 93.0 | 1,268.8 | 29.3 |
| | | 계 | 232,813.8 | 38.9 | 24,128.4 | 199.1 | 7,338.3 | 61.3 |
| 철도 | 고속열차 | KTX | 10,027.4 | 1.7 | 546.1 | 54.5 | 269.3 | 26.9 |

※ 기후변화협약대비 철도수송효과분석 2009

2.3.2 CO₂ 저감효과 분석

2.3.2.1 차량 제작

차량제작 시 온실가스 발생량은 고속철도차량 CORADIA LIREX EPD 결과를 활용하여 산출하였다. 이 문서에 따르면 차량 1편성(6량 1편성) 제작 시 1,600,500 kgCO₂eq/train 이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 10량 기준으로 2,667,500 kgCO₂eq/train 이 발생한다고 가정하고 철도안전법에 따라 고속철도 내구연한인 30년을 적용하게 되면 20편성(10량 1편성) 제작 시에 1,778,333 kgCO₂eq/yr 이 발생하는 것으로 산정하였다.

2.3.2.2 신규 노선건설

노선건설 시 온실가스 발생량은 UIC, Carbon Footprint of High-Speed railway infrastructure(Pre-Study) 문서의 온실가스 배출량 원단위를 참고하였다. 이 연구에서는 데이터의 부재로 인해 건설부문 세부요소 중 교각, 터널, 트랙, 전력 시스템, 통신 & 신호만을 고려하였다. 그 결과는 30,528,205 kgCO₂eq/yr로 나타났으며 세부내용은 다음과 같다.

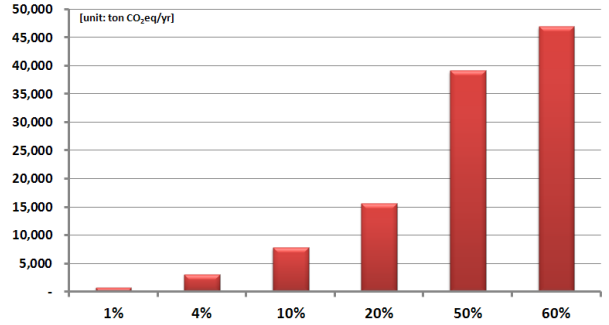
| 구분 | 연장 km | 배출량 원단위 (kgCO ₂ /km*yr) | 연간 CO ₂ 발생량 (kgCO ₂ /yr) |
|------------|-------|------------------------------------|--|
| 교량 | 111.7 | 186,090 | 20,786,253 |
| 터널 | 49.12 | 78,790 | 3,870,165 |
| 트랙 | 230.9 | 21,930 | 5,063,637 |
| 전력 시스템 | 230.9 | 2,460 | 568,014 |
| 통신 & 신호 | 230.9 | 1,040 | 240,136 |
| 총 계 | | | 30,528,205 |

2.3.2.3 철도운영

운영단계는 각 수송수단의 승객 1인당 온실가스배출량 원단위(pkm)를 활용하여 산정하였다. 승객 1인의 이동거리는 시나리오에 따라 300km로 도로와 철도에 동일하게 적용하고, 2010년 호남선 KTX 이용 승객수를 반영하여 기준 철도 승객수는 연간 6,842,000명(최대 좌석수 11,403,000석, 60%이용률)으로 가정하였다. 신규 철도차량의 도입(1편성, 373석)으로 인해 20편성의 차량에 해당하는 좌석수는 연간 5,178,090석이고 이는 60%의 승객 증가가 일어났을 때 최종 좌석 이용률은 64%가 된다. 이에 따라 1%, 4%, 10%, 20%, 50%, 60%의 승객이 증가 하였다고 가정할 때 증가된 승객수를 교통수단별 수송분담률

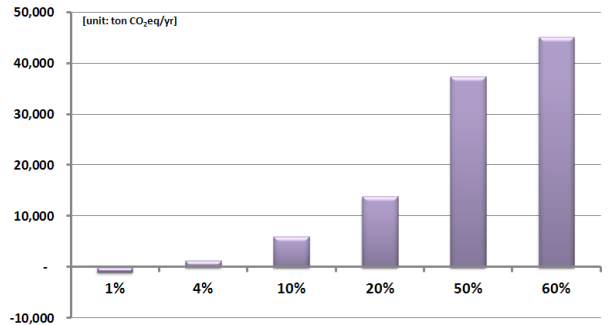
(국토해양부 보도자료)를 반영하여 버스(45인 기준)1대당 승용차(4인 기준) 2대로 가정하여 전환된 도로 교통량을 계산하였다. 얻어진 도로교통량에 따른 온실가스배출량에서 증가된 승객수에 따른 온실가스배출량의 차를 온실가스 배출 저감량으로 산출하였다. 그 결과 1%증가: 782 tonCO₂eq, 4%증가: 3,129 tonCO₂eq, 10% 증가: 7,822 tonCO₂eq, 20% 증가: 15,644 tonCO₂eq, 50%증가: 39,109 tonCO₂eq, 60%증가: 46,931 tonCO₂eq가 저감되는 것으로 산정되었다.

| 승객 증가율 | 사용단계 CO2 저감효과 |
|--------|-----------------------------|
| 1% | 782 kgCO ₂ eq |
| 4% | 3,129 kgCO ₂ eq |
| 10% | 7,822 kgCO ₂ eq |
| 20% | 15,644 kgCO ₂ eq |
| 50% | 39,109 kgCO ₂ eq |
| 60% | 46,931 kgCO ₂ eq |



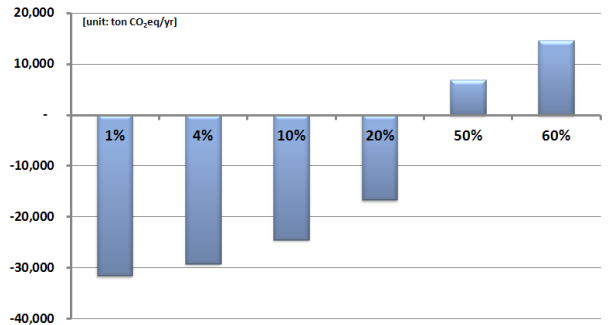
(a) 운영단계만을 고려한 온실가스 저감량

| 승객 증가율 | 사용단계 CO2 저감효과 |
|--------|-----------------------------|
| 1% | - 996 kgCO ₂ eq |
| 4% | 1,350 kgCO ₂ eq |
| 10% | 6,044 kgCO ₂ eq |
| 20% | 13,865 kgCO ₂ eq |
| 50% | 37,331 kgCO ₂ eq |
| 60% | 45,153 kgCO ₂ eq |



(b) 운영, 차량제작을 고려한 온실가스 저감량

| 승객 증가율 | 사용단계 CO2 저감효과 |
|--------|-------------------------------|
| 1% | - 31,524 kgCO ₂ eq |
| 4% | - 29,178 kgCO ₂ eq |
| 10% | - 24,485 kgCO ₂ eq |
| 20% | - 16,663 kgCO ₂ eq |
| 50% | 6,803 kgCO ₂ eq |
| 60% | 14,624 kgCO ₂ eq |



(c) 운영, 차량제작, 건설을 고려한 온실가스 저감량

그림 6 각 요소 적용에 따른 온실가스 저감량 예측결과

3. 결론

기존의 Modal Shift의 온실가스 저감량 산정방식과 동일하게 운행단계만을 고려했을 경우에는 도로에서 철도로 수송수단의 전환이 일어났을 때 모든 Modal Shift 비율에서 온실가스 저감이 발생하는 것으로 나타났다. 운행단계와 차량의 제작을 모두 고려했을 때는 차량의 제작에서 발생하는 온실가스 발생량으로 인해 승객 1% 증가의 경우에는 온실가스 저감량이 나타나지 않았다. 그러나 4% 이상의 승객증가율에서는 온실가스 저감량이 발생하는 것으로 나타났다. 운행과 차량제작, 노선건설을 모두 고려했을 경우에는 노선건설에서 발생하는 온실가스 배출량이 운행과 차량제작을 고려했을 때의 저감량보다 훨씬 많기 때문에 50%와 60%이외에는 저감량이 발생하지 않았다.

이 연구에서는 차량제작, 노선건설, 차량의 운영에 대한 온실가스 배출량을 산정해보았다. 차량의 제작과, 노선건설의 경우 온실가스 배출량을 연간으로 할당하여 적용하였다. 이는 연간 할당된 차량제작과 노선건설 온실가스배출량이 있다고 가정한 것으로 연간 할당된 온실가스배출량이 저감량보다 클 경우 Modal Shift를 통한 온실가스 저감량이 나타나지 않게 된다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 차량제작과정에서 발생하는 온실가스배출량의 저감, 또는 수명연장기술을 개발해야하며 건설부문에서는 건설재료의 생산과정에서 발생하는 온실가스의 저감을 위한 저탄소 건설재료의 개발, 열화방지 등의 건물수명연장기술이 개발되어야할 것으로 사료된다. 수명연장을 통해 연간 할당된 온실가스배출량의 크기를 줄이거나 비교적 낮은 Modal Shift 비율의 조건에서 온실가스 저감효과가 있게 될 것으로 예상된다. 또 다른 방법으로는 Maruti Suzuki 인도회사의 CDM사업 사례와 같이 건설에 따른 영향을 경제성분석을 통하여 차량 한 대당 비용에 투자비용으로 고려하거나, 탄소배출권 등의 구입으로 일부 상쇄시켜 건설에 따른 온실가스 발생량의 부하를 줄이는 방법도 고려해 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 기관고유사업의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국해양수산개발원, “국가 친환경 물류체계 구축을 위한 Modal Shift 활성화 방안”, 2008.
2. 이윤미 외 2인, “친환경수단으로서의 철도화물운송 증대를 위한 Modal Shift 정책 비교 연구”, 한국철도학회논문집, 2008.6, pp.2435-2442, 2008.
3. 이형묵 외 4인, “경인아라뱃길 물류개선 CDM사업 베이스라인 배출량 산출 분석”, 대한전기학회,하계 논문집, 2010.
4. 김병호, “철도네트워크와 지역발전;호남고속철도 건설사업 사업추진현황”, 특별세미나자료, 2008.
4. 코레일연구원, “기후변화협약대비 철도수송효과 분석 보고서”, 2009.
5. 국토해양부 보도자료, “교통수단별 수송분담률 발표”, 2010.
6. CDM사업 문서, “transport sector: Maruti Suzuki PDD”, 2010.
7. Y. TAKAHASHI, "An evaluation study on the social experiment of modal shift to reduce carbon dioxide emission," Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, pp. 2881 - 2893, 2005.
8. 교통량정보제공시스템, <http://www.road.re.kr/main/main.asp>
9. 국토해양통계누리, <https://stat.mltm.go.kr/portal/main/portalMain.do>