Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 37, No. 5: 879-890/ October, 2017
DOI: https://doi.org/10.12652/Ksce.2017.37.5.0879

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Construction Management **시공관리**

탄소량을 고려한 도로 유지보수 경제성에 관한 연구: KPRP (Korea Pavement Research Program) 활용

응웬띤탄* · 최재호**
Nguyen, Dinh Thanh*, Choi, Jae-Ho**

A Study on Economic Feasibility of Highway Maintenance Considering Carbon Amount by Using KPRP (Korea Pavement Research Program)

ABSTRACT

The US Pavement Design method (AASHTO) and HDM-4, a road pavement maintenance decision system, are not suitable for domestic pavement design, construction and maintenance. KPRP(Korea Pavement Research Program) has been developed to reflect Korea's environmental conditions and vehicle characteristics, thereby, extending pavement life. The main objective of this study is to select the best alternative through Life Cycle Cost CO_2 (LCCC) calculations among three representative maintenance strategies using KPRP design software since the environment cost resulting from the extended pavement life will also differ. The analysis of this study illustrates that cumulative carbon emissions for 40 years in alternative 2 (Cutting and Overlaying at Year 30) is the lowest option among them, and the basic cost of CO_2 emission by various road maintenance and repair work can be used for suggesting an optimal maintenance strategy for highway agency.

Key words : Korea Pavement Research Program (KPRP), LCCC, National Highway Pavement Condition Index (NHPCI), CO_2 Emission, Road maintenance, Pavement

초 록

기존 미국의 포장 설계법(AASHTO)과 대표적인 도로포장 유지보수 의사결정시스템인 HDM-4는 국내 실정 또는 환경에 적합하지 않아 현실적인 도로설계, 시공 및 유지관리 차원에서 국내에 적합하지 않다. 포장 수명 연장에 따른 환경비용에서도 차이가 발생할 것으로 판단되는 바, 본 연구의 주요 목표는 대한민국의 환경조건과 차종별 특성을 반영한 한국형 도로포장 설계법(KPRP) 설계 소프트웨어의 도로 공용성 해석 모델을 기반으로 활용하여 운영 및 유지보수단계에서 대표적인 세 가지 유지보수전략별 LCCC 계산을 통해 최적 대안을 선정하는 것이다. 본 연구 결과 40년 동안의 누적 탄소배출량은 대안 2의 절삭 및 덧씌우기가 누적 탄소배출량과 LCCC의 현재가치비용이 제일 적은 것으로 분석되었다. 본 연구를 통해 다양한 도로관리 유지보수 공사별 CO_2배출 원단위 구축이 가능하며 향후 탄소요금의 증가에 따른 도로시설별 다양한 유지관리 전략 마련에 대한 기초연구를 수행하였다는 점에 의의가 있다.

검색어 : 한국형 도로포장 설계법(KPRP), LCCC, 포장평가지수(NHPCI), 탄소 배출량, 도로 유지보수전략, 도로 포장

* 동아대학교 토목공학과 석사과정 (DongA University · ngdinhthanh.nuce@gmail.com)
** 종신회원 · 교신저자 · 동아대학교 토목공학과 교수 (**Corresponding Author** · DongA University · jaehochoi@dau.ac.kr)

Received July 11, 2017/ **revised** July 31, 2017/ **accepted** August 22, 2017

Copyright ⓒ 2017 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

2016년 11월 발효된 "파리협정"(Paris Agreement)의 목표는 지구의 온도 상승을 산업화 이전에 비하여 2°C 아래로 유지하고 더 나아가 1.5°C까지 제한하는 것으로 총 195개 국가가 온실가스 감축에 합의하에 참여하고 있다. 국내도 2010년 이후 "저탄소 녹색성장 기본법" 발효에 따라 온실가스 배출관리 및 의무감축을 추진 중에 있다. 2013년도 온실가스 의무감축 부속서 I에 속하는 국가 내에서 온실가스 총배출량 순위는 미국, 러시아, 일본, 독일, 캐나다 다음으로 6위이며 온실가스 배출량 증가율은 중국, 인도 다음으로 3위(147%)로서 매우 높다. 2030년까지 온실가스의 배출 전망치(Business As Usual, BAU) 대비 37%를 줄이는 자발적 감축 계획을 국제사회에 발표하였고 2021년부터 온실가스 감축 의무와 이에 따른 막대한 배출권 비용이 예상돼 대책 마련이 요구되고 있다(IEA, 2015; UNFCCC, 2015; INDC, 2016).

여러 산업 분야중 건설산업은 전 세계 에너지소비의 1/3, 원재료 소비의 40%, CO_2배출량의 30%를 차지하는 등 환경에 심각한 영향을 미친다(Lee et al., 2012). 건설산업은 국가 온실가스 인벤토리의 제조업 및 건설업으로 분류되며, 특히 1970년대 이후부터 도로부문이 전체 국가 온실가스 발생량의 17%를 차지할 정도로 두 번째로 가장 많은 온실가스 배출 인프라로 조사되었다. 국내 차량 증가는 연료소모량의 증가 외에도 도로 포장 성능 저하에 따른 교통혼잡, 사고발생, 시간지체 등 여러 가지 손해를 끼치게 되며 도로 공사 및 유지보수 작업시 온실가스 발생으로 환경 및 보건 측면에서도 부정적인 영향을 끼친다(Seo and Kim, 2013a).

그동안 국내에서는 2010년까지 자체 포장 설계법이 없어 미국의 포장 설계법(AASHTO 포장설계법)을 획일적으로 사용하였다. 특히 도로포장은 기온 등 환경요인의 영향을 많이 받는데 기후조건이 다른 미국의 포장 설계법을 적용할 경우 도로가 빨리 파손되는 문제점이 있다. 국토교통부는 지난 10여 년간 지역, 재료, 교통 및 환경 인자와 같은 국내 특징을 정확하게 반영한 한국형 도로포장 설계법(Korea Pavement Research Program, KPRP)을 개발하였다. 이로 인하여 도로포장 수명은 1.6배가 늘어나고 도로포장 비용은 연간 840여억 원이 절감되는 것으로 조사되었다(Land transportation issues, 2017).

도로 시설물 온실가스 배출량에 대한 연구는 주로 건설 사업의 복잡성, 현장 및 지역 변수를 고려하여 건설 프로젝트의 환경부하를 평가하는 전 생애주기평가(Life Cycle Assessment) 위주로 진행되고 있다(Bilec et al., 2006). 최근 도로포장의 생애주기비용(Life Cycle Cost, 이하 LCC)에에너지 및 환경(지구온난화)에 대한 관심이 많아지면서 세계은행(World Bank)과 TRB (Transportation Research Board), FHWA등 국제기구나 교통관련 연구기관 등을 중심으로 운영단계시 발생하는 CO_2배출량(이하 탄소 배출량)을 고려한 환경비용(Environmental Cost)을 포함하는 LCCC (Life Cycle Cost CO_2) 접근 방식을 실제 도로관리업무에 적용하고자 노력하고 있다(PIARC, 2000; Chatti et al., 2012; Han et al., 2013).

도로포장의 환경비용 추정에 대한 연구를 검토한 결과 주로 시공단계에서의 재료 생산, 운송, 시공과 시공 장비 운행에 따른 배출량에 대해서는 많은 연구가 진행되었으나 장기적인 운영 및 유지보수단계에서 탄소 배출원인과 배출량에 대한 연구는 상대적으로 부족하다(Kim, 2011; Kwak et al., 2012; Meneses et al., 2013; Seo and Kim, 2013b; Kwak et al., 2015; Ma et al., 2016; Seo et al., 2016).

앞서 언급한 바와 같이 AASHTO 설계법이 아닌 KPRP를 적용할 경우 포장 수명 연장에 따른 환경비용에서도 차이가 발생할 것으로 판단되는 바 본 연구는 KPRP를 활용하여 LCCC 분석을 통해 다양한 유지보수 전략별 가장 탄소 효과적인 대안을 선정하고자 한다. 본 연구를 통해 한국형 포장설계법을 활용한 탄소효과적인 도로유지관리 전략 연구의 기틀이 마련되기를 기대해 본다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 KPRP (2016년4월 버전)에서 제공하는 공용성 해석 모델을 기반으로 유지보수 대안별 탄소 배출량을 고려한 최적 유지보수 방안을 산정하였다(Fig. 1). 가장 먼저 국내 TMS (Transportation Management System)에서 탄소 배출량이 높은 구간을 선정하여 해당 구간의 설계데이터와 교통량 데이터를 활용하여 각 유지보수 대안별 사용자비용(User Cost)과 탄소 배출량을

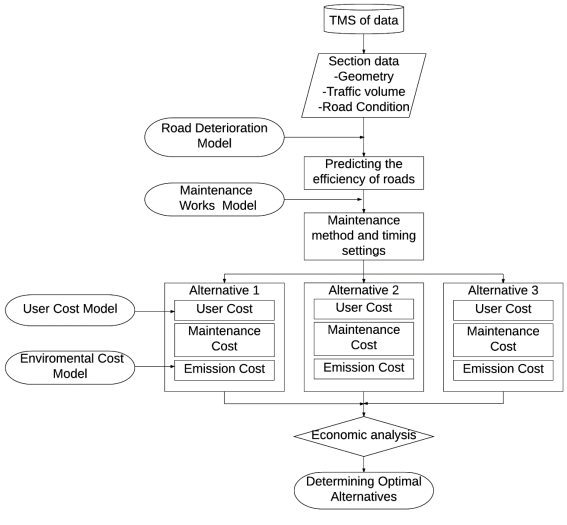


Fig. 1. Research Flowchart

고려한 환경비용을 산정하였다. 환경비용 산정에 필요한 두 가지 모델은 1) 포장파손 예측모델(Road Deterioration Model)과 2) 보수공법 결정모델(Road Maintenance Works Model)이며 포장파손 예측모델을 결정하기 위하여 KPRP에서 제공하는 피로균열, 영구변형, 그리고 IRI (International Roughness Index) 추정 모델을 사용하였다.

이 세 가지 도로 공용성 모델로부터 얻어진 값을 이용하여 현재 국내 고속도로 유지보수에 활용하고 있는 포장평가지수(National Highway Pavement Condition Index, NHPCI) 값을 산정하였고 현행 유지보수방법 선정 기준에 따라 유지보수 시기와 공법을 선택하였다(보수공법 결정모델). 관리자비용(Agency cost)은 사업비와 유지보수비를 포함하나 각 대안별 초기 건설비용은 모든 대안이 동일하기 때문에 유지보수비(Maintenance Cost)만을 고려하였다.

사용자비용은 차량운행비용(Vehicle Operating Cost, VOC)과 통행시간지체비용(Traffic Delay Cost, TDC)을 포함하며, 환경비용은 유지보수작업시 재료, 투입되는 장비에서 발생하는 배출량에 실효탄소요금(Effective Carbon Rate, ECR)을 적용하여 산정하였다. 탄소 배출량을 고려한 최적 유지보수 대안을 결정하기 위하여 현재가치비용(Present Worth Cost, 이하 PWC) 방법을 적용하였다.

2. 기존문헌 고찰

기존 도로시설에서의 탄소 배출량과 관련된 연구는 주로 LCC 방법을 주로 사용하였으며 내부 공용성 모델은 HDM-4나 AASHTO 포장설계법에 따른 공용성 모델을 주로 사용하였다. 유지보수단계에서의 탄소발생량을 산정하기 위해서는 사용자비용 또는 장비별 탄소발생량을 고려하였으나 이 둘 전부를 고려한 연구는 아직 수행되지 않은 상태이다. 특히 국내에서 최근 개발한 KPRP 모델을 기반으로 한 연구는 아직까지 수행되지 않았다. Han et al. (2007)은 HDM-4와 RealCost를 이용하여 최적의 도로포장 유지보수기준을 제시하기 위하여 관리자 및 사용자 그리고 사회-환경 비용까지 포함하여 LCC를 수행하였다. 하지만, 기존 시스템의 경우 국내 현실에 맞지 않는 다수의 불필요한 인자 입력을 요구하여 현실에 맞는 계수 조정이 필요하고, 국내 환경 조건과 차종별 특성 등 반영이 미흡하다는 문제점이 노출되었다(Choi et al., 2012; Do et al., 2014).

도로시설의 배출량에 관한 연구는 최근 2000년도 들어 다양하게 진행되고 있다. Kim (2011)은 HDM-4를 활용한 경제성 분석 및 차량운행으로부터 발생하는 탄소 배출량을 기준으로 최적 유지보수 대안을 선정하고 환경비용의 중요성을 확인하였다. Kwak et al. (2012)은 도로 시설물에 대한 배출량 산정방법을 제안하였고, 사례분석을 통해 공종별 시공단계에서 발생하는 탄소 배출량을 제시하였다. 교량, 터널, 일반도로 구간 순으로 터널구간이 35,779 tCO_2-eq/km로 가장 많은 탄소를 배출한 것으로 분석되었다.

Pruitichaiwiboon et al. (2012)은 국내 도로 시설의 경우 운영단계가 탄소 배출량의 70%를 차지하고 철도시설은 그와 반대로 시공 및 조달 단계가 배출량의 50%를 차지한다고 분석하였다. Seo el al. (2013b)은 전체 연장 거리가 가장 짧으나 대형 장비와 발파 작업이 많은 터널과 콘크리트 교량 구간을 포함하고 있는 고속도로가 국도와 지방도보다 온실가스 배출량이 훨씬 많다고 설명하였다. Ma et al. (2016)은 아스팔트 포장 시공단계에서 골재 혼합시 탄소 발생량이 54%, 아스팔트 타설시 43%를 차지하고 있는 것으로 분석하였다.

이와 같이 도로시설의 경우 운영단계에서의 탄소 배출을 줄일 수 있는 방안 수립이 매우 중요함을 알 수 있다. Kwak et al. (2015)은 아스팔트 포장 유지보수 공법별 탄소 배출 원단위를 제시하였다.[1] Seo et al. (2016)은 중형 및 대형 차량(Medium-and Heavy-Duty Vehicles, MHDV)을 대상으로 2015년 기준 MHDV의 CO_2배출량은 24,470,000 tCO_2-eq (트럭 68.6%, 버스 30.4%)로 전체 차량의 4.2%에 불과하지만 전체 교통차량 배출량의 25.5%에 해당함을 제시하였다.

글로벌 회사 Skanska Norway도 도로 사업에서의 탄소 발생량을 재료 생산과정, 시공장비 운전, 재료 운송, 폐기물 관리 분야별로 측정하였으며, 시공단계에서 발생량이 전체 사업의 약 76% 수준임을 제시하였다(Skanska, 2011). 포르투갈에서는 도로시설에서 사용자비용이 4%인 수준인 관리자 비용보다 훨씬 많은 96%를 차지한다고 제시하였다(Meneses et al., 2013).

기존 차량 주행속도와 관련된 연구는 도로설계 및 안전과 관련이 있고 포장상태와 속도 변화에 대한 연구는 매우 미미하나, Setyawan et al. (2015)은 도로손상이 차량의 속도에 영향을 미칠 수 있다는 가정하에 PCI (Present Serviceability Index)가 100점(Good)보다 PCI가 19점(Serious)있는 도로에서 차량의 속도가 55% 감소하고 평균 탄소 배출량이 2.49% 증가함을 제시하였다.

80km/h의 제한속도 구간에서 균열이 1%씩 악화될수록 0.4km/h의 속도감소가 나타났으며, 소성변형의 경우 1mm씩 악화될수록 0.54km/h, IRI는 1m/km씩 악화될수록 약 2.7km/h의 속도감소가 나타났다. 또한, 60km/h의 제한속도 구간에서 균열은 1%씩 악화될수록 0.35km/h의 속도감소가 나타났으며, 소성변형의 경우 1mm씩 악화될수록 0.47km/h, IRI는 1m/km씩 악화될수록 약 2.36km/h의 속도감소가 있음을 확인할 수 있다(Do et al., 2014). 이처럼 기존 연구 분석 결과 주로 시공단계에서의 재료 생산, 운송, 시공과

1) 표면처리(0.3463 tCO_2-eq/km), 소파보수(2.9102 tCO_2-eq/km), 덧씌우기(0.1704 tCO_2-eq/km) 및 재포장 (0.0413 tCO_2-eq/km)

시공 장비 운행에 따른 탄소 배출량에 대해서는 많은 연구가 진행되었으나 장기적인 운영 및 유지보수단계에서 탄소 배출량에 대한 연구는 상대적으로 부족하다.

3. KPRP 기반 의사결정 모델

3.1 포장파손 공용성 예측모델

KPRP를 활용하여 아스팔트 콘크리트 포장에 대한 전반적인 설계과정은 우선적으로 시공 대상지역의 조건에 적합한 포장단면(예비설계)을 가정하여 선정한 다음, 교통량, 환경조건 및 재료물성과 관련된 입력 변수(기상 및 교통 정보)를 입력한다. 다음 구조해석 프로그램 모듈에 의해 포장 단면의 구조적 거동을 계산하고 아스팔트 콘크리트 포장의 피로균열, 영구변형 및 IRI와 같은 공용성 모델 기준을 설정한다. 마지막으로 공용성 해석 프로그램 모듈을 이용하여 전체 설계기간에 대하여 누적된 손상도를 기반으로 각 공용성 모델을 예측할 수 있다(공용성 해석 및 예측). 예비설계가 공용성 기준을 만족하지 못할 경우 예비설계의 단면을 변경한 후 다시 입력 변수들 항목부터 공용성을 평가항목까지의 과정을 반복하여 해당 설계단면이 공용성 기준을 만족할 때까지 수행한다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011).

3.2 포장 보수공법 결정모델

일반국도의 포장상태를 정량적으로 파악하기 위해 한국건설기술연구원에서는 2007년 도로포장관리시스템 연구과제의 일환으로서 포장평가지수인 NHPCI를 개발하였다. NHPCI는 국도관리사무소의 관리자, 산·학·연 포장 전문가로 구성된 상세조사팀의 현장자료에 대한 통계분석을 통하여 3가지의 독립변수 - 균열, 소성변형 및 종단 평탄성 - 에 대한 함수(Eq. (1))로 개발되었다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010). 사용자비용은 Table 1의 NHPCI 범위별 적정 보수공법을 제시하며 6.0~9.18 경우는 포장상태가 매우 양호함을 나타낸다. NHPCI 범위 5.5~6.0은 예방적 유지보수(표면처리, 균열실링)를 실시하며, NHPCI가 4.0~5.5은 덧씌우기(일반 덧씌우기 또는 절삭 및 덧씌우기), 그리고 4 미만인 경우는 재건 작업이 요구된다(Son et al., 2013).

Table 1. Levels Based on NHPCI in Korea Expressway Corporation (Son et al., 2013)

NHPCI Range	Maintenance Method (Pavement Condition)
6.0～9.18	No Maintenance (Very good)
5.5～6.0	Preventive Maintenance (Good)
4.0～5.5	Overlay (Fair)
0.0～4.0	Rehabilitation (Poor)

$$NHPCI = \frac{1}{(0.33 + 0.003 \times X_{CR} + 0.004 \times X_{RD} + 0.0183 \times X_{IRI})^2} \quad (1)$$

여기서, X_{CR} : Crack Index (%)

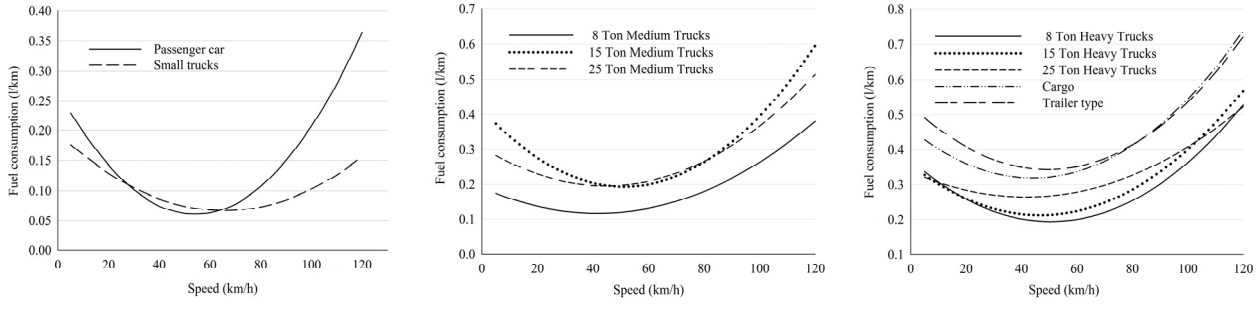
X_{RD} : Rutting Index (mm)

X_{IRI} : International Roughness Index (m/km)

3.3 포장상태와 차량속도 및 연료소모량 관계

사용자비용과 환경비용을 산정하기 위해서는 포장상태가 악화될수록 차량 운행속도가 감소하고 연료소비량이 변화하므로 포장상태에 따른 차량 주행속도의 변화와 연료 소비량과의 관계를 규명하여야 한다. 본 연구에서는 차량운행비용과 지체비용을 포함한 사용자 비용 및 탄소 배출량에 따른 환경비용을 추정하기 위해서 국토해양부지침(2009)에서 제시한 차종별 속도에 따른 연료소비량을 적용하였다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009).

Fig. 2는 지침을 참고하여 차종(Small Trucks, Medium Trucks, Lager Trucks)에 따라 연료소비량을 속도의 함수로 나타내는 것으



(a) Small Truck (b) Medium Truck (c) Lager Truck

Fig. 2. Fuel Consumption of Trucks

로 60km/h 이상에서는 속도의 증가에 따라 연료소모량이 증가하나, 속도가 매우 낮은 경우 그 반대의 경향을 보여준다. 따라서 포장상태의 악화로 저속주행 상태가 유지될 경우 연료소모 비용 및 탄소 배출량에 따른 환경비용 또한 증가함을 알 수 있다.

3.4 환경비용모델

3.4.1 CO_2배출량 측정방법

2006 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 가이드라인은 온실가스의 배출량 및 흡수원에 의한 흡수량 산정 방법을 제공한다(IPCC, 2006). 배출원은 에너지, 산업공정 및 제품사용, 농업, 임업 등으로 분류되어 있으며, 정확성 측면에서 Tier-1 (기본방법)에서 Tier-3 (가장 상세한 방법)까지 산정방법이 제시되어있다. Tier-1은 가장 기본적인 방식으로 연료종류별 에너지소비량과 CO_2배출계수를 이용하는 방식이며, Tier-2은 연료종류뿐만 아니라 차종별, 배출제어기술에 따른 배출계수를 추가로 적용하는 방식이다. Tier-3은 차종별 이동거리에 따른 차종별 배출계수를 적용하는 방식이다. 본 연구에서는 도로 포장상태에 의한 탄소 배출량을 반영하므로 Tier-3 방식을 활용하여 탄소 배출량을 측정한다(Eq. (2)).

$$Emission = \sum_{a,b,c,d} Fuel_{a,b,c,d} \times EF_{a,b,c,d} \quad (2)$$

여기서, Emission (Kg): 배출량
Fuel: 연료소비량(TJ)
EF: 배출계수(Kg/TJ)
a: 연료 종류(휘발유, 경유, LPG 등)
b: 차종별
c: 배출제어기술(제어장치의 미장착, 촉매변화장치 등)
d: 운전조건(도로종류 등)

3.4.2 실효탄소요금

기후변화 대응을 위한 효과적인 온실가스 감축방안으로 정책적으로 적절한 탄소요금을 설정하는 것은 매우 중요하다. 실효탄소요금(Effective Carbon Rate, ECR)이란 탄소세(Carbon taxes), 배출허용비용(Emission permit price) 및 기타 에너지사용에 대해 부과되는 세금을 모두 더해 CO_2톤당 가격으로 나타낸 값이다. 환경비용은 기후와 경제의 불확실성을 근거로 추정하기 때문에 정확한 값을 도출하기 어려우므로 최근에 발표된 연구들을 종합한 결과 $CO_2$1톤당 30유로가 최저치로 추정된다(즉, ECR이 30유로 이상으로 책정돼야 효과가 발생함을 의미). 현재 대한민국에 2017년 5월 19일 기준에 따라 탄소 가격이 21,000원/톤 인데 반하여, 경제 협력 개발 기구(Organization for Economic Co-operation and Development, 이하OECD)가 효과적인 기후변화대응 체제를 위한 적정 탄소요금으로 CO_2톤당 최소 30유로(38,184.9원)에서 최대 50유로(63,641.5원)라고 밝혔다(Academic issue, 2017).

4. 대상구간 선정 및 경제성 분석

4.1 대상구간 선정

본 연구 대상구간으로 TMS의 고속도로 포장구간별 교통량, 시공년도, 노면종류, 시공공법 등을 검토하여 교통량(AADT: Annual Average Daily Traffic) 기준으로 Low구간(1~10,000), Medium구간(10,000~30,000), High구간(30,000 이상)중 High 구간을 선정하였다. 특히 중형 및 대형 차량 비중 높아 탄소 배출량이 많을 것으로 예상되는 경부선의 경주-건천 구간을 선정하였다. Table 2는 본 연구의 대상구간인 경주-건천 구간 교통정보 – 연장거리(10.4km), 4차선, 설계제한속도(100km/h), 최근 5년간 연평균일교통량(AADT)을 제공한다. Table 3에서 차종별 구성 비율이로 국내 차종 분류기준인 12종 분류 교통량에 대해서 연평균일교통량

Table 2. Traffic Base Data of Kyeongju – Geoncheon

Highway Name	Location #	Section	Length (km)	Speed Limit (km/h)	Total Line #	Total Traffic Volume (AADT)				
						2011FY	2012FY	2013FY	2014FY	2015FY
Kyungbu Line	107	Kyeongju-Geoncheon	10.4	100	4	40,443	41,269	41,360	41,905	42,808

Table 3. Data of the Vehicle type of Kyeongju - Geoncheon

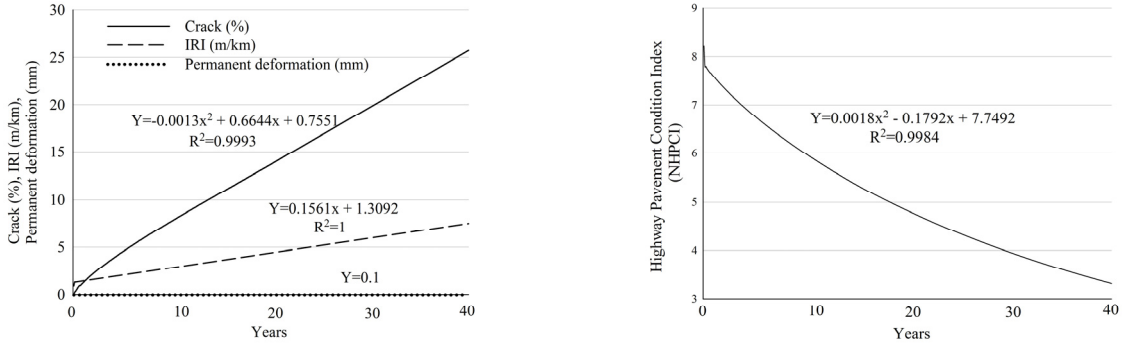
Total Traffic Volume	Car	Bus	Small Truck		Medium Truck			Large Truck				
2015FY	1 Type	2 Type	3 Type	4 Type	5 Type	6 Type	7 Type	8 Type	9 Type	10 Type	11 Type	12 Type
42,808	26,158	1,734	4253	2656	3170	182	1130	231	10	1539	32	213

을 차종별 교통량으로 환산하는데 사용한다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs Directive, 2011). 장래 교통량의 변화로 본 연구에서는 2016년을 기점으로 2%의 교통증가율을 가정하여 장래 40년 동안 교통량의 변화를 예측하였다(Korea Transport Institute, 2016).

4.2 KPRP를 이용한 NHPCI 추정모델 분석

본 연구에서는 KPRP을 활용하여 향후 40년 동안의 공용성 변화를 추정하였다. Fig. 3(a)는 40년 동안 누적된 균열 손상도에 따라 도출된 균열지수 예측모델과 40년 동안의 누적된 평탄성의 변이를 고려한 도로 평탄성 지수(IRI)이다. 영구변형은 40년 동안 수치 변화가 매우 미미하여 Fig. 3(b)는 위의 세 가지 공용성 모델을 Eq. (1)을 이용하여 개발된 NHPCI 추정모델을 보여준다. NHPCI는 시간의 추이에 따라 Table 1에 제시된 기준에 따라 40년 동안의 포장 유지보수 공법과 적용시기를 결정할 수 있다.

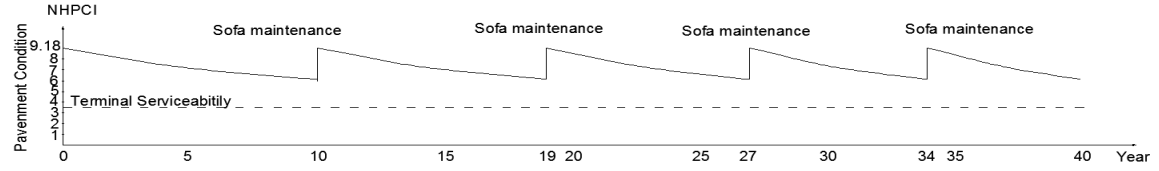
Fig. 4(a)에 대안 1은 NHPCI가 6.0점으로 악화되는 10년째에 소파 보수공법을 적용하고 다시 KRPR로 공용성 분석을 실시하여 NHPCI 지수에 따라 NHPCI가 6.0점이 되는 19년째에 소파보수공법을 적용한다. 그 과정을 반복하여 대안1은 40년 동안 10, 19, 27, 34년째에 총 4번의 소파 보수공법을 적용하는 유지보수전략이다. Fig. 4(b)는 대안 2로써 NHPCI가 4.0점까지 떨어지는 30년 시점에 절삭 및 덧씌우기 공법을 적용한다. Fig. 4(c)는 10년 시점에 소파 보수공법을 적용하고 다시 KRPR 프로그램 분석을 통해 35년 시점에 절석 및 덧씌우기 공법을 적용하였다.



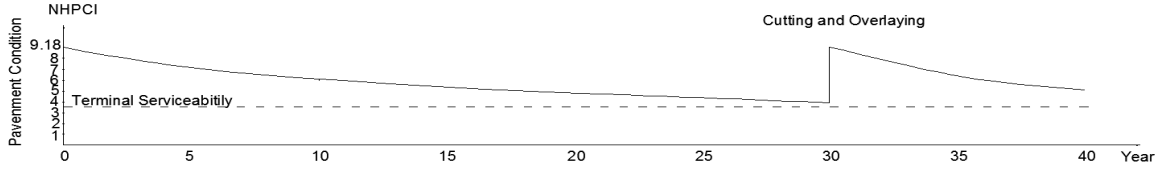
(a) Crack Index, IRI, and Permanent Deformation

(b) NHPCI

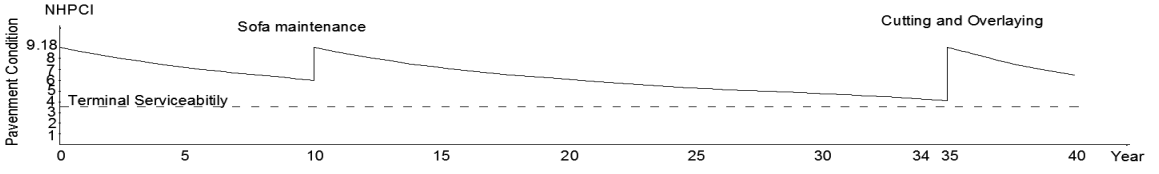
Fig. 3. NHPCI Prediction Model by using KPRP



(a) Maintenance Alternative 1 – Total 4 times SOFA at 10, 19, 27, and 34 Years



(b) Maintenance Alternative 2 - Cutting and Overlaying at Year 30



(c) Maintenance Alternative 3 – SOFA at Year 10 and Cutting and Overlaying at Year 35

Fig. 4. Pavement Maintenance Alternative Strategies

4.3 관리자비용 및 사용자비용 산정

도로의 운영 및 유지보수단계에서 관리자비용은 도로포장의 경우 덧씌우기, 소파보수 등의 유지보수에 따른 비용(재료비, 노무비, 경비 등)을 포함한다. 2011년도 한국물가협회 자료를 이용하여 도로 유지보수에 가장 많이 사용되는 소파보수(1,175,491원/50m^2)와 절삭 및 덧씌우기 공법의 단가(5,084,102원/2,000m^2)를 산정하여 장래 유지보수에 필요한 예산을 산출하였다(Korea Price Association, 2011). Table 4에서 소파보수(50m^2)와 절삭 덧씌우기(2,000m^2)의 재료, 장비, 노무, 경비비용이 포함한다.

도로 사용자비용(User Cost)은 차량운행비용(Vehicle Operating Cost), 통행시간지체비용(Traffic Delay Cost)으로 구성된다(Han et al., 2013). Fig. 5는 각 유지보수 대안별 40년 동안의 (a)차량운행비용, (b)통행시간지체비용, 그리고 이 두 가지를 혼합한 (c)이용자비용을 보여준다.

차량운행비용은 시간의 축에 대해서 포장성능이 떨어지고 차량의 운행속도가 감소하면서 차량운행비용이 감소하는 반면에, 유지보수 작업 완료 직후에 차량의 운행비용은 다시 증가한다. 차량운행비용은 차량 운행으로 발생하는 비용으로 연료소모비, 엔진오일비 등이 있으며 차량의 종류, 속도, 중량뿐만 아니라 교통량, 도로 유지보수 공사기간에 따라 변화하는 비용이다. 차량운행비용은 Fig. 2로부터 생애주기비용 분석기간 동안 차종별 속도변화에 따른 연료소모량(l/km/대)과 차종별 수량(대)과 연장(km)을 곱한 차량운행 총 연료 소모량으로부터 계산하였다.

유지보수 공사로 한 개 차선 통행금지시 운행 가능한 나머지 한 개 차선의 속도는 65km/h인 것으로 가정하였다. 통행시간지체비용은 유지보수작업으로 차량 운행이 지연됨으로써 운전자의 손실시간을 금전적 가치로 나타낸 것이다. 예를 들면 통행자의 임금수준, 이용경로 및 교통수단의 선택 등을 기준으로 평가하는 여객시간가치(Value of Time), 화물의 품목에 따른 시간가치를 평가하는 화물 시간가치 등이 이에 속한다. 본 연구에서는 승용차의 시간가치는 17,678원/대-시, 버스 69,594원/대-시, 그리고 화물차는 15,950원/대-시로 가정하였다(Korea Development Institute, 2008). 통행시간 지체시간은 Walls et al. (1998)에서 제시된 공식을 이용하여 각 대안별 유지보수 시점에서의 지체시간비용을 산정할 수 있다.

Fig. 5(b)에 각 대안별의 통행시간지체비용은 포장성능이 떨어질수록 차량운행 속도가 감소하므로 지체비용이 증가하나 유지보수 이후에는 감소함을 알 수 있다.

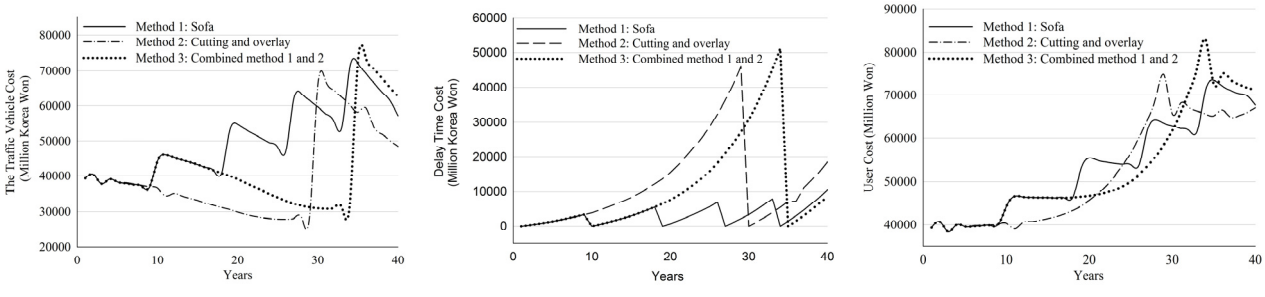
4.4 환경비용

도로 운영단계에서 환경비용에 포함되는 비용은 1) 40년간 차량운행에 따른 탄소배출량과 2) 유지보수 작업에 투입되는 공사재료, 장비 운전시 발생하는 CO_2배출량을 포함한다. 차량운행시 발생하는 CO_2배출량을 산정하기 위해서는 연간 차량운행에 따른

Table 4. Basic Unit of Maintenance Cost for Pavement Rehabilitation

Section	Maintenance Volume (m^3)	Asphalt Density (kg/m^3)[2)]	Asphalt Volume (Ton)	Asphalt Price (Won/ Ton)[2)]	Material Cost (Won)	Equipment, Labor and Security Cost (Won)	Unit Maintenance Cost (Won)
Cutting and Overlay (2,000m^2)[1)]	2000 × 0.1= 200	2,243	448.6	67,330	30,204,238	5,084,102	35,288,340
Sofa (50m^2)[1)]	50 × 0.05= 2.5	2,243	5.6	67,330	377,552.9	1,175,491	1,553,043

1) Thickness of asphalt in pavement; Sofa (0.05m), Cutting and Overlay (0.1m)
2) Asphalt Density (kg/m^3), Asphalt Price (Won/Ton) (Aqua-calc Conversions and Calculation, 2017)



(a) Vehicle Operating Cost (VOC) (b) Traffic Delay Cost (TDC) (c) User Cost (VOC + TDC Combined)

Fig. 5. User Cost for the Study Area

총 연료 소모량을 계산하고, Eq. (2)를 이용하여 차종별 CO_2배출량을 산정한다. 보수공법에 따라 투입되는 장비(노면파쇠기, 아스팔트 피니셔, 로더, 머캐덤로울러, 타이어로울러 등)의 CO_2배출량을 산출하기 위해서는 유지보수공법에 따른 요소(장비의 명세서 - 생산성, 규격 등 -, 수량, 작업시간, 작업량 등)가 필요하다.

본 연구에서는 모든 차종은 경유로 운행하는 것을 가정하였으며 IPCC 2006에서 제공하는 경유 순발열량(Toe/lit) 0.842와 CO_2 배출계수 0.837 (tCO_2/Toe)을 적용하였다. Fig. 6에서 대안 1의 소파가 진행되는 10, 19, 27, 34년째에 공사로 인한 영향과 차량 운행에 따른 탄소배출량을 계산하여 10년째에 95,928.4 tCO_2-eq/년, 19년째에 114,224.7 tCO_2-eq/년, 27년째에 133,464.1 tCO_2-eq/년, 34년째에 152,989.2 tCO_2-eq/년이 배출되는 것을 보여준다. 대안 2에서는 절삭 및 덧씌우기가 진행되는 30년째에 공사로 인한 영향과 차량 운행에 따른 탄소배출량을 계산하여 147,474.9 tCO_2-eq/년이 산출되었다. 대안 3의 소파가 10년째에 95,928.4 tCO_2-eq/년, 절삭 및 덧씌우기가 35년째에 161,976.2 tCO_2-eq/년으로 산출되었다.

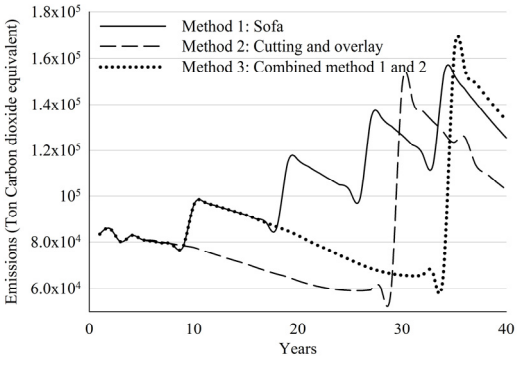


Fig. 6. CO_2 Emissions by Alternatives

Table 5는 소파보수(50m^2)와 절삭 및 덧씌우기(2,000m^2)에 투입되는 재료, 공사 장비 운전시 발생하는 CO_2배출량을 보여준다. 결과 소파보수(50m^2)를 시공하기 위한 투입되는 재료, 장비가 0.5939 tCO_2-eq를 배출하며 절삭 및 덧씌우기(2,000m^2)를 시공하기 위한 투입되는 재료, 장비가 4.9529 tCO_2-eq를 배출한다. 여기서 재료 사용에 따른 CO_2배출량은 Chehovits and Larry (2010)가 제시한 단위 면적당 GHG (Greenhouse Gas) 배출량(T/m^2)을 적용하였으며 Table 5의 8열에 제시되어 있다. 본 연구에서 대안 1에 소파보수 면적이 전체 도로 구간(10.4 x 3.6 x 4 = 149,760 m^2)의 20%로 가정하고 있음에 따라 한번 소파보수를 진행하면

Table 5. Basic Unit of Emissions Material and Equipment in Cutting and Overlaying (2,000m^2), Sofa (50m^2)

Section	Equipment and materials	Standard	Fuel Efficiency (l/h)[2]	Time work (h)	Total Fuel (l)	Maintenance Area (m^2)	GHG Emissions for Asphalt (T/m^2)	Emission Factor (tCO_2/Toe)	Net heating Value Factor (Toe/lit)	CO_2 Emissions (tCO_2)
Cutting and Overlay (2,000m^2)[1]	Surface ripper	2.0M	109	8	872	-	-	0.837	0.842	2.253
	Loader (Tire)	0.57m^3	7.6	8	60.8	-	-	0.837	0.842	0.157
	Asphalt Finisher	3m	13.2	8	105.6	-	-	0.837	0.842	0.272
	Macadam Roller	10-12 TON	9.5	8	76	-	-	0.837	0.842	0.196
	Tire Type Roller	8-15 TON	11.7	8	93.6	-	-	0.837	0.842	0.2418
	Tandem Roller	5-8 TON	9.2	8	73.6	-	-	0.837	0.842	0.1901
	Sprinkler Truck	16,000 l	11.8	8	94.4	-	-	0.837	0.842	0.243
	Asphalt	Hot Mix Asphalt	-	-	-	2000	0.0007	-	-	1.4
	Basic Unit CO_2 Emissions (tCO_2-eq) of Cutting and Overlay									4.9529
Sofa (50 m^2)[1]	Plate Compactor	1.5TON	1.5	8	12	-	-	0.837	0.842	0.031
	Vibrating Roller	0.7TON	14.4	8	115.2	-	-	0.837	0.842	0.2976
	Loader (Tire)	0.57m^3	6.5	8	52	-	-	0.837	0.842	0.1343
	Dump truck	2.5TON	6	8	48	-	-	0.837	0.842	0.124
	Asphalt	Hot Mix Asphalt	-	-	-	50	0.00014	-	-	0.007
	Basic Unit CO_2 Emissions (tCO_2-eq) of Sofa									0.5939

1) Thickness of asphalt in pavement; Cutting and Overlay (0.1m), Sofa (0.05m)
2) Fuel: Diesel

149,760 x 20/100 x 0.5939/50 = 355.77 tCO_2-eq를 배출하며 대안2, 3에 모든 구간 절삭 및 덧씌우기는 149,760 x 4.9529/2,000 = 370.87 tCO_2-eq를 배출한다. 이와 같이 유지보수공법별 CO_2배출 원단위는 소파보수가 11.878 $kgCO_2$-eq/m^2, 절삭 및 덧씌우기가 2.476 $kgCO_2$-eq/m^2로 산정되었다.

Fig. 6에서 각 대안들의 CO_2발생 추이를 보면 유지보수 기간 동안 투입된 시공 재료, 장비로 인한 탄소배출량이 추가되어 추이곡선이 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 대안 1는 시간을 지남에 교통량이 성장 때문에 소파보수 10, 19, 27, 34년째 중에 지난 소파보수 시 보다 다음 소파보수 시는 CO_2배출량이 약 16.8%로 증가한다. 대안 2는 Fig. 2에 의하면 차량의 속도가 100km/h부터 52.5km/h로 떨어짐에 따라 CO_2배출량이 28%로 감소한다. 또한, 유지보수 전후를 살펴보면 대안 1은 소파보수의 CO_2배출량이 30.8%로 증가하며, 대안 2와 3은 절삭 및 덧씌우기로 CO_2배출량이 140.53%로 증가한다.

40년 동안의 누적 탄소배출량은 대안 1은 4,289,486 tCO_2-eq를 배출하고 대안 2는 3,409,614 tCO_2-eq, 그리고 대안 3은 3,590,159 tCO_2-eq를 배출한다. OECD에 적정 탄소요금으로 CO_2톤당 최소 30유로(38,184.9원)로 적용할 경우 40년간 누적된 대안 1의 환경비용은 163,793.6 백만원, 대안 2는 130,195.7 백만원, 그리고 대안 3은 137,089.8 백만원으로 산출되었다. 이로부터 유지보수에 따른 환경비용이 적지 않게 발생함을 알 수 있다.

4.5 총 탄소 배출량의 현재가치비용 산정

경주-건천 구간을 대상으로 40년 생애주기분석 기간 동안 유지보수 대안별 관리자비용, 이용자비용 및 CO_2톤당 최소 30유로(38,184.9원)로 적용한 환경비용을 포함한 현재가치비용(Present Worth Cost, 이하 PWC)은 Table 6과 같다. 대안 1은 관리자비용, 차량운행비용 및 환경비용이 제일 높은 것으로 분석되었으나 통행시간지체비용이 가장 적은 것으로 분석되었다. 대안 2는 통행시간지체비용이 가장 높게 나타났지만 환경비용, 차량운행비용 및 관리자비용에서 가장 작은 것으로 분석되었다. 종합적으로 PWC 값이 가장 작은 대안 2의 절삭 및 덧씌우기 공법은 제시된 3가지 대안가운데 가장 탄소 효율적인 유지보수전략임을 알 수 있다.

Fig. 7은 운영 및 유지보수 단계에서 각 대안별 비용 항목을 보여준다. 대안 1은 차량운행비용의 비중이 제일 높게 분석되었고 대안 2는 통행시간지체비용이 비중이 가장 높게 분석되었다. 환경비용의 비중은 대안 1이 가장 높은 7.11%로 분석되었다. 대안 1은 단기적인 소파보수 공사로 포장의 질은 상시 좋은 상태로 유지되어 통행시간지체비용이 적고 차량 운행비용은 많이 드는 반면에, 30년 시점에 절삭 및 덧씌우기 공사를 하는 대안 2는 차량 운행비용은 적으나 상당히 오랜 기간 낮은 포장 공용성으로 지체비용이 많이 발생하는 특징이 있다. 대안별 차량운행비용은 통행시간지체비용과 반비례 관계가 있으며 환경비용과 비례 관계가 있는 것으로 분석된다. 40년 동안의 3가지 대안들의 개별 평균 비용은 관리자비용이 0.146%, 차량운행비용이 78.445%, 통행시

Table 6. PWCs of Alternatives (Discount Rate 6%, Analysis Period 40yrs) (Unit: Million Won)

Alternative	Maintenance Cost	User Cost		Environmental Cost		Present Worth Cost
		Vehicle Operating Cost	Travel Delay Time Cost	Material, Equipment of Emission Cost	Vehicle of Emission Cost	
Alternative 1	3,721.3	2,019,214.3	118,458.2	54.36	163,739.2	531,208
Alternative 2	2,642.4	1,605,565.1	465,792.0	14.17	130.181.6	183,602
Alternative 3	3,572.7	1,691,858.6	426,246.5	28.84	137,062.1	421,435

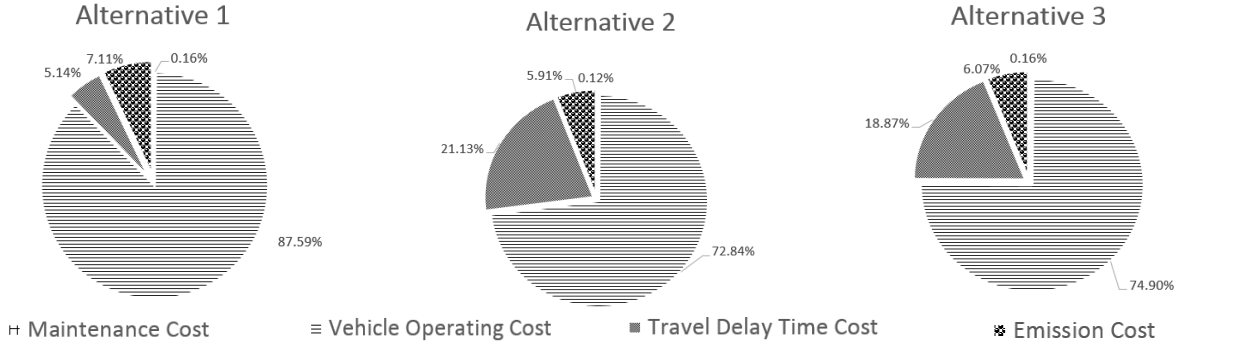


Fig. 7. Cost Ratio Comprising LCCC

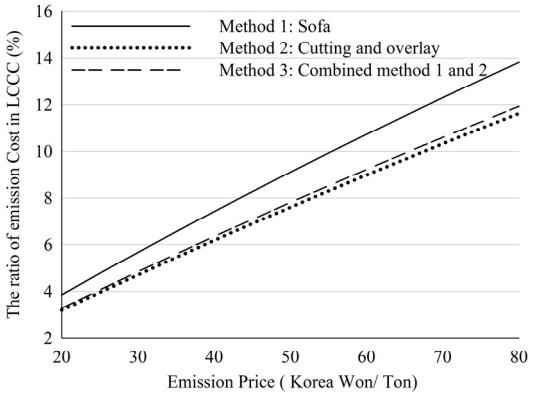


Fig. 8. The ratio of Environmental Cost in LCCC by Emission Price

간지체비용이 16.047%, 환경비용이 6.3%로 분석되었다.

2017년 5월 19일 기준 탄소 거래가격은 21,000 원/톤이며 OECD가 효과적인 기후변화체제를 위한 적정 탄소요금으로 CO_2 톤당 최소 30유로(38,184.9원)에서 최대 50유로(63,641.5원)로 제안하고 있다. Fig. 8는 탄소 거래가격의 변동(20,000~80,000원)이 환경비용에 미치는 결과를 보여준다 배출권가격이 21,000원 수준에서는 전체 LCCC에서 환경비용이 세 가지 대안의 평균값인 3.6%를 차지하나 OECD가 제시하는 최소 탄소요금인 30유로(38,184.9원)에서는 환경비용이 6.36%로 높아진다. 최대 50유로(63,641.5원)에서의 환경비용은 10.17%로 전체 비용중 차지하는 비중이 매우 높은 것을 알 수 있다. Fig. 8에서 보듯이 탄소요금이 높아질수록 대안 2의 탄소 효과성은 더욱 높아짐을 알 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구과제

기존 미국의 포장 설계법(AASHTO)과 대표적인 도로포장 유지보수 의사결정시스템인 HDM-4는 국내 실정 또는 환경에 적합하지 않아 현실적인 도로설계, 시공 및 유지관리 차원에서 국내에 적합하지 않다. 본 연구의 주요 목표는 대한민국의 환경조건과 차종별 특성을 반영한 KPRP 설계 소프트웨어를 활용하여 운영 및 유지보수단계에서 대표적인 세 가지 유지보수전략별 LCCC 계산을 통해 최적 대안을 선정하는 것이다. 본 연구 결과 아래와 같은 결과를 도출할 수 있었다.

(1) 세 가지 대안 중에 40년 동안의 누적 탄소배출량은 대안 1은 4,289,486 tCO_2-eq, 대안 2는 3,409,614 tCO_2-eq, 그리고 대안 3은 3,590,159 tCO_2-eq를 배출하여 대안 2의 절삭 및 덧씌우기가 누적 탄소배출량이 제일 적은 것으로 분석되었다.
(2) 환경비용을 포함한 LCCC의 현재가치비용(Present Worth Cost, 이하 PWC)도 대안 2의 절삭 및 덧씌우기가 가장 적은 것으로 분석되었다.
(3) 유지보수공법별 CO_2배출 원단위를 구축할 수 있었으며, 소파보수가 11.878 $kgCO_2$-eq/m^2, 절삭 및 덧씌우기가 2.476 $kgCO_2$-eq/m^2로 분석되었다.
(4) 배출권가격 또는 적정 탄소요금이 증가할수록 환경비용은 정비례하여 증가하며 대안 2의 LCCC는 타 대안에 비하여 상대적으로 더욱 낮아짐을 알 수 있다.

이와 같이 대안 2는 LCC와 LCCC 측면에서 다른 대안보다 좋은 것으로 판단되지만, 낮은 성능의 도로 상태가 장기간 지속되므로 사용자 만족도가 가장 저조하다는 단점이 있다. 따라서 향후 이러한 부분을 보완할 수 있는 유지보수 전략을 고려하여 환경요금을 낮추고 사용자 만족도를 극대화 할 수 있는 대안을 개발할 필요가 있다. 장기 운영기간 동안의 탄소 배출량을 고려한 환경비용을 정확히 산정하는 것은 교통량, 유지보수 방법, 차종별 분포, 사용 연료의 분배 등 여러 불확실한 요인으로 인하여 매우 어렵다. 그러나 본 연구를 통해 다양한 도로관리 유지보수 공사별 CO_2배출 원단위 구축이 가능하며 향후 탄소요금의 증가에 따른 도로시설별 다양한 유지관리 전략 마련에 대한 기초연구를 수행하였다는 점에 의의가 있다. 특히 본 연구는 한국형 포장설계법인 KPRP를 도입하여 장기공용성과 탄소 배출량을 연계한 국내외 최초 연구이며, 추후 본 연구를 통해 탄소효과적인 도로유지관리 전략 연구의 기틀이 마련되기를 기대해 본다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2017R1D1A1B03036200).

References

Academic issue (2017). “OECD, announcement of the report on the appropriateness of carbon rates.” Available at: http://www.energy.or.kr/web/kem_home_new/energy_issue/mail_vol54/pdf/issue_157_01.pdf (Accessed: June 21, 2017) (in Korean).

Aqua-calc Conversions and Calculation (2017). Available at: http://www.aqua-calc.com/page/density-table/substance/concrete-coma-and-blank-asphalt (Accessed: June 05, 2017).

Bilec, M., Ries, R., Matthews, H. S. and Sharrard, A. L. (2006). “example of a hybrid life-cycle assessment of construction process.” *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 12, No. 4, pp. 207-215.

Chatti, K. and Zaabar, I. (2012). “NCHRP report 720: Estimating the effects of pavement condition on vehicle operating costs.”

Transportation Research Board (TRB), Washington, D.C.

Chehovits, J. and Galehouse, L. (2010, April). "energy usage and greenhouse gas emissions of pavement preservation processes for asphalt concrete pavements." *In Compendium of papers from the first international conference on pavement preservation*, pp. 27-41.

Choi, S., Do, M. S., Baek, J. E. and Kwon, S. A. (2012). "economic analysis on long-life asphalt pavement by using Korean pavement management system." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 18, No. 4, pp. 19-28 (in Korean).

Do, M. S., Kwon, S. A., Lee, S. H. and Kim, Y. (2014). "Development of the decision-making system for national highway pavement management." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 2-D, pp. 645-654 (in Korean).

Han, D. S., Do, M. S., Kim, S. H. and Kim, J. H. (2007). "Life cycle cost analysis of pavement maintenance standard considering user and socio-environmental cost." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 6-D, pp. 727-740 (in Korean).

Han, D. S. and Do, M. (2013). "Development of korean life cycle cost analysis model for road pavement asset management." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 4, pp. 1639-1650 (in Korean).

INDC (2016). "Submission by the republic of korea intended nationally determined contribution." Available at: http://www4.unfccc.int/ndcregistry/PublishedDocuments/Republic%20of%20Korea%20First/INDC%20Submission%20by%20the%20Republic%20of%20Korea%20on%20June%2030.pdf (Accessed: Jan 15, 2017) (in Korean).

International Energy Agency (IEA) (2015). *IEA of world energy outlook.* Available at: http://www.keei.re.kr/web_keei/pendingissue.nsf/0/AF53E2C702762AA049257F19002C2DD1/$file/21_IEA%EC%9D%98+World+Energy+Outlook+2015.pdf/21_IEA%EC%9D%98%20World%20Energy%20Outlook%202015.pdf (Accessed: May 15, 2017) (in Korean).

IPCC (2006). "IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories." Vol. 2, Chapter. 4. Available at: http://www. ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html (Accessed: Dec 15, 2016).

Kim, K. N. (2011). "Economical analysis and CO_2emission with HDM-4 road maintenance method." Hanbat National University Library (in Korean).

Korea Development Institute (2008). *Modification and supplementary study of preliminary feasibility study standard guidelines for road and railway sector projects* (in Korean).

Korea Price Association (2011). Available at: "http://www.kprc.or.kr." (Accessed: April 26, 2017) (in Korean).

Korea Transport Institute (2016). forecasting future transport demand toward 2050. Available at: https://www.koti.re.kr/user/bbs/BD_selectBbs.do?q_bbsCode=1017&q_bbscttSn=20170206161442962&q_clCode=3&q_lwprtClCode=2&q_art=N&q_lang= (in Korean) (Accessed : Mar 20, 2017).

Kwak, I. H., Kim, K. H., Wie, D. H., Park, K. H. and Hwang, Y. W. (2015). "calculation of basic unit of carbon emissions in operation and maintenance stage of road infrastructure." *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 33, No. 3, pp. 237-246 (in Korean).

Kwak, I. H., Park, K. H., Hwang, Y. W. and Park, J. H. (2012). "Development and application of carbon emissions estimation methodology during the life cycle of road." *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 34, No. 6, pp. 382-390 (in Korean).

Land transportation issues (2017). "Development of Korean road pavement design method reflecting climate characteristics." Available at: http://blog.naver.com/mltmkr/220977574460 (in Korean), (Accessed: April 20, 2017).

Lee, K. H., Kim, H. J., Kwon, S. H. and Kim, M. J. (2012). "The program development for environmental quality level and evaluation of carbon dioxide emission in construction works." *LHI Journal of Land, Housing, and Urban Affairs*, Vol. 3, No. 4, pp. 399-406.

Ma, F., Sha, A., Lin, R., Huang, Y. and Wang, C. (2016). "Greenhouse gas emissions from asphalt pavement construction: A case study in China." *International journal of environmental research and public health*, Vol. 13, No. 3, p. 351.

Meneses, S. and Ferreira, A. (2013). "Pavement Maintenance programming considering two objectives: Maintenance costs and user costs." *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 206-221.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs Directive, (2009). *Basic Law of Construction Industry* (in Korean).

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs Directive, (2010). "Guidelines for installation and management of facilities." (in Korean).

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs Directive, (2011). "Road pavement structural design tips." (in Korean).

PIARC (2000). "Permanent international association of road congresses." Highway Development And Management Series, The World Road Association, La Defense, Vol. 1-7.

Pruitichaiwiboon, P., Lee, C. K. and Lee, K. M. (2012). "CO_2emission from the rail and road transport using input-output analysis: An application to South Korea." *Environmental Engineering Research*, Vol. 17, No. 1, pp. 27-34 (in Korean).

Road Pavement Design Program (April 2016 version) (2017). Available at: http://www.kcsc.re.kr/cstd/Search_Detail2.aspx?code=1219 (in Korean), (Accessed: Feb 20, 2017).

Seo, J., Park, J., Oh, Y. and Park, S. (2016). "Estimation of total transport CO_2emissions generated by Medium-and Heavy-Duty Vehicles (MHDVs) in a Sector of Korea." *Journal of Energies*, Vol. 9, No. 8, p. 638 (in Korean).

Seo, Y. G. and Kim, S. M. (2013a). "Estimation of greenhouse gas emissions from road traffic: A case study in Korea." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 28, pp. 777-787 (in Korean).

Seo, Y. G. and Kim, S. M. (2013b). "Estimation of materials-induced CO_2emission from road construction in Korea." *Renewable and Sustainable Energy Reviews 26*, pp. 625-631 (in Korean).

Setyawan, A. and Kusdiantoro, I. (2015). “The effect of pavement condition on vehicle speeds and motor vehicles emissions.” *Procedia Engineering*, Vol. 125, pp. 424-430.

Skanska (2011). “Carbon foot printing on highway projects – Examples from Norway, Sweden and UK.” Available at: http://www.skanska-sustainability-case-studies.com/index.php/latest-case-studies/item/download/20_3bbda6b989c2b55ed7bdfc89d6acfaec (Accessed: Dec 15, 2016).

Son, H. J., Kwon, S. A., Lee, J. J., Baek, C., Lim, J. K. and Sin, H. J. (2013). “A study for determining the rehabilitation method group using NHPCI on asphalt concrete pavement of national highway.” *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 1-9 (in Korean).

UNFCCC (2015). “Report on the structured expert dialogue on the 2013-2015 Review.”

Walls III, J. and Smith, M. R. (1998). “Life-Cycle cost analysis in pavement design-interim technical bulletin.” (No. FHWA-SA-98-079).