

고속도로 종단지형을 고려한 연료 효율적 최적주행전략 모형 개발

Development of Optimized Driving Model for decreasing Fuel Consumption in the Longitudinal Highway Section

최 지 은*

(Ji-eun Choi)

(Pukyong National University)

배 상 훈**

(Sang-hoon Bae)

(Pukyong National University)

· Corresponding author : Sang-hoon Bae(Pukyong National University), sbae@pknu.ac.kr

요 약

국토교통부는 2020년까지 수송부문 온실가스 배출량의 감축목표를 34.3%로 설정하였다. 목표달성을 위해 에코드라이빙 교육 및 정보를 제공하고 있으나 배출량 감축효과가 미비하다. 따라서 본 연구는 연료 효율적인 최적주행전략 모형의 개발을 목적으로 하였다. 종단경사도 및 길이가 다양한 도로지형을 생성하고 주행모드를 바탕으로 하는 시나리오별 속도 프로파일을 Comprehensive Modal Emission Model에 적용하여 연료소모량을 산정하였다. 연료소모량이 최소가 되는 시나리오와 속도변화량을 도출하였다. 도출된 시나리오와 속도변화량을 기반으로 최적주행전략 모형을 개발하였다. 개발된 모형을 검증하고자 실차테스트를 수행하여 일반 운전자의 속도 데이터를 수집하였다. 개발된 모형에 의해 생성된 속도 프로파일과 일반운전에 생성된 속도 프로파일을 분석하고 각각 연료소모량을 산정하였다. 최적주행 시 소모된 연료소모량이 일반운전보다 평균 11.8% 감축하는 것으로 분석되었다.

핵심어 : 온실가스 배출량, 연료소모량, 에코드라이빙, 도로지형, 최적주행전략

ABSTRACT

The Korea ministry of land, infrastructure and transport set the goal of cutting greenhouse gas emissions from the transport sector by 34.3% relative to the business as usual scenario by 2020. In order to achieve this goal, support is being given to education and information regarding eco-driving. As a practical measure, however, a vehicle control strategy for decreasing fuel consumptions and emissions is necessary. Therefore, this paper presents an optimized driving model in order to decrease fuel consumption. Scenarios were established by driving mode. The speed profile for each scenario applied to Comprehensive Modal Emission Model and then each fuel consumption was estimated. Scenarios and speed variation with the least fuel consumption were derived by comparing the fuel consumptions of scenarios. The optimized driving model was developed by the derived results. The speed profiles of general driver were collected by field test. The speed profile of the developed model and the speed profile of general driver were compared and then fuel consumptions for each speed profile were analyzed. The fuel consumptions for optimized driving were decreased by an average of 11.8%.

Key words : Greenhouse gas emission, Fuel consumption, Eco-driving, Road topography, Optimized driving strategy

† 이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(No.NRF-2015R1A2A2A01006386)

* 주저자 : 부경대학교 공간정보시스템공학과 박사수료

** 공저자 및 교신저자 : 부경대학교 공간정보시스템공학과 교수

† Received 18 August 2015; reviewed 12 October 2015; Accepted 23 November 2015

I. 서론

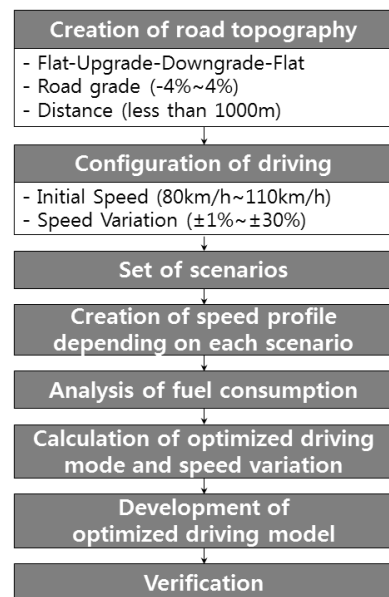
1. 연구의 배경 및 목적

전 세계적으로 2011년 교통 분야의 CO₂ 배출량은 7,001백만톤이며, 도로에서 발생하는 CO₂ 배출량은 73.9%(5,172백만톤)의 비중을 가진다[1]. 이에 따라 2010년부터 미국 U.S. Department of Transportation에서는 차량과 차량 간(Vehicle to Vehicle, V2V), 차량과 인프라 간(Vehicle to Infrastructure, V2I) 통신 환경 하에 안전성, 이동성, 환경성을 극대화하기 위한 Connected Vehicle 프로젝트가 추진 중이다[2]. 환경 분야의 경우, 연료소모량 및 배출량을 최소화하기 위해 connected eco-driving, eco-cooperative adaptive cruise control 관련 연구가 진행되고 있다[3]. 국내의 경우, 2013년 부문별 최종 에너지 소비량을 살펴보면 수송부문이 전체 중 17.8%(37,330천toe)를 차지한다[4]. 수송부문의 온실가스 배출량은 2013년 86백만톤에서 2020년 95.4백만톤으로 증가할 것으로 예측되고 있다. 이러한 문제의 인식 하에 국토교통부는 2020년까지 수송부문 온실가스 배출량의 감축 목표를 34.3%로 설정하였다. 그러나, 2013년도 산업기술수준조사보고서에 의하면 스마트 카의 에코-ITS 연계시스템 기술 개발이 시급한 것으로 분석되었다[5]. 따라서 본 연구에서는 연료소모 및 온실가스 배출량 감축을 위해 전방의 도로지형을 고려한 최적주행전략 모형 개발을 목적으로 한다.

2. 연구의 범위 및 방법

본 연구는 다양한 종단지형에서 주행모드 별 연료소모량을 분석하고 연료소모량이 최소인 주행모드를 도출하고자 하였다. 종단지형은 국토교통부의 ‘도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙’에서 제시되어 있는 종단경사 설치 기준에 준하여 종단경사도의 범위를 설정하였다[6]. 종단경사도와 길이를 무작위로 추출하여 다양한 도로지형을 생성하였다. 도로지형 구간 별 주행모드(등속, 가속, 감속)를 다르게 적

용하여 시나리오를 설정하였다. 각 시나리오 별 가속 및 감속하는 속도변화량을 초기속도의 1%이상 30%이하의 범위로 설정하였다. 시나리오 별 속도 프로파일을 Comprehensive Modal Emission Model(CMEM)에 적용하여 연료소모량을 산정하였다. CMEM은 차종, 연료, 경사도 등에 의해 연료소모량을 산정한다[7, 8]. 속도 프로파일 별 연료소모량을 분석하여 연료소모량이 가장 적게 소모된 시나리오와 속도변화량을 도출하였다. 도출된 결과를 기반으로 최적주행전략 모형을 개발하고 검증하였다.



〈그림 1〉 연구수행절차
〈Fig. 1〉 Flow of study

II. 문헌고찰

Choi 외(2015)는 도로 경사도를 고려한 최적 가속도를 도출하고 고속도로 오르막 구간을 대상으로 연료 효율적 주행방법을 제시하였다. 500m 이상인 오르막 구간에서 100km/h로 주행 시 초기속도의 25% 내에서 감속하는 것이 연료소모량이 적은 것으로 분석되었다. 에코드라이빙과 cruise control 주행을 비교분석한 결과 에코드라이빙의 연료소모량

이 cruise control보다 평균 33.9% 절감되는 것으로 분석되었다[9]. 그러나 다양한 종단지형을 고려하지 않고 제한적인 가속 및 감속으로 주행방법을 제시한 한계성을 가진다.

Staubach 외(2014)는 eco-driving support system을 평가하였다. 이 시스템은 운전자에게 연료 효율적인 기어변속, 가속, 감속하도록 권고하였다. eco-driving support system을 통해 연료소모량이 16% 절감되는 것으로 나타났다[10]. 급정지, 급가속 등 운전행태를 개선시켜 연료소모량을 분석하였으나 교통상황 및 도로상황 별 연료 효율적인 운행지원을 고려하지 않은 한계점이 있다.

Cho 외(2013)는 서울춘천고속도로의 내리막구간에서 Fuel Cut 기능을 사용하였을 경우와 사용하지 않은 경우에 대해서 각각 CO₂ 배출량을 산정하여 비교하였다. 연비 개선 운전을 통해 도로전체 평균 연료소모량 및 CO₂ 배출량이 약 8.35% 감소한 것으로 분석되었다[11].

Kamalanathsharma 외(2012)는 하류부의 교차로에서 대기차량, 선행차량, 신호현시, 도로 특성 등을 고려하여 속도를 제어하는 Eco-Cooperative Adaptive Cruise Control(ECACC)를 개발하였다. 신호교차로에서 급정지 및 급가속을 제어하여 차량의 연료소모량을 28% 감축하였다[12].

에코드라이빙 관련 선행 연구 고찰결과 복합적인 종단구간에서 주행 시 가속 및 감속을 어떻게 조절하여 주행하면 연료소모를 저감할 수 있는지에 대한 연구는 미비하였다. 따라서 연료소모량과 온실가스 배출량을 효과적으로 저감하기 위해서는 하류부의 도로지형을 미리 파악하여 도로지형에 적절한 연료 효율적인 제어가 필요하다.

III. 종단지형에 대한 연료 효율적 최적주행전략 모형 개발

1. 시뮬레이션 환경

본 연구에서는 V2V, V2I 통신을 통해 차량이 고

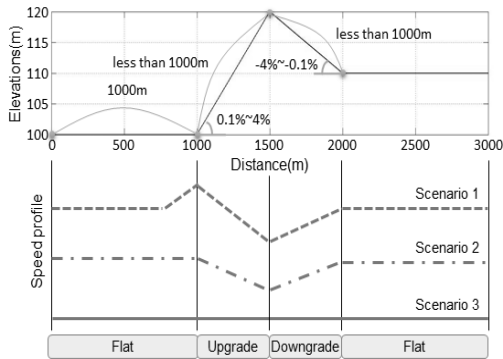
속도로 하류부의 도로지형정보를 미리 수집가능하다고 가정하였다. 종단지형 별 연료소모량을 분석하기 위해 <그림 2>와 같이 하류부의 도로구간을 생성하였다. 설정된 종단경사도의 범위와 종단경사길이의 범위 내에서 무작위로 경사도와 길이를 추출하여 1,020개의 도로지형을 생성하였다. 초기속도는 80km/h이상 110km/h미만으로 설정하였다. <그림 2>와 같이 구간 별 감속, 가속 등 주행모드를 다르게 적용하여 시나리오를 설정하였다. 시나리오 1은 평지 구간에서 <표 1>에서 도출된 가속도로 미리 가속하여 오르막 구간에 진입한 후 감속한다. <표 1>은 경사도별 연료소모량이 최소화되는 최적가속도이다. 최적가속도 모형에서 종속변수(y)는 가속도(m/s²), 독립변수(x)는 속도(km/h)이다[9].

<표 1> 경사도별 최적 가속도 모형
<Table 1> Optimal acceleration model by road grade

Road grade(%)	Optimal acceleration model	R ²
0	$y = -0.007833x + 1.191667$	0.7718
1	$y = -0.007167x + 1.169444$	0.8666
2	$y = -0.007167x + 1.180556$	0.7949
3	$y = -0.007833x + 1.191667$	0.7718
4	$y = -0.007167x + 1.169444$	0.7185

차량이 내리막 구간에서는 가속하며, 평지 구간에서는 초기속도까지 가속한 후 등속으로 주행한다. 시나리오 2는 평지 구간에서 등속, 오르막 구간에서 감속한 후 내리막 구간에서는 가속하는 주행행태이다. 시나리오 3은 모든 구간에서 등속 주행한다. 시나리오 1과 시나리오 2에서 가속 및 감속하는 속도변화량을 초기속도의 1%이상 30%이하로 설정하였다.

시나리오 별 속도변화량을 달리 적용한 속도 프로파일을 CMEM에 적용하여 연료소모량을 산정하였다. 속도 프로파일 별 연료소모량을 비교 분석하여 연료소모량이 최소인 시나리오와 속도변화량을 도출하였다.

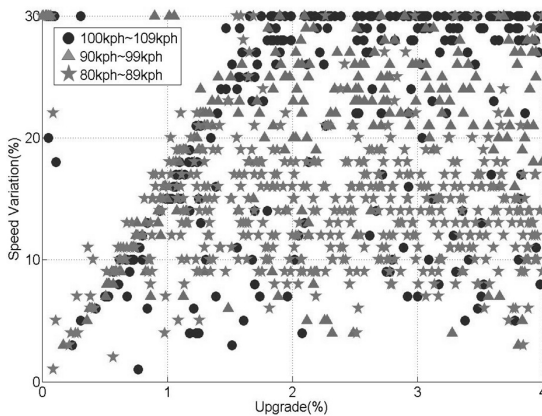


〈그림 2〉 도로지형 및 시나리오
 〈Fig. 2〉 Road topography and scenarios

2. 시뮬레이션 결과

총 1,020개 도로구간에서 시나리오별 연료소모량을 분석한 결과 시나리오 2가 최소 연료소모량으로서 선택된 비율이 86%로 높게 분석되었다.

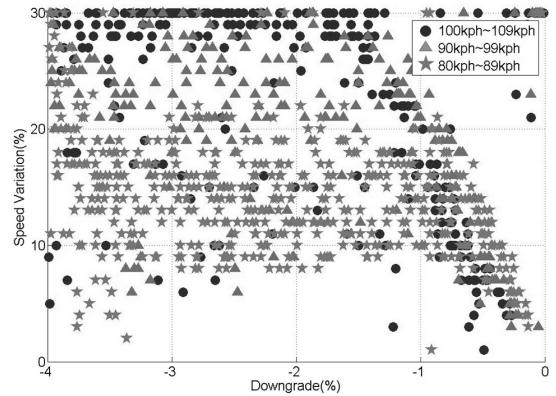
초기속도가 100km/h이상 110km/h미만의 범위에서 오르막 경사도별 연료소모량이 최소인 속도변화량을 분석하고자 하였다. 시나리오 2를 대상으로 초기속도에 따른 오르막 경사별 속도변화량은 <그림 3>과 같다. 그 결과 경사도가 1%미만, 1%이상 1.5%미만, 1.5%이상인 도로지형 각각의 경우, 오르막을 주행 시 초기속도의 15%, 15%에서 25%, 25%에서 30% 범위 내에서 각각 감속 시 연료소모 감축



〈그림 3〉 오르막 경사별 속도변화량
 〈Fig. 3〉 Speed variation by grades (upgrade)

효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

시나리오 2를 대상으로 초기속도에 따른 내리막 경사별 속도변화량은 <그림 4>와 같다. 초기속도가 100km/h이상 110km/h미만의 범위이고 -1%이상 0%미만인 내리막을 주행 시 초기속도의 15%범위 내에서 가속하는 것이 연료소모량이 적었다. 경사도가 -1.5%이상 -1%미만인 도로지형에서는 속도변화량은 15%이상 25%이하, 경사도가 -4%이상 -1.5%미만인 경우 초기속도의 25%에서 30%까지의 범위 내에서 가속 시 연료소모량이 적게 소모되는 것으로 나타났다.



〈그림 4〉 내리막 경사별 속도변화량
 〈Fig. 4〉 Speed variation by grades (downgrade)

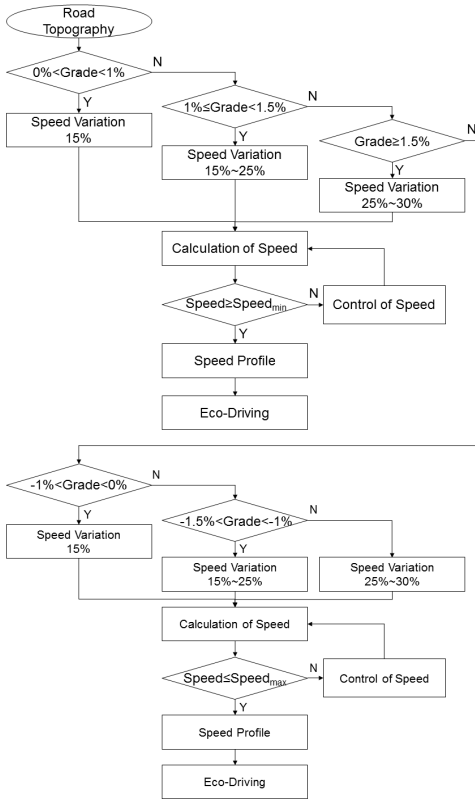
3. 연료 효율적인 최적주행전략 모형

<그림 5>는 초기속도가 100km/h이상 110km/h미만의 범위에서 연료 효율적인 최적주행전략 모형이다.

IV. 검증

1. 데이터 수집

남해고속도로, 남해2지선 고속도로, 중부내륙고속도로, 경부고속도로를 주행하여 데이터를 수집하였다. 중형 휘발유 차량(2011 Kia Forte)에 GPS 수신장비를 장착하여 1초 단위의 속도, 표고, 위치 데이



<그림 5> 최적주행전략 (100km/h~110km/h)
<Fig. 5> Optimized driving strategy (ODS)
(100km/h~110km/h)

터를 수집하였다. 데이터의 대표성을 위해 운전자는 급가속 및 급감속을 최소화하고 주변차량과 유사한 속도로 주행하도록 하였다.

2. 데이터 분석

수집된 데이터를 대상으로 전처리과정을 수행하였다. 터널과 같은 음영지역 통행 시 GPS 데이터의 결측이 발생된다. 데이터가 결측된 부분은 결측 발생 직전의 속도 데이터와 결측 종료 직후의 속도 데이터를 활용하여 결측 보정하였다. GPS 데이터의 결측 보정은 식 (1)과 같다.

$$V_i = V_{t_{i-1}} + \frac{(V_{t_n+1} - V_{t_{i-1}})}{(n+1)} \times i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

여기서, V_i 은 i 번째 결측 데이터의 보정된 속도 (km/h), $V_{t_{i-1}}$ 는 결측 발생 직전의 속도(km/h), V_{t_n+1} 는 결측 종료 직후의 속도(km/h), n 은 연속된 결측 데이터의 수이다.

GPS 수신장비의 수집오류나 noise에 의해 발생되는 일시적인 변동을 보정하기 위해 식(2), (3)을 적용하여 데이터 평활화를 수행하였다[13].

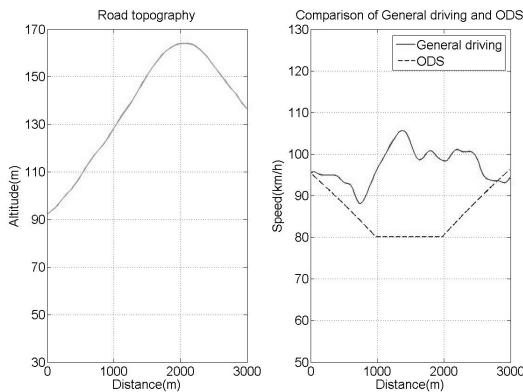
$$V_{sm}(t) = \frac{1}{h} \sum_{s=-h}^h K\left(\frac{s}{h}\right)v(t+s) \quad (2)$$

$$K(x) = \begin{pmatrix} \frac{h^2-1}{h^2}(1-x^2)^2 & (x^2 < 1) \\ 0 & otherwise \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서, V_{sm} 은 평활한 속도(km/h), K 는 시간 t 일 때 가중치, h 는 4이다.

전처리를 수행한 일반 운전자의 속도 프로파일과 최적주행전략에 의해 생성된 속도 프로파일을 분석하였다. 최적주행전략의 속도 프로파일은 다음과 같이 생성하였다. GPS 수신장비에 수집된 도로 지형정보가 <그림 5>와 같이 개발된 최적주행전략 모형에 입력이 되면 경사도를 산정하고 경사에 따라 연료 효율적인 속도변화량을 산정한다. 속도변화량 범위 내에서 가속 및 감속을 하는 속도 프로파일을 생성한다. 속도 프로파일이 최저속도 이상 최고속도 이하의 범위에서 벗어날 경우 속도 프로파일을 다시 생성한다. 최종적으로 생성된 속도 프로파일에 의해 차량은 주행한다.

<그림 6>은 경부고속도로 중 오르막의 경사도는 3.6%, 길이는 약 2km 인 특정 구간이다. 내리막의 경사도는 -3%이며 길이는 약 1km이다. 일반 운전자는 오르막 구간에서 88km/h에서 105.6km/h로 가속하였다가 감속하는 반복적인 주행행태를 보였다. 내리막구간에서는 감속하였다. 최적주행전략의 경우, <그림 6>과 같이 개발된 모형에 의해서 도로경사 별 감속 및 가속을 제어한다. 오르막 구간에서 감속 시 80km/h미만으로 속도가 낮아지지 않도록 제어하였으며 내리막 구간에서는 초기속도까지 가



〈그림 6〉 도로지형과 일반운전과 최적주행전략 간의 속도 비교

〈Fig. 6〉 Road topography and comparison of speed between general driving and optimized driving strategy (ODS)

속하여 주행한다.

각 속도 프로파일을 CMEM에 적용하여 연료소모량을 분석하였다. 분석 결과, 일반 운전자는 오르막 구간에서 약 15km/h 이상 가속하였으며, 오르막과 내리막 구간에서 반복적으로 감속 및 가속하였다. 이로 인해 일반 운전자의 연료소모량은 약 200.8grams 소모되었다. 반면, 최적주행전략은 오르막 구간에서 감속하다가 최저속도인 80km/h로 등속하여 연료소모량이 약 179.5grams 소모되었다. 따라서 최적주행전략의 연료소모량이 일반운전보다 약 11% 절감되는 것으로 분석되었다. 10개 구간에 대한 평균 연료소모량을 분석한 결과, 일반 주행 시 소모된 연료소모량은 평균 164.6grams이며, 최적주행전략에 의해 소모된 연료소모량은 평균 145.3grams로 분석되었다. 최적주행전략의 연료소모량이 약 11.8% 감축효과가 나타났다. 일반주행 시 오르막 구간에서 반복적인 가속 및 감속하거나 지속적인 가속으로 인해 최적주행전략보다 연료소모량이 더 소모된 것으로 판단된다.

V. 결 론

본 연구는 하류부의 도로지형을 고려하여 연료 효율적인 최적주행전략 모형을 개발하였다. 10개의

구간을 추출하여 연료소모량을 비교분석한 결과, 최적주행 시 연료소모량이 평균 약 11.8% 감축하는 것으로 분석되었다. 따라서 하류부의 도로지형을 미리 수집하여 연료 효율적인 최적주행전략을 세워 주행한다면 연료소모량 및 배출량을 효과적으로 감축할 수 있을 뿐만 아니라 사회 경제적 비용도 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

하지만 본 연구에서는 휘발유 승용차에 국한하여 최적주행전략 모형을 개발하였다. 향후 연료, 차종을 고려한 최적주행전략 모형 개발이 필요하다. 또한 추가적인 실차테스트를 수행하여 일반 운전자의 운행패턴에 대한 대표성을 확보해야할 것이다.

REFERENCES

- [1] International Energy Agency, *CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2013 Highlights*, pp.1-143, 2013.
- [2] U.S. Department of Transportation Research and Innovative Technology Administration, *Transforming Transportation through Connectivity, ITS Strategic Research Plan, 2010-2014 Progress Update 2012*, FHWA- JPO-12-019, pp.1-185, 2012.
- [3] U.S. Department of Transportation Research and Innovative Technology Administration, *Applications for the Environment: Real-time Information Synthesis(AERIS)*, Techniques for Evaluating the Environmental Impacts of ITS Deployment, FHWA-JPO-11-142, pp.1-62, 2011.
- [4] Korea Energy Management Corporation, *2015 Energy Statistics Handbook*, pp.1-317, May. 2015.
- [5] Korea Evaluation Institute of Industrial Technology, *Technology Level Evaluation 2013*, Retrieved Jan., 1, 2015, from www.keit.re.kr.
- [6] Ministry of Land, Infrastructure and Transportation, Korea, *Rules about the Road Structure & Facilities Standards*, Retrieved Jun., 1, 2014, <http://www.law.go.kr/main.html>.
- [7] G. Scora and M. Barth, *Comprehensive Modal*

- Emission Model (CMEM), version 3.01, User's Guide(2006)*, Retrieved Jan., 1, 2014, from <http://www.cert.ucr.edu/cmeme>.
- [8] M. Barth, F. An, T. Younglove, G. Scora, C. Levine, M. Roass and T. Wenzel, "Development of a comprehensive modal emissions model," *Final Report, NCHRP Project 25-11*, pp.1-213, 2000.
- [9] J. Choi and S. Bae, "Development of a fuel-efficient driving method based on slope and length of uphill freeway section," *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol. 14, no. 1, pp.77-84, Feb. 2015.
- [10] M. Staubach, M. Schebitz, F. Koster and D. Kuck, "Evaluation of an eco-driving support system," *Transportation Research Part F 27*, pp.11-21, Nov. 2014.
- [11] S. H. Cho, G. O. Park, D. W. Lee, Y. T. Lee and S. W. Lee, "An experimental study about reduction of CO₂ emissions by using the downhill fuel cut function," *The Korea Society of Automotive Engineers Annual Meeting*, pp.547-552. May. 2013.
- [12] R. K. Kamalanathsharma and H. Rakha, "Agent-based modeling of eco-cooperative adaptive cruise control systems in the vicinity of intersections," *15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp.840-845, Sep. 2012.
- [13] P. D. Haan and M. Keller, "Real-world driving cycles for emission measurement: ARTEMIS and Swiss Cycles", *Final Report, Swiss agency for environment, forests and landscape (SAEFL)*, 2011.

저자소개



배 상 훈 (Bae, Sang-Hoon)

2002년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 교수 (공간정보시스템공학과)
 1995년 7월 ~ 2002년 3월 : 한국교통연구원 ITS 연구센터 연구위원
 1995년 5월 : 미국 Virginia Tech. 박사 (ITS 전공)
 e-mail : sbae@pknu.ac.kr



최 지 은 (Choi, Ji-Eun)

2014년 2월 : 부경대학교 박사수료 (ITS전공)
 2009년 2월 ~ 2011년 2월 : 부경대학교 석사 (ITS전공)
 e-mail : 620jieun@gmail.com