

# 경사도 에너지 소모량을 고려한 자전거 경로 선택 모형 개발

## Development of Bicyclists' Route Choice Model Considering Slope Gradient

이 규 진\* · 류 인 곤\*\*

\* 주저자 및 교신저자 : 아주대학교 TOD기반지속가능도시교통연구센터 연구교수

\*\* 공저자 : 아주대학교 TOD기반지속가능도시교통연구센터 연구교수

Kyu-Jin Lee\* · Ingon Ryu\*\*

\* TOD-based Sustainable Urban/Transportation Research Center, Univ. of Ajou

\*\* TOD-based Sustainable Urban/Transportation Research Center, Univ. of Ajou

† Corresponding author : Kyu-Jin Lee, transjin2970@gmail.com

Vol.19 No.3(2020)

June, 2020

pp.62~74

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

<https://doi.org/10.12815/kits.2020.19.3.62>

2020.19.3.62

Received 7 January 2020

Revised 3 February 2020

Accepted 19 May 2020

© 2020. The Korea Institute of  
Intelligent Transport Systems. All  
rights reserved.

### 요 약

중앙정부 및 지방자치단체는 자전거 이용 활성화를 위해 자전거 도로 및 공공 자전거 대여 소의 인프라를 지속적으로 확충하고 있다. 이와 같은 인프라 공급과 더불어 이용 편의성 제고 정책을 병행한다면, 자전거 이용은 더욱 활성화될 수 있다. 본 연구는 자전거 이용 편의 측면에서 자전거 경사를 고려한 경로 안내 알고리즘을 제안하고 있다. 구체적으로는 경사도와 심장 박동수 측정을 통해, 경사도를 고려한 자전거 주행자의 에너지 소모량 추정 모형을 구축하였고, 경사도에 기인한 에너지 소모량을 최소화할 수 있는 자전거 경로 선택 모형을 제안하고 있다. 연구결과, 평지 구간에서는 주행거리와 속도가 증가할수록 에너지 소모량은 증가하며, 내리막 구간에서는 경사도가 크고 속도가 높을수록 더 적은 에너지가 소요되는 것으로 확인되었다. 본 모형을 모의실험 구간에 적용하여 에너지 소모량을 추정한 결과, 본 연구모형의 RMSE는 경사도가 미 반영된 모형보다 41% 우수하였다. 본 연구결과는 자전거 주행로의 종단과 횡단을 함께 고려한 자전거 인프라 계획과 자전거 경로 안내 시스템의 알고리즘에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어 : 자전거, 경사도, 심장 박동수, 에너지 소모량, 자전거 주행 저항

### ABSTRACT

Although the government and local governments devote efforts to activate bicycles, they only access to the supply infrastructure such as bike lanes and the public bicycle rental service centers without considering the measures to overcome the geographical constraints of slope. Therefore, this study constructs bicyclist's energy consumption estimation model through experimental methods of slope gradient and heart rate measurement and suggest the bicycle route choice model which could minimize the energy by the slope gradient. After calculating the RMSE of the estimated energy consumption by applying this model to the simulation section, it is confirmed to be 41% better than the model which does not reflect slope gradient. The results of this study are expected to be applied to the bicycle infrastructure planning that considers both longitude and transverse of bike lanes and the algorithm of bicycle route guidance system in the future.

Key words : Bicycle, Slope, Heart rate, Energy consumption, Bicycle driving resistance

## I. 서 론

### 1. 연구 배경 및 목적

자전거 이용 활성화는 교통 혼잡을 완화하고 에너지 절약과 온실가스 배출을 감소시키는데 기여한다. 이에 따라 중앙정부 및 지방자치단체는 자전거 이용 및 자전거 산업 활성화를 위한 법률적 보완이나 공공자전거 운영센터 설치와 같은 일련의 정책을 지속 추진하고 있다.

하지만 교통수단으로서 자전거 역할을 증대하기 위해서는 도심지의 이용자 및 지형적 특성을 고려한 인프라 확충 및 정책이 필요하다. 특히 오르내림이 심한 우리나라의 지형 특성을 고려할 때 경사를 극복하기 위한 자전거 이용 정책 및 기술이 요구된다. 자전거는 도보보다 경사에 더 민감하고, 경사로 인한 주행시간이 길어질수록 자전거의 수단 분담률은 도보보다 더 급격히 감소한다(Rodríguez and Joo, 2004)는 사실은 우리나라의 자전거 수단분담률이 담보하고 있는 현상에 시사하는 바가 크다.

한편 지형적 경사 특성을 극복하기 위한 방안으로 전기 자전거의 보급을 고려할 수 있으나 일부 전기 자전거만이 자전거 전용도로의 진입이 가능한 실정이고, 고속 주행에 따른 조향 안전성 등 문제로 소비자의 수용성이 일반 자전거에 비해 낮은 상황이다.

본 연구는 자전거 주행 경사도를 극복할 수 있는 대안으로 경사도를 고려한 일반 자전거의 경로 선택 모형을 개발하였으며, 이를 통해 자전거 도로 인프라의 효율적 활용 및 자전거 이용 편의 증진에 기여하는 것을 목적으로 한다. 구체적으로 자전거 경로 선택의 목적함수 종속변수로 자전거 주행자의 에너지 소모량을 설정하고, 주행거리와 경사도가 에너지 소모량에 미치는 영향을 통계적으로 분석하였다. 즉 자전거 주행거리와 경사도를 고려한 자전거 에너지 소모량 추정 모형을 구축하고, 경사도에 따른 에너지 소모량을 최소화할 수 있는 자전거 경로 선택 모형을 제안하였다.

본 연구는 자전거 도로 이용의 체력적 저항을 최소화할 수 있는 경로 안내에 기여할 수 있다는 점에서 자전거 이용자에게 유용할 뿐만 아니라, 자전거 인프라의 획일적 공급 중심 정책을 보완하고 자전거 도로 설계 및 공공 자전거 대여소의 위치 선정 시 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 2. 연구 내용 및 방법

본 연구의 주 내용은 크게 두 가지로 정리된다. 첫째, 경사도와 자전거 주행 상의 에너지 소모량 간의 관련성을 실험적·통계적으로 규명하는 것이며, 둘째, 경사도가 고려된 자전거 이용자의 에너지 소모량 추정 모형을 기반으로, 자전거 이용의 에너지 소모량을 최소화할 수 있는 자전거 경로 선택 모형을 구축하는 것이다.

본 연구의 접근방법은 1초 단위로 주행거리 및 경사도를 측정할 수 있는 GPS 장비 및 심장 박동수 측정기를 실험자에게 부착한 후 자전거를 실제 주행한 후, 주행 구간에서의 경사도와 심장 박동수 등의 분석 자료를 수집하였다. 이후 GPS 장비로 수집되는 고도 정보는 오 측정될 수 있기 때문에 ‘GPS Visualizer’를 활용하여 보정된 고도 및 경사 자료를 확보하였고, Park(2003)이 구축한 심장 박동수와 에너지 소비량 간의 관계식을 이용하여 수집된 심장 박동수를 에너지 소모량으로 변환하였다.

이후 자전거 주행 구간을 평지, 오르막, 내리막 구간으로 분류한 후, 가공된 각종 경사도 및 주행거리가

1) 18년 3월부터 자전거 이용 활성화에 관한 법률 개정에 따라 페달과 전동기의 동시 동력으로 움직이며, 전동기만으로 움직이지 않으며(페달보조방식), 25km/h 이상으로 움직이는 경우 전동기가 작동하지 않으며, 전체 중량 30kg 미만일 것의 조건을 만족하는 경우에만 자전거 도로 진입 가능

자전거 주행자의 에너지 소모량에 미치는 영향을 분석하였으며, 최종적으로 자전거 주행에 있어 경사도가 고려된 에너지 소모량 추정 모형을 구축하였다.

## II. 관련문헌 검토

자전거에 관한 사회적 관심이 높아지면서 최근에 자전거 이용특성을 분석하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 우선 자전거 이용수요에 영향을 미치는 인자 중 경사도와 관계된 연구를 살펴보면, LeClerc (2002)는 도시의 자전거 네트워크와 자전거 통근 통행량과의 관계를 통계 분석하였다. 제안된 모형에서는 경사도가 의미 있는 변수로 고려되고 있으며, 경사도가 높을수록 자전거 통행 가능성이 감소함을 밝히고 있다. Rodríguez and Joo(2004)는 설문조사를 통해 물리적 환경특성이 비동력 교통수단 선택에 미치는 영향을 로짓모형, 네스티드 로짓모형, HEV모형을 통해 해석하였다. 모든 모형에서 비동력 교통수단의 분담률은 경사도와 반비례 관계이며, 자전거가 도보보다 경사에 더 민감하다는 결과를 제시하고 있다. Kim (2011)은 부산광역시의 지역별 자전거 이용여건과 국가교통 DB 자료에서 조사된 자전거 분담률 간의 관계를 분석하였으며, 자전거 경사도가 1도 증가할 때마다 자전거 분담률은 0.11% 감소하는 결과를 제시하고 있다. Jain and Tiwari(2011)는 교통 특성(속도, 버스의 존재)과 토지이용(복합 토지이용 정도, 개발 밀도, 길가 노점상)에 대해 고정 이용자와 잠재적 이용자의 자전거 이용 인지도를 평가한 결과, 잠재적 이용자가 경사도에 민감한 행태를 보였다. Sa and Lee(2018)는 서울시의 공공자전거 이용에 영향을 미치는 물리적 환경요인을 분석하였는데 대여소 반경 100m 이내의 평균 경사도가 낮을수록 공공자전거 대여와 반납이 모두 증가하는 것을 발견하였다.

경사도를 반영해 자전거 경로 선택을 설명하는 선행연구를 검토한 결과, 주로 정성적 또는 거시적으로 접근하고 있었다. Lee(2011)는 목적지까지의 신속한 이동을 요구하는 출·퇴근용 자전거 도로는 단순하게 이동 거리를 기준으로 노선을 선정하기보다는 횡단보도에서의 대기시간과 경사에 의한 속도 증감을 고려한 최단 시간을 기준으로 노선이 선정되어야 할 것을 제안하고 있었다. Charlton et al.(2011)은 San Francisco에서 개발한 Cycle Tracks라는 어플리케이션 자료를 활용하여 자전거 경로선택 모형을 개발하였다. 그 결과 여성이 남성보다 오르막 경사도를 기피하였으며, 모든 자전거 이용자가 기타 통행목적보다 통근통행에서 오르막 경사를 기피하였다. Kim et al.(2011)는 창원시청 통근자 대상의 개별 면접 조사를 통해 자전거 통근자의 경로선택 유형을 분류하였다. 출근이라는 시간 제약에도 불구하고 최단 경로를 이용하지 않는 비율이 54.3%에 이르며, 최단 경로가 절대적인 자전거 주행 선호 환경이 아님을 제시하고 있다. Broach et al.(2011)는 자전거 도로가 설치된 도로, 자전거 도로가 분리된 도로, 평균 2~6% 또는 그 이상의 오르막 경사도를 가진 주행로의 비율, 경로 길이 등이 자전거 경로선택에 영향을 미치는지를 분석하였다. Baik(2012)은 항공 LiDAR 데이터를 활용하여 GIS의 공간연산 기능을 이용하여 수평거리와 수직거리로부터 퍼센트로 표시된 경사도를 계산하고, 이러한 경사도를 자전거 도로의 최적 경로 선정을 위한 비용 요소로서 고려하는 방법을 제시하고 있다. Zimmermann et al.(2017)은 Eugene시의 GPS 관측 데이터를 기반으로 재귀 로짓(RL; Recursive Logit) 모형을 구축하였는데 링크의 효용을 계산할 때 평균 기울기를 변수로 포함시켜 분석을 수행하였다.

그 외 자전거 주행성 평가와 서비스 수준 산정 시 경사도를 반영하고자 시도한 선행연구들이 있었다. Birk et al.(2010)는 도로상의 평균 경사도를 포함한 자전거 도로의 질적 수준 평가모형을 제시하고 있으며, Cho (2010)는 종단경사와 같은 자전거의 주행 저항을 고려한 서비스 수준 산정방안을 제시하였다. Chung et al.(2011)는 설문조사 자료를 기반으로 자전거 도로의 투자 우선순위를 고려하기 위한 항목을 제시하고 있는데, 그 중 편리성 부문에서는 낮은 경사도가 가장 영향력 높은 항목인 것으로 나타났다. 또한 국내의 자전거

도로 설계 가이드로 이용되고 있는 MOPAS and MLTM(2010)에서는 중단경사별로 오르막 도로 설치 제한 길이로서 포장도로 구간에서는 5%, 비포장도로 구간에서는 3%를 제시하여 경사도를 고려한 자전거 도로 설계 방법을 규정하였다. Baik et al.(2011)는 DTM(Digital Terrain Model)<sup>2)</sup> 자료를 이용하여 자전거 도로의 경사도를 확인하였고, 정성적 평가를 통해 경사도가 7% 이상인 자전거 도로에 대해서는 자전거 리프트 도입을 제안하여 중단경사가 고려된 자전거 도로의 노선 계획을 제시하였다. Park(2011)는 안전하고 편리한 자전거 이용 차원에서 오르막 경사 정보, 최단 노선 정보, 편의시설 위치 정보 등 다양한 자전거 관련 정보의 공간적인 시각화 및 웹 기반 서비스가 이루어져야 한다고 제시하고 있다.

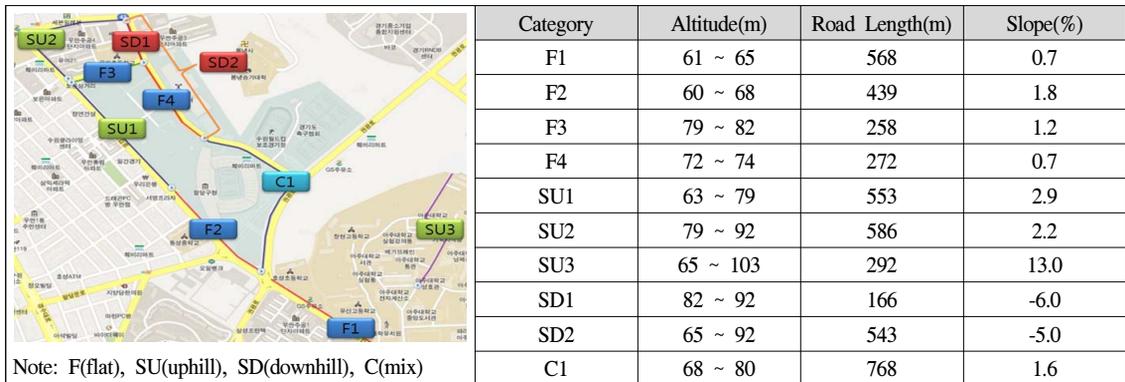
이와 같이 선행연구에서는 경사도가 자전거 이용과 경로선택에서 중요한 변인인 것을 확인하고 있으나, 대부분의 연구 동향이 현상적이고 정성적인 측면 중심으로 접근하고 있다. 본 연구는 실제 주행 실험 데이터에 기반한 실증적 접근을 시도한다는 점에서 선행연구와 큰 차별성이 있다. 또한 이를 에너지 소모량과 연계시켜, 경사도와 자전거 이용자의 에너지 소모량 간의 관계를 실증적으로 규명하고, 자전거 주행에 있어 경사도와 주행거리를 고려할 수 있는 에너지 소모량의 비용함수를 구축하여 이를 통해 자전거 경로선택 모형의 구축을 시도한 점에서 차이점이 있다.

### Ⅲ. 조사 설계 및 자료 수집

#### 1. 조사 설계

본 연구의 자료 수집을 위한 공간적 범위는 다양한 경사도와 주행거리가 수집될 수 있도록 설정하였으며, 자료 수집구간은 -6%~13%의 경사도와 166m~768m 도로 길이의 특징을 나타내고 있는 수원시 월드컵 경기장 인근 도로로 설정하였다.

자료 수집의 시간적 범위는 심장 박동수에 영향을 미칠 수 있는 기온과 날씨의 영향을 최소화할 수 있는 맑은 날로 설정하였으며, 연속 주행 등에 따른 심장박동수(이하, 심박수) 변화의 외생 요인을 배제하기 위해 실험자의 심박수가 80~90bpm로 안정되었을 때 주행 실험을 진행하였다. 다만 본 연구에서는 실험자 간 심장박동수 차이 등 개인적 외생 영향을 배제하기 위해 단일의 실험자로 국한하였으나, 향후 경사도의 체력적 영향에 대해 일반화된 관계식을 정립하기 위해서는 다수 실험자 대상의 설계가 필요할 것으로 판단된다.



<Fig. 1> Topographical specifications of bicycle driving route

2) 지형의 기복을 컴퓨터가 처리할 수 있는 형태로 표현한 것

## 2. 자료 수집

### 1) 자료 수집 장비

본 연구는 자전거 주행의 경사 저항도를 대변할 에너지 소비량 변수로서 심장 박동수를 선택하였다. 심장 박동수는 정서 조건, 환경적 조건, 훈련 상태 등과 같은 여러 요인들에 의해 영향을 받기 때문에 다소 한계성을 가지고 있지만, 에너지 소비를 추정하는데 활용될 수 있으며, 가장 쉽게 측정할 수 있다(Lee, 2009). 본 연구에서는 심장 박동수를 고려하여 에너지 소비량을 추정하고 있는 Park(2003)의 관계식을 이용하여 본 연구에서 수집된 심장 박동수를 에너지 소비량으로 변환하였다.

해당 연구에서 활용한 심장 박동수와 에너지 소모량 간의 관계식은 다음과 같으며, 해당 회귀식의 적합도를 나타내는 결정계수는 0.814이다.

$$\text{에너지소모량}(kcal/min) = -8,477.604 + \text{체중}(kg) \times 6.481 + \text{심박수}(bpm) \times 51.426 + \text{체중}(kg) \times \text{심박수}(bpm) \times 1.018 \dots\dots\dots (1)$$

심장 박동수와 경사도의 수집을 위해 심장 박동수와 위치정보 수집장비인 Polar(RS800CX G3)와 위치정보 수집 장비인 Ascen(GPS850)을 이용하였다. Polar는 국가 대표선수의 에너지 소모 측정과 관리에 활용되는 등 정확성을 인정받고 있으며, 태권도 품새에 따른 심장 박동수, 운동 강도, 그리고 에너지 소비량을 산출한 Jung(2005) 등 다양한 연구에서 활용되고 있다.



<Fig. 2> Data collection equipments

<Table 1> Specifications of data collection device

Device	Specifications
Heart Rate Storage Device (Polar)	Heart Rate Measuring: 15-240 Accuracy of Heart Rate: ±1% or 1bpm
Heart Rate Measuring Device (Polar)	Operation Temperature: -10~50℃
GPS Data Collection Device (Ascen)	GPS Chip: MT3329, 66CH Sensor: E-Compass, G-Sensor, Barometer

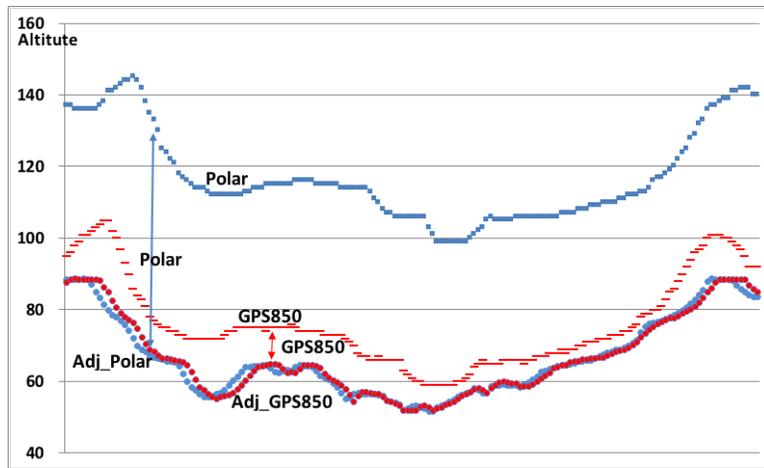
본 연구에서 활용한 자료 수집 장비 중 Polar와 Ascen은 <Table 2>의 자료를 수집할 수 있으며, 본 연구에서는 Polar로 수집된 1초 단위의 심장 박동수, Ascen으로 수집된 1초 단위의 주행거리 및 고도 자료를 분석에 활용하였다.

본 연구에서 활용한 두 수집 장비는 모두 좌표 정보가 수집되기 때문에 주행거리 및 경사 자료의 가공이 가능하다. 최근 GPS 장비는 수평 위치 정보는 정확한 것으로 보고되고 있으나, 고도와 같은 수직 위치 정보는 아직 신뢰도가 낮은 것으로 알려져 있다. 실제 두 장비로 수집된 주행거리는 서로 일치하는 것으로 나타났지만, 고도 정보는 <Fig. 3>과 같이 두 장비 간 차이가 있는 것으로 나타났다. 이에 따라 두 장비로 수집된 고도 정보는 GPS Visualizer<sup>3)</sup>를 통해 사후 보정하였다. 이때 Ascen장비로 수집된 고도는 GPS Visualizer으로 보정된

3) GPS Visualizer는 알고리즘을 통해 DEM(digital elevation model) 데이터베이스로부터 측정 시 빠지거나 오 측정된 고도데이터를 추가로 가져와서 고도 및 경사도 등을 보정할 수 있다.(<http://www.gpsvisualizer.com>)

<Table 2> Types and units of data

Device	Types	Units
Polar	Time	sec
	Heart Rate	bpm
	Pace	min/km
	Altitude	m
	Distance	km
Ascen	Time	sec
	Latitude, Longitude	°
	Altitude	m
	Speed	km/h



<Fig. 3> Collected and calibrated altitude by Ascen and Polar

고도와 오차율이 8%로써, Polar 장비의 오차율인 44%보다 낮은 것으로 나타났기 때문에 본 연구에서는 Ascen 장비로 측정된 고도 기준으로 이를 보정한 값을 활용하였으며, 이를 이용하여 경사도를 산정하였다.

## 2) 자료 수집 결과

본 연구의 실험장비로 수집한 자료는 주행속도(Speed), 경사도(Slope), 주행거리(T.D.), 심장 박동수(H.R.)이다. 심장 박동수는 주행지점의 경사도가 아닌 이전에 주행한 지형적 특성의 영향을 받을 것으로 판단하여, 이전 5초, 15초, 30초 동안의 평균 경사도(Slope\_A), 누적 경사도(Slope\_S), 최대 경사도(Slope\_X), 최소 경사도(Slope\_N) 자료를 가공하였으며, 그 외 누적 주행거리(A.T.D.), 심장 박동수와 자전거 주행자의 신체 특성에 대응하는 에너지 소모량(E.C.), 누적 에너지 소모량(A.E.C)의 자료를 가공하였다.

수집한 자료의 샘플수는 실험구간의 22회 반복 주행을 의한 총 2,846개이며, 경사도 유형별로 자전거 주행의 에너지 소모량에 미치는 영향 요소와 그 정도가 다를 것으로 전제하고, 경사도 유형을 기준으로 수집자료를 분류하였다. 그 결과, 평지 구간(Flat)은 831개, 오르막 구간(Uphill)은 1,377개, 내리막 구간(Downhill)은 638개로 분류되었다. 본 연구는 특히 오르막 구간이 자전거 주행 저항에 미치는 영향의 규명에 목적이 있기 때

문에 오르막 구간 중심으로 실험을 설계하였다.

평지 구간의 평균 주행속도는 6.68km/h, 이전 5초 주행구간의 평균 경사도는 0.41%, 누적 경사도는 3.46%, 최대 경사도는 1.15%, 최소 경사도는 -0.2%로 나타났으며, 평균 주행거리는 1.85km, 평균 심장 박동수는 118bpm, 평균 에너지 소모량은 0.12kcal로 나타났다.

오르막 구간의 평균 주행속도는 11.1km/h로써 평지 구간보다 높은 것으로 나타났으며, 이는 오르막 구간에서의 탄력 주행에 따른 현상으로 이해된다. 특히 본 실험은 평지 구간에서 실험이 시작하고 종료됨에 따른 가속 때문에 평지 구간의 주행속도가 가장 낮게 조사된 것으로 판단된다. 오르막 구간의 평균 경사도는 6.05%, 평균 심장 박동수는 134bpm, 에너지 소모량은 0.15kcal로 조사되었다.

내리막 구간의 평균 주행속도는 21km/h, 평균 경사도는 -4.28%, 5초 이전의 평균 경사도는 -4.02%, 누적 경사도는 -18.76%, 최대 경사도는 -2.7%, 최소 경사도는 -5.52%이며, 평균 심장 박동수는 107bpm, 평균 에너지 소모량은 0.09kcal로 조사되었다.

<Table 3> Descriptive data statistics

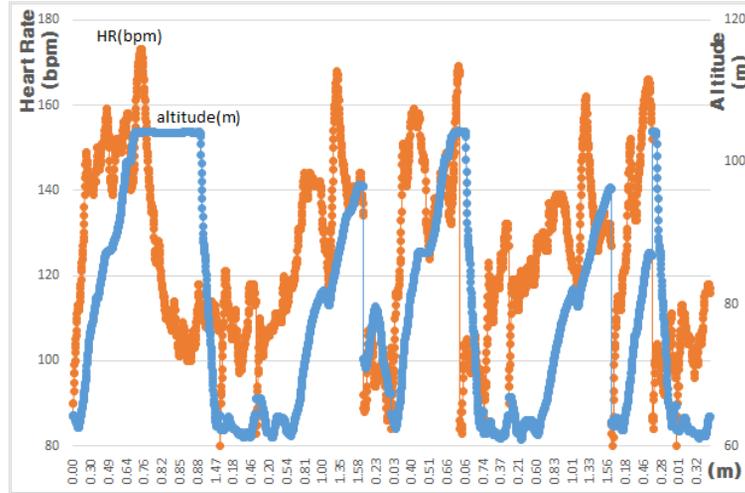
Variables	Unit	All			Flat			Uphill			Downhill		
		ave.	std.	N.	ave.	std.	N.	ave.	std.	N.	ave.	std.	N.
Speed	km/h	11.10	4.68	2,846	6.68	6.54	831	11.1	4.68	1,377	21.00	8.44	638
Slope	%	6.05	3.36		0.00	0.00		6.05	3.36		-4.28	2.84	
Slope_A5	%	5.69	3.06		0.41	1.53		5.69	3.06		-4.02	2.76	
Slope_S5	%	26.95	16.30		3.46	10.14		26.95	16.3		-18.76	14.52	
Slope_X5	%	7.96	4.00		1.15	3.11		7.96	4		-2.70	2.68	
Slope_N5	%	3.66	2.66		-0.20	0.85		3.66	2.66		-5.52	3.15	
Slope_A15	%	5.02	3.30		0.96	2.21		5.02	3.3		-3.39	2.87	
Slope_S15	%	75.37	49.43		14.35	33.16		75.37	49.43		-50.04	42.88	
Slope_X15	%	9.11	4.45		3.42	5.18		9.11	4.45		-0.55	2.68	
Slope_N15	%	1.77	3.13		-0.62	1.53		1.77	3.13		-6.61	3.61	
Slope_A30	%	4.33	3.38		1.39	2.79		4.33	3.38		-2.48	3.14	
Slope_S30	%	129.28	101.97		41.56	84.00		129.28	101.97		-72.06	93.54	
Slope_X30	%	9.85	4.65		5.26	6.29		9.85	4.65		1.67	3.96	
Slope_N30	%	0.13	3.60		-1.33	2.32		0.13	3.6		-7.21	3.87	
T.D.	m	3.34	2.25		1.85	1.81		3.08	1.29		5.83	2.34	
A.T.D.	km	2.13	1.23		0.56	0.46		2.13	1.23		1.82	1.08	
H.R.	bpm	134.35	16.29		118.53	18.99		134.35	16.29		107.38	9.52	
E.C.	Kcal	0.15	0.03	0.12	0.04	0.15	0.03	0.09	0.02				
A.E.C.	Kcal	105.50	59.85	50.76	27.23	105.5	59.85	30.45	17.12				

Note: Slope\_A5=Average Slope for 5 seconds, Slope\_S=Accumulate Slope, Slope\_X=Max Slope, Slope\_N=Min Slope, T.D.=Travel Distance, A.T.D.=Accumulated Travel Distance, H.R.=Heart Rate, E.C.=Energy Consumption, A.E.C.=Accumulate Energy Consumption

## IV. 분석결과

### 1. 경사유형별 자전거 주행의 에너지 소모량에 미치는 영향 요소

본 연구의 주요 수집 자료인 주행거리, 고도변화인 경사도, 심장 박동수의 관계를 도식한 결과는 <Fig. 4>와 같다. 그림과 같이 고도의 증감인 경사도에 따라 심장 박동수의 변화가 발생하고 있는 것을 확인할 수 있다.



<Fig. 4> Comparison of altitude and heart rate by travel distance

연구결과의 해석 및 적용의 용이성 측면에서, 본 연구는 선행 연구결과의 관계식을 이용하여 심장 박동수를 에너지 소모량으로 변환하였다. 그리고 각 경사도 유형별로 경사도 등의 변수와 에너지 소모량·누적 에너지 소모량 간의 관계를 분석하였다.

그 결과 평지 구간의 누적 주행거리와 누적 에너지 소모량 간 상관계수는 0.968로 분석되어, 평지 구간에서 자전거 주행의 에너지 소모량은 주행거리와 직접적인 인과관계가 있는 것을 확인하였다. 그리고 주행속

<Table 4> Results of Correlation analysis

	Flat		Uphill		Downhill	
	E.C	A.E.C	E.C	A.E.C	E.C	A.E.C
Speed	-.140(**)	.471(**)	-.392(**)	-0.009	-.246(**)	.100(*)
Slope			.377(**)	-.095(**)	.190(**)	0.030
Slope_A5	.312(**)	-0.040	.460(**)	-.084(**)	.236(**)	0.021
Slope_S5	.393(**)	-0.025	.491(**)	-.074(**)	.263(**)	0.019
Slope_X5	.309(**)	-0.026	.453(**)	-.123(**)	.217(**)	0.016
Slope_N5	.097(**)	-.090(**)	.394(**)	0.003	.237(**)	0.040
Slope_A15	.520(**)	-0.001	.566(**)	-.074(**)	.308(**)	0.050
Slope_S15	.520(**)	-0.001	.566(**)	-.074(**)	.296(**)	0.020
Slope_X15	.534(**)	0.015	.483(**)	-.116(**)	.242(**)	.089(*)
Slope_N15	.242(**)	-.223(**)	.506(**)	0.039	.266(**)	0.030
Slope_A30	.481(**)	-0.047	.626(**)	-.055(*)	.325(**)	0.071
Slope_S30	.481(**)	-0.042	.629(**)	-0.045	.313(**)	0.028
Slope_X30	.643(**)	0.029	.538(**)	-.133(**)	.200(**)	.194(**)
Slope_N30	.401(**)	-.375(**)	.478(**)	.077(**)	.284(**)	-0.019
T.D	-.135(**)	.456(**)	-.388(**)	0.006	-.237(**)	.102(*)
A.T.D	-.129(**)	.968(**)	-.118(**)	.999(**)	-0.063	.996(**)

Note1: \*significant level at p<0.1, \*\*significant level at p<0.05

Note2: Slope\_A5=Average Slope for last 5 seconds, Slope\_S=Accumulate Slope, Slope\_X=Max Slope, Slope\_N=Min Slope, T.D.=Travel Distance, A.T.D.=Accumulated Travel Distance, H.R.=Heart Rate, E.C.=Energy Consumption, A.E.C.=Accumulate Energy Consumption

도 또한 에너지 소모량과의 상관계수가 0.471로 분석되어, 자전거의 높은 주행속도를 유지하기 위해 더 많은 에너지가 소모된다는 일반적 상식과 일치하는 결과를 나타내었다.

오르막 구간은 경사도가 높을수록 주행속도는 낮게 나타났으며, 주행지점의 경사도보다는 이전 30초간 주행구간의 누적 경사도가 에너지 소모량과의 상관성( $r=0.629$ )이 더 높은 것으로 나타났다. 이는 오르막 구간에서의 등판거리가 길수록 자전거 이용자의 에너지 소모량에 지속적이면서 많은 영향을 미치는 것을 의미하며, 자전거 도로 오르막 구간의 주행거리를 최소화한 자전거 인프라 계획의 필요성을 시사한다.

내리막 구간은 내리막 경사가 클수록 페달 운동 없이 주행속도는 빨라지므로 더 적은 에너지 소모량이 소요되는 것으로 나타났다. 누적 에너지 소모량의 경우 이전 30초 주행 구간의 최대 경사도가 클수록 에너지 소모량이 많은 것으로 확인되었다( $r=0.194$ ). 이는 자전거 도로에서 내리막 구간이 다수 존재하더라도 오르막 구간이 일부 포함되어 있다면 자전거 주행자에게는 더 많은 에너지 소모량이 요구되기 때문에, 평지의 자전거 도로 설계가 자전거 이용 편의에 유리할 것으로 판단된다.

## 2. 경사유형별 자전거 주행의 에너지 소모량 추정 모형

자전거 주행로의 경사도 유형별로 에너지 소모량과 누적 에너지 소모량의 영향 인자를 분석하였으며, 이를 기반으로 에너지 소모량 추정 모형을 구축하였다.

평지 구간은 자전거 주행 1초당 0.12kcal의 에너지가 소모되며, 주행 구간의 총 에너지 소모량은 누적 주행거리와 주행속도의 양의 영향을 받는 것으로 나타났다. 평지 구간에서 적용될 수 있는 자전거 주행의 누적 에너지 소모량 추정 모형의 적합도( $R^2$ )는 0.938이며, 주행속도 20km/h로 1시간 자전거 주행 시 760kcal가 소모되는 것으로 나타났다.

오르막 구간은 직전 주행 구간의 여러 경사도 중 30초 이전 주행 구간의 평균 경사도가 가장 유의한 변수이며, 주행지점에서의 에너지 소모량 추정 모형의 적합도( $R^2$ )는 0.392인 것으로 나타났다. 그리고 1시간 주행 시 974kcal가 소모되어 평지보다 28%의 에너지가 더 소모되는 것으로 분석되었으며, 주행거리에 대한 에너지 소모량의 영향력 또한 오르막 구간이 평지와 내리막 구간보다 높은 것으로 확인되었다.

내리막 구간은 경사도가 크고 속도가 높을수록 적은 에너지 소모량이 소요되는 것으로 확인되었으며, 총

<Table 5> Regression model for energy consumption of bicycle rider

	Flat						Uphill						Downhill					
	E.C			A.E.C			E.C			A.E.C			E.C			A.E.C		
	Coef.	S.E	p	Coef.	S.E	p	Coef.	S.E	p	Coef.	S.E	p	Coef.	S.E	p	Coef.	S.E	p
Con	0.120			18.16	0.391	0.000	0.123	0.001	0.000	2.227	0.143	0.000	0.104	0.002	0.000	1.548	0.110	0.000
Speed				0.078	0.041	0.056							-0.0003	0.000	0.002			
Slope_A30							0.006	0.000	0.000				0.002	0.000	0.000			
Slope_X30																0.14	0.014	0.000
A.T.D				37.10	0.584	0.000				48.57	0.058	0.000				15.75	0.053	0.000
F	-			6,269 (p<0.00)			884 (p<0.00)			696,663 (p<0.00)			42 (p<0.00)			46,542 (p<0.00)		
R <sup>2</sup>	-			0.938			0.392			0.998			0.117			0.993		

Note: Slope\_A30=Average Slope for last 30 seconds, Slope\_X30=Max Slope for last 30 seconds, A.T.D.=Accumulated Travel Distance, E.C.=Energy Consumption, A.E.C.=Accumulate Energy Consumption

누적 에너지 소모량 추정 모형은 이전 30초 주행 구간의 최대 경사도와 누적 주행거리 변수가 설명변수로 반영되며, 해당 모형의 적합도( $R^2$ )는 0.993인 것으로 나타났다. 그리고 1시간 주행 시 312kcal가 소모되어 오르막 구간 소요 에너지의 약 32%가 소요되는 것으로 분석되었다.

### 3. 경사도를 고려한 자전거 경로 선택 모형

자동차 경로선택 모형은 통행시간이나 통행비용이 목적함수로 고려되는 것이 일반적이지만, 자전거는 주행 안전성, 쾌적성 등이 고려될 필요가 있으며, 특히 자전거는 비동력 교통수단이므로 체력적 저항도의 고려가 필수적이다. 이에 본 연구에서는 경사도를 고려한 에너지 소모량 기반의 자전거 경로선택 모형을 구축하였다.

경사로 유형에 따라 에너지 소모량에 미치는 영향인자 및 영향력이 다르므로, 경사로 유형별로 수식 (2)의 모형을 구축하였다. 이때, 평지와 내리막 구간은 총 주행 구간 길이 기반의 총 에너지 소모량 추정함수로 구성하였으며, 오르막 구간은 경사도를 효과적으로 반영할 수 있도록 주행지점의 에너지 소모량 추정함수로 구성하였다. 이때 단위지점별 에너지 소모량의 추정함수를 거리로 적분하여 누적된 에너지 소모량을 산출하였다. 즉, 평지의 경우 누적 에너지 소모량에 유의한 변수로 도출된 주행속도와 누적 주행거리를, 내리막 구간의 경우 30초 이전 주행 구간 중 최대 경사도와 누적 주행거리를 총 에너지 소모량 추정 모형에 반영하였으며, 오르막 구간의 경우 30초 이전 주행 구간의 평균 경사도에 의해 추정된 에너지 소모량의 합을 추정 모형에 반영하였다.

Find Min  $EC^r$

$$EC^r = \begin{cases} 18.16 + 0.078 \times v^r + 57.1 \times l^r & (\text{if, } s = 0) \\ \sum_i \int_0^l (0.123 + 0.006 \times sa_i^r) dl & (\text{if, } s > 0) \\ 1.548 + 0.14 \times sx^r + 15.75 \times l^r & (\text{if, } s < 0) \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

- 여기서,  $EC^r$  : 총 경로 에너지 소비(kcal)
- $r$  : 경로
- $v$  : 통행속도(km/h)
- $l$  : 누적 주행거리(km)
- $i$  : 구간
- $sa$  : 이전 30초간 평균 경사도(%)
- $sx$  : 이전 30초간 최대 경사도(%)

추정된 에너지 소모량 함수를 이용하여 실제 수집한 자전거 주행 자료에 대한 에너지 소모량을 추정하였다. 이를 횡단 자료의 에너지 소모량과 비교한 결과, 평균 제곱근 오차(RMSE)는 7.36으로 산정되었다. 이는 주행거리만으로 추정한 에너지 소모량과 횡단 자료의 에너지 소모량 간의 RMSE인 18.08보다 약 41% 우수한 결과를 나타내고 있다.

<Table 6> RMSE of models

	Distance-based model	Slope-based model
RMSE	18.08	7.36

### V. 모형 적용결과

본 연구에서 구축한 모형을 가상의 도로 구간에 적용하여 대안 경로 간 주행거리와 경사도에 따른 에너지 소모량의 차이를 비교하였다. 이때 두 개의 가상 주행 구간 중 Route 1은 주행거리가 짧지만 오르막 구간이 포함되어 있으며, Route 2는 주행거리는 길지만 평지로 구성되어 있다.



<Table 7> Topographical specifications of study routes

	$\sum l$	$\bar{s}$
Route 1	2.26km	5%
Route 2	2.64km	0

<Fig. 5> Study routes

두 대안 경로를 대상으로 본 연구모형을 적용하여 자전거 주행의 에너지 소모량을 산출하였다. 높은 경사가 다수 포함되어 있는 Route 1의 에너지 소모량(67kcal)이 Route 2(45.4kcal)보다 높은 것으로 분석되었다. 즉, 통상적으로 최적 경로의 목적함수가 주행거리일 때는 Route 1이 최적 경로로 선택되지만, 비동력 교통수단인 보행 및 자전거 통행과 같이 경사도에 영향을 받는 통행일 때는 에너지 소모량이 적은 Route 2가 최적 경로로 선택되는 것으로 확인되었다.

<Table 8> Travel distance and energy consumption of study routes

	$\bar{s}$	$\sum l$	$\sum EC$	$Min(l)$	$Min(EC)$
Route 1	5%	2.26km	67.0kcal	⊙	
Route 2	0	2.64km	45.4kcal		⊙

### VI. 결론 및 향후 과제

본 연구는 자전거 최적 경로 탐색 알고리즘에 적용될 수 있는 자전거 주행 저항에 따른 에너지 소모량 일반화 모형을 구축하였다. 이때, 자전거 에너지 소모량의 영향 인자는 자전거 주행거리와 경사도로 정의하였고, 주행거리 및 경사도와 자전거 에너지 소모량과의 관계를 분석하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 자전거 등 무동력 교통수단을 위한 안내지도 구축에 필수적인 경사도 GIS-DB를 저비용의 인프라로 구축 가능할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 수집된 경사도 DB는 GPS 시스템 전문기관(GPS Visualizer)의 DEM(Digital Elevation Model) 알고리즘에 의한 경사도 자료와 비교하였으며, 경사도 정확도는 92%로 분석되었다.

둘째, 오르막 구간의 경우, 주행 구간 이전 30초간 주행 구간의 누적 경사도가 주행지점의 경사도보다 에너지 소모량과의 상관성( $r=0.629$ )이 더 높은 것으로 나타났다. 평지 구간에서는 주행거리와 속도가 증가할수록 에너지 소모량이 증가하며, 내리막 구간에서는 경사도가 크고 속도가 높을수록 에너지 소모량이 적게 소요되는 것으로 확인되었다.

셋째, 자전거 주행에 있어 경사도와 주행거리를 함께 고려할 수 있는 자전거 이용의 에너지 소모량 비용 함수를 구축하였다. 이를 가상의 자전거 경로 대안에 적용한 결과, 주행거리와 경사도 기반의 최적 에너지 소모량이 소요되는 경로를 선택할 수 있는 비용함수인 것으로 확인되었다. 즉, 경사 구간 회피 측면에서 본 모형의 유용성을 확인하였으며, 본 연구결과는 자전거 경로 안내 알고리즘으로 활용되어 자전거 네비게이션 개발 등에 응용될 수 있을 것이다. 아울러 기존 인프라 중심의 자전거 이용 활성화와 함께 소프트웨어 측면에서도 자전거 이용 활성화에 기여 할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 지형의 높은 경사도가 자전거 주행에 미치는 영향분석 및 관련 모형 구축 가능성을 확인한 연구로써 향후에는 보다 일반화된 모형 정립을 위한 측면에서 다수 조사 자료를 기반으로 접근할 필요가 있다. 또한, 본 연구의 실험적 방법 외에 이용자의 실제 경로선택 행위와의 일치성을 검증할 수 있는 추가적 연구 방법도 요구된다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education(No. 2018R1D1A1B07051354). This supports are gratefully acknowledged.

## REFERENCES

- Baik S. H.(2012), *A Study on Bicycle Route Selection using Optimal Path Search*, Chonnam National University.
- Baik S. H., Han D. Y. and Jin H. S.(2011), “The Bicycle Road Route Selection which Considers the Slope Standard of the Bicycle Road,” *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, vol. 29, no. 6, pp.553-559.
- Birk M., Voros K., Rose M., Geller R., Igarita D. and Patterson B.(2010), “Cycle zone analysis: An innovative approach to bicycle planning,” In *89th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC.
- Broach J., Gliebe J. and Dill J.(2011), “Bicycle route choice model developed using revealed preference GPS data,” In *90th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC.
- Charlton B., Sall E., Schwartz M. and Hood J.(2011), “Bicycle route choice data collection using GPS-enabled smartphones,” In *90th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC.
- Cho H. J.(2010), *A Study on the Guideline for Level of Service by Vertical Grade for Bikeways*, Seoul National University.

- Chung T. H., Cho Y. S. and Kang K. W.(2011), “An Evaluation for the Investment Priority of Bicycle Road: A Case Study of Osan City,” *Gyeonggi Research Institute GRI Review*, vol. 13, no. 1, pp.234-252.
- Jain H. and Tiwari G.(2011), “Captive Cyclists vs. Potential Users: Route Choice Factors in Indian Context,” In *90th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC.
- Jung J.(2005), *Analysis of Intensity and Energy expenditure Poom-sae of Taekwondo Practice*, Graduate School, Ulsan University, Ulsan Korea, pp.1-10.
- Kim S. S.(2011), *A Study on Factors of the Influence of Cycling Environments on Bicycle User Perceptions and Route Choice*, Pusan National University.
- Kim S. S., Song K. W., Jung H. Y. and Ha S. W.(2011), “A Study on the Effect of Bicycling Environment in the Route choice of Bicycle Commuters,” *Journal of the Korea Planners Association*, vol. 46, no. 2, pp.223-233.
- LeClerc M.(2002), *Bicycle planning in the City of Portland: Evaluation of the City's Bicycle Master Plan and statistical analysis of the relationship between the City's bicycle network and bicycle commute*, School of Urban Studies and Planning, Portland State University, Portland, OR.
- Lee H. K.(2009), “The Study of HR and Energy Expenditure Change according to Walking Types,” *The Korea Contents Association*, vol. 7, no. 1, pp.405-409.
- Lee K. W.(2011). *Bike route selection methods considering user characteristics using GIS*, Incheon National University.
- Ministry of Public Administration and Security and Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2010), *Biking Facilities Installation and Management Guidelines*.
- Park J. Y.(2003), *Prediction of energy expenditure during exercise through heart rate in young adult*, Seoul National University.
- Park Y. S.(2011), *Design Improvement and Information Service of Bike Way Considering Environmental Factor*, Incheon National University.
- Rodríguez D. A. and Joo J.(2004), “The relationship between non-motorized mode choice and the local physical environment,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 9, no. 2, pp.151-173.
- Sa K. and Lee S.(2018), “Analysis of Physical Characteristics Affecting the Usage of Public Bike in Seoul, Korea,” *Journal of Korea Planning Association*, vol. 53, no. 6, pp.39-59.
- Zimmermann M., Mai T. and Frejinger E.(2017), “Bike route choice modeling using GPS data without choice sets of paths,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 75, pp.183-196.