

# 압전 하베스팅을 사용한 버스 정류장

## Bus Stop Using Piezoelectric Harvesting

김형경                  안유빈                  조창진  
Kim Hyung Kyung    An Yoo Bin    Cho Chang Jin An

### 1. 서론

현재 에너지 절약을 위한 다양한 방안들이 활발히 연구되고 있다. 가장 대중적인 것은 태양열, 풍력, 지열, 원자력 등이 있다. 하지만 원자력을 제외하고는 많은 양의 에너지를 얻어내지 못할뿐더러 원자력 조차도 안전상의 문제로 그 비중을 줄이기 위해 노력하고 있다. 그러기 위하여 개발 중인 방법이 있다. 이는 남은 에너지를 활용하는 목적을 가진 에너지 하베스팅이다. 에너지 하베스팅에도 여러 가지 종류가 있다. 대표적으로는 압전, 열전, 광전, RF가 있다. 이 중에서 가장 적용시키기 쉬우면서 활용도가 높은 것은 어떠한 것일까?

본 개척학기제에서는 이 4가지 중에서 압전 하베스팅을 이용한 버스 정류장의 버스 정보 안내 단말기(BIS), 정류장의 전구 등 다양한 전자기기를 사용하는 모델을 개발해보려 한다. 버스 단말기의 이용 데이터를 활용하여 버스 정차가 많은 정류장 주변 시설을 조사하여 정차가 많은 정류장 주변의 특징을 Weka 프로그램을 통하여 파악해봤다. 그 중에서도 다차원 분석이 용이한 데이터 마이닝 기법 중 하나인 의사결정나무(decision tree) 알고리즘을 적용하여 다양한 변수들의 변수별 영향력과 변수들 간의 관계를 파악하여 결과에 대한 해석력을 높이하고자 하였다.

본 개척학기제의 구성은 다음과 같다. 기존에 존재하는 압전 하베스팅 연구를 바탕으로 소규모 압전 하베스팅 실험을 진행한 후 그 결과와 기존 논문을 바탕으로 버스 정차량이 많은 버스 정류장 시설에 적용시켜본 후 주변 시설과의 관계를 파악하여 타지역에도 적용가능한 규칙인지 다루어지며 마지막으로 실제 축소 모형을 제작한다.

### 2. 관련연구

현재 압전 하베스팅에 관련하여서는 여러 기업, 학교 등에서 활발하게 연구 중에 있다. 그 중에서 한국 도로 공사의 연구를 소개하고자 한다. 한국 도로 공사는 도로발전용 압전 하베스터를 연구하였으며 도로에 설치하기 위하여 방수 성능, 내열 성능, 축하중 내하 성능, 발전 성능 등 다양한 성능 시험을 통하여 압전하베스팅 센서를 만들었으며 이 센서를 활용하여 휴게소 주차장 직접 설치하여 센서의 성능을 측정하였으며 검증된 센서를 통하여 차량별(무게별), 속도별, 마지막으로 센서 주위의 구성요소에 따라 얻을 수 있는 에너지를 알아낼 수 있었다.

한국 도로 공사의 연구는 압전 하베스팅의 성능을 시험하고 대중들에게 알리는데 요점을 두었지만 본 개척학기제에서는 가장 활용성이 높을 것 같다고 생각하는 버스 정류장에 적용하여 버스

가 지나가면서 얻어내는 압전 에너지를 이용하여 버스 정류장의 버스 정보 안내판(BIS), 전구 등 전자기기에 사용할 수 있다.

관련 연구의 경우 뚜렷한 모델이 없지만 활용도가 높은 버스 정류장에 적용하여 사람들이 직접 그 에너지를 사용하면서 체감할 수 있을 것이다. 또한 에너지의 이송없이 그 자리에서 바로 사용이 가능하다는 이점도 존재한다.

### 3. 배경이론

1)에너지 하베스팅이란 버려지는 에너지를 수집해 저기 기술로 바꿔 쓰는 기술이다. 이러한 에너지 하베스팅에는 네 가지 원리가 있다. ‘압전효과’란 물질을 기계적으로 누르면 양전하와 음전하가 나뉘는 ‘유전 분극’이 일어난다. 이때 표면의 전하 밀도가 변하면서 전기가 흐르는 ‘압전효과’가 발생한다. ‘열전효과’란 온도가 차이날 때 흐르는 현상을 통칭한다. ‘광전효과’란 금속 등이 고에너지 전자기파를 흡수할 때 전자를 내보내는 현상이다. ‘RF’란 전파를 이용한 무선 통신을 뜻한다.

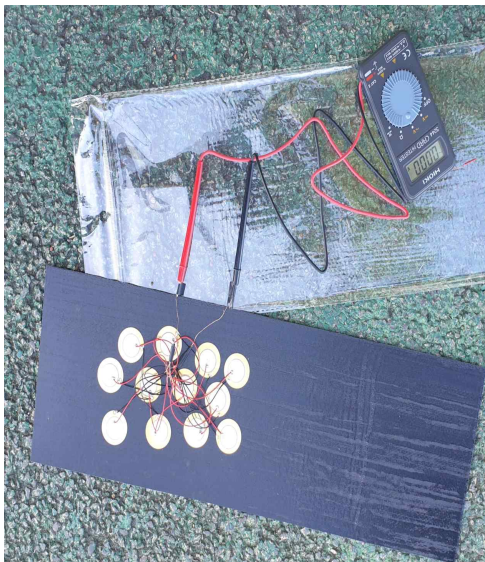
Weka는 데이터 마이닝 분석을 위해 오픈 소스 소프트웨어로 데이터 마이닝 툴로서 사용하였습니다. 변수들의 중요도를 평가할 때는 Select Attributes 탭에서 GainRatioAttributeEval를 통하여 중요도가 가장 낮은 변수부터 제거하는 역방향 제거를 사용하였으며 데이터 분석 시에는 Classify 탭의 J48(의사결정나무) 알고리즘을 이용하였으며 의사결정나무 알고리즘을 적용하여 다양한 변수들의 변수별 영향력과 변수들 간의 관계를 파악하여 결과에 대한 해석력을 높이하고자 하였다.

### 4. 실험

#### 4.1 실험 목적

압전 하베스팅으로 얻을 수 있는 전력이 무게/속도에 비례하는지, 키보드로 축소 실험을 하였을 때 얻을 수 있는 전력량이 얼마나 되는지를 알아보기 위하여 실험을 진행하였다.

#### 4.2 실험 개발 과정 상세 설명



압전 소자 12개를 병렬로 연결하여, 키보드의 바퀴 너비에 맞춰 판에 부착.

테스터기와 압전소자 연결

2)(+) 직렬연결보다 병렬연결의 효율이 좋다는 점을 참고하여 압전소자를 병렬연결함.

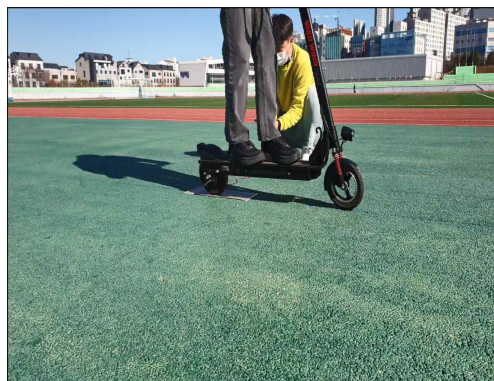
- 전압 측정은 각 상황별 5회 실시

#### 4.2.1 첫 번째 대상

독립변수 : 속도

종속변수 : 전압

통제변수 : 무게 (키보드 15.6kg + 팀원1 58.9kg = 74.5kg, 약 75kg)



- 전압 측정



10km



20km



30km

-10km

#### 4.2.2 두 번째 대상

독립변수 : 속도

종속변수 : 전압

통제변수 : 무게 (킥보드 15.6kg + 팀원2 69.1kg = 84.7kg, 약 85kg)



- 전압 측정



10km



20km



30km

#### 4.2.3 세 번째 대상

독립변수 : 속도

종속변수 : 전압

통제변수 : 무게 (킥보드 15.6kg + 팀원3 74.7kg = 90.3kg, 약 90kg)





전압 측정



## 4.3 실험 개발 결과 설명

### 4.3.1 압전하베스팅으로 얻을 수 있는 전력이 무게/속도에 비례하는가?

무게(kg)		75			85			90		
속도(km/h)		10	20	30	10	20	30	10	20	30
전압 (V)	1	12.09	11.5	12.5	0	19.2	22.4	25.7	10.3	35.5
	2	12.3	14.2	15.6	17.2	20.3	3.6	22.8	30.03	33.7
	3	13.4	12.3	16.4	20.2	21.8	26.1	28.2	25.7	31.4
	4	10.2	13.8	13.5	22.1	18.5	24.5	24.5	28.1	38.9
	5	9.96	15.6	14.7	18.5	23.6	23.3	26.1	23.6	32.9
	평균	11.59	13.48	14.54	19.5	20.68	24.07 5	25.46	26.85 75	34.48
전력량 ( $\mu\text{W} \cdot \text{Sec}$ )		29.8	40.3	46.9	84.4	94.9	128.6	143.9	160.1	263.9

압전 하베스팅으로 얻을 수 있는 전력량은 무게/속도에 비례한다. 그 중 속도보다는 무게에 더 큰 영향이 있다.

빨간색으로 표시된 결과의 경우 정확히 발판을 밟고 지나가지 못하여 생긴 결측치를 의미

### 4.3.2 키포드로 얻을 수 있는 전력량이 어떻게 되는가?

$$W = \int V * C \frac{dV}{dt} dt [W \cdot \text{Sec}]$$

$$W = C V^2 / 2 [W \cdot \text{Sec}]$$

가장 전압이 높게 나온 실험으로 분석하자면 압전소자 1개 당 C(정전용량)가  $0.037 \mu\text{F}$ 이고, 병렬로 12개를 연결했기에 정전용량은  $0.444 \mu\text{F}$ , 따라서 얻는 전력은 약  $335.9 [\mu\text{W} \cdot \text{Sec}]$  즉, 12cm의 거리를 90kg이 30km/h의 속력으로 한 번 지나갈 때  $335.9 [\mu\text{W} \cdot \text{Sec}]$ 의 전력을 얻는다는 것이다.

### 4.3.3 분석

우리가 실험에 사용한 압전소자는 정전용량이 매우 작았고( $0.037 \mu\text{F}$ ) 압전소자를 설치한 발판의 길이가 짧았기 때문에(12cm) 속도와 무게가 충분하여도 압전소자 스펙의 한계로 인해 얻을 수 있는 전력이 매우 작았다. 하지만 실험을 통해 압전 하베스팅으로 얻을 수 있는 전력량은 무게/속도에 비례한다는 것을 증명 하였고, 그 중 속도보다는 무게에 더 큰 영향이 있다는 것을 증명하였기 때문에 더 좋은 스펙의 압전소자를 더 길게 설치한다면 버스가 지나갈 때의 얻을 수 있는 전력량도 측정할 수 있다는 결론을 도출하였다.

## 5. 결과 및 토론

### 5.1 분석데이터

#### 5.1.1 목표변수

본 과제에서는 교통 빅데이터(한국교통연구원)에서 제공하는 포항시 버스 사용자 교통카드 사용 내역을 이용하였습니다. 자료는 2020-01-01부터 2020-03-31까지 총 857,018개의 자료이며 버스 탑승 시점과 하차 시점으로 이루어진 데이터입니다. 그 중 전처리 과정에서 3월 14일 ~ 3월 24일까지의 자료가 비어있어 3월의 자료(87,674개), 포항시의 버스 중 마을 버스의 경우 그 빈도와 통행량이 적다고 판단하여 모든 Feature들이 F인 정류장 자료(21,807개), 현재 사라지거나 개편되어 정류장이 운영되지 않는 정류장 자료(50,344개), 같은날 같은 정류장의 경우 하나의 행에 표현하기 위하여 중복되는 정류장의 행(674,532개)을 삭제하였습니다. 이에 총 857,018개의 자료중 23,701개를 이용하여 ‘T(일일 정류장별 버스 정차수  $\geq 92$ )’, ‘F(일일 정류장별 버스 정차수  $< 92$ )’로 새롭게 구분한 압전 하베스팅 정류장 설치 여부 변수를 목표 변수로 사용하였습니다.

구분	컬럼명 (영문)	컬럼명 (한글)	데이터 타입
	on_date	승차시각	datetime
	off_date	하차시각	datetime
	route_name	노선명	varchar
	descr	노선설명	varchar
	age_type	승객연령	varchar
	trans_yn	환승여부	varchar
	addfee_yn	추가운임여부	varchar
	start_bstop	승차정류장	varchar
	start_gps_x	승차정류장 GPS X	numeric
	start_gps_y	승차정류장 GPS Y	numeric
	end_bstop	하차정류장	varchar
	end_gps_x	하차정류장 GPS X	numeric
	end_gps_y	하차정류장 GPS Y	numeric

### <수정 전 컬럼 정의서(코드북)>

구분	컬럼명 (영문)	컬럼명 (한글)	세부 정보	데이터 타입
	month	달	1월, 2월, 3월을 구분 (3월 데이터를 삭제 시 사용하기 위함)	numeric
	start_bstop	버스 정류장	버스 정류장 정보	varchar
	on_date	승차시각	승차 시각 정보	datetime
	public	공공기관 여부	경찰서, 파출소, 보건소, 소방서, 시청, 행정복지센터 등 공공기관	boolean
	factory	공장 여부	공장	boolean
	apartment	아파트 여부	아파트, 타운 (동으로 이루어진 주거지)	boolean
	kindergarden	유치원, 어린이집 여부	유치원, 어린이집	boolean
	ele_school	초등학교 여부	초등학교	boolean
	mid_school	중학교 여부	중학교	boolean
	high_school	고등학교 여부	고등학교	boolean
	universe	대학교 여부	대학교	boolean
	franchise	프랜차이즈 여부	스타벅스, 빈폴, 엔젤리너스, 네네치킨, 커피베이, bbq, 탐앤탐스, 설빙, 투썸플레이스, 롯데리아, 도미노피자, 서가영죽, 치킨더홈, 저가집양념치킨, 호식이두마리치킨, 교촌치킨, 멕시카나, 페리카나, 네네치킨, 한솔, 피자예당, 뚜레주르, 푸라닭, 이삭토스트, 베스킨라빈스, 이디야, 자담치킨, 파스쿠지, 파리바게트, 맘스터치, 버거킹, 백다방	boolean
	religion	종교시설 여부	종교 관련 시설	boolean
	mart	마트 여부	대형 마트	boolean
	convenience	편의점 여부	편의점, 작은 슈퍼	boolean
	park	공원 여부	공원	boolean
	hospital	병원 여부	병원, 보건소	boolean
	bank	은행 여부	은행	boolean
	attraction	관광지 여부	유명 관광지, 펜션, 민박	boolean
	Target	설치 가능 여부	하루 간 버스 이동량 >= 92 : T 하루 간 버스 이동량 < 92 : F	boolean

### <수정 후 컬럼 정의서(코드북)>

## 5.1.2 독립변수

앞서 언급한 압전 하베스팅 정류장 설치 여부에 관한 정류장 주변 시설(반경 150m)들을 파악하여 주요 변수들을 선정하였습니다. 추가적으로 일부는 분석 목적에 맞게 변환하여 응용하였는데 예를 들어, 일일 정류장별 버스 정차 수를 구하기 위하여 bus\_b라는 이름을 사용하여 전체 데이터 셋에서 엑셀 함수식을 이용하여 날짜가 같고 정류장 이름이 같은 경우 합산하여 보여줄 수 있도록 하였습니다.

## 5.2 모델 구축

독립변수에 분류 알고리즘을 적용시켜 학습을 시킴으로써 데이터 마이닝 모델을 구축합니다. 이 때 사용되는 분류 알고리즘에는 의사결정나무, 인공신경망(ANN), 서포트 벡터 머신(SVM) 등이 있습니다. 이 중 의사결정나무 알고리즘은 모델 구축 시간이 비교적 빠르며, 정확도와 설명력이 뛰어나 많은 연구에서 사용되고 있습니다. 본 과제에서도 이러한 데이터 셋을 바탕으로 타지역에 적용 가능한 기준을 만들기 위하여 의사결정나무 알고리즘을 사용하였습니다.

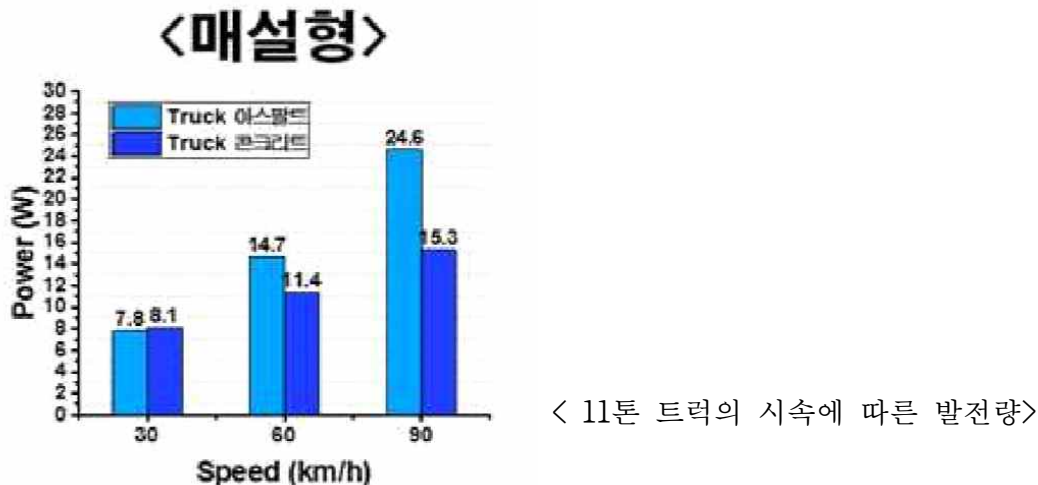
일반적으로 분류 모델의 경우 학습데이터(training data), 검증데이터(test data)로 분할합니다.

학습데이터는 학습시키기 위해 사용되며 검증데이터는 학습데이터를 이용해 구축된 모델의 성능을 평가하기 위해 사용되며 학습 시에는 사용되지 않아야 합니다. 대부분 이 비율을 7:3으로 사용하기로 본 과제에서도 7:3의 비율로 진행하였습니다.

또한 본 과제에서는 데이터 마이닝 분석을 위해 오픈 소스 소프트웨어인 Weka를 데이터 마이닝 툴로서 사용하였습니다.

### 5.3 압전 하베스팅 사용 방법 및 전력 사용량

한 시간 당 전력 사용량 4W의 전구 4개와 300W의 BIS(버스정보안내단말기) 사용을 위해 전구의 경우 하루 6시간, BIS의 경우 17시간 사용하므로  $4W \times 4 \times 6h + 300W \times 17h = 5196W$ 입니다. 압전 하베스팅을 이용하여 얻는 전력의 양은 콘크리트 포장 1cm 매설형 하베스터의 경우로 11톤 트럭 30km/h로 지나갈 때 1세트(발판 2개) 당 8.1W이며 하베스터 발전량 측정 장비는 picoscope 2000 series 사용하였습니다. 본 과제의 경우 버스에 적용을 시켜야 하나 버스의 무게는 11톤 ~ 13톤이므로 최저 무게인 11톤을 기준으로 설계였고 7세트를 적용시켜 한 대당 56.7W를 얻을 수 있습니다.



3) 따라서 최소 전력인 5196W를 얻기 위해서는  $5196W / 56.7W = 91.64$  (대/하루)가 필요합니다. 버스는 소수점이 있을 수 없으므로 올림을 진행하여 92대를 기준으로 92대를 넘으면 Target 변수를 “T”, 그렇지 않으면 “F”로 정의하였습니다.

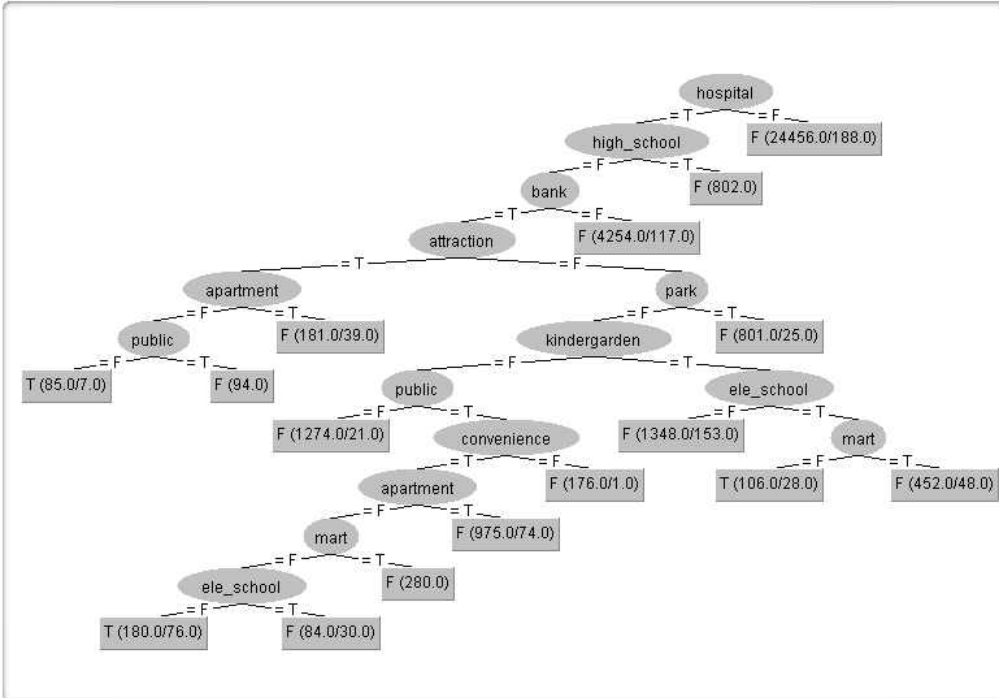
### 5.4 압전 하베스팅 정류장 설치 여부 예측 결과

의사결정나무 기법을 통해 설치 여부의 확률을 알아보기 위하여 Weka 프로그램을 이용하였습니다.

의사결정 나무 이용시 나무의 가지 수를 줄이기 위하여 최소 leaf node 수를 100으로 변경하여 진행하였습니다.



Tree View



- 예측모형 (Decision Tree)

	주변 시설
1	병원, 은행, 관광지, 공공기관
2	병원, 유치원, 초등학교, 마트
3	병원, 공공기관, 편의점, 아파트

위 3가지 시나리오 중 각 시나리오에 해당하는 시설을 가진 정류장은 포항시에서는 버스 통행량이 92대 이상으로, 압전 하베스터 정류장을 설치하여 전구와 버스정보안내단말기를 충분히 운용 가능한 정류장이라는 결론을 얻을 수 있습니다.

위 결과를 바탕으로 타지역 버스 정류장에 적용시켰다.

이 검증을 통해 포항 지역뿐만 아니라 울산 지역 버스정류장에도 압전 하베스터 정류장을 설치하여 전구와 버스정보안내단말기를 충분히 운용 시킬 수 있다는 결과를 도출해낼 수 있고, 대부분의 울산 시내버스 정류장은 포항 시내버스 정류장보다 통행량이 월등히 많아 압전 하베스터를 이용하여 얻을 수 있는 전력도 많아지므로 버스정류장의 전구, 버스정보안내단말기뿐만 아니라 USB케이블 등 얻은 전력을 이용하여 다양한 서비스 제공을 할 수 있다.

더 나아가 포항, 울산 지역의 시내버스 정류장 데이터 분석의 결과로 다른 지역 또한 3가지의 시나리오(표1)에 해당되는 정류장은 통행량이 많을 것이고 압전 하베스터 정류장을 운용 시킬 수 있는 최소한의 전력(= 최소 버스 통행량)을 만족할 것이라고 예측할 수 있다.

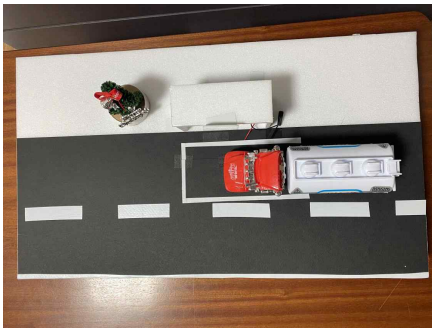
추가적으로 서울 지역의 버스 데이터에 적용시켜봤다.

서울시 시내버스 정류장 중 가장 많은 통행량을 가지는 상위 30개 버스정류장의 주변시설 유무와 포항, 울산 시내버스 정류장 데이터 분석의 결과인 3가지 시나리오와 비교하였을 때 정확도는 10%(3/30) 밖에 되지 않았다.

그 이유로는 1) 포항시, 울산시의 경우에는 대중교통 수단이 버스 밖에 없지만 서울시의 경우에

는 지하철이 존재한다, 2) 포항시, 울산시와는 다르게 서울시는 서울 중심부에 기업들이 위치하여 기업 근처에는 아파트가 많이 없다, 3) 서울시의 경우에는 시외에서 출근하는 사람이 많음으로 추측할 수 있었다.

#### 5.4 축소 모형 제작



- 축소 모형 완성



- 축소 모형을 모형 트럭이 지날 때 불빛이 켜지는 것 확인할 수 있다.

#### 6. 결론

본 개척학기제에서는 데이터 마이닝 기법 중 하나인 의사결정나무 알고리즘을 이용하여 버스 정류장 주변 시설에 따른 버스 정차 횟수가 영향을 미치는지를 바탕으로 하여 예측 모델을 구축하였다.

분석결과, 병원, 은행, 관광지, 공공기관이 주변에 있는 경우가 가장 높게 나왔으며 병원, 유치원, 초등학교, 마트가 2번째로 높았고, 병원, 공공기관, 편의점, 아파트가 3번째로 높다는 것을 알

수 있었다.

결과를 종합적으로 살펴보면 병원의 유무가 가장 중요하며 다음으로는 공공기관, 은행 등이 있다.

또한 타지역에 적용시켜보았을 때 울산의 경우 포항과 비슷한 결과를 나타냈지만 서울의 경우 다른 결과가 나타났다. 그 이유로는 지하철, 지역의 구성 등이 타 지역과는 다르다고 판단하였다. 따라서 지하철이 존재하지 않고 사무공간이 너무 모여있는 지역이 아니라면 동일한 결과를 토대로 압전 하베스터 정류장을 설치할 수 있는 것으로 보인다.

## 관련문헌

- 1) 우아영, “네이버 지식백과 - 에너지 하베스팅”,  
<<https://terms.naver.com/entry.nhn?docId=3579425&cid=58941&categoryId=58960>>, (2015-04-15)
- 2) 권수안, 이재준, 문학룡, 류승기, “압전세라믹 연결방식에 따른 전력생산 평가 연구”, 한국도로학회논문집, 2012
- 3) 김기훈, 이찬영, 박준영, 최영철, 박민석, 최현범, “압전 하베스터 성능검증 및 운영전략 수립”, 한국도로공사 도로교통연구원, 2017