

효율적 차량 검지를 위한 PVDF 압전센서의 사용성 연구

정유석, 오주삼*
한국건설기술연구원 미래융합연구본부

A Study on Serviceability of PVDF Piezoelectric Sensor for Efficient Vehicle Detection

YooSeok Jung, JuSam Oh*

Department of Future Technology and Convergence Research, Korea Institute of Civil engineering and
building Technology

요약 교통분야에 활용되는 여러 가지 센서 중에서 PVDF(Polyvinylidene fluoride) 압전센서는 차량의 축을 검지할 수 있기 때문에 차종을 분류하여 수집하는 용도로 쓰인다. 압전센서는 주로 도로 포장에 매립하여 설치되는 형태로 교통 하중과 온도 하중에 항상 노출되므로, 평균 수명이 6년 이내로 매우 짧다. 또한 설치와 유지보수에 교통통제가 필요하고, 고장 기간 동안 데이터 수집도 중단된다. 센서의 설치 깊이를 늘린다면 교통 하중 및 온도중의 영향이 줄어들 것이고, 센서설치가 포장에 미치는 영향도 축소되어 수명의 연장을 기대할 수 있을 것이다. 따라서, 본 연구에서는 설치 깊이에 따른 센서 신호의 출력을 분석하여, 센서 제조사에서 제시한 설치 깊이인 1cm 보다 더 깊게 설치할 수 있는 가능성을 확인하였다. 추가로, 운하중의 크기, 속도 등 다양한 변수에 따른 압전 센서의 출력 신호도 분석하였다. 운하중은 APT를 이용하여 재하 하였다. 실험 결과, MSI BL센서는 3cm 에 설치해도 안정적으로 데이터를 수집 할 수 있는 100mV 이상의 신호가 출력되었다. 3cm 깊이에 설치 한다면 센서의 기대수명 또한 증가할 것으로 예상된다. 하지만 MSI cable은 가장 얇은 1cm 깊이에서도 100mV 이하의 신호가 출력되어 현장 적용이 불가능 하다는 것이 밝혀졌다.

Abstract Among the various sensors for measuring traffic, PVDF (polyvinylidene fluoride) piezoelectric sensors are used to classify vehicles because they can detect the axle of the vehicle. Piezoelectric sensors are embedded in road pavements and are always exposed to traffic loads and environmental loads. Therefore, the life expectancy is very short, less than 6 years. Traffic control is essential for reinstallation and data collection is interrupted during the failure period. The lifespan will increase if the sensor installation depth is increased. In this study, the sensor signal output was analyzed with a variable depth of sensor installation to verify the possibility of deeper installation. Furthermore, various parameters, such as the weight and speed, were analyzed. The wheel load is applied using APT. As a result, the MSI BL sensor output signal is higher than 100mV when installed at 3cm, which is reliable. If the location of the sensor is deeper in the pavement, the expected lifetime of the sensor is also increased. On the other hand, the MSI cable was found to be less than 100mV at the shallowest depth of 1cm, making it impossible for field applications.

Keywords : APT, Axle count, Installation depth, PVDF piezoelectric sensor, Vehicle classification

1. 서론

교통을 계측하기 위해 많은 방법이 마련되어 있다. 계

측 방법은 매립형과 비매립형으로 구분된다. 비매립형에는 영상검지, 마그네틱센서, 튜브센서 등이 있고 매립형에는 루프센서와 압전센서가 대표적이다. 차종별 교통

본 논문은 한국건설기술연구원 "스마트도로 시대를 위한 전자차량번호판 표준 및 핵심기술 개발 기획연구" 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Ju Sam Oh(Korea Institute of Civil engineering and building Technology)

Tel: +82-2-995-0812 email: jusam@kict.re.kr

Received July 4, 2018

Revised (1st July 30, 2018, 2nd August 7, 2018, 3rd August 22, 2018)

Accepted October 5, 2018

Published October 31, 2018

량, 속도, 점유율을 수집하는 용도로 가장 널리 쓰이는 장비중 하나인 AVC(Automated Vehicle Classification, 자동 차종 분류 장비)는 루프센서와 압전 센서의 조합으로 정보를 수집한다. 해당 장비의 교통정보 중에서 차종을 분류하기 위해서는 차량의 축 수 정보가 필요한데, 이를 얻기 위해서 압전센서가 사용된다.

매립형인 압전 센서는 설치와 유지보수에 교통통제가 필요하고, 교통 하중과 온도하중에 항상 노출된다[1]. 센서의 고장은 예측할 수 없고 재설치가 완료될 때까지는 AVC의 기능을 상실하기 때문에 데이터가 결측 된다. 선행 연구 결과, 도로포장 1cm 깊이에 매설하는 매립형 압전 센서는 평균수명이 6년 이하로 상당히 짧다[2]. 압전 센서의 경우 제조사에서 수명 ESAL(Equivalent Single Axle Load, 등가단축하중) 값을 기준으로 제시하고 있지만, 실제 수명은 도로의 노후정도를 고려해야 한다[3]. 이런 이유로 교통정보 수집장비의 가동률을 높이기 위해서는 센서의 수명이 늘어나고 예측가능해야 한다.

설치 깊이가 깊을수록 교통 하중 및 온도 하중의 영향이 줄어들어 수명이 증가할 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 설치 깊이에 따른 신호 감쇄를 분석하여 센서 제조사에서 제시한 1cm 깊이의 설치보다 더 깊게 설치할 수 있는 가능성을 확인할 것이다. APT(Accelerated Pavement Testing, 포장가속시험) 장비를 활용하여 일정한 윤하중을 재하 하여 신호를 얻을 것이다. 2cm 나 3cm의 깊이에 압전 센서를 설치하여 기존 제어기에 활용 할 수 있는 적절한 신호를 수집할 수 있다면 센서의 수명을 대폭 향상시킬 수 있을 것이다.

2. 관련연구

AVC를 운영하여 교통 정보를 수집하는 동안 센서 고장으로 인하여 일정기간의 자료가 손실되기도 한다[4]. 교통관련 계측 기술이 날로 발전하고 실용화 되고 있지만, 불완전한 계측자료에 의한 교통량자료의 질과 정확성 저하는 중요한 문제이다[5]. 캐나다의 알버타주에서는 7년 동안 절반 이상의 데이터가 결측 되었으며, 미네소타주에서는 1년 중 40% 이상의 데이터가 결측 되었다[6]. 원인별로 결측률을 분류하여 비교하지는 않았지만, 교통량 데이터에 결측이 발생하는 주된 이유는 센서의 오작동 및 고장 이라고 한다[7]. 또한 교통조사 기술과

관련된 설문에 따르면 가격, 정밀도, 내구성, 신뢰도, 휴대성, 편의성 등의 여러가지 특징 중에서 정밀도에 있어서 신뢰도와 내구성이 각각 2번째 3번째로 중요한 인자로 인식되고 있다[8]. 이렇게 신뢰도와 내구성에 대한 논의가 지속되고 있으나, 센서 제조사에서 40 million ESAL을 수명으로 제시했을 뿐 깊이에 따른 동작 상태나 수명에 관련된 기준은 제시하고 있지 않다.

3. 시험계획 및 구성

3.1 센서 설치 계획

센서의 설치깊이, 센서 종류, 하중의 크기와 속도 등 다양한 변수에 따른 압전 센서의 출력 신호를 분석하기 위해서 한국건설기술연구원내 포장가속 테스트 베드에 압전 센서를 설치하였다. APT장비의 주행가능 구간은 10m이고, 시점과 종점의 비정속구간 각 30%를 제외하고 Fig. 1과 같이 센서 설치계획을 수립하였다.

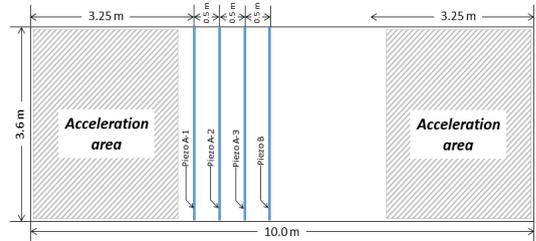


Fig. 1. Sensor installation plan

수립된 센서 설치 계획을 자세히 나타내면 Table 1과 같다. 시험시공 구간에 MSI(Measurement Specialities Inc) 사의 BL Class I 센서인 Piezo A를 깊이 별로 설치하였다. MSI cable을 1cm 간격으로 병렬 제작한 Piezo B를 설치하였다.

Table 1. Condition for sensor installation

Location	Installation Depth (cm)	Width (cm)	Cutting Depth (cm)	Sensor Type
Piezo A-1	1.0	2.0	2.0	BL Class I
Piezo A-2	2.0	2.0	3.0	BL Class I
Piezo A-3	3.0	2.0	4.0	BL Class I
Piezo B	1.0	1.0	4.0	MSI cable (3-row)
	2.0			
	3.0			

3.2 APT 장비 운영 계획

APT는 Table 2와 같이 하중과 속도를 달리하여 운행하였다. APT의 성능 한계를 준수하여, 2톤부터 2톤씩 늘려 최대 10톤의 운하중을 재하 하였고 각각 10km/h의 속도로 운행하였다. 요인 설계에 따라 운행 속도는 하중이 6톤일 경우에만 변경하였다. 운하중 6톤을 재하 할 때, 2km/h 부터 2km/h 씩 늘려 최대 10km/h로 운행하였다.

Table 2. APT operation plan

Speed(km/h)	Load(t)				
	2	4	6	8	10
2	-	-	●	-	-
4	-	-	●	-	-
6	-	-	●	-	-
8	-	-	●	-	-
10	●	●	●	●	●

3.3 센서

MSI사의 BL 센서(Fig. 2)는 교통 정보 수집을 위해 도로 포장에 영구적 혹은 임시로 설치하도록 설계되어 있다. 센서는 압전물질로 PVDF 필름을 사용하였고, 유연한 구조로 되어있어서 도로의 형태에 맞추어 설치 할 수 있다. 센서의 자켓인 황동관은 도로 굴곡, 인접한 차선의 진동과 소음의 영향이 차단한다. 본 실험에서 사용된 Class I 등급의 센서는 ±7% 내의 출력 균일성을 갖고 있어서 교통량조사, 차종분류, 고속 통행료 부스, 속도 감지 등 정밀한 용도로 사용 할 수 있다.



Fig. 2. MSI BL Class I piezo sensor

시공계획의 Piezo B는 MSI piezo cable을 병렬로 연결한 것이다. MSI piezo cable은 Fig. 3처럼 컨덕터와 실드 사이에 PVDF 필름을 권취한 형태의 동축케이블이다. 축검지용으로 사용한다면 앞서 설명한 MSI BL 센서보다 1/5 이상 저렴하게 활용 할 수 있기 때문에 함께 테스트 하였다. 이를 Fig.4의 형태로 1cm 간격으로 병렬 연

결 하였다. 포장 표면으로부터 각각 1cm, 2cm, 3cm에 설치하였다.



Fig. 3. Piezo spiral wrapped coaxial cable

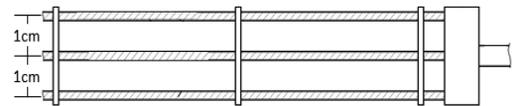


Fig. 4. Plot of 3-row parallel piezo cable

3.4 신호수집방법

DAQ(Data Aquisition)는 센서에서 발생하는 신호를 측정하여 저장하는 장비로 데이터로거라고도 한다. 내셔널인스트루먼트(National Instrument, 이하 NI)사의 compact DAQ 제품을 사용하였다. NI 제품은 모듈형식으로 구성된 것이 특징이며 랩뷰(Labview)라는 프로그램을 이용하여 제어한다. 그 중 컨트롤러가 포함된 cDAQ-9137을 새시로 사용하였다. Fig. 5(a)의 cDAQ-9137은 데이터 로깅 및 임베디드 모니터링 어플리케이션에 적합한 인텔 아톰 쿼드 코어 프로세서 를 사용하고, 32 GB 저장 공간을 제공한다.

압전센서의 전압을 측정하기 위해서 Fig. 5(b)와 같은 NI 9239 모듈을 사용하였다. 모듈은 각 4개 채널에 대하여 24비트의 해상도를 가지고 있으며 50kS/s/ch의 속도와, ±10V 입력 범위의 성능을 발휘한다.

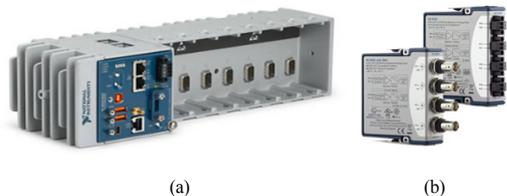


Fig. 5. Data aquisition system(NI)
(a) Controller chassis (b) Voltage measuring module

전압 신호를 수집하기 위해 Fig. 6과 같이 블록다이어그램을 구성하였다. DAQ 설정과 파일저장, 신호의 형태를 분석해서 Peak 유/무를 판단하는 것은 Labview 에서 제공되는 익스프레스를 이용하여 간단하게 구성하였다. 가장 큰 특징은 지정된 채널에서 Peak가 검지되었을 경우에만 전루프와 후루프를 포함하여 파일에 저장하도록 프로그래밍 한 것이다. 하나의 루프는 1초동안 채널별로 2,000개의 샘플을 획득하도록 설정하였으므로 매번 6,000개씩 수집된다.

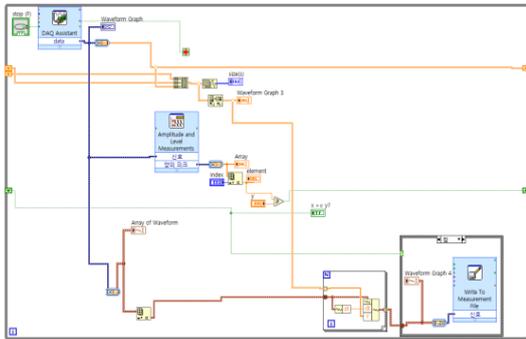


Fig. 6. Programming block-diagram for Labview

3.5 시험시공

교통 계측용 센서시공 1단계인 포장 절삭과 세척작업을 진행하였다. 지정된 위치에 스프레이 페인트를 이용하여 센서 설치 위치를 표시하였다. 표시된 위치의 아스팔트포장을 Fig. 7(a)과 같이 습식으로 절삭한 후 (b)세척 및 건조하였다. 센서의 설치 계획에 따라 절삭 깊이를 정밀하게 맞추는 것이 중요하며, 레진이 경화되면서 완벽하게 부착하도록 절삭면을 깨끗하게 세척하고 건조하였다.



Fig. 7. Traffic sensor installation 1st stage
(a) Pavement cutting (b) cleaning operation

교통 계측용 센서시공 2단계는 센서를 설치하고 레진을 타설하는 것이다. Fig. 8의 (a)처럼 계획된 깊이에 센

서를 설치하였고, 레진을 타설(b)하여 고정하였다.



Fig. 8. Traffic sensor installation 2nd stage
(a) Attached the sensor (b) placing the resin

레진 경화 후 APT 장비를 이용하여 일정한 윤하중을 재하하였다. Fig.9(a)는 APT 장비의 모습인데, 원래는 시험시공한 포장에 윤하중을 지속적으로 재하하여 장기 내구성을 단축된 시간에 평가하는 장비이다. 하지만 본 연구에서는 일정한 윤하중을 속도를 제어하여 재하 할 수 있는 기능을 활용하여 Fig. 9(b) 와 같이 실험을 진행하였다. 진행방향에 따라 속도 및 하중에서 차이가 발생하였으나 분석은 오는 방향과 가는 방향으로 나누어 진행하였다.



Fig. 9. Experimentation of wheel load
(a) View of the APT (b) Application of wheel load

4. 실험결과

4.1 신호수집

Fig. 10은 압전센서에서 출력된 전압신호를 나타낸 것이다. 가장 높은 수치를 Peak로 정의하였다. 임계값을 $\pm 0.01V$ 로 해서 신호가 들어오는 구간의 길이를 Signal length로 정의했다. 모든 변수에 대해서 왕복 30회 이상 실험을 진행하였기 때문에 모든 값은 30회 이상의 데이터의 평균을 나타낸다.

설치위치의 환경에 따라 노이즈가 발생하기도 하기 때문에 압전센서의 신호는 임계값을 설정하여 설정된 임계값보다 큰 신호가 출력 되었을 때, 제어부에서는 1개의 차축으로 인식한다. 각 현장마다 환경이 서로 다르지

만 경험적으로 임계값이 100mV 이상이라면 안정적으로 노이즈를 필터링 할 수 있다.

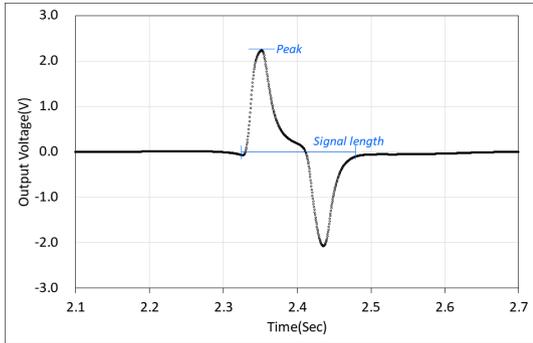


Fig. 10. Plot of raw piezo signal

따라서 신호의 출력 값이 앞서 가정한 100mV 이상이라면 차축을 문제없이 인식 할 수 있고, 차량의 길이와 축수의 함수로 이루어진 차종분류 알고리즘 특성상 정확도에 영향이 없다.

4.2 하중에 따른 신호크기

우선 운하중을 2톤씩 변화해가며 센서의 설치 깊이에 따른 신호 출력을 비교하였다. Fig. 11에 오는 방향의 하중에 따른 신호크기를, Fig. 12에 가는 방향의 하중에 따른 신호크기를 나타내었다. 센서가 포장 표면에 가까울수록, 재하 되는 운하중이 클수록 큰 신호가 출력되었다. 제한적인 실험변수와 현장여건에서 얻은 데이터에 따르면 그래프는 깊이에 따라, 하중에 따라 비선형적인 특징을 보인다. 장비의 운행 방향에 따라 장비 운행 오차라고 할 수 있는 미세한 차이가 보였기 때문에 그래프를 나누어 표시했다.

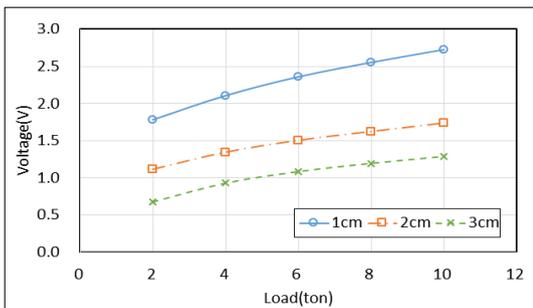


Fig. 11. Peak voltage (MSI BL, Direction: up)

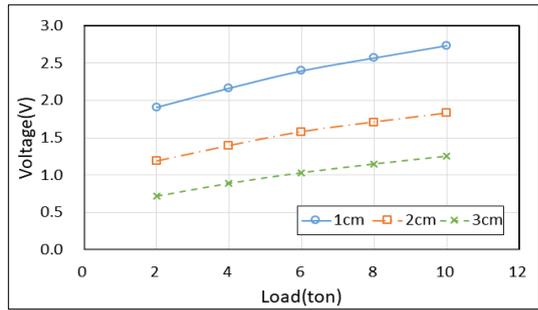


Fig. 12. Peak voltage (MSI BL, Direction: down)

Fig. 13과 Fig. 14는 병렬 형태로 설치된 MSI cable에서 출력된 신호이다. 가장 얇은 1cm 깊이에 설치된 센서조차도 2톤 운하중에 대해 100 mV 이하의 신호를 출력하기 때문에 실제 현장에서 사용하기는 어렵다.

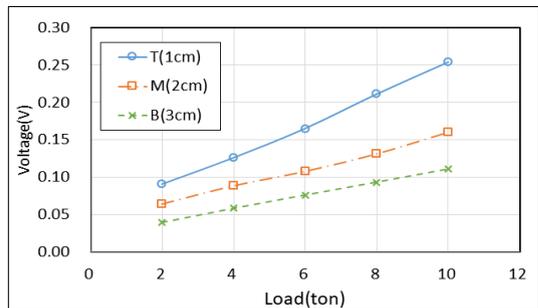


Fig. 13. Peak voltage (MSI cable, Direction: up)

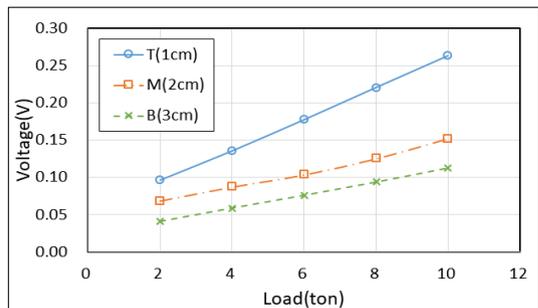


Fig. 14. Peak voltage (MSI cable, Direction: down)

4.3 속도에 따른 신호

Fig. 15와 Fig. 16에는 속도에 따른 출력신호를 비교하였다. 속도가 증가함에 따라 타이어에서 발생하는 충격하중이 차이 나는 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 8km/h 보다 빠를 때는 신호 크기증가가 둔화되는 것을

확인 할 수 있었다.

실제 일반국도에서의 차량운행 속도는 60km/h 에서 80km/h 이상이지만 APT 장비의 운행속도는 10km/h가 한계이다. 한정적인 속도에 따른 신호 실험 결과, 속도가 빨라질 수록 신호의 크기가 커지기 때문에 측정지 정확도에는 아무런 영향이 없을 것이다. 그리고 10km/h는 일반국도의 운행속도로는 매우 낮기 때문에, 교통의 지체나 정체시에도 신호 수집 정확도에는 문제가 없는 것을 확인하였다. 본 연구에서 진행한 시험장비의 한계로 인하여 향후 일반국도에서 실제 주행속도인 60km/h ~ 80km/h에 대한 추가적인 연구를 진행할 예정이다.

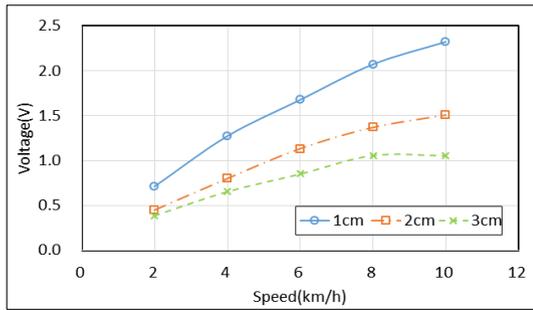


Fig. 15. Plot of Peak Voltage by Speed (MSI BL, Direction: up)

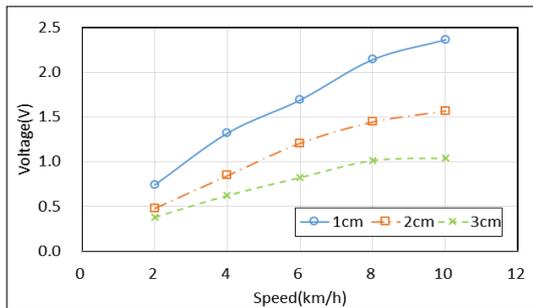


Fig. 16. Plot of Peak Voltage by Speed (MSI BL, Direction: down)

5. 결 론

매립형인 압전 센서는 교통 하중과 온도하중에 항상 노출되어 수명이 6년 이내로 매우 짧다. 설치와 유지보수에 교통통체가 필요할 뿐만 아니라 고장난 기간 동안 데이터 수집도 중단된다. 센서 제조사에서 제시한 설치

깊이는 1cm 인데 이를 늘린다면 교통 하중 및 온도하중의 영향이 줄어들고, 센서설치가 포장에 미치는 영향도 축소되어 수명의 연장을 기대할 수 있을 것이다.

따라서 설치깊이, 운하중의 크기, 속도와 같은 다양한 변수에 따른 압전 센서의 출력 신호를 분석하였다. 한국건설기술연구원내 포장가속 테스트 베드에 각각 1cm, 2cm, 3cm 깊이에 측정지용으로 사용되고 있는 MSI BL 센서를 설치하였다. 경제성을 확보할 수 있는 동축케이블 형태로 제작된 MSI cable도 설치하였다. APT를 이용하여 2톤부터 10톤 까지 2톤 단위로 운하중을 재하 하였다. 6톤의 운하중을 2km/h에서 10km/h로 2km/h단위로 운행속도를 바꾸어 재하 하였다.

MSI BL 센서의 경우에는 기존에 설치하던 1cm 보다 더 깊은 3cm 에 설치해도 안정적으로 데이터를 수집 할 수 있는 100mV 이상의 신호가 출력되는 것을 확인하였다. 센서의 설치 위치가 포장에서 더 깊은 곳에 위치한다면, 센서의 기대수명 또한 증가할 것으로 예상된다. 하지만 가장 얇은 1cm 깊이에 설치된 MSI cable도 100mV 이하의 신호가 출력되어 현장 적용이 불가능 하다는 것이 밝혀졌다. 또한 연구 장비의 한계에 따라 최대 10km/h 의 속도에서 실험하였으므로 향후 일반국도에서 실제 주행속도인 60km/h ~ 80km/h에 대한 추가적인 연구를 진행해야 한다.

References

- [1] L. E. Y. Mimbela, L. A. Klein, "Summary of vehicle detection and surveillance technologies used in intelligent transportation systems", The Vehicle Detector Clearinghouse, p.211, 2000.
- [2] Y. S. Jung, J. S. Oh, "Lifespan Evaluation of Traffic Detector for Automated Traffic Recorders Based on Weibull Distribution", *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, Vol.143, No.9, Article ID 05017006, 2017.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1061/JTEPBS.0000003>
- [3] S. L. Skszek, "State-of-the-art" Report on Non-traditional Traffic Counting Methods. p.88, Arizona Department of Transportation, 2001.
- [4] FHWA, "Traffic monitoring guide" Federal Highway Administration of the US Dept. of Transportation Washington, DC, 2013.
- [5] J. Tang, G. Zhang, Y. Wang, H. Wang, F. Liu, "A hybrid approach to integrate fuzzy C-means based imputation method with genetic algorithm for missing traffic volume data estimation" *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.51, pp.29-40, 2015.

DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2014.11.003>

- [6] M. Zhong, P. Lingras, S. Sharma, "Estimation of missing traffic counts using factor, genetic, neural, and regression techniques" *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.12, No.2, pp.139-166, 2004. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2004.07.006>
- [7] T. M. Kwon, "TMC Traffic Data Automation for MnDOT's Traffic Monitoring Program" Minnesota Department of Transportation, pp.51, 2004.
- [8] S. Peeta, P. Zhang, "Counting device selection and reliability: Synthesis study" Joint Transportation Research Program, pp.46, 2002.

정 유 석(YooSeok Jung)

[정회원]



- 2014년 2월 : 중앙대학교 토목공학과(도로 및 교통공학 석사)
- 2015년 4월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 전임연구원

<관심분야>

도로 교통, 사물인터넷

오 주 삼(JuSam Oh)

[정회원]



- 1998년 2월 : 중앙대학교 공학박사(교통공학)
- 1999년 11월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구위원

<관심분야>

도로 교통, 센서, 빅데이터