



The Design of Embedded System for Locating Damage Point of Smart Sheet

Min Gi Nam, In Sik Hong*

Department of Computer Science & Engineering, Soonchunhyang University

ABSTRACT

As the Internet of things has evolved recently, construction of smart city infrastructures is also actively proceeding. Smart City is a form in which telecommunication infrastructure facilities are connected to all places in a city like a human neural network to attract new investment and job creation and also to provide high- In a society where people and goods are always connected, and the solution to increase the economic power of the city, the movement of introduction in the whole world including Korea is increasing rapidly. As a result, interest in system, which is efficient for infrastructure management and advantageous for maintenance/repair, will increase. SmartSheet is widely used to protect and monitor underground facilities when building Smart City. The SmartSheet is manufactured in the form of a combination of a communication line and a detection tape used to detect various breakage (damage during construction, breakage due to aging, ground subsidence, sink hole, etc.). This makes it possible to judge whether there is an abnormality through the communication between smart sheets. It is hard to find out exactly where it is when it is damaged underground. Although the damage location can be measured by using the existing TDR, there is a blind spot which can not be measured in the vicinity, and it is also very expensive. In this paper, we design a hardware and dedicated detection program that finds faulty locations within tens of meters to 1km using a low cost embedded board. Circuits and software were constructed by analyzing the relationship between time constant - voltage and impedance. The input values measured by the 10-bit ADC are converted to the correct measurement distance on the table-driven correction algorithm. The proposed system can be applied to location detection such as underground facilities such as piping, road - bridge breakage, plant breakage, and pipeline damage in a building.

© 2017 KKITS All rights reserved

KEYWORDS: Smart City, Smart Sheet, Breakage Detection, Damage Location, Embedded Board, Table-Driven Calibration Algorithm

ARTICLE INFO: Received 1 September 2017, Revised 14 September 2017, Accepted 13 October 2017.

*Corresponding author is with the Department of Computer Science & Engineering, SoonChunHyang University, 31538, 22 Soonchunhyang-ro,

Sinchang-myeon, Asan-si, Chungcheongnam-do, KOREA.
E-mail address: ishong@sch.ac.kr

1. 서론

지하에는 상수도관, 하수도관, 가스관, 전선 및 통신관 등의 시설물들이 매설되어 우리생활에 편리함을 제공하지만, 매설 구조가 복잡하고 제대로 관리가 되지 않아 지반침하 등 심각한 인재사고의 발생 여지가 늘 상주해 있는 실정이다. 특히 굴착공사로 인한 지하시설물 파손사고나, 상하수도 누수 시, 실시간 확인 할 수 없어 심각한 2차 사고를 유발시킬 수 있으며, 이로 인한 지반침하 등 시설물 교체를 필요로 하는 많은 문제를 야기 시킬 수 있다. 따라서 지진, 태풍 등 자연재해 파손, 인적재해 파손, 노후 파손 등으로부터 시설물 관리에 효율적인 기술의 필요성이 대두되고 있다.

스마트 시트는 스마트 시티 구축 시, 지하 시설물들을 보호하고 모니터링하기 위해 사용되고 있다. 통신선과 감지 테이프가 결합된 형태로 제작되고 있으며, 시트 간의 통신을 통해 이상 유무를 판단하는 원리로 공사 중 파손, 지반 침하, 싱크홀 등 각종 파손 감지를 목적으로 활용되고 있다. 현재는 지하에서의 시트 파손 시, 그 위치를 정확히 알아내기는 힘든 실정인데 기존의 TDR (Time Domain Reflectometry) 장비 등을 이용하여 파손 위치를 측정 할 수는 있으나, 전기적인 특성으로 근거리 측정은 불가하며, 또한 매우 고가이다[1].

본 논문에서는 저가의 임베디드 보드를 사용하여 1km 이내의 파손 위치를 찾아내는 하드웨어 및 전용 감지 프로그램을 제안한다. 임베디드 보드를 이용한 회로는 임피던스 특성을 고려하여 구성되며, 수집하는 전압 데이터 값을 모니터링 함으로써 시상수와 전압, 임피던스 특성의 관계를 정의/분석하여 정확한 거리 측정을 유도한다. 데이터의 분석에는 임베디드 보드의 처리율을 최적화한 레지스터 제어방식으로 10-bit ADC를 사용하여 측정값을 입력받았으며, 아날로그 데이터에 대한 테이블 드

리븐(table driven) 보정 알고리즘을 적용하여 처리하였다. 제안하는 시스템은 지하시설물, 도로 - 교량, 플랜트, 건물 내 배관 등의 파손 위치 감식에 적용되어질 수 있다.

2. 관련 기술 및 동향

2.1 스마트 시트

스마트 시트는 부틸로 제작된 일정두께의 시트 사이에 두 가닥(Twisted Pair)의 도선을 <그림 1>에서 상단 같은 형상으로 삽입하여 제작한다. 지하 시설물상부에 부착 또는 단독으로 지하에 매설하여 사용한다.

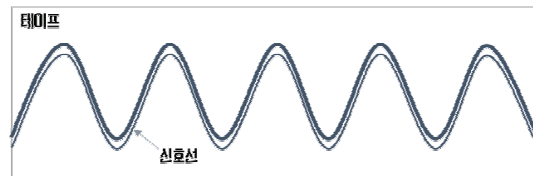


그림 1. 파손 감시 시트
Figure 1. Breakage Watch Sheet

2.2 저가형 임베디드 보드

스마트 시트 양단에는 파손 유무 코드를 주고받기 위한 통신용 보드가 필요하다. 본 논문에서는 일반적인 시리얼통신에서는 데이터전송이 불가능한 1Km가 넘는 긴 거리의 시트를 사이에 두고 통신할 목적으로 RS485 모듈을 사용하게 되는데 3.3V 기반 보다는 5V 기반의 모듈이 장거리 전송에 유리하다. 그러므로 통신 모듈로는 아두이노 우노 또는 아두이노 메가 계열의 보드를 사용하여 시스템을 구현한다[2].

2.3 TDR 기술

TDR은 TDR에서 발견되는 전자기파의 속도를 v , 유선매체의 길이를 L , 전자기파가 유선매체를 왕복하는 시간(transit time)을 t 라고 하면 $Ka=(c/v)^2$ 이고 $v=2L/t$ 의 관계가 성립된다. 쉽게 말해 측정 기지에서 전기적 펄스신호를 쏘아 신호가 고장 지점에서 반사하여 돌아오는 데까지의 시간을 측정하는 측정 계기를 의미한다. 이러한 기술에 사용되는 장비는 고가이며, 300m 이내 블라인드 스팟을 가지고 있다[3][4].

2.4 국내·외 스마트 시티 동향

국내 수도 서울의 행정기관들이 세종 시로 옮겨감에 따라, 도시 행정중심의 역할을 하기 위해 '스마트시티' 사업을 진행하게 됐다. 2006년 개정된 관련법에 따라 '행정중심 복합도시 건설청'이 설립 후 22.5조원을 2030년까지 투자하고 있다.

또한 부산시에서도 '해운대지역 글로벌 스마트시티 조성기본계획'에 따라 스마트시티를 조성할 예정이다. 2015년부터 2019년까지 1035억 원을 투입해 교통, 에너지, 환경, 생활편의, 안전, 관광 등 25개 분야에서 단계적으로 스마트시티 서비스를 구축해 시행할 계획을 가지고 있다.

국외로는 중국의 스마트시티를 위한 5개년 계획인 'IT 분야 12차 5개년'의 일환으로 도시를 스마트시티로 바꾸는 것이다. 약 51조원이 중국 내에 전국 320개 도시의 스마트시티 구축 추진을 위해 투자될 전망이다[5-7].

3. 파손 위치 추정 시스템

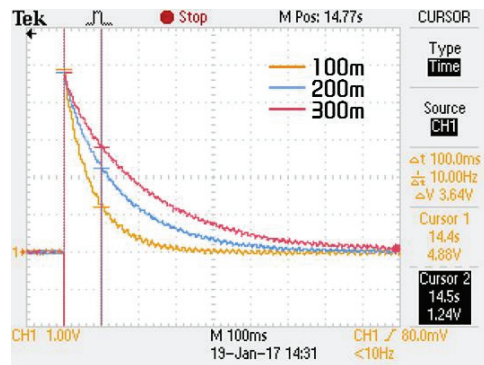
RS485통신은 일반적 디지털신호를 포트별 교차신호로 바꾸어 전송하므로 노이즈가 많은 지하 케

이블 통신에 절대적으로 유리하다. 전송가능거리 또한 1.2Km 까지 가능 할 것으로 판단되나 지하 케이블 특성상 설치 지역에 따라 오차가 발생될 것으로 생각된다.

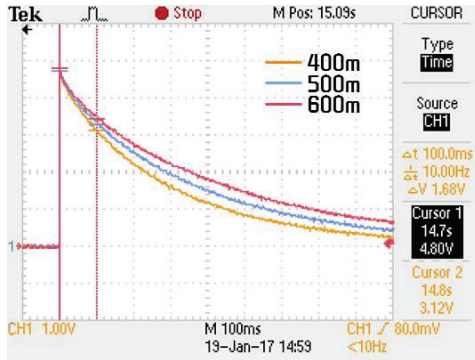
3.1 스마트 시트의 임피던스 특성

본 논문에서는 파손 위치를 찾아내기 위해 시트의 길이별 전기적 특성을 검토하였다.

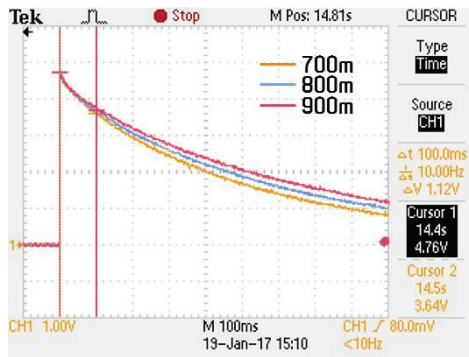
스마트 시트는 한 쌍의 감지도선이 내장된 테이프형태로 일반적 트위스티드 페어 케이블이 가지는 용량성 임피던스 특성을 보이며 <그림 2>에서와 같이 시트의 길이에 따른 전압특성 곡선을 얻어낼 수 있다. <그림 2>에 제시된 그래프를 통해 측정 전압 또는 전압 방전 시간과 도선 길이에 비례하는 특성과, 용량성 임피던스 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 용량성 임피던스 특성과 도선길이 간 연관성을 토대로 시상수를 이용한 전압 측정을 통해 정확한 길이 측정 시스템의 설계를 목표로 한다[8].



(a) 100 ~ 300 m



(b) 400 ~ 600 m



(c) 700 ~ 900 m

그림 2. 스마트 시트 임피던스 특성 그래프
(시상수-전압)

Figure 2. Smart Sheet Impedance Characteristic Graph
(Time Constant-Voltage)

스마트 시티에서 인프라 구축 시, 스마트 시트는 대개 1km 단위로 모니터링 되어 진다. 고로, 본 실험에서는 최대 1000m 내에서 측정 가능한 탐지 모델을 설계한다. 이 때, 각 시트의 길이 특성을 알아내기 위해 방전 시상수 τ 를 이용한다.

$$\tau = R \cdot C$$

이때 시트 길이 별 특정시간에 관측되는 시상수-전압 데이터는 다음과 같다[9].

표 1. 시상수 - 전압 데이터

Table 1. Time Constant-Voltage Data

Sheet length	Time constant(ms)
100m	114.325
200m	134.112
300m	154.112
400m	171.787
500m	197.213
600m	213.105
700m	235.313
800m	252.912
900m	276.542

3.2 파손 위치 추정용 S/W의 설계

본 논문에서 제안하는 시간-전압 값을 기초로 한 길이 측정 플로우는 다음 <그림 4>와 같다.

<그림 4>에서와 같이 위치탐색 알고리즘은 ADC와 디지털 포트 레지스터 레벨 제어를 기반으로 한 루프 시스템으로 동작된다. 임베디드 보드는 사용자 요청에 따라 적정 크기의 펄스를 발생시킨다. 그 후, ADC 모드로 딜레이 없이 전환하여, 임피던스 특성 데이터를 수집한다.

유효한 샘플링 데이터의 시작점을 발견하게 되면 시상수 시간만큼 대기한다. 그 시점을 기준으로 하여 50회 데이터 수집/저장한 후 신뢰구간을 선정하여 클립핑-평균화(Clipping-Averaging)를 수행한다. 최종적으로 처리된 데이터에 거리 환산 알고리즘을 적용하여 길이 측정값을 출력한다[10-12].

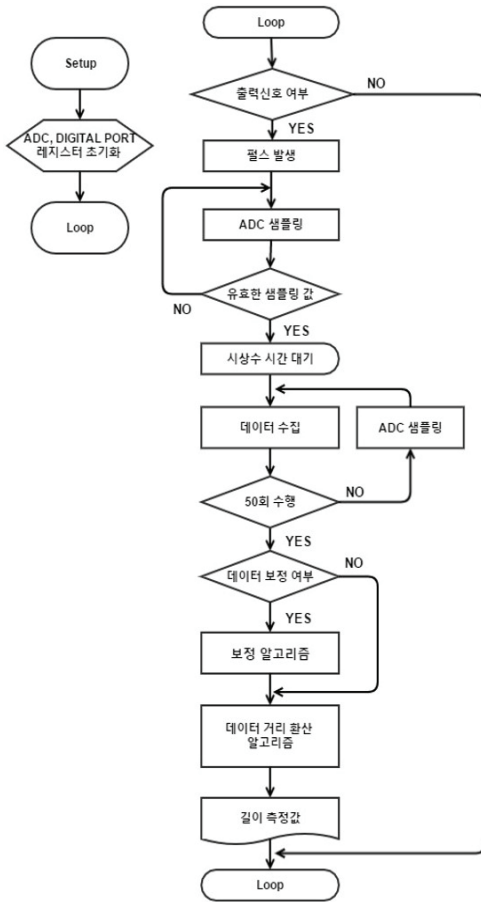


그림 4. 탑재 SW의 플로우차트
Figure 4. Flow Chart of Embedded SW

본 시스템에서는 펄스 발생과 데이터 수집 과정을 모두 수행해야만 하고 이를 최적화하려면 소프트웨어적 멀티 프로세싱 또는 둘 이상의 임베디드 보드 회로 구성이 최선이라 판단되지만 저가형 임베디드 보드 선정 이유에 근거하여 하나의 프로세스를 내장한 아두이노 우노(Uno)를 활용한다. 따라서 싱글 프로세스 기반을 전제하며 프로세스 간 처리 속도를 최대한 감소시키는 방향으로 설계한다.

프로세스 간 처리 속도 최적화를 위해 기본 아두이노 제공 라이브러리 함수 사용은 불가하며, 레

지스터 단의 제어를 통해 불필요한 작업을 줄여 높은 처리율을 유지한다.

- 10-bit Resolution
- 0.5 LSB Integral Non-Linearity
- ±2 LSB Absolute Accuracy
- 13 - 260µs Conversion Time
- Up to 76.9kSPS (Up to 15kSPS at Maximum Resolution)
- Six Multiplexed Single Ended Input Channels
- Two Additional Multiplexed Single Ended Input Channels (TQFP and VFQFN Package only)
- Temperature Sensor Input Channel
- Optional Left Adjustment for ADC Result Readout
- 0 - V_{CC} ADC Input Voltage Range
- Selectable 1.1V ADC Reference Voltage
- Free Running or Single Conversion Mode
- Interrupt on ADC Conversion Complete
- Sleep Mode Noise Canceler

그림 5. 아두이노 우노 ADC 기능
Figure 5. Aduino Uno ADC Features

<그림 5>에서의 같이 ADC 샘플링 데이터 컨버전(Conversion) 시간은 약 13us ~ 260us가 설정 가능하며 ADC 프리스케일러(Prescaler)에 의해 결정된다. AVR의 ADC는 일정한 간격으로 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환한다. 이 간격은 클럭 주파수에 의해 결정되며, 일반적으로 ADC는 50 ~ 200kHz의 주파수 범위에서 작동된다. 하지만 CPU 클럭은 훨씬 높은 MHz 단위의 주파수를 발생한다.

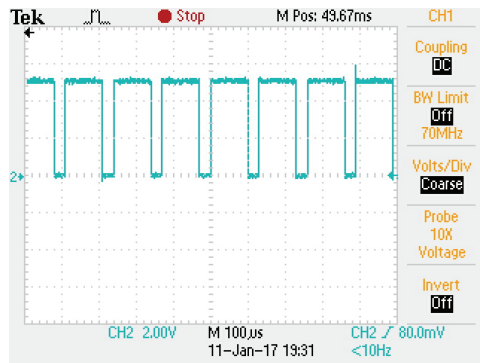


그림 6. ADC 샘플링 시간
Figure 6. ADC Sampling Time

따라서 최적화된 샘플링 목표를 달성하기 위해서는 주파수 분할이 필요한데 빈도수와 정확도 사

이의 트레이드 오프(Trade-off)를 고려하여 ADC 프리스케일러를 선정한다. 최적 프리스케일러 적용 프로그램을 수행한 결과는 <그림 6>에서와 같다.

ADC 소비시간은 1회 ADC 샘플링 후, 다음 샘플링까지의 간격을 의미하며, 약 30 μ s까지 유지시킨다.

3.3 임베디드 보드 선정 및 H/W 설계

본 논문에서는 제안하는 시스템의 최적 충족 요건에 따라 임베디드 보드를 선정하기 위해 아래와 같은 선택 기준 사항을 기초하여 선정한다.

- (1) 다양한 기능의 추가와 제거가 가능.
- (2) 내장 OS 없이도 입력된 펌웨어를 바탕으로 동작이 가능.
- (3) 다양한 Third-Party 제품의 제공으로 확장성이 높은 보드.

위 1차선별에서, 보드의 기능성과 확장성, 본 시스템 특화 보드를 위한 소프트웨어 경량성을 고려한다. 또한, 선별된 임베디드 보드에 아래의 검토 사항을 적용하여 보드를 최종 선택한다.

- ① 아두이노와 라즈베리파이 보드 선정
- ② 파손감지 시트와의 적용성 테스트
- ③ 저가격 및 다양한 확장성을 검토
- ④ 3.3V와 5V 지원 보드 중 5V 지원 보드선택

이렇게 여러 가지 조건에 맞게 선정된 임베디드 보드인 아두이노 우노를 기반으로 구성된 시스템 H/W는 구성은 다음 <그림 7>과 같다.

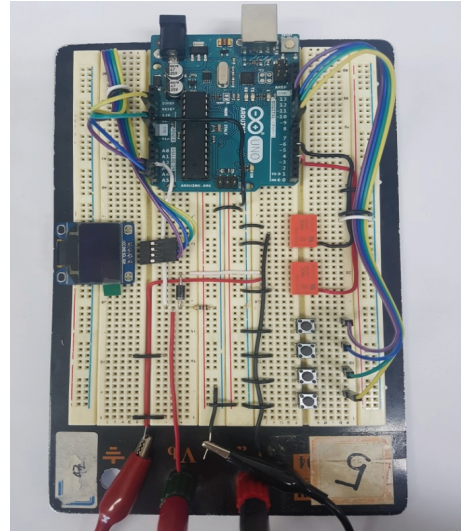


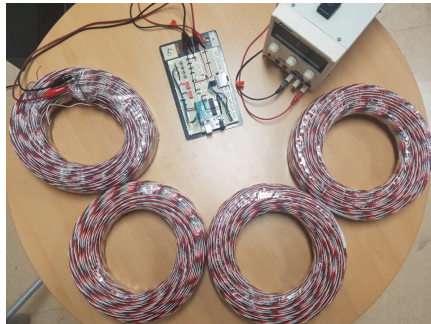
그림 7. 시스템 HW 구성
Figure 7. System H/W Configuration

4. 시스템 시뮬레이션 및 운용

알고리즘의 효율성을 증명하기 위하여 아두이노 우노(Uno)와 추가 하드웨어로 구성된 시스템 베이스에 본 논문에서 제안한 전압/시상수 위치 측정 시스템을 탑재하여, 0.6sq x 3C 규격 200m 통신선로 4세트를 대상으로 한 에뮬레이션을 실시함으로써 파손 위치검출을 수행한다.

4.1 시스템 시뮬레이션

<그림 8>의 (a)에서와 같이 200m 통신선로 1세트 거리측정을 시작으로 최대 4세트까지 직렬 연결하여 각각 200, 400, 600, 800m의 측정값이 정확히 디스플레이 되는가를 확인한다. (b)에서 OLED 모듈 상단, 하단출력 값은 각각 수집한 아날로그 데이터와 거리 환산 알고리즘이 적용된 값을 의미한다.



(a) 시뮬레이션 구성



(b) 내장 OLED 출력 값

그림 8. 시스템 시뮬레이션
Figure 8. System Simulation

4.2 시스템 운용

시스템 운용을 위하여 구글맵 상에 매설된 스마트 시트를 표시하며, 파손 시 그 위치를 측정 및 산정하여 서버로 전송한다. 노드가 많은 경우 지도 상에 모두 표시되며, 정상적인 노드 간 통신 시(스

마트 시티 인프라 관리를 위한 통신), 정상으로 표시되다가 파손 발생 시, 파손 경보와 함께 파손 위치 검색 모드로 전환되어 그 위치를 <그림 9>와 같이 화면에 표시한다[13-15].



그림 9. 구글 맵 상에서의 구간별 감시
Figure 9. Segment-by-segment Monitoring on Google Maps

5. 결 론

본 논문에서는 저가형 임베디드 보드(아두이노 우노)를 이용하여 스마트 시티 지하에 매설되는 스마트 시트의 파손 위치를 검색 할 수 있는 시스템을 설계하였다. 제안되는 시스템은 시트의 용량성 임피던스 특성을 활용한 파손 검색 알고리즘으로 프로그램 되며, GIS 형식으로 PC 및 스마트폰 상에 서비스 할 수 있다.

시스템 하드웨어는 아두이노 우노와 임피던스 측정용 아날로그 회로로 구성되며 거리측정 프로그램을 탑재하여 사용하였다. 서버통신은 에그를 통한 CDMA방식으로 업로드하여 시뮬레이트 하였다. 또한, 지하시설물, 교량, 플랜트, 건물 내 배관 등의 시설물 파손 위치 감식에 적용한다면 기존 시스템 구축비용을 대폭 절감가능하며, 파손으로 인해 연쇄적으로 발생할 위험에 대한 예방과 즉각 대처가 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] C. Andrea, D. B. Egidio, C. Giuseppe, M. Antonio, G. Nicola, D. A. Giuseppe Maria, C. Nicola, D. L. Antonio, and M. Marcello, *advances in the TDR-based leak detection system for pipeline inspection*, Measurement. Vol. 98, No. 3. pp. 347-354 2017.
- [2] M. K. Kim, Y. W. Choi, D. C. Park, and S. C. Kim, *Performance analysis and improvement of RS485 based low speed and multi-node CSMA/CD for control network system*, Journal of the Korea Society for Industrial Information, Vol. 20, No. 1, pp. 27-35, 2017.
- [3] T. J. Kim, B. D. Yoon, and S. H. Woo, *Model-based detection of pipe leakage at joints*, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 39, No. 3, pp. 347-352, 2016.
- [4] S. M. Kim, J. H. Sung, W. Park, J. H. Ha, Y. J. Lee, and H. B. Kim, *Development of a monitoring system for multichannel cables using TDR*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 68, No. 8. pp. 1966-1974, 2016.
- [5] S. M. Yoo, *Smart City Trend Analysis and Case Study*, Journal of the Korea Information Science Society, Vol. 12, No. 1, pp. 19-28, 2016.
- [6] H. S. No, C. Cui, Y. S. Kim, J. B. Choi, and B. S. Kim, *Accuracy improvement of time domain impedance measurement using error calibration method*, Journal of the Korea Electromagnetic Engineering Society, Vol. 23, No. 11, pp. 1315-1322, 2016.
- [7] A. Laura, F. Ana, S. M. Caudia, G. Ricardo, G. Helder, C. Susana, and S. Carlos, *Smart city: A systematic approach towards a sustainable urban transformation*, Energy Procedia, Vol. 91, pp. 970-979, 2016.
- [8] S. J. Ahn, and Y. S. Choi, *A jitter characteristic improved PLL with RC time constant circuit*, Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea, Vol. 54, No. 2, pp. 133-138, 2016.
- [9] H. S. Choi, <https://www.kosbi.re.kr/>, Oct. 2016.
- [10] Y. T. Kwak, *Accelerating levenberg-marquardt algorithm using variable damping parameter*, Journal of the Korea Computer Information Society, Vol. 15, No. 4, pp. 57-63, 2016.
- [11] J. K. Lee, Y. J. Kim, and S. C. Kim, *Efficient localization algorithm for non-linear least square estimation*, Journal of the Korean Institute of Communication Sciences, Vol. 40, No. 1, pp. 88-95 2016.
- [12] J. H. Li, W. X. Zheng and J. Gu, L. Hua, *Parameter estimation algorithms for Hammerstein output error systems using Levenberg-Marquardt optimization method with varying interval measurements*, Journal of the Franklin Institute, Vol. 354, No. 1, pp. 316-331, 2017.
- [13] W. R. Stevens, G. R. Wright, *TCP/IP Illustrated : The protocols*, Addison-Wesley, 2011.
- [14] J. M. Kang, Y. M. Kang, and K. W. Lee, *Construction of integrated infrastructure system on underground facilities using web based GIS*, Transactions of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 25, No. 2, pp. 317-323, 2016.

- [15] I. S. Hong, and B. M. Kang, *A study on a leakage sensing pipe and monitoring system using TDR in GIS*, Journal of the Multimedia Society, Vol. 7, No. 4, pp. 567-578, 2016.

감사의 글

본 연구는 순천향대학교 학술연구비 지원으로 수행하였음.

스마트 시트 파손 위치 탐색용 임베디드 시스템의 설계

홍인식, 남민기

순천향대학교 컴퓨터공학과

요 약

최근 사물 인터넷이 발전함에 따라 스마트 시티 인프라 구축이 적극적으로 진행되고 있다. 스마트 시티는 도시의 모든 장소에 사람의 신경망과 같은 네트워크 인프라 시설이 연결되어 새로운 투자와 일자리 창출을 유도하고, 또한 사람과 사물이 항상 연결된 고수준의 사회 제공과 도시의 경제력을 향상시키는 해결책으로 한국을 포함한 전 세계에서 도입이 급속히 증가하고 있다. 그에 따라 인프라 관리에 효율적이며, 유지/보수에 유리한 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 스마트 시트는 스마트 시티 구축 시, 지하 시설물을 보호하고 모니터링하기 위해 사용되고 있다. 통신선과 감지 테이프가 결합된 형태로 제작되고 있으며, 시트 간의 통신을 통해 이상 유무를 판단하는 원리로 (공사 중 파손, 노후 파손 지반 침하, 싱크홀 등) 각종 파손 감지를 목적으로 활용되고 있다. 지하에서의 시트 파손 시, 현재는 그 위치를 정확히 알아내기는 힘든 실정인데 기존의 TDR 장비 등을 이용하여 파손 위치를 측정 할 수는 있으나, 전기적인 특성으로 근거리 측정은 불가한 블라인드 스팟이 존재하며, 또한 매우 고가이다. 본 논문에서는 시상수와 전압 간 임피던스 특성을 분석한 것을 토대로 저가의 임베디드 보드를 사용하여 1km 이내의 파손 위치를 찾아내는 하드웨어 및 전용 감지 프로그램을 설계한다. 데이터의 분석에는 10-bit ADC를 사용하여 측정값을 입력받았으며 테이블 드리븐 보정 알고리즘을 사용하였다. 제안하는 시스템은 배관 등의 지하시설물, 도로-교량 파손, 플랜트파손, 건물 내 배관파손 등의 위치 감식에 적용되어질 수 있다.



In Sik Hong received an M.S. and Ph.D. in the Department of Electronic Engineering from HanYang University in South Korea, in 1981 and 1988, respectively. He was senior researcher at Frontier Research Program for Water Resources from 2002 to 2011. He has been a professor at SoonChunHyang University in South Korea since 1991. His research interests include AR Technology, GIS, Embedded System and IT Convergence Technology.

E-mail address: ishong@sch.ac.kr



Min Gi Nam is a senior in university at Soonchunhyang University. He has been working in computer engineering and embedded labs since 2013. Currently he is researching embedded systems and sensor interfaces. His research interests include Mobile System/Communication, IoT networking, GIS and Embedded System.

E-mail address: mingi2468@naver.com