

시간영역반사계를 이용한 해수배관시스템의 누수 탐지용 센서 개발 연구

황현규* · 신동호** · 김헌희*** · 이정형****

*, ** 목포해양대학교 대학원 박사과정, *** 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수

Development of TDR-based Water Leak Detection Sensor for Seawater Pipeline of Ship

Hyun-Kyu Hwang* · Dong-Ho Shin** · Heon-Hui Kim*** · Jung-Hyung Lee****

*, ** Ph.D student, Graduate school, Mokpo national maritime university, 91, Haeryangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea

*** Professor, Division of marine engineering, Mokpo national maritime university 91, Haeryangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea

요 약 : 시간영역반사계(TDR)는 케이블의 물리적 결함을 검사하는 기법이며 누수 탐지 분야로의 응용영역을 확대하고 있다. 본 연구는 시간영역반사계 기법을 활용하여 선박 기관실 해수 배관의 누설 감지용 케이블형 센서를 개발하였다. 케이블 센서의 형상은 꼬임형상과 흡습부재를 이용하여 제작하였으며 개발된 센서의 누수 감지 여부와 위치 탐지 가능성을 확인하였다. 개발된 센서는 실제 배관 시험 장치에 부착하여 평가하였으며 해수 누설에 따른 다양한 TDR 신호를 취득하였다. 센서는 꼬임횟수, 피복 두께를 변수로 하여 제작하였으며 TDR 신호에 미치는 효과를 분석하였다. 실험 결과, 꼬임형 센서는 평행한 띠 형상의 센서에 비해 평활한 신호 취득이 가능하였으며 최적 꼬임 횟수는 단위길이 당 10회 이상인 것으로 나타났다. 절연 피복두께의 경우 적정 민감도 확보가 가능한 절연 피복부재의 두께는 도선 직경의 80%~120%로 확인되었다. 누수 위치 추정을 위해 회귀분석 실시 결과, 결정계수는 0.9998로 실제 누설 위치와 높은 상관관계를 나타내었다. 결과적으로 제안된 TDR 기반의 누수 감지용 꼬임형 센서는 해수 배관 시스템의 누수 감시 센서로의 충분한 적용성을 확인하였다.

핵심용어 : 시간영역반사계, 센서, 선박, 해수배관시스템, 누수, 감시

Abstract : Time domain reflectometry (TDR) is a diagnostic technique to evaluate the physical integrity of cable and finds application in leak detection and localization of piping system. In this study, a cable-shaped leak detection sensor was proposed using the TDR technique for monitoring leakage detection of ship's engine room seawater piping system. The cable sensor was developed using a twisted pair arrangement and wound by an absorbent material. The availability and performance of the sensor for leak detection and localization were evaluated on a lab-scale pipeline set up. The developed sensor was installed onto the pipes and flanges of the lab-scale set up and various TDR waveforms were acquired and analyzed according to the different variables including the number of twists and sheath thickness. The result indicated that the twisted cable sensor was able to produce clear and smooth signal as compared to the TDR sensor with a parallel arrangement. The optimal number of twist was determined to be above 10 per the unit length. The optimal diameter of sheath thickness that results in the desired sensitivity was determined to be ranging from 80% up to 120% of the diameter of the conductor. The linear regression analysis for estimation of leak localization was carried out to estimate the location of the leakage, and the result was a determination coefficient of 0.9998, indicating a positive relationship with the actual leakage point. The proposed TDR based leak detection method appears to be an effective method for monitoring leakage of ship's seawater piping system.

Key Words : TDR, Sensor, Ship, Seawater pipeline, Leakage, Monitoring

* First author: shdrn666@gmail.com

† Corresponding author: jhlee@mmu.ac.kr, 061-240-7205

1. 서론

선박 기관실의 주기관 및 각종 보조기기는 운전 시 열을 방출하며 이는 운전 효율에 영향을 미친다. 이에 따라 선박 기관 및 기기의 안정적 운용을 위해 수냉식 냉각 시스템을 탑재하고 있다(Allal et al., 2017). 이와 같은 냉각 시스템의 냉매는 해수를 사용하므로 해수 내 포함된 염소이온(Cl⁻)에 의해 해수배관 내부는 부식 손상을 일으키며, 이러한 손상은 유속에 의한 침식으로 가속화된다(Hwang and Lee, 2021). 배관 계통에서 발생 가능한 고장 형태는 내·외부 부식으로 인한 파공, 제 3의 요인인 외부충격에 의한 손상, 초기 파이프 결함, 설계문제 그리고 초기재료 불량 등이 있다. 이중 내·외부 부식에 의한 누설은 가장 빈번하게 발생하는 고장 형태이다(Yuhua and Datao, 2005). 따라서 배관 누설에 따른 유체의 손실과 위험이 존재하며 이에 대한 대책이 필요한 실정이다.

일반적으로 선박 기관실의 배관 누수 감시는 기관사의 육안 점검이나 빌지웰(Bilge well)의 고수위에 의한 가시화 경보를 통한 인지에 의해 이루어진다. 해수배관시스템은 기관실 하부에 위치하여 육안으로 누설을 판단하기 어려우며, 지속적인 상태감시를 위한 모니터링 장치가 부재한 상황이다(Allal et al., 2017). 더욱이 대부분의 선박은 기관실 무인화 시스템을 채택하므로 배관 누수에 의한 기관실 침수와 같은 대형 사고 발생 시 즉각적 대응이 제한된다. 따라서 배관 누수를 상시 감지하고 누수 발생 전이나 소량 누수 시에 사전 탐지하는 기술 도입이 필요하다.

최근 배관시스템의 누수 진단 기술은 청음식이나 신소재를 활용하고 있다. W. Jiangwen(2012) 등은 음향 방출신호를 이용하여 배관시스템의 파공에 의한 파열음으로 누설을 진단하였다(Jiangwen et al., 2012). I. Stoianov(2012) 등은 신소재인 광섬유 센서를 이용하여 배관시스템의 누수에 따른 국부적인 온도변화로 누수를 진단하였다(Stoianov et al., 2012). 이러한 누수 감지센서 기술을 배관시스템에 도입하기 위한 비용은 고가이며, 누수 진단을 위한 전문 지식이 요구 된다. 뿐만 아니라 광역 감시가 어려우며, 선박 운항 시 발생하는 진동과 소음에 의한 잡음 유입으로 분석의 정확도가 떨어지는 한계를 갖고 있다(Kim et al., 2015).

시간영역반사법(Time domain reflectometry, TDR)은 이러한 한계를 극복할 수 있는 누수 탐지 방법으로 관련된 연구가 진행 중이다(Fisher et al., 2013). TDR 기법은 계측기로부터 발생된 전기신호의 송신지점과 도선 사이의 임피던스 변화에 의해 반사된 지점의 시간 차이를 측정하여 변화된 임피던스의 위치를 탐지한다.(Cataldo et al., 2017). TDR 기법의 장점은

누수 여부 및 위치 감지가 가능하며, 광역 범위의 배관시스템 상태감시를 저비용으로 할 수 있다는 점이다. 또한, 신호 분석에 전문지식이 필요하지 않으며 감시대상 특성에 따라 센서 형상 변경과 길이 조절이 용이하다. 이러한 이유로 TDR 기반 배관 누설 관련 센서 연구가 일부 연구자에 의해 진행된 바 있다.

Cataldo et al.(2017)은 케이블 형상을 갖는 TDR 센서를 개발하여 지중 매설 배관시스템에 대한 누설 탐지 연구를 수행하였다. Kim(2012a)은 TDR 센서를 개발한 후 토양의 함수량과 신호의 변위량 측정하여 산사태 감시 분야에 활용하였다. Fatemi Aghda et al.(2018)은 TDR 기법을 이용하여 매설된 배관시스템의 다중 누설에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과, 다중 누설 탐지에 대한 신호특성은 감소하였으나, 여러 지점의 도선 사이 간격을 증가시켜 기준점을 설정한 경우, 다중 누설을 감지하는 것에 대한 정확도가 향상된다고 보고하였다.

기존 TDR 기법 연구는 지중 매설 배관의 누설 여부판단을 위하여 센서 개발을 수행하였다. 매설 배관의 경우, 토양이 흡습제 역할을 하여 누수에 의한 센서의 신호변화가 뚜렷하게 나타난다. 이와 달리 선박과 같이 외부에 노출된 배관 시스템은 흡습제 역할을 할 수 있는 환경이 조성되어 있지 않아 종래의 연구·개발된 센서로 적용하는데 어려움이 있다. 또한 센서를 배관에 부착하는 경우 도체인 배관에 의해 센서의 신호가 감쇠되기 때문에 기존과 다른 형태의 센서 개발을 요구한다(Kim and Yoon, 2012).

본 연구에서는 선박 기관실의 배관계통의 누설 감지를 위한 TDR 기반의 센서 개발을 위한 기초 연구를 수행하였다. 선박 기관실의 사용 환경을 고려한 배관 부착형 케이블형 센서를 고안하였으며, 케이블의 꼬임과 피복 두께가 TDR 신호에 미치는 영향을 분석하였다. 개발된 센서는 선박 배관을 모사한 시험 장치에 취부하여 현장 적용성을 평가하였다. 본 연구는 배관 누설 감지를 위한 꼬임 형상의 누설 감지 센서를 제안하였으며, 기존 TDR 센서 형상에 비해 평활한 신호를 발생시켜 누설 감지의 정확도를 향상시키고자 하였다.

2. TDR의 측정 원리와 누수 탐지에의 응용

TDR 기법은 주로 전선의 국부 결함을 탐지하는 용도로 사용되었다(Fatemi Aghda et al., 2018). TDR은 전자기파를 이용하여 전선의 결함을 탐지하는 기법으로 원거리 위치 및 대상체 특성 규명에 적용 영역을 확장하였다. 전자기파를 적용한 대표적인 사례는 레이더이다(Park, 2006). 레이더의

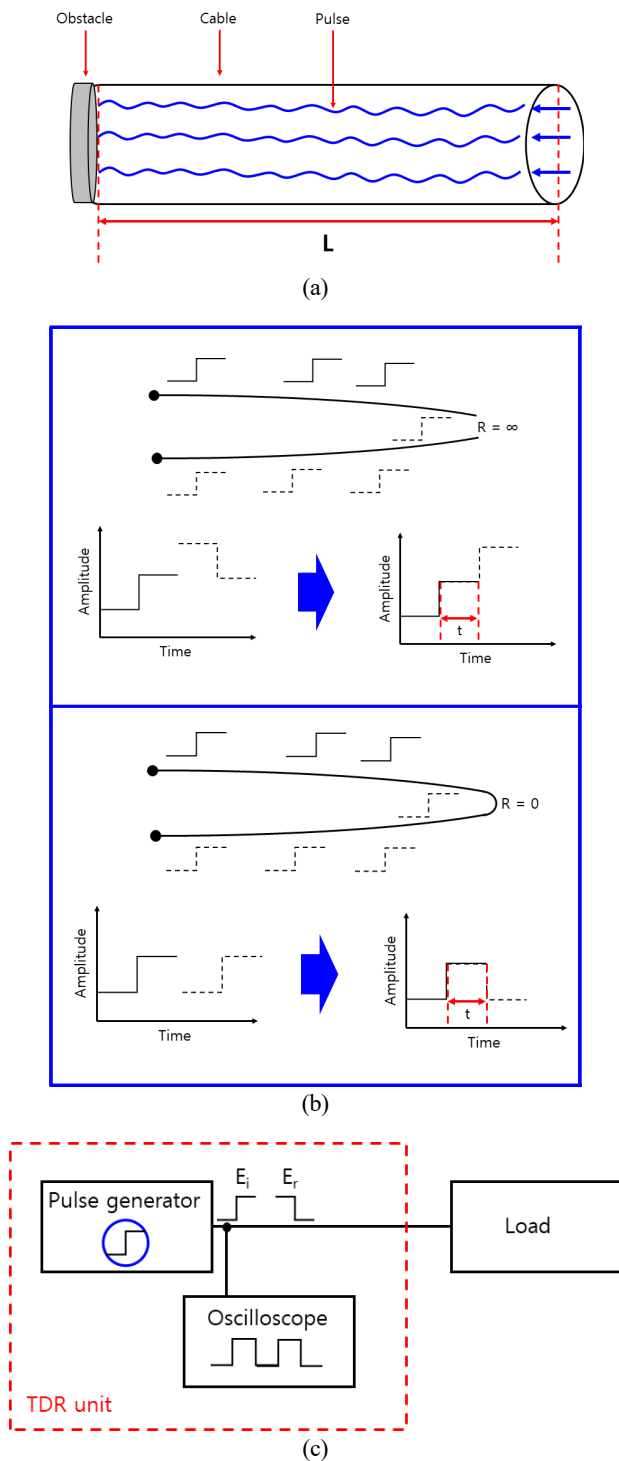


Fig. 1. Working principle of TDR.

구성요소는 발신기와 수신기로 구성된다. 발신기는 고주파의 전자기 파동을 생성 및 전파하는 역할을 하며, 수신기는 원거리 목표물에 부딪혀 반사된 전자기파를 수신한다. 반사파 수신까지의 소요시간과 공기 중의 전파속도를 고려하면,

목표물의 거리와 대상체의 임피던스와 같은 특성을 분석할 수 있다(Hong and Cho, 2007).

케이블형 센서를 이용한 TDR 기법은 레이더의 원리와 유사하다고 볼 수 있다. 수신기와 발신기는 TDR의 계측기이며, 매질은 전송선로로 한 쌍의 케이블형 센서이다(Cataldo et al., 2017). 발신된 전자기파는 케이블을 따라 이동하고 미지의 대상체에 의해 반사된 펄스를 TDR 계측기를 통해 관찰 가능하다. TDR 계측기는 펄스 발생기와 오실로스코프로 구성된다(Kim, 2012b). 모든 미지의 대상물은 부하(Load)이며, 고유의 사인파를 갖고 있다. 따라서 부하에 의해 반사된 사인파를 이용하여 시간간격에 따른 전압변화를 시각화할 수 있으며, 시각화된 파형은 TDR 신호로 표현된다. TDR 신호는 전송선로의 저항, 반사되는 유전체 특성을 반영하며, 반사파의 소요시간은 이러한 특성으로 달라진다. 반사된 신호로 유전체의 특성을 파악할 수 있으며, 소요시간을 통해 유전체의 위치정보를 파악할 수 있게 되는 것이다.

Fig. 1(a)는 TDR 원리 설명의 위해 케이블, 펄스와 부하를 나타낸 것이다(Hanshemian, 2004). 계측기에서 발신한 펄스는 케이블을 통해 이동하며, 부하에 의해 반사된 후 계측기에도달한다. 반사파가 계측기에도달했을 때 소요시간을 측정한다면, 계측기에서 부하까지의 거리는 식(1)과 같이 산출할 수 있다(Hanshemian, 2004).

$$L = \frac{t}{2} V \quad (1)$$

V : 펄스의 속도, L : 장애물까지 거리, t : 반사된 소요시간

Fig. 1(b)는 케이블의 고장유무를 판단하는 원리와 그에 따른 신호형상을 나타낸 것이다. 케이블의 고장유무는 단선(open)과 단락(short)으로 판단할 수 있으며, 이러한 특성을 부하에 적용하였다(Kim et al., 2015). 케이블의 단선은 부하저항이 무한대이며, 단락은 부하저항이 없는 것과 같다. 부하저항이 무한대인 경우, 반사파의 펄스는 발신된 펄스의 두 배가 되어 위로 볼록한 형상이 나타난다. 이 형상의 궤적의 크기는 부하에 따라 달라진다. 만약 부하저항이 없는 경우, 반사된 신호는 없기 때문에 반사파는 발신된 펄스와 동일하다.

Fig. 1(c)는 TDR 계측기와 부하의 모식도를 나타낸 것이다. TDR은 주파수 형태의 펄스를 발신하며, 부하에 의한 시간지연을 측정하는 것이기 때문에 부하저항은 임피던스가 된다. 전송선로에서 임피던스는 반사파 크기를 결정하는 중요한 지표이다. 반사파를 형성하는 반사계수는 부하에 따른 입사파와 반사파의 진폭 비로 나타낼 수 있으며, TDR 검사

후 파형은 일반적으로 거리에 대한 반사계수(Reflection Coefficient)로 표현되고 이를 TDR 특성신호라고 정의한다(Yu et al., 2018). 반사계수는 식(2)와 같이 표현된다.

$$\rho = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2)$$

ρ : 반사계수, E_r : 반사파의 진폭, E_i : 입사파의 진폭,
 Z_L : 부하의 임피던스, Z_0 : 케이블의 임피던스

케이블이 단선될 경우, 부하의 임피던스는 무한대이기 때문에 반사계수는 1로 산출되며, 이 때 반사파(E_r)는 영향을 받지 않는다. 반면, 케이블이 단락된 경우, 부하의 임피던스는 0이므로 반사계수는 -1이며, 반사파와 입사파는 역방향울 의미한다.

TDR 계측기에서 부하까지의 거리는 전자기파의 소요시간과 속도의 곱으로 계산되며, 전자기파의 속도는 식(3)과 같이 표현된다(Yu et al., 2018).

$$v_p \cong \frac{v_c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

v_p : 전자기파의 속도 v_c : 진공에서의 광속, ϵ_r : 비유전율

식(3)에서, 진공에서의 광속은 3×10^8 m/s이며, 비유전율은 매질의 유전율과 진공의 유전율의 비이므로 전자기파의 속도를 산출할 수 있다.

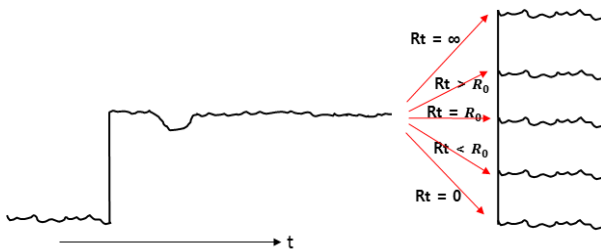


Fig. 2. Various TDR waveforms with different impedances.

Fig. 2는 부하의 임피던스에 따른 파형 변화와 반사계수를 나타낸 것이다(Kim et al., 2015). R_0 는 기준 케이블의 임피던스이고, R_t 는 부하의 임피던스이다. 기준 케이블과 부하의 임피던스가 같을 경우, 식(2)에 의해 산출된 반사계수는 0이다. 따라서 입력파와 반사파는 같으며 이를 정상상태로 정의한다. 기준 케이블의 임피던스가 부하보다 작을 경우, 반사계수는 양의 값으로 산출되어 정상상태의 신호보다 증가

한다. 기준케이블의 임피던스가 부하보다 클 경우, 반사계수는 음의 값을 얻어 정상상태의 진폭보다 감소한다.

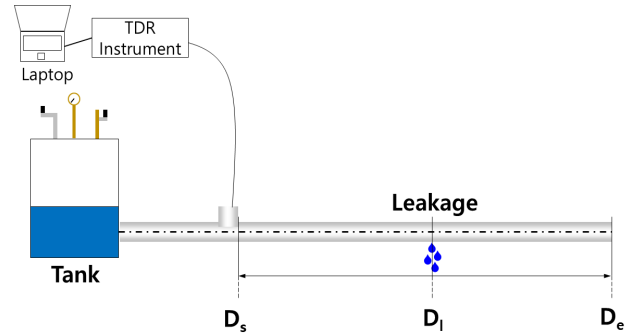


Fig. 3. Schematic diagram of TDR-based leak detection system for pipeline.

Fig. 3은 배관시스템 누수감지를 위한 TDR 시스템의 구성도이다. TDR 시스템은 신호를 모니터링 할 수 있는 컴퓨터, 시간단위 반사파를 임피던스로 변환해주는 TDR 계측기, 누수 여부를 탐지하는 전송선로로 구성된다. 배관시스템의 누수는 부식, 침식 그리고 외부충격 등에 의한 파공으로 발생한다. 누수 발생 시 누수액이 전송선로에 접촉하게 된다. 누수액은 전도성을 가지므로 누수지점에 위치한 센서 신호의 변화를 야기하며, 이 때 반사계수는 음의 값이 되어 정상상태보다 감소하므로 누수 여부를 탐지할 수 있다.

3. 실험방법

3.1 케이블형 센서

1) 센서의 형상 제작

종래의 전송선로는 한 쌍의 케이블을 평행하게 배치한 띠(strip) 형상을 갖고 있다. 본 연구에서 개발한 전송선로는 두 선이 상호 꼬인 구조가 되도록 구성하였다(Suchorab et al., 2018). Fig. 4는 종래의 전송선로와 본 연구에서 개발한 전송선로를 나타낸 모식도이며, 케이블형 센서의 구조를 나타내었다. 케이블형 센서는 도선, 절연 피폭부재 및 흡습부재가 순차적으로 적층된 구조를 이루고 있다. Fig. 4-a에서 1은 흡습부재, 2는 절연 피폭부재이고, 3은 도선을 나타낸다. 개발된 케이블형 센서는 종래의 케이블형 센서에 없는 흡습부재를 포함하여 누설된 액체를 흡수할 수 있도록 하였다(Cataldo et al., 2012). 한 쌍의 전송선로는 임피던스 값이 동일해야하므로 형상과 재질은 같도록 구성하였다. 형상이 다른 두 전송선로를 배관시스템에 설치하여 TDR 신호 특성을 비교·분석하였다.

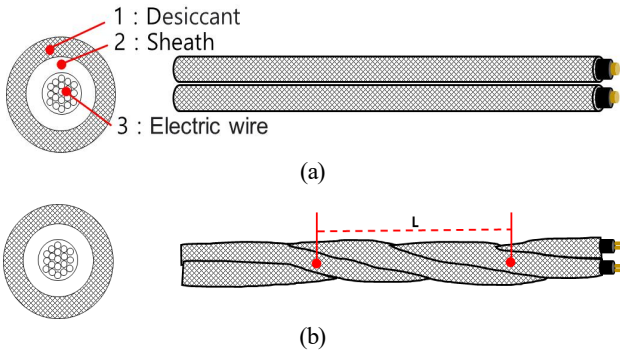


Fig. 4. Configuration of TDR-based leak detection sensor: (a) Conventional sensor (b) Developed sensor.

2) 꼬임형 센서

꼬임 횟수에 따른 전자기과의 신호특성을 관찰하기 위한 실험을 수행하였다. Fig. 4(b)는 단위 길이(L)를 설정하여 단위길이 당 꼬임 횟수를 채택하기 위한 모식도이다. 단위길이(L)는 50 cm로 설정하였고, 단위길이 당 꼬임의 횟수는 임피던스 값이 안정적으로 유지하는 최소 단위를 설정하기 위한 사전 실험 결과에 따라 꼬임 횟수를 변화시켰다. 실험 결과를 고려하여, 단위길이 당 꼬임 횟수는 1, 2, 3, 4, 5 및 10 회로 설정하였다.

3) 피복부재의 두께

꼬임형 전송선로는 입사파와 반사파가 서로 간섭을 주지 않도록 하기 위해 적절한 두께를 선정해야한다. 상용 케이블의 피복 두께는 약 0.78 mm이기 때문에 본 연구에서의 피복두께는 0.2, 0.4, 0.8, 1.2 mm로 선정하여 실험을 수행하였다.

3.2 센서의 설치

본 연구에서는 Fig. 5와 같이 실제 선박 배관시스템 적용 전 사전 연구로서 실험실 규모의 누설 신호 취득 실험을 수행 하였다. 실험구성요소는 컴퓨터, TDR 계측기, 계측기와 센서 연결을 위한 BNC-악어클립 케이블, 한 쌍의 케이블형 센서이다. 센서부와 모니터링 시스템은 10 m의 동축케이블을 이용하여 연결하였다. 배관장치의 경우 Fig. 5와 같이 실제 선박의 배관시스템의 직관부, 곡관부, 수직부 및 이음부를 모두 포함하도록 구성하였다.



Fig. 5. Small scaled indoor experiments for TDR based leak detection system.

Fig. 6은 본 실험에서 구현된 누수 시험의 모식도를 나타낸 것이다. 배관시스템의 직관부에서 누수 시, 누수액은 중력에 의해 배관의 하부로 이동한 후 떨어지므로 전송선로는 직관부 배관 하단부(배관 단면 기준 6시 방향)에 설치하였다. Fig. 6에서 (a)부위는 배관의 플랜지 이음부의 설치방법을 나타낸 것이며, 전송선로는 플랜지 형상에 따라 부착하였다. Fig. 6에서 (b)부위는 곡관부 및 수직부에서는 전송선로를 나선형으로 배관 표면에 감싸면서 설치하였다. 나선형으로 설치된 전송선로는 모든 방향의 누수를 감지할 수 있도록 하였다.

직관부는 10 cm 마다 해수 액적을 투하시켜 흡습부재와 전송선로에 충분히 흡수되도록 하였다. 곡관부의 경우 한 지점에 해수 액적을 투하시켜, 전송선로의 굽힘 작용에 의한 누수 영향을 분석하였다.

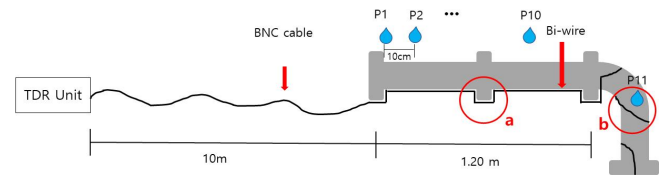


Fig. 6. Schematic diagram of TDR based leak detection system.

3.3 TDR 기기 및 데이터 획득

Fig. 7은 TDR 계측기, 서버와 클라이언트의 일부를 나타낸 것이다. TDR 계측기에서 처리된 TDR 신호를 실시간으로 모니터링 및 저장을 위해 서버-클라이언트를 구축하였다. TDR 계측기는 Hyperlabs 사의 HL1101을 사용하였으며, 사양은 Table 1과 같다.

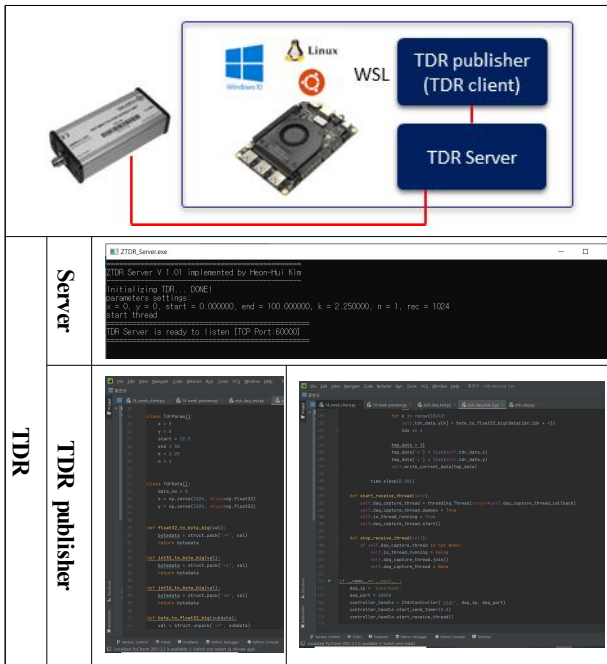


Fig. 7. TDR data acquisition using server-client model.

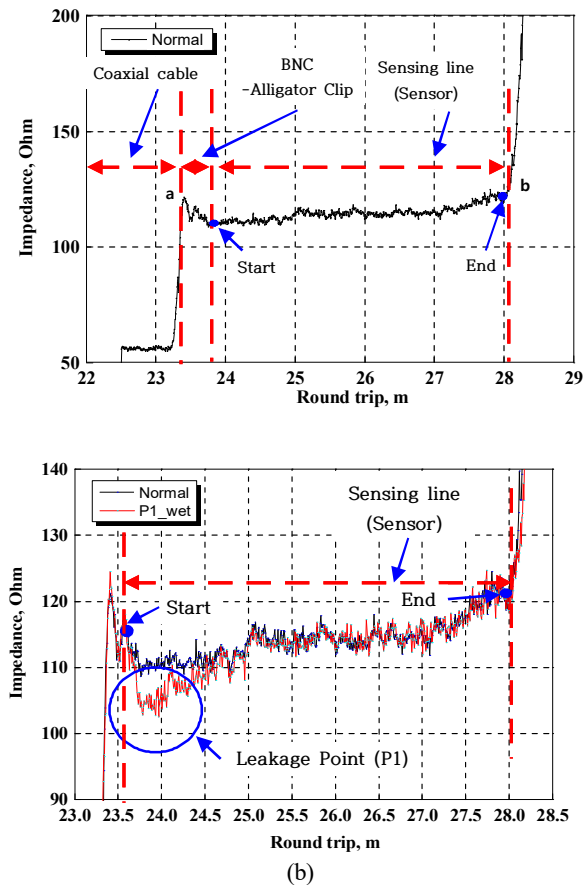


Fig. 8. TDR signal graph acquired for twisted cable.

Table 1. Technical specifications of HL1101

Rise Time (10-90%)	200 ps
Time Base Range	3 μ s
Time Resolution	10.2 ps
Functional Range	200 m (400 m roundtrip)
Distance Resolution	Within \approx 4 cm
Amplitude	+ 250 mV
Aberrations	+15%, -5%, total of 20% peak-to-peak in first 1 ns +3%, -3%, total of 5% peak to peak after 1 ns
Calibration	Internal, \pm 1 Ω at 50 Ω
Time Base Accuracy	\pm 3%
Static Robustness	Complies with Class 2 of ESDS Component Sensitivity Classification (ESD STM5.1-1998)
Output Connector	1 x BNC
Interface	Powered and controlled via one USB cable
Included Software	ZTDR™ for Windows
Horizontal Scaling	Meters, feet, or time (ns)
Vertical Scaling	mV, Rho, normalized, impedance
Dielectric Constant	Selectable, 1.0 to 10.0

4. 실험결과 및 분석

4.1 누수에 따른 TDR 신호

본 연구에서 제안한 꼬임형 센서에 대해 누수에 따른 TDR 신호를 관찰 하였다. Fig. 8(a)은 꼬인 전송선로를 이용하여 정상상태를 나타내는 신호이며, Fig. 8(b)은 P1 지점에 액적을 투하한 후, TDR의 신호를 나타낸 것이다. 그래프의 X축은 왕복거리를 나타내며, Y축은 임피던스 값을 나타낸다. 케이블 형 센서는 길이가 길어짐에 따라 임피던스 값은 증가할 수 있으나, 증가 정도는 미비하게 나타났다. 본 연구에 사용된 TDR 기기는 200m의 유효거리까지 측정이 가능하므로 유효거리 내 임피던스 값은 큰 차이가 없을 것으로 사료된다. 정상상태에 비해 누수가 발생한 위치의 임피던스 값은 감쇠하는 것을 알 수 있다.

배관시스템의 감시범위는 임피던스 값의 피크에 의해 구분된다. 동축케이블은 누수 여부와 관계 없이 케이블 고유의 임피던스인 55 Ω 을 유지한다. a는 감시범위가 시작되는 지점이며, 전송선로 부착에 따른 케이블의 형태 변화로 임피던스는 급격히 상승한다. b는 감시범위가 끝나는 지점이며, 이후 단선에 의해 임피던스가 급격히 증가한다. 따라서

Table 2. Chemical compositions and properties of sea water

Main component (mg/L)						pH	Dissolved oxygen (mg/L)	Electric conductivity (mS/cm)
SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺			
1746	15721	8401	344	1121	357	7.9	16.1	45.3

센서인 전송선로의 감시 구간은 a와 b 사이로 정의할 수 있다.

액적을 투하한 경우, 감시구간에서 임피던스 값은 다음과 같이 산출된다. 한 쌍의 전송선로의 임피던스는 절연피복부재에 의해 약 110~115 Ω로 산출되며, 해수의 임피던스는 20 Ω로 Table 2에 의거한 해수의 전도도로 산출하였다. 한 쌍의 전송선로는 흡수된 해수에 의해 임피던스 값은 105 Ω로 감쇠하였다.

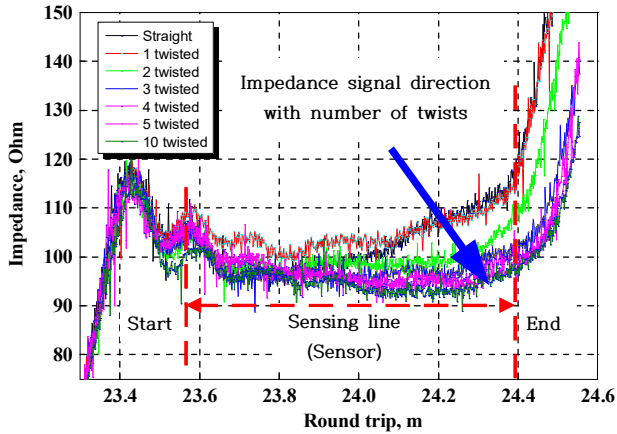


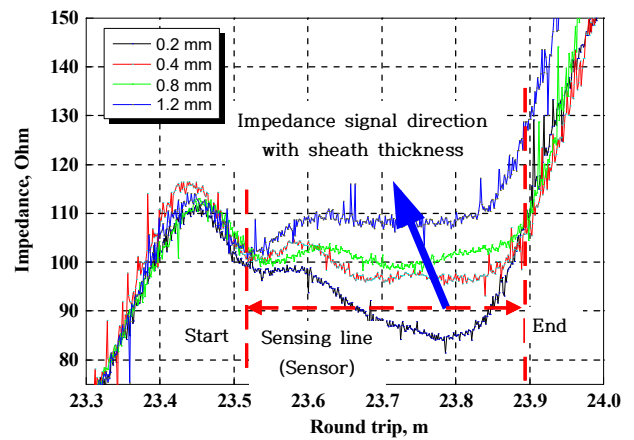
Fig. 9. TDR signal graph with number of twists.

4.2 꼬임 횟수에 따른 정상상태의 신호변화

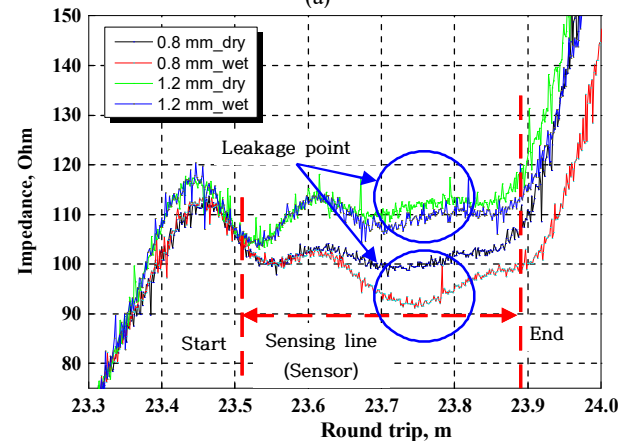
꼬임 횟수에 따른 정상상태의 신호변화를 관찰하기 위한 실험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 측정된 신호를 관찰하면, 꼬임의 횟수가 증가할수록 임피던스 값이 안정되는 것을 볼 수 있다.

평행하게 배치된 전송선로의 경우, 전송선로 사이는 피복부재와 약간의 공기층으로 차폐층을 형성하는데 이는 커패시터 구조와 유사하다고 간주할 수 있다(Kim et al., 2022). 커패시터 구조에 따라 반사파의 신호는 축적되며, 거리증가에 따라 임피던스 값은 점차 상승하여 그래프는 위로 상승한다. 반면에, 전송선로를 서로 꼬인 형상으로 설치하여 꼬임 횟수를 증가시킬 경우, 인덕터 역할로 인해 외부의 전류변화를 상쇄하는 작용이 강해져 거리 증가에 따라 노이즈 없이 평평한 신호를 나타내었다. 꼬임횟수가 5회 이상일 경우, 신호는 크게 달라지지 않았다. 경제성을 고려하여 최소 꼬

임 횟수로 채택하여 설치하는 것이 적합하나, 선박은 횡요, 종요 그리고 진동과 같은 외력이 작용하여 꼬임 횟수는 10~20회 정도로 하여 견고히 설치하는 것이 중요할 것으로 사료된다.



(a)



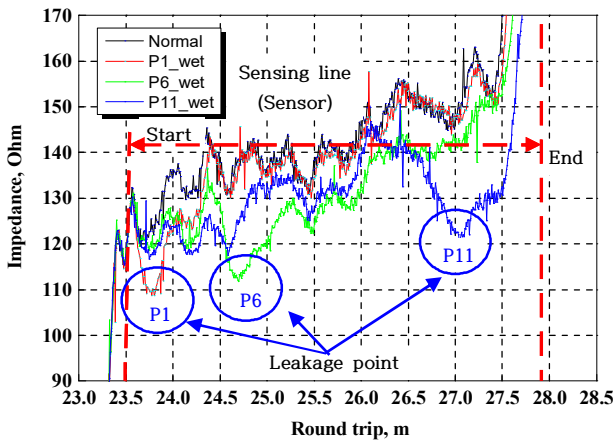
(b)

Fig. 10. TDR signal graph for normal(a) and leakage(b) with sheath thickness of sensor.

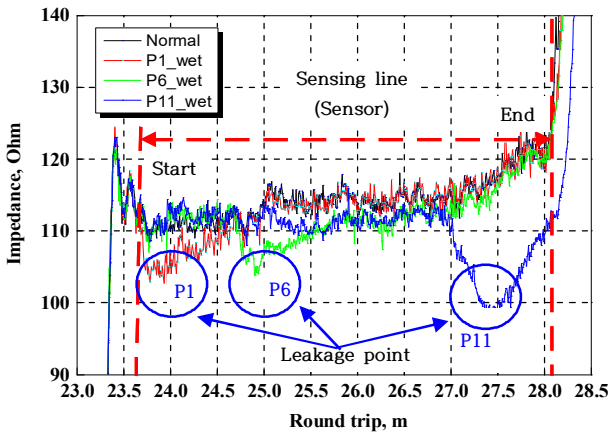
4.3 절연 피복부재 두께에 따른 정상상태 및 누수신호 변화

본 실험에서 전송선로는 서로 꼬인 구조를 형성하므로 절연 피복 부재의 두께는 신호에 영향을 미칠 수 있다. Fig. 10은 피복부재 두께에 따른 정상상태와 누수에 따른 TDR 신호변화를 나타낸 것이다. Fig. 10(a)에서 절연 피복부재의 두

께가 얇을 경우, 전송선로는 상호 간섭 발생 및 약간의 단락으로 임피던스 값은 감소한다. 절연 피복부재의 두께가 두꺼울수록 임피던스 값은 안정적이거나, 과도한 두께의 경우, Fig. 10(b)에서 관찰된 바와 같이 차폐효과가 지나치게 형성되어 누수액에 의한 임피던스 값의 변화가 미비하여 누수 여부 파악에 어려움이 있다. 본 실험에서 개발된 센서의 도체부 직경은 약 1 cm로, 절연 피복부재의 두께는 도선직경의 약 80%에서 120% 사이의 범위로 설정하는 것이 적합하다.



(a)



(b)

Fig. 11. Leakage and location detection signal using TDR sensor: (a) parallel-shaped sensors (b) twisted sensors.

4.4 누수 위치추정과 회귀 분석

Fig. 11은 다중 누수 시 누수위치 추정을 위해 띠 형태의 전송선로와 꼬임 구조의 전송선로에 대한 TDR 신호를 나타낸 것이다. 띠 형태의 전송선로의 경우, 신호 자체가 고르지 않아 누수 신호 여부와 위치 식별이 어려웠다. 반면, 꼬임 구조의 전송선로는 감시 부위가 평활하므로 다중 누수점이 발생하더라도 누수위치를 정확히 파악할 수 있었다.

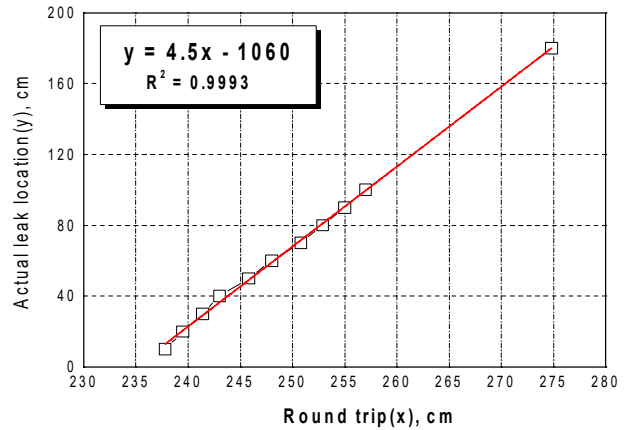


Fig. 12. Linear regression for leak localization estimation.

Fig. 12는 실제 누수 위치와 TDR 계측기로부터 산출된 누수 위치를 비교하기 위한 실험을 진행하였으며, TDR 왕복거리와 실제 누설 위치에 대한 회귀분석 결과를 나타낸 것이다. 각 지점의 신호는 P1을 기준으로 10 cm 간격마다 P2 지점에서 P10 지점까지 누수액을 투하시킨 결과이다. P11 지점의 신호는 나선형으로 감싼 전송선로에 누수액을 투하시킨 결과이며, P1로부터 약 180 cm 떨어진 위치이다.

대표적으로 P1, P6 그리고 P11 지점에서 실제누수위치와 TDR 계측기로부터 산출된 누수위치를 비교하였으며, 이는 다음과 같다. TDR 계측기에서 관찰된 X축의 크기는 왕복거리이기 때문에 누설위치는 편도거리로 산출된다. P5와 P11 지점의 실제누설위치는 P1을 기준으로 각각 50, 180 cm만큼 떨어진 거리이며, TDR 계측기에서 산출된 각 누수지점의 X축의 값은 P1을 기준으로 약 100 cm, 360 cm이다. TDR 계측기에서 산출된 편도길이는 실제 배관의 거리와 유사한 결과를 나타내었다.

실제 누설위치와 TDR 계측기로부터 산출된 누수위치의 값을 선형회귀분석하여 위치추정의 가능성을 나타내었다. 산출된 회귀식은 다음과 같다.

$$y = 4.5x - 1060 \quad (4)$$

회귀식(4)의 결정계수(R²)는 0.9998로 산출되어 실제 누설 위치를 추정할 수 있는 정확도는 99.98 %로 높은 수준의 위치 추정 가능성을 나타내었다.

본 실험의 경우, 상온에서 실험을 수행하여 온도에 대한 영향을 무시하였으나, 온도는 전자기파 측정에 있어 중요한 매개변수로 작용하기 때문에 온도에 따라 달라진 전자기파의 속도를 보완해야한다. 또한 나선형으로 감싼 배관의 누수 위치를 정확히 추정하기 위해 배관 직경과 나선의 피치

를 이용하여 배관길이에 대해 추가적 보정이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 해수배관의 누수 탐지를 위한 TDR 센서 개발과 누설 위치 추정 방법에 대해 고찰하였으며, TDR 센서 역할인 전송선로의 구조, 꼬임 횟수 및 피복 두께를 변수로 실험을 수행하여 수행하였다.

꼬임 형상 전송선로의 신호는 외부 노이즈의 영향이 최소화되어 더 형상보다 평활하게 나타났으며, 나선형으로 배관 표면에 설치한 경우도 안정한 형상이 관찰되었다. 본 연구는 소규모의 실내실험으로 수행하여 외부노이즈의 영향이 많지 않아 꼬임형상으로 노이즈를 제거하였다. 그러나 선박에 적용할 경우, 각종 기기의 진동과 전자기파 등의 노이즈가 발생할 것이다. 이러한 노이즈의 제거는 실제 선박에 설치한 후 기계학습을 통해 제거할 것으로 사료된다. 전송선로의 꼬임 횟수는 단위길이 당 5회 이상으로 설치하는 것이 적합하며, 실제 배관에 부착하기 위해 꼬임 횟수는 단위길이 당 10~20회 정도로 견고하게 설치해야 한다. 전송선로의 피복부재 두께에 따라 신호는 서로 간섭이 생기거나, 누설을 탐지하지 못할 수 있기 때문에 피복부재 두께는 적절하게 설정되어야 한다. 연구 결과, 피복부재 두께는 0.8mm에서 1.2mm 미만일 경우 가장 적합한 것으로 나타났다.

TDR 기법은 전송선로에 충분한 누수액이 흡수되어야 명확한 신호를 얻을 수 있다. 누수 시 누수액은 중력에 의해 바닥으로 낙하하기 때문에, 신호 탐지를 위한 충분한 양을 획득하기 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 센서에 흡습부재를 적용하였으며 일정수준 이상의 신호 강도 향상을 나타냈다.

본 연구는 TDR 기반의 새로운 형상의 누수 감지 센서를 제안하였지만 실제 선박 기관실 적용을 위해서는 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다. 일반적으로 기관실 내부 온도와 해수의 온도차에 의해 해수배관 표면에 응축수가 생성된다. 이 경우 생성된 응축수는 흡습부재에 흡수되어 TDR 계측기와 센서의 임피던스가 변화하므로 누설 신호로 오인될 가능성이 있다. 이러한 운영상 문제점은 기계학습 도입을 통해 해결할 수 있을 것이다. 해수는 응축수보다 전기전도도가 4배 정도 높다. 해수와 응축수의 전기전도도 차이로 임피던스 값의 차이가 발생할 것으로 사료된다. 해수 누수의 신호와 응축수 누수 신호를 기계학습을 통해 이를 구별할 계획이다. 이러한 신호 간섭 문제를 해결하기 위해 최대 우도 추정법(Maximum likelihood estimation)을 고려할 수 있다. 건조 또는 응축수 흡수 상태에서 각 구간의 노이즈를

포함한 신호의 변동 패턴 학습을 통해 정상상태 영역 구성 후 해수 누설을 탐지할 수 있는 기법 개발이 후속연구로서 진행될 예정이다.

감사의 글

“This work was supported by the ‘Autonomous Ship Technology Development Program (2001-1164, Development of Performance Monitoring and Failure Prediction and Diagnosis Technology for Engine System of Autonomous Ships)’ funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea)”

References

- [1] Allal, A. A., K. Mansouri, M. Youssefi, and M. Qbadou(2017), Toward a reliable sea water central cooling system for a safe operation of autonomous ship. In Proceedings of the International Conference on Recent Innovation in Engineering and Technology, Vol. 5, No. 12 pp. 15-16.
- [2] Cataldo, A., E. D. Benedetto, G. Cannazza, A. Masciullo, N. Giaquinto, G. M. D’Aucelli, N. Costantino, A. D. Leo and Marcello Miraglia(2017) Recent advances in the TDR-based leak detection system for pipeline inspection, Measurement, Volume 98, pp. 347-354
- [3] Cataldo, A., G. Cannazza, E. D. Benedetto, and N. Giaquinto (2012), Experimental Validation of a TDR-Based System for Measuring Leak Distances in Buried Metal Pipes, Progress In Electromagnetics Research, Vol. 132, pp. 71-90.
- [4] Fatemi Aghda, S. M., K. GanjaliPour and K. Nabiollahi(2018), Assessing the accuracy of TDR-based water leak detection system, Results in Physics, Vol. 8, pp. 939-948.
- [5] Fisher, M., M. N. Chowdhury, A. A. Khan, and S. Atamturktur(2013), An evaluation of scour measurement devices. Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 33, pp.
- [6] Hanshemian, H. M.(2004), Sensor performance and reliability, International Society of Automation.
- [7] Hong, S. U. and Y. S. Cho(2007), A Study of the Structural Internal Assessment of Concrete Slab Using the Ground Penetrating Radar Exploration, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 23. No. 10 pp. 51-58.
- [8] Hwang, H. K., D. H. Shin, H. H. Kim, and J. H. Lee(2021), Reliability Evaluation of ER Type Corrosion Sensor for Monitoring Corrosion of Piping System Under Accelerated Corrosion Environment, Corrosion Science and Technology,

Vol. 20, No. 6, pp. 403-411.55-67.

- [9] Jiangwen, W., Y. Yang, W. Yinfeng, F. Renjian, and Y. Ning, (2012), Hierarchical leak detection and localization method in natural gas pipeline monitoring sensor networks, *Sensors*, Vol. 12, No. 1, pp. 189-214.
- [10] Kim, D. Y. and S. S. Yoon(2012), Design of Wideband Electromagnetic Wave Absorber Using Magnetic Materials, *Journal of the Korean Magnetism Society*, Vol. 22, No. 6. pp. 210-215.
- [11] Kim, J. S.(2012a), A Study on Application of TDR sensor for Slope Stability Analysis, A thesis for a doctorate, Kyungil University.
- [12] Kim, M. S.(2012b), A Study on Development of the Landfill Liner System Damage Recognition Algorithm using TDR, A thesis for a Master, Kyungil University, Kyungpook National University.
- [13] Kim, T., B. D. Youn, and S. Woo(2015) Model-Based Detection of Pipe Leakage at Joints, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 39, No. 3. pp. 347-352.
- [14] Kim, Y. E., P. W. Jong, and H. S. Lee(2022), The Study on the Inspection Method of CAN Communication Line, *Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers*, Vol. 57, No. 4, pp. 110-115.
- [15] Park, S. K.(2006), Detecting reinforcing bars under multi boundary layers and void shapes in concrete using simulation analysis model of electromagnetic wave radar. *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 26, No. 4A, pp. 809-816.
- [16] Stoianov, I., L. Nachman, and S. Madden(2007), PIPENET: A wireless sensor network for pipeline monitoring, in *Proc. 6th IEEE Int. Symp. Inf. Process. Sensor Netw.*, pp. 264-273.
- [17] Suchorab, Z., M. K. Widomski, G. Łagód, D. Barnat-Hunek, and D. Majerek(2018), A Noninvasive TDR Sensor to Measure the Moisture Content of Rigid Porous Materials. *Sensors*. Vol. 18, No. 11, p. 3935.
- [18] Yu, J. D., J. S. Lee, M. H. Bae, J. Park, and H. K. Yoon (2018), A Study on the Development of Scour Monitoring System Using TDR. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* Vol. 18 , No. 5, pp. 239-245.
- [19] Yuhua, D. and Y. Datao(2005), Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 18, No. 2, pp. 83-88.

Received : 2022. 10. 04.

Revised : 2022. 10. 26.

Accepted : 2022. 10. 28.