

모델 기반 파이프 연결부 누수 감지 시스템

김태진* · 윤병동** · 우시형*

* 서울대학교 기계항공공학부

Model-Based Detection of Pipe Leakage at Joints

Taejin Kim*, Byeng D. Youn**† and Sihyeong Woo*

* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

(Received November 5, 2014 ; Revised December 30, 2014 ; Accepted January 8, 2015)

Key Words: TDR(시간영역반사계), Pipe Leakage Detection(파이프 누수 감지)

초록: 시간영역반사계(time domain reflectometry, TDR)는 한 쌍의 도선에 입력한 파동의 진행 및 반사 현상을 분석하여 도선의 상태를 감시하는 기술이다. 이를 이용하여 본 논문에서는 파이프 연결부의 누수 감지 시스템을 개발하였다. 파이프 표면에 설치된 도선을 통해 TDR 신호를 송신하면, 누수에 의해 도선의 특성 임피던스가 달라지는 지점에서는 반사가 일어나게 되고 이를 기반으로 누수의 발생지점을 추론할 수 있다. 이를 위해, 유한차분 시간영역법(finite difference time domain, FDTD)을 이용한 전진 모델을 만들고, 이의 역문제를 풀어 누수 위치를 추론하였다.

Abstract: Time domain reflectometry (TDR) is widely used for wire failure detection. It transmits a pulse that is reflected at the boundaries of different characteristic impedances. By analyzing the reflected signal, TDR makes it possible to locate the failure. In this study, TDR was used to detect the water leakage at a pipe joint. A wire attached to the pipe surface was soaked by water when a leak occurred, which affected the characteristic impedance of the wet part, resulting in a change in the reflected signal. To infer the leakage from the TDR signal, we first developed a finite difference time domain-based forward model that provided the output of the TDR signal given the configuration of the transmission line. Then, by solving the inverse problem, the locations of the leaks were found.

- 기호설명 -

- V : 전압 (V)
- I : 전류 (I)
- V_g : 소스전압 (V)
- R_g : 소스저항 (Ω)
- R_L : 부하저항 (Ω)
- C : 캐피시턴스 (C/m)
- L : 인덕턴스 (H/m)
- R_F : 누수저항 (Ω)
- L_F : 누수위치 (m)

1. 서론

상/하수도에 사용되는 액체관은 통상적으로

지하에 매설되어 사용된다. 이러한 액체관은 노후화 등의 이유로 손상이 발생하고 누수가 일어나지만, 지하에 매설된 관계로 손상 여부 및 손상 위치의 파악이 용이하지 않다. 누수 문제를 방치하게 되면 불필요한 자원 낭비를 초래할 뿐 아니라 토양 오염과 같은 2차적 피해를 발생시키므로 이를 방지하기 위한 누수 탐지 기술의 개발이 필요하다.

누수는 파이프의 직관부와 연결부에서 발생하며 직관부 누수의 경우, 외부 충격에 의한 배관의 파손에서 기인하는 경우가 대부분이다. 이는 충격을 가한 당사자가 쉽게 누수 여부를 파악할 수 있다는 점에서 누수 감지 시스템의 필요성이 상대적으로 덜하다. 그러나 배관의 노후에 의해 발생하는 누수는 90% 이상이 배관의 연결부에서 발생하고 지하에 매설된 상태로 누수가 발생하기

† Corresponding Author, bdyoun@snu.ac.kr

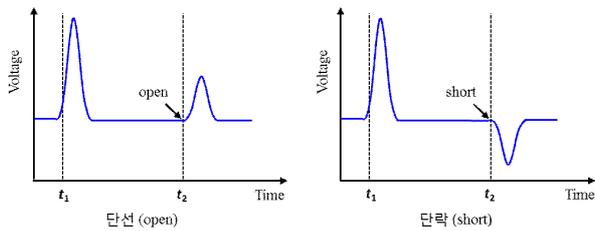


Fig. 1 Pulse response to the open and short of the cable

때문에 누수를 감지하기가 어렵다. 따라서 누수 감지 시스템의 효율성과 경제성을 고려할 때, 배관 전체의 누수 감시보다 연결부 누수를 감지하는 시스템의 개발이 더욱 적절한 것으로 생각된다.

종래의 누수감지 방식으로는 지상에서 청음식으로 탐지하거나, 배관외부에 수분 탐지 센서를 설치하는 방법 등이 있다.⁽¹⁾ 청음식 탐지 방식은 일정량 이상의 누수가 발생하고 나서야 누수 감지가 가능하며 잡음이 심한 곳에서는 정확한 감지가 어렵다. 배관 외부에 부착하는 수분 탐지 센서는 토양 자체의 수분 함량으로 인해 배관 외부에 수분 센서를 설치하는 것이 용이하지 않다. 한편, 수분 감지 테잎을 파이프 외면에 나선형으로 부착하여 누수를 감지하는 방법이 있다. 이는 누수 시, 수분이 감지 테잎에 닿을 때 수분을 감지하는 방식으로 고가의 수분 감지 테잎으로 인해 산업에 적용하는 데 있어 그 실효성은 여전히 의문으로 남는다. 이 같은 단점을 극복하기 위한 방안으로 TDR(time domain reflectometry)과 전도선을 이용한 누수 감지 방법이 개발되었다.⁽²⁾ 누수 시 전도선이 끊어지게 되면 TDR의 신호변화를 분석하여 전도선의 끊어진 부위를 탐지하는 원리이다. 그러나 이 같은 방식은 누수 시 도선이 반드시 끊어지는 것을 가정하고 있으나, 실제로는 경우에 따라서 도선의 절단이 발생하지 않을 가능성을 내포한다. 또한 신호를 육안으로 판단하기 때문에 노이즈 또는 누수 외 다른 요인에 의한 신호 변화를 누수에 의한 변화와 오인할 가능성을 내포한다.

본 연구의 목적은 배관의 연결부위에서 발생하는 누수를 강건하게 감지하는 시스템의 개발에 있다. 이를 위해 본 연구에서도 TDR과 배관 외부에 부착된 전도선을 이용한다. 그러나 전술한 예와 같이 누수 시 전도선이 끊어지는 단선 신호 대신에 전도선이 젖으며 발생하는 단락 신호에 의존하여 누수 여부와 위치를 추정한다. 특히 TDR 신호 변화를 육안에 의존하여 판단하지

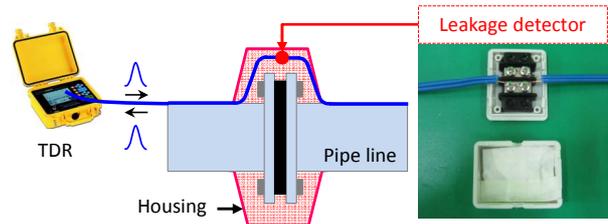


Fig. 2 TDR based pipe leakage detection system

않고, 정량화 하기 위해 신호 분석에 베이지안 기법을 도입하였다. 이를 통해 누수에 의한 신호변화와 누수 위치를 정량적으로 제시할 수 있고, 따라서 누수의 강건한 추정이 가능하다.

이후의 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서 TDR과 전체 누수 감지 시스템에 대해 설명하고 3장에서는 주어진 전송선로 상태에 대한 TDR 신호를 모델링하는 전진 모델에 대해 다룬다. 4장에서는 TDR 신호로부터 전송선로의 상태를 추론하는 베이지안 기법을 설명하고 실제 TDR 데이터를 이용하여 검증한다.

2. 누수감지 시스템

2.1 TDR 원리

본 연구에서 사용한 TDR은 한 쌍의 금속 도체로 이루어진 전송선로의 한 쪽에 전압을 인가하고 반사된 전압 파형을 분석하여 전송선로의 전체 상태를 원격으로 진단하는 기술을 의미한다. 전송선로 한쪽에 전압 펄스를 인가하면 전송선로를 매개로 하여 전자기파가 진행하게 되는데, 전송선로의 특성 임피던스가 변화하는 지점에서 펄스의 반사가 발생하게 된다. 펄스의 반사 형태와 펄스의 반사시간을 고려하여 전송선로 상에서 일어나는 사건을 분석할 수 있다. 먼저 반사된 파형의 크기는 반사계수 ρ 로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1)$$

여기서 Z_0 는 전송선로의 특성 임피던스, Z_L 은 전송선로의 매질 특성이 변하는 지점의 특성 임피던스 값이 된다. 대표적인 특성 변화는 단선(open)과 단락(short)을 들 수 있으며 단선과 단락에 대한 펄스의 반응 파형을 Fig. 1에 보였다. 그림에서 첫 번째 펄스는 TDR이 인가한 전압 펄스에 해당하며 두 번째 펄스는 단락과 단선의 위치에서 반사되어 TDR로 되돌아오는 펄스 신호이다. 단락과 단선의 특성 임피던스는 각각

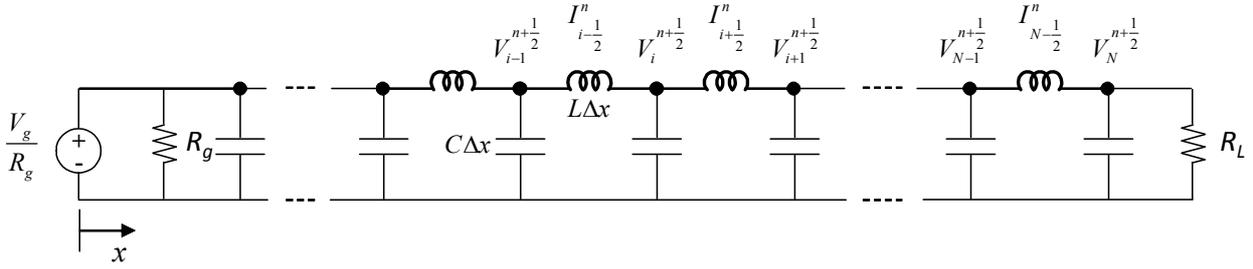


Fig. 3 LC distribution model for transmission line

0과 무한대 값을 가지므로 이들의 반사계수는 -1과 1이 된다. 따라서 Fig. 1에서와 같이 단락에 대해서는 위상이 역전된 신호가 반사되며 단선에 대해서는 동일한 위상의 반사신호를 얻는다. 또한 반사되는 시간과 펄스의 속도로부터 특성 임피던스가 변하는 위치 L_f 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$L_f = v \frac{t_2 - t_1}{2} \quad (2)$$

여기서 v 는 펄스의 속도, t_1 과 t_2 는 펄스의 인가 시간 및 반사 시간을 의미한다.

2.2 누수검출기

TDR을 이용하여 누수를 검출하기 위해서는 누수 부위에서 TDR에 연결된 한 쌍의 전도선에 단락 또는 단선이 일어나야 한다. 누수 발생 시 전도선에 누수액이 스미면 누수액이 전해질의 역할을 하여 양 도선 사이에 전류가 흐르게 되고 약한 단락이 발생한다. 누수 시 전도선의 단락이 효율적으로 발생하도록 Fig. 2와 같은 장치를 고안하여 배관 연결 부에 부착하였다. 누수가 발생하면 배관 연결부를 감싸는 외부 하우징에 누수액이 차올라 누수 검출기 내부로 누수액이 유입되고 단락이 발생하게 된다. 또한, 전하의 이동을 도와 단락의 효과를 높이기 위해 염화나트륨, 즉 소금과 같은 전해물질을 내부에 넣어 두었다.

3. TDR 전진 모델(Forward Model)

본 장에서는 전송선로의 특성이 주어질 때, 이에 대응하는 TDR 신호를 산출하는 전진 모델을 개발한다.

에너지 손실이 없는 전송선로는 Fig. 3과 같이 충분히 작은 LC 회로가 연속해서 연결된 분포 모델을 이용하여 표현할 수 있으며, 이로부터 다음의 전류, 전압에 관한 지배 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial I(x,t)}{\partial x} &= -C \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial V(x,t)}{\partial x} &= -L \frac{\partial I(x,t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 I 는 전류, V 는 전압이며, x 와 t 는 각각 전송선로 상의 위치와 시간을 의미한다. L 과 C 는 단위길이에 대한 인덕턴스 (H/m)와 캐패시턴스 (C/m)다.

전송선로의 모델링은 FDTD (finite difference time domain) 방법을 이용하였다. FDTD 방법에 따라 지배방정식을 중앙차분으로 이산화하여 식 (4)를 얻는다.

$$\begin{aligned} V_i^{n+1/2} &= V_i^{n-1/2} - \frac{\Delta t}{C\Delta x} \left(I_{i+1/2}^n - I_{i-1/2}^n \right) \\ I_{i+1/2}^{n+1} &= I_{i+1/2}^n - \frac{\Delta t}{L\Delta x} \left(V_{i+1}^{n+1/2} - V_i^{n+1/2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 Δt 와 Δx 는 시간 및 공간에 대한 이산화 간격을 뜻하고, n 과 i 를 그 인덱스로 사용한다. Δt 와 Δx 는 수치적 안정 조건 $\Delta x \geq v\Delta t$ 를 만족하도록 설정하였다. v 는 펄스의 전송속도를 의미한다.

전송선로의 경계부 모델링은 다음과 같이 수행하였다. 전송선로의 한쪽 경계는 펄스를 발생시키는 TDR 전압원 V_g 가 연결되어 있고 이는 내부저항 R_g 를 가지는 것으로 모델링하였다. 반대편 경계에 대해서는 부하 저항 R_L 로 마감된 것으로 생각한다. 각 경계 조건에서 키르히호프 전류 법칙을 적용하면 경계에서의 전압에 관한 식 (5)를 얻는다.

$$\begin{aligned} V_0^{n+1/2} &= \left(C \frac{\Delta x}{2\Delta t} + \frac{1}{2R_g} \right)^{-1} \left[\left(C \frac{\Delta x}{2\Delta t} - \frac{1}{2R_g} \right) V_0^{n-1/2} - I_{1/2}^n + \frac{V_g}{R_g} \right] \\ V_N^{n+1/2} &= \left(C \frac{\Delta x}{2\Delta t} + \frac{1}{2R_L} \right)^{-1} \left[\left(C \frac{\Delta x}{2\Delta t} - \frac{1}{2R_L} \right) V_N^{n-1/2} + I_{N-1/2}^n \right] \end{aligned} \quad (5)$$

마지막으로 누수 발생 시 전송선로가 물에

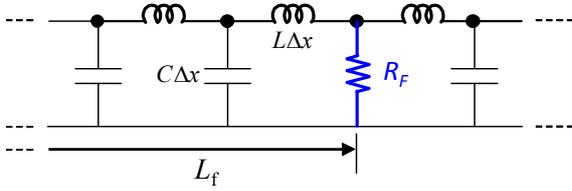


Fig. 4 Distribution model at leakage location, L_f

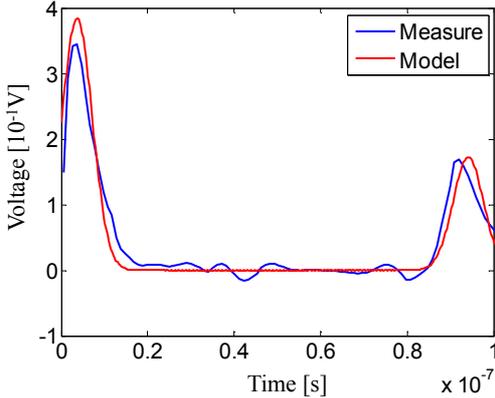


Fig. 5 Measured signal vs. modeled signal

잠기며 발생하는 임피던스의 변화는 전송선로 상의 누수 발생 위치 L_f 에 저항 R_f 를 추가하여 Fig. 4와 같이 모델링 할 수 있다. Fig. 4에 키르히호프 전류 법칙을 적용하면 누수 발생 위치에서의 전류와 전압은 다음과 같이 표현된다.

$$I_{i-\frac{1}{2}}^n = I_{i+\frac{1}{2}}^n + \frac{V_i^{n+\frac{1}{2}}}{R_f} \tag{6}$$

$$V_i^{n+\frac{1}{2}} = R_f \left(I_{i-\frac{1}{2}}^n - I_{i+\frac{1}{2}}^n \right)$$

여기서 R_f 는 누수에 대응하는 전송선로의 저항값이며 좌변의 V 와 I 는 누수 발생 노드에서의 전압과 전류, 우변의 V 와 I 는 누수 발생 노드 이전의 전압과 전류이다. 식 (4-6)으로부터 전송선로의 특성 값 L, C, R_g 가 주어질 때, 이에 대응하는 TDR 신호를 얻을 수 있게 된다.

전술한 전진 모델을 이용하기 위해 파라미터 L, C, R_g 를 실험적으로 구하였다. 8m 길이 전송선로에 대한 TDR 측정신호와 모델 신호간의 RMS(root mean square) 오차를 최소로 하는 값으로 각 파라미터를 선정하였다. Table 1에 전진모델에 쓰이는 파라미터를 정리하였고 Fig. 5에 그 결과를 보였다. 그림에 나타난 첫 번째 펄스는 TDR이 전송선로에 인가하는 전압 펄스이고 두 번째 펄스는 전송선로의 끝단에서 TDR로 되돌아오는 펄스이다.

Table 1 Parameters for the forward model

Parameter	Value
L	2.9379e-07 H/m
C	1.0626e-10 C/m
R_g	15.5778 Ω
R_L	Infinite Ω
Δx	0.1 m
Δt	5.5873e-10 s
v	1.7898e+08 m/s

4. 베이지안 추론

본 장에서는 누수 시 획득한 TDR 측정 신호로부터 전진모델의 파라미터, 즉 전송선로의 특성을 추론하는 베이지안 방법에 대해 제안하고 이를 실험적으로 검증하였다.

4.1 베이즈안 추론 체계

베이지안 기법은 미지의 파라미터에 대한 확률분포를 측정 데이터에 기반하여 추론할 수 있는 있는 방법을 제공한다. 추론하려는 파라미터의 베이지안 사후확률 (posterior) 분포는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\Pr(\theta | y) = \frac{\Pr(y | \theta) \Pr(\theta)}{\int \Pr(y | \theta) \Pr(\theta) d\theta} \tag{7}$$

여기서 θ 는 추론 대상 파라미터이며 본 연구에서 $\theta=(L_f, R_f)^T$ 로 주어진다. L_f 는 누수의 위치이며 R_f 는 누수 위치에서 전송 선로의 저항이다. y 는 TDR로 측정되는 신호를 의미한다.

식 (7)의 사후확률분포를 얻기 위해 사전확률 (prior) 분포 함수 $\Pr(\theta)$ 와 우도(likelihood) 함수 $\Pr(y|\theta)$ 가 요구된다. 먼저 사전확률분포 $\Pr(\theta)$ 는 L_f 와 R_f 가 독립이라는 가정하에 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Pr(\theta) = \Pr(R_f) \cdot \Pr(L_f) \tag{8}$$

윗 식에서 L_f 에 대한 사전확률분포 $\Pr(L_f)$ 는 균등(uniform) 분포를 이용하여 $L_f \sim \mathcal{U}(0, l)$ 로 나타낼 수 있으며, 여기서 l 은 전체 전송선로의 길이이다. 이 같은 분포는 전송선로상의 어느 위치에서든 누수가 일어날 수 있음을 의미한다. R_f 에 대한 사전확률분포 $\Pr(R_f)$ 는 가우시안(Gaussian) 분포를 이용하여 $R_f \sim \mathcal{N}(30, 15)$ 로 선정하였다. 이는 전진모델에서 물에 대한 R_f 값인 45 Ω 에서 의도적으로 벗어난 값이다. 다음 절에서 도선 상에 물이 존재할 때 R_f 의 사후확률분포가 45 Ω 에 가깝게 갱신됨을 알 수 있다.

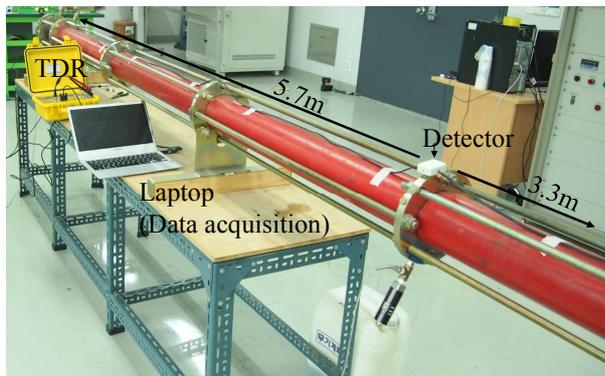


Fig. 6 Experimental setting

우도 함수는 TDR 측정 데이터에 대한 분포를 뜻한다. TDR 측정 데이터는 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$y = v_M(\theta) + \nu \quad (9)$$

식 (9)에서 y 는 TDR 측정 데이터, $v_M(\theta)$ 은 전진 모델로 주어지는 모델의 신호이고, ν 는 노이즈를 나타낸다. y, v_M, ν 는 크기 n 인 벡터로 주어진다. 노이즈 벡터의 각 원소는 서로 독립인 가우시안 분포 $\nu \sim \mathcal{N}(0, \sigma_M)$ 로 가정하였다. 따라서 y 에 대한 우도 함수는 다음과 같은 식으로 표현된다.

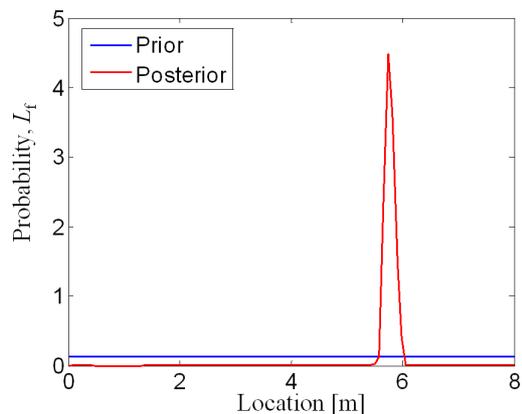
$$\Pr(y | \theta) = (2\pi\sigma_M)^{-n/2} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_M} \|y - v_M\|^2\right) \quad (10)$$

이는 평균이 v_M 이고 분산이 σ_M 인 서로 독립인 n -변량 가우시안 확률분포이다. 식(8, 10)으로부터 식 (7)로 주어지는 사후확률 분포를 계산할 수 있게 된다. 식 (7)의 분모는 정규화 인자로 식 (8, 10)으로부터 수치적으로 구할 수 있다.

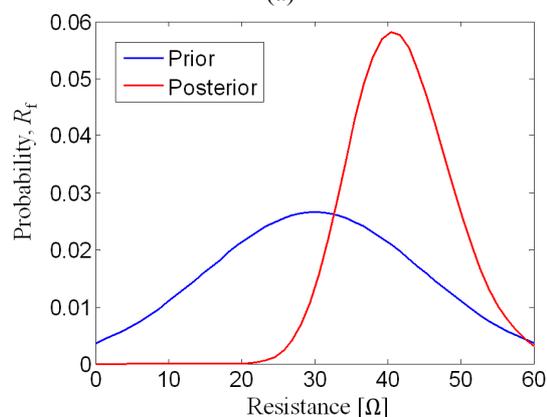
4.2 베이저안 누수 감지 방법 검증

개발된 누수 감지 방법으로부터 데이터 y 가 주어질 때의 전송선로의 파라미터 L_f, R_f 의 확률 분포 $\Pr(L_f, R_f | y)$ 를 추론할 수 있다. 그 유효성을 검증하기 위한 실험을 진행하였다. 먼저 우도 함수의 파라미터 σ_M 을 실험적으로 계산하였다. Fig. 5의 측정 데이터와 모델 신호 간의 차이를 분산값으로 사용하였으며 이로부터 $\sigma_M = 0.6329$ mV를 얻었다.

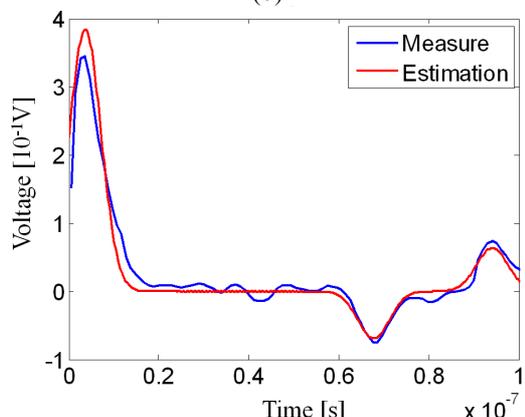
다음으로 전체 8m 길이 평행도선의 5.7m 지점에 누수 환경을 조성하고 그 때의 TDR 신호를 측정하였다(Fig. 6). 측정된 신호와 식 (7, 8, 10)으로부터 θ 에 대한 사후확률분포를 계산할 수 있다. Fig. 7에 θ 에 대한 사전확률분포와 사후확률분포를 보였다. 각 분포의 MAP (maximum a posteriori)는 R_f 의 경우 40.41 Ω ,



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 (a) Prior and posterior distribution for L_f , (b) prior and posterior distribution for R_f , (c) measured signal and estimated signal from the result of maximum a posteriori (MAP)

L_f 의 경우 5.7374m로 나왔다(Fig. 7(a, b)). R_f 가 사전에 알고 있던 물의 저항값 45 Ω 과 유사하므로 전송선로에 발생한 특성변화가 누수에 의한 것임을 짐작할 수 있다. 5 Ω 의 오차는 의도적으로 편향된 사전확률분포에 의한 결과이다. 만일 누설을 감지하려는 매질의 사전확률분포를 정확히 알 수 있다면 추정값은 개선될 수 있다. 또한 L_f 의 사후확률분포로부터 누수의 위치가

실제 누수위치인 5.7m 부근임을 알 수 있고 이로부터 제시한 방법이 유효함을 확인할 수 있다.

추론한 파라미터를 전진 모델에 다시 대입하여 TDR 신호를 생성하고 이를 측정된 신호와 비교한 결과를 Fig. 7(c)에 보였다. 그림에서 첫 번째 펄스는 TDR이 전송하는 전압 펄스이고 두 번째 위상이 역전된 펄스는 누수에 의해 반사되는 펄스이며, 마지막에 나타난 펄스는 전선의 끝단에서 반사되는 펄스이다. 그림으로부터 전진 모델의 신호가 측정 신호와 유사함을 알 수 있으며 이로써 전진 모델 또한 유효함을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 TDR을 이용한 파이프 연결부의 누수 감지 시스템을 다루었다. 전송선로의 특성에 따른 TDR 신호를 생성하는 전진 모델을 만들었고, 베이지안 추론을 통해 임의의 TDR 신호가 주어졌을 시 전송선로의 파라미터, 특히 누수의 위치에 관련한 파라미터의 추론을 통해 누수의 발생여부 및 누수 발생 위치를 효과적으로 알 수 있었다.

그러나 본 연구는 단일 전송선로에 대한 TDR 신호만을 다루었으나 전송선로가 네트워크로 구성된 경우 및 다중 누수에 대한 신호 분석은 아직 이루어 지지 않았다. 관련한 연구는 후속 연구에서 수행할 계획이다.

후 기

본 연구는 산업기술연구회 연구사업의 일환으로 한국기계연구원의 지원을 받아 수행 중인 “대형 기계설비 안전기술 개발” 사업의 위탁연구 결과이며 관련 지원에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

- (1) Hunaidi, O. and Giamou, P., 1998, “Ground-Penetrating Radar for Detection of Leaks in Buried Plastic Water Distribution Pipes,” *7th International Conference on Ground-Penetrating Radar*, pp. 783~786.
- (2) Kang, B.-M. and Hong, I.-S., 2004, “A Study on a Leakage Sensing Pipe and Monitoring System Using TDR in GIS,” *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 7, No. 4, pp. 567~578.
- (3) Gedney, S. D., 2011, *Introduction to the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Method for Electromagnetics*, Morgan & Claypool, California, pp. 21~37.
- (4) Bishop, C. M., 2006, *Pattern Recognition and Machine Learning*, Springer, New York.
- (5) Schuet, S., Timuçin, D. and Wheeler, K., 2011, “A Model-Based Probabilistic Inversion Framework for Characterizing Wire Fault Detection Using TDR,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 60, No. 5. 1654~1663.