

# 가우시안 포락선 선형 칩 신호의 순시 주파수 추정을 통한 원전 내 계측 케이블의 고장점 진단 연구

## Instantaneous Frequency Estimation of the Gaussian Enveloped Linear Chirp Signal for Localizing the Faults of the Instrumental Cable in Nuclear Power Plant

이 춘 구\* · 박 진 배<sup>†</sup> · 윤 태 성\*\*  
(Chun Ku Lee · Jin Bae Park · Tae Sung Yoon)

**Abstract** - Integrity of the control and instrumental cables in nuclear power plant is important to maintain the stability of the nuclear power plants. In order to diagnose the integrity of the cables, the diagnostic methods based on reflectometry have been studied. The reflectometry is a non-destructive method and it is applicable to diagnose the live cables. We introduce a Gaussian enveloped linear chirp reflectometry to diagnose the cables in the nuclear power plants. In this paper, we estimate the instantaneous frequency of the Gaussian enveloped linear chirp signal by using the weighted robust least squares filtering to localize the impedance discontinuities in the class 1E instrumental cable.

**Key Words** : Cable fault localization, Weighted robust least squares, Gaussian chirp signal, Reflectometry, Instantaneous frequency estimation, Auto-regressive model

### 1. 서 론

원자력 발전소 내 제어/계측 케이블은 원전의 안전과 관련된 설비를 동작시키거나, 제어를 위한 상태 측정 데이터를 전송하는 역할을 한다. 이와 같이 원자력 발전소 내 제어/계측 케이블은 원자력 발전소의 안전에 직접적으로 관련이 있는 소자임에도 불구하고, 이에 대한 진단, 감시 및 연구는 미미하였다. 최근 들어 원전 내 설치된 케이블의 설계 수명 종료 시기가 임박해오고 있으며, 장기 가동 원전의 면허 갱신을 위해서 원전 내 포설된 케이블의 건전성 검사가 필요하게 되었다. 원전 내 케이블은 원전 관리자의 접근이 용이한 곳에 포설되어 있는 경우도 있으나, 대부분 지하관로, 트레이 및 덕트에 의하여 접근성이 제한되며, 포설 길이도 수백 킬로미터에 이르기 때문에 육안을 이용한 진단 방법은 한계가 있으며, 이에 따라 원전 내 케이블을 진단하기 위한 기법들이 개발되어 왔다 [1].

현재 원전 내 케이블은 주기적으로 진단되고 있다 [2]. 계획 정비 기간에 케이블의 상태를 진단하는 것으로 시간적 제약으로 인하여 케이블의 전수 검사가 불가능하며, 운전 시 발생하는 결함을 검출하지 못하는 단점이 있다. 따라서 이러한 주기적인 진단 기법의 한계를 극복하기 위하여 상태 기반 진단 기법 (condition based management)이 개발되고

있다 [1, 2].

원전 내 케이블의 상태 진단 기법에 관한 연구는 미국 Nuclear Regulatory Commission (NRC)의 Regulatory guide 1.218에 명시되어 있다 [1]. 케이블의 상태 기반 진단 기법은 케이블의 기계적 특성 변화, 화학적 물리적 특성 변화, 전기적인 특성 변화를 분석하는 기법으로 분류할 수 있다 [2]. 케이블 진단 기법 중에서 기계적, 물리적, 화학적 특성 변화 분석법은 케이블을 진단하기 위해서 다수의 시료 샘플이 필요하며, 대부분 파괴적인 진단 방법이다. 다른 진단 기법에 비하여 비파괴적이며 현장 케이블에 적용할 수 있는 장점으로 인하여 케이블의 전기적 특성 변화를 측정하여 진단하는 기법이 연구되고 있다. 대표적으로 절연저항 (insulation resistance) 측정법, 유전손 측정법 (dielectric loss/dissipation factor), 시간 영역 반사파 계측법 (time domain reflectometry, TDR) [3], 주파수 영역 반사파 계측법 (frequency domain reflectometry, FDR) [4], 시간-주파수 영역 반사파 계측법 (time-frequency domain reflectometry, TFDR) [5, 6] 그리고 부분방전 (partial discharge, PD) [7, 8] 측정법이 있다. 전기적인 측정기법 중 절연저항 측정법, 유전손 측정법, 부분방전 측정법은 케이블을 진단하기 위해 케이블을 전원단에서 분리해야 하는 단점이 있다. 반사파 계측법을 이용한 케이블 진단 기법은 접촉식/비접촉식 커플러 회로를 통하여 활성 상태 진단이 가능하기 때문에 반사파 계측법을 이용한 케이블 진단에 대한 연구가 진행되고 있다.

반사파 계측법은 케이블에 기준신호를 인가하고, 케이블 내 임피던스 불연속 지점에서 반사된 신호를 취득하여 불연속 지점의 위치를 검출하는 기법이다. 대표적인 반사파 계측법으로 TDR, FDR, 그리고 TFDR을 들 수 있다. TDR은 인가 신호로서 구형파를 사용하며, FDR의 경우는 정현파를

\* Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

\*\* Department of Electrical Engineering, Changwon National University, Changwon, Korea

<sup>†</sup> Corresponding Author: Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea  
E-mail : jbpark@yonsei.ac.kr

Received : May 19, 2013; Accepted: June 25, 2013

인가 신호로 사용한다. 이에 반해 TFDR은 시간에 따라 주파수가 선형적으로 증가하는 가우시안 포락선 선형 첩 신호를 사용한다. TDR, FDR, 그리고 TFDR은 케이블에 인가하는 기준신호의 종류가 다른 것 이외에도 반사파를 분석하는 방법에서도 차이점이 있다. TDR과 FDR의 경우 반사파를 검출할 때 각각 시간 영역과 주파수 영역에서의 정보만을 사용하는데 비해서 TFDR은 반사파의 위그너빌(Wigner-Ville) 분포를 구하여 시간-주파수 영역에서의 정보를 이용한다는 점에서 차이점이 있다. TDR은 시간영역에서 취득한 파형을 반사파를 검출하는데 직접 사용하기 때문에 주변의 잡음의 유입이나 신호의 변형이 발생하는 경우 반사파 검출이 어렵다는 단점이 있다. FDR의 경우는 인가한 정현파와 반사된 정현파 간의 위상차이로부터 반사파와 인가 신호간의 시간지연을 구하는 방식이기 때문에 주변 잡음의 유입이나 신호의 변형 발생 시, 정확도가 저하 될 수 있다. TFDR은 TDR과 FDR에서와 같은 잡음의 영향을 줄이기 위해서 반사파와 인가 신호간의 시간-주파수 영역에서의 상관함수를 통하여 반사파를 검출하는 방식을 도입하였다. TFDR의 경우 위그너빌 분포의 비선형적인 특성과, 시간-주파수 영역 상호상관함수를 구하기 위한 연산량이 증가하는 단점이 있다. 이러한 단점에도 불구하고, TFDR은 기준신호설계에 있어서의 유연성과, 잡음에 대한 강인성으로 인하여 케이블 진단에 응용되어 왔다.

본 논문에서는 원전 내 제어/계측 케이블인 600V Q-FR-PN-CMS의 임피던스 불연속 지점 검출을 위한 반사파 계측법을 제시하고자한다. 본 반사파 계측법은 2차 자기회귀 모델 (auto-regression model, AR model)을 이용하여 TFDR에서 사용한 기준신호인 가우시안 포락선 선형 첩 신호를 모델링하고, 모델 계수를 가중 강인 재귀 최소 자승법 (weighted robust recursive least squares method)을 이용하여 추정한다. 모델 계수로부터 순시 주파수 성분을 계산하고 이로부터 기준신호와 반사파의 순시 주파수 간의 시간지연을 구함으로써 TFDR의 연산량을 줄이면서, 임피던스 불연속 지점의 검출 정확도를 높이고자 한다. 본 논문에서는 반사파 계측법의 원전 내 제어/계측 케이블 진단에의 적용을 위해서 원전 계측 케이블의 전파 특성 함수, 전파속도를 구하고, 이를 기반으로 반사파 계측법을 위한 기준신호를 설계한다. 그리고 이를 실제 케이블에 적용하여 유용성을 검증한다.

## 2. 본 론

### 2.1 원전내 제어/계측용 케이블

원전 내 사용되는 케이블은 CLASS 1E급과 NON-CLASS 1E급으로 분류할 수 있다. CLASS 1E급은 방사선에 노출될 수 있는 케이블로서 방사능 차폐를 위한 구성요소가 케이블에 포함된다. 본 논문에서 사용한 원전 내 제어/계측용 케이블은 600V Q-FR-PN-CMS로 600V CLASS 1E급 케이블이다. 이 케이블은 외피가 난연 처리 되어 있으며, 내부 도체는 EPR로 절연되어 있고, 시스층은 Chlorosulfonated Polyethylene (CSP)로 구성되어 있다. 차폐층은 CU/MYLAR 테이프로 되어 있으며, 접지선은 주석도금 연동선을 이용하여

구성되어있다. 600V Q-FR-PN-CMS 제어/계측용 케이블의 구조는 그림 1과 같다. 본 논문에서는 30m 길이의 600V Q-FR-PN-CMS 케이블을 대상으로 반사파 계측법을 적용하여 케이블의 임피던스 불연속 지점을 검출하는 실험을 진행하였다.

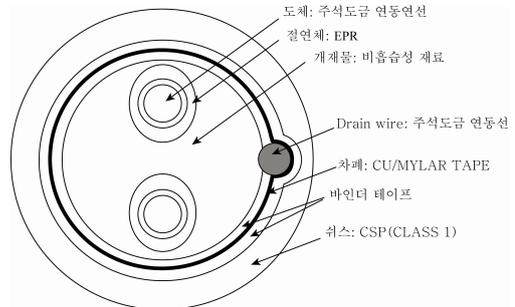


그림 1 600V Q-FR-PN-CMS 케이블 구조  
Fig. 1 Cross-section of the 600V Q-FR-PN-CMS instrumental cable

### 2.2 계측 케이블의 전파 특성 및 전파속도 측정

반사파 계측법을 이용하여 케이블 내 임피던스 불연속 지점을 정확하게 검출하기 위해서는 케이블 내부에서 전자기 신호의 전파 속도를 측정할 필요가 있다. 케이블의 전파속도는 케이블 구조 및 절연층의 종류에 따라 변하기 때문이다. 본 논문에서 사용한 600V Q-FR-PN-CMS 케이블의 전파속도를 측정하기 위해서 네트워크 분석기 (Agilent E5061A)를 이용하였다. 교정된 네트워크 분석기의 양 포트에 1m 길이의 원자력 케이블을 연결한 뒤, S21 파라미터를 측정하였다. 네트워크 분석기의 포트 1에서 포트 2까지 주파수를 순차적으로 증가시키면서 전파하였을 때 주파수 별 군 지연 (group delay)으로부터 케이블 내 전파속도를 측정할 수 있다. 주파수 별 시간 지연을  $t_d(f)$  라 하면 케이블 내 전파속도는 식(1)과 같이 주어진다.

$$v_p(f) = 1/t_d(f) \tag{1}$$

원전 내 제어/전력 케이블의 군 지연을 측정할 결과는 그림 2와 같다. 군 지연 측정결과 1MHz-50MHz 주파수 대역에서 군 지연은 비교적 일정한 것으로 측정되며, 일정한 군 지연은 전파 시 신호 왜곡이 비교적 적게 발생함을 의미한다. 계측 케이블의 S21 파라미터를 측정할 결과는 그림 3과 같다. 50MHz 이하의 주파수 대역에서 감쇠는 미미하게 발생하며 선형 위상을 유지하고 있다. 50MHz 이상의 대역에서는 점차적으로 감쇠가 증가함을 확인할 수 있다.

### 2.3 가우시안 포락선 선형 첩 신호 반사파 계측법

가우시안 포락선 선형 첩 신호는 가우시안 창 함수 (window function)와 시간에 따라 주파수가 선형적으로 증가하는 선형 첩 신호 (linear chirp signal)의 곱으로 표현된다. 가우시안 포락선 선형 첩 신호는 케이블의 전파 특성

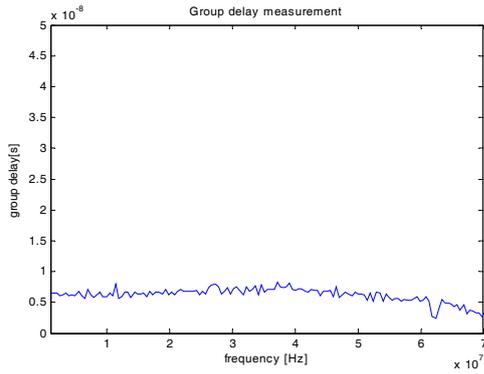


그림 2 군 지연 측정 결과  
Fig. 2 Group delay measurement

및 측정 센서의 대역폭에 따라 주파수 대역을 설계할 수 있으며 또한 시간 폭을 조절할 수 있다.

가우시안 창 함수는 시간축의 분해능과 주파수 축의 분해능이 동시에 좋아 질 수 없음을 나타내는 불확정성의 원리를 위배하지 않는 최소의 경계 값을 달성하는 창 함수이기 때문에 시간-주파수 영역 양쪽에서 최대 분해능을 달성할 수 있으며, 주파수가 선형적으로 증가하는 첩 신호는 일종의 압축신호로서 검파기로 정합필터를 사용하는 경우 높은 신호 대 잡음비와 거리 분해능을 동시에 달성할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 논문에서는 가우시안 포락선 선형 첩 신호를 반사파 계측법의 인가신호로 설정하였으며, 가우시안 포락선 선형 첩 신호는 식 (2)와 같이 주어진다.

$$s_k = Ae^{-(k-m)^2/2\sigma^2} \cos(0.5\xi_d k^2 + \omega_0 k + \phi) \quad (k = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (2)$$

여기서  $A$ ,  $m$ ,  $\sigma$ ,  $\xi_d$ ,  $\omega_0$  그리고  $\phi$ 는 각각 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 크기, 신호의 시간 중심, 시간 폭, 정규화된 각주파수 증가율 (normalized angular frequency sweep rate), 정규화된 시작 각주파수 (normalized initial angular frequency) 그리고 위상 (phase)을 나타낸다. 이 중에서 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 시작 각주파수, 신호 주파수 대역은 대상 케이블에 적합하게 설계 되어야 한다. 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 시작 각주파수는 대상 케이블의 전파 특성, 즉 감쇠 상수와 위상상수를 고려하여 설계 되어야 한다. 케이블의 감쇠가 적으며, 선형 위상을 지니는 대역을 선정할 때 장거리 전파가 가능하며, 신호의 왜곡 (distortion)이 감소하게 된다. 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 주파수 대역은 앞서 언급한 바와 같이 신호의 왜곡과 감쇠에 영향을 주지만, 이와 더불어 신호의 거리 분해능에 관여한다. 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 거리 분해능은 식 (3)과 같이 주어진다.

$$\Delta R = v_p / (2BW) \quad (3)$$

여기서  $BW$ 는 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 주파수 대역을 나타낸다. 즉 주파수 대역이 증가함에 따라 높은 분해능을 달성할 수 있다. 가우시안 포락선 선형 첩 신호의

시간 폭은 신호 대 잡음비에 영향을 주는 파라미터이다. 식 (3)과와 같이 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 거리 분해능은 주파수 대역에만 영향을 받는다. 본 논문에서는 실험 대상 케이블인 600V Q-FR-PN-CMS의 전파 특성을 고려하여 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 시작 각주파수, 주파수 대역을 설계하였다. 그림 3에서 케이블 S21 파라미터는 1MHz-30MHz 대역에서 편평한 특성을 지니고 있으며 선형 위상을 지니고 있다. 50MHz 이상의 고주파수 대역에서는 주파수가 증가함에 따라 감쇠가 증가하는 경향이 있음을 확인하였다.

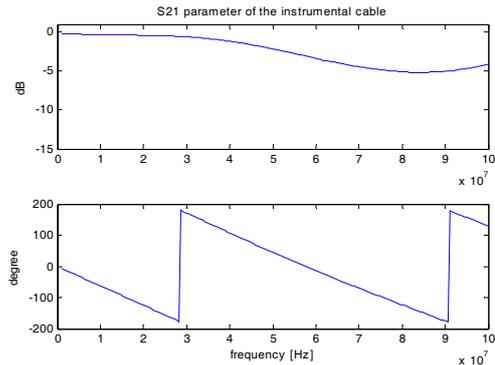


그림 3 S21 파라미터 측정 결과  
Fig. 3 S21 parameter of the instrumental cable

#### 2.4 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 자기 회귀 모델

본 논문에서는 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 순시 주파수 성분의 추정을 통하여 케이블의 임피던스 불연속 지점을 검출하기 위해서 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 2차 자기회귀모델을 유도하고, 2차 자기 회귀모델의 계수 성분으로부터 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 순시 주파수 성분을 추정한다. 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 2차 자기회귀모델은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} a_{k-2}s_k + a_k s_{k-2} &= a_{k-2}a_k \cos(\Phi_k) + a_k a_{k-2} \cos(\Phi_{k-2}), \\ &= 2a_k a_{k-2} \left[ \cos(\Phi_{k-1}) \cos\left(\frac{\xi_d}{2}\right) - \sin(\Phi_{k-1}) \sin\left(\frac{\xi_d}{2}\right) \right] \cos(\omega_{k-1}), \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $\Phi_k = \frac{\xi_d}{2} k^2 + \omega_0 k + \phi$ 는 순시위상 (instantaneous phase)을 나타내며,  $\omega_k = \xi_d k + \omega_0$ 는 순시 각주파수 (instantaneous angular frequency)를 나타낸다.  $a_k = Ae^{-(k-m)^2/2\sigma^2}$ 는 가우시안 포락선의 순시크기 (instantaneous amplitude)를 나타낸다. 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 2차 자기회귀모델을 유도하기 위해서 순시크기를 기준신호 성분에 곱하였다. 기준신호의 순시크기는 기준신호의 파라미터 설계 시 알 수 있으며, 취득된 반사파 신호로부터 추출할 수 있다. 삼각함수 정리를 이용해서 식 (4)를 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

식 (5)에서 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 각주파수는 완만하게 증가하기 때문에  $\cos(\xi_d/2) \approx 1$ ,  $\sin(\xi_d/2) \approx 0$ 로 가정할 수 있다. 따라서 식 (5)는 식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

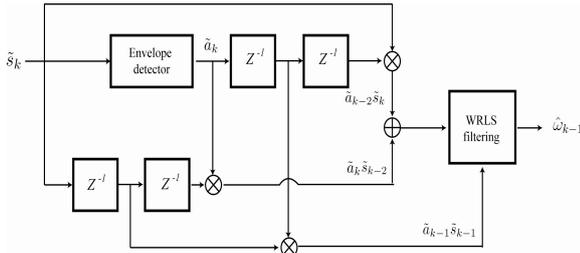


그림 4 제안 기법의 알고리즘 순서도  
 Fig. 4 Flow chart of the proposed algorithm

$$a_{k-2}s_k + a_k s_{k-2} \approx 2a_k a_{k-2} [\cos(\Phi_{k-1})] \cos(\omega_{k-1}). \quad (6)$$

식 (6)에서 순시크기는 가우시안 포락선이므로  $a_k a_{k-2}$ 는 식 (7)과 같은 관계를 만족한다.

$$a_k a_{k-2} = a_{k-1}^2 e^{-2\eta}, \quad (7)$$

여기서  $\eta = 1/2\sigma^2$  이다. 식 (7)을 식 (6)에 대입하여 정리하면, 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 2차 자기회귀 모델은 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} a_{k-2}s_k + a_k s_{k-2} &= 2a_{k-1} e^{-2\eta} \cos(\omega_{k-1}) [a_{k-1} \cos(\Phi_{k-1})] \\ &= 2a_{k-1} e^{-2\eta} \cos \omega_{k-1} s_{k-1} \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)의 우변의 자기회귀모델 계수로부터  $\omega_{k-1}$ 를 추정하기 위해서는 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 순시크기를 추정해야한다. 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 순시크기는 가우시안 포락선 선형 첩 신호를 힐버트 변환 (Hilbert transform)을 이용하여 해석적 신호 (analytic signal)로 만든 뒤, 해석적 신호의 크기를 구하면 된다. 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 해석적 신호는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$a_k = |s_k + jH(s_k)| \quad (9)$$

여기서  $H$ 는 힐버트 변환을 의미한다. 실제 측정된 순시크기 및 가우시안 포락선 선형 첩 신호는 주변 잡음이 포함되어 있다. 따라서 반사파 계측법을 이용하여 측정된 반사파의 2차 자기회귀 모델 식 (6)의 좌변은 식 (10)과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{a}_{k-2}\tilde{s}_k + \tilde{a}_k\tilde{s}_{k-2} &= (a_{k-2} + u_{k-2})(s_k + v_k) + (a_k + u_k)(s_{k-2} + v_{k-2}), \\ &= a_{k-2}s_k + a_k s_{k-2} + \tilde{v}_k, \end{aligned} \quad (10)$$

여기서  $u_k$ 는 순시크기 성분에 포함된 영평균 백색 가우시안 잡음으로 공분산이  $R_k$ 이며,  $v_k$ 는 가우시안 포락선 선형 첩 신호에 포함된 영평균 백색 가우시안 잡음으로 공분산이  $Q_k$ 이다. 본 논문에서는  $E[u_k v_k] = 0$ 으로  $u_k$ 와  $v_k$ 는 상호 비상관성을 지닌 것으로 가정하였다.

$$\tilde{v}_k = a_{k-2}v_k + u_{k-2}s_k + u_{k-2}v_k + a_k v_{k-2} + u_k s_{k-2} + u_k v_{k-2} \text{는 가}$$

우시안 포락선 선형 첩 신호의 2차 자기회귀 모델과 실제 측정치 간의 차이를 나타낸다. 실제 측정된 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 2차 자기회귀 모델은 식 (11)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} &a_{k-2}s_k + a_k s_{k-2} + \tilde{v}_k \\ &= 2(\tilde{a}_{k-1} - u_{k-1})e^{-2\eta} \cos(\omega_{k-1})(\tilde{s}_{k-1} - v_{k-1}) + \tilde{v}_k \\ &= 2(\tilde{a}_{k-1}\tilde{s}_{k-1} - (\tilde{a}_{k-1}v_{k-1} + \tilde{s}_{k-1}u_{k-1} - u_{k-1}v_{k-1})) \\ &\quad \times e^{-2\eta} \cos(\omega_{k-1}) + \tilde{v}_k \end{aligned} \quad (11)$$

이와 같이 반사파 계측법을 이용하여 취득한 가우시안 포락선 선형 첩 신호에는 잡음 성분이 포함되어 있기 때문에 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 2차 자기회귀 모델을 이용하여 순시 주파수를 추정하기 위한 가중 최소 자승 필터를 구성하는 경우, 추정치에 편향오차 (biased error)가 발생하게 된다 [9, 10]. 따라서 본 논문에서는 실 측정치에 포함된 잡음 성분에 의한 편향오차를 보상하기 위한 가중 강인 재귀 최소 자승 필터를 도입하여 측정된 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 2차 자기회귀 모델로부터 순시 주파수를 추정한다.

### 2.5 순시 주파수 추정을 위한 가중 강인 재귀 최소 자승 선형 필터

측정된 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 2차 자기회귀 모델은 측정행렬에 불확도 (uncertainty) 성분이 포함된 측정식으로 표현될 수 있다.

$$y_k = [\tilde{H}_k - \Delta H_k]x_k + \tilde{v}_k \quad (12)$$

여기서  $x_k \equiv \cos(\omega_{k-1})$ ,  $y_k \equiv \tilde{a}_{k-2}\tilde{s}_k + \tilde{a}_k\tilde{s}_{k-2}$ ,  $\tilde{v}_k \equiv a_{k-2}v_k + u_{k-2}s_k + u_{k-2}v_k + a_k v_{k-2} + u_k s_{k-2} + u_k v_{k-2}$ ,  $\tilde{H}_k \equiv 2e^{-2\eta}\tilde{a}_{k-1}\tilde{s}_{k-1}$ , 그리고  $\Delta H_k \equiv 2e^{-2\eta}(u_{k-1}\tilde{s}_{k-1} + \tilde{a}_{k-1}v_{k-1} - u_{k-1}v_{k-1})$ 이다.

측정행렬에 포함된 불확도 성분은 식 (13)과 같은 확률분포를 만족한다.

$$E[\Delta H_k^T \Delta H_k] = W_k, \quad E[\Delta H_k^T \tilde{v}_k] = 0 \quad (13)$$

가중 강인 최소 자승 필터의 상태변수 전파식은 식 (14)와 같다.

$$x_{k+1} = Fx_k \quad (14)$$

여기서  $F$ 는 상태전이행렬을 나타낸다. 상태 천이 행렬을 구하기 위하여 상태 변수간의 관계를 도출하면 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} \cos \omega_k &= \cos \omega_{k-1} \cos \xi_d - \sin \omega_{k-1} \sin \xi_d \\ &= (\cos \xi_d - \sin \xi_d \tan \omega_{k-1}) \cos \omega_{k-1} \\ &\approx (\cos \xi_d - \sin \xi_d (\omega_{k-1})) \cos \omega_{k-1} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서  $\tan\omega_{k-1} \approx \omega_{k-1}$  로 간략화 하였다. 식 (16) 에서 시변하는 정규화 된 순시 각주파수  $\omega_{k-1}$  를 구하는 것은 불가능하므로, 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 에너지가 집중되어 있는 중심 각주파수인  $\omega_c$  로 정규화 된 순시 각주파수 항을 대체하여 모델링하면, 식 (17)과 같은 관계식을 도출할 수 있다.

$$\cos(\omega_k) \approx (\cos\xi_d - \sin\beta(\omega_c))\cos\omega_{k-1} \quad (17)$$

식 (17)로부터 상태 천이행렬은  $F = (\cos\beta - \sin\beta(\omega_c))$  로 주어진다. 가중 강인 재귀 최소 자승 필터는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} P_k^{-1} &= \lambda P_{k-1}^{-1} + \tilde{H}_k^T \tilde{H}_k - W_k \\ \hat{x}_k^{WRLS} &= (I + P_k W_k) \hat{x}_{k-1}^{WRLS} + P_k \tilde{H}_k^T (y_k - \tilde{H}_k \hat{x}_{k-1}^{WRLS}) \\ P_{k+1} &= F P_k F^T \\ \hat{x}_{k+1}^{WRLS} &= F \hat{x}_k^{WRLS} \end{aligned}$$

가중 강인 재귀 최소 자승 필터의 상태 변수는  $x_k = \cos(\omega_{k-1})$  이므로, 순시 주파수,  $\omega_{k-1}$ , 는 식 (18)을 통하여 구할 수 있다.

$$\omega_{k-1} = \cos^{-1}(x_{k-1}). \quad (18)$$

### 2.6 실험 구성 및 결과

본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해서 CLASS 1E급 600V Q-FR-PN-CMS 케이블 30m 지점을 단선 결함을 인가한 후 임피던스 불연속 지점 검출 실험을 진행하였다. 임피던스 불연속 지점 검출 실험을 위하여 가우시안 포락선 선형 첩 신호를 이용한 반사파계측 시스템을 구성하였다. 반사파 계측 시스템은 National Instruments사의 PCI extensions for instrumentation (PXI)과 Labview를 기반으로 구축되었다. 반사파 계측시스템은 가우시안 포락선 선형 첩 신호를 발생시키기 위한 임의파형 발생기 (arbitrary waveform generator : NI-PXI 5422)와 임피던스 불연속 지점에서 반사된 신호 취득을 위한 디지털 스토리지 오실로스코프 (digital storage oscilloscope: NI-PXI 5124)로 구성되었다. 계측 케이블 내 임피던스 불연속 지점 검출을 위한 반사파 계측 시스템의 구성도는 그림 5와 같다.

가우시안 포락선 선형 첩 신호는 임의파형 발생기에 의해서 생성되며, 생성된 기준신호는 T자 커넥터를 거쳐 검사 대상 제어/계측 케이블로 인가된다. 임의파형 발생기와 디지털 스토리지 오실로스코프는 T자 커넥터로 연결되어 있으므로 임의파형발생기로 발생 시킨 기준 신호는 임의파형 발생기와 디지털 스토리지 오실로스코프간의 직접경로를 통하여 전파되어 디지털 스토리지 오실로스코프로 취득된다. 검사 대상 제어/계측 케이블 내로 전파된 기준 신호는 케이블 내 임피던스 불연속 지점에서 반사되어 계측지점으로 다시 전파되고 이는 디지털 스토리지 오실로스코프를 통해 취득된다. 제어/계측 케이블 내의 임피던스 불연속 지점은 대표

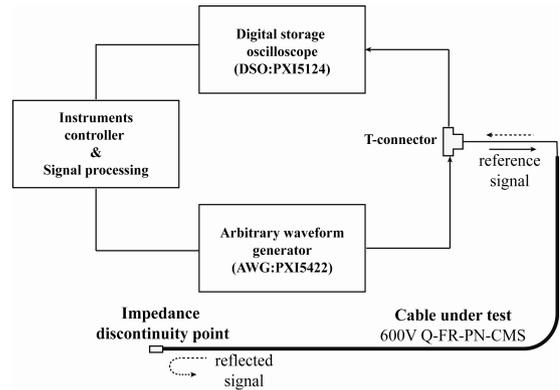


그림 5 가우시안 포락선 선형 첩신호 기반 반사파 계측 시스템

Fig. 5 The schematic diagram of the Gaussian enveloped linear chirp reflectometry system

적으로 케이블간의 접속을 위한 접속재 부분, 분기점, 단선, 단락 및 부적절한 단말처리 부분에서 발생하게 된다. 이러한 케이블 내 임피던스 불연속 지점은 케이블 내에서 케이블의 포설 구조를 파악할 수 있는 특징점 역할을 한다. 다수의 케이블이 복잡하게 포설되어 있는 원전 내 케이블의 특성상 이러한 케이블의 특징점을 정확하게 파악하는 것은 신속한 고장구간 탐지 및 복구를 위해서 필수적이라 할 수 있다. 본 논문에서는 계측 케이블의 임피던스 불연속 지점을 케이블의 중단 지점으로 설정하고, 제안한 기법의 성능을 검증하였다. 계측 케이블의 임피던스 불연속 지점 검출을 위한 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 주파수 대역은 네트워크 분석기를 통해 측정된 S21 파라미터를 기반으로 5MHz-20MHz로 설정하였다. 시간 폭은 기준신호와 반사파간의 중첩 현상을 고려하여 350ns로 설정하였다. 인가 신호의 첨두치는 임의파형 발생기가 발생시킬 수 있는 신호의 최대 첨두치인 5V로 설정하였다. 반사파계측시스템으로 취득한 기준신호 및 반사파 신호는 그림 6의 상단부와 같다.

그림 6 상단부의 그림은 취득한 반사파 신호를 나타낸다. 첫 번째 가우시안 포락선 선형 첩 신호는 임의파형 발생기와 디지털 스토리지 오실로스코프간의 직접 경로를 통해 취

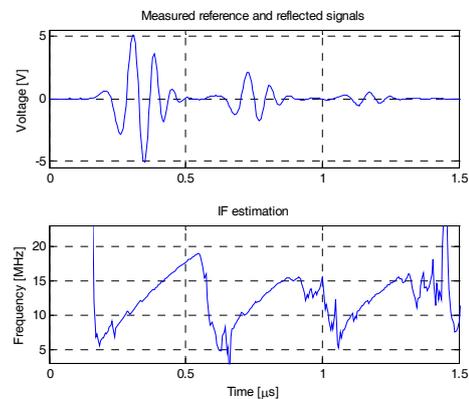


그림 6 추정된 순시 주파수 결과

Fig. 6 Estimated instantaneous frequency of the Gaussian enveloped linear chirp signal

득된 기준신호이며, 두 번째 가우시안 포락선 선형 첩 신호는 케이블의 종단에서 반사된 신호이다. 반사파 신호는 이후 소멸될 때까지 계속해서 반사된다. 따라서 케이블의 종단점을 검출하기 위해서는 기준신호와 종단에서 반사된 신호인 두 번째 가우시안 포락선 선형 첩 신호간의 시간 지연을 구해야 한다. 순시 주파수 추정을 위한 가중 강인 최소 자승 필터의  $x_0$ ,  $P_0$ ,  $\lambda$  그리고  $W_0$ 은 각각 0.1571, 10, 0.6 그리고  $1.4027 \times 10^{-9}$ 로 설정 하였다. 그림 6의 하단부의 그림은 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 순시 주파수 성분을 2차 자기회귀 모델을 통하여 추정된 값을 나타낸다. 기준신호와 반사파의 주파수 대역은 5MHz-20MHz 임을 확인할 수 있다. 기준신호와 반사파간의 시간 지연은 기준신호와 반사파 각각의 중심주파수 간의 시간 지연으로부터 구할 수 있다. 그림 6 상단부의 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 순시 주파수를 추정하고 추정결과로부터 중심 주파수 간의 시간 지연을 측정하여 계측 케이블의 종단점의 위치를 구하였다. 총 10회 측정된 결과는 표 1과 같다.

**표 1 실험 결과**

**Table 1** Experimental results

	기준신호 위치 ( $\mu s$ )	반사파 위치 ( $\mu s$ )	결함 위치 (m)
1	0.35153	0.78033	32.1601
2	0.35096	0.78030	32.2004
3	0.35118	0.78093	32.2314
4	0.35160	0.78083	32.1926
5	0.35137	0.78184	32.2848
6	0.35143	0.77989	32.1347
7	0.35108	0.78108	32.2500
8	0.35246	0.78055	32.1068
9	0.35161	0.78088	32.1959
10	0.35131	0.78063	32.1987
		평균	32.1955
		분산	0.0028

계측 케이블의 전파 속도는 식 (1)을 이용하여 구할 수 있으며, 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 중심 주파수인 12.5MHz의 군지연은  $6.65 \times 10^{-9}s$  이므로 전파속도는  $1.5 \times 10^8 m/s$ 이다. 원자력 계측 케이블의 종단점 위치는 식 (19)를 이용하여 구할 수 있다.

$$D = v_p t_d / 2, \tag{19}$$

여기서  $t_d$ 는 기준신호와 반사파 간의 시간 지연을 나타낸다. 가우시안 포락선 선형 첩 신호의 순시 주파수를 추정하여 계측 케이블의 종단점 위치를 추정된 결과 10회 평균 32.1955m 이며, 분산은 0.0028이다. 실측한 원자력 제어/계측 케이블의 길이는 31.46m 이므로 본 제안 기법의 오차는 2.338%이다.

**3. 결 론**

본 논문에서는 원자력 발전소 내 제어/계측 케이블의 상태 진단을 위한 가우시안 포락선 선형 첩 신호 기반 반사파

기법을 제시하고, 이를 실제 원자력 제어/계측 케이블에 적용하는 실험을 수행하여 제안된 반사파 계측법의 원자력 제어/계측 케이블의 상태 진단 가능성을 제시하였다. 가우시안 포락선 선형 첩 신호를 2차 자기회귀 모델을 이용하여 모델링하고, 순시 각주파수 성분을 재귀 가중 강인 최소 자승 필터를 이용하여 추정함으로써 종래의 최소 자승 필터를 사용함으로써 발생하는 편향 오차를 줄여서 정확한 거리 계측을 가능하게 하였다. 제안한 기법은 원자력 계측 케이블에 존재하는 잡음을 효과적으로 제거하여 인가한 신호의 순시 각주파수 정보를 추정할 수 있기 때문에 반사파의 위치 측정을 통한 임피던스 불연속 지점 탐지 이외에도 순시 주파수의 특성 변화 분석을 기반으로 케이블 전파 상수의 변화를 측정하는 기법으로 적용이 가능할 것으로 생각된다.

**감사의 글**

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MEST) # NRF-2012-M2-A8A4055236

**References**

[1] Regulatory Guide 1.218, "Condition-Monitoring Techniques For Electric Cables Used In Nuclear Power Plants," U.S Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC. Apr. 2012.

[2] 김복렬, 구철수, 강윤식, 안상필, 김철환, "원자력 발전소 케이블의 상태 감시 기법 연구동향", The Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 50, no. 1, pp. 31-39, January, 2001.

[3] S. Schuet, D. Timucin, and K. Wheeler, "A model-based probabilistic inversion framework for characterizing wire fault detection using TDR," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 60, no. 5, pp. 1654 - 1663, May 2011.

[4] C. Furse, Y. C. Chung, R. Dangol, M. Nielsen, G. Mabey, and R. Woodward, "Frequency-domain reflectometry for on-board testing of aging aircraft wiring," IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. 45, no. 2, pp. 306-315, May 2005.

[5] J. Wang, P. E. C. Stone, Y.-J. Shin, R. A. Dougal, "Application of joint time-frequency domain reflectometry for electric power cable diagnostics," IET Signal Process., vol. 4, Iss. 4, pp. 395-405, 2010.

[6] Y.-J. Shin, E. J. Powers, T.-S. Choe, C.-Y. Hong, E.-S. Song, J.-G. Yook, and J. B. Park, "Application of time-frequency domain reflectometry for detection and localization of a fault on a coaxial cable," IEEE Trans. Instrum. and Meas., vol. 54, no. 6, pp.2493-2500, Dec. 2005.

[7] Che-wung Ha, Kwang-ho Joo and Sung-heum Han, "Diagnosis of Power Cables for Nuclear Power

Plant,” The KIEE Summer Conferencs, pp. 2008-2009, July, 2010.

- [8] Che-Wung Ha, Kwang-Ho Ju and Woo-Sang Lim, “Partial Discharge Measurement of Power Cables for Nuclear Power Plant,” Trans. KIEE. vol. 60, no. 8, pp. 1632-1638, Aug. 2011.
- [9] W. S. Ra, and I. H. Hwang, “Recursive weighted robust least squares filter for frequency estimation,” SICE-ICASE International Joint Conf., Busan, Korea, pp. 774-778, Oct. 2006.
- [10] S. H. Doo, W. S. Ra, T. S. Yoon, J. B. Park, “Fast time-frequency domain reflectometry based on the AR coefficient estimation of a chirp signal,” American Control Conference, St. Louis, MO, USA, pp. 3423-3428, Jun. 2009.



**윤 태 성 (尹 泰 星)**

1956년 6월 22일생. 1978년 연세대학교 공과대학 전기공학과 (공학사), 1980년 동 대학원 전기공학과 (석사), 1988년 동 대학원 전기공학과 (박사), 1994년 3월 ~ 1995년 2월 미국 Vanderbilt 대학교 전기공학과 객원교수, 1989년 ~ 현재 창원대학교 전기공학과 교수

Tel : +82-55-213-3633

Fax : +82-55-263-9956

E-mail : tsooon@changwon.ac.kr

저 자 소 개



**이 춘 구 (李 春 九)**

1983년 4월 12일생. 2007년 연세대학교 공과대학 전기전자공학과 (공학사), 2007년 ~ 현재 동 대학원 전기전자공학과 통합과정

Tel : +82-2-2123-2773

Fax : +82-2-392-4358

E-mail : ckleee03@yonsei.ac.kr



**박 진 배 (朴 珍 培)**

1954년 8월 7일생. 1977년 연세대학교 공과대학 전기공학과 (공학사), 1985년 ~ 1990년 Kansas State University 공과대학 전기 및 컴퓨터 공학과 (공학박사), 1990년~1991년 Kansas State University 전기 및 컴퓨터공학과 조교수, 1992년 ~ 현재 연세대학교 전기공학과 교수

Tel : +82-2-2123-2773

Fax : +82-2-362-4539

E-mail : jbpark@yonsei.ac.kr