

소형 임피던스 분석기를 이용한 케이블의 결함 감시 시스템

Fault Monitoring System for Cables Using a Compact Impedance Analyzer

윤채원 · 용환구 · 김광호 · 나완수 · 채장범* · 김병성

Chai-Won Yoon · Hwan-Gu Yong · Kwangho Kim · Wansoo Nah · Jang-Bum Chae* · Byung-Sung Kim

요 약

본 논문은 direct digital synthesizer, 연산 증폭기 및 이득/위상 검출기로 구성된 소형 임피던스 분석기를 사용하여 차분 주파수 영역 반사 계측을 기반으로 한 케이블 결함 모니터링 시스템을 제시한다. 제안된 시스템은 주파수 영역 반사 계측을 위한 고가의 벡터 네트워크 분석기를 저비용으로 대체할 수 있으므로, 장기간 동안 다중 지점을 모니터링하는 센서 네트워크 구성이 가능하다. 이 시스템의 성능은 전원 케이블의 결함 지점을 진단하는 실험을 통해 검증하였다.

Abstract

This work presents a cable fault monitoring system based on the differential frequency domain reflectometry using a compact impedance analyser which is composed of a direct digital synthesizer, an op amp and a gain/phase detector with a micro controller. The proposed system can replace expensive vector network analysers for frequency domain reflectometry and therefore be deployed in sensor networks for long term multi-point cable monitoring. Effectiveness of the system is experimentally confirmed by diagnosing the status of the power cable.

Key words: Impedance Analyzer, Power Cable, Frequency Domain Reflectometry

I. 서 론

원자력 발전소의 경우, 사고를 예방하기 위해 케이블 손상을 초기 단계에서 감지할 수 있도록 장기간에 걸쳐 전원 케이블을 모니터링하는 것을 권고받고 있다^[1]. 케이블 결함은 보통 광대역 신호를 케이블에 주입하고, 결함으로부터 반사된 신호를 분석하는 반사 측정 기술로 진단할 수 있다. 반사 계측은 신호 생성 및 수신 방법에 따라 주파수 영역 반사 계측(frequency domain reflectometry)과 시간 영역 반사 계측(time domain reflectometry)의 두 가지 범주로 분류할 수 있다. 향상된 감도를 가진 여러 가지 기

법이 발표되었지만^{[2]~[4]}, 감도가 좋은 대부분의 방법은 벡터 회로망 분석기 또는 고속의 파형 생성기 및 디지털 이저와 같이 고가의 장비를 필요로 한다. 그러나 상시 및 다지점의 모니터링 시스템은 복잡한 케이블 네트워크에 많은 센서를 필요로 하기 때문에, 매우 높은 비용이 소요된다. 따라서 저가의 단순한 임피던스 측정 모듈을 구현하여, 상시 진단망을 매우 효율적으로 구축하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 연산증폭기 구조의 임피던스 분석기^[5]를 초소형으로 만들고, 차분 주파수 반사법^[6]을 적용하여 저비용으로 케이블의 결함을 진단하는 시스템을 제안한

성균관대학교 정보통신대학(College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University)

*아주대학교 공과대학(College of Engineering, Ajou University)

· Manuscript received August 30, 2017 ; Revised October, 12, 2017 ; Accepted October, 30, 2017. (ID No. 20170830-086)

· Corresponding Author: Byung-Sung Kim (e-mail: bskimice@skku.edu)

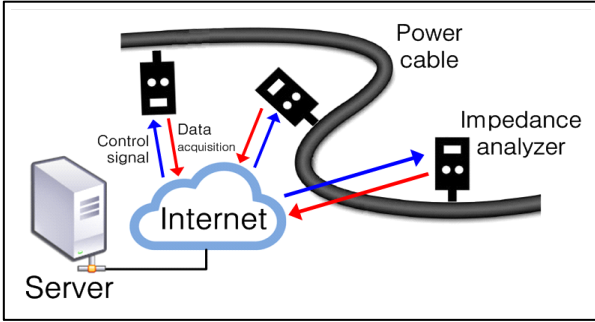


그림 1. 무선데이터 전송을 이용한 케이블 결함 감시 시스템
Fig. 1. Cable fault monitoring system using wireless data transmission.

다. 이러한 구조를 사용하게 되면, 상용 MCU(Micro Controller Unit)에서 제공하는 무선데이터 전송을 이용하여 그림 1과 같은 케이블 결함 감시 시스템을 제안할 수 있을 것이다. 이 시스템에서 다수의 임피던스 분석기는 케이블 네트워크에 장착되며, 결함 위치와 같은 케이블 감시 정보는 이용자에게 무선으로 전송된다. 따라서 복잡한 케이블 네트워크의 결함을 효율적으로 진단할 수 있을 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 임피던스 측정 원리에 대해 설명하고, III장에서는 제작된 임피던스 분석기를 사용하여 케이블을 진단한 결과에 대해 설명하며, 마지막으로 IV장에서 결론을 제시한다.

II. 임피던스 측정 시스템

그림 2는 연산증폭기를 이용한 임피던스 분석기의 블록도이다. 기존 연구에서는 임피던스를 측정하기 위해 고가의 파형 발생기와 고속 디지털타이저를 사용하였다⁵⁾. 그러나 고가의 장비에 기반한 측정 시스템은 본 연구에서 목표로 하는 센서 네트워크 시스템에는 비용 및 부피의 문제로 사용이 불가능하다. 본 연구에서는 고가의 파형 발생기를 200 MHz까지 주파수 생성이 가능한 AD9958 DDS(Direct Digital Synthesis) 칩으로 대체하고, 고가의 디지털타이저를 저가의 소형 이득/위상 검출기 칩인 AD8302로 대체하였다. DDS를 이용하여 정현파를 발생시키고 파형 생성기에서 발생한 신호는 케이블로 대표되는 DUT

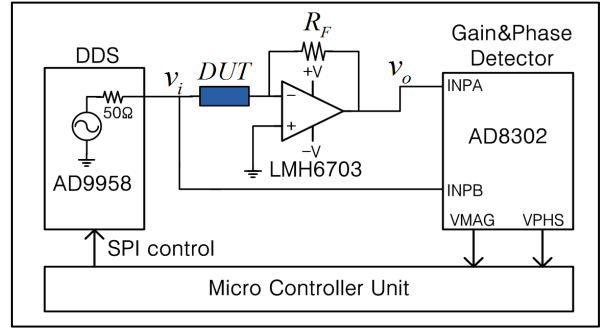


그림 2. 임피던스 분석기의 블록 다이어그램
Fig. 2. Block diagram of the impedance analyzer.

(Device Under Test)를 거쳐 연산 증폭기의 (-)입력에 인가된다. R_F 는 부계환 회로에 달린 저항이고, 이상적 연산증폭기를 가정하면 DUT 임피던스 Z_{DUT} 는 다음식으로 주어진다.

$$Z_{DUT} = -R_F \frac{V_i}{V_o} \quad (1)$$

증폭기 뒷단의 이득/위상 검출기는 v_i , v_o 을 입력으로 받아 이득과 위상차를 구하게 된다. 이 결과는 일정한 범위에서 선형적으로 대응되는 출력전압으로 나타나는데, 그 관계는 그림 3과 같다. -30 dB부터 30 dB까지의 이득과 -180° 부터 180° 까지의 위상차는, 각각 0 V부터 1.8 V까지의 전압으로 나타난다. 그림에서 볼 수 있듯이 위상차는 양의 값과 음의 값이 동일한 전압으로 나타나서 구별할 수 없는 문제가 있다. 하지만 케이블의 입력 임피던스는 측정 주파수가 증가함에 따라 병렬 공진과 직렬 공진을 반복하기 때문에, 그림 4와 같이 스미스 도표 상에서 시계방향으로 회전하는 양상을 나타낸다. 이때 상반원과 하반원을 넘나들면서 위상의 부호가 전환되는데, 동시에 임피던스 크기의 증감이 바뀐다. 즉, 임피던스 크기의 도함수 $d|Z|/df$ 가 극대, 극소가 되는 지점에서 위상을 반전시키면, 위상의 부호를 모호성 없이 결정할 수 있다. 이를 통해 V_i/V_o 를 알 수 있고, R_F 는 우리가 이미 알고 있는 값이므로, 식 (1)을 통해 Z_{DUT} 를 구하고, 입력 임피던스와 반사계수 관계식을 이용하여 반사계수를 구해서 FDR 결과를 얻을 수 있다.

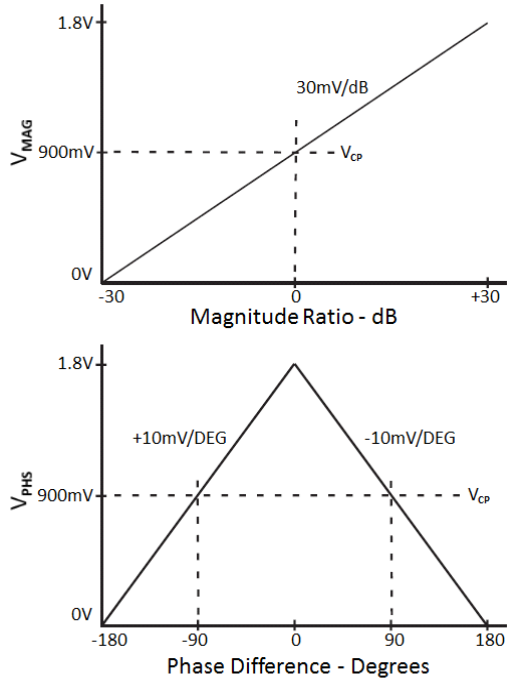


그림 3. AD8302의 이득 및 위상 측정에 대한 전달 특성
Fig. 3. Transfer characteristics for the gain and phase measurement of AD8302.

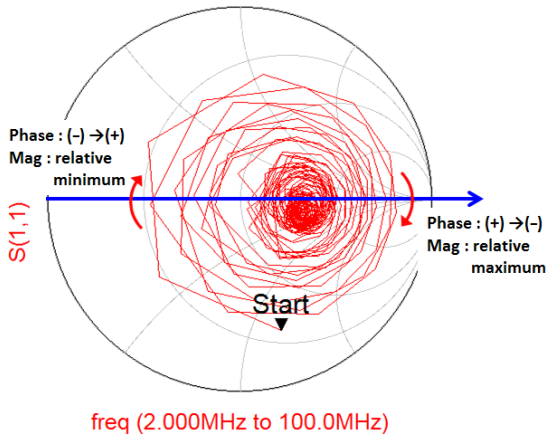


그림 4. 1 port VNA를 이용해 측정된 AWG 14 비차폐케이블 임피던스
Fig. 4. AWG 14 unshielded cable impedance measurement using 1 port VNA.

그러나 식 (1)은 이상적 연산 증폭기를 가정한 결과이며, 본 논문에서 사용한 광대역 연산증폭기 LMH6703은

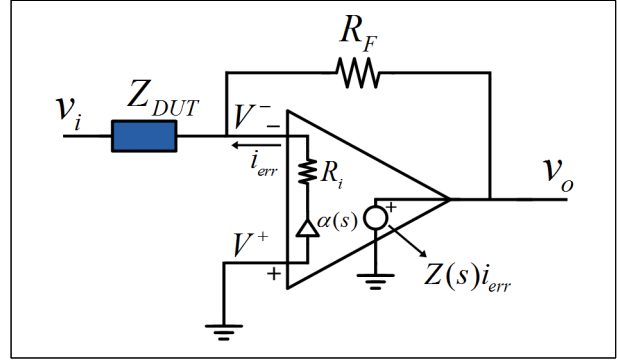


그림 5. 부귀환 연산증폭기의 실제 모델
Fig. 5. Actual model of negative feedback operational amplifier.

전류 제한 연산 증폭기로 그 내부 등가회로는 그림 5와 같다^[7]. 증폭기의 (-)단자에서 흐르는 소신호 오류 전류를 i_{err} 이라 할 때, KCL에 의한 식은 다음과 같다.

$$\frac{v_i - V^-}{Z_D} + \frac{v_o - V^-}{R_f} + i_{err} = 0 \quad (2)$$

또한, i_{err} 이 증폭기 두 입력 단자 사이의 버퍼를 통과하는 것을 고려한 식은 다음과 같다.

$$V^- = \alpha(s)V^+ - i_{err}R_i \quad (3)$$

식 (2)에 식 (3)을 대입한 후, i_{err} 에 대한 트랜스 임피던스와 출력전압의 관계 $i_{err} = \frac{v_o}{Z(s)}$ 를 적용하면, 증폭기의 이득은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{V_o}{V_i} = - \frac{R_f / Z_{DUT}}{1 + (R_f + R_i(1 + R_f / Z_{DUT})) / Z(s)} \quad (4)$$

여기서 $Z(s)$ 는 전류 제한 연산증폭기의 트랜스임피던스 이득으로 주파수가 증가함에 따라 그 크기가 감소하고, 위상지연이 증가하여 연산증폭기의 이상적 특성에서 벗어나게 한다. 따라서, 식 (1)을 사용한 임피던스 측정은 주파수가 증가함에 따라 오차가 증가하게 된다. 이러한 주파수가 증가함에 따라 나타나는 오차는 반사계수의 오차로 나타나기 때문에 결함 진단의 오류를 수반할 수 있

다. 따라서 저가의 임피던스 분석기를 사용한 진단법은 반사계수의 절대 정확도에 의존하는 진단 알고리즘에 사용하는 데는 한계가 있다. 본 연구에서는 제안한 측정 시스템에 차분 주파수 반사법⁶⁾을 적용하였다.

차분 주파수 반사법은 반사계수의 절대 정확도에 의존하지 않고, 정상 상태였던 케이블의 반사계수와 이후 결함이 발생한 케이블의 반사계수 차이를 이용하기 때문에, 임피던스 분석기의 절대 정확도에 대한 의존성이 적을 것으로 추정되며, 이러한 추론은 III 절에서 실험적으로 검증한다. 차분 주파수 반사법을 간단히 요약하면 식 (5)로 표현된다. 케이블의 입력단에서 거리 x 만큼 떨어진 위치에 물리적 손상이 발생하면 재질의 유전을 변화로 인해 케이블에서 등가 어드미턴스가 Y_d 만큼 변화된다. Γ_{in} 과 Γ'_{in} 은 각각 정상 케이블 및 손상 케이블의 입력 반사 계수라 할 때, 결함 부위에 의한 어드미턴스 변화량이 정상 케이블의 특성 어드미턴스보다 훨씬 작다고 가정하면, 다음의 관계를 도출할 수 있다⁶⁾.

$$\Delta \Gamma_{in} = \Gamma'_{in} - \Gamma_{in} \approx -\frac{Y_d}{2Y_0}(e^{-2\gamma x}) \quad (5)$$

따라서, 식 (5)에 역 푸리에 변환(IFT)을 취하면 결함 위치 x 를 결정할 수 있다. 식 (5)의 IFT의 실수부와 허수부는 힐버트 변환 관계를 갖기 때문에 필요에 따라 절대값을 취하면 포락선이 검출되고 포락선이 최대가 되는 값에서 결함점이 발견된다.

III. 측정 결과

그림 6은 그림 2의 구조로 제작된 임피던스 분석기이다. 파형생성기로는 최대 200 MHz까지 신호 생성이 가능한 DDS 칩인 AD9958을 사용해서 고가의 정현파 신호원을 대체하였다. DDS는 MCU 아두이노의 SPI 통신을 이용하여 원하는 주파수의 신호를 생성하도록 프로그래밍할 수 있다. 연산 증폭기로는 Texas Instruments사의 LMH6703을 사용하였다. v_i, v_o 를 통하여 Z_{DUT} 를 구하는 데는, 이득/위상 검출기 AD8302를 이용하여 오실로스코프를 대체하였고, AD8302에서 계산된 데이터는 아두이노의 12 bit ADC로 수집된다. 이 모든 칩들을 하나

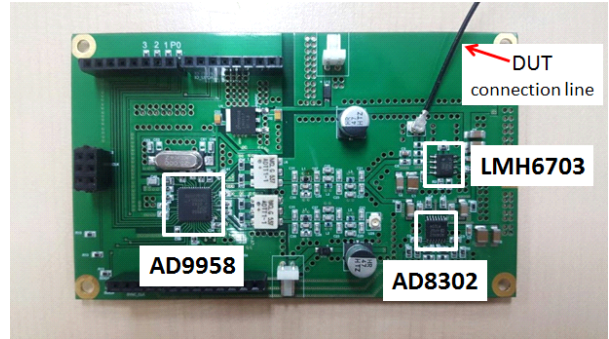


그림 6. 제작된 임피던스 측정 모듈
Fig. 6. Fabricated impedance measurement module.

의 PCB 모듈로 통합하여 아두이노 DUE 보드에 Shield 형태로 부착될 수 있도록 제작하였다.

그림 7은 임피던스 분석기를 구동시키는 아두이노의

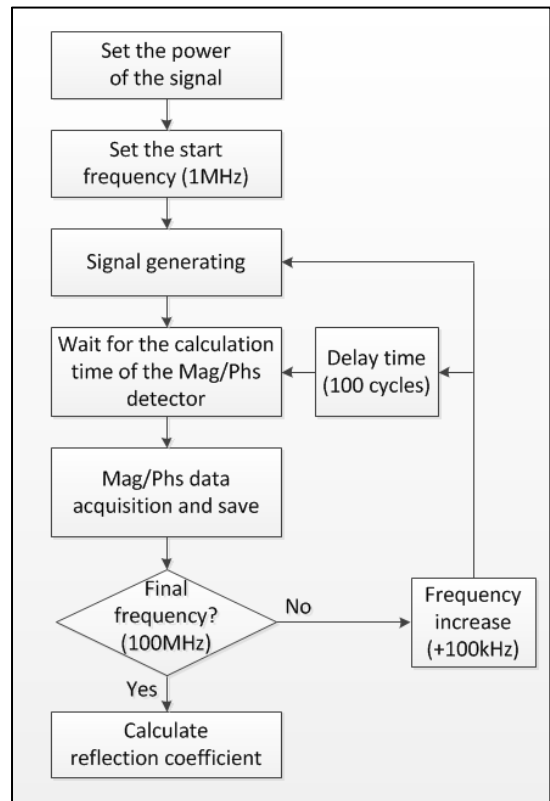


그림 7. 제안한 임피던스 분석기의 신호제어 순서도
Fig. 7. Flow chart of signal control for the proposed impedance analyzer.

신호제어 순서도이다. 먼저 DDS로 출력시킬 신호의 크기와 주파수를 설정한 후 증폭기 단에 인가한다. AD8302에서 이득의 크기와 위상차가 계산될 동안 100번의 주기까지 대기한 후, 계산 결과값을 수집한다. 데이터 저장기가 완료되면 측정 주파수를 100 kHz 증가시키고, 최종 주파수인 100 MHz가 될 때까지 측정을 반복한다. 측정 주파수 해상도는 인가하는 주파수의 주기 대비 측정지속 시간에 따라 달라지므로 동일한 해상도를 위해 주파수가 증가함에 따라 순차적으로 측정시간을 감소시켜서 측정에 소요되는 시간을 단축하였다.

제안된 시스템의 임피던스 측정 성능을 확인하기 위해 50 m 길이의 AWG14 EPR/CSP 전원 케이블을 100 kHz 스텝으로 1 MHz에서 100 MHz까지 측정하였다. 그림 8은 임피던스 분석기와 벡터 회로망 분석기 Agilent E5061B의 측정 결과를 보여준다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 10 MHz 이후로는 두 데이터 사이에 눈에 띄는 불일치가 관찰된다. 이 오류는 II절에서 서술했듯이, 임피던스 분석기를

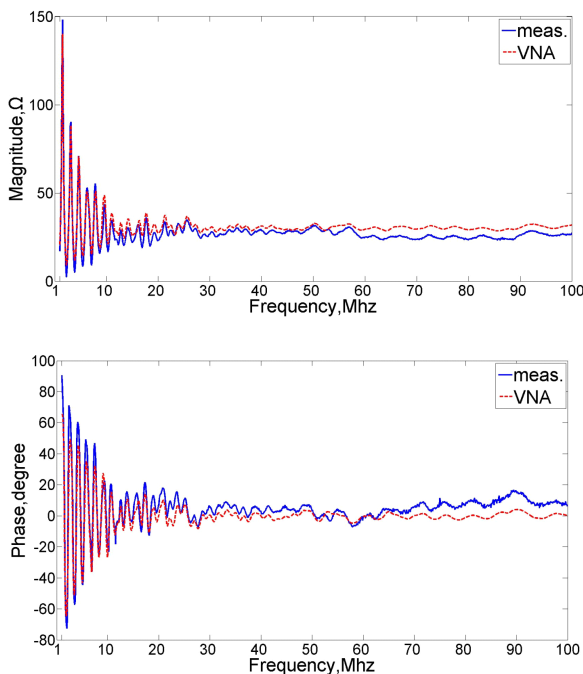


그림 8. 50 m 길이의 AWG 14 비차폐 케이블의 임피던스 측정 결과
 Fig. 8. Impedance measurement results of AWG 14 unshielded cable of 50 m long.

구성하는 연산 증폭기의 비이상적인 동작, 특히 증폭기의 이득이 내부 지연에 의존하는 것에 기인한다.

제작한 소형 임피던스 분석기를 이용한 케이블 진단 가능성을 검증하기 위해 100 m 길이의 AWG14 비차폐 케이블의 결함을 임피던스 분석기를 이용하여 측정 후 차분 주파수 반사법을 적용하여 결함 위치를 진단하는 실험을 진행하였다.

그림 9는 실제 측정 환경을 보여준다. 원전 제어 케이블은 매우 고가의 케이블로 다종의 실험 수행을 위해 케이블에 직접적 손상을 가하기는 어려운 상황이었기 때문에, 케이블의 손상 없이 25×40 cm 크기의 물주머니(polyethylene)를 케이블 위에 얹어 결함 상황을 모의하였다. 이는 케이블의 국부적 침수상황과 같으며, 전자기 시뮬레이션 결과, 케이블에 수 pF의 병렬 어드미턴스의 변화를 주는 것으로 확인되었다. 물주머니는 10 m 간격으로 100 m까지 케이블 위에 배치하였다.

그림 10은 임피던스 분석기와 차분 주파수 반사법을 이용한 케이블 진단 결과를 나타낸다. 도시한 결과는 반사계수의 IFT 결과의 포락선을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 실제 물주머니가 놓인 위치인 10 m, 20 m, 30 m에서 명확한 침투값을 확인할 수 있었다.

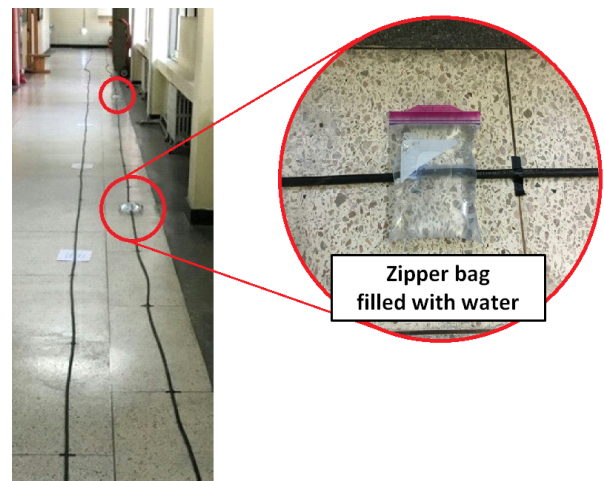


그림 9. 케이블 모니터링 시스템을 위한 측정 설정과 물주머니를 이용한 케이블 손상 모의
 Fig. 9. Measurement setup for cable monitoring system, using water pockets to mimic cable damages.

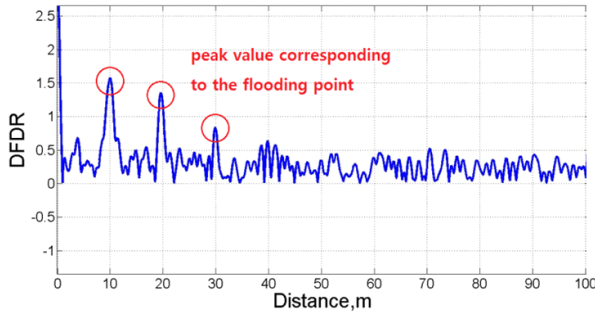


그림 10. 차분 주파수 반사법을 이용한 임피던스 분석기로 발견된 결함 위치

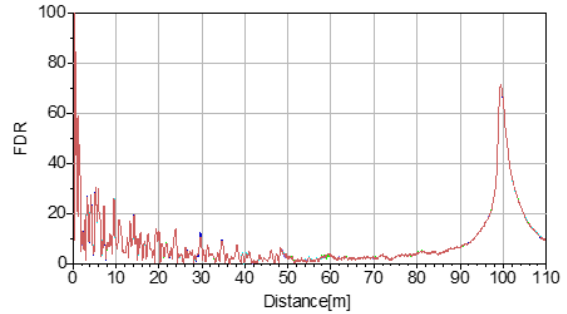
Fig. 10. Defect location found by impedance analyzer using delta frequency domain reflectometry.

그림 11은 비교를 위해 안리쓰 사의 MS46121B 회로망 분석기(VNA)를 이용하여 동일한 조건의 케이블을 진단한 결과이다. 그림 11(a)는 VNA와 기존의 주파수 반사법을 이용한 결과로, 여러 첨두값들이 있으나, 10 m 간격으로 분포하는 정확한 결함점을 진단하기가 어려울 수 있다. 따라서, 저가의 임피던스 분석기를 이용해도 차분 주파수 반사법을 이용하면 VNA를 이용한 단순 주파수 반사법보다 정확한 진단이 가능함을 확인할 수 있다.

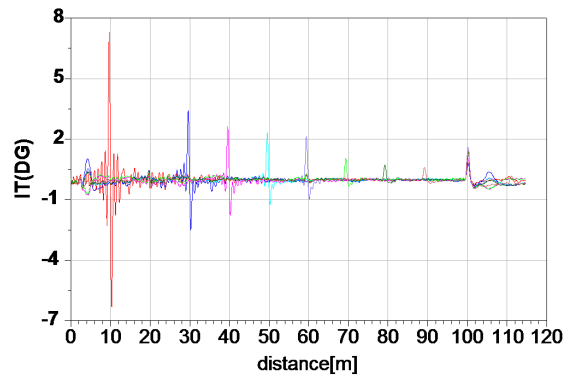
반면, 그림 10의 결과에서 40 m 이상의 결함은 배경 잡음으로 인해 뚜렷한 반사파를 확인하기 어려웠다. 그림 11(b)는 VNA로 측정된 반사계수에 차분 주파수 반사법을 사용하여 진단한 결과로, 90 m 결함점까지 진단됨을 확인하였다. 이러한 차이는 사용한 VNA의 dynamic range (DR)가 80 dB임을 고려할 때, 제안한 시스템의 임피던스 분석기에 사용한 이득/위상 검출기의 DR이 60 dB 정도로 낮기 때문으로 판단되며, 향후 연구를 통해 DR을 개선하면 좀 더 먼 거리의 결함 진단이 가능할 것으로 예상된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 소형 임피던스 분석기를 사용하여 차분 주파수 반사법을 기반으로 한 케이블 모니터링 시스템을 제안하였다. 임피던스 분석기의 불충분한 정확도는 케이블의 반사계수의 상대적 변화를 비교하는 방법으로 보상



(a) VNA와 FDR을 이용한 진단 결과
(a) The result using VNA and FDR



(b) VNA와 DFDR을 이용한 진단 결과
(b) The result using VNA and DFDR

그림 11. VNA를 이용한 진단 결과

Fig. 11. Diagnosis results using VNA.

할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

제안된 시스템은 저비용으로 제작하였기 때문에 고가의 장비를 대체할 수 있을 것으로 기대되며, 후에는 무선 데이터 전송을 이용하여 단일 이용자가 다수의 센서를 사용해 케이블을 안정적이고 지속적으로 감시하는 시스템을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] U. S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Reactor Regulation, "Inaccessible or underground power cable failures that disable accident mitigation systems or cause plant transients", *NRC Generic Letter*, Feb. 2007.
- [2] 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 Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 45, no. 2, pp. 306-315, May 2003.

- [3] Q. Shi, U. Troeltzsch, and O. Kanoun, "Detection and localization of cable faults by time and frequency domain measurements", *2010 7th International Multi-Conference on Systems Signals and Devices*, Amman, Jordan, pp. 1-6, Jun. 2010.
- [4] 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 Tran-*

sactions on Instrumentation and Measurement, vol. 54, no. 6, pp. 2493-2500, Dec. 2005.

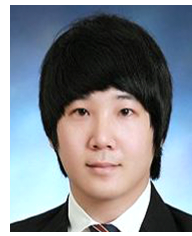
- [5] 노현승, 김양석, 채장범, 김병성, "오차 보정 방법을 이용한 시간 영역 임피던스 측정의 정확도 개선", *한국전자과학회논문지*, 23(11), pp. 1315-1322, 2012년 11월.
- [6] 용환구, 채장범, 김병성, "미약한 결함에 의한 반사 계수 변화를 이용한 제어 및 전력 케이블의 상태 진단", *한국전자과학회논문지*, 25(12), pp. 1269-1274, 2014년 12월.
- [7] *OA-13 Current Feedback Loop Gain Analysis and Performance Enhancement*, <http://www.ti.com/lit/an/snoa366b/snoa366b.pdf>, Texas Instruments, Apr. 2013.

윤 채 원



2015년 8월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학사)
 2016년 3월: 성균관대학교 전자전기공학과 석사과정
 [주 관심분야] RF, 케이블 진단, 신호처리

김 광 호



2013년 2월: 성균관대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2015년 2월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학석사)
 2015년 3월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 박사과정
 [주 관심분야] SI, PI, 기기 진단

용 환 구



2000년 2월: 국립 목포해양대학교 해상운송시스템학부 (공학사)
 2004년 2월: 성균관대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2009년 12월~현재: (주)와이엘 기업부설 연구소 연구원
 2004년 3월~현재: 성균관대학교 전자

공학과 박사과정
 [주 관심분야] 고주파 회로설계, 케이블 진단

나 완 수



1984년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1986년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
 1991년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학박사)
 1991년~1993년: SSCL Guest Collaborator

1993년~1995년: 한국전기연구원 선임연구원
 1995년~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 교수
 [주 관심분야] SI, PI, EMI/EMC

채 장 범



1984년 2월: 서울대학교 기계공학과 (공학사)
1986년 2월: 서울대학교 기계공학과 (공학석사)
1993년 6월: MIT 기계공학과 (공학박사)
1993년 7월~현재: 아주대학교 기계공학과 교수

[주 관심분야] 기계 진단

김 병 성



1989년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1991년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1997년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
1997년 3월~현재: 성균관대학교 정보통신대학 교수

[주 관심분야] RFIC 설계, RF 소자 모델링