

M시퀀스 신호를 이용한 로켓 추진기관 케이블 결함 위치 추정 기법

손지홍
국방과학연구소 제5기술연구본부

Estimation Method of Cable Fault Location in Rocket Motors Using M-sequence Signals

Ji-Hong Son

The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development

요약 본 논문은 M시퀀스 신호를 이용하여 로켓 추진기관의 케이블 결함 위치 추정 기법에 관한 논문이다. 케이블 내부 결함 위치를 추정하기 위해서 다양한 방법이 연구되어왔는데, 이 중에서 TDR(Time Domain Reflectometry), FDR(Frequency Domain Reflectometry), TFDR(Time-Frequency Domain Reflectometry) 등이 가장 널리 사용되어 왔다. 이 방법들은 케이블 결함 상태를 진단하기 위해 주로 사용되지만 사용자가 시험환경에 접근하여 수행해야하기 때문에 리스크가 매우 크다. 따라서 시험안전성을 확보하고 기존의 방법 대비 동등 이상의 성능을 지니는 M시퀀스 신호를 이용한 케이블 결함 위치 추정 방법을 제안한다. 제안된 방법은 로켓 추진기관 시험에 사용되고 있는 DAS(Data Acquisition System)를 활용하도록 하고, 주로 물리량 계측에 이용되는 RG-58 케이블을 적용하여 기존의 방법인 TDR, TFDR과 비교하여 성능을 검증하였다. 시험 결과 40 m 이내 근거리 케이블 결함 추정에서는 기존의 방법보다 낮은 오차율을 나타냈고, 50 m에서는 기존의 방법과 비슷한 오차율을 확인하였다. 따라서 무기체계에 사용되는 DAS를 활용하고 일반적으로 사용되는 M시퀀스 신호를 응용하여 작업자가 시험환경에 접근하지 않고 안전하게 케이블 결함을 추정할 수 있음을 확인하였다.

Abstract This paper describes the estimation method of cable fault location in rocket motors using M-sequence (Maximal Length Sequence). In order to estimate the location of a cable fault, three methods have been usually used: TDR (Time Domain Reflectometry), FDR (Frequency Domain Reflectometry), and TFDR (Time-Frequency Domain Reflectometry). However, these methods suffer the disadvantage of requiring users to be close to a test field, which is dangerous. The estimation method of cable fault location using M-sequence is proposed to solve this problem. The proposed method can make use of DAS (Data Acquisition System). The experiments were three cases: damaged, open, and short. The RG-58 coaxial cable was used in the experiments. As a result, the proposed method has better performance than that of conventional methods such as TDR and TFDR.

Keywords : Cable, Fault Location, Fault Detection, M-sequence, Matched Filter, Defense System

1. 서론

전자장비가 정밀해집에 따라 케이블의 내구성 및 강인

성 등과 같은 품질이 중요 시 되고 있으며 항공기, 함정, 발전소시스템, 전력전송, 무기체계 등과 같은 거대한 시스템 개발에 높은 내구성을 지닌 고품질 케이블은 필수

*Corresponding Author : Ji-Hong Son(Agency for Defense Development)

email: sjh9009@add.re.kr

Received March 9, 2020

Accepted May 8, 2020

Revised April 1, 2020

Published May 31, 2020

적으로 사용된다. 특히 무기체계 개발에 사용되는 구성품은 각종 환경시험을 통과해야하며, 일반산업에서 사용되는 제품에 비해 내구도와 성능 면에서 높은 사양이 요구된다. 따라서 이에 사용되는 케이블 또한 높은 품질이 요구되며, 품질이 좋지 않은 케이블을 사용할 경우 개발되는 장비 전체의 품질이 저하될 우려가 있으며 개발되는 무기체계를 시험하는 시험요원의 작업안전을 위협하는 요소로 작용될 수 있다. 특히 무기체계 중에서 로켓 추진기관은 작업 공간 협소, 구동장치 동작으로 인한 위험성, 추진기관 비정상적인 동작으로 인한 화염방사, 폭발발생 등의 리스크가 매우 크다. 따라서 사람이 접근하여 수월하게 정비하기 어려우며 정비에 대한 시간과 비용이 많이 소요된다.

정비 시간을 단축하기 위해 단순한 방법으로 케이블 상태를 확인하는 경우가 많으며 케이블의 상태를 진단하기 위해서 가장 단순한 방법으로 멀티미터(Multimeter)를 사용하여 케이블의 +단자와 -단자와의 단락, 개방 상태를 확인하는 방법이 주로 이루어진다. 이러한 방법은 시간과 비용 측면에서는 굉장히 효율적이지만 단순히 케이블의 절연 상태만을 확인하는 방법이며 간헐적 접촉 불량, 커넥터 불량 및 케이블 내부 손상 등을 포함한 결함 위치를 파악하기 어렵다. 케이블 결함 위치를 정확하게 파악하기 위해서는 다른 점검방법을 이용하여 케이블의 결함을 파악해야 한다.

케이블 결함 위치를 추정하는 방법은 오래전부터 많은 연구가 이루어져왔으며, 신호를 인가하여 결함 위치에서 반사되는 반사파를 계측하는 방법이 가장 일반적이고 상용화된 방법으로 자리 잡았다[1-5]. 반사파를 이용하여 케이블의 결함 위치를 추정하는 방법은 케이블에 특정한 신호를 인가하여 결함부분에서 발생한 임피던스 부정합(Impedance Mismatch)으로 인해 나타나는 반사파를 획득하여 케이블의 결함 위치를 추정하는 방법이다. 반사파를 계측하여 결함을 추정하는 방법으로는 시간 영역에서 추정하는 방법, 주파수 영역에서 추정하는 방법, 시간-주파수 두 영역에서 동시에 추정하는 방법이 있다.

첫 번째, 가장 대표적인 반사파를 이용하는 방법으로는 TDR(Time Domain Reflectometry)이 있다[1-4]. TDR은 시간 영역에서 반사파 계측 방법이고 케이블의 전송손실에 의한 전압 강하와 반사 신호의 위상 변화를 통해 케이블의 결함을 추정할 수 있다. TDR은 주로 사각 모양의 펄스(Pulse) 파형신호를 케이블에 인가하여 반사파를 수신하여 케이블의 결함을 추정한다. 이는 시간 영역의 반사파를 계측하여 결함을 추정하는 방법으로 인가

되는 신호의 길이가 분해능(Resolution)에 크게 영향을 준다. 인가되는 신호의 길이가 길수록 케이블 결함 탐지가 가능한 거리는 멀어지기 때문에 인가되는 신호는 임펄스(Impulse) 신호에 가깝고 신호의 상승시간(Rising Time)이 짧을수록 분해능이 향상된다. 다만, 케이블에 복수의 결함이 존재할 경우 다중 결함 추정에는 어려움이 있다. TDR을 적용하여 다 채널 케이블 점검에도 이용되고 있는데 채널별 절체를 수행하여 계측케이블 결함 추정하는 기법을 개발하여 무기체계 시험환경에 적용하고 있다[3].

두 번째, 주파수 영역에서 반사파를 계측하여 결함을 진단하는 방법으로 FDR(Frequency Domain Reflectometry)이 있다[6]. FDR은 케이블에 인가하는 신호로써 정현파를 지속적으로 인가한다. 인가되는 정현파 주파수를 천이하면서 정재파비(VSWR : Voltage Standing Wave Ratio)의 변화 차이가 큰 것을 통해 케이블 결함을 추정하며 주파수 영역에서 분석이 가능하다. 하지만 노이즈에 취약하여 오차율이 높게 나타나므로 정확도면에서 낮은 성능을 지닌다.

세 번째, 시간영역과 주파수영역에서 동시에 분석이 가능한 TFDR(Time-Frequency Domain Reflectometry)이 있다[7]. TFDR은 시간-주파수 상호상관 관계함수(Time-Frequency Cross Correlation Function)를 이용하며 인가된 송신신호로써 Chirp 신호를 이용한다. 이 신호는 시간이 지남에 따라 주파수가 변화하는 신호이다. 사각형 형태의 Chirp 신호는 고조파(Harmonic) 현상이 나타날 수 있기 때문에 대역폭(Bandwidth)을 제한하기 위해 가우시안(Gaussian) 포락선 형태로 변형하여 케이블 결함 추정에 이용한다. 획득한 반사된 신호에 위그너 분포함수(Wigner Distribution)를 취해 시간-주파수 상호상관 관계함수를 계산한다. TFDR은 TDR에서 지닌 다중 결함 탐지 문제점을 극복하였고, FDR에서 지닌 노이즈에 취약한 점을 극복하였다. 그리고 TDR, FDR에 비해 정확한 케이블 결함 위치를 추정하는 성능을 보인다. 다만, 위그너 분포함수와 시간-주파수 상호상관 관계함수 계산을 통해 연산량이 많기 때문에 무기체계 개발시험환경에서 즉각적으로 적용하기 어려우며 아직 시험환경에 맞게 구현된 것이 없다는 점이 있다. TDR, FDR, TFDR에 대한 특징을 정리하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Characteristics in accordance with methods

	Advantage	Disadvantage
TDR	Simple, Convenient	Difficult to find multi-fault locations
FDR	Able to obtain VSWR, Frequency domain analysis	Vulnerable to noise
TFDR	Multi-fault locations, Wigner distribution, Group delay analysis	Run time, Weak low frequency bandwidth

위에서 언급한 세 가지의 케이블 결함 추정 방법은 단순하게 멀티미터를 사용하는 것에 비해 정확한 케이블 결함 위치를 파악할 수 있다. 하지만 로켓 추진기관 시험은 추진기관을 시험대(Test Bed)에서 장탈착하여 점검하기는 매우 어려우며 덮개나 하우징, 구동장치, 추진제 등의 위험요인으로 인해 리스크가 매우 크며 접근하여 점검하기 힘든 점이 있다.

2. 케이블 결함 추정

2.1 연구배경

기존의 TDR, FDR, TFDR을 적용하기에는 다음과 같은 문제점이 있다. TDR은 쉽게 적용할 수 있으나 TFDR에 비해 낮은 정확도를 지니며 다수 결함 추정에 취약하다. FDR은 잡음에 매우 취약하므로 케이블 길이가 길게 포설되는 로켓 추진기관 시험에는 적합하지 않다. TFDR은 정확도가 높으며 다수 결함 탐지가 가능하고 시간영역과 주파수영역에서 동시에 정밀하게 분석할 수 있으나,

연산량이 많으며 실제 시험환경에 즉각적으로 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 시험요원이 현장에 직접 접근하는 것을 피함으로써 리스크를 줄이고 로켓 추진기관의 케이블 결함 위치 추정을 위해 M시퀀스 신호를 이용한 케이블 결함 추정 방법을 제안한다. 제안된 방법은 로켓 추진기관을 탈착하지 않고 시험대에 장착되어있는 상태에서 추가적인 도입장비 없이 제어기(Controller)와 시험 데이터 획득을 위해 사용되는 DAS(Data Acquisition System)을 활용하여 케이블 결함 위치를 추정한다. 본 연구에서는 기존의 문제점들을 해결하고 로켓 추진기관 시험환경에 적합한 케이블 결함 추정 기법으로 M시퀀스 신호를 이용한 케이블 점검 방법을 제안한다.

2.2 케이블 점검 시스템 구성

로켓 추진기관은 여러 가지 성능시험을 거치면서 DAS 등의 계측장비로 각 구성품에 대한 데이터 정보를 획득하여 성능 분석을 수행하며 추진기관의 구성품에 사용되는 케이블은 Fig. 1과 같이 서로 약속된 케이블 인터페이스로 연결되어있다. 송신(TX: Transmitter) 케이블 그룹에는 센서 활성화를 위한 여기(Excitation), 착화기 점화 신호(Squib) 등의 신호로 구성되어있으며, 수신(RX: Receiver) 케이블 그룹은 센서의 출력값, 전압 출력 등으로 구성되어있다. 무기체계 개발에는 온도 계측을 위한 K-type 열전대 센서 전용 케이블, 음향 신호 계측을 RG-59, 묶음 형태로 구성되고 차폐 특성이 뛰어난 Belden 사 케이블 등의 다양한 케이블이 사용된다. 로켓 추진기관에 대표적으로 사용되는 케이블은 구성품의 데이터 획득, 센서 물리량에 대한 신호 획득, 점화기 신호획

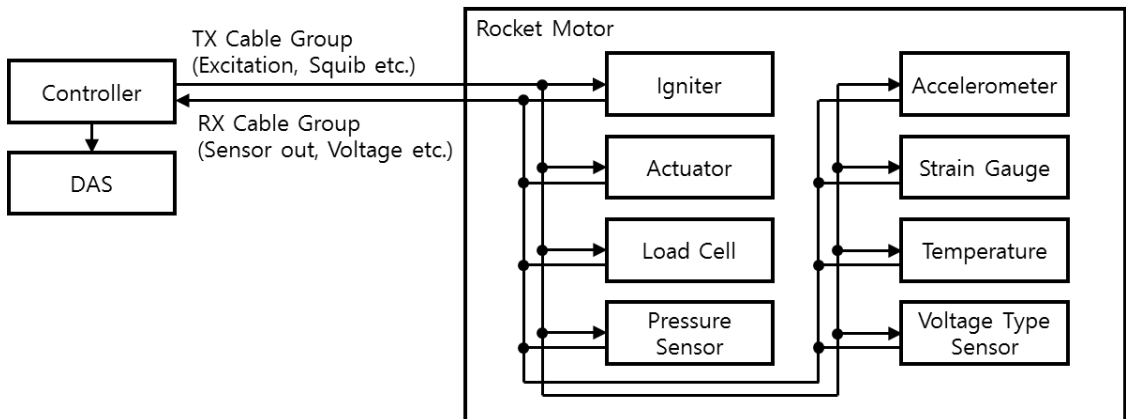


Fig. 1. Rocket motor cable interface

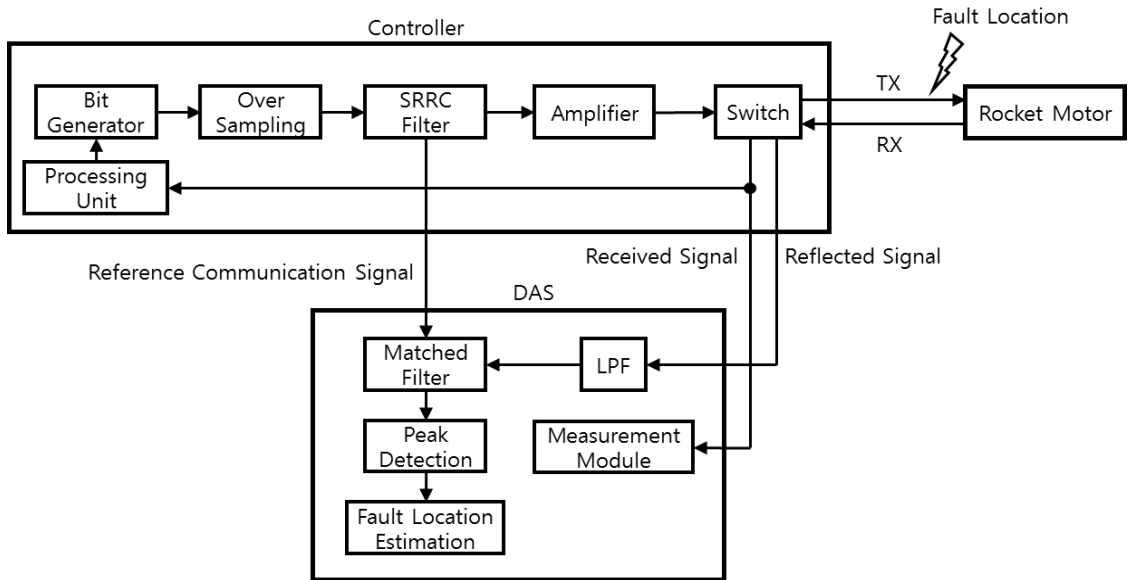


Fig. 2. System block diagram

득 등에 활용되는 동축케이블 RG-58을 이용한다. 제어기에서 다른 구성품으로 신호를 전송할 때 DAS는 전송된 신호를 기록하며, 신호가 인가된 케이블에 결함이 있다면 반사되는 신호를 DAS로 계속하여 케이블의 결함을 추정하도록 한다.

M시퀀스 신호를 이용하여 케이블 결함을 추정하는 시스템의 구성은 Fig. 2와 같다. 구성품을 제어하기 위해 제어기는 비트 생성기(Bit Generator)로부터 디지털 부호를 생성한다. 비트 생성기에서 M 시퀀스 신호를 생성하고 샘플링주파수로 샘플링하고 기저대역(Baseband) 신호로 만들기 위해 오버샘플링(Over-sampling)을 수행한다. 신호의 고조파 성분을 제거하여 대역폭을 제한하기 위해 SRRC(Square Root Raised Cosine) 필터를 이용하여 고조파 성분을 필터링한다. 이후 생성된 신호를 일정 거리 이상 떨어져 위치한 구성품까지 전달하기 위해 증폭기(Amplifier)를 거쳐 증폭이 이루어진다. 송신라인과 수신라인 중에 한쪽 부분에서만 결함 발생할 수 있기 때문에 제어기 끝부분 절체기(Switch)를 통해서 송신 케이블과 수신 케이블을 바꾸어 점검할 수 있도록 한다. 이는 한쪽 케이블에서 고장이 발생한 상황을 대비하여 라인을 바꾸어 점검하기 위함이다. 케이블 결함 없이 구성품으로부터 들어오는 신호가 정상적으로 수신된다면 제어기는 절체기를 통해 처리장치(Processing Unit)로 수신신호를 전달한다.

제어기에서 전송되는 M시퀀스 신호는 구성품으로 연

결되어있는 케이블을 통과하며 케이블에 결함이 없고 구성품의 입력단자의 임피던스 정합이 잘 이루어져있다면 반사되는 신호는 나타나지 않는다. 하지만 케이블에 결함이 있으면 임피던스 부정합으로 인해 신호가 반사되며 DAS로 입력된다. 케이블 결함 위치 추정을 위해 DAS는 저역 통과 대역필터(LPF: Low Pass Filter), 정합필터(Matched Filter), 피크 검출부분(Peak Detection), 결함 위치 추정(Fault Location Estimation)으로 구성되며, 로켓 추진기관 성능시험의 계측을 위한 계측모듈(Measurement Module)로 구성한다.

반사된 신호에는 AWGN(Additive White Gaussian Noise)이 포함되어 있는데 이러한 잡음 신호를 제거하기 위해 저역 통과 대역필터(LPF: Low Pass Filter)를 이용하여 기저대역 신호만 남도록 필터링을 한다. LPF를 통과한 신호는 정합필터(Matched Filter)를 통과하여 신호가 가질 수 있는 최대의 신호 대 잡음비(SNR: Signal to Noise Ratio)를 갖는 상태가 된다[8]. 반사된 신호가 수신된 시점에서 신호 피크 값이 나타나게 되는데, 이를 피크 검출부분을 이용하여 피크의 수신 시점을 얻는다. 이후 결함 위치 추정에서 신호가 송신되는 시점과 반사된 신호가 수신된 시점을 계산한다. 결함 위치 추정은 수식 (2)과 같이 표현할 수 있는데, 사용된 케이블의 종류에 따른 전파속도를 이용하여 케이블 결함 위치 추정할 수 있다.

$$d = \frac{VOP \cdot t_{delay}}{2} \quad (2)$$

Where, d denotes estimated fault location [m], VOP denotes velocity of propagation, and t_{delay} denotes time delay.

2.3 M 시퀀스(Maximal Length Sequence)

Chirp 신호는 높은 직교성(Orthogonality)을 지니므로 상관함수(Correlation Function) 특성이 뛰어나다. 하지만 고조파가 발생하여 대역폭을 넓게 사용하므로 노이즈가 유입될 수 있다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 Chirp 신호를 가우시안 포락선 형태로 변형하여 케이블의 결함 위치를 추정하며 TFDR은 본 특성을 이용한다. Chirp 신호를 생성하기 위한 별도의 주파수 변환기와 같은 변조장치가 필요하며, 추진기관 시험환경에서 별도의 장비를 구성하여야하며 시험 현장에 접근이 필요하다. 그리고 가우시안 포락선 형태로 변환하는 과정에서 Fig. 3과 같이 Chirp 신호의 시작 부분과 끝 부분에 많은 에너지 손실이 발생한다. 에너지 손실을 방지하고 로켓 추진기관의 제어기와 DAS를 활용하고 쉽게 생성할 수 있는 M시퀀스 신호를 이용한다.

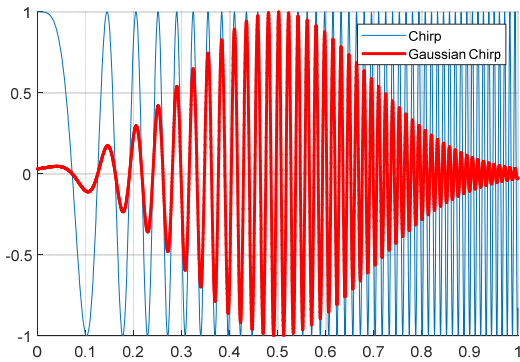


Fig. 3. Example of chirp signal and gaussian chirp signal

구성된 케이블 점검 시스템의 비트 생성기로부터 M시퀀스 신호를 생성할 수 있다. 케이블로 M시퀀스 신호를 인가하는데, Fig. 4와 같이 쉬프트 레지스터(Shift Resister)로 M시퀀스 신호를 생성한다[8].

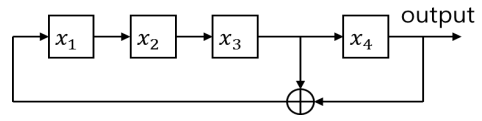


Fig. 4. Linear feedback shift register

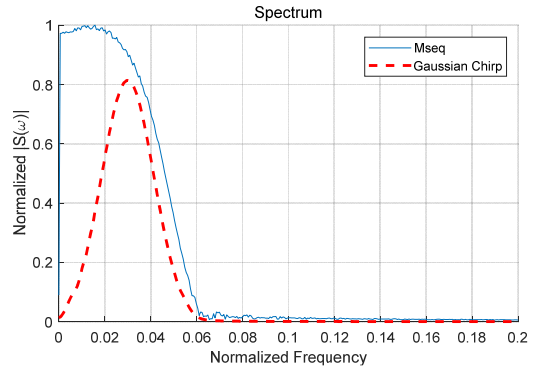


Fig. 5. Spectrum of M-sequence and Gaussian chirp

M시퀀스를 이용하면 각 비트마다 SRRC 필터에 의해 펄스 성형(Pulse Shaping)이 이루어지므로 가우시안 포락선 형태의 Chirp 신호에 비해 에너지 손실이 적도록 구성할 수 있다. 이를 스펙트럼으로 나타내면 Fig. 5와 같다. 가우시안 Chirp 신호는 저주파 대역에서 에너지 손실이 일어나지만, M시퀀스는 가우시안 Chirp 신호에 비해 저주파 대역의 에너지를 활용할 수 있다는 것을 알 수 있다.

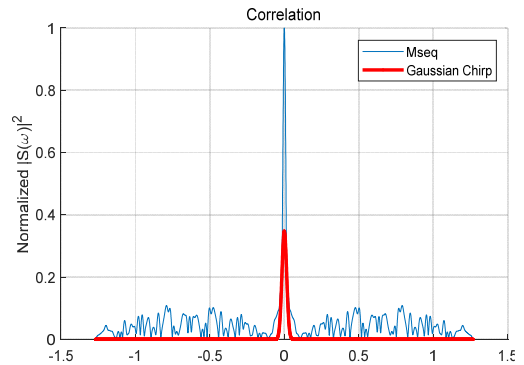


Fig. 6. Auto correlation of M-sequence and gaussian chirp

M시퀀스 신호의 자기 상관함수(Auto Correlation) 특성과 가우시안 포락선 형태로 변형한 Chirp 신호의 자기 상관함수를 비교하면 Fig. 6과 같다. 가우시안 Chirp 신호는 부 돌출부(Side Lobe)가 없는 반면, M시퀀스 신호는 부 돌출부가 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만, 가우시안 Chirp 신호는 가우시안 포락선 형태로 변형되는 과정에서 에너지 손실이 발생해 M시퀀스에 비해 낮은 상관함수 특성 값을 지닌 것을 알 수 있다. M시퀀스를 케이블 결함 위치 추정에 적용하면 로켓 추진기관의 제어기와 DAS를 활용하면서 각 비트마다 펄스 성형을 수행하여 저주파수 대역의 에너지를 이용하고 고조파 현상을 줄여서 가우시안 Chirp 신호보다 정확성 케이블 결함 위치 추정 성능을 기대할 수 있다.

본 장에서는 저주파수 대역에서의 스펙트럼 차이를 분석하기 위해 MATLAB R2018b 버전을 이용하여 동일한 주파수 대역을 지닌 Chirp, M시퀀스 신호를 생성하여 비교분석하였다.

3. 실험 결과

M시퀀스 신호를 이용하여 케이블 결함을 추정하는 기법에 대한 실제 성능을 검증하기 위해 Fig. 7과 같이 케이블 결함 위치 추정 장비를 적용하였으며 시스템 사양은 Table 2와 같다. 케이블 결함 위치 추정 장비의 가운데 위치한 장치는 Fig. 2의 제어기에 해당되는 AWG(Arbitrary Waveform Generator) Unit이다. AWG Unit은 사전에 MATLAB R2018b 프로그램을 통해 생성한 M시퀀스 신호를 점검 대상 케이블로 신호를 물리적으로 생성 및 전송하는 역할을 수행한다. 맨 아랫 부분은 DAS에 해당되는 DAQ (Data Acquisition) Unit으로써 케이블 결함 위치에서 반사된 신호를 획득하는 역할을 수행한다. 점검장비의 Control Unit을 통해 AWG Unit에 파형 생성의 명령을 인가하고 DAQ Unit에 계측을 수행하게 한다.

Fig. 2의 계통도처럼 제어기의 역할을 하는 AWG Unit에서 생성된 신호는 DAS의 역할을 하는 DAQ Unit과 케이블로 인가되고 케이블 결함 위치에서 발생한 반사파를 계측한다. 실험을 위해 케이블에 인가된 신호의 주파수 대역폭은 DC ~ 150 MHz이고 시간 폭은 52 ns이다. 신호 발생기는 임펄스, Chirp, M시퀀스 신호를 생성한다. M시퀀스는 비트 생성기로부터 7비트를 생성하며 Chirp 신호와 동일한 시간 폭을 지니도록 실험에 적

용하였다. 실험에 사용한 케이블은 로켓 추진기관 개발시험에서 물리량 계측을 위해 많이 사용되는 동축케이블 RG-58이며 특성 임피던스(Z_0)는 50 Ω이다.

Table 2. Specification of cable fault estimator

	Specification
Size	- 600 × 1200 × 750
Control Unit	- CPU : Intel i5-7500 - RAM : DDR4 16GByte - SSD : 256GByte - Power : 100~240V, 50/60Hz, Max. 1.5A
AWG Unit	- Resolution : 16Bit - Sample Rate : 2.4GSps - Output Current : Max. 24mA - Output Impedence : 50Ω - Power : 100~240V, 50/60Hz, Max. 1.5A
DAQ Unit	- Resolution : 12Bit - Sample Rate : 2.5GSps - Input Bandwidth : 3.2GHz - Input Voltage Range : Max. 1.2Vpp - Input Impedence : 50Ω - Power : 100~240V, 50/60Hz, Max. 1.5A

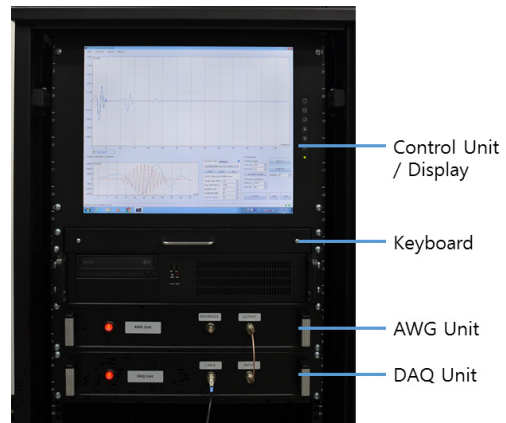


Fig. 7. Cable fault estimator

케이블에 결함을 발생시키기 위해서 3가지 형태로 케이블 손상이 발생한 경우(Damaged), 단선되어 개방된 경우(Open), 케이블 도선과 차폐가 서로 단락된 경우(Short)를 케이블 결함으로 두었다. 로켓 추진기관 구성품이 점검장비로부터 떨어져 있는 거리를 감안하여 손상된 경우는 Fig. 8과 같이 10, 20, 30, 40, 50 m 부분에 케이블 손상을 발생시켰다. 그리고 케이블 개방 및 단락에 대한 위치 추정 성능을 비교하기 위해 10, 20, 30, 40, 50 m 길이의 케이블 끝단에 개방 및 단락하여

Table 3과 같은 절차에 따라 실험을 진행하였다. 본 논문에서 제안한 방법을 적용하여 성능을 검증하였고 제안된 방법의 성능을 비교하기 위해 TDR 방법과 TFDR 방법을 이용하여 동일한 실험 조건에서 성능을 비교하였다.

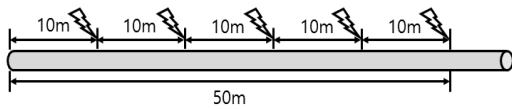


Fig. 8. Damaged cable and fault locations

Table 3. Sequences of the experiment process

Seq.	Process
1	Prepare for RG-58 cables connected to a rocket motor
2	Mark the accurate fault locations.
3	Make the faults on cables. (Damaged, Open, Short)
4	Connect damaged fault cables to the cable fault estimator.
5	Send impulse signals to the cables.
6	Analyze the reflected impulse signals using TDR.
7	Repeat the 5 ~ 6 processes 10 times.
8	Send gaussian chirp signals to the cables.
9	Analyze the reflected chirp signals using TFDR.
10	Repeat the 8 ~ 9 processes 10 times.
11	Send M-sequence signals to the cables.
12	Analyze the reflected M-sequence signals using the proposed method.
13	Repeat the 11 ~ 12 processes 10 times.
14	Connect open fault cables (10m, 20m, 30m, 40m, 50m) to cable fault estimator.
15	Repeat the 5 ~ 13 processes in accordance with meters of open fault cable.
16	Connect short fault cables (10m, 20m, 30m, 40m, 50m) to cable fault estimator.
17	Repeat the 5 ~ 13 processes in accordance with meters of short fault cable.
18	Comparison the whole data

실험은 Table 3의 절차와 같이 매 10회씩 진행하였으며 Table 4에 나타난 결과는 이를 평균값으로 나타낸 것이다. Fig. 9는 TDR, TFDR, 제안된 방법에 대해 반사파 신호를 분석하여 나타낸 것이다. 0 m에서 수신된 신호는 AWG Unit에서 최초로 케이블로 송신된 신호가 DAQ Unit으로 들어와서 기준 시점이 된다. 이후 케이블 결함 위치로부터 반사된 신호가 수신되며 수신된 시점을 통해 결함 위치를 추정할 수 있다. Fig. 9에서 0 m 지점을 보

면 제안된 방법은 TFDR와는 달리 Fig. 6에서 설명한 것처럼 부 돌출부가 발생한 것을 알 수 있다. 부 돌출부에서도 정합필터의 출력 값이 나타나지만, 반사된 신호가 들어온 정확한 시점에서 최대의 SNR을 지니게 되므로 반사된 신호의 피크 값이 나타난 시점을 이용하여 케이블 결함 위치로 추정할 수 있다.

케이블 손상, 개방, 단락에 대한 실험 결과를 비교하기 위해 오차율(Error rate)로 계산하여 Table 4와 Fig. 10~12와 같이 나타내었다.

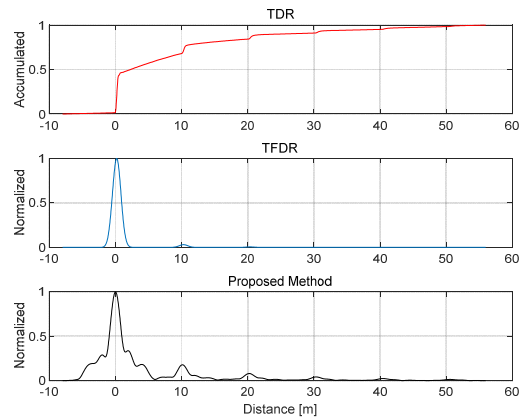


Fig. 9. The results of damaged cable experiments

실험 결과로 알 수 있듯이 TDR은 케이블 다중결함을 파악하는 데는 완전히 불가능한 것은 아니지만 그 정확도가 다른 방법에 비해 떨어진다는 것을 알 수 있다. TFDR 방법은 TDR 방법에 비해 보다 정확한 탐지 성능이 나타나지만 TDR과 마찬가지로 20 m 이내의 케이블 손상/개방/단락 실험에서 약 1.78 % 이상의 오차율이 나타났다. 10 m 케이블 손상지점에서 TDR은 3.58 %, TFDR은 2.78 %, 제안된 방법은 약 1.18 %의 오차율이 나타났으며 10 m 부터 40 m 까지는 예외 없이 제안된 방법이 TDR 방법과 TFDR 방법에 비해 오차율이 낮게 나타났다. 하지만 50 m 지점에서의 케이블 손상/개방/단락 실험 결과로 제안된 방법과 기존의 TDR, TFDR의 방법에 비해 큰 차이가 없지만, 특히 케이블 손상/개방 실험 결과에서 TFDR의 오차율이 가장 낮게 나타났다. TDR과 TFDR 모두 40 m 이내의 근거리 케이블 결함 추정에는 제안된 방법에 비해 비교적 높은 오차율을 지닌다. 반면, 제안된 방법은 케이블 손상/개방/단락 실험에서 다른 방법에 비해 약 1 % 내외 정도수준의 오차율을 지니며 10 m의 근거리 결함 위치부터 50 m의 원거리 결함 위치까지 비슷한 오차율이 나타났다.

Table 4와 Fig. 10~12의 실험 결과를 보면 TFDR은 케이블의 근거리 결함 추정보다는 케이블 길이가 길어질수록 오차율이 낮아지는 경향이 나타나지만, 제안된 방법은 근거리 결함 추정과 원거리 결함 추정 모두에서 전반적으로 다른 방법에 비해 일정한 성능이 나타나는 것을 알 수 있다. 이를 통해 40 m 이내 수준으로 이격되어있는 로켓 추진기관 구성품의 케이블을 점검하기 위해서는 제안된 방법이 적합하다는 것을 알 수 있다.

Table 4. Experiment Results

TDR						
	Damaged [m]	Error rate [%]	Open [m]	Error rate [%]	Short [m]	Error rate [%]
10m	10.3580	3.5800	10.3220	3.2200	10.3740	3.7400
20m	20.4361	2.1805	20.4041	2.0205	20.4561	2.2805
30m	30.5261	1.7537	30.4901	1.6337	30.5541	1.8470
40m	40.6162	1.5405	40.5282	1.3205	40.5842	1.4605
50m	50.7223	1.4445	50.5143	1.0286	50.5663	1.1326

TFDR						
	Damaged [m]	Error rate [%]	Open [m]	Error rate [%]	Short [m]	Error rate [%]
10m	10.2780	2.7800	10.2980	2.9800	10.3540	3.5400
20m	20.3561	1.7805	20.3641	1.8205	20.3961	1.9805
30m	30.4341	1.4470	30.4341	1.4470	30.4741	1.5803
40m	40.4882	1.2205	40.4722	1.1805	40.4922	1.2305
50m	50.5263	1.0526	50.4303	0.8606	50.4663	0.9326

Proposed Method						
	Damaged [m]	Error rate [%]	Open [m]	Error rate [%]	Short [m]	Error rate [%]
10m	10.1181	1.1810	10.1181	1.1810	10.1580	1.5800
20m	20.2361	1.1805	20.1961	0.9805	20.2361	1.1805
30m	30.3142	1.0473	30.2742	0.9140	30.3222	1.0740
40m	40.4322	1.0805	40.3122	0.7805	40.3122	0.7805
50m	50.5823	1.1646	50.4703	0.9406	50.3503	0.7006

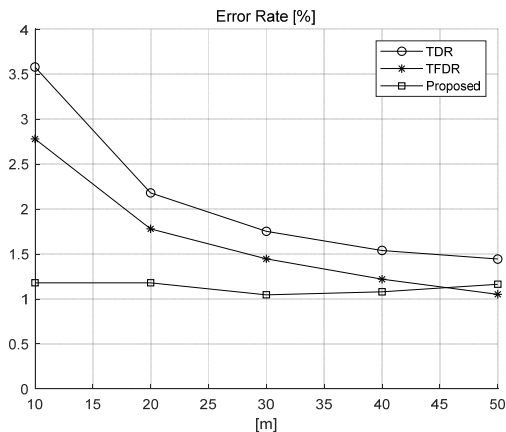


Fig. 10. The error rate of the damaged cable experiment

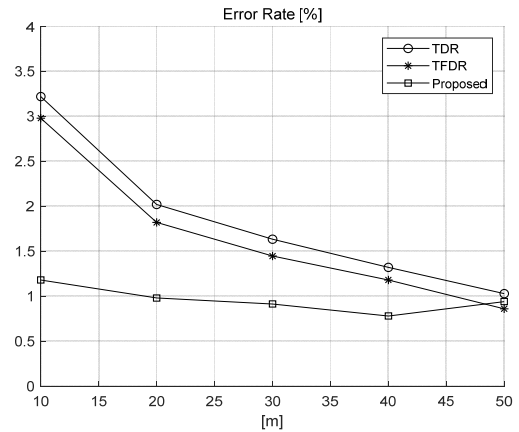


Fig. 11. The error rate of the open cable experiment

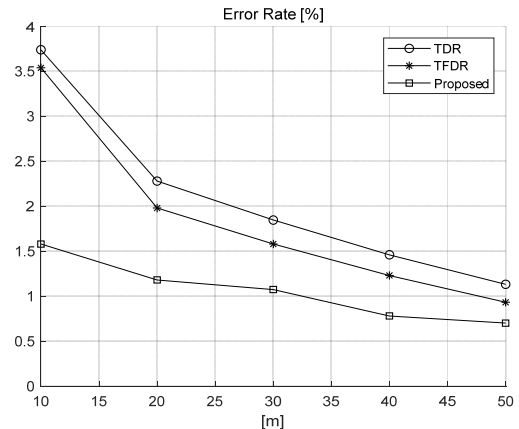


Fig. 12. The error rate of the short cable experiment

4. 결론

본 논문에서는 케이블 결함 위치를 추정하는 데 M시퀀스 신호를 이용한 케이블 결함 추정 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 로켓 추진기관에 사용되는 DAS와 같은 시스템을 활용하여 기존의 방법에 비해 사용자가 간편하게 로켓 추진기관의 케이블 결함 위치를 추정할 수 있도록 하였다. 제안된 방법의 성능을 검증하기 위해 시험환경에서 물리량 계측용으로 많이 사용되는 RG-58 동축케이블을 이용하여 기존 방법들과 함께 성능을 비교하였다. 40 m 이내 수준의 근거리 케이블 결함 위치 추정에서 TDR과 TFDR은 제안된 방법에 비해 높은 오차율을 지녔으며, 제안된 방법은 케이블 결함 위치에 관계

없이 약 1.6 ~ 0.7 % 정도의 안정적인 오차율을 지닌 것을 확인하였다. 이로써 제안된 방법은 저주파수 대역의 에너지 손실을 줄이고, DAS와 같은 로켓 추진기관 내부 인터페이스에 적용되는 구성품을 활용하여 사용자가 간편하고 안전하게 보다 정확한 케이블 결함 위치를 추정할 수 있는 가능성을 확인하였다.

기존의 TDR, TFDR과 같은 방법은 케이블 결함 위치 추정을 위해 많이 이용되었다. TDR은 시간 영역을 이용하여 간편하게 점점에 이용할 수 있으나 작업자가 현장에 접근을 해야 하므로 안전상 문제가 있으며, 다른 방법에 비해 정확도가 떨어진다. TFDR은 시간-주파수 영역을 이용하여 주파수의 영향을 고려하여 결함을 면밀히 분석할 수 있지만 로켓 추진기관 시험환경에 즉각적으로 적용하기 어려우며 저주파수 대역의 신호를 활용하지 못한다는 단점이 있다. 반면에 제안된 방법은 주파수 영향을 분석하기 어려우나 일반적으로 사용되는 기술을 응용하여 간편하고 사용자의 안전을 고려하여 케이블의 결함 위치를 추정할 수 있으며, 구성품을 탈부착하여 결함 위치를 추정하는 수고를 덜어줌으로써 시간과 비용 측면에서 보다 효율적으로 케이블 상태를 확인할 수 있다. 그리고 저주파수 대역의 에너지 손실을 줄여 보다 정확한 케이블 결함 위치 추정에 이용할 수 있다. 본 논문에서 제안된 방법을 이용한 케이블 결함 위치 추정은 무기개발과 같은 사람이 접근하기 어렵고 위험한 환경에서 시험요원의 안전을 위해 다양하게 적용 가능하리라 여겨진다.

References

- [1] P.F. Cale, "Cable-fault location by impulse-current method," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol.122, no.4, pp.403-408, Apr. 1975.
- [2] S. Navaneethen, J.J. Sorghen, W.H. Siew, F. McPherson and P.F. Gale, "Automatic fault location for underground low voltage distribution networks," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.16, no.2, pp.346-351, Apr. 2001.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/61.915506>
- [3] 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 Trans. Instrum. Meas.*, vol.63, no.8, pp.1966-1974, Aug. 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2014.2304353>
- [4] T.C. Chuah, Y.H. Ng, N. Hashim, A.N. Zainal Abidin, A. Asrokin, "Virtual signal-integrity verification tool for copper twisted-pairs using TDR," *IET Sci. Meas. Technol.*, vol.13, Iss.2, pp.231-237, 2019.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5057>

- [5] B.D. Shumaker, C.J. Campbell, C.D. Sexton, G.W. Morton, J.B. McConkey, and H.M. Hashemian, "Cable condition monitoring for nuclear power plants," *2012 Future of Instrumentation International Workshop (FIIW) Proceedings*, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/FIIW.2012.6378325>
- [6] H. Vanhamme, "High resolution frequency-domain reflectometry," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol.39, pp.369-375, Apr. 1990.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/19.52517>
- [7] Y.J. Shin, Edward J. Powers, T.S. Choe, C.Y. Hong, E.S. Song, J.G. Yook, J.B. Park, "Application of time-frequency domain reflectometry for detection and localization of a fault on a coaxial cable," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol.54, no.6, Dec. 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2005.858115>
- [8] Bernard Sklar, *Digital Communications: Fundamentals and Applications*, 2nd Ed, p.1011, Prentice Hall, New Jersey, 2001.

손 지 홍(Ji-Hong Son)

[정회원]



- 2016년 2월 : 한국해양대학교 전 파공학과 (공학석사)
- 2017년 2월 ~ 현재 : 국방과학연구소 연구원

<관심분야>

유도무기 시험평가, 신호처리, 신호계측