

A Study on the Method to Minimize Measuring Burial Depth Error for Submarine Cable

안 용 호[†] · 김 용 학* · 한 정 열* · 이 유 진* · 한 병 성**

(Yong-Ho An · Yong-Hak Kim · Jeong-Yeol Han · You-Jin Lee · Byoung-Sung Han)

Abstract - The distribution submarine cables are normally used for power supply at island, which are mostly installed in the southern coast of KOREA, and partially installed in the west coast and Jeju-Island. There are two way of submarine cable burying system, buried and unburied type. Since 2003, KEPCO is entirely being constructing the distribution submarine cable by buried type. In this case, 'burial depth' is key index for evaluating the suitability of the buried situation. Therefore, the measurement accuracy of 'burial depth' is a big issue for burying system in the distribution submarine cable. This paper demonstrates the measurement error of burial depth that is affected by electrical factor such as grounding type of submarine cable in case of magnetic field detection method, and indicates the method to reduce the measurement error in buried type of distribution submarine cable system.

Key Words : Submarine cable, Burial depth, Magnetic field detection

1. 서 론

우리나라의 도서지역 전력공급을 담당하고 있는 배전 해저케이블은 대부분 남해안에 설치되어 있으며, 그 다음으로 서해안 그리고 제주도에 설치되어 있다. 또한 제주와 육지간 전력공급을 담당하고 있는 송전급 해저케이블로는 제주와 해남간 설치 운전 중인 HVDC 해저케이블로 제주지역 전력의 40%를 담당하고 있다.

해저케이블 설치방법은 매설방식에 따라 매설방식과 비 매설방식으로 분류되는데 한국전력공사에서는 배전 해저케이블의 경우 2003년부터 전량 매설방식으로 시공하고 있다. 그리고 송전급 HVDC 해저케이블은 전 구간 매설방식을 채택하여 시공하고 있다. 매설방식을 채택하고 있는 주된 이유는 태풍, 지형영향 등으로 인한 자연 재해적 요인과, 선박의 어로행위 또는 정박시 투묘(뚝 내림) 등의 인위적 위해요소로부터 해저케이블을 완전히 보호하여 도서지역 고객에 대한 안정적인 전력공급을 확보함으로써, 국민 편익을 도모하는 데 목적이 있으며, 해저케이블의 경우 고장이 발생하면 고장복구에 막대한 비용이 발생하므로 이를 미연에 방지하고자 하는 데 그 목적이 있다.

매설방식으로 해저케이블을 시공할 경우 매설상태의 적합성 여부 판단은 '매설심도'로 판단할 수밖에 없으며, 특히 해저면에 매설된 해저케이블의 매설심도를 어떻게 정확하게 측정해 내느냐가 중요한 Issue로 대두되고 있다. 해저케이블 매설

심도 측정방법으로는 물리적인 탐사방법과 전기적인 탐사방법으로 나눌 수 있는데, 물리적인 탐사방법은 매질의 영향을 받으므로 제한적으로 적용할 수 있다. 반면, 전기적인 탐사방법에 의한 매설심도 측정방법이 있는데 매질에 따른 영향을 거의 받지 않는 장점이 있는 것으로 알려져 있다. 또한 전기적인 탐사방법 중 자기검출방식에 있어서 매질 또는 매설깊이 등의 물리적인 요소들에 대한 매설심도 측정오차는 물리적 특성에 따라 영향을 미치든지 아니면 영향이 없든지 정해진 값이라는 것은 그간 연구를 통해 밝혀진 바 있다[1][2].

본 논문에서는 전기적인 탐사방법 중 자기검출방식을 이용하여 해저케이블 매설심도를 측정할 경우 해저케이블 접지환경 등 전기적인 요인에 의해 매설심도의 측정오차가 발생할 수 있는 것과 측정오차를 저감할 수 있는 방법 및 특성에 관해 기술하였다.

2. 본 론

2.1 이론적 배경

2.1.1 해저케이블 추적 기본원리

해저케이블 탐지 및 추적은 암페어의 오른나사법칙에 의해 발생하는 자계에 있어서, 지구자기장과 케이블 고유자기장의 변화를 Innovatum Ultra #44 센서에 의해 X, Y, Z 성분의 자기장과 dZ의 매설심도 변화를 측정하여 추적할 수 있게 되며, Magnetic Flux Gate를 이용한 그림 1의 자기검출방식을 기본원리로 하고 있다[3]. 해저케이블과 같은 동축케이블에 전류 I 가 흐를 때 발생하는 특정지점의 자계의 세기 H 와 거리 r 과의 관계식은 식(1)로 나타낼 수 있으며, 자속밀도 B 와 자계 H 와의 상관관계는 식(2)로 나타낼 수 있다.

[†] 교신저자, 정회원 : 한국전력공사 전력연구원

E-mail : yhan@kepri.re.kr

* 정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원

** 펠로우회원 : 전북대학교 전자정보공학부 교수

접수일자 : 2011년 9월 19일

최종완료 : 2011년 12월 20일

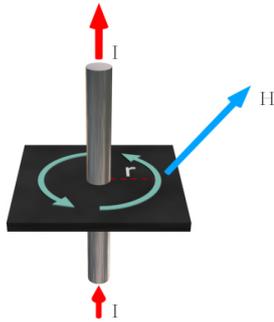


그림 1 자계 검출 원리(암페어의 오른나사 법칙)
 Fig. 1 Principle of magnetic field detection(Ampere's Law)

$$H = I/2\pi r \text{ [AT/m]} \quad (1)$$

$$B = \mu H = \mu I/2\pi r = 200I/2\pi r \text{ [nT]} \quad (2)$$

B : 자속밀도[nT], H : 자계의 세기[AT/m], μ : 투자율,
 I : 전류[A], r : 도체중심과의 거리[m]

2.1.2 매설심도 측정원리

해저케이블 위치추적 및 매설심도 측정임무를 수행하는 핵심장비인 Innovatum Ultra #44 시스템은 활성화된 교류전류에 의해 발생하는 자계를 감지하여 측정하는 Active AC Mode를 기본 운영방법으로 하며, 실제 현장에서는 그림 2와 같이 Innovatum Ultra #44 시스템을 유인잠수정에 탑재하여 매설심도를 측정하게 된다[4].

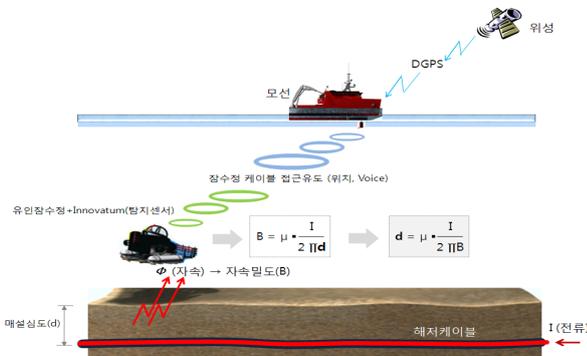


그림 2 유인잠수정에 의한 매설심도 측정 개념도
 Fig. 2 Conceptual diagram for Measuring burial depth using DOV(directly operated vehicle)

2.2 실험장치 구성

2.2.1 육지실험장 구축

해저환경에서 시험시 막대한 비용, 기간, Data의 측정 정밀도 확인 등 불리한 점을 고려하여, 해저환경과 가장 유사한 육지에 실험장을 그림 3과 같이 구축하였으며, 육지실험장의 구축 규모는 궁장 30m, 매설심도 0.5m, 1.0m, 1.5m, 2.0m로 구분하여 설치하였다[5][6]. 또한 케이블 양단을 접지하여 대지를 통해 귀로할 수 있도록 회로를 구성하여 케이블 도체에 특정 시험전류를 주입할 수 있도록 하였다[7][8].

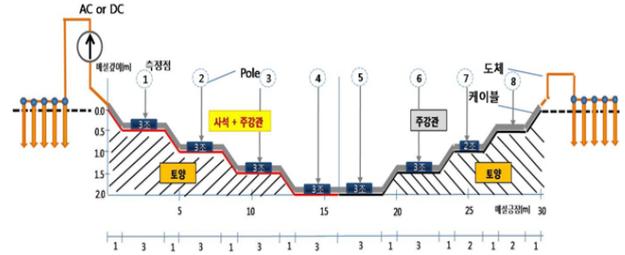


그림 3 육지실험장 구축 단면도
 Fig. 3 Cross section diagram of land test-bed

측정오차를 최소화 하기 위하여 매설심도별로 기준점을 설치하였으며, 육지실험장 구축제원은 표 1에 나타내었다.

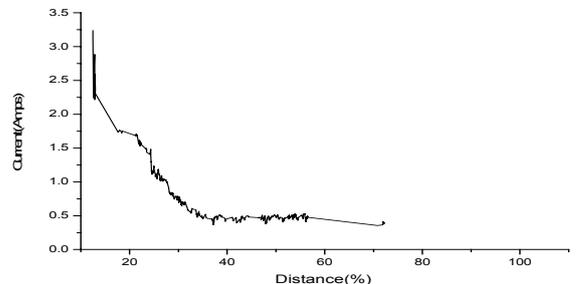
표 1 육지실험장 구축제원

Table 1 Construction factors of land test-bed

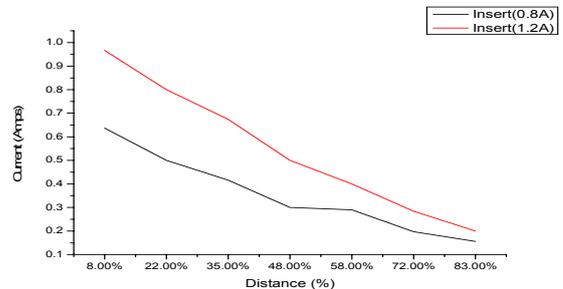
측정점	전원	1	2	3	4	5	6	7	8	말단	
매설심도(m)	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.0	1.5	1.0	0.5	0	
매질	-	사석	사석	사석	사석	토양	토양	토양	토양	-	
보호	-	강관	비보호	-							
거리	이격거리(m)	0	2.5	6.5	10.5	14.5	17.5	21.5	25.0	28.0	30.0
(전원기준)	%환산	0%	8%	22%	35%	48%	58%	72%	83%	93%	100%
거리	이격거리(m)	30	27.5	23.5	19.5	15.5	12.5	8.5	5.0	2.0	0
(말단기준)	%환산	100%	92%	78%	65%	52%	42%	28%	17%	7%	0%

2.2.2 육지실험 시스템 적합성 검토

현장 시스템 구성과 육지실험 시스템 구성과의 적합성 여부 판단을 위해 거리에 따른 전류 특성곡선을 비교 분석한 결과 전류주입 지점의 거리율을 0%로 하고 말단 지점의 거리율을 100%로 하였을 때 그림 4의 (a), (b)에서 보이는



(a) 현장 시스템
 (a) local system



(b) 육지실험 시스템
 (b) land test-bed system

그림 4 거리에 따른 전류 특성곡선 비교

Fig. 4 Comparison of current property profile and distance rate

바와 같이 말단 지점으로 갈수록 급격한 전류의 감쇠현상이 발생하는 유사한 패턴을 나타내는 것으로 보아 육지실험 시스템이 해저 현장 시스템과 유사함을 알 수 있다.

2.2.3 실험장비

매설심도 측정에 사용한 장비는 Innovatum Ultra #44 시스템을 탑재한 그림 5의 육상 케이블 탐지장치를 사용하였다.

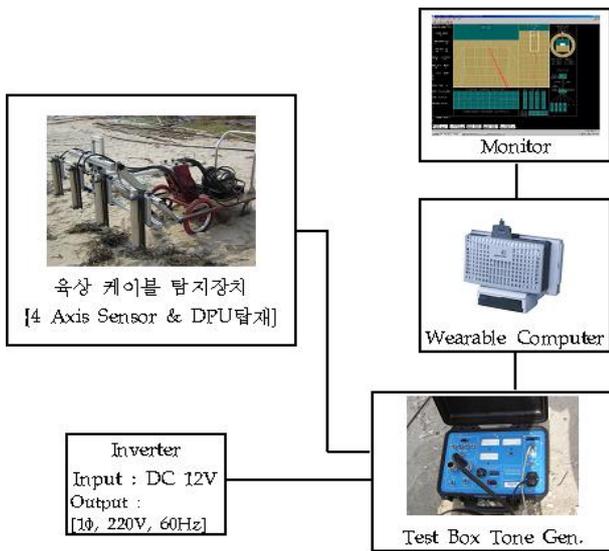


그림 5 육상 케이블 탐지장치
Fig. 5 Detection system for land cable

2.2.4 실험조건 및 회로구성

매설심도 측정에 사용한 육상 케이블 탐지장치는 해저에서 매설심도 측정에 사용하는 유인잠수정 운용조건과 동일한 조건으로 Setting 하여 Active AC 모드에서 매설심도를 측정하였다. 측정 시스템 조건은 센서 높이는 0.5m, 센서 폭은 1.5m로 하였으며, Armor와 시스칸 공통접지 영향검토 실험을 위하여 그림 6과 같이 실험회로를 구성하였다.

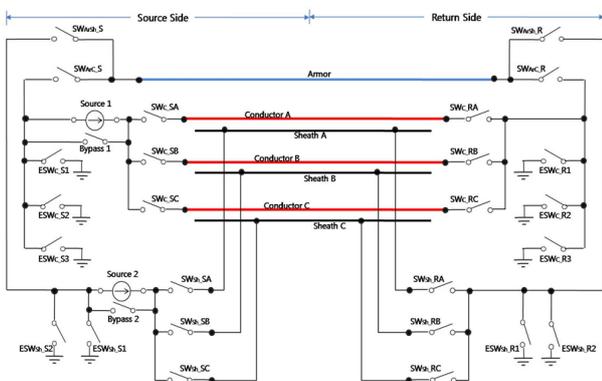


그림 6 실험회로 구성
Fig. 6 Consist of test circuit

또한, 자체검출방법에 의한 매설심도 측정시 실제 해수를 모의하기 위해 염도 3.6의 소금물을 사용하였으며, 공기와의 상관관계를 분석하기 위하여 그림 7과 같이 육지에 실험환경을 구축하여 고무판, 공기, 빈통, 해수 등 매질변화에 따른 영향을 실험할 수 있도록 하였다.

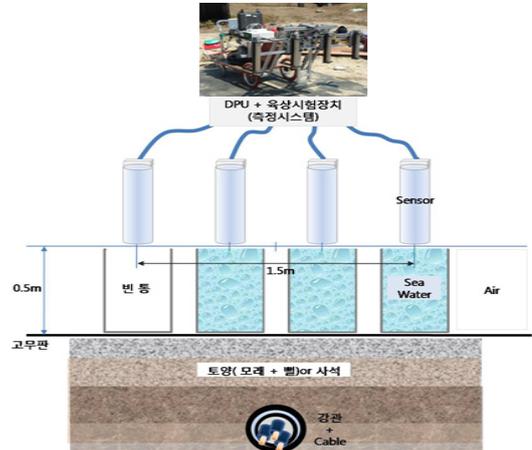


그림 7 매질영향 육지실험 방법
Fig. 7 Land test method of medium affection

2.3 실험결과 분석 및 고찰

2.3.1 실험결과 분석

자체검출방법에 의한 매설심도 측정에 있어서 고무판, 공기, 빈통, 해수 등 매질의 변화가 매설심도 측정 오차에 미치는 영향을 Minitab 프로그램을 통해 분석한 결과 그림 8과 같이 측정조건이 주입전류 0.5A, 매질 사석2m 구간에서 측정오차는 고무판 -7.8%, 공기 -7.1%, 빈통 -6.6%, 해수 -7.5%로 매질에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

자체검출방식에서 나타나는 현상 즉, 매질의 영향을 받지 않는 이유는 자체에 영향을 미치는 인자가 식(2)에 나타낸 바와 같이 투자율(μ)이므로, 비투자율이 공기, 증류수가 1로 서로 동일하기 때문에 매질이 비자성체일 경우 매설심도 측정오차에 영향을 미치지 않는 주요 요인으로 판단된다.

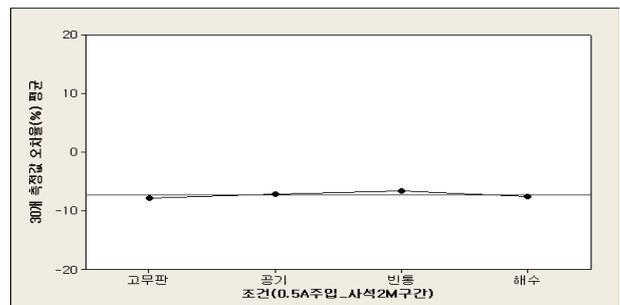


그림 8 매질 영향 특성
Fig. 8 Property of medium affection

동일한 측정환경 하에서 매설심도를 측정할 경우 외장강대(Armor)와 시스간 공통접지 또는 분리 여부에 따라 매설정확도에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하기 위하여 Minitab 프로그램을 사용하여 분석한 결과를 그림 9에 나타내었다. 본 실험에서 매설환경은 매설심도 2.0m, 매질은 토양인 조건으로 하였으며, 측정 결과 외장강대(Armor)와 시스간 공통접지 하였을 경우 평균 오차율은 -12.4%를 보였으며, 외장강대(Armor)와 시스간 분리하였을 경우 평균 오차율은 -8.8%를 나타내었다.

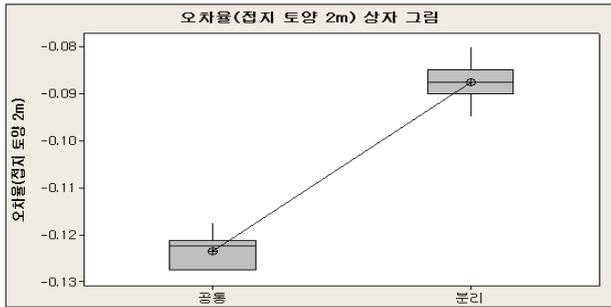
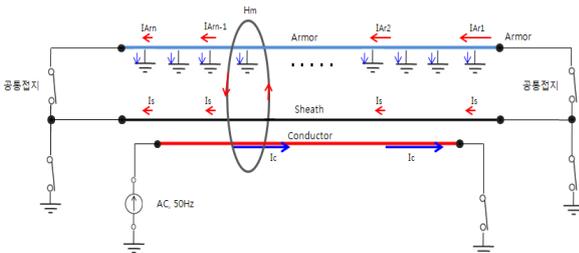


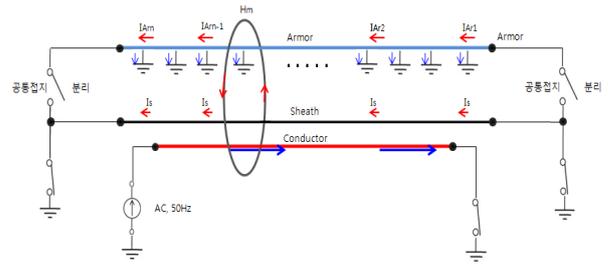
그림 9 Armor 시스간 공통접지 분리 전·후 특성 비교
Fig. 9 Comparison of property between armor and sheath before and after of common grounding separation

외장강대(Armor)와 시스간 공통접지 하였을 경우 평균 오차율이 크게 나타난 이유는 앞장의 그림 4(b)와 같이 말단 지점으로 갈수록 Pick-up 전류의 급격한 감쇠로 인한 것으로, 이러한 현상은 자기검출센서의 감지 특성에 영향을 미치는 요인이라고 볼 수 있으며, 그 원인은 해저케이블 구성요소 중 Armor의 경우 해수가 침투할 수 있는 구조로 되어있기 때문에 그림 10(a)와 같이 Armor가 접지된 형태로 되어 차폐 역할을 하고, 시스와 공통접지를 할 경우 말단 지점에서 가장 큰 전류 감쇠가 발생하기 때문이다. 따라서, 매설심도의 측정오차를 저감시켜주기 위해서는 앞서 언급한 전류주입 지점의 말단으로 갈수록 감쇠되는 특성을 제거시켜 주면 되는데, 그림 10(b)와 같이 Armor를 시스와 공통접지로부터 분리시켜 주면 가능하며, 그 특성을 비교 실험한 결과는 그림 9에 나타난 바와 같다.

또한 그림 10에 나타낸 바와 같이 외장강대(Armor)가 자기신호 감쇠에 큰 영향을 미치는 이유는 시스의 경우 해수로부터 차단되는 층으로 양단접지 또는 편단접지, 때에 따라서 비접지로 운영할 수 있지만, 외장강대(Armor)의 경우에는 해수가 차단되지 않고 직접 침입하는 구조로 되어 있기 때문에 강력한 차폐 역할을 하고 있다고 할 수 있다.



(a) Armor 공통접지 분리 전
(a) before common grounding separation of armor



(b) Armor 공통접지 분리 후
(b) after common grounding separation of armor

그림 10 공통접지 분리 전·후 신호흐름 특성
Fig. 10 Property of signal flow before and after of common grounding separation

오차발생 원인 즉, 신호감쇠가 시스보다 외장강대(Armor)에서 큰 이유는 그림 10(a)에서와 같이 도체에 전류를 주입하면 시스와 외장강대(Armor)에 접지계통을 통해서 주입전류(I_c)와 반대방향으로 전류가 흐르게 되며, 암페어의 오른나사 법칙에 의해 자계가 발생하게 된다. 각 측정점에서의 자계 $H_m = I_m / 2\pi r$ [AT] (여기서 r 은 매설심도[m]임)으로 나타낼 수 있다. 주입전류(I_c)와 반대방향으로 흐르는 전류를 측정점별로 살펴보면 다음과 같다.

전류주입점 말단의 공통접지를 통해 주입전류(I_c)에 반대방향으로 흐르는 전류는 시스의 경우 양단접지이므로 동일한 크기를 갖는데 반하여, 외장강대(Armor)에 흐르는 전류는 전류주입점 말단에서 거의 주입전류(I_c)와 유사한 크기의 외장강대전류(I_{Ar1})가 흐르므로 외부로 나타나는 측정자계 $H_m \approx 0$ 에 가깝게 되어 자기신호가 소멸되는 현상을 나타내게 된다. 즉, 발생신호를 측정할 수 없는 상태가 된다.

계속해서 측정지점이 전류주입점으로 이동할수록 그 영향은 적어지게 되는데 그 이유는 외장강대(Armor)가 해수의 침입으로 해수를 통해 전류가 누설되는 작용을 하기 때문이다. 누설되는 전류를 고려하면 외장강대에 흐르는 전류(I_{Ar})는 전류주입점에 가까울수록 작아지는 특성을 가지고 있다. 즉, 측정자계 H_m 이 최대 값을 갖게 된다.

- 측정자계 H_m 크기 : 전류주입점 > 말단
- 외장강대전류(I_{Ar}) : 전류주입점 < 말단

신호감쇠 특성을 줄이기 위해 제한한 방법의 원리를 설명하면 다음과 같다.

발생오차발생 원인 즉, 신호감쇠가 최소화되도록 외장강대(Armor)를 타 접지시스템으로부터 분리하여 구성하면 그림 10(b)에 나타낸 바와 같이 주입전류(I_c)와 반대방향으로 흐르는 외장강대(Armor) 전류는 전 구간에서 걸쳐 동일한 크기를 갖게 되는데, 이것은 외장강대(Armor)가 해수와 접촉하여 하나의 접지체로 작용하기 때문으로 볼 수 있다.

따라서, 외장강대(Armor)를 타 접지시스템과 분리한 후 측정지점별 신호감쇠 정도를 살펴보면 그림 10(b)의 신호흐름과 같이 전류주입 말단지점에서 신호가 소멸되지 않고 전류주입점이나 말단지점에서 거의 동일한 측정자계 H_m 을 얻을 수 있다. 즉, 이러한 방법을 사용하면 매설심도 측정오차도 최소화 할 수 있다.

- 측정자계 H_m 크기 : 전류주입점 \approx 말단
- 외장강대전류(I_{Ar}) : 전류주입점 \approx 말단

2.3.2 실험결과 고찰

전기적인 환경이 매설심도 측정오차에 미치는 영향을 Minitab 일원분산분석 기법을 이용하여 분석한 결과 외장강대(Armor)와 시스간 분리하였을 경우 평균 오차율은 -8.8%로 외장강대(Armor)와 시스간 공통접지 하였을 경우 보다, 절대 값을 기준으로 3.6% 향상된 것으로 나타났다.

INNOVATUM		ULTRA SYSTEM PERFORMANCE	
The following table gives INNOVATUM system performance as measured in a laboratory environment, and the estimated performance when installed on a typical "Survey" ROV.			
1. AC Tone Tracking Mode			
	System Alone	System on Vehicle **	
Detection	2.5 mA @ 2 metres	5 mA @ 2 metres	
Detection & Direction	40 mA @ 30 metres	80 mA @ 30 metres	
Tracking & Depth (+/- 10 cm)	5 mA @ 1 metre	10 mA @ 1 metre	
2. DC Current Tracking Mode			
Detection	0.4A @ 1.5 metre	0.4A @ 0.75 metre	
Detection & Direction	or 1.6A @ 0 metres	1.6A @ 1.5 metre	
Tracking & Depth (+/- 25cm)	or 0.4A @ 0.75 metre	or 0.4A @ 0.5 metre	
	or 1.6A @ 1.5 metre	1.6A @ 1 metre	
	or 0.4A @ 0.5 metre	or 0.4A @ 0.4 metre	
	or 1.6A @ 1.5 metre	1.6A @ 0.8 metre	

그림 11 매설심도 측정장비 성능 (Innovatum Ultra #44)
 Fig. 11 Performance of measuring system for burial depth (Innovatum Ultra #44)

따라서, 매설심도의 측정오차를 저감시켜주기 위해서는 Armor를 시스와 공통접지로부터 분리시켜 주면 가능하다고 할 수 있다. 또한 본 실험에 사용된 Innovatum Ultra #44 시스템의 보증오차가 그림 11에 나타난 바와 같이 10%인 것[3]을 고려할 때, 외장강대(Armor)와 시스간 분리한 상태에서 매설심도를 측정하여야 센서가 보증하는 허용치 범위 내의 신뢰성을 얻을 수 있다.

그리고 자계검출 방식에 있어서 측정오차는 매설심도 또는 매질 등의 물리적 매설환경보다는 측정시스템의 전기회로 구성 등 전기적 측정환경에 의한 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

전기적인 탐사방법 중 자계검출방식을 이용하여 해저케이블 매설심도를 측정할 경우 해저케이블 접지환경 등 전기적인 요인에 의해 매설심도의 측정오차가 발생할 수 있는 것과 측정오차를 저감할 수 있는 방법 및 특성에 대하여 육지 실험장을 구축하여 매설심도 측정이 가능한 Innovatum Ultra #44 시스템을 탑재한 육상 케이블 탐지장치를 사용하여 실험하고, Minitab 프로그램으로 분석하고 고찰한 결과는 다음과 같다.

외장강대(Armor)와 시스간 분리하였을 경우 평균 오차율은 -8.8%로 외장강대(Armor)와 시스간 공통접지 하였을 경우 보다, 절대 값을 기준으로 3.6% 향상된 것으로 나타났다. 매설심도의 측정오차를 저감시켜주기 위해서는 Armor를 시스와 공통접지로부터 분리시켜 주면 가능하다.

즉, 본 측정시스템을 현장에 적용 시 매설깊이 또는 매질 등의 물리적 매설환경보다는 측정시스템의 전기회로 구성 등 전기적 측정환경에 의한 영향이 크며, 외장강대(Armor)와 시스간 분리한 상태에서 매설심도를 측정하여야 매설심도 측정오차를 저감시킬 수 있다는 것을 본 연구를 통해 입증하였다. 이러한 결과는 앞으로 해저케이블 매설심도 측정 시 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 안용호 외, “자계검출방식에 의한 해저케이블 매설깊이 측정시 매질이 따른 영향 연구”, 대한전기학회 2010년 하계학술대회 논문집, 2010. 7, pp 1990-1991
- [2] 김인환 외, “해저케이블 매설깊이가 매설정확도에 미치는 영향 연구”, 대한전기학회 2010년 하계학술대회 논문집, 2010. 7, pp 2036-2037
- [3] Innovatum, INC. Innovatum Ultra 시스템 Manual, Spec, Revision 2.1, August 8. 2003
- [4] Ocean News January/February, 2003, pp 16
- [5] 한국전력공사 전력연구원 안용호, 김인환, 송택호 “배전 해저케이블 매설 정확도 향상을 통한 비용절감”, 최종 보고서, TDR.K02.B110.0088, 2010. 1
- [6] 한국전력공사 전력연구원 안용호, “배전해저케이블 진단결과” 기술지원보고서, TM.N04.S2009.0119, 2009. 1
- [7] 최종기 외, “지락전류 분류계수 측정에 의한 변전소 접지성능 진단”, 대한전기학회 2004년 하계학술대회 논문집 A, 2004. 7, pp 594-596
- [8] 최종기 외, “접지전류 측정에 의한 다중 접지계통의 접지저항 측정” 대한전기학회 논문지 A, 제53A권 제4호, 2004. 4, pp 234-237

저 자 소 개



안 용 호 (安 勇 豪)

1961년 7월 10일생. 1984년 인천대 전기공학과 졸업. 2000년 전북대 전기공학과 졸업(석사). 1987년 한국전력공사 입사. 1995년~현재 한국전력공사 전력연구원 책임연구원



김 용 학 (金 容 鶴)

1968년 8월 13일생. 1993년 전남대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원



한 정 열 (韓 正 烈)

1980년 2월 15일생. 2006년 전북대 전기 공학과 졸업. 2006년~현재 한국전력공사 전력연구원 일반연구원



이 유 진 (李 瑜 珍)

1983년 4월 25일생. 2007년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2009년 동 대학원 정보통신공학부 졸업(석사). 2010년~현재 한국전력공사 전력연구원 일반연구원



한 병 성 (韓 秉 誠)

1951년 12월 22일생. 1975년 전북대 전기 공학과 졸업. 1981년 전북대 대학원 전기 공학과 졸업(석사), 1988년 프랑스 루이 파스퇴르대학 졸업(박사). 1988년 프랑스 CNRS(프랑스국립과학연구소)연구원. 2002~2004년 전북대 공대 학장. 현재 전북대학교 전자정보공학부 교수