

표적 탐지거리 향상을 위한 근접자기센서 송수신기 설계에 관한 연구

A Study on Transmitter and Receiver Design of Proximity Magnetic Sensor for Enhancement of Target Detection Range

주혜선*	정현주*	양창섭*	전재진*
Hye-Sun Ju	Hyun-Ju Chung	Chang-Seob Yang	Jae-Jin Jeon

Abstract

Proximity magnetic sensor is able to detect the object target accurately in close range and it has been widely used in the underwater guided weapon system because there is no countermeasures from the target. In order to increase the damage of target by shock wave due to explosion of the underwater guided weapon system, the maximum detection range of the proximity magnetic sensor needs to be increased. In this paper, we describe the techniques of the optimum transmitting and receiving coils design using the Finite Element Method for the output power enhancement of the transmitter and the sensitivity improvement of the receiver. Finally, the proposed design techniques of the transmitter and the receiver were verified using a experimental setup and a prototype.

Keywords : Proximity Magnetic Sensor(근접자기센서), Receiving Coils(수신코일), Transmitting Coils(송신코일), Finite Element Method(유한요소법)

1. 서론

수중 유도무기(Underwater Guided Weapon) 체계는 해군 함정에 가장 위협을 주는 공격용 무기체계로서 최근에는 고속화, 고정밀화 및 고지능화 등 발전과 진화를 거듭하고 있다. 현재까지 세계 각국의 수중 유도 무기 체계에서 기폭 신관으로 활용되는 센서의 종류로는 작동 원리에 따라 충격센서, 음향센서, 수동형

자기센서 및 능동형 자기센서 등이 있다. 이들 중에서 능동형 자기센서(이하 근접자기센서)는 특정 주파수의 자기장 신호를 발생시킨 후 표적(함정) 표면에서 발생하는 와전류에 의한 자기장 신호를 탐지하는 방식으로 동작되며 표적 자체에서의 대응이 어렵고 근거리에서 정확한 표적 탐지가 가능한 장점으로 미국, 독일 등의 세계 각국 유도무기 체계들에서 널리 사용되고 있다^[1].

유도무기 체계에서의 근접자기센서는 표적 영역의 확대에 의한 명중률 향상을 위해 표적의 최대 탐지거리를 가능한 증대시킬 필요가 있다. 이를 위해서는 송수신기간의 이격 거리를 최소화하고 송신기의 출력 증

† 2011년 8월 16일 접수~2011년 11월 25일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 주혜선(jhs@add.re.kr)

대는 물론 수신기의 수신감도를 향상시켜야 한다. 그러나 송수신기간의 이격 거리는 어뢰 몸체 형상의 설계 제한 조건으로 인해 현실적으로 변경이 불가능하므로 본 논문에서는 송신출력 증대 및 수신감도 향상 방안 측면에서 설계 주안점을 두었으며, 근접자기센서의 표적 탐지 성능을 향상하기 위한 방법으로 유한요소 해석을 통한 송수신기의 설계, 시제 제작 및 기능 시험 결과를 기술하였다.

2. 근접자기센서 탐지 이론

가. 동작 원리

근접자기센서의 동작 원리는 아래 수식 (1), (2)의 암페어 및 패러데이 법칙에 의해 설명된다. Fig. 1과 같이 송신기(송신코일)에서 특정 주파수의 교류 자기장 신호를 발생시키면 도체인 표적(함정) 표면에는 외부 자기장의 변화를 방해하기 위해 와전류가 발생하게 되고, 이 와전류에 의한 2차 교류 자기장 신호는 수신기(수신코일)를 통해 어뢰 길이 방향에 수직 방향의 유기전력(전압)을 유도한다.

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$emf = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

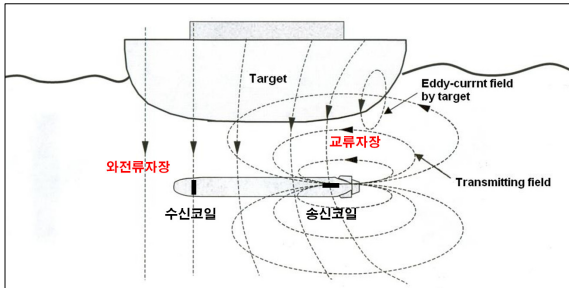


Fig. 1. 근접자기센서 동작 원리

만일 표적이 존재하지 않는 경우에는 상하방향으로 동일한 크기의 자기장이 분포되어 수신코일에서의 유기전력은 영이 되지만 표적이 존재하는 경우에는 Fig. 2에서와 같이 표적 아래로 어뢰가 진행함에 따라 표적 표면에 형성되는 와전류 자기장 신호에 의해 종 모양(Bell-shaped)의 유기전력이 발생되므로, 추

가적인 신호처리를 통해 표적과의 최 근접 위치에서 수중 유도무기를 기폭시키는 명령 신호를 제공할 수 있다.

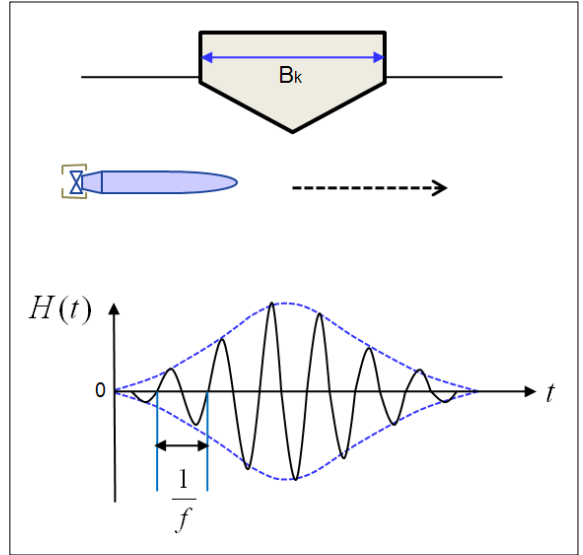


Fig. 2. 어뢰 진행 시 표적 신호의 형태

나. 탐지 이론

근접자기센서의 송신코일 제원에 비해 대상 표적인 함정 제원은 상대적으로 매우 크므로 송신코일을 단순히 자기 다이폴로 가정하여 해석할 수 있다. Fig. 3과 같이 미소 전류가 흐르는 원형루프를 등가 자기 다이폴로 정의하고 이로 인해 임의의 점 $P(r, \beta, \varnothing)$ 에서 발생하는 자기장을 계산하면 수식 (3)과 같다^[2].

$$\vec{H} = \frac{M}{4\pi r^3} (2 \cos \beta a_r + \sin \beta a_\beta) \quad (3)$$

근접자기센서의 탐지 이론은 송신코일의 자기 다이폴모멘트(M)가 무한 평판의 완전 도체(선체)에 의해 반사되어 수신코일에 유기되는 자기장 신호는 송신코일의 자기 다이폴모멘트와 수직 대칭 위치에 놓인 영상 자기 다이폴모멘트(M^*)에 의해 발생하는 자기장 신호와 동일하다는 영상 자기 다이폴모멘트법을 도입하면 간단히 설명될 수 있다. 따라서 수신코일 위치에서 유기되는 자기장을 계산하기 위해 수식 (3)을 이용하여 자기다이폴에 의한 방향별 자기장 세기인 H_r , H_β 를 유도하고 송신코일의 기하학적인 구조를 고려하

을 발생시키기 위한 장치로서 송신코일로부터 발생되는 송신출력의 세기는 자기다이폴의 세기로 간단히 표현될 수 있다. 송신 자기다이폴의 세기는 송신코일의 단면적, 길이, 권선수 및 구동 전류에 의해 결정되며, 어퍼 후부 형상에 의한 송신코일 장착 공간 제한으로 송신코일의 제원 결정에 많은 제약 사항이 존재하게 된다. 따라서 본 논문에서는 체계의 후부 형상을 반영하여 송신코일은 직육면체 형태로 설계되었다. 또한 송신출력 증대를 위한 방안으로 고 투자율의 특성을 가지는 퍼멀로이 계열의 코어를 사용하였으며, 와전류에 의한 철손을 최소화하기 위해 다수의 적층된 코어를 사용하였고, 송신기의 출력을 극대화하기 위해 송신코일의 최대 가능 권선수로 제작하였다.



Fig. 5. 송신기 구성 개념도

가. 유한요소 해석 모델 개발

송신기(송신코일부)의 특성을 해석하기 위한 모델은 유한요소 해석 도구인 MAGNET 소프트웨어를 이용하여 설계되었다. 본 연구에서는 송신코일로부터 발생되는 최대 자속, 코일의 인덕턴스, 코일 양단의 기전력에 대해 유한요소 해석을 수행하였다. 송신코일 단면에서 발생하는 자속밀도 분포는 Fig. 6과 같으며 해석 결과는 Table 1에 제시하였다.

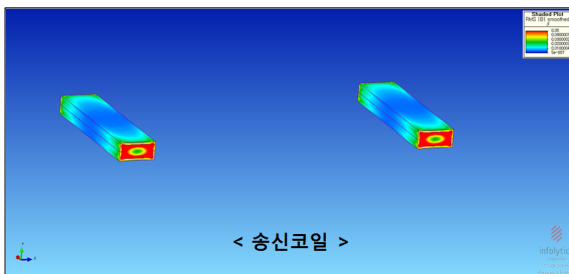


Fig. 6. 송신코일에서 발생하는 자속밀도 분포

Table 1. 송신코일 유한요소 해석 결과

항목	해석 결과
최대 발생 자속($ \Phi _{\text{rms}}$)	6.11×10^{-6} Weber
송신코일 기전력(V)	512 V_{rms}

나. 송신기 제작 및 시험

유한요소 해석 결과를 반영하여 송신코일을 제작한 후 특성 시험을 수행하였다. Fig. 7과 같이 제작된 송신코일을 구동회로와 연결한 상태에서 송신 출력 전류 크기 및 주파수 안정도 측정 시험을 수행한 결과, Fig. 8에서 보는 바와 같이 전류 및 주파수 기준치 대비 각각 $\pm 1.9\%$ 의 미세한 변화가 발생됨을 확인 할 수 있었으며, 이는 동작 시간의 증가에 따른 송신코일(코어 및 코일)에서 발생하는 열에 의한 송신코일의 자기적 특성 변화가 원인인 것으로 추정된다.

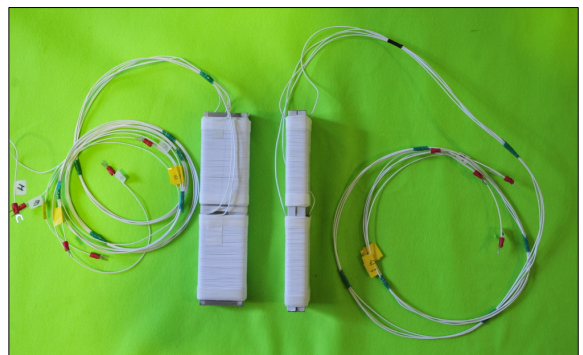


Fig. 7. 제작된 송신코일 형상

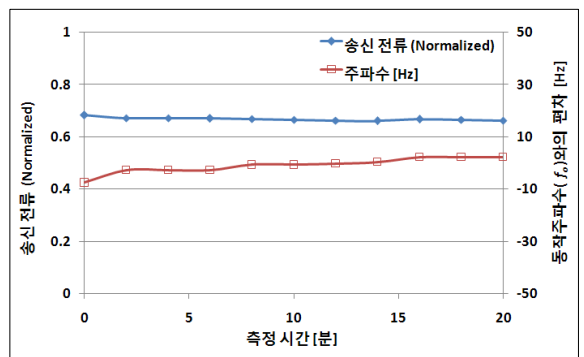


Fig. 8. 송신출력 안정도 시험 결과

4. 근접자기센서 수신기 설계 및 제작

근접자기센서 수신기(수신코일부)는 표적(함정) 표면의 와전류 생성으로 인해 유기되는 전압을 Fig. 9와 같은 신호처리 과정을 통해 표적 식별 및 최적의 기폭 위치를 찾아 신관에 기폭 명령을 제공하는 역할을 담당한다. 본 논문에서는 표적 탐지거리 향상을 위한 수

신코일의 감도 향상에 역점을 두고 연구를 수행한 결과를 기술하였다³⁾. 수신코일의 감도에 영향을 주는 요소인 수신코일 형상 및 코일 권선 방법 등을 설계 변수로 두고 유한요소해석 도구를 이용하여 설계 변수가 적용된 각 수신코일 시제품들에 대한 특성을 예측하고 그 결과를 실험을 통해 확인하였다.

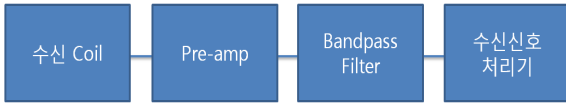


Fig. 9. 수신기 구성 개념도

가. 유한요소해석 모델 개발

1) 자기장 환경 해석 모델 설계

수신코일에 균일한 자기장 환경을 조성하기 위해 먼저 Fig. 10과 같은 솔레노이드 코일 모델을 설계하였

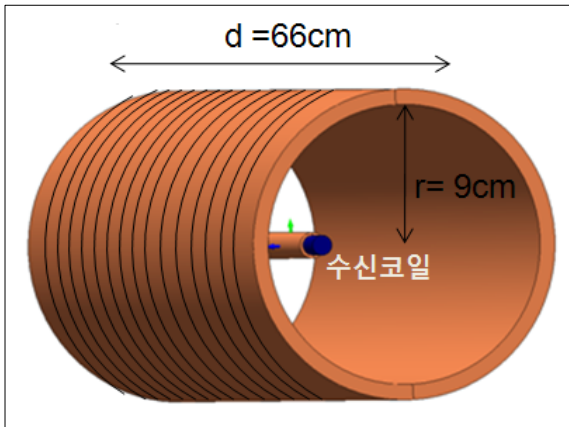


Fig. 10. 솔레노이드 해석 모델

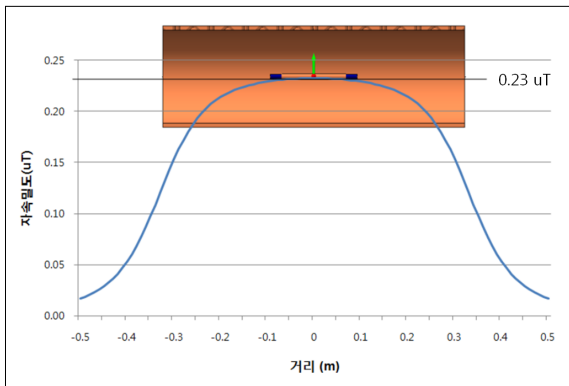


Fig. 11. 솔레노이드의 내부 자장 분포

다. 이 경우 권선수는 138회, 전류는 0.93mA, 주파수는 f_0 Hz로 설정하였다. 솔레노이드 모델에 대한 유한요소해석 결과, Fig. 11과 같이 중앙으로부터 ± 10 cm 부근까지는 내부 자기장이 0.23uT(peak)로 균일하게 분포하였다⁴⁾.

2) 코일 형상 설계

수신코일의 수신감도를 향상시키기 위한 설계 요소를 찾기 위해 먼저 코일을 권선 형상에 대한 영향을 분석하였다. 이를 위해 규격 $\phi 12.7 \times 190$ mm 코어에 권선 방법이 각기 다른 두 가지 코일 모델을 우선 선정하였으며, Fig. 12는 코어 양 끝단을 25mm 띄운 상태에서 권선한 코일(코일 I)과 코어 전체에 권선한 코일(코일 II)를 나타내고 있다. 일반적으로 수신코일의 권선수를 증가시키면 수신 유기기전력도 비례해서 증가하게 되므로 코일 권선수는 동일하게 가정하였으며, 수신 코어는 투자율이 높고 가공성이 용이할 뿐만 아니라 운용 대역에서의 주파수 손실이 비교적 적은 페라이트 재질을 선정하였다⁵⁾.

유한요소해석 결과, 코일 I의 유기기전력은 0.066 V_{rms} 로 코일 II의 유기기전력 값인 0.054 V_{rms} 보다 약 18% 가량 큰 값이 유기됨을 확인하였는데 이는 다음 두 가지 이유로 설명될 수 있다. 첫 번째 이유로는 코어 중심부는 자속선이 조밀하게 분포하여 자기장 신호 신호가 가장 큰 부분이기 때문이다. Fig. 13은 코일 I,

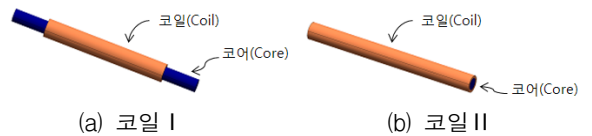


Fig. 12. 수신 코일 해석 모델

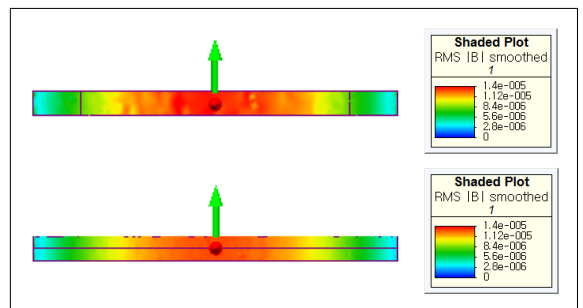


Fig. 13. 코어의 자속밀도(B) (상 : 코일 I, 하 : 코일 II)

코일 II의 코어 자속밀도(Magnetic Flux Density, B) 분포로서 두 코일 모두 코어 중심부의 B값이 가장 큼을 알 수 있으며, 아울러 코일 I의 경우 양 끝을 띄우고 코일을 감았으므로 중심부에 상대적으로 많은 코일이 감기게 됨을 유추할 수 있다.

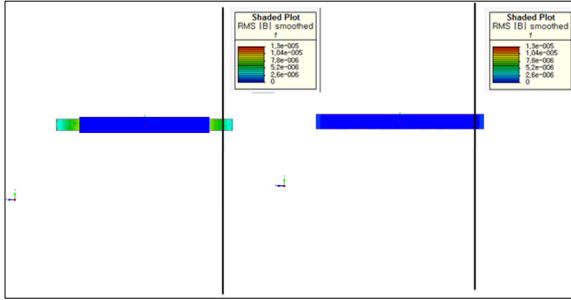


Fig. 14. 수신코일의 z축 단면
(좌 : 코일 I, 우 : 코일 II)

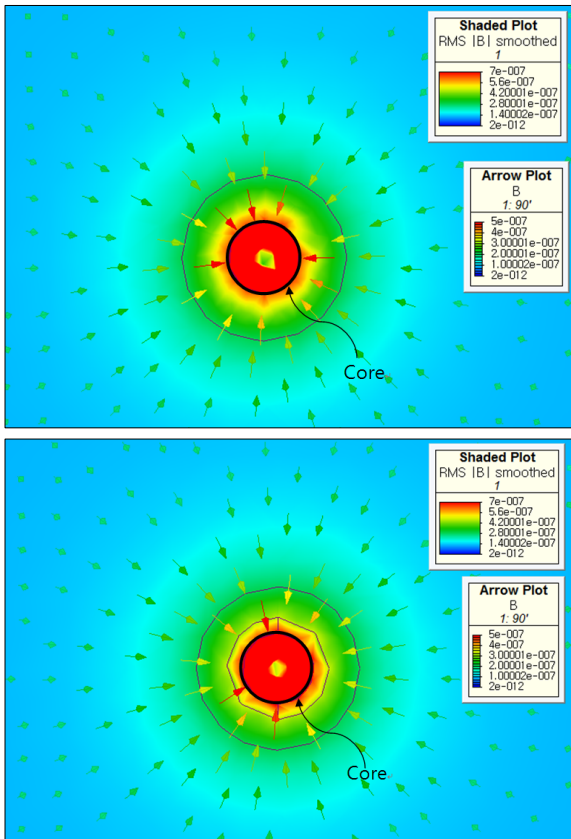


Fig. 15. 솔레노이드에서 수신코일로의 자속밀도 분포
(상 : 코일 I, 하 : 코일 II)

두 번째 이유로는 코어와 자기장의 접촉 면적이 커질수록 자화량이 증가하기 때문이다. Fig. 14와 같이 코일 우측 끝에서 10mm이격된 위치에 Z축 단면을 잘라 자속밀도를 살펴보면 Fig. 15와 같으며, 코일 I의 자속밀도 분포가 코일 II에 비해 상대적으로 큰 값을 가짐을 확인할 수 있다⁶⁾.

3) 코일 권선 분할 설계

표적이 존재하지 않는 경우에는 수신코일 위치에서의 유기기전력은 송신코일에서 발생하는 자장 중 수직 성분이 서로 상쇄되어 영이 되어야 한다. 그러나 수신코일의 코일이 상하로 균등하게 감겨있지 않으면 유기기전력은 상쇄되지 않아 오프셋(Offset) 전압이 발생한다. 이 오프셋 전압은 표적이 존재하는 경우에도 유지되어 S/N를 감소시키는 요인이 될 수 있다. 이러한 현상은 수신코일 권선 시 다수로 구역 분할(Section)하여 각각에 코일을 균등하게 감게 되면 개선 가능하다. 따라서 본 논문에서는 코일 권선 구역 분할에 따른 수신감도 특성을 비교하기 위해 4종의 수신코일을 가정하였다(Fig. 16). 4종 수신코일의 코어 사양은 $\phi 12.7 \times 190\text{mm}$ 코어로 가정하고 코일 형상 설계 시 비교했던 코일 I과 코일 II에 각각 3 구역, 5 구역을 나누어 총 4 가지 형상의 코일(코일 A ~ 코일 D)을 설계하였다. Table 2는 코일 권선 구역 구분에 따른 유한요소 해석 결과로서, 실 제작 시험 시에는 수신코일 출력 전압이 전치증폭기의 이득만큼 증폭되어 나타나게 되므로 유한요소 해석 결과와 시험 결과를 비교하기 위해 코일 출력 전압에 전치증폭기 이득을 고려하여 결과를 나타내었다⁷⁾.

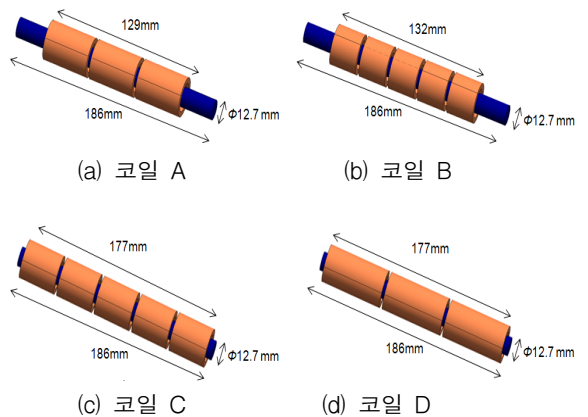


Fig. 16. 수신코일(4종)에 대한 유한요소 해석 모델

Table 2. 코일 구역 구분에 따른 유한요소 해석 결과

시제 종류	제원	유한요소 해석 결과 (V_{peak})
코일 A	코일 129mm_3section	9.40
코일 B	코일 132mm_5section	9.33
코일 C	코일 177mm_5section	8.78
코일 D	코일 177mm_3section	8.79

해석 결과를 종합하면 앞서 코일 형상 설계에서 확인한 것처럼 코어의 양 끝을 어느 정도 띄운 상태에서 코일을 권선하는 방법이 코어 전체에 코일을 권선하는 경우보다 특성이 더 우수한 것으로 해석되었으며, 구역 구분의 경우에는 5개 구역으로 구분하여 권선한 경우보다 3개 구역으로 구분하여 권선한 결과가 코어 중앙부에 코일이 더 많이 감기게 되므로 유기기전력 신호 측면에서 유리한 것으로 해석되었다.

나. 수신코일부 제작 및 시험

유한요소 해석 결과와의 비교를 위해 앞서 Fig. 16에서 언급된 4종의 수신코일을 자체 제작하여 코일 권선 방법에 따른 유기기전력 신호 크기를 비교하였다. Fig. 17은 제작된 수신코일 시제의 형상을 보여주고 있으



Fig. 17. 수신코일 시제 4종(A, B, C, D형)

며, Fig. 18은 수신코일 시험을 위한 시험 장치 구성도를 나타낸다. 또한 Fig. 19는 실제 시험 장면으로 수신코일에 균일한 자기장을 인가하기 위해 신호발생기를

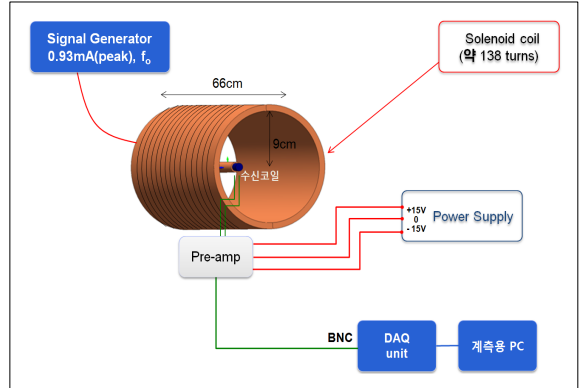


Fig. 18. 시험 장치 구성도



(a) 시험 장비 구성



(b) 시험 장면

Fig. 19. 수신코일 시험 장면

이용하여 수신코일부내의 전치증폭기에서의 증폭률을 고려하여 입력신호를 인가하였으며, 시험 결과는 데이터 획득 보드를 통해 계측용 PC로 저장하였다. 수신코일 4종에 대한 수신 유기기전력 시험 결과는 Table 3 및 Fig. 20과 같으며 4종의 수신코일 시제 중 코일 A의 유기기전력 크기가 10.04V로 가장 큼을 확인할 수 있었다. 4종의 수신코일에 대한 실 제작 시험 결과와 유한요소해석 결과는 약 5~10% 정도의 차이가 발생되었으며, 이는 유한요소 해석 시 재료 특성을 정확히 반영하지 못하거나 적절한 요소분할을 이루지 못한 한계로 추정되었다.

Table 3. 시험 결과 및 유한요소 해석 결과와의 비교

시제 종류	수신코일 유기기전력(V_{peak})	
	시험 결과	유한요소해석 결과
코일 A	10.04	9.40
코일 B	9.69	9.33
코일 C	9.33	8.78
코일 D	9.46	8.79

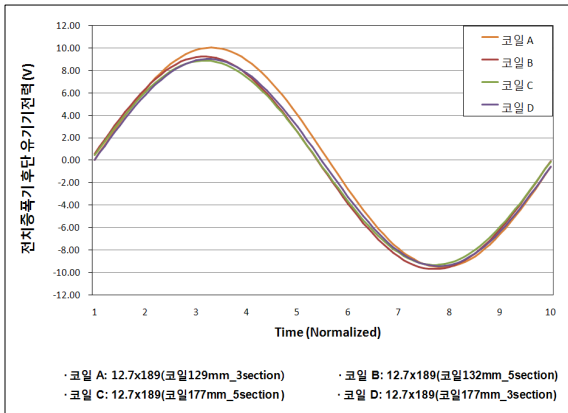


Fig. 20. 수신코일 시험 결과

5. 결론

본 논문에서는 능동형 근접자기센서의 표적 탐지거

리 증대를 위한 송수신기 설계에 관한 연구의 일환으로 유한요소해석 기법을 이용한 자기신호 탐지기 설계, 제작 및 기능 시험 결과를 나타내었다. 근접자기센서 송신기의 송신 출력 증대를 위해 실 체계 장착 공간을 고려한 형상 설계 및 코일 권선수를 결정하였으며 제작 시험을 수행하였으며, 시험 결과 안정된 송신 출력 특성을 나타냄을 확인하였다. 또한 근접자기센서 수신 감도 향상에 설계 주안점을 두고 수신코일 형상 및 권선 방법을 설계 변수로 설정한 후 유한요소 해석을 통해 수신코일 설계 사양을 최종 확정하였으며, 수신코일 시제 제작 시험을 통해 설계 결과의 타당성을 검증하였다. 본 연구를 통해 설계된 근접자기센서 송수신기는 향후 실 표적에 대한 해상 시험을 통해 추가적인 성능 검증이 이루어질 예정이다.

References

- [1] 양창섭, “표적 탐지성능 향상을 위한 능동형 근접 자기센서 설계 연구”, 국방과학연구소 선임논문, 1996.
- [2] 김동욱, “정밀 3차원 수중 운동체의 전자기와 전파 특성 해석 기법”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 842~843, 2010.
- [3] Pavel Ripka, “Advances in Magnetic Field Sensors”, IEEE Sensors Journal, Vol. 10, No. 6, 2010.
- [4] 김종호, 손대락, “차동형 탐지코일 마그네토미터 제작”, 한국자기학회지, 제20권 제5호, pp. 178~181, 2010. 10.
- [5] Enokizono, “New Magnetic Search Coil System for Two-Dimensional Magnetic Measurement”, Elsevier Studies in Applied Electro Magnetism in Materials, Vol. 5, 1993.
- [6] M. Oka, “A Detection of Backside Crack Using Rotational Magnetic Flux Sensor with Search Coils”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 5, 1996.
- [7] Haiyan Sun, “Eddy Currents Induced in a Finite Length Layered Rod by a Coaxial Coil”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No. 9, 2005.