

The Magnetic Treatment Method for Low-Observable Naval Vessel

Hwiseok Kim*, Seonho Lim, and Jaewon Doh

Maritime R&D Lab., LIGNex1 Corp., Seongnam 463-400, Korea

(Received 4 August 2014, Received in final form 19 August 2014, Accepted 19 August 2014)

The control and reduction of the magnetization of naval vessel is important technologies for safety against torpedo and sea mine installed magnetic sensors. In general, we used to conduct as a magnetic treatment for permanent magnetization reduction and to compensate induced magnetization using on-board-degaussing system for the naval vessel's magnetic stealth. Navies have operated magnetic treatment facility in order to protect from sea mines. LIGNex1 Corp. has developed the magnetic treatment facility for the korea navy.

Keywords : magnetic treatment, deperm, magnetic silence, magnetic stealth, magnetic treatment facility

해군함정의 영구자기장 감소를 위한 탈자기법

김희석* · 임선호 · 도재원

LIG넥스원(주), 경기 성남시 분당구 판교로 333, 463-400

(2014년 8월 4일 받음, 2014년 8월 19일 최종수정본 받음, 2014년 8월 19일 게재확정)

강자성체로 이루어진 함정 선체의 자화에 의해 발생하는 자기장을 제어 및 최소화하는 것은 어뢰 및 기뢰로부터 함정의 생존성을 확보하기 위해 매우 중요한 일이다. 함정으로부터 발생하는 영구자기장 및 유도자기장은 각각 자기처리(탈자)와 소자의 방법으로 최소화 한다. 여러 각국의 해군들은 기뢰의 위협으로부터 함정을 안전하게 보호하기 위해 여러가지 대책들을 수립하여 엄격히 통제하고 있으며, 함정의 자기 정숙화와 관련한 독자적인 자기처리시설을 구축하여 운영하고 있다. 국내의 경우, LIG넥스원에서 신규 자기처리시설을 국내 개발하여 현재 전력화 완료 후 운용 중에 있다.

주제어 : 함정 자기처리, 함정 탈자, 자기정숙화, 자기스텔스, 자기처리 시설

I. 서 론

과거 반세기 이상 지속되어 오던 대륙 간 원거리 전략 무기가 지배하던 냉전 시대가 막을 내리면서 대양과 연안을 포괄적으로 아우르는 해군 작전 능력이 날로 중요시 되고 있다. 특히, 최근에는 효과적이며 신속, 정확한 연안 작전 능력에 대한 요구에 맞추어 연안 작전 능력에 대한 핵심기술 확보를 위해 다양한 노력들이 국내외적으로 활발히 진행되고 있다. 비약적인 발전을 거듭하고 있는 탐지센서들로부터 함정의 생존성을 확보하기 위한 함정 스텔스 기술은 필수적이다[1].

함정 스텔스는 크게 음향 스텔스와 비음향 스텔스기술로 구분되며, 비음향 스텔스 기술은 다시 전기장 신호와 자기장 신

호에 대한 스텔스 기술로 구분된다. 함정의 자기장 신호는 표적 신호원으로부터 거리에 따른 신호 감쇄율이 음향신호에 비해 상대적으로 크다는 단점이 있으나 음향신호와는 달리 해양 환경의 변화에 무관하고 근거리 영역에서의 정확한 표적 식별 및 탐지가 가능하여 대부분의 감응기뢰(Influence Mine)에서 최종 기폭 신호원으로 사용되고 있다. 특히, 최근에는 기뢰와 어뢰 등에 장착되어 기폭 트리거 역할을 하는 자기센서의 성능이 날로 발전함에 따라 수중기뢰에 대한 위협으로부터 함정을 보호하기 위한 자기 스텔스 기술이 더욱 더 중요해지고 있다[2]. 이에 대해 여러 각국의 해군들은 기뢰의 위협으로부터 함정을 안전하게 보호하기 위해 여러가지 대책들을 수립하여 엄격히 통제하고 있으며, 함정의 자기 정숙화(Magnetic Silence)와 관련한 독자적인 자기처리시설(Magnetic Treatment Facility)을 구축하여 운영하고 있다.

국내의 경우, 해외에서 도입하여 운용 중인 자기처리시설이

있었으나 최근 세종대왕함 및 독도함등의 대형 함정들이 취역함에 따라 기존의 자기처리시설에서 신규 대형함정들을 수용하기 어렵고 운용장비 또한 노후화되어 LIG넥스원에서 신규 자기처리시설을 국내 개발하여 현재 전력화되어 운용 중에 있다.

본 논문에서는 함정자기장 분석 및 자기처리와 관련된 기본적인 개념을 소개하고, 신규 개발된 자기처리장비에 적용된 신기술 내용을 간략하게 기술하였다.

II. 함정자기장의 종류 및 자기처리 방법

함정은 선체의 대부분이 강자성체로 이루어져 있어서 지구 자기장과 같은 외부자기장에 장시간 노출되거나 해수와의 마찰 등으로 인한 기계적 스트레스에 의해 쉽게 자화특성이 변하는 성질을 가지고 있다. 이러한 원인들에 의해 함정에서 발

생되는 정자기장(static magnetic field)신호는 크게 영구 자기장(permanent magnetic field)과 유도 자기장(induced magnetic field)의 두 가지 성분으로 나누어지고 그 방향에 따라 각각 종축, 횡축, 수직축 성분으로 세분화 된다[3].

Fig. 1과 같이 함정의 선미-선수 방향은 LM(Longitudinal Magnetization), 좌현-우현 방향은 AM(Athwartship Magnetization), 갑판-선체바닥 방향은 VM(Vertical Magnetization)으로 분류된다. 위와 같이 함정자기장을 세분화하는 이유는 기뢰로부터 함정을 보호하기 위해 안전한 함정자기장 크기의 기준이 필요하며, 이에 따라 함정자기장을 정량적으로 다루기 위함이다. 따라서 함정으로부터 발생하는 자기장을 측정하여 함정자기장의 성분분리 방법에 따라 함정의 영구자기장과 유도자기장을 분리하고 영구/유도자기장의 3축 성분을 Fig. 1과 같이 분류하여 관리한다. 이 외에도 함정에서 발생하는 자기장은 다음과 같다.

- 함정의 기동 시 선체의 롤링(Rolling) 및 피칭(Pitching)에 의해 지구자기장에 대한 와전류(Eddy Current)발생으로 생성되는 자기장
- 함정 내의 전력기기 및 전력케이블 등에 의해 선체 외부로 누설되는 자기장
- 함정의 선체부식방지장치(ICCP)에 의한 전류흐름으로 인해 발생하는 자기장

위의 자기장들은 앞서 설명한 영구/유도 자기장에 비하여 매우 크기가 작아서 주로 영구/유도 자기장을 자기처리(magnetic treatment)대상으로 관리하고 있으나 아래에서 설명하게 될 1군 함정의 경우 선체가 비자성체이므로 선체 내의 엔진, 각종 전력기기 및 기계류 등에 의한 누설자기장이 함정자기장의 큰 비중을 차지하여 무시할 수 없으며, 보다 엄격한 기준으로 관리하여야 한다. 이러한 함정자기장들은 함정을 탐지하는 수단으로 이용되고 있으며, 함정의 종류 또는 함정의 주된 작전지역에 따라 서로 다른 자기장을 나타낸다. 따라서 함정을 나타내는 일종의 특징(signature)으로 볼 수 있으므로 함정에서 발생되어 측정되는 자기장을 자기신호(magnetic signature)라고 한다.

함정을 자기처리하는 대표적인 방법으로 탈자(deperming)와 소자(degaussing)가 있다[4]. 탈자는 영구자기장을 줄이기 위해 자기처리시설이 갖추어진 부두에 정박된 함정에 주기적으로 교번하며 감소하는 자기장을 인가해서 처리하는 방법이며, 소자는 함정 내에 설치된 소자코일(degaussing coil)을 이용하여 지구자기장에 의해 함정의 외부로 누설되는 유도 자기장 및 자기처리 후 잔류 영구 자기장을 감쇄시키는 방법이다. 소자코일은 함정의 선체 내부에 Fig. 1과 같이 3축의 함정자기장신호를 생성할 수 있도록 설치되어 있으므로 탈자보다 정밀하게 자기신호를 제어 할 수 있다.

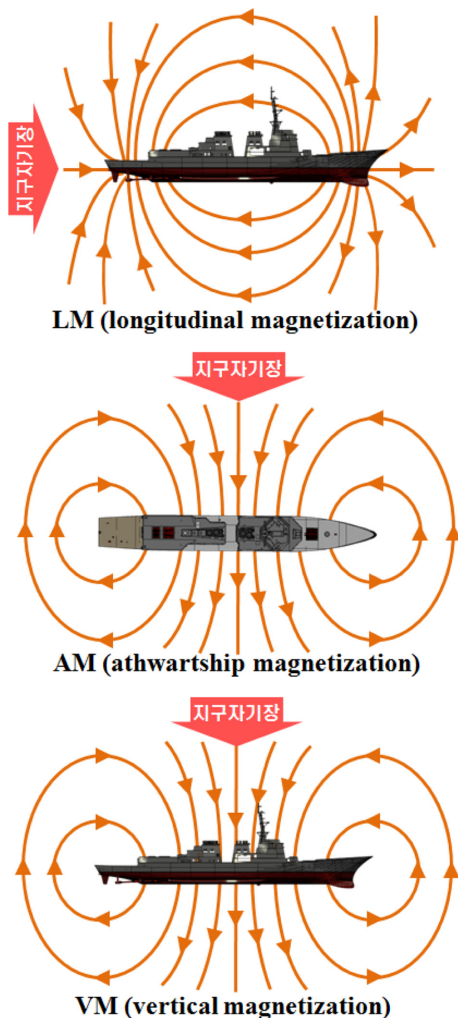


Fig. 1. (Color online) Magnetic field signature components of a magnetized ship.

Table I. Classification of the Korea navy ships.

분류	선체 재질	소자장비 유무
1군	비자성체	○
2군	자성체	○
3군	자성체	×

해군의 모든 함정은 선체의 재질 및 소자장비 보유 여부에 따라 Table I과 같이 분류된다. 소자장비를 보유하고 있는 1군과 2군 함정은 소자를 적용하며, 선체가 강자성체로 이루어진 2군과 3군 함정은 탈자를 적용한다. 따라서 선체가 강자성체로 이루어져 있으면서 소자장비를 보유하고 있는 2군 함정은 탈자와 소자 모두 적용하며, 함정의 자기측정 후 영구자기장 신호크기에 따라 탈자 수행여부를 결정한다.

III. 자기처리 시설의 형태 및 종류

선체가 강자성체로 이루어져 있는 함정은 일정한 주기마다 필히 함정의 자기신호를 측정하고 기준치 이상일 경우 탈자를 수행하여야 한다. 선체가 강자성체로 이루어져 있는 2군과 3군 함정이 탈자의 대상이며, 대한민국 해군에서도 주기적으로 해당함정에 대한 탈자를 수행하고 있다.

함정의 탈자를 위한 자기처리 시설은 다음과 같이 구성되어 있다. 자기처리 자기장 발생을 위한 전력케이블인 X코일 및 Z루프, 함정자기신호를 측정하기 위한 자기센서, X코일/Z루프에 전력공급을 위한 발전시설, 자기처리 자기장 및 함정 자기신호 측정을 위한 측정/제어 시스템 등으로 구성된다. 아래 Fig. 2에 자기처리 시설의 구성을 간략하게 나타내었다. X코일은 3000A이상의 대전류를 통전 할 수 있는 전력케이블로써 솔레노이드의 형태로 Fig. 2와 같이 함정의 둘레를 따라 권선하여 사용하며 함정의 길이방향으로 교번하는 자기장을 발생하는 역할을 한다. Z루프는 자기처리부두의 해저면에 직사각형의 형태로 설치되어 있으며 X코일과 마찬가지로 대

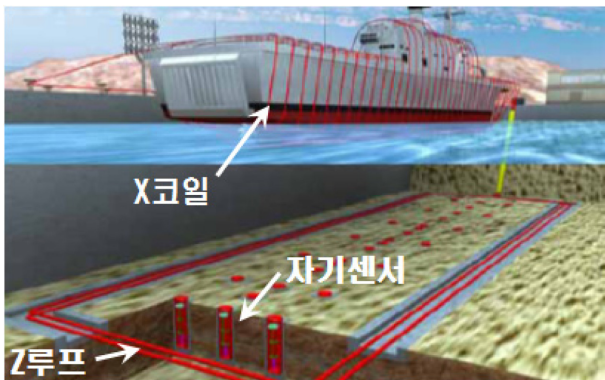


Fig. 2. (Color online) The concept of magnetic treatment facility.

전력을 통전하며 함정의 수직방향으로 자기장을 발생하는 역할을 한다. Z루프의 내부에 배열의 형태로 설치되어 있는 자기센서를 통해 함정의 자기신호를 측정하여 변화하는 함정 자기신호를 모니터링 할 수 있다.

탈자를 위한 자기처리 시설은 크게 overrun 방식과 stationary 방식의 두 가지로 분류 할 수 있다. Fig. 3과 같이 해저면에 다수의 Z루프를 설치하고 탈자 대상함정이 Z루프 위를 이동하며 탈자하는 방법이 overrun 방식이며, 함정을 자기처리 시설에 정박하여 탈자하는 방법이 stationary 방식이다. Overrun 방식은 함정을 이동하며 탈자하므로 자기처리 소요시간이 비교적 짧은 장점이 있으나 함정을 매번 이동할 때마다 동일한 이동경로 및 속력을 유지하는 것이 어려우며 자기처리 프로토콜을 제어하며 정밀한 탈자를 하는 것이 쉽지 않다. 반면 대한민국 해군이 운용중인 X코일을 직접 권선하는 stationary 방식은 매번 자기처리 대상함정에 X코일을 직접 권선해야 하므로 자기처리 시간이 많이 소요되는 단점이 있으나 자기처리 시 함정이 부두에 계류하고 있으므로 동일한 위치에서 탈자를 수행하기 때문에 자기처리 프로세스의 재현성을 높일 수 있으며 보다 정밀하게 자기처리 프로토콜을 제어하며 탈자를 할 수 있는 장점이 있다. Fig. 3의 drive-in 방식은 stationary 방식의 일종으로 X코일을 함정의 선체에 직접 권선하지 않고 사각 솔레노이드의 형태로 고정 설치하여 함정이 X코일의 내부로 들어가는 형태이다. Drive-

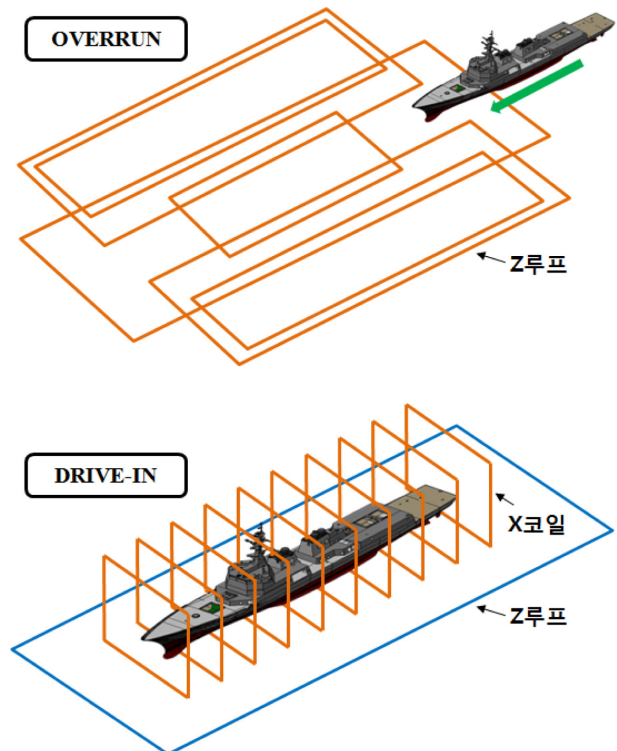


Fig. 3. (Color online) Types of the magnetic treatment facility.

in 방식은 X코일을 권선하는 시간을 절약할 수 있으므로 자기처리 소요시간을 1~2주 정도 줄일 수 있으나, 다양한 크기의 합정을 하나의 자기처리 시설로 수용할 수 없다. 미국의 경우 합정의 종류 및 크기에 따라 drive-in 방식의 자기처리 시설을 다수 운용 중에 있으나, 대한민국은 하나의 자기처리 시설로 소형합부터 대형합까지 전 합정의 자기처리가 가능하며 탈자 후 장기안정도가 높고 정밀한 탈자가 가능한 Fig. 2의 X코일 권선방식을 채택하여 운용하고 있다.

IV. 탈자(Deperming)의 방법

합정 탈자의 절차를 간단히 기술하면 다음과 같다.

- a. 탈자 대상합정의 자기처리 부두 계류
- b. 합정 자기신호 측정 및 분석
- c. X코일 권선
- d. 자기처리 프로토콜 수행 : 합정 탈자
- e. 자기처리 프로토콜 종료 후 합정 자기신호 측정/분석
- f. 자기처리 결과분석 후 기준치 이상일 경우 d. e. 반복

합정의 자기신호 측정/분석 후 X코일을 권선하게 되는데 일반적인 솔레노이드와 같이 하나의 케이블로 한번에 합정의 전체를 권선 할 수 없으므로 X코일을 분할하여 1 turn씩 각각 권선하여 서로 연결한다. X코일의 권선 형태를 나타내면 아래의 Fig. 4와 같다. 권선간격은 일반적으로 2~3 m 정도이며 상황에 따라 운용자가 권선간격을 조정하여 운용할 수 있다. 권선간격을 2 m 이하로 좁게 하면 보다 솔레노이드의 형상에 근접하고 자기처리 자기장을 크게 발생시킬 수 있으나, X코일 저항증가로 인해 대형합정의 경우 자기처리 전원의 전압에 제한이 있으며 권선하는데 많은 시간이 소요된다. 반면에 권선간격을 3 m 이상으로 넓게 하면 누설자기장이 많아지며, 권선수의 감소로 인해 발생 자기장이 줄어들게 되므로 자기처리를 위해 더 많은 전력이 소비된다.

X코일 권선 완료 후 X코일의 권선 상태 및 절연저항이 이상없음을 확인하고 자기처리 전류를 인가한다. 일정한 주기가 반복되는 자기처리 전류를 X코일에 인가하여 자기처리 자기장을 발생시키는 것을 자기처리 프로토콜이라고 한다. 일반적

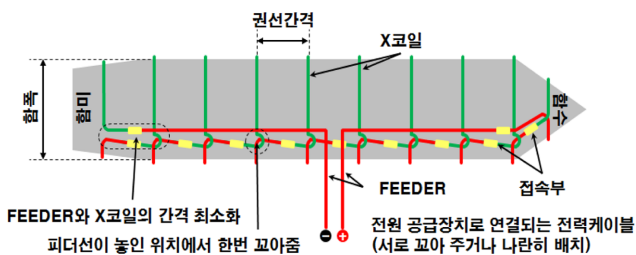


Fig. 4. (Color online) Method of winding X-coil.

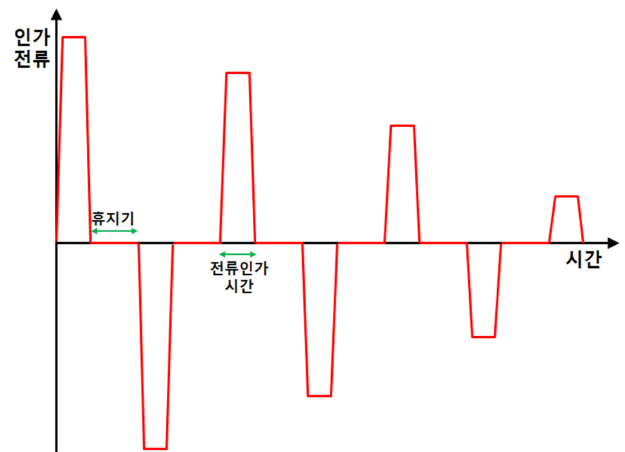


Fig. 5. (Color online) General form of the deperm protocol.

인 자기처리 프로토콜은 Fig. 5와 같으며, 시간에 따라 인가 전류를 나타낸 것이다. 순차적으로 극성을 바꾸면서 일정한 비율로 전류량을 감소시키며 탈자를 진행한다.

자기처리 프로토콜은 X코일 (합정기준 종축방향 자기장)만을 사용하는 방식과 X코일 및 Z루프(합정기준 수직방향 자기장)를 함께 사용하는 방식으로 구분된다. 현재 널리 쓰이고 있는 X코일 사용 자기처리 프로토콜로는 Deperm-R이 있으며, X코일 및 Z루프를 함께 사용하는 자기처리 프로토콜은 Flash-D가 있다. 일반적으로 Deperm-R은 소자장비 보유 합정에 사용하고, Flash-D는 소자장비 미보유 합정에 사용한다. 아래의 Fig. 6에 자기처리 프로토콜의 형태를 나타내었다.

Deperm-R은 X코일을 이용하여 합정의 종축방향 자기신호만을 제어하며 합정의 수직자기신호는 탈자 후 소자장비로 정밀제어 한다. Flash-D는 X코일과 Z루프를 모두 사용하는 프

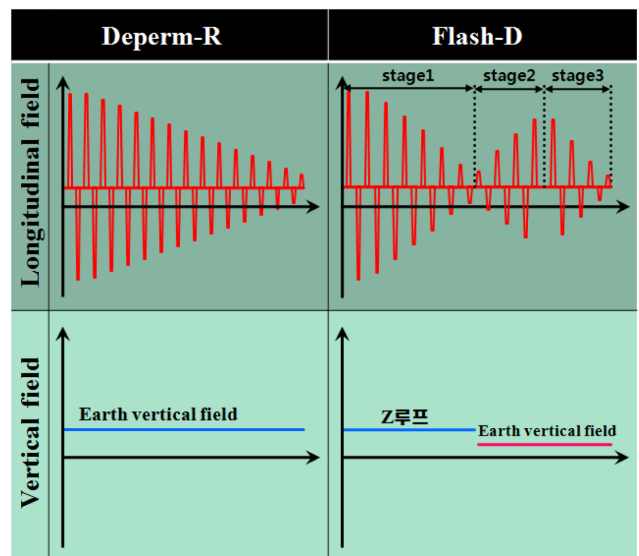


Fig. 6. (Color online) Types of the deperm protocol.

로토콜로서 함정의 종축 및 수직방향의 함정자기신호를 제어한다. 3군 프로토콜의 경우 자기처리 시간이 오래 걸리고 숙련된 운용자의 경험이 필요한 단점이 있다.

자기처리 프로토콜의 주요 인자는 다음과 같다.

- X코일 최초(= 최대) 인가전류 값 및 극성
- X코일 인가전류 간 휴지기
- X코일 인가전류 상승/하강 시간
- X코일 인가전류 유지시간
- X코일 마지막 인가전류 및 극성
- Z루프 인가전류 값(Flash-D의 경우)

최초 인가전류는 자기처리 프로토콜의 최대 인가전류로 함정의 선체를 포화시키는 것이 목적이다. 이상적으로는 선체 재질의 완전한 자기포화를 할 수 있는 크기이면 가장 좋으나, 비용 대비 효율 및 물리적 한계 등의 이유로 선체 B-H루프의 만곡점(knee)부근 전류 값을 사용한다. 인가전류 간의 휴지시간은 X코일 전기저항에 의한 과도한 온도상승을 방지하기 위한 것으로 이론에 근거한 계산으로 결정된다. 인가전류의 상승/하강 시간은 변화율이 클 경우 선체 내 와전류(Eddy current)의 발생으로 효율이 감소되므로 와전류의 발생을 최소화 할 수 있는 변화율을 적용한다. 인가전류의 유지시간은 해당 전류의 유효 자기장에 해당하는 자화상태에 도달할 때까지 유지하는 시간이며, 앞서 설명한 인가전류의 상승시간에 따른 와전류의 영향을 받는다. 마지막 인가전류는 함정의 탈자 후 최종 자기신호 상태를 결정짓는 요소로 같은 함정일지라도 상황에 따라 극성 및 전류의 크기가 달라진다. Z루프 인가전류는 Flash-D에 해당하는 것으로 소자장비가 없는 함정을 자기처리하기 때문에 지구수직자기장과 크기가 같고 반대방향의 자기신호가 형성되도록 하는 것이 목적이다. 즉, 지구자기장과 반대의 자기신호를 형성하여 지구자기장에 의한 유도자기장을 상쇄할 수 있도록 자화상태를 부여하는 것이다.

자기처리를 하여 완벽하게 자기정숙화가 되었을지라도, 이후 함정은 지구자기장에 지속적으로 노출되며 항해 중 과도에 의한 기계적 스트레스 등으로 인해 함정의 자화상태가 변화된다. Flash-D는 안정성은 우수하나 자기처리에 많은 시간이 소요되고 숙련된 운용자의 경험이 매우 중요한 요소가 된다. 이를 해결하고자 Deperm-R과 Flash-D의 장점을 취하여 제안된 Anhyseretic Deperm[5]은 운용자의 경험 의존도를 낮추고 자기처리 결과를 예측할 수 있는 장점이 있는 반면에 실험의 자기처리 후 안정성에 대하여 검증된 바 없다.

V. 자기처리 시설의 성능개선

신규 자기처리 시설은 기존에 비해 자기처리 부두가 크고 대용량의 발전시설을 갖추어 세종대왕함 및 독도함등의 대형

함정을 자기처리 할 수 있도록 설계되었다. 또한 자기처리 시 발전시설의 운용과 측정 및 분석을 하기 위해 운용자가 수동으로 직접 조작하는 부분이 많고 이를 위해 운용자의 자기처리 경험요소가 중요하였으나, 신규 장비는 많은 부분을 자동화하여 자기처리 시 운용자의 개입을 최소화하였다. 특히 함정의 자기신호 측정 및 분석의 경우, 운용자의 경험이 매우 중요하였으나 함정자기신호의 측정 및 분석을 자동화하여 장비 운용이 기존장비에 비하여 보다 용이해졌다. 자기처리 프로토콜 또한 기존의 프로토콜을 개량하여 자기처리 소요시간의 단축 및 자기처리 프로토콜의 운용이 용이하도록 하였다. 기존 자기처리 프로토콜의 경우 인가전류 간의 휴지기가 이론에 근거한 계산으로 결정하여 일괄 적용하였으나, 신규 자기처리 프로토콜은 X코일(자기처리케이블)의 온도를 모니터링하여 온도가 적정수준까지 내려가면 바로 다음 전류를 투입할 수 있게 하여 자기처리 소요시간을 단축하였다[Fig. 7]. Fig. 7의 (a)는 기존에 운용중인 자기처리 프로토콜을 나타낸 것으로 시간에 따른 자기처리 전류 인가 형태를 나타내고 있다. 각각의 인가전류 간에 전류가 인가되지 않는 휴지기는 X코일 케이블의 전기저항에 의한 발열을 냉각하는 시간이며 이

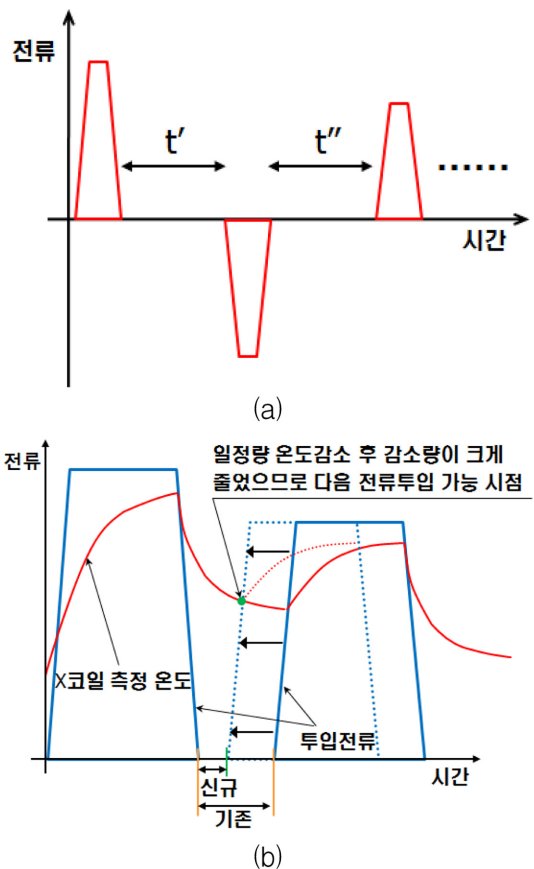


Fig. 7. (Color online) Improvement of the deperm protocol : (a) old, (b) new.

론에 근거한 계산으로 결정된 파라미터가 일괄 적용된다. 반면에 Fig. 7의 (b)는 LIG넥스원이 개발하여 신규로 적용한 자기처리 프로토콜을 나타낸 것으로 자기처리 진행 중에 온도센서에 의해 X코일의 냉각 온도를 실시간으로 모니터링하여 적정수준으로 X코일이 냉각되면 바로 다음 전류를 인가할 수 있게 하였다. 즉, 연속된 대전류 인가로 인해 X코일이 과열되어 손상되는 경우가 발생할 수 있으므로 인가전류 간의 휴지기를 넉넉하게 적용하는데, 온도를 모니터링 함으로써 X코일의 과열에 의한 손상을 방지하며 인가전류간의 휴지기를 최소화하여 자기처리 시간을 단축하였다. 자기처리에는 많은 시간이 소요되며 그 동안 자기처리 중인 함정의 전력공백이 발생하므로 자기처리 시간을 단축하여 전력공백을 최소화하였다. 또한 기존에는 자기처리를 위한 전류투입을 수동으로 진행하며 자기처리 진행 중에 함정의 자기신호 상태를 확인하는 것이 용이하지 않았으나, 신규 자기처리 시설은 고성능의 자기센서를 통해 함정의 자기신호 상태를 실시간으로 모니터링하며 그에 따라 자기처리 투입전류를 정밀 제어하여 자동으로 자기처리 전류를 투입하도록 설계하였다.

VI. 결 론

국내에는 해외에서 도입하여 운용 중이던 기존의 자기처리 시설을 대체하고 대형함 측정 및 처리능력 확보를 위한 신규 자기처리 시설을 LIG넥스원에서 국내 개발하여 현재 운용 중에 있다. 기존 및 신규 자기처리 시설은 X코일을 모두 함정에 직접 권선하는 방식이며 다양한 종류의 함정을 한 개의 시설로 자기처리 할 수 있다는 장점이 있으나, X코일의 권/해선에 많은 시간을 소모하는 단점이 있다. 해외에서는 함정

의 크기에 따라 자기처리 시설을 달리하여 X코일을 솔레노이드의 형태로 고정 설치(Drive-In 방식)해서 운용 중에 있으며, 이는 함정의 자기처리 시간을 단축하여 함정이 자기처리 하는 동안 해군 전력의 공백을 최소화 할 수 있는 반면 자기처리 효율이 떨어지고 많은 비용이 소요된다. 함정의 자기처리는 기뢰로부터 함정을 보호하기 위한 기본적인 대응책으로써 필수로 시행되어야 하는 일이다. 따라서 대한민국의 해군이 더욱 더 효율적으로 작전을 수행하고 작전 중의 안전을 확보하기 위해서는 신규 개발된 자기측정처리시설을 활용하여 자기측정 및 처리 이력 데이터베이스 확보를 통해 함정 자기스텔스 관련분야에 대한 보다 활발한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

References

- [1] K. S. Yoon, Degaussing System Calibration Method under Uncertainty of Degaussing Coil Effect, The Korea Institute of Military Science and Technology (2011).
- [2] C. S. Yang, Prediction Technique for underwater electromagnetic signature characteristics generated by naval vessel, Ph.D. Thesis, Kyungpook National University, Korea (2008).
- [3] John. J. Holmes, Exploitation of a Ship's Magnetic Field Signatures, Morgan & Claypool (2006).
- [4] John. J. Holmes, Reduction of a Ship's Magnetic Field Signatures, Morgan & Claypool (2008).
- [5] Timothy Malcolm Baynes BSc., Analysis of the Demagnetisation Process and Possible Alternative Magnetic Treatments for Naval Vessels, Ph.D. Thesis, The University of New South Wales, School of Physics, Faculty of Science (2002).