



고망간강의 합정 선체 적용 가능성에 관한 연구

신광호[†]

해군 군수사령부 합정기술연구소

A Study on the Applicability of High Manganese Steel to Naval Ship Hulls

Kwangho Shin[†]

Naval Technology Research Institute, Logistics Command, ROK Navy

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

A naval mine is an effective weapon system implemented for defending defends ports and seas. A mine is an underwater weapon that poses a great threat to ships sailing over the sea from shallow areas. Most of the influence-type naval mines detect magnetic field signals from ships and determine the final time of fire. Therefore, the level of underwater electro-magnetic signatures of ships is a key requirement for determining the survival of ships in wartime situations where mines are emplaced. The main reason why the high manganese steel is attracting attention for naval ship hulls is its nature as a non-magnetic steel. The non-magnetic hull does not generate electro-magnetic signatures; thus, it has the advantage improving the stealth of the ship. In this paper, I examine whether this material can be applied in the hulls material of naval ships that must be able to reduce underwater electro-magnetic signatures by considering the non-magnetic characteristics of the first developed high manganese steel in the world.

Keywords : High manganese steel(고망간강), Naval ship hull(합정 선체), Non-magnetic steel(비자성강), Naval mine(기뢰), Uderwater electro-magnetic signature(수중 전자기 신호), Stealth(은밀성)

1. 서론

최근 국내 한 조선소에서, 고망간강(high manganese steel) 소재를 사용해 만든 LNG(Liquefied Natural Gas, 액화천연가스) 연료탱크를 세계 최초로 선내에 탑재한, 초대형 컨테이너 운반선의 건조 및 국외 인도 관련 뉴스 기사가 보도된 적이 있다(Chen, 2023). 과감한 선제 투자로, 우리 조선업계가 철강사와 손잡고 세계 최초로 국내에서 개발한 고망간강 소재를 사용하여, 향후 친환경 선박 시장을 선점하기 위한 교두보를 마련한 것으로 판단된다.

영하 163°C의 LNG를 저장할 수 있는 소재는 니켈강, 스테인리스강, 알루미늄 등으로, 철강의 경우 니켈을 기반으로 극저온에서의 충격 인성을 부여하고 있으나, 소재가 매우 고가이고 LNG 저장탱크 제작을 위한 가공 및 용접시 제작성이 열악하여 비용이 높은 문제가 있었다. 이러한 문제를 극복하기 위해 2010년부터 대우조선해양(現. 한화오션)은 포스코와 극저온용 고망간강 개발을 시작하였다(Kang et al., 2023).

극저온용 고망간강은 니켈 대비 약 열 배 정도 값싼 망간을 이용하여 극저온 충격 인성을 확보한 강재로서 소재 비용을 획기적

으로 낮출 수 있으며, 극저온에서도 기존 소재 대비 우수한 성능을 가지고 있고 제작성도 매우 우수하다. 여기서 주목할 부분은 이러한 고망간강이 비자성의 특성을 나타낸다는 것이다. 해군 합정의 경우, 기뢰(naval mine)의 위협에 대비하여 합정 자체의 수중 전자기신호(underwater electro-magnetic signature)를 은밀성(stealth) 측면에서 매우 중요하게 관리하는데, 현재 합정의 선체재질로 적용하는 기존 탄소강(steel) 대비 강도는 더 강하면서, 비자성의 특성을 나타내는 고망간강에 대한 관심과 그에 따른 연구가 필요할 것으로 생각된다.

따라서 본 논문에서는 세계 최초로 국내 개발된 고망간강에 대해 살펴보고, 합정 선체재질로 고망간강의 적용이 가능한지, 적용을 위해 극복해야 할 사항은 어떤 것들이 있는지 고찰해 보았다.

2. 고망간강

2.1 고망간강 정의 및 개발경위

고망간강의 사전적 정의는 Table 1 (Naver, 2023)과 같다.

Table 1 The definition of high manganese steel (Naver, 2023)

Source	Definition
Doosan Encyclopedia	Having high tensile strength and ductility, this iron alloy exhibits excellent wear resistance, featuring low carbon content and a high manganese content.
Mechanical Engineering Glossary	A steel containing 0.3 ~ 1.3% C and 10 ~ 15% Mn, subjected to water quenching at 1000 ~ 1100°C to achieve an austenitic structure. Known for its excellent work hardenability, it is employed as a wear-resistant material.
Civil Engineering Glossary	An alloy steel containing manganese in the range of 11~14% among its alloying elements, known for its excellent impact resistance and wear resistance
Chemistry Dictionary	High-strength manganese steel with excellent wear resistance
Railway-related Comprehensive Dictionary	Non-magnetic structural steel

고망간강의 사전적 정의를 종합해보면, 고망간강은 일반 탄소강(steel)에 다량의 망간을 첨가하여, 강도가 높고, 비자성, 내마모성 및 극저온 충격 인성을 확보한 합금강이라 할 수 있다. 최근 포스코에서 개발한 고망간강(HMN40)의 화학적 조성은 Table 2와 같으며, 망간의 함유량이 22.5~25.5%를 차지하고 있다 (Posco, 2022).

고망간강은 1970~1980년대 일본에서 개발을 시도하였으나, 상용화에 실패했다. 국내에서는 2000년 초반부터 포스코에서 기초 연구를 수행하였는데, 2010년 포스코-대우조선해양(現. 한화오션) 간 기술개발협약을 맺고, 극저온용 고망간강 개발을 착수하였다.

지구 환경 보호를 위한 액화천연가스(LNG) 시대에 발맞춰 LNG 저장탱크 수요가 증가하는 상황에서, 영하 163°C의 LNG를 저장할 수 있는 기존에 사용한 소재로는 36% Ni강(인버), 9% Ni강, 스테인리스강, 알루미늄 등으로, 기존 소재의 경우 가격이 비싸고, 제작성 또한 열악하였다. 고망간강의 경우, 니켈 대비 약 10배 정도 값싼 망간을 이용하여, 소재 비용은 낮추고, 극저온에서도 기존 소재 대비 우수한 성능을 가지며, 제작성 또한 용이한 장점이 있다.

극저온용 고망간강 개발의 또 다른 중요 이유는 프랑스 GTT社에 종속되어 있는 LNG 탱크 시장의 독립이었다. 1990년대부터 수백 척의 LNG 운반선을 건조한 국내 조선소들은 경쟁력이 있는 자체 탱크 기술이 없어 지난 수십 년간 수조 원의 로열티를 GTT社에 지급해 오고 있는 상황에서 무엇보다도 시급했던 것이 LNG 화물창 시장의 독립이었다. 물론 현재 개발된 고망간강은 우선적으로 LNG 연료탱크에 적용하고 있지만, 싼 소재 원가 및 월등한 작업성을 기반으로 향후 LNG 화물창 시장의 독립에 크게 기여할 것으로 생각된다 (Kang et al., 2023).

이렇게 개발한 고망간강을 사용하여, 2017년 12월 현대미포조선에서 세계 최초 고망간강 LNG 연료 탱크를 탑재한 연안화물선 Green Iris를 건조하였고, 2022년 11월 국제해사기구(IMO)에서 고망간강을 극저온 화물·연료 탱크 선박소재의 국제표준으로 인정하여 조선용 강재 코드로 등재되었다. 2023년 6월 한화오션

Table 2 The chemical composition of high manganese steel (Posco, 2022)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Cu	B	N
0.35 ~ 0.55	22.50 ~ 25.50	≤ 0.030	≤ 0.010	0.10 ~ 0.50	3.00 ~ 4.00	0.30 ~ 0.70	≤ 0.0050	≤ 0.050

Table 3 The mechanical properties of high manganese steel (Posco, 2022)

Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Charpy Impact Energy (J)
≥ 400	800 ~ 970	≥ 22	≥ 27 (@-196°C)

에서 세계 최초 고망간강 LNG 연료 탱크를 탑재한 초대형 컨테이너 운반선 Berlin Express를 건조하여 독일 하팍로이드에 인도하는 쾌거를 이루었다.

2.2 고망간강의 기술수준과 특성

현재까지 개발된 고망간강(포스코社 HMN400)의 기술수준은 조선용 강재 두께 6mm 이상의 판재(후판, steel plate) 생산이 가능하고, 두께 10mm 이상 판재에 대한 가공 및 용접 기술은 확보가 완료된 상황이다. 두께 6mm 미만 판재 생산 및 10mm 미만 판재에 대한 가공 및 용접 기술은 개발 가능할 것으로 예상되나, 향후 시장성을 고려하여 추진할 것으로 여겨진다.

고망간강의 기계적 특성은 Table 3과 같은데 (Posco, 2022), 합성 선체재질로 적용 중인 연강(MS, Mild Steel / 항복강도 235MPa) 및 고장력강(HTS, high tensile steel / 항복강도 315MPa) 보다도 항복강도가 높은 특성을 나타낸다.

구조물이나 기기의 자기 누설을 막기 위해 자기계의 영향을 받지 않게 만든 강을 비자성강이라고 하는데, 투자율(permeability)을 기준으로 합성 선체재질로 적용 가능한 비자성강으로는 고망간강, 스테인리스강, 알루미늄 등을 들 수 있다.

투자율이란 자성체의 자기 유도와 이에 해당하는 자화력과의 관계를 말하는데, 일반적으로 투자율은 자성체에 가해지는 외부 자력에 대한 자속 밀도(flux density)의 비로 표현한다. 자성체의 투자율은 외부 자력이 변화함에 따라 변화하는 특성을 가지고 있다. 일반적으로 투자율이 2.0 보다 큰 물질을 자성체라 하며, 2.0을 넘지 않는 물질을 비자성체로 분류한다. 해군 함정 중 소해함정(기뢰를 탐색, 제거하는 임무)에 사용되는 비자성체의 상태 투자율은 2.0을 넘어서는 안된다 (ROK Navy, 2019). 금속의 경우, 투자율이 높을수록 주파수의 변화가 심해지는데, 알루미늄이나 구리는 투자율이 거의 1에 가까워 주파수 변화가 적게 발생하고, 철 같은 것은 투자율이 높아서 주파수 변화가 많이 발생한다.

통상적으로 해군 함정의 경우, 임무 특수성을 고려하여 소해함정의 선체재질을 비자성체로 적용하고 있는데, 국내 소해함정은

복합재료(composite material) 중 하나인 유리섬유강화 플라스틱(FRP, Fiber Reinforced Plastic)을 적용하고 있다. 만약 고망간강을 함정의 선체재질로 고려해 본다면, 우선적으로 소해함정에 적용하고 있는 복합재료를 대체하는 것으로 검토할 필요가 있다.

고망간강을 포함한 비자성강 및 복합재료의 투자를 비교는 Table 4와 같다 (DAPA, 2023).

Table 4 The comparison of permeability(μ) (DAPA, 2023)

High manganese	Stainless steel	Aluminium	FRP
1.002	1.010	1.000	1.000

3. 함정 선체재질로 고망간강 적용 가능성

3.1 수중 전자기신호 저감의 중요성

함정 선체재질로 고망간강이 주목 받는 가장 큰 이유는 비자성체라는 특성 때문이다. 비자성 재료의 선체는 수중 전자기신호 (underwater electro-magnetic signature)를 발생시키지 않으므로 함정의 은밀성을 향상 시키는 스텔스(stealth) 측면의 장점을 갖는다.

기뢰(naval mine)는 항만이나 해역을 봉쇄 또는 방어하는데 효과적인 무기체계로서, 천해에서 바다 위를 항해하는 함정에 큰 위협이 되는 수중무기이다. 빈자(貧者)의 무기로도 알려진 기뢰는 경우에 따라 단 한 발로 고가의 대형 함정을 침몰시킬 수 있는 매우 위협적이고 효과적인 무기체계로 약 200년 이상의 역사를 가지고 있다. 기뢰는 1차2차 세계대전, 한국전쟁 등을 통해 기존의 접촉식 기뢰에서 자기, 음향, 압력, 항적 등 함정에서 발생하는 다양한 신호들을 감지하여 폭발하는 감응식 기뢰로 발전하였으며, 현재 많은 국가에서 운용하고 있다. 감응식 기뢰의 대부분은 함정에서 발생하는 자기장 신호를 탐지하여 최종 발화시점을 결정한다. 이처럼 함정의 수중 전자기신호 수준은 기뢰가 부설되어 있는 전시 상황에서 함정의 생존 여부를 결정하는 핵심적인 요건의 하나라고 할 수 있다 (Society of naval architects of Korea, 2012).

Fig. 1은 미 해군 함정의 피해 사례를 도식한 내용으로 지난 2차 세계대전 이후(한국전쟁부터) 최근까지 함정이 외부 공격 등에 의해 손상된 현황을 보여주고 있다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 기뢰에 의한 함정 손상은 다른 무기체계에 의한 공격을 모두 합한 것 보다도 4배가 넘는 수치를 기록하고 있다 (Freedberg, 2017). 이처럼 기뢰의 위협은 예전부터 최근까지도 지속적이며, 함정 생존성 측면에서 기뢰 위협에 대비한 수중 전자기신호 저감이 매우 중요함을 알 수 있다.

3.2 함정 전자기신호 발생원

함정에서 발생하는 수중 전자기신호를 발생 원인별로 분류하면, 강자성 재료의 선체 및 탑재장비에 의한 전자기 신호, 선체 부식 및 부식방지 장치에 의한 전자기 신호, 프로펠러 및 전력기기, 전동기, 발전기 등 함내 전력기기에 의한 전자기 신호 등이 있다.



Fig. 1 The cases of US navy ship attacked by weapons (Freedberg, 2017)

3.2.1 강자성 선체 및 탑재장비에 의한 전자기 신호

자기장 내에 도체를 놓으면, 도체의 양 단에 자극이 나타나면서 자기장의 분포가 교란되는데 이러한 현상을 자화(磁化)라 한다. 자화가 되는 물질은 자성체, 자화가 되지 않는 물질은 비자성체라 한다. 자성체 중 철(Fe), 니켈(Ni), 코발트(Co) 등을 강자성체라 하며, 강자성체는 스핀(spin)에 의한 자기 모멘트가 서로 접근하여 원자 전체의 모멘트를 동일 방향으로 정렬하고 있는 자구(magnetic domain)를 가지고 있다. 여기에 강한 외부 자기장이 가해지면 자구가 일정한 방향으로 정렬한다. 이와 같은 상태에서 외부 자기장이 제거되면 자구는 다시 원래의 방향으로 되돌아가는데, 일부는 완전히 되돌아가지 않고 잔류하여 영구자석으로 남게 된다.

강자성 선체 및 탑재장비에 의한 자기장 신호는 지구 자기장 환경에서 함정의 영구적 또는 일시적 자화에 의해 발생하며, 구성성분을 구분하면 아래와 같다.

첫째, 함 건조 과정에서 기계적 또는 열응력에 의해 강자성 재료의 선체 및 탑재장비에 영구적으로 자화되는 영구 자기장(permanent magnetic field) 성분이다.

둘째, 지구 자기장 환경에서 함정 항해방향 및 자기 위도 변화에 의해 일시적으로 유기되는 유도 자화에 의한 유도 자기장(induced magnetic field) 성분이다.

셋째, 횡동요(rolling), 종동요(pitching) 등 함정 요동에 의해 선체 표면에 발생하는 와전류에 의한 와전류 자기장(eddy current magnetic field) 성분이다.

넷째, 함정 내 전력기기 및 전력선 등에 의한 누설 자기장(stray magnetic field) 성분이다.

이들 중 강자성 선체재질로 건조되는 일반 함정의 경우 영구 자기장 및 유도자기장 성분이 함정 자기장의 대부분을 차지한다. (SNAK, 2012)

3.2.2 선체 부식 및 부식방지 장치에 의한 전자기 신호

선체 부식은 부식의 여러 종류 중 갈바닉(galvanic) 부식에 해당한다. 갈바닉 부식에서는 2개의 서로 다른 금속이 쌍을 이룬 상태로 전해질 용액에 놓이게 되면, 두 금속의 갈바닉 전위(galvanic potential) 차에 의해 상대적으로 이온화 경향이 큰(-) 전위를 가지는 금속이 우선적으로 부식되고, 이온화 경향이 작은(+) 전위를 가지는 다른 금속은 부식으로부터 보호된다.

일반적으로 함정 프로펠러의 재질은 청동 합금(nikel aluminum bronze alloy)이며, 함정 선체는 주로 철(steel)로 제작된다. 일반적인 함정 선저 전위는 약 $-0.6V$ 이며, 청동계통 프로펠러인 경우에는 약 $-0.2V$ 부근이다. 따라서 선체의 갈바닉 전위가 프로펠러에 비해 상대적으로 (-) 전위를 가지므로, 선체표면에서 갈바닉 부식현상이 일어나고 프로펠러는 부식으로부터 보호되는 것이다.

상대적으로 (-) 전위를 가지는 선체는 이온화($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$) 되어, 전자(electron)는 프로펠러 축계를 통해 상대적으로 (+)전위를 가지는 프로펠러로 이동한다. 따라서 부식전류는 전자의 이동경로와 반대로 선체 \rightarrow 해수 \rightarrow 프로펠러 축계의 폐루프(closed loop)를 통해 흐르며, 이러한 전류에 의해 전기장 신호가 수중에서 발생하고, 전기장 신호로 인해 자기장이 추가로 발생하게 되는 것이다.

또한, 선체 부식을 방지하기 위해 일반적으로 선저 표면에 내 부식성 도료를 도장하는 방법이 사용되는데, 장기적인 함정 운용으로 인해 국부적인 도료 손상이 일어나므로, 이 방법으로는 선체의 부식현상을 완벽하게 통제할 수 없다. 이를 보완하기 위해 함정에서는 선체 표면에 선체보다 갈바닉 전위가 낮은 금속을 부착하는 수동부식방지 장치와, 비소모성 양극을 통해 선저 전위를 일정한 전위로 항상 유지시켜 주는 능동 부식방지 장치를 적용하고 있다.

수동 부식방지 장치는 함정 선저 표면에 선체 금속보다 갈바닉 전위가 낮은 금속인 아연, 마그네슘, 알루미늄 등을 인위적으로 부착하여 선체보다 먼저 부식이 일어나게 하는 장치로서, 수동 음극보호(passive cathodic protection) 장치라고도 한다. 선체와 프로펠러는 음극이 되고, 선저에 부착된 금속들은 선체보다 먼저 부식이 일어나므로 선체는 부식으로부터 보호된다. 수동 부식방지 장치를 사용하는 경우, 부식방지 전류가 폐루프를 형성하므로 수중에서 전기장과 자기장을 발생시키는 주요 원인이 된다.

능동 부식방지 장치는 선저 표면의 전위를 일정한 값으로 유지하여 선체를 부식으로부터 보호하는 장치로서, 능동 음극보호(active cathodic protection) 장치 또는 ICCP(impressed current cathodic protection) 장치라고도 한다. 능동 부식방지 장치의 경우, 선체의 부식을 방지하기 위해 인위적으로 방식전류를 해수를 통해 선체 표면으로 흘러주므로 수중 전자기 신호를 발생시키는 요인이 된다. 또한, 함정 프로펠러 축계 회전에 의해 선체 부식방지 전류의 변조현상이 생김으로써 수십 Hz 대역까지의 교류 전자기 신호가 발생할 수 있다. 능동 부식방지 장치의 전원 필터 특성이 나쁜 경우 수백 Hz 대역까지의 교류 전자기 신호가 발생한다. 함정 내 60 Hz와 400 Hz를 사용하는 각종 전력기기 및 전

력선에서 방사되는 수 kHz 대역의 교류 전자기 신호도 해수를 통해 수중으로 전파되어 수중 전자기 신호를 발생시킨다 (SNAK, 2012).

3.3 함정 선체재질의 종류

함정의 선체구조는 함정 전체 중량(경하배수량)의 약 40~50% 정도를 차지하고, 건조비의 약 10~15% 및 건조비와 운용유지비용을 모두 합친 총 수명주기 비용의 약 3~4% 정도를 차지한다. 선체구조는 비용 측면에서는 큰 영향을 주지 않으나 중량 측면에서는 큰 비중을 차지하며, 이는 선체구조 설계시 함정 선체구조 중량 감소가 매우 중요한 과제임을 의미한다.

선체구조는 해상 및 운용 환경에서 작용하는 여러 종류의 하중에 충분히 견딜 수 있도록 설계되어야 하며, 이러한 기본개념은 일반 상선과 큰 차이는 없다. 하지만 함정 선체구조는 전투 및 무장 체계에 관련된 다양한 공간과 이로 인한 구조배치가 복잡하며, 전투성능 및 생존성능 향상을 위해 엄격한 기준의 소음, 진동 및 충격 성능 확보가 요구된다. 이런 요구 특성은 선체구조 중량을 증가시키는 요인이 되기도 한다. 이에 따라 함정에 요구되는 제반 성능을 충족시키면서도, 구조강도 및 중량 측면에서 보다 유리한 구조방식과 높은 강도의 선체재질 적용 등 선체구조 경량화를 위한 대책이 강화되고 있다.

선체구조의 일반적인 설계과정은 함정의 운용환경 및 일반배치로부터 구조하중, 선체재질 및 초기 구조부재 배치를 설정하고, 이로부터 부재크기를 계산(scantling)한다. 선체구조의 부재크기가 계산되면 구조강도 해석(strength analysis) 및 구조설계 최적화 등을 통해 부재 배치 및 크기를 최종적으로 결정하는 일련의 과정을 거쳐 구조설계가 완성된다.

함정에 사용되는 선체재질로는 연강(mild steel), 고장력강(high tensile steel), 고강도강(high yield steel), 알루미늄합금(aluminum alloy) 및 복합재료(composite material) 등이 있다. 선체재질 선정 시 일반적으로 재료의 강도, 강성, 비중 등 기계적 특성과 아울러 용접성, 가공성, 보수성 등의 작업성과 내식성, 내화성, 경계성 등이 함께 고려된다. 이들 선체재질의 기계적 특성을 연강을 기준으로 하여 Table 5에 제시하였다. 고장력강 및 고강도강은 연강에 비해 가격은 비싸지만 강도가 좋으므로 중량을 줄일 수 있는 장점이 있다. 알루미늄 및 복합재료도 연강에 비해 중량을 줄일 수 있는 장점을 가진 반면, 탄성계수가 작고 가격이 비싼 단점이 있으므로 용도가 제한된다 (SNAK, 2012).

연강(MS)은 주로 지원함이나 근무지원정의 선체재질로 적용하고 있는데, 최근 수상함 설계시에는 연강을 대신하여 고장력강(HTS)을 주로 적용하는 추세이다. 이러한 고장력강은 강도에 따라 HTS-32(항복강도 32 kg/mm²) 및 HTS-36(항복강도 36 kg/mm²) 등이 있다. 고강도강(HYS)은 강도에 따라 HY-80(항복강도 80 ksi 또는 550 MPa) 및 HY-100(항복강도 100 ksi 또는 690 MPa) 등이 있다. 고강도강은 강도는 매우 우수하나 용접 조건이 까다롭고 가격이 비싸기 때문에 강도 유지가 매우 중요한 잠수함

Table 5 The comparison of ship structure materials (SNAK, 2012)

Index	Yield Strength	Modulus of Elasticity	Specific Gravity	Strength / Specific Gravity	Cost
MS	1 (235 MPa)	1 (205 GPa)	1 (7.85)	1 (235/7.85)	1
HTS-32	1.3 (315 MPa)	1	1	1.3	1.5~2
HY-80	2.3 (550 MPa)	1	1	2.3	3~4
AL 5086	2/3	1/3	1/3 (2.78)	2	5~7
FRP	0.4~1	1/5~1/10	1/5	2~5	1.2~1.5

압력선체 재료로 주로 적용하고 있으며, 수상함에는 일부 특수 부위에 적용하고 있다.

알루미늄합금(AL)은 연강에 비해 강도는 떨어지나 비중이 1/3 정도로 매우 가볍기 때문에 구조중량을 절감할 수 있는 장점이 있다. 한때 전 세계적으로 함정 주선체는 철(steel) 재질을 적용하고, 상부구조물은 알루미늄합금을 적용하는 것이 추세였으나, 지난 세기 세계 해전사에서 알루미늄합금 재질의 함정 상부구조물이 유도탄 피격에 의한 화재에 매우 취약한 것이 드러나면서, 국내에서는 중량 감소를 위한 특수한 상황이나 특수 부위를 제외하고 알루미늄합금을 주선체나 상부구조물의 선체재질로 적용하는 것을 꺼리는 분위기이다.

복합재료 중 선체재질로 가장 많이 적용하는 것은 유리섬유강화 플라스틱(fiber reinforced plastic, FRP)이다. 가볍고 비자성의 특성을 가지고 있기 때문에 임무 특성상 비자성 선체재질 적용이 필수적인 소해함정에 주로 적용하고 있으며, 경량화가 필요한 소형 전투근지원정 및 고속단정 등에도 적용하고 있다.

3.4 비자성 재질간 비교

기뢰는 아군 및 적군 해역 어느 곳이든 부설될 수 있기 때문에 바다를 항해하는 모든 함정은 기뢰의 위협에 노출되어 있을 수 있다. 이런 상황에서 스틸스 성능 강화를 위해 모든 함정의 선체 재질을 비자성체로 하면 좋겠지만, 함정 설계라는 것이 제한된 상황 하에서 선택의 문제이기때 어느 한쪽을 강화하면 다른 한쪽은 손해를 봐야 하는 상황이 발생한다. 결국 전체적인 통합 시스템 관점으로 생각해야 하는데, 함정의 선체재질로 비자성체를 검토하는 것이 처음 있는 일이고, 아직 극복해야 할 사항과 제한사항 등이 있는 관계로 모든 함정에 적용하는 것은 아직까지 무리가 있을 것이다. 따라서, 비자성체의 장·단점을 고려하여, 현재 비자성 선체재질로 설계 및 건조하고 있는 소해함정에 우선적인 적용을 검토할 필요가 있다. 이에 따라, 현재 소해함정에 적용 중인 유리섬유강화 플라스틱(FRP)을 기준으로 함정에 적용 가능한 비자성체인 고망간강, 스테인리스강, 알루미늄합금에 대해 살펴보고자 한다.

Table 6 The comparison of non-magnetic materials
○ : Good, △ : Nomal, × : Disadvantageous

Index	FRP	Non-magnetic materials		
		High manganese steel	Stainless steel	Aluminium
Permeability (μ)	○	○	○	○
Strength	△	○	○	△
Corrosion resistance	○	△	△	△
Fire resistance	×	○	○	×
Material supply	○	○	×	×
Productivity	○	○	○	△
Economic feasibility	○	○	×	△

일반적으로 소해함정의 선체재질은 비자성체를 적용하고 있다. 과거 기술이 발전하기 전에는 목재를 주로 적용했었는데, 최근에는 대부분의 국가에서 유리섬유강화 플라스틱(FRP)를 적용하고 있다. 예외적으로 1990년대 독일에서 건조한 Frankenthal급 소해함과 2017년에 선도함 전력화를 시작하여 현재까지 후속함 건조를 진행 중인 폴란드의 Kormaran급 소해함의 경우, 선체재질로 스테인리스강을 적용한 사례가 있다 (Pape, 2023).

비자성 재질 간 특성 비교에 앞서 자재수급 측면에서 먼저 살펴보면, 고망간강은 세계 최초로 국내 개발되어 생산 및 납품이 가능하나, 상부구조물이나 선체 내부 구조재로 사용되는 박판에 대한 생산 및 가공기술은 추가 연구가 필요한 상황이다. 함정 선체재질로 적용 가능한 스테인리스강은 국외 수입에 의존해야 하는 상황이며, 국외 소해함정에 적용 실적이 있는 동종 계열의 고강도 비자성 스테인리스강의 경우 현재 국내 개발이 진행 중이다. 알루미늄합금 또한 전량 국외 수입에 의존해야 하는 상황이다.

경제성 측면에서 살펴보면, 복합재료인 유리섬유강화 플라스틱(FRP) 대비 고망간강은 약 1.3배, 스테인리스강은 약 7배, 알루미늄합금은 약 2.2배 정도 더 비싸다.

비자성 재질간 특성 비교는 Table 6에 나타나는 바와 같이, 비자성체 특성을 나타내는 투수율(permeability)은 4가지 재질 모두 양호한 수준이며, 재질 자체의 강도(strength)는 고망간강 및 스테인리스강이 유리하다. 내식성(corrosion resistance)은 유리섬유강화 플라스틱(FRP)이 유리하고, 내화성(fire resistance)은 고망간강 및 스테인리스강이 유리하다. 함 건조를 위한 자재 공급성은 유리섬유강화 플라스틱(FRP) 및 고망간강이 유리하고, 제작성(productivity)은 알루미늄합금이 다소 불리하다. Table 6의 비자성 재질간 특성 비교는 각 재질을 종합하여 정리된 참고 문헌이 별도 없어서, 각종 재료 관련 일반문헌, 해군의 차기기뢰

부설함(MLS-III) 건조가능성 검토 자료, 현재 기본설계 진행 중인 차기소해함(MSH-II) 관련 방위사업청 회의 자료 등을 종합하여 비교·분석 하였다.

그간 소해함정의 선체재질로 적용한 유리섬유강화 플라스틱(FRP)은 강도 측면에서 큰 문제는 없었다. 하지만 향후 해군의 소해 개념 발전을 고려 현재 운용 중인 소해함정 보다 규모가 큰 소해함정이 필요할 경우, 기존 유리섬유강화 플라스틱(FRP)를 적용하여 건조가 가능한지에 대한 의구심이 제기 되고 있는 상황이다. 실제로 미래 소해 개념은 무인체계를 활용한 복합적인 장비 운용이 예상되며, 이로 인해 무인체계의 탑재 및 운용 공간 증대가 필요할 것으로 생각된다. 이러한 이유 때문에 유리섬유강화 플라스틱(FRP)를 대체할 비자성강의 검토가 필요한 상황이다.

상기 검토 내용에서 살펴본 고망간강, 스테인리스강, 알루미늄 합금 중 재질 특성, 자재 공급성 및 경제성 등을 종합적으로 고려해 볼 때 유리섬유강화 플라스틱(FRP)를 대체할 비자성강으로는 고망간강이 가장 적합할 것으로 판단된다. 물론, 일반 선박에도 아직까지 고망간강을 주선체 재질로 적용한 실적이 없기 때문에 제한사항과 극복해야 할 과제들에 대해서 면밀한 사전 검토가 필요하다.

4. 함정 선체재질로 고망간강의 적용에 따른 제한사항

고망간강은 기존 소해함정 선체에 적용한 유리섬유강화 플라스틱(FRP) 대비 강도 측면에서 우수하고, 비자성 특성 지표인 투자율은 동등한 수준이며, 내식성은 다수 함정에 적용된 일반 탄소강(steel)과 동등 수준이다. 하지만 현재까지 개발된 고망간강의 기술수준은 두께 6mm 이상의 판재 생산이 가능하고, 두께 10mm 이상 판재에 대한 가공 및 용접 기술은 확보가 완료된 상황으로, 두께 6mm 미만 판재 생산 및 10mm 미만 판재에 대한 가공/용접 기술에 대해서는 추가 연구가 필요하다. 고망간강 자체가 세계 최초로 국내 개발된 소재인 만큼 민·관·군이 협력하여 그 방향을 찾는다면, 함정용 소재로서의 추가 연구가 원활히 진행될 수 있으리라 생각된다.

현재 국방과학연구소에서 미래도전 핵심기술 과제로 「함정용 자기 스텔스 고장력 비자성강 기술」 연구(2022~2027년)를 진행하고 있다. 기존 국내 개발된 고망간강 기술을 토대로 강도 측면에서 더 우수한 소재기술과 용접기술을 함께 연구하는 과제인데, 궁극적인 목표는 잠수함용 압력선체에 적용 가능한 비자성강을 개발하는 것이다. 따라서, 두께가 얇은 박판을 개발하는 연구는 포함되어 있지 않아, 현재 개발된 고망간강을 소해함정을 포함한 일반 수상함정에 적용하기 위해서는 두께 6mm 이하의 박판 제조 기술에 대한 연구가 필요하다.

또한, 고망간강 자체가 조선용 강재로 개발된 것이긴 하나, 현재 상선에는 LNG 저장탱크 용도의 특수한 경우에 적용되고 있으므로, 선박의 주선체나 구조용 강재로 적용될 경우, 제한사항이나 추가 검토해야 할 사항이 없는지 살펴볼 필요가 있다. 예를

들어, 일반 탄소강 대비 선체 용접시 갖추어야 할 추가 장비 및 시설 또는 건조 과정에서 필요한 추가 공정 절차 등이다. 또한, 선체구조 강재로 고망간강의 경우, 기존 함정의 선체 재질로 대다수 적용되고 있는 연강 및 고장력강 등과 상이한 물성치(탄성계수, 항복강도 등)를 가지므로 고망간강으로 제작한 선체의 최종강도와 피로강도에 대한 검토도 필요할 것으로 판단된다.

다른 한편으로, 고망간강을 적용하여 함정을 건조했다고 가정했을 때, 발생 될 수 있는 제한사항에 대해 살펴보면, 선체 부식 방지를 위해 적용해야 하는 장치들에서 발생하는 수중 전자기신호에 대한 관리가 필요할 것으로 예상된다. 고망간강의 내식성은 일반 탄소강들과 유사하기 때문에, 해수에 노출된 상태에서 함정을 운용해야 하는 특성상 선체 부식방지를 위한 조치들을 마련해야 한다. 물론, 강자성 선체 특성에 따른 수중 전자기신호의 대부분을 차지하는 영구 및 유도 자기장은 비자성체인 고망간강을 적용했을 때 현저히 감소할 것으로 판단되나, 소해함정의 경우, 그 이외의 수중 전자기신호도 특별히 관리가 필요한 만큼, 선체 부식방지 장치들로 발생하는 수중 전자기신호도 무시할 수 없을 것이다.

선체 부식 및 부식방지 장치에 의한 수중 전자기신호는 선체 재질과 구조, 선체도로 종류와 도장 손실 정도, 함정 운용수심, 부식방지 장치 운용조건과 수심·수온, 해수 및 해저면의 전도율 등 환경조건에 따라 크게 달라진다. 이에 따라 고망간강을 함정 선체재질로 적용했을 때 발생할 수 있는 부식 상황에 대한 연구가 필요하며, 수중 전자기신호 특성을 예측할 수 있는 모델 개발 및 축소 모형 제작을 통한 모형시험 등의 대책이 필요하다.

최근 개발하고 있는 능동 부식방지 장치는 프로펠러 축계와 선체 사이의 저항 변화에 따른 전위를 실시간으로 감시하여 축계의 저항을 낮추기 위한 점검과 정비를 함으로써, 프로펠러 축계의 부식방지와 부식전류 변조에 의한 교류 전자기 신호발생을 최소화하고 있다. 또한, 전원 주파수 차단특성이 우수한 필터를 사용하여 장비의 전원 리플(ripple)에 의한 교류 전자기 신호 발생을 통제하고 있다. 추가적으로 함정 내부에 탑재되는 전자기 장비 및 설비들에 의한 누설 전자기 신호 발생을 억제하기 위해 전자기 신호 차폐, 접지 및 전력선에 의한 전류환(current loop) 형성 최소화 등 저주파 신호 감소대책들도 포함하여 고망간강 적용에 따른 제한사항들이 슬기롭게 극복될 수 있도록 추가적인 연구 수행이 필요하다.

끝으로 상선과 대비하여 함정 설계/건조에만 적용하고 있는 특수성능 전반에 대한 관련 연구가 필요하다. 자기신호는 앞에서 언급한 선체 부식방지 장치와 연계하여 검토가 필요하며, 선체 구조재질에 따른 소음 및 진동, 수중방사소음 등의 특성과 상부 구조물에 영향을 받는 레이더반사단면적(RCS) 및 전자기간섭/적합성/펄스(EMI/EMC/EMP)에 대한 관련 검토가 개별 또는 종합적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

미국의 미래학자 앨빈 토플러는 “미래는 기회의 시대이기도

하지만, 누구도 남을 위해 그 기회를 잡아주지는 않는다” 라고 말했다. 이제 더 이상 외국의 첨단기술을 단순히 모방하는 방식 만으로는 향후 전쟁에서 승리를 보장할 수 없는 시대이다. 과거 우리 해군은 전투함 한 척 없이, 할 수 있다는 의지 하나로 시작 하여 반세기만에 잠수함에서 첨단 이지스 구축함까지 자체 설계 및 건조할 정도로 괄목할만한 성장을 이루었다. 그러나 기술적인 측면에서 아직도 선진해군에 비해 부족함이 많으며 국내 기술 구축을 위한 많은 노력이 필요한 현실이다. 그동안 우리는 성실한 패스트 팔로어(fast follower) 였다. 하지만 이제는 뛰어난 퍼스트 무버(first mover)가 되어야 한다 (Shin, 2014).

가까운 미래에 국내에서 개발된 고망간강을 적용하여 세계 최초로 고망간강이 적용된 함정이 건조되어, 전 세계 사람들이 부러워하는 모습을 상상해본다. 이러한 노력들이 함정기술을 선도 해 나가는 퍼스트 무버(first mover)의 모습으로 생각된다.

본 논문에서는 세계 최초로 국내 개발된 고망간강의 비자성 특성에 착안하여, 수중 전자자신호 저감이 중요한 함정의 선체 재질로서 적용이 가능한지 살펴보았다. 아직 추가 기술 개발이 필요하고, 새로운 시도를 위해 예상되는 제한사항들이 극복되어야 하지만, 우리 모두의 관심과 노력이 있다면 조만간 현실이 될 수도 있는 고망간강이 적용된 우리 함정의 설계 및 건조를 기대 한다.

References

Che, M.S., 2023. *Delivery of the world's first high manganese steel LNG fuel tank container ship*, Globaleconomic, URL : http://www.g-enews.com/article/Industry/2023/06/202306301631266484a67d2c7d5a_1 [Accessed 30 Jun 2023].

Defense Acquisition Program Administration(DAPA), 2023. *The result of review meeting about MSH-II hull structure material*, Unpublished report.

Freedberg, S.J., 2017. *Worries surface on new navy mine warfare plan*, Breaking Defense, URL: <http://breakingdefense.com/2017/10/distributed-mine-warefare-or-diluted-concerns-on-new-navy-plan/> [Accessed 31 Oct 2017].

Kang, J.K., Yang, H.K. and Yoon, D.W., 2023. Independentcryogenic high manganese steel tank for LNG fuel propulsion ships. *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, 63(2), pp.8~12.

Naver(Internet portal site), 2023. *Encyclopedia of knowledge search : high manganese steel*, URL: http://search.naver.com/search.naver?where=kdic&sm=tab_jum&query=high+manganese+steel [Accessed 13 Nov 2023].

Pape, A., 2023. *Jane's Fighting Ships*. Jane's Groups UK Limited.

Posco, 2022. Steel plates, Product brochure, URL: <http://product.posco.com/homepage/product/kor/jsp/support/s91c5000200b.jsp> [Accessed 13 Nov 2023].

ROK Navy, 2019. *Criteria for degaussing system design*. Naval ship design/building criteria. pp.4.

Shin, K.H., 2014. The development direction of our naval ship technology for a new leap forward, *Journal of naval ship technology*, 82, pp.162.

Society of naval architects of Korea(SNAK), 2012. *The naval Ship*. Textbooks, Inc..

