

# 초전도 MHD 추진선 개발현황 및 전망

최태인\*, 공영경\*\*

(\*국방과학연구소 책임연구원,

\*\*동 연구소 선임연구원)

## 1. 머리말

오래전부터 해양기술자들의 궁극적인 꿈은 보다 빠르면서 조용하게 항해하는 선박을 갖는 것이다. 그러나 기존의 추진기(propeller)로서는 그 꿈을 만족시키지 못하였으며 앞으로도 해결을 기대하기 어려운 현실이다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 추진방식으로 최근에 MHD 추진방식이 초전도 물질의 발달과 더불어 해양기술자들에 의해 널리 연구되고 있다.

MHD 추진선은 1961년 미국의 W.A.Rice가 「Propulsion System」이라는 특허를 내놓은 것을 효시로 보고있다. W.A.Rice는 이 특허에서 MHD 추진은 일반 선박은 물론이고 수중병기 및 수중함 정에도 적용이 가능하다고 지적하였다. 그후 1960년대에 주로 미국에서 연구 개발이 진행되어져 왔다. 1966년경 미국의 S.Way가 외부 직류자장 방식을 채택하고 0.015 테스라 정도의 상전도 자석을 이용한 EMS-1이라는 모델선을 만들어 W.A.Rice가 제안한 MHD 추진 개념을 실험적으로 확인하였다. 이때 전원으로는 연속전지를 사용하였다.

1979년도에는 일본에서 2 테스라 정도의 자장세기를 가지는 초전도 코일을 사용한 최초의 MHD 추진선인 ST-500 모델선을 완성시켜 실험한 바 있다. 이때 초전도 코일은 Race Track 형태의 것을 사용하였다. 이러한 성과를 토대로 1985년에 일

본 조선 진흥재단에서는 초전도 전자 추진선 개발 연구 위원회를 설치, 세계 최초의 초전도 MHD 추진선을 개발하기로 하였다. YAMATO-1 이라고 명명된 이 초전도 MHD 추진선은 총 톤수 280톤, 길이 30m 로써 4 테스라급 초전도 코일을 사용하여 좌, 우 두개의 추력 발생기(Thruster)를 사용하여 8노트 속도를 낼 수 있도록 설계되었다. 1991년에 완성시켜 제 1회 MHD 추진 연구발표회를 개최함과 동시에 전세계적으로 많은 관심 요원들을 초청 시술회를 가졌다. 해상시험 결과 시스템 완성은 성공적이었으나 추진 효율면에서는 약 1.7% 정도 밖에 얻지 못하여 기존의 추진기 효율 수준으로의 향상을 위해서는 많은 노력이 뒤따라야 될 것으로 지적되고 있다.

## 2. MHD 추진원리 및 특성

그 원리는 전자기학 기본법칙인 플레밍의 왼손법칙을 응용한 것으로써 그림 1에 표시하는 바와 같이 선체에 고정된 자석과 전극에 의해 해수 중에 형성된 전장과 자장과의 상호작용에 따라 발생된 전자기력(로렌츠 힘)을 배의 추진력으로 이용한 것이다. 전자기력은 전류와 자장의 크기에 비례하고 전류와 자속이 직교할 때 최대가 된다.

전자유체 추진방법은 크게 4종류로 분류할 수 있다. 자장으로는 교류자장 또는 직류자장을 이용하는 방법이 있고, 또한 자장의 작용 영역에 따라 자

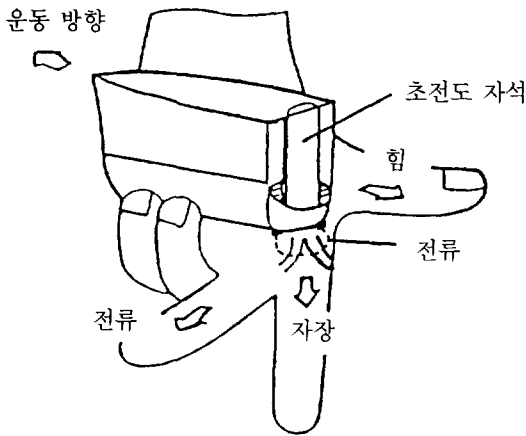


그림 1. 전자유체 추진 원리도

전자유체 추진 방식

자장종류	자장영역	선 내	선 외
직 류		직류내부 자장방식	직류외부 자장방식
교 류		교류내부 자장방식	교류외부 자장방식

내부자장방식과 외부자장방식

항 목	내부 자장방식	외부 자장방식
추진방법	다트내 해수 가압, 분사	선체주위 해수 가속
전자장 분포형태	다트내에서 거의 일정	거리에 따라 변화
자기 차폐	다트내에서 처리가 용이	선체보호 자기차폐 가능 하나 선외에 대해서는 처리가 곤란
전기장 누설	다트외부로 누설이 적다	외부로 누설이 크다
추진 성능	외부자장 방식에 비해 추정 용이	추진이 곤란
외부 환경 영향	미 소	크 다

장이 선체외부에 형성되는 외부자장 방식과 선내에 형성되는 내부자장 방식이 있다.

교류자장을 이용한 방법은 해수 중에 형성된 교류자장과 이것에 의해 유기된 유도전류와의 상호작용에 의해 추진력을 얻는 방식으로써 해수 중에 직

접 통전할 필요가 없는 잇점이 있으나 강력한 진행 자장을 초전도 코일로써 발생시켜야 하는 등의 기술적 어려움이 있다. 외부자장 방식의 경우는 자장과 전장을 형성하기 때문에 해양환경에 미치는 영향을 무시할 수 없다. 한편 내부자장 방식의 경우는 자장과 전장의 작용영역이 선내를 관통하는 다트의 일부에 한정되기 때문에 이러한 해양환경에 미치는 영향이 극히 미소하다.

전자유체 추진선의 최대 특징은 동력 전달축이 없으므로 종래의 추진기 선박과 비교하여 다음과 같은 여러가지 특성을 지니고 있다.

- 기계적 회전 부분이 없으므로 이것에 기인되는 진동, 소음이 없어 정숙운전이 가능하고 보수, 관리가 용이하다.
- 자장세기가 일정할 경우 전류세기에 비례하기 때문에 속도 제어가 용이하고 속응성이 좋다.
- 추력의 발생방법이 추진기에 의존하지 않고 자장과 전장의 상호작용에 의한 전자력을 이용하기 때문에 이론적으로 고속 영역에도 적합하다.
- 선체 관통 회전축계가 없으므로 선형과 선미 형상 설계에 융통성을 발휘할 수 있다.

3. MHD 추진선 개발현황 및 문제점

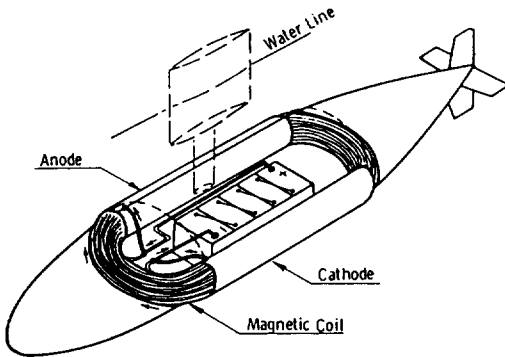
3.1 미국

미국의 W.A.Rice는 액체금속을 이송하는 전자 펌프 특허(A.S.Fenemor, 1957), 진공 중의 입자 가속 특허(B.W.Kerst, 1950)에 대한 역발상으로 전자추진을 제안하였던 것이다. 이러한 특허 제안은 MHD 추진 연구의 기폭제가 된 것이었다.

James B. Friauf는 그후 MHD 추진 효율을 이론적으로 계산하였다. 그는 추진 효율을 높이는데 최대의 장애물은 해수에 통전을 시킬때 해수의 전도도가 낮기 때문에 효율이 떨어진다고 지적하였다. 그의 개선책으로는 해수 덕트에 전기를 잘 통하는 Seed 유입을 검토하였으나 이것을 장시간 연속해서 흘러 주어야 된다는 것은 현실적으로 어렵다는 결론을 내렸다. O.M.Phillips는 Friauf가 직류 자장방식인데 비해 교류자장 방식을 해석하였다. MHD 추진은 추진기가 없으므로 진동이 적고 소음이 없으므로 잠수선의 적용에 흥미를 가졌다고

**표 1. 모델선 EMS-1의 주요 제원**

내 용	크 기
길 이	3.1 m
직 경	0.34 m
코일권 수	402 turns
코일 전류	140 A
자장 세기	0.015 T
해수 전류	120 A
속 도	0.38 m/s



**그림 2. EMS-1 모델선**

말한다. 이중 외부자장 방식의 경우 많은 량의 해수를 압출하므로 해수의 속도는 적어져 해수 중의 유도전류가 적어 그에 수반하여 전력 손실이 적어진다고 지적하였다. 이렇게 하여 해수 중의 광범위한 자장 도달범위가 추력 작용범위가 되므로 추진 효율 향상이 기대된다고 하였다. 그러나 외부자장 방식의 경우 누설자장이 많아 외부환경에 영향을 미치는 점을 우려하고 있다. 그는 잠수선 표면자장을 0.1 테스라일지라도 600 미터 거리에서 0.02 가우스의 자장 누설이 있음을 상기시키고 있다.

L.R.A.Doragh는 MHD 추진에의 초전도화를 제안하였다. 고자장 발생에 적합한 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도체를 MHD 추진에 적용하는 문제를 제안하였다. 그 당시로서는 상당히 신선한 제안이었다고 평가하고 있다. 그는 처음에는 수력 효율 및 덕트 내의 마찰 저항 등을 계산하는 등 추진 특성을 명확히 하였으며 MHD 추력 발생기의 배치에 대해 선체내부의 중심부에 배치하는 방식과 선체 외부에 좌, 우 대칭으로 쌍으로 설치하는 방법을 제안하였다. 연구결

과 그는 20 테스라 정도의 초전도 코일이 개발된다면 소음도 진동도 없는 고속 MHD 추진선이 실용화가 될 수 있음을 지적하였다. 1960년대에 처음으로 상전도 자석을 사용한 EMS-1 모델선을 S. Way가 제작, 주행시험을 수행하였다. 이 모델선에 대한 주요 내용은 표 1 및 그림 2와 같다.

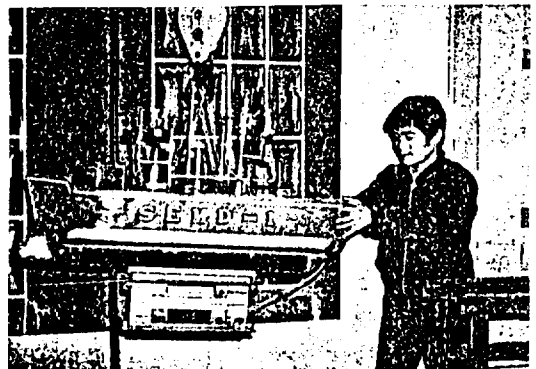
### 3.2 일본

일본에서는 1970년대에 들어와 MHD 추진선의 연구가 시작되었다. 미국의 1960년대에 주로 활발히 연구된 것으로 보았을 때 약 10년 늦게 이에 대한 관심을 가지게 되었다. 앞서 미국의 연구 결과에서도 지적된 바와 같이 마찬가지로 MHD 추진선의 실용화를 위해서는 우수한 초전도 재료가 필수적인 사실을 잘 알고 있는 터였다. 따라서 일본에서는 1960년대에는 크게 빛을 보지 못했던 초전도 재료인 Nb<sub>3</sub>Sn, NbTi 등을 이용한 초전도 MHD 추진선에 초점을 맞추었다. 고베 상선대학을 중심으로 하여 초전도 공학 실험이 가능한 극 저온 실험실이 건설되고 1974년부터 1991년까지 4단계로 나누어 연구개발을 수행하였다.

- ① 소형 초전도 코일 모델선 SEMD-1 개발
- ② 중형 초전도 코일 모델선 ST-500 개발
- ③ 초전도 코일에 의한 교류자장 방식 전자추진 기초연구
- ④ 유인 초전도 MHD 추진선 YAMATO-1 개발

#### 3.2.1 모델선 SEMD-1 개발

SEMD-1은 전자력에 의한 해수 유동의 관측을



**그림 3. 모델선 SEMD-1**

표 2. 모델선 SEMD-1의 주요 제원

모델선 SEMD-1	
재료	선체 스테인레스 강 전극 백금 티타늄 합금
외형 크기	300(W)*500(H)*1000(L)
중량	6.5 kg
추진부 자장 강도	0.6 T (최대)
해수 전류	15 A (최대)
추진력	0.24 N (최대)
완성	1975.9
초전도 코일	
재료	Nb - Ti
코일 형식	Race Track
크기	bore 직경 160/20 mm
	외경 220/80 mm
	높이 90 mm
전류 밀도	$1.3 \times 10^8$ A/m <sup>2</sup>
자장 강도	0.99 T
냉각	액체 헬륨
통전 모드	영구 전류 모드

용이하게 하기 위하여 외부자장 방식을 채용하였고, 초전도 코일은 미국의 Way가 제안한 원형 단면 초전도 코일은 그 당시 초전도 코일 기술로서는 이러한 형상의 초전도 코일 제작이 곤란하여 구형

단면을 가진 Race Track형 초전도 코일을 채택하였다. 초전도 코일의 길이는 22cm로써 선체 용골(Keel)부 내부에 고정되어 상부에 위치한 액체 헬륨 탱크로 냉각된다. 액체 헬륨 탱크 및 초전도 코일 부분은 모두 진공 단열구조로 되어있다. SEMD-1의 주요 내용은 그림 3 및 표 2와 같다.

### 3.2.2 모델선 ST-500 개발

SEMD-1의 성공적인 추진 특성 시험을 수행한 후 추력 발생기 형식은 SEMD-1과 동일한 패널(panel)형을 채용하였으나 초전도 코일은 선저에 수평으로 설치하여 자장이 선저에서 아래 방향으로 나가도록 하였다. 그렇지 않으면 SEMD-1과 같이 자장이 선저에 평행하게 되어 지지기의 방향과 동일한 평면 내에 있어 배의 자장과 지지기의 상호작용으로 배는 동서방향으로 향하는 힘을 받게 된다.

ST-500은 선체를 중심으로 액체 헬륨 공급계, 초전도 코일 전원계, 해수 전류 전원계, 각종 계측기로 구성되고 있다. ST-500의 주요 내용은 그림 4 및 표3과 같다.

### 3.2.3 교류자장 방식 전자추진 기초연구

직류자장 방식은 SEMD-1 이나 ST-500에서 채용된 방식으로써 해수 중에 직접 전류를 흘려 추진력을 얻는다. 이에 반해 교류자장 방식은 교류자장에 의해 해수중에 와류 전류를 발생시켜, 이 전류

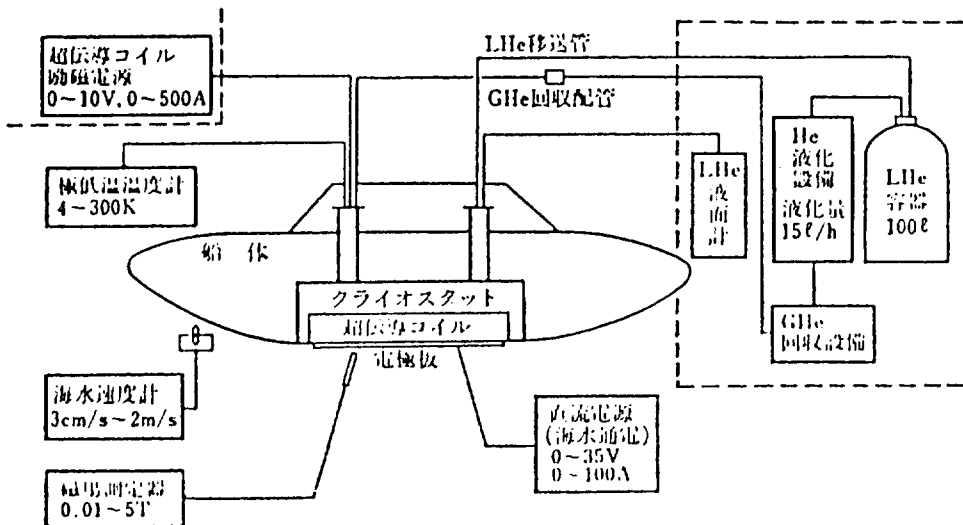


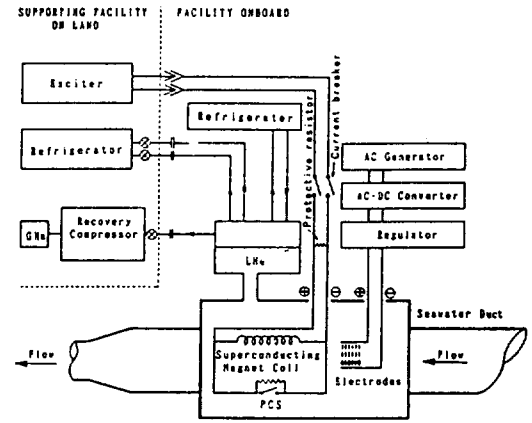
그림 4. 모델선 ST-500 전체 구성도

**표 3. 모델선 ST-500의 주요 제원**

모델선		ST-500
재료	선체	목재
	전극	백금 티타늄 합금
외형 크기	700(W)*1000(H)*3600(L)	
중량	700 kg	
추진부 자장 강도	2.0 T (최대)	
해수 전류	65 A (최대)	
추진력	15 N (최대)	
속도	0.6 m/s	
완성	1979.8	
초전도 코일		
초전도 재료	Nb - Ti - Zr - Ta	
코일 형식	Race Track	
크기	bore 직경	1000 / 200 mm
	외경	1200 / 400 mm
	높이	60 mm
축적 에너지	200 KJ	
전류 밀도	$1.4 \times 10^8 \text{ A/m}^2$	
자장 강도	5.1 T (최대)	
냉각	액체 헬륨	
중량	코일	220 kg
	도체	90 kg

**표 5. YAMATO-1 실험선의 주요특성**

구분	특성
길이	30 m
폭	10.39 m
깊이	3.69 m
톤수	185 톤
속도	8 노트
선체 재질	알루미늄
탑승 인원	10명(승조원 3명 포함)



**그림 5. YAMATO-1의 전체 구성도**

와 교류자장과의 상호작용으로써 추진력을 얻는 방식이기 때문에 직접 통전할 필요가 없는 잇점이 있다. 해석 결과 교류자장 방식에서도 직류자장 방식과 동일하게 10~20 테스라 정도의 강자장을 사용하지 않으면 실용적인 추진 효율이 얻어지기 어렵

다는 것을 지적하고 있다.

**3.2.4 유인 실험선 YAMATO-1 개발**

1985년에 일본 조선 진흥재단에서 초전도 전자 추진선 개발 위원회가 설치되었다. 이 위원회의는

**표 4. 단계별 개발된 초전도 코일 및 추력 발생기**

구분	소형 추력발생기	중형 추력발생기	시제 초전도 코일		실제 초전도 코일
			I 형	II 형	
년도	1986	1987	1988	1988	1989-1990
코일길이	300 mm	1500 mm	720 mm	720 mm	3500 mm
bore 직경	100 mm	210 mm	360 mm	360 mm	360 mm
전류	171 A	4800 A	4200 A	3847 A	3500 A
자속밀도	1.3 T	2.0 T	3.5 T	3.5 T	4 T
로렌츠힘	10 N	400 N	-	-	8000 N
도체	NbTi / Cu	NbTi / Cu	NbTi / Cu	NbTi / Cu	NbTi / Cu

초전도 코일을 이용한 MHD 추진선을 직접 설계, 제작하여 실증 주행시험을 행하는 것이었다. YAMATO-1의 전자추진 방식은 내부자장 방식을 채택하였고 특히 자기 차폐구조의 경량화를 목적으로 6조로 된 안장형 초전도 코일이 원주상에 배치되고 있다. 자장의 세기는 중심부에서 4 테스라 정도이다. YAMATO-1은 1991년도에 총 톤수 280톤, 길이 30m, 추진력 800kg.f, 속도 8노트의 성능을 가지는 실험선이 완성되었다. 실험선에 사용될 초전도 코일 개발을 위해 단계적으로 표 4와 같이 설계, 제작하여 왔다. 표 5는 실험선에 대한 주요 특성을 나타내주고 있다. 그림 5는 본 실험선의 전체 구성도를 나타내주고 있다.

#### 4. 맺음 말

상은 초전도 물질의 발달과 더불어 초전도체의 응용분야 중의 하나인 MHD 추진선은 초전도체의 실용화가 이루어지면 추진기 없는 새로운 추진장치로써 큰 기대를 모으고 있다. 그러나 지금 현재까지 나타난 문제점들인 10~20 테스라급 정도의 고자장 강도를 가진 초전도 코일의 제작, 선체 중량의 5% 이하로 줄일 수 있는 초전도 코일 시스템의 경량화, 강자장 발생에 따른 구조물의 지지문제, 누설자장을 최소화시킬 수 있도록 하는 자기 차폐문제, 전극 문제들이 차례차례 해결된다면 꿈의 MHD 추진선은 반드시 실현될 것으로 생각됩니다.

#### 참 고 문 헌

[1] Akira Iwata, "Superconducting Electromagnetic Propulsion System", Bulletin of

the M.E.S.J. Vol. 18, No.1, March 1990.

- [2] 岩田章, 佐治吉郎: 超傳導による電磁推進の科學, 朝倉書店, 1991.
- [3] 공영경, 박용 MHD 추진에 관한 연구, NSR-D-413-91602, 1992, 국방과학연구소
- [4] MHDS 91 proceedings, International Symposium 28-31 Oct., 1991 Kobe, Japan.



**최태인(崔泰仁)**

1950년 5월 29일생. 1974년 서울대 공대 응용물리학과 졸업. 1980년 University of Florida 전기공학과 졸업(석사). 1984년 University of Florida 전기공학과 졸업(공학). 현재 국방과학연구소 책임연구원, 기술연구본부 제5부장



**공영경(孔泳卿)**

1956년 5월 1일생. 1979년 홍익대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 한국해양대 박사과정 수료. 현재 국방과학연구소 선임연구원