

잠수함용 소나성능예측시스템 SAIMS 1.0 개발

나영남 김영규 김성일 조창봉 김형수 이용곤 이성호

국방과학연구소

Development of Submarine Acoustic Information Management System 1.0

Young-Nam Na, Young-Gyu Kim, Seong-Il Kim, Chang-Bong Cho, Hyung-Soo Kim

Young-Kon Lee, Seong-Hoo Lee

Agency for Defense Development, ynna@add.re.kr

요약

국과연은 현재 해군에서 운용중인 잠수함의 주요 장비와 연동하고 소나의 탐지성능예측이 가능한 시스템 SAIMS 1.0을 개발하였다. 본 시스템의 설계 개념은 다음과 같다. 1) 저주파~고주파 영역 음장계산을 위한 음향모델을 실용화하여 탑재한다. 2) 함 탑재장비와 ENC 기반 전술정보처리용 해도를 연동하여 생산된 음탐정보의 적용성을 최대화한다. 3) 광해역에 대한 정밀 DB를 구축하여 운용한다. 4) CTD 정보로부터 수직속구조를 추정하는 알고리즘을 개발/탑재한다. 개발된 시스템은 '03.10-'04.2 기간 실시된 시험평가를 통해 적용성을 검증하였다.

1. 서론

대형 잠수함이 아닌 대개의 잠수함에는 선제고정형 소나와 제한된 기능의 음탐환경분석시스템이 운용되고 있다. 그러나 미래의 대형 잠수함에서는 예인음탐기체계와 같은 고성능의 수동소나체계도 탑재/운용될 것이 예상되므로 이에 대비하기 위해서라도 보다 체계적이고 종합적인 음탐환경분석시스템이 필요하다. 현재 해군에서 운용중인 AESS[1]나 FAIMS [2,3] 시스템은 1kHz 이하 주파수 대역에서는 매우 제한적이어서 잠수함 작전에 필수적인 전술정보(표적탐지확률, 자함피탐지확률, 귀적잠함심도 등)를 제공하기가 어렵다.

따라서 국과연에서는 2년여의 연구를 통해 잠수함의 주요 장비와 연동하여 실시간으로 소나성능예측이 가능한 시스템인 SAIMS(Submarine Acoustic Information Management System) 1.0을 개발하였다. 이 시스템은 서로 유기적으로 연동되는 6개의 모듈로 구성되도록 설계하였으며, 3회의 시험평가를 통해 그 적용성을 검증하였

다. 본 논문에서는 시스템의 설계 개념 및 H/W, S/W적인 구성, 그리고 시험평가 결과를 기술하기로 한다.

2. 시스템 개요

2.1 시스템 설계 개념

시스템 설계 개념은 다음과 같다.

(가) 저주파~고주파 영역 음장 계산을 위한 음향모델을 검토하여 탑재한다. 특히 능동소나인 경우 20km 수동 소나인 경우 50km까지의 음장을 계산하도록 하여 시스템의 효율성을 제고한다.

(나) 함 탑재장비인 CTD(Conductivity, Temperature and Depth), INS(Inertial Navigation System), GPS(Global Positioning System) 및 소나로부터의 표적위치 정보를 실시간으로 연동하여 생산된 음탐정보의 적용성을 최대화한다.

(다) 광해역에 대한 정밀 해양 DB(수심, 수온, 용속, 지층, 조류 등)를 구축하여 운용한다.

(라) ENC(Electronic Navigation Chart) 기반 전술환경정보처리용 해도를 도입하여 생산된 정보의 효율성을 제고한다.

(마) CTD 정보로부터 전체 음속 수직구조를 추정하는 알고리즘을 개발하여 탑재한다.

(바) 수상함용 시스템인 FAIMS(Fleet Acoustic Information Management System) 2.0[2]과 주요 정보가 호환 가능토록 한다.

2.2 시스템 구성

본 시스템의 H/W적인 구성은 크게 5부분으로 나뉘어

계 있다. 함 탑재장비인 INS(GPS), CTD, 소나정보를 연동하기 위하여 별도의 연동기를 개발하였다. 각 구성 요소별로 간단히 기술하면 다음과 같다.

(가) ENC 기반의 해도 : 국제 수로기구(IHO) 지정 표준 전자해도 입, 출력 형식인 S-57/S2 형식을 적용한 해도로서 통상적인 항해용 해도의 기능을 축소하여 SAIMS 운용에 필요한 기능만을 선택하여 적용한다.

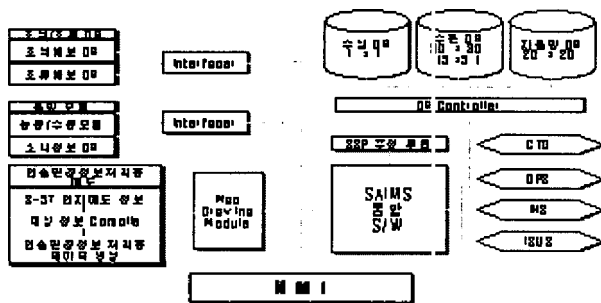
(나) 항해 장비 INS(GPS) : SAIMS의 ENC 기반 해도에 연동되어 잠수함의 위치를 실시간으로 전시할 수 있게 한다.

(다) 해양 장비 CTD : CTD는 잠수함이 부착된 센서로서 심도별 전기전도도(염분)와 수온을 연속적으로 측정하는 장비이다. 이 장비는 SAIMS에 연동되어 음탐환경 분석을 위한 음향모델에 입력정보를 생산할 수 있게 한다.

(라) 음탐 장비 : 사건이 일어날 때마다 표적의 위치 정보를 전송해 주면 SAIMS는 ENC 기반 해도에 이 정보를 전시하며, 이후 각종 전술환경정보 처리에 활용될 수 있도록 한다.

(마) 음향모델/DB : 주요 함 탑재장비와 연동된 정보를 활용하여 음탐환경분석에 필요한 수심-거리별 음장을 계산하고 이에 필요한 입력정보를 생산하는 부분으로서 노트북 PC에 탑재된다.

한편 본 시스템은 실시간으로 관측되는 CTD 정보를 바탕으로 소나성능예측이 가능하도록 HMI(Human-Machine Interface)도 구현하였다. <그림 1>은 SAIMS의 S/W적인 구성을 나타내고 있다.



<그림 1> SAIMS의 S/W 구성.

운용자가 SAIMS 기능면에서 쉽게 구분할 수 있는 모듈은 다음과 같이 6개로 구성되어 있다.

(가) 실시간정보 : 실시간정보 모듈 : ENC 기반 해도를 바탕으로 S-57의 주요 정보를 전시하고 해도의 기본적인

동과 및 운용자 정의 작업을 할 수 있다. 또한 탑재장비로부터의 정보를 연동하여 저장하고 이를 해도에 전시함으로써 수중 항해를 위한 기본 정보를 제공한다. 미리 설정된 소나정보를 바탕으로 360° 전방위 탐지환경을 계산하여 전시하는 기능도 수행한다.

(나) 환경정보처리 모듈 : ENC 기반 해도를 바탕으로 S-57의 주요 정보를 전시하고 해도의 기본적인 동과 및 운용자가 정의한 작업을 할 수 있다. 또한 음향모델의 입력정보인 수층 수온/염분구조, 수심 및 지음향 정보 등을 준비할 수 있게 한다.

(다) 소나성능예측 모듈 : 환경정보처리 모듈과 소나 정보관리 모듈에서 준비한 입력정보를 바탕으로 능동, 수동소나의 수심-거리별 음선경로, (피)탐지확률, (피) 탐지거리, 신호초과 등을 계산하여 전시한다.

(라) 소나정보관리 모듈 : 획득 가능한 능동, 수동소나의 성능범수를 관리하고 음향모델을 위한 입력정보를 추출한다. 대상 소나로는 HMS, 디핑소나, 능동 소노부이 등의 능동형 소나와 TASS, PPS, 소노부이 등의 수동형 소나를 망라한다.

(마) 전술정보분석 모듈 : 수상함과 잠수함의 항적 및 소나 접촉정보를 바탕으로 기동 항적 분석과 소나의 탐지/미탐지 판정 기능을 수행한다. 또한 3차원 정밀 수심정보를 바탕으로 자함과 표적의 기동을 분석함으로써 작전의 효율성 중대를 기대할 수 있다. 운용자의 필요에 따라 작전구역 설정 및 작전 상황을 ENC 기반 해도에 편집할 수도 있다.

(바) 조석조류예보 모듈 : 한국 근해역에 대한 조석 및 조류 예보결과를 DB화하여 현장에서의 작전뿐 아니라 사전 작전계획 수립에도 활용할 수 있다.

3. 시스템 탑재 DB 및 알고리즘

3.1 Data Base

소나성능예측을 위한 DB로는 수심, 수층의 음속, 그리고 퇴적층의 지음향 자료(음속/밀도/감쇠계수 등) 등이 필요하다. 본 시스템에서는 10-60°N, 110-170°E 해역에 대한 자료를 DB화하여 소나성능예측에 활용토록 하였다. 아래 표는 구축된 DB 현황으로서 총 1.58GB에 이르는 대용량이다.

특히 구축된 DB중 KODE는 국과연에서 새로 개발한 것으로서 한국 연안에서 관측한 수심별 수온/염분 자료로부터 5'x5' 격자 간격의 월평균 수온/염분/음속 자료

를 생산하였다. 이를 위해 EOF(Empirical Orthogonal Function) 분석 기법을 도입하였다. 분석 절차를 좀더 자세히 기술하면, 1) 관측 정보로부터 1966년 1월 1일을 1일로 정하고 Julian Day로 관측일을 표시, 2) Akima Spline 내삽법을 이용하여 각 정점 및 수심에서 30일 간격의 시계열 자료로 재구성, 3) EOF 분석을 통해 각 모드와 고유함수 및 시간계수(Principal Component) 시계열 자료를 획득, 4) 내삽법을 이용하여 시간계수 시계열 자료를 매일 15일 기준 월별 시간계수로 재구성, 5) 각 정점에서 존재하는 각 모드 고유벡터를 직관적 분석법에 의해 5'x5' 수평 격자 간격으로 재구성, 6) 각 모드와 고유벡터와 시간계수를 이용하여 1966.1-2001.12 기간 월별 자료 재구성, 7) 합성된 월별 자료를 평균하여 월평균 자료를 획득한다.

DB명	사	양	용량 (MB)	출처
RAVO	80~87년 관측	10x101 격자 간격 수심별 수심/염분/염속	300	해양과학기술원
XBT	1920~1998년 관측	수심별 수온	4	한국 해양
KOBC	1944~2000년 관측	수심별 수온/염분	2	국립수산과학원
JOFC	1940~1998년 관측	수심별 수온	442	일본 해양자료센터
HOBC	1908~1998년 관측	수심별 수온/염분/염속	342	미국 해양자료센터
HOBS	1928~1998년 관측	수심별 수온/염분	80	한국 해양
HOBE	1986~2001년 관측	수심별 수온/염분/염속	30	국립수산연구소
정준수심 자료	1'x1' 격자 간격 수심	1966.1~2001.12 기간 월별 자료	70	영남대학교 한국해양연구소
합계			1,952	

<표 1> SAMS 탑재 Data Base 현황.

3.2 전제 음속구조 추정 알고리즘

잠수함의 탐지 혹은 피탐지환경 분석을 위해서는 표층-해저면 사이 음속구조가 필요하다. 수상함의 경우 현장에서 XBT 등을 이용하여 음속구조를 파악할 수 있으나 잠수함의 경우에는 함재에 부착된 CTD 센서를 통해 제한된 정보만을 획득할 수 있다. 그러므로 이런 제한된 CTD 정보를 활용하여 전제 수심에 대한 음속구조를 추정할 수 있는 알고리즘이 필요하다.

EOF 분석을 통해 한국 근해의 공간구조 변화를 나타내는 100개 모드의 공간벡터를 분리하였다. 각 모드와 고유벡터를 정량화하기 위해 직관적 자료 분석법의 일종인 최적화 내삽법(Optimal Interpolation)을 이용하였다. 수평적으로는 3241개 정점, 수직적으로는 표준수심 14개 층에 대하여 각 모드를 DB화하였다.

월평균 변화를 제거하여 재구성된 자료는 EOF 분석 후 SVD(Singular Value Decomposition)를 수행할 때

오차를 최소화하기 위해서 마련되었다. SVD를 이용한 수온의 수직 조 추정을 위해서는 잠수함의 항적과 CTD 자료를 이용하여 잠수함의 항적에 일치하는 고유벡터로 이루어진 행렬과 수온 행렬을 행렬식으로 계산하여 시간계수를 결정한다.

SVD로 계산된 시간계수와 잠수함 항적의 지정된 위치로부터 추출된 고유벡터를 누적합 결과에 월 평균 수온자료를 더하여 전체 수심에 대한 수온 구조를 추정한다.

$$T_F = T_M + \sum_{i=1}^N A_F \times X_i \quad (1)$$

여기에서 T_F 는 추정된 수온의 수직 구조, T_M 는 지정된 위치에서의 월평균 수온, A_F 는 지정된 위치에서의 고유벡터, X_i 는 SVD로 계산된 각 고유벡터의 시간계수이다. 추정된 수온 자료와 지정된 위치에서의 월평균 열분과 이용하여 음속을 계산한다.

EOF 분석과 SVD를 이용하여 추정된 전제 음속구조의 신뢰도를 통계적으로 산출하기가 매우 어려우므로, 본 연구에서는 EOF와 SVD의 고유치를 변동량의 에너지로 하여 전체 평균자료로부터 변형된 정도를 백분율로 나타내었다.

$$C = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^M E_S}{\sum_{i=1}^M E_M} \right) + \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{M+2} E_M}{\sum_{i=1}^M E_M} - \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^M E_S}{\sum_{i=1}^M E_M} \right) \right\} \times \frac{\sum_{i=1}^M S_i}{\sum_{i=1}^M S_i} \quad (2)$$

위 식에서 우변의 첫째 항은 전제 변동량 중 계절변화에 대한 변동량 비를 나타내고 있다. 입력되는 CTD 정보에 따라서 설명 가능한 변동량이 제한을 받는데, 전제 고유치의 합과 입력자료의 수에 계절변화를 반영하는 2개 모드를 더한 고유치의 합의 비로 나타낸다. 전체 설명 가능한 변동량 중 계절 변동량을 제한 부분에 대해서 singular values 비를 계산하여 음속구조 추정 시 평균치로부터 벗어난 설명 가능한 변동량 비를 나타낸다.

3.3 거리중속 음향모델 BELLHOP

전해일 경우 경계면(해표면, 해저면)의 상태, 해저지형과 퇴적물을 구성하는 물질의 특성에 따라 다양한 환경이 형성된다. 동해안과 같이 복잡한 환경에서의 소나 성능예측을 위해서는 거리독립적 환경에서 적용되는 음향 모델만으로는 어려움이 따르고 거리중속 환경에서 적용 가능한 모델이 필요하다. 특히 저주파 대역 소나의 탐지

성능 예측을 위해서는 정확하면서도 신속하게 음장계산이 가능한 음향모델이 요구된다.

본 연구에서는 SACLANTCEN[5]에서 개발한 BELLHOP 음향모델을 고려하였다. 이 모델은 GBT(Gaussian Beam Tracing) 방법을 이용하여 기존 음선이론 모델의 문제점이었던 인위적 영향을 제거한 것으로 알려져 있다. 원래 거리독립 모델로 개발되었으나 수정, 보완을 거쳐 거리종속 모델로 발전되었다.[6]

한편 BELLHOP 음향모델 수행을 위한 최적화된 주요 입력변수는 다음과 같다.

- 음선 계산 범위 : 수평 기준 최대 +/- 70.0°
- 음선의 수 : 최대 260 (가변)
- 음선의 간격 : 0.2°

음선의 수는 주파수에 따라 가변적인데, 다음과 같은 식에 의해서 개수가 결정된다.

$$N_{horiz} = \alpha + |\alpha - \beta| \quad (3)$$

여기에서 α 는 방사되는 음선의 각도(in rad),

$A = (c/(6fr))^{1/2} \approx (250/(fr))^{1/2}$, c 는, f 주파수, r 거리(m)이다. 위와 같이 입력변수를 최적화한 결과 수행시간도 작전 현장에서 충분히 용인할만한 수준으로 단축시켰다. 수심 3000m, 거리 50km, 주파수 1kHz를 기준으로 할 때 기존 입력변수로는 80초 이상 소요되던 수행시간이 17초 이하로 단축되었다.[4]

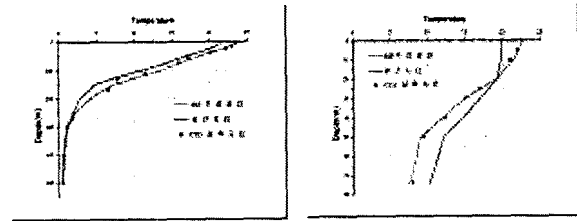
방향성 소나 성능예측은 360° 전방위에 걸쳐서 특정 수심에 대한 전달손실, 탐지확률, 그리고 신호초과 등의 정보를 제공하는데 그 목적이 있다. 이 정보를 이용하여 잠수함의 지휘관은 표적탐지 확률을 극대화하고, 적 소나에 대해서는 피탐지 확률은 극소화되도록 작전계획을 수립할 수 있다. 본 시스템에서는 BELLHOP 음향모델을 10° 간격으로 반복적으로 수행하여(N:2D) 360° 방위에 대한 성능예측 정보를 얻도록 하였다.

4. 해상시험 결과

개발된 시스템에 대한 적용성 검증을 위해 수심 1000m 이상 심해에서 해상시험을 실시하였다. 시험에는 수상함과 잠수함이 동원되었으며, 수상함은 반경 3-45 km 범위 내에서 정해진 루트를 따라 저속기동/중속소나 작동 모드와 고속기동 모드를 수행하고 잠수함은 수심 30-200m 사이를 왕래하면서 수상함 능동소나와 방사 소음을 수신하였다. 시험 항목은 크게 추정 음속구조와

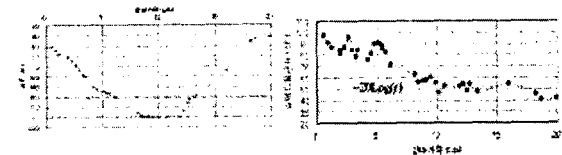
탐지결과와의 정확도 평가였다.

전체 음속구조를 추정된 결과와 실제 CTD 장비를 두 하하여 얻은 결과를 비교하면(그림 3) 추정된 결과가 평균치보다도 측정치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.



<그림 2> 음속구조 추정결과 비교. 좌:동해, 우:서해.

한편 수상함 능동소나 신호를 수신하여 분석한 결과(그림 4)는 수심에 따라 음장 변화가 두드러지게 나타나고 있으며, 이는 표적의 탐지나 표적으로부터의 회피를 위한 최적심도의 존재를 강력하게 시사하고 있다.



<그림 3> 잠수함 심도변화(좌) 및 스펙트럼변화(우).

그리고 시험 해역에서 10회 예측한 능동소나음 탐지 거리는 17.6-19km로서 실제 탐지결과인 20.3km에 근접하였다.

참고문헌

- [1] ROK Allied Environmental Support System (AESS) Ver. 1, NUWC Rep., March 1993.
- [2] 심태보 외, FAIMS Ver. 1.0 User's Manual, 국과연 보고서 NSWD-817-950306, 1995.5.
- [3] 나영남 외, 수상함용 능동소나 음탐환경분석체계 (FAIMS 2.0) 개발, 국과연 보고서 NSDC-517- 011297, 2001.12.
- [4] 나영남 외, 잠수함용 수동소나 음탐환경분석체계 (SAIMS 1.0) 개발(최종보고서), 국과연 보고서 NSDC-517-081109, 2003.11.
- [5] <http://www.saclantic.nato.int>, <http://aalib.saic.com>
- [6] Michael B. Porter and Homer P. Buckner, "Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields, J. Acoust. Soc. Am., 82(4):1349- 1359, 1987.