

차기호위함 전투체계용 함포 사격제원계산장치 개발

Development of Gun Fire Control System for the FFX-I Program

서 태 일* 김 의 진*
Tae-Il Suh Eui-Jin Kim

ABSTRACT

A new gun fire control system has been developed for the Korean next generation frigate class. The engineering requirement was far more tightened than the PKG-A class for the firing range availability and gun control function since 5 inch gun is adopted for the new ship. We mention about the principal technologies required to build a generic gun fire control system and proposed methods for the new gun fire control system. The new system has been designed based on the proposed methods in order to satisfy the requirement and functionality has been proved to be acceptable through the sea trial by Korean navy.

Keywords : Gun Fire Control System(함포 사격제원계산장치), Command and Fire Control System(전투체계), Tracking Filter(추적 필터), Ballistic Calculation(탄도 계산), Naval Gun(함포)

1. 서론

현대 해상전에 있어 과학기술의 발달과 함께 새로운 공격 및 방어 개념이 지속적으로 도출되고 있으며, 축소되었던 함포의 필요성은 21세기를 거치며 새롭게 조명 받고 있다. 함포의 크기에 대한 경쟁 시기였던 2차 대전을 기점으로 함포의 전성시대는 유도무기의 발달과 함께 내리막길을 걸어왔으나, 21세기를 거치며 발달된 IT 기술에 힘입어 저비용 고효율로 무장된 함포의 중요성이 대두되었다. 역사적으로 전쟁에 대한 개념에 혁명을 가져오게 된 총포(함포)의 중요성은 해군의 기본 화력으로써 다시 강조하여도 부족함이 없

며, 특히 제 3국에서의 해상테러를 위시하여 남북한 대치 상황 하에서의 국지전 발발 가능성을 고려할 때 유도무기가 아닌 함포를 이용한 교전 개념 개발이 새롭게 대두되고 있다.

이러한 현 상황을 고려할 때 선전국 의존적이었던 사격제원계산장치 설계기술을 국내 독자개발하고 국제 및 국내 환경 변화에 민감하게 대처할 수 있는 기능 개발 및 성능 향상이 필요하다. 한국 해군은 21세기 해군전력 증강을 위해 함정 전투체계 도입 사업으로부터 국내개발 전투체계 개발 사업으로의 전환을 꾀하였으며, 국방과학연구소 주관의 연구개발을 토대로 독도함, 윤영하함, 차기호위함 등의 전투체계가 성공적으로 국내개발 되었다. 전투체계는 추적 센서와 무장을 사용하여 효과적인 교전을 가능하도록 하는 함정의 두뇌와 같은 역할을 수행하며, 사격제원계산장치는 전투체계의 일부로써 함정의 기본화력인 함포를

† 2013년 7월 5일 접수~2013년 10월 18일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 서태일(ungah@add.re.kr)

통제하는 것으로 사격통제장치라고도 부른다.

현재 한국 해군이 도입하여 운용하고 있는 주요 함포에는 5인치, 76mm, 40mm, 30mm 함포 등이 있으며, 그 외 구경이 작은 함포는 근접방어무기체계의 일환으로 이용되고 있다. 국내에서 개발된 주요 함포로는 위아에서 개발한 76mm 함포와 국과연 주도로 개발되어 두산DST에서 생산하고 있는 40mm 노봉 함포가 있으며 현재 운영하함급 함정에 탑재되어 운용중이다. 전투체계의 경우 해상 전력 증강 사업의 일환으로 1980년대를 전후하여 WM-28, WSA-423과 같은 전투체계가 도입되거나 기술도입생산 되었으며, 국내개발 전투체계는 독도함 및 운영하급 전투체계를 시발로 최근에 차기호위함 전투체계 개발로 이어져 본격적인 국내 독자기술 성숙기에 접어들기 시작하였다. 국내 개발 함포 사격제원계산장치에는 대함 사격이 가능한 40mm 및 30mm 함포용 WCS-86, 대함/대공 사격이 가능한 76mm 및 40mm 함포용 운영하급 전투체계 사격제원계산장치 및 대함/대공/대지 사격이 가능한 5인치 함포용 차기호위함 전투체계 사격제원계산장치가 있다. 운영하급 전투체계 사격제원계산장치는 국내 최초로 개발된 대함/대공 사격이 가능한 사격통제장치이며, 차기호위함 전투체계 사격제원계산장치는 대함/대공/대지 사격이 가능한 선진국 수준 동등 이상의 중구경 함포 사격통제장치이다. 본 논문에서는 차기호위함 전투체계에 탑재된 5인치 함포 사격제원계산장치 설계 기술에 대해 논하도록 하겠다.

차기호위함 전투체계에는 주포인 5인치 함포가 있으며 주포에 대한 효과적인 사격통제를 위해, 5인치 함포 사격제원 계산장치가 표적을 추적하고 표적의 예상명중점을 예측하여 탄도계산을 통해 함포의 최종 포명령을 산출하고 함포를 제어한다. 사격제원계산장치가 정밀한 사격제원을 계산할 수 있도록 추적레이더, 탐색레이더, 전자광학추적장비, 함자이로, 함속계, GPS, 기온기압계, 습도계, 등과 연동되어 있다. 사격제원계산장치는 추적레이더, 탐색레이더, 전자광학추적장비로부터 표적의 위치를 수신하여 표적의 현재 상태(위치/속도/가속도/기동형태)를 추정하고, 추정된 현재 표적의 상태를 바탕으로 표적의 예상명중점이 산출되며 산출된 예상명중점으로 포탄을 보내기 위한 탄도계산을 수행한다. 수행된 탄도계산 결과는 함자이로로부터 수신된 자함 자세정보를 이용하여 함자세 보상을 통해 안정화된 포명령이 산출되며, 안정화된 포명령은 함포로 전달되어 함포 발사를 통해 표적에 대한 정밀 타격

이 가능해진다.

본론에서는 차기호위함 전투체계의 사격제원계산장치에 대한 일반적인 사항을 기술하고 구성 기술을 소개하겠으며, 기존의 사격제원계산장치 대비 향상된 설계 결과에 대해 논하도록 하겠다.

2. 사격제원계산장치 일반

사격제원계산장치 설계기술은 사격제원계산기술과 함포통제기술로 나눌 수 있으며, 사격제원계산기술은 함포통제를 위한 최종 포명령을 계산하는 것이며 함포통제기술은 함포와의 연동통제문서를 기반으로 함포를 제어하는 것이다.



Fig. 1. Configuration of Gun Fire Control System

Fig. 1은 함포 사격제원계산장치에 대한 구성도이자 기능 흐름도이다. Fig. 1은 사격제원계산기술 관점에서 도식화되어 함포통제기술에 관련된 항목이 드러나지 않는다. 5인치 함포 통제기술은 미해군의 운용개념이 녹아있는 연동통제문서 기반의 자동제어 기술과 한국 해군의 운용개념이 녹아있는 콘솔 운전자화면 기반의 수동제어 기술로 나눌 수 있다. 따라서 함포통제기술은 사격제원계산기술 관점으로 도식화된 Fig. 1에는 가사화되지 않았으나, 각 항목에 포함되어 기저를 구성하고 있다고 볼 수 있다. Fig. 1에서 사격제원계산을 위해 기본적으로 표적을 추적하는 추적센서와 화력을 투사하는 함포가 있으며, 사격제원계산장치는 추적센서와 함포 사이에 존재하여 추적센서로부터 표적의 정보를 수신하여 사격제원을 계산하고 포명령을 산출하여 함포로 전송하게 된다. 추적센서는 표적의 위치정보(거리/방위/고각)를 측정하여 사격통제장치로 전달한다. 전처리 필터는 추적센서가 제공하는 표적정

보를 안정화시켜 추적필터로 전달한다. 추적필터는 표적의 기동상태(위치/속도/가속도)를 추정하고, 예상명중점은 포탄발사 및 탄의 비행시간 이후 탄과 표적이 조우하는 표적의 미래위치를 예측한다. 탄도적분은 예상명중점으로 탄을 보내기 위한 함포의 선회각/고각을 산출하기 위해 외부 환경정보(온도, 습도, 기압, 풍향, 풍속)를 반영하여 탄도계적 및 포명령을 산출한다. 포명령안정화는 산출된 포명령에 자함의 흔들림을 보상하고 안정화 시켜 함포에 최종 포명령을 인가한다. 함포는 인가된 최종 포명령에 종속되어 선회/고각 서보를 제어하여 포명령 대비 함포 종속오차를 최소화시킨다.

3. 사격제원계산장치 설계기술

사격제원계산장치 구성 기술에는 설계기술과 분석기술로 나눌 수 있다. 설계기술은 언급된 바와 같이 사격제원계산기술과 함포통제기술이며, 분석기술은 설계된 사격제원계산장치의 상태와 성능을 분석하고 평가하여 기술적 피드백이 가능하도록 하는 기술이다.

가. 전처리 필터

전처리 필터란 표적 추적 센서가 제공하는 표적의 3차원 또는 2차원 위치정보를 안정화시켜 추적필터를 위한 안정적인 측정치를 재생산하는 것이다. 추적 센서는 사격제원계산장치로 표적의 위치정보로서 측정치와 필터치를 제공하며, 전처리 필터는 측정치를 사용하여 표적정보를 안정화시키고 추적필터로 재생산된 측정치를 전달한다. 추적 센서가 제공하는 필터치는 추적센서 제어를 위한 피드백 정보로 사용을 하여, 설계 비용합수가 사격을 고려하지 않기 때문에 사격용으로는 적합하지 않다^[1,2].

추적필터는 기본적으로 칼만필터 가정에 따르며, 전처리필터는 칼만필터 가정에 부합되는 측정치를 재생산 하여야 한다. 첫째, 표적정보는 확률적이며 해석적인 안정성이 보장되어야하며, 이를 위해 수상함의 능동형 추적 센서가 제공하는 표적정보는 추적필터의 상태변수의 가관측성을 보장하기 때문에 안정적인 표적정보 재생산은 Fig. 2와 같이 스파이크성 또는 불연속적 측정치 제거를 통해 가능하다. Fig. 2는 대표적인 median/mean 필터이며 최근 3개의 측정치를 사용하여 중간값과 평균값을 산출한다. 둘째, 추적센서에

독립적인 추적필터 설계를 위해, 전처리 필터는 추적센서 특성에 특화되어야 한다. [3]에서 전자광학추적장비의 레이저 거리측정기 특성이 고려된 전처리 기법에 제안되었다.

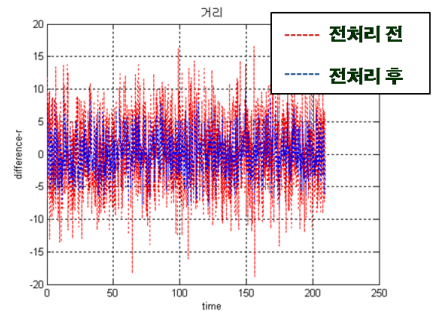
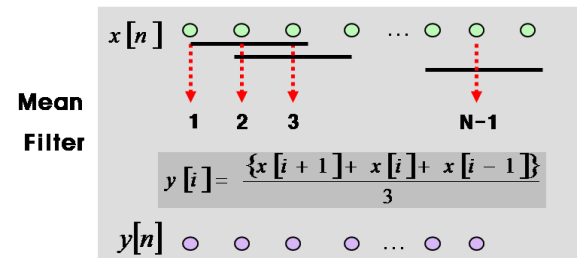
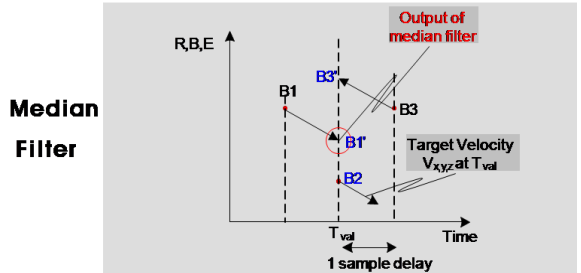


Fig. 2. Overview of Pre-Processing Filter

나. 표적 추적필터

사격제원계산장치는 일반적으로 표적 추적필터로 고정 이득의 알파베타감마 필터나 선택적 단순 칼만 필터가 사용되었으나, 기동하는 자함 및 표적에서의 추적성 향상을 위해 MIMM(Modified Interacting Multiple Model) 추적필터가 개발되었다^[1,4,5]. 선형 저기동, 비선형 중기동 및 비선형 고기동의 세 가지 모델로 구성된 기존의 IMM 추적필터는 기동하는 자함에서의 고기동 표적에 대한 추적성능에 한계가 있으며, 표적 및 자함의 기동에 따른 비선형적 시스템을 고려하여 그 추적성이 향상되었다. 비선형 시스템을 고려하기 위해

서는 확장 칼만 필터가 적용되었으며, 절대 및 상대 좌표계의 조합형 좌표계 개발을 통해 성능이 Fig. 3과 같이 제고되었다. Fig. 3은 포탄 자체의 탄착 분산을 고려한 타원 단축반경 25m/50m/25m/100m에서의 대함 표적에 대한 탄착도이다. 가상공간에서 탄도계산 및 함자세 보상 성능은 추적필터 성능 대비 무시할 만하여 탄착도 자체가 추적필터 성능에 직결되기 때문에 탄착도를 통한 추적필터 성능 향상 결과를 확인할 수 있다. 운영하급 전투체계 사격제원계산장치는 함포 사격통제를 위한 추적필터에 있어 세계 최초로 IMM 추적필터를 적용하였으며, 차기호위함 전투체계 사격제원계산장치를 통해 기동환경에서의 추적성이 향상되었다.

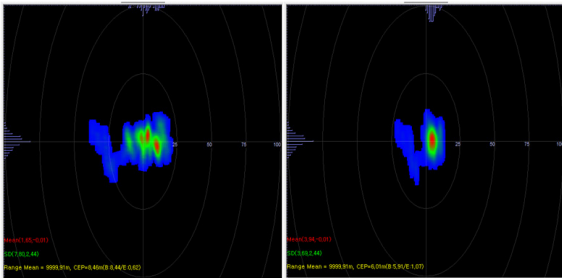


Fig. 3. Improvement of Hitting Probability by Using the Modified IMM Filter

다. 예상 명중점 산출

기존의 일반적 IMM 추적필터의 경우 추정치 산출을 위해 다중 모델을 결합함에 있어 선형적인 방법이 이용되거나 명중률 제고 및 포명령 안정성 확보를 위해 비선형 확률제어 기법이 개발되어 적용되었다. 각 모델의 모드 확률로 대변되는 모델 정확도를 기준으로 선형적으로 조합되는 기존의 IMM 추적필터와는 달리 선형구간 및 비선형구간을 나누어 모델간 조합된 추정치를 사용함으로써 추적성능 및 포명령 안정성을 극대화할 수 있도록 설계되었다⁴⁾. 포명령 안정성 확보는 사격제원계산장치 함포통제기술로 분류가 가능하다.

빈번한 모드 천이에 따른 추정치 불연속성은 불안정한 포명령과 산탄효과를 발생시키는 것뿐만 아니라 함포 서보의 과도한 전류를 발생시켜 고장을 유발한다. 통상 전투체계와 함포간 연동통제문서를 체결함에 있어서, 함포 공급업체는 연동간 과도한 포명령 흔들림을 통해 함포 서보 문제가 발생하는 것을 방지하기 위해, 함포 서보의 주파수 도메인에서의 반응함수를

기반으로 주파수 밴드별 가속명령 노이즈에 대한 한계값을 권고하고 한계값 초과시 함포의 성능을 보장하지 않는다. 개발된 비선형 확률제어 기법을 이용하여 포명령 가속도 노이즈를 Fig. 4와 같이 제거되었다. Fig. 4에서는 1~10Hz 및 1~25Hz 대역에서 한계치를 초과하는 선회(주황색) 및 고각(녹색) 포명령에 대한 가속도 노이즈가[단위 : mrad/sec^2] 한계치의 1/10 수준으로 제어되는 것을 관찰할 수 있다.

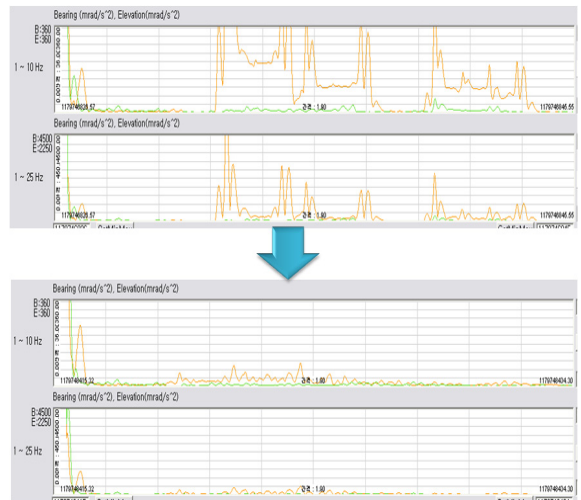


Fig. 4. Gun Acceleration Noise Reduction

라. 탄도 적분

표적을 타격하기 위해서는 탄 비행시간 이후의 예상명중점으로 탄을 보낼 수 있는 포명령을 정확하게 산출하여야 한다. 포명령을 산출하는 방법으로는 사정표 보간기법과 수치해석적기법이 있다. 사정표 보간기법은 일종의 lookup table을 이용하여 interpolation된 포명령을 산출하며, 수치해석적기법은 탄의 운동방정식을 수학적으로 운동방정식을 해석하고 수치적으로 계산하여 포명령을 산출한다. 수치해석적기법을 적용하여 탄도 운동방정식의 수치적 해를 도출함으로써 보다 정확한 포명령 산출이 가능하다^{2,5)}.

포명령 해는 함포의 고각 및 탄의 비과시간으로 구성된다. 정확한 포명령은 탄의 초기 위치 및 포구초속으로 비행시간 이후에 탄이 예상명중점에 위치하게 한다. 일반적으로 단힌해가 존재하지 않기 때문에 shooting 기법을 이용하여 포명령을 초기화하고 비행시간 이후의 탄과 예상명중점 사이에는 탄착오차가 발생하며, 그 탄착오차를 보상하기 위해 오차기울기백

터를 추출하고 오차만큼의 크기를 오차기울기방향으로 보상하는 알고리즘을 개발하였다^[2,6]. 오차기울기벡터를 계산하는 기존 방법으로는 항력을 고려하지 않는 진공근사법이 있으며, 탄착오차가 발생하는 좁은 공간에서의 탄 궤적을 진공환경으로 근사하여 오차기울기벡터를 단한해 형태로 추출하기 때문에 항력을 무시함으로써 발생하는 오차가 항상 존재하게 된다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 항력이 고려된 수치해석적 기법으로 오차기울기벡터를 계산하는 알고리즘을 개발하였다. 가상공간에서 적절한 고각 차이를 둔 두 개의 포명령을 이용하여 탄 궤적을 계산하고, 수치적 difference를 통해 오차방향 기울기벡터를 산출한다. 오차기울기벡터와 사거리 방향(ΔR_S) 및 고각 방향($R_T \Delta \theta$)의 탄착오차를 이용하여 고각 및 비파 시간 수정이 이루어지고, 수정값이 합산되어 최종 포명령이 산출된다.

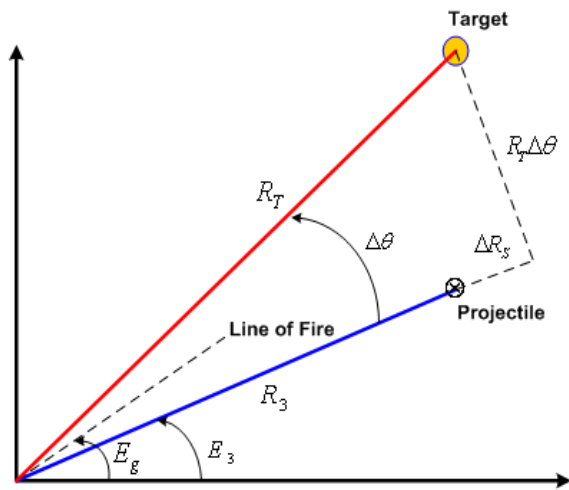


Fig. 5. Gun Order Correction Diagram

마. 포명령 안정화

함포 사격제원계산장치는 포를 제어하기 위한 고각 및 선회각에 대한 포명령을 산출하고 함포에 제어명령을 전달하며, 포는 그 포명령에 종속하게 된다. 포 구동서보의 특성상 급격하게 변화하는 포명령이 사격제원계산장치로부터 인가되는 경우 종속오차가 발생되며 포의 서보는 오차감소를 위한 보상회로를 동작시키고, 과도한 오차에 의한 과전류를 서보가 견디지 못하는 경우 성능저하로 이어진다. 일반적으로 포는 주파수별 포명령 가속 노이즈의 한계치를 규정하여

포명령이 안정적으로 사격제원계산장치로부터 포명령이 인가될 수 있도록 요구하게 되며, 사격통제장치는 포가 요구하는 한계치 이하의 포명령이 포로 인가될 수 있도록 설계되어야 한다. 따라서 설계 목표치를 한계값의 1/5배 이상으로 설정하였으며, 이에 따라 포명령 가속 노이즈를 획기적으로 줄여야하는 필요성이 제기되었다.

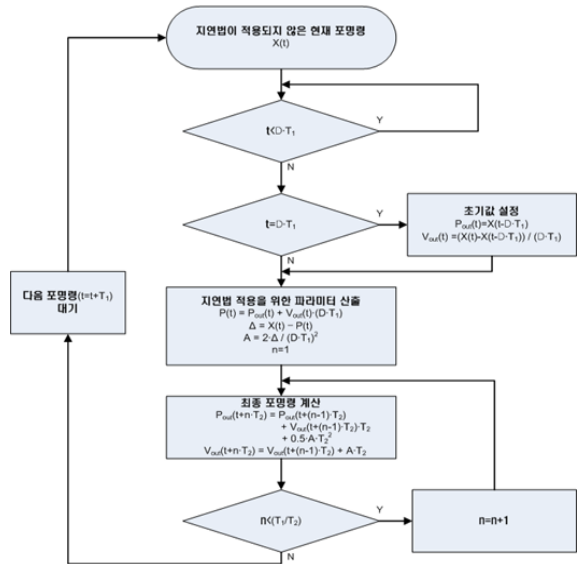


Fig. 6. Two Step Prediction Algorithm for Gun Acceleration Noise Reduction

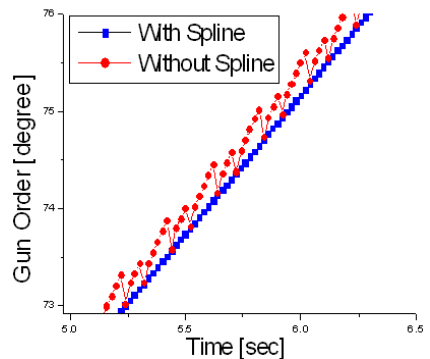


Fig. 7. Results of Two Step Prediction Algorithm

매 주기별로 산출되는 포명령을 두 단계 예측하고 현재 포명령, 한 단계 이후 포명령과 두 단계 이후 포명령을 기반으로 Spline 기법을 사용하여 시간에 대한 포명령값의 1차 미분이 연속이 될 수 있도록 Fig. 6과

같이 설계하여, 급격한 포명령 변경을 방지할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 본 알고리즘은 포의 요구사항 한계치에 따라 예측 주기수를 이용하여 적절한 여유도를 산정하고 포명령 가속 노이즈를 제어할 수 있으며 개발된 알고리즘이 적용된 포명령 안정화 결과는 Fig. 7과 같다⁷⁾.

포명령 가속 노이즈를 발생시키는 주된 원인은 추적 센서의 표적정보 제공 주기, 표적/자함의 흔들림 및 사격제원계산장치 주기때문이다. 자함을 제외한 모든 흔들림 정보는 탄 비파시간 만큼 증폭되어 포명령화 되기 때문에 전체 시스템 차원으로 분석하고 대책이 수립되어야 한다. 일반적으로 함포 서보는 1-25Hz 대역에 대한 한계치를 가지고 있으며 10Hz 대역의 노이즈에 매우 민감한 특성을 가진다. 추적센서의 표적정보 제공 주기는 일반적으로 10~20Hz 대역에 있으며 함포 서보의 반응 주파수 내에 존재하기 때문에 설계시 각별한 주의가 요구된다. 적절한 시간지연을 이용하여 포명령의 1차 미분이 연속이 되도록 설계함으로써 추적센서에 의한 포명령 떨림을 제거하였다. 표적의 흔들림은 표적과 배경 사이에 간섭이 존재하거나 고속으로 기동하는 표적 자체에 의한 glint 효과에 의해 발생되며 개발된 알고리즘에 의해 제어가 가능하다. 중형급 함정 이상에 대한 자함의 흔들림은 비교적 직류성에 가까운 저주파 특성을 가지며 함포 서보 반응 함수 내에 존재하여 문제가 되지 않는다. 사격제원계산장치의 주기는 함포 서보 반응 함수 주파수 외에 존재하도록 설계되었으며 내에 존재하더라도 제안된 알고리즘에 의해 극복이 가능하다.

언급된 원인들 이외에 추가적으로 예견되는 원인은 사전에 식별하고 대책마련이 필요하다. 예를 들어 소형 고속정급 이하 함정에서는 저주파가 아닌 함포 서보 특성 밴드 이내에 자함 흔들림 주파수가 존재할 수 있기 때문에 추가적인 특성 분석이 필요하다. 이와 같은 포명령 가속 노이즈에 대한 주파수 대역 변경이나 고차 미분 연속에 대한 요구가 있는 경우에서도 개발된 알고리즘의 적용이 가능하다.

4. 사격제원계산장치 분석 기술

사격제원계산장치 분석기술은 설계된 사격제원계산장치의 기능별 상태를 점검하고 성능 분석 및 평가하여 안정적 사격통제 및 사격 명중률 제고를 위해 기술

적 피드백이 가능하도록 하는 기술이다. 분석 기술 확보를 위해 시뮬레이션 기반 분석 환경이 구축되었으며, 나아가 기능별 분석기 개발을 통해 개발 단계에서의 분석 및 해상시험 단계에서의 분석이 가능하였다.

가. 시뮬레이션 기반 분석 환경 구축

함포는 전투함정의 가장 기본적인 화력을 제공하며, 폭발력이 있는 탄 및 장약을 이용하는 장비이므로 이를 제어하는 사격제원계산장치에는 높은 정확도뿐만 아니라 고도의 안정성이 요구된다. 정확도 및 안정성을 확보하기 위해서는 수많은 반복 실험 및 다양한 환경에서의 실사격 실험이 필요하나, 실사격 실험에는 경제적 시간적 및 현실적 제약이 따르기 때문에 시뮬레이션을 통한 실험 환경이 구축되었다⁸⁾. M&S에서 흔히 이용되는 간략화된 모델 기반 시뮬레이션은 실제 장비와의 차이점이 존재할 수 있으며, 사격제원계산장치를 위한 시뮬레이션은 실제 장비와의 동일성이 필요하기 때문에 일반 PC상에 실장비와 동일하게 수행되는 Emulation 환경을 구성하고 반복적인 Simulation을 통하여 개발 시스템의 검증 및 최적화를 수행하였다. Simulation 기반 분석 환경을 구축하여 운용함으로써 해상 시험평가 비용 절감, 기간 단축 및 교전 성능 극대화가 가능하였다.

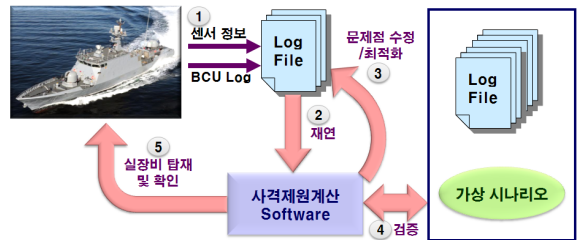


Fig. 8. Debugging Procedure for Sea Trial

해상 환경의 Simulation 과정은 Fig. 8과 같이 이루어진다. 해상에서 전투체계 운용시 가용한 모든 정보를 Logging하여 저장하고, Simulation상에서 이를 재연하여 사격 결과를 예측/분석한다. 분석을 통해 문제점이 식별되거나 각종 알고리즘이 수정 및 개선된 경우에는 Simulation 환경에서 Software를 수정 및 확인한다. 단, 당일 획득된 Logging으로만 사격제원계산장치의 안정성 확보에 한계가 있기 때문에 다수의 가상 시나리오 및 다양한 실제 Logging 정보를 통해 최종 검증을 수행한다. 수정된 Simulation상의 사격제원계산

Software는 Real Time OS를 사용하는 실장비와 Code level에서 완전히 동일하기 때문에 기본적인 추가 확인을 거쳐 함정 탑재가 가능하다.

이러한 실제 정보를 이용한 사후 Simulation 과정을 통해, 실사격 없이도 사격 결과를 예측하여 분석하고 문제점에 대한 수정 및 최적화는 물론 검증까지 수행 가능하다. 실사격 이전에 모든 위험요소를 제거하고 최적화 과정을 통해 정확도를 향상시켜, 모든 실사격 평가에서 선진국 도입 유사 사격제원계산장치(KDX)의 사격평가 기준을 상회하는 성능을 입증하였다.

나. 사격성능 분석도구

사격제원계산장치 개발에 있어서 시험결과의 가시적 분도구 개발이 필수적이다. 추적필터나 탄도계산 알고리즘 등은 개발초기단계에서 Matlab이나 Excel 등의 일반적인 가시화 도구를 이용하여 단위 항목에 국한된 결과 확인으로 충분하다. 그러나 사격제원계산장치는 각 구성 알고리즘들이 통합된 하나의 체계로, 개별 성능뿐만 아니라 통합 성능에 대한 가시화 분석도구가 필요하다. 다음과 같은 분석도구를 개발하여 각 알고리즘의 성능검증 및 결과분석이 가능하도록 하였다.

- 추적센서가 제공하는 표적정보(raw data, filtered data) 분석
- 사격제원계산장치의 각 단계별 상태정보(전처리, 추적필터, 예상명중점, 탄도계산, 자함정보, 포명령) 및 사격성능

특정 알고리즘의 성능저하, SW 오류발생에 대한 문제 식별 및 오류수정 결과 확인을 위해, 사격제원계산장치 내부 흐름의 전 과정에 대한 효과적인 가시화 및 분석이 가능하다. 사격제원계산장치에 연동되어 사격을 위해 허용되는 주요장비는 표적 추적센서, 자함정보 측정센서, 함포가 있으며, 이러한 연동대상 장비는 상호 독립적으로 본연의 역할을 수행하고, 사격제원계산장치는 최종 사격성능 확보를 위해 모든 연동대상 장비를 유기적으로 결합하여야 한다. 특히, 사격제원계산장치의 상태 및 성능 분석뿐만 아니라 연동대상 장비의 부분적 상태 및 성능 분석이 가능하여, 규격화된 장비의 개선사항 식별이 가능하고 개발 단계 장비의 문제점 식별이 가능하다. 개발된 분석도구는 Fig. 9와 같다.

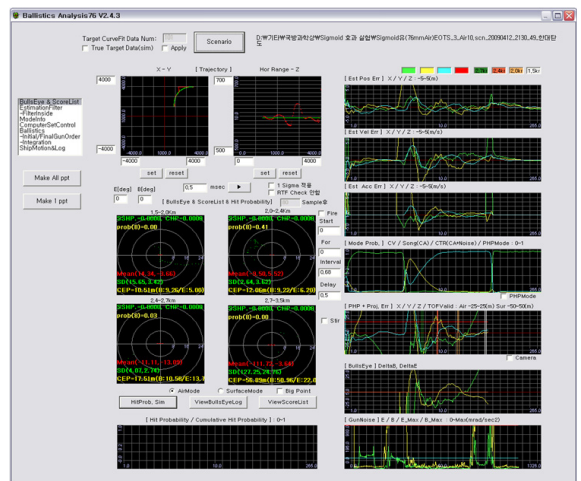


Fig. 9. Overview of Fire Information Analyzer

다. 정보전달 시간지연 분석기술

추적센서와 자이로의 전송지연뿐만 아니라 사격통제장치와 자이로간의 전송지연 역시 정확하게 산출되어야 한다. 함포의 경사도를 측정하기 위한 구동모드로 외부수평점이 있으며, 자이로로부터 수신된 자함의 운동정보를 보상하여 배열카메라가 장착된 함포로 하여금 수평선을 지향하도록 한다. 자이로 전송지연이 정확하게 보상된 경우 함포가 바라보는 영상의 상하 흔들림이 최소화되며 설정 초기치를 이용하여 주변값을 검색함으로써 최적의 값을 추출할 수 있다⁹⁾. 영상 정보에 대한 분석을 위해 영상정보분석기를 설계하였고, 선택된 window내의 pixel 단위 영상추적을 실시하여 기준영상대비 상하 흔들림 크기를 추출하였다. Fig. 10과 같이 외부수평점 배열영상의 상하 흔들림 크기

가 최소화 되는 자이로 전송지연값을 추출하여 적용하였다.

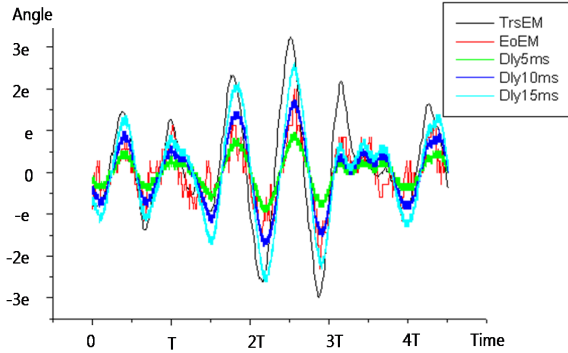


Fig. 10. Analysis for Gyro Information Transmission Delay

라. 배열 분석기술

유도무기와 달리 함포는 Fire and Forget 개념이 탠의 비과시간 동안 탄도 수정이 불가능하기 때문에 추적센서와 함포간의 배열 정확도가 매우 중요하다. 기본적인 배열 정확도 측정은 포신에 포배열카메라를 장착하고 카메라의 영상을 분석함으로써 이루어지며, Fig. 11에 배열 절차를 도식화하였다. 함포배열은 함포 경사각 배열과 추적센서와 함포간 동적 배열로 나눌 수 있다. 함포 경사각 배열은 함포를 수평선을 지향하도록 포명령을 인가하고 수평선이 영상의 중심에 존재하도록 하는 것이다. 동적 배열은 추적센서와 함포가 동일한 표적을 지향하도록 하고, 표적이 영상의 중심에 존재하도록 하는 것이다.

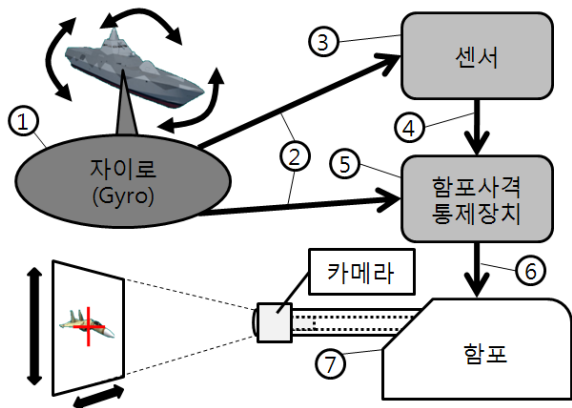


Fig. 11. Gun-Sensor Alignment Procedure

기존의 운영하급 전투체계 사격제원계산장치 개발 단계에서의 포배열 기법은 영상을 이용하여 각 방향 정적배열오차만을 보상하였으나, 차기호위함에서는 동적배열을 분석 및 보상하는 방법이 개발되었다. 함정의 요동은 센서와 함포사격통제장치에 모두 영향을 주어 함포 구동시 포신 흔들림을 유발하여 동적배열 오차를 발생시킨다. 포신에 장착된 포배열 카메라 정보를 영상처리하여 비용함수로 정의하면, 동적배열오차를 정량적으로 분석하는 것이 가능하다. 함포 포신 흔들림에 영향을 주는 자함의 자세 흔들림을 포신방향 흔들림으로 변환하여 영상분석 함으로써 동적배열 오차 분석이 이루어진다¹⁰⁾.

포배열 카메라는 교전이 아닌 평상시 장비 상태 점검 및 보상의 일환으로 이루어지는 행위로 작전중이나 교전중에는 사용이 불가능하며, 이에 대한 극복을 위해 차기호위함 전투체계에 포함된 전자광학추적장비를 사용한 실시간 배열확인 및 사격제원계산 정확도 분석 기능이 개발되었다. 사격제원계산장치가 함포로 인가하는 포명령 정보를 전자광학추적장비로 인가함으로써, 마치 포배열카메라가 함포가 지향하는 방향을 관찰할 수 있는 것처럼 전자광학추적장비가 함포가 지향하는 방향을 관찰하는 기능으로 실시간 배열 확인이 가능하다. 또한 함포 조준모드에 예상명중점을 조준하도록 하는 기능을 개발하여 전자광학추적장비가 탠의 비과시간 이후의 예상되는 표적 위치를 지향하게 함으로써 사격제원계산 정확도 분석이 가능하다.

5. 사격제원계산장치 설계 결과

국내 최초로 개발된 대공/대함전이 가능한 운영하급 전투체계 사격제원계산장치는 비교적 소형함정에 적합하도록 개발되었으며, 차기호위함 전투체계 사격제원계산장치는 기확보된 기반기술을 바탕으로 호위함급 중형 함정에 적합하도록 기존의 기능들에 대한 성능 향상을 꾀하였으며 다양한 기능이 추가되었다.

가. 적응형 다탄종 탄도계산 기술

운영하급 함정에 장착된 76mm 및 40mm 함포는 비교적 소구경에 해당하며 운용개념에 부합되어 사용되는 탄종은 제한적이나, 인침함급 함정에 장착되는 5인치 함포는 중구경에 해당하며 그 탄종은 수십 종에 이른다. 한국 해군에서 운용중인 5인치 함포는 구축함

급인 KDX-I/II/III에서 운용중이며, 함포는 이탈리아의 오토멜라라와 현대위아가 공급하였고 함포탄은 오토멜라라, BAE Systems 및 풍산이 공급하였다. 구축함급의 사격제원계산장치 역시 네델란드의 TNNL과 LockheedMartin이 공급하였기 때문에 KDX-I/II/III에서 사용가능한 탄종 목록은 서로 상이하며 모두 40여종에 이른다. 차기호위함 전투체계 사격제원계산장치는 탄종에 관련된 제한적인 정보를 바탕으로 각종 보상치를 도출함으로써 국내에서 사용가능한 탄종을 거의 모두 사용할 수 있도록 설계되었다^[1].

나. 고사격 기능

탄도해는 일반적으로 고 고각 해인 고사격해와 저 고각 해인 저사격해로 나누어진다. 차기호위함 전투체계 사격제원계산장치는 사정표가 아닌 수치해석적 실시간 탄도계산을 수행하는 것을 바탕으로 은폐된 표적에 대한 사격이 가능하도록 고사격해에 대한 탄도계산이 가능하도록 설계되었다.

고사격시 지나치게 높은 고각으로 사격이 이루어지는 경우 탄의 운동과 궤적이 불안정하여 안정 고각내에서 사격이 이루어져야 한다. 또한 고사격시에는 탄의 비과시간이 최대사거리의 경우보다 길어져 탄도계산은 저사격 대비 비교적 정확하게 산출되어야 한다. 계산속도 및 정확도 향상을 위해, H-P Adaptive 기법을 사용하여 수치해석을 위한 계산 간격을 일정한 오차 이내가 되도록 조절하여 계산속도를 향상시켰으며 수치해석적 차수를 높여 계산정확도를 높였다^[2].

다. 사격 권고 기능

탄착 수정에는 사전 탄착 수정과 실시간 탄착 수정이 있다. 사전 탄착 수정은 자함에 탑재된 환경 센서가 측정하지 못 하는 외탄도적 환경 정보 미확보에 따른 탄착 오차를 수정하는 것이며 실시간 탄착 수정은 교전중 발생하는 표적과 탄착과의 오차를 보상하는 것이다.

일발필중의 교전성능 확보를 위해서 보조적 실시간 탄착 수정 기술을 개발하였다. 사격 이전에 표적 추적 정보와 짧은 탄비과시간에 대한 예상명중점 정보를 이용하여 실제 사격 이전에 사격제원계산 결과의 수렴 여부와 사격시 예상되는 사격오차를 사전에 인지할 수 있다. 예상되는 사격오차가 권고치 이하인 경우 사격제원계산장치가 운용수에게 사격을 권고하게 된다^[3].

라. 항 재밍 기능

최근 증가하고 있는 북한의 전자전 위협에 대응하기 위하여, 사격제원계산장치는 GPS 정보 이외에 자함의 항법장치가 제공하는 측정치를 바탕으로 자함의 항적을 산출함으로써 위성항법장치 재밍시에도 5인치 함포의 주된 목적 중 하나인 해상화력지원이 가능하도록 설계되었다. 표적추적에 있어 일반적으로 자함이 원점인 좌표계를 사용하며 재밍에 의해 원점이 흔들리는 상황에서는 사격 성능에 지대한 영향을 받게 된다. 위성항법장치 재밍에 무관한 항법장치는 3축 가속도 측정치 정보 및 처리된 속도 정보를 제공하며, 사격제원계산장치는 제공된 자함 정보를 정적분하여 자함의 위치를 산출함으로써 항 재밍 기능을 갖추었다. 또한 차기호위함 전투체계는 위성항법장치 재밍시에도 자함이 추적하는 표적에 대한 교전 능력을 가질 수 있도록 설계되었으며, 나아가 사격제원계산장치는 자함이 추적하는 표적뿐만 아니라 네트워크를 통해 전송되는 지상 또는 해상 표적까지도 대응할 수 있도록 설계되었다^[4].

마. 디지털 함포 제어 기술

기존의 아날로그 방식의 76mm 또는 40mm 함포와 달리 5인치 함포는 디지털 방식의 함포 제어를 기반으로 하며, 기존의 선회각 및 고각과 같은 포명령 뿐만 아니라 선회각속력 및 고각속력 포명령을 사용함으로써 보다 신속하며 정확한 조준이 가능하다. 사격제원계산장치는 명중률 향상과 함포 서보 안정화를 만족할 수 있도록, 두 단계 시간 지연을 이용하여 시간에 대해 미분 연속인 선회각 및 고각 명령을 산출하며, 선회각 및 고각 속력 명령 역시 함포 서보의 최대 반응속도 및 가속도를 만족할 수 있도록 산출된다^[5].

6. 해상 사격 결과

개발된 차기호위함 전투체계 사격제원계산장치의 해상 사격시험이 실시되었다. 사격채널은 대함 3채널과 대공 2채널이며, 대함 사격채널의 추적센서에는 탐색레이더, 추적레이더, 전자광학추적장비가 있고 대공 사격채널에는 추적레이더와 전자광학추적장비가 있다. 대함사격 평가 기준으로는 평균오차 표준편차가 이용되었고, 대공 사격 평가 기준으로는 명중률이 이용되었다.

대공 사격 평가 기준은 발사된 탄이 표적으로부터 일정 거리 이내에 특정 명중률 이상으로 탄착을 이루는 것이다. 추적레이더를 이용한 사격결과는 평가 기준 대비 40% 향상되었으며, 전자광학추적장비를 이용한 사격결과는 평가 기준 대비 20% 향상 되었다.

대함 사격 평가 기준을 바탕으로 정규화한 사격결과는 다음과 같다. 추적레이더와 전자광학추적장비를 이용한 사격결과가 편방에 대해 매우 우수함을 관찰할 수 있다.

Table 1. Results of Anti-Surface Gun Fire

구분	거 리 (%)		편 방 (%)	
	평균	편차	평균	편차
탐색레이더	2.6	66.0	37.0	3.0
추적레이더	6.5	59.3	1.1	1.1
전자광학추적장비	10.6	46.5	0	0

7. 결 론

차기호위함 전투체계 사격제원계산장치 개발을 위해, 기개발 완료되어 운용중인 운영하급 전투체계 사격제원계산장치 개발을 통해 축적된 기반기술을 사용하였으며, 새로운 성능 및 기능 요구사항을 만족하기 위해 명중률과 관련된 성능을 향상시키고 추가 기능들을 개발하였다. 해군에 의한 해상시험평가를 통해 그 성능과 기능이 검증되었으며 해군에 인도되었다^[12].

References

[1] Tae-II Suh, Eui-Jin Kim, Bum-Jik Lee, Jon-Ha Ryu and Sung-Eun Lee, "Performance Comparison of

Tracking Filters in Terms of Predicted Hitting Point", International Journal of Control and Systems, Vol. 8, No. 2, pp. 454~461, 2010.

[2] 서태일, "검독수리-A급 전투체계용 사격통제 기술", 국과연 연구보고서, ADDT-2008-0053, 2008.

[3] 류존하, 서태일, 김의진, "포사격통제시스템에서의 표적정보 처리방법 및 그 장치", 특허 등록번호 10-1172705.

[4] 이법직, 서태일, 김의진, "이동체의 위치 예측시스템 및 위치 예측 방법", 특허 등록번호 10-1097169.

[5] 서태일, 류존하, 이법직, 이성은, 송택렬, 김명중, "검독수리-A급 전투체계의 함포 사격 성능 향상을 위한 사격제원 계산장치 개발", 해상무기체계 발전세미나, 2006.

[6] 서태일, 류존하, "기울기법을 이용한 포명령 산출 프로그램", 등록번호 2007-01-121-005120.

[7] 이성은, 서태일, 김의진, "포사격통제시스템의 사격제원 계산 방법 및 그 장치", 특허 등록번호 10-1212215.

[8] Eui-Jin Kim, "Naval Gun Fire Control System Simulation for Verification Depending on Development Phase", 한국시뮬레이션학회, Vol. 20, No. 2, pp. 41~48, 2011.

[9] 김의진, 서태일, "포신의 영상을 활용한 포사격통제시스템의 흔들림 오차 분석 및 시간 지연 성분 보정 방법", 특허 출원번호 10-2012-0145652.

[10] 김의진, 서태일, "포배열카메라 영상을 활용한 함포 사격통제시스템의 동적배열오차 분석 및 보정 방법", 한국군사과학기술학회, submitted.

[11] 서태일, 김점수, 한웅기, 이재권, "울산-I급 전투체계 지휘무장통제체계 소프트웨어 설계 기술서 함포 사격제원계산장치", 국과연 연구보고서, ADDR-415-090330, 2009.

[12] 울산-I급 전투체계 체계개발 결과보고서.