

# 전차포 표적지향 시스템의 안정화 · 구동성능 향상연구

Performance Improvement of the Tank Gun-Pointing System Stabilized Drive

이대옥 · 김학성 · 안태영

국방과학연구소

## Abstract

Objective technology development has been carried out aiming performance improvement of the stabilized gun-pointing system for Type-4 tank. The full nonlinear simulation programs with gun bending modes and nonlinearities were developed to estimate, analyze and design the driving and stabilization system, and validated through the comparisons between simulations and test results of the existing Type-1 tank. The prototype is designed, fabricated, tested and evaluated on the test range as well as in the laboratory and followed by development and operational tests. The performance test results on stationary and on-the-move conditions are turned out to be superior to those of the advanced tanks developed in foreign countries.

Key Words : Bump Course(범프로), Disturbance Rejection(외란 제거), Stabilization Error(안정화 오차), Tank Gun-Pointing System(전차포 표적지향 시스템)

## 1. 서론

표적지향 포/포탑 안정화 구동 시스템은 차체로부터 전달되는 3축방향 외란 상태에서 포의 위치를 사격목표로 정확히 지향시키는 전형적인 표적지향 주-종(master & slave) 시스템으로써 사격목표에 대한 신속 정확한 추종성능과 사격 및 주행에 따른 외란을 배제시키는 강인한 외란제거 성능이 요구되며, 안정화성능은 무기체계의 최종 목표인 명중률에 지배적인 영향을 미치는 주요 요소이다. 그 기능은 주포/포탑의 고저/선회 구동과 주행시 차체에 인가되는 외란에 대하여 주포를 2축 안정화시킴으로써 기동간 사격을 가능하게 하고, 정밀 유압서보 액츄에이터 부분과 강인 서보제어기 및 센서 부분으로 구성되어 있으며,

제어 및 안정화 성능을 증대시키기 위해 보다 발전된 이론과 최신 설계제작기술의 적용이 필요하다.

전차포 표적지향 시스템은 조준장치가 전차포에 종속되어 표적을 지향하는 1세대 구동개념에서 출발하여 전차포가 조준장치에 종속된 2세대 구동개념으로 진전되었으며, 전장환경의 변화에 따라 조준장치와 표적지향 시스템이 안정화되어 기동중 사격을 가능하게 하는 3세대 안정화 구동개념으로 발전하였다. 근래에 들어 미국을 비롯한 선진제국에서 전차포 표적지향 시스템의 안정화 성능에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. Binroth 등<sup>[1]</sup>은 M60전차를 대상으로 모델링 및 시뮬레이션 연구를 수행하였고, Harrison<sup>[2]</sup>은 각종 주력전차에 대한 체계적인 시뮬레이션 연구를

하였으며, Purdy<sup>[3]</sup>는 무장제어를 위한 전기구동식 고저축 비선형 모델을 개발하여 성능분석을 하였다. 또한 Schram<sup>[4]</sup>는 MI전차를 대상으로 차량 전자화 및 사격통제시스템의 디지털화를 위한 연구를 수행하였으며, 국내에서도 3세대 개념인 T1 및 T4의 연구<sup>[5]~[7]</sup>에 이어 선진제국에서 진행중인 자동추적 및 지능제어 개념 적용을 위하여 핵심기술개발을 추진하고 있다.

전차포 표적지향 시스템과 같이 복합기술로 이루어진 시스템의 성능향상 및 개발을 위하여 시스템의 기초설계에 관한 설계해석기술이 축적되어 있어야하며, 그 기술력을 뒷받침할 수 있는 가공, 조립 및 평가기술 등을 보유하고 있어야 한다. 그러나 전차포 표적지향 시스템에 사용되고 있는 포/포탑 구동 안정화 기술은 대부분 선진국 기술에 의존함으로써 시스템 요구성능을 만족하는 포/포탑 구동 안정화 시스템의 성능향상 및 독자설계에 필요한 기술능력이 부족한 실정이다. 지금까지의 전차포 표적지향 시스템의 포/포탑 구동 동특성 분석은 단순화된 모델링 및 성능해석으로 인하여 보다 정확한 분석이 이루어지지

않았으며, 이로 인하여 안정화 조준오차 및 외란 제거성능 등의 실질적인 성능예측을 수행하지 못하였다. 이러한 성능예측을 위한 기존 시뮬레이션 패키지의 한계를 극복하기 위하여 벤딩모드를 포함한 시스템 모델링과, 실차실험결과를 이용한 범프로 안정화성능 및 외란제거성능 등의 분석에 필요한 각종 프로그램의 개발이 요구되고 있다.

본 연구에서는 전차포 표적지향 시스템의 포/포탑 구동부 각 부분의 기본성능을 예측하고 용량을 산출하여 구동부 설계에 적용하였으며, 제어부의 경우에는 회로적인 관점에서의 감도해석과 같은 제어기의 전반적인 하드웨어적인 분석결과를 토대로 하여 보다 우수한 전기/전자특성을 갖는 소자선택 및 회로의 독자설계를 수행하였다. 제어이득 선정과 관련한 설계에는 비상 및 정상모드의 최적 파라미터를 도출하기 위하여 근래적법, Ziegler-Nichols 방법 및 주파수 응답에 의한 보상방법이 적용되었고, 포/포탑 구동부 및 제어부의 보다 완벽한 모델링과 시뮬레이션을 수행하기 위하여 기존모델(T1)의 실차실험 결과와 비교 검토함으로써 프로그램의 신뢰성을 확인하고, 설

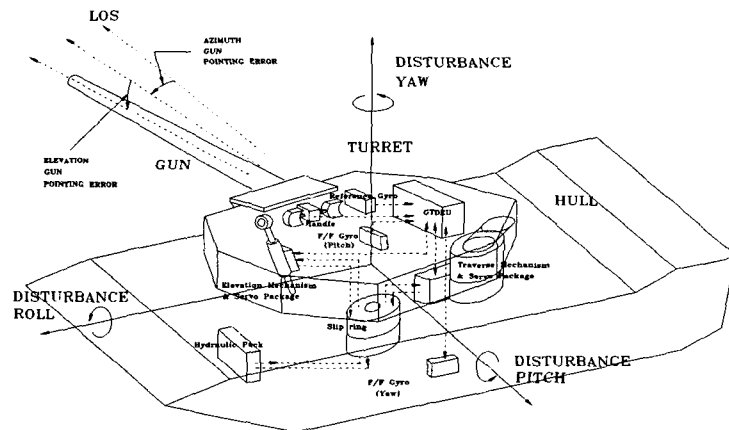


Fig.1 Gun/Turret Driving Stabilization Configuration of Tank Gun-Pointing System

계된 구동부 및 제어부의 성능예측에 대한 확실성을 부여하였다. 또한 주행실험을 통해서 획득된 외란신호를 이용함으로써 구동부하가 증대된 전차포 시스템의 포/포탑구동 안정화장치의 성능예측 및 설계를 보다 높은 신뢰성이 보장되도록 하였다. 실험 및 설계측면에서 최적의 구동·안정화 성능을 도출하기 위하여 이론적 연구 결과에 근거한 실차실험을 통하여 포/포탑 구동 제어기의 각종 이득최적화를 수행함으로써 시스템성능과 관련된 제어기 설계기법을 적용하고 검증하였으며, 포탑 불균형모멘트와 구동·안정화 성능과의 상관관계를 규명하였다. 또한 고저 및 선회 구동부의 각 구성품들의 최적설계를 수행하여 구동·안정화 성능 향상을 기하였으며, 정밀제어를 위한 저감도형 제어기를 설계제작하여 성능 및 내구성 향상을 추구하였다.

## 2. 표적지향 시스템의 모델링

전차포 표적지향을 위한 포/포탑 안정화 구동 시스템은 Fig.1과 같이 차체로부터 전달되는 2축

방향의 외란(roll, pitch)을 차체와 포탑에 장착된 2개의 속도 자이로에 의하여 범프로 및 커브길을 주행할 때 발생하는 차체의 요잉운동 및 포탑의 피칭운동 등이 주포 및 포탑에 미치는 외란을 측정하여 이에 상응하는 값을 포 및 포탑 안정화 구동장치의 선회 및 고저 제어부에 인가하여 구동부로 하여금 그 영향을 상쇄하고 보상하게 함으로써 주행중에도 목표물을 정확히 조준하고 명중시킬 수 있도록 한다.

전차포 표적지향 시스템은 포 및 포탑 구동을 위한 선회축과 고저축이 서로 독립된 모델이라고 가정한다. 즉 포와 포탑은 서로 독립된 운동 좌표계를 갖고 있으며, 각 선회축과 고저축 방향에 대해서 롤링, 요잉과 피칭방향으로 운동이 진행되며, 각 축의 운동에너지는 다른 축방향의 운동에 영향을 미치지 않는 형태의 독립적인 3자유도 운동을 한다고 가정한다.

### 2.1 선회축 안정화 구동모델

표적지향 선회구동 시스템은 Fig. 2와 같이

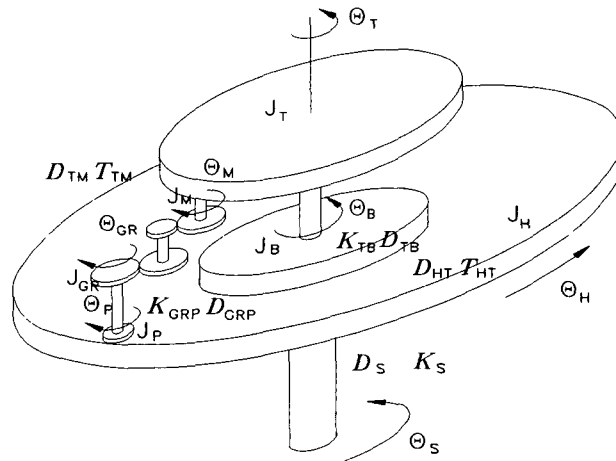


Fig.2 Azimuth Driving Stabilization Model

차체, 유압모터, 바스킷, 포탑과 벤딩모드로 구성 되어 있고, 비선형 요소로는 차체와 포탑, 모터와 포탑사이의 쿨롱 및 스틱션 마찰력, 기어 치차열 사이의 백래쉬, 그리고 유압시스템의 유량특성 등<sup>[5]</sup>이 있다. 기존의 선회구동부에 대한 기구학적 해석은 포탑 및 포의 강체운동만을 고려하고, 기어박스의 모델링이 단순 기어비만으로 해석하였 으나, 제시된 플랜트에는 벤딩모드뿐만 아니라 기 어부의 기구학적 해석을 시도하였다. 동력학적 해 석의 기본적인 접근방법으로 Lagrangian방법을 사용하여 계의 운동에너지, 위치에너지 및 분산에 너지를 계산하여 운동방정식을 유도하는 방법<sup>(5)(8)~(10)</sup>을 적용하였다. 기준자이로는 포의 후미부에 부착되어 있기 때문에 강체모드에서의 감지속도 외는 달리 벤딩모드에서는 정규 진동폭의 기울기 만큼의 속도가 추가로 더해져야 하나 기울기가 무시될 정도로 작기 때문에 자이로의 감지속도중 벤딩모드에 의한 속도는 제외하였다.

전차포 표적지향 시스템의 선회방향 운동방정 식을 유도하면 차체 운동방정식은

$$\begin{aligned}
 & J_H \ddot{\theta}_H + R_{34}K_{GRP}(\theta_{GR} - \theta_P) \\
 & + K_S(\theta_H - \theta_S) + D_{HT}(\dot{\theta}_H - \dot{\theta}_T) \\
 & + D_S(\dot{\theta}_H - \dot{\theta}_S) + R_{34}D_{GRP}(\dot{\theta}_{GR} - \dot{\theta}_P) \\
 & + T_{HT} \cdot \text{sgn}(\dot{\theta}_H - \dot{\theta}_T) = 0
 \end{aligned} \quad (1)$$

모터 운동방정식은

$$\begin{aligned}
 & [J_M + J_{GR} R_{12}^2] \ddot{\theta}_M + J_{GR} R_{12}(R_{12} - 1) \ddot{\theta}_T \\
 & + R_{12}K_{GRP}(\theta_{GR} - \theta_P) + R_{12}D_{GRP}(\dot{\theta}_{GR} - \dot{\theta}_P) \\
 & + D_{TM}(\dot{\theta}_M + \dot{\theta}_T) + T_{TM} \cdot \text{sgn}(\dot{\theta}_M + \dot{\theta}_T) \\
 & = T_M
 \end{aligned} \quad (2)$$

바스킷 운동방정식은

$$\begin{aligned}
 & J_B \ddot{\theta}_B + D_{TB}(\dot{\theta}_B - \dot{\theta}_T) \\
 & + K_{TB}(\theta_B - \theta_T) = 0
 \end{aligned} \quad (3)$$

포탑 운동방정식은

$$\begin{aligned}
 & [J_T + J_{GR}(R_{12} - 1)^2 + M_{\theta G} \eta^2] \ddot{\theta}_T \\
 & + J_{GR} R_{12}(R_{12} - 1) \ddot{\theta}_M + K_{TB}(\theta_T - \theta_B) \\
 & + (R_{12} - R_{34})K_{GRP}(\theta_{GR} - \theta_P) + D_{HT}(\dot{\theta}_T - \dot{\theta}_H) \\
 & + D_{GRP}(R_{12} - R_{34})(\dot{\theta}_{GR} - \dot{\theta}_P) \\
 & + D_{TM}(\dot{\theta}_T + \dot{\theta}_M) + D_{TB}(\dot{\theta}_T - \dot{\theta}_B) \\
 & + T_{HT} \cdot \text{sgn}(\dot{\theta}_T - \dot{\theta}_H) + T_{TM} \cdot \text{sgn}(\dot{\theta}_T + \dot{\theta}_M) \\
 & + 2M_{\theta G} \eta \dot{\eta} \dot{\theta}_T + (I_{\theta G} + S_{\theta G} \cdot x_T) \ddot{\eta} \\
 & = -T_M - T_{UM} \sin \theta_R - M_T c_z e_y \ddot{\theta}_R
 \end{aligned} \quad (4)$$

벤딩모드 운동방정식은

$$\begin{aligned}
 & M_{\theta G} \ddot{\eta} + 2M_{\theta G} \zeta_{\theta G} \omega_{\theta G} \dot{\eta} \\
 & + M_{\theta IG} \omega_{\theta IG}^2 \eta - M_{\theta IG} \eta \dot{\theta}_T^2 \\
 & = -(I_{\theta G} + S_{\theta G} \cdot x_T) \ddot{\theta}_T
 \end{aligned} \quad (5)$$

기준자이로 속도감지 운동방정식은

$$\dot{\theta}_{R|FGYRO} \approx \dot{\theta}_T \quad (6)$$

로 표시된다.

## 2.2 선회축 안정화 제어모델

선회축에 대한 안정화 제어모델<sup>[7][11]</sup>은 Fig.3 과 같이 선회속도명령(rate command), 3단밸브 변환기(LVDT), 기준자이로(reference gyro), 조 준경/포위치오차(DCT), 전방이송자이로(feed-forward gyro), 차동압력변환기(delta pressure

transducer), 전차장래졸버(commander's resolver) 신호 등으로 구성된다. 안정화모드시에는 기준신호 채널에 합성되는 조준경/포 위치오차 신호 때문에 포수가 선회 속도명령을 인가하면 포탑이 자동으로 포수 조준경에 일치된다. 차동압력 변환기 신호는 합성전에 증폭 및 여과(고역통과)되며, 기준 자이로 각속도 신호는 합성전에 증폭, 복조 및 여과된다. 또한 속도명령 신호는 포탑이 충분한 가속 특성을 가지고 기동할 수 있도록 적절한 속도제어기를 내장하고 있으며, 조준경/포 위치오차 신호는 정상상태의 조준경 위치오차를 감소시키기 위해 적절한 위치제어기가 사용되고 있다. 이러한 신호들은 기준신호채널에 합성되어 서보밸브 출력 전류증폭기에 인가된다.

### 3. 시뮬레이션 및 성능예측

#### 3.1 시뮬레이션 프로그램(Simulation Program)

유도된 선회구동부와 제어부를 MATLAB 소프트웨어를 활용하여 Fig.4와 같은 전용 시뮬레

이션 패키지를 개발하였다. 또한 실측한 외란성분을 사용하여 명중률에 많은 영향을 미치는 조준 오차분석을 위한 안정화성능을 예측할 수 있는 범프로에서의 안정화 성능예측 프로그램을 추가로 개발하였다. 기존의 운동방정식은 단순 강제 모델링만을 수행하였으나 본 연구에서는 주포 벤딩모드, 기어 등의 복잡한 기계적 특성들과 각 시스템(차체, 포, 포탑)등이 동력학적 연동으로 인하여 발생하는 비선형방정식의 해를 찾는 방법을 적용하였다. 선회 및 고저 구동부에 대한 동력학적 해석을 위하여 개발한 시뮬레이션 프로그램은 동력학적 방정식에 나타나 있듯이 관성행렬이 서로 연동되어 있어 단순한 형태의 가속도 피드백과 적분기 구성으로는 해석상의 대수적 루프가 발생하게 된다. 따라서 선회부 및 고저부의 관성행렬의 역행렬을 산출하여 각 상태변수의 단순적 분형태를 취할 수 있게 하기 위하여 식을 단순한 형태로 변환하였으며, 문자화한 역행렬을 산출하기 위하여 문자수식계산이 가능한 MATHEMATICA를 이용하였다.

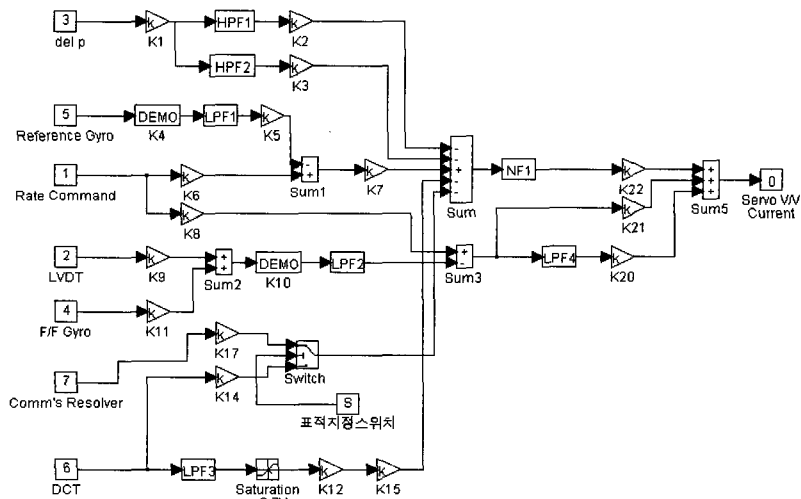


Fig.3 Azimuth Driving Stabilization Control Model

3.2 정지중 성능 특성(Stationary Performance Characteristics)

시뮬레이션 및 실험은 기존모델(T1), 성능향상모델3(T3, 구동부 설계), 성능향상모델4(T4, 구동부/제어부 설계) 등에 대하여 수행하였다. Fig.5는 선회축에 대한 계단응답특성을 보여주고 있으며, T1은 전반적으로 비선형 모델의 시뮬레이션 결과와 실차실험의 결과가 전구간의 속도명령에 대해서 ±10%내로 유사하였다.

T3, T4의 선회구동부는 안정화 모드에서 응답특성을 속도명령 88.8mil/sec 인가시 최대치 도달시간 :  $t_p \leq 0.35s$ , 오버슈트 :  $M_p \leq 88\%$ , 속도오차 :  $\Delta V \leq 5\%$ 가 되도록 설계하였다. 구동부를 전형적인 2차 시스템으로 가정할 경우 식(7)에 의하여 설계인자를 도출할 수 있다.

$$M_p = \text{Exp} \left( \frac{\pi \zeta_n}{\sqrt{1 - \zeta_n^2}} \right), \quad (7)$$

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta_n^2}}$$

제어기 설계를 위해 부하방정식의 선형화(2-3단 서보밸브 시스템의 1차 시스템으로의 단순화 포함), 근궤적 방법과 주파수 응답 방법을 적용한 예상 파라미터 도출, 전류이득 설정, 비상모드 구동에 따른 2-3단 서보밸브의 모델링 및 제어이득의 설정(근궤적 방법과 Ziegler-Nichols 방법 : K21, K22), 비상모드의 속도제어기 설계(MTS(s)), 비상모드에서 입력과 출력의 일치를 위한 제어이득의 설정(K8, K10), 정상모드 구동에 따른 시스템의 댐핑률을 증가시키기 위한 고

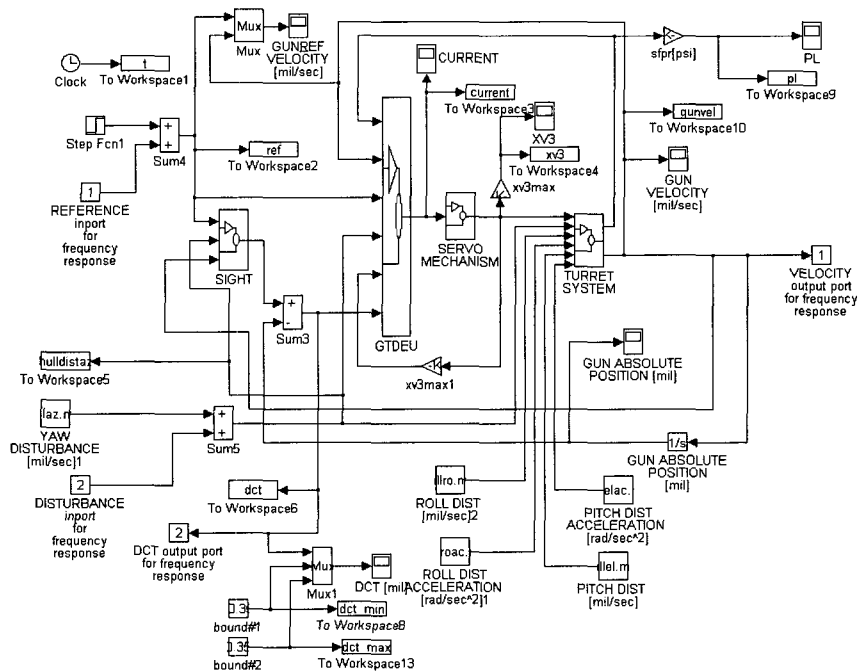


Fig.4 Azimuth Axis Simulation Program

주파통과 필터 설계(근궤적 방법 : HPF#1과 HPF#2의 차단주파수 ah21, ah22, K1, K2, K3), 선회구동부 시스템 영역에서의 대역폭 증가를 목적으로 하는 속도제어 회로 설계(근궤적 방법과 주파수응답 방법 : K7), 선회구동부 시스템 영역에서의 대역폭 증가를 목적으로 하는 위치제어 회로설계(근궤적 방법과 주파수응답 방법 : K14, LPF#3, K12, K15), 범프로 주행중의 안정화를 위한 외란보상이득 설정(K11) 등 체계적인 접근을 시도하였다.

T3, T4의 경우 설계된 구동부 및 제어부의 물성치를 적용한 시뮬레이션 결과는 T1보다 최대 오버슈트량은 10%, 최대 오버슈트시간은 10.2%, 정착시간은 52.8%의 감소효과가 나타나 안정화 오차가 개선될 것으로 예측되었다. 이는 정지간 구동성능시험 결과 구동부하가 증가되었음에도 속도제어회로에 위상리드보상을 함으로써 과도응답특성을 향상시켰고, 속도제어회로의 비최소위상 속도제어기 제거로 성능향상을 이루었으며, 시스템 댐핑률을 증가시키도록 고주파 통과필터를 설

제한 결과에 기인한다.

주파수응답의 경우 시뮬레이션에서 사용한 모델은 선형시스템이므로 실차실험과의 특성비교에는 어려움이 있다. 이는 비선형 시스템에 적용한 제어기를 선형화한 모델에 그대로 적용하였기 때문에 나타날 수 있는 위상지연에 관련한 사항으로 판단된다. 따라서 주파수응답 특성에서는 주파수응답 특성의 경향을 실험결과와 단순 비교하는 것으로 그 의미를 두었다. T4의 선회부 주파수응답특성은 속도제어회로와 위치제어회로의 대역폭 증대기법 적용과 구동부의 토크 증대설계로 구동부하 증가에도 불구하고 T1과 비교하여 비상모드(T1 : 5.8Hz, T4 : 6.7Hz) 및 안정화모드(T1 : 6.5Hz, T4 : 7.5Hz)에서 약 15% 증가된 주파수 대역폭을 보여주고 있다.

### 3.3 주행중 안정화 특성(On-the-Move Stabilizing Characteristics)

RRC9 범프로를 16km/h의 속도로 주행시 차체에 입력되는 요잉방향 외란신호 및 PSD선도

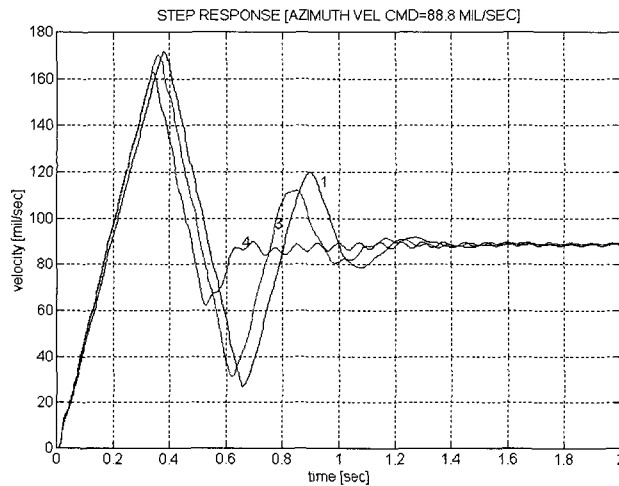


Fig.5 Step Responses of Azimuth Systems(simulation, input=88.8mil/sec)

는 Fig.6과 같으며, 이때 각 외란신호의 수준 (rms)은 피칭외란 101.1mil/sec, 요잉외란 14.54mil/sec, 롤링외란 57.17mil/sec로 측정되었다.

정지나 주행시 안정화오차가 사격가능여부를 결정하는 성능요소로서 선회방향 0.3mil 이내가 바람직하므로 이의 최소화가 요구된다. Fig.7의 T1 선회축의 안정화 오차는 실차실험에 비해 적게 산출되었는데, 이는 외란신호중에 가속도 외란이 실제값보다 작게 입력되어져 나타나는 문제이거나 속도명령에 의한 포탑의 구동 토크보다 큰 외란신호가 주행중에 발생되어 차량에 인가되는 것으로 예측되어지며, 특히 포탑의 불균형모멘

트에 의한 추가적인 외란생성과 관련한 성능분석은 4.4에서 언급된다. T3의 경우는 T1보다 19% 정도의 성능개선 효과가 나타나며, Fig.8에 보여준 바와 같이 T4의 제어기를 적용할 경우에도 39% 정도의 안정화 성능향상 효과가 나타날 것으로 예측된다. 주행중 안정화성능의 PSD선도에서 볼 수 있듯이 주파수에 따른 경향은 거의 유사함을 알 수 있다. 이는 롤링방향으로의 외란이 선회방향인 요잉방향보다 상대적으로 많이 인가됨을 알 수 있고, 포탑의 경우 질량 분포의 불균형으로 인하여 롤링외란에 취약한 면을 보이고 있으며, 불균형모멘트와 롤링가속도에 의한 선회방향으로의 외란현상 재현의 어려움, 감속비가 큰

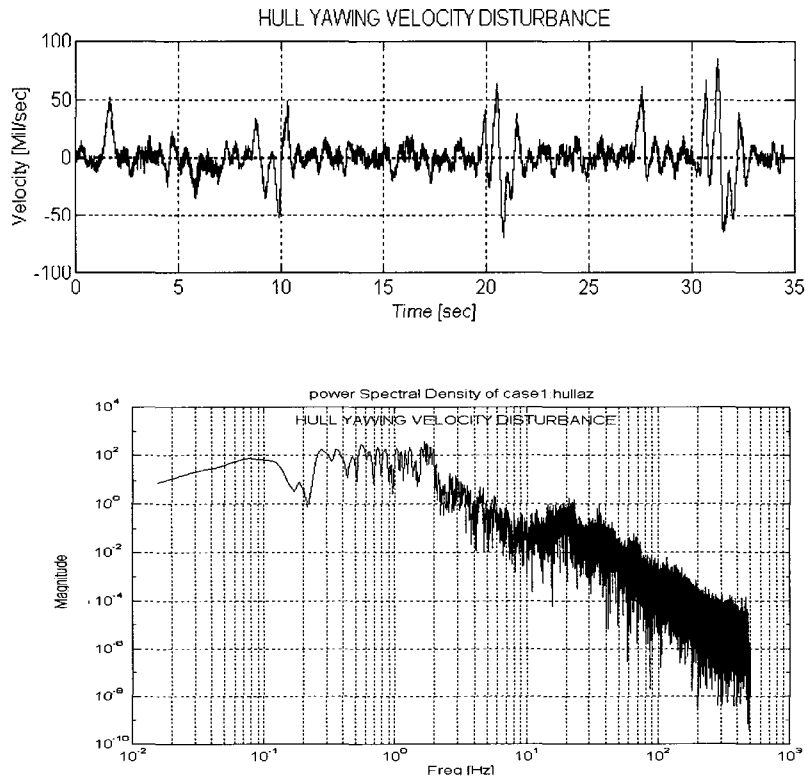


Fig.6 Azimuth Hull Rate Input Disturbance(experiment, RRC9, 16kph)



경우에 증폭된 유압모타의 마찰특성으로 인한 안정화 성능 저하, 주행중의 외란에 의하여 포탑 레

이스팅의 동특성으로 인한 순간적인 동적마찰력 증가 등의 이유로 시뮬레이션상에서는 유사성을

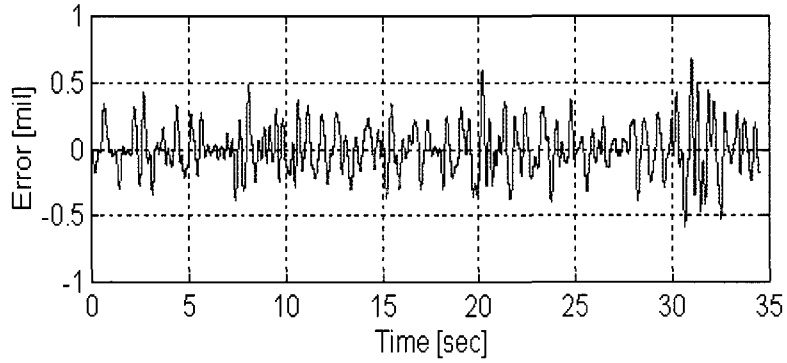


Fig.7 Stabilization Error of T1 Azimuth System(simulation, RRC9, 16kph)

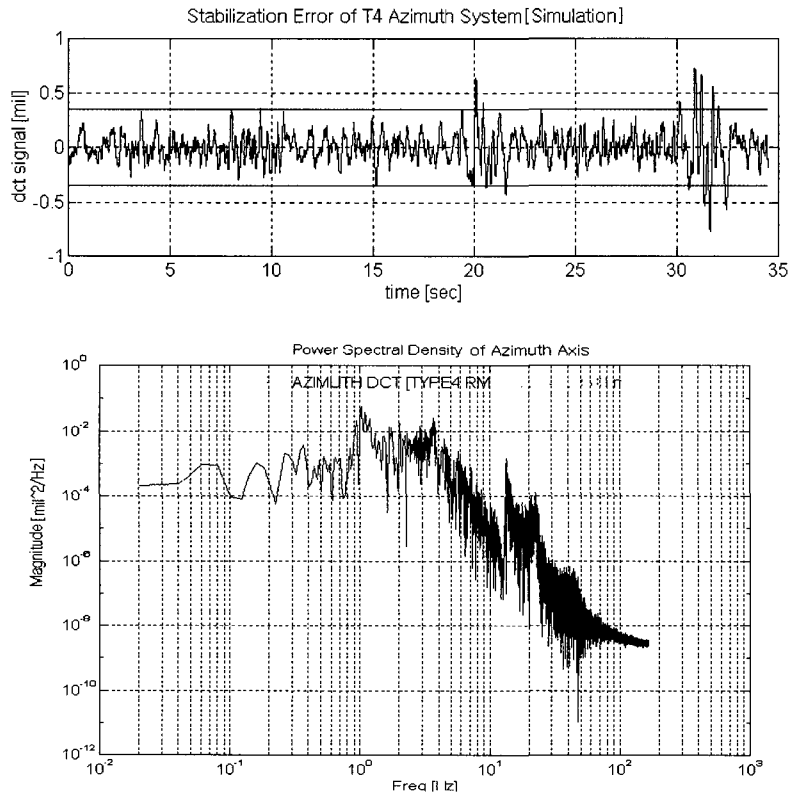


Fig.8 Stabilization Error of T4 Azimuth System (simulation, RRC9, 16kph)

찾기 어려운 것으로 생각된다.

3.4 주행중 외란제거 특성(On-the-Move Disturbance Rejection Characteristics)

표적지향 시스템의 안정화성능 개념은 조준경의 위치로 포/포탑 구동부가 빠르고 정확하게 추종하는 정지간 구동성능과 주행중 지면으로부터 인가되는 위치, 속도 및 가속도 외란인자를 제거

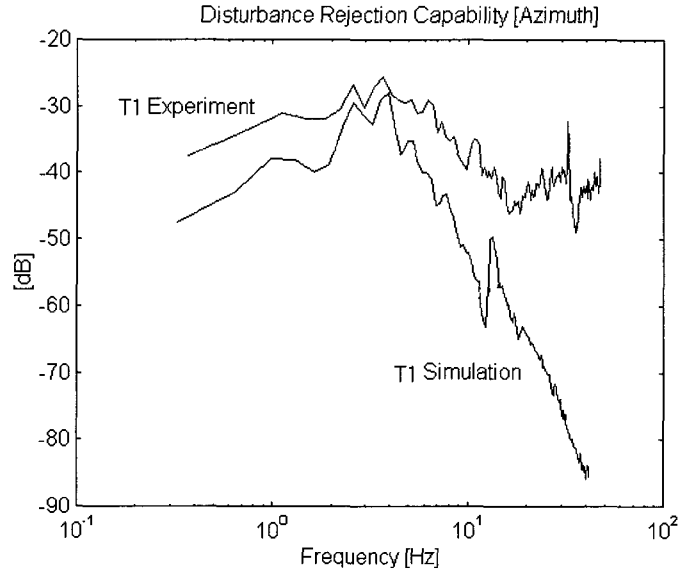


Fig.9 Disturbance Rejection Capability of T1 Azimuth System

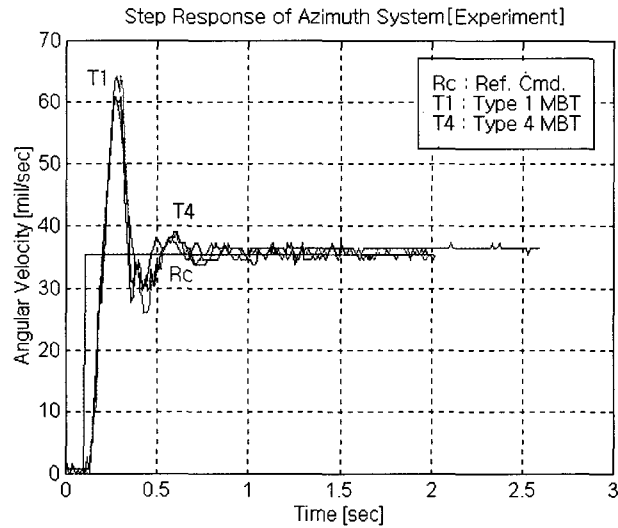


Fig.10 Step Responses of Azimuth Systems (experiment, input=35.7mil/sec)

하면서 조준경을 추종하는 것으로 정의된다. 기본적으로 정지간의 구동성능은 일반적인 제어시스템과 크게 다르지 않으나 주행중 안정화성능은 외란제거성능<sup>[5][6][12]</sup>에 의하여 결정된다. 지금까지의 포/포탑 안정화에 대한 연구는 단순한 속도명령에 대한 응답특성에 대해서만 연구가 수행되어 왔으나, 본 연구에서는 포/포탑에 인가되는 외란들의 제거성능을 분석하였다. 외란제거성능 분석은 모델링한 비선형 플랜트에 실측한 외란(PSD)을 인가하여 그 결과를 획득하고 분석하였다. 외란제거 성능의 정의는 식(8)과 같이 정의된다.

$$DRC(dB) = 10 \text{ Log}_{10} \frac{\phi_{DCT}^A}{\phi_H^A} \quad (8)$$

$\phi_{DCT}^A$  : 포탑 선회 오차(선회 DCT)[PSD]

$\phi_H^A$  : 차체 선회 외란 ( $\theta_H$ )[PSD]

따라서 규격에 주어진 각종 외란의 형태는

PSD의 형태로 주어지기 때문에 모델링한 비선형 시스템의 선형화 모델의 전달함수를 구한 후에 외란에 대한 응답의 PSD를 구할 수 있다. Fig.9는 T1의 외란제거 성능 측정결과 및 시뮬레이션 결과를 도시한 것으로 요구규격은 충족시키나 안정화 특성 분석에서 설명한 이유로 인해 외란제거 성능에서도 주파수 대역에 따른 큰 차이를 볼 수 있다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

성능실험은 정지중 구동성능과 주파수특성실험, 이동중 범프로에서의 안정화성능을 실시하였다. 최적의 구동 및 안정화 성능을 도출하기 위하여 가변형 제어기를 추가로 설계제작하여 이론적 연구 결과에 근거한 실차실험을 통하여 포/포탑 구동 제어기의 각종 이득최적화를 수행함으로써 시

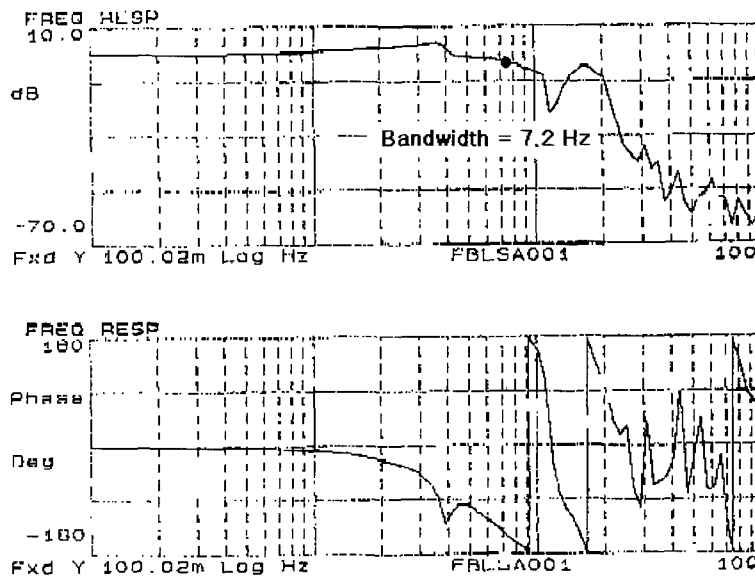


Fig.11 Frequency Response of T1 Azimuth System  
(experiment, input=17.7mil/sec)

시스템성과 관련된 제어기설계기법을 검증하였으며, 포탑 불균형모멘트에 따른 구동안정화 성능을 실험하였다. 또한 장기간이 소요되는 주행실험시 개발실험기간 단축과 자료획득 및 처리를 용이하게 하고자 노트북 컴퓨터와 다채널 신호처리용 인터페이스 보드를 이용한 자료획득처리 시스템을 개발하여 포탑에 탑재함으로써 구동 안정화시험 중 즉각적인 자료분석처리를 하도록 하였다.

#### 4.1 정지중 성능 특성(Stationary Performance Characteristics)

정지중 계단과 응답성능을 최적으로 하기 위하여 고주파 필터, 속도제어기 및 위치제어기를 설계하여 적용하였으나, 주행실험을 실시한 결과 좋은 안정화 성능을 얻지 못함으로써 주행중 안정화성능을 우선으로 속응성 향상을 위하여 계속적인 새로운 형태의 제어기를 재설계하였다. 정지중 구동성능시험 결과 구동부하가 증가되었음에

도 Fig.10에서 알 수 있듯이 T1보다 우수한 성능을 얻었으며, 시뮬레이션결과에서 설명한 것처럼 비최소위상 속도제어회로의 제거와 속도제어회로에 위상리드 보상을 함으로써 과도응답특성을 향상시켰다. 선회제어부는 비레이득만으로 이루어져 있기 때문에 위상보상기능이 상대적으로 취약함을 Fig.11의 주파수응답특성에서 볼 수 있다. Fig.12의 T4의 경우 위치제어회로에 저역통과필터의 차단주파수 변환을 통한 재설계로 대역폭을 7.2Hz에서 10.3Hz로 증대시켰으며, 위치제어회로의 저역통과필터의 재설계로 위상변화를 최소화하였다. 대역폭 증가를 목적으로 근궤적방법과 주파수응답방법을 이용하여 속도제어회로와 위치제어회로를 설계하였다.

#### 4.2 주행중 안정화 특성(On-the-Move Stabilizing Characteristics)

선회부의 경우 Fig.13, 14와 같이 롤링이 발

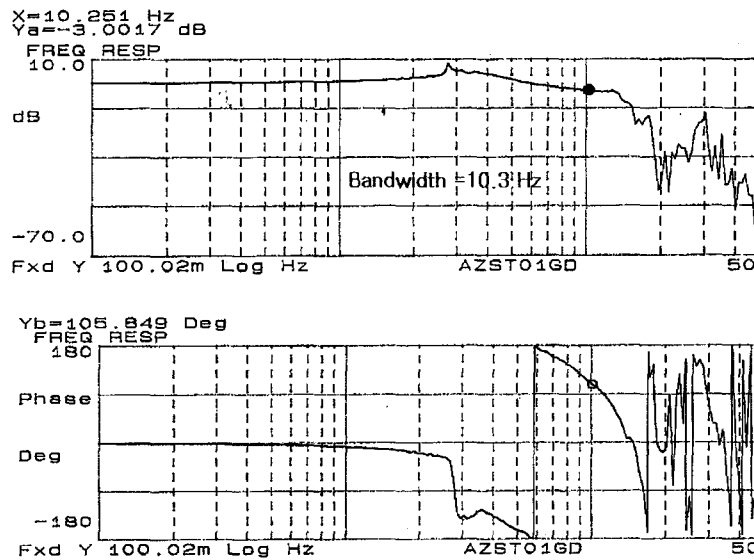


Fig.12 Frequency Response of T4 Azimuth System  
(experiment, input=17.7mil/sec)

생되는 부위에서 안정화오차가 T1과 비교하여 볼 때 감소한 것으로 나타나 주행시의 안정화 오차값이 감소된 것으로 분석되었다. 이 결과는 앞에서 기술한 것처럼 T1에 비해 T4의 안정화 성능이 전반적으로 향상됨을 확인할 수 있다. 구동부하 증가, 동력 및 공간의 제약에도 불구하고 T1의 안정화 성능과 비교하여 40% 향상된 우수한 안정화 성능을 얻었다. 안정화 시스템은 정지중 성능과 주행중 안정화 성능을 동시에 만족해야 하나, 이득조정시험을 통하여 정지중의 특성을 향상시키면 주행시 안정화 성능이 감소하며, 그 반대로 동일한 현상이 발생됨을 확인하였다. 따라서 실험중 정지-주행간의 성능을 상호조정하여 주행중 안정화 성능에 가중치를 더 높게 부여하여 이득조정을 수행한 결과 정지중 구동 성능이 예측 성능과

달리 오버슈트와 같은 부분에서 차이를 보이고 있다. 이는 제어기설계에 시뮬레이션을 통하여 예상한 결과이나 실험을 통하여 정지 및 이동중 구동·안정화 성능의 상호영향 정도를 입증하였으며, 정지 및 주행중의 성능을 모두 극대화시키기 위해서는 제어기 이득의 이원화가 필요하다.

#### 4.3 주행중 외란제거 특성(On-the-Move Disturbance Rejection Characteristics)

T4의 주행중 외란제거 성능은 Fig.15에 보여 주고 있으며, 시뮬레이션에서 예측했던 대로 전 주파수영역에서 규격치를 만족시켰다. 안정화오차 특성 분석에서 설명한 것처럼 T1(Fig.9)에 비해 상당히 개선되었음을 알 수 있다.

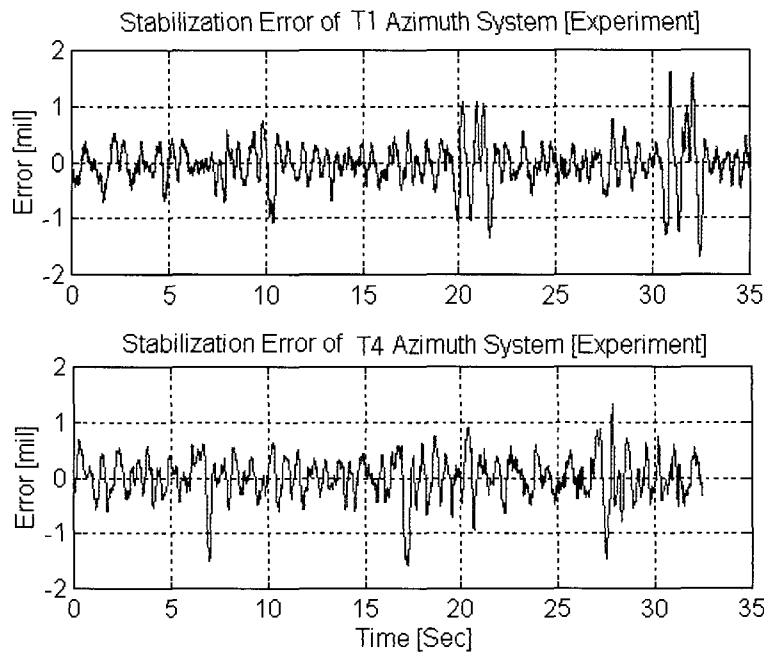


Fig.13 Stabilization Errors of Azimuth Systems (experiment, RRC9, 16kph)

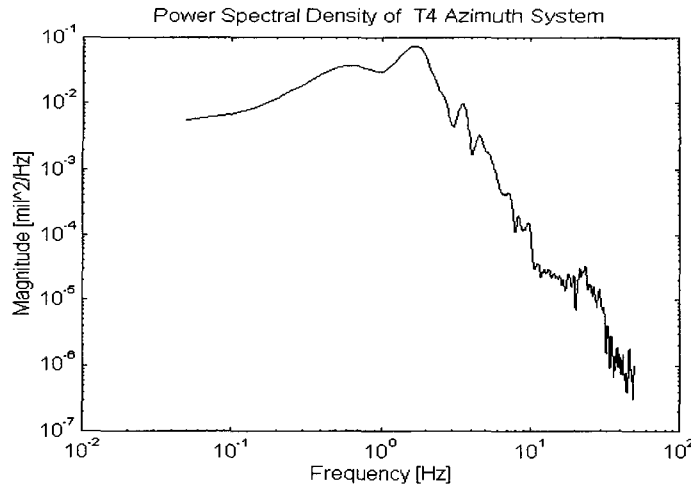


Fig.14 Stabilization Error PSD of T4 Azimuth System (experiment, RRC9, 16kph)

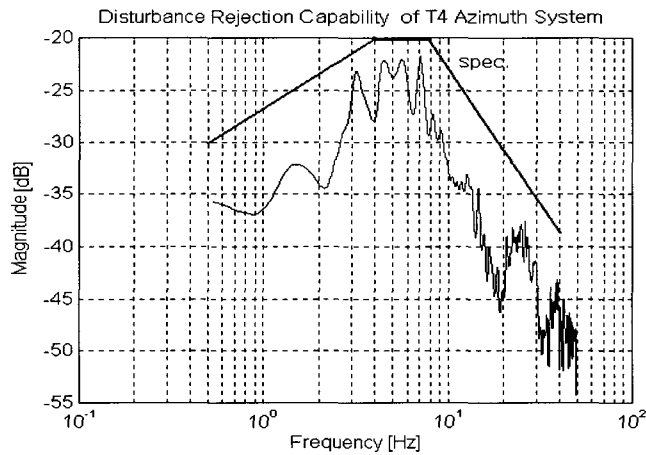


Fig.15 Disturbance Rejection of T4 Azimuth System(experiment, RRC9, 16kph)

#### 4.4 불균형모멘트 변화에 따른 안정화 특성 (Stabilizing Characteristics to Unbalance Moment Variations)

안정화시스템의 성능 감소요인은 여러가지가 있으나 가장 대표적인 것으로 포탑 불균형모멘트를 들 수 있다. 롤링방향으로의 외란이 선회방향인 요잉방향보다 상대적으로 많이 인가됨을 알

수 있고, 포탑의 경우 질량분포의 불균형으로 인하여 롤링외란에 취약한 면을 보이고 있다. Fig.16에서 보는 것처럼 전-우방향에 질량중심이 위치해있으므로 포탑에 선회방향의 속도성분에 의한 외란과 롤링에 의한 가속성분이 불균형 질량중심에 작용함으로써 선회방향으로의 추가적인 가속외란이 발생되게되어 시스템의 안정화성능을

감소시키게 된다. 따라서 T4 포탑에는 추가적인 발라스트를 후-좌방향에 부착하여 관성증가율은 약 2%에 불과하나 불균형 모멘트를 약 20% 감소시킴으로써 불균형 모멘트의 영향을 최소화시켰다. Fig.17은 불균형모멘트의 변화에 대한 T1과 T4의 선회방향 안정화성능을 보여주고 있다. 요구성능 범위내에서 불균형 모멘트량을

5000kgf-m에서 2000kgf-m 까지 변화시켰으며, 허용중량과 정지중 구동성능을 고려하여 2000kgf-m 수준으로 불균형모멘트를 설정하였다. 포탑구조 차원에서 불균형모멘트 최소화를 위한 근원적인 해결시 보다 우수한 구동·안정화성능이 달성될 수 있다.

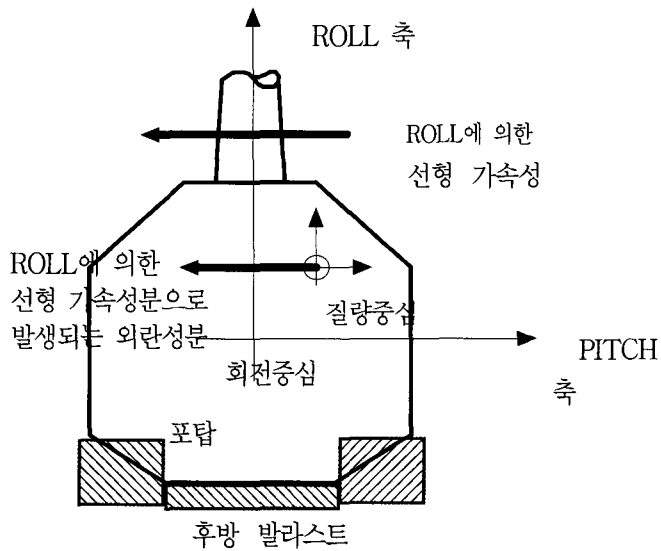


Fig.16 Unbalance Moment Effects of T4 Azimuth System

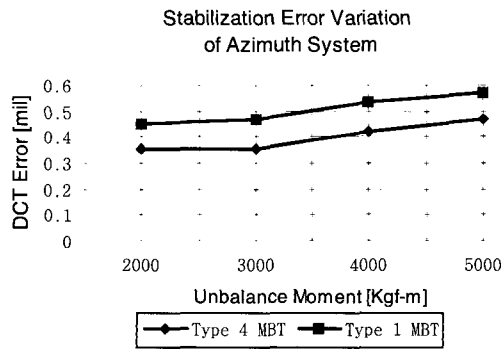


Fig.17. Stabilization Error Variations of Azimuth Systems(experiment, RRC9, 16kph)

## 5. 결 론

본 연구에서는 전차포 표적지향 시스템의 포/포탑 구동·안정화 성능향상을 위하여 비선형 특성 및 벤딩모드를 고려한 시뮬레이션 패키지를 개발하여 기존모델을 평가하고, 새로운 모델의 요구조건을 충족시키는 선화부 및 제어부에 대한 최적화 설계를 수행하였으며, 실차실험을 통하여 성능향상모델의 설계를 입증하였다.

시뮬레이션 패키지에 대한 신뢰성을 부여하기 위하여 실험 및 시뮬레이션 결과를 계단 응답, 주파수 응답, 안정화 특성 측면에서 비교분석하였고, 실차실험 조건과 동일한 시뮬레이션 조건을 충족하도록 범프로 주행시 포탑에 입력되는 외란 신호를 측정하여 개발한 모의차량 프로그램에 적용함으로써 보다 신뢰성이 보장된 안정화 오차를 예측하였다. 선형화된 모델과 시간 및 주파수영역에서의 분석을 통하여 설계한 제어기를 비선형 시스템 시뮬레이션을 수행하여 각 제어이득 및 필터이득을 선정하였고, 구동 및 안정화성능을 동시에 향상시키기 위해서 정지 및 이동중 제어기의 이원화 필요성을 제시하였다.

실험결과 T1이나 선진장비의 포/포탑 안정화 시스템보다 우수한 정지중 및 주행중 안정화성능을 얻었으며, 정지 및 주행중 성능을 동시에 극대화시키기 어려우므로 안정화 성능을 우선으로 설계하여야함을 확인하였다. 또한 포탑 불균형모멘트 감소가 선화시스템의 안정화오차 감소에 결정적인 요인임을 구명하였으며, 동특성 향상을 목적으로 한 안정화 제어기 설계절차와 저감도형 제어기 설계기법 및 비최소위상 속도제어회로가 제거된 안정화 제어기를 연구함으로써 내구성 증대 및 안정화·구동 성능향상에 기여하였다.

본 연구를 통하여 전차포 표적지향 시스템의

주요 핵심기술인 포/포탑 구동 안정화 시스템의 개발 및 성능예측 기술을 확보함으로써 T4체계의 개발기간 단축과 기술적 위험성을 배제하여 성공적인 체계개발에 크게 기여하였으며, 모방개발 차원을 탈피하여 실질적인 독자모델 개발을 가능하게 하였다. 향후 본 기술은 대구경은 물론 소구경 무장 탑재시스템의 독자적인 안정화 시스템 설계에 적용될 것이다.

## 참고문헌

- (1) Binroth, W. and Cornell, G.A., 1975, "Closed-Loop Optimization Program for Tank Gun Stabilization System," Rock Island Arsenal.
- (2) Harrison, T., 1979, "Computer Simulation and Studies of the Behaviour of Stabilized Gun Systems," Royal Military College.
- (3) Purdy, D.J., 1994, "Modelling and Simulation of Weapon Control System for a Main Battle Tank," Royal Military College.
- (4) Schram, G., 1996, "Digitization of Fire Control System and Interface," General Dynamics.
- (5) 김학성, 이대옥, 1994, "벤딩모드를 포함한 포/포탑 구동 시스템의 모델링 및 주행중 안정화 성능 분석," 국방과학연구소.
- (6) 이대옥, 김학성, 안태영, 1996, "T4체계의 포/포탑 구동/안정화 성능 극대화 연구," 국방과학연구소.
- (7) 이대옥, 김학성, 1997, "T4체계의 포/포탑 구동제어용 전자유닛 설계 연구," 국방과학연구소.



- (8) Thompson, R.J., "T1 Program System Technical Support Services," General Dynamics, 1989.
- (9) Krupka, R.M., 1985, "Mathematical-Simulation of the Dynamics of a Military Tank," SAE Technical Paper No. 850416.
- (10) Meirovitch, L., 1975, "Elements of Vibration Analysis," McGraw Hill.
- (11) Ogato, K., 1990, "Modern Control Engineering," 2nd Edition, Prentice Hall.
- (12) Bendat, J.S. and Piersol, A.G., 1991, "Random Data," John Wiley & Sons.