간헐 회전식 약실을 적용한 자동포 시스템의 디지털 제어

Digital Control of Automatic Gun Systems Incorporating an Intermittently Rotating Chamber

임 승 철* 김 기 갑** 심 정 수*** 길 성 진***
S. Lim K. K. Kim J. S. Shim S. J. Kil
김 홍 철**** 이 건 하**** 차 기 업**** 조 창 기**** 홍 석 균****
H. C. Kim G. H. Lee G. U. Cha C. K. Cho S. K. Hong

ABSTRACT

Lately, there exist growing demands to increase the firepower of mid-calibre automatic guns despite spatial limitations of armament. In this context, ammunitions of simple cylindrical shape are considered so advantageous that associated automatic guns are under development incorporating an intermittently rotating chamber mechanism. In this paper, relevant subsystems for such guns are to be described, and a digital controller to automate the entire system as well. Via dynamic simulations it proves to function well being able to drive the chamber at any constant speed up to 200spm, which is merely limited by the recoil performance. It is remarkable that the system synchronization idea in use is applicable to any other multi-actuator systems that should operate on the basis of event rather than time.

주요기술용어(주제어) : CTA(Cased Telescoped Ammunition), DOB(외란 관측기), Motor Control(모터 제어), Recoil System(주퇴/복좌 계), Feeder(송탄기), Event-based Synchronization(사건 기반 동기화)

1. 서 론

현재 전투 장갑차의 주무장으로서 25 또는 35mm 구경의 자동포가 주류이나 공간의 제약에도 불구하고 화력 증대를 위하여 기존 탄보다 화력이 크면서도 단순한 형상을 갖는 탄의 사용이 바람직하다.

예를 들어 40mm CTA[1~3]와 같이 외관상 원통형의 탄을 사용하는 경우, 밀어 넣기(push-through) 개념에 의한 장전과 탄피 방출이 가능한 간헐 회전식 약실을 적용할 수 있다. 이에 따라 발사율 제고와 함께 기존 대비 약 50% 정도 부품이 감소되면서 포 자체의 신뢰도 및 정비성이 대폭 향상될 것으로 기대된다.

이와 같은 CTA 탄과 자동포와 관련하여 국외 연구 결과가 일부 발표된바 있으나[1~2], 그 내용이 매우 개괄적이다. 이에 저자들에 의한 국내 기술 개발이

† 2007년 3월 22일 접수~2007년 5월 18일 게재승인
* 명지대학교 기계공학과(MyongJi Univerity)
** 용인송담대학(Yongin Songdam College)
*** (주)서문기술(SeoMoon Technologies. Inc.)
**** 국방과학연구소(ADD)
주저자 이메일 : slim@mju.ac.kr

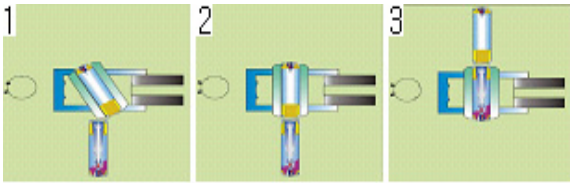
시도되었고 연구 결과 중 약실용 기구와 제어기 설계 부분을 보고한 바 있다[3]. 본 논문에서는 보다 개선된 약실 기구를 위시하여 자동 포를 구성하는 각 서브 시스템 용 기구 및 그들 개별 시스템과 전체 계를 통합 제어하기 위하여 설계된 디지털 제어기를 소개하고 최종적으로 그들의 동력학적 시뮬레이션 결과를 제시하고자 한다.

특기할 만한 것은, 서로 다른 모터를 사용하는 약실 계와 송탄기 시스템을 동기화시키기 위하여 본 논문에서 제안한 방법은 다수의 작동기를 사용하되 시간 대신 사건에 기반하여 동기화 되어야 바람직한 모든 시스템에 적용 가능하다는 것이다.

2. 약실 기구 설계

그림 1은 간헐 회전식 약실기구를 갖는 자동포의 발사 순서를 나타낸다. 탄 발사 및 주퇴/복좌 이후 장전과 탄피 방출과정이 1, 2, 3의 순서로 진행되며 정지 순간 2에 급탄부 반대쪽에서 약실이 개방된다. 순간 3과 같이 새로운 탄이 장전되고 나면 약실이 포강 측과 일직선이 되도록 다시 90° 회전한다. 탄이 발사되면 주퇴부 질량은 상자형 몸통 안에서 가이드 레일을 따라 주퇴하며 이때 약실을 본래의 장전위치로 복귀하는데 필요한 복좌 에너지를 저장한다[2].

위와 같은 간헐 회전용 기구로서 제네바(Geneva) 휠 또는 그의 변형 기구 등을 검토한 바 있으나 본 응용에 적용하기에는 각기 치명적 단점을 갖고 있었다[3~5]. 이에 약실 드라이브 기구로서 산업용으로 다용되고 있는 평행 인덱스[3,6]를 고려하게 되었으며, 특히 구동 모터와 드라이브의 저용량화를 위하여 이전 모델[3]과는 달리 정지 대 회전의 시간 비가 1:1로서 소위 할부각이 180°이며, 90°씩 네번 간헐 회전함으로서 등분수가 4인 평행 인덱스를 채용하였다.



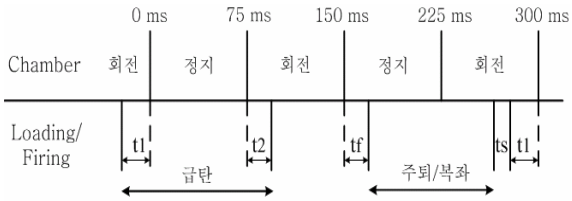
[그림 1] 밀어 넣기와 회전 약실 구동

이 경우 발사율이 분당 200발일 때, 급탄과 발사 및 주퇴/복좌 등 일련의 발사 과정은 아래 그림 2와 같은 타이밍 선도를 따르게 된다.

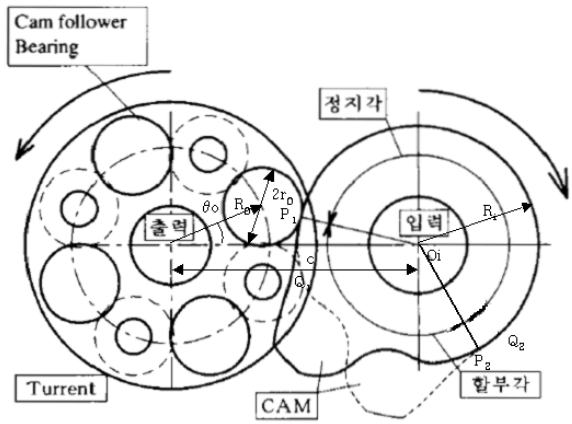
즉, 약실의 정지와 회전시간은 공히 75ms가 되며 t_1, t_2, t_s 및 발사 소요 시간 t_f를 무시할 때 급탄과 주퇴/복좌 시간은 각각 75ms와 150ms가 된다. 또한 300ms동안 약실은 총 180° 회전하며 탄 1발이 발사된다.

평행 인덱스의 구조는 그림 3에서와 같이 상/하판에 존재하는 이중 캠과 터릿 상의 캠 종동절(follower)가 차례로 맞물리며 회전함으로써, 터릿 부분의 간헐 운동을 구현하되 제네바 휠과 같은 각가속도의 불연속성과 백래시가 발생하지 않는 장점이 있다.

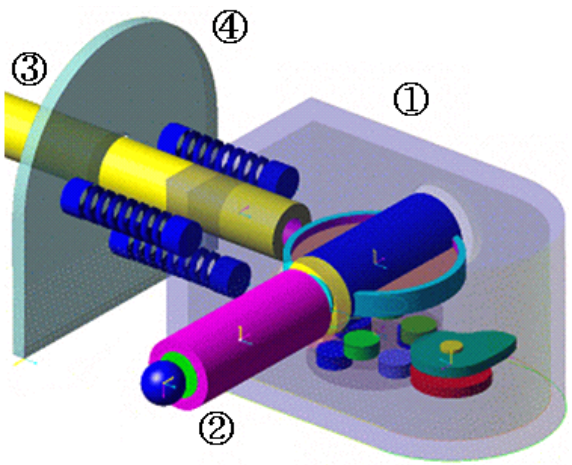
이와 같은 인덱스를 약실 드라이브로 응용한 포미 장치의 모델은 그림 4와 같다. 여기에는 포미부(①)외에도 약실로 진입중인 탄(②)과 포신(③)을 포함하고 있으며 주퇴/복좌 운동의 모델링을 위하여 사용된 고



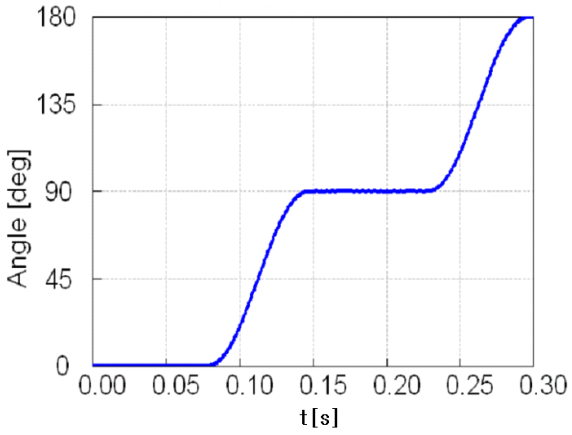
[그림 2] 약실 기구의 타이밍 선도



[그림 3] 평행 인덱스(할부각=120°인 경우)



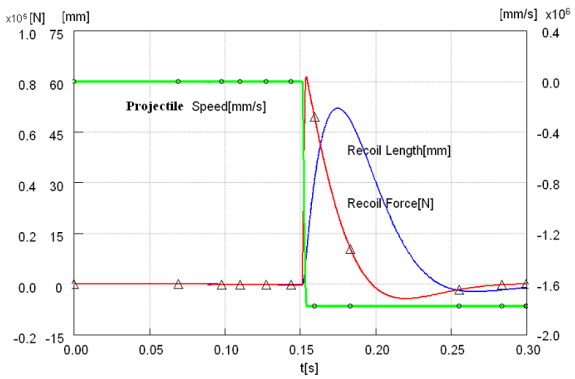
[그림 4] 자동포의 포미부 모델



[그림 5] 약실의 각도 패턴

정부(④)와 포미부 사이의 감쇠 스프링을 보여 주고 있다. 참고로 인덱스의 주요 치수는 축간거리 c=130mm, 캠 종동절 중심까지의 터릿 반경 R=60mm, 그리고 캠 종동절 반경 r=24mm 등이다.

상기 치수와 재료의 물성치를 적용하여 동역학 해석을 수행한 결과 정상 상태 중 약실의 각도 패턴은 그림 5와 같으며, RMS 토크와 드라이브의 최고 발사율 200발/분(spm)에 해당하는 모터의 회전 속도(400rpm)를 근거로 계산할 때 약 3.5kW의 정격 용량을 갖는 작동기가 요구됨을 알 수 있었다. 본 논문에서는 모든 동역학 해석을 위하여 RecurDyn[7]을 이용하였다.



[그림 6] 최적 설계된 주퇴/복좌 성능

3. 주퇴/복좌 계의 파라미터 설계

자동포의 성능 분석에 있어 간과할 수 없는 부분은 탄 발사 후 수반되는 포의 주퇴 및 복좌 거동이다. 이는 장갑차 자체가 발사 충격력을 얼마나 받게 될 것인가 하는 문제 외에도 최고 발사율의 결정에 직접적 영향을 미치기 때문이다.

본 논문에서는 이러한 주퇴/복좌 거동을 근사적으로 다루기 위하여 2절에서 언급한 바와 같이 선형 스프링-질량-댐퍼 모델을 도입하였다. 주퇴 질량이 213 kg, 점성 감쇠율이 0.707이며 목표 주퇴 길이, 주퇴 반력, 탄두 출구 속도 사양 등을 각각 52mm, 82kN, 1776m/s로 설정하였을 때 최적 강성이 540N/mm로 산출되었다.

그림 6은 상기 파라미터 적용 시의 주퇴/복좌 성능을 나타내며 그림 2의 해당 시간 150ms내에 주퇴/복좌가 완료될 것임을 예측할 수 있다.

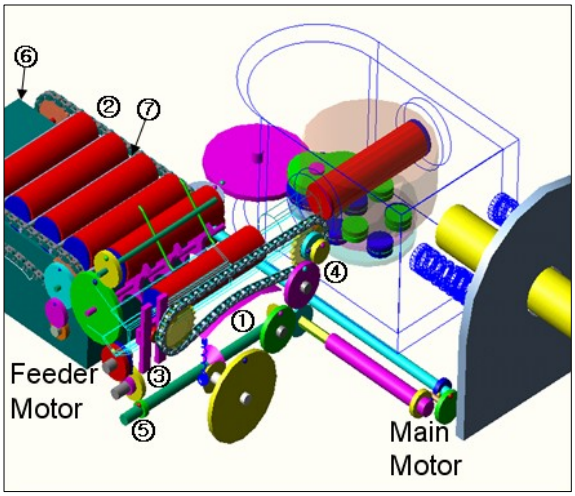
4. 급탄 및 송탄 장치 설계

약실에 탄을 공급하기 위한 장치로서 크게 급탄기(①)와 송탄 장치(②)가 설계되었다(그림 7 참조). 전자는 약실 장전 위치에 포신과 직교하도록 배치되며 구동원으로 약실용 모터를 공유하고, 후자는 약실과는 상대적으로 멀리 있으나 급탄 장치와 연동하여 연속적으로 탄을 공급하는 역할을 한다. 송탄 장치는

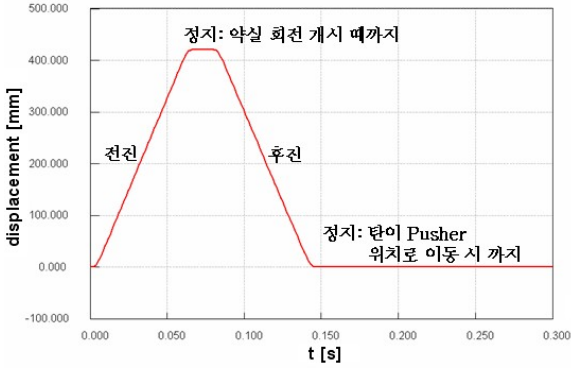
그 용도상 약실 기구와 급탄기로 구성되는 약실계와는 달리 별개의 모터를 사용하도록 설계되었다. 두 장치는 공히 무링크 구조인 체인을 통하여 구동되며 오동작과 과도한 장력의 필요성을 방지하기 위하여 곡면 형태의 장력기(tensioner)를 갖고 있다.

보다 상세히는 급탄 장치의 경우, 탄을 약실내로 밀어주는 밀판(pusher)(③)과 약실 계 모터의 동력을 단속하는 클러치(④)를 추가로 보유한다. 이는 연속 회전하는 약실 계 모터의 동력을 속성상 그림 8에서와 같이 간헐적으로 전·후진해야 하는 밀판의 운동에 적용하기 위한 수단이다.

한편, 송탄 장치는 그림 7에서와 같이 감속기(⑤)를 경유하되 약실 계(혹은 메인) 모터에 의하여 연속



[그림 7] 급탄 및 송탄 장치 모델



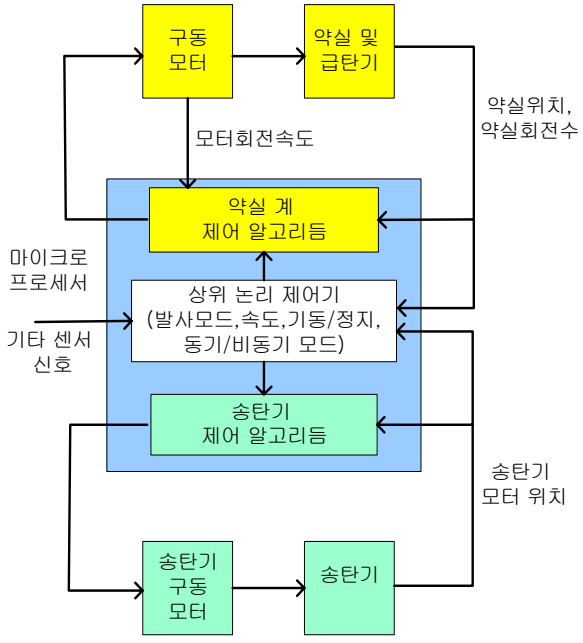
[그림 8] 밀판의 간헐 운동 타이밍

회전하는 별도의 매개 장치들[5]을 통하여 적절한 순간에 급탄기로 탄 한 개씩을 넘겨주게 된다. 이러한 송탄기용 구동 모터의 용량을 최소화하기 위하여 사실상 탄들은 격벽구조(⑥) 상에 지지되도록 하였으며 모터는 단지 탄과 탄사이의 횡방향 분리 막대(⑦)를 이동시켜 탄을 굴려 주는 역할만을 담당하도록 설계하였다.

5. 디지털 제어기의 설계

앞에서 설명한 포 전체계의 자동화를 위하여 그림 9에서와 같이 마이크로프로세서 기반 상위 논리 제어기 1개와 하위 제어기 2개를 구성하였다.

그 중 상위 논리 제어기는 발사 모드 및 속도 명령 입력에 따라 하위 2개 시스템 즉, 약실 계와 송탄기를 기동시켜 탄을 발사하고 발사 명령 완수 후 자동 정지시키는 역할을 맡는다. 이와 같이 약실계와 송탄기가 연동하는 동기 모드의 경우에는 2개 모터의 운동을 적절히 조화시켜 탄이 연속적으로 흘러갈 수 있도록 하여야 하며, 약실계가 정지된 상태에서 병사가



[그림 9] 제어기 아키텍쳐

송탄기에 탄을 보충하는 작업 등을 위하여 존재의 필요성이 있는 비동기 모드의 경우에는 하위 시스템간의 연동을 해제시켜야 한다.

한편 각 서브 시스템의 구동용 작동기로는 제반 사항을 고려하여 직류 서보 모터를 선택하였다. 이들 모터의 개별적 제어 방식은 약실계의 경우 과거 연구[3]에서와 같이 큰 부하 변동에도 불구하고 일정한 속도로 회전하기 위하여 외란관측기(DOB)[8,9]가 포함된 PID+prefilter 방식의 속도제어와 요구된 수의 탄이 발사된 후 원점복귀하기 위한 위치제어를 모두 고려하였다. 다만 디지털 제어를 위하여 식 (1)과 같은 쌍선형 변환[10]과 샘플링 주기 T=0.1ms에 의하여 시간 이산화된 제어기를 사용하였으며 해당 약실계의 제어 블록 선도는 그림 10과 같다. 참고로 선도 내 PI 주 제어기의 입력 x와 출력 v사이의 관계는 식 (2)와 같은 전달 함수 혹은 차분 방정식 형태로 표현된다.

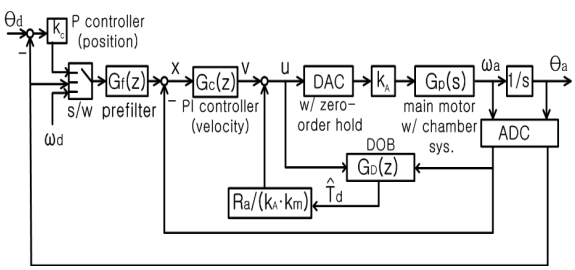
$$s \cong (\frac{z-1}{z+1})\frac{2}{T} \quad \text{for } T \ll 1 \tag{1}$$

$$G_C(z) = \frac{(K_p + \frac{T}{2}K_I)z + (-K_p + \frac{T}{2}K_I)}{z - 1} \tag{2a}$$

$$v(k) = v(k-1) + (K_p + \frac{T}{2}K_I)x(k) + (-K_p + \frac{T}{2}K_I)x(k-1),\ k = 1,2,3,... \tag{2b}$$

또한 블록 선도 내 DOB는 외란과 시스템 출력간의 전달함수와 출력신호로부터 외란 관측을 가능케 하며, 관측된 외란($\widehat{T}_d$)을 플랜트 입력에 반영함으로써 외란의 영향을 최소화 시키고자 하였다. 한편 prefilter는 출력에 미치는 유한 영점의 영향을 제거하여 과도 응답을 개선시키게 된다.

송탄기의 경우도 약실 계와 동일한 방식을 따르되 선도 내 S/W 블록이 없이 위치 제어만을 수행한다.



[그림 10] 제어 블록선도(약실계)

6. 제어 성능 시뮬레이션

제안된 제어기를 표 1과 같은 제원의 직류 모터 2개와 그들로 구동되는 약실 계 그리고 송탄기 모델에 적용하여 그 성능을 수치 시뮬레이션 하였다.

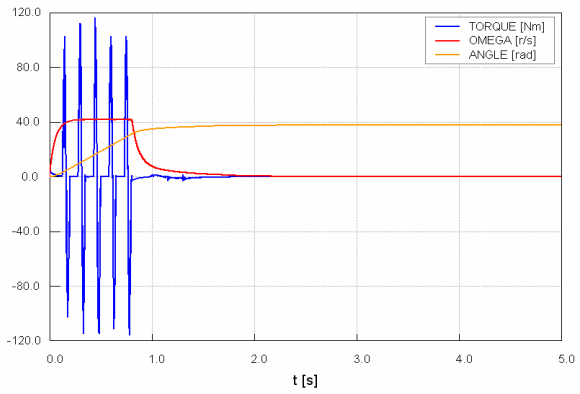
먼저 감속장치를 무시한 채 이너셔가 91,077kgmm^{2}인 약실만을 정지 상태에서 기동하여 최고 속도인 200spm으로 3발 연사 후 원점 복귀하도록 제어하였다. 그 결과 그림 11에서와 같이 과도 상태를 지나 2발부터는 속도 제어에 의하여 약실 드라이브의 요구 속도 41.87r/s(또는 400rpm)를 유지하다가 3발 발사 직후 로직 스위치(그림 10의 S/W)가 작동하여 위치 제어에 의해 약실이 원점 즉 초기 장전 각 위치로 복귀하며 정지하는 것을 알 수 있다. 아울러 상기 운동을 일으키기 위한 모터 토크가 주기적 간헐 운동으로 인한 부하의 변동 때문에 맥동하게 됨을 파악할 수 있다.

가. 동기 모드 제어

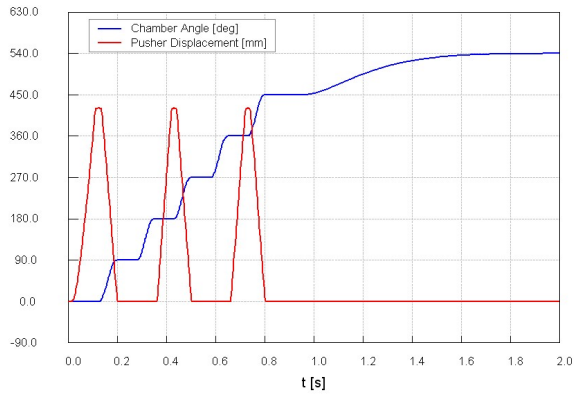
예로써 약실계와 송탄기를 통합한 전체 자동포 시스템을 최고속도로 3발 연사후 영점으로 복귀하는 동기 모드를 점검하여 보았다. 예측한 바대로 그림 12에서 보인 탄 발사 주기는 정상 상태에서 300ms이며, 밀판이 탄을 약실에 밀어 넣고 복귀하는데 150ms의 시간이 소요된다. 또한 약실을 90° 회전 시키는데

[표 1] 모터 관련 상수

k_m [Nm/A]	1.12	k_b [Vs/rad]	1.12
R_a [Ω]	0.169	k_A	10
J [kgm^2]	0.85	b [Nms/rad]	5e-5



[그림 11] 약실만 제어한 경우의 거동

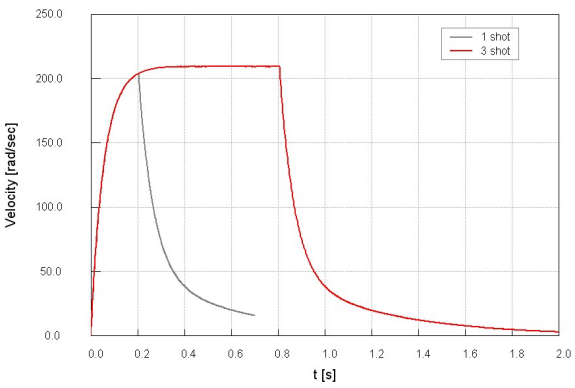


[그림 12] 시스템 통합 시뮬레이션

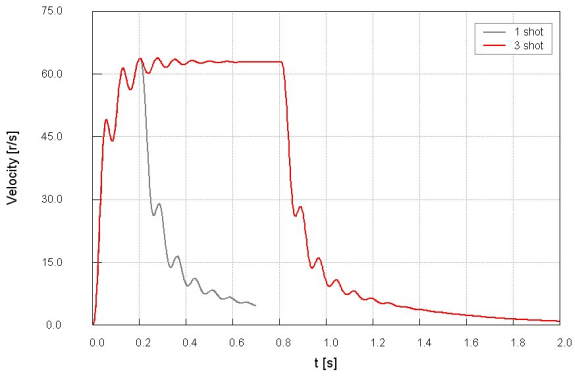
약 75ms가 소요되고 포가 주퇴/복좌하는데 약 150ms의 시간이 소요됨을 알 수 있다.

이러한 동기 모드를 위하여 약실의 실제 회전각을 감지하고 그 값에, 약실의 회전각 대 바람직한 송탄기내 탄 이송거리의 비율로 결정되는 상수를 곱하여 송탄기의 위치 제어 명령 값으로 사용하였다.

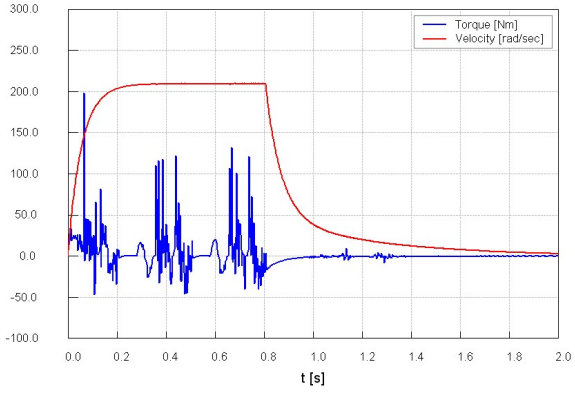
이 때의 각 구동 모터의 속도 추이는 그림 13~14에서와 같다. 한편 동 그림에는 단발 발사의 경우도 함께 비교하였다. 그림 13은 약실계 모터의 속도 궤적으로서 단발의 경우에는 미처 정상 상태 값(감속비 5*드라이브 속도 41.87r/s=209.4r/s)에 도달하지 못한 채 원점 복귀함을 보여 준다. 그림 14는 송탄기 모터의 속도 궤적이며, 송탄기가 위치 제어에 의존함에 따라 과도 상태의 속도는 그림 13과 유사한 경향의 평균 곡선 주위에서 요동함을 관찰할 수 있다.



[그림 13] 메인 모터의 속도 궤적

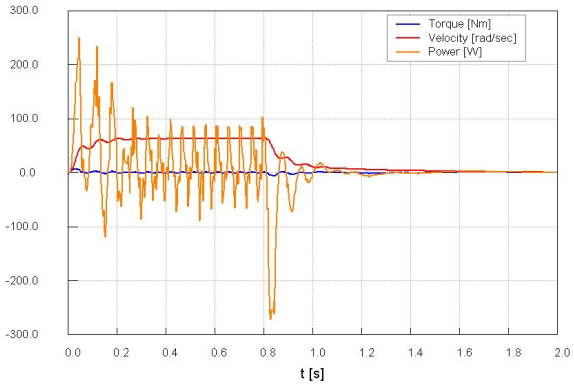


[그림 14] 송탄기 모터의 속도 궤적

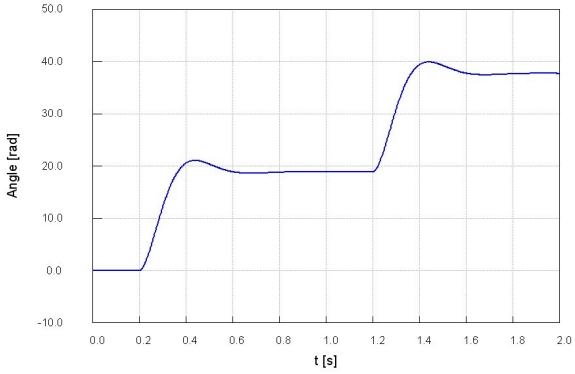


[그림 15] 메인 모터의 속도 및 토크 궤적

한편, 그림 15~16에는 동일한 경우의 모터 속도와 토크 곡선을 함께 도시하고 있어 요구 동력의 크기를 가늠케 한다. 즉 정상 상태에서 약실 계 모터의 경우



[그림 16] 송탄기 모터의 속도 및 토크 궤적



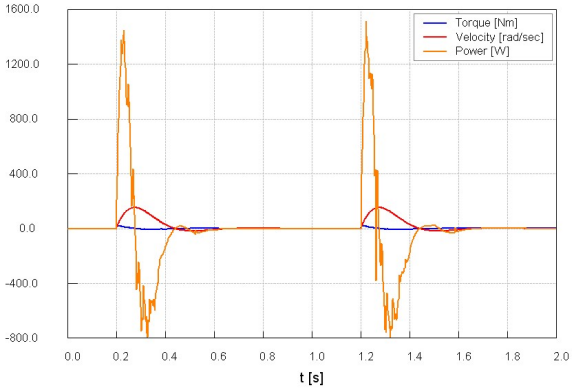
[그림 17] 비동기 모드 중 송탄기 모터의 회전각

동력 $P_{rms} = T_{rms} * \omega_{\max}$=25.8Nm*209.4r/s=5.4kW, 4개의 탄이 적재된 송탄기 모터의 경우 $T_{\max}$=6.8Nm, 기동과 정지 시 각각 $P_{\max}$=0.251, 0.271kW임을 알 수 있다. 한편 그림 11과 15의 토크 궤적의 차이로부터 급탄 장치 구동에 필요한 추가 토크의 크기를 알 수 있는 데, 특히 급탄 장치 내 클러치의 단속에 소요되는 시간을 가능한 범위 내에서 증가시킬수록 토크의 피크치가 저감됨을 알 수 있었다[5]. 이는 인가 외란의 주파수가 저하되기 때문으로 사료된다.

나. 비동기 모드 제어

5절 도입부에서 전술한 바와 같이 비동기 모드는 대표적으로 송탄기에 추가 탄을 적재하기 위한 운전 모드로서 송탄기용 제어기를 그대로 사용하지만 기준 위치 명령으로 단위 이송거리에 해당하는 일정 각을 계단 함수 형태로 주게 된다. 이 때 제어기내 바깥쪽 루프의 비례 이득 K는 이송 탄의 과도기 중 발생 가능한 위치 오버슈트의 허용 크기에 맞추어 조정할 필요가 있었다.

비동기 모드의 일예로서 송탄기에 2개의 탄이 적재되어 있고 정지상태에서 0.2초 이후 1초당 1pitch에 해당하는 18.85rad만큼씩 이동하는 명령이 내려지는 경우를 상정하였다. 그림 17은 그 때의 모터 회전각을 보여준다. 동 그림으로부터 알 수 있듯이 비동기 모드 중 DC 송탄기 모터의 거동은 마치 스텝핑 모터와 흡사하다. 한편, 그림 18은 모터의 속도, 토크, 파워를 보여주며, 그로부터 $T_{\max}$=22.6Nm, $P_{\max}$=1.4



[그림 18] 비동기 모드 중 송탄기 모터의 거동

kW, P_{rms}=0.3kW임을 알 수 있다. 따라서 상대적으로 급격한 가감속으로 인하여 동기 모드 보다는 비동기 모드에서 큰 동력이 필요함을 알 수 있다(그림 16, 18 참조).

7. 결 론

본 논문에서는 장갑차의 중구경 화기로서 화력 증강과 무장의 크기 제한을 동시에 만족시킬 수 있는 원통형 탄의 사용에 대비하여, 그에 적합한 자동포용 기구 및 디지털 제어기 설계 그리고 동력학 해석을 수행하였다.

이에 근거하여 최고 발사율이 분당 200발일 때 간헐 회전식 약실과 급탄기 구동에 필요한 작동기의 용

량이 약 5.4kW, 별도의 송탄 장치용 구동 모터의 용량이 비동기 모드에서 상대적으로 크게 요구되어 약 0.3kW임을 파악하였다.

한편 탄 발사 시 기본 모드인 동기 모드 중 약실계와 송탄기 시스템을 동기화시키기 위하여 본 논문에서 제안한 방법은 매우 효과적이었으며, 향후 다수의 작동기를 사용하되 시간 대신 사건에 기반하여 동기화 되어야 바람직한 모든 시스템에 적용 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2006년도 국방과학연구소의 기초연구비 지원과 한국과학재단의 목적기초연구(R-01-2003-000-10014-0) 지원사업(3차년도)으로 수행되었으며 이에 관계자들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] Michael Duckworth, “40mm CTWS Supporting UK and France”, 40th Annual Gun & Ammunition Missiles & Rockets Conference & Exhibition, 2005.

[2] David Leslie, “40mm Cased Telescoped Weapon System- A Weapon System to Match Army Transformation”, 36th Annual Gun & Ammunition Symposium & Exhibition, 9-12 April, 2001.

[3] 임승철, 김기갑, 심정수, 길성진, 이건하, 차기업, 조창기, 홍석균, “CTA 자동포용 회전 약실 기구 및 제어기”, 한국군사과학기술학회지, 9권, 1호, 2006.

[4] 권성규외 5인, 기구학, 피어슨 에듀케이션 코리아, pp.377～382, 2000.

[5] 임승철, 연구 최종 보고서 : 회전식 약실 기구의 디지털 제어 모델링 기법 연구, 국방과학연구소, 2006.

[6] 양헌기공, Handex, 2005.

[7] RecurDyn Basic Training Guide, Function Bay, Inc., 2004.

[8] 최영진, 양광진, 정완균, 김홍록, 서일홍, “강인성과 제어 성능을 고려한 외란 관측기의 설계 (I) : 2차 시스템에 대한 이론적 해석”, 제어·자동화·시스템공학 논문지, 8권, 8호, pp.655～663, 2002.

[9] M. Iwasaki and N. Matsui, “Robust Speed Control of IM with Torque Feedforward Control”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 40, No. 6, pp.553～560, 1993.

[10] C. H. Phillips and H. T. Nagle, Digital Control System-Analysis and Design-, 2nd Ed., Prentice Hall, 1984.