

유도무기체계 驅動장치 기술현황(1)



文義俊 / 국방과학연구소
책임연구원, 공학박사

유도무기체계를 위한 구동장치는 크게 유도탄 조종용 구동장치와 유도무기 발사대 터렛 구동장치로 나눌 수 있다. 유도탄 구동장치는 1회용이지만 높은 출력/무게비가 요구되고, 발사대 구동장치는 대부하라는 점에서 기술적 특성이 구별된다. 유도무기 구동장치로는 유압, 공압, 전기모터 구동장치가 쓰일 수 있으나 종래에는 작은 동력이 요구되는 전술용 유도무기의 구동장치를 제외하고는 많은 경우에 출력對 무게 比가 높은 유압구동장치가 사용되어왔다 (필자 주)

설계

되는 구동장치는 요구되는 성능과 Duty cycle, 허용공간 조건, 환경 조건을 만족시켜야 하고, 신뢰성, 정비성, 저장성 등이 높아야 하며, 가용한 동력원과 경제성이 고려되어야 한다.

구동장치의 설계 기준 및 구성

● 설계 기준

구동장치에 요구되는 성능 조건에는 일반적으로 다음과 같은 항목들이 포함된다.

- 최대 힘 혹은 토크
- 최대 (각) 변위
- 최대 (각) 속도
- 강성(Stiffness)
- 제어 정확도
- 주파수 반응대역

유도무기의 유도조종 회로 내에서, 기계적 요소가 포함된 구동장치가 종종 불가피하게 성능상의 가장 큰 제약을 준다. 그러므로 구동장치의 높은 성능은 기동성이 높은 유도무기를 위해 필수적이다. 그러나 필요 이상의 높은 성능요구는 지나치게 크고 무거우며 따라서 값비싼 부품을 요구한다.

특히 유도탄 구동장치에서 최대 속도, 최대 힘 등 성능상의 제한이 구동장치가 공급할 수 있는 에너지 양을 제한한다.

조종날개의 공탄성(aero elastic) 현상인 동요(flutter)시에 날개의 이탈 등 심각한 결과를 막아준다는 점에서 너무 큰 성능상의 여유는 바람직하지 않다.

구동장치의 환경 조건에는 온도, 가속도, 진동, 습도, 모래/먼지, EMI(electromagnetic interference), 핵 경화(nuclear hardening) 등의 조건들이 포함된다.

● 구동장치의 일반적 구성

직접 구동력을 내는 구동기와 구동기의 움직임을 제어하는 구동 제어기 외에 구동 에너지를 공급하는 동력원과 동력 전환장치로 구성된다.

유도탄에서 사용되는 동력원으로는 축전지, 고압의 상온 압축 기체, 고온 기체 발생기 등이 있다. 유도무기용 축전지로는 일회용이며 저장성이 높은 열 축전지와 silver-zinc 축전지가 많이 사용된다.

열 축전지의 전해 물질은 상온에서는 고체 상태를 유지하다가 열이 가해지면 녹으면서 비로소 작동한다.

열 축전지는 상온에서는 대단히 안정하여 저장성이 높으며 가열함에 따라 1초 내의 짧은 시간 동안에 작동을 시작한다.

상온 압축동력원은 기체용기에 고압으로 충전된 기체(질소나 헬륨)를 사용하며 고압 기체 동력을 얻는데 쓰이는 고온기체 발생기는 주로 산탄통에 든 고체연료를 연소시킨다. 또한 Isopropyl Nitrate와 같은 액체연료도 동력원으로 사용될 수 있다.

구동장치는 위치 혹은 드물게는 힘과 속도의 제어를 위하여 케환 감지기를 사용하여 폐회로를 구성하는 것이 일반적이다.

비교적 낮은 동적 및 정적 성능이 요구되는 경우에는 bang-bang 형태의 간단한 開회로 구동장치도 사용되나, 높은 강성, 반응속도 그리고 정확도를 위해서는 서보 구동장치가 사용된다. 때때로 주 케환회로 내에 시스템 성능 특히 동적 특성을 높이기 위하여 속도 혹은 가속도 부(minor)회로가 추가된다.

발사대 구동장치의 경우 0~90°사이의 고각 구동변위와 ±180° 범위의 구동변위가 요구되며 resolver, synchro, encoder 등의 위치 케환 감지기가 사용된다.

서보 전자회로는 보상회로와 출력 증폭회로로 구성된다. 서보 보상회로는 위치제어 시스템의 안정성을 유지하고 제어정확도와 동적 특성을 더욱 높이기 위하여 이용된다.

이러한 구동장치의 제어회로에는 수동 및 능동 소자를 이용한 아날로그 제어기가 많이 사용되어 왔으나 근래에 와서는 마이크로 프로세서 칩을 이용한 디지털 제어기가 보편화 되어가고 있다.

디지털 자동 조종 장치가 일반화되어 있으므로 구동장치의 제어기도 D/A 등의 인터페이스 문제를 없앨 수 있게 「all the way」 디지털화가 요구되고 있다.

그러나 유도탄 구동장치의 경우 부피가 작고 신뢰도와 정확도가 높은 디지털 위치케환 감지기의 확보 등에 문제가 있어 현재로서는 디지털 제어기에 D/A 혹은 A/D 변환기를 거쳐 아날로그 구동장치로 사용하는 hybrid 구동장치가 계속 쓰이고 있다.

최근에는 연산속도가 빠른 DSP(Digital Signal Processor)칩을 이용하여 특히 DC brushless 모터를 위한 제어기 구현이 활발히 시도되고 있다.

동력 전환/전달기는 주로 선형운동을 회전운동으로 전환시키거나 감속을 위해 필요하며, 구동장치에 따라 동작전환만을 위해서 간단한 크랭크나 로크암이 쓰이거나 동작전환과 감속을 함께 얻기 위해서 더 복잡한 기어 시스템이나 정교한 볼스크류가 요구될때도 있다.

동력 전달기구는 구동장치가 높은 강성을 가지게 짧고 강하게 설계되어야 하며 따라서 구동장치는 가능한한 구동될 부하 가까이에 설치된다. 구동장치에는 여러가지 동력원을 사용할 수 있으며 구동기에도 여러가지가 있어 다양한 종류의 구동장치가 구성될 수 있다.

구동장치별 특성 및 발전현황

● 유압 구동장치

유압 구동장치는 구동을 위해 2천~4천 psi의 고압의 유압을 사용하는 장치이다. 유도무기에서 고압의 유압을 얻는 방법으로는 유압 펌프를 사용하는 순환식 방법과 고압의 축압기를 사용하는 축압식 방법이 있다.

상대적으로 큰 힘을 요구하며 數分 이상의 비행시간을 갖는 중장거리용 유도무기에서는 축전지를 동력원으로 하는 DC 모터 펌프 시스템이 사용된다.

그러나 축전지(DC 모터)유압펌프 시스템은 1회성인 유도무기에는 비싸므로, 비록 비행시간 혹은 작동시간은 길지 않으나 유압의 높은 특성을 요구하는 유도무기에서는, 한쪽면을 상온 혹은 고온의 고압기체로 가압하는 축압식 시스템이 사용된다.

흔히 상온 고압기체는 고압으로 충전된 기체용기로부터 얻으며 고온 고압기체는 고체 연료를 연소시켜 얻는다. 상온 압축 기체를 동력으로 하는 유압 구동장치는 축압식 blow down 유압 구동장치라 불리운다.

그러나 축압식 유압 시스템은 작동유를 재순환시키는 장치가 아니므로 작동유를 저장하는 저유기가 작동시간에 비례하여 커지며 따라서 작동시간이 짧은 경우에만 적용이 가능하다.

그 외에 순환식 유압동력원으로 고압의 기체로 유압펌프가 연결된 터빈을 돌려 유압을 얻는 방법도 있다. 이 방법은 터보유압 동력원으로 불리우며 요구 유량이 크고 작동시간이 비교적 짧은 유압 구동장치에 사용되며, 수만에서 수십만 rpm으로 회전 가능한 터빈과 유압펌프 및 저유장치로 구성된다.

유압 구동장치의 제어는 전기 유압밸브를 통해 이루어진다. 전기 유압밸브에 의해 제어되는 유압장치는 전기유압식 구동장치라고도 하며 제어는 전자제어의 융통성을 얻기위해 전기 유압밸브를 이용하며 힘은 유압력에 의해 얻는다.

주로 사용되는 전기유압밸브는 1단 혹은 2단 서보 밸브를 전기적 입력신호에 의해 작동 유 흐름의 양과 방향을 동시에 제어한다.

서보 밸브는 기술적으로 상당히 개발되어 1백Hz 이상의 높은 주파수 반응특성을 가지고 있으며, 큰 신뢰와 함께 사용되고 있으나 정밀도 0.0001인치 정도의 고정밀 부품으로 가격이 비싸고 오염에 약하다.

최근에는 반응이 빠르고 값이 싼 on-off 혹은 비례 솔레노이드 밸브가 개발되어 사용이 증가되고 있다. 솔레노이드 밸브는 가용 동력

최근 유도무기의 높은 기동성 혹은 반응성 요구에 의해, 더욱 높은 성능을 가진 새로운 형태의 디지털화, 집적화가 이루어진 구동장치가 요구되고 있는 가운데 새로운 磁性재료들의 개발, 제어기술 및 동력전자 기술의 발달과 기타 구동장치 관련 기술의 발전도 두드러져 각 구동장치의 기술수준, 구동장치의 선택기준, 설계개념 등이 빠른 속도로 변화하고 있다

이 극히 제한된 유도 무기에서 동력손실 방지를 위한 closed center 장치를 구성할 수 있다는 장점이 있다.

유압 구동장치의 동작전달기구는 비교적 간단하므로, 구동장치의 강성은 주로 구동기와 밸브 그리고 그 사이의 연결로 안에 들어 있는 유압유의 탄성에 좌우된다.

일반적으로 유압 구동장치는 시스템이 복잡하고 유압펌프, 서보밸브 등의 고정밀 부품을 요구하므로 가격이 비싸고 오염에 취약하며 정비가 복잡하다. 유압유는 온도 변화에 따라 점성과 체적탄성계수 등의 변화가 심하고 누설에 대한 방지 문제가 단점이 된다.

특히 유압유의 압력강하 등에 의한 에너지 손실은 대부분 열에너지로 변하므로 유압장치에서 온도상승 방지는 중요한 설계 고려사항의 하나이다. 유압구동장치의 또 하나의 단점은 무동작 동력손실이 크다는 점이다.

이는 유압구동장치가 작동치 않을때라도 일정 시스템 압력을 유지해야 하며 이로 인한 누설 손실이 크기 때문이다. 유압 구동장치에 사용되는 유압유가 가연성이며 온도변화에 따라 점성 변화폭이 크다는 점 등도 유압 구동장치의 큰 단점이 된다.

최근 유압 구동장치의 발전추세는 다음의 3가지로 집약할 수 있다.

- 고압 시스템화
- 집적화
- 디지털화

고압 시스템화는 주로 항공기 유압구동장치와 관련하여 부피와 무게를 줄이고 반응속도를 높이기 위하여 작동압력을 현재의 일반적인 3천psi에서 더 높은 압력으로 높이는 시도 방법이다.

미국 해군에서 주관하여 Rockwell사에서 10여년 동안 2만psi까지의 시스템을 시험 연구한 결과, 8천psi 압력이 항공기 유압시스템의 최적압력으로 선정되었다.

압력상승에 따라 고강도 재질 혹은 베어링 문제 외에 누설에 대한 밀폐문제, 온도상승문제 등이 예상되었으나 현재까지 대부분 기술적인 문제들이 해결되었다.

최근 큰 관심을 끌고 있는 항공기의 FBW화를 위하여 유압 구동장치의 집적화와 디지털화가 시도되어 왔다. 집적화의 시도로 integrated hydraulic package, 집적화된 액츄에타 혹은 더 나아가서 유압동력원과 액츄에타가 독립적으로 집적된 전기-정유압구동장치(EHA)가 개발되었다.

이러한 집적화 기술은 실링 기술의 발전과 함께 유도탄 유압 구동장치의 신뢰성 향상에 이바지하고 있다.

지능적인 구동장치를 구현키 위한 디지털화의 일환으로 동력 증폭 및 제어를 위해 종래에 사용된 2단 혹은 다단 밸브 대신 높은 전류의 디지털 PWM신호를 받아 밸브의 주(main) 스펴을 토오크 모터가 직접 구동하는 direct drive 밸브의 이용이 시도되고 있다.

Direct drive 밸브의 사용은 디지털화는 물론 유압 증폭단을 없애므로써 가격 저하 및 신뢰도 향상을 가져다 주며, SmCo5와 같이 희토류 자성체의 개발과 부피가 작아진 solid state amplifier의 등장으로 가능해 졌다.

●공압 구동장치

공압 구동장치는 작동유체로 기체를 사용하며 고압기체를 얻는 방법 즉, 동력원에 따라 다음의 2가지 시스템으로 구별된다.

- 고온 기체 장치(hot gas system)
- 상온 기체 장치(cold gas system)

고온 기체 장치에서는 산탄통에 든 Ammonium Nitrate 혹은 Mechanite 14 등과 같은 비교적 낮은 온도에서 연소하는 고체 연료를 연소시켜 고온의 고압기체를 생성시켜 고압 기체를 얻는다. 이 경우 압력 조절을 위해서는 릴리프 밸브가 사용된다.

상온 기체 장치에서는 기체의 압축성을 이용하여 고압용기에 작동기체를 6천~1만2천psi 사이의 고압으로 충전하고 밀폐한 후 저장하였다가, 유도탄 발사시 압력조절기에 의해 5백~2천psi 사이로 강하시켜 사용한다.

상온 기체 장치에서는 그 작동기체로 건조된 공기나 기체질소(N₂) 혹은 헬륨(He)을 사용한다. 그중 공기가 가장 얻기 쉽지만 고압에서는 압축성이 좋지 않아 6천psi 이하에서 사용되며, 질소 또한 공기와 비슷한 압축성과 유량 특성을 가진다. 헬륨기체는 불활성이며 1만psi 부근에서 압축성이 비교적 높다.

특히 기체 상수가 공기 혹은 질소의 7배로 체적 유량 특성이 $\sqrt{7}$ 배 만큼 높아 빠른 동특성을 주며 열전도율이 커서 등온과정에 가까운 체적팽창을 하므로 동일한 동력전달을 위한 기체 질량 소모가 낮다.

공압 구동기로는 push-pull 혹은 push-push 형이 많이 사용된다. 공압 구동장치의 감쇄 특성을 높이고 피스톤 위치에 따른 시스템의 동적 특성의 변화를 줄이기 위하여 감쇄 오리피스가 사용된다.

공압 구동장치의 제어기로는 대개의 경우에는 간단하며 값이 싸고 신뢰성 높은 직구동 on off 솔레노이드 밸브가 사용된다. 점성이 낮은 기체의 흐름을 제어하는 공압 솔레노이드 밸브에는 포펫(poppet)형이 많이 쓰인다.

유압 서보밸브에서 자주 쓰이는 스펴밸브와는 달리 포펫밸브는 주로 on-off 형이지만 간단하고 저렴하며 닫혔을때 밀폐성이 좋다.

공압구동장치에서 가장 자주 적용되는 밸브 구동방법은 PWM 구동으로 on-off형의 2-way 혹은 3-way 솔레노이드 밸브를 사용하여 비례제어를 얻을수 있다.

또한 높은 주파수의 PWM 반송파에 의해 진동효과를 얻을수 있어 오염이나 여러가지 비선형 요소들의 영향에 민감도가 낮은 시스템을 구현할수 있다.

PWM방식은 소모전력이 25-30와트 정도로 작으므로, 솔레노이드의 수명과 성능에 큰 영향을 미치는 온도상승을 감소시켜 준다.

PWM 반송주파수는 매끄러운 반응 특성을 얻기 위해 공압 구동장치 주파수 반응대역의 5-10배 정도로 높게 선정될 것이 요구된다.

따라서 20Hz 이상의 주파수 반응대역을 가지는 공압 구동장치를 구성하기 위해서는 1백Hz 이상의 PWM 반송주파수가 선정되어야 하며, 선정된 반송주파수에서 충분한 선형 제어범위 혹은 변조비율을 가지기 위해서는 1.5msec 이하의 반응속도를 가진 솔레노이드 밸브가 요구된다.

공압 구동장치의 시정수(time constant)는 제어 체임버 내의 압력 상승을 위해 기체가 충전되고 배기되는 시간에 좌우되며 기체의 압축성에 의해 이 시간이 상당히 길다. 결국 공압 구동장치는 기체의 압축성으로 말미암아 시스템 동적강성, 반응속도와 회로이득이 낮고 따라서 위치 제어 정확도가 떨어진다.

특히 공압 구동장치의 낮은 강성으로 인한 불안정성을 고려하여 유도탄 조종날개의 설계시 가능한한 작은 음의 공력부하가 작용하게끔 힌지선을 두어야 하며, 음의 부하 load rate가 양의 부하 load rate의 2분의 1 이상을 상회하지 않도록 추천된다.

그외에 공압 구동장치는 비선형 특성이 두드러지고 따라서 이론적 해석이 어려우며 기체의 점성이 낮아 감쇄 특성이 나쁘고 밀폐가 어렵다.

그러나 유압 구동장치와는 달리 동력 전환기가 따로 필요없으며, 작동기체의 무게가 작고, 사용되는 부품들의 구조가 비교적 간단하여 값이 싸다.

특히 짧은 작동시간을 위한 구동장치의 경우에는 시스템 전체무게나 체적이 작다.

또한 보관수명이 길며, 저온, 고온 및 핵반응 환경에서 유리하다는 장점이 있다. 특히 공압 구동장치는 고압기체가 밸브 오리피스를 통과할때 일어나는 팽창에 의해 얻어지는 Joule-Thomson 효과로 냉각작용을 얻으므로 유압장치와는 달리 고온 환경이나 자체 온도상승이 큰 문제가 되지않는다.

또한 공압시스템에 대한 이해의 증가와 새로운 고성능 솔레노이드 밸브 등의 개발에 의한 세심한 설계로, 유압시스템의 동특성에는 미치지 못한다.

그러나 소형 전술유도무기에서 요구되는 40Hz 가까운 주파수 응답특성을 가지는 공압 시스템의 개발이 충분히 가능하여 종래의 유압 구동장치가 응용되던 분야에까지 그 응용범위가 넓어지고 있다.

● 전기모타 구동장치

전기모타 구동장치는 전원을 직접동력원으로, 전기모타를 구동기로 사용하는 장치를 말하며, Electro-Mechanical 혹은 EMAS(Electro-Magnetic Actuation System)라 불리운다.

유도무기용 구동장치에 사용될수 있는 전기모타의 종류로는 DC PM(permanent magnet) 서보모타, DC PM direct drive 토오크 모타, Stepper 모타, AC synchronous 모타 등이 있으나, 빠른 반응과 높은 위치제어 정확도를 위해서는 DC PM 모타가 적합하다.

DC PM 서보 모타는 작은 모타로 큰 출력을 얻기 위하여 고속회전 모타를 감속시키며, 이를 위해 스퍼기어와 볼 스크류를 사용한다. DC PM 모타의 큰 단점은 회전자의 armature 코일에 전류를 적절히 분배하여 보내기 위해 정류자와 브러쉬가 필요하고, 이에 따라 브러쉬의 마모와 EMI 문제 등이 생기는 것이다.

프레임이 없이 회전축에 바로 붙일 수 있는 direct-drive DC PM 토오크 모타는 감속기어의 부정확성, limit cycle 진동 등의 악영향을 없애준다. 그러나 우선 직경이 크고, 고출력 서보증폭기를 요구하므로 과구동(over drive)시 정상상태 발열 문제가 더욱 심각하다.

여러가지 심각한 제약조건이 주어진 유도무기 시스템에서 최적의 구동장치를 선정하고 구현하는 것은 중요하면서도 어려운 문제이다. 선진국과 뚜렷한 기술 격차가 존재하는 가운데, 유도무기에 관련된 부품의 판매와 기술이전이 엄격히 통제되고 있는 상황에서, 발전된 유도무기용 구동장치를 성공적으로 개발하기 위해서는 많은 분야에서 국내 기술의 발전이 시급히 요망되고 있다

큰 유도계수에 의해 전기적 시간상수가 크며, 외력에 의한 교란이 기어에 의한 감소 없이 바로 모타에 전해지므로 서보 강성이 낮다는 단점이 있고, 브러쉬로 인한 마모와 EMI 문제도 여전하다.

최근의 전기 모타 구동장치 관련기술의 큰 진전이 있기 이전에는 클러치를 이용한 DC 모타가 사용되었었다.

기존의 Alnico(Aluminum-Nickel-Cobalt), Ferrite 등의 자성체들은 큰 부하에서 빠른 간헐적 작동과 갑작스런 방향 전환등에 의해 모타의 성능이 떨어진다.

1970년대 후반에 와서 전기모타의 영구자석으로 Alnico나 Ferrite보다 매우 큰 보자력과 에너지 밀도를 갖고있는 희토류의 Samarium-Cobalt(SmCo5, SmCo17)와 Neodymium-Iron-Boron(Nd-Fe-B) 합금 자성체가 개발되어, 높은 전류를 흘릴수 있는 트랜지스터 스위치와 같은 반도체기술의 발달과 함께 작은 무게와 부피를 가지고도 응답성이 높은 전기모타 구동장치의 개발이 가능하게 되었다.

DC PM 서보 전기모타 구동장치의 경우, 스퍼기어 혹은 볼 스크류에 의해 감속이 필요하고 따라서 부하의 관성은 물론 기어를 포함한 모타 자체의 관성이 구동장치 동특성에 큰 영향을 미친다.

희토류 자성체를 사용함으로써 동일한 힘을 내기 위한 자성체 자체의 무게도 줄고 「In-

side-Out」 구조를 가진 브러쉬가 없는 DC 모타 혹은 AC PM 브러쉬가 없는 모타의 설계로 더 높은 출력대 관성력비를 갖게되어 응답성이 더욱 높아졌다.

더우기 Inside-Out 구조는 모타의 주된 열손실인 고정자에서의 copper 손실로 인해 발생하는 열을 모타의 케이스를 통해 바깥으로 전달시킬수 있고 슬립링을 사용하지 않고도 권선의 온도를 측정할수 있어 모타의 열적 제어가 크게 향상되었다.

Brushless 모타에서는 기계적인 브러쉬와 정류자가 없어 EMI 문제, 브러쉬의 마모문제가 해결되었으나 정류를 위한 전자회로가 추가로 필요하여 전체적인 제어전자회로가 복잡하고 이를 위해 회전자의 위치를 측정하는 감지기가 필요하다.

전자 정류를 위한 회전자 위치 감지기에는 정류방식에 따라 optical, inductive, capacitance 트랜스듀서와 그리고 Hall effect 감지기 등이 사용될수 있다.

많이 쓰이는 6단계 구형과 정류방식을 위해서는 Hall effect 감지기가 신뢰성이 높고 전력소모가 작고 복잡한 전자회로도 요구치 않아 널리 사용된다.

특히 저속에서 토크 변화와 속도ripple이 작다는 장점이 있는 정현파 정류방식과 함께, resolver, inductosyn, 혹은 sychro도 사용된다.

모타의 구동제어는 전류제어와 전압제어의 2가지 방식이 있으며 구동방식에는 선형 서보 증폭기에 의한 구동방식과 스위칭 서보 증폭기에 의한 펄스폭 변조방식이 있다. 선형 서보 증폭기는 간단하고 값이 싸며 소음 문제가 없으나 동력 손실이 크므로 수백와트 이상의 모타 구동에서는 PWM 방식이 주로 쓰인다.

일반적으로 DC 모타는 제작사가 제시하는 정격 전류보다 순간적으로 3-4배 높은 전류로 과구동시킬수 있으며, SmCo, Nd 같은 희토류 자성체들은 기존 자성체들보다 더높은 peak 과부하를 견딜수 있어 쉽사리 탈자나 성능저하를 일으키지 않는다. (다음호에 계속)