

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(3), 272-281(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.3.272

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

초소형 스마트탄 최근기술 동향분석

이성현*, 조한진**, 조영기**, 방효충***

Recent Status on Miniature Smart-bullet Techniques

Seongheon Lee*, Hanjin Cho**, Youngki Cho** and Hyochoong Bang***

Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology* , ***
Core Tech R&D Lab, LIG Nex1**

ABSTRACT

Miniature smart-bullet is a human-carrying guided missile designed to hit a target easily while having a miniature size. Contrary to the normal missiles, miniature smart-bullet is highly expected to enhance the military strength and survival rate of troops by its compact size readily carriable to a single soldier. In this paper, previously developed techniques, activities and patents of miniature smart-bullet, particularly its structural shape and actuators are surveyed. Furthermore, analysis of required techniques to develop a miniature smart-bullet are also discussed for upcoming conceptual design.

초 록

초소형 스마트탄은 탄도를 수정하여 손쉽게 목표물을 타격할 수 있도록 고안된 개인 휴대용 유도미사일이다. 초소형 스마트탄은 유도미사일에 준하는 기능을 수행하는데 반하여 그 크기가 일반 병사들이 쉽게 휴대할 수 있도록 축소됨으로써 아군의 전력과 생존율을 크게 높일 수 있을 것으로 기대된다. 본 논문에서는 초소형 스마트탄의 탄도수정을 위해 사용된 구동장치를 중심으로 해외에서 선행된 기술개발 사례와 특허들을 수집해 보았다. 이를 바탕으로 초소형 스마트탄의 개발을 위한 소요기술들을 분석해 보고, 추후 개념설계를 위한 초석을 마련하였다.

Key Words : Smart-bullet(스마트탄), Guided Missile(유도 미사일), Guided Bullet(유도탄), Piezoelectric Actuator(압전 구동기)

1. 서 론

이라크전, 아프간전 등 현대전의 양상에서 확인되는 바, 오늘날의 전쟁은 원거리 정밀타격을 이용하여 아군의 전력을 최대한 보존하고, 무기체계를 무인화·효율화하여 적은 비용으로 전장을

장악하는 방향으로 발전해 나가고 있다. 초소형 스마트탄은 이러한 추세를 반영하여 탄환의 비행 속도를 조정하거나 원하는 방향으로 탄도를 수정하고, 더 나아가서는 스마트탄에 탑재된 각종 센서로부터 얻은 데이터를 외부로 송신하는 기능을 수행하도록 설계되고 있다. 이는 무차별적으로

† Received : November 3, 2014 Revised : January 16, 2015 Accepted : February 6, 2015

* Corresponding author, E-mail : skynspace@kaist.ac.kr

사격이 이루어지던 전장의 패러다임을 바꾸고, 교전에 사용되는 탄환의 수와 교전시간을 축소함으로써 아군의 전력과 생존율을 높이는 데에 크게 기여할 수 있다.

초소형 스마트탄의 개발에는 미소전자기계시스템(MEMS: Micro Electro Mechanical Systems)의 발달로 인한 각종 센서들의 소형화가 큰 획을 담당하고 있다. 그 반면, 실제 탄도제어에 필요한 기계식 구동장치는 소형화에 한계점을 지니고 있기 때문에 기계적인 구조로 링크지·타면, 혹은 추력 방향제어를 구성하여 스마트탄을 제어하는 데에는 많은 어려움이 따르고 있는 실정이다.

본 논문에서는 해외 기술개발 사례와 특허들을 바탕으로 초소형 스마트탄에 대한 기술동향을 분석해 보고, 특히 스마트탄의 형상과 구동장치를 어떠한 방식으로 구성하였는지 정리하여 향후 초소형 스마트탄의 개념설계를 위한 초석을 마련하고자 한다.

II. 기술개발 및 특허 사례

2.1 기술개발 사례

2.1.1 BLAM

미국에서는 이미 1995년부터 항공기에서의 사격 명중률을 높이기 위한 방안으로 스마트탄인 BLAM(BalleL Launched Adaptive Munition)의 개념설계를 시작하였다. 설계된 탄환은 밑면의 직경이 약 50mm, 길이가 134mm인 원뿔 형태를 하고 있으며, 내부에 압전 세라믹 근육(piezoceramic tendons)을 배치하여 머리와 꼬리 부분이 관절과 근육으로 결합된 형태를 모사하고 있다(Fig. 1).

내부 압전 구동기의 길이를 변화시켜, 머리 부분이 꼬리를 기준으로 자유롭게 방향을 전환할 수 있도록 하였고, 이를 통하여 탄의 방향을 제어하는 데에 성공하였다. 압전 구동기를 이용하여 빠른 응답속도를 가지는 것이 특징이며, 개발 당시 탄환의 구조적 강도 문제(발사 도중 작용하는 수천g에 달하는 가속도를 견뎌야 함), 탄환의 작동 및 보관환경(온도)에 대한 구동장치의 영향이 주요 쟁점이었다[1,2].

2.1.2 EXACTO

EXACTO(Extreme Accuracy Tasked Ordnance)는 미국 국방 고등 연구 기획청(이하 DARPA)에서 2008년부터 저격수를 위한 50구경의 유도탄환 개발을 위해 록히드 마틴과 1230만 달러 Teledyne Scientific & Imaging, LLC 와 950만 달러규모의 계약을 체결하여 진행하고 있는 프로그램이다[3].

저격수들에게 있어 원거리에서 빠르게 움직이는 목표물을 안개나 흙먼지, 거센 바람과 같은 악조건을 뚫고 맞힌다는 것은 쉽지 않은 일이며, 탄환이 불발되어 제시간에 임무를 완수하지 못하면 자신의 위치가 발각되고, 아군의 임무 수행에 차질이 발생하는 등 안전에 위협을 받을 가능성 또한 증가하게 된다.

EXACTO 프로그램은 이러한 위험성을 차단하고 저격수들의 명중률을 높이기 위하여 스마트탄을 개발함으로써, 주·야간 전천후 활용 가능한 저격 시스템을 구축하는 것을 목표로 하고 있다. 해당 시스템은 탄도 수정이 가능한 자세 제어 및 실시간 유도 시스템으로 구성된다고 밝혔을 뿐, 자세한 개발 진행상황 및 성능은 보안상 밝혀진 바가 없고[4], 2014년 7월에 들어 실험자료 일부가 언론에 공개된 바 있다[5].

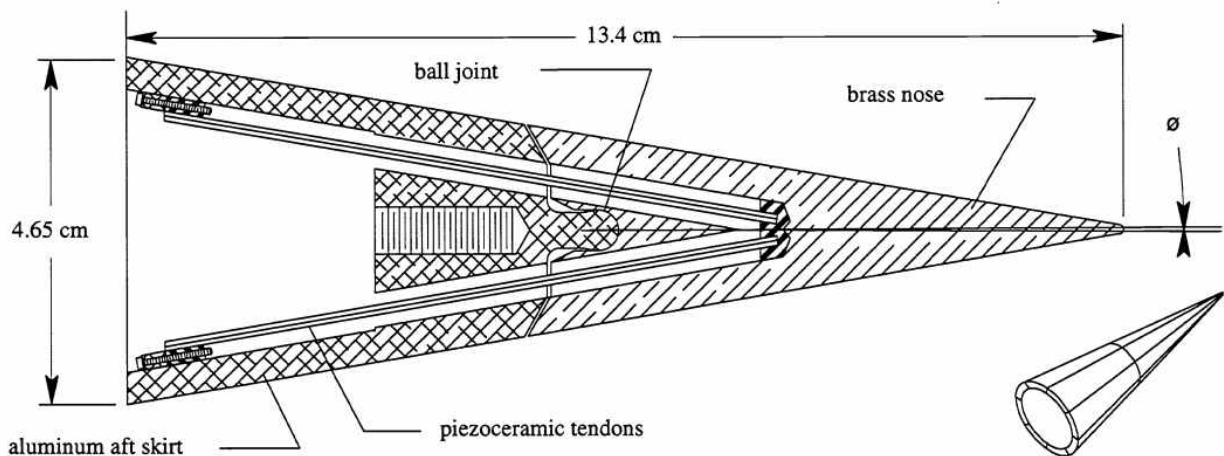


Fig. 1. Overall Configuration of the BLAM[1]

2.1.3 Self-guided bullet program

2012년 미국의 샌디아 국립 연구소(Sandia National Laboratories)에서는 초소형 유도탄에 대한 시제품을 발표한 바 있다(Fig. 2). 탄두에 광학센서를 장착하여 레이저빔으로 조준된 물체를 추적할 수 있도록 하였고, 전자석을 이용한 구동기로써 후미의 타면(Control fin)을 초당 30회까지 조정하여 자세를 제어하게 된다. 일반적인 탄두가 축방향으로 고속회전하여 안정성을 확보하는 것과는 다르게, 탄두를 무겁게 하고 사면(四面)으로 지느러미를 부착하여, 다트와 같이 안정적인 직선 비행이 가능하도록 하였다(Fig. 3)[6].

당사의 모델링 및 시뮬레이션 결과, 해당 탄환은 사수에 의한 명중률을 90%까지 끌어올릴 수 있으며, 바람 등의 악조건에서 탄환이 목표물로부터 30피트 이상 빗나가는 상황에서도 수인치 이하의 탄착 오차를 보인다고 밝히고 있다[7].



Fig. 2. Self-guided Bullet Prototype

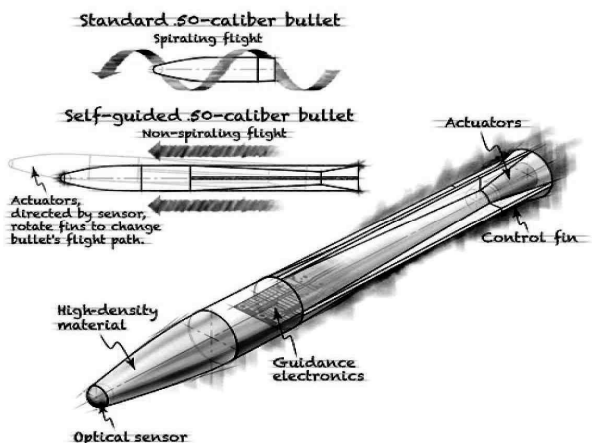


Fig. 3. Self-guided Bullet Conceptual Design

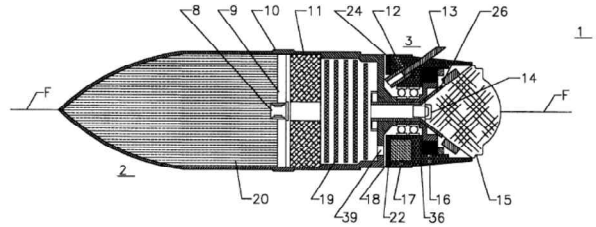


Fig. 4. Smart Bullet Cross-sectional View

2.2 특허 사례

2.2.1 Patent No. US 6,422,507: Smart bullet

본 특허(Fig. 4)는 탄환의 비행 중 후미에 위치한 스포일러(13)를 가이드(12)를 따라 외부로 돌출시켜 항력을 유발함으로써 자세 및 탄도를 조정하도록 하는 개념설계이다.

스포일러의 돌출에는 선형 회전식 구동기(linear rotary actuator, 24)가 사용된다. 탄환의 직경은 3인치(76mm)미만이며, 내부에 MEMS 자이로(22)를 탑재하여 탄환의 자세측정이 가능하도록 한다. 후방에는 렌즈(15) 및 검출기(14)를 장비하여 외부의 발사장비로부터 탄환의 유도정보를 수신할 수 있도록 하였다[8].

후방 스포일러를 이용함으로써 스마트탄의 제어방법에 대한 새로운 아이디어를 제공하고 있으나, 구동기에 대한 상세한 언급이 없고, 제어 가능성에 대한 시뮬레이션·실험적 검증이 없어 실질적 활용에는 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

2.2.2 Patent No. US 6,474,593: Guided bullet

본 특허(Fig. 5)는 정전기로 구동되는 전면의 덮개들(18)을 펼쳐 유동의 변화를 일으킴으로써 탄환을 조정하도록 하는 형태의 개념설계이다.

정전기로 제어 가능한 MEMS 장치를 탄환의 축방향을 따라 여러 개 부착하여, 제어 명령에 따라 필요한 위치의 덮개에 전원을 인가함으로써 탄도를 조정할 수 있도록 하였다. 탄환의 직경은 0.5인치(13mm) 미만으로 규정하였으며, 탄환의 유도 방법에 대한 별도의 장치나 설명은 누락되어 있고, 구동기에 대해서는 적은 전력으로 큰 변형률을 얻음과 동시에 빠른 응답특성을 확보할 수 있다고 설명하고 있다[9].

본 특허 역시 앞선 사례와 마찬가지로 스마트탄의 제어방법에 대한 새로운 아이디어를 제공하고 있으나, 구동 및 제어 가능성에 대해 실험적으로 검증된 부분이 없어 실질적인 적용에는 어려움이 따를 것으로 보인다.

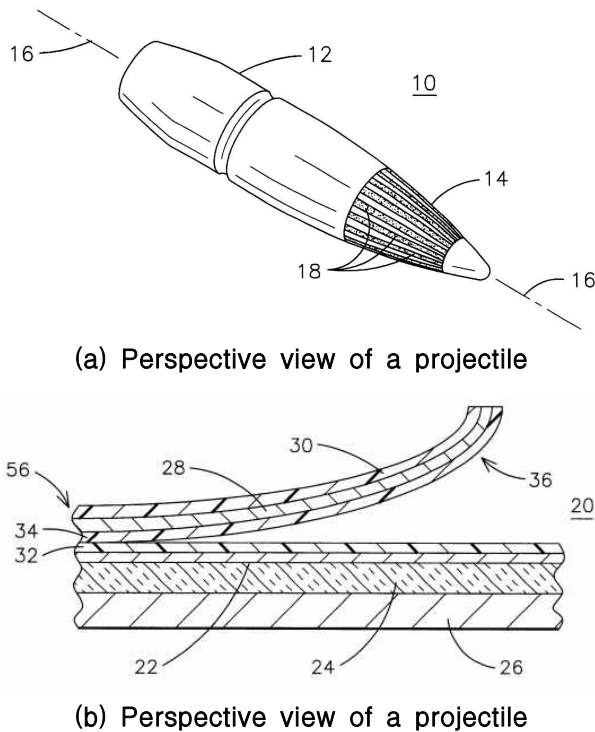


Fig. 5. Conceptual Design of Guided Bullet

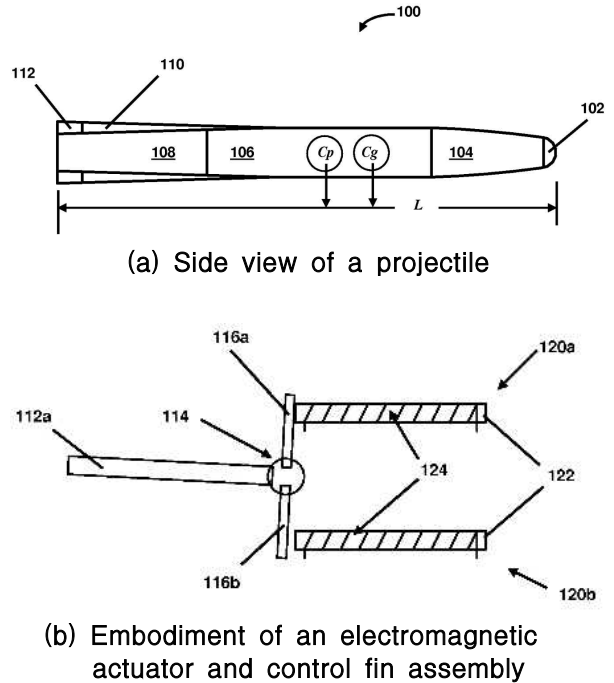


Fig. 6. Conceptual Design of Small Caliber Guided Projectile

Table 1. Summary of the specifications regarding miniature smart bullet

	시제품			특허	
	BLAM	Self-guided bullet	EXACTO	US 6,422,507	US 6,474,593
발표년도	1995년	2012년	2014년	2002년	2002년
개발국가	미국	미국	미국	미국	미국
탄직경 [mm]	< $\Phi 50$	$\Phi 12.7$	< $\Phi 20$	< $\Phi 76$	< $\Phi 10$
탄길이 [mm]	134	102	100	< 280	< 50
소재	-	강철, 텅스텐	-	-	-
구동기 종류	압전구동기	전자기력 구동기	-	rotary actuator	Electrostatic MEMS actuator
유효사거리	~3km	~2km	~2km	-	-
발사속도	610m/s (M1.8)	1000m/s (M2.9)	900m/s (M2.6)	-	-
무게	-	54g	50g	-	-

2.2.3 Patent No. US 7,781,709: Small caliber guided projectile

본 특허(Fig. 6)는 2.1.3의 개념설계와 관련된 것으로, 전자석 구동모듈(108)을 이용하여 타면(112)을 조종함으로써 탄도를 조정하는 것을 골자로 한다. 구동모듈은 회전축(114)에 타면(112)과 자성체(116)가 연결되어 있고, 강자성체(122)에 코일(124)을 감아 구성한 전자석에 전원을 인가하면 자성체(116a)가 전자석으로 당겨지면서

타면을 회전시키는 방식으로 동작하며, 접촉/비접촉 두 가지의 상태만을 가지게 된다.

탄두에는 표적으로부터 반사되는 레이저신호를 감지할 수 있도록 광학 센서(102)가 장착되어 있고, 텅스텐과 같은 고밀도 재료를 평형추(104)로 사용함으로써 무게중심을 압력중심 앞에 두어 정안정성을 확보하였다. 탄환의 직경은 0.5인치(약 13mm), 길이는 4인치(약 102mm)로 50구경 소총의 카트리지에 맞도록 설계 하였다[10].

III. 초소형 스마트탄 소요기술

앞서 소개된 사례들 외에도 내부 압축 공기를 이용하여 탄도를 조정하는 방안에 대한 특허 [11,12], 탄두를 비대칭형상으로 제작하고 이를 탄의 중심축을 따라 회전 가능하도록 함으로써 탄 주변의 유동을 제어하는 방안에 대한 특허 [13], 압전 구동기를 이용하여 동작되는 꼬리날개를 부착한 탄환과 이를 레이저로 유도하는 소총의 운용방안에 대한 특허[14] 등 초소형 스마트탄 개발을 위하여 다양한 형태의 개념안들이 제시된 바 있다.

이러한 개념안들은 공간적인 제약으로 인하여 기존 구동장치를 사용할 수 없는 문제점을 극복하기 위하여 다양하고 독창적인 시도를 하고 있다는 점에서 높이 평가받을 수 있으나, 실질적인 성능 검증이나 구현에는 도달하지 못한 경우가 대부분이다. 현재 시제품 단계까지 구현된 초소형 스마트탄은 압전 구동기와 전자기력 구동기를 이용한 경우가 대표적인 사례로 손꼽힌다.

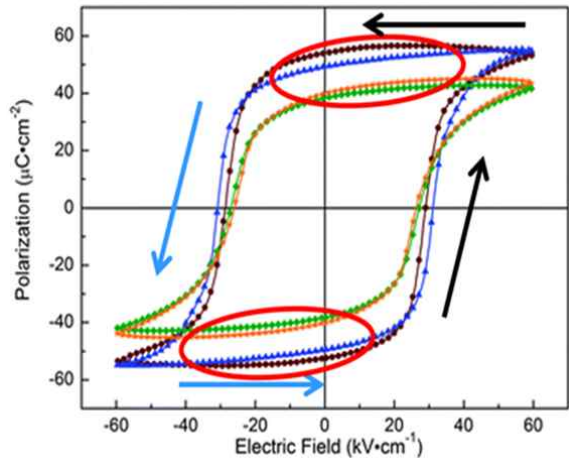
3.1 압전 구동기

압전소재는 외부응력, 진동 등 기계적인 변위를 주었을 때 출력단에 전기신호를 발생시키는 압전효과와, 반대로 압전소자에 전위차를 발생시켰을 때 소자가 기계적인 변형, 변위를 일으키는 역압전 효과를 나타내는 재료이다. 따라서 압전 효과는 센서, 역압전 효과는 구동기의 원리로서 사용될 수 있다.

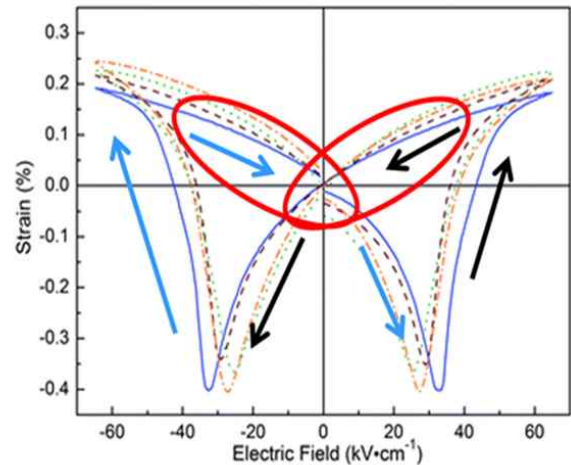
압전효과는 자연계에서 결정구조를 갖는 여러 물질들에서 쉽게 확인할 수 있으나, 그 효과가 미비하여 인공적으로 PZT(Lead Zirconate Titanate)와 같은 다결정 세라믹을 합성하여 사용하게 된다. PZT는 밴드, 튜브, 스택 등 여러 가지 형태로 가공되어 용도에 맞게 사용이 가능하지만, 전기장에 따른 최대 변형률이 0.2% 미만으로 매우 작아[15] 그 응용분야가 제한적이다.

최초 PZT 합성시에는 분극 방향이 서로 상쇄된 상태로 압전 효과를 확인할 수 없으나, 전기장을 가하면 분극 방향이 정렬되면서 Fig. 7과 같은 이력곡선을 그리게 된다(Fig. 7(a) - 전기장과 전속밀도, Fig. 7(b) - 전기장과 변형률사이의 관계).

이력곡선에서 확인되는 바와 같이 압전재료는 비선형적 특성을 가지나, 타원으로 표시된 영역과 같이 일부 구간을 선형성이 있다고 가정하여



(a) Polarization-electric field behavior



(b) Strain-electric field behavior

Fig. 7. Example of the piezo ceramic hysteresis curve

구동기 모델로써 사용하게 된다. 압전재료에 대한 선형 구성 방정식은 다음과 같다[16].

$$\begin{aligned} D &= dT + \epsilon^T E \\ S &= s^E T + dE \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 T, S, D, E는 각각 응력(텐서), 변형률(텐서), 전속밀도(벡터), 전기장(벡터)이며, d는 압전 변형상수(piezoelectric strain constant, C/N), ϵ^T 는 일정 응력하에서 재료의 유전율(permittivity, farad/m), s^E 는 일정 전기장하에서 압전소재의 탄성용량(elastic compliance, m^2/N)을 나타낸다.

일반적인 기계재료의 모델링은 응력(T)과 변형률(S)사이의 관계식을 유도함으로써 이루어진다.

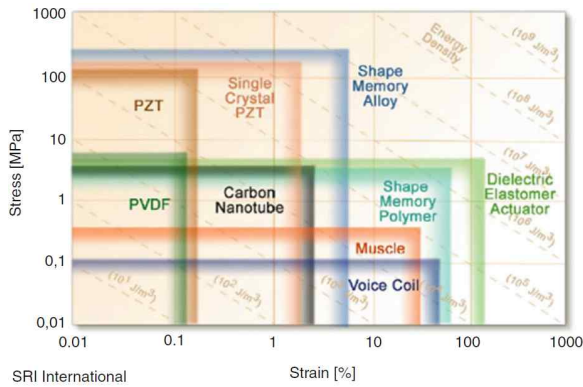


Fig. 8. Stress-strain behavior of transducer materials[17]

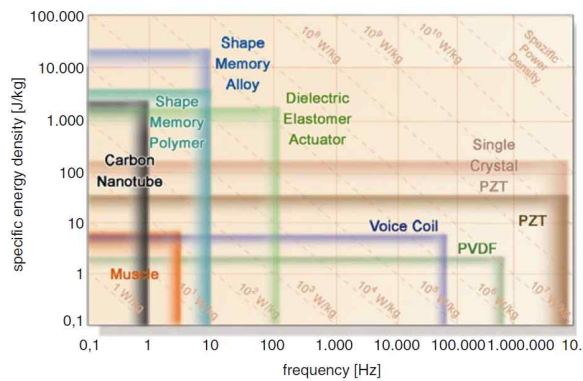


Fig. 9. Energy density-frequency behavior of transducer materials[17]

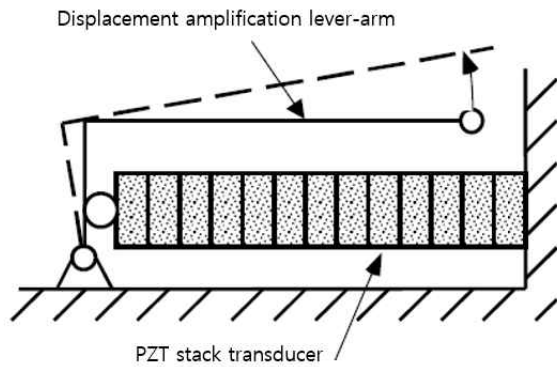


Fig. 10. PZT Stack Actuator(transducer) and Lever-arm Mechanism[18]

그러나 압전소재의 경우 응력과 변위뿐만 아니라 전기장(E)과 전속밀도(D)가 모델링에 포함되어 복합방정식을 구성함을 확인할 수 있다.

압전소재를 이용한 구동기의 특성은 응력-변형률(Fig. 8)과 비동력-작동주파수(Fig. 9)에 따른 구동기간의 특성 비교 그래프에서도 확인할 수 있다. 압전소재를 이용하여 제작한 구동기는 에너

지 변환 효율이 좋고, 빠른 응답 특성을 가지며 단위부피당 작동력이 크기 때문에 기존의 기계장치를 대체할 수 있는 새로운 수단으로 각광받고 있다. 그러나 변형률이 작다는 단점으로 인하여 PZT를 여러겹 쌓아 올린 적층형 구동기(stack actuator)를 사용하거나 레버(lever)등의 기구를 통해 압전구동기의 변위를 증폭시키는 방식(Fig. 10), 압전섬유 복합재(MFC, Macro Fiber Composite)를 사용하는 방법(Fig. 11, 12) 등이 적용되고 있다.

압전소재가 가지는 또 다른 특성으로 취성이 강하여 외부 충격에 의하여 쉽게 깨진다는 문제점이 있다. 초소형 스마트탄의 경우 본질적으로 탄의 운반, 취급 및 발사과정에서 충격을 받게 될 소지가 매우 많다. 따라서 국내 연구팀의 경우 압전소재만으로 구동기를 구성하지 않고, 두장의 압전 소재 사이에 연성 재료인 알루미늄 판을 삽입하는 압전벤더 형태의 구동기를 제안한 바 있다.

3.1.1 적층형 구동기

적층형 구동기는 0.1mm정도로 얇은 두께를 가지는 PZT 세라믹을 수십~수백장 쌓아올려 만드는 막대형태의 구동기이다. PZT 각각의 변형률은 작지만, 각각의 변형률이 누적되어 구조물 전체의 변위를 수십 μ m 수준으로 확대할 수 있다. 또한 구동력이 큰 특성을 이용하여 레버암(lever-arm)과 같은 변위확대기구를 추가로 구성 [19]하면 구동기의 전체적인 작동 범위를 증폭시킬 수 있다(Fig. 10).

3.1.2 압전섬유 복합재

압전섬유 복합재는 압전 섬유를 손가락형상의 전극(IDE, Interdigitated Electrodes)과 함께 중첩

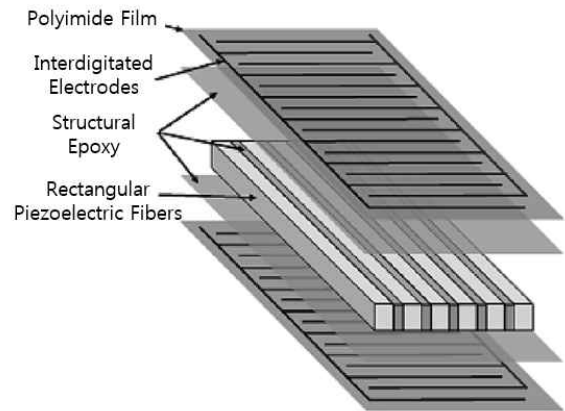


Fig. 11. Expanded view of an MFC[20]



Fig. 12. Advanced MFC actuators[21]

하여, 배열 패턴에 따라 인장·수축·휨과 같은 기능을 수행하도록 제작된다(Fig. 11).

중첩으로 인한 변위 확대 효과는 물론, 복합재 구성에 들어가는 필름과 에폭시가 압전섬유 사이에서 응력을 전달하는 역할을 하여, 기존의 압전 구동기에 비하여 취성이 적고 인장강도가 개선되며 휨 특성이 우수하다. 이에 따라 두께가 얇으면서도 곡면 형상을 가지는 다양한 형태의 구동기의 제작이 가능하다(Fig. 12).

3.1.3 압전벤더 구동기

압전벤더 구동기는 한쪽 끝단이 고정된 외팔보 형태를 기본 형상으로 한다(Fig. 13). 단일 압전소자와 압전소자의 취성 보완을 위한 금속판을 부착하여 단방향으로의 변위를 획득하는데 주력한 (a) Unimorph 모델, 양방향으로의 변위 획득을 위해 두 장의 압전소자를 극성이 반대되도록 부착한 (b) Bimorph in series connection 모델, 단방향으로의 변위 획득을 목적으로 사용되는 (c) Bimorph in parallel connection 모델, 그리고 양방향으로의 변위 획득은 물론 취성을 보완하고자 한 (d) Triple layer bender 등 다양한 형태의 벤더에 대한 수학적 모델의 연구가 활발히 진행되어 왔다 [22,23].

Triple layer piezoelectric bender의 경우를 예로 들면, 고정단으로부터 x 만큼 떨어진 위치에서의 변형은 다음과 같이 물성치와 치수정보를 통해 나타낼 수 있다[23].

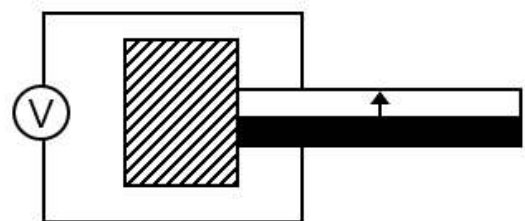
$$\delta(x) = \int_0^x \left(\frac{12s_{11}^m s_{11}^E}{Dw} Mx + \frac{6s_{11}^m d_{31}(t_m + t_p)}{D} Vx \right) dx \quad (2)$$

여기서, $D = 2s_{11}^m (3t_m^2 t_p + 6t_m t_p^2 + 4t_p^3) + s_{11}^E t_m^3$, M 은 구동기에 작용하는 모멘트, V 는 구동기에 인가

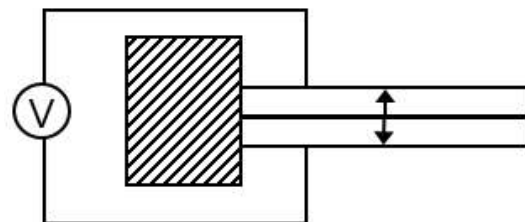
되는 전위차, s^E 는 압전소재의 탄성용량(elastic compliance), s^m 은 연성 금속재료의 탄성용량, d 는 압전 변형 상수(piezoelectric strain constant), t_p 는 압전소재 한 층의 두께, t_m 금속재료의 두께, w 는 구동기의 너비.

3.2 전자기력 구동기

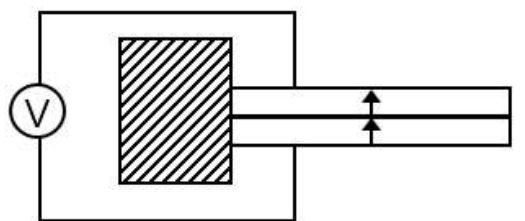
전자기력 구동기는 쉽게 접할 수 있는 전자석, 혹은 영구자석과 코일을 이용한 장치로써, 운동하는 전하가 자기장속에서 힘을 받는다는 로렌츠 법칙에 기반한다. 온/오프 두 가지 상태의 구동



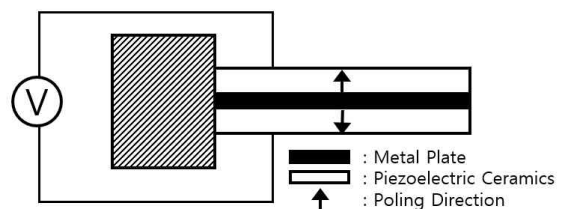
(a) Unimorph model



(b) Bimorph in series connection model



(c) Bimorph in parallel connection model



(d) Triple layer model

Fig. 13. Piezoelectric benders

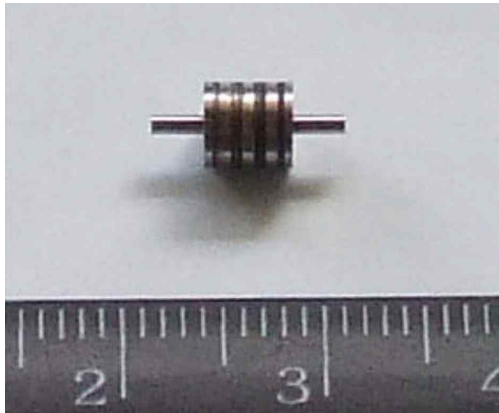


Fig. 14. Electromagnetic actuator[24]

이나 선형성을 필요로 하는 구동에 이점이 있으며, 압전 구동기가 큰 전위차를 필요로 하는 반면 저전압에서도 구동이 가능하고, 비접촉식으로 구동이 가능하다는 특징이 있다.

전자기력 구동기는 크기가 축소되더라도 다른 구동기들과는 달리 충분한 힘과 변위를 확보할 수 있고(높은 에너지밀도), 전력소모가 적기 때문에 초소형 로봇의 제작에 활용되어 수차례 그 능력을 검증받은 바 있다[24,25]. Fig. 14는 자벌레 로봇에 사용된 소형 전자기력 구동기의 예이며, 직경은 약 5mm이다.

전자기력 구동기는 현재 MEMS소자를 구동시키기 위한 방법으로 사용될 정도로 소형화가 가능하며, 자기장의 무상 공급원인 영구자석과 병행하여 더욱 높은 에너지 밀도를 얻기 위한 연구가 지속되고 있다[26]. 초소형 스마트탄과 관련하여서는 앞선 2.1.3, 2.2.3의 사례와 같이 샌디아 연구소에서 Self-guided bullet제작에 전자기력 구동기를 채택하여, 온/오프 형태로 타면을 제어하는 방안(bang-bang control)을 채택한 바 있다.

IV. 주요 기술적 이슈 및 향후전망

일반적인 유도미사일의 경우 탄도 수정을 위한 방법으로써 미사일 주변에 부착한 타면을 제어하거나, 추력 방향제어 방식을 사용한다. 이러한 제어 방법에 사용되는 서보기구들은 가스, 유압, 전기모터와 같은 보조수단을 이용하게 된다[27]. 이러한 보조수단을 사용함에 따라 수반되는 각종 기계장치들은 공간적인 제약으로 인하여 총알 수준의 소형화에 한계점을 가지게 된다. 뿐만 아니라 구동장치를 움직이기

위해 사용되는 제어기, 목표물 인식과 항법을 위해 사용되는 각종 센서류, 내장되는 배터리의 소형화, 이에 따라 소모 전력이 적은 센서와 구동장치를 설계하는 것이 주된 기술적 과제가 될 것이다.

앞선 사례들은 이러한 기술적 과제를 극복하기 위하여 다양한 형태의 구동기를 제안하고 있다. 그러나 가장 현실성 있는 대안은 압전소재와 같이 빠른 응답특성을 가지는 지능재료를 활용하여 전력소모를 최소화하고, 기계적 구조물을 줄여 설계를 단순화하거나, 전자석을 이용한 구동기와 같이 온/오프 형태로 구동 방식을 단순화하는 것으로 확인된다. 이러한 사실을 종합하여 불 때 향후에도 지능재료를 이용한 새로운 형태의 구동기 설계가 지속될 것으로 전망된다.

국내에서는 탄환의 모습 보다는 미사일과 같은 형태의 개념설계가 제시된 바 있으며, 관련 설계에서는 최초로 압전벤더를 구동기로 채택하여 충분한 변위 확보는 물론 압전소재의 취성을 보완하고자 하였다. 구동기에 대한 해석적·실험적 검증을 통해 압전벤더를 통한 스마트탄의 제어가능성을 확인하고, 서로 다른 탄성용량과 압전변형상수를 가지는 여러 종류의 압전소재들을 비교해보는 등 효율적인 물성치를 가지는 소재를 지속적으로 발굴함으로써, 초소형 스마트탄의 개발을 위한 기술기반을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

V. 결 론

탄도수정을 위해 사용된 구동장치를 중심으로 초소형 스마트탄의 선행 기술개발 및 특허 사례들을 정리해 보았다. 최근들어 미국 국방 고등연구 기획청의 실험 영상과 샌디아 국립 연구소의 초소형 스마트탄에 대한 시제품들이 속속 등장하는 바, 기술적인 구현 가능성 또한 충분히 검증된 것으로 보인다.

국내에서도 초소형 스마트탄의 개발에 이러한 사실들을 반영하여, 지능재료를 활용한 독창적인 형태의 구동기 설계 및 운용이 이루어질 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 “소형 스마트탄의 압전구동 및 동

적 제어성능 해석" 과제의 일환으로, LIG넥스윈의 지원으로 수행되었습니다. 본 문헌에 이용된 그림은 해당 참고문헌의 전자문서에서 인용하였습니다.

References

- 1) Barrett, R., Stutts, J., "Modeling, Design, and Testing of a Ballel-launched Adaptive Munition," *Proc. SPIE; Smart Structure and Materials*, San Diego, CA. 3-6 Mar. 1997, Vol.3041, pp.578-589.
- 2) Agneta, M. B., *Advances in Flight Control Systems*, InTech, 11 Apr. 2011, pp.10-12.
- 3) EXACTO, <http://www.wired.com/2008/11/what-if-a-snipe>
- 4) DARPA, http://www.darpa.mil/Our_Work/TTO/Programs/
- 5) EXACTO, Washington Post, <http://wapo.st/1js5DUw>
- 6) Self-Guided Bullet, Popular Science, <http://www.popsci.com/technology/article/2012-05/rough-sketch-self-guided-bullet>
- 7) Sandia Labs News Releases, https://share.sandia.gov/news/resources/news_releases/bullet/
- 8) Jay Lipeles, *Smart bullet*, US Patent 6,422,507, 23 Jul. 2002.
- 9) Jay Lipeles, R. Glenn Brosch, *Guided bullet*, US Patent 6,474,593, 5 Nov. 2002.
- 10) James, F. J., Brian, A. K., Marc, W. K., Scott, E. R., Brandon, R. R., James, W. W., Ronald, W. G., *Small caliber guided projectile*, US Patent 7,781,709, 30 Sep. 2008
- 11) Alan, B. M., Stephen, A. H., Fredrick, W., Timothy, S. K, Frederic, H. M., *Guided projectile*, US Patent 7,891,298, 22 Feb. 2011.
- 12) Rober, J. C., *Steerable projectile charging system*, US Patent 8,362,408, 29 Jan. 2013.
- 13) Allister, M., *Apparatus for guiding a rifle-launched projectile*, US Patent 8,502,127, 6 Aug. 2013.
- 14) Paddy, M., *Steerable projectile*, US Patent 8,716,639, 6 May 2014.
- 15) Park, S. E., Thomas R. S., "Ultrahigh strain and piezoelectric behavior in relaxor based ferroelectric single crystals," *Journal of Applied Physics*, Vol. 82, 1997, pp.1804-1811
- 16) Bernard, J., William R. C., Hans J., *Piezoelectric ceramics*, 1st Ed., Academic Press, 1971, pp.16-20.
- 17) Laperrière, L., Reinhart, G., *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, 1st Ed., Springer, 2014, pp.10-11.
- 18) Piezoelectric Actuation Mechanisms: An Introduction, Dynamic Structures & Materials, <http://www.dynamic-structures.com/s/DSM-App-Note-An-Introduction-to-Piezo-Actuation-v100604.pdf>
- 19) K. J. Yun, N. S. Goo, H. C. Park, "Research & Development Trends in Piezoelectric Actuators for Smart Structures", *J. of Korea Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 29, No. 1, 2001, pp. 134-141
- 20) Issac, A. H., David, A. M., Tyler, T., "Fatigue life characterization for piezoelectric macrofiber composites," *Smart Materials and structures*, Vol. 21, No. 10, 2012, 105037 (pp.1-2)
- 21) MFC, <http://www.smart-material.com/MFC-product-main.html>
- 22) Park, J. K., Moon, W. K., "Constitutive relations for piezoelectric benders under various boundary conditions", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 117, No. 1, Jan. 2005, pp.159-167.
- 23) Wang, Q. M., Eric, C. L., "Constitutive Equations of Symmetrical Triple Layer Piezoelectric Benders", *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, Vol. 46, No. 6, Nov. 1999, pp.1343-1351.
- 24) Cugat, O., Delamare, J., Reyne, G., "Magnetic micro-actuators and systems (MAGMAS)," *Magnetics, IEEE Transactions on*, Vol.39, No.6, Nov. 2003, pp.3607-3612.
- 25) Haiwei, L., Jianguo, Z., Zhiwei, L., Youguang, G., "An inchworm mobile robot using electromagnetic linear actuator", *Mechatronics*, Vol. 19, No. 7, Oct. 2009, pp.1116-1125.
- 26) David, P. A., Naigang, W., "Permanent Magnets for MEMS," *Journal of Microelectromechanical*

Systems, Vol. 18, 2009, pp.1255-1266.

2nd Ed., Brassey's Defence Publishers, 1985,

27) P. Garnell, *Guided weapon control systems*,

pp.27-55.