

소형 무인주행로봇에 탑재되는 EOD 매니플레이터 설계에 대한 연구

Study of the Design of an Explosive Ordnance Disposal Manipulator for Small Unmanned Ground Vehicle

고 두 열* 이 승 호* 이 준 성** 황 기 상** 김 수 현*

Doo-Yeol Koh Seung-Ho Lee Joon-Seong Rhee Ki-Sang Hwang Soo-Hyun Kim

Abstract

In this paper, mechanism design of the explosive ordnance disposal(EOD) manipulator for small unmanned ground vehicle(SUGV) is presented from the conceptual to detailed design. EOD manipulator has been widely developed in the world due to the growing threat of the improvised explosive devices at war. It has distinctive characteristics, such as small size and high loading performance, compared to the industrial manipulator which is fixed on the floor. Design of new EOD manipulator must take into account various functional requirements and constraints simultaneously. We focused on developing the EOD manipulator that has suitable size for the SUGV and maximum 15kg payload capacity. Design approach taken in this paper is based on axiomatic design procedure and comparison among many possible candidates of each joint structure to obtain appropriate entire structure of EOD manipulator.

Keywords : EOD Manipulator(매니플레이터), Small Unmanned Ground Vehicle(소형 무인주행로봇), Improvised Explosive Devices(급조 폭발물), Design(설계)

1. 서론

현대 전쟁은 과학기술의 발전에 힘입어 점차 새로운 양상으로 변화하고 있다. 과거 중세시대에는 사람이, 근대 1, 2차 세계 대전에서는 기계가 전쟁의 중심

이었다면, 현대에는 인간을 대신하는 로봇의 활용이 점차 확대되고 있다. 특히 2000년대 들어 테러의 위협이 세계적으로 확산되면서 인명을 대신하여 작전을 수행하는 소형 무인 주행로봇(SUGV : Small Unmanned Ground Vehicle)의 수요가 점차 증가하고 있는 추세이다¹⁾.

소형 무인주행로봇은 정찰, 전투, 수송, 폭발물 제거 등 다양한 활용도를 가지나 그 중 가장 활용도가 높은 용도는 폭발물 제거라고 할 수 있다. 최근 이라크 전쟁을 통하여 급조 폭발물(IED : Improvised Explosive

† 2011년 5월 10일 접수~2011년 8월 26일 게재승인
 * 한국과학기술원(KAIST)
 ** 한화 종합연구소(Hanwha)
 책임저자 : 김수현(soohyun@kaist.ac.kr)

Devices)로부터 발생하는 피해가 급증함에 따라 인명의 손실을 줄이기 위한 방편으로 원격에서 폭발물을 제거하는 로봇들이 투입되고 있다^[1]. 이때 로봇에서 가장 중요한 기계적 요소는 인간의 팔을 대신하는 매니플레이터(manipulator)이다. 일반적으로 소형 무인주행로봇에 장착되어 폭발물 제거를 목적으로 하는 매니플레이터를 EOD 매니플레이터라고 지칭하고 있다.

현존하는 대부분의 지상 무인 주행로봇들은 EOD 매니플레이터를 탑재하고 있으며, 가장 대표적인 사례로는 iRobot社의 PackBot EOD과 Foster-Miller社의 Talon IV Engineer를 들 수 있다. PackBot EOD의 매니플레이터는 8개의 자유도를 가지며, 최대 6.8kg의 무게를 들 수 있도록 개발되었다. 또한 매니플레이터를 완전히 펼쳤을 때 최대 203cm의 도달거리(reach)를 가지며, 모든 전선은 외부로부터 보호되어 매니플레이터 내부로 통과하도록 설계되었다^[2]. 한편, Talon IV Engineer는 현존하는 50kg이하의 소형 무인 주행로봇 중에서 가장 높은 성능을 보이고 있으며, 4개의 자유도, 최대 29.5kg의 적재하중(payload), 213cm의 최대 도달거리 등의 성능을 갖고 있다^[3]. 이외의 알려진 여러 EOD 매니플레이터를 Table 1에 정리하여 나타내었다. Table 1에 나타난 로봇들은 모두 50kg 이하 급의 소형 무인 주행로봇이다.

Table 1. 주요 EOD 매니플레이터 사양

이름	제조사	자유도	최대도달거리	최대적재하중
Talon	Foster-Miller	4	213cm	29.5kg
PackBot	iRobot	8	203cm	6.8kg
MURV-100	HDE	3	152cm	23kg
MATILDA	Mesa Robotics	5	112cm	16kg
CASTOR	Cybernetix	4	88cm	10kg
MK2 ROV	Vanguard	5	-	16kg

EOD 매니플레이터 설계의 주요 고려사항에는 강인성(robustness), 크기, 무게, 적재하중, 작동 범위(operational space), 수리 용이성(ease of repair), 가공 용이성(ease of manufacture) 등이 있다. 이중 본 연구에서 중점적으로 고려하는 사항들은 다음과 같다. 첫째, 개발된 매니플

레이터는 소형 무인 주행로봇에 장착이 가능한 크기여야 한다. 둘째, Table 1에서 나타나듯이 대부분의 소형 무인 주행로봇에 장착되는 EOD 매니플레이터의 최대 적재하중은 10kg이상인 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발되는 매니플레이터는 최대 15kg의 적재하중을 가지도록 개발한다. 본 논문에서는 이와 같은 고려사항을 바탕으로 소형 무인 주행로봇에 탑재되는 EOD 매니플레이터 개발을 위한 개념 고안 및 설계에 대하여 중점적으로 논의한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 EOD 매니플레이터의 상세 설계 사양에 대하여 언급하였고, 3장에서 각 관절 별 개념 설계와 이의 적합성에 대하여 설명하였다. 4장에서는 각 부분에 대한 개념설계를 적용하여 상세 설계한 결과를 나타내고, 마지막으로 5장에서 결론 및 향후 연구로 본 논문을 완성하였다.

2. EOD 매니플레이터 주요 설계 사양

먼저, 이 장에서는 매니플레이터의 상세 설계에 앞서 개발 목적에 맞는 설계 사양을 유도하여 상세 설계를 위한 설계 목표를 결정한다.

가. 공리적 설계

기구설계는 과거부터 재료, 가공기술 등의 산업기술의 성장과 함께 동반되어 발전하여왔다. 기구설계 분야는 다양한 요구사항 및 제한조건들을 종합적으로 만족시켜야 하므로 상당부분 개발자의 경험적인 요소에 의하여 결정된다. 하지만 이러한 경험적인 요소는 때로 미리 예측하지 못한 부분으로부터 설계에 결함을 유발하여 치명적인 문제를 야기하기도 한다. 따라서 복잡한 설계 과정을 좀 더 합리적으로 접근하여 설계오류를 최소화하고, 설계자의 의사 결정을 도와주는 도구로써 공리적 설계(axiomatic design)기법이 다양한 분야에 적용되고 있다^[4].

공리적 설계에서 설계과정을 진행하기 위해서는 먼저 설계목적들이 명시된 요구조건을 정의하는 기능요구사항(FRs : Functional Requirements)과 이를 만족시키기 위한 물리적인 설계변수(DPs : Design Parameters)를 결정해야 한다. 본 연구에서 개발되는 매니플레이터의 기능요구사항은 앞서 언급한 최대 15kg의 적재하중과 소형로봇에 장착 가능한 크기이고, 이러한 기능요구사항들을 만족시키기 위한 물리적 설계변수들

은 모터의 구동 토크와 매니플레이터의 크기이다. 기능요구사항과 설계변수 사이의 사상(mapping)을 수학적으로 표현하면 (1)과 같다.

식 (1)에서 기능요구사항과 설계변수 사이의 관계를 나타내는 설계 행렬(design matrix)은 비연성화 설계(decoupled design)의 형태를 가지므로 DP2를 결정 후 DP1을 결정하는 설계 과정을 거쳐야 함을 알 수 있다^[4]. 실제로는 매니플레이터의 무게 역시 중요한 설계 변수가 될 수 있으나 여기서는 DP2와 독립적이지 않으며, 설계 초기 단계에서 미리 예측하기 어려우므로 무시하였다.

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

where, FR_1 : 15kg 유효하중

FR_2 : 소형로봇에 탑재 가능한 크기

DP_1 : 모터 구동 토크

DP_2 : 매니플레이터 크기

나. 매니플레이터 크기 결정

앞서 언급하였듯이 공리적 설계에서 기능요구조건을 만족하기 위해서는 먼저 매니플레이터의 크기를 결정해야 한다. 본 연구에서 목표로 하는 소형 로봇에 탑재 가능한 평면의 크기는 460mm × 330mm이다. 매니플레이터의 기초부분은 제시된 면적 내부에 설치 가능하여야 하며, 매니플레이터가 완전히 접힐 경우 면적 내부를 크게 벗어나지 않도록 설계해야 한다. 만약 매니플레이터를 단일 링크(link) 구조로 설계할 경우 원하는 크기를 만족시킬 수 있으나 EOD 매니플레이터의 목적인 폭발물 제거를 위한 작업공간(workspace)이 확보되기 어렵다. 따라서 매니플레이터는 단일 링크 구조가 아닌 다중 링크 구조가 되어야 한다. Table 1에 나타낸 모든 EOD 매니플레이터 역시 2개 이상의 링크를 갖는 구조로 개발되었다. 한편 매니플레이터의 링크의 개수가 증가할수록 좀 더 넓은 작업공간을 확보할 수 있으나 매니플레이터 기초(base)부분에 작용하는 구동 부하 역시 증가하므로 적절한 링크의 개수를 결정해야 한다. 따라서 본 연구에서는 15kg의 적재하중을 고려하여 매니플레이터의 링크의 개수를 2개로 결정하였다.

링크의 길이는 길수록 작업공간의 증가 효과를 가져오나 역시 기초부분에 구동 부하를 증가시키므로 적

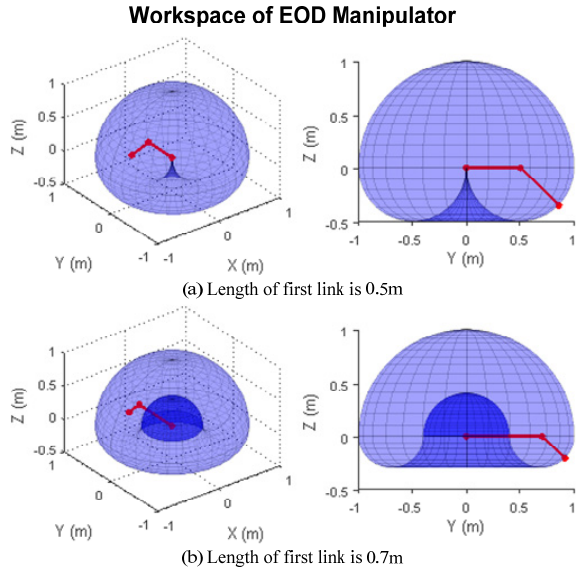


Fig. 1. EOD 매니플레이터의 링크길이에 따른 작업공간 비교

절한 길이를 가져야 한다. 본 연구에서는 EOD 매니플레이터의 목적을 고려하여 매니플레이터의 최대 인장시 길이를 1m로 결정하였다. 이로부터 하나의 링크 길이가 결정되면 나머지 링크 길이도 결정할 수 있다. 여기서 두 번째 링크의 길이가 길어질수록 관절(joint)에 걸리는 구동 부하 역시 증가하여 두 번째 링크의 길이가 짧을수록 좋으나, Fig. 1과 같이 전체적인 작업공간의 크기가 줄어드는 것을 알 수 있다. Fig. 1에서 붉은 색 선들은 각 링크를 나타내며 첫 번째 링크 길이가 0.7m일 경우, 0.5m일 경우에 비하여 전체적인 작업공간이 약 23% 줄어드는 것을 알 수 있다. 반면 첫 번째 링크의 길이가 0.5m 이하로 줄어들 경우 전체 작업공간은 크게 증가하지 않는다. 한편 두 개의 링크가 서로 다른 길이를 가질 경우 길이가 긴 링크로 인하여 탑재 공간의 크기가 증가하게 된다. 본 연구에서는 이러한 점들을 고려하여 첫 번째 링크와 두 번째 링크의 길이를 동일한 0.5m로 결정하였다. 이와 같이 결정된 대략적인 매니플레이터의 크기와 3장에서 설명될 각 관절들의 구조가 결정되면 각 구동기의 요구 구동 토크를 산정할 수 있다.

다. 매니플레이터 자유도 결정

다음으로 매니플레이터의 자유도(degree of freedom)를 결정해야 한다. 매니플레이터는 다수의 관절과 링

크가 직렬(serial)형태로 연결된 기구로, 각 관절은 한 개의 회전(rotational) 혹은 선형 자유도를 갖고 상대적으로 움직인다. Table 1에 나타나듯이 기존에 개발된 EOD 매니플레이터들은 다양한 자유도를 갖고 있다. 일반적으로 자유도가 증가할수록 더욱 유연한 움직임이 가능하여 폭발물 제거 임무에 유리하나 제어의 복잡도가 증가하고, 전장부의 필요 공간 역시 늘어나게 된다. 현존하는 EOD 매니플레이터들은 소형 무인주행로봇의 협소한 탑재공간으로 인하여 한 개만 탑재가 되어 구동되고 있으며, 따라서 인간과 같이 양팔을 이용한 정교한 폭발물 제거 작업이 불가능하다. 현재 임무에 수행되고 있는 EOD 매니플레이터들은 인명의 피해를 줄이고자 인간을 대신하여 폭발물을 탐색하여 관측하거나 안전지역으로 이송하는 것을 주 목적으로 하고 있다. 이러한 임무 목적을 고려하였을 때, EOD 매니플레이터는 다양한 시각(perspective)에서 폭발물 관측이 가능해야 하며, 폭발물을 안전하게 쥐고 들어 올릴 수 있는 능력을 가져야 한다.

매니플레이터를 사람의 팔에 비유하면 관절의 위치에 따라 크게 어깨(shoulder), 팔꿈치(elbow), 손목(wrist), 그리고 손에 해당하는 그리퍼(gripper)로 구분할 수 있다. 일반적으로 EOD 매니플레이터에는 카메라가 장착되어 사용자가 원격에서 폭발물을 관측한다. 이때 카메라는 폭발물 관측이 가장 용이한 매니플레이터 끝 부분에 위치하고, 폭발물을 잡기 위한 그리퍼와 폭발물의 상대운동을 관측하기 위하여 그리퍼 이전에 설치된다. 따라서 카메라로부터 입력되는 영상의 시각 정보는 그리퍼 이전의 자유도에 의하여 결정된다. 카메라로부터 멀리 떨어진 관절일수록 움직임에 대한 카메라 영상의 변화가 커지게 되므로, 다양한 영상 정보를 위해서는 어깨부분의 자유도가 중요하다. 주행로봇은 평면 움직임으로부터 2개 자유도가 보장되므로 높이에 대한 추가적인 자유도 만으로 원하는 물체의 관측이 가능하다. 하지만 매니플레이터의 어깨부분에 한 개의 자유도만 있을 때 좀 더 다양한 시각에서 관측하고자 하거나, 관측되는 물체가 특정 시각에서만 바라볼 수 있는 경우에는 로봇을 움직여야 한다. 하지만 소형 무인주행로봇에서 사용하는 트랙형 주행 장치는 미끄러짐(slip)이 발생하여 정확한 위치제어가 어렵다는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 어깨부분에 팬-틸트(pan-tilt) 2축 회전 자유도를 고려하였다.

EOD 매니플레이터는 로봇 상부에 탑재되므로 지상보다 높은 위치에 고정되어 있다. 만약 매니플레이터

를 이용하여 접근하고자 하는 폭발물이 지면에 위치할 경우 매니플레이터 끝 단이 지면을 향할 수 있도록 개발되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 팔꿈치 관절에 1축 회전 자유도를 고려하였다.

앞서 언급하였듯이 EOD 매니플레이터는 폭발물을 안전하게 이동시킬 수 있도록 개발되어야 한다. 폭발물은 충격과 진동에 의하여 격발이 가능하므로 매니플레이터가 폭발물을 쥐었을 때 폭발물이 흔들리거나 회전하지 않고 항상 수평이 유지되도록 개발되어야 한다. 따라서 어깨와 팔꿈치 부분에서 발생한 움직임을 손목에서 보상할 수 있도록 손목 부분이 설계되어야 한다. 이를 위하여 손목 관절부분에 어깨부분과 같이 팬-틸트 2축 회전 자유도를 고려하였다. 만약 손목 관절이 팬 혹은 틸트의 하나의 자유도만 가질 경우, 매니플레이터가 폭발물을 쥐 상태로 이동 시 폭발물이 회전되어 불안정해지거나, 최악의 경우 폭발물을 지면에 떨어뜨려문제가 발생할 수 있다.

마지막으로 그리퍼는 Table 1에 나타난 다른 EOD 매니플레이터와 같이 구조와 제어의 단순함을 위하여 물체를 쥐고 펼 수 있는 하나의 자유도를 갖도록 결정하였다.

종합해보면, 본 연구에서 개발되는 EOD 매니플레이터는 어깨 부분에 2개, 팔꿈치 부분에 1개, 손목 부분에 2개를 합한 총 5개의 회전 자유도를 가지며, 끝 단에 하나의 자유도를 갖는 그리퍼로 구성된다.

3. 각 관절의 구조 선정

본 장에서는 구동기로부터 관절에 동력이 전달되는 다양한 방식들을 비교해 보고, 선정된 동력 전달 방식을 이용한 매니플레이터의 각 부분별 개념 설계를 고안한다. 최종적으로 고안된 여러 개념 설계 안들을 비교하여 상세 설계를 진행할 관절 구조를 선정한다.

가. 동력 전달 방식

구동기와 메커니즘 사이에 기구학적으로 동력을 전달하는 방식에는 직접 구동(direct drive), 체인, 타이밍 벨트, 유압, 공압 등이 있다. 직접 구동 방식은 구동기와 메커니즘 사이가 단일 혹은 다수의 기어들로 연결된 방식을 의미한다. 이러한 방식은 작은 공간에 높은 기어비 구현이 가능하여 공간 효율이 좋으며, 구동력의 전달 효율이 높다. 하지만 기어에 백래쉬(backlash)

가 존재하며 동력 전달 거리가 제한된다는 문제가 있다. 체인을 이용한 방식은 구동 톱니(sprocket)에서 발생하는 동력을 체인을 이용하여 전달하는 방식으로 높은 구동력의 전달이 가능하고, 동력 전달 거리를 체인으로 조절이 가능한 장점이 있다. 하지만 오염물질 제거를 위하여 정기적인 윤활이 필요하고, 금속으로 만들어져 무겁고 소음이 발생한다는 문제가 있다. 타이밍 벨트는 일반 벨트에 발생하는 미끄러짐을 줄이기 위하여 벨트와 풀리(pulley)에 이빨 모양을 내어서 서로 맞물려져 동력을 전달한다. 타이밍 벨트 동력 전달 장치는 체인과 같이 높은 동력 전달이 가능하고, 동력 전달 거리를 조절 할 수 있을 뿐 아니라, 고무와 우레탄 재질을 이용하므로 무게와 소음도 저감이 가능하다. 하지만 일정 구동력 이상의 부하가 작용하면 미끄러짐이 발생한다⁵⁾. 유압은 비압축성 매체를 이용하여 크기에 비해 큰 힘을 낼 수 있다는 장점이 있으나, 오일 관리가 어렵고, 효율이 낮으며, 소음과 진동이 발생하기 쉽다. 공압은 구조가 간단하고 반응속도가 빠르나, 정확한 위치와 속도 제어가 어렵다⁶⁾.

매니플레이터 개발 시 동력 전달 방식에 관한 구조적인 고려사항은 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 다음과 같은 사항을 중점적으로 고려하였다. 첫째, 장치의 크기 대비 높은 구동력을 낼 수 있어야 한다. 다시 말하는 작은 크기로 높은 감속비 구현이 가능해야 한다. 본 연구에서 설계되는 매니플레이터는 높은 구동력이 요구되므로 고회력의 구동기를 필요로 하고, 일반적으로 구동기의 크기와 무게는 출력에 비례하여 증가한다. 매니플레이터 설계 과정에서 구동기와 동력 전달 장치의 크기와 무게는 중요 제한 사항으로 작용한다. 따라서 크기가 작으면서 높은 구동력을 낼 수 있는 구조가 공간적으로 유리하다. 둘째, 백래쉬가 적어야 한다. 매니플레이터는 각 관절이 직렬로 연결된 구조이므로 기초부분의 백래쉬가 끝 단까지 전달되어 큰 진동을 유발 할 수 있다. 이론적으로 매니플레이터의 기초부분에서 1°의 백래쉬가 발생하면 매니플레이터의 길이가 1m인 경우 끝 단에서 17.5mm의 오차가 발생하고, 각 관절에서 백래쉬가 누적될수록 더욱 악화된다. 이러한 백래쉬는 EOD 매니플레이터의 임무를 고려하였을 때 치명적인 문제를 유발시킬 수 있으므로 설계 시 반드시 고려해야 한다.

앞서 언급한 여러 방식들 중, 유압 방식은 효율이 낮으며, 소음과 진동이 발생할 수 있고, 공압 방식은 추후 매니플레이터의 제어를 고려하여 본 연구에서는

고려대상에서 제외하였다.

나. 각 부분별 개념 설계 고안

이번 장에서는 매니플레이터의 각 부분 별 구동 메커니즘에 대하여 몇 가지를 개념적으로 고안해보고, 비교를 통하여 적합한 개념 설계를 도출한다.

1) 어깨 부분

매니플레이터의 하단부에 해당하는 어깨부분은 팬-틸트의 2자유도를 갖는다. 이때 모터의 배치 및 회전축의 방향 등을 고려하면 Fig. 2와 같이 다양한 형상의 개념을 고안할 수 있다. Fig. 2에서 (a)는 팬-틸트의 회전 방향과 각 모터의 회전축이 평행한 것이고, (b)는 (a)와 동일하나 팬과 틸트의 순서가 반대이다. (c)는 팬 회전방향과 모터축의 회전방향이 직교 혹은 엇갈린 형태이고, 틸트 회전은 모터축 방향과 동일한 구조이다. (d)는 (c)에서 틸트의 회전 방향이 모터축의 회전방향과 직교 혹은 엇갈린 구조이다. (a)-(d)에서는 팬을 구동하는 모터가 하단부에 고정되고 나머지 상단의 기구부가 회전하는 구조인 반면, (e)와 (f)는 팬을 구동하는 모터가 기구부와 같이 회전하는 구조를 갖는다. (e)와 (f)의 차이점은 틸트 회전축과 모터 회전축의 방향이 (e)는 직교 혹은 엇갈린 구조이고, (f)는 평행한 구조이다. 마지막으로 (g)는 팬과 틸트를 구동하는 모터가 모두 하단부에 고정되어 있고, 중공축 구조를 이용하여 팬과 틸트를 구동하는 구조이다. (a)를 제외한 대부분의 어깨 부분 개념 고안들은 매니플레이터의 무게중심의 위치를 낮추기 위하여 팬 구동 모터를 가로로 배치하였다.

Fig. 2에서 표현된 각각의 구조를 앞서 언급한 고려사항에 대하여 비교하면 Table 2와 같다. (a)와 (b)의 구조는 모터 구동력을 직접적으로 연결하거나, 유성기어, 평 기어(spur gear), 벨트, 체인 등과 같이 회전 입력 축과 출력 축이 같은 방향을 갖는다. 일반적으로 이와 같은 구조는 한 개의 동력 전달 부분만을 거친다면 백래쉬가 적으나 고 감속비를 구현하기 위해서는 크기가 매우 증가한다. 예를 들어, 모터 이후의 동력 전달 부분에서 10:1 기어 비를 구현하기 위해서는 출력 축 회전체의 직경이 입력 축보다 10배가 증가한다. 만약 모터 회전축에 연결된 회전체의 직경이 20mm라면, 출력 축 회전체의 직경은 200mm가 되어야 한다. 따라서 기어 비에 비례하여 크기가 증가하므로 소형화 구조에 적합하지 않다. 이를 해결하기 위해서는 유성

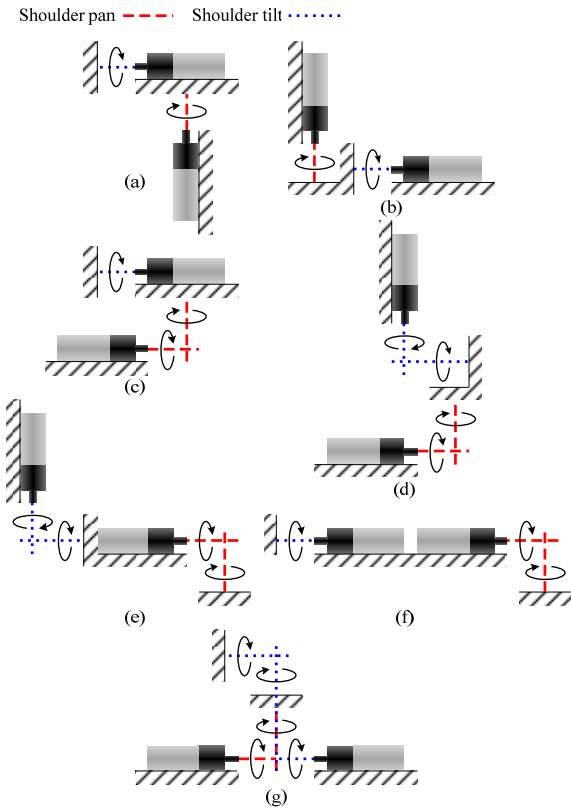


Fig. 2. EOD 매니플레이터의 어깨부분 개념 설계 안

Table 2. EOD 매니플레이터 어깨부분 구조 개념 비교

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
감속비/크기	X	X	△	○	○	△	△
백래쉬	○	○	○	○	○	○	△

상 : ○, 중 : △, 하 : X

기어와 같이 여러 기어를 복합적으로 구성해야 하지만, 구조가 복잡해지고, 효율이 떨어지며, 백래쉬가 증가하게 된다. (c)-(g)는 모터 회전 축이 수직 혹은 엇갈려서 동력을 전달하는 바벨 기어, 워 기어, 하이포이드 기어 등과 같은 교차축 혹은 스큐 기어(skew gear)를 이용한 구조이다. 이중 워 기어나 하이포이드 기어는 작은 크기로 큰 감속비 구현이 가능하여 공간 효율이 높다. 하지만 워 기어의 경우 기어의 큰 마찰 손실로 인하여 동력 전달 효율이 다른 기어에 비하여 낮다는 단점이 있다. 반면 하이포이드 기어는 큰 동력

전달이 가능하고, 워 기어보다 동력 전달 효율이 높다. Fig. 2(g)는 중공 축 구조를 이용하여 팬-틸트를 구동하기 위한 기어를 모두 하단부에 위치시켜 전선 꼬임을 방지할 수 있고, 무게 중심의 위치도 낮아지는 장점이 있으나, 구조에 따라 팬 혹은 틸트에 동력 전달 부를 2개를 이용해야 하므로 구조의 크기와 백래쉬가 증가하는 문제가 있다.

종합하여 보면, Fig. 2에 제시된 구조 중 (d)와 (e)가 요구된 기능을 가장 잘 만족하는 것을 알 수 있다. 하지만 (e)와 같은 경우 팬을 구동시키는 모터도 같이 회전하는 구조이므로 추후 전선 꼬임 문제가 발생할 수 있으므로 본 연구에서는 매니플레이터의 어깨 부분에 (d)와 같은 구조를 선정하였다. 한편, (d) 구조는 틸트 구동 모터가 수직 방향으로 배치가 되므로 어깨와 팔꿈치를 연결하는 링크 내부에 모터를 배치시킬 수 있어 공간 활용 및 전선 배치 부분에도 장점이 있다.

2) 팔꿈치 부분

팔꿈치 부분은 1개의 회전 자유도를 갖는 구조로 Fig. 3과 같은 개념들을 고안하였다. (a)의 구조는 앞에서 언급하였듯이 모터의 회전축과 관절의 회전축이 평행한 경우로 동력 전달 구조가 간단하고 백래쉬가 적은 반면, 동력 전달부의 크기가 감속비에 비례하여 증가하는 문제가 있다. (c)의 경우는 모터 축과 관절 사이에 하나의 회전체가 더 추가되어 동력 전달 거리를 자유롭게 조절할 수 있어 모터를 아래쪽에 배치하여 무게중심의 위치를 낮출 수 있다. 하지만 부품이 증가하여 구조가 복잡해지고, 백래쉬가 증가하는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서 개발되는 팔꿈치 구조는 (b)의 형태와 같이 모터를 링크 내부에 수직하게 배치하여 공간 효율을 높이고, 워 혹은 하이포이드 기어를 이용하여 좁은 공간에서 높은 감속비를 구현할 수 있는 구조로 결정하였다.

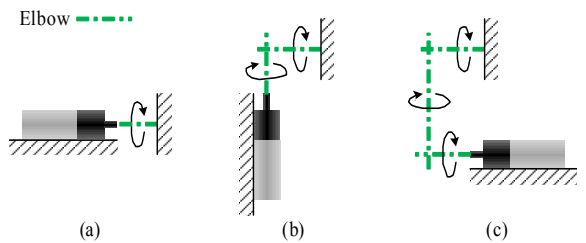


Fig. 3. EOD 매니플레이터의 팔꿈치 부분 개념 설계 안

Table 3. EOD 매니플레이터 팔꿈치 부분 구조 개념 비교

	(a)	(b)	(c)
감속비/크기	X	○	△
백래쉬	○	○	△

상 : ○, 중 : △, 하 : X

3) 손목 부분

손목 부분은 어깨 부분과 같이 팬-틸트 구동이 가능한 2개의 회전자유도로 이뤄져 있다. 따라서 어깨 부분과 유사한 개념들을 고안할 수 있을 것이다. 어깨 부분과 가장 큰 차이점은 모터의 배치를 들 수 있다. 어깨 부분에서는 하단 고정부분의 공간이 넓으므로 구동 모터를 가로로 배치시킬 수 있는 반면 상단에 위치한 손목부분에는 구동 부하를 견딜 수 있는 크기의 모터를 가로로 배치시킬 수 있는 공간이 충분히 확보되기 어렵다. 가장 효과적인 공간 활용은 관절 사이를 연결하는 링크를 관 형태로 하여 내부에 모터를 배치하는 것이다. 따라서 손목부분의 개념들은 Fig. 4와 같이 첫 번째 모터와 같이 수직으로 배치하여 링크 내부에 위치가 가능하도록 고안하였다.

Fig. 4(a)와 (b)는 손목의 팬 구동 후 틸트를 구동하는 구조이고, (c)와 (d)는 반대로 틸트 구동 후 팬을 구동하는 구조이다. Table 4에 나타내었듯이 Fig. 4의 (a)와 (b)는 팬을 구동하는 동력 전달부분이 작은 공간에 큰 감속비를 구현하기 어려운 구조이다. 따라서 (c), (d)와 같이 팬의 회전 방향을 수직으로 전환하는 웜 혹은 하이포이드 기어를 사용하는 구조가 작은 공간에서 감속비 측면에서 유리하다. 본 연구에서는 (c)와 같은 구조를 손목 구조에 적용하였다. 손목의 팬 회전 부하는 잡고자 하는 물체의 무게중심에 얼마나 가깝게 잡는가에 결정된다. 따라서 손목의 팬 부분은 물체를 잡는 위치에 따라서 다른 관절과 달리 큰 부하가 걸리지 않는다. 결론적으로 다른 관절부분과 같

Table 4. EOD 매니플레이터 손목 부분 구조 개념 비교

	(a)	(b)	(c)	(d)
감속비/크기	X	△	△	○
백래쉬	○	△	○	△

상 : ○, 중 : △, 하 : X

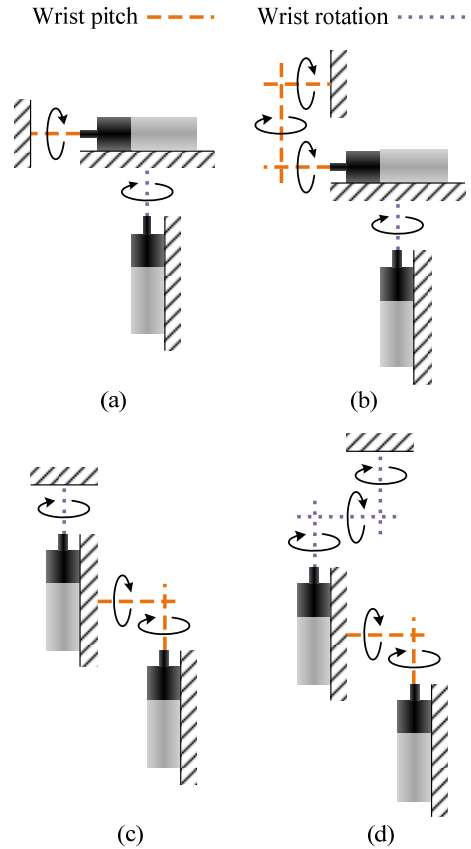


Fig. 4. EOD 매니플레이터의 손목 부분 개념 설계 안

은 고 감속비를 요구하지 않는다. 따라서 (c)의 팬 구동 모터와 같은 구조로도 원하는 감속비를 만족시킬 수 있다고 판단하였다. 한편 (d)와 같은 팬 구동 구조는 구조의 복잡성과 백래쉬를 증가시켜 배제하였다.

4) 그리퍼

그리퍼는 사람의 손가락과 같이 물체를 쥐었을 때 미끄러지지 않고, 부하가 주어졌을 때 퍼지지 않을 정도의 힘을 생성해야 한다. 한편 잡고자 하는 물체의 크기와 형상을 고려하여 그리퍼의 크기, 형상, 자유도 등이 결정되어야 한다. 그리퍼는 집게(jaw)와 같은 단순한 구조부터, 인간형 로봇에서 사용하는 사람 손가락과 같은 높은 자유도를 갖는 구조까지 다양한 형태로 개발되고 있다. 높은 자유도를 갖는 그리퍼는 정밀한 작업이 가능하나 여러 구동기를 사용하여 출력이 분산되므로 본 연구에서 목표로 하는 높은 부하를 견디기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 간단한 개폐형의

그리퍼를 고려하였다. Table 1에 나타난 현재 개발된 대부분의 EOD 매니플레이터들 역시 단순 개폐형 구조를 이용하고 있다.

일반적인 개폐형 그리퍼의 구조는 Fig. 5와 같이 구분될 수 있다. Fig. 5의 (a)와 (b)는 그리퍼의 집게가 좌우로 평행하게 열리고 닫히는 구조이고, (c)와 (d)는 회전축을 중심으로 회전하여 열리고 닫히는 구조이다. 한편 (a)와 (c)는 단순 좌우 집게로만 구성된 구조이고, (b)와 (d)는 단순 집계에 링크가 접목된 구조이다. 평행 개폐형은 회전 개폐형에 비하여 안정적인 파지가 가능하나, 잡을 수 있는 물체의 크기가 구동범위에 따라 제한된다는 단점이 있다. 회전 개폐형은 평행 개폐형의 반대 특성을 갖는다. (a)와 (c)는 (b)와 (d)에 비하여 구조가 간단한 장점이 있으나 끝 단에서 같은 힘을 내기 위해서는 더 큰 구동력을 갖는 모터가 필요하다. (b)와 (d)는 추가적인 링크로 인하여 모터의 구동 부하를 좀 더 줄일 수 있지만 링크 구조로 인하여 구동 범위가 (a)와 (c)에 비하여 제한된다는 문제가 있다. 본 연구에서 목표로 하는 15kg의 부하는 높은 파지 구동력을 요구하게 되므로 (b) 혹은 (d)와 같은 구조가 좀 더 적합하다. 이때 (b)는 연결링크의 길이와 이동 범위에 따라서 파지 범위가 결정되는데, 다양한 폭발물의 크기를 고려하면 이용에 제한이 될 수 있으므로 본 연구에서는 최종적으로 (d) 형태의 그리퍼 구조를 선정하였다.

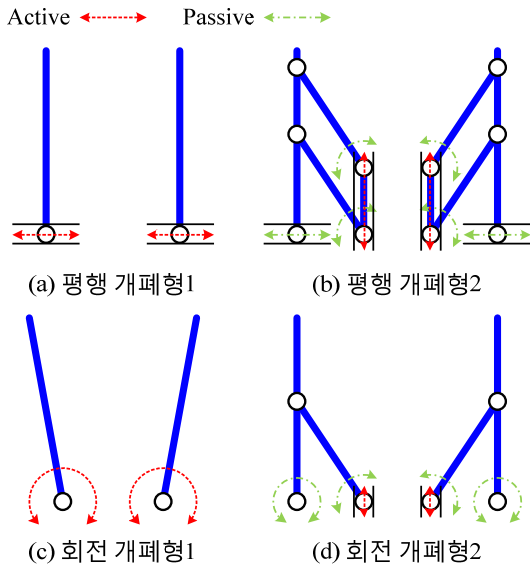


Fig. 5. EOD 매니플레이터의 그리퍼 구조

4. EOD 매니플레이터 상세 설계

설계는 Pro/Engineering Wildfire를 이용하여 앞장의 개념설계를 반영하여 수행하였다. 각 구동기, 기어헤드, 동력전달 기어들은 설계 목적을 만족하도록 선정되었으며, 본 논문에서는 전체적인 설계 과정을 중점적으로 논의하므로 자세한 내용은 생략하였다. 전체적인 상세설계는 Fig. 7과 같으며, 각 구동기와 카메라에 필요한 동력 및 신호 선들은 매니플레이터 내부의 링크를 통과하도록 설계 하였고, 카메라는 그리퍼로 물건을 잡을 때 사용자가 영상으로 확인할 수 있도록 손목 부분 상단에 배치하였다. 설계된 EOD 매니플레이터의 상세 설계 사양은 Table 5와 같다.

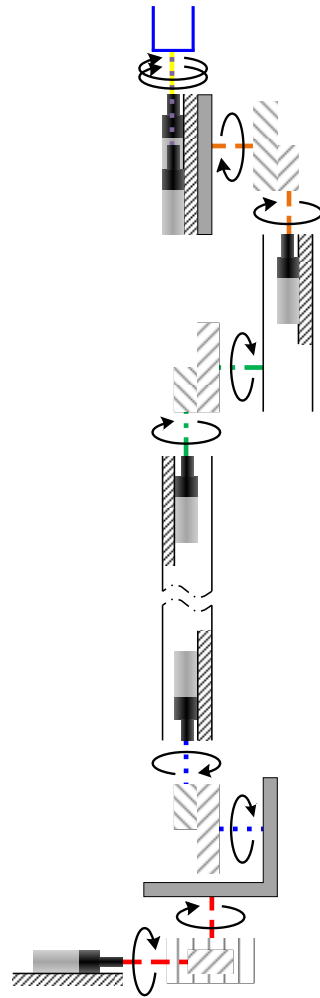
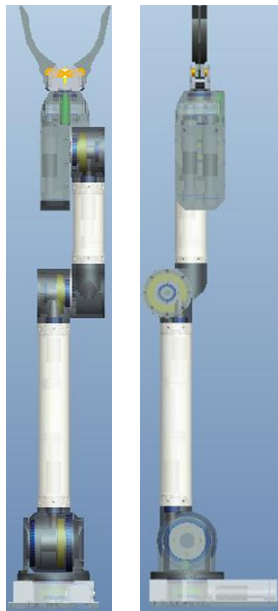
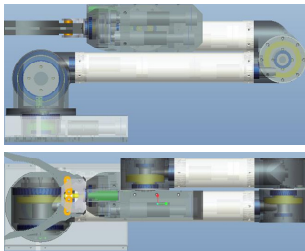


Fig. 6. EOD 매니플레이터의 전체 구조



(a) 펼친 형태



(b) 접힌 형태

Fig. 7. EOD 매니퓰레이터의 상세 설계

Table 5. 설계 EOD 매니퓰레이터 주요 사양

하단 장착부 크기	255mm × 180mm	
무게	14.75kg	
자유도	6(그리퍼 포함)	
부하하중	최대 인장 시	5kg
	최대	15kg
최대 도달 거리	1m	
최대 파지 범위	140mm	

5. 결론

로봇 기술이 발전하면서 군사분야에서 다양한 역할을 수행할 수 있는 무인 소형주행로봇들이 개발되고 있다. 최근 급조 폭발물에 대한 우려가 급증하면서 세계 여러 나라에서 무인 소형주행로봇에 EOD 매니퓰레이터를 탑재하여 인간을 대신한 폭발물 제거 임무를 수행하는 사례가 늘고 있다. EOD 매니퓰레이터는 산업용 매니퓰레이터와는 다른 기능이 요구되므로, 기존 매니퓰레이터들과는 차별화되어 개발되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 소형 무인주행로봇에 장착 가능한 EOD 매니퓰레이터를 여러 개념들을 비교 분석하여 사용 목적에 적합한 구조로 상세 설계 구현하였다.

설계 초기 단계에서 공리적 설계 기법을 이용하여 설계의 초기 접근 순서를 결정하였으며, 각 동력 전달 방식을 비교하여 EOD 매니퓰레이터에 적합한 구동방식을 결정하였다. 또한 각 부분별 여러 개념 고안들을 비교하여 전체적인 개념을 수립 후 상세설계 과정을 통하여 최종 설계를 완성하였다.

향후 설계된 매니퓰레이터를 최종 개발 완성하여 실험을 통하여 성능을 검증해 보고, 사용자 입력에 따른 통합 제어 시스템을 구현할 것이다.

References

- [1] P. W. Singer, "Robots at War : The New Battlefield", The Wilson Quarterly, Winter 2009.
- [2] http://www.irobot.com/gi/ground/510_PackBot/
- [3] <http://www.foster-miller.com/products-unmanned-talon-gen-iv-heavy-lift.htm>
- [4] Nam Pyo Suh, Axiomatic Design : Advances and Applications, Oxford University Press, 2001.
- [5] Robert C. Juvinall, Kurt M. Marshek, Fundamentals of Machine Component Design, John Wiley & Sons, 2000.
- [6] Anthony Esposito, Fluid Power with Applications, Prentice Hall, 2008.