

구조물의 가변성을 위한 모듈형 유닛의 설계 및 해석

(Design and Analysis of a Modular Unit for Reconfiguration of the Structure)

유인환* · 이보희** · 송현선**

(In-Whan Yu · Bo-Hee Lee · Hyun-Son Song)

Abstract

In this paper, the design and analysis of a reconfigurable modular structure, which reforms itself according to the change of the environment and realize appropriate forms and motions, are dealt with. This modular is a free structure from the restrictions with constraints about fixed environment and has various forms and motions by combining units. The form of this unit has a shape of a square with 7 centimeters side each, and has a structure which can be combined in a chain-shape or a lattice-shape. Additionally, The structure has a mobility by being equipped with wheels so that it can be combined for itself. In this paper, all the wireless controllers, sensor system, and communicating method between modules according to module structures were suggested and transformation method to be transformed to shape of snakes, caterpillars were presented. Moreover, simulations for each method were performed to show the validity of the motions including motor torque analysis. All the motions suggested were realized and experimented, whereby the availability of the designed mechanism and algorithm was verified with the result of experiments.

Key Words : Reconfigurable Modular structure, Wireless Controller, Motor Torque Analysis

1. 서 론

지금까지 전기 구조물들은 주어진 환경에서 정해진 역할을 잘 수행하도록 견고한 구조로 설계되었다. 이러한 구조로 정해진 용도에 맞게 모든 기능을 구현하기 힘들기 때문에 산업용 구조물로부터 서비스형태를

갖는 구조물에 이르기까지 다양한 형태의 구조물들이 연구되고 있다. 이러한 구조물들은 특정 환경과 임무 수행에 적합한 능력을 최대한 발휘하도록 중요하고 필요한 요소들을 고려해 하드웨어와 소프트웨어를 설계하여야 한다. 예를 들면 청소영역에 사용되는 구조물은 먼지나 얼룩 같은 이물질 제거하기 쉬우면서 빠른 이동을 위해 하드웨어는 높이가 낮은 모바일 로봇형태로 제작이 되어야 한다. 그리고 소프트웨어는 넓은 방을 효율적으로 청소하기 위해서 위치인식, 장애물 회피와 같은 소프트웨어가 적용된다. 이러한 작업 환경에서는 설계하는 사람의 경험과 능력이 제한

* 주저자 : 세명대학교 대학원
** 교신저자 : 세명대학교 전기공학과 정교수
Tel : 02-354-1323~4, Fax : 02-388-1321
E-mail : tough0507@hanmail.net
접수일자 : 2011년 7월 7일
1차심사 : 2011년 7월 9일
심사완료 : 2011년 7월 25일

되어 있기 때문에 작업자가 생각한 작업환경보다 많은 변수들이 작용하기 때문에 예상을 벗어난 문제들이 발생하거나 전혀 다른 상황에 놓일 수도 있다. 따라서 새로운 문제에 대한 원활한 임무 수행을 하고 새로운 기능을 추가하기 위해서는 보통 구조물을 다시 설계 후 제작해야 한다. 전술한 바와 같이 청소 로봇 설계 시 고려하지 않은 계단이나 높은 턱 같은 장애물에 대해서 대응하기 힘들다. 장애물에 대해 수동적인 동작의 가장 큰 이유는 구조물의 변형이 힘들기 때문이다. 기구부는 구조물이 잡거나 이동하는 등 실제 임무에 최적화되어 설계되어 있다. 새로운 장애물 회피나 모바일 이동과 같은 새로운 기능을 추가할 경우 발생 가능성 있는 문제들을 파악해 다시 설계 후 제작해야 한다. 따라서 이러한 환경 변화에 대응하기 위해 구조를 변경할 수 있는 모듈러 형태의 구조물에 대한 연구가 진행되고 있다. 모듈러 구조물은 단위 모듈들이 여러 개의 모듈과 서로 결합할 수 있는 연결 메커니즘과 동작 표현을 위해 구동부가 내장되어 있는 일종의 로봇 형태의 구조물이라 볼 수 있다. 연결 메커니즘을 이용해 여러 개의 단위 유닛과 결합과 분리가 가능하기 때문에 다양한 형태로 변형이 가능하다. 그리고 동작 표현을 위한 구동부가 내장되어 있기 때문에 극한 상황이나 지형적인 한계를 극복하기 위해 적합한 형태로 변형 후 그에 맞는 동작 구현이 가능하다. 형태를 구성하는 각각의 단위 유닛들은 무선 통신 기능이 내장되어 있어 자유롭게 이동하며 수집한 정보를 교환할 수 있다. 즉 변화하는 상황에 대한 적응력이 뛰어나 높은 작업의 효율성, 넓은 활동 영역을 기대할 수 있다[1-2]. 따라서 향후 개발되는 구조는 체인 시스템, 래치시스템, 트러스시스템, 형태가 자유로운 시스템의 형태로 개발될 것으로 보고 있다[3]. 이런 모듈러 유닛에 관한 연구는 현재 외국 연구소들을 중심으로 개발 중이며, 대표적인 연구기관으로는 스위스 EPFL의 Swarm-bot[4], 미국의 PARC의 Polybot G1-G4[5]시리즈, USC대학의 Conro[6], Superbot[7], 일본의 AIST에서 개발한 M-Trans[8] I,II,III 시리즈가 있다. 일반적으로 모듈러 형태의 구조물은 다수의 개체를 이용하여 형상을 표현하고 또한 표현된 형상으로 특수한 작업을 수행하는데 목표를 가지고 있다.

따라서 다수의 개체 간에 어떠한 형태로 결합을 하고 필요에 따라서 분리를 하는 과정을 반복하여야 하며 이를 위한 간결하면서도 효과적인 방법이 연구되어야 한다. 하지만 Swarm-bot의 경우는 독특한 형태의 분리와 결합 구조를 가지고 있으나 결합과 분리하는 방법이 복잡하여 소형의 모듈을 구현하기가 어려운 단점을 가지고 있다. Polybot과 Conro의 경우는 정방향의 구조를 가지고 있으며 자석을 이용한 결합이 이루어지지만 락킹을 위한 구조물이 지나치게 복잡하며 실제 구현 시에 어려움을 가지고 있다. M-Trans의 경우 1개의 모듈을 구현하기 위한 가격이 높아 다수의 모듈라 형상을 표현할 때는 가격적인 부담이 제기된다. 따라서 상기 형태의 구조물의 단점을 보완하면서 소형이면서 경량화된 구조의 연구가 절실히 요구되며 본 논문에서는 이러한 목적에 맞는 구조 연구가 제시되었다.

2. 단위 모듈라 유닛 설계

2.1 기구 구조 설계

제안한 모듈러 구조물은 단위 몸체를 구성하는 기구부와 이를 제어하기 위해 전자회로 부분으로 구성된다. 전체 구조는 기존 버전과 같은 형태인 정방형 모양을 가지고 있으며[9], 그림 1과 같이 ㄷ구조를 사용하여 접속되는 2면을 이용 결합과 분리를 수행할 수 있게 만들었다. 각 2면은 용도에 따라 도킹하는 면과 락킹 하는 면으로 동작하게 되며 두 개의 면이 결합하여 형태를 만들게 된다.

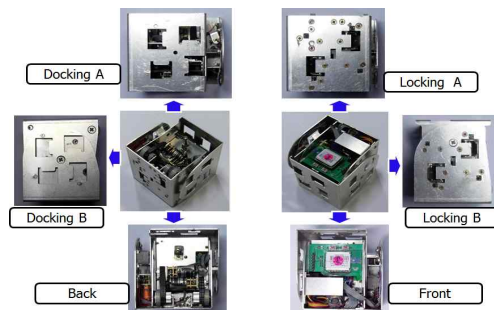


그림 1. 모듈 유닛 기구 모습
Fig. 1. View of modular unit

구조물의 가변성을 위한 모듈형 유닛의 설계 및 해석

도킹 및 락킹에 필요한 기구 메커니즘은 독립된 구조로 분리되어 배치하였다. 모든 전장 및 배터리와 동작 메커니즘은 모듈 유닛 내에 장착이 되며 일체형으로 구성되어 있으며 전체 구조는 그림 2와 같은 형태로 제작되었다. 그림에서 좌측은 전 방향에서 본 그림이며 우측은 후방에서 본 그림이다.

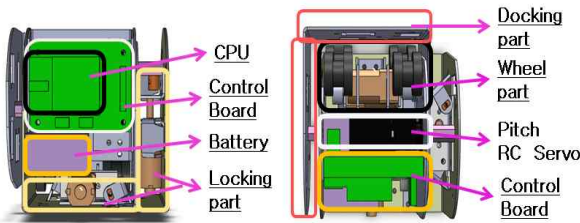


그림 2. 모듈 구성
Fig. 2. Module configuration

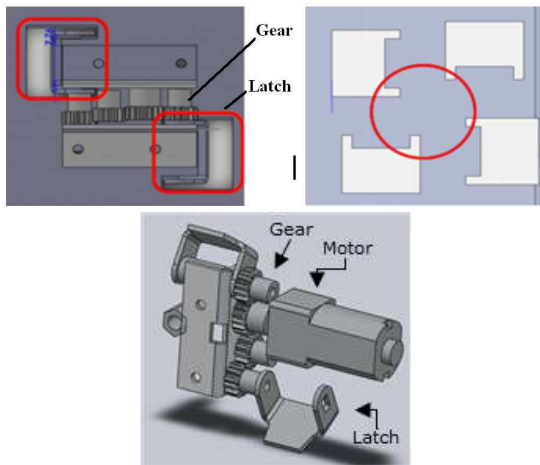


그림 3. 결합용 기구 구조
Fig. 3 Connection mechanism

결합과 분리를 위한 구조는 2개의 모터와 래치를 이용해 무게는 증가하더라도 빠르고 유격이 있더라도 유연하게 결합할 수 있도록 래치를 사용했다. 도킹은 2개의 래치가 안쪽으로 회전하며 모듈을 잡는 단순한 구조로 설계되었다. 거는 면적이 넓고 대각선으로 잡기 때문에 고정 핀을 따로 설치하여 고정시킬 필요가 없으며 래치되는 구조물의 앞부분을 길게 연장시켜 결합되는 면이 2~3[mm] 정도 떨어져 있더라도 문제 없이 결합할 수 있게 했다. 또한 래치가 들어가는 홈

의 크기도 크게 하여 수평과 수직에 정확히 맞지 않더라도 결합될 수 여유를 만들어 유연성을 확보하였다.

최종 재구성할 모듈러 로봇을 만들기 위해 움직임과 형태가 결정되므로 결합 면과 각도를 인식할 시스템이 필요하다. 그림 4는 각 면에 배치된 자석과 자성을 인지할 수 있는 홀(Hall) 센서의 조합 및 패턴을 나타낸 그림이다. 그림에서 원의 모양은 자석의 위치를 나타내었고 사각형은 홀 센서의 위치를 표현하였다.

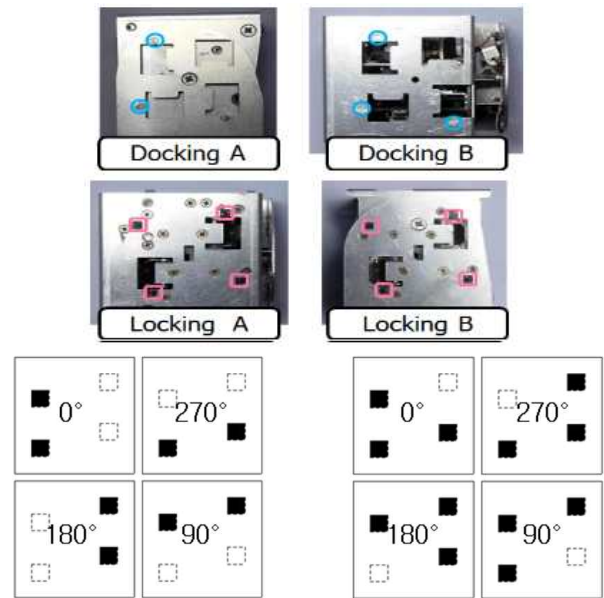


그림 4. 자석 및 결합 센서의 위치
Fig. 4 Magnets and sensor position

그림 3에서와 같이 결합 구조는 모터가 회전을 시작하면 축에 장착된 기어가 연동하고 기어에 붙어 있는 걸쇠 구조물을 시계 방향으로 회전시켜 반대면의 장착되는 구조물을 잡게 되어 결합되게 되는 구조를 가지고 있다. 그리고 모터를 구동한 일정시간 후에는 모터를 멈추어 결합을 마치게 된다. 이때 멈추는 시간은 모터에 걸리는 전류의 급격한 변화로 감지하여 결합이 완료됨을 인식하게 된다. 분리는 결합과는 반대로 동일한 방법으로 모터를 돌려서 래치를 해제하게 되는데 모터의 회전방향을 반대로 하면 된다. 이 구조의 특징은 결합과 분리할 때만 모터에 전력을 공급하고 결합을 유지하는 데는 에너지가 소모되지 않기 때

문에 에너지의 절약을 가져올 수 있는 장점을 가지고 있다.

여기서 감지 각도는 설계한 모듈러 로봇이 90도 단위로 회전하여 결합하므로 4개의 결합각도와 도킹과 락킹 면 각각 2개씩 혹은 3개씩 조합하여 2개의 면을 감지할 수 있어야 한다. 홀센서가 부착되는 기준면은 전원이 필요하므로 배터리와 제어로직이 장착되어 있는 락킹 면으로 설정했다. 센서 위치는 회전방향에 상관없이 감지할 수 곳을 선정해 각 면 당 4개의 센서를 부착했다.

센서에 감지되는 자력의 위치정보를 컨트롤러에 전달해 도킹 면과 각도를 검출한다. 도킹 면에 부착된 자석의 수에 따라 면과 회전 각도를 인식하며, 4개의 자석을 이용할 경우 어떤 방향으로 결합되는지를 알 수 없기 때문에 A면에는 두 개의 자석을 이용하고 B면에는 3개의 자석을 이용하여 검출 면에서 감지되는 개수에 따라 결합하는 면을 결정할 수 있게 된다. 또한 1개를 사용하는 경우 결합이 비정상적으로 기울어져서 결합이 되는 경우를 대처하지 못하기 때문에 최소 2개가 요구된다. 그리고 결합되는 면의 센싱값의 패턴에 따라 각각 결합되는 회전 각도를 판단하게 된다. 그리고 결합되는 기구물의 래치 구조가 ‘C’자 모양으로 삽입되기 때문에 결합시의 유격을 고려하여 최대한 ‘C’자 형태의 바깥쪽에 배치하였기 때문에 배치 모양의 마름모꼴로 나타난다.

전체 결합과 분리하는 과정은 그림 5와 같이 2개의 래치가 안쪽으로 회전하며 모듈을 잡는 단순한 구조이다. 거는 면적이 넓고 대각선으로 잡기 때문에 고정 핀을 넣을 필요가 없다. 그리고 래치 앞부분을 길게 하여 2~3[mm] 정도 면이 떨어져 있더라도 결합할 수 있게 했다. 래치가 들어가는 홈의 크기도 크게 하여 수평과 수직 위치가 맞지 않더라도 결합할 수 있는 여유를 두었다. 모듈러 유닛이 형상을 만들기 위해서는 서로 간의 결합이 필요하다. 결합은 수동으로 모듈러 유닛의 각 개체를 서로 마주 보게 만들어서 결합이 이루어질 수도 있지만 완전 자동으로 자체 내의 움직임으로도 구성할 수 있게 만들었다. 모듈러 유닛이 형상을 만들기 위해서는 서로 간의 결합이 필요하다.

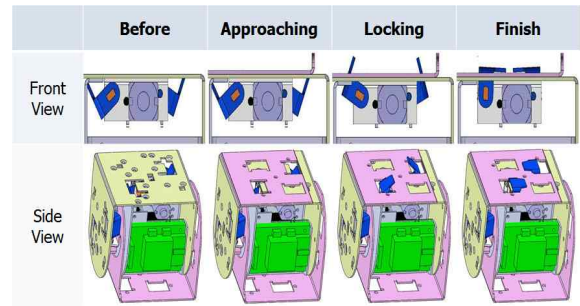


그림 5. 결합 과정
Fig. 5. Combination procedure

결합은 수동으로 모듈러 유닛의 각 개체를 서로 마주 보게 만들어서 결합이 이루어질 수도 있지만 완전 자동으로 자체 내의 움직임으로도 구성할 수 있게 만들었다.

자체 구동은 바퀴를 이용한 방식이며 바퀴를 이용하여 독립적인 움직임을 구현하였다. 2개의 모터는 각각 구동하여 독립적으로 구동되게 하였으며 벨트와 풀리를 이용했다. 그림 6에서 좌측 그림은 바퀴와 바퀴를 구동하는 구조물의 모양을 나타낸 그림이며 우측 그림은 구조물에 부품이 실장되어 있는 실제 그림이다. 구동 방법은 모터를 구동하면 모터에 결합되어 있는 감속기어를 동작시키고 감속 기어는 벨트를 이용하여 최종 단계 체결된 풀리를 구동하여 회전시키며 바퀴는 플라스틱으로 풀리에 장착하여 움직이게 된다. 각각 모터 2개가 서로 독립적으로 구동되기 때문에 속도 차에 의해 직진, 회전이 가능하게 설계되어 있으며 캐스터를 장착하여 원활하게 회전되게 구성하였다.

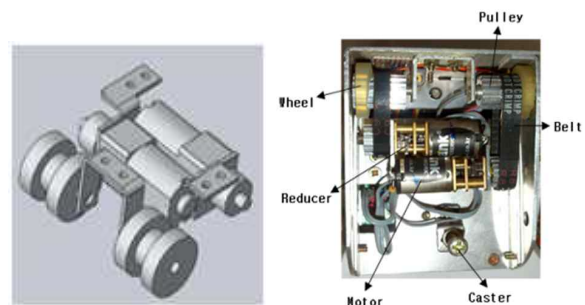


그림 6. 바퀴 구동부
Fig. 6. Assembly of wheel drive

2.2 제어부 설계

제어부는 모듈러 유닛의 전장 부분을 제어하는 주 제어기의 역할을 하고 있으며 다른 모듈과의 도킹 및 자체 내의 정보를 다른 모듈과의 통신을 통하여 정보 교환하는 기능을 담당한다. 제어부는 전원부와 도킹 분리용 DC 모터 구동부와 서보 모터 PWM 제어기 센서부로 구성되어 있다. 전체 구성된 제어부의 구성은 그림 7과 같이 표현할 수 있다. CPU로는 제닉 사의 JN5139R[10]이며 32비트처리 능력과 자체 내의 Zigbee스택을 지원하며 각종 메모리와 A/D기능을 가지고 있기 때문에 주변 센서와의 접속을 원활히 할 수 있다.

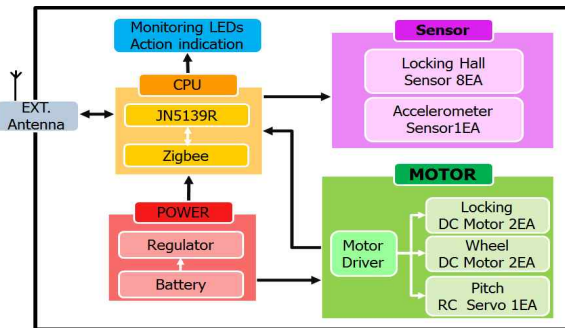


그림 7. 주제어기 구성도
Fig. 7. Block diagram of main controller

그림 8은 전장부가 기구에 장착된 모양을 나타내며 각각 CPU부 및 모터 구동부는 한 보드에 장착이 되어 있다.

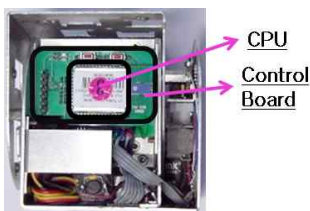


그림 8. 주제어기 및 제어 보드
Fig. 8. Main controller and control board

제작된 모듈구조는 분리 결합을 위한 락킹 모터와 평지구동을 위한 바퀴구동 모터, 동작 구현을 위한 Pitch모터 로 구성된다. 락킹 모터와 바퀴 구동 모터는

정밀한 제어가 필요 없고, 작으면서 큰 토크를 사용할 수 있는 감속기가 장착된 DC 모터를 사용했다. 하지만 동작구현을 위한 Pitch 모터는 정밀한 제어가 필요하고 공간제약에서 비교적 자유로운 RC 서보 모터를 사용했다.



그림 9. 구동 모터
Fig. 9. Driving motor

바퀴 구동 모터는 독립된 2개의 바퀴를 사용해 방향 전환이 가능하다. 작은 크기에 바퀴 모듈을 넣기 위해 2개의 모터만으로 방향 전환과 이동을 할 수 있도록 되어 있으며, 빠른 이동을 위해 회전속도가 빠른 모터를 선정했다. 락킹 모터는 2개의 모터를 사용해 독립적으로 결합/분리할 수 있다. 따라서 다른 쪽 면의 결합상태와 상관없이 자유롭게 분리 및 결합을 할 수 있도록 하였다.

피치모터는 모듈러유닛이 결합했을 때는 Pitch 자유도를 갖는 조인트 역할을 한다. 2개 이상의 모듈이 결합될 때 결합 면과 방향에 따라 피치자유도를 물과 요를 구현할 수 있다. 제어 신호는 빠른 응답 속도가 PWM 신호를 사용했다. 제어 신호는 그림 10처럼 전체 주기가 10[ms]이며, 각도 제어는 0.3[ms]시 0[°]에서 2.3[ms] 시 180[°]로 동작한다. RC 서보를 사용하기 때문에 너무 빠른 속도 변화 시 토크 출력이 낮아지는 문제가 있으므로 적정한 값을 설정해 주어야 한다.

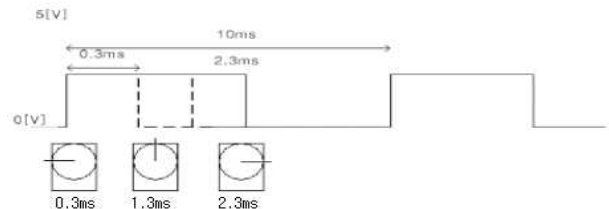


그림 10. 피치 서보모터 타이밍
Fig. 10. Timing chart of pitch servo motor

또 다른 전기 장치로는 배터리 및 센서 장치가 있으며 전체적인 부가적인 사양은 표 1과 같다

표 1. 단위 모듈 셀의 사양
Table 1. Module specifications

모듈 형태	체인형
크기	7[cm]×7[cm]×7[cm](정육면체)
배터리	Li-polymer(3.6[V], 2개, 400[mAh])
사용 관절	피치 움직임 (0[°]~180[°])
이동 방법	2개의 바퀴(전후, 좌우, 방향전환)
모듈간의 결합	기구 래치 및 Hall 센서
사용 CPU	Jennic 5139 R1
모듈간의 통신	무선 Zigbee(Jennet)
센서 구조	면 인식용, 자세 제어용 가속도 센서
결합모터	DC 7.2[V], 감속기 장착 1개
구동모터	DC 7.2[V], 감속기 장착 2개
피치모터	DC 7.2[V] Hitec Servo Motor
동작사양	7.2[V], 120[mA](일반), 400[mA](모터구동)

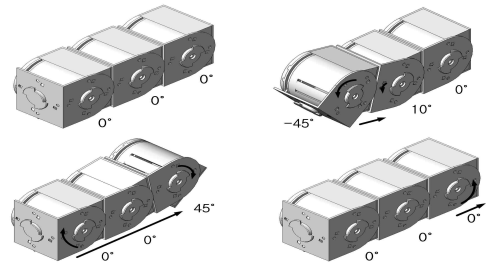


그림 11. 3개 모듈 애벌레 움직임
Fig. 11. 3 modules inchworm motion

그림 12는 4개의 모듈을 결합하여 나비와 같은 움직임을 모방하였다. 좌측상단은 초기 위치를 나타내며, 움직이기 시작한다. 첫 단계로 양쪽 끝의 모듈은 다리 역할을 하여 바닥을 지지하도록 하였다. 안쪽 두 개의 모듈은 관절 역할을 하여 앞으로 전진한다. 그리고 양쪽 끝의 모듈을 들고 지지할 모듈을 앞으로 밀어 전진할 준비를 한다. 또한 양쪽 끝의 모듈을 바닥에 지지하고, 지지 모듈을 당기고, 밀어서 모듈이 앞으로 전진시킨다. 그리고 지지 모듈을 들어 다시 앞으로 당겨오는 동작을 반복하게 하여 움직임을 표현하였다.

3. 변형 동작 설계

3.1 동작 생성

모듈라 구조물은 단위 모듈을 이용하여 분리와 결합을 반복하면서 형상을 변형할 수 있으며 변형된 형상을 이용하여 다양한 작업에서 이용할 수 있다. 이러한 동작을 모의 실험하기 위해 대표적인 애벌레, 뱀, 나비의 동작을 만들고 모의실험을 진행하였다. 우선 3개의 모듈을 결합하여 애벌레의 움직임을 모방하였다. 그림 11과 같이 3개의 모듈을 나란히 결합하여 준비를 하고, 뒷부분이 가벼워서 뒤를 먼저 들어 앞으로 오므린다. 그리고 앞 모듈을 당기고, 뒤 모듈을 펴면서 몸체를 앞으로 이동하는 형식이다. 결국 3개의 모듈을 결합한 애벌레의 움직임은 그림 11의 좌측에서 우측 그리고 다음 동작을 반복하여 앞으로 전진한다.

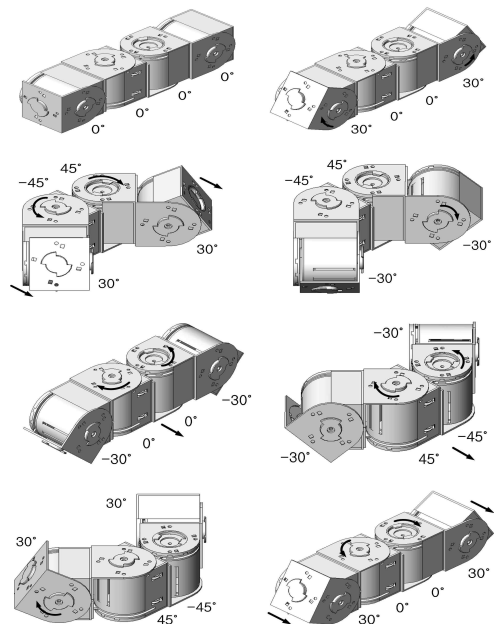


그림 12. 4개 모듈 나비 움직임
Fig. 12. 4 modules butterfly motion

3.2 기구학 해석

모듈러 구조물의 움직임을 해석해 내기 위해서는 움직임을 기구학(Kinematics)적으로 해석하고 이를 기초로 하여 각 연결된 모듈의 끝단에 대해 궤적을 생성하여 이를 기초로 움직임을 찾아내게 된다. 따라서 구조물의 움직임에 부드러움을 줄 수 있으며 최적의 궤적 생성을 수행하고 이를 기반으로 다양한 행동을 생성하게 된다. 이를 위해 우선 그림 13과 같이 Denavit-Hartenberg 강제 링크 표시법을 사용하여 각 링크에 고착된 3개의 링크 파라미터, 그리고 관절 변수로 표현하고, 이에 대한 해석을 첫 번째 장착되어 있는 기준 좌표계에 대해 표 2와 같이 표현할 수 있다.

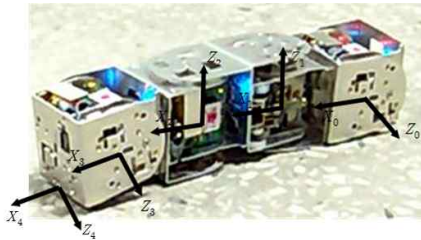


그림 13. 4개 모듈 셀 좌표계
Fig. 13. Cartesian coordinate of modules

표 2. 모듈의 DH 변수
Table 2. DH Parameters of modules

링크	a	α	d	θ	초기치
1	0.07	90	0	θ_1	90
2	0.07	0	0	θ_2	90
3	0.07	-90	0	θ_3	90
4	0.035	0	0	θ_4	90

모듈러 셀의 궤적 계획방법은 주어진 궤적 경유 점에 대하여 관절변수 값을 이용하여 관절공간에서 궤적을 계획하는 방법을 사용한다. 궤적 계획 함수의 사용 빈도가 상대적으로 낮기 때문에 비교적 낮은 연산 기능에서도 수행할 수 있는 장점이 있다. 이를 수행하기 위하여 우선 고차 함수를 이용하여 궤적 계획을 수행하고 중간의 이동변위를 찾았다. 함수는 5차 다항식

을 이용하여 관절 공간을 배경으로 이루어지도록 설계되었다. 궤적계획에 있어 시작점과 목표점이 주어지면 시작속도, 가속도 그리고 목표점에서의 속도 가속도 등의 6개의 미지수로 이루어진 시간에 대한 5차 함수를 구할 수 있다. 아래의 식 (1)은 6개의 미지수로 이루어진 시간에 대한 5차 함수이다.

$$\lambda(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \quad (1)$$

식 (1)로부터 모듈의 궤적을 6개의 구속조건을 이용하여 대수적으로 구할 수 있다. 이때 경유 점 정보는 표 3과 같다.

표 3. 궤적의 경유점
Table 3. Via points of trajectory

링크 \ ([ms])	0	300	600	900	1200
1모듈	90[°]	45[°]	90[°]	90[°]	90[°]
2모듈	90[°]	90[°]	0[°]	0[°]	90[°]
3모듈	90[°]	90[°]	180[°]	180[°]	90[°]
4모듈	90[°]	90[°]	0[°]	90[°]	90[°]

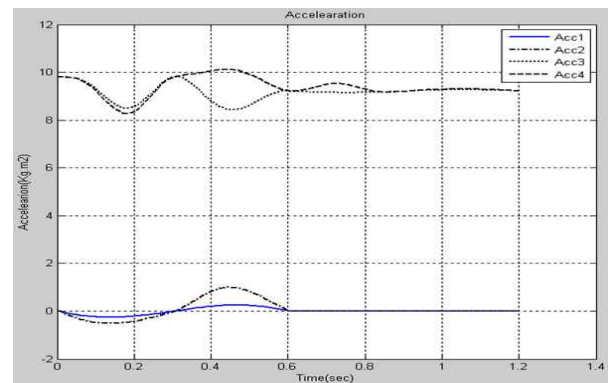


그림 14. 모듈구동축의 가속도
Fig. 14. Acceleration of module joints

식 (1)에서 $a_0 \sim a_5$ 는 각각 결정해야 할 상수 값이며 이에 따라 궤적을 표현할 수 있다. 이렇게 주어진 물리적 조건에 대하여 최고차인 5차 다항식을 이용하여 궤적계획을 할 경우 가속도 함수가 3차 함수로 표현될 수 있어 충격량(Jerk)을 갖지 않는 장점이 있다. 상기

수식을 이용하여 Matlab을 이용하여 각 부분의 가속도와 각속도를 측정하면 그림 14 및 그림 15와 같다.

3.3 동역학 해석

구조의 안정적인 구동을 위하여 시스템에 대한 동역학적인 해석이 필요하다. 동역학적 해석을 위해 구조셀을 총 4개의 질점으로 해석하여 Newton-Euler[11] 방법으로 처리하였으며 모듈의 기계적인 연쇄를 통한 방법으로 동역학을 해석하여 각 모듈러 유닛에 소요 예상되는 토크를 유추하였다. Newton-Euler Method를 이용한 동역학 해석은 아래와 같이 표현될 수 있다.

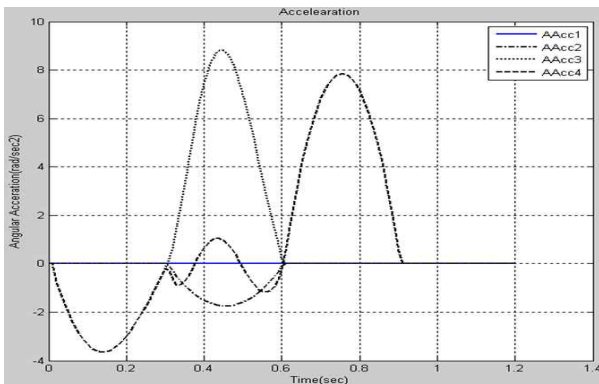


그림 15. 모듈 구동축의 각가속도
Fig. 15. Angular velocities of module joints

$$\begin{aligned}
 {}^i R_0 f_i &= {}^i R_{i+1} ({}^{i+1} R_0 f_{i+1}) + m_i {}^i R_0 a_i \\
 {}^i R_0 n_i &= {}^i R_{i+1} [{}^{i+1} R_0 n_{i+1} + ({}^{i+1} R_0 p_i^*) \times ({}^{i+1} R_0 f_{i+1})] \\
 &\quad + ({}^i R_0 p_i^* + {}^i R_0 s_i) \times {}^i R_0 F_i + (R_0 I_i R_i) (R_0 \omega_i) \\
 &\quad + (R_0 \omega_i) \times [({}^i R_0 I_i {}^0 R_i) ({}^i R_0 \omega_i)] \\
 \tau_i &= ({}^i R_0 n_i)^T (R_{i-1} z_0) + b_i \dot{q}_i
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기에서 ${}^i R_0$ 는 기준 좌표계에서 i 좌표계까지의 회전 행렬을 의미하며, ω_i 는 기준 좌표계에서 본 i 좌표계의 각속도(angular velocity)를, z_0 는 $(0,0,1)^T$ 를, \dot{q}_i 는 i 좌표계에서의 각속도를, a_i 는 기준좌표계에서 i 번째 질량 중심에서의 선가속도(linear acceleration)를 의미한다. 그리고 f_i, F_i, n_i, b_i 는 각각 질점에 걸리는

힘(internal force), 외력(external force), 모멘트(moment), 점성 마찰(viscous damping)상수를 의미하며, I_i, τ_i 는 각각 i 링크의 형상에 의한 모멘트 관성(inertia)과 관절에 걸리는 토크를 의미한다. 상기 수식을 이용하여 각 모듈에 걸리는 토크를 그림 16과 같이 Matlab을 이용해 계산하여 나타내 보았다.

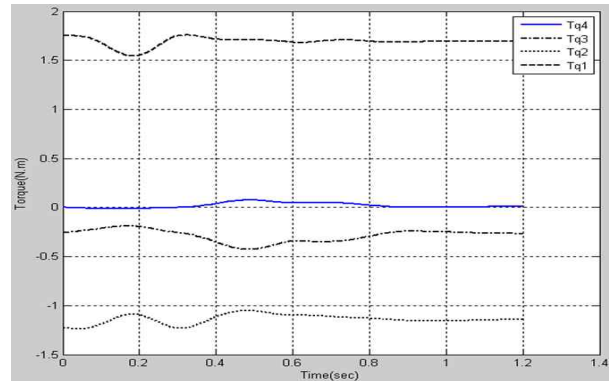


그림 16. 모듈 구동축의 토크
Fig. 16. Torques of module joints

그림 16에서 최대토크는 약 1.7[Nm]이며 즉 17 [kgf*cm]이며 사용된 모터 HITEC(HS-5125MG)사 [12]의 DC모터의 최대 토크 5.3[kgf*cm]에 비해 3배의 차이가 있음을 알 수 있었다. 따라서 한 개의 모듈이 다른 3개의 모듈을 동작하기에는 토크가 부족함을 알 수 있으며, 이는 다른 모듈과의 협조 작업에 의해 분산 동작이 필요함을 알 수 있었다. 나비 모양의 움직임은 일부 모듈이 바닥에 부착되어 움직이기 때문에 협조 작업으로 이를 해결할 수 있으며, 협조 작업을 이용하여 토크를 분산하는 방법은 차후의 연구에 필요한 부분이며 이를 위한 폐쇄형 구조의 제어 방법에 대한 연구가 요구된다.

4. 동작 실험

개발한 모듈러 모듈이 스스로 분리하고 결합할 수 있는지 검증했다. 외부 도움 없이 형태를 변형하기 위해서는 스스로 구조를 변경하고 동작표현이 가능해야 한다. 이를 검증하기 위해 모듈러 유닛이 가지고 있는 바퀴를 사용해 자동결합한 후 상하로 움직이는 애벌

레의 동작을 구현했다.

바퀴는 지면이나 결합 면에 정확히 만나기 쉽다. 만일 레일을 설계하여 추가로 장착한다면 정해진 경로 따라 이동하므로 안정적으로 이동이 가능하다. 그리고 2차원 평면이기 때문에 도킹 면을 맞추기 쉽다. 가이드 없이 이동해 유격이 발생했지만 도킹 면의 모듈을 잡아끌어 결합을 했다. 바퀴를 사용하는 면은 도킹 면 쪽이 낮아 결합하는 면의 사이 간격이 그림 17의 5"373초에서처럼 바닥보다 위쪽에 3~4[mm] 정도로 크다. 결합면의 들어진 정도는 1~2[mm] 정도로 작았다. 이때 결합 매커니즘의 래치는 문제없이 도킹 면에 걸었다. 그리고 반대편 모듈을 잡아당김으로써 모듈끼리 견고하게 걸었다. 결합시간은 약 1초 내외로 빠르게 작동했다. 결합이 완료된 후에는 애벌레로 동작시켰다. 이동주기는 약 1초로 애벌레 동작을 반복하며 이동했다.

일반적인 바닥에서도 동작구현과 이동이 가능했다. 일반 건물의 시멘트 바닥으로 비교적 미끄러웠지만 그림 17에서 2개의 모듈이동시 2번열과 3번열과 같이 이동뿐만 아니라 방향 전환도 가능했다. 무게가 가벼운 1개의 모듈 이동에서도 4번열과 같이 분리 후 바로 이동할 수 있음을 확인했다. 그림 18과 같이 4개의 모듈을 이용해 간단한 뱀 형태를 구성한 후 동작 실험을 진행했다.



그림 17. 모듈의 자동 결합과 애벌레 동작
Fig. 17. Self-assembly and inchworm motion

애벌레 동작에서는 전진밖에 안되므로 방향전환을 위해서는 바퀴를 이용해야 했다. 하지만 뱀 형상에서는 가운데 2개의 모듈이 측면으로 누워 있기 때문에 방향 전환이 가능하였다. 그리고 더 빠른 이동을 위해서 바퀴 모듈 앞과 뒤에 있는 모듈을 이용해서 바퀴로 이동도 가능하였다.

전체 동작에서는 방향 전환 시 분리 없이 잘 동작되었다. 앞뒤로 한 개의 모듈이 장착되어 방향전환 시 많은 힘이 가해지며, 락킹 래치가 발생하게 된다. 바퀴 이동 역시 4개의 모듈을 지탱해야 하기 때문 부하가 많이 걸리게 된다. 하지만 중간에 분리되거나 바퀴모듈이 파손되는 문제뿐만 아니라 오작동도 없이 작동했다. 모듈 결합에서 견고한 결합뿐만 아니라 빠른 결합이 가능하기 때문에 더 많은 모듈이 결합할 경우 신속한 변형과 안정적인 동작을 보여 줄 것으로 기대된다. 상기 실험 시에는 모듈과 유닛이 가지고 있는 바퀴를 사용하여 움직였으며 이는 실제로 이동형 구조물을 제작 시 응용될 수 있으며, 애벌레 동작을 구현하기 위하여 상하 공간상의 움직임이 표현되어 다양한 형태의 방향을 조정할 수 있는 구조를 제작에 사용될 수 있다. 또한 두 모듈간의 성공적인 결합을 통하여 향후 사용될 수 있는 구조물에 결합될 수 있는 형태임을 확인하였다.

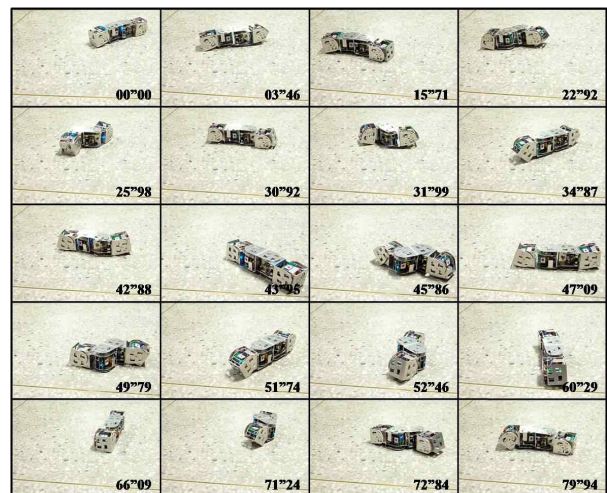


그림 18. 뱀 형상의 움직임 구현
Fig. 18. Snapshot of a snake motion

5. 결 론

장애물과 환경 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 모듈러 구조물은 기존 구조물들이 가지는 고정된 환경에서의 작업을 가지는 새로운 장애물에 대해 적절한 대처가 힘든 경우에 유연성을 보여 줄 수 있는 지능화된 설비이다. 이러한 목적에 맞게 동작할 수 있도록 단위 모듈 유닛을 결합해 주변 환경이나 장애물에 따라 결합과 분리를 반복하여 스스로 적절히 대응할 수 있는 모듈러로 된 형태로 동작할 수 있게 단위 모듈 형태를 제안하였으며 실험을 통해 성능의 유효성을 증명하였다. 또한 제안된 연결 및 분리 방법에 적합한 연결 메커니즘과 바퀴 모듈이 탑재된 모듈 유닛을 실제 설계 제작함으로써 연결 메커니즘이 유격이 있어도 결합이 가능함을 보여 스스로 결합과 분리가 가능한 구조임을 검증하였다. 그리고 모듈러 유닛을 구성하는 각 모듈에 들어가는 제어기 형태와 이를 구동하기 위한 알고리즘 및 동작 감지 센서 시스템을 설계 및 구현하였다.

제안된 구조의 활용성을 보이기 위해 벌레, 뱀, 나비 움직임의 고안하고 동작에 대한 모의실험과 토크 및 동적 요인을 해석하여 설계된 메커니즘 및 알고리즘의 유용성을 확인하였으며, 실제 실험과 연계시켜 연결 메커니즘과 연속 동작을 검증했다.

향후 연구에서는 다양한 환경에서 실험 하에서의 기구부의 개선이 필요하다. 이를 위하여 연결 메커니즘에 사용되는 DC모터를 형상 기억합금과 같은 소재를 도입해 소형이면서 단순한 형태로 개선과 함께 전체 모듈의 무게를 경량화 시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

References

[1] Murata, S. et al, "Hardware design of modular robotic system," Proceedings of 2000 IEEE/RSJ International Conference, vol.3, pp2210 - 2217, 2000.
 [2] Akiya Kamimura et al, "Automatic Locomotion Design and Experiments for a Modular Robotic System", IEEE Transaction on Mechatronics, Vol.10, No.3, pp314-325, 2005
 [3] k. Gilpin, D. Rus, "Modular robot systems," Robotics & Automation Magazine, vol. 17, no. 3, pp.38-55, 2010.

[4] Francesco Mondata et al, "Swarm-Bot: A New Distributed Robotic Concept", Autonomous Robots, Kluwer Academic Publisher, Vol.17, p193-221, 2004.
 [5] M. Yim, D. G. Duff, and K. D. Roufas, "Polybot: A modular reconfigurable robot," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA2000), pp. 514 - 520, 2000.
 [6] Andres Castano et al, "The Conro Modules for Reconfigurable Robots", IEEE Transaction on Mechatronics, pp100-106, 2002
 [7] Behnam Salemi et al, "SUPERBOT: A Deployable, Multi-Functional, and Modular Self-Reconfigurable Robotic System", Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ Conference, pp3636-3641, China, 2006.
 [8] S. Murata, E. Yoshida, A. Kamimura, H. Kurokawa, K. Tomita, and S. Kokaji, "M-TRAN: Self-Reconfigurable Modular Robotic System," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.7, No. 4, pp. 431-441, 2002.
 [9] 이보희, 이상경, 공정식, "체인형 모듈러 로봇의 설계," 한국퍼지 및 지능시스템학회지, Vol. 19, pp. 674-682, 2009.
 [10] http://www.jennic.com/products/protocol_stacks/zigbee
 [11] K.S. Fu et al, Robotics, McGraw-Hill inc., pp118-123, 1987.
 [12] <http://hitecrd.co.kr>

◇ 저자소개 ◇



유인환(劉仁煥)

1955년 10월 19일생. 1979년 2월 광운대학교 응용전자공학과 졸업. 2008년 2월 세명대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 2월 세명대학교 대학원 박사 수료.



이보희(李普熙)

1962년 4월 20일생. 1996년 인하대학교 대학원 자동화공학과 졸업(박사). 1997년 7월 현재 세명대학교 전기공학과 부교수.



송현선(宋賢善)

1953년 3월 25일생. 1979년 2월 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1982년 2월 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 2월 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 세명대학교 전기공학과 정교수.