

## 모듈러 로봇의 결합 및 분리 구조 설계

유인환<sup>1\*</sup>, 이보희<sup>1</sup>, 공정식<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>세명대학교 전기공학과, <sup>2</sup>인덕대학 기계설계과

### Design of the Combination and Separation Structures of a Modular Robot

In-Hwan Ryoo<sup>1\*</sup>, Bo-Hee Lee<sup>1</sup> and Jung-Shik Khong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of electrical engineering Semyung University

<sup>2</sup>Department of machine design Induk University

**요 약** 모듈러 로봇은 기존 바퀴 혹은 다리를 가지고 있는 이동용 로봇이 가지는 공간 이동의 제한성을 극복하기 위해 개발된 로봇이다. 이는 다리형 로봇의 경우 이동 속도나 지형 등에 있어 균형 잡기 등에 어려움이 존재하며, 바퀴 이동형 로봇의 경우 요철과 둔턱 등을 극복하는데 한계를 지니게 된다. 이에 비해 모듈러 로봇의 경우 형상의 변경이 용이하며 이를 통해 자유로운 이동이 가능하여 이동성능에 제약을 극복할 수 있는 로봇이다. 하지만 모듈러 로봇의 경우 구동메커니즘 뿐만 아니라 형상 변경에 따른 결합 분리 메커니즘에 대한 연구도 진행되어야 한다. 이에 본 논문에서는 네 종류의 모듈러 로봇 결합 메커니즘을 제안하였다. 또한 각 모듈러 로봇 결합 메커니즘에 따른 결합 알고리즘을 제시하였다. 그리고 제안된 구조를 실제 구현하여 구조의 유용성을 검증하였다.

**Abstract** The modular robots are a kind of system that was developed to overcome the limitation of the movement for the mobile robot with wheels or legs. In legs type mobile robot case, they are limited for velocity and balance during moving at the uneven terrain. In wheeled mobile robot case, they are also limited to overcome bump, stair and so on. The modular robots can overcome moving limitation because of their transforming ability. However, they are researched not only driving mechanism but also combination mechanism. In this paper we proposed four kinds of unique structure for the combination and separation and also its algorithm. The effectiveness of the structure is verified with building the real structure and taking experiments to the designed modular robot

**Key Words :** Modular robot, Connection mechanism, Combination, Separation, Docking algorithm

### 1. 서 론

최근 로봇에 대한 높은 관심과 활발한 연구로 인해 다족 보행로봇, 휴머노이드 로봇, 수술용 로봇, 구조용 로봇, 청소용 로봇 등 많이 개발되어 보급되고 있다. 이런 많은 로봇 개발 분위기 속에 최근 새롭게 등장한 것이 재구성이 가능한 모듈러 로봇이다. 모듈러 로봇은 기존 로봇이 가지는 지형에 따른 제한성을 극복하고자 개발되었다. 예를 들어 이족보행 로봇은 바위나 자갈, 모래와 같이 지지면의 압력이 균일하지 않은 지형에서 동작할 때 균

형을 잡기가 힘들어 제어에 어려움을 겪는다. 모바일로봇의 경우도 마찬가지로 모래나 요철, 높은 턱 등이 있을 때 모바일 로봇의 기구적인 한계 때문에 이동에 제약을 받는다. 이에 비해 모듈러 로봇은 분리와 결합이라는 동작을 이용해 상황이나 지형에 따라 최적의 모양(뱀, 2족 보행, 애벌레, 등)으로 변형 할 수 있으며 이를 통해 지형적 한계를 극복하고 보다 자유로운 이동이 가능하게 된다. 또한, 단순한 변형과 이동이 아니라 각 모듈별로 제어기를 내장해 다양한 움직임을 구현할 수 있다. 이러한 모듈들은 서로 통신수단을 이용하여 정보를 교환하며 상황

\*교신저자 : 유인환(tough0507@hanmail.net)

접수일 2011년 06월 10일

수정일 (1차 11년 07월 08일, 2차 11년 07월 25일)

게재확정일 11년 08월 11일

에 따라 정보를 수집하고 그에 맞추어 동작할 수 있어, 변화하는 상황에 대한 적응력이 뛰어나 높은 작업의 효율성을 기대할 수 있다[1,2]. 이러한 모듈러 로봇 연구는 현재 외국 연구소들을 중심으로 개발 중이며, 대표적인 연구기관으로는 스위스 EPFL의 Swarm-bot[3], 미국의 PARC의 Polybot G1-G4[4,5]시리즈, USC대학의 CONRO[6], SUPERBOT[7], 일본의 AIST에서 개발한 M-Trans[8] I,II,III 시리즈가 있다. 그리고 요즘에는 중국을 중심으로 Sambot[9,10]과 같은 큐빅 형태의 로봇이면서 무선네트워크를 이용하는 독특한 형태를 가지고 있는 구조의 연구가 진행되고 있다.

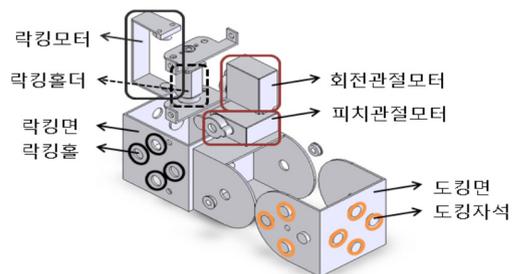
일반적으로 모듈러 로봇은 다수의 개체를 이용하여 형상을 표현하고 또한 표현된 형상으로 특수한 작업을 수행하는데 목표를 가지고 있다. 따라서 다수의 개체 간에 어떠한 형태로 결합을 하고 필요에 따라서 분리를 하는 과정을 반복하여야 하며 이를 위한 간결하면서도 효과적인 방법이 연구되어야 한다. Swarm-bot의 경우는 독특한 형태의 분리와 결합 구조를 가지고 있으나 결합과 분리하는 방법이 복잡하여 소형의 로봇 모듈을 구현하기가 어렵다. Polybot과 CONRO의 경우는 정방향의 구조를 가지고 있으며 자석을 이용한 결합이 이루어지지만 락킹을 위한 구조물이 지나치게 복잡한 단점을 가지고 있으며, M-Trans의 경우 모듈에 2개의 자유도를 가지고 있어 유연성을 보이고 있으나 1개의 모듈을 구현하기 위한 가격이 높다. Super-Bot의 경우는 M-Trans와 유사한 구조를 가지고 있으나 가운데 허리 조인트 부분이 있어 회전 기능이 가능하여 많은 자유도를 확보하고 있으나 크기가 다소 큰 편이다. MoleCube의 경우는 플라스틱으로 만들어져서 대량 생산이 가능한 구조이며 무엇보다도 제작 방법을 공개하고 있어서 응용 연구를 구현하기가 쉽다. Sambot의 경우는 결합과 분리를 위한 기구 메카니즘이 간단한 형태로 제시되어서 다수의 모듈이 결합되는 모듈라 로봇의 구조로 적합하지만 크기가 큰 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 기존 모델의 장단점 중에서 소형이면서 결합 성능 대비 가격이 장점인 즉 대량 생산에 적합한 형태의 결합메카니즘을 제시하려고 한다. 이때, 각 결합 메카니즘은 전기적인 면과 기구학적 요소로 나누어 설명하였다. 이렇게 제안된 4가지 메카니즘 방식에 있어 각 모듈에 대한 장단점을 비교하였으며 이를 통해 모듈러 로봇에 적합한 결합 메카니즘에 대해 고찰하였다. 그리고 실제 모듈러 로봇을 제작하여 각 모듈에 대한 결합 유용성을 검증하였다.

## 2. 모듈의 결합 및 분리 구조 설계

모듈러 로봇은 여러 가지 형태의 구조를 가지고 제작될 수 있으며 필요에 따라서 원형 형태가 될 수 있고 어떤 경우에는 복잡한 구조의 개체가 될 수 있다. 본 연구에서는 큐빅 형태의 동일한 면을 가지고 있는 모듈러 로봇에 적용할 수 있는 결합 및 분리 구조에 대한 연구에 대해 한정적으로 다루었다.

### 2.1 1차 모델

우선 모듈 간 결합과 분리를 위해 도킹/락킹 구조로 설계 하였으며 자력을 이용하여 결합할 수 있도록 구성하였다. 또한 모듈러 로봇이 다른 형태로 로봇을 변형시킬 수 있도록 모듈 스스로 분리 할 수 있도록 하였다. 도킹부 구성은 도킹과 도킹가이드를 위한 면으로 구성되며 두 개의 모듈이 도킹을 할 수 있도록 그림 1과 같이 도킹면에 4개의 자석을 부착했다. 반대편에는 락킹 홀을 구성하였으며 이는 돌출되어 있는 도킹 면 자석이 락킹 홀더와 접촉할 수 있도록 유도하는 가이드 역할을 한다. 이때 도킹/락킹 시 1개의 도킹홀더를 사용하므로 1개의 모듈만 장착시킬 수 있다.

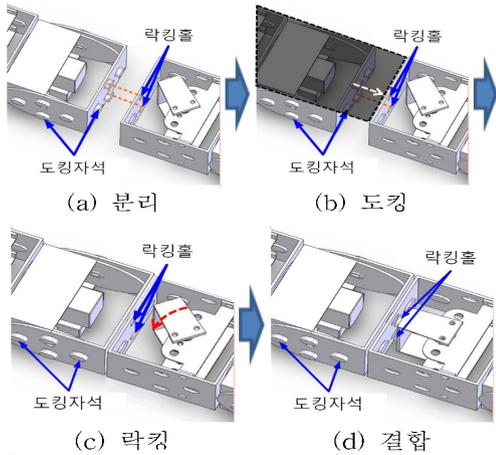


[그림 1] 1차 모듈 및 로봇 구조

[Fig. 1] First module structure

1차 모델에서는 결합 시 결합력을 형성함에 있어 오직 자석을 이용하므로 도킹을 위해 락킹 모터를 회전시켜 락킹 홀더와 도킹 자석간의 자석 면을 일치시킬 경우 최대 자력이 발생하여 전원공급이 없어도 강력한 결합이 이루어진다. 그리고 락킹 모터를 회전시켜 락킹 홀더와 도킹 자석 간에 위치가 수평 방향으로 구성될 경우 자력의 힘이 약하므로 쉽게 분리가 가능하다. 따라서 결합하려는 면과 락킹 홀더 면이 수평하게 되면, 도킹 자석과 가깝게 위치하면서 수직으로 강한 자력이 작용할 수 있게 했다. 분리 시에는 수평방향으로 이동시켜 적은 힘으로 모터를 구동시킬 수 있게 하였다. 단위 모듈 셀이 다른 모듈과 결합하는 과정과 분리 과정은 다음과 같다. 그

림 2-(a)에서의 분리는 모듈이 결합하기 전 떨어져 있는 상태를 의미하며 이때 도킹홀더는 자석면과 수직으로 위치하여 자석의 영향을 받지 않는다. 결합 과정이 시작되어 면이 접촉되면 락킹 모터에 장착된 도킹홀더가 회전을 시작하여 도킹 면과 평행하게 만들어지며 자력의 세기가 가장 커져 두 개의 모듈이 결합된다. 이때 락킹 홀더가 금속판으로 되어 있어 인력이 작용해 쉽게 결합되도록 돕는다. 분리과정은 결합과정과 동일하며 순서만 반대이다. 두 개의 모듈이 결합되어 있으면 락킹 홀더를 수직위치로 회전시켜 자력을 감소시킨다. 자력이 감소해 모듈 간 결합력이 약해졌기 때문에 쉽게 모듈이 분리된다. 이때 락킹 홀더는 측면으로 이동되므로 자력이 강하더라도 적은 힘으로 분리가 가능하다.

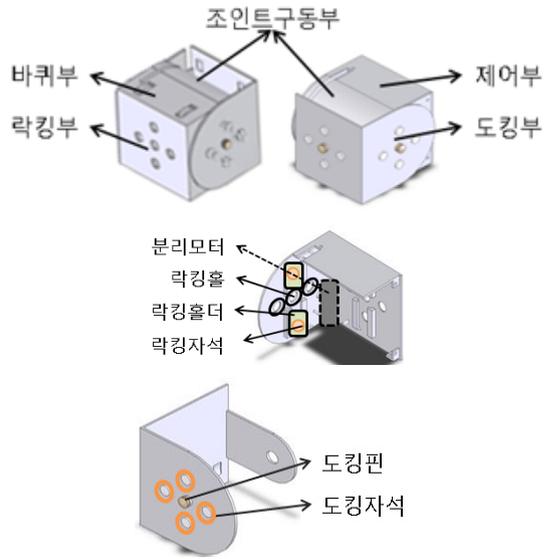


[그림 2] 1차 결합과 분리구조  
[Fig. 2] Combination and separation of first module

그러나 이러한 구조는 모듈 간 결합력이 약해 외부 충격에 쉽게 분리 되는 단점을 가지고 있다. 비록 2개의 모듈이 결합되어 있을 때는 자력의 힘을 충분히 가능했다. 하지만 모듈러 로봇이 동작 표현을 위해서는 관절 모터를 움직이거나 외부 충격 같이 순간적으로 많은 부하가 발생하는 경우 쉽게 분리되는 문제점을 가졌다. 이러한 문제를 해결하기 위해 자력을 크게 하면 분리가 힘들어지고, 모터 같은 부품은 작동을 할 수 없게 된다.

## 2.2 2차 모델

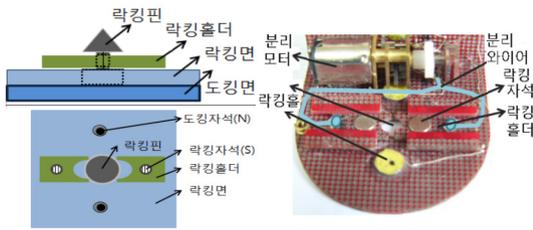
2차 모델은 유지 보수가 쉬우며 1차 모델의 단점인 결합할 때 연결이 약하다는 단점을 보완하기 위해 설계되었다. 그림 3에 새로 설계된 결합과 분리 하는 구조를 가진 2차 모델의 모듈러 로봇을 나타내었다.



[그림 3] 2차 모듈 및 로봇 구조  
[Fig. 3] Second module structure

우선, 락킹부는 약한 자석의 결합력으로 인해 모듈이 분리되는 것을 방지해주는 역할을 한다. 그리고 락킹 홀더가 도킹 핀을 잡아 단단히 고정될 수 있게 해준다. 전체 구성은 모듈이 결합되면 락킹 홀더를 자동으로 이동시키는 락킹 자석, 모듈을 잡아주는 락킹 홀더, 모듈이 결합될 수 있게 가이드 역할을 하는 락킹 홀, 마지막으로 분리를 도와주는 분리 모터로 되어있다. 락킹 홀더를 공유하지 않기 때문에 여러 개의 모듈을 동시에 결합할 수 있지만 와이어를 공유하기 때문에 동시에 2개의 모듈을 분리하거나 결합만 가능하다. 여기서 도킹부는 모듈끼리 결합 시 고정되는 기준면으로 모듈을 고정하기 위해서는 락킹부의 락킹 홀더가 잡을 수 있는 면이 도킹 핀과 자석을 이용하여 구현되었다.

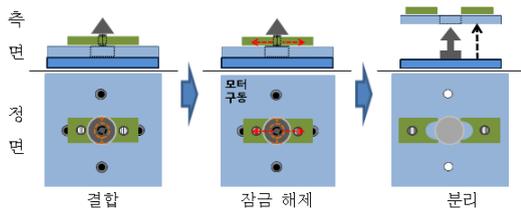
전체 결합구조는 그림 4와 같으며 결합 방법은 1차 모델과 반대로 자석의 척력을 이용해 수행하게 만들었다. 자력의 인력만으로는 모듈 결합력이 약해 다른 극이 가까이 붙을 경우 밀어내는 척력을 사용하였다. 락킹 홀더와 락킹 자석의 극은 다르게 부착했다. 결합을 위해 도킹 면과 락킹 면이 가깝게 붙으면 락킹 홀더가 안으로 서로 조이면서 락킹 핀을 잡르게 되어서 락킹 홀더가 락킹 핀을 잡는 구조가 되기 때문에 자석의 인력보다 더 큰 힘으로 모듈 간 결속력을 유지할 수 있게 설계 되었다.



[그림 4] 2차 모듈 결합 및 분리 구조  
[Fig. 4] Combination and separation of second module

이때 결합할 2개의 모듈의 결합은 도킹 면과 락킹 면 사이에서 발생하는 척력을 이용하며 락킹 홀더가 안으로 밀리면서 중앙으로 모이고 락킹 홀더는 락킹 핀에 있는 홈 사이로 삽입되면서 모듈이 고정되게 된다.

분리 할 때는 과정은 다음과 같다. 첫 번째로 모터와 와이어를 이용해 잠겨 있는 락킹 핀을 푼다. 이때 자석의 척력 때문에 닫혀있는 락킹 홀더를 분리하기 위해서는 외부 힘을 이용해 강제로 열어주어야 한다. 이를 위해 분리모터로 락킹 홀더에 묶여있는 분리와이어를 잡아 락킹 홀더를 바깥쪽으로 밀게 했다. 그리고 락킹 자석과 도킹 자석이 다시 가까워지면서 척력이 발생해 모듈분리를 돕는다.



[그림 5] 2차 모듈의 결합과 분리 동작  
[Fig. 5] Combination process of first module

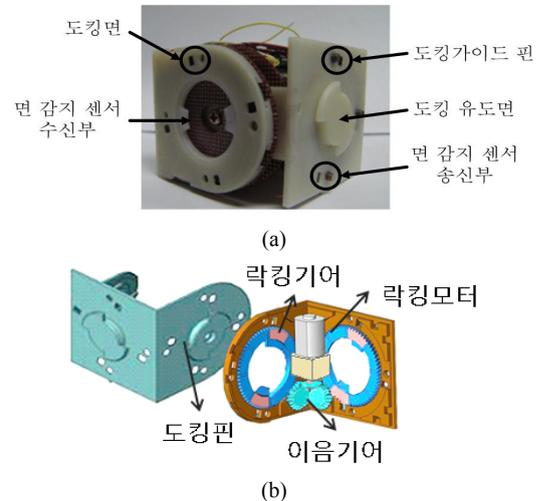
이때 분리 모터 수를 줄이기 위해 가운데 위치시켰다. 락킹 홀더를 열기위해 필요한 분리와이어는 가운데 위치한 분리 모터를 이용해 감도록 했다. 분리 모터 수는 1개로 동시에 와이어를 잡아당기므로 양쪽 면에 있는 모듈을 같이 분리할 수 있다. 분리 후에는 와이어를 풀어 결합이 가능한 상태를 유지한다. 그리고 와이어가 풀어져 있으므로 양쪽 면이 독립적으로 결합할 수 있다. 하지만 양쪽 면을 개별적으로 분리 할 수 없다.

2차 모델에서는 전자석과 같이 자력을 제어할 수 없기 때문에 결합 시 락킹 홀더를 제때 동작하기 어려웠다. 양쪽에서 락킹 핀을 잡아주는 락킹 홀더는 한쪽에만 자력이 작용해도 동작하게 되는 경우도 있었다. 따라서 한쪽에만 자력이 작용하도록 비스듬히 삽입될 경우 락킹 핀

이 삽입되기 전에 잠기게 된다. 분리 시에는 와이어가 잘 움직이게 하는 도르래 같은 부품을 장착하기 힘든 경향이 있었다. 이를 해결하기위해 와이어를 중간에 매듭으로 묶거나 소형 고무 링 같은 다양한 부품을 사용해 보았다. 하지만 중간에 꺾이는 부분이 많아 당겨지지 않거나 늘어져 제대로 동작을 하는 단점을 보였다.

### 2.3 3차 모델

1차, 2차 모델에는 제작하기 쉬운 구조에 초점을 두고, 자석을 이용한 결합·분리 메커니즘을 기본 개념으로 하여, 단위 모듈의 크기를 줄이면서 공간 효율성이 좋은 방향으로 설계 되었다. 하지만 락킹 홀더는 결합 방향이나 자력의 세기에 따라 오작동이 발생하고, 분리와이어가 단선 되거나 혹은 반대로 늘어지는 등의 문제점을 가지고 있었다. 이를 위해 해결하기 위해서는 자석의 세기를 조절하기 위해서는 장치를 추가해야하므로 무게가 증가하고 기구부도 복잡해지게 된다. 따라서 대신 기어를 사용해 잠그는 방식을 사용하여 그림6과 같이 새로운 형태의 3차 기구부를 설계 하였다.



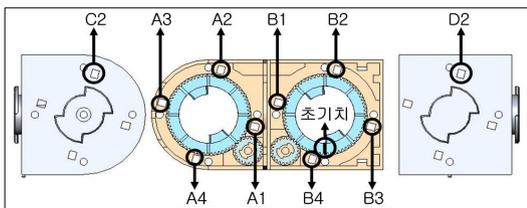
[그림 6] 3차모듈 전체 구조(a)및 결합분리 구조(b)  
[Fig. 6] Module structure of third model(a) and combination structure

이 방법은 하나의 모터로 단위 셀 로봇을 동시에 2개 또는 선택적으로 1개만 결합이 가능하게 설계되었다. 이때 결합되는 고정 기어의 면적은 45°로 하고 락킹 핀의 면적을 90°로 동작되게 하였다. 한 개의 구동 모터를 사용하기 때문에 무게나 크기도 개선시킬 수 있었다. 또한 2개의 락킹 기어를 동작시키기 위한 모터위치는 2차 모델과 같이 배치되었다. 양측 면에 부착된 두 개의 락킹

기어를 동시에 구동하기 위해서 2차 모델과 같이 락킹 모터를 중앙에 위치시켰다. 그리고 거리를 짧게 해 기어를 줄였다. 다른 점은 분리외어와 락킹 홀더 대신에 기어를 사용했다. 이에 따라 기본구조가 유지되므로 모든 방향에서 결합이 가능해 다양한 변형을 할 수 있게 설계되었다. 모터 구동 방향은 수신된 결합 면 정보와 저장된 현재 모듈의 결합상태를 비교하여 방향을 결정한다. 두 개의 인접 모듈은 고정 모터로 고정 기어를 회전시켜 모듈이 결합 또는 분리 하고, 이전 저장된 결합면 정보를 현재 상태로 고치는 구조를 가지고 있다.

전체 결합 동작은 센서의 위치와 결합 면의 상태에 따라 자동화된 동작을 하게 제작되었다. 이에 따른 각각의 센서와 결합면의 정보를 그림 7과 같이 표현하였다. 그림에서 초기 위치(아래방향 화살표), 센서위치(동그라미), 초기위치마크(사각형)를 의미하고, 기어에 표시된 대각선 화살표는 고정 기어의 회전 방향을 나타낸다. 센서는 위치에 따라 시계 방향으로 숫자 부여해 면 정보와 같이 표시했다. A, B면은 서로 인접하는 결합되는 면이며 C, D는 여기에 결합하는 반대 면을 나타낸다. 그림7의 원안의 값은 센서의 번호를 나타낸다. 자세한 결합알고리즘은 표 1에 나타난 것과 같으며, []과 <>심벌은 한쪽 면이 결합되어 있을 때 반대 면을 결합하고자 하는 상황을 표현하고 있다.

그리고 ()안은 결합되는 면의 결합 돌출 핀의 방향이며, CCW, CW는 각각 시계 반대 방향 과 시계 방향의 회전을 의미하며 뒤의 숫자는 결합 기어의 한 개 락 간격을 의미하며 각도 상으로는 45도를 의미한다.



[그림 7] 고정면과 센서의 명칭  
[Fig. 7] Locking faces and sensors

그러나 3차 모델은 1개의 모터를 이용하여 구동하여 구동의 효율화를 도모할 수는 있으나 알고리즘이 너무 복잡하고, 만일 결합시 밀착되어 수행하지 않으면 결합 기어의 유격이 없기 때문에 정확한 결합이 이루어지지 않아 결합이 되지 않는 단점을 보였다. 마지막으로 결합 핀의 방향은 그림에서 밀면을 기준면하며 긴 막대기 모양으로 표시했다(슬래시:/, 백슬래시:\).

[표 1] 결합 알고리즘  
[Table 1] Combination algorithm

모듈결합 상태	수신된 결합 면 정보	결합준비	결합완료
없음	A1, A3(\)	CCW 1	CW 1
	A2, A4(/)	-	CCW 1
없음	B1,B3(\)	CW 1	CCW 1
	B2, B4(/)	-	CW 1
<A2, A4(/)> [B1,B3(\)]	<B2, B4(/)> [A1, A3(\)]	-	CCW 1
	<B1,B3(\)> [A2, A4(/)]	CCW 1	CW 1
<A1, A3(\)> [B2, B4(/)]	<B2, B4(/)> [A1, A3(\)]	CW 1	CCW 1
	<B1,B3(\)> [A2, A4(/)]	-	CW 1

만일 A2(/)가 결합되어 있을 때, B1 혹은 B3을 결합시키고 싶으면 반시계방향으로 결합준비를 한 후 결합 신호가 감지되면 시계방향으로 45도 회전시켜 모듈을 결합시키게 된다. 아울러 B2 혹은 B4로 구동시키고 싶으면 결합준비는 필요 없으며 반시계 방향으로 45도 회전시켜 결합이 된다. 그리고 만일 A3(\)가 결합되어 있을 때, B2 혹은 B4을 결합시키고 싶으면 시계방향으로 45도 돌려서 결합준비를 한 후 결합 신호가 감지되면 반시계방향으로 45도 회전시켜 모듈을 결합시키게 된다. 이런 방법으로 표1의 결합 알고리즘으로 각각의 결합된 모양에 따라 모터를 이용하여 기어를 구동하여 도킹 및 락킹을 수행할 수 있다.

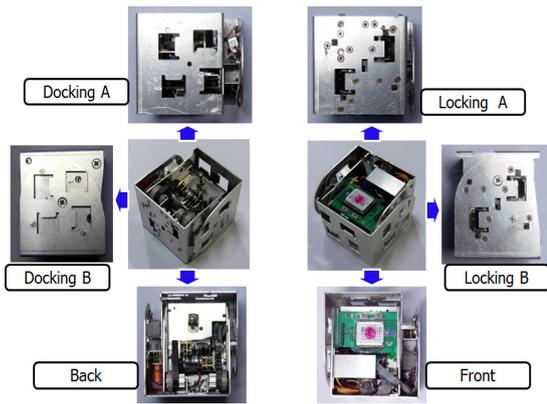
표1을 통해 알 수 있듯이 돌출 핀의 방향에 고정 모터의 회전 방향이 결정되기 때문에 결합면의 서로 마주보는 센서는 같은 동작을 하지만, 이웃하는 센서와는 대칭하여 동작 된다.

2.4 4차 모델

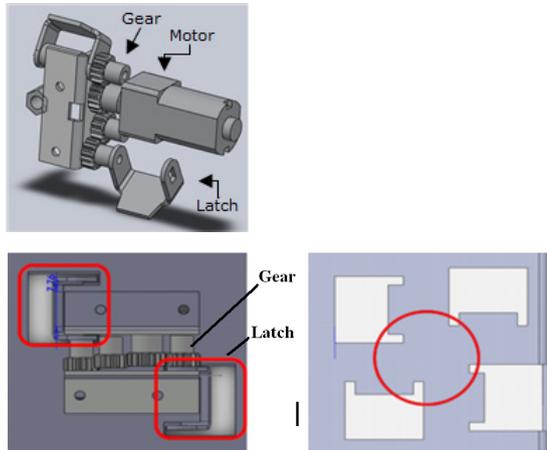
3차 모델의 결합과 분리에 대한 복잡성을 개선시키기 위하여 그림 8과 같은 4차 모델을 설계 하였다.

4차 모델은 3차 모델과 동일한 ‘ㄷ’자 구조를 사용했으며, 제어나 바퀴, 피치 모터의 위치도 그대로 사용했다. 하지만 도킹/락킹 매커니즘을 각 면에 독립된 구조로 변경되면서 2곳으로 분리되어 배치되고 래치 구조를 사용하면서 결쇠와 기어 개념을 사용했다. 여기서 래치를 대칭 배치하였는데 래치를 직선 배치할 경우 그림의 원처럼 래치를 거는 부분의 간격 중첩되어 일정 크기 이상

줄이기 힘들며, 모듈의 무게 힘이 집중되는 가운데 지지하는 면적이 작아 내구성이 약하게 된다. 그래서 그림9와 같이 래치를 대칭 배치하여 중첩되는 부분을 줄이면서 무게가 집중되지 않게 분산 배치시켰다. 아울러 기구의 강건성을 높이기 위해 알루미늄1.5t로 변경하여 내구성이 강하게 제작 되었다.



[그림 8] 4차 모델의 외관  
[Fig. 8] 4th model of modular robot



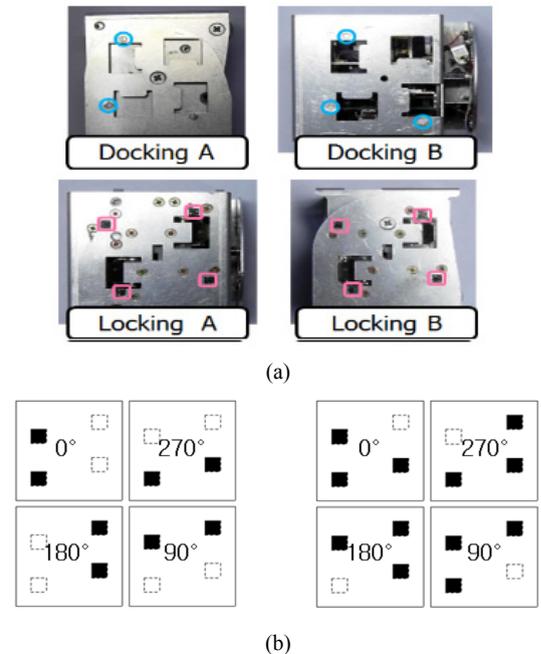
[그림 9] 4차 모델 결쇄 배치  
[Fig. 9] Latch position of 4th model

대칭 배치에 따라 기어의 수도 그림 9와 같이 4개로 줄였다. 배열도 2열로 배치해 길이를 줄이고 효율적으로 사용할 수 있도록 했다. 양쪽 래치의 위치와 속도는 다를 경우 결합이 안 되므로 같도록 기어비와 기어위치를 조정했다. 하지만 래치의 잠김과 풀림 상태를 감지하는 센서를 부착하여 잠김 동작을 멈추는 구조로 설계 되었다.

3차 모델에서 1개의 모터를 사용해 로봇을 결합과 분

리할 때 다른 면을 고려해야 되므로 과정이 복잡해지고 시간도 많이 걸리는 단점이 있었다. 무엇보다 면이 밀착해야 되기 때문에 스스로 결합이 힘들고 마찰력이 커서 파손이 되는 경향이 있었다. 2개의 모터와 래치를 이용해 무게는 증가하더라도 빠르고 유격이 있더라도 유연하게 결합할 수 있도록 래치를 사용했다. 도킹은 2개의 래치가 안쪽으로 회전하며 모듈을 잡는 단순한 구조로 설계 되었다. 거는 면적이 넓고 대각선으로 잡기 때문에 고정 핀을 따로 설치하여 고정시킬 필요가 없으며 래치 되는 구조물의 앞부분을 길게 연장시켜 결합되는 면이 2~3mm정도 떨어져 있더라도 문제없이 결합할 수 있게 했다. 또한 래치가 들어가는 홈의 크기도 크게 하여 수평과 수직에 정확히 맞지 않더라도 결합할 수 여유를 만들어 유연성을 확보 하였다.

최종 재구성할 모듈러 로봇을 만들기 위해 움직임과 형태가 결정되므로 결합 면과 각도를 인식 시스템이 필요하다. 그림 10은 각 면에 배치된 자석과 자성을 인지할 수 있는 홀(Hall) 센서의 조합 및 패턴을 나타낸 그림이다.



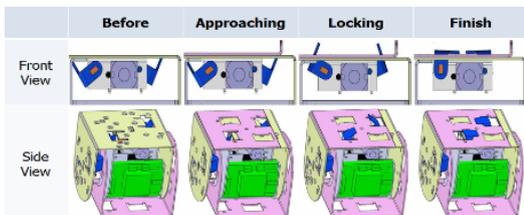
[그림 10] 4차 모델의 결합센서 위치(a)와 패턴(b)  
[Fig. 10] Sensor position(a) and pattern(b) of 4th model

그림에서와 같이 결합 구조는 모터가 회전을 시작하면 축에 장착된 기어가 연동하고 기어에 붙어 있는 결쇠 구조물을 시계 방향으로 회전시켜 반대면의 장착되는 구조

물을 잡아서 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 때문에 에너지의 절약을 가져올 수 있는 장점을 가지고 있다.

여기서 감지 각도는 설계한 모듈러 로봇이 90도 단위로 회전하여 결합하므로 4개의 결합각도와 도킹과 락킹면 각각 2개씩 4개의 면을 감지 할 수 있어야한다. 홀센서가 부착되는 기준면은 전원이 필요하므로 배터리와 제어로직이 장착되어 있는 락킹 면으로 설정했다. 센서 위치는 회전방향에 상관없이 감지할 수 곳을 선정해 각 면당 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 180회전은 검출할 수 없으며, 1개의 경우는 두개의 모듈이 결합할 때 접촉의 평행정도를 알 수 없다. 따라서 A면에는 2개를 부착하고 B면에는 3개를 부착해 회전 각도와 면을 검출할 수 있게 했다. 그리고 2개의 자석을 사용하는 도킹 A면의 도킹각도에 제약을 주기 위해 부착위치를 마름모꼴로 배치했다. 4차 모델의 결합과 분리 과정은 그림 11과 같이 상기의 자석의 위치에 따라 걸쇠를 돌려서 잠금 하는 구조로 되어 있으며 분리 하는 방법은 역방향으로 돌려서 걸쇠를 해제하는 구조로 만들었다.



[그림 11] 4차 모듈 결합  
[Fig. 11] Combination of 4th model

1차 및 2차 모델은 자석의 힘을 이용하여 결합과 분리를 하기 때문에 실제로 외력에 의해 쉽게 분리가 되는 단점을 가지고 있어서 실제의 모듈라 로봇을 구현할 때는 제한적인 형태의 응용 분야에 한정시켜 적용될 수 있다. 3차 모델에서는 본 연구 방향에 맞는 소형 경량화에 맞는

결합과 분리 구조를 가지고 있으며 향후 설계되는 다수의 모듈을 이용한 응용 분야에 적합한 구조라 할 수 있다. 3차 모델은 결합할 때 한 개의 모터로 2개 면을 한꺼번에 결합시킬 수 있으므로 결합이 신속하고 크기가 작기 때문에 많은 모듈로 형태를 구성하는 변형 로봇을 만들 때 적합한 구조이므로 상대적으로 관절이 많은 뱀 로봇이나 휴머노이드 로봇을 만드는데 적합한 구조이다. 반면 4차 모델은 3차 모델에서 결합 시 유격이 있을 때 동작을 할 수 없다는 단점을 보완하여 유격이 있을 때 결합할 수 있는 기구 래치 개념의 도입한 결합 방법이며 센서가 특별히 필요하지 않는 장점을 가지고 있다. 따라서 정밀하게 움직이지는 않지만 결합이 빈번이 일어나고 외관이 금속재질이기 때문에 견고하게 결합하여야 하는 응용 분야에 적합한 구조이다. 이러한 구조는 움직이면서 변형이 자주 일어나고 간단한 구조로 사용되지만 견고성도 확보해야 하는 비교적 동작 환경이 열악한 환경에서 작업을 할 수 있는 청소 로봇과 배관 로봇 혹은 탐사로봇에 적합한 구조로 판단된다. 이처럼 향후 사용될 모듈라 로봇의 활용영역에 맞게 다양한 구조를 적용시킬 수 있다고 판단된다.

[표 2] 모델 비교  
[Table 2] Model comparison

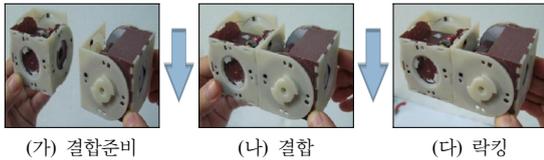
모델특성	1차	2차	3차	4차
도킹구조	자석 반발력	자석 와이어	기어	래치
구동면수	1	2	2	1
도킹소자	자석 흡인력	자석 (척력)	기어위치	걸쇠
분리소자	자석모터	와이어	기어위치	걸쇠
견고성	약함	중간	중간	좋음
복잡도	간단	복잡	매우복잡	간단
알고리즘	간단	간단	복잡	간단
유연성	없음	중간	없음	많음
구동모터	1	1	1	2
가격	저렴	저렴	고가	중간

### 3. 동작 실험

모듈러 로봇이 상황에 따라 분리, 결합, 재구성을 통하여 적합한 형태로 변형하고, 적절한 움직임을 보일 수 있어야 한다. 이를 위해서는 가장 기본적인 동작인 결합과 고정 동작이 구현되어야 한다.

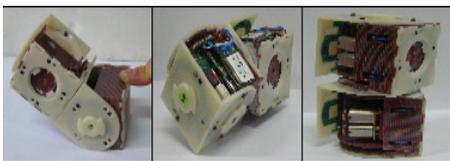
본 실험에서는 비교적 동작의 구현이 안정적이고 향후

모델에 사용이 가능한 3차 및 4차 모델에 초점을 맞추어 실험 하였다. 우선 3차 모델의 동작을 위해서 우선 두 개의 모듈이 접근을 하고 모듈 접근을 감지한 후 결합을 위한 기어 동작을 수행하고 결합 알고리즘을 이용하여 결합을 하였으며 결합 과정을 그림 12에 표현하였다. 결합 방법은 표 1에 사용한 알고리즘을 이용하였으며 실험 결과 그림과 같이 견고히 결합됨을 알 수 있었다.



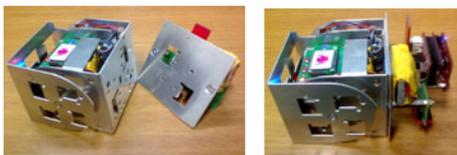
[그림 12] 3차 모듈 결합  
[Fig. 12] Combination test for third model

결합 방법은 같은 방향만이 아니고 측면 방향으로 결합이 있을 수 있다. 아래 그림은 각각 정면과 측면 방향으로 결합된 모습을 나타내었으며 두 개의 모듈간의 결합이 원활함을 알 수 있다.



[그림 13] 3차 모듈의 측면결합  
[Fig. 13] Combination at side of third model

4차 모델도 같은 방법으로 결합을 시도 하였다. 먼저 센서와 같은 모듈을 장착 할 수 있는 단순한 형태의 모듈간의 결합을 시도 하였다. 이러한 시도는 향후 사용될 수 있는 모듈러 로봇의 응용동작을 위해서이며 이를 이용하여 각각의 센서 및 구동 모듈을 만들어 모듈러 로봇과 결합하여 다양한 형태의 작업을 시도 할 수 있다. 실험에 사용된 센서는 카메라를 이용한 시각센서이며 시각 센서를 결합할 수 있는 면과 원활히 결합되어 동작함을 알 수 있었다.



[그림 14] 4차 모듈과 센서 모듈 결합  
[Fig. 14] Combination of 4th module with sensor

그림 15는 여러 개의 모듈의 결합성을 실험하였다. 좌측과 같이 2개의 모듈로 부터 우측의 단위 모듈 4개가 각기 다른 방향으로 결합 되는 구조를 실험 하여 원활하게 결합이 이루어지는 것을 확인하였다.

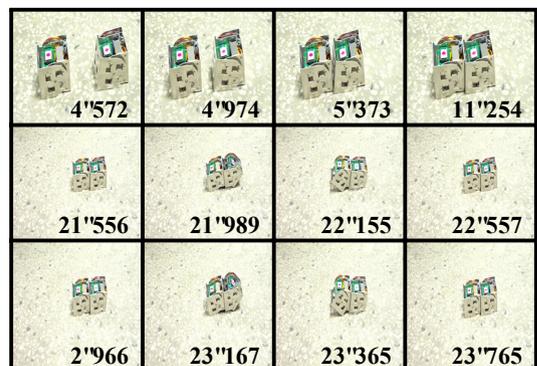


[그림 15] 다수의 모듈 결합  
[Fig. 15] Combination with multiple module

실험 결과 다양한 형태의 결합을 시도하고 제안된 결합과 분리 구조의 원활함을 알 수 있었다. 이때 실험 중에 발생하는 유격을 관찰 할 수 있었으나 발생된 유격은 기구구조의 유연성으로 제거됨을 확인하였다.

이번에는 두 개의 모듈을 자동으로 결합하여 구동하는 실험을 진행 하였다.

자동으로 결합하는 구조는 자체 내에 이동수단인 바퀴로 이동하며 결합 시 센서의 감지 하에서 동작하므로 실질적으로 센서와 구동기와 기구 메카니즘이 연동하여 제대로 동작하는지를 확인할 수 있다. 그리고 도킹한 후 에 별레 동작을 진행함으로써 두 모듈이 견고하게 연결됨을 확인할 수 있다. 그림 16에서 알 수 있듯이 시작은 서로 떨어져 있으며 4초, 5초 구간은 모듈이 결합을 위해 이동하는 구간이며 바퀴 모듈 때문에 5"373초에서처럼 유격이 있지만 문제없이 결합이 가능하였다. 결합 후 동작구현도 2번째와 3번째 열과 같이 바로 이동이 가능했다. 약 1초 주기로 에벌레 동작을 반복하며 이동했으며, 자동결합 후 이동하더라도 사람의 조작 같은 외부 도움 없이 동작되었다. 허용 유격이 넓어 여러 개의 모듈을 이용해 결합할 때도 적합할 것으로 판단된다.



[그림 16] 4차 모듈의 자가 결합과 에벌레 동작  
[Fig. 16] 4th model self-assembly and inchworm motion

이상과 같이 각 모듈 셀들의 동작하여 결합을 수행하였고 이에 따른 동작의 원활함을 검증하였으며 기본이 되는 간단한 형상구현에 관한 결과로 실제로 응용될 수 있음을 보였다. 하지만 모듈라 로봇에 제대로 적용하기 위해서는 보다 간결한 형태이며 실제 모듈러 로봇의 전체 구조와 유연성 있는 동작을 구현함이 요구되며, 아울러 실제 모듈라 로봇에 장착된 상태로 다양한 응용분야에 대한 적응성에 대한 실험으로 확장되어야 할 것이다.

#### 4. 결론

본 연구는 큐빅 모양의 모듈 형태를 기반으로 하여 모듈 셀들을 재구성하여 형태를 변형 할 수 있는 로봇결합 구조를 제안하고 그 결합 방식을 다양한 형태로 설계 및 구현 하였다. 또한 각각의 방식에서의 모듈간의 결합과 분리를 위한 알고리즘을 제안하고 구현하였다.

이러한 모듈 기반의 로봇은 분리, 결합, 재구성을 통하여 원하는 형태로의 변형이 가능하며 상황에 적합한 형태로 변형한 후 적절한 움직임을 보일 수 있기 때문에 움직이는 지형에 대한 적응력이 뛰어나고, 상황에 따라 적합한 형태를 변형함으로써 작업에서의 효율성을 기할 수가 있다. 이러한 형태의 로봇은 특히 인명구조와 같은 시간에 따라 급박하게 처리하여야 할 상황에서 여러 종류의 장비와 협조가 필요 없이 상황에 따라 시각장치와 간단한 구동기를 적재하여 신속하게 구조 활동을 전개할 수 있는 분야에 적절히 사용 될 수 있어 경제적으로 파급 효과가 지대하다고 볼 수 있다. 본 논문에서는 이러한 목적에 적합한 체인형 모듈러 로봇의 형태를 기반으로 한 결합과 분리에 대한 4 종류의 방법을 제안 및 구현하였으며 각각의 장단점을 분석하여 설계되는 모듈라 로봇의 결합방법으로 적용하였다. 그리고 제안된 형태의 유용성을 실험하기 위해 실제 모듈라 로봇을 제작하여 결합과 분리 실험을 하여 적절히 동작함을 확인하였다. 향후 정확하게 주위의 환경에 반응하는 센서 시스템의 설계와 모듈 셀 간의 정보를 효율적으로 공유하는 방식 대한 연구가 필요하며 이를 이용하여 다양한 형태의 변형 로봇의 플랫폼에 대한 개발이 필요하다.

#### References

[1] Murata, S.; Yoshida, E.; Tomita, K.; Kurokawa, H.; Kamimura, A.; Kokaji, S. "Hardware design of modular robotic system", (IROS 2000). Proceedings. 2000

IEEE/RSJ International Conference on Volume 3, Issue, pp2210 - 2217 vol.3, 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] Francesco Mondata et al, "Swarm-Bot: A New Distributed Robotic Concept", Autonomous Robots, Kluwer Academic Publisher, Vol.17, p193-221, 2004.

[4] 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.

[5] Mark Yim et al, "Modular Reconfigurable Robots in Space Applications", Autonomous Robots, Kluwer Academic Publisher, Vol.14, p225-237, 2003.

[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] H. Wei, Y. Cai, H. Li, D. Li, and T. Wang, "Sambot: A Self-assembly Modular Robot for Swarm Robot", 2010 IEEE ICRA, pp66-71, 2010.

[10] H. Min, Z. Liu, H. Wei, T. Wang, "Control of A Self-assembly Modular Robot System over A Wireless ZigBee Network", Proceedings of the 8<sup>th</sup> WCICA, pp 1057-1061, 2010.

#### 유인환(In-Hwan Ryoo)

[정회원]



- 2008년 2월 : 세명대학교 전기전자(석사)
- 2008년 7월 ~ 현재 : 세명대학교 전기전자공학과 박사과정

<관심분야>  
모듈러 로봇, 제어시스템

**이 보 희**(Bo-Hee Lee)

[정회원]



- 1996년 2월 : 인하대학교 대학원 자동화공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 세명대학교 전기공학과 부교수

<관심분야>

모듈러 로봇, 휴모노이드, 인공지능, 제어시스템, 임베디드 시스템

---

**공 정 식**(Jung-Shik Kong)

[정회원]



- 1998년 2월 : 인하대 자동화공학과 졸업.
- 2006년 2월 : 인하대 자동화공학과 박사졸업
- 2009년 3월 ~ 현재 : 인덕대학 기계설계과 전임강사

<관심분야>

지능 제어, 재활 공학, 지능형 로봇 및 제어