

위치 제어를 위한 SMA(Shape Memory Alloy) 매니플레이터 설계

이승열* · 유석종† · 유병갑* · 한창수**

Design of Shape Memory Alloy Manipulator for Position Control

Seok-jong Yu, Seung-yeol Lee, Byung-gab Yu and Chang-soo Han

Key Words : SMA(형상 기억 합금), coil pattern(코일 형태), Pentograph manipulator(팬터그래프 매니플레이터), PD compensator(PD 보상기)

Abstract

This paper describes a new mechanism for improving the force of actuators based on shape memory alloys (SMA) by increasing the number at which a coil pattern SMA spring can evenly be heated. This structure accomplishes a high efficient transformation between force and displacement overcoming the main mechanical drawback of shape memory alloys, that being the limit strain. A pantograph manipulator actuated by the introduced new mechanism has been designed for this research. Mechanical structure and driving mechanism of this manipulator are described in detail, and its control algorithm and current amplifier circuit in a position control system are designed.

기호설명

d : 구동축과 피동축 사이의 거리

l_i : 링크의 길이

l_{ci} : 링크의 질량중심

c_i, s_i : $\cos \theta_i, \sin \theta_i$

c_{ij}, s_{ij} : $\cos(\theta_i + \theta_j), \sin(\theta_i + \theta_j)$

1. 서론

로봇 시스템의 소형화 연구는 구동기의 경량화, 소형화 및 고출력에 관한 연구와 밀접한 관계가 있다. 기존의 전기, 유압 및 공압 구동기는 크기나 무게를 줄일 경우 출력의 크기가 급격히 감소되는 단점을 감수해야 한다.⁽¹⁾ 이런 한계를 극복하기 위해 다른 형태의 구동기, 특히 형상기억합금(Shape

Memory Alloy)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 형상기억합금은 중량 대 파워 비가 비교적 높기 때문에 소형 메커니즘의 이상적인 구동기로 사용될 수 있다. 예를 들어 형상기억합금 와이어가 최대 180(MPa)의 인장력을 가질 때, 전동기 단지 0.002(MPa)의 출력을 나타낸다.⁽²⁾ 이 사례는 단면적 당 파워비가 거의 10^5 정도 증가됨을 나타낸다.

형상기억합금 구동기의 원리는 형상기억합금에 잔류변형이 발생하도록 응력을 가한 후 열을 가하게 되면 잔류변형이 존재하기 전의 상태로 돌아가는 현상을 이용하여 직선왕복 운동에 이용한다. 이러한 현상은 금속의 결정학적 관점에서 마르텐사이트(Martensite)상과 오스테나이트(Austenite)상 사이의 상 변화의 결과에 기인한다. 냉각 시 마르텐사이트 상에서는 외력을 통해 쉽게 변형이 가능하다. 여기에 상 변태온도 이상으로 가열하면 형상기억합금은 원래의 형상으로 복원된다. 형상기억합금은 저항체이므로 전기적으로 쉽게 가열될 수 있다.

형상기억합금이 높은 중량 대 파워 비를 갖고 있는 반면, 다수의 문제점도 함께 보유하고 있다. 우선 온도에 따른 상변화 관계 상에서 복잡한 히스테리시스와 같이 비선형 특성을 갖고 있다.⁽³⁾ 하

† 한양대학교 대학원 기계공학과

E-mail : redmoo80@hotmail.com

TEL : (031)400-4062 FAX : (031)406-6398

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한양대학교 기계공학과

지만 이러한 특성은 피드백 제어를 포함한 제어 기술을 통해 해결될 수 있다. 그리고 또 다른 문제는 물리적인 변형량이 전체 길이의 5(%)이내로 제한된다는 점이다.

형상기억합금을 이용한 구동기의 설계상에서 기계적인 변형량을 증가시키기 위한 방안으로 긴 와이어를 사용하거나,^{(4),(5),(6)} 긴 와이어를 코일형태로^{(7),(8),(9)} 감아서 사용하는 경우로 나눌 수 있다. 제안된 매니플레이터에 사용되는 구동부 메커니즘은 다수의 코일형태의 형상기억합금을 병렬 구조로 사용하여 긴 와이어 구조보다 크기가 작고, 코일 타입 직렬형 구동기보다 파워 면에서 효율적이다. 뿐만 아니라 와이어 구동 메커니즘을 통해 직선 왕복운동을 회전운동으로 변환시키고, 냉각시간을 단축하기 위한 바이어스(bias) 구동 메커니즘을 포함한다.

본 논문에서 제안되는 매니플레이터의 개발목표는 제안된 구동부 메커니즘을 적용하여 소형화, 경량화 구조로 평면 위 약 50(g) 추의 위치를 제어하기 위함이다. 따라서 기구부 메커니즘은 경량화를 고려한 팬터그래프(pantograph) 구조의 2 자유도 메커니즘이 소개되고, 다수의 형상기억합금에 충분한 전류를 공급하기 위한 전류증폭회로, 추의 위치제어 알고리즘으로 PD 보상기가 제어부 메커니즘에서 언급된다.

2. 개념 설계

2.1 기존 형상기억합금 구동기의 문제점

지금까지의 형상기억합금을 이용한 구동기가 보유한 대표적인 문제점을 정리하면 다음과 같다. 이 문제점은 본 논문에서 제안되는 매니플레이터의 구동부, 기구부 및 제어부 메커니즘 설계 시 중요한 설계인자로 사용된다.

- (1) 일반적으로 형상기억합금은 온도에 따른 상변화 관계 상에서 높은 비선형 특성을 갖고 있다. 상변화 온도까지 전기적으로 가열되어 오스테나이트 상까지 도달하는 시간(수축시간)은 비교적 작으나, 마르텐사이트 상까지 도달하는데 걸리는 시간(복귀시간)은 주변온도와 보상을 통해 냉각되므로 비교적 오랜 시간이 필요하다.
- (2) 현재까지의 형상기억합금의 형태를 살펴보면 긴 와이어형태와 와이어를 감아서 만든 코일형태로 구분된다. 큰 지름을 가진 와이어형태는 큰 인장력을 얻을 수 있으나, 와이어의 외부와 내부에 온도차이로 응답속도가 떨어진다. 뿐만 아니라 큰 변형량을 얻기 위해 긴 와이

어가 필요하므로 구동부 메커니즘이 크고, 복잡하다. 코일형태는 와이어타입보다 지름이 상대적으로 작기 때문에 크기는 작으나, 큰 인장력을 얻을 수 없다는 단점이 있다.

2.2 구동부 메커니즘 선정

제안된 형상기억합금 매니플레이터는 평면 상 작업범위 내에서 약 50(g)의 추를 원하는 위치로 이동시키기 위한 충분한 구동력을 발생시켜야 한다. 일반적으로 큰 구동력을 발생시키기 위해 지름이 큰 와이어타입의 형상기억합금이 많이 사용되지만, 메커니즘의 크기가 크고, 구조가 복잡해지며, 긴 냉각시간이 필요하다는 단점이 있다. 본 매니플레이터는 소형화, 경량화를 위해 와이어형태 대신 코일형태의 형상기억합금을 사용한다(기계적 변형량 200(%)). 부족한 인장력은 4 개의 형상기억합금을 병렬 구조로 배치하여 보다 큰 출력(이론상 최대 1.6(N))을 얻을 수 있는 ‘병렬형 구동 메커니즘’으로 해결하였다. 뿐만 아니라 양방향 직선 왕복운동을 일정 각도 내의 회전운동으로 변경하기 위해 풀리(pulley)와 와이어를 이용한 ‘와이어 구동 메커니즘’을 도입하였다. 특히 긴 냉각시간을 단축하기 위해 풀리를 기준으로 반대쪽에 인장스프링을 설치한 ‘바이어스 구동 메커니즘’이 포함된다. 이상 2 개의 세부 메커니즘을 포함한 전체 메커니즘을 본 매니플레이터의 구동부 메커니즘으로 선정되었다.

2.3 기구부 메커니즘 선정

매니플레이터의 기구부 메커니즘은 기본적으로 평면상에서 2 자유도 운동을 구현해야 한다. 따라서 흔히 5-bar 메커니즘으로 알고 있는 팬터그래프 메커니즘을 도입하여 작업범위 내 위치제어가 가능하도록 한다. 작업범위는 기구부 링크의 길이, 두 회전축 간의 거리에 의해 결정된다. 제안된 매니플레이터는 소형화뿐만 아니라 경량화도 고려되어야 하므로, 기구부 메커니즘의 구조는 50(g)의 추를 지지하기 충분한 강도 내에서 기구부 자중을 최대한 줄일 수 있는 경량설계 및 경량재질 선정이 수행되어야 한다.

2.4 제어부 메커니즘 선정

구동부 메커니즘은 앞에서 언급된 것처럼 4 개의 코일형태의 형상기억합금이 병렬 구조로 배치되므로 4 개의 형상기억합금에 충분한 전류가 공급되어야 한다.(개당 300(mA)공급) 또한 구동기의 응답속도를 향상시키기 위해 충분한 기동력이 필요하다. 따라서 직류전원에서 공급되는 전류가 보

다 빠르게 구동기로 공급되기 위해 별도의 전류증폭회로가 설계되어야 한다. 그리고 제안된 매니플레이터가 추를 원하는 위치로 정확히 이동시키기 위한 위치제어 알고리즘이 필요하다. 일반적인 PD 제어기는 온도에 따른 비선형 특성을 가지는 형상기억합금의 위치제어 알고리즘으로 부족하므로 PD 보상기가 포함된 피드백 제어기가 설계된다. 피드백제어를 위한 측정장치로 포텐서미터(potentiometer)가 사용되며, 기구부 메커니즘의 두 구동축에 각각 연결된다.

3. 구동부 설계

3.1 병렬형 구동 메커니즘

매니플레이터의 구동부 메커니즘은 앞서 개념설계 상에서 언급된 두 가지 세부 메커니즘이 포함된다. 우선 첫 번째로 메커니즘의 소형화, 경량화를 위해 선정된 코일형태의 형상기억합금의 단점인 낮은 인장력을 보완하기 위해 Fig. 1 과 같이 4 개의 형상기억합금이 병렬 구조로 연결되는 병렬형 구동 메커니즘을 제안한다. 그림에서 부품 A 는 직선 왕복운동 시 중심축이 통과할 수 있도록 중공 구조를 가지고 있다. 부품 B 는 코일형태의 형상기억합금이 고정되며, 왕복운동 시 마찰력을 감소시키기 위해 무급유 부쉬가 설치된다. 또한 코일형태의 형상기억합금에 전류가 병렬 형태로 공급되기 위한 전기배선이 이루어진다. 부품 C 의 4 개의 구멍에는 각각의 형상기억합금과 연결되는 전기배선이 이루어지며, 4 개의 형상기억합금이 동일한 인장력을 발생시키기 위해 장력조절나사가 설치된다. 부품 C 위 쪽으로 부품 D 가 씌워져 주변의 먼지나 수분으로부터 내부 전기배선을 보호하는 역할을 한다. 이 메커니즘에 사용된 코일 형태 형상기억합금의 전체길이는 약 40(mm)이며, 최

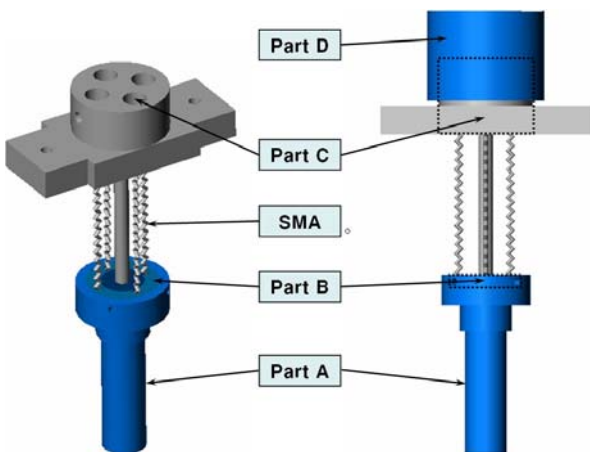


Fig. 1 Parallel type actuator

대수축 시 약 20(mm)가 된다. 그리고 개당 최대 0.4(N)의 인장력을 발생시키므로, 이론상 최대출력은 약 1.6(N)이 된다. 따라서 50(g)의 추를 상승시키기 위해 필요한 인장력 0.5(N)보다 더 큰 출력이 발생됨을 확인할 수 있다.

3.2 와이어 구동 메커니즘

병렬형 구동 메커니즘은 형상기억합금의 수축, 이완에 따라 직선 왕복운동을 구현한다. 제안된 매니플레이터는 평면 상 작업범위 내에서 2 자유도 운동을 구현하기 위해 팬더그래프 메커니즘이 도입된다. 따라서 두 개의 구동(회전)축이 필요하므로 직선 왕복운동을 회전운동으로 변환시키는 메커니즘이 필요하다. 일반적으로 직선 왕복운동을 회전운동으로 변환시키기 위해 ‘와이어 구동 메커니즘’을 많이 사용한다. 형상기억합금 구동기에 적용된 와이어 구동 메커니즘은 형상기억합금의 냉각시간을 단축하기 위해 폴리를 기준으로 반대쪽에 바이어스 스프링을 설치한 ‘바이어스(bias) 구동 메커니즘’과 반대쪽에 똑 같은 형상기억합금 구동기를 설치한 ‘대립(antagonistic) 구동 메커니즘’의 두 가지 메커니즘이 많이 사용된다. 본 매니플레이터는 Fig. 2 와 같이 바이어스 구동 메커니즘을 사용하여 형상기억합금 구동기의 주파수를 높여주고, 원래 형상으로 잘 복원시켜주며, 무엇보다도 냉각 시에도 큰 복원력을 발생시켜 줄 수 있는 장점을 가지고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 병렬형 구동 메커니즘을 통해 전달된 직선운동이 와이어를 통해 폴리를 회전시키고, 이 때 발생된 회전력이 이 와이어 구동 메커니즘의 출력으로 나타나게 된다. 폴리를 기준으로 반대쪽은 외부 프레임에 고정된 바이어스 스프링이 설치되어 있다. 이 스프링의 기능은 형상기억합금에 공급된 전류

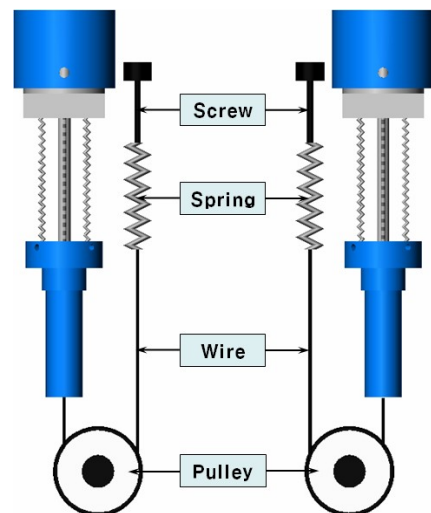


Fig. 2 Bias type actuator

가 차단되어 원래 형태로 복원될 때 복원속도를 증가시키는 목적과 시스템의 진동과 충격을 완화시키는 역할을 한다. 마찬가지로 스프링은 장력조절나사와 연결되어 양 쪽 와이어의 장력을 일정하게 유지시킨다.

4. 기구부 설계

약 50(g)의 추의 위치를 원하는 위치로 이동시키기 위해 3 장에서 구동부 메커니즘이 언급되었다. 4 장에서는 구동부의 출력을 이용하여 실제 추의 위치를 이동시키는 기구부 메커니즘에 대해 설명한다. 평면 상 작업범위 내에서 2 자유도 운동을 구현하기 위해 매니플레이터 기구부는 5-bar 메커니즘으로 알려진 팬터그래프 메커니즘을 도입한다. 일반적인 팬터그래프 메커니즘에서 지면과 만나는 두 구동축 링크를 풀리와 고정시켜 와이어를 통한 풀리의 각도변화가 팬터그래프 메커니즘의 두 입력각으로 사용된다. 사용된 링크의 길이는 짧은 링크가 3(cm)이고, 긴 링크가 6(cm)이다. 팬터그래프 메커니즘의 기구학적 특성에 의해 두 입력각에 의한 매니플레이터의 끝점의 위치 및 작업범위가 결정된다.

4.1 기구학 해석

Fig. 3 은 매니플레이터의 기구부에 사용된 팬터그래프 메커니즘 개략도를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 제안된 매니플레이터는 2 개의 구동축(θ_1, θ_3)과 2 개의 피동축(θ_2, θ_4)을 가진다. 정기구학 해석은 구동축이 주어진 경우 매니플레이터의 끝점위치(P)와 자세를 구하는 것으로 피동축의 회전각도가 필요하다. 이를 구하기 위해 매니플레이

터의 끝점 P 를 가상으로 자른 후, 왼쪽 체인과 오른쪽 체인은 한 점 P 에서 만난다는 기하학적 구속조건으로부터 (1)식을 유도할 수 있다.

$$P_x : \frac{d}{2} + l_1 c_1 + l_2 c_2 = -\frac{d}{2} + l_3 c_3 + l_4 c_{34} \quad (1)$$

$$P_y : l_1 s_1 + l_2 s_{12} = l_3 s_3 + l_4 s_{34}$$

그리고, $l_1 = l_3$, $l_2 = l_4$ 일 때 (1)식은 (2)식으로 변환된다.

$$\frac{-d - l_1 c_1 + l_1 c_3}{l_2} = c_{12} - c_{34} = \alpha$$

$$\frac{-l_1 s_1 + l_1 s_3}{l_2} = s_{12} - s_{34} = \beta \quad (2)$$

$$\gamma = a \tan 2(\alpha, \beta)$$

(2)식을 정리하면 다음과 같이 피동축의 회전각도를 구할 수 있다.

$$\theta_2 = -\gamma + a \sin\left(\sqrt{(\alpha^2 + \beta^2)/2}\right) - \theta_1 \quad (3)$$

$$\theta_4 = -\gamma + a \sin\left(\sqrt{(\alpha^2 + \beta^2)/2}\right) - \theta_3 + 2\pi \quad (4)$$

역기구학 해석은 기준 좌표계에 대한 끝점 P 가 주어질 경우 구동축의 회전각도를 구하는 것으로 (1)식에서 구동축과 피동축을 분리시킨 후 이를 제공해서 더한 후 정리하면 다음과 같이 왼쪽 체인에 대한 (5)식을 구할 수 있다.

$$\theta_3 = 2a \tan 2\left(\gamma_1 \pm \sqrt{\gamma_1^2 - (\alpha_1^2 - \beta_1^2)}, \alpha_1 + \beta_1\right) \quad (5)$$

여기서,

$$\alpha_1 = P_x^2 + P_y^2 + P_x d + \left(\frac{d}{2}\right)^2 + l_3^2 - l_4^2$$

$$\beta_1 = 2l_3 P_x + l_3 d$$

$$\gamma_1 = 2l_3 P_y$$

같은 방법으로 오른쪽 체인에 대한 (6)식을 구할 수 있다.

$$\theta_1 = 2a \tan 2(\gamma_2 \pm \sqrt{\gamma_2^2 - (\alpha_2^2 - \beta_2^2)}, \alpha_2 + \beta_2) \quad (6)$$

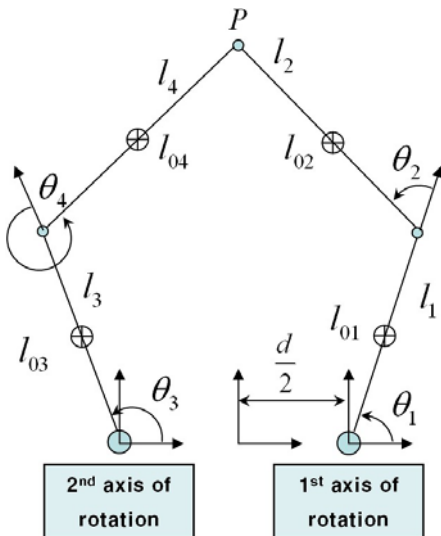


Fig. 3 Schematics of pantograph mechanism

여기서,

$$\alpha_2 = P_x^2 + P_y^2 - P_x d + \left(\frac{d}{2}\right)^2 + l_1^2 - l_2^2$$

$$\beta_2 = 2l_1 P_x - l_1 d$$

$$\gamma_2 = 2l_1 P_y$$

4.2 매니플레이터의 작동범위

제한된 매니플레이터의 작동범위는 기구학 해석을 통해 얻어진 매니플레이터의 운동 시뮬레이션을 통해 얻을 수 있다. 링크의 길이와 두 구동축 사이의 거리가 Table 1 과 같이 주어졌을 때 끝 점 P 의 좌표가 입력되면 두 구동축의 회전각도가 결정된다. Fig. 4 는 두 구동축의 회전각도가 90°일 때의 매니플레이터의 운동결과를 나타낸다. 형상

Table 1 Length of link

	l_1	l_2	l_3	l_4	d
Length(mm)	30	60	30	60	60

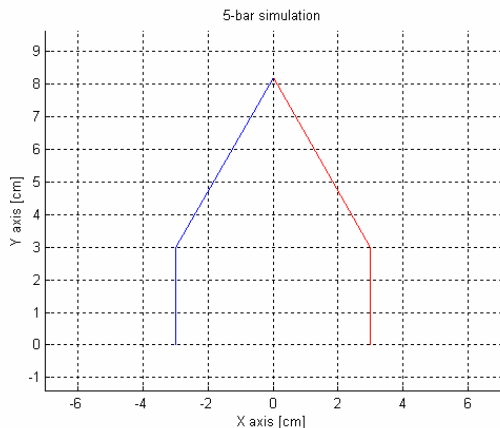


Fig. 4 Simulation of pantograph mechanism (at $\theta_{1,3} = 90^\circ$)

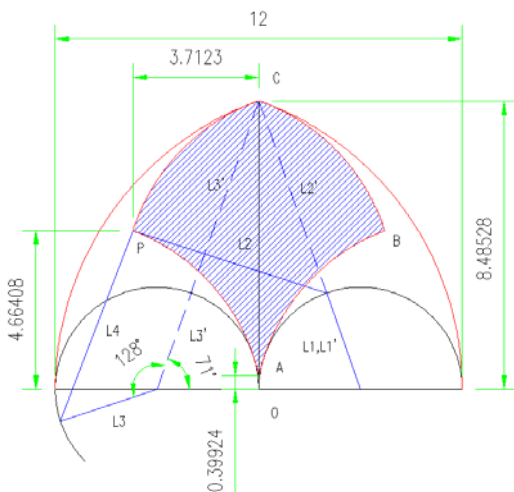


Fig. 5 Workspace of pantograph mechanism

기억합금의 최대 변형길이가 20(mm)라고 가정할 때 폴리(지름 18(mm))의 회전각도는 약 128°이다. 만약 폴리 회전각의 초기 각도를 구동링크와 연결된 피동링크가 수평방향으로 놓여진 상태(가장 멀리 도달할 수 있는 위치)로 둘 때 θ_1 는 약 109°이며, θ_3 는 약 71°이다. 이 상태를 기준으로 폴리의 최대 회전각인 128°로 회전할 경우 매니플레이터의 운동범위는 기구학적 특성에 의해 Fig. 5 의 빗금 친 부분과 같이 제한된 작동범위를 가지게 된다.

5. 제어부 설계

열에 의해 거동특성이 좌우되는 형상기억합금의 모델링은 다수의 연구개발자에 의해 거론되었으나 현재까지 모든 면에서 신뢰할 수 있을만한 모델링은 존재하지 않는다. 하지만 이런 단점을 극복하여 원하는 제어를 설계하기 위해서는 비선형 특성을 최소화시키고, 제어 시스템을 선형 시스템으로 변화시키기 위한 고찰이 필요하다.

5.1 제어부 설계 시 고려사항

형상기억합금은 히스테리시스를 포함한 열에 의한 비선형 특성 때문에 다른 구동기에 비해 응답 속도 및 반복 정밀도가 떨어지는 현상을 보인다. 이러한 비선형 특성을 줄이고, 시스템을 선형적인 거동으로 변환시켜 2 차원 평면 상에 원하는 위치로 추를 이동시키기 위한 제어부 메커니즘을 설계하기 위해 다음과 같은 제반 사항이 고려된다.

- (1) 충분한 강성을 가져 변형이 없는 와이어 사용
- (2) 바이어스 스프링과 추를 이용한 백 드라이브 및 충격완화 기능
- (3) 형상기억합금의 변형량과 비례한 전류증폭회로
- (4) 고정밀도 포텐셔미터를 이용한 형상기억합금 거동의 선형적 변환
- (5) 역기구학 해석을 통한 피드백 제어
- (6) 시스템 특성을 고려한 PD 보상기 설계

5.2 위치 제어 알고리즘

Fig. 6 은 매니플레이터의 위치 제어를 위한 제어시스템의 블록 선도를 나타낸다. 우선 작업자가 매니플레이터의 운전범위 내의 좌표 값을 입력시키면 팬더그래프 메커니즘의 역기구학 해석을 통

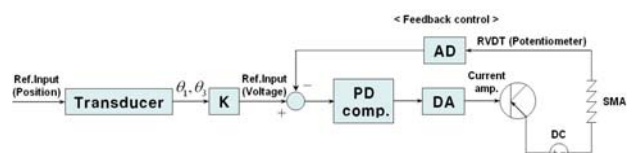


Fig. 6 Block diagram of position controller

해 폴리와 연결된 두 회전축의 회전각도(θ_1, θ_3)가 변환기를 통해 계산된다. 두 회전각은 비례상수 K 값에 의해 포텐서미터의 제원과 맵핑되어 0.5(V)~ 4.5(V)내의 전압 값으로 변환된다. 이 값은 신호는 형상기억합금의 운동에 필요한 기준 전압 값이 되어 전류증폭회로를 통해 형상기억합금에 필요한 전류를 공급한다. 형상기억합금의 운동결과는 포텐서미터를 통해 전압 값으로 피드백 되고, 이 때 발생된 오차는 PD 보상기를 통해 감소된다.

5.3 전류증폭회로

추를 원하는 위치로 이동하기 위해 필요한 매니플레이터의 두 회전각은 비례상수 K 값을 통해 전압 값으로 변환된다. 실제 형상기억합금에 공급되는 전류량은 이 전압 값에 비례한 전류량이 필요하므로, 전압 값에 비례하여 전류량을 공급할 수 있는 전류증폭회로가 제어부 메커니즘으로 설계된다. 전류증폭회로의 원리는 트랜지스터의 전류 증폭 특성을 이용한다. 즉, 전류이득이 매우 큰 달링턴 회로를 기반으로 한다. 매니플레이터에 사용된 형상기억합금은 각각의 구동 모듈에 4 개의 병렬형태로 구성되어 있다. 따라서 각각의 형상기억합금에 기준 전압 값이 0.32(V) 일 때 최대 전류 300(mA)가 흐를 수 있도록 설계된다.

6. 결론

본 논문에서는 기존의 형상기억합금 구동기가 보유하고 있는 문제점을 해결하고 소형화 및 경량화를 고려한 새로운 매니플레이터 설계방법이 제안되었다. 제안된 매니플레이터의 설계인자는 2 차원 평면 상에 50(g)의 추의 위치를 제어 목표로서 구동부, 기구부 및 제어부에서 각각 결정되었다. 우선 구동부에서는 구동기의 소형화 및 경량화를 고려하여 4 개의 형상기억합금이 병렬 구조로 연결된 병렬형 구동 메커니즘이 설계되었다. 또한 바이어스 타입의 와이어 구동 메커니즘이 직선 왕복운동을 회전운동으로 바꾸고, 복귀시간을 단축시켜 구동기의 응답성을 향상시켰다. 기구부에서는 2 자유도 운동을 구현하기 위해 팬터그래프 메커니즘이 도입되었고, 구동기의 효율성을 고려하여 경량화 설계가 수행되었다. 끝으로 제어부에서는 정확한 위치제어를 위한 제어 알고리즘 및 다수의 형상기억합금에 충분한 전류를 공급하기 위한 전류증폭회로가 설계되었다. Fig. 7 은 매니플레이터의 전체 설계도를 나타낸다. 앞으로 이 설계를 바탕으로 실제 매니플레이터가 제작되고, 위치제어 실험을 통해 설계 안이 검증될 예정이다.

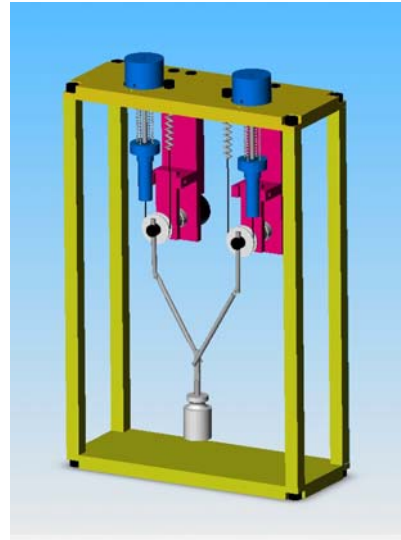


Fig. 7 Manipulator design

후기

본 연구는 삼성물산 건설부문과 과학기술부 우수연구센터육성사업인 한양대학교 친환경건축 연구센터의 지원으로 수행되었음 (R11-2005-056-03003-0)

참고문헌

- (1) K. Ikuta, 1990, "Micro/Miniature Shape Memory Alloy Actuator, " *IEEE Robotics and Automation*, vol. 3, pp.2156~2161
- (2) I. Hunter, S.Lafontaine, J.Hollerbach, and P.Hunter, 1991, "Fast Reversible NiTi Fibers for Use in Microrobotics, " *Microelectro-Mechanical Systems*, pp. 166-170
- (3) T.W Duerig, K.N. Melton, D.Stockel, and C.M Wayman, 1990, "Engineering Aspects of Shape Memory Alloys", *Butterworth-Heinemann Ltd.*
- (4) M. Hashimoto, Mansanori Takeda, Hirofumi Sagawa, and Ichiro Chiba, 1985, "Application of Shape Memory Alloy to Robotic Actuators, " *Journal of Robotic Systems*, 2(1):3~25
- (5) K. Kuribayashi, 1986, "A New Actuator of a Joint Mechanism Using TiNi Alloy Wire, " *Journal of Robotics Research*, 4(4),pp.47~58
- (6) D.Reynaerts and H. Van Brussel, 1991, "Development of a SMA High Performance Robotic Actuator, " *Fifth International Conference on Advanced Robotics*, vol.2,pp.19~27