

복합재료를 이용한 직접구동방식 로봇제작

오 세 훈

한국기계연구원 로봇공학실장

이 대 길

한국과학기술원 부교수

곽 윤 근

한국과학기술원 교수

김 수 현

한국과학기술원 조교수

1. 서 론

모터 축과 부하 사이에 감속기와 같은 동력 전달기구를 생략하고 모터와 부하를 직결시킴으로서 전동기구에서의 문제점을 극복할 수 있음이 DD(Direct Drive)의 특징인데 반하여 다자유도의 로봇 팔의 경우에는 여러개의 모터가 직렬로 연결되는 형식으로 인하여 DD방식의 채용이 곤란한 것으로 여겨졌다.

직접구동방식 로봇트는 1983년 Asada와 Kanade에 의해 Carnegie-Mellon대학에서 처음 시도되었고, 1984년 Asada와 Youcef-Toumi에 의해 M. I. T.에서 직립형 직접구동방식 로봇트의 개발에 성공되었으나, 모터의 과도한 무게 및 지속적인 운전에 수반되는 모터의 과열현상 등으로 실제 응용이 극히 제한되었다. 그러나 모터의 급속한 발달로 단위 무게당 출력토크의 향상 등이 직접구동 로봇트의 실제 산업현장에 적용을 가능케 하였고, 그결과 미국의 Adept Technology가 1987년에 Adept One이라고 불리우는 수평다관절 DD 로봇트를 개발하여 상품화시킴으로써 실용화의 길이 열리게 되었다. 1988년 일본의 Fanuc사는 A-600이라는 직접구동방식 로봇트를 개발하였는데 이 로봇트는 모든 모터를 관절에 장착한 직접구동방식을 채용하고 있으며, 모터의 관성을 이기기 위하여, 첫번째 팔을 구동하는 모터를 출력토크가 매우 큰 모터를 사용하였다. 그러나 두 로봇트는 모두 팔의 재료로 알루미늄을 사용하므로 팔의 강성도가 작고 직접구동방식의 작은 감쇄특성을 극복하지 못하고 있다. 본 연구에서는 로봇트의

팔을 고탄성 탄소섬유 복합재료를 사용한다. 복합재료는 재료의 높은 비탄성 계수(Specific Modulus: E/ρ)와 비강도(Specific Strength) 특성 때문에 구조물의 경량화가 요구되는 우주선, 항공기 등에 주로 사용되어 왔다. 복합재료는 무게를 가볍게 하는 특성 외에도 재료의 고유진동수와 감쇄값이 매우 크므로 빠른 속도로 움직이는 기계에 적합하다. 즉 탄소섬유나 Boron섬유, 복합재료와 같은 높은 비탄성 계수를 갖는 재료를 사용하여 구조물을 제작하면 구조의 고유진동수를 철이나 알루미늄을 사용하는 것보다 두배 정도 증가시킬 수 있다. 또한 복합재료는 철이나 알루미늄 보다 감쇄(Damping) 값이 10배 정도 크므로, 진동을 빨리 흡수하여 동역학적 성질을 향상시킬 수 있다.

2. 직접구동로봇의 구조

그림 1은 DD Robot로 팔을 복합재료로 만들었다. 그림 2는 로봇의 조립 도면을 나타낸다. 이 로봇트는 4개의 자유도를 갖고 있으며 두 개의

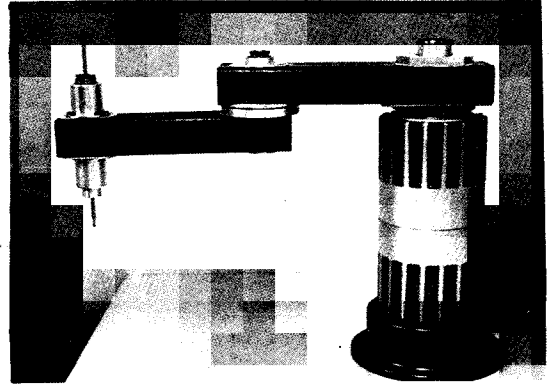


그림 1) 복합재료로 만든 팔을 가진 스카라형 DD Robot

모터는 로봇트 기둥 안에 내장되어 있으며 다른 두 개의 모터는 로봇트 끝단에 내장되어 있다. 로봇트 팔을 몸체로부터 첫번째 팔, 두번째 팔이라고 하면, 첫번째 팔의 구동은 몸체 상부에 위치하고 있는 Brushless모터에 의하여 바깥축을 회전시킴으로서 바깥축에 볼트로 결합되어 있는 첫번째 팔을 구동하게 된다. 두번째 팔은 몸체 하부에 위치하고 있는 Brushless모터에 의하여 구동된다. 모터는 안쪽의 장축을 회전시키며, 이

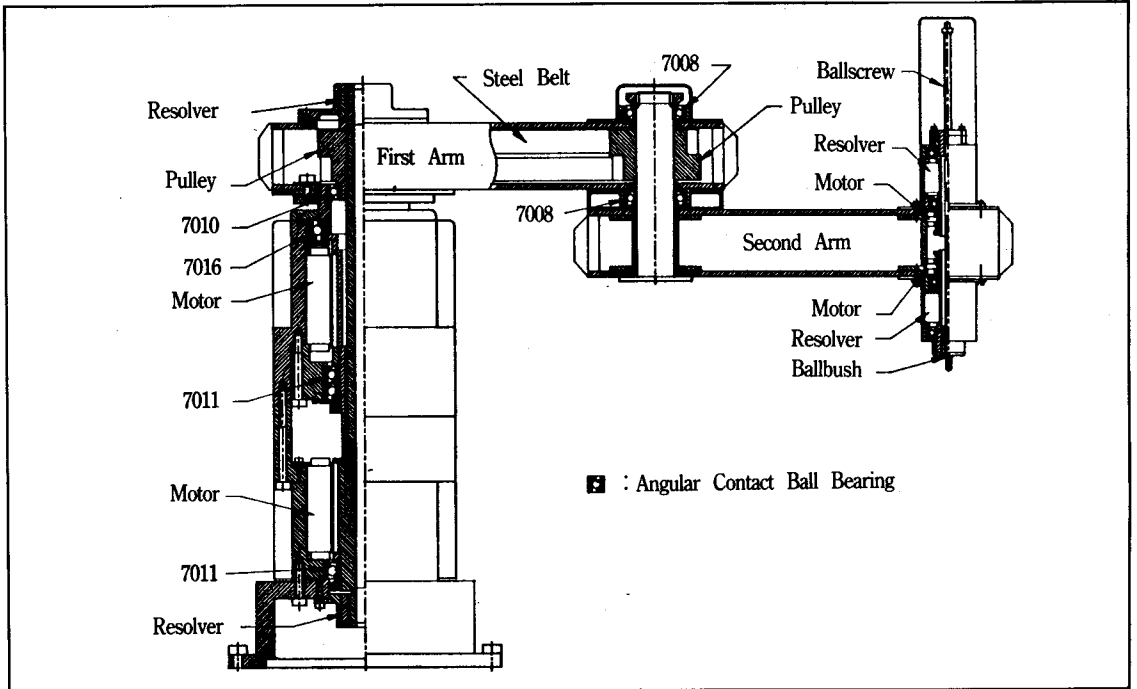


그림 2) DD Robot의 조립도면

표 1) DD Robot의 사양(Inland, USA)

| | Wrist Drive Motor RBE-01200 | Arm Drive Motor RBE-03006-A50 |
|-------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Power(Watt) | 31.9 | 466.3 |
| Torque(N·m) | 0.097 | 14.15 |
| Speed(RPM) | 3144 | 314 |
| Weight(kg) | 0.088 | 5.9 |

축과 두번째 팔의 회전축에는 풀리(Pulley)가 고정되어 있고, 풀리와 풀리는 벨트로 연결되어 팔을 구동하게 된다. 그리퍼의 상하운동은 그리퍼 상부에 위치하고 있는 Frameless 모터에 의하여 Ballscrew 구동축을 회전시키며, 구동 축에는 Ballscrew Nut가 고정되어 구동축과 함께 회전하게 된다. 이때 Ballscrew는 그리퍼가 연결되는 Torque Resistant Ball Bushing에 고정되므로 회전운동은 이루

어지지 않고 상하운동만을 하게 된다. 또한 그리퍼의 회전운동은 상하부 모터의 동시 구동에 의하여 이루어진다. 여기에 사용한 모터는 모두 Inland Co.계 모터를 사용하였다.(표 1. 참조)

3. 로봇트 팔의 크기와 Winding 각도 계산

본 연구에서는 로봇트가 하중 1Kg 속도를 5 m/sec, 가속도를 10m/sec²하는 부하 조건을 사용하여 설계하였다. 설계에 사용한 동역학 모델은 그림 3이고 이 모델을 통하여 필요한 모터의 크기를 식(1), (2)에 따라 결정하였고 정확한 모델은 동적인 상태에서 작용하는 힘을 경계조건 값으로 하여 FEM을 행하여야만 할 것이다. 일반적으로 기계의 동역학적 성능은 정적강성도에 감쇄(Damping) 값을 곱하면 되므로 정적강성도를 이용할 수 있다. 본 논고에서는 모델 그림 4를 이용하였다.

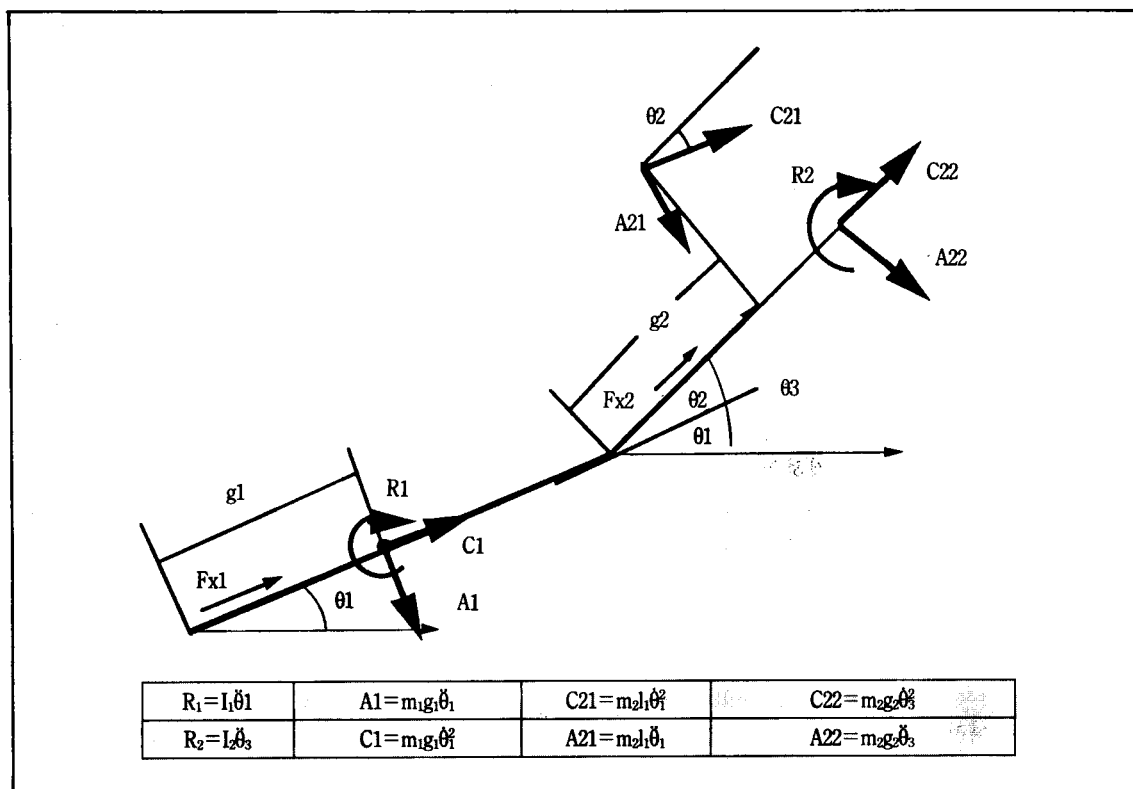


그림 3) DD Robot의 자유물체도

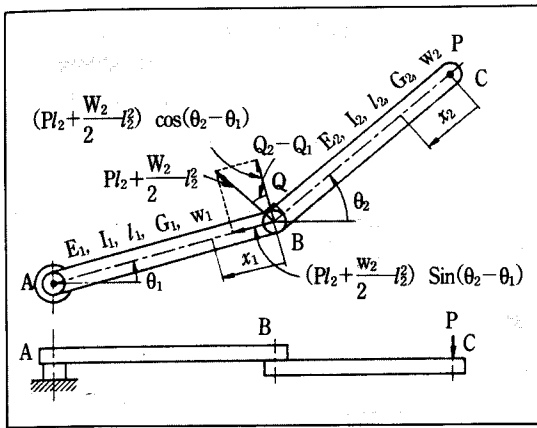


그림 4) 스카라 Robot의 모델

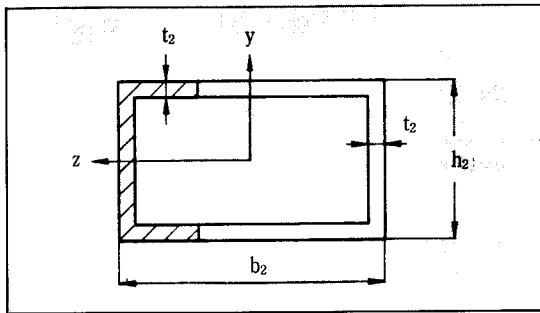


그림 5) 로봇트 팔에 사용된 단면 구조

$$T_2 = R_2 + g_2 \times C_{21} \times \sin \theta_2 + g_2 \times A_{21} \times \cos \theta_2 \quad (1)$$

$$T_1 = T_2 + R_1 + g_1 \times A_1 + L_1 (A_{21} - C_{22} \times \sin \theta_2 + A_{22} \times \cos \theta_2) \quad (2)$$

팔의 A점과 B점은 스프린들 베어링에 의하여 지지되어 있어서 평면내에서 회전은 자유로우나 수직방향으로는 변형이 없다고 가정하였으며, B점의 베어링 무게를 \$Q\$로 가정하였다. C점은 그리퍼가 설치되는 점으로 그리퍼 및 하중의 합을 \$P\$로 표시하였다. 팔 BC는 하중 \$P\$ 및 팔의 자중에 의한 Bending 모우먼트와 전단력에 의하여 변형을 일으키는 것으로 가정하였다.

로봇트 팔의 구조는 그림 5와 같은 사각형 형태를 하였다. 자세한 계산과정은 문헌[10]을 참조 바란다. 팔의 여러위치에서의 변형을 각각 그림 6에 나타내었다. 그림 6로부터 첫번째 팔의 Winding 각도는 \$Q/P\$ 값에 관계없이 \$20^\circ\$가 최적이고

두번째 팔의 각도는 \$10^\circ\$ 또는 \$15^\circ\$ 정도로 택하는 것이 바람직하다.

4. 주요부품별 세부 설계 및 제작

4.1. Base

베이스는 전체 구조의 지지점 역할을 하기 때문에 빠른 속도로 움직이는 로봇트 관성모멘트에 견딜 수 있도록 비중이 큰 재료이어야 하며, 방진효과 또한 우수하여야 한다.

이러한 조건에 부합되는 재료는 회주철이 적절하다고 판단하여 베이스 재료로 회주철을 선정하였다. 베이스 상부에는 몸체의 하부 케이스가 장착되며 내부에는 Resolver가 부착된다. 그리고 모터를 제어하는 모든 전선들이 베이스로 모아지기 위하여 전선의 출구가 설계 되었다. 제작된 베이스는 사진 7과 같다.

4.2. Casing Part

Case는 로봇트 전체 구조의 윤곽을 형성해 주는 부품으로 내부에는 모터, 구동축, 베어링 등이 장착되게 된다. 설계에 있어서 고려한 사항으로는 모터에서 발생하는 열과 베어링 장착을 위한 허용공차 등이다. 그리고 모터에서 발생하는 열을 쉽게 발산시킬 수 있는 알루미늄 재료를 택하였고, 베어링등 주요 부품들이 장착되며, 전체 하중을 지탱하는 역할을 하기 때문에 알루미늄 중에서도 보다 강성이 우수한 Al-P AC8A를 선택하였다. 또한 열 발산을 고려하여 외부에 냉각핀을 부착하였으며 모터와 케이스의 접촉 부분에 보다 더 열전달을 용이하게 해주는 실리콘 그리스 처리를 하였다.

주형 제작 과정을 거쳐 완성된 Casing Part는 각각 사진 8(a), 8(b)와 같다.

4.3. Shaft

축은 첫번째 팔과 두번째 팔을 구동하기 위한 것이다. 재료의 선정은 축이 회전 운동에 의한 관성 모멘트를 줄여 모터에 부하를 감소시킬 목

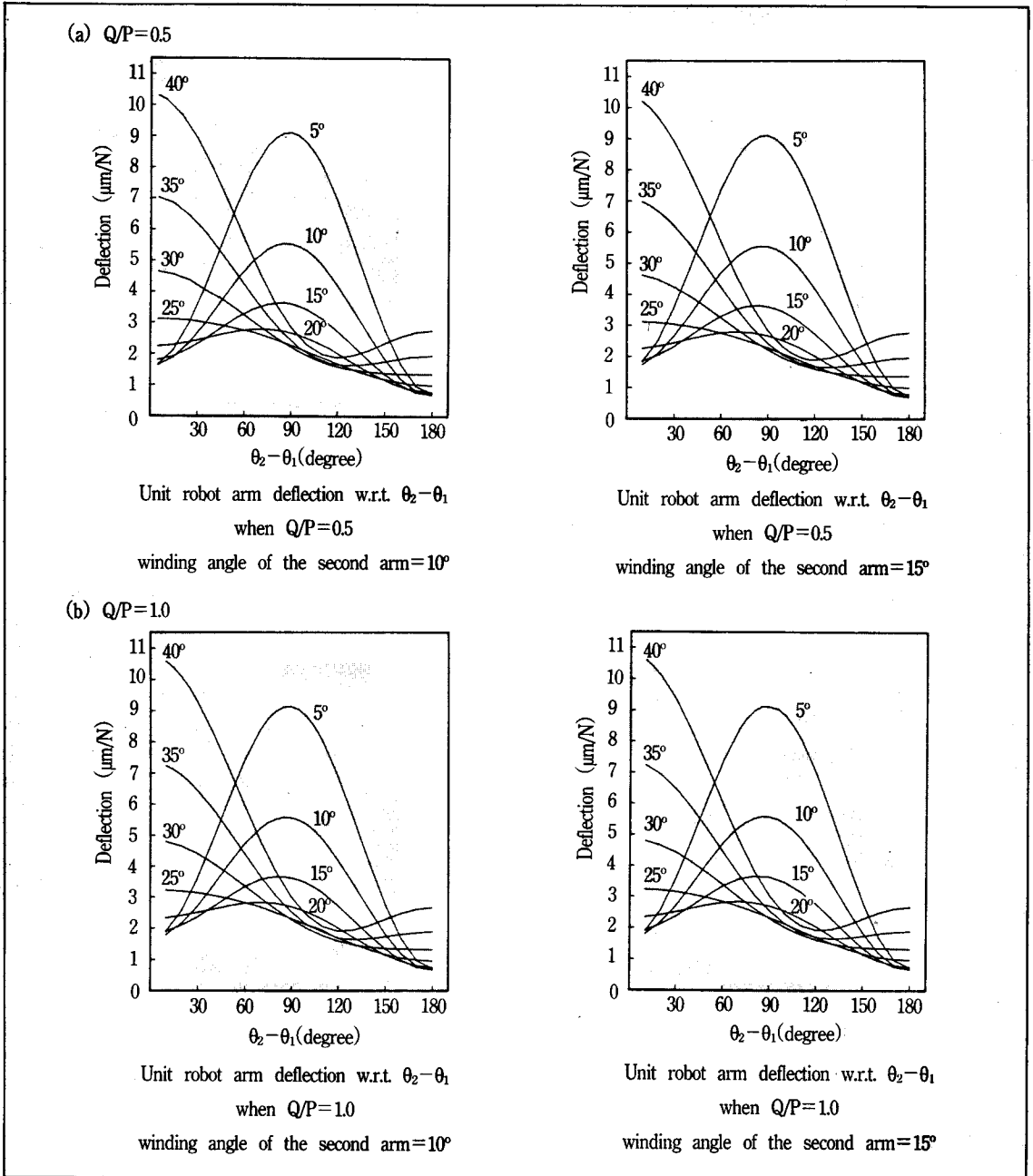


그림 6) Unit robot arm deflection w.r.t. $\theta_2 - \theta_1$. (a) Q/P=0.5 (b) Q/P=1.0

적으로 Al2024를 택하였다.

제작을 위한 가공 공정은 선삭→복합재료 Winding→Brake 마찰부→Bonding→Key 가공순으로 이루어졌다. 제작된 형상은 사진 9와 같다.

4.4. 복합재료 팔

복합재료 팔의 설계와 제작은 제3절에서 언급한 것처럼 최적 Winding 각도의 계산을 통하여 설계

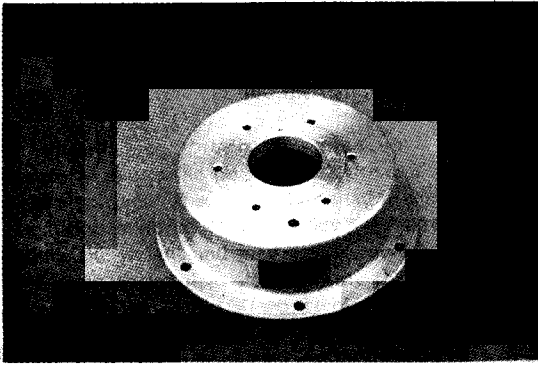


그림 7) 주철로 만든 로봇 Base

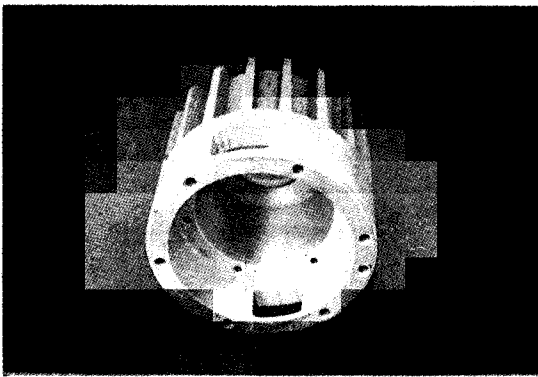
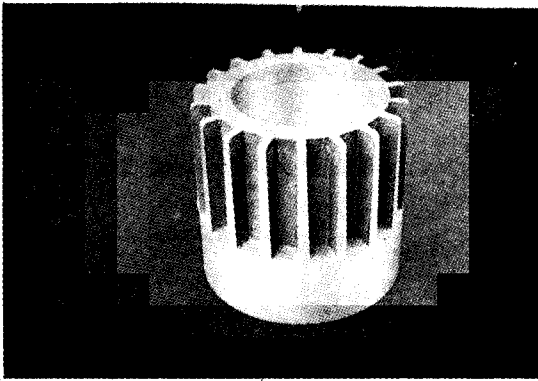


그림 8) 로봇의 몸체 (a) Upper part. (b) Lower part.

및 제작이 이루어졌다.

설계 및 제작 과정의 수행은 최적 Winding 각도의 계산→적층 방법 및 Curing과정의 검토 및 고안→복합재료의 절삭 특성 규명→Autoclave에서의 팔의 제작→밀링 절삭→보오링→드릴링 등의 순으로 이루어졌다.

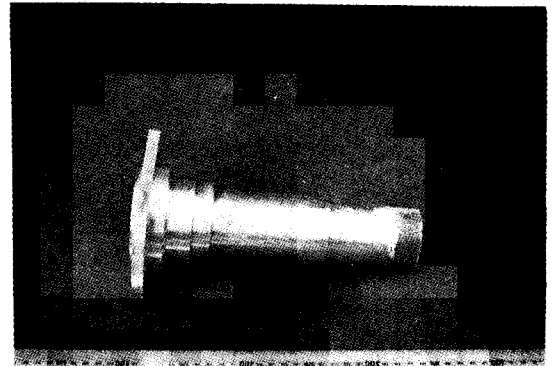
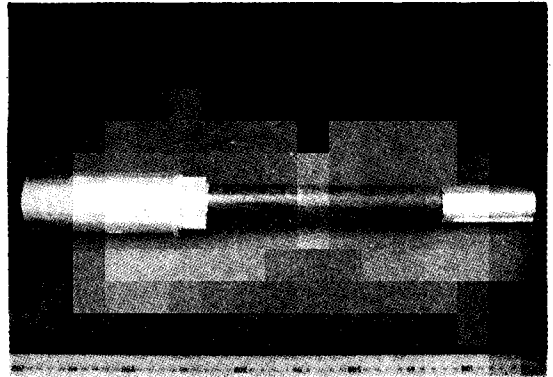


그림 9) 로봇 팔 구동축 (a)Elbow drive shaft which drives the pulley for the steel belt. (b)Shoulder drive shaft which drives the first robot arm.

4.5. 복합재료 팔과 각 부품들의 접합

탄소 섬유 에폭시 복합재료는 방향성을 가지고 있기 때문에 Bolt joint 방법을 이용할 경우 복합재료 팔의 성능저하를 초래한다. 이러한 문제점을 보완하기 위한 방법으로 각 조인트 부분은 열경화성 수지(IPCO 9923A)를 이용하여 접합하였다. 접합은 가공된 각 부품과 로봇 팔의 기능을 고려하여 접합에 필요한 각종 지그를 설계하여 제작하였고, 각 부품의 Bonding을 위한 표면 처리 후 지그를 이용하여 접착하였다. 그림 10은 베어링 하우징의 본딩 지그를 나타낸다.

4.6. 두번째 팔을 구동하기 위한 플리

직접구동 방식 로봇에 있어서 두번째 팔을

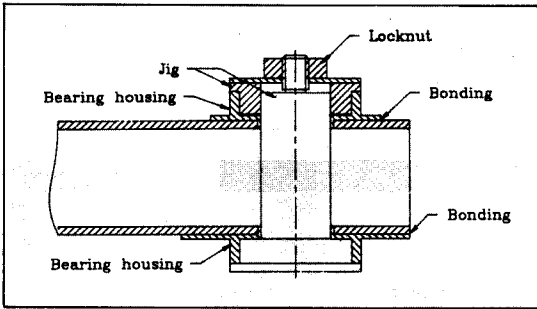


그림 10) 로봇트 앞에 부착된 베어링 하우스

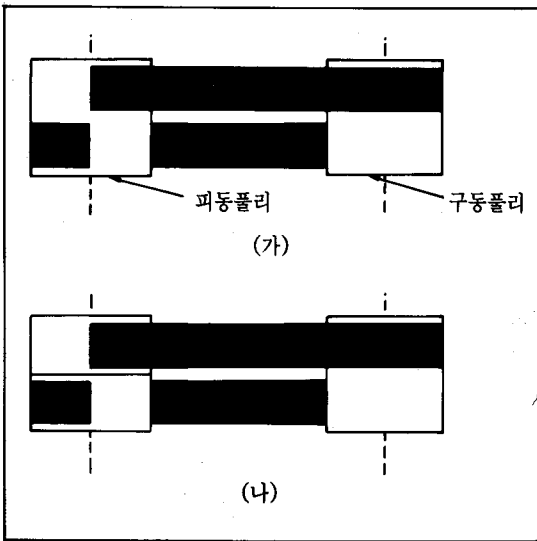


그림 11) Double belt 구동방식

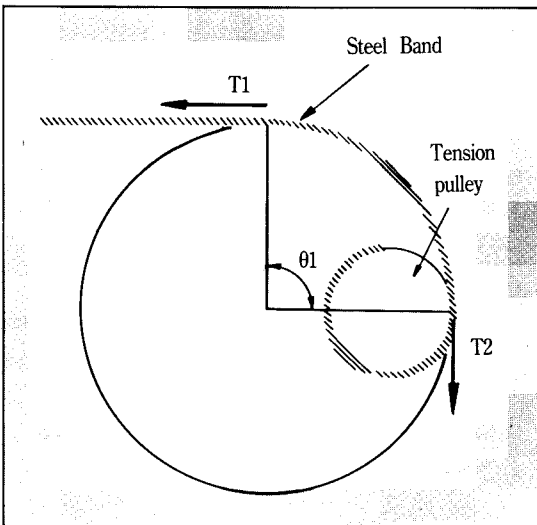


그림 12) Tension 조절기구

구동하기 위한 모터는 첫번째 팔과 두번째 팔의 조인트 부분에 위치하는 것이 보통이다. 그러나 이 경우 모터의 무게가 첫번째 팔을 구동하는 모터에 관성력으로 작용하여 부하 토크의 증대를 초래한다. 따라서 고속 운동을 위해서는 첫번째 팔을 구동하는 모터가 두번째 팔을 구동하는 모터보다 더 큰 토크를 발생시킬 수 있도록 선정하여야 한다.

직접구동 방식 로봇트의 설계에 있어서, 두번째 팔의 구동 모터를 몸체 쪽에 장착하여 모터의 부하 토크를 줄이고, 동력 전달 장치는 Steel 벨트 풀리를 이용하여 백래쉬에 의한 영향을 최대한 줄이도록 하였다. 한 개의 벨트를 쓸 경우에는 벨트의 슬립에 의해 전달하고자 하는 회전각 Loss가 생기게 되고 이것이 결국 Loss motion이 되는 것이다. 두개의 벨트를 쓸 경우에는 벨트가 각각의 풀리에 고정됨으로서 근본적으로 백래쉬는 발생될 수 없기 때문이다.

그러나 이러한 메카니즘에서 문제되는 것은 구동부에서 피동부로 동력을 전달할 경우 벨트에 장력을 주어야 하는 것이다. 처음 이 로봇트를 설계할 당시 그림 11의 (가)에 표시한 것과 같이 구동부와 피동부가 모두 단체로 된 각각의 풀리로 되어 있었다. 그리고 장력을 주는 메카니즘으로 그림 12에 표시한 것과 같이 Tension Pulley를 돌려서 벨트에 장력을 주려고 하였다. 매우 근사하였고 가능한 메카니즘으로 인식되었다. 그러나 여기에 함정이 있었다. 이것을 이론적으로 해석하면 다음과 같다.

$$T_2 = T_1 e^{\mu\theta} \quad (3)$$

여기서 μ 는 벨트와 풀리 사이의 마찰계수

Belt Tension 풀리에 가해지는 힘과 실제 벨트 장력 사이에는 식(3)과 같은 관계가 있게 되고 이 힘들 사이에는 지수함수적인 관계가 있기 때문에 T_1 과 T_2 사이에는 큰 차이가 있게 된다. 실제로 이 원리에 의해 구동한 결과 벨트의 Tension이 적은 관계로 진동등 부수적인 현상이 일어났다. 이의 해결책으로 그림 11의 (나)와 같이

피동 풀리를 두개로 나누어서 윗 부분은 상단의 벨트를 고정하고 하단 풀리에는 하단의 벨트를 고정하였다. 상단의 풀리와 하단의 풀리가 분리됨으로 해서 쉽게 풀리의 Tension을 조정할 수 있게 되었다.

4.7. Wrist

그리퍼 구동 메카니즘은 로봇트 끝단에 위치하게 되어 중량이 크게 되면 관성모우먼트의 증가로 인하여 구동모터에 부하증가가 초래된다. 따라서 손목부를 Compact하게 설계하여야 하며, 재료는 가벼우면서 강성이 우수한 것을 택하여야 한다. 그림 13은 손목부의 단면도로 두개의 앵글러 컨택트 베어링을 수직운동과 회전운동에 사용하였다.

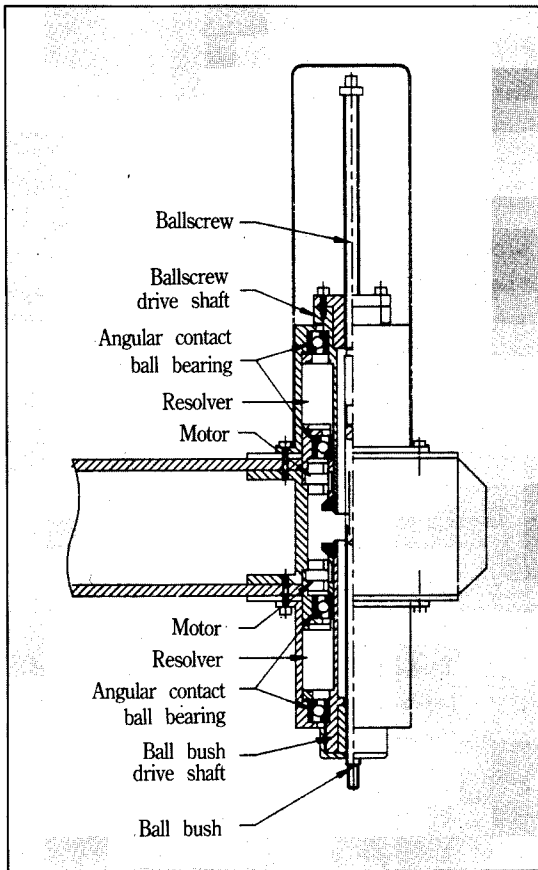


그림 13) DD Robot 손목부의 메카니즘

5. 결 론

본 논고에서도 주로 다루었듯이 복합재료를 이용하여 경량화와 진동특성을 개선 시킬 수 있었으며 기동부에 모터를 삽입 함으로 해서 간결한 설계가 가능하였다. 특히 손목부에 중공 모터들을 사용함으로 해서 부가적인 전동기구가 제거되어 더욱 경량화를 이룰 수 있었다. 가반 중량에 비하여 가장 가벼운 직접구동로봇트를 제작 할 수가 있었다. Steel belt 전동방식으로 구동 모터의 크기를 줄일 수 있으나 이로 인해 로봇트 시스템의 진동특성이 나빠졌다. 결국 로봇트의 성능과 구동 모터의 가격 등에 의해 타협점을 찾을 수 밖에 없다.

감사말

이 프로젝트는 한국과학기술원과 영국 Imperial College 사이의 공동 프로젝트로 추진되었던 것이다. 필자는 영국에 머무는 동안 DD Robot 설계에만 관여하였었고 복합재료에 관한 연구는 주로 과학기대에서 이루어졌다. 자료를 제공해 주신 한국과학기술원 교수님들께 감사의 글을 올린다. 특히 설계에서 모범을 보여 주셨던 C.B. Besant 교수님께도 감사의 글을 드린다.

참 고 문 헌

- [1] 山田, 精密小形モータの基礎と應用, 綜合電子出版社, 1975.
- [2] H. Asada, T. Kanade, et al., "Design Concept of Direct-Drive Manipulators Using Rare-Earth DC Torque Motors", Proc. of 11th ISIR, pp. 629-636, 1981.
- [3] H. Asada, K. Youcef-Toumi and R. Ramirez, "Design of MIT Direct-Drive Arm" In International Symposium on Design and Synthesis, Japan Society of Precision Engineering, Tokyo, Japan, 1984.
- [4] H. Asada and K. Youcef-Toumi "Direct-Drive Robots, Chapter 1." MIT Press 1987.
- [5] 井上, 松下電器生産技術研究所開發, (研究室紹

- 介), 日本學會誌, Vol. 4, No. 4, pp. 452-453, 1986.
- [6] R. Curran and G. Mayer, "The Architecture of the Adept One Direct-Drive Robot", Proc. of 1985 American Control Conference, pp. 716-721, Boston, 1985.
- [7] R. J. Roark and W. C. Young, "Formulas for stress and Strain," 5th Edition McGraw-Hill pp. 64-69, pp. 290-296, 1976.
- [8] R. M. Jones, "Mechanics of Composite Materials" McGraw-Hill Section 2.6, 1976.
- [9] L. A. Carlsson and R. B. Pipes, "Experimental Characterization of Advanced Composite Materials" Prentice-Hall, New-York, pp. 31-34, 1987.
- [10] 직접구동방식 로봇의 개발과 그 응용에 관한 연구(II) 과학기술처, 1989.