

◆ 특집 ◆ 산업용 듀얼 암 로봇(AUTOMAN) 개발

산업용 듀얼 암 로봇용 중공형 서보 조립체 개발

Development of Hollow-type Servo Assembly for Industrial Dual Arm Robot

이영진¹, 고석조^{2,✉}, 윤영진³, 이재욱³, 박경택⁴, 박찬훈⁴, 신용재⁴, 신윤성⁵
Young Jin Lee¹, Seok Jo Go^{2,✉}, Young Jin Yoon³, Jae Yook Lee³, Kyoung Taik Park⁴, Chan Hun Park⁴,
Yong Jae Shin⁴ and Yoon Seong Shin⁵

1 (주)오토파워 (AUTOPOWER Co. Ltd)

2 동의과학대학 컴퓨터응용기계계열 (Division of Mechanical Engineering, Donggeui Institute of Technology)

3 부산대학교 지능기계공학과 (School of Mechanical and Intelligent Engineering, Pusan National University)

4 한국기계연구원 로봇/지능기계연구실(Department of Robotics & Intelligent Machinery, Korea Institute of Machinery and Materials)

5 위아주식회사 (WIA Cooperation)

✉ Corresponding author: sjgo@dit.ac.kr, Tel: 051-860-3152

Key Words: Dual Arm Robot (듀얼 암 로봇), Hollow-type (중공형), Servo Assembly (서보 조립체), Servo Motor (서보 모터), Electric Break (전기 브레이크), Harmonic Drive (하모닉 드라이브), Multi-turn Encoder (멀티 턴 인코더)

1. 서론

산업용 듀얼 암 로봇(industrial dual arm robot)은 기존의 수직 다관절 로봇과 달리 사람의 양팔처럼 양팔의 협력 작업을 구현할 수 있는 로봇이다. 듀얼 암 로봇은 기구학적으로 좁은 공간에서 자유로운 움직임이 가능할 수 있어야 하며, 운동 영역을 확대하기 위해 전원 케이블 및 각종 신호선들이 외부로 노출되지 않아야 한다. 아울러 같은 작업 범위에서도 경량이면서 큰 가반하중을 들 수 있는 구조일수록 장점을 가지게 된다.¹

이를 위해 듀얼 암 로봇이 가져야 하는 가장 큰 특징 중의 하나는 모듈형 타입의 축 결합구조와 중공형 서보 조립체를 이용한 구동부 그리고 동일한 가반하중 대비 경량화 설계 기술 등이다. 모듈형 타입의 축 결합구조는 로봇의 기구학적인 결합에 의해 결정되는 것으로 본 연구에서는 야스카와(YASKAWA) 타입의 결합 구조를 가지도록 설계하였다.¹ 그리고 중공형 서보 조립체는 로봇의 각 관절에 들어가는 모든 서보 모듈이 중공형 형태를 가지는 것을 말하며, 중공형 감속기, 중공형

서보모터, 중공형 브레이크, 중공형 인코더, 프레임 및 튜브 등이 하나의 프레임에 일체형으로 조립되어 로봇의 각 관절을 구동하는 조립체를 말한다.^{1,2}

기존의 수직 다관절 로봇의 경우에는 중실형(solid arm type) 액추에이터(actuator)를 이용하여 제작됨으로써 해서 암의 각 관절에 장착된 모터와 관련 전원선, 센서선, 공압선 등 각종 케이블들이 로봇의 외부에 노출되거나, 로봇 프레임 내부로 실장할 경우 이를 위한 별도의 프레임 공간이 요구된다. 따라서 로봇의 자유도가 올라감에 따라 복잡한 모션을 구현할 시 케이블의 꼬임, 외부 마찰에 의한 케이블의 마모, 프레임 공간 증가에 따른 로봇의 무게 증가 그리고 이로 인한 서보부의 용량 증가 등과 같은 문제를 가지고 있다. 반면, 중공형(hollow shaft arm type)은 각 관절의 구동부가 중공인 것으로 중공인 공간을 통하여 각종 케이블을 로봇의 내부로 치구할 수 있어 케이블로 인한 작업상의 제약이나 수명의 제한 등에 있어서 장점을 가지며, 별도의 케이블을 위한 프레임 공간이 필요없어 경량화한 로봇을 구현할 수 있게 한다.

그러므로 모듈형 로봇의 경우 케이블의 내장화는 필수적이다.

동일한 작업범위와 동일한 가반하중에서 로봇의 경량화는 자원과 에너지를 절약할 수 있는 장점을 가지며 특히 모바일과 같은 환경에서는 보다 큰 장점을 가지게 된다. 이를 구현하기 위해서는 중공형 서보 조립체의 각 모듈을 부품 단위에서 경박 단소하게 하는 방법과 이를 결합하는 방법에서 최소화하는 방법 그리고 로봇의 프레임과 조립체의 프레임을 일체화시키는 방법 등이 있다.

본 논문에서는 경량이면서도 가반하중이 크며 좁은 공간에서도 자유로운 거동이 가능한 듀얼 암 로봇을 만들기 위하여 필요한 중공형 서보 조립체를 설계, 제작하고 이를 모듈형으로 구현하기 위한 방안을 제시하고자 한다.

2. 듀얼 암 로봇

듀얼 암 로봇에 대한 독자 기술 확보와 신규 시장 창출에 미리 대비하기 위해 본 연구의 선행 연구에서는 산업용 듀얼 암 로봇의 설계 및 제어 기술을 확보하고자 하였다.^{3,4} 선행 연구에서 개발된 듀얼 암 로봇은 Fig. 1 과 같이 가반중량 10 kg, 2 자유도의 몸체(torso), 각각 6 자유도의 양팔을 가지고 있으며, 로봇 제어를 위한 제어 시스템, 작업 교시기, OLP 등으로 구성되어 있다. 그러나 듀얼 암 로봇의 무게 대비 가반하중 부족, 부피와 무게 증대로 인한 서보 모터의 용량 증대, 케이블 동선에 의한 디자인의 제약 등이 문제점으로 나타났다. 본 연구에서는 중공형 서보 조립체를 개발 및 적용하여 이러한 문제점을 해결하고자 한다.

본 연구에서는 좁은 공간에서도 거동이 자유로운 모듈형 타입의 경량의 산업용 듀얼 암 로봇을 구현하기 위해 일본 (주)야스카와의 MOTOMAN DA20 을 대상으로 듀얼 암 로봇을 개발하고자 하였으며 DA20 의 주요 특징은 Table 1 과 같다.¹

상기와 같은 성능을 가지는 로봇을 제작하기 위해 듀얼 암 로봇의 기구 해석을 수행하였으며 CAE 기법을 활용한 듀얼 암 로봇의 정적, 동적 강성, 강도 해석을 수행하였다. Fig. 2 는 이를 통해 제안한 로봇의 3D 형상을 나타낸다.

중공형 서보 조립체를 로봇의 각 관절축에 적용하기 위해서는 먼저 각 축의 용량과 사양을 결정하여야 한다. 각 축별 중공형 서보 조립체의 용량은 Fig. 3 과 같이 로봇 암이 풀 리치(Full reach)

를 했을 때 주어진 시간 내에서 특정 궤적 추종 시 발생하는 최대 토크 및 정상 상태 토크를 CAE 해석을 통해 Fig. 4 와 같이 구한 후, 안전율을 적용하여 Table 2 와 같이 선정하였다.

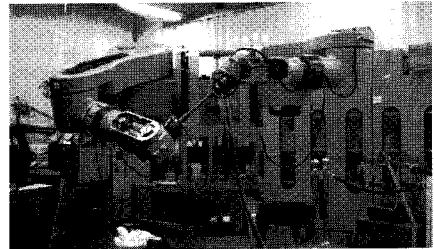


Fig. 1 Dual arm robot(solid-arm type) by previous study

Table 1 Specifications of MOTOMAN DA20

Controlled Axes	13(Right 6, left 6, rotate 1)
Payload	20kg/arm
Repeatability	±0.1mm
Mass	120kg /arm

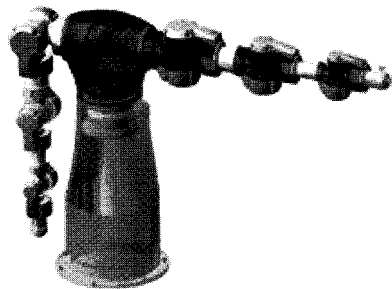


Fig. 2 Proposed light-weight dual arm robot using hollow shaft servo assembly

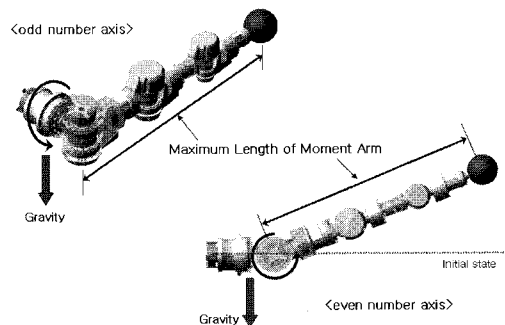


Fig. 3 Dynamic critical conditions of dual arm robot

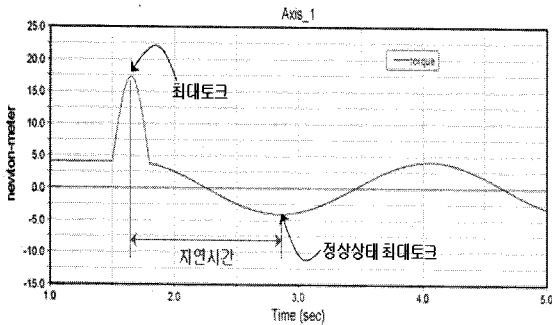


Fig. 4 Simulation result of torque response

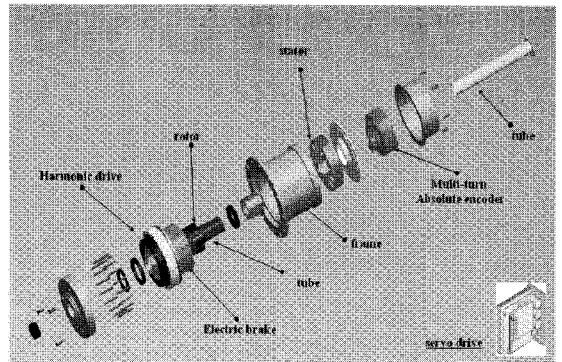


Fig. 5 Hollow-type servo assembly (exploded view)

Table 2 Final servo motor specification for each axes (safety factors are considered)

Axis	Capacity [kW]	Torque [Nm]	Velocity [RPM]
1, 2	2.0	6.8	3,000
3, 4	0.9	2.9	3,000
5	0.6	1.9	3,000
6, 7	0.4	1.3	3,000

Table 3 Diameter specification for each hollow-type servo motors

Axis	Cable Dia. [mm]		Required No. of cable	Inner Dia. [mm]
	Power & Brake	Encoder		
1	9.0	6.5	Ø6.5 : 6 Ø7.0 : 1 Ø8.0 : 4 Ø9.0 : 4	29.0
	Diameter of Hollow Shaft			35.0
2	9.0	6.5	Ø6.5 : 5 Ø7.0 : 1 Ø8.0 : 4 Ø9.0 : 4	26.6
	Diameter of Hollow Shaft			32.0
3	8.0	6.5	Ø6.5 : 4 Ø7.0 : 1 Ø8.0 : 3	24.0
	Diameter of Hollow Shaft			30.0
4	8.0	6.5	Ø6.5 : 3 Ø7.0 : 1 Ø8.0 : 2	25.0
	Diameter of Hollow Shaft			29.0
5	8.0	6.5	Ø6.5 : 2 Ø7.0 : 1 Ø8.0 : 1	21.0
	Diameter of Hollow Shaft			29.0
6	8.0	6.5	Ø6.5 : 1 Ø7.0 : 1	13.6
	Diameter of Hollow Shaft			17.0
7	7.0	6.5	Not Required	X
	Diameter of Hollow Shaft			X

다음으로 중공형 서보 조립체의 각 축별 내경을 결정하기 위하여 각 축별에 관통되는 케이블의 사양과 갯수가 검토되었다. 중공축 내로 인입되는 케이블은 크게 두 종류로 전원 및 브레이크용 케이블과 엔코더 신호용 케이블이다. 각 축별 요구되는 케이블의 종류에 따른 직경 및 케이블의 개수, 케이블 내 보호관의 관경을 바탕으로 산출된 필요 중공축 내경을 산정하였고, 이에 따라 최종적으로 요구되는 내경을 Table 3에 표시하였다.

3. 중공축 서보 조립체 개발

중공형 서보 조립체의 적용을 통해 최종적으로 개발하고자 하는 듀얼 암 로봇은 가벼우면서도 상대적으로 크기를 작게 만들 수 있다. 또한, 동적 거동 해석에 의한 로봇 암의 기구적 최적 설계를 통하여 고강성화 및 경량화 달성이 가능하다. 이와 같은 과정을 통하여 본 연구에서 개발된 중공형 서보 조립체는 Fig. 5와 같다. 서보 조립체를 구성하는 핵심 부품은 크게 중공형 서보 모터, 중공형 브레이크, 중공형 하모닉 드라이브, 중공형 멀티 턴 절대치 인코더, 서보 드라이브 등이다.

3.1 중공형 서보 모터

중공형 서보 모터에서 가장 중요한 점은 로봇 암의 모든 케이블이 서보 모터의 중공축에 인입된다는 것이다. 따라서, 가능한 중공축의 크기는 크게 하고, 동시에 중공축 엔코더와 중공형 브레이크와의 조립 및 체결에도 문제가 없어야 한다. 또한, 중공축의 회전에 의한 케이블의 마모를 방지하기 위하여 케이블 보호관의 삽입이 요구되고, 감속기의 축과의 연결 방식에 따라 축의 설계가

이루어져야 한다. Table 4 는 본 연구에서 개발된 서보 모터의 축별 사양을 나타낸다.

성능 평가를 위해 상용 중실형 서보 모터와 등포텐셜도 및 자속밀도 분포를 Fig. 6 와 같이 비교하였다. Fig. 6 에서 서보 모터의 스테이터 코어와 로터 코어는 실리콘 스틸 S18 과 S30 을 각각 사용하였으며, 자석은 Nd-Fe-B, N-35SH 을 사용하였다.

Fig. 6(a)에 제시된 상용 중실형 서보 모터의 등포텐셜 분포 및 자속밀도 분포와 Fig. 6(b)에 제시된 본 연구의 개발품인 중공형 서보 모터의 등포텐셜 분포 및 자속밀도 분포를 상호 비교함으로써 개발된 중공형 서보 모터가 상용품 대비 동등 이상의 특성을 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

3.2 중공형 브레이크

브레이크의 종류에는 여자 작동형과 무여자 작동형이 있다. 여자 작동형 브레이크는 코일에 전류가 통전되면 회전체를 제동시키는 브레이크이고, 부하가 수평 운동을 하는 기계에 적합하다. 무여자 작동형 브레이크는 코일에 전류가 통전되면 제동력은 상실하고, 회전체가 자유롭게 되는 브레이크이고, 수직 운동 기계에 적합하다. 따라서 본 연구에서는 수직 운동에 사용되고, 부피가 작고 협소한 장소에 적합한 무여자 작동 방식을 사용하여 중공형 브레이크를 개발하였다

중공형 브레이크 개발 시 고려되어야 할 사항은 각 축별 요구 토크 분석에 따른 적절한 브레이크 타입의 결정, 요구 외경 사이즈를 만족하는 최소 두께 및 최소 무게의 달성, 서보 모터의 중공축이 관통될 수 있는 허브 축의 직경 등이 있다. Table 5 는 이와 같은 고려 사항을 바탕으로 본 연구에서 개발된 중공형 브레이크의 사양을 나타낸다.

3.3 중공형 하모닉 드라이브 선정

로봇에 적용되는 감속기는 크기와 중량 대비 고평토크, 고정밀도가 필요하며, 특히 본 연구에서 요구되는 중공의 홀(hole) 크기를 만족해야 한다. 이를 위해 하모닉 시스템즈사의 중공형 하모닉 드라이브를 적용하였다.⁵

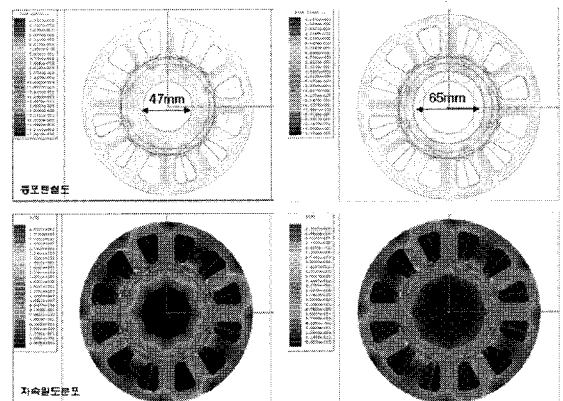
하모닉 드라이브는 소형, 경량, 고감속비, 적은 백래쉬, 그리고 높은 위치 결정 정도와 높은 토크 용량으로 로봇 및 서보 제어 시스템에 널리 사용된다. 본 연구에서는 각 축별 요구 토크, 속도, 기어비 등의 분석과 각 축의 모터와 조립이 되면서

필요 외경 및 중공 사이즈를 만족해야 하는 것 등을 고려하여 감속기를 선정하였다.

본 연구에서는 중공형 감속기의 설계를 위해 Fig. 7 과 같이 간이 유니트형 감속기를 고려하였으며 중공형 모터와의 결합을 위해 열박음을 하였다. 결합부의 제작 공차 및 토크 성능을 검증하기 위해 Fig. 8 및 Table 6 과 같이 동심도의 직각도 측정 및 열박음 비틀림 강도 해석을 수행하여 평가 기준을 만족함을 확인하였다. Table 7 은 개발된 중공형 감속기의 축별 사양을 나타낸다.

Table 4 Specification of hollow-type servo motors

Axis	Capacity [kW]	Torque [Nm]	Velocity [RPM]	Weight [kg]
1	2.0	6.3	3,000	25.9
2	2.0	6.3	3,000	
3	0.9	2.86	3,000	15.8
4	0.9	2.86	3,000	
5	0.6	3.8	3,000	14.8
6	0.4	1.3	3,000	7.0
7	0.4	1.3	3,000	



(a) commercial version (b) developed version

Fig. 6 Electromagnetic characteristics of servo motor

Table 5 Developed hollow-type break

Axis	Frictional Torque [Nm]	Weight [kg]	Outer Dia. / Inner Dia. / Thickness
1,2	6.86	2.77	147 / 51 / 38.3
3,4	2.94	1.18	104 / 41 / 36/2
5,6,7	2.45	0.54	74.8 / 26 / 29/8

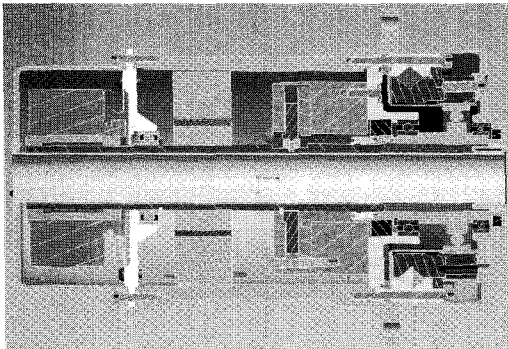


Fig. 7 Hollow harmonic drive: simplified unit type

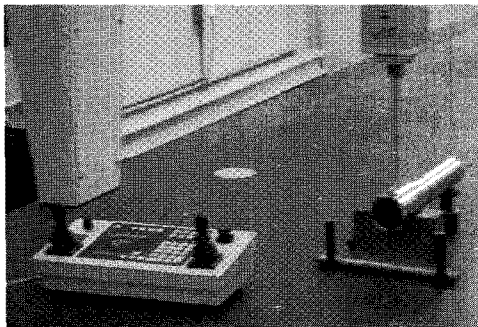


Fig. 8(a) Eccentricity check using 3D Measuring Tool

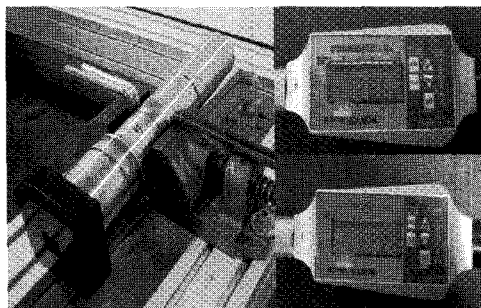


Fig. 8(b) Torsion stress measurement

Table 6 Evaluation for shaft of simplified unit type

	Spec.	Test 1	Test 2
Concentricity ₁	0.02 and less	0.0103	0.0122
Concentricity ₂		0.0047	0.0185
Dia[mm]	50 + 0.015	50.0144	49.9985
Length[mm]	300 ± 0.3	300.0625	300.1394
Torque[Nm]	More than 4.7	274.5	246.37

Table 7 Specification of applied hollow harmonic drive

Axis	Ratio	Torque [Nm]	Speed [RPM]	Weight [kg]	Outer/Inner [mm]
1,2	120	523	3,000	6.9	190 / 52
3,4	120	178	3,000	3.1	142 / 36
5,6,7	80	44	3,000	0.89	90 / 21

Table 8 Specification of applied Encoder

Axis	Resolution [bit]	Revolution [RPM]	Weight [kg]
1,2	33	1,500	2.1
3~7		3,000	1.2

3.4 중공형 멀티 턴(multi-turn) 절대치 인코더

수직 다관절 형태의 로봇은 전원의 투입이나 단절 후 재 투입 등의 문제가 발생하더라도 각 축의 각에 대한 절대 위치 정보를 가지고 있어야 한다. 그리고 본 연구에서 다루는 로봇 암은 중공형 서보 시스템이므로 레졸버(resolver)나 중공형 절대치 인코더와 같은 센서가 적용되어야 한다. 통상적으로는 1 회전 절대치 센서가 적용되나, 본 연구에서는 로봇의 각 축의 서보 모터 조립체가 120:1 또는 80:1 의 감속기와 직렬로 연결되어 있으므로 1 회전 절대치 센서는 적용이 불가하다. 따라서 120 회전 또는 80 회전 이상의 멀티 턴이 가능한 중공형 절대치 인코더를 선정하였다.⁶ 멀티 턴의 턴 수는 120:1 또는 80:1 과 같은 기어비에 의해 결정이 된다. Table 8 에서 중공형 절대치 인코더의 사양을 나타내었다.

4. 통합 및 성능 평가

각 모듈간의 조립 시 간섭 여부 및 결합성을 확인한 후 각 축별 서보 조립체를 Fig. 9 와 같이 조립하여 로봇 암을 구성하였다. 그리고 개발하고자 하는 로봇 암의 기구 설계에서는 전체 하중을 줄일 수 있도록 축별 형상을 설계 제작하였다. Fig. 10 은 본 연구에서 개발한 중공형 서보 조립체를 이용한 로봇 암의 외형을 나타내고, Table 9 는 로봇의 사양을 나타낸다. 로봇 구동 실험에서는 각 축별 서보 조립체에 대한 기동 시험을 수행하였다. Table 10 은 구동 시험 결과를 나타낸다.

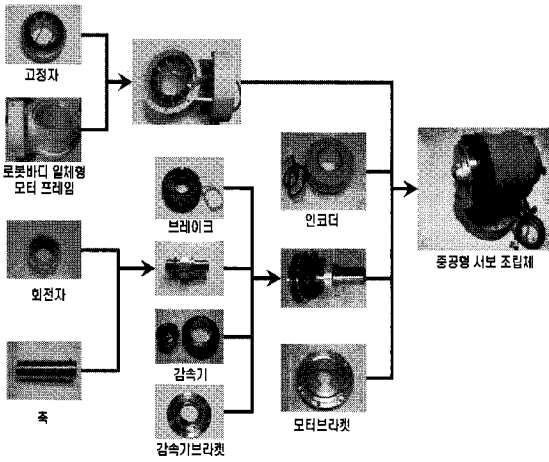


Fig. 9 Assembling sequence for servo assembly

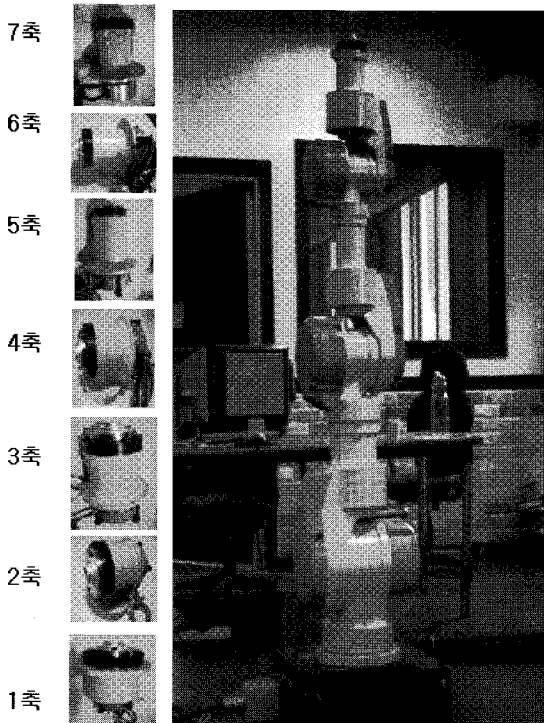


Fig. 10 Developed hollow-type robot arm

Table 9 Specification of developed Robot Arm

Content	Weight	Length	Payload
Specification	94kg	1,574mm	20kg

Table 10 Performance evaluation for Servo Assembly

	Spec.	1 axis	2 axis	3 axis	4 axis
Coil resistance	Spec./axis	0.053 ± 10%		0.551 ± 10%	
	Measurement	0.055		0.561	
Withstand Voltage	0.5mA and less	0			
Insulation resistance	More than 10MΩ	10GΩ	4GΩ	55GΩ	4GΩ
RPM	3,000	3,000			

	5 axis	6 axis	7 axis
Coil resistance	0.750 ± 10%		1.150 ± 10%
	0.772	1.216	1.250
Withstand Voltage	0		
Insulation resistance	14GΩ	∞	25GΩ
RPM	3,000		

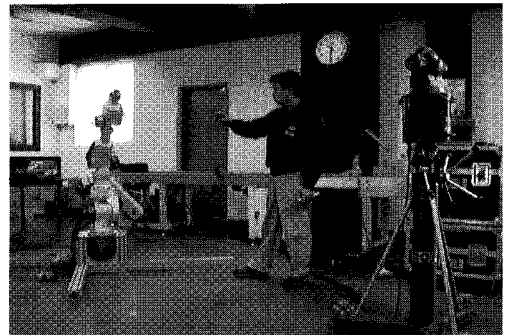


Fig. 11 Tracking Performance Test for Developed Robot

그리고 로봇 암 전체에 대한 성능 평가에서는 KS 규격에 의거하여 위치 트래킹에 대한 반복 재현 정밀도를 검증하였다. 3 차원 공간 상에 로봇이 추종해야 하는 좌표를 P1~P5 까지 지정 후, 해당 위치를 어느 정도의 오차 범위 내에서 연속적으로 트래킹(tracking)이 가능한지를 알아보기 위해서 30 회 연속으로 반복 트래킹을 수행하였다. 추종해야 하는 궤적은 P1→P2→P3→P4→P5 의 순서로 하였으며, 측정은 레이저 트래커(tracker)를 사용하였다. Fig. 11 은 반복 정밀도에 대한 시험 현황을 나타내며, Fig. 12 는 트래킹해야 할 궤적을 보여주고 있다.

이상과 같은 시험 환경 내에서 수행된 로봇의 반복적 위치 추정에 대한 결과는 Table 11 과 같다. P1~P5 에 대한 평균 반복 정밀도는 $\pm 0.05\text{mm}$ 이내로 측정되어 위치 추종 성능은 만족스러운 것으로 확인되었다.

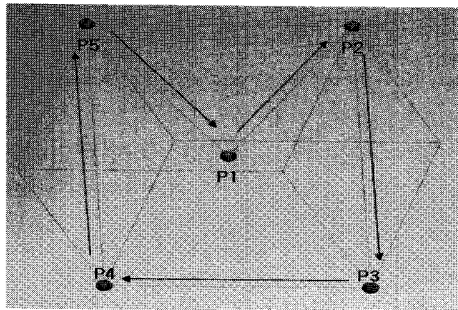


Fig. 12 3-Dimensional target trajectory

Table 11 Result of repeatability test

No of point	x axis			repeatability
	avr	min	max	
1 point	131.397	-0.032	0.035	$< \pm 0.05\text{mm}$
2 point	-10.382	-0.026	0.035	
3 point	0.037	-0.015	0.027	
4 point	266.166	0.013	0.046	
5 point	275.881	-0.034	0.045	

5. 결론

본 연구에서는 중공형 서보 조립체를 이용하여 듀얼 암 로봇 개발에서 요구하는 로봇 암의 경량화, 소형화 그리고 고강성화를 이루고자 하였다. 이를 위해 중공형 서보 모터, 중공형 브레이크, 중공형 하모닉 드라이브, 중공형 멀티 턴 절대치 인코더 등을 설계 제작하여 중공형 서보 조립체를 개발하였다. 그리고 중공형 서보 조립체에 의해 개발된 로봇에 대한 구동 실험에서는 각 축별 서보 조립체에 대한 동작 상태를 확인하였다. 따라서 듀얼암 로봇의 개발에서 나타난 로봇의 무게 대비 가반하중 부족, 부피와 무게 증대로 인한 서보 모터의 용량 증대, 케이블 동선에 의한 디자인의 제약 등의 문제점을 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지역산업중점기술개발사업(과제번호:10025003)의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. YASKAWA Co. Ltd., <http://www.motoman.com>
2. DLR, <http://www.dlr.de/en/>
3. Go, S. J., Lee, Y. J., Boo, K. S. and Shin, Y. S., "Development of Control System and OLP for Dual Arm Robot," International Symposium on Advanced Intelligent Systems, pp. 636-640, 2007.
4. Go, S. J., Han, H. G., Lee, Y. C., Jung, C. G., Shin, Y. S. and Lee, Y. J., "Study on Development of Hollow Shaft Servo Assembly for Dual Arm Robot," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 43-44, 2008.
5. Samick HDS, <http://www.samickhds.co.kr>
6. Tamagawa Seiki, <http://tamagawa-seiki.com>