

## ◆ 특집 ◆ 산업용 듀얼 암 로봇(AUTOMAN) 개발

## CAE 기법을 활용한 듀얼 암 로봇의 정적/동적 강성, 강도 설계

## Static/Dynamic Stiffness and Strength Design of Dual-Arm Robot using CAE Technique

이재욱<sup>1</sup>, 유원석<sup>2,✉</sup>, 한현규<sup>3</sup>, 이영철<sup>3</sup>, 이영진<sup>3</sup>  
Jae Wook Lee<sup>1</sup>, Wan Suk Yoo<sup>2,✉</sup>, Hyun Gyu Han<sup>3</sup>, Young Chul Lee<sup>3</sup> and Young Jin Lee<sup>3</sup><sup>1</sup> 부산대학교 기계공학부 대학원 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)<sup>2</sup> 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)<sup>3</sup> (주)오토파워 (AUTOPOWER Co. Ltd)

✉ Corresponding author: wsyoo@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2328

Key Words: Dual Arm Robot (듀얼 암 로봇), Static Stiffness/Strength Design (정적 강성/강도 설계), Dynamic Stiffness/Strength Design (동적 강성/강도 설계), Frequency Response Analysis (주파수 응답 해석)

## 1. 서론

본 연구의 목표는 양팔을 사용하여 협조 작업이 가능한 듀얼 암 로봇에서 서보 조립체 지지부의 정적 및 동적 강성/강도 해석을 수행하여 설계 초기에 발생할 수 있는 강성/강도 특성 상의 문제점을 사전에 예측하고 수정, 보완함으로써 안정적인 성능을 확보한 모델을 제안하는 것이다.

듀얼 암 로봇은 기존의 싱글 암 로봇의 작동 한계를 극복하고, 사람이 직접 두 손을 사용하여 작업하는 방식의 협조 정밀 작업이 가능해 고도의 작업성이 요구되는 산업체 분야에 적용되고 있는 추세이다. 이러한 듀얼 암 로봇이 고도의 정밀도를 가지도록 제어하기 위해서는 서보의 정적 무게 뿐만 아니라 작업 시 동적인 하중에 대한 변형도 고려하여 서보 조립구조의 설계가 이루어져야 한다. 로봇 암의 무게는 동적 작업 시 로봇의 동적 강성/강도에 직접적인 영향을 미치므로 무게를 줄임과 동시에 강성/강도를 보강하는 방법을 찾아야 한다. 그러나 로봇의 동적인 작동 성능을 결정하는 모터의 경우, 그 사양이 한번 결정되고 나면 더 이상의 수정이나 무게 절감 작업이 불가능하므로 서보의 무게를 지지하고, 목표로 하는 동적인 강성/강도를 확보하기 위해서는 서보 조립체 지지

부의 사전 성능 검증을 통한 신뢰성 설계가 반드시 필요하다.

최근 산업체의 많은 분야에서 초기 설계 단계의 반복적인 설계 시간이나 제작 비용의 절감을 위해 CAE(Computer Aided Engineering)<sup>1-3</sup> 기법이 널리 활용되고 있다. 본 연구는 설계 초기 단계에서 서보 조립체의 정적 및 동적 강성/강도 성능을 사전 검증하기 위하여 CAE 기법을 활용함으로써 반복되는 수정 및 제작에 소요되는 비용 및 시간의 절감, 설계 품질의 안정화를 이루기 위한 목적으로 수행되었다. 우선 싱글 암을 대상으로 정적 강성 해석을 수행하여 목표로 하는 성능을 나타내는 최적의 서보 조립체 지지부 모델을 설계하였고, 다물체 동역학 기반의 극한 거동 해석을 수행함으로써 발생한 하중 이력을 이용하여 비선형 동적 강도 해석을 수행하여 구조적 안전성을 평가하였다. 그리고 제안된 모델을 사용하여 유연 다물체 동역학(Flexible Multibody Dynamics)<sup>4</sup> 기반의 듀얼 암 모델을 모사하여 듀얼 암 모델의 동적 거동 시 발생하는 강성/강도 성능을 평가하여 제안된 서보 지지부 구조의 신뢰성을 검토하였다. 마지막으로 제안된 듀얼 암 로봇의 거동 시 진동 해석을 수행함으로써 주파수 영역에서의 로봇 동강성의 변화에 관해서도 검토하였다.

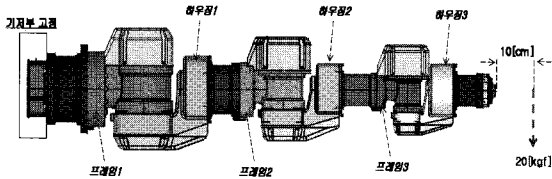


Fig. 1 Static stiffness analysis model of single arm

Table 1 Requirements of stiffness and strength analysis

	Stiffness	Strength
Load	20 kgf at 10 cm from end point	
Requirement	≤ 4.5 mm	No facture

Table 2 Material property

	E [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_r$ [MPa]	$\epsilon_r$ [%]
AC4CH	72397.8	197.2	271.6	3.1

2. 정적 강성 해석

서보 조립체 지지부는 Fig. 1 과 같은 싱글 암에서 총 7 개 서보 모터를 지지하는 각각 3 개의 프레임과 하우징을 의미한다. 이러한 지지부의 구조의 강성 설계를 위해 Table 1 과 같은 하중 조건과 요구 조건을 이용하여 정적 해석을 수행하였다. 그리퍼를 고려하여 암의 끝 단보다 10cm 전방에 정적인 가만하중 20kg 을 부차하였고 로봇 암이 최장으로 뻗었을 경우를 고려하였다. 해석에 적용된 프레임과 하우징의 물성치는 Table 2 와 같으며, 여기서 E 는 탄성계수,  $\sigma_y$  는 항복 강도,  $\sigma_r$  는 파단 강도 그리고  $\epsilon_r$  는 파단 신율을 의미한다.

Fig. 2 와 같은 강성 해석을 통해 주어진 요구 조건인 정적 처짐 4.5mm 를 만족시키기 위해, Fig. 3(a), Fig. 3(b) 그리고 Fig. 3(c)와 같은 국부적인 수정을 수행하였으며, 그 결과, Table 3 과 같은 강성 성능을 가지는 서보 조립체 지지부를 제안할 수 있었다. Table 3 의 해석 결과는 각 하우징과 프레임이 로봇 암 끝단의 강성에 미치는 변형량 정도를 나타낸 것으로 제안된 조립체 지지부의 구조가 요구하는 강성 기준을 잘 만족하고 있는 것을 알 수 있으며, 하우징 1 의 강성이 전체 강성에 미치는 영향이 매우 지배적임을 알 수 있다.

하우징과 프레임은 각각 케이블의 동선을 확보하기 위해 중공형 타입으로 제안되었고, 하우징 구조는 모터의 연결을 위해 'L' 자형으로 제안하였

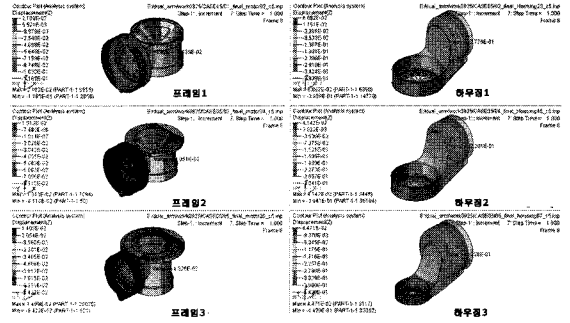


Fig. 2 Static Stiffness analysis for servo assembly supporter structures

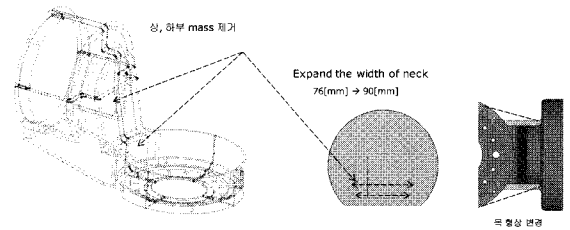


Fig. 3(a) Local Modification lists; local shape change

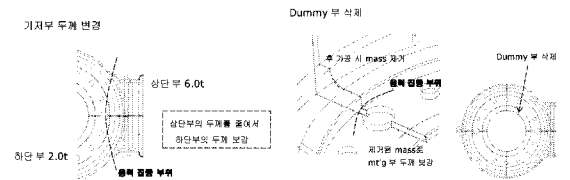


Fig. 3(b) Local Modification lists; base thickness change

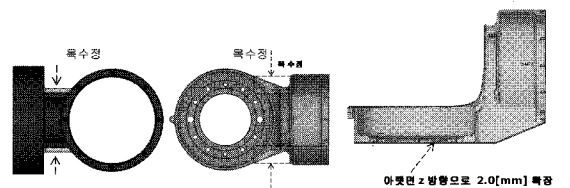


Fig. 3(c) Local Modification lists; width enlargement

Table 3 Stiffness analysis results of dual arm robot

part	deflection	part	deflection
Frame 1	0.62 mm	Housing 2	0.80 mm
Housing 1	1.86 mm	Frame 3	0.22 mm
Frame 2	0.26 mm	Housing 3	0.50 mm

\* Total Deflection at end point 4.26mm (< 4.5mm)

으며, 프레임 구조는 로봇 팔의 길이를 축소하여 기저부의 무게를 줄이기 위해 방법으로 중공형과 모터 지지부를 하나의 일체 구조로 가져가는 'U' 자형 구조를 제안하였다.

### 3. 동적 강도 해석

제안된 모델의 강도 평가는 정적 강성 해석보다 동적 강도 해석을 통해 평가하는 것이 더 타당하다. 그러므로 다물체 동역학 해석 프로그램인 ADAMS<sup>5</sup>를 이용하여 모터의 회전속도, 감속비, 가반 하중 등을 고려한 동역학적 싱글 암 해석 모델을 Fig. 4 과 같이 구현하였다. 1~4 축은 1/120 의 감속비, 5~7 축은 1/80 의 감속비를 가지며 각 축에 걸리는 최대 토크를 산출하여 동적 강도 해석의 입력으로 사용하였고, 로봇 팔의 관성이 가장 커지는 극한 조건의 경우에 대하여, 각 모터의 정격 속도 3000 rpm 에 도달하는 시간을 0.5 초로 설정하여 해석하였다. 도달 시간 0.5 초는 실제 사용 시간보다 더 짧은 시간이므로 실제 사용보다 더 큰 관성력을 유발해 더 큰 토크를 계산함으로써 하우징 및 프레임의 강도 성능에 안전율을 확보할 수 있도록 하였다. Fig. 5(a)는 하우징에 부착된 국부 좌표계를 보여주며, 3 차원 동적 거동 시 그 국부 좌표계에 발생하는 모터의 반력과 모멘트 하중 이력을 Fig. 5(b)와 5(c)에 각각 나타내었다. 하우징에 걸리는 하중은 최대 853.0 N 의 하중과 207.8 Nm 의 모멘트가 걸리는 것으로 나타났다.

이상으로 다물체 동역학 모델의 극한 조건에서 구한 동하중 이력을 바탕으로 싱글 암의 과도 동적 거동 해석을 수행하였다. 비선형 유한요소 해석 프로그램의 암시적 동역학(implicit dynamic) 기법을 이용하여 Fig. 5(b)와 5(c)와 같은 과도 하중과 모멘트 이력을 하우징의 연결 지점에 입력하여 해석하였다. 5 초 이상의 구간에서는 과도 구간에 비해 적은 하중이 발생하는 정상상태 선회 운동을 하므로 동적 강도 해석 역시 6 초까지만 해석을 수행하였다. 6 초 과도 동 해석 동안 발생하는 최대 주 응력 선도와 하우징에서 발생하는 최대 주 응력 이력 선도를 Fig. 6(a)와 6(b)에 각각 보여준다. 재료의 파단 강도는 271.6 MPa 인데 비해, 극한 조건에서도 172.5 MPa 의 최대 주 응력이 발생하는 것으로 판단하여 파단은 없을 것으로 사료되므로, 싱글암의 정상 거동 시에도 하우징과 프레임은 동

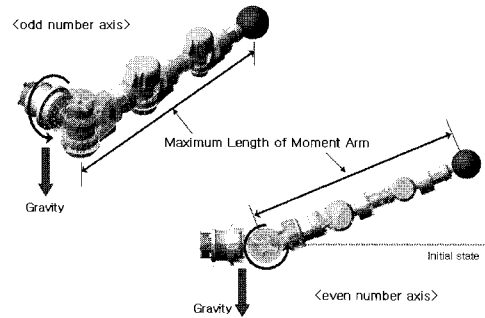


Fig. 4 Dynamic analysis model for getting critical load conditions of single arm model

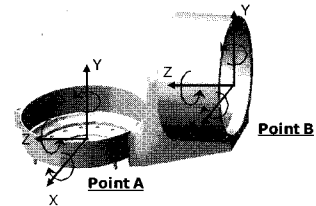


Fig. 5(a) Local coordinate system of housing structure under critical driving conditions

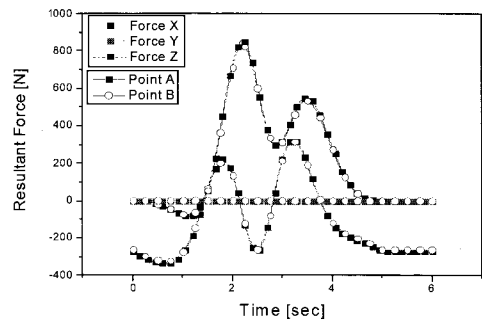


Fig. 5(b) Reaction force history under critical driving conditions

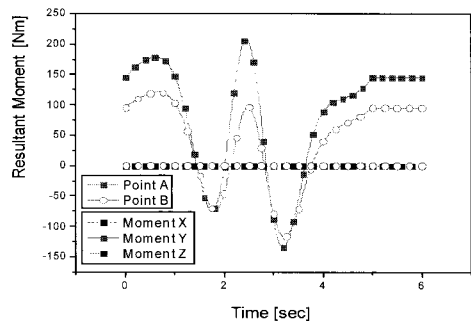


Fig. 5(c) Reaction moment history under critical driving conditions

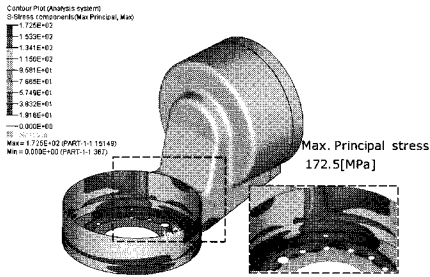


Fig. 6(a) Transient dynamic strength results under critical conditions: Max. principal stress contour

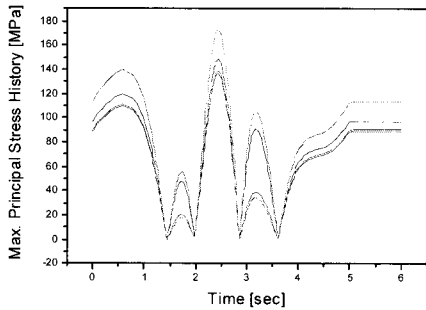


Fig. 6(b) Transient dynamic strength results under critical conditions: Max. principal stress history

적 강도 상 안전할 것으로 판단된다.

듀얼 암 모델은 Fig. 4 에서 제안한 싱글 암 모델을 상, 하부 몸체로 연결한 Fig. 7 과 같으며, 7 자유도 싱글 암 두개와 상, 하부 몸체의 사이에 1000rpm, 22.1Nm 사양의 몸체부 모터를 가지는 전체 15 자유도 모델이다. Table 4 는 듀얼 암의 구성품이 몸체 모터 축에 관하여 가지는 회전 관성을 의미하며, 다물체 동역학 해석 결과, 몸체 부 모터는 Fig. 8 과 같은 최대 속도 11.24rpm 과 최대 토크 18.8Nm 를 낼 수 있는 것으로 판단된다.

상부 몸체의 강도 성능을 평가하기 위한 방법 역시, 서보 조립체 지지부의 강도를 평가하기 위해 수행한 강도 해석과 동일한 방법을 사용하였다. 상부 몸체가 상기에 기술한 바와 같이 최대 성능으로 회전하고, 동시에 양팔이 기저부 모터의 극한 조건으로 회전할 때 발생하는 하중과 모멘트의 이력을 Fig. 9 와 같이 추출하였다. 추출된 하중과 모멘트 이력에서 최대 하중 655.9N 과 최대 모멘트 643.6Nm 가 각각 발생하였으며, Fig. 10 과 같이, 이상의 하중에 의해서도 상부 몸체의 최대 주 응력은 20MPa 로써 상부 몸체는 극한 조건에도 파손은 없을 것으로 판단된다.

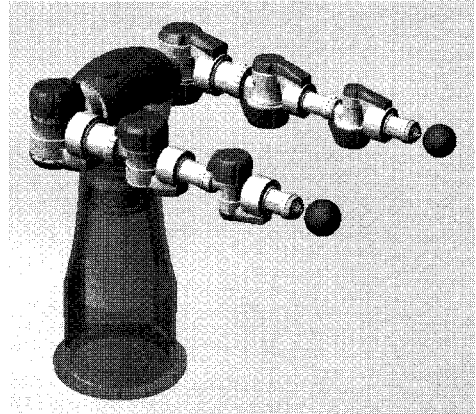


Fig. 7 Transient dynamic stiffness analysis model based on flexible multibody dynamics using ADAMS

Table 4 Inertia property w.r.t. body motor axis

	Arm	Body	Motor	Total
Inertia [kgm <sup>2</sup> ]	105.2	0.83	10.9E-4	106.1

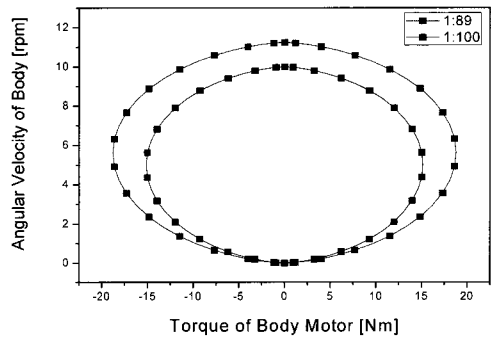


Fig. 8 Angular velocity vs Torque of body motor w.r.t. reduction gear ratio

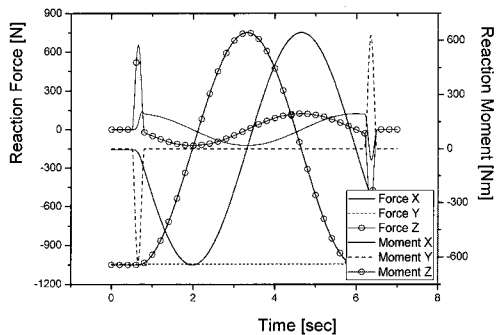


Fig. 9 Reaction force & moment at body's arm point

### 4. 동적 강성 해석

#### 4.1 고유 진동 해석(Normal Mode Analysis)

3장에서 수행한 과도 동적 비선형 강도 해석의 경우, 동적 거동 시의 프레임과 하우징의 강도 평가는 가능하나 로봇 암의 끝단 부에서의 강성 평가는 불가능하다는 단점이 있다. 그러므로 본 연구에서는 듀얼 암 모델의 동적 거동 시 강성을 직접적으로 평가하기 위해 유연 다물체 동역학의 기법(Flexible multibody dynamics)<sup>4,5</sup>을 이용하였다. 먼저 유한요소 모델의 고유 모드(normal mode) 해석을 수행하여 질량과 강성의 모달 행렬(modal matrix)를 구성하고 ADAMS의 MMF(Modal Neutral File)<sup>5</sup>를 생성하여 유연체를 구성하였다. 그리고 Fig. 11과 같이 왼쪽 싱글 암을 대상으로, 상대적으로 강성이 약한 3개의 하우징(황색)과 3개의 프레임(하늘색), 그리고 상부 몸체(보라색)를 유연체로 변경하였다. 로봇 암의 고주파 작업 시 진동(chattering)을 고려하기 위해 10번째 고유진동 모드까지 해석에 포함시켰으며, 기본 고유진동수의 결과를 Table 5에 나타내었다. 고유진동 모드 해석 결과 모든 유연체의 기본 진동수가 1000Hz 이상으로, 전반적인 구조 동강성이 각 단품의 경우에는 매우 높음을 알 수 있다.

#### 4.2 치 물림 강성 효과

본 연구의 듀얼 암에 사용된 서보 조립체에는 하모닉 드라이브(harmonic drive)를 사용한다. 하모닉 드라이브는 1개의 치가 물려 큰 감속비를 통한 토크를 전달함으로 치 강성뿐만 아니라 하모닉 드라이브 측면 축에 관한 비틀림 강체 운동이 발생할 수 있다. 그러므로 동적 강성 해석 시에 이에 대한 고려가 필요하다.

치 강성의 경우, 제품 매뉴얼(Harmonic Drive Unit Manual)<sup>6</sup>에 3141.6Nm/deg 로 그 값이 주어진 반면, 하모닉 드라이브 측면 축에 관한 비틀림 강성은 알 수가 없다. 그러므로 본 연구에서는 드라이브의 비틀림 강성에 관한 저차 모드를 실험적 모드 해석 기법(Experimental Modal Analysis)<sup>7,8</sup>을 통해 구하고 그 저차 모드가 나오기 위한 치물림 비틀림 강성을 역으로 추정하여 사용하였다. Fig. 12와 같은 실험의 결과로부터 나온 기본 고유진동수는 10.8Hz이다. 이는 전체 싱글 암의 무게 86kg을 고려하더라도 매우 낮은 저차 모드이고 로봇 암의 동적 강성에 큰 영향을 미치는 주요 인자이므로,

치 물림 비틀림 강성을 고려하기 위하여 비틀림 축 방향 회전 조인트와 Table 6과 같은 비틀림 강성을 사용하여 10.8Hz의 저차 모드를 모델에 추가하였다. 추가된 저차 모드 형상은 Fig. 13과 같다.

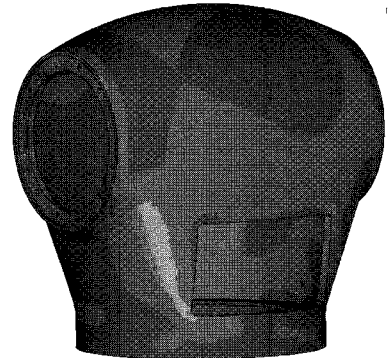
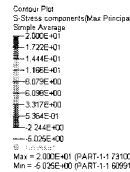


Fig. 10 Max. principal stress contour at 0.65 sec

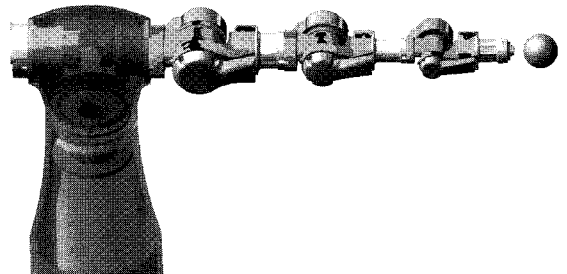


Fig. 11 Flexible multibody dynamics model; 7 flexible bodies

Table 5 Fundamental natural frequency of flexible bodies

Body	Freq. [Hz]	Body	Freq. [Hz]
Upr. Body	1064.1	-	-
Frame 1	1781.0	Housing 1	1029.8
Frame 2	2603.3	Housing 2	1358.8
Frame 3	3383.2	Housing 3	1671.6



Fig. 12 Experimental modal analysis to find the torsion stiffness of harmonic drive

Table 6 Torsion stiffness of harmonic drive for analysis

Motor	stiffness	Motor	Stiffness
Motor 1	3528.0	-	-
Motor 2	3024.0	Motor 5	4536.0
Motor 3	4032.0	Motor 6	5040.0
Motor 4	4032.0	Motor 7	5040.0

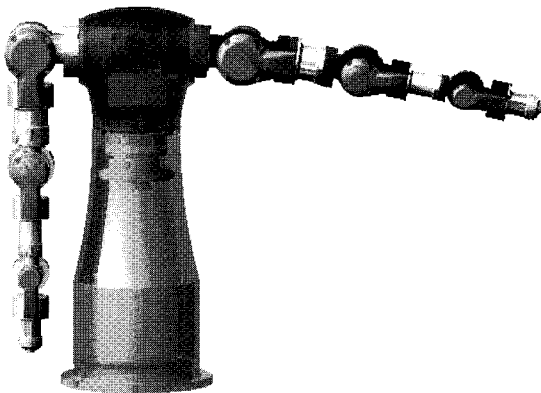


Fig. 13 Rigid body mode due to torsion stiffness of harmonic drive

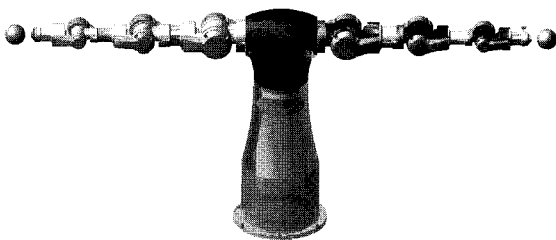


Fig. 14(a) Stress contour of flexible single arm under static deflection

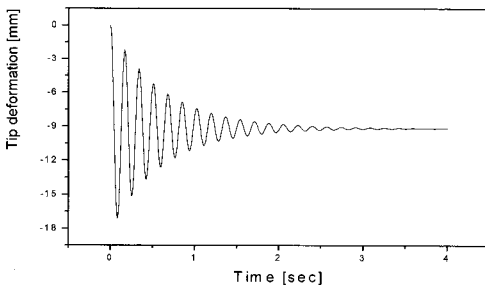


Fig. 14(b) Tip deflection of flexible single arm under static deflection

### 4.3 듀얼 암의 동적 강성 해석 결과

앞의 4.1 절과 4.2 절에서 총 7 개의 유연체 모델을 추가하고 치 물림 강성 효과도 듀얼 암의 동적 강성 해석 모델에 고려하였다. 듀얼 암의 양 팔 중 오른팔은 상부 몸체를 제외하고는 모두 강체로 구성되어 있고, 왼팔은 유연 서보 조립체 지지부 구조로 구성되어 있으므로 두 팔의 끝단 변형량 비교를 통해 서보 지지부의 강성 효과를 검토할 수 있다.

첫 번째로 수행한 동적 강성 해석은 Fig. 14(a)와 같은 듀얼암의 정적 처짐 해석이다. 유연체와 치물림 강성 효과를 포함한 경우, Fig. 14(b)와 같이 9.17mm의 처짐이 나타나는 것을 볼 수 있다. 2장에서 계산된 치물림 강성이 제외된 정적 처짐의 경우가 4.26mm였으므로 4.91mm가 치물림 강성에 의한 처짐량을 의미한다. 일반적으로 구조만의 강성으로 치지는 처짐량이 치물림 강성에 의해 치지는 처짐량에 비해 적으면 구조적인 강성 특성이 안정하다고 말한다. 그러므로 본 연구에서 제안한 서보 조립체 지지부의 동적 강성 특성은 하모닉 드라이브를 사용하는 경우에 타당한 것으로 판단되며, 더 정밀한 반복 정밀도를 가지는 듀얼암 로봇을 개발하기 위해서는 지지부의 구조적인 강성 보강보다는 치물림 강성이 더욱 뛰어난 드라이브를 사용하는 것이 효율적인 것으로 판단된다.

두 번째로 수행한 동적 강성 해석은 양팔을 뺀 Fig. 14(a)의 상태에서 몸체 모터의 구동 및 제동에 따른 가반 하중 끝단의 변형량을 평가하였다. 몸체 부 모터를 0.3 초 이내에 정상상태로 구동 및 제동을 완료하는 조건으로 유연 싱글 암의 각 방향 변형량은 Fig. 15와 Table 7과 같다. y 축의 경우 중력에 의한 변형량으로 큰 의미는 없으나, z 축의 경우 구동과 제동 시 각각 8.58mm 정도의 변형이 발생하고, x 축의 경우 최대 5.48mm의 변형이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 유사한 방법으로 각 축의 모터에 모터 입력을 가하면 임의의 동적 거동 조건에 대한 강성/강도의 평가도 가능할 것으로 판단된다.

### 4.4 듀얼 암 거동 시 주파수 특성의 변화

듀얼 암 로봇은 생산성 향상을 위하여 고속 동작, 적은 에너지 소모 및 높은 위치 정밀도 보장 등이 요구된다. 작업 중에 충격 하중이나 급제동, 급가속 시의 진동 문제를 해결하기 위해 주로 시스템의 상태 방정식을 이용한 다양한 디지털 최적

제어 및 최적 관측기 이론을 적용<sup>7</sup> 하고 있지만 진동 제어에 대한 내용은 본 연구의 범주를 넘어서므로 언급하지 않겠다. 그러므로 본 연구에서는 제안된 서보 지지부 구조가 적용된 듀얼 암 로봇이 작업 동작 중에 어떠한 주파수 특성의 변화를 일으키는지에 대한 평가를 수행하여 듀얼 암 로봇의 진동 제어에 가이드 라인을 제시하고자 한다.

Fig. 16(b)는 듀얼 암이 Fig. 16(a)의 세가지 자세 변화에 따른 주파수 응답 특성의 변화를 보여준다. Fig. 16(b)의 첫 두 개의 peak는 치 물림 비틀림 강성에 기인한 1 차, 2 차 굽힘 모드를 의미한다. 서보 조립체 지지부의 구조적인 변형 모드에 기인한 주파수 응답 곡선은 state 3의 듀얼 암 상태 기준에서 70.2Hz 에서 발생하며, 이는 Fig. 17 과 같이 하우스징 1 와 하우스징 3, 그리고 몸체의 변형 모드에 기인하여 발생하게 된다.

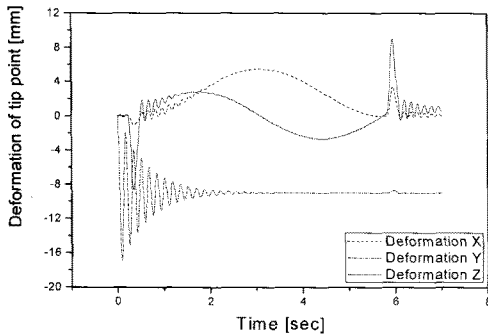


Fig. 15 Each deformation of flexible arm under body motor's driving and braking

Table 7 Maximum deformation of flexible arm under body motor's driving and braking

	x-dir	y-dir	z-dir
Deformation	5.48 [mm]	16.9 [mm]	8.58[mm]

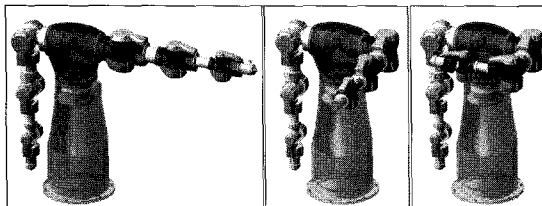


Fig. 16(a) Inertance response state: state 1(left), state 2(middle), and state 3(right)

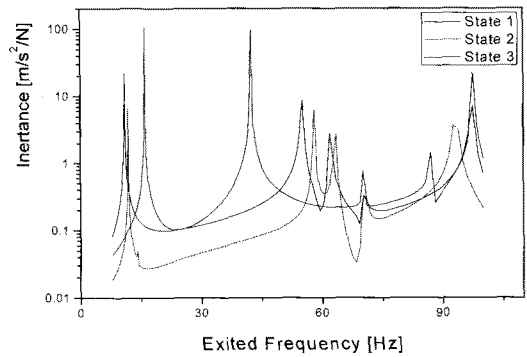


Fig. 16(b) Inertance response due to lateral input, lateral response

### 5. 듀얼 암 로봇의 제작

2~4 장의 다양한 CAE 해석을 통하여 정적 및 동적 거동에 대한 듀얼 암 로봇의 강성/강도 성능을 평가하였다. 제안된 모델을 사용하여 실제 듀얼 암 로봇을 제작하였으며, 특징은 중공형 서보 조립체를 적용함으로써 케이블의 동선 문제를 해결하여 별도의 케이블의 움직임을 위한 내부 공간이 필요없다는 것이다.

그 결과 로봇 프레임, 개별 암 및 허리부의 무게를 감소시킬 수 있었고 무게 대비 가반하중을 증가시켜 소형화, 경량화 및 고강성이라는 초기의 목적을 달성할 수 있었다. Fig. 18(a)와 18(b)는 각각 앞절에서 수행한 CAE 해석을 기반으로 제작된 실제 하우스징 구조와 프레임 구조를 보여준다. 재료는 알루미늄을 사용하였으며, 진공 주형과 가공을 통하여 제작하였다. 마지막으로 Fig. 19 는 개발된 모든 사양이 조립되어 시험 중인 중공형 듀얼 암 로봇의 모습을 보여준다.

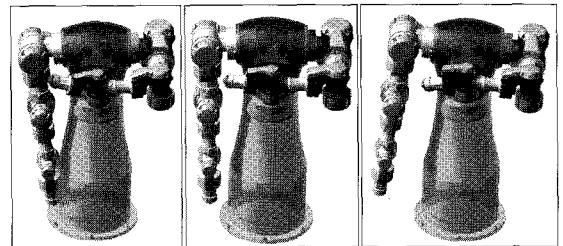


Fig. 17 Structural deformation mode at 70.2Hz due to modes of housing 1, housing 2 and upper body

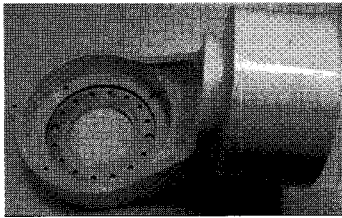


Fig. 18(a) Developed housing structure

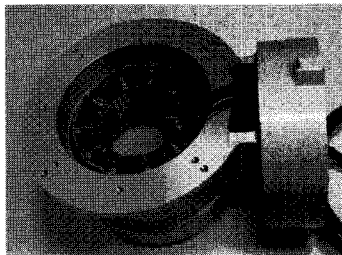


Fig. 18(b) Developed frame structure

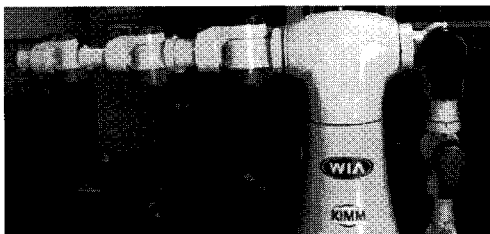


Fig. 19 Developed dual arm model

## 6. 결론

본 연구에서는 듀얼 암 서보 조립체 지지부의 설계 초기 단계에서 정적 및 동적 강성/강도 성능을 사전에 검증하여 수정 및 제작에 소요되는 비용 및 시간의 절감, 설계 품질의 안정화를 이루는데 그 목적이 있다.

초기 구조 작업 시 잦은 설계 변경에 대응하기 위해 해석 시간이 가장 짧게 걸리는 정적 강성 해석을 사용하여 요구된 강성을 가지는 서보 지지부 구조를 제안하였다. 유연 다물체 동역학 기법에는 모드 기반 유연성 기법(modal flexibility)과 노드 기반 유연성 기법(nodal flexibility)이 있으며, 각각의 강도 평가에 신뢰성이 더 높은 노드 기반 유연성 기법은 동적 강도 평가에, 로봇 거동 시 강성 평가를 거동 해석과 동시에 할 수 있는 모드 기반 유연성 기법은 동적 강성 평가에 각각 활용함으로써 두 방법의 장점, 단점을 유용하게 이용하였다. 하모닉 드라이브의 사용에 따른 치 물림 강성을

실험을 통하여 찾고 강성 해석에 추가하였으며, 100Hz 까지 듀얼 암의 진동 특성을 규명하여 제안된 지지부 구조에 기인한 변형 모드가 70.2Hz 에서 발생함을 확인하였다. 마지막으로 제안된 모델을 실제 제작하고 시험을 통해 강성/강도 성능 및 실제 사용 조건에서의 작동 성능 검토를 수행하여 신뢰성 있는 듀얼 암 로봇을 개발할 수 있었다.

## 후 기

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

## 참고문헌

1. Choi, C. J. and Lee, H. K., "CAE Application of plastic molding industry," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 31, No. 1, pp. 60-67, 1991.
2. Kim, G. S., Gil, H. M. and Yoo, W. S., "Development of a CAE Technique for Vehicle Suspension Design," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 160-168, 1998.
3. Choi, H. H., Ku, T. W., Hwang, S. M. and Kang, B. S., "A CAE Approach for Net-Shape Automobile Stamping Components of Aluminum alloy," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 16, No. 10, pp. 164-171, 1999.
4. Kim, H. S. and Kim, C. B., "Flexible Multibody Dynamic Analysis using Experimental Modal Analysis," Proc. of KSAE Spring Conference, Vol. 2, p. 791, 2002.
5. MSC.Software, "ADAMS Technical Manual, ADAMS 2005r2," MSC.Software, pp. 27-156, 2003.
6. Samick HDS, "Harmonic Drive User Manual, Engineering Data, Stiffness and backlash," Samick HDS, pp. 41-57, 2006.
7. Ewins, D. J., "Modal Testing: theory, practice and application, 2nd Edition," Research Studies Press LTD., pp. 25-276, 2000.
8. McConnell, K. G., "Vibration Testing: Theory and Practice," John Wiley & Sons, Inc., pp. 475-500, 1995.