

## 2 축 병렬로봇의 작동강성 최적설계<sup>§</sup>

이재욱\*, 장진석\*, 이상곤\*, 정명식\*, 조용재\*, 김건우\*, 유완석\*\*†

\* 한국생산기술연구원, 대경지역본부, \*\* 부산대학교 기계공학부

### Optimization of the Operating Stiffness of a Two-Axis Parallel Robot

Jae-Wook Lee\*, Jin-Seok Jang\*, Sang-Kon Lee\*, Myeong-Sik Jeong\*, Yong-Jae Cho\*,  
Kun-Woo Kim\* and Wan-Suk Yoo\*\*†

\* Korea Institute of Industrial Technology, \*\* Dept. of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received November 17, 2014 ; Revised April 14, 2015 ; Accepted April 15, 2015)

**Key Words:** High Stiffness Design(고강성 설계), Multi-body dynamics(다물체 동역학), Operating Stiffness Optimization(작동강성 최적화), Parallel Robot(병렬로봇), Topology Optimization(위상최적설계), Weight Reduction Design(경량화 설계)

**초록:** 본 논문에서는 고 중량물을 빠르게 이송시키며 ‘Pick & Place’ 작업을 수행하는 병렬로봇의 작동강성 최적설계에 대한 연구를 수행하였다. 20~30kg 의 고 중량물을 사용하여 특정 작업을 빠르게 수행하기 위해서는 빠른 응답속도를 위한 관성 기구부 경량 설계와 동시에 동작의 정밀도를 위한 고 강성설계가 필요하다. 하지만 요구조건인 관성 기구부 경량 설계와 고강성 설계는 상호 배타적인 관계이므로 본 연구에서는 다물체동역학 해석을 통해서 병렬로봇의 동적 거동을 분석함으로써 로봇의 작동 중에 작용하는 하중상태를 분석하였고, 상호 배타적인 두 성능을 동시에 만족시키기 위해 관성 기구부 위상 최적 설계를 수행하였다. 그리고 위상 최적설계 결과를 병렬로봇에 적용하여 그 신뢰성을 검증하였다.

**Abstract:** In this paper, the operating stiffness of a parallel robot used to handle heavy packages is optimized. Because the studied model, called a “pick and place robot,” is applied for packaging logistics, it is important for the robot to be lightweight so that it may respond rapidly and have high stiffness to allow sufficient operating precision. However, these two requirements of low weight and high stiffness are mutually exclusive. Thus, the dynamic characteristics of the robot are analyzed through multibody dynamics analysis, and topology optimization is conducted to achieve this exclusive performance. Lastly, the reliability of the topology optimization is verified by applying the optimized design to the parallel robot.

### 1. 서 론

일반적으로 직렬 로봇(serial robot) 형태인 수직 다 관절 로봇은 가용 작업공간(available working space)이 크다는 장점은 있지만 직렬 형태의 수직 다 관절에 기인한 구조적인 특성 상 로봇관절 내 구동부의 무게까지 관성하중(inertial load)으로 고려해야 하므로 가반 하중이 상대적으로 작고 고속의 움직임을 수행하기에 강성이 약한 단점이 있다.

이에 반해 병렬 로봇(parallel robot)은 구동부가 상부 고정체에 부착되어 구동부 자체가 관성하중으로 작용하지 않고, 폐쇄계(closed loop) 형태이므로 비교적 가반 하중이 크고 고속 작업에 유리한 장점을 가지고 있어 고속작업이나 정밀을 요하는 작업에 많이 사용되고 있다.<sup>(1~4)</sup>

본 연구에서 사용된 로봇은 Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 ‘Pick & Place’작업을 수행하는 포장 물류용 2 축 로봇이며 작동강성이라는 의미는 로봇이 동작하는 상황을 고려하여 기구부의 관성하중과 가반하중이 고려된 상태에 대한 정강성과 동강성을 의미한다. Fig. 1(a)에 2 축 병렬로봇의 부품 명칭을 나타내었으며, 다물체 동역학 해석을 위한

§ 이 논문은 2014 년도 대한기계학회 부산지회 춘계학술대회 (2014. 5. 16., 농심호텔) 발표논문임

† Corresponding Author, [wsyoo@kitech.re.kr](mailto:wsyoo@kitech.re.kr)

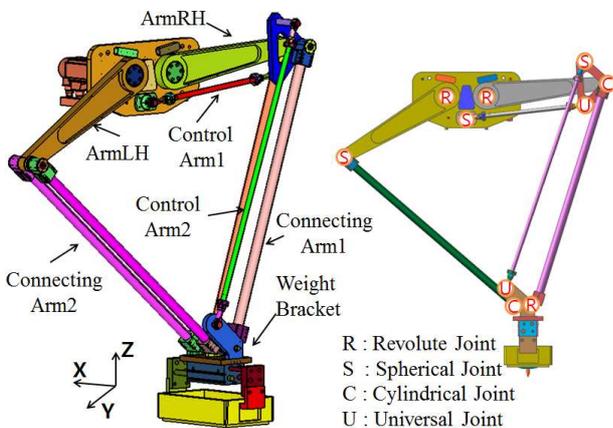
© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

모델링 정보를 Fig. 1(b)에 나타내었다. ArmLH 와 ArmRH, Control Arm1 의 경우 길이는 600mm 이며, Connecting Arm1, 2, Control Arm2 의 경우 1200mm 로 설계되었으며, 전체 가반 하중 20~30kg 급의 병렬 로봇으로 설계되었다. 이러한 고하중의 가반 하중이 고려된 상황에서 빠른 응답속도를 확보 하기 위해서는 로봇 관성 기구부의 경량화 설계가 중요하다. 게다가 빠른 작업 속도 대비 급격한 가, 감속 하중에 견디는 높은 정밀도를 확보하기 위해서는 기구부의 고강성 설계 역시 필요하다.<sup>(5-8)</sup> 하지만 이러한 경량화 설계와 고강성 설계는 서로 상반되는 성능이므로 상호 균형적인 성능확보가 중요하기 때문에 본 연구에서는 가반 하중 30kg 으로 작업을 수행하는 중에 발생하는 로봇 기구부의 하중 상태를 다물체 동역학해석을 통해 분석하고 동특성을 평가함으로써, 작동강성 취약 부위를 파악하였다. 그리고 로봇의 관성 구조 부 경량화와 고강성을 동시에 확보하기 위해 위상 최적 설계를 수행하여 병렬로봇의 관성 기구 부 작동강성 최적화를 수행하였다.

2. 병렬로봇의 강성최적설계

2.1 탄성 다물체 동역학해석 및 정강성 해석

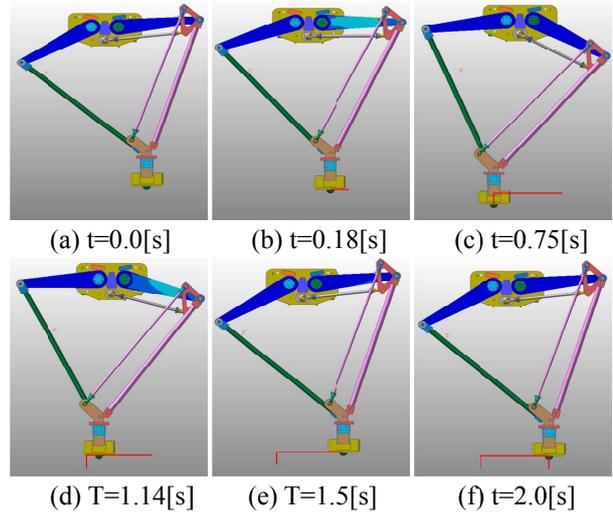
병렬로봇의 강성 최적설계를 수행하기 이전에 로봇의 동작 중에 관성 기구 부에 발생하는 하중 상태를 파악하기 위해 탄성 다물체 동역학해석과 세 방향 복합 하중에 대한 정적 강성해석을 각각 Fig. 2~3 과 같이 수행하였다. 탄성 다물체 동역학해석의 경우, 상용 동역학해석 프로그램인 Recurdyn 을 사용하여 해석하였으며, 세 방향 복합하중에 대한 정강성 해석의 경우, 비선형 유한요소해석 프로그램인



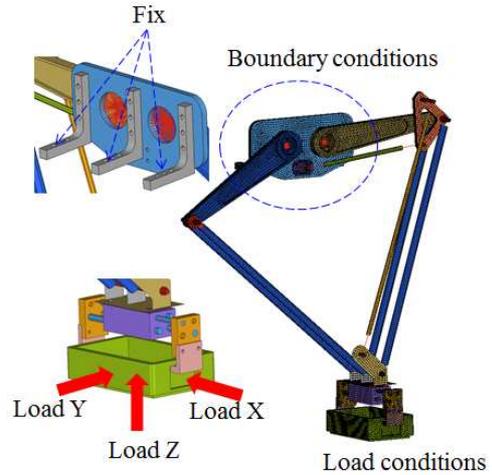
(a) Part name (b) Kinematic constraints  
**Fig. 1** Two axis parallel robot for packaging logistics

Abaqus 를 활용하였다.

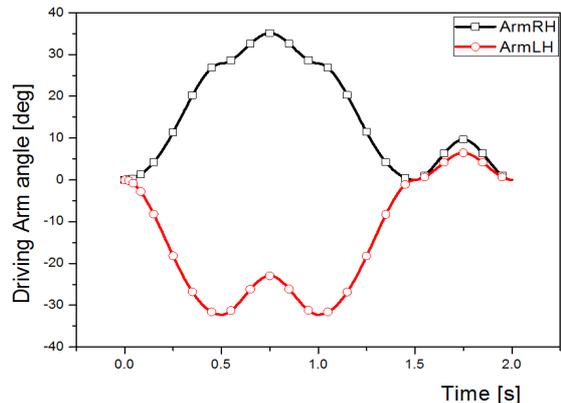
유한요소 모델과 정강성 해석 모델 및 하중 방향을 Fig. 3 에 나타내었다. 가반 하중 30kg 이 장착된



**Fig. 2** Flexible multi-body dynamics analysis results



**Fig. 3** Finite element models of two axis parallel robot



**Fig. 4** Two control arm angle under operating

상태에서 30cpm(cycle per minute)의 속도로 작업을 수행하는 로봇의 기구 부에 발생하는 응력 상태를 Fig. 2 와 같이 분석하였으며 0.14s 의 가속구간과 1.14s 의 감속구간에서 비틀림 응력이 집중되는 현상을 확인할 수 있다. ‘Pick & Place’ 작업을 수행하는 도중에 초기각 210° 를 가지는 ArmRH 의 각변위와 초기각 10° 를 가지는 ArmLH 의 각변위를 Fig. 4 에 나타내었다. 로봇의 끝 단에 X, Y, Z 세 방향 정하중이 인가되었을 경우에 대한 응력 분포를 Fig. 5 에 나타내었다.

두 ArmLH 와 ArmRH 는 비틀림 변형을 겪으며, 컨트롤암은 굽힘 변형이 발생함을 확인할 수 있으

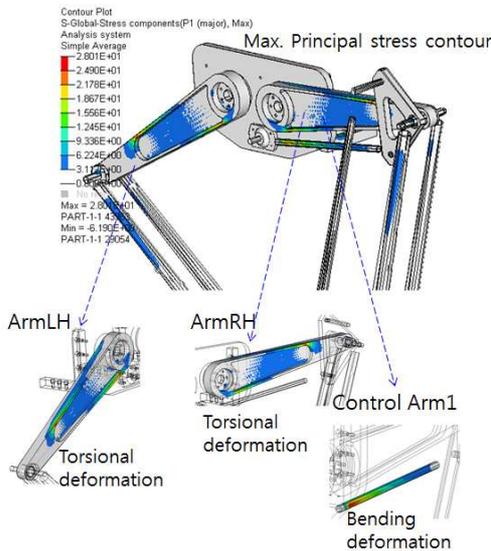


Fig. 5 Max. Principal Stress distribution under three complex static loads

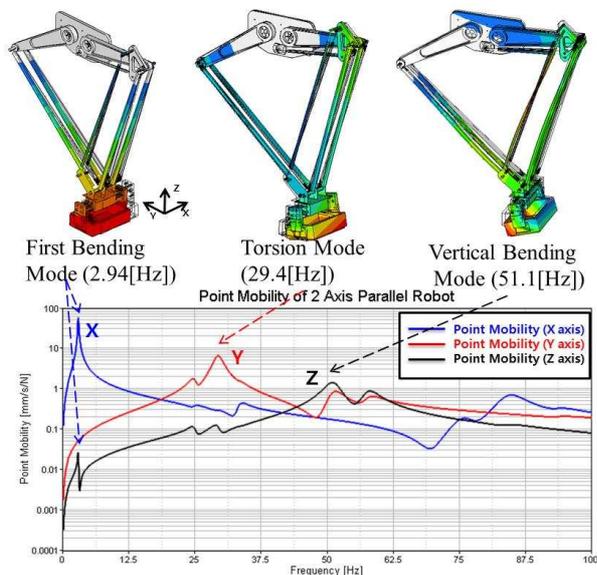


Fig. 6 Frequency response analysis results

며, Fig. 2 와 Fig. 5 의 결과로부터, 2 축 병렬 로봇의 작동 강성을 증가시키기 위해서는 ArmLH 와 ArmRH 의 비틀림 강성이 보장될 필요가 있다고 판단하였다.

2.2 동강성 해석(Dynamic stiffness analysis)

병렬로봇의 고유 진동수와 세 방향(X, Y, Z) 동하중에 대한 주파수 응답 특성을 Fig. 6 과 Table 1 에 나타내었으며, 동강성 보강을 위한 변형률 에너지 밀도 분포를 Fig. 7 에 나타내었다. 병렬로봇의 끝 단에 X, Y, Z 방향으로 1N 의 하중을 0~100Hz 로 가진 하였을 경우, 해당 병렬로봇은 Y, Z 방향 동강성 보다는 측면 방향인 X 방향 동강성이 동강성이 매우 취약한 것으로 판단되었으며 이를 지배하는 모드는 측면방향 굽힘모드로 기본 주파수가 2.94Hz 로 매우 낮아 보강이 필요한 것으로 판단하였다.

그리고 Fig. 7 에 나타낸 기본 주파수의 변형률 에너지 밀도 분포 역시 ArmRH 와 ArmLH 의 동적 변형은 비틀림 모드가 지배적이므로 로봇의 작동 강성을 보강하기 위해서는 ArmRH 와 ArmLH 의 비틀림 강성이 보장되어야 함을 알 수 있다.

2.3 위상최적설계(Topology optimization design)

앞서 언급한 바와 같이, 물류포장을 위한 병렬로봇은 응답속도를 위한 경량화뿐만 아니라 서로 상반되는 특성인 고강성 설계를 통한 정확성도 요구된다. 그러므로 본 절에서는 병렬 로봇의 관성하중은 줄이면서 작동 강성을 보강하기 위한 방법에 관하여 연구하였다.

Table 1 Natural frequency results of 2 axis parallel robot

|                | 1 <sup>st</sup> mode | 2 <sup>nd</sup> mode | 3 <sup>rd</sup> mode |
|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Frequency [Hz] | 2.94                 | 29.4                 | 51.1                 |
| Mode shape     | Lateral              | Torsion              | Vertical             |

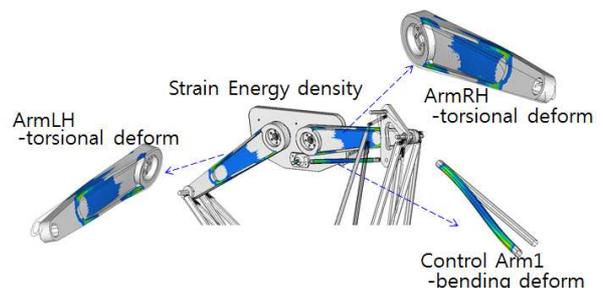


Fig. 7 Strain energy density of fundamental mode

먼저 Fig. 8 과 같이, 현재 설계된 ArmLH 의 비틀림 강성 특성을 파악하였으며, Fig. 9 와 같은 위상 최적설계(Topology optimization)을 수행하였다. 위상 최적설계의 경우, 상용 최적설계 프로그램인 Opti-Struct 를 사용하여 해석하였으며, Fig. 9 에서 확인할 수 있는 바와 같이, 설계변수를 구동 모터와 연결되는 링크 결합 부(Non-design region)를 제외한 나머지 영역을 모두 위상 최적설계 가능 영역(Design region)으로 정의하였고, 목적함수는 ArmLH 의 축 방향 회전 토크 플라이언스(compliance)를 최소화하는 것으로 설정하였다.

추가적으로 제작성을 고려하기 위하여 Fig. 9 처럼 두 면의 대칭조건과 암 중앙을 기준으로 양방향 취출조건(draw direction)을 설정하였다. 위상 최

적설계 해석 동안에 발생하는 목적함수와 최대 구속 오차의 이력을 Fig. 10 에 나타내었으며, 전체 37 번의 반복 후에 70%의 질량이 제거된 상태로 결과가 도출되었다. Fig. 11 에서 확인할 수 있는 바와 같이, 원 모델 대비 비틀림 강성이 2.6 배 증가하였으며 강도 성능 역시 59% 향상되었다.

이러한 최적설계 결과를 바탕으로 상세 설계를 수행하였으며, ArmLH 의 최종 설계 형상은 Fig. 12 와 같다. 기존 모델과 최적 설계된 모델의 강성, 질량, 응력을 각각 Table 2 에 비교, 정리하였다.

최종 설계된 ArmLH 의 경우, 위상 최적설계 결과 보다는 9% 질량은 줄어들었지만 비틀림 강성이 원 모델 대비 2.4 배 증가함으로써 신속한 응답성을 위한 중량절감과 정밀성을 확보하기 위한 강

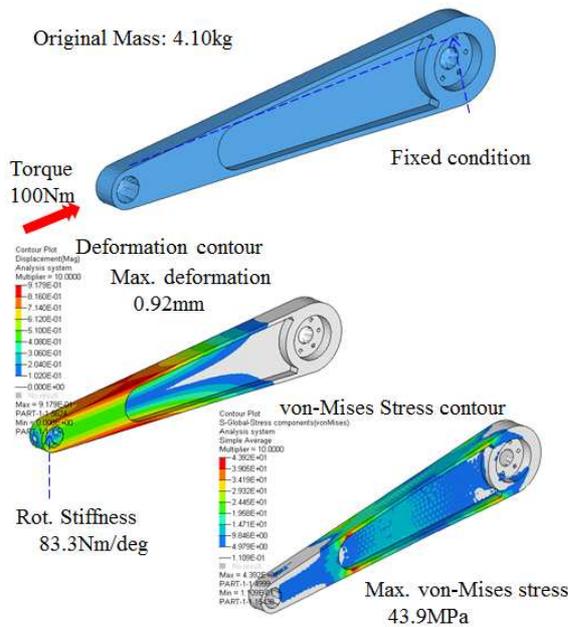


Fig. 8 Torsion analysis of original ArmRH model

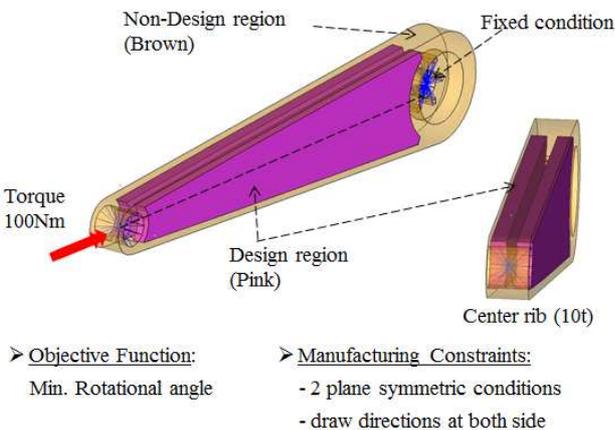


Fig. 9 Object function and manufacturing constraints

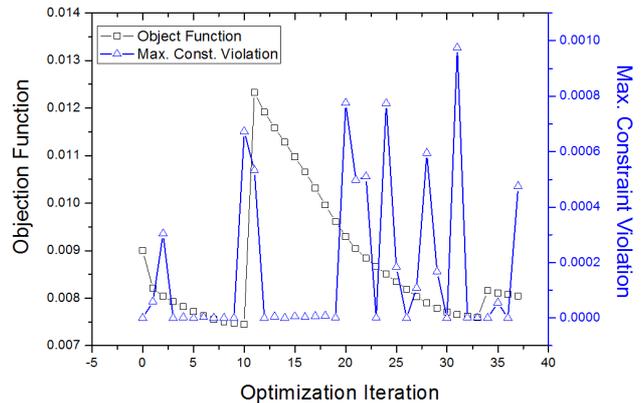


Fig. 10 Object function and Maximum constraint violation history during topology optimization

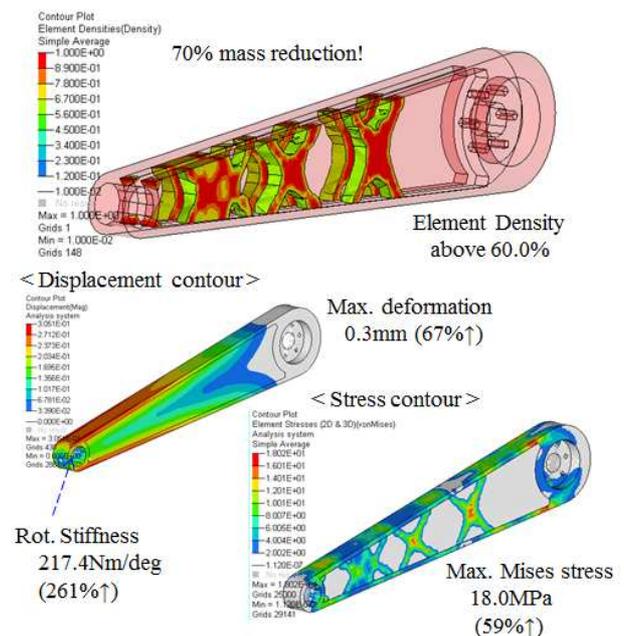


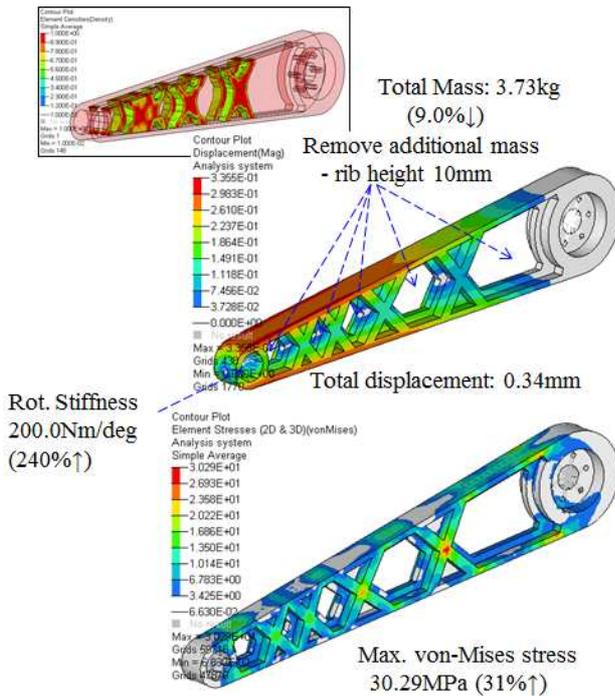
Fig. 11 Topology optimization results

**Table 2** Topology optimization results

|                    | Original | Optimized |
|--------------------|----------|-----------|
| Total mass [kg]    | 4.1      | 3.7       |
| Stiffness [Nm/deg] | 83.3     | 204.1     |
| Stress [MPa]       | 43.9     | 30.3      |

**Table 3** Dynamic stiffness results according to three axes

|              | Dynamic Stiffness [N/mm] |        |        |
|--------------|--------------------------|--------|--------|
|              | X Axis                   | Y Axis | Z Axis |
| Original     | 5.0                      | 360.0  | 1800.0 |
| Modification | 10.0                     | 360.0  | 1800.0 |

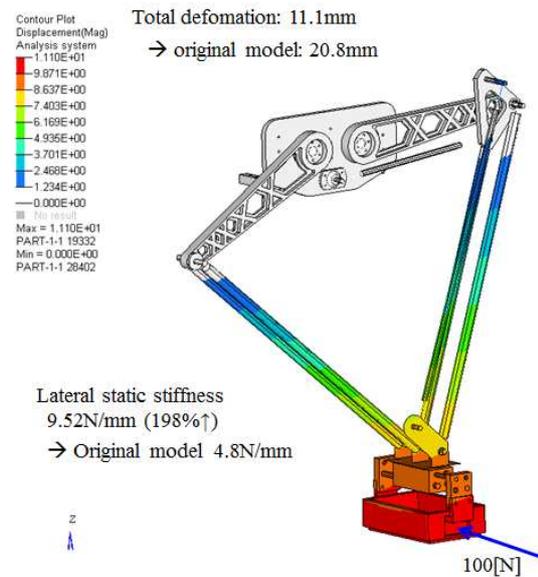


**Fig. 12** Detailed analysis of optimized ArmLH

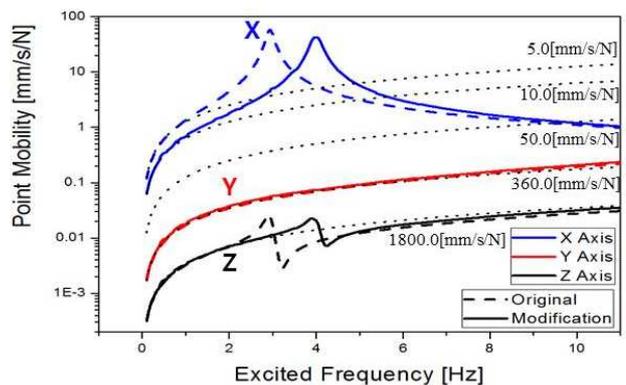
성 확보에 관한 상반되는 두 결과를 동시에 얻을 수 있는 구조임을 확인할 수 있었다.

### 3. 최적설계모델 성능검증 결과

제안된 ArmLH와 ArmRH의 작동 성능을 확인하기 위하여 최적 설계된 ArmLH와 ArmRH를 전체 병렬 로봇에 대체 적용하였다. 이에 따른 정적 강성 해석 결과를 Fig. 13에 나타내었으며, 최적설계 모델에 대한 동적 특성을 검토하여 Fig. 14와 Table 3에 나타내었다. Fig. 14와 Table 3의 결과와 같이, Y 방향 및 Z 방향 동강성은 각각 360N/mm와 1800N/mm를 나타낸 것에 비해 X 방향 동강성은 10N/mm를 나타내었으므로 병렬 로봇의 동적 응답을 결정하는 것은 X 방향 측면 강성이 지배적임을 알 수 있다. 그러므로 측면 강성에 대한 자세한 동적 응답 결과를 Fig. 15에 나타내었으며, 초기 모델과 최적설계 모델에 대한 성능 비교 결과를 Table 4에 요약하였다. 제안된 최적설계 모델은 초기 모델 대비 0.8kg의 중량이 줄었지만 정적



**Fig. 13** Static stiffness analysis of optimized model

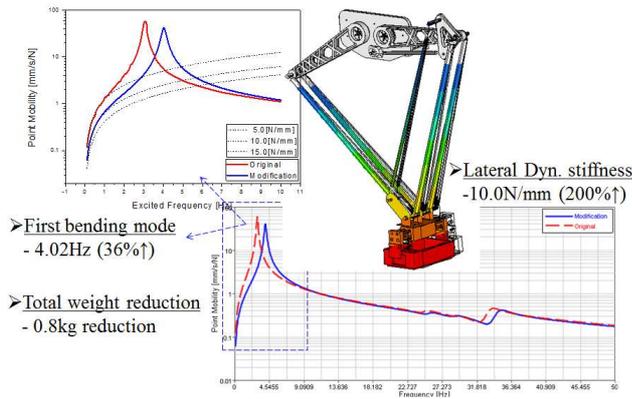


**Fig. 14** Point mobility results according to three axes of optimized model

강성과 동적 강성 모두 두 배 정도 보강되었으며, 관성하중 역시 초기모델 대비 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 기본 주파수가 36% 증가한 4.02Hz를 나타낼 것으로 판단된다. 본 최적설계 결과는 앞서 언급한 바와 같이, 신속한 응답성을 위해 각 관성 기구부 체적을 증가시키지 않도록 제한하였으므로 현 체적 용량 대비 최대의 강성을 가질 것으로 사료된다.

**Table 4** Performance Comparison of two models

|                          | Original | Optimized |
|--------------------------|----------|-----------|
| Mass reduction [kg]      | -        | 0.8       |
| Static Stiffness [N/mm]  | 4.8      | 9.5       |
| Fundamental Freq. [Hz]   | 2.94     | 4.02      |
| Dynamic Stiffness [N/mm] | 5.0      | 10.0      |



**Fig. 15** Dynamic stiffness analysis results of optimized model

#### 4. 결론

본 연구에서 사용된 가반 하중 30kg 의 ‘Pick & Place’작업을 수행하는 병렬 로봇의 경우, 빠른 응답속도를 확보하기 위한 로봇 관성 기구부의 경량화 설계가 중요하다. 게다가 빠른 작업 속도에 따른 급격한 가,감속 하중에 견디는 높은 정밀도를 확보하기 위해서 관성 기구부의 고강성 설계 역시 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 병렬로봇 관성 기구부의 작동강성 최적설계를 수행하여 상호 상반되는 경량화와 고강성 특성을 동시에 확보하였다.

우선, 로봇의 동작 중에 관성 기구 부에 발생하는 하중 상태를 파악하기 위해 탄성 다물체 동역학해석과 정적, 동적강성해석을 수행하였으며, 이를 바탕으로 병렬 로봇의 작동 응답을 결정하는 것은 X 방향 측면 강성이 지배적이며, 특히 두 ArmLH 와 ArmRH 의 비틀림 강성 보강이 필요하다고 판단하였다. 그리고 이러한 비틀림 하중에 대한 위상 최적설계를 수행하여 9% 중량이 줄어들었지만 강성은 2.4 배 증

가된 최적설계 모델을 제안하였으며, 마지막으로 제안한 ArmLH 와 ArmRH 모델을 기존 병렬 로봇에 적용한 결과, 0.8kg 의 중량은 줄었지만 정적 강성 및 동적 강성 모두 2 배 정도 증가하고 관성하중의 감소를 통해 기본 주파수가 36% 증가하였음을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 한국생산기술연구원 기관고유사업의 지원을 받아 연구되었음을 밝히며, 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌 (References)

- (1) Taghirad, H. D., 2013, "Parallel Robots; Mechanics and Control," *CRC Press*
- (2) Siciliano, B., Oussanma, K., 2008, "Springer Handbook of Robotics," *Springer-Verlag New York Inc.*
- (3) Tsai, L. W., 1999, "Robot Analysis: the Mechanics of Serial and Parallel Manipulator," *Wiley-Interscience*
- (4) Altuzarra, O., Pinto, C., Sandru, B. and Hernandez, A., 2011, "Optimal Dimensioning for Parallel Manipulators: Workspace, Dexterity and Energy," *ASME Journal of Mechanical Design*, 133(4), 041007-1-7
- (5) Kim, H. I., Kyung J. H., Do H. M. and Jo S. H., 2013, "Development of Industrial High-Speed Transfer Parallel Robot," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 8, pp. 1043~1050.
- (6) Kozak, K., Ebert-Uphoffl, Voglewede, PA and Singhose, W., 2002, "Concept paper: on the significance of the lowest Linearized Natural Frequency of Aparallel Manipulator as a Performance Measure for Concurrent Design," *Proceedings of the WORKSHOP on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators*, Canada, p.112-118.
- (7) Li, H. H., Yang, Z. Y. and Huang, T., 2009, "Dynamics and Elasto-dynamics Optimization of a 2-dof Planar Parallel Pick-and-place Robot with Flexible Links," *Structural and Multi-disciplinary Optimization*, 38(2), 195-204.
- (8) da Silva, M. M., de Oliveira, L. P. R., Bruls, O., Michelin, M. and Baradat, C., 2010, "Integrating Structural and Input Design of a 2-dof High-speed Parallel Manipulator: a Flexible Model-based Approach," *Mechanism and Machine Theory*, 45(11), pp. 1509-1519.