

# 서비스 로봇용 컴플라이언스 형 안전관절의 설계

## Design of a compliance type safety joint for service robots

정재진<sup>1</sup>, 이상무<sup>2</sup>, 남경태<sup>2</sup>, 소병록<sup>2</sup>, \*장승환<sup>1</sup>

J. J. Jeong<sup>1</sup>, S. M. Lee<sup>2</sup>, K. T. Nam<sup>2</sup>, B. R. So<sup>2</sup>, \*S. H. Chang (phigs4@cau.ac.kr)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 중앙대학교 기계공학부, <sup>2</sup> 한국생산기술연구원 로봇기술본부

Key words : safety joint, service robot, compliance type, energy absorption

### 1. 서론

로봇의 활용 범위 확대 및 제반 기술이 발전함에 따라 서비스 로봇은 우리의 생활 속에 훨씬 가까워지고 있다. 의료, 복지, 건설, 극한작업 등 비제조업에서 사용되는 로봇과 인간 공존형 대인지원 로봇인 개인용 로봇은 통칭 서비스 로봇이라 부르며 향후 더욱 다양한 형태가 우리 앞에 등장할 것으로 기대되고 있다. 이러한 추세에 따라 로봇과 인간은 활동 공간의 공유로 뜻하지 않은 충돌을 일으켜 안전사고를 발생시킬 수 있으므로 그 피해를 예방할 수 있는 장치를 마련하는 것이 중요한 문제로 부각되고 있다. 그러나 이 문제를 해결하기 위해 높은 안전성을 갖춘 로봇을 설계하는 것은 기구 설계뿐 아니라 하드웨어와 소프트웨어를 설계하는 모든 엔지니어들 간에 긴밀한 협력을 필요로 하는 까다로운 문제로 인식되고 있다. 일반적으로 전자적인 능동 제어방식으로 상해가 발생할 수 있는 충돌을 방지하는 메커니즘은 상대적으로 고가인 센서 장비와 복잡한 제어 알고리즘을 필요로 하며 반응 속도가 센서와 액추에이터의 민감성에 전적으로 의존하는 단점을 가지고 있다. 이에 비해 외부에서 가해지는 힘에 반응할 수 있는 물리적인 기계장치를 활용한 수동형 컴플라이언스 (compliance) 방식은 보다 즉각적인 반응과 로봇의 낮은 생산단가, 제작 및 제어의 용이성을 확보할 수 있는 장점이 있다[1]. 본 논문에서는 기구 커플링 (Kinematic coupling)[2]과 볼 캐스터 (Ball caster)를 이용하여 소형, 경량화를 구현한 가변-강성형 수동 컴플라이언스 안전 관절을 설계하고 제작하였다.

### 2. 안전관절의 설계

본 논문에서 설계한 안전 관절 조인트는 세 개의 원형 구멍 (Hole groove)이 120° 간격으로 배치된 디스크 1과 세 개의 볼이 반구 형태로 돌출된 디스크 2 (Fig.1)가 맞물려 준-기구 커플링 (Quasi-kinematic coupling)[3]을 구성하며, 외부에서 허용된 임계치 이상의 힘이 가해지기 전까지 커플링과 같은 역할을 수행하여 구동부의 동력을 피동부에 전달하게 된다.

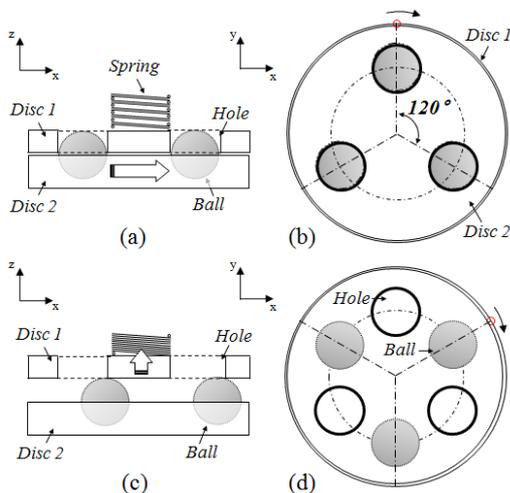


Fig. 1 Diagram of safety joint mechanism (a) matched state (b) free-rotation state

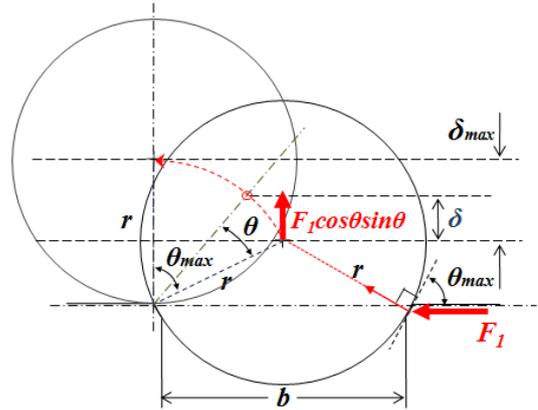


Fig. 2 Motion diagram for the safety joint

두 디스크가 서로 맞붙어 있는 안전조인트의 초기 체결력은 스프링의 탄성력으로 제공되며, 이는 초기 압축 변위  $\zeta$ 로 조절할 수 있다. 한 쪽 디스크의 회전은 볼과 홀 사이의 기하학적 관계에 의해 리프팅 포스 (Lifting force)를 발생시켜 두 디스크가 서로 이탈하려는 효과가 나타나 이격거리  $\delta$ 가 발생한다. (Fig.2 참조).

$$\delta = r \{ \cos(\theta_{max} - \theta) - \cos \theta_{max} \} \tag{1}$$

홀에서 볼이 빠져나오며 그리는 볼 중심 궤적에서  $\theta$ 를 통해  $\delta$ 를 표시하여 식(1)을 정리하면 변위각  $\theta$ 를 만들기 위해 필요한 회전력( $F_1$ )을 구하는 식(2)을 완성할 수 있다.

$$F_1 = \frac{k \{ r \{ \cos(\theta_{max} - \theta) - \cos \theta_{max} \} + \zeta \}}{3 \cos \theta \sin \theta} \tag{2}$$

지름 4mm를 가지는 홀에 6.35mm 직경을 가지는 볼이 맞물려 있을 때 이루는 각도  $\theta_{max}$ 는 39°이며, 200kN/m의 탄성계수 ( $k$ )를 가지는 스프링이 연결된 상태에서 초기 스프링의 압축 변위  $\zeta$ 를 각각 0.1mm와 0.01mm로 했을 때 볼이 빠져나오며 0°에서 39°에 이를 때까지 필요한 회전력( $F_1$ )을 식(2)에 의해 Fig.3과 같이 나타낼 수 있다.

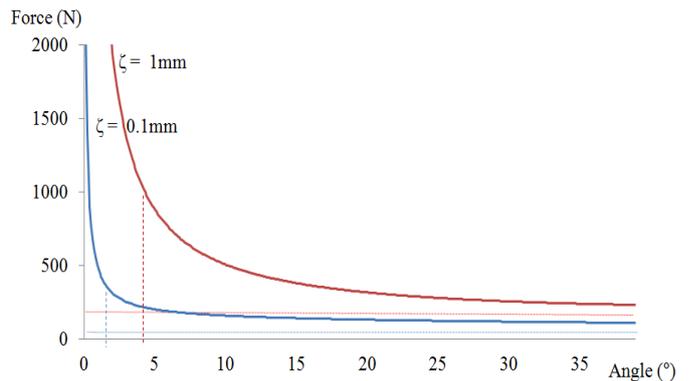


Fig. 3 Rotational triggering force ( $F_1$ ) variation on initial deflection of the spring

위 그래프에서 보듯이 5°미만의 범위에서 초기 변위각  $\theta$ 를 만들기 위해서 큰 외력이 필요하므로 낮은 외력 범위에서는 안전조인트가 높은 강성을 유지할 수 있음을 알 수 있다.

### 3. 안전관절의 제작

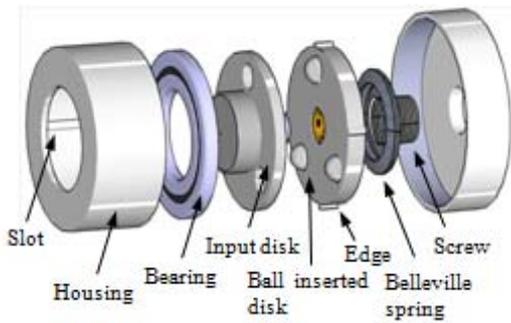


Fig.4 Concept modeling of the safety joint

볼 캐스터는 볼과 볼의 원활한 회전을 위한 미세한 작은 볼들로 구성되어 있다. 볼이 반구 형태로 돌출되어 있기 때문에 홈 형태의 홈에 끼워 맞물려 있을 수 있으며 홈에서 이탈한 후 디스크 위를 베어링과 같은 상태로 이동할 수 있는 역할을 수행한다. 접시 스프링은 작은 변위에서도 하중 수용력 (High energy storage capacity)이 우수하며 공간 활용도가 높아 소형화 설계가 필요한 조인트에 매우 이상적이다. 또한 스프링의 초기 압축량을 조절할 수 있는 스크류를 삽입함으로써 안전 관절의 작동 시점을 가변적으로 조절할 수 있다. 조절 스크류를 통해 압축된 스프링은 훨씬 큰 탄성력을 가지게 되어 조인트가 보다 높은 충격력에서 작동하도록 할 수 있다(Fig. 4 참조).



Fig. 5 Prototype of the safety joint

Fig. 5는 설계된 안전관절의 실제 제작된 모델이다. 제작된 안전관절의 주요 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specifications of the safety joint

Design variable	Value
Diameter	500mm
Thickness	420mm
Weight	450g
Force at action	400-800N (variable)
Free rotation	120° (when over stiffness)

### 3. 성능평가 방안

충돌 발생 시 안전성의 평가 지표로 자동차 충돌 시 인체 (특히, 머리 부분)의 상해 정도를 상대 가속도와 충돌 시간으로 나타내는 HIC (head injury criterion) 값을 활용할 수 있다.

$$HIC = T \left( \frac{1}{T} \int_0^T a(t) dt \right)^{2.5} \quad (3)$$

위의 식에서 HIC값이 1000 이상일 때 인체에 치명적이며 100 이하의 일 때 안전하다고 판단할 수 있다[4].

아래와 같이 충격 발생 장치를 구성하여 HIC값을 측정할 수 있다. 로봇암의 엔드 부분에 로드셀 (Load cell)이 장착되어 있어 로봇암이 받은 충격력을 실시간으로 아날로그 신호화시켜 앰프가 내장된 인디케이터를 통해 증폭한 후 디지털 신호화 시킨다. 여기서 시간에 따른 충격력으로 측정된 데이터는 컴퓨터를 통해 적분하여 충격량으로 계산될 수 있다. 또한 측정된 충격력을 로봇 암의 질량으로 나눠 가속도를 구하면 HIC값을 계산할 수 있어 안전성을 평가할 수 있다(Fig. 6 참조).

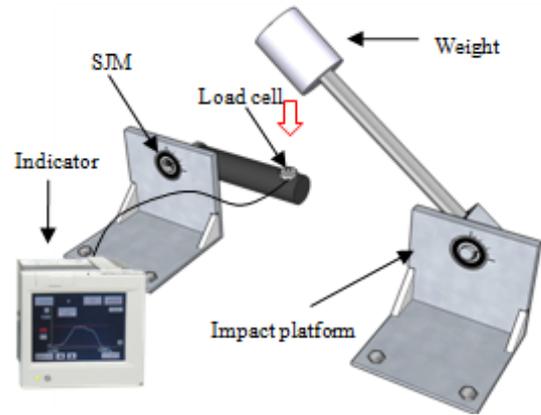


Fig. 6 Experimental platform for the safety joint

### 4. 결론

안전 관절은 로봇 매니퓰레이터의 갑작스러운 충격에 대해 조인트로 가해질 토크를 신속하게 차단하고 무강성을 가짐으로써 인체와의 충격에 대해 상해를 예방하고 조인트 자체의 파손을 방지한다. 본 논문에서는 기구 커플링과 볼 캐스터를 안전 관절 설계에 적용하여 기존에 연구되었던 가변 강성 장치들의 문제를 해결함과 동시에 메커니즘을 하나의 요소에 집중하고 강성변화의 핵심 요소를 3차원으로 배치하여, 작동공간의 효율성이 높은 집적화된 디자인을 완성함은 물론 강성 조절의 용이성을 극대화 하였다. 임의의 시스템에도 쉽게 적용할 수 있는 모듈화 된 구조의 시작품을 완성하였으며, 설계된 안전관절의 성능평가를 위한 플랫폼을 설계하였다. 본 연구를 통해 개발된 서비스 로봇용 안전관절은 향후 안전 조인트의 활용을 통해 조인트부에 필요했던 복잡한 안전 제어 알고리즘과 제반 장치를 대체하고 로봇의 경량화와 제작의 편의성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

1. S. S. Yoon, S. H. Kang, S. K. Yun, S. J. Kim, Y. H. Kim, M. S. Kim, "Safe Arm Design with MR - based Passive Compliant Joints and Visco - elastic Covering for Service Robot Applications", Journal of Mechanical Science and Technology, 19, 10, 1835-1845, 2005.
2. L. C. Halea, A. H. Slocum, "Optimal design techniques for kinematic couplings," Precision Engineering Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 25, 114-127, 2001.
3. M. L. Culpepper, "Design of quasi-kinematic couplings," Precision Engineering, 28, 338-357, 2004.
4. D. Marjoux, D. Baumgartner, C. Deck, R. Willinger, "Head injury prediction capability of the HIC, HIP, SIMon and ULP criteria" Accident Analysis and Prevention, 2008.