산업용 로봇에 적용 가능한 안전기구의 최적 강성 선정

Selection of Optimal Stiffness of Safety Mechanism for a Manipulator

*김휘수[1], 박정준[2], #송재복[3]
*H.-S. Kim[1], J.-J. Park[2], # J.-B. Song[3] (jbsong@korea.ac.kr)
고려대학교 기계공학과[1, 2, 3]

Key words : Safety mechanism, Industrial manipulator, Safe arm

1. 서론

산업현장에서 로봇과 작업자간의 협업작업에 대한 필요성이 증대되면서, 충돌 안전성이 로봇팔 설계에 있어서 중요한 문제로 대두되었다. 이를 해결하기 위하여 로봇팔을 유연하게 설계하는 방법이 많이 연구되고 있다.

일반적으로 로봇팔에 컴플라이언스(compliance)를 부여하기 위해서는 센서 및 제어 기반의 능동적인 방법과 기계요소를 통한 수동적인 방법이 있다. 능동적 방법은 제어기의 오작동과 느린 반응속도 등의 문제로 안전성 구현에 한계가 있다[1]. 따라서 고려대에서는 수동적 방법, 즉 스프링과 4절링크를 적용한 안전장치를 개발함으로써 신뢰성 높은 로봇 안전성을 구현하였다[2].

로봇팔에 장착된 안전기구는 설정된 임계치보다 작은 외력이 인가되었을 때는 스프링이 동작하지 않도록 하여 고강성을 유지함으로써 작업 성능을 향상시키고, 임계치 이상의 충격이 가해졌을 때에는 스프링이 동작하여 충격을 흡수하는 유연한 팔로 변환되는 구조를 갖고 있다. 따라서 안전기구의 임계치는 로봇팔의 작업 시에 인가되는 통상적인 외력보다 높고, 충돌 시에 작업자에게 위해를 가하는 안전기준보다는 낮게 설정되어야 한다. 본 연구에서는 로봇팔의 관절 토크와 안전을 고려한 안전기구의 강성 선정 방법을 제시하여, 산업용 로봇을 포함한 다양한 로봇에 대한 안전기구의 설계를 용이하도록 하였다.

본 논문에서는 안전기구의 구성 및 작동 원리에 대하여 살펴본다. 그리고 로봇팔이 작업 시 요구되는 관절 토크를 계산하고, 이에 대한 안전기구의 강성 선정방법에 대하여 설명한다. 또한, 이를 기반으로 설계된 안전기구의 안전성을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

2. 안전기구의 구조 및 원리

로봇의 위치 정확성(positioning accuracy)을 위해서는 큰 강성이 바람직하지만, 충돌시의 안전성을 위해서는 작은 강성이 유리하다. 이러한 특성을 동시에 구현하기 위하여 선형 압축 스프링과 4절링크로 구성된 비선형 강성의 안전기구를 제안하였다[2]. 안전기구는 Fig. 1과 같이 2개의 슬라이더와 연결링크, 크랭크 링크, 그리고 선형 압축 스프링으로 구성되어 있다.

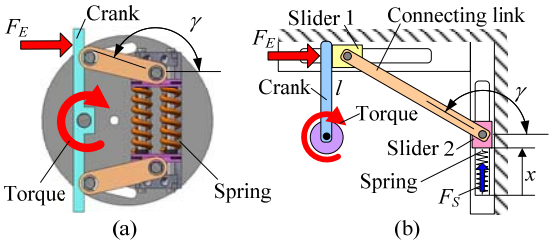

Fig. 1 Safety mechanism with double-slider and spring; (a) prototype and (b) free body diagram of safety mechanism.

Fig. 1과 같이 슬라이더 2에 초기 압축된 스프링으로부터 압축력이 발생한다. 이 압축력이 슬라이더 1에 인가되는 외력 F_E 와 정적 평형을 이루게 되면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$F_E = -k(x_0 - x)\tan\gamma \qquad (2.1)$$

여기서 x_0와 x는 스프링 초기길이와 슬라이더 2의 위치, k는 스프링 강성, γ 는 전달각이다. 이때 안전기구가 정적 평형상태에 있을 때의 외력을 임계충격력(critical impact force)이라 정의한다. 이는 주어진 전달각에 대하여, 외력이 식 (2.1)으로 계산되는 임계충격력 이하일 때는 정적 평형이 유지되어 높은 위치 정밀도를 갖지만, 이 보다 큰 외력이 작용하면 평형상태가 무너지고 스프링이 급격히 압축되어 낮은 강성으로 변하기 때문에 붙여진 이름이다.

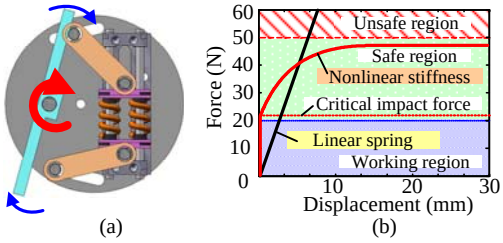

Fig. 2 Nonlinear stiffness of safety mechanism; (a) after collision, and (b) characteristic curve.

Fig. 2는 본 안전기구의 외력에 대한 슬라이더 2의 변위를 나타낸다. 만약, 로봇팔의 관절에 선형스프링을 설치한다면, 충격흡수 성능은 좋게 되지만, 작은 외력에도 변위가 발생하므로 정밀한 작업이 어렵게 된다. 그러나 비선형 강성 특성을 갖는 본 안전기구는 임계 충격력 이하에서는 매우 높은 강성을 유지하고, 그 이상의 외력에는 급격한 변위가 발생하여(즉, 로봇팔이 매우 유연하게 변환되어) 충격을 흡수하므로 안전성과 위치정확성을 동시에 만족할 수 있다.

3. 안전기구 강성 설계

3.1 관절토크 산출

안전기구는 Fig. 3과 같이 로봇팔의 관절 3에 장착되어 엔드이펙터에 가해지는 외부의 충격을 흡수한다. 따라서 안전기구의 사양은 관절 3에 인가되는 토크에 따라 결정된다. 로봇팔의 설계조건에 맞추어 다음과 같이 관절 토크를 산출하였다.

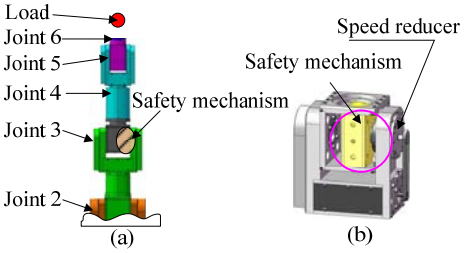

Fig. 3 (a) 6 DOF industrial robot, (b) Joint 3 with safety mechanism.

Table 1에 명시된 로봇팔의 설계 조건(질량, 무게중심까지의 거리, 각속도, 각가속도 등)을 모두 충족하기 위하여, 정적상태와 동적상태 그리고 극한상태로 나누어 관절 3의 토크를 계산하였다. 정적상태에서는 일정속도에서의 관절에 요구되는 최대 토크를 계산하였고, 동적상태에서는 가

감속시 발생하는 최대 관절토크를 산정하였다. 또한, 극한 상태는 로봇팔의 작업에 있어서 다수의 축이 동시에 움직이는 경우를 고려하여, 동역학 시뮬레이션으로부터 관절 3의 필요한 최대 토크를 얻었다.

Table 1 Specifications of robot arm.

	Weight (kg)	Mass center from load (mm)	Speed (°/s)	Acceleration (°/ s^2)
Load	6	-	–	-
Joint 6	0.11	50	180	900
Joint 5	1.65	120	180	900
Joint 4	3.26	345	180	900
Joint 3	4.56	570	112.5	375
Joint 2	10	900	57	190
Total	25.6	900		

Table 2 Required maximum torque at joint 3.

	Static	Dynamic	Extreme
Max. torque (Nm)	53.4	71	80

Table 2의 결과와 같이 모든 관절이 동시에 움직이는 상황에서 관절 3에 가장 큰 토크가 인가된다. 이때의 최대 토크로부터 안전기구의 임계충격토크를 80Nm로 결정할 수 있다. 임계 충격토크란 안전기구의 동작을 결정하는 임계 충격력을 관절토크로 환산한 값이다. 따라서 충돌에 의하여 관절 3에 80Nm 이상의 토크가 인가되면 안전기구가 동작하여 충격을 흡수한다. 그 이하의 토크에서는 안전기구가 높은 강성을 갖기 때문에 위치정밀도를 유지할 수 있다.

3.2 스프링 강성 선정

앞 절에서 기술한 안전기구의 임계충격력과 토크는 식 (2.1)에서 보듯이 초기 전달각과 스프링 초기 압축길이, 그리고 스프링강성에 의하여 결정된다. 본 연구에서는 초기 전달각과 스프링 초기 압축길이를 고정하고, 스프링의 강성만을 조절하는 방법을 적용하였다. Fig. 1의 안전기구에 삽입되는 스프링의 강성은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$k = -0.9 \times \frac{T_c}{l \times N \times d} \times \frac{1}{\tan \gamma_0} \tag{3.1}$$

여기서 T_c은 안전기구의 임계 충격토크, l은 크랭크 길이, N은 스프링의 개수, d는 스프링의 초기 압축길이이다. 실제 모델에서 각 부품들간에 존재할 수 있는 마찰력에 의한 영향을 고려해 주기 위해 비례상수 0.9를 곱하였다. 본 연구에서는 초기 전달각 γ_0 = 163.5°, 초기 압축길이 d = 12mm로 설정하였고, 링크길이 l = 48mm로 설계하였다. 사용할 수 있는 스프링의 개수는 8개이다. 식 (3.1)을 이용하여 계산한 결과 필요한 스프링 강성은 4.6kN/m이므로, 그에 해당하는 스프링을 선정하였다.

4. 안전성 평가

본 안전기구의 안전성을 검증하기 위하여 AIS (Abbreviated Injury Scale) 3등급을 기준으로 평가하였다. AIS는 머리상해 기준인 HIC(Head Injury Criterion)로부터 충격에 의한 상해 가능성을 계산한 값이다. HIC와 AIS 3등급의 상해가능성은 다음과 같이 얻을 수 있다[3].

$$HIC_{36} = \max\left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a_h(t) dt \right)^{2.5} (t_2 - t_1) \tag{4.1}$$

$$P(AIS \geq 3)_{HIC_{36}} = \phi\left(\frac{In(HIC_{36}) - \mu}{\sigma} \right) \tag{4.2}$$

식 (4.1)의 HIC_{36}은 36ms 이내의 충격에 대해서 계산한 값이다. 그리고 식 (4.2)는AIS 3등급의 기준의 상해 가능성을 나타내는 식으로서, a_h는 머리의 가속도이고 AIS 3등급에 해당하는 상수인 μ와 σ는 각각 7.65605와 0.60580으로 설정하였다.

Fig. 4(a)와 같이 Solidworks로 안전기구와 이를 장착한 로봇팔 그리고 사람의 머리를 모델링 하였고, Visual Nastran 4D를 이용하여 충돌에 대한 동역학해석을 수행하였다. 여기서 사람 머리의 무게는 성인 기준으로 3.5kg, 목의 강성은 1kN/m으로 가정하였다.

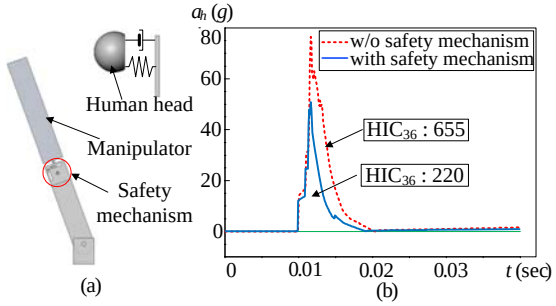

Fig. 4 Simulation of human-robot collision; (a) modeling of robot and human, and (b) simulation result.

시뮬레이션 결과 Fig. 4(b)에서와 같이 안전기구의 장착 여부에 따라 HIC 값이 각각 220과 655로 산출되었다. 즉, 안전기구에 의하여 1/3만큼의 완충효과가 있음을 알 수 있다. 또한, 안전기구를 장착하였을 때 AIS 3등급 기준으로 0.27%의 상해 확률을 가지며, 위험 정도는 “매우 안전” 등급에 속한다. 반면에, 안전기구의 미장착시에는 9.7% 의 상해 확률을 가지며, 안전기준인 5%의 범위를 벗어나므로, 로봇이 사람에게 상해를 가할 수 있음을 알 수 있다[4].

5. 결론

본 논문에서는 동적, 정적 계산 및 해석을 통하여 산업용 로봇에 적합한 안전기구의 강성 선정법을 제시함으로써 다음과 같은 성과를 얻었다.

(1) 산업용 로봇의 오동작 시 발생할 수 있는 임계충격력 이상의 외력으로부터 작업자의 안전을 확보할 수 있다.
(2) 임계충격력 이하의 외력에 대해 높은 강성을 유지하고 위치 정밀도를 높여 로봇팔 작업 성능을 보장하였다.
(3) 로봇과 사람간의 협업이 가능하도록 산업용 로봇팔의 안전에 대한 신뢰성을 높일 수 있었다.

후기

본 연구는 산업자원부 성장동력기술개발사업(R0710651) 지원으로 수행 되었음.

참고문헌

1. De Luca, A., Albu-Schaffer, A., Haddadin, S., and Hirzinger, G., “Collision detection and safe reaction with the DLR-III lightweight manipulator arm,” Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, pp. 1623-1630, 2006.
2. J.-J. Park, J.-B. Song, and H.-S. Kim, “Safe Joint Mechanism based on Passive Compliance for Collision Safety”, Lecture Note In Control and Information Sciences, Recent Progress in Robotics: Viable Robotic Service to Human, pp.49-61,2008.
3. Kuppa, S., “Injury Criteria for Side Impact Dummies”, NHTSA, 2004.
4. EuroNCAP, “European Protocol New Assessment Programme-Assessment Protocol and Biomechanical Limits”, 2003.