

< 논문 >

4절링크의 전달각에 기초한 충격흡수식 안전기구

박정준[†] · 김병상* · 송재복**

(2005년 7월 21일 접수, 2005년 9월 12일 심사완료)

Shock-Absorbing Safety Mechanism Based on Transmission Angle of a 4-Bar Linkage

Jung-Jun Park, Byeong-Sang Kim and Jae-Bok Song

Key Words : Safety Mechanism(안전기구), Transmission angle(전달각), Passive Compliance(수동 컴플라이언스), Manipulator(머니플레이터)

Abstract

Unlike industrial manipulators, the manipulators mounted on service robots are interacting with humans in various aspects. Therefore, safety has been one of the most important design issues. Many compliant robot arms have been introduced for safety. It is known that passive compliance method has faster response and higher reliability than active ones. In this paper, a new safety mechanism based on passive compliance is proposed. Passive mechanical elements, specifically transmission angle of the 4-bar linkage, springs and shock absorbing modules are incorporated into this safety mechanism. This mechanism works only when the robot arm exerts contact force much more than the human pain tolerance. Validity of this mechanism is verified by simulations and experiments. It is shown that the manipulator using this mechanism provides higher performance and safety than those using other passive compliance mechanisms or active methods.

1. 서론

과거의 산업용 로봇과는 다르게 최근의 서비스 로봇은 인간과 공존하면서 작업을 수행하여야 한다. 로봇이 직접적으로 인간과 접촉하기 때문에 인간과 로봇간의 안전성이 중요한 문제로 부각되고 있다. 그러므로 로봇의 팔을 인간의 팔처럼 유연하게 설계하여 안전성을 해결하는 방법이 많이 연구되고 있다.

일반적으로 로봇 팔에 컴플라이언스(compliance)를 부여하기 위해서는 능동적인 방법과 수동적인 방법의 두 가지가 있다. 능동적인 방법은 로봇에 장착된 힘/토크 센서의 피드백 신호를 제어기에서

감지하여 외부에서 작용된 힘이나 충격에 대해 적절하게 대처하는 것이다. 수동적인 방법은 스프링, 댐퍼 등의 요소에 기반한 기구로 안전성을 구현하는 것이다.

능동적인 방법은 센서를 사용하고 피드백 신호에 의한 제어를 하기 때문에 안전성을 구현하는데 한계를 지니고 있다. 예를 들어, 비전센서를 사용할 경우 분해능이 낮기 때문에 빠른 속도로 외부 충격이 가해지면, 이에 따른 즉각적인 대처가 어렵다. 또한, 센서의 신호에 잡음이 섞이면 오작동의 위험도 있다. 그러나 수동적인 방법은 특별한 센서를 사용하지 않고, 기구부로 충격을 흡수하기 때문에 반응속도가 빠르고 오작동의 위험이 작다.

이제까지 수동 컴플라이언스를 구현하는 기구에 대한 연구가 많이 수행되어 왔다. Laurin-Kovitz가 개발한 프로그래머블 수동 임피던스(Programmable passive impedance) 기구는 비선형 스프링과 바이너리 댐퍼를 사용하여 인간 근육의 동작원리를 구현하였다.⁽¹⁾ Morita와 Sugano는 가변스프링과 전기브레이크를 이용하여 기계 임피던스 조절기

[†] 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과
E-mail : hantiboy@korea.ac.kr
TEL : (02)923-3591 FAX : (02)923-3591

* 고려대학교 기계공학과

** 회원, 고려대학교 기계공학과

(Mechanical impedance adjuster)를 제안하였다.⁽²⁾ Okada는 탄성링크를 이용하여 프로그래머블 수동 컴플라이언스 어깨(Programmable passive compliance shoulder)를 개발하였다.⁽³⁾ 그리고 Kang이 회전형 스프링과 MR 댐퍼로 구성된 수동 컴플라이언스 관절(Passive compliance joint)을 서비스 로봇의 팔 관절부에 적용하였다.⁽⁴⁾

위에서 열거한 기존의 안전팔들은 관절부에 스프링과 댐퍼를 장착한 공통점이 있다. 스프링을 이용하면 충격을 흡수하는 데 매우 효과적이지만, 진동이 발생한다. 댐퍼를 이용하여 스프링의 진동을 감쇠시킬 수 있지만, 관절부가 비대해지고 복잡한 능동제어 기법이 적용되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 수동적인 방법만을 사용하여 인간과 로봇 상호간의 안전을 유지할 수 있는 기구를 개발하였다.

본 연구에서 개발한 수동 안전기구는 스프링과 4절링크, 그리고 분할 모듈로 구성되어 있다. 안전기구에서 스프링과 분할 모듈은 외부에서 가해지는 충격에 유연하게 대처하여 안전성을 높이고, 4절링크는 전달각의 특성 때문에 안전기구가 정해진 임계치보다 작은 외력에는 반응하지 않도록 하여 성능을 향상시킨다. 지금까지 많은 연구들은 안전성 또는 성능 중 하나를 위하여 나머지를 다소 희생하는 방식을 선택하였다. 그러나 제안된 안전기구는 상황에 따라 안전성과 성능을 최대화하였다. 따라서 작업의 효율을 높일 수 있는 동시에 충돌에 대한 안전성도 높일 수 있다.

본 논문에서는 스프링과 4절링크, 분할모듈과 와이어로 구성된 안전기구를 설계하고, 시뮬레이션을 통하여 성능을 확인한 후 시제품을 제작하였다. 그리고 강제와 안전기구에 충돌 실험을 수행하여, 안전기구의 충격 흡수 성능을 비교하였다.

2. 안전기구의 구성

본 연구에서 제안하는 수동 컴플라이언스 안전기구는 4절링크의 전달각 특성과 모듈-와이어 조합에 의한 충격흡수 장치로 구성되어 있다. 2.1절에서는 4절링크의 전달각의 개념을 살펴보고, 4절링크와 스프링이 조합된 기구의 특성에 대하여 설명한다. 2.2절에서는 충격을 흡수하기 위한 모듈과 와이어의 조합에 대하여 살펴본다.

2.1 4절링크의 전달각과 스프링

일반적으로 로봇의 위치 정확성(positioning accuracy)을 위해서는 큰 강성이 바람직하지만, 충돌시의 안전성을 위해서는 작은 강성이 유리하다.

따라서 사람에게 상해를 줄 수 있는 외력 이상에서는 로봇팔의 강성이 감소하여 충돌 안전성이 확보되지만, 그 이하의 외력에 대해서는 강성이 충분히 커서 로봇팔이 정확하게 위치제어를 할 수 있는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 이러한 기능을 구현하기 위하여 스프링과 4절링크로 구성된 다음과 같은 기구를 제안한다.

코일 스프링은 외력의 크기와는 무관하게 일정한 강성을 가진다. 기존의 스프링에서 원하는 안전성을 얻기 위하여 4절링크의 전달각(transmission angle)의 특성을 이용하였다. Fig. 1과 같은 4절링크 기구에서, 전달각은 플로팅(floating) 링크와 출력링크가 이루는 각도로 정의된다. 그림과 같은 평면 4절링크 기구의 경우, 입력링크 상의 B점에 입력된 힘을 출력링크상의 A점으로 가장 효율적으로 동력을 전달할 수 있는 전달각은 90°이다. 전달각이 45°보다 작거나 135°보다 크다면 링크를 작동시키기 위해서는 큰 힘이 필요하므로 동력전달이 어려워진다. 전달각이 45°~135°의 범위에서 90°에 근접할수록 힘이 점점 효율적으로 전달되어 4절링크의 작동이 용이하게 된다.⁽⁵⁾

대칭 구조를 갖는 Fig. 1의 4절링크에서, 입력링크 끝에 x축 방향으로 외력 F_E 가 작용할 때, 적절한 크기의 힘 F_R 을 y축 방향으로 작용시키면 출력링크의 움직임을 막을 수 있다. 이제, Fig. 1의 4절링크 구조를 다음과 같이 변환하여 보자.

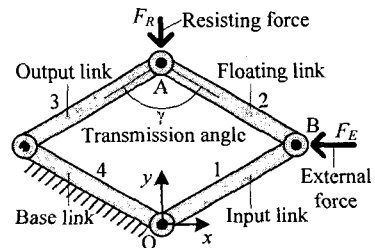


Fig. 1 4-bar linkage

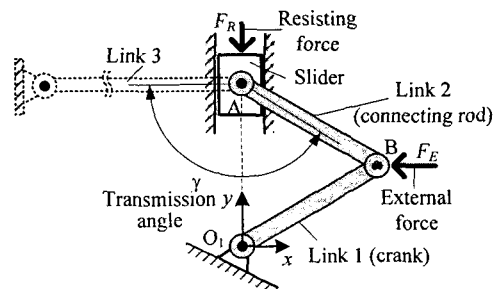


Fig. 2 Slider-crank linkage

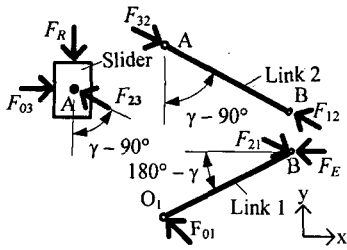


Fig. 3 Free-body diagram of slider-crank linkage

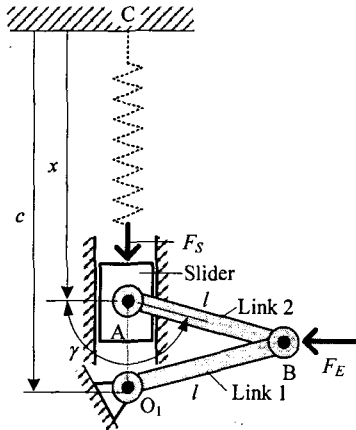


Fig. 4 slider-crank linkage with spring

Fig. 2에서와 같이 출력링크(링크 3)의 길이가 무한대이며, x축 방향으로 위치하고 있다고 가정하면, 링크 2와 링크 3 사이의 회전관절 A는 y축 상에서 직선운동을 수행하게 된다. 따라서 이 경우에 4절링크의 운동은 Fig. 2의 슬라이더-크랭크 기구로 취급할 수 있다. 한편, 이러한 경우에도 앞에서와 마찬가지로 전달각은 플로팅 링크와 출력링크 사이의 각도로 정의될 수 있다.

슬라이더-크랭크 기구의 자유물체도를 Fig. 3에 나타내었다. 링크 1과 링크 2의 길이는 l로 같다고 가정한다. 피스톤에 작용하는 힘의 평형 조건으로부터 다음 식이 성립된다.

$$F_{23} \cos(\gamma - 90^\circ) = F_R \quad (1)$$

그리고 점 O_1 에 대한 모멘트의 평형으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\sum M_{O_1} = -F_{21}l \sin(360^\circ - 2\gamma) + F_E l \sin(180^\circ - \gamma) = 0 \quad (2)$$

F_{12} 와 F_{32} 의 힘의 크기가 동일하므로 식 (1)과 (2)로부터 외력 F_E 와 저항력 F_R 간의 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$F_R = -\frac{F_E \tan \gamma}{2} \quad (3)$$

식 (3)에서 보는 바와 같이, 비록 외력 F_E 가 일정

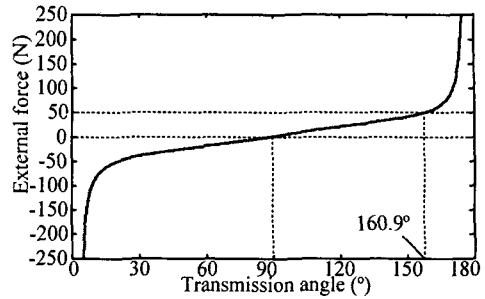


Fig. 5 Relation between transmission angle and external force

하더라도 저항력 F_R 은 기구부의 전달각 γ 에 따라 변하게 된다.

Fig. 4와 같이 A점과 고정단 C점 사이에 압축 스프링을 초기 압축된 상태로 장착하면 저항력 F_R 을 제공할 수 있다. 스프링 계수가 k , 스프링의 초기길이가 x_0 일 때 압축된 스프링의 힘 F_S 는 다음과 같다.

$$F_S = k(x_0 - x) \quad (4)$$

압축된 스프링의 힘 F_S 는 저항력 F_R 과 같으므로 앞에서 유도한 식 (3)에 식 (4)를 대입하고 4절링크의 기하학적 형상을 고려하면 외력과 전달각의 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$F_E = -2k(x_0 - c + 2l \sin \gamma) \cot \gamma \quad (5)$$

여기서, 파라미터 k, l, x_0, c 가 주어지는 경우에, 전달각 γ 를 변화시키면 스프링의 변위 x 가 변하게 되며, 식 (5)에 의해서 해당하는 외력 F_E 가 계산된다. 즉, 위와 같이 계산된 외력을 가해주면 전체 기구는 스프링 변위가 x 인 상태로 정적 평형을 이루게 된다. 예를 들어, 스프링 상수 $k = 250\text{N/m}$, 링크 길이 $l = 0.03\text{m}$, 스프링의 초기길이가 $x_0 = 0.085\text{m}$, $c = 0.07\text{m}$ 로 설정하였을 때, 전달각에 따른 외력의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보듯이, 전달각이 180° 근처에서는 외력이 양의 무한대로 급격히 발산하므로, 큰 외력에도 작은 스프링의 힘만으로 정적 평형을 유지할 수 있다. 한편, 전달각이 90° 이면 링크 1과 2가 완전히 일직선이 되므로 외력이 0이 되더라도 정적 평형이 이루어진다.

제안된 안전기구에서는 정적 평형상태에 있을 때의 외력을 임계 충격력(critical impulsive force)이라 정의한다. 이는 주어진 전달각에 대하여, 외력이 식 (5)로 계산되는 임계 충격력일 때는 정적 평형이 유지되지만, 이 보다 큰 외력이 작용하면 정적 평형상태가 무너지고 스프링이 급격히 압축되기 때문에 붙여진 이름이다.

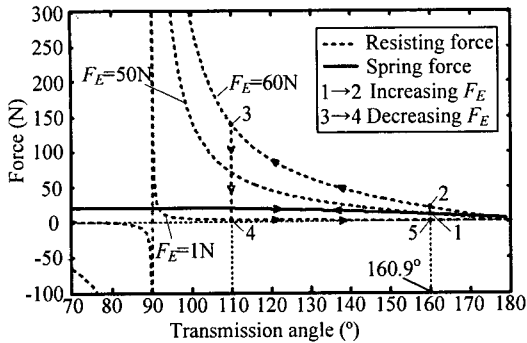


Fig. 6 Graph represented by plots of resisting force and spring force versus transmission angle at higher and lower critical impulsive force

이 현상에 대하여 좀더 자세히 고찰하여 보기로 한다. Fig. 6은 외력이 가해질 때 스프링 변형에 의한 탄성력과 정적 평형을 유지하기 위한 저항력을 함께 나타낸 그림이다. 예를 들어, 앞서 주어진 스프링 상수와 기하학적 조건에서 임계 충격력을 50N으로 선정하는 경우에 정적 평형을 유지하기 위한 전달각은 160.9° 가 된다 (Fig. 5 참조). 따라서 전달각이 160.9° 일 때 스프링의 탄성력과 정적 평형을 유지하기 위한 저항력의 크기가 같게 된다 (평형점1). 그러나 외력이 임계 충격력보다 큰 60N으로 증가하면(1→2) 슬라이더가 위로 움직이면서 전달각이 감소하게 되며, 이 경우 Fig. 6에서와 같이 스프링의 탄성력과 저항력이 모두 증가한다(2→3). 이 때, 그림에서 슬라이더에 작용하는 저항력은 주어진 외력과 전달각에 대하여 식 (3)으로 계산되며, 스프링의 탄성력은 전달각의 함수로 식 (4)로 주어진다. 그림에서 보듯이, 정적 평형을 벗어난 후에는 정적 평형을 유지하기 위하여 슬라이더에 공급해 주어야 되는 저항력이 스프링에 의해서 제공되는 힘에 비하여 훨씬 크게 되므로, 평형상태를 유지하지 못하고 슬라이더가 급격히 이동하게 된다.

그리고 슬라이더가 이동한 후 외력이 임계 충격력 이하인 1N으로 감소하였을 때(3→4), 스프링의 힘이 저항력보다 커지게 되어 슬라이더를 밀게 되므로 전달각이 증가하게 된다(4→5). 만약, 외력이 거의 없다면 스프링에 의한 힘과 저항력은 전달각 180° 근처에서 평형을 이루게 된다.

2.2 충격흡수 모듈과 와이어

완충판(crash panel)이나 자동차 범퍼는 평상시의 사용상태에서는 영구변형을 일으키지 않아야 하지만, 사고가 발생할 경우에는 소성적으로 변형하면서 운동량을 흡수하여 충격을 완화시킨다.

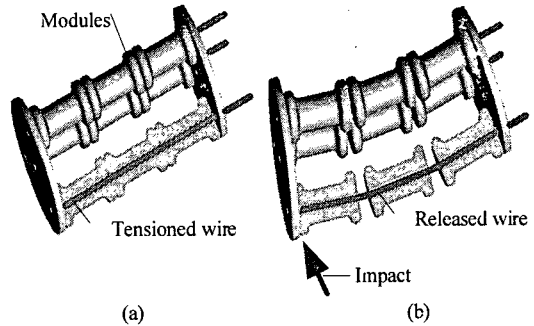


Fig. 7 Shock absorbing modules and wire; (a) before collision and (b) after collision

이와 같은 기구들은 강소성 재료(rigid-plastic material)로 탄성변형과 시간의존 변형이 무시되는 재료이다⁽⁶⁾

강소성 재료가 임계응력 이상에서 변형이 발생하고, 소성변형 시 충격을 흡수하는 현상은 본 연구에서 구현하려는 안전기구의 특성과 동일하지만, 강소성 재료는 변형 후 복원이 불가능하다. 이러한 단점을 보완하기 위하여, 제안된 안전기구에서는 충격흡수 와이어-모듈 장치를 도입하였다. Fig. 7(a)와 같이 원통 형상의 모듈들을 와이어로 연결하여 고정하였다. 평상시에는 와이어의 장력 때문에 모듈들이 강소성 재료처럼 결합을 유지한다. 그러나 외부에서 충격이 가해지면, 충격력에 의해서 와이어 지지부분이 움직여 와이어가 느슨하게 되며, 이로 인하여 Fig. 7(b)와 같이 각 모듈들이 분리됨으로써 외부 충격을 흡수할 수 있게 된다. 충격 시 와이어의 장력이 감소하는 원리는 다음 절의 Fig. 9에서 자세히 설명된다.

3. 안전기구 모델

3.1 시제품 모델링

수동 컴플라이언스 안전기구를 개발하기 위하여 4절링크의 전달각과 스프링, 그리고 모듈-와이어 시스템을 조합한 시제품을 설계하였다. 이와 같은 충격흡수식 안전기구는 로봇 팔의 안전성을 향상시키기 위하여 사용하는데, 이 기구의 무게와 크기는 안전성에 영향을 미칠 수 있는 요소들이다. 따라서 Fig. 8과 같이 슬라이더-크랭크 기구를 단순화하여, 전달각의 특성은 그대로 유지하는 반면에, 크기는 최소화할 수 있도록 설계하였다.

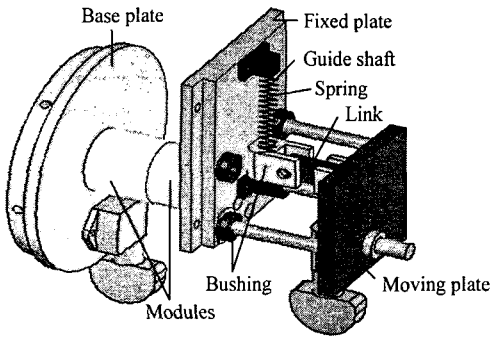


Fig. 8 Modified safety mechanism

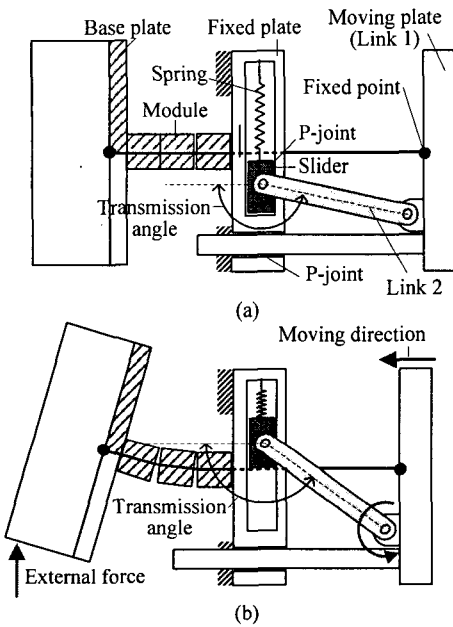


Fig. 9 Modified safety mechanism; (a) before collision, and (b) after collision

Fig. 8에서 보듯이, 슬라이더-크랭크 기구의 슬라이더는 신뢰성이 높은 리니어 부싱(linear bushing)으로 구성하였는데, 리니어 부싱은 슬라이딩 면과 볼 접촉을 하기 때문에 마찰손실을 최소화할 수 있다. 스프링을 리니어 부싱의 가이드 축에 삽입하여, 링크와 연결된 부싱에 저항력을 가할 수 있도록 하였다. 그리고 이동판이 고정판에 대하여 평행하게 직선운동을 할 수 있도록 4개의 부싱을 사용하였다.

2.1절에서 정의한 슬라이더-크랭크 기구의 전달각에 기초한 힘 전달 특성을 제안된 안전기구에 적용하였다. Fig. 4에서 슬라이더-크랭크 기구의 크랭크를 이동판(링크 1)으로 대체하고, 고정판과 이동판 사이에 리니어 부싱을 이용하는 직선관절(prismatic joint; P-joint)을 구성하면 Fig. 9와 같이

된다. Fig. 9와 같이 베이스 판에 임계충격력을 초과하는 외력이 가해지면 이동판이 좌측으로 당겨지게 되며, 링크 2에 의해서 링크 3에 해당하는 슬라이더가 고정판에 장착된 가이드 축을 따라 움직이면서 가이드 축에 삽입된 스프링을 압축하게 된다. 슬라이더가 움직이면 전달각이 감소하게 되어 동일한 외력에 대하여 더 큰 저항력이 작용하여야만 평형을 유지할 수 있는 상태가 된다. 따라서 스프링의 압축에 의하여 저항력이 증가하기는 하지만, 평형을 유지하기에 충분하지 못하여 평형이 무너지면서 슬라이더가 급격히 위로 움직이게 된다. 따라서 와이어가 느슨하게 되며, 이로 인하여 각 모듈들이 분리됨으로써 외부 충격을 흡수할 수 있게 된다. 그러나 임계충격력 이하의 외력에 대해서는 베이스판이 거의 움직이지 않게 된다.

3.2 프로토타입 시뮬레이션

위에서 제안한 안전기구의 성능을 검증하기 위하여 다양한 시뮬레이션을 수행하였다. Solidworks로 구성요소들을 모델링하였고, MSC Visual Nastran 4D를 이용하여 동역학 해석을 수행하였다.

Fig. 10의 시뮬레이션 모델에서 힘을 전달받는 4절링크 부분만을 모델링을 하였으므로, 와이어가 고정되는 이동판 중앙부에 와이어가 전달하는 힘과 같은 크기의 외력을 가해준다. 또한, 리니어 부싱 블록이 가이드축을 따라서 이동할 때의 거동을 스프링-댐퍼 시스템으로 모델링하였는데, 이때 댐퍼는 리니어 부싱과 축 사이의 마찰을 나타내는 것으로 개별적인 댐퍼를 사용하는 것은 아니다.

안전기구가 임계충격력(50N)에 반응할 수 있는 전달각을 찾기 위하여 다음과 같은 시뮬레이션을 수행하였다. 이동판에 최대 55N의 외력을 0 ~ 1.0sec 동안 선형적으로 증가시켰다가 제거하였을 때, 이동판의 변위를 측정하였다.

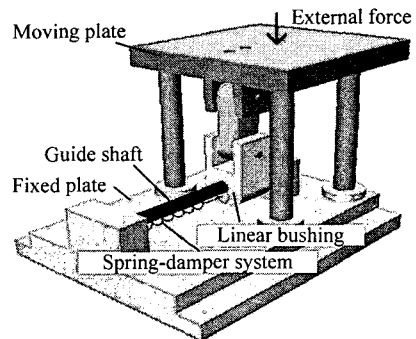


Fig. 10 Modeling of safety mechanism

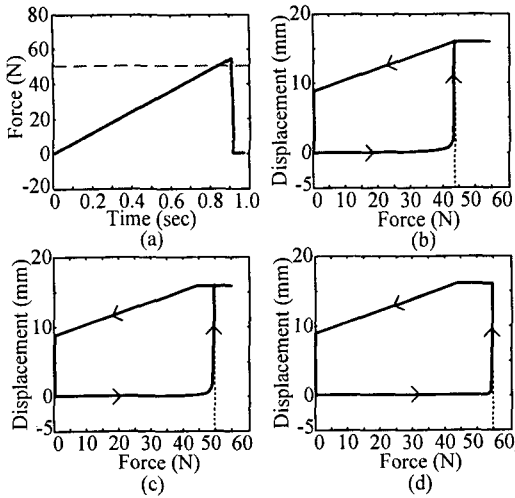


Fig. 11 Graph of force-based simulation results; (a) Force exerted on moving plate, (b) Transmission angle $\gamma = 160^\circ$, (c) $\gamma = 165^\circ$, (d) $\gamma = 170^\circ$

이 때 댐핑계수 c 는 1kg/s, 스프링 상수 k 는 250N/m, 스프링의 초기변위 x_i 는 0.085m, 정적 평형상태에서의 스프링 변위 x 는 0.07m로 고정시키고, 전달각 γ 을 160° , 165° , 170° 로 변화시키면서 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 11은 외력에 대한 이동판의 변위를 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 보듯이 임계충격력 이하의 외력이 가해지면 이동판의 움직임이 거의 없다. 그러나 임계충격력 이상의 힘이 가해질 때는 슬라이더의 변위가 급속히 증가하고 외력이 제거되면 스프링의 힘에 의하여 원래대로 복귀하게 된다. Fig. 11에서처럼 전달각 γ 가 160° 일 때 안전기구의 임계충격력은 44N, 165° 일 때는 50N, 170° 일 때는 55N이다. 전달각이 180° 에 가까워질수록 안전기구에 더 큰 임계충격력을 얻을 수 있다. 즉, 전달각의 크기를 변화시켜서 안전기구의 임계충격력의 조정이 가능하다.

3.3 안전기구의 제작

본 안전기구를 적용한 로봇 팔에 가해지는 외부 충격에 대한 성능을 실험하기 위하여 Fig. 12와 같은 시제품을 제작하였다. 안전기구의 충격 강도를 고려하여, 충격흡수 장치의 모듈을 제외하고, 이동판, 고정판, 베이스판 및 링크부분을 두랄루민으로 제작하였다. Fig. 13(a)와 같이 고정판에 리니어 부싱을 장착하고, 이동판에 연마봉을 고정하여 두 판 사이에 평행 이동이 가능하도록 하였다. 그리고 충돌 발생 후 이동판의 복원을 위하여 연마봉 사이에 압축 스프링을 삽입하였다.

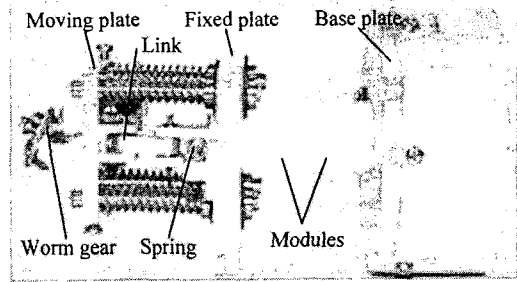


Fig. 12 Prototype of safety mechanism

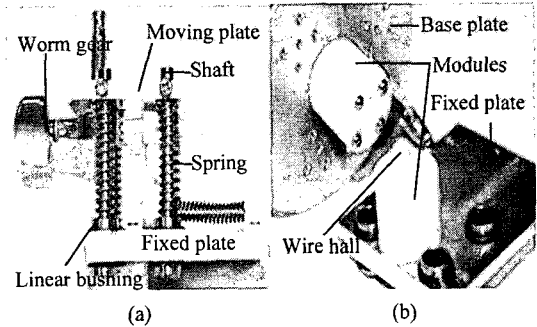


Fig. 13 Components of safety mechanism; (a) restoration mechanism, (b) shape of modules

충격흡수 모듈은 내피로성이 우수한 폴리아세탈(Polyoxymethylene)을 사용하여, 반복충격이나 연속 진동을 받은 환경에서도 안전기구의 안정된 성능을 계속 유지하도록 하였다. Fig. 13(b)와 같이 한 모듈의 접촉면에서는 볼록한 반구 모양으로, 다른 모듈의 접촉면에서는 오목한 반구 모양으로 가공하여, 모듈간의 비틀림 모멘트와 처짐을 방지하도록 하였다.

와이어는 일반 스테인리스 와이어를 사용하여 충격에 안정적으로 견딜 수 있고, 윗기어를 사용하여 베이스판과 이동판에 와이어의 장력을 조정할 수 있도록 하였다.

3.4 안전기준

안전기준은 정적 충돌과 동적 충돌로 나누어 고려할 수 있다. 먼저 정적 충돌 발생시 인간에게 안전하게 전달될 수 있는 힘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F \leq F_{limit} \quad (6)$$

여기서, F_{limit} 는 상해기준으로, 여러 실험적인 연구에 의해서 그 값이 제시되어 있다.⁽⁷⁾ 예를 들어, 정적 충격에 대하여 인간이 견딜 수 있는 한계충격력은 대략 50N정도이다. 정적 충격은 로봇의

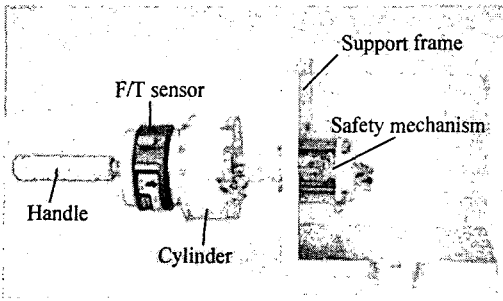


Fig. 14 Experimental setup for safety mechanism

팔이 매우 느린 속도로 사람에게 힘을 가하는 경우로 정의한다.

동적 충돌에 대한 안전기준도 문헌을 참조하여 설정하였다.⁽⁸⁾ 본 논문에서는 동적 충돌의 경우 최대 충격력이 아닌 평균 충격력을 안전기준으로 설정하였다. 충격력 $F(t)$ 의 평균은 어떤 주기 동안에 충격력의 시간 적분으로 얻어진다.

$$F_{mean} = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt \quad (7)$$

즉, 정적 충돌의 경우는 최대 충격력을, 동적 충돌의 경우는 평균 충격력을 안전기준으로 설정하면, 식 (6)에서 두 경우 모두 임계 충격력으로 50N을 적용할 수 있다.

3.5 실험 결과

Fig. 14는 안전기구의 충격 실험장치이다. 시험의 편의를 위해서 안전기구의 베이스판에 원형 실린더를 부착하였다. 실린더가 모멘트 팔의 역할을 하여, 안전기구에 외부 충격력을 쉽게 전달할 수 있다.

원형 실린더 끝단에는 힘/토크 센서를 설치하여 충격력의 크기를 측정하였다. 그리고 힘/토크 센서 끝단에는 손잡이를 부착하여 외력을 가할 수 있게 하였다.

안전기구의 스프링 계수를 6kN/m로 고정하고, 전달각의 크기를 163.6°, 171.8°, 175.9°로 조절하면서 정적 충격 실험을 수행하였다. 정적 충격의 안전기준이 50N이므로, 전달각의 크기에 따라서 임계 충격력이 어떻게 변하는지 실험하여 보았다. 실험방법은 Fig. 14와 같이 토크 센서가 장착된 손잡이에 분동을 이용하여 외력을 서서히 50N까지 증가시켜서 정적 충격력을 측정하였다. 안전기구가 장착된 경우와 장착되지 않은 로봇팔에 동일하게 실험하였다.

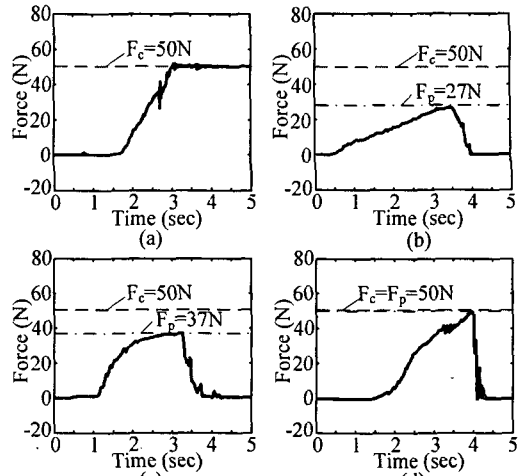


Fig. 15 Experimental results for static collision; (a) rigid robot arm, and robot arm with safe mechanism at transmission angle (b) 163.6°, (c) 171.8°, (d) 175.9°

Fig. 15의 정적 충격에 대한 실험 결과에서 알 수 있듯이, 안전기구가 장착되지 않은 로봇팔에서는 외부에서 가해진 충격력이 그대로 인간에게 전달되지만, 안전기구가 설치된 팔에서는 충격력이 기구에 의해서 흡수된다. 전달각의 크기가 163.6°일 때는 임계충격력이 27N, 171.8°일 때는 37N, 175.9°일 때는 50N이다. 따라서 정적 충격에서는 175.9° 이하의 전달각을 사용함으로써 50N 이상의 충격력으로부터 인간을 보호할 수 있다.

다음으로 안전기구의 동적 충격에 대한 실험을 수행하였다. 안전기구를 장착한 경우와 하지 않은 경우로 나누어, 토크 센서가 부착된 손잡이에 동적 충격을 가하였다. 손잡이 부위에 농구공을 자유낙하 시켜서 그 때 발생하는 충격력을 측정하였다. 0.6kg의 고무공을 각각 일정한 높이 0.5m, 1m, 1.5m에서 자유낙하하여 손잡이 부위에 충돌시켰다. 본 실험에서 안전기구의 전달각은 175.9°로 조정하였고, 스프링 계수가 6kN/m인 압축 스프링을 사용하였다.

실험 결과 Fig. 16에서 보는 바와 같이 안전기구를 장착하지 않았을 경우 낙하거리 0.5m일 때 평균 충격력은 27N이고, 1.0m일 때 49N, 1.5m 일 때 70N이다. 그러나 안전기구를 장착하면, 낙하거리 0.5m일 때 평균 충격력은 15N이고, 1.0m일 때 25N, 1.5m 일 때 34N이다. 안전기구를 사용함으로써 모든 경우에 대하여 임계충격력인 50N 이하로 충격을 유지할 수 있었다.

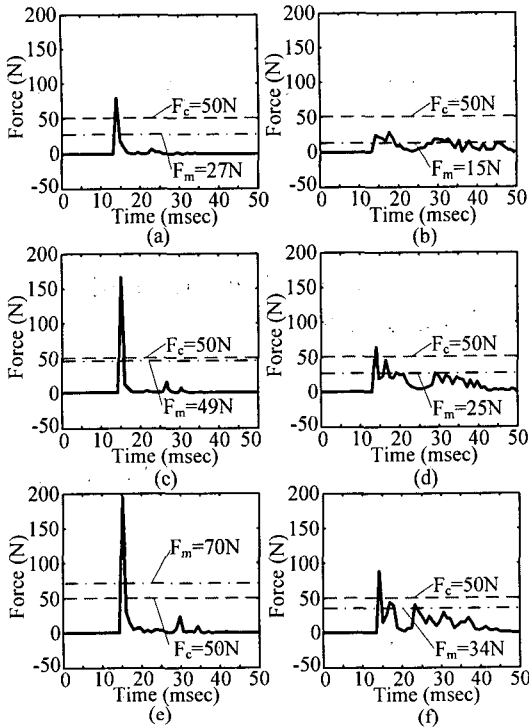


Fig. 16 Experimental results for dynamic collision; without safety mechanism at free fall height (a) 0.5m, (c) 1.0m, (e) 1.5m, and with safety mechanism at free fall height (b) 0.5m, (d) 1.0m, (f) 1.5m

4. 결론

본 연구에서는 4절링크의 전달각의 특성을 이용하여 임계치 이하의 충격에 대해서는 반응하지 않지만, 임계치 이상의 충격에 대해서는 충격을 흡수할 수 있는 수동적인 안전기구를 제안하였다. 제안된 안전기구에 대한 해석과 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 임계충격력 이하의 외력에 대해서는 안전기구의 강성을 그대로 유지할 수 있으므로, 로봇 팔을 이용한 작업의 성능을 보장할 수 있었다.
- (2) 임계충격력 이상의 외력에 대해서는 안전기구의 강성이 급격히 저하되어 안전성을 확보할 수 있었다.
- (3) 4절링크의 전달각을 조절함으로써 안전기구의 임계충격력을 해석적으로 정확히 설정할 수 있었다.

(4) 제안된 안전기구는 수동적으로 동작하기 때문에 반응속도가 빠르고 오동작의 위험이 거의 없다. 안전의 신뢰도가 매우 높다.

현재 본 연구에서 개발한 안전기구를 안전 로봇 팔에 적용하고, 이 외에도 다양한 형태의 안전장치에 적용하는 연구를 진행 중이다.

후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10336-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Laurin-Kovitz, K.F. and Colgate, J. E., 1991, "Design of Components for Programmable Passive Impedance," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1476~1481.
- (2) Morita, T. and Sugano, S., 1995, "Development of One-D.O.F. Robot Arm Equipped with Mechanical Impedance Adjuster," *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, pp. 407~412.
- (3) Okada, M., Nakamura, Y. and Ban, S., 2001, "Design of Programmable Passive Compliance Shoulder Mechanism," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 348~353.
- (4) Kang S. and Kim, M., 2002, "Safe Arm Design for Service Robot," *Proc. of the International Conference on Control, Automation and System*, pp. 88~95.
- (5) Wilson, Charles E. and Sadler, J. Peter, 1993, *Kinematics and Dynamics of Machinery*, Second Edition.
- (6) Stephen H. Crandall and Norman C. Dahl, 1978, *An Introduction to The Mechanics of Solids*, Second edition.
- (7) Yamada, Y., Hirasawa, Y., Huang, S.Y. and Umetani, Y., 1996, "Fail-Safe Human/Robot Contact in the Safety Space," *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp. 59~64.
- (8) Yamada, Y., Suita, K., Imai, K., Ikeda, H. and Sugimoto, N., 1997, "Human-Robot Contact in the Safeguarding Space," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 2, No. 4, pp. 230~236.