

고중량의 원통형 작업대상물 파지용 집게형 그리퍼의 슬립 조건과 이를 반영한 설계 및 해석

Slip Considered Design and Analysis Pincers-type Gripper for Seizing Heavy-weighted Cylindrical Objects

최 정 현¹, 안 진 용⁺, 이 상 문¹, 장 명 언²

Choi Jung Hyun¹, An Jinung⁺, Lee Sang Mun¹, Jang Myeong Eon²

Abstract This paper dealt with a pincers-type gripper being able to grip a heavy-weighted cylindrical object having various size with itself. This gripper should be designed to seize the objects without any change of jaw shape. Grasping achieved equilibrium after the object slipped on the jaw while grasping it. To cope with this situation, we suggested the slip considered gripper design procedure based on grasping equilibrium. The obtained slip condition can provide a limit friction coefficient depending on the contact angle when initiating contact between jaw and object. Consequently, the gripping force and the required actuating force can be calculated. In order to verify the proposed slip condition, the simulations were performed using a dynamic software.

Keywords: Gripper, Slip, Grasping Equilibrium, Friction Limit

1. 서 론

로봇이 수행하는 작업의 종류와 그 특성에 따라 로봇의 말단장치가 결정된다. 일반적으로 로봇의 말단장치는 파지(gripping), 절단(cutting), 흡착(suction) 등 작업의 기능에 따라 기구적 구조와 구동 메커니즘이 달라진다. 특히 파지는 로봇 작업의 가장 대표적인 기능으로 작업물의 크기, 형태, 무게, 환경 등에 따라 매우 다양한 파지용 말단장치(그리퍼, gripper)들이 산업용 로봇은 물론 서비스용 로봇 등에서 활용되고 있다. 예를 들어 포탄 등과 같은 고중량물을 파지하기 위한 말단장치는 유공압으로 작동되는 것이 보통이나 유공압 발생을 위한 엔진 등의 별도 장치들과 공기 또는 기름의 누출 방지를 위한 부가 장치들이 필요하게

되어 말단장치 자체의 중량을 늘리는 단점이 있다. 반면에 전기 구동 방식의 그리퍼는 유공압 방식에 비해 큰 파지력을 제공하기 어렵게 때문에 고중량인 작업대상물을 파지하기 위해서는 작업대상물의 파지 조건에 적합한 파지력과 구동력 계산을 통한 그리퍼의 설계가 요구된다. Schunk사는 3 종류의 파지 자세에 따른 파지력을 수치적으로 산출하여 그리퍼의 구동력 산출에 활용하고 있다^[1]. 이 수식은 그리퍼 한 쌍의 악(jaw)이 대칭모양이고 제시한 3종류의 파지 조건에만 적용할 수 있다. 만일 다양한 크기와 형상의 물체를 파지하고자 한다면 형상 적응형 기구(adaptive finger mechanism)^[2-4]나 일반적인 다자유도 로봇 손^[5,6] 등을 적용 할 수 있다. 이는 악의 형상이 다양한 크기에 맞게 변화 될 수 있으나 악의 기구적 특성상 작업영역이 좁고 파지력이 낮은 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서는 악의 형상을 변화시키지 않고 다양한 크기의 중량물을 파지할 수 있는 그리퍼가 요구되며 뿐만 아니라 기존의 집게형 그리퍼^[1]에서 제시하지 못한 악과 파

Received : Mar. 4. 2015; Reviewed : Apr. 20. 2015; Accepted : Jun. 2. 2015

※ This research was supported by a grant for the project managed by Agency for Defense Development, "Technology development for a rescue robot capable of lifting over 120 kgf," funded by the Dual-use technology program.

[†] Corresponding author: Robotics Research Division, DGIST, 333, Techno Jungang Dae-ro, Hyeonpung-Myeon, Dalseong-Gun, Daegu, Korea(robot@dgist.ac.kr)

¹ Robotics Research Division, DGIST (jhchoi-sog@dgist.ac.kr, bestoflee@dgist.ac.kr)

² Agency for Defense Development (jangmyeong@add.re.kr)

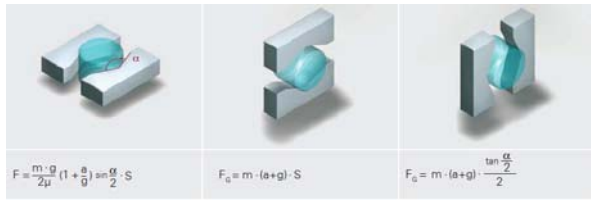


Fig. 1. Circumstances of gripping^[1]

지대상물 사이의 미끄러짐(슬립, slip)을 고려한 파지력 방정식을 제시할 필요가 있다.

본 논문에서는 작업대상물을 지름과 무게가 다른 원통형의 포탄으로 한정하고 이를 파지하기 위한 파지 환경을 정의하고(2장) 이에 맞는 그리퍼 악의 형상과 치수를 결정한 후(3장), 악과 포탄 사이의 마찰을 고려한 파지력과 구동력을 산출하였다(4장). 제안된 방식은 다양한 크기의 작업대상물을 악의 형상을 변경하지 않으면서 파지할 수 있으며 산출된 수식에 근거한 파지력으로 구동기의 용량을 예측하는데 활용할 수 있다.

2. 작업대상물과 파지환경의 정의

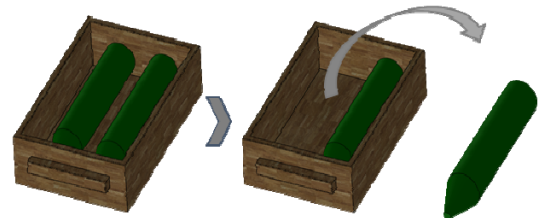
이 연구는 인명 구조와 포탄 운반을 목적으로 하는 로봇 시스템 개발^[7]의 말단장치 연구의 일부에 해당하는 것으로 작업대상물인 포탄의 종류와 형상을 Fig 2와 Table 1에 나타낸다. 포탄운반 시나리오^[6]에 따르면, Fig 3과 같이 상자 안에 놓인 상태에 있는 포탄을 그리퍼가 파지하고 로봇이 파지된 포탄을 상자 밖으로 들어 올려 꺼낸다. 이때 다양한 크기와 중량을 갖는 포탄을 파지하기 위해 그리퍼는 파지 시에 포탄의 지름과 상관없이 파지력 평형 (grasping equilibrium)^[8]이 되어야 한다. 예를 들어 Fig 4와 같이 포탄의 지름에 대응하여 악의 길이를 조절하여 파지할 수 있다. 이 경우, 악의 길이 조절을 위한 구동 요소가 필요하게 되어 악 기구부의 강도를 약화시키고 그리퍼 전체의 중량과 크기를 증가시키는 단점이 예상된다. 따라서 악 길이 변화 없이 파지하는 방법을 고려하고자 한다.

Table 1. Dimension of shells

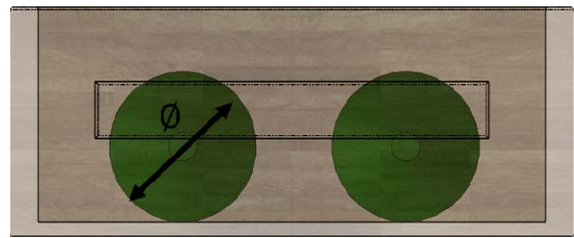
No	Diameter [mm]	Weight [kg]
1	105	19.5
2	120	19.7
3	130.9	23



Fig. 2. Shape of shells



(a) Shells in the box



(b) Front view of shell in the box

Fig. 3. Task environment

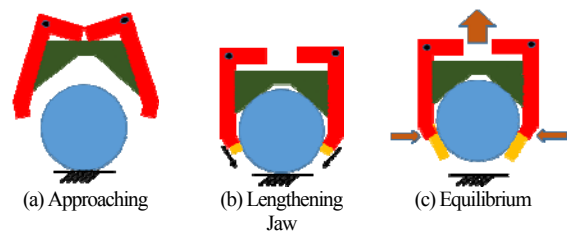


Fig. 4. Grip with lengthening jaw

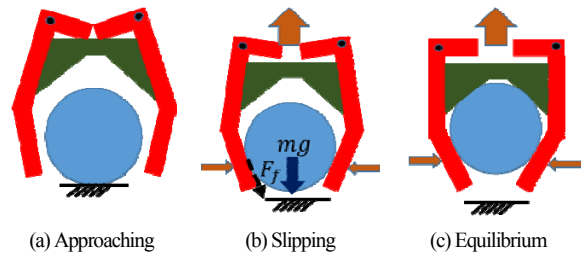


Fig. 5. Slip during gripping

Fig 5와 같이 포탄과 악면(jaw surface)이 접촉을 시작하면 서부터 발생하는 슬립을 극복하여 포탄을 파지력 평형에 이르게 해야 한다. 먼저 대상 포탄들의 지름들에 대해 파지력 평형을 보장하는 악 길이를 결정하고 악면과 포탄사이의 마찰력의 변화에 따른 파지력을 산출해야 한다.

3. 그리퍼 형상 및 치수 선정

3.1 파지력 평형에 따른 악 형상 선정

파지력 평형의 필요 조건은 한 쌍의 악이 작업 대상물과 두 면에서 최초로 접촉이 일어나야 한다는 것이다. Fig 6에 파지력 평형인 그리퍼의 형상을 예시한다. 악과 지면이 이루는 각도에 따라 접촉점이 달라지고 접촉력(F_C)이 발생하고 이를 유지하기 위한 파지력(F_G)이 요구된다. 파지력은 구동기 선정 및 구동부 설계에 중요한 구동력을 결정하는 설계 인자로 파지력을 최소화하는 것이 그리퍼의 중량과 크기 그리고 에너지 효율 등에 있어 유리하다. 악의 꺾인 각도(α)가 작을수록 파지력은 작아지는 대신 악이 움직이는 범위(w_1)가 더 넓어진다(Fig 7). 앞서 말한 대로 연구의 대상인 그리퍼는 전체 로봇시스템의 일부 구성

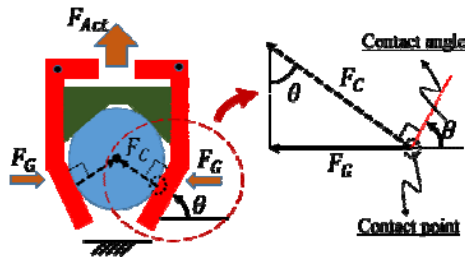


Fig. 6. Gripping configuration

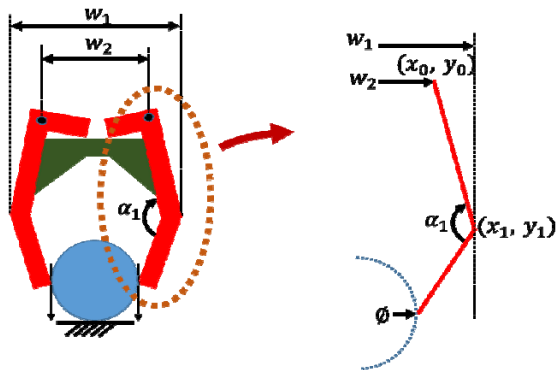


Fig. 7. Jaw angle and width

요소로 각 구성품 간의 설계 요구 사양이 결정되어 있으며 그리퍼의 폭(w_2)은 180mm이하로 주어지며 악이 움직일 수 있는 최대 범위(w_1)는 250mm 이하로 주어진다. 이에 따라 꺾인 각도는 식 (1)에서 122.6°로 나타나며 설계 시 123°를 적용하였다. 이로부터 악과 포탄이 파지력 평형에 도달했을 때, 악과 지면이 이루는 각(θ)을 접촉각(contact angle)으로 정의하면 접촉력과 파지력의 관계는 식 (2)와 (3)이 된다.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{x_1^2 + y_1^2 - x_0 x_1 - y_0 y_1}{\sqrt{\Delta}} \right) \quad (1)$$

Here, $\Delta = (x_1^2 + y_1^2)(y_0^2 + y_1^2 + x_0^2 + x_1^2 - 2x_0 x_1 - 2y_0 y_1)$

$$F_C = \frac{mg}{2 \cos \theta} \quad (2)$$

$$F_G = F_C \sin \theta \quad (3)$$

또한 악 길이(jaw length)는 접촉각과 포탄의 지름에 의해 대수적으로 최대 포탄의 지름(130.9mm)에 대해 72mm에서부터 최소 포탄의 지름(105mm)에 대해 지면과 부딪히지 않는 조건 하에 100mm까지 가능하고 이 둘 사이의 중간치인 86mm로 선정하였다(Fig 8).

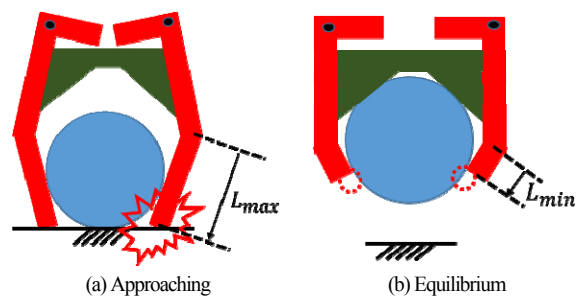


Fig. 8. Jaw length

3.2 그리퍼 구조 설계

선정된 악 길이와 꺾인 각도를 적용한 그리퍼의 구조는 Fig 9에 나타낸다. 그리퍼 양측에 구비된 관절 A(joint A)를 정첩(hinge)로 하여 그리퍼 중앙의 이동판(moving plate)이 회전형 구동기에 연결된 볼스크류(ball screw)에 의해 상하로 동작하면서 물체를 파지하는 작동원리이다. 이때 관절

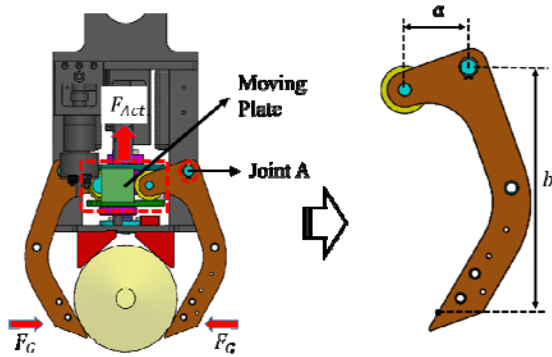


Fig. 9. Gripper mechanism

A와 이동판의 접점까지의 거리를 a , 관절 A에서 포탄 파지점(contact point)까지의 수직거리를 b 라고 하면 식 (3)의 파지력(F_G)을 내기 위한 이동판의 구동력(F_{Act})은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 F_{ACT} &= 2\left(\frac{b}{a}\right)F_G \\
 &= 2\left(\frac{b}{a}\right)F_C \sin \theta \\
 &= \left(\frac{b}{a}\right)mg \tan \theta
 \end{aligned} \tag{4}$$

4. 파지력 평형을 위한 슬립 조건

그리퍼는 파지 도중에 발생하는 슬립, 이탈 등을 극복하고 안정적인 파지를 할 수 있어야 한다. 따라서 슬립이 존재하는 상태에서 파지력을 계산하여 적절한 구동력을 제시할 필요가 있다. Fig 10.a와 같이 큰 지름의 포탄은 악(jaw)과 장(palm)에 모두 슬립 없이 접촉하여 파지력 평형에 이른다. 이와는 달리 Fig 10.b의 작은 지름의 포탄을 파지할 때 악면과 포탄 사이에 슬립이 발생하므로 이를 극복해서 파지력 평형을 도달해야만 한다. 따라서 슬립 상태에서의 파지력 산출이 필요하다. Fig 11로부터 식 (6)의 힘 평형이 계산되고 슬립 상태에서의 접촉력 식 (7)을 식 (4)에 대입함으로써 마찰이 고려된 파지력과 구동력을 얻을 수 있다. 여기서 마찰을 무시할 수 있는 수준($\mu=0$)이면 식 (7)은 식 (2)이 된다. 일반적으로 마찰계수는 접촉면의 재질이나 윤활 상태 등의 비선형적인 특성들로 안전계수로만 취급하는 경향이 있으나 본 연구에서는 슬립이 일어나는 포탄과 악면 사이의 접촉 형태가 일정하고 재질도 변

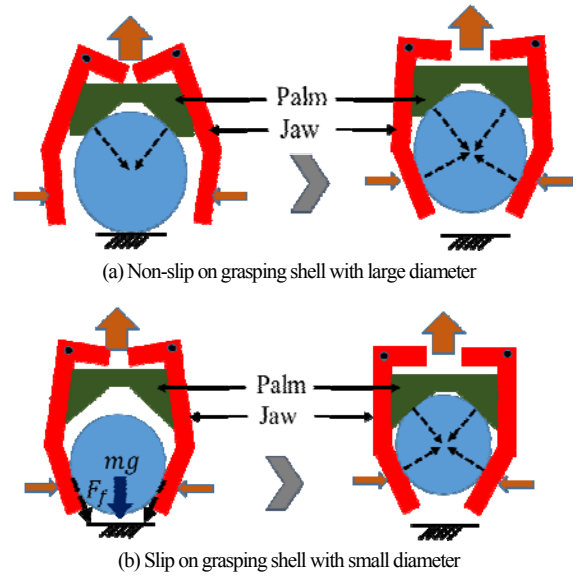


Fig. 10. Grasping shells

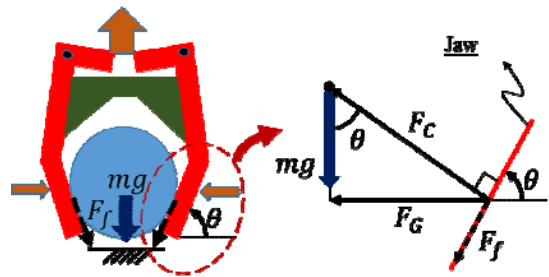


Fig. 11. FBD of slip situation

$$F_f = \mu F_C \tag{5}$$

$$2(F_C \cos \theta - \mu F_C \sin \theta) = mg \tag{6}$$

$$F_C = \frac{mg}{2(\cos \theta - \mu \sin \theta)} \tag{7}$$

화가 없으므로 파지작업 동안 마찰계수는 일정하다고 가정할 수 있다. 식 (7)에 의하면, 슬립 존재 시의 파지력은 접촉각이 작아짐에 따라 감소하고, 마찰계수가 클수록 증가한다. 즉 접촉각과 마찰계수에 따라 파지력이 결정되는 것을 알 수 있다. 접촉각은 포탄의 종류에 따라 초기 접촉각이 달라지고 파지가 진행되면서 감소하며 일정한 값에 이른다. 마찰계수는 Fig 12와 같이 악의 선정되는 재질에 따라 달라진다. 여기서, 포탄과 악의 마찰계수가 한계 마찰계수(μ_c) 보다 큰 재질로 악의 재질을 선정하면 아무리

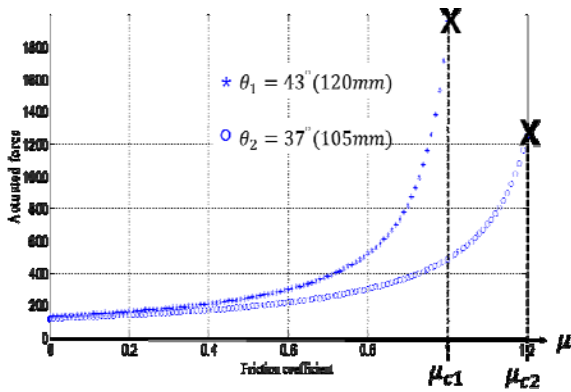


Fig. 12. Limit friction coefficient

큰 힘으로 포탄을 파지하더라도 끼임 현상이 발생하여 완전히 파지될 수 없게 되므로 재질을 선정 시 식 (8)과 같은 조건에서 결정되어야 한다.

$$\mu_c < \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \quad (8)$$

5. 시뮬레이션

파지 조건에 대하여 산출된 그리퍼에서 요구되는 파지력과 구동력이 적절한 것인지 상용 동역학 시뮬레이션 RecurDyn^[9]을 사용하여 검증하였다. 파지전략은 Fig 13과 같다. 지면에 놓인 포탄을 파지하여 장에 접촉할 때까지 구동력을 점차 증가 시킨 후 그리퍼를 상승시켜 포탄이 이탈 되지 않은 상태로 파지력 평형에 이르게 하였다. Fig 14.a와 같이 슬립이 발생하지 않는 130.9mm 크기의 포탄을 파지할 때 접촉력은 약 163N, 구동력은 약 1016N이 산출

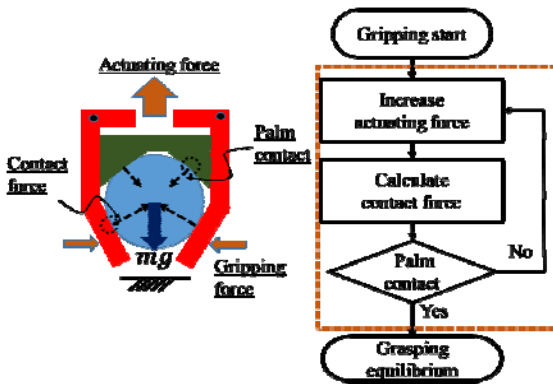
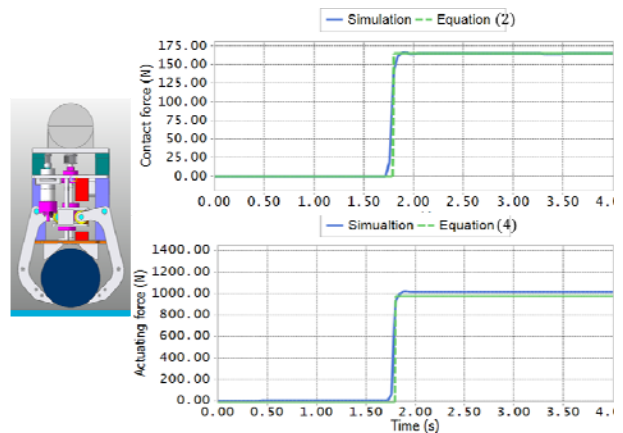
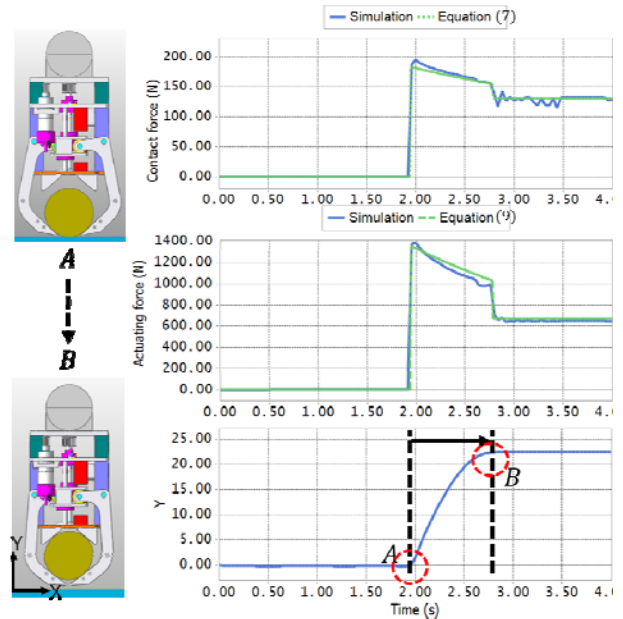


Fig. 13. Gripping scenario



(a) Force calculation of non-slip situation



(b) Force calculation of slip situation

Fig. 14. Force calculation

되었으며 이는 식 (2)과 (4)에 의한 결과와 비교하면 접촉력은 최대 0.6%, 구동력은 최대 3.5%의 오차가 발생하였다. 이는 시뮬레이션을 할 때 입력된 구동 부품들의 중량과, 약의 관절에서 길이비 측정오차의 영향 등에 기인한다.

120mm 크기의 포탄을 파지할 때 슬립이 발생하며 시뮬레이션에 적용할 수 있는 마찰계수의 범위는 식 (8)에 의해 1.04이하로 선정할 수 있으나, 약의 재질을 고려하여 0.3으로 설정하였다. 포탄은 Fig 14.b의 맨 아래에 나타낸 바와 같이 A지점에서 약과 포탄 간의 최초 접촉이 일어난 후 슬립을 일으키며 서서히 B지점으로 상승하여 완전히

파지력 평형에 다다르게 된다. 이 때 최대 접촉력은 약 195N, 최대 구동력은 약1380N으로 계산되며 식 (7)과 (4)의 결과와 비교하면 접촉력은 6.1%, 구동력은 9.7%의 오차를 보인다(Table 2).

여기서 요구되는 구동력은 악면과 포탄 사이의 마찰계수가 중요한 요인으로 작용하며 제안된 식 (7)을 이용하여 그 영향을 정의할 수 있다. 또한, 120mm크기의 포탄 경우 130.9mm크기의 포탄보다 중량이 14.3% 작지만 요구되는 구동력은 약 27.1% 정도 더 크다는 것을 알 수 있다. 동일한 마찰계수에서 슬립이 존재하는105mm크기의 포탄을 파지하는 경우는 초기 접촉각이 120mm크기의포탄을 파지하는 경우보다 작아 요구되는 파지력이 낮으므로 굳이 고려하지 않아도 된다.

Table 2 Calculated force by Eq. (2), (4) and (7)

	120[mm]		130.9[mm]	
	Eq.	Sim.	Eq.	Sim.
Contact Force[N]	183	195	164	163
Error[%]	6.1		0.6	
Actuating Force[N]	1246	1380	980	1016
Error[%]	9.7		3.5	

6. 결 론

본 연구에서는 다양한 크기를 갖는 포탄을 파지할 수 있는 집게형 그리퍼의 설계를 다루었다. 이를 위해 파지 환경을 고려하여 그리퍼의 기구적인 특성(악의 길이와 각도)을 선정하고 파지 초기 시 포탄을 파지력 평형 상태로 만드는데 요구되는 파지력을 악면과 포탄 사이의 슬립을 고려하여 도출하였다. 슬립은 그리퍼의 구동력 선정에 있어 매우 중요한 요인으로 한계 마찰계수를 도입하여 실제 사용 가능한 악 재질을 결정하는 데 활용할 수 있다. 본 연구에서 도출된 악의 접촉각에 따른 한계 마찰계수를 제시함으로써 악의 재질을 결정하는데 있어 구체적인 범위를 제공하는 장점이 있다. 뿐만 아니라 수학적으로 제안한 슬립을 고려한 집게형 그리퍼 설계 과정의 검증에 위해 상용 동역학 프로그램을 사용하여 비교 고찰하였다. 결론적으로 슬립을 고려한 그리퍼 파지력의 수학적 모델링은

구동기 용량을 정확하게 예측하는 데 매우 요긴하며 파지 자세에 따라 실시간으로 변화하는 파지력의 예측과 일정한 파지력을 유지할 필요가 있는 경우의 파지 제어에 활용성이 크다. 앞으로는 본 연구에서 설계된 그리퍼를 제작하여 실험을 통하여 제시된 수식적 모델링을 최종 검증할 계획이다.

References

- [1] Andreas Wolf, Ralf Steinmann, Henrik Schunk, "Gripper in motion", Springer, 2006.
- [2] H.-S. Yu, M.-C. Kim, J.-B. Song, "Tendon-driven Adaptive Robot Hand", Journal of Korea Robotics Society, vol. 9, no.4, pp.258-263, 2014.
- [3] Dubey, Venketesh N, and Richard M. Crowder, "A finger mechanism for adaptive end effectors", International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp.995-1001, 2002.
- [4] Y. Cho, J. Cheong, D. Kim, "Generalized Graph Representation of Tendon Driven Robot Mechanism", Journal of Korea Robotics Society, vol. 9, no.3, pp.178-184, 2014.
- [5] J. Butterfass, M. Fischer, M. Grebenstein, S. Haidacher, G. Hirzinger, "Design and experiences with DLR hand II", In Automation Congress, vol. 15, pp.105-110, 2004
- [6] S.-M. Lee, K.-D. Lee, H.-K. min, T.-S. Noh, S.-T. Kim, "Design of a Humanoid Robot-hand with MEC-Joint", Journal of Korea Robotics Society, vol. 7, no.1, pp.1-8, 2012.
- [7] Civil-military technology cooperation, "Technology development for a rescue robot capable of lifting over 120 kgf", 2013~2019.
- [8] J. Ponce, S. Sullivan, A. Sudsang, J. Boissonnat, D. Merle, "On computing four-finger equilibrium and force-closure grasps of polyhedral objects", The International Journal of Robotics Research, vol. 16, no.1, pp.11-35, 1997.
- [9] RecurDyn V8R3, <http://www.functionbay.co.kr/>



최정현

2010 영남대학교 기계공학부
(학사)
2013 영남대학교 기계공학
(석사)
2013~현재 대구경북과학기술원, 연
구원

관심분야 : 로봇 기구해석 및 설계



이상문

2004 영남대학교 기계공학부
(학사)
2007 영남대학교 기계공학
(석사)
2007~2013 고등기술연구원
선임연구원

2013~현재 대구경북과학기술원, 선임연구원
관심분야 : 과구동 로봇 설계 및 제어



안진웅

1993 성균관대학교 기계공학부
(학사)
1997 한국과학기술원 제어공학
(석사)
2005 한국과학기술원 로봇공학
(박사)

2005~2008 광운대학교 정보제어공학과 조교수
2008~현재 대구경북과학기술원, 책임연구원
관심분야 : 국방사회안전로봇, 재활로봇



장명언

1987 전남대학교 기계공학
(학사)
1990 전남대학교 기계공학
(석사)
2009 충남대학교 메카트로닉스공학
(박사)

1993~현재 국방과학연구소 책임연구원
관심분야 : 로봇 설계 및 제어