

# SWM을 이용한 케이블 드라이브 시스템

## SWM Utilized Cable Drive System

이 범 주\* · 김 갑 일†  
(Bum-Joo Lee · Kab Il Kim)

**Abstract** - In this paper, cable drive mechanism is proposed to implement high reduction gear ratio. Cable drive mechanism has great advantages such as light weight, high degree of freedom about design aspect and zero backlashes. However, it is restrictively utilized for robotic applications because it is difficult to implement high reduction gear ratio more than 10 to 1. Proposed mechanism enables multi-level reductions by adopting seamless winding method (SWM) which links the previous output axis and the next input axis. Consequently, this reduces the mechanical complexity significantly and enables high reduction with only one single wire cable. 3D CAD design was provided and prototype was manufactured.

**Key Words** : Reduction gear, Cable drive, Actuator, Zero backlash and back drivability

### 1. 서 론

좋은 감속기가 가져야 하는 요소로서 제로 백래쉬(Zero Backlashes), 역구동성(Back Drivability), 내구성(Durability), 소형/경량화(Compactness) 등을 들 수 있다. 이를 위하여, 대부분의 로봇에서는 하모닉드라이브(Harmonic Drive)가 많이 사용되어 왔다 [1-3]. 백래쉬가 없고 높은 감속비의 구현이 가능하며, 유성기어에 비하여 소형화가 가능하다는 장점을 지니고 있으나, 마찰력과 관성이 다소 높아 역구동성이 만족스럽지 못하고, 축 방향 충격에 약하며 무겁다는 단점을 지니고 있다. 이러한 성능상의 한계로 인하여, 토오크 제어의 성능이 떨어지고, 질량 분포가 커지게 되며 로봇의 기구부를 세련되게 디자인하기 어렵게 된다. 이러한 하모닉드라이브 단점을 보완하고자, 케이블 와이어를 이용한 연구가 최근 주목을 받고 있다[4-9]. 즉, 입력 축과 출력 축에 와이어를 감아 반지름 비율을 감속비로 이용하는 방법으로서, 제로 백래쉬, 높은 역구동성과 내구성 및 경량화를 모두 만족시킬 수 있다. 그러나 높은 감속비를 구현하기 위해서는 여러 차례의 감속을 수행해야하며, 이를 위하여 다시 복잡한 기계 메커니즘이 필요하다는 단점이 발생한다. 와이어만을 이용하여 높은 감속비(10대 1이상)를 구현하기 위해서는 여러 단으로 이루어진 감속기로 구성해야 하는데, 와이어를 풀리(Pulley)에 고정하기 위한 장치와 장력조절장치의 설치비용 등으로 인하여 크기를 작게 설계하기가 어려웠다. 본 논문에서는 하나의 와이어만을 이용하여 끊임없이 감는 새로운 방법을 제안하여 이를 해결하도록 하였다. (그림 1 참고).

2장에서는 감속기의 전체 구조에 대하여 설명하며, 3장에

서 와이어가 감기는 경로와 소형화할 수 있는 방안에 대하여 논의한 후 4장에서 결론을 맺도록 한다.

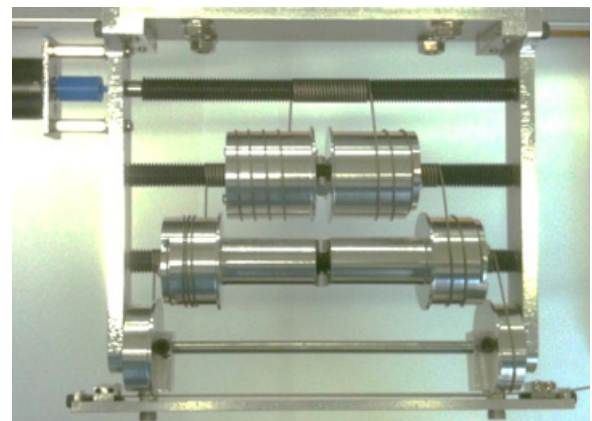


그림 1 개발된 시작품.

Fig. 1 Prototype of the proposed cable drive system

### 2. 본 론

와이어를 이용한 감속 시스템은 와이어의 장력이 일정하게 유지되어 동작 영역에서 팽팽하게 감겨 있어야 하며 이를 위하여 와이어가 감기는 경로를 정확하게 계산하여야 한다. 또한 와이어 케이블의 피로로 인한 손상 및 영구 변형을 방지하기 위하여 와이어가 감기는 회전 반경이 와이어의 특성에 따른 최소곡률반경 보다 커야 한다.

$$r \geq r_b, \forall r \in R$$

여기서  $r_b$ 와  $R$ 은 각각 최소곡률반경과 와이어가 감기는 전체 영역을 나타낸다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Myongji University, Korea  
E-mail : kkl@mju.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Myongji University, Korea  
Received : October 31, 2013; Accepted : January 27, 2014

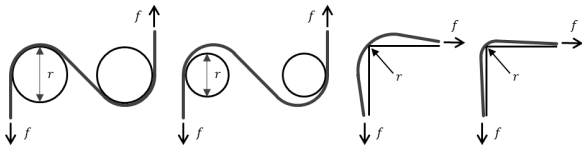


그림 2 와이어가 감기는 패턴에 따른 분류.

- (a) 적절한 경우 ( $r \geq r_b, f \leq f_n$ ).
- (b) 부적절한 경우 1 ( $r < r_b, f \leq f_n$ ).
- (c) 부적절한 경우 2 ( $r = r_b, f \leq f_n$ ).
- (d) 부적절한 경우 3 ( $r = 0, f > f_n$ ).

Fig. 2 Classification of the winding pattern.

- (a) Proper case ( $r \geq r_b, f \leq f_n$ ).
- (b) Improper case 1 ( $r < r_b, f \leq f_n$ ).
- (c) Improper case 2 ( $r = r_b, f \leq f_n$ ).
- (d) Improper case 3 ( $r = 0, f > f_n$ ).

그림 2는 와이어가 감기는 여러 경우를 도시한 것이다. 와이어가 감긴 기구부의 반경이 최소곡률반경보다 클 경우에는 와이어가 기구부와 접촉하여 생기는 곡선이 최단 경로가 된다(그림 2(a)). 그러나 와이어가 감긴 기구부의 반경이 최소 반경보다 작을 경우에는 와이어의 경로가 최단 경로가 되지 못하기 때문에 장력이 커짐에 따라 경로의 길이가 줄어들게 된다(그림 (b) (c) (d)). 이러한 경우, 입력단(=모터 입력)과 출력단(=감속기 출력) 사이의 강성이 낮아지게 되어 제어 특성이 낮아지게 된다. 이상과 같이, 와이어가 감기는 최소곡률반경을 고려하여 와이어의 경로가 항상 최단 거리가 되도록 와이어를 감는 영역을 다음과 같이 세 부분으로 나누어 생각하도록 한다.

### 2.1 Constant Winding Radius Region

이 영역은 일반적으로 입력축과 출력축에 감기는 와이어의 영역에 해당한다. 이 영역에서는 와이어가 감기는 반경이 일정하기 때문에 인접하여 감기는 와이어끼리 동일한 간격으로 감기게 된다. 더욱이 와이어가 팽팽하게 감겨 있어야 하기 때문에, 축의 표면을 펼쳐보면 와이어가 지나가는 경로(winding path)가 최소 경로가 되어야 하므로 직선의 형태를 띠게 된다(그림 3 참고). 이 때, 와이어가 감긴 수직상의 길이를 winding length로, 수평상의 거리를 winding distance로 정의하기로 한다. 따라서 와이어가 팽팽하게 감기기 위한 winding path는 다음과 같이 winding length와 winding distance의 비율이 일정한 상수 값으로 나타난다.

$$w_s = \frac{\text{winding distance}}{\text{winding length}} \tag{1}$$

이 비율을 winding slop으로 정의한다. 즉, 와이어가 팽팽하게 감기기 위한 필요충분조건은 와이어가 감기는 모든 영역(inter-level winding region과 non-winding radius region 포함)에서 winding slop이 일정한 상수 값을 갖는 경우이다.

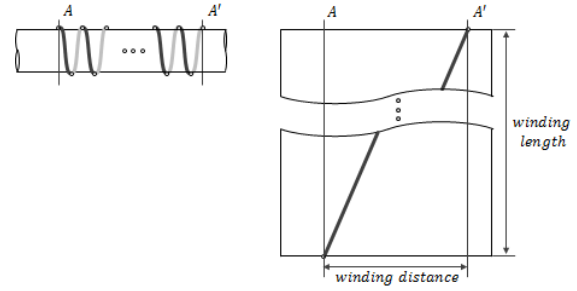


그림 3 와이어가 팽팽히 감기기 위한 조건.

Fig. 3 Necessary condition for thigh winding

### 2.2 Inter-level Winding Region

와이어를 이용하여 감속을 이루기 위해서는 각기 다른 반경의 축을 와이어로 감아서 연결해야 한다. 이 때, 입력축에서 출력축으로 와이어가 전이되는 동안에는 와이어가 어느 축과도 접촉하지 않고, 공중에 떠 있게 된다. 그림 4에서 이를 도시하고 있다. 검은색 곡선과 회색 곡선은 각각 앞쪽과 뒤쪽 와이어를 나타낸다. 이 영역에서도, winding slop이 일정하게 유지되어야 하며, 이로부터 이 영역의 크기(폭,  $d_h$ )를 설계할 수 있다. 와이어의 반경이 0이 아닌 일정한 값( $r_w$ )을 가지고 있기 때문에, 계산을 쉽게 하기 위하여 다음과 같이 각 축의 반경에 와이어의 반경을 고려한 값을 이용한다.

$$r_i = \overline{r_i} + r_w, \tag{2a}$$

$$r_o = \overline{r_o} + r_w. \tag{2b}$$

이와 같이 수정된 반경을 유효반경(effective radius)으로 정의하며, 1 단 감속비는 다음과 같이 유효반경을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \frac{r_i}{r_o} \tag{3}$$

$r_i$ 는 최소곡률반경을 고려하여 설계되며 구현하고자 하는 감속비로부터 식 (3)을 이용하여  $r_o$ 이 결정된다. 앞서 기술한 바와 같이, 와이어의 경로가 최단거리가 되기 위해서는 winding slop이 일정하게 유지되어야 한다. 따라서 식 (1)로부터

$$w_s = \frac{d_i}{2\pi r_i} = \frac{d_o}{2\pi r_o}. \tag{4}$$

여기서,  $d_i$ 는 와이어의 이탈 방지를 위하여 인접한 와이어와의 경계(홈)를 주기 위한 설계 파라미터이다. 따라서 식 (4)로부터  $w_s$ 와  $d_o$ 가 결정된다. 또한, 와이어가 공중에서 이동하는 거리(xz 평면 기준으로  $p_{ci}$ 에서  $p_{co}$ 까지 거리)는 다음과 같이 계산된다.

$$a = \sqrt{d_v^2 - (r_o - r_i)^2} \tag{5}$$

여기서  $d_v$ 는 각 축 사이의 거리이며 설계 공정 및 조립을 고려한 설계 파라미터 이다. 따라서 식 (5)와 winding slop의 정의로부터 와이어가 공중에서 이동하는 거리(yz 평면 기준)는 다음과 같이 계산된다.

$$b = w_s a. \tag{6}$$

또한, winding slop 및 와이어와 기구부 사이의 접촉점이 이루는 각도  $\theta$ 로부터  $c_i$  와  $c_o$  이 결정된다.

$$c_i = w_s \theta r_i, \tag{7a}$$

$$c_o = w_s (\pi - \theta) r_o. \tag{7b}$$

여기서

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{a}{r_o - r_i} \right)$$

이다. 이로써 각 축의 유효반경 및 축사이의 거리가 결정되면 식 (8)-(10) 으로부터 다음과 같이 최종 결정된다.

$$d_h = b + c_i + c_o. \tag{8}$$

즉, 와이어의 경로가 최단 거리로 유지되기 위해서는 입력축의 최고점( $p_t$ )과 최저점( $p_b$ ) 사이의 거리( $d_h$ )가 정확히 설계되어야 한다.

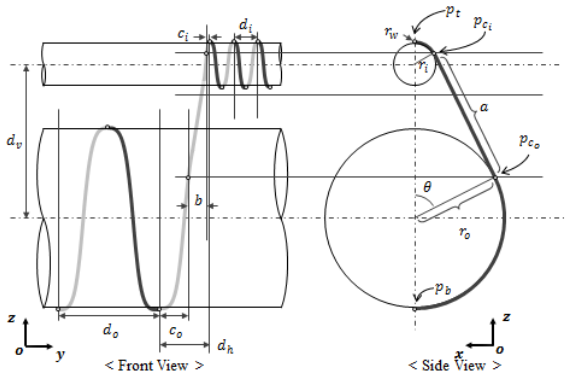


그림 4 레벨 간 와이어 경로 설계. (a) 정면. (b) 측면.

Fig. 4 Design of winding path between levels.

(a) Front view. (b) Side view.

### 2.3 Non-uniform Winding Radius Region

다단계 감속 시스템에서는 1단 감속이 여러 개 연결되어 있는 형태로 높은 감속비를 구현하게 된다(그림 1 참고). 즉 1단의 출력이 2단의 입력이 되고, 다시 2단의 출력이 3단의 입력이 되는 구조이다 (이는 기존의 톱니바퀴열(gear train)을 생각하면 쉽게 이해할 수 있다). 케이블을 이용한 기존의 감속 시스템에서는 각 단계 사용되는 와이어 케이블들이 분리되어 있는 구조였다. 따라서 각 단마다 와이어를 고정하

기 위한 장치가 사용되어야 했으며 그로인하여, 기계구조가 복잡해지고 부피가 커지게 되어 로봇용으로 사용되기가 어려웠다. 본 발명에서 제안하는 방식은 각 출력단의 와이어가 다음 입력단으로 이어짐으로써, 별도의 고정장치나 장력 조절장치 불필요하다. 따라서 기계구조가 단순해짐으로 인하여, 상대적으로 작은 크기로 모듈화설계가 용이해진다(그림 5 참고). 이를 위하여, 와이어가 이전 출력단에서 다음 입력단으로 감기는 동안에도 winding slop이 일정해 지도록 도면에서와 같이 곡선 형태로 winding path가 설계하는 것이 매우 중요하다.

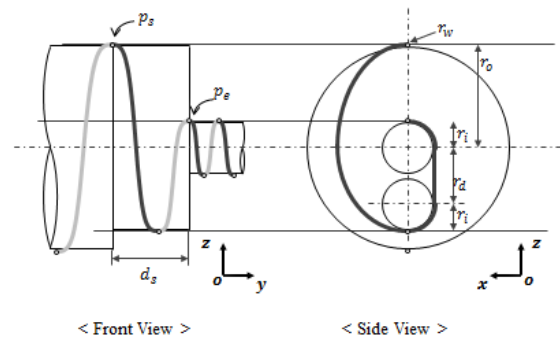


그림 5 SWM(Seamless Winding Module) 디자인.

(a) 정면. (b) 측면.

Fig. 5 Design of SWM(Seamless Winding Module).

(a) Front view. (b) Side view.

본 논문에서는, 다음과 같은 3차 다항식으로 winding path를 설계하였다.

$$r(q) = \alpha_3 q^3 + \alpha_2 q^2 + \alpha_1 q + \alpha_0 \tag{9}$$

식 (9)로부터 이 곡선의 길이는 다음과 같이 계산된다.

$$l = \int_0^\pi r(q) dq + \pi r_i + r_d \tag{10}$$

winding slop의 값이 상수로 유지되기 위하여 식 (1)로부터 다음이 만족되어야 한다.

$$d_s = w_s l \tag{11}$$

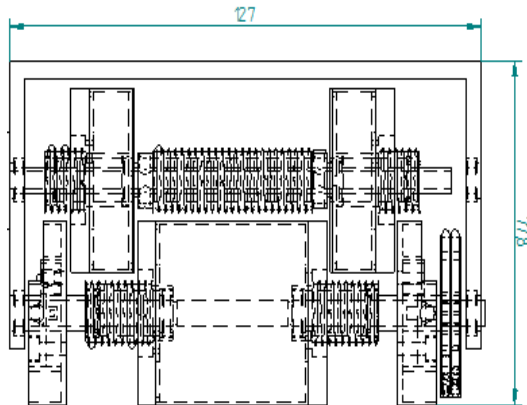
따라서 식 (9) - (11)로부터 설계 파라미터인  $r_d$ 가 다음과 같이 결정된다.

$$r_d = \frac{4r_i d_s - d_i (3r_i + r_o)}{d_i (1 + 2/\pi)} \tag{12}$$

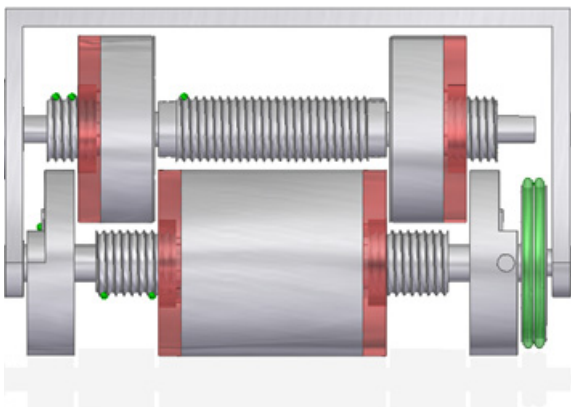
식 (12)를 이용하여 SWM의 곡면 부를 설계할 수 있으며 이를 바탕으로 와이어가 끊김없이 이전 단의 출력에서 다음 단의 입력으로 이어질 수 있게 된다.

### 3. Improved Mechanism

본 논문에서 제안한 와이어를 이용한 케이블 드라이브 시스템은 끊임없는 와인딩 기법을 도입하여 기존의 케이블 드라이브 시스템보다 구조가 간단하고 크기가 작은 다단계 감속을 구현하였다. 향후 연구에서는 이러한 끊임없는 와인딩 기법을 활용하여 본 연구 결과인 병렬 구조의 시스템(그림 1)을 동축 구조로 개선하여 실제 로봇에 장착하기 용이하도록 구조를 개선하는 연구를 진행할 예정이다 (그림 6).



(a)



(b)

그림 6 동축 구조의 향상된 케이블 드라이브 시스템 설계. (a) 와이어 프레임. (b) 3D CAD 설계.

Fig. 6 Improved cable drive system adopting coaxial mechanism. (a) Wire frame. (b) 3D CAD design.

### 4. 결론

와이어 케이블을 이용한 다단계 감속 시스템을 제안하였다. 본 시스템은 여러 개의 1단 감속기를 이용하여 높은 감속비를 구현하였다. 와이어 케이블을 각 단별로 사용하지 않고 하나의 와이어를 이용하여 여러 단의 감속을 수행함으로써, 구조 및 복잡도를 현저히 감소시킬 수 있었으며 제안된 구조는 3D CAD 도면과 시제품 제작을 통하여 검증하였

다. 추후 감속기의 부피와 구조를 개선하고 기계적 특성을 파악하는 연구를 수행하도록 한다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 로봇산업원천기술개발 사업 [No. 10047635, (약칭)고난이도 작업 수행을 위한 유압 구동 로봇 제어 기술 개발]의 지원으로 수행되었음.

### References

- [1] S. Lohmeier, T. Buschmann, and H. Ulbrich, "Humanoid Robot LOLA," in IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 775-780, 2009.
- [2] P. J. McKerrow, "Introduction to Robotics," Addison-Wesley Publishing Company, pp. 100-117, 1993.
- [3] T. Ishida and A. Takanishi, "A Robot Actuator Development With High Backdrivability," in IEEE Conf. Robotics, Automation and Mechatronics, pp. 1-6, 2006.
- [4] B. Rooks, "The harmonious robot," Industrial Robot: An International Journal, vol. 33, no. 2, pp. 125-130, 2006.
- [5] T. Lens and O. von Stryk, "Investigation of Safety in Human-Robot-Interaction for a Series Elastic, Tendon-Driven Robot Arm," in IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 4309-4314, 2012.
- [6] H. Truong, S. Abdallah, S. Rougeaux and A. Zelinsky, "A Novel Mechanism for Stereo Active Vision," Australian Conf. on Robotics and Automation, 2000.
- [7] G. Aquirre-Ollinger, J. E. Colgate, M. A. Peshkin, and A. Goswami, "Design of an active one-degree-of-freedom lower-limb exoskeleton with inertia compensation," Int. Journal of Robotics Research, vol. 30, no. 4, pp. 486-499, 2011.
- [8] T. H. Massie and J. K. Salisbury, "The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects" in Proc. ASME Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, vol. 55, no. 1, pp. 295-300, 1994.
- [9] B-J. Lee, K. I. Kim, "Development of Cable Drive System", KIEE Summer Conference, pp. 1560-1561, 2013. 7.

## 저 자 소 개



### 이 범 주 (李 範 周)

2002년 연세대학교 기계전자공학부 졸업.  
2004년 한국과학기술원(KAIST) 전자전산학과 졸업(석사). 2008년 동 대학원 전자전산학과 졸업(박사). 2012년부터 현재 명지대학교 전기공학과 조교수.



### 김 갑 일 (金 甲 一)

1979년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1981년 한국과학기술원(KAIST) 전자전산학과 졸업(석사). 1990년 Clemson Univ. in South Carolina(USA) 전기공학과 졸업(박사). 1991년부터 현재 명지대학교 전기공학과 교수.