클러치 방식 슬관절 보조기의 개발 및 평가

Development and evaluation of clutch-type knee orthosis

*#장대진[1], 강성재[1], 김종권[1], 김신기[1], 류제청[1], 문무성[1]

*#D. J. Jnag(djjang@korec.re.kr)[1], S. J. Kang[1], J. K. Kim[1], S. K. Kim[1], J. C. Ryu[1], M. S. Mun[1]

[1] 재활공학연구소

Key words : Clutch-type knee orthosis, One-way clutch bearing, PGO(Power Gait Orthosis)

1. 서론

기존의 장하지 보조기(Knee-Ankle-Foot Orthosis : KAFO)와 왕복보행보조기(Reciprocating Gait Orthosis : RGO)의 슬관절 장치는 무릎이 신전된 상태로 고정되어 있어서 마비환자의 보행시 어려움을 호소해왔다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 노력으로는 슬관절 중심을 체중선 뒤로 보내는 오프셋(offset)을 사용하거나 다축식 슬관절방식과 마찰 브레이크, 기어 타입 제동장치, 롤러-캠 방식의 제동장치 등이 사용되었다. 이와 같은 기계식 안전장치는 입각기 중 최초 접지기에 안정성을 확보할 수 있으나 슬관절의 정확한 잠금을 위해서는 사전에 보조기의 정렬이 필요하며 기계적 장치의 한계로 인하여 정밀한 무릎제어가 불가능하였다. 또한 유압식 실린더와 밸브를 이용한 Stance-and-Swing 유압시스템이 고안된 바 있으며 이는 기계식 안전장치보다 정밀한 제어가 가능하였으나 실린더 자체의 무게로 인하여 보조기에 적용되지 못했다.

슬관절 안전장치로 개발한 제품으로는 Becker사에서 개발한 safetyStride가 있다. 이는 슬관절에 클러치 베어링과 라쳇기어를 이용하여 유각기시에는 라쳇기어가 풀리면서 양방향으로 회전이 가능하며 입각기시에는 무릎이 어떤 각도에 있더라도 무릎장치가 굴곡되지 않도록 하여 환자의 낙상을 방지할 수 있도록 고안되었다. 하지만 이는 대퇴사두근 약화(Quadriceps weakness) 반장슬(Genu recurvatum) 또는 심하지 않은 척수손상(Spinal Cord Injury : SCI) 과 같이 증상이 심하지 않은 환자들에게는 사용이 가능하나 하반신 환자용으로는 입각기시 지지할 수 있는 힘이 많이 부족하다.

또한 Horton은 one-way 캠락을 사용하여 입각기시 굽힘을 방지할 수 있는 SCOKJ을 개발한바 있다. 이 장치는 무릎 신전/굴곡에 이상이 있는 장하지 보조기 사용자가 지면에 무릎이 완전히 펴지지 않은 상태에서도 무릎이 무너지지 않고 지지할 수 있고 입각기 말기에 기계적인 링크장치를 이용하여 자동으로 풀린다. 하지만 소아마비나 증상이 경미한 경우에는 사용이 가능하나 하반신 마비 환자에게는 적용할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 하반신 마비 또는 편마비 장애인을 위하여 입각기시 장애인의 체중을 지지하며 최대 토크 60Nm를 낼 수 있는 one-way 클러치 슬관절 보조기를 개발하고자 한다. 연구 방법으로는 기존의 one-way 클러치 베어링의 구조를 해석하여 클러치 장치의 크기를 선정하며 특히 클러치 장치 내부 형상에 대해서 마찰해석을 실시하여 최적의 형상을 얻어내고자 한다. 또한 one-way 클러치 슬관절 장치의 구조적인 안정성 확보를 위하여 설계와 구조해석을 진행하며 제작한 시제품을 마비 장애인에게 실제 적용하여 보행 테스트를 통하여 one-way 클러치 슬관절 장치에 대해서 평가하고자 한다.

2. One-way 클러치 베어링 해석

One-way 클러치 베어링은 흔히 볼 수 있는 일반 볼 베어링과는 달리 축이 한쪽 방향으로만 회전하는 베어링이다. One-way 클러치 베어링은 자동차의 트랜스미션에 주로 사용되고 있는 베어링으로서 외관상으로는 일반 니들 롤러 베어링과 별반 차이가 없다. 하지만 내부적으로 들여다보면 베어링 외곽을 지지하는 외륜과 니들 롤러를 지지하는 케이지와 니들 롤러를 한쪽 방향으로 밀어주는 스프링으로 구성되어 있다. 특히 베어링 외곽 안쪽이 움푹 들어가 있으며 양쪽 곡면 중 한쪽은 경사가 완만하며 반대쪽 곡면은 급하게 되어 있어서 완만한 경사의 마찰력을 이용하도록 되어있다.

작동 원리는 베어링 내륜 축이 외륜 안쪽 경사 아랫방향으로 회전하면 니들 롤러가 내외륜 사이에 걸리게 되고 회전을 멈추지만 내륜이 반대방향으로 회전하면 니들롤러가 내외륜 사이로 쉽게 빠져 나오게 되고 내륜은 자유롭게 회전할 수 있다.

이와 같이 one-way 클러치 베어링은 여러 개의 니들 롤러와 베어링 내외륜 사이의 곡면 마찰을 이용하여 한쪽방향으로만 회전이 가능하다. 이와 같이 내부 니들 롤러의 마찰력의 합에 의해서 베어링의 허용 토크가 결정된다.

본 연구에서는 60Nm의 허용 토크를 낼 수 있는 one-way 클러치 베어링을 개발하기 위해서 클러치의 내외륜 크기와 니들롤러 개수와 내륜 곡선 형상을 설계하였다. 내부 곡선 형상에 따라 마찰력이 상이해져서 one-way 클러치 베어링의 성능에 큰 영향을 미치기 때문에 니들 롤러가 내외륜 사이에 끼여 고정될 때 외륜의 형상 각도에 따라서 마찰력을 계산하고 끼임각도를 최적화해야 한한다. 이 때 고려해야할 요소로는 고정/풀림 되는 작동 범위, 가공 방법, 백래쉬(backlash) 등이 있다.

니들 롤러가 베어링 내외륜 사이에 끼어 있고 외부 토크가 전달된다고 가정했을 때 니들 롤러 한 개가 받는 힘 F 과 수직 반력 N_1, N_2 은 니들 롤러와 외륜과 이루는 각도 θ 에 의한 정적 힘의 균형에 의해서 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$N_1 = F/\sin\theta\ ,\ N_2 = F/\tan\theta \quad (1)$$

$$F_{\mu_1} = \mu N_1,\ F_{\mu_2} = \mu N_2 \quad (2)$$

일반적으로 볼 베어링에서의 마찰계수는 0.015~0.002정도이나 롤러 베어링은 0.005정도이다. 일반 베어링에서의 마찰계수는 면의 조도가 매우 높고 정밀가공기법에 의하여 가공하기 때문에 마찰계수가 매우 적으나 one-way 클러치 방식은 마찰로 작동되는 방식이기 때문에 적절한 마찰력이 유지되어야 니들 롤러가 외부 토크에 의해 슬립되지 않고 고정될 수 있다. 따라서 one-way 클러치 내외륜의 표면 거칠기에 따라서 마찰계수가 달라지기 때문에 적절한 열처리가 중요하다. 하지만 반대로 마찰계수가 너무 크면 니들 롤러가 내외륜 사이에서 마찰로 인하여 완전히 끼이지 못하고 중간에 걸리게 되어 백래쉬가 커질 수 있으므로 적절한 마찰계수가 요구된다.

식 (1), (2)로부터 마찰력 F_{μ_1}, F_{μ_2} 은 토크에 의해 니들 롤러에 작용하는 힘 F 보다 커야 하고 양쪽의 마찰력 중 하나라도 F 보다 작으면 미끄러짐이 발생한다. 또한 식 (1), (2)로부터 마찰계수와 끼임각도의 관계를 알 수 있다.

클러치 무릎 장치의 허용 토크를 높이려면 마찰계수를 크게 하거나 끼임각도를 작게 설계하면 되나 마찰계수를 크게 하려면 마찰 표면을 거칠게 해야 하나 백래쉬가 커지는 문제점이 있고 마찬가지로 끼임각도를 작게 하면 백래쉬가 커진다. 따라서 적절한 표면 거칠기를 가지면서 끼임각도를 작게 하는 것이 중요한 요소라고 할 수 있다.

3. 클러치 슬관절 보조기의 설계 및 평가

본 연구에서는 60Nm의 허용 토크를 낼 수 있는 one-way 클러치 슬관절 보조기를 개발하기 위해서 one-way 클러치 베어링 해석결과를 바탕으로 내외륜과 니들 롤러의 개수 및 크기를 결정하였다.

이러한 결과를 바탕으로 니들 롤러의 개수를 24개로 결정하였으며 one-way 클러치 장치의 내외륜 크기와 외륜의 접촉각도를 정하였다. One-way 클러치 구조 부분은 큰 토크에 견뎌야 하므로 베어링강에 준하는 재료로 설계하였고 슬관절 보조기 전체 무게를 줄이기 위해 바디와 베어링 부분을 나누어 재료를 달리하였다. 또한 클러치 장치를 잠금상태로 유지할 수 있도록 니들 롤러 리테이너 한쪽에 레버를 설치하여 스프링으로 밀어주어 니들 롤러를 밀어 주도록 하였으며 입각기시 굴곡을 방지하기 위해 슬관절 offset을 주었다.

One-way 클러치 슬관절 보조기 대하여 외부 토크에 견딜 수 있는 구조를 설계하기 위하여 그림 1과 같이 구조해석을 진행하였다. 무릎 장치에 60Nm의 토크를 무릎 회전축으로 가했을 때 해석결과 안전율은 2.5로 니들 롤러 부분이 가장 취약한 것으로 나타났으며 하부바디 목 부분의 응력 상태를 분석한 결과 안전율이 6이상으로 나타나서 외부 토크에 대해서 안전한 것으로 나타났다. 또한 슬관절 보조기에 대한 변형은 그림 1로부터 최대 변형은 약 0.4mm 발생하는 것으로 나타났다.

슬관절 보조기의 보행 테스트를 위해서 PGO에 장착하였으며 보행시 유각기에서 슬관절이 굴곡될 수 있도록 와이어를 클러치 리테이너에 연결하였다. 와이어는 고관절 주위에 연결하여 고관절이 굴곡될 때 와이어가 리테이너를 당겨서 잠금 해제 상태가 되도록 하는 것이 목적이나 본 테스트에서는 슬관절 보조기의 기능과 성능을 테스트하기 위해 수동으로 작동하였으며 차후에 자동으로 슬관절이 잠금/해제 될 수 있도록 제작할 예정이다.

One-way 클러치 슬관절 보조기를 그림 2와 같이 하반신 마비 장애인에게 착용하게 하여 보행 테스트를 실시하였다. 테스트 결과 하반신 마비 장애인이 입각기시에는 슬관절 보조기가 굴곡되지 않고 장애인의 체중을 잘 지지하였으며 유각기시에는 슬관절 보조기가 자연스럽게 스윙이 가능하였다.

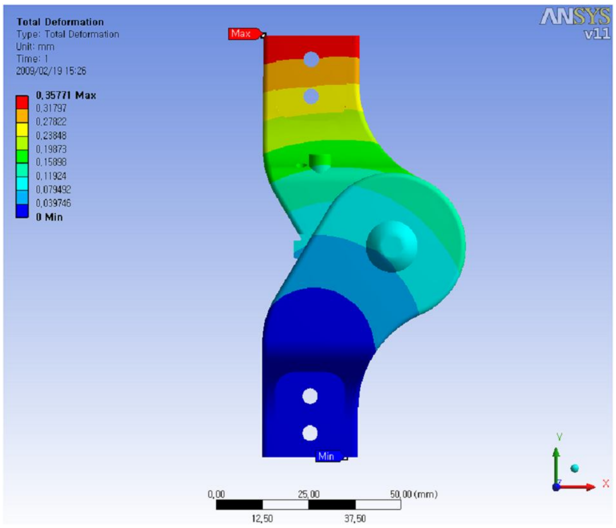

그림 1. 클러치 슬관절 보조기의 변형량 해석

그림 2. One-way 클러치 슬관절 보조기 보행 테스트

하반신 마비 장애인이 one-way 클러치 슬관절 장치를 착용하고 보행한 결과 유각기에서는 와이어를 위로 잡아당겨 완전히 클러치 슬관절 장치를 풀림상태로 만들어주어 신전/굴곡이 자유스럽게 이루어졌으며 입각기에서는 와이어를 본래위치로 놓아둠으로써 클러치 장치가 작동하도록 하였으며 그 결과 슬관절이 잠금상태가 되어 보조기가 슬관절의 굴곡을 방지할 수 있었다. 따라서 하반신 마비 장애인이 발끝떼기(toe-off) 후 입각기에서 유각기시로 넘어가면서 다시 슬관절이 풀림으로 되면서 슬관절 보조기가 쉽게 굴곡이 이루어지면서 유각기 다리가 앞으로 부드럽게 신전되었다.

4. 결론

본 연구는 외부 토크 60Nm를 견디며 안정적으로 보행이 가능한 one-way 클러치 슬관절 보조기를 개발하는 것이었다. 본 연구를 수행하기 위해 먼저 기존의 one-way 클러치 베어링의 구조를 이해하고 해석하였으며 one-way 클러치 베어링 외륜 형상에 따른 마찰에 따라서 최적의 끼임각도를 도출하였다. 일반적으로 금속면과 금속면과의 마찰계수는 0.15정도나 one-way 클러치 베어링은 면 접촉이 아닌 니들 롤러의 길이방향으로 접촉하는 선 접촉이기 때문에 0.15보다는 작을 것으로 예상되며 입각기시 슬관절 보조기의 안정도를 높이기 위해 무릎 조인트에 offset을 주었다. 구조적 안전도를 확보하기 위해 구조해석을 통해 안전도를 평가하였으며 안전계수는 2.5로 나타났다.

특히 하중 테스트에서 60Nm의 토크를 가하였을 때 약 2도의 변형이 발생하였는데 이는 one-way 클러치 장치의 순수 백래쉬, 마찰로 인한 백래쉬와 구조적 변형으로 인하여 발생한 것으로 파악된다. 이 중에서 구조적 변형으로 인한 변형량은 구조설계를 최적화함으로서 최소화할 수 있으며 마찰로 인한 순수 백래쉬는 외륜 내부면의 조도를 달리하여 최적의 마찰 조건을 얻을 수 있다.

보행 테스트에서는 다른 제품에서 발생했던 입각기시 과도한 외부 하중에 대해서 스스로 굴곡되었던 문제점을 개선할 수 있었으며 기존의 슬관절 보조기보다 구조적으로 안전하면서도 더 가벼운 보조기를 개발할 수 있었다.

하반신 마비장애인이 보행시 입각기와 유각기에 따라서 수동으로 와이어를 잡아당겨 one-way 슬관절 보조기의 잠금/해제를 유도하였으며 유각기에서는 쉽게 슬관절 굴곡과 신전이 이루어졌으며 입각기에서는 슬관절이 안전하게 잠금상태로 되면서 굴곡을 방지하였다.

차후 연구 과제로는 하반신 마비 환자의 체중에 따라서 자동으로 입각기와 유각기에서 잠금/해제가 가능한 one-way 클러치 슬관절 보조기를 개발하는 것이며 본 연구결과를 바탕으로 보행시 발생했던 백래쉬를 최소할 수 있도록 다양한 연구를 진행할 예정이다.

참고문헌

1. McMillan AG, Kendrick K, Michael JW, et al., "Preliminary evidence for effectiveness of a stance control orthosis," J Prosthet Orthot, 16, 6-13, 2004.
2. Jaspers, P., Van Petegem, W., Van der Perre, G. and Peeraer, L., "Optimisation of a combined ARGO-FES system:Adaptation of the knee mechanism to allow flexion of the knee during the swing phase," Engineering in Medicine and Biology Society, IEEE 17th Annual Conference, 1143-1144 , 1995.
3. Lehmann, J.F., and Stonebridge, J.B., "Knee lock device for knee ankle orthoses for spinal cord injured patients, an evaluation," Arch. Phys. Med. Rehabil., 59, 430-437, 1978.
4. 이기원, 강성재, 김영호, 조강희, "전자-기계식 클러치를 이용한 장하지 보조기용 무릎관절 자동 제어 장치의 개발," 대한생체의용공학회지 22, 359-368, 2001.