



## 수동휠체어의 변속 기능이 추진 동작에 미치는 영향

### Effects of Manual Wheelchairs' Transmission on the Propulsion Motion

신용수\*(충북대학교)

Shin, Eung-Soo\*(Chungbuk National University)

#### ABSTRACT

E. S. SHIN, Effects of Manual Wheelchairs' Transmission on the Propulsion Motion. Korean Journal of Sport Biomechanics, Vol. 17, No. 3, pp. 225-232, 2007. This work intends to investigate the effects of shift characteristics on the propulsion performance of a manual wheelchair with an automatic transmission. A planetary gear train is employed to generate a two-stage shift automatically, based on the distance traveled from rest. Motion analysis has been performed for measuring kinematic properties of the arm and then the inverse dynamics has been applied for estimating joint forces/torques. Then, a parametric study has been performed to find a set of the shift ratios and the shift intervals for optimizing propulsion performance. Results show that the propulsion performance is closely related to the shift condition. It is found that a short shift interval is desirable for a short distance propulsion. However, an optimum shift interval for a long distance propulsion is inversely proportional to the shift ratio approximately. Consequently, the automatic transmission can greatly lower the joint loadings by the speed reduction, which eventually contribute to prevent joint injuries of wheelchair users.

KEYWORDS : MANUAL WHEELCHAIR, AUTOMATIC TRANSMISSION, PROPULSION, SPEED REDUCTION, SHIFT TIMING

## I. 서론

전 세계적인 인구 노령화와 사고 등으로 인한 후천적 장애자의 증가에 따라 휠체어 수요는 갈수록 늘어나고 있다. 휠체어는 구동 방식에 따라 핸드림을 손으로 밀어 바퀴에 회전력을 전달시키는 수동 휠체어와 전기 모터로 회전력을 발생시키는 전동 휠체어로 나눌 수 있는데 전동휠체어의 수요가 점차 높아가고는 있지

만 아직도 80% 이상이 수동 휠체어를 사용하고 있다.

하지만 수동 휠체어는 구동 효율이 매우 낮을 뿐 아니라(Guo, Zhao, Su, & An, 2003; Boninger, Cooper, Shimada & Rudy, 1998) 핸드림을 밀고 당기는 반복 동작의 과정에서 상체의 관절 및 근육에 작용하는 힘이 골고루 배분되지 않기 때문에 장시간 사용 시 피로를 유발하게 되고 어깨를 비롯한 팔꿈치, 손목 등의 관절 부위에 부상을 초래할 수 있다(Finley, Rasch,

\* esshin@chungbuk.ac.kr

Keyser, & Rodgers, 2004; Khelia, Laboisse, Pillu, & Lavaste, 2000).

이러한 수동 휠체어의 구동 문제점을 개선하기 위하여 핸드림에 변속 기어를 추가하는 방안이 국내외에서 시도된 바 있는데(Conner, 1999; Woude, Bosmans, Bervoets, & Veeger, 2000) 감속에 의해 구동 토크를 증폭함으로써 인체 관절에 작용하는 하중을 줄일 수 있어 기존 수동 휠체어가 갖는 문제점을 개선할 수 있지만 구조가 복잡해지고 변속 조작에 따르는 사용자의 번거로움이 있어 실제 휠체어에 적용된 사례는 별로 없는 실정이다. 또한 핸드림을 레버로 대체하는 방안이 제시되었는데(Woude, & Vriend, 1997) 구동 효율을 높일 수는 있으나 주행 직진성이 저하되는 문제점을 안고 있다.

한편 자동 변속기를 수동휠체어에 도입하는 방안이 제시된 바 있는데(신응수, & 유문수, 2005), <그림 1>의 개략도에 나타난 바와 유성기어를 이용하여 휠체어 핸드림과 바퀴 사이에 2단 자동 변속이 가능하도록 함으로써 기존 변속기가 갖고 있는 변속의 번거로움을 해결하고자 하였다. 이 경우 자동 변속의 조건을 어떻게 결정하느냐에 따라 휠체어의 추진 성능이 크게 영향을 받게 되는데 이에 대한 면밀한 분석이 이뤄지지 않았다. 일반적으로 자동차에 적용되는 자동변속기의 경우 속도에 따라 변속되는 방식이 보편화되어 있지만 수동 휠체어의 경우 워낙 저속이기 때문에 새로운 개념의 자동 변속이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 휠체어가 일정 거리를 주행하면 자동 변속이 일어나는 주행거리 변속 방식을 제

시하고 변속비 및 변속이 일어나는 주행 거리에 따라 수동 휠체어의 구동 성능에 미치는 영향을 생체 역학적 관점에서 분석하고자 한다.

## II. 연구방법

### 1. 동작 분석 실험

본 실험의 목적은 자동 변속기를 내장한 수동 휠체어의 추진 시 인체 각 관절의 기구학적 운동량을 측정하는데 있다. <그림 2>는 실험 장치를 나타낸 것으로 휠체어 및 지지대, 그리고 주행 저항 효과를 발생하기 위한 제동판으로 구성하였다. 휠체어 핸드림의 축방향으로의 운동은 매우 작으며 핸드림의 구동 토크에 미치는 영향은 미미하다는 가정하에 시상면 상에서의 2차원 동작 분석을 수행하였으며 손목, 팔꿈치 및 어깨 관절과 핸드림 중앙에 표식을 부착하고 지면에 보정점을 지정하였다. 영상 취득 장비로는 Ariels사의 영상처리보드(NISC frame grabber)와 분석 소프트웨어(APAS 2000)를 사용하였으며 60 Hz의 샘플링 주파수로 실시간 취득하되 3차 스플라인 함수를 적용하여 필터링하였다.

동작 분석 결과로서 각 관절의 위치, 속도, 가속도와 팔꿈치 상하부의 각속도 및 각가속도를 구했는데 <그림 3>은 위치 궤적의 결과를 도시한 것이다.

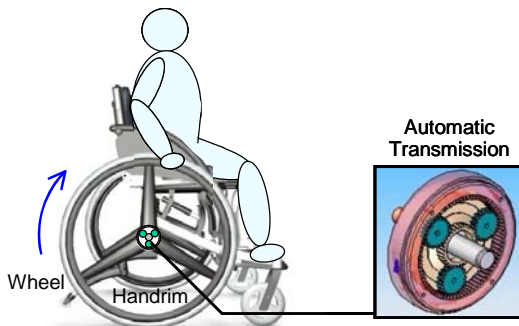


그림 1. 수동휠체어용 자동변속기 개략도

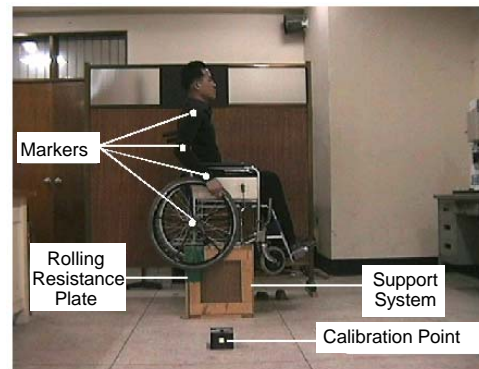


그림 2. 동작분석 실험

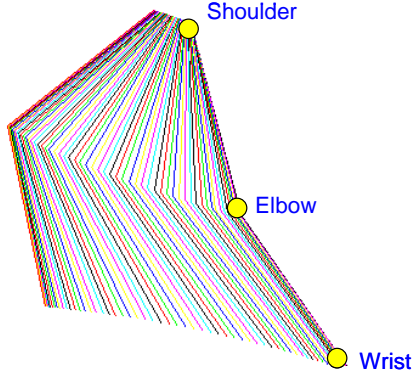


그림 3. 휠체어 구동팔의 제작

표 1. 해석 모델 물성치

Object	Kinetic properties	Value
Upper arm	Length (m)	0.207
	Mass (kg)	2.085
	Moment of inertia (kg-m <sup>2</sup> )	0.0116
Fore arm	Length (m)	0.212
	Mass (kg)	2.318
	Moment of inertia (kg-m <sup>2</sup> )	0.0339
Handrim	Radius (m)	0.29
	Mass (kg)	1.74
	Moment of inertia (kg-m <sup>2</sup> )	0.058
Wheel	Radius (m)	0.30
	Mass (kg)	2.26
	Moment of inertia (kg-m <sup>2</sup> )	0.095
Wheelchair /User	Mass (kg)	75.0

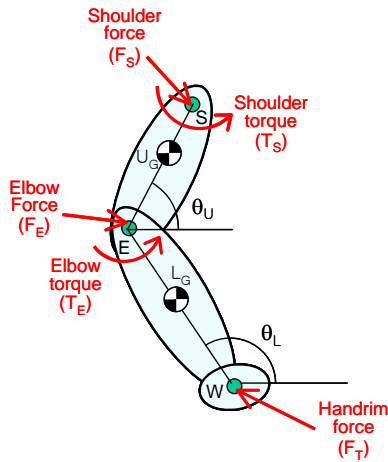


그림 4. 해석 모델 및 관절 하중

## 2. 해석 모델 개발

휠체어의 변속 조건이 변함에 따라 휠체어의 추진 성능이 어떻게 달라지는지를 분석하기 위해서는 다양한 조건을 시뮬레이션해야 하고 이를 위해서는 해석 모델이 필요하다. 본 연구에서는 <그림 4>에 도시한 바와 같이 팔꿈치 상하부, 핸드림과 바퀴로 해석 모델을 구성하였다.

<표 1>은 모델 각 요소의 물성치를 정리한 것으로 선행연구 결과를 참조하였으며(이영신, 임현균, 김철중, 이남식, & 박세진, 1994) 휠체어를 포함한 사용자의 체중은 수직 하중으로만 고려하였다.

<그림 4>에서 팔꿈치 및 어깨 관절의 하중은 뉴턴의 운동법칙에 의하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{F}_E = m_L \ddot{L}_G - m_L \vec{g} - \vec{F}_T \quad (1)$$

$$\vec{F}_S = m_U \ddot{U}_G - m_U \vec{g} - \vec{F}_E \quad (2)$$

$$T_E = I_L \ddot{\theta}_L + (\vec{R}_{WL_G} \times \vec{F}_T) + (\vec{R}_{EL_G} \times \vec{F}_E) \quad (3)$$

$$T_S = I_U \ddot{\theta}_U + T_E - (\vec{R}_{EU_G} \times \vec{F}_E) + (\vec{R}_{SU_G} \times \vec{F}_S) \quad (4)$$

위 식에서 m은 질량, I는 질량관성모멘트, R은 거리를 나타내며 아래첨자 L 및 U는 팔상하부를 각각 나타낸다. 또한 아래첨자 S, E, W는 어깨, 팔꿈치, 손목 관절을 각각 의미한다.

해석 모델은 다음과 같은 방법으로 검증하였다. 우선 동작분석실험으로부터 측정된 운동 데이터를 식 (1)-(4)에 대입하여 각 관절에 작용하는 하중을 구했다. 단, 핸드림 약력의 방향은 기존 연구를 참조하여 결정하였다(Bonniger, Cooper, Baldwin, Shimada, & Koontz, 1999). 이렇게 구한 관절 하중을 다시 해석 모델에 가한 후 순동역학 해석(Forward dynamic analysis)을 수행하여 핸드림의 회전 속도를 구하고 이를 동작 분석 실험으로부터 측정된 결과와 비교하였다. <그림 5>는 그 결과를 나타낸 것으로 해석 모델로부터 구한 관절 하중이 실제 하중과 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 <그림 4>와 <표 1>에 나타난 모델은 본

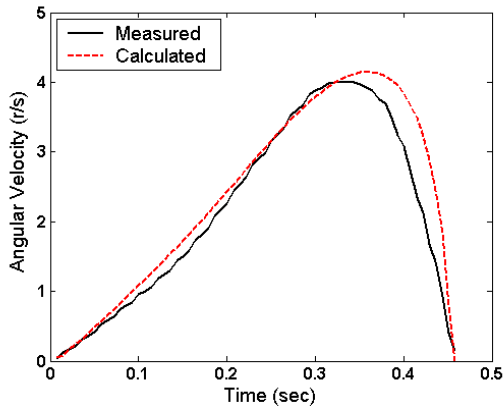


그림 5. 핸드림 회전 속도의 비교 검증

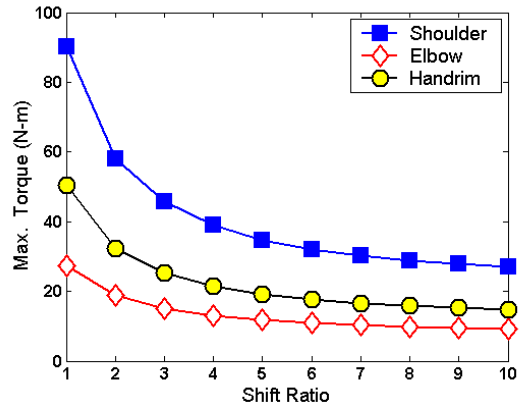


그림 6. 변속비와 관절 토크의 관계

연구에서 수행하고자 하는 휠체어 추진 성능을 분석하는데 적합하다.

### 3. 변속 파라미터 분석

자동 변속 기능이 휠체어의 추진 성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 변속 및 추진 파라미터를 각각 정의하고 값을 변화시키면서 분석을 수행하였다.

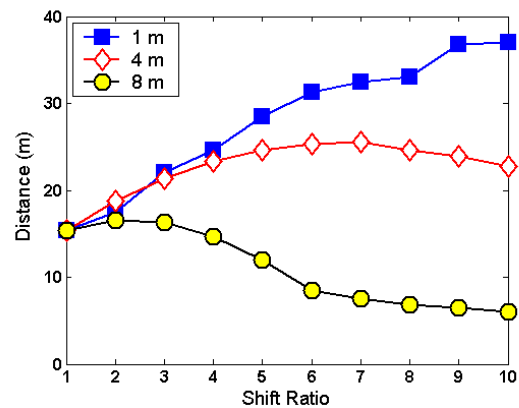
변속 파라미터는 변속 1단에서 핸드림과 휠체어 바퀴의 변속비(Shift ratio)와 1단에서 2단으로 변속이 일어나는 시점에서의 주행 거리로 선정하였다. 반면 추진 성능을 나타내는 파라미터로는 주행에 소요되는 시간, 각 관절에 작용하는 하중 크기로 정의하였다.

앞 절에서 개발한 해석 모델에 대해 순동역학 해석을 수행하여 변속 파라미터 값의 변화에 따른 성능 파라미터의 변화를 도출하였다.

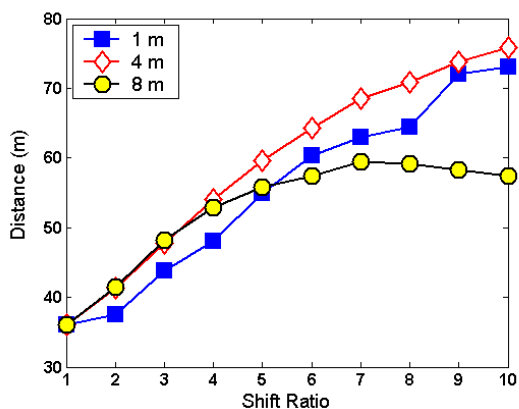
## III. 결과 및 논의

### 1. 변속비가 추진 성능에 미치는 영향

<그림 6>은 변속비의 변화에 따라 인체의 관절에 작용하는 하중이 어떻게 변화하는지를 나타내는 결과이다. 변속비가 증가한다는 것은 휠체어 바퀴에 전달되



(a) 주행 시간=10초



(b) 주행 시간=20초

그림 7. 변속비와 주행 거리의 관계

는 구동 토크가 비례하여 증폭된다는 것을 의미하며 동시에 각 관절에는 반비례하여 하중이 줄어든다는 것을 의미한다. 따라서 관절 하중의 측면에서 보면 변속비가 증가할수록 바람직한 추진 조건이라고 할 수 있다.

반면 변속비가 변화함에 따라 주어진 시간동안 휠체어가 주행하는 거리도 <그림 7>에 나타난 바와 같이 영향을 받는다. <그림 7b>의 경우처럼 주행 시간이 상대적으로 긴 경우 변속비에 비례하여 주행 가능 거리가 늘어나지만 <그림 7a>와 같이 주행 시간이 짧은 경우 변속비가 증가하면 오히려 주행 거리가 줄어들게 되어 추진 성능이 저하될 수 있다.

## 2. 변속 시점이 추진 성능에 미치는 영향

<그림 8>은 이동 목표 거리가 주어져 있을 때 최단 시간 내에 이동하기 위한 변속 시점을 나타낸 것이다. 그 결과를 보면 짧은 거리를 이동할 때는 변속비와 관계없이 변속 시점이 빠를수록 바람직함을 알 수 있다. 즉 그림에서 이동 목표 거리가 5 m인 경우 변속비가 1.5, 2.0, 4.0의 세 경우 모두 변속 시점이 1 m일 때 가장 바람직하다.

반면 이동 목표 거리가 길어지면 변속비가 작은 경우에는 변속 시점이 늦을수록 바람직하지만 변속비가 큰 경우에는 상대적으로 빠른 변속이 바람직하다. 예를 들어 <그림 8>에서 이동 거리가 45 m이고 변속비가 1.5인 경우는 7 m를 통과하는 시점에서 변속이 일어나는 것이 가장 좋지만 변속비가 4인 경우는 3 m를 주행한

시점에서 변속이 일어나는 것이 가장 바람직함을 알 수 있다.

이를 정리하면, 바람직한 변속 시점은 이동 거리 및 변속비에 따라서 결정되는데 단거리 이동일 때는 변속 시점이 빠를수록 좋지만 상대적으로 긴 거리를 이동할 경우 최적 변속 시점은 변속비에 대략적으로 반비례하게 된다. 즉 장거리 주행 시에는 변속비가 작은 경우의 최적 변속 시점이 변속비가 큰 경우의 변속 시점보다 늦다. 이를 운동 관점에서 분석하면 장거리 이동의 경우 변속 시점이 늦을수록 높은 속도에서 변속이 일어나게 되고 변속 이후의 고속 주행이 장거리인 경우는 유리하기 때문이다.

<그림 9>는 변속 시점이 주어졌을 때 변속비와 이동 거리와의 상관 관계를 도시한 것으로 <그림 8>과 동일한 결과를 보여준다.

## 3. 변속에 의한 휠체어 성능 향상

<그림 10>과 <그림 11>은 자동 변속 기능의 도입으로 수동 휠체어의 제 성능이 어떻게 변화하는지를 나타낸 것이다. 변속비가 2이고 1 m 만큼 주행한 시점에서 변속이 일어나는 조건일 때 정지 상태에서 3초 동안 구동하였을 때 휠체어의 운동 성능 및 관절 하중을 변속기가 없는 경우와 비교하였다.

<그림 10a>의 휠체어 바퀴의 각속도 변화를 보면 대략 1.5초 경과했을 때 변속이 일어나며 변속을 전후하여 휠체어의 추진 가속도가 변속비만큼 변화함을 <그림 10b>로부터 확인할 수 있다. 또한 첫 번째 추진

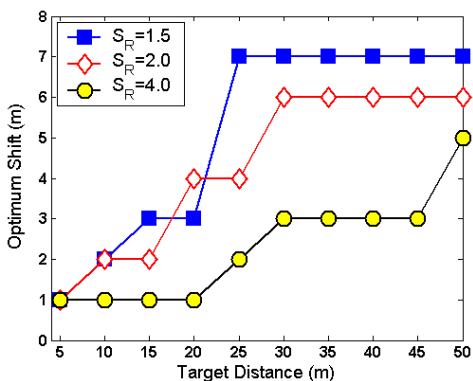


그림 8. 변속 시점과 이동 거리의 관계

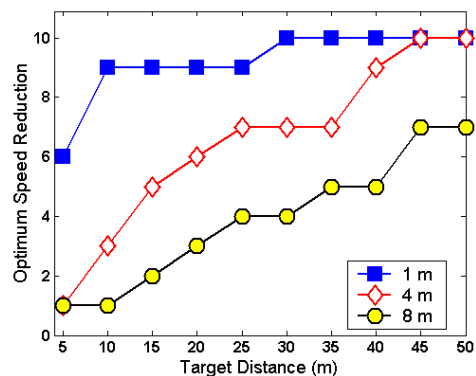
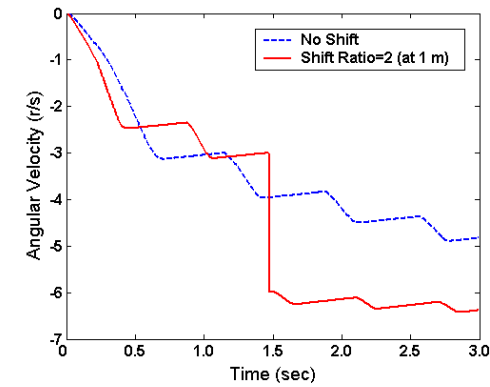


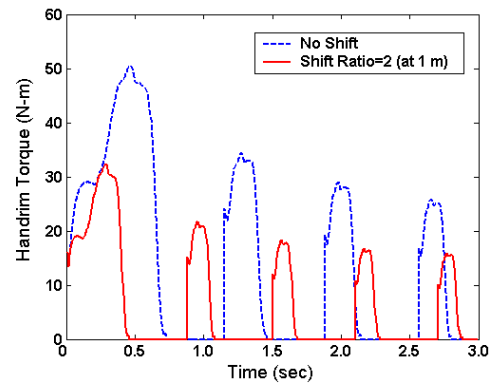
그림 9. 변속비와 이동 거리의 관계

스트로크 동안의 최대 가속도는 변속기가 없는 경우와 비교하여 약 20%만큼 증가했으며 <그림 10c>로부터 이동 거리도 25% 정도 향상함을 알 수 있다. 한편 <그

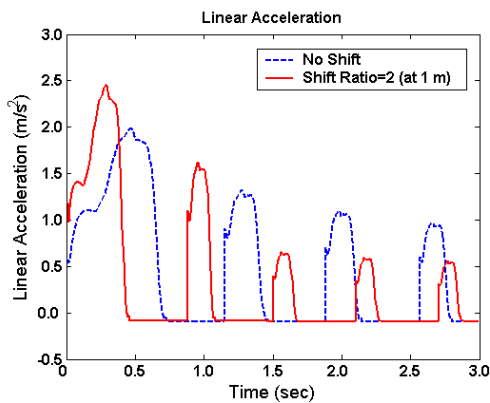
림 11>로부터 핸드림의 구동 토크와 어깨 및 팔꿈치 관절에 작용하는 토크를 비교하면 변속을 통하여 최대 토크가 대략 60% 정도 감소함을 알 수 있다.



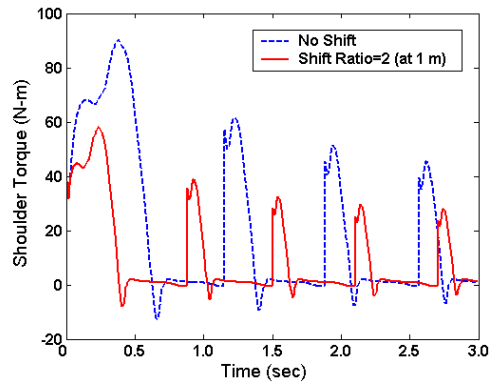
(a) 휠체어 바퀴의 각속도



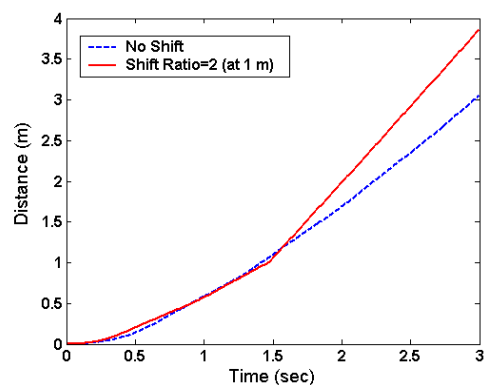
(a) 핸드림 구동 토크



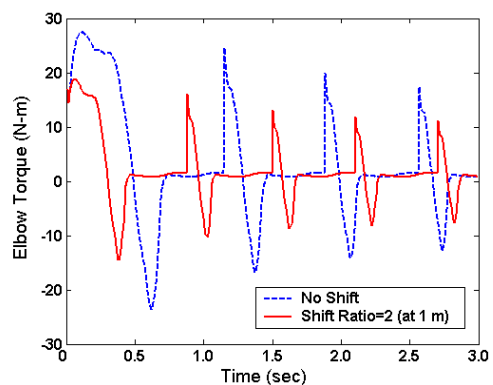
(b) 휠체어 추진 가속도



(b) 어깨 관절 토크



(c) 이동 거리



(c) 팔꿈치 관절 토크

그림 10. 변속기 유무에 따른 휠체어 운동 성능

그림 11. 변속기 유무에 따른 관절 토크 비교

표 2. 이동 거리에 따른 변속 조건과 휠체어 성능 비교

Target distance (m)	5	10	20	40	
Optimum condition.	Shift ratio	6	10	9	5
	Shift distance (m)	1	1	1	8
Time (sec)		2.87 (32.7)	4.13 (42.1)	6.09 (50.1)	15.83 (26.7)
	Handrim	17.68 (64.9)*	14.87 (70.0)	15.28 (70.0)	19.19 (61.9)
Torque (N-m)	Shoulder	32.06 (64.5)	26.91 (70.2)	27.84 (69.2)	34.79 (61.5)
	Elbow	10.93 (60.1)	9.15 (66.6)	9.42 (65.6)	11.83 (56.8)

(\*) : Performance enhancement in percentage, compared to the case of no shift

따라서 변속 기능을 도입함으로써 휠체어의 추진 성능이 크게 향상된다는 것을 확인할 수 있으며 앞 절에서 수행한 파라미터 분석 결과에 근거하여 최적의 변속 조건을 도출할 수 있다. 다만 최적 조건이라는 것이 휠체어의 이동 거리에 따라 달라지게 되므로 충분한 임상 실험을 거쳐 가장 발생 확률이 높은 이동 거리를 찾아내는 것이 선행되어야 한다.

<표 2>는 이동 거리에 따른 최적 변속 조건과 그에 따른 휠체어의 추진 성능을 변속기가 없는 경우와 비교하여 나타낸 것이다.

#### IV. 결론 및 제언

본 연구에서는 자동변속 기능이 추가된 수동 휠체어의 추진 성능이 변속 조건에 따라 어떻게 변하는지를 분석하였다. 동작분석 실험으로부터 휠체어 추진 동작의 운동량을 측정하고 이를 바탕으로 추진 해석모델을 개발하였으며 변속 파라미터 분석을 수행하여 휠체어의 추진 성능과 변속 조건 사이의 관계를 구했다.

그로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 단거리 주행시에는 큰 변속비와 빠른 변속 시점이 휠체어의 성능 향상을 위하여 바람직하다. 반면에

장거리 주행시에는 변속비에 따라 최적 변속 시점이 정해지며 단거리 주행의 경우와 비교하여 변속 시점이 늦는 것이 바람직하다.

2. 수동휠체어에 변속 기능을 도입함으로써 휠체어의 초기 가속 능력 및 주행 속도를 향상시킬 수 있으며 동시에 관절에 작용하는 하중은 대략 60% 정도의 큰 폭으로 감소시킬 수 있다.

3. 최적의 변속 조건은 휠체어 이동 거리의 영향을 받는다. 향후 충분한 임상 실험을 거쳐 가장 발생 가능한 이동 거리를 찾아내는 것이 필요할 것으로 보인다.

#### 참 고 문 헌

- 신용수, & 유문수 (2005). 수동휠체어용 자동변속기어의 특성 분석, **대한기계학회 2005추계학술대회**.
- 이영신, 임현균, 김철중, 이남식, & 박세진 (1994). 한국인 20대 청년 인체분절의 관성특성에 관한 연구, **대한기계학회논문집**, 18-8, pp.1952-1966.
- Boninger, M., Cooper, R., Shimada, S., & Rudy, T. (1998). Shoulder and elbow motion during two speeds of wheelchair propulsion. *Spinal Cord*, 36. pp. 418~426.
- Boninger, M., Cooper, R., Baldwin, M., Shimada, S., & Koontz, A. (1997). Wheelchair Pushrim Kinetics: Body Weight and Median Nerve Function. *Arch Phys Med Rehabil*, 80. pp. 910~915.
- Conner, O. (1999). Analysis of a Prototype Geared Pushrim with a Manual Pushrim Using Physiological Data. *Proc. of the First Joint BMES/EMBS Conference*.
- Finley, M., Rasch, E., Keyser, R., & Rodgers, M. (2004). The biomechanics of wheelchair propulsion in individuals with and without upper-limb impairment. *J. of Rehabil Res & Dev*, 41-3B. pp. 110~119.
- Guo, L., Zhao, K., Su, F., & An, K. (2003). Moment

- generation in wheelchair propulsion. *J. of Engineering in Medicine*, 217. pp. 405~413.
- Khelia, I., Laboisse, J., Pillu, M., & Lavaste, F. (2000). Manual wheelchair propulsion and elderly shoulder pain: a biomechanical study," XXVI *Congress de la SOCIETE DE BIOMECHANIQUE*.
- Woude, V., Bosmans, I., Bervoets, B., & Veeger, H. (2000). Handcycling: differenct modes and gear ratios. *J. of Medical Engineering & Technmology*, 24-6, pp. 242~249.
- Woude, V., & Vriend, B. (1997). Mechanical Advantages in Wheelchair Lever Propulsion. *J. of Rehabilitation Research and Development*, 34-4, pp. 286~294.

투 고 일 : 7월 31일  
심 사 일 : 8월 6일  
심사완료일 : 9월 20일