

정·역 구동 방식 수동 휠체어의 인체공학적 성능 분석

신 응수* · 이 희태** · 안 성철***

Biomechanical Evaluation of a Manual Wheelchair with Forward · Reverse Propulsion

Eung-Soo Shin, Hee-Tae Lee and Seong-Chul Ahn

Key Words: Manual Wheelchair(수동 휠체어), Forward · Reverse Propulsion(정·역 구동), Motion Analysis(동작 분석), Inverse Dynamic Analysis(역동역학 해석), Biomechanical Evaluation(생체역학적 평가)

Abstract

This work provides the biomechanical evaluations of a manual wheelchair with a bi-directional driving system. The new propulsion strategy can be accomplished by employing a special gear system that converts the oscillatory motion of a handrim into the unidirectional output motion of a wheel. A main feature of the forward · backward propulsion is to supply continuous driving torque without break. Motion analysis has been performed through 2-dimensional image processing for measuring the kinematic properties of the upper arm and fore arm. Then, the inverse dynamics analysis has been done for obtaining the joint torques, the handrim forces and input/output powers. Results show that the output power by the forward · reverse propulsion is almost twice as much as that by conventional propulsion. Also, the new propulsion is expected to reduce the fatigues and injuries at arm joints by employing more muscle groups for movement. In conclusion, the forward · reverse propulsion can greatly improve the performances of manual wheelchairs by providing better mobility as well as by guaranteeing several advantages from a biomechanical viewpoint. Future development of a manual wheelchair optimized for the bi-directional propulsion will further improve the propulsion performances.

1. 서론

인구 고령화와 후천적 장애의 증가에 따라 정상 보행이 불가능하여 휠체어를 사용하는 수요는 계속 늘어나 전세계적으로 약 4000만에 이르며 그 중 약 80%의 사용자는 핸드림을 손으로 밀어 바퀴에 회전력을 전달시키는 수동 휠체어를 쓰고

있다. 수동 휠체어는 가격이 저렴하고 구조가 간단한 장점이 있으나 핸드림을 앞으로 밀때만 추진력이 전달되고 핸드림에서 손을 떼어 다음 미는 동작까지는 추진력이 전달되지 않기 때문에 구동 효율이 낮고 경사진 길을 오르는 경우에는 보조자의 도움을 필요로 하는 단점이 있다. 또한 상체의 관절 및 근육에 작용하는 힘이 핸드림을 밀고 당기는 동작에서 골고루 배분되지 않기 때문에 장시간 사용 시 피로를 유발하게되고 어깨를 비롯한 팔꿈치, 손목 등의 관절 부위에 부상을 초래할 수 있다.

수동 휠체어의 구동 방식을 개선하기 위한 기

* 충북대학교 기계공학부

** 충북대학교 대학원

*** (주) 세계산업

존의 연구들을 살펴보면, 핸드림에 감속 기어를 추가하거나⁽¹⁾ 핸드림을 레버로 대체한 사례가 있는데^{(2),(3)} 특히 레버형 휠체어의 경우 연속 추진이 가능하고 인체에 작용하는 힘을 배분할 수 있어 기존의 수동 휠체어가 갖는 문제점을 개선할 수 있지만 레버의 왕복 속도와 바퀴의 회전 속도가 일정 비율을 유지하기 어렵기 때문에 휠체어의 직진 주행성이 떨어지는 단점을 갖고 있다. 이밖에 핸드림의 역구동(reverse propulsion)에 의한 추진이 시도된 바 있는데⁽⁴⁾ 기존 휠체어와 비교하여 큰 차이가 없다는 점이 밝혀졌다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 기존의 연구들과 달리 핸드림을 전진과 후진의 양방향으로 구동 가능한 새로운 방식의 수동 휠체어에 대해서 생체역학적 관점에서 그 성능을 분석하고자 한다.

2. 정·역 구동 휠체어

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 수동 휠체어로서 핸드림이 앞·뒤 방향으로 회전할 때 휠체어 바퀴는 항상 앞으로 추진된다. 이를 위하여 핸드림과 바퀴의 회전축 사이에 유성 기어 트레인과 클러치로 구성된 특수 기어 장치를 설치한다.⁽⁶⁾

정·역 구동 휠체어의 가장 큰 특징은 추진력의 단절없이 핸드림의 왕복 회전 운동에 의해 바퀴를 연속적으로 추진할 수 있다는 점이다. 기존의 레버형 휠체어와 비교하여 레버의 왕복 회전에 의해 바퀴를 연속 회전시킨다는 점에서는 같지만 레버와 바퀴의 회전 속도비가 레버의 위치에 따라 끊임없이 바뀌는 것과 달리 정·역 구동

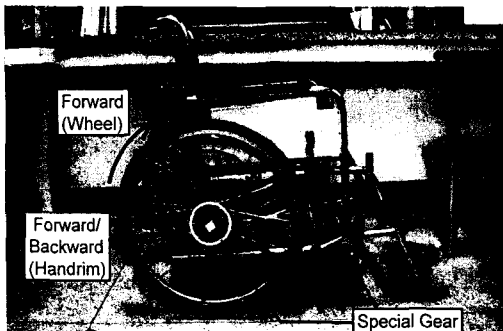


Fig. 1 Bidirectionally propelled wheelchair

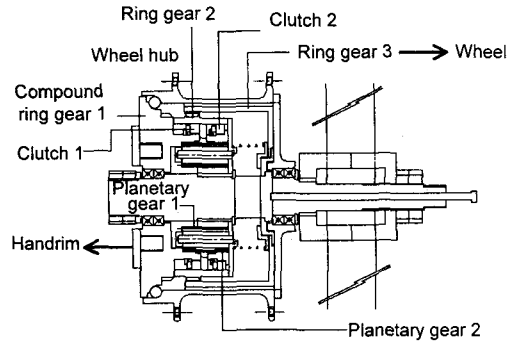


Fig. 2 Drivetrain through a special gear set

휠체어에서는 핸드림과 바퀴의 회전 속도비를 항상 일정하게 유지할 수 있으며 본 연구에서는 감속없이 입출력 속도비를 1:1로 유지하도록 설정하였다.

Fig. 2는 정·역 구동 휠체어의 운동 전달 경로를 개략적으로 도시한 것이다. 핸드림의 전진 회전 시 운동 경로는 링기어 1 → 클러치 1 → 링기어 2 → 링기어 3을 거쳐 바퀴로 전진 방향의 회전이 전달된다. 반면에 핸드림의 역회전 시 운동 경로는 링기어 1 → 유성 기어 1 → 유성 기어 2 → 클러치 2 → 링기어 2 → 링기어 3을 거쳐 바퀴의 전진 회전이 출력된다. 여기서 클러치는 한 방향 운동만을 전달하는 역할을 한다.

3. 동작 분석 실험

정·역 구동 휠체어의 구동 특성을 기존의 수동 휠체어와 비교 분석하기 위하여 영상 처리 방법을 이용한 동작 분석 실험을 수행하였다. Fig. 3은 실험 장치의 구성을 나타낸 것으로 휠체어를 지지대에 고정시키고 마찰판을 지지대에 부착하여 바퀴에 저항 토크를 발생시킴으로써 경사면 등판 시의 중력 효과를 대신하였다. 동작 분석을 위한 표식(marker)은 바퀴의 중심축, 손목, 팔꿈치 및 어깨에 각각 1개씩 부착하고 각 관절 및 팔의 상·하부의 기구학적 운동량(kinematic properties)을 2차원 영상 처리에 의하여 시상면(sagittal plane) 상에서 측정하였다.

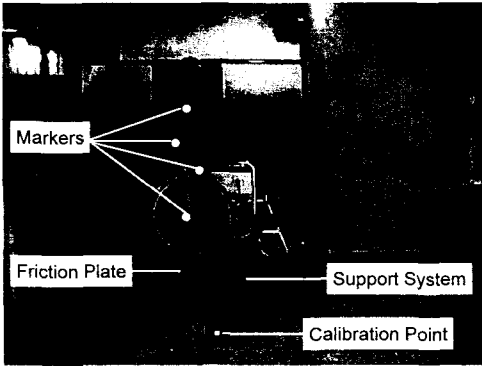


Fig. 3 Experimental setup

실험 조건은 5° 의 경사면을 오르는 경우로 설정하였으며 마찰력의 크기를 조건에 맞도록 조정하였다. 기존의 수동 휠체어와 비교 분석하기 위하여 핸드립을 정방향으로만 구동하는 실험과정·역 방향으로 구동하는 실험을 각각 수행하되 1회에 3분씩, 각각 9회에 걸쳐 반복 수행하였다. 동작 데이터는 60 Hz의 샘플링 주파수로 실시간 취득하되 1회당 10초로 제한하였다.

Fig. 4 및 Fig. 5는 동작 분석의 결과를 나타낸 것으로 팔 상·하부의 각변위, 각속도 및 각가속도를 도시하였다.

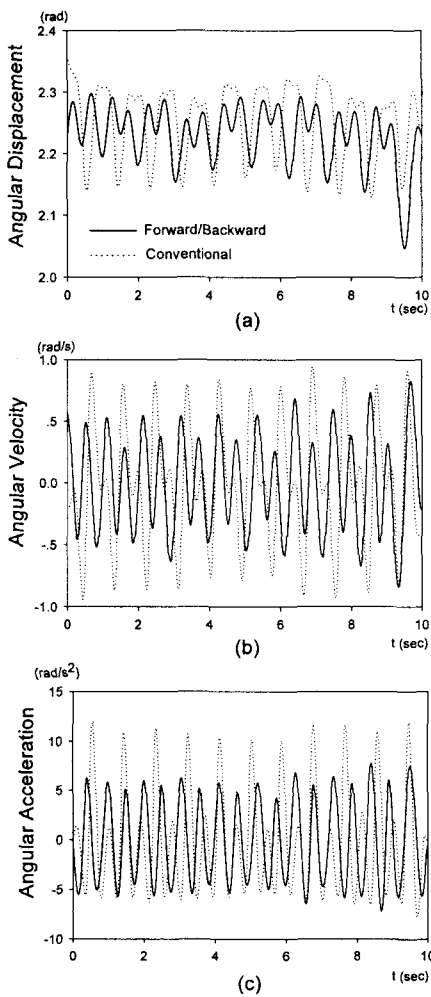


Fig. 4 Kinematic properties of the fore arm

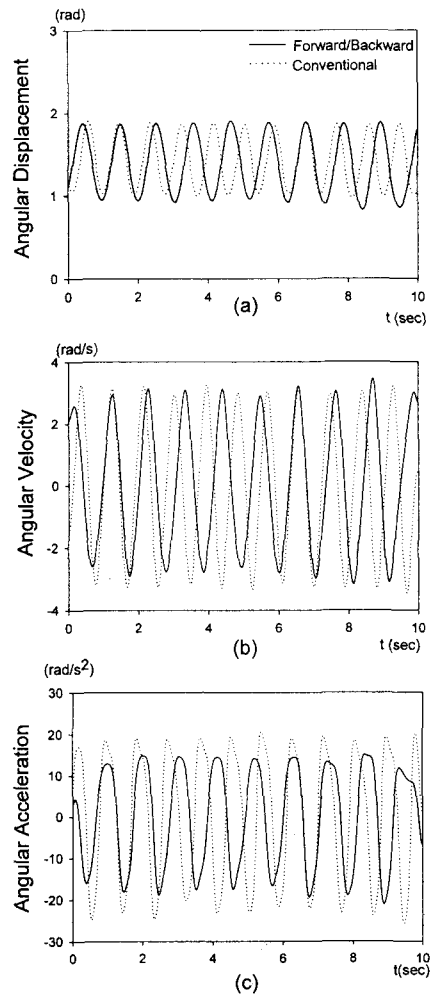


Fig. 5 Kinematic properties of the upper arm

한편 동작 분석으로부터 얻은 기구학적 데이터에 근거하여 역동역학 해석을 수행하여 각 관절 토크, 핸드림에서의 접선력 및 입출력 파워를 구했다. Table 1은 역동역학 해석에 사용한 팔 상부의 데이터를 정리한 것이며 Fig. 6 및 Fig. 7은 역동역학 해석의 결과를 도시한 것이다.

4. 결과 분석

4.1 정구동과 역구동의 비교

정·역 구동 휠체어에서 정구동과 역구동의 추진 방식에 따른 휠체어의 구동 특성을 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 정구동 방식에 비해 역구동 방식의 경우 상체 운동의 주기가 약 17% 길어지며

그 결과 팔 상·하부의 각속도 및 각가속도가 느려진다. 이는 정구동에 비해 역구동 방식이 익숙하지 않은 점과 핸드림의 반경 및 설치 위치 등과 같은 휠체어 구동부의 전반적인 설계가 정구동에 적합하도록 되어 있기 때문인 것으로 생각할 수 있다. 둘째, 관절 토크를 비교해 보면 팔꿈치에서는 역구동일 때 정구동에 비해 40% 가량 큰 폭으로 감소한 반면 어깨에서는 오히려 약 16% 정도 증가하였는데 역구동 시 팔의 운동 속도가 상대적으로 떨어짐에도 불구하고 토크가 증가하는 것은 위에서도 언급한 바와 같이 역구동 시 팔의 동작과 휠체어 구동부 설계와의 상관 관계가 적절하게 고려되지 못했기 때문인 것으로 볼 수 있다.

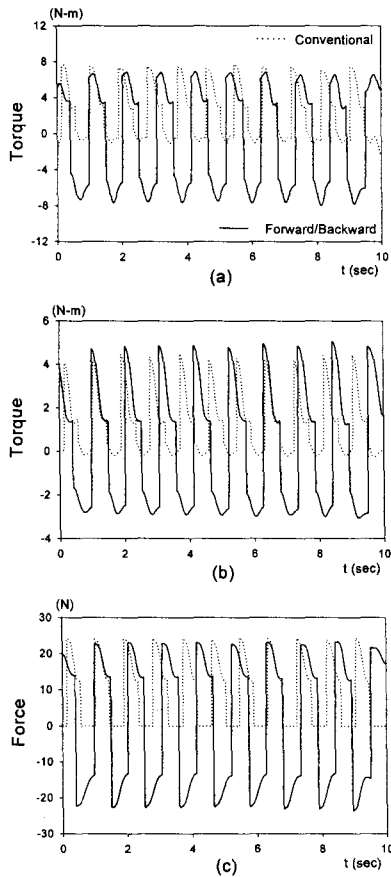


Fig. 6 Joint kinetic properties (a) Shoulder (b) Elbow (c) Wrist

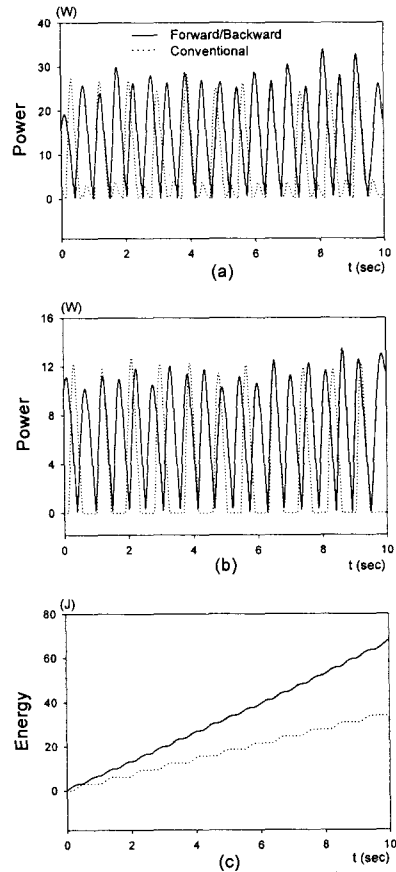


Fig. 7 Driving performances (a) Input power (b) Output power (c) Output energy

Table 1 Kinetic properties

Object	Kinetic properties	Value
Upper arm	Length (m)	0.207
	Mass (kg)	2.085
	Moment of inertia (kg-m ²)	0.0116
Fore arm	Length (m)	0.212
	Mass (kg)	2.318
	Moment of inertia (kg-m ²)	0.0339
Handrim	Radius (m)	0.24
	Moment of inertia (kg-m ²)	0.058
Wheelchair /User	Mass (kg)	85.0

4.2 정·역 구동과 기존 휠체어의 비교

양방향 구동 휠체어와 기존 휠체어의 성능을 비교 분석한 결과를 Table 3에 정리하였는데 구동 성능에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 우선 기존 휠체어와 비교하여 추진 동작의 주기가 약 21% 길어진다. 이는 기존 휠체어의 경우 핸드림에서 손을 떼어 뒤로 돌아오는 동작에서 손에 하중이 작용하지 않기 때문에 빨리 돌아올 수 있으나 정·역 구동 휠체어에서는 하중이 작용하는 것이 주된 요인이다. 따라서 휠체어의 설계 변경에 의해 후진 시의 소요 시간을 다소 줄일 수는 있으나 기존 휠체어에 비해 주기가 약간 늘어나는 것은 불가피한 것으로 보인다.

둘째, 관절에 작용하는 토크는 크기 면에서는 큰 차이가 없는 것으로 보인다. 하지만 작용 토크의 물리적 의미를 살펴보면 정·역 구동 시에는 토크의 방향이 한 주기 내에서 계속 바뀌기 때문에 관절 토크를 생성시켜주기 위해 여러 근육을 사용하는 반면 기존 휠체어에서는 토크의 방향이 계속 일정한 상태에서 크기만 주기적으로 바뀌기 때문에 사용하는 근육이 제한적이다.

셋째, 입출력 파워 및 에너지 측면에서 볼 때 정·역 구동 휠체어가 기존 휠체어에 비해 훨씬 우수한 구동 특성을 보인다. 이는 추진력이 끊임 없이 전달되는 정·역 구동 방식이 주기적으로 단절되는 기존 휠체어에 비해 당연한 결과라 할 수 있으며 입출력 에너지가 약 2배 정도 증가하는 것을 수치적으로 확인할 수 있다. 이러한 연속 추진은 정·역 구동 휠체어의 가장 큰 특징이라 할 수 있으며 구동 효율의 정량적인 향상뿐 아니라 경사면 등판 또는 바퀴의 역회전 방지 등과 같은 정성적 측면에서의 성능 향상도 동시에 보장할 수 있다.

한편 본 연구의 분석 결과는 2차원 영상 처리와 팔 상부의 모델링에 있어 손목 관절에서의 토크를 제대로 고려하지 않았기 때문에 결과에 있어 약간의 오차를 갖고 있으나 그 범위는 크지 않을 것으로 보인다. 또한 휠체어 설계의 모든 인자들에 대하여 역구동 시 인체 동작을 고려한 최적 조건을 결정할 경우 휠체어의 구동 성능은 더 향상될 수 있을 것으로 보인다.

Table 2 Performance comparison between forward and backward propulsion

Performance		Forward	Backward	Comparison (B / F)
Stroke ratio		0.46	0.54	1.17
Maximum propulsion velocity (m/s)		0.82	0.87	1.06
Maximum Torque (N-m)	Shoulder	6.88	7.97	1.16
	Elbow	5.05	3.04	0.60
Maximum propulsion force (N)		23.25	23.57	1.01
Maximum power (W)	Input	33.96	26.27	0.77
	Output	13.48	12.60	0.93

Table 3 Performance comparison between forward/backward and conventional wheelchairs

Performance		Forward/ Backward	Conventional	Comparison (FB / C)
Period	Total period (s)	1.06	0.88	1.21
	Forward stroke ratio	0.46	0.50	0.92
	Backward stroke ratio	0.54	0.50	1.08
Maximum Torque (N-m)	Shoulder	7.97	7.76	1.03
	Elbow	5.05	4.49	1.12
Maximum propulsion force (N)		23.25	24.50	0.95
Maximum Power (W)	Input	33.96	28.25	1.20
	Output	13.48	12.75	1.06
Energy (J)	Input	151.19	80.62	1.88
	Output	67.92	34.06	1.99

5. 결론

본 연구에서는 핸드림을 앞·뒤 방향으로 구동시키면서 휠체어 바퀴를 연속 추진을 시킬 수 있는 휠체어의 구동 성능을 분석하였다. 이러한 양방향 추진 방식은 휠체어의 구동 효율을 크게 향상시킬 수 있을 뿐 아니라 생체역학적 관점에서 근육의 효과적인 사용을 가능하게하여 근육 피로도를 줄일 수 있다. 본 연구에서 얻은 역구동 시 구동 성능은 사용한 휠체어가 정구동에 맞게 설계·제작된 점과 정구동에 비해 역구동 방식이 익숙하지 않은 점 등을 고려하면 향후 좀더 향상시킬 수 있을 것으로 보인다. 따라서 양방향 구동 방식을 고려한 휠체어의 최적 설계가 필요하며 동시에 본 연구에서 제외한 직진 주행성 및 조향 성능에 대해 향후 검증이 필요하다.

참고문헌

(1) O'Conner, 1999, "Analysis of a Prototype Geared Pushrim with a Manual Pushrim Using Physiological Data," Proc. of the First Joint

BMES/EMBS Conf, Atlanta, GA.

- (2) P. Engel and K. Seelinger, 1986, "Technological and physiological characteristics of a newly developed hand-lever system for wheelchair," J. of Rehabilitation Research and Development, Vol. 23, No. 4, pp.37-40.
- (3) V. Woude and B. Vriend, 1997, "Mechanical Advantages in Wheelchair Lever Propulsion," J. of Rehabilitation Research and Development, Vol. 34, No. 4, pp.286-294.
- (4) A. Linden, G. Holland, S. Loy and W. Vincent, 1993, "A Physiological comparison of Forward vs. Reverse Wheelchair Ergometry," Medical Science and Sports Exercises, Vol. 25, No. 11, pp.1265-1268.
- (5) F. Savi, M. Hoffman, S. Sabharwal and P. Clifford, 1998, "Physiological comparison of forward and reverse wheelchair propulsion," Archives of Physical Medicine & Rehabilitation, Vol. 79, No. 1, pp.36-40.
- (6) 세계산업, 1999, "자전거의 전진구동 주행장치," 미국특허 No. 5895336.