

## 자전거를 탈때의 정적 생체역학 모형에 관한 연구

### -Estimation of Loads applied to a Rider using a static Biomechanical Model.-

반 영 환\*

Pan, Young Hwan

장 필 식\*

Jang, Phil Sik

#### ABSTRACT

Torques on each joint, the compression on L5/S1 disc, the force on hand of a rider are estimated using a static biomechanic model. Forces that the rider applies to the pedals, saddle and handle during starting and speeding are estimated using static mechanics.

Physical stress is considered according to handle height and horizontal distance between handle and pedal. When handle height is higher in normal speeding, the force on handle and sum of torques on each joint decreases.

#### 제 1장 서론

효율적인 자전거를 설계하기 위해서는 사용자의 에너지 효율을 극대화하는 것과 사용자의 사용편의성을 최대화 하는 것이 필요하다. 지금까지 자전거에 대한 주요 연구는 사용자의 에너지 효율을 극대화 하는 자전거 설계에 주안점을 두었다. 즉, 바퀴의 지름이나 크랭크 축의 길이에 따른 에너지 효율, 공기의 저항과 지면의 마찰, 효율적인 브레이크, 속도에 따른 에너지 효율 등이 연구되었다[10].

자전거를 탈 때에 인체의 움직임에 관한 연구는 역학적인 측면에서 연구되었다. Hull은 자전거를 탈 때에 페달링하는 것을 신체역학적으로 분석을 했고[7], 또한 자전거 탈 때의 횡 움직임에 대해 분석을 하였다[6]. Patricia Ruby는 자전거 탈때에 무릎 관절의 움직임을 3차원적으로 분석을 했다[9]. 이러한 연구들은 발목, 무릎, 힌관절에서의 모멘트와 운동 특성에 초점을 맞춘 것들이다.

자전거를 탈때에 자전거의 각 부위에 부과되는 힘은 자전거 구조(frame) 강도와 수행도(performance) 평가에 이용되며[3], 자전거 타는 자세, 즉 신체의 무게중심이동과 관련이 있다. 또한 핸들에 작용하는 힘이 자전거 전체 구조에 부과되는 부하에 직접적인 영향을 준다.

본 연구에서는 자전거를 탈때 신체의 각 관절(joint)에 걸리는 토크(torque)를 구하고 또한 L5/S1에서의 압박(compression)과 손에 걸리는 힘을 알기 위해 자전거 타는 상황을 설정하여

---

\* 한국과학기술원 산업공학과

페달과 손잡이와 안장에 걸리는 힘을 유추하는 모델링을 하였다. 이 모델링에서 구해지는 힘과 자전거를 탈때의 각 체절(segment)의 각도를 측정하여 자전거 구조에 따라 각 신체의 부과되는 힘들을 구하였다. 이 데이터를 이용하여 자전거 핸들의 높이, 안장과 핸들사이의 거리, 크랭크 축의 위치에 대한 지침을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 신체에 부과되는 부하를 다음과 같은 세가지 관점에서 분석하였다.

(1) L5/S1 디스크에 부과되는 압박(compression)

허리에 부과되는 압박은 요통의 직접적인 원인이 된다. 평상속도로 자전거를 타고 다닐때에는 디스크에 크게 부하가 부과되지 않지만 MTB 자전거 등을 이용하여 빠른 가속을 하거나 높은 경사를 오르거나 하는 경우에 L5/S1에서도 많은 압박이 가해지게 된다. 큰 압박이 부과되지 않더라도 반복적인 압박은 척추에 무리가 간다.

(2) 팔에 부과되는 힘(손잡이에 부과되는 힘)

팔에 부과되는 힘을 고려하는 이유는 자전거를 탈때에 팔의 역할이 중요하기 때문이다. 페달에 많은 힘을 가하기 위해서는 핸들을 잡아 당긴다. 평지를 달릴때에는 안장과 함께 상반신을 유지시키는 역할을 한다. 자전거를 탈때에 팔에 부과되는 부하가 많으므로 손에 부과되는 힘을 기준으로 삼았다.

(3) 각 관절에서의 염력의 합

각 관절의 염력은 근육이 하는 일과 직접적인 관련이 있다[8]. 어느 특정부위의 염력을 적게 하는 것이 아니라 신체 전체 관절에서의 염력의 합을 기준으로 삼았다.

자전거 탈때의 상황을 안장에 앉아서 타는 경우와 안장에 앉지 않는 경우로 나누어 각 체절에 부과되는 힘을 정적 상태에서 분석을 하였다. 신체의 순간적인 가속으로 인한 힘이나 관성모멘트는 고려하지 않았다.

## 제 2장 모델링

### 2.1 생체역학 모델

#### 2.1.1 인체 모형과 인체 자료

측면평면에서의 2차원 상황에서 모델을 구성한다. 인체를 8개의 solid link(foot, lower leg 2개, upper leg 2개, trunk, upper arm, lower arm)로 나누고, trunk를 L5/S1 joint를 기준으로 다시 두개의 solid link로 나눈다. 각 관절에서의 염력이나 몸의 무게중심 등을 구하기 위해 필요한 link의 길이들은 신체의 여러가지 측정자료를 바탕으로 구한다[3]. 또한 각 link의 질량은 Drillis et al.[5] 자료에서 구하고 체절(segment)의 무게 중심은 Dempster[4]의 자료를 이용한다.

여기서의 모델은 다음과 같은 가정을 포함하고 있다.

- (1) 작용하는 수평, 수직의 힘은 sagittal 평면에서 작용을 한다.
- (2) 페달링을 하는 경우에 양발이 벌어지게 되는데 몸체(torso)와 넓적다리(thigh)의 각도는 두발의 평균치로 하였다.
- (3) erector spinae가 작용을 하면 rectus abdominis가 작용을 안하고, 반대로 rectus abdominis가 작용을 하면 erector spinae가 작용을 한다.
- (4) 페달링하는 힘은 크랭크축이 수평일때 수직힘만을 고려한다.
- (5) 페달링을 할때 신체의 각 부분에 부과되는 힘은 정적인(static) 상황에서 고려한다. 각 체절의 관성 모멘트는 고려하지 않는다.

2.1.2 L5/S1에 걸리는 압박 예측

L5/S1 디스크에서 염력의 등식은 (1)식과 같다.

$$T_{L5S1} - T_{ABDOM} + F_{ab} * A - F_{sp} * B = 0 \text{ ----- (1)}$$

- F<sub>ab</sub> = 0 if T<sub>L5S1</sub> - T<sub>ABDOM</sub> >= 0
- F<sub>sp</sub> = 0 if T<sub>L5S1</sub> - T<sub>ABDOM</sub> <= 0
- A : Rectus Abdominis의 모멘트 팔의 길이 (12cm)
- B : Erector Apinae의 모멘트 팔의 길이 (5cm)
- T<sub>L5S1</sub> : L5S1에서의 모멘트
- T<sub>ABDOM</sub> : 복부에서의 모멘트

식 (1) 에서 T<sub>ABDOM</sub>을 구하기 위해서는 복부압력 P<sub>a</sub>를 알아야 한다. 복부 압력은 횡경막(diaphragm)과 복부 벽 근육(abdominal wall muscle)이 reflex fashion으로 tense되었을때 발생한다.

L5/S1에서의 힘의 균형식은 다음과 같다.

$$RN_{body} * \sin(DANG) + F_{ab} + F_{sp} - F_{ABDOM} + F_x * \cos(DANG) - F_y * \sin(DANG) - F_{comp} = 0 \text{ ----- (2)}$$

- F<sub>comp</sub> : L5/S1에서의 압박
- RN<sub>body</sub> : L5/S1 에서 몸의 무게때문에 가해지는 힘
- DANG : 수평에 대한 압박의 각도
- F<sub>x</sub> : x축 방향의 외력
- F<sub>y</sub> : y축 방향의 외력

2.2 자전거의 모델링

2.2.1 자전거 구조 개요와 전체 상황

페달에 가하는 힘이 저항력보다 클 때 자전거는 앞으로 전진한다. 저항에는 바퀴를 돌리는데 따른 지면의 저항(rolling-friction drag), 공기 저항(air drag), 체인과 크랭크의 전달 저항, 바퀴 베어링의 저항 등이 있다.

일반적으로 체인과 크랭크의 전달 저항과 바퀴 베어링의 저항등은 보통 0.05% 이하이고 주요 저항으로는 공기의 저항과 지면의 저항이다[1].

공기의 저항은 두가지 주요한 힘 때문에 생기는데, 첫째는 신체의 피부에 수직인 방향의 힘으로서 바람의 압력처럼 느껴지고 둘째는 신체의 피부에 접하는 방향의 힘으로 피부의 마찰력이라고 할 수 있다. 일상적인 상황에서

$$\text{공기저항(N)} = 0.54 * \text{앞면적(m}^2\text{)} * [\text{속도(m/s)}]^2$$

인데, 자전거 탈때의 앞면적은 0.5 m<sup>2</sup> 로 가정한다.[1].

바퀴가 회전할때 지면의 저항(rolling resistance)은 타이어 바퀴의 팽창 압력(inflation)과 지면의 노면 상태에 큰 영향을 받는다. 팽창 압력이 클수록, 노면 상태가 고르고 딱딱할수록 저항은 작아진다.

신체역학 모델을 분석하기 위해서 손잡이에 걸리는 힘을 알아야 하는데, 이 힘은 페달과 안장에 걸리는 힘과 직접적인 관계가 있다. 페달에 걸리는 수직힘은 크랭크가 지면에 수평일때 최

대이다[7]. 페달에 걸리는 힘은 수평, 수직힘이 다 존재하나 크랭크 축이 지면에 평행일 때의 최대힘을 분석하는 것이므로 수직힘만 분석한다.

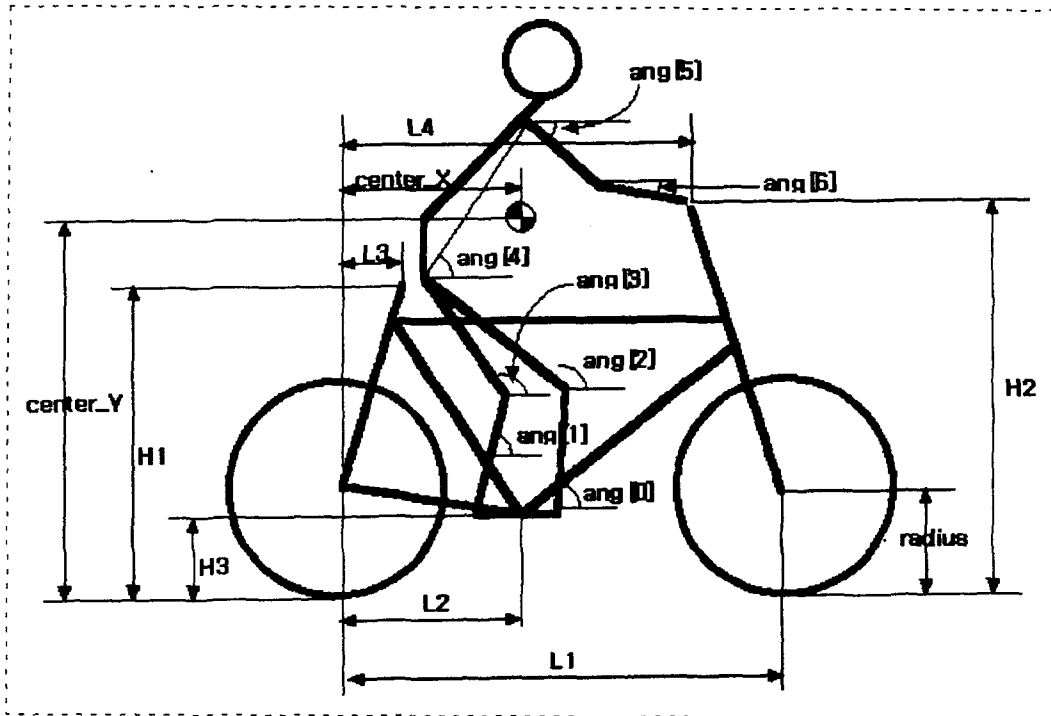


그림 2-1 자전거 구조와 신체의 각도

### 2.2.2 가속하는 경우

가속을 빠르게 하기 위해 엉덩이를 안장에서 든 상황이다. 몸무게가 weight인 사람이  $a$   $m/sec^2$ 의 가속도로 출발하기 위해서 뒷바퀴에 필요한 수평힘은

$$Hon\_F = (a / 9.8) * weight$$

페달링에 드는 평균 토크는

$$mean\_T = F * radius * (기어수)$$

토크가 사인함수 형태라 가정하면[7] 최대 토크는

$$max\_T = \pi / 2 * mean\_T$$

이때에 페달에 걸리는 힘은

$$pedal\_F = max\_T / crank$$

여기서 crank는 페달링의 회전 반지름으로 크랭크축의 길이이다.

$$F_x = -Hon\_F$$

앞바퀴와 뒷바퀴에 부과되는 힘은 자전거와 타는 사람의 무게이다.

$$R_{fore} + R_{back} = weight \quad \text{----- (1)}$$

뒷바퀴의 지면에 닿는 점을 기준으로 한 모멘트에서

$$R_{fore} * L1 + Hon\_F * center\_Y = weight * center\_X \text{ ----- (2)}$$

$$P_{y1} + P_{y2} = pedal\_F \text{ ----- (3)}$$

수직 방향의 힘들의 균형식은

$$- F_y - P_{y1} + P_{y2} + R_{fore} + R_{back} = 0 \text{ ----- (4)}$$

뒷바퀴 밑을 축으로 한 모멘트에서

$$R_{fore} * L1 - F_x * H2 - F_y * L4 - P_{y1} * (L2 + crank) + P_{y2} * (L2 - crank) = 0 \text{ ----- (5)}$$

(1), (2), (3), (4), (5)에서  $R_{fore}$ ,  $R_{back}$ ,  $P_{y1}$ ,  $P_{y2}$ ,  $F_y$ 를 구할 수 있다.

- ( $R_{fore}$ ,  $R_{back}$  : 앞바퀴, 뒷바퀴에서의 수직항력
- $F_x$ ,  $F_y$  : 핸들에서의 수평, 수직 힘
- $P_{y1}$ ,  $P_{y2}$  : 페달에서 지면쪽으로는 힘, 지면 반대방향으로의 힘
- $S_x$ ,  $S_y$  : 안장에서의 수평, 수직 힘 )

### 2.2.3 평지를 등속으로 가는 경우

자전거를 달리지 못하게 하는 저항은

$$resist(N) = 0.54 * 0.5 * (\text{자전거의 속도 m/sec})^2 + \text{rolling resistance}$$

수평방향의 힘은  $Hon\_F = resist$

자전거를 이동하는데 드는 일률은

$$\begin{aligned} POWER &= Hon\_F * (\text{자전거의 속도}) \\ (\text{페달의 각속도}) &= \text{속력} / (\text{gear\_rate} * \text{radius}) \\ (\text{페달에서의 평균 염력}) &= POWER / (\text{페달의 각속도}) \\ (\text{페달에서의 최대 염력}) &= 2 * (\text{페달에서의 평균 염력}) \\ (\text{페달에 걸리는 최대 힘}) &= (\text{페달에 걸리는 최대 염력}) / \text{crank} \end{aligned}$$

외력인 수평 힘  $Hon\_F$  가 안장에 부과된다고 하면 신체의 무게에 의해 생기는 핸들의 수평방향의 힘을  $F_x$ 라 하면

$$S_x = - Hon\_F + F_x \text{ ----- (8)}$$

수직 성분의 힘의 등식은

$$S_y + P_{y1} + F_y - R_{fore} - R_{back} = 0 \text{ ----- (9)}$$

뒷바퀴의 지면에 닿는 부분에서의 모멘트 등식은

$$R_{fore} * L1 - F_y * L4 - P_{y1} * (L2 + crank) - S_y * H1 - F_x * H2 = 0 \text{ ----- (10)}$$

안장에 앉아 있고 핸들을 손으로 붙잡고 있는 상황에서 정적 평형을 이루고 있으면 어깨관절에서의 염력은 0 이 된다.

$$T_{SHOULDER} = 0 (F_x, F_y \text{ 미지수인 등식}) \text{ ----- (11)}$$

(8), (9), (10), (11) 에서  $S_x$ ,  $S_y$ ,  $F_x$ ,  $F_y$ 를 구할 수 있다.

### 제 3장 모형의 적용 및 결과

#### 3.1 모의실험(Simulation)

피실험자 4명(나이 23~25, 신장 170~172, 몸무게 57~82.5)에 대해 모의실험을 하였다. 이를 위해 핸들의 높이, 안장의 높이, 바퀴사이의 거리, 크랭크축 길이, 바퀴의 지름, 안장에서 핸들까지의 수평거리, 뒷바퀴 중심에서 크랭크 축의 중심까지의 길이 등을 측정하였다.

신체 모형을 위한 자료인 피실험자의 키, 몸무게, 손의 길이, 발의 길이, tibia의 길이, radius의 길이, HTE(발바닥에서 팔꿈치까지의 길이)를 측정하였다.

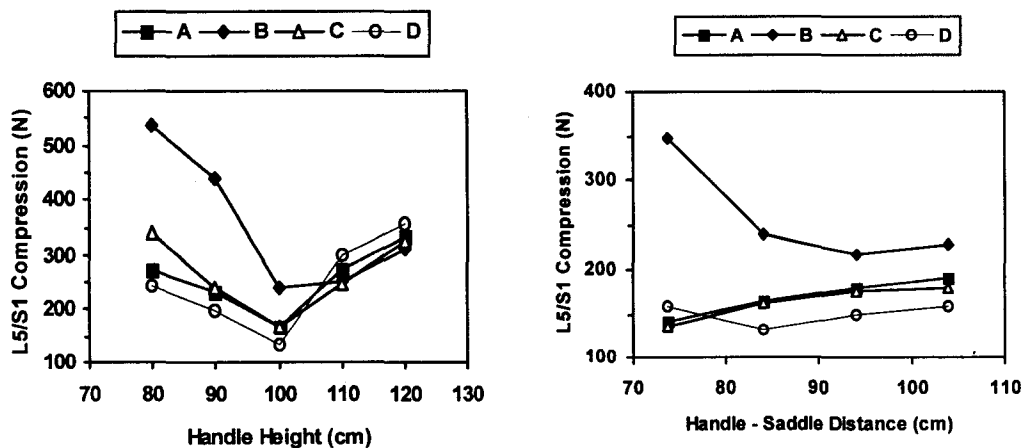
평지에서 등속으로 달리는 상황에서 페달에서 핸들까지의 연직거리 5가지(50, 60, 70, 80, 90, 100cm)와 핸들과 안장까지의 수평거리 4가지(74, 84, 94, 104 cm)를 설정하고 인체에 부과되는 부하를 구하였다.

#### 3.2 결과 및 분석

##### 3.2.1 L5/S1 디스크의 압박

5m/sec의 속도로 달릴때 핸들높이의 변화에 따라 L5/S1에 부과되는 압박을 피실험자와 핸들높이, 핸들과 안장거리에 따라 분산분석한 결과, 핸들의 높이는 압박에 영향을 주지만 ( $F(4,69)=15.53, p < 0.01$ ) 핸들과 안장 사이의 거리는 통계적으로 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

핸들높이의 변화에 따라 L5/S1 디스크의 압박은 그림 3-1의 (a)와 같다. 그림 3-1의 (b)는 핸들과 안장사이의 거리에 따른 변화를 나타낸다. 핸들의 높이가 100cm일때 모든 피실험자가 최소의 압박 값을 가졌다. 최대 압박이 600 N을 넘지 못하므로 안장에 앉아 등속으로 자전거를 탈때에는 L5/S1에 부과되는 압박이 크게 고려해야 할 요소는 아니라고 여겨진다.



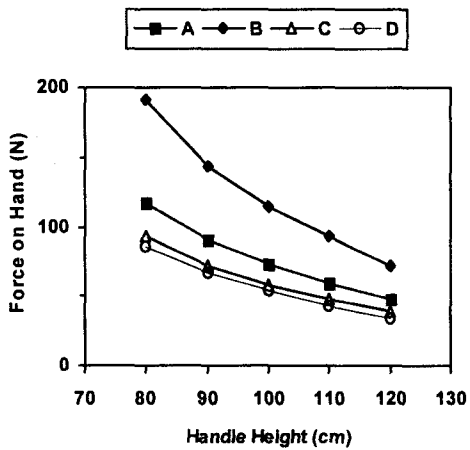
(a) 핸들 높이 변화

(b) 핸들과 안장사이 거리변화

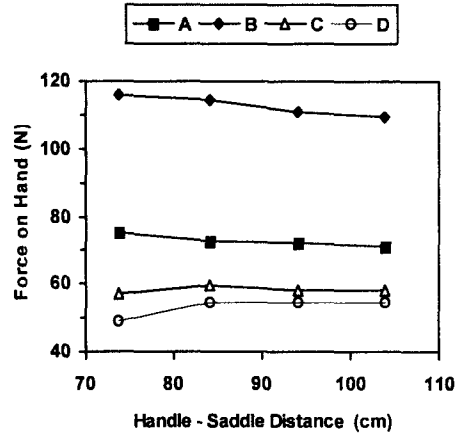
그림 3-1 평지를 등속으로 달릴때 L5/S1 디스크의 압박

3.2.2 손에 부과되는 힘

핸들의 높이는 손에 부과되는 힘에 영향을 주는 것으로 나타났으나( $F(4,69) = 98.97, p < 0.01$ ) 핸들과 안장의 거리는 손에 부과되는 힘에 통계적으로 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 그림 3-2의 (a)는 핸들높이에 따라, (b)는 핸들과 안장의 수평거리에 따라 손에 부과되는 힘을 나타낸 것이다.



(a) 핸들 높이 변화

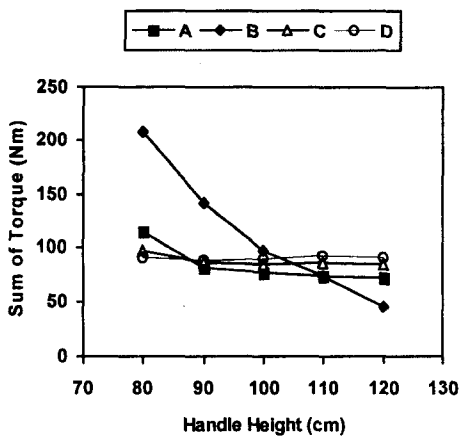


(b) 핸들과 안장사이 거리변화

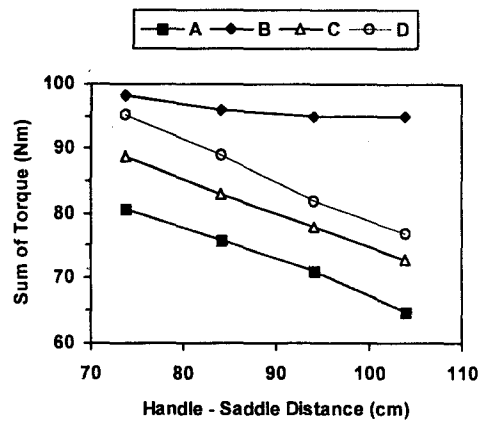
그림 3-2 평지를 등속으로 달릴때 손잡이에 부과되는 힘(핸들높이)

3.2.3 평지를 등속으로 달릴때 각 관절의 염력 합

핸들의 높이는 관절의 염력의 합에 영향을 주는 것으로 나타났다( $F(94,69) = 14.32, p < 0.01$ ) 그림 3-3 에서 볼 수 있는 것처럼 핸들의 높이가 높은 것이 각 관절의 염력 합을 작게 해준다



(a) 핸들 높이 변화



(b) 핸들과 안장 사이 거리변화

그림 3-3 평지를 등속으로 달릴때 각 관절의 염력 합

#### 4. 결론 및 토의

자전거를 탈때에 L5/S1 디스크에 부과되는 압박과 각 관절에서의 염력 합, 손에 부과되는 힘 등을 여러 가지 설계요소를 변화시키면서 구하였다. 모든 피실험자에 대해 L5/S1에 부과되는 압박은 실험 조건 5가지 핸들높이 중 중간 높이(100cm)에서 최소의 압박값을 가지는 것으로 나타났으며, 핸들이 높아지거나 낮아지거나 하면 압박값은 증가하였다. 대부분의 압박의 값이 400N 이하로서 핸들 높이에 영향을 받긴 하지만 NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health) 기준에 비교해 볼 때 아주 낮은 값을 보여준다.

염력의 합은 핸들이 높을수록 낮아지는 경향을 보였다. 핸들과 안장사이의 거리는 L5/S1에서의 압박, 손에 부과되는 힘, 각 관절의 염력의 합에 대해 유의한 영향( $\alpha=0.05$ )을 미치지 않는 것으로 나타났으며, 0.1 유의수준에서는 각 관절의 염력의 합에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 핸들 높이의 변화에 의한 값변화보다 상대적으로 작게 변하지만 핸들과 안장사이의 거리가 멀어질수록(104cm까지) 약간씩 염력 합이 작아지는 양상을 보였다. 손에 부과되는 힘은 핸들이 높을수록 작아지며, 핸들과 안장사이의 거리는 손에 부과되는 힘에 유의한 영향을 주지 못했다.

이러한 본 연구 결과는 사용자의 사용편의성과 에너지 효율을 고려한 자전거 설계에 이용될 수 있으리라 생각된다.

#### 참고문헌

- [1] Aleshinsky, Sergei Yu., "An energy sources and fractions approach to the mechanical energy expenditure problem : I. Basic concepts, escription of the model, analysis of a one-link system movement" *J. Biomechanics* Vol.19, No.4, pp.287-293, 1986.
- [2] Chaffin, Don B. and Gunnar B.J. Andersson, *Occupational Biomechanics*, John Wiley & Sons, 1984.
- [3] Dempster, W.T., L.A. Sherr and J.F. Priest, "Conversion scales for estimating humeral and femoral lengths of functional segments in the limbs of American caucasoid male", *Human Biology*, Vol.36, No.3, pp. 246-261, 1964.
- [4] Dempster, W.T., *Space Requirements of the seated Operator*, WADC-TR-55-159, Aerospace Med. Res. Lab., Wright-Patterson AFB, 1955.
- [5] Drillis, R.J., R. Contini and M. Bluestein, "Determination of body segment parameters", *Human Factors*, Vol.5, No.5, pp.493-504, 1963
- [6] Hull, M.L., Andrew Beard and Hemant Varma, "Goniometric measurement of hip motion in sycling w hile standing", *J. Biomechanics* Vol.23, No.7, pp.687-703, 1990.
- [7] Hull, M.L. and M. Jorge, "A methid for biomechanical analysis of bicycle pedalling", *J. Biomechanics* Vol.18, No.9, pp.631-644, 1985.
- [8] Redfield, Rob and M.L. Hull, "On the relation between joint moments and pedalling rates at constant power in bicycling", *J. Biomechanics* Vol.19, No.4, pp.317-329, 1986.
- [9] Ruby, Patricia, M.L. Hull and David Hawkins, "Three-demensional knee joint loading during seated cycling", *J. Biomechanics* Vol.25, No.1, pp.41-53, 1992.
- [10] Whitt, F.R. and D.G. Wilson, *Bicycling Science*, The MIT Press, 1982.