산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제21권 B호, 2001.
Journal of Industrial Technology, Kangwon Natl. Univ., Korea, No. 21 B, 2001.

운전자 자세에 따른 팔꿈치 동작의 불편도 평가

Assessment of discomfort in elbow motion from driver posture

탁 태 오* 이 벽 림**
Tak, Tae-Oh Lee, Pyoung-Rim

Abstract

The human arm is modeled by three rigid bodies(the upper arm, the forearm and the hand)with seven degree of freedom(three in the shoulder, two in the elbow and two in the wrist). The objective of this work is to present a method to determine the three-dimensional kinematics of the human elbow joint using a magnetic tracking device. Euler angle were used to determine the elbow flexion-extension, and the pronation-supination.

The elbow motion for the various driving conditions is measured through the driving test using a simulator. Discomfort levels of elbow joint motions were obtained as discomfort functions, which were based on subjects' perceived discomfort level estimated by magnitude estimation. The results showed that the discomfort posture of elbow joint motions occurred in the driving motion.

키워드 : *맨-머신 시스템, 팔꿈치, 불편도*
Keywords : *man-machine system, elbow motion, discomfort*

1. 서론

자동차는 초기의 특수 계층만을 위한 기계에서 현재에는 일반 대중들에게도 없어서는 안될 생활의 일부분이 되었다. 또한 이러한 자동차는 현존하는 최첨단 기술들이 집적되어 있는 하나의 시스템으로 계속 발전되고 있는 추세이다. 하지만 현재까지는 자동차를 설계할 때 기계적 성능 및 기술들의 향상에만 치중할 뿐 자동차를 운전하는 주체인 인간이라는 개념에 그다지 많은 비중을 두고 있지 않은 실정이다. 그러나 점차 운전자에 대한 행동과 양식을 파악해 나가고자 하는 연구가 점진적으로 진행되고 있다. 아직 국내에서는 해외의 연구에 따르지 못하는 기초적인 수준에 불과하지만, 앞으로 많은 투자와 연구가 이루어지면 man-machine system에 대한 발전이 이루어 질 것이다.

Man-Machine System은 인간이라는 대상물에 대한 법칙성을 탐구함으로써 인간의 특성을 찾아내고, 인간이 안전하면서도 손쉽게 조작할 수 있도록 인간의 특성에 맞추어, 공학적인 측면에서 기계, 설비를 설계하거나 연구하는 것이다[1]. 이러한 개념을 자동차-운전자간의 시스템에 결합하면, 좀더 운전자에게 편리하고 효과적인 조작을 가능하게 할 것이다.

자동차기술의 첨단화에도 불구하고, 결국 모든 차량의 동작은 사람의 행위에 따라 결정되어 진다. 그 중에서도 차량을 조향시키는 핸들링 동작은 가

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수
** 강원대학교 대학원 기계공학과 석사과정

장 기본적이고, 또한 가장 중요한 운전자의 동작이다. 따라서 이러한 운전자의 핸들링 동작을 연구함으로써, 자동차-운전자간의 효율적인 시스템을 구축 할 수 있다.

운전자가 장시간에 걸쳐 운전을 할 때에는 핸들링 동작에 있어서 불편함을 느끼는 자세나 거동을 유발해서는 안된다. 즉 운전자가 운전석에 앉아있을 때 핸들링 동작에 불편함을 최소화하는 방향으로 승용차의 내부 설계 파라미터들을 규정해야 한다. 여기서 파라미터로는 핸들의 반지름, 핸들의 각도와 시트와 핸들간의 거리등을 선정할 수 있다. 본 논문에서는 각 파라미터를 변수로 하여 피실험자들의 팔꿈치 관절의 움직임에 대한 불편도 함수식에 적용하여, 운전자의 조향동작을 정량적으로 평가하였다.

2. 실험 장비

2.1 Motion Capture System

실제 공간상에서의 움직임을 감지하여 데이터화함으로써 가상 공간 안에서 실제적인 시뮬레이션을 가능하게 해주는 장비이다. 공간상에서 움직이는 작은 리시버(receiver)들의 움직임을 실시간으로 측정하여 역동적인 6 자유도의 위치값(X,Y,Z좌표)과 방위값(X,Y,Z축에 대한 회전값)으로 전달해 준다. 실제공간 안에서 인간의 움직임을 감지하여 가상공간에서 이루어지는 작동들과 일치시킴으로써 인체의 움직임을 정확한 데이터로 표현할 수 있다. 이 논문에서 모션 캡처에 사용할 장비는 독일의 Polhemus사에서 나온 InsideTRAK HP 으로 하나의 Global Coordinate를 설정해 주는 트랜스미터(transmitter)와 두 개의 리시버(receiver)를 장착해 주는 장비로써, 장비의 구성도는 Fig 2.1 과 같다.

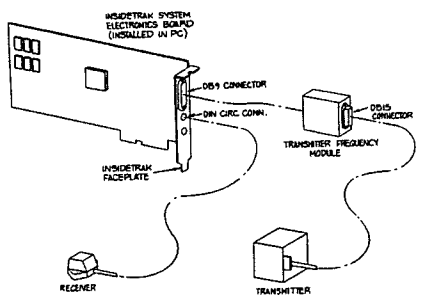

Fig 2.1 System Interconnections

2.2 Simulator

본 연구에서는 비용과 위험이 많이 따르는 실차 실험대신 실시간 차량 시뮬레이션을 실험에 사용하게 되었다. Fig 2.2는 실험에 사용된 시뮬레이터 장비의 사진이다.

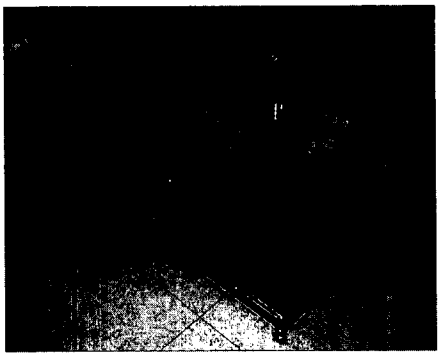

Fig 2.2 Picture of Simulator

3. 사람 팔의 운동 해석

3.1 관절의 자유도

차량의 핸들링에 주체가 되는 부분이 바로 사람의 팔이다. 그러므로 팔에 대한 운동과 그에 따른 해석이 필수적이다. 사람의 팔은 7자유도를 가진 기구로 해석하는데, 각 관절에 따른 적절한 조인트를 설정하는데 있어 관절의 움직임을 파악하는 것은 중요한 작업이다. Fig 3.1 은 사람의 팔에 일어날 수 있는 관절의 운동을 나타낸 것이다. 그 첫째가 굽힘(flexion-extension)운동, 두 번째가 돌림(internal-external rotation)운동, 그리고 마지막으로 벌림(abduction-adduction)운동이다[7].

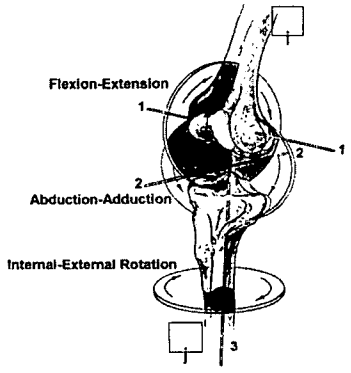

Fig 3.1 Joint rotation of Human Arm

어깨가 세 가지 운동을 모두 허용하는 3자유도, 팔꿈치 관절이 굽힘과 돌림운동의 2자유도를 가지고 있다. 그리고 손목은 굽힘과 벌림의 2자유도를 가지고 있다.

3.2 팔꿈치 관절의 파라미터 규정

팔꿈치 관절에 대한 운동을 나타내기 위해서 몇 개의 파라미터들을 규정해야만 한다. 팔꿈치 관절은 어깨 관절과는 다르게 공통된 회전축을 공유하지 않고 Fig 3.3 에서 보는 바와 같이 h_w 만큼 떨어진 A1, A2 점의 서로 다른 회전축을 가지고 있다[10]. 즉 A1, A2 점을 지나는 각각의 회전축 w_{1e} 와 w_{2e} 를 정의하여야만 한다. 회전하는 인접하는 두 물체 사이에는 공통의 축을 가져야만 한다. 따라서 벡터의 차이가 최소가 되는 두 축을 구할 수 있다. 즉 두 바디가 공통된 축을 가지기 위해 식(1)과 같이 벡터 w_{1e} , w_{2e} 차의 크기가 최소가 될 경우의 벡터 값을 구하면 된다.

$$\Delta w = \frac{1}{T}\int_0^T (R_1 w_{1e} - R_2 w_{2e})^2 dt \qquad (1)$$

여기서 R_1 과 R_2는 M_1, M_2에서 부착한 센서에서 나오는 회전 메트릭스 이고 T는 시간을 나타낸다. 윗 식에서 우리가 구하고자 하는 w_{1e} , w_{2e} 를 구하기 위해 식(2),(3)와 같이 편미분을 한다.

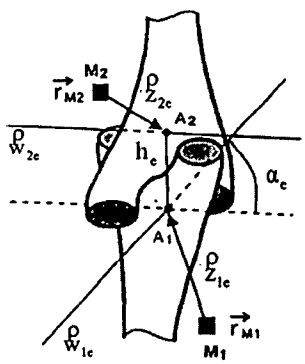

Fig 3.3 Skew-oblique joint as the model in the elbow joint

$$\frac{\partial \Delta w}{\partial w_{1e}} = \frac{2}{T}\int_0^T (R_1^t R_1)dt \cdot w_{1e} - \frac{2}{T}\int_0^T (R_1^t R_2)dt \cdot w_{2e} = 0 \qquad (2)$$

$$\frac{\partial \Delta w}{\partial w_{2e}} = \frac{2}{T}\int_0^T (R_2^t R_1)dt \cdot w_{1e} - \frac{2}{T}\int_0^T (R_2^t R_2)dt \cdot w_{2e} = 0 \qquad (3)$$

선형식으로 윗 식(2),(3)을 조합하면 식(4)와 같다.

$$Dx = 0 \qquad (4)$$

여기서 미지수 $x = \begin{pmatrix} w_{1e} \\ w_{2e} \end{pmatrix}$ 이고

$$D = \begin{pmatrix} I & -\int_0^T R_1^t R_2 dt \\ \int_0^T R_2^t R_1 dt & -I \end{pmatrix}$$ 이다.

윗식은 우항이 0이기 때문에 고유치(eigenvalue) 문제이다. 따라서 고유치 λ의 값을 구하여 그에 만족하는 고유벡터(eigenvector)를 구하면 미지수 x를 구할 수 있다[11].

3.3 팔꿈치 관절의 회전각

팔꿈치 관절의 회전각도는 Fig 3.4 에서 보는 바와 같이 upper arm(A_1 X_1 Y_1 Z_1)과 팔뚝(A_2 X_2 Y_2 Z_2)의 좌표계를 설정함으로써 계산할 수 있다. X_1 축은 굽힘축인 w_{1e} 의 방향으로 설정하며, Y_1는 마커점 M_1 점의 종, 횡 방향의 평면위에 위치하게 설정한다. 그리하여 오른손법칙으로 자연스럽게 축 Z_1을 결정하게 된다. 마찬가지로 X_2 축은 돌림축인 w_{2e} 의 방향으로 정하고 Y_2 축은 M_2 마커점의 평면상에 존재하도록 정한다. Z_2축은 자연스럽게 결정되게 된다.

여기서 Z_{in} 은 두 회전축에 직교하는 방향으로 설정하게 된다. 따라서 굽힘과 돌림의 회전각 결정은 Z_1과 Z_{in} 축의 회전 각 α_{FE} 과 또한 Z_2와 Z_{in} 축의 회전 각 β_{IE} 을 구함으로써 두 자유도의 회전각을 구할 수 있는 것이다.

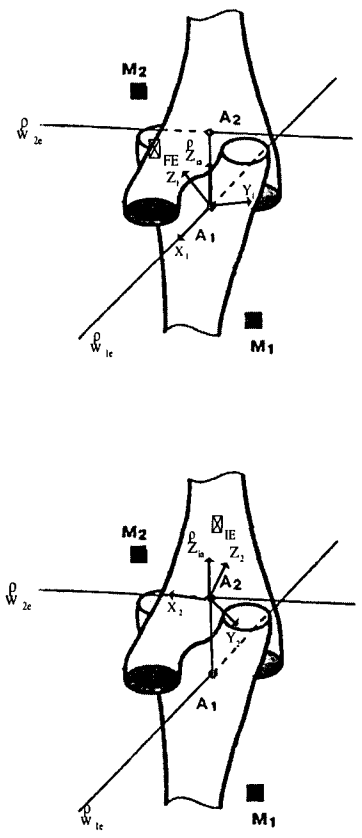

Fig 3.4 Angle of rotation in the elbow joint

3.4 불편도 함수

3.4.1 Magnitude Estimation

Man-machine system의 중요성이 강조되면서 설계에서는 인간의 신체치수(anthropometric dimension)를 우선적으로 고려하여, 이를 바탕으로 여러 다양한 man-machine system 설계를 하게 된다. 이러한 인간의 신체치수에는 가장 기본이 되는 신장, 팔 길이, 체중과 같은 정적 인체치수(static anthropometric dimension)를 들 수 있으나, 실제 설계에서는 이보다는 움직이는 인체에서 측정한 관절의 동작범위 등의 동적 인체치수(dynamic anthropometric dimension)가 중요한 역할을 한다. 이러한 관절의 동작범위들을 기계설계에 적용하는 예는 자동차 시트 설계에까지 영향을 미쳐, 운전자가 운전석에 앉았을 때의 안락 동작범위(joint angle of comfort)가 시트 설계의 가장 중요한 요소로 사용되고 있다. 여기서 안락 동작범위란 각 관절의 운동시에 불편을 느끼지 않고 움직일 수 있는 관절의 운동범위를 의미한다[12].

안락 동작범위의 설정을 위하여 각 관절 동작에서의 동작 수준에 따른 주관적 불편도를 magnitude estimation을 이용하여 측정한다. Magnitude Estimation 기법은 인간이 외부환경에 대한 인지강도를 비율로 판단할 수 있고, 적절한 형태로 표현이 가능하다는 가정을 바탕으로 한다. 이러한 가정을 바탕으로 둔 Magnitude Estimation 기법은 인간의 인지도의 정량적 파악에 적합하다고 할 수 있다.

3.4.2 불편도 식

Magnitude Estimation 기법을 사용하여 자동차의 운전자가 핸들을 작동시키기 위한 여러 가지 파라미터들에 대하여 팔꿈치 관절의 불편도를 정량적으로 나타낼 수 있을 것이다. 이러한 불편도를 가지고 사람들에게 가장 안락감을 줄 수 있는 파라미터를 규명할 수 있다. 팔꿈치 관절에서의 동작 수준에 따른 불편도의 경향은 동작 수준이 증가함에 따라 지각 불편도가 증가한다[12]. 이러한 팔꿈치 관절의 동작 수준에 따른 불편도를 정량적인 식으로 나타내면 Table 1 로 나타낼 수 있다. 여기서 y는 불편도, x는 동작자유도의 수준을 나타낸다.

Table 1. Function of Discomfort

관절	앉 은 자 세	
	동작자유도	관 계 식
팔꿈치	굽힘	$y=0.0004x^2+0.0947x+7.7$
	돌림	$y=10.11e^{0.0144x}$

4. 실 험

4.1 실험 변수

우리가 안락한 핸들링 태도를 정하기 위한 변수들은 아래 그림과 같이 크게 세 가지로 분류하였

다. 첫째 핸들의 각도, 둘째로 핸들과 어깨의 거리, 셋째로 핸들의 크기이다. 이러한 세 가지 변수들을 변화시키며, 사람 팔의 팔꿈치 운동의 불편도를 측정하여 최적의 안락한 거주공간을 설계한다.

차량에 달린 핸들의 반경은 측정해본 결과 19 cm 의 길이를 가지고 있다. 본 실험에서는 19cm 를 기준으로 ±3cm 의 차이를 두고 불편도를 측정할 것이다. 핸들의 각도와 핸들과 어깨와의 거리는 자유로이 조절이 가능하므로, 본 연구에서는 핸들의 각도는 20°, 40° 를 가지고 실험을 하며, 어깨와의 거리는 50 cm에서 ±5cm 의 거리를 두고 각각 실험을 할 것이다.

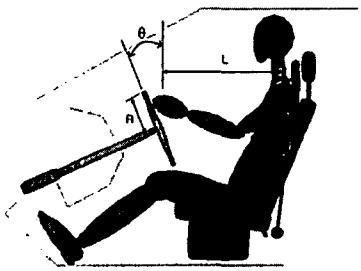

Fig 4.1 Parameter of comfortable driver

4.2 피실험자

본 연구의 실험에는 3명의 남자 대학 및 대학원 학생이 참여하였으며, 이들은 팔의 근골격계 질환의 경력이 없는 건강한 학생들이다. 피실험자들의 인체 측정치는 나이 27세, 신장 170 cm, 그리고 체중 64 kg을 보였다. 이들 중 운전 경력이 있는 사람은 2명이고, 나머지 1명은 운전 경력이 없는 사람이다.

4.3 실험방법

본 연구에서는 운전 불편도를 실험하기 위해 시뮬레이터 장비를 사용하였다. 실차에서의 실험은 장비의 장착 및 피실험자의 안전에 큰 위험을 주기 때문에 실차에서의 실험은 하지 않았다. 그러나 시뮬레이터에서의 주행감각도 충분히 실차의 운전과 같은 감각을 낼 수 있기 때문에, 본 연구에서는 시뮬레이터에서의 실험을 수행하였다.

피실험자중에 운전에 익숙하지 못하고 시뮬레이터 작동이 피실험자들에게 익숙치 못함으로 인해 시뮬레이터조작에 불편함 정도를 없애기 위해 실험자들은 실험에 임하기 전 충분한 코스 연습과 시뮬레이터 작동 연습을 하였다. 피실험자는 Fig 4.2 에서 보는 바와 같은 시뮬레이터 장비에 앉아서 프로젝트로 영사되는 화면을 보고 정해진 코스를 따라서 핸들을 움직이게 하였다. 핸들링 조작에 의한 불편도 만을 체크하기 위해 모든 동작은 배제하고 단순히 피실험자들은 핸들링 조작만을 하였다.

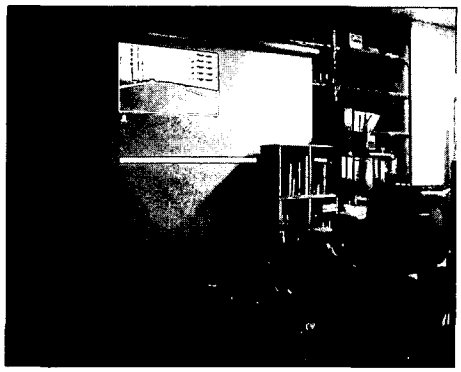

Fig 4.2 Picture of Test

4.4 실험 결과

피실험자들의 테스트 결과 Fig 4.3, Fig 4.4에서 보는바와 같이 거의 비슷한 양상을 나타내는 것을 볼 수 있다. 따라서 피실험자중에서 시뮬레이터작동이나 관절에 이상이 없는 것으로 판단된다.

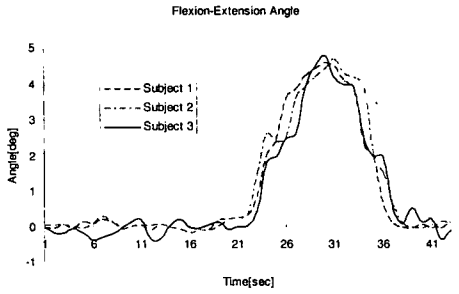

Fig 4.3 Comparison of flexion-extension angle

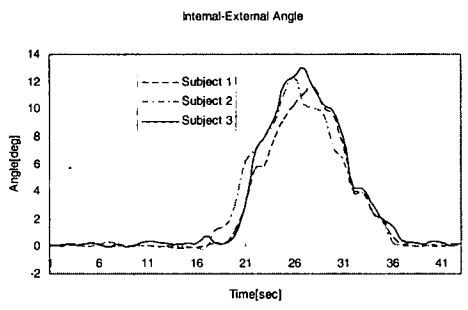

Fig 4.4 Comparison of internal-external angle

Fig 4.5은 핸들의 반경에 따른 불편도 값을 나타낸 것이다. 3명의 피실험자들에게 각각의 반경에 대한 실험을 실시하고, 각 실험에서 구한 값들을 불편도 식에 대입하여 평균을 한 값들이다. 핸들과의 거리는 45cm, 핸들의 각도는 40°에서 실험하였다. Fig 4.5에서 보듯이 값에서 큰 차이가 나지는 않지만, 반경이 22cm일 경우에서 불편도의 최고치가 가장 적게 나옴을 볼 수 있다.

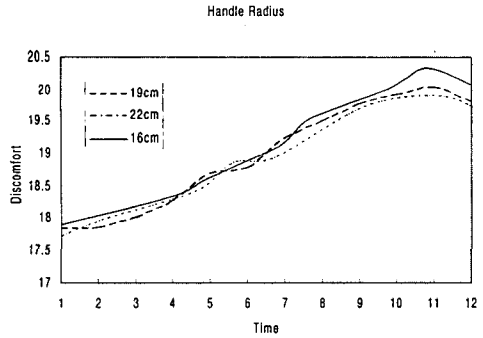

Fig 4.5 Discomfort data of subject from handle radius

Fig 4.6은 핸들과 피실험자들의 어깨의 거리 차이에 따른 불편도 값이다. 마찬가지로 모든 실험자들의 결과치를 평균한 값이다. 실험은 핸들 반경에서 가장 불편함을 느끼지 못한 22cm에서, 핸들의 각도는 40°에서 하였다. Fig 4.6에서 보듯이 핸들간의 거리가 50cm일 경우 가장 적은 불편도를 나타냄을 볼 수 있다.

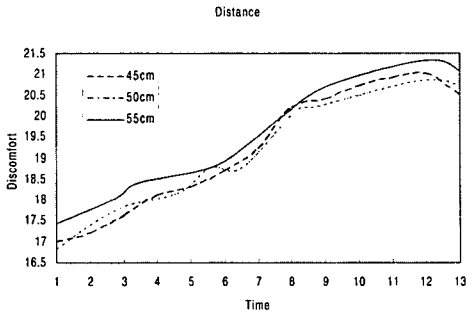

Fig 4.6 Discomfort data of subject from distance

Fig 4.7 에서는 핸들의 각도에 따른 불편도 측정이다. 위의 실험에서 밝혀진 결과값을 토대로 핸들간의 거리는 50cm, 핸들의 반경은 22cm에서 측정하였다. 그 측정 결과 핸들의 반경이 40° 일 경우 좀 더 운전자에게 안락함을 주었다.

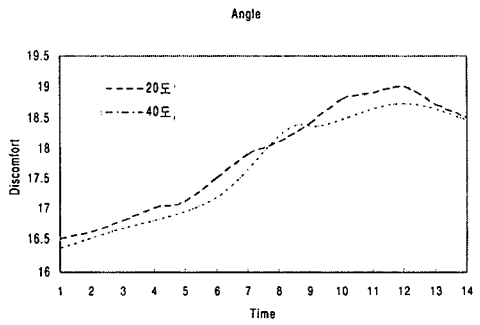

Fig 4.7 Discomfort data of subject from handle angle

위의 실험결과들로부터 최적의 값으로, 즉 핸들과의 거리 50cm, 반경 22cm, 각도 40°의 값으로 모든 피실험자들에 실험을 하였다. Fig 4.8에서 보듯이 불편도 값이 가장 적은 값들로 나옴을 볼 수 있었다.

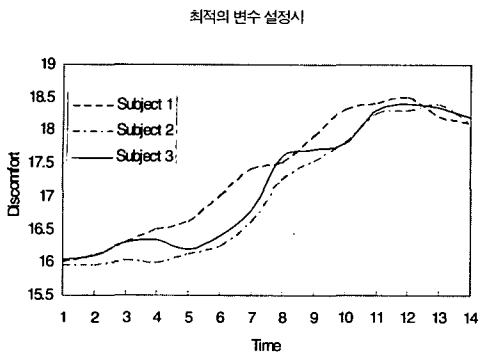

Fig 4.8 Discomfort data of subject

5. 결론

본 논문의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 사람 팔을 7자유도를 가지는 기구학적 연쇄로 모델링하고, 실험을 통하여 팔꿈치 관절에 대한 기구학적 파라미터를 결정하였다.

둘째, 시뮬레이터를 이용한 주행시험을 통하여 다양한 운전조건에 대한 팔꿈치 운동을 측정하였다. 이 자료로부터 구한 팔꿈치 관절의 기구학적 파라미터를 Magnitude Estimation 기법에 적용하여 운전자 조향동작의 불편도를 정량적으로 평가하였다.

셋째, 조향동작에 필요한 설계 파라미터로 핸들의 반지름, 핸들의 각도, 운전자의 어깨와 핸들과의 거리를 선정하여, 이들 설계 파라미터를 변화시키면서 다양한 설계조건에 따른 운전자 조향동작의 불편도를 평가하였다.

넷째, 앞으로의 연구과제로서 팔꿈치 관절외에도 어깨 관절과 팔목 관절에 대한 기구학적 파라미터 결정과 팔의 운동과 척추의 움직임에 따른 운전자의 자세에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] 류시호, 김재현 (1982) "인간공학과 자동차 관계", 대한기계학회지, Vol. 22, No. 3

[2] Shinsuk Park (1999) "Driver-Vehicle Interaction in Braking", Massachusetts Institute of Technology.

[3] Arihiro Isomura, Toru Hara, Koichi Kamiya, "Human factors in driver's steering operation", 자동차기술회논문집, Vol. 27, pp. 122-126

[4] 이상규, 박우진, 정의승, 기도형, 최재호, 박성준, "운전석 위치에 따른 운전자의 지각 불편도 평가"

[5] 신원경, 정성재, 박민용, "한국인 인체 측정 데이터를 이용한 내수용 승요차 내부 설계 평가 및 개선에 대한 연구", 한양대학교 산업공학과

[6] R.A. Prokopenko, A.A. Frolov, E.V. Biryukova, A. Roby-Brami (2001), "Assessment of the accuracy of human arm model with seven degrees of freedom", Journal of Biomechanics, Vol. 34 , pp. 177-185

[7] Vladimir M. Zatsiorsky (1998) "Kinematics of Human Motion", Human Kinetics, pp. 337-361

[8] 이재일 "3차원 인체 모형의 설계 및 활용 (Design & Application of 3DM)", 한국 CAD/CAM 학회지

[9] Rositsa Raikova(1992), "A general approach for modelling and mathematical investigation of the human upper limb", Journal of Biomechanics, Vol. 25, No. 8, pp. 857-867

[10] E.V. Biryukova , A. Roby-Brami, A.A. Frolov, M. Mokhtari (2000) "Kinematics of human arm reconstructed from spatial traking system recordings", Journal of Biomechanics 33(2000) 985-995

[11] Erwin Kreyszig, "Advanced Engineering Mathmetics" (1999)

[12] 기도형(1997), "작업장 설계와 평가를 위한 한국인 관절의 안락 동작범위 측정", Journal of the Ergonomics Society of Korea, Vol. 16, No.2, 1997

[13] 송맹기, 한성호, 곽지영, "Magnitude Estimation 데이터 분석 절차에 관한 연구", 포항공과대학교

[14] 최재호, 김성환, 정의승, "팔의 자세예측을 위한 비용함수의 개발에 관한 연구", 포항공과대학교 산업공학과

[15] Okihiko Nakayama, Tohru Futami and Tomokazu Nakamura, Erwin R. Boer (1999) "Development of a Steering Entropy Method for Evaluating Driver Workload", SAE International. Paper number 1999-01-0892

[16] 우범영, 정의승, 윤명환 (2000) "Determination of the Elbow Transverse Joint Using the Helical Axis Concept and its Application to the Development of a Kinematic Arm Model", Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers, Vol. 26, No. 1, pp.73-80

[17] John J.Craig (1989) "Introduction to Robotics Mechanics and Control", Addison Wesley

[18] E.S. Grood , W.J. Suntay (1983) "A Joint Coordinate System for the Clinical Description of Three-Dimensional Motions", Journal of Biomechanical Engineering, Vol. 105