

동작분석기법을 이용한 조향동작에 대한 팔의 생체역학적 특성분석

김영환* · 탁태오**

* 강원대학교 기계의용공학과

Biomechanical Analysis of Arm Motion during Steering Using Motion Analysis Technique

Younghwan Kim* and Tea Oh Tak**

*Dept. of Mechanical and Biomedical Engineering, Kangwon Nat'l Univ.

(Received April 11, 2011 ; Revised September 7, 2011 ; Accepted September 22, 2011)

Key Words: Biomechanics(생체역학), Motion Analysis(동작분석), Steering Motion(조향동작), Joint Torque(관절토크), Range of Motion(운동범위), Sensitivity(민감도)

초록: 본 논문은 장비의 동작분석기법을 이용하여 운전자가 핸들을 돌릴 때 팔의 관절 운동에 대한 생체역학적 해석을 수행하였다. 모형 운전석에서 운전자가 핸들을 돌릴 때 모션 캡처(motion capture) 시스템을 이용하여 팔의 3차원 운동궤적을 구하고, 이 결과를 이용하여 팔의 근-골격계 모델에 대한 역기구학 해석과 역동역학 해석을 수행함으로써 팔 관절의 변위와 관절 토크의 크기를 계산하였다. 각 관절의 회전 운동은 동시에 복합적으로 발생하며, 관절 운동의 크기의 관점에서 팔꿈치 관절의 회내-회외, 어깨 관절의 내전-외전, 굴곡-신전, 손목 관절의 굴곡-신전 등이 주요한 운동임을 확인할 수 있었다. 모형 운전석의 운전 자세, 핸들의 각도 및 좌석에 대한 상대적 위치와 관련된 설계변수에 대한 관절운동의 민감도 해석을 통하여 운전 자세와 핸들의 위치가 조향 동작에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

Abstract: Biomechanical analysis of arm motion during steering was performed using a motion analysis technique. Three-dimensional position data for each part of arm are fed into an interactive model combining a musculoskeletal arm model and the mechanical steering system to calculate joint angles and torques using inverse kinematic and dynamic analyses, respectively. The analysis shows that elbow pronation/supination, wrist flexion/extension, shoulder adduction/abduction, and shoulder flexion/extension have significant magnitudes. Sensitivity analysis of the arm joint motion with respect to seating posture and steering wheel configuration is carried out to investigate the qualitative influence of the seating posture and driver's seat configuration on the steering behavior.

1. 서론

자동차의 조향장치는 차량의 운동을 결정하는 중요한 부품으로서 현재 사용되는 대부분의 조향장치는 동력을 보조하는 기능을 가지고 있어 유압이나 전기 구동력을 이용하여 운전자가 작은 힘으로도 핸들을 원활하게 조작할 수 있도록 하는 편의기능을 제공하고 있다. 차량이 지능화, 전장화됨에 따라 최근 개발되는 조향장치는 단순

히 조타력을 보조해 주는 기능뿐 아니라 주행상황에 따라 스스로 판단하여 조향토크를 제어하거나 차선을 변경하는 등의 능동적 기능을 수행하는 수준으로 발전되고 있다. 드라이브 바이 와이어(drive-by-wire system), 능동조향장치(active steering system), 차선유지장치(lane keeping systems) 등이 이런 시스템의 예이다.

조향장치는 조향입력을 바퀴에 전달함과 동시에 주행상황에 따라 변하는 타이어의 접지력을 운전자에게 피드백 시켜줌으로써 운전자와 조향장치가 폐회로로 연결되는 대표적인 인간-기계 시스템(man-machine system)이다. 지금까지 조향장

† Corresponding Author, totak@kangwon.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

치에 대한 연구는 주로 하드웨어나 이를 제어하기 위한 로직에 대한 연구가 주를 이루었으며 운전자의 거동은 별로 주목을 받지 못하였다. 그러나 지능화 되고 능동화 되는 조향장치가 최적의 성능을 가지기 위해서는 조향장치의 하드웨어뿐 아니라 조향장치와 운전자를 연계하는 접근이 필요하다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 조향동작에서 운전자 팔의 관절운동에 대한 생체역학 해석을 수행하여 운전자 팔 운동의 특성을 이해하고자 한다.

팔의 근-골격계의 운동을 해석하기 위해서는 뼈와 뼈 사이의 관절운동을 일으키는 근육운동에 대한 이해가 필수적이다. 이와 관련하여 Delp⁽¹⁾는 1990년 이전까지 보고된 자료를 참조하고, 젊은 사체에 대한 분석을 통하여 근육-건 파라미터 값들을 정의하였고 이를 바탕으로 인체 운동해석 프로그램을 개발하였다. Garner와 Pandy 등⁽²⁾은 등척성(isometric)상태에서 최대 근육 힘, 근육 길이, 건 길이를 바탕으로 최적화 기법을 통하여 26개의 주요한 상체 근육과 움직임에 대하여 연구하였다. Manal과 Buchanan⁽³⁾은 근육의 길이 변화가 건 길이 변화보다 크게 작용한다는 가정으로 건의 길이의 수치적 최적화 기법을 개발하였다. 이동섭 등⁽⁴⁾은 7자유도 팔운동 모델을 사용하여 조향 동작의 동역학적 해석을 수행하였다. 조향 장치와 연결된 팔의 근-골격계 모델을 통하여 조향동작을 할 때 어깨, 팔꿈치, 손목에 걸리는 관절 토크를 이론적으로 계산하였다.

근래에 계측 장비와 신호처리 기술 그리고 생체역학적 모델링 측면에서 빠르게 발전하는 동작분석(motion analysis)기법은 인체의 근-골격계 운동에 대한 해석을 신뢰할 수 있는 수준으로 가능하게 해준다. 빛을 반사하는 마커(marker)를 인체에 부착하고 모션 캡처 카메라를 이용하여 연속 동작을 기록하고 이미지 프로세싱을 통하여 인체 각 부분의 3차원 궤적을 구하고 이 결과를 인체의 근-골격계 모델에 입력함으로써 관절의 기구학적 거동과 여기에 요구되는 근육의 힘을 계산할 수 있게 해준다.

본 연구는 동작분석 기법을 이용하여 조향동작 시 운전자의 어깨, 팔꿈치 그리고 손목관절의 운동범위(ROM; range of motion)와 운동의 특성을 분석하였다. 운전자 팔의 생체역학적 모델과 조향장치의 기계적 시스템이 상호 연계된 모델을

이용하여 조향동작 시 각 관절에 작용하는 토크를 추정하였다. 또한 운전석과 조향장치의 운전석에 대한 상대 위치와 각도가 바뀔 때 따른 관절 운동의 민감도 해석을 수행하였다.

2. 동작분석

동작분석을 위한 실험장치의 구성이 Fig. 1에, 그리고 실험에 사용된 승용차용 운전석이 Fig. 2에 나타나 있다. 운전석은 기준점에 대한 전후위치, 등받이 경사각을 바꿀 수 있고, 핸들은 핸들 경사각과 높이를 조절할 수 있도록 제작하였다. 핸들의 조향반력을 모사하기 위하여 조향축과 연결된 서보모터가 조향각의 함수로서 조향 반력을 생성하도록 하였다. 조향반력의 크기는 일반적인 승용차용 유압식 파워 핸들을 조향하는데 요구되는 토크를 가정한다. 조향토크와 핸들의 회전각도는 토크미터와 회전변위 센서에 의해서 측정된다.

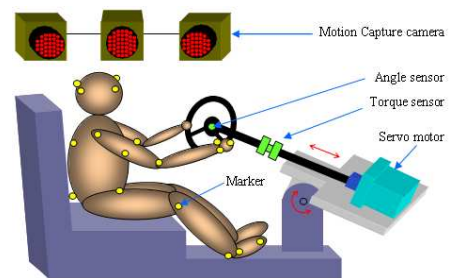


Fig. 1 Experimental setup for steering motion analysis

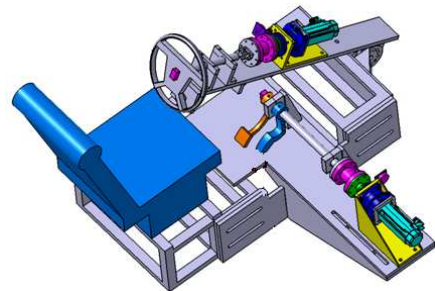


Fig. 2 Experimental seat for motion analysis

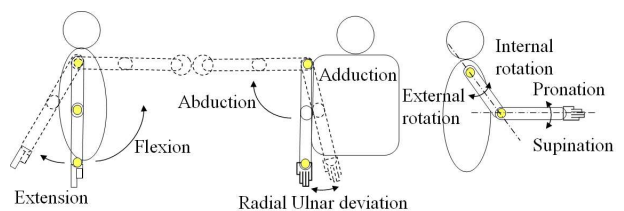


Fig. 3 Arm joint motion

동작분석을 위해서 마커를 운전자 신체에 부착하였고 모두 6대의 모션캡처 카메라를 사용하여 마커의 움직임을 추적하였다. 마커의 궤적은 실시간 신호처리 소프트웨어를 사용하여 3차원 데이터화 하였으며, 이를 인체의 근-골격계 모델링 소프트웨어인 ADAMS/Life-MOD를 이용하여 어깨, 팔꿈치, 손목 관절의 회전 각도와 관절토크를 계산하였다.

조향동작 해석을 위해서 운전자의 근-골격계 모델과 조향장치의 기계시스템이 연계된 통합 모델이 있어야 한다. 조향동작은 주로 팔 관절 운동에 의해서 발생되므로 상체는 시트에 고정되어 있다고 가정하고 어깨부터 손까지의 팔 부분만을 고려한다. 팔은 Fig. 3와 같이 상완(어깨와 팔꿈치 사이)과 전완(팔꿈치와 손목사이)과 손으로 구성된다. 상완의 움직임은 어깨 관절에서 굴곡(Flexion)-신전(Extension), 외전(Abduction)-내전(Adduction), 외회전(External Rotation)-내회전(Internal Rotation)의 3자유도, 전완의 움직임은 팔꿈치 관절에서 굴곡-신전, 회내(Pronation)-회외(Supination)의 2자유도, 손은 손목 관절에서 굴곡-신전, 요측편위(Radial deviation)-척측편위(Ulnar deviation)의 2자유도를 가지며 전체적으로 모두 7 자유도를 가진다고 가정하였다.⁽⁵⁻⁸⁾

3. 조향 동작 분석

운전자가 핸들을 잡는 위치는 핸들의 2시와 10시 방향으로 가정한다. 운전자는 60deg/s의 회전 속도로써 초기위치로부터 반시계방향으로 120도 회전한 뒤 초기위치로 돌아오고, 다시 시계방향으로 120도를 회전한다. 이때 손은 핸들을 놓치지 않도록 한다. 핸들의 조향반력은 일반적인 승용차가 80km/h의 속도로 차선을 변경할 때 발생하는 조향반력을 측정하고 이를 Fig. 4와 같이 조향각의 함수로서 핸들과 연결된 서보모터를 통해 구현 하였다. Fig. 4에는 실제로 측정된 조향토크와 서보모터를 통해서 모사된 조향토크를 비교하고 있으며 토크의 크기와 히스테리시스 특성이 잘 모사되고 있음을 알 수 있다.

조향동작을 할 때 좌우 팔의 움직임은 서로 대칭이므로 오른쪽 팔에 대해서만 동작분석을 수행하였다. 각 관절의 회전각은 인체의 해부학적 자세(anatomical position)⁽⁹⁾에서의 각도를 0도로 하고 이를 기준으로 측정된 값이다. 해부학적 자세는

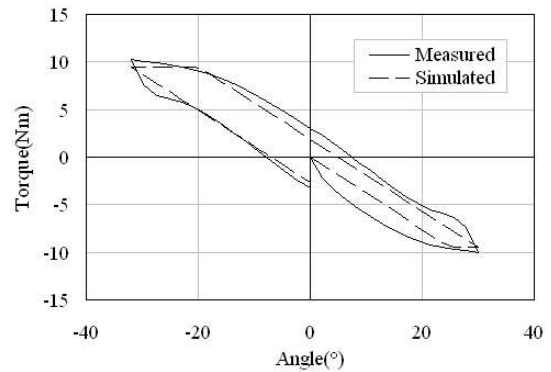


Fig. 4 A measured and simulated steering torque

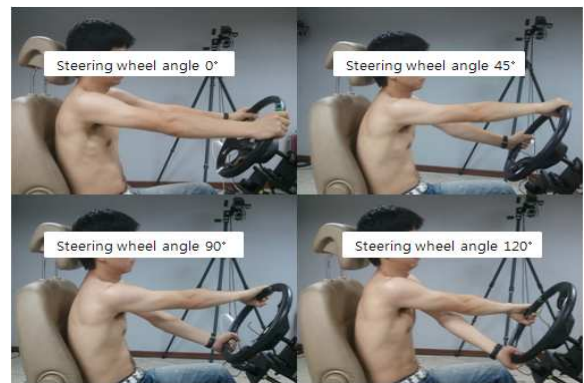


Fig. 5 Steering wheel turning motion(ccw)

선채로 정면을 바라보며 발은 바닥에 밀착시키고 손바닥은 앞을 향하게 하고 엄지손가락은 바깥쪽을 향하게 한 자세이다.

Fig. 5는 측면에서 관찰한 핸들이 약 120도를 회전할 때 팔의 움직임을 보여주고 있으며, Fig. 6~8은 각각 핸들 회전각의 함수로 표시한 어깨, 팔꿈치 그리고 팔목 관절의 회전각을 보여주고 있다.

Chaffin 등⁽⁹⁾은 인체의 각 관절 운동에 대해서 개별적으로 최대운동범위(ROM : Range Of Motion)를 측정하였는데, Fig. 6-8에 Chaffin 등이 측정된 결과를 본 논문에서 측정된 결과와 함께 표기하였다.

오른쪽 팔의 어깨관절의 운동을 분석해 보자. 우선 굴곡-신전 운동은 핸들이 시계방향으로 회전하는 경우에는 상완이 옆구리와 접촉하여 더 이상 신전 하지 못한다. 핸들이 반시계방향으로 회전하는 경우 90°까지 굴곡은 30°정도까지 거의 선형적으로 증가하다가 이 이상의 핸들각에 대해서 일정한 값을 유지한다. 한편 내전-외전 운동에서 핸들 회전각도가 반시계방향으로 90°일 때까지는 내전이 20°정도의 크기까지 완만히 증가하

다가 핸들 회전각도가 90°보다 커지게 되면 외전 각도가 급격히 증가하게 된다. 한편 핸들이 시계 방향으로 회전할 때 내전각도는 작은 크기지만 일정한 비율로 계속 증가한다. 내회전-외회전 움직임은 핸들의 회전방향에 관계없이 대칭적으로 변함을 알 수 있다. 내회전은 핸들의 회전각이 120°에 이르면 관절운동의 한계인 최대운동범위에 접근한다.

팔꿈치 관절의 움직임을 분석하면 굴곡-신전은 핸들의 전체 각도에 대해서 10°~15° 정도의 작은 변위를 가진다. 그러나 팔꿈치 관절의 회내-회외 움직임은 상대적으로 크며 팔꿈치 관절에서 가장 큰 운동을 한다. 특히 핸들이 반시계방향으로 90° 정도 회전하면 회내각은 최대운동범위에 접근한다. 핸들이 시계방향 회전하면 회내각은 감소하다가 핸들각이 70° 정도에서 0이 되고 그 이후에는 회외가 발생한다.

손목관절에서 굴곡-신전은 핸들이 반시계 방향으로 회전하는 경우 굴곡이나 신전이 거의 발생하

지 않으며 시계방향으로 회전하는 경우 약간의 신전이 발생한다. 요측편위-척측편위 움직임은 핸들이 반시계방향으로 회전하는 경우 요측편위가 최대운동범위까지 발생하고, 시계 방향으로 회전하는 경우 요측편위-척측편위는 거의 발생하지 않는다.

모션캡처 시스템을 통해 얻어진 팔의 움직임 정보를 활용하여 핸들 회전 시 각 관절에서 발생하는 토크를 계산하기 위해 Fig. 9와 같이 ADAMS/Life-MOD를 이용하여 운전자-조향장치 연계모델을 구성하였다. 운전자 팔은 Fig. 3과 같이 7자유도를 가진다고 가정하였고, 손이 핸들과 고정이 된다. 조향장치는 핸들과 조향축으로

구성되며, 조향축은 차체와 유니버설 조인트(Universal Joint), 핸들은 조향축에 대해서 축방향 병진과 회전이 가능한 실린드리컬 조인트(Cylindrical Joint)로 연결하였으며 실린드리컬 조인트의 회전변위의 함수로서 조향반력이 발생하도록 하였다. 이와 같이 핸들과 조향축을 기구학적으로 구속하면 핸들은 조향축의 길이방향의 병진이 가능하고 핸들과 조향축 결합체는 조향축과 차체를 연결하는 유니버설 조인트에 의해서 2

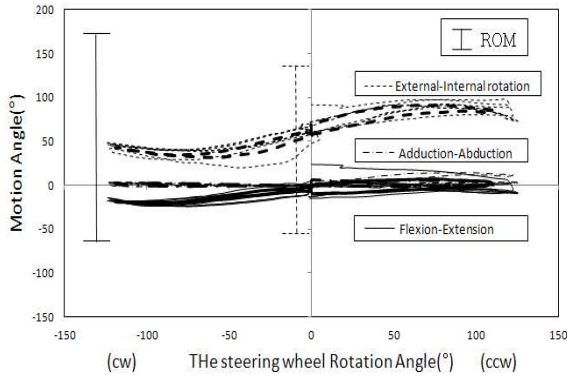


Fig. 6 Shoulder joint rotation angles

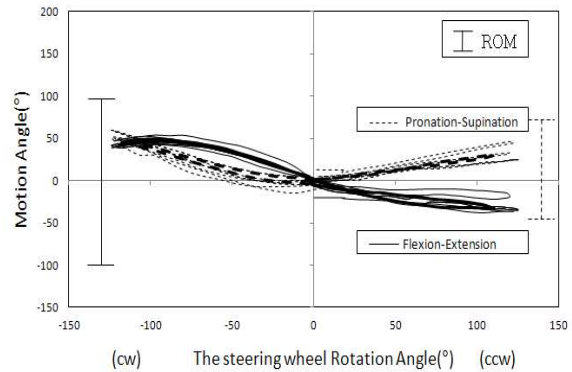


Fig. 8 Wrist joint rotation angles

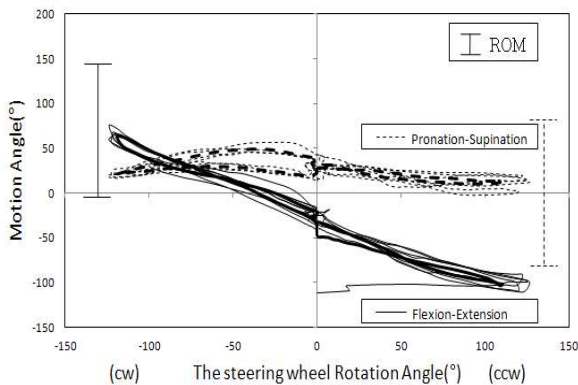


Fig. 7 Elbow joint rotation angles

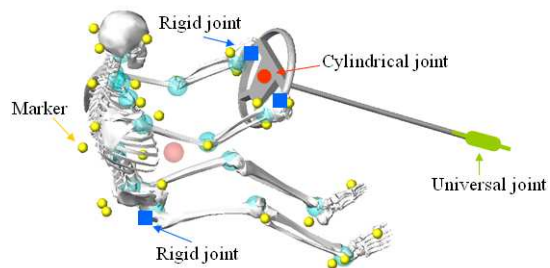


Fig. 9 The driver-steering system interactive model

방향으로의 회전이 가능하다.

실제의 조향장치는 조향축에 대한 하나의 회전 자유도만 가지고 있으나 본 연구에서 조향장치모델이 실제보다 많은 자유도를 가지도록 한 이유는 다음과 같다. 모션캡처 시스템으로 측정된 손의 3차원 궤적(위치와 방향)은 측정과 신호처리 과정의 오차로 인하여 실제궤적과 비교하면 약간의 차이를 가지게 된다. 그러나 손은 핸들과 결합되어 일체로 움직여야 하므로 손의 궤적에 존재하는 오차로 인하여 손이 핸들의 원형 운동궤적을 추종할 수 없게 되어 해석이 불가능해진다. 이러한 손 운동 궤적의 오차를 핸들이 기구학적으로 수용할 수 있도록 하기 위해서 핸들에 자유도를 추가한 것이다. 핸들에 잉여 자유도가 있다 라도 핸들의 운동은 모션캡처 시스템에 의해서 측정된 손의 운동에 의해서 구동되므로 실제운동과 큰 차이는 없다.

다음에는 핸들을 돌릴 때 각 관절에서 발생하는 관절토크의 값을 구해보기로 하자. 실험을 통해서 Table 2와 같이 25-7 세의 남성 운전자 4명이 돌릴 수 있는 핸들토크의 최대값이 약 70N-m 정도임을 측정하였다. 조향축에 연결된 서보모터에서 70N-m의 일정한 토크가 발생되도록 하고, 실험자에게 정적인 상태를 가정하여 가능한 천천히 핸들을 돌리도록 하였다. 운전자의 자세는

Table 1 Steering wheel position parameters

Parameters	Min.	nominal	Max.
Steering Wheel Tile Angle: θ [°]	18	23	28
Horizontal Steering Wheel Center: L [mm]	300	350	400
Vertical Steering Wheel Center: H [mm]	600	650	700
Upper Body Angle: ψ [°]	105	110	115

Table 2 Steering wheel position parameters

	실험자1	실험자2	실험자3	실험자4
Age[year]	25	25	26	27
Height[cm]	170	168	175	173
Weight[kg]	74	64	65	59
Max Touque[Nm]	72	65	67	70

SAE 표준(10)을 참조하여 핸들과 운전자의 상대적 위치와 각도에 대한 설계변수를 Fig. 10과 같이 4개를 선정하였다; 핸들의 경사각(θ), 핸들의 수평위치(L), 핸들의 수직위치(H), 상체 경사각(ψ). 실험자의 운전 자세를 참조하여 설계변수의 값은 Table 1에서와 같이 설정하였다.

운전자-조향장치 모델을 이용하여 계산한 어깨, 팔꿈치, 그리고 팔목관절에 발생하는 조인트 토크가 Fig. 11~13에 나타나 있다. Chaffin 등⁹⁾은 25명의 남성 산업근로자에 대해서 각각의 개별적인 관절운동을 할 때 생성 가능한 최대 토크값을 측정하였다. 50 퍼센타일에 해당하는 값들 중에서 본 연구에서 고려하는 조인트 운동과 일치하는 관절토크의 값을 표시하였다. Chaffin 등이 제시한 최대토크 보다 본 연구에서 조향동작을 할 때의 관절 토크값의 크기가 항상 더 작은 값을 알 수 있는데, 그 이유는 Chaffin 등은 실험자가 한 가지 관절운동을 할 때의 관절토크를 측정된 것이나, 조향동작 시에는 앞에서 본 바와 같이 여러 가지 관절운동이 동시에 발생하게 되므로 이때의 관절토크는 한 가지 관절운동에 대한 토크값 보다 현저히 작아지게 된다.

해석결과를 살펴보면 관절토크는 핸들 회전 각도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 핸들 회전 각도에 따라 관절 토크가 작용하는 방향이 다르게 되고 관절 토크의 작용이 전환되는 것을 보여주고 있다. 각 관절에 작용하는 토크의 크기의 최대값은 약 40N-m 정도이며, 최대값은 핸들을 돌리지 않았을 때의 중립위치에서 발생하거나(어깨의 굴곡-신전, 외회전-내외전; 팔꿈치의 회내-회외) 또는 핸들의 일정한 회전각에서 발생하기도 한다.

4. 운전자세에 따른 관절운동 민감도 분석

Fig. 10에 정의된 운전자와 핸들의 상대적 위치

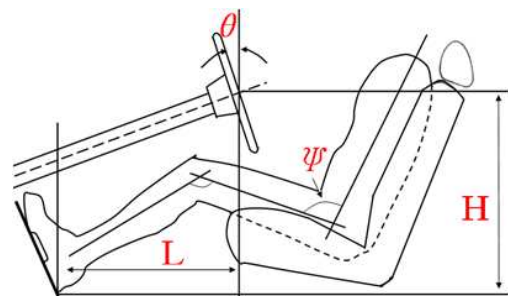


Fig. 10 Steering wheel and seat configuration parameters

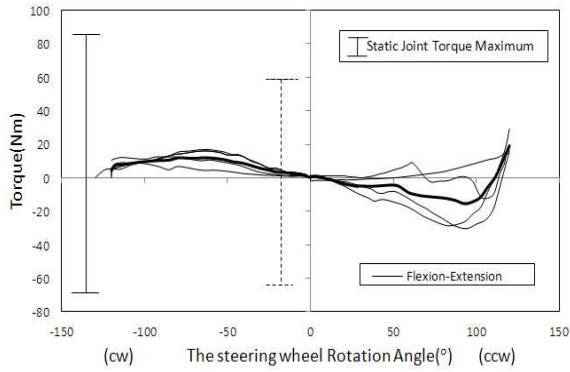


Fig. 11 Joint torque of shoulder flexion-extension

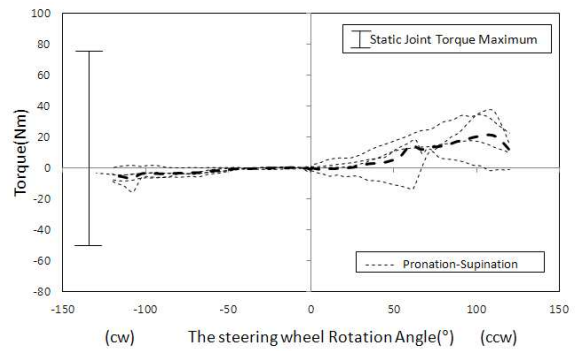


Fig. 15 Joint torque of elbow pronation-supination

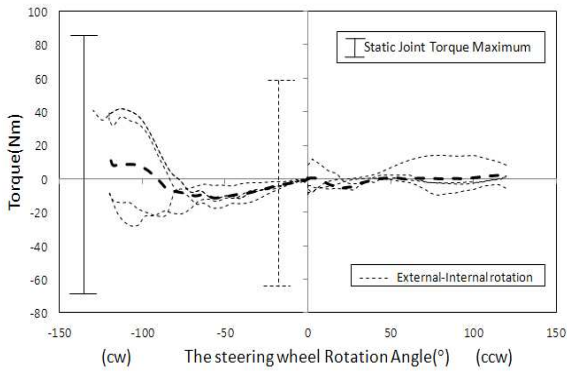


Fig. 12 Joint torque of shoulder external-internal rotation

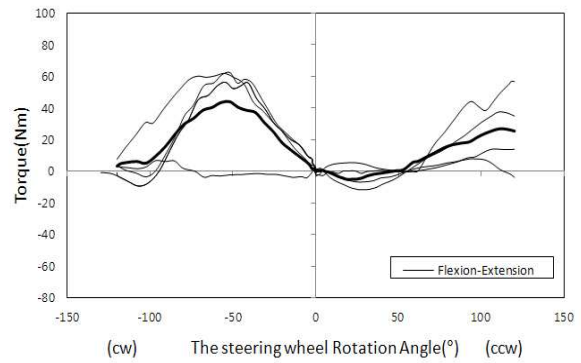


Fig. 16 Joint torque of wrist flexion-extension

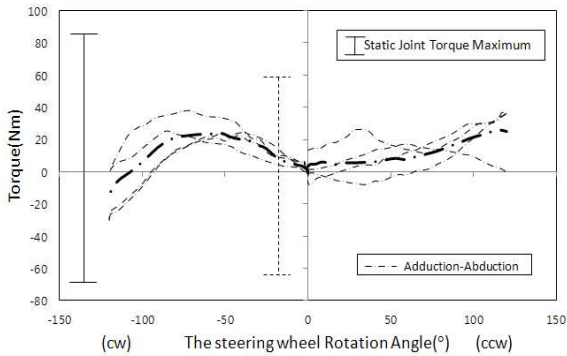


Fig. 13 Joint torque of shoulder adduction-abduction

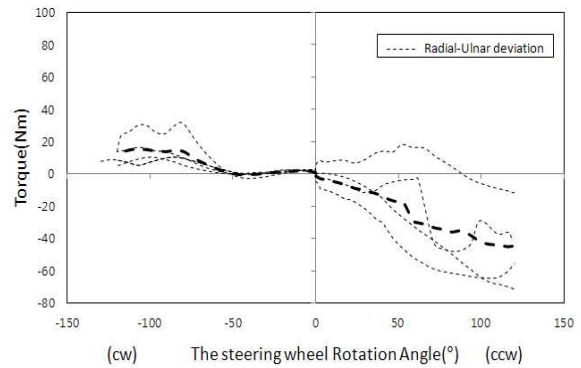


Fig. 17 Joint torque of wrist radial-ulnar deviation

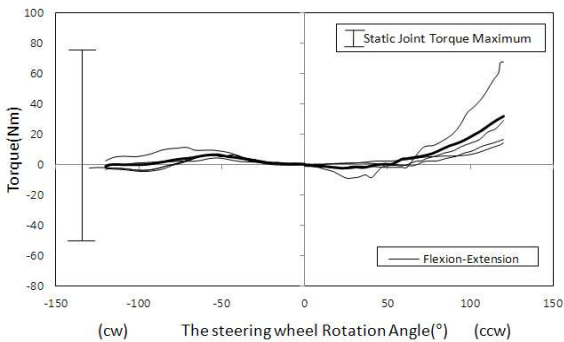


Fig. 14 Joint torque of elbow flexion-extension

와 각도, 상체 경사각 등의 변화가 팔운동에 미치는 영향을 알아보도록 한다. 각 설계변수의 기준 값과 최대값 및 최소값을 Table 1과 같이 설정하였다. 설계변수가 바뀔 때 각 관절의 각도 변화를 관찰함으로써 해당 변수에 대한 민감도를 알 수 있다.

Fig. 18~21은 4개의 설계변수의 변화에 대해서 어깨, 팔꿈치 그리고 손목 관절 회전각의 변화를 나타내고 있다. 각각의 설계변수에 대해서 상대

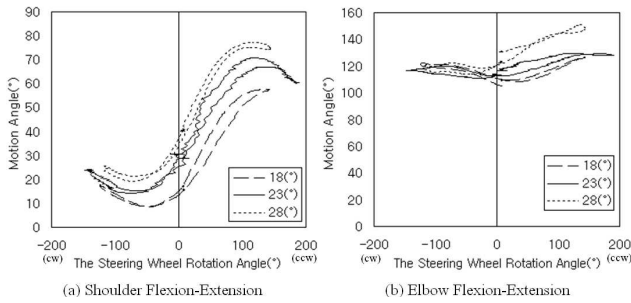


Fig. 18 Change of steering wheel tilt angle (Θ)

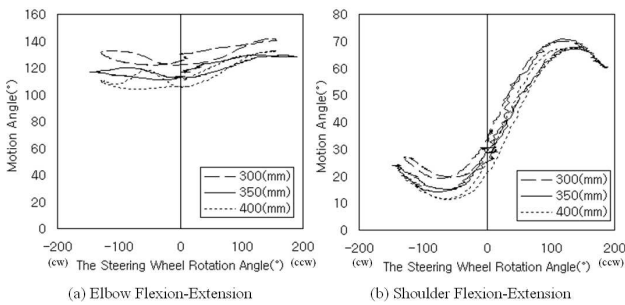


Fig. 19 Change of horizontal steering wheel center (L)

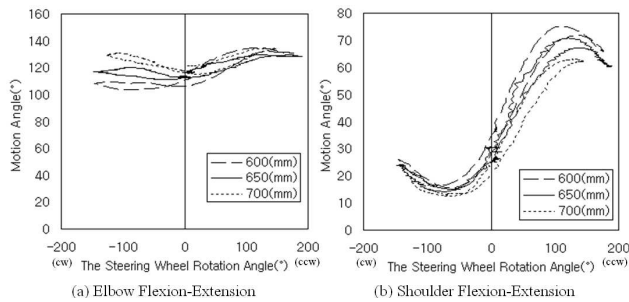


Fig. 20 Change of vertical steering wheel center (H)

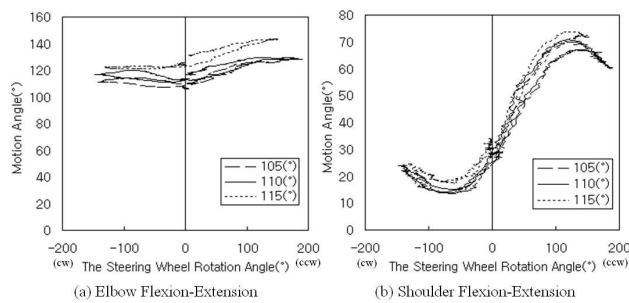


Fig. 21 Change of upper body angle (ψ)

적으로 가장 큰 변화는 보이는 관절의 움직임은 2개씩 선택하여 나타내었다. 관절 운동 중에서 상완의 외회전-내회전, 전완의 회내-회외, 손목의 굴곡-신전, 손목의 요측편위-척측편위는 4개의 설계변수 모두에 대하여 영향을 거의 받지 않았다.

각각의 설계변수에 대해서 가장 민감도가 큰 관절운동을 알아보기로 하자. 우선 핸들의 경사각 변화에 대해서 어깨 관절의 굴곡-신전, 팔꿈치 관절의 굴곡-신전, 어깨 관절의 내전-외전의 움직임 순으로 영향이 크게 나타났다. 핸들의 수평위치 변화에 대해서는 팔꿈치 관절의 굴곡-신전, 어깨 관절의 굴곡-신전, 어깨 관절의 내전-외전 등의 변화가 컸다. 다음으로 핸들의 수직위치 변화에 대해서 팔꿈치 관절의 굴곡-신전, 어깨 관절의 굴곡-신전, 어깨 관절의 내전-외전 등의 변화가 컸으며, 마지막으로 상체 경사각 변화에 대하여 팔꿈치 관절의 굴곡-신전, 어깨 관절의 굴곡-신전, 어깨 관절의 내전-외전이 회전각 변화가 상대적으로 크게 나타났다.

다음에는 설계변수의 영향이 가장 커지는 핸들 회전각의 범위를 알아보도록 하자. 모든 설계변수에 대해서 핸들 회전각의 범위가 $\pm 40^\circ$ 에서는 팔꿈치 관절의 굴곡-신전과 어깨 관절의 굴곡-신전이 영향을 쉽게 받는 것을 확인할 수 있으며, $\pm 40^\circ$ 이상의 핸들 회전 각도에서는 어깨 관절의 내전-외전이 상대적으로 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

운전자의 조향동작에 대하여 동작분석을 통해 팔 관절의 운동을 분석하였으며 조향동작에 큰 영향을 미치는 주관절의 관절토크를 분석하였다. 조향동작에서의 팔 관절 운동은 팔꿈치 관절의 회내-회외, 손목 관절의 굴곡-신전, 어깨 관절의 내전-외전, 굴곡-신전의 움직임이 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 조향핸들의 범위가 약 $\pm 40^\circ$ 일 때 전완의 굴곡과 신전의 움직임이 가장 큰 민감도를 나타냈다. 조향 동작시 각 관절에서 발생할 수 있는 최대 관절토크의 값은 하나의 관절운동에 대한 최대값에 비하여 약 50% 정도의 값을 가지는 것을 알 수 있는데 그 이유는 조향동작을 할 때는 여러 관절운동이 동시에 발생하기 때문이다.

후기

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (C1001495-01-01)

참고문헌

- (1) Delp, S. L., 1990, Surgery Simulation : A Computer Graphics System to Analyze and Design Musculoskeletal Reconstruction of the Lower Limb, Ph.D Thesis, Stanford University, California.
- (2) Garner, B. A. and Pandy, M. G., 2003, "Estimation of Musculo Tendon Properties in the Human Upper Limb," *Annals of Biomedical Engineering*, Vol.31, No.2, pp.207~220.
- (3) Manal, K. and Buchanan T. S., 2004, "Subject-Specific Estimates of Tendon Slack Length: A Numerical Method," *Journal of Applied Biomechanics*, Vol.20, No.2, pp.195~203.
- (4) Lee, D. S., Tak, T. O. Kim, S. J. and Chun, H. H. 2006, "Steering Motion Analysis and Development of Dynamic Arm Model," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, pp.2979~2984.
- (5) Neumann, D. A., 2002, *Kinesiology of the Musculoskeletal System*, Mosby, Milwaukee, pp.101~212.
- (6) Nordin, M. and Frankel, V. H., 2001, *Basic Biomechanics of the Musculoskeletal System*, Lippincott Williams & Wilkins, New York, pp.351~427.
- (7) Hall, S. J., 1998, *Basic Biomechanics*, McGraw-Hill, El paso, pp.180~219.
- (8) Zatsiorsky, V. M., 1998, *Kinematics of Human Motion*, Human Kinetics, Champaign Illinois, pp.79~146.
- (9) Chaffin, D. B., Andersson, G. B. J. and Martin, B. J., 2006, *Occupational Biomechanics*, Wiley-Interscience, New Jersey, pp.53~74.
- (10) SAE Handbook, 1994, *Driver Hand Control Research*, Vol.3. pp.34.157~34.191.