

승용차 승하차 동작의 정량적인 불편도 평가 방법

최남철*, 심지성*, 김재호**, 이상목***, 이상헌****

Quantitative Discomfort Evaluation for Car Ingress/Egress Motions

Nam-Chul Choi*, Ji-Sung Shim*, Jac-Ho Kim**, Sang-Muk Lee*** and Sang Hun Lee****

ABSTRACT

This paper describes a novel quantitative discomfort evaluation method based on motion data and its application to discomfort analysis of ingress/egress motions for cars. To develop the discomfort evaluation model, we introduced the discomfort regression curve and the range of motion for each degree-of-freedom of the joints of a whole human body. The maximum discomfort value for the joints at a specific time is selected to represent the discomfort value of the whole body at the time. The results of the experiments and questionnaires support the claim that our discomfort measure matches experimental subjective discomfort levels.

Key words : Discomfort, Ingress, Egress, Ergonomic Design, Car Door

1. 서 론

1.1 연구 배경

최근 삶의 질의 향상과 더불어 인간을 고려한 제품 설계의 중요성은 모든 분야의 제품에 널리 과급되고 있다. 특히 자동차의 경우 최종 소비자가 직접 탑승하여 조작하는 제품이기 때문에 일찍부터 운전자 및 승객을 고려한 제품 설계 및 시험이 중요시되어 왔다. 또한, 최근 자동차 소비자의 제품 구매 유형이 차량 성능에서 디자인, 안전, 편의성 등을 중시하는 경향이 높아지고 있으며, 특히, 고령화 사회의 급속한 진전에 따라 더욱더 인간고려 차량 설계의 중요성이 높아지고 있다. 자동차 승하차의 편의성은 노약자 및 장애인에게 중요한 이슈이며, 또한 영업용 차량의 경우와 같이 다양한 승객에 의해 빈번한 승하차가 발생하는 경우나 우리나라와 같이 주차공간이 협소한 곳에서 인접 주차 차량에 의해 승하차의 불편이 많이 발생하는 경우도 중요하다고 할 수 있다.

지금까지의 인간공학적인 제품 개발 과정을 살펴보면 제품에 대한 실물 복업(mock-up)을 만들어 피실험자들로 하여금 직접 제품을 사용하면서 느낀 불편 사항들을 조사하고 그 결과에 따라 다시 목업을 수정하면서 재실험하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 인간공학적인 성능 평가 이외의 다른 제품 성능 평가 부분은 현재 대부분 디지털 복업을 이용한 컴퓨터상의 해석으로 대체하고 있는 상황이며, 특히 자동차 개발에서는 디지털 복업에 바탕을 둔 가상 설계 및 생산 기술을 적극적으로 활용하여 신차 개발 기간 단축과 경미 절감의 효과를 거두고 있다. 따라서 이러한 가상엔지니어링 기법을 인체를 고려한 제품 설계에 적용시킨다면, 즉, 가상의 디지털 인간을 가상의 디지털 시작차와 함께 생성시켜 필요한 각종 시험을 컴퓨터상에서 실시하고 그에 대한 결과를 바탕으로 재설계를 수행할 수 있다면 시작차 대수와 실험 횟수를 크게 줄일 수 있으며 다양한 운전자에 대한 실험을 대신할 수 있을 것이다.

본 연구는 궁극적으로 이러한 가상의 인간공학적 제품개발 프로세스를 개발하여 이를 자동차 승하차의 편의성을 고려한 자동차 도어 설계에 적용하는 것을 목표로 하고 있다. 이를 위해서는 크게 다양한 유형의 디지털 인간을 생성하는 기능, 그 인간에 대한 승하차 동작 생성하는 기능, 그리고 가상인간의 승하차 불편

*학생회원, 국민대학교 자동차공학전문대학원

**학생회원, 두리시스템 테크놀로지

***학생회원, 리얼타임 테크놀로지

****중신회원, 국민대학교 자동차공학과

- 논문투고일: 2010. 07. 20

- 논문수정일: 2010. 08. 25

- 심사완료일: 2010. 08. 31

도를 컴퓨터 상에서 정량적으로 평가하는 기능의 개발이 필요하다. 이 가운데 본 연구에서는 세번째 기능, 즉, 승하차에 대한 불편도의 평가를 실제 사람의 주관적인 설문 조사가 아닌 객관적 데이터에 근거한 보다 정량적인 불편도 평가 척도를 개발하는 것을 목표로 하고 있다.

인체의 자세 및 동작에 있어서 불편도를 정량화하기 위한 각종 실험 및 컴퓨터 모델에 대한 연구가 오래 전부터 수행되어 왔으며, 최근 자동차의 승하차 동작에 대한 정량적인 불편도 평가 방법에 대하여 몇 가지 연구 사례가 발표되고 있다. 이 가운데 인체 전체에 대한 불편도 평가 방법을 제시한 대표적인 방법으로 Dufour와 Wang^[1]이 제안한 중립 운동 개념을 이용한 불편도 평가 방법이 있다. 여기에서는 승용차 밖에 서 있는 자세와 차 내부 시트에 앉아있는 자세를 중립 자세로 설정하고 이 두 자세 사이의 운동을 중립 운동으로 정의하였다. 또한, 이 중립 운동에 대해서는 불편도가 0이라고 가정하고 이를 벗어나는 경우 불편이 발생한다고 가정하였다. 즉, 두 중립 자세에서의 각 관절의 자유도(dgree of freedom; DOF)의 값들 사이의 불편도를 0으로 두고, 이를 벗어나는 경우 벗어나는 정도에 따라 불편도가 증가하는 식을 만든 후, 이를 이용하여 승하차시의 전구간 동작에 대한 불편도를 계산하였다. 그러나 이 컴퓨터 모델은 두 중립 자세 사이에 존재하는 관절 각도의 경우 불편도가 모두 0으로 평가된다는 불합리한 결과가 발생하며, 또한 본 논문의 4.4장에서 지적하듯이 현재 제시된 수식에도 일부 문제점을 가지고 있다.

이러한 문제를 해결하고 보다 사람이 실제 느끼는 지각 불편도와 잘 일치하는 불편도 평가 모델을 개발하기 위하여 본 연구에서는 각 관절의 자유도에 대한 일반화된 불편도 회귀식을 도입하여 모든 승하차 동작에 대하여 객관적이고 정량적인 불편도 값을 계산할 수 있는 새로운 모델을 개발하였다. 또한, 이 모델의 타당성을 보여주기 위하여 도어의 주요 설계 변수를 변화시키면서 피실험자들의 지각 불편도를 조사한 후, 이를 본 연구에서 제시한 불편도 모델로 계산한 객관적인 불편도와 비교하여 본 연구 결과가 타당함을 입증하도록 하였다.

이후 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제1장 서론의 나머지 부분에서는 일반 동작 및 승하차 동작의 불편도 예측과 관련된 기존 연구들을, 제2장에서는 본 연구에서의 수행한 승하차 실험 방법에 대해 소개한다. 제3장에서는 실험 결과로 얻은 주관적인 지각 불편도 값들을 정리하여 보여준다. 제4장에서는 본 연구에서

제시하는 새로운 불편도 평가 모델을 소개하고, 이 방법을 적용한 불편도 계산 결과를 주관적인 불편도 값과 기존 평가 방법에 의한 값과 비교 토의하도록 하고, 끝으로 제6장에서 결론 및 향후 연구에 대해 언급한다.

1.2 관련 연구

인체의 자세 및 동작에 대한 불편도에 관한 실험 및 연구는 작업장에서의 인간공학적 설계 및 평가가 이드라인, 또는 잘못된 작업 자세에 대한 이해 및 개선을 위하여 오래 전부터 활발히 연구되어 왔다. 특히 최근 인간의 자세나 동작에 대한 기구학적 또는 운동역학적 해석을 바탕으로 한 동작의 불편도의 정량적 판단 기준을 제시하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 나아가 이를 자동차의 승하차 동작에 대한 불편도 평가에 적용하는 연구가 최근 시도되고 있다.

기도형^[2]은 인체의 주요 관절에 대한 각 동작 자유도에 대한 안락 동작 범위와 불편도 회귀식을 제시하였다. 이는 20대 남성을 대상으로 실험적 방법을 통하여 각 자세에서의 주관적 불편도를 기초로 하여 제시하였으며, 각 관절의 각 자유도의 운동에 대한 정적 자세의 불편도를 측정하여 관절간의 가중치를 고려한 회귀식으로 정의하였다. 이 연구 자료는 작업장이나 자동차의 실내 설계와 작업 자세 평가의 기초 자료로서 활용될 수 있다.

Kee와 Karwowski^[3]는 실험을 통해 측정된 지각 불편도를 바탕으로 관절과 관절 운동의 불편도를 평가하기 위한 등급 시스템(ranking system)을 개발하였다. 이 연구에서 지각 불편도는 관절 운동의 유형, 크기, 그리고 관절에 의해서 영향을 받는다는 것을 밝히고, 관절 운동과 관절, 그리고 관절 운동의 유형에 의해 분류되는 세 가지의 등급 시스템을 개발하였다. 이에 따르면 둔부와 등의 운동이 다른 관절 운동에 비해서 높은 불편도를 보여주는 데 반하여 팔꿈치 관절 운동이 가장 불편도가 적다는 것을 보여주고 있다.

Zacher와 Bubh^[4]는 어떤 특정 자세에서의 관절의 각도와 관절에 걸린 모멘트를 측정하고 이때 피실험자들이 느끼는 불편도를 조사하여 정적 불편도에 대한 간단한 모델을 제시하였다. 또한 서로 다른 높이의 단을 오르는 경우 각 관절에서 느끼는 불편도를 조사하여 동작중에 느끼는 동적 불편도가 어떠한지를 조사하였다. 그러나 이 논문에서는 정적불편도에 대해서는 일부 관절에 대한 실험 결과만 보여주고 있고, 동적불편도는 그 경우가 매우 제한적으로 되어 있어서 이를 이용하여 승하차 동작의 불편도를 예측하기

는 곤란하다.

장수혁 등⁶⁾은 지게차의 승하차시 운전자의 안락성을 측정하는 평가 지수의 모델을 개발하였다. 지게차의 발판의 위치와 손잡이의 위치에 따른 탑승자가 승하차시 느끼는 불편도를 설문 조사법에 의해 평가하고 탑승자의 불편도를 최소로 하는 발판과 손잡이의 최적의 위치를 제안하였다.

Anderson 등⁶⁾은 관절의 각도와 각속도를 이용하여 관절의 수준에 대한 동적 불편도를 정의하는 모델을 제시 하였다. 관절에 걸린 모멘트는 각도와 각속도에 의한 영향을 받고 다시 모멘트는 근육에 의한 영향을 받아 발생한다고 가정하고 인체의 하지 부분의 등척성(isometric), 구심성(concentric), 원심성(centric) 운동에 대한 각 관절의 자유도에서의 불편도를 평가 하였다. 이는 동작에서의 각도와 각속도의 변화에 의한 힘의 변화를 반영하여 불편도를 평가하여 비교적 정확한 불편도의 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 하지만 관절의 굽힘 운동만을 고려하여, 각 관절의 자유도를 굴곡과 신전 2개 자유도에서만 측정 하였으므로 나머지 자유도인 내전, 외전, 내전, 외전 동작 등의 전체 자유도에서의 불편도의 평가에 한계가 있다.

Giacomin와 Quattrocolo⁷⁾는 승하차 동작에서 차량의 주요 치수 변화에 따라 인간이 느끼는 불편도를 실험을 통하여 검증하였다. 변수로 설정한 차량의 치수로는 지면에서부터 차량 천정까지의 높이, 지면에서 차량의 바닥까지의 높이, 차량 바닥에서 시트의 힙 포인트까지의 높이, 앞좌석과 뒷좌석의 시트 사이의 거리이며, 36명의 피실험자를 동원하여 각 케이스별 5회씩 동작을 반복하여 피실험자가 승하차 동작에서 느끼는 전체적 불편도를 설문을 통하여 조사하고 이를 통계 처리하여 차량의 치수 변수 중 승하차 동작에 가장 영향을 많이 미치는 변수를 검증하였다. 이 연구에서 승하차 동작에 영향을 가장 많이 주는 변수로서 지면에서부터 차량의 천정까지의 높이와 앞좌석과 뒷좌석 사이의 거리임을 증명하였다.

Kazuhiko 등⁸⁾은 자동차의 승하차 동작 시 인간이 느낄 수 있는 불편도를 운동 생리학적인 실험 데이터를 바탕으로 평가하는 방법을 제시하였다. 이 연구에서는 승하차시 느낄 수 있는 불편도를 신체의 각 근육의 근전도를 바탕으로 정의하였다. 즉, 차량의 승하차 동작 시 주로 관여하는 근육을 정의하고 승하차 동작에 대한 EMG 데이터를 획득하여 근육의 최대 근전도에 대한 승하차시 발생하는 근전도의 비율로서 그 불편도를 정의하였다. 이 연구는 보다 직접적인 생체 데

이터를 이용한다는 장점을 가지고 있지만, 동작의 불편도의 평가를 위하여 EMG 데이터를 사용하고 있기 때문에 실험 수행시 많은 번거로움이 있으며 또한 근전도의 측정이 가능한 표피 근처의 큰 근육에서만 측정이 가능하다는 문제점을 가지고 있다.

Dufour와 Wang¹⁾은 승용차의 승하차 동작 중 인간이 느끼는 불편도의 평가를 위하여 중립 자세 및 동작의 개념을 도입하고, Kee와 Karwowski¹⁾가 제시한 RDI(relative discomfort index)를 각 관절의 자유도에 대한 불편도 가중치로 활용하여 각 관절 및 몸 전체에 대한 불편도를 정의하였다. 이 연구에서 제안한 불편도 평가식은 승하차의 불편도를 손쉽게 계산할 수 있다는 장점을 가지고 있으나, 각 관절의 자유도에 대한 가중치와 각 관절에 대한 가중치가 중복되게 적용되었으며, 중립자세인 선 자세와 앉은 자세 사이의 관절 각도에 대해서는 무조건 불편도가 0이라고 가정함으로써 불편도 평가가 불가능한 관절이 존재하는 문제점을 안고 있다.

2. 실험 방법

2.1 실험 설계

2.1.1 독립 변수

승용차 승하차 동작의 불편도 평가를 위한 실험에서 차량 운전 장치의 유무와 출입구의 높이를 실험의 독립변수로서 선정하였다. 차량 운전 장치의 유무는 운전 조작 장치가 있는 운전석과 운전 조작 장치가 없는 뒷좌석 승객석의 2수준으로 설정하였다. 또한, Giacomin와 Quattrocolo⁷⁾에 따라 차량의 천정의 높이가 승하차에 가장 크게 영향을 주는 요인이라는 것을 반영하여 지상으로부터의 도어 천정 높이를 독립변수로 선정하고 이를 3수준으로 설정하였다. 즉, 실험용 목업의 천정 높이를 현재 국내에서 양산된 승용차 중 가장 낮은 높이(1055 mm: H사의 Tuscani)와 가장 높은 높이(1295 mm: H사의 Atoz), 그리고 천정을 제거한 상태(no-roof)에서의 실험을 실시하였다.

2.1.2 종속 변수

승하차 동작 불편도 검증 실험의 종속 변수로서 승하차 동작에 기여하는 인체의 대표 관절들의 불편도 값을 선정하였다. 대표 관절로서는 Dufour와 Wang¹⁾이 선정한 것과 동일하게 인체의 하지, 척추, 그리고 목과 관련된 관절을 선정하였으며 선정된 6개의 대표 관절과 12개의 관절 자유도가 Table 1에 나타나 있다. 승하차 동작은 탑승자의 습관과 체형에 따라 다스

Table 1. 승하차 동작의 대표 관절

No	Joint	No. of DOF	DOF (Degree of Freedom)
1	Left Knee	1	Flexion / Extension
2	Right Knee	1	Flexion / Extension
3	Left Hip	3	Flexion / Extension Lateral Bending Rotation
4	Right Hip	3	Flexion Lateral Bending Rotation
5	Lumbar	3	Flexion / Extension Rotation Adduction / Abduction
6	Neck	1	Flexion / Extension
Total	6	12	

차이가 있으며, 크게 다리를 먼저 차량의 내부로 넣는 방법과 머리를 먼저 넣는 2가지 방법이 있다. 본 연구에서는 승차 방법의 약 80%를 차지하는 것으로 알려진 다리를 먼저 넣는 방법으로 국한하여 승차하도록 하였다. 또한 승하차의 불편도를 계산하는 구간을 승차시는 문 입구에서 승차동작의 축이 되는 왼발을 지면에 댄 상태에서 오른발이 지면에서 떨어지는 순간부터 둔부가 시트에 닿는 순간까지를 승차 구간으로 설정하였으며, 하차시는 둔부가 시트에서 떨어지는 순간에서 몸이 차 밖에서 서는 자세를 취하기까지의 구간을 하차구간으로 설정하였다.

2.2 피실험자

본 실험의 피실험자로서 본교 학부생 및 대학원생 15명을 선정하였다. 피실험자의 성별은 남자 12명, 여자는 3명이며, 연령은 23.7 ± 2.7 세, 신장은 174.5 ± 9.5 cm, 체중은 73.0 ± 13.2 kg이다. 자동차의 승하차시 자연스러운 동작의 획득을 위해서 승용차의 운전석의 승하차 경험이 있는 자동차 운전 경력 6개월 이상인 사람으로 선정 기준을 정하였다. 또한 최근 6개월간 근골격계 질환이 없고, 목, 어깨, 척추 및 하지의 관절 운동 범위에 이상이 없으며, 피로, 통증, 인지능력 이상 등의 인지장애가 없는 사람을 선택하였다.

2.3 실험 장치

2.3.1 실험용 목업 차량

승용차의 승하차 동작 실험을 위하여 Fig. 1과 같은 목업을 제작하였다. 운전석과 승객석에 대하여 도어 천정의 높이를 조절할 수 있으며, 또한 광학식 카메라를 사용하여 인체 동작을 용이하게 캡처할 수 있도록

차체, 시트, 운전 장치등에서 꼭 필요한 부분만 제작하였다.

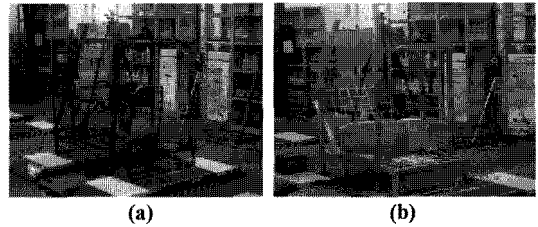


Fig. 1. 실험용 목업 차량: (a) 운전석, (b) 승객석.

2.3.2 동작 캡처 장치

승용차의 승하차 동작을 캡처하기 위하여 광학식 모션 캡처 시스템(optical motion capture system)을 사용하였다. 카메라는 Vicon MX시리즈 13대를 이용하여 촬영을 실시하였으며, 승하차 동작에 대한 각 신체 분절의 3차원 좌표값을 얻기 위해서 피실험자에게 35개의 마커를 부착하였다. 각 마커에 대해 매 순간 2대 이상의 카메라가 인식해야만 위치를 계산할 수 있기 때문에 다수의 카메라를 설치하였으며 카메라의 시야 각도를 확보하기 위하여 높은 천정의 실내 공간($5\text{m} \times 5\text{m} \times 5\text{m}$)에 가능한 높은 곳에 카메라를 설치하였다. Fig. 2는 실험 스튜디오의 구성과 카메라의 배치이다.

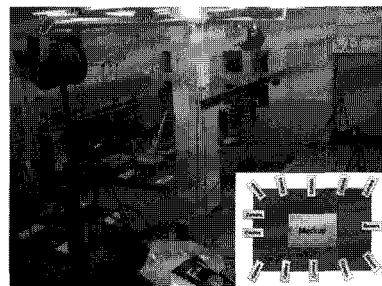


Fig. 2. 실험 스튜디오.

모션 캡처를 하기 위하여 피실험자에 총 35개의 마커를 부착하였다. 마커는 LifeMODTM에서 사용하는 Plug in Marker Set에 따라 4개의 머리 마커(head markers), 5개의 몸통 마커(torso markers), 좌우 총 10개의 팔 마커(arm markers), 4개의 골반 마커(pelvis markers), 좌우 총 12개의 다리 및 발 마커(leg and foot markers)이다. Fig. 3에 실험을 위해 피실험자에 부착한 마커들의 모습이 나타나 있다. 카

매라에 의하여 캡처된 보선은 Vicon사의 Nexus라는 소프트웨어를 이용하여 LifeMOD에서 읽을 수 있는 .sif 파일 형식으로 출력하는데, 이 .sif 파일은 Plug in Marker Set에 의해 정의된 35개의 마키들을 이듬별로 구분하고 이를 다시 시간에 따라 순차적으로 나타낸 x, y, z 좌표를 포함하고 있다.



Fig. 3. 보선 캡처 실시.

2.4 실험 절차

본 논문에서는 승용차 승하차 동작 불편도에 대한 보다 객관적인 평가 모델을 개발하기 위하여 Fig. 4에 나타난 것과 같은 절차로 실험과 분석을 수행하였다. 먼저 도어의 설계 변수 가운데 독립 변수와 그 수준을 선정하는 실험 설계를 실시하였다. 그 다음 실제 실험을 실시할 수 있도록 실험용 승용차 목업을 제작하고, 카메라를 이용한 동작 측정 시스템을 설치하였다. 다음, 피실험자들을 선정하고 교육시킨 후, 이들의 신체 각 부위의 지수 및 몸무게를 측정하고, 이들로 하여금 준비된 각 차량 목업에 대하여 계획된 승하차 동작을 실시하여 동작 데이터를 획득하였다. 각 수준에 대한 승하차 실험을 실시한 후 바로 피실험자의 주관적 불편도에 대한 설문 조사를 실시하였다. 승하차시 피실험자가 느끼는 불편도 정도를 각 신체 부위에 대하여 -4점에서 4점까지 9점 척도로 점수를 기입하도록 하였다. 본 실험에서 채택한 불편도는 ‘최고 불편’(-4), ‘매우 불편’(-3), ‘불편’(-2), ‘약간 불편’(-1), ‘보통’(0), ‘그저 그렇다’(1), ‘편안’(2), ‘매우 편안’(3), ‘최고 편안’(4)의 9단계이다. 기입해야 할 불편도를 기본적으로 정수로 기입하도록 하였지만 본인이 느껴지는 불편도가 두 점수간의 중간 정도라고 느낀다면 0.5점 단위까지 세분화해서 점수를 기입할 수 있도록 하였다. 또한, 피실험자가 느끼는 불편도를 망각하지 않도록 각 수준별 실험 실시 후에 바로 불편도를 기입하도록 하였다. 실험이 끝난 후 설문 조사 결과에 대해 통계적 분석을 실시하여 주관적 불편도에 대한

유익한 결과를 추출하도록 하였다. 한편, 실험에서 얻은 동작 데이터를 이용하여 상용 시스템을 이용한 운동 역학적 시뮬레이션을 실시하여 관절에서의 각도를 추출한 후, 이를 이용하여 피실험자의 승하차 불편도를 객관적이고 정량적으로 계산한 후, 이를 주관적 불편도와 비교하여 그 타당성을 검증하도록 하였다.

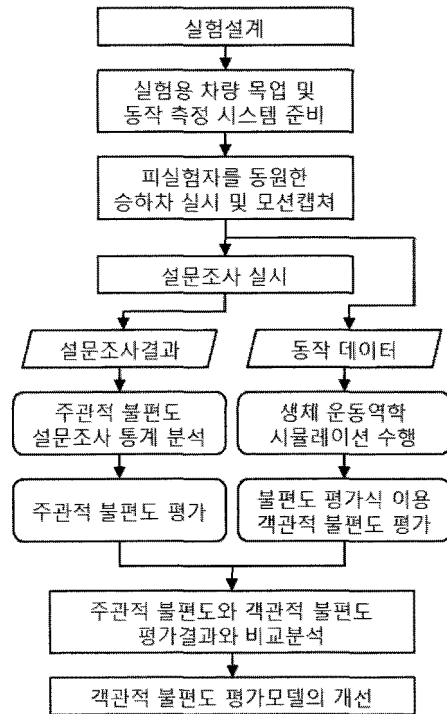


Fig. 4. 연구 방법의 흐름도.

3. 주관적 불편도

본 실험에서의 설문조사를 통해 얻어진 자료를 취합하여 통계 분석을 실시하였다. 먼저 분석에 앞서 설문지에 표시된 불편도의 일상 용어 표기 및 9점 척도를 Table 2에 나타난 것과 같이 기도형^[2]이 제안한 백분율 기준 지각 불편도 값으로 전환하여 평균과 표준편차를 계산하였다. 이 변환 작업은 후후 백분율 기준으로 표기되는 객관적 불편도 값을 본 설문 조사 결과와 비교하기 위하여 동일한 척도로 미리 맞춰 놓는 것이라고 할 수 있다.

운전석과 승객석에 대해 도어의 전정 높이를 변화시키면서 측정된 피실험자의 주관적 불편도의 조사 결과가 Fig. 5와 6에 나타나 있다. Fig. 5에서는 신체

Table 2. 불편도의 9점 척도에 대한 백분율 표기

국문 표기	영문 표기	9점 척도	불편도 크기 (%)
극히 불편함	Extremely Poor	-4	100.0
매우 불편함	Very Poor	-3	80.4
불편함	Poor	-2	64.1
조금 불편함	Poor a Little	-1	49.9
보통	So-So	0	35.9
조금 편안함	Good a Little	1	26.7
편안함	Good	2	16.3
매우 편안함	Very Good	3	9.9
극히 편안함	Extremely Good	4	6.9

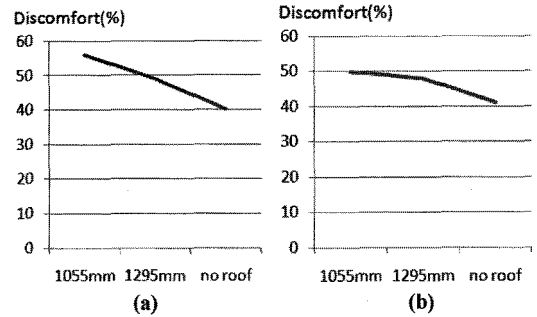


Fig. 6. 도어 높이 변화에 따른 승하차 동작의 주관적 불편도 조사 결과: (a) 운전석, (b) 승객석.

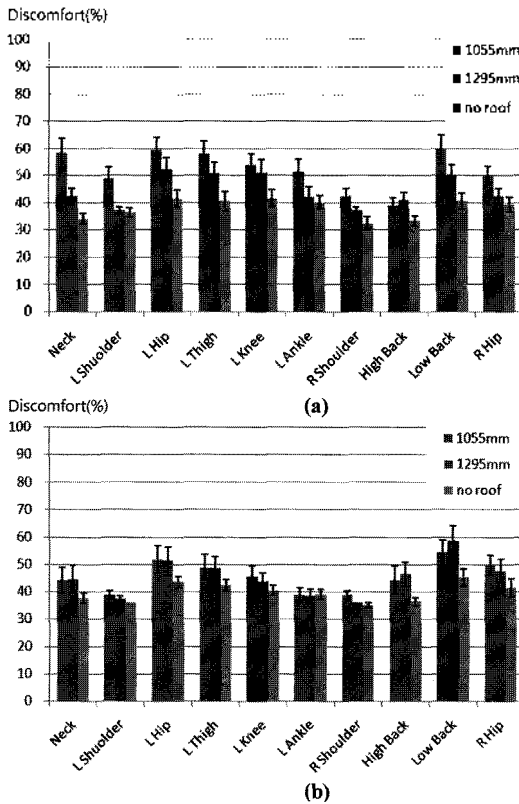


Fig. 5. 승하차의 주관적 불편도: (a) 운전석, (b) 승객석.

각 부위별 불편도에 대한 각 경우에 대한 불편도의 평균을 살펴볼 수 있다. 등 척추는 상부(high back)와 하부(low back)로 구분하였으며 척추 하부는 허리(lumbar) 부위를 뜻한다. 허리, 고관절, 허벅지, 무릎 등이 승하차시 불편을 많이 느끼는 것으로 나타났으며, 이는 주로 승하차시 몸무게를 지탱해 주는 허리 이하 하지인 것으로 판단된다. 또한 Fig. 6에는 2개의

독립변수를 변화시키면서 조사한 승하차시 몸 전체에 대한 불편도 값의 변화가 나타나 있다. 몸 전체의 불편도 값은 승하차와 관계되는 주요 관절, 즉, 목, 허리, 고관절, 무릎 관절에 대한 불편도 값의 평균을 취하여 계산하였다. 이 그림에 나타난 것과 같이 차량 운전 장치가 없는 승객석쪽이 불편도가 적으며, 또한 차량의 도어 천정 높이가 높아질수록 불편도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히 천정이 없는 경우는 차량 운전 장치의 회피가 용이해져 그 장치로 인한 불편도는 차이가 없는 것으로 나타나고 있다.

4. 객관적 불편도

4.1 승하차 동작 시뮬레이션

상용 생체역학 소프트웨어인 LifeMODTM을 이용하여 피실험자의 동작에 대한 각 관절의 시간에 따른 각도, 각속도, 각가속도 및 기타 물리적인 속성들을 계산하였다. LifeMOD의 인체모델은 19개의 세그먼트로 구성되어 있으며 피실험자의 신장, 몸무게, 나이, 성별의 입력을 통해 인체모델이 생성되어진다. 생성된 인체모델에 18개의 관절을 생성해 주고 앞선 실험에서 측정된 모션데이터를 입력해 줌으로써 승하차 승하차 동작에 대한 시뮬레이션을 실행할 수 있도록 하였다.

4.2 정량적 불편도 평가 모델

인체의 각 관절은 하나 이상의 자유도로 구성되어 있고, 그 자유도는 시상면(sagittal plane), 수평면(transverse plane), 전두면(frontal plane)의 3개의 평면 가운데 하나 위에 존재한다. 관절의 각 자유도에 대해서는 고유의 동작 범위와 불편도 특성이 존재하는데, 특히 기도형¹⁾은 인체의 주요 관절에 대한 각 자유도

의 안락 동작 범위와 각도 변화에 따른 일반적인 불편도 회귀식을 제시하였고, 나아가 Kee와 Karwowski^[3]는 이를 바탕으로 관절과 관절 운동의 불편도를 평가하기 위한 등급 시스템(ranking system)을 개발하였다. 본 연구에서는 [2]와 [3]에서의 연구 성과를 활용하여 승용차 승하차에 대한 개관적이고 정량적인 불편도 평가 모델을 개발하였다.

동작에 대한 불편도를 계산하기 위하여 먼저 어떤 인체 동작에 대한 각 관절에 대한 불편도를 다음 식으로 나타내었다.

$$D_i^{Joint}(t) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m D_{ij}^{DOF}(t) \quad (1)$$

여기서 D_i^{Joint} 는 i 번째 관절의 불편도 값을, D_{ij}^{DOF} 는 i 번째 관절의 j 번째 자유도에서의 불편도 값을, 그리고 m 은 관절이 가진 자유도의 수를 뜻한다.

어떤 순간에서의 몸 전체에 대한 불편도는 식 (2)에서와 같이 각 관절에서의 불편도 값에 대한 평균값을 취하여 표시하거나, 식 (3)에서와 같이 관절들 가운데 가장 불편도 값이 큰 것을 선택하여 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 Zacher와 Bubb^[4]가 밝힌 신체 일부의 최대 불편도 값이 신체 전체의 불편도를 좌우한다는 연구 성과를 받아들여 식 (3)을 이용하여 몸 전체의 불편도를 나타내도록 하였다.

$$D_{avg}^{Body}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i^{Joint}(t) \quad (2)$$

$$D_{max}^{Body}(t) = \max_{i=1, \dots, n}(D_i^{Joint}(t)) \quad (3)$$

여기서 n 은 몸 전체의 관절 또는 동작에 기여하는 주요 관절들의 수를 뜻한다.

최종적으로 동작 전체에 대한 몸 전체의 불편도는 아래 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$D^{Body} = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} D_{max}^{Body}(t) dt \quad (4)$$

여기서 t_0 와 t_1 은 동작 시작 및 종료 시간을 뜻한다.

4.3 승하차 동작의 정량적 불편도 평가

본 연구에서는 승하차 동작에 대한 불편도의 크기를 구하기 위하여 Dufour와 Wang^[4]이 제안한 내용과 마찬가지로 팔을 제외한 나머지 관절들을 선택하여 불편도 값을 측정하였다. 본 연구에서 선택한 대표 관절은 목(lower neck), 허리(lumbar), 좌우 고관절(hip), 좌우 무릎(knee)의 6개 관절이다. 승하차 동작기간 중

안도의 순간에 대한 몸 전체의 불편도는 식 (3)을 이용하여 구할 수 있고, 신체에 대한 몸 전체의 불편도는 식 (4)를 이용하여 계산 가능하다. 독립 변수의 각 수준별 불편도를 비교할 수 있도록 승하차 소요 시간을 승차, 착석, 하차의 3개의 구간으로 나누고 이들을 각각 1초, 0.4초, 1초의 시간으로 정규화시켰다. 즉, 승하차 전체 구간을 승차구간($0 \leq t \leq 1$), 하차구간($1.4 \leq t \leq 2.4$), 착석구간($1 \leq t \leq 1.4$)의 세 구간으로 시간을 정규화시켰다.

도어 천정의 높이가 1055 mm인 운전석의 경우에 대하여 임의로 선택한 피실험자의 몸 전체의 불편도에 대한 시간에 따른 불편도의 변화를 나타낸 그림이 Fig. 7에 나타나 있다. 여기서 점선은 식 (2)를 이용하여 몸 전체의 불편도를 나타낸 것이고, 실선은 식 (3)을 이용하여 몸 전체의 불편도를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 식 (2)에 비하여 식 (3)이 불편도에 대한 변별력이 높을 뿐만 아니라 설문으로 얻은 주관적 불편도와 유사한 수치에 도달하기 때문에 몸 전체의 불편도를 나타내는데 보다 적합하다는 것을 쉽게 알 수 있다.

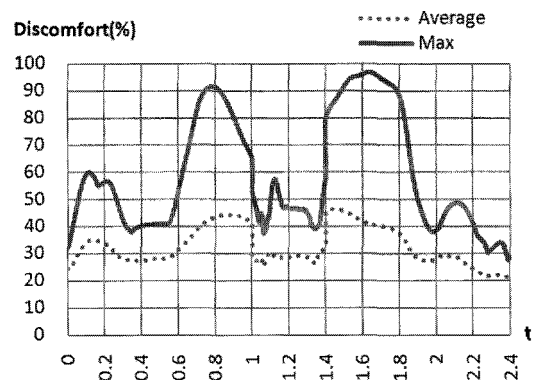


Fig. 7. 승하차에 대한 몸 전체의 불편도 계산 결과(운전석, 도어 높이 1055 mm).

Fig. 8은 선정된 피실험자에 대한 승용차 승하차시 각 관절의 평균 불편도를 나타낸 그래프이다. 고관절에서 가장 큰 불편도를 보이고 있는 것을 알 수 있으며, 이는 주관적 설문 조사의 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 주관적 불편도 설문 조사에서는 허리의 불편도 수치가 높는데 반하여 본 연구에서 제시한 방법에서는 불편도 수치가 낮게 나오는 것을 볼 수 있는데, 이는 불안정한 자세를 유지하기 위해서는 허리의 근육이 많이 쓰이는데 반하여 허리 관절의 자세는 큰 변화가 없었기 때문으로 판단된다.

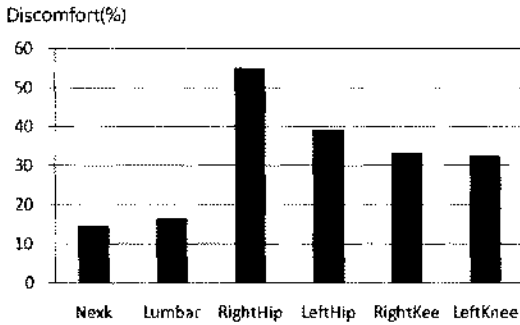


Fig. 8. 승하차시 각 관절의 평균 불편도(운전석, 도어높이 1055 mm).

Fig. 9는 운전석과 승객석의 각 도어 천정 높이에 대해서 선정된 피실험자의 승하차 동작 전체 불편도를 나타낸 그래프이다. 본 논문에서 제안한 방식인 식 (3)을 이용하여 동작 구간 전체에 대해 몸 전체의 불편도를 구한 것이 양쪽 그래프에 잘 나타나 있다. 설문 조사를 통해 구한 주관적 불편도 값과 비교하여 주관적 불편도 값을 기준으로 승차 동작은 약 14%, 하차 동작은 약 6%의 오차를 보여주고 있으며, 도어 천정 높이의 변화에 따른 불편도 감소율을 비교해 본 결과 주관적 불편도 값의 감소율을 기준으로 승차 동작은 약 5%, 하차동작은 8%의 오차를 보여주고 있는 것으로 나타났다. 수준의 변화에 따른 불편도 절대값의 변화에 비하여 감소율 변화에 더 높은 정확도를 보여주고 있으며 이는 비록 정확한 절대값을 예측하지 못하더라도 여러 설계 대안에 대한 불편도의 증감율에 대해서는 보다 정확히 예측할 수 있다는 것을 뜻한다. 이러한 특성은 절대치뿐만 아니라 증감율을 이용하여 여러 가지의 설계 대안들을 서로 비교 평가할 수 있다는 것을 뜻한다.

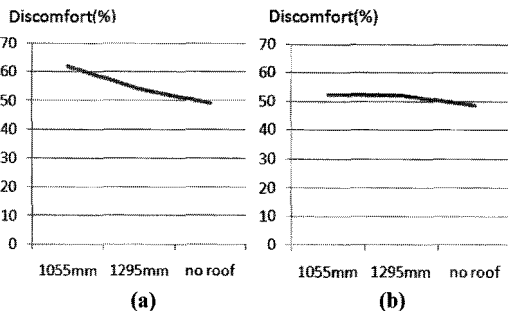


Fig. 9. 도어 높이 변화에 따른 승하차 동작의 시뮬레이션 불편도 평가 결과: (a) 운전석, (b) 승객석.

4.4 기존 연구와의 비교

Dufour와 Wang¹¹⁾이 제안한 방법에서는 먼저 어떤 인체 동작에 대한 각 관절에 대한 불편도를 식 (5)로 나타내고, 몸 전체에 대한 불편도를 식 (6)으로 계산하도록 하였다.

$$D_i^{joint}(t) = \min(1; \sqrt{\sum_{j=1}^m (DOFCoeff_{ij} \times D_{ij}(t))^2}) \quad (5)$$

$$D^{Body}(t) = \min(1; \sqrt{\sum_{i=1}^n (JointCoef_i \times D_i^{joint}(t))^2}) \quad (6)$$

여기서 D_i^{joint} 는 i 번째 관절의 불편도 값을, D_j 는 j 번째 관절의 j 번째 자유도에서의 불편도 값을, 그리고 m 과 n 은 관절이 가진 자유도의 수를 뜻한다. $DOFCoeff_{ij}$ 는 Kee와 Karwowski의 ranking level에 기초한 값으로 1/8에서 1까지의 값을 가지며, $JointCoef_i$ 는 관절에 대한 가중치로서 이는 Kee와 Karwowski¹¹⁾의 관절의 불편도 등급(the rank of stressfulness by the joints)을 이용하여 계산되는 값이다. 불편도의 최소값 및 최대값은 0과 1로서 0은 중립 자세에서의 불편도, 1은 관절 동작범위의 90% 이상에 도달했을 때 느끼는 불편도에 해당된다.

이 식을 운전석 도어 천정 높이 1055 mm의 경우에 적용하여 선정된 피실험자의 승하차 동작 동안의 불편도를 계산한 결과가 Fig. 10과 11에 나타나 있다. 시간에 따른 불편도의 변화를 보면 승차구간($0 \leq t < 1$)과 하차구간($1.4 \leq t < 2.4$) 사이에 최대 1을 초과하는 구간이 발생하는 것을 볼 수 있으며, 착석구간($1 \leq t < 1.4$)에서는 불편도가 크게 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 불편도가 1을 초과하는 값이 발생하는 것은 식 (5)과 (6)의 계산시 평균을 취하지 않고 불편도 벡터의 크기를 취하기 때문이다. 또한, $JointCoef_i$ 는 $DOFCoeff_{ij}$ 로부터 유도된 값인데 이를 중복해서 적용하는 것은 문제가 있다.



Fig. 10. Dufour와 Wang¹¹⁾의 방법을 이용한 승하차 동작의 불편도 계산 결과(운전석, 도어 높이 1055 mm).

보다 심각한 문제 가운데 하나는 Fig. 11에 나타난 것과 같이 무릎의 경우 전혀 불편도가 계산되지 않는 것이다. 이는 서있을 때와 앉았을 때의 자세를 중립 자세로 보고 그 사이의 관절각도에 대해서는 불편도가 0이라고 가정하기 때문에 발생하는 것으로 무릎의 경우 그 범위를 벗어나는 경우가 없기 때문에 결국 불편도 값이 0이 되어버리는 것이다. 본 연구의 결과를 비교해 보면 [1]이 가지고 있는 이러한 문제점을 잘 해결하고 나아가 보다 주관적 불편도에 잘 맞는 새로운 불편도 평가 모델을 제시하고 있다고 할 수 있다.

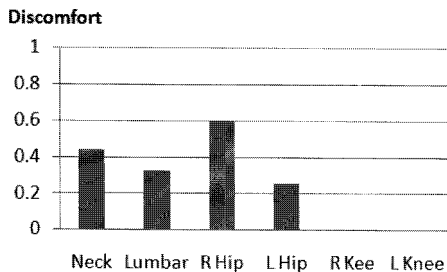


Fig. 11. Dufour와 Wang^[1]의 방법을 이용한 승하차의 불편도 계산 결과(운전석, 도어 높이 1055 mm).

5. 결 론

본 연구에서는 제품에 대한 신체의 불편도의 평가를 피실험자의 주관적인 설문 조사가 아닌 동작 데이터에 근거한 보다 객관적이며 정량적인 새로운 방식의 불편도 평가 모델을 개발하고 이를 승용차의 승하차 분야에 적용하였다. 불편도 평가 모델을 개발하기 위하여 본 연구에서는 각 관절의 자유도에 대한 일반적인 불편도 회귀식을 도입하였으며, 관절 가운데 최대 불편도를 보이는 관절을 몸 전체의 대표 불편도 값으로 취하여 보다 지각 불편도와 잘 부합할 수 있도록 하였다. 개발된 불편도 평가 모델을 승용차 승하차에 적용하기 위하여 승하차 동작에 기여하는 대표 관절들을 선택하여 전체의 불편도를 계산하도록 하였다. 실험 및 설문 조사를 통해 얻어진 주관적 불편도 값과 본 연구의 방식에 따라 계산한 객관적 불편도를 비교한 결과 본 논문에서 제시한 불편도 모델이 매우 타당함을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제시한 불편도 모델은 간단한 동작 분석만으로도 신체에 끼치는 불편도를 손쉽게 계산할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. 그러나 우리 몸이 불편함을 느끼는 것은 근육에 대한 수축으로부터 발생하는 것이기 때문에 생체역학적인 근육 해석 결과

를 바탕으로 불편도를 계산하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 현재 이에 대한 연구를 계속하고 있으며, 나아가 궁극적으로는 컴퓨터 상에서 가상의 인간과 동작을 생성시켜 그에 대한 제품에 대한 불편도 평가를 수행한 후 이를 재설계에 반영하는 컴퓨터를 이용한 인간공학적 제품 개발 프로세스를 개발하는 연구를 추진하고 있다. 이러한 연구가 실제 설계에 활용될 수 있다면 실물 투입 제작과 인체 실험에 소요되는 비용과 시간을 단축하고 회사의 경쟁력을 보다 강화하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2008-313-D00066(과제번호)).

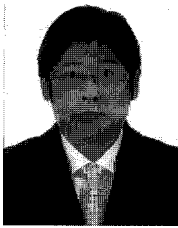
참고문헌

1. Dufour, F. and Wang, X., "Discomfort Assessment of Car Ingress/Egress Motions Using the Concept of Neutral Movement", SAE International Conference and Exposition of Digital Human Model for Design and Engineering, Iowa City, June 15-17, 2005, SAE paper 2005-01-2706, 2005.
2. 기노형, "작업장 설계와 평가를 위한 한국인 관절의 안락 동작범위 측정", 대한인간공학회지, Vol. 16, No. 2, pp. 73-82, 1997.
3. Kee, D. and Karwowski, W., "Ranking Systems for Evaluation of Joint and Joint Motion Stressfulness Based on Perceived Discomforts", *Applied Ergonomics*, Vol. 34, No. 2, pp. 167-176, 2003.
4. Zacher, I. and Bubb, H., "Strength Based Discomfort Model of Posture and Movement", Digital Human Modeling for Design and Engineering Symposium, Oakland University, Rochester, Michigan, USA, June 15-17, 2004, SAE Paper 2004-01-2139, 2004.
5. 장수혁, 박 범, 박영기, 김영호, "지게차 승하차 안락성 측정을 위한 평가지수 모델 개발", 2007 대한인간공학회 추계학술대회 논문집, pp. 336-341, 2007.
6. Anderson, D. E., Madigan, M. L., and Nussbaum, M. A., "Maximum Voluntary Joint Torque as a Function of Joint Angle and Angular Velocity: Model Development and Application to the Lower Limb", *Journal of Biomechanics*, Vol. 3, pp. 3105-3113, 2007.
7. Giacomini, J. and Quattrocolo, S., "An Analysis of Human Comfort When Entering and Exiting the Rear Seat of an Automobile", *Applied Ergonomics*, Vol. 28, No. 5-6, pp. 397-406, 1997.

8. Namamoto, K., Atsumi, B., Kodera, H. and Kanamori, H., "Quantitative Analysis of Muscle Stress During Ingress/Egress of the Vehicle", *JSAE Review*,

Vol. 24, No. 3, pp. 335-339, 2003.

9. LifeMOD, <http://www.lifemodeler.com>, Biomechanics Research Group, Inc.



최 남 철

2008년 수원대학교 기계공학과 학사
2009년~현재 국민대학교 자동차공학
전문대학원 설계 및 생산정보기
술전공 석사과정

관심분야: CAD/CAM, Human-centered
Design, Human-Vehicle Interac-
tion, Motion Analysis



심 지 성

2007년 우석대학교 기계자동차공학과
학사

2009년~현재 국민대학교 자동차공학
전문대학원 설계 및 생산정보기
술전공 석사과정

관심분야: CAD/CAM/PLM, Human-
centered Design, Human-Vehicle
Interaction



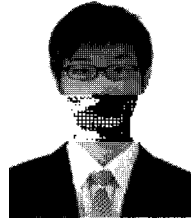
김 재 호

2007년 대전대학교 컴퓨터응용기계
설계공학과 학사

2009년 국민대학교 자동차공학전문대
학원 설계 및 생산정보기술전공
석사

2009년~현재 (주)두리시스템테크놀로지
동작분석연구소 연구원

관심분야: Ergonomics Design, Motion
Analysis, Modeling



이 상 목

2008년 대전대학교 컴퓨터응용기계
설계공학과 학사

2010년 국민대학교 자동차공학전문대
학원 설계 및 생산정보기술전공
석사

2010년~현재 (주)리얼타임테크놀로지
연구원

관심분야: Virture Reallity, Motion
Generation, Motion Analysis



이 상 현

1986년 서울대학교 기계설계학과 학사

1988년 서울대학교 기계설계학과 석사

1993년 서울대학교 기계설계학과 박사

1993년~1995년 신도리코 기술연구소
책임연구원

1996년 대우 고등기술연구원 선임연구원

1996년~현재 국민대학교 교수

관심분야: CAD/CAM, Human-centered
Design, Human-Vehicle Interac-
tion, 3D Geometric Modeling,
Die and Mold CAD