

ACT-R 인지 아키텍처를 이용한 운전자의 인지 부하 측정

임수용¹ · 명노해^{1*} · 홍기범²

¹고려대학교 산업경영공학과 / ²현대자동차 인간편의연구팀

Prediction of Driver's Cognitive Workload using Cognitive Architecture : ACT-R

Sooyong Lim¹ · Rohae Myung¹ · Gi Beom Hong²

¹School of Industrial Management Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

²Human Factors and Devices Research Team, Hyundai Motors

The driver model based on the ACT-R cognitive architecture was developed in order to predict the performance and cognitive workload of a driver operating HVI devices. In the 10 HVI tasks, the predicted performance time and cognitive workload by the ACT-R driver model was well matched and highly correlated with the mean of performance times and subjective workload ratings from 15 participants, respectively. It is strongly proposed that the ACT-R driver model in this study can be applied to evaluate the usability of a new HVI design with less cost in the early stage of system development.

Keyword: ACT-R, cognitive architecture, driver's workload, model-based evaluation

1. 서론

운전 시 차량 내의 내비게이션 장치나 공조 및 라디오 버튼의 사용이 증가하고 여러 형태의 인터페이스가 개발됨에 따라 이러한 장치들이 운전과제 수행에 어떠한 영향을 미치게 되는지, 그리고 운전자가 어느 정도의 인지적 작업부하를 느끼게 되는지를 예측하는 것은 인간-자동차 상호작용(HVI; Human-Vehicle Interaction)에 매우 중요한 단서를 제공할 수 있다. 이러한 이유로 다양한 내비게이션 장치의 조작이나 휴대폰 통화 등과 같은 2차 과제들이 운전자의 운전 과제 수행에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다(Briem and Hedman, 1995; Salvucci *et al.*, 2007; Sayer *et al.*, 2005). 이와 더불어 2차 과제를 진행함으로써 운전자가 추가적으로 느끼는 인지적 작업부하와 운전과제 수행 간의 영향에 대한 연구도 진행되어 왔다

(Bardauf *et al.*, 2009; Collet *et al.*, 2009; Recarte and Nunes, 2003). 그런데 운전자의 인지적 작업부하는 다차원적 변수로서 이에 영향을 미치는 요인들이 매우 다양하기 때문에 여러 가지의 측정방법론을 동시에 적용하여 운전과제와 2차 과제 수행에 대한 영향, 운전자의 생리적 상태의 변화 등을 측정하고 그 결과를 종합적으로 분석해야 한다. 그러나 프로토타입(prototype)이 가용하지 않은 개발 초기단계에서는 실제 피실험자의 수행도와 생리적 측정, 주관적 평가 등의 여러 기법을 동시에 적용하기 곤란하다. 또한 이러한 평가를 위해 프로토타입을 제작하고 피실험자를 선발, 훈련하는 것은 제품개발의 기간을 지연시키고 개발 비용을 증가시키게 된다. 이와 더불어 동적으로 주위 환경이 실시간으로 변화하는 운전 실험 상황에서는 피실험자의 지각적 오류나 실수로 인해 사고가 발생할 수 있고 생명과 직결된 치명적인 결과로 이어질 수 있기 때문에, 운전과

본 논문은 '2단계 BK21 사업 운전자 인지 작업부하 정량적 측정 및 평가기술개발(R0910153)'과 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(Grant No. 2011-0004349).

*연락처 : 명노해 교수, 136-713 서울특별시 성북구 안암동 5가 고려대학교 산업경영공학과, Fax : 02-929-5888,

E-mail : rmyung@korea.ac.kr

투고일(2012년 01월 02일), 심사일(1차 : 2012년 01월 26일), 게재확정일(2012년 01월 26일).

제 수행도와 운전 작업 부하에 대한 측정을 위해 피실험자를 이용하는 것은 안전의 측면에서 재고되어야 한다. 그러므로 제품개발 초기 단계에서는 컴퓨터를 이용한 인지 모델로 운전자의 행동을 모의하고 그 모의 결과를 이용하여 운전자의 인지적 작업부하를 정량적으로 예측하는 방법론이 적용 가능한 평가기법이며, 프로토타입을 제작하고 피실험자를 선발, 훈련 시키는데 필요한 시간과 비용을 절약할 수 있는 경제적 기법이다.

한편 인지 모델을 이용하여 운전자의 행동을 예측한 대표적인 연구 사례로는 운전자 행동을 QN-MHP(Queuing Network - Model Human Processor)를 이용해 운전자의 행동양식을 분석한 연구(Fuller *et al.*, 2010)와 ACT-R(Adaptive Control of Thought - Rational) 인지 아키텍처로 모델링한 Salvucci(2001; 2004; 2006)의 연구가 있으며, 통화를 위해 휴대폰 버튼을 조작하거나 음악 재생과 같은 다양한 2차 과제에서의 운전자 수행을 비교한 연구(Salvucci and Macuga, 2001; Siewiorek, 2002)들이 진행되면서 운전자 행동에 대한 인지 모델 연구가 지속적으로 증가하고 있다.

이에 본 연구에서는 지금까지 개발된 여러 가지 인지 모델 중에서도 인간의 인지과정을 가장 세부적으로 그리고 정량적으로 정확히 묘사할 수 있는 모델로 인정받고 있는 ACT-R을 이용한다. 본 연구의 목표는 ACT-R을 통해 운전자의 인지적 행동 절차를 모의하여 운전자의 과제 수행시간을 예측하고, 그 과정에서 모델에 의해 처리된 정보량을 계산함으로써, 운전을 하면서 동시에 내비게이션 메뉴를 조작할 때 운전자가 느끼게 되는 운전 작업부하를 평가하는 것이다. 또한 이를 통해 예측된 수행시간이 피실험자의 수행시간을 정확히 묘사하고 있는지 검증하고 운전 모델에서의 운전 부하 예측 값이 운전자가 실제로 느끼는 운전 부하를 반영하는지를 평가한다.

2. 배경

2.1 ACT-R 인지 아키텍처

ACT-R은 지금까지 개발된 여러 가지 인지 아키텍처 중에서도 인간의 인지과정을 하위수준까지 가장 세부적으로 그리고 정량적으로 정확히 묘사할 수 있는 인지 아키텍처로 인정받고 있다. ACT-R 6.0 버전은 <Figure 1>과 같이 인간 두뇌의 여러 역할을 8개의 모듈(module)에서 각각 나누어 담당하게 된다. 특히 중앙처리장치 역할을 하는 procedural 모듈은 나머지 7개의 모듈과 인지과정에 대한 정보를 버퍼(buffer)를 통해 서로 교환한다. 이 때 버퍼에서는 한 번에 한 개의 정보만 순차적으로 저장하고 처리할 수 있어 사람의 인지적 한계를 잘 묘사할 수 있다. 반면 각 모듈은 여러 개의 정보를 동시에 검색하거나 저장할 수 있으며, 여러 개의 생산 규칙(production rule)을 동시에 병렬적으로 비교 처리할 수 있어 다중 과제를 동시에 수행하는

사람의 인지적 과정을 정확히 묘사할 수 있다.

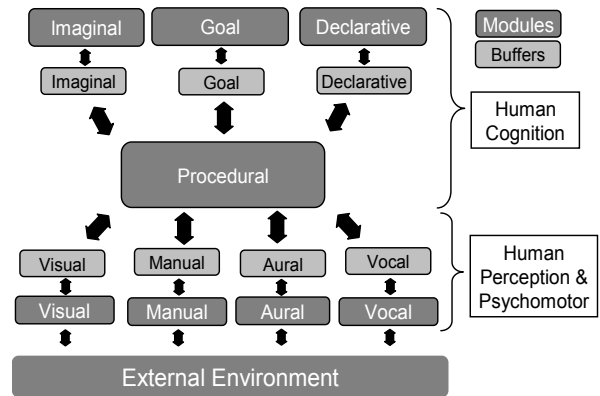


Figure 1. ACT-R 6.0 Architecture

2.2 ACT-R 운전 모델

본 연구의 ACT-R 운전 모델은 ACT-R 인지 아키텍처를 이용하여 수립된 운전자 행동에 대한 컴퓨터를 이용한 인지 모델로서 Salvucci(2004)에 의해 개발된 운전 모델에 기초를 두고 있다. 이 모델은 차선 중앙과 선행 차량과의 간격을 유지하는 운전 행동과 차량 내부의 각종 장치들을 조작하는 2차 과제를 모의할 수 있도록 개발되었다. 모델의 운전환경은 일반적인 고속도로 교통상황에서 주행하는 차량을 기준으로 하였다. 또한 본 운전 모델은 Michon(1985)의 운전 수행절차 단계 구분과 유사한 개념으로 구성되어 있다. 이 중 제어 요소는 외부 환경으로부터의 자극을 지각하고 직선 혹은 곡선 도로에서 차선 중앙을 유지하는 횡적 제어와 선행차량과의 간격을 일정하게 유지하려는 종적 제어를 수행한다. 제어 요소의 개념을 반영한 인지 모델에서의 운전 규칙은 <Figure 2>에서 보는 바와 같이 7개의 생산 규칙으로 구성되어 있다.

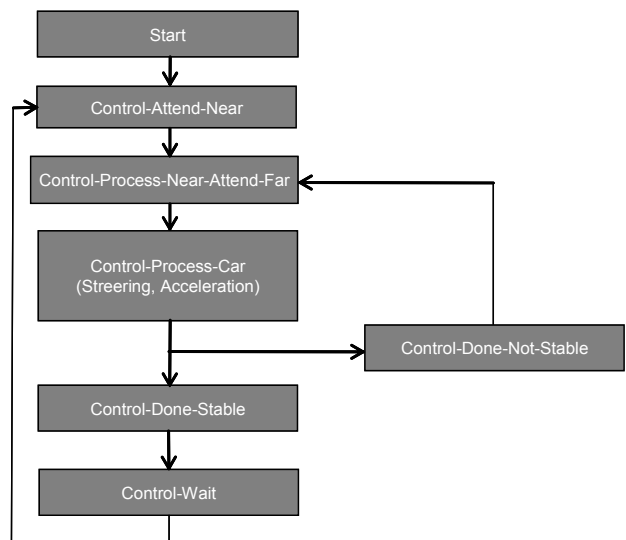


Figure 2. ACT-R Production System for Driving

운전 모델의 제어 요소는 차량의 횡적 제어(lateral control)와 종적 제어(longitudinal control)를 수행하기 위해 시각적 단서들을 지각하는 과정을 거친다. 특히 차량의 횡적 제어와 종적 제어를 위해서 두 개의 지점을 시각적으로 처리하고 이를 비교하여 차량을 통제한다. ‘control attend near’ 규칙은 차량 전방 10m인 근접 지점(near point)으로 시각적 주의를 이동하여 근접 지점에 대한 시선 각도를 판단한다. ‘control process car near attend far’ 규칙은 시각적 주의를 원거리 지점(far point)으로 이동하여 원거리 지점에 대한 시선 각도를 판단한다. 이때 원거리 지점은 직선 도로일 경우에는 수평선에 위치하게 되고 같은 차선에 선행 차량이 존재할 경우 그 선행 차량에 위치하게 되며, 곡선 도로에서는 접선 부분에 원거리 지점이 위치하게 된다. 셋째 ‘control process car’ 규칙은 근접 지점과 원거리 지점 간 시선각도의 차이를 계산하여 운전대를 돌리거나 가속페달을 밟게 함으로써 횡적, 종적 제어를 시행한다. 그 다음 ‘control done stable’ 규칙과 ‘control done not stable’ 규칙은 시선각도의 변화속도를 판단하여 차량이 안정적인 상태인지 확인하고, 안정적인 상태이면 ‘control wait’ 규칙이 실행되어 잠시 아무런 제어 행동도 일어나지 않도록 대기하게 되며, 만일 안정적이지 않은 상태로 판단되면 바로 원거리 지점의 위치와 시선각도를 확인하는 ‘control process car near attend far’ 규칙이 다시 실행되게 된다. 이렇듯 시각적 주의를 번갈아 옮겨가면서 횡적, 종적 제어의 필요성을 판단하고 행동으로 옮기는 과정은 차량이 안정적이지 않은 경우에는 약 0.2초에 한 번씩 반복되게 되며, 차량이 안정적인 상태인 경우에는 0.25초에서 수초에 걸쳐 한 번씩 반복된다.

또한 운전 중 차량 내부 기기를 조작하는 등의 2차 과제를 수행하는 운전 모델의 운전 규칙은 <Figure 3>에서 보는 바와 같으며 운전자가 1차 과제인 운전과 2차 과제를 완벽하게 다중 작업을 할 수 있다는 가정 하에, 기본 운전 모델과 스펙드 인지 이론(threaded cognition theory)(Salvucci and Taatgen, 2008)을 이용하여 기본 운전 모델에 해당하는 하위 목표(subgoal)와 2차 과제에 해당하는 하위 목표를 동시에 수행할 수 있다. 2차 과제를 수행하는 운전 모델의 운전 규칙은 차량 변경 운전 모델의 운전 규칙과 매우 유사하다. 기본 운전 규칙을 수행하면서 안정적 주행 상태가 유지될 경우 일정 시간 동안 차량을 조정하는 것을 쉬게 된다. 이는 사람이 실제 운전 시에도 항상 집중하고 있지 않은 것을 표현한다. 이처럼 차량의 제어를 일정 시간 쉬는 동안에는 ‘control done stable’ 규칙이 실행되며 2차 과제를 수행할 수 있다. 이때 운전 모델은 2차 과제만을 계속 수행하는 것이 아니라 기본 운전 규칙의 ‘control attend near’ 규칙으로 주의를 전환하였다가 안정적 주행이 유지되면 다시 2차 과제 생산 규칙으로 주의를 전환하여 2차 과제의 생산 규칙을 실행하게 된다. 그러므로 2차 과제 수행 운전 모델은 2차 과제 수행에 요구되는 시간과 인지적 자원에 따라 운전과제와 2차 과제 수행이 크게 달라질 수 있다.

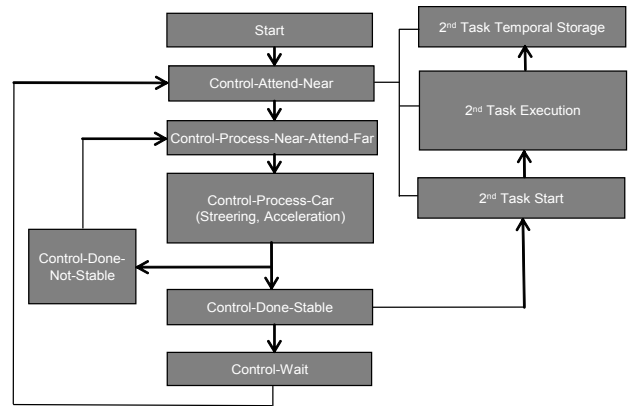


Figure 3. ACT-R Production System for Driving including Secondary Task

2.3 작업부하 예측 알고리즘

운전자가 수행해야 할 주된 과제는 복잡한 교통 환경 하에서 차량을 안전하게 제어하는 것이다. 차량 운전은 계속하여 변화하는 환경 속에서 일어나는 동적 제어 행동이라 할 수 있는데 이는 운전자 자신에 의해 영향을 받을 뿐만 아니라 주변의 다른 운전자들의 행동으로부터도 영향을 받게 된다. 이러한 복잡한 외부 환경 속에서 차량을 안전하게 제어하는데 영향을 미치는 요소의 하나로 운전자의 정신적 작업부하를 들 수 있다. 높은 정신적 작업부하는 인간의 과제 수행을 즉각적으로 저하시킬 수 있으며, 피로를 누적시켜 계속되는 과제에 대한 수행의 질을 떨어뜨릴 수 있다. 그러므로 운전자가 언제 어떤 상황에서 어느 정도의 정신적 작업부하를 느끼게 되고 그것이 운전과제 수행에 어떠한 영향을 미치게 되는지를 정확히 예측하는 것은 안전 운전을 보장할 수 있는 HVI 기술 개발에 매우 중요한 정보를 제공할 수 있을 것이다. 또한 정신적 작업부하의 평가는 이미 개발된 HVI 기술에서도 그 사용성 분석에 매우 유용하게 적용될 수 있다. 이는 어떠한 시스템을 사용하고 있을 때의 수행이 상당히 우수하다 하더라도 작업부하가 지나치게 높은 경우 그 시스템은 개선되어야 하기 때문이다.

이러한 이유로 지금까지 운전자의 정신적 작업부하를 측정하고 예측하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 정신적 작업부하의 측정방법은 시스템 인터페이스의 설계 과정과 관련하여 크게 경험적 방법과 분석적 방법으로 분류할 수 있다(Lysaght et al., 1989). 시스템 개발 과정의 초기 단계에서 비교, 전문가 의견, 수학적 모델, 과제 분석 모델, 인지 모델 등을 이용하여 작업부하 요구를 예측하는 것이 분석적 기법이며, 개발된 시스템이나 시제품 시뮬레이션 환경에서 직접적으로 작업부하를 측정하는 것이 경험적 방법이라 할 수 있다. 경험적 방법은 다시 1차 과제 측정, 2차 과제 측정, 생리적 측정, 주관적 측정 등의 네 가지로 분류되는데, 운전자의 정신적 작업부하에 대한 기존의 연구는 일차 또는 이차 과제 측정 결과와 생리적 또는 주관적 측정 결과 간의 상관관계를 분석한 연구들이 대

부분이다. 또한 분석적 방법에 대한 기존 연구에서는 경험적 방법에 의한 측정 결과와의 상관관계를 분석하여 그 타당성을 검증하였는데 최근에는 여러 분석적 방법 중 보다 정량적인 평가가 가능한 인지 모델에 의한 방법이 많이 연구되고 있다.

먼저 운전부하의 생리적 측정에 대한 연구로 Recarte *et al.* (2003)은 실제 도로 주행에서 운전자의 시각적 탐색, 즉 안구의 움직임과 운전부하와의 관계를 연구하였는데, 이들은 운전 수행 중 추가적으로 정신적 과제가 부여되면 시각적 응시의 집중이나 시각적 탐색이 방해받는다 하였다. 한편 Ryu and Myung(2005)은 2차 과제 수행에서의 작업부하를 평가하기 위해 다양한 생리적 측정 결과 값을 요인분석과 회귀분석을 적용하여 종합적으로 분석하는 방법론을 제시하였다.

운전과제 수행과 주관적 측정도구에 대한 연구를 살펴보면, Pauzic(2008)는 작업부하의 주관적 측정방법 중 가장 널리 알려진 것 중 하나인 NASA-TLX(NASA-Task Load Index)(Hart *et al.*, 1988)를 운전과제에 적합하게 수정한 DALI(Driving Activity Load Index)를 제안하였는데, 이는 NASA-TLX와 측정절차는 매우 유사하지만 세부 측정항목을 운전과제에 부합되게 수정한 것이다. NASA-TLX에서는 정신적, 물리적, 시간적 요구, 수행도, 노력, 좌절감의 6개 항목을 측정하지만 DALI에서는 주의 노력, 시각적, 청각적, 시간적 요구, 간섭, 상황적 스트레스 등을 측정항목으로 제시하고 있다. 한편 Ma and Kaber(2005)는 모의 운전 실험을 통해 적응형 크루즈 컨트롤(adaptive cruise control)이 적용된 운전 시스템에서 운전 중 휴대폰을 사용할 경우 운전자의 상황인식과 작업부하의 변화에 대해 연구하였다. 이들은 차선과 속도 유지 등의 운전 수행도가 상황인식과 주관적 작업부하와 서로 상관관계를 가지며, 운전 시스템의 자동화가 운전 작업부하 감소에 기여할 수 있음을 확인하였다. 그리고 Bardauf(2009) 등은 모의 운전 실험에서 2차 과제를 주어진 시간 지각이 운전 수행도에 영향을 미치며 SWAT (Subjective Workload Assessment Technique)에 의한 주관적 작업부하 측정 결과와 상관관계가 있음을 확인하였다.

Wu and Liu(2007)는 모델에 의한 운전 작업부하의 예측에 대한 기존 연구의 특징을 정리하였는데 제어 이론, 신경망 모델, 통계적 모델, 공학적 모델, 인지 모델 등을 이용하여 운전 작업부하를 예측했던 여러 연구의 특징을 조사하였으며 이를 그들의 대기 행렬 네트워크 모델(queueing network model)에 의한 운전 작업부하 예측모델과 비교하였다. 또한 그들은 QN-MHP 모델의 결과와 NASA-TLX 측정결과를 수학적 함수 관계로 표현함으로써 인지 모델이 운전 작업부하 측정에 적용될 수 있음을 제안하였다. 한편 Lebiere(2001)는 운전과제가 아닌 항공관제 과제에서 ACT-R 모델의 수행 결과를 간단한 시간선분 방법으로 분석하고 이를 NASA-TLX 측정결과와 비교하여 이들의 상관관계를 확인하였다. 그리고 Salvucci(2006)는 ACT-R 모델을 이용하여 모의 환경에서의 운전 수행을 예측하여 실제 실험과 잘 일치함을 확인하였으며, 그의 모델에서는 운전 수행 시 시각적 탐색, 동작 제어, 상황인식, 의사결정 등의 과정을 묘사할

수 있어 이러한 자료를 운전부하 평가에 이용할 수 있음을 제안하였다.

그러나 인지 모델에 의한 작업부하 평가에 대한 기존의 연구에도 몇 가지 해결되어야 할 문제점이 존재한다. Wu and Liu (2007)는 QN-MHP 운전자 모델에서 운전과제 수행 간 각 인지적 요소에서 처리된 정보량의 합을 정량적 작업부하로 가정하고 이를 NASA-TLX 측정 결과와 비교하였다. 이때 그들의 모델에 포함된 네 가지 요소는 시각적 요소, 청각적 요소, 인지적 요소, 동작 요소 등이며, NASA-TLX에 포함된 6개의 세부 평가 요소는 물리적 요구, 시간적 요구, 정신적 요구, 노력, 수행도, 좌절감 등이다. 이들 중 QN-MHP 모델의 인지적 요소와 동작 요소는 NASA-TLX의 정신적 요구와 물리적 요구에 각각 직접적으로 연관되어 있는 것으로 해석할 수 있으나 NASA-TLX의 시간적 요구, 노력, 수행도, 좌절감 등은 모델의 어떤 요소와도 직접적인 연관성을 가지고 있지 못하였다. 한편 Lebiere(2001)는 항공관제 과제를 대상으로 ACT-R 모델의 결과와 NASA-TLX 측정 결과를 비교함으로써 ACT-R 모델을 작업부하의 정량적 평가로 제안하였지만, 그는 모델에서 얻은 자료와 NASA-TLX 측정값을 연결시키는 어떠한 함수관계나 가중치를 제시하지 못하였다. 또한 Salvucci(2006)는 ACT-R 모델을 이용하여 운전 수행 시 시각적 탐색, 상황인식, 의사결정, 행동 수행 등의 과정을 세부적으로 설명하였지만 이러한 모델링 결과를 운전자의 작업부하 측정에 어떻게 적용해야 하는지는 언급하지 않았다.

이에 본 연구에서는 여러 작업부하 측정 방법론 중에서도 컴퓨터 인지 모델을 이용한 시뮬레이션에 의한 정신적 작업부하 평가 방법을 적용하였고, 지금까지 개발된 여러 가지 인지 모델 중에서도 인간의 인지과정을 가장 세부적으로 그리고 정량적으로 정확히 묘사할 수 있는 인정받고 있는 ACT-R로 작업부하를 측정하기로 하였다. Jo 등의 연구(2010)에 따르면 ACT-R로 수립된 모델 예측 결과가 NASA-TLX로 분석된 피실험자의 작업 부하와 높은 상관관계가 있음을 증명한 바 있다. 이들에 따르면 과제 수행에 주어진 가용시간 동안 그 과제를 수행하는 인지 모델의 자원이 얼마만큼의 시간 동안 사용되었는지를 산출하여 비교함으로써 정신적 작업부하를 예측하고자 하였다. 또한 인지 모델에서 이루어지는 활동과 정신적 작업부하와의 관계에 대해 다음과 같은 가정을 바탕으로 정신적 작업부하를 예측하는 수학적 방정식을 수립하였다.

가정 1 : 과제 수행을 위해 주어진 가용시간 동안 ACT-R 인지 모델의 각 모듈이 활동한 시간이 길수록 정신적 작업부하가 증가한다.

가정 2 : ACT-R 각 모듈의 인지적 기능 특성에 따라 정신적 작업부하에 미치는 영향이 다르다.

가정 3 : ACT-R 각 모듈 내에서 자원의 경합으로 인해 시간적 지연이 발생하거나 수행의 오류가 발생하면 정신적 작업부하가 높아진다.

위의 가정들은 인지 모델과 정신적 작업부하 간의 관계에 대한 기존의 연구에 근거한 것으로 가정 1, 가정 2와 관련된 기존의 연구는 Lebiere(2001), Wu and Liu(2007)의 연구 등이 있고, 가정 2, 가정 3와 관련하여 Salvucci and Taatgen(2008), Anderson (2007)의 연구가 존재한다. 특히 가정 1은 시간선분 모델에서와 같이 가용한 시간 동안 인지 모델의 각 모듈이 활동한 시간의 비율로 정신적 작업부하를 평가하는 개념을 포함하고 있으며, 가정 2와 3은 인지 모델을 구성하는 각각의 인지적 요소를 정신적 작업부하를 평가하기 위한 자원요소로 추가하기 위한 개념을 제공하고 있다.

위 가정을 바탕으로 ACT-R 인지 모델의 활동으로부터 정신적 작업부하를 평가하기 위해서는 먼저 ACT-R 인지 모델에서 각 모듈들이 언제 얼마나 활성화되는지를 알아야 한다. 미소 시간 dt 동안 ACT-R 모듈 i 가 활성화되는지를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$(IA)_i = A_i(t)dt \quad (1)$$

이 때 $(IA)_i$ 는 모듈 i 가 활성화된 시간을 나타내며 $A_i(t)$ 는 dt 동안 모듈 i 가 활성화되는지 여부를 결정하는 함수를 의미하며 활성화된 경우 1, 활성화되지 않은 경우 0을 나타낸다. 그리고 위 가정에 따라 미소시간 dt 에서의 순간 작업부하는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(IW)_i = [W_i \cdot (1 + E_i(t))] \cdot [A_i(t)dt/dt] \quad (2)$$

이 때 W_i 는 모듈 i 의 인지 기능적 특성에 따른 정신적 작업부하에 미치는 영향 정도를 나타내는 가중치이며($W_i \geq 1$), $E_i(t)$ 는 dt 동안 모듈 i 에 자원 경합이나 에러가 발생했는지를 나타내는 함수이다. 본 연구에서는 Jo and Myung의 연구(2012)를 바탕으로 ACT-R 모듈 중 지각-반응과 같은 단순한 절차와 관련된 visual, aural, manual, vocal 모듈의 가중치를 1, 행동 절차를 통제하는 중앙처리 기능을 수행하는 procedural, goal 모듈의 가중치를 2, 기억 저장과 인출 기능을 수행하는 imaginal, declarative 모듈의 가중치를 4로 선정하였으며, 가정 3에 따라 모듈 내 자원 경합이 발생하거나 기억 인출이 실패하는 등의 에러 가중치를 1로 선정하였다. 한편 과제 수행을 위해 주어진 가용시간을 T 라 했을 때 그 시간 동안 모듈 i 에 의해 유발된 누적 작업부하는 시간 간격 $[0, T]$ 동안 위의 식을 적분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\int_0^T (IW)_i dt = \int_0^T W_i \cdot (1 + E_i(t)) \cdot A_i(t) dt \quad (3)$$

그리고 ACT-R의 모든 모듈에 의해 유발된 누적 작업부하, $(AW)_{total}$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(AW)_{total} = \sum (AW) \quad (4)$$

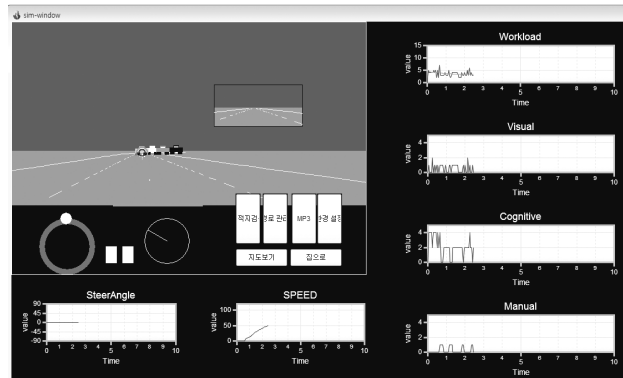


Figure 4. ACT-R Driving Model

ACT-R 인지 아키텍처를 이용하여 운전 환경에서의 작업 부하를 실시간으로 시각화한 모델은 <Figure 4>와 같으며 횡적 및 종적 제어를 수행하면서 내비게이션 메뉴에서 버튼을 조작하는 2차 과제를 동시에 수행한다. 이와 더불어 운전 모델이 실행되는 동안 총 작업부하와 모듈별 작업부하를 실시간으로 분석할 수 있어 인간의 운전 양상을 세분화하여 분석할 수 있다.

3. 모델 검증

ACT-R 인지 아키텍처를 기반으로 개발된 운전 모델이 실제 운전자의 수행시간과 인지부하를 잘 예측하고 있는지를 검증하기 위하여 다음과 같은 실험을 실시하였다.

3.1 피실험자

운전 수행에 영향을 줄 수 있는 신체 질환이 없으며 운전면허를 소지한 대학생 및 대학원생 15명이 실험에 참가하였다. 이들의 평균 연령은 28.2세이고 평균 운전 경력은 5.1년이었다.

3.2 실험

본 연구에서 개발된 운전 모델이 다양한 운전환경에서 서로 다른 2차 과제 수행을 모두 잘 예측할 수 있는지를 확인하기 위하여, 검증실험의 독립변수는 운전의 난이도와 2차 과제의 종류 두 가지로 선정되었다. 운전의 난이도는 도로 형태를 직선, 곡선의 2수준으로 구분하여 설정하였으며, 2차 과제는 정적 메뉴, 동적 메뉴, 목적지 검색, 주유소 찾기, 음악 곡명 검색 등 5가지 메뉴 선택과제로 구분하였다. 메뉴의 배치가 빈도수에 따라 달라지는 동적 메뉴의 경우 기존 정적 메뉴와 달리 선택된 상위 메뉴의 위치에 가장 빈번하게 선택되었던 하위 메뉴가 나타나는 메뉴 구조를 말하며 ACT-R로 사용성에 대해 검증되었던 과제(Kong et al., 2009; Min et al., 2010)이며, 나머지 세 가지 과제는 운전 시 자주 사용되는 기능을 선택, 적용하였다. 실험은 피실험자 내 실험(within-subject)으로 계획되어 피실

험자는 개인별로 10개의 과제를 수행하였고 피실험자가 과제의 반복으로 인해 학습하는 효과를 줄이기 위해서 과제 순서를 임의로 제시하였다.

한편 종속 변수는 (1) 2차 과제 수행 시간, (2) 운전과제와 2차 과제를 동시에 수행할 때 실험자의 주관적 인지부하 평가 값으로 선정하였다. 2차 과제 수행 시간은 운전 중 2차 과제 개시부터 종료 시점까지의 시간을 측정하였고 인지부하의 주관적 평가 값은 피실험자가 각 과제를 수행한 후 작성한 NASA-TLX 평가를 통해 측정하였다.

피실험자는 실험에 시작하기에 앞서 자유롭게 운전을 하여 핸들의 감이나 속도감 등을 느껴볼 수 있도록 하였고, 운전의 피로와 지루함을 고려하여 매 과제가 끝날 시에 적절한 휴식 시간이 주어졌다. 운전과 같은 과제의 경우 소홀히 수행할 경우 자칫 치명적인 사고와 이어질 수 있기 때문에 검증 실험을 함에 있어서 2차 과제를 수행하느라 1차 과제(운전)가 소홀하지 않도록 피실험자가 충분히 인지한 상태에서 실험을 진행하였으며 매 과제를 수행하기 전에 2차 과제, NASA-TLX 작성 방법(Yeh and Wickens, 1988)에 대한 충분한 설명이 제시되었다. 각 과제가 시작될 때 선행 차량과의 거리를 유지하도록 실험을 진행하였고 최대한 차선의 중앙에 차량을 위치하면서 운전하도록 하였다. 2차 과제 수행은 100m를 진행한 이후에 2차 과제를 수행하라는 구두 명령이 주어지면 그 시점부터 2차 과제를 수행할 수 있도록 하였다. 피실험자는 1차 과제인 운전을 최대한 유지하면서 여유가 생길 때마다 2차 과제를 수행하도록 숙지한 상태에서 운전 및 2차 과제를 수행하였다.

4. 결 과

4.1 수행시간

10가지 과제에 대한 운전 모델의 수행시간 예측 값과 피실험자 15명의 평균 과제 수행시간은 <Table 1>과 <Figure 5>에서 보는 바와 같다. Campbell and Bolton(2005)에 따르면, 인지 모델과 피실험자의 결과를 통계적으로 비교할 때 전통적인 가설 검정 방법은 적합하지 않다고 보면서 그 대안으로 인지 모델의 적합도를 고려해야 한다고 주장하였다. 이를 위해 모델과 피실험자의 결과 간 경향의 적합도를 산정하기 위해서 회귀분석을 통한 r^2 를 계산하였고 정확한 대응의 정도를 산정하기 위해서 RMSE(Root Mean Square Error)를 계산하였다. 그 결과 피실험자의 결과와 모델의 예측 값 사이의 추세($r^2 = 0.950$)와 편차(RMSE = 1.253)로 분석되어 모델이 피실험자의 결과를 정확히 반영함을 알 수 있다. 이러한 결과는 본 연구에서 개발된 운전자 모델이 실제 운전자의 운전 수행을 잘 예측할 수 있음을 의미한다.

4.2 작업부하

과제 수행시간 비교와 마찬가지로 과제에 대한 모델의 인지

Table 1. Comparison between Model and Empirical Data on Performance Time (sec)

| Task | | Model Prediction | Empirical Data |
|---|-----------------------|------------------|----------------|
| S T R A T I G H T | Static Menu | 8.421 | 7.44 |
| | Dynamic Menu | 4.231 | 5.72 |
| | Searching Destination | 16.971 | 19.23 |
| | Searching Gas Station | 8.208 | 10.51 |
| | MP3 Selection | 10.468 | 11.15 |
| C U R V E | Static Menu | 9.054 | 10.34 |
| | Dynamic Menu | 6.749 | 10.01 |
| | Searching Destination | 23.237 | 23.24 |
| | Searching Gas Station | 10.115 | 11.76 |
| | MP3 Selection | 12.395 | 14.29 |

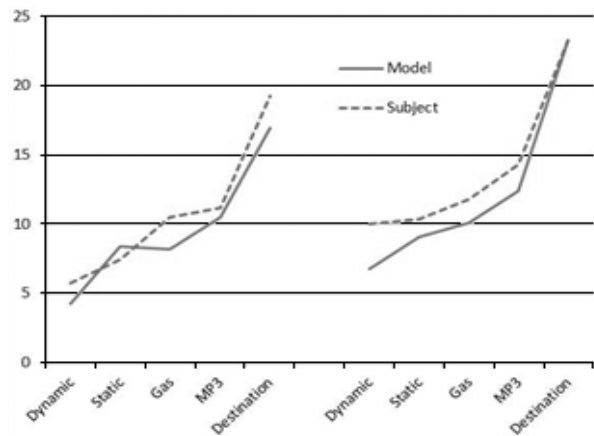


Figure 5. Comparison between Model and Empirical Data on Performance Time(sec)

부하 예측 값과 피실험자의 주관적 인지부하 평가 값 평균은 <Table 2>, <Figure 6>과 같다.

수행시간과 마찬가지로 운전 모델의 인지부하 예측 값이 주관적 인지부하 평가 값을 정확히 반영하고 있음($r^2 = 0.846$, RMSE = 6.837)을 확인할 수 있다. 한편, 과제 수행의 난이도가 높은 환경에서는 과제 수행자가 경험하는 주관적 인지부하가 더 높게 평가될 수도 있고(Salvucci and Taatgen, 2010) 직선 도로 주행 상황보다 곡선 주행 상황에서 피실험자가 느끼는 작업 부하가 모델에서 예측한 값보다 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 피실험자들이 직선 주행 상황보다 곡선 주행 상황에서 더 많은 노력을 기울여 수행도를 향상시키고자 하였기 때문이고 따라서 결과적으로 직선 상황보다 곡선 상황에서 수행시간은 적게 증가하였지만 주관적 작업부하 평가 값은 그보다 더 많이 증가한다. 이에 본 연구에서 모델과 피실험자의 인지부하 비교를 운전과제 수행이 용이한 직선 환경과 운전과제 수행이 더 어려운 곡선 환경을 분리하여 각각 회귀분석을 실시하였다. 그 결과 모델 예측 값이 주관적 인지부하 측정값을 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있었다($r^2_{직선} = 0.952$, $r^2_{곡선} = 0.982$).

Table 2. Comparison between Model and Empirical Data on Workload

| Task | | Model Prediction | Empirical Data |
|---|-----------------------|------------------|----------------|
| S T R A T I G H T | Static Menu | 20.1 | 20.2 |
| | Dynamic Menu | 11.4 | 13.3 |
| | Searching Destination | 45.0 | 38.0 |
| | Searching Gas Station | 20.2 | 21.9 |
| | MP3 Selection | 23.3 | 26.8 |
| C U R V E | Static Menu | 35.8 | 42.9 |
| | Dynamic Menu | 19.4 | 37.6 |
| | Searching Destination | 71.2 | 71.6 |
| | Searching Gas Station | 29.5 | 39.2 |
| | MP3 Selection | 36.0 | 43.5 |

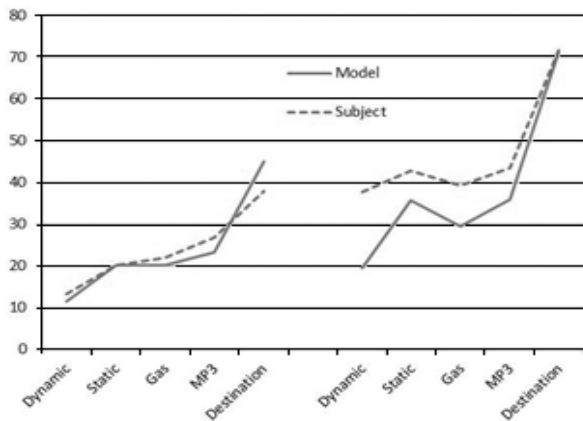


Figure 6. Comparison between Model and Empirical Data on Workload

5. 토 의

본 연구에서 개발된 ACT-R 운전 모델로부터 예측된 수행시간과 인지부하는 각각 피실험자의 과제 수행시간과 인지부하를 정확히 예측할 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나 <Table 1>과 <Table 2>에서 볼 수 있는 것처럼 대부분의 과제에서 모델의 수행시간과 인지부하가 피실험자의 수행시간과 인지부하보다 작은 값을 가지는 것으로 나타났다. 이는 스투드 인지 이론을 기반으로 한 ACT-R 운전 모델의 경우 피실험자와는 달리 운전과제와 2차 과제에 각각 명확하게 주의를 배분하고 전환하여 과제를 수행할 수 있도록 모델링된 반면, 피실험자는 운전과제와 2차 과제를 동시에 수행할 수 있을 정도로 충분히 숙달되지 않은 상태였기 때문에 두 과제에 교대로 주의를 배분하고 전환하는 것이 원활히 이루어지지 않았기 때문으로 분석된다. 실제로 피실험자는 2차 과제를 수행할 수 있는 충분한 거리를 유지하고 있음에도 불구하고 운전을 지속하거나, 2차 과제에 몰입하여 운전을 소홀히 하는 운전 양상을 보임으로써 수행시간이 증가하였고 이에 따라 피실험자의 운전 부하도 증

가하였다.

한편, 2차 과제가 시각적 탐색과 손의 움직임의 조합으로 구성된 과제였기 때문에 운전과제에 요구되는 시각적 자원과 중복되는 현상이 발생했다. 즉, ACT-R 인지 아키텍처의 vision 모듈에서 운전을 위해 근접 지점과 원거리 지점으로 시각적 주의를 이동하는 생산 규칙이 실행되다가 운전이 안정적인 경우 2차 과제 수행을 위해 시각적 주의를 이동하는 생산 규칙이 실행되기 때문에 운전 과제와 2차 과제의 수행이 병렬적으로 일어날 수 없고 두 가지 생산 규칙이 순차적으로 일어난다. 이와 마찬가지로 ACT-R의 manual 모듈에서 운전 과제를 위한 손의 움직임과 2차 과제의 수행을 위한 손의 움직임이 모듈 안에서 중복되기 때문에 병렬적으로 수행될 수 없고 순차적으로 처리될 수밖에 없다. 그러나 ACT-R은 모듈 간에는 병렬적인 정보처리가 가능하기 때문에 만약 2차 과제가 시각적인 주의 자원이 아닌 청각적인 주의 자원(aural module)을 요구하거나 2차 과제 수행을 위한 행동이 손의 움직임이 아닌 음성적인 형태(vocal module)로 이루어진다면 운전과제를 위한 시각적(vision module)이고 손의 움직임을 요구하는 자원(manual module)과 병렬적으로 처리될 수 있을 것이다. 따라서 2차 과제가 시각적 자원을 요구하지 않는 경우 또는 청각적 자원을 요구하는 경우에는 2차 과제의 수행도가 증가되는 효과를 얻을 것으로 기대된다(Salvucci and Taatgen, 2010).

6. 결 론

본 연구에서는 운전 중 HVI 조작 과제를 수행하는 운전자의 행동을 ACT-R 인지 아키텍처를 이용하여 모델링하고 운전자의 과제 수행시간과 인지부하를 예측하였다. 개발된 ACT-R 운전 모델은 실제 운전자의 수행시간과 주관적 인지부하를 잘 예측할 수 있었으며, 이를 통해 모델이 피실험자의 행동을 정확히 묘사하고 있다고 볼 수 있다. 또한 모델과 피실험자 모두 2차 과제 완료를 위한 수행시간이 길어질수록 인지부하도 증가하는 것으로 나타났다.

이를 통해 본 연구에서 개발된 ACT-R 운전 모델을 HVI 조작 과제가 운전과제 수행에 미치는 영향을 평가하는데 적절히 활용할 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

Anderson, J. R. (2007), *How Can the Human Mind Occur in the Physical Universe?*, Oxford University Press, Oxford.
 Bardaouf, D., Burgard, E., and Wittmann, M. (2009), Time Perception as a Workload Measure in Simulated Car Driving, *Applied Ergonomics*, 40(5), 929-935.
 Briem, V. and Hedman, L. R. (1995), Behavioral Effects of Mobile Telephone Use during Simulated Driving, *Ergonomics*, 38(12), 2536-2562.

- Collet, C., Clarion, A., Morel, M., Chapon, A., and Petit, C. (2009), Physiological and Behavioural Changes Associated to the Management of Secondary Tasks while Driving, *Applied Ergonomics*, 40(6), 1041-1046.
- Fuller, H. J. A., Reed, M. P., and Liu, Y. (2010), Integrating Physical and Cognitive Human Models to Represent Driving Behavior, *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, 54, 1042-1046.
- Campbell, G. E. and Bolton, A. E. (2005), HBR Validation : Integrating Lessons Learned from Multiple Academic Disciplines, Applied Communities and the AMBR Project, In *Modeling Human Behavior with Integrated Cognitive Architectures : Comparison, Evaluation, and Validation*, R. W. Pew and K. Gluck, Eds. Lawrence Erlbaum.
- Hart, S. and Staveland, L. (1988), Development of NASA-TLX Results of Empirical and Theoretical Research, *Human Mental Workload*, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, 139-183.
- Jo, S., Myung, R., and Yoon, D. (2012), Quantitative Prediction of Mental Workload with the ACT-R Cognitive Architecture, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 42(4).
- Jo, S., Myung, R., and Yoon, D. (2010), A Proposed Methodology for the Theory-Based Prediction of Mental Workload with a Cognitive Architecture, *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, 54, 1941-1945.
- Kong, B. D., Min, J. S., and Myung, R. (2009), Menu Design for Touch Screen Interfaces, *Human Factors and Ergonomics Society, 53rd Annual Meeting Proceedings*, 53(15), 950-954.
- Lebiere, C. (2001), A Theory Based Model of Cognitive Workload and Its Applications, In *Proceedings of the 2001 Interservice/Industry Training, Simulation and Education Conference*, Arlington, VA : NDIA, USA.
- Lysaght, R. J., Hill, S. G., Dick, A. O., Plamondon, B. D., and Linton, P. M. (1989), Operator Workload : Comprehensive Review and Evaluation of Operator Workload Methodologies, *Army Research Institute for the Social Sciences*.
- Ma, R. and Kaber, D. B. (2005), Situation Awareness and Workload in Driving while using Adaptive Cruise Control and a Cell Phone, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(10), 939-953.
- Michon, J. A. (1985), A Critical View of Driver Behavior Models: What Do We Know, What Should We Do, *Human Behavior and Traffic Safety*, Plenum Press, New York, 485-520.
- Min, J. S., Jo, S. S., and Myung, R. (2010), Prediction of Menu Selection on Touch-screen using a Cognitive Architecture : ACT-R, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 29(6), 907-914.
- Mitchell, D. (2000), Mental Workload and ARL Workload Modeling Tools, *Army Research Laboratory*.
- Pauzie, A. (2008), Evaluating Driver Mental Workload using Driving Activity Load Index (DALI), *European Conference on Human Centered Design for Intelligent Transport Systems*, Lyon, 67-77.
- Recarte, M. and Nunes, L. (2003), Mental Workload While Driving : Effects on Visual Search, Discrimination, and Decision Making, *Journal of Experimental Psychology : Applied*, 9(2), 119-137.
- Ryu, K. and Myung, R. (2005), Evaluation of Mental Workload with a Combined Measure Based on Physiological Indices during a Dual Task of Tracking and Mental Arithmetic, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35, 991-1009.
- Salvucci, D. D. (2001), Predicting the Effects of In-Car Interface Use on Driver Performance : An Integrated Model Approach, *Journal of Human-Computer Studies*, 55, 85-107.
- Salvucci, D. D. (2006), Modeling Driver Behavior in a Cognitive Architecture, *Human Factors*, 48(2), 362-380.
- Salvucci, D. D. and Gray, R. (2004), A Two-Point Visual Control Model of Steering, *Perception*, 33, 1233-1248.
- Salvucci, D. D. and Macuga, K. L. (2002), Predicting the Effects of Cellular-Phone Dialing on Driver Performance, *Cognitive Systems Research*, 3, 95-102.
- Salvucci, D. D., Markley, D., Zuber, M., and Brumby, D. P. (2007), iPod Distraction: Effects of Portable Music-Player Use on Driver Performance, In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*.
- Salvucci, D. D. and Taatgen, N. A. (2008), Threaded Cognition : An Integrated Theory of Concurrent Multitasking, *Psychological Review*, 115, 101-130.
- Salvucci, D. D. and Taatgen, N. A. (2010), *The Multitasking Mind*, Oxford University Press.
- Sayer, J. R., Devonshire, J. M., and Flannagan, C. A. (2005), The Effects of Secondary Tasks on Naturalistic Driving Performance, *University of Michigan Transportation Research Institute*.
- Siewiorek, D., Smailagic, A., and Hornyak, M. (2002), Multimodal Contextual Car-Driver Interface, In *Proceedings of Multimodal Interfaces*, 367-373.
- Wu, C. and Liu, Y. (2007), Queuing Network Modeling of Driver Workload and Performance, *Intelligent Transportation System*, 8(3), 528-537.
- Yeh, Y. and Wickens, C. D. (1988), Dissociation of Performance and Subjective Measures of Workload, *Human Factors*, 30(1), 111-120.



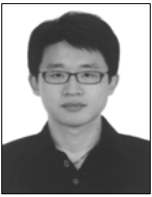
임수용

고려대학교 산업시스템정보공학과 학사
현재 : 고려대학교 산업경영공학과 석사과정
관심분야 : 인지모델링, 인지공학



명노해

고려대학교 산업공학과 학사
M.S in Industrial and Management Systems
Engineering, University of Nebrasaka
Ph.D. in Industrial Engineering, Texas Tech
University
현재 : 고려대학교 산업경영공학과 교수
관심분야 : 인간공학



홍기범

고려대학교 산업공학과 학사
KAIST 산업공학과 석사
KAIST 산업공학과 박사
현재 : 현대자동차 인간편의연구팀
책임연구원
관심분야 : Gesture UI, 생체신호, 운전자 주의
분산