

3-수준 자율주행에서 고령운전자의 제어권 인수와 장애물 충돌 회피에서의 주관적 작업부하에 대한 주의분산과 도로혼잡도 효과*

이 재 식[†]

운전 시뮬레이션을 사용하여 차량 전방의 장애물 출현으로 인해 제어권 인수가 요구되는 3-수준 자율주행 상황에서 운전자의 주의분산 및 도로혼잡도 조건에 따른 제어권 인수시간 (takeover time: TOT)과 장애물 회피에 대한 정신적, 신체적 작업부하에서의 차이를 비교하였다. 실험참가자들은 연령대에 따라 20대의 청년운전자 집단과 65세 이상의 고령운전자 집단으로 구분하였다. 주의분산은 자율주행 중 운전과 직접적으로 관련없는 과제(non-driving task: NDT)의 수행으로 유도되었고, 도로혼잡도 조건은 실험참가자 차량 주변의 차량 대수를 달리 하여 조작하였다. 본 연구의 주요 결과와 시사점은 다음과 같다. 첫째, 자율주행 중의 NDT 미수행 조건에 비해 수행 조건에서, 그리고 한산도로보다는 혼잡도로에서 실험참가자들의 TOT가 유의하게 지체되었고, 제어권 인수 이후 장애물 회피 과정에서 경험하는 정신적, 신체적 작업부하의 수준도 유의하게 더 높았다. 둘째, 특히 이러한 경향은 청년운전자 집단에 비해 고령운전자 집단에서 더 뚜렷하였다. 이러한 결과는 혼잡한 도로에서 주의가 시각적, 청각적으로 분산될 경우 고령운전자 집단은 차량 전방의 장애물에 대한 안전하고 효과적인 회피 수행에서 어려움이 더 증가할 수 있다는 것을 시사한다.

주요어 : 고령운전자, 3-수준 자율주행, 제어권 전환, 주의분산, 도로혼잡도

* 이 논문은 이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

† 교신저자: 이재식, 부산대학교 심리학과 교수, (46241)부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2

E-mail : jslee100@pusan.ac.kr, TEL : 051-510-2131

 Copyright ©2025, The Korean Psychological Association of Culture and Social Issues
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License
(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

최근 들어 우리 사회의 중요한 사회문제 중 하나는 고령운전자에 의한 교통사고율 및 교통사고 사망률에서의 급격한 증가이다. 물론 교통사고에 영향을 미치는 요인들은 매우 다양하지만 운전과제수행의 결과 교통 사고율에 가장 직접적으로 영향을 미치는 주요한 요인 중 하나는 운전자의 연령, 구체적으로 말하면 운전자의 연령증가에 따른 운전수행 역량에서의 저하이다(이재식, 2022; 고예슬 & 이재식, 2023; 이재식, 2024; McCarty & Kim, 2024). 운전자의 연령증가는 안전하고 효율적인 차량통제에 영향을 미치는 정보처리의 거의 모든 단계에서 저하를 가져오는 것으로 보고되고 있다. 구체적으로, 고령운전자는 야간시력(Xu et al., 2023)을 비롯하여 운전환경에서 제시되는 정적요소 및 동적요소에 대한 시각 민감성(Jones et al., 2022), 운전자의 시야 범위를 결정하는 가용시각장(Wood, 2022), 주의범위 및 주의전환을 포함한 주의 능력(Ortiz-Peregrina et al., 2020), 운전상황에 대한 일시적 정보파지에 필수적인 작업기억 능력(Urlings et al., 2018), 그리고 신속하고 정확한 반응실행에 요구되는 단순반응 및 선택반응 능력(Caird et al., 2018) 등의 거의 모든 측면에서 저하를 보인다. 특히 다양한 정보처리 단계들에서의 저하가 복합적으로 작용할 경우 운전과제수행에서의 심각한 수행 손상 가능성은 증폭될 수 있다 (Depestele et al., 2020). 도로교통공단의 교통사고 통계자료(한국도로교통공단, 2024)에 따르면 만 65세 이상 고령운전자의 사고 건수는 2023년 39,614건으로 전체 교통사고수의 20.0%를 차지하였고, 사망자수와 부상자수도 각각 745명(전체 사망자수의 29.2%)과 56,067명(전체 부상자수의 19.8%)이었다. 특히 이러한 고령운전자의 교통사고율, 사망자 비율 및

부상자 비율 모두는 다른 연령대의 운전자들과 비교하여 가장 높은 비율이다.

고령운전자들은 운전과제수행에서 필수적으로 요구되는 다양한 정보처리 요소들에서의 저하, 그리고 이로 인한 높은 수준의 교통사고 빈도 및 교통사고에 대처하기 위하여 일종의 자기-조절적 운전 방략을 취한다(Gwyther & Holland, 2012; Liu et al., 2024a). 예를 들어, 고령운전자들은 운전빈도를 줄이거나, 운전속도를 낮추어 운전하거나, 혹은 운전하기 어려운 운전조건(야간 운전, 상습정체 구간이나 주변 차량이 많은 도로, 또는 친숙하지 않은 지점에서의 운전, 악천후에서의 운전 등)에서는 운전을 자제하는 등 운전행동 방식을 조절하는 경향이 있다(Ball et al., 1998). 이러한 고령운전자의 자기-조절적 운전수행 방략은 고령운전자의 교통사고 감소에는 긍정적 영향을 미칠 수 있다. 그러나 자기-조절적 운전수행 방략을 취한다는 것은 고령운전자의 차량을 이용한 이동성을 낮춘다는 것을 의미하는 것일 수도 있다. 많은 연구들은 고령운전자의 차량을 이용한 이동성에서의 감소는 고령운전자의 사회적 상호작용(Fonda et al., 2001), 독립성(Martin et al., 2011), 자아 존중감(Carp, 1988)을 저하시키고 나아가 주관적 안녕감을 포함한 삶의 질에도 영향을 미칠 수 있다는 것을 보고하였다 (이재식 등, 2015; 정지은, 박지선, 2022; 주미정, 이재식, 2016; Yang & Lee, 2021).

고령운전자 집단을 포함하여 다양한 연령대의 운전자가 경험할 수 있는 운전과제수행에서의 부담 경감은 물론 운전과제를 좀 더 용이하고 안전하며 효율적으로 수행할 수 있도록 하기 위해 자율주행 차량(Automated Vehicle: AV)이 최근 들어 많이 보급되고 있다. 실제로, 운전자-보조 시스템(advanced driver-assistance

system: ADAS)의 개발 및 적용은 이미 오래 전에 시작되었고 그 유형도 다양하다(Maharajpet & Roy, 2024). 자동차 스스로 목적지까지 운전하여 이동할 수 있는 AV는 고령운전자의 이동성 확보와 관련하여 가장 적극적으로 고려되어야 하는 대안이 될 수 있다(Zandieh & Acheampong, 2021). 실제로 우리나라에서는 2020년에 '자율주행자동차 상용화 촉진 및 지원에 관한 법률'이 제정되어 AV에 대한 개발 촉진과 상용화 지원을 위한 근거를 마련하였다. 특히 고령운전자의 교통사고 감소를 위해 운전면허 자진 반납제도나 면허갱신 및 교육 강화와 같은 제도를 시행함과 동시에 자율주행 기반의 모빌리티 서비스(예를 들어, 로보택시나 자율주행 셔틀 등)를 강화하고 있다는 점도 주목된다.

AV의 자동화 수준을 구분하는 방식은 다양하지만 미국 도로교통안전국(NHTSA, 2013)의 기준에 따르면 AV가 얼마나 차량을 통제하는지에 따라 5단계의 수준으로 구분된다. 이 중에서 3-수준 자율주행은 차량 전방의 장애물을 출현과 같이 긴급한 상황에서만 AV로부터의 제어권 인수 요청에 의해 운전자가 차량통제에 개입한다. 이 때문에 AV가 제어권을 갖고 있을 때 운전자는 차량 전방의 운전상황을 항상 주시할 필요가 없고 필요한 경우 차량통제와 직접 관련없는 활동, 예를 들어, 주행 중 차량 안에서 휴대전화를 사용하거나 테블릿 PC로 동영상을 시청하거나 혹은 책을 읽는 등의 활동을 할 수 있다. 운전과 직접적으로 관련이 없는 과제를 비운전 과제(non-driving task: NDT) 또는 비운전-관련 과제(non-driving related task: NDRT)라 부른다. 4-수준 자율주행은 주행의 전 과정에서 AV가 주행 전체를 담당한다.

본 연구에서는 3-수준 자율주행에 초점을 맞춘다. 3-수준 자율주행은 운전자가 항상 차량을 통제하거나 도로 전방을 주시하지 않아도 되지만 상황에 따라 제어권을 인수받아 수동으로 운전해야 하기 때문에 AV와 운전자 사이의 원활한 상호작용을 위해서는 제어권 전환 즉, AV가 운전자에게 제어권을 인수받도록 하거나 운전자가 AV에 제어권을 이양한다. AV로부터 제어권 인수 요청이 제시되는 경우는 AV가 스스로 차량을 통제하기 어려운 상황, 예를 들어 차량 전방에 장애물이 출현하여 이를 회피해야 하는 일종의 긴급상황에서 주어진다. 따라서 이러한 상황에서 운전자는 제어권을 인수받아 수동운전으로 전환하여 장애물을 직접 회피해야 한다. 이때 운전자가 얼마나 신속하게 제어권을 인수받는지는 장애물 회피에서의 인지적, 신체적 부담 수준 혹은 장애물 회피 수행의 질을 결정하는 중요한 요소가 된다(Wu et al., 2022). 이러한 특징을 고려하여 본 연구에서는 운전자의 제어권 인수시간(takeover time: TOT)을 주요 종속측정치로 선택하고 실험조건들에 걸쳐 관찰되는 TOT를 비교하였다.

운전자의 제어권 인수 수행(특히, TOT), 그리고 제어권 인수 이후의 차량통제의 질을 결정짓는 것에는 제어권 전환 정보의 제시 방식이나 제어권 인수를 위한 시스템 조작 방식 등을 비롯한 기술적 측면 뿐만 아니라 운전자 연령을 포함한 운전자 요인, 그리고 도로혼잡도 등을 포함한 주행 차량 주변의 환경적 요인 등이 복합적으로 작용할 것이다. 특히, 운전자의 운전수행 부담을 경감시켜주고 안전하고 효율적인 운전수행을 보조하기 위해 보급되고 있는 AV는 고령운전자가 경험할 수 있는 운전수행에서의 어려움과 교통사고 가능성

을 줄여줄 수 있기 때문에 고령운전자의 차량을 이용한 이동성 확보에 도움을 줄 수 있다 (Hartwich et al., 2021). 그럼에도 불구하고 고령운전자에 초점을 맞추어 자율주행 상황에서 고령운전자가 보이는 AV와의 상호작용 특성과 차량통제 수행을 검토한 연구들은 지금까지 많이 보고되고 있지 않은 것으로 보인다 (Gasne et al., 2022; Peng & Iwaki, 2020). 아래에서는 AV와 운전자 사이의 상호작용에 영향을 미치는 다양한 변인들 중 본 연구에서 고려된 변인들인 주의분산과 도로혼잡도에 대한 기존 연구들을 고령운전자에 초점을 맞추어 개관하였다.

자율주행과 주의분산

앞에서도 언급하였듯이, 3-수준 자율주행 상황에서 운전자는 항상 차량 전방을 주시할 필요가 없기 때문에 NDT 수행에 주의를 집중할 수 있다 (Zeeb et al., 2016). 그러나 운전자가 차량 전방에 주의를 집중하거나 직접 운전과제를 수행하지 않는 상황이라 하더라도 NDT 수행은 그 자체로 TOT를 지연시킬 수 있고, 운전자의 정신적, 신체적 부담을 증가시킬 수 있으며, 또한 제어권 인수 이후의 수동 운전수행도 저하시킬 수 있다. 특히 운전과제 수행에 기초가 되는 다양한 정보처리 단계에서 저하를 보이는 고령운전자의 경우라면 자율주행 중의 NDT 수행에 의해 AV와의 상호작용에서 더 저하된 수행을 보일 수 있을 것이다.

실제로 고령운전자의 자율주행 중 NDT 수행은 고령운전자의 주의전환, 상황인식, 제어권 인수 이후의 차량통제, 나아가 AV에 대한 신뢰에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

Khan et al. (2021)은 고령운전자가 NDT에 주의를 집중할 경우 차량 전방으로의 주의전환에 요구되는 시간이 젊은 운전자보다 유의하게 길어진다는 것을 발견하였다. 이러한 결과는 장애물 출현에 따른 긴급상황에서의 회피반응 시간을 지연시켜 사고 가능성을 높이는 결과를 초래할 수 있다는 것을 시사한다. 또한 Pan et al. (2024)는 고령운전자가 NDT에 집중하는 경우 주변 교통상황이나 차량의 주행 상태에 대한 상황인식이 저하된다는 것을 관찰하였고, Ding et al. (2024)은 고령운전자가 NDT 수행 중 운전 개입을 갑작스럽게 요구받는 상황에서는 심리적 불안감이 발생하고 AV에 대한 신뢰가 감소한다는 것을 보고하였다.

고령운전자의 자율주행 중 NDT 수행이 안전운전에 미치는 영향 중 가장 일차적인 측면은 아마도 NDT 수행에 의해 제어권 인수가 지연될 수 있다는 점일 것이다. 장애물 출현 등에 의한 긴박한 상황에서 제어권 인수가 지체된다는 것은 장애물에 대한 회피 반응이 늦어질 수 있다는 것을 의미하고 이것은 결국 장애물과의 충돌로 이어질 가능성이 높다. Peng et al. (2022)은 일본 고령운전자들을 대상으로 NDT 수행 여부가 TOT에 미치는 효과를 검토하였는데, 그 결과 고령운전자 집단은 청년운전자 집단에 비해 NDT를 수행하는 조건에서의 TOT가 NDT를 수행하지 않은 조건에 비해 유의하게 더 길다는 것을 발견하였다. 본 연구에서도 우리나라 고령운전들을 대상으로 차량 전방의 장애물 출현에 의한 긴급한 상황에서 제어권 인수 요청에 대한 고령운전자의 TOT를 청년운전자 집단과 비교하고자 한다.

자율주행과 도로혼잡도

운전자의 운전과제수행을 검토하기 위해 가장 많이 채택되는 변인 중 하나가 도로 조건, 구체적으로 도로의 곡률로 정의되는 도로형태나 운전자 차량 주변의 교통량(차량 대수)으로 정의되는 도로혼잡도이다. 도로 조건은 도로 환경에 대한 운전자의 정보처리뿐만 아니라 차량제어를 위한 신체적 부담 수준에 영향을 미치는 중요한 요소이다(Radlmayr et al., 2014). 본 연구에서는 도로 조건의 영향을 검토하기 위한 독립변인으로 도로혼잡도를 사용하였다. 일반적으로 도로혼잡도가 증가할수록 운전자의 차량통제는 저조해지고(Onate-Vega et al., 2020), 주관적 작업부하의 수준은 증가하며 (Pennetti, et al., 2019), 도로 환경에 대한 상황 인식은 감소한다(Park et al., 2022). 도로혼잡도는 AV와 운전자 사이의 상호작용에도 영향을 미친다. Radlmayr et al.(2014)은 3-수준 자율주행 조건에서 주행할 때 운전자 차량 주변의 차량 수가 적은 한산도로에 비해 교통량이 많은 혼잡도로에서 TOT가 상대적으로 더 느려진다는 것을 발견하였고, Gold et al.(2016)은 운전자의 차량 주변의 도로혼잡도가 증가함에 따라 TOT에서의 증가는 물론 제어권 인수 이후의 수동운전에서 선행 차량과의 차간거리를 일정하게 유지하는 수행에서 저하가 발생하다는 것을 보고하였다.

앞에서 고령운전자에 초점을 맞추어 AV와의 상호작용을 검토한 연구가 많이 없다고 언급한 바 있으나 이러한 연구 맥락에서 도로혼잡도를 독립변인으로 채택한 연구는 더 드문 것으로 보인다. 다만, Körber et al.(2016)의 연구에서는 28세 이하의 젊은 운전자 집단과 60세 이상의 고령운전자 집단을 대상으로 도로

혼잡도에 따른 TOT와 운전수행에서의 차이를 비교하였는데, 그 결과 고령운전자 집단은 혼잡도로에서 청년운전자 집단에 비해 TOT가 유의하게 더 느렸고, 브레이크 입력 및 선행 차량과의 차량거리 유지에서 상대적으로 더 불안정적인 수행을 보인다고 보고하였다. 이와 유사하게 Peng과 Iwaki(2020)의 연구에서도 고령운전자 집단은 청년운전자 집단에 비해 혼잡도로에서 TOT와 운전수행에서 상대적으로 더 저조한 수행이 관찰되었다. 본 연구에서는 차량 전방의 장애물 출현으로 제어권 인수가 요구되는 3-수준 자율주행 상황을 운전 시뮬레이션을 통해 모사한 후 서로 다른 연령 대의 운전자 집단(청년운전자 집단 vs. 고령운전자 집단)이 주의분산 여부(NDT 미수행 vs. NDT 수행) 및 도로혼잡도 조건(한산도로 vs. 혼잡도로)에 따라 보이는 TOT와 장애물 회피 과정에서 경험하는 주관적 작업부하에서의 차이를 비교하였다.

방법

연구 참여자

OO대학교 교내 게시판, 온라인 홈페이지 게시판, 온라인 커뮤니티, OO시 노인 일자리 센터에서 운전 경력 1년 이상이고 유효한 운전면허증을 소지한 운전자들을 실험참가자로 모집하였다. 실험참가자 중 청년운전자는 27명이었고, 고령운전자는 29명이었다. 청년운전자 집단의 평균 연령은 24.15세($SD=2.65$), 평균 운전경력은 2.96년($SD=1.76$)이었고, 고령운전자 집단의 경우 평균 연령은 67.55세($SD=2.24$), 평균 운전경력은 27.52년($SD=7.85$)이었다. 모든

실험참가자들에 대해 본 연구에서 요구하는 운전 시뮬레이션 과제들을 수행하는데 특별한 문제가 없는 적정한 수준의 신체적, 인지적 능력을 갖고 있음을 확인하였다. 실험참가자들은 실험 실시 이전에 실험 절차에 대한 안내를 받았고 실험 참가에 대한 서면동의서를 작성한 후 연구에 참여하였다.

실험장치 및 도구

운전 시뮬레이터

본 연구에서 사용된 운전 시뮬레이터는 고정형 운전 시뮬레이터였다. 운전 시뮬레이션을 운용하기 위한 소프트웨어로 Forum 8 UC-win/Road(ver. 14)을 사용하였다. 운전 장면은 좌우 방향으로 연결된 해상도 1360 x 768 인 50인치 모니터 3대를 통해 제시하였고 운전장면이 제공하는 시야각은 약 120°였다. 중앙 모니터의 하단에 위치한 사운드바 스피커를 통해 운전상황에서 발생하는 소리와 제어권 전환 정보를 제시하였다. 시뮬레이터 차량의 통제 및 제어권 전환을 위해 Logitech사의 G29 조이스틱이 사용되었다. 이 장치를 통해 제어권 전환이 이루어졌는데 제어권 인수와 이양을 포함하는 제어권 전환이 요청되면 실험참가자들은 스티어링 휠의 좌측에 부착된 버튼을 이용하여 제어권을 인수받거나 이양하였다. 운전 시뮬레이션을 구현하는 PC의 사양은 CPU i7-4790였고, NVIDIA Geforce GTX770 그래픽카드를 통해 운전 장면이 제시되었다.

주의분산: 비운전과제의 수행

본 연구에서는 AV가 차량에 대한 제어권을 갖고 스스로 주행하는 상황에서 운전자의 주의를 분산시키기 위해 시각적, 청각적 주의의

할당이 모두 요구되는 NDT를 수행하도록 요구하였다. 구체적으로, 스티어링 휠 우측에 위치한 태블릿 PC의 4-분할 화면에 4 가지 종류의 동물들이 서로 다른 수로 각각 제시되었고 스피커를 통해 특정 동물의 명칭이 제시되면 실험참가자는 그 동물이 몇 마리인지 세어 구두로 응답하는 방식이었다. 동물의 종류는 총 8가지(고양이, 기린, 사자, 말, 닭, 개, 양, 곱) 였고, 각 동물의 마릿수는 1 ~ 5마리 사이였다. 제시되는 동물의 종류, 동물의 마릿수 및 표적 동물은 모두 무선적으로 배정하였다. NDT는 무선으로 연결된 노트북과 태블릿 PC를 사용하여 실험자가 태블릿 PC를 원격으로 제어하는 방식으로 제시하였다. NDT는 자율 주행 차량 전방에 위험요소가 출현하기 이전 까지 반복적으로 요구되었다. 일반적인 자율 주행 상황에서 운전자는 메시지 보내기나 전자기기 화면 터치 등과 같이 손을 스티어링 휠에 위치하지 않고 NDT를 수행하는 경우가 많을 것이다. 그리고 본 연구에서 중요하게 살펴보고자 하는 TOT에는 제어권 인수 버튼을 누르기 직전에 운전자의 손이 어디에 위치하고 있었는지가 많은 영향을 미칠 수 있을 것이다. 본 연구에서는 NDT 수행에 손의 사용이 요구되지는 않았지만 제어권을 인수받기 이전의 실험참가자 손 위치를 동질적으로 통제할 필요가 있었기 때문에 본 연구에서는 실험참가자가 NDT를 수행하는 동안 손을 무릎 위에 위치하도록 하였다.

도로혼잡도

본 연구에서 도로혼잡도는 운전자 차량 주변에서 주행하는 차량의 수를 달리하여 조작되었다. 즉, 비혼잡 도로 조건에서는 실험참가자 차량 주변의 차량을 제시하지 않았던 반면

혼잡도로에서는 실험참가자 차량 반경 1km 이내에 20대의 차량이 주행하도록 하였다. 실험 전반에 걸쳐 3차선의 완만한 S자 형태의 도로가 제시되었고, 각 실험조건에서 운전자가 주행해야 하는 도로의 길이는 대략 4000m였다. 주변 차량에 의해 실험참가자의 차량통제가 영향을 받을 수 있는 가능성을 배제하기 위하여 실험차가자들은 3차선 도로 중 2차선에서 주행하도록 한 반면, 실험참가자 주변 차량들은 3차선 도로 중 1차선과 3차선에서만 주행하도록 프로그램을 설정하였다. 또한 자율주행 상황에서의 차량의 주행속도가 60km/h로 설정되었고, 마찬가지로 수동운전 상황에서도 실험참가자들에게 60km/h의 운전속도를 유지하면서 주행하도록 지시하였기 때문에 주변 차량들이 실험참가자 차량을 일정한 속도로 앞서가며 주행하도록 주변 차량들의 주행속도는 65km/h로 설정하되 주변 차량들 사이의 차간거리는 약간씩 차이가 나도록 설정하였다.

절차 및 운전 시나리오

모든 실험참가자는 실험을 시작하기에 앞서 실험의 배경, 목적, 주의사항에 대한 안내를 받고 운전경력을 포함한 연구에 필요한 개인정보 및 실험 동의서를 작성하였다. 그 다음, 실험에서 제시될 운전 시나리오와 과제수행 방식에 대한 정보를 제공하였는데 제어권 전환 방법과 NDT 수행 방법은 화면을 통해 시각적 예시와 함께 설명하였다. 과제수행 방식에 대한 설명이 끝난 후에는 실험참가자가 운전 시뮬레이터 조작과 제어권 전환 및 NDT 수행에 익숙해질 수 있도록 연습주행을 실시하였다. 연습시행이 종료된 후 필요할 경우 추가 질문과 대답 과정이 추가되었다.

모든 주행은 수동운전으로 시작하였고, 300m의 주행 이후에 제어권 이양 요청 알림이 제공되면 실험참가자는 미리 지시된 절차에 따라 지정된 버튼을 눌러 자율주행으로 전환하였다. 자율주행 시작과 함께 NDT 수행이 요구되었다. 실험참가자가 NDT를 수행하고 있는 도중에 실험참가자의 주행 차선(2차선) 전방에 장애물이 나타나면 제어권 인수 요청 알림이 제공되었다. 제어권 인수 요청 시간과 관련하여 Gold et al.(2016)은 운전자가 주의가 분산되는 경우라면 차량이 장애물과 충돌까지의 소요시간(time-to-collision: TTC)을 기준으로 TTC가 7초 이상 되어야 한다고 밝힌 바 있다. 본 연구에서는 실험참가자들의 주의를 분산시키는 절차가 포함되어 있고 또한 실험참가자들의 장애물 회피 반응을 좀 더 민감하게 살펴볼 필요가 있었기 때문에 본 연구에서의 제어권 인수 요청 제시 시점은 TTC를 기준으로 7초로 하였다. 장애물의 유형에는 2차선 위에 멈춰 서 있는 구급차, 사고로 서 있는 자동차, 흙더미, 그리고 도로 공사 현장 등이 포함되었다. 제어권 인수 요청 알림이 제시되면 실험참가자는 빠르고 정확하게 미리 지정된 버튼을 누르도록 지시받았다(제어권 인수를 위한 버튼은 제어권 이양을 위한 버튼과 동일한 버튼이 사용되었다).

실험참가자는 제어권 인수 요청에 따라 제어권을 인수받은 후, 직접 수동으로 운전하여 2차선 상에 제시된 장애물을 안전하게 회피하도록 지시받았다. 차선을 변경하여 장애물을 회피한 이후에는 지정된 주행 차선이었던 2차선으로 복귀하도록 하였다. 2차선으로 복귀한 뒤 대략 150m의 주행 이후에 제어권을 이양하라는 알림이 제공되면 피험자는 버튼을 눌러 자율주행으로 전환하였다. 제어권 인수 및

이양 요청 알림은 시각과 청각 정보를 모두 사용하여 동시에 제공되었다. 시각적으로는 운전 화면 상단에 '별표 버튼을 눌러 수동운전(혹은 자율주행)으로 전환하세요.'라는 문구를 표시하였고, 청각적으로는 '띵동'음 이후에 '수동운전(자율주행)으로 전환하세요.'라는 음성을이 제시하였다. NDT 수행 여부(2수준: 수행 vs. 미수행)와 도로혼잡도 조건(2수준: 한산 vs. 혼잡)의 조합으로 구성된 4가지 실험조건에 대해 실험참가자는 각 조건별로 2회씩 총 8회 주행하였고 주행 순서는 실험참가자 사이에서 역균형화되었다. 각 주행 조건에서 서로 다른 유형의 장애물이 각각 4회씩 제시되었다.

종속변인의 측정 및 분석

본 연구에서는 운전자의 연령대, NDRT 수행 여부 및 도로혼잡도 조건에 따른 실험참가자의 TOT와 장애물 회피 과정에서 실험참가자가 경험하는 주관적 작업부하의 두 가지 차원의 즉, 실험참가자가 주관적으로 경험한 정신적 작업부하와 신체적 작업부하에서의 차이를 비교하였다. TOT는 제어권 인수 요청 알림이 제시된 시점부터 스티어링 휠에 부착되어 있는 버튼을 누르기까지 소요된 시간으로 정의하고 초 단위로 측정하였다. 연구들에 따라서는 제어권 인수 과정 자체에 대한 작업부하를 측정하기도 하지만(Ma, et al., 2021), 본 연구에서는 실험참가자가 장애물 회피 과정에서 경험하는 주관적 작업부하의 수준에 초점을 맞추었다. 실험참가자들의 주관적 작업부하는 NASA-TLX(The National Aeronautics and Space Administration Task Load Index)를 사용하여 측정하였다.

NASA-TLX에는 주관적 작업부하를 측정하

기 위한 6개 차원 즉, 정신적 부하, 신체적 부하, 시간적 압박감, 수행의 질, 정신적, 신체적 노력 수준, 그리고 짜증감 등이 포함된다. 본 연구에서는 이러한 차원들 중 정신적 작업부하와 신체적 작업부하를 측정하는 문항을 본 연구의 목적에 맞게 수정하여 사용하였다. 구체적으로 정신적 작업부하에 대해서는 제어권을 인수 요청이 제시된 이후 차량 전방의 장애물을 확인하고 회피하기 위한 방법을 생각하거나 결정하는 것을 포함하여 장애물을 회피하기 위한 정신적 활동이 얼마나 힘들었는지, 그리고 신체적 작업부하에 대해서는 제어권 인수 요청이 제시된 이후 차량 전방의 장애물을 회피하기 위해 사용한 브레이크 및 스티어링 휠의 조작을 포함하여 장애물을 회피하기 위한 신체적 활동이 얼마나 힘들었는지 질문하였다. 각 질문에 대해 '1 = 전혀 힘들지 않았다', '4 = 보통이다', '7=매우 힘들었다'를 포함한 7점 리커트 척도로 응답하도록 하였다.

결과

자료는 NDT 수행 여부(2: 수행 vs. 미수행)와 도로혼잡도(2: 한산도로 vs. 혼잡도로)의 조합에 따른 2×2 설계에 대해 변량분석을 통해 분석하였다. 자료 분석을 위해 IBM SPSS Statistics 29가 사용되었고 통계적 유의수준은 5%였다. 변량분석에 앞서 종속측정치들이 정상성과 공분산 행렬 동질성 가정을 충족하였는지 먼저 확인하였다. 자료의 정상성 가정은 왜도와 첨도로 확인하였다. 본 연구에서의 자료는 왜도의 경우 .568~1.747의 범위를, 그리고 첨도의 경우는 -.018~2.359의 범위를 보였

표 1. NDT 수행 여부와 도로혼잡도에 따른 종속측정치의 평균 및 표준편차

종속측정치	NDT	도로혼잡도 조건	청년운전자(N=27)		고령운전자(N=29)		왜도	첨도
			<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>		
제어권 인수 시간 (초)	미수행	한산	1.693	.349	1.699	.534	1.188	2.112
		혼잡	1.777	.388	1.953	.594	.849	1.006
	수행	한산	1.858	.474	2.122	.665	1.212	1.819
		혼잡	1.959	.477	2.390	.498	.393	-.58
정신적 작업부하 (1-7)	미수행	한산	1.106	.407	2.525	1.086	1.162	1.359
		혼잡	1.775	.706	2.896	1.335	.568	-.018
	수행	한산	1.100	.288	2.728	1.079	1.747	2.359
		혼잡	1.690	.924	3.438	1.093	.736	.061
신체적 작업부하 (1-7)	미수행	한산	2.781	.798	2.355	.757	1.457	2.901
		혼잡	2.819	1.410	3.130	1.610	1.503	2.406
	수행	한산	2.569	1.349	2.998	1.554	1.151	1.241
		혼잡	2.750	1.399	3.635	1.320	.706	-.315

다(표 1 참조). 일반적으로 왜도는 절대값이 2 이하, 첨도는 절대값이 7 이하이면 자료의 정상성이 충족된 것으로 받아들일 수 있다는 기준 연구에 비추어(Curran et al., 1996), 본 연구의 자료는 모두 정상성을 충족하였음을 확인하였다. 공분산 행렬 동질성은 Box의 *M* 검증을 통해 분석하였다. 일차적 분석 결과, TOT 와 정신적 작업부하 측정에 대한 분석에서 공분산 행렬 동질성 가정이 충족되지 않았음을 확인하였다: TOT(Box's *M*=22.16, *p*<.05), 정신적 작업부하(Box's *M*=75.498, *p*<.001). 이에 따라 이 두 가지 종속측정치들은 연령집단의 주효과를 제외한 효과들에 대해 Pillai의 Trace 값에 기초하여 변량분석을 실시하였다. 그리고 유의한 주효과에 대해서는 *t*-검증을 통해 조건 간 평균 차이(mean difference: *MD*)를 비교하였다. 본 연구에서 측정한 측정치들의 기술적

통계치는 표 1에 제시하였다.

제어권 인수시간

TOT에 대한 분석 결과, 연령집단의 주효과는 유의확률이 임계값(5%)에 근접하여 통계적으로 경계선상에 있었고 [*F*(1,54)=3.850, *p*=.0551, *n*_{*p*}²=.067], NDT 수행 여부의 주효과[Pillai's Trace=.384, *F*(1,54)=33.733, *p*<.001, *n*_{*p*}²=.384] 및 도로혼잡도 조건의 주효과[Pillai's Trace=.271, *F*(1,54)=20.046, *p*<.001, *n*_{*p*}²=.271] 가 모두 유의하였다. TOT에서의 차이에 대해 연령집단은 6.7% 정도 설명한 반면, NDT 수행 여부와 도로혼잡도 조건은 각각 38.4%와 27.1%를 설명하였다. 상호작용 효과 중에서는 연령집단과 NDT 수행 여부의 사이의 이원상호작용 효과[Pillai's Trace=.101, *F*(1,54)=6.079,

$p=.027$, $\eta^2_p=.101$]와 연령집단과 도로혼잡도 조건 사이의 이원상호작용 효과[Pillai's Trace=.078, $F(1,54)=4.537$, $p=.038$, $\eta^2_p=.078$]가 유의하였다. 연령집단, NDT 수행 여부 및 도로혼잡도 조건의 주효과가 유의했던 것은 청년운전자 집단보다($M=1.823$, $SD=.346$)는 고령운전자 집단($M=2.041$, $SD=.475$)에서, NDT 미수행 조건($M=1.782$, $SD=.448$)에 비해 수행 조건($M=2.089$, $SD=.499$)에서, 그리고 한산도로($M=1.846$, $SD=.457$)보다는 혼잡도로($M=2.025$, $SD=.452$)에서 TOT가 유의하게 더 길었기 때문이다.

TOT에 대한 연령집단과 NDT 수행 여부의 사이의 유의한 상호작용 효과와 연령집단과 도로혼잡도 조건 사이의 유의한 상호작용 효과가 시사하듯이 연령집단에 따른 TOT에서의

차이는 NDT 수행 여부 및 도로혼잡도 조건에 따라 달라지는 것으로 보인다. 먼저 연령집단과 NDT 수행 여부 사이의 상호작용 효과를 구체적으로 살펴보기 위해 연령집단별로 NDT 수행 여부에 따라 TOT가 어떻게 달라지는지 t -검증을 통해 차이를 비교하였다. 그 결과, 두 연령집단 모두에서 NDT 미수행 조건에 비해 수행 조건에서 TOT가 유의하게 느렸으나 그 차이는 청년운전자 집단에 비해 고령운전자 집단에서 더 컸다(청년운전자 집단: NDT 미수행 조건 $M=1.735$, $SD=.329$; NDT 수행 조건 $M=1.909$, $SD=.414$, $MD=.174$, $t=3.166$, $p=.002$; vs. 고령운전자 집단: NDT 미수행 조건 $M=1.826$, $SD=.538$; NDT 수행 조건 $M=2.256$, $SD=.519$, $MD=.430$, $t=4.984$, $p<.001$).

TOT에서의 연령집단간 차이는 도로혼잡도

표 2. NDT 수행 여부와 도로혼잡도에 따른 따른 TOT의 변량분석 결과(N=56)

변산원	df	MSE	F	P	η^2_p
집단 간					
연령집단(A)	1	2.691	3.850 [†]	.055	.067
오차	54	.699			
집단 내					
NDT(B)	1	5.096	33.733***	<.001	.384
A x B	1	.918	6.079*	.017	.101
오차	54	.151			
도로혼잡도(C)	1	1.745	20.046***	<.001	.271
A x C	1	.395	4.537*	.038	.078
오차	54	.087			
B x C	1	.003	.033	.856	<.01
A x B x C	1	.001	.001	.985	<.001
오차	54	.100			

[†] $<.10$, * $p<.05$, ** $p<.01$, *** $p<.001$; NDT=Non-Driving Task

조건에 따라 비교할 경우 더 두드러지는 것으로 보인다. 즉, 연령집단별로 도로흔잡도 조건에 따라 TOT에서의 차이를 비교한 결과, 청년 운전자 집단은 도로흔잡도 조건에 따른 TOT에서의 차이가 유의하지 않았던 반면(한산도로 $M=1.776$, $SD=.383$; 흔잡도로 $M=1.868$, $SD=.383$, $MD=.092$, $t=1.469$, ns), 고령운전자 집단에서는 한산도로에 비해 흔잡도로에서 유의하게 느린 TOT가 관찰되었다(한산도로 $M=.1.911$, $SD=.516$; 흔잡도로 $M=1.172$, $SD=.469$, $MD=.261$, $t=5.373$, $p<.001$).

정신적 작업부하

실험참가자가 제어권 인수 이후에 수동으로 운전하면서 장애물을 회피하는 과정에서 경

험한 정신적 작업부하 수준에 대한 분석 결과(표 3), 연령집단의 주효과[$F(1,54)=22.332$, $p<.001$, $\eta^2_p=.253$]와 NDT 수행 여부의 주효과[Pillai's Trace=.128, $F(1,54)=7.92$, $p=.007$, $\eta^2_p=.128$] 및 도로흔잡도 조건의 주효과[Pillai's Trace=.485, $F(1,54)=24.700$, $p<.001$, $\eta^2_p=.285$]가 모두 유의하였다. 즉, 정신적 작업부하에서의 차이에 대해 연령집단은 25.3%, NDT 수행 여부는 12.8%, 도로흔잡도 조건은 28.5%를 설명하였다. 그리고 연령집단과 NDT 수행 여부 사이의 이원상호작용 효과[Pillai's Trace=.153, $F(1,54)=9.779$, $p=.003$, $\eta^2_p=.153$]가 유의하였고, 연령집단과 도로흔잡도 조건 사이의 이원상호작용 효과[Pillai's Trace=.054, $F(1,54)=3.083$, $p=.085$, $\eta^2_p=.054$]는 유의확률이 임계값(5%)에 근접하여 통계적으로 경계선상에 있었다.

표 3. NDT 수행 여부와 도로흔잡도에 따른 정신적 작업부하의 변량분석 결과(N = 56)

변산원	df	MSE	F	P	η^2_p
집단 간					
연령집단(A)	1	17.151	22.332***	<.001	.253
오차	54	.768			
집단 내					
NDT(B)	1	9.551	7.92**	.007	.128
A x B	1	11.792	9.779**	.003	.153
오차	54	1.206			
도로흔잡도(C)	1	18.976	24.700***	<.001	.285
A x C	1	2.367	3.083†	.085	.054
오차	54	.768			
B x C	1	5.556	7.064*	.011	.116
A x B x C	1	7.034	8.942**	.004	.142
오차	54	.787			

† $<.10$, * $p<.05$, ** $p<.01$, *** $p<.001$; NDT=Non-Driving Task

그리고 NDT 수행 여부와 도로혼잡도 조건 사이의 이원상호작용 효과[Pillai's Trace=.116, $F(1,54)=7.064, p=.010, \eta^2_p=.116$]도 유의하였다. 또한 연령집단과 NDT 수행 여부 및 도로혼잡도 조건 사이의 삼원상호작용 효과[Pillai's Trace=.142, $F(1,54)=8.942, p=.004, \eta^2_p=.142$]가 유의하였다. 연령집단, NDT 수행 여부 및 도로혼잡도 조건의 주효과가 유의했던 것은 청년운전자 집단보다($M=1.416, SD=.292$)는 고령운전자 집단($M=3.147, SD=.540$)에서, NDT 미수행 조건($M=2.098, SD=1.006$)에 비해 수행 조건($M=2.528, SD=1.259$)에서, 그리고 한산도로($M=1.892, SD=1.006$)보다는 혼잡도로($M=2.734, SD=1.133$)에서 정신적 작업부하 점수가 유의하게 높았기 때문이다.

정신적 작업부하에 대한 연령집단과 NDT 수행 여부 및 도로혼잡도 조건 사이의 삼원상호작용 효과가 유의하였기 때문에 이 효과를 구체적으로 살펴보기 위해 각 연령집단별로 NDT 수행 여부와 도로혼잡도 사이의 이원상호작용 효과를 분석하였다. 먼저, 청년운전자 집단에서의 정신적 작업부하에 대한 NDT 수행 여부와 도로혼잡도 사이의 이원상호작용 효과를 분석한 결과, 도로혼잡도 조건의 주효과만 유의하였다[$F(1,26)=43.376, p<.001, \eta^2_p=.635$]. 즉, 청년운전자 집단은 NDT 수행 여부와는 상관없이 한산도로($M=1.103, SD=.238$)보다는 혼잡도로($M=1.732, SD=.487$)에서의 장애물 회피 수행에 대해 유의하게 높은 정신적 작업부하를 보였다.

이와는 대조적으로 고령운전자 집단에서는 NDT 수행 여부의 주효과[$F(1,28)=13.019, p<.01, \eta^2_p=.317$], 도로혼잡도 조건의 주효과[$F(1,28)=25.081, p<.001, \eta^2_p=.473$], 그리고 NDT 수행 여부와 도로혼잡도 사이의 이원상

호작용 효과[$F(1,28)=10.782, p=.003, \eta^2_p=.278$]가 모두 유의하였다. 고령운전자 집단에서의 유의한 NDT 수행 여부와 도로혼잡도 사이의 이원상호작용 효과를 세부적으로 분석하기 위해 각 도로혼잡도 조건별로 NDT 수행 여부에 따른 정신적 작업부하에서의 차이를 분석하였다. 그 결과, 한산도로에서는 정신적 작업부하에 대한 NDT 수행 여부에 따른 정신적 작업부하 점수 차이가 유의하지 않았던 반면(NDT 미수행 조건 $M=2.525, SD=2.086$; NDT 수행 조건 $M=2.728, SD=1.079, MD=.203, t=.868, ns$), 혼잡도로에서는 NDT 미수행 조건($M=2.896, SD=1.335$)에 비해 수행 조건($M=3.438, SD=1.093$)에서 유의하게 높은 정신적 작업부하 수준이 관찰되었다[$MD=.542, t=3.040, p<.01$]

신체적 작업부하

신체적 작업부하 수준에 대한 분석결과(표 4), 연령집단의 주효과[$F(1,54)=7.173, p=.009, \eta^2_p=.117$]와 도로혼잡도 조건의 주효과[$F(1,54)=8.180, p=.006, \eta^2_p=.132$]가 유의하였고, NDT 수행 여부의 주효과[$F(1,54)=3.891, p=.054, \eta^2_p=.067$]는 유의확률의 임계값에 근접하는 수준에서 유의하였다. 즉, 신체적 작업부하에서의 차이에 대해 연령집단은 11.7%, NDT 수행 여부는 6.7%, 그리고 도로혼잡도 조건은 13.2%를 설명하였다. 상호작용 효과 중에서는 연령집단과 NDT 수행 여부 사이의 이원상호작용 효과[$F(1,54)=7.739, p=.007, \eta^2_p=.125$]와 연령집단과 도로혼잡도 조건 사이의 이원상호작용 효과[$F(1,54)=5.158, p=.027, \eta^2_p=.087$]가 유의하였다. 전반적으로 실험참가자가 도로 전방의 장애물을 회피하는 과정에서 경험한

표 4. NDT 수행 여부와 도로혼잡도에 따른 신체적 작업부하의 변량분석 결과(N = 56)

변산원	df	MSE	F	P	η_p^2
집단 간					
연령집단(A)	1	10.096	7.173**	.009	.117
오차	54	1.407			
집단 내					
NDT(B)	1	6.539	3.891†	.054	.067
A x B	1	13.005	7.739**	.007	.125
오차	54	1.681			
도로혼잡도(C)	1	15.881	8.180**	.006	.132
A x C	1	10.015	5.158*	.027	.087
오차	54	1.941			
B x C	1	.887	.480	.492	.009
A x B x C	1	.170	.092	.763	.002
오차	54	1.849			

† <.10, *p<.05, **p<.01, ***p<.001; NDT=Non-Driving Task

신체적 작업부하 수준은 청년운전자 집단($M=2.730, SD=.610$)에 비해 고령운전자 집단($M=3.155, SD=.577$)에서, NDT 미수행 조건($M=2.098, SD=1.006$)에 비해 수행 조건($M=2.770, SD=.825$)에서, 그리고 한산도로($M=2.676, SD=.791$)보다는 혼잡도로($M=3.224, SD=1.096$)에서 신체적 작업부하 수준이 더 높았기 때문이다.

연령집단과 NDT 수행 여부 사이의 이원상호작용 효과를 구체적으로 살펴보기 위해 각 연령집단별로 NDT 수행 여부에 따른 신체적 작업부하에서의 차이를 t-검증을 통해 비교하였다. 그 결과, 청년운전자 집단에서는 NDT 수행 여부에 따른 신체적 작업부하의 수준에서 차이가 유의하지 않았던 반면(NDT 미수행 조건 $M=2,800, SD=.747$; NDT 수행 조건

$M=226, SD=.916, MD=.140, t=.638, ns$], 고령운전자 집단에서는 NDT 미수행 조건에 비해 수행 조건에서 신체적 작업부하 수준이 유의하게 더 높았다(NDT 미수행 조건 $M=2,743, SD=.904$; NDT 수행 조건 $M=3.567, SD=.929, MD=.824, t=3.116, p=.002$). 신체적 작업부하 점수에 대한 연령집단과 도로혼잡도 사이의 이원상호작용 효과를 세부적으로 분석하기 위해 각 연령집단별로 도로혼잡도 조건에 따른 신체적 작업부하에서의 차이를 분석하였다. 그 결과, 청년운전자 집단에서의 신체적 작업부하 점수는 도로혼잡도 조건에 따라 유의한 차이를 보이지 않았던 반면(한산도로 $M=2,675, SD=.731$; 혼잡도로 $M=2.745, SD=1.051, MD=.110, t=.426, ns$], 고령운전자 집단에서는 한산도로에 비해 혼잡도로에서 신체적 작업부

하 점수가 유의하게 더 높았다(한산도로 $M=2,677$, $SD=.856$; 혼잡도로 $M=3.633$, $SD=.987$, $MD=.956$, $t=3.568$, $p<.001$).

논 의

본 연구의 결과와 시사점을 기술하면 다음과 같다. 첫째, 청년운전자 집단에 비해 고령운전자 집단에서, NDT 미수행 조건에 비해 수행 조건에서, 그리고 한산도로보다는 혼잡도로에서 TOT가 유의하게 더 길었다. 그러나 TOT에 대한 연령집단과 NDT 수행 여부의 사이의 유의한 상호작용 효과와 연령집단과 도로혼잡도 조건 사이의 유의한 상호작용 효과가 시사하듯이 두 연령집단 모두에서 NDT 미수행 조건에 비해 수행 조건에서 TOT가 유의하게 느렸으나 그 차이는 청년운전자 집단에 비해 고령운전자 집단에서 더 커졌고, 청년운전자 집단은 도로혼잡도 조건에 따른 TOT에서의 차이가 유의하지 않았던 반면 고령운전자 집단에서는 한산도로에 비해 혼잡도로에서 유의하게 느린 TOT가 관찰되었다. 이러한 결과는 전반적으로 고령운전자 집단이 청년운전자 집단에 비해 제어권을 신속하게 인수받는데 어려움을 경험할 수 있고, 특히 운전과제 이외의 활동에 의해 시각적, 청각적 주의가 분산된 경우에는 TOT가 더 지연될 수 있음을 시사한다.

Wu et al.(2020)의 연구에는 다양한 연령대의 운전자들을 대상으로 3-수준 자율주행 상황에서 비디오 시청이나 게임하기 등과 같은 NDT 수행을 요구한 후 운전자들의 TOT를 분석한 결과, 고령운전자 집단은 젊은 운전자 집단에 비해 TOT가 유의하게 느려졌다는 것

을 보고하였다. 본 연구에서도 이러한 결과와 일치하는 결과를 관찰한 것으로 보인다. 또한 청년운전자 집단은 도로혼잡도 조건에 따른 TOT에서의 차이가 유의하지 않았던 반면 고령운전자 집단은 한산도로에 비해 혼잡도로에서 유의하게 더 느린 TOT를 보인 것은 고령운전자가 자신의 차량 주변에 위치한 다른 차량들의 움직임에 의해 청년운전자 집단에 비해 제어권 인수에서 더 많은 방해받을 수 있다는 가능성을 시사한다. 실제로 Gold et al.(2016)은 운전 시뮬레이션을 이용하여 자율주행 중 운전자 주변 차량의 밀도를 0대, 1대 및 20대로 조작한 후 운전자들의 TOT를 비교하였는데, 그 결과 운전자의 차량 주변에 다른 차량들이 수가 많을수록 운전자의 TOT가 유의하게 느려진다고 보고하였다. 특히 이 연구에서는 주변 교통량이 TOT에 미치는 효과를 분석하면서 연령집단을 구분하지 않았는데, 본 연구에서는 이들의 연구 결과를 고령운전자 집단까지 확장하였다고 할 수 있다.

둘째, 제어권 인수 이후에 실험참가자가 장애물을 회피하는 과정에서 경험한 주관적 작업부하를 정신적 작업부하와 신체적 작업부하로 구분하여 요약하면 다음과 같다. 먼저, 전반적으로 청년운전자 집단에 비해 고령운전자 집단에서, NDT 미수행 조건에 비해 수행 조건에서, 그리고 한산도로보다는 혼잡도로에서 정신적 작업부하 점수가 유의하게 높았다. 그러나 정신적 작업부하에서의 이러한 경향을 각 연령집단별로 정신적 작업부하에 대한 NDT 사용 여부와 도로혼잡도 조건의 조합 조건을 구분하여 살펴보면 연령집단에 따라 차별화되는 패턴이 관찰되었다. 청년운전자 집단에서는 NDT 수행 여부에 따른 정신적 작업부하에서 유의한 차이가 관찰되지 않았으나

도로흔잡도 조건에 따라서만 유의한 차이를 보여 한산도로에 비해 흔잡도로에서 정신적 작업부하 수준이 유의하게 더 높았다. 이와는 대조적으로 고령운전자 집단의 정신적 작업부하는 NDT 수행 여부와 도로흔잡도 조건에 모두에 의해 영향을 받았다. 그러나 고령운전자 집단도 한산도로에서는 NDT 수행 여부에 따른 정신적 작업부하 점수 차이가 유의하지 않았던 반면 흔잡도로에서는 NDT 수행 조건에서 유의하게 더 높은 정신적 작업부하 수준을 보였다. 이러한 결과는 도로흔잡도 조건은 두 연령집단 모두에 대해 정신적 작업부하에서의 차이를 가져오지만 NDT 수행 여부는 흔잡도로에서 운전하는 고령운전자 집단에게만 차별적으로 영향을 미칠 수 있다는 것을 시사한다.

신체적 작업부하 수준에 대한 분석 결과도 정신적 작업부하에 대한 분석 결과와 전반적으로 유사한 패턴을 보였다. 즉, 신체적 작업부하 수준은 청년운전자 집단에 비해 고령운전자 집단에서, NDT 미수행 조건에 비해 수행 조건에서, 그리고 한산도로보다는 흔잡도로에서 신체적 작업부하 수준이 더 높았다. 그러나 신체적 작업부하에 대한 연령집단과 NDT 수행 여부 사이의 상호작용 효과가 시사하듯이 청년운전자 집단에서는 NDT 수행 여부에 따른 신체적 작업부하의 수준에서 차이가 유의하지 않았던 반면 고령운전자 집단에서는 NDT 수행 조건에서 신체적 작업부하 수준이 유의하게 더 높았다. 또한 청년운전자 집단에서의 신체적 작업부하 점수는 도로흔잡도 조건에 따라 유의한 차이를 보이지 않았던 반면 고령운전자 집단에서는 한산도로에 비해 흔잡도로에서 신체적 작업부하 점수가 유의하게 더 높았다. 이러한 결과는 청년운전자 집

단과는 달리 고령운전자 집단은 NDT 수행 여부나 도로흔잡도 조건에 따라 장애물 회피에서의 신체적 작업부하에서 유의한 차이를 보일 수 있다는 것을 시사한다.

Zhang et al.(2022)은 자율주행에서 운전자가 장애물을 회피하는 과정에서 경험하는 주관적 작업부하를 NASA-TLX를 통해 측정하여 비교하였다. 그 결과 운전자들의 정신적, 신체적 작업부하의 수준은 전방에 출현한 장애물을 회피하도록 요구받지 않은 조건에 비해 요구받은 조건에서 더 높다는 것을 발견하였다. 특히 이 연구에서는 장애물 회피가 요구되었을 때 제어권 인수 요청에 대한 운전자들의 TOT가 느려질수록 주관적 작업부하 수준이 더 크게 증가한다는 것을 관찰하였다. 또한 Liu et al.(2024b)은 차량 전방의 장애물 출현에 의한 자율주행 차량으로부터의 제어권 인수요구 시간이 급하게 주어질수록 장애물을 회피하는데 운전자의 경험한 주관적 작업부하 수준이 유의하게 증가한다는 것을 보고하였다. 이러한 결과들은 제어권 인수 요청이 급하게 제시되어서건 아니면 운전자의 제어권 인수반응이 지체되어서건 전방에 제시된 장애물과의 거리가 짧아질수록 (따라서 운전자가 장애물을 회피하기까지의 시간적 여유가 감소할수록) 운전자의 주관적 작업부하 수준이 증가할 수 있음을 시사한다.

본 연구 결과들은 자율주행 중 실험참가자가 NDT를 수행하지 않는 조건에 비해 NDT 수행에 의해 주의가 분산되는 조건에서, 그리고 한산도로보다는 흔잡도로에서 실험참가자의 제어권 인수반응은 지체되고 제어권 인수 이후의 수동운전을 통한 장애물 회피 과정에서 경험하는 정신적, 신체적 작업부하의 수준은 유의하게 더 높아질 수 있다는 것을 보여

준다. 특히 이러한 경향은 청년운전자 집단보다는 고령운전자 집단에서 더 두드러지는 것으로 요약할 수 있다. 이러한 결과는 고령운전자 집단의 경우 주변에 차량이 많이 주행하고 있는 혼잡한 도로에서 고령운전자의 시각적, 청각적 주의가 차량 전방으로부터 분산될 경우 장애물 회피에 대한 정신적, 신체적 작업부하에서의 증가뿐만 아니라 차량 전방의 장애물에 대한 안전하고 효과적인 회피 수행에서 어려움이 증가할 수 있다는 것을 시사한다.

본 연구 결과를 종합적으로 고려하면 고령운전자와 자율주행 차량 사이의 안전하고 원활한 상호작용을 위해 다음과 같은 사항들을 고려할 필요가 있다. 먼저 Liu et al.(2024a)의 연구에서도 시사되었듯이 고령운전자들은 주어진 자율주행 상황에서 반드시 필요한 NDT가 아니라면 자율주행 중 NDT 수행을 스스로 제한하는 자기-조절 운전 방략을 적극적으로 활용하는 필요하다. 고령운전자는 AV가 차량을 제어하는 상황이라 할지라도 주의를 차량 전방으로부터 분산시키기보다는 차량전방의 상황에 주의를 더 집중하는 운전방략을 선택할 가능성도 있다.

Liu et al.(2024a)는 다양한 연령대의 운전자들을 대상으로 자율주행 상황에서 NDT를 수행하는 경향을 비교하였는데, 그 결과 AV 주변에 교통량이 증가할수록, 그리고 AV의 주행 속도가 높을수록 운전자들은 NDT 수행을 주저하고 특히 이러한 경향은 고령운전자들에게서 더 뚜렷하였다는 것을 발견하였다. 고령운전자는 인지적, 신체적 역량 저하에 따른 운전수행에서의 어려움을 경험할 경우 스스로 운전 빈도를 줄이거나, 좋지 않은 날씨나 혼잡한 도로에서의 운전을 피하는 일종의 자기-

조절 행동을 보일 수 있는데(Meng & Siren, 2012), 자율주행 상황에서의 NDT 수행에 대한 고령운전자의 선택도 이러한 자기-조절 행동의 맥락에서 이해할 수 있을 것이다. 또한 고령운전자는 AV의 주행 방식을 전적으로 신뢰하여 주행의 전 과정을 AV에 위임하기보다는 자신의 차량 주변의 교통량 등을 지속적으로 모니터링하는 등 주변 운전환경에 대한 상황 인식을 높은 수준으로 유지하여 수동운전으로의 전환이 요구되는 긴급 상황에 대해 선제적으로 대응할 수 있도록 해야 할 것이다(Gasne et al., 2022).

본 연구는 지금까지 많이 보고되지 않았던 고령운전자들을 대상으로 제어권 인수 반응과 제어권 인수 이후의 차량통제에 대해 운전자 연령집단, NDT 수행 여부 및 도로혼잡도 조건을 통합적으로 조작하여 살펴보았다는 점에서 의미가 있다. 그러나 본 연구는 연구방법 및 실제 자율주행 환경으로의 연구결과 적용 측면에서 몇 가지 추가적으로 고려할 한계가 있다. 먼저, 본 연구에서는 자율주행 중 실험 참가자가 수행하는 NDT의 유형은 연구 관심이 아니었기 때문에 제시 정보에 대한 청각적, 시각적 주의와 구두 반응이 요구되는 한 가지 유형의 NDT 수행만을 요구하였다. 그러나 자율주행 중 운전자가 수행하는 NDT의 유형이 다양할 수 있고(Zhang et al., 2023), 또한 NDRT 유형에 따라 제어권 인수 요청에 의한 TOT나 차량통제에서도 유의한 차이가 관찰 된다는 기존 연구들을 고려하면(Yoon et al., 2019) 추후 연구에서는 NDT의 유형을 달리하여 NDT 유형에 따른 효과를 차별화하여 살펴 볼 필요도 있을 것이다. 나아가 본 연구에서의 NDT는 실제 현실에서 운전자들이 수행할 수 NDT 예를 들어, 스마트폰을 이용한 문자

보내기, 노트북 사용, 동영상 시청 등과 같은 활동에 비해 현실성이 떨어지는 과제였다. 따라서 추후 연구에서는 인위적 형태의 NDT가 아닌 실제 현실에서 운전자들이 수행할 수 있는 활동들로 NDT를 구성해야 할 필요가 있다. 또한 맑은 날씨를 포함하여 야간, 안개, 우천 등과 같이 고령운전자들의 운전을 어렵게 할 수 있는 조건을 반영한 운전환경을 구현할 필요도 있을 것이다.

둘째, 본 연구의 실험참가자들은 자율주행 차량을 운전한 경험이 없는 운전자들이었다. 이 때문에 제어권 인수 및 이양 요구에 따른 자율주행과 수동운전 사이의 전환이나 자율주행 상황에서 NDT를 수행하는 도중 긴급하게 수동운전으로 장애물을 회피하는 과제 등의 수행 경험이 충분하지 않았을 것이다. 또한 실험참가자들(특히 고령운전자 집단)은 본 연구에서의 실험기기들(차량통제 및 제어권 전환을 위한 조이스틱 형태의 운전장치와 NDT 수행을 위한 태블릿 등)에 대해 친숙하지 않았을 가능성도 고려해 봐야 할 측면이다. 추후 연구에서는 자율주행 차량 통제와 실험기기 사용에 대해 실험참가자들의 친숙성 문제를 검토하거나 해결할 수 있는 추가적 절차의 실행을 고려해야 할 것이다.

참고문현

고예슬, 이재식 (2023). 자율주행 환경에서 비운전과제 유형과 도로혼잡도에 따른 청년 및 고령운전자의 제어권 인수와 운전수행 차이. *Journal of The Korean Data Analysis Society*, 25, 1177-1192.

이재식 (2022). 탐지자극 제시방식과 도로유형

에 따른 중년 및 고령운전자의 탐지반응과 운전수행 차이: 운전 시뮬레이션 연구. *Journal of The Korean Data Analysis Society*, 24, 1543-1561.

이재식 (2024). 자율주행 상황에서 운전자의 장애물 회피 전후와 운전자 연령대에 따른 상황인식과 차량통제 차이. *감성과학*, 27, 89-106.

이재식, 주미정, 김정호, 이원영, 류준범, 오주석 (2015). 연령대에 따른 주관적 주의능력과 외부환경 적응능력이 운전이동성에 미치는 영향에서의 차이: 동기특성의 조절효과. *한국심리학회지: 문화및사회문제*, 21(3), 457-479.

정지은, 박지선 (2022). 타인의존 자기애와 보복운전 경험 간의 관계에 대한 연구. *한국심리학회지: 문화및사회문제*, 28(1), 61-81.

주미정, 이재식 (2016). 운전능력에 대한 주관적 평가가 고령운전자의 이동성과 주관적 안녕감에 미치는 영향. *감성과학*, 19, 67-78.

한국도로교통공단 (2024). 2024년판 교통사고 통계분석.

Ball, K., Owsley, C., Stalvey, B., Roenker, D. L., Sloane, M. E., & Graves, M. (1998). Driving avoidance and functional impairment in older drivers. *Accident Analysis & Prevention*, 30, 313-322.

Caird, J. K., Simmons, S. M., Wiley, K., Johnston, K. A., & Horrey, W. J. (2018). Does talking on a cell phone, with a passenger, or dialing affect driving performance?: an updated systematic review and meta-analysis of experimental studies. *Human Factors*, 60,

- 101-133.
- Carp, F. M. (1988). Significance of mobility for the well-being of the elderly. *Transportation in an Aging Society: Improving Mobility and Safety of Older Persons*, 2, 1-20.
- Curran, P. J., West, S. G., & Finch, G. F. (1996). The robustness of test statistics to nonnormality and specification error in confirmatory factor analysis. *Psychological Methods*, 1, 16-29.
- Depestele, S., Ross, V., Verstraelen, S., Brijs, K., Brijs, T., van Dun, K., & Meesen, R. (2020). The impact of cognitive functioning on driving performance of older persons in comparison to younger age groups: A systematic review. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 73, 433-452.
- Ding, W., Murzello, Y., Samuel, S., & Cao, S. (2024). Examining the takeover process for senior drivers in conditionally Automated Vehicles. *Advances in Transportation Studies*, 4, 127-140.
- Fonda, S. J., Wallace, R. B., & Herzog, A. R. (2001). Changes in driving patterns and worsening depressive symptoms among older adults. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 56, S343-S351.
- Gasne, C., Paire-Ficout, L., Bordel, S., Lafont, S., & Ranchet, M. (2022). Takeover performance of older drivers in automated driving: A review. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 87, 347-364.
- Gold, C., Körber, M., Lechner, D., & Bengler, K. (2016). Taking over control from highly automated vehicles in complex traffic situations: the role of traffic density. *Human Factors*, 58(4), 642-652.
- Gwyther, H., & Holland, C. (2012). The effect of age, gender and attitudes on self-regulation in driving. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 19-28.
- Hartwich, F., Hollander, C., Johannmeyer, D., & Krems, J. F. (2021). Improving passenger experience and trust in automated vehicles through user-adaptive HMIs: "The more the better" does not apply to everyone. *Frontiers in Human Dynamics*, 3, 669030.
- Jones, P. R., Ungewiss, J., Eichinger, P., Wörner, M., Crabb, D. P., & Schiefer, U. (2022). Contrast sensitivity and night driving in older people: Quantifying the relationship between visual acuity, contrast sensitivity, and hazard detection distance in a night-time driving simulator. *Frontiers in Human Neuroscience*, 16, 914459.
- Khan, B. A., Leva, M. C., & Cromie, S. (2021, November). A Systematic Review of Older Drivers in a Level 3 Autonomous Vehicle: A Cognitive Load Perspective. In *International Symposium on Human Mental Workload: Models and Applications*, 60-77.
- Körber, M., Gold, C., Lechner, D., & Bengler, K. (2016). The influence of age on the take-over of vehicle control in highly automated driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 39, 19-32.
- Liu, X., Madigan, R., Sadraei, E., Lee, Y. M., & Merat, N. (2024a). Drivers' engagement in NDRTs during automated driving linked to

- travelling speed and surrounding traffic. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 101, 332-339.
- Liu, Y., Wu, C., Zhang, H., Ding, N., Xiao, Y., Zhang, Q., & Tian, K. (2024b). Safety evaluation and prediction of takeover performance in automated driving considering drivers' cognitive load: A driving simulator study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 103, 35-52.
- Ma, Y., Zhang, Y., Wang, C., & Xiao, Y. (2021). Influencing factors and variation of subjective workload in the process of takeover during autonomous driving. In *6th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*, 1496-1502.
- Maharajpet, S. S., & Roy, R. (2024). The Intersection of Technology and Driving: A Review of Advanced Driver Assistance Systems. In *2024 International Conference on Recent Innovation in Smart and Sustainable Technology (ICRISST)*, 1-6.
- Martin, M., Kressig, R. W., & Röcke, C. (2011). Maintaining and promoting mobility and functional independence in older adults. *Gerontology*, 57(3), 237-238.
- McCarty, D., & Kim, H. W. (2024). Risky behaviors and road safety: An exploration of age and gender influences on road accident rates. *PLoS one*, 19(1), e0296663.
- Meng, A., & Siren, A. (2012). Cognitive problems, self-rated changes in driving skills, driving-related discomfort and self-regulation of driving in old drivers. *Accident Analysis & Prevention*, 49, 322-329.
- NHTSA, U. (2013). *Department of Transportation Releases Policy on Automated Vehicle Development*, National Highway Traffic Safety Administration, US Department of Transportation.
- Onate-Vega, D., Oviedo-Trespalacios, O., & King, M. J. (2020). How drivers adapt their behaviour to changes in task complexity: The role of secondary task demands and road environment factors. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 71, 145-156.
- Ortiz-Peregrina, S., Ortiz, C., Casares-López, M., Castro-Torres, J. J., Jimenez del Barco, L., & Anera, R. G. (2020). Impact of age-related vision changes on driving. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(20), 7416.
- Pan, H., Payre, W., Xu, J., & Koppel, S. (2024). Age-related differences in takeover performance: A comparative analysis of older and younger drivers in prolonged partially automated driving. *Traffic Injury Prevention*, 25(7), 968-975.
- Park, S., Xing, Y., Akash, K., Misu, T., & Boyle, L. N. (2022). The impact of environmental complexity on drivers' situation awareness. In *Proceedings of the 14th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 131-138.
- Peng, Q., & Iwaki, S. (2020). Visual attention of young and older drivers in takeover tasks of highly automated driving. In the *International Conference on Human- Computer Interaction*, 210-221.
- Peng, Q., Wu, Y., Qie, N., & Iwaki, S. (2022).

- Age-related effects of executive function on takeover performance in automated driving. *Scientific Reports*, 12(1), 5410.
- Pennetti, C. A., Hollenback, K., Kim, I., & Lambert, J. H. (2019). Cognitive load variability from road characteristics should influence a safety requirement for vehicle stopping sight distance. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 2129-2133.
- Radlmayr, J., Gold, C., Lorenz, L., Farid, M., & Bengler, K. (2014). How traffic situations and non-driving related tasks affect the take-over quality in highly automated driving. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 58, 2063-2067.
- Urlings, J. H., van Beers, M., Cuenen, A., Brijs, K., Brijs, T., & Jongen, E. M. (2018). The relation between reinforcement sensitivity and self-reported, simulated and on-road driving in older drivers. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 56, 466-476.
- Wood, J. M. (2022). Vision impairment and on-road driving. *Annual Review of Vision Science*, 8, 195-216.
- Wu, H., Wu, C., Lyu, N., & Li, J. (2022). Does a faster takeover necessarily mean it is better? A study on the influence of urgency and takeover-request lead time on takeover performance and safety. *Accident Analysis & Prevention*, 171, 106647.
- Wu, Y., Kihara, K., Hasegawa, K., Takeda, Y., Sato, T., Akamatsu, M., & Kitazaki, S. (2020). Age-related differences in effects of non-driving related tasks on takeover performance in automated driving. *Journal of Safety Research*, 72, 231-238.
- Xu, J., Hutton, A., Dougherty, B. E., & Bowers, A. R. (2023). Driving difficulties and preferences of advanced driver assistance systems by older drivers with central vision loss. *Translational Vision Science & Technology*, 12(10), 7-7.
- Yang, Y., & Lee, H. (2021). The effects of cognitive and visual functions of Korean elderly taxi drivers on safe driving behavior. *Risk Management and Healthcare Policy*, 465-472.
- Yoon, S. H., Kim, Y. W., & Ji, Y. G. (2019). The effects of takeover request modalities on highly automated car control transitions. *Accident Analysis and Prevention*, 123, 150-158.
- Zandieh, R., & Acheampong, R. A. (2021). Mobility and healthy ageing in the city: Exploring opportunities and challenges of autonomous vehicles for older adults' outdoor mobility. *Cities*, 112, 103135.
- Zeel, K., Buchner, A., & Schrauf, M. (2016). Is take-over time all that matters? The impact of visual-cognitive load on driver take-over quality after conditionally automated driving. *Accident Analysis & Prevention*, 92, 230-239.
- Zhang, H., Zhang, Y., Xiao, Y., & Wu, C. (2022). Analyzing the influencing factors and workload variation of takeover behavior in semi-autonomous vehicles. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1834.
- Zhang, N., Fard, M., Davy, J. L., Parida, S., & Robinson, S. R. (2023). Is driving experience

이재식 / 3-수준 자율주행에서 고령운전자의 제어권 인수와 장애물 충돌 회피에서의 주관적 작업부하에 대한 주의분산과 도로혼잡도 효과

all that matters? Drivers' takeover performance
in conditionally automated driving. *Journal of
Safety Research*, 87, 323-331.

논문 투고일 : 2025. 09. 22

1차 심사일 : 2025. 10. 27

게재 확정일 : 2025. 11. 06

The Effects of Attention Distraction and Road Complexity on the Elderly Driver's Takeover Time and Subjective Workload for Obstacle Avoidance in Level-3 Automated Driving

Jaesik Lee

Department of Psychology, Pusan National University

This driving simulation study compared differences in driver's takeover time (TOT) and subjective workload for obstacle avoidance under different conditions of road complexity and attention distraction in a level-3 automated driving. Participants were divided into two groups: young drivers in their 20s and older drivers aged 65 or older. Attention distraction was induced by performing a non-driving task (NDT) during autonomous driving, and road complexity was manipulated by varying the number of vehicles surrounding the drivers' vehicle. The main findings and implications of this study are as follows. First, drivers' TOT was significantly delayed in the NDT condition compared to the non-NDT condition during automated driving, and in the congested traffic condition compared to the clear road condition. Furthermore, the level of mental and physical workload during obstacle avoidance through manual driving after control takeover was significantly higher. Second, this tendency was particularly pronounced in the older driver group compared to the younger driver group. The results of this study suggested that older drivers may experience increased difficulties in safe and effective avoidance regarding obstacles ahead of their vehicle when visually and audibly distracted on congested roads.

Key words : elderly driver, level-3 automated driving, control takeover, attention distraction, road complexity