

주행상황에 따른 운전피로와 생리적 반응

성은정, 민병찬, 최현재, 김태은, 전효정, 전광진, 강인형, 신용균*, 김철중

한국표준과학연구원 인간정보연구그룹, *도로교통안전관리공단 교통과학연구원

Driver Fatigue and Physiological Responses to Driving Conditions

·E.J. Sung, B.C. Min, H.J. Choi, T.E. Kim, H.J. Jeon,
K.J. Jeon, I.H. Kang, *Y.K. Shin, C.J. Kim

Ergonomics & Information Technology Group, Korea Research Institute of Standards and Science

*Road Traffic Safety Authority

Abstract

본 연구에서는 3시간 연속 운전에서 운전자의 피로감과 생리적 반응을 고속도로 주행과 시내주행으로 실시하여 비교 검토하였다. 중추신경계 반응의 측정결과 양 주행조건 모두 각성되고 불쾌하였으나 시내주행의 경우가 상대적으로 각성되고 쾌한 경우가 많았던 것으로 나타났다. 한편, 시내주행의 경우는 심박수의 변화가 심하였으나, 고속도로의 주행에서는 눈깜빡임율이 크게 증가하였다. 따라서 2가지 주행조건 모두 운전시간이 경과함에 따라 피로감을 느끼거나 그러한 피로감을 느끼는 원인이나 현상은 상이한 것으로 나타났다.

Keyword : Driver Fatigue, EEG, Blink Rate, Heart Rate, Driving Condition

1. 서론

자동차의 운전은 지각, 의사결정, 운동능력 등 다양한 능력을 필요로 하는 복잡한 행동의 연속이고, 지속적인 고도의 의식집중이나 외부자극에 대한 긴장감이 유발되므로 운전자는 피로하게 되기 쉬우며, 이러한 피로는 교통사고의 중요한 원인이 되고 있다[1]. 그럼에도 불구하고 복잡한 도시생활, 교통체증, 직업적인 특성 등에 의하여 운전자가 차량 내에서 보내는 시간은 증가하고 있고, 그에 따른 피로나 스트레스를 피할 수 없는 실정이다. 운전자의 피로감에 관한 연구는 차

량 시뮬레이터나 실제 차량을 이용하게 되는데, 시뮬레이터의 경우는 위험부담이 적고 동일조건에서의 제시가 용이한 이점이 있으나 실제상황과 다르다는 단점이 있다. 한편 실제 차량을 이용한 실험에서는 실제의 운전상황을 그대로 재현할 수가 있으나, 실험 중 위험부담이 크고 특히 생리신호 측정시에 노이즈의 발생이 문제시 되고 있다. 따라서 생리신호 측정 기자재가 차량 내에 구비되어 노이즈의 문제가 없는 실험전용 차량을 이용하여 실제 주행상황을 그대로 재현하는 실험을 행하였다. 본 연구에서는 도로상황 및 시

간경과에 따른 운전자의 피로감을 알아보기 위하여, 고속도로와 시내주행에서 주행시간 경과에 따른 운전 피로감에 대하여 주관적인 평가 및 생리적인 평가를 통하여 검토하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 피험자

피험자는 신체 건강하고 운전이 능숙한 20대의 남자 8명을 대상으로 하였고, 그들의 평균 연령은 24.3 ± 2.7 세, 신장 174.9 ± 5.4 cm, 체중 69.5 ± 10.6 kg, 운전 경력은 4.3 ± 3.3 년이었으며, 실험차량과 유사 차종의 운전경험이 있는 자로 섭외하였다. 피험자는 피로에 대한 간접적인 영향을 최소화하기 위하여 실험 전날 충분한 수면을 취하고 과격한 운동, 흡연, 카페인 음료, 약물 복용을 금하였으며, 각 피험자들은 2가지 도로조건에 대하여 연속 이틀간 같은 시간대에 참여하였다. 또한 실험차량에 충분히 익숙해지도록 시운전을 실시한 후에 실험에 임하도록 하였다.

2.2 실험장비 및 주행조건

실험에 사용한 차량은 도로교통안전관리공단의 실험전용 차량으로서, 차량내부에 생리신호측정에 필요한 앰프, PC, 모니터 및 피험자 상태를 관찰할 수 있는 CCD카메라(3대)와 VTR모니터 등이 설치되어 있다.

실험조건은 고속도로 및 시내주행의 2조건으로서, 고속도로 주행의 경우는 경부고속도로 북대전~기흥 구간을 80~100km로 왕복 주행하였고 시내주행의 경우는 대전시내 중심가를 40~60km로 주행하도록 하였다. 2가지 조건은 순서효과가 없도록 랜덤하게 실시하였고 오후1시부터 4시까지 3시간 연속주행으로 하였다.

2.3 실험 프로토콜

피험자는 오전11시30분까지 실험실에 도착하여 실험에 대한 설명을 듣고 일반적인 사항(운전경력, 병력, 운전피로를 느끼는 시간 및 부위 등)에 대한 설문지를 작성한 후 실험차량으로 시운전을 실시하고 생리신호 수집에 필요한 전극을 장착하였다. 12시30분경에 차량에 승차하여 실험에 필요한 셋팅 및 테스트를 행하고 피험자는 잠시 안정

을 취하게 한다. 12시50분에 출발전 안정상태에서 최초의 측정을 하고 오후 1시에 주행을 개시하여 10분 간격으로 3분간 주행상태에서 생리신호측정을 실시한다. 주행 개시 후 90분이 경과하면 안전한 장소에 정차시켜 생리신호, 혈압, 주관평가를 실시하고 측정이 끝나면 다시 90분간 10분 간격으로 생리신호를 측정하여 총 180분의 주행종료 후 마지막 측정을 행한다. 주행 중에는 피험자 이외에 신호수집을 위하여 2명의 실험자가 동승하였다.

2.4 측정항목

생리신호는 심전도(ECG; CM5유도법), 안전도(EOG; 수직방향), 근전도(EMG; 요추 및 우측 하퇴부위), 피부전기반응(GSR; 우측 검지와 중지)을 Biopac System 및 AcqKnowledge 프로그램을 이용하여 3분간 수집하였고, 뇌파(EEG; Fp1, Fp2)는 HSK System을 이용하여 102.4초간 측정하였다. 또한 혈압은 자동혈압계를 이용하여 수축기혈압, 이완기혈압 및 맥박수를 측정하였다.

주관적 평가로서 23문항으로 구성된 운전 피로감 평가지를 이용하여 피로감의 정도를 단극 4점 척도(0~3점)로 평가하도록 구성하였고, 이것은 졸림과 나른함, 주의집중의 곤란, 신체적 위화감의 3그룹으로 분류되어진다. 졸림감은 KSS(Kansei-gakuin sleepiness scale)의 항목(22문항)을 이용하였는데 이것은 0~7점의 고유점수가 있어 정도에 따라 선택한 한 문항에 대한 고유점수로서 졸림감의 상태를 평가할 수 있다. 신체부위별 피로감은 신체의 15부위별로 피로의 정도를 0~4점으로 평가하도록 하였다. 주관적 평가는 정차한 상태에서 피험자 자신이 직접 기록하도록 하였다. 그 외에 차량내외의 온습도 및 산소농도를 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1. 중추리듬

주행시 중추신경계의 변화를 알아보기 위하여 뇌파(EEG)는 HSK System (Hitosensing Co. Japan)을 이용하여 측정하였다. HSK System은 좌우 전전두부(Fp1, Fp2)에 헤어밴드 형식으로 센

서를 착용하여 중추리듬을 평가할 수 있는 장비로서, 소형의 본체와 노트북 컴퓨터 및 센서부로 구성되어 있고 전지 구동이므로 차량주행과 같은 동적환경에서 사용이 용이하다. 기준전극은 왼쪽 컷볼, 접지는 오른쪽 컷볼에 가볍게 집게형식으로 착용하고, 왼쪽손목에서 심박수를 측정하도록 되어있다. 측정은 102.4초 동안 이루어지고 측정이 끝나면 신속히 결과를 확인할 수 있다. 중추리듬의 측정은 출발전 안정시와 주행시 10분간격으로 실시하여 1회의 실험에서 총19회 측정으로 하였고 실험자가 조수석에서 측정에 따른 조작을 행하였다.

3.1.1 평균주파수

수집한 뇌파는 4~30Hz의 대역으로 filtering하여 이 대역에서의 평균주파수를 비교하였다. 좌우 전전두부의 평균주파수는 고속도로 및 시내주행에서 출발전에 비하여 주행중에 조금 저하하는 경향이고 두 조건간의 현저한 차이는 없는 것으로 나타났다(그림1). 단, 90분, 170분, 180분 경과시에 고속도로 주행의 경우가 시내 주행에 비하여 유의하게 증가한 것으로 나타났으나($p < 0.05$), 이때는 주로 정차한 상태에서 측정이 이루어지므로, 주행중에는 두 조건간의 차이가 없는 것으로 보여진다.

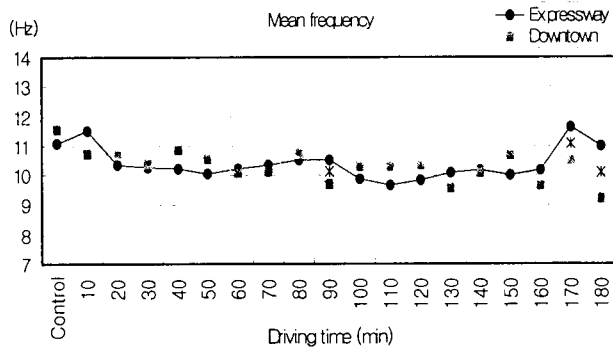


그림 2. 주행조건별 시간경과에 따른 뇌파의 평균주파수 (* $p < 0.05$)

한편, 평균주파수를 우뇌와 좌뇌에서 각각 비교한 결과, 우뇌에서는 고속도로 주행시에 증가하였고 좌뇌에서는 시내주행에서 증가하여, 고속도로와 시내주행에서 대뇌 좌우반구에서의 차이가 존재하는 것으로 보여진다. 또한 평균주파수의 경향

은 우뇌(9.8~12.4Hz)가 좌뇌(8.6~11.1Hz)에 비하여 높게 나타나 주행시에는 우뇌가 활성화 될 가능성을 시사하였다.

3.1.2 쾌적도

뇌파의 주파수 fluctuation(변동리듬) 추출원리에 의하여 쾌적도를 산출하였다. 즉, filtering된 뇌파 신호를 $\pm 5\mu V$ 로 역치를 잡아 zero cross의 pulse를 발생시켜 pulse 간격을 주파수로 변환하고 FFT로 주파수 fluctuation 스펙트럼을 산출한다. 가로축은 주파수, 세로축은 스펙트럼 밀도로 하여 그래프가 작성되고 변곡점을 중심으로 저주파수 대역의 중회귀식 및 경사도를 산출하는 원리로서, HSK System은 이 모든 과정이 자동으로 처리되도록 되어있다[2].

좌우 뇌파의 경사도에 의해 구해지는 쾌적도의 평균값을 그림2에 나타내었다. 쾌적도는 전체적으로 시내주행이 고속도로 주행에 비하여 다소 높게 나타났고, 특히 70분, 150분 경과시에 두 조건간의 통계적 유의차가 인정되었다($p < 0.05$). 90분 경과시에 쾌적도가 높아진 것은 정차중 휴식하게 되므로 나타나는 결과로 보여지며, 그 이외에 시간경과에 따른 특별한 경향은 나타나지 않았다. 전체적으로 시내주행은 90분경 정차시를 제외하고는 비슷한 쾌적도를 나타내었으나 고속도로 주행의 경우는 60~70분 간격으로 쾌적도가 저하하는 것으로 나타나 주행중 쾌적도 유지를 위해서는 적절한 휴식이 필요할 것으로 사료된다.

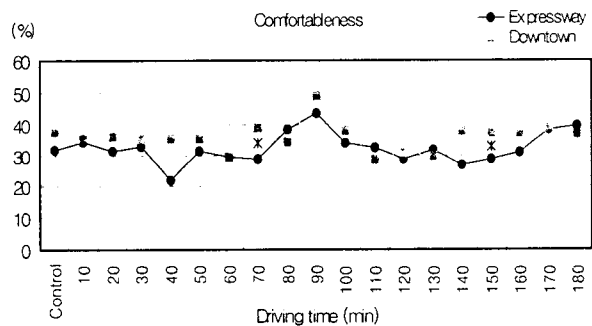


그림 1. 주행조건별 쾌적도의 경시변화 (* $p < 0.05$)

쾌적도 산출의 모토가 되는 경사도를 좌우로 구분하여 나타낸 결과, 우뇌에서는 시내주행이 경사도가 다소 증가한 경향으로 20분, 70분, 140분

경과시에 고속도로주행에 비하여 유의하게 높았다($p<0.05$). 또한 좌뇌의 경사도에 있어서도 시내주행이 다소 높게 나타나 40분, 150분, 160분 경과시에 고속도로 주행에 비하여 유의하게 증가하였다($p<0.05$). 우뇌에 비하여 좌뇌에 있어서 시간경과에 따른 경사도의 증감경향이 현저하여 좌뇌가 주행중의 쾌적도를 더욱 민감하게 반영할 가능성이 있는 것으로 생각되어졌다.

3.1.4 벡터의 각도

좌우뇌파의 경사도를 이용하여 벡터의 각도를 구할 수 있고, 전술한 쾌적도와 벡터 각도로서 그림3과 같은 기본감정 벡터모델의 그래프상에 plot이 가능하다. 즉, X축은 각성/진정(혹은 흥분/졸림)의 정도를 나타내고 Y축은 쾌/불쾌를 나타내며 원의 바깥쪽으로 갈수록 쾌적도가 높은 것을 의미하는데, plot된 점이 $0\sim 90^\circ$ 이면 쾌하면서 각성(혹은 흥분)된 상태, $90\sim 180^\circ$ 이면 쾌하면서 진정된(혹은 졸린) 상태, $180\sim 270^\circ$ 이면 불쾌하면서 진정된(혹은 졸린) 상태, $270\sim 360^\circ$ 이면 불쾌하면서 각성(혹은 흥분)된 상태를 나타내는 것이다.

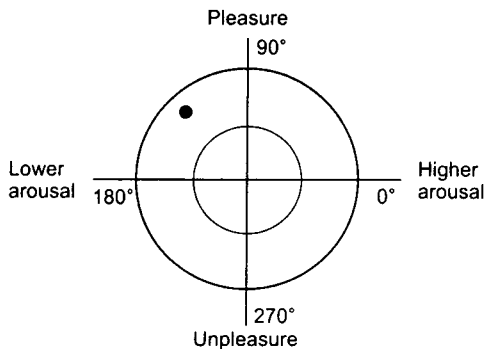


그림 3. 기본 감정 벡터 모델

Plot을 위한 쾌적도 및 각도의 산출식은 다음과 같다.

* 벡터의 스칼라량(쾌적도)

$$= [\sqrt{((\text{좌뇌의 경사도})^2 + (\text{우뇌의 경사도})^2)}] / 2 \times 100$$

* 벡터의 각도

$$= \arctan\{[(\text{좌뇌 경사도의 절대치}) - 0.5] / [(\text{우뇌 경사도의 절대치}) - 0.5]\}$$

그림4는 각각 고속도로로 주행과 시내주행에서

피험자 8명의 벡터각도를 시간경과별로 나타낸 것으로, $0\sim 90^\circ$ 는 쾌하면서 각성된 상태, $90\sim 180^\circ$ 이면 쾌하면서 졸린 상태, $180\sim 270^\circ$ 이면 불쾌하면서 졸린 상태, $270\sim 360^\circ$ 이면 불쾌하면서 각성된 상태를 나타내는 것이다. 두 가지 주행 조건 모두 전 주행시간에 있어서 불쾌하면서 각성된 상태가 가장 많은 것으로 나타났고(고속주행: 103case, 시내주행: 106case), 다음으로 쾌하면서 각성된 상태(고속주행: 23case, 시내주행: 25case), 불쾌하면서 졸린 상태(고속주행: 14case, 시내주행: 9case), 쾌하면서 졸린 상태(고속주행: 5case, 시내주행: 5case)의 순서로 많은 것으로 나타났다. 따라서 대부분의 경우에 각성상태로 나타났으나 불쾌의 경우가 상당히 많은 것을 알 수 있었다. 또한 시내주행은 고속도로 주행에 비하여 각성상태가 더 많았고 쾌한 경우도 더 많은 것으로 나타나, 운전자는 시내주행에서 상대적으로 각성을 유지하면서 기분 좋게 운전하고 고속도로에서 상대적으로 졸리거나 지루함을 느낀 것으로 사료된다.

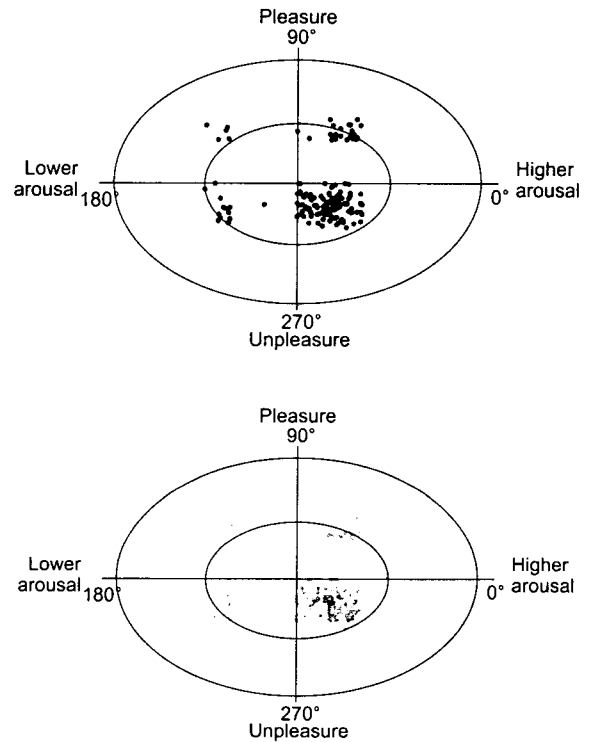


그림 4. 각 피험자별 벡터각도의 분포 (상단:고속도로, 하단:시내주행)

3.2 안전도

안전도(EOG; Electrooculogram)는 우측 동공을 지나가는 수직선상의 눈썹 위쪽 전액부와 아래쪽 안검부에 전극을 부착하여 피험자의 눈깜빡임 횟수를 측정하였고 눈깜빡임율(분당 눈깜빡임 횟수)을 구하였다.

그림5는 눈깜빡임율의 증감을 출발전 안정시를 기준으로 나타낸 것으로 고속도로 주행과 시내주행을 비교하였을 때, 고속도로 주행이 시내주행보다 눈깜빡임이 많았으며, 20~120분 경과시 및 160분 경과시에 통계적인 유의차가 인정되었다($p < 0.05$, $p < 0.01$). 고속도로 주행이 시내주행보다 고속으로 주행하므로, 피험자는 운전 중 전방의 도로상황에 집중하여야 한다. 따라서 고속도로 주행 시 안구의 좌우방향 움직임은 거의 나타나지 않고 주로 눈깜빡임이 많았던 것으로 생각된다.

시내주행에서는 주행초기 눈깜빡임율이 조금 감소하다가 주행중 다소 증가한 경향을 나타내어 증감의 변화가 적은 반면, 고속도로 주행에서는 주행시 크게 증가하고 정차시(90분)와 도착시(180분)에 크게 감소하여 증감의 변화가 현저하였고 통계적인 유의차도 인정되었다($p < 0.05$).

고속도로 주행과 시내 주행시의 눈깜빡임 횟수는 고속도로 주행의 경우가 시내주행시 보다 증가한 것으로 보아 고속도로 주행시에 보다 긴장감 혹은 불쾌감을 더 많이 느꼈고 이것은 운전 피로에 영향을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

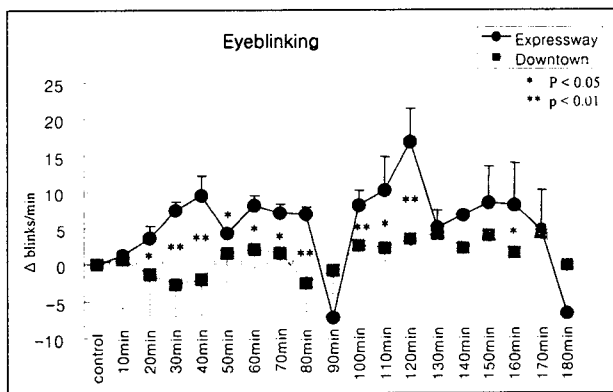


그림 5. 주행조건별 눈깜빡임율의 경시변화

3.3 심박수

심전도의 RR간격으로부터 구한 심박수는 고속주행초기 급격히 증가한 후 서서히 감소하다가 정차시에 급격히 감소하는 경향을 나타내었다(그림6). 출발전 안정상태를 기준으로 비교해 보면 고속도로 주행이 시내주행에 비하여 심박수가 상대적으로 증가하였고, 특히 주행30분에서 120분 사이에서 주행조건간의 유의차가 인정되었다($p < 0.05$).

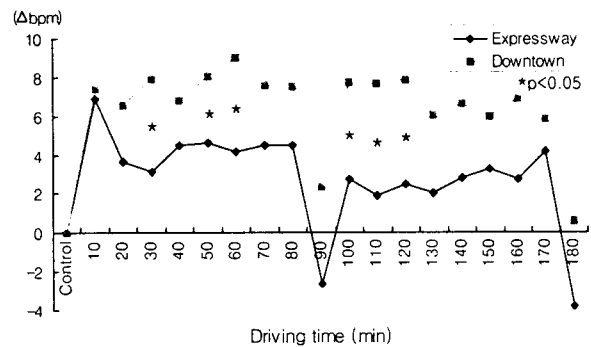


그림 6. 주행조건별 심박수의 경시변화

3.4 주관적인 운전 피로감

본 연구에서 조사한 주관적인 피로감 설문지는 운전으로 인한 피로감을 나타내는 23항목을 4점 척도로 평가하도록 구성되어 있으며 이 항목들은 졸림과 나른함, 주의집중의 곤란, 신체적 위화감군으로 분류되어진다. 주관적 피로감은 출발 전, 주행 90분 후(정차), 주행 180분 후(도착 후) 3회 측정하였으며 피험자가 직접 기록하도록 하였다.

운전 피로감(23항목)은 고속도로, 시내 주행시 모두 시간이 경과함에 따라 증가하는 것으로 나타났다(그림6). 즉, 모든 주행 조건에서 출발 전에 비하여 주행 90분 후에서 유의하게 증가하였으며($p < 0.05$) 주행 180분 후($p < 0.05$)에 더욱 증가하였고 통계적인 유의차가 인정되었다($p < 0.05$, $p < 0.01$). 동일한 시간대에서 도로 조건에 따른 운전 피로감은 주행 90분 후에는 고속도로에서 주행했을 때 시내주행보다 높았고 주행 180분 후에는 시내주행시 고속도로로 주행했을 때보다 더 높았으나 통계적인 유의차는 없었다.

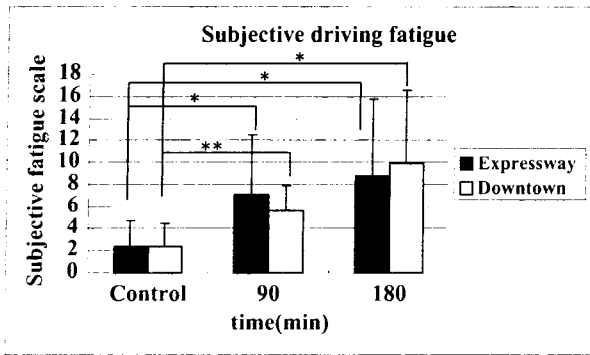


그림 7. 주관적인 운전 피로감 (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$)

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 도로상황 및 시간경과에 따른 운전자의 피로감을 알아보기 위하여, 고속도로와 시내주행에서 주행시간 경과에 따른 운전 피로감에 대하여 주관적인 평가 및 생리적인 평가를 통하여 비교 검토하였다. 피험자는 건강한 성인남자 8명으로, 각 피험자는 동일한 시간대에 3시간 주행을 이틀간 참가하였고, 주행전후 및 주행시 10분 간격으로 생리신호를 측정하고 주행전후 및 90분경과(정차)시에 주관적 평가를 실시하였다.

중추신경계 뇌파의 평균주파수는 고속도로 및 시내주행에서 출발전에 비하여 주행중에 조금 저하하는 경향이고 두 조건간의 현저한 차이는 없는 것으로 나타났다. 중추리듬에 의하여 구한 쾌적도는 전체적으로 시내주행이 고속도로 주행에 비하여 다소 높게 나타났고, 부분적으로 두 조건간의 통계적 유의차가 인정되었다. 중추리듬의 벡터각도에서는 두 가지 주행조건 모두 전 주행시간에 있어서 불쾌하면서 각성된 상태가 가장 많은 것으로 나타났고, 시내주행은 고속도로 주행에 비하여 각성상태가 더 많았고 쾌한 경우도 더 많은 것으로 나타났다.

안전도에 의한 눈깜빡임율은 고속도로 주행이 시내 주행보다 눈깜빡임이 많았으며 통계적인 유의차가 인정되었다. 즉, 시내주행에서는 눈깜빡임을 증감의 변화가 적은 반면, 고속도로 주행에서는 주행시 크게 증가하고 정차시(90분)와 도착시(180분)에 크게 감소하여 증감의 변화가 현저하였다.

그러나 심박수는 시내주행의 경우가 고속도로 주행에 비하여 주행중 전구간에 있어서 현저히 증가하여 신체적 부담이 큰 것으로 나타났다.

주관적인 운전 피로감은 고속도로 및 시내 주행시 모두 시간이 경과함에 따라 유의하게 증가하는 것으로 나타났다. 동일한 시간대에서 주행조건에 따른 운전 피로감은 주행 90분 후에는 고속도로에서 주행했을 때가 더 높았고 주행 180분 후에는 시내 주행시가 더 높았다.

이상의 결과로부터 3시간의 고속도로 주행 및 시내주행의 경우 운전자가 느끼는 피로감은 시간 경과에 따라 현저하게 증가하였는데, 고속도로의 경우에는 졸림감에 의한 피로, 시내주행의 경우에는 신체적 위화감에 의한 피로가 증가하는 것으로 평가되었다. 또한 중추신경계의 측정결과 양 주행조건 모두 각성되고 불쾌하게 나타났으나 시내주행의 경우가 상대적으로 각성되고 쾌한 경우가 많았던 것으로 나타났다. 시내주행의 경우는 고속도로 주행에 비하여 심박수의 변화가 심하고 고속도로의 주행에서는 눈깜빡임이 크게 증가하였다. 따라서 2가지 주행조건 모두 운전시간이 경과함에 따라 피로감을 느끼나 그러한 피로감을 느끼는 원인이나 현상은 상이한 것으로 나타났다. 그러므로 고속도로 주행시에는 졸림감이나 지루함을, 시내주행시에는 신체적 불편함을 경감시키는 대책마련이 요구된다고 할 수 있겠다.

5. 참고문헌

- [1] Lal, S.K. and Craig, A, A critical review of the psycho-physiology of driver fatigue, *Biol Psychol*, 55(3), p173-194, 2001
- [2] Yoshida T, 1/f-like frequency fluctuation in frontal alpha wave as an indicator of emotion, *Proceeding of the KOSES & International Sensibility Ergonomics Symposium*, p99-103, 2000