

심장박동변량과 뇌전위 변화를 통해 본 운전자 피로의 특성

노영한¹ · 박형준² · 이순철¹

¹충북대학교 심리학과 · ²원광대학교 전기공학부

본 연구는 운전자에게서 측정된 생리측정 자료를 분석하여 운전시간의 경과에 따른 피로의 변화를 알아보기 위해 행해졌다. 피로의 지수로써 심장박동변량(Heart Rate Variability; HRV)과 뇌전위(Electroencephalogram; EEG)를 이용하였다. 피로로 인해 운전자의 주의력이 감소하게 되면 HRV가 증가하지만, 반면에 운전자의 작업부하가 증가하면 HRV는 감소한다. EEG의 경우 알파파와 베타파와 같은 속파(速波)는 각성수준과 관련이 있는 반면에, 델타파와 세타파와 같은 서파(徐波)는 이완이나 수면과 관련이 있다. 운전행동과 HRV의 변화를 분석한 결과, 본 연구에서의 분석에 이용된 4 건의 사례 중 사례 2를 제외한 나머지 세 개의 사례들에서 운전시간이 경과함에 따라 HRV는 전반적으로 증가하였으며, 특히 운전 후 30 분이 경과하면서 HRV의 증가가 크게 나타났다. 운전상황의 분석이 가능했던 연구사례 1을 중심으로 HRV와 EEG의 변화를 분석한 결과, 운전 후 10 - 15분, 30 - 35분, 60 - 65분 구간에서 HRV의 증가가 peak를 이루었으며, 특히 30 - 35분 구간에서의 HRV의 증가가 가장 크게 나타났다. 주행구간별로는 고속도로에서의 HRV가 가장 높게 나타났고, 램프구간에서의 HRV가 가장 낮게 나타났으며, 그리고 램프구간을 지나 I.C. 구간에서 국도구간으로 이동함에 따라 HRV는 다시 증가하였다. 주행속도별로는 고속주행시의 HRV가 정상속도주행시보다 더 낮게 나타났다. 운전 중 흡연상태에 따른 HRV의 분석결과, 흡연 이전단계에서 흡연을 마친 단계로 이동함에 따라 HRV는 점차 감소하였다. 연구사례 1의 경우, 운전시간이 경과하면서 EEG의 파형들 중 서파(徐波)는 점차로 증가한 반면에, 속파(速波)는 감소하였는데, 특히 30분이 경과하면서 서파(徐波)의 증가가 크게 나타난 반면에, 속파(速波)는 가장 많은 감소를 보였다.

운전이란 작업은 매우 복잡한 과정의 연속이다. 운전 중 운전자가 잠시 운전이 필요한 행위에서 벗어나 다른 행위를 하게 되면 사고로 이어질 확률이 높아지게 된다.

자동차 운전에서는 지각, 의사결정, 운동기능 등을 포함하여 모든 분야의 인간 능력이 필요하다. 때로는 스트레스를 받는 조건에서조차도 이러한 능

력을 고도로 발휘해야 한다(Sanders & McCormick, 1996). 특히 운전이라는 작업은 일반 다른 형태의 작업과는 달리 운전자에게 있어 고도의 연속적인 주의집중을 요하는 작업이라 할 수 있다. 따라서 운전자는 운전 중 외부환경으로부터 유입되는 많은 자극들에 긴장과 주의력을 갖고 대처해야 한다. 이와 같은 운전작업을 휴식이나 적절한 수면이

없이 장시간 계속 하게 되면, 운전자에게 지나친 스트레스와 그로 인한 피로감을 유발할 수 있는데, 이는 특히 영업용 차량의 운전자들에게 있어 심각한 부담이 되고 있다(강규성, 1982). 또한 도심지 교통상황에서 운전을 하는 버스 및 택시 운전기사들이나 장거리 운전을 하는 트럭 운전기사들의 경우 지나친 근무시간에 비하여 휴식이 턱없이 부족하기 때문에 상당한 피로감을 느끼고 있다(Milosevic, 1997). 이와 같이, 운전자들이 경험하는 피로는 복잡한 과정을 거치는 운전작업에서의 의사결정에 오류를 유발할 수 있으며, 이는 보다 치명적인 사고로 이어질 수 있다.

Cameron(1973)은 운전 중 운전자에게서 나타나는 피로에 관심을 갖는 연구들은 안전이라는 개념을 궁극적인 목표로 삼고 있다고 보았다. 그는 산업화가 이루어진 국가들에서는 장거리를 빠르게 이동할 수 있는 고속도로의 체계가 발달되어 있으며, 그것이 장거리 운전을 하는 트럭 및 버스 운전자들의 피로를 지속적으로 연구할 수 있는 강력한 계기를 마련해 주었다고 보았다. 또한 운전 중 발생하는 피로에 관한 유용한 자료를 최대한 활용하여 운전시간에 대한 법적인 규제, 휴식시간에 대한 규정 등을 명확히 할 필요가 절실하다고 설명하였다. 그리고 Brown(1994)도 비록 도로교통사고의 원인으로써 피로가 충분히 인식되지 못하고 있는 상태이지만, 피로에 관한 보다 객관적인 연구를 수행함으로써 피로가 운전수행에 미치는 결과를 이끌어 낼 수 있다고 보았다.

운전자의 피로에 관한 연구들은 다양한 방법과 기법을 사용하고 있다. 운전자의 피로를 연구하는 방법에는 운전 전·후에 정신생리적 테스트 및 생화학적 테스트를 실시하여 피로를 측정하거나 운전을 하는 동안 지속적으로 생리적·행동적 변화를 기록하는 방법이 있다. 또한 부가적인 작업에 있어서의 수행을 측정하거나 피로에 대한 운전자의 증상을 측정하는 척도와 질문지를 이용하

여 주관적인 평가를 하는 방법들도 이용되고 있다(Milosevic, 1997).

본 연구는 운전 중 운전자에게서 측정한 생리측정 자료들 중 심전도(Electrocardiogram: ECG)와 뇌전위(Electroencephalogram: EEG) 자료를 분석하여 운전시간의 경과와 주행 상황(주행구간, 주행속도, 흡연상태)에 따른 운전자의 생리적 변화를 알아보고, 이것을 피로와 관련지어 운전시간의 경과에 따른 피로의 출현 시점과 지속시간과 같은 피로에 대한 객관적인 자료를 얻고자 하였다. 그리고 비록 운전자가 주관적으로 피로를 느끼지 않는다 하더라도 수행의 감소를 초래할 수 있는 생리적 변화에 대한 분석을 통해 피로에 관한 객관적인 자료를 얻음으로서, 운전 중의 경계(vigilance) 및 주의과제에서의 수행감소를 최소화할 수 있는 효율적인 운전시간에 대해 알아보하고자 한다.

이론적 배경

피로와 운전행동

피로에 관해 수행된 연구들은 크게 3가지 주제로 분류될 수 있다(Cameron, 1973). 첫 번째 주제는 산업 장면에서의 생산성과 피로를 관련짓는 것이었는데, 주로 제1차 세계 대전과 그 후에 수행된 연구들에서 다루어졌다. 당시의 연구들은 작업자의 생산성이 피로로 인해 줄어든다는 것을 증명하고 피로를 줄이는 방법을 모색하여 높은 수준의 생산성을 유지하려는 데에 관심을 가졌었다. 두 번째 주제는 1940~1950년대 사이 항공기 특히 군용 항공기 조종사의 수행과 피로를 관련지었던 연구들에서 다루어졌다. 이러한 연구들은 항공기 조종과 같은 숙련된 작업에서 나타나는 피로와 기타 다른 형태의 스트레스로 인해 유발되는 수행의 변화에 관심을 가졌었다. 세 번째 주제는 1940년대에 시작되어 이후로 꾸준한 관심을 모았던 운전자의 피로에 관한 것이다. 이 분야에서의 연구들은

사고와 관련하여 운전작업에서 나타나는 피로와 그에 따른 결과들에 관심을 가졌다.

비록 피로에 관한 많은 연구들이 수행되었지만, 피로라는 것은 한 마디로 정확히 정의 내리기가 어려운 복잡한 현상이다. 그러나 넓은 의미로서 피로라는 개념은 작업자들에게 있어서 작업에 필요한 능력이 감소한 상태를 의미한다(Brown, 1994).

피로에 관한 선행연구들에서는 작업자에게서 나타나는 피로를 심리적 피로와 생리적 피로로 구분하고 있다. Brown(1994)에 의하면, 심리적인 피로란 자신에게 주어진 작업을 계속적으로 수행하는 상황에서 작업자가 주관적으로 지각하는 수행저하를 의미하는데, 작업자가 심리적인 피로를 지각하게 되면, 작업수행에서의 효율성이 감소하게 된다. 심리적인 피로는 신체 내의 에너지의 고갈에 의해서만 발생하는 것이 아니며, 또한 단순히 수행이 감소했다는 것만으로 측정할 수 있는 것이 아니다. Bartley와 Chute(1947)는 심리적인 피로는 생리적인 손상과는 달리 항상 직접적으로 경험되어지는 것이라고 보았다. 그들에 의하면, 생리적인 피로란 근육 조직에서의 산소고갈로 인해 발생하는 신체상의 능력감소 즉, 생리적인 손상(impairment)을 의미한다. 그들은 심리적 피로와 생리적 피로가 반드시 동시에 발생하지 않는다고 보았다. 즉, 개인이 비록 피로를 느끼지 않더라도 수행이 저조할 수 있으며, 반대로 수행이 적절하더라도 개인이 피로를 느낄 수 있다.

Brown(1994)은 피로가 연장된 작업 수행에 의해서 뿐만 아니라 신체와 정신에 영향을 주는 심리적·환경적·사회경제적인 요인들에 의해서 발생한다고 보았다. 특히, 피로는 작업자가 작업부하에 대처하기 위해 노력을 기울이는 상황과 그리고 주의, 지각, 의사결정 과정에서의 예측할 수 없는 사건들에 지속적으로 대처하는 상황에서 발생한다. 피로의 결과로서 나타나는 현상은 다양하다. 먼저 피로에 따른 일반적인 현상을 살펴보면, 운전을 포함한 일

반적인 작업에서는 시간경과에 따라 물리적 노력을 요하는 활동에서 뿐만 아니라 경계(vigilance), 선택적 주의, 복잡한 의사결정, 자동화된 지각-운동 제어 기능과 같은 인지적 활동에서도 변화가 발생한다. Bartlett(1948)는 피로의 출현신호라 할 수 있는 행동상의 특징 네 가지를 제시하였는데, 작업자가 움직임을 통제하는 데에 있어서 시간적으로 부적절해지며, 작업자가 자극에 반응하기 위해선 앞선 반응에서 제시되었던 자극보다 더 큰 자극을 요구하는 경향이 발생한다. 그리고 정상적인 예측에 소요되는 시간이 명백히 감소하며 신체적으로 변화에 매우 민감하게 반응하게 된다.

피로가 운전행동에 미치는 영향을 野澤와 小木(1980)은 세 가지로 설명하였는데, 운전태도가 거칠고 치밀하지 못하게 되며, 지각 및 운동계통의 협동관계가 떨어지고, 그리고 반응동작이 둔화된다. Brown(1994)은 피로의 주된 결과로서 운전자들의 주의력이 점진적으로 약화된다고 보았다. 이 경우, 겉으로 보기에 차량 통제를 제대로 하고 있는 것처럼 보이지만, 실제로 피로로 인해 운전자들의 차량 통제력, 주의력, 및 경계 능력이 손상되어 교통사고를 회피할 수 있는 운전자들의 능력이 저하된다. 그리고 운전자의 주의력 손상에 따른 가장 빈번한 증상은 졸음(eye closure)이다. 이는 단조로운 운전 상황이 점진적으로 운전자의 주의를 내적인 사고 과정으로 전환시킴으로서 발생한다. 더욱이 이러한 현상은 운전자가 피로를 느끼지 않고 또한 외부환경을 주시하고 있는 상태에서조차도 발생할 수 있다.

그러나 운전이란 작업에서 피로가 나타난다고 하여도 그것이 지속적으로 유지되는 것은 아니다. 비록 피로한 상태에서 운전을 할지라도, 운전자는 스스로 또는 외부요인에 의해 피로를 상쇄하는 어떠한 행동(예; 라디오 볼륨을 올리기, 창문 열기, 흡연 등)을 하게 된다. 따라서 피로가 잠시 출현을 하였다 하더라도 그것은 지속적으로 유지되지 않

으며, 피로를 상쇄하는 행동을 통해 운전자는 적절한 각성 수준을 유지하기 위한 노력을 기울인다. 그럼으로써 운전 작업을 계속 수행할 수 있게 되는 것이다. 만일 운전 중 피로가 지속적으로 유지된다면, 그것은 곧 사고로 이어질 가능성이 그만큼 높다는 것을 의미한다고 볼 수 있겠다.

운전행동과 피로를 관련지어 볼 때 중요한 주제로서 고려할 수 있는 것으로 경계작업(vigilance task)을 들 수 있다. 이순철(1995)은 고속도로와 같이 변화가 적고 위험사태의 출현이 적은 교통상황에서, 적절한 운전작업을 수행하기 위해 전방을 계속 주시하여야 하는 운전작업을 예측할 수 없는 사태에 대처하기 위해 주의를 지속시키는 경계작업이라 볼 수 있다고 하였다. 이러한 경계작업에서는 단조로움에 빠지기 쉽고, 주의력이 저하되며, 그리고 졸음이 오거나 과제수행능력이 저하된다. 마찬가지로 Milosevic(1997)도 운전작업과 경계(vigilance)간에는 상당히 밀접한 관련이 있다고 보았다. 그는 운전 중 경계작업 수행에서의 감소가 자동차 사고의 원인에 있어서 상당히 많은 부분을 설명할 수 있다고 보았다. 또한 Wiener(1984)는 운전자들에게서 나타나는 수행수준의 감소현상이 경계작업 수행에서의 감소나 운전피로에 의해 유발된다는 사실을 지적하였다. 그리고 Dureman과 Bodén(1972)은 운전 시뮬레이터를 이용하여 운전 시간의 경과에 따른 경계 작업수행 수준의 변화를 연구하였는데, 운전시간이 경과함에 따라 운전자들의 경계작업 수행수준이 감소한다는 사실이 밝혀졌다.

Brown(1994)은 개인이 주관적으로 경험하는 피로를 연구하는 데 있어서 다음과 같은 문제점이 발생할 수 있다고 보았다. 먼저 운전자가 피로를 경험하게 되면, 내적 통찰력이 손상되어 피로를 보고하는 데 있어서의 신뢰성을 떨어뜨릴 수 있다. 그리고 주관적인 피로를 연구하는 데에 사용되는 기법으로 체크리스트 및 질문지 등이 이용되는데, 운전자들이 이러한 질문지에 반응하는 자체가 또

다른 자극요인이 될 수 있다. 따라서 운전자들의 주관적인 경험에만 의존하는 것보다는 생리적인 측정치를 이용하여 피로를 분석하는 것이 보다 객관적인 결과를 얻을 수 있는 방법이라 하겠다. 운전자의 행동을 생리측정장치를 이용하여 측정할 경우에 얻을 수 있는 장점으로는, 도로조건이나 그 밖의 외적상황의 변화에 따른 운전자의 반응을 즉각적으로 알아볼 수 있으며, 중추신경계나 자율신경계의 반응을 그대로 기록계가 입력하므로 피험자 반응조작의 문제를 배제할 수 있다. 그리고 기계로 입력된 생리적인 반응을 수치로 정량화할 수 있다(이순철, 1995).

운전행동과 정신·생리적 반응과의 관계

본 연구에서는 운전행동과 피로와의 관계를 알아보기 위한 생리측정 자료로서 뇌전위와 심전도를 분석하였다.

뇌전위(Electroencephalogram; EEG) 활동은 파형의 모양, 주파수, 진폭 그리고 특정 주파수의 기간을 기초로 하여 분류한다. 주로 발견되는 뇌파들에는 20~60 μ V의 높은 진폭과 8~13 Hz의 적은 주파수를 보이는 뇌전위 파형으로서 흔히 눈을 감고 이완된 자세로 앉아 있는 경우에 유발되는 알파파(α wave)와 2~20 μ V의 진폭과 14~30 Hz 정도의 주파수를 보이는 불규칙적인 파형으로서 정신적인 활동이나 신체적 운동에 의해 발생하는 베타파(β wave)가 있다. 그리고 최고 100~200 μ V의 큰 진폭과 0.5~3.5 Hz 정도의 적은 주파수를 보이는 파형으로서 정상인이 깊은 수면을 하고 있을 때 대개 나타나는 델타파(δ wave)와 20~100 μ V의 진폭과 4~7 Hz 정도의 주파수를 보이는 파형으로서 즐겁거나 불만상태 또는 졸고 있는 성인에게서 나타나는 세타파(θ wave)를 들 수 있다. 경계 및 신호탐지와 관련된 뇌파활동과의 관계를 밝힌 여러 연구들의 결과, 세타파와 알파파의 활동이 증가되면 상대적으로 탐지능력 및 경계과제에서의

수행이 떨어지지만, 그러나 베타파의 활동이 많을 수록 상대적으로 수행이 우수해진다는 사실을 발견하였다(이인혜 외 12인, 1997). 또한 운전자의 속도에 따른 뇌전위 반응을 측정 한 연구에서는 주행속도가 증가할수록 델타파와 세타파와 같은 서파(徐波)는 감소하고 알파파와 베타파와 같은 속파(速波)는 증가하였다. 특히 각성상태를 반영하는 지표라고 할 수 있는 베타파가 증가하여 주행시 속도를 높이면 중추신경계가 활성화되어 긴장상태 혹은 각성상태에 들어감을 예상할 수 있었다(이순철, 신용균, 오애령, 1995).

심전도(Electrocardiogram : ECG)는 심장이 수축함에 따라 심박동과 함께 발생하는 전위차를 곡선으로 기록한 것이다(김대석 외 7인, 1997). 심전도에서 나타나는 파형에는 여러 가지가 있지만 대표적으로 사용되는 파형들에는 먼저 ECG상에 기록되는 최초의 파로서 심방의 탈분극에 의해 일어나는 양성파인 P파와 심실의 탈분극에 의해 형성되어 음성파와 양성파를 번갈아 나타내는 QRS 군이 있다. 그리고 심실의 재분극에 의해 형성되며, 심실흥분 회복기를 나타내는 T파와 T파에 이어 바로 뒤에 그려지는 매우 작은 평탄한 파인 U파 등이 있다. ECG를 통해 운전자에게서 나타나는 피로를 알아보기 위한 방법으로, 연속적으로 기록되는 심전도의 파형들 중 가장 두드러진 파형인 R파의 출현 간격, 즉 R파와 R파 사이의 시간간격의 변화를 의미하는 심장박동변량(Heart Rate Variability : HRV)을 이용하여 운전행동에 따른 심전도의 변화를 살펴본 연구들의 결과, 운전시간이 경과함에 따라 HRV가 증가한다는 사실이 발견되었다(O'Hanlon, 1972). 그리고 운전자에게 있어서 정신적인 작업의 횟수가 증가할수록 HRV가 감소하지만, 반대로 정신적인 작업의 횟수가 감소할수록 HRV가 증가하였다(Egelund, 1982; Assman, Hartley, & Arnold, 1994; Mulder & Mulder 1987; Wilson, 1993).

운전작업은 다른 형태의 작업과 달리, 운전자가

지닌 가용한 자원의 100% 모두를 요구하지 않는다고 볼 수 있다. 즉, 운전작업에 요구되는 여러 기능들 중 어느 한 기능이 저하되더라도 다른 기능이 대신 작용하여 운전작업이 유지될 수 있다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 작업자가 가진 가용한 자원의 100% 모두를 사용해야 하는 작업(예; 한 손으로 20kg의 추를 팔 근육의 한계 상황까지 들어올리고 있는 작업)과는 구분되는 운전작업에서의 피로에 관심을 가졌다.

연구방법 및 절차

생리측정 자료

본 연구에서는 도로교통안전관리공단 교통과학연구원에서 수행한 4건의 연구들에서 측정된 생리 측정치자료를 이용하였다. 본 연구에서 이용한 4건의 연구들은 각각 독립적인 연구들이었다.

실험차량 및 탑재장비

운전자의 정신·생리적 반응을 측정하기 위해 도로교통안전관리공단 교통과학연구원의 실험차량이 사용되었다. 그리고 차량에 탑재된 생리측정장치로는 BIOPAC SYSTEMS Inc.에서 제작한 MP100WS (hardware part)를 사용하였다.

자료분석

실험차량에서 측정된 자료의 입력 및 분석은 MP100WS의 software part인 AcqKnowledge, version 3.0을 사용하였다. 심전도를 이용하여 심장박동변량(Heart Rate Variability; HRV)을 분석하는 여러 방법들 중에 연속적으로 기록되는 심전도의 파형들 중에서 가장 높게 나타나는 파형인 R파의 출현 간격, 즉, R파와 R파 사이의 평균시간의 변화를 가지고 HRV를 분석하였다. AcqKnowledge, version 3.0을 이용하여 심전도 파형들 중 가장 높은 파형인 R파를 추출하여 R파와 R파 사이의 시간간격을

수치화 하여 평균을 구하였다. 그 후 R파와 R파 사이의 시간간격의 변량을 나타내는 HRV를 계산하기 위해 계산 프로그램을 이용하여 HRV의 값을 구하였다. 또한 뇌전위(Electroencephalogram; EEG)의 경우도 AcqKnowledge, version 3.0을 이용하여, 주파수 대역별로 하위뇌파들이 차지하는 비율을 알아보는 대역별 분석(spectral analysis)을 이용하여 이를 수치화 하였다. 그리고 대역별 분석에서 나타난 수치를 계산 프로그램을 이용하여 각 파형별로 차지하는 비율을 계산하였다.

본 연구에서 분석한 4건의 연구사례에서 얻은 생리측정치 자료 중에서 사례 1의 경우는 HRV와 EEG 두 개의 측정치를 분석하였다. 그리고 사례 2, 사례 3, 사례 4의 경우는 EEG의 자료가 손상되어 HRV만 분석하였다.

실험주행 구간

본 연구에서 분석한 4건의 연구사례 중 사례 1의 경우는 실험주행 구간이 고속도로와 국도를 동시에 사용하였다. 그리고 나머지 사례 2, 사례 3, 사례 4의 경우는 모두 고속도로에서만 실험주행을 하였다.

운전상황 분석

본 연구에서 분석한 4건의 연구사례 중 사례 1을 제외하고는 운전상황을 비디오로 녹화하지 못하였다. 각 연구사례별 운전시간은 사례 1의 경우

전체 운전시간은 1시간 20분이었고, 사례 2의 경우는 1시간, 사례 3의 경우는 1시간 20분, 그리고 사례 4의 경우는 55분이었다.

사례 1의 운전상황 비디오 분석

전체적인 운전상황을 녹화된 비디오 테이프를 통해 분석할 수 있었던 사례 1의 운전상황을 그림 1에서 제시하였다.

그림 1에서 보듯이 운전자는 49분 43초 동안 고속도로 주행을 수행하다가 국도로 빠져나가기 위해 램프에 진입을 하였다. 램프에서 소요된 운전시간은 25초였으며, 램프를 통과한 후 50분 08초에 I.C.에 진입하였다. 국도로 빠져나가기 전 구간인 I.C.에서 소요된 운전시간은 1분 01초였으며, 이후 51분 09초부터 운전상황이 종료하기 전까지 국도를 이용하여 주행을 하였다.

결 과

운전행동과 HRV의 변화

그림 2는 본 연구에서 분석된 4건의 연구사례에서 운전시간의 경과에 따른 HRV의 변화를 보여주고 있다. 각각의 사례에서 분석간격을 5분으로 하여 HRV를 구한 후, 최초 0-5분 구간을 기준으로 하여 이후 운전시간의 경과에 따른 HRV의 증감을 계산하였다.

그림 2에서 보듯이 사례 2를 제외한 나머지 사

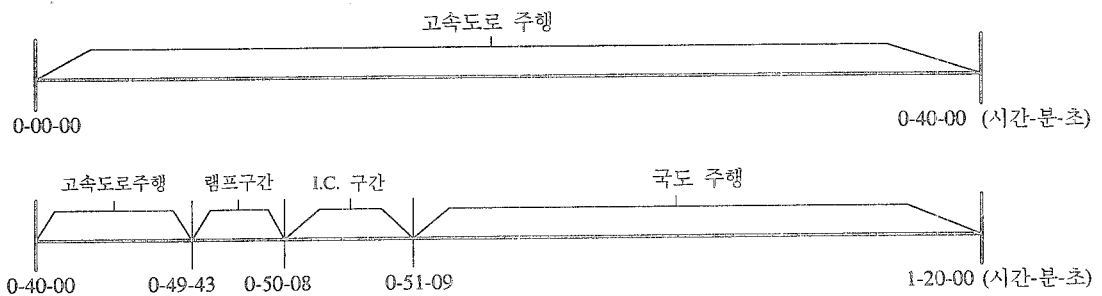


그림 1. 연구사례 1의 운전상황 분석

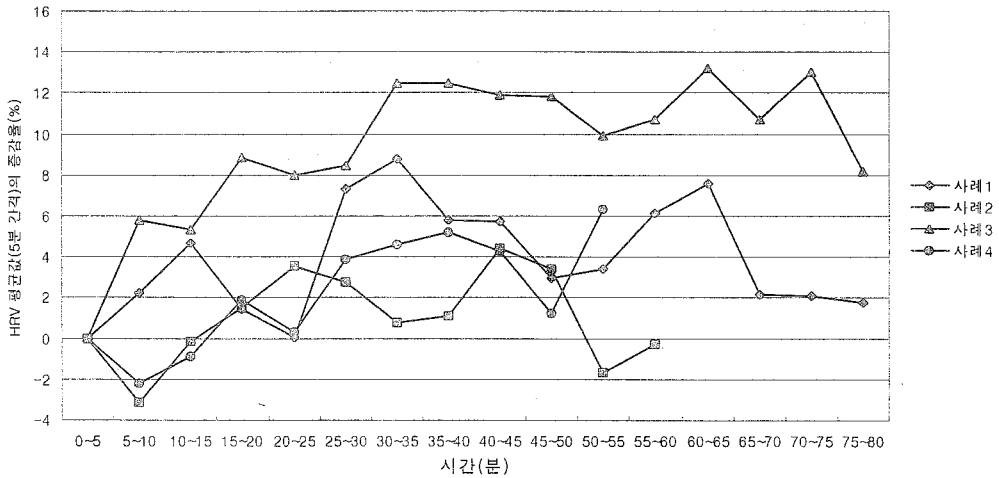


그림 2. 각 사례별 HRV의 평균의 증감율(%)

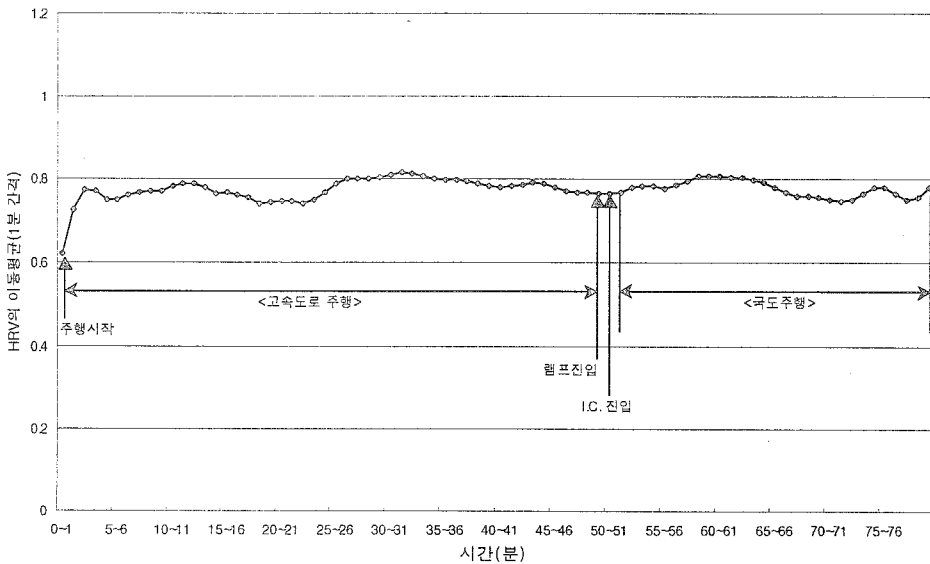


그림 3. 운전시간 경과에 따른 HRV 이동평균의 변화

래에서 HRV는 운전시간이 경과함에 따라 기준구간(0-5분)과 비교하여 전반적으로 증가하고 있다. 이러한 결과는 운전시간이 경과함에 따라 HRV가 증가하였다는 O'Hanlon(1972)의 연구결과와 일치한다. 그리고 4개의 사례 모두에서 실험주행시간이 끝나감에 따라 HRV가 전반적으로 감소하는 것으로 나타났다.

실험주행상황을 비디오로 녹화하여 운전상황을 분석할 수 있었던 연구사례 1의 자료를 중심으로 HRV와 EEG의 분석결과를 살펴보면 다음과 같다.

그림 3은 전체 운전시간을 1분의 구간으로 나누고, 각각의 구간별로 HRV 평균을 산출한 후, 그 값을 통해서 얻어진 이동평균의 변화를 보여주고 있다. 그림 3에서 보듯이 연구사례 1의 경우, 운전

시간이 경과함에 따라 HRV의 이동평균의 값이 시작지점보다 전체적으로 증가하고 있다. 비디오를 통해 운전상황을 분석한 결과, 고속도로 구간 중 15-25분 구간에서는 주행차선과 노선을 반복적으로 오가며 주행을 하였고, 특히 공사구간에 있어서는 장애물을 피하여 주행을 한 구간이었다. 따라서 운전자에게 있어서 작업부하가 증가한 상태로 운전을 한 구간이며, 그러한 결과로 HRV의 변화 곡선이 하강하였다고 볼 수 있다. 그리고 25분이 경과한 지점부터는 정상적인 고속도로 주행이 이루어졌는데, 이 구간을 주행하는 동안 운전자에게 피로가 증가하여 HRV의 변화곡선이 다시 상승한 것으로 볼 수 있다. 그리고 램프구간과 I.C. 구간을 이동함에 따라 HRV의 변화 곡선이 다시 하강하였는데, 이 구간들에서 운전자의 각성수준이 증가하였음을 알 수 있다. 그리고 국도구간을 주행하면서 다시 HRV의 변화 곡선이 상승하였지만, 65분 구간부터는 휴먼 및 추월, 그리고 의도적인 가속상황으로 인하여 HRV의 변화 곡선이 하강하였다.

그림 4에서는 운전시간의 경과에 따른 HRV의 이동평균의 증가율을 보여주고 있다. 운전시간의 경과에 따른 HRV의 변화를 보다 명확히 알아보기 위

해, 전체 운전시간을 5분으로 나누고, 각각의 구간에서의 HRV의 평균을 산출한 후, 그 값을 통해 각 구간의 이동평균의 값을 계산하였다. 그리고 다시 최초 0-5분 구간을 기준구간으로 정하고, 이후 구간에서의 이동평균의 증가율을 계산하였다. O'Hanlon (1972)은 운전시간이 경과함에 따라 운전자의 피로 상태를 예측할 수 있는 지수인 HRV가 증가한다는 사실을 밝혔다. 또한 Assman, Mulder, & Mulder (1987)는 HRV의 증가는 각성수준의 저하를 의미하며, 이는 반대로 피로가 증가하였음을 의미하는 것이라고 보았다. HRV와 피로의 이러한 관계를 고려한다면, 그림 4에서 제시된 HRV의 변화를 통해 운전 후 10-15분, 30-35분, 60-65분 구간에서 운전자에게 급격한 피로가 나타난다고 볼 수 있다. 특히 30-35분 구간에서 HRV의 증가율이 가장 높았다는 것은 이 구간에서의 피로가 정점을 이루고 있는 것으로 생각할 수 있다. 또한 운전시간이 경과하면서 운전자는 35분 이내에 최대의 피로를 경험하고 이후 피로가 점차 감소하다가 다시 증가하는 것을 반복하여 경험하고 있음을 알 수 있다. 이러한 변화는 운전작업을 수행하는 동안 운전자에게 피로가 지속적으로 증가하지 않는다는 것을 시

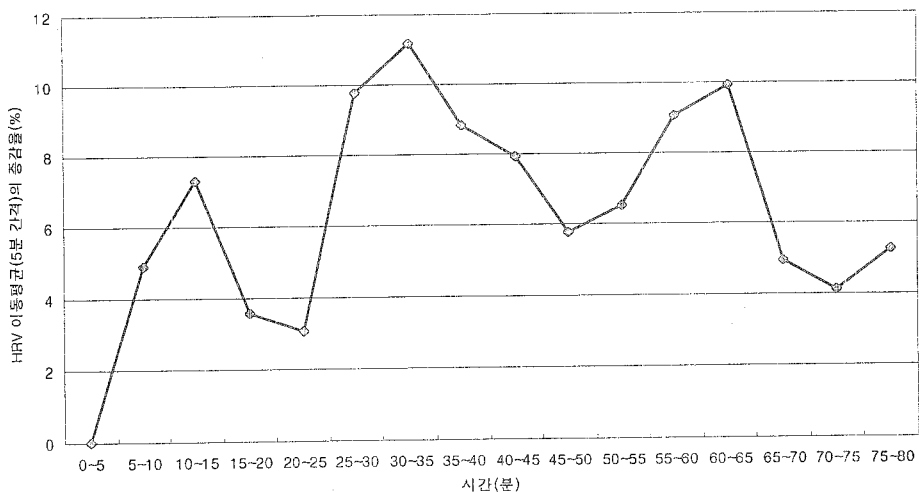


그림 4. 운전시간 경과에 따른 HRV 이동평균의 증가율(%)

사해 준다고 볼 수 있다. 즉, 운전자는 운전 중 피로를 상쇄할 수 있는 행동을 함으로서 운전이 필요한 주의 및 경계작업에서의 수행수준을 유지하려 한다고 볼 수 있다. 이러한 현상은 달리 말해, 피로가 정점에 이르러 운전자의 주의력이 크게 손상된 순간에 돌발적인 상황이 발생하는 경우, 운전자가 미처 그 상황에 대처하지 못해 사고로 이어질 가능성이 그만큼 높아질 수 있다는 가능성을 보여주고 있다.

그림 5에서는 주행구간별 HRV의 평균을 보여주고 있다. 그림 5에서 보듯이 고속도로 주행시

HRV의 평균이 가장 높은 반면에 램프구간 주행시 HRV의 평균이 가장 낮게 떨어졌으며, 인터체인지를 거쳐 국도를 주행하면서 다시 HRV의 평균이 증가하고 있음을 알 수 있다. 고속도로 구간에 비해 램프구간에서의 HRV의 평균값이 감소하였다는 것은 고속도로 주행시보다 램프구간에서의 주행이 운전자에게 더 높은 각성수준을 요구하고 있는 것으로 생각할 수 있다. 즉 운전자는 고속도로에서 국도로 빠져나가기 위해 램프에 진입을 하면서 피로에 의해 손상된 주의력을 회복하기 위한 노력을 더 많이 하고 있으며, 또한 고속도로 주행에서보다

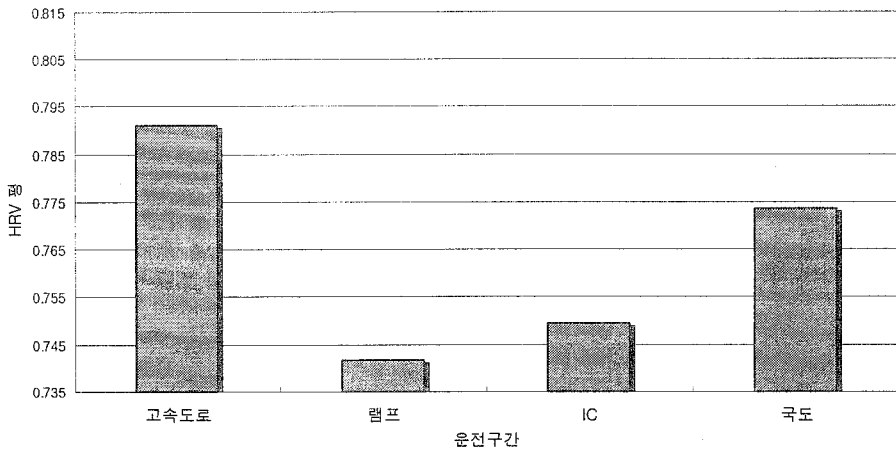


그림 5. 고속도로, 램프, I.C. 및 국도 주행시 HRV의 평균 비교

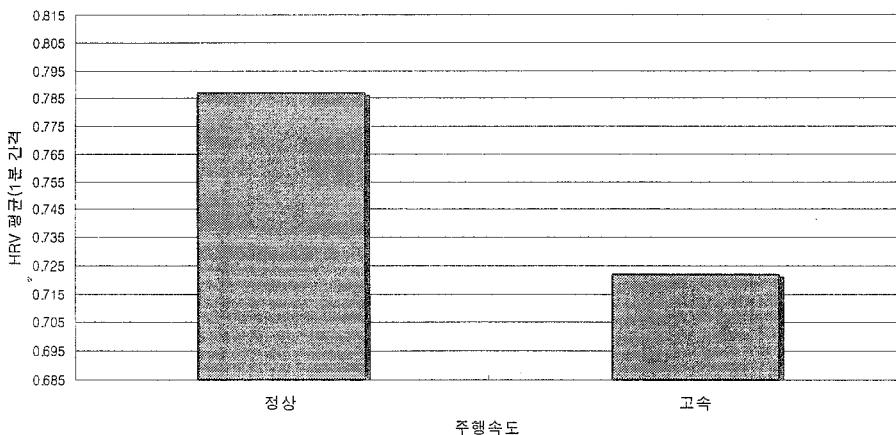


그림 6. 주행속도별 HRV 평균 비교

램프구간에서의 주행이 운전자에게 더 높은 수준의 작업부하를 요구한다고 볼 수 있다. 이는 만일 운전자가 운전상황이 비교적 단조로운 고속도로에서의 주행을 통해 피로가 증가한 상태에서 램프에 진입을 할 때 램프구간 주행에 요구되는 각성수준을 회복하지 못한다면 사고로 이어질 가능성이 높다는 것을 의미한다고 볼 수 있다.

그림 6은 주행속도에 따른 HRV 평균을 비교하기 위해 국도 주행 중 60 Km/h로 주행을 한 구간과 100 Km/h로 주행을 한 구간을 각각 1분씩 선정하여 HRV의 평균을 계산하여 비교한 결과를 보여주고 있다. 정상적인 속도로 주행한 구간에서의 HRV의 평균이 고속으로 주행한 구간에 비해 높게 나타났다. Luczak(1979)은 정신적인 부하가 증가할수록 HRV는 감소한다고 하였다. 즉, 작업자가 정신적인 노력을 많이 할수록 HRV는 감소한다는 것이다. 이러한 관점에서 볼 때, 고속주행시 운전자에게 더 많은 정신적인 부하가 걸린다고 생각할 수 있다.

그림 7은 운전 중 흡연이 운전자에게 미치는 생리적인 현상을 알아보기 위해 국도주행에서 흡연 전·중·후 각각 2분씩을 발췌하여 HRV의 평균을 계산한 결과를 보여주고 있다. 흡연을 함으로써 점

차로 HRV의 평균이 감소함을 알 수 있다. 이러한 사실을 통해 운전 중의 흡연행동이 운전자의 작업 부하 수준을 높여주는 역할을 하고 있다는 것으로 생각할 수 있다.

운전행동과 뇌전위(Electroencephalogram; EEG)

다음은 연구사례 1을 중심으로 운전시간의 경과에 따른 뇌전위(Electroencephalogram; EEG)의 변화를 살펴보았다.

그림 8은 전체 운전시간을 5분으로 나누고, 각각의 구간에서 하위뇌파들이 차지하는 면적의 비율을 구한 후, 기준구간(0-5분)과 비교하여 이후의 구간에서의 증감율을 계산한 결과를 보여주고 있다. 그림 8에서 보듯이 운전시간이 30분을 경과하면서 이완이나 수면시에 나타나는 서파인 델타파와 세타파는 증가하였지만, 반대로 각성시에 나타나는 속파인 베타파는 감소하였음을 알 수 있다. 즉 운전시간이 30분을 경과하면서 운전자의 각성수준이 저하되었다고 볼 수 있다. EEG의 이러한 변화는 HRV 분석결과와 마찬가지로 운전 후 30분이 경과하면서 운전자의 각성수준이 저하되고 있음을 보여준다.

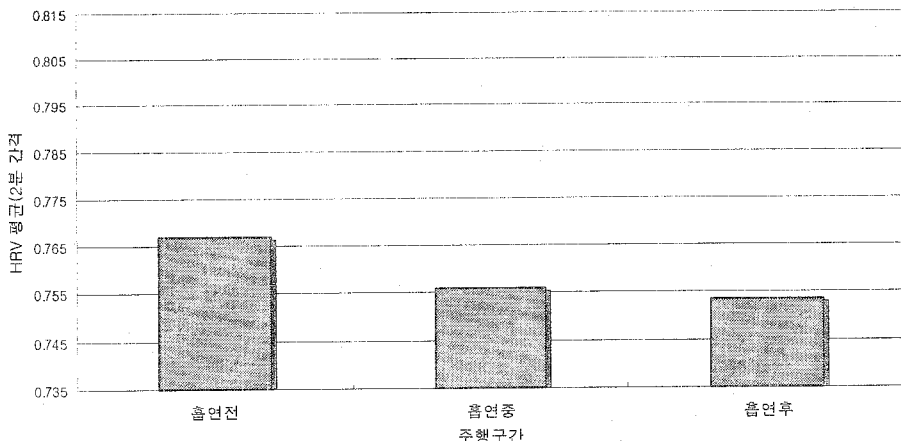


그림 7. 흡연 상태에 따른 HRV 변화 비교

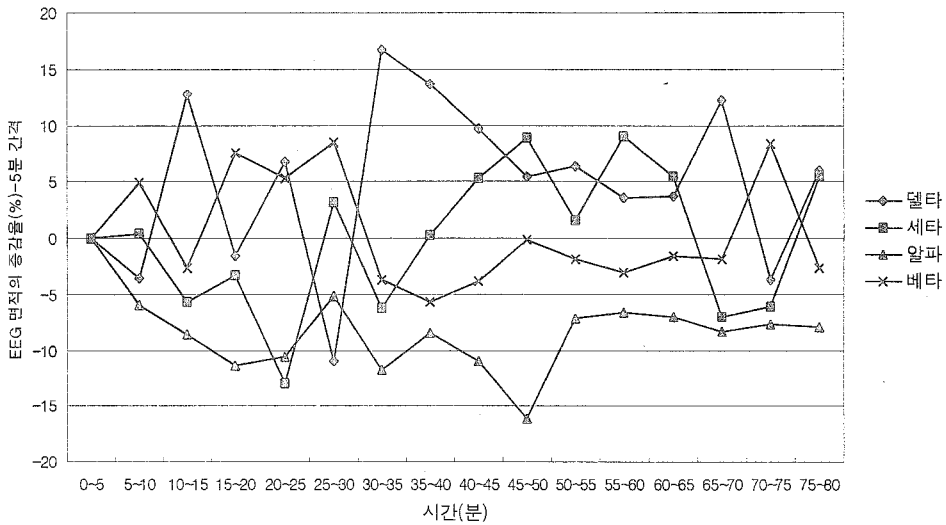


그림 8. 운전시간 경과에 따른 EEG 면적의 증감율(%)

논의 및 제언

본 연구는 운전자가 비록 경험하지 못한다 할지라도, 운전작업에 손상을 가져올 수 있는 피로를 알아보기 위해 행해졌다. 운전자의 피로에 대한 객관적인 자료를 얻기 위해 실험주행을 통해 운전자들의 생리적인 변화를 측정된 4건의 연구사례에서의 생리측정치를 분석하였다. 본 연구에서는 운전시간의 경과에 따라 운전자에게 나타나는 피로의 생리적인 지수로써 HRV와 EEG를 분석하였다. 연구사례 2를 제외한 나머지 세 개의 연구들에서 운전시간이 경과함에 따라 전반적으로 HRV가 증가하는 경향을 보였다. 특히 운전 후 30분을 전후로 해서 HRV의 증가율이 전반적으로 크게 증가하였다. 이러한 결과는 운전시간의 경과에 따라 피로가 증가하여 운전자의 주의력(attention)이 감소되며, 그에 따른 결과로 HRV가 증가한다는 O'Hanlon(1972)의 현장연구 결과와 일치하는 것이다.

운전상황을 비디오로 분석한 후 그에 따른 HRV의 변화를 관찰할 수 있었던 연구사례 1의 자료를 통해 전체 운전시간 경과에 따른 HRV 변화를 살

펴보았다. 연구사례 1의 경우 운전시간이 경과하면서 전체적으로 HRV가 증가하였다. 특히 운전 후 10-15분, 30-35분, 60-65분 구간에서 HRV의 증가가 peak를 이루었으며, 30-35분 구간에서의 HRV 증가가 가장 크게 나타났다. 이러한 결과는 운전자에게 나타나는 피로의 출현 시점이 매우 빠르다는 사실을 의미하는 것이라 할 수 있다. 그러나 실제 운전작업에서는 시간과 장소의 제약으로 인하여 운전자가 피로를 지각한다 할지라도 차량을 멈추고 휴식을 취하는 것이 쉽지 않다. 비록 현실적인 제약으로 인하여 휴식시간을 갖는 것이 쉽지 않지만, 운전자는 피로의 출현 시점이 빠르다는 사실을 인식하고 평소보다 빨리 휴식시간을 갖는 것이 바람직하다고 할 수 있겠다.

주행구간별 HRV의 차이를 분석한 결과, 고속도로 구간을 주행하였을 때의 HRV가 가장 높은 반면에, 고속도로에서 국도로 빠져나가기 위해 램프 구간에 진입을 하면서 HRV는 급격하게 감소하여 가장 낮은 값을 나타내었다. 그리고 램프구간을 지나 I.C. 구간을 주행하면서 HRV는 다소 증가하였으며, 국도구간을 주행하는 동안에는 고속도로에서

의 HRV보다 작지만 HRV가 증가하였다. 고속도로에서의 주행시 HRV가 가장 높게 나타났다는 것은 비록 고속도로에서의 주행속도가 다른 구간에서의 주행속도보다는 높다고 하더라도 고속도로와 같이 변화가 적고 단조로운 운전상황에서 운전을 함으로써 운전자에게 있어서 피로가 증가한다는 사실을 시사해준다. 그리고 램프구간에서의 HRV가 가장 낮게 나타났다는 것은 고속도로에서 램프구간으로 진입하는 과정에서 운전환경의 급격한 변화로 인하여 운전자에게 더 많은 정신적인 부하가 요구되었다고 볼 수 있다. 이러한 사실은 고속도로에서의 장거리 운전으로 인하여 피로가 증가한 상태에서 무리하게 램프구간에 진입하는 경우, 운전자의 각성수준이 회복되지 않는다면 사고로 이어질 가능성이 높아질 수 있다고 생각할 수 있다.

주행속도별 HRV의 차이를 알아보기 위해 국도주행 구간에서 정상속도로(60 Km/h)로 주행을 한 구간과 고속(100 Km/h)으로 주행한 구간을 선정하였다. 분석결과 정상속도로 주행을 할 때보다 고속으로 주행을 하는 경우에 HRV 평균이 더 작게 나타났다. 이러한 결과는 작업부하가 증가할수록 HRV가 감소한다는 Wilson(1993)의 연구결과와 일치하고 있다. 즉, 정상속도로 주행을 할 때보다 고속으로 주행을 할 때에 작업자의 각성수준이 증가한다고 볼 수 있겠다.

흡연상태에 따른 HRV의 차이를 분석하였다. 흥미로운 분석결과가 나왔는데, 흡연상태에 들어가기 전 구간에서 흡연을 하고 난 후의 구간으로 이동함에 따라 HRV는 감소하였다. 즉, 운전 중의 흡연이 운전자의 작업부하를 증가시켜 그에 따라 HRV가 감소하였다고 생각할 수 있다.

주행속도와 흡연상태에 따른 HRV의 변화를 분석한 결과는 고속주행과 흡연상태에서 운전자의 각성수준이 증가한 것을 보여주고 있다. 그러나 한정된 운전자의 능력에서 많은 부분이 운전작업을 유지하는 데 사용되고 있으므로 안전운전을 하는

데 필요한 운전자의 여분 능력이 그만큼 감소할 것이라 생각할 수 있다.

연구사례 1에서 운전시간의 경과에 따른 EEG의 변화를 분석한 결과, 이완이나 수면시 나타나는 서파인 델타파와 세타파는 운전시간이 30분을 경과하면서 증가를 보인 반면에, 각성상태를 반영하는 속파인 베타파는 감소하였다. 운전시간에 따른 EEG의 변화는 HRV와 동일한 경향의 변화를 보였다.

운전 중 운전자에게서 나타나는 피로의 객관적인 자료를 얻고자 행해진 본 연구에서는 몇 가지 제한점이 발견되었다. 본 연구에서는 운전자의 피로를 알아보기 위해 4개의 연구에서 얻어진 자료를 분석하였지만, 주행상황(주행구간, 주행속도, 흡연상태)에 따른 운전자의 피로를 분석하는 데에는 실험주행상황의 분석이 가능했던 한 개의 사례만을 분석하였다. 그리고 운전시간이 짧았던 이유로 연구결과를 일반화시키는데 어려움이 있었다. 따라서 향후연구에서는 더 많은 사례들에 대한 분석이 요구되며, 그리고 실험주행구간을 늘려 전체 운전시간을 장거리 운전상황에 소요되는 운전시간과 비슷하게 설계할 필요성이 있다. 그리고 연구사례 1을 제외하고 나머지 연구사례들에서는 운전상황과 그에 따른 생리측정치들의 변화를 비교하는데 어려움이 있었다. 따라서 향후연구에서는 운전상황을 비디오 및 오디오 테이프에 기록을 하여 운전상황에 따른 생리측정치의 변화를 정확히 설명할 수 있는 근거를 확보하는 것이 필요하다. 또한 운전 시뮬레이터를 이용한 연구가 이루어진다면, 실험외적 변인 및 자극들을 통제할 수 있을 뿐만 아니라 다양한 실험설계 및 여러 명의 피험자들을 통해 얻어진 자료의 분석을 통해 보다 신뢰롭고 타당한 연구결과가 나올 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

강규성(1982), 교통사고 요인 중 운전자의 피로에

- 관한 연구. 영남대학교 석사논문.
- 김대식 외 7 인(1997), 임상생리검사학. 고려의학.
- 김복원 · 정순희 · 김영활 · 이옥경 · 심재환(1993), 임상생리학. 고문사.
- 이순철 · 신용균 · 오애령(1995), 속도증가에 따른 운전자의 반응특성-심리 · 생리적 변화를 중심으로. 교통안전연구논집, 제14권, pp. 15-29.
- 이순철(1997), 운전자행동의 심리학적 연구. 심리과학, 6-1, pp. 11-26.
- 이인혜 외 12 인(1997), 정신생리학. 학지사.
- 野澤 浩 · 小木和孝 (1980), 自動車 運轉勞動. 勞動科學研究所, 東京.
- Assman, J., Mulder, G., & Mulder J. M.(1987), Operator Effort and the Measurement of Heart-Rate Variability. *Human Factors*, 29-2, pp. 161-170.
- Bartlett, F. C.(1943), Fatigue following highly skilled work. *Proceedings of Royal Society. Series B*, 131, 247-257.
- Bartlett, F. C.(1948), A note on early signs of skill fatigue. *MRC Flying Personnel Research Committee Report FPRC703*. London : Medical Research Council.
- Bartley, S. H., & Chute, E. F.(1947), Fatigue and Impairment in Man. New York : McGraw Hill.
- Brown, I. D.(1994), Driver Fatigue. *Human Factors*, 36-2, pp. 298-314.
- Cameron, C.(1973), A Theory of Fatigue. *Ergonomics*, 16-5, pp. 633-648.
- Davis, D. R.(1946), The disorganisation of behaviour in fatigue. *Journal of Neurology and Psychiatry*, 9, 23-29.
- Drew, G. C.(1940), An experimental study of mental fatigue. *Air Ministry Flying Personnel Research Committee Report No. 227*.
- Dureman, E. I. & Bodén, C. H.(1972), Fatigue in Simulated Car Driving. *Ergonomics*, 15-3, pp. 299-308.
- Egelund, N.(1982), Spectral analysis of heart rate variability as an indicator of driver fatigue. *Ergonomics*, 25-7, pp. 663-672.
- Grandjean, E.(1969), *Fitting the task to the man: An ergonomics approach*. London: Taylor & Francis.
- Hartley, L. R. & Arnold, P. K., Smythe, G., & Hansen, J.(1994), Indicators of fatigue in truck drivers. *Applied Ergonomics*, 25-3, pp. 143-156.
- Lindsley, D. B.(1952), Psychological phenomena and the electroencephalogram. *EEG and Clinical Neurophysiology*, 4, pp. 443-456.
- Luczak, H.(1979), Fractioned heart rate variability. Part II: Experiments on superimposition of components of stress. *Ergonomics*, 22-12, pp. 1315-1323.
- Maulsby, R. L.(1971), An illustration of emotionally evoked theta rhythm in infancy : Hedonic hypersynchrony. *EEG and Clinical Neurophysiology*, 31, pp. 157-165.
- Michon, J. A., & Wertheim, A. H.(1978), Drowsiness in driving. In *Driving fatigue and road traffic accidents*(Rep. EUR6506EN, pp. 62-71). Brussels : Commission of the European Communities.
- Milosevic, S.(1997), Drivers' fatigue studies. *Ergonomics*, 40-3, pp. 381-389.
- Mulder, G.(1973), Mental Load and the Measurement of Heart Rate Variability. *Ergonomics*, 16-1, pp. 69-83.
- O'Hanlon, J. F.(1972), Heart rate variability : A new index of driver alertness/fatigue. *Society of Automotive Engineers*, No. 720141, New York.
- Sanders & McCormick(1996), 조영일 譯, 인간공

학, 대영사.

Walter, W. G.(1953), *The Living Brain*. New York :
Norton.

Wiener, E. L.(1984), *Vigilance and inspection*, in J.
S. Warm(ed.). *Sustained Attention in Human*

Performance, New York : John Wiley.

Wilson, G. F.(1993), Air-to-ground training missions :
a psychophysiological workload analysis. *Er-
gonomics*, 36-9, pp. 1071-1087.

The Study of Drivers' Fatigue Analyzing Heart Rate Variability and Electroencephalogram

Young-Han No¹, Hyung-Jun Park² and Soon-Chul Lee¹

¹ Department of Psychology, Chungbuk National University and

² Division of Electrical Engineering, Wonkwang University

Analyzing the physiological data measured in driving over time, the aim of this study was to identify the effects of fatigue experienced among drivers.

Heart Rate Variability(HRV) and Electroencephalogram(EEG) were measured as the indicator of fatigue. While HRV decreased when the workload of drivers increased, it increased when the attention of drivers decreased because of fatigue. In the case of EEG, fast waves such as alpha wave and beta wave are correlated with the level of arousal but slow waves such as delta wave and theta wave are related with the relaxation or sleeping.

The results of analyzing the behaviour of driving and the variance of HRV showed that HRV increased over time in three studies except the study 2, which were used to identify the effects of fatigue in this study, especially after 30 minutes the increase of HRV is to be manifest.

I analyzed the variance of HRV and EEG in the research 1 which was capable of observing the conditions of driving. The results showed that the increase of HRV appeared in 10-15, 30-35, and 60-65 minutes, especially in 30-35 minutes the peak of the increase of HRV was highest.

Analyzing the variance of HRV in the course of driving, the driving in a high way caused HRV to be highest but the driving in a lamp did it to be lowest. In addition, as moving on a local way from an I.C. HRV progressively increased.

The results of analyzing the variance of HRV related with the speed of driving showed that the measurements in driving fast were higher than in driving slowly.

In relation to smoking during driving, I analyzed the measurements of HRV before/during, and after smoking. The results showed that as moving on the stage of finishing smoking from the stage before smoking, the measurements of HRV progressively decreased.

Using the data of research 1, the measurements of EEG over time were analyzed to examine the effects of fatigue also. The results showed that fast waves meaning the level of arousal decreased, however slow waves meaning the relaxation or sleeping increased, especially after 30 minutes these changes were to be clear.

In discussion the problem of this study and the suggestion of the following study were described.