가상주행 시뮬레이터를 활용한 고속도로 차로유도선 적정 연장길이 산정 연구

An Evaluation on the Length of Guidance Lane Marking on Expressways Using Virtual Driving Simulator

박 제 진* · 김 덕 녕**

* 주저자 : 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원
** 교신저자 : 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원

Je jin Park* · Duck nyung Kim**

* Korea Expressway Corporation Research Institute
** Korea Expressway Corporation Research Institute

† Corresponding author : Duck nyung Kim, k999@ex.co.kr

Vol.16 No.5(2017)
October, 2017
pp.01~11

ISSN 1738-0774(Print)
ISSN 2384-1729(On-line)
https://doi.org/10.12815/kits.2017.16.5.01

Received 16 August 2017
Revised 15 September 2017
Accepted 19 September 2017

ⓒ 2017. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

국내 육상교통망의 중추적인 역할을 하는 고속도로는 7×9 형태로 양적, 질적 성장을 거듭하고 있다. 점차 복잡해지는 고속도로 기하구조에 대응하고자 차로유도선을 설치하여 운전자들의 보다 원활한 차로 변경을 유도하고 있으나 해당 시설의 설치기준이 부재하고, 그 효과 검증 또한 제한적으로 시행되고 있는 실정이다. 본 연구는 도로주행 시뮬레이터를 활용하여 주행안전성 측면에서 차로유도선의 효과를 재조명하고, 적정 연장 설치기준을 수립하는데 주된 초점을 맞추고 있다. 이를 위해, 피험자의 선호도를 조사하고, 가상의 주행환경에서 운전자의 차로 변경 행태를 분석하였다. 또한, 피험자가 차로변경 시 느끼는 편안함 정도를 계량화하기 위해 뇌파분석을 실시하였고, 도출된 결과에 대한 통계적 검증을 수행하였다. 본 연구는 차로유도선 설치기준 수립 시 기반자료로 활용될 것으로 기대한다.

핵심어 : 차로유도선, 나들목/분기점, 가상주행 시뮬레이터, 주행안전성, 뇌전도

ABSTRACT

Expressway network which plays an important role on land transportation system, have been developing quantitatively and qualitatively with 7×9 structure. To cope with complex geometric condition, guidance lane marking has been installed to induce safer lane-changing maneuver. However, there is no standard on guidance lane marking and its effectiveness is also verified with limited scope. The major purpose of this research is to clarify its effectiveness in terms of driving safety aspect using virtual driving simulator and to suggest standard on the proper length. To carry this out, preference data from subjects was collected and lane-changing pattern within virtual driving environment was investigated. In addition, in order to quantify the level of comfort, Electroencephalogram data was collected and validated using statistical test. Finally, it is expected that this research can be used to establish standard on guidance lane marking.

Key words : Guidance lane marking, Interchange/Junction, Virtual driving simulator, Driving safety, Electroencephalogram(EEG)

Ⅰ. 서 론

2015년 기준 우리나라 고속도로는 33개 노선, 4,194km(재정 : 3,872km, 민자 : 332km)의 연장으로 구성되어 있다(Korea Expressway Corporation, 2016). 고속도로의 연장은 국내 전체 도로 연장의 4% 수준에 불과하지만, VKT(Vehicle Kilometer Travelled) 측면에서 보았을 때, 전체 도로부분의 약 47%를 차지하고 있어 국내 육상 교통망의 중추적인 역할을 수행하고 있다. 제2차 도로정비기본계획(2011~2020)에서 제시하는 국가간선도로망계획에 따르면 7×9의 구조로 총 7,266km에 달하는 고속도로가 향후 보급될 전망이다. 이와 같이 고속도로는 향후 양적 성장이 예견됨과 동시에 네트워크의 복잡성 또한 증대되어 교통안전성 제고 등의 질적 차원의 성장 또한 요구되고 있는 실정이다.

2015년 기준, 재정 고속도로에는 총 449개소(나들목 370개소, 분기점 79개소)의 입체교차로 시설이 존재한다. 즉, 고속도로 운전자는 평균 8.6km 마다 입체교차 시설을 접하게 되는 상황이며, 고속도로 상에 존재하는 휴게소(180개소) 및 졸음쉼터(165개소) 상의 진출입까지 고려했을 때 주행 중 교통류의 합류, 분류 및 주행노선 전환을 위한 빈번한 차로변경이 예상된다. Highway safety manual(AASHTO, 2010)에 따르면 분기점(IC) 설계 시 차로변경 횟수를 감소(2회→1회 차로변경)시킬 때 약 38%의 사고건수가 절감된다고 제시하였다. 요컨대, 고속도로 네트워크가 복잡해질수록 운전자는 차로변경을 위한 작업부하가 증대되고, 최종적으로 교통사고를 발생시킬 수 있는 잠재적 확률 또한 증가될 수 있다. 이를 극복하기 위해 차로변경 횟수를 최소화 하는 것도 중요하지만, 차로변경을 유도하는 방법과 유도 시점 또한 중요한 이슈로 제기되고 있다.

한국도로공사에서는 2007년 하이패스 진출입 구간을 대상으로 차로유도선을 시행하였고, 2012년에는 고속도로 본선 진출입 및 분류 구간 도로노면에 차로유도선(노면 색깔 유도선, Color lane 등으로 명명)을 설치하여 운전자가 차로 및 경로변경을 원활하게 수행할 수 있도록 유도하고 있다. 최근 차로유도선의 교통사고 저감 효과를 인정하여, 국내 고속도로뿐만 아니라 일반 시가지 도로 등에 확대 적용하고 있으나 관련 지침이 부재하여 차로유도선의 규격, 설치위치 및 준거 등에 대한 근거 마련이 요구되고 있다.

본 연구에서는 차로유도선 지침수립을 위한 기반연구의 일환으로 차로유도선의 설치위치를 운전자 주행안전성 측면으로 해석하는 것에 주된 목적을 두고 있다. 차로유도선의 설치 유무에 따라 비교군과 대조군을 설정하여 가상의 주행환경 실험을 시행하였다. 특히, 차로유도선이 설치되는 시점을 시나리오로 구성하여 가상주행 시뮬레이터를 이용한 반복 실험을 수행함으로서 실험결과의 신뢰성을 제고하였다. 본 연구의 2장에서는 차로유도선에 대한 선행 연구내용이 제시되며, 3장에서는 가상 주행실험의 방법론이 제시된다. 4장에서는 차로유도선의 주행패턴 및 심리적 측면 효과가 정량적 지표로 제시되며, 5장의 결론부분에는 본 연구의 의의 및 향후 연구계획이 제시된다.

Ⅱ. 기존 연구문헌 고찰

1. 차로유도선 설치 지침

차량 운전자들은 목적지까지 통행하면서 차로변경 및 경로전환에 대한 작업을 수시로 수행한다. 이때, 진ㆍ출입 및 분기 시설의 다양한 형태로 인해 운전자가 진행 경로를 올바르게 인지하지 못하는 경우도 빈번하게 발생한다. 특히, 고속도로는 연속류 시설로 주변상황에 대한 정보를 실시간으로 탐색하지 않고, 전방 차량만 주시하면서 주행하기 때문에 운전자의 집중 및 각성 수준이 일반 시가지 도로에 비해 낮다고 볼 수 있다. 또한 고속도로는 주행속도가 높아 100km/h로 주행시 1초에 약 30m를 이동함으로써 운전자가 한 순간

방심하면 경로변경 지점을 인지하지 못해 지나치거나 무리한 경로변경을 시도할 확률이 증가된다. 기존 진출입 방향안내표지는 전방 2km, 1km, 500m(분기점), 150m 지점에 설치하여 운영하고 있지만, 고속도로 간 연결지점 및 진출입 구간이 증가하면서 운전자들이 경로변경을 수행하는데 혼란은 점점 가중되고 있다.

차로유도선은 이러한 운전자 혼란의 최소화를 목적으로 방향안내에 대한 정보를 연속적으로 제공하여 안전하고 원활한 소통을 유도하는 시설로 정의된다. 그러나 본 시설은 MOLIT(2014)「도로안전시설 설치 및 관리 지침 - 시선유도시설 편」 및 KNPA(2012)「교통노면표지 설치・관리 매뉴얼」에 제시되지 않은 비정규 교통안전시설물로 설치 및 관리에 대한 구체적인 지침은 수립되어 있지 않다. 단, MOLIT(2017) 「고속국도 졸음쉼터의 설치 및 관리 지침」에서는 졸음쉼터 진입구간에 한하여 차로유도선의 설치 준거, 규격, 색상 및 설치 위치 등이 제시되어 있다. 한국도로공사에서는 자체적으로 공사 내부 기준을 수립하여 졸음쉼터 뿐만 아니라 나들목, 분기점 및 하이패스 차로 등을 대상으로 한 차로유도선 지침을 제시하고 있다. 분기점의 경우 나들목에 인접(1km 이내) 2방향 분리구간, 나들목의 경우 휴게소에 인접(1km 이내) 구간에 차로유도선을 설치한다. 그 외에도 시인성 불량구간, 사고잦은구간(경로혼전에 의한 사고건수가 연 3건 이상), 별도의 감속차로 없이 방향전환이 되는 구간 등에 차로유도선을 설치한다. 2방향 분리구간의 경우 먼셀 표색계 상의 분홍(5.0RP 8.0/6.0), 녹색(5.0G 5.0/10.0)을 사용하며, 도색폭 50cm, 유도선 간격 40cm로 설정하여 차로유도선을 승용차 바퀴 사이에 위치하도록 한다. 그러나 한국도로공사 내부 기준에는 차로유도선의 설치위치(도색 시점)에 대한 규정은 제시되어 있지 않다.

일반적으로 운전자가 보다 안전한 경로 변경을 위해서는 ⅰ)지각-반응, ⅱ)차로변경, ⅲ)감속을 위한 여유시간/공간이 요구된다. Do(2009)은 연속류의 지각-반응시간은 2.5초로 제시하고 있으며, MOLIT(2013)는 자동차가 무리 없이 차로를 변경하기 위한 시간으로 횡방향 1m당 1초를 제시하고 있다. 예를 들어, 본선 및 연결로 설계속도가 각각 100km/h, 40km/h로 운영되는 일방향 4차로 고속도로의 경우 ⅰ)지각-반응에 소요되는 주행거리 70m(100km/h×2.5초×1/3.6), ⅱ)차로변경에 소요되는 거리 400m(100km/h×3.6m×4차로×1/3.6), ⅲ) 감속에 소요되는 주행거리 145m(「도로의 구조・시설 기준에 관한 규칙」에서 제시하는 감속차로 최소길이)를 모두 합산한 615m의 소요길이가 산출된다. 그러나 해당 기준은 이상적 조건에 대한 공학적 기준으로 운전자의 주행습관, 운전경력, 신체적 조건 등 행태적 특성이 반영된 결과라고 보기 어렵다.

2. 차로유도선 설치현황 및 설치효과

차로유도선의 경우 국내와 일본의 사례가 유일한 것으로 조사되었으며, 양국 모두 복잡한 기하구조를 갖는 도로시설에서 주행경로를 명확하게 인지시키기 위한 목적으로 안내표지와 병행하여 설치되고 있다. 국내 고속도로의 경우 2017년 기준 갈림길 구간 총 88개소, 졸음쉼터 61개소에 차로유도선이 설치되었다.

〈Table 1〉 Status on guidance lane marking

	Main-line		Toll-plaza		
	IC/JC	Parking area	ETC Lane		Tolling machine
			Normal	Heavy truck	
Number of sites	JC:51, IC:32, Other:5	61	343	343	42
Case					
Color	Pink / Green	Lime green	Blue	Orange	Pink

고속도로는 다른 위계의 도로와 달리 주행속도가 높은 고규격의 도로로서 운전자의 순간적인 판단착오로도 대형 교통사고를 유발할 수 있다. 운전자의 착오는 단조로운 주행환경 하에서 발생빈도가 높으며, 차로유도선은 도로노면의 색상변화로 운전자의 주의를 환기시킴과 동시에 경로방향을 명확하게 인지할 수 있도록 유도함으로써 갈림길 교통사고를 사전에 예방할 수 있다. 최근 5년간 고속도로에서 발생한 교통사고(A~C급 기준)를 사고위치(진출입부 및 고어부), 사고요인(주시태만), 사고직전 차량조작(차로변경 및 핸들과대조작) 별로 추이를 살펴 본 결과는 <Table 2>와 같으며 전반적으로 사고건수 및 사망자수가 줄어들고 있음을 알 수 있다.

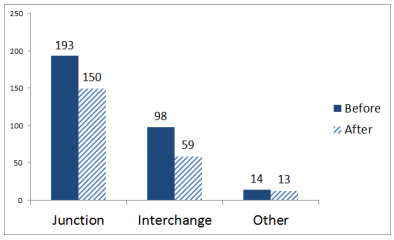
<Table 3>에 제시된 바와 같이 국내 고속도로 JC/IC 상에 차로유도선이 설치된 76개소의 교통사고 변화추이를 살펴본 결과, 설치 전 305건, 설치 후 222건으로 총 83건의 사고가 감소되었다. 특히 나들목 부근에서 약 40%의 사고절감 효과를 보이고 있어 차로유도선의 교통안전성 제고 효과가 있는 것으로 보고되었다.

〈Table 2〉 Traffic crashes on expressway

Item	Location of crash [Entrance/exit and gore]		Cause of crash [Careless]		Driving maneuver before crash [Lane changing, over-steering]	
	Number of crashes	Number of casualties	Number of crashes	Number of casualties	Number of crashes	Number of casualties
2012	274	18	705	129	500	48
2013	226	11	738	90	448	29
2014	242	10	658	84	472	32
2015	190	13	643	72	319	32
2016	186	10	706	69	324	26

〈Table 3〉 Before and after comparison in installed locations

Item	Total	JC	IC	Other
Before	305	193	98	14
After	222	150	59	13
Difference(ratio)	-83(-27%)	-43(-22%)	-39(-40%)	-1(-7%)



3. 가상주행 시뮬레이터의 활용

기존의 교통안전시설에 대한 평가는 설치 전·후의 교통사고건수의 변화에 초점을 맞추고 있어 설치 전에 효과를 미리 판단할 수 없다는 한계점이 존재한다. 또한 교통사고 변화에는 다양한 외생적 요인이 포함되어 있어 분석결과의 정확성을 담보할 수 없고, 주행 환경에 대한 다양한 시나리오 분석에 제약을 받는다. 따라서 사고 등으로 규명되지 않는 교통안전성을 분석하기 위한 방법으로 도로주행 시뮬레이터가 사용되고 있으며, 이는 피험자가 가상의 도로를 주행함으로서 발생되는 다양한 데이터를 분석하여 해당 구간 및 시설물의 안전성을 대리척도(surrogate measure)로 분석하는 기법으로 정의할 수 있다.

Kim et al.(2016)의 연구에서는 실제 기상조건에 따른 가변속도제어 시스템의 실효성을 판단하기 위해 운전자 순응도 및 기대심리를 분석하였다. 예컨대, 기대심리가 위반될 경우(기상변화가 없음에도 제한속도가

하향조정되는 경우 등) 운전자의 주행행태적 측면에서 부정적인 결과가 도출되었다. Kang et al.(2016)은 고속도로 커브구간과 직선구간 간의 운전자 부하를 측정・비교하기 위해 생체신호(알파파, 베타파, 감마파)를 분석하였으며, 로지스틱 모형을 통해 구간 간의 통계적 차이를 제시하였다. Lim et al.(2014)은 설계속도 140km/h 이상인 초고속도로에서 운전자 심리적 측면을 반영한 배향곡선 설계방향을 제시하였다. 선행 연구들과 마찬가지로 피험자 생체신호 중 베타파를 활용하여 연구를 수행하였으며, 곡선반경이 3,000m 이하일 때 운전자의 불안감이 증가하는 것으로 분석되었다. Park et al.(2011)은 노인층, 젊은층을 대상으로 유고상황에 따른 급정거를 했을 때 운전자의 심리적 상태를 분석하였다. 젊은층의 경우 유고상황 발생 이후 약 1km 구간에서 베타파가 높게 관측된 반면, 노인층은 4배 이상 불안정상태가 지속된 것으로 분석되었다. 해당 연구에서는 피험자 뇌파뿐만 아니라 직류전기 피부반응을 동시에 검토하여 운전자 연령층별로 유고상황에 대한 여파의 지속여부를 비교하였다. 이처럼 도로주행 시뮬레이터를 활용한 선행 연구들은 피험차량의 주행궤적은 물론 피험자의 심리상태를 규명하여 주행안전성이라는 정성적 지표를 계량화하는데 초점을 맞추고 있다.

Ⅲ. 가상주행 실험환경 구축

본 연구에서 구축한 가상 도로주행 환경은 운전자와 교통안전시설물 간의 상호작용을 평가하는데 주된 목적을 두며 차로유도선의 효과분석 및 적정연장을 산정하는데 연구의 초점을 맞추고 있다. 본 연구에서는 본선 주행 중 분기점(JC)에 진입 후 노선을 변경해야 하는 임무를 피험자에게 부여하였고, 피험자는 분기점 진입을 위한 차로변경을 시도하게 된다. 이 때, 차로유도선의 설치 여부 및 연장별 운전자 주행행태를 파악하기 위해 실험 시나리오를 구성하였다.

가상 주행실험 대상구간은 서해안고속도로 목포방향 발안 나들목에서 서평택 분기점(서해안고속도로↔평택제천간고속도로)까지로 구성(292.0~299.0km)하였으며, 교통 및 주변여건은 실제 경관과 동일하게 3D 영상으로 구현하였다. 가상 시나리오는 <Table 4>와 같이 차로유도선의 설치 여부에 따라 일차적으로 구분되며, 설치 시나리오의 경우 차로유도선의 연장에 따라 0.5, 1.0, 1.5, 2.0km로 세분화된다. 가상 주행실험 피험자는 1차로에서 출발하게 되며, 차로변경을 통해 서평택 분기점으로 진출할 때까지의 주행패턴 및 피험자 생체신호가 실시간으로 측정・기록된다.

〈Table 4〉 Experimental scenario design

	Length of guidance lane marking	Virtual driving segment(292.0~299.0km)
Do nothing	Balan IC — W. Peongtaek JC	
0.5km	Balan IC — W. Peongtaek JC	
1.0km	Balan IC — W. Peongtaek JC	
1.5km	Balan IC — W. Peongtaek JC	
2.0km	Balan IC — W. Peongtaek JC	

도로주행 시뮬레이터(Driving simulator)는 실제 도로주행 실험이 불가능한 환경을 가상현실(VR : Virtual reality) 기법을 이용하여 실제 운전상황을 모의하는 가상주행 실험시설이다. 실험하고자 하는 변인을 시나리오 상에서 직접적으로 통제할 수 있기 때문에 다양한 목적의 실험이 가능하며, 실차실험에서 야기되는 안전성, 비용 상의 문제를 최소화할 수 있다는 장점을 내포하고 있다. 본 연구에서는 한국도로공사에서 보유하고 있는 도로주행 시뮬레이터 실험장비(TIME Tracker)를 활용하였으며, 해당 시설에는 차량의 운동성능을 모사할 수 있는 6자유도의 Motion platform과 실제 차량과 동일한 캐빈 및 동역학 시뮬레이션 소프트웨어가 탑재되어 있어 가상 주행의 재현성을 극대화 시킬 수 있다.

도로주행 시뮬레이터를 통해 구득 가능한 자료로는 운전자 주행행태 자료(조향핸들, 가감속패달 조작 등), 차량거동 자료(속도, 가감속, RPM, 차로 치우침 등)가 있으며, <Fig. 1>에 제시된 바와 같이 생체신호 감지장비를 통해 주행 중 피험자의 뇌파를 측정할 수 있다.

Driving simulator	BIOPAC-150	Data management

〈Fig. 1〉 Driving simulator facilities

피험자 모집단의 대표성 확립을 위해 성별, 연령 및 운전경력에 대한 고른 분포를 갖도록 피험자를 구성하였다. 피험자 선정 과정에서 시뮬레이터 증후군(Simulator sickness) 발현 여부를 판단하기 위해 고속도로 일반구간(IC진입-토공-교량-터널구간-IC진출) 15km를 대상으로 시험 운전을 시행하였고, 본 연구수행에 별 무리가 없다고 판단한 피험자 30명을 <Table 5>와 같이 선정하였다. 피험자의 평균 연령은 37.5세(표준편차 10.6세), 평균운전경력은 12.4년(표준편차 6.7년)이며, 피험자 모두 고속도로에서 사고경험이 없는 것으로 조사되었다.

피험자의 모든 실험 자료는 분석툴(Scanner studio 1.0)을 통해 동기화된 시간 축에 따라 저장・통합・매칭된다. 최종적으로, 본 연구에서는 피험자가 차로유도선과 방향안내표지를 마주하는 시점으로부터 20m 간격으로 주행행태 자료(가감속, 차로변경 등)와 뇌파자료(α, β, γ파)를 DB화하였다.

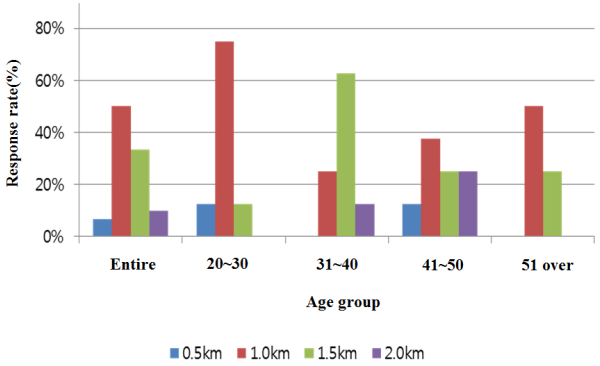
〈Table 5〉 Subjects information

Classification		Observations	Classification		Observations
Age	20~30	8	Driving experience	1~5 years	5
	31~40	8		5~10 years	5
	41~50	8		More than 10 years	20
	More than 51	6	Crash experience	Expressway	0
Gender	Male	15		National highway	16
	Female	15	Daily average travelled (km)		29.2

Ⅳ. 주행실험 분석결과

1. 선호도 분석

차로유도선은 복잡한 기하구조를 갖는 고속도로 나들목, 분기점을 대상으로 차로 변경을 원활하게 유도하는 시설로 2007년부터 본격적으로 도입되었다. 이에 대해 피험자 30명을 대상으로 차로유도선의 필요성을 설문한 결과, 피험자 모두 주행의 편리성 및 쾌적성에 긍정적 효과가 있다고 응답하였다. 또한 차로유도선의 적정 연장을 설문하였을 때, 30대에 한하여 상류부 1.5km 지점, 그 외 피험자는 1.0km 지점에서부터 설치하는 것이 효과적이라고 응답하였다. 이는 전술된 지각-반응, 차로변경, 감속에 필요한 공학적 기준 615m의 1.6~2.4배에 해당되는 값으로 실제 도로상황, 운전자 특성을 감안하여 최소 기준 이상이 확보되었을 때 운전자의 편리성 및 쾌적성이 확보됨을 시사한다.



〈Fig. 2〉 Preference analysis

2. 차로변경 주행패턴 분석

차로유도선의 설치로 인한 피험자의 차로변경 주행행태를 살펴보기 위해 차로유도선 설치 지점별 차로변경 위치를 분석하였다. <Table 6>에 제시된 바와 같이 1차로→2차로 차로변경, 2차로→3차로 차로변경 지점은 차로유도선 연장길이에 따라 비례하여 증가하는 것으로 분석되었다. 즉, 차로유도선이 설치됨에 따라 피험자는 노선변경(서해안 고속도로→평택제천간 고속도로)을 위한 대비를 사전에 미리 수행하는 패턴을 보이고 있다. 차로유도선이 설치되지 않았을 때와 각 시나리오별 차로변경 위치의 차이를 통계적으로 살펴보기 위해 Paired t-test를 수행하였다. Paired t-test는 동일한 피험자가 서로 다른 환경을 각각 주행했을 때 도출된 차이가 통계적 유의성을 갖는지를 판단하는 방법이다(Seo et al., 2012). 본 연구에서는 차로유도선의 설치여부와 상관없이 차로변경 위치가 동일하다는 귀무가설(H_0: $\mu_{\text{미설치시}} = \mu_{\text{설치시}}^{\text{전방}\,0.0km}$)을 Equation (1)과 같이 검토하였다. 이때, $DIFF$는 차로변경 지점의 차이, $S.D$는 $DIFF$의 표준편차를 나타낸다.

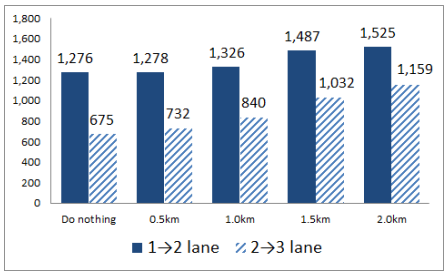
$$\text{Paired } t\text{-test} = \frac{DIFF}{S.D} \qquad (1)$$

그 결과, 최초 차로변경(1차로→2차로) 시 위치에 대한 차이는 통계적으로 미미하며(p-value>0.05), 대부분의 피험자는 상류부 1.2~1.5km에서 차로변경을 시행하는 것으로 조사되었다. 피험자는 상류부 2.0km에 설치된 방향안내표지판을 가장 먼저 인지하고, 잔여거리 1.0km 이상 남아있는 거리에서 서서히 차로변경을 시도하는 것으로 분석되었다. 다만, 차로유도선이 1.5km 이상의 연장을 가지고 있을 경우 차로변경에 대한 정보가 연속적으로 제공되기 때문에 피험자의 차로변경 위치가 당겨지는 효과를 기대할 수 있다. 비록 통계적 유의성은 확보되지 못했으나, 2단계 차로변경에 위치를 앞당기는데 단초를 제공하는 역할을 수행한다.

2단계 차로변경(2차로→3차로)의 위치를 검토한 결과, 차로유도선이 상류부 1.5km 지점부터 설치되었을 때 운전자는 보다 빠른 시점에 차로변경을 완료하는 것으로 분석되었으며, 이러한 차이는 신뢰수준 95% 이상에서 통계적 유의성을 확보(p-value<0.05)하는 것으로 분석되었다. 요컨대, 차로유도선이 1.5km 이상의 연장으로 설치될 경우 피험자는 잔여거리 1.0km 이상을 남긴 지점 전에서 모든 차로변경을 완료함으로써 보다 안전한 주행이 가능한 것으로 판단할 수 있다.

〈Table 6〉 Paired t-test result for lane changing point(m)

Lane changing		①Do nothing[1]	② 0.5km[2]	③ 1.0km	④ 1.5km	⑤ 2.0km
1→2	Mean	1,276	1,278	1,326	1,487	1,525
	p-value	-	①vs② 0.987	①vs③ 0.749	①vs④ 0.220	①vs⑤ 0.115
2→3	Mean	675	732	840	1,032	1,159
	p-value	-	①vs② 0.982	①vs③ 0.510	①vs④ 0.027*	①vs⑤ 0.004*



1 : Without guidance lane marking
2 : With guidance lane marking which is installed 0.5km(or 1.0km, 1.5km, 2.0km) ahead from diverging point
* : Statistical significant at 95% level of confidence

3. 생체반응 분석

뇌전도(Electroencephalogram, EEG)는 신경계에서 외신경 사이에 신호가 전달될 때, 생기는 전기신호로 정의되며, 뇌의 활동상황을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 근거가 된다. 뇌파는 주파수 영역대에 따라 α, β, γ, δ, θ파로 구분할 수 있으며 서로 다른 생체반응을 의미한다. 예컨대 도로상의 유지관리 작업장 통과 시 고도의 집중력이 요구되기 때문에 β 및 γ파의 발생빈도가 높다. 반대로 장시간 운전을 통해 집중력이 저하되거나 졸음운전을 경험할 경우 δ 및 θ파의 빈도가 높아진다.

Schier(2000)는 가상 주행시뮬레이터를 통해 뇌전도 신호 분석의 유의미성을 분석하였으며, 주행거리가 증가할수록 운전자의 집중도가 저하되어 α파의 발생 빈도가 높아짐을 제시하였다. Bouchner et al.(2009)은 운전자의 SMR(Sensorimotor Rhythm)파를 통해 운전집중도를 분석하였고, 가상 주행 시뮬레이터와 바이오피드백 시스템을 통해 신경질환 및 주의력 결핍 장애를 갖는 운전자의 훈련 방안을 제시한 바 있다.

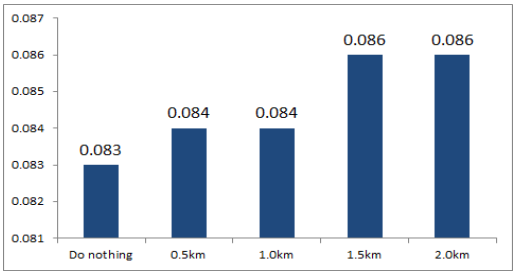
이처럼 뇌파는 진폭 및 주파수의 형태에 따라 운전자의 심리적 상태를 실시간으로 파악할 수 있게 한다. 본 연구에서는 차로유도선의 연장길이별 운전자의 심리적 안전성을 평가하기 위해 뇌파 지표 중 편안함을 의미하는 RFA(Relatvie Fast Alpha) 비율을 활용하였으며, 산출식은 Equation (2)과 같다. 해당 값은 4~50Hz 사이에서 발생하는 뇌파와 11~13Hz 사이에서 발생하는 뇌파의 발생비율을 통해 산출되며, 그 값이 높을수록 보다 편안한 주행행태를 대변하는 역할을 한다.

$$RFA = \frac{11 \sim 13\,Hz\,\text{발생빈도}}{4 \sim 50\,Hz\,\text{발생빈도}} \qquad (2)$$

<Table 7>에 제시된 바와 같이, 차로유도선 미설치보다 설치 시에 RFA 비율이 증가하여 운전자의 편안함이 증가되는 것으로 분석되었다. 또한, 본 연구에서는 차로유도선의 설치여부와 상관없이 RFA 비율이 동일하다는 귀무가설(H_0: $\mu_{\text{미설치시}} = \mu_{\text{설치시}}^{\text{전방}\,0.0km}$)의 기각여부를 판단하기 위해 Paired t-test를 수행하였으며 그 결과, 차로유도선이 1.5km 이상일 때 신뢰수준 95%에서 RFA 비율의 차이가 통계적으로 유의미한 것(p-value<0.05)으로 도출되었다. 요컨대, 1.5km 이상의 차로유도선이 설치될 경우 운전자는 차로/경로 변경 시보다 편안함을 느끼는 것으로 나타나 향후 고속도로 차로유도선 신규설치 및 재도색 시 운전자의 주행안전성을 반영할 수 있는 기준치로 적용될 수 있다.

〈Table 7〉 Paired t-test result for RFA ratio

Lane changing	①Do nothing[1]	② 0.5km[2]	③ 1.0km	④ 1.5km	⑤ 2.0km
Mean	0.083	0.084	0.084	0.086	0.086
p-value	-	①vs② 0.186	①vs③ 0.368	①vs④ 0.002*	①vs⑤ 0.049*



1 : Without guidance lane marking
2 : With guidance lane marking which is installed 0.5km(or 1.0km, 1.5km, 2.0km) ahead from diverging point
* : Statistical significant at 95% level of confidence

V. 결 론

복잡한 기하구조를 갖는 고속도로망에서 운전자의 혼선을 방지하고 보다 편안하고 안전한 차로변경을 유도하기 위해 차로유도선의 설치가 확대되고 있는 실정이다. 차로유도선은 현재 비정규 교통안전시설물로 구분되어 설치기준이 부재하고, 그 효과 또한 제한적으로 규명된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 차로유도선의 주행안전성 측면의 효과를 규명하고 특히, 노면 설치 시 적정 연장길이 설치기준을 수립하는데 주된 목적을 둔다.

주행안전성 측면의 효과평가는 ⅰ)설문조사를 통한 선호도 조사, ⅱ)도로주행 시뮬레이터를 활용한 차로변경 시점 분석, ⅲ)주행 중 편안함을 대변하는 뇌파분석으로 나누어 시행하였다. 설문조사 결과, 분기점 고어(gore)부로 부터 1.0~1.5km 연장을 갖는 차로유도선을 선호하였으며, 시뮬레이터를 통한 가상 주행시 차로유도선 설치 시 보다 안정적인 차로변경 행태를 보였다. 특히, 차로유도선 연장이 1.5km 이상일 때 상류부 1.0km 이전에 모든 차로변경을 완료하는 것으로 분석되었으며, 이는 갑작스런 차로변경을 사전에 방지하고, 전방 유고에 탄력적 대응이 가능한 시간적·공간적 여유를 확보함으로 해석할 수 있다. 마지막으로 피험자의 RFA 비율을 비교했을 때, 차로유도선의 연장이 1.5km 이상 확보될 경우 주행 시 보다 편안함을 느끼는 것으로 분석되었으며, 도출된 값은 신뢰수준 95% 이상에서 미설치 시와 통계적 차이를 보이고 있다. 요컨대,

차로유도선은 분기점 상류부 이전에 충분한 이격거리를 두고 설치해야 하며, 이때 최소 기준을 1.5km 이상으로 설정하는 것이 합리적이다. 제시된 기준은 공학적 관점의 최소기준인 615m를 약 2.4배 상회하는 값으로 운전자의 주행습관, 운전경력, 신체적 조건 등 행태적 특성을 고려하여 보수적인 입장에서의 적정 연장이 필요함을 시사하고 있다.

본 연구는 도로안전시설의 설치효과를 주행안전성 측면으로 해석하는데 주된 학술적 기여가 있을 것으로 판단하며, 특히 도로주행 시뮬레이터를 통해 주행안전성을 계량화할 수 있는 지표를 제시하고 통계적 검증을 시행했다는 점에서 기존 연구와의 차별성이 존재한다. 또한 차로유도선에 대한 적정 연장 기준을 제시함으로써 향후 관련지침 수립 시 근거자료로 활용될 수 있다.

본 연구에서 제시하는 기준(1.5km)은 설치 대상구간의 기하구조에 따라 선별적으로 적용할 필요가 있다. 예를 들어, 해당 구간에 졸음쉼터 등으로 나들목/분기점과의 이격거리가 1.0km 이하가 될 경우, 해당 구간이 급격한 종단선형을 갖는 경우, 해당 구간 및 연결로의 설계속도가 일반적이지 않은 경우를 대상으로 보정 기법이 제시된다면, 본 연구 결과의 활용성을 제고할 수 있을 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진 연구개발사업의 연구비지원(17CTAP-C098646-03)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

AASHTO.(2010), *Highway Safety Manual*, American Association of State Highway and Transportation Officials, pp.15-8.

Bouchner P., Faber J., Novotny S. and Tichy T.(2009), “Driver's attention level improvement with use of biofeedback stimulation incorporated into driving simulator,” *Neural network world*, vol. 19, no. 1, pp.109-118.

Do C. W.(2009), *Transportation engineering theory*, Chungmungak, p.41.

Kang X., Namgung M., Kim W. C. and Wang W.(2016), “The Analysis of Driving Workload and Gamma Waves on Curved Sections in Expressway,” *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 34, no. 6, pp.560-569.

Kim Y. S., Lee S. K. and Kim S. L.(2016), “A Study on The Relationship Between Expectancy and Variable Speed Limit Under the Adverse Weather Conditions By Using A Driving Simulator,” *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transportation Systems*, vol. 15, no. 6, pp.138-149.

KNPA(2012), *‘Traffic Road Surface Marking’ Installation and Management Manual*, National Police Agency, Korea.

Korea Expressway Corporation(2016), *Annual Statistic Report*, Korea Expressway Corporation internal report.

Lim J. B., Lee S. B., Kim K. H., Kim S. Y. and Choi J. S.(2012), “A Study of the Relationship

between Driver's Anxiety EEG & Driving Speed in Motorway Sections," *Journal of the Korean Society of the Safety*, vol. 27, no. 3, pp.167-175.

MOLIT(2013), *Rules on the Standard of Road Structures and Facilities*, Ministry of Land, Infrastructure and Transportation, Korea.

MOLIT(2014), *'Road Safety Facilities' Installation and Management Guidelines'*, Ministry of Land, Infrastructure and Transportation, Korea.

MOLIT(2017), *'Rest area in expressway' Installation and Management Guidelines'*, Ministry of Land, Infrastructure and Transportation, Korea.

Park S. J. and Lim H. K.(2011), "Characteristics of Elderly Driver's Driving Behavior and Cognition under Unexpected Event Using Driving Simulator," *SAE Technical Paper 2011-01-0552*.

Schier M. A.(2000), "Changes in EEG alpha power during simulated driving : a demonstration," *International Journal of Psychophysiology*, vol. 37, no. 2, pp.55-162.

Seo I. K., Park J. J., Sung S. L. and Nam-gung, M.(2012), "Drivers' Workloads through the Driving Vehicle Test at Intersections," *Journal of the Korean Institute of ITS*. vol. 11, no. 3, pp.112-123.