

〈응용 논문〉

## 자율주행 모빌리티의 제어권 전환을 위한 MPC 알고리즘 기반 주행 능력 지수 개발

유병훈<sup>1)</sup> · 오광석<sup>\*1,2)</sup>한경국립대학교 ICT로봇기계공학부<sup>1)</sup> · 한경국립대학교 기계융합기술연구소<sup>2)</sup>

### Development of a Driving Capability Index for Takeover of Autonomous Mobility based on Model Predictive Control Algorithm

ByeongHun Yoo<sup>1)</sup> · Kwangseok Oh<sup>\*1,2)</sup><sup>1)</sup>School of ICT, Robotics and Mechanical Engineering, Hankyong National University, Gyeonggi 17579, Korea<sup>2)</sup>Institute of Machine Convergence Technology, Hankyong National University, Gyeonggi 17579, Korea

(Received 19 December 2025 / Revised 13 January 2026 / Accepted 29 January 2026)

**Abstract :** This study presented a driving capability index to control autonomous mobility based on the model predictive control (MPC) algorithm. To compute the driving capability index, the control error between the driver steering input and the MPC-based control input was computed, and its squared term was regulated based on recursive least squares with forgetting. The regulated control error was used to compute the driving capability index with two parameters and a scale factor. To ensure a reasonable performance evaluation, the CarMaker software was employed with MATLAB/Simulink, and a path tracking scenario was applied in evaluating various drivers' response delays, such as normal, elderly, and drowsy drivers. The evaluation results reveal that the proposed driving capability index can represent degraded driving capability effectively in real time. It is expected that the proposed approach can be used as a perception algorithm for safety control and takeover applications in a fail-safe system for autonomous mobility.

**Key words :** Driving capability index(주행 능력 지수), Autonomous mobility(자율주행 모빌리티), Steering control(조향 제어), Path tracking(경로 추종), Model predictive control(모델 예측 제어), Recursive least squares(순환 최소 자승)

#### Nomenclature

$e_y$	: lateral error, $m$
$e_\psi$	: yaw angle error, $rad$
$v_x$	: longitudinal velocity, $m/s$
$\dot{\psi}$	: yaw rate, $rad/s$
$\dot{\psi}_d$	: desired yaw rate, $rad/s$
$L_{whl}$	: wheel base, $m$
$\delta_f$	: front steering angle, $rad$
$\delta_{driver}$	: driver input steering angle, $rad$
$\delta_{MPC}$	: MPC input steering wheel angle, $rad$
$I_m$	: monitoring index, -
$R$	: Turning radius, $m$

#### 1. 서론

최근 단계별 자율주행 기술의 발전과 함께 운전자 입력을 고려하면서 주행 안전을 확보할 수 있는 다양한 제어 연구가 진행되고 있다. 특히, 운전자의 졸음운전이나 부주의로 인한 사고를 예방하는 시스템 개발이 중요한 연구 과제로 부각되고 있다. 기존의 운전자 보조 시스템은 차선 유지 보조, 자동 긴급 제동 등의 기능을 통해 운전자의 주행을 보조하지만, 다양한 운전자와 환경의 상태를 고려하기에는 한계가 있었다. 이에 따라 운전자의 주행 상태를 지속적으로 모니터링하는 상태 추정 기술과 이를 고려하는 제어 시스템의 필요성이 대두되고 있다.

Cao, S. 외 4인은 다중 모드 신경망을 구성했다.<sup>1)</sup> Essahraoui,

\*Corresponding author, E-mail: oks@hknu.ac.kr

<sup>1)</sup>This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

S. 등은 다양한 얼굴 특징(눈, 머리 방향, 하품)을 분석하고 KNN, SVM, YOLOv5/8 등의 분류기를 평가했고, UTA-RLDD 데이터셋에서 YOLOv5/8이 100 % 정밀도 및 재현율을 달성했다.<sup>2)</sup> Samuel, M 외 5인은 차량의 차선 인식 및 차선 유지를 위해 퍼지 PID를 활용했으며, 응답 시간과 안정화 시간 측면에서 우수한 결과를 도출했다.<sup>3)</sup> Geng, G. 외 3인은 고속 주행 환경에서 효율성, 승차감, 미끄러짐, 차선 중심 오차 등을 프레네 좌표계에서 5차 다항 제적을 최적화해 고속 교통 환경에서 안전하고 부드러운 차선 변경을 가능하게 하는 ADAS(Advanced Driver Assistance Systems) 제어 시스템을 제안했다.<sup>4)</sup> Shah, SM 등은 YOLOv4+Inception 기반 얼굴 탐지와 InceptionResNet-v2를 이용한 실시간 시선 추적 기반 모니터링 기법을 제안하였으며, 추정 결과 91 % 정확도 결과를 확인했다.<sup>5)</sup> Boateng, C. 등은 주행 경로를 분할하고 특이값 분해 및 군집화를 통해 이상 운전 패턴을 식별해 인지 능력 저하가 의심되는 고령 운전자와 일반 운전자를 구분했다.<sup>6)</sup> Beles, H. 등은 눈 움직임(EOG)과 영상 기반 눈 상태 정보를 결합한 퍼지 논리를 이용해 경고 시스템을 개발했다.<sup>7)</sup> Sathya, D. 등은 차량 내 카메라를 사용하여 운전자의 눈 상태, 하품 등을 감지하고, 졸음 상태가 판단되면 경고음을 즉시 발생시켜 운전자를 깨우는 시스템을 제안했다.<sup>8)</sup> Doroudgar, S. 등은 젊은 운전자와 고령 운전자의 반응 시간과 운전 능력의 차이를 비교했다.<sup>9)</sup> 이택규 등은 급격한 조향 상황에서 발생하는 속도 감소 효과를 반영한 비선형 MPC(Model Predictive Control) 차량 제어 전략을 제안하여 조향 안정성과 주행 성능을 동시에 개선했다.<sup>10)</sup> 홍승준 등은 차량 데이터를 기반으로 위험 운전 행동을 감시, 탐지할 수 있는 장치를 설계 및 분석했다.<sup>11)</sup> 기존 연구들을 살펴보면 운전자의 운전 능력 모니터링을 위해 운전자의 시선, 머리 방향, 행동 등을 분석하여 졸음 및 부주의 정도를 모니터링하고, 차량의 경로 오차 기반 제어 및 최적화 기법을 활용해 ADAS 시스템을 개발하였다. 또한 센서 기반 데이터 주도 운전자 상태 모니터링 및 동적 거동 기반 고령 및 젊은 운전자의 반응 시간 및 운전 능력을 정량화하고, 보조 제어 관련 연구가 활발히 진행되고 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 MPC 알고리즘 기반 운전자의 주행 능력을 정량화할 수 있는 방법을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 운전자가 주행하는 동안 경로 추종을 위한 MPC 조향 제어 입력이 실시간 계산되도록 설계되었다. 운전자의 주행 능력 지수 개발을 위해 MPC 기반 도출된 조향 제어 입력과 운전자 조향 입력 간 오차를 계산하고, 이를 이용해 주행 능력 지수를 계산하였다. 지수 도출을 위해 조향 오차의 제곱을 이용하는 RLS(Recursive Least Squares) 기법이 활용

되었으며, 지수 크기 조절을 위한 파라미터와 스케일 요소가 적용되었다. 성능평가를 위해 CarMaker와 Matlab/Simulink 소프트웨어를 연동했으며, 다양한 특성을 보이는 운전자 모델을 이용하여 평가했다.

본 논문의 나머지는 다음과 같이 구성되었다. 2장에서는 모델 예측 제어 기반 조향 제어 입력 도출 및 주행 능력 모니터링 지수 도출 알고리즘에 대해 기술하고, 3장에서는 제안하는 알고리즘의 성능평가 결과에 대해 기술한다. 4장에서는 결론 및 제안하는 연구의 한계점 분석과 함께 향후 계획을 기술한다.

## 2. 주행 능력 지수 계산 알고리즘

Fig. 1은 본 연구에서 제안하는 모델 예측 제어와 순환 최소 자승 기반 주행 능력 지수 도출 알고리즘의 전반적 모델 개략도를 나타낸다.

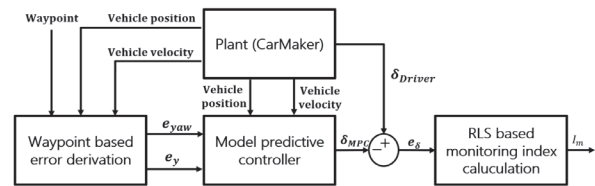


Fig. 1 Overall block diagram of the proposed algorithm

경로 추종을 위한 경로점(Waypoint) 기준 오차 도출 블록, 모델 예측 제어기 블록, 순환 최소 자승 기반 모니터링 지수 계산 블록 총 세 개의 블록들로 구성되었다. 경로점 기준 오차 도출 블록에서는 차량의 질량 중심을 기준으로 16, 22 m 반경의 경로점을 실시간 갱신하여 경로에 대한 횡 및 요 각도 오차를 도출한다. 이때 16, 22 m의 반경은 성능평가 시 주행 속도인 60, 80 km/h를 기준으로 1초의 예견 시간(Preview time)에 해당하는 이동 거리를 계산하여 정수 단위로 근사화한 결과이다. 모델 예측 제어기 블록 및 순환 최소 자승 기반 모니터링 지수 계산 블록에서는 참조 조향 입력을 도출하고, 도출된 참조 조향 입력과 운전자 조향 입력간의 차이를 기반으로 주행 능력 지수를 계산한다.

### 2.1 모델 예측 제어 기반 참조 조향 입력 도출

본 절에서는 MPC 기반 경로 추종 참조 조향각 도출 과정에 대해 기술한다. MPC 기반 경로 추종 제어를 위한 오차 동역학 모델은 목표 경로와 차량 중심 기준 횡 방향 오차와 요 각도 오차 상태량을 기반으로 도출되었다. 오차 동역학 모델 도출을 위해 활용된 횡 오차와 요 각도 오차 동역학 모델은 다음과 같다.

$$\dot{e}_y = v_x e_\psi \quad (1)$$

$$\dot{e}_\psi = \dot{\psi} - \dot{\psi}_d \quad (2)$$

에커만 조향 기하학에 따라 차량의 회전 중심은 후륜의 연장선이 만나는 점에 위치하게 된다. 이때, 전륜의 중심 조향각을 차량 종방향 속도와 회전 반경을 통해 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\dot{\psi} = v_x / R = (v_x / L_{whl}) \delta_f \quad (3)$$

식 (1), (2), (3)을 이용하여 오차 동역학 방정식을 상태 공간 형태로 표현하면 식 (4)와 같은 상태 공간 방정식의 형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{e} &= A_e e + B_e \delta_f + F_e \dot{\psi}_{des} \\ \text{where, } e &= [e_y \ e_\psi]^T, A_e = \begin{bmatrix} 0 & v_x \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ B_e &= \begin{bmatrix} 0 \\ v_x / L_{whl} \end{bmatrix}, F_e = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \dot{\psi}_{des} \end{aligned} \quad (4)$$

모델 기반 상태 예측 및 최적해 도출을 위해 이산화된 오차방정식은 식 (5)와 같다.  $e_k$ 는  $k$  단계에서의 오차 상태량을 의미한다.

$$\begin{aligned} e_{k+1} &= A_d e_k + B_d \delta_f + F_d w_k \\ y_k &= C_d e_k \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{where, } A_d = A_e \Delta t + I, B_d = B_e \Delta t, F_d = F_e \Delta t$$

식 (6)은 시간  $k$ 에서 현재 상태와 제어 입력 기반 미래 예측 출력력을 나타내는 식이며, 식 (7)~(14)는 식 (7)을 구성하는 행렬들이다.

$$Y = G e_k + L U + M \delta_k + F W + S w_k \quad (6)$$

$$Y = [y_{k+1} \ y_{k+2} \ \dots \ y_{k+n}]^T \quad (7)$$

$$G = [C_d A_d \ C_d A_d^2 \ \dots \ C_d A_d^N]^T \quad (8)$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ C_d B_d & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_d A_d^{N-2} B_d & C_d A_d^{N-3} B_d & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$U = [u_{k+1} \ u_{k+2} \ \dots \ u_{k+n}]^T \quad (10)$$

$$M = [C_d B_d \ C_d A_d B_d \ \dots \ C_d A_d^{N-1} B_d]^T \quad (11)$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ C_d F_d & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_d A_d^{N-2} F_d & C_d A_d^{N-3} F_d & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$W = [w_{k+1} \ w_{k+2} \ \dots \ w_{k+n}]^T \quad (13)$$

$$M = [C_d F_d \ C_d A_d F_d \ \dots \ C_d A_d^{N-1} F_d]^T \quad (14)$$

모델 예측 제어 알고리즘 설계를 위한 비용 함수는 식 (15)와 같이 설계했다. 식 (16), (17)은 비용 함수를 구성하는 가중 행렬이다. Quadratic programming 기법을 이용한 최적해 도출을 위해 정의된 비용 함수를 Quadratic form으로 표현한 식은 식 (18)과 같다.

$$J = Y^T Q^T Q Y + U^T D^T R D U \quad (15)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \sqrt{q_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sqrt{q_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sqrt{q_n} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & \dots & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$J = \frac{1}{2} U^T H U + v^T U \quad (18)$$

$$v = L^T V \quad (18a)$$

$$H = L^T Q^T Q L + D^T R D \quad (18b)$$

$$V = Q^T Q (G e_k + M_k + F W + S w_{d,k}) \quad (18c)$$

본 연구에서는 MPC 알고리즘에 불평등 및 경계 제약 조건을 적용했다. 물리적 제한을 고려하여 휠의 최대 조향각 제한 및 조향 변화 속도 제한 제약 조건이 설계되었다. 최대 조향각 크기는 630 deg, 휠 각도 변화율 크기 제한은 500 deg/s로 적용되었다. 이는 성능평가에 사용된 CarMaker 내 운전자 모델의 조향 및 조향 각속도를 반영

한 수치이다.

제한된 MPC 참조 조향 제어 입력 도출 알고리즘은 모빌리티에 제어 입력이 인가되지 않으면서, 도출된 경로 추종 제어 입력과 운전자에 의해 인가되는 조향 입력 간 차이를 비교하는 방식으로 동작하도록 알고리즘을 설계하였다.

### 2.2 조향 오차 기반 주행 능력 지수 도출

설계된 MPC 알고리즘은 모빌리티가 운전자에 의해 주행하는 동안 경로 기준 추종 오차를 이용하여 경로 추종을 위한 전륜 휠 각을 실시간 도출한다. 실시간 도출된 경로 추종 휠 각은 조향 휠 각으로 변환되었고, 운전자 조향 입력과 비교함으로써 다음 식 (19)와 같이 조향 휠 각 오차를 정의하였다.

$$e_{str} = \delta_{driver} - \delta_{MPC} \quad (19)$$

조향 휠 각 오차의 크기가 클수록 경로 추종을 위해 계산된 MPC 참조 조향각과 운전자의 조향 입력과 차이가 있다는 것으로 이는 운전자의 주행 능력이 상대적으로 낮은 것으로 간주할 수 있다. 계산된 조향 휠 각 오차는 실시간으로 변화하기 때문에, 현시점의 조향 오차 값만으로 주행 능력을 도출하는 것은 상대적으로 어려움이 있다. 그러므로 본 연구에서는 RLS를 이용하는 지수 기반 운전 능력 정량화 방법을 제안한다. Fig. 2는 지수 기반 운전 능력 정량화 알고리즘을 보여주는 블록선도이다. MPC 알고리즘을 통해 도출된 참조 조향 입력 값과 운전자 조향 휠 각의 오차를 도출하고, RLS 알고리즘을 통해 주행 능력 조절하는 단계와, 파라미터와 스케일 요소 기반 지수를 도출하는 단계로 이루어져 있다.

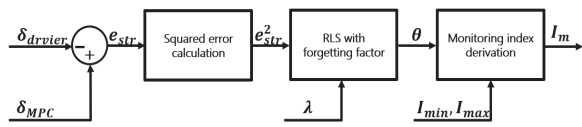


Fig. 2 Block diagram of monitoring index derivation

운전 능력 지수 계산을 위해 이용되는 오차 제곱 값의 조절을 위해 A. Vahidi 등의 연구 이론을 참고하여 망각 인자를 이용하는 RLS 알고리즘을 설계하였다.<sup>12)</sup> 조향 오차의 제곱 값을 RLS의 출력 인자로 적용하였으며, 회귀 변수의 경우 상수 값 1로 정의했다. 망각인자를 통해 오차 제곱의 변화 민감도를 조절할 수 있도록 RLS 알고리즘이 설계되었으며, RLS에 이용된 함수는 식 (20)과 같다.

$$y = \phi\theta \quad (20)$$

where,  $y = e_{str}^2, \phi = 1$

망각인자를 적용함으로써 과거 데이터에 더 적은 가중치를 부여하고 최근 데이터에 더 큰 가중치를 부여하도록 RLS 알고리즘을 설계하였다. 설계된 RLS 알고리즘의 손실 함수는 식 (21)과 같이 정의된다.

$$V_{loss}(\hat{\theta}, k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \lambda^{k-i} (y_i - \phi_i^T \hat{\theta}_k)^2 \quad (21)$$

추정값, 이득 및 공분산은 식 (22)~(24)를 통해 실시간 갱신되도록 설계되었다.

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}_{k-1} + L_k(y_k - \phi_k^T \hat{\theta}_{k-1}) \quad (22)$$

$$L(k) = P_{k-1} \phi_k^T (\lambda + \phi_k^T P_{k-1} \phi_k^T)^{-1} \quad (23)$$

$$P(k) = (1 - L_k \phi_k^T) P_{k-1} \frac{1}{\lambda} \quad (24)$$

$$I_m = C_I \frac{\theta - \theta_{min}}{\theta_{max} - \theta_{min}} \quad (25)$$

RLS 알고리즘에 의해 조절된 오차의 제곱 값은 식 (25)를 통해 0~100 사이 값으로 조절되어 정량화되었다.  $\theta_{max}$  및  $\theta_{min}$ 는 실험적 과정으로 도출될 수 있는 조향 오차 제곱 값의 최대/최소값이다.  $C_I$ 는 합리적 모니터링 지수 영역 설정을 위한 비례 계수이며, 계산 결과  $I_m$ 은 주행 능력 지수이다.

### 3. 성능평가

본 장에서는 설계된 MPC 기반 경로 추종 제어 알고리즘과 운전자 모델을 함께 이용하는 주행 능력 지수 도출 알고리즘의 성능평가를 진행하였다. 성능평가는 Matlab/

Table 1 Vehicle parameter

Division	Value [unit]
Mass	1,600 [kg]
Length between mass center and front axle	1.48 [m]
Length between mass center and rear axle	1.48 [m]
Wheel tread	1.614 [m]
Rear track width	0.85 [m]
Front wheel cornering stiffness	85,030 [N/rad]
Rear wheel cornering stiffness	68,147 [N/rad]

Simulink 및 카메이커 소프트웨어를 연동하여 진행되었다. 차량 파라미터는 Table 1에서 확인할 수 있다. MPC 기반 참조 조향 입력 도출을 위한 MPC 조향 오차 기반 운전 능력 지수 도출을 위한 RLS 및 모니터링 지수 관련 파라미터는 Table 2에 정리되었다.

Table 2 Controller and regulator parameters

Symbol	Description	Value
$Q$	Weighting matrix for state	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
$R$	Weighting for input	15,500
$\lambda$	Forgetting factor	0.9995
$P_{init}$	Initial covariance	0.1
$\theta_{max}$	Max value of squared error	2.0
$\theta_{min}$	Minimum value of squared error	0
$C_I$	Coefficient of monitoring index	100
$N$	Prediction step	10
$T_d$	Discretization time	0.1
$T_u$	Update period	0.1

### 3.1 운전 능력 지수 크기 조정 성능평가

알고리즘의 성능을 평가하기 위해 운전자의 반응 시간을 고려하는 주행 성능평가를 진행했다. 평가는 60 km/h 주행, 30 m 직진 후 차선 변경하여 100 m 직진하는 시나리오로 구성되었으며, CarMaker 소프트웨어 내 운전자 모델 입력 기반 성능평가 환경을 구성했다. 운전자 모델의 반응 시간을 고려하기 위해 소프트웨어 내 운전자 모델 파라미터 조정 항목 중 Reaction time 항목을 조절하였다. 이는 일반적으로 예견 지점을 기준으로 주행하는 운전자의 전방 주행 경로 변화를 인지하고 반응하기까지의 소요 시간을 나타내는 항목이다. 본 성능평가에서는 반응 시간의 영향을 분석하기 위해 허용 편차를 0.15 m로 설정하고, 이에 따라 다양한 반응 시간을 적용해 운전자 반응이 모니터링 지수에 미치는 영향을 확인했다. Table 3은 적용된 반응 시간 파라미터이다.

Fig. 3, 4를 통해 반응 시간이 늘어남에 따라 주행 도로

Table 3 Reaction time parameter

Case	Reaction time
Case 1-1	1 [sec]
Case 1-2	2 [sec]
Case 1-3	3 [sec]
Case 1-4	4 [sec]

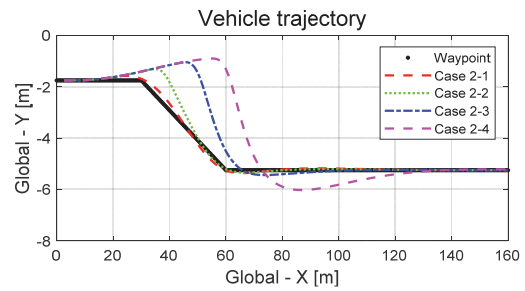


Fig. 3 Vehicle trajectory (lane change)

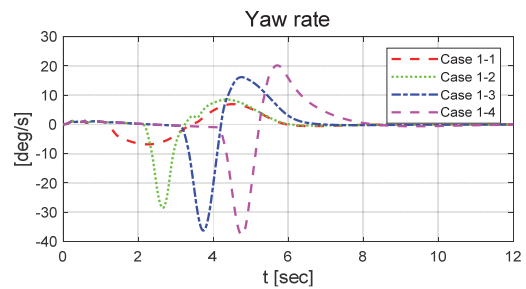


Fig. 4 Vehicle yaw rate (lane change)

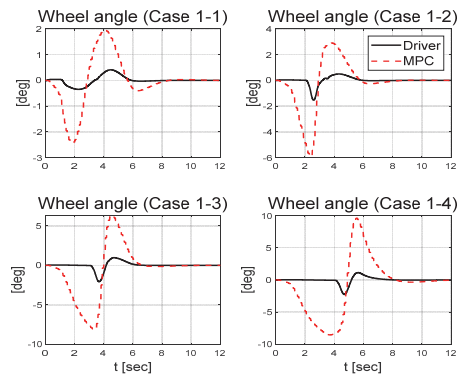


Fig. 5 Front wheel angle (lane change)

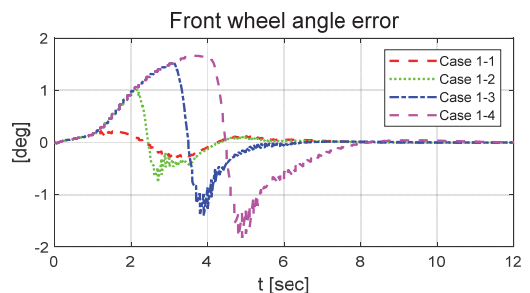


Fig. 6 Front wheel angle error (lane change)

에서 벗어나는 궤적과 요 각속도의 크기가 커지는 것을 확인했다. Fig. 5는 운전자와 MPC로부터 도출된 조향각을 보여준다. 전반적으로 MPC는 운전자에 비해 더 빠르

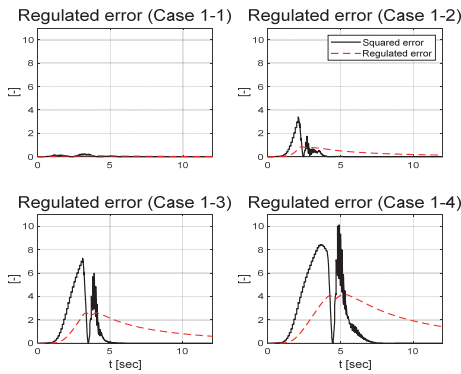


Fig. 7 Regulated error (lane change)

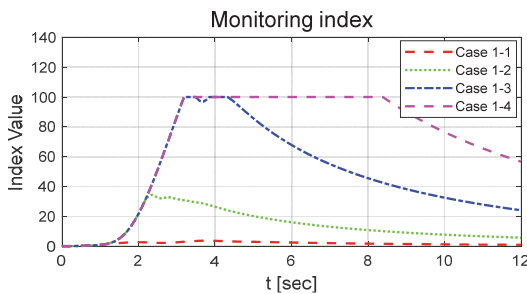


Fig. 8 Monitoring index (lane change)

게 반응하였으며, 특히 초기 조향 입력에서 큰 차이를 보였다. 반응 시간이 짧은 Case 1-1에서는 MPC와 비교적 작은 오차를 가졌지만 반응 시간이 증가한 Case 1-2, 3, 4에서는 초기 조향 반응이 지연되며 조향 진동이 커지는 현상이 나타났다. Fig. 6은 MPC와 운전자 간의 조향각 오차를 나타낸다. 반응 시간이 증가함에 따라 초기 오차의 크기가 커졌으며, 특히 Case 1-4에서는 큰 과도 응답과 함께 오차 수렴 속도가 현저히 느려졌다. Fig. 7은 조정된 조향 오차를 나타낸 것으로, 응답 시간이 지연됨에 따른 운전자의 주행 경향을 확인할 수 있다. Case 1-1에서 제곱 오차는 0에 가까운 값을 유지했으며, Case 1-2부터 반응 시간이 늘어남에 따라 제곱 오차의 크기가 큰 값을 가졌고 오차가 수렴하는 시간이 늘어남을 확인했다. RLS를 통해 조정된 오차는 모든 케이스에서 완만하게 수렴하는 것을 확인했으며, 이는 운전자의 조향이 정상적으로 복귀하더라도 이전의 오차를 반영해 모니터링 지수에 계산될 수 있음을 보여준다. Fig. 8은 모니터링 지수를 나타낸다. 반응 시간 지연에 따른 지수의 변화를 확인할 수 있다. 경로를 작은 오차로 추종한 Case 1-1의 경우 모니터링 지수가 0에 가까운 값으로 도출되었으며, 이는 정상적인 주행으로 간주할 수 있다. Case 1-2의 경우 초기 모니터링 지수가 증가했지만 경로에 크게 이탈

하지 않아 오차가 비교적 작은 쪽으로 증가했으며, 모니터링 지수는 초기 증가 이후 감소하는 결과를 확인할 수 있다. Case 1-3, 4의 경우 초기 모니터링 지수가 100%를 초과하는 결과가 도출되었으며, 이는 운전자가 허용 오차를 넘어섰음을 의미한다. Case 1-3의 경우 100%를 넘어선 후 감소하는 경향을 보였고, Case 1-4의 경우 운전자 조향 입력이 늦게 인가되었고, 그에 따라 모니터링 지수가 초기에 크게 증가했으며, 8초 이후 조향 각도, 요 각 속도가 안정됨에 따라 감소하는 결과를 보여준다. 이와 같은 결과들을 통해 운전자 반응 시간이 길어질수록 조향 능력이 저하되며, 차량의 주행 궤적, 조향 오차 및 조정된 오차가 증가함을 확인했으며 모니터링 지수를 통해 조향 입력에 따른 조향 경향 및 위험을 판단하는 지표로 사용할 수 있다. 본 성능평가를 통해 반응 시간이 증가할수록 조향 입력이 불안정해지며, MPC는 불안정한 상태를 보정하기 위해 더 큰 조향을 계산하며, 운전자와 제어기 간의 오차가 증가했다. 오차의 증가로 인해 단순 오차뿐 아니라 조향 안정성 지표로 볼 수 있는 모니터링 지수는 현재 운전 상태의 위험한 상황을 정량적으로 나타낼 수 있다.

### 3.2 운전자 응답 시간 지연을 고려한 성능평가

앞선 절에서 임의로 설정한 시간 지연을 적용하여 알고리즘의 정량적 특성을 확인했다. 실제 주행 환경에서는 운전자의 상태에 따른 반응 시간 차이는 주행 안전성에 영향을 미칠 수 있다. 본 절에서는 고령 운전자 및 졸음 운전자 등의 반응 지연 특성을 반영하여 실제로 위험할 수 있는 주행 환경에서 제안한 알고리즘이 다양한 응답 시간 조건에서 효과적으로 주행 위험을 정량화하는 지에 대한 평가를 진행했다.

본 평가는 곡률 반경 100 m의 S자 곡선 도로를 주행 시나리오에서 80 km/h의 정속 주행 조건으로 수행되었다. 평가 속도인 80 km/h는 기존 연구의 64~88 km/h 속도 범위를 참고하여 설정했다. 기존 연구의 속도 범위 내에서도 가혹 조건에 해당한다. 이러한 시나리오 설정을 통해 운전자의 반응 지연이 차량의 경로 이탈 위험으로 직결되는 상황을 모사했으며, 해당 조건에서 위험도를 판별할 수 있는지 확인했다.

알고리즘의 평가를 위해 고령 운전자 및 졸음 운전자의 반응 시간을 고려하는 주행 성능평가를 진행했다. 반응 시간은 기존 연구 조사를 통한 반응 시간 실험 결과를 사용했다. 고령 운전자의 평균적인 반응 시간은 약 0.51초 표준편차 약 0.21초이며,<sup>9)</sup> 졸음 운전자가 휴식을 취했을 경우 반응 시간은 약 2.78초이며, 휴식을 취하지 않은 졸음 운전자의 평균적인 반응 시간은 약 3.58초이다.<sup>13)</sup>

성능평가는 졸음 운전자의 반응 시간과 고령 운전자 반응 시간의 평균값과 표준편차를 이용해 식 (26)과 같이 추정했다. 여기서  $t_{delay}$  는 지연 시간,  $\mu$  은 평균값,  $\sigma_{delay}$  는 표준편차,  $C$  는 표준편차에 곱해지는 계수다. 인가된 지연 시간 상수는 Table 4에 정리했다.

$$t_{delay} = \mu \pm C\sigma_{delay} \quad (26)$$

where,  $C=3$

Table 4 Reaction time value

Case	Explanation	Reaction delayed time
2-1	Older driver average	0.51
2-2	Older driver $\mu + 3\sigma$	1.14
2-3	Drowsy driver(w/ rest)	2.78
2-4	Drowsy driver(w/o rest)	3.58

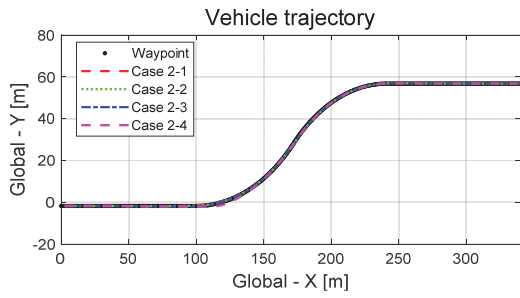


Fig. 9 Vehicle trajectory (curved path)

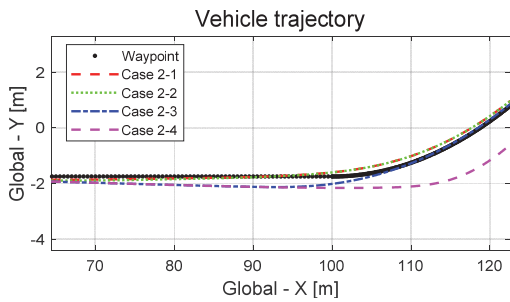


Fig. 10 Vehicle trajectory - zoom in (curved path)

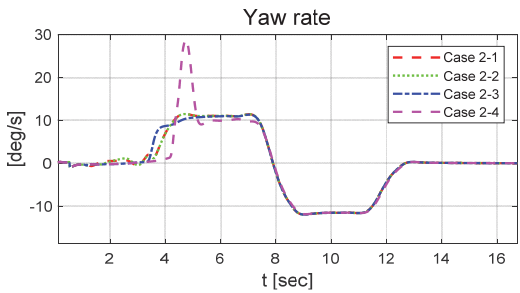


Fig. 11 Vehicle yaw rate (curved path)

Figs. 9 ~ 11은 차량의 궤적과 요 각속도 변화를 보여준다. Fig. 12와 13은 운전자와 MPC로부터 도출된 최적 조향각과 두 조향각 간 차이를 통해 도출된 오차를 보여준다. Fig. 14는 도출된 오차의 제곱 오차와 RLS를 통해 조정된 오차이다. Fig. 16은 운전 능력지수다.

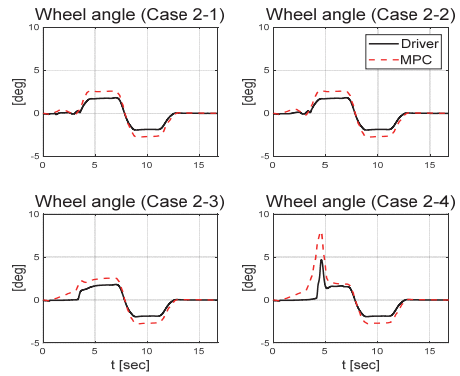


Fig. 12 Front wheel angle (curved path)

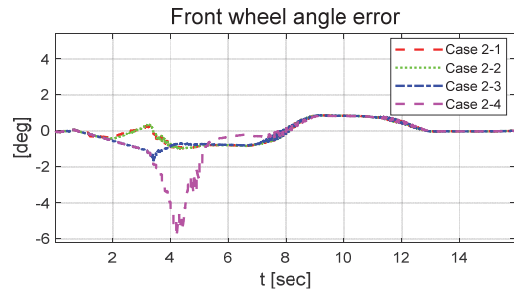


Fig. 13 Front wheel angle error (curved path)

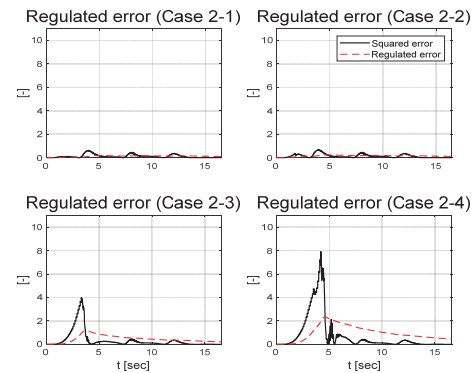


Fig. 14 Regulated error (curved path)

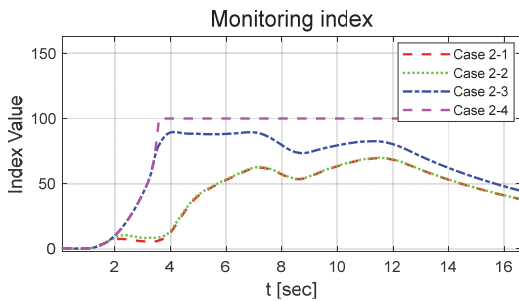


Fig. 15 Driving capability index (curved path)

Figs. 9, 10을 통해 차량 궤적에서 Case 2-1, 2-2의 주행 경로가 크게 벗어나지 않고, 주행 궤적을 유지하며 안정적인 주행이 이루어졌음을 볼 수 있다. 특히 곡선 구간에서도 차량이 도로 중심선 근처를 일정하게 따라가며, 경로 이탈 징후는 거의 관찰되지 않는다. 반면, Case 2-3부터는 경로 외측으로의 편차가 증가하고 있으며, 특히, Case 2-4의 확대된 궤적을 보면 곡선 구간에서 차량이 도로 중앙선을 기준으로 바깥쪽으로 밀려나는 현상이 확인된다. 이는 운전자 상태가 저하됨에 따라 조향 반응성이 떨어지고, 결과적으로 안정적인 궤적 유지가 어려워지는 현상을 보여준다. Fig. 10에서는 각 케이스에서 차량의 요 각속도를 비교했다. Case 2-1, 2에서는 안정적인 진폭과 위상을 유지했고, 안정적인 주행 및 조향이 수행되고 있음을 의미한다. 반면, Case 2-3, 4에서는 선회 구간에서 조향 입력이 초기에 개입되지 못하면서 선회 동작이 매끄럽지 못하고, 그에 따른 차량의 조향 능력에 문제가 생기는 현상으로 해석된다. Figs. 12, 13을 보면, Case 2-1, 2의 경우 조향 각도가 부드럽고 안정적으로 제어되고 있으며, 불필요한 진동이나 과도한 조향 변화는 보이지 않는다. Case 2-3은 조향각의 진폭이 증가하였고, 부드럽지 않은 조향 각도를 보인다. Case 2-4에서는 급격한 조향 변화가 나타나며 불안정한 조향을 보인다. Fig. 14를 통해 제곱 오차와 RLS를 통해 조정된 오차를 확인할 수 있다. Case 2-1, 2-2를 통해 조정된 오차가 상대적 낮은 수준에서 유지되며, 시스템 성능이 안정적임을 보여준다. Case 2-3, 2-4에서 곡선 구간 진입 전후에서 제곱 오차가 큰 폭으로 증가하는 경향을 보이며, 그에 따라 조정된 오차가 큰 폭으로 변동하는 결과를 볼 수 있다. Fig. 15에서 제안된 모니터링 지수의 변화를 나타낸다. 해당 지수를 통해 운전자의 상태를 간접적으로 반영하는 결과를 볼 수 있다. 낮은 지수를 유지하는 Fig. 2-1과 2-2는 비슷한 수준을 보이지만 전체 구간에서 Case 2-2가 초기 조향 시 소폭 큰 값을 보였지만, 두 케이스는 안정적인 주행 경향 및 지수를 보여준다. 그러나 Case 2-3부터는 지수 값이 급격히 상승하며, 선회 구간 이후 정상적 직진 주행

으로 복귀함에 따라 모니터링 지수가 점차 감소하는 형태를 확인했다. Case 2-4에서는 100 %를 넘어서는 값을 유지한다. 이를 통해 운전자의 주행 능력 저하 탐지하고 실시간 정량화할 수 있다.

성능평가 결과를 전반적으로 확인하면, 곡선 주행에서 반응 시간이 비교적 작은 Case 2-1, 2-2는 목표 궤적과 요 각 속도 모두에서 안정적인 추종 성능을 보였다. 반면 반응 시간이 크게 증가하는 Case 2-3 및 2-4에서는 곡선 진입 구간에서 조향 오차가 발생하며, 참조 조향과 운전자 조향각의 오차가 증가하며, 주행 안정성이 크게 저하되었다. Regulated error는 반응 지연 증가에 따라 급격히 상승하였으며, 특히 Case 2-4에서는 매우 높은 위험 지수가 나타났고, 성능평가 종료까지 유지되었다. 모니터링 지수는 반응 지연의 증가를 명확하게 반영하여 Case 2-3부터 위험 영역을 초과하며, Case 2-4에서는 장시간 100 % 이상으로 유지되어 운전자의 조향 능력 저하를 실시간으로 판별하는데 유효하다는 결론을 뒷받침했다.

성능평가 결과를 전반적으로 확인하면, Case 2-1, 2-2에서 조향각 입력, 조향 오차에서 안정적인 결과를 보였고, Case 2-3과 2-4는 운전자 반응 시간 지연에 따른 궤적 이탈, 조향 불안정 등 전반적인 조향 능력이 저하되는 양상이 드러났다. 이러한 결과는 모니터링 지수를 통해서도 확인할 수 있으며, 본 연구에서 제안된 모니터링 지수가 운전자 주행 능력 상태 저하에 반응할 수 있는 것으로 간주할 수 있다.

### 3.3 RLS를 통한 주행 능력 지수 조정

본 절에서는 주행 오차 기반 주행 능력 지수 도출 알고리즘의 특성을 결정하는 주요 파라미터 조정을 통해, 주행 능력 지수가 운전자의 상태를 변별할 수 있도록 RLS 민감도 조정 실험을 진행했다.

본 실험은 앞선 절에서 설정한 곡률 반경 100 m의 S자 곡선 도로 및 80 km/h의 정속 주행 조건과 동일한 환경에서 수행했고, 반응 시간은 2.78초의 시간 지연이 발생하는 상황을 상정했다. 이러한 시나리오에서, 망각 인자 계수의 변화에 따른 주행 능력 지수의 민감도 특성을 분석하였다. 망각 인자 계수를 조정하며 주행 오차에 따른 위

Table 5 Forgetting factor value

Case	Forgetting factor
3-1	0.995
3-2	0.9995
3-3	0.9999
3-4	0.99999

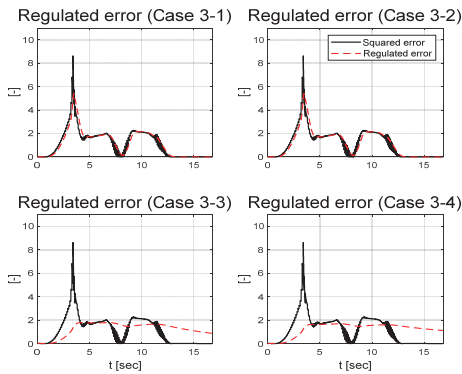


Fig. 16 Regulated error (adjusted sensitivity)

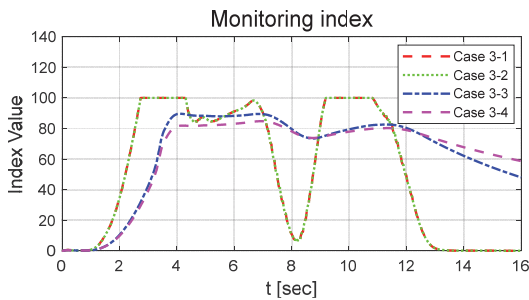


Fig. 17 Driving capability index (adjusted sensitivity)

험 상태를 얼마나 즉각적이고 정량적으로 반영하는지에 중점을 두었다. 성능평가에 적용된 망각 인자 계수는 Table 5에 정리했다.

Fig. 16은 주행 시 제곱 오차와 각 망각 인자 값에 따른 조정된 오차를 나타낸다. 모든 케이스에서 동일하게 2.78초의 반응 시간이 적용되었으나, 망각인자 설정에 따라 오차를 추종하는 민감도가 다르게 나타남을 확인할 수 있다. Case 3-1, 3-2의 경우 조정된 오차가 제곱 오차의 과도구간을 즉각적으로 추종하며 민감하게 반응하는 특성을 보인다. Case 3-3, 3-4에서는 조정된 오차가 완만하게 상승 및 하강하는 경향을 보이고, 곡선 구간 종료 후 오차가 감소하는 시점에서도 조정된 오차 수치가 서서히 줄어드는 감쇠 특성을 확인했다. Fig. 17은 민감도 조정이 따른 최종적인 주행 능력 지수에 미치는 영향을 보여준다. Case 3-1, 3-2는 주행 오차 발생 시 지수가 빠르게 상승하여 약 3초 지점에서 최대치인 100%에 도달하며, 이후 도로의 곡률 변화와 오차의 증감에 따라 지수가 민감하게 변동하는 것을 볼 수 있다. 이는 운전자의 위험 상태를 실시간으로 빠르게 포착하는 데 유리하지만, 일시적인 오차 변화에도 지수가 크게 요동치는 특성을 가진다. 반면, Case 3-3, 3-4에서는 지수가 100%에 도달하지 않고 약 80~90% 수준에서 유지되며, 오차의 변동에

대해 상대적으로 안정적인 수치를 확인할 수 있다. Case 3-4는 지수의 상승과 하강 속도가 가장 완만하게 나타나며, 이는 주행 중 발생하는 단기적인 노이즈나 일시적 오차에 의한 지수 급변을 억제하는 효과가 있다. 다만, 위험 상황이 해소된 이후에도 지수가 서서히 감소하여 회복 시간이 길어지는 특성을 보인다. 이러한 결과는 RLS 파라미터 조정을 통해 운전자의 누적된 피로도나 장기적인 주행 성능 저하를 감시할 것인지, 혹은 돌발적인 위험 상황을 즉각적으로 감지할 것인지에 대한 알고리즘의 운영 목적에 따라 최적의 망각 인자 값을 설정할 수 있는 것을 확인했다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 운전자의 조향 입력과 모델 예측 제어 기반 경로 추종 제어기 간의 오차를 실시간으로 도출하고, 운전자의 주행 능력 상태를 정량화하는 주행 능력 지수 도출 방법을 제안했다. 고령 운전자 및 졸음 운전자의 반응 시간 특성을 반영하여 성능평가를 수행함으로써, 고위험 운전 시나리오에서 알고리즘 적용 가능성 평가했다. 평가 결과 높은 반응 지연 시간을 가진 졸음 운전자가 작은 지연 시간을 가진 운전자에 비해 주행 궤적 이탈이 크게 나타났으며, 이에 따라 조향 오차 및 정량화된 주행 능력 지수가 상대적 높은 값을 보였다. 졸음 운전자 평가 시나리오에서는 운전 능력 지수가 이른 시간에 급격히 상승하며 상대적 주행 능력 저하 상태로 정량화하는 것을 확인하였다. 이러한 결과들은 제안된 알고리즘이 각기 다른 반응 지연으로 인한 주행 능력을 정량화하고, 주행 안전도를 정량화할 수 있음을 보여준다.

또한, RLS 기반의 지수 도출 방식은 단기적인 조향 편차보다는 전반적 주행 능력 변화를 반영할 수 있다. 이는 고령자 및 피로 누적 상태의 운전자에 대한 실시간 모니터링 시스템으로서의 유효성을 강화하며, 자율주행 차량 및 운전자 보조 시스템과의 연계를 통해 차량 전체의 안전성을 향상할 수 있는 기반 기술로 적용될 수 있을 것으로 예상된다. 향후, 운전자의 주행 특성을 반영한 MPC 제약 조건 설계 고도화를 추진할 예정이다. 학습 기반 알고리즘을 통해 운전자의 반응 지연 시간 및 주행 능력을 정량화하고, 이를 기반으로 개별 운전자에게 최적화된 맞춤형 참조 조향 입력을 도출하고자 한다. 이후 시스템의 동적 지연 요소들을 고려하여 MPC 제약 조건을 설계하고, RLS 파라미터 및 지수 경계값 최적화를 수행함으로써 실시간 적응성이 확보된 고도화된 운전자 지원 제어를 구현할 계획이다. 또한 HiLs(Hardware in the Loop Simulation)기반 다양한 시나리오에서의 성능평가와 합

계 운전자 주행 능력 판단에 따른 모빌리티의 제어권 전환 알고리즘 개발을 계획하고 있다.

## 후 기

본 연구성과물은 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. RS-2025-25436080).

## References

- 1) S. Cao, P. Feng, W. Kang, Z. Chen and B. Wang, "Optimized Driver Fatigue Detection Method Using Multimodal Neural Networks," Scientific Reports, Vol.15, No.12240, pp.1-15, 2025.
- 2) M. Afifi, M. El-Adawy and R. Hajjeh, "Real-Time Driver Drowsiness Detection Using Facial Analysis and Machine Learning Techniques," Sensors, Vol.25, No.3, Paper No.812, 2025.
- 3) M. Samuel, K. Yahya, H. Attar, A. Amer and M. B. Mohamed, "Evaluating the Performance of Fuzzy-PID Control for Lane Recognition and Lane-Keeping in Vehicle Simulations," Electronics, Vol.12, No.3, Paper No.724, 2023.
- 4) G. Geng, G. Cheng, C. Duan and X. Jiao, "Optimal Lane-Changing and Collision Avoidance Strategy for Intelligent Vehicles in High-Speed Driving Environments," Vehicle System Dynamics, Vol.62, No.10, pp.2632-2656, 2024.
- 5) S. Shah, Z. Sun, K. Zaman, A. Hussain, M. Shoaib and L. Pei, "A Driver Gaze Estimation Method Based on Deep Learning," Sensors, Vol.22, No.10, Paper No.3959, 2022.
- 6) C. Boateng, T. Ro, A. Alsheikh, D. Lee, M. Abdel-Aty, Y. Lee and S. Ghosh, "Spatial Deep Learning Approach to Older Driver Classification," IEEE Access, Vol.12, pp.191219-191230, 2024.
- 7) H. Beles, T. Vesselenyi, A. Rus, T. Mitran, F. Scurt and B. Tolea, "Driver Drowsiness Multi-Method Detection for Vehicles with Autonomous Driving Functions," Sensors, Vol.24, No.5, Paper No.1541, 2024.
- 8) R. Sathya, D. Harsha, M. Krishna, G. Reddy and P. Arhith, "Driver Drowsiness Detection and Alerting Model for Minimizing Road Accidents," IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science, pp.1-6, 2023.
- 9) S. Doroudgar, H. Chuang, P. Perry, K. Thomas, K. Bohnert and J. Canedo, "Driving Performance Comparing Older versus Younger Drivers," Traffic Injury Prevention, Vol.18, No.1, pp.41-46, 2016.
- 10) T. Lee, M. Kim and Y. Kang, "Nonlinear Model Predict Controller Strategy Considering Velocity Reduction by Large Steering Angle in Extreme Maneuver," Transactions of KSAE, Vol.27, No.2, pp.133-143, 2019.
- 11) S. Hong, L. Lim and J. Oh, "A Study on In-Vehicle Aggressive Driving Detection Recorder System for Monitoring on Drivers' Behavior," Transactions of KSAE, Vol.19, No.3, pp.16-22, 2011.
- 12) A. Vahidi, A. Stefanopoulou and H. Peng, "Recursive Least Squares with Forgetting for Online Estimation of Vehicle Mass and Road Grade: Theory and Experiments," Vehicle System Dynamics, Vol.43, No.1, pp.31-55, 2005.
- 13) J. Lowrie and H. Brownlow, "The Impact of Sleep Deprivation and Alcohol on Driving: A Comparative Study," BMC Public Health, Vol.20, No.980, pp.1-10, 2020.