

급발진 의심 사고의 EDR 파워트레인 데이터 분석

박종진¹⁾ · 조상수²⁾ · 김정윤^{*3)}

국립과학수사연구원 교통사고분석실¹⁾ · 한국교통안전공단 자동차안전연구원²⁾ · 대구가톨릭대학교 미래자동차공학과³⁾

Analysis of EDR Powertrain Data in Suspicious Sudden Unintended Acceleration Accidents

Jongjin Park¹⁾ · Sangsoo Cho²⁾ · Jungyun Kim^{*3)}

¹⁾Traffic Accident Analysis Division, National Forensic Service, 139 Jiyang-ro, Yangcheon-gu, Seoul 08036, Korea

²⁾Secretariat of Automobile Safety and Defect Deliberative Commission, Korea Automobile Testing & Research Institute(KATRI), KOTSA, 200 Samjon-ro, Songsan-myeon, Hwaseong-si, Gyeonggi 18247, Korea

³⁾Department of Automotive Engineering, Daegu Catholic University, Gyeongbuk 38430, Korea

(Received 21 May 2024 / Revised 15 June 2024 / Accepted 17 June 2024)

Abstract : Due to the recent increase in suspicious sudden unintended acceleration accidents, more and more vehicle users are questioning the function and effectiveness of an EDR(Event Data Recorder). Accordingly, the Ministry of Land, Infrastructure and Transport is exerting great efforts to secure the necessary information to obtain accurate accident analysis, such as expanding the data of an EDR. In this study, we aimed to analyze the cause of the accident more accurately by applying vehicle dynamics technology to the analysis of EDR data. A sudden increase in vehicle speed accompanies changes in the state of the powertrain, such as the engine or transmission. Then, by analyzing such behaviors from the EDR data of the accident vehicle, we could determine if there was sudden unintended acceleration that occurred under normal circumstances or if there was abnormal acceleration due to a malfunction or a defect in related parts. Therefore, this study investigated whether sudden unintended acceleration occurred by analyzing the relationship between the speed change of the vehicle and accelerator pedal displacement, focusing on the shifting of the transmission. To this end, first, we developed a driving simulation program based on the simplified vehicle dynamics and the numerical models of powertrain components. Next, we discussed the shifting characteristics and powertrain behavior according to the driver's operation of the accelerator pedal of a vehicle equipped with an automatic transmission. To determine the shifting status of the accident vehicle, we proposed an integer-valued function of the speeds of the engine and the vehicle. Finally, on two suspicious sudden unintended acceleration accidents, we analyzed data extracted from the EDR of the accident vehicle to determine if there was a defect in the vehicle's powertrain.

Key words : Suspicious sudden unintended acceleration accident(급발진 의심 사고), Powertrain(파워트레인), Shifting(변속), EDR(사고기록장치), Vehicle dynamics(차량동역학)

1. 서론

1989년에 자동차 급발진 사고란 “자동차가 정지상태 또는 매우 낮은 초기 속도에서 명백한 제동력 상실을 동반하는 의도하지 않고 예상하지 않은 고출력의 가속도를 내는 사고”로 정의하고 있으며¹⁾ 해외 여러 나라에서도 사회적 이슈가 되어 많은 조사가 진행되었다. 급발진

의심 사고에서 운전자는 공통으로 의도하지 않았지만 짧은 시간 동안 차속이 크게 증가하였다고 주장하고 있다. 하지만 이러한 급발진 의심 사고의 대부분은 운전자의 주장과는 달리 차량의 결함이 아닌 운전자의 페달 오조작이 그 원인으로 분석 보고되고 있다.²⁻⁷⁾

최근 늘어난 급발진 의심 사고로 인해 사고기록장치

*Corresponding author, E-mail: kjungyun@cu.ac.kr

¹⁾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.

의 기능과 효용에 대해 의문을 가지는 차량 이용자들이 많아졌다. 이에 국토교통부에서는 사고기록장치의 저장 항목을 확대하는 등 정확한 사고원인 분석에 필요한 정보 확보에 큰 노력을 기울이고 있다. 본 연구에서는 이러한 사고기록장치의 정보 확장에 더불어 사고기록 데이터의 분석에 차량 동역학 기술을 적용하여 더욱더 정확한 사고원인을 분석하고자 한다.

차량의 가속은 운전자의 가속 의지에 따라 주행부하보다 큰 엔진 구동력을 출력하면서 이루어지는데 이때 파워트레인에서는 엔진 회전수가 증가하거나 변속기의 변속이 발생한다. 이렇듯 차속의 증가는 반드시 엔진이나 변속기 등 파워트레인의 상태변화를 수반하게 된다. 따라서 운전자의 가속페달 변위 변화에 따른 파워트레인 거동을 분석하면 급발진 의심 사고 차량이 정상적인 가속을 하였는지 아니면 관련 부품의 고장이나 결함으로 인한 비정상적인 가속을 하였는지 판단할 수 있다. 이에 본 연구에서는 사고 당시 차량의 변속 여부를 중심으로 차량의 급격한 속도와 가속페달 변위 사이의 연관성을 분석하여 급발진 여부를 판단하고자 한다.

이를 위해 먼저 자동차의 구동 동역학을 바탕으로 한 구동 시뮬레이션 프로그램을 개발하고 차량이 가속하기 위해서는 파워트레인의 주요 부품인 엔진과 변속기가 어떻게 작동하는지 살펴본다. 특히 자동변속기를 장착한 차량을 대상으로 차량의 구동 중 운전자의 가속페달 조작에 따른 변속 특성과 파워트레인의 거동을 시뮬레이션하고 분석하였다. 마지막으로 급발진 의심 사고 사례를 대상으로 사고 차량의 사고기록장치(EDR: Event Data Recorder)에서 추출한 데이터 분석을 통해 사고 차량 파워트레인의 결함 여부를 판단하였다.

2. 차량의 구동 동역학

차량의 구동 시스템인 파워트레인은 엔진과 같은 구동원과 차량의 바퀴를 연결하는 변속기, 프로펠라 샤프트, 차동장치, 중감속기 등으로 구성된다. 엔진에서 출력된 구동력은 차량의 바퀴에 작용하는 주행 부하와 비교하면 대체로 작으므로 그대로 바퀴에 전달하면 자동차가 가속하지 못하거나 시동이 꺼지게 된다. 따라서 엔진의 구동 토크를 증가시키기 위한 장치가 필요하며 대부분 차량에는 감속기어를 사용하는 변속기를 장착하고 있다.

2.1 차량의 구동

운전자가 가속페달을 밟게 되면 엔진제어기는 운전자의 가속페달 위치 센서(APS: Acceleration Pedal Sensor)의

값에 맞춰 스로틀 밸브(Throttle valve) 등을 개방하여 가속에 필요한 동력(토크)을 출력한다. 이 값이 감속기어를 거쳐 기어비만큼 증대되어 바퀴에 작용하는 주행부하보다 크면 차량은 가속하게 되고, 바퀴에 연결된 엔진의 회전수도 차속과 함께 증가하게 된다. 하지만 엔진은 최대 출력 회전수가 제한되어 있어 그보다 큰 값으로 차량을 가속하기 위해서는 추가적인 장치가 필요하다. 이렇듯 엔진에서 출력되는 동력과 차량의 주행부하에 대응하여 차량을 가속할 수 있도록 다수의 기어비를 제공하고 변화시킬 수 있는 장치가 파워트레인의 변속기다.

변속기는 여러 개의 기어쌍으로 구성되어 있으며, 기어비의 변화를 운전자가 직접 결정하는 수동변속기와 변속제어장치에서 자동으로 수행하는 자동변속기로 구분된다. 특히 자동변속기는 토크 컨버터와 유성기어, 습식 다판 클러치로 구성된 전형적인 구조 이외에 최근에는 DCT(Dual Clutch Transmission)와 같은 AMT(Automated Manual Transmission)도 많이 사용되고 있다.

차량의 구동 시 파워트레인의 거동은 Fig. 1과 같은 구동력 선도(Tractive effort and resistance diagram)로 표시할 수 있다.⁸⁾ 구동력 선도는 차속을 가로축으로 하고 바퀴에 작용하는 구동력과 주행부하를 표시한 그림으로 이를 이용하여 대상 차량의 최대 등판 각도와 최대속도 등 구동 성능을 판별할 수 있다. 대체로 변속기의 1단 기어비는 차량의 최대 등판성능을, 최고 단수 기어비는 최대 속도를 목표로 설계하므로 Fig. 1에 표시한 차량의 최대 등판 경사는 57.7%이며, 최대속도는 170 km/h 정도임을 알 수 있다.

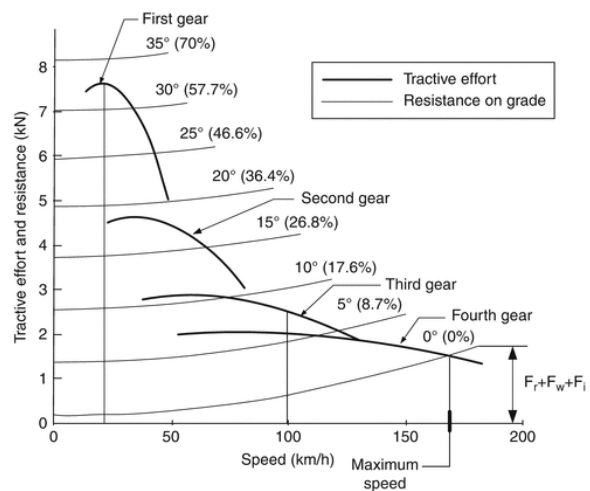


Fig. 1 Tractive effort and resistance diagram of a moving vehicle(https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_799)

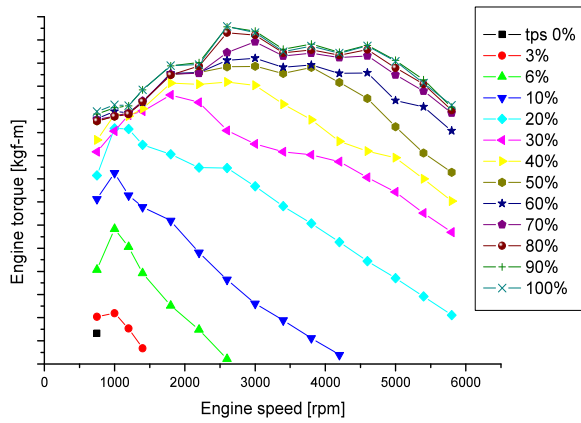


Fig. 2 Engine performance curve

차량의 주행 시 바퀴에 작용하는 주행부하는 식 (1)과 같이 등판저항(R_C)과 공기저항(R_A), 구름저항(R_R)으로 분류할 수 있다. 공기저항은 차량 속도의 제곱에 비례하며 구름저항은 차량의 바퀴에 작용하는 차량 무게에 대한 타이어와 지면과의 마찰계수로 표현되며 주행 노면과 차량 속도, 타이어의 종류 등 다양한 변수에 따라 달라지므로 대상 차량의 타행시험을 통하여 추출한 실험 계수 C_1 과 C_2 를 이용하여 모델링할 수 있다.

$$R_C + R_A + R_R = W \times \sin\theta + C_1 \times V^2 + C_2 \cos\theta \quad (1)$$

여기서 W 는 차량의 무게, θ 는 등판각도, V 는 차량 속도이다. 구동력 선도에서 주행부하를 등판 각도에 따라 표시하면 차속의 제곱에 비례하는 곡선으로 나타난다.

내연기관인 엔진의 출력은 대체로 특정 회전수에서 최대 토크 값을 가지며 그 전후에서 감소하여 포물선의 형태로 나타난다(Fig. 2). 따라서 구동력 선도에서 보이는 포물선은 엔진의 풀-스로틀(Full throttle) 시의 최대 토크 값을 변속기 각 단의 기어비를 사용하여 차속으로 변환한 것이다.

2.2 차량의 가속속과 변속

차량의 가속은 운전자가 가속페달을 통해 구동원인 엔진의 속도를 직접 변화시키거나 변속기의 변속을 통해 이루어진다. 이러한 변속은 차량의 주행부하와 엔진 상태에 맞추어 수동변속기는 운전자가 변속 시점을 결정하지만, 자동변속기는 미리 정해진 변속스케줄(변속 맵 또는 변속 패턴)에 맞추어 이루어진다. 변속스케줄은 운전자의 가속 의지를 반영하는 APS 값과 차속을 입력 조건으로 하며, 차량의 연비와 구동 성능 등을 종합적으

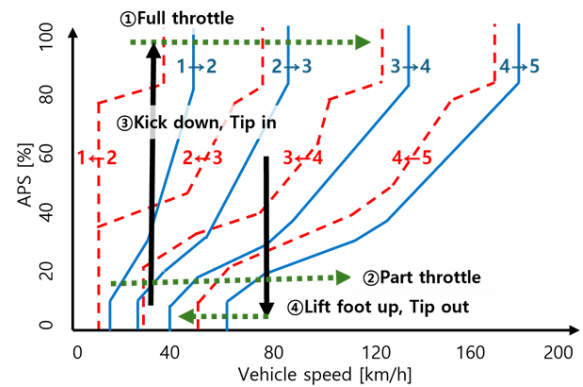


Fig. 3 Shifting schedule in an automatic transmission

로 고려하여 설계되며 변속 제어기(TCU: Transmission Control Unit 또는 PCM: Powertrain Control Module)에 록업(Look-up) 테이블 형태로 저장되어 사용된다(Fig. 3).

일반적인 차량의 가속은 주행 상황에 따라 엔진을 최대 토크 또는 최대 파워 회전수까지 구동한 후 낮은 기어비로 변속하여 엔진의 작동 영역을 확장하는 상단 변속을 통해 이루어진다. 이때 APS 값이 크면 급가속(Fig. 3의 ① Full throttle)으로 판단하여 지연된 상단 변속스케줄을 사용하고, 값이 작으면 완가속(Fig. 3의 ② Part throttle)의 빠른 상단 변속이 이루어진다.

이와 달리 운전자가 추월과 같은 급격한 가속을 원해서 주행 중 가속페달을 더 밟게 되면 APS 값이 순식간에 증가하면서 변속기는 차량 가속도를 최대화하기 위해 일시적으로 높은 기어비로 하단 변속하여 증가한 기어비만큼 엔진 출력 토크를 증배하여 구동축에 전달한다. 이러한 급가속은 운전자가 밟은 APS 값 변화량에 따라 킡-다운 또는 팁-인(Fig. 3의 ③ Kick down, Tip in)이라고 하며 하단 변속 이후 지연된 변속스케줄에 따른 상단 변속이 이루어지면서 가속하게 된다. 특히 킡-다운의 경우 엔진의 과회전을 방지하기 위해 무리한 하단 변속을 방지하는 안전 기능이 변속기에 있으며, 운전자의 페달 조작 판별이나 빈번한 변속이 발생하지 않도록 차량 제조사별로 약간의 시간지연을 두고 작동한다.

이에 반해 운전자가 주행 중 가속페달에서 발을 떼는 리프트-풋-업 또는 팁-아웃(Fig. 3의 ④ Lift foot up, Tip out)이 발생하면 APS 값이 순식간에 감소하면서 차량은 운전자가 가속 의지가 없다고 판단하고 상단 변속하여 엔진의 작동점을 최대 토크 영역에서 고연비 영역으로 이동하게 된다. 특히 내리막길에서 이를 관성주행(Coasting)이라고 하며 APS가 계속해서 낮은 값으로 유지되면 차량은 순차적인 하단 변속 이후 정지하게 된다.

3. 차량 가속 시 파워트레인의 거동 분석

운전자의 급격한 가속페달 조작으로 인한 차량 가속 시 파워트레인의 거동을 분석하기 위해서는 각종 계측기를 차량에 장착한 실험이나 최신 공학 소프트웨어를 활용한 시뮬레이션을 이용할 수 있다. 실차 실험은 비용과 시간이 많이 소모되고 다양한 시험조건을 적용하기 어려워 본 연구에서는 Mathworks사의 Matlab/Simulink를 플랫폼으로 사용한 자동변속기 장착 차량의 구동 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 활용하였다(Fig. 4).

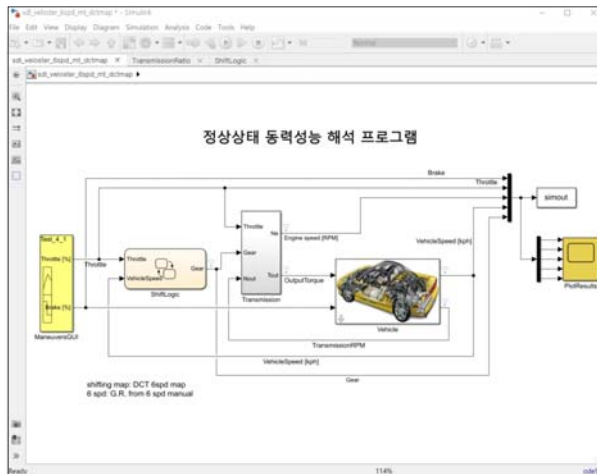


Fig. 4 Driving simulation program

3.1 차량의 구동 시뮬레이션 프로그램

차량의 엔진과 변속장치의 구성은 무수히 많은 조합이 가능하므로 파워트레인 각 구성요소는 복잡한 동적 특성을 무시한 정상상태로 가정하여 다음과 같이 모델링하고(Fig. 5), 이를 바탕으로 차량의 속도관계식과 운동방정식을 유도하였다(식 (2), (3)).

$$T_2 = \alpha \cdot T_1, \omega_2 = \frac{1}{\alpha} \omega_1 \quad (2)$$

$$(\alpha^2 \cdot I_1 + I_2) \dot{\omega}_2 = \alpha \cdot T_1 - T_2 \quad (3)$$

여기서 I_1 은 엔진과 플라이휠, 클러치, 변속기 입력축

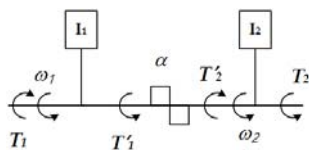


Fig. 5 Free body diagram of a simplified powertrain system

의 등가 회전관성을 나타내고 I_2 는 변속기 출력축과 변속기어열, 차동장치, 종감속기, 차량의 등가 회전관성을 나타낸다. 또한 α 는 변속기의 변속 기어비를 나타내고 ω_1 과 ω_2 는 각각 엔진과 구동축의 회전속도, T_1 과 T_2 는 각각 엔진과 주행부하의 토크 값을 나타낸다.

시뮬레이션 대상 차량에 탑재된 엔진은 4,600 rpm에서 최대 토크 163 Nm을 출력하는 1,600 cc 휘발유 엔진이다. 엔진의 공회전 상태와 동특성이 차량의 발진 거동에 미치는 영향은 매우 크지만, 엔진 실린더 내의 폭발력 등에 대한 정확한 모델링이나 실험 등이 어려우므로 앞서 설명한 대로 엔진의 동특성을 무시한 정상상태의 성능 데이터를 사용하였다. 시뮬레이션에 필요한 스로틀 개도(TPS: Throttle Position Signal) 별 엔진 토크 값은 정상상태 성능 데이터 곡선을 3차원 보간하여 계산하였다. 시뮬레이션 프로그램에서 차량의 주행 조건은 간단한 운전자 모델을 이용하여 가속페달과 제동페달의 변위를 시간에 대해 백분율로 입력하도록 하였다. 차량에 탑재된 변속기는 6속 DCT이며 변속스케줄은 Fig. 6과 같고 각 단의 변속 기어비와 종 감속비, 주행부하 계산에 필요한 타행 실험 계수와 차량 사양은 Table 1과 같다.

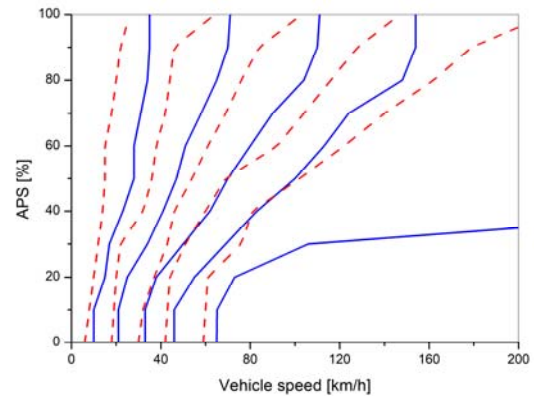


Fig. 6 Shifting schedule in the target vehicle

Table 1 Vehicle specification

Parameter	Value
Curb weight	1270 kg
Tire dynamic load radius	0.305 m
Aerodynamic coefficient C_1	0.035051
Rolling resistant coefficient C_2	146.35
Vehicle mass moment of inertia I_2	149 kg · m ²
Gear ratio	3.615, 1.962, 1.294, 0.976, 0.778, 0.633
Final gear ratio	4.467

3.2 차량 가속 시 파워트레인의 거동

먼저 개발 프로그램의 해석 결과를 검증하기 위해 대상 차량의 APS 값 100 %의 풀-스로틀(Full throttle)과 APS 값 20 %의 파트-스로틀(Part throttle) 주행을 시뮬레이션하였다.

시뮬레이션 결과에서 차량은 정해진 변속스케줄에 따라 차속이 증가하면서 상단 변속이 차례대로 이루어졌음을 확인할 수 있다(Fig. 7). 파트-스로틀의 경우 풀-스로틀보다 변속 시점이 빠르고 변속이 이루어진 엔진 회전수가 최대 토크가 아닌 연비가 좋은 영역으로 낮게 형성되고 있는데 이는 파트-스로틀 변속스케줄이 가속 성능보다 연비 성능에 우선하도록 작성되었기 때문이다.

시뮬레이션 결과 풀-스로틀 가속에서 차량 속도 100 km/h에 도달하는 시간이 8.1초로 계산되었다. 실제 차량의 제로-백 성능은 약 7초로 알려져 있으나 해석 프로그램

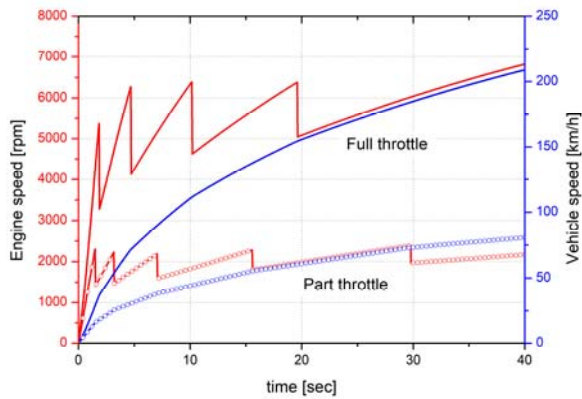


Fig. 7 Simulation result(full throttle and part throttle)

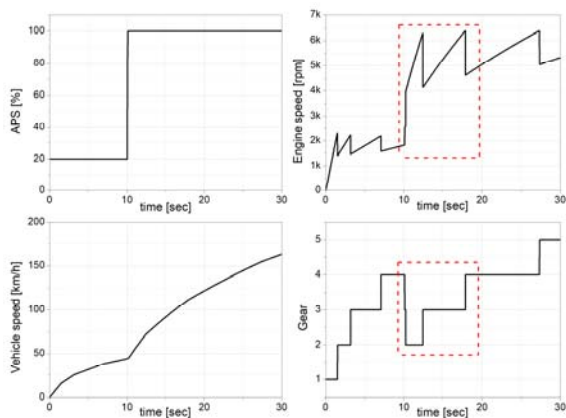


Fig. 8 Simulation result(kick-down)

램에서는 클러치나 토크 컨버터와 같은 발전기구를 고려하지 않았으며 차량의 발전 시 엔진의 아이들 상태가 고려되지 않았다. 특히 실제 시험 차량의 타이어 상태 등 여러 사양이 성능시험을 위해 조정되고 최적화되었음을 고려하면 시뮬레이션 결과가 비교적 정확하다고 할 수 있다.

프로그램을 이용하여 대상 차량의 급격한 가속페달 조작인 킥-다운과 리프트-풋-업에서 차량의 속도와 엔진 회전수, 변속 기어 단수의 변화를 시뮬레이션하였다. 먼저 Fig. 8은 출발 후 10초까지 APS 값 20 %로 가속하다가 이후 100 %로 급가속하여 킥-다운이 발생한 경우이다. 처음에 차량은 4단까지 순차적인 상단 변속으로 완만히 가속하다가 10초에 킥-다운이 발생하면서 2단으로 급격한 하단 변속을 하게 된다. 이에 따라 엔진 회전수는 약 2,000 rpm에서 4,000 rpm으로 급변하고 이후 계속되는 운전자의 가속 의지에 대응하기 위해 최대 엔진 회전수인 6,300 rpm까지 증가한 후에 3단으로 변속하게 된다. 이후 차량은 변속스케줄에 따라 5단까지 상단 변속하면서 급가속하고 있다.

Fig. 9는 출발 후 6초까지 APS 값 60 %로 가속하다가 0 %로 리프트-풋-업이 발생한 경우의 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 6초까지 차량은 3단까지 완만히 변속하면서 가속하다가 6초 이후 순식간에 6단까지 상단 변속을 하고 있다. 이는 운전자의 가속 의지가 없어졌다고 판단한 차량이 낮은 기어비로 상단 변속하여 엔진의 작동 영역을 최대 토크에서 고연비 영역으로 이동하였기 때문이다. 따라서 엔진 회전수는 이전 4,000 rpm 부근에서 2,000 rpm 이하로 감소하고 이후 차량은 순차적인 하단 변속을 통해 감속하고 있다.

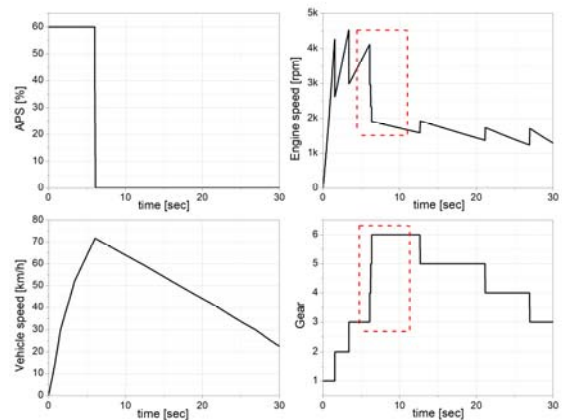


Fig. 9 Simulation result(lift foot up)

4. 급발진 의심 사고의 파워트레인 거동 분석

국내에서 판매되고 있는 차량의 종류와 파워트레인의 조합은 매우 다양해서 차량별 기어비와 변속스케줄, 엔진 성능곡선 등을 입수하여 개발 시뮬레이션 프로그램에서 사용하는 것이 쉽지 않고 특히 사고 차량의 실험은 차량의 파손 등으로 인해 불가능한 경우가 많다. 하지만 사고기록장치(EDR)는 사고 시점을 전후하여 차량의 여러 정보를 저장하고 기록할 수 있어 EDR에서 추출한 엔진 회전수와 차속 데이터를 비교하면 사고 이전의 파워트레인 거동을 분석할 수 있다.

차량의 EDR은 사고 후 사고원인을 분석하기 위해 매우 중요한 장치이기 때문에 차량의 파손이나 화재에 대비할 수 있도록 설계되고 가능하면 사고충격에 직접적인 영향을 받지 않는 곳에 장착된다. 또한 사고 차량 EDR에서 추출한 데이터의 무결성과 정확성을 확보하기 위해 항상 사고 차량의 EDR과 각종 센서의 정상적인 작동 여부를 확인하고 추출한 데이터가 훼손되지 않았는지 점검하는 작업이 선행되어야 한다.

특히 사고 시점 이후 0.25초까지 EDR에 기록되는 차량 정보(System status data, Post-crash data)는 사고로 인해 장치의 손상이 발생하거나 유효하지 않은 기록이 발생할 수 있으나 본 연구에서는 사고 발생 5초 전까지 저장된 유효한 정보(Pre-crash data)만을 분석 대상으로 하였다. EDR 데이터를 통한 분석을 위해 본 연구에서 사용한 가정은 다음과 같다.

- 사고 차량의 EDR과 차량 파워트레인에 사용되는 센서는 고장 없이 정상적으로 작동하였다.
- 사고 차량 EDR에 저장된 각종 센서 신호는 정상적으로 기록되었다.

4.1 사고 사례 A

본 사례는 사고 차량이 시골길에서 급가속하여 우측 앞 범퍼로 전방의 구조물을 충돌한 후 주차된 차량의 좌측 뒷바퀴 부분을 충격하여 동승자가 상해를 입은 급발진 의심 사고이다. 당시 사고 차량에 차량 진단기를 연결하여 EDR 기록에 관여하는 여러 센서류 등의 이상 유무를 점검한 결과 특별한 고장 코드가 발견되지 않았으며 가속페달과 제동페달, 변속 레버, 인히비터 스위치도 정상 작동함을 확인하였다. 이후 전용 추출장비를 이용하여 EDR에서 ACU(Airbag Control Unit)가 충격을 인지한 시점을 기준으로 5초 전의 주행 정보가 0.5초 단위로 기록한 데이터가 식별되었으며 추출한 주행 정보의 일부를 Fig. 10과 같이 표시하였다.

EDR 기록 중 TPS 값과 엔진 회전수, 차속, 변속 여부

시간 (sec)	차량속도 (kph)	엔진 회전수 (rpm)	엔진 스로틀밸브 개량량 (%)	제동페달 작동여부 (on/off)
-5.0	17	2600	100	OFF
-4.5	28	3000	100	OFF
-4.0	38	3900	52	OFF
-3.5	14	4200	16	OFF
-3.0	17	3600	27	OFF
-2.5	13	3800	16	OFF
-2.0	70	4200	100	OFF
-1.5	45	3600	29	OFF
-1.0	22	3100	100	OFF
-0.5	28	4200	19	OFF
0.0	24	3100	31	OFF

Fig. 10 EDR data in case A(printed from EDR report)

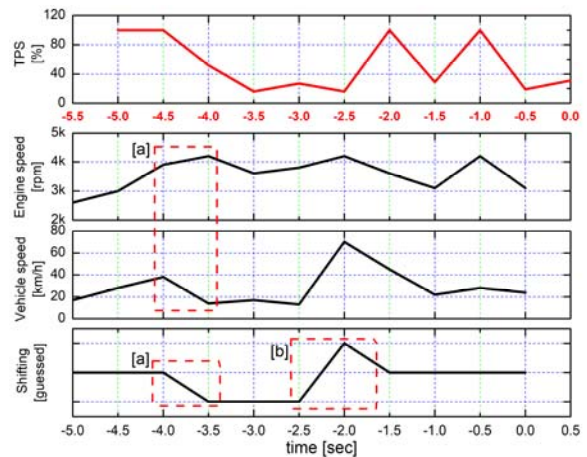


Fig. 11 Powertrain behavior in case A

를 그림으로 표시하면 다음과 같다(Fig. 11). 시뮬레이션과 달리 실제 차량의 엔진은 회전관성이 비교적 크고, 내연기관의 연소 과정인 실린더 내 행정으로 엔진 출력 토크의 변화가 TPS 값의 변화에 대해 약간의 시간지연 후에 이루어진다. 따라서 보다 정확한 비교를 위해 TPS 값을 다른 주행 정보에 비해 본 연구에서는 0.5초 이동하여 표시하였다.

사고 차량의 변속 여부를 판단하기 위해 EDR 파워트레인 데이터 중 엔진 회전수와 차속을 비교하여 전체 기어비 변화를 추정하였다. 이론적으로 변속이 발생하지 않으면 전체 기어비는 일정한 값을 가져야 하지만 실차에서 차속은 휠속 센서(Wheel speed sensor)에서 입력된 각 바퀴의 회전수로 계산하기 때문에 사고 발생 시 바퀴의 미끄러짐이나 타이어 파손으로 인한 동하중 반경값 변화에 따라 오차가 발생할 수 있다. 특히 토크 컨버터를 장착한 자동변속기의 경우에는 유체장치인 토크 컨버터

의 슬립률에 따라 차량 전체 기어비가 일정하지 않고 변할 수 있어 식 (4)와 같이 정수화(Integer-valued) 함수를 이용하여 계산하였다.

$$Shifting[guessed] \cong Int\left(\frac{Vehicle\ speed}{Engine\ speed}\right) \quad (4)$$

$Int(x) = n$, where $n \leq x < n+1$ and n is an integer

EDR 기록에서 사고 차량의 TPS 값은 5초 동안 최소 16 %에서부터 최대 100 %까지 기록되어 있으며 차속은 -5.0초에 17 km/h에서 -4.0초에 38 km/h로 급가속하고, 이후 2차로 -2.5초에 13 km/h에서 70 km/h로 0.5초 만에 순간적으로 증가한 것으로 나타난다.

먼저 -5.0초에서 -4.0초 사이는 TPS 값 100 %로 엔진 회전수가 2,600 rpm에서 고토크 영역인 3,900 rpm까지 증가하였고 이후 1차 추돌로 차량이 하단 변속하면서 차속이 감소하였다(Fig. 11의 [a]). 이후 -3.0초에 TPS 값이 16 %에서 27 %로 변하는 톱-인이 발생하였는데 이전의 하단 변속으로 인해 약 3,800 rpm의 높아진 엔진 회전수 때문에 차량은 -2.5초에 상단 변속하여(Fig. 11의 [b]), 차속이 13 km/h에서 70 km/h로 크게 증가하였다. 사고 당시 노면이 고르지 않아 타이어의 마찰저항이 감소할 수 있고 사고 직전까지 운전자가 브레이크 페달을 작동하지 않고 주행함을 고려하였을 때 사고 차량의 파워트레인은 정상적인 변속 거동을 나타낸 것으로 보이며 급발진의 의심과 같은 차량의 이상 거동은 확인할 수 없다.

4.2 사고 사례 B

본 사례는 아파트 단지 아스팔트 도로를 주행하던 사고 차량이 불상의 이유로 정문 외벽을 충격한 급발진 의심 사고이다. 당시 사고 차량은 에어백이 전개된 상태이며 센서류 등의 이상 유무를 점검한 결과 특별한 고장 코드가 발견되지 않았다. 이후 EDR에서 추출한 주행 정보를 Fig. 12와 같이 표시하였다.

EDR 기록에서 사고 차량은 -5.0초부터 -4.0초까지APS 값 15 ~ 44 % 내외로 가속하다가 이후 90 %로 급하게 운전자가 가속페달을 밟은 후 밟을 떼고, 이후 -1.0초에서 90 %로 잠시 변화하였다가 다시 가속페달을 밟은 것으로 나타난다. EDR 기록을 바탕으로 APS 값에 대응한 TPS 값과 엔진 회전수, 차속, 변속 여부를 표시하면 다음과 같다(Fig. 13).

먼저 -2.0초까지 차량은 전형적인 가속 상태를 나타내고 있다. -4.0초에서 TPS 값이 100 %로 일시적으로 증가하였으나 차속이 23 km/h 내외로 이미 낮은 변속 단으로 주행 중이었고, TPS 값이 바로 줄어들어 킥-다운과 같은

시간 (sec)	자동차 속도 [kph]	엔진 회전수 [rpm]	엔진 스톱볼륨브 일량량 [%]	가속페달 변위량 [%]	자동변속 작동여부 (on/off)
-5.0	19	1500	4	14	OFF
-4.5	20	1800	17	44	OFF
-4.0	22	2200	15	12	OFF
-3.5	23	2400	100	90	OFF
-3.0	27	2500	24	21	OFF
-2.5	27	2100	0	0	OFF
-2.0	26	1800	0	0	OFF
-1.5	26	1700	0	0	OFF
-1.0	27	1700	17	90	OFF
-0.5	30	2300	0	0	OFF
0.0	34	2300	61	75	OFF

Fig. 12 EDR data in case B(printed from EDR report)

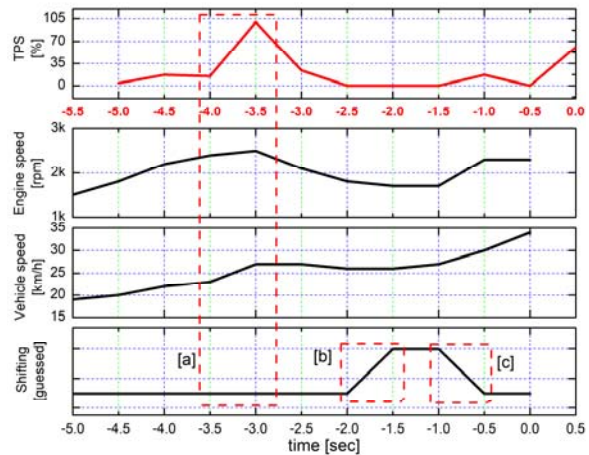


Fig. 13 Powertrain behavior in case B

급격한 하단 변속은 발생하지 않은 것으로 판단된다(Fig. 13의 [a]). 이후 운전자가 가속페달에서 발을 떼 -2.5초부터 TPS 값은 0%로 1초간 유지되면서 차량은 -2.0초에서 리프트-풋-업으로 상단 변속하여(Fig. 13의 [b]) 주행하고 있다.

그리고 -1.5초에서 TPS 값이 16 %에서 27 %로 변하는 톱-인이 발생하였고 차량은 -1.0초에 하단 변속하여(Fig. 13의 [c]) 엔진 회전수가 1,700 rpm에서 2,300 rpm의 고토크 영역으로 증가하였고 차속은 26 km/h에서 34 km/h로 증가하였다. 이 사례에서 사고 차량의 파워트레인은 APS 값에 따른 정상적인 변속 거동을 나타낸 것으로 판단되며 마찬가지로 급발진 의심과 같은 차량의 이상 거동은 확인할 수 없다.

5. 결론

본 연구에서는 급발진 의심 사고의 파워트레인 거동

을 분석하여 사고 차량의 가속이 운전자의 가속페달 조작에 의한 정상적인 거동인지 아니면 차량의 고장이나 결함으로 인한 비정상적인 가속인지 여부를 판단하였다. 이를 위해 먼저 차량 구동 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 가속페달 조작으로 인한 차량의 변속 시 파워트레인 거동의 특징을 살펴보았다. 이후 급발진 의심 사고 사례에서 추출한 사고기록장치의 데이터를 통해 운전자의 APS 값 변화와 엔진 회전수, 차속을 비교하고 사고 차량의 속도 변화와 변속 상태를 분석하였다. 이를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 차량의 가속은 가속페달에서 운전자의 가속 의지를 APS 값으로 입력받아 이루어지며 이후 엔진 구동력과 주행부하의 차이만큼 가속하게 된다. 정상 상황에서 차량을 계속해서 가감속하기 위해서는 운전자가 가속페달을 통해 엔진의 속도를 직접 변화시키거나 변속기의 변속이 필요하며 이러한 변속은 특히 자동 변속기에서는 변속스케줄을 통해 자동으로 이루어진다.
- 2) 자동변속기의 변속스케줄은 APS 값과 차속을 기준으로 작성되어 있으며 가속페달 조작으로 인한 APS 값 변화에 따라 파워트레인은 상단 또는 하단 변속을 수행하여 운전자의 가속 의지를 반영한다. 이때 차량은 변속으로 인해 달라진 기어비 때문에 차속과 엔진 회전수의 거동이 변화하게 된다.
- 3) 파워트레인 주요 구성요소의 정상상태 모델과 1자유도 동역학 식을 바탕으로 차량의 구동 상태를 시뮬레이션할 수 있는 성능해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 통해 차량의 구동 중 운전자의 가속페달 조작에 따른 4가지 종류의 변속 특성과 파워트레인 거동을 분석하고 설명하였다.
- 4) 사고 차량의 변속 여부를 판단하기 위해 EDR 파워트레인 데이터 중 엔진 회전수와 차속을 이용하여 전체 기어비 변화를 추정하는 방법을 제안하였으며 사고 시 차량의 바퀴 미끄러짐이나 타이어 파손, 토크 컨버터의 슬립 등으로 인한 차속 오차를 고려할 수 있도록 정수화(Integer-valued) 함수를 사용하였다.
- 5) 급발진 의심 사고 사례의 EDR에서 추출한 TPS 값과 차속, 엔진 회전수를 바탕으로 사고 당시 차량의 변속 여부를 중심으로 차량의 급격한 속도 변화와 운전자의 가속페달 변위 사이의 연관성을 분석하여 사고 차량이 정상적인 가속을 하였는지 아니면 관련 부품의 고장이나 결함으로 인한 비정상적인 가속을 하였는지

고찰하였다. 본 논문에서 살펴본 사고 차량의 EDR 과 각종 센서 신호는 고장 없이 정상적으로 작동한 경우이며, 사고로 인한 차량의 손상이 발생하기 이전인 사고 발생 5초 전까지 유효하게 저장된 정보만을 분석 대상으로 하였다.

후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2021-KA162419).

References

- 1) J. Pollad and E. D. Sussman, "An Examination of Sudden Acceleration," DOT-HS-807-367, U.S. Department of Transportation (National Highway Traffic Safety Administration), 1989.
- 2) J. Park, J. Park and Y. Lee, "Case Study on Driver's Pedal Mal-Operation in Sudden Unintended Acceleration Accidents," Transactions of KSAE, Vol.27, No.11, pp.877-882, 2019.
- 3) J. J. Park, J. M. Park and Y. S. Lee, "Case Study on Driver's Pedal Mal-Operation in Sudden Unintended Acceleration Accidents," KSAE Spring Conference Proceedings, p.998, 2019.
- 4) Kyunghyang Shinmun, Hyundai Motor, Top in Sudden Unintended Acceleration Accidents for 5 Years, <http://news.khan.co.kr>, 2014.
- 5) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Automobile Sudden Unintended Acceleration Open Reconstruction Test, <http://www.molit.go.kr>, 2013.
- 6) Y. M. Ha, M. C. Park, D. H. Kim, J. H. You, S. K. Shon, J. C. Park, J. H. Choi and Y. N. Lee, "A Statistical Analysis on 40 Traffic Accidents by Sudden Vehicle Start and Methods for Proving Sudden Unintended Acceleration or Driver's Maloperation," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.1129-1130, 2013.
- 7) K. Shinohara, "Analysis of the Mistakes of Stepping on the Accelerator and Brake Pedal, and Proposed Psychological and Engineering Countermeasures," International Association of Traffic and Safety Sciences (IATSS), H2294, 2011.
- 8) Y. Gao, Vehicle Dynamics and Performance, In: Meyers, R. A. (eds) Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Springer, New York, NY, 2012.