



대형 화물차 제동 방식과 기어 변경이 연료 소모에 미치는 영향

우주환^a, 김수진^{a,b,*}

Effects of Braking Strategies and Gear Downshift on Fuel Consumption of Heavy-Duty Trucks

Ju-Hwan Woo^a, Su-Jin Kim^{a,b,*}^a Department of Aerospace & Technology Management, Gyeongsang National University^b School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	27	January	2026
Revised	14	February	2026
Accepted	23	February	2026

Keywords:

Heavy-duty truck
Braking strategy
Fuel consumption
Gear downshift
Deceleration

ABSTRACT

This study experimentally investigates fuel-consumption characteristics during the deceleration and stopping of a heavy-duty cargo truck under different braking strategies. The results indicate that fuel consumption during deceleration is governed primarily by downshift events rather than by deceleration intensity. Distinct fuel-consumption peaks are consistently observed during the 4→3→2→1 gear downshift sequence across all braking modes. By contrast, fuel consumption in the low-speed region below 10 km/h is attributable primarily to engine idling. Comparative analysis indicates that coasting yields the lowest total fuel consumption by minimizing downshift and idling. Blended braking increases fuel consumption due to a combined increase in gear-shift frequency and idle duration. The results suggest minimizing low-speed idle time and downshift counts in deceleration zones to improve fuel efficiency in heavy-duty vehicles.

1. 서론

최근 상용차 산업에서는 배출가스 규제 강화와 연료비 상승으로 인해 주행 중 연비 향상 기술의 중요성이 더욱 커지고 있다. Harrington과 Krupnick^[1]에 따르면, 미국을 비롯한 글로벌 주요국들은 대형 상용차에 대한 연비 규제를 강화하고 있으며, 이는 하드웨어적 개선뿐만 아니라 운행 전반의 효율적 관리가 필요함을 시사한다. 특히 대형 화물차는 주행 속도와 차량 중량에 따라 연료 소모 패턴이 매우 다르게 나타나는데, Oh와 Eo^[2]는 기존 연비 산정모형이 대형 차량의 차종 특성을 충분히 반영하지 못하고 있음을 지적하며 실차 주행 기반의 정밀한 연비 모형 구축의 중요성을 강조한 바 있다. 화물 차량의 연비는 가속, 정속 주행뿐만 아니라 감속 및 제동

구간에서의 에너지 관리에 의해서도 크게 결정된다. Yu 등^[3]은 다양한 주행 사이클에서의 연료 소모 특성을 분석하며, 감속 조건에서의 에너지 효율이 전체 연비 편차를 만드는 주요인 중 하나임을 확인하였다. 특히 Lee 등^[4]은 적재량이 가속 및 감속 시의 연료 소모와 배출가스에 미치는 영향을 분석하여, 관성력을 이용한 경제 운전이 고중량 화물차에서 더 큰 연비 개선 효과를 가져온다는 점을 시사하였다.

대형 상용차의 제동 시스템은 단순한 감속을 넘어 에너지 소산의 핵심적인 통로가 된다. Güleriyüz와 Başer^[5]는 대형 차량의 복잡한 공압 브레이크 시스템 모델링을 통해 제동 안정성과 응답 속도의 중요성을 강조하였으며, Zhang 등^[6]은 고속에서의 열 퇴화 문제를 극복하기 위해 통합형 전자기-유압 리타더와 같은 보조 제

* Corresponding author. Tel.: +82-55-772-1636

E-mail address: sujinkim@gnu.ac.kr (Su-Jin Kim).

동 장치를 활용한 제동 토크 배분 전략의 우수성을 입증하였다. 또한, 제동 중의 에너지 회수 및 흐름 분석에 관한 연구도 활발히 진행되어, Qiu와 Wang^[7]은 제동 시 발생하는 에너지 유동을 분석하여 효율을 극대화할 수 있는 제어 전략을 제시한 바 있다.

제동 후 완전 정차 시 발생하는 공회전 연료 소모 또한 무시할 수 없는 요소이다. Shim 등^[8]은 도심 주행 중 공회전 정지(idling stop)를 통해 상당한 연료 절감이 가능함을 입증하였는데, 이는 제동 과정부터 정차 후 공회전에 이르기까지의 통합적인 에너지 관리 전략이 필요함을 의미한다.

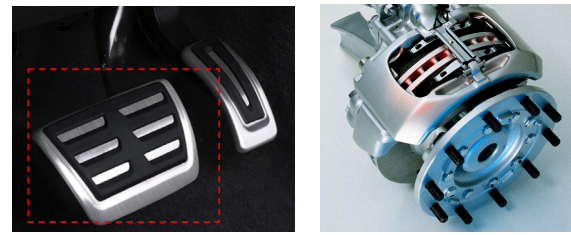
대형 상용차는 일반적으로 발 브레이크(foot brake), 리타더(retarder), 배기 브레이크(exhaust brake), 그리고 이들을 조합한 브레이크 블렌딩(brake blending) 제동방식과 구동계 저항으로 자연 감속하는 타력주행 정차(coasting stop)를 사용하고 있다. 발 브레이크는 응답성과 제동력이 우수하지만, 모든 운동에너지를 마찰열로 분산시키므로 연비 손실이 크다. 반면 리타더 및 배기 브레이크는 구동계 저항을 이용해 감속하므로 마찰손실이 적고 브레이크 마모를 줄이는 장점이 있다. 최근에는 이러한 보조 제동장치와 엔진 제어를 통합한 블렌딩 제동 제어 기술이 적용되고 있으나, 실제 연비 영향에 대한 정량적 비교 연구는 여전히 부족하다.

이에 본 연구에서는 대형 카고형 상용차를 대상으로 발 브레이크, 리타더, 블렌딩, 타력주행 네 가지 제동방식이 제동 구간에서의 연료 소모 및 에너지 효율에 미치는 영향을 실차 실험을 통해 정량적으로 분석하고자 한다. 특히 제동 중 연비 특성이 단순한 감속도 차이보다는 제동 지속시간과 엔진 및 제어 시스템의 개입 방식에 의해 결정된다는 점을 실험적으로 규명하는 것을 연구의 핵심 목표로 한다.

본 연구의 차별점은 제동 중 연료 소모를 변속 이벤트와 공회전 구간으로 명확히 분리하여 정량 분석하였다는 점에 있다. 특히 감속 과정에서 발생하는 연료 소모 피크를 시간 적분하여 누적 연료 소모 관점에서 평가함으로써, 제동 연비의 지배 요인이 저속 공회전과 중속 기어 변경 구간에 있음을 실험적으로 규명하였다.

2. 제동방식 및 연료 소모 이론적 배경

차량 제동 시 초기 운동에너지는 외부로 회수되지 않는 한 대부분 마찰열 또는 유체 저항, 공기저항 등의 형태로 흩어진다. Fig. 1(a) 발 브레이크(foot brake)는 운전자가 브레이크 페달을 밟로 조작하여 제동력을 발생시키는 가장 기본적이며 표준화된 차량 제동방식이다. 운전자의 입력은 페달을 통해 기계적 또는 전자유압식 제어장치로 전달되며, 이후 제동 시스템의 구성요소들에 의해 바퀴 제동력으로 변환된다. 마찰력을 이용해 운동에너지를 직접 열로 변환하는 방식으로 제동 응답성이 우수하지만 에너지 회수 측



(a) Foot brake



(b) Retarder

Fig. 1 Foot brake and retarder

면에서는 비효율적이다.

Fig. 1(b) 리타더는 상용차에서 차량 감속을 보조하는 장치로, 발 브레이크와 함께 운용되어 제동 안정성을 높이고 브레이크 마모를 줄이는 역할을 한다. 리타더가 작동하면 유압이 공급되어 변속기 출력축에 연결된 기어를 통해 회전 저항을 생성해 속도를 감소시킨다. 구동계 저항을 이용하여 회전 에너지를 흡수함으로써 마찰 브레이크의 부담을 줄이고 제동을 수행한다.

제동 과정에서 주목할 점은, 차량의 운동에너지가 소모되는 과정과는 별도로 엔진 및 보조장치 제어를 위해 연료가 추가로 소비될 수 있다는 점이다. 예를 들어 제동 중 공회전 유지, 변속 제어, 리타더 냉각 시스템 작동 등은 연료 소모를 유발한다. 따라서 제동방식에 따른 연비 특성은 단순한 제동력의 크기뿐만 아니라, 제동 지속 시간과 ECU 제어전략에 의해 복합적으로 결정된다.

3. 실험 장치 및 시험 방법

3.1 시험 차량 및 계측 시스템

시험 대상은 Fig. 2(a)에 보이는 8톤급 대형 카고형 상용차로, 전자식 제동제어장치(EBS)와 리타더가 장착된 차량을 사용하였다. 시험 차량은 리타더, 오토 리타더, 발 브레이크, 오토 배기브레이크 등 다양한 제동 시스템이 적용되어 있어, 각 제동방식에 따른 에너지 손실 및 연료 소모 특성을 실험적으로 비교할 수 있다. 또한 차량의 주요 제원은 아래 별도의 표 Table 1에 정리하였다.

실험 중 연료소모량은 ECU 연료분사 데이터를 기반으로 측정되었으며, 차량 속도 및 제동압력은 CAN 통신을 통해 동시 수집하였다. 시험 데이터의 수집과 제어신호 분석을 위해 Fig. 2(b)와 같이 Vehicle Communication Interface (3VCI3)와 Scania Diagnos &

Table 1 Specification of test truck

Vehicle type	G360 B8x4*4NB
Engine	DC09 141/360hp
Gearbox	G33CM1
Retarder	R4700D
Brake	Disk
Brake chamber	Spring
Tire	385/65R 22.5
Weight	10.24 t
Length	9,260 mm
Width	2,495 mm
Cab height	3,520 mm

Programmer 3 (SDP3) 진단 프로그램을 사용하였다.

VCI3는 차량의 CAN 네트워크와 진단 포트를 통해 엔진, 리타더, 브레이크 등 주요 제어 유닛의 실시간 자료를 수집하며, SDP3는 이를 노트북 컴퓨터를 통해 해석, 기록 및 관찰할 수 있도록 지원한다.

노트북은 자료 수집(data logging) 장치로 활용되어, 주행 중 엔진 회전수, 차량 속도, 제동 신호, 연료 소모량 등의 주요 변수를 실시간으로 수집하였다. 이러한 측정 장비를 통해 제동방식별 연료 소모 특성을 정량적으로 비교·분석할 수 있다.

3.2 시험 조건 및 제동 시나리오

시험은 직선 아스팔트 포장된 전용 시험 트랙에서 시행하였다. 차량은 400 m 구간에서 50 km/h까지 가속한 후, 이후 300 m 구간에서 제동하여 700 m 지점에서 완전히 정차하도록 설정하였다. 가속 구간은 제동 구간의 초기 조건을 일정하게 유지하기 위한 용도로 사용되었으며, 분석 대상은 제동 구간 데이터로 한정하였다.

전방 400 m 가속 구간에서 차량을 목표 속도 50 km/h까지 안정적으로 가속하며, 후방 300 m 구간에서 각각 다른 브레이크 방식을 사용해 제동하였다. 차량은 시험마다 700 m 지점에서 완전히 정차하도록 하여, 제동 종료 시점을 일정하게 유지하였다.

가속 구간에서는 엔진 부하와 동력전달계의 정상 작동 여부를 확인하기 위해 기본 데이터를 수집하였으나, 본 논문에서는 제동에 따른 연비 변화를 중점적으로 분석하기 때문에 가속 구간 데이터는 분석 항목에서 제외하였다. 가속 종료 시점의 속도와 변속단, 엔진 회전수 등은 제동 구간의 초기 조건으로 동일하게 맞추어 실험의 일관성을 확보하였다.

제동시험은 같은 노면 조건과 하중 조건에서 수행되었으며, 각 제동방식에 따라 발 브레이크, 리타더, 브레이크 블렌딩, 타력주행 네 가지 시나리오로 구분하였다.

발 브레이크 단독 제동은 발 브레이크 페달만을 이용하여 차량



(a) Test truck



(b) VCI3 and laptop

Fig. 2 Test truck and measurement

을 정지시키는 조건이다. 이때 리타더, 오토 배기브레이크 등 보조 제동장치는 모두 비활성화하였다. 본 조건은 일반적인 운전자 제동 행위를 재현하기 위한 기준 시험으로 사용되었다.

리타더 제동은 리타더의 제동 토크로 차량을 감속 및 정지시킨다. 리타더의 제어는 변속기 ECU 신호로 자동으로 이루어지며, 이 시험을 통해 비 마찰식 제동장치의 에너지 감속 효율을 평가할 수 있다.

브레이크 블렌딩 제동은 오토 리타더(auto retarder)와 오토 배기브레이크(auto exhaust brake) 기능을 모두 활성화한 상태에서 발 브레이크를 병행하여 제동하는 복합제동 조건이다. 이 모드는 실제 운전상황에서 가장 빈번히 사용되는 제동 전략으로, 시스템 간 제동 토크 배분 특성과 연료 소모 간의 상관관계를 분석하기 위함이다.

타력주행 정차(coasting)는 초기 감속 구간에서 엔진 구동 개입 없이 차량을 타력시켜 감속하는 조건이다. 고속 및 중속 구간에서는 구동계 저항과 공기저항에 의해 감속이 이루어지며, 저속 구간에서는 최종 정차를 위해 발 브레이크를 작동하였다. 이를 통해 고속 및 중속 구간에서 제동 시스템 개입이 없는 상태의 에너지 손실 특성을 관찰할 수 있다.

각 제동 조건은 같은 초기 속도, 적재 하중(실제 차량 총중량 기

준)으로 설정되었으며, 2회 반복 측정을 수행하여 데이터의 신뢰성과 재현성을 확보하였다. 실험 중에는 엔진 회전수, 차량 속도, 연료소모량, 제동압력, 리타더 작동 단계, 배기브레이크 등의 주요 변수를 측정하였다. 이러한 시험 환경과 절차를 통해, 실제 상용차 주행 조건을 모사한 상황에서 제동방식별 에너지 소모와 제동시간 차이를 체계적으로 분석할 수 있었다.

3.3 데이터 전처리 및 연료소모량 계산

CAN 통신으로 수집한 차량 속도(vehicle speed), 엔진 회전수(engine rpm), 행정당 연료 소모량(fuel quantity burned per stroke) 및 제동 관련 데이터는 시간 축 기준으로 동기화하였으며, 노이즈 제거를 위해 이동평균 기반 저역 통과 필터를 적용하였다. 샘플링 주파수는 10 Hz 이상으로 확보되어 시간분해능은 충분한 것으로 판단하였다.

제동 방식별 특성 비교를 위해 주요 측정 데이터 및 다음 지표를 계산해 비교하였다. 시험에서 기록된 주요 측정 데이터는 정차까지 소요된 제동시간(braking time) t_{stop} , 제동 동안 소모된 총 연료 소모량(total fuel consumption) $m_{fuel, total}$ 이다. 총 연료 소모량은 행정당 연료 소모량 $m_{fuel/stroke}$ 데이터를 시간에 대해 적분하여 총 질량(mg)으로 산출하였다.

$$m_{fuel, total} = \int m_{fuel/stroke} \frac{rpm}{120} N_{cylinder} dt \quad (1)$$

본 실험에 사용된 차량은 4행정 5기통 엔진으로, 엔진 2회전당 1회 분사가 이루어지는 특성을 반영하여 엔진 회전수(rpm)를 120으로 나누어 시간당 분사 횟수로 환산하였으며, 실린더 수($N_{cylinder}$)는 5를 대입하였다.

4. 실험 결과

4.1 제동 방식별 데이터 분석

네 가지 제동 조건에서 2회씩 반복 실험하면서 측정한 브레이크 신호와 행정당 연료 소모 데이터를 Fig. 3 시간에 따른 속도와 엔진 회전수 그래프에 표시해 동시에 비교할 수 있도록 하였다. 이를 통해 감속 과정에서 발생하는 변속 이벤트, 연료 소모 피크 및 공회전 구간을 명확하게 분석할 수 있다.

Fig. 3(a)의 발 브레이크 단독 제동시험은 두 가지 제동 입력 조건에서 수행되었다. 첫 번째 시험에서는 브레이크를 약 40%로 일정하게 유지하였으며, 정차 시간은 15.3 s, 총 연료소모량은 6.19 g으로 나타났다. 변속이 4 → 3 → 2 → 1단으로 순차적으로 발생하면서 엔진 회전수 증가와 함께 총 3회의 연료 소모 피크가

관찰되었다.

두 번째 시험에서는 감속 초기 약 4~5 s 동안 브레이크 입력을 약 60%까지 증가시킨 후 이후 구간에서 40%로 유지하였으며, 정차 시간은 12.4 s, 총 연료 소모량은 5.88 g으로 감소하였다. 초기 강한 제동으로 인해 약 5 s 부근에서 복수 단 변속(3 → 1단)이 발생하여 연료 소모 피크가 통합돼 총 2회로 감소하였다.

또한 두 조건 모두에서 차량 속도가 약 10 km/h 이하로 감소한 이후에는 변속이 완료되고 엔진이 공회전 상태로 유지됨에 따라 낮은 수준의 연료 소모가 지속적으로 나타났다.

Fig. 3(b)는 리타더 브레이크를 2단으로 놓고 제정한 경우이다. 두 시험 모두 감속 초기에는 리타더와 배기브레이크 제동에 의해 차량 속도가 감소하였으며, 리타더 제동 요청 토크(RetB/10)는 50~30 km/h 영역에서 약 2,000 Nm로 일정하고 이후 차량 속도에 비례해 점진적으로 감소하는 경향을 보이며, 배기 브레이크 제동 요청 토크(ExhB)는 약 200 Nm 정도에서 엔진 회전수에 비례해 증감하고 저속에서 꺼진다.

첫 번째 시험에서는 약 4 s, 7 s 및 9 s 부근에서 각각 변속(4 → 3 → 2 → 1단)에 따른 엔진 회전수 증가와 함께 총 3회의 연료소모 피크가 관찰되었고 감속이 빠르게 일어났다. 반면 두 번째는 약 6 s 부근에서만 복수 단 변속이 발생하였으며, 이에 따라 연료소모 피크가 하나의 주요 피크 형태로 나타났다.

저속 정차 구간에서 발 브레이크가 보완적 제동 수단으로 사용되어 정차하며, 엔진이 공회전 상태로 유지되는 지속적인 연료 소모가 나타났다. 두 번째 시험에서는 변속 완료 이후 공회전 상태가 더 길게 유지되면서 공회전 구간에서의 연료 소모 비중이 상대적으로 크게 나타났다.

동일한 제동 조건에서도, 감속률 차이에 따른 변속 패턴 변화와 최종 발 브레이크 조작 차이에 따라, 연료 소모 피크와 공회전 연료 소모가 달라질 수 있음을 보여준다. 기계적 마찰을 사용하는 발 브레이크 제동과 비교할 때, 구동계 저항을 이용하는 리타더 제동에서는 전체 연료 소모 수준이 낮았다.

Fig. 3(c)는 브레이크 블렌딩 제동 시의 속도 연료 소모 관계를 나타낸다. 블렌딩 제동에서는 약 30 km/h, 20 km/h, 11 km/h 부근에서 기어 변경으로 엔진 회전수가 증가하면서 세 개의 연료 소모 피크가 관찰된다. 리타더는 약 2,000 Nm 제동하고 첫 번째 기어 변경 이후 차량 속도에 비례해 감소한다. 배기 브레이크는 엔진 회전수에 비례해 감소하고 기어가 낮아지면 증가해 2단 1단 기어에서 약 600 Nm까지 증가한다. 블렌딩 모드에서는 기어 전환이 3회 발생하면서, 각 제동 장치의 작동·비작동 과정에서 엔진 및 변속기 ECU가 개입하여 순간적인 연료 분사가 나타난다. 또한 저속 영역에서 발 브레이크로 정차하면서 6초 등속 운동 후 브레이크를 밟은 첫 실험의 공회전 연료 소모가 더 크게 발생했다. 블렌딩

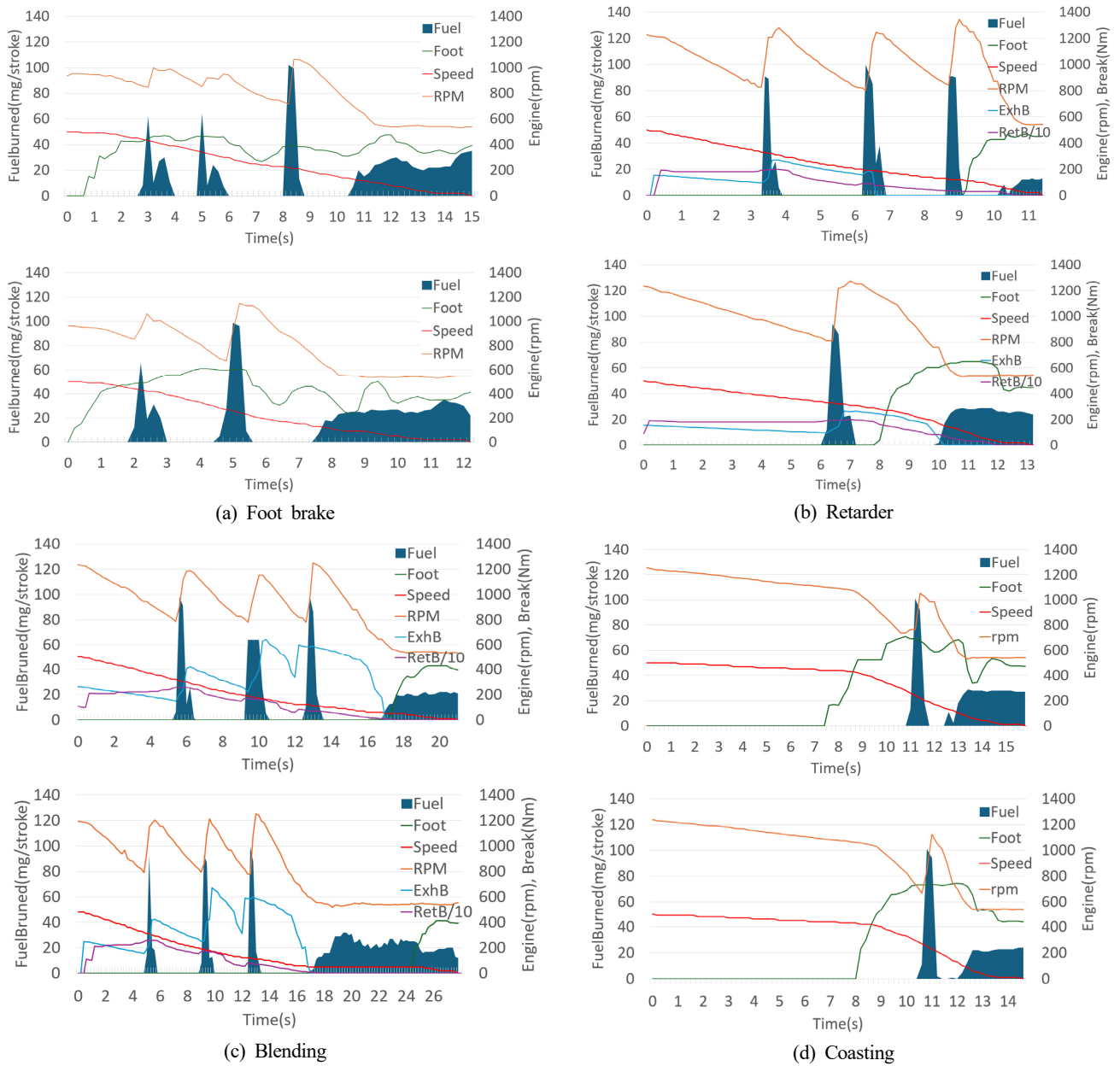


Fig. 3 Time histories of vehicle speed and fuel burned during deceleration under different braking conditions

제동은 연료 소모와 제동시간 모두 발 브레이크보다 크고 길었다. 타력주행 조건의 특성은 Fig. 3(d)에 나타난 바와 같이, 초기 감속 구간에서 엔진 구동 개입이 최소화된 상태에서 공기저항 및 구동계의 기계적 저항으로 감속이 이루어지므로 연료 분사량은 매우 낮은 수준을 유지하였다. 그러나 전체 감속 거리의 약 2/3 지점에서 차량 속도가 약 40 km/h 수준으로 유지되어 자연 감속만으로는 정차가 어려웠으며, 이에 따라 최종 정차를 위해 발 브레이크를 약 70% 수준으로 작동하였다. 이 과정에서 약 25 km/h 부근에서 1회의 연료소모 피크가 발생하였으며, 이는 감속 과정 중 발생한 변속 이벤트 및 엔진 제어 개입에 따른 영향으로 해석된다. 이후

저속 영역에서는 엔진이 공회전 상태로 전환되면서 일정 수준의 연료분사가 지속적으로 유지되는 특성이 나타났다. 그런데도 타력주행 조건의 총 연료소모량은 네 가지 제동 조건 중 가장 낮게 나타났다. 이는 감속 에너지의 대부분이 제동장치 개입 없이 공력 및 구동계 저항으로 소비되었기 때문으로 판단된다.

4.2 변속 및 공회전 연료 소모

차량 감속 과정에서의 속도 변화와 행정당 연료 소모량의 관계 Fig. 3을 차량 속도로 나누어 비교하면 고속과 저속에서 기어 감속 과정에서 발생하는 변속 기인 연료 소모와 저속 영역에서 발생하

는 공회전 연료 소모로 구분된다.

감속 구간(40~10 km/h)에서 관찰되는 3~1차례 뚜렷한 연료 소모량 피크는 엔진 회전수 증가 위치와 일치해 기어 변경에 기인한 것으로 해석된다. 각 변속 구간에서는 기어 변경 후 클러치가 연결되면서 엔진 회전수가 순간 증가하고 차량이 급격히 감속하는 현상을 방지하기 위해, ECU가 연료를 분사해 일시적으로 엔진 회전수를 증가시켜 변속 충격을 완화한다. 이 과정에서 행정당 연료 소모량이 순간적으로 증가해 약 1초의 피크로 관측된다. 피크 3개가 보이는 것은 기어가 1단씩 순차적으로 변경된 경우, 2개 이하는 여러 단이 한꺼번에 감속된 경우로 해석된다. 이러한 결과는 감속 중 연료 소모의 주요 피크가 제동력 자체보다는 변속 이벤트와 이에 수반되는 엔진·변속기 제어전략에 의해 지배됨을 의미한다.

한편 저속 구간(10~0 km/h)에서는 제동방식과 무관하게 연료 소모량이 다시 증가하는 경향을 보이는데, 이는 정차 직전 엔진 공회전 유지, 보조장치 구동, 제동 안정성 확보를 위한 ECU 제어에 의해 일정 수준의 연료 분사가 지속되기 때문이다.

종합하면, 제동 중 연료 소모는 두 가지 다른 메커니즘에 의해 발생한다. Fig. 3에서 관찰되는 세 개의 주요 연료 소모 피크는 제동 방식과 관계없이 4→3→2→1단 다운시프트 구간에서 반복적으로 발생하며, 이는 제동 중 연료 소모가 감속 강도보다는 변속 제어 로직에 의해 지배됨을 명확히 보여준다. 저속 영역에서는 공회전 유지에 따른 연료 소모가 누적되어, 정지 직전 연비 특성은 저속 유지 시간에 좌우됨을 보여준다. 이러한 특성은 이후 Fig. 4와 Fig. 5에서 제시되는 연료 소모 분해 분석의 핵심 근거로 활용된다.

4.3 정량 비교 결과

Fig. 4는 Fig. 3에서 관찰된 연료 소모 피크의 원인을 보다 정량적으로 규명하기 위해, 전체 연료 소모를 변속 기인 연료 소모와 공회전 연료 소모로 분해한 결과를 나타낸 것이다. 발 브레이크 단독은 제동시간이 짧아 우수하지만, 운동에너지가 마찰열로 완전히 소산 되어 연료 효율이 낮게 나타났다. 리타더 제동은 시간 편차가 크고 오래 걸리지만, 평균 연료 소모량이 적었다. 브레이크 블렌딩 제동은 총 연료 소모량이 10.04 g, 8.23 g으로 최대값을 보였고 총 제동시간도 28.3 s, 21.3 s로 가장 길었다. 기어 변경이 3회 발생하면서 엔진 회전수가 반복적으로 증가하고, 이에 따라 연료 분사 피크가 누적된다. 타력주행은 제동장치의 개입 없이 감속이 이루어져 총 연료 소모량이 3.59 g, 2.88 g으로 가장 적었으며, 총 제동 시간은 16.0 s, 14.8 s로 보통이었다. 이는 고속에서 감속할 때 연료 분사량이 거의 0에 근접하고, 중속에서 엔진 회전수가 1회만 증가해 기어 변경 연료 분사가 작고, 중속 저속에서 발 브레이크를 60%로 깊이 밟아 저속 정차 엔진 공회전 시간이 짧았기 때문으로, 연비 향상에 가장 유리한 조건임을 의미한다.

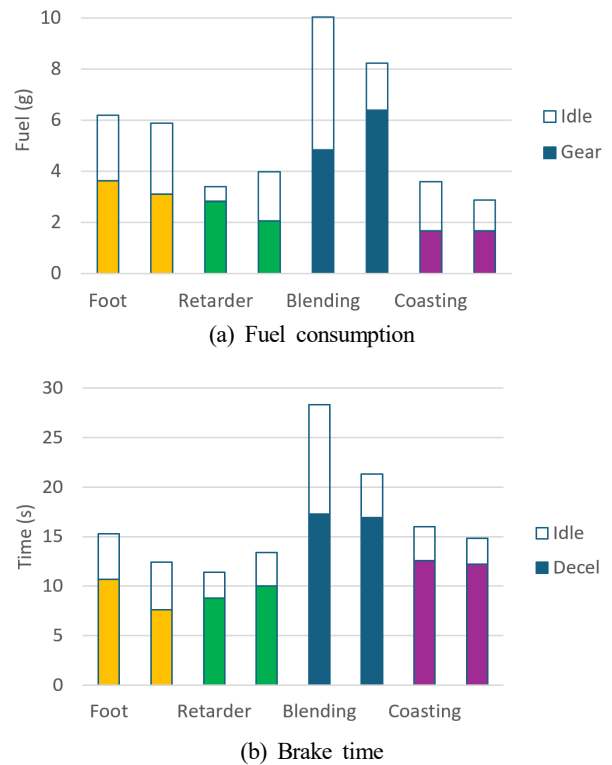


Fig. 4 Comparison of braking methods

Fig. 5는 Fig. 3에서 관찰된 중속에서 기어 변경 횟수와 변속 기인 연료 소모 관계를 보다 정량적으로 규명하고 위해, 정차 직전 저속 시간과 공회전 연료 소모 상관관계를 규명한 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 5(a)는 제동 중 기어 변경 횟수와 변속 기인 연료 소모량의 관계를 보여준다. 기어 변경 횟수가 1회 2회 3회로 늘어나면서 연료 소모량도 비례해 증가하고 있으며, 선형 상관관계수는 $R^2 = 0.617$ 로 상관관계가 있으며 제동 방법의 영향도 함께 받음을 알 수 있다. 블렌딩은 두 실험 모두 기어 변경 3회이고 소모량이 많았지만, 타력주행은 두 실험 모두 기어 변경이 1회만 발생하고 연료 소모량이 최소이다.

Fig. 5(b)는 저속 정차 구간 공회전 시간과 공회전 기인 연료 소모량 관계를 보여준다. 블렌딩은 시간 편차가 가장 크게 발생했고, 공회전 시간이 짧은 리타더와 타력주행의 연료 소모가 가장 작았다. 공회전 시간과 연료 소모량은 로그함수로 근사하면 $2.91 \ln(t_{idle}) - 1.87$ 이고 상관관계수 $R^2 = 0.949$ 로 아주 높아, 저속 정지 구간의 연료 소모량은 시간에 의해 뚜렷하게 증가함을 확인하였다.

종합하면, Fig. 5(a)와 (b)는 제동 중 연료 소모가 변속 횟수와 공회전 시간이라는 두 가지 독립적인 요인에 의해 결정됨을 명확히 보여준다. 변속 횟수 증가는 변속 기인 연료 소모를 증가시키는 반면, 공회전 시간 증가는 공회전 연료 소모를 증가시키며, 제동

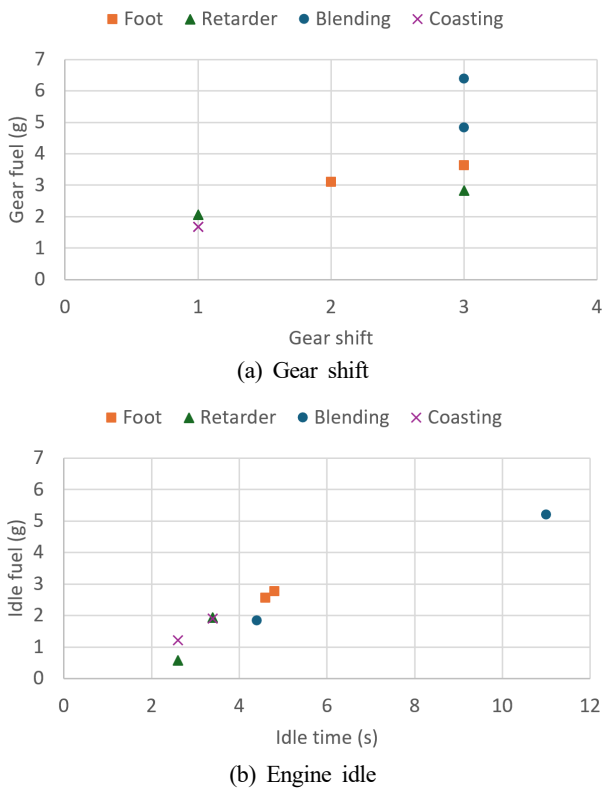


Fig. 5 Fuel consumption due to gear shifts and engine idling

방식별 연비 특성은 이 두 요소의 상대적 비중에 의해 결정된다. 이러한 결과는 제동 연비 개선을 위해서는 변속 억제 전략과 저속 정차 구간 단축을 동시에 고려한 통합 제어 접근이 필요함을 시사한다.

Table 2는 네 가지 제동 조건에서의 기어 변경 횟수(gear shift), 기어 변경 기인 연료 소모량(gear fuel), 공회전 기인 연료 소모량(idle fuel), 공회전 시간(idle time), 총 제동시간(total time)을 비교한 결과를 정리한 것이다. 분석 결과, 감속 과정에서의 총 연료 소모는 제동장치의 종류뿐 아니라 변속 이벤트 발생 횟수와 공회전 상태 지속시간에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 대형 화물차를 대상으로 제동 방식에 따른 연료 소모를 실험으로 분석하였다. 발 브레이크, 리타더, 배기브레이크 및 블렌딩 제동, 타력주행 조건을 비교함으로써 제동 중 연료 소모 메커니즘을 정량적으로 규명하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

1. 제동 중 연료 소모는 감속 강도 자체보다는 4→3→2→1단으로 이어지는 기어 변경 과정에서 발생하는 연료 분사 피크에 의해 지배적으로 결정됨을 확인하였다. 모든 제동 조건에서 관찰된 연료 소모 피크는 엔진 회전수 증가 구간과 명확히 대응되었다.

Table 2 Fuel consumption and braking time under different braking methods

	Foot		Retarder		Blending		Coasting	
Gear shift	3	2	3	1	3	3	1	1
Gear fuel (g)	3.63	3.11	2.83	2.06	4.83	6.39	1.68	1.67
Idle fuel (g)	2.56	2.77	0.57	1.93	5.21	1.84	1.91	1.21
Idle time (s)	4.6	4.8	2.6	3.4	11.0	4.4	3.4	2.6
Total time (s)	15.3	12.4	11.4	13.4	28.3	21.3	16.0	14.8

2. 차량 속도가 약 10 km/h 이하로 감소하는 저속 정차 구간에서는 제동 방식과 무관하게 엔진 공회전 유지에 따른 연료 소모가 발생하였다.

3. 타력주행 조건에서는 후반 급속한 감속으로 기어 변경이 1회로 줄고 저속구간이 짧아 총 연료 소모가 가장 낮게 나타났다. 반면, 블렌딩 제동은 변속 횟수와 공회전 시간이 모두 증가하여 변속 기인 연료 소모와 공회전 연료 소모가 동시에 증가하는 경향을 보였다.

종합하면, 본 연구는 대형 화물차 제동 과정에서 연료 소모가 발생하는 주요 원인이 변속 이벤트와 공회전 시간에 있음을 실험적으로 규명하고, 제동 방식별 연비 특성의 차이를 정량적으로 제시하였다. 본 결과는 향후 상용차의 제동 및 변속 통합 제어 전략 설계와 에너지 효율 향상을 위한 운전자 지원 시스템 개발에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후기

이 연구는 경상국립대학교 글로벌대학 30 프로젝트의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

[1] Harrington, W., Krupnick, A., 2012, Improving Fuel Economy in Heavy-Duty Vehicles, Resources for the Future DP 12-02, <http://doi.org/10.2139/ssrn.2038842>.

[2] Oh, J. S., Eo, H. K., 2011, Fuel Consumption Estimation Models for Heavy Vehicles on Various Operating Speeds, KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research, 31:6D 749-754, <https://doi.org/10.12652/Ksce.2011.31.6D.749>.

[3] Yu, H., Liu, Y., Li, J., Ma, K., Liang, Y., Xu, H., 2022, Investigations on Fuel Consumption Characteristics of Heavy-Duty Commercial Vehicles Under Different Test Cycle, Energy Reports, 8:14 102-111, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.261>.

- [4] Lee, T. W., Keel, J. H., Jeon, S. J., Park J. H., Lee, J. T., Hong, J. Y., 2011, Effect of Payload on Fuel Consumption and Emission of Light Duty Freight Truck during Acceleration Driving, Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, 19:2 133-141, <https://koreascience.kr/article/JAKO201113663903861.page>.
- [5] Güleriyüz, İ. C., Başer, Ö., 2021, Modelling the Longitudinal Braking Dynamics for Heavy-Duty Vehicles, Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 235:10-11 2802-2817, <https://doi.org/10.1177/09544070211004508>.
- [6] Zhang, K., Shang, H., Xu, J., Niu, J., Yue, Y., 2023, Testing and Performance Analysis of an Integrated Electromagnetic and Hydraulic Retarder for Heavy-Duty Vehicles, Eng. Appl. Artif. Intell., 126:Part 3 106906, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106906>.
- [7] Qiu, C., Wang, G., 2016, New Evaluation Methodology of Regenerative Braking Contribution to Energy Efficiency Improvement of Electric Vehicles, Energy Convers. Manage., 119 389-398, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.044>.
- [8] Shim, M. K., Rim, J. M., Lee, B. H., Hong, S. T., Lee, D. Y., 2009, A Methodology on Analyzing Fuel Saving with Idling Stop, Transactions of KSAE, 17:6 120-126.



Ju-Hwan Woo

Student in the Department of Aerospace & Technology Management, Gyeongsang National University. His research interests include automobile dynamics.

E-mail: juhwan.woo@scania.com



Su-Jin Kim

Professor in the School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University. His research interests include CAM and CNC machining.

E-mail: sujinkim@gnu.ac.kr