속도가 아닌 흐름을 설계하다! 터널 교통운영의 새로운 패러다임

페이스 메이커 시스템(PMS)을 통한 유령정체 해소 및 교통류 안정화

이석기 KICT 도로교통연구본부 연구위원

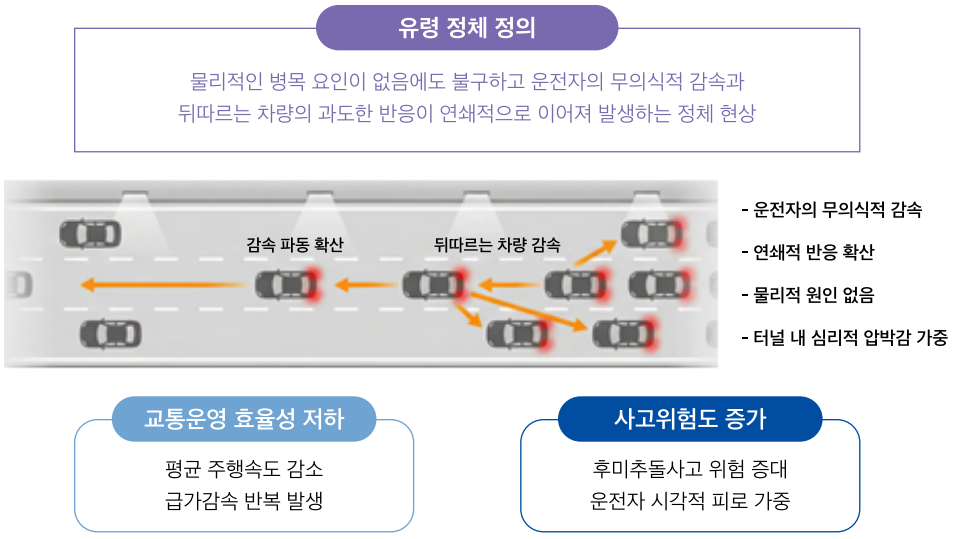
터널 속, 보이지 않는 정체가 시작된다

터널은 외부와 차단된 폐쇄 구조, 제한된 시야, 조명 변화, 차로 폭 인식 왜곡 등으로 인해 운전자에게 심리적 부담을 주는 특수한 도로 구조물이다. 이러한 환경적 특성은 운전자의 무의식적인 감속을 유발하며, 교통 흐름에 직접적인 영향을 미친다. 이와 같은 감속은 단순한 속도 저하에 그치지 않고 차량 간 속도 편차를 확대시켜 교통류를 점차 불안정하게 만든다. 그 결과, 물리적 병목이 없음에도 속도 변동이 후방으로 전달·증폭되는 유령정체(Phantom Jam)가 발생하며, 이는 평균 주행속도 저하, 급가감속 증가, 추돌사고 위험 증가로 이어지는 대표적인 비정상 교통현상이다. 특히 터널 구간은 시각적 단조로움과 외부 정보 부족으로 인해 이러한 현상이 더욱 빈번하게 발생하며, 실제로 터널 교통사고의 치사율[1]은 일반 도로 대비 약 2배 이상 높은 것으로 보고되고 있다.

유령 정체 문제 해결의 새로운 접근, 흐름을 제어하다

국내 도로 환경은 산악지형의 영향으로 터널 비중이 지

[그림 1] 유령 정체의 원인과 문제점



1 치사율: 교통사고 100건당 사망자 수

속적으로 증가하고 있으며, 향후 대심도 지하고속도로 확대에 따라 이러한 경향은 더욱 가속화될 것으로 예상된다. 이에 따라 터널 중심 교통환경에 적합한 새로운 교통운영 전략의 필요성이 더욱 부각되고 있다.

기존의 교통관리 방식은 도로전광표지(VMS), 속도제한 표지 등과 같이 운전자에게 정보를 전달하는 방식에 의존하고 있다. 그러나 이러한 방식은 운전자의 인지와 판단을 전제로 하기 때문에 실제 주행 행동까지 직접적으로 유도하기 어렵다는 한계를 가진다. 특히 터널과 같이 시야가 제한되고 인지 여건이 열악한 환경에서는 이러한 한계가 더욱 두드러진다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 교통 흐름을 직접 제어하는 접근으로의 전환이 요구된다. 이에 대한 대안으로 제시된 것이 페이스 메이커 시스템(Pacemaker System, PMS)이다. PMS는 차량의 개별 속도 제어가 아니라 교통류 전체의 흐름을 일정하게 유지하는 데 초점을 두는 기술로, 속도 편차를 줄이고 교통류를 안정화하는 데 목적이 있다. 즉, 기존 교통관리 패러다임이 운전자에게 선택을 맡기는 방식이었다면, PMS는 교통 흐름 자체를 능동적으로 유도하는 새로운 운영 개념으로 전환시키는 기술이라 할 수 있다. 이는 터널 및 대심도 도로와 같은 특수 환경에서 효과적인 교통류 제어 수단으로서 중요한 의미를 가진다.

운전자는 생각하지 않아도, 흐름은 만들어진다

PMS의 핵심은 운전자의 판단을 요구하지 않는 직관적 행동 유도 메커니즘에 있다. PMS는 터널 측면에 일정 간격으로 설치된 LED 유도등을 차량 진행 방향으로 순차적으로 점등시켜, 하나의 연속적인 빛의 흐름을 형성한다. 이러한 시각 자극은 인간이 움직이는 대상이나 흐름을 자연스럽게 따라가려는 인지 특성에 기반한다. 운전자는 속도를 계산하거나 판단하지 않아도, 단순히 눈에 보이는 빛의 이동을 따

[그림 2] 페이스 메이커 시스템 국외 운영 사례

호주 M1 고속도로 Burnley 터널
출처 | https://www.transurban.com

독일 A9 고속도로 Munich 터널
출처 | https://www.spie.com

튀르키예 유라시아 터널
출처 | https://www.avrasyatuneli.com

일본 C3 Gaikan 고속도로
출처 | https://www.e-nexco.co.jp

라 주행하게 되며, 그 결과 목표 속도를 자연스럽게 유지하게 된다. 이 과정에서 운전자의 기준은 전방 차량이 아닌 빛의 흐름으로 전환되며, 차량 간 속도 차이가 줄어들고 교통류가 균질화된다. 그 결과, 교통 흐름 내 속도 변동과 충격파가 감소하며 유령정체 발생이 억제된다. 결국 PMS는 단순한 정보 전달 기술이 아니라, 인간의 인지 특성을 활용하여 운전자 행동을 직접 유도하고 교통 흐름을 안정화하는 행동유도형 교통운영 기술로 정의될 수 있다.

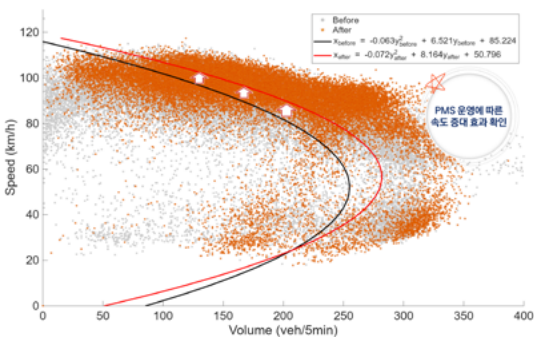
운전자 행동유도형 PMS, 금남터널에서 교통흐름을 재설계하다

서울양양고속도로 금남터널에서 수행된 실증 연구에서는 PMS 설치 전·후 1년간의 VDS 데이터를 활용하여 교통운영 효율성을 비교·분석하였으며 통계적으로 유의한 수준($p < 0.05$)에서 검증되었다.

분석 결과, PMS 운영 이후 평균 주행속도는 약 6.5% 증가하였으며, 특히 혼잡도가 높은 서비스수준(Level of

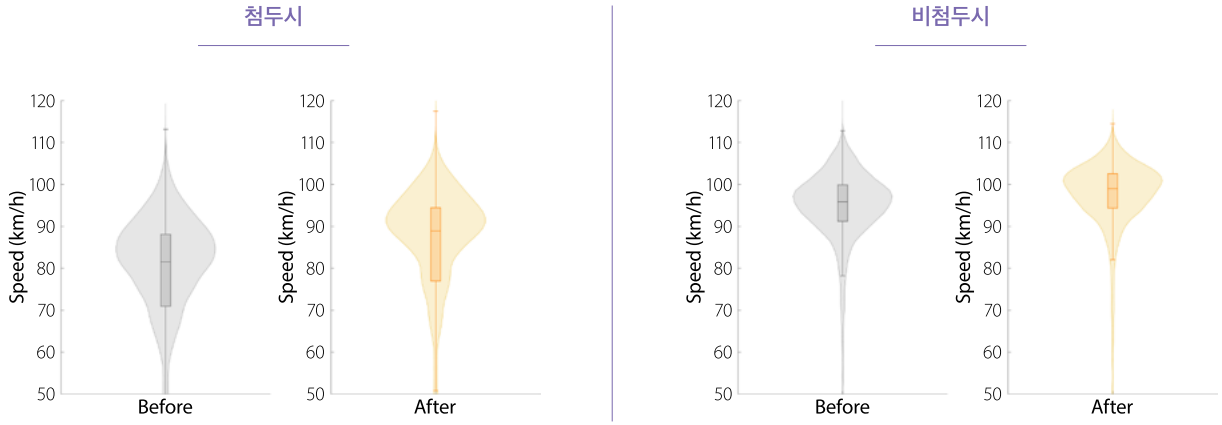
[그림 3] 분석 수행 절차

[표 1] 서비스 수준별 PMS 운영 효과

서비스수준 (LOS)	운영 전(Before) (km/h)	운영 후(After) (km/h)	증가율 (%)	속도-교통량
A	95.00	99.67	4.9	
B	94.75	99.20	4.7	
C	89.84	94.78	5.5	
D	82.02	87.95	7.2	
E	72.00	79.30	10.1	

[그림 4] 서비스 수준별 PMS 운영 효과

[그림 5] 첨두·비첨두시 PMS 운영 효과



Service, LOS)[2] C~E 구간에서 최대 약 10% 이상의 개선 효과가 확인되었다. 주목할 점은 단순한 평균속도 증가뿐만 아니라 속도 분산 감소가 함께 나타났다는 것이다. 이는 저속 차량의 속도가 상승하고 차량 간 속도 편차가 줄어들었음을 의미하며, 결과적으로 교통류의 균질성이 향상된 것으로 해석된다. 이러한 속도 균질화는 교통류 내 충격파 발생을 억제하여 유령정체 발생 가능성을 감소시키는 핵심 요인으로 작용한다.

시간대별 분석에서도 PMS의 효과는 명확하게 나타났다. 첨두시간대에서는 약 7% 이상의 속도 증가가 확인된 반면, 비첨두시간대에서는 약 3% 수준의 증가에 그쳤다. 이는 교통량이 많고 속도 변동성이 클수록 PMS의 효과가 더욱 크게 나타남을 의미하며, PMS가 혼잡 상황에서 교통류 안정성을 회복시키는 데 효과적인 기술임을 시사한다.

터널 교통 흐름 제어의 새로운 패러다임

터널은 폐쇄적 구조와 시각적 단조성이라는 특성으로 인해 운전자의 무의식적 감속을 유발하며, 이는 교통류의 불균질성과 유령정체를 촉발하는 근본적 요인으로 작용한다. 이와 같은 한계를 극복하기 위해 제안된 PMS는 LED 기반의 시각 유도 메커니즘을 통해 운전자 행동을 직접적으로 이끄는 새로운 교통운영 기술이다. PMS는 더 이상 정보를 전달하고 판단을 요구하는 방식에 머물지 않는다. 대신 운전자의 인지·판단 과정을 최소화하고, 시각적 흐름에 대한 직관적 반응을 유도함으로써 자연스럽게 목표 속도를 유지하도록 만든다. 그 결과, 개별 차량의 속도를 통제하는 수준을 넘어 교통류 전체의 흐름을 균질화하고 안정화하는 효과를 창출한다. 이는 교통공학적 관점에서 속도 관리 중심의 기존 접근을 흐름 제어 중심으로 확장시키는 중요한 전환이라 할 수 있다. 결국 PMS는 터널 교통 운영의 패러다임을 정보 중심에서 행동 유도 기반 흐름 제어로 전환하는 핵심 기술이며, 향후 대심도 지하도로를 포함한 다양한 도로 환경에서 교통 흐름을 능동적으로 설계·운영하는 미래형 스마트 인프라의 중심으로 자리매김할 것으로 기대된다. **KICT**

참고자료

- 조영, 김용석, 정준화, 신승철, 이석기, “터널 구간 교통운영 효율성 향상을 위한 페이스 메이커 시스템 효과 분석 : 금남터널 사례 연구”, International Journal of Highway Engineering, Vol. 27, No. 6, pp. 125-134, Dec. 2025.
- 조영, 신승철, 김용석, 이석기, “주행 시뮬레이션 기반 터널 내 페이스 메이커 시스템의 교통운영 효율성 및 안전성 평가”, International Journal of Highway Engineering, Vol. 27, No. 6, pp. 173-181, Dec. 2025.
- “도로 교량 및 터널 현황정보시스템”, 국토교통부.
- “교통사고분석시스템 교통사고 통계(2018~2022)”, 한국도로교통공단.

2 서비스 수준(Level of Service, LOS): 도로·교차로·교통시설의 운영상태를 운전자나 이용자가 체감하는 서비스 품질의 관점에서 평가하는 개념이다. 이는 교통량·속도·밀도 등 공학적 지표를 종합적으로 반영하여 등급화한 것으로, 운전자 체감 서비스 수준을 A~F 단계로 등급화한 지표(예 : A : 자유로운 흐름, F : 교통정체/비정상적 흐름)