

대도시권 지하고속도로의 교통운영전략

Traffic Management Strategies for Underground Highway



한동희



김상구



백승걸



강정규

1. 서론

대도시권의 지하고속도로 도입은 필요성을 논의 할 단계를 지나 구체적인 방안을 마련해야 하는 시점에 와있는 상황이다. 2011년 6월 고시된 제2차 도로정비기본계획(2011~2020)에는 수도권 등 대도시 주변의 상습 지정체 구간에 지하도로 건설 사업 추진을 명시하고 있으며 구체적으로 경부선 판교~양재 구간 지하화 계획이 포함되어 있다. 국토해양부의 수도권 지하고속도로 구상방안(2009. 12)에는 수도권 고속도로 수요증가에 대처하고 교통혼잡 해소를 위한 도로용량 증대 방안으로 기존 고속도로와 연계한 지하고속도로의 건설 방안을 제시하고 있다. 서울시의 경우 제물포~여의도 지하도로나 서부간선 지하화 사업 등이 이미 설계단계가 진행되고 있으며 강변북로 하저터널 건설, U-SmartWay 사업 등이 계획되어있다. 이와 같

이 중앙정부 및 지자체를 중심으로 지하도로, 지하 고속도로에 대한 구체적인 계획이 이미 수립되어 있거나 사업이 진행되고 상황이다.

현재 서울시에서 사업이 시행되고 있는 지하도로는 대도시권에 대심도로 계획되어 있으나 그 기능상 터널과 크게 다르지 않으며 현재의 교통운영 기술 수준으로 적용 가능한 범위에서 추진되고 있는 측면이 있다. 그러나 고규격화된 지하고속도로의 도입을 위해서는 기존 교통운영방법의 개선을 통하여 지하공간의 특성을 반영하고, 보다 안전하고 효율적으로 지하도로 공간을 운영할 수 있는 교통운영전략과 세부방안이 요구된다.

또한 향후 지하도로가 지상도로를 대체하거나 보완하여 지상공간의 활용과 도심지 도로네트워크의 용량증대라는 본연의 기능을 수행하기 위해서는 지하도로에서의 분기, 유출입(나들목, 분기점) 시설이 도입되어야 하며 철도 등 타교통수단과의

한동희 : 한국도로공사 도로교통연구원 교통연구실 선임연구원, airchild@ex.co.kr, 직장전화:031-371-3485, 직장팩스:031-371-3319
김상구 : 전남대학교 교통물류학부 교수, kim-sg@chonnam.ac.kr, 직장전화:061-659-3343, 직장팩스:061-659-3349
백승걸 : 한국도로공사 도로교통연구원 교통연구실 수석연구원, bsctrans@ex.co.kr, 직장전화:031-371-3311, 직장팩스:031-371-3319
강정규 : 한국도로공사 도로교통연구원 교통연구실 연구위원, kangsan@ex.co.kr, 직장전화:031-371-3301, 직장팩스:031-371-3319

환승연계를 통한 복합교통네트워크 기능을 수행해야 할 것으로 예상된다. 따라서 지하고속도로의 목적과 기능에 맞는 교통운영 전략수립과 구체적인 실행방안은 바로 지금부터 준비되어야 하는 중요한 사안으로 판단된다.

본고에서는 해외 지하도로 사례를 통한 교통운영 측면의 동향을 살펴보았으며, 지하공간의 특수성을 고려한 교통관리(교통규제, 차로운영 및 본선속도관리, 진출입 미터링, 정보수집 및 제공)와 안전관리(방재, 돌발상황)에 관한 교통부문 운영방안을 제시하였다. 이는 향후 지하고속도로 건설시 안전하고 효율적인 교통운영전략 수립의 기본방향을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

II. 해외 지하도로 사례

해외의 경우 미국, 유럽, 일본을 중심으로 이미 지하도로가 건설되어 운영되고 있으며 현재 공사가 진행 중인 도로들도 있다. 국외 지하도로 건설의 주요 목적은 대도시권의 교통혼잡 완화, missing link 연결 및 지상부의 친환경조성 등으로 국내의 지하도로 도입목적과 크게 다르지 않다. 그러나 일부 지하도로의 경우 지상의 문화재보호나 하천의 홍수방지를 위한 수로터널로의 활용 등을 목적으로 지하도로를 건설했으며 이를 통해 지하도로의 부차적인 기능을 확인할 수 있다. 이를 통해 지하공간의 활용측면에서 지하도로의 복합적인 기능을 활용하는 방안에 대한 고려도 필요하다

〈표 1〉 해외 지하도로의 교통관리시스템

국가	제한차종	제한속도	연장	교통관리시스템
프랑스 A86 Beltway	LPG연료차 이륜차	70kph	동:10.0km 서: 7.5km	<ul style="list-style-type: none"> • CCTV : 350대(80~100m 간격) • 도로전광판(400m간격) • FM방송을 통한 교통정보 제공 • 종합사령실 :교통상황 모니터링 및 정보제공
스페인 마드리드 M30	없음	70kph	55.7km	<ul style="list-style-type: none"> • LCS 및 VLS 시스템 설치 •VMS 교통정보 제공 • 가변정보판, 차량이용 규제신호 •영상유고자동감지 시스템
스웨덴 Södra Länken	-	70kph	5.5km	<ul style="list-style-type: none"> • 차로제어 신호기(LCS) 설치 •극초단파 검지기 • LCS표지→ 가변속도제어(VSL) •VMS 전광판 설치 • 가변 방향표지, 차단봉, 터널 입구 표지판 • 교통사고 및 지정체 차동 감지 시스템 • Prism 및 Lane Matrix 표지 이용 통합시스템
보스턴 Big Dig	-	65kph	12.0km	<ul style="list-style-type: none"> • 루프검지기 : 1,400 (200ft 간격) • CCTV : 지하 450ft 간격, 지상 1,200ft 간격 • 차고(Height) 검지기 : 진입제한 차량 감시 • Highway Advisory Radio (HAR) 적용 • 신호등 600개소, • VSL 표지판 100개소 • 램프미터링 15개소 (HOV priority 포함)
일본 동경 중앙환상선 -신주쿠선 -시나가와선	이륜차, 저속전기차위 험물차량	60kph	신주쿠 11.0km 시나가와 9.4km	<ul style="list-style-type: none"> • 도로교통정보센터(JARTIC) : 교통상황 모니터링 • 능동형 초음파 검지기(300~600m 간격) : 지진감지 및 교통정보수집, •터널경보판, 터널신호등 설치 • 교통감시카메라(영상인식) 터널경보판, 터널신호등 설치 • VMS, FM/AM 라디오, 경고방송, 문자정보판
말레이시아 SMART터널	차고2m초과 대형차량	60kph	12.7km	<ul style="list-style-type: none"> • 통제센터를 통한 교통정보 수집 및 제공 • LCS, 터널진입 차단시설 등
싱가포르 KPE Road Tunnel	위험물차량 사이드카 특장차	70kph	12.0km	<ul style="list-style-type: none"> • FM방송시설을 통한 교통정보 제공 • LCS, 과속단속카메라, 계도정보 표지판 설치

는 시사점을 얻을 수 있다.

사례분석 결과, 국외 지하도로의 교통운영관리는 주로 차종 및 제한속도를 규제하여 안전상의 문제를 최소화하였으며, 교통관리는 소통과 안전측면에서 지상도로에 비해 강화된 기능을 갖는 것으로 분석되었다. 또한 기본적으로 차로제어시스템(LCS, Lane Control System)과 가변속도제어시스템(VSL Variable Speed Limit)이 적용되고 각종 교통정보 수집을 위한 검지기와 기능이 강화된 CCTV가 설치되어 있으며 검지기의 경우 일반적인 지상부 도로보다 조밀한 간격으로 설치된 것으로 파악되었다. 또한, 차단시설, 표지판, 차단봉 등 진출입부의 교통처리를 위한 시설물의 설치를 강화한 것으로 나타났다.

III. 지하고속도로 교통운영관리 방안

1. 지하고속도로 교통특성 분석

지하공간에서의 교통특성을 운전자 행태요소, 설계요소와 지하공간의 교통류 특성요소로 구분하였다. 운전자 행태요소에는 반응시간, 시각 및 심리가 있고 설계요소로 정지시거, 조명 등이 있다. 그리고 교통량(용량 포함), 속도, 밀도 등과 같은 교통류 특성 변수가 있다. 이들의 분석을 통하여 지하공간에서의 교통 특성의 시사점을 도출하였다.

1) 운전자 행태 : 운전자 반응시간 및 시각

국내 터널구간에서의 정지시거 산정 시 적용하는 운전자 반응시간은 일반구간과 동일하게 2.5초를 사용하고 있다. 그러나 터널 내 운전자의 암순응/명순응 현상과 조도순응시간을 고려한 반응시간이 지하공간 내 반응시간으로서 적정한지에 대한 검토가 필요하다. 지하공간에서 장애물을 인지하고 파악하기 위해서는 조도의 영향으로 일반구간의 도로 상황보다는 더 큰 반응시간이 요구되므로 조도순응시간이 고려된 새로운 운전자 반응시간 결정이 필요하다.

운전자의 시각 특성은 흔히 암순응/명순응 현상으로 대비된다. 터널 진입 시에는 일시적으로 주변이 검게 보이는 블랙홀 효과가 발생하며, 터널 진출 시에는 밝은 자연광의 갑작스런 유입으로 시각기관의 광수 용체가 잠시 동안 활성화되지 못하는 화이트홀 효과가 발생한다. 따라서, 지하공간 내 차량의 진출입시 운전자 조도순응시간이 필요하고 이는 지하고속도로 진출입 구간에 대한 블랙홀과 화이트홀의 영향을 최소화하는 것이 요구된다.

2) 설계요소 : 정지시거 및 조명시설

터널 내에서는 운전자가 장애물을 인지하고 파악하기 어렵고 조명상태에 따라 장애물의 인지반응시간이 길어져 반응시간에 의한 정지시거의 공주거리가 증가할 것으로 판단된다. 따라서 지하공간에 해당되는 터널의 정지시거가 일반구간보다

〈표 2〉 운전자 행태 및 설계요소관련 기존연구결과 분석 결과

구분	현행 기준	기존 연구결과	
운전자 행태	반응시간	<ul style="list-style-type: none"> • 단로부 : 2.5초 • 표지판 판독거리 : 2.0~2.5초 	<ul style="list-style-type: none"> • 인지반응시간 1.6초, 예측 vs 미예측 35% 증가 • 정보단위당 판독시간 1.0초
	운전자 시각	<ul style="list-style-type: none"> • 조도순응시간 : 3초 	<ul style="list-style-type: none"> • 조도순응시간 : 2~3초 • 고령층 정지시력 20% 감소
	운전자 심리	-	<ul style="list-style-type: none"> • 화재 등 긴급상황 탈출 두려움 • 터널내 폐쇄감, 압박감
설계요소	정지시거	<ul style="list-style-type: none"> • 반응시간 2.5초 적용 • 노면건조상태 마찰계수 적용 	<ul style="list-style-type: none"> • 미국, 일본, 국내 기준 동일 • 터널 정지시거 일반구간과 동일
	조명시설	<ul style="list-style-type: none"> • 터널내 입출구부 기본조명 기준 • 출구부 70m 야외휘도 1/10이상 	<ul style="list-style-type: none"> • 운전자는 조명 밝기에 따라 안정감을 가짐

더 짧게 결정되어지나, 운전자 반응시간과 조도순응시간을 고려한 지하공간 내 정지시거가 검토되어야 한다.

조명시설의 경우 운전자 시각의 변화와 심리적 반응을 고려해야 하는데 지하도로는 터널구간 내·외의 환경변화 순응하는 것 외에도 장시간 지하공간에서의 운행 시 조명밝기에 따른 운전자 안정감 변화 등이 주요 사항이다. 따라서 지하공간 기본 조명은 운전자의 심리적 반응을 고려하여 기존 터널의 입출구부 조명기준과 상응하게 결정하는 것이 필요하고 이를 통해 지하공간에서의 쾌적한 운전환경을 확보해주어야 한다.

3) 터널내 교통류 특성

기존 연구결과를 종합해 보면, 터널부에서는 일반구간과 비교하여 용량이 감소하는 것을 알 수 있다. 그 이유를 기존 연구에서 크게 기하구조 요인과 운전자의 심리적, 생리적 요인으로 분석하고 있다.

- 기하구조 요인 : 차로폭, 측방여유폭, 종단구배 변화량, 곡선반경, 시계 확보
- 운전자 심리적, 생리적 요인 : 터널입구 측면 충돌 우려, 터널내 조도변화, 운전자 시·시각 변화

그러나 지하고속도로 내 교통류가 동일차종 또는 유사 성능의 차종으로 구성되어 있다면 한 단계 향상된 교통류관리를 통한 용량증대 방안이 존재할 것으로 판단된다.

〈표 3〉 터널구간의 교통류 특성 관련 연구결과 분석

변수	연구결과
교통량	· 최대교통량 및 교통류율 감소(평균 3.7%)
속도	· 구배, 길이 증가시 속도감소 · 주야간, 차로별 속도변화 차이 발생 · 진입부 및 터널부 중간지점까지 속도감소 · 자유교통류속도 및 임계속도 모두 감소 · 길어깨폭에 따라 속도감소 발생
밀도	· 임계밀도 증가

2. 교통운영전략의 목표 및 기본 방향

지하공간의 특성을 반영한 차별화된 교통운영전략의 목표를 설정하면 다음과 같다. 진출입 미터링, 차로운영 등을 통한 ①교통와해(Breakdown) 제로화, ② 속도관리를 통한 교통류 속도편차 최소화, ③ 위반차량 및 차로위반 규제를 통한 교통사고 발생 제로화, ④ 교통정보제공을 통한 운전자편의 최대화, ⑤ 방재예방 및 돌발상황 대응을 통한 돌발상황 영향 최소화 등이다.

지하고속도로의 진입교통량은 교통와해 발생 가능성 최소화를 위한 확률변수를 고려한 용량보다 작아야 하며, 주행속도는 제한속도보다 낮고 용량에 해당되는 임계속도의 일정 배수보다 높은 속도편차 이내로 관리가 필요하다. 또한 터널내 교통사고 분석에 의하면 교통량 수준 대비 화물차의 교통사고 비중이 가장 높으므로 화물차 진입금지 및 운행시 관련 시스템으로 집중 관리를 시행해야 하며 운전자 편의를 향상시키기 위해서는 적절한 교통정보 및 안내체계구축과 운전자 시·시각에 적합한 조명시설 및 교통안전시설 보강 설치해야 한다.

지하고속도로의 기능상 독립관계¹⁾의 경우, 차종규제와 미터링 운영전략이 필요 없고 별도의 요금징수 시스템과 인접교차로와의 연계가 소극적으로 운영될 것으로 판단된다. 지하고속도로의 병행관계²⁾는 지상고속도로와의 관계를 고려해볼 때, 교통규제 및 교통운영 시스템 모두가 구축, 활용되어야 하고 특히 소형차 전용의 도로로 인하여 과적, 위험물, 배출가스 규제는 사전에 진입규제로 인하여 소극적인 운영전략이 필요할 것으로 판단된다.

3. 교통규제

지하고속도로에서 교통규제는 허용차종규제, 속도규제, 차로규제 등으로 구분할 수 있다. 본고에서는 현재 적용되고 있는 규제방안 및 시스템을 검토하여 지하고속도로에 적용 가능한 방안을 제시하였다.

1) 독립관계 : 지상고속도로와는 관계없이 Missing link 연결개념으로 별도의 독립 노선을 지하고속도로 건설
 2) 병행관계 : 지상고속도로의 용량 증대 등을 목적으로 지상과 동일한 노선에 고차 병행하여 지하고속도로 건설

1) 허용차종 규제

소형차 또는 승용차만의 통행을 허용하는 지하고속도로인 경우 진입통제(허용)규제가 필요하다.

도로교통법, 도로법에는 “도로에서의 위험을 방지하기 위하여 차량의 운행을 제한할 수 있다”고 규정하고 있다. 다만 현재 소형차만을 통행시키도록 하고 있는 법규는 없기 때문에 법규 개정 및 정비가 필요하다.

허용차종 규제방법은 진입부 전방에 VMS 및 높이제한 표지판을 설치하여 정보를 제공하고, 진입부 30m 부근에서는 높이제한 시설물을 설치하여 강제로 진입을 규제할 수 있다. 또한, 위반촬영 시스템은 진입부 규제방법 적용이 어려운 도로에 적용할 수 있으며, 무인카메라를 통해 위반차량을 추적하여 벌금을 부과할 수 있다.

2) 속도 규제

지점과속단속의 경우 단속지점에서만 급격하게 속도를 줄이는 형태가 발생하여 사고발생 가능성이 높으며 이동식 단속은 공간특성상 적용이 불가능하다. 지하고속도로의 경우 진출입부 또는 분기점에 단속카메라를 설치하여 단속을 시행하며, 이때 적정단속구간 길이 설정을 통해 단속의 효과를 극대화 시켜야 할 것으로 판단된다.

또한 구간과속단속 방법 중 무인단속시스템은 위반차량 적발 및 고지서 발부까지 자동으로 처리

되는 시스템으로 지하고속도로에 적용하여 교통사고의 감소 및 원활한 소통을 도모할 수 있다. 단, 지하고속도로 진입이전에 단속관련 안내표지판을 설치하여 운전자들이 인지할 수 있도록 하며, 최대의 효과를 나타낼 수 있는 적정 단속구간길이를 설정하여 적용토록 해야 한다.

3) 차로규제

지하고속도로에서의 원활한 교통소통을 도모하고 교통사고를 예방하기 위해서 차로위반에 대한 단속방안의 제시가 필요하다. 지하고속도로에서의 차로위반 규제는 지정차로 단속, 앞지르기 및 진로변경 단속 및 끼어들기 단속이 있으며 단속방법 적용을 위한 검토내용은 다음과 같다.

지정차로제 단속을 위해서 지하도로 내부에 단속카메라를 설치할 경우 급격한 속도감소로 인해 사고 발생 가능성이 높기 때문에 입·출구부에 무인단속 장비 설치 검토가 필요하다. 앞지르기 및 진로변경 단속을 위해서는 내부에 설치되어 있는 방재용 CCTV에 단속에 필요한 시스템과의 연계를 통해 단속이 이루어져야 할 것으로 판단되며 지하고속도로 내부에 분기점이 설치되어 있거나, 진출입램프부에서는 차로변경을 허용할 수 있는 방안이 필요하다. 끼어들기 단속의 경우 진출입램프부에 무인단속 시스템을 설치하여 단속을 시행해야 하며, 위반차량의 번호판을 확인할 수 있는 위치에 설치가 필요하다.



〈그림 1〉 지하고속도로 진입 전 사전 단속(허용차종, 속도, 과적 및 위험물 단속)

4. 교통운영방안

지하고속도로에서는 기본적으로 일정한 운영목표 속도를 유지하게 할 수 있는 교통운영방안이 필요하며 혼잡이나 돌발상황으로 발생하는 대기행렬은 지상도로에서 보다 운전자에게 심리적으로 더 크게 영향을 미칠 것이므로, 혼잡구간 상류부의 교통량 처리와 영향권 내의 교통량 처리를 통해 대기행렬의 지속시간을 최소화할 수 있는 방안이 요구된다.

1) 차로제어시스템(LCS)

차로제어시스템은 차로의 사용유무, 진출입표시, 차로의 용도제한 및 이용차량제한, 속도제공 등의 역할을 수행하는 시스템이다. 현재 운영 중인 차로제어시스템은 교량 및 터널 전방과 터널 내부에서 운전자의 안전을 환기시켜줄 목적으로 단순한 차로준수를 유도하고 있으며, 도시부에서 고정된 시간대에 따라 가변적으로 차로를 운영하는 데 사용 중이다. LCS의 지하고속도로 적용방안은 <표 4>와 같다.

지하고속도로의 교통상황별 차로제어시스템의 운영전략은 <표 5>와 같다.

<표 4> 지하고속도로의 차로제어시스템 적용방안

구분	적용방안
설치지점	<ul style="list-style-type: none"> 지하고속도로 전 구간 설치 특별 관리구간 별도 기준 적용 <ul style="list-style-type: none"> - 유·출입 구간 - 사고발생 가능성 높은 지점
신호기	규격 및 설치 높이 <ul style="list-style-type: none"> 공간 특성상 현수식 설치 시설한계와 터널단면을 고려한 규격 및 설치 기준 적용 신호기의 소형화 필요
	설치 간격 <ul style="list-style-type: none"> 정보부재공간이 없도록 설치 설계속도(80kph 등) 고려
	설치 형식 <ul style="list-style-type: none"> 정보제공매체(VMS)와 단속매체(VES³), CCTV) 조합으로 비용 최소화
기호 형태	<ul style="list-style-type: none"> 화살표, 숫자외에 교통정보제공을 위한 신규 기호 추가 교통상황 정보제공을 위한 픽토그램 도입
운영형태	<ul style="list-style-type: none"> 운영전략 수립

3) VES : Vehicle Enforcement System

<표 5> 지하고속도로의 차로제어 운영전략

구분	운영전략
안정 교통류	<ul style="list-style-type: none"> 차로별 균형화 전략 <ul style="list-style-type: none"> - 유출입 구간부터 차로별로 사용 가능한 교통류 정보제공 - 차로별 균형화 후 다음 유출입 구간까지 차로변경금지 유출입 구간 진입전 차로변경 유도 <ul style="list-style-type: none"> - 진출 : 진출 차량 외측, 통과교통류는 내측으로 유도 - 진입 : 안전한 합류를 위해 본선 상류부 교통류 외측차로 사용 금지
혼잡 교통류	<ul style="list-style-type: none"> 대기행렬 최소화를 위해 혼잡영향권 상류 교통류 관리에 중점 <ul style="list-style-type: none"> - 상류 교통류 우회경로 정보제공 - 거리별 차등 속도제공
돌발 교통류	<ul style="list-style-type: none"> 돌발상황으로 점유된 차로별 전략 수립 영향권 상류부에 대해 우회경로 정보제공 및 속도 감소 길어깨의 사용을 통해 용량을 늘림

2) 가변속도제어(VSL)

지하고속도로의 가변속도제어는 첫째, 차두거리를 균일하게 유지하여 운전자들의 심리적 안정을 도모하고 둘째, 차간 속도차이를 줄여 차로변경을 감소시켜 용량의 효율적 활용하며 셋째, 과속차량의 감속을 유도하고 적정속도를 제공하여 안전성을 증대하기 위해서 필수적이다.

우리나라에서는 가변속도제한 시스템 운영이 활성화 되어 없으므로 기존 연구를 바탕으로 지하고속도로 가변속도제어의 도입 시 요구사항과 지하고속도로에서의 적용을 위한 기본방향을 표6과 같이 제시하였다.

지하고속도로의 적정 속도제공은 교통상황에 신속하게 대처하기 위해서 검지기 자료를 바탕으로 분석되어 자동으로 설정된 속도를 제공하고, 운영자의 현장상황 모니터링에 따른 판단과 현장 요원으로 부터의 정보를 통해 적정 속도에 대한 검증을 통해 속도선택 및 제공에 대한 오차를 줄여야 한다.

〈표 6〉 지하고속도로의 가변속도제어시스템 구성

구분	적용방안	
적용대상	<ul style="list-style-type: none"> 지하고속도로 내부 전 구간에 걸쳐 교통상황별로 적용 	
시스템구성	<ul style="list-style-type: none"> 교통관리센터, 검지체계, 제공매체, 통신체계 시스템 검지체계는 지하공간 특성상 신뢰성 유지 가능 	
속도 규제 표지	형상	<ul style="list-style-type: none"> 원형의 적색 테두리+ 테두리 내 숫자(규제속도) 소자 이용시 시인성 확보를 위한 색채선택 필요 <ul style="list-style-type: none"> - 바탕색 무광흑색, 문자/기호 백색
	크기	<ul style="list-style-type: none"> 시설한계를 고려한 크기 설계 외벽 단독설치 및 차로별 설치에 따른 크기산정 필요
	설치 형식	<ul style="list-style-type: none"> 지하공간의 효율적 활용을 위해 LCS, VES와 함께 차로별로 설치하여 통합적으로 연계 운영 설치가 부적절한 경우 단독설치를 고려할 수 있으나 전 차로에 정보의 제공이 가능해야 함

〈표 7〉 가변속도제어시스템의 운영전략

구분	적용방안
운영 형태	<ul style="list-style-type: none"> 차로별 교통량의 수준에 따른 운영 적합 지속차량 중심으로 운영 기본구간 : 사고/정체시, 연결로 : 지속적운영 교통류 상황별 운영전략 설정
속도 선택	<ul style="list-style-type: none"> 검지기, 현장요원, 운영자 확인 및 지속적인 모니터링 상호 연계필요 - 차량검지기 자료를 바탕으로 자동 설정 - 현장요원 정보를 통해 신뢰성 확보 - 운영자가 CCTV를 통해 다시 확인 • 교통류 상황에 대한 등급별 속도 설정
속도 제공	<ul style="list-style-type: none"> 센터에서 수동으로 조작 컴퓨터에 의한 자동설정 (차로폐쇄 및 공사구간에서는 수동조작) 가변속도표지 및 VMS 이용 속도단위(5km/h, 10km/h)에 따라 조금씩 속도를 증가 또는 감소 양호상태, 중간상태, 불량상태의 등급을 정해 3가지의 속도만 제공

3) 진입, 진출 미터링

지하고속도로의 용량은 지상도로보다 작고 진출입 시설이 제한적이기 때문에 미터링을 통한 수요조절이 절대적으로 필요하다. 미터링은 진입 교통수요를 적절히 조절하고, 안정적인 진출수요 관리를 통해 지하고속도로 용량을 최대한 활용하고 동시에 지하도로에서의 교통와해 발생을 최대한 억제해야 한다.

연결로에서의 진입 미터링의 경우, 허용차종 규제, 요금징수와 위험물 차량규제 등과의 연계를 통해 지하고속도로로 진입하는 수요교통량 조절이 이루어져야 한다. 진입 미터링은 크게 영업소를 이용한 방법과 신호기를 이용한 방법으로 구분된다.

영업소 방식의 경우, 사전예방 차원의 수요조절이 이루어질 수 있도록 교통정보 수집매체와 영업소의 기능 개선이 요구되며 신호기 방식의 경우 연결로에 영업소가 설치되지 않는 경우 적용할 수 있으며 램프미터링과 유사한 개념으로 대량의 교통류 처리에 중점을 두고 시스템을 개선해야 한다.

진출 미터링의 경우 지상고속도로와의 합류지점에서 차로제어시스템을 활용하여 지하고속도로 진출수요를 연속적으로 합류시키며, 합류지점에 대한 교통와해의 방지를 위해 지상고속도로 유입부에서의 램프미터링이 이루어지는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

〈표 8〉 연결로 미터링(영업소) 적용방안

구분	내용
운영 방식	<ul style="list-style-type: none"> 진입수요와 지하고속도로 내부의 용량을 비교하여 혼잡이 발생하지 않도록 사전 예방 수요조절
교통 정보 수집	<ul style="list-style-type: none"> DSRC방식의 통행량 수집환경 인프라 확충 및 신뢰성 있는 교통류 상태 파악 영상 검지기의 교통류 검지 기능과 CCTV기능을 함께 고려
수요 조절	<ul style="list-style-type: none"> 지하고속도로의 발생 가능한 다양한 교통패턴을 분석하여 교통상황별 수요조절의 단계를 설정하여 운영
영업소 용량	<ul style="list-style-type: none"> 서비스 시간 단축으로 용량 확충 및 신속한 교통량 처리를 통한 수요조절 하이패스 차로의 진입속도 상향으로 서비스 시간 감소를 통해 용량 증대

〈표 9〉 진출 미터링 방안

미터링 방안	세부 방안
지상도로와의 연속적인 합류	<ul style="list-style-type: none"> 합류부에서의 직접적인 차로운영을 하지 않고 있기 때문에 직접적인 차로운영 차로운영은 LCS와 VMS를 적극 활용하여 관리
합류부 유출입 시설의 수요조절	<ul style="list-style-type: none"> 기존 램프미터링 시스템을 이용하여 상·하류부 용량의 비교를 통해 수요조절

4) 돌발상황관리

돌발상황관리는 교통소통과 교통안전을 저해하는 비정상적 상황이 발생할 경우, 이로 인한 혼잡 및 사고위험의 최소화를 목적으로 취해지는 일련의 조직적이고 계획된 활동을 의미한다.

지하고속도로의 신속한 돌발상황 관리를 위한 목표를 설정하면 ① 지하고속도로 용량의 신속한 회복, ②돌발상황에 따른 2차 사고의 감소, ③지하고속도로 비상구급체계의 구축 등이 있다.

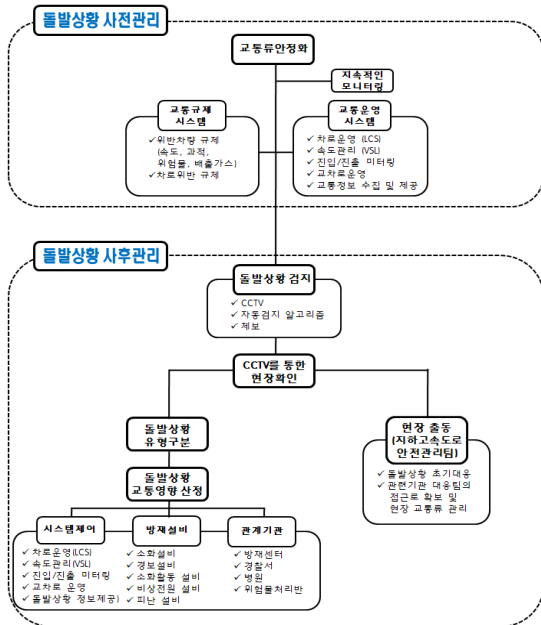
지하고속도로에서의 돌발상황관리는 교통규제 및 운영시스템, 방재설비, 연계기관의 적용을 돌발

상황 예방차원의 사전관리와 돌발상황 발생 후 처리를 위한 사후관리로 구분된다.

지하고속도로는 교통량이 낮은 상태의 경우 돌발상황이 발생하더라도 교통특성의 변화가 크지 않아 자동검지 알고리즘을 이용한 자동검지가 어렵기 때문에 이를 보완하여 수동검지 방식을 이용하여야 하며 돌발상황에 대한 검지율의 향상, 오보율의 저하 및 교통상황별 일관성 있는 검지율 유지와 같이 검지의 신뢰성이 확보되어야 한다. 또한 이를 위해서는 기존 자동검지 알고리즘은 낮은 신뢰성으로 인해 활용도가 낮으므로, 신뢰성의 증진방안 및 적정 검지기 설치간격, 영상검지기의 적극적인 활용방안이 필요하다. 돌발상황 관리의 지하고속도로 교통운영에서의 중요도를 고려할 때 돌발상황 대응과 처리시 돌발상황 자체에 대한 관리와 지하고속도로 내부 및 진입하고자 하는 전체 교통류의 관리를 위한 시나리오가 작성되어야 하며 교통류 관리 시스템, 방재설비, 안전관리팀을 서로 통합적으로 연계하는 방안이 필요하다.

〈표 10〉 지하고속도로 돌발관리 방안

구분	지하고속도로
돌발상황 검지	<ul style="list-style-type: none"> 신속한 검지를 위해서 자동검지 방안의 강화 순찰대를 활용한 수동검지 방안과 병행 자동검지 : 영상식 검지 적극 활용 수동검지 : TMC Wallmap Display, CCTV, 운전자 제보, 고속도로 순찰대, 외부기관 제보 등
돌발상황 확인	<ul style="list-style-type: none"> CCTV와 도로 순찰대 또는 영상검지기를 활용하여 돌발상황 확인 심각도 기준 강화 필요 : 차량당 평균 지체시간, 대기행렬 길이 이용
돌발상황 대응 및 처리	<ul style="list-style-type: none"> 교통규제 및 운영 시스템의 연계를 통해 지하고속도로 내부의 교통류와 진입 교통류 관리 지하고속도로의 방재 및 환기 시스템을 통해 화재 등 대형사고 발생 억제 지하고속도로 안전관리팀을 활용한 돌발상황의 처리 및 긴급의료서비스(EMS) 연계 : 부상자의 분류, 치료, 신속 이송을 통해 인명피해 감소



〈그림 2〉 돌발상황 사전/사후관리 구성

IV. 결론

지하고속도로는 그 특성상 대도시권에 도심도, 초장대로 구축되고 지상도로와의 관계 등을 통해 그 역할과 기능(독립, 병행관계)이 정의될 수 있다는 점을 고려할 때, 세부적인 운영목표와 전략은 매우 다양하게 설정될 수 있다. 본고에서는 국외 주요 지하도로 사례를 통한 교통운영 측면의 동향을 살펴보았으며, 지하공간의 교통특성분석과 이를 고려한 교통운영의 목표를 설정하였다. 또한 교통부문 운영방안의 고려요소 및 운영전략을 제시하였다. 그 주요내용을 요약하면 다음과 같다.

지하고속도로 진입부에서는 VMS와 고정식표지판을 활용한 정보제공이 이루어져야 하며, 허용차종 등 진입통제정보 및 지하고속도로 내부의 교통상황(안정, 혼잡, 돌발)에 따른 우회정보 등이 제공되어야 한다. 또한 지하고속도로 교통정체 시 진입 수요조절을 위해서 미터링을 수행하거나 인접교차로의 신호조절을 통한 진입수요 관리가 필요하다.

지하고속도로 내부에서는 교통규제, 차로운영 및 속도관리, 돌발상황 관리 시스템이 통합적으로 운영되어야 한다. 교통규제방안에서 과속단속은 구간 과속단속 시스템이 운영되어야 한다. 앞지르기 및 진로변경 단속은 지점별로 설치된 무인단속 시스템을 활용하여 측정 지점과 이전 지점에서 측정된 차로를 비교하여 단속이 이루어져야 한다.

차로별 교통류 제어를 위해 LCS를 전체 지하구간에 설치하고, VSL을 통해 교통상황별 동적인 속도를 제공해야하며 LCS와 VSL을 연계하여 교통상황에 따라 구간별 동적으로 교통류를 관리해야 한다. 돌발상황관리 시스템 또한 지하고속도로는 전 구간에서 운영되어야 하며, 돌발상황 관리는 교통규제 및 운영시스템을 활용한 교통류의 직접 제어, 방재 및 피난설비를 통해 화재의 방지 및 인명피해 최소화, 지하고속도로의 안전관리팀에 의해 체계적이고 신속하기 이루어져야 한다.

본고에서 제시한 지하고속도로의 교통운영전략의 기본적인 고려요소, 운영전략은 향후 지하고속도로 구축 시 교통운영부문의 기본 목표와 세부 방

안을 마련하는데 기여할 것으로 판단된다. 물론 개별 교통운영방안의 세부적인 실행방안과 시스템을 구축하기 위해서는 매우 구체적인 수준에서 항목별 연구개발 과정과 이에 대한 평가, 검증과정이 요구된다. 본고에서 제시된 내용을 바탕으로 지속적인 연구개발이 수행된다면 수도권 등 대도시권 교통문제 해결을 위한 지하고속도로구축 시 효율적이고 안전한 교통운영방안이 실용화될 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Johansson, G. and Rumar, K. (1971), Driver's Brake Reaction Time, Human Factors, Vol. 13, No. 1, pp.22~27.
2. Koppa, R. J., Fambor, D. B., and Zimmer, R. A.(1986), Measuring Driver Performance in Braking Maneuver, TRB 1550.
3. 도철웅(1998), 교통공학원론.
4. 도철웅 · 최재성(1999), 교통공학, 박영사.
5. 교통개발연구원(2001), 교령운전자의 운전행태 고찰 및 안전운전대책 연구.
6. 오주석 · 박선진 · 이순철(2008), 터널구간에서의 운전자 시각순응 소요시간 연구, 한국심리학회 연차학술발표대회 논문집, 한국심리학회, pp.140~141.
7. 한국도로공사(2008), 소형차 전용도로 도입 방안 연구.
8. 국토연구원(2010), 고속도로 영업소 진입교통량 조절 시행, 도로정책 Brief 27.
9. 한국도로공사(2010), 도심지 도로터널 지하입출구부 및 분기점 설치 사례 분석, 고속도로誌 76호.
10. 김지영(2010), 고속도로 영업소 미터링 효과 분석에 관한 연구.
11. 도로교통협회(2010), 스페인 마드리드 순환도로 M-30 개·보수프로그램, 통권 제121호 가을호, pp.30~37.
12. 한국도로공사(2011), 지하고속도로 계획 및 운영방안수립연구.