

대용량 신교통수단의 분석



박태진



최동호

1. 서론

교통난이 심각한 대도시에서 대량의 교통수요를 감당하려면 편리하고 빠른 대용량교통수단이 필요하다. 도시집중현상이 가속화되면서 대용량교통수단이 필요해졌고, 지하철, 도시형 버스 등이 승객을 대량으로 수송하고 있으나 입석 위주로 운행하여 불편하며 용량도 충분하지 못한 문제가 있다. 입석위주의 교통수단들은 불편하면서도 용량이 충분하지 못하여 고통스러운 교통상황이 계속되고 있다. 그래서 택시 수준의 편리함을 내세우는 개별고속교통수단(PRT: Personal Rapid Transit)이 40여년 전에 논의된 이래 집단고속교통수단(GRT: Group Rapid Transit), 자동승객이동수단(APM: Automated People Mover) 등 많은 신교통수단이 개발되고 제안되었지만, 운송용량이 적어 효용성이 떨어진다. 오랫동안 지하철의 운송량을 증가하는 교통수단이 나오지 않고, 열악한 편의성이 방치되는 동안 각종 신교통수단들의 실용화 주장이 계속되는 한편, 자가용이 증가하여 교통난은 더욱 심화되고 있다. 불편하거나 용량이 작은 교통수단들은 서로의 단점을 극복해내지 못한 가운데 편리한 대용량교통수단의 필요성이 절실한 상황이며, 충분한 크기의 대용량교통수단은 편의성도 향상시킬 수 있을 것이다. 운송용량은 정원과 시간당 운송회수의 곱인데, 정원증대에 의한 용량증대방안은 한계에 도달하였으며, 시간당 운송회수의 증대에 의한 방안도 구조적인 한계를 갖고 있다.

시간당 운송회수의 증대, 즉 고빈도운행을 위해서는 효율적인 궤도구조와 운행

방식이 필요하며, 본 연구의 목적은 고빈도운행이 가능한 궤도의 구조에 대해 알아보고 그 효과를 파악하는데 있다. 또한 고빈도운행이 가능한 구조를 제시하고, 고빈도운행의 유기적인 이행가능성, 용량증대 가능성, 도심설치 가능성, 이동속도 및 접근성, 편의성 등을 비교, 계산 및 예상의 방법으로 분석해 보고자 한다.

II. 고빈도운행의 조건

1. 선행연구 검토

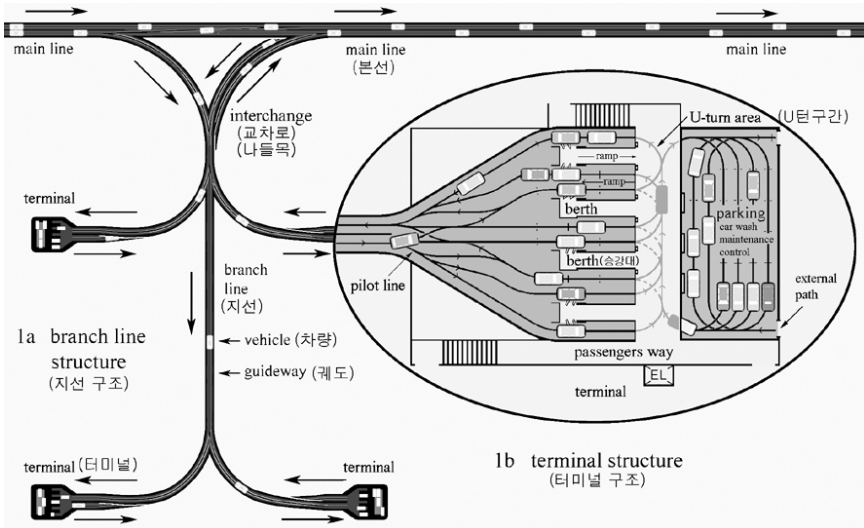
대용량 대중교통수단인 지하철은 첨두시간에 과포화 상태로 운행되어 운송량은 증가되지만 편의성은 그에 반비례한다. 지하철을 정점으로 정원증대에 의한 운송 용량 증대는 한계에 부딪쳤으며, 한편으로 편의성을 향상시키고 건설비와 운영비를 절감하려는 수많은 신교통수단 들이 개발되고 또한, 제안되고 있다(이종호, 1998).

신교통수단 들이 집대성되고 분석, 분류된 워싱턴대 웹사이트에는 수많은 종류의 신교통수단 들이 제안되어 있으나 대부분은 정원과 운송용량이 둘 다 작아서 실용성이 낮으며 대도시 교통난에 대처하기에는 미흡함이 많다. 특히, 80여 종류의 신교통수단 들이 별도로 분석, 비교되어 있는 비교표에서도 대부분은 운송용량이 작으나 두 가지의 교통수단은 대용량교통수단으로 분류되었다(Schneider, 2004). 그 중 하나인 HiLoMag(Reynolds, 2001)는 고빈도운행의 효과에만 치중하는데 비해 지선형대중교통(BT: Branch Transit)¹⁾은 고빈도운행에 적합한 궤도구조를 가진 대용량 신교통수단이다(박태진, 2003). BT는 무정차 고속주행 및 고빈도운행이 용이하게 이뤄지는 고속도로와 유사한 궤도구조를 가진 교통수단 이면서, 일정한 속도와 간격으로 운행하여 대량운송에 적합하도록 개발된 신교통수 단이므로 BT를 위주로 분석하고자 한다.

2. 고빈도운행이 가능한 구조

궤도교통수단에서 1분에 수십 회 운행되는 수준의 고빈도운행이 가능 하려면 주정차, 승하차, 가감속이 주행 궤도 이외에서 이행되어야 한다. 지선형대중교통의 구조는 고빈도운행 되는 주행 궤도인 본선, 나들목(interchange)으로 연결된

1) 많은 지선(Branch line)으로 구성된 교통수단(Transit)의 의미로 지선형대중교통(Branch Transit)의 머리 글자.



〈그림 1〉 지선과 터미널의 구조

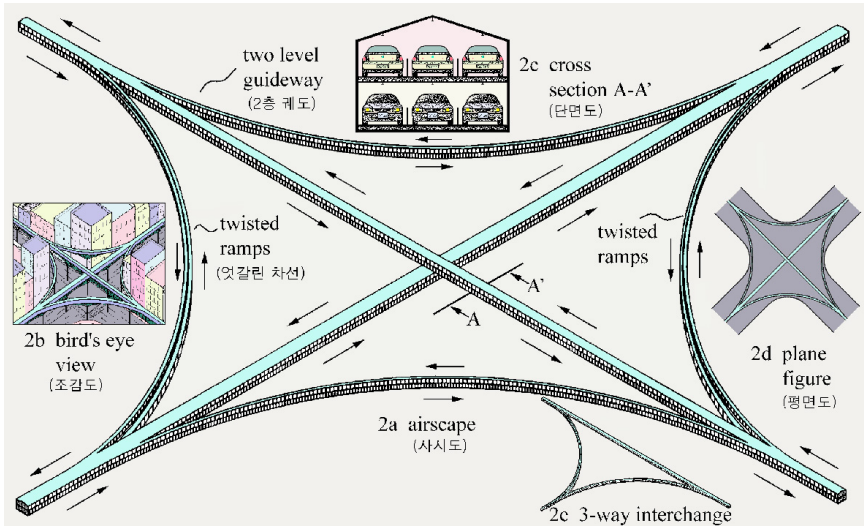
저속구간의 지선, 지선에 연결되어 주정차와 승하차 하는 터미널로 구성된다. 지선에 연결된 터미널에서 승객이 승하차하면 본선에서 승하차 하는 기존 방식에 비해 구조적으로 역할이 분산되어 효율적인 고빈도 운행이 가능할 것이다. 즉, 많은 지선에 연결된 많은 터미널에서 순차적으로 많은 차량이 출발하면 본선에서는 고속도로처럼 무정차 주행 및 고빈도운행이 가능한 것이다.

〈그림 1〉과 같이 나들목으로 본선에 연결된 지선에는 여러 개의 터미널이 연결된다. 터미널은 톨게이트와 유사한 구조로, 많은 수의 승강대를 병렬로 배치하고, 교행방향 궤도의 끝을 U턴구간으로 연결하여 하차대와 승차대를 연결하고 주차공간도 갖춘 구조이며 본선에서 고빈도운행 되는 많은 차량들을 받아들이거나 내보내는 구조로 되어 있어서 고빈도운행을 가능하게 한다.

모든 터미널과 승강대는 본선에 대해 병렬로 배치된 구조이며, 1개의 승강대에서 10인승 차량이 30초당 1대씩 출발한다면 6개의 승차대를 운용 가능한 터미널 100개에서는 $10인 \times (3600초/30초) \times 6개 \times 100개 = 72만$ 명/h의 승객이 출발할 수 있다. 이때, 행선지에도 같은 수의 병렬 배치된 하차대에서 하차차량을 수용할 수 있어야 할 것이다.

3. 궤도의 도심건설

톨게이트 형태의 터미널에서 승하차와 주정차가 이뤄진다는 점 외에 고속도로



〈그림 2〉 간단한 교차로 구조

와 별 차이가 없는 구조의 궤도교통수단인 지선형대중교통이 대도시의 도심에 건설 가능하여야만 대용량교통수단이 되거나, 도시고속도로와의 차별성을 가질 것이다. 도시고속도로의 단점으로는 교차로의 면적이 넓어 도심에 교차로를 많이 설치할 수가 없다는 점과 진출램프가 수시로 정체된다는 점이 있다. 지선형 대중교통인 BT는 차량출발을 통제하며 일반도로와 분리되어 있어서 정체가 없고, 교차로는 그 설치 면적이 적어 도심 건설이 가능함은 물론 필요지점마다 건설이 가능하다는 장점이 있다.

고속도로의 교차로는 좌회전램프의 회전반경을 크게 하려다 교차로가 넓어지는데, 대향차선 간 단차를 가진 차선들이 교차하면 좌회전램프는 좌측으로 90°내의 만 회전하는 큰 회전반경을 갖는 간단한 구조로 연결이 가능해진다. 또한, 단차가 있는 대향차선을 포개고 각 방향 연결램프를 연결하면, 엇갈린 연결램프가 포함되긴 하지만 〈그림 2〉와 같이 형태가 간단한 교차로 구조가 되고, 연결램프들의 회전반경이 모두 크므로 교차로 크기를 1/10 이하²⁾로 대폭 줄일 수 있으며, 따라서 공간이 여유롭지 못한 도심에 설치하기가 용이해진다. 이처럼 크기가 작고 간단한 형태이면서도 연결램프들이 모두 큰 회전반경을 갖는 교차로는 아주 효율적인 구조로서 차량들의 고속통과가 가능한 구조이다.

교행차선을 모두 포개어 2층 궤도가 되면 교차로, 삼거리, 분기로가 모두 단선

2) 좌회전의 회전반경이 같은 경우를 비교

으로 구성된 것처럼 간단한 형태가 되고 궤도가 설치되는 평면도 반으로 절감되는 장점이 있으므로 <그림 1>과 같이 터미널과의 연결부위만 동일 평면이 되도록 한다.

본선은 도심의 넓고 곧은길을 골라 지하나 고가로 건설하고 넓은 교차로에 주로 궤도의 교차로를 건설하며, 나들목으로 연결된 지선은 교통발생지점이나 필요 지점에 설치된 터미널과 본선을 연결한다. 터미널은 지선궤도가 연결되는 한 어디나 설치가 가능하므로 백화점, 병원, 주차빌딩, 관공서, 대형건물 등의 건물 내 주차공간이나 아파트, 학교, 역, 공항, 버스터미널, 경기장 등 교통발생지점에 설치하여 접근성을 크게 향상시킨다. 본선이나 지선궤도는 도로 이외에도 철도, 고속도로, 수로, 강, 하천, 골목길을 따라 지하나 고가로 건설될 수 있으며, 공터, 논밭, 산, 터널, 건물 등도 지날 수 있다.

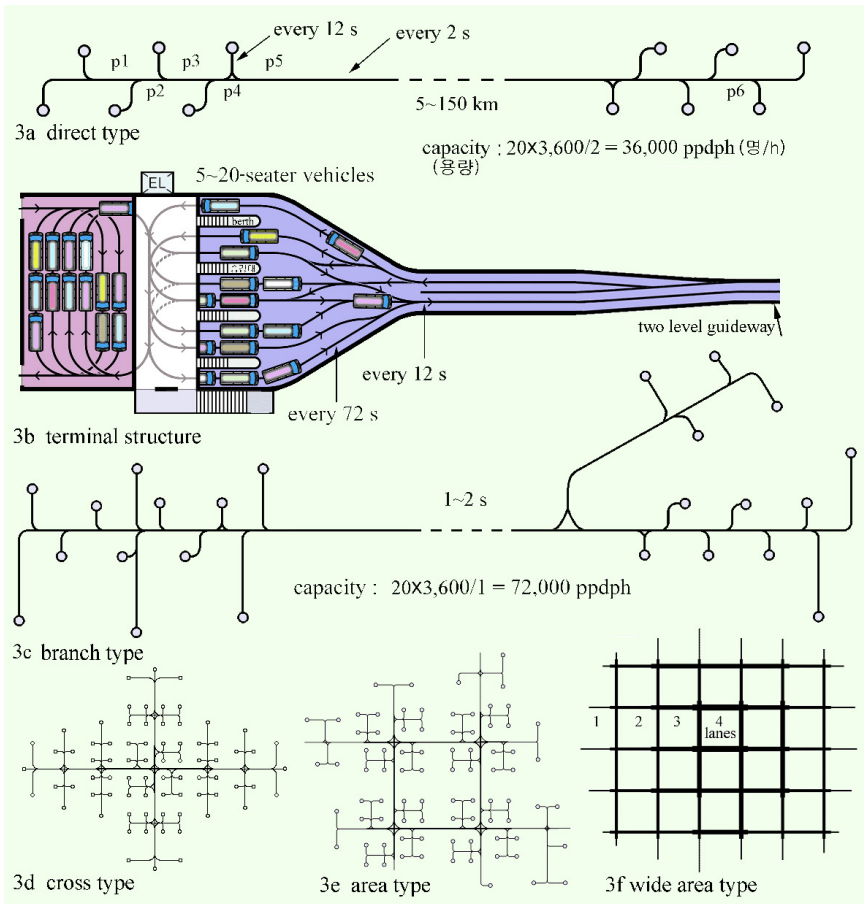
Ⅲ. 대용량 교통수단

1. 노선구성과 운송용량

차량은 승용차와 승합차로 5~20인승을 혼용하여 운영하는 것이 가능하며 노선 내 터미널 개수가 많아질수록 5인승 승용차의 수를 늘려 운영하고, 차량은 안전하게 자동운전 될 때까지 숙련된 운전자로 운행한다. 운전자 대신 차량이 자동 운전 되면, 운행간격을 축소시켜 더욱 빈번한 운행이 가능할 것이며 운행간격을 고속도로보다 2배 단축하면 운송용량과 효율은 2배로 커진다. 운행 간격이 넓으면 안전하고 통제도 쉽겠지만 간격이 좁을수록 운송용량은 커진다.

예를 들어 인접한 두 도시 간에 각각 6개씩의 터미널을 가진 두 개의 지선이 <그림 3>의 3a와 같이 왕복차선으로 직결되어 있다면 10회 이내의 합류 후에 10회 이내의 분기만으로 운행되므로 제어방식은 간단할 것이다. 20인승 차량이 <그림 3>의 3b와 같은 한 터미널에서 3a와 같은 노선에 있는 하나의 도착터미널을 향해 72초마다 출발하면 6개의 도착터미널로는 매 12초마다 출발할 수 있다. 6개의 출발터미널에서도 순차적으로 출발하면 본선에서는 2초마다 한 대씩 운행되고 운송용량은 36,000명/h가 된다.

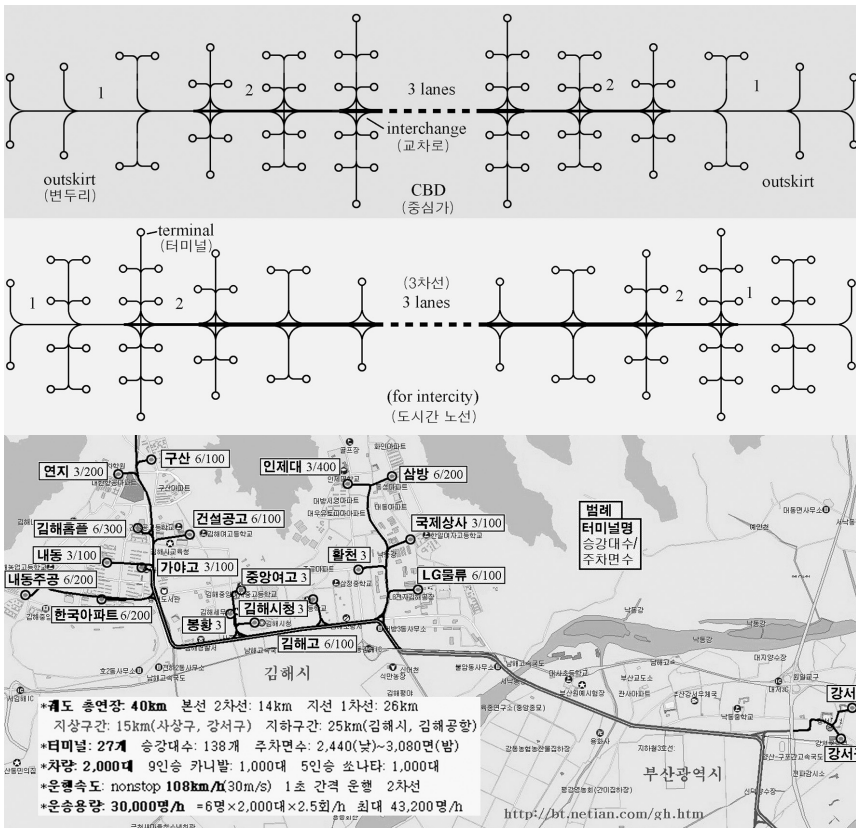
그림 3a의 P1부터 P6까지의 본선속도를 일정하게 무정차 90km/h(25m/s)로 유지하면 50m 간격으로 안전하게 운행될 것이며 차량들이 각각의 터미널에서 P5 지점의 도달순서에 맞게 정확한 시각에 출발되면 순조로운 고빈도운행이 이행될 것이다. 여기서, 차량이 40인승이면 운송용량이 72,000명/h가 되거나 운



〈그림 3〉 다양한 시스템 구성

행간격이 100m로 되어 운송용량이 크고 안전한 교통수단이 구성된다. 지선에 많은 터미널과 승강대가 병렬로 배치된 상기의 구조들은 고빈도운행을 하기에 효율적이며 고빈도운행은 운송용량을 효과적으로 증대 시킬 수 있음을 알 수 있다. 50m나 100m 간격의 운행은 운전자에 의한 운전도 가능한 간격이며, 현재의 기술수준으로도 궤도 내에서의 자동운전이 무난한 간격과 조건이다.

궤도의 본선은 물론 터미널과 지선은 필요한 만큼 증설될 수 있으며 입체교차 궤도를 이용하여 다른 방향의 궤도를 연장해 낼 수도 있다. 〈그림 3〉의 3c는 터미널이 12개씩으로 증설된 형태인데, 터미널이 증가할수록 행선지는 더욱 다양화되며 접근성이 향상된다. 소규모 터미널은 2개의 승강대만으로도 운영되며 행선



〈그림 4〉 노선구성 사례

지가 20개 이상이면 10인승 이하가 더 효율적일 수 있고, 수요가 많은 쪽에 더 자주 배차한다. 3d, 3e 및 3f는 케도 및 지선을 확장하고 입체교차로를 사용하여 넓은 지역에 건설이 가능함을 나타낸다.

차량은 승객이 있을 때만 운행하는 수요대응(On Demand) 방식으로 운영하며 24시간 승차대기 한다. 도시에 건설 시 터미널의 분산설치로 인해 터미널의 개수가 많아지고 승객이 항상 터미널에 도착 즉시 대기 중인 차를 탈 수 있다면 한 사람만 타고 운행하는 경우도 많을 것이므로 5인승 위주로 차량을 운행하여 손실을 줄이고 편의성을 높이는 것이 좋다. 대량생산 되는 5인승 승용차는 우수한 성능을 가진 저렴한 차량이며, 차량은 분기와 합류, 자동운전이 가능하다면 어떤 동력방식도 운행가능 하다.

지하철이나 경전철 대신 노선을 구성한다면 〈그림 4〉와 같이 구성할 수 있으

며, 터미널의 위치, 개수, 크기를 필요에 맞게 조절할 수 있고 차선 수를 늘려 운송용량을 증대시키는 물론, 궤도의 전 구간을 충분하고 적절한 용량으로 설계할 수 있다. 또한, 접근성이 우수하므로 연계교통수단으로도 적격이다. 터미널은 승강대가 1개인 초소형까지 용도와 용량에 맞게 설치 및 증설이 가능하며 터미널 설치위치의 유연성은 아파트 엘리베이터에서 회사나 학교, 백화점의 엘리베이터 앞까지 무정차로 연결하는 등의 문전(door-to-door) 서비스의 실현도 가능하게 한다.

2. 다양한 노선구성

직진성, 정체 가능성 등에서 궤도가 고속도로와 동등 이상의 여건이면 본선에서의 차량들은 108km/h(30m/s) 내외의 속도와 2~0.5초 간격의 주행이 가능할 것이다. 비슷한 여건인 0.37초 Headway(운행간격)의 자동운행은 97년 8월 10일 미국 캘리포니아 15번 도로에서 실현되었다³⁾(Shladover, 1997).

궤도바닥이 평면이고 고속도로처럼 차선변경이 가능하여 다차선 설치가 가능한 지선형대중교통의 구간용량은, 10인승으로 1초 간격 운행에 5차선이면, 10인승 \times (3600초/1초) \times 5차선 = 18만 명/h의 용량이 되고 0.5초 간격에 3차선이면 21만 명/h의 용량이 된다. <그림 3>의 3g처럼 그물 망 형태로 구성 가능한 BT의 전체 통행량을 산출하면 최대운송용량은 정원 및 유효승강대수에 비례하고 승차 시간에 반비례한다. 예를 들어 8개의 승강대 중 6개가 혼잡방향(하차승객이 많을 때는 6개는 하차대, 2개는 승차대로 이용)으로 유효승강대수가 6개인 터미널이 전체 교통시스템 내에 500개이고 평균승차인원이 8명, 승차시간이 30초라면, 6개 \times 500개 \times 8명 \times (3600초/30초) / 2 = 144만 명/h의 용량이 된다. 여기서 2로 나눈 이유는 승강대 2개당 1통행이 되기 때문이다. 이때, 초당 50대의 운행으로 400명이 이동되며 시스템 내에 최소 50차선(1초 간격 운행), 혹은 25차선(0.5초 간격 운행)이 필요하다.

지선형대중교통은 구간최대용량이 21만 명/h이며, 승강대 개수, 차량정원, 본선 차선 수, 운행간격 등을 조절하여 요구되는 용량을 맞출 수 있는 가변용량 교통수단이다. 러시아워에는 승객들을 방면별로 합승 시켜 환승역으로 보내고, 환승역에서는 한 방면으로 가기 위해 인근 터미널에서 보내진 승객들을 행선지별로 합승 시키며, 터미널들은 환승역 기능을 병행한다. 승객들의 한차례 환승을 통해 차량들이 정원을 채워 운행하게 되며, 러시아워마다 최대용량에 가깝게 효율적으

3) 105km/h, 6.4m 간격, 7대 편대주행, 10.7m 차두간격.

〈표 1〉 구간 운송용량 (10인승 운행의 경우, 명/h)

차선 수 운행간격	1차선	2차선	3차선	4차선	5차선
2초	18,000	36,000	54,000	72,000	90,000
1초	36,000	72,000	108,000	144,000	-
0.5초	72,000	144,000	216,000	-	-

로 운영할 수 있게 된다.

지선형대중교통은 최소 2개의 지선만으로도 운행 가능하며 필요에 따라 지선 및 터미널, 본선을 계속 증설해 나갈 수 있고, 통행량이 많은 구간은 다차선으로 구성하여 수백 개의 지선을 연결한 대형 교통수단도 가능하게 된다. 궤도의 직진성이 좋아서 주행속도를 높이면, 이동속도, 차간거리, 운송용량은 증가되고, 소요 차량대수와 차선 수는 감소된다. 지선형 대중교통은 무정차 고속이동과 편안한 좌석, 요구대응방식 운행, 자유로운 터미널 위치 및 크기선정으로 인한 접근성 향상, 고빈도운행으로 인한 고수익의 가능성 또는 낮은 건설비로 인한 낮은 요금, 가변용량, 대용량 교통수단의 장점을 갖게 될 것이다.

10인승 차량을 운행할 경우 차선 수별, 운행간격별 구간 운송용량은 〈표 1〉과 같고, 5인승 차량일 경우 용량은 반이 되며 20인승은 2배가 되어 넉넉한 용량이고, 소형화물의 운송도 가능하다.

3. 이중수단

자동차가 궤도를 통해서 이동 가능하도록 하는 교통방식인 이중수단(Dual Mode)(Schneider, 2004)이 신교통수단 연구의 한 축을 이루면서 다양한 방식의 시도가 진행되고 있다. 승객을 최종목적지까지 수송하지 못하는 궤도교통수단의 단점이 부각되고, 자가용이 보편화되면서 이중수단은 미래교통의 당연한 지향점으로 보인다. 다만, 아직까지 실용적인 이중수단 교통수단이 제시되지 않아 그 가능성을 인정받지 못하고 있다.

그러나 지선형대중교통 차량은 가장 진보된 차종인 승용차를 기본 차량으로 채택하고 있어서, 승용차의 부가적인 대량수요를 창출함은 물론, 도로를 주행하던 자가용 승용차가 궤도를 이용하여 고속주행 할 수 있다. 이때, 궤도이용을 사전 승인 받은 자가용은 〈그림 1〉의 터미널 외부통행로(external path)를 통해 궤도를 이용하게 된다. 자가용이 궤도를 통하여 목적지 인근 터미널까지 무정차 고속 주행하고, 최종목적지까지 일반도로를 통해 이동하면 바람직한 교통형태가 실

현되는 것이고 실용적인 이중수단이 될 것이다.

시간당 100,000명 이상의 승객을 빠르고 편하게 운송함은 물론, 자가용에게 신속 이동할 수 있는 새로운 통로를 제공하게 되면 기존의 도로교통도 급격히 원활해질 것이다. 지선현대중교통은 대용량교통수단이어서 대도시에 적합하지만, 이중수단이 가능하고 접근성이 좋으므로 교통수요가 있는 어느 곳이나 용도와 용량에 맞게 건설되어 편리하고 빠른 교통서비스를 제공하게 될 것이다. 지선현대중교통이 주 통행수단이 되면 차량들은 고가나 지하를 통해 고속이동 되고, 지상의 도로는 차량들이 서행으로 근거리를 이동하거나 주차하는, 보행자 우선의 조용하고 평화로운 공간이 될 수 있다.

IV. 결론

많은 장점을 가진 다양한 신교통수단 들이 개발되었지만, 편의성 등은 개선된 반면 가장 중요한 특성 중 하나인 운송용량이 작아 실용화가 지연되고 있다. 궤도교통수단에서 운송용량증대의 유력한 방안 중 하나는 운행빈도를 증대 시키는 것이다. 본 논문은 고빈도로 운행되는 교통방식인 고속도로와 유사한 구조의 궤도를 검토하였다.

터미널을 본선이 아닌 지선에 설치한 구조는 무정차 운행을 가능하게 하고, 지선 내에서 여러 개로 분산된 터미널은 접근성을 향상시키며 지선 내 수십 개의 병렬배치 된 승강대는 고빈도운행을 가능하게 한다. 교행방향이 2층으로 구성된 궤도의 구조는 분기로와 교차로 구조를 간단하게 하고, 그 설치면적을 줄여 도심 건설에 유리하며 회전반경이 커져서 차량의 고속통과가 가능해진다. 궤도바닥이 평면인 구조는 차량의 분기, 합류 및 차선변경을 용이하게 하고 교통량이 많은 도심구간은 다차선을 설치하여 궤도의 전 구간을 충분하고 적정한 용량으로 설계할 수 있게 된다. 일반 승용차를 궤도차량으로 채택하여 성능이 우수하고 저렴하며, 차선변경이 용이하여 다차선 궤도를 설치함은 물론, 자가용의 궤도이용을 현실화한 이중수단을 실현시킨다.

고속으로 고빈도 운행 되는 대용량교통수단인 지선현대중교통은 구간 최대 21만 명/h의 용량이고, 시스템 전체용량은 100만 명/h 이상도 가능하여 다양한 교통수요를 모두 충족시킬 수 있는 가변용량 교통수단이며, 따라서 고빈도운행이 가능한 구조는 대량운송이 가능함을 알 수 있었고, 충분한 크기의 용량은 편의성을 충분히 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

침두 시에는 합승을 통해 차량정원을 채워 운행하며 비침두 시에는 소형화물을

운송하여 더욱 효율적으로 운영 할 수 있다. 접근성이 우수하면서 무정차 고속이동, 좌석제, 저렴한 요금, 24시간 운행대기 등의 편의성을 갖춘 대용량교통수단은 현재의 교통난을 크게 완화시킬 것이다.

향후, 본 논문에서 제시된 운송용량 등의 효과는 각종 변수를 고려한 시뮬레이션이나 시험구간 건설을 통한 실험, 실제적인 상업운행을 통해 검증되고 보완, 강화되어야 할 것이며 기존 교통수단에 미치는 영향을 연구해야 할 것이다. 본 논문의 한계는 제시된 내용을 현실에 적용하기 위해 짧은 차두간격 내에 차량의 진입 시 안전 확보 문제, 안전사고 대책, 밀폐궤도의 환기 문제 그리고 2층형 궤도건설에 따른 경제성 문제 등의 문제를 충분히 언급하지 못한 점이다.

참고문헌

1. 박태진 · 최동호. (2003), "A High Capacity Transit of Structure for a High-Frequency Service".
<http://bt.netian.com/paper.htm>
2. 이종호. (1998), "경량전철의 국내 적용 가능성 검토", 대한교통학회지, 16권 4호, p.249~264.
3. Reynolds, D Francis. (2001), "The End of Traffic Jams: A Transportation System for the Future".
<http://faculty.washington.edu/jbs/itrans/reynoldsfuturist.htm>
4. Schneider, Jerry. (2004), "Comparison Matrix of Ready and Emerging Innovative Transportation Technologies".
<http://faculty.washington.edu/jbs/itrans/tehtable.htm>
5. Schneider, Jerry. (2004), "Dualmode Transportation Concepts".
<http://faculty.washington.edu/jbs/itrans/dualmode.htm>
6. Shladover, Steven. (1997), "AHS Demo 97 Complete Success", Intellimotion, 6권 3호.
<http://www.path.berkeley.edu/PATH/Intellimotion/intel63.pdf>