

소형궤도차(PRT) 가이드웨이의 수송용량에 대한 고찰

Contemplation of PRT Guideway Capacity

송달호* 김종현** 김남호***
Song, Dahl Ho Kim, Jong Hyoun Kim, Nam Ho

ABSTRACT

본 논문에서는 PRT 시스템의 시장성 검증에 앞서 시스템의 수송용량을 정확히 정의하기 위한 노력의 일환으로 우선 가이드웨이에서의 용량에 대해서 고찰하였다. 가이드웨이 수송용량을 고찰함에 있어서는 유격 및 시격의 계산을 통한 선로의 처리용량 개념을 가이드웨이 전체의 용량을 구하는데 확장 적용하였다. 이때에, 노선 전체에서 운행되는 차량의 총 대수, 차량의 가이드웨이 점유율 등이 고려되었다.

주행속도가 빨라질수록 유격의 증가로 운행 가능한 차량의 수효가 줄어들고, 그 결과로 가이드웨이 처리용량의 증가율이 둔화된다. 특정한 시격과 가이드웨이 내에 차량대수가 정해지면 선로 처리용량 특성이 정해진다. 가이드웨이 내 차량 대수의 증가에 따른 최대 운행회수와 유격에 따른 최대 운행회수는 일정한 주행속도에서 교차하며, 교차하는 점에서 운영 범위가 결정된다. 이 교차점을 기준으로 주행속도가 증가하면 유격의 제약에 의하여 최대 운행의 증가율이 둔화되고, 주행속도가 떨어지면 차량의 수효가 부족하여 평균 유격은 멀어지고 선로 처리 용량은 감소함을 알 수 있었다.

Keywords : 소형궤도차(PRT), 수송용량(Capacity), 가이드웨이(Guideway), 유격(Headway Length), 시격(Headway), 제동감속도(Braking Deceleration)

1. 서론

최근 국민들의 소득이 급속히 신장되고 생활수준이 높아짐에 따라 이제는 승용차가 생활필수품이 되었다. 차량은 하루가 다르게 기하급수적으로 늘어나 이제 도심지역은 어디를 가나 밀려드는 차량으로 교통이 항상 정체되고 있다. 이에 따른 경제적 손실이 2002년 기준 22조 1000억 원으로 추정되고 있어서 교통문제의 해결이 시급한 과제로 대두되고 있다. 정부 및 지방자치단체에서는 오래전부터 이러한 문제를 해결하기 위하여 다양한 노력들을 해오고 있다.

신교통수단으로 주목받는 대표적인 것 중에 하나가 소형궤도차(Personal Rapid Transit) 시스템이다. PRT 시스템은 기존의 고정노선구간만을 왕복 운행(line haul system)하는 교통수단과는 다른 운영 특성을 갖는다. PRT 시스템의 특징은 네트워크 형태의 노선(network system)에서 운행된다. 그리고 주행선로와는 분리된 역사(off-line station)를 갖는다. 이러한 특징으로 인하여, 정차하고 싶지 않은 역에서는 본선(main line)을 주행함으로써, 도중에 정차하지 않고 목적지 역까지 도착이 가능하다. 이러한 특징 등으로 PRT 시스템은 기존의 고정노선 왕복형 교통수단과는 다른 관점에서의 수송용량에 대한 고찰이 필요하다.

본 논문에서는 PRT 시스템의 시장성 검증에 앞서 시스템의 수송용량을 정확히 정의하기 위한 노력의 일환으로 우선 가이드웨이 용량(guideway capacity)에 대해서 고찰한다. 우선 유격(headway ; length) 및 시격(headway ; time)을 고려하여 가이드웨이에서의 처리용량을 계산하였고, 다음으로 노선 전체에서 운행되는 차량의 총 대수(fleet size), 차량의 가이드웨이 점유율(guideway occupancy)을 고려한다.

* 우송대학교, 교수, 정회원
** (주)스카이카, 선임연구원, 정회원
*** (주)스카이카, 대표이사, 정회원

2. 가이드웨이 용량

선로의 처리용량의 개념으로부터 출발하여 이 개념을 가이드웨이 전체의 처리용량을 구하는데 확장 적용한다. 처리용량의 계산에는 속도, 이동 거리, 가이드웨이 길이, 네트워크 내의 총 차량 대수, 유격 및 시격이 고려된다.

선로의 처리용량을 증가시키기 위하여 주행속도를 증대시키는 데는 한계가 있다. 선로의 처리용량은 주행속도의 함수이고 주행속도는 유격과 시격의 함수이기 때문에 결국은 안전을 위한 최소한의 유격과 시격을 확보하기 위하여 선로의 처리용량은 제한을 받게 된다. 유격과 시격에 대한 식은 다음과 같다.

$$\text{유격} = \text{차량길이} + (\text{판단시간 동안 이동거리} + \text{제동 적용 거리} + \text{긴급 제동 거리}) + \text{마진}$$

$$\text{시격} = \text{유격} / \text{주행속도}$$

2.1. 차량 유격 및 시격의 계산

극히 드물지만 차량의 심각한 파손 또는 제동장치의 오동작 등으로 선행차량이 급감속하는 경우 후속 차량은 충돌을 피하기 위하여 급제동하여야 한다. 이런 경우의 제동감속도는 아주 높을 것이다. 제동 감속도의 값은 일반적으로 노면 상태, 주행 상태, 기후 등 여러 가지 요인에 의해서 복합적으로 변하게 된다. 그러나 제동력을 바닥과 바퀴사이의 마찰로 얻는 것이 아니라, 선형전동기에 의한 제동력과 부가적인 기계적 제동장치를 사용하는 차량에서 최대로 급감속되는 상황은 브레이크 장치의 오동작에 의하여 발생할 가능성이 가장 높다. 따라서 고장난 차량의 최대 감속도는 기계적 제동장치의 최대 제동력에 의한 가속도인 $0.7g$ 로 가정하여 문제를 검토하였다. 충돌을 피하기 위하여 확보해야할 유격을 결정하는 가장 중요한 인자는 선행차량의 사고상황을 감지하여 후속차량의 제동장치가 작동할 때까지 걸리는 공주시간 τ 이다. 공주시간 τ 는 판단시간과 제동 적용시간의 합으로서, PRT 시스템의 경우 통상 $0.2 \sim 0.4 \text{ sec}$ 를 가정한다. 고장난 선행차량의 제동감속도를 a_f 라 하고 후속차량의 제동감속도를 a_e 라 하자. 선행차량이 고장으로 급감속을 시작하는 시간이 0 일 때, 후속차량이 제동을 시작하는 시간을 τ 고장 차량이 정지하는 시간을 T_f 후속차량이 정지하는 시간을 T_e 라 하면, 그림과 같이 두 대의 차량에 대한 속도-시간 관계를 나타낼 수 있다.

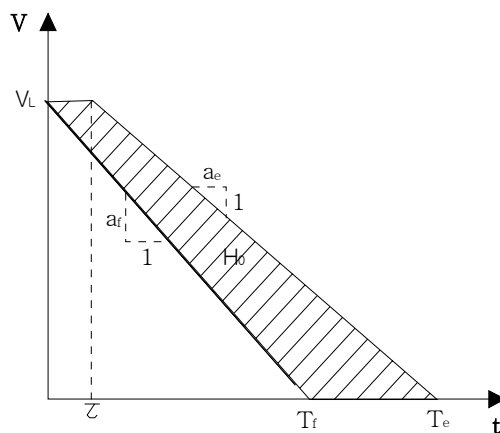


그림 1. 사고차량과 후속차량의 시간-속력 관계

그림 3에서 보듯이 고장난 선행차량의 가속도 a_f 와 후속차량의 가속도 a_e 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_f = \frac{V_L}{T_f} \text{로부터 } T_f = \frac{V_L}{a_f} \quad (\text{식 1})$$

$$a_e = \frac{V_L}{T_e - \tau} \text{로부터 } T_e = \frac{V_L}{a_e} + \tau \quad (\text{식 2})$$

그리고 빗금 친 면적 H_o 는 두 차량 간 이동거리의 차이를 말하며, 이것이 사고 이전에 확보되었던 차간거리보다 작으면 충돌을 피할 수 있다.

$$\begin{aligned} H_o &= V_L T_e - \frac{1}{2} T_f V_L - \frac{1}{2} V_L (T_e - \tau) \\ &= \frac{1}{2} V_L^2 \left(\frac{1}{a_e} - \frac{1}{a_f} \right) + V_L \tau \end{aligned} \quad (\text{식 4})$$

유격(headway length) H 는 H_o 와 차량의 길이 L_v 의 합에 마진(여유)을 둔 것으로 다음과 같다. 이때 마진은 H_o 에 일정 마진율을 곱하여 정하며, 마진율을 10 % 정도로 계산하는 것이 일반적이다.

$$\begin{aligned} H &= (1 + \text{margin ratio}) \times H_o + L_v \quad (\text{식 5}) \\ &= 1.1 \times \left[\frac{1}{2} V_L^2 \left(\frac{1}{a_e} - \frac{1}{a_f} \right) + V_L \tau \right] + L_v \end{aligned}$$

고장난 선행차량의 감속도 a_f 와 급제동하는 후속차량의 감속도 a_e 는 모두 PRT의 최대 정지가속도인 0.7 g로 가정한다. 공주시간 τ 는 0.2~0.4 sec의 범위에서 변화시켜가며 유격을 계산한다. 차량의 길이는 2.25 m로 가정한다. 그림 2와 그림 3은 위 식들에 따른 결과를 나타낸다. 그림들에서 보는 바와 같이 주행속도가 빨라질수록 유격은 길어지고 시격은 짧아진다.

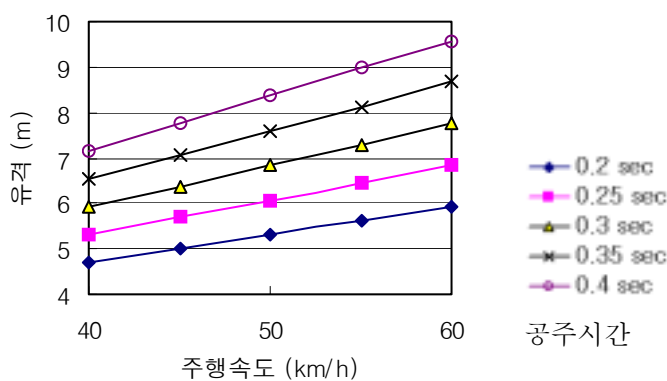


그림 2. 주행속도와 유격

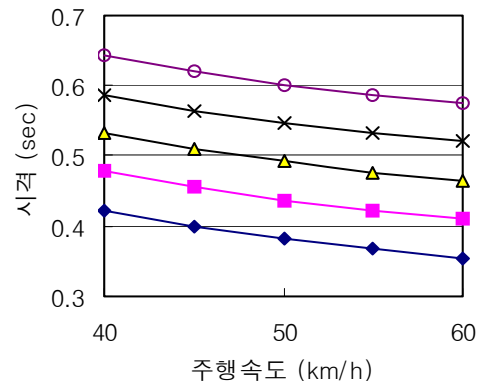


그림 3. 주행속도와 시격

최대 선로 처리 용량은 다음 식과 같다.

$$\text{최대 선로 처리용량} = 1 \text{ hour} / \text{시격} \quad (\text{식 6})$$

가이드웨이의 최대 처리용량은 그림 4와 같다.

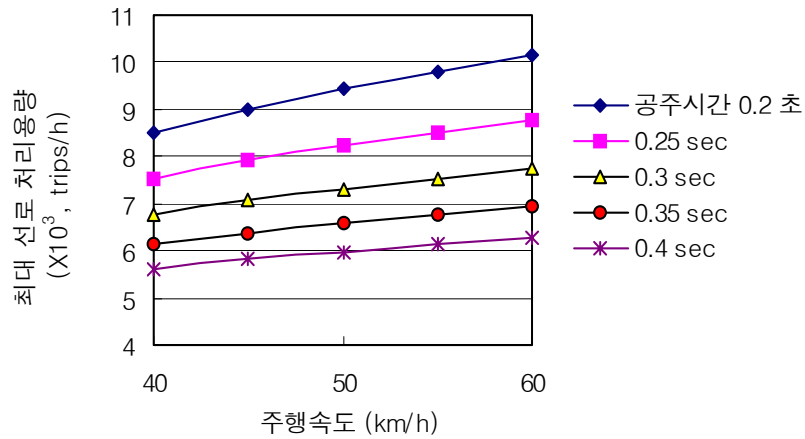


그림 4. 최대 선로처리용량

그러나 가이드웨이에는 합류점이 있으므로 최대 선로처리 용량은 위에서 계산한 선로용량의 1/2로 생각하는 것이 합리적일 것이다.

2.2. 차량의 평균 운행속도와 시간당 이동차량 대수

가이드웨이의 일정 구간이 소화할 수 있는 시간 당 운행 회수는 평균 운행속도와 관련이 있다. 전체 운행차량 수가 정해져 있을 때, 차량의 평균 운행시간을 T_{mt} , 평균 주행시간을 T_{av} , 평균 승차대기시간을 T_{dw} , 시간당 운행 수를 N_{tw} 라 하면, 시간당 운행 수와의 관계는 식 9와 같다.

$$T_{mt} = T_{av} + T_{dw} \quad (\text{식 7})$$

$$N_{tw} = 1/T_{mt} \quad (\text{식 8})$$

$$\text{시간당 차량의 운행 수} = \text{전체 운행차량 수} \times N_{tw} \quad (\text{식 9})$$

그림 5는 평균운행거리는 0.7~1.6 km로 일정 가이드웨이 구간에서 운행되는 차량의 수효(fleet size)는 300 대, 차량 당 평균 역내 승차대기시간은 13 초를 가정하여 계산한 결과이다. 이 시간당 차량의 운행 수를 차량 대수가 정해진 경우의 가이드웨이의 처리용량으로 생각할 수 있다.

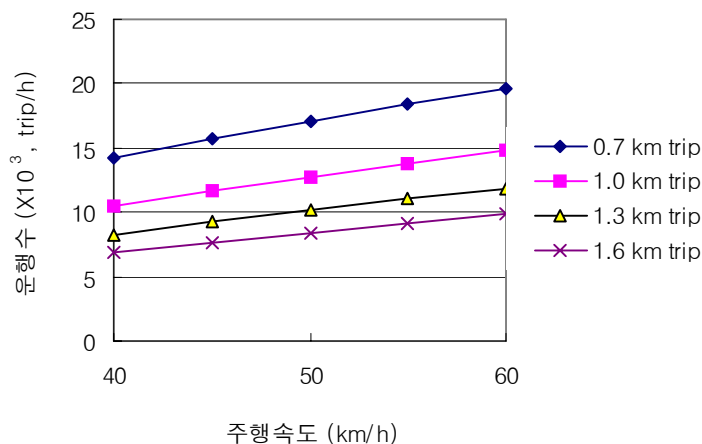


그림 5. 가이드웨이 처리용량 (전체 운행차량 300 대)

2.3. 이동속도와 네트워크의 차량 총 대수

유격과 시격은 시스템의 처리용량을 결정하는 중요한 제한요소이다. 안전을 보장하기 위한 최소 간격만을 유지하며, 가이드웨이 위에 차량이 줄지어 진행한다면 총 운행차량 대수는 단순히 전체 노선의 길이를 유격으로 나눈 값이 된다. 그러나 현실적인 계산에는 매끄러운 차량의 소통을 위한 여유 공간을 염두에 두어야 한다. 특히 합류를 위한 공간이 필수적이다. 그림 6은 공주시간 0.3초, 긴급 제동감속도 0.7 g를 가정하여, 총 연장 3 km의 구간에 필요한 차량의 수효를 가이드웨이 점유율 값을 변화시켜 가며 계산한 결과이다. 그림 6에 의하면 차량의 속력이 느릴수록, 또한 차량에 의한 가이드웨이 점유율이 높을수록, 시스템의 운행에 필요한 차량의 수효가 많아짐을 알 수 있다.

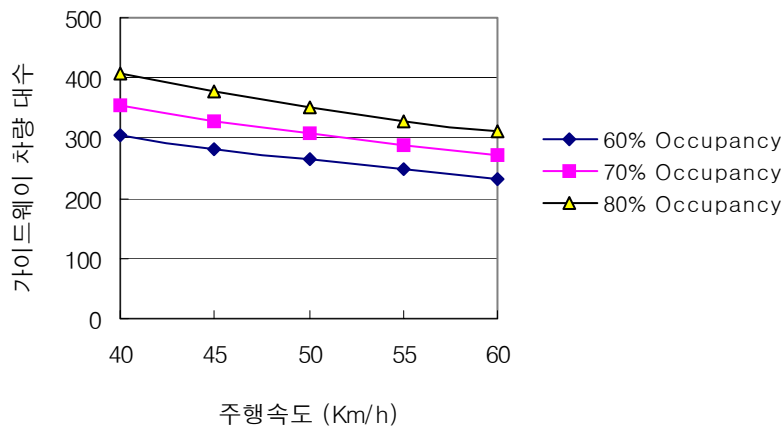


그림 6. 속도에 따른 차량의 수요

가이드웨이 점유율은 80 %가 현실적으로 가장 적정한 것으로 알려져 있다. PRT의 주행속도 45 km/h 이고, 가이드웨이의 길이를 3 km라 하면, 구간에 필요한 차량의 대수는 376.5 대, 즉 약 370 대이다.

2.4. 이동속도와 가이드웨이의 처리용량

공주시간을 0.3 초, 가이드웨이 점유율은 80%로, 평균 주행거리는 1.5 km로 가정하였을 경우에 유격과 가이드웨이 내에 최대 차량 대수를 계산하여 시간 당 가능한 최대 운행 수를 계산한 것이 그림 7이다. 다시 말하여 주행속도의 변화에 따라 적정한 가이드웨이 내의 차량 대수가 가변적으로 변하는 시스템에 대한 시간당 최대 운행을 계산한 것이다.

만일, 차량의 수효가 고정되어 있는 경우에 대하여 시간당 최대 운행 수를 계산하면 그림 8과 같다. 주행속도와 가이드웨이 내에 차량 수가 증가함에 따라 시간당 운행수가 증가함을 보여준다.

그림 9는 그림 7과 그림 8을 하나의 그림에서 나타낸 것이다. 세 개의 실선은 차량의 수효가 고정되어 있는 경우 가이드웨이 처리용량을 나타낸다. 유격의 변화에 따른 운행의 변화를 나타내는 점선은 유격에 의하여 제한된 가이드웨이 처리용량을 나타낸다.

일단 특정한 유격과 가이드웨이 내에 차량 대수가 정해지면 주행선로의 처리용량은 그림 9와 같이 정해진다. 가이드웨이 내에 차량 대수가 350 대일 때 가이드웨이 내에 차량 대수에 따른 최대 운행회수와 유격에 따른 최대 운행회수는 대략 50 km/h의 주행속도에서 교차한다. 따라서 두 선의 아래 영역이 운영 범위가 된다. 주행속도가 50 km/h 이상으로 증가하면 유격의 제약에 의하여 차량의 최대 운행대수의 증가율이 둔화되고, 주행속도가 50 km/h 이하로 떨어지면 차량의 수효가 부족하여 평균 유격은 커지고 선로의 처리용량은 감소한다. 주행속도를 60 km/h로 증가시켜 선로처리용량을 증대시키려면 가이드웨이 내의 차량 대수를 300 대로 감소시켜야 함을 알 수 있고, 주행속도 40 km/h에서 최대 선로처리용량을 얻기 위해서는 가이드웨이 내의 차량 대수를 400 대로 증가시켜야 함을 알 수 있다.

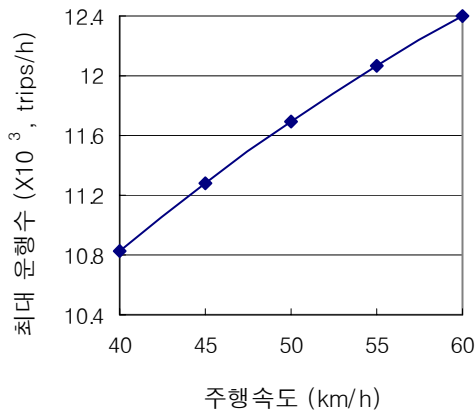


그림 7. 가이드웨이 처리용량

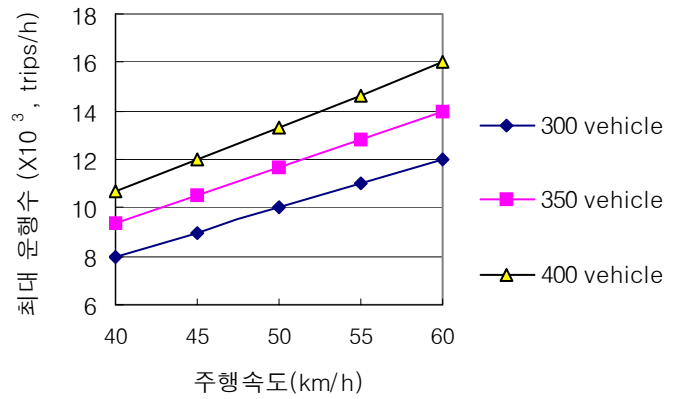


그림 8. 고정수요인 경우의 가이드웨이 처리용량

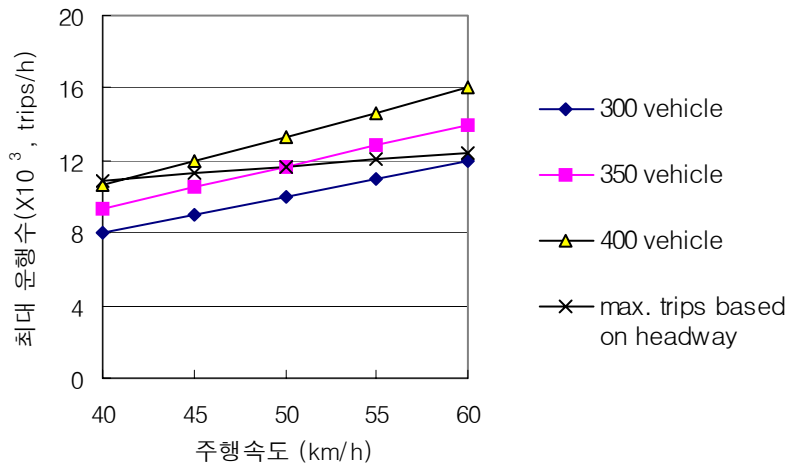


그림 9. 시간당 최대 운행 수

교통수요가 많지 않은 off-peak 시간대에는 그 시간대의 수요량을 충족시킬 수 있는 최소량의 차량만을 운행하며 나머지는 정기적인 정비를 위하여 운행하지 않으면서 운행하는 차량의 수효를 더욱 줄이기 위하여 주행속도를 증가시키는 방법을 쓸 수 있다.

3. 결론

운행속도가 빠를수록 또한 이동거리가 짧을수록 가이드웨이에서의 처리용량은 증가한다. 차량의 속력이 느릴수록, 차량에 의한 가이드웨이 점유율이 높을수록, 시스템의 운행에 필요한 차량의 수효가 많아진다. 주행속도가 빨라질수록 유격의 증가로 운행 가능한 차량의 수효가 줄어들고, 그 결과로 가이드웨이 처리용량의 증가율이 둔화된다. 특정한 시격과 가이드웨이 내에 차량대수가 정해지면 선로 처리용량 특성이 정해진다. 가이드웨이 내 차량 대수에 따른 최대 운행과 유격에 따른 최대 운행은 가이드웨이 내 차량 대수가 일정한 수준의 일정한 주행속도에서 교차하며 교차하는 점에서 운영 범위가 결정된다. 이 교차점을 기준으로 주행속도가 증가하면 유격의 제약에 의하여 최대 운행의 증가율이 둔화되고 주행속도가 떨어지면 차량의 수효가 부족하여 평균 유격은 멀어지고 선로 처리 용량은 감소한다.