

A Study on the Capacity of the Off-line Station for PRT System

이 준 호[†] · 정 락 교^{*}
(Lee Jun-Ho · Jeong Rac-Gyo)

Abstract - In this study we deal with a simple computer simulation algorithm to decide the PRT station capacity. PRT system is different from the conventional rail traffic system in such point that the station is off-line so as to guarantee a very short headway. This characteristic has correlation with the accurate prediction of the line capacity and with the scale of the off-line station. In this paper physical factors and vehicles per hour that are necessary to decide the off-line station scale and the off-line station capacity, respectively, are shown through a simple computer simulations.

Key Words : PRT, Off-line station, Line capacity, Vehicle operational control

1. 서 론

PRT 시스템의 기본 개념은 매우 짧은 운전 시격을 유지 하면서 출발지에서 목적지까지 무정차로 운전자 없이 자동 운행하는 것이며 이러한 요구조건을 만족하기 위해서 선행되어야 하는 것은 적절한 운행제어 알고리즘의 개발과 함께 설계된 노선에서 감당할 수 있는 수용용량을 적절히 산출하는 것이다 [1][2]. 수용용량의 산출을 위해서는 여러 가지 조건이 종합적으로 고려되어야 하며 특히 off-line 형태로 역이 설계되는 PRT 시스템에서는 시간당 수용할 수 있는 역의 규모 산출이 PRT 시스템의 효율성을 결정하는 중요한 인자라고 말할 수 있다 [3][4].

PRT 시스템은 현재 많은 나라에서 개발을 추진 중이거나 상용화 사업을 추진하고 있다 [5][6][7]. West Virginia 대학은 미 연방 정부의 자금지원으로 1970년대 중반 이후 세계에서 처음으로 PRT와 같은 개념의 GRT(Group Rapid Transit)를 대학구내에서 운영이 가능하도록 실용화 했으며 이 시스템은 특별한 안전사고 기록 없이 지금도 운영되고 있다. 1980년대에는 유럽 여러 나라와 미국등지에서 시스템 개발 및 실용화 사업을 추진해 왔으며 독일의 Cabintaxi, 영국의 Ultra, 미국의 Skyweb express 등이 대표적인 시스템 개발 업체이며, 최근에는 핀란드의 Techvillia Ltd., 미국의 MicroRail PRT, 싱가포르의 MonicPRT, 스웨덴의 Skycab, 한국의 Vectus 등이 활발한 실용화 사업을 추진하고 있다. 특히 영국의 Ultra 시스템은 영국 히드로 공항 5터미널과 주차장의 연계 교통수단으로 선정된 이후 2010년 상업운전을 눈 앞에 두고 있으며, 미국의 산호세 시 또한 공항연계 수단

으로 PRT 시스템을 선정된 이후 RFP 작성을 완료 하였다. 이와 같이 PRT 시스템은 연계교통 수단으로서 점차 세계적인 관심의 대상이 되고 있으며 우리나라의 경우도 각 지자체를 중심으로 도입 여부를 면밀히 검토 하고 있다.

본 논문에서는 off-line 형태로 구축되는 PRT 시스템 역사의 규모를 산정하기 위한 간단한 시뮬레이션 모델을 제시 한다. Off-line 역사의 규모 산정은 transition-in, platform, transition-out의 길이에 의해서 결정되어지며 그 중에서도 platform의 길이가 가장 중요한 결정인자가 된다. 시뮬레이션 모델을 구축하기 위해서 차량의 길이, 정차대의 길이, 정차대의 수, 플랫폼에서 최대 차량 속도, 문 개폐에 걸리는 시간, 승객의 승하차에 걸리는 시간, 불확실한 임의의 인자 등을 고려하였으며 간단한 시뮬레이션을 통해서 PRT 시스템 off-line 역사 규모 산정에 대한 예를 보인다.

2. Off-line 역 구조

미국 토목공학회 산하 APM(Automated People Mover) 표준사양에서 2010년 4월 승인한 PRT 시스템의 off-line 구역(section)에 대한 정의가 발표되었다. Off-line 구역은 제한된 속도로 자동 운전하는 가이드웨이 구역으로 정의하며, off-line 역이나 차량 보관 지역 등이 이에 해당한다. 그림 1은 PRT 시스템의 off-line 역의 개념적 구조를 보여 준다. PRT 시스템의 역은 주 가이드웨이에서 분기한 off-line 형태로 구성되어지며 이는 PRT 시스템의 고유기능인 짧은 운전시격확보와 주 가이드웨이 상에서 차량의 운행 효율성의 극대화를 달성하기 위함이다. Off-line 역은 transition-in 구간, platform, transition-out 구간으로 이루어지며 각각의 구간에는 차량의 성능을 고려한 규정 속도가 정해진다. 구간별 규정 속도는 역사의 규모를 정하는데 주요 인자로서 작용하며 특히 transition-in 구간에서의 규정 속도가 높을 경우는 platform에서 차량이 정차하는데 긴 체동거리를 필요

† 교신저자, 정회원 : 한국철도기술연구원 선임연구원

E-mail : jhlee77@krti.re.kr

* 정 회 원 : 한국철도기술연구원 책임연구원

접수일자 : 2010년 5월 6일

최종완료 : 2010년 5월 18일

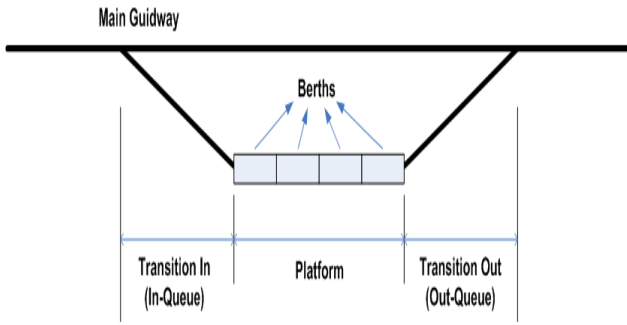


그림 1 Off-line 역의 개념적 구조
 Fig. 1 Conceptual configuration of the off-line station

로 하기 때문에 역사의 규모는 커질 수 있다. 따라서 역사의 규모 산출과 차량의 성능사이에는 매우 밀접한 관계가 있으며, 역사의 규모 산출시에는 다양한 시물레이션과 차량의 설계에 따른 정확한 차량의 성능과 역 후 구간별 규정 속도의 설정이 요구된다.

3. 수학적 모델

역사의 규모를 산정하고 시간당 역에서 수용할 수 있는 PRT 차량의 대수를 파악하기 위해서는 수학적 모델을 활용한 시물레이션 결과에 근거해서 판단할 필요가 있다. 역사의 규모를 산정하는 인자들 중에서 가장 중요한 부분은 역에서 수용할 수 있는 PRT 차량의 대수이며 이는 platform의 길이 또는 platform내의 berth 수 및 platform 내에서 차량 운행관련 시간에 의해서 결정되어 진다. 식 (1)은 역의 시간당 처리 용량을 나타낸다. 식 (1)에서 vehicle operation time은 초당 차량운행 간격, N_B 는 platform에서 berth의 수를 나타낸다. 따라서 $T_{operation}(N_B)$ 는 $T_{operation}$ 가 N_B 의 함수로서 N_B 가 많으면 초당 차량운행 간격은 길어지고, N_B 가 적으면 초당 차량운행 간격은 짧아지는 것을 의미한다. 따라서 식에서 보이는 것과 같이 platform에서 시간당 차량 처리 용량을 크게 하기 위해서는 platform의 berth 수를 많게 하거나, vehicle operation time을 짧게 하는 것이 필요하다. 하지만 위 두 가지 조건은 서로 상반된 의미를 내포하고 있기 때문에 여러 가지 상황 및 조건을 조사해서 최적화된 역사 규모 산정 조건을 도출하는 것이 필요하다.

$$S_{VPH} = \frac{3600 \times \text{berths}}{\text{Vehicle operational time}(T_{operation}(N_B))} \quad (1)$$

식 (1)에서 $T_{operation}(N_B)$ 은 위에서 언급한 것과 같이 N_B 의 함수로서 초당 차량운행 간격을 나타내며 platform 내에서 차량의 진행시간, 차량의 문의 열림과 닫힘에 걸리는 시간, 승객이 차량에서 내리고 타는데 걸리는 시간의 합으로 결정되어 진다. 식 (2)는 $T_{operation}(N_B)$ 를 나타낸다.

$$T_{operation}(N_B) = T_{forwarding}(N_B) + T_{(door-open-close)} + T_{(boarding-deboarding)} \quad (2)$$

식 (2)에서 차량진행 시간을 나타내는 $T_{forwarding}(N_B)$ 는 N_B 의 함수로서 berth의 수가 많으며 $T_{forwarding}(N_B)$ 는 길어지고 berth의 수가 적으면 $T_{operation}(N_B)$ 는 짧아진다. 따라서 $T_{operation}(N_B)$ 은 다음의 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$T_{forwarding}(N_B) = \frac{\text{Platform Length}}{\text{Max. vehicle speed on platform}} + \text{Uncertain time factor} \quad (3)$$

여기서 uncertain time factor는 예측하지 못한 차량의 지연 시간을 나타낸다.

4. 모의시험을 위한 영향인자의 결정

이상에서 살펴본 식을 통해서 역에서 소화할 수 있는 시간당 차량의 수를 결정하기 위한 모의시험을 수행하기 위해서는 모의시험에 영향을 미치는 영향인자들을 고려할 필요가 있다.

표 1 모의시험 영향인자

Table 1 Variables for the simulations

Factors	Values
Vehicle length	Variable
Berth length	Variable
Number of berth	Variable
Max. vehicle speed on platform	2.5 m/s = 9km/h
Door open/close time	6 sec
Deboarding/boarding time	9.5 sec or 10 sec
Uncertain time factor	2 sec

표 2에서 알 수 있는 것처럼 역의 차량 수용용량을 결정하기 위해서는 차량의 길이, berth 길이, berth 수, platform에서의 최대 차량 속도, 차량 문의 열리고 닫히는데 걸리는 시간, 차량에서 내리고 타는데 걸리는 시간, 예측하지 못한 시간 인자 등이 기본적으로 고려 되어야하며 특히 berth 길이의 결정은 차량의 길이와 차량 사이의 간격에 의해서 결정되고 차량의 길이는 차량의 제동 특성과 연관되어 있기 때문에 berth의 길이를 결정하기 위해서는 매우 다양한 시물레이션을 통해서 최적의 조건을 구하는 것이 올바른 접근 방법이다. 또한 berth의 수는 역의 차량수용 용량을 결정하

는데 있어서 매우 중요한 인자로서 berth 수의 많고 적음은 off-line 역의 규모를 정하데 있어서 직접적인 인자가 될 뿐만이 아니고 전체 PRT 노선의 경제성 및 효율성에도 영향을 미치는 중요한 영향 인자 이다. 본 논문에서는 임의의 다양한 berth 길이 및 임의의 berth 수에 대해서 시뮬레이션을 수행하고 이들 결과를 통해서 위에서 언급한 영향 인자들이 역의 수용용량 결정에 미치는 영향에 대해서 살펴본다.

표 2 berth 수, berth 길이, platform의 길이에 대한 관계
Table 2 Relations between number of berth, berth length, platform length

영향인자	Berth 수				
	1	5	10	15	20
S_{VPH} [VHP]	184	703	1084	1323	1487
Platform 길이 [m]	3.8	19	38	57	76

5. 모의시험

본 절에서는 앞 절에서 살펴본 내용들을 기반으로 모의시험한 결과에 대해서 다룬다. 그림 2는 platform의 berth의 길이에 대한 시간당 역의 차량 수용용량에 대한 것으로서 berth의 길이는 1[m]에서 5[m]까지 임의로 변화 시켰다. 또한 이러한 berth의 길이의 변화에 대해서 berth의 수를 1에서 20까지 변화 시켰다. 그림에서 알 수 있듯이 이것은 berth의 길이를 일정한 값으로 고정할 경우 시간당 역의 차량 수용용량은 berth의 수에 의해서 결정이 되고, berth의 수를 일정한 값으로 고정할 경우 시간당 역의 차량 수용용량은 berth의 길이에 의해서 결정되는 것을 의미한다. 일반적으로 PRT 차량의 길이는 3.6[m]정도이며 차량 간의 간격을 0.2[m]라고 하면 berth의 길이는 3.8[m] 이므로, 이때 시간당 역의 차량 수용용량은 berth의 수가 각각 1, 5, 10, 15, 20일 때 S_{VPH} 는 184[VPH], 703[VPH], 1084[VPH], 1332[VPH], 1487[VPH]의 값을 갖는다. 표 2는 이들의 관계를 보여 준다.

Berth의 길이, berth의 수, 역의 차량 수용용량사이에는 그림에서 보듯이 비례함수적인 관계가 성립하지 않으며 berth의 수가 많아지고 berth의 길이가 짧아질수록 역의 차량 수용용량은 지수함수적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 3은 berth 길이와 berth 수 및 platform의 길이에 대한 모의시험결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 platform의 길이는 berth의 길이 및 berth의 수에 비례해서 증가하는 것을 알 수 있다.

Off-line 역의 길이를 산정할 경우에는 berth의 길이와 berth의 수에 의해서만 결정되어지는 것이 아니고 그림 1에서 보는 것과 같이 transition-in 구간과 transition-out 구간도 함께 고려해야 한다. transition in/out 구간의 길이 산정

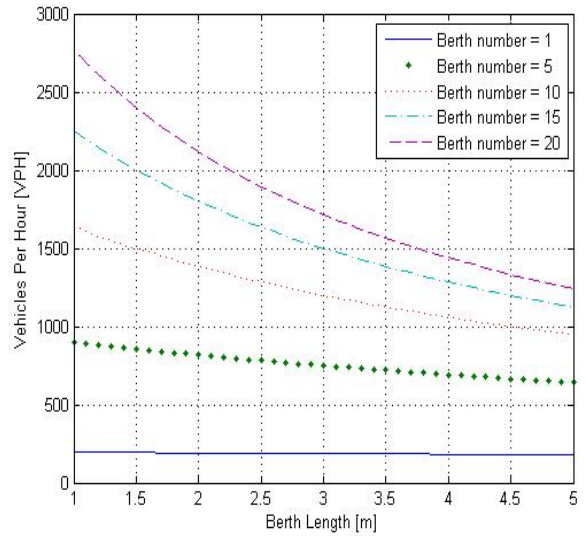


그림 2 Berth 길이, berth 수 및 역의 차량 수용용량
Fig. 2 Berth length, number of berth, station capacity

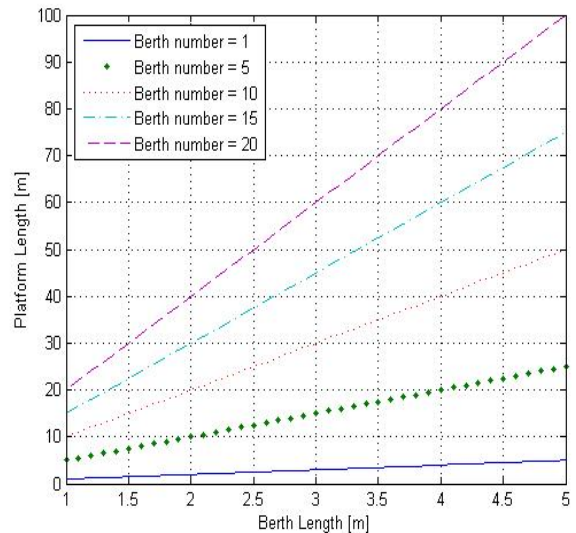


그림 3 Berth 길이, berth 수 및 platform의 길이
Fig. 3 Berth length, number of berth, platform length

은 PRT 차량의 성능과 밀접한 관계가 있다. 다시 말해서 PRT 차량의 제동 성능이 매우 우수하다면 transition-in 구간의 길이는 어느 정도 짧게 하는 것이 가능하지만 그렇지 않을 경우에는 PRT 차량의 제동특성에 맞는 transition-in 구간의 길이를 확보해야 한다. 이와 같이 transition-in 구간과 transition-out 구간에 대한 설계 규모는 차량의 역 진입 및 진출속도와 platform에서의 차량의 최대허용속도에 따라서 변화하는 가변성이 큰 인자이므로 전체 노선의 구간별 속도와 연계해서 매우 신중하게 설계할 필요가 있다. 표 3은 berth 수, berth 길이, platform의 길이에 대한 관계를 보여주고 있으며 off-line 역의 길이를 정하기 위해서 필요한 transition-in/out 구간의 속도는 16[km/h] 및 23[km/h]로 설정했다. transition-in/out 구간의 속도를 16[km/h] 및 23[km/h]로 할 경우 34[m](17*2)와 42[m](21*2)의 거리를

필요로 한다 ([8] Skyweb express 연산 data 참조). 또한 차량의 탑승 인원을 차량 당 2명 및 3명으로 설정 했을 경우 berth 수에 따라서 26명, 1604명, 2168명, 2646명, 2974명 및 552명, 2109명, 3252명, 3969명, 4461명의 수송이 가능하다. 표 3의 영향인자별 소요수치를 고려하면 PRT 시스템의 off-line 역의 규모를 정량적으로 결정하는 것이 가능하다. 신 교통 시스템으로서 PRT 시스템이 환승 연계 수단으로서 적용될 수 가능성이 가장 높다고 하면 PRT 시스템이 수용해야 하는 수요산정이 정량적으로 결정되어 질 수 있으며 이들 수요요구에 따라서 표 3과 같은 분석이 가능하다. 예를 들면 표 3에서 보듯이 PRT 시스템의 운영제어 알고리즘 및 구현 가능성 등을 고려하면 역에서 시간당 처리 용량은 1000[SVH] ~ 1300[SVH]가 적당하다고 판단된다. 하지만 PRT 시스템에 요구되는 수요와 PRT 시스템의 운영제어 알고리즘의 구현 가능성은 PRT시스템의 성공적인 운영을 위해서 매우 중요한 상관관계를 갖고 있기 때문에 본 논문에서 고려한 역의 규모 산정 시나리오뿐만이 아니고 주 guideway 상에서 PRT 차량의 적절한 운영을 위한 영향인자별 소요 수치에 대한 시나리오 개발 및 모의시험이 병행되어야 한다고 판단된다.

표 3 영향인자별 소요 수치
Table 3 Values for the variables

영향인자	Berth 수				
	1개	5개	10개	15개	20개
시간당 차량 처리 용량 (S_{VPH})	184 VPH	703 VPH	1084 VPH	1323 VPH	1487 VPH
시간당 수용 인원 (2명/차량)	368 명	1,406 명	2,168 명	2,646 명	2,974 명
시간당 수용 인원 (3명/차량)	552 명	2,109 명	3,252 명	3,969 명	4,461 명
플랫폼 길이	3.8 m	19 m	38 m	57 m	76 m
Transition 구간 (34m) 포함 전체 역 길이 (17m×2=34m)	37.8 m	53 m	72 m	91 m	110 m
Transition 구간 (42m) 포함 전체 역 길이 (21m×2=42m)	45.8 m	61 m	80 m	99 m	118 m

6. 결 론

본 논문에서는 PRT 시스템의 off-line 역의 규모를 산정하기 위한 수학적 모델과 이를 기반으로 하는 간단한 모의 시험을 다루었다. Off-line 역은 transition-in/out, platform 구간으로 나누어지며 off-line 역에서 가장 중요하게 정량적

으로 분석되어야하는 부분은 platform의 길이 산정이며 본 논문의 수학적 모델은 platform의 길이 산정에 초점을 맞추고 있다. transition-in/out 구간의 길이는 PRT 차량의 성능과 매우 밀접한 관계가 있기 때문에 Skyweb express의 연산 data를 참조 하였다.

모의시험을 통하여 berth의 길이, berth의 수, 역의 차량 수용용량사이에는 비례함수적인 관계가 성립하지 않으며 berth의 수가 많아지고 berth의 길이가 짧아질수록 역의 차량 수용용량은 지수함수적으로 증가하는 것을 알 수 있었으며, platform의 길이는 berth의 길이 및 berth의 수에 비례해서 증가하는 것을 알 수 있었다.

앞에서 언급했듯이 PRT 시스템의 성공적인 운영을 위해서는 역의 규모산정 시나리오뿐만이 아니고 주 guideway 상에서 PRT 차량의 적절한 운영을 위한 운영시나리오의 구현 가능성에 대해서도 매우 신중한 검토가 이루어져야하며 이러한 검토들을 종합한 후에 PRT 시스템의 수용가능 용량을 결정해야 한다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 국토해양부의 승객여정선택형 대중교통(PRT) 운영기술 사업에 의하여 이루어진 연구로서 국토해양부의 지원에 감사드립니다.

Reference

[1] Advanced Transit Association, "Personal Rapid Transit (PRT): Another Option for Urban Transit", *Journal of Advance Transportation*, Vol. 22, pp. 192-314, 1988

[2] J. E. Anderson, *Transit System Theory*, Lexington Books: 1978

[3] Jack, H. Irving, *Fundamentals of Personal Rapid Transit*, Lexington Books: 1987

[4] J.E. Anderson, "Control of Personal Rapid Transit", *Teletronikk 1*, 2003

[5] Jun-Ho Lee, "A Design of a Simulation Apparatus for the Control of the Personal Rapid Transit (PRT) Vehicles", *The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 57, No. 11, pp. 2001-2005, 2008.

[6] Jun-Ho Lee, "An Experimental Evaluation of the Vehicle Control Algorithm in Personal Rapid Transit System", *The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 56, No. 10, pp. 1770-1774, 2007.

[7] Ollie Mikosza, Wayne D. Cottrell, "MISTER and other New-Generation Personal Rapid Transit Technology", *Transportation Research Board*, 2007

[8] <http://www.taxi2000.com/> "Basic Specifications", September, 2004

저 자 소 개



이 준 호 (李浚豪)

1964년 7월 3일생. 1987년 광운대학교 공대 전기공학과 졸업. 1989년 광운대학교 전기공학과 대학원졸업(석사). 광운대학교 전기공학과 대학원 박사수료. 1998년 일본 가나자와 국립 대학교 전기컴퓨터공학과 졸업(공학박사). 1998년 5월 - 2005년 1월 Univ. of Virginia 주립대 기계항공공학과 연구원. 2005년 2월 - 현재 한국철도기술연구원 전기신호연구본부 선임연구원.



정 락 교 (鄭樂敎)

1964년 1월 25일생. 1991년 인하대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 졸업(석사). 1990~1994년 (주)한진중공업철차사업부. 2003년 현재 한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단 책임연구원

Tel : 031-460-5725

Fax : 031-460-5749

E-mail : rgjeong@krri.re.kr