

# 개인 고속 이동(Personal Rapid Transit) 시스템의 운전시격에 대한 연구

## A Study on the Headway of the Personal Rapid Transit System

이준호\* · 신덕호\* · 김용규\*

Jun-Ho Lee · Ducko Shin · Yong-Kyu Kim

### Abstract

We deal with the headway which effects on the performance of the PRT(Personal Rapid Transit) system and the system safety. The headway, time between passage of one vehicle and the next, is one of the important factors to assess the line capacity, which has a cue to solve the problem of the congestion in public transportation. To decide the headway there are many important factors, especially such as the failure vehicle deceleration rate, the following vehicle emergency deceleration rate, the vehicle line speed and the break actuation time, etc. With these factors a simple analytical equation can be made to assess the relation between the line speed and the minimum headway. In this paper we employ a numerical analysis method using a simple analytical equations for the evaluation of the minimum headway and show simple simulation results.

**Keywords** : PRT(Personal Rapid Transit), Headway, Central control, Guideway, Network

## 1. 서론

현대 정보화시대에는 경제·사회 및 산업전반에서 물적·인적 수송의 고속화가 요구되고 있으며, 이러한 요구에 대응해서 교통시스템의 경우에도 이용자의 접근이 용이하면서 빠르고 안전한 새로운 개념의 이동 수단이 요구되고 있다. 개인 고속 이동(PRT: Personal Rapid Transit) 시스템은 이러한 사회, 경제적 요구에 부응해서 1970년대 중반부터 활발히 연구[3]가 진행된 새로운 개념의 교통수단이다.

PRT 시스템에 대한 개념은 1964년 Don Fichter의 Individualized Automated Transit in the City에 최초로 소개되었으며, 1960년대 말 부터 미 정부 소속인 Aerospace Corporation에서 시스템 분석과 이론 개발이 수행되었다. 이를 바탕으로 미국 웨스트 버지니아주의 모간타운시에서는 도시 중심부와 대학 구내를 연결하는 최초의 PRT 시스템을 1971년 설계해서 1979년 완성 하였으며 현재 까지 도 운영하고 있다. 그 후 독일의 Cabintaxi, 영국의 Ultra,

미국의 Taxi 2000사 등에서 PRT 개념을 도입한 도심지내의 개인고속 이동 시스템의 실용화에 많은 노력을 투입하고 있으며, 우리나라에서도 1990년대 초반부터 개인고속 이동 시스템의 개념도입 후 시스템 개발 및 실용화를 위해 정부차원에서 활발한 투자가 이루어지고 있다.

개인고속 이동 시스템의 기본개념은 출발지에서 목적지까지 정차 없이 무인 운전이 가능하도록 하는 것이다[3,4]. 이를 달성하기 위해서는 차량 간의 위치를 파악할 수 있도록 지능화 되어있는 차량, 차량과 역, 역과 중앙 통제소간의 무선과 유선 통신이 가능하도록 하는 통신시스템, 차량의 진로를 적절히 안내해 줄 수 있는 guideway, 차량의 운행과 관련한 모든 정보와 무인 운전용 제어 알고리즘을 포함하고 있는 중앙 통제 시스템으로 구성된다. 특히 개인 고속 이동 시스템은 정상 운전 시 완전 무인 자동운전 모드에서 운행되기 때문에 운행 제어 알고리즘은 매우 중요한 역할을 담당하고 있으며, 차량과 차량의 운행간격을 나타내는 운전시격(headway)은 운행제어 알고리즘의 설계 시 가장 먼저 고려되어야할 요소 중의 하나이다. 운전시격의 길고 짧음은 선로 용량을 결정하는 중요한 인자로 이용되어지고, 결정된 선로 용량의 밀도에 따라서 운행 제어 알고리즘은 정규 스케줄 모드(pre-scheduled mode)와 수요 모드

\* 책임저자: 정회원, 한국철도기술연구원, 전기신호연구본부 열차제어팀,  
E-mail: jhlee77@krti.re.kr,

TEL: (031)460-5040 FAX: (031)460-5449

\* 한국철도기술연구원, 전기신호연구본부 열차제어팀

(demand mode) 로 구분하여 운영해야한다. 따라서 운전시격의 결정은 시스템의 성능 및 효율성을 결정하는 매우 중요한 변수이다. 운전시격을 결정하기 위해서는 기본적으로 선형차량의 고장 감속도, 후미 차량의 비상 감속도, 차량의 선로 속도, 후미차량이 비상 제동을 작동시키는데 걸리는 시간 등이 정의되어야하며, 또한 이들 변수들의 역학 관계를 분석할 필요가있다[2-6].

본 논문에서는 차량 간의 위치를 시스템이 실시간으로 파악할 수 있다고 가정하고, 차량 간의 간격과 차량의 속도에 대한 동 특성의 수식화를 통해 운전시격 및 운전거리를 수치 해석적 방법으로 분석한다. 먼저 운전시격을 나타내는 수식을 유도하고, 유도된 수식을 통해서 차량의 간격과 차량의 선로 속도와의 관계를 보이고, 마찰제동 사용 시 최대 충돌 허용속도와 안전거리와의 관계를 보인다. 마지막으로 간단한 예제를 통해서 수치 해석적 방법에 의한 운전시격의 결정 예를 보인다.

## 2. 본 론

### 2.1 차량의 이동속도와 거리

어떤 이동 차량의 이동속도는 처음속도, 나중속도, 평균속도와 모두 관련이 있으며 시간에 따라서 속도가 일정하게 증가, 감소하기 때문에 평균속도  $\bar{v}$ 는  $v_0$  와  $v$ 의 산술평균으로 주어질 수 있다.

$$\bar{v} = \frac{v_0 + v}{2} \quad (1)$$

여기서  $v_0$ 는 이동차량의 초기속도,  $v$ 는 이동차량의 나중속도를 나타낸다. 이동차량의 이동 거리를 시간의 함수로 나타내면

$$d = \bar{v}t = \left(\frac{v_0 + v}{2}\right)t \quad (2)$$

가 된다. 또한 속도  $v$ 와 가속도  $a$ 는  $v = v_0 + at$ 의 관계를 가지므로 이 식을 식 (2)에 대입하면

$$d = v_0t + \frac{1}{2}at^2 \quad (3)$$

를 얻는다. 차량의 이동속도와 이동거리와의 관계는  $t = \frac{v - v_0}{a}$ 를 식 (2)에 대입하면 구할 수 있고 다음의 식으로 표현된다.

$$d = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} \quad (4)$$

식 (4)는 식 (5)로 표현 할 수 있으며

$$v^2 = v_0^2 + 2ad \quad (5)$$

이때 차량의 초기속도가 0 이라면 차량의 이동속도  $v$ 는  $v = \sqrt{2ad}$ 가 된다.

### 2.2 최소 운전거리

운전시격을 계산하기 위해서는 차량 간의 충돌을 피하기 위한 최소 운전 거리를 계산할 필요가 있다. 차량 간의 최소 운전 거리의 계산은 그림 1에서 보는 것처럼 두 차량의 속도와 가속도의 관계로 부터 유도해 낼 수 있다. 충돌을 피하기 위한 최소 운전 거리는 B 차량(후미 차량)이 비상 제동 시 정지하는데 필요한 거리와 A 차량(선형 차량)이 고장이나 장애물에 의해서 정지하는데 필요한 거리의 차로 나타낼 수 있다. 식 (6)은 충돌을 피하기 위한 최소 운전 거리를 나타낸다.

$$d_s = vt_d + (d_e - d_f) \quad (6)$$

여기서  $d_s$ 는 충돌을 피하기 위한 최소 운전 거리,  $v$ 는 이동차량의 속도,  $t_d$ 는 후미차량이 비상제동을 작동시키는데 걸리는 지연시간,  $d_e$ 는 후미 차량이 비상 제동 시 정지하는데 필요한 거리,  $d_f$ 는 선형 차량이 고장이나 장애물에 의해서 정지하는데 필요한 거리를 나타낸다. 식 (4)를 식 (6)에 대입하고 두 차량의 초기속도가 같다고 가정하면 충돌을 피하기 위한 최소 운전 거리는

$$d_s = vt_d + \left(\frac{v^2}{2a_e} - \frac{v^2}{2a_f}\right) \quad (7)$$

이 된다. 식 (7)에서  $a_e$ 는 후미차량의 비상 제동 감속도,  $a_f$ 는 선형 차량의 고장 및 장애물에 의한 제동 시 감속도를 나타낸다. 식 (7)에서 알 수 있듯이 만약  $a_e = a_f$ 의 조건이 만족 한다면, 즉 선형 차량의 고장 제동 감속도와 후미 차량의

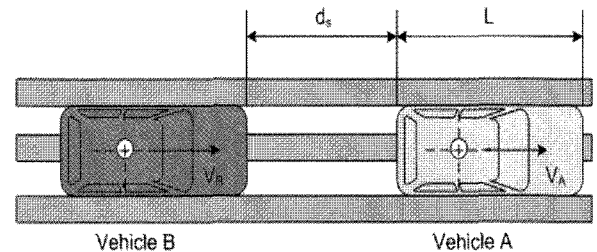


Fig 1. Distance between vehicles

비상제동 감속도가 같다면,  $d_s$ 는  $t_d$ 의 함수가 된다. 따라서 차량 간의 운행 거리를 최소화함으로써 최대 선로용량을 확보하기 위해서는 차량의 이동속도가 일정할 때, 선행차량의 고장제동 감지 후, 후미차량의 비상제동이 작동하는데 걸리는 지연시간  $t_d$ 를 최소화할 필요가 있다. 실제로 지연시간은 다음의 식으로 표현된다.

$$t_d = t_c + \left( \frac{a_e}{j_e} \right) \tag{8}$$

여기서  $t_c$ 는 선행차량의 제동 시점에서 후미차량의 제동이 작동하는데 걸리는 시간,  $j_e$ 는 후미 차량 감속도의 시간 변화율(jerk)을 나타낸다. 따라서  $\frac{a_e}{j_e}$ 은 후미 차량이 제동을 시작해서 일정 제동 감속도  $a_e$ 에 도달하는데 걸리는 시간을 의미한다. 또한 식 (7)에서  $a_f \rightarrow \infty$ 라면, 즉 선행차량이 제동과 동시에 정지한다고 가정하면,  $d_s$ 는 지연시간  $t_d$ 와 후미차량의 비상제동 감속도  $a_e$ 의 함수가 된다. 이때 최소 운전 거리  $d_s$ 를 brick wall 평가에 의한 운전거리라고 하고 충돌을 피하기 위해서 확보해야 할 최대 안전거리로 정의한다.  $a_e \neq a_f$ 인 경우, 즉  $a_f$ 값이 크고  $a_e$ 값이 작은 경우, 충분한 초기 안전거리가 확보되어 있지 않으면 두 차량의 충돌은 피할 수 없으며 충돌을 피하기 위해서는 적절한 해석 방법을 이용해서 안전거리를 확보해야 한다. 안전거리의 확보 방법에 대해서는 다음 절에서 설명한다.

**2.3 최소 운전시격 (Headway)**

운전시격은 앞 차량의 전 두부가 통과한 지점을 후미 차량의 전두부가 지나는데 걸리는 시간으로 정의된다. 따라서 최소 운전 시격  $t_{mh}$ 은 그림 1에서 보는 것처럼

$$t_{mh} = \frac{d_s + L}{v} \tag{9}$$

으로 표현된다. 여기서  $L$ 은 차량의 길이를 나타낸다. 식 (7)을 식 (9)에 대입하면 선행 차량의 제동 감속도와 후미 차량의 제동 감속도의 함수로서 표현되는 최소 운전 시격을 얻을 수 있다.

$$t_{mh} = \frac{L}{v} + t_d + \left( \frac{v}{2a_e} - \frac{v}{2a_f} \right) \tag{10}$$

식 (10)에서 나타나고 있지는 않지만 일반적으로 실제 차량의 운전시격계산에는 역의 정차시간도 포함 된다. 본 논문에서는 차량의 역 정차 시간은 일정하다고 가정하고, 식

(10)에는 포함 시키지 않는 것으로 한다.

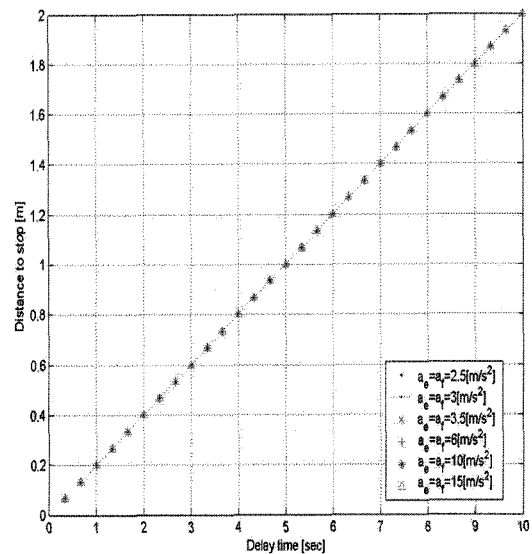
**2.4 운전시격의 계산 예**

운전시격의 계산 예를 보이기 위해서 표 1에 보이는 것처럼 다음의 변수 값들을 가정한다.

그림 2는 선행 차량의 고장제동 감속도  $a_f$ 와 후미 차량의 비상제동 감속도  $a_e$ 가 같은 경우에 충돌을 피하기 위한 최소 안전거리가 후미차량의 비상제동이 작동 하는데 필요한 지연시간에 종속되는 것을 보여준다. 따라서 차량의 선로속도가 일정할 때 최소 안전거리를 최소화함으로써 선로용량을 최대화하기 위해서는 차량의 제동 성능을 높임으로서 지연시간  $t_d$ 를 최소화 할 필요가 있다. 그림 3은 선행차량의 고장 감속도가  $a_f \rightarrow \infty$ 일 때 후미차량의 비상 감속도와 차량의 선로속도 변화에 따른 충돌을 피하기 위한 최소 안전거리 보여준다. 그림에서 보는 것처럼 차량의 선로속도가 8[m/s]이하의 경우에는 모든  $a_e$ 의 값에서 약 30[m]의 최소

**Table 1.** Parameters to calculate headway

변수	값	단 위
Vehicle length : $L$	3	$m$
Emergency deceleration rate : $a_e$	[2.5, 3, 3.5, 6, 10, 15]	$m/s^2$
Failure deceleration rate : $a_f$	[3.43, 3.92, 4.9, 6.86, 9.8, 11.76]	$m/s^2$
Delay time : $t_d$	0.2	$s$



**Fig 2.** Minimum safety distance for  $a_e = a_f$

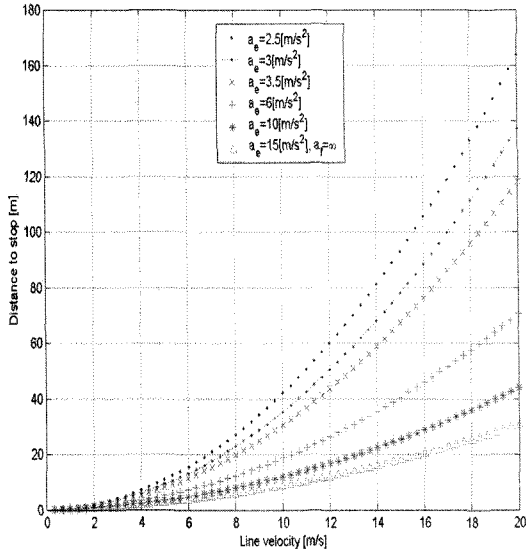


Fig 3. Change of the safety distance with respect to the change of  $a_e$

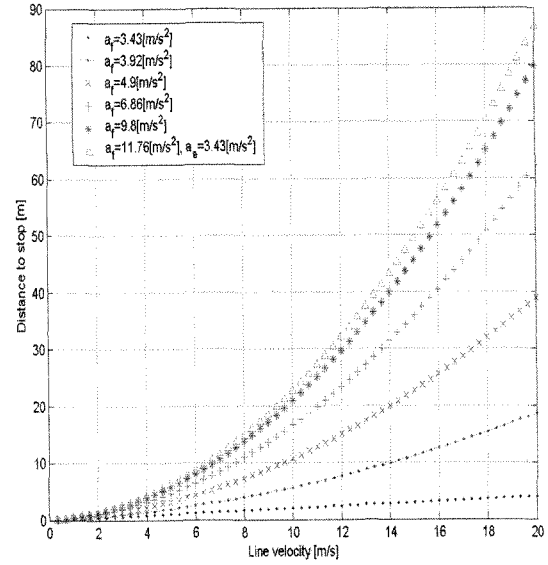


Fig 5. Change of the safety distance with respect to the change of  $a_f$

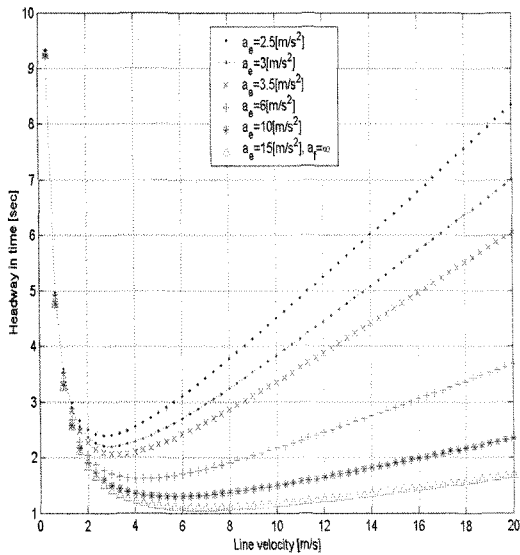


Fig 4. Change of the headway with respect to the change of  $a_e$

안전거리를 요구하지만 차량의 속도가 증가하면 비상제동 감속도의 변화에 따라서 최소안전거리도 지수 함수적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이때 선행차량의 고장 감속도는 거의 무한대에 가깝기 때문에 고장제동 작동과 동시에 선행 차량은 그 자리에 정지하는 것이 가능하기 때문에 차량의 성능이  $a_f \rightarrow \infty$ 을 가능하도록 한다면 brick wall 평가에 의한 안전거리의 설계가 가능하다. 그림 4는  $a_f \rightarrow \infty$ 이고  $a_e$ 가 변화할 때 차량의 이동속도 변화에 따른 운전시각의 변화를 보여준다. 그림에서 보듯이 후미차량의 비상제동 성능이 우

수 할수록 차량의 운전속도 증가에 따른 운전시각의 증가에는 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 따라서 운전시각을 단축시키기 위해서는 차량의 운전속도를 감소시키면서 후미차량의 비상제동 성능을 향상시키는 것이 요구된다. 그림 5는 후미차량의 비상 감속도  $a_e$ 가 일정한 값을 갖고, 선행차량의 고장 감속도  $a_f$ 가 변화 할 때, 차량의 이동속도 변화에 따른 안전거리의 변화를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이  $a_e$ 가 일정할 때 최소안전거리를 유지하면서 선로용량을 극대화시키기 위해서는 선행차량의 고장 감속도와 후미차량의 비상 감속도는 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$a_e \geq a_f \tag{11}$$

그림 6은 그림 5의 경우와 같은 조건에서 최소 운전시각의 변화를 보여준다. 그림에서 보듯이 가장 짧은 운전 시각은  $a_e = a_f$ 의 경우이며  $a_f$ 의 증가에 따라서 운전시각도 증가 하는 것을 알 수 있다.

### 2.5 충돌 속도 (Impact Velocity)

지금까지 선행차량의 고장 감속도  $a_f$ , 후미차량의 비상 감속도  $a_e$ , 차량의 이동속도  $v$ , 의 변화에 대응하는 충돌을 피하기 위한 최소 안전거리의 변화에 대해서 수치 해석적 방법을 이용하여 분석 하였다. 만약 차량에 탑승하고 있는 승객의 안전에 영향을 주지 않는 한도 내에서 차량 간의 간격을 줄이기 위해서 정지 시 선행차량과 후미차량의 경미한

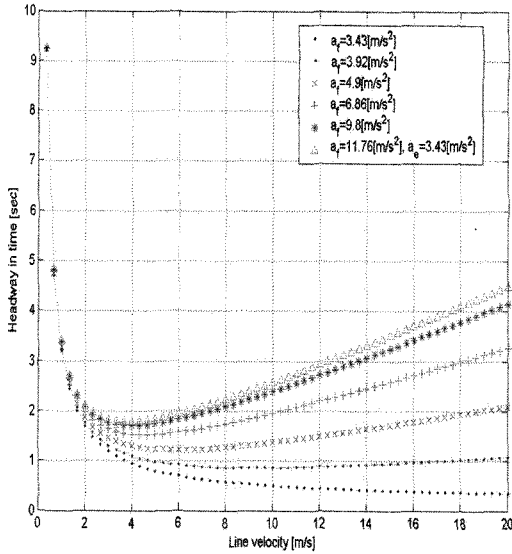


Fig 6. Change of the headway with respect to the change of  $a_f$

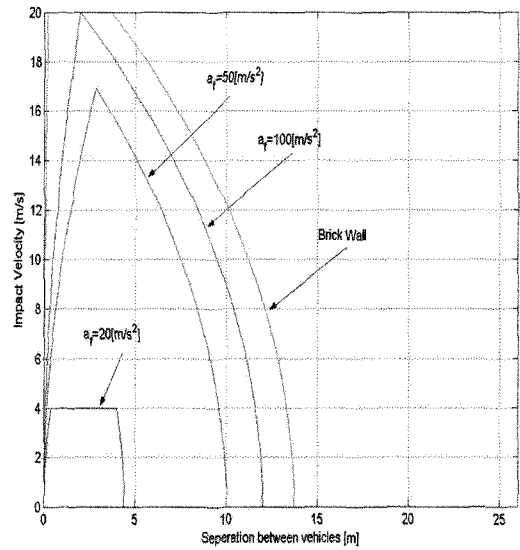


Fig 8. Impact velocity( $v=20[m/s]$ ,  $a_e=20[m/s/s]$ ,  $t_d=0.2[sec]$ )

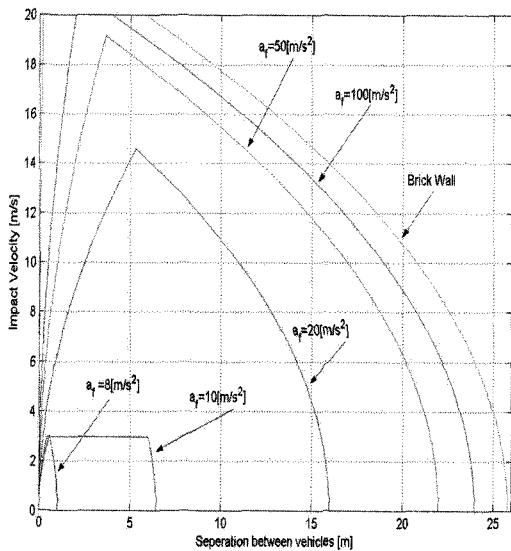


Fig 7. Impact velocity( $v=20[m/s]$ ,  $a_e=10[m/s/s]$ ,  $t_d=0.3[sec]$ )

충돌을 허용한다면 운전시력 및 최소 운전 거리는 더 짧아질 수 있으며, 결과적으로 선로 용량을 증가시킬 수 있다. 이와 같이 충돌 허용과 충돌허용속도의 결정에 관한 설계의 필요성은 개인고속이동(PRT) 시스템이 고무 차량에 의한 추진과 마찰제동에 의한 제동 방식을 채용할 경우에 발생한다. 선형 유도 모터(Linear Induction Motor)에 의한 추진과 제동 방식을 채용할 경우에는 전기적 관성 특성을 갖고 있는 인덕턴스(Inductance) 값을 작게 함으로서 빠른 전류 변화 특성을 얻을 수 있다. 따라서 LIM 방식에 의한 추진과 제동은

$a_f$ 를 가능한 크게 함으로서 선로용량을 극대화시킬 수 있다.

일반적으로 충돌속도는 그림 7과 그림 8에서 보는 것처럼 0에서 증가하기 시작해서 최대 값에 도달하게 되며 차량 간의 거리가 멀어짐에 따라 다시 감소하게 된다. 그림 7은 차량의 이동 속도  $v$ 를 20[m/s]로 고정하고 후미차량의 비상제동 감속도  $a_e = 10[m/s/s]$ , 지연시간  $t_d = 0.3[sec]$ 로 했을 때, 선행차량의 고장 감속도  $a_f$ 의 변화에 대응해서 차량의 충돌 속도를 차량 간 거리의 함수로 표현한 것이다.

그림 7에서 보듯이  $a_f = 20[m/s/s]$ 일 경우에 후미차량이 비상제동을 작동 시켜서 충돌을 피하기 위한 최소 안전거리(충돌속도 = 0)는 약 16[m]이지만 이 거리가 확보되어 있지 않을 경우에는 충돌을 필할 수 없다. 예를 들면 약 6[m]의 초기거리에서 후미차량이 비상제동을 작동시킨다 할지라도 선행차량과는 약 14[m/s]의 속도로 충돌을 하게 된다. 따라서 개인 고속 이동 시스템의 제동 시스템 설계 시 마찰제동에 의한 충돌허용 방식을 채용한다면 충돌속도와 승객의 안전에 관한 면밀한 검토가 이루어져야 한다. 또한 그림 7에서 알 수 있듯이 차량의 이동속도는  $v = 20[m/s]$ 이므로 충돌속도는 20[m/s]를 넘지 않는다. 그림 8은 그림 7의 조건에서와 같이 차량의 이동속도는  $v = 20[m/s]$ 로 같지만, 후미차량의 비상 감속도는  $a_e = 20[m/s/s]$ 로 증가되었고 지연시간도  $t_d = 0.2[sec]$ 로 감소했을 때 simulation 한 결과를 보여준다. 그림 8에서 보듯이 후미차량의 증가된 감속도와 감소된 지연시간으로 충돌을 피하기 위한 최소 안전거리도 짧아진 것을 알 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서 저자들은 개인 고속 이동 시스템의 설계 시 시스템의 성능과 승객의 안전에 밀접한 관계를 가지고 있는 최소운전시격 및 최소안전거리 계산과 해석에 대해서 다루었다. 최소운전시격과 최소안전거리를 결정하기 위한 변수 들로는 선행차량의 고장 감속도, 후미차량의 비상 감속도, 차량길이, 후미차량이 선행차량의 제동을 감지하는데 필요한 시간, 후미차량이 감속 시작 후 일정 감 속도에 도달하는 데 걸리는 시간, 차량의 이동속도 등이 있다. 이들 변수들의 상관관계에 의한 최소운전시격과 최소안전거리의 동적 변화를 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 수치 해석적 방법에 의해서 분석하였으며 시뮬레이션 결과들은 운전시격을 단축시키기 위해서 차량의 운전속도를 감소시키고 또한 차량의 비상제 동 성능을 향상 시켜야 함을 보여주고 있다.

앞으로의 연구과제로는 최소운전시격 및 최소안전거리와 승객의 안전과의 상관관계를 정량적으로 연구하기위한 검증 시스템의 개발 및 개인 고속 이동 시스템 설계 시 필요한 안전 요구사항의 구축을 위한 연구를 하는 것이다.

### 참고문헌

1. 김영태, "신호제어시스템", *테크미디어*, 2003
2. Markus Theodor Szillat, "A Low-level PRT Microsimulation", *Ph. D. dissertation, University of Bristol, April 2001.*
3. Jack H. Irving, "Fundamentals of Personal Rapid Transit", *Lexington Books, 1978*
4. Duncan Mackinnon, "High Capacity Personal Rapid Transit System Developments", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. VT-24, No.1, pp.8-14, 1975
5. J.E. Anderson, "Control of Personal Rapid Transit", *Elektronikk 1, 2003*
6. J.E. Anderson, "Safe Design of Personal Rapid Transit Systems", *Journal of Advanced Transportation*, 28:1, pp.1-15, 1994.