

동적 차량배차 환경에서의 차량 대수 결정

구평희^{1*} · 서정대²

¹부경대학교 산업공학과 / ²경원대학교 산업공학과

Fleet Sizing under Dynamic Vehicle Dispatching

Pyung-Hoi Koo¹ · Jungdae Suh²

¹Department of Industrial Engineering, Pukyong National University, Pusan, 608-739

²Department of Industrial Engineering, Kyungwon University, Kyunggi, 461-701

This paper addresses a planning problem in a pickup-delivery transportation system under dynamic vehicle dispatching. We present a procedure to determine a fleet size in which stochastic characteristics of vehicle travels are considered. Statistical approach and queueing theory are applied to estimate vehicle travel time and vehicle waiting time, based on which an appropriate fleet size is determined. Simulation experiments are performed to verify the proposed procedure.

Keywords: fleet sizing, dynamic vehicle dispatching, pickup-delivery transportation problem, vehicle waiting time

1. 서론

본 논문에서 대상으로 하는 시스템은 임의의 장소에서 차량 서비스가 필요한 경우 실시간으로 유휴차량이 배정되어 요구 사항에 대응하는 동적 차량운영시스템이다. 시스템 내에는 여러 대의 차량이 운영되고 있고, 어느 한 장소에서 차량을 요청하면 유휴 중인 차량 중에서 한 대의 차량이 요청된 곳으로 공차 상태로 이동하여 서비스를 수행한다. 계획기간 동안에 임의의 장소에서 차량을 요청하는 평균 횟수는 사전에 확률적으로 알고 있으나, 차량의 요청은 임의의 시점에서 발생하므로 구체적으로 다음 운반요청이 언제 어디에서 올지는 사전에 알지 못한다. 다음 차량요청이 발생하면 어디에 있는 어떤 차량이 서비스를 수행하여야 하는지는 미리 정해진 배차정책에 의해 실시간으로 결정된다. 이러한 동적 차량운영시스템 환경은 긴급 차량 서비스, 긴급 고장수리 서비스, 콜 택시, 시내 긴급 우편물 서비스, 단위용량의 동적 dial-a-ride, 물류시스템에서 무인운반차량(AGV)에 의한 단위제품 운반, 항만의 컨테이너 터미널, 장애인 이동 서비스 등 여러 경우에서 찾아볼 수 있다 (Psaraffis 1995, Gendreau and Potvin 1998). 본 연구에서는 이

중에서 물품 운송 서비스를 위해 차량이 요청되고, 하나의 운송 요청은 하나의 차량을 필요로 하는 dial-a-ride, 단위제품 운반, 컨테이너 운반 등과 같은 운송시스템의 경우를 다룬다. 이러한 운송 환경을 Pickup & Delivery(P/D) 운송 서비스라 하는데, 동적 운송시스템 환경에서는 차량 요구에 빠르게 대응해 주는 것이 중요하다.

운송시스템에서 몇 대의 차량을 운영해야 하는가를 결정하는 차량 대수 결정은 시스템 운영에 있어 초기에 결정해야 하는 중요한 문제이다. 이를 위하여 운송시스템의 초기설계 단계에서는 여러 가능한 시스템의 구조에 대해서 포괄적으로 이해하고 여러 가지 설계 및 운영상의 대안에 대한 수행도를 신속하게 분석하는 것이 필요하다. 시스템 설계 단계에서 결정된 변수에 의한 영향은 시스템 구축 후에 발생하는 비용의 대부분에 영향을 미친다는 점에서 설계 초기의 적절한 의사결정은 시스템 성공 여부에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 운송시스템의 수행도를 세부적으로 알기 위해서는 시뮬레이션 방법을 사용하는데 이를 위해서는 세부적인 자료가 필요하다는 점과, 모델링의 어려움, 그리고 결과를 얻기까지의 시간 및 비용이 많이 소요된다는 단점이 있다. 이러한 단점 때문에 시스템 설계 초기에는 분석적인 방법이 주로 이용된다.

* 연락처: 구평희 교수, 608-739 부산시 남구 용당동 산 100 부경대학교 산업공학과, Fax : 051-620-1546, e-mail : phkoo@pknu.ac.kr
2002년 2월 접수, 1회 수정(4일 소요) 후, 2002년 6월 게재 확정.

본 연구에서는 운송시스템의 환경이 시시각각으로 변하는 동적인 경우에 불확실성에 대응하기 위하여 통계적 접근법과 대기이론을 활용하여 차량대기 시간을 고려한 차량 대수 결정 절차를 제시한다. 필요한 차량의 대수는 차량을 사용하는 시간량에 의해 결정된다. 차량의 사용시간은 차량의 수요가 발생한 지점까지 빈차로 운행하는 공차운행과 요구 장소에서 물건을 싣는 상차, 물건을 목적지로 운반하는 적재운반, 그리고 목적지에서 물건을 내리는 하차에 소요되는 시간의 합으로 구해진다. 공차운행 시간은 전체 이동 시간 중에서 많은 부분을 차지하고 있지만 아직까지는 차량운영 시간 분석에 있어 많이 연구되어 오지 않았다(Kobza 1998). 차량이 요청되었을 때, 유휴 중인 차량은 여러 대 있을 수 있는데 이때 어떤 차량을 선택하는가의 결정인 배차정책에 따라 공차운행 시간은 영향을 받는다. 대표적인 차량배차정책으로는 가장 오래 유휴 상태인 차량을 배차하는 최장유휴차량(LIV) 배차, 지금까지 가장 적게 이용된 차량을 배차하는 최소이용차량(LUV) 배차 그리고 차량이 요청된 장소에서 가장 가까이에서 유휴인 상태로 있는 차량을 배차하는 근거리차량(NV) 배차 등이 있다.

본 논문에서는 동적인 P/D 운송 서비스 환경에서 차량운행 시간을 예측하는 모델과, 차량을 기다리는 대기 시간을 예측하는 모델을 제시하고, 이를 기반으로 적정의 차량 대수를 산출하는 절차를 제시한다. 차량운행 시간 중 공차운행 시간은 배차 방법에 따라 다르므로 앞에서 언급한 세 가지 배차정책 하에서의 공차운행 시간을 예측한다. 차량대기 시간의 예측을 위해서 일반도착과 서비스 분포를 갖는 대기시스템에서 분산계수(coefficient of variation)를 이용한 근사식을 활용한다. 제시된 절차는 시뮬레이션 실험을 통하여 여러 운영 환경에서 그 수행도가 평가된다.

2. 문제 정의 및 기존 연구

P/D 운송 서비스는 운송 네트워크의 구성에 따라 일 대 다수(one-to-many 또는 hub-and-spoke)와 다수 대 다수(many-to-many) 형태로 분류할 수 있다. 일 대 다수 형태에서는 여러 터미널에서 물건을 수집하여 중앙 센터에 배달하거나 또는 중앙 센터의 물건을 여러 터미널로 배달해 주는 운송작업이 행해지고, 다수 대 다수 형태에서는 물건의 운반이 여러 장소에서 혼합적으로 발생한다. 또한 운송문제는 정적인 환경과 동적인 환경으로 구분된다. 정적인 운송 환경은 계획기간(예: 1일 또는 1주일) 동안의 운반 정보가 모두 알려져 있고 운반물이 계획기간 초기에 모두 운송 대기하고 있는 경우이고, 동적인 운송 환경은 운반요청이 사전에 예측하지 못하는 임의의 시점에서 동적으로 발생하는 경우이다. 본 논문은 다수 대 다수 P/D 운송 서비스에서 동적인 경우를 다룬다.

본 논문에서 다루는 운송시스템에서의 차량운행 절차가 <그림 1>에 나타나 있다. 그 특징과 가정은 아래와 같다.

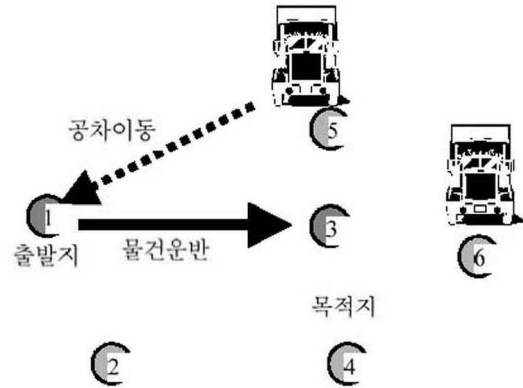


그림 1. 차량운행 절차.

1. 출발지에서 물건운반요청이 있으면 유휴 중인 차량 중에서 배차정책에 따라 배정된 차량이 공차로 출발지로 가서 물건을 상차한 후 목적지로 이동하여 물건을 하차하는 서비스를 제공한다.
2. 계획기간 내의 물품운반요청은 동적으로 발생하며 그 발생 시점은 확률적으로 알려져 있다.
3. 각 지점 간의 차량이동 시간과 상차, 하차 시간은 확정적이며 미리 알고 있다.
4. 차량이 물건을 하차한 후 다음 운반작업이 없는 경우는 그 장소에서 대기한다.
5. 하나의 물건 운반요청은 차량 1대 분이다. 즉, 차 한 대가 하나의 차량요청을 담당한다.
6. 차량요청이 있을 때 여러 대의 유휴차량이 대기 중이면 차량배차정책에 따라 서비스할 차량이 결정된다. 반대로 차량요청이 발생할 때 모든 차량이 이용 중이고, 후에 하나의 차량이 유휴 상태로 되었을 때 여러 곳에서 차량 서비스를 기다리고 있다면 그 중에서 가장 먼저 차량을 요청한 운반물을 처리한다.

P/D 운송시스템에서 차량의 대수를 결정하는 연구는 대부분 정적인 환경에서 이루어져 왔다. Du and Hall(1997)과 Seo and Lee (1998)는 한 곳의 센터와 여러 터미널 사이에 물품을 운반하는 일 대 다수 형태에서의 시스템에서 차량의 대수 결정과 유휴차량의 제분배 절차를 제시하였다. 각 터미널을 수요량과 공급량을 고려하여 잉여 터미널과 부족 터미널로 구분하고 빈 차량의 과잉에서 오는 차량 유지 비용과 차량 부족에서 오는 차량 부족 비용을 고려하고 제고이론을 근거로 하여 차량 대수를 결정하는 절차를 제시하였다. Maxwell and Muckstadt(1982)는 생산시스템에서 제품을 운반하는 무인운반차량 기반의 물류시스템에서 정적으로 주어진 물량을 운반하는 최소의 차량 대수를 구하기 위한 수리 모델을 제시하였다. 각 장소마다 제품이 들어오고 나가는 양의 차이를 나타내는 순 흐름(net flow)을 계산하고 이를 공차운행과 연관시켜 최소의 공차운행이 되도록 하였다. 제시된 수리모델은 정적인

상황에서 필요한 차량의 하한(lower bound)을 제공한다. Ko *et al.*(2000)은 컨테이너 서틀 운송 환경에서 필요한 차량의 대수를 결정하기 위하여 네트워크 변환을 통하여 운송문제를 Multiple TSP(Traveling Salesman Problem)로 표현하고 이를 해결하는 해법을 제시하였다.

동적인 P/D 운송시스템에서 많이 연구된 부분은 하나의 차량이 여러 운반 요구를 수용할 수 있는 다용량을 갖는 경우에 차량의 경로를 설정하는 동적 차량경로(dynamic routing) 문제이다. 이는 주로 다수의 차량이 상차와 하차 제약하에 물품을 최적으로 운송하는 Multiple P/D TSP에 의해 모델링되고, 실제 문제를 해결하기 위해 많은 휴리스틱 접근법이 연구되었다(Psarafitis 1995, Teodorovic and Radivojevic 2000). 한편, 단위용량 차량으로 구성된 동적인 P/D 운송시스템에 대한 연구로서, Tanchoco *et al.* (1987)은 폐쇄대기망(closed queueing network)을 이용하여 생산시스템 내에서의 무인운반차의 수행도를 예측하고 이를 기반으로 적정 차량 대수를 구하였다. 이 방법은 운반요청, 운반 시간 등이 일정한 분포를 따라야 한다는 제약과 임의 배차 방식에서만 적용 가능하다는 제약이 있다. Kobza(1998)는 이산시간 마코브 체인을 적용하여 확률적인 공차운행 시간을 계산하고 이를 기반으로 차량의 소요 대수를 계획했다. 이 모델은 차량의 가동률(utilization)을 고려하지 않기 때문에 운송 시스템의 부하가 적은 경우에는 좋은 결과를 제공하나 일반적으로 공차운행 시간을 저평가(underestimate)하는 경향이 있다. Koo *et al.* (1999)은 동적인 운반 환경에서 차량을 임의로 배차하는 경우의 공차흐름 모델을 제시하고 이를 기반으로 차량 대수를 결정하는 절차를 제시하였다. 이 방법은 차량 대수 결정에 차량의 대기 시간을 고려하고 있으나 임의로 차량을 배차하는 경우에 한해 사용될 수 있다.

3. 차량 대수 결정 모델

차량의 대수를 결정하기 위해서는 우선 차량사용 시간의 예측이 필요하다. 요구되는 최소한의 차량 대수는 주어진 기간 중에 필요한 전체 차량의 사용시간을 한 대가 제공할 수 있는 운행 시간으로 나누어서 구한다. 운송시스템에서 운송 자원은 다수의 차량이고, 운송 요청이 있을 경우 자원 중에서 하나가 이를 처리하는 상황은 대기시스템(queueing system)에 의해 표현될 수 있다. 대기시스템에서는 고객도착(즉, 차량요청)과 서비스 시간(즉, 차량사용 시간)에 대한 평균과 분산을 알면 서비스 대기 시간 등의 수행도를 예측할 수 있다. 차량의 사용 시간은 차량을 요청한 장소까지 빈차로 이동하는 공차운행 시간과, 물건을 적재한 상태로 목적지까지 운행하는 적재운행 시간, 그리고 물건을 차에 싣고 내리는 상하차 시간으로 구성되어 있다. 여기서, 전체적인 운반 수요가 주어졌다면 적재운행 시간과 상하차 시간은 비교적 쉽게 예측할 수 있으나, 공차운행 시간은 운반요청과 그때의 유휴차량의 위치에 따라 변하

므로 상대적으로 구하기가 어렵다. 공차운행 시간이 전체 차량운행 시간에 많은 부분을 차지하므로 공차운행 시간을 구하는 것은 차량의 대수를 결정하는 데 중요하다.

각 장소 간의 차량이동 소요 시간은 정해져 있지만, 차량의 관점에서는 여러 장소 간에 물품을 운반해야 하므로 하나의 운반요청을 처리하기 위한 이동 시간은 일정하지 않다. 본 절에서는 자주 적용되는 세 가지 차량배차정책에 대해 차량운행 시간의 평균과 분산을 구하고, 표준편차와 평균의 비율로 정의되는 분산계수(coefficient of variation)를 이용하여 운반요청이 있을 때 차량을 기다리는 평균 대기 시간을 구한 후 이를 차량 대수 결정에 사용하는 절차를 제시한다.

다음과 같은 기호가 사용된다.

n : 물품 운반의 출발지와 목적지의 수(출발지는 목적지로도 사용됨)

m : 운영되는 차량의 대수

f_{ij} : 계획기간 동안 출발지가 i 이고 목적지가 j 인 물품(또는 운반요청)의 수

t_{ij} : 장소 i 에서 장소 j 로 차량이 운행하는 시간

l_u : 물품의 상하차 시간(상차 시간과 하차 시간의 합)

F : 계획기간 동안의 총 운반물량 ($F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij}$)

3.1 적재운행 시간

적재운행 시간은 운반물을 싣고 운반하는 시간으로, 여기서는 상하차작업이 적재운행 전후에 이루어지므로 적재운행 시간에 물품의 상하차 시간도 포함시킨다. 두 지점 간의 운반량을 이미 알고 있다면 자동차량의 평균 운반 시간(t_i)과 분산(σ_i^2)은 다음과 같다.

$$t_i = \sum_{j=1}^n \left[\sum_{j=1}^n \{f_{ij}(t_{ij} + l_u)\} \right] / F,$$

$$\sigma_i^2 = \sum_{j=1}^n \left[\sum_{j=1}^n \{f_{ij}(t_{ij} + l_u)^2\} \right] / F - t_i^2 \quad (1)$$

3.2 배차정책별 공차운행 시간 모델

공차운행 시간은 차량이 요청된 장소와 그때의 유휴차량의 위치에 의해 결정된다. 차량의 위치와 운반요청 장소의 상대적인 위치는 배차정책에 영향을 받는다. 본 논문에서는 배차정책으로 자주 사용되는 최장유휴차량 배차, 최소이용차량배차, 근거리차량 배차정책을 적용하는 경우의 공차이동 시간을 제시한다.

3.2.1 최장유휴차량 배차

차량을 요청할 때 가장 오랫동안 유휴 중인 차량을 배차하는 경우이다. 이 배차 방식은 차량의 가동률을 평균화하는 데 유용하다. 최장유휴차량 배차 방식을 적용하면 차량의 선택이

그 위치와는 독립적으로 이루어지며 차량의 속성에 따라 차량이 선택된다. 따라서, 선택된 유휴차량이 일정한 장소에 위치할 확률은 차량을 임의로 선택할 때와 동일하다. 따라서, 최장 유휴차량이 임의의 장소 k 에 대기해 있을 확률은, 물건을 운반한 후 차량은 그 자리에서 대기하므로, 운반물의 목적지가 장소 k 인 확률과 같다. 따라서, 최장유휴차량을 선택하는 경우에 공차운행 시간의 평균(t_e)은 Koo and Jang(2001)이 제시한 임의차량 배차하에서의 공차운행 시간 모델을 따르고, 분산(σ_e^2)은 아래의 식에 의해 얻을 수 있다.

$$t_e = \sum_{i=1}^n \left[f_{s_i} \sum_{k=1}^n (f_{d_k} t_{ki}) \right],$$

$$\sigma_e^2 = \sum_{i=1}^n \left[f_{s_i} \sum_{k=1}^n (f_{d_k} t_{ki}^2) \right] - t_e^2 \quad (2)$$

여기서, $f_{s_i} = \sum_{j=1}^n f_{ij}/F$ 이고, $f_{d_k} = \sum_{i=1}^n f_{ik}/F$ 이다. f_{s_i} 는 전체 운반량 중 출발지가 i 인 비율, 즉 차량요청이 장소 i 에서 나올 확률이고, f_{d_k} 는 목적지가 k 인 비율로 유휴차량이 장소 k 에 있을 확률이다. 또한 차량의 요청이 있을 때 아직까지 가장 적게 사용된 차량을 배차하는 최소이용차량배차정책을 사용하는 경우에도 선택되는 차량의 상대적인 위치가 차량 선택에 영향을 주지 않으므로 식 (2)를 동일하게 사용할 수 있다.

3.2.2 근거리차량 배차

차량의 요청이 있을 때 운반해야 할 물건이 있는 장소로부터 가장 가까이에서 유휴 중인 차량을 배차하는 방법이다. 공차의 이동 시간을 최소화하여 차량의 부하를 줄일 수 있다는 점에서 가장 자주 사용되는 배차 방식이다. 근거리차량 배차 방식에서의 공차운행 시간은 가장 가까이에서 유휴 중인 차량의 위치에 의해 결정된다. 근거리 차량배차 방식에서의 공차운행 시간의 평균은 Koo and Jang(2001)에 의해 제시된 아래의 식을 이용한다.

$$t_e = \sum_{i=1}^m \left[f_{s_i} \sum_{z=1}^n [P(z) \sum_{k=1}^n \{q(k, i) t_{ki}\}] \right] / \sum_{z=1}^n P(z) \quad (3)$$

여기서, $P(z)$ 는 유휴차량이 z 대일 확률이고, $q(k, i)$ 는 장소 i 에서 장소 k 보다 가까운 모든 장소에서는 유휴차량이 없고 장소 k 에 유휴차량이 존재할 확률이다(이때, 근거리차량 할당정책에서는 장소 k 에 있는 차량을 이용하여 장소 i 에서 운반을 요청한 부품을 운반한다). 근거리차량 할당정책하에서의 공차운행 시간의 분산은 다음과 같다.

$$\sigma_e^2 = \sum_{i=1}^m \left[f_{s_i} \sum_{z=1}^n [P(z) \sum_{k=1}^n \{q(k, i) t_{ki}^2\}] \right] / \sum_{z=1}^n P(z) - t_e^2 \quad (4)$$

근거리차량 배차 방식에서 평균과 분산을 계산할 때 주의해야 할 점은 공차운행 시간을 결정하는 $P(z)$ 가 차량의 가동률

에 영향을 받고, 또한 가동률도 공차운행 시간에 영향을 받는다는 점이다(차량의 가동률은 공차운행, 적재운행, 물품 상차에 소요되는 시간과 차량을 사용할 수 있는 시간의 비율을 나타냄). 이를 해결하기 위해 우선 공차운행 시간을 최장유휴차량 배차 방식에 따라 구하고 이때의 차량 가동률을 이용하여 $P(z)$ 를 계산한 후, 식 (4)를 이용하여 근거리차량배차를 적용할 때의 공차운행 시간을 구하고, 이를 다시 차량 가동률에 대입하는 반복적인 방법을 이용한다.

3.3 총 차량사용시간 모델

위의 3.2절에서 구한 공차운행 시간은 차량요청시에 적어도 한 대의 유휴차량이 대기하는 경우(경우 I)이다. 차량요청 간격이 지수분포를 따른다고 가정하면 차량요청은 PASTA (Poisson arrivals see time averages) 특성에 따라 서버의 시간 평균을 보게 되므로(Wolff, 1982; Melamed and Whitt, 1990), 운영 중인 m 대 차량의 평균 가동률이 ρ 이고 차량이 유휴상태일 확률이 서로 독립이라고 가정하면, 차량요청시 한 대 이상의 유휴차량이 가용한 경우는 $(1 - \rho^m)$ 의 확률로 발생한다. 본 논문에서는 차량요청이 근사적으로 PASTA 특성을 갖는다고 가정한다.

차량요청이 있을 때 유휴 중인 차량이 한 대도 없는 경우(경우 II)에는 다음 차량이 유휴할 때까지 차량을 기다려야 하는데 이는 ρ^m 의 확률로 발생한다. 이때 다음 차량이 운반을 마치고 유휴한 상태로 되면 하나 이상의 요청들이 차량을 배정받지 못하고 대기하고 있을 것이다. 이 경우, 유휴 상태로 된 차량은 운반을 기다리고 있는 물건들 중에서 하나를 선택해야 한다. 본 연구에서는 먼저 차량을 요청한 물건을 우선적으로 운반토록 한다. 이러한 규칙에서의 차량과 운반요청 간의 상호 할당은 앞서 언급한 최장유휴차량 배차정책과 같이 차량의 위치나 운반요청 장소와는 무관하게 결정되므로 공차운행 시간은 식 (2)에서 주어진 식을 동일하게 이용할 수 있다. 경우 II에서의 공차운행 시간의 평균과 분산을 각각 t_{ev} 과 σ_{ev}^2 이라고 하자. 그러면 각 차량배차정책에 따른 총 차량사용시간에 대한 평균(t_v)과 분산(σ_v^2)은 적재운행 시간과 공차운행 시간이 독립적이라는 가정하에 아래의 식에 의해 표현된다.

$$t_v = t_i + (1 - \rho^m)t_e + \rho^m t_{ev},$$

$$\sigma_v^2 = \sigma_i^2 + (1 - \rho^m)\sigma_e^2 + \rho^m \sigma_{ev}^2 \quad (5)$$

3.4 차량배정 시간

위에서 차량사용 시간의 평균과 분산이 구해지면 대기행렬 이론을 이용하여 차량에 운반을 요청한 후 유휴차량이 물건을 상차하기 위하여 요청한 장소에 도착할 때까지의 시간(차량대기 시간)을 구하고 이 값이 적절히 유지될 수 있도록 차량대수를 결정한다. 차량이 너무 많으면 차량의 투자비와 관리비가

증가할 것이고, 너무 적으면 차량대기 시간이 오래 걸리게 된다. 차량의 대기 시간은 차량을 요청한 후 유휴차량이 배정되기까지의 시간(차량배정 시간)과 유휴차량이 할당된 후 빈 상태로 요청한 장소로 이동하는 공차운행 시간을 더하여 얻는다. 차량의 배정은 유휴차량이 한 대라도 있는 경우에는 즉시 되지만, 모든 차량이 사용 중이면 다음에 유휴상태로 될 때까지 기다려야 한다. 공차운행 시간은 앞 절에서 구했으므로 차량배정시간을 추가로 구해야 한다. 임의분포의 도착과 임의분포의 서비스 시간을 따르는 대기시스템($G/G/m$)에서 대기 시간, 즉 본 논문에서의 차량배정 시간(W_q)을 근사적으로 추정하기 위하여 Kimura(1991)가 제시한 다음의 모델을 활용한다.

$$W_q = W_0(c_a^2 + c_v^2)gw/2 \quad (6)$$

여기서, W_0 는 포아송 도착과 지수분포의 서비스 시간을 갖는 $M/M/m$ 대기시스템에서 차량요청 후 유휴차량이 배정되는 시간으로서 이는 대기이론에 의해 정확한 값이 구해진다. 또한 c_a 는 운반요청 시간 간격에 대해, 그리고 c_v 는 단위 운반요청을 서비스하기 위한 차량운행 시간에 대한 분산계수이다. 즉, $c_a = \sigma_a/t_a$, $c_v = \sigma_v/t_v$ 이다. 여기서, c_a 는 과거의 경험에 의해 얻을 수 있다고 가정한다. 식 (6)에서 g 와 w 는 다음과 같다.

$$g = \text{EXP} \left[\frac{-2(1-\rho)(1-c_a^2)^2}{3\rho(c_a^2 + c_v^2)} \right], \quad \text{if } c_a < 1,$$

$$= 1, \quad \text{if } c_a \geq 1,$$

$$w = [c_a^2 + c_v^2 - 1 + (1-c_a^2)/(1-4\gamma) + (1-c_v^2)/(1+\gamma)]^{-1}, \quad \text{if } c_a < 1,$$

$$= [2(c_a^2 + c_v^2 - 1) + (1-c_a^2)(1-4\gamma) + (1-c_v^2)(1+\gamma)] / (c_a^2 + c_v^2), \quad \text{if } c_a \geq 1,$$

$$\gamma = \min[(1-\rho)(m-1)(\sqrt{4+5m}-2)/(16m\rho), 0.25(1-10^{-6})]$$

위의 식에서 m 은 차량의 대수이고 ρ 는 차량의 가동률이다.

3.5 차량 대수 결정 절차

응급상황이나 제조생산성 관리의 경우 등에서 볼 수 있듯이 차량요청이 발생했을 때 그 요청에 대응하여 하나의 차량이 원하는 장소까지 와서 서비스를 시작할 때까지의 시간을 나타내는 차량대기 시간은 동적 운송시스템에서 중요한 의미를 갖는다. 차량 대수 결정시에 평균적인 차량대기 시간이 일정한 수준을 넘지 않게 차량을 유지하는 것이 요구된다. <그림 2>는 차량대기 시간을 고려하여 적정 차량 대수를 결정하는 절차를 보여준다. 우선 기본적인 차량요청과 이동 시간에 대한 데이터를 이용하여 적재운행 시간을 계산하고 이를 기반으로 최소의 차량 소요 대수를 계산한다. 최소 차량 대수는 차량의 가동률이 100% 이내에서 운영되는 최소의 차량이다. 최소 대수의

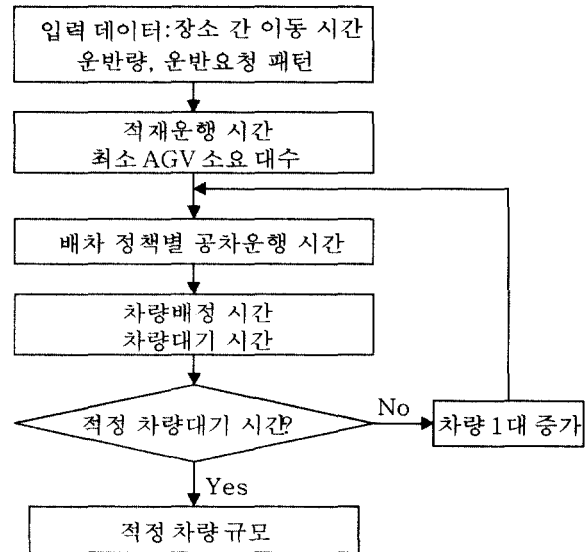


그림 2. 차량 대수 결정 절차.

차량이 구해지면 이를 기반으로 주어진 배차정책에 따라 공차운행 시간을 앞의 절에서 제시한 모델에 의해서 예측한다. 차량운행 시간이 구해지면 대기이론에 의한 식을 이용하여 차량배정 시간을 구하고 공차운행 시간과 차량배정 시간을 더하여 차량대기 시간을 계산한다. 구해진 차량대기 시간이 사전에 정한 차량대기 시간보다 크다면 차량을 1대 증가시켜 공차운행 시간계산을 다시 수행하여 절차를 반복한다. 만일 구해진 시간이 정해진 차량대기 시간보다 작으면 현재의 차량 대수가 원하는 적정 차량 보유 대수이므로 절차를 마친다.

4. 수치예제 및 시뮬레이션 검증

본 연구에서 제시된 적정 차량 대수 결정 절차를 설명하고 그 타당성을 검증하기 위하여 9곳의 장소에서 운반 물류가 발생하는 Mahadevan and Narendran(1993)의 시스템을 이용하여 시뮬레이션을 수행한다. <표 1>과 <표 2>는 4,800분(80시간) 동안에 각 장소별 기대되는 물류의 흐름량과 거리를 나타낸 것이다. 물량을 운반하는 과정에서의 상하차 시간은 3분이다. <표 1>에서 총 운반량(적재횟수)은 1,567($F=1,567$)이고, fs_i 와 fd_i 는 각각 총 운반물량 중 해당 장소가 출발지와 도착지가 되는 확률을 의미한다. 예를 들어, 운반물량 중 장소 1에서 출발할 횟수는 176회이고, 이는 전체 물량에서 11%를 차지한다. 즉, 차량요청의 11%는 장소 1에서 발생된다는 것을 의미한다. 식 (1)에서 하나의 운반요청에 대한 상하차 시간을 포함한 적재운행 시간의 평균(t_i)은 총 적재운행시간을 적재운행 횟수로 나누어 구하고, 적재운행 시간의 분산(σ_i^2)도 같은 요령으로 계산한다.

$$t_i = 11,040\text{분}/1,567 = 10.045\text{분}$$

$$\sigma_i^2 = 172,103/1,567 - 10.045^2 = 8.921\text{분}^2$$

표 1. 장소 간 물품 이동량(f_{ij})

장소	1	2	3	4	5	6	7	8	9	출발량	f_{si}
1	0	15	18	0	50	28	0	65	0	176	0.11
2	0	0	20	30	0	26	0	37	0	113	0.07
3	0	52	0	0	25	52	72	0	0	201	0.13
4	65	0	72	0	30	74	16	0	0	257	0.16
5	0	0	25	54	0	27	18	0	22	146	0.06
6	0	65	0	12	52	0	32	0	54	215	0.14
7	39	0	48	0	0	0	0	41	63	191	0.12
8	0	38	12	37	15	0	0	0	0	102	0.07
9	75	25	0	22	0	44	0	0	0	166	0.11
도착량	179	195	195	155	172	251	138	143	139	1567	
fd_i	0.11	0.12	0.12	0.10	0.11	0.16	0.09	0.09	0.09		1.00

표 2. 장소 간 차량이동 시간(t_{ij})

장소	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	4	8	10	12	8	8	6	6
2	8	0	4	6	8	8	8	6	6
3	10	8	0	2	8	8	12	6	10
4	10	6	6	0	6	6	10	4	8
5	12	8	8	2	0	8	12	6	10
6	8	8	8	6	4	0	4	6	6
7	4	8	12	14	16	12	0	10	2
8	6	6	6	8	6	6	6	0	4
9	2	6	10	12	14	10	10	8	0

위의 적재운행 시간은 어떠한 배차정책을 사용하여도 동일하고, 차량의 운영 대수와는 무관하다. 그러나 공차운행 시간은 배차방식과 운영 중인 차량의 수에 따라 다르다. 차량을 7대 운영하는 경우에, 최장유휴차량 배차정책과 최소이용차량 배차정책에서 하나의 차량요청에 대한 공차운행 시간에 대한 평균과 분산은 식 (2)를 이용하면 $t_e = 6.739$ 분, $\sigma_e^2 = 13.241$ 분²이 된다. 근거리차량 배차정책에서 경우 I의 공차운행 시간에 대한 평균과 분산은 식 (3)과 (4)를 이용하여 구하고, 경우 II의 공차운행 시간은 식 (2)를 이용하여 구한다. 근거리 차량배차 경우에 차량의 가동률이 공차운행 시간에 영향을 주므로, 우선 최장유휴차량 배차 방식에서 시작하여 차량의 가동률을 구하고 이를 공차운행 시간 계산에 이용하는 반복적인 방법을 사용한다. 본 예제에서 경우 I과 경우 II를 모두 고려한 공차운행 시간의 평균은 6.739 → 5.621 → 5.221 → 5.079 → 5.028 → 5.010 → 5.004 → 5.002 → 5.001분으로 수렴하고, 분산은 12.559

로 수렴한다. 적재운행 시간과 공차운행 시간이 구해졌으므로 식 (5)에 의해 단위 운반 수요당 총 차량사용시간을 구할 수 있다. 즉, 최장유휴차량 배차와 최소이용차량 배차정책에서는 $t_v = 10.045 + 6.739 = 16.784$, $\sigma_v^2 = 8.921 + 13.241 = 22.163$ 이 되고, 근거리차량 배차정책에서는 $t_v = 10.045 + 5.001 = 15.046$, $\sigma_v^2 = 8.921 + 12.559 = 21.480$ 이 된다. 차량의 가동률은 최장유휴차량 배차와 최소이용차량 배차정책에서는 78.3%(= $16.784 * 0.326/7$)이 되고, 근거리차량 배차정책에서는 공차운행 시간의 감소에 따라 70.2%로 감소한다.

차량운행 시간에 대한 데이터가 얻어지면 차량배정 시간순식 (6)에 의해 구한다. 여기서, 제곱분산계수인 c_v^2 은 차량요청 수요의 도착 분포에 의해 결정된다. 예를 들어, 차량 요구가 포아송분포를 따라 발생한다면, $c_v^2 = 1$ 이 된다. c_v^2 은 예를 들어 임의차량배차인 경우에는 $c_v^2 = \sigma_v^2/t_v^2 = 22.163/16.784^2 = 0.079$ 가 된다. 운반이 요청된 경우, 유휴한 차량이 배차되기까지의 시간을 나타내는 차량배정 시간은 식 (6)에 의해 최장유휴차량 배차정책에서는 3.113분이 되고 근거리 차량배차의 경우에는 1.516분이 된다. 따라서, 차량대기 시간은 최장유휴차량 배차정책에서는 6.739 + 3.113 = 9.852분이 되고, 근거리 차량배차정책에서는 5.001 + 1.516 = 6.517분이 된다. 계산된 차량대기 시간이 정해진 적정의 차량대기 시간보다 크면 적절한 대기 시간을 만족할 때까지 차량을 한 대씩 증가시켜 위의 계산 절차를 반복한다.

최장유휴차량 배차, 최소이용차량 정책에서는 공차운행 시간 또한 차량의 수에 영향을 받지 않는다. 따라서, 이러한 배차정책에서는 앞서 계산된 차량이동 시간 및 공차운행 시간 정보가 차량의 수와 관계없이 유효하다. 단지 차량배정 시간만이 차량의 수에 영향을 받는다. 그러나 근거리차량 배차의 경우에는 차량배정 시간과 공차운행 시간 모두 차량의 수에 영향을 받는다. 차량이 많아지면 더 가까이에 있는 차량이 배차될 가능성이 많아지기 때문이다.

제시된 모델의 정확도를 검증하기 위하여 시뮬레이션 소프트웨어인 Visual SLAM과 AweSim을 이용하여 시뮬레이션 실험을 수행하였다. 시뮬레이션은 초기 불안정한 상태의 영향을 배제하기 위하여 500시간 동안 시험 가동을 거친 후 2,000시간 동안 수행하여 결과를 얻었다. <표 3>은 위 모델 케이스에서 차량이 7대 운영되는 경우에 제시된 모델과 시뮬레이션 결과를 비교하고 있다. 본 실험에서는 차량요청이 포아송분포($c_v^2 = 1$)를 따른다고 가정하였다. <표 3>에는 적재운행 시간이 포함되어 있지 않은데 이는 운반 수요가 주어지면 적재운행 시간은 차량의 대수에 관계없이 변함이 없고 또한 제시된 모델에 의한 추정치는 시뮬레이션 실험 결과 일치함이 확인되었기 때문이다.

<표 3>은 제시된 모델에 의해 산출된 공차운행, 대기 시간 및 가동률 예측치가 시뮬레이션에 의한 실제 값과 근사적으로 일치하고 있음을 보여준다. 특히 최소이용차량 배차와 최대유휴차량 배차의 경우에 두 배차 방식에서 동일한 모델을 적용

표 3. 제시된 모델 및 시뮬레이션 실험 결과(차량 7대인 경우)

차량배차 방법	실험	공차운행 시간	차량배정 시간	대기 시간	가동률 (%)
최소이용 차량	제시모델	6.739	3.111	9.852	78.3
	시뮬레이션	6.735	2.827	9.562	78.3
	오차(%)	0.1	10.0	3.0	0.0
최대유휴 차량	제시모델	6.739	3.111	9.852	78.3
	시뮬레이션	6.743	2.855	9.598	78.3
	오차(%)	-0.1	9.0	2.6	0.0
근거리 차량	제시모델	5.001	1.516	6.517	70.2
	시뮬레이션	5.252	2.025	7.277	71.4
	오차(%)	-4.8	-25.1	10.4	-1.7

하였는데 시뮬레이션 실험에서도 두 경우에 차량운행 시간에서는 차이가 없음을 보여주고 있다. 또한 이들 배차정책에서의 예측치들은 근거리차량 배차정책에서의 예측치들보다 더욱 정확하게 대기 시간을 예측하고 있다. 차량배정 시간은 특히 근거리차량 배차정책의 경우에 오차가 발생하고 있는데 이는 일반도착과 일반 서비스 시간 환경($G/G/m$)에서는 정확한 대기이론식이 존재하지 않고 근사식만 존재하기 때문이다.

차량배정 시간에 대한 정확도가 차량의 수에 따라 어떻게 변하는지 알아보기 위해 차량의 수를 변화시켜 가며 실험을 수행한 결과를 <그림 3>에서 보여주고 있다. 그림에서 제시된 모델이 시뮬레이션의 결과에 근접하게 따라감을 볼 수 있다. 특히 차량의 가동률이 큰(즉, 차량의 대수가 작은) 경우에 제시된 모델의 정확도가 상대적으로 높았다.

<그림 4>는 차량의 대수 변화에 따른 차량대기 시간에 대한 추정치와 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 그림에서 제시된 모델이 비교적 정확하게 차량대기 시간을 추정하는 것을 볼 수 있다. 시스템 설계자는 산출된 대기 시간을 이용하여 시스템 운영적인 면과 경제적인 면을 고려하여 차량대기 시간이 어느 수준 이상 되지 않도록 적정한 차량의 대수를 결정한다. <그림 4>에서 차량의 평균 대기 시간이 9분으로 정해져 있다면, 최장유휴차량 배차 방식에서는 8대의 차량을 보유해야 하

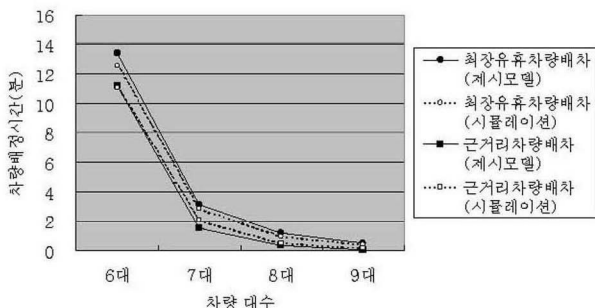


그림 3. 제시모델과 시뮬레이션의 차량배정 시간 결과.

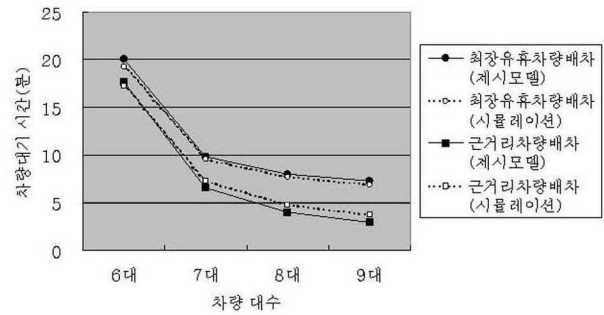


그림 4. 차량 대수 증가에 따른 대기 시간.

고, 근거리 배차 방식에서는 7대의 차량만 보유하면 됨을 알 수 있다. 최장유휴차량 배차의 경우에는 공차운행 시간이 차량의 대수에 관계없이 6.739분이 소요되므로 차량대기 시간이 이 수치보다 적을 수는 없다. 따라서, 예를 들어 대기 시간 5분으로 지정된 경우에는 최장유휴차량 배차로는 달성하지 못한다. 근거리차량 배차 방법을 선택하면 차량 8대의 운영으로 차량대기 시간을 5분 이내로 유지할 수 있다.

제시된 모델은 차량요청이 포아송분포를 따르지 않더라도 적용 가능하다. 전체 차량에 대한 차량요청 시간 간격이 k -일랑(k -Erlang) 분포를 갖는 경우를 실험하여 모델과 비교한다. 이때 도착 시간 간격에 대한 제곱분산계수 $c_s^2 = k^{-1}$ 이 된다. <그림 5>는 k 가 1, 2, 4, 8인 경우, 즉 제곱분산계수가 1, 0.5, 0.25, 0.125인 경우에 최장유휴차량과 근거리차량 배차 방식에서의 제시된 모델과 시뮬레이션으로부터의 차량배정 시간을 보여주고 있다. 차량요청 도착 분포가 변하더라도 제시된 모델의 결과가 시뮬레이션의 결과와 근사한 것을 볼 수 있다.

본 논문에서는 장소 간의 운송 시간이 확정적인 것으로 가정하였다. 그러나 실제로 운송시스템에서 두 장소 간의 차량 이동 시간은 확률적으로 변하는 것이 일반적이다. 특히 시내에서의 차량이동은 여러 변수가 차량의 이동 시간에 영향을 미친다. 이러한 확률적인 이동 시간인 경우에 본 모델이 어느 정도 정확한 모델을 제시하는지 알아보기 위하여 확률적인 차량이동 시간을 고려할 때 자주 적용되는 일양분포, 삼각분포 및 정규분포를 사용하여 시뮬레이션 실험을 수행하였다. 모든 분포에서의 이동 시간 평균은 <표 2>에 주어진 시간으로 하였

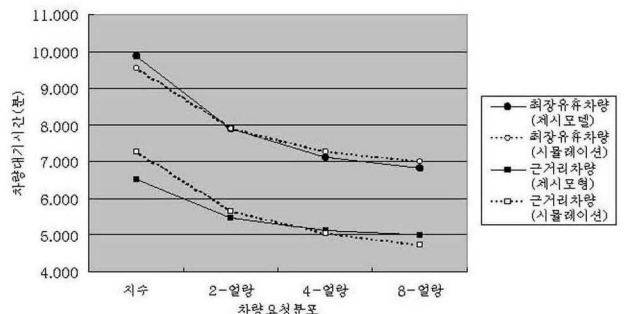


그림 5. 차량요청 분포에 따른 차량대기 시간 비교.

표 4. 차량요청 도착 분포에 따른 대기 시간 비교

차량배차 방법	실험	제시 모델	확정적	일양 분포	삼각 분포	정규 분포
최소이용 차량	공차운행	6.739	6.735	6.755	6.740	6.773
	배정 시간	3.111	2.827	2.814	2.994	3.076
	대기 시간	9.852	9.562	9.569	9.734	9.849
근거리 차량	공차운행	5.001	5.252	5.205	5.252	5.221
	배정 시간	1.516	2.025	1.981	2.059	2.233
	대기 시간	6.517	7.277	7.186	7.311	7.454

다. 일양분포에서는 두 장소 간의 평균 이동 시간을 기준으로 하여 하한 시간은 80%, 상한 시간은 120% 사이에서 일정하게 발생하는 것으로 간주했고, 삼각분포에서는 최빈값은 이동 시간 평균으로 하고, 최저값은 80%, 최고값은 120%로 하였으며, 정규분포에서는 표준편차를 평균 이동 시간의 10%로 하였다. <표 4>는 여러 확률분포를 따르는 이동 시간과 확정적인 경우에서의 공차운행 시간, 차량배정 시간 및 대기 시간을 비교한 것이다. 차량이동 시간이 확률적으로 변하더라도 차량대기 시간이 확정적인 경우와 큰 차이가 없음을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 동적인 P/D 운송시스템에서 배차 방법에 따라 차량운행 시간을 예측하는 모델과 차량을 기다리는 대기 시간을 예측하는 모델을 제시하고, 차량대기 시간을 고려하여 적정의 차량 대수를 산출하는 절차를 제시하였다. 제시된 절차의 정확성을 검증하기 위하여 적용된 배차환경별로 시뮬레이션 실험을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 여러 상황에서 제시 모델이 비교적 정확히 대기 시간을 예측하고, 따라서 적정차량 대수를 제시하는 것을 확인하였다. 또한 최장유휴차량 배차 방법과 최소이용차량 배차 방법에 대해 동일한 모델을 사용하였는데, 시뮬레이션 실험을 통하여 운행 시간과 대기 시간에서 동일한 결과를 얻음을 확인하였다.

동적인 상황에서의 운송시스템에서 차량이 유휴한 상태로 된 후에 대기하고 있는 운반물이 없는 경우에 유휴차량의 위치를 정하는 유휴차량 재배치도 시스템의 수행도에 많은 영향을 주는 중요한 문제이다. 본 논문에서는 유휴 상태로 된 그 장소에 차량이 대기하고 있는 것으로 가정하였으나, 다른 전략을 적용할 수도 있을 것이다. 예를 들어, 다음 차량요청은 차량의 수요가 많은 곳에서 발생할 확률이 크므로 유휴 중인 차량이 미리 그 장소로 간다면 차량대기 시간의 감축이 가능할 것

이다. 유휴차량 재배치 정책에 대한 추가적인 연구와, 이에 따른 차량 대수 결정문제가 추후 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

Du, Y. and Hall, R. (1997), Fleet Sizing and Empty Equipment Redistribution for Center-Terminal Transportation Networks, *Management Science*, **43**(2), 145-157.

Gendreau, M. and Potvin, J. Y. (1998), Dynamic Vehicle Routing and Dispatching, *Fleet Management and Logistics*, Edited by Crainic, T. G and Laporte, G., Kluwer Academic publishers, 115-126.

Kimura, T. (1991), Approximating for the Mean Waiting Time in the GI/G/s Queue, *Journal of the Operations Research Society of Japan*, **34**(2), 173-186.

Ko, C. S., Chung, K. H and Shin, J. Y. (2000), Determination of Vehicle Fleet Size for Container Shuttle Service, *Korean Management Science Review*, **17**(2), 87-95.

Kobza, J. E, Shen, Y-C. and Reasor, R. J. (1998), A Stochastic Model of Empty-Vehicle Travel Time and Load Request Service Time in Light-Traffic Material Handling Systems, *IIE Transactions*, **30**, 133-142.

Koo, P. H. and Jang, J. J. (2001), Vehicle Travel Time Analysis in Automated Guided Vehicle Systems, *Journal of Korean Management Science*, **26**(1), 97-108.

Koo, P. H., Jang, J. J. and Lee, S. W. (1999), Fleet Size Determination Considering Vehicle Waiting Time in Automated Manufacturing Systems, *Proceedings of Korean Institute of Industrial Engineering Conference*, 451-454.

Mahadevan, B. and Narendran, T. T. (1993), Estimation of Number of AGVs for a flexible manufacturing system; an analytical model, *International Journal of Production Research*, **31**(7), 1655-1670.

Melamed, B. and Whitt, W. (1990), On Arrivals that See Time Averages, *Operations Research*, **38**(1), 156-172.

Maxwell, W. L and Muckstadt, J. A. (1981), Design of Automated Guided Vehicle Systems, *IIE Transactions*, **14**(2), 114-124.

Psaraftis, H. N. (1995), Dynamic Vehicle Routing: Status and Prospect, *Annals of Operations Research*, **61**, 143-164.

Rajotia, S., Shanker, K. and Batra, J. L. (1998), Determination of Optimal AGV Fleet Size for an FMS, *International Journal of Production Research*, **36** (5), 1177-1198.

Soe, S. K. and Lee, B. H. (1998), On Fleet Sizing and Distribution Policy of Transportation Equipments in Hub-and-Spoke Network, *IE Interface*, **11**(1), 55-66.

Tanchoco, J. M. A, Egbelu, P. J. and Taghaboni, F. (1987), Determination of The Total Number of Vehicles in a AGV-Based Material Transport System, *Material Flow*, **4**(112), 33-51.

Teodorovic, D. and Radivojevic, G. (2000), A Fuzzy Logic Approach to Dynamic Dial-A-Ride Problem, *Fuzzy Sets and Systems*, **116**, 23-33.

Wolff, R. W. (1982), Poisson Arrivals See Time Averages, *Operations Research*, **30**(2), 223-231.