대한산업공학회/한국경영과학회 2000 춘계공동학술대회 논문집. 2000년4월21-22일. 경남대학교
Session PA6.3

확률적 서비스 물량과 이동시간 설정에서 확정적 VRP 휴리스틱들의 수행도 평가를 위한 계산실험 연구

A Computational Study of Deterministic Routing Heuristics in Stochastic Service Quantity and Travel Time Settings

박양병 · 김홍남* · 이주영*
경희대학교 기계·산업시스템 공학부 산업공학 전공

Abstract

실제 많은 차량경로결정문제(Vehicle Routing Problem: VRP)에서 차량의 이동속도는 도로의 교통량 등의 요인에 의해 시간에 따라 변화하고 서비스 수량이 고객의 운영상태에 따라 달라질 수 있다. 이러한 사실에도 불구하고, 거의 대부분의 VRP 기법에서 차량속도와 서비스 수량을 확정적으로 가정하거나 평균값을 사용하는 이유는 알고리즘 적 분석의 어려움 때문인 것으로 알려져 있다. 이에 따라 확정적 VRP 기법들에 의해 구해진 해는 실제 적용에서 그 유효성에 대해 심각한 이의가 제기될 수 있다. 그러나 만일 잘 알려진 확정적 VRP 기법들이 확률적 상황에서도 뛰어난 성능을 보인다면, 실제 차량경로계획 상황에서 이들 확정적 기법들이 복잡하고 난해한 확률적 VRP 기법을 대신할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 확률적 환경에서 네 가지 확정적 VRP 기법들의 성능을 평가하는 계산실험 연구를 소개한다. Solomon의 다양한 실험문제를 사용하였으며, 모든 문제에서 hard 및 soft 서비스 시간대를 설정하였다. 그리고 지점간 차량이동시간과 고객들의 서비스 물량은 세 가지 확률분포로써 나타내었다. 실험결과, 특정 확정적 VRP 기법이 특정 확률적 환경에서 뛰어난 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

1. 연구배경

차량에 의해 물품을 수거 또는 배달을 계획하는 일은 많은 로지스틱(logistics) 네트워크의 핵심 문제로 알려져 있다. 이에 따라 차량의 이동경로를 최적으로 결정하는 차량경로결정문제 (vehicle routing problem: VRP)은 매우 중요하다. VRP는 지리적으로 산재해 있는 고객들을 서비스하기 위해서 차량들이 차고지로부터 출발하여 고객들을 방문하는 최적의 경로를 결정하는 모든 문제를 포함한다. Dantzig and Ramser[1]의 LP 모형을 이용한 최초의 휴리스틱 이후, 그 동안 VRP의 최적 또는 최적에 근사한 해를 구하기 위한 많은 연구[2,3]가 수행되어 왔다. VRP의 적용 예로서, 물품 배달문제, A/S 방문계획문제, 물품 수거문제, 폐기물 수거문제, 통학버스 운행문제, dial-a-ride 문제 등이 있다.

거의 대부분의 VRP 연구에서 지점간 이동시간과 고객의 서비스 물량은 확정적으로 알려져 있는 것으로 가정하고 있다. 그러나 실제 VRP 상황에서 차량의 이동속도는 시간에 따라 변화하고, 수거 서비스의 경우 서비스 물량이 고객의 운영상태에 따라 달라질 수 있다. 이러한 사실에도 불구하고, VRP의 기법에서 두 요소를 확정적으로 가정하는 이유는 분석의 어려움으로 인해 효과적이고 효율적인 기법의 개발이 극히 어려운 때문인 것으로 알려져 있다. 따라서 이들 두 가지 요소를 확정적으로 가정하고 개발된 VRP 기법들은 실제 확률적 VRP 상황에서 최적의 해를 제공할 수 없게 된다.

확률적 상황을 고려한 VRP 기법에 대한 연구[4]는 그다지 활발하지 않다. 지금까지 개발된 기법들은 계산상 분석과 적용의 어려움 그리고 성능의 불확실성이 주요 문제점으로 지적되고 있으며, 성능이 좋은 휴리스틱의 개발조차도 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 이러한 이유로 인해 확률적 VRP 기법의 실제 적용은 거의 이루어지고 있지 않고 있다.

만일 이동시간과 고객수요가 확률적인 상황에서 이들의 평균값을 가지고 확정적 VRP 기법을 적용하여 좋은 해를 구할 수 있다면, 확률적 VRP에서도 확정적 VRP 기법을 사용할 수 있을 것이다. 이에 따라 확률적 수요와 이동시간이 설정된 상황에서 확정적 VRP 기법들의 수행도 평가에 대한 연구의 필요성이 대두된다.

본 연구를 위하여 네 가지 확정적 VRP 기법을 선택하였다; savings 기법, space-time 기법, nearest - neighbor 기법, insertion 기법. 이들은 지점간 이동거리(시간)과 지점에서의 서비스물량이 확정적으로 알려진 상황에서 차량의 총 이동거리(시간)를 최소화하는 경로를 결정하는 대표적인 휴리스틱으로서, 해를 구하는 과정이 아주 빠르고 간단하면서도 상당히 좋은 해를 구해 주는 특성에 의해 실제 VRP에서 널리 활용되고 있다. 이들 기법들을 hard 및 soft 시간대가 존재하는 VRP에 적용하기 위해 변형한 내용은 제 2절에서 설명한다.

hard 서비스 시간대가 존재하는 경우, 서비스 시간대는 해당지점에서 서비스가 시작될 수 있는 시간대로서 반드시 지켜져야 하는 제약조건이 된다. 따라서 서비스 시간대의 하한시각 이전에 도착한 차량은 하한시각까지 기다려야 된다. 그리고

soft 서비스 시간대가 존재하는 경우, 고객의 서비스 시간대는 정해진 벌칙을 감수하면서 위반될 수 있으며, 차량은 도착시점에서 곧바로 서비스를 시작한다.

hard 시간대가 존재하는 경우에는 총 차량이동시간의 최소화와 총 차량대기시간의 최소화를, 그리고 soft 시간대가 존재하는 경우에는 차량이동시간의 최소화와 서비스 시간대 총 위반시간의 최소화를 각각의 복수 목적함수로서 고려하였다.

2. 실험 및 결과

2.1 실험 방법 및 평가척도

실험에 사용된 네 가지 기법에서 hard 및 soft 서비스 시간대 특성을 보완한 내용을 간략히 정리한다.

먼저, savings 기법(SAV)에서는 Clarke and Wright[7]가 제안한 savings 기법의 루트구축 과정에서 사용하는 savings 계산식에 hard 서비스 시간대의 경우에는 차량대기시간의 savings 그리고 soft 서비스 시간대의 경우에는 서비스 시간대 위반시간의 savings를 각각 추가하였다.

space time 기법(SPT)]8]에서는 서비스 시간대의 중앙시점이 가장 빠른 고객을 루트의 첫 번째 방문지점으로 선택하였다. 그리고 제약조건을 만족하여 연결 가능한 모든 지점들에 대해 space-time 규칙에 근거한 $SP(k)$값을 계산하여 가장 작은 값의 지점 k를 루트 상 지점 j의 다음 방문지점으로 결정하였다.

nearest-neighbor 기법(NEN)[9]에서는 다음 지점의 선택 기준에 hard 서비스 시간대의 경우에는 차량대기시간 그리고 soft 서비스 시간대의 경우에는 서비스 시간대 위반시간을 추가하였다. 즉, 아직 루트에 할당되지 않은 지점들 중 제약조건을 만족하여 연결 가능한 모든 지점들에 대해 $NP(k)$를 계산하여 가장 작은 값의 지점 k를 루트 상 지점 j의 다음 지점으로 연결하였다.

insertion 기법(INS)[10]에서는 인접 지점간에 새로 삽입할 고객을 선택하는 기준에 hard 서비스 시간대의 경우에는 차량대기시간 그리고 soft 서비스 시간대의 경우에는 서비스 시간대 위반시간의 증가 분을 추가하였다. 즉, 아직 어떤 루트에도 할당되지 않은 지점들 중 미완성 루트 상 인접한 두 지점 i와 j 사이에 제약조건을 만족하여 삽입 가능한 모든 지점의 $P_{ij}(k)$를 모든 가능한 삽입위치에 대해서 계산하여 가장 작은 값의 지점 k를 해당 지점 i와 j사이에 삽입하면서 루트를 구축해 나가도록 하였다. 루트의 첫번째 방문지점으로는 차고지에서 가장 멀리 떨어져 있는 지점을 선택한다.

확률적 VRP 환경에서 네 가지 확정적 VRP 기법의 수행도를 평가하기 위해 Solomon[5]이 만든 5가지 형태의 확정적 실험문제 집단으로부터 각각 5문제씩 선정하여, 이들을 모두 배달과 수거의 2가지 경우로 설정하였다. 모든 실험문제에서 고객의 서비스 시간대는 각 문제에서의 차량귀환시각 상한치 크기를 고려하여 임의로 정하였다.

실험문제에 확률적 환경을 만들어 주기 위해 지점간 이동시간은 정규분포, 일양분포, 지수분포를 따르는 것으로 가정하였으며, 원래 문제에서의 지점간 이동시간을 각 분포의 평균치로 사용하였다. 그리고 정규분포의 표준편차는 $0.1*\mu$, 일양분포의 구간 크기는 $[\mu-\mu*0.5, \mu+\mu*0.5]$로 정하였다. 수거문제의 경우에는 추가로 고객지점에서의 공급량이 정규분포, 일양분포, 포아손분포를 따르는 것으로 가정하였으며, 원래 문제에서의 고객 서비스물량을 각 분포의 평균치로 사용하였다.

한 개의 실험문제는 서비스 형태(배달과 수거), 서비스 시간대(hard와 soft 서비스 시간대), 확률분포(단, 이동시간이 지수분포를 따르는 문제의 경우 물량은 포아손분포를 따른다.)의 종류에 따라 12개의 다른 확률적 VRP로 구축된다. 따라서 본 실험에서는 총 300개(5형태*5문제*12개)의 확률적 VRP가 다루어진다. 또한 각 확률적 VRP에서 해당 확률분포를 따르는 확률변수 값을 다르게 하여 3회씩 반복 실험을 수행함으로써, 결과적으로 총 900개의 확률적 VRP에 대해 실험이 이루어진다. 4가지 기법은 모두 Visual Basic 6.0으로써 프로그래밍 하였다.

확률적 VRP 환경에서 확정적 VRP 기법들의 성능을 분석하기 위해 다음과 같은 계산들을 필요로 한다. 먼저 확률적 VRP에 대해 지점간 이동시간과 고객 서비스물량(수거문제의 경우)의 평균치를 가지고 확정적 VRP 기법을 적용하여 루트 해를 구한다. 그리고 해당 확률적 VRP에서 지점간 이동시간과 고객 서비스 물량(수거문제의 경우)에 대한 확률변수를 발생시켜 실제 상황을 설정한 다음, 구해진 루트 해를 실행하여 총 차량이동시간, 총 차량대기시간(hard 서비스 시간대의 경우), 총 서비스 시간대 위반시간(soft 서비스 시간대의 경우), 차량소요대수 등의 목적 값을 계산한다. 이것은 확률적 상황을 무시하고 구한 루트 해를 실제 상황에 적용한 결과를 의미한다.

계속해서, 확률적 VRP의 설정된 실제 상황에 대해 확정적 VRP 기법을 적용하여 루트 해와 목적값들을 구한다. 이것은 확률적 VRP에서 지점간 이동시간이나 서비스 물량에 대한 확률적 값을 사전에 정확히 알고 VRP 기법을 적용한 결과를 의미한다.

확률적 VRP 환경에서 확정적 VRP 기법들의 성능평가를 위해 세 종류의 평가척도를 사용한다

첫째, 실험문제에서 확률적 환경을 무시하고 확정적 VRP 기법을 적용하여 구한 각 목적 값들에 대한 오차율을 구한다. 한 목적 값에 대한 해법의 오차율 계산식은 다음과 같다.

$$\text{오차율}(\%) = (A-B) \times 100 / B$$

여기서

A = 확정적 VRP로 가정하고 적용한 기법에 의해 구해진 루트 해의 한 목적 값,

B = VRP의 확률변수 값을 사전에 인지한 상태에서 4 기법을 적용하여 구한 루트 해 중 목적 값의 최소 값.

둘째, 확정적 VRP로 가정하여 구한 루트 해를 실제 확률적 상황에서 실행할 때 차량귀환시각, 차량용량, 서비스 시간대 등의 제약조건 때문에 차량들이 할당된 루트에 속한 모든 고객들을 한번의 순

표 1. 평가척도에 대한 네 해법들의 순위

서비스 형태	서비스 시간대	SAV	SPT	NEN	INS
배달	hard	(1, 3, 2)[a]	(4, 2, 4)	(3, 4, 3)	(2, 1, 1)
		(1, 1, 1)[b]	(2, 2, 2)	(4, 4, 4)	(3, 3, 3)
	soft	(2, 3, 1)	(4, 2, 3)	(3, 1, 4)	(1, 4, 2)
		(4, 2, 4)	(3, 1, 2)	(1, 3, 1)	(2, 4, 3)
수거	hard	(1, 3, 2)	(4, 2, 4)	(3, 4, 3)	(2, 1, 1)
		(1, 1, 1)	(2, 2, 2)	(4, 3, 4)	(3, 4, 3)
	soft	(2, 3, 1)	(4, 2, 2)	(3, 1, 4)	(1, 4, 2)
		(4, 3, 3)	(3, 2, 2)	(1, 1, 1)	(2, 4, 4)
순위 합	hard	12	20	20	8
		6	12	23	19
	soft	12	17	16	14
		20	13	8	19

(주)
a: (총 차량이동시간 오차율에 대한 순위, hard 서비스 시간대의 경우에는 총대기시간 오차율에 대한 순위 그리고 soft 서비스 시간대 경우에는 서비스 시간대 총 위반시간 오차율에 대한 순위, 차량소요대수 오차율에 대한 순위)
b: (한 순회동안에 모든 고객들의 서비스를 완료한 문제 수에 대한 순위, 문제당 평균 미 서비스 고객수에 대한 순위, 문제당 평균 미 서비스 물량에 대한 순위)

회(tour)에서 서비스하지 못하고 차고지로 귀환해야 하는 현상이 발생할 수 있다. 이 경우에 해당되는 문제 수, 그리고 이들 문제에 대해 한 순회에서 서비스를 하지 못한 고객 수와 총 물량을 구한다.

셋째, 모든 확률변수 값이 사전에 알려진 상황에서 한 기법을 실험문제들에 적용하여 구해진 루트 해가 네 기법에 의한 해 중에서 최선인 회수를 각 목적에 대해 구한다.

2.2 결과

배달과 hard 시간대, 배달과 soft 시간대, 수거와 hard 시간대, 수거와 soft 시간대 네 가지 경우의 각 실험분석에서 5 가지 문제 형태를 종합하여 구한 평가척도 값에 대해 기법들의 순위를 매긴 결과가 표 1에 정리되어 있다.

이 표로부터 기법들은 배달과 수거의 특성과는 상관없이 서비스 시간대의 특성에 따라 거의 일정한 순위를 유지하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 앞서 언급했듯이, 수거문제에 존재하는 서비스물량의 확률적 성질이 확정적 VRP 기법의 성능에 거의 영향을 미치지 않기 때문이라고 말할 수 있다. 이를테면, 총 이동시간에 대한 기법의 성능은 배달과 수거에 상관없이 hard 서비스 시간대가 설정되어 있는 확률적 VRP에서는 SAV, INS, NEN, SPT의 순서로 뛰어난 것으로 나타났으며, soft 서비스 시간대가 설정되어 있는 확률적 VRP 에서는 INS, SAV, NEN, SPT의 순서로 우수한 것으로 나타났다.

표 1의 맨 아래 기록되어 있는 순위 합은 각 해법들이 세 가지 오차율 평가척도에 대해 얻은 순위(a에 해당)와 미 서비스 고객과 관련한 세 가지 평가척도에 대해 얻은 순위(b에 해당)를 hard와 soft 시간대에 대해 각각 합산한 것이다. 그 결과, 확률적 환경에서 세 목적들에 대해서는 hard 서비스 시간대의 경우 INS가 그리고 soft 서비스 시간대의 경우 SAV가 가장 뛰어난 것을 나타났다. 또한 미 서비스 고객과 관련하여서는 hard 서비스 시간대의 경우 SAV가 그리고 soft 서비스 시간대의 경우 NEN이 가장 뛰어난 것으로 나타났다.

미 서비스 고객이 존재한 문제 비율은 모든 경우에 대해 C2 유형의 문제에서 약 3~7%로 가장 낮게 그리고 RC1 유형의 문제에서 약 53~68%로 가장 높게 나타났다. 따라서 한 순회동안 미 서비스 고객 수를 최소화하는 관점에서는 차고지를 중심으로 고객들이 그룹을 이루어 분포되어 있는 형태의 문제에 대해 확정적 VRP 기법을 적용할 때 그 효과가 가장 뛰어나다고 말할 수 있다. 전 실험과정에서 VRP에 대한 모든 기법의 컴퓨터 계산시간은 거의 차이 없이 아주 짧게 소요되었다.

네 가지 모든 경우의 stochastic VRP에서 각 해법은 정규분포, 일양분포, 지수(포아손)분포에 대해 거의 비슷한 결과를 보였다. 즉, 확률분포의 다름은 해법의 수행도에 거의 영향을 미치지 않았다.

3. 요약 및 결론

본 논문에서는 확정적 VRP 기법들이 차량이동시간과 고객의 서비스 물량이 변화하는 확률적 VRP 환경에서 어떠한 성능을 보이는 지를 여러 관점에서 실험한 내용을 소개하였다. 서비스 물량의 변화는 수거문제의 경우에만 포함하였다.

실험대상 VRP 기법으로는 savings 기법,

space-time 기법, nearest-neighbor 기법, insertion 기법을 고객의 서비스 시간대 제약을 다룰 수 있도록 변형 사용하였으며, 차량이동시간과 서비스 물량의 변화는 모두 정규분포, 일양분포, 지수(포아손)분포로써 표현하였다. Solomon의 다양한 형태의 문제에 hard와 soft 서비스 시간대를 추가하여 구성한 총 900개의 확률적 VRP에 대한 실험 결과, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(i) 총 차량이동시간, 총 대기시간 또는 서비스 시간대 총 위반시간, 차량소요대수 목적들을 종합적으로 최소화 관점에서 hard 서비스 시간대가 존재하는 stochastic VRP에서는 insertion 기법이, 그리고 soft 서비스 시간대 stochastic VRP에서는 savings 기법이 가장 뛰어났다.
(ii) 차량의 한 순회에서 미 서비스 고객이 존재하는 문제 수, 문제당 평균 미 서비스 고객 수, 문제당 평균 미 서비스 물량을 종합적으로 최적화 하는 관점에서 hard 서비스 시간대가 존재하는 확률적 VRP에서는 savings 기법이, 그리고 soft 서비스 시간대가 존재하는 확률적 VRP에서는 nearest-neighbor 기법이 가장 뛰어났다.
(iii) 미 서비스 고객이 존재한 문제 비율은 모든 경우의 문제에서 C2 유형이 가장 낮았다. 그리고 RC1 유형이 가장 높았다.

모든 경우에서 가장 뛰어난 것으로 판명된 해법의 평균 오차율은 비록 최적해 대신 네 가지 발견적 기법에 의해 구해진 루트 해의 최소 목적 값에 대해 계산된 것이지만 대략 -3~15% 내외로 나타났다. 미 서비스 관점에서 가장 뛰어난 것으로 판명된 해법의 평균 미 서비스 고객 수는 1.5 미만으로 나타났다.

결론적으로, 실제 확률적 성질이 존재하는 환경에서 차량의 경로를 결정하는데 있어 난해하고 긴 계산시간을 요하면서도 성능이 불확실한 확률적 VRP 기법 대신에 문제의 특성에 따라 최적의 확정적 VRP 휴리스틱을 적용할 수 있다.

참고문헌

[1] Dantzig, G. B., Ramser, J. H., "The Truck Dispatching Problem", *Management Science*, Vol. 6, pp. 80-91, 1959.
[2] Desrochers, M., Lenstra, J. K., and Savelsbergh, M. W. P., "A Classification scheme for Vehicle Routing and Scheduling", *European Journal of Operational Reserch*, Vol. 46, pp. 322-332, 1990.
[3] Laporte, G., "The Vehicle Routing Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms", *European Journal of Operational Research*, Vol.59, pp. 345-358, 1992.
[4] Gendreau, M., Laporte, G., and Seguin, R., "Invited Review: Stochastic Vehicle Routing", *European Journal of Operational Research*, Vol. 88, pp.3-12, 1996.
[5] Solomon, M., "Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Contraints", *Operations Reserch*, Vol. 35, No. 2, pp.254-265, 1987.
[6] Desrosiers, J., Dumas, Y., Solomon, M. M., and Soumis, F., "Time Constrained Routing and Scheduling", in Networks and Distribution, *Handbooks in Operations Research and Management Science*, North-Holland, Amsterdam , 1996.
[7] Clarke G., Wright, J., "Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points", *Operations Research*, Vol. 12, pp. 568-581, 1964.
[8] Balakrishnan, N., "Simple Heuristics for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows", *Operations Research*, Vol. 44, No. 3, pp. 279-287, 1993.
[9] Koskosidis, Y. A., Powell, W. B., and Solomon, M. M., "An Optimization-Based Heuristic for Vehicle Routing and Scheduling with Soft Time Window Constraints", *Transportation Science*, Vol. 26, No. 2, pp. 69-85, 1992.
[10] Solomon, M. M., "On the Worst-case Performance of Some Heuristics for the Vehicle Routing and Scheduling Problem with time Window Constraints", *NETWORKS*, Vol. 16, pp. 161-174, 1986.