
Global Report

다중운송 산업의 가용성, 요구사항 및 품질 이슈

1. 개요
2. 3차원 궤환 운송문제
3. 3차원 운송비용에 대한 수치해석
4. 계산 결과
5. 결론

1. 개요

전형적으로 TP(Transportation Problem : 교통/운송 문제)에서 교통의 품질을 결정하는 기본적인 요소는 출발지(m)에서 목적지(n)로 안전하고 신속하게 운송하는 것이다. 출발지에서의 운송물량의 합계는 다양한 목적지에서 요구되는 운송물량의 합과 같아야 한다. 목표는 총 운송비용을 최소화할 수 있도록 모든 경로를 통해 운송할 제품의 양이나 승객의 숫자를 결정하는 것이다. 많은 연구자들은 이러한 비용 및 시간을 최적화할 수 있는 교통문제를 광범위하게 연구하여 왔다. Appa는 운송문제의 여러 가지 문제에 대해 논의했으며, Brigden은 혼합 제약조건으로 운송문제를 접근하기도 했다. Klingman과 Russel은 추가적인 선형 구속조건으로 TP의 특수한 문제를 해결한바 있다. Adlakha 등은 고정요금제를 시행하는 데 따른 운송문제에 대한 분기방법을 연구하기도 했다. 이러한 각각의 문헌연구에서, TP는 일반적으로 MDM(Modified Distribution Method : 수정된 분배방법)을 적용하여 해결할 수 있는 2차원 선형 수송문제로 제시하였다. MDM은 가장 큰 부정적 개선지수를 나타내는 사용되지 않는 경로를 결정하여 초기 실행 가능한 솔루션의 최적성을 확인하는 효율적인 방법으로 평가받고 있다. 가장 큰 인덱스가 식별되면 닫힌 경로 하나만 추적해야 한다. 이 경로는 사용하지 않는 최상의 경로를 통해 운송할 수 있는 최대 단위 수를 결정하는 데 도움이 된다. Haley는 MDM의 확장으로 출발지(m), 목적지(n) 및 유형(p)의 상품에 대해 보다 확고한 운송문제를 소개하였다. 다른 불확실성 환경에서 복잡한 운송문제는 그간 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔다. Khurana와 Adlakha는 다중 인덱스 고정요금제를 사용하는 이중 운송문제를 제시하였으며, Khurana는 3차원 운송전환 문제를 연구하기도 했다. 이러한 선행연구 결과는 운송 산업의 수익극대화를 위한 복잡한 운송문제를 해결하는 데 기여해왔다. 이 연구에서는 다양한 운송모델이 갖는 출발지와 목적지의 제약조건, 운송비용 및 돌발 상황 등 도로교통 관리자의 재평가 요구사항들을 제시한다. 보다 개선된 교통흐름을 구현할 수 있는 CTP(Constrained Transportation Problem : 제한된 교통/운송 문제)에 대한 솔루션 방법을 논의하고 불균형적인 제한된 운송 문제를 처리하는 방법을 제시한다. 특히 매우 제한적인 복잡한 운송문제를 해결하기 위해 필요한 최대반복수는 $^{mnp}C_{m+n+p}$ 이며, m, n, p 는 문제(P1)이 결정된 후 정의된다. 2차원 제한된 운송문제에 가장 적합한 다항식 실행시간은 $O(m \log n(m+n \log n))$ 로 나타낼 수 있다. (Orlin, 1988).

2. 선형제약조건에 따른 3차원 제약적 운송문제

Khurana가 제시한바 있는 3차원 운송 문제는 운송할 상품의 양이나 승객의 숫자에 대한 총 가용성, 요구 및 수량 등이 지정된 제3의 목적지로의 다양한 운송 산업 발전에 기여해왔다. 가용성, 수요 및 다양한 상품에 대한 경계를 갖는 3차원 CTP(P1, P2, P3)는 다음과 같이 계산하여 도로교통에 적용한다.

$$\begin{aligned} P1 : & \text{Minimize } \sum_i \sum_j \sum_k c_{ijk} x_{ijk} \text{ subject} [\\ P2 : & \text{Minimize } \sum_i \sum_j \sum_k c'_{ijk} y_{ijk} \text{ subject} [\\ P3 : & \text{Minimize } \sum_{i=1}^{m+2} \sum_{j=1}^{n+2} \sum_{k=1}^{p+2} c'_{ijk} y_{ijk} \end{aligned}$$

여기서 $I=\{1, 2, \dots, m\}$, $J=\{1, 2, \dots, n\}$, $K=\{1, 2, \dots, p\}$ 는 각각의 출발지, 목적지 및 상품(a_i)의 집합, A_i 는 j th Origin의 최소 및 최대 가용성, b_j 와 B_j 는 각각 j th 에서 최소 및 최대 수요, 각각의 목적지 (e_k , E_k)는 상품의 최소 및 최대 가용성 (k th), c_{ij} 는 i th 출발지에서 j th 목적지까지의 운송비용, l_{jk} 및 u_{jk} 는 상품의 k th 유형에 대한(i, j)번째 경로의 하한 및 상한을 나타낸다.

- 정리 1 : 문제 P1의 실행 가능한 솔루션과 문제 P2의 가능한 솔루션(M)은 일대일로 대응되는 관계이며, 정리 1의 증거는 이 논문의 부록에 제공한다.
- 정리 2 : 실행 가능한 솔루션(P1, P2)에서 객관적인 함수와 값은 동일한 것으로 간주한다.
- 정리 3 : P1에 대한 모든 최적 실현 가능한 솔루션에는 P2에 대한 최적의 실현 가능한 솔루션이

존재하며, 그 반대의 경우도 마찬가지인 것으로 간주한다.

가용성, 수요 및 상품에 대한 경계가 있는 3차원 교통흐름에 대한 CTP는 다양한 목적지로 상품의 흐름을 제한할 수 있는 시장의 수요가 급격히 변화하는 경우를 의미한다. 이는 기존의 정치환경, 경제적 상황의 변화 또는 기업의 가용예산 등에 대한 제한요인으로 인해 발생할 수 있다. 이러한 상황은 정부/국가/회사가 일부 상품(무기, 의약품, 곡물 등)의 재고를 보유하도록 요구할 수도 있다. 이러한 상황은 소스의 가용성, 대상 요구 및 다양한 유형의 상품 간 경계가 다른 매우 복잡한 교통흐름에 대한 3차원 CTP를 유도하는 데 이용된다. 가용성, 수요 및 상품에 대한 경계를 갖는 3차원 개선된 교통흐름에 대한 CTP는 시장에서 수요가 급격히 증가하여 향상된 흐름을 필요로 하는 경우를 의미한다. 여기에는 다양한 상황(자연재해, 선거기간 또는 휴일이나 휴가시즌 등)이 야기될 수 있다. 이는 교통흐름이 공지된 지정된 레벨(F)로 개선된다고 가정하는 향상된 교통흐름에 대한 3차원 수송 문제의 경우를 의미한다. 따라서 교통흐름에 대한 다양한 제약조건($\sum_i \sum_j \sum_k X_{ijk} = F$)을 도입하여 다양한 운송 문제가 발생할 수도 있음을 확인할 수 있다.

3. 3차원 운송비용에 대한 수치해석

다양한 유형의 노트북 컴퓨터를 생산하는 3개의 기업(X, Y, Z)을 고려해보자. X는 뉴욕($i=1$), Y는 캘리포니아($i=2$), Z는 시카고($i=3$)에서 생산된다고 가정하고, 생산된 노트북은 워싱턴 DC($j=1$), 메릴랜드($j=2$) 및 필라델피아($j=3$)로 각각 배송된다고 가정한다. 노트북은 3가지 유형(8인치 화면을 갖는 노트북($k=1$), 12인치 화면을 갖는 노트북($k=2$), 16인치 화면을 갖는 노트북($k=3$))이 있다고 가정한다. O1지역에는 한 달에 모든 유형의 30~40대 노트북이 배송되며, O2지역에는 모든 유형의 15~30대 노트북이 배송되며, O3지역에는 한 달에 모든 유형의 10~20대 노트북이 배송되는 가용성 제약조건을 갖는다고 가정한다. 모든 유형의 노트북에 대한 최소 및 최대 배송 요구사항은 D1의 경우 15와 25, D2의 경우 20과 25, D3의 경우 25와 40이 된다. 이러한 제약조건은 유형1의 최소 및 최대 노트북수는 각각 20과 30이고, 유형2는 30과 40, 유형3는 15와 20이라는 요구조건이 된다. 이러한 요구조건을 수용할 수 있는 제한적인 교통흐름(P1)을 갖는 3차원 운송비용은 <표 1>과 같이 나타낼 수 있다.

<표 1> 제한적인 교통흐름(P1)을 갖는 경우 3차원 운송비용

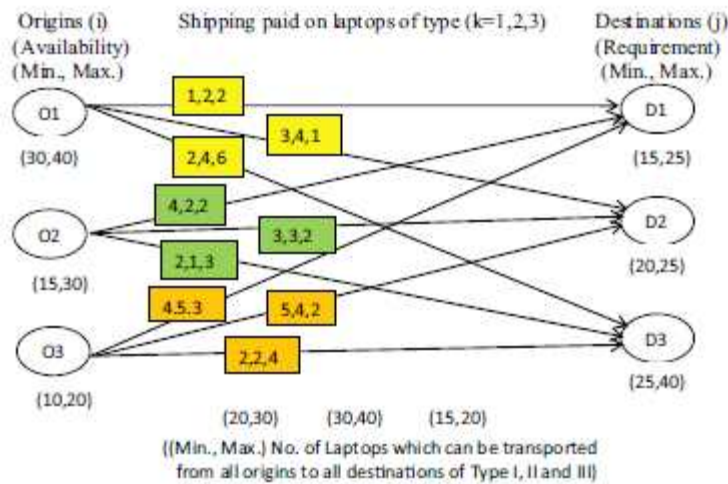
	j=1			j=2			j=3			ai	Ai
i=1	1			3			2			30	40
		2			4			4			
			2			1			6		
i=2		4			3			2		15	30
			2			3					
				2					3		
i=3		4			5			2			
			5			4			2	10	20
				3		2			4		
bj	15			20			25				
Bj	25			25			40				

$e1=20$, $E1=30$, $e2=30$, $E2=40$, $e1=15$, $E1=20$

* 자료 : Archana Khurana, Veena Adlakha, Benjamin Lev, "Multi-index constrained transportation problem with bounds on availabilities, requirements and commodities", Operations Research Perspectives 5 (2018) 319-333, p.323.

<표 1>의 비용행렬에 대한 흐름도는 [그림 1]과 같이 정의할 수 있다. 각 배송지역별 유형은 다음과 같이 실행될 때 최적화할 수 있다.

- O1지역에서 D1지역으로 배송되는 노트북수는 유형1(1, 12), 유형2(2, 10) 및 유형3(0, 8)이 된다.
- O1지역에서 D2지역으로 배송되는 노트북수는 유형1(2, 10), 유형2(0, 7), 유형3(2, 10)이 된다.
- O1지역에서 D3지역으로 배송되는 노트북수는 유형1(0, 8), 유형2(3, 5), 유형3(2, 6)이 된다.



- * 자료 : Archana Khurana, Veena Adlakha, Benjamin Lev, “Multi-index constrained transportation problem with bounds on availabilities, requirements and commodities”, Operations Research Perspectives 5 (2018) 319-333, p.325.

[그림 1] <표 1>의 비용행렬에 대한 흐름도

4. 계산 결과

가용성, 수요 및 상품에 대한 경계가 있는 다중 인덱스 CTP의 경우 2가지 테스트문제가 해결되었다. 첫째로, 제한된 교통흐름의 제약조건이 테스트문제 해결을 통해 보다 개선된 것으로 나타났다. 둘째로, 테스트문제 해결을 위한 데이터를 검증하여 결과가 요약되었다. 테스트문제에 대해 정의되지 않은 의사 결정 변수의 하한과 상한은 서로 동일한 것으로 나타났다. 더 큰 규모의 테스트 문제에서 제안된 솔루션의 타당성을 검증하기 위해 $10 \times 10 \times 9$ 로 크기를 증가시켜 몇 가지 다른 문제들을 해결하였다. 중복성이 있는 데이터에 대한 해결방법은 여기에 포함되어 있지 않다. 테스트문제는 1.7GHz, 8GB RAM(Random Access Memory)을 갖는 인텔 펜티엄 프로세서(Intel Pentium Processor)를 컴퓨터상에서 GAMS(General Algebraic Modeling System : 일반 대수모델링 시스템)를 이용하여 해결하였다. 이로써 원래 안고 있던 문제와 변형된 문제를 모두 해결하였으며, 각각 5초미만의 계산시간이 소요되었다. m 개의 노드와 n 개의 호를 이용하여 운송경로 P1에서 P5로의 복잡한 운송문제와 관련된 계산복잡성($O(m, n)$)을 <표 2>에 나타낸다.

<표 2> 운송경로(P1~P5)와 관련된 계산복잡성

운송 문제	복잡성(제안 절차)
(P1)	$O(mnp, m+n+p)$
(P2)	$O((m+1)(n+1)(p+1), m+n+p+3)$
(P3)	$O((m+2)(n+2)(p+2), mp+np+mn+4(m+n+p)+12)$
(P4)	$O(mnp, m+n+p+1)$
(P5)	$O((m+1)(n+1)(p+1), m+n+p+4)$

- * 자료 : Archana Khurana, Veena Adlakha, Benjamin Lev, “Multi-index constrained transportation problem with bounds on availabilities, requirements and commodities”, Operations Research Perspectives 5 (2018) 319-333, p.330.

5. 결론

교통정책은 운송목적지, 자원의 가용성 및 여러 유형의 교통품질 등 매우 다양한 요구사항 등이 반영되어야 한다. 이와 관련된 문제점들은 다중 인덱스로 변환하여 쉽게 해결할 수 있는 교통문제들이다. 이 연구에서는 다양한 운송모델에 대한 제약조건(소스의 가용성 등), 운송비용 및 돌발 상황 등 도로교통 관리자의 요구사항들을 반영한 CTP에 대한 솔루션 방법을 제시하였다. 주어진 CTP(Constrained Transportation Problem : 제한된 교통/운송 문제)에 다양하게 나타날 수 있는 교통흐름 제약조건들을 기반으로 나타날 수 있는 CTP 성능의 저하 또는 개선된 교통흐름에 대한 솔루션방법도 제시하였다. 이를 통해 불균형적인 교통문제에서 발생할 수 있는 상황을 처리하는 방법을 제시하였다. 솔루션 방법은 무작위 공급지점, 운송 대상 및 물량(승객 수) 등을 기반으로 주어진 CTP와 관련된 복잡한 운송문제들을 해결할 수 있었다. 이를 위해 1962년과 1963년 Haley KB에 의해 제시된 방법들(The solid transportation problem, The multi-index problem)을 적용하여 다중 인덱스 운송문제를 해결할 수 있었다. (참고문헌 [2][3] 참조) 솔루션 방법은 다양한 상품이나 승객을 운송하는 데 매우 유용함을 확인하였다. 특히 매우 제한적인 교통흐름의 제약조건을 갖는 필요한 최대 반복수를 $^{mnp}C_{m+n+p}$ 로 사용하여 복잡한 운송문제를 해결할 수 있었다. (m, n 및 p는 각각 출발지, 목적지 및 상품 수를 나타냄) 향후에는 시간과 비용 간 우선순위에 따라 최적의 쌍을 검증할 수 있는 비용-시간 절충(cost-time trade-off) 방법에 대한 연구가 필요하다.

[참고문헌]

- [1] Archana Khurana, Veena Adlakha, Benjamin Lev, “Multi-index constrained transportation problem with bounds on availabilities, requirements and commodities”, Operations Research Perspectives 5 (2018) 319–333.
- [2] Haley KB. The solid transportation problem. Oper Res 1962;10:448–63.
- [3] Haley KB. The multi-index problem. Oper Res Q 1963;11:368–79.

<원문제목> Multi-index constrained transportation problem with bounds on availabilities, requirements and commodities

<원문출처> Operations Research Perspectives 5 (2018) 319–333