

Stackelberg 게임이론을 이용한 물류시설의

최적입지결정에 관한 연구

A Study on the Optimal Location of Logistics Facilities

Using the Stackelberg Game Theory

장 훈

(서울대학교 환경대학원 박사수료)

이 강 대

(한국표준협회 선임연구원)

김 찬 성

(한국교통연구원 책임연구원)

임 강 원

(서울대학교 환경대학원 교수)

목 차

I. 서론	III. 모형 설정
1) 연구의 배경 및 문제제기	1) Bi-level 문제의 종류 및 형태
2) 연구의 방법	2) 문제의 구성
II. 기존문헌 고찰	IV. 풀이 알고리즘 및 적용
1) Covering problem	1) 알고리즘의 구성
2) Center problem	2) 예제 네트워크의 적용과 결과
3) Median Problem	V. 결론
4) Fixed charge facility location problem	참고문헌

I. 서론

1. 연구의 배경 및 문제제기

우리나라 2003년도의 국가물류비는 112.2조원(국제수송비 포함)으로 국내총생산(GDP) 대비 15.5%¹⁾로서 선진국에 비해 높은 비중을 차지하고 있어 산업 및 국가 경쟁력에 막중한 영향을 끼치고 있다. 특히 국가물류비 중에서 수송비는 전체의 81.4%를 차지하고 있어 수송비의 비중이 매우 높은 실정이다.

정부는 물류시스템의 비효율성을 극복하기 위해 물류시설의 공급과 효율적 이용, 복잡한 유통구조의 개선과 더불어 화물터미널, 물류단지와 같은 물류거점시설의 부족을 해결하기 위해서 물류시설의 효율적 확충에도 많은 노력을 기울이고 있다.

또한 국가물류비의 많은 부분이 화물을 수송하는데 발생되므로 이의 효율을 향상시키기 위한 방안 중의 하나로 국토의 중심권역에 물류거점을 설치하여 국내 및 국제 물류의 허브 역할을 수행하기 위한 물류시설을 조성하고 있다.

하지만 지금까지 국내에서 대규모 물류거점시설의 입지를 결정할 때에는 화물의 실제적인 물동량을 고려하지 않고, 각 권역별로 도시계획법이나 이와 관련한 제도, 국토의 균형발전, 지형적 조건 등에 의해 크게 좌우되거나 의사결정자의 권역별 배분에 의해 결정되고 있다.

이로 인해 물류시설의 적정입지 선정 및 수요에 따른 적정규모 산정에는 연구가 부족한 실정이며, 국내의 주요 물류거점 시설은 권역별로 화물물동량의 처리 능력이 부족하거나 일부 시설의 경우에는 시설이 과잉 공급되는 현상이 발생하고 있다.

따라서 물류시설에 대한 투자는 사회적 최적

1) 한국교통연구원(2005), 「2003 국가물류비 산정 및 추이 분석」.

화(social optimization)를 목표로 국가적 차원에서 장기적이고 종합적으로 수행되어야 하며 이를 위해서는 공공부문의 개입에 의해 사회적 최적화를 달성하도록 투자함으로써 사회전체적으로 자원배분의 극대화를 추구해야 할 필요가 있다.

2. 연구의 방법

Kim, T. J. and Suh, S. D.(1988)은 정부에서 지속적으로 시행하고 있는 교통, 물류, 자원 개발 등과 같은 국토개발계획들은 자원을 공급하는 공공부문과 이를 이용하거나 서비스를 제공하는 민간부문으로 구성되어 있는 혼합경제(mixed economic system)라고 정의하였다. 공공부문과 민간부분이 상호작용을 하게 되는 혼합경제 분야에서는 공공부문(정부)에서는 서비스, 시설 및 재화의 공급을 담당하고, 민간부문(개인, 가구, 기업 등)은 공급된 서비스 및 시설을 소비한다.

이 과정에서 공공부문은 많은 사람들의 이익을 충족시키기 위한 목적을 달성하고자 하고, 민간부문은 자신의 효용을 최대화하기 위한 선택을 하면서 두 부문은 상호 밀접한 영향을 미치게 된다²⁾.

따라서 교통, 물류, 토지이용과 같은 국가적인 계획모형에서는 공공과 민간 부문의 상호작용에 대한 관계를 동시에 고려하여 문제를 정의하는 것이 필요하며, 다수준 의사결정 방법(multi-level decision making)³⁾으로 주로 사용되고 있는 bi-level programming은 천연자원 관리, 지역개발 및 교통망설계문제(transportation network design: NDP) 등에 다양하게⁴⁾ 적용되어 왔다.

이러한 bi-level문제는 상위수준 문제와 하위수준 문제로 나눌 수 있으며, 상위수준(일반적으로 서비스 공급자)과 하위수준(일반적으로 서

비스 이용자)의 의사결정자는 자신의 목적함수를 최적화하기 위해서 자신의 전략을 선택해야 하는 계층적인 구조를 가지게 된다.⁵⁾

따라서 본 연구에서는 물류시설의 입지결정 문제에 있어서 물류시설을 공급하는 의사결정자의 선택원리를 반영하는 상위수준 문제와 시설을 이용하는 기업들의 의사결정원리를 반영하는 하위수준의 문제를 동시에 고려할 수 있는 bi-level 문제를 고려하여 최적입지를 찾고자 한다.

II. 기존문헌 고찰

입지이론은 인간의 공간적 활동으로 인해 발생한 것으로 이를 설명하기 위한 입지분석이론은 다양한 학문분야에서 개별적인 관심에 따라 연구되어 왔으며, 입지분석에 관한 이론적 근거는 지대이론(bid rent theory), 차등생산이론(product differentiation theory), 중심지이론(central place theory) 및 입지배분모형(locational-allocation model)의 4가지 분야로 구분되어 발전되어 왔다(김광식, 1987).

이 중에서 입지배분모형(locational-allocation model)은 베버⁶⁾가 주장한 공업입지의 일반이론에 근거한 것으로 베버의 최소비용입지론은 공공시설 입지분석에서 서비스 이용자와 시설간의 통행거리 또는 수송비용이 최소화되는 지점이 공공시설의 입지점이 되는 것으로 해석된다. 이 개념은 공공시설과 이용자간의 총통행거리를 최소화시키는 공공시설의 입지점을 찾는 것으로서 공간적 효율성⁷⁾을 추구하게 된다(윤대식 외, 1995).

베버의 입지이론 이후로 일정한 제약조건 하

5) 김병관(2004) 참조.

6) 1909년에 출판된 <공업입지론 Über den Standort der Industrien>에서 공업입지론을 정식화했다. 입지삼각형이라고 불리는 베버의 이론은 지리학적으로 삼각형을 형성하는 시장과 2가지 원료의 원산지에 근거하여 재화의 생산을 위한 최적입지를 찾는다. 그는 삼각형 내에서 원료를 두 원산지로부터 생산지로, 그리고 생산품을 생산지에서 시장으로 운반하는 총비용을 산출함으로써 비용이 최소가 되는 생산입지를 결정한다.

7) 입지를 결정할 때 기준이 되는 요소는 입지시설 특성, 분석자의 주관, 정치적 요소, 민간시설 또는 공공시설 등의 여부에 따라 다양하지만 일반적으로 수리모형의 경우에는 총통행거리 또는 평균통행거리를 최소화시키는 공간적 효율성과 최대통행거리 또는 최대불편을 최소화시키는 공간적 형평성으로 구분된다.

2) 이에 대한 일반적인 예로 새로운 도로 건설시에 발생하는 UE(User Equilibrium)와 SO(Social Optimum)의 불일치를 들 수 있다.

3) 다수준 의사결정문제는 경제시스템에 참여하여 의사결정을 내리는 주체가 복수임을 의미하며, 주체가 2부문인 경우에 bilevel이라고 한다. 일반적인 경우에 다수준 의사결정문제라고 하면 bilevel 의사결정문제로 정의된다.

4) 이의 예로는 천연자원의 관리문제(Shenck(1980)), 농업분야의 장기 계획(Cassidy et al.(1981)), 지역개발 계획((Seo and Sakama(1980) 등이 있다. Kim, T. J. and Suh, S. D.(1988) 개인용.

에서 목적함수의 최적화를 도모하는 입지분석 이론은 경영과학의 발달과 함께 많은 분야에서 광범위하게 수행되었으며, 많은 학자들은 연구 목적 및 문제특성에 따라 다양한 기준으로 분류하고 있다.

2.1 Covering Problem

초기의 많은 입지연구에서 특정한 시설과 수요(고객) 사이의 서비스 제공 여부는 시설과 수요지 사이의 거리에 따라 결정되는 것으로 인식하였는데, 이러한 서비스를 제공하는데 있어서 기준이 되는 거리기준을 거리범위(coverage 혹은 coverage distance)라 부른다. 일반적으로 시설입지에서 사용되는 거리(distance)의 의미는 연구자나 문제의 정의에 따라서 통행시간(travel time)이나 통행비용(travel cost)과 동일한 의미로 사용되고 있으며, covering model에서도 거리는 시간이나 비용과 같은 기준으로 대체되어 사용될 수 있다.

시설의 입지를 결정할 때 이러한 거리범위를 주요한 목적으로 삼는 방법으로는 모든 수요가 서비스를 공급하는 시설로부터 미리 설정된 거리기준인 거리범위 내에 시설이 입지하도록 하는 set covering 모형과 주어진 비용여건과 시설의 공급 능력을 감안하여 수요가 최대한으로 충족되도록 필요한 서비스를 공급하는 maximum covering 모형이 있다.

즉 covering problem은 공공서비스에 대해서 서비스를 제공하는데 필요한 특정한 수행기준이 정해져 있는 상태에서 이러한 기준에 부합하는 적절한 시설 수와 입지를 결정하는 방법으로, 일반적으로 시간(비용 또는 거리)을 중요시하는 응급시설과 그렇지 않은 일반시설의 입지 모두에 적용될 수 있다.

2.2 Center Problem

앞 절에서 살펴 본 covering model은 새로운 시설의 입지를 결정할 때 중요한 기준으로 사용되는 시설과 수요사이의 서비스 제공범위인 거리범위(coverage distance)가 외생적으로 미리 결정되어 있는 것으로 가정하였다.

하지만 center problem⁸⁾은 이러한 가정을 배

제하여, 모든 수요지가 적어도 하나의 서비스 시설로부터 필요한 서비스를 제공받으면서 시설과 수요지 사이의 최대거리를 최소화하고자 한다.

이 문제는 어떤 지역에 시설 수가 정해져 있는 특정의 시설을 설치하고자 할 때 그 시설을 이용하고자 하는 수요의 최대통행거리(통행시간 또는 통행비용)을 최소화하는 위치를 결정하는 방법으로 응급의료 중심지, 소방서와 같이 수요가 일정치 않고, 빠른 시간내에 서비스를 제공해야 하는 시설의 위치를 결정할 때 주로 사용된다.⁹⁾

이와 같은 center problem은 수요지와 서비스를 제공하는 시설 사이의 거리기준(coverage distance)이 주어지지 않았다는 측면에서 coverage 모형과는 다르지만, 시설의 최대치까지 외생적으로 주어진다라는 측면에서는 maximum covering model과 유사성¹⁰⁾을 보이고 있다.

2.3 Median Problem

앞에서 살펴 본 coverage model과 center problem에 속하는 입지문제들은 수요지와 이와 인접한 입지시설 사이의 거리가 기준이 되는 거리범위(coverage distance)보다 작은 경우에는 수요지에서 필요한 모든 서비스는 인접한 시설에서 제공받을 수 있지만, 이 보다 큰 경우에는 어떠한 서비스도 공급을 받지 못함을 가정하고 있다. 즉, 아래의 그림 1에서 알 수 있듯이 두 지점 사이의 거리가 거리범위의 임계점 내에 있는 경우에는 두 지점 사이의 거리에 관계없이 수요지는 모든 편익을 인접한 시설에서 제공받을 수 있으나, 임계점 거리를 벗어나는 순간부터 어떠한 편익도 제공받지 못함을 가정하고 있다(그림 1).

하지만 일반적인 경우에는 수요지와 시설 사이에서 발생하는 편익이나 비용은 두 지점 사이의 거리에 관계없이 일정하기 보다는 거리가 증가함에 따라서 점진적으로 감소하거나 증가

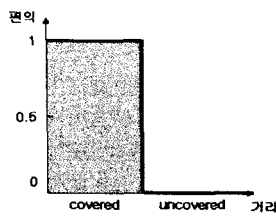
수에 따라서 연구자에 따라서는 minimax라는 의미로도 사용되고 있다.

9) 이우승(1999), p. 72. 참조.

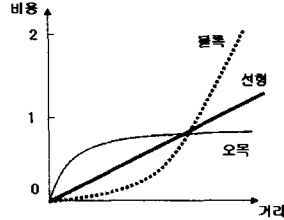
10) center problem은 입지해야 하는 시설의 수가 외생적으로 주어지는데, 정의된 시설의 수 P에 따라 p-center problem이라고 불린다.

8) center problem은 최대통행거리를 최소화한다는 목적함

한다고 인식되고 있다. 이러한 경우에 수요지와 시설 사이에 발생하는 비용의 변화는 두 지점의 거리가 증가함에 따라서 일정한 비율로 증가하는 선형의 관계와 비선형 관계로 구분될 수 있고, 비선형 관계는 다시 볼록(convex)한 형태와 오목(concave)한 형태로 구분되고 있다 (그림 2).



<그림 1> covering 개념의 거리기준별 편익



<그림 2> median 모형의 거리별 비용함수

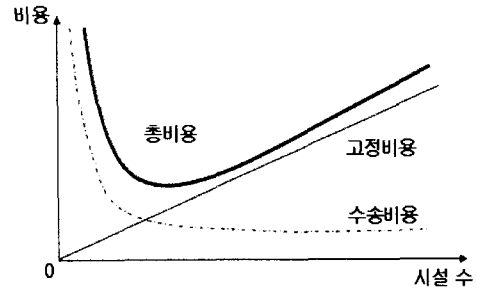
1.4 Fixed Charge Facility Location Problem

대부분의 입지모형에서는 입지해야 하는 시설의 수가 미리 주어지는 것으로 가정하여 모형을 설정하고 있다.

위와 같이 미리 정해진 시설의 수를 입지시키기 위해 설정된 목적함수를 최적화시키는 방법들은 목적함수에 시설의 운영측면에 관한 요소(수송비)는 명백하게 포함하고 있지만, 시설의 건설에 관계된 고정비용은 시설의 수(P)가 이를 대리하여 반영하고 있음을 가정하고 있다.

이러한 가정은 시설을 설치하는 비용(고정비용)을 지불하는 주체와 공급된 시설로 인해 편익이 증가하는 주체가 서로 다르거나, 비용과 편익이 하나의 단위로 측정이 불가능한 경우에는 타당성이 있으나, 두 주체가 동일하거나 설치비용과 편익이 하나의 단위로 측정이 가능한 경우에는 타당성이 부족하게 된다.

이러한 관계는 다음의 그림 3에서도 살펴볼 수 있다. 즉, 시설의 고정비용(건설비용)을 고려하지 않고, 운영비용(수송비용)만을 고려할 경우에는 입지되는 시설의 수가 증가할수록 수요지와 인접한 시설간의 평균비용(거리)이 감소하게 되므로 시설이 최대한 많이 설치될수록 서비스 수준은 높아지게 되지만, 시설을 공급해야 하는 주체의 입장에서는 시설의 수가 증가할수록 예산제약에 직면하게 된다.



<그림 3> 수송비 및 고정비와 총비용의 trade-off 관계

따라서 전체 물류시스템적인 관점에서 각 시설을 설치하는데 소요되는 건설비용과 두 지점 사이의 수송비용을 총비용 측면에서 동시에 고려한다면 시설의 수는 무한히 건설되는 것이 아니라 총비용을 최소화 시키는 수준에서 건설되는 것이 바람직함을 알 수 있다.

<표 1> 고전적 입지모형의 구분

구분	시설 수	거리 기준	목적함수	서비스 공급대상	투입요소 ¹⁾
covering	set covering	내생 ²⁾ 있음	총비용 최소화	모든 수요	- 거리기준
	maximum covering	외생 ²⁾ 있음	수요 최대화	최대한 많은 수요	- 거리기준 - 수요량 - 입지할 시설 수
center	외생	없음	최대거리 최소화	모든 수요	- 수요량 - 입지할 시설 수
median	외생	없음	총비용 최소화	모든 수요	- 수요량 - 입지할 시설 수
fixed charge	내생	없음	총비용 ³⁾ 최소화	모든 수요	- 수요량 - 시설의 고정비 - 수요 · 거리당비용 - 시설의 용량 ⁴⁾

주1) 수요노드, 입지후보지 및 이들 사이의 거리는 모든 모형에 기본적으로 필요한 항목임

주2) 다른 모형에서의 시설의 수(P)는 P개의 시설이 입지되어야 함을 의미하지만, 여기서는 P개 혹은 이보다 적은 수의 시설이 입지

주3) 다른 모형에서의 총비용은 수송비만을 대상으로 하고 있으나 fixed charge 모형에서의 총비용은 수송비와 고정비의 합을 의미

주4) fixed charge 모형은 입지할 시설의 용량이 제약되어 있는 경우와 그렇지 않은 경우로 구분되는데, 용량이 제약되어 있는 경우에는 시설의 용량이 미리 결정되어야 함

III. 모형설정

3.1 Bi-level 문제의 종류 및 형태

바이레벨 형태로 구성된 최적화 문제는 게임 이론 측면에서 보면 두 문제(상위수준 문제와 하위수준 문제)들이 서로 협력 없이 (noncooperative) 자신들만의 목적을 최적화시키는 형태인 Nash 비협력 게임과 리더(leader)와 추종자(follower)가 존재하여 리더는 추종자

의 행태를 알 수 있다는 가정하에 문제를 구성하는 Stackelberg 협력 게임으로 구분된다¹¹⁾.

Nash 비협력 게임에서는 두 의사결정자가 자신의 목적을 최적화하기 위해 다른 의사결정자의 반응을 알지 못하고, Nash 균형상태에서는 어떤 의사결정자도 자신의 결정을 일방적으로 바꿈으로써 자신의 목적을 향상시킬 수 없다는 특징을 가지고 있다. 이에 반해 Stackelberg 게임에서는 상위수준 의사결정자는 하위수준 의사결정자가 어떻게 행동할지를 알고 있다고 가정하여 상위수준의 의사결정자는 하위수준의 의사결정에 개입할 수는 없지만, 자신의 의사결정에 하위수준 의사결정자의 반응을 고려할 수 있다는 특징을 가진다¹²⁾.

이 두 게임이론은 정책결정자와 이용자 집단이 서로 결합되어서 서로의 어떤 전략 또는 결과물을 내놓을 때 두 집단 사이의 반응을 모형화하기 위한 토대를 제공한다.

본 연구에서 분석의 대상으로 삼고 있는 Stackelberg 방식에 근거한 bi-level 문제는 상위수준과 하위수준의 목적함수와 제약조건에 따라서 다음과 같이 정의된다.

상위수준 목적함수(U)

$$\begin{aligned} & \underset{x}{\text{minimize}} && F(x, y) \\ & \text{subject to} && G(x, y) \leq 0 \end{aligned}$$

여기서, $y = y(x)$ 은 아래에 의해서 정의된다.

하위수준 목적함수(L)

$$\begin{aligned} & \underset{y}{\text{minimize}} && f(x, y) \\ & \text{subject to} && g(x, y) \leq 0 \end{aligned}$$

3.2 문제의 구성

1) 상위수준 목적함수

의사결정자의 기준(예산 범위) 내에서 운송비와 고정비의 합인 총비용을 최소화시키면서 다양한 지점에 있는 고객들의 수요수준을 충족시키는 물류시설의 최적입지를 산정하기 위한 상위 목적함수는 아래와 같이 설정된다.

상위수준 목적함수(U)

$$\min \sum_i \sum_j^q C_{ij}(X_{ij}) \cdot W_{ij} + \sum_j \sum_k^r C_{jk}(X_{jk}) \cdot W_{jk} + \sum_j f_j Y_j$$

$$\text{where } \sum_j Y_j \geq 1$$

$$Y_j \in 0, 1$$

$$\sum_j W_{ij} = O_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, p$$

$$\sum_j W_{jk} = D_k \quad \forall k = 1, 2, \dots, r$$

$C_{ij}(\cdot)$: 통행 비용

X_{ij} : 시설 j를 이용하는 수요지 i의 교통량

f_j : 시설 j를 설치하는데 소요되는 비용

Y_j : 입지변수(location variable)

2) 하위수준 목적함수

통행비용이 비대칭적인 복수수단의 통행배정 문제는 주로 대각화 알고리즘을 이용하여 풀 수 있는데, 여기에는 변동부등식을 목적함수로 이용하는 방식과 명시적인 모형의 구축을 사용하지 않고, 대각화 알고리즘과 convex combination algorithm을 이용하여 해를 구하는 방법이 있다¹³⁾. 본 연구에서는 두 번째 방법인 Beckmann식 형태를 이용하여 구축된 최소화함수를 대각화 알고리즘으로 푸는 방법을 사용하기 위해 하위수준의 목적함수를 아래와 같이 구성한다.

하위수준 목적함수(L)

$$\min Z^n(x) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(x_1^n, \dots, x_{a-1}^n, w, x_{a+1}^n, \dots, x_n^n) dw$$

위 식의 경우 통행비용함수식 내에서 변수는 w뿐이고, 나머지 변수들은 상수로 간주되기 때문에 미분시 0이 된다. 따라서 네트워크를 구성하는 차종이 두 가지인 경우의 대각화 기법에 사용되는 목적함수는 아래와 같다.

하위수준 목적함수(L)

$$\min Z(x_{a,a}, x_{a,b}) = \sum_a \int_0^{x_{a,a}} t_{a,a}(w) dw + \sum_a \int_0^{x_{a,b}} t_{a,b}(w) dw$$

$$\text{where } \sum_k f_{ak}^s = q_a^s, \quad \sum_k f_{bk}^s = q_b^s \quad \forall k, r, s$$

$$f_k^s = f_{ak}^s + f_{bk}^s$$

$$q^s = q_a^s + q_b^s$$

11) 임용택 · 임강원(2004) 참조

12) 김병관(2004) 참조

13) 임강원 · 임용택(2003), pp. 189-190 참조.

- $x_{a,a}$: 링크 a를 이용하는 a수단의 교통량
- $x_{a,b}$: 링크 a를 이용하는 b수단의 교통량
- $t_{a,a}$: 링크 a를 이용하는 a수단의 통행시간
- $t_{a,b}$: 링크 a를 이용하는 a수단의 통행시간
- f_k^{rs} : r-s를 연결하는 경로(path) k의 교통량
- f_{ak}^{rs} : 경로(path) k중 a수단을 이용하는 교통량
- f_{bk}^{rs} : 경로(path) k중 b수단을 이용하는 교통량

IV. 풀이 알고리즘 및 적용

4.1 알고리즘의 구성

본 연구의 목적인 물류시설의 입지를 구하기 위해 stackelberg bi-level을 풀기 위해서 상호작용을 하게 되는 하위 문제와 상위문제를 해결해야 한다.

상위문제는 하위문제에서 결정된 링크별 교통량을 이용하여 최적입지를 구하는 문제로, 하위문제는 복수수단간 사용자 균형을 만족하는 균형해를 찾는 식으로 구성된다.

여기서 하위문제의 복수수단은 승용차와 트럭으로 구성되어 있기 때문에 이 문제는 복수수단의 통행배정 문제로 귀결된다. 복수수단 통행배정문제는 사용된 링크비용 함수의 야코비안 행렬에 따라 대칭적인(symmetric) 문제와 비대칭적(asymmetric)인 문제로 구성되는데 이는 다음과 같다.

- 대칭적인 상황의 통행비용함수의 야코비안 관계

$$\frac{\partial c_a(x)}{\partial x_b} = \frac{\partial c_b(x)}{\partial x_a}, \quad \forall a \neq b$$

- 비대칭적인 상황의 통행비용함수의 야코비안 관계

$$\frac{\partial c_a(x)}{\partial x_b} \neq \frac{\partial c_b(x)}{\partial x_a}, \quad \forall a \neq b$$

하지만 일반적으로 모형의 현실설명력을 고려할 때 복수수단의 통행비용은 비대칭적 즉, 링크 a에 트럭이 미치는 영향과 링크 b에 승용차가 미치는 영향이 동일하지 않음을 가정하고 있다.

따라서 본 연구에서도 하위수준의 복수수단의 통행배정을 실시할 때 비대칭적인 통행비용 함수로 구성되어 있는 링크통행비용을 이용하기로 한다. 또한 이러한 상황에서 많이 이용되

고 있는 streamlined diagonalization algorithm을 이용한다.

이를 풀기위한 알고리즘의 구성은 다음과 같다.

단계 1: 초기화

- 초기의 물류입지 패턴을 가정한다.

단계 2: 하위문제 풀이

- 하위문제는 별도의 복수수단통행배정 방법이 필요하며, 이를 위해 사용되는 일반적으로 사용되는 diagonalization algorithm의 구성은 다음과 같다.

단계 1: 초기화

- 자유교통류 링크 비용을 통해 승용차와 트럭의 최단경로를 각각 계산하여 all-or-nothing 배정을 실시한다. 이를 통해 각각의 수단에 대한 링크별 통행량(X_a^n) 산출한다.

단계2: 갱신

- 위에서 구한 교통량에 따른 새로운 통행비용의 값을 산출한다.

단계 3: 방향탐색

- 새로 결정된 링크 통행비용에 따라 다시 all-or-nothing을 수행한다. 이를 통해 산출된 링크 통행량(Y_a^n)으로 설정한다.

단계 4: Line Search

- 다음의 식을 풀어서 α 를 결정한다.

$$\min \sum_a \int_0^{x_a^n + \alpha(y_a^n - x_a^n)} t_a(w) dw$$

단계 5: 이동

- 위에서 구한 α 와 다음의 식을 이용하여 새로운 교통량 산출한다.

$$x_a^n + \alpha(y_a^n - x_a^n)$$

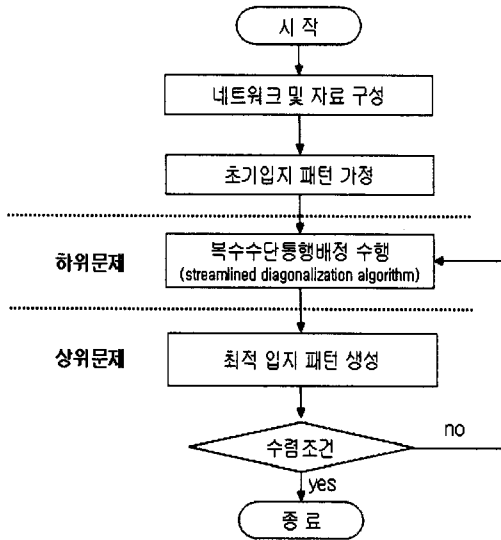
단계 6: 수렴 테스트

단계 3: 상위문제 풀이

- 하위문제에서 결정된 교통량을 이용하여 최적입지를 결정한다.

단계 4: 수렴테스트

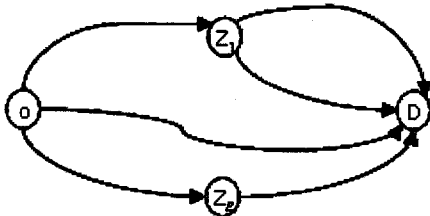
지금까지 살펴본 알고리즘의 흐름은 다음과 같다.



<그림 4> 모형의 흐름도

4.2 예제 네트워크 적용 및 결과

본 연구의 적용을 위한 예제 네트워크의 구성은 출발지와 목적지는 각 1개 노드, 물류시설이 입지해야 할 후보지는 Z_1 과 Z_2 의 간략한 구성되어 있다.



<그림 5> 네트워크 형태

또한 위의 네트워크에 사용되는 수단별 교통량은 승용차와 트럭이 각각 5대와 3대이며, 링크 통행비용함수는 다음과 같다.

$$t_{a,승}(x_{a,승}, x_{a,트}) = 1 + 2x_{a,승} + x_{a,트}$$

$$t_{a,트}(x_{a,트}, x_{a,승}) = 1 + 3x_{a,트} + 2x_{a,승}$$

위의 예제를 풀기 위해서 입지해야 하는 시설의 초기값을 두 시설 모두 시설이 입지함을 의미하는 (1,1)로 설정하였으며, 이를 기반으로 하위수준의 통행배정을 실시하였다. 이 초기값을 이용하여 승용차와 트럭의 복수수단통행배정을 수행하였으며, 이를 통해 트럭의 경로통행비용이 사용자균형(UE: User Equilibrium)을 만족하는 교통량을 산출하였다. 상위문제의 해를 풀기 위해서 이용하여 이 값을 최적의 입지를 구한 값은 입지시설의 위치는 Z_1 로 설정되었다.

문제를 완료하기 위해서는 전체 문제의 첫 번째 수행에서 구한 목적함수의 값이 두 번째 목적함수의 값과 비교해서 기준값 이내에 들거나 동일해야 하기 때문에 Z_1 을 이용하여 다시 하위 문제의 통행배정을 실시한다. 이 방식을 반복하여 두 번째 수행에서 구한 최적입지는 첫 번째 수행에서 구한 Z_1 과 동일한 위치로 구해졌다. 따라서 간략하게 구성된 네트워크에서 bi-level 문제를 구성하여 구한 최적 입지는 Z_1 으로 선정되었다.

V. 결론

지금까지 물류시설의 입지결정문제는 시설을 공급하는 정부나 이를 이용하는 기업이 서로 독립적으로 의사결정을 하는 것이 아니라 기업의 의사결정 패턴이 정부의 입지시설 공급 및 위치결정에 상호 영향을 미친다는 가정을 통해서 stackelberg bi-level 문제로 구성하였다.

여기서 상위문제는 총비용 최소화문제, 하위 문제는 비대칭적인 통행비용함수를 가지는 트럭과 승용차의 복수수단에 대해서 균형교통량을 만족시키는 최소화문제로 구성하여 해결하였다.

하지만 하위문제는 수학적인 모형이라기 보다는 목적함수를 만족시키기 위해 일반적으로 사용되는 대각화 알고리즘을 이용하였으며, 모형의 적용을 위해서 사용된 알고리즘은 2개의 입지 후보지와 하나의 기·종점을 갖는 소규모 네트워크로 구성하였다.

따라서 본 모형의 실제적인 적용성과 다른 모형과의 비교를 위해서는 현재 구축되어 있는 실제 네트워크와 물동량 자료를 이용하여 이에 대한 연구를 확장할 필요가 있다.

■ 참고문헌

- 강맹규(1991), 「네트워크와 알고리즘」, 박영사.
- 광노균·최태성(1998), 「경영과학-이론과 응용」, 다산출판사.
- 김광식(1987), "도시공공서비스 시설과 그 이용자간의 접근성 측정에 관한 연구", 국토계획, 제22권, 제3호, pp.69-84.
- 김광식(1989), "도시공공서비스 시설의 입지-배분모형과 그 적용", 사회과학, 제28권, 제2호, pp. 185-207.

- 김병관(2004), 『Stackelberg 게임 이론을 적용한 도로 혼잡통행료 산정 모형 개발』, 서울대학교 환경대학원 석사학위논문.
- 김병관·임용택·임강원(2004), “민감도 분석을 이용한 도로 혼잡통행료 산정 모형 개발”, 대한교통학회지, 제 22권, 제5호, pp. 139-149.
- 임강원·임용택(2003), 『교통망분석론』, 서울대학교 출판부.
- 임용택·임강원(2004), “Bi-level program에서 Cournot-Nash 게임과 Stackelberg 게임의 비교 연구”, 대한교통학회지, 제22권, 제5호, pp. 99-106.
- Ballou, R. H.(2004), 『Business Logistics/Supply Chain Management: Planning, Organizing and Controlling the Supply Chain』, Prentice Hall.
- Brandeau, M. L. and S. S. Chiu(1989), “An Overview of Representative Problems in Location Research”, Management Science, Vol. 35, No. 6, pp. 645-674.
- Chhajed, D., R. L. Francis and T. J. Lowe(1993), “Contributions of Operations Research to Location Analysis”, Location Science, Vol. 1, pp. 263-287.
- Current, J., M. S. Daskin and D. Schilling(2002), “Discrete Network Location Models”, In Drezner, Z. and H. W. Hamacher, 『Facility Location: Applications and Theory』, Springer.
- Daskin, M. S. and S. H. Owen(2003), “Location Models in Transportation”, In Hall, R. W., 『Handbook of Transportation Science』, Kluwer Academic.
- Francis, R. L., L. F. McGinnis and J. A. White(1983), “Locational analysis”, European Journal of Operational Research, Vol. 6, pp. 220-252.
- Francis, R. L. and J. A. White(1974), 『Facility Layout and Location』, Prentice-Hall, pp. 2-7.
- Gao, Z. Y., J. J. Wu and H. J. Sun(2005), “Solution Algorithm for the Bi-level Discrete Network Design Problem”, Transportation Research B, Vol. 39, pp.479-495.
- Garey, M. D. and D. S. Johnson(1979), 『Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness』, W.H. Freeman & Co., pp. 219-220.
- Handler, G. Y., and P. B. Mirchandani(1979), 『Location on Networks Theory and Algorithms』, MIT Press.
- Hamacher, H. W. and S. Nickel(1998), “Classification of Location Model”, Location Science, Vol. 6, pp. 229-242.
- Mesa, J. A. and T. B. Boffey(1996), “A Review of Extensive Facility Location in Networks”, European Journal of Operational Research, Vol. 95, pp. 592-603.
- Owen, S. H. and M. S. Daskin(1998), “Strategic Facility Location: A Review”, European Journal of Operational Research, Vol. 111, pp. 423-447.
- Sun, H. J., Z. Y. Gao and J. J. Wu(2007), “A Bi-level Programming Model and Solution Algorithm for the Location of Logistics Distribution Centers”, Applied Mathematical Modelling, In Press, Corrected Proof, Available online.