

엘리베이터 시스템 설치 사양의 최적화를 위한 모델 (A Model for Optimizing Configurations of the Elevator Systems)

이 영 혜*

이 재 봉*

Abstract

A mixed integer non-linear programming model which has the object function as minimizing building costs, and constraints with the functions for carrying capacity and service level of queueing time is developed. By using the proposed model, the most adequate on a building and the most economical elevator's specifications could be determined by sequential search method like complex method.

1. 서 론

도시의 교통은 전철, 지하철, 자동차는 물론이고 엘리베이터도 종방향의 교통기관으로서 큰 역할을 하고 있다.

현재 철도, 지하철의 설치 및 증설계획은

시설규모로 부터 경제성까지 교통수요, 가동율 등을 면밀히 조사 연구한 후 여러가지 수학적 기법을 이용하여 결정하고 있다. 그러나 종래의 엘리베이터 설비는 건축 설계자로부터 건물의 부대설비로서 어느정도 경시

* 한양대 산업공학과

되어 온것이 사실이다. 따라서 그 설비계획도 과거의 실례를 토대로, 또는 설계자의 임의대로 설치하여 왔다. 그 결과 신축건물에 비교하여 조잡한 엘리베이터도 되고 반대로 건물의 규모 및 이용자에 비해 경제성을 무시한 고급 엘리베이터를 설치하는 것도 결국은 설비계획에 관한 과학적인 고찰이 결여된 때문이다.

현재 세계무역센터 빌딩, 존 한코크센터 빌딩 등 선진국 초고층빌딩의 엘리베이터 설비계획은 최초 건축설계시 부터 교통수요를 수년 후까지 예측하고 운행상태를 시뮬레이션(simulation)으로 검토하여 적재량, 속도, 댓수, 운행계획 등을 컴퓨터에 의해 입안하고 있다. 그러나 국내 엘리베이터의 실례를 살펴보면 40여년전 신세계 백화점에 일본회사의 엘리베이터가 설치된 이래 1968년까지 수입에만 의존하여 왔다. 그 후 1978년의 고도성장과 아파트 건설붐에 따른 엘리베이터 수요량의 급증으로 10년 사이 부품의 국산화율이 97-98%에 달하고 있다. 그러나 software측면에선 아직도 선진국의 과학적인 설비계획에 수준이 크게 못미치고 업계와 학계의 연구실적 역시 극히 미미한 실정이다. 실례로 우리손에 의해 설계, 건설된 국내 최고층 빌딩인 대한생명보험 사옥, 63빌딩도 엘리베이터 설비계획은 일본의 미쯔비시, 히타치사에 의해서 이루어진 실정이다. 앞으로 우리나라는 여러가지 실정

에 비추어 건물의 대형화, 고층화가 더욱 가속될 것이며 이에따라 엘리베이터의 중요성도 종래에 비해 더욱 커질 것이다. 따라서 엘리베이터 시스템에 대한 개발과 연구는 필요불가결한 상태에 있다. 이러한 배경하에서 본 연구는 신축건물의 엘리베이터 설비계획시 엘리베이터 수송능력 및 서비스조건을 설계자의 요구에 최대한 충족시키면서 또한 설비비용을 최소화하는 경제적인 엘리베이터 사양을 결정하는 최적화모형을 개발하는데 목적이 있다.

연구방법으로는 「승강기 안전설계 기준」(KSCP-C-1027)에 제시된 엘리베이터 설비계획에 관한 이론적 고찰을 한후 5분간 수송능력, 승객평균 대기시간등을 제한식으로 하고 비용을 최소화하는 목적함수를 가진 최적화모형을 개발하여 비선형 혼합 정수계획법에 의하여 최적안을 구하는 알고리즘을 제시한후 사례연구로서 실제의 건물에 적용, 모형을 평가하는 방법으로 연구를 진행한다. 이러한 연구에 대한 본 논문의 각 장별 구성은 제2장에서 엘리베이터 설계기준에 관한 일반적인 이론을 고찰하고 제3장은 경제적인 엘리베이터 사양결정을 위한 최적화 모형을 제시 제4장에서 모형을 적용, 그 결과를 분석한다. 제5장은 결론으로서 연구의 내용을 요약하고 본 논문의 한계점 및 앞으로의 연구방향을 제시하였다.

2. 엘리베이터 설비에 관한 일반적 고찰

2.1 엘리베이터의 기본사양

엘리베이터 설비계획을 입안 할때는 빌딩의 규모 및 성격에 따른 교통수요를 추정하고 그 빌딩의 규모 및 용도에 적합한 서비스 형식을 선택하여 교통수요를 충분히 수용할 수 있는 엘리베이터의 양적, 질적인 서비스 능력은 물론 설비비용에 따른 경제성이 동시에 고려되어야 한다.

엘리베이터는 정원과 속도에 따라 권상기와 전동기의 용량, 카아(car)의 크기, 구동 방식 등이 결정되며 여기에 건물의 용도나 규모에 따라 운전방식, 승강장이나 카아의 위치가 정해지고, 교통수요를 충족할 수 있는 엘리베이터 댓수가 산정되어 마지막으로 가격이 산출된다. 즉 엘리베이터 설비계획의 기본 사양은 정원, 속도, 설치 댓수라고 할 수 있다.

현재 국내외에서 생산되고 있는 승용 엘리베이터는 카아의 정원이 4인승에서 24인승까지, 정적 속도는 30(m/min)의 저속에서 부터 1980년 일본에서 생산한 600(m/min)까지로 다양하다.

2.2 사양결정을 위한 교통계산

교통계산이라 함은 교통수요, 즉, 건물의 상주인구와 단위시간에 집중되는 집중인구를 최대한 정확히 추정하고 이에 따른 엘리베이터의 운행계획과 사양을 가정하여 엘리베이터의 수송능력과 승객의 평균 대기시간을 산출한 후 계산결과를 기준치와 비교, 판정하는 과정을 말한다. 엘리베이터의 기본사양을 결정하기위한 절차는 그림 1과 같다.

2.2.1 교통수요 예측

교통수요는 건물의 용도 및 성격, 입지상황 등과 수년후 기업의 성장에 따른 인구의 증가를 고려하여 정확하게 예측 되어져야 한다. 교통수요는 건물 상주인구와 집중율로 나누어 추정한다.

(1) 건물인구의 추정

건물 상주인구의 추정은 한회사 전용빌딩의 경우는 어느정도 예측이 가능하나 불가능한 상황에서는 층별인구를 가정한다.

$$\text{건물인구} = \text{층별인구} \times \text{층수}$$

$$\text{층별인구} = \frac{\text{층별 유효면적}(m^2)}{1\text{인당 점유면적}(m^2/\text{인})}$$

1인당 점유면적은 대사무소빌딩인 경우 7-8 (m²/인), 중사무소빌딩의 경우 6-7(m²/인)의 수치로 가정할 수 있다.*

* 한회사전용빌딩 - 건물 대부분에 한 회사만 입주하는 빌딩

o 준 전용 빌딩 - 건물의 하층이 일사빌딩이고 나머지 상층엔 플로어 임대로 입주하는 방법

o 플로어(floor) 임대빌딩 - 층단위로 여러회사가 입주하는 빌딩

o 블록(block) 임대빌딩 - 1개층에 여러회사가 입주하는 빌딩

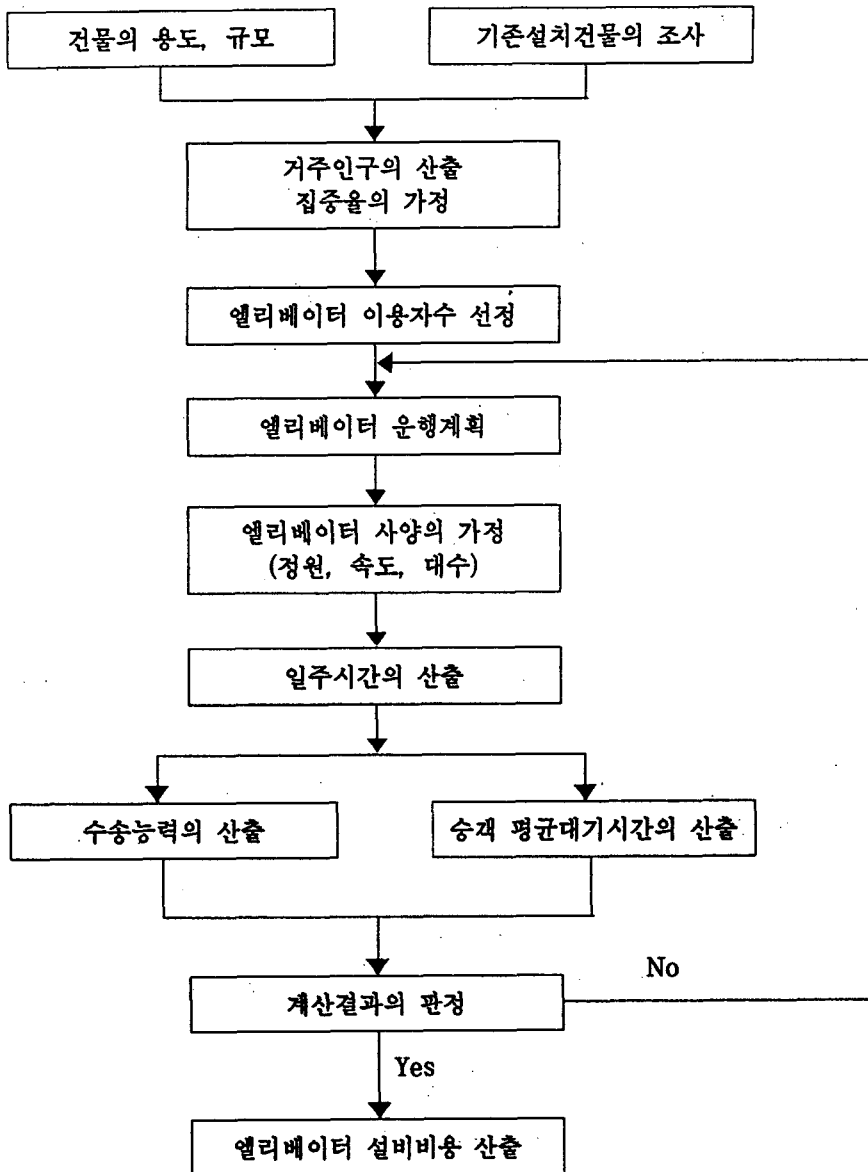


그림1. 기본사양 결정을 위한 절차

(2) 집중율

집중율은 전체 거주인구에 대하여 단위시간에 집중되는 엘리베이터 이용자수의 비율로서 건물의 성격, 규모에 따라 상이하다. 설치될 엘리베이터의 수송능력을 판정하는 중요한 기준으로서 피이크 타임시의 최고집중율을 추정한다.

$$\text{집중율 (\%)} = \frac{\text{5분간 엘리베이터 이용자 수}}{\text{엘리베이터 이용 거주인구}}$$

승강기 안전설계 기준(KSC-C-1027)상에 나타난 사무소빌딩의 출근시 집중율은 다음과 같다.

- 일사 전용빌딩 : 20-25%
- 준 전용빌딩 : 16-20%
- 관공서 빌딩 : 14-18%
- 플로어(floor) 임대 빌딩 : 14-16%
- 블록(block) 임대 빌딩 : 12-14%

(3) 교통계산을 위한 시간대의 결정

일반적으로 교통수요의 피이크 타임은 출근시, 점심시, 퇴근시에 발생한다. 사무소빌딩의 경우는 통상 아침 출근시 피이크가 발생하므로 상승 피이크패턴(intense up peak pattern)을 대상으로 교통계산을 한다. 그러나 사원식당이 아래층에 있어 점심때의 교통수요가 출근시 이상 혼잡할때는 점심시간에 하강 피이크패턴을 대상으로 할 수도 있다.

2.2.2 엘리베이터의 수송능력

엘리베이터의 수송능력은 양적인 면과 질적인 면으로 나누어 볼 수 있다. 양적으로는 교통수요를 과부족없이 충분히 수송할 수 있어야하며 질적으로는 엘리베이터 이용자의 대기시간을 어느 허용치 이하로 서비스 할 수 있도록 설계되어야 한다.

(1) 5분간 수송능력 (5-min Carrying Capacity)

엘리베이터의 양적인 수송능력을 말하며 건물인구에 대하여 엘리베이터가 5분간에 수송할 수 있는 인원을 백분율로 나타낸다.

$$\text{1대당 5분간 수송능력(명)} p = \frac{5 \times 60 \times r}{RTT}$$

$$\text{5분간수송능력 (\%)} P = (pN/Q) \times 100 \dots (1)$$

r : 승객수(엘리베이터 탑승인원의 추정치)

N : 엘리베이터 댓수

Q : 건물인구

RTT : 일주시간

(2) 승객 평균대기시간 (Average Queueing Time)

엘리베이터 이용자가 평균적으로 대기하는 시간으로서 엘리베이터의 일주시간을 그룹운행하고 있는 엘리베이터의 병설댓수로 나눈값으로 평균운행간격이라고 할 수 있다.

$$\text{Tav(초)} = \frac{RTT}{N} \dots \dots \dots (2)$$

표1. 수송능력 판정기준 [5]

건 물 의 종 류	5분간 수송능력 (%)	평균 대기시간
일사전용의 대빌딩	20 - 25	30초이하 : 양 호 30 - 40초 : 보 통 40초이상 : 불 량
준전용 빌딩	16 - 20	
관공서 빌딩	14 - 18	
블록임대 사무소빌딩	12 - 14	
플로어임대 빌딩	14 - 16	
아 파 트	5 - 7	90초이하 : 양 호
호 텔	10	40초이하 : 양 호
병 원	20	40초이하 : 양 호

엘리베이터의 능력은 5분간 수송능력, 승객 평균대기시간으로 나타낼 수 있으며 이 두가지 항목이 어느 수준에 도달할 수 있도록 기본사양이 설계 되어져야 한다. 또한 댓수가 많은 엘리베이터군(群)에 대해서는 서비스층의 분할(zoning)을 검토한다. 표 1은 한국공업표준상의 5분간수송능력, 승객평균 대기시간의 설계기준치를 나타낸 것이다.

2.2.3 일주시간(One Round Trip Time)

교통계산에서 일주시간이라 함은 카아가 출발층에 되돌아 온 시점으로 부터 출발층에서 승객을 싣고 올라갔다다 다시 출발층에 되돌아 올 때까지의 시간이며 수송능력을 산출하는 기본이 된다.

$$\text{일주시간(RTT)} = \text{주행시간} + \text{문개폐합계시간} \\ + \text{승객출입시간} + \text{손실시간(초)}$$

그림 2는 일주시간을 그래프로 나타낸 것이다.

일주시간을 항목별로 설명하면 다음과 같다.

(1) 주행시간 (Tr)

주행시간은 가속·감속시간 및 전속주행시간의 합이다. 분할서비스형식을 취할 경우 지역구간 주행시간과 급행구간 주행시간으로 나눌 수 있다. 주행시간은 급행구간(express area)에서는 엘리베이터의 정격속도를 높여서 시간을 단축할 수 있으나 지역구간(local area)의 경우에는 엘리베이터가 정격속도에 도달치 못하므로 그 실효 속도가 떨어진다. 주행시간이 많으면 비용이 상승하므로 지역구간에서는 타는 기분이 좋고 가감속시간이 짧은 엘리베이터를 선택할 필요가 있다.

다음은 엘리베이터의 주행시간에 관한 요소를 JIS A 4301에 따라 설명한 것이다.

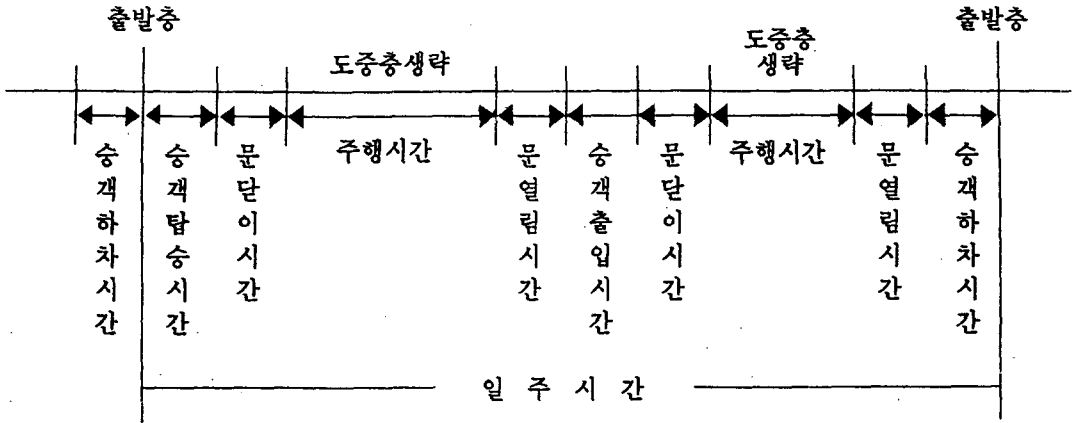


그림2. 일주시간의 그래프

1) 가속시간 (t_a)

가속시간은 엘리베이터가 정격속도에 도달할 때 까지의 시간이며 그림3은 정격속도와 가속시간의 관계를 그래프로 나타낸 것이다. 가속시간 t_a 를 구하는 공식은 식(3)과 같다.

$$v = \int_0^{t_a} \alpha dt = \alpha_n (t_a - t_0) \quad *$$

$$t_a = v/\alpha_n + t_0 \text{ (초)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

v : 정격속도 (m/sec)

t_a : 가속시간 (sec)

S_a : 가속거리 (m)

α_n : 최대가속도 (m/sec²)

t_0 : 증가속시간 (sec)

2) 가속: 감속거리 (S_a)

속도 V 에 도달할때까지의 가속거리는 식(4)에 의하여 구하고 감속거리도 동등하다고 간주한다.

$$S_a = \int_0^{t_a} v dt = \frac{1}{2} \cdot V \cdot t_a \quad \dots\dots\dots (4)$$

3) 지역구간 주행시간 (t_{rl})

주행거리 (S)와 가감속거리의 합 ($2S_a$)의 크기를 비교하여 다음과 같이 구한다.

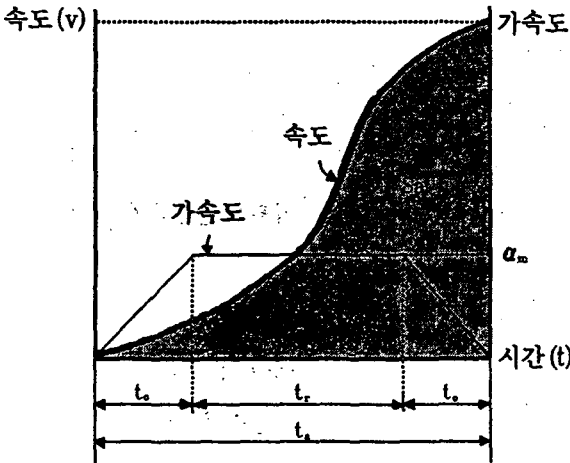


그림3. 시간에 대한 속도 및 가속도의 변화

- * i) 무치차(無齒車) 엘리베이터 : 기어없음, 120 m/min 이상 고속 고층빌딩에 주로사용.
 $\alpha_n = 1.0 \text{ (m/sec}^2\text{)}, t_0 = 0.7 \text{ (sec)}$.
- ii) 치차(齒車) 엘리베이터 기어있음, 120 m/min 미만의 저속, 저층빌딩에 주로사용.
 $\alpha_n = 1.1 \text{ (m/sec}^2\text{)}, t_0 = 0.75 \text{ (sec)}$.

$$S \geq 2Sa \text{ 인 경우 } S_L/V + t_a * f_L \dots\dots\dots (5)$$

$$S < 2Sa \text{ 인 경우 } t * f_L \dots\dots\dots (6)$$

S_L : 지역구간 주행거리 (m)

f_L : 지역구간내 예상정지수 (군데)

t_a : 가속시간 (초)

t : 단구간 운전주행시간 (초)

4) 급행구간 주행시간 (tre)

$$S_e/V + t_a * f_e \dots\dots\dots (7)$$

S_e : 급행주행거리 (m)

f_e : 급행구간내 정지수 (군데)

5) 단구간 운전 주행시간 (tr)

지역구간 주행시에 주행거리(S)가 가·감속 거리의 합계(2Sa) 보다 짧을 경우, 식(6)

의 단구간 운전주행시간은 다음과 같다.

$$tr = t_a + \sqrt{t_a^2 + 4S/\alpha} \dots\dots\dots (8)$$

각각의 서비스형식에 따른 주행시간 산출공식은 2.2.4 표4에 나타나 있다.

(2) 문개폐합계시간 (Td)

문개폐합계시간은 일주시간에 상당한 부분을 차지하므로 문의 형식결정에는 개폐시간이 짧은 2매중앙개폐식품의 사용이 최적이다. 부득이 카아실의 공간이 협소할때는 2매일방개폐식문을 사용한다.

표2. 는 문개폐시간 t_d 를 나타낸 것이다.

$$T_d = t_d * F \text{ (초)} \dots\dots\dots (9)$$

F : 전 예상 정지수

표2. 문 개폐시간 (“출처 : 승강기 안전설계 기준 II”)

출입구 폭(mm)	문 개폐 방식		비 고
	2매 중앙	2매 일방	
800	3.7	4.7	정원11인승까지
850	3.8	5.0	
900	4.0	5.3	
950	4.1	5.5	12-15인승까지
1000	4.2	5.7	16-17인승까지
1100	4.4	6.1	24인승까지
1200	5.0	6.5	
1400	5.5(초)	7.0(초)	

(주) 직류엘리베이터 전자동 운전의 경우, 교류엘리베이터인 경우 (+)0.2초임

(3) 승객출입시간 (Tp)

승객출입시간은 일주시간중 상당한 비중을 차지함에도 불구하고 사람이 대상이 되므로 불확정 요소가 많다. 승객출입시간은 엘리베이터가 정지하는 예상정지수 f에 비례한다.

사무소빌딩 출근시의 승객출입시간에 대한 실험식은 다음과 같다.

$$T_p = (0.8 + K \times \sqrt[3]{f}) \times r \dots\dots\dots (10)$$

r : 엘리베이터 승객수

K : 출입구 폭에 의한 계수

f : 편도 예상정지수

0.8은 시발중에서 승객의 카아 승입시간, $K \times \sqrt[3]{f}$ 는 일반층의 강하 시간이다. 출입구 폭에 의한 계수 K의 값은 표3과 같다. 예상정지수 f는 엘리베이터가 운행하는 전층

표3. 출입구폭에 의한 계수 [5]

출입구 폭	K	비 고
800	1.0	11인승까지
900	0.95	12-15인승까지
1,000	0.90	16-17인승까지
1,100	0.85	
1,200	0.80	24인승까지
1,400	0.70	

을 정지한다고 볼 수 없으므로 승객이 내리는 층, 호출이 있는 층에만 정지하고 기타의 층은 통과하는 것으로 간주하여 확률계산으로부터 다음식으로 표시한다.”

$$f = n \left\{ 1 - \left(\frac{n-1}{n} \right)^r \right\} - 1 \dots\dots\dots (11)$$

f : 편도 예상 정지수

n : 서비스 층수

r : 엘리베이터 승객수

$\left(\frac{n-1}{n} \right)^r$: r명의 승객이 있을시 어느 한층을 통과할 확률

(4) 손실시간 T1

문개폐합계시간 및 승객출입시간은 상당히 불확실한 요소를 포함하므로 합계시간의 1할을 손실시간으로 간주한다.

$$T_1 = 0.1 \times (\text{문개폐합계시간} + \text{승객출입시간})$$

2.2.4 엘리베이터의 서비스형식과

교통계산식

엘리베이터 설비계획시 기본사양을 가정하기 앞서 서비스형식을 먼저 결정해야만 한다. 엘리베이터 서비스형식을 결정하기 위해서는 다음과 같은 사항들을 검토할 필요가 있다.

- (1) 전층 서비스가 필요한가
- (2) 항구(恒久) 분할방식으로 할 것인가, 피이크시만 분할 서비스 할 것인가
- (3) 스킵 스톱(Skip Stop)방식으로 할 것인가, 지정층 운전방식으로 할 것인가
- (4) 서비스에서 제외 가능한 층이 있는가 (통상 빌딩의 입구가 1층일때는 2층은 서비스가 없는 것으로 하는 등).

서비스 형식은 빌딩의 용도, 규모, 성격에 따라 통상 다음과 같은 5가지 형태중 하나를 취하거나 혼합하는데 각각에 따라 교통 계산식이 다소 차이가 있다.

(1) 편도급행(片道急行) 서비스 형식

상승시 전층을 서비스하고 하강시는 무정차 급행하강 한다. 퇴근에는 역으로 하강시 전구간 서비스, 상승시 급행서비스를 생각할 수 있다.

(2) 편도구간급행(片道區間急行) 서비스 형식

상승시 일정구간을 급행서비스하고 고층구간부터 전층서비스하는 형식으로 건물높이에 따라 고층구간(high zone), 중층구간(middle zone), 저층구간(low zone)으로 구간을 분할

하여 서비스할 수 있다.

(3) 전층자유(全層自由) 서비스 형식

가장 널리 사용되는 엘리베이터 운행방식으로 상승, 하강시 전층을 서비스 하며 소형빌딩, 아파트, 호텔, 병원 등에 많이 사용되고 있다.

(4) 왕복구간급행(往復區間急行) 서비스 형식

항구분할 방식일때 중·고층행 엘리베이터의 평상시 서비스 형식이다.

(5) 편도 고층(저층) 서비스 형식

지하층에 식당이 있는 경우에 대해 부하 중심층에서 분할 했을때의 석식시 서비스 형식이다.

통상 사무소용 고층빌딩에 다수의 엘리베이터를 설치할 경우 서비스 구간을 항구 분할하거나 피이크타임시 임시 분할하여 빌딩의 성격, 교통수요에 맞추어 운행하며 고층구간은 (2)의 형식을 저층구간은 (1)의 형식으로 교통계산을 한다.

각각의 서비스형식에 대하여 엘리베이터 기본사양에 따른 교통계산식은 참고문헌 (4,5)에 나타나 있다. 이는 계산된 5분간 수송능력과 평균대기시간이 사양결정을 위한 지표가 되며 허용치를 충족치 못할때는 사양을 변경하여 반복계산을 행한다.

2.3 기본 사양에 따른 설비비용

교통계산에 의하여 사양이 결정되면 사양

에 따른 설비비용을 산출한다. 설비비용에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 카아의 크기(정원), 속도, 설치갯수이다. 먼저 엘리베이터의 정원에 따라 카아의 크기 및 하중이 달라진다. 예를들면 6인승 엘리베이터인 경우 하중이 450kg, 카아부피가 1850×1460×2100(mm³), 기계실의 크기가 2000×3200(mm²)이며 15인승의 경우 하중이 1000kg, 부피가 2150×2150×2100(mm³), 기계실은 2300×4200(mm²)로 제작된다. 따라서 하중 및 부피의 증가에 따른 카아 제작비와 기계실, 승강로의 건축비가 상승한다. 또한 카아 크기에 비례하여 의장, 지장물 등의 부대설비 비용이 추가된다. 따라서 카아제작비는 최초 4인승 제작시의 고정비 F₁과 정원증가에 따른 증가비용 C₁×정원의 합으로 나타낼 수 있다.

둘째로 속도가 빨라짐에 따라 권상기와 전동기의 용량이 커져야 한다. 또한 운행비용이 상승한다. 권상기와 전동기의 설비고정비를 F₂, 속도증가에 따른 용량상승비용 C₂로 표시했을때 속도에 따른 비용함수는 F₂+C₂×속도로 나타낼 수 있다. 또한 정원과 속도는 전체 비용에 복합적인 영향을 미친다. 즉 정원증가에 따라 하중이 커짐으로 인해 권상기와 전동기의 용량이 커져야 하며, 속도의 증가에 따라 카아제작의 추가비용이 소요된다. 따라서 정원, 속도 증가분의 복합적 추가비용 C₃가 도입되어야 한다. 설치갯수는 엘리베이터 N

대를 설치했을때 1대분 설치비용의 N배로 산정된다. 따라서 정원, 속도, 갯수에 의한 설비 비용을 함수로 나타내면

$$\{(F_1 + (C_1 \times \text{정원})\} + \{F_2 + C_2 \times \text{속도}\} + \{C_3(\text{정원} \times \text{속도})\} \times \text{설치갯수}$$

F₁+F₂=F로, 정원 x₁, 속도 x₂, 설치갯수 x₃로 놓았을때 전체설치 비용 Z는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$Z = (F + C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_1 X_2) * X_3 \dots \dots \dots (12)$$

- Z : 엘리베이터 설비비용
- F : 고정비용
- C₁ : 정원1명당 추가비용
- C₂ : 속도 1(m/sec)당 추가비용
- D₃ : 정원, 속도에 따른 추가비용
- x₁ : 카아의 정원(인)
- x₂ : 속도(m/sec)
- x₃ : 설치갯수(대)

3. 최적화 모델의 개발

3.1 전제조건

- (1) 일반적으로 사무소용 고층빌딩 고층구간에 사용되는 편도구간 급행 서비스형식을 모델로 한다.
- (2) 수송방식은 출근시의 상승피이크 패턴으로 교통계산을 한다.
- (3) 엘리베이터 기종은 고층빌딩에 적합한 직류(DC) 기어레스(gearless) 엘리베이터를 사

용하여 주행시간 T_r 을 산출한다.

(4) 엘리베이터의 특성은 무치차(無齒車) 엘리베이터로 가정(최대 가속도 $\alpha_m=1.0(m/sec^2)$, 증가속시간 $t_0=0.7(초)$) 한다.

(5) 엘리베이터의 문은 2매 중앙개폐식을 사용, 문개폐시간 및 출입구폭에 의한 계수를 적용한다.

(6) 카아의 승객수는 사무소빌딩 출근시 승강기 안전설계기준에 제시된 카아정원의 80%로 산정한다.

3.2 교통계산식의 모형화

3.2.1 부호의 정의

그림 4는 편도구간급행 서비스형식을 도식한 것이다.

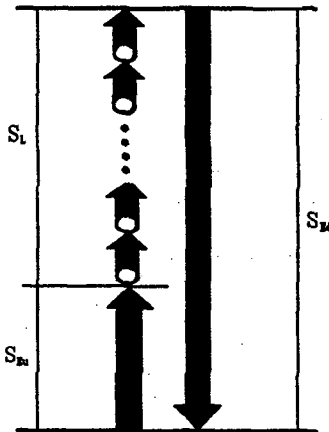


그림 4. 편도구간 급행서비스형식

S_L : 지역서비스구간(m)

S_{EU} : 급행상승서비스구간(m)

S_{Ed} : 급행하강서비스구간(m)

n : 지역구간내서비스 층수(군데)

Q : 건물상주인구(인)

엘리베이터 사양

x_1 : 카아의 정원(인)

x_2 : 엘리베이터의 정격속도(m/sec)

x_3 : 설치댓수(대)

3.2.2 정식화

(1) 엘리베이터 사양에 따른 변수

· 승강기 승객수

$$r(\text{인}) = kx_1 = 0.8x_1$$

(k : 건물용도에 따른 계수, 사무실용: 0.8)

· 지역구간내 예상정지수

$$f_L(\text{회}) = n \left\{ 1 - \left(\frac{n-1}{n} \right)^r \right\} - 1$$

$$= n \left\{ 1 - \left(\frac{n-1}{n} \right)^{0.8x_1} \right\} - 1$$

· 급행구간내 정지수

$$f_E(\text{회}) = 2$$

· 전 예상정지수

$$F(\text{회}) = f_L + f_E$$

$$= n \left\{ 1 - \left(\frac{n-1}{n} \right)^{0.8x_1} \right\} + 1 \dots\dots (13)$$

(2) 엘리베이터 특성에 따른 변수

· 가속시간

식(3)으로 부터

$$t_a(\text{초}) = v/\alpha_m + t_0 = x_2(x_2 + 0.7) \quad (\because \alpha_m=1, t_0=0.7)$$

· 가감속 거리

식(4)로부터 $2Sa(m)$

$$= 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot V \cdot ta = x_2(x_2 + 0.7) \dots\dots (14)$$

· 지역구간 평균 주행거리 $S(m)$

$$= S_L / f_L = S_L / [n \{ 1 - \left(\frac{n-1}{n}\right)^{0.8x_1} \} - 1] \dots\dots (15)$$

(3) 문개폐시간

2.2.3 표 2의 2매 중앙개폐식의 문개폐시간을 다음식으로 변환한다.

$$x_1 \leq 11 \text{일때 } td(\text{초}) = 3.7 \dots\dots (16)$$

$$x_1 > 11 \text{일때 } td(\text{초}) = 0.1(x_1 - 11) + 3.7 \\ = 0.1x_1 + 2.6 \dots\dots (17)$$

(4) 출입구폭에 의한 계수

2.2.3 표 3의 승객 출입시간 출입구폭에 의한 계수는 다음식으로 나타낸다.

$$x_1 \leq 11 \text{일때 } K = 1.0 \dots\dots (18)$$

$$x_1 > 11 \text{일때 } K = -0.01(x_1 - 11) + 0.96 \\ = -0.01x_1 + 1.07 \dots\dots (19)$$

(5) 5분간 수송능력

식(1)로부터 $P(\%)$

$$= P \times (N/Q) \times 100 = \frac{100(5 \times 60) \times 0.8x_1 \cdot x_2}{RTT \times Q} \dots\dots (20)$$

(6) 승객평균 대기시간

식(2)로부터 $Tav(\text{초}) = RTT/N$

$$= RTT/x_3 \dots\dots (21)$$

(7) 일주시간

$$RTT = Tr + Td + Tp + Tl$$

i) $Tr = tre + trl$ 이므로

$S \geq 2Sa$ 일때 식(5)와 식(7)로부터

$$S_L/V + t_2 \times f_L + S_E/V + ta \times f_E \\ = ta(f_L + f_E) + (S_L + S_{Ev} + S_{Ed})/V \\ = ta \times F + 2S_{Ed}/x_2$$

$S < 2Sa$ 일때 식(6)과 식(7)로부터

$$t_2 \times f_L + S_E/V + t_0 \times f_E$$

식(8)을 대입하여,

$$(t_0 + \sqrt{t_0^2 + 4S/\alpha_0}) \times f_L + S_E/v + t_0 \times f_E$$

다시 식(3)을 대입하여,

$$(t_0 + \sqrt{t_0^2 + 4S/\alpha_0}) \times f_L + S_E/v + (x_2/\alpha_0 + t_0) \times f_E$$

그리고 $\alpha_0 = 1$, $t_0 = 0.7$ 이므로 $(0.7 + \sqrt{0.7^2 + 4S}) \times f_L + S_E/x_2 + (x_2 + 0.7) \times f_E$

ii) $Td = td * F$ 이므로

$x \leq 11$ 일때 식(13), (16)으로부터

$$(3.7)^n \{ 1 - \left(\frac{n-1}{n}\right)^{0.8x_1} \} + 1$$

$x > 11$ 일때 식(13), (17)로부터

$$(0.1x_1 + 2.6) [n \{ 1 - \left(\frac{n-1}{n}\right)^{0.8x_1} \} + 1]$$

iii) $Tp = (0.8 + K * \sqrt{f}) * r$ 이므로

$x \leq 11$ 일때 식(11), (18)로부터

$$[0.8 + \sqrt[n]{\{ 1 - \left(\frac{n-1}{n}\right)^{0.8x_1} \} - 1}] \times 0.8x_1$$

$x > 11$ 일때 식(11), (19)로부터

$$[0.8 + (-0.01x_1 + 1.07) \sqrt[n]{\{ 1 - \left(\frac{n-1}{n}\right)^{0.8x_1} \} - 1}] \times 0.8x_1$$

iv) $Tl = 0.1 * (Tp + Td)$

3.3 최적화 모델

위에서 설명한 내용들을 포함한 최적화 모델은 식(12)의 설비비용의 함수 Z를 최소화 하는 목적함수와 식(20)의 5분간 수송능력이 P₁%이상 P₂%이하, 식(21)의 승객평균대기시간이 q(초)이하, 정원과 속도는 생산이 가능한 또는 고객이 요망하는 범위내, 설치댓수는 1대 이상 등을 나타내는 제한식들이 요구된다. 따라서 이 최적화 모델은 정수값을 갖는 변 X₁, X₃와 실수값을 갖는 X₂를 가지는 혼합정수 비선형 계획법(Mixed Integer Non-Linear Programming) 모델로 아래와 같이 나타내진다.

목적함수 : $\min Z = (F + c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_1x_2) * x_3$

제한식 : $P_1 \leq \frac{100(5 \times 60) 0.8x_1x_2}{RTT \times q} \leq P_2$

$0 < \frac{RTT}{x_3} \leq q$

$a_1 \leq x_1 \leq a_2$

$b_1 \leq x_2 \leq b_2$

$1 \leq x_3$

$x_1, x_3 : \text{integer}$

$x_2 : \text{real}$

$RTT = Tr + Td + Tp + T1$

i) Tr :

$$\frac{S_L}{n \left\{ 1 - \left(\frac{n-1}{n} \right)^{0.8x_1} \right\} - 1} \geq x_2 (x_2 + 0.7) \text{ 일때}$$

$$(x_2 + 0.7) \left[n \left\{ 1 - \left(\frac{n-1}{n} \right)^{0.8x_1} \right\} + 1 \right] \geq 2S_M / x_2$$

$$\frac{S_L}{n \left\{ 1 - \left(\frac{n-1}{n} \right)^{0.8x_1} \right\} - 1} < x_2 (x_2 + 0.7) \text{ 일때}$$

$$\left[0.7 + \sqrt{(0.7)^2 + \frac{4S_L}{n \left\{ 1 - \left(\frac{n-1}{n} \right)^{0.8x_1} \right\} - 1}} \right]$$

$$\left[n \left\{ 1 - \left(\frac{n-1}{n} \right)^{0.8x_1} \right\} - 1 \right]$$

$$+ (S_M + S_M) / x_2 + (x_2 + 0.7) \times 2$$

ii) Td :

$x_1 \leq 11$ 일때 $3.7 \left[n \left\{ 1 - \left(\frac{n-1}{n} \right)^{0.8x_1} \right\} + 1 \right]$

$x_1 > 11$ 일때 $(0.1x_1 + 2.6) \left[n \left\{ 1 - \left(\frac{n-1}{n} \right)^{0.8x_1} \right\} + 1 \right]$

iii) Tp :

$x_1 \leq 11$ 일때 $0.8x_1 \left[0.8 + \left\{ n \left\{ 1 - \left(\frac{n-1}{n} \right)^{0.8x_1} \right\} - 1 \right\}^{1/q} \right]$

$x_1 > 11$ 일때 $0.8x_1 \left[0.8 + (-0.01x_1 + 1.07) \cdot \left\{ n \left\{ 1 - \left(\frac{n-1}{n} \right)^{0.8x_1} \right\} - 1 \right\}^{1/q} \right]$

iv) T1 = 0.1(Tp + Td)

모델의 최적해를 구하기 위해서 비선형 제한식을 갖는 비선형 목적식에 대해 효과적인 search 알고리즘인 complex method(15)를 사용한다.

4. 사례연구

4.1 L사 빌딩의 엘리베이터 설비계획

기존의 사무소용 고층빌딩에, 개발된 최적화 모델을 적용하여 설치될 엘리베이터의 사

양을 결정하고 교통계산식에 의해 5분간 수송 능력 및 승객 평균대기시간을 계산, 분석하여 본 모델의 타당성을 고찰하고자 한다. 서비스 조건은 표1에 나타난 KS상의 서비스 판정기준에 따르고 기타 사양의 범위는 최대한 생산 가능한 범위내로 한정하였다. 여의도에 위치한 L사의 본사빌딩은 사무소용 준 전용빌딩으로서 건물 층수 24층, 건물높이 84.6m로서 추정된 건물인구는 938명, 출근시 최대집중율은 16-20%이다. 설치될 엘리베이터는 저층 구간(L/Z)은 1-13층까지, 고층구간(H/Z)은 14-24층까지로 서비스 구간을 출근시 일시 분할하여 운행하려 한다.

(1) 엘리베이터 운행계획

· 서비스 형식 : 편도구간 급행 서비스 형식 분할서비스 층수 및 거리

저층구간(L/Z) : 1-13층 ($S_{LZ}=57.72m$)

고층구간(H/Z) : 14-24층 ($S_H=26.88m$)

급행하강거리 ($S_{zd}=84.6m$)

· 엘리베이터의 특성

직류, 무치차식 엘리베이터, 2매 중앙 개폐식문 사용

· 요망 서비스 수준

- 5분간 수송능력 : 16%이상

- 승객 평균대기시간 : 30초이하

(2) 설비비용

고정비, $F=1,000$ 만원

정원 1인당 상승비용, $C_1=10$ 만원

속도 1(m/sec)당 상승비용, $C_2=50$ 만원

정원, 속도에 따른 복합상승비용, $C_3=2$ 만원

비용함수 $Z = (1000 + (10 \times \text{정원}) + (50 \times \text{속도}) + 2 \times (\text{정원} \times \text{속도})) \times \text{댓수}$

(3) 사양의 범위

· 정원 : 4-24인승

· 속도 : 0.5-10(m/sec)

· 댓수 : 1대 이상

4.2 최적화 모델

목적함수 :

$$\min Z = (1000 + 10x_1 + 50x_2 + 2x_1 \cdot x_2) \times x_3$$

$$\text{제한식} : 16 \leq \frac{100(5 \times 60) \times 0.8x_1x_2}{RTT \times Q} \leq 100$$

$$0 < \frac{RTT}{x_3} \leq 30$$

$$4 \leq x_1 \leq 24$$

$$0.5 \leq x_2 \leq 10$$

$$1 \leq x_3$$

$$x_1, x_3 : \text{integer}$$

$$x_2 : \text{real}$$

$$RTT = Tr + Td + Tp + Tl$$

4.3 모델에 대한 최적안

$$Z^* = 8658.9670$$

$$X_1^* = 18.7606$$

$$X_2^* = 3.3185$$

$$X_3^* = 5.8583$$

최적화 모델에 의해 나타난 결과를 x_1, x_2 는 제약식을 만족하는 가까운 정수로 x_2 는 정수를 취하면 정원 19인승, 속도 3.3(m/sec), 즉 정격속도 199(m/min)의 엘리베이터를 6대 설치하는 것이다. 이 사양에 의한 설비비용을 8,659만원으로서 요망서비스 수준을 만족시키는데 필요한 최소비용이 된다.

5. 결 론

본 연구는 공업진흥청의 「승강기 안전설계 기준」(KSCP-C-1027)를 근거로 현재 업계에서 엘리베이터 시스템설계시 사용하고 있는 사양결정방법을 설비비용 개념을 도입한 최적화 모델을 개발하여 수계산에 의한 절차를 컴퓨터에 의하여 간단하게 설비비용을 최소로 하는 최적사양과 비용을 도출할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 직류식, 무치차 엘리베이터를 사용한 편도구간 급행서비스 형식에 대한 모델만을 제시하였으나 다른 유형의 서비스 형태는 본문의 엘리베이터 서비스형식과 교통계산식의 공식들을 참조하여 모델 제약식의 일부분만 간단히 변형하여 사용할 수 있으며 교류, 치차 엘리베이터에서도 주행시간에 대한 공식변환만으로 적용할 수 있다.

본 논문을 작성하는데 있어 기존의 문헌과 자료의 부족으로 인하여 연구에 많은 어려움

이 있었다. 서론에서 언급한 바와 같이 현재 국내의 엘리베이터의 중요성은 날이 갈수록 커지고 있으므로 하루속히 엘리베이터 시스템에 관련된 대기이론(queueing theory)과, 엘리베이터의 운행방식을 결정할 수 있는 시뮬레이션 패키지(simulation package) 등의 개발이 시급한 실정이다. 그런 의미에서 본 연구가 현재 엘리베이터 시스템에 대한 연구와 개발이 극히 저조한 업계와 학계에 하나의 작은 디딤돌이 되었으면 한다.

본 연구는 엘리베이터 승객의 도착분포, 승객의 향방(向方)에 관한 분포 등의 queueing개념에 대한 연구부족으로 단순히 엘리베이터 일주시간을 운행댓수로 나눈 평균운행간격을 승객평균대기 시간으로 간주하므로 실제의 시스템과는 차이가 있을 수 있다. 또한 엘리베이터 서비스방식은 시뮬레이션에 의한 운행상태 교착이 없이 빌딩의 성격, 규모 등에 의해서만 결정하였다는 문제점이 있다.

그러므로 앞으로의 연구방향은 첫째 엘리베이터의 대기이론에 대한 많은 연구가 요구되며, 둘째로 건물에 가장 적합한 운행방식을 결정할 수 있는 시뮬레이션 패키지의 개발이 촉구된다. 또한 업계에서 본 모델을 적용키 위해서는 설비비용 함수에 더욱 현실성을 부여할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. 김만식, O. R. 이론, 회중당, 서울, 1987.
2. 강석호, Operation Research, 영지사, 서울, 1982.
3. 오형재, 민은기, 승강기 대기 시스템의 시뮬레이션 모델, 시립대학교원, 석사학위논문, 한국
군사O. R학회지, 서울, 1986.
4. 공업진흥청, 승강기 안전설계기준 (I) (KSCP-C-1026), 한국공업표준협회, 서울, 1979.
5. 공업진흥청, 승강기 안전 설계기준 (II) (KSCP-C-1027), 한국공업표준협회, 서울, 1979.
6. 공업진흥청, 승용엘리베이터와 승강로의 치수 (KS F 1506), 한국공업표준협회, 서울, 1980.
7. 공업진흥청, 승강기 검사 표준, (KS F 2802), 한국공업표준협회, 서울, 1981.
8. 일본규격협회, 승용엘리베이터와 승강로의 치수 (JIS A 4301), 1983.
9. トシバ電機(株), エレベーターの交通計算, トシバ 研究所, 東京, 1980.
10. T. Saito, Planning of Elevator Facilities, Mitubishi Elec. Co. Tokyo, 1980.
11. Geoffrey Gordon, System Simulation, Prentice-Hall Inc, 1969.
12. Leonard Kleinrock, Queueing System, Vol. 1, Vol. 2, John Wiley & Sons, 1975.
13. G. V. Reklaitis et al., Engineering Optimization, John Wiley & Sons, Inc., 1983.
14. Mokhtar S. Bazsraa et al., Nonlinear Programming, John Wiley & Sons, Inc., 1979.
15. M. J. Box, A New Method for Constrained Optimization and a Comparison with Other
Methods, Computer Journal, Vol. 8, pp. 42-52, 1965.