

Simulation을 이용한 건물의 비상대피문제 연구†

(A Simulation Model for Emergency Building Evacuation)

최 원 준*

Abstract

A computer simulation model is proposed for selecting effective egress paths and estimating the evacuation time in case of evacuating all the residents of a building to the safe area.

The physical structure of a building is formulated into a network. The followings are considered in the model: the congestion effect to the velocity, the behavioral pattern of the evacuees, and the probabilistic nature of the evacuation process.

Coded in SLAM II/PC, the simulation model can generate the output such as evacuation time (max, average), utilization of exits, utilization of passages, floor clearance times, and bottleneck information.

The "rigorous" validation of the proposed model is not completed yet but remains to be a future research topic.

I. 서론

건물안의 사람들을 비상시에 소개(evacuation)시켜야하는 경우 (예를들어 화재발생 시, 적기의 공습, 지진의 위협, 태풍등) 신속하고 안전한 소개는 대피당사자는 물론, 건물관리자, 대피관련 안전담당관청, 건축가등 여러 사람의 관심사이다. 건물이 고층, 복잡화하여 건물내에 상주하는 사람들의 수가 대규모화하는 추세이고 특히 민방공 대피훈련이 빈번하게 실시되는 우리나라의 경우 효과적 소개의 중요성은 더욱 크다고 볼 수 있다.

건물의 안전규칙은 복도, 계단, 방화문등 건물의 각 구성요소에 대하여 설정되어 있기는 하나 이것만으로는 성공적인 소개를 보장할 수 없다. 경우에 따라 건물의 각 구성요소는 안전규칙을 만족시키고 있는데, 전체적으로 보았을 때는 각 구성요소의 소개 능력이 상호조정이 되지않아 대피 중에 심한 혼잡을 유발할 수도 있다. 따라서 전체 건물을 하나의 총합 system으로 보고 전체 system하의 건물의 각 구성요소가 소개에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하여, 효과적 소개계획을 세우고 평가하기 위한 객관적인 모형화 (modeling)의 접근점이 필요하다.

어느 소개 계획이 효과적이다 아니다는 그 판단기준에 따라 다른데, 대표적으로 사용되는 기준으로는 1) 건물소개시간의 최소화, 2) 주어진 시간내의 소개인원의 최대화, 3) 소개경로의 단순화등이며 이들 목표를 위하여 몇가지 계량적인 모형이 개발되

* 울산대학교 공과대학 산업공학과

† 이연구는 1988년도 한국과학재단 연구지원에 의한 결과임 (과제번호:883-915-019-2)

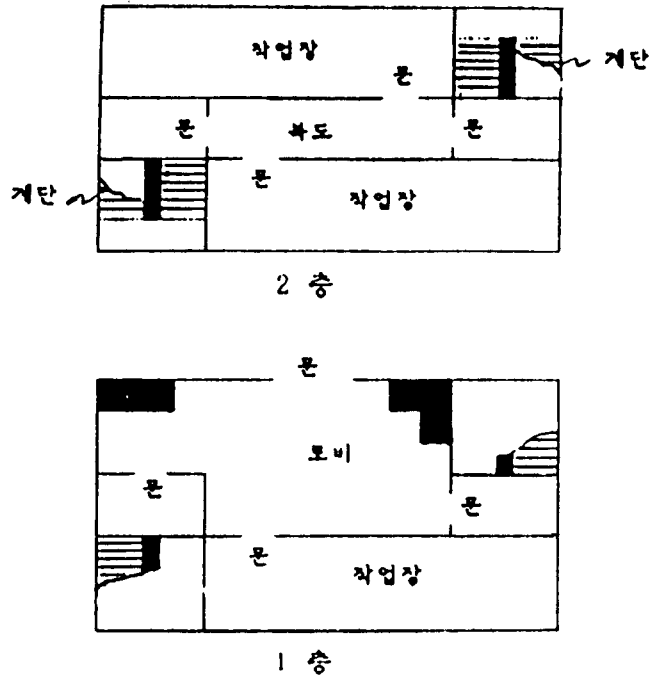


그림 2.1 건물의 배치도

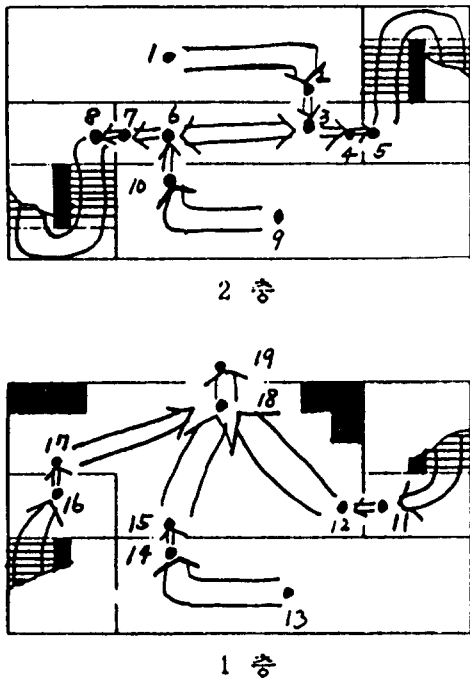


그림 2.2 건물의 배치도와 arc표시

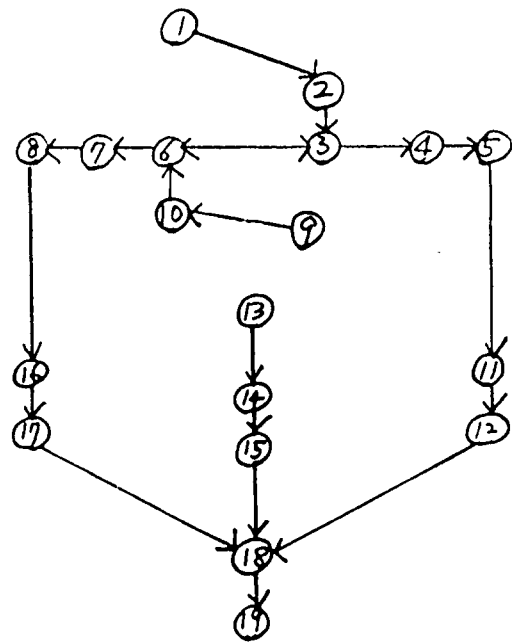


그림 2.3 건물구조의 graph표현

어 있다. (위의 목표들은 일반적인 경우, 그 최적해가 서로 다르다 [1].) 계량적 모형의 해는 주어진 조건하에서 달성할 수 있는 이상적 소개방법을 제시함으로써 기존의 소개방법의 효율성을 진단할 수 있는 근거가 되며, 또한 소개시 혼잡으로 인한 병목현상 (bottleneck)의 발생가능구역을 사전에 찾아내어 이를 해소하기 위한 소개계획의 설정 또는 건물설계의 변경등에 활용될 수 있다.

본 연구는 비상시 건물안의 사람들을 신속하게 소개시키기 위한 대피경로의 선정 및 대피시간을 추정하는 새로운 방법론을 제시하고자 한다. 현재까지의 이 분야의 연구는 건물의 일부본 또는 실험실 내에서의 관측적, 서술적 연구가 많았었고 [11], 근래들어 소개를 위한 의사결정문제를 하나의 총합적 체계로 보고 이를 network 흐름문제로 모형화하려는 시도가 있었다. 본 연구는 network모형화 접근법의 체계적관점 (systematic viewpoint)을 견지하면서 보다 현실성있는 소개계획을 설정하기 위한 전산 simulation방식을 제시한다.

특히 실제 소개담당자들의 의사결정의 보조수단으로서의 활용을 용이하게 위하여 개인용 컴퓨터를 이용하여 전산프로그램을 개발하였으며, 또한 소개과정중 전체적 진행 상황을 컴퓨터 모니터상에서 일목요연하게 알아볼 수 있도록 활동묘사 (animation)를 이용하였다. 본연구 결과는 소개계획의 객관적 평가수단으로서, 개선안 창출의 보조수단으로서 이용될 수 있다고 본다.

II. Simulation 모형의 개발

2.1. 건물구조의 Network표현

비상대피시의 소개 (emergency evacuation)은 이동밀도가 5명/m² 이하인 정상시의 소개 (normal evacuation)에 비하여 이동밀도가 아주 높으며 극단적인 경우는 소개대상자들의 심리적 동요로 참사가 발생하기까지도 하여 대기경로와 출입문등의 적정설계와 소개과정중의 효과적인 통제를 필요로 한다. 비상소개시에는 엘리베이터등 전기적 동력을 필요하는 장치는 사용을 하지 않는 것이 원칙으로 되어 있어 이외의 경로들을 이용할 때 총대피시간이 얼마나 (평균적 또는 최악의 경우) 소요되며 또한 어느부분이 사람의 흐름을 가장 심하게 제약하고 있는지 알 수 있다면 적정설계와 효과적 통제에 많은 도움이 될 것이다.

사람들이 대피시 이용하는 경로들을 network모형으로 정형화할 수 있는데 아래에 그 기본적인 요소를 소개하여 보기로 한다. 어느 건물이 있을 때, 사무실 내 통로, 복도, 계단, 문등을 arc로 표시하고 arc의 양 끝점을 node들로 표시하여 건물의 구조를 graph $G = (V, E)$ 로 나타낼 수 있다. 이 때 V 는 node의 집합, E 는 arc의 집합을 나타낸다.

설명의 편의를 위하여 예를 들어 보자. 그림 2.1은 어느 2층 건물의 배치도를 도시하고 있는데 이 때 하나의 arc가 나타내는 범위는 모형의 복잡도와 모형집행결과의 정확도의 절충(tradeoff)에 대한 모형작성자의 판단에 따라 달라진다. Arc의 포괄범위가 작으면, 예를 들어 하나의 복도를 많은 arc로 분할하여 표시하면, 건물내 사람들의 이동과 소개상황의 변화를 상세하게 나타낼 수 있는데, 반면에 graph가 커져서 분석결과를 도출하여 내는데 더 많은 시간과 노력이 필요하다. 그림 2.2가 나타내는 건물의 구조를 graph로 표시한 것이 그림 2.3이다. 비상대피시의 상황을 염두에 두어 그림 2.3에서 arc의 방향은 대부분 일방통행으로 하였다. 물론 쌍방통행으로 할 수도 있으나 이럴 경우 graph가 커진다는 단점이 있다.

2.2. 기초자료

소개문제의 완전한 network모형화를 위하여는 건물구조를 나타내는 graph외에 몇가지 정보가 더 필요한바,

- 1) 소개시작전의 사람들의 건물내 분포위치,
- 2) 각 arc의 최대 수용 인원,
- 3) 이동속도의 양태,
- 4) 소개당사자들의 소개과정시의 의사결정 행태

들이다.

2.2.1. 소개시작전의 사람들의 건물내 분포위치

소개시작전의 사람들이 위치하고 있는 장소들과 그 인원과 그 구성원의 종류를 알아야 한다. 소개전 사람들의 위치 node가 source node가 될 것이고 안전지대로 인도하는 출구 (destination)가 sink node가 된다. 구성원의 종류, 대표적으로는 어른과 어린이,에 따라 이동속도등이 다르므로 구성원의 종류와 인원수를 파악하여야 하는데, 많은 경우 계절적, 시간적 변동을 보이므로 평균적인 경우, 또는 최악의 경우의 자료를 구하여 사용한다.

2.2.2. 각 arc의 최대 수용인원

Arc에 관련된 자료는 건물의 특성및 소개당사자의 성질에 따라 변하는 것이므로 완벽한 자료를 도출하여 내기란 불가능하다. 여기에서는 문헌조사를 통하여 얻어진 결과를 중심으로 서술하겠다.

Arc의 최대수용인원은 arc가 표현하는 건물부분이 특정 순간에 수용할 수 있는 최대인원을 말하며 이는 단위면적당 사람의 밀도를 구하면 바로 얻어질 수 있다. Fruin [2, 3]에 의하면 1인당 점유면적이 13이상 - 2이하 $ft^2/인$ 으로 관측되었다. Fruin의 경우 밀도의 최대상한에 대하여 명확한 값을 보이고 있지 않는데 이는 Fruin은 1인당 점유면적의 유형의 구분에 주로 관심이 있었기 때문이라고 보여진다. 최대밀도에서는 각 사람이 서로 접촉하고 있으며 각 개인의 자유로운 이동이 불가능한 상태이다.

본연구에서는 최대밀도의 값은 Fruin의 결과를 원용하여 $7인/m^2$ 으로 한다. 그러면 arc의 최대수용인원은

최대수용인원 = arc의 가용바닥면적 X 최대밀도 ($7인/m^2$)
로써 구할 수 있다.

만약 어느 arc에 사람들이 많이 몰려 최대 수용인원에 이르게 되면 이 arc에서 사람들이 빠져나가기 전까지는 이 arc는 더 이상 사람을 받을 수 없다. 이때 이 arc는 봉쇄 (blocked) 되어 있다고 하고 그렇지 않은 경우는 개방(unblocked) 되어 있다고 하겠다.

2.2.3. 이동속도의 양태

소개당사자들의 이동속도는 밀도와 관련이 있다. 일반적으로 밀도가 증가하면 이동속도가 감소하는 경향이 있다. 복도와 계단과 문의 경우에 대하여 그 현상을 살펴보기로 한다.

복도의 경우

Predetechenskii와 Milinskii [6]는 최대밀도에서의 평균이동속도를 $16 m/분$ 이라고 보고하였다. Karbowicz와 Smith [4]는 실제비상대피훈련에서 측정한 결과 이동속도가 평균 $3.85 ft/초$, 표준편차 $0.95 ft/초$ 의 lognormal분포를 따른다고 보고하였다. 그런데 Karbowicz와 Smith는 소개과정중의 밀도의 변화에 따른 이동속도의 변화를 고려하지 않았다. Stahl [10]은 그의 simulation모형에서 "가설적" 공식, 즉 폭이 $0.61 m$ 인 복도의 경우 $v = 0.782 - 0.685 \log d$, 폭이 $1.22 m$ 인 복도의 경우 $v = 0.816 - 0.530 \log d$ (이 때, v 는 이동속도 ($m/초$), d 는 밀도 ($인/m^2$)를 표시한다)를 적용하였는데 타당성에 대하여는 더 연구가 필요하다.

이동속도와 밀도와의 관계에 대한 가장 충실한 자료는 Fruin [3]에 의하여 보고되었다. Fruin은 교통공학의 service수준 (level of service)의 개념을 빌려와 혼잡도를 A, B, ..., F의 6 단계로 구분 (A가 가장 혼잡하지 않고, F가 가장 혼잡함)하고 각 service 수준하에서 평균이동속도와 단위시간당 평균흐름량을 측정하여 보고하였다.

service수준	A	B	C	D	E	F
밀도(인/㎡)	0.30 미만	0.30~0.43	0.43~0.71	0.71~1.07	1.07~2.15	2.15 이상

그림 2.4는 Fruin의 결과에 근거하여 재작성한것이다. 그림 2.4에 의하면 1인당 점유 면적 (average pedestrian area occupancy)의 감소 (즉 밀도의 증가)에 따른 평균 이동속도의 감소의 양상을 잘 보여주고 있다. 본연구에서는 그림 2.4를 이용하기로 한다. Fruin은 이동속도의 표준편차에 대하여는 별다른 보고를 하지 않았지만 밀도가 증가하면 이동속도의 표준편차가 감소한다고 하였다. 그런데 Stahl의 미시적 simulation연구 [10] 결과를 따르면 이동속도의 표준편차는 대략적으로 평균이동속도의 25%정도가 된다.

결국 본연구에서는 특정 밀도 d 에서의 이동속도 $v(d)$ 는 다음과 같은 “가설적” 분포를 따른다고 보았다.

$$v(d) \sim \text{lognormal} (\text{평균} = \mu(d), \text{표준편차} = 0.25 \mu(d))$$

이 때 $\mu(d)$ 는 밀도가 d 일 때의 평균이동속도로서 그림 2.4으로부터 구한다. 분포형을 lognormal 분포로 한 것은 Karbowicz와 Smith의 결과에 따랐다.

계단의 경우

계단에서의 이동 속도는 복도에서의 이동속도보다도 느리다. 계단에서의 이동속도는 계단의 너비, 각도, 수직널 (riser)의 높이, 계단판(tread)의 너비등에 의하여 영향을 받으므로 모든 경우에 대하여 정확하게 기술하기란 매우 어렵다. 문헌에 나타난 결과를 정리하면 다음과 같다.

Predetechenskii와 Milinskii [6]는 최대밀도에서 하향 계단에서의 평균이동속도는 10 m/분 이라고 보고하였고, Karbowicz와 Smith [4]는 실제 비상대피훈련의 측정결과 하향 이동속도가 평균 2.91 ft/초, 표준편차 1.2 ft/초의 lognormal 분포를 따른다고 보고하였다. Pauls의 경우 [5] 실제관측결과 단위시간당 계단을 빠져나오는 사람 수, f (인/초), 와 계단위의 사람 수, p , 와의 관계를 다음과 같은 회귀식으로 표시하고 있다. $f = (w/8.40)^{0.73} p^{0.23}$. 이 때 w 는 계단의 유효너비 (m)를 표시하고 있다. 단 Pauls의 경우 관측된 계단은 최종 출구밖의 계단으로서 그 결과를 일반화하기에는 한계가 있다.

그림 2.5는 하향계단들에서의 Fruin [3]의 관측결과를 근거로 작성한것이다. 이때 이동속도는 수평속도를 말한다. 밀도와 평균이동속도와의 관계에 대한 해석은 복도의 경우와 같으며 service수준의 분류는 다음과 같다.

service수준	A	B	C	D	E	F
밀도(인/㎡)	0.53 미만	0.53~0.71	0.71~1.07	1.07~1.53	1.53~2.69	2.69 이상

상향계단의 경우 Fruin은 data를 충분히 제시하지 않았는데 Predetechenskii와 Milinskii [6]에 의하면 상향계단의 경우 이동속도가 하향계단에 비하여 10%정도 작다고 보고하였는데 본연구에서는 계단의 상향 속도는 Fruin의 하향속도의 90%라고 보겠다. (비상대피시 지하실의 경우는 상향계단을 이용하여야 하며 또 옥상이 안전장소로 설정되어 있는 경우 상향계단을 이용할 수도 있다.)

본연구에서는복도에서의 경우와 마찬가지로 하향계단에서의 이동속도 $v(d)$ 는 다음과 같은 분포를 따른다고 보았다.

$$v(d) \sim \text{lognormal} (\text{평균} = \mu(d), \text{표준편차} = 0.25 \mu(d))$$

이 때 $\mu(d)$ 는 밀도가 d 일 때의 평균이동속도로서 그림 2.5로부터 구한다.

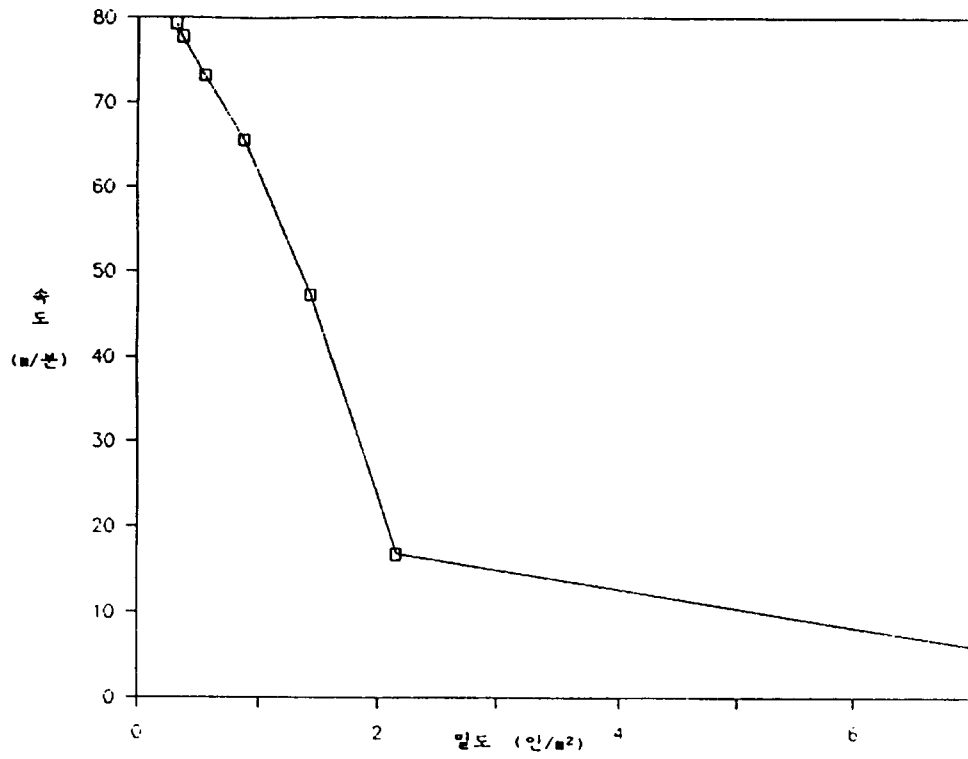


그림 2.4 복도에서의 이동속도

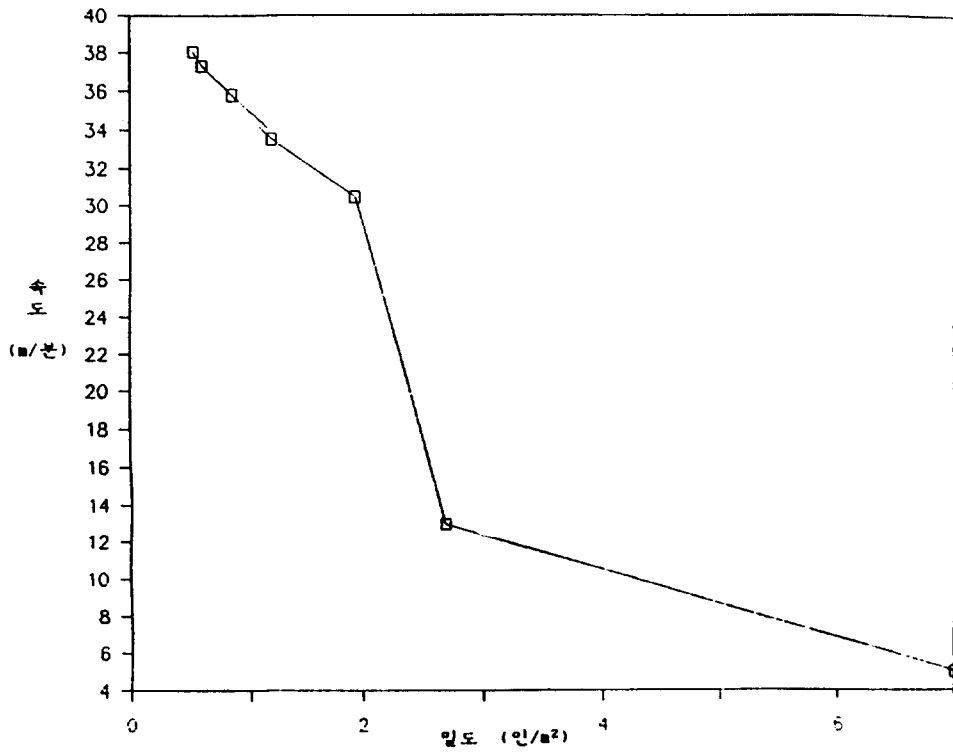


그림 2.5 계단에서의 이동속도

문의경우

밀도가 높은 경우 통로의 소개흐름을 제약하는 곳이 보통 문이다. 소개과정중 병목 현상을 유발하는 원인 중 가장 큰 곳이 문임에도 불구하고 이에 관련된 연구는 미진한 편이다. Karbowicz와 Smith [4]는 문을 통과하는 시간을 1.5초로 보고하였다. Fruin [3]에 의하면 보통문의 경우는 평균통과시간이 1 ~ 1.5초, 회전문의 경우는 1.7 ~ 2.4 초이다. 문에 관한 보다 충실한 연구는 Predtechenskii와 Milinskii [6]에 의하여 이루어졌다. 문의 너비가 0.75m 이하인 경우에는 arch현상에 의한 제밍 (jamming, 아무도 이동하지 못 함)이 발생할 가능성이 있으나 너비가 1.2m 이상인 경우 jamming 현상 발생가능성이 거의 없다고 하였다. 최대밀도하에서 문의 너비가 1.5m미만인 경우는 문통과시 평균속도가 4.8m/분이고 너비가 1.5m이상인 경우는 6m/분이라고 보고하였다. 그런데 문앞의 사람들의 밀도가 달라지면 단위시간당 문을 통과하는 사람들의 수가 변화하게 되는데 Predtechenskii와 Milinskii에 의하면 문너비 1m당 1분간 통과하는 평균사람수는 다음과 같다고 보고하였다.

문앞의 밀도 (인/m ²)	1	2	4	6	8	10이상
평균통과 수 (인/m 분)	70	108	120	108	60	50

예를 들어 문의 너비가 1.2m 인데 문앞의 밀도가 6인/m²인 상황하에서는 1분간 평균 129.6명 (1.2 X 108)이 이 문을 통과할 수 있다.

본연구에서는 Predtechenskii와 Milinskii의 결과를 이용한다.

2.2.4. 소개과정시의 의사결정행태

소개과정중의 사람들의 의사결정행태에 대하여는 통제된 실험실행의 어려움과 사후 survey data의 타당성의 결여등으로 유용성있는 연구결과를 이용하기가 어렵다 [8, 9, 10]. 본 연구에서는 소개과정중의 의사결정행태중 소개시간의 단축과 병목현상의 제거를 위한 소개계획의 설정에 관련이 크다고 보이는 분기행태를 모형속에 고려하고자 한다. 분기행태는 교차지점과 같이 여러 통로로 연결되는 지점에서 어느 통로를 택하는가에 대한 의사결정 행태를 말한다. 지금까지의 모형화접근법에서는 소개시간을 최소화하기 위하여 최소비용흐름network문제 또는 최단경로문제등을 풀어 system 전체의 관점에서 “최적” 소개경로를 도출하여 이를 소개 계획및 건물의 설계에 응용하였는데 이렇게 얻어진 소개시간및 경로등은 기준적인 해 (benchmark solution)로서는 의미가 크나 실제 소개시에 이들 해에 따라 엄격한 통제가 이루어지지 않으면 실제의 소개 상황및 결과는 이들 모형이 제시하는 해와는 차이가 많을 수 있다. 본연구에서는 소개당사자의 관점에서 분기결정행태를 (다시말하여 소개당사자가 분기지점을 만났을 때 어떠한 결정을 내리는 가를) 모형속에서 고려하기로 한다. 앞에서 언급한 이유등으로 여기에서 제시되는 분기행태는 아직 가설적인 수준이다.

어느 소개당사자가 어느 node (node n 이라고 표기하자)에서 다음으로 진행할 arc를 결정한다고 하자. Node n 에서 나오는 arc들의 집합을 $\Gamma(n)$ 라고 하자. 다시말하여 $\Gamma(n) = \{ e \in \mathcal{E} \mid e = (n, \nu) \text{ for some } \nu \in \mathcal{V} \}$. 본연구에서는 소개당사자가 node n 에서 다음과 같은 분기결정규칙을 따른다고 보겠다:

“현재지점 (node n)에서 가장 가까운 sink로 간다고 판단되는 arc를 택한다.”

그런데 한 소개당사자가 분기결정시에 건물전체의 현재상황을 알 수 없기 때문에 분기결정시 이중 얼마만큼의 현재 정보를 고려하여야 하는가하는 문제가 있다. 여기에서는 이 소개 당사자에게 현재상황에 대한 정보는 “바로 앞에 보이는” arc들 (즉 arc $e \in \Gamma(n)$)에 대하여만 얻을 수 있다고 보고, 그 너머의 arc들에 대한 정보는 평상시의 경험치에 의존한다고 보겠다. 이에 대하여 보다 구체적으로 설명하여 보자.

혼잡하지 않은 경우(service수준이 A인 경우)의 이동속도를 자유속도 (free speed) 라고 부르는데, 자유속도로 이동할 때 node ν 에서 가장 가까운 안전지대인 sink node 까지의 평균소요시간을 $T(\nu)$ 라고 표기하자. 또한 현재의 밀도하에서 arc e ($e \in$

$\Gamma(n)$ 를 통과하는데 소요되는 시간을 $t(e)$ 라고 표기하자. 그러면 node n 에서 arc $e = (n, \nu)$ 를 택하여 node ν 로 진행한다고 할 때 가장 가까운 sink까지의 소요시간의 예측치는 $\{ t(e)+T(\nu) \} \cdot \varepsilon(e)$ 라고 보겠다. 여기에서 $\varepsilon(e)$ 는 소요당사자의 예측오차를 나타내는 확률변수이다. $\varepsilon(e)$ 의 구체적 확률분포 모양은 소개당사자들의 건물에 대한 사전지식과 관련이 있다고 볼 수 있는데 건물에 대한 지식이 작은 사람이 많을 수록 $\varepsilon(e)$ 의 표준편차는 크다고 말할 수 있다. 본연구에서는 $\varepsilon(e)$ 의 확률분포를 0.8에서 1.2까지의 균등분포 (다시 말하여 오차가 $\pm 20\%$)로 보았다.

그러면 node n 에서의 분기결정은

$$[t(e^*)+T(\nu^*)] \cdot \varepsilon(e^*) = \text{Min} \{ [t(e)+T(\nu)] \cdot \varepsilon(e) \mid e = (n, \nu) \in \Gamma(n) \}$$

가 성립하는 arc $e^* = (n, \nu^*) \in \Gamma(n)$ 를 택한다. 그런데 만약 선택된 arc e^* 에 이미 최대 수용인원만큼 차있을 때에는 (즉 blocked인 경우) 이 소개당사자는 arc e^* 의 blocking이 해제될 때까지 기다린다고 가정한다.

2.3. Simulation 모형의 개발

2.3.1. 서언

건물구조의 graph 및 위와 같은 정보가 주어져 있을 때 건물소개시간 (source node로부터 sink node들까지 사람들을 모두 이동시키는데 소요되는 시간)을 추정하는 문제는 추계적 동적 network 흐름문제 (stochastic dynamic network flow problem)가 된다. 추계성은 이동속도의 불확실성, 분기확률에서 기인하고, 동적 성질은 시간에 따라 system의 특성이 달라지는 데에서 기인한다. 소개문제의 경우 건물 graph의 크기 및 parameter의 복잡성뿐만 아니라, 특히 짧은 기간내에 건물내의 사람들이 이동하기 때문에 system의 상태가 매우 변이적 (transient)인 성격을 갖으므로 추계적 동적 network의 해를 분석적으로 구하는 것은 불가능하고, 대신 simulation방식이 적절한 방법이 된다.

Simulation은 연속형 simulation과 이산형 simulation으로 나누어지고 다시 이산형 simulation의 방식은 과정중심 (process-oriented)과 사상중심 (event-oriented)으로 구분된다. 과정중심 simulation은 network 기초 (network-based) simulation이라고도 하는데 앞의 절에서 언급한 network와 기본적으로 같은 골격을 갖고 있어 적용하기는 용이하나 응용성면에서 제약이 많아 본연구에서는 소개문제를 사상중심 simulation으로 나타내겠다. Simulation언어로서는 SLAM II/PC [7]를 선택하였다.

2.3.2. 입력정보와 출력결과

Simulation을 위한 입력정보는 기본적으로 건물network, 소개시작전의 사람들의 건물내 분포위치, sink의 위치등이며 그 밖에 각 arc의 최대 수용 인원, 이동속도의 양태, 소개당사자들의 소개과정시의 의사결정 행태등은 모형속에 직접 포함되어 있거나 입력정보로부터 구한다. 입력정보를 열거하여 보면

1) 각 arc별:

양 끝 node들 (from-node와 to-node)번호,
 유형 (복도, 계단, 문중 택일),
 너비,
 길이 (문의 경우는 제외),
 일방통행인가 또는 쌍방통행인가 여부,
 위치하는 층번호 (필수적으로 입력하지 않아도 됨).

2) 각 source node별:

node 번호,
 소개전 사람수.

3) 각 sink node별:

node 번호.

Arc의 방향지정에 대하여 잠시 언급하면 평상시에는 대부분의 arc가 쌍방통행이 가능하나 소개시에는 sink node들 쪽으로 일방통행인 경우가 많다. 소개시에 일방통행이

본명한 arc는 방향지정을 일방통행으로, 그렇지 않은 arc는 쌍방통행으로 지정하면 된다. 일방통행arc가 많을 수록 network의 크기가 작아져서 computer의 기억용량의 필요량과 집행시간이 줄어들어 유리하다.

Simulation모형집행의 결과 다음과 같은 출력을 얻을 수 있다.

- 1) 소개시간에 대한 정보:
최종소개시각, 평균소개시각.
- 2) 각 sink node별:
총 이용자수, 시간대별 이용자수의 histogram.
- 3) 각 arc별:
총 이용자수, 평균밀도, 최대밀도, 최초이용시각, 최후이용시각.
- 4) 각 층별:
최종소개시각.
- 5) bottleneck정보.

2.3.3. Simulation의 진행

Simulation진행단계는 개략적으로 다음과 같다.

자료 입력 및 前처리

- 1) 입력자료를 읽는다.
- 2) 각 arc의 최대수용인원을 계산한다.
- 3) Network의 data structure를 구축한다.
- 4) 각 node ν 에 대하여 자유속도로 이동할 때 node ν 에서 가장 가까운 안전지대의 sink node까지의 평균소요시간 $T(\nu)$ 를 구한다. (Dijkstra의 최단경로 algorithm 이용.)

초기화 routine

각 source node (node s 라고 표기하자)에 대하여:

Node s 에 있는 각 사람들에 대하여 다음을 처리한다.

- 1) 소개전 준비시간 (여기에서는 0.1분 ~ 0.9분사이의 균등분포를 따른다고 보았다)이 경과한 후에
- 2) 진행할 arc를 분기결정 routine을 통하여 구한다. (Source node에 연결되어 있는 arc가 보통은 하나이나 경우에 따라 2개 이상인 경우도 있다.) 이 진행할 arc를 e 라고 표기하고 $e = (s, \nu)$ 라고 하자. 또한 arc e 를 통과하는 데 소요되는 시간 $t(e)$ 도 구한다. (2.2.4. 참조)
- 3) 현재시각으로부터 시간 $t(e)$ 가 경과한 후에 EVENT(e)를 수행한다.

EVENT(e) routine

여기에서 e 는 어느 arc를 가르킨다. $e = (n, m)$ 이라고 하자. EVENT(e)는 어느 사람이 arc e 의 to-node인 node m 에 도착할 때 불리워 집행되는 사상(event) routine이며 다음을 처리한다.

- 1) Node m 이 어느 sink node이면 이 사람을 system밖으로 없애고 아래의 단계 5)를 수행한다. 아니면 단계 2)를 수행한다.
- 2) 다음으로 진행할 arc를 분기결정 routine에 의하여 구한다. 이 진행할 arc를 e^* 라고 하자. 또한 분기결정 routine으로부터 arc e^* 를 통과하는 데 소요되는 시간 $t(e^*)$ 도 구한다. 그리고 단계 3) 또는 4)를 수행한다.
- 3) 만약 arc e^* 가 현재 봉쇄되어 있으면 이 사람은 대기행렬 $Q(e^*)$ 에 추가시킨다. (각 arc $e \in \mathcal{E}$ 에 대하여 $Q(e)$ 는 arc e 가 blocked 되어 있을 때 arc e 로 진행하려는 사람이 arc e 가 unblocked될 때까지 대기하는 queue이다.) 그리고 단계 5)를 수행한다.
- 4) 만약 arc e^* 가 현재 개방되어 있으면 이 사람을 arc e^* 로 진행시키기 위하

여 현재시각으로부터 시간 $t(e^*)$ 가 경과한 후에 $EVENT(e^*)$ 를 수행한다. 그리고 단계 5)를 수행한다.

- 5) 만약 arc e 가 현재 봉쇄 상태에서 개방 상태로 변하면 $|Q(e)| \neq 0$ 인 경우에는 $Q(e)$ 에 가장 일찌기 들어갔던 사람을 꺼낸다. 이 사람이 현재 위치하고 있던 arc가 arc e^* 라고 하자. 이 사람을 곧바로 arc e 로 이동시키기 위하여 현재시각에 $EVENT(e^*)$ 를 수행한다.

Simulation의 종료

Simulation은 더 이상 수행할 사상이 없을 때, 즉 모든 사람이 건물을 빠져 나갔을 때 종료된다. 종료시에 2.3.2.에서 언급한 출력을 마련한다.

III. 사례연구

앞에서 설명한 simulation방법을 울산대학교 중앙도서관에 대하여 적용하여 보았다. 울산대학교 중앙도서관 (이하 도서관이라고 지칭) 건물은 4층 건물로서 울산대학교 교내의 중앙에 위치하고 있으며 울산대학교학생및 울산전문대학학생들이 이용하고 있다. 이 건물은 많은 학생들이 상주하고 있어 비상소개시에 일시에 많은 사람이 몰려 상당한 혼잡이 예상되나 건물의 구조가 복잡하고 건물의 설계가 안전한 소개에 문제점이 있는 것으로 판단되어 연구대상으로 삼았다.

도서관내의 사람들의 수는 시간에 따라 변하는데 5회 관측치의 평균값에 근거하였다. 총인원은 574명이었다.

현재 건물구조와 초기인원분포하에서의 소개과정을 simulation하여 보았다. 시행횟수는 10회로 하였다. 출력자료중 소개시간에 대한 정보를 가장 중시하고 다른 출력은 참고로 하였다.

소개시간에 대한 정보

매회 최종소개시각, 평균소개시각은 다음과 같았다. 최종소개시각은 맨마지막으로 건물을 빠져나오는 시각을 말하며, 평균소개시각은 각 사람들이 건물을 빠져나오는 시각을 평균한 값이다.

시행번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
최종소개시각	6.01	5.91	5.93	5.85	6.22	5.74	6.03	5.86	5.69	5.45
평균소개시각	2.82	2.94	2.84	2.90	2.91	2.72	2.83	2.88	2.65	2.53

(단위: 분)

출력을 분석한 결과 떠오른 문제점중 대표적인 것은 다음과 같았다.

1. 문의 너비가 협소하다. 1층의 북쪽계단에서 출구로 통하는 문은 현재 문의 너비가 0.80m인데 평균대기 인원이 9명이 넘었다. 이는 1층과 2층사이의 북쪽계단의 평균 혼잡도가 E로 상당히 혼잡한 원인의 하나로 보여진다.
2. 1층출구가 협소하다. 이 출구의 평균 혼잡도가 F로서 매우 혼잡한 편이다. 이로 인하여 출구에 연결되는 통로들이 혼잡하게 되었다.

현재의 상태대로 그냥 내버려 두는 것을 대안 I이라고 하자.

보다 나은 방안을 강구하기 위하여 우선 건물의 구조변경이 쉬운 것중 하나인 1층 문의 너비를 넓혀보는 대안을 검토하여 보았다.

- 1층의 북쪽계단에서 출구로 통하는 문을 현재 0.8m에서 최대가능한 1.5m로 늘렸다.
- 1층의 제1,2열람실에서 출구로 통하는 문들을 각각 현재 0.7m에서 1.0m로 늘렸다.

다. (Predetechenskii와 Milinskii [6]에 따르면 문의 너비가 0.75m 이하인 경우에는 arch현상에 의한 jamming이 발생할 가능성이 있다.)
 이 대안을 대안 II라고 하자.
 대안 II를 10회 수행하여 본 결과 아래와 같은 소개시각의 통계량을 얻었다.

시행번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
최종소개시각	5.79	5.94	5.83	5.81	6.20	5.85	5.92	5.79	6.05	5.83
평균소개시각	2.70	2.84	2.75	2.88	2.95	2.82	2.96	2.70	2.87	2.93

(단위: 분)

대안 II가 대안 I보다 최종소개시간을 단축시키는가를 알아보기 위하여 Mann-Whitney U 검정을 SPSS를 이용하여 실시하였다. 유의수준이 97%보다 크지 않은 경우 두 대안이 별다른 차이가 없었다. (검정통계량 $U = 49.5$) 따라서 대안 II가 대안 I보다도 최종소개시간을 단축시킨다고 볼 수 없다. 그 원인을 알아보기 위하여 대안 II의 arc별 이용정보와 bottleneck정보를 검토한 결과 다음을 알 수 있었다.

1층의 북쪽계단에서 출구로 통하는 문의 확장으로 이 문에서와 또 1층과 2층사이의 북쪽계단에서의 혼잡도는 상당히 감소하였으나 대신 1층 출구쪽 부분의 부담이 더욱 가중되어 출구의 평균 혼잡도가 더 증가하게 되어 평균밀도가 가장 높게 되었다. 따라서 이들 출구의 능력을 확장하지 않고서는 소개시간을 단축하기 어렵다고 판단되어 가능한 방안을 강구하여 보았다. 현재 출구의 통로는 출입확인및 보안을 위한 사무실이 있는데 이 곳의 시설을 재배치하면 출구의 통로의 너비를 확장가능하다. 결국 출구의 통로의 너비를 현재 1.5m에서 1.7m로 확장한 대안을 고려하여 보기로 하였다. 이 대안을 대안 III이라고 하자.

마찬가지로 대안 III를 10회 수행하여 본 후 Mann-Whitney U 검정을 실시한 결과 유의수준에 관계없이 대안 III이 대안 II보다도 최종소개시간을 단축시킨다고 볼 수 있었다. (검정통계량 $U = 0$.)

1층출구및 인접부분의 능력은 더 이상 확장할 수 없다. 새로운 대안을 모색하기 위하여 대안 III의 출력을 검토하였다. 2층의 시설중 참고자료실 출입문와 계단으로 연결되는 문이 가장 대기현상이 심하여 1층으로의 흐름을 제약하고 있었다. 따라서 이들 문을 현재 대안 III의 0.8m에서 각각 1.5m로 확장시키는 대안을 검토하여 보았다. 대안 III에 이러한 변화를 한 것을 대안 IV라고 하였다.

대안 IV를 10회 수행하여 본 후 Mann-Whitney U 검정을 실시한 결과 유의수준이 52%보다 크지 않은 경우 두 대안이 별다른 차이가 없었다. (검정통계량 $U = 41.5$) 따라서 대안 IV가 대안 III보다도 최종소개시간을 단축시킨다고 볼 수 없다. 그 원인을 알아보기 위하여 대안 IV의 arc별 이용정보와 bottleneck정보를 검토한 결과 다음을 알 수 있었다.

2층의 참고자료실 출입문에서 계단으로 연결되는 문의 대기현상의 정도는 완화되었으나 대신 1층 출입구부분의 혼잡을 더 유발하였다. 그런데 1층 출입구부분은 대안 III에서도 이미 혼잡도가 F이어서 2층에서 더 많은 사람이 1층에 신속하게 도착한다고 하더라도 이들이 건물을 빠져나가는 시간은 별차이가 없다. 대안 IV의 출력에 의하면 3층의 과제도서실 출입문이 매우 혼잡한 것으로 나타났다. 그러나 이 부분의 능력을 확충시키는 것은 마찬가지로 소개시간의 단축에는 기여하지 못하리라고 판단되어 검토하지 않겠다.

이제는 문이나 통로의 너비를 확장하는 것으로는 소개시간의 감소를 기하기는 어렵다고 보고 다른 각도에서 대안을 강구하여 본다. 2층에는 많은 사람이 있으나 출입구가 하나이기 때문에 많은 혼잡이 일어났다. 그러나 극지적으로 이 부분의 능력만을 확충하는 방법 (대안 IV)으로는 소개시간단축이 가능하지 않다. 또한 출입구가 하나이어서 비상시 안전확보에도 문제점이 많다. 이런 이유로 2층의 남쪽편에 비상 출입문을 설치하여 비상시에 이용하는 것을 고려하여 보았다. 그러나 이것만으로는 소개시간을 단축시킬 수 없다. 왜냐하면 새 출입문을 이용하는 사람들도 결국 이전과 같은 1층 출구를 이용하는데 그 거리가 조금 단축은 되나 반면에 1층 열람실 출입문들 앞에

서 가중된 혼잡으로 인하여 대기시간이 더 길어지기 때문이다. 따라서 1층의 남쪽편에 비상문을 추가로 고려하였다. 비상문의 너비가 각각 1.5m라고 하자. 대안 IV에 비상문 두개를 추장나 것을 대안 V라고 부르자.

소개시 이 비상문을 바로 이용할 수 있고 소개당사자들이 이를 충분히 알고 있다는 가정하에 대안 V의 효과를 알아 보자. 대안 V를 10회 수행하여 본 결과 다음과 같은 소개시각의 통계량을 얻었다.

시행번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
최종소개시각	3.77	3.98	4.04	3.72	3.47	3.59	4.10	3.63	3.69	3.60
평균소개시각	1.84	1.77	1.63	1.76	1.75	1.76	1.62	1.71	1.84	1.74

(단위: 분)

대안 V이 대안 IV보다 최종소개시간을 단축시키는가를 알아보기 위하여 Mann-Whitney U 검정을 실시한 결과 유의수준에 관계없이 대안 V이 대안 IV보다도 최종소개시간을 단축시킨다고 볼 수 있었다. (검정통계량 $U = 0$.) 또한 소개경로의 이용도의 분산으로 인하여 1층에서 출구근처의 혼잡도도 상당히 완화되었다.

대안 V는 지금까지 검토한 대안 중에서 가장 훌륭하다. 대안 V의 집행은 두 개의 비상문의 설치를 전제로 한다. 만약 이것이 어려울 때에는 대안 III 또는 IV의 경우는 구조변경이 용이하며 현재상태인 대안 I보다도 소개효과가 우월하므로 이들 대안의 채택을 권한다.

IV. 앞으로의 연구과제

앞으로의 연구과제는 다음과 같다.

- 1) 제시된 simulation 모형의 타당성 (validity) 검증이 필요하다. 특히 분기결정논리의 적합성을 검증할 필요가 있고 분기결정시의 소개시간의 예측오차와 건물에 대한 사전지식의 관계에 대하여 더 많은 연구가 필요하다.
- 2) 건물의 구성부분, 즉 arc의 종류를 더 세분화하여 입력자료의 정확성을 높인다. 예를 들어 문의 경우, 회전문, 좌우로 움직이는 문, 앞뒤로 움직이는 문, 자동여부에 따라 통과시간이 달라지는데 입력시 이를 구분할 수 있게 한다.
- 3) Bottleneck 판정에 객관적 규칙을 개발한다. 예를 들어 여러곳이 혼잡한 경우 출구쪽에 가까운 곳 또는 아래층의 능력을 확장하는 것이 먼 곳의 능력을 확장하는 것보다도 더 효과적일 것으로 생각이 드나 이에 대하여는 연구가 더 필요하다.
- 4) Program code를 보완하여 입출력을 더욱 편리하게 한다.
- 5) Program code에서 SLAM II에 의존하는 부분을 자체작성하여 SLAM II가 없이도 수행 가능하게 한다.

참고문헌

- [1] Choi, W., Network Flow Models of Building Evacuation Models with Flow-Dependent Arc Capacities, Ph.D. Dissertation, University of Florida, Gainesville, Florida, USA, May, 1987.
- [2] Fruin, J.J., Designing for Pedestrian - a Level of Service Concept, Ph.D. Dissertation, The Polytechnic Institute of Brooklyn, New York, June, 1970.
- [3] Fruin, J.J., *Pedestrian Planning and Design*, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, New York, 1971. (out of print)
- [4] Karbowicz, C.J., and Smith, J.M., "A K-shortest Paths Routing Heuristic for Stochastic Network Evacuation Models," Department of Industrial Engineering and Operations Research, University of Massachusetts at Amherst, Mass., May, 1983.
- [5] Pauls, J., "Building Evacuation: Research Findings and Recommendations," in *Fires and Human Behavior*, J. Canter (ed.), J. Wiley and Sons, New York, 251-275, 1980.
- [6] Predtechenskii, W.M., and Milinskii, A.I., *Planning of Foot Traffic Flow in Buildings*, Amerind Publishing Co., New Delhi, 1978.
- [7] Pritsker, A.A.B., *Introduction to Simulation and SLAM II (third edition)*, A Halsted Press Book, John Wiley and Sons, 1986.
- [8] Stahl, F., "BFIRES/VERSION I Computer Simulation of Emergency Egress Behavior During Fires: Calibration and Analysis," NBSIR 79-1713, National Bureau of Standards, Washington, D.C., 1979.
- [9] Stahl, F., "An Examination of BFIRES/VERSION I Computer Program: Comparing Simulated with Actual Fire Events," *Architectural Science Review*, Vol. 23, 85-89, 1980.
- [10] Stahl, F., "BFIRES-II: A Behavior Based Computer Simulation Emergency Egress During Fires," *Fire Technology*, Vol. 18, No. 1, 49-65, 1982.
- [11] Stahl, F., and Archea, J., "An Assessment of the Technical Literature on Emergency Egress from Buildings," NBSIR 77-1313, National Bureau of Standards, Washington, D.C., 1977.