이형적 초등학교 건물에서 비상시 군집보행을 고려한 정량적 배치계획

Systematic Emergency Exit Planning Method in School Design

이 승 선* 권 준 범**
Lee, Seung-Sun Kwun, Joon-Bum

Abstract

This study developed an algorithm to predict the most efficient evacuation protocol in an elementary school that has an irregular type of architectural planning. The assumption of this study takes a stand point that today's elementary schools are designed in unusual and irregular floor type and, therefore, past architect's knowledge regarding efficient evacuation will no longer effective to save lives. In this regard, this study applied an algorithm that is especially designed to find appropriate locations in general in the field of industrial engineering, which has been proven for many decades. Furthermore, this study not only adapted an engineering model but also conversed to examine spatial relationship and added the concept of group evacuation, which will delay the whole evacuation process, in the tested algorithm to make it more architectural. Consequently, this study compared its outcome with an existing elementary school and questioned its effectiveness in evacuation process based on the algorithm.

키워드 : 비상구, 정량적 평가, 시설배치계획, 군집피난

Keywords : Emergency Exit, Quantitative Evaluation, Facilities Layout, Group Evacuation

1. 서론

1.1 연구의 배경과 목적

초·중·고등학교 시설물은 2009년도 기준에 따르면 전국적으로 11318개가 있으며 그 개수 또한 매년 증가하고 있다. 그 중에서도 초등학교는 전체 학교 수의 50.61%로 가장 높은 비율을 차지하고 있다.¹⁾ 만 6세부터 12세까지의 학생이 주로 이용하는 초등학교 시설의 가장 큰 특징은 구성원들의 학년 별 발육상태가 뚜렷한 차이를 보이고 있다는 것이다. 또한 초등학생은 신체적·지적으로 구성원들의 성장 및 발달이 편차가 크기 때문에 비상시 상황판단이 다양할 수 있다.

더욱이 7차 교육과정이 시작된 이후 초등학교 건물은

교육정책의 변화와 함께 과거 획일적인 학습공간에서 벗어나 다목적 공간, 공용교실 조성과 같은 공간구성에서의 변화도 같이 이루어지고 있다.²⁾ 이러한 공간구성의 변화와 더불어 과거의 一자형, 二자형의 편복도식 교실 배치에서 발전한 ㄷ자형, ㄱ자형의 배치방법이 주로 나타나고 있으나³⁾ 최근에 이르러서는 형태를 규정하기 어려운 이형적인 배치방법의 초등학교건물들이 현상설계를 통하여 점차 더 많이 계획되고 있는 실정이다. 이러한 복합적인 요소들 때문에 건축가의 주관적이고 관습적인 피난대처방법에서 벗어나 객관적이고 정량적인 대피계획의 수립이 필요하다. 그러나 점차 복잡해지고 있는 이형적인 배치방법의 초등학교건물 피난계획에 있어, 과학적 검증은 따로 이루어지지 않고 기본적인 피난법규에 따라서 건축가의 주관에 의

* 정회원, 세종대 건축대학원 학석사 연계과정

** 정회원, 세종대 건축학과 부교수, 건축학 박사, 교신저자
(joonkwun@sejong.ac.kr)

1) 행정안전부 지역발전정책국 지역경제과, 한국도시연감(2009), 국가통계포털, 2009

2) 김승중 외, 제7차 교육과정에 대응하는 초등학교 학습공간의 공간구조에 관한 연구, 대한건축학회 추계학술발표대회 논문집, v21 n.2, pp.229, 2001

3) 김현진 외, 초등학교 현상설계 당선안에 나타난 배치 유형에 관한 연구, 한국교육시설학회논문집, v.17 n.5, pp.11-12, 2010

해 피난계획이 수립되고 있다. 특히, 초등학교를 이용하는 사용자 의 대다수를 어린이가 차지하기 때문에 더욱더 객관적이고 구체적인 피난계획이 수립되어야 할 것이다. 따라서 과거에 볼 수 없었던 이형적 배치의 초등학교건물에 대한 피난계획이 정량적으로 검증될 필요가 있다.

1.2 연구의 방법 및 범위

선행연구에서는 수리적 모형과 최적화 알고리즘의 분석을 통해 학교건축물의 비상구를 중심으로 대피거리의 총합을 최소화하는 피난성능위주의 정량적 배치방법의 가능성을 논하였다.⁴⁾ 그 연장선상에 있어 기존에 고려되었던 특성인 물리적 거리의 최소화뿐만 아니라 보행자의 보행속도와 신체적 약자의 보행속도, 대피상황에서 나타나는 병목현상 등의 화재 시 나타나는 특징들을 종합한 동적 알고리즘 수리모형(Dynamic Algorithm Model)의 개발을 통해 학교건축물에서 정량적으로 비상구를 배치하는 것을 목적으로 한다. 그리고 화재시 피난행동은 심리적인 상태가 영향을 미칠 수는 있으나 화재나 사고발생 시 인간의 행동특성에 대해서는 정보가 적고 객관적이지 못하기 때문에 인간의 행동특성과 같은 정성적 요인은 연구의 범위에서 제외하기로 하였다. 연구의 대상은 최근 신축되고 있는 이형적인 배치방법의 P초등학교로서 어떠한 형태라 특정 지을 수 없고, 평면상에서 1~3층의 평면구성과 복도의 연결등 공간 구성이 다르다. 또한 전체적인 배치형상이 곡면으로 되어 있는 등 여러 가지 특성이 이전에 볼 수 없던 학교배치계획을 보여주고 있어 알고리즘 분석을 통해 비상구를 배치하기 위한 본 연구의 목적에 적합하다고 판단되었다.

2. 이론적 고찰

본 절에서는 선행연구에 대한 고찰과 더불어 선행연구에서 논의되지 않은 피난에 연관된 요인 중 보행속도에 관하여 일반인 및 신체적 약자들의 보행속도와 일정 공간 내 다수의 사람이 있을 경우인 군집보행등의 피난장해요소를 포함하여 정량적인 비상구의 위치선정을 객관화 시키는 알고리즘을 테스트 하고자 한다.

2.1 선행연구 검토

선행연구에서는 ㄷ자형 배치의 S초등학교를 중심으로

4) 이승선 외 2명, ㄷ자형 초등학교의 비상구를 중심으로 한 정량적 배치방법, 한국교육시설학회논문집, v18, n5, pp.35-42, 2011

해당 건물의 실을 유형별로 나누고 각 실의 물리적 최단거리(Arc)와 각 실 재실자 수(Node)의 합을 수리적 모형과 최적화 알고리즘 통해 분석하여 총 7개의 비상구 중 2개의 비상구에 대해 새로운 위치를 제안하였다.⁵⁾ 그러나 대피거리의 최소화가 반드시 피해의 최소화로 이어진다고 단정하기는 힘든 약점이 있다.

따라서 본 연구에서는 기존연구의 약점을 보완하기 위해 재실자의 수에 따른 물리적 거리의 최소화와 더불어 재실자들의 피난시 이동속도와 복도등 좁은공간내 다수의 사람들이 있을 때 발생하는 병목현상등을 정량화 할 수 있는 이론적 검토를 통하여 보다 현실적이고 정량적인 비상구 배치방법의 제안하고자 한다.

2.2 군집보행속도에 대한 고찰

보행속도에 관한 연구는 사람의 운동특성, 도시 공간에서의 보행량, 피난상황의 측정 등 다양한 목적을 위해 실시되고 있으며, 다양한 상황에서의 실험을 통해 조사되는 것으로 나타나고 있다. 본 연구의 목적을 위한 피난상황에서의 보행속도는 재실자의 신체능력이나 피난경로의 면적에 따른 군집밀도에 의해 화재 상황 시 발생하는 열과 연기의 농도에 따라 달라지는 것으로 나타난다.⁶⁾ 이전의 실험이나 관찰결과에 의하면 일반적인 성인의 수평적 보행속도는 [1m/s] 전후의 범위로 나타나지만, 유년기 아동이나 고령자등 신체적 약자들의 경우에는 [0.5m/s]의 수평적 보행속도가 나타난다.⁷⁾ 초등학교 각 학년의 키와 몸무게는 학년별로 신체적 특징의 차이가 있으나, 장동진 외2명의 연구에 따르면 학년별 운동능력은 의외로 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타난다.⁸⁾ 그러므로 신체적 약자의 보행속도인 [0.5m/s]를 초등학교생의 보편적인 보행속도로 보아도 문제가 없을 것으로 판단된다.

군집보행에 관한 연구는 해외에서 먼저 시작되었으며, 최근 들어 국내에서도 몇 차례 연구가 진행되어졌다. 일반

5) 이승선 외 2명, ㄷ자형 초등학교의 비상구를 중심으로 한 정량적 배치방법, 한국교육시설학회논문집, v18, n5, pp.35-42, 2011

6) 김동은 외 5명, 성능적 피난안전설계를 위한 수직적 보행 속도에 관한 연구, 한국화재소방학회 학술대회 논문집, n11, pp.311-316, 2009

7) 日本建設省告示, 避難安全檢證法の解説及伊討算例とその解説, 日本, p.42, 2001

8) 장동진 외2명, 초등학교생의 학년별 체격, 체력 및 신체특성 비교, 한국초등체육학회지, v13, n2, pp177-189, 2008 (연구에 의하면 초등학교 1학년과 6학년 남학생의 키와 몸무게는 각각 28cm와 21kg 정도의 차이를 보이지만, 50m 달리기 경우 1학년과 6학년은 2초 정도의 차이를 보이는 것으로 나타났다.)

그림 1. 수평군집보행에 대한 연구결과¹⁰⁾ 그림 2. 수직군집보행(하행)에 대한 연구결과¹²⁾

적으로 측정을 위해서 영화관, 지하철역사, 가로등의 장소가 사용되었으며 위급상황이 아닌 일반적인 상황에서의 관찰이나 실험자들을 대상으로 한 실험을 통하여 연구가 진행되었다. 피난인원의 밀도가 증대 될 경우, 통로 상에 경사가 없는 수평공간에서의 보행속도는 피난인원 밀도가 0.5~1인/m² 이하 일 경우 자유보행이 가능하지만, 밀도가 1.2인/m² 이상부터는 피난 시 전면에 위치한 피난자를 추월하기 위해서 피난인원 간 물리적 충돌을 피할 수 없기 때문에 군집보행이 형성된다.⁹⁾ 군집보행에 관한 6개의 해외 연구와 1개의 국내 연구를 종합하여 분석하면 <그림 1>과 같이, 일정한 성향을 나타내는 것을 알 수 있다. 즉, 군집밀도가 0~2인/m²에서는 [0.6~1.5m/s]의 보행속도를 보이지만 3인/m² 이상부터는 보행속도가 급격히 줄어들어 평균적으로 [0.2m/s]의 속도를 보이는 것으로 나타난다.

수직공간은 계단과 램프등 층간 이동을 할 수 있는 공간으로서 수직보행속도에 관한 연구는 상행과 하행으로 나뉘지며, 상행의 보행속도보다는 하행의 보행속도가 높으며 층 간격이 많을수록 피난시간이 증대하는 것을 알 수 있다.¹¹⁾ 본 연구의 대상인 P초등학교의 경우 4층 높이의 건물로서 사고 발생 시 상행의 피난행동보다는 하행의 피난행동이 일반적으로 나타날 것으로 예상되기 때문에 수직공간에서 하행의 피난행동을 연구의 범위로 한다. 상행 보행속도에 대한 4개 연구를 제외한 <그림 2>의 하행보행속도의 연구결과에 따르면 군집밀도가 0~2인/m² 일 때는 두 연구의 보행속도 차이가 크지만 3인/m² 이상 부터

는 두 연구가 비슷한 성향을 나타내고 있으며 4인/m² 에서 평균 [0.4m/s] 정도의 수직보행속도가 나타나는 것으로 보인다.

위와 같은 연구들을 통해 본 연구에서는 이전연구보다 객관적인 분석을 위해서 일반보행, 수직공간이동, 수평공간이동 그리고 군집보행등의 상황을 고려한 알고리즘을 바탕으로 최적화된 비상구의 위치를 제시하고자 한다.

2.3 분석 알고리즘의 소개 및 특성¹³⁾

본 연구에서 사용하는 수리적 모형과 최적화 알고리즘은 시설배치계획(Facilities Layout)¹⁴⁾의 방법론 중 공학적으로 설비위치를 설정하는데 사용되는 알고리즘 모형을 응용하여 건물 내의 계단, 통로, 실의 용도, 재실자의 수와 그에 따른 군집형성등을 감안하여 평면계획상 비상구의 위치를 적절히 배열하는 것이다. 이때, 각 실의 유형별 인원수(node)와 실 간의 거리(arc)를 분석하고 그에 따른 최적의 비상구 위치를 설정 할 수 있다. 이에 따라 기존의 피난 시뮬레이션 프로그램들과 같은 P.O.E(거주후 평가) 위주의 분석이 아닌 건축계획단계에서부터 최적화된 비상구의 위치를 통해 피난성능의 평가와 분석을 동시에 수행

9) 박재성, 건축물 화재시 피난행동을 고려한 피난예측모델에 관한 연구: 대규모 다중이용 건축물을 중심으로, 서울시립대학교 대학원, 2004

10) 서동구 외 2명, 성능적인 피난안전설계를 위한 군집형성시 보행속도 조사연구, 대한건축학회논문집, v26, n12, 2010

11) 최준호 외 4명, 초고층 건축물의 수직적 피난방향에 따른 피난군집의 층간 이동시간 및 보행속도 비교, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, v29, n1, pp.630-632, 2009

12) 김동은 외 5명, 성능적 피난안전설계를 위한 수직적 보행속도에 관한 연구, 한국화재소방학회 학술대회 논문집, n11, pp.311-316, 2009

13) 이승선 외 2명, ㄷ자형 초등학교의 비상구를 중심으로 한 정량적 배치방법, 한국교육시설학회논문집, v18, n5, pp.35-42, 2011

14) 한상찬, 산업공학개론, 초판, 형설 출판사, pp.139-157, 2006 (시설배치계획[Facilities Layout]은 서비스 내지 생산의 흐름에 맞춰 건물, 시설, 기계설비, 통로, 차고, 사무실 등의 위치를 공간적으로 적절히 배치하는 것인데, 통상 공장 내의 건물배치, 통로배치, 기계배치, 시설배치 등이 모두 망라된다. 설비배치의 본래의 목적은 생산시스템의 유효성이 크도록 기계, 원자재, 작업자 등의 생산요소와 생산설비의 배열을 최적화하는 것이다.)

할 수 있는 장점이 있다.

3. 수리적 모형과 최적화 알고리즘 분석방법

최적화된 비상구 위치의 합리적인 비교분석을 위해서 건축가가 설정한 5개의 비상구의 개수는 여러 현실적인 문제들을 감안하여 고정 값으로 설정한다. 또한 건물의 여러 가지 기능과 건축법규를 고려하여 계획한 코어의 위치와 개수 또한 고정 값으로 설정한다.

3.1 P초등학교의 피난층 분석

이형적 배치의 'P초등학교'는 <그림 3>과 같이 피난층에서 2개의 동으로 나뉘어져 있다. 북측의 1개동을 A동 남측의 1개동을 B동이라 정의하였다. A동의 경우 2개의 비상구와 2개의 직통계단이 설치되어 있으며, B동의 경우 3개의 비상구와 2개의 직통계단이 설치되어있다. 또한 건축 법규상 대피층 평면의 모든 위치에 비상구의 설치 가능한 것으로 분석되었다. 1층의 식당과 유치원, 2층의 식당공간 위에 배치된 다목적강당은 전체 배치형상에 있어 별도의 공간으로 구성되어 있으며, 각각 피난계획이 별도로 수립되어 있기 때문에 분석 대상에서 제외하도록 하였다.

그림 3. P초등학교 피난층 현황

3.2 P초등학교의 공간구성 및 재실자 분석

본 연구에서 각 실의 유형별 재실자 수를 분석하기 위하여 P초등학교의 설계개요 중 층별 면적개요에 표기된 용도에 따라서 실의 유형을 분류하였으며, 각각의 실을 하나의 Node로 설정하였다. 재실자의 수가 명확하지 않은 경우에는 학교건축계획의 학급수별 시설기준에 따른 수용 학생수를 기준으로 하였으며 이 기준마저 명확하지 않은

표 1. 2층 공간별 재실자 구성 (단위: 명)

종합멀티미디어실1	다목적실	북측교실5개	교사연구실	도서실	방송실	교무회의실	교사휴게실1	교사휴게실2	실과실
35	18	175	8	84	10	13	8	8	35

표 2. 3층 공간별 재실자 구성 (단위: 명)

종합멀티미디어실2	다목적실2	북측교실5개	교사연구실1	남측교실5개	교사연구실2	미디어센터	과학실1	과학실2
35	18	175	8	175	8	14	35	35

표 3. 4층 공간별 재실자 구성 (단위: 명)

종합멀티미디어실3	다목적실3	북측교실5개	교사연구실3	남측교실5개	교사연구실4	미디어센터	음악실1	미술실2
35	18	175	8	175	8	14	35	35

경우 설계도면상 좌석수를 재실자 수로 산정하였다.¹⁵⁾ 화장실의 경우 재실자의 수를 정량적으로 파악하기 어려우며, 학교시설의 이용특성에 의해 쉬는 시간이나 점심시간 등 특정시간에 주로 활용되는 시설이다. 또한 화장실 이용자들의 구성은 인접한 다른 시설들의 재실자들이 활용한다 보아도 무방할 것으로 판단된다. 따라서 재실자 수가 추가되는 것을 막기 위해 구성목록에서는 제외하였다. 각 실별 재실자 수를 최대인원으로 산정한 이유는 모든 상황에서 최악의 경우를 고려하기 위함이다.

3.3 각 실의 유형별 물리적 최단거리(Arc) 분석방법¹⁶⁾

물리적 최단거리(Arc)는 <그림 4>와 같이 각 실간의 실질적인 최단거리를 말한다. 이를 계산하는 방법은 Node별로 하나의 무게중심점을¹⁷⁾ 산출하여 Node와 Node간 무게중심점 사이의 최소 직선거리를 이루는 경로를 따라 측정되는 거리의 합이다.

그림 4. 물리적 최단거리(Arc)의 산출방법 예시

15) 이호진, 학교건축계획, 초판, 사단법인 한국교육환경연구원, pp.97-203, 2009

16) 이승선 외 2명, ㄷ자형 초등학교의 비상구를 중심으로 한 정량적 배치방법, 한국교육시설학회논문집, v18, n5, pp.35-42, 2011

17) 평면상에서 한 공간의 면적 상 중심점을 뜻한다.

표 4. A초등학교 지상1층(A동) 시설 유형별 거리(Node) & 시설 유형간 거리(Arc)

(단위: m)

A동	시청각실 (119명) (178㎡)	교실1 (35명) (84㎡)	교실2 (35명) (84㎡)	교실3 (35명) (84㎡)	교실4 (35명) (84㎡)	교실5 (35명) (84㎡)	교사연구실 (8명) (50㎡)	계단1 (350명) (30㎡)	계단2 (350명) (30㎡)
시청각실 (119)		22	30.6	35.0	48.3	57.1	60.5	18.5	59.3
교실1 (35)	22		15.2	24	32.9	41.5	48.3	17.9	48.2
교실2 (35)	30.6	15.2		15.2	24	32.9	39.5	25.9	39.4
교실3 (35)	35.0	24	15.2		15.2	24	32.4	35.5	30.4
교실4 (35)	48.3	32.9	24	15.2		15.2	22	43.4	21.9
교실5 (35)	57.1	41.5	32.9	24	15.2		13.4	52.1	14.4
교사연구실 (8)	60.5	48.3	39.5	32.4	22	13.4		60.8	11.9
계단1 (350)	18.5	17.9	25.9	35.5	43.4	52.1	60.8		58.8
계단2 (350)	59.3	48.2	39.4	30.4	21.9	14.4	11.9	58.8	

3.4 수리적 모형과 최적화 알고리즘의 프로세스¹⁸⁾

본 연구에서 사용하는 수리적 모형과 최적화 알고리즘을 간단히 요약하면 <그림 5>와 같은 순서로 이루어진다. 실의 용도별 분류 및 재실자수 수(Node) 산출, 실 간 최소직선거리(Arc) 입력, 의사결정변수(해당 장소에 비상구를 설치한다. 설치하지 않는다.) 입력, 수리모형 구축(이동시간 최소화, 군집보행으로 인한 보행속도 절감 등의 변수입력) 그 후에 이에 따른 최적화된 비상구위치를 알 수 있다. 각의 입력과정 및 구축과정은 다음 절을 통해 설명하도록 한다.

그림 5. 수리적 모형과 최적화 알고리즘의 프로세스 과정

4. 결과 및 해석

본 절에서는 P초등학교의 화재발생시 각 시설에서 비상구까지의 총 대피시간을 최소화하는 비상구의 최적위치를 결정하기 위한 수리모형을 제안한다. 또한 실제 설치된

비상구의 위치와 수학적으로 최적화된 비상구의 위치를 비교 분석하는 것을 목적으로 한다.

4.1 수리적 모형과 최적화 알고리즘에 의한 변화모델

P초등학교의 수리모형을 구축하기 위해 필요한 기호를 정리하면 아래와 같다.

w_i : 시설 i 의 상주 인원, $i=1,2,\dots,N$,

A동의 경우 시설물의 개수 $N=9$

B동의 시설물의 개수 $N=7$

A동을 구성하고 있는 시설은

$i = (1:시청각실), (2: 교실1), (3: 교실2), (4: 교실3), (5: 교실4), (6: 교실5), (7: 교사연구실), (8: 계단1), (9: 계단2)$ 이고

B동을 구성하고 있는 시설은

$i = (1:특수학급), (2: 행정실), (3: 회의실), (4: 교장실), (5: 보건실), (6: 계단3), (7: 계단4)$ 이다.

s_i : 시설 i 의 소요 면적(m^2).

d_{ij} : 시설 i 에서 시설 j 까지의 거리

t_{ij} : 시설 i 에서 시설 j 의 상주인원이 동일 비상구로 대피할 때 걸리는 대피시간

M : 임의의 큰 수

다음으로 수리모형을 통해 우리가 결정하고자 하는 의사결정변수는 아래와 같다.

Y_j : 만약 시설 j 의 근처에 비상구가 설치된다면 1, 그렇지 않으면 0.

X_{ij} : 만약 시설 i 의 인원이 시설 j 의 근처에 설치된 비상구를 사용한다면 1, 그렇지 않으면 0.

18) 이승선 외 2명, ㄷ자형 초등학교의 비상구를 중심으로 한 정량적 배치방법, 한국교육시설학회논문집, v18, n5, pp.35-42, 2011

표 5. A초등학교 지상1층(B동) 시설 유형별 거리(Node) & 시설 유형간 거리(Arc)

(단위: m)

B동	특수학급(10명) (64m²)	행정실(10명) (46m²)	회의실(8명) (18m²)	교장실(1명) (47m²)	보건실(10명) (62m²)	계단3 (350명) (30m²)	계단4 (350명) (30m²)
특수학급 (10)		27.4	48.8	43.9	46.2	16.7	45.0
행정실 (10)	27.4		16.5	14.1	29.2	19.3	28.9
회의실 (8)	48.8	16.5		6.3	17.6	41.0	17.7
교장실 (1)	43.9	14.1	6.3		12.3	35.7	12.4
보건실 (10)	46.2	29.2	17.6	12.3		38.1	14.8
계단3 (350)	16.7	19.3	41.0	35.7	38.1		37.8
계단4 (350)	45.0	28.9	17.7	12.4	14.8	37.8	

위에서 w_i 와 s_i 는 A동과 B동별로 각각 <표 4>와 <표 5>에서 주어진 바와 같다. 각 계단의 상주인원은 학교 2층부터 4층까지의 전체 상주인원이 균등하게 4개의 계단을 통해 비상시에 대피함을 가정하여 계산하였다. 위의 기호와 의사결정변수를 사용하여 수리모형을 구축하면 아래와 같다.

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_i t_{ij} X_{ij}$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^N X_{ij} = 1, \forall i \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^N Y_j = u \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} \leq MY_j, \forall j \quad (3)$$

$$X_{ij} = 0, 1, \forall i, j \quad (4)$$

$$Y_j = 0, 1, \forall j \quad (5)$$

목적함수는 각 시설에서 시설에 배정된 비상구까지 이동시간의 합을 최소화하는 식이다. 서동구외(2010)의 군집형성시 보행연구에 의하면 피난군중의 밀도(인원/m²)가 ρ 이고 수평이동하는 피난군중의 이동속도 ν 는 아래의 회귀직선식에 의해 근사화 될 수 있다고 하였다.

$$\nu = 0.978 - 0.191\rho$$

그러므로 시설 i 와 시설 j 에서 대피하는 군중이 하나의 비상구로 대피하게 되는 경우 피난군중의 밀도는 $\rho_{ij} = \frac{w_i}{s_i} + \frac{w_j}{s_j}$ 로 계산할 수 있고 위의 식에 의해 시설 i 와 시설 j 에서 대피하는 피난군중의 이동속도를 구할 수 있게 된다.

$$\nu_{ij} = 0.978 - 0.191\rho_{ij}$$

서동구외(2010)의 연구에서 군중밀도가 4인/m²을 초과하게 되면 속도가 0.21m/s로 감소하고 그 이상의 군중밀도에 대한 자료는 나타나 있지 않다. 본 연구에서는 계단의 군중밀도가 이미 10을 초과하므로 계단의 군중과 함께 대피하게 되는 경우 대피 속도를 0.21m/s라고 가정하였다.

최종적으로 피난에 걸리는 시간은 다음과 같다.

$$t_{ij} = \frac{d_{ij}}{\nu_{ij}}$$

그러므로 목적함수를 보면 시설 i 의 인원이 시설 j 옆의 비상구로 대피한다면 ($X_{ij}=1$)시설 j 의 인원은 $d_{jj}=0$ 이기 때문에 바로 대피할 수 있으나 시설 i 의 인원은 t_{ij} 의 시간이 걸려서 대피하게 된다. 대피시간의 합은 시설 i 에 상주하는 인원수 곱하기 대피시간으로 인원수가 많은 시설일수록 대피에 많은 시간이 걸리게 된다. 제약식 (1)은 모든 시설에 사용 가능한 하나의 비상구가 할당되어야 함을 나타낸다. 제약식 (2)은 설치될 전체 비상구의 개수로 1동의 경우 $u=2$, 2동의 경우 $u=3$ 을 적용하였다. 제약식 (3)은 비상구가 설치될 때에만 그 비상구로 시설이 할당되어 대피가 가능함을 의미한다. 마지막으로 제약식 (4), (5)은 의사결정변수가 0혹은 1의 값을 가져야 함을 나타낸다.

실험은 Intel(R) Core 2 Duo CPU 3.16 GHz, 3.25 GB RAM을 가지는 컴퓨터에서 Microsoft Visual Studio 2005 C++과 상용 최적화 소프트웨어인 ILOG CPLEX 11.0 연동하여 진행하였다. 실험 결과 A동의 경우 비상구를 계단 1과 계단2의 옆에 각각 설치하고 계단1 옆의 비상구를 통해서 시정각실, 교실1, 교실2, 계단1의 인원이 대피하고 계단2옆의 비상구를 통해서 교실3, 교실4, 교실5, 교사연구실, 계단2의 인원이 대피하는 것이 최적인 것으로 나타났다. 이 경우 총 대피시간의 합은 29353.3초로 이를 1인당 대피시간으로 환산하면 약 97.19초가 소요되는 것으로 나타났다.

B동의 경우는 비상구를 각각, 행정실, 계단3, 계단4에 근처에 설치하는 것이 최적으로 나타났다. 행정실 옆의 비

상구를 통해서도 특수학급, 행정실, 회의실, 교장실, 보건실 인원이 대피하는 것이 최적이고 계단3과 계단4의 비상구를 통해서도 각각 계단의 인원들만 대피하는 것이 최적인 것으로 나타났다. B동의 경우 총대피시간은 794초로 이를 1인당 대피시간으로 환산하면 약 20.35초가 소요되는 것으로 나타난다. 이와 같이 A,B동간 대피시간이 차이는 A동의 상주인원이 B동 보다 많음에도 불구하고 현재 비상구의 개수가 오히려 적기 때문에 발생하는 문제로 판단된다.

4.2 기존 평면과 알고리즘 분석결과와 비교평가

건축가가 계획한 평면상 기존 비상구의 위치는 <그림 6>과 같이 5개를 제안하고 있다. 이를 수리적 모형과 최적화 알고리즘에 의해 분석한 결과인 <그림 7>과 비교하면 결과적으로 현재 A동의 시청각실 옆의 비상구를 계단1 옆으로 옮기고 B동의 경우는 현재의 비상구 위치가 최적 위치와 일치함을 알 수 있다.

하지만 이를 외부공간계획과 함께 놓고 본다면, 외부공간계획이나 A,B동의 연계 동선 등을 함께 고려했을 시 좋지 않은 건축계획이 된다. 따라서 알고리즘 분석결과와 값과 P초등학교의 건축계획을 종합하여 고려해 보았을 때 다음과 같은 두 가지 제안을 할 수 있다. 첫째, 기존 1층 A동의 시청각실과 계단1 및 부수적인 시설들의 위치를 서로 맞바꾸는 계획을 통하여 피난에 더 효율적인 공간구성을 이룰 수 있을 것이다. 두 번째, 알고리즘에서 제안한 계단 1의 앞으로 비상구를 하나 더 설치하여 피난 효율성을 높이는 것과 동시에 후면부의 녹지공간과도 연계가 가능한 제안으로 발전 할 수 있다. 이와 같은 두 가지 제안

그림 6. P초등학교 피난층의 비상구 위치

그림 7. 알고리즘 결과에 의한 비상구 위치변화

중 하나를 선택하여 공간구성을 하는 것이 알고리즘결과와 대상초등학교의 배치계획을 모두 충족시킬 수 있는 이상적인 대안이라 판단된다.

5. 결론

본 연구는 최근 설계된 초등학교 건축물 중 형태를 규정할 수 없는 이형적인 배치방법의 P초등학교를 대상으로 공학적 알고리즘 분석을 실행하였다. 평면을 구성하고 있는 각 실들에 대해서 유형별 재실자 수(Node)를 분류하고 각 실 간의 최단거리(Arc), 실 별 면적과 복도의 면적 등의 분석을 통해 해당 공간의 밀집 보행을 고려하여 수리적 모형과 최적화 알고리즘을 기반으로 객관적이고 정량적인 최적의 비상구 위치를 제안 할 수 있었다. 또한 현재의 P초등학교의 공간계획은 A와B동으로 나누어져있으며 그 사이에 식당과 중정을 배치시킴으로써 건축적 동선계획이나 공간계획은 주어진 사이트의 조건에 따라 훌륭히 충족시키는 것을 볼 수 있으나 비상시 대피에 있어서는 분석결과 그 문제점이 구체적이고 심각하게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 즉, 규모나 실들의 종류와 인원수가 더 많은 A동의 비상구 수는 2개이며 상대적으로 모든 면에서 작은 B동의 비상구 수는 오히려 3개로 계획된 불합리한 점을 볼 수 있다. 이러한 불합리한 점을 알고리즘을 통해 분석을 하면 비상시 군집보행으로 인해 대피시간도 최악의 경우 36배가 넘을 수도 있는 것을 증명하였다. 따라서 건축가가 제안한 P초등학교의 평면과 알고리즘에 의한 위치선정결과와 비교를 통해 다음과 같은 제안이 가능할 것으로 사료된다.

- (1) P초등학교의 현재 A동 1층의 시청각실과 계단1 및 화장실 등의 부수시설의 위치를 서로 맞바꾸는 제안이다. 이 제안을 수용할 시 2~4층의 멀티미디어 실과 코어공간 또한 같이 변경이 이루어져야 한다. 이는 현실적으로 실현가능성이 적은 제안이지만, 알고리즘 분석이 건축계획단계에서부터 이루어져서 분석결과가 반영이 되었다면, P초등학교의 공간계획이 피난에 최적화되고 전체적 공간구성의 효율성 또한 높아졌을 것으로 판단된다.
- (2) 알고리즘에서 제안한 계단 1의 앞으로 비상구를 하나 더 설치하여 피난 효율성을 높이는 것과 동시에 후면부의 녹지공간과도 연계가 가능한 제안이다. 이번 제안은 현실적으로 즉각 반영이 가능한 제안이다. 또한 B동이 3개의 비상구를 통해 총대피시간은 794초이고 A동의 경우, B동보다 면적이 넓고 재실자의 수 또한 많은 것에 비해서 2개의 비상구만이 설치되어있다. 이로 총대피시간은 29353초나 소요되게 되므로 A동의 비상구의 개수를 늘리는 것이 피난계획에 있어서 더욱 합리적인 것으로 판단된다.

연구결과를 통해서 수리적 모형과 최적화 알고리즘을 바탕으로 학교건축의 피난계획을 보다 정량적으로 수립할 수 있으며 현재 P초등학교의 피난계획상의 문제점을 파악할 수 있었다. 또한, 이러한 정량적 분석을 통해서 전체적인 공간배치구성도 더 효율적으로 계획 할 수 있는 가능성을 찾을 수 있었다. 이를 통해 학교건축뿐만 아니라 대규모 지하공간과 같은 더 복잡하고 대형화된 공간모델에서의 연구가 이루어진다면 수리적 모형과 최적화 알고리즘의 활용성을 더 크게 알 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 본 논문이 제안하는 수리모형의 가정과 이로 인해 발생하는 한계는 다음과 같다.

첫째, 제안된 수학 모형의 목적함수가 쌍으로 된 두개의 시설의 인원이 한번에 탈출하게 되는 상황만을 고려하므로 특정상황에 의해서 비상구로 할당된 모든 시설의 인원이 한꺼번에 몰리게 되는 상황인 경우 분석 결과와 일치하지 않게 된다.

둘째, 재난 시 인원이 최적 비상구를 통해 대피함을 가정하므로 실제 상황 시 인원의 비이성적 대피행태가 나타날 경우 분석 결과와 일치하지 않게 된다.

셋째, 본 연구에서는 시설별로 최대 인원이 상주하는 경우의 최적 비상구의 위치를 결정했으나 현실적으로는 모든 시설에 최대인원이 있는 상황은 불가능하다. 그러므로

수업시간 중인 시나리오, 혹은 체육시간인 시나리오등에 의해 시나리오별 분석이 현실적이다. 그러나 이 또한 시나리오별로 서로 다른 비상구위치를 어떻게 조화 시킬지에 대한 문제가 발생한다. 그러므로 현실적으로는 시설별 평균 상주인원을 고려한 문제를 추후에 연구해볼 가치가 있다고 판단된다.

참고문헌

1. 김동은 외 5명, 성능적 피난안전설계를 위한 수직적 보행 속도에 관한 연구, 한국화재소방학회 학술대회 논문집, n11, pp311-316, 2009
2. 김승중 외, 제7차 교육과정에 대응하는 초등학교 학습공간의 공간구조에 관한 연구, 대한건축학회 추계학술발표대회 논문집, v21 n.2, pp229, 2001
3. 김형진 · 김상진 · 이선영 · 박찬규, 초등학교 현상설계 당선안에 나타난 배치 유형에 관한 연구, 한국교육시설학회지 v.17 n.5, 연구논문, 2010
4. 박재성, 건축물 화재시 피난행동을 고려한 피난예측모델에 관한 연구: 대규모 다중이용 건축물을 중심으로, 서울시립대학교 대학원, 2004
5. 서동구 외 2명, 성능적인 피난안전설계를 위한 군집형성시 보행속도 조사연구, 대한건축학회논문집, v26, n12, 2010
6. 이승선 외 2명, ㄷ자형 초등학교의 비상구를 중심으로 한 정량적 배치방법, 한국교육시설학회논문집, v18, n5, pp.35-42, 2011
7. 이호진, 학교건축계획, 초판, (사)한국교육환경연구원, 2009
8. 장동진 외2명, 초등학생의 학년별 체격, 체력 및 신체특성 비교, 한국초등체육학회지, v13, n2, pp177-189, 2008
9. 최준호 외 4명, 초고층 건축물의 수직적 피난방향에 따른 피난군집의 층간 이동시간 및 보행속도 비교, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, v29, n1, pp630-632, 2009
10. 행정안전부 지역발전정책국 지역경제과, 한국도시연감(2009), 국가통계포털, 2009
11. 日本建設省告示, 避難安全檢證法の解説及伊計算例とその解説, 日本, p.42, 2001

접수 2011. 12. 15
1차 심사완료 2012. 01. 04
게재확정 2012. 01. 19