

■ 論 文 ■

건물 화재시 Quickest Path를 이용한 Adaptive 피난경로 유도방안

A Study on an Adaptive Guidance Plan by Quickest Path Algorithm
for Building Evacuations due to Fire

신 성 일

(서울시정개발연구원 연구위원)

서 용 희

(서울시정개발연구원 연구위원)

이 창 주

(서울대학교 환경대학원 석사과정)

목 차

I. 서론

II. 국내외 첨단 소방시스템 고찰

III. 피난경로 유도 시스템

IV. 사례연구

V. 결론 및 향후 연구과제

참고문헌

Key Words : 화재, 지능형빌딩시스템, 피난경로, 유도, 최속경로 알고리즘

Fire, Intelligent Building System, Evacuation Route, Guidance, Quickest Path Algorithm

요 약

건축기술의 발달로 세계적으로 초대형 건축물들이 나타나고 있다. 건축물들의 대형화, 복잡화는 안전상의 큰 문제점을 가지고 있으며, 이에 걸맞는 안전대책이 요구된다.

본 연구에서는 건물에 적용되는 최신기술 및 시스템을 외국사례를 기준으로 소개하고 더 나아가 이를 바탕으로 건물에서 화재시 직접적으로 피난자들을 유도할 수 있는 방안을 제시하였다. 구체적으로 빌딩에서 화재를 실시간으로 감지하여 영향을 파악할 수 있는 무선센서 네트워크가 현실화됨에 따라 이러한 정보를 이용할 수 있게 되었고, 이점에 착안하여 방향성유도등을 전제로 한 직접적인 유도방안을 마련하였다.

화재 정보를 이용함에 있어서 기본적으로 Quickest Path Algorithm에서 비 지배경로의 개념을 사용하여 시간과 용량을 고려한 경로를 선택하게 하였고, 화재의 영향을 시간과 용량의 제한조건으로 설정하여 경로의 선택에 영향을 주도록 하였다. 마지막으로 사례연구를 통해 네트워크에 적용해본 결과 Quickest Path Algorithm은 링크의 용량에 따라 효율적인 분산유도가 가능하였으며, 화재상황을 부여하여 경로상 화재에 의한 온도, 연기에 의해 링크 이용이 제한되는 경우에 있어서 해당링크를 피하거나, 수요를 제한하여, 실제적용시 안전과 피난시간의 최소화 등 피난유도의 목적을 얻을 수 있었다.

Enormously sized buildings are appearing world-wide with the advancement of construction techniques. Large-scaled and complicated structures will have increased difficulties for dealing with safety, and will demand well-matched safety measures.

This research introduced up-to-date techniques and systems which are applied in buildings in foreign nations. Furthermore, it proposed a direct guidance plan for buildings in case of fire. Since it is possible to install wireless sensor networks which detect fires or effects of fire, the plan makes use of this information. Accordingly, the authors completed a direct guidance plan that was based on omnidirectional guidance lights. It is possible to select a route with concern about both time and capacity with a concept of a non-dominated path.

Finally, case studies showed that quickest path algorithms were effective for guiding efficient dispersion routes and in case of restriction of certain links in preferred paths due to temperature and smoke, it was possible to avoid relevant links and to restrict demand in the network application. Consequently, the algorithms were able to maximize safety and minimize evacuation time, which were the purposes of this study.

1. 서론

1. 연구배경 및 목적

최근 우리나라에서 계획중인 초고층 빌딩의 추진계획이 이슈가 되었다. 2007년 현재 추진중인 빌딩만 해도 부산롯데월드와 서울의 제2롯데월드, 상암 국제비즈니스센터, 송도 인천타워 등 모두 500m 이상으로 타워팰리스의 두배가 넘는 높이이다. 세계적으로 빌딩의 초고층화 추세와 더불어 지하공간 활용의 활성화, 건축물의 대형화는 경제성장의 표면적 지표가 될 수도 있지만 그만큼 많은 사람들을 탈출구가 한정된 제한공간에서 활동하게 하기 때문에 철저한 방재계획이 부재하다면 비상상황시 대형참사가 발생할 우려가 높다. 최소한 200여명의 인명을 앗아간 대구 지하철 방화 참사 당시 미국의 월스트리트 저널은 우리나라의 대형 참사를 열거하면서 우리사회의 무관심한 안전대책을 지적했고, 지하철 참사 사건의 1차적인 원인은 정신병자의 방화이지만 2차적인 원인은 제연, 소화, 피난유도시설 등 방재대책의 부재를 꼽았다. 이처럼 기존의 화재방호를 위한 최소한도를 요구하는 현행 법규체계의 경직성과 건축법과의 분리운영 등 제도적 한계가 드러나는 가운데 2006년 소방관련기본법 개정계획에서 2008년말이나 2009년초에 연면적 5만㎡ 이상 또는 건축물의 높이가 100미터 이상의 건축을 신축하는 경우 “화재영향평가”와 “성능위주소방설계”를 시행하는 법안을 발표했다. 이미 세계적으로 보편화 추세에 있는 성능위주소방설계(PBD: Performance Based Design)를 기반으로 한 화재영향평가는 화재 및 피난 시물레이션을 위주로 한 종합적인 방재체계로서 현재 시행에 앞서 공학적인 완성도를 위한 준비기간을 갖고 있다.

따라서 본 연구는 대규모 건축물 방재체계에 있어서 미국의 NIST(National Institute of Standard and Technology)에서 연구된 무선센서 네트워크(WSN : Wireless Sensor Network)를 기반으로 한 지능형 대응 빌딩(iBR: intelligent Building Response)의 개념을 소개하고 교통시스템 공학적 지식을 접목시켜 화재시 용량과, 돌발상황 등을 고려하여 실시간으로 변동 가능한 최단시간, 최단경로 유도시스템을 제안하고 해당 알고리즘을 구현함으로써 화재영향평가에서 생존을 위한 수단으로 교통의 영역을 확장하고, 나날이 발전하는 첨단기술을 활용하는 방안을 연구함으로써 건축물내 거주자의 생존성을 높이는데 목적이 있다.

2. 연구내용 및 방법

본 연구는 휴대폰이 보편화되고 IT, 무선통신, 인식, 센서기술 등이 급격하게 발전하여 생활속에 스며드는 시점에서 이러한 기술을 교통공학적 지식을 적용하여 인간의 생명안전을 위해 활용하는 방안에 대한 것이다. 따라서 현재까지의 적용가능한 국내의 기술현황과 정책적 현황을 살펴보고 실질적으로 대규모 건축물에 효과적인 유도를 위한 유도시스템을 제안하고 이를 적용하기 위한 방안을 살펴보았다. 지금까지 각종 시설물에 설치되어 있는 유도등은 글자와 화살표를 잘보이게 하기 위해 불빛을 이용한 표지판이었다면 본 연구에서 제안한 방향성 있는 유도등은 자칫 혼란에 빠질 수 있는 피난자들을 실시간으로 안전한 경로로 유도하여 지능형 또는 감응식 신호등의 역할을 함으로서 효과를 극대화할 수 있을 것으로 예상된다.

잘못된 유도 시스템은 오히려 피난자들을 화재발생지역으로 유인하거나, 용량이 적은 통로나 계단으로 몰아 피난시간을 지체시킬 우려가 있으며, 피난시간 증가는 곧 피해발생 가능성이 높아진다는 것을 의미한다. 따라서 위험도 및 행동조건 등 다양한 화재 영향이 포함된 지체시간 및 용량, 즉 두가지의 목적함수를 고려할 수 있는 Quickest Path Method를 이용한 활용법을 간단한 네트워크에 적용해보고 상황부여를 통해 경로에 미치는 영향을 고려하여 adaptive 유도방향을 찾아보았으며, 화재의 영향이 없을 때와 상황이 부여됐을 때를 비교해봄으로서 적용방안을 평가해 보았다.

3. 기존연구 검토

1) 피난모델

손봉세(2004), 소은탁(2005) 등 기존의 피난연구는 건축물의 설계단계에서 복도, 계단, 피난계단, 피난동선 등 피난시설물을 이용하여 화재 시 피난자들의 자유대피에 의한 효율적인 피난계획에 초점을 맞추고, 이수경(2000), 이평강(2003) 등 다수의 연구에서 분석방법으로 건축물의 크기 및 특성별로 Simulex, EXODUS 등 피난 시물레이션 프로그램을 이용한 피난시간 추정방법을 이용하고 있다.

2) 건물 화재시 거주자 피난행태

박재성(2004), Shi Pu(2005) 등 다수의 연구에서 사고사례 및 설문조사를 이용하여 빌딩내 거주자들의 피

난행태 및 화재의 열기, 연기의 독성, 피난자 성별, 나이별 특성 등 피난고려요소를 분석하였으며 박동주(1993)은 보행교통류 특성에 관해 분석하였다.

3) Quickest Path Algorithm

이상욱(2000)은 Moore(1976)에 의해 제안된 최속 경로알고리즘을 발전시켰고 기존연구는 주로 통신, 물류 분야에 적용되고 있다.

4) 시사점

피난계획에 있어서 건축물의 설계위주의 인적피해 최소화 연구는 피난인원을 통제하지 못하는 한계를 지니고 있다. Shi Pu(2005)와 김정훈(2006)은 건축물의 첨단 자동화 시스템과 소방시스템의 접목을 시도하여 PDA를 이용한 정보제공 및 유도, 그리고 양방향성 유도등을 이용한 유도시스템을 제안하였다. 본 연구에서는 피난 유도에 있어서 자동화된 유도방향 표시 및 기술이용방안의 기본적인 개념을 기존연구에서 착안하였으나, 보다 구체적으로 방향 표시등 및 시스템 구동 프로세스, 적용 알고리즘 등을 제시하였고, 사례연구를 통해 효과성을 분석하였다.

II. 국내외 첨단 소방시스템 고찰

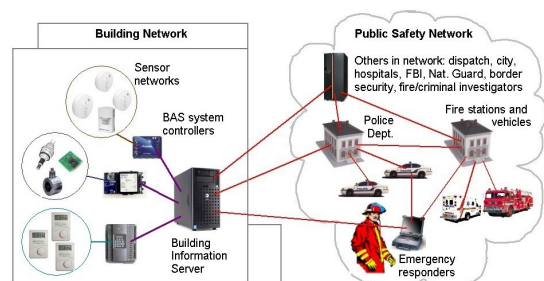
기존의 소방시스템은 자동화재탐지 설비나 스프링클러, 건물 내외부 소화전 및 소화전의 경보발생기, 비상구 유도등과 비상등 등으로 구성되어 있다. 자동화재탐지기 및 스프링클러가 화재발생을 탐지하고 이를 수신기로 보내어 경보기를 울리게 하고 이를 통해 건물 관리자는 화재발생 상황을 알게 되어 건물내부의 사람들에게 알리고 소방서로 전화하여 화재상황을 대처하게 된다.

기존 소방시스템의 문제는 먼저 화재발생 위치 및 확산 정도에 대한 정확한 정보가 없다는 것이다. 재난의 대응은 정확한 실시간 정보가 있을 때 가장 효율적으로 처리할 수 있으나, 정보가 없을 때는 실시간 돌발 상황에 대한 대응이 불가능하다. 따라서 기술진보에 따라 속속 나타나고 있는 지능형 건물 시스템을 알아보고 이를 활용할 수 있는 방법을 찾아보았다.

1. 미국 NIST의 iBR

Intelligent(지능형) 빌딩이란 첨단정보 통신기능,

LAN과 같은 네트워크화된 사무자동화기능을 이용해서 빌딩관리 시스템, 에너지절약시스템, 보안시스템을 통합하고 이를 바탕으로 지적, 창조적 작업에 알맞은 건축환경을 겸비한 건물을 말하며, 최근에는 소방시스템의 통합에 관한 연구가 진행되고 있다. 미국 NIST는 비상사태에 대비한 지능형 빌딩에 관한 프로젝트로서 "Intelligent Building Response(iBR)"에 관한 연구보고서인 "Building Tactical Information System for Public Safety Officials"를 진행중이며 이것은 빌딩내 비상상황 발생시 소방관, 경찰, 병원 등 대응기관에 무선 센서 네트워크로부터 획득한 센서정보를 실시간으로 전파하고 빌딩 자체적으로 초기대응을 이행하는 방법에 관한 연구이다. 화재 대응자가 직면하는 가장 큰 문제 중 하나는 정확한 정보의 부족이며 정보가 있을 때는 빠른것만이 훌륭한 대응이 아니다. 최초 발화지, 화재 및 연기의 확산정도, 거주자들의 현재 위치, 화재 대응장치들의 작동여부 등 센서 네트워크가 제공하는 실시간 정보들은 대응자들에게 훌륭한 대응 데이터가 되며 오늘날 지능형 빌딩은 빌딩내 화재의 상태 정보, 보안, control system 등으로 정보제공뿐만 아니라 즉각 사고대응기관과의 연락시스템을 통해 협조, 연계가 가능하다(〈그림 1〉).



〈그림 1〉 빌딩 네트워크와 공공안전 네트워크의 연계

2. 우리나라의 지능형 건물 인증제도

우리나라는 건축기술과 IT기술의 발전을 접목하여 21세기 지식정보화 사회에 부응할 수 있는 첨단시스템을 갖춘 지능형 건축물의 필요성이 제기됨에 따라 건설교통부는 지능형 건축물의 건설을 유도·촉진하기 위해 「지능형 건축물 인증제도 시행지침」을 마련하고 2006년 8월부터 건축주의 자발적 참여에 의한 "지능형 건축물 인증제도"를 시행했다. 건교부장관이 지정한 인증기관에서 건축주



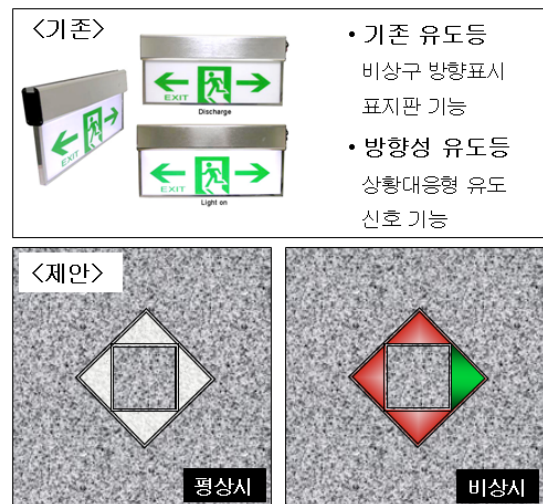
〈그림 2〉 인증마크

(사업주체)가 지능형 건축물 인증을 신청하는 경우, 6개 분야(건축계획 및 환경, 기계·전기·정보통신 설비, 시스템통합, 시설경영관리)에 대한 평가·심사를 거쳐 지능형 건축물 인증서를 교부하고 인증마크 〈그림 2〉를 건물 외부에 부착한다. 6개의 분야에서 통합감시제어, 통합연동(방법, 화재, 근무지원)서비스, 통합정보 분석 등이 필수항목으로 포함되고, 긴급통보지원기능과 피난계획, 무선시스템 활용 등이 가점항목에 들어간다. 제도적으로 IBS (Intelligent Building System)의 도입을 유도하는 목적으로 시행하는 지능형 건물 인증제도는 아직 분야별 심사기준을 마련했을 뿐 IBS가 나가야 할 방향을 제시해주지 못하는 한계를 가지고 있으며, 앞으로 미국의 iBR과 같이 국가적인 차원에서 연구를 통해 공공기관과의 연계를 활성화하고 건물내 센서 네트워크를 통해 화재의 영향을 파악하여 신속하고 효과적으로 대처할 수 있는 소방시스템의 통합을 유도해야 할 것이다.

3. 피난경로 유도의 전제조건 및 필요성

피난경로 유도 알고리즘은 건물내 화재나 비상상황시 통로 바닥에 설치된 방향성 있는 유도등을 설치하고 화재의 영향을 고려하여 안전하고 신속한 경로를 통해 안전지대로 대피시키는 것을 목적으로 함으로서 이를 위해서는 먼저 건물내 화재발생지점, 화재 및 연기의 확산과 영향권이 실시간으로 파악되어야 가능하다. 과거에는 화재의 영향을 파악하는데 목격자의 증언, 외부의 관찰, 직접 확인을 통해 이루어질 수밖에 없었지만 과학기술이 진보하고 센서기술, 감시시스템이 발달한 현재는 어려운 일이 아니다. 따라서 멀지 않은 미래에는 화재대응에 있어서 빌딩으로부터 수신되는 모든 정보를 이용하는 것이 가능하리라 예상된다.

그리고 피난경로 알고리즘이 효과를 거두기 위해서는 거주자를 실질적으로 유도할 수 있는 일종의 방향성 있는 신호등이 필요하다. 박재성(2004)은 재실자들의 피난경



〈그림 3〉 바닥 유도등 설치 예

로선택의 특성이 기본적으로 연기에 오염되지 않은 경로를 선택하고, 건물에 익숙한 특징인은 근거리 및 일상동선에 위치한 피난계단 등 안전한 경로를 선택하게 되며, 건물에 익숙하지 않은 불특정인은 자신이 들어왔던 경로나 다른 사람들을 무조건 따라가는 추종성에 의해서 경로를 선택하게 되는 비율이 높아서 주출입구 등 극히 일부 피난경로에 피난자가 몰리는 현상이 발생하게 된다고 말했다. 또한 일본의 비슷한 두 호텔 화재사건을 예로 들면서 종업원에 의한 피난유도를 한 경우에 사상자가 발생하지 않았지만 하지 않은 경우엔 많은 사상자가 발생하였다는 조속한 피난개시와 피난유도가 무엇보다 중요하다고 하였다. 따라서 적절한 피난유도는 피난의 효율을 크게 높인다고 할 수 있다. 또한 나옥정(2005)은 유도등의 유도효율을 높이는 유도등의 크기, 밝기, 음향유도, 연기에 의한 시야장애 극복과 유도등의 적정 설치거리에 대해 연구했다. 본 연구에서는 유도효율을 위한 유도등의 제원에 대해 고찰하여 연기에 의한 시계제한이 비교적 적은 바닥에 적절한 거리마다 방향성 유도등 〈그림 3〉을 설치하여 다양한 조건을 고려한 알고리즘을 통해 피난자들을 분산유도하는 방안을 제안하였다.

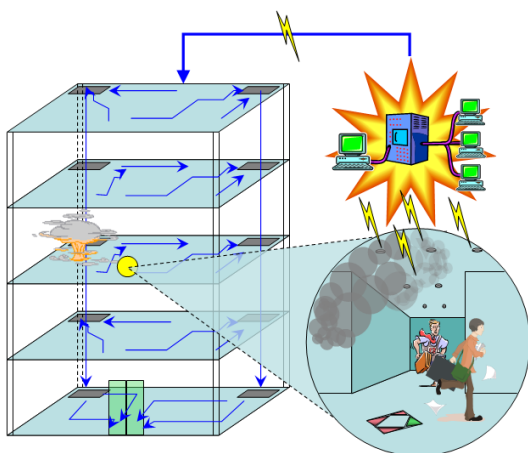
III. 피난경로 유도 시스템

1. 피난경로 유도 시스템 및 고려조건

피난경로를 유도하기 위해서는 빌딩내 실시간 화재영향 파악이 가능한 지능형 빌딩을 전제 했었다. 〈그림 4〉

에서 보면 무선통신이 가능한 열, 연기 감지 센서가 빌딩 내에 곳곳에 전개되어 중앙서버에 수집된 정보를 전송하고 전송된 자료를 바탕으로 각 노드에서 동적으로 유도 방향이 변경되어야 한다.

알고리즘 계획시 고려해야하는 주요 결정요소로는 직접적인 화재, 연기의 농도, 경로의 단절, 경로의 용량, 최종 목적지 결정 등이 있으며 알고리즘의 목적요소는 피난시간의 최소화 및 안전성이다. 따라서 피난자의 안전을 보장하는 범위에서 최소시간경로를 찾기 위해 각 링크의 용량을 고려하여 전체 피난자의 피난시간을 최소화시키고 화재의 직접적인 영향이나 진한 농도의 연기에 의해 영향을 받을 경우 우회경로를 실시간으로 탐색해야 한다. 또한 최우선 안전지대인 건물외부 지상으로 향하는 모든 경로가 단절되었을 경우 차순위의 안전지대를 탐색하여 고가 사다리의 도움을 받을 수 있는 위치 또는 항공구조의 도움을 받을 수 있는 옥상으로 잔류 피난자를 유도하여 고립되는 인원이 없어야 한다. 만약에 외부로의 모든 경로가 단절되었을 경우에는 화재의 영향으로부터 가장 멀리 떨어진 곳으로 유도하여 구조대의 도움을 받을 때까지 생존시간을 연장해야 한다. 그리고 화재에 의한 센서 및 유도시스템의 손상에 대비해 미국의 NIST의 각 센서노드 손상에 대한 연구와 같이 설치 시설물인 각 센서와 유도표시 등은 독립적으로 자체 전력에 의해 운용되고 개개의 손상 및 고장이 네트워크 전체의 고장으로 이어지지 않도록 시스템 운용이 중앙서버와 각 센서노드 및 유도등과의 전파를 이용함으로써 일정영역 센서 손상 시 중앙서버는 주변정보를 종합하여 정보를 처리하며 방향성 유도등 손상 시에는 인근 유도등에

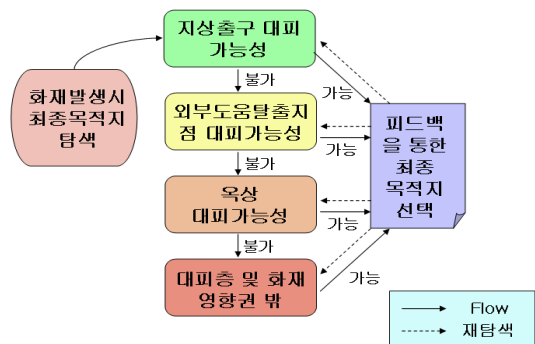


〈그림 4〉 피난경로 유도 시스템

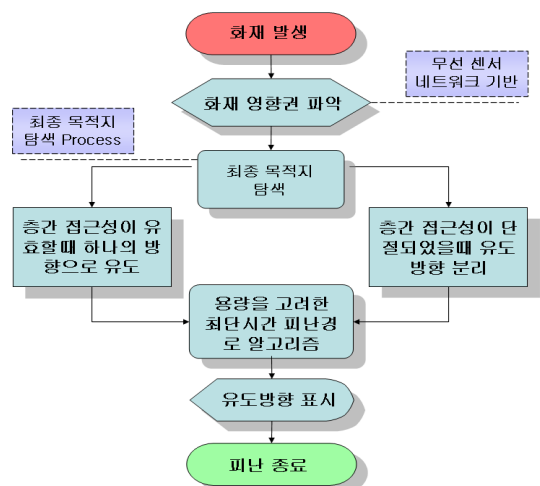
서 다시 정보를 얻을 수 있다. 화재발생시 첫 5분이 급속한 피해확산의 향방을 결정짓는다. 따라서 피난상황을 빠르게 인식시켜 피난개시시간을 단축시키고, 이 모든 프로세스가 빌딩 관리자나 소방관계자에 의해 통제되기 전에 시스템에 의해 자동적으로 이루어질 수 있는 체계가 필요하다.

2. 피난경로 유도 프로세스

화재시 경로가 선택되기 위해서는 시점과 종점이 존재해야 한다. 시점은 건물내 방향을 유도할 수 있는 각 유도등이 되고 종점은 일차적으로 지상출구가 되어야 하며 그것이 불가능할 때를 대비해 차순위의 목적지가 계획되어야 한다. 〈그림 5〉에서 보듯이 지속적으로 피드백을 통해 최종 목적지 탐색 프로세스가 진행되고 실시간



〈그림 5〉 화재시 최종목적지 탐색



〈그림 6〉 유도방향표시 프로세스

으로 알고리즘에 적용되어야 한다.

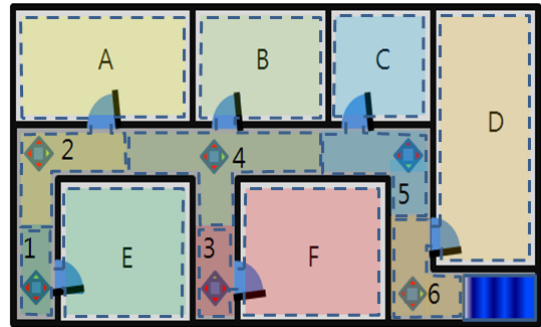
최종목적지가 탐색되면 이것을 <그림 6>와 같이 층간 접근성이 유효할 때는 문제가 되지 않지만, 단절되었을 경우에는 단절된 층을 기준으로 경로탐색의 최종목적지가 달라져야 한다. 예를 들어, 15층건물 화재시 7층에서 불이 삼시간에 확대되어 7층 이하로 향하는 모든 비상계단을 이용할 수 없을 때 8층 이상의 유도경로는 지상으로 향해서는 안되고, 고가사다리과 같은 외부의 도움이 가능한 창문 또는 항공구조대의 도움을 받을 수 있는 옥상 헬리포트 등으로 유인하여 피난 유도를 이원화해야 하며, 따라서 8층 이상은 옥상 목적지로 향하는 프로세스를 분리시켜서 별도로 진행시켜야 하며, 이 프로세스는 잔류인원이 남아있을지 모르는 상황에서 화재가 진화될 때까지 계속되어야 한다.

3. 기초자료 산정방법

1) 노드 잠재수요 산정방법

노드 잠재수요는 피난자들이 유도등을 확인하기까지의 과정이기 때문에 행태적 측면에서 접근해야 한다. 따라서 잠재수요를 재실자들이 피난 개시 후 최초로 발견하고 접근하는 유도등의 접근수요로 정의하면 가시권 안에 위치한 재실자의 수로서 추정할 수 있다.

<그림 7>과 같은 유도등(1~6)이 설치되고 6개의 방(A~F)이 있는 층이 있을 때 각 유도등의 잠재수요를 산정할 영향권은 통로상 가시권이 확보되고 거리가 가까운 노드의 범위안에 포함되도록 하며 방 내부인원은 출



<그림 7>노드 수요 영향권

입구의 위치가 포함되는 영향권의 노드의 잠재수요가 되도록 한다. 영향권이 산정되면 각 노드의 영향권의 용도별 면적을 계산하고, 미국의 건축법에서 규정하고 있는 인명안전기준에 있는 용도별 재실자 밀도설정치와 같은 통계자료를 이용하여 노드 영향권의 잠재수요를 추정한다(<표 1>).

2) 링크구간 지체시간 및 용량 산정방법

아직까지 피난목적통행의 보행자용량 산정방법에 대한 연구가 되어 있지 않아 직접적인 용량산정 모형을 제시하지는 않으나 이에 대한 연구방향을 언급하고자 한다. 링크구간의 용량 및 지체시간은 실질적으로 거주자의 신체적 능력, 시설물 현황 등에 따라 달라지기 때문에 알고리즘의 기초자료로서 건물의 용도와 거주자의 신체적 특징 등과 직접적으로 영향을 미치는 경로의 폭, 형태를 고려해야 한다. 따라서 먼저 NEPA (National Fire Protection Association)의 인명안전 기준의 용도분류

<표 1> 각 용도별 재실자 밀도의 설정치

용도	시설								
교육	교실	0.54		기타		0.2 2	유치원		0.31
의료	병동부분		0.09			진료부분		0.045*	
숙박	호텔, 방					0.054			
공동주택	거실 등					0.054			
상업	매장	지상층	지하층	복수의지상층		기타층	몰	창고, 발송	주방
		0.36*	0.36*	0.27*		0.18*	0.2~0.35*	0.036*	0.11*
사무실	사무실					0.11			
집회	극장, 회의실 등		고정석	고밀도 부분(고정석 無)			저밀도 부분(고정석 無)		
			n		1.54		0.72		
	회의실	교회	라운지	대합실	전시실		댄스홀		체육관
	0.72	1.54	0.72	3.59	0.72		0.54		0.72
	도서관 열람실		서가		레스토랑			Pool 수면	
0.22		0.11*		0.72			0.22*		

〈표 2〉 인명안전기준의 용도분류

내용		
집합시설	사업시설	창고시설
교육시설	사업장	주거시설
보호시설	공업시설	복합용도

〈표 2〉와 같이 각 건축물을 용도별로 분류하여 거주자의 신체적 특징과 환경적 특징을 적용하고 피난경로상의 링크구간의 형태를 복도, 계단, 출입구 등과 같이 분류하여 링크구간의 폭에 따른 용량과 지체시간을 산정해야 한다.

또한 화재상황에서 실시간으로 측정되는 화재에 의한 열기 및 연기가 미치는 영향을 고려하여 통행이 가능한 경우엔 안전도를 산정하여 지체시간과 용량을 실시간 재산정하고 통행이 불가능한 경우 용량을 '0'으로 설정하여 통행을 제한한다.

Ⅵ. 사례연구

1. Quickest Path를 이용한 유도경로 탐색

최속경로(Quickest path)문제는 경로의 시간과 용량, 두개의 목적함수를 갖는 최단경로(Shortest path) 문제의 변형으로 주어진 교통량(volume)을 기점에서 종점으로 보내는 최소시간을 갖는 경로를 찾는다. 몇 가지 기호를 정리하면 기점 O, 종점 D, 링크(i, j)의 이동 시간 t_{ij} , 링크(i, j)의 용량상한 u_{ij} , v 를 목적지로 보내려는 교통량으로 정의하고 P 를 O와 D사이 가능한 모든 경로의 집합, p 를 집합 P 에 속하는 하나의 경로, $t(p)$ 를 경로 p 를 지날 때 걸리는 시간, $u(p)$ 를 경로 p 의 용량을 나타낸 것이라 할때 최속경로의 목적함수는 다음과 같다.

$$\min_{p \in P} t(p) + \frac{v}{u(p)}$$

일반적으로 두 목적함수를 동시에 만족시키는 최적해는 존재하지 않는다 따라서 지배경로(dominated path)와 비지배경로(nondominated path)라는 개념을 사용하게 되는데 비지배경로란 두개의 경로 $p, q \in P$ 가 주어졌을때, $t(p) \leq t(q)$ 이고 $u(p) > u(q)$ 이거나, 또는 $t(p) \geq t(q)$ 이고 $u(p) < u(q)$ 일때의 경로 p 를 말하며, 경로 p 가 경로 q 를 지배한다(dominate)고 한다. 기호로는 pDq 를 사용한다.

지배경로란 P 를 $P_N = P - P_D$ 와 $P_D = \{p \in P \mid \exists q \in P, qDp\}$ 로 나누었을때 P_D 에 속하는 경로를 말한다. P_N 에 속하는 경로는 비지배경로가 된다. 결국, 주어진 데이터의 양에 대한 최속경로란 지체시간은 작고 용량은 최대한 경로를 찾는 것이므로, 최속경로는 이러한 비지배경로 집합 중에서 존재하게 되며, 특정 교통량(volume)의 양에 대한 최속경로가 비지배경로가 됨은 Martines와 Santos (1997)가 증명하였다(이상욱 외 2명, 2000).

(정리)

$$v \in]0, \frac{t(p_2) - t(p_1)}{u(p_2) - u(p_1)} \times u(p_1) \times u(p_2) \quad (1)$$

에 대하여 p_1 은 최속경로이다.

$$v \in \left[\frac{t(p_i) - t(p_{i-1})}{u(p_i) - u(p_{i-1})} \times u(p_{i-1}) \times u(p_i), \right. \quad (2)$$

$$\left. \frac{t(p_{i+1}) - t(p_i)}{u(p_{i+1}) - u(p_i)} \times u(p_i) \times u(p_{i+1}) \right]$$

$i \in \{2, \dots, r-1\}$ 에 대하여 p_i 는 최속경로이다.

$$v \geq \frac{t(p_r) - t(p_{r-1})}{u(p_r) - u(p_{r-1})} \times u(p_{r-1}) \times u(p_r) \quad (3)$$

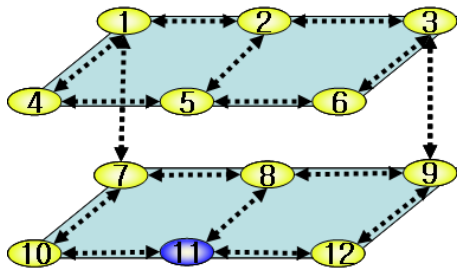
에 대하여 p_r 은 최속경로이다.

구성된 네트워크에서 유도방향이 표시되는 노드는 해당노드로 향하는 대피인원의 잠재수요(v_n)가 필요하고, 통로의 역할을 하는 링크는 링크지체시간(t_{ij})과 통로 크기에 따른 통과용량(u_{ij})의 data가 구축되어야 한다. 링크의 지체시간(t_{ij})은 링크 길이를 통로폭을 고려한 평균피난보행속도로부터 산정되며, 거리와 실시간으로 화재의 영향으로부터 측정된 위험조건에 따른 평균피난보행속도가 적용되어 계산된다.

〈그림 8〉의 네트워크를 가지고 화재의 영향이 없어서 링크의 지체시간이 단순히 거리와 최속피난평균보행속도로 계산되었을 때, 기점 5번노드에서 출구 11번노드의 최속경로를 찾아보면,

v_n : n노드의 잠재수요

t_{ij} : 링크의 길이(d_{ij})
 : 조건에 따른 평균보행속도(m/s)
 + 연기의 독성 및 온도에 의한 지체(α)
 u_{ij} : {링크의 통과용량(인/min)×안전도(0~1)}



〈그림 8〉 간단한 2층네트워크

〈표 3〉 노드 잠재수요

n	v_n	n	v_n
1	20	7	15
2	45	8	60
3	10	9	20
4	50	10	65
5	70	11	100
6	60	12	75

〈표 4〉 링크 지체시간 및 용량

i, j	(1,2)	(2,3)	(1,4)	(2,5)	(3,6)	(4,5)
t_{ij}	21	22	15	16	14	23
u_{ij}	10	13	15	10	12	11
i, j	(5,6)	(1,7)	(3,9)	(7,8)	(8,9)	(7,10)
t_{ij}	20	7	8	21	22	16
u_{ij}	12	8	4	11	15	14
i, j	(8,11)	(9,12)	(10,11)	(11,12)	-	-
t_{ij}	14	17	23	20	-	-
u_{ij}	13	15	16	15	-	-

총 2개의 비지배경로가 존재한다.

〈표 5〉 5→11 비지배경로

비지배 경로	지체시간	용량
$p_1(5 \rightarrow 6 \rightarrow 3 \rightarrow 9 \rightarrow 8 \rightarrow 11)$	78	4
$p_1(5 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 11)$	79	8

위의 정리 (1)에 의하면 p_1 은 $v \in]0, 8]$ 에 있어서 최속 경로이어야 하며, $v > 8$ 인 경우엔 p_2 가 선택되어야

〈표 6〉 O/D path table

O→D	경로	시간	용량	수요범위
1→11	$p_1(1, 7, 8, 11)$	42	8	-
2→11	$p_1(2, 1, 7, 8, 11)$	63	8	-
3→11	$p_1(3, 9, 8, 11)$	44	4	0~328
	$p_1(3, 2, 1, 7, 8, 11)$	85	8	328~
4→11	$p_1(4, 1, 7, 8, 11)$	57	8	-
5→11	$p_1(5, 6, 3, 9, 8, 11)$	78	4	0~8
	$p_1(5, 2, 1, 7, 8, 11)$	79	8	8~
6→11	$p_1(6, 3, 9, 8, 11)$	58	4	0~328
	$p_1(6, 3, 2, 1, 7, 9, 8, 11)$	99	8	328~
7→11	$p_1(7, 8, 11)$	35	11	0~204
	$p_1(7, 10, 11)$	39	14	204~
8→11	$p_1(8, 11)$	14	13	0~4365
	$p_1(8, 9, 12, 11)$	59	15	4365~
9→11	$p_1(9, 8, 11)$	36	13	0~97
	$p_1(9, 12, 11)$	37	15	97~
10→11	$p_1(10, 11)$	23	16	-
12→11	$p_1(12, 11)$	20	15	-

한다. 이런 방법으로 모든 노드에서 출구로의 최속경로를 〈표 6〉에 정리하면,

비지배 경로가 존재하는 경우 수요범위에 따라 경로 선택이 이루어져야 하는데 경로를 선택함에 있어서 비지배경로의 출발노드의 잠재수요뿐만 아니라 해당노드를 통과하는 모든 경로의 잠재수요가 합산되어야 한다. 따라서 비지배 경로 시점노드의 합산수요 V_N 는 다음과 같다(v_n^* 는 경로가 결정되지 않은 출발노드의 잠재수요).

N : 비지배경로의 출발노드, n : 출발노드
 v_n : n 의 잠재수요, S : 노드집합
 $|S|$: 집합의 원소수

$$V_N = \sum_{n=1}^{|S|} v_n \cdot S_N^n$$

$$S_N^n \in \begin{cases} 1 : n \text{에서 도착지까지 경로가 } N \text{을 통과하면} \\ 0 : \text{그렇지 않으면} \end{cases}$$

$$V_3 = v_3 + v_5^* + v_6$$

$$V_5 = v_5 = 70$$

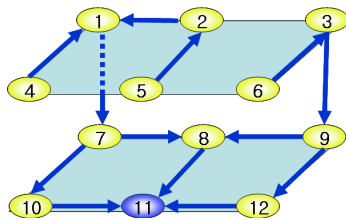
$$V_6 = v_5^* + v_6$$

$$V_7 = v_1 + v_2 + v_3^* + v_4 + v_5^* + v_6^* + v_7$$

$$V_8 = v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5 + v_6 + v_7^* + v_8 + v_9^*$$

$$V_9 = v_3^* + v_5^* + v_6^* + v_8^* + v_9$$

V_5 가 70이므로 다음엔 V_3 와 V_6 를 구할수 있으며 이를 반복하면 모든 비지배경로 시점노드의 합산수요는 $V_3 = 140$, $V_5 = 170$, $V_6 = 130$, $V_7 = 270$, $V_8 = 330$, $V_9 = 160$ 으로 결정되고 따라서 수요범위에 따라 각각 N_3 은 p_1 , N_5 은 p_2 , N_6 은 p_1 , N_7 은 p_2 , N_8 은 p_1 , N_9 은 p_2 를 선택하게 된다. 각 노드에서 최종적으로 선택된 경로를 하나의 네트워크상에 방향으로 나타내면 다음과 같다.

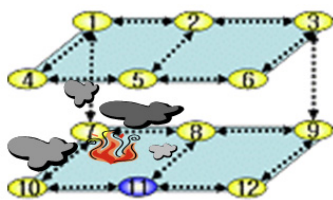


〈그림 9〉 최종 방향표시

2. Adaptive 피난경로 탐색

건물내에 화재가 발생하면 건물의 용도에 따라 의류 매장의 옷가지나 영화극장의 의자, 내장재와 같은 가연성 물질이 존재하는 경우 삽시간에 확산된다. 또한 자신이 위치한 층에 화재가 눈으로 확인이 되지 않은 경우 피난경로상에 화재로 인하여 그 경로를 포기하고 다른 경로를 찾아 헤매야 한다. 따라서 경로상 화재의 영향(온도, 연기)에 의해 통과가 불가능하거나 시간이 지체되는 경우 또는 적재물, 인화성 물질에 의한 위험이 감지되는 경로에 대해 우회경로로 유도해야한다.

이러한 경우에 대해 임의의 상황을 〈그림 10〉의 네트



〈그림 10〉 링크상 화재의영향

워크에 부여하여 적용해보면(지체시간과 용량은 계산과 정 없이 〈표 7〉의 수치로 변경되었다고 가정),

〈표 7〉 링크변경정보

i, j	t_{ij}	u_{ij}
(1, 7)	32	2
(7, 8)	66	0
(7, 10)	36	4
(8, 11)	29	10

우위의 경로들과 비지배경로를 정리하면,

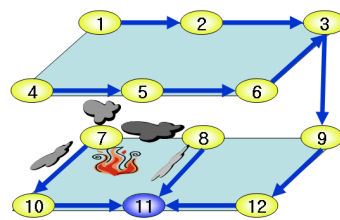
〈표 8〉 O/D path table

O→D	경로	시간	용량	수요범위
1→11	$p_1(1, 2, 3, 9, 12, 11)$	88	4	-
2→11	$p_1(2, 3, 9, 12, 11)$	67	4	-
3→11	$p_1(3, 9, 12, 11)$	45	4	-
4→11	$p_1(4, 5, 6, 3, 9, 12, 11)$	102	4	-
5→11	$p_1(5, 6, 3, 9, 12, 11)$	79	4	-
6→11	$p_1(6, 3, 9, 12, 11)$	59	4	-
7→11	$p_1(7, 10, 11)$	59	4	-
8→11	$p_1(8, 11)$	29	10	0~900
	$p_2(8, 9, 12, 11)$	59	15	900~
9→11	$p_1(9, 12, 11)$	37	15	-
10→11	$p_1(10, 11)$	23	16	-
12→11	$p_1(12, 11)$	20	15	-

비지배경로 8→11의 경로를 선택하기 위해서 8번노드를 경유하는 모든 경로의 출발노드의 잠재수요를 더하면 합산수요 315 인/min이 되지만 900 인/min을 넘지 않기 때문에 경로 p_1 이 선택된다.

$$V_8 = v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5 + v_6 + v_8 = 315$$

비지배경로가 모두 선택되어졌기 때문에 최종 선택된 경로들을 네트워크상에 표현하면 다음과 같다.



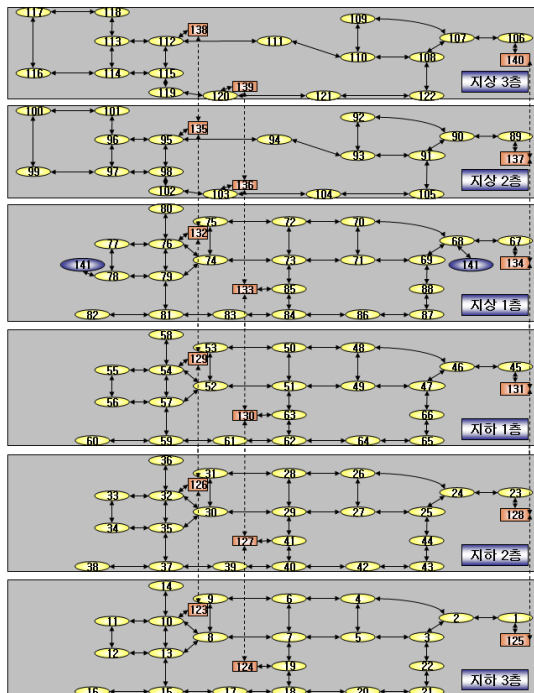
〈그림 11〉 최종 adaptive 방향표시

3. 네트워크 확장

기본적으로 12개의 노드로 시행한 알고리즘의 적용은 현실과 거리가 있어 신뢰성이 떨어질 수 있다. 따라서 서울시 구로구에 위치한 코오롱 사이언스 2차 15층 주상복합건물의 평면도(그림 12)를 이용하여 지하3층, 지상3층의 6층 네트워크를 구성하였고 프로세스를 적용해 보았다. 1층의 출구는 2개로 설정하고 기본적으로 알고리즘은 단일 출발지/목적지로 구현되기 때문에 2개의 출구를 잇는 가상의 지상목적지노드(Node 141)를 설정하였다.



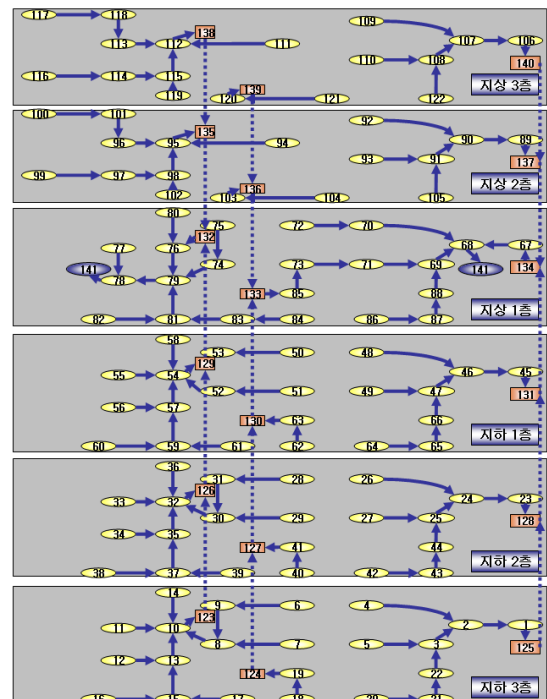
〈그림 12〉 적용 평면도(지상 3층)



〈그림 13〉 확장 네트워크

주요 교차점 및 적정거리마다 노드 즉, 방향성 유도등을 설치한다는 전제하에 건물내 노드 140개와 지상목적지 노드 1개를 포함하여 총 141개의 노드와 노드별 잠재수요(6층건물내 총 3630인) 그리고 양방향 링크 187개에 대하여 링크별 거리 및 통로 폭 및 계단, 출입구 폭을 고려한 적정 용량에 대한 데이터를 보행자도로 서비스수준을 참고하여 임의로 구성하고 해당 프로세스를 구현하였다.

계산과정의 편의를 위해 quickest path를 구할 수 있는 Netsolver 1.0(서울대 산업공학과 박순달 교수 개발)을 이용하였고 건물 내부 140개의 노드에서 지상목적지(Node 141)로 향하는 quickest path를 구하였더니 75개의 노드가 우위경로로서 결정되었고 나머지 노드에 대한 비지배 경로들 중 건물내 총수요를 넘어서 경로가 확정된 노드가 40개, 나머지 다른경로에 의해서 결정되는 경로를 가진 노드가 25개가 나타났다. 따라서 수요에 관계없이 경로가 결정된 노드는 65개이고 나머지 다른경로에 영향을 받는 미결정노드 25개에 대해 다른 경로로부터 합류되는 잠재수요를 합한 합산수요에 의해 미결정 노드의 경로를 선택하였다. 최종적으로 선택된 각 노드의 방향은 다음과 같다.



〈그림 14〉 확장 네트워크 프로세스 결과

4. 비교분석

화재의 영향이 없다는 가정 하에 <그림 8>의 네트워크를 이용해 유도방향을 표시하였을 때 2층의 경우 1번, 2번, 4번, 5번 노드의 피난경로가 계단을 의미하는 링크(1, 7)를 이용했고, 3번, 6번 노드는 링크(3, 9)를 이용했다. 이것은 거리가 비슷했을 때 계단링크의 용량과 관계가 있는데 링크(1, 7)의 용량은 8인/min이고 유도된 수요는 1, 2, 4, 5번 노드의 합산수요로 총 185인/min이며, 링크(3, 9)의 용량은 4인/min이고 3, 6번 노드의 합산수요는 70인/min으로서 많은 수요를 용량이 큰 계단으로 유도했음을 알 수 있다. 정확히 계단의 용량에 비례해 수요가 분배되지 않은 이유는 수요를 노드를 중심으로 aggregate 방식으로 추정하고 수요에 따라 출발노드의 경로를 배정하기 때문이다. 하지만 비지배경로의 경로선택시 노드의 합산수요를 고려하기 때문에 상당히 비슷한 수준으로 분배하여 피난시간의 단축이 가능하다.

같은 네트워크에 <그림 10>와 같이 상황을 부여했을 때 경로가 변경되었다. 링크(1, 7), (7, 8), (7, 10), (8, 11)에 화재의 정도를 설정해 임의로 지체시간과 용량을 변경하였는데 용량이 0인 경우는 해당 링크를 이용할 수 없다는 의미이다. 계단링크 (1, 7)은 지체시간을 증가시키고 용량을 감소시켰으나 경로를 폐쇄시키지 않았음에도 불구하고 최종 경로가 선택되지 않았다. 또한 화재위험지역으로 향하는 1→9경로도 선택되지 않았음을 알 수 있다. 화재 위험지역에서 링크(7, 10)은 위험지역에서 대피하기 위함으로 선택되었고 링크(8, 11)의 경우 안전하게 9번노드를 통과해 돌아서 나올수도 있으나 위험의 정도가 높지 않고 피난 거리가 훨씬 짧아 선택되었던 것으로 보인다. 두 가지의 사례연구를 통해 비교적 효율적인 분배를 함으로서 피난시간의 단축이 가능하며, 실시간으로 화재의 영향에 따라 adaptive 유도경로 탐색으로 위험지역을 우회하는 것이 가능하였다.

마지막으로 실제 건축물에 대해 지상 3층, 지하 3층으로 층수를 축소하여 네트워크를 구성 프로세스를 진행시킨 결과는 주상복합건물의 특성상 폐쇄한 보행환경을 위해 거주자 및 유동인구에 비해 통로폭, 계단폭이 넓고 비상계단을 포함한 계단의 수가 3개로서 건물의 크기에 비해 많아서 용량에 의해 경로가 제약되는 경우 없이 모두 최단경로로서 결정되었다. 비교적 합리적인 경로선택이

이루어졌음에도 불구하고 경로선택의 비중이 거리에 의한 영향이 가장 크게 나타난다. 하지만 화재시 피난자 개인의 최단시간보다 네트워크 전체의 피난시간 최소화가 이루어져야 함에도 불구하고 경로선택에 있어서 일부계단(124-127-130-133-136-139)이 거리가 멀다는 이유로 거의 이용되지 못하여 용량이 충분히 반영되지 못한 것을 알 수 있다. 그리고 건물전체에 대하여 하나의 목적지를 가지고 프로세스가 이루어져서 각 층에서 가까운 계단을 이용하지 않고 지상출구로 향하는 전체 경로의 거리가 짧은 다른 계단을 이용하도록 유도하는 문제점이 발생했다. 이것은 두가지 목적함수를 갖는 quickest path 알고리즘이 최단경로에서 수요가 일정용량을 넘는 경우에만 경로 변경이 이루어지므로 수요가 용량을 넘어서는 경우를 제외하고 주요경로(계단)에 적절히 분배되는 기능은 떨어진다고 할 수 있다.

V. 결론 및 향후 연구과제

1. 결론

본 연구에서는 지능형 빌딩의 도입추세와 더불어 우리나라에서도 빌딩통합시스템(BIS)과 거주자의 안전과 직결된 소방안전시스템의 통합을 강조했으며, 방향성 있는 유도등 시스템을 제안하였다. 또한 기존 연구에서 언급된 유도의 중요성을 강조하고 사람에 의한 유도보다는 빌딩 전체의 관점에서 모든 정보를 종합하여 효율적으로 피난인원들을 대피시키는 방안을 제시하였다. 그리고 기존에 통신망에서 사용하던 Quickest Path 알고리즘을 교통망에 적용하고, 화재의 영향을 피해 용량을 고려한 최단시간 경로를 선택하는 기법을 마련해 보았다. 두 가지 사례의 비교분석을 통해 유도시스템의 효율성을 확인하였고 실제 건축물 평면도를 이용하여 네트워크를 구성해 유도 프로세스를 진행하여 알고리즘의 적용상의 문제점도 발견하였지만, 실질적으로 용량을 고려하여 수요를 분배하는 기법을 제외하더라도 실시간으로 화재의 영향을 피해 출구로 나갈 수 있는 방안을 마련하였다는 점에서 의미있는 일이 아닐 수 없다. 이러한 유도시스템은 대규모 건축물 뿐 아니라 지하철 역사와 같이 사람이 모이는 시설 혹은 영화관이나 대형 매장과 같이 통로가 미로 같아서 길을 잃기 쉬운 공간에서 더욱 유효할 것으로 기대된다.

2. 향후 연구과제

지금까지 이러한 방향성 있는 유도시스템을 이용한 구체적인 유도 방안이 연구된 사례가 거의 없었기 때문에 미흡한 점이 매우 많다. 본 연구는 건축물 내부의 한정된 경로에 수요의 효율적인 배분 문제로서 기존 교통의 연구분야이기도 하며, 통행배분 방법으로서 본래 통신망에 활용되던 최속경로 알고리즘을 활용하였으나 교통분야에 적용하는데는 아직 미흡한 부분이 존재하기 때문에 교통류 이론에 따른 delay개념의 내재화, Dynamic 표현으로 대기행렬이론의 적용 등의 보완이 필요하다. 또한 본래 Quickest Path Algorithm도 하나의 기점에서 하나의 종점으로 향하는 최소시간경로를 결정하는 기법으로서 본 연구에서는 이것을 활용하는 방안을 제시하였으나 보다 구체적으로 네트워크상 다수의 출발지와 다수의 목적지(출구)사이에 선택된 경로간의 수요 및 용량을 고려한 알고리즘의 개발이 이루어져야 할 것으로 보이며, 사례연구를 통해 통로의 용량에 따라 피난자를 적절히 분배하는데 한계가 있음을 발견하였으므로 이에 대한 향후 연구가 이루어져 전체 피난자 피난시간의 최소화가 이루어져야 할 것이다. 그리고 시스템적으로 센서와 유도시스템의 유기적인 결합을 위해 화재시 시거 및 심리적 영향에 따른 노드 즉, 방향성 있는 유도등의 적정 설치 거리와 화재영향에 따른 용량 감소 등 무수히 많은 향후 연구과제가 존재한다. 그리고 향후 유도시스템이 지능형빌딩시스템의 한 부분으로 자리잡을 경우 대규모 건축물에 시행되는 화재영향평가에서 성능 위주소방설계(PBD)에 필요한 피난시뮬레이션에서 유도시스템의 적용에 대한 연구도 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- 손봉세 · 이용재(2004), “초고층 건축물의 화재시 방재 · 피난계획”, 한국초고층건축포럼, 제4차 국제 심포지엄 논문집, p.181.
- 소은택(2005), “멀티플렉스 영화관의 피난특성을 고려한 피난계획에 관한 연구”, 한국실내디자인학회, 제14권 3호, pp.147~155.
- 이수경 · 이상준(2000), “피난모델을 이용한 대형 할인매장의 화재시 피난에 관한 연구”, 화재 · 소방 학회논문지, 제 14권 제4호, pp.17~22.
- 이평강 · 김지성 · 조동만 · 배경태 · 김석완(2003), “시뮬레이션에 의한 노인복지시설의 피난안정성 평가”, 대한설비공학회, pp.1390~1395.
- 박재성 · 윤명오(2004), “대규모 미로형 다중이용 공간에서의 피난경로선택 특성에 관한 연구”, 대한 건축학회, 제 20권 제9호, pp.71~78.
- Shi Pu and Sisi Zlatannova(2005), “Evacuation Route Calculation of Inner Buildings”, Delft University of Technology, OTB Research Institute for Housing, Urban and Mobility Studies.
- 박동주(1993), “보행목적에 따른 보행교통류 특성에 관한 연구”, 서울대 환경대학원.
- 이상욱 · 박찬규 · 박순달(2000), “수정된 최속경로 알고리즘(The revised quickest path algorithm)”, 한국국방경영분석학회지, 제26권 2호, pp.1~7.
- M. H. Moore(1976), “On the fastest route for convoy-type traffic in flowrate-constrained networks” Transportation Science 10, pp.113~124.
- 김정훈(2006), “대형 건물에서의 지능형 소방제어 시스템 구현에 관한 연구” 홍익대 대학원.
- David G. Holmberg, William D. Davis, Stephen J. Treado, Kent A. Reed(2006), “Building Tactical Information System for Public Safety Officials”, National Institute of Standards and Technology.
- 나옥정 · 전규엽 · 홍원화(2005), “지하공간 화재시 피난 유도등 성능평가를 통한 피난유도효율 향상에 관한 연구”, 대한건축학회논문집, 제25호 1권, pp.383~386.
- Ernesto de Queiros Vieira Martins, Jose Luis esteves dos santos(1997), “An algorithm for the quickest path problem”, Operations Research Letters 20, pp.195~198.

✉ 주 작 성 자 : 신성일
 ✉ 교 신 저 자 : 신성일
 ✉ 논문투고일 : 2007. 5. 19
 ✉ 논문심사일 : 2007. 8. 7 (1차)
 2007. 12. 11 (2차)
 2007. 12. 21 (3차)
 ✉ 심사판정일 : 2007. 12. 21
 ✉ 반론접수기한 : 2008. 4. 30