어린이집 화재 시 연기 거동에 관한 실험적 연구

이성룡 · 한동훈[†]

중앙소방학교 소방과학연구실

An Experimental Study of Smoke Movement in a Kindergarten Fire

Sung-Ryong Lee · Dong-Hun Han[†]

National Fire Research Laboratory, National Fire Service Academy

(Received February 15, 2013; Revised April 5, 2013; Accepted April 5, 2013)

요 약

본 연구에서는 어린이집 화재 시 열 및 연기의 거동 특성을 파악하기 위하여 재개발 예정지의 어린이집에서 실험이 실시되었다. 실험대상 어린이집은 2층 구조로 되어있으며, 각 층의 연면적은 252 m²이다. 가연물로는 헵탄 36리터를 사용하였다. 한 변의 길이가 0.8 m인 정사각형 화원을 사용하였으며, 정상상태에서 최대 열방출율은 약 1.7 MW이다. 실험 동안 연기의 이동 및 온도 변화를 측정하였다. 1층 복도에서, 화재 발생 1분 후 연기가 1.4 m 높이까지 하강하였으며, 화재 발생 약 4분 후 복도 전체가 연기로 가득 찼다. 2층 대부분의 영역에서 온도가 70 °C 이하로 유지되었으나 실내가 연기로 가득 찼다.

ABSTRACT

In this study, a full scale experiment was carried out to analyze the heat and smoke movement. The experiment was conducted a kindergarten that is scheduled to reconstruction. The kindergarten is a two-story building and the area of each floor is 252 m². 36 l heptane was used as a fuel and heptane was burned in a 0.8 m square steel pool. Maximum heat release rate was 1.7 MW at natural condition. Smoke movement and temperature variation were measured during the experiment. In the first floor corridor, smoke was moved downward about 1.4 m at 1 minute after a fire. Corridor was filled with smoke at 4 minutes after a fire. In the second floor, temperature was maintained at 70 °C or less. But, second floor rooms were filled with smoke.

Keywords : Kindergarten fire, Full scale experiment, Smoke movement, Temperature variation

1. 서 론

영유아 보육시설은 소방시설 설치유지 및 안전관리에 관한 법률시행령[별표2]⁽¹⁾에 따라 분류하면 교육연구시설의 초등학교 병설유치원 및 노유자시설의 아동 관련 시설이 이에 해당된다. 영유아보육법⁽²⁾에서는 국공립어린이집, 사회복지법인어린이집, 법인·단체등어린이집, 직장어린이집, 가정어린이집, 부모협동어린이집, 민간어린이집으로 분류하고 있다.

2011년도 통계자료⁽³⁾에 의하면 전국에 설치된 어린이집은 39,842개소로 해마다 증가추세에 있으며, 경기도에 가장 많은 11,825곳의 어린이집이 설치 운영되고 있으며 약 29.7 %를 차지하고 있다. 전국 39,842곳의 어린이집 가운데 국공립 어린이집이 2,116개, 사회복지법인 어린이집이

1,462개, 민간 어린이집이 15,004개 등의 어린이집이 운영 중이다. 최근 맞벌이 부부의 증가로 인하여 보육시설 이용 영유아의 수가 지속적으로 증가할 것으로 예상된다.

1999년 6월 30일 경기도 화성군 씨랜드 청소년 수련원에서 화재가 발생하여 투숙 중이던 유치원생 23명이 숨지고 5명이 부상을 입는 참사가 발생하였다.

2012년 10월 19일 경기도 성남시의 한 어린이집에서 전기히터 과열로 인하여 화재가 발생하였으나, 평소 대피훈련과 지도교사의 침착한 대응으로 인하여 인명피해가 없었다.

위의 사례⁽⁴⁾와 같이 화재와 같은 사고 발생 시 보육교사 등의 신속한 대처 및 피난 유도가 수반되지 않는다면 대형 인명사고를 초래할 위험성이 매우 높다.

화재현상의 해석 및 예측을 위한 가장 좋은 방법은 실험

[†] Corresponding Author, E-Mail: hdongh1@korea.kr
TEL: +82-41-559-0548, FAX: +82-41-541-1108

ISSN: 1738-7167
DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2013.27.2.062>

Figure 1. Photograph of the kindergarten.

공간에서 실험을 실시하는 것이 가장 타당한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 실험 공간의 확보 및 화재 발생 위험성 등으로 인하여 실물 화재실험은 그다지 많이 실시되지 못하고 있는 실정이다. 지하 노래방, 공동주택, 의류창고에 대한 실물실험이 실시되어 유용한 데이터를 제공하고 있다⁽⁵⁻⁷⁾. 윤선화⁽⁸⁾는 유치원 및 초등학교를 대상으로 화재안전교육의 효과를 평가하였다.

영유아의 경우 인지 능력 및 상황 대처 능력이 성인에 비하여 떨어지는 등 사고가 발생하였을 경우 취약한 특성을 가지고 있다. 또한 어린이집에는 교재 및 교구로 사용되는 합성수지 제품, 목재, 종이류 등 연소가 용이한 가연물이 상존하고 있다. 최근의 화재 사례에서 보듯이 지속적인 화재 예방교육 및 안전 관리가 무엇보다 필요하다. 또한 어린이집이라는 특수 공간에 대한 화재 특성 파악이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 어린이집 화재 재현실험을 통하여 화재 위험성 평가 및 열·연기의 거동특성을 파악하여 어린이집 화재 안전계획 수립의 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 본 론

2.1 실험대상 어린이집

본 연구에서는 재건축 예정지에 위치한 어린이집에서 화재 재현실험이 실시되었다. 실험대상 어린이집은 2층으로 이루어져 있으며, 각 층의 연면적은 약 252 m²이다. 1층에 7개의 방이 있으며, 2층에 4개의 방으로 구성되어 있다. 1층 중앙에 주출입구(2 m×2 m)가 있으며, 1층 복도 양측으로 비상 출구가 위치하고 있다. 1, 2층에서 계단실을 통해 옥상으로 통하며, 옥상에 출입문(0.8 m×2 m)이 설치되어 있다. 각 층의 천장 높이는 2.6 m이다. 각 방 출입문의 크기는 0.9 m×2.0 m이다. 실험대상 어린이집 전경을 Figure 1에 나타내었으며, 어린이집의 평면도를 Figure 2에 나타내었다. 실험대상 어린이집의 벽체는 콘크리트로

(a) 1st floor

(b) 2nd floor

(c) staircase

Figure 2. Floor plan of the kindergarten.

구성되어 있으며, 천장은 목재 및 석고보드로 구성되어 있다. 실험으로 인한 건물 전체로 화재의 확산을 방지하기 위하여 실험 시 실내의 모든 가연물을 제거하고 실험을 실시하였다.

2.2 측정장치 및 방법

화재실험을 위하여 1층 주출입문과 옥상 출입문을 제외하고 비상출입문 및 창문은 합판을 이용하여 밀폐시켰다. 각 방의 모든 출입문을 개방시킨 상태에서 실험이 실시되었다.

실험공간의 온도 측정을 위하여 소선 지름 0.6 mm의 K-타입 열전대를 사용하였다. 열전대의 측정범위는 -200 °C~

1200 °C이며 -20 °C~120 °C 구간에서 ± 2 °C의 오차를 가진다. 열전대에 발생된 신호는 Agilent 34970A Data Acquisition Unit과 Agilent 34901A 채널을 통해 수집되었다. 데이터 수집 장치의 각 채널에서 수집된 데이터는 RS232를 통해 PC로 전송된다.

총 59개의 열전대를 설치하여 실험동안 실내의 온도 변화를 측정하였다. 1층 복도 및 출입구의 2.4 m 높이에 13개의 열전대를 설치하였다. 또한 복도공간 2개소(T2, T5)에 높이에 따른 온도변화를 측정하기 위하여 각각 4개의 열전대(2.2 m, 2.0 m, 1.6 m, 1.0 m) 총 8개의 열전대를 설치하였다. 각 방의 출입문 10 cm 아래 위치(높이 1.9 m)에 12개의 열전대(1층 8개, 2층 4개)를 설치하였다. 각 방에서의 온도 변화를 측정하기 위하여 총 23개의 열전대를 각 방 중앙의 2.4 m 및 1.6 m 높이에 설치하였다. 계단실에 3개의 열전대를 설치하여 온도변화를 측정하였으며 옥상 출입문 10 cm 아래 위치에 열전대를 설치하였다. 각 열전대의 설치위치를 Figure 2에 표시하였다. 각 위치의 열전대에서 5초 간격으로 데이터를 수집하였다.

실험공간의 연기 거동을 촬영하기 위하여 CCTV를 2대 설치하였다. 1층 복도에서의 연기 거동을 촬영하기 위하여 1층 복도 끝에 설치하였으며, 계단실에서의 연기 거동을 측정하기 위하여 2층 계단 상부에 1대의 CCTV를 설치하였다.

가연물로는 헵탄 36리터를 사용하였다. 한 번의 길이가 0.8 m인 정사각형 화원을 제작하여 사용하였으며, 개방된 공간에서 질량감소율을 측정하였다. 측정된 질량감소율을 이용하여 아래 식을 이용하여 열방출율을 계산하였다.

$$\dot{Q} = \dot{m}_f \cdot \Delta H_c$$

여기서 $\dot{Q}$ 는 열방출율, $\dot{m}_f$ 는 질량감소율, ΔH_c 는 연소열을 나타내며 헵탄의 연소열은 44.6 MJ/kg이다. 최대 열방출율은 약 1.7 MW이다⁽⁹⁾.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실내 연기 거동 측정 결과

화재가 발생하면 연기가 상승하여 천장에 도달한 후 천장을 따라 복도 공간 길이 방향으로 전파된다. 연기가 천장을 따라 전파되면서 화원에서 멀어질수록 연기가 가지고 있는 열에너지의 손실과 천장과 마찰 등으로 인해 부력이 감소하기 때문에 연기의 이동속도가 저하된다.

복도 끝에 설치된 CCTV에서 촬영한 영상을 Figure 3에 나타내었다. 화재 발생 약 30초 후 주 출입구 부근 복도에서 연층이 약 2.2 m 이하로 하강하였으며, 화재 발생 60초 후 약 1.4 m까지 하강하였다. 화재 발생 약 90초 후 1 m까지 하강하였으며, 약 110초 후 바닥까지 연기가 하강하였다.

2층 복도 상부에서 촬영한 영상을 Figure 4에 나타내었다. 화재 발생 약 1분 후 연기가 2층 계단실 상부에 도달하였으며, 약 80초 후 계단실 내부가 연기로 가득차 시야 확보가 불가능해졌다.

3.2 1층 실내 온도분포 측정 결과

1층 복도 천장 20 cm 아래에서의 시간 경과에 따른 온도 변화를 Figure 5에 나타내었다. 화재 발생 후 온도가 급격하게 증가하여 화재실 입구 천장(T2)에서 화재 발생 약 35초 후 온도가 약 350 °C까지 증가하였으며, 천장 마감재가 연소되면서 화재 발생 약 160초 후 온도가 600 °C

Figure 3. Smoke movement in the first floor corridor.

Figure 4. Smoke movement in the staircase.

Figure 5. Temperature variation in the corridor.

Figure 6. Temperature variation at first floor doors.

이상 증가하였다. 이후 약 480 °C 이상 온도가 유지되었다. 주출입구 부근 복도(T5)에서는 정상상태에 도달한 약 170 초 후부터 온도가 약 350 °C 이상 도달하였다. 복도 끝(T10)에서는 온도가 증가하여 화재 발생 약 50초 후부터 온도가 약 170 °C로 유지된 후 내부 마감재 연소로 인하여 온도가 증가하여 화재 발생 약 170초 후부터 약 240 °C 이상 온도가 유지되었다. 화재 발생 약 300초 후 천장 반자 및 구조물 추락으로 인하여 T1 열전대가 탈락되어 100 °C 이하로 온도가 감소하였다.

1층 각 방의 출입문 10 cm 아래에서의 시간 경과에 따른 온도 변화를 Figure 6에 나타내었다. 화재실 출입문 아

래(T14)에서는 화염의 직접적인 분출로 인하여 온도가 약 700 °C까지 증가하였으나, 실험도중 열전대 탈락으로 인하여 온도가 감소하였다. 화재실 맞은편 4번방 출입문(T19)에서는 온도가 약 350 °C 이상 도달하였다. 1번방 출입문(T15)에서는 온도가 약 200 °C 이상 유지되었다. 그 외 방들에서는 온도가 100 °C 이상 유지되었다. 주출입구(T13)에서는 160 °C에서 온도가 유지되었다.

1층 각 방 중앙의 2.4 m와 1.6 m 높이에 열전대를 설치하여 온도 변화를 측정하였으며, 이를 Figure 7에 나타내었다. 1번 방의 2.4 m 높이에서 화재 발생 약 35초 후에 온도가 감지되기 시작하였으며 1.6 m 높이에서는 약 60초

Figure 7. Temperature variation in the first floor room.

후에 온도가 감지되기 시작하였다. 2.4 m 높이에서는 화재 발생 약 100초 후 온도가 약 62°C까지 증가하여 일정하게 유지되다가, 약 230초 경과 후 약 86°C까지 온도가 증가하여 일정하게 유지된 후 감소하였다. 1.6 m 높이에서는 화재 발생 약 130초 후 온도가 약 50°C까지 증가한 후, 약 240초 경과 후 약 70°C까지 온도가 증가한 후 점차적으로 감소하였다.

2번 방의 2.4 m 높이에서 화재 발생 약 35초 후에 온도가 감지되기 시작하였으며 1.6 m 높이에서는 약 60초 후에 온도가 감지되기 시작하였다. 2.4 m 높이에서는 화재 발생 약 105초 후 온도가 약 52°C까지 증가한 후 감소하다가 190초 후 다시 증가하기 시작하였으며, 약 210초 경과 후 약 64°C까지 온도가 증가하여 일정하게 유지된 후 감소하였다. 1.6 m 높이에서는 화재 발생 약 115초 후 온도가 약 36°C까지 증가한 후, 약 260초 경과 후 약 46°C까지 온도가 증가한 후 점차적으로 감소하였다.

3번 방의 2.4 m 높이에서 화재 발생 약 40초 후에 온도가 감지되기 시작하였으며 1.6 m 높이에서는 약 55초 후에 온도가 감지되기 시작하였다. 2.4 m 높이에서는 화재 발생 약 105초 후 온도가 약 56°C까지 증가한 후 감소하다가 190초 후 다시 증가하기 시작하였으며, 약 210초 경과 후 약 75°C까지 온도가 증가하여 일정하게 유지된 후 감소하였다. 1.6 m 높이에서는 화재 발생 약 115초 후 온

도가 약 40°C까지 증가한 후, 약 240초 경과 후 약 50°C까지 온도가 증가한 후 점차적으로 감소하였다.

4번 방의 2.4 m 높이에서 화재 발생 약 40초 후에 온도가 감지되기 시작하였으며 1.6 m 높이에서는 약 55초 후에 온도가 감지되기 시작하였다. 2.4 m 높이에서는 화재 발생 약 110초 후 온도가 약 50°C까지 증가한 후 일정하게 유지되다가 165초 후 다시 증가하기 시작하였으며, 약 210초 경과 후 약 92°C까지 온도가 증가하여 일정하게 유지된 후 감소하였다. 1.6 m 높이에서는 화재 발생 약 115초 후 온도가 약 44°C까지 증가한 후, 약 210초 경과 후 약 72°C까지 온도가 증가한 후 점차적으로 감소하였다.

5번 방의 2.4 m 높이에서 화재 발생 약 55초 후에 온도가 감지되기 시작하였으며 1.6 m 높이에서는 약 65초 후에 온도가 감지되기 시작하였다. 2.4 m 높이에서는 화재 발생 약 140초 후 온도가 약 37°C까지 증가한 후 다시 감소되다가 190초 후 다시 증가하기 시작하였으며, 약 240초 경과 후 약 47°C까지 온도가 증가하여 일정하게 유지된 후 감소하였다. 1.6 m 높이에서는 화재 발생 약 125초 후 온도가 약 34°C까지 증가한 후, 약 260초 경과 후 약 38°C까지 온도가 증가한 후 점차적으로 감소하였다.

6번 방의 2.4 m 높이에서 화재 발생 약 45초 후에 온도가 감지되기 시작하였으며 1.6 m 높이에서 약 65초 후에 온도가 감지되기 시작하였다. 2.4 m 높이에서는 화재 발생

약 125초 후 온도가 약 43℃까지 증가한 후 다시 감소되다가 185초 후 다시 증가하기 시작하였으며, 약 245초 경과 후 약 62℃까지 온도가 증가하여 일정하게 유지된 후 감소하였다. 1.6 m 높이에서는 화재 발생 약 120초 후 온도가 약 41℃까지 증가한 후, 약 250초 경과 후 약 53℃까지 온도가 증가한 후 점차적으로 감소하였다.

3.3 1층 복도 수직 온도분포 측정 결과

1층 복도의 화재실 입구 위치(T2)와 주출입구 부근(T5)에서 수직으로 열전대를 설치하여 시간 경과에 따른 온도를 측정하였다. 2.4 m, 2.2 m, 2.0 m, 1.6 m 및 1.0 m 높이에 열전대를 설치하였다. T2 위치에서 시간 경과에 따른 수직온도 분포를 Figure 8에 나타내었다.

화재 발생 초기 화염의 직접적인 분출로 인하여 2 m 높이 부근에서는 가장 높은 온도를 나타내었다. 2.0 m 이상 높이에서는 뜨거운 열기류의 이동으로 인하여 전체적으로 유사한 온도를 나타내었으며, 최고 약 600℃ 이상 도달하였다. 주위 공기와의 혼합작용 보다는 직접적인 열기류의 이동속도의 영향이 더 커 전체적으로 유사한 온도를 나타내는 것으로 사료된다. 열기류의 이동이 안정화된 300초 이후에는 약 500℃ 온도에서 일정하게 유지되었다. 1.6 m 높이에서는 상부의 뜨거운 열기류와 하부의 차가운 공기층의 혼합작용으로 인하여 혼합영역이 형성되었으며 안정화 된 후 약 350℃의 온도를 유지하였다. 화재발생 300초 이후 1.0 m 높이에서는 약 100℃의 온도를 유지한 후 감소하였다.

T5 위치에서 시간 경과에 따른 수직온도 분포를 Figure 9에 나타내었다.

T5 위치에서는 이동하는 상부의 뜨거운 열기류가 천장 및 벽면과의 마찰과 열전달, 부력 감소, 주위공기로의 열전달 및 혼합작용으로 인해 높이에 따라 온도 강하 효과가

Figure 8. Temperature variation at Tree 2.

Figure 9. Temperature variation at Tree 5.

화재실 부근에 비하여 큰 것을 알 수 있다. 화재 발생 200초 후 2.4 m 높이에서 약 500℃까지 증가하였으며, 2.2 m 높이에서는 400℃, 2.0 m 높이에서는 320℃까지 증가하였다. 1.6 m 높이에서는 약 80℃ 이하의 온도를 유지하였다. 1.0 m 높이에서는 약 40℃ 이하의 온도를 유지하였다.

3.4 2층 실내 온도 분포 측정 결과

2층 각 방의 출입문 10 cm 아래에서의 시간 경과에 따른 온도 변화를 Figure 10에 나타내었다.

계단실에 인접한 T36에서는 화재 발생 50초 후에 열전대가 반응하였으며, T37에서는 화재 발생 70초, T38에서는 화재 발생 130초, T39에서는 화재발생 140초 후에 열전대가 반응하였다.

Figure 10. Temperature variation at second floor doors.

Figure 11. Temperature variation at the room 9.

T36 위치에서는 화재 발생 약 205초 후 온도가 약 115°C까지 증가한 후 점차적으로 감소하였다. T37 위치에서는 화재 발생 약 310초 후 온도가 약 64°C까지 증가한 후 점차적으로 감소하였다. T38과 T39 위치에서는 최대 약 38°C까지 증가한 후 점차적으로 감소하였다.

2층 9번 방에서의 온도 변화를 Figure 11에 나타내었다. 9번 방 상부 및 중앙 2.4 m 높이(T40, T41)에서 화재 발생 약 60초 후에 온도가 감지되기 시작하였으며, 중앙 1.6 m 높이(T42)에서는 약 85초 후에 온도가 감지되기 시작하였다. 하부 2.4 m 높이(T43)에서 화재 발생 약 65초 후에 온도가 감지되기 시작하였다. 중앙 2.4 m 높이에서는 온도가 약 65°C까지 증가하였으며, 1.6 m 높이에서는 온도가 약 49°C까지 증가하였다. 상부 2.4 m 높이에서 화재 발생 약 310초 후 67°C까지 온도가 증가하였다. 하부 2.4 m 높이에서 화재 발생 약 300초 후 약 60°C까지 온도가 증가하였다. 2층의 9번 방을 제외한 다른 방들에서는 2.4 m 높이에서 온도가 45°C 이하로 유지되었다.

3.5 계단실 온도분포 측정 결과

계단실에서의 온도 변화를 측정하기 위하여 천장 아래 20 cm 떨어진 위치 및 옥상 출입문 아래 10 cm 떨어진 위치에 열전대를 설치하여 온도 변화를 측정하였다. 이를 Figure 12에 나타내었다.

복도 끝에 설치된 열전대(T10)가 화재 발생 약 30초 후에 반응하였으며, 1층과 2층 중간(T34)에서는 약 35초, 2층 계단실(T35)에서는 화재 발생 약 45초 후에 열전대가 반응하였다. 옥상 출입문에서는 화재 발생 약 55초 후에 열전대가 반응하였다. 연기가 1층 복도 끝에서 옥상 출입문에 도달하는 데 약 20초가 소요되었다.

T34 위치에서 온도가 최대 약 170°C까지 증가하였으며,

Figure 12. Temperature variation in the staircase.

T35 위치에서는 약 109°C까지 온도가 증가하였다. 옥상 출입문에서는 화재 발생 약 235초 후 최대 72°C까지 온도가 증가하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 화재 시 대형 인명사고를 유발할 위험성이 높은 어린이집을 대상으로 화재 위험성을 평가하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론을 다음과 같이 정리할 수 있다.

1. 화재 발생 약 1분 후 주출입구 부근 복도에서 연기가 1.4 m 높이까지 하강하였다.
2. 화재 발생 약 4분 후 복도 전체가 연기로 가득차 시야 확보가 불가능하였다.
3. 화재 발생 약 1분 후 계단실 2층에 연기가 도달하였으며, 화재 발생 약 80초 후 계단실 전체가 연기로 가득차 시야 확보가 불가능하였다.
4. 화재 발생 후 정상상태 도달 후 1층 복도에서 온도가 230°C 이상 도달하였으며, 각 방의 출입문들에서 온도가 100°C 이상 도달하였다.
5. 2층에서는 대부분의 영역에서 온도가 70°C 이하로 유지되었으나, 연기로 가득차 계단을 통한 2층 피난이 곤란하므로 양방향 피난로의 확보가 필요하다.

참고문헌

1. Enforcement Decree of the Act on the installation maintains fire protection facilities and safety management, National Emergency Management Agency (2012).
2. Early Children Education Act, Article 10, Ministry of Health & Welfare (2012).
3. Korean Statistical Information Service, <http://kosis.kr>.

4. "National Fire Data System", www.nfds.go.kr, National Emergency Management Agency.
5. S. R. Lee, "A Study on the Application of a Exhaust Engine in Basement Karaoke Fires", *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 20, No. 4, pp. 277-283 (2010).
6. Y. H. Yoo, O. S. Kweon and H. Y. Kim, "The Real Scale Fire Test for Fire Safety in Apartment Housing", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 23, No. 5, pp. 57-65 (2009).
7. O. S. Kweon, Y. H. Yoo and H. Y. Kim, "An Experimental Study on the Warehouse Mock-up Fire Test", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 24, No. 4, pp. 47-54 (2010).
8. S. H. Yoon, "Effectiveness of Fire Safety Education for Children", *Proceedings of 2012 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering*, pp. 182-185 (2012).
9. S. R. Lee and D. H. Han, "An Experimental Study on Mechanical Ventilation Using an Exhaust Engine in Corridor Fires", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 99-105 (2010).