

# 가압 강제환기방식의 유효성에 대한

## NIST 실험보고서



### 머리말

가을에 맞추어 NIST는 고등학교로 사용되었던 폐교건물에서 양압배기방식을 평가하였다. 지난 6년간 NIST(National Institute of Standards and Technology)는 소방에 있어서 양압배기방식(Positive Pressure Ventilation : PPV)의 효과를 실험한 경험이 상당하다. 전략적인 측면에서, 소방서는 흔히 유해성이 적은 상태에서 인명구조와 정밀조사를 완수할 수 있도록 화재진압 후에는 건축물 환기를 위한 PPV를 사용하고 있다. PPV는 화염 속에 위치한 소방대의 시야 확보와 열기 제거를 위한 소화활동에도 사용되고 있다. 이처럼 성공적인 임무수행에도 불구하고 PPV를 사용하는 데 있어서는 몇 가지 난제가 있다.

PPV는 어떻게 사용되어야 하는가? 이들 가운데 최선의 전략은 무엇인가? 이러한 질문에 답하기 위해 NIST는 방재연구재단(Fire Protection Research Foundation : FPRF)의 연구용역을 의뢰받아 실험연구 시리즈를 개발하였다. 이는 싱글룸에서부터 30층 규모의 업무빌딩의 범위에서, PPV 팬을 가장 효율적으로 사용하는 전략적 고찰에 대한 연구이다. 연구결과는 초고층 빌딩의 계단실을 효과적으로 가압하기 위하여 팬이 어디에 위치해야 하는지, 팬으로부터 공급된 산소로 인하여 화재가 얼마나 성장하는지, 그리고 팬의 사양은 어느 정도가 적절한지에 대한 통찰을 제공한다.

실험은 오하이오 톨레도에 소재한 연면적 2층으로서 약 28,000㎡ 규모의 폐교에서도 시행되었다. 이는 교육시설에서 원하는 장소의 연기를 제거하거나 연기 확산을 방지하기 위한 PPV 팬의 성능을 실험하기 위한 것이다. 불행하게도 많은 소방서는 다중이용 건축물에서 다수를 구출할 수 있는 충분한 인원을 보유하고 있지 못한 실정이다. NIST가 탐구하는 전략은 거주자로부터 위험요소를 제거하는 소방서비스를 제공할 것이다. 이는 단순히 위험요소로부터 거주자를 이격시키는 것과는 차이가 있으며, 많은 시간과 노동력을



〈그림1〉연기가 학교건물 출입구를 통해 배출되고 있다.(자연배기)

필요로 한다.

당해 학교건물은 조적벽과 철골조로 시공되었다. 지붕과 바닥은 대부분 철강상판 및 철근콘크리트의 철근보로 구성되어 있다. 평면도가 복잡하다는 점과 건축물의 구조상태, 그리고 실험의 목적 등을 고려하여 엔지니어들은 건축물의 섹션을 각각 구분하였다. 이 섹션은 긴 복도, 다수의 교실, 넓은 체육관을 포함하여 주출입구의 우측에 위치한다. 건물에는 많은 배기구가 존재하며, 실험을 진행하는 동안 연구자로 하여금 다양한 장소에서 형상을 관찰할 수 있도록 해준다.

개별 실험은 상당량의 연기 및 고온의 가스를 발생시키는 화재가 동반된다. 생존가능성 기준을 평가함에 있어서, 소방대가 활동하는 조건과 PPV 전략이 잠재적 거주자의 생존 가능성을 높이는지 아니면 낮아지도록 하는지를 관찰하기 위함이다. 측정방법은 온도, 압력, 적외선열화상 이미지, 그리고 비디오 촬영이 포함된다.

### 교실 화재형상

각 실험은 복도를 향하고 있는 화재실의 출입구를 제외하고서는 모든 출입문, 배기구, 창문이 닫힌 상태에서 시작되었다. 그런 다음 엔지니어가 나무팔레트, 대패밥, 폼소재의 매트에 점화하였고, 화재가 성장하도록 했다. 1차 측정에서 팔레트 6개와 매트가 적재된 상태에서는 피크 열방출률이 2.5MW, 팔레트 10개가 적재된 상태에서는 3.5MW로 나타났다. 이 계산은 'NIST 열방출률 실험자료' 및 SFPE 핸드북의 'Heat Release Rates' 챕터에 기술된 상관관계를 활용하였다. 6분이 지나서 화재는 피크에 도달했고, 배기가 제대로 이루어지지 않는 상태가 되었다.

내부에 설치된 카메라와 열전대의 사용시기는 연기층이 복도의 바닥으로 낮아지고 생존 가능성이 한계에 달했을 때로 결정하였다. 바로 이때 엔지니어들은 건축물을 환기시키고 화재실로부터 멀리 떨어진 화재실 창문이나 현관을 개방하였다.(<그림 1> 및 <그림 2> 참조) 엔지니어들은 화재상태에서 2분간 자연 배기시킨 후 팬을 작동시켜 강제 배기하였다. 연구원들은 서로 다른 장소에 배치된 팬으로부터의 데이터를 기록하였고 마침내 화재를 진압하였다.

### 팬을 사용한 실험적 성과

어떤 건축물이든 화재가 진행 중일 때에는 압력이 중요한 요소로 작용하는데 그 이유는 건축물에서 연기와 열을 유동시키는 작용을 하기 때문이다. 화재는 압력을 형성하고, 연기와 열가스는 압력이 상승한 화재지역으로부터 압력이 낮은 곳으로 이동하게 된다. 실험 시나리오에서, 압력이 낮은 곳은 화재실의 외부에 있는 복도가 된다.

(단위 : PA)

실험	배기 전 화재실 최대압력	교실 창문을 통한 자연 배기 시 압력(팬 미사용)
CF1	13	12 → 8
CF2	14	14 → 11
CF3	18	15 → 12
CF4	14	16 → 10
CF5	17	NA
CF6	12	NA

<표 1> 최대 화재 시 실내 압력

(단위 : Pa)

실험	팬 작동 시 화재실 직근 복도에서의 평균압력	
	화재실 창문을 통한 배기 시	복도 출입구를 통한 배기 시
CF1	18	NA
CF2	21	NA
CF3	16	12
CF4	8	6
CF5	35	25(창문, 출입구 모두 개방)
CF6	32	28

〈표 2〉 PPV 사용 시 복도에서의 평균압력

〈표 1〉은 자연배기 또는 PPV가 적용되기 전에는 화재실에서의 최대압력이 12~18Pa에 이르는 것을 보여준다. 창문을 개방하게 되면 바닥으로부터 2m 높이에서 평균 4Pa의 압력강하가 발생한다. 팬을 사용한 연기유동 콘트롤의 핵심은 화재로 인하여 발생하는 것보다 높은 압력을 생성하는 것이다. 테스트 과정에서 팬동작이 활성화되었을 때 현관의 배기구 또는 화재실 창문은 항상 개방된 상태였다. 각각의 실험에서 화재실 부근의 팬에 의하여 복도의 압력은 상승하였는데 그 평균 압력상승을 나타내면 〈표 2〉와 같다. 대부분의 실험에서 화재과정에서 발생하는 최대압력을 초과하는 크기의 압력이 팬에 의해서 생성되었다.

건축물에서의 온도측정은 엔지니어들이 거주자의 생존가능성, 현장에서 화재를 진압하는 소방대원의 실행 조건들, 그리고 잠재적 화재와 연기 확산 등을 분석하는데 있어서 유용하다. 건축물의 긴 복도는, 구획이 미흡하게 되면 그 지역에서 멀리 떨어진 화재 중심으로부터의 영향을 받는 잠재적인 위험을 증가시킨다. 소방대원은 그들이 거주자를 구조하고 화재를 진압하는 동안에 거주자와 소방대원 모두가 고온에 노출되는 것을 방지하고 온도를 콘트롤할 수 있는 적절한 배기 테크닉을 사용할 수 있다. 그런 다음 엔지니어는 온도에 대한 몇몇 배기 테크닉의 영향을 분석하고, 화재실 창문뿐만 아니라 복도현관 및 배기구에 설치된 PPV와 자연 배기의 영향을 규명한다.

(단위 : °C)

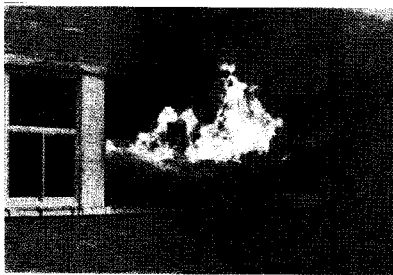
실험	배기 후 90초 동안 화재실 직근 복도에서의 온도 변화			
	화재실 창문을 통한 자연 배기	복도 출입구를 통한 자연 배기	화재실 창문을 통한 PPV	복도 출입구를 통한 PPV
CF1	-2	NA	-110	NA
CF2	+5	NA	-200	NA
CF3	+10	-25	-138	0
CF4	+50	+25	-88	-5
CF5	NA	+20	-140	-180
CF6	-10	-5	-135	-43

〈표 3〉 2m 높이에서의 화재실 평균온도에 대한 배기의 영향

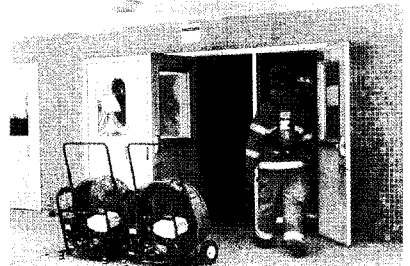
〈표 3〉은 각각의 실험에서 배기가 실시된 후에 90초 동안 화재실에 설치된 두 개의 인접한 열전대의 평균 온도변화를 나타낸 것이다. 이는 복도구역에서 거주자와 소방대원 모두 최대 온도에 노출될 수 있음을 나타낸다. 화재실에서의 온도는 각 출입구에서 생존 가능한 기준을 초과하였다. 화재실 외부의 온도는 복도의 공간이 크기 때문에 바닥으로부터 1.2m 높이를 기준으로 100°C를 초과하지 않았다. 자연 배기는 화재실과 연결된 복도에서의 천장온도에 대한 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 각 사례에서 볼 수 있듯이, 온도의 변화는 매우 적게 나타났다. 열방출로 인한 미세한 온도강하 또는 산소 유입으로 인한 화재성장이 온도를 미세하게 상승시킨 정도이다.

PPV 시나리오는 모든 실험에서 천장부 온도를 낮추도록 작용하였다. 화재실 창문을 통하여 배기시키는 것은 일반적으로 온도를 낮추는 데에 상당히 유용하다. 그러나 화재와 떨어진 곳을 배기시킬 때조차도, 복도의 온도는 같은 수준을 유지하거나 낮게 나타났다. 이동식 싱글팬 하나만으로도 온도를 낮추도록 작용했지만, 차량 트레일러에 고정된 팬이 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

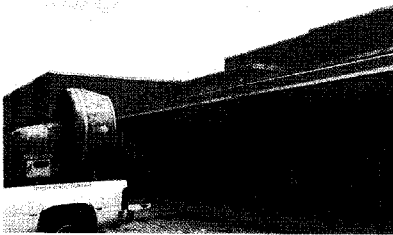
결과적으로, 실험을 통하여 PPV를 사용하는 것은 열가스 확산을 제한할 수 있으며, 건축물 내에서의 온도를 낮추도록 작용한다. 이는 잠재적 희생자의 생존율을 높일 수 있고 소방대원의 안전을 제고할 수 있도록 해준다.



〈그림 2〉 화재실 창문을 통한 배출 실험(자연 배기)



〈그림 3〉 체육관 배기를 위한 이동식 팬의 설치 모습



〈그림 4〉 트레일러에 설치된 배기용 고정 팬



〈그림 5〉 실험 중 연료 패키지의 화재 성장

### 체육관 화재 실험

교육연구시설 건축물의 또 다른 공공장소로서 공간의 체적이 상당히 큰 체육관 또는 강당을 들 수 있다. 체적이 상당히 큰 공간은 연소를 지속적으로 유지하고 화재가 상당히 성장하는 데 필요한 산소를 공급한다. 따라서 소방대원이 공간적으로 수색하기가 어려우며, 자연적으로 배기가 이루어지는 데에는 많은 시간이 걸린다. 이 실험은 소화활동과 관련된 화재성장, 연기 확산, 연기 제거를 분석하는 것이다. 9,630m<sup>3</sup> 체적의 체육관에서 여섯 번의 실험이 시행되었다. 세 가지 타입이면서 서로 다른 사양의 네 개의 팬이 사용되었다. 세 번의 실험은 이동식 팬을 사용하였고, 다른 세 번의 실험은 트레일러에 고정된 팬을 사용하였다.(〈그림 3〉 및 〈그림 4〉 참조) 이들은 모두 체육관 로비의 외부에 위치하였으며 자연 배기가 실시된 이후에 작동하였다. 이동식 팬은 로비와 체육관 사이의 출입문 내부로 이동하면서 실험이 진행되었다. 배기구는 체육관 뒤편과 지붕개폐부 두 장소로 정해졌다. 체육관 뒤편의 출입문은 폭 1m, 높이 2m, 지붕개폐부는 대략 체육관 뒤편 출입문과 비슷한 규모이다.

다시 한 번 배기포인트, 출입문, 창문이 닫힌 상태이고, 로비쪽 팬이 설치된 장소의 문들

은 개방된 상태에서 각 실험이 시작되었다. 엔지니어들은 팔레트, 대패밥, 매트 의 연료패 키지에 점화하였고, 화재는 9~14분 동안 성장했다. 가연물 적재형태 또는 연기의 상태 는 <그림 5>와 같다. 이는 대체로 연기가 가득 차게 되는 시간에 가깝다. 열방출률은 2.5~56MW 범위로 측정되었다. 내부카메라와 열전대를 사용하여, 엔지니어들은 언제 쯤 연기층이 바닥까지 내려와 생존가능성이 한계에 이르게 되는지를 측정하였다. 이때, 체육관 뒤편 출입문 또는 지붕 개폐부를 통하여 건축물의 배기가 이루어졌다. 화재에 응 하는 시나리오에 따라 자연 배기와 양압에 의한 배기가 이루어졌다. 연구자들은 팬 배치 를 달리할 때의 영향을 기록하고 화재를 진압했다. 진화가 끝나고 연기는 방출되었다.

**PPV를  
이용한  
체육관 화재  
억제**

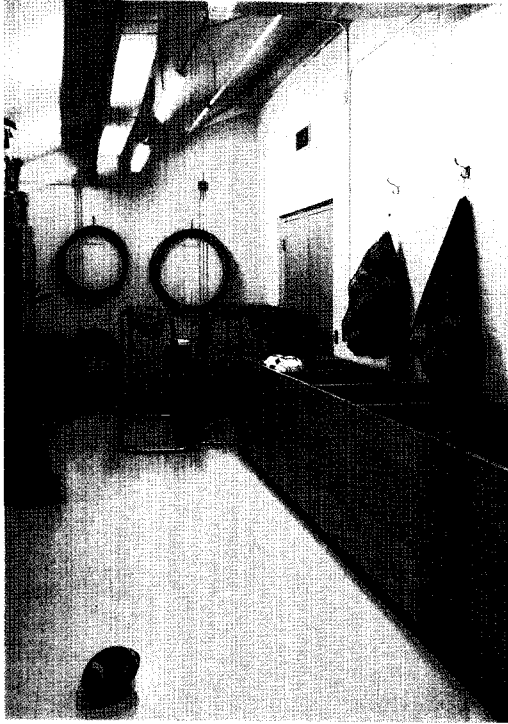
체육관에서의 제한적인 실험에서, PPV를 사용하여 압력을 상승시킴으로써 온도를 낮추고 연기확산을 방지하며 가시도를 높이는 것은, 효과적인 것으로 나타났다. 압력, 온도, 비디오데이터는 각각의 팬이 로비에서의 조건을 개선 함으로써 로비를 통하여 체육관으로 연소되어 들어오는 것을 막을 수 있는 충분한 압력 을 생성한다는 것을 보여주었다. 이러한 가능성은 이 건물과 같은 타입에서는 매우 중요 한데, 그 이유는 연기를 특정지역에 한정시키며 소방대원이 안전한 상태에서 건축물에 잔류하고 있는 사람들을 보다 쉽게 발견할 수 있도록 해줌으로써 건물에 남아있는 사람 들을 연기로부터 보호할 수 있기 때문이다.

모든 팬은 체육관 내부보다 높은 압력을 생성하였으며 배기구 외부로의 유동이 증가하도 록 작용하였다. 처음 다섯 번의 실험은 화재가 낡은 무대부에 갇힌 상태를 유지하도록 조 건을 만들어내었다. 이동식 싱글팬은 이러한 규모의 체적에서 배기량을 증가시키기 위한 충분한 가압상태를 만들었지만, 효과는 제한적이었다. 첫 번째 팬과 평행한 방향으로 두 번째 팬을 추가하여 압력을 약 2배로 증가시키면, 고정 팬은 두 개의 이동식 팬의 영향으 로 처음 상태와 비교하여 약 3배의 압력을 생성하게 된다.

체육관의 경우 압력을 높이는 목적이 배기구를 통한 연기배출량을 증가시키는 것이지만, 로비에서의 압력을 높이는 주된 목적은 연기의 유동을 차단하기 위한 것이다. 이러한 테 크닉을 사용하면, 소방대원을 보호할 수 있고 개구부가 있는 장소라면 소방대원을 보호 함과 동시에 배기시키는 것도 가능하다.

체육관 외부에 설치된 이동식 싱글팬은 1분당 3~6℃의 냉각효과를 보였다. 체육관에서 의 고정식 팬과 두 개의 이동식 팬은 1분당 8~15℃의 비율로 냉각시켰다. 이 비율은 화재 가 최고점에 이른 후 5분 동안 체육관의 낡은 무대부 화재의 배기에 대한 것이다. 화재가 발생한 이후에 실시하는 배기는 냉각비율이 낮게 나타나며, 보다 큰 화재가 발생한 이후 에 배기를 실시하게 되면 냉각효과는 더 크게 나타났다. 하지만 이러한 수치는 체적이 큰 화재가 자연적으로 쇠퇴하는 경우의 효과가 이미 반영된 상태일 수도 있지만, 그렇다고 하더라도 합리적으로 기대했던 바와 같은 결과이다. 물론, 피난 방향, 피난 구역, 갇힌 거 주자가 있는 방향으로 화재, 연기, 열가스를 유발하도록 팬이 사용되어서는 안 된다.

모든 연기를 제거하기 위해서는 매우 긴 시간이 걸리기 때문에 체적이 큰 곳에서 시야를 복구하는 것은 매우 어려운 일이다. 그러나 크기에 관계없이 모든 팬은 시야 복구 시간을 단축하도록 작용하였다. 복도에서는 팬에 의하여 연기가 복도의 위에서 아래로, 또한 배



기구가 아닌 장소로 연기를 밀어낼 수 있다. 또한 팬을 사용하여 체육관 저층고 부분의 시야를 회복 시킴으로써 피난층을 보다 쉽게 찾도록 해준다. 팬을 사용하면 관람석에서의 시야가 크게 향상된다. 이와 같은 잠재적 연구가 발전하기 위해서는 상당한 시간이 걸리지만 계속 진행하고 있다.

체적이 큰 체육관이 자연적으로 배기되기까지 상당한 시간이 걸린다. 지붕이 개방된 상황에서의 실험에서는, 가시성 또는 열계층이 2분이 지나서 약간 개선된 것으로 나타났다. 지붕배기와 더불어 작동된 팬은 연기층을 위로 올라가도록 작용하였지만, 뒤편 출입구에서 작동시킨 것보다 효과적이었다고 볼 수는 없다. 지붕 개폐부의 크기는 뒤쪽 출입구 하나의 크기와 동일하며, 4개의 출입구 크기는 트레일러에 고정된 팬으로부터 발생한 양압을 유효하게 사용할 수 있다.

체육관에서 시행된 마지막 실험에서는 PPV와 천장부 배기의 조합에 의하여 배기가 제한된 화재가

플래시오버로 변환되도록 작용하였다. 이렇게 되기를 바라지는 않지만, 배기가 이루어지기 전에 이 공간은 지킬 수 없다는 사실은 중요하다. 플래시오버가 나타날 때, 팬은 체육관의 연소물 및 건물에 남아있는 사람들을 보호한다. 이 또한 가시성과 소화조건을 향상 시킴으로써 소방대원이 체육관 입구와 열기 사이에 위치한 복도를 걸어서 진입하여 안전하고 신속하게 소화할 수 있도록 해준다.

화재는 체육관의 팬으로 확대되지는 않았는데, 그 이유는 팬에 의해서 화재장소보다 높은 압력이 형성되었기 때문이다. 만약 소방대원이 가연물이 상당하고 저산소 상태에서 구조활동을 해야 한다면, 건축물 입구의 개방된 배기구와 화재 사이에 위치해야 할 것이다. 만약, 지붕을 통해서나 다른 대원이 문을 개방함으로써 공기가 공급되면 화재의 중심을 찾으려는 소방대원들은 화재가 급격하게 변하고 있다는 사실을 발견하게 된다. 저산소상태 또는 가연물이 상당한 화재에서의 배기는 자연 배기든 기계적 배기든 관계없이 화재의 성장을 촉진할 수 있다. 배기는 냉각과는 확연한 의미의 차이가 있다. 배기는 반드시 화재 현장의 모든 작용을 고려하여 동시에 이루어져야만 하는 것이다.

이처럼 한정된 실험 시리즈에서 살펴보았듯이, 온도를 낮추기 위한 압력상승이 충분히 이루어지면 잠재적 거주자의 생존가능성 증가, 소방대원의 안전도 향상(연기의 확산을 억제하고, 건축물이 구조적으로 안전하고 손상 당하지 않는 가운데 거주자의 안전을 유지함으로써 소방대원에게 응급상황이 보다 적게 발생하도록 한다), 가시도 향상, 거주자가 스스로 피난할 수 있는 기회 제공, 소방대원의 활동이 더욱 용이한 환경을 제공한다. 적절한 지식 및 훈련과 더불어 PPV는 소방대원들이 보다 안전하고 효율적으로 임무를 완성할 수 있도록 해주는 유용한 방안이다. 이 실험에 대한 완성된 세부분석자료는 'www.fire.gov' 를 통해 얻을 수 있다. (6)