



교도소 내 연기감지기 설치에 대하여

출처 / FPE 2006년 가을호

번역 / 이보영, 한국화재보험협회 고객센터시스템 대리

1. 머리말

북아메리카의 교도소에서는 종종 화재가 발생하는데 주로 잠겨진 감방 안에서 일어난다. 이런 화재는 대부분 공식적으로 보고되지 않는 작은 규모의 화재이다. 교도소 감방 내의 화재는 수감자들이 그 안에 갇혀 있기 때문에 초기 감지와 구조출동이 중요하다. 이러한 이유로 빌딩코드는 감방 안에 연기감지기 설치를 요구하고 있다. 캐나다에서도 규정(the National Building Code of Canada)에 의하여 각 감방 안에 연기감지기 설치를 의무화하고 있다. 또한 NFPA

101 인명안전코드도 4명 이상의 수감자가 있는 감방에는 감지기 설치를 규정하고 있다.

캐나다 연방 교도소에서의 화재의 발화 원인과 빈도는 북아메리카 대부분의 시설물들과 평균적으로 비슷할 것이다. 캐나다에서는 종교적, 교육적, 지역적 이유와 관련한 인권 재판 결정에 따라 수감자가 감방 안에 들어오는 물건들이 다른 지역보다 많기 때문이다. 또한 캐나다 연방 교도소의 감방 안에서는 흡연이

허용되고 있다. 그러나 모든 캐나다 연방 교도소 내 주거시설에는 스프링클러설비가 충분히 설치되어 있어, 플래시오버의 위험성을 감소시키고 있다.

교정시설의 관리자들이 감방 내 설치된 감지기로 인해 부딪히는 문제점은 주로 수감자에 의해 발생하는 일과성 비화재보이다. 수감자가 의도적으로 감지기 근처에(흡연이나 종교적, 문화적 행사에 의해) 연기를 발생시키거나 악의적으로 시설에 손상을 입혀 일과성 비화재보가 발생할 수 있다. 원인이 무엇이든 간에 일과성 비화재보는 다음의 결과를 가져온다.

- 관리자는 경보의 원인을 조사하기 위해 시간을 낭비하게 된다. 이것은 '양치기 소년의 거짓말' 현상을 불러와 관리자와 수감자들이 점점 경보에 대해 관심을 기울이지 않게 만든다. 또한 직원들이 시설의 다른 분야에 대처해야 할 시간을 낭비하게 만든다.
- 감지기를 조사하고 교체하기 위하여 상당한 비용이 소요될 것이다. 마찬가지로 적절한 작동을 위해 시스템을 복구하는 비용도 고려해야 할 것이다.
- 손실의 정도나 발생 시간, 발생 일자, 또는 시설의 위치에 따라 화재경보설비가 얼마동안 작동하지 않을 수 있기 때문에 그만큼 관리자와 수감자들은 위험에 노출된다. 원거리 지역의 시스템은 교체나 수리를 기다리는 동안 장기간 작동되지 않을 수 있다.

그러므로 교정시설의 관리자는(주로 일과성 비화재보의 원인 때문에) 감방 내 연기감지기를 감방 밖으로 이설하기를 원한다. 이런 교체에 대한 기술적인 근거를 마련하기 위해 캐나다 교정국(CSC)은 NRCC(National Research Council of Canada), Ken Richardson 방재회사와 함께 ON주 Kingston 시에 있는 교도소를 임시로 이용하여 전면적인 연구 프로젝트에 착수하였다. 이 연구 프로젝트의 목적은

감방 내 연기감지기의 이설 가능 여부와 이로 인한 화재 발생시 수감자에 대한 화재위험이 CO가스, CO₂ 가스 또는 온도의 한계점을 초과하지 않는 화재방호 수준을 계속 유지할 수 있는지를 검토하는 것이다.

2. 교도소 내 화재 손실

다행히도 캐나다 연방 교도소 내에서 발생한 화재 건수는 사망 및 부상자를 포함하여 낮은 편이다. 본 고에서는 교도소에서 발생한 모든 화재는 보고된다고 가정한다. 이것은 아주 작거나 미미한 손해가 발생한 화재는 보고되지 않기 때문에 보수적인 가정이다. 1995년~2000년에 발생한 캐나다 교도소의 화재발생 통계는 다음 <표 1>과 같다.

● 표 1 ● 1995~2000년 캐나다 연방 교도소 시설 내 연소 확대 범위

연소확대 범위	화재건수	비율	사망	부상
발화물에 한정	173	63%	0	24
발화실(감방)에 한정	100	36%	1	25
발화층에 한정	2	1%	0	0
계	275	100%	1	49

<표 1>은 사실상 교도소 내 거의 모든 화재가 발화 감방에 한정되어 있다는 것을 보여주는데 캐나다 교정시설에 자동식스프링클러설비가 설치되어 있다는 것을 고려하면 그리 놀라운 일이 아니다. 플래시오버는 전형적으로 발화실을 넘어 확산되는데(감방 내 모든 화재와 관련하여) 교도소에는 플래시오버가 자주 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다.

캐나다 연방 교도소의 화재자료에 의하면, 거의 모든 화재는 수감자들이 고의적으로 발생시킨 것이다. 원인은 다른 수감자나 교도관의 위협, 시설이나 개인 물품의 파괴, 폭행 또는 탈출시도를 위한 주의분산, 자살시도, 또는 지루함 등이다. 최초 발화물질은 주로 감방 내 수감자가 소유하고 있는 물품들이다.

캐나다에는 최초 발화물질에 대한 통계자료가 없지만,

● 위험 관리 정보 1 ●

교도소 내 연기감지기 설치에 대하여

미국방화협회(NFPA)에서는 이 분야에 대한 지침을 제공하고 있다. 미국에서의 1989~1993년 최초 발화물질 통계는 <표 2>와 같다. 캐나다 교도국은 이 비율이 그들의 경험치와 비슷하다고 밝혔다.

● 표 2 ● 주요 최초 발화물질

매트리스, 침대보	40.3%
쓰레기	10.2%
종이	6.1%
의류	6.0%

<표 2>는 감방 내에 화재 발생시 연기감지기가 감지할 수 있어야 하는 연소물질의 품목을 보여주고 있다. 그러므로 이 자료를 이번 연구 프로젝트의 실험에서 발화원으로 사용하였다.

3. 실험 변수

가. 발화원

감방 내와 감방 밖에 설치된 감지기의 작동 차이점을 확인하기 위해서는 감방 안에서 발생하는 화재를 대표하며 감지기 자체에서 감지가 가능한 발화원을 설정해야 한다. <표 2>의 최초 발화물질에 대한 통계자료를 이용하여 실험에 사용할 발화원을 <표 3>과 같이 선택하였다.

● 표 3 ● 실험에 이용한 발화원

연소 방식	발화물
불꽃화재	의류/피카, 신문
훈소화재	방염처리된 코튼 매트리스 방염처리된 폼 매트리스

실험에 이용할 발화원의 가연물 패키지를 만들기 위한 (신문을 제외한) 모든 재료는 캐나다 교도국에서 제공받았다. 방염 매트리스는 캘리포니아 BHF*TI(Bureau of Home Furnishings and Thermal Insulation)의 기술고시 121, 'Flammability Test Procedure for Mattresses for Use in High-Risk Occupancies.' 6 기준을 따랐다.

감방 안과 감방 밖에 설치된 연기 감지기가 작동할 수 있도록 <표 3>의 발화원이 선택되었다. 더 큰 발화원은 실험에서보다 더 빨리 감방 안을 치명적 조건(Critical Conditions)으로 만들 수 있다. 또한 더 큰 화재로 감방 내부 또는 외부의 감지시간이 빨라질 것이다. 모든 캐나다 연방 교도소에 스프링클러설비가 설치되어 있기 때문에, 스프링클러설비 역시 큰 발화원에 더 잘 반응할 것이다. 명확한 것은 아니지만, 큰 규모의 화재는 인근 감방의 수감자가 더 쉽게 화재를 감지하고 경보를 작동시킬 수 있게 할 것이다.

이 실험에서 치명적 조건이 도달하는 범위는 실험 조건에 달려있다. 감방 내 치명적 조건에 영향을 미치는 요소들이 많이 있기 때문에 이 실험결과로 기타 모든 발화원과 조건들의 치명적 조건을 추정하는 것은 쉽지 않다.

나. 치명적 조건(Critical Conditions)

이 연구의 접근법은 주어진 실험 조건에서 감방 밖-복도나 순환공기덕트 내에 설치된 연기감지기로 감방 내 화재 발생시 치명적 조건이 발생하는지를 조사하기 위한 것이다. 두 가지 사례를 살펴보기로 한다.

(1) Case 1

이 경우는 각 감방 내 감지기가 설치되어 있는 상황이다. 이 경우 관련 식은 다음과 같다.

$$T_{\text{Detection}} + T_{\text{Assist}} < T_{\text{Critical}} \quad (1)$$

이 식은 감지시간($T_{\text{Detection}}$)의 기준을 세우는 식이지만 감지시간이 길다는 것이 수감자에게 큰 위험을 발생시킨다는 것을 뜻하는 것은 아니다. 중요한 것은 총 감지시간에 관리자가 화재 발화실에 출동하고 수감자를 지원하는 시간(T_{Assist})을 더한 시간이 감방 내에 치명적인 연기 조건이 형성되는 시간보다 적다는 것이다. 모든 사례에서 T_{Assist} 는 120초로 설정되었다. NFPA 101 인명안전코드에 명시된 최대 시간 조건은 교도소 관리자가 비상대피

혹은 구출을 위해 잠금장치를 해제하거나 또는 기타 긴급 상황 조치를 취하는 최대시간으로 정해져있다.

(2) Case 2

이 경우는 감방 외부(복도나 순환공기 덕트)에 감지기를 설치한 상황이다. 관련 식은 사례 1의 식과 같다.

사례 2에서 총 시간이 사례 1보다 길어진다 해도 필요시 감지기 응답의 확률은 더 높으며(즉, 감지기의 작동가능성이 높다) 감방 내부가 치명적 조건에 도달하지 않는다면 감방 외부에 감지기가 설치되고 감지시간이 더 길어짐에도 불구하고 수감자의 궁극적인 위험은 더 낮을 수도 있다.

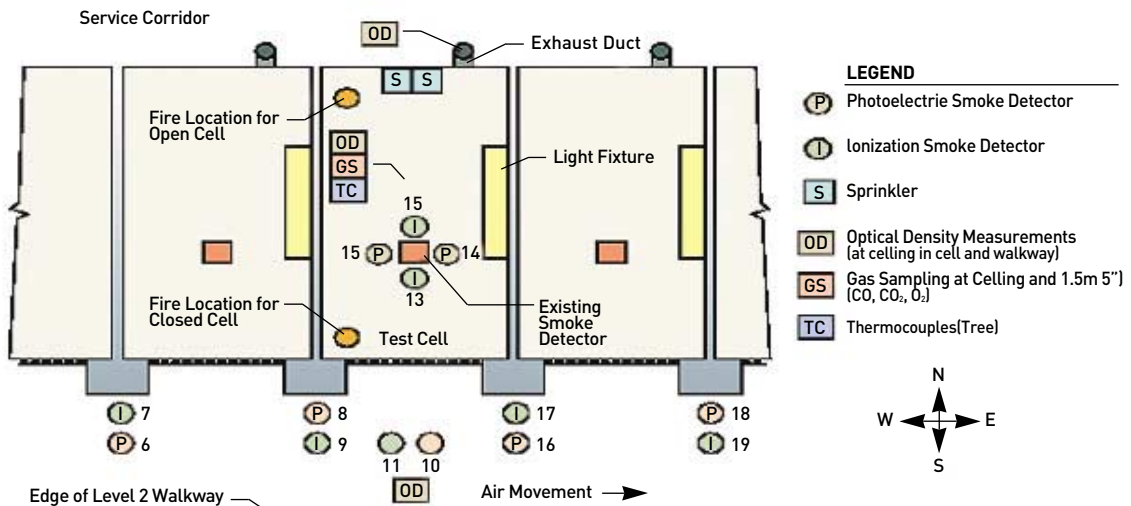
이 연구에서 가장 중요한 사항은 감방 내 화재로 인한 감방 내 치명적 조건을 설정해 놓는 것이다. 이 연구에서는 아래의 조건을 치명적 조건이라고 보고 있다.

- CO 농도가 1,000ppm에 도달할 때(Reference 7에서는 1,500ppm이 제시되어 있으나 보수적인 접근을 위해 낮은 수치 제시)
- CO₂ 농도가 5%에 도달할 때
- O₂ 농도가 14%이하가 될 때
- 온도가 80℃에 도달할 때

이 농도들은 생명 또는 건강에 치명적인 수준의 극한값이며, 보통 30분 정도의 노출될 때의 값이다. HCl, HCN, NO_x와 같은 많은 독성 가스가 인간행동장애와 관련되어 있지만, 그 발생과정 및 인체에 미치는 영향에 대한 알려지지 않은 요소들(연소물질 특성, 화기, 화재 규모 등)이 있기 때문에 이 프로젝트에서는 그것을 연구하지 않았다. 또한 위에서 언급한 이 세 가지 가스는 화재 실험에서 극한조건을 설정하는데 공통적으로 사용되는 요소들이다. 80℃라는 온도의 한계점은 이상 고열과 피부 화상을 입을 수 있는 보수적인 한계점에 따라 설정된 것이다.

다. 실험 프로그램

교도소에서는 13가지의 실물 크기 실험이 이뤄졌다. 실험 시설과 기구의 배치도는 [그림 1]과 같다. 감방이 개방면(창살문 open-bar door) 또는 폐쇄면(철문, solid door) 전면을 가지는가에 따라 감방 외부에 설치된 감지기에서 최대한의 입력조건을 만들어 주기 위해 발화원의 위치를 변화시켰다.



● 그림 1 ● 실험 시설과 기구의 배치도

● 위험 관리 정보 1 ●

교도소 내 연기감지기 설치에 대하여

캐나다 연방교도소는 감방의 10~20%가 창살문이며, 그 수치는 감소하고 있다. 실시된 실험은 <표 4>와 같다. 변수들은 창살문/철문 감방, 감방내 발화 위치, 가연물 패키지, 연소유형 등을 포함한다.

● 표 4 ● 실험 번호

연소 방식	발화물	실험 번호	
		창살문 감방 (문 반대쪽에서 화재발생시)	철문 감방 (앞쪽에서 화재발생시)
불꽃화재	의류/짜카	1, 2, 6	7 ^{*)} , 8, 9
	신문	3	10
훈소화재	방염 코튼 매트리스	4	11
	방염 폼 매트리스	5, 13	12

주) 7번 실험에서는 화재가 감방의 문 반대쪽에서 발생하였다.

라. 실험 결과

실험 과정 및 결과에 대한 자세한 사항은 참조문헌에 포함되어 있다. 13개의 실제규모 실험은 각각에 대하여 감지된 모든 감지기의 작동 시간이 기록되었으며 발화실의 조건이 측정되었다. 모든 실험은 15분 동안 진행되면서 감지시간이 기록되었다. 실험의 목적은 감방 내, 감방 외부 그리고 덕트의 감지기가 작동할 때의 감방 내의 상태를 평가하는 것이다.

감방 내 감지기의 경우, 동일한 종류의 두개 감지기의 감지시간 평균이 이후 분석에 사용되었다. 덕트에 설치한 감지기의 작동시간은 감방 내에 설치된 광전식 또는 이온식 감지기 중 더 빨리 작동한 감지기 두개의 작동시간의 평균감지시간에 도달한 덕트 내 광학농도가 감방 내 광학농도에 도달하는 시간으로 추정한다. 감방 외부의 감지기에 대해서는 실제 작동시간이 사용되었다.

치명적 조건을 평가하기 위해 고려하는 시간은 $T_{\text{Detection}} + T_{\text{Assist}}$ 이다. 그러므로 총 감지시간을 정하기 위해 각 감지시간에 앞에서 언급한 최대 120초의 지원시간을 더한다. 교도소 관리자가 화재위치를 파악하고 지원을 배치할 시간을 보수적으로 평가한 것이다. 치명적 조건은 이 총 감지시간의 감방 내 조건과 비교되어 평가된다.

마. 천장 온도

최대 천장 온도는 감방 중앙에 있는 열전대 수에 기록된다. <표 5>는 감방 외부에서 감지하는 시간에 교도관의 지원시간을 더한 시간(또는 두개의 감지기의 평균 감지시간 더하기 지원시간)에 나타난 감방 내 최대 온도를 보여준다. 표와 같이, 최대 $T_{\text{Detection}} + T_{\text{Assist}}$ 시간에 나타나는 모든 실험을 통틀어 최대 온도는 46°C이다. 모든 실험에서 기록된 온도는 캐나다 교도국에 의해 감방 내부에서 사용된 스프링클러의 작동 온도보다 낮다. 이 스프링클러의 온도 등급은 71°C(160°F)이다.

● 표 5 ● 감방 내 천장 온도

연소 방식	발화물	최대 온도 (°C)	
		창살문 감방 (문 반대쪽에서 화재발생시)	철문 감방 (앞쪽에서 화재발생시)
불꽃화재	의류/짜카	30, 40, 38	33 ^{*)} , 36, 46
	신문	42	36
훈소화재	방염 코튼 매트리스	27	28
	방염 폼 매트리스	26, 25	27

주) 감방의 문 쪽에서 화재발생

바. CO 농도

감방 외부의 최대 평균감지시간에 지원시간을 더한 시간에 감방 내 CO 농도는 <표 6>과 같다. 표와 같이 최대 CO 농도는 340ppm(보수적인 치명적 조건의 34%)로 철문 감방 내 코튼 매트리스의 훈소화재에서 발생하였다.

● 표 6 ● 감방 내 CO 농도

연소 방식	발화물	최대 CO 농도 (ppm)	
		창살문 감방 (문 반대쪽에서 화재발생시)	철문 감방 (앞쪽에서 화재발생시)
불꽃화재	의류/짜카	30, 15, 20	50 ^{*)} , 65, 70
	신문	90	160
훈소화재	방염 코튼 매트리스	240	340
	방염 폼 매트리스	150, 150	190

주) 감방의 문 반대쪽에서 화재발생



사. CO₂ 농도

감방 외부의 최대 평균감지시간에 지원시간을 더한 시간에 감방 내 CO₂ 농도는 <표 7>과 같다. 최대 CO₂ 농도는 실험 9번(불꽃화재, 의류)에서 발생한 0.55% 혹은 치명적 조건의 11.6%이다.

● 표 7 ● 감방 내 CO₂ 농도

연소 방식	발화물	최대 CO ₂ 농도 (ppm)	
		창살문 감방 (문 반대쪽에서 화재발생시)	철문 감방 (앞쪽에서 화재발생시)
불꽃화재	의류/따카	0.06, 0.18, 0.15	0.21 ^{*)} , 0.32, 0.55
	신문	0.18	0.25
훈소화재	방염 코튼 매트리스	0.05	0.09
	방염 폼 매트리스	0.02, 0.03	0.07

주) 감방의 문 반대쪽에서 화재 발생

아. O₂ 농도

감방 외부의 최대 평균감지시간에 지원시간을 더한 시간에 감방 내 O₂ 농도는 <표 8>과 같다. 실험에서 O₂ 농도 감소가 작았으므로 <표 8>에는 실제 농도를 표시하지 않고 치명적 조건과의 비율을 표시하였다. 최대 농도 감소는 실험 9번에서 정해져있는 발화실의 치명적 조건과의 비율이 8.5%일 때 발생하였다.

● 표 8 ● 감방 내 O₂ 농도

연소 방식	발화물	O ₂ ¹⁾ (치명적 조건과의 비율)	
		창살문 감방 (문 반대쪽에서 화재발생시)	철문 감방 (앞쪽에서 화재발생시)
불꽃화재	의류/따카	1.0%, 2.2%, 2.9%	1.4% ²⁾ , 1.6%, 8.5%
	신문	2.9%	36
훈소화재	방염 코튼 매트리스	0.7%	28
	방염 폼 매트리스	1.0%, 0.7%	27

1) 치명적 조건과의 비율

= (실험농도-대기농도)/(치명적 조건 농도-대기농도)×100%

2) 감방의 문 반대쪽에서 화재발생

자. 감방 내 광학농도

각 실험에서 광학농도는 감방 내 발화 위치에서, 배기덕트, 복도에서의 계속 측정되었다. 이 결과들은 덕트 내 감지기가 발화점에서 감지기가 작동하는 시간에서의 감방 내 광학농도를 감지하는 시간을 비교하려는 목적으로 사용되었다. 실험 2번의 창살문 감방 실험과 실험 9번 철문 감방 실험에서의 광학농도점은 [그림 2]와 같다.

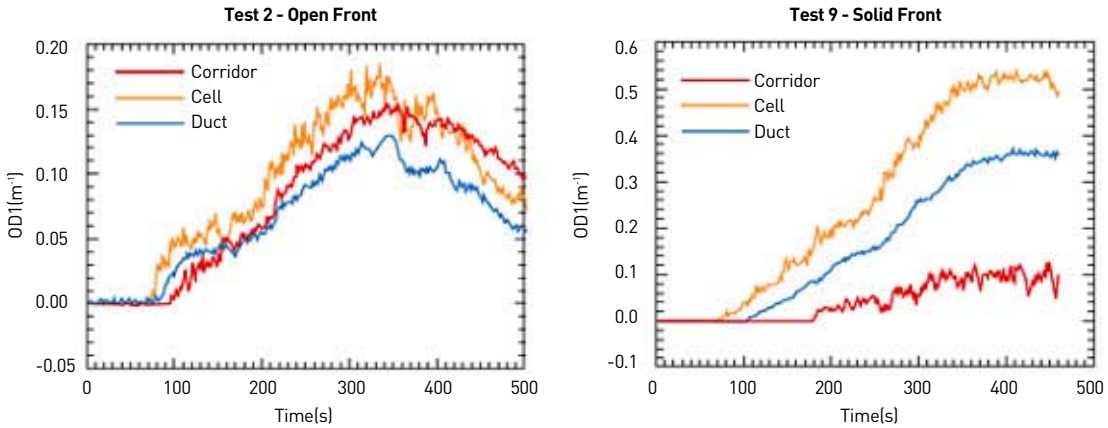
4. 관측사항 및 결론

실험 결과로부터 다음의 관측사항이 도출되었다.

훈소 화재와 매우 작은 불꽃 화재는 가장 큰 감지시간을 갖는다. 가장 주목할 만한 치명적 조건은 CO의 축적이 발

● 위험 관리 정보 1 ●

교도소 내 연기감지기 설치에 대하여



● 그림 2 ● 감방 내 광학농도점

생활 때이다. 훈소 화재에서 CO축적이 가장 컸다.(치명적 조건의 34%까지) 불꽃 화재 시 감방 내 온도가 가장 높아진다. 그러나 실험에서 최대 온도는 46°C였는데 이 온도는 감방 내 스프링클러를 작동시키기 위한 일반 온도보다 낮았다. 배기 덕트 내의 연기 감지는 모든 실험 시나리오에서 실용적인 선택임이 입증되었다.(배기 덕트가 정상 작동한다는 가정 하에)

창살문 감방은 철문의 감방보다 감방 밖 감지기 설치에 어려움이 덜한 것으로 나타났다. 창살문 감방의 경우 이번 실험에서 설정한 화재 시나리오에 근거하였을 때 감지기를 감방 밖(덕트 또는 복도)으로 옮기는 것이 감방 실내가 치명적 조건에 도달할 때까지 감지시간을 연장시키지 않는다고 결론내릴 수 있었다. 그러나 감방 내에서 배기 덕트로 감지기를 옮기려면 덕트가 막히지 않고 잘 작동할 수 있도록 효과적인 조치를 요구한다. 구체적으로 다음 사항들이 창살문 감방에 적용될 수 있다.

감지기는 감방 안에서 감방 밖 복도로 옮겨 설치될 수 있

다. 복도 내 공기의 흐름은 복도에 설치된 감지기의 작동에 영향을 미친다. 실험 감방의 아래에 설치한 감지기는 감방의 윗부분에 설치한 감지기보다 대체적으로 더 빨리 작동한다. 복도 내 감지기의 위치는 각 감방 사이의 기둥이나 감방 앞에 정면으로 설치한다. 기둥을 하나씩 걸러(두개의 감방마다) 감지기를 설치하는 것은 치명적 조건이 되기 전에 감지기의 작동을 장담할 수 없다. 감방 내 배기 덕트에서 감지된 광학농도 수치는 감지기를 덕트 내에 설치했을 때 감방 실내가 치명적 조건에 도달하기 전에 감지기가 작동할 수 있다는 것을 보여준다.

이러한 적용을 위해서는 사용중인 덕트 감지기의 신뢰성에 더하여 배기설비의 신뢰성이 요구된다. 수감자가 배기구를 막는 것을 방지하기 위한 조치가 취해져야 한다. 오보를 줄이고 신뢰성 있는 작동을 위한 유지 및 보수계획이 세워져야 한다.

철문 감방은 창살문 감방보다 감방 밖 감지에 더 큰 어려움이 있음이 증명되었다. 또한 철문 감방은 감방 내 감지



시간이 더 빨랐다. 철문 감방의 경우 감지기를 밖으로 옮기는 것은 본 연구의 모든 화재시나리오에서 감방 실내가 치명적 조건에 도달하기 전 감지되는 것을 보장할 수 없었다.(복도의 감지기는 15분 테스트에서 매우 작은 불꽃 화재에 응답하지 못했다.)

그러나 감방 내 배기 덕트에서 감지된 광학농도 수치는 감지기를 덕트 내에 설치했을 때 덕트가 정상 작동한다는 가정 하에 감방 실내가 치명적 조건에 도달하기 전에 감지기가 작동할 수 있다는 것을 보여주었다. 구체적으로 다음 사항들이 철문 감방에 적용될 수 있다.

감지기는 감방 내에서 배기덕트로 옮길 수 있다. 단, 창살 문 감방의 경우와 같은 조치가 요구된다. 매우 작은 불꽃 화재에 복도의 감지기가 작동하지 않는 것을 고려한다면 현재의 철문 감방의 경우는 감지기를 감방 밖 복도로 옮길 수 없다. 각 감방 문쪽 벽 상단에 배기구를 통하면 배기구 직근에 설치된 감지기는 감방 실내가 치명적 조건에 도달하기 전 충분한 시간에 연기를 감지할 수 있을 것이

다. 이것은 감방 문쪽의 정상적 공기 배출이 있는 철문 감방의 외부 복도 감지기의 실험결과로부터 얻은 결론이다. 많은 화재 시나리오에서 감방 내 온도가 높아질수록 가스가 팽창하여 연기를 복도로 이동시켰다. 배기구 및 배기구로부터 감지기 위치의 정확한 설계사항이 실험에 의해 평가될 필요가 있다. 복도 내 천정 팬의 유무 역시 고려되어야 할 사항이다. (☹)