화재 시뮬레이션 프로그램을 이용한 냉동창고의 화재 해석 Fire Analysis of the Refrigeration Warehouse by Fire Simulation Program

이의철* · 이병곤** · 정길순***

Lee, Eui Cheol · Lee, Byung Kon · Jung, Gil Soon

Abstract

Forty people died in the fire of refrigeration warehouse at January 7th, 2008. In this thesis, Computer-simulation has been performed to understand the cause of deaths and fire diffusion processes of the refrigeration warehouse fire by using the FDS program. Also, the effect of sprinkler system was examined hypothetically. The results showed that smoke flew along the corridor and reversed after crash into the end of corridor, so the mechanical and electrical room were filled with smoke earlier than other rooms. CO density of corridor exceeded to the safety upper value, and it could be a cause of 8 persons died in corridor. CO density of mechanical room increased rapidly up to safety lower value from the beginning of fire and the CO density of adjacent corridor was higher than the mechanical room. It presumed the cause of 20 persons died in mechanical room, and they could not escape to adjacent corridor. The density of CO₂ and O₂ were lower than the limit of safety value, its could not be an immediate causes of death. The effect of sprinkler was not much because water droplets descended the flame and smoke to the height of breath.

Key words : Fire, Refrigeration warehouse, Smoke, FDS, Sprinkler

요 지

2008년 1월 7일 발생한 냉동창고 화재에서 40명이 사망하였다. 이러한 초대형 화재의 초기 확산과정과 화재 재현을 통한 인명피해의 원인을 파악하기 위하여 FDS 프로그램을 이용하여 시뮬레이션하였다. 화재시나리오와 화재해석조건을 입력하여 화재를 해석하고, 사망원인을 추정하였다 또한, 가상적으로 스프링클러가 작동했을 때의 변화를 검토하였다. 그 결과 냉동실 13에서 화재가 발생하여 나온 연기는 통로를 따라 유동하며 통로 끝에 부딪힌 후에는 역류하여 통로 끝에 인접한 기계실과 전기실에 연기가 먼저 유입된다. 통로의 CO농도가 안전 상한값 이상으로 수분 이내 무의식으로 사망하였을 것으로 추정된다. 기계실과 전기실은 화재발생 초기부터 CO농도가 급격히 상승하여 안전하한값까지 증가하며, 통로의 CO농도가 더 높아 대피할 수 없어서 질식 사망하였을 것으로 추정된다. 사망자 실과 통로들의 연기온도가 안전상한값을, 고온의 열로 사망할 수 있으며, 2도 화상 온도 100°C를 훨씬 상회하여 상당한 화상을 입었을 것으로 추정된다. CO₂농도와 O₂농도는 안전 한계값 이하로서 직접적인 사망 원인으로 볼 수 없다. 스프링클러가 1개씩 작동한 경우, 천정의 연기온도, CO, CO₂, O₂농도는 급격히 감소하나, 인체 호흡높이에서는 화염과 연기가 아래로 하강하여 크게 감소하지 않아서, 스프링클러의 효과가 크지 않다.

핵심용어 : 화재, 냉동창고, 연기, FDS, 스프링클러

1. 서 론

최근 급격한 도시화로 물류창고나 냉동창고가 도시 주변에 집중되고 대형화하는 추세이다. 냉동창고는 화재의 위험성이 적지만 냉동창고 내부의 칸막이 재료로 대부분 샌드위치 패널을 사용하며 내부 마감재인 단열재인 우레탄폼은 화재 발생시 짧은 시간에 열 또는 연기로 인하여 인명 및 재산피해

를 증가시키는 원인이 되고 있다(정태호 등, 2008).

2008년 1월 경기도 ○○지역 냉동창고에서 화재가 발생하였다. 화재현장은 물류 및 냉동창고 건설현장으로, 철근 콘크리트조와 철골조이며 내부는 샌드위치패널을 사용하였다. 화재가 발생한 작업장은 반 지하에 위치해 유독가스가 밖으로 배출되기 어려운 구조로서 구조작업이 지연되어 사망 40명, 부상 10명과 71억원의 재산피해가 발생하였다.

*정회원. 충북대학교 안전공학과 석사(E-mail: dale2@hanmail.net)
Member. Chungbuk National University, Dept. of Safety Engineering

**정회원. 충북대학교 안전공학과 명예교수
Member. Chungbuk National University, Dept. of Safety Engineering

***교신저자. 정회원. 충북대학교 안전공학과 박사(Tel: +82-10-3463-3838, Fax: +82-43-261-2457, E-mail: jks712@naver.com)
Corresponding Author. Member. Chungbuk National University, Dept. of Safety Engineering

Fig. 1. Location of fatalities of the refrigeration warehouse

소방방재청에서는 화재원인을 유증기가 확산된 상태에서 용접불티에 의한 폭발사고로 추정하였다(정태호 등, 2008). Fig. 1은 화재당시 상황도이다(그림에서 사람 표시는 사망자를 표시한다.).

본 연구에서는 냉동창고 화재에 대하여 CFD Model을 사용한 화재시뮬레이션 프로그램을 이용하여 화염과 연기유동을 해석하여 화재를 재현하고 이를 통해, 어떻게 많은 인명피해가 발생하였는지 원인을 파악하여 추후 사고를 미연에 방지하는 것이다. 또한, 가상적으로 스프링클러가 작동했다면 어떤 변화가 있는지를 검토하였다.

2. 화재 시뮬레이션 해석

2.1 화재 시뮬레이션과 FDS 프로그램

화재 시뮬레이션이란 실제로 화재를 발생하지 않고 화재의 성상을 예측하는 기술로서 화재 시뮬레이션은 성능위주 소방설계(Performance Based Design)에 많이 이용하고 있다. 본 연구에서는 시간적인 변화와 함께 공간적인 변화를 해석하기 위하여 전산유체역학을 이용하여 물리적 현상을 미분형태의 보존방정식들을 해석함으로써 실제의 화재현상과 유사하게 예측할 수 있는 FDS(Fire Dynamic Simulator)를 이용하여 지배방정식들을 해석하였다(NIST, 2008).

2.2 화재해석의 계산 영역 모델링

화재해석에 이용된 냉동창고는 계산의 편의상 부분적으로 Fig. 2와 같이 계산 영역을 변경하여 단순화하였다. 냉동실 11과 통로 1 동쪽 벽에는 수직개구부가 있고, 통로 2 남쪽 벽은 주차장 출입구로서 절반은 열려있는 것으로 간주하여 점선으로 표시하였다. 기호 밑이나 옆의 괄호안 숫자는 사망자 수이다.

2.3 화재 시나리오와 해석조건 입력

냉동창고 지하층 내부는 두께 10 cm의 우레탄폼과 샌드위

Fig. 2. Modeling of computational region

치패널로 덮여 있었고, 사고 현장의 작업은 시너와 우레탄을 혼합발포하여 시공하므로 유증기가 발생하였다. 이 유증기에 불꽃이 튀며 우레탄폼으로 불길의 급속히 확산되었다는 2011년 소방방재청 자료에 따라 화원은 냉동실 및 통로의 우레탄폼과 샌드위치패널로 상정하였다.

화재 시나리오는 Fig. 2의 냉동실 13 중앙 바닥에서 시작하여 화염과 연기가 천정으로 상승한 후, 유증기를 통하여 매우 빠른 속도로 인접한 냉동실과 통로의 천정을 통하여 순차적으로 매우 빠르게 확산하는 것으로 해석하였다. 각 냉동실과 통로의 천정 화염과 연기는 주위 벽으로 하향하여 실하부로 확산된다.

본 연구에서는 초기의 화재 확산과 사망 원인 규명으로, 화재는 천정에서만 연소하고, 각 실과 통로는 천정을 통하여 화재가 확산되는 것으로 상정하였다. 냉동창고 화재는 몇 차례의 폭발과 함께 유증기로 인한 급속한 확산으로, 화염확산 속도는 매우 빠른 예혼합화염속도를 기준으로 하여, 0.1 m/s로 결정하였다(NIST, 2008). Table 1은 각 실별 천정의 총발열량과 화염전파시간으로, 총발열량은 면적에 폴리스티렌의 방출열유속 65 kw/m²을 곱한 값이다. 화염전파는 천정의 가장 긴 길이인 대각선 방향으로 전파되는 것으로 간주하여, 표의 화염전파시간은 대각선 길이를 화염확산속도 0.1 m/s로 나눈 값이다. 최초 화재가 발생한 냉동실 13은 실 중앙에서 화재가 발생한 것으로 간주하여 대각선 길이의 반을 고려하여 정하였다.

2.4 화재시 인체에 영향을 주는 인자에 대한 기준

건물내 화재의 위험성은 대부분 연기에 의한 질식사로서, 질식사를 유발하는 원인은 화재발생 초기에 연기에 휩싸여 대피공간을 확보하지 못하여 유독가스에 노출되어 의식불명 상태에 도달하고, 장시간 유독가스 노출이 가장 큰 원인으로 판명되고 있다. Table 2의 성능안전기준은 건축물에서의 인명안전 성능기준의 범위를 나타낸다(NFPA, 2009)(NFPA Handbook, 2009).

또한, 화재공학원론(오규형 등, 2008)에서는 혈액중 O₂, CO, CO₂농도에 따른 인체의 영향을 제시하고 있다.

Table 1. Total heat of reaction and time of flame propagation in each room

	가로 (m)	×	세로 (m)	대각선 (m)	면적 (m ²)	총발열량 (kw)	화염전파 시간(s)	화재발생 후 화염전파시간(s)(min)
냉동실 13	12.4	×	23.6	26.6	293	19045	133	0-133 (0-2)
통로 5	63.6	×	10.3	64.4	655	42580	644	133-777(2-13)
통로 6	106.4	×	10.3	106.9	1096	71240	1069	777-1846(13-31)
통로 4	13.3	×	48.2	50	641	41665	500	777-1277(13-21)
통로 3	76.9	×	12.3	77.9	946	61490	779	1277-2056(21-34)
기계실	12.4	×	32.6	34.9	404	26260	349	2112-2461(35-41)
냉동실3	28.5	×	26.7	39.1	761	49465	391	1277-1618(21-27)
냉동실4	20.9	×	26.7	33.9	558	36272	339	1618-1957(27-33)
사무실	22.8	×	16.3	28.0	374	24310	280	1400-1680(23-28)
냉동실2021	11.4	×	21.5	24.3	245	15925	243	1590-1833(27-31)
전기실	12.4	×	21.5	24.8	267	17329	248	2107-2355(35-39)
통로1	13.3	×	32.6	35.2	434	28210	352	1400-1752(23-29)
냉동실14	12.4	×	26.7	29.4	331	21520	294	236-530(4-9)
냉동실12	28.4	×	23.6	36.9	670	43565	369	133-502(2-8)
냉동실1516	51.5	×	26.7	57.7	1367	88858	577	298-875(5-15)
냉동실11	22.8	×	23.6	32.8	538	34970	328	502-830(8-14)
냉동실910	30.3	×	23.6	38.4	715	46480	384	830-1214(14-20)
냉동실2	17.0	×	26.7	31.7	454	29504	317	910-1277(15-21)
냉동실8	28.5	×	23.6	37	672	43720	370	1214-1584(20-26)
냉동실7	20.9	×	23.6	31.5	493	32045	315	1584-1899(26-32)
냉동실6	26.7	×	23.6	35.6	630	40958	356	1899-2255(32-38)
냉동실5	26.7	×	26.7	37.8	713	45338	378	1957-2335(33-39)
냉동실1789	22.8	×	21.5	31.3	490	31863	313	1277-1590(21-27)
냉동실2324	28.4	×	32.6	43.2	926	114335	432	1680-2112(28-35)
냉동실22	17	×	21.5	27.4	365	23758	274	1833-2107(31-35)
냉동실25	22.8	×	16.3	28.0	374	24310	281	1680-1960(28-33)
통로 2	93.1	×	12.3	93.9	1145	74433	939	1277-2216(21-37)
냉동실1	93.1	×	21.5	95.5	2002	130107	955	1152-2107(19-35)

Table 2. Performance Criteria

		lower limit	upper limit
Therma effect	Upper layer smoke temperature (°C)	80	200
Toxic effect	CO (ppm)	1400	1700
	O ₂ (%)	10	15
	CO ₂ (%)	5	6

3. 화재해석 결과

3.1 연기 유동

Fig. 3은 연기유동을 시간별로 도시한 것이다. 시간대 별로 중요상황을 살펴보면, (a) 화재가 발생하기 시작시점(냉동실 13)이고, (e) 통로 3을 거쳐 기계실과 전기실에 연기가 유입된다. 통로 2로 들어간 연기는 남쪽 벽의 출입구로 연기가 유출된다. 사망자가 가장 많이 발생한 기계실의 화재시간은 35~41분이었고, 화재 초기인 약 8분부터 연기가 유입된다. (f) 전기실과 기계실에 인접한 냉동실 22~24에 연기가 유입되고, 냉동실 25에 연기가 차는 것을 볼 수 있다.

통로6의 연기는 화재발생실인 냉동실 13에서 가장 멀리 떨어진 냉동실 6과 냉동실 5의 출입문으로 연기가 먼저 들어가며 냉동실 7 → 냉동실 4, 냉동실 8 → 냉동실 3으로 유입한다. (h) 약 20분 후에는 완전한 흑색으로 구분이 되지 않는다.

3.2 연기온도의 변화

Fig. 4는 화재 발생실인 냉동실 13에서 통로 1~6까지 연기가 유동할 때의 온도변화이다. 인체호흡높이의 최고온도는 통로 2를 제외하면, 약 200°C 이상을 보인다. 이는 안전상한값 200°C를 상회하여 열에 의한 고온으로 인하여 사망했을 가능성이 있다. 또한, 2도 화상 최고온도를 훨씬 상회하여 상당한 화상을 입었을 것이다.

Fig. 5는 사망자가 발생한 실의 온도변화로서 기계실 및 전기실을 제외하면, 고온의 열로 사망에 이를 수 있다. 기계실 및 전기실의 온도가 상대적으로 낮은 것은 화재초기 연기 유입으로 완전연소에 방해가 되는 때문으로 생각된다. 26~35분 사이에는 연기온도 안전하한값 80°C를 상회하여 연기 질식과 함께 연기온도도 사망에 영향을 주었을 것이다.

Fig. 3. Smoke flow in the refrigeration warehouse fire

Fig. 4. Temperature variation along the corridor

3.3 연기농도의 변화

Fig. 6은 화재 발생실인 냉동실 13과 통로들의 CO농도변화로서, Fig. 6(a)에서는 통로 3 끝에 있는 기계실과 전기실의 많은 인명 피해 발생에 영향을 미쳤을 것으로 추정된다. Fig. 6(b)에서는 화재 초기부터 급속히 증가하여 CO농도 안전

상한값 1,700 ppm 이상을 보였다. 이러한 CO농도가 높은 연기온도와 함께, 통로에서 무려 6명이 사망한 이유일 것이다.

Fig. 7은 사망자가 발생한 실의 CO농도변화로서, 기계실과 전기실을 제외하면, 전체 실에서 CO농도 안전상한값 이상을 갖는다. 또한, 전체실에서, CO농도 하한값 600 ppm을 훨씬

Fig. 5. Temperature variation of refrigeration room which is found the dead

Fig. 6. CO Variation along the corridor

Fig. 7. CO variation of the refrigeration room which is found the dead

상회하여, CO에 의한 질식으로 수 분 이내에 사망하였을 것이다. 사망자가 가장 많이 발생한 기계실에서 17분 이상 600 ppm 이상으로 상승하여 CO에 의한 질식이 사망의 원인으로 추정할 수 있다.

Fig. 8은 화재 발생실인 냉동실 13과 통로들의 CO₂농도변화로서, 전체 통로의 인체호흡높이에서 CO₂농도 안전상한값 6% 이하로서 안전한계값 수준이다. 화재공학원론(오규형 등, 2008)에 의하면, 몽롱함과 독성 증세에 해당되어 사망의 직접적인 원인이라고 볼 수는 없다.

화재 시뮬레이션 프로그램을 이용한 냉동창고의 화재 해석

Fig. 9는 사망자가 발생한 실의 CO₂농도변화로서, 천정에서는 기계실과 전기실을 제외하면, CO₂는 안전한계값을 유지한다. 인체호흡높이에서는 기계실과 전기실을 제외하면, 안전한계값을 유지하며, 화재공학원론(오규형 등, 2008)에서의 몽롱함과 독성 증세에 해당된다. 기계실과 전기실은 인체호흡높이에서 4%로 유지되어 전체 사망자 실에서 CO₂는 직접적인 사망 원인으로 볼 수 없다.

Fig. 10은 화재발생실인 냉동실 13과 통로들의 O₂농도변화로서, 통로들에서의 인체호흡높이 산소농도는 안전한하한값

Fig. 8. CO₂ variation along the corridor

Fig. 9. CO₂ variation of the refrigeration room which is found the dead

Fig. 10. O₂ variation along the corridor

10%이하의 농도이며, 호흡하기 위험한 상태이다. 화재공학원론(오규형 등, 2008)의 기준에 의하면, 통로들에서는 산소부족으로 마비와 의식불명의 위험한 상태를 초래하여 사망에 이를 수 있을 것이다.

Fig. 11은 사망자가 발생한 곳의 O₂농도변화로서, O₂농도는 연기온도가 최대값일 때에 수직 감소하여 최소값을 보인 후에 일정한 값으로 회복한다. 화재공학원론(오규형 등, 2008)의 기준에 의하면, 냉동실 3과 냉동실 1에서는 의식불명에 해당되고, 나머지 실에서는 마스크용, 구토, 신체마비 상태를

야기할 수 있다.

4. 스프링클러가 작동시 화재해석 결과

4.1 스프링클러 제원

실제화재에서는 스프링클러가 작동하지 않았지만, 화재해석에 스프링클러를 입력하여 해석하였다. 스프링클러헤드는 조기반응형, RTI는 50, 유량은 80 L/min, 액적속도는 5 m/s, 작동온도는 72°C이다. 스프링클러헤드는 각 실과 통로의

Fig. 11. O₂ variation of the refrigeration room which is found the dead

7.5 m 높이에 1개씩 설치하였다.

4.2 스프링클러 작동시 연기온도의 변화

Fig. 12는 스프링클러가 작동했을 때 화재 발생실인 냉동실 13과 통로들의 온도변화로서, 실제화재시(Fig. 4)와 비교하면, 천정온도는 스프링클러가 1개라도 작동하였을 때 최고온도가 1/2~1/3 정도로 급격히 감소하지만, 인체호흡높이인 1.2 m 높이에서는 온도는 크게 감소하지 않고 안전상한값

200°C를 상회하여 위험한 상태로서, 스프링클러의 효과가 별로 없다. 이는 물방울의 침투력이 낮아 침투하지 못하고, 천정의 화염을 밑으로 하강시키는 때문이다.

Fig. 13은 스프링클러가 작동했을 때의 사망자가 발생한 실의 온도변화로서, 실제화재시(Fig. 5)와 비교하면 천정온도는 1/2~1/5 정도로 급격히 감소하나 인체호흡높이에서는 화염과 연기의 강하로 인하여 감소폭이 작았다. 냉동실 3과 사무실을 제외하면, 인체호흡높이에서 100°C 이하이며, 가장 많은

Fig. 12. Temperature variation along the corridor under sprinkler operation

Fig. 13. Temperature variation of the refrigeration room which is found the dead under sprinkler operation

사망자가 발생한 기계실이 70°C 이하로서, 연기온도 안전하한값 80°C보다 낮아서 열에 의한 위험에서는 벗어날 수 있다고 추정된다.

4.3 스프링클러 작동시 연기농도의 변화

Fig. 14는 스프링클러 작동시 냉동실 13과 통로들의 CO 농도변화로서, 실제화재시(Fig. 6)와 비교하면, 천정에서는 1/2~1/3 정도로 감소하였으나, 1,400~2,000 ppm으로 CO농도 안전기준값을 초과하고, 인체호흡높이의 농도는 약간 감소하여 안전기준값에 근접한 값을 보인다. 화재공학원론(오규형 등,

2008)의 기준으로 하면, 전체 통로에서 위험한 상태이다. 따라서, 각 통로에 스프링클러 1개가 작동하여도 안전하지 않다.

Fig. 15은 스프링클러 작동시 사망자가 발생한 실의 CO농도변화로서, 실제화재시(Fig. 7)와 비교하면, 천정에서는 1/2~1/3 정도 감소하였고, 인체호흡높이에서는 소폭으로 감소하였다. 전체 실에서, CO농도 안전한계값을 보인다. 화재공학원론(오규형 등, 2008)의 기준으로 하면, 전체 사망자실에서 위험한 상태이다. 따라서, 각 실에 스프링클러 1개가 작동하여도 CO에 의한 질식 위험이 있다.

Fig. 16은 스프링클러 작동시 냉동실 13과 통로들의 CO₂

Fig. 14. CO variation along the corridor under sprinkler operation

Fig. 15. CO variation of the refrigeration room which is found the dead under sprinkler operation

Fig. 16. CO₂ variation along the corridor under sprinkler operation

농도변화로써, 실제화재시(Fig. 8)와 비교하면, 전체 통로에서 스프링클러 작동시는 안전하한값인 이하로 감소하였고, 인체 호흡높이에서는 대부분 하한값 이하로 위험한 상태라고 볼 수 없다.

Fig. 17은 스프링클러 작동시 사망자가 발생한 실의 CO₂ 농도변화로써, 실제화재시(Fig. 9)와 비교하면, 천정에서는 스프링클러의 영향으로 5% 이하로 감소한다. 인체호흡높이에서도 4% 이하로 유지되어, CO₂농도 안전하한값 이하가 되어 질식의 위험은 없다.

Fig. 18은 스프링클러 작동시 냉동실 13과 통로들의 O₂

농도변화이다. 실제화재시(Fig. 10)와 비교하면, 천정에서 냉동실 13은 5%로 증가하였고, 인체호흡높이에서는 7%로 급격히 감소한 후 회복되었음. O₂농도는 안전하한값 이하로 감소하였다. 스프링클러가 작동하여도 통로에서의 O₂농도는 화재시와 거의 유사한 값과 변화를 보여서, 효과가 크지 않았다.

Fig. 19는 스프링클러 작동시 사망자가 발생한 실의 O₂ 농도변화로써, 실제화재시(Fig. 11)와 비교하면, 냉동실 3은 천정에서는 약간 증가하였고, 인체호흡높이에서는 감소한 후 회복되었으며, 다른 냉동실에서는 거의 유사한 값을 나타냈다. 이러한 산소농도는, O₂농도 안전하한값 이하로 감소하여, 상

Fig. 17. CO₂ variation of the refrigeration room which is found the dead under sprinkler operation

Fig. 18. O₂ variation along the corridor under sprinkler operation

Fig. 19. O₂ variation of the refrigeration room which is found the dead under sprinkler operation

한값 10%에 근접한 농도이다. 스프링클러가 작동하여도 사망자 실에서의 O_2 농도는 화재시와 거의 유사한 값과 변화를 보여서, 효과가 크지 않았다.

5. 결 론

2008년 1월 냉동창고에서 발생한 화재의 초기 확산과정과 화재 재현을 통한 인명피해의 원인을 파악하기 위하여 FDS 프로그램을 이용하여 시뮬레이션하였다. 화재 시나리오와 화재해석조건을 입력하여 화재를 해석하고, 사망원인을 추정하였다 또한, 가상적으로 스프링클러가 작동했을 때의 변화를 검토하였다. 본 연구의 화재 시뮬레이션 조건에서 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 냉동실 13에서 화재가 발생하여 나온 연기는 화염이 전파되기 이전에 통로를 따라 유동하며 통로 끝에 부딪힌 후에는 역류한다. 이 연기유동과 역류로 통로 끝에 인접한 실에 연기가 먼저 유입되어, 통로 3에서는 기계실과 전기실에 연기가 먼저 유입된다.
- 2) 기계실 및 전기실을 제외한 사망자 실과 전체 통로의 인체호흡높이 CO 농도가 안전상한값 이상으로 증가하여 수분 이내 무의식으로 사망하였을 것으로 추정된다. 기계실과 전기실은 화재발생 초기부터 CO 농도가 급격히 상승하여 안전상한값까지 증가하며, 통로의 CO 농도가 더 높아 대피할 수 없어서 CO 에 의한 질식으로 사망하였을 것으로 추정된다.
- 3) 기계실 및 전기실을 제외한 전체 사망자 실과 통로들의 인체호흡높이 연기온도가 안전상한값 $200^{\circ}C$ 를 상회하여, 고온의 열로 사망할 수 있으며, 2도 화상온도 $100^{\circ}C$ 를 훨씬 상회하여 상당한 화상을 입었을 것으로 추정된다.
- 4) CO_2 농도변화는 통로들과 사망자 실의 인체호흡높이 CO_2 농도는 안전상한값인 6% 이하로서 CO_2 농도는 직접적인 사망 원인으로 볼 수 없다.

- 5) 통로들의 인체호흡높이 O_2 농도는 안전상한값 10% 이하로서, 산소부족으로 인한 마비와 의식불명의 위험한 상태이다. 사망자 실은 안전상한값 15% 이하로 다소 호흡하기 어렵고 신체마비 상태로서, 직접적인 사망 원인으로 볼 수 없다.
- 6) 스프링클러가 1개씩 작동한 경우, 천정연기온도는 급격히 감소하나 인체호흡높이에서는 화염과 연기가 아래로 하강하여 크게 감소하지 않는다. 그러나, 가장 많은 사망자가 발생한 기계실은 열에 의한 위험에서 벗어날 수 있다. CO , CO_2 , O_2 농도도 천정에서는 급격히 감소하나, 인체호흡높이에서 화재시와 유사한 상태로 스프링클러의 효과가 크지 않다.

References

- Jung, T.H., Park, S.H., and Kim, H.G. (2008) A Study on Enhancing Institutionlization on the Fire Analysis of the Warehouse at Icheon City, *Korea Institute of Fire Science and Engineering*, pp. 80-84.
- NFPA (2009) *Combustion Products and Their effect on Life Safety*, Fire Protection Handbook.
- NFPA Handbook (2009) *Human Factors Considerations*, Introduction to Performance-Based Fire Safety.
- NIST (2008a) FDS (Fire Dynamics Simulator) User's Guide (Version 5) and NIST (2008) FDS (Fire Dynamics Simulator) Technical Reference Guide (Version 5).
- NIST (2008b) CFAST (Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport) User's Guide (Version 6).
- Oh, G.H. et al. (2008) *Principles of Fire Behavior*, pp 180-183.

© 논문접수일 : 2012년 09월 17일
 © 심사의뢰일 : 2012년 09월 17일
 © 심사완료일 : 2012년 10월 04일