

물류센터의 소방시설과 방재대책



박현식 | 한국방재엔지니어링 이사

1. 머리말

오늘날 경제규모가 커지면서 물류비용을 줄이는 프로세스(process)가 기업에 있어 중요한 역할을 함에 따라 자연스럽게 물류창고는 대형화되고 다품종을 취급하는 실정이다. 따라서 창고공간 사용의 극대화를 위하여 층고가 높고 자동화된 랙크식 창고가 요즘 물류창고의 주류를 이루고 있다. 이와 관련하여 본 고는 랙크식 창고를 중심으로, 물류센터의 방재적 특성과 화재원인을 분석하고 소방시설설계 사례와 시뮬레이션을 통한 방재대책을 제시하고자 한다.

2. 물류센터의 방재상 특성

물류센터의 특성상 용도는 창고이지만, 장기간 물품을 보관·관리하는 것이 아니라 다품종의 대량 물품이 빠른 시간에 입·출고가 이루어져야 한다. 따라서 물류센터 창고는 첫째로 층고가 높은 대공간이어야 하며, 둘째로 창고 내에서 운송기(이송크레인, 지게차 등)가 운행되어야 한다. 셋째는 많은 물량을 취급해야 하므로 팔레트(Pallet)화되어 고밀도로 적재되고 운반관리가 용이하도록 공간이 구성되어야 한다.

대규모 물류센터 화재의 공통점을 정리하면 다음과 같다.

- 시설관리가 아무리 잘 되어있는 창고라도 발화요인은 항상 존재한다.
- 모든 방재활동이 수행되었음에도 연소확대 저지를 못하여 대형화재로 확산된다.
- 창고건물의 내부에서 진화작업은 극히 어렵고 위험하다.
- 창고 관계자가 위험물질과 일반물질을 구별하여 저장하지 않고, 취급물질의 위험성 특성을 모르는 경우가 많다.

- 층고가 높아 차동식 등의 열감지기로는 화재 발생 감지가 어렵다. 이러한 특성 때문에 화재가 발생되면 인명피해보다 재산피해가 크며 직접피해보다 사회에 미치는 경제적인 영향이 크다.
- 운송기 등으로 인하여 방화구획이 어렵다. 따라서 화재하중이 높고 화재지속시간이 물품에 따라 차이가 있지만 팔레트 포장재료 등이 가연재이므로 표면화재가 빠르게 진행된다. 또한 이와 관련하여 초기화재 단계를 지나 심부화재로 발전되면 화재진압이 어렵고, 물품이 적재되어 있어 일반 스프링클러 설비에 의한 살수는 물의 침투가 어렵다.
- 장시간의 화재로 방화벽과 방화문이 고열에 의해 제 역할을 못하고 있다.

이상과 같이 대형창고 화재는 화재하중이 높고, 연소조건이 좋아 초기진압이 되지 않으면 장시간 심부화재로 발전된다.

3. 방재대책

가. 화재원인과 대책 : <표 1> 참조

나. 방재시설

창고의 방재시설 기준은 저장물질의 연소특성과 물질의 저장상태(저장량, 저장높이, 통로폭, 저장방법 등)를 고려하여야 한다. 따라서 조기경보, 조기진압을 위해서 감지기는 연기감지기(20m초과부분은 화염감지기, 광전식 분리형 감지기), 스프링클러설비는 창고의 모든 부분에서 유효하도록 설치가 필요하다.

팔레트 등은 화재하중 및 독성가스를 줄이기 위해 플라스틱제의 사용을 금하고, 연소확대 방지를 위하여 방화구획 설치하도록 하며, 저장물 양옆의 공간확보와 상방연소방지용 페이스 스프링클러헤드 설치가 필요하다. 또한 수순에 대비하여 저장물은 팔레트와 같은 받침대 위에 적재하여 바닥으로

<표 1> 화재원인과 대책

원 인	대 책
용접, 용단	<ul style="list-style-type: none"> • 통제관리, 별도작업장 마련실시 • 창고내 작업은 가연물과 10m이상 이격 또는 석면포로 가연물을 덮은 후 실시 • 작업완료 후 30분 이상 감시확인 • 소화기 비치 작업
차량(지게차, 운송차)	<ul style="list-style-type: none"> • 차량 정기정비 • 창고 외부에서 주차 수리 급유
난방, 전기시설	<ul style="list-style-type: none"> • 가연성 저장품과 접촉방지 • 조명등은 파손방지 보호망 • 스위치는 창고 밖에 설치
흡연	<ul style="list-style-type: none"> • 창고내 금연
나화취급	<ul style="list-style-type: none"> • 창고내 나화취급 엄금 • 창고내 대기소 등은 방화구획
방화(Arson)	<ul style="list-style-type: none"> • 경비철저 • 방화의 표적에서 제외되도록 안전관리
자연발화	<ul style="list-style-type: none"> • 물성에 따른 분리 보관 등 개선

특 집 | 물류센터의 방재대책

부터 10cm이상 이격시키고, 바닥은 일정구배를 가지도록 하여 배수설비를 한다.

스프링클러설비 설치상 필요한 것은 다음과 같다.

- 천장면 헤드의 감도를 낮추어 랙크 내 헤드보다 높은 온도에서 작동토록 권장한다.(천장헤드 개방으로 랙크 내 헤드가 개방되지 않아 효율적 소화가 어려움)
- 랙크 내 헤드는 직상부에 차폐판(Watershield)을 설치한다.(상부헤드 개방으로 인한 물의 냉각 영향으로 랙크 하부 헤드가 개방되지 않음)
- 수원은 90분 이상 급수 가능하여야 한다.
- 헤드배치는 높이, 저장위험물질에 따라 달라지고 있으나 공간개념에서 배수관을 종횡으로 배치하며 25ft(7.6m)를 초과하는 헤드의 방수량은 30gpm(113.6l/min)이상으로 한다.
- 랙크식 창고의 높이가 7.6m를 넘는 경우의 기준은 <표 2>와 같다.

다. 시뮬레이션에 의한 공학적 분석

(1) 시뮬레이션 목적

본 시뮬레이션은 스프링클러가 설치된 임의의 랙크식 물류창고를 대상으로 하여 일정크기의 화재시 발생할 수 있는 상황을 CFD기법을 이용하여 공학적으로 예측하는 것을 목표로 한다. 본 시뮬레이션

대상은 재실인원이 비교적 적은 창고이기 때문에 연기에 의한 영향보다는 연소물 간의 화재 전파와 스프링클러의 작동에 대하여 중점적으로 분석하기로 한다.

(2) 조건 및 가정

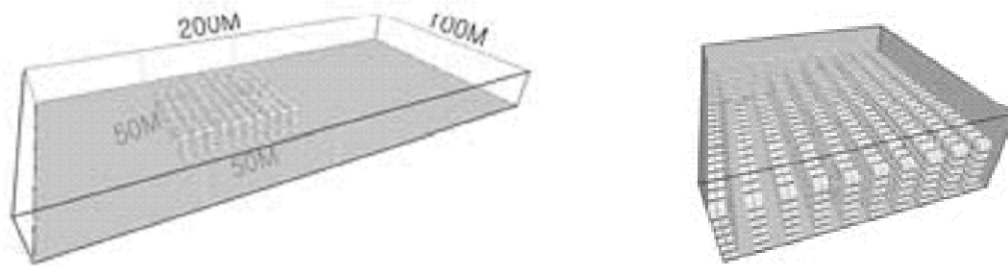
본 시뮬레이션 대상은 200m×100m의 넓이에 평균 높이 16m를 가지고 있는 대규모 자동화 랙크식 물류창고이다. 본 시뮬레이션에서는 계산영역을 전체공간으로 하지는 않고 일부 지역에서 연소물간의 화재의 전파 및 거동을 살피기 위해 일부분(50m×50m×16m)으로 한정하였다. 계산 영역은 연소물이 집중되어 있는 곳을 선택하였고 격자는 0.25m마다 설치하여 계산의 정확성을 높였으며, 계산영역 외부에 있는 연소물은 고려하지 않았다. 사용한 소프트웨어는 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 제작한 FDS 2.99이다.

본 시뮬레이션에서 설정된 가정은 다음과 같다.

- (가) 계산영역의 가연물은 1.8m×1m×1.5m의 크기로 일정하며 물질은 플라스틱으로 본다.
- (나) 계산은 발화원에 의해 이미 1개의 가연물 전면이 화재가 발생한 시점에서 시작하는 것으로 한다.

<표 2> 랙크식 창고의 높이가 7.6m를 넘는 경우 기준 자료

구 분	소방기술기준에 관한 규칙	Loss prevention data	
	Standard + in Rack	Large drop + in Rack	ESFR
저장높이허용	제한없음	9.2m	10.7m
헤드동시 사용개수	30개	20개	12개
헤드방출압	1kg/cm ²	1.7kg/cm ²	5.2kg/cm ²
설비형식	습식, 건식	습식, 건식	습식
헤드배치간격	2.5m	3m	3m
급수시간	20분	90분 이상	90분 이상



[그림 1] 시뮬레이션 대상 공간 및 계산 공간

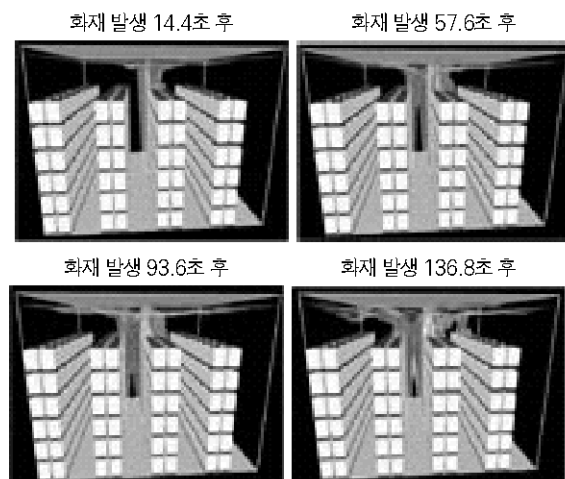
- (다) 초기 가연물은 성장속도 ultra fast급의 3MW의 화재로 가정하였으며 나머지 가연물은 일반적인 플라스틱으로 가정한다.
- (라) 선반은 철(steel) 제품이며, 각 선반의 크기는 2m×1m×2m로 한다.
- (마) [그림 1]에서 보듯이 가연물과 가연물 사이의 공간은 3m로 한다.
- (바) 바닥은 콘크리트로, 천장은 철 시트(steel sheet)로 가정한다.
- (사) 스프링클러는 바닥으로부터 각각 6m, 15m 지점에 설치하였는데 6m 지점에 설치한 것은 2.5m 간격으로 선반과 선반 사이에 설치하고 (TYPE A), 15m 지점에 설치한 것은 7m 간격으로 설치한다(TYPE B).
- (아) 스프링클러의 주요 특성치는 다음과 같다.

특성항목	스프링클러 헤드	
	TYPE A	TYPE B
설치 높이 (m)	6	15
K-factor (L/minBAR ^{0.5})	114	210
C-factor (m ^{0.5} s ^{0.5})	0.3	0.3
RTI (m ^{0.5} s ^{0.5})	200	100
작동 압력 (kgf/cm ²)	1.034214	1.034214
작동 온도 (°C)	74	68
헤드 타입	상향식	상향식

- (자) 화원은 11층 14열 제일 아래에 있는 가연물로 가정한다.
- (차) 열전대는 화재발생지점의 통로부분의 높이에 10m에 설치한다.
- (카) 해석 시간은 150초로 한다.
- (타) 화재의 전파는 대류, 전도, 복사로써 이루어진다.
- (파) 산소는 충분히 공급되는 것으로 가정한다.
- (하) 기타의 전문적인 가정은 본 기고에서는 생략하기로 한다.

(3) 시뮬레이션 결과 및 분석

(가) 화재의 성장 및 전파



[그림 2] 시간에 따른 화염의 발생과 전파

[그림 2] 는 화재의 성장과 전파를 보여준다.

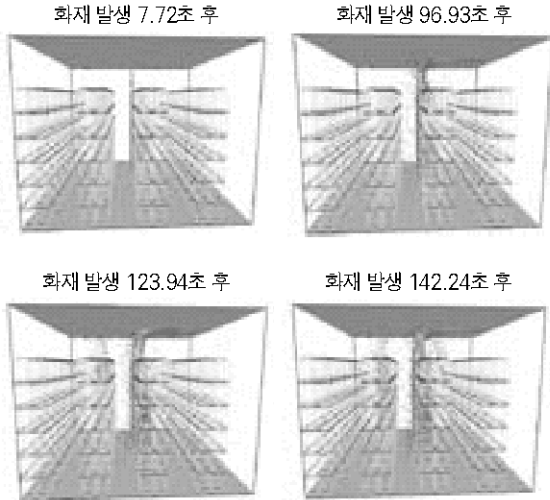
연기와 화염은 ultra fast급의 화재이기 때문에 급격히 성장하였다. 가정에서 밝혔듯이 화재 시작시점은 인큐베이션 타임(incubation time)없이 1개의 연소물 옆면 및 윗면 모든 부분에 화재가 발생한 시기이다. 따라서 화재발생 후 얼마 지나지 않아 화재는 급격히 성장하게 되고 윗 부분의 연소물들로 이동하게 된다. 이에 따라 연기의 발생량 또한 급격히 늘어난다. 화재가 일단 발생하면 처음에는 연소물 윗부분으로 화염이 발생하여 화재가 전파되게 된다. 그리고 복사에 의해 화재발생 57초 후에 전방의 연소물에서 연기가 피어오르기 시작하지만 아직 화염이 나타나지는 않는다.

본격적인 화염은 약 93초경에 발생한다. 이때부터 화재는 이 부분에서도 옆으로 확산하게 된다. 이때 처음 연소되었던 면은 위뿐만 아니라 옆면으로도 많이 전파된 상태이다. 이렇게 전파된 화재는 직접적인 화점에서의 전도보다는 천장류(ceiling jet)에 의해 세 번째 가연물군으로 전파되게 된다. 그림에서 보듯이 136초경에 세 번째 가연물군의 맨 위의 가연물에서 연기가 발생하는 것을 알 수 있다. 산소가 충분하다고 가정했기 때문에 그것에 의한 제약은 없는 상태이고 워낙 공간이 방대하기 때문에 연기층의 하강은 서서히 이루어진다.

(나) 스프링클러의 작동

[그림 3]은 스프링클러의 시간에 따른 작동에 대한 그림이다. 본 그림은 스프링클러의 작동특성과 불방울을 자세히 관찰하기 위하여 연소물을 아랫라 인만 남기고 생략했으며 연기 또한 생략하였다.

계산시간 동안 스프링클러는 총 4개가 작동하였다. 첫 번째는 7.72초 후에 6m 지점에 설치한 화재 직근의 스프링클러가 작동하였다. 이것으로써 화재



[그림 3] 스프링클러의 시간대별 작동상황

가 옆의 다른 연소물로 전파되는 것을 계속적으로 차단해 주는 것으로 나타났다.

두 번째는 96.93초에 화염에 바로 직상에 있는 스프링클러가 작동하였다.

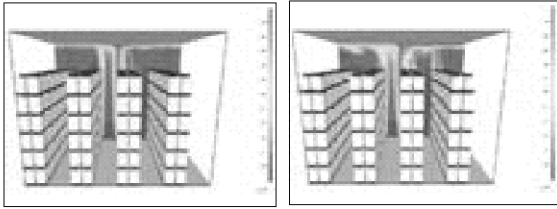
세 번째 스프링클러는 천장류에 의해 작동하였다. 이곳은 또한 전도에 의해 연소가 전파된 곳이어서 이곳에서 나온 화염에 의해 천장류가 다른 곳에 비해 좀더 상승한 것을 알 수 있다.

네 번째는 세 번째 연소물군의 윗 부분의 스프링클러가 작동하였다.

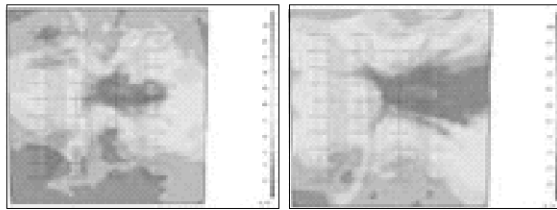
(다) 화재공간의 온도분포

[그림 4]는 화재 발생 72초와 144초 후의 수직면과 천장면의 온도분포를 나타낸다. 이때 가시화 최고온도는 1000℃로 설정하였다. 이것은 실제 최고온도가 1000℃가 되는 것을 의미하는 것이 아니다. 실제 최고 온도는 144초에 1802℃까지 올라가게 된다. 이처럼 빠른 시간에 높은 온도가 나오는 것은 초기 화재 설정과 화재 자체의 높은 발열율 또한 다른

화재발생 72초 후 수직면 온도분포 화재발생 144초 후 수직면 온도분포



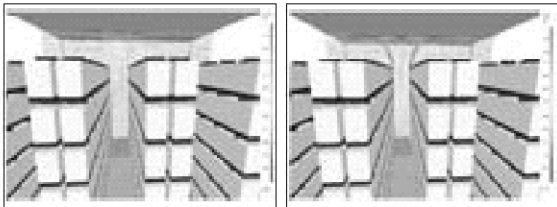
화재 발생 72초 후 천장 온도분포 화재발생 144초 후 천장 온도분포



[그림 4] 수직면 및 천장면의 온도분포

가연물들이 플라스틱이라는 특성 때문 등일 것이다. 천장면의 온도가 시간이 지남에 따라 점점 더 고온부가 커지는 것을 알 수 있다.

화재 발생 72초 후 수직면 온도분포 화재발생 144초 후 수직면 온도분포

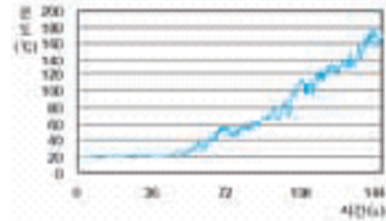


[그림 5] 속도(speed)의 흐름장

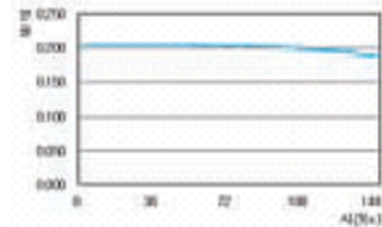
(라) 화재공간의 흐름장(flow vector) 분포

[그림 5]는 화재 발생 후 72초, 144초의 화재 발생 지역의 속도의 흐름장을 보여준다. 가시화 최대치는 10m/s로 설정하였다. 72초에는 상승기류가 114초에 비해 현저히 적은 것을 알 수 있다. 또한 천장면에서도 천장류가 114초일 때에는 더 강한 속도로 퍼져나가는 것을 알 수가 있다.

<표 3> 열전대에서의 온도 변화



<표 4> 열전대에서의 산소농도 변화



(마) 열전대에서의 온도변화, 산소농도 변화

<표 3>과 <표 4>는 각각 열전대에서 측정된 온도 변화와 산소농도의 분율변화를 보여주고 있다. 온도 변화는 천장면이나 연소물의 표면보다 매우 적게 나오는 것을 알 수 있다. 이것은 열전대 천장과 가연물로부터 일정거리가 떨어진 공간에 설치하여 천장면이나 가연물로부터 나오는 열을 비교적 적게 받았다는 것을 알 수가 있다. 또한 산소분율의 경우 처음에 21%에서 시작하여 조금 줄기는 하지만 가정에서 밝혔듯이 산소의 공급은 제한받지 않는 것으로 나타났다. 그러나 구획된 공간에서는 이러한 산소분율이 화재에 상당한 영향을 미치게 된다.

이상 위의 결과와 분석은 FDS를 통하여 얻을 수 있는 수많은 결과 중 극히 일부분에 지나지 않는다. 많은 중요한 사항들이 지면의 제약에 의해 누락되었음을 밝힌다.

특 집 | 물류센터의 방재대책

(4) 결론

시뮬레이션 결과로 볼 때 본 창고처럼 화재 하중이 높은 물건을 보관하는 곳은 앞 뒤 연소물간의 이격 거리를 충분히 하고 초기화재를 확실하게 하여 화재의 전파를 막아야 할 것이다. 특히 6m 부분에 설치한 스프링클러는 화재 직후 작동하여 뒷부분으로의 화재전파를 지연시켰으나 좁은 지역에 설치한 관계로 화재 확산에 큰 영향을 끼치지 못했으며 6m에 설치된 다른 일반형 스프링클러는 작동하지 않아 화재확산에 영향을 주지는 못했다. 따라서 화재 조기진압형(ESFR : Early Suppression Fast Response) 스프링클러가 필요하며, 15m에 설치한 것도 RTI나 방수량을 높여 화재를 적절하게 진압할 수 있게 하는 것이 중요하다.

CFD가 실제 상황과 100% 유사하기에는 수많은 변수들로 인해 불가능하나, 이처럼 화재 시나리오를 통한 공학적인 분석기법을 활용하여 화재에 대해 취약한 지점과 사항을 미리 파악하여 대처한다면 인명과 재산에 대한 큰 위협을 막을 수 있을 것이다.

4. 물류센터의 스프링클러 등 용량설계 사례(천안 물류센터)

건물규모	연면적 : 50,000m ²
	구 조 : 철골조
	층 수 : 지하1층, 지상2층
	용 도 : 물류창고, 사무실, 주차장

가. 설계기준

- (1) 수리적으로 가장 먼 방호구역의 살수기준으로 한다.
- (2) 소화설비할인을 위하여 보험개발원 소화설비 규정(한국화재보험협회의 소화설비할인점검 근거규정)에 의한다.

나. 수원 산출 : <표 5> 참조

다. 펌프 용량 계산

- (1) 양정 : <표 6>참조

- 배관구경은 소방법에 의한 스케줄 방식
- 스프링클러설비의 배관마찰손실이 옥내소화전설비의 배관마찰손실보다 크므로 스프링클러설비의 배관마찰손실로 계산함
- 배관마찰손실은 윌리엄 & 하젠 공식을 사용하여 계산하였음

<표 5> 수원 산출

구분	수원위치	형태	산출근거	적용기준	적용
1차 수원	지하1층 물탱크실	일반 수조	옥내소화전 30m ² (갑급) 옥외소화전 20m ² (병급) 스프링클러설비 150m ² (특급) 합계 230m ²	보험개발원 소화설비 규정	230m ³
2차수원			$230\text{m}^2 \times \frac{1}{2} = 115\text{m}^2$ (1차 수원과 별도로 확보)		115m ³
소화용수			연면적 ÷ 7500 = 7.33 ≈ 8 (8 × 20m ² = 160m ²)		160m ³

* 소화용수는 시상수도가 인입되지 않아 상수도 소화전의 대체설비로 설치함.

〈표 6〉 양정

구분	양정(m)	비고
실양정	18.2	지하1층 ~ 지상2층
방수압력	10	1.0kg/cm ² 이상
배관 및 부속류 마찰손실	40	
계	68.2 ≈ 70	(여유율 가산)

$$P(kW) = \frac{0.163 \times Q \times H}{E} \times K$$

$$= \frac{0.163 \times 0.06 \times 70}{0.4} \times 1.1 = 1.9kW$$

(3) 실제 펌프 선정 : 〈표 7〉 참조

$$\Delta P = 6.174 \times 10.5 \times \frac{Q^{1.85}}{C^{1.85} \times D^{4.87}} \times L$$

ΔP : 배관마찰손실(kg/cm²)
 Q : 배관 유량(l/pm) C : 윌리암 & 하젠상수
 D : 배관 내경(mm) L : 배관 길이(m)

(2) 설계상의 소화 주펌프 전동기 용량

- 토출량 산정
 - 옥내소화전설비(갑급)
 - 5개 × 250 l/min = 1,250 l/min
 - 스프링클러설비(특급) : 2,400 l/min
 - 옥외소화전설비(병급)
 - 2개 × 350 l/min = 700 l/min
 - 토출량 합계
 - 1,250 + 2,400 + 700 = 4,350 l/min
- 유량(Q) = 4,350 l/min → 2.5m³/min × 2대
- 양정(H) = 70m
- 펌프 효율(E) = 65%
- 전동기 직결 전달계수(K) = 1.1

5. 맺음말

이상과 같이 랙크식 창고에 대해서 방재대책을 제시하였으나 부족한 것이 많이 있다. 특히, 우리나라의 소방기술기준은 일반적인 건물에 대해서 적용하도록 되어있어 특수한 건물(특수기능건물 또는 대형의 층고가 높은 건물 등)은 현행 소방법에 의한 소방시설의 적용이 적절치 못한 경우가 많다.

NFPA의 경우 랙크식 창고는 수용물품의 위험별, 건물의 층고별, 물품의 수납방법 등에 따라 스프링클러 설치기준을 달리하고 있다. 화재 성상이 틀리기 때문에 일반적인 소화방법으로는 초기진압이 어렵다는 것은 감안한 것이다. 우리나라 특수기능 또는 대형화재 발생가능성이 있는 소방대상물은 화재 하중, 건물의 구조, 크기, 용도 등을 고려하여 피난 및 연소방지대책 등 성능위주의 방재계획에 의해 방재대책이 강구되어야 화재로 인한 손실방지를 최소화할 수 있다고 생각된다. ㉞

〈표 7〉 실제 펌프 선정

구분	설비명	토출구경(mm)	유량(l/min)	양정(m)	동력(kw)	형식	비고
주펌프	옥내소화전,	100	2,500	70	55	양흡입	모터펌프
층압펌프	옥외소화전,	40	60	70	2.2	수직다단	모터펌프
예비펌프	스프링클러,	125	5,000	70	95	양흡입	모터펌프
2차 수원용펌프	겸용	125	5,000	70	95	양흡입	엔진구동펌프
소화용수 채수펌프	소화용수설비	100	3,300	40	55	양흡입	모터펌프