

## 영향인자 분석을 통한 고임화재의 미분무수 최적소화 모델링 Optimum Fire Extinguishing Modeling using Impact Factor Analysis on Water Mist System of Pool Fire

황원준\* · 김황진\*\* · 이성은\*\*\* · 김성원\*\*\*\* · 오규형†

Won-Jun Hwang\* · Hwang-Jin Kim\*\* · Sung-Eun Lee\*\*\* ·  
Sung-Won Kim\*\*\*\* · Kyu-Hyung Oh†

\*삼성전자, \*\*호서대학교 대학원, \*\*\*호서대학교 산업안전기술연구소, \*\*\*\*(주)파라다이스산업, 호서대학교 소방방재학과  
(2009. 8. 17. 접수/2009. 10. 9. 채택)

### 요 약

본 연구에서는 미분무수 노즐을 이용하여 소화시간에 영향을 미치는 인자들을 변화시키며 소화실험을 수행하였다. 주요 인자는 화염의 위치와 노즐 중심으로부터의 거리, 미분무 입자의 크기, 노즐의 설치 높이, 개구부 여부 등이었다. 소화실험 결과로부터 각 인자들 간의 상호작용과 소화에 대한 민감도를 Mini tab을 이용하여 분석하여 미분무수 소화시스템의 최적 소화모델을 도출하였다. 소화시간에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 노즐 중심으로부터의 거리이며 개구부의 여부는 다른 인자들에 비하여 소화시간에 미치는 영향도가 적게 나타났다.

### ABSTRACT

In this study, the fire extinguishing experiment was performed using a water mist nozzle with variation of factors which affect on the extinguishing time. The variables were distance from nozzle center to fire location, droplet size, height of nozzle and opening or not. With the experimental data, interaction and sensitivity between factors were analysed with Mini tab and deduce a optimum model of fire extinguishing of water mist system. Based on the experiment and modeling of fire extinguishing with water mist system, the most important factor on extinguishing time is the distance from the center of nozzle to fire and the opening effect was small compare with other factors.

**Key words :** Water mist, Factor analysis, Mini tab, Extinguishing model

### 1. 서 론

미분무수 소화설비에 관한 연구는 1950년대부터 시작되었는데 평균직경이 0.3mm(300 $\mu$ m) 미만인 미분무수를 이용해 확산화염을 냉각 및 소화시키는데 있어서 괄목할 만한 성공을 거둔바 있다.<sup>1,2)</sup>

또한 1987년 몬트리올 의정서의 조인에 따라 환경보호차원에서 할론 소화약제의 사용억제 및 선박이나 항공기와 같은 제한된 공간에서의 물의 저장용이하고, 스프링클러 설비에 비해 월등히 작은 구경의 배관(최대지름 약 40mm)을 사용함으로써 설비의 무게를 줄

일 수 있는 점과 설비의 방수 잠재력(미세화된 물방울이 증발되면서 흡수되는 열용량)이 양호하고 또한 주거시설, 인화성 액체저장시설 및 전기장치시설에 대한 응용과 효과성에 대하여 진행되어 온 연구결과를 바탕으로 방재소화설비로서 새롭게 평가되고 있다.<sup>3)</sup> 미분무수를 이용한 소화설비는 작은 양의 소화 용수로 화재진압을 가능하게 할 뿐 아니라 2차 수손피해를 최소화시킬 수 있는 소화시스템으로서 국내에서도 관련 연구가 지속적으로 이루어지고 있으며, 최근에는 전량 수입에 의존했던 노즐 및 시스템의 국산화율도 높아지고 있는 실정이다.<sup>4)</sup>

하지만, 개방공간이나 기류 등의 조건에서 미분무수의 소화성능이 저하되거나 예측과 다른 화재 양상을

† E-mail: khoh@hoseo.edu

나타내는 경우가 많아 미분무수의 적용과 관련하여 주변 여건과 함께 복합적으로 고려해야 한다는 연구결과도 있다.<sup>5)</sup>

따라서, 본 연구에서는 약 71m<sup>3</sup>의 방호체적 공간에서 B급 고임화재(Pool fire)를 대상으로 미분무수 소화시스템을 이용하여 소화시간에 영향을 미치는 인자들을 변화시키면서 소화실험을 수행하였다. 소화시간에 영향을 미치는 인자로는 노즐 중심으로부터 화염의 이격거리, 미분무 입자의 크기, 노즐의 설치 높이, 개구부 여부 등이며, 유류화재 소화실험과 Mini tab을 이용하여 실험 변수들 간에 미치는 영향과 민감도 등을 분석하여 미분무수 소화시스템의 최적 소화모델을 도출하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서는 B급 고임화재를 대상으로 순수한 미분무수를 이용한 소화실험을 하였다. 실험실은 가로 × 세로 × 높이(평균)가 각각 3m, 5m, 5m이고 벽면의 재질은 유리섬유가 충전된 조립식 판넬로 제작되었다. 실험장치의 전체적인 구성은 10Mpa의 압력에서 분당 26리터 이상의 공급이 가능한 플런저 펌프를 사용하였고, 조작스위치, 압력조절기, 체크밸브 등으로 구성되며, 미

Table 1. Specification of Water Mist Nozzle for Experiment

Nozzle	A-Type	B-Type	C-Type
Type	Multi Orifice	Swirl Type	Multi Orifice
K-factor	0.64	2.7	2.0
Flow Rate(L/min)	6.4	27	19.8
Pressure(Mpa)	10 ~ 11		
Spray Angle(°)	60	70	80
Spray Type	Full cone type		
Protect Area	3m × 4m	3m × 4m	3m × 4m
Installed Height	4m	3~5m	3~5m
Fluid Type	Single	Single	Single
Thread Type	3/8" BSP	3/8" BSP	3/8" BSP
SMD(μm)	35	50	68
Dv0.9(μm)	55	100	287

\*SMD(Sauter mean diameter): 입자 표면적 체적 평균비에 대한 평균 입자크기

\*Dv0.9: 입자의 90% 이상이 주어진 입도 이하인 것을 뜻하며 PDA를 이용하여 측정<sup>10)</sup>

분무수 노즐은 몸체에 직접 오리피스를 가공한 일체형 노즐을 사용하였다.<sup>6)</sup>

화염의 크기에 따라 실험실 내부의 온도, 화염온도, 시간에 따른 연료와 연료의 열손실을 가능한 일정한 조건으로 유지하기 위해, 연료팬 내부, 연료팬 중앙 수직방향, 실험실 벽면, 배기구 등에 9개의 열전대를 설치하였으며, 매초 1회씩 스캔하면서 온도를 측정하여 컴퓨터에 저장되도록 하였다.

화염의 크기는 “수동식 소화기의 형식승인 및 검정 기술기준”의 B급 연소팬 중 1단위(44.7 × 44.7cm)와 2단위(63.3 × 63.3cm) 크기의 연소팬을 사용하였고<sup>7)</sup> 연료는 일반적으로 사용하는 헵탄을 사용하였다.

또한, 소화시간에 미치는 인자들의 영향정도를 위하여 노즐의 높이를 3m와 4m로 변경하였으며, 두 번째 인자의 실험 조건은 노즐 중심으로부터 0.5m 간격으로 1m까지 조건을 변경하였다. 또한 미분무수 입자 크기가 각기 다른 노즐을 세 번째 인자로 하였고 실험실의 출입문을 개방과 밀폐로 조건을 달리하여 화재 진압 특성실험을 하였다.<sup>10)</sup> Table 1은 실험에 사용한 입자가 각기 다른 노즐의 특성을 나타내었다.

### 2.2 실험방법

#### 2.2.1 4인자 2수준 완전요인 실험

소화성능 실험에서 어떠한 인자가 소화시간에 미치는 영향의 정도를 파악하고, 효율적 특성치를 얻기 위해 실험계획법(Design of experiments: DOE)을 사용하였다.<sup>8,9)</sup> 이는 실험방법과 데이터 취합방법, 결과 분석 방법을 통계학을 바탕으로 하여 보다 구체적이고 과학적인 접근방법을 활용하기 위해서였다. 실험은 4가지 인자에 대한 2수준 완전요인 실험을 하였다. 한 가지 인자를 고정시킨 후 3가지 인자를 변화시키면서 소화실험을 실시하고 최초 고정된 인자를 다른 인자로 변화시키면서 실험을 하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

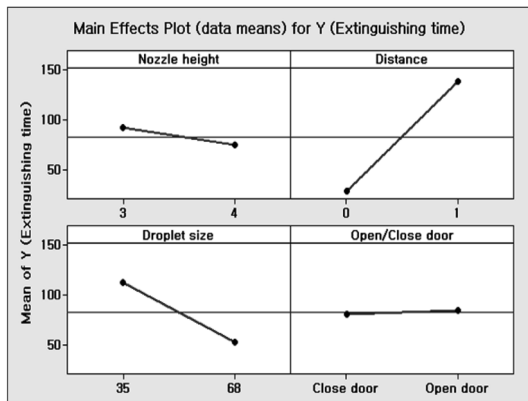
### 3.1 DOE 분석에 의한 수학적 모형

Table 2에서는 DOE(Design of Experiment)를 이용하여 화재시험실의 실험 조건 및 각 인자들이 화재 진압에 미치는 영향을 나타내기 위한 실험 조건과 결과를 나타내었다. 첫 번째 인자인 노즐의 높이는 3m와 4m로 변경하였으며, 두 번째 인자의 실험 조건은 노즐 중심으로부터 0.5m 간격으로 1m까지 화염을 이동하였다. 또한 입자 크기가 각기 다른 노즐을 세 번째 인자로 하였고 실험실의 출입문을 개방과 밀폐로 조건을 달리

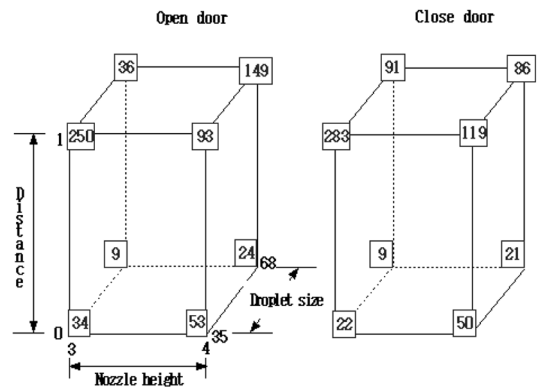
**Table 2.** Experiment Condition and Result for DOE Analysis Table

No.	Test Condition				Result (Extinguishing Time)
	Nozzle Height	Distance	Droplet Size	Door	
1	3(m)	0(m)	35(μm)	Close	34(sec)
2	4(m)	0(m)	35(μm)	Close	53(sec)
3	3(m)	1(m)	35(μm)	Close	250(sec)
4	4(m)	1(m)	35(μm)	Close	93(sec)
5	3(m)	0(m)	68(μm)	Close	9(sec)
6	4(m)	0(m)	68(μm)	Close	24(sec)
7	3(m)	1(m)	68(μm)	Close	36(sec)
8	4(m)	1(m)	68(μm)	Close	149(sec)
9	3(m)	0(m)	35(μm)	Open	22(sec)
10	4(m)	0(m)	35(μm)	Open	50(sec)
11	3(m)	1(m)	35(μm)	Open	283(sec)
12	4(m)	1(m)	35(μm)	Open	119(sec)
13	3(m)	0(m)	68(μm)	Open	9(sec)
14	4(m)	0(m)	68(μm)	Open	21(sec)
15	3(m)	1(m)	68(μm)	Open	91(sec)
16	4(m)	1(m)	68(μm)	Open	86(sec)

하여 화재 진압 특성에 대한 결과를 얻었다. 이전 실험 결과와 같이 동일한 크기의 화염에서는 미분무수가 방사되는 노즐 중심으로부터 멀어질수록 진화에 소요되는 시간이 길어진다는 것을 알 수 있다. 또한, 미분무수 노즐의 특성에 따라 조금씩 차이는 있지만 노즐 1개가 방호할 수 있는 거리를 초과한 경우에는 소화화



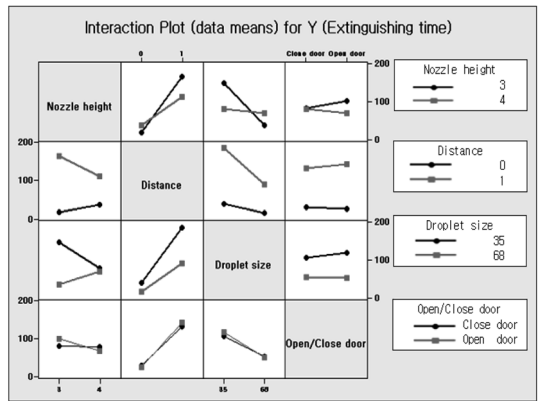
**Figure 1.** Main effect plot (data means) for extinguishing time.



**Figure 2.** Cube plot of extinguishing time.

과가 현저히 떨어지는 것으로 나타났다. Figure 1에는 노즐의 설치높이, 미분무수 노즐 중심으로부터의 거리, 각 노즐의 입자 크기, 화재시험실의 개구부 유무 등의 4가지 인자를 이용한 “4인자 2수준 완전요인”의 시험 결과를 나타내었다. 4개의 인자들이 화재 진압에 미치는 주요한 효과를 나타낸 것으로 화재진압에 영향을 미치는 순서는 미분무수 노즐 중심으로부터의 거리, 입자의 크기, 노즐의 설치 높이 순이었으며 화재시험실의 개구부 유무는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

Figure 2에는 실험에서 얻은 소화시간을 각 인자들 간의 주 효과를 의미하는 입체형 분포를 나타낸 것으로 화재 진압시간에 영향을 미치는 주요 인자들의 수준 변화에 따른 실험 결과 값이다. 화재진압에 영향을 주는 각 인자에 의한 주 효과 외에 관심이 되는 효과로서 인자에 대한 교호작용(Interaction)이 있다. 화재진압의 특성상 같은 조건에서도 소화에 걸리는 시간의



**Figure 3.** Interaction plot (data means) for extinguishing time.

차이는 노즐의 설치 높이, 노즐 중심으로부터의 거리, 미분무수의 입자 크기 등 인자에 대한 교호작용이 있기 때문이다.

인자들 간의 교호작용에 대하여는 Figure 3과 같이 Interaction Plot을 통해서 알 수 있으며, 각각의 인자들에 대한 교호작용(Interaction)을 나타낼 수 있다. 영향을 미치는 인자들 간의 비교되는 직선의 기울기가 다를수록 교호작용이 있는 것으로 노즐 설치높이 변화에 따른 교호작용 인자는 물입자의 크기와 노즐 중심으로부터의 거리임을 알 수 있다.

또한, 노즐 중심으로부터 거리에 가장 큰 영향 인자는 노즐의 설치 높이로 나타났으며, 미분무수의 입자 크기는 노즐의 중심으로부터의 거리와 화재시험실 개구부의 개, 폐 여부는 상호 작용이 거의 없는 것으로 나타났다.

Figure 4에는 각 인자들의 효과와 인자 상호간의 교호작용이 화재 진압에 미치는 영향 정도를 나타낸 것이다. 중심으로부터의 거리와 미분무수 입자의 주 효과와 두 인자들 간의 교호작용이 화재 진압 시간에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 노즐의 설치 높이는 화재 진압 시간에 직접적인 영향을 미치지 못하나 그 인자로 하여금 파생되는 교호작용 효과가 있으므로 제거할 수 없고 개구부의 유무는 주 효과와 교호작용 효과가 적으므로 1차적으로 제거하고 그 후에, 그와 관련된 교호작용 인자를 제거했다.

Figure 5은 Figure 4에서 화재 진압 시간에 미치는 영향을 분석하여 소화효과에 미치는 영향의 정도가 작은 인자를 제거하여 나타낸 것이다.

노즐 높이와 중심거리 및 개구부 유무에 대한 교호작용과 노즐 높이와 미 분무 입자의 크기 및 개구부

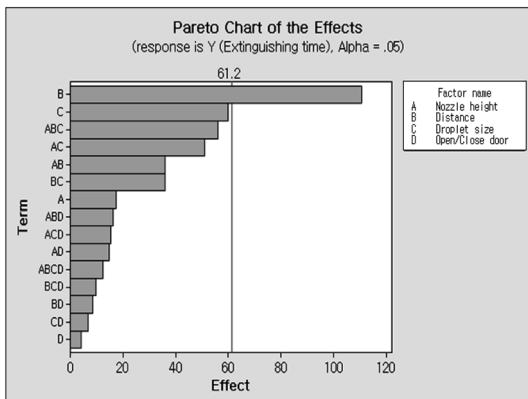


Figure 4. Pareto chart of the standardized effects (1st).

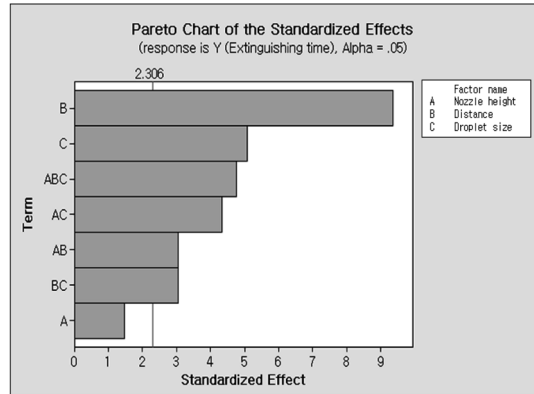


Figure 5. Pareto chart of the standardized effects (pooling).

유무에 대한 교호작용, 노즐 높이와 개구부 유무에 대한 교호작용은 화재 진압에 소요되는 시간에 영향을 미치지 못하므로 제거를 하였다. 또한, 수학적 모델 도출을 위한 인자로는 노즐 중심으로부터의 거리, 미분무수 노즐 입자의 크기, 노즐의 설치 높이와 중심으로부터의 거리와 입자와의 상호작용, 노즐의 설치높이와 입자 크기 및 노즐 중심으로부터의 거리와의 상호작용, 노즐 중심으로부터의 거리와 입자크기와의 상호 작용이 발생하였음을 알 수 있다. A인자(노즐의 설치 높이)가 기준선 이내에 있음에도 제거하지 않은 이유는 그

Table 3. Test Results for Extinguishing Time Using Estimated Coefficients

Estimated Effects and Coefficients for Y (Extinguishing Time)		
Term	Coefficient	Effect
Constant	83.06	
Nozzle Height	-8.69	-17.38
Distance from the Nozzle Center	55.31	110.62
Droplet Size	-29.94	-59.87
Nozzle Height × Distance from the Nozzle Center	-17.94	-35.88
Nozzle Height × Droplet Size	25.56	51.13
Distance from the Nozzle Center × Droplet Size	-17.94	-35.87
Nozzle Height × Droplet Size × Distance from the Nozzle Center	28.06	56.12
S = 23.6128 R-Sq = 95.64% R-Sq(adj) = 91.83%		

A인자가 다른 인자와의 교호작용이 화재 진압 시간에 미치는 영향이 크기 때문이다.

식(1)은 소화시간에 대한 수학적 모델로 화재 소화에 영향을 주는 인자들과 소화시간과의 상관관계를 나타낸 식이다.

여기서, A는 노즐의 설치높이, B는 노즐 중심에서부터의 거리, C는 미분무수 입자크기이며, 식(1)에 의한 화재 진압 실험은 95.64%를 신뢰할 수 있다.

Table 3에는 소화시간에 영향을 미치는 인자들 간의 Main Effect와 교호작용을 이용한 수학적 모형과 해당 결과를 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} \text{소화시간} = & 83.06 + \{(- 8.69) \times A\} + \{55.31 \times B\} \\ & + \{(- 29.94) \times C\} + \{(- 17.94) \times A \times B\} \\ & + \{(- 25.56) \times A \times C\} \\ & + \{28.06 \times A \times B \times C\} \end{aligned} \quad (1)$$

Figure 6에는 노즐의 설치 높이, 노즐 중심에서부터의 거리, 분무 입자 등 주요 인자들을 이용한 소화시간의 최적화를 나타낸 것으로 1단위 화재의 경우 노즐의 설치 높이를 3.7m, 노즐 중심으로부터의 거리를

New	Hi	Nozzle height	Distance	Droplet size
D	Cur	4.0	1.0	68.0
1.000	Lo	[3.7037]	[0.50]	[68.0]
		3.0	0.0	35.0

Y(Extinguishing time)				
Target : 60.0				
y = 60.0				
d = 1.0000				

Figure 6. Response optimization.

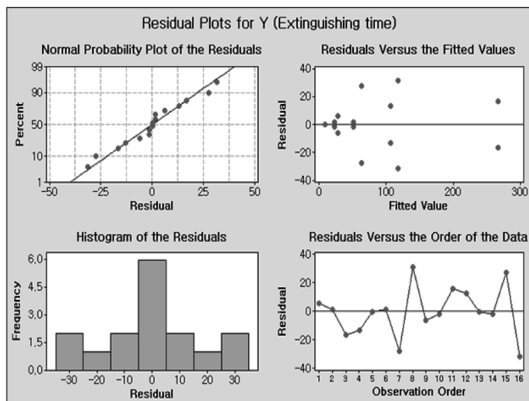


Figure 7. Residual plots for result.

0.5m, 미분무수 입자의 크기(SMD)가 68인 조건으로 소화실험을 할 경우에 소화시간이 60초가 됨을 알 수 있다. 노즐 중심으로부터의 거리와 분무 입자를 고정된 상태에서 노즐의 설치 높이를 변경하며 실험하면 소화되는 시간을 예측 할 수 있음을 알 수 있다.

Figure 7에는 본 연구의 화재 실험모델로서의 적합도를 분석한 것으로 주 효과와 교호작용 모두가 정규 분포를 이루고 있고 데이터들이 어떠한 패턴이나 특징을 가지고 있지 않고 랜덤하게 분포되어 있는 것으로 실험 인자들의 선정과 화재 시험실의 시험장의 조건은 DOE(Design Of Experiment)를 이용한 실험에 적합하였음을 알 수 있었다.

### 4. 결 론

미분무수 노즐을 이용하여 소화시간에 영향을 미치는 인자들을 변화시키면서 소화실험을 수행하였다. 화염의 위치가 노즐 중심으로부터의 이격거리, 미분무 입자의 크기, 노즐의 설치 높이, Door의 개·폐 유무가 신호인자로 작용하였으며, 각 인자들 간의 상호작용을 유류화재 소화실험과 Mini tab을 이용하여 실험 변수들 간에 미치는 영향과 민감도를 분석하여 미분무수 소화시스템의 최적 소화모델을 도출하였다. 소화시간에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 노즐 중심으로부터의 거리이며 개구부의 여부는 다른 인자들에 비하여 소화시간에 미치는 영향도가 적게 나타났다.

또한 본 연구를 통해 미분무 소화설비의 소화성능 향상을 위하여 미분무수 소화시스템에 대한 성능인증이 국가적으로 이루어져야할 뿐만 아니라 소화성능에 대한 수학적 접근 방안이 가능함을 알 수 있었다.

### 참고문헌

1. D.J. Rasbash, Z.W. Rogowski and G.W.V. Stark, "Mechanism of Extinction of Liquids Fuels with Water Sprays", Combustion and Flame, Vol.4, pp. 223-234(1960).
2. J.R. Mawhinney and Gerard G. Back, "Water Mist Fire Suppression System", The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 3rd edition, pp.4-311 (2002).
3. M.B. Kim and Y.J. Jang, "Water Mist Fire Suppression (1) - A Personal Computer", J. of Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol.13, No.3, pp.27-33(1999).
4. K.D. Lee, "Performance of Fire Extinguishing of

- Water Mist Nozzle for Power Transformer Fire Scenario”, J. of the Korean Society of Safety, Vol.21, No.6, pp.46-54(2006).
5. L. Liu and A. Kim, “A Review of Water Mist Fire Suppression Systems -Fundamental Studies“, J. of Fire Protection Engineering, Vol.10, No.3, pp.32-50 (2000).
  6. W.J. Hwang and K.H.Oh, “Experimental study on the Fire Extinguishing Characteristics of water Mist System”, J. of Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol.23, No.2, pp.82-84(2009).
  7. 한국소방검정공사, “수동식 소화기의 형식승인 및 검정기술기준 (KOFEIS 0901)”, 한국소방검정공사 (2000).
  8. 이레테크 미니탭 사업팀, “새 MINI TAB 실무완성”, (주)이레테크(2005).
  9. 삼성전자 6시그마 아카데미, “Black Belt DMAIC 간접과정”, Rev.8.0, pp.341-362(2007).
  10. 황원준, “포소화약제를 이용한 고압미분무수 소화시스템의 소화성능향상”, 호서대학교 박사학위논문 (2009).