KIGAS Vol. 16, No. 2, April, 2012
(Journal of the Korean Institute of Gas)

설치비와 피해액의 정형화를 통한 화재 시뮬레이션 및 수리계획법에 기반을 한 스프링클러의 배치 최적화

이기준 · 신영섭* · 홍기훈 · 주기돈 · 신동일 · †김태옥
명지대학교 화학공학과, *BASIS Scottsdale
(2012년 3월 23일 접수, 2012년 4월 27일 수정, 2012년 4월 27일 채택)

Sprinkler Layout Optimization Based on Fire Simulation and Mathematical Programming including Installation and Damage Costs

Kijun Lee · Youngsup T. Shin* · Gi Hoon Hong
Kidon Joo · Dongil Shin · † Tae-Ok Kim
Department of Chemical Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea
**BASIS Scottsdale, 11440 N. 136th Street, Scottsdale, AZ 85259, U.S.A.*
(Received March 23, 2011; Revised April 27, 2012; Accepted April 27, 2012)

요 약

본 연구에서는 화재로부터 가장 효과적인 소화설비로 평가받고 있는 스프링클러 시스템에 대해 화재 시뮬레이션과 수리계획법에 기반을 한 최적 배치방법을 제안하였다. 사례연구로, 5.2 m(L)×5.4 m(W)×2.4 m(H) 크기의 일반 주거지 형태를 대상공간으로 설정하고, 부주의로 폴리우레탄 소재의 소파에 불이 인화되어 화재가 전이되는 시나리오를 구성하였다. 그리고 스프링클러의 종류와 개수에 따른 소화속도, 온도변화, 표면 열방출률을 시뮬레이션을 통해 분석하고, 공간 균등배분 방법으로 설치된 스프링클러의 설치비와 화재 피해액의 정형화를 바탕으로, 수리계획법을 이용하여 최적 소화성능의 스프링클러 배치시스템을 얻을 수 있었다.

Abstract - The sprinkler system is regarded as the most effective fire extinguishing system. In this study, we proposed a sprinkler layout optimization framework based on fire simulation and mathematical programming. As a case study, the target space in the form of ordinary residence was set up with the size of 5.2 m(L)×5.4 m(W)×2.4 m(H), and we constructed the fire scenario that polyurethane couch was ignited through carelessness. And we simulated and analyzed fire speed, temperature change and heat release rate according to the type and number of sprinklers installed. Through the formulation of installation and damage costs depending on sprinklers, the sprinkler layout showing optimal performance was resulted from mathematical programming.

Key words : sprinkler layout, fire dynamic simulator (FDS), mathematical programming, cost-benefit analysis

†주저자:kimto@mju.ac.kr

Ⅰ. 서 론

최근 10년간 발생한 화재의 발화요인은 부주의가 가장 큰 비율을 차지하고 있고, 방재시설을 미설치한 경우와 고장으로 인한 미작동이 주요 원인으로 보고되고 있다[1]. 이와 관련하여 많은 방재 전문가들로부터 가장 효과적인 설비로 평가받고 있는 스프링클러 소화설비 시스템은 우리나라를 비롯한 세계 각국에서 여러 관계법령을 통해 설치를 의무화 하고 있다. 특히, 미국의 경우 NFPA (National Fire Protection Association)에 의하면 200개 이상의 지역사회에서 가정용 스프링클러 시스템의 설치를 의무화하고 있다[2]. 그러나 대부분의 건축물 소유주들은 건물의 설계, 시공 및 유지관리 비용을 절감하기 위해 최소한의 설계나 법규에서 지정된 설치대상에 한해서만 방재시설을 설치하고 있는 실정이다[3]. 이것은 초기 소화설비 시스템의 설치에는 큰 비용이 들어가지만 실질적으로 화재가 발생하기 전에는 방재시설에 의한 직접적인 효과를 파악할 수 없고, 설치에 따른 피해액의 감소에 대한 체계적인 근거가 확립되어 있지 않기 때문으로 판단된다.

최근에는 초대형 건물의 화재 안정성 확보와 건축비용 절감 측면에서 성능위주 설계에 대한 관심이 고조되고 있으며, 다양한 공간 구조와 화재 시나리오에 대해 화재전파에서 소화에 이르기까지 소화성능을 평가하기 위한 시스템이 필요한 실정이다. 이와 관련하여 기존 코드기반에서 성능기반의 설비기준으로 전환하기 위한 연구가 국내·외에서 활발히 진행되고 있다. 특히, NIST (National Institute of Standards and Technology)에서는 Benefit-Cost Analysis of Residential Fire Sprinkler Systems에 관한 연구한 사례가 있으며[2], 스프링클러의 설치비용과 그에 따른 이득을 보여주는 웹기반 도구를 아울러 제공하고 있다[4].

본 연구에서는 스프링클러 소화설비 시스템의 효과적인 작동여부에 대해서는 제한된 실화재시험 이외에 실질적으로 검증할 수 있는 방법이 없기 때문에 NIST의 FDS (Fire Dynamics Simulator)를 활용한 화재 시뮬레이션과 비선형계획법에 기반을 한 설치비용과 화재에 따른 피해액의 정형화를 통해 주거지 형태의 공간구조에서 최적 소화효율을 제시하는 스프링클러 배치시스템을 제안하고자 하였다.

Ⅱ. 이 론

화재 모델링 및 시뮬레이션 분석을 위해 NIST의 FDS(ver. 5.4.8)를 사용하였으며, 스프링클러 소화설비 시스템의 설치비와 피해액의 정형화를 위해서는 수리계획법 기반의 최적화 도구인 GAMS(ver. 23.2)를 이용하였다.

2.1. FDS 화재 시뮬레이션

CFD (Computational Fluid Dynamics) 기반의 FDS는 화재에 의한 열 및 연기 거동을 시뮬레이션하기 위해 난류모델, 연소모델 및 복사도 모델을 사용하고, 화재 성상을 해석하기 위해서는 다음과 같이 CFD 이론이나 유체역학에 적용하는 4가지 지배방정식을 이용한다[5].

Conservation of mass :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = \dot{m}_b''' \tag{1}$$

Conservation of momentum(Newton's second law) :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{u}\mathbf{u} + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \tau_{ij} \tag{2}$$

Transport of sensible enthalpy :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s \mathbf{u} = \frac{\mathrm{D}p}{\mathrm{D}t} + \dot{q}''' - \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{q}'' + \epsilon \tag{3}$$

Equation of state for a perfect gas :

$$P = \frac{\rho R T}{W} \tag{4}$$

여기서 t는 시간, ρ는 밀도, $\boldsymbol{u}$는 속도벡터, ∇는 방향벡터, P는 압력, T는 온도, $\dot{m}_b'''$는 입자의 증발속도, $\mathbf{g}$는 중력가속도, $\boldsymbol{f}_b$는 외부의 힘 벡터, τ_{ij}는 전단응력(stress tensor), h_s는 온도변화에 따른 엔탈피, $\dot{q}'''$는 단위부피당 열 방출속도, $\dot{q}_b'''$는 입자의 열 방출속도, $\dot{q}''$는 전도와 복사에 의한 열 플럭스, ϵ는 소산율(dissipation rate), R은 기체상수, W는 혼합기체의 분자량이다.

본 연구에서는 FDS 자체가 화원을 표면 열방출률(heat release rate)로 설정하는 경우 반영하여야 하는 소화계수에 대한 실질적인 물질 데이터의 사용이 불가능하기 때문에 화원을 기화열로 하였다. 그리고 소화에 사용된 스프링클러의 종류는 국내 스프링클러 표준합격기준을 만족시키는 수분무형태의 Acme를

사용하였고, 스프링클러의 유량, 반응시간지표(response time index), 분사각, 분사속도(droplet velocity), offset 등은 임의로 조정하여 Type A에서 Type D로 갈수록 그 효율이 우수하도록 설정하였다[6].

2.2. 최적화 모델

공학분야에서 널리 쓰이는 최적화 도구인 GAMS를 이용하여 스프링클러 소화설비 시스템의 설치비와 화재에 따른 피해액을 정형화하여 해석하였다. 스프링클러의 설치비는 내부 급수시설에 따라 크게 차이가 나기 때문에 건물의 수압, 대상의 크기와 높이, 대상의 붕괴 위험도, 배관의 종류와 사이즈, 펌프의 유무 등은 고려하지 않았다. 또한 우리나라의 경우 설치비에 관한 체계적인 지표가 마련되어 있지 않기 때문에 스프링클러 소화설비의 제조 및 설치에 관해 Rutstein과 Cooke[7]가 제안한 바와 같이 고정비와 단위면적, A(m^2)당 설치비의 합으로 표현되는 아래의 식들을 사용하여 계산하였다. 이때, 각 식의 수치는 경제성장과 더불어 나타나는 인플레이션 등을 고려하지 않고 있으나[8], 상대적인 비교를 통해 최적을 찾는 관점에서는 크게 문제가 되지 않는다.

$$\text{Extra low hazard} : \text{비용} = 500 + 0.77A \quad (5)$$

$$\text{Ordinary hazard} : \text{비용} = 500 + 1.87A \quad (6)$$

$$\text{Extra high hazard} : \text{비용} = 500 + 2.53A \quad (7)$$

피해액을 산정하는 과정은 손해보험협회의 보험가액 및 손해액의 평가기준(부칙 2010년 6월 1일 시행)을 이용하였다. 특히, 보험 목적물의 경우에는 주거지 환경에 해당하는 건물, 내부시설 및 집기비품을 고려하였으며, 물리적 손모를 중시하는 정액법에 의한 경년감가율 계산식을 이용하였다[9].

$$\text{잔가율}(\%) = 100\% - \text{경년감가율}(\%) \times \text{경과년수} \quad (8)$$

$$\text{경년감가율} = \frac{\text{재조달가액}(100\%) - \text{최종잔가율}(20\%)}{\text{추정내용연수}} \quad (9)$$

$$\text{감가율} = \text{경년감가율} \times \text{경과년수}, \ \text{감가공제액} = \text{재조달가액} \times \text{감가율} \quad (10)$$

Ⅲ. 화재 모델링 및 시뮬레이션

스프링클러의 소화속도를 분석하기 위하여 스프링클러를 설치하지 않는 경우와 설치하는 경우에는 Table 1과 같은 4가지 종류의 스프링클러에서 각각 1, 2, 3, 4개를 설치하는 경우(총 16가지 경우)에 대해 다음과 같은 절차를 수행하여 시간에 따른 온도 변화와 표면 열방출률의 변화를 분석하였다.

3.1. 화재 시나리오

화재 시나리오는 Fig. 1에서와 같이 2011년 화재현황을 기준으로[1], 10,509건으로 가장 높은 비율을 차지하고 있는 주거지에서 17,870건으로 높은 비율을 차지하고 있는 부주의로 인해 화재가 발생하는 경우로 설정하였다. 이때, 일반 주거지 형태에서 담뱃불과 같은 부주의로 소파에서 화재가 발생하여 불이 전이되고, 일정온도에서 스프링클러가 작동하여 소화된다고 가정하였다. 또한 창문이 없는 방이고, 한쪽 외벽에 출입문으로 통로가 연결되어 있으며, 전체 셀은 개방되지 않은 무풍상태로 가정하였다. 그리고 스프링클러는 임의로 공간을 균등 배분하여 설치하였다[10].

3.2. 화재 모델링

대상공간의 크기는 너비(L), 폭(W) 그리고 높이(H)를 5.2 m(L)×5.4 m(W)×2.4 m(H)로 하였고, 석고로 된 한쪽 외벽에 출입구를 만들어 개방공간으로 하였다. 따라서 3.1절의 화재 시나리오에 의하여 모델링한 결과는 Fig. 2와 같으며, 이때, 그리드 크기는 총 67,392개이었다. 또한 수분무형태의 Acme 스프링클

Table 1. Characteristics of sprinklers

Sprinkler type	FDS property ID	Flow rate (L/min)	Initial droplet velocity (m/s)	Cone angles for water spray (deg)	Response time index($\sqrt{ms}$), activation temperature(℃) and droplet offset distance(m) are the same.
A	Acme	189.3	10	30 / 80	
B	Acme	192.3	12	35 / 80	
C	Acme	195.3	14	40 / 80	
D	Acme	198.3	16	45 / 80	

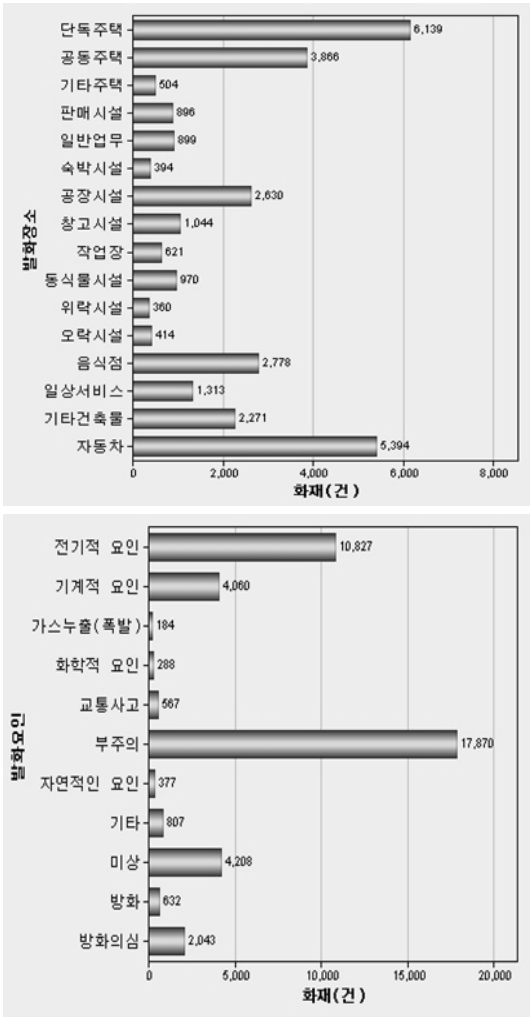

Fig. 1. Fire statistics of year 2011[1].

러를 설치하는 경우에 대하여 화재 모델링의 결과는 Fig. 3과 같으며, 이때, 활성화 온도는 74 ℃로 설정하였고, 스프링클러의 종류가 A형에서 D형으로 갈수록 높은 유량 및 분사속도와 넓은 분사각을 입력하였다[11].

3.3. 화재 시뮬레이션

발화원은 폴리우레탄 소재의 소파(C=6.3, H=7.1, O=2.1, SOOT=0.10 kg/kg)에 1,500 kW의 점화원으로 하였고, 열전달 및 열역학적인 물성과 반응변수는 NFPA Handbook을 참조하였다[12]. 또한 주위 환경조건은 의자와 TV 받침대로 설정하고, 총 900

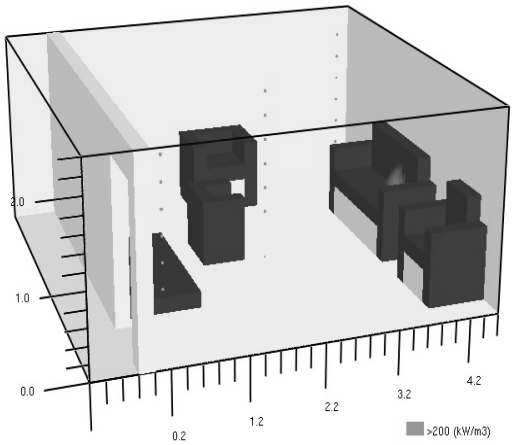

Fig. 2. Fire modeling of the room fire without sprinkler system.

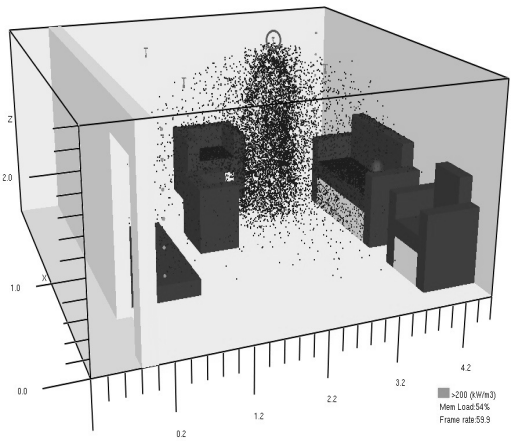

Fig. 3. Fire modeling of the room fire with sprinkler system.

초 동안 시뮬레이션 하였다.

3.4. 화재 모델의 확인 및 스프링클러 소화속도 모델링

3.2절에서 설정한 화재 모델의 확인을 위하여 스프링클러를 설치하지 않은 경우와 설치한 경우(16가지 경우)에 대해 시간에 따른 열화상 이미지를 비교하였고, 표면 열방출률의 변화곡선을 확인하였다. 그리고 스프링클러의 종류와 개수에 따른 비선형 소화속도 모델을 구성하여 최적화에서 활용하였다.

Ⅳ. 수리계획법에 의한 최적화

4.1. 피해액의 정형화

2.2절에서 제시한 식 (5) ~식 (7)의 비용은 현재 환율을 고려하여 산출하였다. 이때, 정액법에 의한 피해액 산정방법에서는 일반 주거지임을 감안하여 콘크리트/석조로 가정하였고, 경년감가율은 각각 1.60%와 1.33%(보험가액 및 손해액의 평가기준)를 초기값으로 설정하였다. 따라서 소화시간에 따른 피해액의 변화곡선은 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있었으며, 그림에서와 같이 초기에는 화재에 의한 피해액이 급격히 증가하지만 시간이 지날수록 서서히 증가함을 알 수 있었다.

4.2. 목적함수 및 제약조건 설정

최적의 스프링클러 배치시스템은 다음과 같이 스프링클러의 종류와 개수에 따른 설치비와 화재에 의한 피해액의 합을 최소화함으로써 결정할 수 있다. 따라서 최소화시키고자 하는 목적함수, z는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\min(z) &= \min(\text{스프링클러 하드웨어비} + \text{설치비} + \text{화재 피해액}) \\ &= \min\left[sprinkler\ head\ \cos t(type)\times n_{type} + installation\ \ \cos t(type, n_{type}) + f(extinguishing\ \ time(type, n_{type}))\right] \quad (11)\end{aligned}$$

여기서 sprinkler head cost(type)는 스프링클러 헤드당 가격, n_{type}는 스프링클러의 개수, installation cost(type, n_{type})는 스프링클러 개수에 따른 설치비, extinguishing time(type, n_{type})은 설치된 소화설비 시스템의 소화시간, f는 분당 피해액이다. 따라서 고효율의 스프링클러를 사용하면 설치비는 증가하지만 피해액은 감소하고, 저효율의 스프링클러를 사용하면 설치비는 감소하지만 피해액이 증가되기 때문에 식 (11)을 이용하여 두 값이 상쇄되는 최적값을 찾을 수 있다.

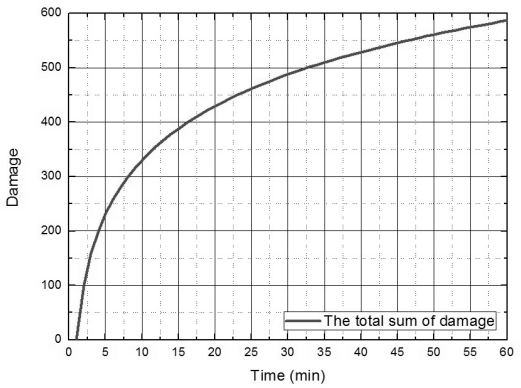

Fig. 4. Damage according to the time.

피해액을 정형화하는 과정에서 피해액을 적게 책정할 경우에는 스프링클러를 설치하지 않는 것이 최적값이 되고, 크게 책정할 경우에는 효율이 좋은 D형태의 스프링클러를 많이 설치하는 것이 당연히 최적값이 된다. 따라서 최소 한 개 이상의 스프링클러를 설치하는 것을 제약조건으로 설정하였다.

Ⅴ. 결과 및 고찰

5.1. 화재 시뮬레이션 결과

Fig. 5 및 Fig. 6은 3.2절에서 설정한 화재모델을 바탕으로, 스프링클러를 설치하지 않은 경우와 B형의 4개를 설치하는 경우에 대하여 화재 시뮬레이션을 하여 얻은 열화상 이미지를 나타낸 대표적인 그림이다. 그림에서와 같이 스프링클러를 설치하지 않은 경우에는 화재가 전이되어 대상공간이 전소되지만, 4개의 B형 스프링클러가 작동되는 경우에는 화재가 확산되지 않고, 완전히 소화가 됨을 알 수 있다.

또한 화재 시뮬레이션 결과, Fig. 7 및 Fig. 8과 같이 스프링클러를 설치하지 않은 경우와 설치한 경우에 대해 시간에 따른 표면 열방출률의 변화를 확인할 수 있으며, 이를 통해 스프링클러의 소화성능을 판단할 수 있다.

5.2. 최적화 결과

스프링클러의 배치방법에 대해 식 (11)에 의해 최적화한 결과는 Table 2와 같으며, 본 연구범위에서는 B형의 스프링클러를 4개 설치하는 경우가 최적의 경우로 판정되었다.

이상의 결과와 같이 최적의 소화성능을 갖는 스프링클러 배치시스템은 화재 시뮬레이션 결과와 스프링클러의 설치비 및 피해액의 정형화를 바탕으로, 수리계획법에 의해 선정할 수 있었으며, 스프링클러 시스템의 최적배치를 위한 플로우차트는 Fig. 9와 같다.

Ⅵ. 결 론

본 연구에서는 스프링클러 시스템에 대하여 제한된 실화재실험이 아닌 시뮬레이션을 통해 소화성능을 해석하고, 그동안 체계적인 산출방법이 제시되지 않았던 설치비와 화재 피해액의 정형화를 통해 최적

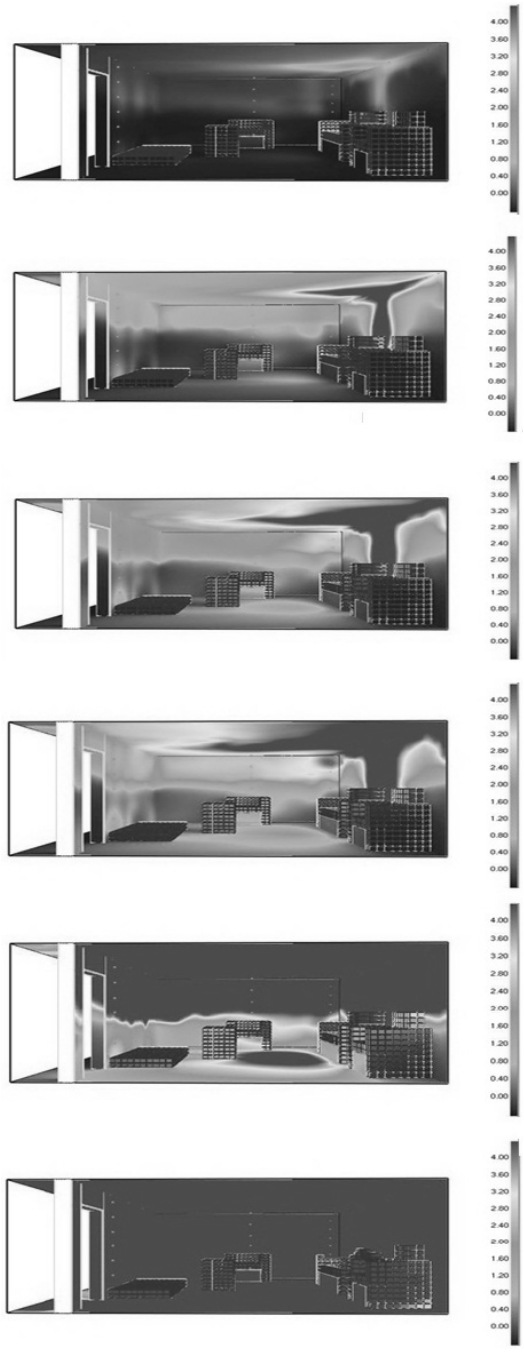

Fig. 5. Infrared image of fire propagation with no installation of sprinklers.

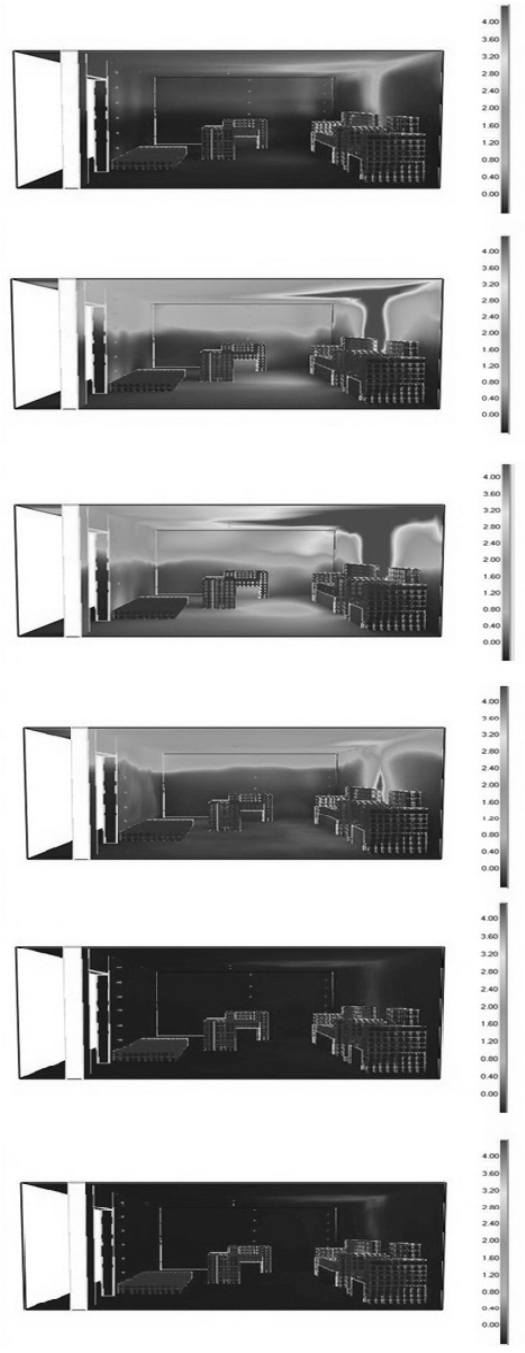

Fig. 6. Infrared image of fire propagation with installation of B type/4 EA sprinklers.

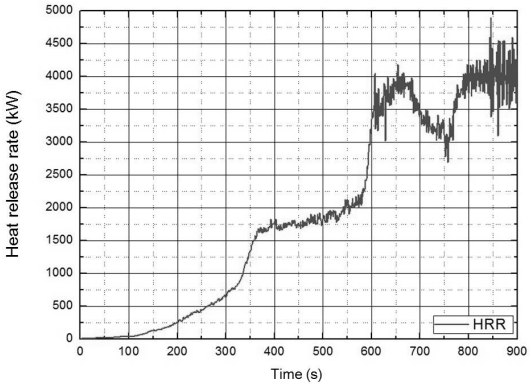

Fig. 7. Heat release rate curve without sprinkler system.

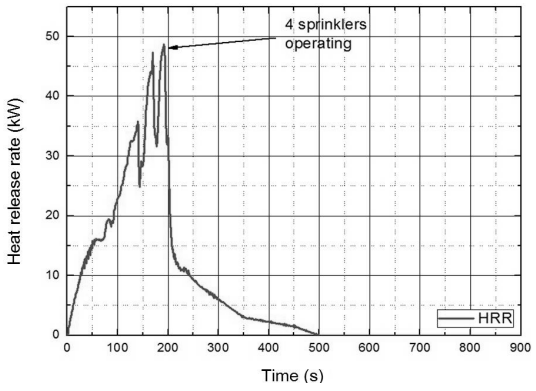

Fig. 8. Heat release rate curve with B type/4 EA sprinkler system.

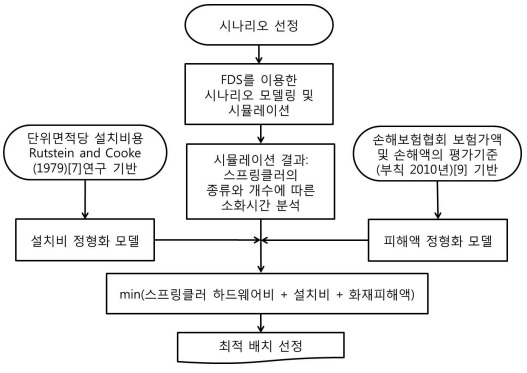

Fig. 9. Flowchart of sprinkler layout optimization system.

Table 2. Comparison of optimization result against the enumeration

Sprinkler type & no.	Cost enumerated for each case	Result out of the optimization
A type / 1 EA	1261	
A type / 2 EA	1224	
A type / 3 EA	1225	
A type / 4 EA	1226	
B type / 1 EA	1.259500e+003	
B type / 2 EA	1.243500e+003	
B type / 3 EA	1.265500e+003	
B type / 4 EA	1.221500e+003	The best layout
C type / 1 EA	1247	
C type / 2 EA	1.245500e+003	
C type / 3 EA	1277	
C type / 4 EA	1.309500e+003	
D type / 1 EA	1.233500e+003	
D type / 2 EA	1270	
D type / 3 EA	1316	
D type / 4 EA	1.358500e+003	

배치방법을 제안하였으며, 이를 통해 스프링클러를 설치하는 경우의 정량적인 효용성을 판별할 수 있도록 하였다. 따라서 이 결과를 바탕으로 건축물 소유주들이 최소의 비용으로 효과적인 소화설비를 설치하여 비용 절감이 아닌 화재 안정성 측면에서 소화설비를 확대 설치하는데 기여할 수 있을 것으로 기대한다. 또한 화재 시나리오에 따라 자동으로 코드가 생성되는 FDS 시뮬레이션의 구현이 가능한 경우에는 제안된 최적배치 선정방법이 실질적인 성능평가와 최적설계 등에 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원에 의해 수행한 연구결과입니다. (과제번호: 2011T100200023)

참고문헌

[1] 소방방재청 국가화재정보시스템, http://www.nfds.go.kr/

[2] Butry, D. T., Brown, M. H., and Fuller, S. K., *Benefit-Cost Analysis of Residential Fire Sprinkler Systems,* National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, Gaithersburg, (2007)

[3] 김용달, 최영화, 윤명오, "스프링클러 설비투자의 경제적 효용성 분석에 관한 연구", *한국화재소방학회지*, **24**(1), 31-39, (2010)

[4] NIST, Sprinkler use decisioning, http://w680.nist.gov/firesprinkler/default.aspx

[5] Anderson, D. A., Tannehill, J. C., and Pletcher, R. H., *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer,* Hemisphere Publishing Corporation, Philadelphia, Pennsylvania, (1984)

[6] McGrattan, K. B., Hostikka, S., and Floyd, J. E., *Fire Dynamics Simulator (Version 5) - User's Guide,* NIST Special Publication 1019-5, National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, Maryland, U.S.A., (2009)

[7] Rutstein, R and Cooke, R. A., *The Value of Fire Protection in Buildings,* Fire Research Report, London: Home Office Scientific Advisory Branch, (1979)

[8] Ramachandran, G., *The Economics of Fire Protection*, Taylor & Francis, London and New York, (1998)

[9] 손해보험협회, *보험가액 및 손해액의 평가기준*, (2010.6.1)

[10] Kenneth, E. and Isman, P. E., *Layout, Detail and Calculation of Fire Sprinkler System*, National Fire Sprinkler Association, Inc., (2007)

[11] 황준호, 정거성, 강동일, *3차원 시뮬레이션 해설*, 동화기술, (2008)

[12] NFPA, Fire Protection Handbook, 18th ed, NFPA, Quincy, MA, (1997)