최적화 기법을 이용한 이산화탄소 소화설비의 설계프로그램 개발에 관한 연구

이동명

경민대학교 소방행정학과

A Study on the Design Program Development of the Carbon Dioxide Fire Extinguishing System Using an Optimization

Dong-Myung Lee

Depart. of Fire Protection Administration, Kyungmin Univ.

(Received January 15, 2014; Revised May 12, 2014; Accepted June 13, 2014)

요 약

본 연구에서는 이산화탄소 소화설비의 설계이론, 소방방재청 고시 제2012-11호, KS B 6261과 최적화 기법 중 최대 경사법을 바탕으로 이산화탄소 소화설비의 설계인자를 최적화할 수 있는 설계프로그램을 개발하였다. 설계프로그램은 정립된 로직 및 알고리즘을 바탕으로 C++ 컴파일러를 이용하여 개발하였고 윈도우 운영체제에서 운영되도록 하였다. 이산화탄소 소화설비 설계인자의 최적화는 제한조건으로 구속되어있는 약제유동율, 방출시간 및 설계변수(배관내경 등)를 최소화하였다. 시험장치에 의해 설계프로그램의 성능을 검증하였고, 소방분야에 최적설계의 기틀을 마련하였다. 또한 최적 설계인자를 바탕으로 이산화탄소 소화설비를 시공함으로써 소화설비의 효율성을 높이고 화재진압을 극대화할 것으로 본다.

ABSTRACT

In this study, it was developed to the design program optimization the design factors of the carbon dioxide fire extinguishing system on the basis of design theory for the carbon dioxide fire extinguishing system, national emergency management agency (NEMA) notice No. 2012-11, KS B 6261 and steepest descent method of optimization. The design program was developed to C++ compiler based on established the logic and algorithms and was to operate on the Windows operating system. The optimization of design factors for the carbon dioxide fire extinguishing system are minimized subject to constraint on agent flow rate, emission time and design variables (pipe size etc.). It was verified to the design program performance for test system, and it was provided to the foundation for optimal design in fire fighting field. Also, it is considered to improve the efficiency of the fire extinguishing system and to maximize of fire suppression as the construction of the carbon dioxide extinguishing system based on the optimal design factors.

Keywords : Optimization, Steepest descent method, Carbon dioxide fire extinguishing system, Design program, Optimal design

1. 서 론

산업발전과 경제적인 고도성장을 통해 인구와 산업이 도시에 집중되면서 건축물은 대형화·초고층화·다양화되어가고 있고, 건축물이 대형화·초고층화·다양화되어 갈수록 화재가 발생하면 화재진압이나 피난 등이 어려워져 위험성은 더욱 커질 수밖에 없다. 이러한 위험성을 줄이기 위해 소방설비는 다기능화 되어가고 있다.

많은 장점을 가진 이산화탄소 소화설비가 고가의 장비가 설치된 주요시설이나 건물에 설치되고 있다. 이산화탄

소 소화설비가 설치되고 화재 시 정상적으로 동작하였다 하더라도 방호구역에 필요한 약제량의 부족이나 정확치 못한 소화배관에 의한 방출 약제량의 차이, 방출시간의 차이로 소화약제가 방출되었더라도 화재진압이 되지 않는 경우가 발생할 수도 있다. 따라서 주요건물과 시설의 화재 안전을 위해 사용하는 이산화탄소 소화설비는 화재보호 대상물(구역)에 따라 필요한 소화약제의 소요량과 이송경로의 배관자재 크기, 소화약제의 방출시간 및 방호구역 내 소화약제의 효율적인 분배에 따라 화재진압을 보다 효과적으로 이룰 수 있으며, 또한 화재로부터 인명과 재산을

보호할 수 있는 설비가 될 수 있다⁽¹⁾.

최근 이산화탄소 소화설비의 소화성능을 높이기 위해 Kim⁽²⁾은 이산화탄소가 방출될 때 기화되기 때문에 방출배관의 체적을 제한해야 된다는 필요성을 제기하였고, Lee 등⁽³⁾은 방호구역 내 적절한 이산화탄소의 설계농도를 확보하고 일정한 시간을 유지해야 소화성능을 발휘할 수 있다고 주장하였다. 또한 소방방법에서도 이산화탄소 소화설비 소화성능의 향상을 위해 이산화탄소 소화설비를 설치할 때 적절한 약제량, 약제방출시간 등의 검증절차로 소방방재청 고시 제2012-11호⁽⁴⁾에 따라 프로그램을 개발 또는 인증을 받은 프로그램을 사용하여 설계하도록 규정하고 있고, 프로그램으로부터 설정된 설계인자에 따라 화재안전기준 NFSC 106⁽⁵⁾을 적용하여 시공하도록 규정하고 있다.

소화성능은 대상물에 설치된 소화설비를 이용하여 효과적이고 효율적으로 화재진압을 하는 것이며, 이때 소화설비는 최적의 시설을 설치하고 최소 약제량으로 최대 진압효과를 얻는 것이라고 생각한다. 소방도 이제는 소화성능 향상을 위한 노력뿐만 아니라 가치공학(value engineering) 측면에서 원가절감 등을 고려한 시설의 소화성능을 고려해야 할 것이다. 공학분야에서는 원가절감 등에 목적을 두고 수학의 최적화 이론과 공학적 이론을 접목시킨 최적설계(optimal design)⁽⁶⁾는 1970년대부터 시작되어 기계⁽⁶⁾, 설비⁽⁷⁾, 토목⁽⁸⁾ 등 많은 분야에서 응용되고 있고 경제적인 알고리즘 개발에 노력을 하고 있다. 하지만 국내외 소방분야에서는 최적설계의 접목이나 응용연구가 매우 미진한 실정이다.

본 연구에서는 이산화탄소 소화설비의 소화성능향상과 원가절감에 목적을 두고 최적화(optimization) 기법을 응용하여 이산화탄소 소화설비의 설계프로그램을 개발함으로써 소방분야에 최적설계의 기틀을 마련하고자 한다. 설계프로그램은 이산화탄소 소화설비의 설계이론과 최적화 기법 중 민감도 해석(sensitivity analysis)에서 비선형 문제를 선형 문제로 바꾸기 위해 미분을 취하는 방법인 최대 경사법(steepest descent method)을 이용하여 이산화탄소 소화설비의 약제방출량, 배관 및 분사헤드의 내경 등의 설계인자를 최적화할 수 있도록 하고 시험을 통해 설계프로그램을 검증하고자 한다.

2. 설계프로그램

2.1 이산화탄소 소화설비의 설계이론

이산화탄소 소화설비의 소화약제량 $M_s(\text{kg})$ 은 전역방출방식의 경우 표면화재와 심부화재에 따라 약제량 계산이 다르지만, 본 연구에서는 표면화재의 일반 방호대상물인 경우만을 고려하기로 한다. 소화약제량^(4,5)은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 식(1)에서 V 는 방호구역의 체적(m^3), M_v 는 체적당 약제량(kg/m^3), A 는 방호구역의 개구부 면적(m^2), K_1 은 방출계수, K_2 는 개구부 보정계수를 의미한다.

$$M_s = V \times M_v \times K_1 + A \times K_2 \quad (1)$$

각 분사헤드(노즐)에서 필요한 약제량을 방출하기 위해서는 계산 기준에 따라 배관 내경(D_p)과 분사헤드의 오리피스 내경을 결정해야 한다. 분사헤드의 약제방출율과 배관망 각 배관의 약제유동율은 배관 내경 또는 분사헤드의 오리피스 내경과 배관의 압력손실에 따라 결정된 식(2)로부터 구할 수 있다⁽⁹⁾. 식(2)에서 $M_h(\text{kg/s})$ 는 분사헤드의 약제방출율, $M_p(\text{kg/s})$ 는 배관망 각 배관의 약제유동율, $D = D_p = D_h(\text{m})$ 로서 D_p 는 배관 내경, D_h 는 오리피스 내경, $L(\text{m})$ 은 배관 등가길이, Y 와 Z 는 약제저장 및 배관의 압력에 의해 의존되는 계수를 의미한다⁽⁹⁾.

$$M_h^2 = M_p^2 = \frac{3.647(D^{5.25}Y)}{60L + 484.8(D^{1.25}Z)} \quad (2)$$

이산화탄소는 포화압력에서 액체 상태로 저장용기 밖으로 분출되기 때문에 이산화탄소 소화설비에 설치된 배관망의 각 배관에 따라 압력손실이 일정하지 않다. 배관마찰로 인해 압력손실이 발생하면 액체는 끓어오르게 되고 액체와 증기의 혼합물을 생성시키기 때문에 혼합물의 유량과 유속 또한 증가하게 된다. 따라서 배관의 단위 길이 당 압력손실은 배관의 입구보다 출구에서 더 크다. 식(2)에서 배관 내경과 분사헤드의 오리피스 내경을 계산할 때 이 점을 주의해서 계산해야 한다. 따라서 NFPA 12⁽⁹⁾에서 식(2)의 계수 Y 는 압력의 변화 값으로 계수 Z 는 밀도의 변화 값으로 나타내고, 이들 값을 용기의 평균 충전압력(5,171 kPa)일 때와 주위온도가 온도 21 °C일 때 쉽게 계산할 수 있도록 제시하고 있다. 또한 식(2)는 배관 내경과 분사헤드의 오리피스 내경을 계산할 때 계산의 편리성을 위해 등가 길이와 배관 내경 및 오리피스 내경으로 나타내면 식(3)과 같이 나타낼 수 있다⁽⁹⁾.

$$\frac{L}{D^{1.25}} = \frac{3.467Y}{(M_p/D^2)^2} - 484.8Z \quad (3)$$

소화배관 내 약제가 이동할 때 배관 벽과 약제의 흐름에 의해 발생하는 에너지손실은 유체의 마찰손실수두로 발생하고, 이 값은 배관의 길이, 직경, 조도 및 관부속 등 여러 조건에 따라서 결정된다. 배관의 유동손실은 배관자체에 의한 것과 관부속류에 의하여 발생하게 된다. 유체유동의 마찰손실은 다소 계산하기가 곤란한 점이 있으나 신뢰성이 입증되어 현재 널리 사용되고 있고 유체의 난류 유동현상에도 적용할 수 있는 Hazen-William 식을 이용하였다. 단위길이(m) 당 압력손실(ΔP)은 식(4)와 같다⁽¹⁰⁾. 식(4)에서 $\Delta P(\text{MPa/m})$ 는 배관의 길이 1 m당 마찰손실에 의한 압력손실, M_p 는 배관망 각 배관의 약제유동율, D_p 는 배관 내경, C 는 배관의 조도에 의한 마찰계수를 의미한다.

$$\Delta P = 6.174 \times 10^4 \frac{M_p^{1.85}}{C^{1.85} \times D_p^{4.87}} \quad (4)$$

이산화탄소는 충전압력에 의해 저장용기 밖으로 분출될 때 관마찰로 인해 압력손실이 발생하며, 이때 이산화탄소는 단열팽창과 그다지 크지 않은 운동에너지의 변화와 함께 이산화탄소의 방출조건은 저장용기의 압력에 의해 결정된다. 이 같은 저장용기의 압력에 의해 용기에서 단위시간당 방출되는 이산화탄소의 질량 $M_{loss}(kg)$ 은 식(5)와 같이 압력이 증가되는 배관 끝부분에서의 이산화탄소 체적으로부터 결정할 수 있다⁽¹¹⁾. 식(5)에서 $V_{loss}(m^3)$ 는 압력이 변하는 동안 저장용기에서 방출된 이산화탄소의 체적이며, $V_{fluid}(m^3)$ 는 배관망의 배관 끝점에서 압력과 온도의 변화가 시작되는 구간에서 저장용기 내에 있는 이산화탄소의 질량이 차지하는 전체 체적이고, $V_{cyl}(m^3)$ 는 저장용기의 체적이며, $\rho_{loss}(kg/m^3)$ 는 저장용기에서 방출된 이산화탄소의 밀도를 의미한다.

$$\begin{aligned} V_{loss} &= V_{fluid} - V_{cyl} \\ M_{loss} &= V_{loss} \times \rho_{loss} \end{aligned} \quad (5)$$

저장용기와 분사헤드에서 이산화탄소가 방출되는 동안 두 부분 모두 동일한 유량으로 이동하는 것으로 가정하면, 이산화탄소의 온도는 기화가 발생하는 경계에서 이산화탄소가 방출되기 바로 직전의 저장용기와 임의의 경계면 사이의 에너지 균형으로부터 해결할 수 있다. 또한 분사헤드에서 방출되는 소화약제의 약제방출시간 $t_h(s)$ 는 이산화탄소의 질량균형으로부터 식(6)에 의해 결정된다⁽¹¹⁾. 식(6)에서 $M_{np,i}(kg)$ 와 $M_{np,j}(kg)$ 는 시간변화에 따른 배관의 시작과 끝점에 저장된 이산화탄소의 질량이고, $i(=1 \sim n)$ 는 배관망 각 배관의 시작점 및 $j(=1 \sim m)$ 는 배관망 각 배관의 끝점이며, $M_{h,k}(kg/s)$ 는 각 분사헤드의 약제방출율이고, $k(=1 \sim o)$ 는 방호구역에 설치된 분사헤드의 번호를 의미한다.

$$t_h = \frac{M_{loss} - (M_{np,i} - M_{np,j})}{M_{h,k}} \quad (6)$$

2.2 최적설계 이론

이산화탄소 소화설비는 대상물에 따라 필요 약제량과 이송경로의 배관자재, 소화약제의 유동특성 등을 파악하고 방출시간, 방호구역 내 약제의 효율적인 분배에 따라 효율적인 화재진압을 할 수 있을 것이다. 따라서 이산화탄소 소화설비의 최적화는 화재발생 시 최소의 약제방출로 최대의 진압효과를 얻는 것이라고 생각한다. 이산화탄소 소화설비의 최적설계(optimal design)는 약제량, 약제방출량, 약제방출시간, 배관의 압력손실 등을 최적화하면 배관이나 분사헤드의 내경을 최적화할 수 있다.

일반적으로 최적화는 요구조건에 따른 목적함수(object function)와 제한조건식(constrain equations)에 의해 설정된다. 본 연구에서는 최적화 기법으로 제한조건의 목적함수의 최종 목적 점인 최적점(optimum point)을 수렴해가는 민감도 해석에서 비선형 문제를 선형 문제로 바꾸기 위

해 미분을 취하는 방법인 최대 경사법(steepest descent method)을 이용하였다^(1,12).

이산화탄소 소화설비의 최적화에 필요한 목적함수(F)는 약제량(M_s), 약제방출율(M_h), 약제방출시간(t_h), 분사헤드의 오리피스 내경(D_h), 약제공급을 위한 배관 내경(D_p), 배관의 압력손실(ΔP) 등을 포함하게 된다. 이들 모두를 포함한 목적함수는 분사헤드에서 방출되는 약제방출량과 약제방출시간의 함수가 될 수 있다. 하지만 약제방출시간(t_h)은 분사헤드와 약제방출량이 결정되어야만 산정될 수 있기 때문에 제한조건식이 된다. 목적함수에서 약제량은 식(1)에 나타낸바와 같이 방호구역의 체적에 의해 결정되기 때문에 상수의 의미를 갖고, 약제방출량과 약제방출시간은 산정된 약제량이 이산화탄소 소화설비의 배관망을 통해 분사헤드에 분배된 약제량과 분사헤드의 내경(D_h)에 따라 결정된다. 이산화탄소 소화설비의 최적화를 위한 목적함수는 식(7)과 같이 약제방출율(M_h)만의 함수로 나타낼 수 있고, 식(7)에서 분사헤드의 내경은 설계변수가 된다.

$$F(D_h) = \sum_{k=1}^O M_h(D_h) \quad (7)$$

제한조건식은 약제방출량을 결정하는 식(2)의 분사헤드 약제방출율 및 배관망 각 배관 약제유동율, 식(4)의 압력손실, 식(6)의 약제방출시간으로 식(8)~(10)으로 나타낼 수 있다. 제한조건식의 선형화와 민감도 해석은 최적화 이론의 최대 경사법을 적용하였다.

$$(M_{np})_{i,j} > 0, \text{ for all } i = 1, 2, \dots, n \\ j = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

$$(M_h)_k > 0, \text{ for all } k = 1, 2, \dots, o \quad (9)$$

$$(t_h)_k < 60(s), \text{ for all } k = 1, 2, \dots, o \quad (10)$$

여기서, i 는 배관망 각 배관의 시작점, j 는 배관망 각 배관의 끝점, k 는 방호구역에 설치된 분사헤드의 번호를 의미한다. 제한조건식 식(8)과 식(9)에서 배관망 각 배관의 약제량과 분사헤드의 약제방출율은 최소 영(zero)보다 커야하고, 제한조건식 식(10)의 분사헤드 방출시간은 소방방재청 고시 제2012-11호와 화재안전기준 NFSC 106에 따라 60초보다 작게 설정하였다.

2.3 개발 설계프로그램

설계프로그램은 이산화탄소 소화설비의 설계와 최적설계의 공학적 이론과 KS B 6261⁽¹³⁾을 바탕으로 로직 및 알고리즘⁽¹⁾을 정립하고, 윈도우 운영체제에서 운영되도록 하였으며, C++ 컴파일러를 이용하여 개발하였다. 설계프로그램은 Figure 1과 같이 방호구역, 실린더, 화재종류, 설계농도 등의 기본 자료를 입력하는 시스템자료 탭, 소화에 필요한 약제량 등을 계산하는 약제량 계산 탭, 시스템자료와 약제량 계산 탭에서 입력한 데이터나 계산된 결과를

Figure 1. The program for the optimal design factors determination of the carbon dioxide fire extinguishing system.

미리 보기, 저장·인쇄 등을 할 수 있는 약제보고서 탭, 설계하고자 하는 이산화탄소 소화설비의 배관 및 분사헤드 등의 내경을 최적화 기법에 의해 결정하는 배관자료 탭, 배관자료에서 결정된 배관의 각 구간별 유량, 입구 및 출구의 압력분포 등 계산해주는 압력분포 탭, 결정한 분사헤드(노즐)의 특성값(노즐효율, 유량, 압력분포, 내경 등)을 계산해주는 노즐계산 탭의 6개 부분으로 나누어 개발하였

다. 설계프로그램의 각 탭의 결과들로부터 이산화탄소 소화설비의 최적설계인자를 구할 수 있도록 하였다.

3. 시험장치

설계프로그램으로부터 결정된 설계인자의 검증과 성능 시험을 위한 시험장치의 구성도와 성능시험 계측상황은

Table 1. The Test Equipments Specification of Figure 2

Name		Specification	Name		Specification
①	1 st Fire room volume	172.8 m ³	③	Pressure gauge	0~10 MPa
	2 nd Fire room volume	27 m ³		Temperature sensor	-20~2,000°C
②	Agent cylinder	45 kg (68 L)	④	O ₂ Concentration analyzer	0~100%

Figure 2. The test system for the design factors verification and test schematic of the carbon dioxide fire extinguishing system.

Figure 2와 같고, 시험장치는 화재실에 설치된 이산화탄소 소화설비의 배관압력, 분사헤드의 압력, 약제방출량, 방출헤드의 온도 등을 측정할 수 있도록 구성하였다. 시험장치에 구성된 ① 방호구역(제1 및 제2 화재실), ② 약제저장용기, ③ 압력 및 온도센서, ④ 산소농도의 계측기 각 사양은 Table 1과 같고, ()속의 숫자 101~103은 방호구역에 설치된 이산화탄소 분사헤드의 번호를 의미한다.

4. 프로그램 운영, 시험 및 고찰

앞서 서술한 바와 같이 Figure 2의 방호구역(제1 및 제2 화재실)에 일반화재로 표면화재가 발생하고 개구부는 없는 것으로 가정하면, 설계프로그램 운영과 설계프로그램 운영결과로부터 설정된 설계인자의 검증 및 성능시험을

위한 조건은 방호구역에 따라 소방방재청고시 제2012-11호에 의해 Table 1과 같이 설정할 수 있다. Table 2에서 각 방호구역의 필요 약제량(162 kg과 18 kg)은 Table 2의 조건과 식(1) 의해 작성된 설계프로그램으로부터 방호구역의 체적(m^3)에 의한 약제량(kg)과 개구부면적을 보정한 보정 약제량(kg)이 계산되고, 약제량과 보정 약제량으로부터 자동 연산되어 두 약제량이 합산된 필요 약제량(kg)이 계산되며, 실린더 수량(개), 분당 방출유량(kg/min)이 자동으로 계산되어진다. 단, 개구부가 없는 조건으로 하였으므로 보정 약제량은 영이다. 방호구역에 설치될 분사헤드는 방호구역의 필요 약제량으로부터 제1 화재실에는 두 개(102, 103), 제2 화재실에는 한 개(101)를 설치하는 것으로 설정하였다.

배관 및 분사헤드의 내경을 최적화하기 위해 제한조건

Table 2. The Requirements for Design and Test of the Carbon Dioxide Fire Extinguishing System

Used	General Fire				
Fire Type	Surface Fire		Design Concentration	34%	
Emission Time of Agent	60 ± 10 s		Total Agent Quantity	180 kg ± 10%	
Pressure of Pipe	2.35 MPa Over		Pressure of Nozzle	2.35 MPa Over	
1 st Fire Room			2 nd Fire Room		
Volume	172.8 m ³		Volume	27 m ³	
Agent Quantity	162 kg ± 10%		Agent Quantity	18 kg ± 10%	
Nozzle NO./ Emission Quantity	2EA	102/81 kg	Nozzle No./ Emission Quantity	1EA	101/18 kg
		103/81 kg

Figure 3. The construction schematic of the carbon dioxide fire extinguishing system.

Table 3. The Pipe and Nozzle Sizes & the Comparison of Requirements and Design Factors

Determination of Pipe and Nozzle Sizes				Comparison of Requirements and Design Factors			
Section	Start point	End point	Size	Specification	Unit	Requirements ⁽³⁾	Design Program
1	201	1	15A	Agent Quantity	kg	180 ± 10%	180
2	1	2	32A	Emission Time of Agent	s	60 ± 10	60
3	2	3	32A	Pressure of Pipe	MPa	2.35 Over	4.02~4.20
4	3	4	32A	Pressure of Nozzle	MPa	101	4.20
5	4	101	15A			102	4.05
6	4	5	32A			103	4.02
7	5	102	25A	Emission Quantity of Nozzle	kg	101	18 ± 10%
8	5	103	25A			102	81 ± 10%
						103	81 ± 10%

식(10)에서 초기조건으로 사용될 각 분사헤드의 약제방출량은 Table 2와 같이 제1 화재실의 경우, 각 분사헤드(102, 103)는 약제량(162 kg)의 1/2(81 kg)씩 방출하는 것으로 설정하고, 제2 화재실의 경우, 분사헤드(101)는 약제량(18 kg)을 방출하는 것으로 설정하였다.

Figure 2의 방호구역에 설치할 이산화탄소 소화설비의 설치 계획도는 Figure 3과 같다. Figure 3에서 101~103은 Table 1에 제시한바와 같이 각 화재실에 설치될 분사헤드, 201은 이산화탄소 소화약제 저장용기, 0.50~4.36 등의 치수는 배관길이를 의미하고, ①~⑤는 설계프로그램에 입력되는 배관망 구간의 시작점과 끝점을 설정하게 되는 절점 번호를 의미한다.

Table 2의 조건과 Figure 3의 배관망 구간별 배관길이와 배관망 형상에 대한 배관부속(밸브, 엘보 등)의 위치를 개발된 설계프로그램에 입력하고 운영하면, 설계프로그램은 최대 경사법의 민감도 해석을 통해 최적화된 배관망 구간별 배관 및 분사헤드의 내경이 Table 3과 같이 결정된다.

설계프로그램에서 결정된 설계인자를 Table 2와 비교하여 Table 3에 나타냈다.

Table 3을 살펴보면, 약제량과 약제방출시간은 초기조건으로 입력된 것이므로 편차가 없고, 배관압력은 4.02~4.20 MPa, 분사헤드압력은 101 = 4.20 MPa, 102 = 4.05 MPa, 103 = 4.02 MPa로 기준 값 이상이므로 모두 만족된다. 분사헤드는 Table 3에 나타난 바와 같이 최적화에 의해 101 = 15A, 102와 103 = 25A로 결정되었고, 이들 각 분사헤드에 의한 약제방출량은 101 = 18.01 kg으로 +0.1%, 102 = 73 kg으로 -9.8%, 103 = 88.9 kg으로 +9.8%의 편차로 모두 ±10% 범위에 만족되는 것으로 나타났다. 아울러 설계프로그램으로부터 결정된 최적설계인자의 검증과 시험은 설계프로그램으로부터 결정된 Table 3의 각 분사헤드 약제방출량을 사용하여 소화/성능시험을 하였다.

이산화탄소 소화설비의 설계프로그램으로부터 결정된 Table 3의 최적설계인자와 Figure 3의 설치도를 바탕으로 Figure 2의 시험장치에 설치하고, Table 2의 조건을 바탕

Figure 4. The test of fire extinguishing and performance for the design factors verification.

으로 설계인자검증 및 소화/성능시험을 Figure 4와 같이 하였다. 단, 각 분사헤드의 약제방출량은 앞서 설명했듯이 Table 3의 설계프로그램에서 결정된 약제방출량을 사용하였다. Figure 4와 같이 소화/성능시험을 진행하면서 이산화탄소 소화설비의 소화/성능시험의 지표가 되는 화재실의 산소농도와 온도, 약제저장용기의 압력, 화재실 각 분사헤드의 방출압력, 약제방출밸브의 압력 등을 Figure 2에 나타낸 것과 같이 계측하였고, 그 결과는 Figure 5~Figure 9에 나타났다.

Table 3의 설계인자를 바탕으로 소화/성능시험을 한 결과 Figure 5의 화재실 산소농도에 나타낸바와 같이 화재발생 후 화재는 산소농도와 온도가 급격히 줄어드는 약 22 s 부터 진화되기 시작하여 약 35초 만에 진화되었고, 약제방출시간은 35 s가 된다. 아울러 화재실의 온도는 Figure 2에서 제시한 온도센서(③)을 이용하여 온도를 계측한 결과 Figure 6과 같고, Figure 6에 나타낸바와 같이 각 화재실은 약제방출 약 4초정도부터 온도가 급격히 떨어지기 시작하여 화재가 진화됨을 알 수 있다. 또한 Figure 6의 분사헤드 102 근처에서 약제방출 약 12 s~32 s 사이 온도

가 상승한 나타난 것은 약제방출압력에 의해 화염이 분출되어 나타나는 현상인 것으로 확인하였다.

시험결과 Figure 7~Figure 9의 데이터와 Table 2, Table 3과 비교하여 Table 4에 나타냈다. Table 4을 Table 3의 조

Figure 7. The pressure of CO₂ agent cylinder.

Figure 5. The O₂ concentration of the 1st fire room.

Figure 8. The pressure of each nozzle.

Figure 6. The temperature at nearby each nozzle.

Figure 9. The pressure of agent emission valve.

Table 4. The Comparison of the Design Program and Test for Requirements

Specification	Requirements ⁽³⁾		Design Program (A)	Test (B)	Deviation of A and B
Agent Quantity (kg)	180		180	169.82	-10.18(-5.7%)
Emission Time of Agent (s)	60 ± 10		60	35(-41.7%)	-25(-41.7%)
Pressure of Pipe (MPa)	2.35 Over		4.02~4.20	4.05~4.34	0.03~1.14(0.7~27.1%)
Pressure of Nozzle (MPa)	101	2.35 Over	4.20	4.34	1.34(27.1%)
	102		4.05	4.11	0.06(1.5%)
	103		4.02	4.05	0.03(0.7%)
Emission Quantity of Nozzle (kg)	101	18 ± 10%	18.01	19.31(+7.2%)	1.31(7.3%)
	102	81 ± 10%	73.00	67.89(-7.0%)	-5.11(-7.0%)
	103	81 ± 10%	88.90	82.62(-7.1%)	-6.28(-7.1%)

건과 비교해 보면, 방출시간은 35 s, 배관압력은(4.05~4.34) MPa, 분사헤드압력은 101 = 4.34 MPa, 102 = 4.11 MPa, 103 = 4.05 MPa로 Table 1의 조건 값 이상이므로 모두 만족되고, 각 분사헤드의 약제방출량은 101 = 19.31 kg으로 +7.2%, 102 = 67.89 kg으로 -7.0%, 103 = 82.62 kg으로 -7.1%의 편차로 모두 ±10% 범위에 만족된다. 하지만 Table 4의 결과를 비교해 보면, 설계프로그램 값보다 방출시간은 -25 s 작고, 배관압력은(0.03~1.34) MPa, 분사헤드압력은 101 = 1.34 MPa, 102 = 0.06 MPa, 103 = 0.03 MPa로 크게 나왔으며, 각 분사헤드의 약제방출량은 설계프로그램 값보다 101 = 1.31 kg으로 크고, 102 = -5.11 kg과 103 = -6.28 kg으로 작게 방출되었다. 또한 소화/성능시험으로부터 개발된 설계프로그램의 효용성을 입증하였지만, 배관압력 등의 편차(0.7~27.1) %를 줄이기 위해 프로그램에서 제한조건에 의해 최적 점을 수렴하는 민감도를 좀 더 세밀하게 조정할 필요가 있다. 분사헤드의 압력과 약제방출량도 배관의 압력편차만큼 각 분사헤드의 압력과 약제방출량이 같은 폭의 편차(0.7~27.1%)를 보여주고 있다. 따라서 배관의 압력편차를 줄인다면 각 분사헤드의 압력과 약제방출량 편차도 함께 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

이산화탄소 소화설비의 설계이론, 소방방재청 고시 제 2012-11호 및 KS B 6261과 최적화 기법 중 최대 경사법을 바탕으로 이산화탄소 소화설비의 설계인자를 최적화할 수 있는 설계프로그램을 개발하고 설계프로그램의 검증에 위한 소화/성능시험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 이론과 소화/성능시험을 통해 이산화탄소 소화설비의 최적설계인자를 구할 수 있는 엔지니어링 데이터 구축과 기술을 확보함으로써 소방분야에도 최적설계를 접목할 수 있는 기틀을 마련하였다.

2) 본 연구에서 채택된 예의 경우 설계프로그램과 소화시험에서의 배관압력 및 분사헤드 약제방출량 등의 편차는 소방방재청 고시의 조건 ±10% 범위에는 만족되어 소

화시험으로부터 개발된 설계프로그램의 효용성을 입증하였지만, 배관압력 등의 편차(0.7~27.1) %를 줄이기 위해 프로그램에서 제한조건의 수렴조건을 수치해석적으로 좀 더 세밀하게 조정할 필요가 있다.

3) 분사헤드의 압력과 약제방출량의 편차는 배관의 압력 편차만큼 발생되고, 이들의 편차는 배관압력과 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

4) 설계프로그램으로부터 결정된 설계인자에 의한 소화시험으로 프로그램의 성능 및 효용성을 입증함으로써 성능 위주설계의 실현이 가능할 것으로 생각되며, 설계프로그램으로부터 이산화탄소 소화설비 설계인자를 사전에 검증함으로써 이산화탄소 소화설비의 효율성을 높이고 화재진압을 극대화 할 수 있는 소화설비가 시공될 것으로 기대된다.

References

1. D. M. Lee and W. K. Lim, "A Development Design Program and Test Module of the Carbon Dioxide Fire Extinguishing System", Proceedings of 2012 Autumn Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 267-270 (2012).
2. W. K. Kim, "Quantity of the Agent in the Piping System of Low Pressure Carbon Dioxide Extinguishing Systems", Proceedings of 2011 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 136-139 (2011).
3. S. M. Lee, S. W. Moon and S. H. Ryu, "A Study on verifying the reliability of CO2 Fire Extinguishing Systems through the Direct Discharge Test", Proceedings of 2012 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 155-158 (2012).
4. NEMA, "The Certification Performance of Design Program and the Technical Standard of Product Inspection of Gas Extinguishing Systems", NEMA Notice No. 2012-11 (2012).
5. NEMA, "National Fire Safety Code of Carbon Dioxide Fire Extinguishing System", NEMA NFSC 106 (2012).

6. D. M. Lee, "A Study on Dynamic Optimization of Machine Structures", In-Ha University (1997).
7. C. Y. Choi and S. C. Ko, "A Practical Approach for Optimal Design of Pipe Diameters in Pipe Network", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 18, No. 8, pp. 635-640 (2006).
8. S. D. Shon and S. J. Lee, "A Study on the Optimum Design Program for Steel Truss Using Discrete Design Variables", Proceedings of KASS Symposium-Spring, Vol. 8, No. 1, KASS, pp. 111-118 (2011).
9. NFPA, "Standard on Carbon Dioxide Fire Extinguishing Systems", NFPA 12A (2006).
10. SFPE, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", Third Edition, NFPA (2002).
11. P. J. DiNenno, E. W. Forsselli, M. J. Ferreira, C. P. Hanauska and B. A. Johnson, "Modeling of the Flow Properties and Discharge of Halon Replacement Agents", NFPA Technical Papers, pp. 117-129 (1994).
12. E. J. Haug and J. S. Arrora, "Applied optimal Design", pp. 15-94 (1979).
13. Korean Industrial Standard, "KS B 6261 Fixed High-Pressure Carbon Dioxide Fire Extinguishing Systems", Korean Standards Association (2007).