

제연구역 출입문 개방 각도에 따른 폐쇄력에 관한 연구

오 원 신* · 정 석 환*

*세종사이버대학교 소방방재학과

A Study on the Closing Force according to the Opening Angle of the Door in the Smoke Control System

Won-Sin Oh* · Suck-Hwan Joung*

*Department of Fire and Disaster Prevention, Sejong Cyber University

Abstract

In this study, the experiment was conducted on a fire door ($W \times H = 0.98 \text{ m} \times 2.19 \text{ m}$) installed on the vestibule. The effective leakage area for each opening angles and closing forces derived from the impulse-momentum equation was compared and analyzed with the experimental results. As a result of the experiment, the major factors affecting the door closing forces were the pressure difference and the area of the door. The difference of door closing forces between measured and calculated values by the impulse-momentum equation showed a deviation of less than $\pm 15\%$ at the opening angles of 5° to 10° . At the door opening angle of 2.5° , the dynamic pressure was much higher than the measured static pressure, and this pressure difference is estimated to be air resistance acting to prevent the door from being completely closed.

Keywords : Door Closing Force, Smoke Control system, Effective Leakage Area

1. 서론

화재에 의해 발생한 연기의 제어는 고층 건축물 인명안전을 위하여 가장 중요한 요소 중 하나이다. 국내에서는 건축법에서 수직으로의 연기확산 방지 및 피난경로 확보 등의 목적으로 공동주택의 경우 16 층 이상, 기타 건축물은 11층 이상에 대하여 특별피난계단의 설치를 요구하고 있다.[1]

특별피난계단의 계단실 및 부속실 제연설비의 제연구역 선정은 계단실 및 그 부속실을 동시에 제연, 부속실 단독 제연, 계단실 단독제연, 비상용승강기 승강장 단독 제연 중 하나를 따르도록 하고 있다.[2] 국내의 경우 부속실 단독제연 방식을 가장 많이 적용하고 있다. 부속실 단독 제연 방식은 별도의 수직덕트와 각 층 부속실에 설치된 차압댐퍼를 이용하여 가압하는 방식으로, 부속실은 일반적으로 내화구조의 벽체와 2개의 출입문으로 구성된다.

제연구역 내 출입문의 완전한 닫힘을 유지하기 위하여 자동폐쇄장치를 설치하고 있으나, 계단에 면한 출입문의

폐쇄력은 거실 또는 복도와의 차압, 문의 개방 각도에 따른 유효누설 면적, 방화문의 크기, 문의 닫히는 속도 등에 영향을 받아 완전히 닫히지 않는 상태가 발생하고 있다.

부속실 제연설비의 방화문 폐쇄력과 관련된 국내의 연구 중 이창욱 외[3]의 연구에서는 방화문의 개폐력 측정장치를 제작하여 출입문의 개폐 각속도와 폐쇄력의 관계를 연구하여 폐쇄력이 일정하게 유지되는 임계각속도가 존재한다는 것을 확인하였다. 유우준 외[4]의 연구에서도 방화문의 회전각도 및 회전속도 변화에 따른 개방력과 폐쇄력에 대한 시험을 실시하였다. 이재오 외[5]의 방화문 개방력과 관련된 연구는 완전 폐쇄된 상태 보다 5° 개방된 상태에서 측정할 때 더 많은 개방력이 필요한 것으로 분석하였다. 국외의 경우 부속실 가압보다는 계단실 가압을 많이 적용하기 때문에 이와 관련된 연구는 부족한 실정이며, D.A. Marshall 외[6]은 창문 등 개구부가 없는 공간에서 문이 닫히는 경우에 대하여 문의 개방각도에 따른 누설틈새를 가정하고 폐쇄속도에 따른 힘을 계산하여, 문이 거의 닫힐 때까지 폐쇄력이 급격히 증가하는 것을 이론적

†Corresponding Author : Suck-Hwan Joung, Department of Fire and Disaster Prevention, Sejong Cyber University, 121, Gunja-ro Gwangjin-gu, Seoul, E-mail: shiner@sjcu.ac.kr

Received December 9, 2021; Revision December 21, 2021; Accepted December 21, 2021

으로 제시하였다. 국내·외의 선행연구에서는 방화문 개폐 조건에 의한 제연구역의 누설면적 변화와 그로 인한 차압덤퍼를 통한 급기 유량의 변화 조건에 따른 출입문 폐쇄력에 대한 영향과 관련된 연구가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 Door fan을 이용하여 ASTM E779-03 따른 문의 개방각도별 유효누설틈새 면적, 기하학적 형상에 의하여 계산되는 면적 및 CAD (Computer aided design) 도면에 의하여 산출된 면적을 비교하고, 차압을 유지하기 위한 풍량과 문의 개방 각도에 따른 폐쇄력을 측정하여 이를 역적-운동량 방정식을 이용하여 방화문 폐쇄력과 비교하여 출입문의 폐쇄력에 영향을 주는 가장 주요 인자를 도출하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 이론적 배경

2.1.1 유효누설면적 산정

D.A. Marshall 외의 연구에서는 문의 개방각도에 따른 기하학적 형상에 의해 누설틈새 면적을 도출하였다. 문이 바닥에 충분히 가까이 있다고 가정하고 문이 각도 θ 만큼 열려 있을 경우 개방된 공간의 면적은 아래 식(1)과 같다.

$$A_T = A_{xy} + A_z \\ = w^2 \sin\theta + 2hw \sin(\theta/2) \quad \text{----- (1)}$$

여기서, A_T : 총 개방면적(m^2)

A_{xy} : x-y 방향의 개방면적(m^2)

A_z : z 방향의 개방면적(m^2)

w : 출입문의 폭(m)

h : 출입문의 높이(m)

θ : 개방각도 ($^\circ$)

Fan 가압을 이용한 공기 누설량 결정을 위한 시험방법인 ASTM E779-03 (Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization)에서는 지수흐름 방정식(Exponential flow Equation)과 오리피스 방정식(Orifice Equation)을 이용하여 무차원 유량계수(dimensionless flow coefficient)=1일 때의 유효누설면적 $A_{L,ref}$ 를 구하며 아래 식(2)와 같다.

$$A_{L,ref} = C_0 \left(\frac{\rho_0}{2} \right)^{\frac{1}{2}} (dP_r)^{\left(n - \frac{1}{2} \right)} \quad \text{----- (2)}$$

여기서, $A_{L,ref}$: 유효누설면적(m^2)

C_0 : 공기 누설 계수

(Air leakage coefficient, $\frac{m^3}{s Pa^n}$)

dP_r : 참조 압력 (reference pressure, Pa)

n : 압력지수 (pressure exponent)

2.1.2 역적-운동량 방정식에 의한 폐쇄력

[Figure 1]과 같이 출입문이 일부 개방된 조건에서 역적-운동량 방정식을 이용하여 폐쇄력 식을 유도하면 아래 식(3) 및 식(4)과 같으며 합성력에 의한 폐쇄력은 식(5)와 같다.

$$F_x = P_1 A_1 - P_2 A_{xy} \sin\theta - \rho Q (v_2 \sin\theta - v_1) \quad \text{--- (3)}$$

$$F_y = (P_2 A_{xy} + \rho Q v_2) \cos\theta \quad \text{--- (4)}$$

$$\therefore F = P_1 A_1 \cos\theta + \rho Q v_1 \cos\theta \quad \text{--- (5)}$$

여기서, F : 방화문 폐쇄력(N)

P_1 : 부속실의 압력(Pa)

P_2 : 복도의 압력(Pa)

A_1 : 문의 크기(m^2)

A_{xy} : 유효누설면적(m^2)

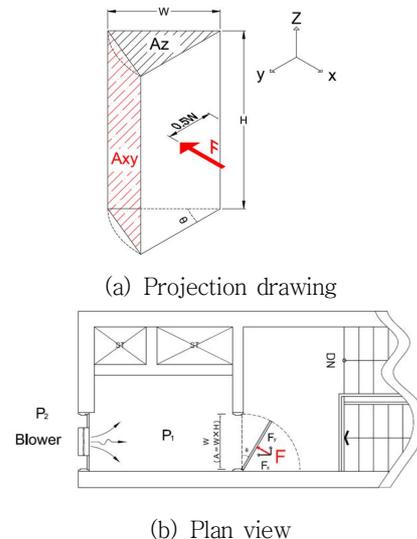
θ : 문의 개방 각도($^\circ$)

Q : 공기흐름유량(m^3/s)

v_1 : 90도 개방된 문을 통한 유속(m/s)

v_2 : 개방각도 θ 시에 A_{xy} 면을 통한 공기의 유속(m/s)

출입문의 폐쇄력에 영향을 주는 인자는 식(5)에서 알 수 있듯이 부속실의 압력, 방화문 크기, 공기유량, 유속, 공기밀도 및 유효누설면적이다.



[Figure 1] Door closing forces by opening angles

2.1.3 공기 저항에 따른 닫힘 힘

D.A. Marshall 외 연구에서는 문의 폐쇄에 필요한 힘을 기하학적 형상에 의한 누설틈새 면적 및 Bernoulli's 방정식을 이용하여 아래 식과 같이 유도하였다.

$$F_{air} = \frac{1}{32} \frac{\pi^2 h^3 w^3 \rho}{[w \sin \theta + 2h \sin(\theta/2)]^2} \quad \text{--- (6)}$$

여기서, F_{air} : 방화문 폐쇄에 필요한 힘 (N)
 W : 문의 폭 (m)
 d : 도어 손잡이의 이격거리 (m)
 θ : 문의 개방 각도 (°)

2.2 실험방법 및 결과

2.2.1 실험방법

부속실의 방화문 개방 각도에 따른 유효누설틈새 면적을 측정하기 위하여 [Figure 1-(b)]와 같이 복도에 면한 출입문에 Blower를 설치하고 계단실과 면한 출입문의 개방 각도를 변경하면서 공급 유량과 복도와 제연구역 사이의 차압 및 폐쇄력을 측정하였다. 개방각도는 0° ~ 10° 까지 2.5° 간격으로 변화를 주었으며, 개방 각도별 10, 30, 50 Pa의 압력수준에서 Blower가 정상상태가 되었을 때 풍량과 폐쇄력을 측정하였다. 풍량과 차압은 가압과 감압에 대하여 각각 측정하였으며, 폐쇄력은 방화문의 폭 1/2 지점에서 가압 시 측정하였다.

실험대상 부속실의 구조는 방화문 폭 0.98 m 높이 2.19 m, 부속실의 높이 3.917 m, 바닥면적은 3.27 m²이

며, 측정 시 온도는 15.0 °C였다. 누설틈새의 크기를 정확히 측정하기 위하여 부속실 내에 설치된 차압뎀퍼는 밀폐하였으며, 측정에 사용한 장비 사양은 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Specification of the Experiment Instruments

Instruments	Model	Specification
Push-pull Gage	FG-5020	Range 0 - 200N Accuracy: ±2%
Door Fan	Retrotec 6000	Flow Accuracy: +/-5%
Pressure Sensor	DM32	Accuracy: ±1% of pressure reading or ±0.25 Pa

2.2.2 실험결과 및 유효누설면적

개방 각도 및 차압에 따른 유량 및 폐쇄력의 측정결과는 <Table 2>와 같으며 Fan 가압을 이용한 공기 누설량 결정을 위한 ASTM E779-03에 따라 문의 개방각도별 압력지수 n, 공기누설지수 C 및 참조압력 4 Pa에서의 누설면적 $A_{L,ref}$ 을 계산한 결과는 <Table 3>과 같다.

이 결과를 연기제어에서 일반적으로 사용하는 출입문의 유효누설면적으로 환산하기 위하여 Orifice 방정식의 무차원 유량계수 $Cd = 0.65$ 를 적용결과와 식(1)에 따라 계산된 기하학적 면적 및 CAD에서 산출된 면적을 비교 분석한 결과를 <Table 4>와 [Figure 2]에 나타내었다.

삼각함수를 이용해 산출된 기하학적 면적인 식(1)은 출입문의 두께와 문틀에 의한 간섭이 반영되지 못하기 때문에 다른 계산 방법에 의한 것보다 누설면적이 크게 산출됨을 알 수 있다.

<Table 2> Pressure difference, Flow rate and door closing forces by opening angles

Opening Angle	0°		2.5°		5°		7.5°		10°	
	Test ¹	Test ²								
Air flow Condition*										
Differential Pressure (Pa)	-9.9	10	-10.5	11.3	-9.6	11.1	-9.8	11.4	-10.5	12.6
Air rate (CMH)	168	158.3	318	320.6	1,552	1,528	2,957	2,949	4,389	43,75
Opening Force (N)	-	-	37	-	25.4	-	22.3	-	25	-
Differential Pressure (Pa)	-30	29.9	-30.2	29.1	-30.6	32.6	-29.4	30.8	-23.6	32.7
Air rate (CMH)	315.8	294.1	588.9	607.3	2,731	2,770	4,955	5,178	6,949	7,343
Opening Force (N)	-	-	76.7	-	65	-	65.3	-	55.1	-
Differential Pressure (Pa)	-50.3	50	-49.6	49.6	-49.1	50.8	-44.3	46.3	-53.3	63.1
Air rate (CMH)	424	391.1	802.6	835.7	3,428	3,573	5,971	6,709	10,453	11,091
Opening Force (N)	-	-	119.7	-	103.3	-	97.7	-	101	-

* Air flow Condition* : Test¹ is Pressurization and Test² is Depressurization

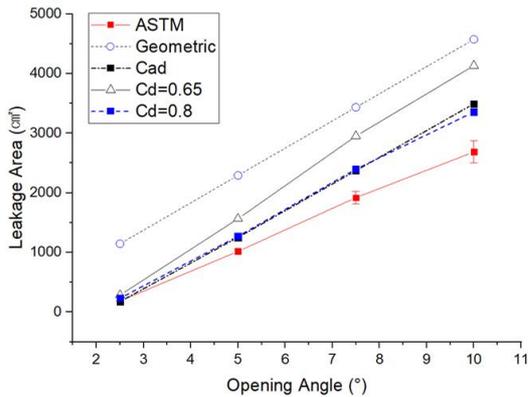
<Table 3> Leakage area calculated by exponential equation

Opening Angle (°)	n	C (m ³ /s · P ⁿ)	A _{L,ref} (cm ²)
0	0.563	0.012	102.3
2.5	0.621	0.020	185.1
5	0.518	0.128	1,017.7
7.5	0.521	0.240	1,918.4
10	0.543	0.326	2,685.9

<Table 4> Effective leakage areas by opening angles

Opening Angle (°)	Air leakage area (cm ²)				
	ASTM E779-03	geometric	CAD	Cd = 0.65	Cd = 0.8
2.5	185.1	1145.8	176.7	284.7	231.3
5.0	1017.7	2290.8	1253.0	1565.7	1272.1
7.5	1918.4	3434.2	2371.4	2951.2	2397.9
10.0	2685.9	4574.9	3494.2	4132.0	3357.2

엔지니어링 실무에서 적용 가능성이 가장 높은 CAD 산출면적과 오리피스 방정식을 적용했을 때 가장 유사한 크기는 오리피스 방정식에 Cd=0.8을 적용한 결과로 2.5° 개방 조건에서는 CAD 산출 면적대비 31% 편차를 보였으나 나머지 개방각도에서는 4% 이내의 편차를 보였다.

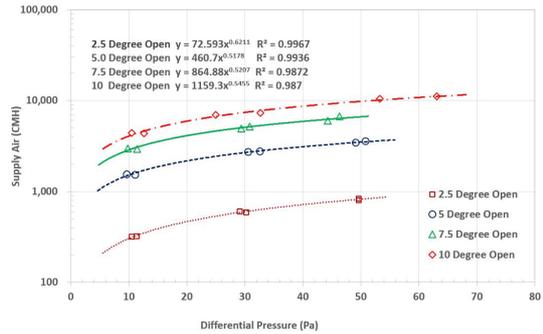


[Figure 2] Effective leakage areas by opening angles

3. 분석 및 고찰

3.1 개방각도별 차압과 풍량의 관계

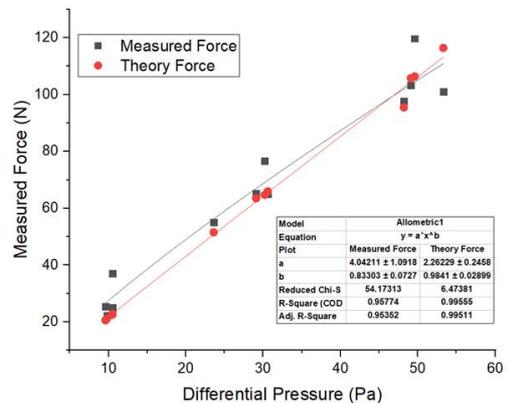
출입문의 개방각도에 따라 부속실과 복도간의 차압을 유지하기 위해 부속실로 공급되어야 하는 유량과 차압과의 관계는 [Figure 3]과 같다. 개방 각도가 작아질수록 측정값에 대한 추정 곡선의 결정계수(R²)가 1에 가까워지는 특성을 보였으며, 10° 개방 조건에서도 R² = 0.987로 지수방정식의 관계가 있음을 확인할 수 있었다.



[Figure 3] Relationship between pressure difference and flow rate by opening angle of a door

3.2 폐쇄력 시험결과 분석

부속실이 가압되고 출입문이 일부 개방된 조건에서 출입문 폭의 1/2 위치에서 측정된 폐쇄력과 식(5)에 따라 계산된 이론 폐쇄력의 결과는 <Table 5>와 같다. [Figure 4]는 2.5° ~ 10° 사이의 출입문 개방 조건에서 차압과 출입문 개방력의 관계를 나타낸다.



[Figure 4] Relationship between pressure difference and closing forces by opening angle of a door

이론 폐쇄력과 측정값의 차이는 2.5° 개방 조건에서 차압 10 Pa 부근에서 60.9 %로 측정치와 이론치의 차이가 가장 크게 나타났으며, 이외의 측정점에서는 약 ±15%의 편차를 보였다. 또한 차압이 낮을수록 편차가 크게 발생하였으며, 개방각도가 작을수록 큰 편차를 보였다.

<Table 5> Closing forces by opening angle of a door

Opening Angle(°)	Differential Pressure (Pa)	Measured Force (N)	Theory Force (N)
2.5	10.5	37.0	22.5
	30.2	76.7	64.8
	49.6	119.7	106.5
5.0	9.6	25.4	20.6
	30.6	65.0	65.8
	49.1	103.3	105.5
7.5	9.8	22.3	21.2
	29.1	65.3	63.6
	48.2	97.7	95.8
10	10.5	25.0	23.0
	23.6	55.1	54.9
	53.3	101.0	117.5

역적-운동량 방정식에 의하여 폐쇄력의 크기에 영향을 주는 요인은 차압, 방화문 크기, 공기유량, 유속, 공기밀도 및 유효누설면적이다. 그러나 식(5)에서 출입문 개방각도에 따른 누설면적을 통한 흐름 유량에 의한 폐쇄력 변화는 차압과 면적에 의한 항에 비해 매우 작았으며 개방각도 10°, 차압 50 Pa 수준에서 약 3.23%로 가장 크게 나왔다. 따라서 출입문의 폐쇄력에 영향을 미치는 주요 인자는 부속실의 차압과 출입문의 크기라 할 수 있다.

3.3 개방 각도에 따른 문의 폐쇄력

[Figure 4]에서 개방 각도가 2.5° 일 때 역적-운동량 방정식에 의하여 계산된 힘보다 측정값이 모든 압력차에서 높게 나타났다. 이에 대한 분석을 위하여, 베르누이 방정식을 이용한 동압과 정압을 비교하였다. 부속실에서의 총 누설틈새는 개방된 방화문의 흐름 유량에 의해 지배된다고 가정하였다. 계산 결과 <Table 6>과 같이 5° ~7.5°에서는 베르누이 방정식을 이용하여 기하학적 면적과 측정 유량을 적용하여 계산된 동압과 측정된 정압이 유사하였으나 2.5°에서는 50Pa 부근에서 측정치의 정압보다 동압이 약 76% 이상 높은 것으로 나타났다. 이것은 D.A. Marshall 외의 연구에서 분석된 공기저항(air resistance)에 의한 영향으로 추정된다. 따라서 개방각도가 2.5° 이하인 경우

역적-운동량 방정식(식 5)에 의하여 문의 폐쇄력을 계산하는 것은 한계가 있는 것으로 분석되었다.

<Table 6> Comparing dynamic pressure and static pressure

Opening Angle(°)	P _v (Pa)	P _{s, tested} (Pa)	rate
2.5	13.7	11.3	121.2%
	46.9	29.1	161.2%
	87.2	49.6	175.8%
5	10.8	11.1	97.3%
	33.3	32.6	102.1%
	52.5	50.8	103.3%
7.5	11	11.4	96.5%
	30.9	30.8	100.3%
	44.9	46.3	97.0%
10	12.4	12.6	98.4%
	31	32.7	94.8%
	70.1	63.1	111.1%

4. 결론

본 연구에서는 문의 개방각도별 유효누설틈새 면적을 가압 팬을 이용한 누설틈새 면적 산출 방법인 ASTM E779-03을 적용하여 구하고 이를 삼각함수를 이용하여 산출된 기하학적 면적과 비교하였다. 또한 부속실이 가압되는 조건에서 출입문(W×H=0.19 × 2.19m)의 개방각도에 따른 폐쇄력을 측정하고 이를 역적-운동량 방정식에 의해 유도된 이론값과 비교하여, 폐쇄력에 영향을 주는 가장 주요한 인자를 분석하여 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

- 부속실 가압에 의한 힘과 역방향으로 닫히는 출입문의 폐쇄력에 영향을 미치는 주요인자는 부속실과 복도간의 차압과 방화문의 면적임을 확인할 수 있었으며, 개방각도가 2.5° 이하인 경우 역적-운동량 방정식에 의한 힘보다 크며, 이는 가압 공간의 공기저항에 의한 것으로 추정된다.
- 가압 공기에 의해 출입문에 발생하는 힘과 역방향으로 작용하는 출입문의 경우 개방각도가 작아지면 공기저항에 의하여, 동압이 측정된 정압 보다 높게 나타났다. 이 압력이 개방된 출입문이 완전히 폐쇄되지 않도록 작용하는 공기 저항으로 추정된다.
- 출입문 폐쇄력의 측정값과 이론적 계산값의 편차는 2.5°, 10Pa 근처의 측정점 이외에는 약 ±15% 이내인 것으로 분석되었다.

- 출입문 폐쇄력에서 가압공기의 유량에 의해 발생하는 속도항은 10° 개방 시 차압 50 Pa 부근에서 3.23% 정도로 영향이 크지 않았으며, 개방 각도가 증가할수록 영향도는 증가하는 것으로 분석되었다.
- 삼각함수를 이용한 기하학적 면적은 출입문의 두께와 문틀에 의한 간섭에 의한 면적 감소를 반영하지 못하기 때문에 ASTM E799-03에 의해 산출된 누설면적보다 크게 산정될 수 있다.

본 연구는 특정 조건의 부속실 1개만을 대상으로 한 분석 결과로서의 한계가 있으며, 보다 많은 부속실을 대상으로 추가적인 평가가 수행된다면, 부속실 가압 조건에서 출입문의 일시적 개방 후 완전 폐쇄에 필요한 폐쇄력과 부속실의 차압과 관련된 일반화가 가능할 것으로 보여진다.

5. References

- [1] Enforcement decree of the building act.
- [2] National fire safety code 501A.
- [3] C. W. Lee, H. J. Kim, Y. K. Choi, M. C. Youm, H. S. Ryo(2009), "A study on the conditions of injection pressurization in the smoke-control zone II. analysis of the conditions for closing force of fire door with variation of angular velocity." Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, 27(2):6-10.
- [4] B. Y. Jeong, J. U. Lee(2001), "Movement compatibility of ON/OFF controls." IE Interfaces, 14(3):302-309.
- [5] J. O. Lee, C. S. Choi(2013), "Study on the Assessment of the Criteria on a Door for the Optimum Design of the Access Door of a Smoke Control Zone" Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, 27(3):66-71.
- [6] W. J. You, J. S. Nam, H. S. Ryou(2010), "A study on the fire door performance method of pressurized room for special evacuation stairwells." Proceedings of 2010 Autumn Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, 6-16.
- [7] D. A. Marshall, T. O. Hands, I. Griths, G. Douglas(2011), "Slamming doors due to open windows." Journal of Physics Special Topics, A2_7.
- [8] M. J. Hurley, SFPE(2016), SFPE handbook of fire protection engineering (5th ed). p. 1799.

저자 소개



오 원 신

세종사이버대학교
소방방재학과 겸임교수
관심분야 : CONTAM 및 FDS Simulation,
화재 및 피난 Simulation 등



정 석 환

세종사이버대학교
소방방 재학과 교수
관심분야 : 연기제어 시스템 개발, CONTAM
및 FDS Simulation 등