

[Research Paper]

## 아크릴계 내화도료 연소가스의 유해성 평가와 배기온도에 대한 고찰

전수민<sup>†</sup> · 김재준

한양대학교 건축공학과

### Review of Hazard Test of Combustion Gas and Exhaust Temperature of Acrylic Fire Protection Paint

Soo-Min Jeon<sup>†</sup> · Jae-Jun Kim

Department of Architectural Engineering, HanYang University

(Received September 12, 2016; Revised June 30, 2017; Accepted July 10, 2017)

#### 요 약

국내 건축물에 사용되는 내화도료는 품질시험을 통하여 내화구조로 인정받아야 사용할 수 있다. 품질시험은 내화 시험 및 부가시험이며 내화도료의 부가시험 항목은 가스유해성과 부착강도이다. 이중 가스유해성의 경우 관련 KS 등에 따라 동물실험을 하며 매년 16마리의 살아있는 쥐가 희생된다. 이에 실험자는 윤리적 부담을 느끼게 되며 실험 기관은 관련 법률에 따른 실험동물운영위원회 운영 등 행정적 부담을 지게 된다. 이에 연소 가스의 성분 분석을 통한 유해성 측정 등 상기 동물실험을 대체하려는 연구와 노력이 지속되고 있으나 현재까지는 동물실험이 유지되고 있다. 연소가스의 유해성 평가 시 시험체 가열에 따라 발생하는 배기온도가 측정되는데 특정 타입 내화도료에 대한 배기 온도를 분석하여 유의한 초기 반응 양상을 파악할 수 있다면 동물실험 대체에 기여할 수 있을 것이라 사료된다. 이에 본 논문을 통하여 가스유해성 시험 시 쥐의 행동정지시간과 배기온도와의 관계를 파악하여 현 동물실험의 개선점을 찾아보고자 하였다.

#### ABSTRACT

A fire resistance certification needs to be obtained before fire protection paint can be used in Korea. In the case of paint, the tests for certification are fire, gas hazard and bond strength. According to the hazard test standard of combustion gas, 16 mice are sacrificed every test. Therefore, there are ethical problems for the experimenter and legal problems for the laboratory. Accordingly, many alternatives are being assessed, such as combustion gas analysis, but they have not replaced animal testing yet. With gas hazard testing, the exhaust gas temperature can be measured. The property of the initial reaction of a specific fire paint can be characterized by this temperature. The purpose of this study was to consider the improvement point for a gas hazard test through comparative analysis of the exhaust temperature and the time of death of the mice.

**Keywords** : Computational Fluid Dynamics, Flash Point, Numerical Analysis, Flammable Liquid, Pool Fire, Relative Humidity, Radiation Heat Flux, Atmospheric Transmissivity, Low Flammability Limit

## 1. 서 론

### 1.1 연구배경 및 목적

화재 시 인명과 재산 및 건축물의 구조적 안전을 도모하기 위하여 집회시설, 의료시설 및 공동주택 등의 건축물은 주요구조부에 의무적으로 내화구조를 사용하여야 하는데, 특히 강재의 경우 화재 시 내력저하가 크게 발생하므로 철골조 주요구조부에 내화구조를 적용하는 것이 중요하다.<sup>(1,2)</sup> 내화구조의 적용에 대한 국내 제도는 성능적 내화설

계법 보다 사양적 내화설계법을 따르고 있으며 관련 규칙, 고시, 한국산업표준 등에서 정한 시험방법에 따라 성능을 확인하여 ‘도료피복철골보’, ‘도료피복철골기둥’, ‘뿔철피복철골보’ 및 ‘뿔철피복철골기둥’ 등을 내화구조로 인정하고 있다.<sup>(3)</sup> 내화구조의 성능은 품질시험을 실시하여 확인하는데 품질시험은 내화성능을 확인하기 위한 내화시험과 내구성 및 안전성 등을 확인하기 위한 부가시험으로 구성된다. 내화도료의 부가시험 항목은 가스유해성, 부착강도 및 성분분석인데 가스유해성 즉 연소가스의 유해 여부는 연소

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: [min99806@hanmail.net](mailto:min99806@hanmail.net), TEL: +82-31-910-0733, FAX: +82-31-910-0505

© 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

가스에 노출된 쥐의 행동정지시간 즉 쥐가 사망하는데 까지 걸린 시간으로 판단하고 있다. 이에 동물실험에 대한 윤리적 부담과 실험동물운영위원회 운영 등 절차적 부담이 발생한다. 이러한 동물실험에 대하여 연소가스 분석을 통한 유해성 측정 등 대체방안이 연구되어 왔으나 현재까지는 동물실험을 대체하지 못하고 있다. 본 논문에서는 가스 유해성시험 시 합부를 결정짓는 쥐의 평균행동정지시간과 시험과정에서 측정되는 연소가스 배기온도와의 관계를 파악하여 동물실험을 대체할 성분분석방법 도입 이전까지 동물실험을 조금이라도 감소시킬 수 있는 방안은 없을 지 찾아보고자 하였다.

## 1.2 연구방법 및 범위

내화도료는 내화성능에 따라 1시간용, 2시간용 및 3시간용으로 구분되는데 가장 일반적인 경우는 1시간용이며 현재(2017년 6월) 총 15개 구조의 1시간용 내화도료 인정이 유효하다.<sup>(4)</sup> 이를 도료 물성에 따라 살펴보면 수성 내화도료 2개 구조 외에는 모두 아크릴계 내화도료이다. 본 논문에서는 상기와 같이 가장 일반적인 경우인 1시간용 아크릴계 내화도료 13개 구조에 대한 내화구조 인정 당시의 품질시험 결과를 연구 대상으로 하였다. 가스유해성시험방법 및 판정기준은 KS F 2271 ‘건축물의 내장재료 및 구조의 난연성 시험방법’<sup>(5)</sup>에 따르는데 6분간 내화도료를 가열하여 발생한 가스에 8마리의 쥐를 노출시켜 평균 행동정지시간이 9분보다 클 경우 합격으로 판단하며 ‘내화구조 인정 및 관리업무 세부운영지침’<sup>(6)</sup>(이하 내화지침)에 따라 구조별 2회의 시험을 실시한다. 유해가스를 발생시키는 가열시간이 6분으로 상대적으로 짧으므로 도료의 초기 반응양상이 가스유해성 시험결과에 중요한 영향을 미친다고 볼 수 있다. 내화구조 인정을 위한 품질시험 중 도료의 초기 반응양상을 정량적으로 나타내는 수치는 가스유해성 시험 시 측정되는 배기온도이다. 이에 상기 13개 구조에 대한 26건의 가스유해성시험에 대하여 가열시간 6분간의 배기온도 변화를 조사하여 쥐 평균행동정지시간과의 관계를 살펴보았다.

## 2. 관련제도 및 기존연구 고찰

### 2.1 관련제도 고찰

‘건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙’(국토교통부령 제238호, 이하 피난규칙)<sup>(7)</sup> 제3조의 규정에 따라 내화구조가 정의된다. 동조 제1호부터 제7호까지는 건축물의 부위별 내화구조에 해당되는 특정재료 및 구조가 명시되어 있으며 통상 이를 법정 내화구조라 칭한다. 예컨대 보의 경우 철골을 두께 5 cm 이상의 콘크리트로 덮으면 내화구조인 것으로 정의되어 있다. 또한 동조 제8호부터 10호까지는 법정 내화구조에 해당되지 않는 내화시스템에 대하여 한국건설기술연구원(이하 KICT)에서 공장품질관리확인

및 품질시험 등을 거쳐 내화구조로 인정하도록 명시되어 있으며 통상 이를 인정 내화구조 또는 내화구조라 칭한다.<sup>(8)</sup> 내화구조의 인정절차는 ‘내화구조의 인정 및 관리기준’(국토교통부 고시 제2016-416호, 이하 내화기준)<sup>(9)</sup>으로 정해져 있으며 내화구조를 구성하는 주요 재료·제품을 생산하는 제조공장에 대한 품질관리확인, 생산입회, 시료채취 후 내화 및 부가시험을 거쳐 KICT에서 내화구조로 인정하고 있다. 내화구조 인정 여부 판단에 가장 중요한 항목이라 할 수 있는 품질시험에 대한 사항은 관련 한국산업표준(KS F 2257-1<sup>(10)</sup> 등) 및 내화지침에서 정하고 있다.

내화구조의 종류는 내화기준 제2조에 따라 ‘내화품목’으로 나누어지며 내화지침 별표1에 내화품목이 정의되어 있는데 본 논문에서 다루고자하는 내화도료는 내화품목 중 ‘도료피복철골보’ 및 ‘도료피복철골기둥’에 해당된다. 동 별표1에 따르면 도료피복철골보는 ‘도료가 가열되었을 때 발포하여 단열층을 형성하는 것 또는 도막을 두껍게 하여 단열효과가 있는 도료를 철골보 바탕에 도장한 구조’로 정의되며 도료피복철골기둥의 정의도 이와 유사하다. 또한 내화지침 별표 6에서 내화품목별 품질시험 항목 및 방법을 정하고 있으며 도료피복철골보 및 도료피복철골기둥의 경우 내화시험, 부착강도시험, 가스유해성시험 및 제품성분 분석을 실시하도록 되어 있고 동 지침 부록1 품질시험방법에서 도료의 가스유해성시험은 KS F 2271을 따르도록 명시하고 있다.

가스유해성시험 시 살아있는 흰쥐가 사용되는데 1회 시험 시 8마리, 1개 구조 당 2회 시험하므로 16마리의 쥐가 시험의 합부와 무관하게 희생되며 시험 후 사체도 처리하여야 하기 때문에 시험자에게 도덕적인 부담을 주게 된다. 또한, 시험기관은 동물보호법에 따른 동물실험윤리위원회<sup>(11)</sup> 또는 실험동물에 관한 법률에 따른 실험동물운영위원회<sup>(12)</sup>를 의무적으로 설치 및 운영하여야 하는데 동 위원회에 수의사를 필수적으로 참여시켜야 하는 등 준수하여야 하는 행정절차가 간단하지 않다.

### 2.2 해외 사례 고찰

연소가스 유해성 평가에 대한 해외 제도를 살펴보면 미국의 경우 내부 마감 재료에 대하여 ASTM E 84 시험을 실시하여 화염전파와 연기발생의 정도에 따라 Class A, B 및 C 급으로 재료를 구분하는데 화염전파의 경우 시멘트 보드에 대한 측정결과를 0, 붉은 참나무에 대한 측정결과를 100으로 기준 삼아 0~25의 수치는 Class A는, 26~75의 수치는 Class B, 76~200의 수치는 Class C로 구분한다. 유럽의 경우 EN 13823 규격에 의하여 Single Burning Item test (SBI)시험을 실시하여 재료의 화재성장지수(Fire Growth Rate)와 연기발생지수(Smoke Growth Rate), 10분간의 총 방출열량(Total Heat Release) 등에 따라 A~E 등급으로 구분한다. 일본의 경우 ISO 5660-1 규격 시험을 하여 열방출률 등을 기준으로 불연, 준불연 및 난연재료를 구분하고 있다.

### 2.3 기존연구 고찰

건축재료 연소가스의 유해성 평가에 대한 기존연구를 살펴보면, 조남욱 등은 연소가스의 흡입독성시험을 통하여 서로 다른 생성가스가 쥐의 행동과 조직에 영향을 미친다고 연구하였으며,<sup>(13)</sup> 서현정 등은 주요 내장재의 연소가스 측정 및 독성지수를 산출하여 화재안전성 평가를 위한 기초 데이터를 제시하였고,<sup>(14)</sup> 김남균 등은 연소생성물 중 입자상 물질의 필터링 여부에 따른 비교분석을 통하여 입자상 물질의 유해성을 제시하였다.<sup>(15)</sup> 그리고 조남욱 등은 설치류의 평균 행동정지시간을 측정하고 동시에 ISO 19702를 적용한 연소가스정량분석 및 독성지수 산정을 통하여 시안화수소, 일산화탄소, 이산화탄소의 상대적 독성을 평가하였으나<sup>(16)</sup> 이와 같은 기존 연구의 결과가 연소가스의 유해성을 평가하는 동물실험을 대체하는 단계에 이르지 못하는 못하고 있는 실정이다.

## 3. 가스유해성 평가방법 및 결과 고찰

### 3.1 가스유해성 평가방법 개요

내화기준 제8조 등의 규정에 따라 내화구조는 한국산업표준 및 내화지침에서 정한 시험방법 및 판정기준에 따라 성능을 평가한다. 내화도료 연소 시 발생하는 가스의 유해성 평가는 KS F 2271 ‘건축물의 내장재료 및 구조의 난연성 시험방법’ 중 가스유해성 시험방법에 따른다. 두께 1.2 mm 정방형 강판에 Figure 1과 같이 지름 25 mm의 구멍을 3개 뚫고 인정 신청된 두께로 도료를 도장한 후 1개월 양생 및 24시간 건조를 거친 시험체를 사용한다. 가스유해성 시험 장치는 Figure 2와 같이 가열로, 교반상자 및 피검상자로 구성된다.

시험체에 대하여 부열원으로 3분 가열 후 주열원으로 3분 가열하여 발생한 연소가스에 주령 5주 체중 18~22 g 인 암놈 흰 쥐를 노출시키며, 쥐 8마리를 피검상자 내 쳇바퀴 형상의 회전바구니 8개에 넣고 회전바구니의 움직임을 자동으로 기록하여 쥐의 행동정지시간을 측정한다. 이에 따라 Figure 3과 같은 측정결과가 도출된다.

또한, 쥐의 평균행동정지시간(x)은 다음 식 (1)에 따라 구한다.

$$x = \bar{X} - \sigma \tag{1}$$

여기서  $\bar{X}$ 는 8마리 쥐의 행동정지시간의 평균값(단위 : 분),  $\sigma$ 는 8마리 쥐의 행동정지시간의 표준편차(단위 : 분)를 의미한다. 인정 신청된 내화구조의 가스유해성에 대하여 2

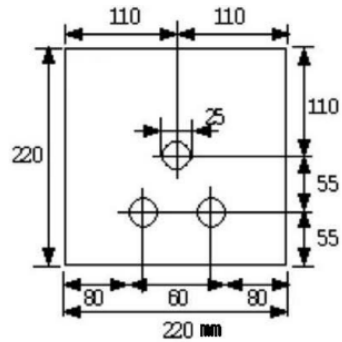


Figure 1. Size of test specimen.

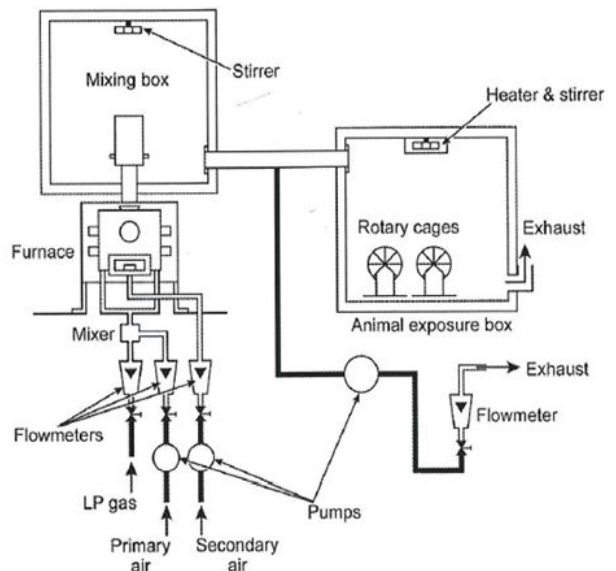


Figure 2. Test equipment for gas hazard.

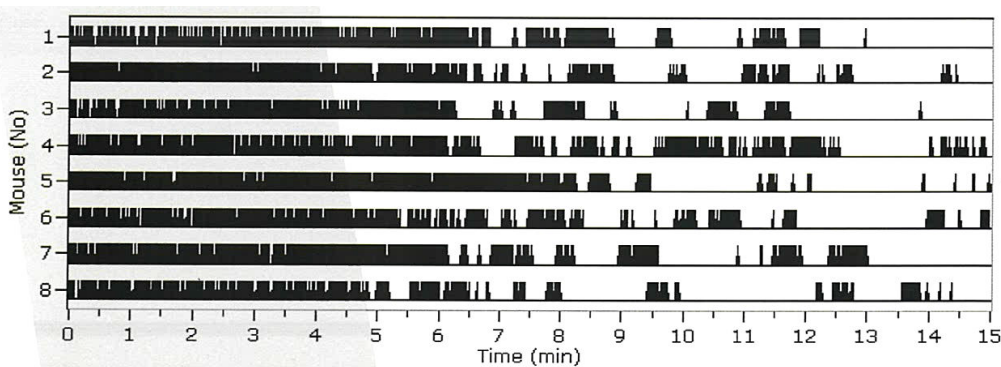


Figure 3. Mouse stop time.

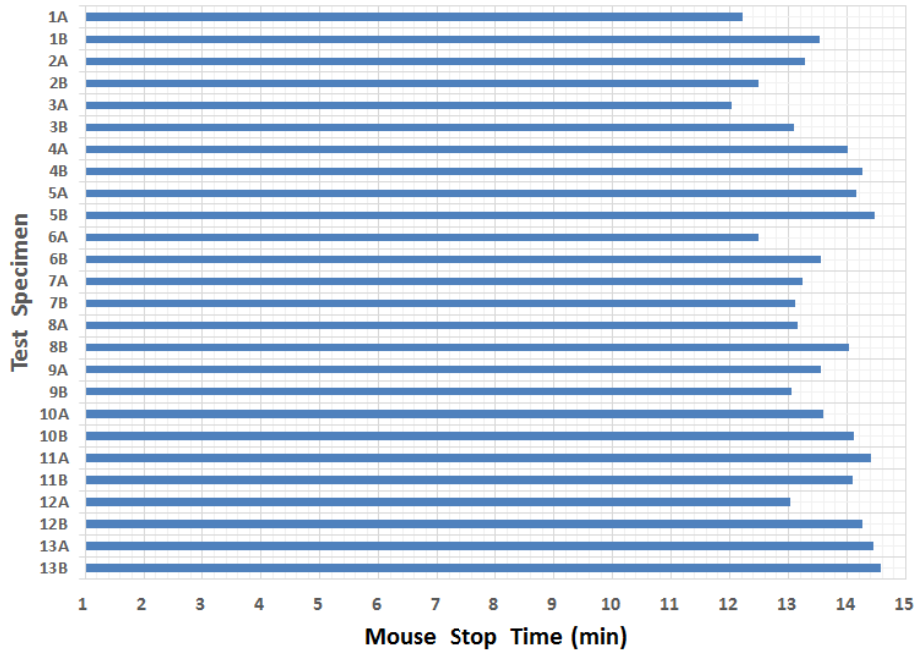


Figure 4. Gas hazard test results.

회 시험의 평균행동정지시간(x) 값이 모두 9분보다 큰 경우 합격으로 한다. 상기 시험과정 중 가열로에 설치된 시험체에서 발생하는 연소가스의 배기온도를 측정하도록 되어 있다.

### 3.2 가스유해성 평가결과

내화구조의 인정이 유효한 1시간용 아크릴계 내화도로 13개 구조의 가스유해성 시험결과를 Figure 4와 같다. 인정 구조 1개마다 2회씩 시험하므로 26개의 평균행동정지시간이 존재한다. 이들 평균행동정지시간의 최솟값은 12.04분, 최댓값은 14.57분, 평균값은 13.55분이고 표준편차는 0.73분이다.

## 4. 배기온도와 가스유해성 평가결과 고찰

### 4.1 단계별 연소가스 배기온도 고찰

가스유해성 시험 시 연소가스 배기온도는 1분 간격으로 6분간 측정되므로 매 시험 시 6개의 배기온도가 측정된다. 26건의 시험결과를 대상으로 하였으므로 1분에서 6분까지 6단계의 경과시간마다 26개씩의 배기온도 데이터가 존재하며 이를 각각 행동정지시간과 비교해 보면 Figure 5에서부터 Figure 10까지의 비교결과가 도출된다. Figure 5의 경우 Y축은 Figure 4에서 전술한 위의 평균 행동정지시간 (Mouse Stop Time) 26건이며 X축은 동 행동정지시간과 매치되는 시험체 가열 1분 경과시점의 배기온도 26건이다. Figure 6에서 Figure 10의 경우 Y축은 Figure 5의 경우와 동일하며 X축은 행동정지시간 26건과 매치되는 가열 2분에서 가열 6분 경과시점까지의 배기온도들이다.

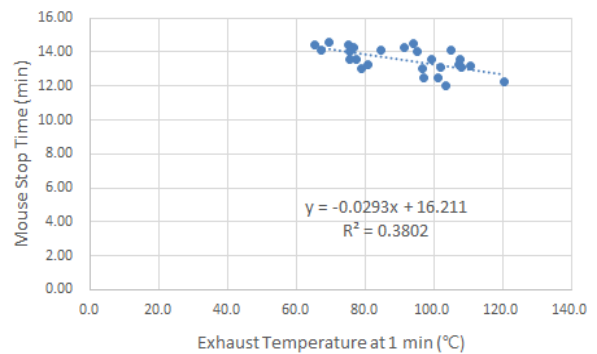


Figure 5. Stop time and exhaust temperature at 1 min.

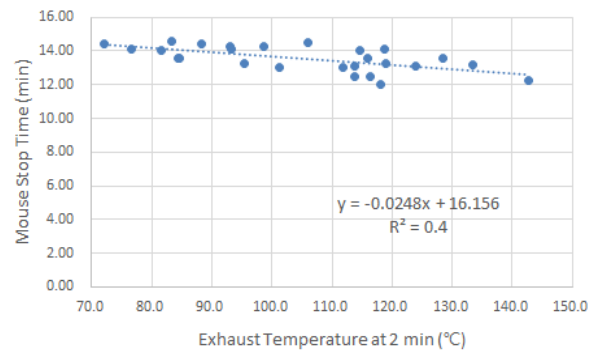


Figure 6. Stop time and exhaust temperature at 2 min.

단계별 배기온도와 행동정지시간과의 관계를 Excel (2013)의 데이터분석 도구 중 회귀분석을 활용하여 분석하면 Table 1의 결과가 도출된다.

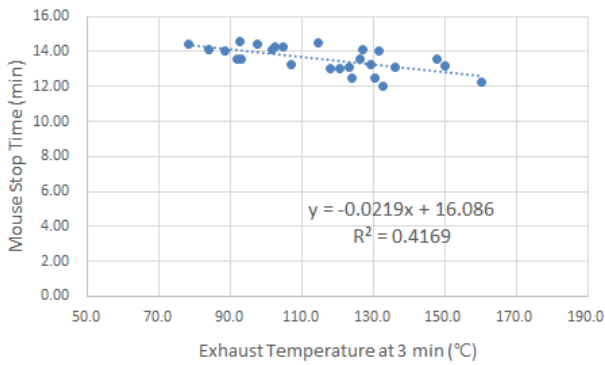


Figure 7. Stop time and exhaust temperature at 3 min.

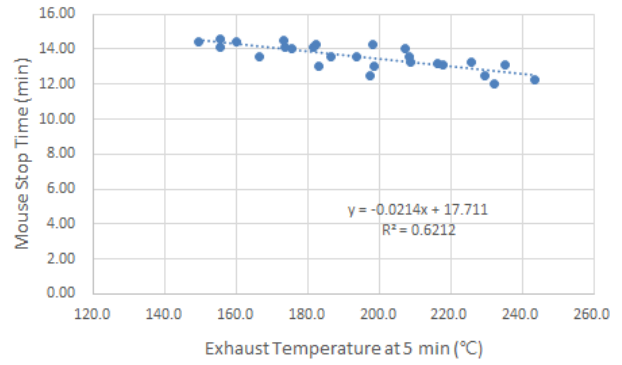


Figure 9. Stop time and exhaust temperature at 5 min.

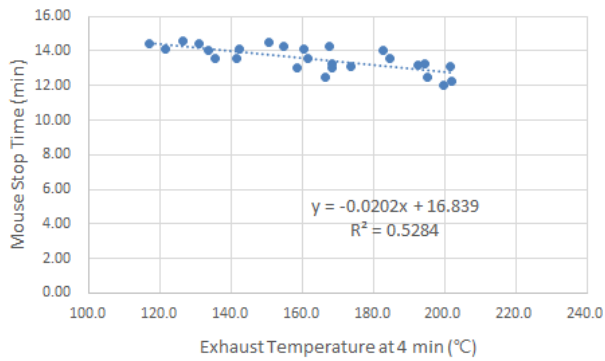


Figure 8. Stop time and exhaust temperature at 4 min.

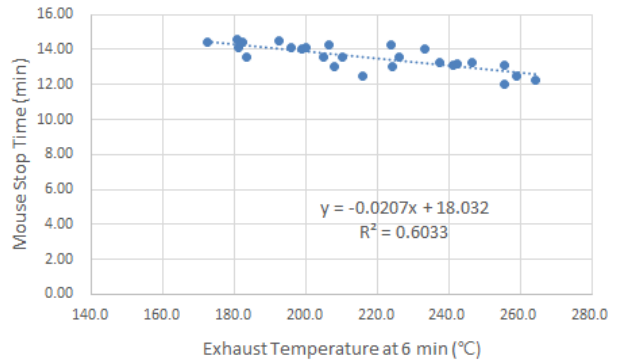


Figure 10. Stop time and exhaust temperature at 6 min.

Table 1. Regression Statistics

Regression Statistics	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min
Multiple R	0.6166	0.6324	0.6457	0.7269	0.7882	0.7767
R Square	0.3802	0.4000	0.4169	0.5284	0.6212	0.6033
Intercept	16.2107	16.1560	16.0858	16.8388	17.7110	18.0323
X Variable 1	-0.0293	-0.0248	-0.0219	-0.0202	-0.0214	-0.0207
t Stat	23.0430	24.4074	25.8270	26.2064	26.4460	24.1072
P-value	7.04E-18	1.87E-18	5.05E-19	3.60E-19	2.91E-19	2.49E-18

#### 4.2 배기온도와 행동정지시간의 관계고찰

상기 분석결과를 살펴보면 다중상관계수(Multiple R) 및 결정계수(R Square) 모두 가열 1분 경과시점에서 가장 작은 값을, 가열 5분 경과시점에서 가장 큰 값을 나타내었다. 다중상관계수는 공분산을 X의 표준편차와 Y의 표준편차의 곱으로 나눈 값으로 변수간의 상관관계를 나타내는 지표이며 1에 가까울수록 양의 상관관계를 나타내며, 결정계수는 상관계수를 제곱한 값으로 Y의 변화가 X의 변화에 의해 몇 % 설명이 되는지 보여주는 지표이다. 이에 다중상관계수 0.788 및 결정계수 0.621로 시간대별 배기온도 중 두 값 모두 최대치를 보인 ‘5분 경과시점의 배기온도’가 쥐의 행동정지시간과 가장 밀접한 관계가 있음을 알 수 있는데 이

를 회귀식으로 표현하면 다음 식 (2)와 같다.

$$y = 17.711 - 0.0214x \tag{2}$$

여기서 y는 8마리 쥐의 행동정지시간의 평균값, x는 가스유해성 시험체 가열 5분 경과 시점의 배기온도를 의미한다. 또한, Table 1의 분석결과 중 4분, 5분 및 6분 즉 후반 3분의 경우가 1분, 2분 및 3분 즉 전반 3분의 경우보다 상대적으로 높은 다중상관계수 및 결정계수를 나타내었는데 이를 통하여 주열원으로 시험체를 가열하는 후반 3분간 아크릴계 내화도로에서 쥐의 행동정지에 영향을 미치는 연소가스가 주로 발생하는 것으로 추정해 볼 수 있다.

## 5. 결 론

내화구조 인정을 위한 필수 부가시험 중 유일한 동물실험인 가스유해성시험의 대안이 제시되지 못하고 있는 현실을 바탕으로 현재 인정이 유효한 아크릴계 1시간용 내화도료 13개 구조의 가스유해성 시험결과 26건에 대하여 쥐의 행동정지시간과 배기가스의 상관관계를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 가스유해성 시험을 위한 시험체 가열시간 6분 중 주로 후반 3분 동안 쥐의 행동을 정지시키는 유해가스가 발생하였다. 가열시간 6분 동안 배기온도는 지속적으로 상승하였으나, 시험체 가열시간에 따른 배기온도 중 가열개시 5분 경과 시점의 배기온도와 쥐의 행동정지시간과의 상관관계가 가장 밀접하였다.

2) 상기 상관관계의 다중상관계수는 0.788이며 Y절편 17.711 및 배기온도 계수 -0.0214의 회귀식으로 쥐의 행동정지시간을 나타낼 수 있다.

내화구조 인정신청이 가장 많이 이루어지는 1시간용 아크릴계 내화도료는 고성능 특수 내화도료에 비하여 품질시험 데이터가 상대적으로 많아 객관적 일반화가 용이하다. 이에 본 연구를 통하여 동 내화도료 연소 초기의 특성과 동물실험 결과와의 상관관계를 고찰하여 보았으며 향후 아크릴계 내화도료에 대한 가스유해성 평가 시 동물실험과 더불어 동 회귀식도 참고적으로 고려해 볼 것을 조심스럽게 제안한다. 아울러, 본 논문은 현행 내화기준 및 내화지침에 따른 가스유해성 평가 방법과 그에 따른 제한적인 결과물을 대상으로 하는 한계를 가지고 있으므로 그 외의 조건에 대하여는 향후 추가적인 연구가 수반되어야 할 것으로 사료된다.

## References

1. I. K. Kwon, N. Y. Jee and H. Y. Kim, "Experimental Study on the Determination of Fire Protection Thickness through Section Factors of Structural Steels", Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 18, No. 9, pp. 125-132 (2002).
2. S. C. Kim, "Correlation Analysis with Fire Endurance Time based on Section Factor to Obtain an Estimate of Fire Protection Material Thickness", Architectural Engineering Master's Thesis, Chungju National University (2009).
3. S. H. Lee, K. H. Kim, M. S. Lee, H. Y. Kim, H. D. Kim, T. H. Song, C. Y. Ok, B. K. Jin, et al., "Development of Fire Resistance Design Method in Building", KICT 2004-376, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (2004).
4. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, "Certificate List of Fire Resistant Construction", <http://www.kict.re.kr/160728> (2016).
5. Korea Agency for Technology and Standards, "Testing Method for Incombustibility of Internal Finish Material and Element of Buildings", KS F 2271:2006 (2006).
6. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Detail Instructions for Accreditation and Management of Fire Resistant Construction", Document No:11556 (2016).
7. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "The Evacuative and Fireproof Construction of Buildings", Minister Decree No:238 (2015).
8. S. M. Jeon and J. J. Kim, "Experimental Study on Separate Evaluations of Fire Resistance of SFRM for Steel Beams and Columns", Fire Science and Engineering, Vol. 29, No. 4, pp. 1-6 (2015).
9. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Standards for Accreditation and Management of Fire Resistant Construction", Notification No:2016-416 (2016).
10. Korea Agency for Technology and Standards, "Methods of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction-General Requirements", KS F 2257-1:2014 (2014).
11. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, "Animal Protection Act", Act No:13023 (2015).
12. Ministry of Food and Drug Safety, "Laboratory Animal Act", Act No:14023 (2016).
13. N. W. Cho, D. H. Rie and E. H. Oh, "A Toxicity Evaluation for Toxic Gases of Building Finish Materials", Journal of Korean Oil Chemists' Society, Vol. 29, No. 1, pp. 129-140 (2012).
14. H. J. Seo and D. W. Son, "Hazard Assessment of Combustion Gases from interior Materials", Fire Science and Engineering, Vol. 29, No. 4, pp. 49-56 (2015).
15. N. K. Kim, N. W. Cho and D. H. Rie, "A Study on the Risk of Particulate Materials Included in the Combustion Products of Building Materials", Fire Science and Engineering, Vol. 30, No. 1, pp. 43-48 (2016).
16. N. W. Cho, J. C. Lee and D. H. Rie, "A Comparative Study on Toxic Gas Index and Stop Time of Mouse Activity", Fire Science and Engineering, Vol. 25, No. 4, pp. 35-41 (2011).