[Research Paper]

실물 연소 실험이 진행된 비닐장판의 연소거동 및 탄화 패턴 해석에 관한 연구

조희수 · 최충석^{*†}

대전둔산소방서 화재조사팀장, *전주대학교 소방안전공학과 교수

A Study on the Analysis of the Combustion Behavior and Carbonization Pattern of Vinyl Flooring on Which a Real-Scale Combustion Test Was Performed

Hi-Su Joe · Chung-Seog Choi^{*†}

Leader, Fire Investigation Team, Daejeon Dunsan Fire station,

^{*}Professor, Dept. of Fire Safety Engineering, Jeonju University

(Received November 6, 2019; Revised November 26, 2019; Accepted November 27, 2019)

요 약

본 연구에서는 구획된 공간에 비닐장판을 깔고, 인화성 액체 50 ml를 뿌리고 실물 연소 실험을 실시하였다. 연소가 진행될 때의 연소 거동을 실시간 분석하였으며, 탄화된 비닐장판의 표면 및 단면의 탄화 패턴을 해석하였다. 휘발유에 착화되어 화염이 최성기에 도달하면 지속적으로 화염이 일어나는 영역, 간헐적으로 화염이 일어나는 영역, 플룸 영역 등이 형성되는 것을 알 수 있었다. 50 ml의 휘발유가 비닐장판 위에서 연소되는데 약 26 s가 소요되었으며, 달무리 패턴이 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 등유를 비닐 장판 위에 동일하게 뿌리고, 가스 토치를 이용하여 착화를 시도하였으나 실패하였다. 연소가 완료된 후의 비닐장판의 탄화 범위는 가로 600 mm, 세로 380 mm이며, 탄화면적은 1,000 mm²로 분석되었다. 탄화된 비닐장판의 표면은 열에 의해 코팅층이 탄화층으로 변형되어 더욱 딱딱한 것을 알 수 있었다. 그리고 탄화된 비닐장판의 경계면을 실체현미경을 이용하여 단면을 분석한 결과 부풀림 현상이 확인되었고, 코팅층 하부의 흰색 경계층이 없어지는 것을 알 수 있었다.

ABSTRACT

A real-scale combustion test was conducted on a vinyl flooring in a divided space, with 50 mL of an inflammable liquid sprayed on it. The combustion behavior of the vinyl flooring was studied in real time, and the carbonization patterns of the surface and cross-sections of the carbonized vinyl floor were analyzed. When the flame ignited by gasoline reached its peak, a continuously flaming region, intermittent flaming region, plume region, etc., were formed. The combustion of 50 mL gasoline on vinyl flooring took 26 s, and a halo pattern was observed. This test involved spraying kerosene evenly on the vinyl flooring and attempting to ignite the flooring using a gas torch, which failed. After the combustion of the vinyl flooring was complete, its carbonized range was measured to be 600 mm in length and 380 mm in width, and the carbonized area was 1000 mm². Heat transformed the coated layer of surface of the carbonized vinyl flooring into a carbonized layer, which became harder. The analysis of cross-section of the boundary surface of the carbonized vinyl flooring using a stereoscopic microscope showed that the vinyl flooring was bubbling, and that the white boundary layer at the bottom of the coated layer had disappeared.

Keywords : Combustion behavior, Carbonization pattern, Real scale combustion, Halo pattern

[†]Corresponding Author, E-Mail: enetek@naver.com. TEL: +82-63-220-3119, FAX: +82-63-220-2056

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

1. 서 론

일반적으로 화재는 에너지원에 따라 구분하면 전기화재, 가스화재, 유류화재 등 사용된 에너지가 무엇인가에 따라 그 이름을 붙여 명명한다. 화재가 발생하여 건축물 또는 기계기구의 소실 정도에 따라 전소, 반소, 부분연소 등으로 분류할 수 있다. 화재가 발생되면 피난과 진압이 우선이므로 현장은 심하게 변형되고, 본래의 모습과 형태는 보존되는 경우가 거의 없다. 휘발성 유기 용매가 연소된 화재 현장은 짧은 시간에 넓은 범위로 화재가 확산되고, 소화가 급격하게 진행되므로 산소 결핍을 수반된다. 개구부 및 공기의 유통이 잘되는 곳은 플래쉬 오버가 발생할 수 있고, 연소 과정에 생성된 복사 및 전도열 등에 의해 탄화 패턴을 한정하는데 어려움이 있다⁽¹⁻³⁾. 인화성 액체를 이용한 방화는 휘발유(Gasoline), 알코올(Alcohol), 시너(Thinner), 등유(Kerosene) 등을 혼합하는 경우가 있다. 인화성 액체 화재의 연소 확산 패턴은 액체의 흐름 및 온도와 밀접한 관계가 있으며, 바닥재의 물성 및 형상에 따라 다양한 탄화 패턴을 형성시킨다⁽⁴⁻⁶⁾.

따라서 본 연구에서는 실물 연소 실험을 위해 구획된 공간에 비닐장판을 깔고 그 위에 인화성 액체를 뿌리고, 인위적으로 착화시켰을 때의 연소 거동을 해석하는데 있다. 연소가 완료된 후 바닥재의 표면 및 단면 패턴을 해석하여 화재 원인의 판정에 활용하고자 한다.

2. 실험 방법

Figure 1에 나타낸 것은 실물 연소 실험이 진행된 실험실의 개략도이다. 연소가 일정하게 진행된 바닥은 한 변의 길이가 2m의 내화 벽돌 위에 한 변의 길이가 1m인 비닐장판을 깔았다. 실물 연소 실험이 진행될 때 발생한 연기를 자연 배출하기 위해 실험실 상부의 가운데에 환기창이 설치되어 있으며, 인화성 액체가 연소될 때의 온도 변화를 동시에 측정하였다. 실험실의 온도는 12 ~ 14 °C, 습도는 61 ~

Figure 1. Schematic diagram of the laboratory where the experiment of actual combustion has been carried out.

65%, 풍속은 0.3 ~ 0.5 m/s로 일정하게 유지시켜 실험의 신뢰성을 확보하였다. 또한, 실물 연소 실험의 안전성을 확보하기 위해 실험실 운용의 표준작업절차(Standard Operating Procedure; SOP)를 준수하였다.

Figure 2는 바닥재 위에서 연소되는 인화성 액체의 실물 연소 과정을 나타낸 것이다. 실험에 사용된 바닥재는 일반 주택에서 가장 많이 사용되는 비닐장판(한화황토팩트, 고운매 Yellow hanhwa chemical corp., Korea)이며, 한 변의 길이가 1m이다. 탄화된 비닐장판의 연소 패턴은 디지털 카메라(Digital camera, Nikon co., D-90, Japan)로 촬영하였으며, 화염의 온도 측정은 크로멜-아로멜 열전대를 사용하여 온도 측정기(Temperature measuring system, Yokogawa co., Japan)로 측정하였다. 실험에 사용된 휘발유의 착화온도는 Low octane에서 약 280 °C이고, 100 octane에서는 약 456 °C이다. 그리고 20 °C에서 가연성 범위(%)는 Low octane은 1.4 ~ 7.6이며, 100 octane 1.5 ~ 7.6 정도이다. 등유의 인화점은 38 °C 이상으로 휘발성이 낮아 상대적으로 휘발성이 높은 물질보다는 위험성이 낮다. 자연 발화되는 온도는 220 °C이며, 밀폐 공간에서 누출되어 공기와 잘 혼합되고 점화원이 존재할 때 폭발을 일으킬 수 있다⁽⁷⁻⁹⁾.

3. 결과 및 고찰

Figure 3은 구획된 공간에서 휘발유를 비닐 장판 위에 일정량 뿌리고, 연소가 실험이 진행될 때의 연소 거동 및 화

Figure 2. Fire test process after spraying flammable liquid on flooring material.

Figure 3. Fire Behavior when Gasoline Sprayed on Vinyl Floor Covering is Burned.

염의 확산 분포를 나타낸 것이다. Figure 3(a)는 연소 실험의 준비 단계이며, 바닥재인 비닐장판 위에 휘발유를 뿌린 후 휴대용 가스 토치로 점화시켜 휘발유에 착화된 화염의 실제 사진이다. 층류와 난류가 혼합된 연소 거동을 나타내며, 검정색의 연기가 다량 발생되는 것으로 촬영되었다. 가스 상태의 화염 확산은 액체의 온도가 인화점보다 높고, 가연물 증기의 인화성 농축액이 가연물 표면에서 형성된다고 보고되고 있다^(7,8). Figure 3(b)는 휘발유에 착화된 후 화염의 높이가 최고 화염일 때의 실제 사진이다. 상단 부분의 화염은 난류 패턴이 지배하였고, 하단 부분 일부 화염은 층류 패턴으로 황적색이며, 검은색 연기가 발생하였다. 또한, 인화성 액체의 연소 거동인 지속적으로 화염이 일어나는 영역(Continuously flaming region), 간헐적으로 화염이 일어나는 영역(Intermittently flaming region), 플룸 영역(Plume region) 등이 생성되는 것을 확인할 수 있었다. Figure 3(c) 및 Figure 3(d)는 화염의 높이가 감소될 때를 나타낸 실제 사진이다. 다량의 검은색 연기가 발생하여 점차 줄어들어, 연기의 양도 줄어드는 것을 알 수 있다. Figure 3(e)는 연소가 완료되기 직전의 실제 사진이다. 인화성 액체의 연소 말기의 특성이 확인되며, 검은색이던 연기의 색상이 백색으로 변화되는 것을 알 수 있으며, 연소가 완료된 부분의 탄화 패턴이 일부 확인된다. Figure 3(f)는 연소가 완료된 후의 바닥재에 형성된 탄화 패턴을 나타낸 실제 사진이다. 50

Figure 4. Fire behavior when kerosene sprayed on vinyl floor covering is burned.

ml의 휘발유가 비닐장판 위에서 연소되는데 약 26 s가 소요되었으며, 선명한 탄화 패턴이 형성되는 것을 알 수 있다. 특히, 연소가 진행되는 과정에서 확인된 바와 같이 담무리 패턴이 형성되는 것을 확인할 수 있다⁽¹⁰⁻¹⁴⁾.

Figure 4는 등유를 비닐 장판 위에 일정량 뿌리고, 연소가 진행될 때의 연소 특성을 해석하기 위한 것이다. 실물 연소 실험이 진행된 실험실의 온도는 휘발유의 실험과 동일하게 유지하였다. 휴대용 가스 토치를 이용하여 착화를 시도하였으나 착화가 되지 않아 실험을 정지한 시간은 30 s이다. Figure 4(a)는 연소 실험을 진행하기 위해 준비된 초기 사진이며, Figure 4(b)는 착화를 시키기 위해 가스 토치 화염을 지속적으로 공급 하였으나 착화를 시킬 수 없었다. 즉, 등유의 착화 온도 약 38 °C 보다 낮은 실험실의 온도 환경에서 실험이 진행되었기 때문으로 판단된다⁽¹⁰⁻¹⁴⁾.

Figure 5는 비닐장판 위에 한 변이 10 cm인 면섬유를 놓고, 휘발유를 뿌린 후의 연소 거동 및 화염의 확산 분포를 나타낸 것이다. Figure 5(a)는 연소 실험을 위해 준비된 바닥재인 비닐장판 위에 휘발유를 뿌린 후 휴대용 가스 토치로 점화시켜 휘발유에 착화된 화염의 실제 사진이다. Figure 5(b)는 휘발유에 착화된 것으로 화염이 점진적으로 성장하고 있는 상태의 실제 사진이다. 화염은 불완전 연소에 따른 검은 연기가 발생되며, 층류 및 난류가 혼합된 연소 거동을 확인할 수 있다. 그리고 인화성 액체의 연소 거동인 지속적으로 화염이 일어나는 영역, 간헐적으로 화염이 일어나는 영역, 플룸 영역 등이 생성되는 것을 확인할 수 있었다. Figure 5(c)는 연소가 활성화되어 화염이 최성기에 도달했을 때의 연소 거동이다. 화염은 더욱 커졌으며, 검정색 연기의 양도 증가하는 특성을 나타냈다. Figure 5(d)는 화염의 높이가 급격히 감소되었을 때의 실제 사진이다. 검은색 연기가 발생되는 것이 확인되며, 바닥재의 낮은 부분에 남아있는 휘발유가 연소되는 것으로 분석되었다. Figure 5(f)는 연소가 완료된 후의 바닥재에 형성된 탄화 패턴을 나타낸 실제 사진이다. 50 ml의 휘발유가 비닐장판 위에서 연소되는데 소요되는 시간은 약 162 s이며, 선명한 테두리의 탄화 패턴이 형성되는 것을 알 수 있다. 면섬유를 놓은 부분은 진하게 탄화 패턴이 생성되었고, 경계면 역시 일반 비닐 장판의 탄화 패턴과 구분되는 것을 알 수 있다⁽¹⁰⁻¹⁴⁾.

Figure 5. Fire behavior when cotton pieces sprayed with gasoline is placed on vinyl floor covering and burned.

Figure 6. Fire damage pattern of flooring material when gasoline sprayed on vinyl floor covering is burned.

Figure 6은 Figure 3(f)의 탄화 패턴을 확대하여 나타낸 실제 사진이다. 탄화된 범위는 가로 600 mm, 세로 380 mm이며, 탄화 면적은 약 1,000 mm² 정도로 단시간에 연소가 완료되어 탄화 심도는 깊지 않으나 탄화 범위가 넓은 것으로 분석되었다. 또한, 연소 경계면이 명확하고 연소 경계면의 안쪽 부분의 탄화 정도가 중심부의 탄화심도 보다 깊은 것을 알 수 있다. 이것은 Halo pattern이 나타나는 현상과 같은 이유로 인화성 액체의 액면의 영향으로 가장자리부터 연소하기 때문으로 판단된다⁽¹⁰⁻¹⁴⁾.

Figure 7은 Figure 5(f)의 탄화 패턴을 확대하여 나타낸 실제 사진이다. 탄화된 범위는 가로 430 mm, 세로 350 mm, 탄화 면적은 약 950 mm² 정도이다. 연소 범위가 넓고 전체

Figure 7. Fire damage pattern of flooring material when cotton pieces sprayed with gasoline is placed on vinyl floor covering and burned.

(a) Normal surface (b) Boundary surface (c) Carbide surface

Figure 8. Microscope photo of the upper surface of flooring material after gasoline sprayed on vinyl floor covering is burned.

적인 연소 강도가 약하지만 연소 경계면이 명확하고 연소 경계면 안쪽의 탄화 정도가 더 강하며, 면섬유에 흡수된 휘발유가 가장 장시간 연소되면서 면섬유 주변으로 가장 강한 탄화 범위가 형성되었다. 또한, 경계면과 Halo pattern 등이 구분되는 것을 알 수 있다⁽¹⁰⁻¹⁴⁾.

Figure 8은 비닐장판 위에 휘발유를 50 ml 뿌리고 휴대용 가스 토치로 화염을 착화시켜 연소가 완료된 후 소손된 표면의 실제 사진이다. Figure 8(a)는 정상 제품 표면의 실제 사진으로 비교적 규칙적인 형상이며, 표면은 윤기가 있는 것을 알 수 있다. Figure 8(b)는 연소된 경계면의 표면 실제 사진으로 탄화된 부분과 정상 부분의 차이가 명확함을 알 수 있다. 탄화된 부분의 검정색으로 변화되었고, 일부의 부풀음과 박리가 형성된 것을 알 수 있다. Figure 8(c)는 탄화된 표면으로 용융과 재결합이 진행됨에 따라 정상 제품보다 경화되었고, 불규칙적인 표면 및 박리 특성을 나타낸다.

Figure 9는 Figure 8의 단면을 실제 현미경으로 나타낸 것이다. Figure 9(a)는 정상 제품의 단면 실제 사진으로 표면의 코팅층이 있고, 그 하부에 얇은 흰색의 경계층으로 되어 있다. 그리고 경계층의 아래는 비교적 균일한 보이드층 순서로 구성된 것을 알 수 있다. Figure 9(b)는 탄화된 단면을 나타낸 것으로 비닐장판의 상부는 화열에 의해 코팅층이 탄화층으로 변형되었고, 경계층은 흰색을 나타낸다. 그리고 보이드층은 정상 제품과 차이가 없는 것을 알 수 있다⁽¹⁰⁻¹⁴⁾.

Figure 10은 비닐장판 위에 면섬유를 놓고 휘발유를 50 ml 뿌리고 휴대용 가스 토치로 화염을 착화시켜 연소가 완

Figure 9. Microscope photo of the cross-section of flooring material after gasoline sprayed on vinyl floor covering is burned.

Figure 10. Microscope photo of the upper surface of flooring material after cotton pieces sprayed with gasoline is placed on vinyl floor covering and burned.

료된 후 소손된 표면의 실제 사진이다. Figure 10(a)는 정상 제품 표면의 실제 사진으로 비교적 규칙적인 형상이며, 표면은 윤기가 있는 것을 알 수 있다. Figure 10(b)는 탄화된 표면으로 용융과 재결합이 진행됨에 따라 정상 제품보다 더욱 경화되었고, 불규칙적인 망상 구조를 나타낸다. 또한, 탄화된 덩어리가 불규칙적으로 섬을 형성하는 것을 확인할 수 있다. Figure 10(c)는 연소된 경계면의 표면 실제 사진으로 탄화된 부분과 정상 부분의 차이가 명확함을 알 수 있다. 탄화된 부분의 검정색으로 변화되었고, 일부의 부풀음과 박리가 형성된 것을 알 수 있다.

Figure 11은 Figure 10의 단면을 실제 현미경으로 나타낸 실제 사진이다. Figure 11(a)는 정상 제품의 단면 실제 사진으로 표면의 코팅층이 있고, 그 하부에 얇은 흰색의 경계층으로 되어 있다. 그리고 경계층의 아래는 비교적 균일한 보이드층 순서로 구성된 것을 알 수 있다. Figure 11(b)는 탄화된 단면을 나타낸 것으로 비닐장판의 상부는 화열에 의해 코팅층이 탄화층으로 변형되었고, 경계층 역시 선명한 흰색을 나타낸다. 그리고 보이드층은 정상 제품과 차이가 없는 것을 알 수 있다. Figure 11(c)는 연소된 경계면의 단면을 나타낸 것으로 비닐장판의 상부는 심하게 탄화되었고

Figure 11. Microscope photo of the cross-section of flooring material after cotton pieces sprayed with gasoline is placed on vinyl floor covering and burned.

부풀림 현상이 확인된다. 또한, 코팅층 하부에 있는 얇은 흰색의 경계층은 없어진 것을 알 수 있다⁽¹⁰⁻¹⁴⁾.

4. 결 론

구획된 공간에 인화성 액체를 뿌리고, 실물 연소 실험을 실시하여 연소의 거동 및 탄화패턴을 해석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 구획된 공간에 설치된 비닐 장판에 위에 휘발유 50 ml를 뿌리고, 착화되어 화염이 활성화되었을 때 화염이 일어나는 영역, 간헐적으로 화염이 일어나는 영역, 플룸 영역 등이 생성되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 50 ml의 휘발유가 비닐장판 위에서 연소되는데 약 26 s가 소요되었으며, 연소가 진행되는 되는 과정에서 확인된 바와 같이 달무리 패턴이 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

2) 등유를 비닐 장판에 위에 일정량 뿌리고, 휴대용 가스 토치를 이용하여 착화를 시도하였으나 착화를 실패하였다.

3) 비닐장판 위에 면섬유를 놓고, 휘발유를 뿌린 후의 연소 거동 분석에서 불완전 연소에 따른 검은 연기가 발생되었으며, 층류 및 난류가 혼재된 연소 거동을 확인할 수 있다.

4) 연소가 완료된 후의 탄화된 범위는 가로 600 mm, 세로 380 mm이며, 탄화 면적은 1,000 mm² 정도로 분석되었다. 또한, 단시간에 연소가 완료되어 탄화 심도는 깊지 않으나 탄화 범위가 넓은 것으로 분석되었고, 경계면과 Halo pattern 등이 구분되는 것을 알 수 있었다.

5) 탄화된 표면은 용융과 재결합이 진행됨에 따라 정상 제품보다 더욱 경화되었고, 불규칙적인 표면 및 박리 특성을 나타낸다. 또한, 단면의 상부는 화열에 의해 코팅층이 탄화층으로 변형되었고, 경계층 역시 더욱 선명한 흰색을

나타내는 것으로 분석되었다.

6) 실제 현미경 분석에서 정상 제품은 코팅층 하부에 얇은 흰색의 경계층이 있고, 비교적 균일한 보이드층 순서로 구성된 것을 알 수 있다. 탄화된 비닐장판의 상부는 화열에 의해 코팅층이 탄화층으로 변형되었고, 경계층 역시 흰색을 나타낸다. 그리고 보이드층은 정상 제품과 차이가 없는 것을 알 수 있으나 경계면의 단면은 부풀림 현상이 발생되고, 코팅층 하부의 흰색 경계층이 없어진 것을 알 수 있다.

이상의 결과에서 알 수 있듯이 동일한 물질이라도 연소 조건에 따라 연소 거동, 탄화 패턴 및 단면 구조 등의 차이가 발생하므로 화재원인조사 및 분석을 실시할 때 화재 조사관은 목격자의 진술, 현장 상황 및 탄화 패턴 등을 종합적으로 분석할 필요가 있다.

References

1. N. Kakae, T. Tsuchihashi, Y. Tanaka, Y. Ohmiya and K. Harada, "Influence of Combustible Dimension and Density on Heat Release Rate Part 2 Relation between Combustible Dimension, Maximum Heat Release Rate and Duration of Maximum Burning", *Fire Science and Technology*, pp. 491-496 (2007).
2. P. Villagran, V. L. Santini, P. P. Save and E. Poucet, "Properties of Place Cell Firing after Damage to the Visual Cortex", *The European Journal of Neuroscience*, pp. 771-776 (2002).
3. J. S. Kim, S. W. Baek and C. R. Kaplan, "Effect of Radiation on Diffusion Flame Behaviour Over a Combustible Solid", *Combustion Science and Technology*, p. 133 (1993).
4. W. J. Sheu, H. C. Shia and N. C. Liou, "Ignition Length of Laminar Combustible Pipe Flows", *Combustion Science and Technology*, pp. 451-460 (1998).
5. C. Schroll, "Flammable Liquid Safety. Storage Areas should have Several Basic Features", *Occupational Health & Safety*, pp. 50-54 (2002).
6. H. Liaw, J. Gerbaud, V. Chen, C. C. Shu and C. M., "Effect of Stirring on the Safety of Flammable Liquid Mixtures", *Journal of Hazardous Materials*, pp. 1093-1101 (2010).
7. J. D. Dehaan, "Kirk's Fire Investigation", Pearson Prentice Hall, p. 35, pp. 51-52, pp. 109-112, pp. 252-276 (2012).
8. O. Badr, A. Marafi, F. Amin, A. Rahimi and K. A. Muhannadi, "Risk Assessment of Accidental Spills of Toxic and Flammable Liquids on Land", *Disaster Prevention and Management*, pp. 13-23 (2004).
9. Institute of Environmental Science, Seoul National University, "Guide to Laboratory Safety", Donghwa Technology Publishing Co., pp. 359-368 (2005).
10. H. S. Joe, "A Study on the Flame Propagation Speed of Flammable Liquids and Patterns of Damage by Fire", *Master's Thesis, Jeonju University*, pp. 25-36 (2013).
11. H. S. Joe and C. S. Choi, "Analysis of Fire Patterns of Flammable Liquids for Oil Flow Tests of Compartment Fires with Reduced Simulation", *Fire Science and Engineering*, Vol. 28, No. 3, pp. 43-48 (2014).
12. H. S. Joe and C. S. Choi, "A Study on Combustion Patterns of Flammable Liquids by Contained Oil Test", *Fire Science and Engineering*, Vol. 28, No. 4, pp. 14-20 (2014).
13. H. S. Joe, J. O. Lee and C. S. Choi, "Propagation Speed and Characteristics Analysis of Flame by Compartment Fires of Flammable Liquids", *Fire Science and Engineering*, Vol. 29, No. 3, pp. 31-36 (2015).
14. H. S. Joe and C. S. Choi, "Growth Characteristics and Hydrocarbon Patterns of Flammable Liquid on a Vinyl Layer", *Fire Science and Engineering*, Vol. 32, No. 5, pp. 15-21 (2018).