화재 실험을 통한 에어컨 실내기의 화염확산에 관한 현상학적 연구

최승복 · 이승훈 · 최민기* · 최돈묵**†

서울지방경찰청 과학수사계 화재감식팀, *가천대학교 대학원 소방방재공학과, **가천대학교 소방방재공학과

A Phenomenological Study on the Flame Spread of Air Conditioner Indoor unit by Fire Tests

Seung-Bok Choi · Seung-Hun Lee · Min-Ki Choi* · Don-Mook Choi**†

Dept. of Fire & Explosion Investigation Team, Seoul Metropolitan Police Agency

*Dept. of Fire & Disaster Protection Engineering Graduate School, Gachon Univ.

**Dept. of Fire & Disaster Protection Engineering

(Received November 18, 2013; Revised December 6, 2013; Accepted December 6, 2013)

요 약

본 연구의 목적은 연소 실험을 통하여 에어컨 실내기의 화염확산에 관한 현상을 관찰하여 화재원인 및 발화지점을 확인하기 위함이다. 본 실험은 화염이 주변으로부터 에어컨 상단에 옮겨 붙는다는 것을 가정하여 실내기 상단을 n-헵탄을 적신 천으로 착화시켰으며, 동일한 조건으로 2회의 반복실험을 하였다. 착화 후 559 s와 734 s 사이에 실내기와 연결된 냉매관이 파열되면서 내부에 충입되어 있던 냉매와 함께 윤활유가 커다란 폭음을 내며 고온·고압의 화염이 급격히 분출되었으며 연소 잔류물을 확인한 결과, 증발기 일부와 모터, 금속함 등을 제외한 대부분은 소실되었다. 에어컨 자체에서 발화되었을 경우와 외부 화염에 의해 소훼되었을 경우 배선의 합선흔적 위치는 유사하였다. 따라서 연소 잔류물의 형상만으로 발화원인과 지점을 특정 짓는 것은 불확실하다는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

The purpose of this study is to check the fire origin and cause of the fire by observing the shape of the flame propagation in air-conditioner indoor unit through the fire tests. We supposed that the flame is spread from the surroundings to the top of the air-conditioner and ignited on top of the air-conditioner with n-heptane. And then repeated this experiment twice under the same conditions. After the ignition, refrigerant filled in air-conditioner and lubricating oil exploded with large explosion and flame having high temperature and pressure belched out rapidly due to bursting refrigerant pipe linked air-conditioner between 734 seconds and 559 seconds. After result of checking the combustion residue we found that almost all of that was lost except a part of the evaporator, motor and metal. The position of short-circuit traces of wiring for the air-conditioner ignited itself is similar to that of fire damage by external flame. Therefore, we verified that it is not certain to determine the ignition cause and point by only the shape of the combustion residues.

Keywords : Air conditioner fire, Combustion residue, Lubricating oil

1. 서 론

도시화와 지구 온난화 현상에 따른 냉방기 사용이 급증하면서 에어컨과 관련된 화재가 증가하는 추세이다. 소방방재청 통계에 의하면 냉방기 화재 중 선풍기가 45.7%로 가장 많고 그 다음으로 에어컨이 19.3%를 차지하고 있다⁽¹⁾.

에어컨을 구성하고 있는 구성품의 대부분은 플라스틱 재료로 구성되어 있고 화재하중이 크기 때문에 화재가 확산되는 과정에서 외부의 다른 화염에 의해 에어컨이 소훼

될 경우에도 에어컨 주변이 심하게 소훼되는 특징이 있어 발화부로 오인될 소지가 많다.

에어컨은 용도별로 천장형, 벽걸이형 및 스탠드형 등으로 구분되며 에어컨이 설치되어 있는 주변은 화염이 확산되는 과정에서 비교적 다른 곳에 비하여 먼저 화염의 영향을 받을 수 있다. 또한 전력소모가 많기 때문에 대부분 독립된 전원을 사용하는 관계로 화재 발생 시 에어컨과 연결된 배선 또는 그 내부에서 합선흔적이 발견되는 경우가 종종 있다. 이러한 이유로 에어컨 자체에서 발화하였을 경우

† Corresponding Author, E-Mail: fire@gachon.ac.kr
TEL: +82-31-750-5716, FAX: +82-31-750-8749

와 확산되는 화염에 의해 2차적으로 소훼될 경우에도 에어컨에서 발화한 것으로 오인하는 경우가 종종 있다⁽²⁾.

에어컨은 크게 실내기와 실외기로 나뉘며, 실내기는 외함, 공기청정기, 증발기, 모터와 팬 등으로 구성되어 있다. 플라스틱 재질의 외함과 팬은 이연성이기 때문에 화염의 성장에 영향을 미치지만, 그 이외 대부분의 부품과 외함은 금속재질로 불연성이기 때문에 화염 성장에 영향을 미치지 않는다.

에어컨에 사용되는 냉매 또한 HFC계 냉매이기 때문에 비가연성으로 분류되고 있어 화염 성장에 아무런 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다. 하지만 에어컨의 구성품 대부분이 금속임에도 불구하고 그 주변이 심하게 연소되어 발화부위로 오인되는 경우가 종종 있다.

실외기의 실화재 연소실험 결과, 열방출율이 5,830 kW이고 최성기의 온도가 1,201 °C로 확인된 바 있다⁽³⁾.

압축기는 방폭구조이기 때문에 외부 화염에 의해 폭발하지는 않는다. 에어컨 압축기의 냉매는 저압(20~40 bar), 고압(150~250 bar)상태로 충입되어 있으며 모터의 원활한 회전과 마모 방지를 위해 압축기에는 윤활유가 주입되어 있다.

에어컨 실내기가 심하게 연소하는 이유는 실내기를 구성하고 있는 플라스틱류의 이연성 재질뿐만 아니라 압축기에 충입되어 있는 윤활유가 냉매관을 통해 실내기까지 순환되고 있다가 화염으로 인해 냉매관이나 증발기가 과열될 경우 이곳을 통해 고압의 윤활유가 피열부위를 통해 냉매와 함께 분출되면서 화염방사기와 같은 형태의 화염을 형성하였기 때문으로 여겨진다.

본 실험에서는 에어컨에 전원을 인가한 후 작동한 상태에서 외부 화염에 의해 에어컨 실내기가 연소될 경우를 가정하여 실험체 상단을 n-헵탄으로 착화하고 화염의 성장과 냉매 및 윤활유의 분출 거동을 확인하였다. 또한 Large Scale Cone calorimeter를 이용하여 발열량과 일산화탄소, 이산화탄소량을 분석하였으며 최종적으로 타고 남은 연소 잔해를 검사하여 합선이 생성된 위치가 에어컨에서 발화되었을 경우와 어떻게 다른가를 서로 비교분석하였다.

이러한 연소실험결과는 화재현장 조사 시 화재 조사자들이 연소형태를 정확히 이해하고 정확한 발화원인과 발화 장소를 특정할 수 있는 능력을 함양하는데 활용될 수 있을 것이다.

2. 화재사례

2.1 사례 1

2011년 11월 ○○시에 소재한 200여명 규모의 식당에서 화재가 발생하여 30억 원 정도의 재산피해가 발생하였다. 화재원인은 식당 건물 외부에 모아둔 쓰레기에서 발화하여 주변의 낙엽 등에 연소가 확대되어 지붕을 통하여 내부

Figure 1. Combustion residues of region around the air-conditioner indoor unit 1.

로 확산되었던 것으로 최종 확인되었다. 화재 진화 후 조사한 결과, 발화지점 주변의 낙엽과 울타리 일부가 소훼된 정도였으나 건물내부에 설치되어 있는 업소용 에어컨 주변은 Figure 1과 같이 소손상태가 심하여 마치 그 부위가 발화부인 것처럼 오인될 수 있을 정도의 연소 형태가 확인되었음은 물론 에어컨 내부 송풍 모터 등과 연결된 배선에서 여러 개의 합선흔적이 식별되어 마치 에어컨 자체에서 발화된 것과 같은 형태를 보였다.

2.2 사례 2

2012년 ○○시 ○○ 공장에서 화재가 발생하여 수백 억 원 상당의 재산피해가 발생한 현장을 나타낸 Figure 2에서도 확인 할 수 있듯이 에어컨 실내기가 놓인 주위의 샌드위치패널 표면이 천공되어 있고 주변 벽체에서 타 올라간 상승연소 패턴이 식별되어 이 부위를 발화부위로 결정하였던 사례도 있었다.

Figure 2. Combustion residues of region around the air-conditioner indoor unit 2.

Figure 3. Installation of experimental equipment.

3. 실험

3.1 실험체

실험에 사용된 에어컨은 Figure 3과 같이 스탠드형 에어컨 18평형과 스탠드형 16평형 각 1기로 HFC계 냉매의 냉매(R-410)가 충전된 상태였다. 충전된 윤활유는 Polyvinylether (PVE)로 발화점은 216 °C이며 충전량은 약 470~900 ml이었다.

윤활유인 PVE는 화학적으로 안정하고 수분과 반응이 적으며 윤활막을 형성하여 내마모성이 좋은 것으로 알려져 있다. 이러한 냉동기유는 냉매가스가 기상과 액상은 반복하는 과정 중 압축기 피스톤이나 전동기의 마모 방지, 냉매가스 누출 방지 등을 위해 냉매와 함께 충전된다. 냉매의 충전 압력은 고압의 경우는 4.02 MPa, 저압의 경우는 0.74 MPa 정도로 고압의 경우 냉매관에 걸리는 내압은 약 3.92 MPa 이상으로 볼 수 있다.

3.2 R-410 냉매

실험에 사용된 에어컨에 충전된 냉매는 R-410으로 권장된 용도는 냉각제이다. 유해 위험성으로는 고압가스로 가열시 폭발할 수 있으나 인화하지는 않는다. 사용 시 주의 사항으로는 직사광선을 피하고 환기가 잘 되는 곳에 보관해야 하며 액상의 경우 액체가 빠르게 증발하면서 동상을 유발할 수 있고, 공기보다 무겁기 때문에 산소결핍으로 질식을 유발할 수 있다. 끓는점은 -51.6 °C이고, 증기압은 대기온도 25 °C에서 16,530 hPa이고 50 °C에서 30,520 hPa의 특성을 갖는다⁽⁴⁾.

3.3 윤활유(PVE) 물리 · 화학적 특성

최근 오존층 파괴와 같은 환경문제로 인해 기존의 냉매사용이 제한되면서 에어컨과 같은 냉방기에 사용되는 윤활유 또한 냉방 효율을 고려한 냉동기유 사용이 관심을 끌고

Table 1. Characteristics of Chemical & Physical Properties of PVE

Items		PVE
Type		Ether
Viscosity	at 40 °C	68 cst
	at 100 °C	8.2 cst
Density at 15 °C (g/cm ³)		0.926
Color (ASTM)		0.01
Resistivity at RT (Ωcm)		7×10 ¹³
Ignition Temperature (°C)		216

있다. 냉동기유로는 보편적으로 합성오일인 Polyalkylene glycol (PAG), Polyolester (POE), Polyvinylether (PVE)가 사용되고 있으며, 본 실험에 사용한 윤활유인 PVE의 물리 · 화학적 특성값은 Table 1과 같다⁽⁵⁾.

3.4 열전대

연소실험 시 각 부위의 온도를 측정하기 위하여 에어컨 주변에 철재 앵글 기둥을 세우고 그 기둥 좌측에 열전대 4개(S₁₋₁, S₂₋₁, S₃₋₁, S₄₋₁), 우측에 (S₁₋₂, S₂₋₂, S₃₋₂, S₄₋₂) 4개, 상부와 바닥에 각각 1개씩 모두 10개의 열전대를 에어컨과 20 cm 간격으로 설치하였다. 각 설치된 열전대로부터 에어컨이 연소될 때 측정된 온도를 측정하였다.

3.5 점화원

에어컨의 연소과정에서 화염이 성장하는 과정과 실외기에 충전되어 있는 냉매와 윤활유의 화염 분출형태를 현상학적으로 관찰하기 위하여 에어컨 상단에 n-헵탄을 적신 천으로 착화하였다.

3.6 연소실험

연소 시 열방출율, 연소온도 및 연소가스를 측정하기 위하여 Figure 4와 같은 Large Scale Cone calorimeter를 사

Figure 4. Appearance of Large Scale Cone calorimeter.

용하였다. 상대습도 88%, 대기온도 21 °C의 무풍상태에서 실험을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 연소과정의 현상학적 특성

에어컨에 전원을 인가한 다음 실외기와 실내기를 작동시키고 약 180 s 후 n-헵탄을 침적시킨 천으로 에어컨 실내기 상단을 착화시켰으며 그 연소과정을 Figure 5에 나타내었다.

Figure 5의 ①~⑧와 같이 착화 약 300 s부터 화재가 급속도로 성장하여 약 560 s 후(Figure 5의 ④)에는 화염의 길이가 약 2 m 정도에 도달하였다. 그 후로부터 짧은 시간 내에 화염은 플라스틱 외함을 모두 연소시키고 아래방향

으로 점차 전이되어 착화 600 s 후에 에어컨 전체가 화염에 휩싸였으며 에어컨 플라스틱 외함 전체가 용융되고 무게 중심이 앞으로 치우치면서 전도되었다.

실험체가 전도된 후 약 120 s~180 s 후 화염의 성장은 최성기에 이르렀으며 1차 실험에서 에어컨 상단에 착화하였을 때 최성기에 이르는 시간은 약 720 s 가량 소요되었고, 2차 실험에서는 1차 실험과 동일한 조건하에 504 s 만에 최성기에 이르렀다.

최성기에 이르렀을 때에는 에어컨 주변에 설치하였던 열전대가 실험체와 함께 전도되어 각 부위의 온도 측정이 불가능한 상태가 되었다.

에어컨 실내기의 작동 표시등은 에어컨 상단 약 1/4지점까지 화염이 확대된 때(점화 후 440 s)에 꺼졌지만 에어컨 실외기의 팬은 계속 작동하고 있는 상태였다.

Figure 5. Burning process of air-conditioner.

Figure 6. Form of abrupt flame like a flame thrower.

Table 2. Quantity of Lubricating Oil

Breadth (m ²)	Oil quantity (ml)	Pipe length (m)
29.7	310	5
52.8	470	8
59.4	900	8
75.9	1,080	8
99.0	1,300	15~30
165	2,325	15~30
264	4,125	15~45
330	5,160	15~45

이 시점은 에어컨 실내기에 내장된 퓨즈가 용단되는 순간으로 판단되었으며, 이후 최정기에 이르러 전도된 에어컨이 지속적으로 연소되면서 실내기에 투입된 전원 코드에서는 합선으로 추정되는 전기스파크 소리가 지속적으로 발생하였다.

점화 후 약 730 s가 경과할 즈음 Figure 6에 나타난 것과 같이 갑자기 커다란 폭음을 냄과 동시에 화염 방사기에서 분출된 것과 같은 화염(약 3~4 m)이 고온의 섬광을 내면서 약 40 s간 지속되었다.

실외기 압축기에 충전되는 윤활유는 모터의 회전을 원활하게 해주고 냉매의 순환을 돕는 역할을 한다.

Table 2는 에어컨 용량에 따른 에어컨 실외기 압축기에 충전되는 윤활유량을 나타내고 있다.

이러한 윤활유는 냉매와 함께 회석되어 냉매관을 따라 실내기까지 순환하게 되는데 화재 시 주변으로부터 성장해 온 고온의 화염이 에어컨 실내기 및 실외기로 전이가 되면 고압으로 내부에 충전되어 있던 냉매와 가연성의 윤활유가 팽창하면서 냉매관 등이 기계적 강도를 유지하지 못하고 파열되게 된다. 그리고 파열된 배관을 통하여 고압으로 분출되는 냉매와 윤활유의 혼합물이 화염방사기에서 분출되는 화염과 같이 연소되면서 고온·고압의 화염을 형성한다. 이렇게 형성된 화염은 사례 2와 같이 샌드위치패널등과 같은 얇은 철판으로 이루어진 가연물과 접촉하게 되면 Figure 2와 같은 형태의 연소흔적을 남길 수 있다. 그리고 고온·고압의 화염은 주변의 여러 가연물을 연소시켜 화재의 확대원인으로 작용할 것이다.

따라서 에어컨과 같이 냉매와 윤활유가 동시에 고압으로 충전된 가전제품이 위치한 장소에서 발생한 화재의 발화지점을 특정함에 있어서 화염의 전파방향이냐 패턴 등을 면밀히 검토하여 오류를 범하지 않도록 해야 한다.

4.2 시간대별 온도 분포

에어컨 실내기의 연소에서 최정기 온도는 약 1,042 °C까지 상승하였다. 연소 실험을 시작한 직후부터 Figure 7과 같이 360 s 이를 때까지는 900 °C 이하의 비교적 낮은 온도 분포를 보이다가 370 s를 경과하면서 900 °C로 상승하였고

Figure 7. Temperature changes during the burning test (CH₄).

Figure 8. Infrared imaging camera at breaking point of refrigerant tube.

420 s 경과 후 CH₄에서 최고온도인 1,042 °C를 나타내었다.

냉매관이 파열되는 시점인 730 s에서 온도는 Figure 8에 나타난 것과 같이 약 810 °C였다. 이러한 현상은 비 가연성의 냉매가 분출되면서 필요한 기화열을 주변으로 공급받았기 때문에 발생한 현상으로 판단되었다.

4.3 열방출율(HRR)

Large Scale Cone calorimeter에서 냉매와 윤활유가 총

Figure 9. Total heat release rate during the burning test.

전된 냉장고를 연소시키면서 획득한 HRR을 Figure 9에 나타내었다. 착화 후 360 s까지는 연소초기로 방출량이 아주 낮기 때문에 큰 변화는 관찰되지 않았다.

360 s 경과 후 에어컨 표면이 연소하기 시작하는 420 s 이후부터 화염이 성장함에 따라 열방출율이 점차 증가하였고 600 s 경과 후에는 약 200 kW, 660 s 경과된 시점에는 450 kW까지 상승했다. 730 s 경과된 시점에서 최고 1,043 kW의 열방출율을 나타내었다.

따라서 본 실험에서 사용된 냉방능력이 59.4 m²인 에어컨 실내기의 HRR은 약 1,043 kW로 확인되었다.

4.4 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂)의 농도

연소시험 과정 중 발생하는 CO와 CO₂의 농도를 Figure 10, 11에 나타냈다.

착화 420 s 경과 후 CO의 농도는 약 13.3 ppm이었으며 연소가 진행됨에 따라 계속 증가하여 약 440 s 경과 후 107.18 ppm을 나타내었다. 시험체가 붕괴되었던 시간인 600 s가 경과한 시점에서의 농도는 371.4 ppm이었다. 또한 냉매관이 파열되는 시점인 610 s가 지난 시점에는 475.7 ppm으로 점차 그 농도는 증가하다가 720 s가 경과한 최성기에서는 최고 농도인 1,046 ppm을 나타냈다.

이후 900 s 경에는 612 ppm으로 감소하였고 연소가 거의 종료된 시점인 1050 s 경과 후에는 22 ppm정도로 낮은 농도를 나타내었다.

CO₂ 농도는 실험 시작 370 s 경과 후부터 서서히 증가하

Figure 10. CO concentration of during the burning test.

Figure 11. CO₂ concentration of during the burning test.

여 실험체가 붕괴되는 시점인 600 s 경과 후 0.1113%을 나타내었고, 냉매관이 파열되는 1610 s 경과 후에는 0.1201%를 나타내었다. 최고 농도를 보인 시점은 착화 1670 s가

Figure 12. Residue of after burning test.

Figure 13. PCB box after burning test.

Figure 14. Melted fuse during the burning test.

경과한 시점으로 0.1967%를 나타내었다.

4.5 시험 후 현상학적 관찰

연소가 종료된 후의 연소 잔해를 관찰한 결과 Figure 12, 13과 같이 연소 가능한 이연성 재질은 모두 소실되었으며 알루미늄 합금으로 구성된 증발기와 모터 그리고 금속함에 내장된 PCB만 일부가 남아 있는 상태이다.

에어컨 실외기와 실내기를 연결하는 냉매관은 실내기 증발기와 연결된 부위인 냉매 동관을 연결한 땀 접촉부가 높은 압력과 화염에 의해 이탈된 상태이고 알루미늄 합금 재질의 증발기는 대부분 용융 소실되거나 수개의 조각으로 분리된 상태이다.

그리고 PCB박스 내부에 내장되어 있는 Figure 14의 관퓨즈는 가용선이 용융 소실된 상태로 내부 관벽에 부착된 것이 관찰되었다.

1차 연소실험 결과, 대부분의 내부 배선은 용융 · 소실되었고, PCB의 소자 일부도 멸실된 상태로 부품과 배선에서

Figure 15. Form of cord short after burning test 1.

Figure 16. Form of cord short after burning test 2.

는 합선흔적 등과 같은 아크흔적은 식별되지 않았지만 2차 실험한 결과, Figure 15~16에서 확인할 수 있듯이 금속함에 담긴 내부 배선 3개소와 에어컨 실내기로 유입되는 전원배선 1개소에서 합선흔적이 식별되었다.

따라서 에어컨이 위치한 화재현장의 발화 지점을 조사할 경우, 전원배선에 단락흔이 관찰되는 경우와 그렇지 않은 경우가 있기 때문에 다른 화재원인을 충분히 배제할 수 있는 근거를 제시하지 않고 단순히 단락흔의 유무만으로 발화개소를 특정하는 것은 문제가 있다.

5. 결 론

본 연구는 스탠드형 에어컨을 Large Scale Cone calorimeter를 이용하여 연소실험을 2회 실시하였다. 열방출율(HRR), 온도, 및 CO, CO₂ 농도를 측정하였고 압축기에 충입되어 있던 윤활유와 냉매의 분출형상 및 연소형태를 확인한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 무풍조건에서 에어컨 상단에 n-헵탄을 이용 착화하였을 때 최성기에 이르는 시간은 약 480 s~540 s 정도였다.

(2) 에어컨 실내기의 열방출율은 1,043 kW였으며, 최고 온도는 1,205 °C였다.

(3) 최성기에서 일산화탄소와 이산화탄소의 농도는 각각 약 61 ppm, 0.2%였다.

(4) 연소시험 후 증발기 일부와 모터, 금속함 등이 남아 있긴 하나 대부분의 부품은 소실되었고 배선 또한 용융 소실되었기 때문에 감식 시 확인된 합선흔적의 위치만으로 최초 발화지점이 에어컨 자체 또는 주변이라고 단정을 짓는 것은 무리가 있음을 확인할 수 있었다.

(5) 최성기에서 알루미늄 합금인 증발기가 용융되고 냉매관이 과열되면서 굉음과 함께 냉매와 윤활유가 고온 · 고압의 화염을 형성하면서 급격히 분출되었다.

(6) 외부의 화염에 의하여 미리 연화된 샌드위치패널과 같은 얇은 철판이 에어컨 냉매와 윤활유의 연소에 의해 생성된 고온 · 고압의 화염에 노출되면 커다란 천공을 형성하는 경우도 있기 때문에 이 연소흔적만으로 최초 발화지점을 특정 짓는 것은 문제가 있다.

후 기

본 연구는 가천대학교 2013학년도 연구지원(2013-R300)에 의한 결과임.

References

1. NEMA, 2012 Statics of Fire Yearbook in Korea National Emergency Management Agency (2012).
2. D. M. Choi, S. B. Choi and J. S. Choi, "A Study on the Discrimination of Fire Pattern by the Phenomenological Observation (Focused on the Fire Cases)", Journal. of

- Korean Institute of Fire Science. & Engineering, Vol. 23, no. 6, pp. 103-105 (2009).
3. S. H. Min and Y. J. Bae, "A Study on Combustion Experiments of Multi Type Air-Conditioner Outdoor Units by Large Scale Calorimeter", Journal. of Fire Science. & Engineering, Vol. 25, No. 6 (2011).
 4. Korea MSDS Testing Laboratory, Dupont (TM) SUVA(R)410A Refrigerant.
 5. The manual training Guide Book for Air-Conditioner.