일반화염에 의해 소손된 정수기의 연소 확산 패턴 및 화재위험성 평가

최충석

전주대학교 소방안전공학과

Assessment of the Combustion Diffusion Pattern and Fire Risk of a Water Purifier Damaged by a General Fire

Chung-Seog Choi

Department of Fire Safety Engineering, Jeonju University

(Received February 6, 2012; Revised May 14, 2012; Accepted June 8, 2012)

요 약

본 논문에서는 정수기의 외부 및 내부에서 인위적으로 착화시켰을 때의 연소 확산 패턴을 분석하고, 소손된 정수기의 화재원인 규명을 위한 자료를 제공하는데 있다. 정수기의 연소 확산 속도는 외부에서 착화시켰을 때보다 내부에서 착화시켰을 때 화염의 진행은 빠른 것으로 분석되었다. 외부에서 착화되어 정수기가 반소 이상 되는데 소요되는 시간은 360 sec 정도이었고, 내부에서 착화시켰을 때는 180 sec 정도가 소요되었다. 즉, 내부에서 착화되면 발생한 열이 내부에 축적되었다가 일순간에 방사되기 때문에 연소가 빠른 것으로 판단된다. 외부에서 착화시켜 소손된 것은 균일한 탄화 패턴을 보이며, 바닥면에 탄화물은 순차적으로 퇴적되었다. 내부에서 착화시켜 소손된 것은 탄화면의 경계가 비교적 선명하였으며, 발화점을 기준으로 브이패턴을 형성하였다. 따라서 연소 패턴의 차이를 통해서 어느 쪽에서 화재가 진행되었는지를 판단할 수 있는 객관적 근거가 제시되었다. 정수기가 화염의 공격을 받아 반소될 때까지 내장된 퓨즈의 용단 및 전원 보호 장치의 작동 등은 발생하지 않았다. 또한 일반화염을 공격 받아 소손된 퓨즈는 금속 홀더 부분에서 탄화가 발생하는 것이 확인됨에 따라 사고원인 판정의 근거로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT

This paper analyzes the combustion diffusion pattern when a water purifier is artificially ignited outside and inside in order to provide data to examine the cause of fire of a water purifier damaged by fire. The analysis result of the combustion diffusion pattern of a water purifier shows that the combustion diffused at a higher speed when it was ignited inside the purifier than when ignited outside. It took approximately 360 seconds for the water purifier to be half-burned when ignited on the outside, and approximately 180 seconds when ignited from inside. That is, it is thought that the internal combustion speed is higher because the internal ignition causes the generated heat to be accumulated and radiated instantly. It was observed that the water purifier damaged by fire caused by external ignition showed a uniform carbonization pattern and the carbide burned down at the bottom were gradually deposited. The water purifier damaged by internal ignition showed a relatively clear boundary of carbonized surface, which formed a V-pattern. The difference in the combustion patterns presents an objective base from which to determine where the fire started. By the time the purifier was half-burned by fire, the built-in fuse had not melted and the power supply protection device did not operate. In addition, as was found in the case of the fuse damaged by a general fire, carbonization occurred at the metal holder, and it is thought that this fact may be used as a basis from which to determine the cause of a fire.

Keywords : Combustion diffusion pattern, Fire risk, Water purifier, Carbonization pattern, V-Pattern

1. 서 론

전기제품은 편리성과 안전성으로 국가 사회와 경제 발전에 크게 공헌하여 왔다. 또한 산업기술의 발달에 따라 제품이 다양화, 고급화가 이루어지고 있는 추세이다. 전기에너지는 산업현장, 주택 등 현대문명에 있어서 사용빈도가 점

점 늘어가고 있으며, 전기관련 사고 발생빈도 역시 높은 비율을 차지하고 있다. 한국전력통계에 의하면 국민 1인당 전력소비가 2001년 5,444 kWh에서 2010년 8,883 kWh로 63 % 정도 증가한 것으로 보고되었다. 2010년 소방방재청 통계자료에 의하면 총 화재 41,863건이 발생하여 사망 304명, 부상 1,588명이 인명피해가 보고되었다. 발화요인별 화

재발생 현황에 의하면 부주의에 의한 것이 43 %로 화재발생 빈도가 가장 높은 것으로 나타났으며, 전기적 요인 26 %, 방화 6.7 %, 기계적 요인 6.6 % 등으로 나타났다^(1,2).

정수기는 물리·화학적 과정을 거쳐 물을 깨끗하게 거르는 기구를 총칭한다. 물을 걸러 불순물을 제거하는 형태에 따라 수도꼭지에 직접 연결하는 직결형과 물을 용기에 담아서 필터를 통과하도록 하는 저장형 등이 있다. 일반적으로 사용되는 정수기의 필터는 활성탄 필터, 이온교환수지 필터, 한외(限外) 필터, 역삼투막 필터, 나노 필터 등이 있다. 정수기의 구성은 외함, 방열판, 필터, 온수 및 냉수 탱크, 펌프, 감압 또는 체크 밸브, 기타 부속품 등으로 구성되어 있다. 외함은 안전한 상태에서 정수기를 사용할 수 있도록 지지해 줄뿐만 아니라 오염 물질이 내부로 유입되지 않도록 설계되어 있어야 한다. 방열판은 물을 정수하는 과정에서 발생하는 열을 외부로 방출하여 시스템을 안정화시키기 위해서 설치하는 것으로 주로 후면에 설치한다. 일상생활의 편리성을 위해 사용되는 정수기는 전기에너지를 사용하므로 단락, 누전, 접촉(숙)불량, 트래킹 및 흑연화 현상 등에 의한 위험에 노출되어 있어서 기존 연구자들에 의해 상당부분 연구가 진행된 것으로 보고되고 있으나 일반화염(방화 또는 실화)에 의한 화재 패턴 및 성상에 대한 연구는 미약하다⁽³⁻⁸⁾.

따라서 본 연구에서는 정수기의 외부 및 내부에 인위적으로 착화시켰을 때 정성적 연소 확산 패턴을 분석하고, 방화 또는 실화에 의해 소손된 정수기의 화재원인 규명을 위한 자료를 제공하는데 있다.

2. 실험 방법

Figure 1은 일반화염(방화 또는 실화)에 의해 정수기에

Figure 1. Schematic system diagram applied to the simulation test.

화염이 인가되었을 때의 연소 특성을 해석하기 위해 나타난 계략도이며, 실험에 적용된 제품은 OO정수기(XX-05X, OO Electronics. Co., Korea)로 220 V 2P, 60 Hz, 소비전력은 냉수 115 W, 온수 500 W이다. 화재실험동의 크기는 한 변의 길이가 6 m인 정사각형 구조이며, 실험실의 온도는 24 ± 2 °C, 습도는 60 ± 5 % 정도로 유지시켰다. 또한 실험이 재현되는 동안 정수기는 정상 작동 상태를 유지시켰다. 착화는 휘발성 유기용매(석유)를 함침시킨 사각형의 섬유($100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$)를 사용하였으며, 외부화염이 재현될 때는 정수기 좌측 하단 바깥에 착화시켰으며, 내부화염이 재현될 때는 정수기 좌측 하단 내부에 착화가 되도록 하였다. 실험이 재현될 때 정수기의 전원은 정상적으로 공급되었고, 주탱크에 물이 가득 채워진 상태이었다. 실험 과정은 캠코더와 디지털 카메라를 이용하여 양방향에서 실시간 녹화하여 방사 패턴 해석의 신뢰성을 확보하였다.

Figure 2. Combustion diffusion pattern of a water purifier damaged by fire caused by external ignition.

3. 실험 결과 및 고찰

Figure 2는 정수기의 하단 외부에 인위적으로 착화시켰을 때의 소손되는 과정을 나타낸 것이며, 소손의 범위 및 화염의 성장 패턴 등을 근거로 비교하였다. Figure 2(a)는 화염을 인가하고 10 sec 경과되었을 때이며, Figure 2(b)는 화염이 정수기의 외함에 착화되어 성장하는 단계이다. Figure 2(d)는 화염이 정수기에 착화되어 150 sec를 경과되었을 때 불꽃은 상부까지 확산되었으며, Figure 2(e)~(h) 시점에서는 화염뿐만 아니라 검은 연기가 더욱 많이 발생하고 탄화되어 떨어진 현상을 확인할 수 있다. 필터 및 물받이 등은 난연성이 없어서 바닥에 떨어진 상태에서도 지속적인 연소가 진행되었고, 그로 인해 화염은 더욱 확산되는 것을 알 수 있다. Figure 2(i)는 화염이 착화되어 약 360 sec 경과된 상태를 나타낸 것으로 일반 목조 화재(소형)보다 연소 시간이 길게 진행됨을 알 수 있었다. 즉, 정수기가 물을 사용하는 기기이지만 전기에너지에 의해 작동되고 플라스틱 소재의 필터 및 내장재 등이 많이 적용되

Figure 3. Photograph of a water purifier damaged by fire caused by external ignition.

어 방화 또는 실화가 발생했을 때 연소 범위 및 속도가 빠르므로 2차재해의 유발 가능성이 있을 알 수 있다. 또한 정수기의 외함이 강판으로 제작되어 있어도 화염의 확산 패턴은 일반 건물의 측면화재와 동일한 특징을 보이는 것으로 확인되었다^(9,10).

Figure 3은 Figure 2의 과정이 완료된 후의 탄화 패턴 해석을 위해 나타낸 실체사진이다. 정수기가 화재로 360 sec 정도 소손되었을 때 소화기를 이용하여 화재를 강제 진압시킨 후 분석을 실시하였다. Figure 3(a)는 정면 사진이며, 금속성 재료를 제외한 대부분이 탄화되어 떨어졌다. Figure 3(b)~(c)는 좌측 및 우측의 금속 강판의 실체사진으로 화염의 공격이 심한 부분에서 백화현상이 확인되고, 불완전 연소가 진행된 곳은 검정색의 탄화흔적을 보이고 있다. 그리고 Figure 3(d)~(f)는 후면 및 내부를 나타낸 실체사진이다. 정수기의 골격인 강판과 후면의 방열판 등의 표면은 균일한 탄화 패턴을 보이며, 내부는 박리 현상을 확인할 수 있다. Figure 3(g)~(i)는 화염에 의해 탄화되어 떨어진 것으로 표면이 고르게 탄화되었고 퇴적된 패턴을 보이고 있다. 즉, 단락 또는 접촉(숙) 불량 등에 화재는 용융 흔적이 형성되나 방화 또는 실화 등에 의해 화염의 공격을 받은 정수기의 강판 표면은 비교적 균일한 탄화패턴을 나타내며, 강판의 용융 및 변형은 없는 것을 알 수 있다.

Figure 4는 정수기의 하단 내부에 인위적으로 착화시켰

Figure 4. Combustion diffusion pattern of a water purifier damaged by fire caused by internal ignition.

을 때를 가정하여 소손되는 과정을 나타낸 것이며, 실물 화재의 특성을 고려하여 소손의 범위 및 화염의 성장 패턴 등을 근거로 비교하였다. Figure 4(a)는 화염을 인가하고 50 sec가 경과하였으나 검은색의 연기만 확인되고 외부로 화염이 방사되지 않았다. Figure 4(b)는 화염이 외부로 일순간에 방사된 실체사진으로 120 sec 정도가 소요되었다. Figure 4(c)는 정수기 외부로 진행된 화염을 나타낸 것이다. Figure 4(d)~(f)는 화염이 상하로 빠르게 진행된 것으로 관측되었고, 이때부터 자기소화 기능을 완전히 상실한 것으로 판단된다. 즉, 내부에 화염이 인가되면 화염의 초기 확산 속도는 미약하나 일정시간이 경과된 후부터는 축열된 에너지에 의해 급속한 연소를 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 정수기가 반소 이상 되는데 외부화염의 착화에서는 360 sec 정도 소요된 것과 비교하면 절반 정도의 시간으로도 소손의 범위는 유사한 것으로 나타났다^(9,10).

Figure 5는 Figure 4의 과정이 완료된 후의 탄화 패턴 해석을 위해 나타낸 실체사진이다. Figure 5(a)는 정면 사진으로 발화점을 기준으로 브이패턴(V-pattern)이 형성된 것을 알 수 있고, Figure 5(b)는 좌측면 사진으로 직사화염이

공격된 부분에 명확한 탄화가 발생하였으며, 인접한 부분은 비교적 양호한 상태를 보이고 있다. Figure 5(c)~(d)는 우측 및 후면의 실체사진으로 탄화된 흔적이 거의 없고 단지 오염의 흔적만을 확인할 수 있다. 즉, 발화점을 기준했을 때 대각선 방향에 위치한 곳은 화염의 공격이 가장 늦게 진행되는 것을 알 수 있다. Figure 5(e)~(f)는 탄화된 정면 바닥 및 하부를 나타낸 것이다. 화염의 확산 속도가 빠름에 따라 브이 패턴을 형성했으며, 직사화염의 공격을 받은 부분과 간접화염을 받은 부분의 경계가 선명함을 알 수 있다. Figure 5(g)~(i)는 탄화된 내부, PCB 및 퓨즈를 나타낸 것이다. 직사화염의 공격 유무에 따라 탄화 패턴의 경계가 비교적 선명하게 구분되며, 국부적인 소손이 발생한 것을 알 수 있다.

Figure 6은 정수기가 화염의 공격 위치에 따른 어떤 탄화 패턴을 보이는지 해석하기 위해 나타낸 실체사진이다. Figure 6(a)는 외부에 착화시켰을 때 소손된 것으로 균일한 탄화패턴을 보이고 있고, 바닥면에 떨어진 탄화물이 순차적으로 퇴적되는 것을 알 수 있다. Figure 6(b)는 내부에 착화시켰을 때 소손된 것으로 브이패턴의 연소 패턴을 나타내며, 연소 흔적의 경계가 비교적 선명한 것을 알 수 있다. 즉, 외부에서 착화될 때는 밖으로 방사되는 열량이 많지만 내부에 착화되었을 때는 사방이 대부분 차폐되어 있어서 축열량이 상대적으로 많으므로 화염확산의 급격히 진행되는 것으로 확인되었다. 이와 같이 연소 상태의 차이를 통해서 어느 쪽에서 어떻게 화재가 진행되었는지를 판단할 수 있는 객관적 근거를 제시할 수 있게 되었다⁽³⁾.

Figure 7은 실험을 통해서 확보된 전원퓨즈(220 V, 60 Hz,

Figure 5. Photograph of a water purifier damaged by fire caused by internal ignition.

Figure 6. Comparison of ignition points of a carbonized purifier.

(a) Damage by fire due to external ignition

(b) Damage by fire due to internal ignition

Figure 7. State of the fire damaged fuse of a carbonized water purifier.

10 A)의 실체사진이다. Figure 7(a)는 정수기의 외부에서 착화시켰을 때 소손된 퓨즈의 예를 나타낸 것이다. 외부에서 화염이 공격함에 따라 전제적인 탄화가 발생했지만 금속 홀더 또는 인접 부분 등에서 더 많은 탄화가 발생한 것을 알 수 있다. 즉, 금속홀더가 있는 곳이 열전도율이 우수하므로 소손이 큰 것으로 판단됩니다. Figure 7(b)는 정수기의 내부에서 착화시켰을 때 소손된 퓨즈의 예를 나타낸 것이다. 퓨즈의 형태가 비교적 완전하게 유지되어 있으나 금속 홀더 부분이 심하게 탄화된 것을 알 수 있다. 또한 정수기에 착화되어 연소가 진행되는 동안 내장된 퓨즈 및 전원 제어용 보호 장치는 작동하지 않았다. 즉, 시스템의 단락 또는 과부하 등이 발생했을 때는 퓨즈 내부의 소손 흔적이 명확한 것이 특징인데, 외부 화염을 받아 소손된 퓨즈는 금속 홀더 부분의 탄화가 집중되는 것으로 확인됨에 따라 사고원인 판정의 중요한 근거로 활용할 수 있을 것으로 판단된다⁽³⁾.

4. 결 론

외부 화염에 의해 소손된 정수기의 정성적 연소 확산 패턴 및 퓨즈의 탄화심도 등을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 정수기의 하단 외부에 인위적으로 착화시켜 150 sec 정도 경과되었을 때 불꽃은 상부까지 확산되었으며, 반소 이상 진행되는 데 360 sec 정도가 걸렸다. 또한 외부가 강판으로 제작되어 있어도 화염의 확산 패턴은 일반 건물의 측면화재와 동일한 특징을 보이는 것으로 확인되었다.

(2) 외부에서 착화된 정수기의 탄화 패턴 분석에서 금속 강판의 표면에 백화현상이 확인되었고, 후면의 방열판 및 탄화된 부품은 비교적 균일하게 탄화된 것을 알 수 있었다.

(3) 정수기를 내부에서 착화시켰을 때 초기 연소는 미약했으나 120 sec 정도가 경과된 후에 화염이 외부로 일순간에 방사되어 화염이 상하로 빠르게 진행되는 것으로 관측

되었고, 이때부터 자기소화 기능을 완전히 상실한 것으로 판단된다.

(4) 내부에서 착화된 정수기의 탄화 패턴 분석에서 발화점을 기준으로 명확한 브이패턴이 형성되었으며, 발화점을 기준했을 때 대각선 방향에 위치한 곳은 화염의 공격이 가장 적게 받는 것으로 나타났다.

(5) 정수기의 착화 위치에 따른 분석에서 외부에서 착화시켜 소손된 것은 균일한 탄화패턴을 보이고 있고, 내부에서 착화시켜 소손된 것은 브이패턴이 형성되었다. 즉, 연소 패턴의 차이를 통해서 어느 쪽에서 어떻게 화재가 진행되었는지를 판단할 수 있는 객관적 근거를 제시할 수 있게 되었다.

(6) 정수기가 화염의 공격을 받아 반소될 때까지 내장된 퓨즈의 용단 및 시스템 보호 장치의 작동 등은 발생하지 않았다. 또한 외부 화염을 받아 소손된 퓨즈는 금속 홀더 및 인접 부분 등에서 탄화가 집중되는 것으로 확인됨에 따라 사고원인 판정의 중요한 근거로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. KEPCO, "2010 Statistics of Electrical Power in Korea", Vol. 80, pp.16-17 (2011).
2. National Fire Data System, www.nfds.go.kr, NEMA (2011).
3. C. S. Choi, H. W., Kim, K. S. Lee, Y. S. Lim, C. H. Lee and J. H. Chung, "Electrical Fire Engineering", Honghwa Technology Publishing Co., pp. 161, 172, 189-199 (2004).
4. S. H. Lee, "Theory and Business of Fire Investigation", Honghwa Technology Publishing Co., pp. 2-4, 91-92 (2009).
5. K. Y. Lee, C. S. Choi, D. O. Kim, H. K. Kim and D. W. Kim, "Research on Improvement of Power Control System of Cold & Hot Water Purifier", Trans. KIEE, Vol. 56P, No. 1, pp. 45-50 (2007).
6. D. O. Kim, H. J. Kil, H. W. Moon, H. K. Kim and C. S. Choi, "A Study on the Heating Factor of Thermostat due to the Using Environment", 2012 Spring Conference of the Korean Society of Safety, pp. 207-212 (2007).
7. D. O. Kim, C. S. Choi, K. Y. Lee, H. W. Moon and H. K. Kim, "The Protective Countermeasure of Water Purifier PCB according to Abnormal Voltage", Journal of KIIEE, Vol. 21, No. 8, pp. 64-70 (2007).
8. C. S. Choi, "Study of the Method to Examine the Cause of Damage to a Flat-Type Vinyl Cord (VFF) According to the Type of Energy Source", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 25, No. 6, pp. 83-88 (2011).
9. John D. Dehaan, "Kirk's Fire Investigation", 4th Edition, Prentice Hall, pp. 21-26 (2002).
10. J. Warnatz, U. Maas and R. W. Dibble, "Combustion", Springer, pp. 157-159 (1996).