[Research Paper]

화재 조건의 액체풀 표면 위 액적 충돌 현상에 대한 실험적 연구

양지현 · 박민영* · 이치영**,***†

부경대학교 소방공학과 대학원생, *부경대학교 건축·소방공학부 대학원생, **부경대학교 소방공학과 교수,

***부경대학교 건축·소방공학부 교수

Experimental Study on Droplet Impact Phenomena on Burning Liquid Pool Surfaces

Ji Hyun Yang · Min Yeong Park* · Chi Young Lee**,***†

Graduate Student, Department of Fire Protection Engineering, Pukyong National University,

*Graduate Student, Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University,

**Professor, Department of Fire Protection Engineering, Pukyong National University,

***Professor, Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University

(Received August 16, 2021; Revised August 17, 2021; Accepted August 18, 2021)

요 약

본 연구에서는 화재 조건의 메탄올과 헵탄 액체풀 표면에 다양한 크기 및 속도의 물 액적이 충돌할 때 나타나는 현상에 대한 실험을 수행하였다. 화재 조건의 헵탄풀의 경우가 메탄올풀에 비해 액체풀 내 더 깊은 위치까지 온도가 상승하고, 액적 충돌 속도가 느린 것으로 나타났는데 이는 헵탄풀의 열방출률이 더 높기 때문으로 판단된다. 반면, 화재 조건의 메탄올풀과 헵탄풀에서의 충돌 액적 크기는 유사하게 나타났다. 액체풀 표면 위 액적 충돌 현상 가시화를 통해 화재 조건의 메탄올풀 및 헵탄풀의 충돌 영역 지도를 구축하였고, 이를 기존 연구의 비화재 조건 충돌 영역 지도와 비교하였다. 비교 결과, 화재 및 비화재 조건의 메탄올풀과 비화재 조건의 헵탄풀의 경우, 단일 제트와 2차 제트가 생성되는 스플래시 양식이 관찰된 반면, 화재 조건의 헵탄풀의 경우, 단일 제트와 캐노피 양식이 관찰되었다.

ABSTRACT

In this study, the phenomena of water droplet impact on burning methanol and n-heptane pool surfaces were experimentally investigated under various size and velocity conditions of impact droplet. In the n-heptane pool, the temperature increased to the deeper location of the pool and the droplet impact velocity was slower, as compared with those in the methanol pool. These results were caused by the higher heat release rate of the n-heptane pool. However, the impact droplet sizes on the burning methanol and n-heptane pool surfaces appeared to be similar. By visualizing the droplet impact phenomena, the impact pattern maps of burning methanol and n-heptane pool surfaces were constructed and compared with the previous impact pattern maps of their unburned pool surfaces. In the burning and unburned methanol and unburned n-heptane pools, patterns of single jet and splash with secondary jet were observed. On the contrary, in the burning n-heptane pool, patterns of single jet and canopy were observed.

Keywords : Droplet impact phenomena, Impact pattern map, Burning liquid pool, Droplet and liquid surface interaction

1. 서 론

물은 친환경적이고 독성이 없으며 경제적이고 소화효가 우수한 소화약제이다. 하지만 유류 화재에는 스프링클러설비(sprinkler systems)와 같은 수계소화설비의 적용이 제

한적이다. 스프링클러설비의 헤드(head)로부터 생성되는 물 액적이 유류 화재의 액체 표면에 도달할 경우 물 액적에 의해 액체 표면이 극심하게 교란되어 원하지 않는 화재 확산 등이 일어날 가능성이 있다. 한편, 미분무소화설비의 경우 유류 화재에 적응성이 있다고 알려져 있으나 미분무

† Corresponding Author, TEL: +82-51-629-6493, FAX: +82-51-629-7078, E-Mail: cylee@pknu.ac.kr

© 2021 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

헤드에 의해 국부적으로 물의 미립화가 충분히 되지 않는 경우 유사한 상황이 발생할 수 있다. 이와 같이 물 액적과 화재 상황의 액체 표면 간 충돌 현상에 대한 연구는 화재 소화 및 확산 현상과 밀접한 관련이 있고, 소화약제로 많은 장점을 가지고 있는 물을 더욱 다양한 화재 상황(예를 들면, 유류 화재 등)에 적용하기 위해서 수행되어야 할 중요한 연구 주제 중 하나이다.

기존에 액체 표면 위 액적 충돌 현상에 대한 다양한 연구가 수행되어 왔다. 예를 들면, Rodriguez와 Mesler⁽¹⁾는 액적과 액체풀(liquid pool)로 물을 이용하여 실험을 수행하였다. 액체 표면 위 액적 충돌 양식(impact pattern)을 병합(coalescence)과 스플래싱(splashing)으로 구분하였고, Froude 수(Froude number)와 Reynolds 수(Reynolds number)를 이용하여 2가지 양식이 관찰되는 영역을 구분하였다. Okawa 등⁽²⁾은 물을 이용하여 액적이 액체 표면에 충돌할 때 발생하는 2차 액적에 대한 연구를 수행하였다. 실험을 통해 충돌 양식이 나타나는 영역과 왕관 형상의 테두리(crown rim)에서 생성되는 2차 액적의 양에 대한 상관식을 제안하였다. Huang과 Zhang⁽³⁾은 다양한 액체 종류, 액적 크기 및 속도, 액막(liquid film) 두께에서의 액적 충돌 현상에 대한 연구를 수행하였다. 충돌 양식의 천이 경계(transition boundary)에 대해 기존 상관식과 비교를 수행하였고, 바운싱(bouncing), 병합, 제팅(jetting), 스플래시(splash) 간 천이 경계에 대한 새로운 상관식을 제안하였다. Zhao 등⁽⁴⁾은 물, 에탄올(ethanol), 노말 펜탄(n-pentane), 메탄올(methanol), 1-프로페놀(1-propanol)을 사용하여 병합과 제팅 영역에 대해 연구를 수행하였다. 점성계수와 표면장력이 작을수록 충돌 과정 동안 불안정성(instability)이 증가한다고 보고하였고, 실험 결과를 토대로 병합에서 제팅으로의 천이에 대한 상관식을 제안하였다. Cai⁽⁵⁾는 액체 표면 위 액적 충돌 시 스플래시, 관통(penetration), 분열(cleavage) 현상에 대한 연구를 수행하였고, 실험 결과를 기존 전산시뮬레이션 결과와 비교하였다. 본 연구 그룹에서도 액체 표면과 충돌 액적 간 상호작용에 대한 연구를 수행한 바 있다. Yang과 Lee⁽⁶⁾는 단일 물 액적과 4가지 종류의 액체풀 표면을 이용하여 실험을 수행하였으며, 충돌 양식 지도(impact pattern map) 및 충돌 영역 예측 상관식을 제안하였다. 이외에도 충돌 액적과 액체 표면 간 상호작용에 대한 다양한 연구가 기존에 활발하게 수행되었음이 보고^(7,8)되었다. 하지만 대부분의 기존 연구에서는 비화재 조건의 액체 표면을 이용한 연구가 수행되었다. 따라서 소방 및 화재 분야의 응용을 고려할 때 화재 조건의 액체 표면에서의 액적 충돌 현상에 대한 연구가 수행될 필요가 있다.

화재 조건의 액체 표면 위 단일 액적 충돌 현상에 대한 연구가 제한적으로 수행된 바 있다. Xu 등⁽⁹⁾은 화재 조건의 알코올(alcohol) 표면에 물 액적이 충돌할 때의 현상에 대해 실험을 수행하였다. 3가지 충돌 영역에 대해 보고하였고, 액적 충돌 속도가 크레이터(crater), 제트(jet), 왕관(crown) 형상의 세부 거동에 미치는 영향에 대해 검토하였다. Xu

등⁽¹⁰⁾은 비화재 조건과 화재 조건의 액체풀 표면에서 액적이 충돌할 때, 크레이터의 세부 거동 및 변화에 대한 연구를 수행하였다. 크레이터 최대 폭 및 깊이의 경우 비화재 조건에서는 액체풀 크기와 관련이 없었으나 화재 조건에서는 액체풀 크기 증가에 따라 감소하였다. 또한 크레이터 진화 시간(evolution time)의 경우 비화재 액체풀 조건이 화재 액체풀 조건에 비해 더 긴 것으로 관찰되었다. Xu 등⁽¹¹⁾은 화재 조건의 에탄올 표면에 액적이 충돌할 때 관찰되는 현상에 대한 실험을 수행하였다. 3가지 충돌 영역을 보고하였고 이에 대한 충돌 영역 지도(impact regime map) 및 상관식을 제안하였다. 또한 에너지 보존 및 변환(energy conservation and conversion)을 토대로 최대 크레이터 폭과 제트 길이에 대한 이론적 연구를 수행하였다. Fan 등⁽¹²⁾은 화재 조건의 헵탄(heptane) 액체풀을 이용하여 액체풀의 깊이와 Weber 수(Weber number) 조건 변화에 따른 액적 충돌 현상에 대한 실험을 수행하였다. 충돌 양식, 최대 크레이터 깊이 및 폭, 최대 제트 높이 등에 대해 보고하였고 액적 충돌 높이와 속도 간의 이론적인 관계를 연구하였다. 이러한 기존 연구 동향을 토대로 볼 때, 화재 조건 액체 표면에서의 액적 충돌 현상에 대한 연구는 비화재 조건에 비해 매우 미흡한 상황이고, 화재 조건과 비화재 조건의 액체 표면 간 액적 충돌 현상 차이에 대한 체계적인 연구가 부족하다고 판단된다. 따라서, 액체 표면 위 액적 충돌 현상을 세부적으로 이해하기 위해서는 다양한 액체 표면 및 액적 충돌 조건에서 화재 조건과 비화재 조건의 액체 표면을 이용한 연구가 수행될 필요가 있다.

본 연구에서는 화재 조건의 액체풀을 이용하여 액적 충돌 현상에 대한 연구를 수행하였다. 액적으로는 물을, 액체풀로는 메탄올과 헵탄을 이용하였다. 3가지 크기의 니들(needle)과 다양한 낙하 높이 조절을 통해 충돌 액적의 크기와 속도를 변화시켰다. 실험을 통해 열방출률, 액체풀 내 온도 분포, 충돌 액적 크기 및 속도를 측정하였고, 다양한 액적 크기와 속도 조건에서의 액적 충돌 현상을 가시화하였다. 가시화 결과를 토대로 화재 조건의 메탄올과 헵탄 액체풀에 대한 충돌 양식 지도를 구축하였고 본 연구 그룹의 기존 연구⁽⁶⁾에서 보고한 비화재 조건의 충돌 양식 지도와 비교하고 검토하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 충돌 현상 가시화 실험 장치

본 연구에서 이용한 액적과 액체 표면 간 충돌 현상 가시화 실험 장치⁽⁶⁾의 개략도를 Figure 1에 나타내었다. 액적 생성을 위해 실린지 펌프(syringe pump)를 이용하여 일정한 유량으로 유체를 공급하였으며, 공급된 유체가 니들팁(needle tip)에 도달하여 액적이 생성되고 액적 무게에 의해 자유 낙하하도록 하였다. 액적이 생성되는 니들은 이송장치(moving stage)에 고정되어 있고, 니들은 이송장치에 의해

Figure 1. Schematic diagram of experimental setup.

Figure 2. Properties of liquid pools^(13,14).

상·하로 움직일 수 있도록 설계하였다. 본 연구에서는 니들로부터 액적이 생성되어 자유 낙하하면 실린지 펌프 작동을 멈추어 하나의 액적이 액체풀 표면에 충돌하도록 하였다. 액적 충돌 현상 가시화를 위해 초고속 카메라(Photron FASTCAM Mini UX)와 렌즈(lens, SAMYANG 100 mm ED UMC MACRO)를 이용하였고, 광원으로는 light-emitting diode, LED) 조명과 확산판(diffuser)을 사용하였다. 초고속 카메라를 컴퓨터(computer)와 연결하여 액적 충돌 현상을 관찰하고 이미지(image)를 저장하였다.

액적을 위한 유체로 물을 이용하였고, 충돌 액적의 크기를 조절하기 위해 26 gauge (내경: 0.33 ± 0.05 mm), 22 gauge (내경: 0.45 ± 0.13 mm), 17 gauge (내경: 0.83 ± 0.16 mm)와 같이 크기가 다른 3가지 종류의 니들을 이용하였다. 한편, 액적 충돌 속도는 이송장치를 이용하여 액체풀 표면으로부터 액적

이 생성되는 니들 간 높이를 변화시켰고, 본 연구에서는 액체풀 표면에서 니들 사이의 높이를 0.5-0.8 m로 설정하였다.

본 실험에서는 액체풀을 위해 메탄올과 헵탄(n-heptane)을 사용하였고 모든 실험은 액체풀 표면이 화재 조건인 상황에서 수행하였다. 액체풀의 물성치는 액적과 액체풀 표면 간 충돌 현상에 지대한 영향을 미칠 수 있다. Figure 2에 각 액체풀의 온도에 따른 밀도, 점성계수, 표면장력 변화를 나타내었고, 비교를 위해 물의 물성치를 함께 나타내었다. 물, 메탄올, 헵탄의 비등점(boiling point)은 각각 약 100 °C, 64.7 °C, 98.4 °C로 해당 온도 근처까지의 물성치를 나타내었다. 온도가 높아질수록 각 액체의 밀도, 점성계수, 표면장력의 값이 감소하였다. 또한, 밀도, 점성계수, 표면장력 모두 물이 가장 컸고 메탄올, 헵탄의 순서로 작아짐을 확인하였다.

Figure 3. Schematic diagram of thermocouple installation in liquid pool.

2.2 액체풀 화재의 열방출률 측정

각 액체풀 화재에 대해 열방출률(heat release rate; HRR)을 측정하였다. 점화 후 전자저울을 사용하여 각 액체의 질량손실량(Δm)을 900 s (Δt) 간 측정하여 질량손실률($\Delta m/\Delta t$)을 계산하였다. 그리고 연소열(H_c)⁽¹⁵⁾을 이용하여 식(1)을 토대로 열방출률을 도출하였다.

$$HRR = (\Delta m/\Delta t) \times H_c \quad (1)$$

2.3 액체풀 내 온도 분포 측정

비화재 조건의 액체풀의 경우 액체풀 내부 온도가 일정한 반면, 액체풀 표면에 화재가 발생하게 되면 액체풀 내 온도는 화재가 발생한 표면에서 깊이 방향으로 시간에 따라 변화하게 된다. 액체풀 표면 위 단일 액적 충돌 현상의 경우, 액체풀의 물성에 지대한 영향을 받을 수 있으므로 액체풀 내부 온도 분포에 대한 정보가 중요하다. 본 연구에서는 액체풀 표면과 액적 충돌 현상 가시화 실험 전에 액체풀 화재 시 액체풀 깊이 방향으로의 시간에 따른 온도 분포 변화를 측정하였다. 본 연구에서는 액체풀을 위해 직경 95 mm, 높이 55 mm의 유리 재질의 접시(dish)를 이용하였고, 연료풀의 깊이는 45 mm로 설정하였다. 액체풀 내 온도 분포를 측정하기 위해 Figure 3과 같이 액체풀 표면으로부터 깊이 방향으로 5 mm 마다 1/16 inch 직경의 K-type 열전대를 설치하였고, 시간에 따라 측정된 온도 데이터를 데이터 수집 장치(DATA TRANSLATION, DT9828)를 통해 컴퓨터에 저장하였다.

2.4 충돌 액적 크기 및 속도 측정

본 연구에서는 기존 연구⁽⁶⁾에서 적용한 방법을 이용하여 충돌 액적 크기 및 속도를 측정하였다. 충돌하는 물 액적 크기 및 속도를 결정하기 위해 액체풀 표면에 액적이 충돌하기 2 ms 전에서의 이미지와 충돌하는 시점에서의 이미지를 이용하였다. 액체풀 표면에 액적이 충돌하기 2 ms 전에서의 이미지에서 액적의 수평 방향 길이(D_x)와 수직 방향 길이(D_y)를 측정하였으며, 식(2)를 이용하여 액적의 등가

직경(D_m)을 계산하였다.

$$D_m = (D_x^2 \times D_y)^{1/3} \quad (2)$$

물 액적의 충돌 속도(V)는 식(3)을 토대로, 액체풀 표면에 액적이 충돌하기 2 ms 전에서의 이미지와 충돌하는 시점에서의 이미지로부터 낙하하는 액적의 이동 거리(Δh)를 측정하고 이를 시간 간격(Δt)인 2 ms로 나누어 도출하였다.

$$V = \Delta h / \Delta t \quad (3)$$

3. 실험 결과

3.1 액체풀의 열방출률 및 온도 분포 측정 결과

식(1)을 통해 도출된 본 연구에서 이용한 메탄올풀(methanol pool)과 헵탄풀(n-heptane pool)의 열방출률은 각각 1.11과 2.18 kW로 나타났다. 즉, 헵탄풀의 열방출률이 메탄올풀의 열방출률 보다 높았다.

한편, Figure 4에 점화 후 100 s, 180 s, 300 s에서의 액체풀 내 온도 분포 측정 결과를 나타내었다. 점화 전 액체풀의 초기 온도는 약 19.9(±0.9) °C인 조건이었다. 점화 후 모든 액체풀에서 액체풀 표면 부근의 온도가 높고 깊이 방향으로 온도가 낮아지는 경향이 관찰되었다. 모든 시간에서 헵탄풀의 온도가 메탄올풀의 경우보다 높은 것으로 관찰되었다. 또한 액체풀 표면 부근에서 일정 깊이까지 온도가 급격하게 변화한 반면, 특정 지점 이후에는 깊이 증가에 따른 온도 변화가 미미한 것으로 나타났다. 메탄올풀의 경우, 점화 후 100 s 일 때는 액체풀 표면에서 약 10 mm 깊이까지, 180 s 일 때는 약 15 mm 깊이까지, 300 s 일 때는 약 20 mm 깊이까지 온도가 급격하게 변화하였다. 반면, 헵탄풀의 경우 점화 후 100 s 일 때는 액체풀 표면에서 약 15 mm 깊이까지, 180 s 일 때는 약 25 mm 깊이까지, 300 s 일 때는 약 35 mm 깊이까지 온도가 급격하게 변화하였다. 즉, 동일한 시간에서 온도가 급격하게 변화하는 구간은 헵탄풀이 메탄올풀보다 깊은 것으로 관찰되었다. 또한, 헵탄풀이 메탄올풀보다 표면 근처에서의 온도가 높은 것으로 나타났다. 이러한 경향이 나타난 이유는 헵탄풀이 메탄올풀에 비해 열방출률이 높고 헵탄이 메탄올에 비해 비등점이 높기 때문으로 판단된다.

3.2 충돌 액적 크기 및 속도 측정 결과

액체풀 화재 조건에서 측정한 충돌 액적 크기 측정 결과를 니들 크기에 따라 Figure 5에 나타내었다. 니들 번호가 감소함에 따라 충돌 액적의 크기가 증가하였는데 이는 니들 직경이 증가하기 때문이다. 또한 모든 니들에서 액적의 자유낙하 높이가 증가함에 따라 충돌 액적 크기가 약간 감소하는 것처럼 관찰되었다. 이는 자유낙하 높이의 증가에 따라 충돌 액적의 이동 거리와 속도가 증가하여 액적 증발

Figure 4. Temperature distributions in liquid pools at certain times.

Figure 5. Droplet diameters for different needle sizes (Note that ranges in y-axis are different).

Figure 6. Impact velocities of droplets for different needle sizes.

이 증대되기 때문으로 추측된다. 그리고 메탄올fuel인 경우가 헵탄fuel인 경우에 비해 충돌 액적 크기가 약간 큰 것처럼 관찰되었는데 이는 메탄올fuel의 열방출률이 헵탄fuel의 열방출률보다 작아서 액적 증발률이 상대적으로 낮기 때문으로 판단된다. 하지만 본 실험데이터의 오차막대(error bar)를 고려할 때 본 실험 조건에서 액적의 자유낙하 높이와 액체fuel의 종류(열방출률)가 충돌 액적 크기에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다. 26, 22, 17 gauges의 니들에 의해 생성된 충돌 액적 크기는 각각 약 2, 2.5, 3.2 mm로 측정되었다.

Figure 6에 액적 충돌 속도 측정 결과를 니들 크기별로 나타내었다. 비교를 위해 액체fuel이 물인 비화재 조건에서 측정된 기존 연구⁽⁶⁾의 액적 충돌 속도 측정 결과를 함께 나타내었다. 모든 니들 크기 조건에서 액적의 자유낙하 높이가 증가함에 따라 액적 충돌 속도가 증가하는 경향이 나타났다. 또한 화재 조건(메탄올과 헵탄인 경우)에서의 액적의 충돌 속도가 비화재 조건(물인 경우)에 비해 느린 것으로 나타났다. 이는 액체fuel 화재에 의해 생성되는 상승 흐름이 액적의 충돌 속도를 감소시키기 때문으로 판단된다. 한편, 본 연구의 화재 조건에서, 메탄올fuel에서의 액적 충돌 속도

Figure 7. Impact patterns observed in this study.

가 헵탄풀에서보다 더 빠른 것으로 관찰되었다. 이는 메탄올풀이 헵탄풀에 비해 열방출률이 낮아서 상승 흐름이 약하고 이로 인해 충돌 액적에 대한 감속 효과가 작기 때문으로 판단된다. 화재 조건의 메탄올풀과 헵탄풀에서의 액적 충돌 속도는 각각 약 2.78-3.55 m/s와 약 2.54-3.46 m/s로 측정되었다.

3.3 액적 충돌 가시화 및 액체풀의 충돌 양식 지도

다양한 크기 및 충돌 속도 조건의 물 액적을 화재 조건의 메탄올풀과 헵탄풀 표면에 낙하시켜 충돌하는 액적과 액체풀 표면 간 상호작용을 가시화하였고, 가시화 결과를 토대로 충돌 양식 선도를 구축하였다. 물 액적은 액체풀 표면 점화 후 약 180 s 시점에서 자유 낙하시켰다.

본 실험 조건에서는 단일 제트(single jet), 2차 제트가 생성되는 스플래시(splash with secondary jet), 캐노피(canopy)와 같이 3가지 종류의 충돌 양식이 관찰되었고 Figure 7에 해당 충돌 양식에 대한 가시화 사진을 나타내었다. Figure 7(a)에 단일 제트 양식(single jet pattern)을 나타내었다. 액적이 액체풀 표면에 충돌하면 액체풀 표면에 분화구 형태의 크

레이터가 형성된다. 이때 액적 충돌 부근에서 왕관 형상이 생성되기도 한다. 시간이 지남에 따라 크레이터가 수축하고 이후 액체풀 표면 위로 제트 형상이 생성된다. Figure 7(b)에 2차 제트가 생성되는 스플래시 양식(splash pattern with secondary jet)을 나타내었다. 액적이 액체풀 표면에 충돌하면 크레이터와 함께 충돌 부분 근처에서 왕관 형상이 발생된다. 이후, 크레이터가 수축하면서 중심 제트(central jet)가 형성되고 이때 중심 제트의 끝에서 2차 액적(secondary droplet)이 생성되기도 한다. 중심 제트와 2차 액적이 하강하여 액체풀 표면에 재충돌하면 크레이터가 다시 생성되고 이러한 크레이터가 수축되면서 2차 제트(secondary jet)가 형성된다. Figure 7(c)는 캐노피 양식(canopy pattern)을 나타낸다. 액적이 액체풀 표면에 충돌하게 되면, 2차 제트가 생성되는 스플래시 양식과 유사하게 크레이터와 왕관 형상이 생성된다. 이때 주변에 형성된 왕관 형상이 극심하게 연장(extension)되고 중심부에서 서로 병합되어 둥근 지붕과 같은 형태가 나타난다. 이후 표면 기포(surface bubble)가 형성되는데 이러한 양식을 캐노피 양식으로 분류하였다.

가시화 결과를 토대로, 단일 물 액적이 화재 조건의 메

Figure 8. Impact pattern maps of burning liquid pool surfaces.

Figure 9. Impact pattern maps of unburned liquid pool surfaces⁽⁶⁾.

탄올풀과 헵탄풀 표면에 충돌하는 경우에 대한 충돌 양식 지도를 Figure 8에 나타내었다. Figure 8(a)에 나타낸 메탄올풀의 경우, 충돌 액적 크기가 작고 속도가 낮은 조건에서는 단일 제트 양식이 관찰되었고 비교적 충돌 액적 크기가 크고 속도가 높은 조건에서는 2차 제트가 생성되는 스플래시 양식이 나타났다. 반면 헵탄풀은 메탄올풀과 다른 충돌 양식 지도를 나타냈다. Figure 8(b)에 나타낸 바와 같이 액적 충돌 속도가 낮은 조건에서는 단일 제트 양식이 관찰되었으나 충돌 속도가 높은 조건에서는 캐노피 양식이 나타났다. 즉, 본 실험 조건에서 메탄올풀 표면에서는 주로 2차 제트가 생성되는 스플래시 양식이 관찰된 반면, 헵탄풀 표면에서는 주로 캐노피 양식이 관찰되었다.

화재 조건의 액체풀에 대한 충돌 양식 지도를 비화재 조건의 액체풀에 대한 충돌 양식 지도와 비교하는 것은 액적과 액체풀 표면 간 충돌 현상을 이해하고 화재 소화와 관련된 응용적인 측면에서 의미가 있다고 판단된다. Yang과 Lee⁽⁶⁾는 메탄올풀과 헵탄풀을 이용하여 비화재 조건에서 물 액적이 액체풀 표면에 충돌할 때의 현상을 가시화하여 각 액체풀에

대한 충돌 양식 지도를 보고한 바 있다. 기존 연구⁽⁶⁾에서 보고한 비화재 조건의 액체풀에 대한 결과 중 본 실험과 유사한 조건에서의 충돌 양식 지도를 Figure 9에 나타내었다. 메탄올풀의 경우 Figure 9(a)에 나타낸 비화재 조건과 Figure 8(a)에 나타낸 화재 조건에서의 충돌 양식 지도가 크게 다르지 않은 것처럼 관찰되었다. 즉, 비화재 및 화재 조건 모두에서 2차 제트가 생성되는 스플래시 양식이 나타났다. 그러나 헵탄풀의 경우 비화재 조건과 화재 조건에서의 충돌 양식 지도가 큰 차이를 보였다. Figures 9(b)와 8(b)에 나타낸 바와 같이 낮은 충돌 속도 영역에서는 비화재와 화재 조건 모두에서 단일 제트 양식이 관찰되었다. 그러나 높은 충돌 속도 영역에서는 비화재 조건의 경우 Figure 9(b)와 같이 2차 제트가 생성되는 스플래시 양식이 관찰된 반면, 화재 조건의 경우 Figure 8(b)와 같이 캐노피 양식이 관찰되었다.

Figures 8과 9를 토대로 볼 때, 화재 및 비화재 조건의 메탄올풀(Figures 8(a)와 9(a)), 그리고 비화재 조건의 헵탄풀(Figure 9(b))의 경우, 대부분 2차 제트가 생성되는 스플래

시 양식이 나타난 반면, 이와 유사한 액적 크기 및 충돌 속도 조건에서, 화재 조건의 헵탄폴(Figure 8(b))의 경우, 캐노피 양식이 관찰되었다. 이러한 경향이 나타난 이유는 화재 조건의 헵탄폴 표면 근처에서 밀도, 점성계수 및 표면장력이 낮기 때문으로 추측된다. 화재 조건에서 메탄올폴과 헵탄폴 표면 근처에서의 온도는 비등점 부근의 높은 온도이다. 이러한 상황에서 헵탄폴 표면 부근에서의 밀도, 점성계수 및 표면장력은 메탄올폴에 비해 더 낮을 것으로 예상된다. 또한 화재 조건에서 액체폴 표면 근처에서의 온도는 비화재 조건에 비해 높기 때문에 화재 조건의 헵탄폴 표면 부근에서의 밀도, 점성계수 및 표면장력은 비화재 조건보다 더 낮을 것으로 판단된다. 밀도, 점성계수 및 표면장력의 감소는 충돌 양식에 지대한 영향을 미칠 수 있다. 밀도와 점성계수가 낮을 경우 충돌하는 액적에 의해 액체폴 표면이 쉽게 변형될 수 있고, 표면장력이 낮을 경우 액체폴 표면이 변형하여 더 넓은 표면을 형성하는데 용이할 수 있다. 따라서, 화재 조건의 헵탄폴 표면에 액적이 충돌한 후 변형이 극심하게 일어나고 주변에 형성된 왕관 형상이 액막의 형태로 쉽게 연장되어 중심부에서 서로 접촉하여 병합되는 캐노피 양식이 주로 나타나는 것으로 추측된다.

기존의 대부분 관련 연구가 비화재 조건의 액체폴에서 수행된 상황에서, 본 연구를 통해 충돌 액적 조건(액적 크기 및 충돌 속도) 뿐 아니라 액체폴 조건(화재 여부 및 액체 종류)이 액적 충돌 현상에 지대한 영향을 미친다는 것을 확인했다는 측면에서 본 연구는 의미가 있다고 판단된다. 추후 응용 측면을 고려하여, 더욱 다양한 액체폴 조건(액체 종류 및 열방출률 조건 등)과 충돌 액적 조건(높은 속도, 다양한 액적 크기, 다중 액적 충돌 조건 등)에서의 실험이 수행될 필요가 있다고 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 화재 조건의 메탄올폴과 헵탄폴 표면에 물 액적이 충돌할 때의 현상에 대해 실험을 수행하였다. 3가지 크기의 니들을 이용하여 충돌 액적 크기를 조절하였고, 니들과 액체폴 표면 간 높이를 조절하여 충돌 속도를 변화시켰다. 열방출률, 액체폴 내 온도 분포, 충돌 액적 크기 및 속도를 측정하였고, 충돌 액적과 액체폴 표면 간 상호작용에 대한 가시화 결과를 바탕으로 화재 조건의 액체폴에 대한 충돌 양식 지도를 구축하였다. 또한, 이를 본 연구 그룹의 기존 연구⁽⁶⁾에서 보고한 비화재 조건의 액체폴에 대한 충돌 양식 지도와 비교하고 검토하였다. 본 연구에서 도출된 주요 실험 결과를 아래에 정리하였다.

1) 열방출률 측정 결과, 메탄올폴과 헵탄폴은 각각 1.11과 2.18 kW로 나타났다. 액체폴 내 온도 분포 측정 결과, 동일한 시간에서 메탄올폴에 비해 헵탄폴이 더 깊은 위치까지 온도가 상승하는 것이 관찰되었고, 이는 헵탄폴의 열방출률이 메탄올폴에 비해 높기 때문으로 추측된다.

2) 본 실험 조건에서 액체폴 종류(열방출률)와 액적의 자유낙하 높이가 충돌 액적 크기에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 26, 22, 17 gauges의 니들에 의해 생성된 충돌 액적 크기는 각각 약 2, 2.5, 3.2 mm로 측정되었다.

3) 충돌 속도의 경우, 액적의 자유낙하 높이가 증가함에 따라 증가하였고, 메탄올폴에 비해 헵탄폴에서 액적 충돌 속도가 느린 것으로 나타났다. 이는 헵탄 액체폴의 높은 열방출률로 인해 상승 흐름이 강하여 충돌 액적에 대한 감속 효과가 크기 때문으로 판단된다. 메탄올폴과 헵탄폴에서의 액적 충돌 속도는 각각 약 2.78-3.55 m/s와 약 2.54-3.46 m/s로 측정되었다.

4) 충돌 양식의 경우, 화재 조건의 메탄올폴에서는 단일 제트와 2차 제트가 생성되는 스플래시 양식이 관찰되었고, 헵탄폴에서는 단일 제트와 캐노피 양식이 관찰되었다.

5) 화재 조건과 비화재 조건의 충돌 양식 지도를 비교한 결과, 메탄올폴의 경우 전체적으로 큰 차이가 없는 것으로 나타난 반면, 헵탄폴의 경우 비화재 조건의 2차 제트가 생성되는 스플래시 양식이 나타나는 영역에서 화재 조건의 경우에는 캐노피 양식이 관찰되었다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1F1A1064002). 이 논문은 제1저자의 석사학위 논문 내용의 일부를 수정, 보완 및 발전시켜 작성하였음.

References

1. F. Rodriguez and R. Mesler, "Some Drops Don't Splash", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 106, No. 2, pp. 347-352 (1985). [https://doi.org/10.1016/S0021-9797\(85\)80008-4](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(85)80008-4).
2. T. Okawa, T. Shiraishi and T. Mori, "Production of Secondary Drops during the Single Water Drop Impact onto a Plane Water Surface", *Experiments in Fluids*, Vol. 41, No. 6, pp. 965-974 (2006). <https://doi.org/10.1007/s00348-006-0214-x>.
3. Q. Huang and H. Zhang, "A Study of Different Fluid Droplets Impacting on a Liquid Film", *Petroleum Science*, Vol. 5, No. 1, pp. 62-66 (2008). <https://doi.org/10.1007/s12182-008-0010-8>.
4. H. Zhao, A. Brunsvold and S. T. Munkejord, "Investigation of Droplets Impinging on a Deep Pool: Transition from Coalescence to Jetting", *Experiments in Fluids*, Vol. 50, No. 3, pp. 621-635 (2011). <https://doi.org/10.1007/s00348-010-0966-1>.
5. Y. K. Cai, "Phenomena of a Liquid Drop Falling to a Liquid Surface" *Experiments in Fluids*, Vol. 7, No. 6, pp.

- 388-394 (1989). <https://doi.org/10.1007/BF00193420>.
6. J. H. Yang and C. Y. Lee, "Experimental Study on Phenomena of Single Water Droplet Impacts on Liquid Surfaces: Regime Maps and Correlations", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 130, Article 110480 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2021.110480>.
7. A. L. Yarin, "Drop Impact Dynamics: Splashing, Spreading, Receding, Bouncing...", *Annual Review Fluid Mechanics*, Vol. 38, pp. 159-192 (2006). <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092144>.
8. M. Rein, "Phenomena of Liquid Drop Impact on Solid and Liquid Surfaces", *Fluid Dynamics Research*, Vol. 12, No. 2, pp. 61-93 (1993). [https://doi.org/10.1016/0169-5983\(93\)90106-K](https://doi.org/10.1016/0169-5983(93)90106-K).
9. M. Xu, C. Wang and S. Lu, "Experimental Study of a Droplet Impacting on a Burning Fuel Liquid Surface", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 74, pp. 347-353 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.01.002>.
10. M. Xu, C. Wang and S. Lu, "Water Droplet Impacting on Burning or Unburned Liquid Pool", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 85, pp. 313-321 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.02.021>.
11. M. Xu, J. Zhang, C. Wu, C. Li, X. Chen and S. Lu, "Impact Behavior of Single Water Drop Impacting onto Burning Ethanol Surface", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 56, No. 49, pp. 14686-14693 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b04008>.
12. X. Fan, C. Wang, X. Wang, M. Li and Z. Shen, "Comparison of Single Droplet Impact Behaviors on the Burning Shallow/Deep Pool", *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, Vol. 74, pp. 191-199 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2018.11.016>.
13. NIST Chemistry WebBook, "NIST Standard Reference Database Number 69", <https://webbook.nist.gov/chemistry> (2021).
14. N. B. Vargaftik, "Tables on the Thermophysical Properties of Liquids and Gases", Hemisphere Publishing Corporation, New York (1975).
15. P. J. DiNenno, D. Drysdale, C. L. Beyler, W. D. Walton, L. P. Richard, J. R. Hall and J. M. Watts, "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 3th edition, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts (2008).