

코로나-19 보호용 페이스 마스크에서의 액적 고속 충돌 거동

최재원 · 이동호 · 어지수 · 이동근 · 강전웅 · 지인서 · 김태영 · 홍지우[†]

충실대학교 기계공학부
 06978 서울시 동작구 상도로 369
 (2021년 10월 31일 접수, 2021년 11월 23일 수정본 접수, 2021년 12월 14일 채택)

Microdroplet Impact Dynamics at Very High Velocity on Face Masks for COVID-19 Protection

Jaewon Choi, Dongho Lee, Jisu Eo, Dong-Geun Lee, Jeon-Woong Kang, Inseo Ji, Taeyung Kim and Jiwoo Hong[†]

School of Mechanical Engineering, Soongsil University, 369 Sangdo-Ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06978, Korea
 (Received 31 October 2021; Received in revised form 23 November 2021; Accepted 14 December 2021)

요 약

코로나 팬데믹 시대에서 비말(respiratory droplet)을 통한 감염 및 확산을 막기 위해 마스크는 없어서는 안 될 생활 필수품이 되었다. 본 연구에서는 두 가지 다른 타입의 마스크(KF-94 마스크와 덴탈 마스크)가 비말 차단에 얼마나 효과적인지를 파악하기 위하여, i) 각각의 마스크를 구성하고 있는 필터의 젖음성(wettability) 특성을 분석하고, ii) 필터 표면에 빠른 속도로 충돌하는 미소 액적의 동적 거동 특성을 실험적으로 관찰하였다. 각 필터의 구성 재료에 따라 상반된 젖음성 특성, 소수성(hydrophobicity) 또는 친수성(hydrophilicity)을 보임을 확인하였다. 또한, 일정 체적을 갖는 미소 액적을 안정적으로 토출하는 공압 조건을 탐색하고 액적의 충돌 속도 변화에 따른 액적 충돌 거동 변화를 분석하였다. 마스크를 구성하고 있는 필터의 종류와 액적 충돌 속도에 따라 i) 필터를 통과하지 못하거나(no penetration), ii) 필터에 포획(capture)되거나, iii) 필터를 통과(penetration)하는 등의 다른 충돌 후 거동을 보임을 확인하였다. 이러한 결과들은 비말 차단용 마스크 디자인에 있어 매우 기본적이고 유용한 정보를 제공할 뿐만 아니라, 다양한 다공성 표면에서의 액적 거동에 대한 학문적 연구에도 도움이 될 것으로 판단된다.

Abstract – Facial masks have become indispensable in daily life to prevent infection and spread through respiratory droplets in the era of the corona pandemic. To understand how effective two different types of masks (i.e., KF-94 mask and dental mask) are in blocking respiratory droplets, i) we preferentially analyze wettability characteristics (e.g., contact angle and contact angle hysteresis) of filters consisting of each mask, and ii) subsequently observe the dynamic behaviors of microdroplets impacting at high velocities on the filter surfaces. Different wetting properties (i.e., hydrophobicity and hydrophilicity) are found to exhibit depending on the constituent materials and pore sizes of each filter. In addition, the pneumatic conditions for stably and uniformly dispensing microdroplets with a certain volume and impacting behaviors associated with the impacting velocity and filter type change are systematically explored. Three distinctive dynamics (i.e., no penetration, capture, and penetration) after droplet impacting are observed depending on the type of filter constituting the masks and droplet impact velocity. The present experimental results not only provide very useful information in designing of face masks for prevention of transmission of infectious respiratory diseases, but also are helpful for academic researches on droplet impacts on various porous surfaces.

Key words: Facial masks, Corona pandemic, Droplet impacts, Hydrophobicity, Hydrophilicity

1. 서 론

코로나 팬데믹 시대에서 마스크는 기침이나 대화, 재채기 등을 통해 방출되는 비말(respiratory droplet)을 차단하여 코로나 감염 및 확산을 저지하는데 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 대부분의 마스크가 코로나와 같은 비말을 통한 호흡기 감염 바이러스를 차단하는데 일조하고 있지만, 마스크의 종류에 따라 차단 성능의 차이를 보

[†] To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jiwoohong@ssu.ac.kr

‡ 이 논문은 포항공과대학교 강인석 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

인다. 이와 관련되어서 많은 연구자들이 다양한 상황에서 비말 차단과 확산에 대한 유체역학적 연구들을 집중적으로 수행하고 있다[1-9]. Hui의 연구진은 기점을 통해 분산된 에어로졸의 이동 거리를 마스크를 통해 감소시킬 수 있으며, 마스크의 종류에 따라 이동 거리가 달라진다는 사실을 규명하였다[3]. Fischer의 연구진은 사람이 말을 하는 동안 발생하는 비말에 대한 마스크 성능을 평가하기 위해 마스크 종류에 따른 배출되는 비말의 수와 속도에 대한 관계를 실험적으로 검증하였다[5]. 아주 최근 들어 Sharma와 연구진은 재채기를 통해 빠르게 토출된 코로나 바이러스를 포함한 비말이 마스크를 통과할 수 있음을 모사 실험을 통해 규명하였다[9]. 하지만, 마스크를 구성하고 있는 필터 종류에 따른 젖음성 특성이나 고속 충돌 시 비말의 동적 거동 변화에 대한 시스템학적인 연구들은 아직까지 보고된 바가 없다.

일반적으로 마스크 필터 상에서의 비말 충돌은 섬유(fibers)나 직물(textiles)과 같은 다공성 표면(porous surface)에서의 액적 충돌과 관련된 유체역학적 문제와 유사하게 접근할 수 있다. 액적이 다공성 표면에 충돌 시, 다공성 표면의 젖음성, 기공 크기, 액적의 유체 물성 및 충돌 속도 등이 충돌 후 액적 거동에 미치는 영향에 대한 많은 연구들이 보고되고 있다[10-17]. 대표적인 예를 들면, Sahu의 연구진은 액적이 다공성 특성을 갖는 섬유 표면에 충돌할 때 임계 충돌 속도 이상에서는 표면의 젖음성에 상관없이 항상 섬유의 기공을 통과한다는 사실을 실험적으로 규명하였다[10].

본 연구는 두 가지 다른 타입의 마스크(KF-94 마스크와 덴탈 마스크)가 비말 차단에 얼마나 효과적인지를 파악하기 위한 기초 연구로서, 각각의 마스크를 구성하고 있는 필터에 대한 젖음성 특성과 필터 표면에 고속으로 충돌하는 미소 액적의 동적 거동 특성을 파악하고자 한다. 우선적으로, KF-94 마스크와 덴탈 마스크를 구성하고 있는 필터 표면의 접촉각과 접촉각 이력을 측정하였다. 다음으로, i) 일정 미소 체적을 갖는 단일 액적을 안정적으로 토출하는 공압 조건과 ii) 공압과 액적 토출 속도 간의 상관관계를 탐색하였다. 끝으로, 마스크를 구성하고 있는 필터의 종류와 액적 충돌 속도에 따른 충돌 후 거동을 파악하였다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 이용한 액적 충돌 실험을 위한 장치에 대한 개념도를 보여준다. 마스크 타입에 따른 액적 충돌 거동을 관찰 및 분석하기 위해 본 실험에서는 KF-94 마스크와 덴탈 마스크, 두 가지 다른 타입의 마스크를 사용하였다. KF-94 마스크는 일반적으로 마스크 외부로부터 겹감(폴리프로필렌), 지지체(폴리프로필렌/폴리에틸렌 복합섬유), 중간재(폴리프로필렌), 안감(폴리프로필렌 폴리에틸렌 복합섬유) 등의 4개 필터 층으로 이루어져 있다. 한편, 덴탈 마스크는 총 마스크 외부로부터 겹감(폴리프로필렌), 중간재(레이온), 안감(폴리프로필렌) 등의 3개 필터 층으로 구성되어 있다.

두 마스크 표면의 젖음성 특성을 비교 및 분석하기 위해 마스크를 구성하고 있는 각 필터 층의 접촉각(contact angle)과 접촉각 이력(contact angle hysteresis)을 측정하였다. 여기서, 접촉각 이력은 접촉선(contact line)이 전진하기 직전의 최대 접촉각인 전진 접촉각(advancing contact angle)과 접촉선이 후진하기 직전의 최소 접촉각인 후진 접촉각(receding contact angle)의 차이로 정의되며, 고체 표면의 물리적, 화학적 동질성을 나타낸다. 각 마스크 필터

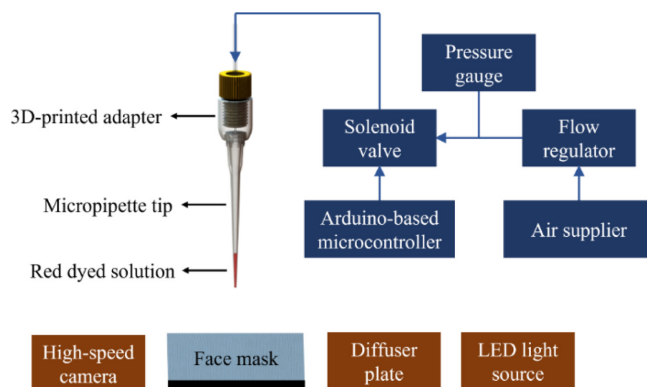


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup for droplet impacting on face masks for COVID-19 protection.

층의 접촉각을 측정하기 위해 0.5 μL 의 체적을 갖는 액적을 마이크로피펫을 통해 필터 층 위에 디스펜싱한 다음, 매크로 렌즈(MP-E 65 mm f/2.8 1-5x, Canon)와 DSLR 카메라(EOS 90D, Canon)를 통해 액적의 이미지를 획득한 후 이미지 처리 프로그램(Image J, National Institutes of Health)을 사용하여 측정하였다. 한편, 필터 표면 위에 놓인 5 μL 의 액적에 유체를 서서히 주입(+10 $\mu\text{L}/\text{min}$) 및 흡입(-10 $\mu\text{L}/\text{min}$)시 접촉선의 전진 및 후퇴 거동을 관찰하면서 전진 접촉각 및 후진 접촉각을 측정함으로써 접촉각 이력을 구하였다.

본 실험에 사용한 작동 유체는 비말과 유사한 점도를 갖기 위하여 탈이온수(deionized water)/글리세롤(glycerol) 혼합유체(50:50 wt%)를 사용하였으며, 액적 충돌 거동을 명확하게 가시화하기 위하여 적색의 수용성 잉크를 소량(1 wt%) 첨가하였다. 이 작동 유체는 23 $^{\circ}\text{C}$ (± 1 $^{\circ}\text{C}$)에서 6.0 mPa·s의 점성계수, 0.065 N/m의 표면장력, 1130 kg/m^3 의 밀도 등의 물성을 가진다.

각 마스크 필터 표면 마다 일정 체적을 갖는 액적을 빠른 속도로 충돌시키기 위하여 자체 제작한 공압 디스펜서(pneumatic dispenser)를 사용하였다. 마이크로피펫 팁에 원하는 체적의 작동 유체를 로딩한 후 3차원 프린터(MAX X27, Asiga)를 통해 제작된 어댑터를 통해 공압 제어장치와 연결하였다. 공압 공급원으로는 에어 컴프레서(air compressor)를 사용하였으며, 유량 조절기(flow regulator)를 통해 압력을 조절하였다. 아두이노 기반의 마이크로컨트롤러(Arduino-based microcontroller)를 통해 솔레노이드 밸브(solenoid valve)의 개폐 주기(200 ms)를 제어하여 순간적인 공압을 마이크로피펫 팁에 로딩된 작동 유체에 전달하여 일정 체적을 갖는 액적 형태로 빠르게 토출시킬 수 있었다.

마스크 필터 표면 위에 고속으로 충돌하는 액적의 거동을 가시화하기 위하여 충돌 평면과 수직인 방향으로 매크로 렌즈를 연결한 초고속 카메라(Fastcam Mini UX100, Photron), 확산판(diffuser plate), 광원(1kW)의 LED light)을 배치하였다. 액적 충돌 후 매우 짧은 시간의 연속 이미지를 획득하기 위하여 10000 fps이상으로 고속 촬영하였다.

본 연구에서의 모든 실험은 최소 5회 이상 반복 실험하였으며, 이에 대한 평균값과 표준 오차를 그래프에 표시하였다. 한편, 매우 짧은 시간 내 실험이 진행되기 때문에 액적 증발에 대한 영향은 무시하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 마스크 필터에 따른 마스크 필터의 젖음성 특성

KF-94와 덴탈 마스크를 구성하고 있는 각 필터 층의 젖음성 특성을 비교 및 분석하기 위해 각 필터 층의 접촉각을 측정하였다(Fig. 2). Fig. 2에서 Layer(또는 L) 옆에 표기된 숫자는 숫자 순서대로 각 마스크 외부 겉감부터 안감까지의 필터 층을 의미한다. 예를 들면, KF-94 페이스 마스크의 경우 Layer 1(L1), Layer 2(L2), Layer 3(L3), Layer 4(L4)는 각각 겉감, 지지체, 중간재, 안감을 의미한다. KF-94 마스크의 Layer 2(지지체)와 Layer 4(안감)를 제외하고 KF-94와 덴탈 마스크를 구성하고 있는 모든 필터 층은 소수성(hydrophobic)의 젖음성을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 특히, KF-94 마스크의 Layer 3(중간재)와 덴탈 마스크의 Layer 2(중간재)가 각 마스크에서 가장 큰 접촉각을 보이는데, 이러한 접촉각 특성은 두 필터 층 모두 멜트 블로운(melt blown)필터로 이 필터 층이 각 마스크에서 비말 및 미세먼지를 차단하는 필터 층으로 사용되는 이유와 밀접한 연관성이 있을 것으로 판단된다. 한편, 접촉각 이력은 KF-94 마스크의 Layer 1과 Layer 3에서는 각각 13.4°와 33.4°의 값을, 덴탈 마스크의 Layer 1, Layer 2, Layer 3에서는 각각 16.6°, 11.2°, 27.6°의 값을 가짐을 측정하였다. 대부분의 마스크 필터들이 소수성의 젖음성을 보임에도 불구하고, 높은 접촉각 이력을 보임을 확인하였고, 이는 액적이 마스크 필터에 충돌한 후 평행상태에 도달하는 동안의 동적 거동에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

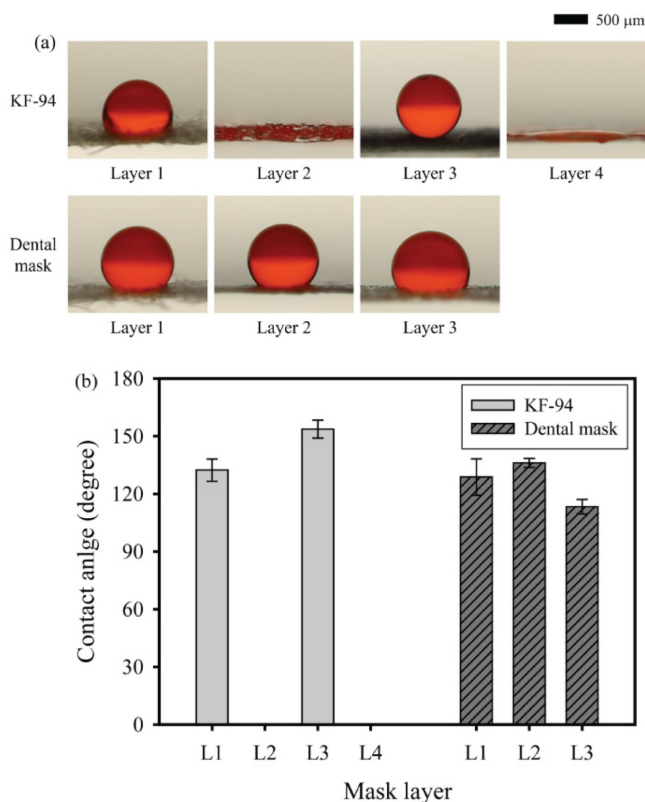


Fig. 2. Effects of filter layer type consisting of KF-94 and dental face masks on wettability characteristics: (a) snapshots of sessile droplets sitting on various types of face mask filter layers and (b) their measured static contact angles. An increase in Arabic numerals indicates more inner layers.

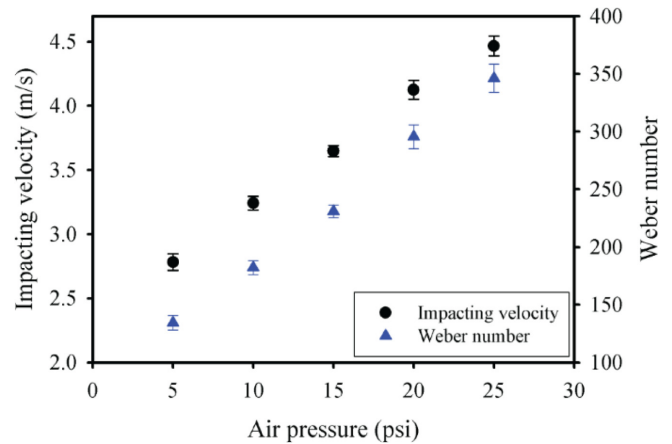


Fig. 3. Dependencies of impacting velocity and Weber number on air pressure. Here, the Weber number ($We = \rho V^2 D / \sigma$, ρ : density, V : impacting velocity, D : droplet diameter, σ : surface tension) is a dimensionless number, defined as the ratio of inertial force to surface tension force.

3-2. 공압에 따른 액적 충돌 속도 변화

일정 체적을 갖는 미소 액적을 안정적으로 토출하는 공압 조건을 탐색하고 액적의 충돌 속도 변화에 따른 액적 충돌 거동 변화를 분석하기 위하여 다양한 공압 조건에서 액적 토출 거동 및 액적 충돌 속도를 관찰하였다(Fig. 3). 0.5 μL 체적의 탈이온수/글리세롤 혼합 유체를 마이크로피펫에 로딩한 후 유량 조절기를 통해 유압을 조절하며 액적의 토출 및 충돌 거동 변화를 관찰하였다. 5 psi에서 25 psi까지의 공압 조건에서 로딩한 혼합유체를 안정적으로 단일 액적 형태(0.5 μL의 체적, 1 mm의 직경)로 토출할 수 있음을 확인하였다. 25 psi를 초과하는 높은 공압에서는 혼합유체가 단일 액적 형태로 토출되지 않고 여러 개의 액적으로 분할되어 분사되는 것을 관찰하였다. 또한, 안정적인 액적 토출 조건(5 psi ~ 25 psi)에서 공압에 따라 액적의 충돌 속도가 선형적으로 증가함을 확인하였다. 여기서, 충돌속도는 초고속 카메라로부터 획득한 충돌 직전의 액적 이미지들로부터 시간에 따른 이동변위를 추출하여 계산하였다. 액적 충돌에 의한 관성력 대비 표면장력의 상대적 크기비를 나타내는 무차수인 Weber수($We = \rho V^2 D / \sigma$, ρ : 밀도, V : 충돌 속도, D : 액적의 직경, σ : 표면장력)를 도입하여 공압에 따른 Weber수 변화도 같이 도시하였다.

3-3. 마스크 필터 표면에서의 액적 충돌 후 동적 거동

KF-94 마스크를 구성하고 있는 4가지 필터 표면 위에서 다른 충돌 속도(Weber 수)를 갖는 액적의 충돌 후 거동을 관찰하였다(Fig. 4). 각 그림에서 위에서 아래 행으로 내려갈수록 충돌 속도(Weber 수)가 증가하는 경우를 나타낸다. 132°의 접촉각을 갖는 소수성 겉감 필터(Layer 1)의 경우, Weber수 증가에 따라 3가지 다른 형태의 충돌 후 거동을 보임을 확인하였다(Fig. 4(a)). 낮은 Weber수에서는 충돌한 액적이 겉감 필터 표면에서 퍼짐 및 수축 거동을 보인 후 평행상태에 도달하는 반면에, Weber수가 증가할수록 액적이 퍼지면서 액적 일부가 필터 내부로 침투하여 액체 필라멘트(liquid filaments)를 형성하는 것을 관찰하였다. 매우 높은 Weber수에서는 이 액체 필라멘트가 2차 액적(secondary droplets)형태로 분할되어 토출하는 것을 확인하였다. 한편, 겉감 필터보다 더 높은 소수성(154°의 접촉각)을 갖는 멜트 블로운 필터(Layer 3)의 경우에는 액체 필라멘트와 2차



Fig. 4. Consecutive images of droplet impacting dynamics on four filter layers consisting of the KF-94 face mask at different Weber numbers: (a) Layer 1 (i.e., outside layer), (b) Layer 2 (i.e., support layer), (c) Layer 3 (i.e., melt blown filter layer), and (d) Layer 4 (i.e., inside layer). Note that the impacting velocity (i.e., Weber number) increases from the top row to the bottom row of each figure. The blue arrows indicate secondary droplets break up from the liquid filaments.

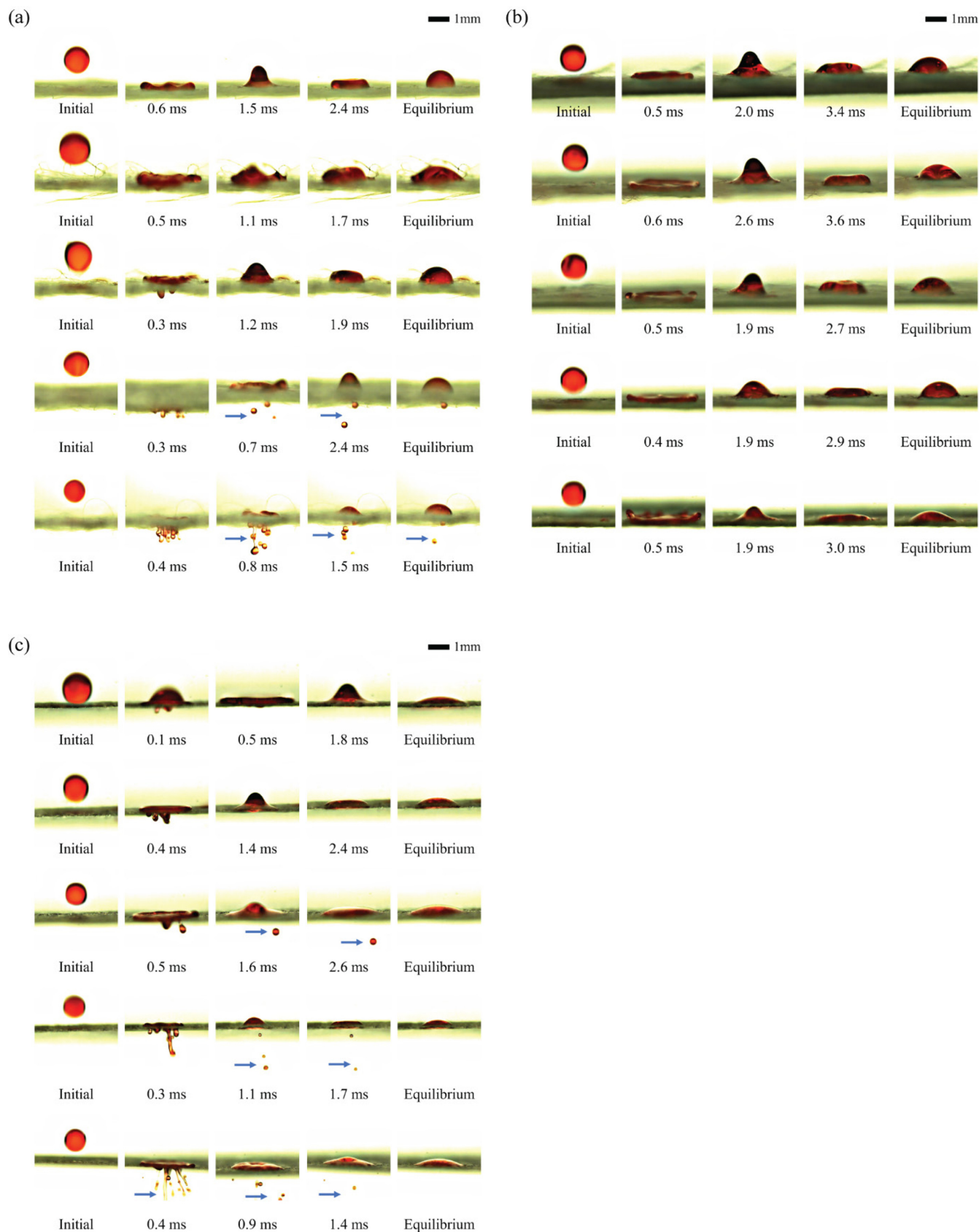


Fig. 5. Consecutive images of droplet impacting dynamics on three filter layers consisting of the dental mask at different Weber numbers: (a) Layer 1 (i.e., outside layer), (b) Layer 2 (i.e., melt blown filter layer), (c) Layer 3 (i.e., inside layer). Note that the impacting velocity (i.e., Weber number) increases from the top row to the bottom row of each figure. The blue arrows indicate secondary droplets break up from the liquid filaments.

액적이 형성되는 것을 현재 가시화시스템으로는 관찰하지 못하였다(Fig. 4(c)). 즉, 매우 높은 Weber수로 충돌하는 액적일지라도 멜트 블로운 필터를 통과하기 어렵다는 사실을 단적으로 보여주고 있다. 반면에, 친수성의 지지체(Layer 2)와 안감 필터(Layer 4)는 소수성의 걸감 필터 및 멜트 블로운 필터에 비해 더 낮은 Weber수에서 액체 필라멘트와 2차 액적 형성을 명확하게 관찰할 수 있었다(Fig. 4(b)와 (d)).

KF-94 마스크와 유사하게 덴탈 마스크를 구성하고 있는 3가지 필터 표면 위에서 다른 충돌 속도(Weber 수)를 갖는 액적의 충돌 후 거동을 관찰하였다(Fig. 5). 멜트 블로운 필터(Layer 2, 136°의 접촉각), 걸감 필터(Layer 1, 129°의 접촉각), 안감 필터(Layer 3, 113°의 접촉각)순으로 충돌 액적이 통과할 수 있는 임계 Weber수가 증가하는 것을 확인하였다. 이는 높은 소수성을 가지는 필터일수록 액적이 필터 내부를 침투하기 어렵다는 사실을 보여주고 있다. 특히, KF-94 마스크와 마찬가지로 덴탈 마스크의 멜트 블로운 필터 역시 매우 높은 Weber수에서도 액적을 잘 차단하는 것을 확인할 수 있었다. 흥미로운 사실은 친수성을 갖는 KF-94 마스크의 안감 필터(Layer 4)와 소수성을 갖는 덴탈 마스크의 안감 필터(Layer 3)가 상반된 젖음성을 갖음에도 불구하고 동일한 충돌 후 거동을 보이는 것을 확인하였다. 이는 마스크 필터의 젖음성 외에도 기공의 크기와 같은 다른 물리적 요인도 액적 충돌 후 거동에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이를 규명하기 위하여 각 필터의 기공 크기 분석 및 3차원 네트워크 구조를 가시화할 수 있는 연구를 수행할 예정이다.

Fig. 4와 5를 통해 얻은 고속 이미지 정보를 기반으로 KF-94 마스크와 덴탈 마스크를 구성하고 있는 각각의 필터 종류와 Weber수에 따른 충돌 후 액적 침투 여부를 Fig. 6과 같이 도식화하였다. 이를 통해 각 필터별로 고속 충돌하는 액적을 차단할 수 있는 임계 Weber수에 대한 정보를 얻을 수 있다.

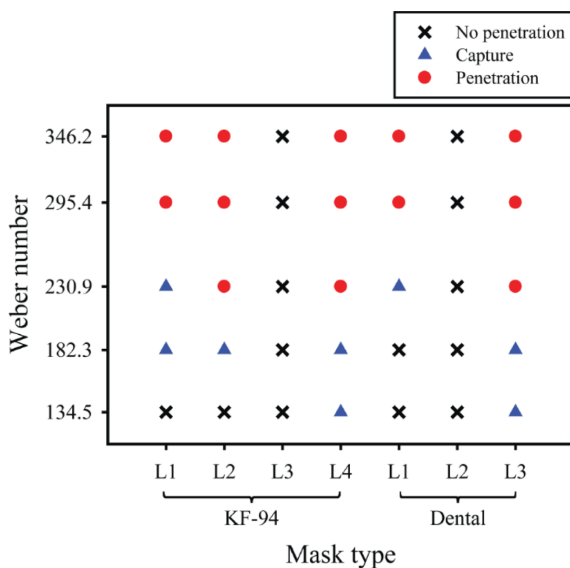


Fig. 6. Distinctive dynamic regimes (i.e., no penetration, capture, and penetration) after droplet impacting depending on the type of filter constituting the masks and droplet impact velocity. Here, the Weber number is a dimensionless number, defined as the ratio of inertial force to surface tension force.

4. 결 론

본 연구에서는 KF-94 마스크와 덴탈 마스크를 구성하고 있는 필터의 젖음성 특성을 분석하고, 필터 표면에 빠른 속도로 충돌하는 미소 액적의 동적 거동 특성을 실험적으로 관찰하였다. KF-94 마스크의 지지체와 안감을 제외하고 KF-94와 덴탈 마스크를 구성하고 있는 모든 필터 층은 소수성의 젖음성을 보이는 것을 확인할 수 있었다. KF-94와 덴탈 마스크 둘 다 가장 높은 소수성을 갖는 멜트 블로운 필터를 포함하고 있었다. 마스크 필터 표면에 고속으로 충돌하는 액적 실험을 수행하기 위해 공압 기반의 디스펜싱 시스템을 자체적으로 제작 및 구축하였다. 이 공압 기반의 디스펜싱 시스템을 통해 일정 미소 체적을 갖는 단일 액적을 안정적으로 토출할 수 있는 공압 조건에 대한 정보를 획득하였으며, 공압 조절을 통해 액적 충돌 속도를 제어할 수 있었다. 끝으로, 각각의 마스크를 구성하고 있는 필터의 종류와 액적 충돌 속도에 따라 i) 필터를 통과하지 못하거나(no penetration), ii) 필터에 포획(capture)되거나, iii) 필터를 통과(penetration)하는 등의 다른 충돌 후 거동을 보임을 확인하였고 이를 도식화하였다. 이러한 결과들은 비말 차단용 마스크의 효용성 및 효용성을 평가하는 기본적인 정보를 제공할 뿐만 아니라, 기능성 보호 섬유나 자가세정 개발 및 응용 연구에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감 사

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R1F1A1066664).

References

- Tang, J. W., Liebner, T. J., Craven, B. A. and Settles, G. S., "A Schlieren Optical Study of the Human Cough with and Without Wearing Masks for Aerosol Infection Control," *J. R. Soc. Interface*, **6**, S727-S736(2009).
- MacIntyre, C. R., Cauchemez, S., Dwyer, D. E., Seale, H., Cheung, P., Browne, G., Fasher, M., Wood, J., Gao, Z., Booy, R. and Ferguson, N., "Face Mask Use and Control of Respiratory Virus Transmission in Households," *Emerg. Infect. Dis.*, **15**(2), 233-241(2009).
- Hui, D. S., Chow, B. K., Chu, L., Ng, S. S., Lee, N., Gin, T. and Chan, M. T. V., "Exhaled Air Dispersion During Coughing with and Without Wearing a Surgical or N95 Mask," *Plos One*, **7**(12), e50845(2012).
- Fischer, E., Fischer, M., Grass, D., Henrion, I., Warren, W. and Westman, E., "Low-cost Measurement of Facemask Efficacy for Filtering Expelled Droplets During Speech," *Sci. Adv.*, **6**(36), eabd3083(2020).
- Dbouk, T. and Drikakis, D., "On Respiratory Droplets and Face Masks," *Phys. Fluids*, **32**(6), 063303(2020).
- Verma, S., Dhanak, M. and Frankenfield, J., "Visualizing the Effectiveness of Face Masks in Obstructing Respiratory Jets," *Phys. Fluids*, **32**(6), 061708(2020).
- Kähler, C. J. and Hain, R., "Fundamental Protective Mechanisms of Face Masks Against Droplet Infections," *J. Aerosol Sci.*, **148**, 105617(2020).
- Aydin, O., Emon, B., Cheng, S., Hong, L., Chamorro, L. P. and

- Saif, M. T. A., "Performance of Fabrics for Home-made Masks Against the Spread of COVID-19 Through Droplets: A Quantitative Mechanistic Study," *Extrem. Mech. Lett.*, **40**, 100924(2020).
9. Sharma, S., Pinto, R., Saha, A., Chaudhuri, S. and Basu, S., "On Secondary Atomization and Blockage of Surrogate Cough Droplets in Single- and Multilayer Face Masks," *Sci. Adv.*, **7**(10), eabf0452(2021).
 10. Sahu, R. P., Sinha-Ray, S., Yarin, A. L. and Pourdeyhyimi, B., "Drop Impacts on Electrospun Nanofiber Membranes," *Soft Matter*, **8**(14), 3957-3970(2012).
 11. Dressaire, E., Sauret, A., Boulogne, F. and Stone, H. A., "Drop Impact on a Flexible Fiber," *Soft Matter*, **12**(1), 200-208(2016).
 12. Ryu, S., Sen, P., Nam, Y. and Lee, C., "Water Penetration Through a Superhydrophobic Mesh During a Drop Impact," *Phys. Rev. Lett.*, **118**(1), 014501(2017).
 13. Kumar, A., Tripathy, A., Nam, Y., Lee, C. and Sen, P., "Effect of Geometrical Parameters on Rebound of Impacting Droplets on Leaky Superhydrophobic Meshes," *Soft Matter*, **14**(9), 1571-1580 (2018).
 14. Zhang, G., Quetzeri-Santiago, M. A., Stone, C. A., Botto, L. and Castrejón-Pita, J. R., "Droplet Impact Dynamics on Textiles," *Soft Matter*, **14**(40), 8182-8190(2018).
 15. Safavi, M. and Nourazar, S. S., "Experimental, Analytical, and Numerical Study of Droplet Impact on a Horizontal Fiber," *Int. J. Multiph. Flow.*, **113**, 316-324(2019).
 16. Sen, U., Roy, T., Chatterjee, S., Ganguly, R. and Megaridis, C. M., "Post-impact Behavior of a Droplet Impacting on a Permeable Metal Mesh with a Sharp Wettability Step," *Langmuir*, **35**(39), 12711-12721(2019).
 17. Gu, W., Yan, S. and Bai, Z., "A Study on a Droplet Impact on a

Fiber During Coalescence-separation: Phenomena and Models," *Chem. Eng. Sci.*, **212**, 115337(2020).

Authors

Jaewon Choi: Senior, School of Mechanical Engineering, Soongsil University, 369 Sangdo-Ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06978, Korea; cjo0529@gmail.com

Dongho Lee: Senior, School of Mechanical Engineering, Soongsil University, 369 Sangdo-Ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06978, Korea; fgltm0212@gmail.com

Jisu Eo: Senior, School of Mechanical Engineering, Soongsil University, 369 Sangdo-Ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06978, Korea; glsu0430@gmail.com

Dong-Geun Lee: Senior, School of Mechanical Engineering, Soongsil University, 369 Sangdo-Ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06978, Korea; dg970422@gmail.com

Jeon-Woong Kang: Master's course, School of Mechanical Engineering, Soongsil University, 369 Sangdo-Ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06978, Korea; kangjw159@gmail.com

Inseo Ji: Master's course, School of Mechanical Engineering, Soongsil University, 369 Sangdo-Ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06978, Korea; inseotropy@gmail.com

Taeyung Kim: Master's course, School of Mechanical Engineering, Soongsil University, 369 Sangdo-Ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06978, Korea; rlaxodudsla@gmail.com

Jiwoo Hong: Professor, School of Mechanical Engineering, Soongsil University, 369 Sangdo-Ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06978, Korea; jiwoohong@ssu.ac.kr