

## Enhancement of bloodstain on the dark or multi-colored surfaces by using the acidic hydrogen peroxide

Sungwook Hong<sup>★</sup>, Wonyoung Lee, Jaeyoung Byeon, Hyunju Shin, and Jaek Ha

Graduate School of Forensic Science, Soonchunhyang University, 22-3, Soonchunhyang-ro, Asan 31538, Korea

(Received December 14, 2022; Accepted January 11, 2023)

## Acidic hydrogen peroxide를 이용한 어둡거나 다양한 색상의 표면에 부착된 혈흔의 증강

홍성욱<sup>★</sup> · 이원영<sup>1</sup> · 변재영<sup>1</sup> · 신현주<sup>1</sup> · 하재욱<sup>1</sup>

순천향대학교 법과학대학원

(2022. 12. 14. 접수, 2023. 1. 11. 승인)

**Abstract:** The detection of blood at a crime scene is an important process for identification and case reconstruction. However, blood may be difficult to observe with the naked eye on dark or multi-colored surfaces. Acidic hydrogen peroxide (AHP) is a recently reported blood enhancement reagent that can enhance blood with high sensitivity by increasing the exposure time of the camera. However, it has never been compared to previously known techniques on dark or multi-colored surfaces. For this purpose, the method of observation/photographing (UV and IR photography), alginate casting, leuco rhodamine 6G (LR6G), and AHP were applied to bloody impression on dark or multi-colored surfaces and the results were compared. As a result, blood treated with AHP had a higher contrast to the surfaces than UV and IR photography, and it was applicable on all surfaces, opposed to alginate casting. In addition, AHP successfully enhanced blood on dark or multi-colored surfaces, similar to LR6G.

**요약:** 범죄 현장에서 혈액을 찾아 식별하는 것은 신원 확인 및 사건 재구성을 하기 위해 중요한 과정이다. 하지만, 혈액은 어둡거나 다양한 색상의 표면에서 육안으로 관찰하기 어려울 수 있다. Acidic hydrogen peroxide (AHP)는 최근에 발표된 혈액 증강 시약으로, 카메라의 장노출 기능을 사용하면 혈액을 높은 감도로 관찰할 수 있다. 그러나 어둡거나 다양한 색상의 표면에서 기존에 알려진 기법과 비교된 바는 없다. 이를 위해, 어둡거나 다양한 색상의 표면 8 종류에 혈흔족적을 남기고 UV나 IR을 비추면서 관찰/촬영하는 방법, alginate 전사법, leuco rhodamine 6G (LR6G), AHP를 적용하여 비교하였다. 그 결과, AHP는 UV 및 IR 촬영법보다 증강한 혈액과 표면의 contrast가 높았고, alginate 전사법과 달리 모든 표면에서 적용이 가능했다. 또한 LR6G와 마찬가지로 AHP 역시 어둡거나 다양한 색상의 표면에 부착된 혈액을 성공적으로 증강하였다.

**Key words:** blood, acidic hydrogen peroxide, dark surfaces, multi-colored surfaces, forensic science

★ Corresponding author

Phone : +82-(0)41-530-4756 Fax : +82-(0)41-530-4755

E-mail : [swhong524@naver.com](mailto:swhong524@naver.com)

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.

## 1. 서 론

범죄 현장에 남은 혈액은 범인의 신원을 확인함은 물론이고 사건을 재구성하는데 중요하게 사용되는 물질이다.<sup>1</sup> 그러므로 현장에 남은 혈액을 찾아 식별하는 것은 혈액 증거를 수사에 활용하기 위해 반드시 필요한 과정이다.<sup>2,3</sup> 혈액은 붉은색이기 때문에 대부분의 경우에는 육안으로 쉽게 구분된다. 그러나 혈액이 부착된 표면이 어둡거나 붉은색이거나,<sup>4</sup> 너무 적거나,<sup>5</sup> 물 등에 희석된 경우에는 육안으로 관찰하기 어려울 수 있고,<sup>2</sup> 이런 경우에는 혈액 증강 기법을 사용하여 혈액을 관찰할 필요가 있다. 따라서 법과학자들은 혈액을 화학적으로 증강하는 다양한 시약을 개발해 왔고, 이런 시약을 사용하면 희미한 혈흔도 성공적으로 증강하여 관찰할 수 있게 되었다.<sup>6-8</sup>

혈액 증강 시약은 혈액과 반응하여 색상 변화가 일어나는 정색시약과 형광이 나타나는 형광시약이 있다. Amido black 등과 같은 정색시약은 백색광 아래에서 혈흔을 관찰할 수 있어 사용하기가 편리하지만, 형광시약에 비해 혈액에 대한 감도가 떨어지고<sup>9</sup> 증강된 혈액의 색상과 바탕면 색상과의 contrast가 좋지 않을 경우에는 혈액이 잘 관찰되지 않는다는 문제가 있다.<sup>10,11</sup> Luminol이나 Bluestar는 대표적인 형광시약으로서 이들은 혈액에 대한 감도가 좋지만 암실에서 작업해야 하고 화학발광의 지속시간이 길지 않으며 혈흔의 미세 흔적을 손상시키는 문제가 있다.<sup>12-14</sup>

법과학자들은 이런 문제를 해결하기 위해 자외선 (ultraviolet, UV)이나 적외선(infrared, IR)을 이용해 혈흔을 관찰/촬영하는 방법,<sup>1,15,16</sup> alginate 반죽으로 혈흔을 casting하는 방법(alginate 전사법),<sup>17</sup> leuco rhodamine 6G (LR6G)와 혈액이 반응했을 때 나타나는 형광을 관찰하는 방법<sup>18,19</sup> 등을 개발해 왔다. 이 중 UV나 IR을 이용하는 방법은 쪼여준 빛이 혈액에 흡수되는 반면 표면에서는 반사되는 성질을 이용하는 방법으로서<sup>2</sup> 이런 방법을 사용하면 다양한 색상의 표면에서도 화학적 처리 없이 혈액을 관찰할 수 있다. 그러나 혈액이 부착된 표면이 쪼여준 빛을 반사하지 않고 흡수하는 경우에는 혈액이 관찰되지 않는다는 문제가 있다. 또한 증강 과정 없이 관찰하는 방법이기 때문에 감도가 낮다는 문제도 지적되어 왔다.<sup>1</sup> Alginate로 전사하는 방법 역시 간접적으로 혈흔을 관찰하는 방법이기 때문에 감도가 낮다는 문제가 있다. 그러나 어두운 색상의 표면에 부착된 혈흔을 관찰할 대안이 없었기 때문에 이런 문제가 있음에도 불구하고 과학수사 현장

에서 여전히 사용되고 있다.

2022년, 새로운 혈액 증강 시약인 acidic hydrogen peroxide (AHP)에 관한 연구가 발표되었다.<sup>20</sup> 이 논문의 저자들은 AHP가 혈액에 대한 감도가 높고 제조 방법이 간단하고 저렴하며 표면의 porosity에 상관없이 사용할 수 있다고 주장하였다. 또한 증강된 혈액을 관찰할 때 카메라의 장노출 기능을 사용할 수 있으므로 혈액에 대한 감도를 luminol이나 Bluestar로 처리한 경우만큼 증가시킬 수 있다고 주장하였다. 이는 AHP를 이용하면 어두운 색상의 표면에 부착된 혈흔도 성공적으로 관찰할 수 있을 것이라는 가능성을 보여준다. 그러나 어두운 색상의 표면에 부착된 혈흔을 증강하기 위해 예전부터 사용되던 방법과 AHP 중 어느 것이 우수한지에 대해서는 포괄적으로 비교한 연구 결과는 발표되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 어두운 색상 및 다양한 색상으로 이루어진 표면에 부착된 혈흔을 증강할 때 AHP와 기존에 알려진 방법 중 어느 것이 우수한지를 포괄적으로 비교하였다. 기존의 방법으로는 현재 널리 사용되고 있는 UV나 IR을 비추면서 관찰/촬영하는 방법,<sup>1,7,8</sup> alginate로 전사하는 방법,<sup>9</sup> LR6G로 증강하는 방법<sup>10,11</sup>을 선정하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 재료 및 장비

혈액은 성인 1명으로부터 채취하여, ethylenediaminetetraacetic acid를 항응고제로 사용하는 채혈 용기에 담아 냉장 보관하였다(IRB number: 1040875-202112-BR-106).

검은색 polyvinylchloride (PVC), acrylonitrile butadiene styrene copolymer (ABS), 다양한 색상의 실리콘, 회색 시멘트 벽돌, 체크무늬 면직물, 나무는 대한민국 아산 지역의 전자재 가게에서 구입하여 사용하였다.

Rhodamine 6G는 Sirchie (USA)의 제품을, mossy zinc는 Acros Organics (Belgium)의 제품을, alginate는 Cavex Holland BV(Netherlands)의 Alginoplast를 사용하였다.

365 nm (UV), 505 nm, 850 nm의 범광원은 Rofin (Australia)의 Polilight® Flare Plus 2를, 오렌지색 필터는 Altlight (Korea)의 CUSP를, IR 촬영용 필터는 Massa (China)의 infrared filter 850 nm를 사용했다.

일반광 카메라는 Nikon (Japan)의 D5600 카메라를 사용했다. IR 카메라는 Nikon (Japan)의 D7000 카메라의 센서 앞에 부착된 low pass filter를 제거한 후, 렌

즈 앞에 IR 촬영용 필터를 장착하여 개조한 카메라를 사용하였다.

## 2.2. 실험 방법

신발 바닥에 혈액을 문힌 후 표면에 신발을 대고 손으로 누르는 방식으로 3차례 연속으로 족적을 남겼다(혈흔족적). 이후, 혈흔족적을 실내에서 하루 동안 건조하였다. 모든 표면은 혈흔족적을 남기기 전 70% (v/v) ethyl alcohol로 세척 후 건조하였다. 실험은 표면마다 3회씩 반복하였다.

AHP 작업 용액은 탈이온수를 이용하여 염산 1 M, 5-sulfosalicylic acid 2% (w/v), 과산화수소 1% (v/v)가 되도록 만들어 사용하였다.<sup>20</sup>

Alginate 반죽은 alginate powder 1g당 탈이온수 2.7 mL의 비율로 혼합하여 제조하였고, 제조 후 바로 사용하였다.<sup>9</sup>

Leuco rhodamine 6G (LR6G) 저장 용액은 rhodamine 6G 1 g, zinc powder 20 g, glacial acetic acid 10 mL를 ethyl alcohol 200 mL에 넣고 30분간 교반한 뒤, 이 용액에 5-sulfosalicylic acid 0.22 g, mossy zinc 10 g, 30% 과산화수소 1방울을 넣고 10분간 다시 교반한 다음, 여과 과정을 거쳐 제조하였다. 그리고, LR6G 저장 용액과 diethyl ether를 1:4 비율로 혼합하여 작업 용액을 제조하였다.<sup>10,11</sup>

## 3. 결과 및 토의

### 3.1. 각 기법의 혈흔 증강 결과

범죄 현장에는 다양한 형태의 흔적이 존재할 수 있고 그 중 혈흔족적은 범인의 신원을 확인하거나 이동 경로를 판단하는데 널리 사용되는 매우 중요한 흔적이다. 또한 혈흔족적을 잘 증강할 수 있다면 다른 혈액 흔적 역시 잘 증강할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 혈흔족적을 증강 대상으로 하였다.

범죄 현장에 자주 등장하면서 혈흔을 관찰하기 어렵다고 흔히 알려진 어두운 색상의 표면(검은색 PVC, 검은색 ABS, 검은색 종이, 회색 시멘트 벽돌)과 다양한 색상의 표면(캔, 실리콘, 나무, 체크무늬 면직물, 지폐)에 혈흔족적을 남긴 후 이들을 아래에 기재한 방법으로 처리하여 관찰하였다.

#### 3.1.1. AHP

다양한 표면에 만든 혈흔족적에 스프레이로 AHP를 분무한 후 505 nm의 범광원을 비추며 오렌지색 필터

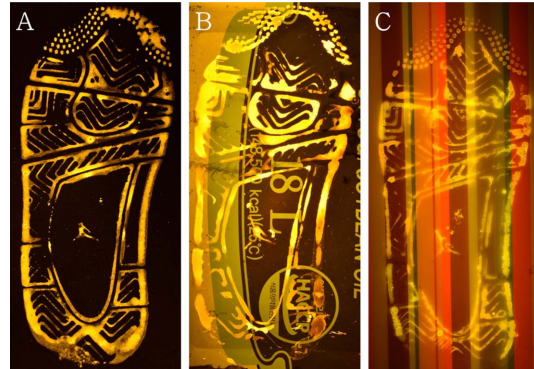


Fig. 1. Photoluminescence of footwear impression in blood deposited on the dark or multi-colored surface. The surfaces were treated with AHP, and were photographed through an orange filter under a 505 nm forensic light source (A: Black paper (F/8, ISO 400, shutter speed 10 s), B: Aluminium can (F/8, ISO 400, shutter speed 5 s), C: Silicone (F/8, ISO 400, shutter speed 1 s)).

를 통해 광발광을 관찰하였다. Fig. 1은 그 결과를 보인 것으로서 노출 시간을 다양하게 조절하면 표면의 색상에 상관없이 혈액의 광발광을 성공적으로 관찰할 수 있음을 알 수 있고, 이는 Lee and Hong (2022)의 연구와 일치하는 결과이다.<sup>20</sup>

#### 3.1.2. UV 촬영법

UV로 촬영하는 기법은 혈흔을 화학적으로 증강하는 기능은 없지만 혈흔을 물리적으로 훼손시키지 않으면서 표면의 색상에 상관없이 관찰할 수 있는 방법이므로 널리 사용되고 있다. 따라서 본 비교 대상에 UV 촬영법을 포함시켰다.

Fig. 2는 혈흔족적이 부착된 검체를 암실에서 UV 광원을 비추며 촬영한 결과로서 대부분의 표면에서 혈흔족적을 잘 관찰할 수 있었다(Fig. 2(A)). 반면, 체크무늬 면직물에 있는 일부 무늬와 검은색 PVC, 검은색 종이, 검은색 ABS, 회색 시멘트 벽돌에서는 혈흔족적과 표면의 contrast가 낮게 나타나 잘 관찰되지 않았다(Fig. 2(B), 2(C)). UV 촬영법은, 혈액은 UV를 흡수하는 반면, 표면은 UV에 의해 형광을 띄는 특성을 이용하는 기법이다. 그런데 일부 표면은 UV에 의한 형광이 나타나지 않고 어둡게 보여 혈액과 표면과의 contrast가 낮아지는 현상이 일어났고 이는 Finnis et al. (2013) 연구 및 Schuler et al. (2012)의 연구와 일치하는 결과이다.<sup>1,20</sup>

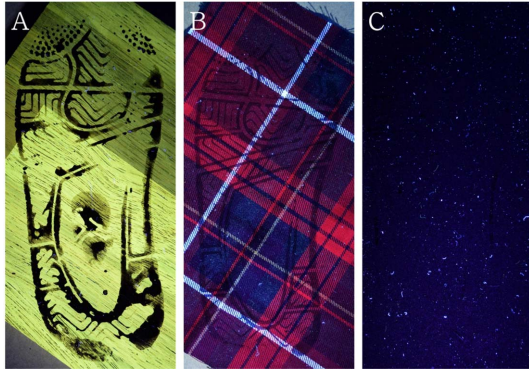


Fig. 2. Footwear impression in blood deposited on the dark or multi-colored surface. The surfaces were photographed through a UV forensic light source (A: Wood (F/8, ISO 400, shutter speed 1/6 s), B: Plaid cotton (F/8, ISO 400, shutter speed 1 s), C: Black PVC (F/8, ISO 400, shutter speed 1 s)).

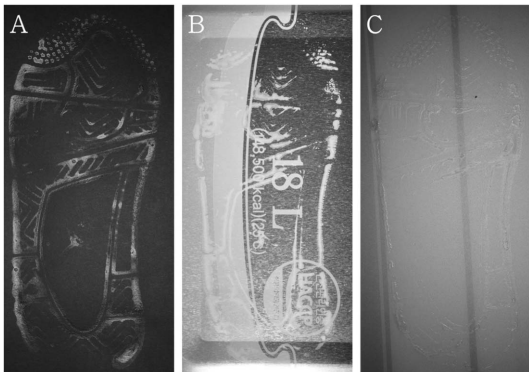


Fig. 3. Footwear impression in blood deposited on the dark or multi-colored surface. The surfaces were photographed by IR camera through an IR forensic light source (A: Black paper (F/8, ISO 400, shutter speed 1/2 s), B: Aluminium can (F/8, ISO 400, shutter speed 1/40 s), C: Silicone (F/8, ISO 400, shutter speed 1/2 s)).

### 3.1.3. IR 촬영법

IR로 촬영하는 기법은 혈흔을 증강하는 기능이 없고, IR 광원과 IR 카메라를 사용해야 하는 불편함이 있지만 암실 조건이 아니어도 혈흔을 물리적으로 훼손시키지 않으면서 표면의 색상에 상관없이 관찰할 수 있는 방법이므로 널리 사용되고 있다. 따라서 본 비교 대상에 IR 촬영법을 포함시켰다.

Fig. 3은 다양한 표면에 부착된 혈흔을 IR 광원을 비추며 IR 카메라로 촬영한 결과로서 대부분의 표면에서 혈흔족적을 잘 관찰할 수 있었다(Fig. 3(A)). 반면, 다양한 색상으로 이루어진 캔이나 실리콘 표면에서는

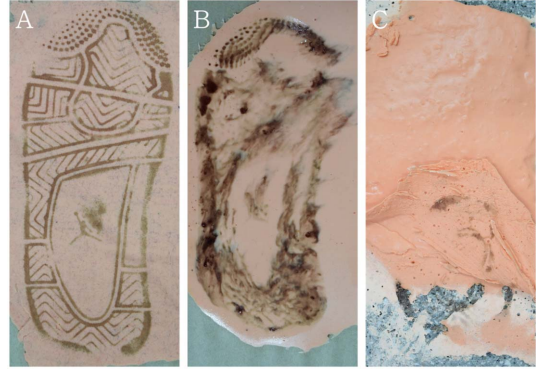


Fig. 4. Enhancement of a footwear impressions in blood on the dark or multi-colored surface using alginate (F/8, ISO 400, shutter speed 1/10 s) (A: Plaid cotton, B: Silicone, C: Cement brick)).

바탕면과의 contrast가 낮아 잘 관찰되지 않았다(Fig. 3(B), 3(C)). IR 촬영법은, 혈액은 IR을 흡수하는 반면, 표면은 IR을 반사하는 특성을 이용하는 기법이다. 그런데 일부 표면은 IR을 반사하지 않고 흡수하기 때문에 이렇게 혈액과 표면과의 contrast가 낮아지는 현상이 일어났고 이는 Finnis et al. (2013)의 연구와 일치하는 결과이다.<sup>1</sup>

### 3.1.4. Alginate 전사법

Alginate 반죽으로 혈흔을 전사하는 방법은 혈흔을 증강하는 기능은 없지만, 표면의 색상에 영향을 받지 않고 관찰할 수 있게 하는 방법이므로 본 비교 대상에 alginate로 전사하는 방법을 포함시켰다.

다양한 표면에 부착된 혈흔 위에 alginate 반죽을 고르게 도포하여 1분 정도 굳힌 뒤 표면에서 떼어내는 방식으로 혈흔족적을 전사하였고,<sup>17</sup> 전사한 혈흔족적은 바로 촬영하였다. Fig. 4는 그 결과를 보인 것으로서 종이나 면직물에 남겨진 혈흔족적은 성공적으로 전사할 수 있었다(Fig. 4(A)). 그러나 실리콘 표면에 부착된 혈흔은 번져서 나타났다(Fig. 4(B)). 또한 시멘트 표면에서는 alginate 반죽이 시멘트 표면과 강하게 결합한 후 떨어지지 않아 전사 실험 자체가 불가능하였다(Fig. 4(C)). 이를 통해 alginate로 전사하는 방법은 모든 표면에서 사용할 수 있는 방법이 아니라는 것을 알 수 있었다.

### 3.1.5. LR6G

LR6G는 혈액에 포함된 헤모글로빈의 촉매반응에 의해 산화되어 rhodamine 6G로 변화된다. 이 rhodamine

6G는 광발광을 나타내기 때문에 혈액이 어두운 색상의 표면에 부착된 경우에도 관찰할 수 있다고 알려져 있다.<sup>11</sup> 따라서 본 연구에서는 비교 대상으로 LR6G를 포함시켰다.

다양한 표면에 부착된 혈흔족적 위에 LR6G를 스프레이로 분사하여 증강하였고, 이렇게 증강한 혈흔족적은 505 nm의 범광원을 비추며 오렌지색 필터를 통해 관찰하였다. 그 결과 모든 표면에서 혈흔족적을 성공적으로 관찰할 수 있었다(Fig. 5).

### 3.2. LR6G와 AHP의 비교

#### 3.1 항의 결과를 종합해보면 비교 대상으로 삼은 기

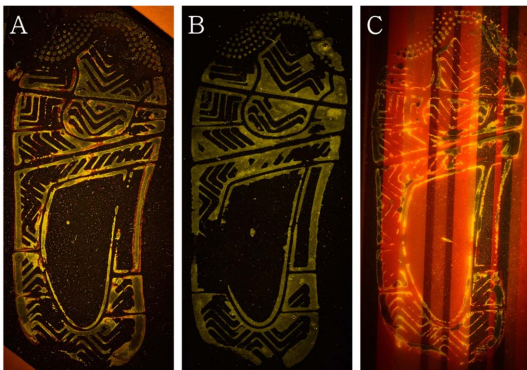


Fig. 5. Photoluminescence of footwear impression in blood deposited on the dark or multi-colored surface. The surfaces were treated with LR6G, and were photographed through an orange filter under a 505 nm forensic light source (A: Black ABS (F/8, ISO 400, shutter speed 1/2 s), B: Black paper (F/8, ISO 400, shutter speed 1/2 s), C: Silicone (F/8, ISO 400, shutter speed 1/10 s)).

법 중 AHP와 LR6G만이 모든 표면에서 성공적으로 혈흔족적을 증강할 수 있었다. 반면, UV 촬영법과 IR 촬영법은 일부 표면에서는 혈흔족적이 있어도 식별해 내지 못하는 문제를 보였다. 또한 alginate 전사법 역시 일부 표면에서는 사용할 수 없다는 문제를 노출하였다. 따라서 AHP와 LR6G 중 어느 것이 어둡거나 다양한 색상의 표면에 부착된 혈흔족적을 증강하는데 적절한 시약인지 비교하였다.

비교를 쉽게 하기 위해 다양한 표면에 남긴 혈흔족적을 2등분한 후 한 쪽은 LR6G, 다른 한 쪽은 AHP로 처리하여 증강하였다. 증강한 결과를 비교한 결과 모든 표면에서 두 시약 모두 혈액과 표면과의 contrast가 양호하게 나타났다(Fig. 6(A)). 그런데 회색 시멘트 벽돌 및 지폐에 부착된 혈흔족적을 LR6G로 처리한 경우에는 혈흔족적은 검게 나타난 반면, 표면에서는 형광이 나타나는 역현출(reverse development) 현상이 나타났다. 그러나 AHP에서는 이런 현상이 관찰되지 않아 AHP가 LR6G에 비해 나은 시약인 것을 확인할 수 있었다. 반면, 회색 시멘트 벽돌을 AHP로 처리한 경우에는 혈흔족적이 약간 번져서 나타나는데 이는 Fig. 6(C)의 사각형 안에 보인 확대 사진을 통해 확인할 수 있다(Fig. 6(D)). 시멘트는 염기성 물질인 반면, AHP에는 염산이 포함되어 있기 때문에 산-염기 반응에 의해 이런 번짐 현상이 나타난 것이라고 판단된다. 이를 통해 염기성 표면에서는 AHP를 사용할 때 주의가 기울여야 한다는 점을 알 수 있다.

시약의 혈흔족적 증강 능력 이외에도 경제성 측면에서 LR6G와 AHP를 비교하였다. LR6G의 경우, 아연을 이용해 rhodamine 6G를 환원시켜 제조하기 때문

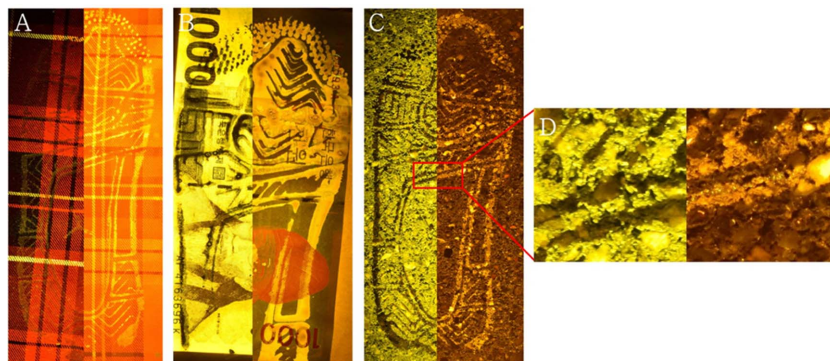


Fig. 6. Photoluminescence of footwear impression in blood deposited on the dark or multi-colored surface. The surfaces were treated with LR6G (left) or AHP (right) for comparing results, and were photographed through an orange filter under a 505 nm forensic light source (A: Plaid cotton (F/8, ISO 400, shutter speed 1/2 s (left), 5 s (right)), B: Paper banknote (F/8, ISO 400, shutter speed 1/4 s (left), 1/5 s (right)), C: Cement brick (F/8, ISO 400, shutter speed 1/20 s (left), 10 s (right))).

에 작업 용액을 제조하기 어렵고 두 시간 이상의 시간이 소요되며 재료 가격도 상대적으로 비싸다. 반면, AHP는 제조 방법이 간단하여 즉시 제조할 수 있고 재료 가격도 저렴하다는 장점이 있다.

#### 4. 결 론

Acidic hydrogen peroxide (AHP)를 사용하면 UV 촬영법, IR 촬영법, alginate 전사법을 사용한 경우와 달리 어둡거나 다양한 색상의 표면에 남은 혈액을 성공적으로 증강할 수 있었다. 또한 leuco rhodamine 6G (LR6G)와 비교하였을 때는 어둡거나 다양한 색상의 표면에서 혈액을 증강하는 성능에 큰 차이는 없었다. 그러나 LR6G를 사용한 경우에는 LR6G가 배경과 반응하여 형광을 띠므로서 혈액이 오히려 검게 보이는 역현출(reverse development) 현상이 나타난 반면, AHP를 사용했을 때는 이런 현상이 관찰되지 않았고 혈액의 형광만을 관찰할 수 있었다. 또한 AHP가 LR6G보다 제조 과정이 간단하고 제조 시간이 상대적으로 적게 소요되며, 경제적이므로 현장에서 사용하기에 편리하고 더 좋은 시약이라고 판단된다. 따라서 어둡거나 다양한 색상의 표면에서 혈액을 효과적으로 증강하기 위해서는 빛을 이용한 방법, LR6G, alginate 전사법보다 AHP를 사용하는 것이 좋다고 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 순천향대학교 학술연구비 지원으로 수행하였음.

#### References

1. J. Finnis, J. Lewis, and A. Davidson, *Sci. Justice*, **53**(2), 178-186 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2012.09.001>
2. M. Vandewoestyne, T. Lepez, D. Van Hoofstat, and D. Deforce, *J. Forensic Sci.*, **60**(3), 707-711 (2015). <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12720>
3. N. Praska and G. Langenburg, *Forensic Sci. Int.*, **224**(1-3), 51-58 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2012.10.027>
4. B. Li, P. Beveridge, W. T. O'Hare, and M. Islam, *Sci. Justice*, **54**(6), 432-438 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2014.05.003>
5. S. J. Seashols, H. D. Cross, D. L. Shrader, and A. Rief, *J. Forensic Sci.*, **58**(1), 130-133 (2013). <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2012.02259.x>
6. L. Dilbeck, *J. Forensic Identif.*, **56**(5), 706 (2006).
7. L. C. Bossers, C. Roux, M. Bell, and A. M. McDonagh, *Forensic Sci. Int.*, **210**(1-3), 1-11 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.04.006>
8. K. J. Farrugia, K. A. Savage, H. Bandey, and N. N. Daéida, *Sci. Justice*, **51**(3), 99-109 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2010.11.001>
9. C. J. Frégeau, O. Germain, and R. M. Fourmey, *J. Forensic Sci.*, **45**(2), 354-380 (2000). <https://doi.org/10.1520/jfs14688j>
10. L. Schwarz and I. Klenke, *J. Forensic Sci.*, **52**(3), 649-655 (2007). <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2007.00416.x>
11. O. Daniel, A. Levi, A. Chaikovskiy, and Y. Cohen, *J. Forensic Sci.*, **66**(3), 1143-1147 (2021). <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14656>
12. S. M. Bleay, R. S. Croxton, and M. De Puit 'Fingerprint Development Techniques: Theory and Application', Wiley, New Jersey, 2018.
13. K. J. Farrugia, K. A. Savage, H. Bandey, T. Ciuksza, and N. N. Daéid, *Sci. Justice*, **51**(3), 110-121 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2010.11.002>
14. S. Polacco, P. Wilson, M. Illes, A. J. Vreugdenhil, and T. Stotesbury, *Forensic Chem.*, **12**, 91-98 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.forc.2019.01.002>
15. T. G. Schotman, A. A. Westen, J. van der Weerd, and K. G. de Bruin, *Forensic Sci. Int.*, **257**, 214-219 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2015.08.024>
16. A. C. Y. Lin, H. M. Hsieh, L. C. Tsai, A. Linacre, and J. C. I. Lee, *J. Forensic Sci.*, **52**(5), 1148-1150 (2007). <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2007.00502.x>
17. M. Munro, P. Deacon, and K. J. Farrugia, *Sci. Justice*, **54**(3), 185-191 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2013.11.002>
18. L. Yapping, Y. Wang, *J. Forensic Identif.*, **54**(5), 542 (2004).
19. K. J. Farrugia, H. Bandey, L. Dawson, and N. N. Daéid, *J. Forensic Sci.*, **58**(6), 1472-1485 (2013). <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12209>
20. W. Lee and S. Hong, *J. Forensic Sci.*, **67**(1), 161-168 (2022). <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14866>
21. R. L. Schuler, P. E. Kish, and C. A. Plese, *J. Forensic Sci.*, **57**(6), 1562-1569 (2012). <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2012.02171.x>

---

**Authors' Positions**

Sungwook Hong : Professor

Wonyoung Lee : Graduate student  
Jaeyoung Byeon : Graduate student  
Hyunju Shin : Graduate student  
Jaeuk Ha : Graduate student