

A study on the role of lipids in latent fingermark development using physical developer

Ji-Won Shin, Sung-Min Kim, So-Ra Yoon, Ye-Jin Lee, and Je-Seol Yu[★]

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

(Received February 1, 2025; Revised February 25, 2025; Accepted February 27, 2025)

Physical developer의 잠재지문 현출 과정에서 지문을 구성하는 지질의 역할에 관한 고찰

신지원 · 김성민 · 윤소라 · 이예진 · 유제설[★]

순천향대학교 법과학대학원

(2025. 2. 1. 접수, 2025. 2. 25. 수정, 2025. 2. 27. 승인)

Abstract: The reactive substances and mechanism of physical developer (PD) for developing aged fingerprints on porous surfaces have not yet been clearly identified. This study investigated the role of lipid components in the PD development process using various amino acid and lipid components presumed to be reactive. PD reacted with lipid components alone, but a stronger reaction was observed when a mixture of amino acids and lipid components was used. Among these, the most pronounced reaction occurred when the concentration of an amino acid with a positively charged side chain was fixed, and the concentration of lipid components was varied. As a result, it was observed that the reaction of PD gradually increased with higher concentrations of lipids that protect amino acid components, and the degree of the reaction varied depending on the type of lipid. In water-based PD solutions, lipid components are known to protect amino acids, promoting stronger reactions. However, this experiment confirmed that the extent to which lipid components protect amino acids can influence the outcome of the PD reaction. The PD reaction was not exclusively attributable to specific reactive substances but could be explained as a phenomenon in which lipid components adequately protect amino acids, facilitating the precipitation of silver particles in the PD reaction. Furthermore, it was observed that the reaction intensity and stability of lipid components with PD differed depending on the type of lipid, and these characteristics were found to affect the results of the PD reaction.

요 약: 다공성 표면에 유류된 오래된 지문을 현출하는 데 효과적인 physical developer(PD)의 반응 물질과 반응 원리는 아직 명확히 밝혀지지 않았다. 이에 본 연구는 PD의 반응 물질로 추정되는 다양한 아미노산 성분과 지질 성분을 이용하여 PD의 현출 과정에서 지질 성분의 역할을 알아보고자 하였다. PD는 지질

[★] Corresponding author

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

E-mail : haplf@naver.com

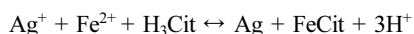
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

성분과 단독으로도 반응했지만 아미노산 성분과 지질 성분의 혼합물에서 훨씬 강한 반응을 보였다. 그 중에서도 반응이 가장 뚜렷했던 양전하 결사슬을 가진 아미노산 성분의 농도를 고정하고 지질 성분의 농도를 달리 하여 PD의 반응을 관찰하였다. 그 결과 아미노산 성분을 보호하는 지질 농도가 높아질수록 PD의 반응이 점차 증가하고 지질의 종류에 따라 반응의 정도가 다른 것을 관찰할 수 있었다. 물 기반의 PD 용액에서 지질 성분은 아미노산 성분을 보호하여 더욱 강한 반응을 유도하는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 실험을 통해 지질 성분이 아미노산 성분을 보호하는 정도에 따라 PD의 반응 결과가 달라질 수 있음을 확인하였다. PD의 반응은 특정 반응 물질에만 나타나는 현상이기 보다, 지질 성분이 아미노산 성분을 적절히 보호함으로써 PD의 은 입자가 침전되는 반응에서 나타나는 현상으로 설명할 수 있었다. 또한 지질 성분마다 PD와의 반응 강도와 PD 용액 내에서의 안정성이 달랐으며 이러한 특성이 PD의 반응 결과에도 영향을 줄 수 있음을 확인하였다.

Key words: physical developer #1, electrically charged side chains #2, amino acid components #3, lipid components #4, forensic science #5

1. 서 론

Physical developer(PD)는 은 이온(Ag^+)이 산화환원 용액(redox solution)에 포함되어 있는 2가 철 이온(Fe^{2+})으로부터 전자를 받아 입자로 환원되며 은 입자가 지문을 구성하는 물질에 침전되어 지문을 시각화하는 원리를 갖고 있다. PD는 질산은 용액, 산화환원 용액, 계면활성제 용액 등 3종의 서로 다른 액체로 구성되어 있으며 핵심적인 반응 원리는 아래와 같다.



PD는 1969년 네덜란드 Phillips 연구소의 Jonker 등에 의해 처음 연구되었으며¹ 1975년 영국의 Morris에 의해 처음으로 잠재지문을 현출하는 데 사용되었다.^{2,3} PD는 젖은 다공성 표면에 유류된 지문을 효과적으로 현출하는 기법으로 알려져 있다.^{4,5} 다공성 표면에서 잠재지문을 현출하는 경우 아미노산 반응 시약들이 효과적이지만 표면이 젖거나 높은 습도의 환경에 노출되면 지문 유류물의 아미노산 성분이 용해되어 해당 시약들로 지문을 현출하는 데 한계가 있다. 이러한 경우 Nile red, oil red O와 같이 지질 성분을 염색하는 시약들을 적용할 수 있지만 이들은 유류된 지 4주가 경과되지 않은 신선한 지문에만 효과적이라는 단점을 가지고 있다.^{6,7} 이에 반해 PD는 다공성 검체에 유류된 지 오랜 시간이 지난 지문까지도 효과적으로 현출하는 것으로 알려져 있다.^{8,9}

이와 같은 이점에도 불구하고 PD는 기법 적용 시 오염되지 않은 기구와 탈이온수만을 사용해야 한다는 점과 일정한 품질의 지문 현출 결과를 기대하기 어렵

다는 점 등 적용 방법이 매우 까다롭다는 특징이 있다. 또한 반응 물질과 반응 원리가 밝혀지지 않았다는 점에서 실질적인 활용이 어려운 측면이 있다.

Hunty 등은 두 편의 연구를 통해 PD가 지질 성분과 아미노산 성분 중 어떤 물질에 반응하는지에 대하여 탐구하였다.^{4,10} 해당 연구를 통해 저자들은 PD의 반응 물질은 지질 성분이 아닌 에크린 구성 물질 중에 존재할 것이라고 밝혔으며, 특히 지질 성분에 의해서 잘 보호된 아미노산 성분에 반응하는 것으로 추측하였다. 한편 Saunders는 비수용성 물질에 의해서 보호된 수용성 물질 중 아미노산과 단백질이 PD의 주요 반응 물질이라고 주장하였으며, Margot도 지질 성분이 아미노산 성분을 보호하여 PD와 반응하는 것이라고 밝혔다.⁵ Wright 또한 아미노산 성분이 단독으로 존재할 때보다 아미노산 성분과 지질 성분의 혼합물이 PD와 더 강하게 반응한다고 밝힌 바 있다.¹¹

이러한 다양한 연구에도 불구하고 PD의 반응물질은 여전히 밝혀지지 않았으며, 물에 노출되어 아미노산 성분이 감소한 경우와 유기용매 등에 노출되어 지질 성분이 감소한 경우에도 지문이 잘 현출되는 이유에 대해서는 명백히 밝혀지지 않았다. 선행연구들의 공통적인 주장은 지질 성분만 단독으로 존재하는 경우 PD에 반응하지 않으며 지질 성분은 PD와 반응하는 아미노산 성분을 보호하는 역할이라는 것이다.

본 연구에서는 PD의 반응 원리에서 지질 성분의 역할을 구체적으로 밝히기 위해 PD의 반응물질로 추정되는 다양한 아미노산 성분과 지질 성분을 이용하여 실험하였다. 먼저 지질 성분 5종(cholesterol, oleic acid, palmitic acid, squalene, stearic acid)을 대상으로 PD와

의 반응을 확인하였다. 그리고 PD에 반응하는 지분 유류물의 상태에서 지질 성분이 아미노산을 보호하는 정도에 따라 PD와의 반응 결과에 미치는 영향을 알아보고자 하였고, 이를 위해 먼저 PD의 반응 결과가 뚜렷하게 나타나는 아미노산 성분을 알아보려고 하였다. 은 입자와 아미노산 성분의 전기적 성질을 이용하여 지문을 현출하는 PD의 반응 원리를 토대로, 전하를 띠는 아미노산 5종(arginine, aspartic acid, glutamic acid, histidine, lysine)을 PD에 반응시켜 강하게 반응하는 아미노산 성분을 확인하였다. 마지막으로 지질 성분의 역할을 규명하기 위하여 지질 성분의 농도 변화에 따라 PD가 어떻게 반응하는지 알아보려고 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시약 및 기구

본 연구에서 사용한 지질 성분은 유기용매에 녹여 제조하였다. Cholesterol (Alfa Aesar, USA)은 acetone (Daejung, Korea)에, oleic acid (Samchun chemicals, Korea), palmitic acid (Samchun chemicals, Korea)는 isopropyl alcohol (Daejung, Korea)에, squalene (Sigma aldrich, USA)은 ethanol (Daejung, Korea)에, stearic acid (Samchun chemicals, Korea)는 dichloromethane (Daejung, Korea)에 녹여 사용하였다.

본 연구에서 사용된 아미노산 성분인 arginine (Samchun, Korea), aspartic acid (Samchun, Korea), glutamic acid (DeJong, Korea), histidine (Samchun, Korea), lysine (Sigma aldrich, USA)은 탈이온수에 녹여 사용

하였다.

PD 작업 용액은 iron (III) nitrate nonhydrate (Daejung, Korea), ammonium iron (II) sulfate hexahydrate (Daejung, Korea), citric acid anhydrous (Daejung, Korea), n-dodecylamine acetate (Tokyo chemical industry, Japan), decaethylene glycol monododecyl ether (Sigma aldrich, USA)를 사용하였다.

본 연구에서 지질 및 아미노산 성분을 유류하기 위해 거름종이(CHMLAB, F1002, Spain)를 사용하였다.

카메라는 Nikon D5600 (Nikon, Japan), 접사렌즈는 LAOWA 60 mm f/2.8 2X ultramicro (LAOWA, Korea)를 사용하였다.

2.2. 실험 방법

2.2.1. PD 작업 용액 제조 및 처리

Thomas-Wilson 등의 연구¹²를 참고하여 DGME 기반의 PD 작업 용액을 제조하였다. 산화환원 용액은 탈이온수 900 mL에 iron (III) nitrate nonhydrate 30 g, ammonium iron (II) sulfate hexahydrate 80 g, citric acid 20 g을 녹여 제조하였다. 계면활성제 용액은 탈이온수 1 L에 n-dodecylamine acetate 1.5 g, decaethylene glycol monododecyl ether 1.25 g을 녹여 제조하였다. 질산은 용액은 탈이온수 50 mL에 silver nitrate 10 g을 녹여 제조하였다. 작업 용액은 산화환원 용액 900 mL, 계면활성제 용액 50 mL, 질산은 용액 50 mL를 혼합하여 제조하였다.

검체를 탈이온수에 담근 후 5분 동안 세척하였다. 그리고 검체에 남아있는 불순물을 제거한 뒤 PD 작업

Table 1. Types and concentrations of amino acid components and lipid components used in Section 3.1,3.2 and 3.3

Section	Amino acid	Concentration (mM)	Lipid	Concentration (mM)
Section 3.1	-	-	Cholesterol	30
			Oleic acid	100
			Palmitic acid	100
			Squalene	100
			Stearic acid	50
Section 3.2	Arginine	100	Cholesterol	30
	Aspartic acid		Oleic acid	100
	Glutamic acid		Palmitic acid	100
	Histidine		Squalene	100
	Lysine		Stearic acid	50
Section 3.3	Arginine	50	Oleic acid	10-30-50-100-200-300
			Palmitic acid	10-30-50-100-200-300
			Stearic acid	10-30-50

용액에 검체를 넣어 15분 동안 처리한 후 탈이온수로 PD 작업 용액이 남아 있지 않을 때까지 세척하였다.

2.2.2. 지질 성분의 단일 spot test

각 지질 성분의 용해도를 고려하여 유기용매에 용해한 물질을 거름종이에 떨어트렸다. Cholesterol 30 mM, oleic acid 100 mM, palmitic acid 100 mM, squalene 100 mM, stearic acid 50 mM로 만들어 사용하였다 (Table 1). 그 후 지질 성분을 각각 20 μ L씩 거름종이에 떨어트리고 24시간 동안 건조했다. 그 후 PD 작업 용액을 처리하였다.

2.2.3. 결사슬이 전하를 띠는 아미노산 그룹과 지질 성분의 혼합 spot test

아미노산과 지질의 혼합물 중 아미노산의 전하에 따른 PD의 반응을 살펴보기 위해 거름종이에 아미노산 성분과 지질 성분을 각각 20 μ L씩 떨어트렸다. 결사슬이 양전하를 띠는 아미노산 arginine, histidine, lysine과 음전하를 띠는 아미노산 aspartic acid, glutamic acid를 각각 100 mM 농도로 만들어 각각 20 μ L씩 거름종이에 떨어트렸다. 그리고 그 위에 같은 농도의 oleic acid, palmitic acid, squalene을 20 μ L씩 떨어트리고 24시간 동안 건조하였다. 지질 성분의 최대 용해도를 고려하여 cholesterol은 30 mM, stearic acid는 50 mM로 녹여 아미노산 성분 위에 떨어트렸다 (Table 1). 그 후 PD 작업 용액을 처리하였다.

2.2.4. 아미노산 성분과 농도별 지질 성분의 혼합 spot test

아미노산 성분과 지질 성분의 혼합물이 지질 성분의 농도에 따라 PD와 어떻게 반응하는지 알아보았다. 먼저 아미노산 성분인 arginine 50 mM을 20 μ L씩 거름종이에 떨어트렸다. 그리고 그 위에 지질 성분인

oleic acid, palmitic acid를 각각 10 mM, 30 mM, 50 mM, 100 mM, 200 mM, 300 mM로 녹이고, stearic acid를 10 mM, 30 mM, 50 mM로 녹여 20 μ L씩 떨어트리고 24 시간 동안 건조하였다 (Table 1). 그 후 PD 작업 용액을 처리하였다.

2.2.5. 사진 촬영

PD를 처리한 거름종이는 24시간 건조 후 형광등 아래에서 촬영하였다. 카메라는 M모드로 F/11, ISO 160, 셔터스피드 1/5초로 설정하여 촬영하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 지질 성분에 따른 PD 반응

Cholesterol, oleic acid, palmitic acid, squalene, stearic acid를 각각 PD로 처리한 결과, cholesterol과 palmitic acid가 강하게 반응하였다. 이는 선행연구와 일치하는 결과이며 지질 성분 또한 PD의 반응물질임을 추정할 수 있다 (Fig. 1).¹³

3.2. 결사슬이 전하를 띠는 아미노산 그룹과 지질 성분 혼합물에 따른 PD 반응

아미노산 성분이 가지는 전하 특성에 따라 PD가 반응하는 정도에 차이가 나타나는지 확인하기 위해 결사슬이 양전하를 띠는 아미노산 그룹 (arginine, histidine, lysine)과 음전하를 띠는 아미노산 그룹 (aspartic acid, glutamic acid)을 각각 지질 성분과 혼합하고 각각의 혼합물이 PD와 반응한 결과를 확인하였다. 이때, cholesterol은 단일로 PD와 반응한 결과가 아미노산 5종과의 혼합물이 반응한 결과에서도 크게 달라지지 않아 아미노산의 전하에 따른 차이가 결과에 미치는 영향을 알 수 없다고 판단하였다. 따라서 이를 제외한 지질 성분 4종 (oleic acid, palmitic acid, squalene, stearic

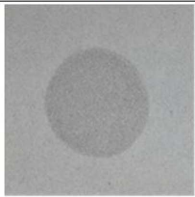

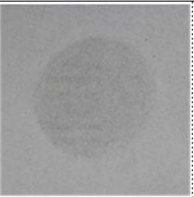
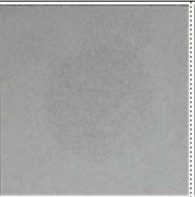
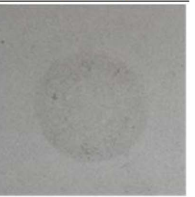
Spot of lipid components				
Cholesterol 30 mM	Oleic acid 100 mM	Palmitic acid 100 mM	Squalene 100 mM	Stearic acid 50 mM
				

Fig. 1. Results of PD treatment of a single spot of lipid components.

Amino acid Lipid	Positively charged side chains			Negatively charged side chains	
	Arginine	Histidine	Lysine	Aspartic acid	Glutamic acid
Oleic acid					
Palmitic acid					
Squalene					
Stearic acid					

Fig. 2. Results of PD treatment of mixed spots of charged amino acids and lipid components.

acid)과 아미노산 성분의 혼합물을 증점으로 실험을 진행하였다.

실험 결과 아미노산 성분과 지질 성분의 혼합물이 반응한 결과는 지질 성분이 단일로 PD에 반응한 결과보다 더 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 2). 결사슬이 양전하를 띠는 아미노산 그룹과 음전하를 띠는 그룹을 나누어 PD와의 반응 결과를 비교하면 oleic acid와의 혼합물에서는 두 아미노산 그룹 모두 결과에 큰 차이가 보이지 않았다. 하지만 palmitic acid, stearic acid, squalene과의 혼합물에서는 결사슬이 양전하를 띠는 아미노산 그룹이 음전하를 띠는 아미노산 그룹보다 PD에 더 강하게 반응한 것을 확인하였다. 또한 결사슬이 양전하를 띠는 아미노산 그룹과 지질 성분의 혼합물 중에서도 palmitic acid와 stearic acid가 포함된 각 혼합물이 PD에 강하게 반응하였으며, 특히 arginine과 palmitic acid의 혼합물이 가장 강하게 반응하는 것을 관찰하였다.

3.3. 지질 성분의 농도 변화에 따른 PD 반응

앞선 section 3.2의 결과에 따라 지질 성분이 단일로

PD와 반응한 결과보다 아미노산 성분과 지질 성분의 혼합물이 더 강한 반응을 보이는 것을 관찰하였다. 선행연구에서는 이러한 현상을 지질 성분이 아미노산 성분을 보호하기 때문이라고 설명하였다. 이에 따라 본 연구에서는 해당 가설을 바탕으로 지질의 농도에 따라 아미노산을 보호하는 정도가 달라질 것이며 이에 따라 PD의 반응에도 차이가 나타날 것으로 추측하였다. 이를 확인하기 위해 아미노산 성분의 농도는 일정하게 유지하고, 지질 성분의 농도를 아미노산 성분의 농도보다 낮은 농도에서부터 높은 농도까지 다양하게 설정하여 혼합한 뒤 각각의 혼합물이 PD에 반응하는 정도를 비교하였다. 이때 앞선 section 3.2에서 PD와 강한 반응을 보였던 arginine(아미노산 성분)과 oleic acid, palmitic acid, stearic acid(지질 성분)를 선정하여 실험을 진행하였다.

실험 결과, 지질 성분의 농도가 높아질수록 PD가 더 강하게 반응하는 것을 확인하였다(Fig. 3). 이는 농도가 높아질수록 아미노산 성분을 보호하는 지질 성분의 입자 수가 증가하고 물 기반의 PD에서도 수용성인 아미노산 성분이 용해되지 않고 보호되어 PD의 은

Amino acid	Lipid	Concentration of lipid components					
		10 mM	30 mM	50 mM	100 mM	200 mM	300 mM
Arginine 50 mM	Oleic acid						
	Palmitic acid						
	Stearic acid				-	-	-

Fig. 3. Results of PD treatment of mixed spots with a fixed concentration of arginine and varying concentrations of lipid components.

입자가 침전될 수 있는 상태가 되었음을 의미한다. 또한 동일한 지질 성분의 농도에서 성분의 종류에 따라 PD의 반응 결과에 차이가 나타났으며, 이는 지질 성분이 PD에 반응하는 정도 그리고 지질 성분마다 아미노산 성분을 보호하는 정도의 차이에서 나타난 결과로 보인다.

4. 결 론

본 연구는 PD가 반응하는 원리에서 지질 성분의 역할을 규명하고자 하였다. 실험 결과, 지질 성분 5종 모두 PD와 미약하게 반응하였다. 이는 지질 성분이 단독으로도 PD의 반응 물질이 될 수 있음을 보여주고 있다. 또한 전하를 띠는 아미노산 성분 5종을 대상으로 한 실험에서는 양전하의 결사슬을 가진 arginine, histidine, lysine이 PD 반응에 더 강하게 관여하는 것으로 나타났으며 그 중 arginine과의 혼합 spot이 PD와 가장 강하게 반응하였다. 이를 통해 아미노산의 전기적 성질이 PD 반응에 중요한 역할을 한다는 사실을 확인할 수 있었다.

아미노산 성분은 지질 성분으로 보호되지 않을 경우 쉽게 물에 용해되기 때문에 PD와의 반응성이 약할 수 있다. 실험 결과와 같이 지질 성분은 스스로 PD와 유의할 정도의 반응을 하지 않지만, PD와 강하게 반응하는 친수성 아미노산을 적절히 보호하며 PD와 지문 유류물의 반응을 돕는다.

아미노산 성분을 감싸고 있는 지질 성분의 양이 극히 적은 경우, PD 용액 안에서 친수성 아미노산이 존재를

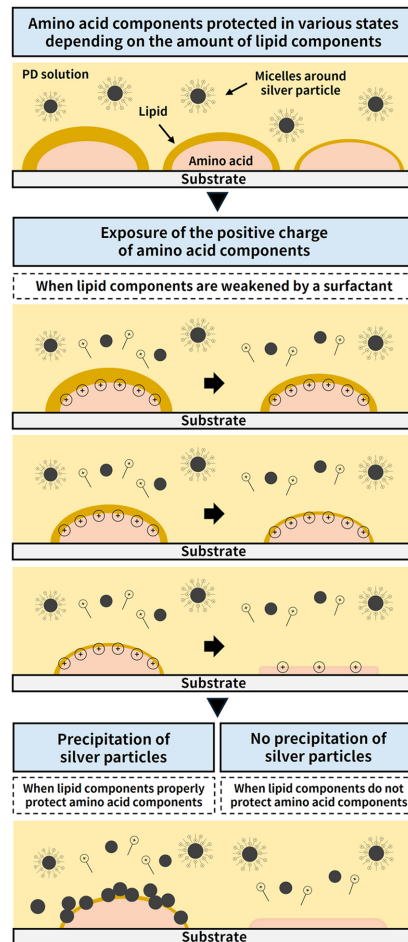


Fig. 4. Fingerprint development process in PD working solution according to the protective state of lipid components for amino acid components.

그대로 유지하지 못할 것이고 그 반응은 약하거나 거의 일어나지 않을 것이다. 이와 반대로 아미노산 성분을 감싸고 있는 지질 성분의 양이 매우 많은 경우, PD와 반응할 수 있을 정도로 아미노산 성분이 노출되지 않아 반응이 매우 약할 것으로 추측할 수 있다. 이러한 지질 성분, 아미노산 성분, PD의 관계를 Fig. 4와 같이 설명할 수 있다. 결론적으로 PD와 지문 구성 성분의 반응은 지질 성분이 아미노산 성분을 적절히 보호할 때 이루어지며 반응의 세기는 지질 성분이 아미노산 성분을 보호하는 정도에 따라 달라질 수 있다.

감사의 글

본 연구는 순천향대학교 학술연구비 지원으로 수행하였음.

References

1. H. Jonker, A. Molenaar, and C. J. Dippel, *Photogr. Sci. Eng.*, **13**(2), 38-44 (1969).
2. J. R. Morris, SSCD Memorandum 367, April. Aldermaston: Atomic Weapons Research Establishment (1975).
3. J. R. Morris, and G. C. Goode, SSCD Memorandum 356. Aldermaston: Atomic Weapons Research Establishment (1974).
4. M. de la Hunty, S. Moret, S. Chadwick, C. Lennard, X. Spindler, and C. Roux, *Forensic Sci. Int.*, **257**, 481-487 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2015.06.034>
5. A. A. Cantu, *Forensic Sci. Rev.*, **13**(1), 30-64 (2001).
6. K. Braasch, *Forensic Sci. Int.*, **230**(1-3), 74-80 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2013.03.041>
7. G. R. Lee and J. M. Chae, *Police Sci. Inst.*, **29**(2), 287-315 (2015). <http://dx.doi.org/10.35147/knpsi.2015.29.2.287>
8. C. E. Phillips, D. O. Cole, and G. W. Jones, *J. Forensic Identif.*, **40**(3), 135-147 (1990).
9. B. Rimmer and H. Tuthill, *Ident. Canada*, **8**(4), 3-7 (1985).
10. M. de la Hunty, S. Moret, S. Chadwick, C. Lennard, X. Spindler, and C. Roux, *Forensic Sci. Int.*, **257**, 488-495 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2015.08.029>
11. A. Exall, D. Cutler, E. Brewer, E. Cartledge, G. Knevit, H. Bandey, I. Maybury, L. Hussey, M. Sealey, S. Bleay, S. Kirk, and S. Vassell, 'Fingerprint Visualisation Source Book', 3rd Ed., Defence Science and Technology Laboratory, U. K., 2022.
12. A. Thomas-Wilson, Z. Y. Guo, R. Luck, L. J. Hussey, M. Harmsworth, J. L. Coulston, A. R. Hillman, and V. G. Sears, *Forensic Sci. Int.*, **323**, 1-14 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2021.110786>
13. S. J. Ahn, Y. J. Lee, and J. S. Yu, *Anal. Sci. Technol.*, **36**(3), 113-120 (2022). <https://doi.org/10.5806/AST.2023.36.3.113>