

범인잡는 진공기술 - 지문 감식

주장현

내용들



1. 지문의 분류(Classification of fingerprint)
 2. 지문 증거의 형태(Types of fingerprint evidence)
 3. 지문 감식(Fingerprint detection)
 4. 진공 금속 증착(Vacuum Metal Deposition)
 5. 진공 금속 증착 메커니즘(Mechanism of vacuum metal deposition)
 6. 진공 금속 증착 장비(Vacuum metal deposition tool) - Edwards
 7. 과학 수사에서의 금(Au) (Gold in Forensic Science)
- 참고문헌(References)

범죄 현장에 남겨진 지문들은 범죄 수사에 있어 매우 중요하지만 실제 지문을 이용하여 범인을 검거하는 것은 지문을 얼마나 신속하고 정확하게 감식할 수 있는가에 따라 달라진다. 이 기사에서는 진공 기술의 응용 예 가운데 하나로 진공 금속 증착 방법을 통해 육안으로 잘 보이지 않는 지문을 선명하게 확인할 수는 방법을 간략하게 소개하고자 한다.

1. 지문의 분류(Classification of fingerprint)

임신(gestation) 기간 중 다양한 요인들 때문에 사람 지문 모양내의 마루(ridge)와 땀구멍(sweat pore)의 분포는 매우 다양하고 개인마다 차이가 나게 되는데, 심지어 유전적으로 일란성 쌍둥이(monozyotic twin)는 외모는 같지만 각자의 지문은 서로 구별이 된다.

사람의 지문은 마루와 계곡이 교대로 배치된 모양으로 이루어져 있는데 각 개인은 자신만의 지문을 가지고 있다. 개인의 지문 유일성(uniqueness)은 지문내의 부분적인 마루 특성과 마루들간의 관계에 의해 전적으로 결정된다. 지문의 마루 부분들은 평행하게 배치되어 있고 때로는 끊어지거나 두 갈래로 나누어지기도 한다. 지문 전체적으로는 마루들의 배치는 특이성(singularity)이라고 부르는 수 많은 특별한 형상들을 이루는데 크게 말굽문(loop), 삼각문(delta) 그리고 와상문(whorl) 3가지 형상으로 구분된다. 부분적으로는 마루와 골 모양은 미세하고 특이한 형상을 갖는데 실용적인 측면에서 단지 두 개의 미세 모양, 즉 마루 맺음(ridge ending)과 마루 갈라짐(ridge bifurcation)으로 구분된다. 전자는 마루가 갑작스럽게 끝나는 점이고, 후자는 마루가 두 개의 마루로 갈라지는 것이다. 좋은 상태의 지문에는 통상 약



<저자 약력>

주장현 박사는 1996년 연세대학교에서 물리학 박사학위를 받고 에드워드 코리아주식회사에 입사하여 현재까지 근무하고 있으며 2005년 제1회 반도체 기술 대상 산업자원부 장관상을 수상하였고 저서로 <진공기술 실무>와 <진공 이해하기>가 있다. (jh.joo@edwardsvacuum.com)

40 ~ 100개의 미세 모양이 들어 있다.

지문 전체적으로 특이성(singularity)이 지문 분류의 기준이 되는데 이 특이성들은 엄청난 양의 지문 이미지 데이터를 연구하고 검색하는 것을 수월하게 해 준다. 말굽문과 세부 형상 구조/개수에 따라 그림 1처럼 지문이 분류된다.

평균적으로 잔류 지문은 0.1 mg 정도의 무게를 가지며, 시간에 따라 증발하는 약 98 ~ 99 % 정도의 물로 구성되어 있다. 물이 증발하고 나면 약 1 μg 정도의 잔류물이 남는데 이 잔류의 반은 NaCl같은 무기물이고 나머지 반은 유기물이다. 지문 중 수용성인 부분은 염(salt)과 아미노산(amino acid)같은 땀샘 분비물로 되어 있다. 수용성이 아닌 부분은 방수성 단백질, 극성을 갖지 않은 지질(lipid)로 구성되어 있다.

2. 지문 증거의 형태(Types of fingerprint evidence)

범죄 현장에는 3가지 유형의 지문 증거가 남을 수 있는데 첫 번째는 들쭉날쭉한 손가락자국(fingermark)으로 퍼티(putty)나 양초 왁스 같은 늘릴 수 있는 물체에 생기는 3차원 골무(손가락 끝) 자국으로 일반적으로 빛을 비스듬히 비추면 좀 더 잘 보인다. 두 번째는 눈에 보이는 손가락자국으로 혈액같은 색깔이 있는 물질에 의해 손가락이 오염되었는지 또는 지문의 마루에 의해 표면에서 색깔이 있는 물질(먼지나 검댕)이 제거되었는지에 따라 양각(positive)이나 음각(negative)이 된다. 이런 자국들은 오염 물질들의 성질에 따라 광학적으로 잘 보일 수도 있다.

손과 발에서 볼 수 있는 마루 모양은 각 개인을 식별하는 데 있어 가장 이상적인 방법이다. 지문의 마루들은 각 개인마다 고유한 것이고 변하지 않는데 그 이유는 지문의 마루가 모든 사람들에서 동일하게 피부 깊숙이 형성되어 있기 때문이다. 이런 마루선들 모양의 흔적은 맨손으로 물체를 다룰 때 대상 물체에 남게 되기 때문에 이 흔적을 통해 나중에 해당 물체와 접촉한 사람을 찾아내는 데 사용될 수 있다.

맨손으로 만진 물체에 남겨진 흔적들은 피부에 있는 3개의 내분비선에서 나오는 분비물이나 땀으로 이루어져 있다. 에크린(eccrine) 선, 피지선(sebaceous) 그리고 아포크린(apocrine) 선에서 분비된 분비물들이 지문에 항상 남게 된다. 가슴, 등 그리고 이마같은 곳에 있는



[Fig. 1] Six major fingerprint classes (a) arch, (b) tented arch, (c) left loop, (d) right loop, (e) whorl, (f) twin-loop

피지선들, 서혜부(apocrine), 겨드랑이, 항문같은 곳에 있는 아포크린 선에서 분비되는 것들은 남는 정도가 다르다. 에크린 선에서 분비되는 것은 98%가 물이고, 많은 종류의 무기물과 유기물이 포함되어 있는데 유기물 성분들에는 아미노산, 요소 그리고 당이 포함되어 있고 무기물 성분들에는 염화물(chloride)와 암모니아가 포함되어 있다.

물체에 남은 지문들은 지문이 남겨진 표면이나 잔류 지문의 오염에 의해 자연스럽게 눈으로 볼 수도 있지만 대부분은 육안으로 잘 보이지 않는다. 잘 보이지 않는 지문이 증거물로 유용하기 위해서는 반드시 눈으로 확인 가능하여야 하는데 이것이 지문 감식의 목표이다.

지문 증거의 공통적인 문제는 이런 지문들이 대부분 육안으로 확인이 불가하다는 것이고 지문이 남겨진 물체와 지문 자체를 구분할 수 있기 위해서는 물리적 또는 화학적 처리를 필요로 한다. 육안으로 보이지 않는 지문의 통상적인 상태는 내분비물과 환경에 의한 오염물이 복잡하게 혼합되어 있기 때문에 잔류 지문의 주요 구성 성분들을 파악하는 것이 효과적인 지문 감식에 있어 필수적이다. 또한 지문을 구성하고 있는 성분들이 서로 다른 환경 조건들에 의해 어떻게 영향을 받는지 고려하는 것도 중요하다.

3. 지문감식(Fingerprint detection)

DNA profiling같은 분야에서 많은 진전이 있음에도 불구하고 지문은 여전히 범죄 조사 목적으로 개인 식별을 하는데 있어 가장 좋은 방법으로 생각되고 있다. 지문 감식 방법은 그 방법이 무엇이든 간에 남겨진 지문 자체나 양각으로 나타나는 잔류물의 구성 성분을 이용하거나 음각으로 나타나는 지문 주변 표면을 이용하는

것이며, 지문 마루와 골간의 명암 대비를 극대화하는 것이 가장 좋은 방법이다. 남겨진 지문들은 대부분 마루와 골 사이에 강한 윤곽을 만들지 않기 때문에 명암 대비가 그리 좋지 않은데 그 이유는 마루 사이의 골들에 잔류 지문 물질이 그리 많이 남지 않기 때문이다. 많은 광학적, 물리적 그리고 화학적 기술들이 육안으로 보이지 않는 지문들을 감식하고 더 잘 보이게 하는데 사용되고 있는데 여러 기술들을 논리적 순서에 따라 적용하면 최상의 결과를 얻을 수 있다. 즉 여러 가지 기술이나 여러 가지 시약(reagent)을 이용하며 찾을 수 있는 지문의 개수가 늘어나거나 이미 감식된 지문의 선명도를 더욱 높일 수 있다.

육안으로 보이지 않는 지문들을 감식하는 것은 매우 어려운 문제이다. 극미량의 특정한 화학적 화합물들을 감지하여야 하는데 지문 분말(fingerprint powder)을 이용하여 성공적으로 지문을 감식하기 위해서는 남아있는 지문 물질이 최소한 500 ~ 1000 ng 정도이어야 한다. Ninhydrin같은 화학적 방법을 이용해서 지문에 색깔을 만들기 위해서는 100 ~ 200 ng 정도의 물질이 남아 있어야 하지만 DFO같은 화학 시약을 이용하는 냉발광(luminescence) 감식은 1 ~ 10 ng만 남아 있어도 된다.

주어진 환경 조건에 따라 지문 감식의 최상의 기술이나 기술들의 적용 순서는 다음과 같은 몇 가지 요인들에 의해 달라진다.

- 지문이 남아 있는 표면의 특성(예, 다공성, 비다공성, 거칠거나 부드러운)
- 특정한 오염물질(예를 들면 혈액) 유무
- 환경적 요인들(예 해당 표면이 습한 상태이거나 습한 상태를 거쳤거나)
- 증거 지문이 만들어진 후 경과 시간

지문 감식 절차에서 광학 기술이 비파괴적이기 때문에 매우 중요하며, 물리/화학적 방법들을 사용하는 경우 조심해야 하며 각 단계마다 확보된 지문을 항상 기록으로 남겨야 하는데 그 이유는 손가락 자국이 쉽게 훼손될 수 있기 때문이다.

앞에서 언급하였듯이 육안으로 보이지 않는 손가락 자국들은 표면의 종류에 따라 다른 양상을 나타내게 된다. 또한, 몇 가지 감식 기술들은 어떤 표면에 대해서는 효과적이지만 다른 표면에 대해서는 효과적이지 않을 수도 있다. 따라서 표면의 종류가 특정한 환경 조건들에서

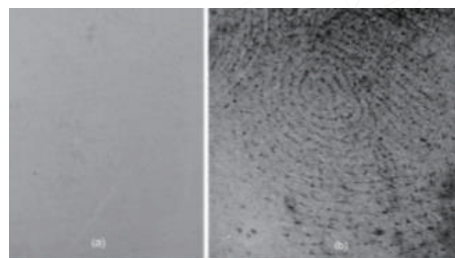
지문 감식 기술을 적용하는 절차를 선택하는데 있어서 주요 고려 대상이다.

4. 진공 금속 증착(Vacuum Metal Deposition)

지문 감식 절차에서 광학적 기술들이 다른 기술보다 먼저 실행되어야 한다. 범죄 현장에 고정된 표면들의 경우 낮은 감도에도 불구하고 분말 도포(powdering)가 지문 감식의 첫 번째 방법으로 여전히 확고하게 사용되고 있다. 범죄 현장에서 습한 표면의 경우는 작은 입자 시약을 분사하는 분말 습식 도포 방법이 적용되기도 한다. 시아노아크릴레이트 증기법(cyanoacrylate fuming)은 1970년대 이후 다공성이 아닌 표면들(예, 유리, 플라스틱, 금속 그리고 광택 표면)에 보편적으로 사용되는 잘 알려진 실험실 기반의 지문 감식 기술이다. 채취된 지문들을 발광 착색(luminescent stain)시켜 더욱 선명하게 할 수 있다. 다른 방법으로 실험실이 있는 곳에서는 오래된 지문이나 감식이 잘 되지 않는 표면의 경우 진공 금속 증착이 특히 효과적이다.

진공 금속 증착법은 1960년 대에 육안으로 보이지 않는 지문 감식 기술로 검토되었으며, 1970년대에 실질적인 적용이 이루어졌다. 진공 금속 증착은 운반용 백, 플라스틱 그리고 유리 같은 부드럽고 다공성이 아닌 표면 위의 남겨진 지문을 감식하기 위해 도입된 매우 감도 높은 기술이며 오래되었거나 풍화된(비바람을 맞은) 지문을 감식하는 데에 있어 특히 유용하다. 진공 금속 증착은 육체적/성적 폭행 사건과 관련된 의류를 조사하여 손가락 자국과 손바닥 굴곡(palmar flexion) 등을 눈으로 볼 수 있게 해주는데 면봉을 이용한 DNA 채취와 병행하여 사건이 발생 순서를 추정할 수 있게 해 준다.

진공 금속 증착(VMD)은 지문 감식에 있어 잘 확립된



[Fig. 2] Fingerprint deposited on brass (a) before, (b) after vacuum metal deposition

기술이다. 통상 얇고 불연속적인 금(Au) 층이 감식하고자 하는 지문 위에 먼저 증착되고 이렇게 먼저 증착된 금 나노클러스터(nanocluster)가 아연(Zn) 증착을 위한 핵자(nucleation site) 기능을 하게 된다. 이 방법은 다양한 종이와 폴리머 위에 남겨진 눈에 보이지 않는 지문들을 감식하는 데 특히 효과적인 것으로 알려져 있다.

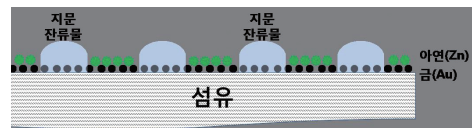
금(Au) 증착 후 아연을 기화시켜 지문이 눈으로 보일 수 있도록 상대적으로 어두운 배경을 만들게 된다. 금이 먼저 증착되고 아연 금속이 증착될 수 있는 바탕이 되는 표면이 금(Au) 클러스터에 의해 형성되지만 지문으로 덮인 노출 표면에는 금 클러스터가 노출 표면 아래로 가라앉아 아연 증착을 촉진하는 역할을 하지 못 한다. 진공 금속 증착은 지문을 손상시키지 않는 것으로 알려져 있고 따라서 후속 조치로 취해지는 DNA 분석에 영향을 미치지 않는다.

많은 금속들이 진공 금속 증착 용으로 사용될 수 있지만, 금(Au), 은(Ag), 그리고 금-아연 조합의 사용이 지문 감식에 주로 사용된다. 이런 금속들은 응용의 실용성, 독성, 증착 효율, 사진 작업의 용이성 그리고 비용 측면에서 선호되어 왔다. 지문 골과 마루간의 최대 명암 대비는 이 영역간의 전위차(potential)가 가장 클 때 얻을 수 있다. 진공 금속 증착 처리를 하지 않은 상태에서 골에 대한 마루(ridge-to-furrow) 명암 대비는 금속과 금속-지문 증착물 조합간의 전위차에 의해 결정된다. 명암 대비를 높이기 위해 진공 금속 증착 처리 과정은 마루와 골 간의 전위차가 크게 나도록 해야 한다. 따라서 진공 금속 증착에 사용되는 금속을 선택하는 방식은 명암 대비 최대화가 가능하도록 증착면에 대해 가장 불활성인 금속이나 가장 불활성이 아닌 금속을 선택하는 것이다.

시아노아크릴레이트 증기법과 진공 금속 증착이 영국의 과학 수사 기법에서 다공성이 아닌 표면 위의 육안으로 보이지 않는 지문을 감식하는 표준 기술로 사용되고 있다. 진공 금속 증착법은 특히 오래된 지문을 감식할 때 시아노아크릴레이트 증기법보다 감도가 더 좋은 기술이지만 이 방법은 노동 집약적이고 설치 운영비가 많이 들며 지문 감식을 극대화하기 위해 훈련된 인력이 필요하다라는 문제가 있다.

5. 진공 금속 증착 메커니즘 (Mechanism of Vacuum Metal Deposition)

진공 금속 증착은 진공 중에서 금(Au)과 아연(Zn)같은 금속들을 열을 이용하여 증발시켜 시료 표면에 얇게 증착하는데 금이 먼저 시료 표면 전체에 증착된다. 이 금속 원자들은 함께 클러스터를 형성하여 응집체(agglomerate)를 만들며 지문 잔류물의 구성 성분들을 뚫고 들어간다. 다음으로 아연이 증발되어 지문 속에 있는 영역보다는 노출된 금 응집체 위에 선택적으로 증착되는데 이것은 아연이 지문의 골과 결합하고 지문의 마루와는 결합하지 않는다는 것을 의미한다. 따라서 얻어지는 손가락 자국은 시료의 배경 색으로 보이는 마루에 대해 음각으로 보이고 금과 아연으로 덮인 지문의 골은 회색으로 보이게 된다.



[Fig. 3] Vacuum Metal Deposition of gold and zinc onto fabric

금속 박막은 아연이 결합할 수 있는 핵자 위치를 만드는 역할을 하여 그 위에 아연 박막이 증착될 수 있게 한다. 아연은 지문 잔류물이 있는 곳을 제외한 전체 표면을 덮게 되어 투명한 지문 마루와 금속성 배경을 만들게 되어 지문의 골이 보이게 된다. 금(Au) 층의 증착은 지문 잔류물 유무와 무관하다. 단위 면적당의 금 밀도는 지문 마루와 깨끗한 배경에 대해 같다. 증착된 금은 스테아린 산(지문 잔류물의 한 성분)이 있을 때 지문 잔류물의 특정 깊이에 묻히게 된다. 금속 박막은 1 angstrom의 평균 두께를 갖는 불연속 박막이다. 금(Au) 박막의 두께는 quartz crystal monitor를 이용하여 모니터링할 수 있거나 사전에 측정된 무게의 금을 증발시켜 제어할 수 있다. 얇은 금 박막은 진공 금속 증착법에 의해 감식되는 지문의 선명도를 결정하는 중요한 인자이다. 박막의 구조는 원자와 원자가 증착될 표면간의 결합력에 의해 결정된다. 만일 원자들간의 응집력(cohesion force)이 원자와 표면간의 흡착력(adhesion force)보다 강하면 원자들은 표면에 고르게 퍼지기 보다는 클러스터나 응집체(agglomerate)를 형성한다.

표면에 도착한 새로운 금(Au) 원자들은 기존의 클러스터에 합류하여 클러스터 크기를 증가시키거나 새로운 클러스터를 형성하여 클러스터 밀도를 증가시킨다. 클러스터의 크기와 밀도는 박막이 급격하게 붙어 연속 박막을 형성하는 위치에서 클러스터들이 서로 합체될 때

까지 증가된다. 작은 클러스터들은 어떤 크기가 될 때까지 이동성을 갖는 것으로 생각되기 때문에 이런 작은 클러스터들은 더 큰 클러스터에 흡수되어 클러스터 밀도를 높이기 보다는 클러스터 크기를 증가시키게 된다. 클러스터 밀도는 새롭게 형성된 클러스터들이 움직일 수 없게 되기 전에 포획될 확률이 큰 시점에 도달할 수 있다. 이런 조건에 되었을 때 클러스터 밀도는 클러스터들이 합체될 때까지 상수를 유지한다.

금(Au) 클러스터들은 전자 현미경을 통해 보면 원형과는 많이 다르다. 이 클러스터들은 타원에 가깝고 그 대칭 축은 기관 평면과 나란하다. 이 타원형 형상은 원자들간의 금속-금속 작용이 금속-기관 작용을 압도할 때 클러스터 표면 장력에 의해 만들어진다. 클러스터 크기가 커짐에 따라 형상의 불균칙성 또한 증가되며, 금 박막 구조는 표면의 특성과 무관하며 서로 다른 표면에서 같은 조건인 경우 형성되는 금 클러스터의 밀도와 크기만 다를 뿐이다. 폴리에틸렌(polyethylene)은 스테아린 산의 클러스터 밀도에 비해 2.5배 크다. 스테아린 산은 폴리에틸렌 위에서 클러스터 크기 영역 내에 있는 더 좁은 영역의 클러스터를 갖는 것으로 밝혀졌다.

6. 진공 금속 증착 장비 (Vacuum Metal Deposition Tool) – Edwards

에드워드사의 E-600 진공 금속 증착 chamber 내의 진공도는 5×10^{-4} mbar이다. 효과적인 금속 증착이 이 압력 영역에서 이루어진다. 영국 경찰은 1976년 이후 이 기

술을 이용하여 성공적으로 지문 감식을 수행하여 왔다.

금(Au)은 실질적으로 지문 잔류물에 흡수되는 것으로 생각되고 있다. 다음으로 아연을 증발시키고 금과 같은 방법으로 증착한다. 아연은 일반적으로 다른 금속 위에만 응축되기 때문에 지문 마루들 간의 사이 골들과 금이 코팅된 배경에만 붙게 된다. 진공 chamber 내에 감식할 지문을 넣은 후, 금을 가열하여 증발시키고 기관 위에 미세한 박막을 펴게 된다. 다음으로 아연을 가열하여, 지문 잔류물이 없는 금에 아연이 붙게 되고 이를 통해 지문이 나타나게 된다.

7. 과학 수사에서의 금(Au) (Gold in forensic science)

과학 수사에 금(Au)을 이용하는 중요한 이점은 금 나노 입자들의 높은 선택성과 감도뿐만 아니라 불활성 특성으로 인해 현상된 지문을 장시간 보관할 수 있다는 것이다. 금은 또한 판별 가능한 형태의 코카인과 헤로인과 함께 미세결정(microcrystal)을 형성한다. 금속 나노 입자들과 특히 금에 대한 관심은 내산화성이 강하고 감식된 지문이 시간이 지나도 안정되게 유지된다는 것과 지문 감식뿐만 아니라 불법 약품 추정 검사에 있어 효과적인 금속이라는 것이다. 금 나노 입자들은 분말 형태 지문 마루에 있는 수분과 오일 성분들에 붙기 때문에 다공성이 아닌 표면 위의 지문 감식에 이용될 수 있으며 금속 분말이 붙는 효율은 나노 입자의 크기와 형상에 따라 달라진다.

References

- [1] Forensic applications of chemical imaging : latent fingerprint detection using visible absorption and luminescence, Exline DL, Wallace C, Roux C, Lennard C, Nelson MP, Treado PJ, J. Forensic Sci., 2003 Sept. 48(5):1047-53
- [2] Nanoscale Analysis of the Interaction between Cyanoacrylate and Vacuum Metal Deposition in the Development of Latent Fingermarks on Low-Density Polyethylene, Jones Benjamin, Downham R and VG Sears, Journal of Forensic Sciences, 2012, 57(1), pp. 196-200
- [3] Sputter coating a viable alternative for the development of latent prints on non-porous surfaces, I.J.Turner, M. A. Burgess, J.M. Love, P. T. Lynch, Journal of Forensic Science, 2010, 9(1), pp. 19-24
- [4] Columnar thin film acquisition of fingerprint topology, R.C. Shater, A. Lakhatakia, J. W. Rogers, D. P. Pulsifer, J. Nanophoton, 5(1), 2011,
- [5] Latent Fingerprint Visualization using a Scanning Kelvin Probe in conjunction with Vacuum Metal Deposition, H. Dafydd, M. Phil, G. Williams, S. Bleay, Journal of Forensic Science, January 2014, Vol. 59, No. 1, pp. 211-218