

고속 푸리에 변환(fast Fourier transform, FFT)을 이용한 겹친지문 분리의 효과와 한계*

김재원** · 김채린*** · 이한나*** · 유제설**** · 장윤식*****

〈요 약〉

사진은 가장 일반적으로 사용되는 현장 기록 방법으로, 증거물 관리의 연속성을 유지하고 현상을 있는 그대로 담아낼 수 있기 때문에 범죄수사 및 각종 사고조사에 널리 이용된다. 최근에는 디지털 카메라가 이용되기 때문에 이미지 조작에 따른 진정성(authenticity) 훼손위험이 있어 이미지 증강에 사용할 수 있는 방법이 제한적인데, 그 중 널리 활용되는 하나가 푸리에 변환(Fourier transform)이다. 푸리에 변환은 이미지를 주파수 신호로 변환하는 것으로, 본 연구에서는 fast Fourier transform(FFT)을 사용하였다.

본 실험에서는 지문을 규칙적인 패턴을 가진 모눈종이나 또 다른 지문과 겹치게 한 뒤 FFT로 분리하였다. 그리고 원래의 지문과 분리한 지문의 품질을 각각 평가하고 비교하였으며, 두 지문이 같은 지문으로 판정될 수 있는지 검사하였다. 규칙적인 패턴을 가진 배경에 찍힌 지문이나 general pattern끼리 겹쳐진 지문을 분리한 경우 지문 융선이 증강되어 식별에 용이하였다. 하지만 core나 delta와 같이 복잡한 패턴끼리 겹쳐진 지문의 경우 원래의 지문보다 FFT로 분리하여 얻은 지문의 품질이 낮고 식별오류가 많았다. 지문 품질의 저하는 감정관의 신뢰성에 부정적 영향을 미칠 수 있다. 연구의 주요 논점은 지문감정 이외에도 디지털이미지 개선기술이 활용되는 여러 상황에서 참고할 수 있을 것이다.

주제어 : 고속푸리에변환, 겹친지문, 지문분리, 지문감정, 이미지증강

* 이 논문은 2018년도 한림대학교 교비연구비(HRF-201802-019)에 의하여 연구되었음

** 순천향대학교 법과대학원 박사과정 (제1저자)

*** 순천향대학교 법과대학원 석사과정

**** 순천향대학교 법과대학원 교수

***** 한림대학교 정보법과학연구소 교수 (교신저자)

목 차
I. 서론 II. 이론적 배경 III. 재료 및 방법 IV. 결과 V. 고찰

I. 서론

적절한 기록은 범죄 등 사고의 상황을 재구성하는데 가장 중요하게 사용되고 기억의 환기 및 진술을 지지하거나 반박하는데 사용될 수 있으며 나아가 재판에서는 유무죄 판결에 직접적인 영향을 미친다. 기록하는 방법에는 스케치, 노트 필기, 비디오 및 사진 촬영이 있으며, 이들은 상호 유기적인 관계를 가지고 있다(Fish, Miller, Braswell & Wallace, 2014). 그중에서도 사진은 가장 일반적으로 사용되는 현장 기록 방법으로서 증거물 관리의 연속성(chain of custody)을 유지하고 무결성을 입증하는데 도움을 준다.

사진을 수사에 활용할 수 있었던 가장 큰 이유는 현상을 있는 그대로 담아낸다고 평가되기 때문이다. 촬영된 사진의 품질이 좋지 않거나 수정이 필요할 경우에는 원래 이미지를 개선하는 과정이 필요하다. 이는 없던 것을 새롭게 창조하는 것이 아니라 있는 것을 더 잘 보이게 하는 증강(enhancement)으로, 조작과는 달리 원본의 진정성(authenticity)을 유지하는 것을 조건으로 한다.

필름 카메라로 촬영한 사진은 기본적으로 명도, 채도 등을 조절하여 대조비나 색감을 개선하는 것 등의 단순한 보정 작업만 할 수 있으므로 조작 가능성이 낮다고 평가된다. 반면 디지털 카메라로 촬영한 사진은 컴퓨터를 통해 기존에는 거의 불가

능 했던 다양한 방식으로 이미지 수정이 가능해졌다 (신이철, 2012). 현장 사진에 조작에 준하는 처리를 가한다면 이는 증거로 사용될 수 없다. 그렇기 때문에 증강을 위한 목적으로 사용될 수 있는 기능은 매우 한정적이다. 푸리에 변환은 이러한 법적 요건을 충족하는 가운데 이미지를 개선하는 데 유용하게 사용된다. 흔히 현장에서는 하나의 지문이 아닌 다른 무늬 혹은 지문과 겹쳐진 지문(overlapped fingerprint)이 발견되며 이를 분리할 때도 푸리에 변환이 흔히 활용된다.

본 연구에서는 복잡한 신호를 가진 지문이 두 개 이상 겹쳐있을 때, 푸리에 변환의 종류 중 하나인 FFT로 두 이미지를 잘 분리해낼 수 있을지 알아보려고 하였다. 따라서 본 연구자들은 지문이 겹쳐질 수 있는 다양한 경우를 설정하고 FFT로 겹친지문(overlapped fingerprint)을 분리하였다. 또한 제대로 분리되지 않은 지문이 실제로 존재하는 지문과 동일한 것으로 오인될 가능성은 매우 적기 때문에 특정오류가 발생할 우려는 상대적으로 적지만 특정 지문과 1:1대조를 했을 때 배제 오류는 쉽게 발생할 가능성이 있다는 사실에 주목하였다. 이러한 FFT의 한계를 검증하고자 평가자들로 하여금 FFT로 분리된 지문과 원본 지문을 1:1 대조하도록 하였다.

먼저 FFT의 개념과 법과학 분야에서 FFT의 활용 역사, 법과학 이미징 전문가 집단의 FFT 사용에 대한 권고 사항에 대해 살펴보고 실험 결과를 검토해봄으로써 FFT를 통한 겹친지문 분리의 오류 가능성 및 한계를 알아보고 결론으로써 바람직한 FFT 사용에 대한 가이드라인을 제시하고자 한다.

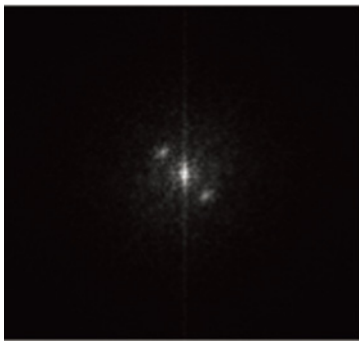
II. 이론적 배경

1. Fast Fourier transform (FFT)의 개념

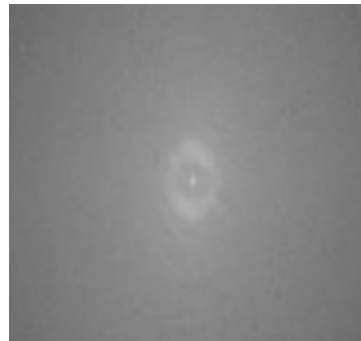
우리는 매일 소리나 이미지와 같이 다양한 형태의 신호를 주고받으며 생활한다. 이 신호는 크게 시간에 따른 신호의 진폭과 주파수에 따른 신호의 분포라는 두 가지 관점에서 해석할 수 있다. 시간의 영역을 주파수 영역으로 변환시킬 수 있는데 이 작업을 푸리에 변환 (Fourier transform)이라 한다. 즉 파동을 푸리에 변환한 결과가 그 파동을 구성하는 주파수이다. 이처럼 푸리에 변환을 사용하여 주파수를 분석하는 일을 푸리에 해석이라고 한다. 발전된 기술인 고속 푸리에 변환 (fast Fourier

transform, FFT)은 컴퓨터를 이용하여 이산적 (discrete)인 데이터를 고속으로 푸리에 변환하는 방법이다.

규칙적인 신호를 가진 이미지를 푸리에 변환하면 <그림 1>과 같이 세 개의 점들의 합으로 표현된다(Ramotowski, 2013). 신호가 회전하면 이 세 개의 점도 함께 회전하기 때문에 결과적으로 변환된 이미지에 포함된 세 개의 점은 신호의 방향과 수직인 방향으로 배열된다. 그런데 지문은 모든 방향의 융선으로 이루어져있기 때문에 <그림 2>와 같이 지문을 푸리에 변환한 스펙트럼 이미지에서는 주파수 신호가 마치 동그랗게 배열된 것처럼 보인다. 이와 달리 규칙적인 패턴은 스펙트럼 이미지에서도 규칙적인 패턴을 갖기 때문에 어떤 신호가 배경에 해당하는 신호인지를 예측할 수 있다. 따라서 일정한 패턴을 가진 배경에 지문이 유류된 경우 이미지를 푸리에 변환하여 배경에 해당하는 영역을 지운 후 이를 역변환 (inverse FFT, IFFT)하면 개선된 지문 이미지를 얻을 수 있다. 법과학 분야에서 푸리에 변환은 이미지 개선 목적으로 흔히 사용된다.



<그림 1> 이미지를 FFT로 변환했을 때의 주파수 신호



<그림 2> 지문에 FFT 필터를 적용시켜 얻은 주파수 신호

2. 법과학에서의 fast Fourier transform (FFT) 활용 역사

법과학 분야에서 푸리에 변환은 1972년에 미국 샌디에이고에서 일어난 살인사건 해결을 위해 처음으로 사용된 것으로 알려져 있다. 침대 시트에 남겨진 혈흔지문이 시트에 수놓아진 패턴으로 인해 융선 식별이 어렵게 되자 수사관은 이 이미지를 제트 추진 연구소 (Jet Propulsion Laboratory)에 의뢰하여 당시 최신 기법 중 하나였던

푸리에 변환을 사용하여 침대 시트의 패턴을 지우자 범인의 대조 장문(palm print)과 17개의 특징점이 일치할 정도로 개선되었다. 이렇게 개선된 장문은 법정에 제출되었으나 증거로서 받아들여지지 못했다. FFT의 원리와 적용 방법이 법과학 분야 전문가들의 일반적 수용 (general acceptance)¹⁾을 얻지 못했다는 것을 이유로 법원은 FFT에 의해 개선된 장문 이미지에 대하여 과학적 확실성 (scientific certainty)이 없다고 판결한 것이다. (Olsen & Thomas, 1978; Dalrymple & Smith, 2018, Forensic Digital Image Processing에서 재인용).

1990년대 들어 컴퓨터의 보급과 기술의 발전으로 증거 사진을 향상시키는 후처리 과정이 활발하게 이루어졌다. 하지만, 증거 사진에 어떠한 처리를 가한다는 것 자체가 그 당시에는 일반적인 절차가 아니었기 때문에 법정에서는 후처리된 현장 사진의 증거 채택에 대해 빈번한 논란이 있어왔다.

1990년 3월 미국 버지니아에 거주하던 Dawn Bruce가 자택에서 강간살해 당했다. 법과학 실험실 요원들의 피문은 베개를 감식하여 희미한 지문 용선 형태를 관찰하였고, 1,8-Diazafluoren-9-one (DFO)를 사용하여 지문을 현출하였다. 이를 촬영하여 지문 감정을 시도하였으나 지문 용선의 품질이 저하된 상태였고 베개에 수놓아진 패턴에 의해 지문의 식별능 (discriminating power)이 좋지 않았다. 이 지문 이미지의 베개 패턴을 FFT로 제거하자 개인 식별을 할 수 있을 만큼 이미지가 개선되었다. 지문 감정 결과 범인은 피해자의 이웃인 Robert Knight이었다. 그밖에도 다른 결정적인 증거들이 발견되어 Knight는 기소되었다. 이 사건의 재판에서 피고 측 변호사는 사용된 지문 이미지 증강 프로세스의 타당성에 대해 공격하였는데, FFT가 새로운 기술이기 때문에 지문 이미지가 제대로 개선되었다고 보기 어렵다고 주장하였다. 그러나 재판부는 전문가에 의해 FFT가 수행되었으므로 이미지 증강 프로세스에는 아무런 문제가 없다고 밝히며 지문 이미지를 증거로 받아들였다(The Forensics Library, n.d.).

이후 학계에서는 FFT의 법과학적 사용에 대한 연구가 이루어졌다. Kaymaz 외 (1993)의 연구에서는 여러 이미지 증강 기술을 비교하였다. 실험 결과 FFT를 통한 지문 이미지 개선이 다른 이미지 증강 기법보다 대조비 개선의 측면에서 뛰어난 결

1) 1923년 Frye v. United States 사건에서 수축기 혈압을 이용한 거짓말탐지기 검사방법이 증거능력이 있는지가 쟁점이 되었다. 대법원은 어떤 과학적 증거가 법정에서 받아들여지기 위해서는 관련 학계 과학자들의 '일반적 수용(general acceptance)'을 얻어야 한다고 판시하였다. 이를 계기로 새로운 증거가 증거능력을 갖기 위해서는 그 증거와 증거 처리에 관련된 기술 또는 방법이 일반적으로 수용되는지를 고려하게 되었는데, 이것을 Frye test라고 한다. (Frye v. United States(1923))

과를 보였다. 연구진들은 FFT 기술이 소프트웨어 간의 호환성이 좋고 합리적인 비용을 갖는다는 점, 잡음이 많은 지문 이미지를 효과적으로 개선시키는 방법으로 평가하였다(Kaymz & Mitra, 1993). Dalrymple 외(1994)의 연구에서는 실제 사례를 중심으로 다양한 이미지 증강 기법의 법과학적 사용에 대해 서술하였다. 결론적으로 증거 분석가가 아날로그 이미지보다 디지털 이미지를 분석하는 것이 이미지의 각 구성 요소를 제어하는데 효과적이라고 밝혔다. 또한 FFT를 사용하여 지문 이미지를 적절히 개선하면 방해되는 패턴을 줄이고 이미지를 개선할 수 있다고 하였다. 하지만 FFT도 다른 이미지 증강 기법과 마찬가지로 사용자의 기술과 경험이 증강 결과에 직접적인 영향을 미친다고 강조하였다 (Dalrymple & Menzies, 1994).

1998년 미국 법원에서는 FFT가 쟁점이 된 또 하나의 재판이 있었다. 1995년 5월 미국 커클랜드에 거주하던 한 여성이 아파트에서 숨진 채로 발견되었는데, 이웃 주민인 Eric Hayden이 유력한 용의자로 지목되었다. 침대 시트에 남겨진 손자국을 분석하기 위해 침대 시트를 자르고 단백질 타깃 시약인 Amido Black을 처리하였지만 지문이 유류된 침대시트(섬유)에도 시약이 염색되어 좋은 대조비를 얻을 수 없었다. 결국 현출된 지·장문 이미지는 법과학 이미지 증강 전문가인 Erik Berg에게 넘겨졌다. 그는 FFT로 침대 시트 패턴을 제거하고 색감을 조정하여 이미지를 개선하였다. 개선된 지문에서 관찰되는 용선 특징점의 개수가 12개로 늘어났으며 심지어 장문에서는 총 40개의 특징점이 관찰되었다. 지·장문 감정 결과 침대 시트에 유류된 지·장문은 이미 유력한 용의자로 거론된 Eric Hayden의 것이었다. 그는 1급 살인죄로 기소되었으며 재판 끝에 유죄를 선고받았다.

그러나 Hayden은 Amido Black은 법과학계에 이미 일반적 수용이 된 기법이지만 FFT는 법과학 전문가 집단 내에서 사용된 것이 비교적 최근이기 때문에 Frye test를 만족할 만큼 일반적 수용을 얻었다고 할 수 없으며, 본 건에서 이미지 전문가들이 사용한 소프트웨어가 법과학용으로 제작된 것이 아니기 때문에 개선된 지·장문 이미지가 증거로서 허용되는 것은 부당하다는 이유로 즉각 항소하였다. 하지만 검찰 측은 법과학 전문가 집단 내에서 FFT가 수용되었음을 입증하기 위해 2명의 전문가 증인과 5개의 관련 문헌을 제시하였고, 재판부는 자격을 갖춘 전문가에 의한 FFT 사용의 타당성에 대해 법과학 전문가 집단에서 별다른 반박이 없는 것으로 보아 이 프로세스는 관련 학계에서 일반적으로 수용된 것이라 볼 수 있다고 판결하였다. 따라서 증강된 이미지는 증거로 인정되었으며 결국 Hayden이 제기한 항소는 기각되었

다(State v. Hayden, 1998). 이렇듯 재판부로부터 법과학계의 일반적 수용을 얻었다고 재차 인정된 FFT는 증거 사진을 증강하는 기술로 널리 사용되고 있다.

3. FFT 사용에 대한 법과학 이미징 전문가 집단의 권고사항

디지털 카메라로 촬영된 사진 파일을 컴퓨터로 불러와 작업할 수 있게 되면서 사용자가 원하는 대로 이미지의 조정이 가능해졌다. 하지만 현장 사진은 사건 현장을 있는 그대로 묘사해야 하며 법정에서는 유무죄의 판단 근거로 작용한다는 점에서 이미지에 어떠한 처리를 가한다는 것은 그 이미지의 진정성과 무결성 여부에 중대한 영향을 미치게 된다(조형우, 2016). 따라서 법과학 이미징 전문가 집단에서는 이미지 증강 도구의 사용에 주의해야 할 것을 강조하고 있다.

FFT는 오래전부터 포토샵, V++, Image Pro 등의 이미징 소프트웨어에서 사용되어왔고 일정하게 반복되는 패턴을 제거하는 기능을 통해서 이미지를 깨끗하게 개선하는 역할을 해왔다. 법과학 이미징 전문가 모임인 Scientific Working Group on Imaging Technology (SWGIT)는 FFT를 법사진 개선에 사용 가능한 기술로 규정하고 있으며 지문이 '일정한 패턴'을 가진 배경에 유류되었을 때 그 배경 주파수를 제거하는 용도로 사용하도록 가이드라인을 제시하고 있다 (Scientific Working Group on Imaging Technology, n.d.).

E. Robinson(2016)은 일정하게 반복되는 신호를 가진 배경 패턴을 제거하거나 흐리게 하여 기본 피사체의 시각화를 방해하지 않도록 하는 기능이라고 밝히고 있다. B. Dalrymple(2018)은 FFT를 사용하여 지문이나 족적을 식별하는데 방해가 되는 배경의 패턴이나 색상을 일정 수준 연하게 만들거나 제거할 수 있다고 하였다.

그렇지만 제거하고자 하는 패턴이 지문 용선 패턴과 주파수가 비슷한 경우에는 주파수 도메인 상에서도 두 패턴이 비슷한 위치에 자리하고 있을 것이기 때문에 FFT로 분리할 수 없다고 하였다. N. Marsh(2014)는 지문 패턴과 배경 패턴 주파수가 비슷하다면 배경을 지우면서 지문도 같이 지워질 수 있다고 하였다. H. Blitzer 외(2010) 또한 그들이 저술한 책에 이와 같은 맥락의 내용을 담았다. 또한, Shradhdha K. Mahajan와 Priyanka S.Joshi(2015)는 잠재지문의 품질은 지문마다 서로 다르기 때문에 모든 겹치 지문에 적용할 수 있는 단 하나의 분리 알고리즘을 개발하는 것은 비현실적이라고 언급한 바 있다.

이상의 권고 사항들에 의하면 FFT는 증강하고자 하는 패턴과는 확연히 다르고 일정하게 반복되는 신호를 가진 패턴의 배경을 지우는데 사용할 수 있는 기능이라는 사실을 알 수 있다.

Ⅲ. 재료 및 방법

1. 지문 유류 및 촬영

실험에 사용된 지문은 20세 이상 40세 미만의 성인 남녀 18명을 대상으로 사전에 동의를 얻은 뒤 수집하였다. General pattern은 모든 지문 제공자에게서 수집하였고, core영역은 여성 3명과 남성 1명, delta영역은 여성 2명과 남성 1명에게서 수집하였다. 수집된 지문 문형은 제상문 2개, 외상문 1개, 궁상문 1개였다.

지문은 세라믹 잉크패드 (SIRCHIE, USA) 또는 일화용 잉크먹지 (SIRCHIE, USA)를 이용하여 종이에 찍었다. 지문을 1회 유류한 뒤 촬영하고, 그 지문 위에 동일한 사람이 동일한 손가락을 이용하여 원래의 지문과 방향이 다른 지문을 찍어 겹친 지문을 만든 뒤 촬영하였다. 카메라 본체는 Panasonic DMC-GM1 (Japan)을 사용하였고, 렌즈는 Olympus M.Zuiko Digital ED 60mm 1:2.8 Macro (Japan)을 사용하였다.

2. 지문 분리

Adobe Photoshop CS6 (Adobe Systems, San Jose, CA, USA)의 Fast Fourier Transform 필터를 이용하여 겹친 두 지문 중 하나를 분리하였다.

- (1) 겹친 지문 이미지를 Photoshop에서 엮.
- (2) [필터]를 클릭하여 [FFT Wizard UI]를 활성화시킴.
- (3) [Fixel FFT Wizard] 창에서 [Forward FFT]를 클릭하여 이미지에 FFT 필터를 적용.
- (4) 화면 우측 하단의 채널에서 RGB 중 신호를 나타내는 채널을 선택.
- (5) [브러시 도구]를 선택하고 브러시의 색을 검은색으로 설정. 원하는 브러시 크기로 설정.

- (6) 지우고자 하는 신호를 브러시로 지움.
- (7) [필터]를 클릭하여 [FFT Wizard UI]를 활성화시킴.
- (8) [Fixel FFT Wizard] 창에서 [Backward FFT]를 클릭하여 FFT 신호를 지문 이미지로 역변환.

3. 지문 평가

평가를 위해 선정된 평가자는 법과학 교육을 받은 28명이며, 7명의 과학수사 실무자와 21명의 법과학 전공자로 구성하였다. 지문 전문가 커뮤니티인 Scientific Working Group on Friction ridge Analysis, Study and Technology (SWGFAST)는 지문의 질적·양적인 면을 모두 고려하는 총체적 접근방법 (holistic approach)에 근거하여 지문 평가 기준을 제시하였는데, 그 내용을 반영하여 본 연구의 취지에 맞도록 연구자들이 개선한 평가 기준을 사용하였다. 평가자들은 원래의 지문과 FFT로 개선된 지문의 품질을 <표 1>에 제시된 기준에 따라 평가하였다.

SWGFAST는 지문 감정관이 식별, 배제, 유보라는 세 개의 결론을 제시하도록 지침을 두고 있다. 동일한 평가자가 두 지문을 같은 지문이라고 볼 수 있는지 SWGFAST의 기준에 따라 일치 여부를 검사하였다. 자세한 내용은 <표 2>와 같다.

<표 1> 지문 평가 기준

0 점	지문이라고 볼 수 없음
1 점	지문임은 알 수 있지만, 융선(ridge)과 고랑(furrow)을 구별할 수 없음
2 점	융선과 고랑은 구별할 수 있으나 특징점(끝점, 분기점)은 관찰할 수 없음
3 점	특징점(끝점, 분기점)이 잘 보여서 개인 식별을 하기에는 충분하지만, 세부적인 특징(주름, 융선의 세부 형태, 땀구멍 등)은 보이지 않음
4 점	지문의 품질이 개인 식별을 하기에 충분하며, 세부적인 특징(주름, 융선의 세부형태, 땀구멍 등)까지도 잘 보임

<표 2> 지문 일치 여부 판정 기준 (SWGFAST)

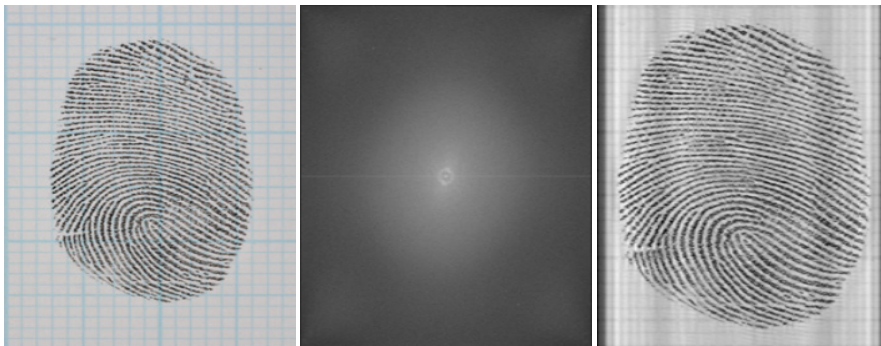
식별	두 지문이 동일한 사람의 동일한 손가락으로부터 유래된 것이며, 다른 사람의 지문과 일치할 가능성이 없음. 공통적인 특징만 있고 차이점이 존재하지 않음
배제	두 지문이 동일한 사람의 동일한 손가락으로부터 유래된 것이 아님
유보	일치 여부를 판단하기가 애매하여 식별과 배제 판정 중 어떤 것도 내릴 수 없음.

평가자들에게 제공된 지문은 앞서 수집한 25개의 지문 중 특정 오류 (다른 지문을 같은 지문이라고 판정하는 오류)용 지문 샘플 4쌍, 배제 오류 (같은 지문을 다른 지문이라고 판정하는 오류)용 지문 샘플 12쌍이었다. 평가자들에게 지문 평가 및 일치 여부 검사 기준에 대한 가이드라인을 제외한 연구 관련 내용은 고지하지 않았다.

IV. 결 과

1. 규칙적인 패턴을 가진 배경에서 지문을 분리한 경우

<그림 3>은 모눈종이에 잉크 지문을 찍고 촬영한 것이다. 이 이미지를 Adobe Photoshop CS 6에서 열고 FFT 필터를 사용하여 공간적 영역에서 주파수 영역으로 변환시킨 것이 <그림 4>에 제시되어 있다. Dalrymple의 연구 결과와 같이 지문에 해당하는 신호는 원형으로 나타난다. 모눈종이 신호는 규칙적인 패턴이므로 가로 실선이 강하게 나타난다. 이 실선을 지운 후 역변환 하여 개선된 지문 이미지는 <그림 5>이다. <그림 3>과 <그림 5>를 비교하면 방해되는 배경 패턴이 제거되었기 때문에 지문 이미지가 잘 보이도록 개선되었다.



<그림 3> 모눈종이 위에 찍은 잉크 지문

<그림 4> 그림 3에 FFT 필터를 적용하여 얻은 주파수 신호

<그림 5> 그림 4에 IFFT 필터를 적용하여 얻은 이미지

2. Core 영역이 겹쳐진 지문을 분리한 경우

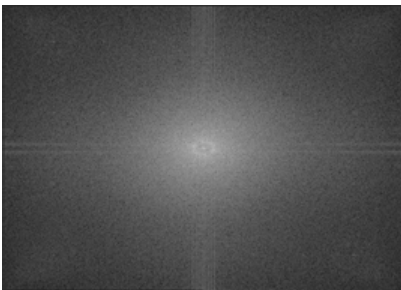
<그림 6>은 와상문 core이며, <그림 7>은 와상문 core끼리 겹친 것이다. <그림 8>은 core가 겹쳐진 용선 이미지를 FFT 필터를 사용하여 주파수 영역으로 변환시킨 것이다. 겹쳐진 core의 방향을 고려하여 하나의 core에 해당하는 것으로 추정되는 신호를 지운 후 역변환하였다. 이렇게 분리된 지문이 <그림 9>이다.



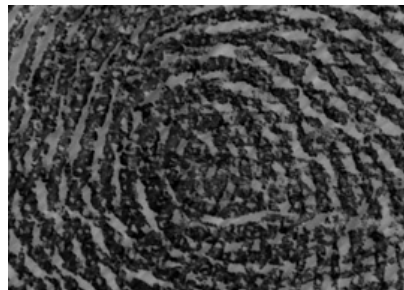
<그림 6> 와상문의 core 영역을 찍은 잉크 지문



<그림 7> 그림 6에 손가락 방향만 다르게 하여 겹쳐 찍은 지문



<그림 8> 그림 7에 FFT 필터를 적용하여 얻은 주파수 신호



<그림 9> 그림 8에 IFFT 필터를 적용하여 얻은 이미지

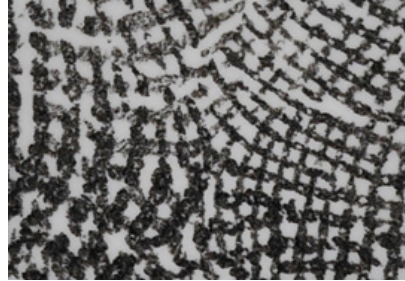
3. Delta가 겹쳐진 지문을 분리한 경우

<그림 10>은 제상문과 와상문에서 관찰되는 delta이며, <그림 11>은 delta끼리 겹친 것이다. <그림 12>는 delta가 겹쳐진 용선 이미지를 FFT 필터를 사용하여 주파수 영역으로 변환시킨 것이다. 겹쳐진 두 delta의 방향을 고려하여 하나의 delta에 해당

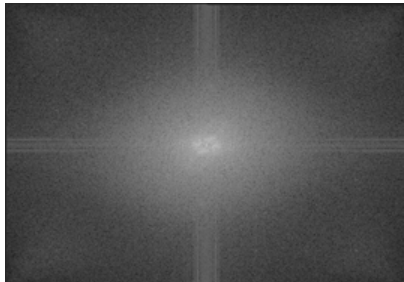
하는 신호를 지운 후 역변환 하였다. 이렇게 분리하여 <그림 13>과 같은 지문을 얻었다.



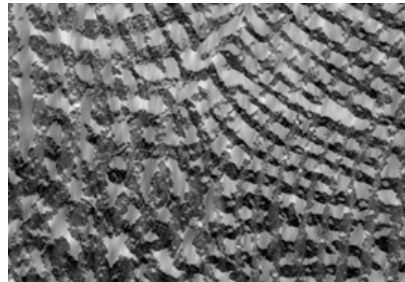
<그림 10> Delta 영역을 찍은 잉크지문



<그림 11> 그림 10에 손가락 방향만 다르게 하여 겹쳐 찍은 지문



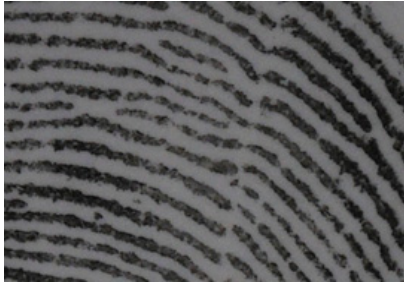
<그림 12> 그림 11에 FFT 필터를 적용하여 얻은 주파수 신호



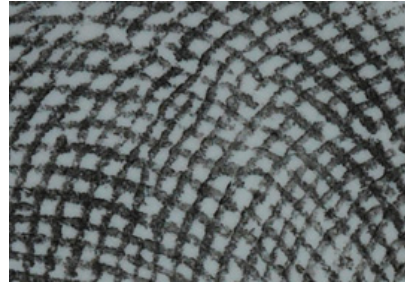
<그림 13> 그림 12에 IFFT 필터를 적용하여 얻은 이미지

4. General pattern이 겹쳐진 지문을 분리한 경우

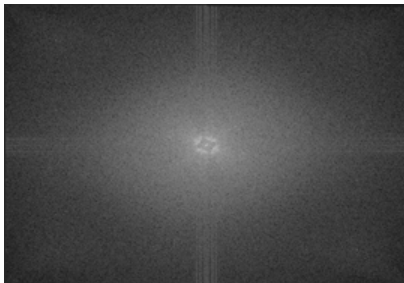
<그림 14>, <그림 18>은 앞서 core와 delta같이 복잡한 패턴이 아닌 단순한 형태의 패턴으로 구성된 general pattern이다. 지문의 중심부에서 손가락 끝부분으로 갈수록 이런 패턴이 관찰된다. <그림 15>, <그림 19>는 general pattern끼리 겹친 것이다. <그림 16>, <그림 20>은 general pattern이 겹쳐진 용선 이미지를 FFT 필터를 사용하여 주파수 영역으로 변환한 것이다. General pattern의 가로, 세로 방향을 고려하여 한 방향의 신호를 지운 후 역변환하였다. 이렇게 분리된 지문이 <그림 17>, <그림 21>이다.



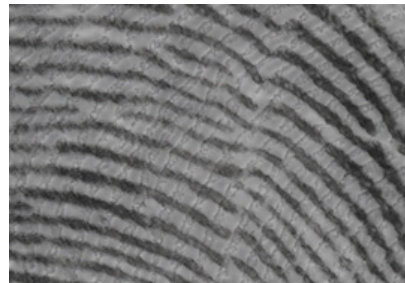
〈그림 14〉 General Pattern을 찍은 잉크지문



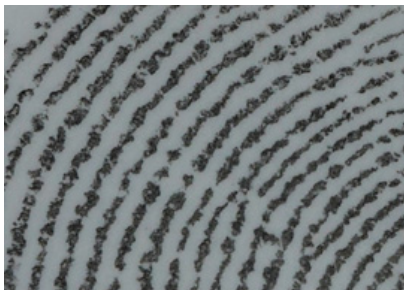
〈그림 15〉 그림 14에 손가락 방향만 다르게 하여 겹쳐 찍은 지문



〈그림 16〉 그림 15에 FFT 필터를 적용하여 얻은 주파수 신호



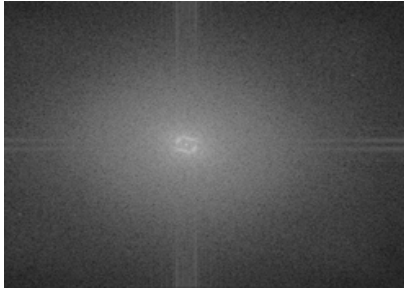
〈그림 17〉 그림 16에 IFFT 필터를 적용하여 얻은 이미지



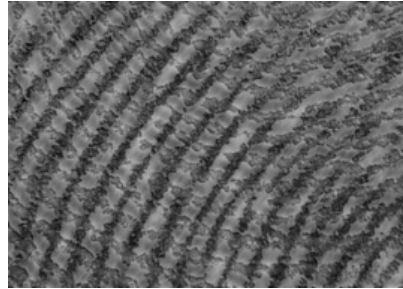
〈그림 18〉 General Pattern을 찍은 잉크지문



〈그림 19〉 그림 17에 손가락의 방향만 다르게 하여 겹쳐 찍은 지문



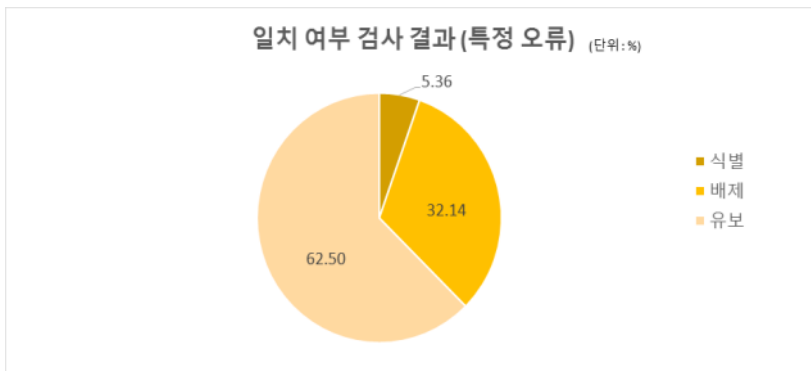
〈그림 20〉 그림 19에 FFT 필터를 적용하여 얻은 주파수 신호



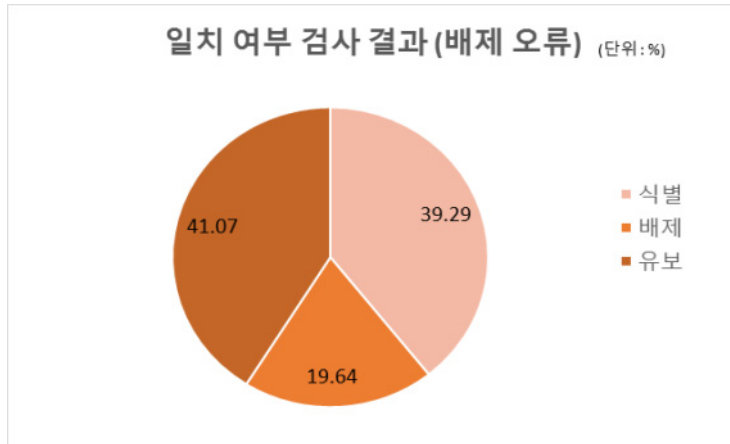
〈그림 21〉 그림 20에 IFFT 필터를 적용하여 얻은 이미지

5. FFT로 분리된 지문의 일치 여부 검사 결과

수집한 25개의 겹친지문을 FFT로 분리하여 얻어낸 지문 이미지를 특정 오류 (다른 지문을 같은 지문이라고 판정하는 오류)용 지문 샘플 4쌍, 배제 오류 (같은 지문을 다른 지문이라고 판정하는 오류)용 지문 샘플 12쌍으로 분류하였다. 연구자가 제시한 지문 일치 여부 검사 기준에 따라 평가자들이 검사한 결과는 <그림 22>, <그림 23>과 같다.



〈그림 22〉 평가자들의 검사 결과에서 나타난 특정 오류 비율



<그림 23> 평가자들의 검사 결과에서 나타난 배제 오류 비율

6. FFT로 분리된 지문 평가 결과

<표 1>의 기준에 따른 지문 평가 결과는 <표 3>과 같다. 각 지문의 평가 점수를 분석한 결과, 원본지문을 평가한 점수의 평균보다 FFT로 분리하여 얻은 지문을 평가한 점수의 평균이 현저히 낮았다. 평균값의 차이가 가장 큰 지문은 3번 지문으로 2.86점 차이를 보였으며, 평균값의 차이가 가장 작은 지문은 4번 지문으로 0.14점 차이를 보였다. 단 두 개의 지문을 제외하고는 원본지문을 평가한 점수의 표준편차보다는 FFT로 분리하여 얻은 지문을 평가한 점수의 표준편차가 더 높았다.

<표 3> 지문 평가 점수의 평균과 표준편차

종류	번호	원래의 지문		FFT로 분리하여 얻은 지문	
		평균	표준편차	평균	표준편차
core	2	3.86	0.44	1.68	0.85
	4	3.89	0.31	3.75	0.57
	7	3.96	0.19	2.00	1.04
delta	3	4.00	0.00	1.14	0.95
	11	3.36	1.01	1.25	0.91
	13	3.57	0.73	1.79	1.15

종류	번호	원래의 지문		FFT로 분리하여 얻은 지문	
		평균	표준편차	평균	표준편차
general pattern	1	3.57	0.62	1.64	0.97
	5	3.61	0.62	2.36	0.89
	6	3.29	0.75	2.71	0.84
	8	2.36	1.17	1.00	0.80
	9	3.21	0.77	1.00	0.80
	10	3.50	0.63	1.25	0.91
	12	3.39	0.77	1.89	1.11
	14	3.29	0.80	1.21	1.05
	15	3.46	0.78	1.07	0.92
	16	3.82	0.54	1.61	1.05

V. 고찰

1990년 미국에서 FFT를 사용하여 개선된 지문 이미지가 증거능력을 인정받은 이후 FFT는 기본적인 법과학 이미지 증강 방법의 하나로 자리 잡았다. 본 연구에서는 겹치진문 안에서 하나의 지문을 하나의 패턴으로 간주하고 FFT로 이를 분리할 수 있는지 알아보려고 하였다.

먼저 규칙적인 패턴을 가진 배경에 잉크지문을 찍고 FFT로 배경 패턴을 지워보았다. 그 결과 용선 식별에 방해가 되는 배경 패턴은 지워지고 지문 용선이 개선되었다. 또한 단순한 형태의 패턴으로 구성된 general pattern끼리 겹쳐진 지문에서도 지문이 잘 분리되었다. 하지만 core나 delta와 같이 복잡한 패턴끼리 겹쳐진 지문의 경우 주파수 신호도 복잡하기 때문에 정확하게 분리되지 않았다. 이는 앞서 살펴본 선행연구자들의 연구 결과와도 일치한다. 모든 법과학 증거가 비교·대조의 대상이라는 관점에서 FFT로 분리된 지문은 얼마든지 그 대상이 될 수 있다는 점을 고려하여 본 연구자들은 평가자들로 하여금 분리된 지문 시료를 원본지문과 함께 평가하게 하였다.

기존 연구들에서는 지문 품질에 관한 논의 없이 단순히 FFT로 지문을 배경과 분리하고 역변환한 결과물만 제시하였으며, 원본 지문 시료와 FFT로 분리한 겹치진문

시료를 비교하고 평가하지 않았다는 한계를 가지고 있어 본 연구는 비슷한 맥락의 연구들과는 차별성을 갖는다.

FFT의 원리상 깨끗하게 분리되지 않았다면 지문 원본 이미지와는 다르게 나타날 것이기 때문에 특정오류 (다른 지문을 같은 지문이라고 판정하는 오류)가 일어날 가능성은 매우 낮고 배제 오류 (같은 지문을 다른 지문이라고 판정하는 오류)는 상대적으로 빈번하게 일어날 것이다. 그러나 특정오류 발생의 위험성이 낮다는 사실이 FFT를 사용해서 겹친지문을 분리하는 것의 근거가 되는 것은 아니다. 그 오류가 특정 오류든 배제 오류든 지문을 통한 신원확인에서는 허용되는 오류가 아니기 때문이다.

연구자들은 평가자들이 분리된 지문의 일치 여부를 검사할 때 오류를 얼마나 저지르는지 알아보기 위하여 특정 오류 검사용 지문샘플 4쌍, 배제오류 검사용 지문샘플 12쌍을 시험자들에게 제공하였다. <그림 22>, <그림 23>에 제시된 것처럼 결과적으로 같은 지문을 다르다고 판정한 배제오류는 61% 발생하였고, 다른 지문을 같다고 판정한 특정오류도 5%나 발생하였다. 제시된 지문 샘플들이 잘 분리가 되었다면 서로 같은 지문 쌍에서는 식별의 빈도가 높아야 하고 서로 다른 지문 쌍에서는 배제의 빈도가 높아야 한다. 매우 일정한 융선 흐름을 보이는 지문 쌍들을 제외한 모든 지문에 대해서 평가자들은 유보 (결정할 수 없다는 의미) 판정을 하였다. 이는 FFT를 사용하여 분리된 지문들이 식별 가능한 상태로 온전하게 분리되지 않는다는 것을 의미한다. 분리 전과 분리 후의 지문의 품질을 평가한 점수는 <표 3>에 나타나 있는데 원본지문보다 FFT로 분리하여 얻은 지문의 점수가 더 낮은 것으로 보아 FFT로 분리하여 얻은 지문의 품질이 떨어졌음을 알 수 있다.

평가자의 자신감에는 보통 개인의 경험, 교육, 지식 등이 영향을 미치며, 특히 지문 감정의 경우 지문의 품질 또한 큰 영향을 미친다. 지문의 품질이 낮을수록 평가자의 자신감은 떨어지며, 품질이 떨어지는 지문을 평가할 때 평가자의 신뢰수준은 평소보다 낮아진다(Haber & Haber, 2009). 따라서 지문의 품질이 떨어질수록 잘못된 결정을 하거나 유보결정을 할 가능성이 높아진다(Haber & Haber, 2009). FFT로 지문을 분리하여 얻은 낮은 품질의 지문을 감정한다면 결국 잘못된 판단을 내릴 가능성이 높아지게 되는 것이다.

중대한 사건일수록 편향의 영향을 받기 쉽다. 이는 절대적인 증거로 믿어져 왔던 지문에도 오류가 발생할 수 있다는 교훈을 준 브랜든 메이필드 사건을 통해서 쉽게 확인할 수 있다²⁾. 'One Discrepancy Doctrine'³⁾에 따라 공개졌거나 먼지 얼룩 등으로

인해 하나라도 설명하거나 해명할 수 없는 두 지문 사이의 차이점이 있으면 일치 가능성을 배제(Scientific Working Group on Friction Ridge Analysis Study and Technology, n.d.)해야 하지만, 부담감을 느끼거나 편향에 사로잡힌 감정관이 이 원칙을 따르는 것은 상당히 어려운 일이다. 지문 검사자의 편향은 법정에서 중대한 영향을 끼칠 수 있다. 법정에서 이들의 진술은 전문가 증인이라는 이유로 높은 신뢰를 받기 때문에 전문가 증인의 오류는 매우 치명적이다.

때로는 지문 감정관이 지문의 낮은 품질을 이유로 ‘판정 유보’라는 결정을 내릴 수도 있다. ‘판정 유보’란 두 지문 사이에 상이한 점이 발견되지 않았지만 지문의 일치 여부도 확인할 수 없다는 결과를 의미한다. 따라서 지문의 품질이 낮을수록 감정관이 판단을 유보하는 비율은 높아진다. 이는 <표 3>에서도 확인할 수 있다. ‘판단 유보’는 설블리 잘못된 판단을 하지 않는다는 측면에서는 상당히 보수적인 결정이라고 할 수 있다. 하지만 또 다른 측면에서는 ‘유보’ 판정을 내리는 것도 오류에 해당할 수 있다. 즉, 판정자의 잦은 유보 판정에도 문제의 여지가 있는 것이다. 낮은 품질의 지문은 이러한 딜레마를 발생시킬 수 있다.

본 연구 결과는 FFT를 통한 겹친지문의 분리가 경우에 따라서 심각한 오류를 초래할 수 있다는 사실을 보여주고 있다. 앞에서 살펴본 바와 같이 지문의 품질이 저하되는 것은 경우에 따라 매우 위험할 수 있다. 따라서 FFT는 겹친지문처럼 동일한 신호를 갖고 있거나 지문과 유사한 신호를 가진 배경면을 제거하는 목적으로는 사용할 수 없으며 매우 일정하고 반복되는 배경 패턴의 제거를 위해서만 제한적으로 사용되어야 한다. 이는 서론부에서 언급한 범사진 전문가들의 권고사항과도 일치한 것이며 본 논문은 이를 실험데이터 분석을 통해 보였다.

결론으로, 겹친지문 분리를 위한 FFT 사용에 대한 가이드라인을 제시하고자 한다.

2) Brandon Mayfield 사건은 편향에 의해 ‘One Discrepancy Doctrine’ 을 따르지 못하고 오류가 발생한 사건 중 하나이다. 이 사건에서는 많은 사상자가 발생하였기 때문에 전 세계의 이목이 집중되었다. 또한, 현장에서 현출한 지문은 고온에 노출된 비닐봉지에서 나온 것이기 때문에 품질이 매우 좋지 않았다. 감정 결과, FBI는 이 지문과 Brandon Mayfield의 지문이 일치한다는 결과를 발표하였다. 그러나 현장의 지문은 Brandon Mayfield의 것이 아닌 Ouhmane Daoud의 지문으로 밝혀졌다. 이후 FBI는 지문 감정 결과를 반복하고 사과 서명을 발표하였다. 그러나 사건 이후 해당 감정관이 다시 똑같은 지문을 감정했을 때에는 사건 당시와는 다른 감정 결과가 나왔다. 이를 통해 중대한 사건에 대한 부담으로 인해 편향이 발생할 수 있고, 이로 인해 평소보다 넓어진 지문 감정관의 허용 오차 (tolerance), 품질이 낮은 지문을 감정할 때 형성되는 낮은 신뢰수준에 의해 지문 감정에서 중대한 오류가 발생할 가능성이 있다고 유추할 수 있다.

3) 지문에서 단 하나의 차이점이라도 발견된다면 동일한 것으로 판정할 수 없다는 원칙

일정하게 반복되는 패턴을 가진 배경 면에 지문이 유류되어 있을 경우 그 패턴이 주파수 영역에서 지문과는 확연히 구별되는 신호를 가지기 때문에 FFT로 반복되는 패턴을 지우는 것이 가능하다. 그러한 점에서 general pattern처럼 단순한 패턴끼리 겹쳐졌을 경우에는 FFT로 분리하는 것을 시도해볼 수 있다. 하지만 겹쳐진 지문이 Level 2와 Level 3에 해당하는 용선 세부형태가 많고 core나 delta와 같이 그 자체가 복잡한 패턴일 경우 주파수 영역에서 겹쳐진 부분의 신호를 잡아내기 매우 어렵다는 점에서 FFT를 통한 분리는 주의를 요한다.

지문 외에도 이미지증강은 다양한 영역에서 활용되고 있으므로 본 연구의 시사점은 다른 영역에서의 이미지증강 기술이 법적 증거능력의 문제로 이어지는 경우의 논의에 유용하게 참조될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 국내문헌

- 신이철 (2012). 형사증거법상 사진의 증거능력 제한. *일반법감*, 22, 298-329.
- 조형우 (2016). 법사진의 증거가치 향상을 위한 디지털 처리과정에서의 진정성 및 무결성 확보에 관한 연구. 순천향대학교 법과학대학원 석사학위논문.

2. 국외문헌

- Blitzer, H. L., Stein-Ferguson, K., & Huang, J. (2010). *Understanding forensic digital imaging*. Academic Press.
- Dalrymple, B. (2018). Fast fourier transform: A Niche, but critical strategy in optimizing impression evidence. *Journal of Forensic Science and Medicine*, 4(4), 192.
- Dalrymple, B., & Menzies, T. (1994). Computer enhancement of evidence through background noise suppression. *Journal of Forensic Science*, 39(2), 537-546.
- Dalrymple, B., & Smith, J. (2018). *Forensics Digital Image Processing, 1st Ed*. CRC Press.
- Fish, J., Miller, L., Braswell, M., & Wallace, E. (2014). *Crime Scene Investigation, 3rd Ed*. Elsevier.
- Haber, L., & Haber, R. (2009). *Challenges to fingerprints*. Lawyers & Judges Publishing Company, Inc.
- Kaymaz, E., & Mitra, S. (1993). A novel approach to Fourier spectral enhancement of laser-luminescent fingerprint images. *Journal of Forensic Science*, 38(3), 530-541.
- Marsh, N. (2014). *Forensic Photography: A Practitioner's Guide*. John Wiley & Sons.
- Olsen, R. D. (1978). *Scott's Fingerprint Mechanics*. Charles C Thomas Pub.
- Ramotowski, R. (2013). *Lee and Gaensslen's Advances in Fingerprint Technology, 3rd Ed*. CRC Press.
- Robinson, E. M. (2016). *Crime scene photography*. Academic Press.
- Shraddha, K. M., & Priyanka, S. J. (2015). Separation of Overlapped Fingerprints for Forensic Applications. *International Journal of Engineering and Technology*, 2(9), 1741-1743.

3. 기타

- Scientific Working Group on Friction Ridge Analysis Study and Technology, Standards for Examining Friction Ridge Impressions and Resulting Conclusions (Latent/Tenprint), available at www.swgfast.org, 검색일 2019.08.20.

Scientific Working Group on Imaging Technology, Overview of SWGIT and the Use of Imaging Technology in the Criminal Justice System, available at www.swgit.org, 검색일 2019.04.20.
State v. Hayden, <http://caselaw.findlaw.com/wa-court-of-appeals/1189825.html>, 검색일 2019.06.11.
The Forensics Library, <http://aboutforensics.co.uk/robert-knight/>, 검색일 2019.06.11.

【Abstract】

Effects and Limitations of Separating Overlapped Fingerprints Using Fast Fourier Transform

Kim, Chaewon · Kim, Chaelin · Lee, Hanna · Yu, Jeseol · Jang, Yunsik

Photography is the most commonly used method of documenting the crime and incident scene as it helps maintaining chain of custody (COC) and prove integrity of the physical evidence. It can also capture phenomena as they are. However, digital images can be manipulated and lose their authenticity as admissible evidence. Thus only limited techniques can be used to enhance images, and one of them is Fourier transform. Fourier transform refers to transformation of images into frequency signals. Fast Fourier transform (FFT) is used in this study.

In this experiment, we overlapped fingerprints with graph paper or other fingerprints and separated the fingerprints. Then we evaluated and compared quality of the separated fingerprints to the original fingerprints, and examined whether the two fingerprints can be identified as same fingerprints. In the case of the fingerprints on graph paper and general pattern-overlapping fingerprints, fingerprint ridges are enhanced. On the other hand, in case of separating complicated fingerprints such as core-to-core overlapping and delta-to-delta overlapping fingerprints, quality of fingerprints can be deteriorated. Quality of fingerprints is known to possibly bring negative effects on the credibility of examiners.

The result of this study may be applicable to other areas using digital imaging enhancement technology.

Keywords: Fast Fourier transform, Overlapped fingerprint, Separation of fingerprint, Fingerprint identification, Imaging enhancement