

광간섭 단층촬영법을 이용한 우량 참외 종자 실시간 감별 시스템 개발

한승훈¹ · 이창호¹ · 이승열² · 정희영² · 김지현^{1,+}

Development of Real-time Screening System for Superior Melon Seeds Using Optical Coherence Tomography

Seunghoon Han¹, Changho Lee¹, Seung-Yeol Lee², Hee-Young Jung², and Jeehyun Kim^{1,+}

Abstract

We developed a real-time screening system using optical coherence tomography (OCT) to distinguish the fruitful melon seeds efficiently. Cross-section images of melon seeds infected with *Cucumber green mottle mosaic virus* (CGMMV) showed an additional layer that did not appear in normal seeds. Additional layer appeared under 100~300 μm from the surface of the seed. OCT can visualize the micro-structural and morphological changes of the internal seed structure. Real-time OCT seed screening system provided the real-time, non-destructive, cross-section image and quantitative information such as A-scan analysis of selected region in the cross-section image. We can distinguish the viral infection seeds while monitoring the averaged A-scan analysis graph in real-time by considering the second peak value of the graph which refers to the layer that occurred owing to the virus. Real-time OCT seed screening system could assist to distinguish the disease caused by CGMMV.

Keywords : OCT (Optical Coherence Tomography), Real-time A-scan analysis, Plant imaging

1. 서론

오이녹반모자이크바이러스(*Cucumber Green Mottle Mosaic Virus*, CGMMV)[1]는 유럽(Ainsworth, 1935)에서 처음 보고되었고[2], 국내에서는 1989년 진주, 함안 지역의 수박에서 처음으로 보고된 이래 현재까지 농가에 많은 경제적인 손실을 초래하는 대표적인 식물바이러스이다. CGMMV가 감염된 수박 종자와 대목용 박종자는 발아하지 않는 것이 대부분이며, 발아를 하더라도 과실은 상품성이 떨어지므로 농가에 경제적인 피해를 입힌다[3]. CGMMV에 감염된 종자를 검출하는 방법으로는 생물학적 기법, 혈청학적 기법, Reverse Transcription-Polymerase Chain Reaction(RT-PCR)

에 의한 분자생물학적 기법이 많이 사용되고 있다. 하지만 이러한 진단법은 대상 종자를 파괴하여야 하며, 진단에 많은 시간이 소요되고 대량의 종자에 대한 진단이 불가능하다는 단점이 있다. 특히 RT-PCR을 이용한 진단법의 경우, 감염여부를 검정하기까지 많은 시간이 소요되며, 진단에 사용된 종자는 파괴되어 재사용이 어렵다는 문제점을 가지고 있다[4-11].

광간섭 단층촬영법(Optical Coherence Tomography, OCT)은 근적외선 파장대의 광원 간섭원리를 이용하여 대상체를 파괴하지 않고 마이크로 단위의 고해상도 단면 영상을 얻을 수 있는 기술이다. OCT는 샘플의 깊이에 따라 역산란(backscattering)되는 빛의 크기를 얻어서 단층 이미지화시키는 광상관 간섭계(Optical Coherence Domain Reflectometry, OCDR)를 응용한 것으로, 1991년 MIT의 Fujimoto 연구그룹에 의해 처음 보고되었다[12]. OCT는 실시간으로 피측정물을 비절개 상태에서 단면 영상을 얻을 수 있고 장비의 크기가 작아 비교적 이동성이 좋으며 저가여서 현재 표면 검사, 치아 측정, 망막과 시신경 검사 등 의료 및 다양한 산업 영역에서 응용되고 있다. 또한, 최근에 식물 내부의 형태학적인 변화 측정의 연구가 진행 중이다.

본 연구에서는 우량 종자와 바이러스 감염 종자 내부의 형태학적 차이를 비교하기 위해 OCT를 사용하였다. 앞서 OCT를 이용하여

¹경북대학교 전자공학대학원(Graduate School of Electrical Engineering, Kyungpook National University)

Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

²경북대학교 농업생명과학대학(College of Agriculture and Life Sciences, Kyungpook National University)

Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

⁺Corresponding author: jeehk@knu.ac.kr

(Received : May. 15, 2013, Accepted : Jul. 9, 2013)

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.

연구 발표된 결과들의 경우, 식물 내부의 구조를 측정하기 위해 식물의 임의의 영역을 선택하여 OCT로 단층정보 데이터를 저장하고, 저장된 데이터만을 이용하여 형태학적 변화 여부를 판별하기 위한 분석 과정이 따로 진행되었다[13-15]. 이런 과정들은 수십 분의 시간이 소요되며 대량의 종자를 감별하기에 어려움 점이 있다. 이를 개선하여, 본 연구에서는 2차원 단층 이미지를 획득하는 OCT 시스템에 깊이별 간섭신호(A-scan) 분석 알고리즘을 추가하였다. A-scan 분석 알고리즘을 통하여 참의 종자의 내부 깊이별 층계 존재 여부 및 위치를 그래프화하였다. 이를 통해, 종자의 2차원 단층 이미지와 A-scan 분석 그래프를 실시간으로 출력하여 우량종자 감별 시간을 단축하고 편의성을 높였다. 본 시스템을 사용하여 종자의 껍질로부터 400 μm 까지 깊이 정보를 획득하였으며, 실시간으로 종자 내부의 형태학적 변화를 분석하여 우량 참의 종자를 감별할 수 있었다. 따라서 본 연구는 기존의 바이러스감염 감별기법들의 문제점을 개선하여, 종자의 깊이별 단층 산란정보를 이용하는 기법을 통해 감별에 사용된 종자를 재사용할 수 있으며 우량종자를 감별하는데 걸리는 시간을 줄임으로써 대량의 종자 감별에 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 광간섭 단층촬영법(OCT)

본 연구에서 Time Domain-Optical Coherence Tomography (TD-OCT)를 사용하였다.

최근에는 Spectral Domain OCT(SD-OCT) 등과 같은 빠른 속도의 시스템이 많이 이용되지만, 농업용으로 현장에서 사용하기에는 TD-OCT와 같이 비교적 외부 충격에 둔감한 시스템이 장점을 가지고 있다. 시스템의 구성도는 Fig. 1과 같고, OCT 시스템의 기본구성으로는 광원부, 간섭계부, 지연선로, 스캐너부 및 신호 처리부로 나눌 수 있다.

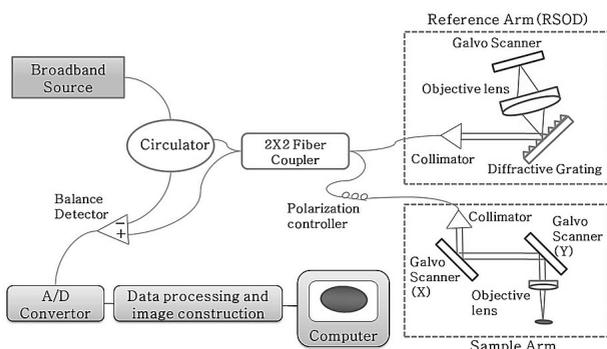


Fig. 1. Schematic of TD-OCT.

광대역 SLED(Super Luminescent Emitting Diode) 광원에서 출력된, 중심 파장이 1310 nm이고 150 nm의 반폭폭(FWHM)을 가지는 빛이 50:50 광커플러(fiber coupler)를 통과하게 되면 한쪽은 기준단으로 다른 한쪽은 샘플단으로 나뉘어 진행하게 된다. 기준단은 시간 도면상의 빠른 이미지 스캐닝을 위하여 RSOD(Rapidly Scanning Optical Delayline)을 사용하였다[16-19]. 샘플단은 2차원 이미지를 위한 B-scan과 3차원 이미지를 위한 C-scan을 하기 위해 2 개의 갈보 스캐너(galvo scanner)를 사용하였으며, 18 mm 초점거리를 가지는 대물렌즈(NA=0.037, Thorlabs)를 사용하였다. 기준단으로 분리된 빛은 기준단에 들어갔다 거울에 반사되어 다시 나오게 되며, 샘플단으로 간 빛은 샘플로 입사된 뒤 다시 반사되거나 역산란 되어 나온다. 이렇게 각각 반사되어 나온 빛들은 광커플러를 통하여 다시 만나게 되는데, 이때 기준단과 샘플의 광경로가 같아지거나 가깝게 거리 안에 있게 되면 간섭현상이 발생한다. 이렇게 발생한 광신호는 광검출기(photo detector)로 입력되어 데이터화된다. 광검출기는 신호대잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR)를 높이기 위해 균형 광검출기(balanced photo detector, Thorlabs)를 사용하였다[20-24].

광검출기를 통해서 들어오는 간섭신호는 스캐너의 스캔 각도별 빛의 입사 지점에 대한 깊이별 간섭신호의 정보이다. 본 실험에서는 약 2 mm의 스캔 범위를 400 개로 나눈 일정한 각격 위치의 깊이별 간섭 신호를 획득하여 고해상도의 2차원 단층 이미지를 획득하였다.

본 시스템의 이론상으로 계산된 깊이 방향 해상도는 4.5 μm 의 고해상도를 가지고 있으며, 횡 방향 해상도는 13.0 μm 이다. 실제 측정된 깊이 방향 해상도는 약 6.7 μm 이며 횡 방향 해상도는 약 17.3 μm 이다. 1.0 frame의 종자 OCT 단층이미지를 획득하는데 0.7 초의 시간이 소요되며, 동시에 A-scan 분석 프로그램이 동작할 수 있게 개발하였다.

2.2 OCT 이미지 생성 및 깊이별 간섭신호 분석

OCT 시스템의 간섭계는 샘플단과 기준단으로 이뤄지는 데, 샘플단에서 측정하고자 하는 샘플의 한 지점에 근적외선 파장대의 빛을 비춰 획득한 간섭 신호는 깊이별 광 단층 산란의 세기를 나타내며, 이는 샘플 한 지점의 깊이 별 층계의 정보를 보여준다. 이를 A-scan이라고 하고, 지정된 거리만큼 횡 방향으로 스캔하며 이동하여 얻은 간섭신호의 데이터들을 2차원 배열화시켜 이미지화시키면 샘플의 깊이별 단층 이미지가 획득된다.

OCT의 간섭계부에서 광검출기로 들어온 간섭신호는 전압으로 바뀌어서 컴퓨터와 연결된 DAQ보드(PCI 6115, National Instrument)로 들어가게 된다. 이 전압신호를 LabVIEW(ver.2010, National Instrument) 언어를 이용하여 대역통과여과기(band-pass-filter)에 통과시켜 DC성분을 걸러내고 포락검출(envelop-detection)을 한 후 디지털 신호로 변환하여 원데이터(raw data)로 얻었다. 측정

시 샘플률은 10,000,000 Hz이고 A-scan 수는 400 개이며 한 스캔 당 픽셀 수는 15,000 개이다. 이 원데이터는 광간섭 신호의 세기를 픽셀별 수치화한 것이며, 15,000*400 배열의 형태이다. 이 데이터 파일과 LabVIEW의 강도 그래프를 이용하여 2차원 OCT 이미지를 얻을 수 있다.

Fig. 2는 실시간 A-scan 분석 시스템의 순서도이다. 출력된 OCT 2차원 이미지에 두 개의 커서(cursor 1, cursor 2)를 이용하여 원하는 부분을 지정하면, Fig. 2의 A-scan 범위 지정 부분과 같이 두 커서 사이의 데이터에 대해 A-scan 분석이 시작된다. 즉, 횡 방향으로 B-scan하여 얻은 종자의 빛 간섭 세기 데이터를 OCT 이미지로 얻은 후 종자 내부의 정량적인 분석을 위해 분석이 필요한 부분을 OCT 2차원 이미지에 지정해 주는 것이다. 범위를 지정해 주는 이유는 종자 표면 한 부분의 스캔된 데이터 값으로 종자 내부를 분석하는 것은 신뢰성이 떨어져, 지정된 범위 안의 여러 A-scan 데이터 값들을 평균하여 분석데이터의 신뢰성을 높이기 위함이다. 획득된 범위 내의 평균적인 패턴을 획득하기 위해서, 샘플 종자의 층 모양이 동일하지 않음을 고려하여 각각의 A-scan 별 데이터 값들 중 최대값의 인덱스(P(i))를 중심으로 하고, 지정된 범위(n) 안의 데이터 배열로 재배치 한다. 재배열된 데이터의 X축 데이터 값들을 평균하여 하나의 A-scan 그래프를 획득하였다.

위와 같은 과정들을 차례대로 거침으로써 OCT 이미지를 얻음과

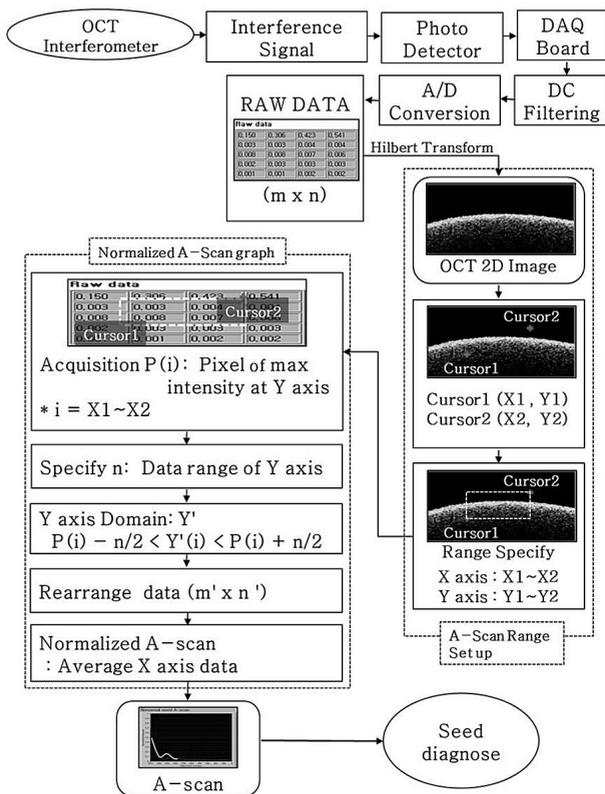


Fig. 2. Flow chart of real time A-scan analysis system.

동시에 이미지상의 분석하고자 하는 범위를 지정하고 피측정 종자의 평균화된 A-scan 그래프를 실시간으로 출력할 수 있다. 2차원 OCT 이미지와 A-scan 그래프는 jpg와 bmp 형식의 파일로 저장하고, 각각의 원 데이터는 txt 형식의 파일로 저장할 수 있도록 개발되었다.

2.3 Materials

본 실험에 사용된 건전 참외 종자와 CGMMV감염 참외 종자는 연구실에서 보관중인 종자를 사용하였으며, 이는 RT-PCR로 감염여부가 검증된 종자이다.

A-scan 분석을 통해 선별된 참외 종자는 total RNA 추출 후 RT-PCR로 CGMMV감염 여부를 재검정하였다. total RNA는 1개의 종자를 대상으로 tri reagent를 이용하여 추출하였으며, 방법은 제조사의 실험방법에 따라 수행되었다. RT-PCR은 RT/PCR premix kit(Bioneer, Korea)로 수행하였으며, 종자의 total RNA와 CGMM-C60/CGMM-N30 primer를 각각 0.5 μl (10 pM/ μl)씩 넣고 RNase free water로 total volume을 20 μl로 조정하였다. RT-PCR 조건은 42°C에서 60분간 cDNA를 합성하고, 94°C에서 5분간 처리하였다. cDNA의 증폭 반응은 94°C에서 45초, 55°C에서 1분, 72°C에서 1분 30초로 35회 증폭시켰으며, 추가로 72°C에서 5분간 반응하였다. 반응을 마친 산물은 1% agarose gel에서 전기영동 후 ethidium bromide를 이용하여 염색하고 UV light에서 검출 유무를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 우량종자 감별 시스템의 사용자 인터페이스

Fig. 3은 우량종자 감별을 위해 개발된 사용자 인터페이스이다. Fig. 3의 ①영역은 TD-OCT 및 A-scan 작동을 위한 시스템 초기 설정 부분으로, 갈보 스캐너의 스캔 길이, RSOD 속도와 크기, 샘플링 속도 및 평균화된 A-scan을 위한 설정 값들을 입력한다. 그리고 OCT 이미지와 A-scan 그래프의 저장여부를 지정할 수 있다. 특히 평균화된 A-scan 그래프를 얻기 위해 각 지정된 데이터 값 중 최대값의 인덱스에서 +y, -y를 직접 입력하여 원하는 크기만큼의 A-scan 데이터를 평균할 수 있다. Fig. 3의 ②영역은 OCT 2차원 단면이미지이며, 이미지상의 실제 범위 지정을 위한 커서 사용을 볼 수 있다. Fig. 3의 ③은 추가적인 데이터 설정영역으로, OCT 이미지와 A-scan 그래프의 저장경로를 지정할 수 있다. Fig. 3의 ④영역의 위쪽 그래프는 시간별 광간섭 신호의 원신호를 나타내며, 아래 그래프는 원신호의 힐버트 변환(Hilbert transform) 신호처리 이후의 데이터를 보여준다. 최종적인 평균화된 A-scan 그래프는 Fig.

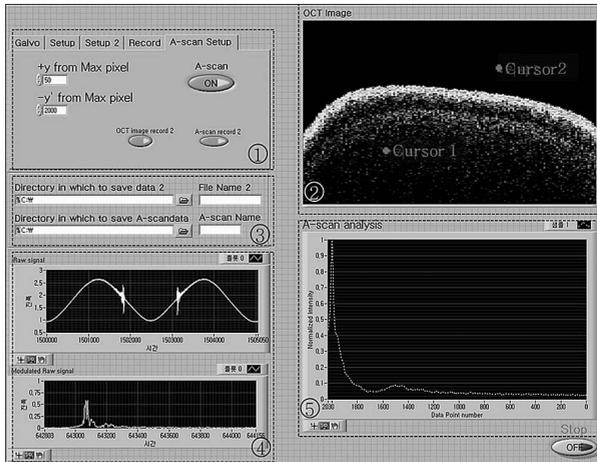


Fig. 3. Interface of real time screening system for superior melon seeds. ① Set-up part of system, ② OCT 2 dimension image, ③ Data store set part, ④ Raw data graph, and ⑤ A-scan analysis graph.

3의 ⑤와 같다. 이때 A-scan 그래프의 X축은 종자의 깊이를 나타내며 Y축은 정형화된 광간섭 신호세기(0~1, dB)를 나타낸다.

3.2 OCT 단층이미지

Fig. 4는 우량종자와 불량 종자의 OCT 2 차원 단면이미지이다. OCT 이미지는 깊이 400 μm , 횡 방향 2 mm로 스캔한 것을 보여주고, 이미지를 얻기 위해 약 0.7 초가 소요됐다.

OCT 이미지 상에서 과피(seed coat), 호분(aleurone) 및 배유(endosperm) 영역을 구별할 수 있으며, 바이러스에 감염된 종자는 겉질로부터 100~300 μm 아래의 내부 변화를 확인하였다. 이는 바이러스에 감염된 종자 내부의 형태학적 변형을 보인다. OCT 이미지를 이용하여 우량종자를 감별하는 것은 주관적이며 그 한계가 있어 A-scan 그래프를 비교 분석하여 수치적 차이로 객관적인 참의 우량종자 감별을 수행하였다.

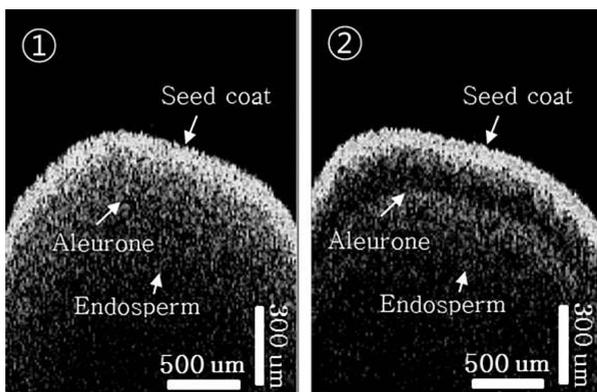


Fig. 4. OCT 2D Image comparison of normal and abnormal superior melon seed. ① Normal seed and ② Abnormal seed.

3.3 A-scan 분석

Fig. 5는 우량종자와 바이러스 감염종자를 비교한 A-scan 분석 그래프이다. OCT 이미지상에서 바이러스 감염 종자는 우량종자와는 다르게 과피 아랫부분에 층이 하나 더 존재함을 이용하여 A-scan을 통해 종자 속 깊이별 광 간섭신호 세기를 그래프화 하였다. 본 시스템을 이용한 A-scan 분석결과, 바이러스 감염종자의 스캔 분석그래프 상에 2 개의 피크 값을 찾을 수 있다. 이것은 불량 참외 종자의 경우, 과피에서 큰 간섭 신호가 발생하고 일정 거리 떨어진 종자 속에 두 번째 층과 같은 형태의 부분이 있어 두 번째 피크의 간섭 신호가 발생한 것을 알 수 있다. 첫 번째 피크와 두 번째 피크 사이는 약 100~300 μm 이며, 평균화된 A-scan 이미지를 얻기 위해 OCT 2 차원 이미지를 얻은 이후 0.3 초가 소요된다. 본 시스템을 이용하여 실시간으로 종자 내부의 깊이별 형태 변화를 그래프로 파악할 수 있다.

Table 1은 참외 우량종자 감별시스템의 구체적인 구간별 작동시간이다. 작동시간 값은, 시스템의 진행속도를 프로그램상에서 측정 한 것이다.

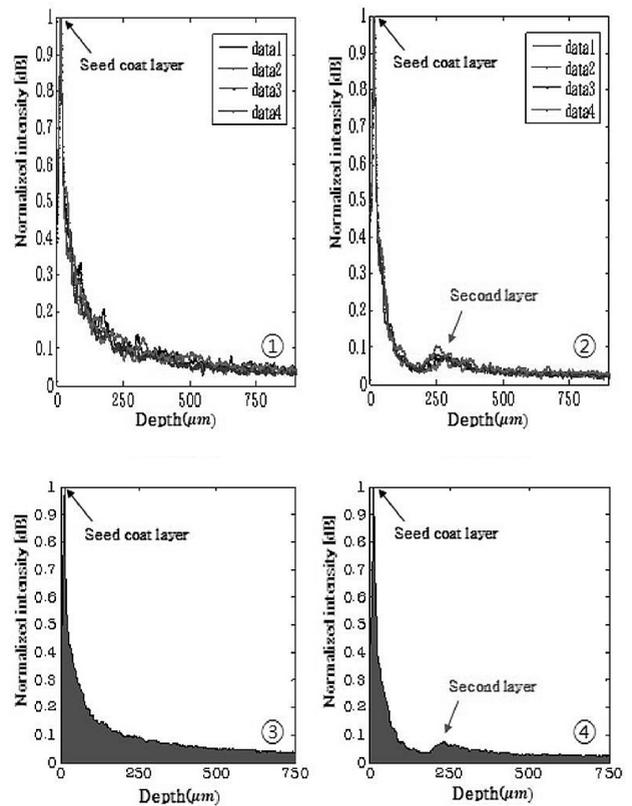


Fig. 5. Real time A-scan comparison of normal and abnormal superior melon seed. ① Normal seed: 4 samples, ② Abnormal seed: 4 samples, ③ Averaged graph of a normal seed's 300 A-scans, and ④ Averaged graph of an abnormal seed's 300 A-scans.

Table 1. Operation time of system

System Section	Signal Process	OCT Imaging	Normalized A-scan Graph Process	Total Time
Operating Time(s)	0.3	0.4	0.4	1.1

Table 1의 신호 처리부(signal process)는 광원 부에서 간섭 신호의 원 데이터를 얻기까지의 부분이며 0.3 초가 소요되었고, 원 데이터를 이용하여 OCT 이미지를 얻는데 0.4 초가 소요되었다. OCT 이미지를 얻은 이후 범위를 설정하고 평균화된 A-scan 이미지를 얻는 데까지는 0.4 초가 소요되어 총 참외 우량종자 감별을 위해 1.1 초가 소요된다. 즉, 1.1 초마다 새로운 OCT 2 차원 이미지와 A-scan 그래프를 실시간으로 얻어 종자를 분석할 수 있다. 이는 기존의 우량종자 감별 방법들과 비교했을 때 많은 시간을 단축하였다.

4. 결론

OCT를 이용하여 CGMMV에 감염되어 종자 내부에 일어난 형태학적 변형을 분석했다. 분석 결과 바이러스 감염 종자는 종피에서 약 100~300 μm 떨어진 속에 이상적으로 발생한 층이 존재하였고, 이러한 형태학적 차이를 수치상으로 나타내기 위해 A-scan 분석을 사용하였다. OCT를 이용한 참외 종자 선별법은 RT-PCR 기법을 이용하여 감염종자를 진단하는 데 걸리는 시간에 비해 시간을 획기적으로 단축하였다. 또한, 비침습적 방법을 통하여 정상적인 종자로 판단된 경우 재사용이 가능하였다.

본 우량종자 실시간 감별 시스템은 A-scan 그래프를 실시간으로 보여주어, 우량종자를 감별하는 데 걸리는 시간을 줄임으로써 대량의 종자 감별에 효과적으로 사용될 수 있게 하였다. 앞으로 자동으로 우량종자를 감별하는 시스템을 개발한다면 무인 실시간 종자 감별장치 구현도 가능할 것이다. 또한, 실시간 영상구현이 가능한 OCT를 참외 이외의 다른 품종의 종자와 식물 단층 이미지 측정에 응용연구를 진행하여 농업 발전에 큰 기여를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 보건복지부 보건의료기술진흥사업(A102024-1011-0000200), 교육부와 한국연구재단의 지역혁신 인력양성사업(2011-05-대-02-026)의 지원으로 수행되었기에 이에 감사 드립니다.

REFERENCES

- [1] H. Wang and G. Stubbs, "Structure determination of cucumber green mottle mosaic virus by X-ray fiber diffraction", *J. Mol. Biol.*, Vol. 239, pp. 371-384, 1994.
- [2] G. C. Ainsworth, "Mosaic disease of cucumber", *Ann. Appl. Biol.*, Vol. 22, pp. 55-67, 1935.
- [3] S. J. Park, J. H. Lee, M. Nam, C. Y. Park, J. S. Kim, J. H. Lee, E. S. Jun, J. S. Lee, H. S. Choi, J. S. Kim, J. S. Moon, H. G. Kim, and S. H. Lee, "Virus disease incidences and transmission ecology of oriental melons in Seongju area", *Res. Plant Dis.*, Vol. 17, No. 3, pp. 342-350, 2011.
- [4] S. K. Lee, W. Y. Song, and H. M. Kim, "Detection of cucumber green mottle mosaic virus in bottle gourd seeds by RT-PCR", *Res. Plant Dis.*, Vol. 10, No. 1, pp. 53-57, 2004.
- [5] S. J. Ko, Y. H. Lee, K. H. Cha, J. W. Park, and H. G. Choi, "Detection of CGMMV from commercial cucumber seed and resistance test of cultivars", *Res. Plant Dis.*, Vol. 10, No. 2, pp. 154-158, 2004.
- [6] J. K. Choi, H. J. Kim, J. Y. Yoon, S. J. Park, D. W. Kim, and S. Y. Lee, "Detection of virus in fruit and seed of vegetables using RT-PCR", *Korean J. Plant Pathol.*, Vol. 14, No. 6, pp. 630-635, 1998.
- [7] R. I. B. Francki, J. Hu, and P. Palukaitis, "Taxonomy of cucurbit-infecting tobamoviruses as determined by serological and molecular hybridization analyses", *Intervirology*, Vol. 26, pp. 156-163, 1986.
- [8] H. Y. Chen, W. J. Zhao, Q. S. Gu, Q. Chen, S. M. Lin, and S. F. Zhu, "Real time TaqMan RT-PCR assay for the detection of cucumber green mottle mosaic virus", *J. Virol. Methods*, Vol. 149, pp. 326-329, 2008.
- [9] M. Sugiyama, T. Ohara, and Y. Sakata, "A new source of resistance to cucumber green mottle mosaic virus in melon", *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.*, Vol. 75, pp. 469-475, 2006.
- [10] P. Barreiro, C. Zheng, D. W. Sun, N. Hernandez-Sanchez, J. M. Perez-Sanchez, and J. Ruiz-Cabelloc, "Non-destructive seed detection in mandarins: comparison of automatic threshold methods in flash and comspira MRIs", *Postharvest*

- Biol. Technol.*, Vol. 47, pp. 189-198, 2008.
- [11] D. W. Sun and B. Li, "Microstructural change of potato tissues frozen by ultrasound-assisted immersion freezing", *J. Food Eng.*, Vol. 57, pp. 337-345, 2003.
- [12] D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito, and J. G. Fujimoto, "Optical coherence tomography", *Science*, Vol. 254, pp. 1178-1181, 1991.
- [13] C. Lee, S. Y. Lee, J. Y. Kim, H. Y. Jung, and J. Kim, "Optical sensing method for screening disease in melon seeds by using optical coherence tomography", *Sensors*, Vol. 11, pp. 9467-9477, 2011.
- [14] A. Reeves, R. L. Parsons, J. W. Hettinger, and J. I. Medford, "In vivo three-dimensional imaging of plants with optical coherence microscopy", *J. Microsc.*, Vol. 208, pp. 177-189, 2002.
- [15] I. V. Meglinski, C. Buranachai, and L. A. Terry, "Plant photonics: Application of optical coherence tomography to monitor defects and rots in onion", *Laser Phys. Lett.*, Vol. 7, pp. 307-310, 2010.
- [16] A. M. Rollins, M. D. Kulkarni, S. Yazdanfar, R. Ung-arunyawee, and J. A. Izatt, "In vivo video rate optical coherence tomography", *Opt. Express*, Vol. 3, pp. 219-229, 1998.
- [17] D. Piao and Q. Zhu, "Power-efficient grating-based scanning optical delay line: time-domain configuration", *Electron. Lett.*, Vol. 40, pp. 97-98, 2004.
- [18] B. E. Bouma and G. J. Tearney, *Handbook of Optical Coherence Tomography*, Marcel Dekker: New York, NY, USA, 2002.
- [19] G. J. Tearney, B. E. Bouma, and J. G. Fujimoto, "High-speed phase- and group-delay scanning with a grating-based phase control delay line", *Opt. Lett.*, Vol. 22, pp. 1811-1813, 1997.
- [20] J. F. de Boer, B. Cense, B. H. Park, M. C. Pierce, G. J. Tearney, and B. E. Bouma, "Improved signal-to-noise ratio in spectral-domain compared with time-domain optical coherence tomography", *Opt. Lett.*, Vol. 28, pp. 2067-2069, 2003.
- [21] R. Leitgeb, C. K. Hitzenberger, and A. F. Fercher, "Performance of fourier domain vs. time domain optical coherence tomography", *Opt. Express*, Vol. 11, pp. 889-894, 2003.
- [22] N. H. Cho, U. Jung, H. I. Kwon, H. Jeong, and J. Kim, "Development of sd-oct for imaging the in vivo human tympanic membrane", *J. Opt. Soc. Korea*, Vol. 15, pp. 74-77, 2011.
- [23] J. G. Fujimoto, M. E. Brezinski, G. J. Tearney, S. A. Boppart, B. E. Bouma, M. R. Hee, J. F. Southern, and E. A. Swanson, "Optical biopsy and imaging using optical coherence tomography", *Nat. Med.*, Vol. 1, pp. 970-972, 1995.
- [24] J. H. Kim and B. H. Lee, "Murine heart wall imaging with optical coherence tomography", *J. Opt. Soc. Korea*, Vol. 10, pp. 42-47, 2006.