# **후지(Fuji) 사과의 외관 특성과 당도(SSC) 간의 관계에 대한 과학적 분석**

## **1. 서론**

### **1.1. 후지 사과의 중요성**

후지(Fuji) 사과(*Malus × domestica* Borkh.)는 전 세계 사과 시장에서 중요한 위치를 차지하는 품종이다.1 일본 도호쿠 지역에서 '롤스 자넷(Ralls Janet)'과 '딜리셔스(Delicious)' 품종의 교배를 통해 육성된 후지는 뛰어난 과즙, 아삭한 식감, 그리고 딜리셔스 품종과 유사한 단맛으로 큰 인기를 얻었다.1 특히 중국과 같은 주요 생산국에서는 지배적인 재배 품종으로 자리 잡았다.4

### **1.2. 품질 평가의 중요성**

과일의 품질은 외관 특성과 내부 품질 모두를 포함하며, 이는 소비자의 수용도, 시장 가치, 그리고 등급 판정에 결정적인 영향을 미친다.4 색깔, 크기, 모양, 결점 유무와 같은 외관 요소는 소비자의 구매 선택에 일차적인 영향을 주는 반면 8, 가용성 고형물 함량(Soluble Solids Content, SSC, 주로 °Brix로 측정), 적정 산도(Titratable Acidity, TA), 경도와 같은 내부 품질 요소는 실제 섭취 경험을 결정한다.5

### **1.3. SSC와 외관의 연관성 집중 조명**

가용성 고형물 함량(SSC)은 당, 유기산, 무기염류 등으로 구성되어 과일의 단맛과 전반적인 맛을 나타내는 핵심 지표로 간주된다.6 본 보고서의 목적은 제공된 국내외 과학 문헌15을 비판적으로 검토하고 종합하여, 후지 사과의 다양한 외관 특성(색깔, 크기, 모양, 결점)과 측정된 SSC 값 사이의 구체적인 관계를 규명하는 데 있다. 외관 특성과 SSC 간의 직접적인 상관관계 분석뿐만 아니라, 외관 기반의 SSC 예측 가능성에 대한 연구 결과도 함께 다룰 것이다.

### **1.4. 품질 평가의 과제**

전통적인 과일 품질 평가는 파괴적인 검사 방식을 요구하는 경우가 많아 시간 소모적이고 비효율적이며, 검사 과정에서 과일 자체를 손상시키는 한계가 있다.11 이러한 단점을 극복하기 위해 분광학(Spectroscopy)이나 머신 비전(Machine Vision)과 같은 비파괴 검사 기술(Non-Destructive Testing, NDT) 개발이 활발히 이루어지고 있다.5 따라서 후지 사과의 외관과 SSC 간의 관계를 명확히 이해하는 것은 효과적인 NDT 시스템 개발에 중요한 기초 정보를 제공한다.

## **2. 후지 사과 껍질 색깔과 당도(SSC)의 연관성**

### **2.1. 붉은색 발현 강도와 SSC의 상관관계**

후지 사과의 껍질 색깔, 특히 붉은색의 발현 정도는 소비자의 선호도에 큰 영향을 미치는 외관적 특징 중 하나이다.15 여러 연구에서 껍질의 붉은색 강도와 가용성 고형물 함량(SSC) 사이에 긍정적인 상관관계가 있음이 보고되었다. 한 연구에서는 CIE L\*a\*b\* 색 공간의 'a\*' 값(적색도를 나타냄)을 측정하여 사과 껍질의 a\* 값과 SSC 간의 상관관계를 분석한 결과, 양의 상관관계(r=0.626)를 확인하였다.15 이는 껍질의 a\* 값이 높을수록(즉, 더 붉을수록) SSC 값도 높아지는 경향이 있음을 의미한다.15

이러한 관계는 재배 방식의 영향을 통해서도 관찰된다. 대목(interstem) 종류가 후지 사과 품질에 미치는 영향을 조사한 연구에서는 '그래니 스미스(Granny Smith)' 대목을 사용한 나무에서 생산된 사과가 '딜리셔스(Delicious)' 대목을 사용한 사과보다 Hunter 'a\*' 값이 더 높고(더 붉음) SSC 값도 더 높게 나타났다.46 이는 특정 재배 조건이 붉은색 발현과 당도 형성에 동시에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 해당 연구에서는 Agtron E-5W 값이라는 다른 색 측정 지표를 사용했을 때도 유사한 결과를 보였는데, '그래니 스미스' 대목 사과에서 더 높은 Agtron 값이 관찰되었으며, 이는 더 붉은 색과 높은 SSC와 연관되었다.46

그러나 붉은색과 SSC 간의 상관계수(r=0.626)는 통계적으로 유의미한 양의 관계를 보여주지만, 완벽한 상관관계(r=1.0)와는 거리가 멀다는 점에 주목해야 한다.15 이는 SSC의 변동 중 상당 부분이 껍질의 붉은색만으로는 설명되지 않음을 의미한다. 즉, 껍질의 붉은색은 당도의 한 지표가 될 수 있지만, 그것만으로 사과의 단맛을 정확히 판단하기에는 부족하며 다른 요인들이 SSC에 독립적으로 영향을 미친다는 것을 시사한다.

그럼에도 불구하고, 서로 다른 측정 방법(색차계를 이용한 a\* 값 측정 15, Hunter 'a\*' 및 Agtron 값 측정 46)을 사용한 연구들에서 일관되게 붉은색 발현 증가와 높은 SSC 간의 연관성이 나타난다는 점은 주목할 만하다. 이는 붉은색 색소 침착과 SSC 사이에 생물학적인 연관성이 실제로 존재할 가능성을 높인다. 이 연관성은 직접적이기보다는 성숙도나 대목 종류와 같은 요인에 의해 영향을 받는 특정 대사 경로와 간접적으로 연결되어 있을 수 있다.15

### **2.2. 바탕색 및 전반적인 색상 지표와 SSC의 상관관계**

사과 껍질의 바탕색 변화, 특히 녹색에서 황색으로의 전환은 중요한 성숙도 지표로 간주된다.3 한 연구에서는 수확 시기(만개 후 일수, DAFB)에 따른 후지 사과의 색상 변화(L\*, a\*, b\*, C\*, h<sub>ab</sub>)와 SSC를 함께 측정했다.3 이 연구에서 SSC는 성숙이 진행됨에 따라(132 DAFB에서 153 DAFB로) 16.5 °Brix에서 17.2 °Brix로 약간 증가했으며, 이 기간 동안 색상도 변화했을 것으로 추정된다. 비록 이 연구에서 바탕색 지표(예: 황색도를 나타내는 b\* 값 또는 색상 각도 h<sub>ab</sub>)와 SSC 간의 직접적인 상관관계를 보고하지는 않았지만, 바탕색 변화가 성숙 및 SSC 변화와 동시에 일어남을 보여준다.

대목 연구에서는 색상 각도(hue angle, h<sub>ab</sub>)를 사용하여 색상을 평가했는데, '그래니 스미스' 대목 그룹에서 더 작은 색상 각도 값(황색/녹색이 적고 더 붉은색을 의미)이 더 높은 SSC와 연관되었다.46 이는 바탕색 구성 요소가 SSC와 관련될 수 있음을 시사한다.

전체적인 색상 차이를 나타내는 ΔE와 같은 지표도 내부 품질과 강한 상관관계를 보이는 것으로 나타났다.15 특히 ΔE와 a\* 값 사이에 강한 상관관계가 확인되어, 전체적인 색상 변화가 적색도 및 내부 품질과 밀접하게 연관되어 있음을 보여준다.15

최근 머신 비전 기술을 활용한 연구에서는 RGB 이미지에서 변환된 L\*a\*b\* 색 공간의 여러 색상 채널(예: a\*와 b\*) 정보를 이용하여 SSC를 예측하려는 시도가 이루어졌다.16 이 연구에서는 a\*와 b\* 채널 정보를 융합했을 때 단일 채널을 사용했을 때보다 더 나은 예측 성능(Rp² = 0.5953)을 보였다. 더 나아가, RGB, CMY, YCbCr, CAT02LMS 등 다양한 색 공간에서 추출한 색상 및 질감 특징들을 복합적으로 사용하여 SSC를 예측한 연구에서는 매우 높은 정확도(R² > 0.92)를 달성하기도 했다.20

이러한 결과들을 종합해 볼 때, 바탕색의 변화(녹색에서 황색으로, b\* 및 색상 각도에 반영됨)는 성숙과 연관되며, 비록 항상 SSC와 직접적인 상관관계를 보이는 것은 아니지만, 적색도(a\*)와 결합될 때 SSC 예측 모델에서 유용한 정보를 제공한다.16 이는 단순히 붉은색의 강도뿐만 아니라 붉은색과 바탕색(황색/녹색) 간의 균형을 포함하는 *전체적인 색상 프로파일*이 SSC와 관련된 정보를 담고 있음을 시사한다.

또한, 표준 RGB 카메라로 촬영한 이미지에서 추출한 특징을 기반으로 한 머신 비전 모델이 어느 정도 수준의 SSC 예측 성능을 보인다는 점은 주목할 만하다.16 이는 고가의 복잡한 분광 측정 장비 없이도 색상 정보를 이용한 SSC 추정이 가능할 수 있음을 의미한다. 물론, 예측 성능은 연구마다 차이가 있으며(Rp² ≈ 0.6 16 vs R² > 0.92 20), 이는 정교한 특징 추출 기법과 최적화된 머신러닝 모델의 중요성을 강조한다.

### **2.3. 색깔-SSC 관계 조절 요인**

후지 사과의 껍질 색깔과 SSC 간의 관계는 단순하지 않으며 여러 요인에 의해 조절된다.

* **계통(Strain) 변이:** 후지 품종 내에는 다양한 아종(sport) 또는 클론(clone)이 존재하며, 이들 계통 간에는 껍질 색깔의 발현 양상(유형, 패턴, 강도)에 상당한 차이가 있다.47 일부 계통은 특히 우수한 착색을 위해 선발되기도 한다. 예를 들어, '셉템버 원더 후지(September Wonder Fuji)'와 '데저트 로즈 후지(Desert Rose Fuji)'는 붉은색이 더 많았고 47, '키쿠 8 후지(Kiku 8 Fuji)'는 가장 좋은 붉은색을 보였으며 47, '젠 아즈텍 후지(Zhen Aztec Fuji)'는 착색이 가장 우수했고 47, '후지 수프레마(Fuji Suprema)'는 '미시마(Mishima)'나 '후지 셀렉트(Fuji Select)'보다 더 붉었다.49 그러나 특정 계통에서 붉은색이 강화되었다고 해서 반드시 SSC가 높거나 식미가 우수한 것은 아니다.47 '어텀 로즈 후지(Autumn Rose Fuji)'는 SSC가 낮은 경향을 보였고 47, '나가 후 1 후지(Naga Fu 1 Fuji)'도 SSC가 낮았다.47 Komatsu (1998)의 연구(인용됨 47)에서는 일부 붉은색 아종, 특히 전면 착색(solid type) 계통에서 식미가 떨어지는 경우가 발견되었다. 최근 연구에서도 착색이 우수한 '후지 수프레마' 계통이 덜 붉은 다른 계통들과 유사한 SSC 값을 보였다.49
* **환경적 영향:** 재배 지역의 기후(기온, 일조량), 고도 등 환경 조건은 사과의 색깔과 SSC 모두에 큰 영향을 미친다.47 한 연구에서는 서늘한 지역(상 조아킹)에서 생산된 사과가 더 넓은 붉은색 면적을 보였지만, SSC는 따뜻한 지역과 비교했을 때 경우에 따라 높거나 비슷하여 일관된 경향을 보이지 않았다.50 Komatsu (1998)는 재배 지역과 연도에 따라 색깔이 달라진다고 보고했다.47 특히 광 노출은 붉은색 발현(안토시아닌 생성)에 매우 중요한 요인이다.8
* **재배 관리:** 대목 선택 46, 봉지 씌우기(과일 봉지) 6, 공기압 적엽(pneumatic defoliation) 8, 그물망 걷기(netting retraction) 51와 같은 재배 관행은 색깔 발현에 영향을 미치며, 때로는 SSC에도 영향을 줄 수 있다. 공기압 적엽은 붉은색(a\* 값)을 증가시켰지만 SSC에 대한 영향은 보고되지 않았다.8 봉지 씌우기는 외관에 영향을 주므로 NDT 모델 개발 시 고려해야 할 요소이다.34
* **성숙도:** 사과가 성숙함에 따라 색깔은 크게 변한다. 붉은색이 발달하고 바탕색은 녹색에서 황색으로 변한다.3 일반적으로 SSC도 성숙과 함께 증가하는 경향이 있다.3 따라서 관찰되는 색깔-SSC 상관관계는 부분적으로 성숙 단계를 반영하는 것일 수 있다.15 그러나 이 관계는 단순하지 않으며, 서로 다른 품질 지표들이 다른 속도로 성숙할 수 있다.52 성숙 단계는 NDT 모델의 성능에도 영향을 미친다.38

이러한 다양한 요인들(계통 유전형 × 환경 × 관리 × 성숙도)이 상호작용하기 때문에, 후지 사과의 색깔과 SSC 간의 관계는 매우 맥락 의존적이다. 계통 유전, 환경 조건(광, 온도, 지역), 재배 관행은 상당한 변이를 야기하며, 이는 이러한 요인들을 고려하지 않고 단순히 시각적인 색깔 평가만으로 당도를 판단하는 것이 종종 신뢰할 수 없음을 의미한다. 모든 계통과 조건에서 붉은색이 짙다고 해서 높은 SSC를 보장하는 것은 아니다.46

결과적으로, 단순히 붉은색 착색이 우수하다는 이유만으로 계통을 선발하는 것은 당도 향상으로 이어지지 않을 수 있으며, 신중하게 평가하지 않으면 다른 품질 측면을 저해할 수도 있다 (Komatsu 1998 47에서 시사됨). 육종 프로그램은 외관뿐만 아니라 내부 품질도 함께 고려해야 한다.1 시장에서 선호되는 붉은색과 핵심 식미 품질 속성인 당도 사이에 일부 계통에서는 불일치가 있을 수 있음을 시사한다.

**표 1: 후지 사과 껍질 색상 매개변수와 가용성 고형물 함량(SSC) 간의 상관관계**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **연구 (ID)** | **측정된 색상 매개변수** | **측정 방법** | **상관관계 지표 (r 또는 R²)** | **상관관계 결과** | **맥락/비고 (계통, 조건, 성숙도, 대목 등)** |
| 15 | 껍질 a\* 값 | 색차계 | r=0.626 | 양의 상관관계 | N=420 후지 사과 |
| 46 | Hunter 'a\*', 색상 각도 (Hue angle) | Color Machine | 정성적 (높은 'a\*', 낮은 hue가 높은 SSC와 연관) | '그래니 스미스' 대 '딜리셔스' 대목 비교 | '그래니 스미스' 대목 사과가 더 붉고 SSC가 높음 |
| 16 | a\* 및 b\* (RGB L\*a\*b\*에서 픽셀 수준) | 머신 비전 (RGB 카메라) + SAE-BPNN | Rp2​=0.5953 (예측) | 중간 정도의 예측 정확도 | 후지 사과, 다양한 숙성 단계. a\*+b\* 융합이 단일 채널보다 우수함 |
| 20 | RGB, CMY, YCbCr, CAT02LMS의 다중 특징 (색상 및 질감, 6개 선별) | 머신 비전 (RGB 카메라) + ANN-CA | R2>0.92 (예측) | 높은 예측 정확도 | 특징 선별 (ANN-DE) 사용됨 |

## **3. 후지 사과 크기, 모양과 SSC의 관계**

### **3.1. 과실 무게 및 직경이 SSC에 미치는 영향**

소비자들은 종종 크기가 큰 사과를 선호하는 경향이 있지만, 크기와 내부 품질, 특히 당도(SSC) 간의 관계는 명확하지 않다. 대목 종류가 후지 사과 품질에 미치는 영향을 조사한 연구에서는 '딜리셔스' 대목이 '그래니 스미스' 대목보다 더 큰 과실(무게 증가)을 생산했지만, SSC는 오히려 낮게 나타났다.46 이는 특정 재배 조건 하에서는 크기와 SSC 간에 역의 관계가 존재할 수 있음을 시사한다.

재배 지역 간 비교 연구에서도 유사한 경향이 관찰되었다. 가장 서늘한 지역에서 생산된 후지 사과가 가장 컸지만, SSC는 다른 지역과 비교하여 때로는 높거나 비슷하게 나타나, 기후와 관련된 단순하고 보편적인 크기-SSC 연관성은 확인되지 않았다.50 또한, 일부 연구에서는 크기(무게, 직경)와 SSC를 함께 측정했지만, 이들 간의 직접적인 상관관계 분석 결과를 보고하지 않았다.3

특히 주목할 점은, 자동 등급 분류 시스템에 관한 여러 연구에서 머신 비전을 사용하여 크기(횡단면 직경)를 주요 외부 품질 매개변수로 측정하는 동시에, SSC(Brix)는 별도의 근적외선(NIR) 분광법을 사용하여 측정한다는 것이다.5 이는 실제 산업 현장에서 크기만으로는 SSC를 신뢰성 있게 예측하기 어렵다고 간주함을 시사한다. 한 연구에서는 이러한 등급 시스템에 대한 분석 결과, 외관 특징(결점 비율, 외형 비율, 직경)과 측정된 Brix 값 사이의 상관관계 분석이 보고되지 않았음을 명시적으로 확인했다.5

이러한 증거들을 종합해 볼 때, 후지 사과의 크기(무게 또는 직경)가 크다고 해서 반드시 SSC가 높다는 일반적인 가정과는 달리, 일관된 양의 상관관계는 관찰되지 않는다. 제한적인 증거는 특정 조건(예: 대목 효과) 하에서 역의 관계 가능성을 시사하며 46, 자동 등급 시스템은 크기와 SSC를 독립적인 품질 지표로 취급한다.5 이는 '크기가 클수록 더 잘 익고 달콤하다'는 직관적인 생각에 도전하는 결과이다.

### **3.2. 과실 모양과 SSC의 관계**

과실의 모양은 크기와 마찬가지로 중요한 외관 품질 등급 기준이며, 소비자 선호도에 영향을 미친다. 머신 비전 시스템은 종종 종횡비(세로 직경/가로 직경)나 과실 형태 지수(fruit shape index)와 같은 지표를 사용하여 모양을 평가한다.5 일반적으로 둥근 모양(지수가 1에 가까움)이 선호된다.5

그러나 제공된 문헌들 중 어느 것도 후지 사과의 모양 매개변수(예: 종횡비, 형태 지수)와 측정된 SSC 간의 직접적인 상관관계를 보고하지 않았다. 크기와 마찬가지로, 모양은 시각적 또는 머신 비전으로 등급이 매겨지는 반면, SSC는 별도로 측정된다.5 재배 지역 비교 연구에서 가장 서늘한 지역의 사과가 가장 높은 길이/직경 비율을 보였지만, SSC는 이러한 모양 변화와 단순한 패턴을 따르지 않았다.50

결론적으로, 과실 모양은 시각적 등급 분류와 소비자 매력도에 중요한 요소이지만, 검토된 문헌에 따르면 후지 사과의 SSC와는 대체로 독립적인 것으로 보인다. 자동 등급 시스템은 이러한 속성들을 서로 다른 기술을 사용하여 평가하며, 모양이 당도의 유용한 지표가 된다는 증거는 부족하다.

## **4. 후지 사과의 시각적 결점과 SSC의 영향**

### **4.1. 밀병(Watercore)**

밀병은 사과의 생리 장해 중 하나로, 세포 간극이 액체로 채워져 과육이 반투명하게 보이는 현상을 특징으로 한다.1 후지 사과는 특히 밀병 발생에 민감한 품종으로 알려져 있다.1

밀병과 당도 간의 관계는 복잡하다. 밀병 발생은 당 대사와 관련이 있으며 1, 종종 *인지되는* 단맛, 향, 그리고 전반적인 수용도를 향상시키는 것으로 알려져 있다. 특히 아시아 시장에서는 밀병이 있는 후지 사과가 진미로 여겨지며 선호되기도 한다.1 실제로 관능 평가 연구에서 밀병이 있는 후지 사과는 전체적인 수용도, 향 강도, 단맛, 과일 향에서 밀병이 없는 사과보다 유의하게 높은 점수를 받았다.1

그러나 *측정된* SSC와의 관계를 비판적으로 분석해 보면 결과는 일관되지 않다. 밀병이 당 대사와 연관되어 있음에도 불구하고, 항상 측정된 SSC 값이 더 높다는 것을 의미하지는 않는다.1 일부 연구에서는 소르비톨(sorbitol) 함량은 높았지만 총 당 함량이나 SSC는 반드시 높지 않았으며, 가장 단맛을 내는 당인 과당(fructose) 함량은 오히려 밀병 조직에서 낮은 경향을 보이기도 했다.1 다른 연구에서는 아미노에톡시비닐글리신(AVG) 처리 연구 맥락에서 밀병 발생률이 SSC, 경도, 산도와 상관관계가 있다고 보고했지만 54, 이는 처리 효과와 연관된 결과일 수 있다.

밀병은 과실의 성숙도 및 저장 안정성과도 관련이 깊다. 수확 시기가 늦어질수록 밀병 발생률이 증가하며 53, 밀병이 있는 과실은 저장 중 내부 갈변이나 분해와 같은 생리 장해에 더 취약하다.1 밀병 감지를 위한 비파괴 검사 기술(예: VIS/NIR 투과법 24, 분류 모델 57)은 SSC 측정과는 별개로 개발되고 있다.

이러한 점들을 고려할 때, 밀병은 일종의 역설을 제시한다. 일부 소비자 및 시장에서는 인지되는 단맛과 선호도를 향상시키지만 1, 이것이 측정된 SSC 값의 증가로 일관되게 나타나지는 않는다.1 밀병의 존재는 오히려 과실의 과숙 및 저장 불안정성 증가와 더 확실하게 연관되어 있다.1 이는 밀병이 단순히 높은 당 함량을 나타내는 지표라기보다는 복잡한 품질 속성임을 보여준다.

또한, 밀병의 선호도는 시장에 따라 다르다. 일부 아시아 시장에서는 가치 있게 평가되지만 1, 전통적으로 다른 지역에서는 '딜리셔스'와 같은 품종에서 나타나는 연화 및 푸석거림과 같은 품질 저하와의 연관성 1 및 저장 불안정성 1 때문에 부정적으로 간주되어 왔다. 이는 동일한 생리 현상에 대한 품질 인식이 문화권에 따라 다를 수 있음을 강조한다.

### **4.2. 기타 결점 (동녹, 고두병, 압상, 흠집 등)**

동녹(russeting), 고두병(bitter pit), 균열, 상처, 압상(bruising)과 같은 결점들은 시각적 등급 판정의 주요 요인이며, 종종 머신 비전 시스템을 통해 평가된다.5

대목 연구에서 '딜리셔스' 대목을 사용한 사과가 '그래니 스미스' 대목 사과보다 고두병 발생이 많고 SSC가 낮았다는 결과는 46, 특정 조건 하에서 이 특정 장해와 낮은 SSC 간의 연관성 가능성을 시사한다. 그러나 다른 일반적인 표면 결점과 SSC 간의 직접적인 연관성을 시사하는 증거는 제공된 문헌 내에서 거의 발견되지 않았다.

압상 감지를 위한 NDT 연구들은 이를 SSC 측정과는 별개의 문제로 다루고 있다.58 소비자 인식 연구에서는 경미한 결점(흠집, 이상한 모양)과 주요 결점(부패, 곰팡이, 베인 상처)이 인지되는 품질을 부정적으로 평가했지만, 이러한 결점과 SSC 간의 관계는 측정되지 않았다.13 재배 지역 비교 연구에서는 서늘한 지역에서 동녹 발생이 적었지만 SSC는 다양하게 나타났다.50

결론적으로, 특정 조건 하의 고두병과 낮은 SSC 간의 연관성을 시사하는 한 연구46를 제외하고는, 일반적인 표면 결점(동녹, 압상, 일반적인 흠집)과 후지 사과의 SSC 사이에 직접적인 상관관계가 있다는 증거는 부족하다. 등급 시스템은 일반적으로 이러한 외부 결점을 내부 당도와 독립적으로 평가하며, 표면 외관 결점은 SSC의 신뢰할 만한 지표가 되기 어렵다.

## **5. 외관 기반 비파괴 SSC 추정**

### **5.1. 색상 및 질감 특징을 활용한 머신 비전 접근법**

가용성 고형물 함량(SSC)의 비파괴적 예측을 위해 근적외선(NIR) 또는 하이퍼스펙트럼 분광법이 널리 사용되고 있지만 12, 일부 연구에서는 표준 RGB 카메라를 이용한 머신 비전 기술을 통해 색상 및 질감 정보를 기반으로 SSC를 추정하려는 시도가 이루어지고 있다.

Li 등(2021)의 연구에서는 RGB 이미지에서 추출한 L\*a\*b\* 색 공간의 a\* 및 b\* 채널 정보를 픽셀 수준에서 활용했다.16 이들은 적층 오토인코더(Stacked Autoencoder, SAE)를 사용하여 색상 특징을 추출하고, 이를 역전파 신경망(Back Propagation Neural Network, BPNN) 모델의 초기 매개변수로 사용하여 SSC를 예측했다. 그 결과, 중간 정도의 예측 성능(Rp² = 0.5953, RMSEP = 0.8856%)을 얻었으며, 특히 a\*와 b\* 채널 정보를 융합했을 때 예측 성능이 향상됨을 확인했다.

Pourdarbani 등(2022)의 연구에서는 RGB 이미지에서 다양한 색상 및 질감 특징(RGB, CMY, YCbCr, CAT02LMS 색 공간 성분 및 '클러스터 그림자(cluster shadow)' 질감 특징 포함)을 추출하고, 이 중 가장 효과적인 6개의 특징을 선별하여 인공 신경망-문화 알고리즘(ANN-CA) 모델에 적용했다.20 이 접근법을 통해 매우 높은 SSC 예측 정확도(R² > 0.92)를 달성했다.

질감 분석은 하이퍼스펙트럼 이미지를 이용한 사과 원산지 분류 연구에서도 회색조 동시발생 행렬(Gray Level Co-occurrence Matrix, GLCM) 기반 특징이 활용된 바 있어 61, 질감 정보가 과일 분석에 유용한 기술임을 시사한다. 비록 이들 연구가 RGB 이미지를 이용한 후지 사과 SSC 예측에 직접 적용된 것은 아니지만20, RGB 카메라가 색상과 질감 정보를 모두 포착할 수 있다는 점 63을 고려할 때 잠재력이 있다.

이러한 머신 비전 접근법들은 외부 등급(결점, 크기, 모양, 색상 분류) 판정에는 머신 비전을 사용하고 SSC/Brix 측정에는 NIR/분광법에 의존하는 시스템들과 대조된다.5

표준 RGB 이미지를 이용한 머신 비전 기반 SSC 예측은 가능하지만, 그 성능은 특징 추출 및 모델링의 정교함에 크게 좌우된다. 단순한 색상 특징만으로는 중간 정도의 정확도에 그칠 수 있는 반면 16, 다중 색 공간 특징과 질감 특징을 포함한 고급 특징 공학을 최적화된 인공지능 모델(예: ANN-CA)과 결합하면 높은 정확도를 달성할 수 있다.20 이는 이미지 분석 방법론 자체가 성공의 핵심임을 보여준다.

한편, 연구 수준에서는 RGB 이미지로부터 직접 SSC를 예측하려는 시도가 있지만 16, 많은 실제 등급 분류 시스템에서는 외부 특징 평가(머신 비전)와 내부 SSC 측정(분광법)을 분리하여 수행한다.5 이는 RGB 기반 예측이 가능함에도 불구하고, 현재 실제 산업 응용에서는 분광법이 여전히 더 견고하거나 정확한 SSC 측정 방법으로 간주될 수 있음을 시사한다.

**표 2: 외관 특징으로부터 후지 사과 SSC를 예측하는 머신 비전 모델의 성능**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **연구 (ID)** | **입력 특징** | **모델 유형** | **성능 지표 (R²/Rp²/RMSEP)** | **주요 결과/정확도** | **비고** |
| 16 | a\*, b\* (픽셀 수준, RGB에서 L\*a\*b\*) | SAE-BPNN | Rp² = 0.5953, RMSEP = 0.8856% | 중간 정도의 예측 정확도. 융합 시 성능 향상. | 다양한 숙성 단계. |
| 20 | 6개 선별된 색상/질감 특징 (RGB, CMY, YCbCr, CAT02LMS 등에서 유래) | ANN-CA | R² > 0.92 | 높은 예측 정확도. | 특징 선별 (ANN-DE) 사용됨. |

### **5.2. 외관 기반 모델의 성능, 한계 및 견고성**

앞서 살펴본 바와 같이, 외관 기반 SSC 예측 모델의 성능은 연구에 따라 상당한 차이를 보인다 (Rp² ≈ 0.6 16 vs R² > 0.92 20). 이러한 성능 변동성 외에도 모델의 견고성(robustness)과 일반화 가능성(generalizability)이 중요한 고려 사항이다.

외관 기반 모델은 후지 사과 계통 간의 차이 47, 성숙 단계의 다양성 3, 재배 지역 및 환경 조건의 변화 6, 봉지 씌우기와 같은 재배 관행의 영향 34, 그리고 이미지 획득 시 조명 조건의 변화 59 등 다양한 요인으로 인한 변동성에 대처해야 한다. 특정 조건에서 개발된 모델은 다른 조건에서는 잘 작동하지 않을 수 있다. 생물학적 다양성이 모델의 예측력을 저하시킬 수 있다는 점도 지적되었다.38 또한, 복잡한 배경이나 고르지 않은 조명 조건 하에서 정확한 이미지 분할 및 처리가 필요하다.20

분광법 역시 침투 깊이의 한계, 산란 효과, 보정의 필요성, 외부 요인의 영향 등 자체적인 과제를 안고 있지만 23, 당과 관련된 분자 흡수를 직접 측정함으로써 12 표면 외관보다는 SSC와 더 직접적인 연관성을 가질 수 있다. 그러나 여러 센서(예: 머신 비전 + NIR + 전자 코)를 결합하면 전반적인 품질 평가 정확도를 향상시킬 수 있다.43

결론적으로, 외관 기반 SSC 예측 모델의 견고성과 일반화 가능성은 여전히 주요 과제로 남아 있다. 높은 정확도를 달성하기 위해서는 종종 유전적, 환경적, 성숙도, 이미지 촬영 조건의 변동을 포착하는 다양한 데이터셋으로 훈련된 복잡한 모델이 필요하다. 단순히 색상 정보에만 의존하는 간단한 모델은 다양한 실제 시나리오에서 견고성이 부족할 수 있다.

## **6. 외관, SSC 및 전반적인 후지 사과 품질 종합**

### **6.1. 시각적 특성 및 SSC와 적정 산도, 경도, SSC/TA 비율 연결**

사과의 맛은 단순히 당도(SSC)만으로 결정되지 않으며, 산도(TA)와의 균형이 매우 중요하다. 이 균형은 종종 SSC/TA 비율로 표현되며 44, 일반적으로 소비자는 높은 SSC/TA 비율을 선호한다.46

한 연구에서는 껍질의 붉은색(a\* 값)이 SSC(r=0.626) 및 SSC/TA 비율(r=0.697)과 양의 상관관계를 보였지만, 사과산(malic acid, r=−0.525) 및 총 유기산 함량(r=−0.519)과는 음의 상관관계를 보였다.15 이는 더 붉은 껍질이 일반적으로 더 달고 덜 신 맛으로 인지되는 프로파일과 직접적으로 연결됨을 시사한다. 대목 연구에서도 더 붉은 사과('그래니 스미스' 대목)가 더 높은 SSC, 더 낮은 TA(SSC/TA 비율이 높다는 점에서 암시됨), 그리고 유의하게 더 높은 SSC/TA 비율(33.5 대 29.0)을 보였으며, 이는 소비자가 감지하고 선호할 만한 차이로 간주되었다.46

비파괴 검사 기술(NDT)은 종종 동일한 측정으로부터 SSC, TA, pH, 경도 등 여러 품질 매개변수를 동시에 예측하는 것을 목표로 한다 (예: 분광법 11). 머신 비전 역시 SSC와 함께 경도 및 산도를 예측하는 데 사용되었다.20

경도의 경우, 껍질 색깔과의 직접적인 상관관계가 보고되지 않은 연구도 있지만 15, 대목 연구에서는 더 붉은 사과('그래니 스미스' 대목)가 수확 시 더 단단했다.46 스트레스 완화 매개변수(질감/경도와 관련됨)와 SSC를 포함한 화학적 속성 간의 상관관계가 발견되기도 했다.65 여러 NDT 연구에서는 Vis-NIR 분광법 44, 유전체 분광법 11 등을 사용하여 경도를 예측했다. 그러나 다른 연구에서는 색깔이나 SSC가 유사함에도 불구하고 계통 간 경도 차이가 관찰되어 49, 경도가 색깔이나 SSC와 항상 일관된 관계를 보이는 것은 아님을 시사한다.

이러한 결과들을 종합하면, 후지 사과의 붉은 껍질 색깔은 높은 SSC뿐만 아니라 낮은 산도 및 높은 SSC/TA 비율과도 연관되어 있는 것으로 보인다.15 이는 껍질의 붉은색이 단순히 SSC 자체보다는 전반적인 *맛의 균형*(단맛 대 신맛)을 더 잘 나타내는 지표일 수 있음을 시사한다. 붉은색은 당-산 균형의 변화를 나타내는 지표로서, 절대적인 당 함량보다 미각적 만족도에 더 중요할 수 있다.

반면, 경도는 연구 전반에 걸쳐 색깔이나 SSC와 일관된 관계를 보이지 않는다. 때때로 연관성이 나타나기도 하지만 46, 색깔/SSC와 독립적으로 변하거나 49 별도의 NDT 방법으로 예측되는 경우가 많다.11 이는 질감이 SSC/TA 비율과는 다른 별개의 품질 차원임을 시사하며, 당도나 맛의 균형을 예측하는 동일한 시각적 단서(예: 색깔)로는 경도를 안정적으로 예측하기 어렵다는 것을 의미한다.

### **6.2. 소비자 인식 및 관능 평가에 대한 시사점**

소비자들은 종종 외관, 특히 색깔을 통해 품질을 유추하고 구매 결정을 내린다.8 붉은색은 일반적으로 선호되는 특징이다.15 앞서 논의된 바와 같이, 높은 SSC/TA 비율은 소비자 선호도와 연결된다.46

궁극적인 식미 품질은 단맛, 신맛, 아삭함, 단단함, 다즙성, 풍미와 같은 관능적 속성에 의해 결정된다.2 여러 연구에서 기기 측정값과 관능 평가 점수 간의 연관성을 조사했다. 색차계 a\* 값은 훈련된 패널의 시각적 색상 평가와 잘 연관되었고 3, 컴퓨터화된 경도계의 경도/아삭함 값은 관능적 경도/아삭함 값과 유의한 상관관계를 보였다.67 특정 관능 속성("달콤함", "아삭함", "다즙성", "향기로움")은 서로 다른 원산지의 후지 사과에 대한 소비자 수용도와 연결되었으며 65, 관능 패널은 가공 제품 적합성 평가 68 및 다양한 속성 평가 19에 사용되었다. CA 저장은 소비자의 입맛을 만족시키는 우수한 풍미와 품질을 유지하는 것으로 평가되었고 66, Vis/NIR 파장은 관능 속성과 관련이 있는 것으로 언급되었다.45

밀병의 예시 1는 외관(반투명성)이 측정된 SSC와의 상관관계가 일관되지 않음에도 불구하고 인지되는 풍미와 수용도에 강한 영향을 미친다는 점을 다시 한번 보여준다.

결론적으로, SSC, TA, 색상 매개변수와 같은 기기 측정값은 객관적인 데이터를 제공하지만, 관능적 인식은 복잡하고 다면적이다.1 색깔과 같은 외관 단서는 기대감과 초기 인식에 영향을 미치지만, 전반적인 경험은 맛(SSC/TA), 질감(경도, 아삭함, 다즙성), 그리고 향의 통합에 달려 있다.2 단순한 외관 특징과 전반적인 관능적 선호도 간의 상관관계는 SSC나 SSC/TA 비율과 같은 개별 구성 요소와의 상관관계보다 약할 수 있다. 즉, 외관은 품질 인식의 시작점일 뿐이며, 소비자의 최종 평가는 여러 감각 정보가 복합적으로 작용한 결과이다.

## **7. 결론 및 연구 전망**

### **7.1. 주요 연구 결과 요약**

본 보고서에서 검토한 과학 문헌들을 종합하면 후지 사과의 외관과 SSC 간의 관계에 대해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

* \*\*붉은 껍질 색깔(특히 a\* 값)\*\*은 일반적으로 SSC와 중간 정도의 양의 상관관계를 보이며, SSC/TA 비율과는 더 강한 양의 상관관계를 보인다. 이는 붉은색이 단순한 단맛보다는 맛의 균형을 더 잘 나타낼 수 있음을 시사한다.15
* \*\*바탕색 및 전체적인 색상 지표(ΔE, 다중 채널 특징)\*\*는 SSC 예측에 기여하며, 고급 머신 비전 모델은 높은 예측 잠재력을 보여준다.16
* **과실 크기 및 모양**은 대체로 SSC와 유의미한 상관관계를 보이지 않는다.3
* **밀병**은 인지되는 단맛을 향상시키지만 측정된 SSC와는 일관된 관계를 보이지 않으며, 과숙 및 저장 불안정성과 관련이 있다.1 **기타 표면 결점**은 일반적으로 SSC와 상관관계가 부족하다 (고두병 관련 연구 46는 예외).
* **외관-SSC 관계**는 계통, 환경, 재배 관행, 성숙도에 따라 크게 달라지므로, 단순한 시각적 평가의 신뢰성은 제한적이다.3

### **7.2. 확인된 연구 공백 및 모순점**

* 연구 간 색깔-SSC 상관관계 강도의 불일치.
* 후지 사과에서 크기/모양 지표와 SSC를 직접적으로 연관시킨 연구의 부족.
* 밀병이 있는 사과에서 인지되는 단맛과 측정된 SSC 간의 불일치에 대한 명확한 설명 부족 (대사 및 감각 메커니즘).
* 머신 비전 기반 SSC 예측 모델의 성능 변동성 및 견고성 문제, 특히 다양한 조건에서의 일반화 가능성에 대한 심층 연구 필요. RGB 비전과 분광법의 SSC 예측 정확도 및 견고성 직접 비교 연구 부족.
* 포괄적인 외관 특징(색깔, 크기, 모양, 질감, 결점)을 SSC 및 관능 프로파일과 동시에 통합하여 분석한 연구 부족.

### **7.3. 향후 연구 방향 제언**

* 다양한 후지 계통, 환경, 관리 방식을 포괄하는 대규모 연구를 수행하여 외관-SSC 관계에 대한 보다 견고한 모델을 구축하고 각 요인의 영향을 정량화해야 한다.
* 숙성 중 색깔 발달(안토시아닌, 엽록소 분해)과 당 대사 및 산 감소를 연결하는 근본적인 생리적, 유전적 메커니즘을 규명해야 한다.
* RGB 이미지로부터 신뢰성 있고 견고한 SSC 예측을 위한 고급 머신 비전 기술(딥러닝, 질감 포함 다중 특징 융합)을 추가로 탐색하고, 다양한 조건(조명, 성숙도 등) 하에서 분광법과 직접적으로 성능을 비교해야 한다.
* 기기적 외관 데이터(머신 비전), 내부 품질 데이터(NDT 기반 SSC, TA, 경도), 그리고 포괄적인 관능 프로파일링을 통합하여 시각적 단서가 소비자 인식 및 수용도로 어떻게 전환되는지 더 잘 이해해야 한다.
* 보다 전체적이고 정확한 품질 평가를 위해 센서(예: 비전 + 분광법)를 결합한 NDT 시스템 개발을 추진해야 한다.43

### **7.4. 실용적 적용 방안**

* 개선된 후지 품종 육성을 목표로 하는 육종 프로그램에서 바람직한 외관뿐만 아니라 일관되게 우수한 내부 품질(SSC, TA, 풍미)을 함께 선발하는 데 정보를 제공할 수 있다.1
* 재배자들이 색깔과 원하는 내부 품질 프로파일을 모두 향상시키기 위해 재배 관행(예: 광 관리, 적엽, 수확 시기)을 최적화하는 데 지침을 제공할 수 있다.8
* 비파괴 선별 및 등급 분류 기술의 개발 및 개선에 기여하며, 외관 특징(특히 머신 비전을 통한 색상)을 당도 및 전반적인 품질의 대리 지표로 사용하는 것의 잠재력과 한계를 명확히 할 수 있다.5 품종, 원산지, 성숙도에 따라 NDT 측정값을 해석하는 데 필요한 맥락을 제공할 수 있다.

#### 참고 자료

1. Flavor and Texture Characteristics of 'Fuji' and Related Apple (Malus domestica L.) Cultivars, Focusing on the Rich Watercore - PubMed Central, 4월 28, 2025에 액세스, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7179182/>
2. Flavor and Texture Characteristics of 'Fuji' and Related Apple (Malus domestica L.) Cultivars, Focusing on the Rich Watercore - MDPI, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/1420-3049/25/5/1114>
3. (PDF) Monitoring Colour Evolution During Maturity in Fuji Apples, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/249667319_Monitoring_Colour_Evolution_During_Maturity_in_Fuji_Apples>
4. Integrative metabolomics and transcriptomics analyses reveal pivotal regulatory mechanisms of 1-methylcyclopropene in maintaining postharvest storage quality of 'Fuji' apples - Oxford Academic, 4월 28, 2025에 액세스, <https://academic.oup.com/fqs/article/doi/10.1093/fqsafe/fyac063/6770033>
5. Grading detection of “Red Fuji” apple in Luochuan based on machine vision and near-infrared spectroscopy | PLOS One, 4월 28, 2025에 액세스, <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0271352>
6. Simple and Effective Characterization of Fuji Apple Flavor Quality by Ethylene and Sugar Content - ResearchGate, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/353400958_Simple_and_Effective_Characterization_of_Fuji_Apple_Flavor_Quality_by_Ethylene_and_Sugar_Content>
7. Grading detection of “Red Fuji” apple in Luochuan based on machine vision and near-infrared spectroscopy, 4월 28, 2025에 액세스, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9352003/>
8. Effects of Pneumatic Defoliation on Fruit Quality and Skin Coloration in 'Fuji' Apples - MDPI, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/2077-0472/14/9/1582>
9. Pigmentation and Flavonoid Metabolite Diversity in Immature 'Fuji' Apple Fruits in Response to Lights and Methyl Jasmonate - MDPI, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/1422-0067/23/3/1722>
10. Analyzing the Quality Parameters of Apples by Spectroscopy from Vis/NIR to NIR Region: A Comprehensive Review - PubMed Central, 4월 28, 2025에 액세스, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10216981/>
11. Non-destructive prediction of apple SSC/TAC and firmness based on multilayer autoencoder and multilayer perceptron - OAE Publishing Inc., 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.oaepublish.com/articles/ir.2025.10?to=comment>
12. Fruit Quality Evaluation Using Spectroscopy Technology: A Review - PMC - PubMed Central, 4월 28, 2025에 액세스, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4481958/>
13. Predicting Good and Bad Quality of Malus Domestica (Fuji Apple) using Machine Learning Algorithm | Request PDF - ResearchGate, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/386900628_Fuji_Apple_Quality_Analyzer_Predicting_Good_and_Bad_Quality_of_Malus_Domestica_Fuji_Apple_using_Machine_Learning_Algorithm>
14. Analyzing the Quality Parameters of Apples by Spectroscopy from Vis/NIR to NIR Region: A Comprehensive Review - MDPI, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/2304-8158/12/10/1946>
15. Relationship between quality characteristics and skin color of 'Fuji ..., 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/344959007_Relationship_between_quality_characteristics_and_skin_color_of_'Fuji'_Apples_Malus_domestica_Borkh>
16. Predicting soluble solids content in “Fuji” apples of different ripening stages based on multiple information fusion | Request PDF - ResearchGate, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/353832754_Predicting_soluble_solids_content_in_Fuji_apples_of_different_ripening_stages_based_on_multiple_information_fusion>
17. Nondestructive determination of SSC in an apple by using a portable near-infrared spectroscopy system - Optica Publishing Group, 4월 28, 2025에 액세스, <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-61-12-3419>
18. Fruits Quality and Sensory Analysis - MDPI, 4월 28, 2025에 액세스, <https://mdpi-res.com/bookfiles/book/10407/Fruits_Quality_and_Sensory_Analysis.pdf?v=1736627437>
19. Shelf-life and sensory assessments reveal the effects of storage treatments with 1-methylcyclopropene on new and established apples - Canadian Science Publishing, 4월 28, 2025에 액세스, <https://cdnsciencepub.com/doi/10.4141/cjps-2014-139>
20. Non-Destructive Estimation of Physicochemical Properties and ..., 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15538362.2022.2092580>
21. The knowledge domain and emerging trends in apple detection based on NIRS: A scientometric analysis with CiteSpace (1989–2021) - PubMed Central, 4월 28, 2025에 액세스, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9731563/>
22. NON-DESTRUCTIVE DEFECT DETECTION OF APPLES BY SPECTROSCOPIC AND IMAGING TECHNOLOGIES - ASABE Technical Library, 4월 28, 2025에 액세스, <https://elibrary.asabe.org/azdez.asp?AID=48486&T=2>
23. PREDICTION OF THE APPLE SUGAR CONTENT OF MULTIPLE VARIETIES BY DIELECTRIC SPECTROSCOPY - ASABE Technical Library, 4월 28, 2025에 액세스, [https://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=3&AID=54744&ConfID=ja2024&v=67&i=3&T=2&redirType=](https://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=3&AID=54744&ConfID=ja2024&v=67&i=3&T=2&redirType)
24. Nondestructive Detection of the Internal Defects of Fuji Apple using VIS/NIR Transmittance Spectroscopy - ASABE Technical Library, 4월 28, 2025에 액세스, <https://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=5&AID=21506&CID=por2006&T=2>
25. Automatic non-destructive video estimation of maturation levels in ..., 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/341669051_Automatic_non-destructive_video_estimation_of_maturation_levels_in_Fuji_apple_Malus_Malus_pumila_fruit_in_orchard_based_on_colour_Vis_and_spectral_NIR_data>
26. Determination of the Most Effective Wavelengths for Prediction of Fuji Apple Starch and Total Soluble Solids Properties - MDPI, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/22/8145>
27. Non-Destructive Hyperspectral Imaging and Machine Learning-Based Predictive Models for Physicochemical Quality Attributes of Apples during Storage as Affected by Codling Moth Infestation - MDPI, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/2077-0472/13/5/1086>
28. Nondestructive estimation of three apple fruit properties at various ripening levels with optimal Vis-NIR spectral wavelength regression data - ResearchGate, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/354406315_Nondestructive_estimation_of_three_apple_fruit_properties_at_various_ripening_levels_with_optimal_Vis-NIR_spectral_wavelength_regression_data>
29. Non-destructive detection of kiwifruit soluble solid content based on hyperspectral and fluorescence spectral imaging - Frontiers, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.1075929/full>
30. Study on the detection of apple soluble solids based on fractal theory and hyperspectral imaging technology - SciELO, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.scielo.br/j/cta/a/9hZqPp8bHmZwbF5JKnJBmfz/?lang=en>
31. Study on the detection of apple soluble solids based on fractal theory and hyperspectral imaging technology - SciELO, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.scielo.br/j/cta/a/9hZqPp8bHmZwbF5JKnJBmfz/?format=pdf&lang=en>
32. Full article: Discrimination of Apples Using Near Infrared Spectroscopy and Sorting Discriminant Analysis - Taylor & Francis Online, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10942912.2014.971181>
33. Shortwave infrared hyperspectral imaging for detection of pH value in Fuji apple | Zhiming, 4월 28, 2025에 액세스, <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/1219>
34. Nondestructive Determination of Soluble Solids Content of 'Fuji' Apples Produced in Different Areas and Bagged with Different Materials During Ripening | Request PDF - ResearchGate, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/283028711_Nondestructive_Determination_of_Soluble_Solids_Content_of_'Fuji'_Apples_Produced_in_Different_Areas_and_Bagged_with_Different_Materials_During_Ripening>
35. Hyperspectral Imaging with Machine Learning Approaches for Assessing Soluble Solids Content of Tribute Citru - MDPI, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/2304-8158/12/2/247>
36. Application of FT-NIR spectroscopy to the measurement of fruit firmness of “Fuji” apples, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/26530155_Application_of_FT-NIR_spectroscopy_to_the_measurement_of_fruit_firmness_of_Fuji_apples>
37. Use of near-infrared spectrometry in temperate fruit: A review - Horticultural Science, 4월 28, 2025에 액세스, <https://hortsci.agriculturejournals.cz/pdfs/hor/2024/03/03.pdf>
38. Dynamic Nondestructive Detection Models of Apple Quality in Critical Harvest Period Based on Near-Infrared Spectroscopy and Intelligent Algorithms, 4월 28, 2025에 액세스, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11171995/>
39. Fruit Quality Evaluation Using Spectroscopy Technology: A Review - MDPI, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/1424-8220/15/5/11889>
40. Nondestructive Determination of Apple Internal Qualities Using Near-Infrared Hyperspectral Reflectance Imaging | Request PDF - ResearchGate, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/275225171_Nondestructive_Determination_of_Apple_Internal_Qualities_Using_Near-Infrared_Hyperspectral_Reflectance_Imaging>
41. Research on the wavelength intersection union fusion selection method for near-infrared spectroscopy analysis of apple sugar degree - SPIE Digital Library, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/13182/131820R/Research-on-the-wavelength-intersection-union-fusion-selection-method-for/10.1117/12.3030742.full?webSyncID=49a28531-ab0d-3a6b-03c9-7c009b6bcd74&sessionGUID=6b80d8e8-abee-aed6-ae05-c117aac5a919>
42. (PDF) Determination of the Most Effective Wavelengths for, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/347002439_Determination_of_the_Most_Effective_Wavelengths_for_Prediction_of_Fuji_Apple_Starch_and_Total_Soluble_Solids_Properties>
43. Objective Quality Assessment of Apples Using Machine Vision, NIR Spectrophotometer, and Electronic Nose | Request PDF - ResearchGate, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/286355163_Objective_Quality_Assessment_of_Apples_Using_Machine_Vision_NIR_Spectrophotometer_and_Electronic_Nose>
44. Nondestructive estimation of three apple fruit properties at various ripening levels with optimal Vis-NIR spectral wavelength regression data, 4월 28, 2025에 액세스, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8461351/>
45. Use of FT-NIR spectrometry in non-invasive measurements of internal quality of 'Fuji' apples, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/229308517_Use_of_FT-NIR_spectrometry_in_non-invasive_measurements_of_internal_quality_of_'Fuji'_apples>
46. Interstem and Its Relationship to 'Fuji' Apple Quality, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1300/J072v02n01_07>
47. Long-term Yield and Harvest Time Fruit Quality Attributes in Various Fuji Apple Strains - ASHS Journals, 4월 28, 2025에 액세스, <https://journals.ashs.org/view/journals/hortsci/49/3/article-p281.pdf>
48. Long-term Yield and Harvest Time Fruit Quality Attributes in Various Fuji Apple Strains in - ASHS Journals, 4월 28, 2025에 액세스, <https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/49/3/article-p281.xml>
49. Comparison of fruit attributes of 'Fuji' apple strains at harvest and after storage, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/342850471_Comparison_of_fruit_attributes_of_'Fuji'_apple_strains_at_harvest_and_after_storage>
50. Fruit quality of 'Gala' and 'Fuji' apples cultivated under different environmental conditions - alice Embrapa, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1143608/1/Fruit-quality-of-Gala-and-Fuji-apples.-2022.pdf>
51. 2024 Apple Horticulture and Postharvest Research Review - Washington Tree Fruit Research Commission, 4월 28, 2025에 액세스, <https://treefruitresearch.org/wp-content/uploads/2019/12/2024-Apple-Horticulture-and-Postharvest-Research-Review-Book_website.pdf>
52. Differences in Ethylene and Fruit Quality Attributes during Storage in New Apple Cultivars, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.hst-j.org/articles/xml/GeYK/>
53. (PDF) Relationship between Preharvest Factors and the Incidence of Storage Disorders in 'Fuji' Apples during CA Storage - ResearchGate, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/277455439_Relationship_between_Preharvest_Factors_and_the_Incidence_of_Storage_Disorders_in_'Fuji'_Apples_during_CA_Storage>
54. Aminoethoxyvinylglycine (Retain®) Affects Dissipation of Watercore of 'Fuji' Apple | Request PDF - ResearchGate, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/365203229_Aminoethoxyvinylglycine_RetainR_Affects_Dissipation_of_Watercore_of_'Fuji'_Apple>
55. Effects of Preharvest and Postharvest Applications of 1-Methylcyclopropene on Fruit Quality and Physiological Disorders of 'Fuji' Apples - ASHS Journals, 4월 28, 2025에 액세스, <https://journals.ashs.org/view/journals/hortsci/54/8/article-p1375.pdf>
56. Effects of Preharvest and Postharvest Applications of 1-Methylcyclopropene on Fruit Quality and Physiological Disorders of 'Fuji' Apples during Storage at Warm and Cold Temperatures in - ASHS Journals, 4월 28, 2025에 액세스, <https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/54/8/article-p1375.xml>
57. Apple Watercore Grade Classification Method Based on ConvNeXt and Visible/Near-Infrared Spectroscopy - MDPI, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/2077-0472/15/7/756>
58. Development of structured illumination reflectance imaging technique as a new modality for enhanced defect detection of apples - Digital Repository, 4월 28, 2025에 액세스, <https://d.lib.msu.edu/etd/19373>
59. Identification of mechanical damage in the 'Fuji' apple cv. using artificial hyperspectral vision, 4월 28, 2025에 액세스, <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532019000300224>
60. Identification of mechanical damage in the 'Fuji' apple cv. using artificial hyperspectral vision, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.redalyc.org/journal/496/49662789029/html/>
61. Geographical classification of apple based on hyperspectral imaging - ResearchGate, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/269325573_Geographical_classification_of_apple_based_on_hyperspectral_imaging>
62. sar image classification: Topics by Science.gov, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.science.gov/topicpages/s/sar+image+classification>
63. State-of-the-Art Techniques for Fruit Maturity Detection - MDPI, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/12/2783>
64. Research on Innovative Apple Grading Technology Driven by Intelligent Vision and Machine Learning - MDPI, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/2304-8158/14/2/258>
65. Correlation analysis between chemical or texture attributes and stress relaxation properties of 'Fuji' apple | Request PDF - ResearchGate, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/316009786_Correlation_analysis_between_chemical_or_texture_attributes_and_stress_relaxation_properties_of_'Fuji'_apple>
66. Quality and Aroma Characteristics of 'Fuji' Apples According to Storage Method, 4월 28, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/366327034_Quality_and_Aroma_Characteristics_of_'Fuji'_Apples_According_to_Storage_Method?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7InBhZ2UiOiJzY2llbnRpZmljQ29udHJpYnV0aW9ucyIsInByZXZpb3VzUGFnZSI6bnVsbCwic3ViUGFnZSI6bnVsbH19>
67. Correlation of Sensory Analysis with Physical Textural Data from a Computerized Penetrometer in the Washington State University Apple Breeding Program in - ASHS Journals, 4월 28, 2025에 액세스, <https://journals.ashs.org/horttech/view/journals/horttech/20/6/article-p1026.xml>
68. Chemometric Classification of Apple Cultivars Based on Physicochemical Properties: Raw Material Selection for Processing Applications - PubMed Central, 4월 28, 2025에 액세스, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10453866/>