최 종
연구보고서

GA0485-0113

내부 품온 예측 및 모니터링 기술에 의한 과실의 저장·유통 모델개발

Model development for storage and distribution of apple using the numerical prediction simulation of internal temperature and real time monitoring techniques

연 구 기 관

한국식품연구원

농 림 부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “내부 품온 예측 및 모니터링 기술에 의한 과실의 저장·유통 모델개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2004 년 10 월 14 일

주관연구기관명 : 한국식품연구원

위탁연구기관명 : 전 주 대 학 교

총괄연구책임자 : 김 종 훈

위탁연구책임자 : 이 충 호

참 여 연 구 원 : 정 진 웅

참 여 연 구 원 : 권 기 현

참 여 연 구 원 : 김 의 웅

참 여 연 구 원 : 이 호 준

참 여 연 구 원 : 유 정 환

요 약 문

Ⅰ. 제 목

내부 품온 예측 및 모니터링 기술에 의한 과실의 저장·유통 모델 개발

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 중요성

최근 사회 환경의 변화와 식생활의 개선으로 과실의 소비는 꾸준히 증가하고 있으며, 안정성과 품질에 관한 소비자의 관심이 높아지고 있다. WTO, FTA 등 농산물 수입 자유화에 따른 국내 농산물의 대내외적 경쟁력 제고를 위해 고품질의 소비자 지향적 농산물 공급이 요구되고 있는 실정이다. 또한 농산물의 교역이 국제화됨에 따라 과실도 생산위주에서 경영개선 위주로 전환되고 있다. 과실의 수확 후 손실은 개발도상국의 경우에는 20~50%, 선진국의 경우에는 5~25%로 추정되고 있다. 최근 국내에서도 정부의 유통구조 개선사업이 추진되어 시행착오 속에서도 과실의 유통이 규격화되고 표준화되어 가고 있다. 이러한 지속적인 유통구조 개선사업과 더불어 유통과정 중 과실의 품질을 지속적으로 유지하기 위한 연구도 활발히 진행 될 것이다.

일반적으로 국내 과실의 유통은 수확 후 예냉을 거쳐 저온저장 후 시장에 출하된다. 현재 국내의 경우 다양한 연구를 통해 품종별 사과의 저온저장 기간 및 출하시기 등의 예측이 가능하며 등급판정 또한 영상처리기술을 이용한 자동선별 시스템의 이용이 확대되고 있다. 후지사과의 경우 저온저장을 통해 6개월 이상을 저장하고 있으며, 저장기간 중에 호흡에 영향을 주는 요인에 대한 다양한 연구가 수행되어지고 있다. 최근 근적외분광분석법 등과 같은 비파괴적인 방법을 이용한 사과 내부의 당, 산도 측정 등의 연구도 활발히 추진되고 있다. 그러나 사과내부의

온도분포나 세포 변화와 같은 내부의 역학적인 요인에 관한 연구는 세계적으로도 연구가 미진한 실정이다. 이와 같은 연구를 위해서는 현미경 수준에서 측정한 영상분석 기술과 유한요소법(finite element method) 등을 이용한 공학적인 해석이 필요하며 컴퓨터 시뮬레이션 기술을 통하여 저장 유통 중에 과실 내부의 품질변화에 대한 예측모델 개발이 가능할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 사과의 수확 후 저장, 유통과정에서 온도 등의 외부환경 변화에 대한 내부 품온 변화 예측 및 단일세포 상태를 모니터링 할 수 있는 기술을 개발하여, 최종 소비자에게 유통될 때의 사과 품질에 의한 소비자 구매도를 예측하고자 하였다. 이러한 기술은 수확 저장 후 상온 또는 냉장유통 단계에서 과실 내부의 품질을 모니터링 하여 유통과정에서 유통방법 및 외부환경에 따라 유통기한을 예측할 수 있을 것이다.

Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

1. 외부온도 변화에 따른 사과의 내부 품온 예측 기술 개발
   - ○ 사과 내부온도 변화 수학적 모델링
   - ○ FDM, FEM을 이용한 사과 내부온도 예측 프로그램 개발
   - ○ 개발된 사과 내부온도 예측 모델 검증
2. 사과 내부 세포 구조 분석 기술 개발
   - ○ 외부환경에 따른 사과 세포의 단면 분석
   - ○ 영상처리기술을 이용한 측정세포 구조 분석 기술
3. 외부온도에 따른 사과의 품질변화 분석
   - ○ 외부환경에 따른 사과의 화학적, 물리적 특성
   - ○ 관능평가에 의한 사과 품질기준 선정

○ 외부환경에 따른 온도분포와 품질기준의 상관성 분석

4. 사과의 품질 모니터링 기술 개발

○ 저장, 유통과정 중 사과 내부 품온 변화 예측 기술

○ 저장, 유통과정 중 사과 내부품질 예측 기술

○ 외부환경 변화에 따른 사과 내부 품질 모니터링 기술

Ⅳ. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

본 연구에서는 사과의 수확 후 저장, 유통과정에서 온도 등의 외부환경 변화에 따른 사과 내부 품온 변화 예측 기술, 내부 세포 영상처리 기술 및 설정된 온도에서 시간에 따라 품질을 예측하는 기술을 개발하였다. 본 연구의 주요 연구결과는 다음과 같다.

○ 외부온도에 따른 사과의 내부 품온 예측 기술을 개발하였다. 유한차분법과 유한요소법을 이용한 과실의 내부 품온 예측 모델을 통하여 사과의 내부 온도 예측 프로그램을 개발하였다. 유한차분법을 이용한 사과의 품온 예측 모델의 경우 검증 결과에서 실험값과 시뮬레이션 예측값의 관계는 선형적으로 나타났으며, 결정계수는 0.85로 나타났다. 유한요소법을 이용한 사과의 품온 예측모델의 경우에는 검증 결과 실험값과 시뮬레이션 예측값은 선형적인 관계를 가지며 결정계수가 0.95로 유한차분법을 이용한 사과 품온 예측 모델은 유의적인 것으로 분석되었다. 유한요소법을 이용한 사과 품온 예측 모델은 유한차분법을 이용한 사과의 품온 예측 모델의 결정계수 0.85보다 높게 나타났으며, 샘플시료의 실제 모형 분석이 가능하고 유한요소 해석 결과를 데이터베이스화하여 사용자의 입력 조건에 가장 적합한 해석 결과를 찾아 임의의 시간에 사과 내부의 온도분포를 모니터링할 수 있으므로 유한차분법의 모델보다는 현장에 적용하기 적합한 모델로 판단되었다.

○ 과실 내부 세포 구조 분석 기술을 개발하였다. 현미경 수준에서의 영상측정의 정밀도 향상을 위한 사과 세포 영상분석을 위한 알고리즘 및 소프트웨어를 개발하였다. 세포벽의 변화는 온도변화에 대한 화소수의 변화를 가지고 산출하였으며 저장 유통과정중의 세포내부의 변화는 열적특성을 기계적인 특성으로 대치하여 산출하였다. 본 연구를 통해 3차원으로 가시화 된 세포 모델은 솔리드 모델화를 통해 상용해석 프로그램을 사용한 과실 세포의 상태변화를 분석하는 것이 가능하며, 향후 나노기술 등을 융합한 연구가 필요하리라 본다.

○ 사과의 외부온도에 따른 품질변화를 분석하기 위하여 외부온도별 시간에 따른 수분, 당도, 산도, 색도, 경도를 측정하였으며, 색, 향, 맛, 조직감, 종합 평가, 구매도에 대한 관능검사를 실시하였다. 시간에 따른 사과의 수분은 유의적인 차이가 나타나지 않았다. 당도와 경도의 경우에는 시간이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났으며, 산도는 시간이 증가함에 따라 증가하는 경향이 나타났다. 색도의 경우 시간에 따라 L, a 값은 유의적인 경향이 나타나지 않았으나, b 값의 경우에는 시간이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 수분, 당도, 산도 L, a, b, 경도와 소비자 구매도와의 상관계수는 각각 0.19, 0.85, -0.76, -0.30, -0.16, -0.67, 0.92로 나타났다.

○ 사과의 외부온도에 따른 관능검사 결과에서 색, 향, 맛, 조직감, 종합적인 평가의 모든 항목은 시간이 경과함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 외부온도가 높을수록 시간이 경과함에 따라 모든 항목에서 감소하는 폭이 컸으며, Duncan's multiple range test 결과 초기와 비교하여 유의적인 차이가 나타나는 시간은 향, 맛, 조직감, 전체적인 평가 항목에서 외부온도 25℃의 경우는 각각 21일, 7일, 7일, 7일로 외부온도 15℃의 각각 84일, 56일, 28일, 56일보다 매우 빠른 것으로 나타났다. 사과의 종합적 평가와 색, 향, 맛, 조직감과의 상관계수는 0.850, 0.910, 0.973, 0.974로 조직감과 맛이 종합적 평가와 가장 상관성이 큰 것으로 나타났다.

○ 오차 역전파(back propagation) 다층 신경회로망(mult-layer neural network)을 사용하여 사과의 품질 모니터링 모델을 개발하였다. 품질 모니터링 모델은 주어진 외부온도에서 유통, 판매될 때 소비자 구매도를 예측하는 것으로서 예측모델의 독립변수는 당도, 산도, L, b, 경도를 사용하였다. 신경회로망 학습으로 개발된 사과 품질 모니터링 모델의 검증 결과는 소비자 구매도에 대한 예측값과 실험값의 관계가 선형적으로 나타났으며, 결정계수는 0.82로서 사과 품질 모니터링 모델의 소비자 구매도의 예측값은 유의적인 것으로 판단되었다. 향후 본 연구에서 사용한 변수외에 소비자 구매도와 사과의 품질에 영향을 미치는 요인들을 모델의 변수로 추가한다면 좀 더 높은 예측성능을 가지는 모델로 개선될 것이다.

○ 본 연구에서 개발된 사과 내부 품온 예측 기술, 세포 구조 분석 기술 및 품질 모니터링 기술이 접목되어 사과의 수학 후 저장, 이송, 판매 등의 유통과정에서 외부 온도 변화에 따른 내부 품온 예측 및 신경회로망을 이용한 소비자 구매도를 예측하여 제시된 사과의 시간 경과에 따른 품질 변화 예측과 판매가 가능한 기간 등을 산출하여 사과의 수학 후 유통과정 중의 품질을 모니터링 할 수 있다. 이러한 기술의 개발은 향후 과실의 수확 후 유통과정에서 품질을 지속적으로 유지할 수 있는 기술 개발에 활용되어 관련 분야의 발전에 기여할 것으로 판단된다.

SUMMARY

In this study, three different technologies were developed. First, prediction technology of inner thermal variance of an apple with its environmental changes such as storage and shelf life after harvesting was developed. Second, image processing technology of inner cell structure was developed. At last, prediction technology of quality for an apply at specific time and temperature was also developed.

The main results of this study are like followings.

○ We developed prediction technology of inner thermal variance of an apple with environment temperature. And we also developed software program for prediction of inner temperature of an apple based on FDM and FEM methods. In the case of prediction model based on FDM method, predicted values and measured values were linear (R^2=0.78). In the case of prediction model based on FEM method, predicted values and measured values were linear (R^2=0.87). The results were proved to available.

○ 3D visualization model for FEA and software was developed using image processing technique for real and microscopic image, and it gives basic result to estimate a variation of temperature through FEA and visualization image processing. Further result should be performed to verify the simulation result such as new measurement technique. Variation of cell wall according to the temperature changes was measured by total pixel number of one cell, and

an condition of internal cell tissue was measured mechanical changes substitution for thermal properties.

○ We measured moisture content, soluble solid, pH, color, hardness for apple and also experimented sensory evaluation of color, flavor, taste, texture, overall evaluation, purchasing index at the same time. Moisture content was proved to non-available. Soluble solid and Hardness were decreased but pH was increased as a function of time. In case of Color, L and a factors were non-available but b factor was available. Relative coefficients between Purchasing index and other factors such as Moisture content, Soluble solid, pH, L, a, b, Hardness were 0.19, 0.85, -0.76, -0.30, -0.16, -0.67, 0.92 respectively.

○ In the results of sensory evaluation of apple, Color, Flavor, Taste, Overall evaluation were decreased as a function of time. And the decreasing rate became larger when outside temperature were higher. According to the result of Duncan's multiple range test, the variance time of factors at 25℃ outside temperature were more faster than that of 15℃ outside temperature. And the date which noticeable change appeared are 21th, 7th, 7th, 7th at 25℃ outside temperature but 84th, 56th, 28th, 56th at 15℃ outside temperature for the factor of Flavor, Taste, Texture, Overall evaluation. Relative coefficients between Overall evaluation and Color, Flavor, Taste, Texture are 0.850, 0.910, 0.973, 0.974, respectively - which showed that Texture and Taste were major factors.

○ Quality monitoring program of an apple using back propagation and multi-layer neural network was developed, which was used to predict purchasing index at specific temperature during distribution and marketing.

Soluble solid, pH, color and hardness were used as independent variables of prediction model. The results of prediction model by multi-layer neural network were linear between predicted value and measured value(R^2=0.82) and was proved to available.

CONTENTS

Chapter 1 Introduction ····· 17

Section 1 Background and objectives ····· 17

Section 2 Literature review ····· 20

Chapter 2 Materials and Methods ····· 26

Section 1 FDM modeling ····· 26

Section 2 FEM modeling ····· 36

Section 3 Image analysis of fruits cell ····· 41

Section 4 Monitering of fruit qualities ····· 45

Chapter 3 Results and Discussion ····· 50

Section 1 Prediction of inner temperature of apple based on FDM ··· 50

1. Prediction program of inner temperature ····· 50

2. Thermal properties of apple ····· 52

3. Verification ····· 53

Section 2 Prediction of inner temperature of apple based on FEM ··· 56

1. Simulation model ····· 56

2. Prediction program of inner temperature ····· 58

3. Verification ····· 61

Section 3 Image processing technology of fruits cell ····· 63

1. Algorithm ····· 63

2. Image analysis program ····· 70

3. Cell analysis with temperature change ····· 72
4. Cell structure analysis of apple ····· 75
Section 4 Quality monitering technology of apple ····· 79
1. Qualities change analysis ····· 79
2. Primary factors analysis ····· 89
3. Qualities monitering model ····· 92

Chapter 4 Summary and Conclusion ····· 95

Reference ····· 99

목 차

제 1 장 서 론 ····· 17

제 1 절 연구개발 목표 및 필요성 ····· 17
제 2 절 관련기술 현황 ····· 20

제 2 장 재료 및 방법 ····· 26

제 1 절 유한차분법 모델링 ····· 26
제 2 절 유한요소법 모델링 ····· 36
제 3 절 과실 세포 영상 분석 ····· 41
제 4 절 과실 품질 모니터링 ····· 45

제 3 장 결과 및 고찰 ····· 50

제 1 절 유한차분법에 의한 과실의 품온 예측 ····· 50
1. 품온 예측 프로그램 ····· 50
2. 사과의 열특성 ····· 52
3. 품온변화 및 검증 ····· 53
제 2 절 유한요소법에 의한 과실의 품온 예측 ····· 56
1. 시뮬레이션 모델 ····· 56
2. 품온 예측 프로그램 ····· 58
3. 모델 검증 ····· 61
제 3 절 과실세포의 영상분석 기술 ····· 63
1. 과실 세포 영상처리 알고리즘 개발 ····· 63
2. 영상분석 프로그램 ····· 70

3. 온도변화에 따른 세포분석 ····· 72
4. 저장, 유통 과정 중 사과 세포구조 분석 ····· 75
제 4 절 사과의 품질 모니터링 기술 ····· 79
1. 외부온도별 시간에 따른 품질변화 ····· 79
2. 품질변화에 따른 주요 요인 분석 ····· 89
3. 품질 모니터링 모델 ····· 92

제 4 장 요약 및 결론 ····· 95

참고문헌 ····· 99

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발 목표 및 필요성

최근 사회 환경의 변화와 식생활의 개선으로 인하여 과실의 소비는 꾸준히 증가하고 있으며, 안정성과 품질에 관한 소비자의 관심이 높아지고 있다. WTO, FTA 등 농산물 수입 자유화에 따른 국내 농산물의 대내외적 경쟁력 제고를 위해 고품질의 소비자 지향적 농산물 공급이 요구되고 있는 실정이다. 또한 농산물의 교역이 국제화됨에 따라 과실도 생산위주에서 경영개선 위주로 전환되고 있다. 절대 생산량의 증가도 중요하지만 비용절감 및 부가가치를 높일 수 있는 방안이 모색되어야 한다. 과실의 수확 후 손실은 개발도상국의 경우에는 20~50%, 선진국의 경우에는 5~25%로 추정되고 있다. 최근 국내에서도 정부의 유통구조 개선사업이 추진되어 시행착오 속에서도 과실의 유통이 규격화되고 표준화되어 가고 있다. 이러한 지속적인 유통구조 개선사업과 더불어 유통과정 중 과실의 품질을 지속적으로 유지하기 위한 연구도 활발히 진행 될 것이다.

과실의 수확 후 처리기술에 관한 연구는 수확 후 세척, 선별 등의 전처리 기술 개발 및 저장성 향상을 위한 기술 개발 등 여러 분야에서 활발히 수행되고 있다. 그러나 대부분 단위공정별 연구가 진행되었으며 수확 후에 전처리, 예냉, 저장, 유통 등 소비자에게 공급되는 과정에서 발생하는 온도 등 외부의 환경변화에 대한 공학적 해석에 관한 연구는 미비한 실정이다.

사과의 저장 유통 중의 품질변화는 화학적 요인과 물리적인 외적인 요인에 의하여 나타나게 되며 각각은 양립할 수 없는 중요한 요인으로 상호적인 성질을 갖는다. 사과의 저장 유통 중의 품질변화는 복합적이며 다양한 각도에서의 연구가 국내외에서 활발히 수행되었다. 저장기간 중 또는 유통 중에 영향을 주는 큰 요인으로는 온도, 습도, 산소, 이산화탄소, 운반 저장과정 중에 가해진 외력 등과 같은

외부적 요인과 이로 인해 내부에서 생성되는 이화학적 변화에 따른 요인으로 구분된다.

일반적으로 국내 과실의 유통은 수확 후 예냉을 거쳐 저온저장 후 시장에 출하된다. 현재 국내의 경우 다양한 연구를 통해 품종별 사과의 저온저장 기간 및 출하시기 예측이 가능하며 등급판정 또한 영상처리기술을 이용한 자동선별시스템의 이용이 확대되고 있다. 후지사과의 경우 저온저장을 통해 6개월 이상을 저장하고 있으며, 저장기간 중에 호흡에 영향을 주는 요인에 대한 다양한 연구가 수행되어지고 있다. 최근 근적외분광분석법 등과 같은 비파괴적인 방법을 이용한 사과 내부의 당, 산도 측정 등의 연구도 활발히 추진되고 있다. 그러나 사과내부의 온도분포나 세포 변화와 같은 내부의 역학적인 요인에 관한 연구는 세계적으로도 연구가 미진한 실정이다. 이와 같은 연구를 위해서는 현미경 수준에서 측정한 영상분석 기술과 유한요소법(finite element method) 등을 이용한 공학적인 해석이 필요하며 컴퓨터 시뮬레이션 기술을 통하여 저장 유통 중에 과실 내부의 품질변화에 대한 예측모델 개발이 가능할 것으로 판단된다.

유통되는 과일의 품질유지는 판매상에게는 매우 중요한 문제다. 실제 소매되는 환경에서 과일의 품질이 어떻게 영향을 받는가에 대한 정보가 국내의 경우 부족한 실정이다. 판매중의 과일에 생기는 변화는 소비자의 선택과 판매 가격에 중요한 영향을 미치고 있는 실정이다. 과실의 생산과 유통에 관련된 단체에서는 비용감소 및 품질 유지를 위한 적절한 유통 조건 및 유통기한 산출이 절실한 실정으로, 과실의 수확 후 예냉, 저온저장 및 유통 과정의 외부환경 변화에 따른 과실의 내부 품온 및 품질 변화를 예측할 수 있는 기술의 개발이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 수확 후 저장, 유통과정 중의 온도 등의 외부환경 변화에 대한 내부 품온 변화 예측 및 단일세포 상태를 모니터링 할 수 있는 기술을 개발하여, 최종 소비자에게 유통될 때의 사과 품질에 의한 소비자 구매도를 예측하고자 하였다. 이러한 기술은 수확 저장 후 상온 또는 냉장유통 단계에서 과실 내부의 품질을 모니터링 하여 유통과정에서 유통방법 및 외부환경에 따라 유통기한을 예측할 수 있을 것이다. 사과의 저장 및 유통방법에 따른 유통기한 예측은

수익성 향상과 과다한 냉장 또는 저온 처리비용의 감소를 위해 중요하며 특히 세포상태의 영상분석에 의한 구조해석은 포장재의 선정 및 운반과정에서의 내부손상에 대한 해석에 있어서 중요하리라 판단된다.

제 2 절 관련기술 현황

1. 과실 내부 열전달 해석

유한요소법(Finite Element Method, FEM)은 구조공학분야에서 발전하여 과학기술 전반에 적용되는 수치해석 또는 시뮬레이션 기법으로서, 공학적 문제를 수치적으로 풀어내는 조직적인 방법의 하나이다. 유한요소법이 다른 수치적 근사법과 다른 특징을 요약한다면 다음과 같다. 유한요소(finite element)라 불리 우는 물리적 혹은 편의상 나누어진 요소 위에 정의된 특정함수를 주어진 문제에 맞는 어떤 적분형의 원리에 사용하여, 연속체 문제를 유한차원 문제로 수식화하는 근사적인 방법이다. 유한차분법(Finite Difference Method, FDM)은 경계조건이 제약이 있으나 단순하게 적용이 가능한 장점이 있다.

유한요소법은 1930년대에 개발된 Matrix이론을 사용하여 1960년대에 영국과 미국에서 개발되어 이론화 및 상용화가 이루어진 것은 컴퓨터의 발전이 이루어진 1970년대 이후이다. 이러한 유한요소법은 공학과 물리학에서 많이 사용되었으며 컴퓨터 하드웨어의 발전과 더불어 급속히 발전하였다.

유한요소법은 초기에는 복잡한 구조물의 응력해석을 위해 개발되었으나, 그 후 발전을 거듭하여 연속체 역학(continuum mechanics)분야 등 광범위한 분야에서 사용되고 있다. 구조물에 대해 요소의 공통되는 점, 선 및 면 등에서 여러 가지 경계조건을 사용하여 수식을 만들고, 이를 이용해 구조물 전체에 대한 연립 대수 방정식을 만들어 해를 구한다. 공통되는 점이나, 선, 면이 많아질수록 연립방정식이 커지게 되어 해를 구하는데 많은 계산이 필요하게 되었고, 이러한 특징으로 인하여 유한요소법은 컴퓨터의 발전 속도와 비례하여 발전하였다. 유한요소법은 여러 가지 엔지니어링(engineering)분야에 적용이 가능하지만, 구조분야에서 가장 먼저 적용이 되었고, 현재는 열, 유동해석 등 다양한 분야에서 적용이 되고 있다.

2. 과실 내부 세포 분석

농산물은 힘이 가해지는 경우에 변형이 수반되고 파괴가 일어난다. 이와 같은 점탄성의 내부성질에 대한 비파괴적인 검사 및 내부 상태의 역학적 거동을 해석하는 연구에 대한 필요성은 샘플링 방법, 수확 후 다양한 샘플의 상태변화에 따른 제약이 따른다. 식물체는 세포의 집합체이므로 개별 세포에 대한 고찰 연구가 중요하다. 그동안 국내외의 많은 연구는 전체 식물체를 대상으로 역학적인 특성을 고찰한 연구가 대부분이다.

현재 세계적으로 관심이 있는 식물세포분야의 연구는 현미경 수준에서 측정된 식물 세포의 형상을 연속적으로 단층 촬영한 후 이를 이용한 3차원 형태의 단일 또는 복수의 세포벽 형상을 복원하여 개개의 세포벽으로 구성된 식물세포 내부를 분석하기 위한 영상처리 방법과 힘 또는 열에 의한 변형을 해석하기 위한 유한해석모델을 자동으로 생성하여 향후 다양한 센싱기술과 융합하여 내부의 변화를 정량적으로 분석할 수 있는 기반기술의 개발이 포함된다.

이와 같은 연구는 초기에는 영률(Young's modules)과 포와송비(Poisson's ratio)와 같은 인자를 측정하여 식물체를 탄성체 또는 점탄성체로 가정한 모델개발에 대한 연구로 시작하였으며, 영률은 일축 압축시험기를 이용하여 실시한 연구가 많았고 포와송비는 횡방향의 변위를 직접 계측하였다. 다음으로 3축 압축시험에 의해 체적 탄성률을 구하는데, 이것과 일축압축시험의 결과를 이용하여 해석하였다. 그 밖의 계측방법에는 충격실험, 주파수응답실험이 있으며 과실 전체의 물리적 특성에 중요한 표피에 대한 물리적 특성을 연구하였다.

1970년대에는 식물체를 점탄성체로 가정하여 유명한 맥스웰모델(Maxwell model), 켈빈모델(Kelvin model) 등이 개발되어 분석에 사용되었고 유한요소법이 도입된 시기이며 전자현미경을 이용하여 식물 파단면에 대한 관찰을 수행하였다. 1980년대에 들어와서는 새로운 연구가 시도되었는데 조직을 평면의 6각형 형태로 치환하여 세포의 팽압과 조직세기의 관계에 관한 고찰과 세포를 얇은 벽체 둘레에 액체가 가득 채워진 구형으로 가정하여 여기에 외력을 가한 후 변형을 관찰하

는 연구가 시도되었다. 최근에는 영상처리기술을 이용한 세포파괴와 공간내의 재배열이라 불리는 관점에서 모델화를 수행하여 조직 물리특성을 결정하는 연구가 수행되고 있으며, Pitt는 세포의 형상이 14면체가 된다는 것에 착안하여, 세포 한 개에 해당하는 거동을 해석할 수가 있다는 가정을 바탕으로 이론 모델식을 개발하였다. 국내의 경우 아직 농산물의 수확, 저장, 운반 등의 작업을 고려한 식물 세포단위의 힘의 거동에 대한 연구가 수행되고 있지 않으며 일부 시험편에 의한 조직의 인장 압축시험을 수행한 연구사례가 보고되고 있다.

현재 마이크로 단위의 미세 가공기술에 대한 개발이 활발히 수행되고 있는 상황에서 마이크로 단위의 힘의 거동해석을 위한 영상처리 기술의 개발과 유한해석을 위한 자동 매쉬 생성 등의 연구는 향후 미소 계측기술의 발달과 융합하여 세포벽에의 직접계측에 의한 물성연구에 중요하다.

3. 과실의 품질 관련 기술

과실의 품질에 관한 연구는 활발히 수행되어지고 있다. 국내의 경우 사과의 저장기간에 대한 연구는 사과의 호흡에 영향을 주는 이산화탄소, 산소의 변화에 대한 연구가 수행되었다. 일반적으로 사과는 급등형의 발육단계를 가지며 호흡량이 최소점에 이르면 과실의 성숙은 완료되므로 이 시점이 과실의 수확시기에 해당하며 수확 후 저장 또는 유통 기간에 해당되는 시기는 호흡의 증가가 계속되어 호흡량이 최고점에 이르는 시기로 후숙이 완료되어서 과실은 식용에 가장 적합한 상태가 된다. 후숙이 완료된 후 호흡은 다시 감소하기 시작하며 과실의 노화가 진행되어 세포의 생리적 기능 상실 및 조직의 점차적인 붕괴와 함께 품질이 급격히 떨어지게 된다.

사과내부에서 일어나는 여러 생리적 반응은 온도의 변화에 큰 영향을 받으며, 일반적으로 온도가 낮을수록 반응속도가 느려진다. 특히 수확 후 과실의 호흡은 온도의 영향을 심하게 받아 호흡량이 감소하며 상온에서 보다 저온에서 호흡량이

전반적으로 낮은 수준을 유지한다. 같은 품종에서도 수확 후에 호흡은 변화되는데 수확시 보다는 어느 정도 기간이 지나면 상온 및 저온에서 호흡이 최대치에 이르는 시점(climacteric peak)이 있다. 이점을 지나면 과실은 노화되어 상품성을 상실하기 시작한다. 상온 보다는 저온에서 호흡 최대치에 이르는 시점이 늦추어 진다. 호흡의 최대치를 지나면 과실은 노화되어 상품성을 상실하기 시작하기 때문에 에틸렌 발생량과 비교하여 상온유통 및 저온저장 기간을 설정할 수 있다. 이는 내부 품온의 변화와 밀접한 것으로 발표되고 있으며, 이를 이용한 한계치 설정에 관한 전문가적인 진단시스템 개발에 관한 연구가 진행될 것이다.

경도과실은 성숙함에 따라 과육의 단단함을 구성하는 세포벽의 두께나 강도, 세포끼리의 결합 능력이 떨어져 연화하게 된다. 세포벽을 구성하는 물질은 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 펙틴 등이 있는데 과육의 연화는 이러한 물질을 분해하는 효소의 작용에 의해서이다. 사과의 단단함은 기상조건과 환경 인자에 의해 다를 수 있으나 일반적으로 유전적인 요소가 크게 좌우하여 수확기의 경도가 다르게 나타나고 있으며, 저장 중에도 연화되는 정도는 품종에 따라 차이를 보이는 것으로 보고되고 있다.

실제 소매되는 환경에서 과일의 품질이 어떻게 영향을 받는가에 대한 정보가 부족한 가운데서 벨기에에서는 상대습도가 유통되는 과일의 품질에 미치는 영향을 보다 체계적으로 조사하였다. Verstreken과 De Baerdemaeker는 저장 시간, 온도, 상대습도가 복숭아의 성숙 과정에 미치는 효과를 연구하고 저장 중에 그 과일의 중량 감소를 예측할 수 있는 회귀 모형을 제안한 바 있다.

Landrigan 등(1996)은 열대과일의 수확 후 갈변에 상대습도가 미치는 효과를 조사하고 높은 상대습도에서 손상 받은 조직이 갈변하는 것은 효소가 관여하기 때문일 것이라고 발표하였다. 낮은 상대습도에서는 건조가 갈변의 주요 요인이었기 때문에 억제물질은 효과가 없는 것으로 보고하였다. Hatfield와 Knee(1988)는 저장 중 수분 손실이 사과 품질에 미치는 효과를 보고했는데 그들은 사과 과일 내부의 공기 공간(internal air spaces)을 결정하는 방법을 보고했고 높은 IAS가 분질에 상응한다고 발표했다. 수분 손실은 심한 시들음, 연화, 주름짐, 보기 싫은

분질 (가루가 낀 것 같은 증상)을 일으키게 된다고 하였다.

벨기에 Katholieke Universiteit Leuvend의 K. Tu 등은 Braeburn, Jonagold 두 사과 품종의 조직 발달을 세 가지 상대습도 조건 하에서 추적했다. 인장 시험 후에 시료가 터진 표면에서 세포벽의 구조 변화를 조사하기 위해서 주사전자현미경 관찰을 수행하였다. 이 연구의 목적은 상대습도에서 사과 품질에 상대습도가 미치는 효과를 조사하는 것으로써 파괴적인 방법과 비파괴적 방법으로 조사하였다. 연구자들은 단순히 중량 감소만을 조사하는데 그치지 않고 굳기, 다즙성, 분질 등과 같은 다른 중요한 조직 파라미터들을 연구하였고 그 결과를 세포 구조 변화에 관련시켰다. 사과의 굳기, 짜낼 수 있는 즙액의 함량, 중량 감소, pH, 가용성 고형물 함량(SSC), 그리고 기타 품질 변량들을 기기적으로 결정하였다. 연구 결과 상대습도는 중량감소, 굳기, SSC 값에 중요한 효과를 가지고 있는 것으로 발표하였다.

4. 신경회로망 응용 기술

최근 기존의 해석학적으로 풀기 어려운 문제들을 해결하는 방법으로 지능처리 시스템(intelligent processing system)에 관한 연구가 활발히 추진되고 있으며, 이런 시스템에서 중요한 역할을 하는 것이 신경회로망(neural network)이다. 신경회로망이란 생물의 뇌신경조직을 수학적인 모델로 대체한 것으로 정보의 병렬처리, 자기조직 및 연상(self organization) 능력 등을 이용하고자 개발되었다.

신경회로망은 1960년대 초반에 Rosenblatt에 의해 퍼셉트론에 대한 심층적인 이론이 발표되었고, Widrow 등이 Adaline 모델의 학습시스템 발표하였는데 이는 최소평균자승 알고리즘을 적응제어(adaptive control) 등에 적용하였다. 초기에 퍼셉트론 이론은 개념이 간단하여 많은 연구자의 반응을 받았으나 Minsky와 Papert가 퍼셉트론 이론이 복잡한 논리함수에 적용이 안 된다는 것을 수학적으로 증명하여 관심이 퇴조되었다. 1970년대에 Werbos는 다층퍼셉트론이라 불리우는 MLP(multi layer perceptron)의 학습이론인 오차역전파(error back propagation)

알고리즘을 개발하였으며, 1980년대에 들어 Rumelhart 등에 의해 이공학분야에서 오차역전달(BP) 알고리즘이 재조명되면서 퍼셉트론에 대한 관심이 높아지게 되었다. 이 BP 알고리즘은 동적시스템(dynamic system)에 가장 많이 적용되고 있다. 1980년대의 활발한 연구 활동으로 인해 신경망에 대한 관심이 고조되어 현재까지도 여러 분야에 걸쳐 수많은 응용논문들이 발표되고 있다.

신경회로망의 연구 및 적용기술의 개발이 생물학, 심리학, 물리학 분야를 포함하여 컴퓨터를 비롯한 공학 전 분야에 걸쳐 활발히 추진되고 있다. 이 작업의 가장 중요한 목적은 인간의 능력처럼 반복적인 경험으로부터 학습할 수 있다는 것이다. 신경회로망은 많은 선형 또는 비선형 모델들이 병렬적으로 연결되어 있어서 정보의 처리속도가 빠르며 자기연상에 의해 학습(learning)이 가능하다는 장점을 가진다. 자기연상에 의해 신경회로망은 데이터의 변화에 적응할 수 있으며 입력과 출력간의 관계를 매핑(mapping)을 통해 학습을 수행한다. 신경회로망은 패턴인식(pattern recognition), 영상인식, 음성인식, 최적화 등에 널리 사용되어져 왔으며 제어분야, 공정예측, 주가분석, 기상예측, 신뢰성평가, 농업분야의 불확실한 정보처리 등에도 적용되고 있다. 특히 농산물과 같이 기준이 애매하고 개체마다 편차가 있는 대상을 다룰 때에는 앞에서 예시한 신경망의 장점은 중요한 이점으로 작용한다.

제 2 장 재료 및 방법

제 1 절 유한차분법 모델링

1. 온도변화의 수학적 해석

농산물이나 식품의 열전달 과정의 수학적 해석 방법으로는 대류열전달 및 잠열의 관계로부터 경험적으로 만들어진 Plank방정식으로 제안되고 있다(Cleland, 1982; Pham, 1986). 상변화를 동반하는 열전달문제는 상변화하면서 제거되는 잠열이 온도의 폭을 감안하여 해석은 잠열집중형 문제와 잠열분산형 문제로 나눌 수 있다. 이러한 상변화와 잠열을 감안한 수학적 해석 방법으로는 Neumann이 유일한 해이며, Neumann 해를 확장한 고액양상의 중간상을 고려한 Weiner해, 열전달 과정에서 고형분 분포를 고려한 Tien해 등이 있다.

일반적으로 농산물의 열전달 특성은 전도 및 대류에 의한 열이동, 내부의 상변화에 따른 온도구배 및 농산물의 물성값을 이용해 모델링을 수행할 수 있다. 수학적 모델링을 유도하는 공급열원은 일정한 온도의 공기이며 상변화는 짧은 시간에 이루어지며 내부의 상변화는 일정한 것으로 가정한다.

단일 개체의 온도구배는 대류저항에 대한 전도저항의 비를 의미하는 Biot 계수를 이용하여 산출하게 된다. 일반적으로 크기가 작은 농산물의 경우는 열전도도의 변화가 거의 없으므로 단일상수 값으로 치환하게 된다. Biot 계수가 0.2이하일 때는 뉴톤의 냉각법칙에 따라 내부의 전도에 의한 온도구배가 무시되며, 10이상의 경우는 표면과 주위의 온도차가 없고 Fourier 냉각법칙의 영향을 받아 내부 온도구배가 존재한다.

Biot 계수 Bi는 다음 식으로 표시된다.

$$Bi = \frac{h_c \cdot R}{k}$$

여기서, Bi : Biot 계수, h_c : 대류 열전도 계수, R : 반경, k : 열전도도

과일의 대부분은 구형체로 이루어졌으며 사과에 대한 모델링도 그림 2-1과 같은 구면체(sphere)로 가정하였고, 내부 온도구배가 반경깊이 방향에 따라 존재한다고 가정하였다.

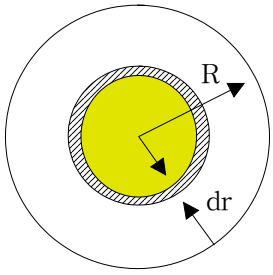


그림 2-1. 사과의 원구형 냉각요소

단위시간당 필요한 열량 q_k는 반경에 대한 온도함수의 형태로 나타낼 수 있다.

$$q_k = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dr}$$

단위면적당 열용량(heat flux) J_h는 $\frac{q_k}{A}$ 이며 시스템의 열출입은 다음과 같은 에너지 방정식으로 쓸 수 있다.

$$\int_{t_n}^{t_n+\Delta t} (\text{단위 시간당 투입 에너지량} - \text{단위시간당 유출 에너지량}) dt$$

$$= (t_n+\Delta t) \text{ 시간에서의 총 에너지량} - (t_n) \text{시간에서의 총 에너지량}$$

$$\int_{t_n}^{t_n+\Delta t} [4\pi r_j^2 J_h \mid_{r_j} - 4\pi (r_j+\Delta r)^2 J_h \mid_{r_j+\Delta r}] dt$$

$$= \int_{r_j}^{r_j+\Delta r} \rho h(r, t_n+\Delta t) 4\pi r^2 dr \; - \; \int_{r_j}^{r_j+\Delta r} \rho h(r, t_n) 4\pi r^2 dr$$

$$= 4\pi r^2 \int_{r_j}^{r_j+\Delta r} \rho [h(r, t_n+\Delta t) - h(r, t_n)] dr$$

좌식은 평균값(mean theorem)의 정리에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다. 여기서 ρ(Kg/m^3)는 시료의 밀도를 나타낸다.

$$\int_{t_n}^{t_n+\Delta t} [-4\pi \frac{\partial}{\partial r}(r^2 J_h)|_{r_{(1)}} dr] dt \; = \; -4\pi \frac{\partial}{\partial r}(r^2 J_h|_{r_{(2)}} \Delta r \Delta t)$$

우식은 $h(r, t_n+\Delta t) - h(r, t_n) = \frac{\partial h}{\partial t}|_{(2)} \cdot \Delta t$ 이므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\int_{r_j}^{r_j+\Delta r} \rho \Delta t \frac{\partial h}{\partial t}|_{t_{(2)}} \cdot 4\pi r^2 dr \; = \; 4\pi\rho(r^2 \frac{\partial h}{\partial t})|_{t_{(2)}, r_{(3)}} \Delta r \Delta t$$

$$-4\pi \frac{\partial}{\partial r}(r^2 J_h)|_{r_{(2)}} \Delta r \Delta t \; = \; 4\pi\rho(r^2 \frac{\partial h}{\partial t})|_{t_{(2)}, r_{(3)}} \Delta r \Delta t$$

$$\therefore \quad -\frac{\partial}{\partial r}(r^2 J_h) \; = \; \rho r^2 \frac{\partial h}{\partial t}$$

위 식에서 열용량은 Fourier법칙에 의해 $J_h = -k\frac{\partial T}{\partial r}$ 로, $\frac{\partial h}{\partial t}$ 는 체인법칙(Chain Rule)에 의하여 정압비열 C_p와 단위 시간당 온도변화의 비로 고쳐 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} \; = \; \frac{\partial h}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \; = \; C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

따라서, 구형체의 전도(conduction)에 의한 열전도방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \; = \; \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r}(r^2 k \frac{\partial T}{\partial r})$$

위 식에서 열전도도 k가 각각 반경 및 온도의 함수가 아닌 경우에는 다음의 편미분방정식으로 대치할 수 있다. 여기서, 열확산계수(thermal diffusivity) α는 $k/\rho \cdot C_p$를 나타낸다.

$$\frac{1}{\frac{k}{\rho C_p}} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}(r^2\frac{\partial T}{\partial r})$$

$$\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial^2 r} + \frac{2}{r}\frac{\partial T}{\partial r}$$

따라서, 단위시간당 온도의 변화를 나타내는 $\frac{\partial T}{\partial t}$로 대치하여 구형체에 대한 열전도 지배방정식을 산출하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha(\frac{\partial^2 T}{\partial^2 r} + \frac{2}{r}\frac{\partial T}{\partial r})$$

이 지배방정식의 구형체모델에 대한 열전도 지배방정식의 반경중심에서의 경계조건(boundary condition)은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial r}(0, t) = 0$$

표면에 대해서는 온도가 일정한 경우는 $T(R, t) = T_f$로 쓸 수 있다. 여기서 T_f는 외부 표면온도를 나타낸다. 그러나 대류경계조건일 때는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$-k\frac{\partial T}{\partial r}(R, t) = h_c \cdot (T(R, t) - T_f)$$

초기조건(initial condition)은 모델의 초기온도 T_0를 기준으로 하여 중심점에서의 온도 $T(r, 0) = T_0$으로 정의되며, 표면온도가 일정할 경우의 지배방정식의 해는 위의 초기 및 경계조건을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\frac{T(r,t)-T_f}{T_0-T_f} = \frac{2R}{\pi r}\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n+1}\exp(-\frac{n^2\pi^2\alpha t}{R^2})\sin(\frac{n\pi r}{R})$$

표면이 대류 경계조건일 때의 해는 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{T(r,t)-T_f}{T_0-T_f} = 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin M_n - M_n\cos M_n}{M_n-\sin M_n\cos M_n}\exp(-\frac{M_n^2\alpha t}{R^2})\frac{\sin(M_n\frac{r}{R})}{M_n\frac{r}{R}}$$

$$\text{여기서,}\quad \frac{M_n}{\tan M_n} = 1-\frac{h_c R}{k}$$

그리고 중심점인 $r=0$인 지점에서의 해는 다음과 같다.

$$\frac{T-T_f}{T_0-T_f} = 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin M_n - M_n\cos M_n}{M_n-\sin M_n\cos M_n}\exp(-\frac{M_n^2 kt}{C_p\rho R^2})$$

위식에서 T_0는 초기온도, T_f는 표면온도를 나타내며, 평균온도를 구하기 위하여 질량평균온도(mass averaged temperature) T_{av}는 일반적인 열량에 대한 식인 $Q=mc\Delta t$를 이용하여 구할 수 있게 된다. 구형체의 체적은 $\frac{4}{3}\pi R^3$이고 표면적은 $4\pi R^2$이므로 공급열량은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$Q=\rho\frac{4}{3}\pi R^3 C_p T_{av}$$

이것을 반경중심($r=0$)에서 표면($r=R$)까지의 적분형태로 나타내면 다음과 같다.

$$Q=\int_0^R \rho C_p A\pi r^2 T(r)dr = 4\pi\rho C_p\int_0^R T(r)r^2 dr$$

따라서 질량평균온도 T_{av}는 다음과 같이 구한다.

$$T_{av}=\frac{3}{R^3}\int_0^R T(r)r^2 dr$$

질량평균값은 다양한 수치적분법을 이용할 수 있으며 본 연구에서는 Simphson의 수치적분방법(numerical integral method)을 사용하여 유한차분 시뮬레이션에서 평균온도를 산출하였다.

2. 온도변화의 유한차분 모델링

수학적 모델을 이용한 컴퓨터 해석은 일반적으로 과일의 깊이별 온도변화 등을 예측하는데 많이 사용되고 있는 수치해석 방법인 양함수 유한차분법(explicit finite differential method)을 이용하였다.

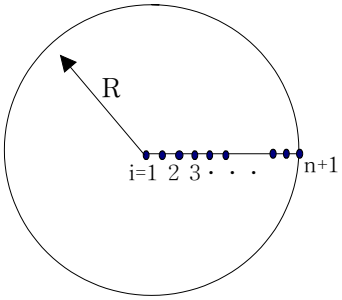


그림 2-2. 유한차분 요소의 분할

해석 노드점 i는 구형체의 중심점 1에서 표면점 $n+1$사이의 범위를 갖도록 n등분하였다. 온도함수 $T(r_i, t_j)$에 대한 각 해석 노드점들에 대한 거리함수 r_i와 시간함수 t_j는 각각 다음과 같다.

$$r_i = (i-1)\Delta r$$

$$t_j = (j-1)\Delta t$$

여기서, Δr과 Δt는 각 해석 노드점사이의 단위거리 및 시간을 나타내며 i, j는 각각 1에서 $n+1$까지의 범위를 가진다.

$T(r_i, t_j) = T_{i,j}$로 놓고 구형체에 대한 열전도 지배방정식을 임의 해석노드점 (r_i, t_j)에서의 유한차분식으로 표시하면 컴퓨터 연산을 수행할 수 있다. 먼저 반경거리에 대한 온도변화식은 주어진 초기조건을 이용하기 위해 중앙차분법(Central Differential)에 의해 다음과 같이 수정하였다.

$$\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{i,j} = \frac{T_{i+1} - T_{i-1,j}}{2\Delta r}$$

$$\frac{\partial T^2}{\partial r^2}\Big|_{i,j} = \frac{T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}}{\Delta r^2}$$

단위시간에 대한 온도변화는 전진차분법(forward differential)을 이용하여 다음과 같이 산출하였다.

$$\frac{\partial T}{\partial t}\Big|_{i,j} = \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta t}$$

열전도 지배방정식에다 위의 각각의 차분식을 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\left(\frac{\partial T^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right)$$

$$\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta t} = \alpha\left(\frac{T_{i-1,j} - 2 \cdot T_{i,j} + T_{i+1,j}}{\Delta r^2} + \frac{T_{i+1} - T_{i-1,j}}{2\Delta r}\right)$$

윗식을 $T_{i,j+1}$에 대해서 정리하여 다음 해석노드점에서의 온도로 나타내면 다음과 같다.

$$T_{i,j+1} = \frac{\alpha\Delta t}{\Delta r^2}\left[\left(1 - \frac{1}{i-1}\right)T_{i-1,j} + \left(\frac{\Delta r^2}{\alpha\Delta t} - 2\right)T_{i,j} + \left(1 + \frac{1}{i-1}\right)T_{i+1,j}\right]$$

첫 번째와 마지막 해석노드점은 경계 및 초기조건을 이용하고 두 번째 해석노드점부터 유한차분에 의한 반복연산이 수행되므로 $i = 2,3,4,,,,n$ 사이의 값을 대입할수 있다. $i=1$과 $i=n+1$은 초기 및 경계 조건식에 의해 구해진 상수항의 의미를 갖는다.

$r=0$(또는, $i=1$)인 중심점 해석노드에서는 다음과 같이 Macclaurin's series를 이용하여 식을 전개하여 이용할 수 있다.

$$T(r)=T^{(1)}(0)+rT^{(2)}(0)+\frac{1}{2}r^2T^{(3)}(0)+\cdots\cdots \fallingdotseq T^{(1)}(0)+rT^{(2)}(0)$$

중심점에서는 $T'(0)=0$으로 가정하면 다음과 같이 $T^{(1)}(r)=rT^{(2)}(0)$이 된다.

따라서, $\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}=\frac{\partial T^2}{\partial r^2}$ 이 되므로 이를 지배방정식에 대입하면 다음과 같이 열전도 지배방정식을 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 3\alpha\frac{\partial T^2}{\partial r^2}$$

윗식을 유한차분식으로 다시 표시하면 다음과 같다.

$$3\alpha\frac{T_{0,j}-2T_{1,j}+T_{2,j}}{\Delta r^2}=\frac{T_{i,j+1}-T_{1,j}}{\Delta t}$$

위식을 다음 해석노드점인 $T_{1,j+1}$에 대하여 풀면 다음과 같다.

$$T_{i,j+1}=T_{1,j}+\frac{3\alpha\Delta t}{\Delta r^2}(T_{2,j}-2T_{1,j}+T_{0,j})$$

$r=0$에서 $\frac{\partial T}{\partial r}=0$으로 놓고 유한차분식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{T_{2,j}-T_{0,j}}{2\Delta r}=0 \quad \text{여기서} \quad T_{0,j}=T_{2,j}$$

따라서 위식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_{1,j+1} = T_{1,j} + \frac{6\alpha\Delta t}{\Delta r^2}(T_{2,j}-T_{1,j})$$

$r=R$ (또는, $i=n+1$)인 표면점에서 일정한 온도값을 갖는다고 가정하면 이때의 온도함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T(R,t) = T_f(t)$$

여기서, $T_{n+1,j+1} = T_f$

또한, 대류경계조건에서 열용량(heat flux) J_h를 이용하여 내부 해석노드점에 대한 유한차분 형태로 표시하기 위해 다음과 같이 대류 열전달식을 이용하였다.

$$-k_s \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R} = h_c[T(R,t) - T_f]$$

$$-k_s \frac{T_{n+1,j+1} - T_{n,j+1}}{\Delta r} = h_c(T_{n+1,j+1} - T_f)$$

$$T_{n+1,j+1} = \frac{1}{(1+\frac{h_c \Delta r}{k_s})}(T_{n,j+1} + \frac{h_c \Delta r}{k_s} T_f)$$

여기서 h_c는 대류열전달 계수를 나타낸다.

위의 편미분식을 컴퓨터연산을 위해 유한차분 형태의 행렬식으로 표시하면 다음과 같다.

중앙점의 노드점에서의 온도,

$$T_{i,j+1} = (1-6\mu) \cdot T_{1,j} + 6\mu \cdot T_{2,j}$$

내부 노드점에서의 온도,

$$T_{i,j+1} = (1-\frac{1}{i-1})\mu T_{i-1,j} + (1-2\mu)T_{i,j} + (1+\frac{1}{i-1})\mu T_{i+1,j}$$

표면의 노드점에서의 온도,

$$T_{n+1,j+1} = (\frac{1}{i+\beta})[(1-\frac{1}{n-1})\mu T_{n-1,j} + (1-2\mu)T_{n,j} + (1+\frac{1}{n-1})\mu T_{n+1,j}] + \frac{\beta}{1+\beta} T_f$$

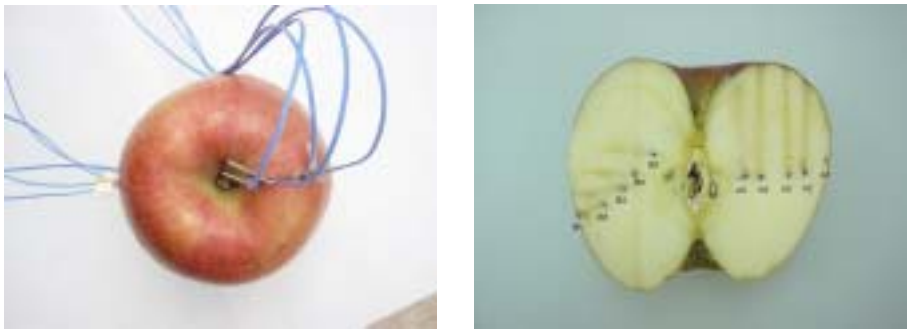
여기서, μ는 $\frac{\alpha \Delta t}{\Delta r \cdot \Delta r}$ 을 β는 $\frac{h_c \Delta r}{k_s}$ 로 Nusselt수를 나타낸다.

3. 검증실험

본 연구에서 개발한 시뮬레이션 모델을 이용한 온도분포 예측 결과와 실제 사과의 내부온도를 측정한 실험값을 비교함으로서 개발된 모델을 검증하였다. 검증실험에 사용된 시료는 충청북도 충주에서 생산된 후지품종으로서 0.02㎜의 PE필름에 넣어 4℃의 저온저장고에 저장한 후 실험에 사용하였다.

검증실험은 시료 외부온도가 10, 15, 20, 25, 30, 35 ℃일 때 수행하였으며, 설정된 온도에서 사과 반경을 5등분하여 시료내부에 온도센서인 열전대(thermocouple, K type) 10개를 삽입하여 지정된 위치의 온도를 측정하였다. 본 연구에서는 온도센서가 정확한 위치에 삽입되도록 시료 표면부터 지정된 위치까지 열전대가 삽입될 수 있도록 가이드 구멍을 만들어주는 보조도구를 사용하였다. 그림 2-3은 사과 시료에 온도센서를 삽입한 모습과 내부에 온도센서가 삽입된 위치를 나타내고 있다. 온도 계측은 온도계측시스템(hydra data acquisition system, model 2620A, Fluk, USA)을 이용하여 30초 간격으로 연속 측정하였다.

시뮬레이션 모델 검증을 위한 온도분포 예측값과 실제 사과의 실험값의 비교는 통계프로그램인 SAS(ver. 8.01)의 REG procedure를 사용하였다.



(a) 온도센서 (b) 내부 측정 위치

그림 2-3. 사과 내부 온도측정

제 2 절 유한요소법 모델링

1. 유한요소 모델링

온도분포는 물체 안으로 혹은 밖으로 이동하는 열의 양과 또한 물체내부의 응력들에 영향을 미친다. 열응력들은 어떤 평형상태로부터 온도 기울기가 발생되었으나 모든 방향으로 자유롭게 팽창되지 않는 물체 내부에 발생한다. 유한요소법은 물체 내부의 온도분포와 열응력과 같은 양들을 예측하기 위한 실제적인 방법으로서 다음과 같이 열전달 방정식을 정식화하였다.

$$\pi_h = \mathrm{U} + \Omega_Q + \Omega_q + \Omega_h$$

여기서,

$$\mathrm{U} = \frac{1}{2}\iiint_V [K_{xx}(\frac{\partial T}{\partial x})^2 + K_{yy}(\frac{\partial T}{\partial y})^2] dV$$

$$\Omega_Q = -\iiint_V Q T \; dV$$

$$\Omega_q = -\iint_{S_2} q^* T \; dS$$

$$\Omega_h = -\frac{1}{2}\iint_{S_3} h(T - T_\infty)^2 \; dS$$

1단계는 그림 2-4와 같이 세 개의 절점을 가진 삼각형 요소를 선정한다.

2단계는 형상함수 N과 절점온도 t의 항으로 각 요소들의 온도함수 T를 정의한다.

$$\{T\} = [N_i \quad N_j \quad N_m] \begin{bmatrix} t_i \\ t_j \\ t_m \end{bmatrix}$$

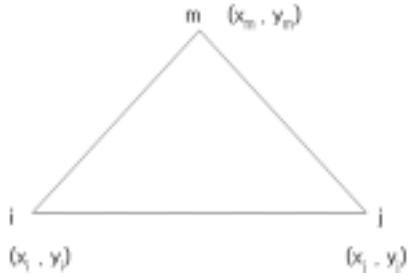


그림 2-4. 기본 삼각형 요소

3단계는 온도기울기-온도, 열유속-온도기울기의 관계식을 정의한다.

온도기울기 행렬 $\{g\}$는 응력 해석 문제의 변형률 행렬 $\{\epsilon\}$과 유사하게 주어진다.

$$\{g\} = [B]\{t\}$$

여기서,

$$[B] = \frac{1}{2A}\begin{vmatrix} \beta_i & \beta_j & \beta_m \\ \gamma_i & \gamma_j & \gamma_m \end{vmatrix}$$

열유속과 온도기울기의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} q_x \\ q_y \end{pmatrix} = -[D]\{g\}$$

여기서,

$$[D] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 \\ 0 & K_{yy} \end{bmatrix}$$

4단계에서는 요소 전도행렬과 방정식을 유도한다. 강성행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$[k] = \iiint_V [B]^T[D][B]\,dV + \iint_{S_3} h\,[N]^T[N]\,dS$$

여기서,

$$[k_c] = \iiint_V [B]^T[D][B]\,dV$$

$$= \frac{1}{4A^2}\begin{bmatrix} \beta_i & \gamma_i \\ \beta_j & \gamma_j \\ \beta_m & \gamma_m \end{bmatrix}\begin{bmatrix} K_{xx} & 0 \\ 0 & K_{yy} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \beta_i & \beta_j & \beta_m \\ \gamma_i & \gamma_j & \gamma_m \end{bmatrix} dV$$

요소안에서 두께가 일정하다면 위 식의 모든 적분항이 상수가 되어 다음 식을 얻을 수 있다.

$$[k_c] = \iiint_V [B]^T[D][B]\,dV = tA\,[B]^T[D][B]$$

위 식은 전체좌표계에 대한 강성행렬 식에서 순수히 전도에 의한 부분이다. 강상행렬 식의 두 번째 적분(전체좌표계에 대한 강성행렬의 대류부분)은 다음과 같이 정의된다.

$$[K_h] = \iint_{S_3} h\,[N]^T[N]\,dS$$

위 식에 행렬을 곱하면 다음과 같다..

$$[K_h] = h\iint_{S_3}\begin{bmatrix} N_iN_i & N_iN_j & N_iN_m \\ N_jN_i & N_jN_j & N_jN_m \\ N_mN_i & N_mN_j & N_mN_m \end{bmatrix} dS$$

위 식의 사용을 설명하기 위해 대류가 있는 삼각 요소의 절점 i와 j사이의 면을 고려한다. 이때 $i-j$ 면을 따라 $N_m = 0$ 이므로, 다음 식을 얻을 수 있다.

$$[K_h] = \frac{hL_{i-j}t}{6}\begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

여기서, L_{i-j}는 $i-j$ 사이의 길이이다.

하중행렬 적분은 일정 열원 Q에 대하여 다음과 같다.

$$\{f_Q\} = \iiint_V Q\,[N]^T\,dV = Q\iiint_V [N]^T\,dV$$

그러므로 이 적분은 다음과 같이 된다.

$$\{f_Q\} = \frac{QV}{3}\begin{bmatrix}1\\1\\1\end{bmatrix}$$

여기서, V=At는 요소의 부피이다. 같은 크기의 세 부분에서 물체에 의해 발생되는 열이 절점에서 생성된 것으로 나타낸다. 두 번째 하중행렬은 다음과 같다.

$$\{f_q\} = \iint_{S_2} q^*[N]^T dS = \iint_{S_2} q^*\begin{bmatrix}N_i\\N_j\\N_m\end{bmatrix} dS$$

위식은 다음과 같이 세분화 된다.

$$\frac{q^*L_{i-j}t}{2}\begin{bmatrix}1\\1\\0\end{bmatrix} \quad on\ side\ \ i-j$$

$$\frac{q^*L_{j-m}t}{2}\begin{bmatrix}0\\1\\1\end{bmatrix} \quad on\ side\ \ j-m$$

$$\frac{q^*L_{m-i}t}{2}\begin{bmatrix}1\\0\\1\end{bmatrix} \quad on\ side\ \ m-i$$

여기서, $L_{i-j}, L_{j-m}, L_{m-i}$는 요소의 측면의 길이다. 그리고 q^*는 각각의 면에서 일정하다고 가정한다.

5단계는 전체좌표계에 대한 방정식을 얻기 위한 요소 방정식들의 조합과 경계조건을 설정한다. 전체좌표계에 대한 강성행렬[K]와 하중행렬{F} 방정식을 다음과 같이 조합한다.

$$[K] = \sum_{e=1}^{N}[K^{(e)}] \qquad \{F\} = \sum_{e=1}^{N}\{f^{(e)}\}$$

$$\{F\} = [K]\{t\}$$

이 조합 순서는 직접강성법에서의 방법과 동일하지만 두 요소 사이의 공통 절점의 온도가 같다는 필요조건을 기초로 두고 있다.

마지막으로 절점온도, 요소내의 온도 기울기 및 열유속을 계산한다.

2. 검증실험

본 연구에서 개발한 시뮬레이션 모델을 이용한 온도분포 예측 결과와 실제 사과의 내부온도를 측정한 실험값을 비교함으로서 개발된 모델을 검증하였다. 검증실험에 사용된 시료는 후지품종으로서 0.02㎜의 PE필름에 넣어 4℃의 저온저장고에 저장한 후 실험에 사용하였다. 검증실험은 시료 외부온도가 10, 15, 20, 25, 30, 35 ℃에서 수행하였으며, 사과 시료 내부의 온도측정 방법은 유한차분법의 검증실험과 동일하다. 시뮬레이션 모델 검증은 시뮬레이션 결과와 사과 검증 실험값에 대하여 선형 회귀분석을 실시하였다.

제 3 절 과실 세포 영상분석

1. 시료 전처리 및 영상수집

과실 세포의 현미경 영상을 측정하기 위해서 시료를 적절한 약품처리로 고착시킨 후 염색을 통해 시편을 제작하였다. 그림 2-5는 사과 세포의 영상분석을 위하여 사과 세포의 시편 제작을 통한 영상획득 과정을 나타낸 것이다.

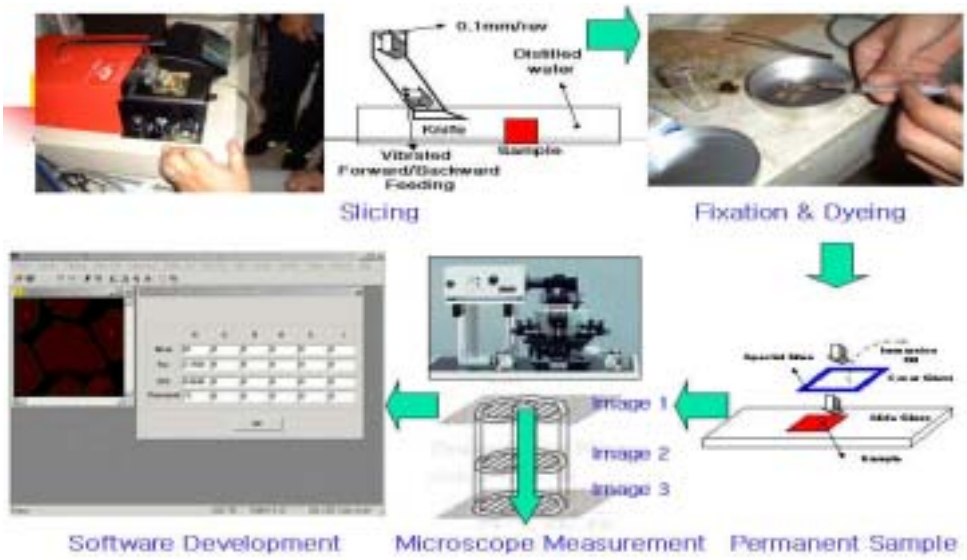


그림 2-5. 과실 세포 시편 제작 후 영상획득 과정

본 연구에서 사용한 사과의 시편 제작방법은 다음과 같다.

① 시료를 1㎠의 크기로 절단한 후 마이크로 시료절단기를 사용하여 박막 시편을 제작하였다.

② 조직내 남아 있는 수분을 제거하기 위해 에탄올 용액에 침잠시켜 조직을

고정하기 위한 전처리를 수행한다

③ 세포내부를 고착하기 위해 FAA용액(Formaldehyde:5ml, Acetic acid: 5ml, Ethanol:45ml, Distilled pure water:45ml)을 처리한다.

④ 렌즈의 굴절을 방지하기 위해 고정된 시료에 85% 에탄올 용액처리를 수행한다.

⑤ 특정파장에 반응하는 염색시약을 처리한다.

(Acrindine Orange: 기동파장 490nm, Argon Laser 기동파장: 488nm)

⑥ 렌즈변형을 방지하기 위해 침전유(Immersion Oil)를 시료 위에 처리하고 슬라이드 글라스를 덮고 접착제를 이용하여 완전 밀봉시킨다.

본 연구에 사용된 영상입력장치는 마이크로렌즈를 장착한 IR카메라(Duncan Tech. MS3100)와 공집점 레이저현미경을 사용하였다.

그림 2-6. 마이크로 렌즈가 장착된 IR카메라

실험에 사용한 현미경은 형광현미경의 일종으로 표본에 자외선 및 단파장의 가시광선을 조사함으로써 기동되는 시료의 발광을 광학적으로 관찰하는 방식으로

488nm에서 구동되는 아르곤(Ar) 레이저에 의해 구동된다. 현미경 관찰을 위해서는 박층의 표본을 제작함에 있어서 주의가 필요하며 특히 형광염색방법에 따라 결과의 차이가 발생한다. 본 연구에서는 주로 가장 간단한 방법으로 형광색소를 이용하여 시료를 처리하는 방법인 형광염색법을 사용하였으며, Formaldehyde 5㎖, 아세틱산 5㎖, 에탄올 45㎖, 증류수 45㎖를 혼합하여 사용하였다.

2. 측도설정

CLSM의 렌즈는 기본적으로 장착되어 있는 렌즈와 추가로 장착할 수 있는 렌즈로 구성되어져 있다. 일반적으로 현미경의 배율은 접안렌즈와 대물렌즈의 배율의 곱으로 구해진다. 또한 IR 카메라의 경우도 마이크로 렌즈를 사용하였으므로 별도의 측도설정을 통해 화소의 크기를 결정해야 한다.

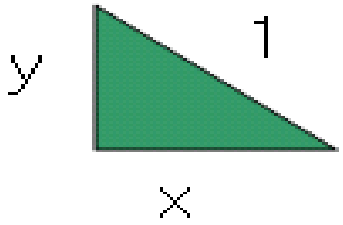


그림 2-7 측정영상의 Aspect ratio

본 연구에서는 그림과 같이 마이크로 스캐일(1/100mm)을 이용하여 영상을 측정할 때 마다 스캐일의 눈금을 자동으로 읽어 들여 측도설정을 수행하였다. 측정된 영상은 이치화를 거쳐 이진영상(binary image)로 변환하여 세선화 알고리즘을 적용하여 정해진 간격사이의 화소(pixel)수를 계수하여 한 개 화소당의 실제거리로 변환하였다. 모든 영상은 Aspect Ratio 가 1:1이 되도록 영상을 변환하여 처리를 수행하였다.

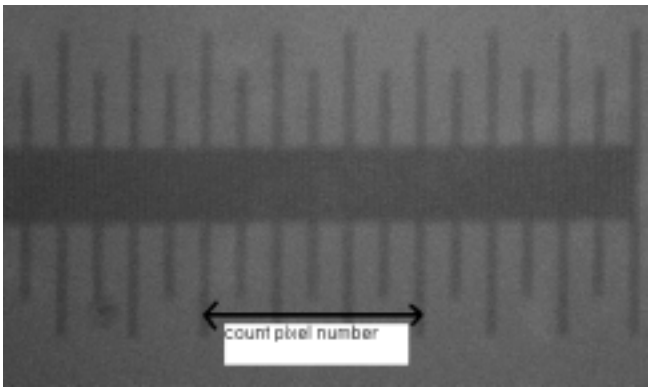


그림 2-8. 측도설정용 스캐일 자(ruler)의 영상

3. Bianry 영상변환 및 색 정보처리

CLSM에 의해 측정된 영상은 490nm 부근의 적색파장 영역에 해당되므로 주로 R값에 의한 영상 이치화를 이용하였으나 Pseudo-Color를 이용하여 잡음의 제거와 선명한 영상을 얻기 위한 영상변환을 수행하였다. 또한 IR카메라의 경우 R,G,B 및 IR 영역이 각각 존재하므로 색상정보의 처리는 깨끗한 영상을 얻을수 있는 가장 중요한 요인이 된다.

이치화는 Golden Section 탐색 알고리즘과 모드변환(mode separation)법 등을 사용하였다. Golden Section 탐색 방법은 통계적으로 최적의 이치화 문턱값(threshold)을 계산하는데 유용하나 연산시간은 단순 모드분리법 등에 비해 시간이 많이 소요된다. 색정보는 일반적인 RGB형태의 데이터를 수집하여 이를 각각의 영상 프레임에 대한 황금분할방법을 이용하여 이치화를 수행하여 영상값을 얻도록 하였다. 또한 RGB 프레임뿐 아니라 HSI 프레임을 이용한 영상변환을 이용하였다.

제 4 절 과실 품질 모니터링

1. 외부온도 따른 품질변화

사과의 외부온도에 따른 품질변화를 분석하기 위하여 외부온도가 15, 25℃에서 시간에 따른 수분, 당도, 산도, 색도, 경도를 측정하였으며, 색, 향, 맛, 조직감, 종합적 평가, 구매도에 대한 관능검사를 실시하였다. 사과의 품질을 고려하여 외부온도 15℃에서는 총 98일 동안 7일 간격으로 분석하였으며, 외부온도 25℃에서는 총 28일 동안 2~3일 간격으로 분석하였다.

수분은 70℃에서 상압가열건조법을 사용하였고, 색도는 색도계(CR-300, Minolta, Japan)를 사용하여 밝은 정도를 나타내는 L값(lightness), 붉은색의 정도를 나타내는 a값(redness) 및 노란색의 정도를 나타내는 b값(yellowness)을 측정하였으며, 초기 시료와 주어진 온도에서 시간이 경과된 시료의 색차(color difference, ΔE)를 분석하였다. 색차(ΔE)는 두 색을 비교할 때 매우 유용하게 사용되며, 색차 값이 0~0.5이면 색차가 거의 없으며, 0.5~1.5는 근소한 차이, 1.5~3.0은 감지할 수 있을 정도의 차이, 3.0~6.0은 현저한 차이, 6.0~12.0은 극히 현저한 차이, 12 이상이면 다른 계통의 색으로 결정한다(송 등 1995). 당도는 과육을 압착하여 분쇄하고 불용성 고형분을 제거 한 후 당도계(PR-1, Atago, Japan)로 측정하였으며, 산도는 당도와 동일하게 처리하여 pH meter(AB15, Fisher scientific, U.S.A)를 이용하여 pH 값을 측정하였다. 경도는 침투시험(puncture test)을 통하여 측정하였다. 침투실험은 텍스쳐 분석기(TA-XT2, Stable Micro System Ltd., England)를 이용하여 직경 5㎜의 침(probe)을 시료 표면 15㎜ 깊이까지 2.5㎜/s 속도로 침투시켰다. 경도는 침투실험에서 최대하중을 침의 단면적으로 나누어준 응력(stress)으로 표시하였다.

관능평가는 시료의 품질과 평가기준에 대하여 교육이 된 13인의 관능요원이 색, 향, 맛, 조직감 및 종합적인 평가 등의 항목을 비교 평점법으로 평가하였고, 이

때 대조구로 쓰인 신선한 사과의 점수를 9.0으로 하여 비교하였다.

수분, 당도, 산도, 경도 및 관능평가 결과는 분산분석(ANOVA)을 통하여 온도별 저장시간에 따른 유의적인 차이를 분석하였으며, 각 집단끼리의 평균치 차이는 다중비교방법(multiple comparison)인 Ducan 방법 사용하였다. 실험결과의 통계분석은 통계프로그램인 SAS 8.01을 이용하였다.

2. 품질변화에 따른 주요 요인 분석

외부온도별 시간의 증가에 따른 수분, 당도, 산도, 색도, 경도의 이화학적 성분 변화와 소비자 구매도의 상관성과 관능검사의 색, 향, 맛, 조직감 및 종합적인 평가의 결과와 소비자 구매도와의 상관성을 조사하고자 상관 분석을 실시하였다. 본 연구에서 소비자 구매도는 사과 품질평가에 대하여 교육이 된 13인의 관능요원이 제시된 사과의 품질에 대한 관능검사를 마친 후 제시된 시료를 대상으로 사과를 구매할 경우에 '확실히 사겠다, 아마도 살 것이다, 살지 안살지 모르겠다, 아마도 사지 않을 것이다, 절대로 사지 않겠다'의 5단계로 구분하여 조사하였다.

사과의 품질변화에 따른 주요 요인의 분석은 소비자 구매도에 가장 큰 영향을 미치는 이화학적 성분을 분석하고 구매도의 종속 변수에 대한 의미 있는 독립변수를 선택하기 위하여 SAS 프로그램의 변수 선택법을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 변수 선택법은 결정계수 선택법(R^2 selection)으로, 이 방법은 주어진 모델에 대하여 제시된 변수들의 가능한 모든 조합에 대한 R^2와 Mallow의 C_p를 계산하여 모든 경우의 수에 대하여 결정계수가 큰 순으로 나타낸다.

3. 품질 모니터링 모델

본 연구에서는 사과의 품질 모니터링 모델 개발을 위하여 일반적으로 공학 전 분야에서 가장 활발히 적용되며 성능이 우수한 것으로 알려진 오차 역전파(back propagation) 다층 신경회로망(mult-layer neural network)을 사용하였다. 이것은 보통 BP 네트워크라고 불리운다. BP 네트워크는 결합 가중치 수정에 관한 델타법칙(delta rule)을 일반화한 다층 신경회로망으로서 그림 2-9와 같이 세개 이상의 층(layer)구조로 이루어진다. 최하층은 입력층(input layer), 가장 위쪽을 출력층(output layer)이라고 부르며 입력층과 중간층 사이를 미지층(hidden layer)이라고 한다. 각각의 층은 뉴우런(neuran)에 해당하는 다수의 유니트로 구성되며 입력층의 각각의 유니트들은 외부 또는 독립적으로 주어진 입력패턴 벡터의 요소를 나타낸다. 모든 입력의 크기는 보통 유사한 범위 내에서 정규화(0~1) 되고 각각의 유니트는 상위층의 모든 유니트로 연결되어 진다.

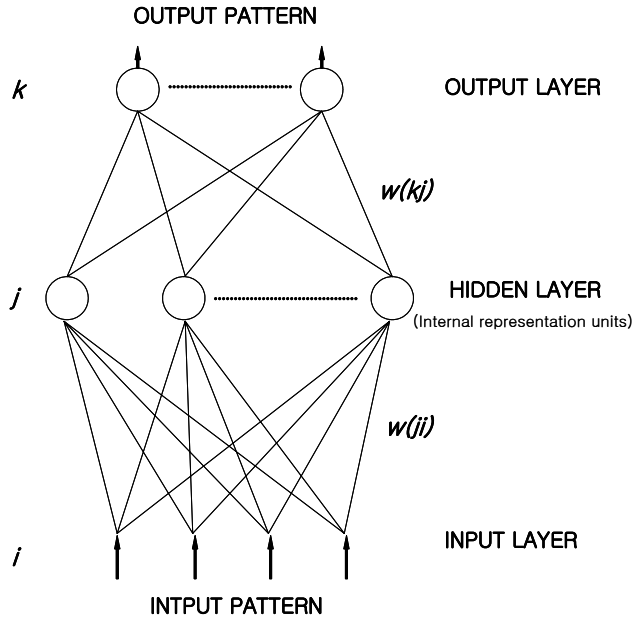


그림 2-9 오차 역전파 다층 신경회로망 구조

BP 네트워크는 단조미분(semi-linear) 형태의 활성함수를 가지며 시그모이드(sigmoid) 형태의 논리함수가 활성함수로 주로 이용된다. 논리함수는 점근적으로 0과 1에 접근하며 학습 목표값은 0 또는 1에 근접하는 값으로 설정해준다. 입력층 유니트를 제외하고는 각 유니트에 대한 네트워크 입력은 앞선 층내의 유니트 가중치의 합으로 나타낼 수 있다. 선행층의 유니트 i로부터 다음층의 j 번째 유니트로의 네트워크 입력은 다음과 같이 정의된다.

$$net_j = \sum w_{ji} o_i$$

여기서, w_{ji}는 아래층의 유니트 i에서 다음층의 유니트 j로의 결합가중치를 나타내며 o_i는 유니트i 에서의 출력을 나타낸다.

초기에 모든 결합가중치(connection weight)는 가중치 대칭성(weight symmetry)에 의해 발생되는 학습지연(learning pathology)을 피하기 위해서 아주 작은 임의의 값으로 설정해준다.

유니트 j의 출력은 다음과 같다.

$$o_j = f(net_j)$$

여기서, f 는 활성함수를 나타낸다.

시그모이드 형태의 활성함수는 다음과 같이 정의된다.

$$0_j = \frac{1}{1 + \exp[-(net_j + \theta_j)]}$$

θ_j는 뉴우런 j의 Bias를 나타내며 경계(threshold)값의 의미를 갖는다.

Bias는 학습 수렴치에 빠르게 도달할 수 있도록 하는 데에 영향을 준다. 입력 유니트들은 Bias를 가지고 있지 않으므로 실제에서는 각 층에 출력이 하나인 가상 유니트를 설정한다. 네트워크의 학습은 반복적으로 수행하며 학습의 중단 조건은 최대 반복수와 전체 학습오차의 한계를 명시함으로써 나타낸다. 원하는 학습 목표값과의 비교를 통해 구해지는 개개의 출력유니트 오차는 네트워크를 통해 역방향으로 전파되며 결합가중치를 수정하는데 이용된다. 주어진 입력패턴에 대해서 전

체 학습오차는 다음과 같이 구한다.

$$E = \sum_p E_p = \frac{1}{2} \sum_p \sum_j (t_{pj} - o_{pj})^2$$

여기서, p는 하나의 입력패턴, t_{pj}는 학습 목표값, o_{pj}는 네트워크의 출력을 나타낸다.

오차 역전파 학습의 원리는 개개의 가중치에 대해 전체 학습오차의 미분 도함수의 반대 방향으로 비례하게 가중치를 조정하는 Gradient Descent 방법을 기초로 하고 있다.

결합 가중치는 다음과 같이 수정되며 δ_j는 출력 및 미지층에 대해 각각 계산된다.

$$[w_{ji}]_{NEW} = w_{ji} + \Delta w_{ji}$$

$$\Delta w_{ji} = \eta \delta_j o_i$$

여기서, η는 학습율(learning rate)을 나타내며 학습율이 크면 많은 수의 가중치를 수정하므로 네트워크의 진동(oscillation)현상의 원인이 된다. 진동이 없이 학습율을 증가시키기 위해서 다음과 같은 모멘트항 α를 추가함으로써 학습을 수행하는 방법이 있다.

$$\Delta w_{ji}(t+1) = \eta \delta_j o_i + \alpha \Delta w_{ji}(t)$$

여기서, α는 가중치 공간상에서 이전의 가중치 변화가 현재의 진행방향으로 변화하는 영향을 결정하기 위한 모멘트율(mementum rate)이라고 한다.

BP 학습은 순방향(forward)과 역방향(backward)의 두 단계 학습에 의해 수행되어진다. 순방향 학습에서는 입출력쌍의 조합이 주어지고 네트워크의 출력을 산출하며, 역방향 학습은 최종층에서 구한 오차신호를 역방향으로 전달하도록 되어 있다.

제 3 장 결과 및 고찰

제 1 절 유한차분법에 의한 사과의 품온 예측

1. 품온 예측 프로그램

사과의 품온변화를 분석하기 위하여 열전달과정의 수학적 모델 및 유한차분 해석을 이용하여 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 본 프로그램은 마이크로소프트사의 Visual C++ 프로그램 언어를 이용하여 개발되었으며, 윈도우 메뉴방식으로 개발되었다. 그림 3-1은 개발된 품온 예측 프로그램의 시뮬레이션 수행과정을 나타낸 것이다. 개발된 프로그램은 열전도도, 비열, 대류 열전달계수 등 사과의 열적 특성과 밀도를 밤 시료의 고정변수로 사용하고, 동결온도, 시료의 초기온도, 시료의 직경 등을 시뮬레이션 입력변수로 사용하여 주어진 외부온도에서 시간에 따른 내부의 온도변화과정을 해석할 수 있도록 개발되었다. 표 3-1은 개발된 프로그램의 입력과 출력변수를 나타낸 것이다.

표 3-1. 시뮬레이션 프로그램의 입력과 출력변수

구 분		항 목
입력변수	고정변수	○ 열전도도 ($KJ/hr \cdot m \cdot ℃$)
		○ 비열 ($KJ/Kg \cdot K$)
		○ 대류 열전달계수 ($KJ/m^2 \cdot Hr \cdot ℃$)
		○ 밀도 (Kg/m^3)
	가변변수	○ 외부온도 (℃)
		○ 시료반경 (m)
		○ 시료의 초기온도 (℃)
출력변수		○ 시간(sec), 내부 깊이(㎜), 내부 온도(℃)

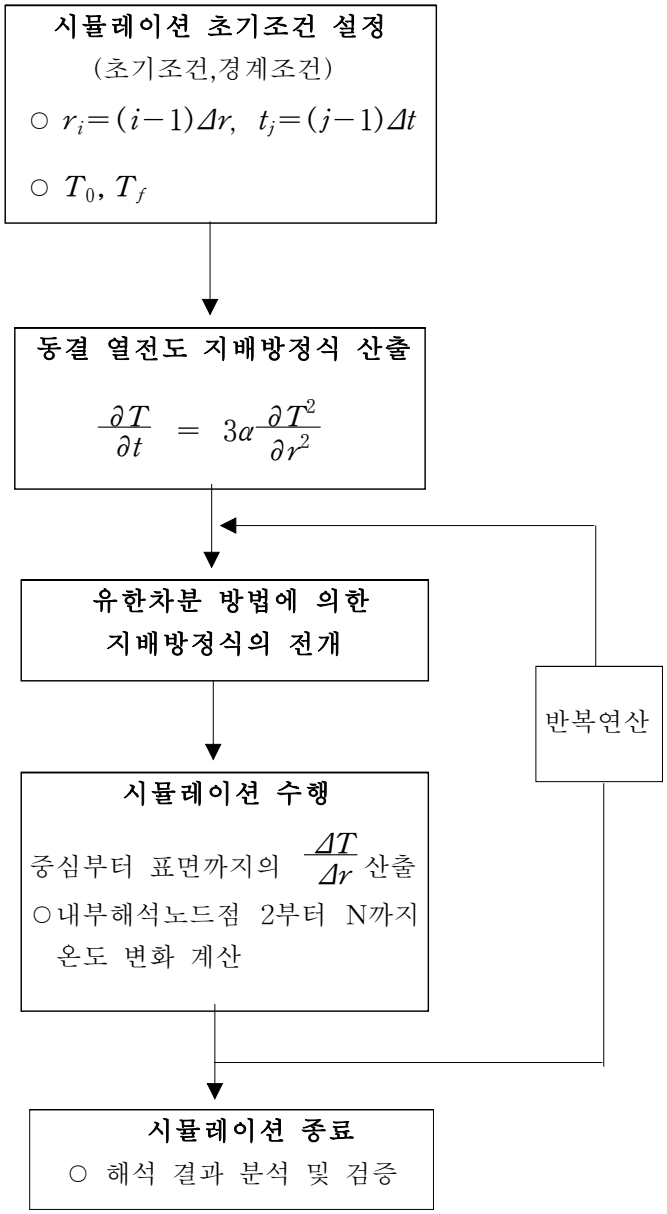


그림 3-1. FDM을 이용한 온도예측 시뮬레이션 Flowchart

2. 사과의 열특성

과일의 동결점, 비열, 열전도도 등 열 물성치는 저장, 수송, 판매 등의 공정 해석에 필수적인 자료이다. 일반적으로 청과물 및 식품에 대한 동결점, 비열 등에 대한 열 물성치는 많이 보고되고 있고(ASHARE, 1989), 일부 식품에 관한 열전도 및 열확산율이 보고되고 있다(Kong, 1982; Singh, 1982; Incropera 1996). 본 연구에서는 사과의 내부온도 예측 모델링에 필요한 열적 특성을 조사, 분석하였다.

사과의 밀도는 부피에 대한 중량의 비로써 산정하였으며 초기 빙결점은 Beckmann법에 의해 열평형 온도대를 외삽하여 결정하였으며, 표면 열전달계수는 Creed와 James의 총괄 열전달계수의 산출을 위한 transient temperature method를 적용하였다. 비열은 빙결점 이상의 온도에서는 Siebel 및 Kong의 실험식에 의해 빙결점 이하의 온도에서는 Yano 및 Kong의 실험식으로 산정하였으며, 전열량은 시료의 초기온도와 최종온도사이의 total enthalpy차를 이용하여 산출하였다. 그리고, 열전도도를 추정하기 위해 열확산율을 측정하여 k = α · ρ · Cp 식(여기서 α=열확산율(㎡/hr), ρ=밀도(kg/㎥), Cp=비열(J/㎥℃))으로 산출하였다. 이를 위해 열확산율은 항온조에서 시간에 따른 온도변화를 연속 측정하여 curve fitting법을 이용하였다. 표 3-2는 본 연구에서 사과의 내부 온도분포 해석에 사용한 열적 특성을 나타낸 것이다.

표 3-2. 온도분포 해석을 위한 사과의 열적 특성

Parameters	Thermal properties
Density(kg/㎥)	955.7
Thermal conductivity(W/m℃)	0.52
Specific heat(J/㎥℃)	3.46×10^{6}
Freezing point(℃)	-2.8
Water content(%)	85.6

3. 품온변화 및 검증

검증실험은 외부온도가 10, 15, 20, 25, 30, 35 ℃일 때 수행하였으며, 설정된 온도의 변화를 최소화하기 위하여 유리상자의 실험용기를 제작하여 사용하였다. 그림 3-2는 실증실험의 설정온도가 15℃일 때 시간에 따른 외기온도, 항온항습기 챔버온도 및 실험용기 내부의 온도 변화를 측정한 것이다.

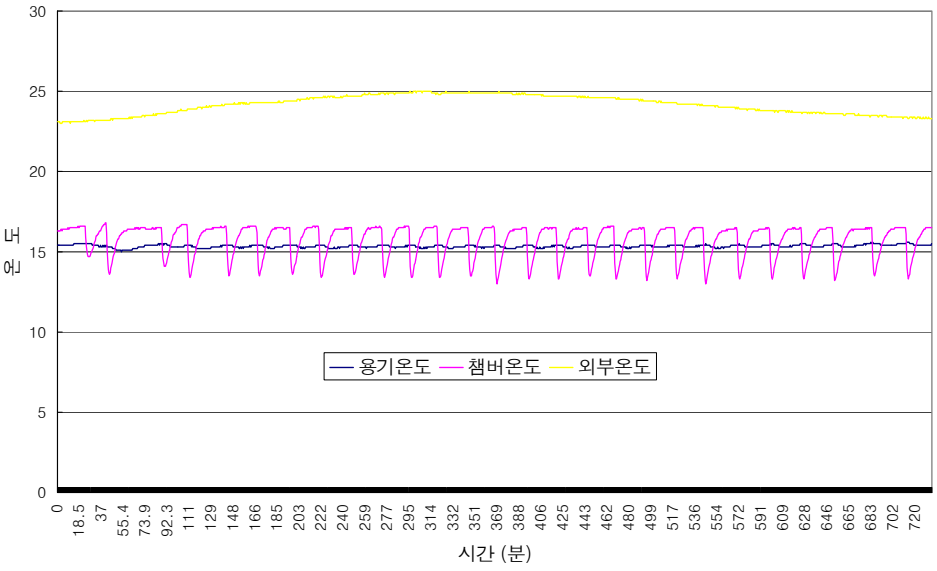


그림 3-2. 검증실험 용기내부의 온도변화

그림 3-3은 사과의 외부온도가 20℃에서 실험한 결과를 나타낸 것이다. 모든 점은 외부온도인 20℃로 접근하고 있으며, 사과 표면으로부터 2, 5, 15, 25, 35 mm의 위치에서 15℃에 도달하는 시간은 각각 83, 98, 125, 135, 150 분으로 사과 내부가 표면으로부터 가까울수록 외부온도에 도달하는 시간이 빠른 것을 알 수 있다. 초기온도가 깊이별로 차이가 나타난 것은 저온 저장고에 보관되어 있던 시료에 온도센서를 부착하고 실험용기까지 옮기는 과정에서 과일의 표면 온도가 다소 상승했기 때문이다.

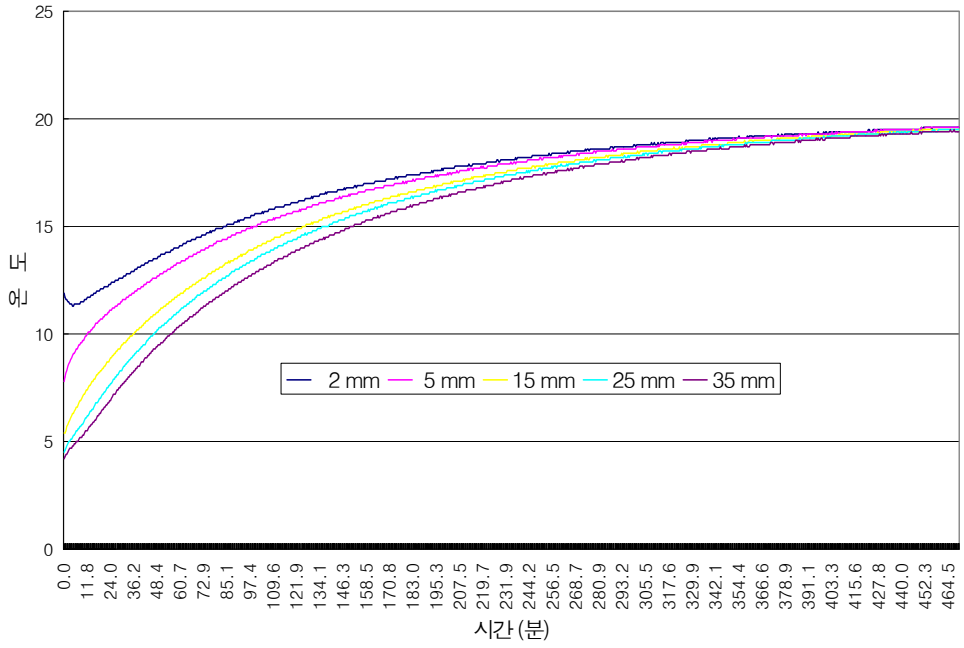


그림 3-3. 외부온도 20℃에서 실험 결과

본 연구에서 개발된 유한차분법을 이용한 사과의 내부 품온 예측 모델을 검증하기 위하여 시뮬레이션 예측값과 실증실험의 실험값을 비교 분석하였다. 실증실험은 10, 15, 20, 25, 30, 35 ℃의 온도에서 사과 반경을 중심으로 그림 2-3과 같이 10개 지점의 온도를 측정하였다.

그림 3-4는 FDM의 사과 내부 품온 예측 모델을 이용한 예측값과 실증실험의 실험값의 관계를 보여주고 있다. 그림 3-4에서 실험값과 시뮬레이션 예측값의 관계는 선형적으로 나타났으며, 결정계수는 0.85로 나타나 사과의 품온 예측 모델의 예측값과 실험값과는 잘 일치하는 것으로 나타났다.

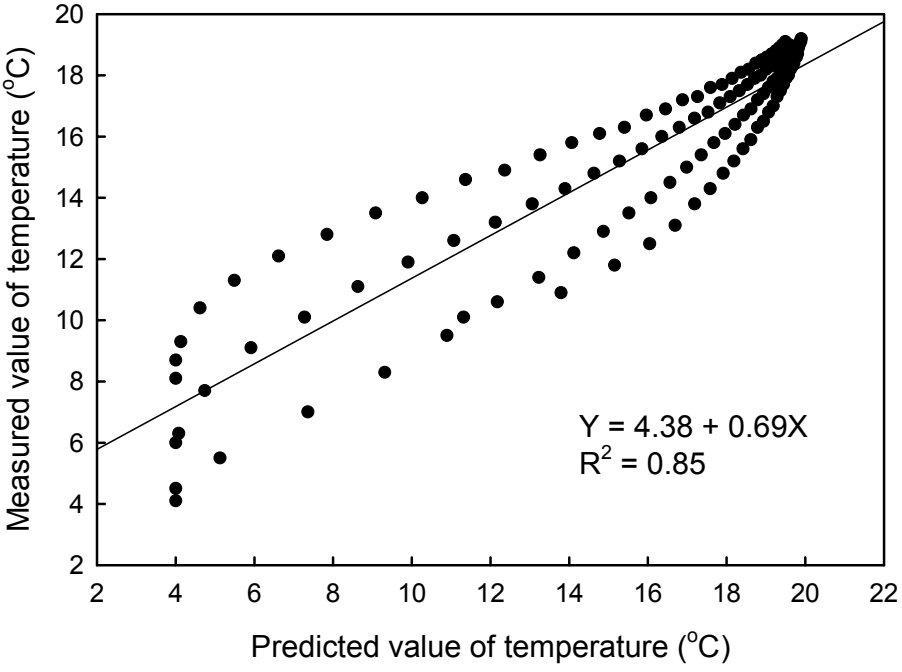


그림 3-4. FDM을 이용한 품온 예측 모델 검증 결과

제 2 절 유한요소법에 의한 사과의 품온 예측

1. 사과의 유한요소 해석

본 연구에서는 사과의 유한요소 해석을 위하여 ANSYS Release 8.0 프로그램을 사용하였으며, 본 연구에서 수행한 사과의 유한요소 분석 작업은 다음과 같다.

유한요소법의 장점중의 하나는 분석 시료의 실제 형상을 입력하여 시료와 일치된 모형을 생성하여 시료와 동일한 형상에서 분석을 수행할 수 있다는 것이다. 따라서 본 연구에서는 분석 시료별로 사과의 실제 모형을 입력하기 위하여 사과의 절단면 형상외곽선 좌표입력 및 ANSYS 데이터 변환 소프트웨어를 개발하여 ANSYS 모델 데이터로 변환하여 사용하였다. 그림 3-5는 본 연구에서 개발한 사과의 외곽선 변환 프로그램을 나타낸 것이다.

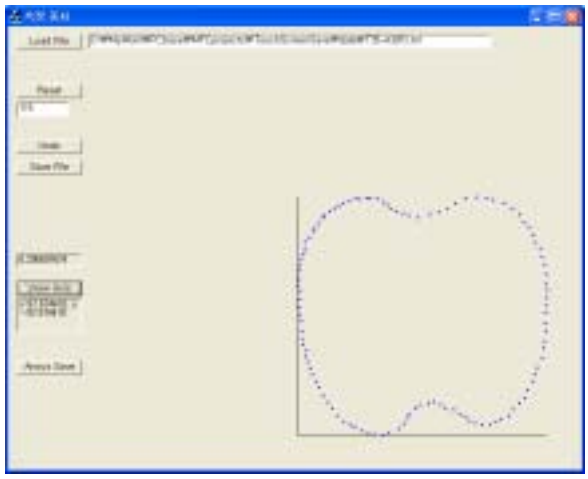


그림 3-5. 외곽선 변환 프로그램

개발된 데이터 변환 소프트웨어는 실제 사과의 외곽선 좌표를 터치스크린 모니터를 통하여 입력하고, 모니터 좌표계를 실제 좌표계로 보정하기 위하여 5cm 기준선을 측정하고 외곽선 좌표를 실제 좌표값으로 변환한 후 외곽선의 x, y 기준

선을 설정하여 기준선 보정하여 변환된 데이터를 ANSYS 모델 데이터로 환산하였다. 그림 3-6은 변환된 사과의 외곽선 데이터를 ANSYS 모델로 변환한 결과를 나타낸 것이고, 그림 3-7은 생성된 모델을 FEM해석하기 위하여 Mesh로 분할한 결과를 나타낸 것이다.

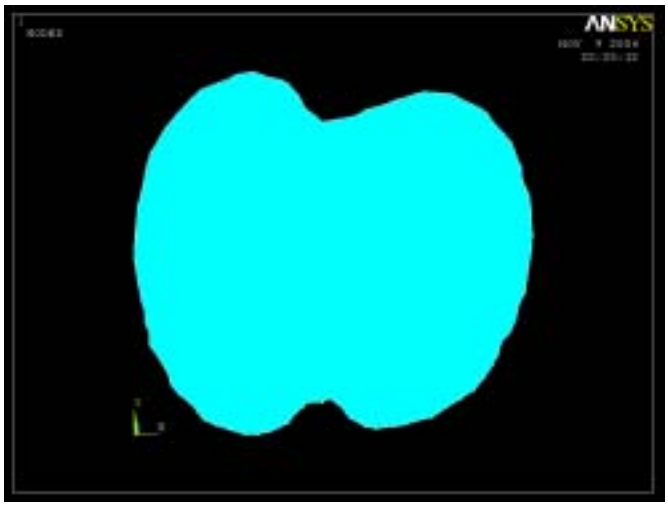


그림 3-6. 사과 모형 생성

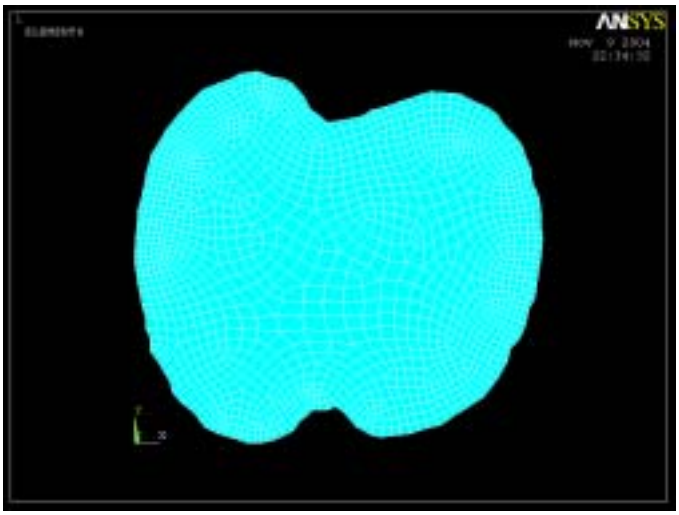


그림 3-7. 사과 모형의 Mesh 분할

유한요소법을 이용하여 외부온도 변화에 따른 사과 내부 품온 변화를 예측하기 위하여 ANSYS 프로그램에서 설정한 조건은 표 3-3과 같다.

표 3-3. 사과의 온도해석에 사용한 ANSYS 파라메타

Parameters	Conditions
Method	Thermal Analysis
Analysis type	Transient
Element type	Thermal Solid Quad 4node 55
Initial temperature	4℃
Global mesh size	3
Thermal load condition	Uniform convection on whole surface
Time step	over 12hrs

2. 품온 예측 프로그램

사과의 품온변화를 분석하기 위하여 FEM 해석 결과를 바탕으로 품온 예측 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 본 프로그램은 마이크로소프트사의 Visual C++ 6.0을 사용하여 제작되었으며, 윈도우 O/S 용으로 제작되었다.

개발된 프로그램은 열전도도, 비열, 대류열전달계수, 밀도 등 사과의 열적 특성을 고정변수로 사용하고, 시료의 초기온도, 시간에 따른 외부온도, 시료의 직경 등을 사용자가 입력하면 사과의 내부온도분포를 모니터링할 수 있도록 제작되었다.

시뮬레이션 결과의 출력형식은 시간별, 위치별로 데이터 형식 및 이미지 형식으로 출력이 가능하며 이미지 형식은 실시간 변화되는 온도 분포 해석에 적합하다. 또한 개발된 사과 품온 예측 프로그램은 유한요소 해석 결과를 데이터베이스화하여 사용자의 입력 조건에 가장 적합한 해석 결과를 찾아내어 임의의 순간에 사과 내부의 온도분포를 모니터링할 수 있도록 하였다.

그림 3-8과, 3-9는 본 연구에서 개발한 유한요소법을 이용한 사과의 품온 예측 프로그램에서 사과 내부의 온도를 분석한 결과를 나타낸 것이다. 그림 3-8은 시료 초기의 내부온도가 4℃일 때 외부온도가 35℃로 설정되었을 때 시간별, 위치에 따른 사과 내부 온도변화에 대한 분석 결과를 나타낸 것이고, 그림 3-9는 초기온도 4도에서 10도까지 시간에 따라 사과의 내부 품온이 변화하는 이미지 형태의 결과를 나타낸 것으로 초기 4℃에서 시간별로 온도변화를 관찰할 수 있다.

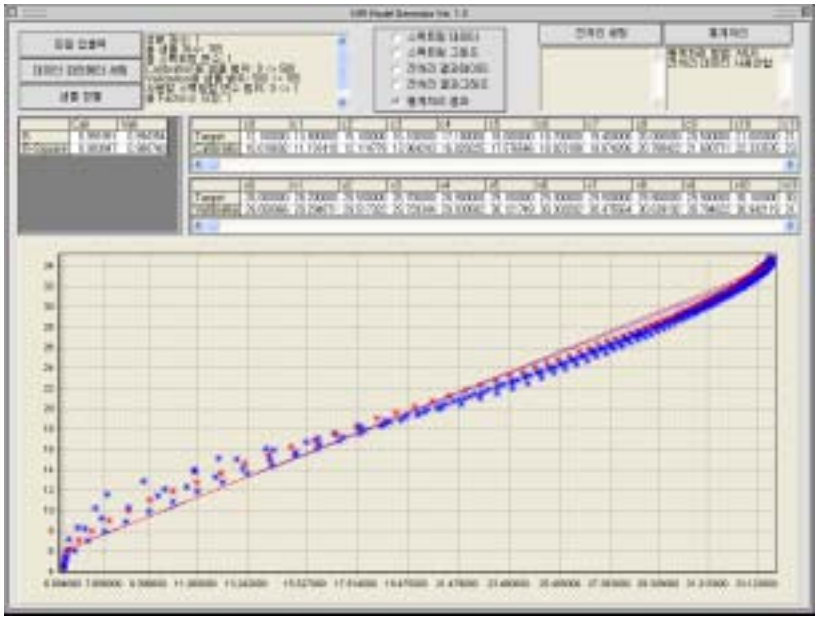
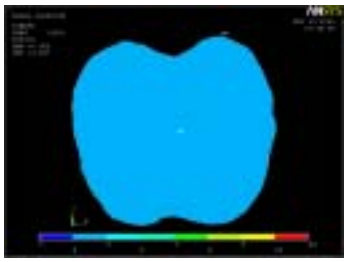
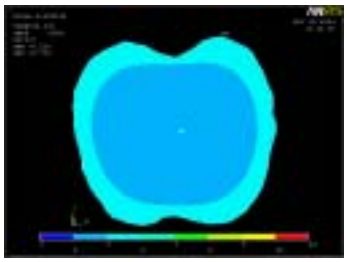


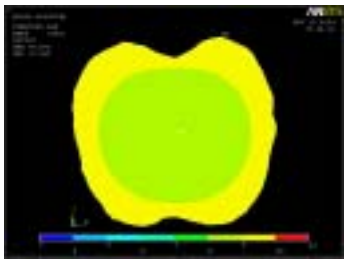
그림 3-8. FEM을 이용한 사과의 온도분포 분석 결과



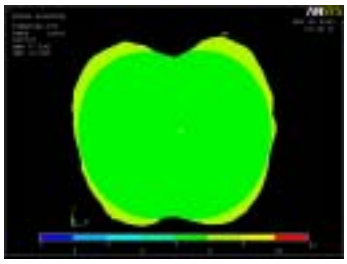
10분 경과



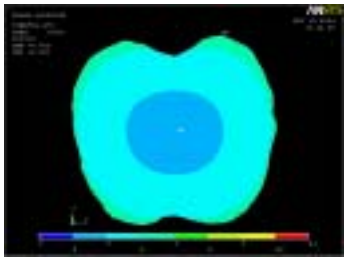
50분 경과



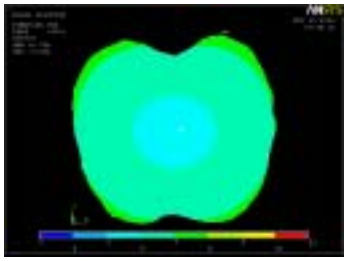
1시간40분 경과



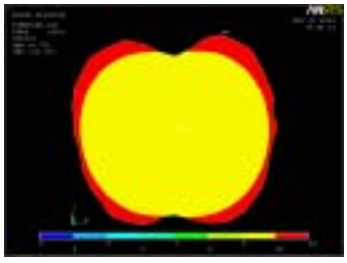
2시간30분 경과



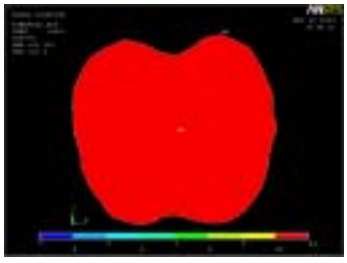
3시간20분 경과



4시간 경과



5시간 경과



6시간30분 경과

그림 3-9. FEM을 이용한 사과의 내부 품온 변화 예측

3. 모델 검증

본 연구에서 개발된 FEM을 이용한 사과의 외부온도에 따른 내부 품온 예측 모델을 검증하기 위하여 시뮬레이션 예측값과 실험을 통하여 측정된 실험값을 비교 분석하였다. 실증실험은 10, 15, 20, 25, 30, 35 ℃의 온도에서 사과 반경을 5등분하여 양쪽으로 10개 지점의 온도를 30초 간격으로 측정하였다.

모델 검증은 초기부터 외부온도에 도달할 때까지 시료 중심으로부터 5등분한 위치에 대하여 매 20분 간격의 데이터를 사용하여 측정값과 예측값을 선형회귀 분석하였다. 그림 3-10은 실험값과 시뮬레이션 예측값을 선형회귀 분석 결과를 나타낸 것이다. 그림 3-10에서 실험값과 시뮬레이션 예측값은 선형적인 관계를 가지며 결정계수가 0.95로 유한차분법을 이용한 사과 품온 예측 모델은 유의적인 것으로 분석되었다. 유한요소법을 이용한 사과 품온 예측 모델은 유한차분법을 이용한 사과의 품온 예측 모델의 결정계수 0.85보다 높게 나타났으며, 샘플시료의 실제 모형 분석이 가능하고 유한요소 해석 결과를 데이터베이스화하여 사용자의 입력 조건에 가장 적합한 해석 결과를 찾아 임의의 시간에 사과 내부의 온도분포를 모니터링할 수 있으므로 유한차분법의 모델보다는 현장에서 사용하기 적합한 모델로 판단되었다.

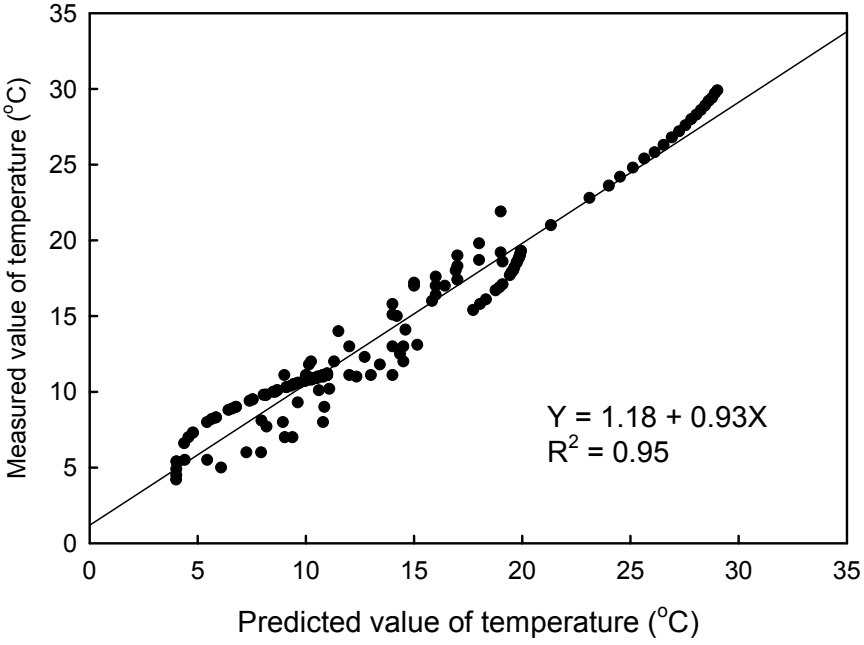


그림 3-10. FEM을 이용한 품온 예측 모델 검증 결과

제 3 절 과실세포의 영상분석 기술

1. 과실세포 영상처리 알고리즘 개발

가. 윤곽선 검출 알고리즘

측정된 세포영상의 상태는 다양한 요인으로 인해 많은 노이즈를 포함하고 있으며 세포벽이 결합된 형태, 세포벽의 연결이 되지 않은 상태로 측정되므로 이에 대한 영상처리를 수행하였다. 측정된 영상은 황금분할법에 의해 이치 영상으로 변환을 수행하였으며 일반적인 Acridine 염색에 의한 처리는 R을 기준으로 이치화를 수행하였다. 염색시약의 종류가 다른 경우 RGB, HSI의 각 프레임과 조합프레임을 가지고 잡음이 거의 없는 프레임을 선정하여 이치화를 수행하였다. 그림 3-10은 이치화 및 마스크 변환을 통한 윤관선 산출 결과를 나타낸 것이다.

그림 3-10. 이치화 및 마스크변환을 통한 윤곽선 산출 결과

일반적으로 내부가 빈 형태의 세포영상은 에지검출을 수행하기 위해서 마스크 연산자(mask operator)를 사용하였으며 반대로 속이 충진된 형태의 영상을 가진 세포는 라벨링(Labelling)을 먼저 수행한후 라벨링 값을 기준으로 체인코딩과 마스크연산자를 혼합하여 경계부인 세포벽을 검출하였다. 잡음제거와 영상분할을 위해

서 다음과 같은 영상축소(Image Shrink) 알고리즘을 이용하였으며 윤곽선을 검출하기 전에 적용하였다.

$$A \ominus B = \{ x \in EN \mid x+b \in A \text{ for every } b \in B \}$$

또한 경계요소의 검출을 위해서 Prewitt의 8방향의 마스크를 이용한 에지 검출을 수행하였다. 그림 3-11은 Prewitt 마스크에 의한 윤곽선 추출 과정을 나타낸 것이다.

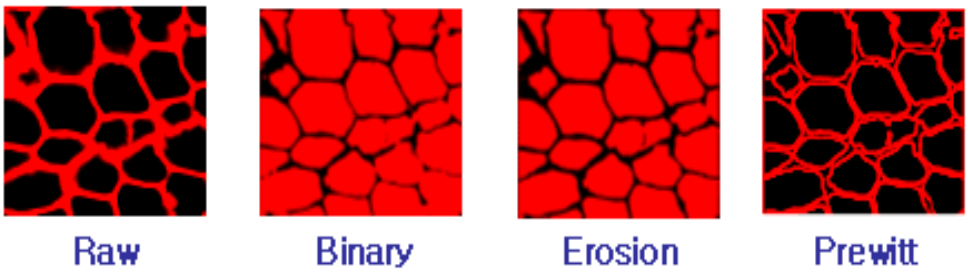


그림 3-11. Prewitt 마스크에 의한 윤곽선 추출

윤곽선 검출은 마스크 연산자에 의해 산출되었으나 각 과실 세포단위의 중심점 위치, 개수, 면적, 둘레 등의 정보를 산출하는 방법은 측정하여 얻은 영상의 상태에 따라 선택적으로 적용하였다. 윤곽선을 얻은 영상이 연결되어 있지 않은 경우에는 특별히 윤곽선을 연결해 주는 방법(SDDA)을 적용하였다. 하지만 대부분의 경우는 단순히 위에서 언급한 정보를 산출할 경우에는 이치화 된 영상에 잡음 성분의 제거를 위한 화소평균법에 의한 잡음을 제거한 후 아래의 식에 의해서 물체의 중심점을 산출하였고 면적은 화소의 개수를 계수하여 계산하였다. 윤곽선이 완전한 경우에는 Freeman의 체인코딩 알고리즘을 이용하여 필요한 정보를 산출하도록 하는 알고리즘을 적용하였다.

$$X_c = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} y_i \ , \quad Y_c = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i$$

나. 영상라벨링과 세선화

검출된 윤곽선은 세선화를 통해서 단순한 영상으로 변환을 하였다. 세선화 알고리즘은 Hilditch의 알고리즘을 적용하였으며, 복수개의 세포를 계산하기 위해서 그림 3-12와 같은 탐색영역을 지정하여 영상 라벨링(Labeling)을 수행하였다.

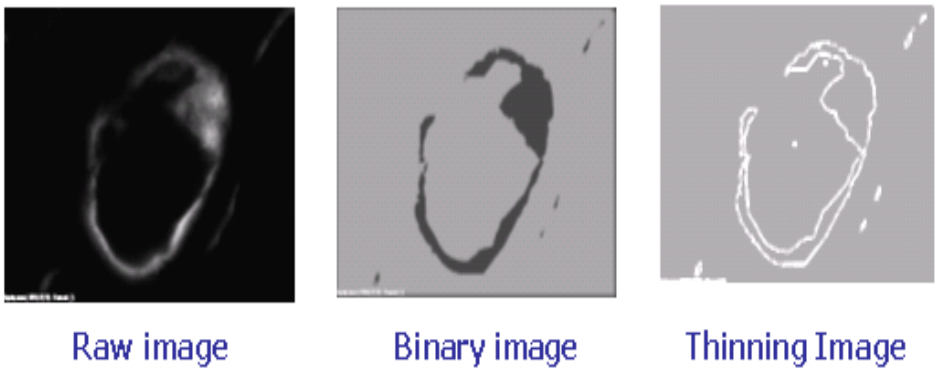


그림 3-12. 세선화 알고리즘에 의한 변환 영상

알고리즘은 스캔을 수행하면서 최초로 만나는 오브젝트에 동일한 값을 부여하고 다시 스캔을 수행하여 다음 번 오브젝트도 마찬가지로 구별이 가능한 수치를 부여하였다. 이 방법을 통해 작은 오브젝트는 잡음으로 간주하여 이에 해당하는 수치값에 해당하는 화소를 제거하였다. 이와 같이 각각의 다른 값으로 라벨링된 전체 오브젝트를 다시 스캔하여 각각의 세포에 대한 면적, 중심점, 둘레 등의 정보를 산출하였다. 체인코딩을 수행하여 이와 같은 값들을 산출하였다.

다. 직선 및 곡선 생성 알고리즘

탐색 도중 끊어진 연결성분을 찾는데 단순 차분 디지털분석(Simple Differential Digital Analyzer) 알고리즘을 적용하였다. 이 방법은 끊어진 연결성분을 직선으로 연결시키거나 탐색방향을 지정하여 설정된 화소위치에서 직선으로 탐색하고 360°방향으로 회전시켜 가면서 원하는 화소밝기에 해당하는 화소의 위치

를 탐색하는 데 적용된다. 이를 통해 체인코딩을 수행할 때의 가장 큰 문제점인 끊어진 경계부에 대한 탐색중지가 발생하는 문제를 해결할 수 있다.

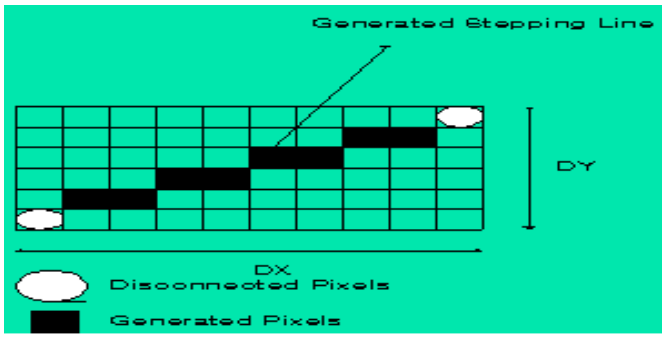


그림 3-13. SDDA 알고리즘에 의한 탐색

SDDA방법은 직선을 생성하거나 그 방향으로 탐색을 하는 목적으로 적용하였으나 실제로 아래의 그림 3-14와 같이 끊어진 연결 성분은 곡선의 형태를 띄므로 이 부분을 연결하기 위해서는 곡률생성 알고리즘이 필요하다. 본 연구에서는 Overhauser 곡률생성 알고리즘을 적용하여 수치해석적인 curve fitting을 수행하였다. 그림 3-14에서 끊어진 화소 P_2, P_3에 대해서 이미 알고 있는 위치의 화소점 P_1, P_4를 이용하여 다음과 같은 수식에 의해 자동적으로 곡선을 생성하여 폐곡선 형태의 윤곽 영상을 가지고 필요한 정보를 체인코딩에 의해 산출하였다. 여기서 새로 생성될 곡률 함수 C[t]는 [a][b][c]로 설정된다.

$$[a] = [t^3, t^2, t, 1]$$

$$[b] = \begin{vmatrix} -0.5 & 1.5 & -1.5 & 0.5 \\ 1 & -2.5 & 2 & -0.5 \\ -0.5 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \qquad [c] = \begin{vmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{vmatrix}$$

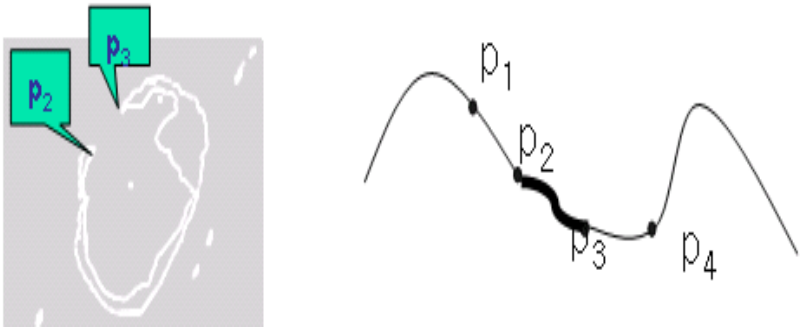


그림 3-14. 연결이 안된 윤곽선 영상과 Overhauser 곡률 생성

라. 집중 세포벽의 검출

한 개의 영상은 여러 세포의 집합으로 측정이 된다. 이 중에서 관심이 되는 대상 영상만을 측정하기 위한 방법은 라벨링을 통해 떨어진 개개의 영상을 측정하였다. 측정방법은 이치영상에 대해 잡음성분을 제거하고 난 후 라벨링을 통해 일정 면적이하의 오브젝트를 제외한 나머지 라벨링된 오브젝트에 대해 스캔을 수행한 후 필요한 정보를 산출하고 난후, 스캔이 시작된 화소의 좌표를 시작으로 다음의 라벨에 대해 스캔을 시작하는 과정을 반복한다. 이렇게 하여 각 오브젝트의 면적, 둘레, 좌표, 도심 등의 정보를 메모리에 저장하였다. 그림 3-15는 세포벽의 다중 오브젝트 측정한 결과를 나타낸 것으로, A는 $2.192\times10^{-3}mm^2$, B는 $8.117\times10^{-4}mm^2$, C는 $7.825\times10^{-4}mm^2$의 값을 나타냈다.

세포의 모양과 세포벽 사이의 간격은 각 도심점사이의 거리에서 각 오브젝트의 도심에서 외벽사이의 거리의 합을 뺀 값으로 산출하였다. 또한 전체영상의 좌측상단을 기준으로 각 오브젝트의 상대적인 위치와 기울기 등에 대해 정보를 산출하였다. 여기에는 중심모멘트, 정규화된 중심모멘트와 이를 통해 인식자로 활용하여 오브젝트인 세포 개개의 형상과 위치에 대한 정보를 정량적으로 이용하는 것이 가능하였다.

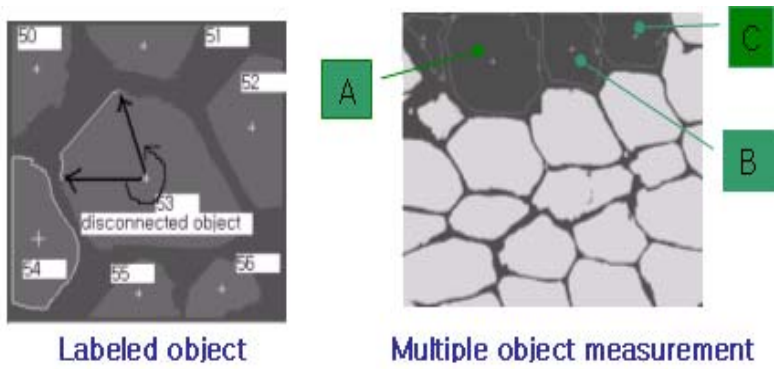


그림 3-15. 다중 오브젝트의 측정

마. 3차원 정보의 추출 및 측정기술

CLSM 현미경에 의한 영상은 위에서 아랫방향으로 측정하였고 측정대상인 사과의 세포 한 개의 Z방향의 높이가 대개 50~150㎛이내이므로 자동으로 조절되는 현미경의 Z방향의 변위를 0.x㎛ 또는 1/n unit로 설정하여 측정하였다. 이렇게 측정된 영상은 각각의 영상변환을 거쳐 최종적으로 윤곽선모양의 영상과 필요한 정보를 메모리에 저장하였다. 본 연구에서는 이렇게 측정한 영상을 3차원으로 복원하는 알고리즘을 개발하였다.

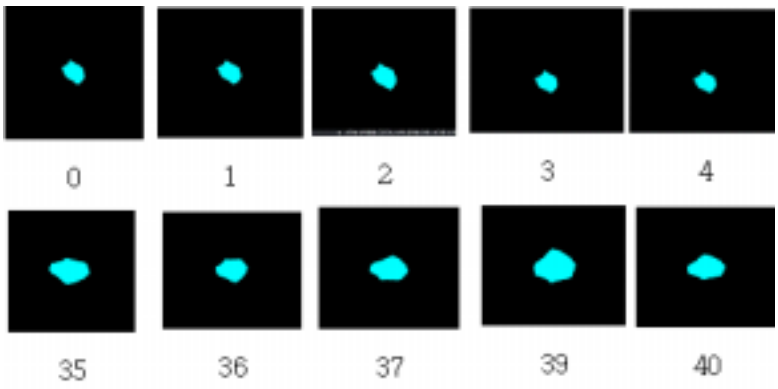


그림 3-16. 연속적으로 측정한 영상의 2치화 결과

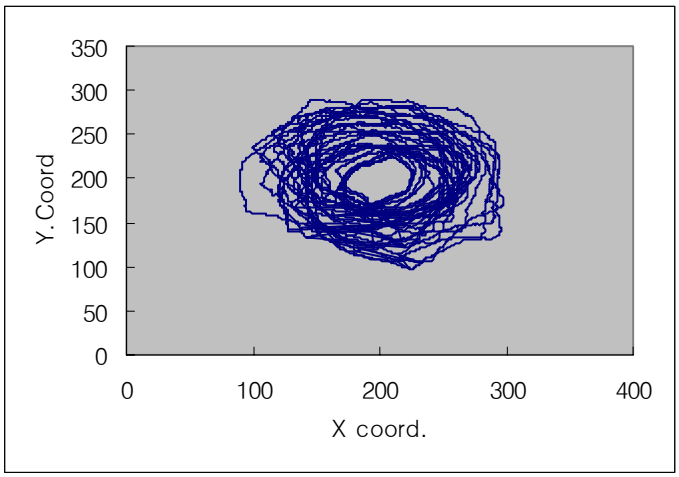


그림 3-17. 연속으로 측정된 오브젝트의 2-D 프로파일

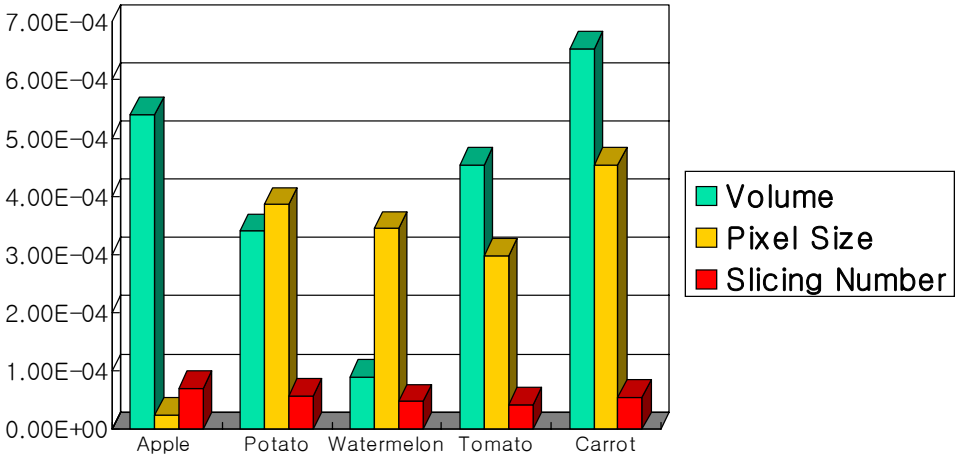


그림 3-18. 단일세포의 체적 영상측정 결과

2. 영상분석 프로그램

현미경과 IR카메라에 의한 세포 영상 측정 알고리즘 개발 및 형상분석 방법을 이용한 영상처리 소프트웨어를 개발하였다. 또한 식물세포 단위의 기계적 특성과 열적특성 분석을 위한 기초연구로 모델링한 데이터를 이용한 유한해석 툴을 개발하였다. 연속적으로 측정한 영상은 윤곽선 등의 정보를 추출하여 3차원 데이터로 활용이 가능해지며 이를 이용한 3차원 모델링결과를 얻을 수 있다. 소프트웨어는 Visual C++ 6.0과 OpenGL 라이브러리 및 그래픽 오픈소스 라이브러리인 VTK(Visualization Toolkit)을 사용하여 개발하였다. 그림 3-19는 본 연구에서 개발한 3D 복원영상 및 개발 소프트웨어를 나타낸 것이다.

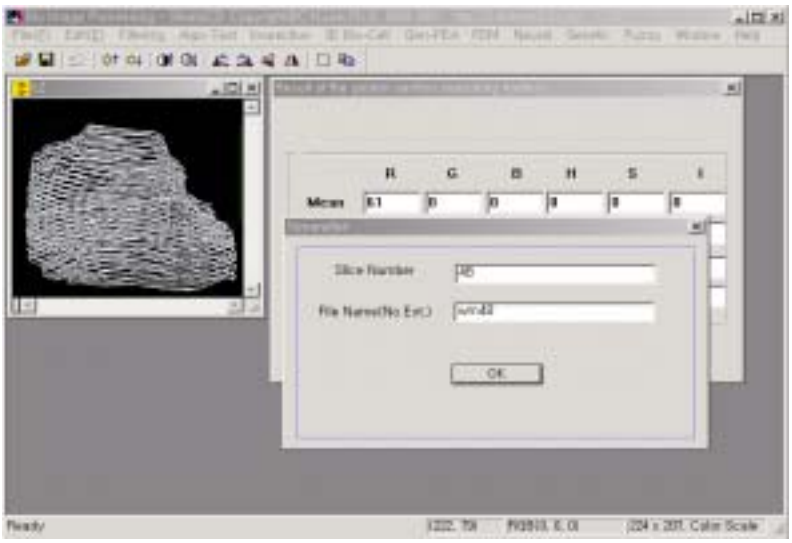


그림 3-19. 3D 복원영상 및 개발 소프트웨어

개발한 소프트웨어는 세포단위의 힘의 거동을 측정하기 위한 기반기술인 영상처리 기술과 이를 이용한 3차원 단일 세포벽 식물모델의 자동 산출 등을 통해 단일세포에 대한 역해석(reverse analysis)을 수행하기 위한 과실세포의 영상을 측정하고 분석하는 방법의 개발을 수행하였다. 과실은 세포로부터 구성되어지며 과실

의 역학특성은 현재까지 매크로 단계의 해석에 머물고 있으나 마이크로 단위에 대한 연구의 중요성이 커가고 있는 실정이다. 세포의 역학특성에 대해서도 예전에는 Nilsson 이 세포벽의 강성과 팽압의 관계를 해석하는 것으로 시작하여 Pitt는 세포가 압축되는 때의 변형과 팽압의 메커니즘을 해석하였다. 아직까지 Gao와 Pitt는 Kelvin 14면체의 역학특성을 해석하고 있는 실정이다. 그러나 과실세포를 가지고 측정하는 것은 아직까지도 상당한 기술적인 문제가 있으며 이제까지의 연구의 해석 정밀도의 고찰이 필요하며 본 연구에서 개발한 자동 매쉬 생성에 의한 해석을 위한 모델링 방법은 다양한 식물 세포 분석에 활용이 가능하다.

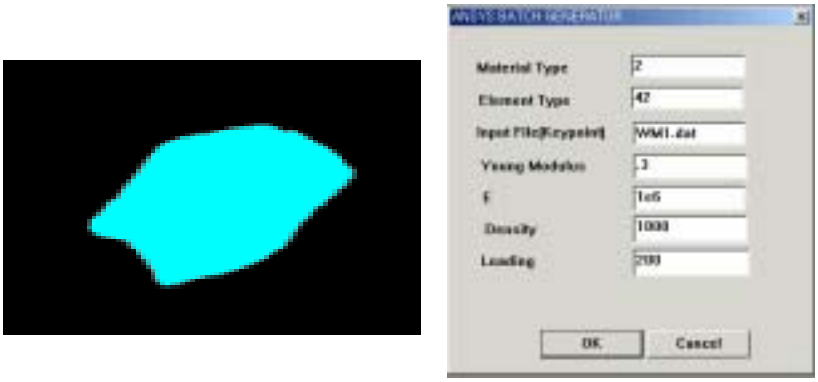


그림 3-20. 영상분할된 세포영상과 ANSYS 배치처리 모듈

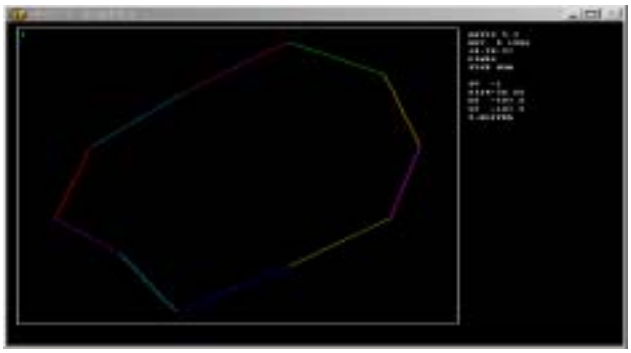


그림 3-21. ANSYS 2D 모델 자동생성결과

그림 3-20, 3-21에서 이치화 된 영상분할 된 1개의 과실세포영상의 둘레정보를 이용하여 전체의 좌표성분 중 모델을 단순화하기 위해 지정한 개수만큼의 점 데이터를 개발한 ANSYS 모듈을 이용하여 지정한 후 자동으로 ANSYS 입력파일을 생성하여 출력한 결과를 보여준다. 이 방법은 과실세포에 대한 모델링을 수행할 때 상당히 많은 처리시간의 단축을 가져다준다.

3. 온도변화에 따른 세포분석

측정 대상이 되는 식물체의 전체 대상을 이용한 유한 해석방법에 대한 연구는 많이 보고되고 있으니 세포단위의 영상측정과 유한해석 모델에 대한 연구는 앞으로 다양한 테마를 가지고 적용 가능성이 높다. 국내의 경우 아직 과실의 수확, 저장, 운반 등의 작업을 고려한 식물 세포단위의 힘의 거동에 대한 연구가 수행되고 있지 않으며 일부 시험편에 의한 조직의 인장 압축시험을 수행한 연구사례가 보고되고 있다. 과실은 수확, 수송, 저장 등의 경우에 외력에 의해 손상을 받게 되고 이에 따른 상품가치에 영향을 준다. 본 연구에서는 현미경 영상처리를 통해 축적한 각각의 농산물에 대한 세포벽 기준으로 추출한 영상을 가지고 세포단위의 해석적 모델링을 수행하였다.

모델링은 ANSYS의 Batch 방식으로 작성하였으며 개발한 프로그램에서 물성치를 입력하고 매쉬를 생성하였다. 아래의 그림 3-22에서 좌측의 윤곽선만 나타난 그림이 현미경에서 측정한 한 개의 사과 세포의 2차원 캐드 화면이고 2, 3번째 그림은 자동으로 생성한 매쉬를 나타내며 오른쪽은 Batch화일 생성 메뉴화면을 보여준다.

본 연구에서는 실제 측정한 세포단위의 영상을 모델링하여 앞 절에서 실험을 통해 산추한 과실의 물성값을 이용한 해석을 수행하였다. 이 방식은 역설계 모델링과 같은 방법으로 평가가 수행된다.

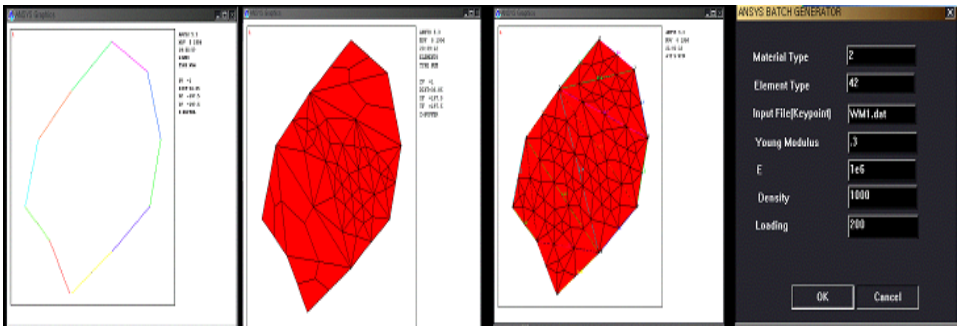


그림 3-22. 개발한 ANSYS Batch 처리기와 처리화면

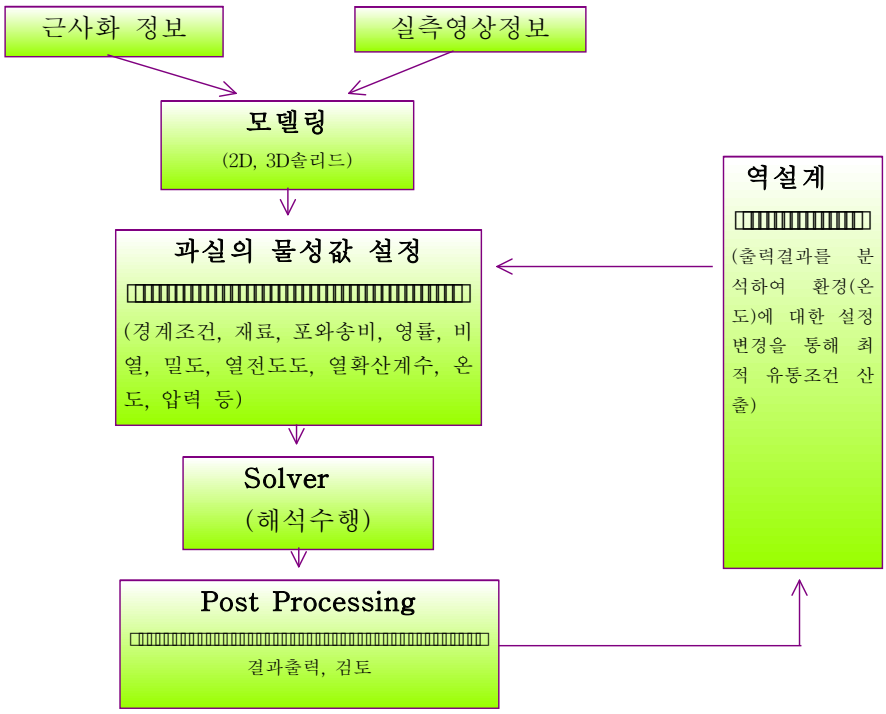


그림 3-23. 영상정보를 이용한 유한해석

온도변화에 따른 세포벽의 변화를 측정하기 위해서 12개의 시편을 가지고 각각 시간별로 화소수의 변화를 영상처리를 통해 측정하였다. 온도는 최초 20℃에서 4시간 간격으로 5℃를 상승시켜 가면서 측정하였다. 세포벽의 변화는 둘레의 변화, 형상의 변화, 조직의 변화 등 다양한 측정인자 중에서 상대적으로 변화율을 판단하기 쉬운 화소수의 변화를 통해 온도에 따른 세포벽 특성의 변화를 영상처리를 통해 산출하였고 그림 3-24는 시간별 단일 세포벽의 화소수를 산출한 결과이다.

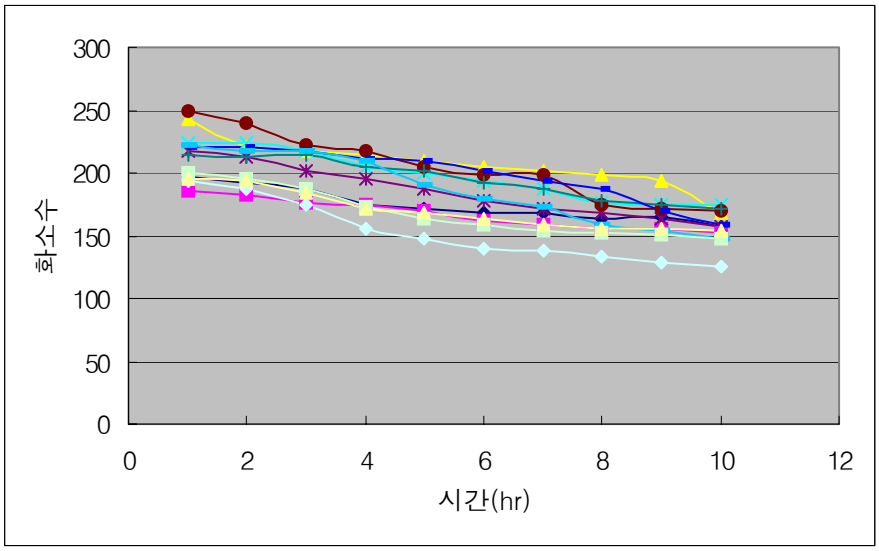


그림 3-24. 시간별 단일 세포벽의 화소수 변화

4. 저장, 유통 과정 중 사과 세포구조 분석

식물세포에는 세포막 바깥에 세포벽이 있다. 세포벽은 셀룰로오스로 되어 있으며 펙틴으로 구성된 1차벽과 그 안쪽에 셀룰로오스와 리그닌으로 구성된 2차벽이 있다. 세포벽은 세포에 비하여 두껍고 단단하여 세포를 싸고 보호하고 형태를 유지해 주는 역할을 하며 세포벽은 세포에 비하여 두껍고 단단하여 세포를 싸서, 보호하고 형태를 유지해 준다. 또한, 세포벽은 물과 용질을 모두 통과시키므로 물질 출입의 조절 능력이 없으며 작은 구멍들을 통하여 원형질이 이웃세포와 통한다. 식물세포만이 갖는 특성으로 자체의 큰 하중을 견딜 수 있어 대형나무로 성장할 수 있고 동물과는 다르게 노화과정에서 주름이 생기지 않는 이유도 세포벽 때문이다. 그러나 세포벽으로 인하여 식물은 운동할 수 없는 조직으로 이루어져 유연성을 갖지 못한다. 이와같은 세포외벽을 검출하기 위해서는 염색방법과 이에 대응하는 파장대의 검출장치를 이용하게 된다.

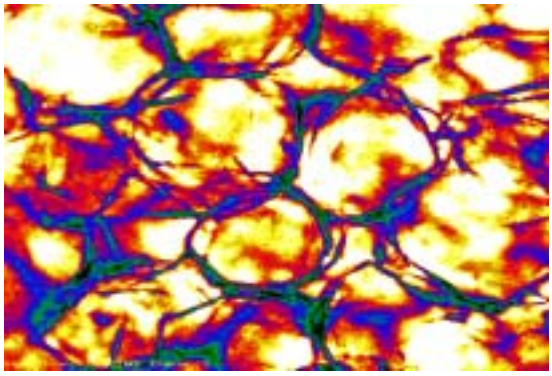


그림 3-25. 확대한 사과세포 염색처리 영상

사과의 저장 유통과정중의 품질 및 상태 변화는 외부의 열특성의 변화에 따른 내부조직의 변화가 열적, 기계적 성질로 나타나게 된다. 실제적으로 외부에 변위를 주어서 측정한 영상은 그림 3-26과 같이 0.5mm 간격의 외력을 가해 얻어진 동일 시료에 대한 영상을 통해 변위량을 측정하였다. 이는 열변형에 의한 내부조

직의 변화량이 단면영상의 변위량으로 대체할 수 있으므로 상대적인 변화량으로 간주하여 측정하였다. 대개의 경우 실시간적으로 이와 같은 영상을 측정하기가 어려운 실정이며 측정방법의 정밀도가 중요한데 실제적으로 이에 대한 보완 연구가 필요한 실정이다.

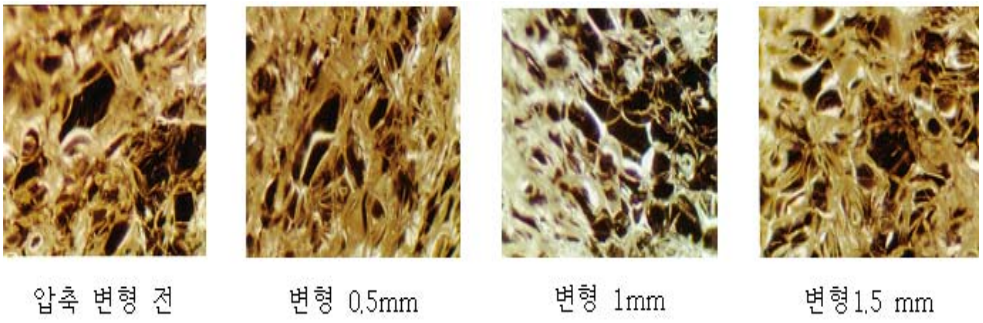


그림 3-26. 압축에 따른 세포형상의 변화

그림 3-26과 같이 변형이 진행되면 원하는 원점의 위치를 측정하기에 무리가 따른다. 본 연구에서는 측정에 따른 세포형상의 변화에 대한 관찰을 통해 내부의 상태변화를 추정할 수 있었다. 대개의 경우 이와 같은 변화는 외력이나 온도나 습도의 변화에 따른 결합수의 이동과 증발에 따라 내부 품질이 변화하는 것으로서 이와 같은 특성을 이용한 열 유동학적인 해석을 통해 유통모델 개발 등에 활용이 가능하리라 본다. 변위에 따른 각각의 하중곡선은 UTM을 사용하여 측정하였으며 그림 3-27, 28, 29, 30과 같이 나타났다.

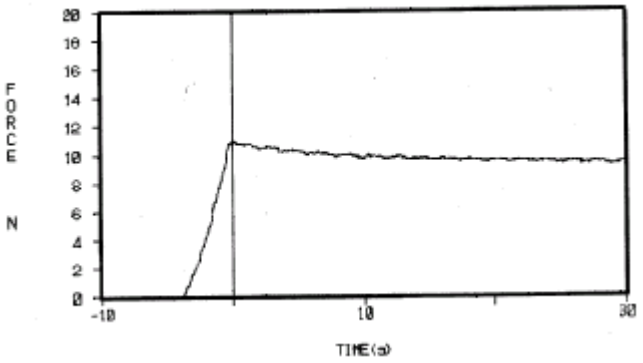


그림 3-27. 사과의 하중곡선

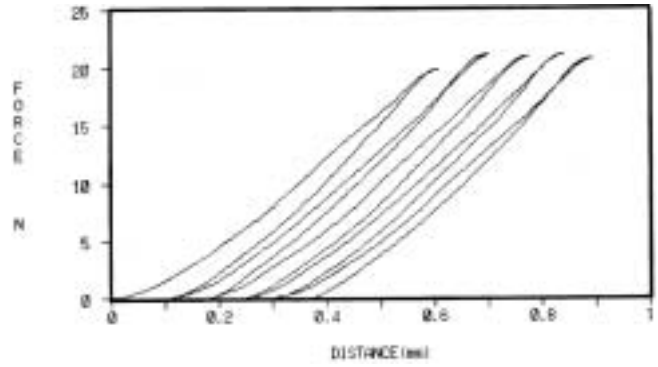


그림 3-28. 변위 0.5mm에 대한 사과의 하중곡선

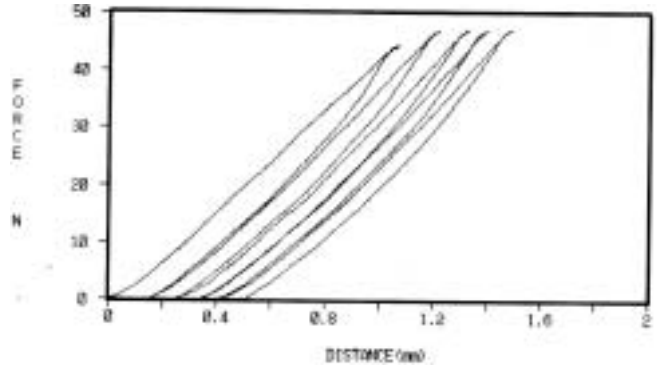


그림 3-29. 변위 1.0mm에 대한 사과의 하중곡선

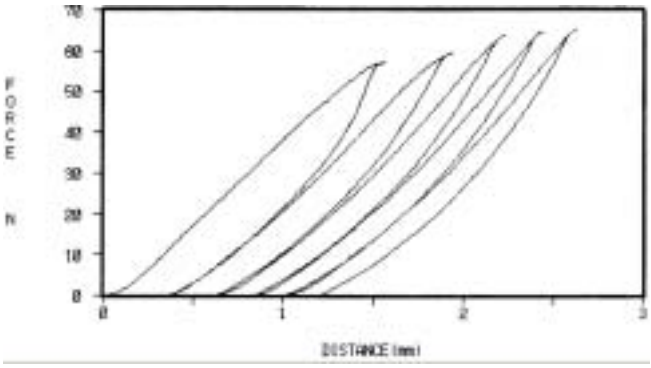


그림 3-30. 변위 1.5mm에 대한 사과의 하중곡선

세포의 크기는 사과의 경우 70~80㎛, 수박의 경우 200㎛, 감자의 경우는 100㎛ 정도로 측정되었으며 형상은 매 실험마다 상이한 결과를 보여준다. 본 연구에서 제시한 방법은 세포벽 모델을 적용한 Pitt의 이론을 기반으로 실제 과실 세포영상을 품온 변화에 대한 정량적인 데이터로서 활용에 관한 방법이다. 실제에 있어서는 세포형상이 다양해서 세포자체의 모델은 3차원 가시화 알고리즘의 개발과 가시화 모델에 대한 유한요소 해석을 할 수 있는 단계의 연구를 수행하였다. 향후 시뮬레이션에 의한 결과를 검증할 수 있는 측정방법의 개발이 추진되어져야 할 것이다. 본 연구를 통해 3차원으로 가시화 된 세포 모델은 솔리드 모델화를 통해 상용해석 프로그램을 사용한 과실 세포의 상태변화를 분석하는 것이 가능하며 나노기술 등을 융합한 연구가 필요하리라 본다.

제 4 절 품질 모니터링 기술

1. 외부온도별 시간에 따른 품질변화

가. 외부온도 15℃

표 3-4는 외부온도 15℃일 때 시간에 따른 사과의 수분, 당도, 산도, 경도의 변화를 나타낸 것이다. 수분의 경우 98일 동안 84.7~86.6%의 범위에서 큰 변화를 나타내지 않았으며 Duncan's multiple range test에서도 시간에 따른 수분의 유의적인 차이는 나타나지 않았다. 당도의 경우에는 초기에는 15.0 °brix에서 98일에는 11.8 °brix로 시간이 지남에 따라 감소하는 경향이 나타났으며, Duncan's multiple range test 결과 14일부터 유의적인 차이가 나타났으며, 이후에도 시간에 따라 감소하는 경향이 유의적인 것으로 나타났다. 산도는 시간이 증가함으로서 증가하는 경향이 나타났으며, Duncan's multiple range test 결과 70일에서 유의적인 차이가 나타났으나 시간이 증가함에 따른 집단간의 차이는 크게 나타나지 않았다. 경도는 시간이 증가함에 따라 감소하는 경향이 나타났으며, Duncan's multiple range test 결과 14일부터 초기 시료와는 유의적인 차이가 분석되었고 그 이후 49일까지는 유의적인 차이가 나타나지 않았으며 56일, 77일에 유의적인 차이가 나타났다.

표 3-5는 외부온도 15℃에서 시간에 따른 사과 과육의 색도를 분석한 결과를 나타낸 것이다. 밝은 정도를 나타내는 L값은 77.4에서 81.7까지 시간에 따른 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다. 붉은색의 정도를 나타내는 a값도 -5.4에서 -7.3까지 나타났으며 시간에 따른 유의적인 경향은 나타나지 않았다. 노란색 정도를 나타내는 b값의 경우에는 초기값이 22.4이고 98일에는 26.9로 나타났으며, 시간이 증가함에 따라 증가하는 경향이 나타났다. 색차를 보면 14일부터 차이가 나타났으며 그 이후에도 98일까지 색차가 3.0~6.0 사이로 초기시료와 극히 현저한 차이가 나타나지는 않는 것으로 분석 되었다.

표 3-4. 외부온도 15℃에서 시간에 따른 사과의 이화학적 성분

Time (days)	Moisture content (%)	Soluble solids (°brix)	pH	Hardness
0	85.6^{fgh}	15.0^{a}	3.89^{e}	1156.4^{a}
7	86.6^{a}	14.3^{a}	3.93^{cde}	1153.4^{a}
14	85.3^{hij}	13.3^{b}	3.94^{bcde}	1022.7^{bc}
21	85.0^{ijk}	12.8^{bcd}	3.93^{cde}	995.0^{bcd}
28	86.4^{abc}	12.8^{bcd}	3.92^{de}	1083.9^{ab}
35	86.1^{cde}	12.7^{bcd}	3.93^{cde}	1023.9^{bc}
42	85.0^{jk}	13.0^{bc}	3.98^{bcde}	1026.4^{bc}
49	86.5^{abc}	12.3^{bcd}	3.97^{bcde}	996.9^{bcd}
56	86.2^{bcd}	12.5^{bcd}	3.99^{bcde}	953.3^{cde}
63	85.8^{efg}	12.7^{bcd}	4.01^{abcde}	910.4^{cdef}
70	86.0^{def}	12.5^{bcd}	4.03^{abcd}	972.9^{bcde}
77	84.7^{k}	12.8^{bcd}	4.06^{abc}	870.0^{ef}
84	86.3^{abcd}	12.0^{cd}	4.08^{ab}	894.3^{def}
91	86.5^{ab}	11.7^{d}	4.08^{ab}	815.6^{f}
98	85.4^{ghi}	11.8^{cd}	4.13^{a}	878.4^{def}

^{ab}Means with same superscripts in a column are not significantly different by Duncan's multiple range test($p<0.05$)

표 3-5. 외부온도 15℃에서 시간에 따른 사과의 색도

Time (days)	L	a	b	ΔE
0	80.9	-5.4	22.4	
7	79.8	-5.6	25.1	2.9
14	77.4	-5.8	24.0	3.9
21	80.2	-6.3	25.5	3.4
28	81.2	-6.0	24.7	2.4
35	82.1	-5.9	24.6	2.5
42	77.6	-5.8	25.3	4.4
49	80.9	-6.9	26.3	4.2
56	81.5	-6.1	26.0	3.7
63	81.3	-6.1	25.1	2.9
70	81.7	-7.3	25.9	4.1
77	81.4	-5.4	26.1	3.8
84	82.1	-6.5	26.5	4.4
91	81.3	-6.5	27.7	5.4
98	81.3	-5.9	26.9	4.5

* ΔE는 저장초기의 색도와 해당 저장시기의 색도와의 색차값 임

표 3-6은 외부온도 15℃일 때 시간에 따른 관능평가 결과를 나타낸 것으로, 대조구로 쓰인 신선한 사과의 점수를 9.0으로 하여 색, 향, 맛, 조직감 및 종합적인 평가의 항목에 대하여 비교 평점법을 사용하였으며, 시간의 증가에 따른 조사 항목의 유의적인 차이를 분석하기 위하여 Duncan′s multiple range test를 실시하였다.

색, 향, 맛, 조직감, 종합적인 평가의 모든 항목은 시간이 경과함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 색은 자른 단면의 사과 색감을 평가하였으며 초기 8.7에서 98일에 7.6으로 감소하였으나 시간의 증가에 따른 집단간의 유의적인 차이는 나타나지 않았다. 향의 경우에는 자른 단면에서 풍기는 신선한 사과향을 평가하였으며, 초기 8.6에서 98일 7.6으로 나타났으며 56일에서 초기와 유의적인 차이가 나타났다. 맛은 사과 과육의 단맛을 평가하였으며, 저장초기 8.6에서 98일에는 6.8로 감소하였으며 Duncan′s multiple range test 결과 56일에서 초기와 유의적인 차이가 나타났다. 조직감은 자른 과육의 씹히는 조직감을 평가하였으며, 초기 8.6에서 98일에는 6.1로 떨어졌으며, 28일에 초기값과 유의적인 차이가 나타났다. 종합적 평가는 종합적 사과품질을 고려하여 평가하였으며, 초기에 8.7에서 98일에는 6.7로 감소하였다. 시간의 증가에 따른 유의적인 차이의 분석 결과 56일에서 초기값과 유의적인 차이가 나타나는 것으로 분석되었다.

표 3-6. 외부온도 15℃에서 시간에 따른 사과의 관능평가

Time (days)	Color	Flavor	Taste	Texture	Overall
0	8.7^{a}	8.6^{a}	8.6^{a}	8.6^{a}	8.7^{a}
7	8.3^{a}	8.1^{abc}	8.2^{ab}	8.2^{abc}	8.4^{a}
14	7.8^{a}	7.8^{abc}	7.6^{abc}	7.6^{abcde}	7.5^{ab}
21	8.4^{a}	8.5^{ab}	8.6^{a}	8.3^{ab}	8.4^{a}
28	8.0^{a}	8.3^{ab}	7.6^{abc}	6.8^{cdef}	7.4^{ab}
35	7.6^{a}	7.5^{abc}	7.9^{ab}	7.8^{abcd}	7.8^{ab}
42	7.8^{a}	7.8^{abc}	7.5^{abc}	7.4^{abcdef}	7.4^{ab}
49	7.8^{a}	8.0^{abc}	7.8^{ab}	6.8^{cdef}	7.3^{ab}
56	8.3^{a}	7.5^{abc}	6.8^{bc}	6.3^{def}	6.8^{b}
63	7.7^{a}	7.7^{abc}	7.9^{ab}	7.9^{abc}	7.7^{ab}
70	8.2^{a}	7.9^{abc}	7.5^{abc}	7.4^{abcdef}	7.7^{ab}
77	8.1^{a}	8.0^{abc}	7.5^{abc}	7.1^{bcdef}	7.6^{ab}
84	7.4^{a}	7.0^{bc}	6.8^{bc}	6.6^{cdef}	6.5^{b}
91	7.4^{a}	6.9^{c}	6.3^{c}	5.9^{f}	6.5^{b}
98	7.6^{a}	7.6^{abc}	6.8^{bc}	6.1^{ef}	6.7^{b}

^{ab}Means with same superscripts in a column are not significantly different by Duncan's multiple range test($p<0.05$)

나. 외부온도 25℃

표 3-7는 외부온도 25℃일 때 28일까지 시간의 증가에 따른 사과의 수분, 당도, 산도, 경도의 변화를 나타낸 것이다. 수분의 경우 초기에 85.6%에서 28일에는 86.2%로 나타났으며 Duncan's multiple range test 결과 시간의 증가에 따른 수분의 유의적인 차이는 나타나지 않았다. 당도는 초기에 15.0 °brix에서 28일에 11.5 °brix로 시간이 지남에 따라 감소하는 경향이 나타났으며, Duncan's multiple range test 결과에서 2일부터 초기 값과 유의적인 차이가 나타났으며 9일과 22일에도 집단간 유의적인 차이를 보이고 있다. 11일 이후에는 11.5~12.2 °brix로 유의적인 차이가 나타나지 않았다. 산도는 시간이 증가함으로서 증가하는 경향이 나타났으며, Duncan's multiple range test 결과 4일에서 유의적인 차이가 나타났다. 경도는 시간이 증가함에 따라 감소하는 경향이 나타났으며, Duncan's multiple range test 결과 4일부터 초기 시료와는 유의적인 차이가 분석되었고 그 이후 18일까지는 유의적인 차이가 나타나지 않았으며 21일, 28일에 유의적인 차이가 나타났다.

표 3-8는 외부온도 25℃에서 시간에 따른 사과 과육의 색도를 분석한 결과를 나타낸 것이다. 밝은 정도를 나타내는 L값은 77.4~81.8의 범위에서 시간에 따른 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다. 붉은색의 정도를 나타내는 a값의 경우에는 -4.7에서 -5.9까지 나타났으며 시간에 따른 유의적인 경향은 나타나지 않았다. 노란색 정도를 나타내는 b값의 경우에는 초기값이 22.4이고 28일에는 26.2로 나타났으며, 초기에는 큰변화가 나타나지 않았으나 시간이 증가함에 따라 전체적으로 증가하는 경향이 나타났다. 색차는 2일부터 감지할 수 있을 정도의 차이는 나타났고 11일부터 현저한 차이가 나타났으며 그 이후에는 28일까지 3.0~6.0 사이로 초기시료와 극히 현저한 차이가 나타나지는 않는 것으로 분석 되었다.

표 3-7. 외부온도 25℃에서 시간에 따른 사과의 이화학적 성분

Time (days)	Moisture content (%)	Soluble solids (°brix)	pH	Hardness
0	85.6^{def}	15.0^{a}	3.89^{d}	1156.4^{a}
2	87.4^{a}	13.8^{b}	4.08^{bc}	1115.7^{ab}
4	86.3^{b}	13.5^{bc}	4.05^{c}	1011.6^{cde}
7	85.3^{efg}	13.8^{b}	4.05^{c}	1035.1^{bc}
9	85.2^{g}	12.5^{cd}	4.2^{ab}	1022.8^{bcd}
11	85.9^{cd}	12.3^{d}	4.18^{abc}	931.2^{def}
14	85.6^{de}	11.8^{d}	4.24^{ab}	928.4^{def}
16	86.1^{bc}	12.2^{d}	4.31^{a}	960.3^{cdef}
18	85.3^{fg}	12.2^{d}	4.24^{ab}	917.1^{ef}
21	86.3^{b}	11.7^{d}	4.29^{a}	877.5^{fg}
25	83.2^{h}	12.0^{d}	4.27^{a}	792.7^{gh}
28	86.2^{bc}	11.5^{d}	4.31^{a}	733.3^{h}

^{ab}Means with same superscripts in a column are not significantly different by Duncan's multiple range test($p<0.05$)

표 3-8. 외부온도 25℃에서 시간에 따른 사과의 색도

Storage time (days)	L	a	b	ΔE
0	80.9	-5.4	22.4	
2	80.4	-5.9	23.8	1.6
4	79.6	-5.3	22.0	1.4
7	81.8	-5.5	23.5	1.5
9	78.8	-5.1	23.6	2.5
11	77.9	-4.7	21.8	3.2
14	77.4	-4.9	24.6	4.1
16	80.9	-4.8	26.3	3.9
18	80.7	-5.6	25.8	3.4
21	81.2	-5.1	25.5	3.1
25	81.9	-4.7	25.9	3.7
28	81.0	-4.8	26.2	3.8

* dE는 저장초기의 색도와 해당 저장시기의 색도와의 색차값 임

표 3-9는 외부온도 25℃일 때 시간에 따른 관능평가 결과를 나타낸 것이다. 색, 향, 맛, 조직감, 종합적인 평가의 모든 항목은 시간이 경과함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 색은 초기 8.7에서 28일에는 6.1로 감소하였으며 12일에 초기와 유의적인 차이가 나타났다. 향의 경우에는 초기 8.5에서 28일에는 5.6으로 나타났으며 21일에서 유의적인 차이가 나타났다. 맛은 저장초기 8.6에서 28일에는 4.5로 감소하였으며 Duncan's multiple range test 결과 7일에서 초기와 유의적인 차이가 나타났다. 조직감은 초기 8.6에서 28일에는 3.9로 떨어졌으며, 7일에 초기값과 유의적인 차이가 나타났다. 종합적 평가에서는 초기에 8.7에서 28일에는 4.0으로 감소하였으며, 시간의 증가에 따른 유의적인 차이의 분석 결과 7일에서 초기와 유의적인 차이가 나타나는 것으로 분석되었다.

표 3-9. 외부온도 25℃에서 시간에 따른 사과의 관능평가

Time (days)	Color	Flavor	Taste	Texture	Overall
0	8.7^{a}	8.5^{a}	8.6^{a}	8.6^{a}	8.7^{a}
4	8.2^{ab}	8.2^{ab}	7.9^{ab}	7.8^{ab}	7.9^{ab}
7	7.8^{abc}	7.7^{abc}	6.8^{bc}	6.7^{bcd}	7.1^{bc}
12	6.5^{cd}	7.2^{abc}	7.6^{ab}	7.2^{abc}	7.2^{bc}
14	6.7^{cd}	7.7^{abc}	6.9^{bc}	6.9^{bcd}	6.8^{bcd}
18	7.1^{bcd}	7.9^{abc}	5.9^{cd}	6.4^{bcd}	6.4^{cde}
21	6.0^{d}	6.8^{bcd}	5.9^{cd}	5.6^{cd}	5.6^{de}
25	6.3^{d}	6.4^{cd}	5.3^{cd}	5.3^{d}	5.4^{e}
28	6.1^{d}	5.6^{d}	4.5^{d}	3.9^{e}	4.0^{f}

^{ab}Means with same superscripts in a column are not significantly different by Duncan's multiple range test($p<0.05$)

그림 3-31은 시간이 28일 경과되었을 때 외부온도 15℃와 25℃일 때 사과의 관능검사 결과를 비교한 것으로, 신선한 사과의 점수를 9.0으로 하여 색, 향, 맛, 조직감 및 종합적인 평가의 항목을 비교한 것이다.

색, 향, 맛, 조직감, 종합적인 평가에서 외부온도가 15℃의 경우에는 각각 8.0, 8.3, 7.6, 6.8, 7.4로 나타났으며, 외부온도가 25℃의 경우에는 각각 6.0, 6.8, 5.9, 5.6, 5.6으로 외부온도 25℃의 경우 15℃와 비교하여 시간이 증가함에 따라 빠른 속도로 품질이 저하되는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 시간의 증가에 따른 조사항목의 유의적인 차이를 분석하기 위하여 실시한 Duncan's multiple range test 결과에서도 초기와 비교하여 유의적인 차이가 나타나는 시간은 향, 맛, 조직감, 종합적 평가 항목에서 외부온도 25℃의 경우는 각각 21일, 7일, 7일, 7일로 외부온도 15℃의 각각 84일, 56일, 28일, 56일보다 매우 빠른 것으로 나타났다.

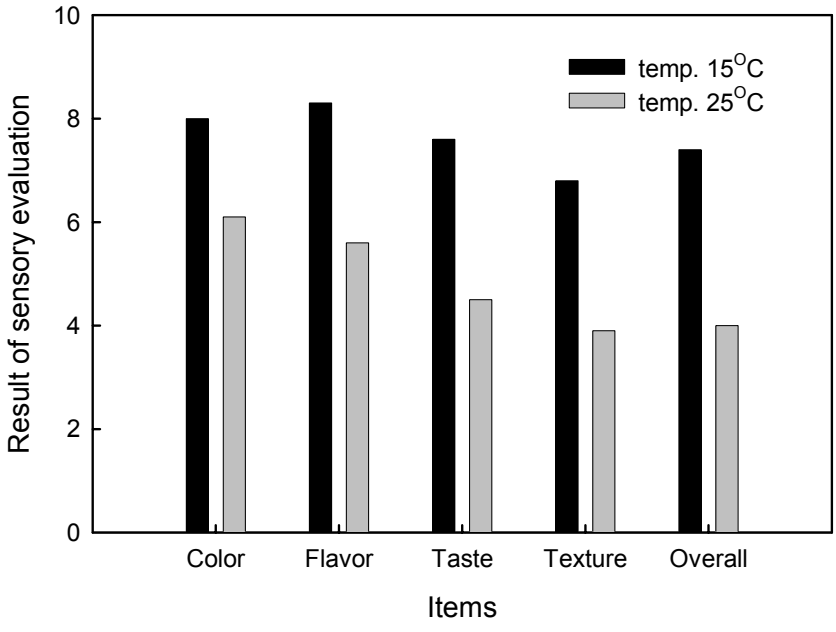


그림 3-31. 28일에서 온도별 관능검사 결과

2. 품질변화에 따른 주요 요인 분석

표 3-10은 외부온도별 시간의 증가에 따른 수분, 당도, 산도, 색도, 경도의 이화학적 성분 변화와 소비자 구매도의 상관분석 결과를 나타낸 것이다. 소비자 구매도는 제시된 시료를 대상으로 사과를 구매할 경우에 '확실히 사겠다, 아마도 살 것이다, 살지 안살지 모르겠다, 아마도 사지 않을 것이다, 절대로 사지 않겠다'의 5단계로 조사한 후 1~9점으로 환산하여 사용하였다. 소비자의 구매도과 수분, 당도, 산도 L, a, b, 경도와의 상관계수는 0.19, 0.85, -0.76, -0.30, -0.16, -0.67, 0.92로 분석된 성분 중 구매도와 상관성은 경도, 당도, 산도, b, L, 수분, a 순으로 나타났다. 이들 중 유의 수준 0.01에서 구매도와 당도, 산도, b, 경도가 유의적인 상관성이 있는 것으로 나타났다.

표 3-10. 사과의 이화학적 성분과 구매도의 상관관계

	Moisture content	Soluble solid	pH	L	a	b	Hardness	Purchasing index
Moisture content	1							
Soluble solid	0.07	1						
pH	-0.16	-0.68**	1					
L	0.08	-0.08	-0.04	1				
a	-0.33	-0.00	0.57**	-0.32	1			
b	-0.03	-0.66**	0.26	0.42*	-0.39*	1		
Hardness	0.27	0.86**	-0.68**	-0.21	-0.15	-0.61**	1	
Purchasing index	0.19	0.85**	-0.76**	-0.30	-0.16	-0.67**	0.92**	1

* correlation is significant at the 0.05 level

** correlation is significant at the 0.01 level

표 3-11는 소비자 구매도와 색, 향, 맛, 조직감, 종합 평가의 관능검사 결과와의 상관 분석 결과를 나타낸 것이다. 소비자 구매도와 각 항목별 상관계수는 색 0.768, 향 0.840, 맛 0.929, 조직감 0.934, 종합적 평가 0.933으로 전체적으로 관능검사의 결과와 소비자 구매도와는 높은 상관성을 가지는 것으로 나타났다. 이들 색 향, 맛, 조직감, 전체 평가 모든 항목이 유의 수준 0,01에서 소비자 기호도와 유의적인 상관성을 가지는 것으로 나타났으며, 조직감, 전체 평가, 맛, 향, 색의 순으로 소비자 구매도와 상관성이 높게 나타났다. 관능평가에서도 사과의 종합적 평가와 색, 향, 맛, 조직감과의 상관계수는 0.850, 0.910, 0.973, 0.974로 조직감과 맛이 종합적 평가와 가장 상관성이 큰 것으로 나타났다.

표 3-11. 사과의 관능평가 항목과 구매도의 상관관계

	Color	Flavor	Taste	Texture	Overall	Purchasing index
Color	1					
Flavor	0.83**	1				
Taste	0.80**	0.87**	1			
Texture	0.76**	0.86**	0.96**	1		
Overall	0.85**	0.91**	0.97**	0.97**	1	
Purchasing index	0.77**	0.84**	0.93**	0.93**	0.93**	1

** correlation is significant at the 0.01 level

사과의 품질변화에 따른 주요 요인의 분석은 소비자 구매도에 가장 큰 영향을 미치는 이화학적 성분을 분석하고 구매도의 종속 변수에 대한 의미 있는 독립변수를 선택하기 위하여 변수 선택법을 실시하였다. 표 3-12는 소비자 구매도 모델의 독립변수를 수분, 당도, 산도, L, a, b, 경도로 선정하여 변수 선택 분석결과를 나타낸 것으로 SAS의 결정계수 선택법(R^2 selection)을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 결정계수 선택법은 선정된 변수들의 모든 경우의 수에 대하여 결정계수가 큰 순으로 나타난다. 본 연구에서는 소비자 구매도 모델에 사용할 변수로 결정계수가 높으면서 변수의 수가 적은 당도, 산도, L, b, 경도로 총 5개의 변수를 선택하였다.

표 3-12. R^2 selection 방법에 의한 구매도의 변수 선택 결과

Model	No. of variable in model	R^2	Variable[1)] in model
Purchasing Index	1	0.6981	X_7
	2	0.7766	X_3, X_7
	3	0.8113	X_3, X_4, X_7
	4	0.8382	X_2, X_3, X_4, X_7
	5	0.8484	X_2, X_3, X_4, X_6, X_7
	6	0.8543	X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7
	7	0.8544	X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7

1) X_1 : moisture content (%), X_2 : soluble solids (^{o}brix), X_3 : pH, X_4 : L, X_5 : a, X_6 : b, X_7 : hardness (g/mm^2)

3. 품질 모니터링 모델

본 연구에서는 오차 역전파(back propagation) 다층 신경회로망(mult-layer neural network)을 사용하여 사과의 품질 모니터링 모델을 개발하였다. 품질 모니터링 모델은 주어진 외부온도에서 유통, 판매될 때 소비자 구매도를 예측하는 것으로서 예측모델의 독립변수는 2절에서 모델의 적정 변수로 선정된 당도, 산도, L, b, 경도를 사용하였다.

신경회로망에 의한 사과의 구매도를 예측하기 위하여 온도별로 27개의 표준 샘플의 학습을 통하여 시뮬레이션 모델을 개발하였으며, 신경회로망의 학습 시뮬레이션 조건은 표 3-13과 같다.

표 3-13. 신경회로망의 학습 시뮬레이션 조건

입 력 조 건	설 정 값
입력층 유니트 수	5
미지층 유니트 수	7
출력층 유니트 수	1
학 습 율 (η)	0.3
모 멘 텀 (α)	0.5
학습 반복수	10000
최대 허용 오차	0.01
학습 목표값	0.1 - 0.9

회로망의 입력 항목으로는 변수로 선정된 당도, 산도, L, b, 경도를 사용하였으며, 입력값은 0에서 1사이의 값으로 정규화(normalization)하여 입력하였다. 학습 목표값(target value)은 소비자 구매도로서 그림 3-*은 개발된 신경회로망 모델의

학습 결과를 나타내고 있다. 그림 3-32에서 개발된 산경 회로망 모델에 의하여 산출된 소비자 구매도와 실제 소비자 구매도와의 관계는 선형적이며 결정계수가 0.925로 나타났다.

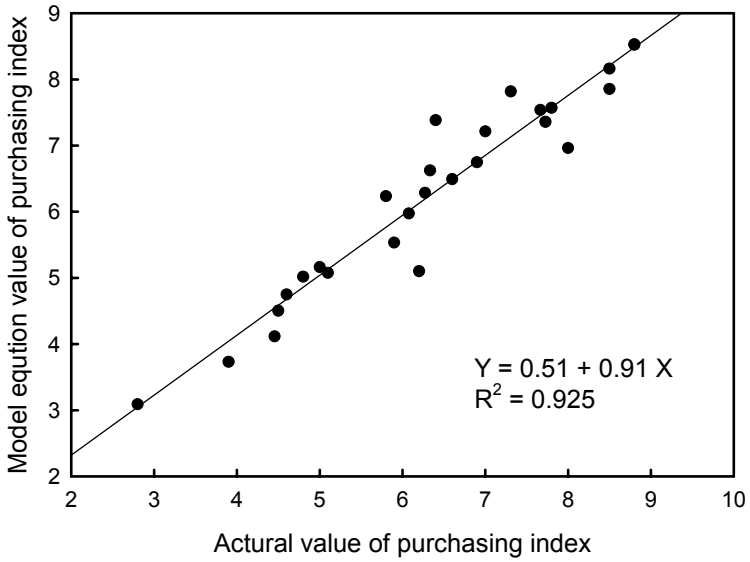


그림 3-32. 신경회로망을 이용한 소비자 구매도 모델의 학습 결과

학습의 일반화 효과(generalization effect)에 의한 학습되지 않은 미지의 시료에 대한 회로망의 인식 및 구매도 모델의 효율성을 검증하기 위하여 학습에 사용되지 않은 80개의 시료에 대하여 신경회로망의 구매도 모델을 이용한 예측값과 실제 소비자 구매도 값을 비교 검증하였다.

그림 3-33은 신경회로망에 의한 구매도 모델의 검증 결과를 나타낸 것이다. 소비자 구매도에 대한 예측값과 실험값의 관계는 선형적으로 나타났으며, 결정계수는 0.815로서 모델의 소비자 구매도의 예측값은 유의적인 것으로 판단되었다. 향후 본 연구에서 사용한 변수외에 소비자 구매도와 사과의 품질에 영향을 미치는 요인들을 모델의 변수로 추가한다면 좀더 높은 예측성능을 가지는 모델로 개선될 것이다.

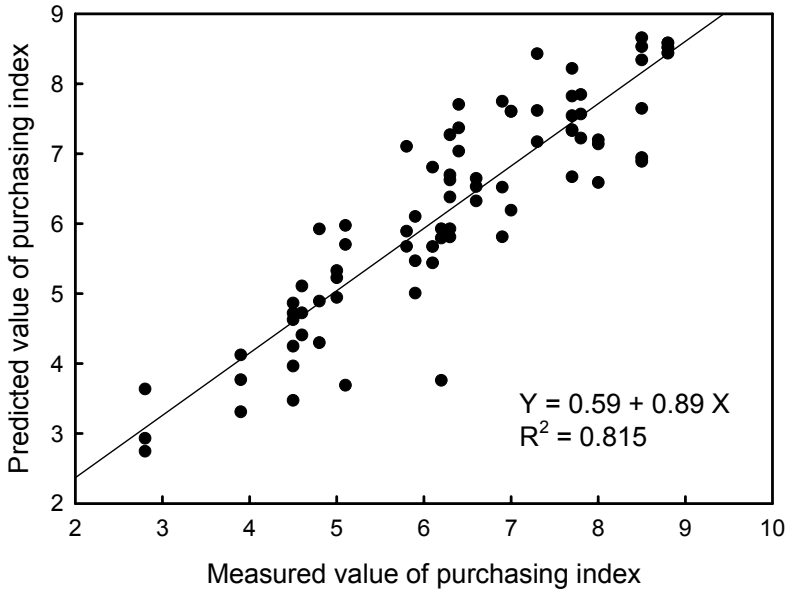


그림 3-3. 신경회로망을 이용한 소비자 구매도 모델의 검증 결과

제 4 장 요약 및 결론

본 연구에서는 사과의 수확 후 저장, 유통과정에서 온도 등의 외부환경 변화에 따른 사과 내부 품온 변화 예측 기술, 내부 세포 영상처리 기술 및 설정된 온도에서 시간에 따라 품질을 예측하는 기술을 개발하였다.

본 연구의 주요 연구결과는 다음과 같다.

○ 외부온도에 따른 사과의 내부 품온 예측 기술을 개발하였다. 유한차분법과 유한요소법을 이용한 과실의 내부 품온 예측 모델을 통하여 사과의 내부 온도 예측 프로그램을 개발하였다. 유한차분법을 이용한 사과의 품온 예측 모델의 경우 검증 결과에서 실험값과 시뮬레이션 예측값의 관계는 선형적으로 나타났으며, 결정계수는 0.85로 나타났다. 유한요소법을 이용한 사과의 품온 예측모델의 경우에는 검증 결과 실험값과 시뮬레이션 예측값은 선형적인 관계를 가지며 결정계수가 0.95로 유한차분법을 이용한 사과 품온 예측 모델은 유의적인 것으로 분석되었다. 유한요소법을 이용한 사과 품온 예측 모델은 유한차분법을 이용한 사과의 품온 예측 모델의 결정계수 0.85보다 높게 나타났으며, 샘플시료의 실제 모형 분석이 가능하고 유한요소 해석 결과를 데이터베이스화하여 사용자의 입력 조건에 가장 적합한 해석 결과를 찾아 임의의 시간에 사과 내부의 온도분포를 모니터링할 수 있으므로 유한차분법의 모델보다는 현장에 적용하기 적합한 모델로 판단되었다.

○ 과실 내부 세포 구조 분석 기술을 개발하였다. 현미경 수준에서의 영상측정의 정밀도 향상을 위한 사과 세포 영상분석을 위한 알고리즘 및 소프트웨어를 개발하였다. 세포벽의 변화는 온도변화에 대한 화소수의 변화를 가지고 산출하였으며 저장 유통과정중의 세포내부의 변화는 열적특성을 기계적인 특성으로 대치하

여 산출하였다. 본 연구를 통해 3차원으로 가시화 된 세포 모델은 솔리드 모델화를 통해 상용해석 프로그램을 사용한 과실 세포의 상태변화를 분석하는 것이 가능하며, 향후 나노기술 등을 융합한 연구가 필요하리라 본다.

○ 사과의 외부온도에 따른 품질변화를 분석하기 위하여 외부온도별 시간에 따른 수분, 당도, 산도, 색도, 경도를 측정하였으며, 색, 향, 맛, 조직감, 종합 평가, 구매도에 대한 관능검사를 실시하였다. 시간에 따른 사과의 수분은 유의적인 차이가 나타나지 않았다. 당도와 경도의 경우에는 시간이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났으며, 산도는 시간이 증가함에 따라 증가하는 경향이 나타났다. 색도의 경우 시간에 따라 L, a 값은 유의적인 경향이 나타나지 않았으나, b 값의 경우에는 시간이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 수분, 당도, 산도 L, a, b, 경도와 소비자 구매도와의 상관계수는 각각 0.19, 0.85, -0.76, -0.30, -0.16, -0.67, 0.92로 나타났다.

○ 사과의 외부온도에 따른 관능검사 결과에서 색, 향, 맛, 조직감, 종합적인 평가의 모든 항목은 시간이 경과함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 외부온도가 높을수록 시간이 경과함에 따라 모든 항목에서 감소하는 폭이 컸으며, Duncan's multiple range test 결과 초기와 비교하여 유의적인 차이가 나타나는 시간은 향, 맛, 조직감, 전체적인 평가 항목에서 외부온도 25℃의 경우는 각각 21일, 7일, 7일, 7일로 외부온도 15℃의 각각 84일, 56일, 28일, 56일보다 매우 빠른 것으로 나타났다. 사과의 종합적 평가와 색, 향, 맛, 조직감과의 상관계수는 0.850, 0.910, 0.973, 0.974로 조직감과 맛이 종합적 평가와 가장 상관성이 큰 것으로 나타났다.

○ 오차 역전파(back propagation) 다층 신경회로망(mult-layer neural network)을 사용하여 사과의 품질 모니터링 모델을 개발하였다. 품질 모니터링 모델은 주어진 외부온도에서 유통, 판매될 때 소비자 구매도를 예측하는 것으로서 예측모델의 독립변수는 당도, 산도, L, b, 경도를 사용하였다. 신경회로망 학습으로

개발된 사과 품질 모니터링 모델의 검증 결과는 소비자 구매도에 대한 예측값과 실험값의 관계가 선형적으로 나타났으며, 결정계수는 0.815로서 사과 품질 모니터링 모델의 소비자 구매도의 예측값은 유의적인 것으로 판단되었다. 향후 본 연구에서 사용한 변수외에 소비자 구매도와 사과의 품질에 영향을 미치는 요인들을 모델의 변수로 추가한다면 좀더 높은 예측성능을 가지는 모델로 개선될 것이다.

○ 본 연구에서 개발된 사과 내부 품온 예측 기술, 세포 구조 분석 기술 및 품질 모니터링 기술이 접목되어 사과의 수학 후 저장, 이송, 판매 등의 유통과정에서 외부 온도 변화에 따른 내부 품온 예측 및 신경회로망을 이용한 소비자 구매도를 예측하여 제시된 사과의 시간 경과에 따른 품질 변화 예측과 판매가 가능한 기간 등을 산출하여 사과의 수학 후 유통과정 중의 품질을 모니터링 할 수 있다. 이러한 기술의 개발은 향후 과실의 수확 후 유통과정에서 품질을 지속적으로 유지할 수 있는 기술 개발에 활용되어 관련 분야의 발전에 기여할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김기복, 김만수, 정현모, 이상대. 2003. 저장기간에 따른 사과 과육의 기계적 특성 및 초음파 파라미터. 한국농업기계학회지 28(3).

2. 김동만 외. 2000. 주요 농산물의 콜드체인화를 위한 유통기술 개발. 한국식품개발연구원 연구보고서.

3. 김종훈, 이충호. 2000. 식품 및 생물산업 공정의 신경회로망 응용. 식품과 산업 33(1).

4. 농림부, 농수산물유통공사. 1999. 농산물 표준물류관리 -사 과-.

5. 이호철. 1999. 능급 등급화의 심층 연구. 경북대학교 출판부.

6. 조용진. 1999. 사과의 선도 평가를 위한 경도 인자 탐색. 한국농업기계학회 학술대회논문집 4(1).

7. ASAE. 1999. ASAE Standards. S368.3 MAR99.

8. ASHRAE. 1989. ASHRAE Handbook.

9. Burton, W. G. 1982. Physiological Response to Stress and Disease. Postharvest physiology of Food Crop, Longman, London, pp 119-226.

10. Calslaw, H. S. and J. C. Jaeger. 1959. Conduction of heat in solids, 2th., Oxford Univ. Press, 282-296.

11. Cleland, A. C. and R. L. Earle. 1982. Freezing time prediction for foods a simplified procedure. Int. J. Refrig., 5(3):134-140.

12. Ennis, D. M., H. Boeleus., H. Haring. and P. Bowman. 1982. Multivariate Analysis in Sensory Evaluation. Food Technol. 32(1): 83.

13. F. Rosenblatt. 1958. The perceptron: A probabilistic model for information

storage and organization in the brain. Psychological Rev.,Vol.65

14. F. C. Chen. 1990. Back propagation neural networks for nonlinear self-tunning adaptive control. IEEE Control Syst. Mag.

15. Gao, Q. and R. E. Pitt. 1991. Mechanics of Parenchyma Tissue Based on Cell Orientation and Microstructure. Trans. of the ASAE 34(1), pp 232-238.

16. Hilditch. C. 1969. Linear skeleton from square cuoboard. In machine intelligence.

17. J. J. Hopfield. 1982. Neural Networks and physical systems with emergent collective computational abilities. Proc. Nat. Academy Sci., Vol. 79

18. J. J. Hopfield and D.W. Tank. 1986. Neural computation of decisions in optimization problems. Boiol. Cybern. Vol.52

19. Kim, J. H., S. G. Yoon., J. B. Choi. J. C. Kim. and U. Y. Kong. 1995. Application of Principal Component Analysis to Shelf-life Determination of Processed Food. Korean J. Food Sci. Technol. 27(5): 703-707.

20. Kong, J. Y. et al. 1982. Analysis and prediction of the effective thermal conductivities of meat. Argic. Biol. Chem. 46(5):1235.

21. Lee C.H.. 1995. Computer vision inspection and automatic sorting system of dried oak mushrooms. Sunkkyunkwan Univ. School of graduate, Dept. of agricultural machinery engineering, Ph.D. dissertation thesis.

22. Lee, C. H. and M. Umeda. 2001. Finite Element Analysis for the Biological Plant Cell using the Microscope 3D Bio-image Processing. Proc. of ASAE annual meeting, Sacramento, CA, USA. Paper No. 01-3057.

23. Lyons, J. M., J. K. Raison and P. L. Steponkus. 1979. the Plant Membrance in Responese to Low temperature: An Overview. In Low Stress in Crop

Plants, Acedemic Press, New York, pp 1-24.

24. Meltzer and Michie(eds.). 1994. ITII,C language based image processing technunique information institute. International technology. Edinburgh University Press,Edinburgh,:403-420.

25. Motomura T. 1995. Mechanical Properties of Plant Cell. Kyoto university master dissertation thesis. pp 1-4.

26. Pham, Q. T. 1986. Simplified equation for predicting the freezing time of foodstuffs. J. Food Tech., 21:209-219.

27. Pitt, R. E. 1982. Models for the Rheology and Statistical Strength of Uniformly Stressed Vegetative Tissue. Trans. of the ASAE 25(6), pp 1776-1784 .

28. Pitt, R. E. and A. Rutina. 1983. Time Dependant Aspects of the Strength and Rheology of Vegetative Tissue. Trans. of the ASAE 26(4), pp 1275-1280.

29. Pitt. R. E. and D. C. Davis. 1984. Finite Analysis of Fulid-filled Cell Response to External Loading. Trans. of the ASAE 27(6), pp 1976-1983.

30. Pitt, R. E. and A. Ruina. 1990. A Mechanics Model of the Compression of Cells with Finite Initial Contact Area. Biorheology 27, pp 225-240.

31. Robert M. Haralick and L. G. Shapiro. 1992. Computer and Robot Vision Volume I. Addison-wesley publishing company. pp 161-167.

32. Ryall, A. L. and W. J. Lipton. 1979. In Handling, Transpotation and Storage of Fruits and Vegitables. AVI Publishing Co. Westport

33. Singh, R. P. 1982. Thermal diffusivity in food processing. Food Techn. 36(2):87

34. Strang, G. and G. J. Fix. 1973. An Analysis of the Finite Element Method.

35. Swanson Analysis Systems, 1989, Introduction to ANSYS.

36. Thompson, A. K. 1996. Postharvest Technology of Fruit and Vegetables. Blackwell Science Ltd, USA.

37. Tien, R. H. and G. E. Geiger. 1967. A heat transfer analysis of the solidification of a binary eutectic system. Trans. ASME, Ser. C, 62(714):362-368.

38. Umeda M. and K. Namikawa. 1994. Modeling the Deformation of Cell to Loads using Model Cell of Rubber Ball Filled with Water. Agrophysics 8, pp 597-601.

39. 福田裕穗 外. 1997. 植物の細胞を觀る實驗プロトコール. (株)秀潤社

40. 松山陸司 外. 1999. コンピュータビジョン(技術評論と將來展望). (株)新技術コミュニケーションズ