

유한요소법을 이용한 사과 내부 품온 예측 Prediction Technology of Inner Temperature of Apple using Finite Element Method

김중훈*	권기현*	이충호**	최태현***
정희원	정희원	정희원	정희원
J. H. Kim	K. H. Kwen	C. H. Lee	T. H. Choi

1. 서론

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 영상처리기술과 근적외분광법 등 비파괴 선별기술을 이용한 자동선별시스템의 이용이 확대되고 있다. 후지사과의 경우 저온저장을 통해 6개월 이상을 저장하고 있으며, 저장기간 중에 호흡에 영향을 주는 요인에 대한 다양한 연구가 수행되어지고 있다. 그러나 사과내부의 온도분포나 내부의 역학적인 요인에 관한 연구는 세계적으로도 연구가 미진한 실정이다. 이와 같은 연구를 위해서는 유한요소법(Finite Element Method, FEM) 등을 이용한 공학적인 해석이 필요하다.

유한요소법은 구조공학분야에서 발전하여 과학기술 전반에 적용되는 수치해석 또는 시뮬레이션 기법으로서, 초기에는 복잡한 구조물의 응력해석을 위해 개발되었으나 그 후 발전을 거듭하여 연속체 역학 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 분야에 적용이 가능하며 구조분야의 해석이외에도 열, 유동해석 등 다양한 분야에서 적용이 되고 있다.

본 연구에서는 다양한 모양을 가지는 사과의 실측 외형으로부터 사과의 내부 품온을 분석하기 위하여 유한요소법을 이용하여 외부온도 변화에 따른 사과 내부온도 변화 예측 기술을 개발하였다.

+ 이 연구는 농림기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었음

* 한국식품개발연구원 특화연구본부 유통연구단

** 전주대학교 공과대학 생산디자인공학과

*** Sensor Eye R&D Technology

2. 재료 및 방법

가. 유한요소법 모델링

유한요소법은 물체 내부의 온도분포와 열응력과 같은 양들을 예측하기 위한 실제적인 방법으로서 다음과 같이 열전달 방정식을 정식화하였다.

$$\pi_h = U + \Omega_Q + \Omega_q + \Omega_h$$

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

$$\Omega_Q = - \iiint_V QT dV$$

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

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

1단계는 세 개의 절점을 가진 삼각형 요소를 선정하였다.

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

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

3단계는 온도기울기-온도, 열유속-온도기울기의 관계식을 정의하였다.

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

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

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

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

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

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

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

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

마지막으로 절점온도, 요소내의 온도 기울기 및 열유속을 계산하였다.

나. 검증실험

본 연구에서 개발한 시뮬레이션 모델을 이용한 온도분포 예측 결과와 실제 사과의 내부

온도를 측정한 실험값을 비교함으로써 개발된 모델을 검증하였다. 검증실험에 사용된 시료는 충청북도 충주에서 생산된 후지품종으로서 0.02mm의 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. 그림 2-3은 사과 시료에 온도센서를 삽입한 모습과 내부에 온도센서가 삽입된 위치를 나타내고 있다. 온도 측정은 온도계측시스템(hydra data acquisition system, model 2620A, Fluk, USA)을 이용하여 30초 간격으로 연속 측정하였다.

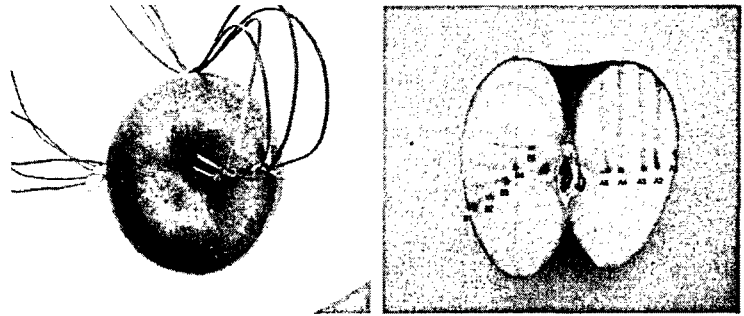


그림 2. 사과 내부 온도측정

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

3. 결과 및 고찰

가. 유한요소 해석

본 연구에서는 사과의 유한요소 해석을 위하여 ANSYS Release 8.0 프로그램을 사용하였다. 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 형상의곽선 좌표입력 및 ANSYS 데이터 변환 소프트웨어를 개발하여 ANSYS 모델 데이터로 변환하여 사용하였다.

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 기준선을 설정하여 기준선 보정하여 변환된 데이터를 ANSYS 모델 데이터로 환산하였다. 변환된 사과의 외곽선 데이터를 ANSYS 모델로 생성하였으며, 그림 3는 생성된 모델을 FEM해석하기 위하여

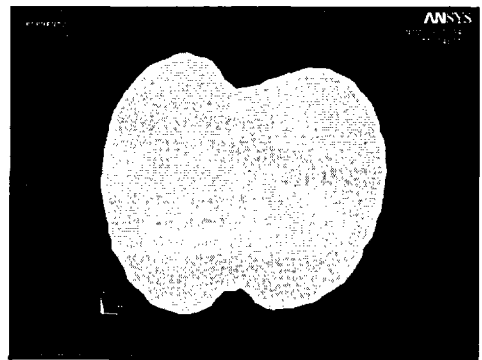


그림 3. 사과 모형 생성 및 Mesh 분할

Mesh로 분할한 결과를 나타낸 것이다.

유한요소법을 이용하여 외부온도 변화에 따른 사과 내부 품온 변화를 예측하기 위하여 ANSYS 프로그램에서 설정한 조건은 표 1과 같다.

표 1. 사과의 온도해석에 사용한 ANSYS 파라메타

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

나. 품온 예측 프로그램

사과의 품온 변화를 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, 대류열전달 계수, 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 3과, 4는 본 연구에서 개발한 유한요소법을 이용한 사과의 품온 예측 프로그램에서 사과 내부의 온도를 분석한 결과를 나타낸 것이다. 그림 3은 시료 초기의 내부온도가 4°C일 때 외부온도가 35°C로 설정되었을 때 시간별, 위치에 따른 사과 내부 온도 변화에 대한 분석 결과를 나타낸 것이고, 그림 4는 초기온도 4도에서 10도까지 시간에 따라 사과의 내부 품온이 변화하는 이미지 형태의 결과를 나타낸 것으로 초기 4°C에서 시간별로 온도변화를 관찰할 수 있다.

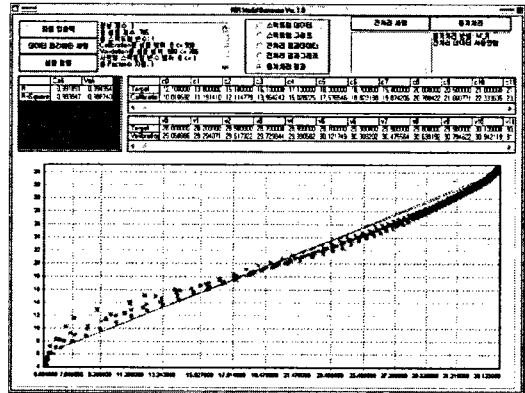


그림 4. FEM을 이용한 사과의 온도분포 분석

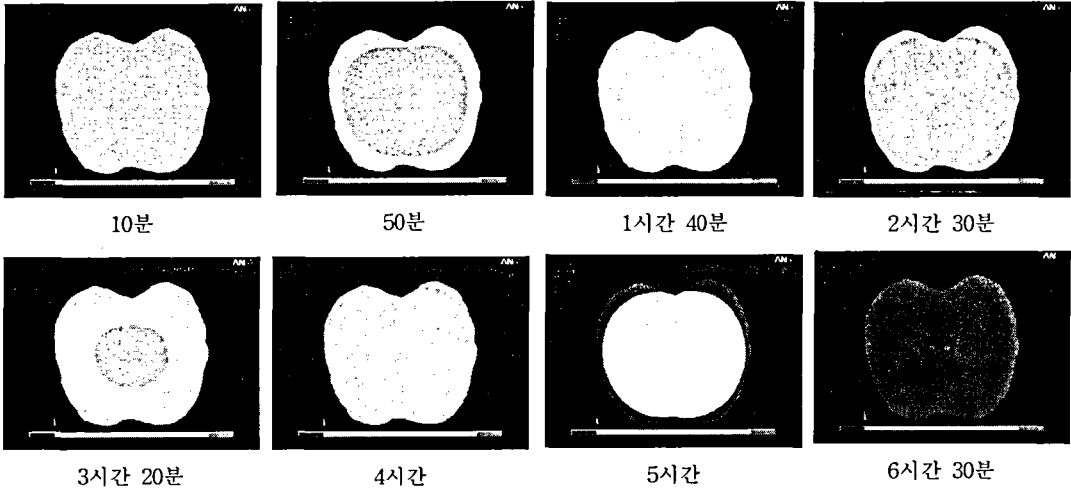


그림 4. FEM을 이용한 사과와 내부 품은 변화 예측 (외부온도 35°C)

다. 모델 검증

본 연구에서 개발된 FEM을 이용한 사과와 외부온도에 따른 내부 품은 예측 모델을 검증하기 위하여 시뮬레이션 예측값과 실험을 통하여 측정된 실험값을 비교 분석하였다. 모델 검증은 초기부터 외부온도에 도달할 때까지 시료 중심으로부터 5등분한 위치에 대하여 매 20분 간격의 데이터를 사용하여 측정값과 예측값을 선형회귀 분석하였다. 그림 5는 실험값과 시뮬레이션 예측값을 선형회귀 분석 결과를 나타낸 것이다. 그림 5에서 실험값과 시뮬레

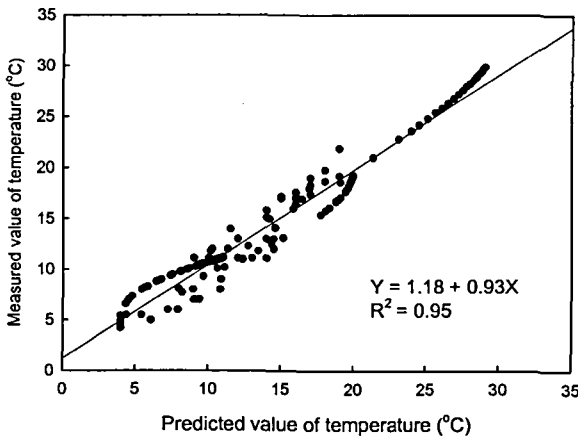


그림 5. FEM을 이용한 품은예측 모델 검증 결과

이션 예측값은 선형적인 관계를 가지며 결정계수가 0.95로 유한차분법을 이용한 사과 품은 예측 모델은 유의적인 것으로 분석되었다. 유한요소법을 이용한 사과 품은 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.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 다양한 모양을 가지는 사과와 실측 외형으로부터 사과와 내부 품온을 분석하기 위하여 유한요소법을 이용하여 외부온도 변화에 따른 사과 내부온도 변화 예측 기술을 개발하였다. 유한요소법을 이용한 사과와 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 샘플시료의 실제 모형 분석이 가능하고 유한요소 해석 결과를 데이터베이스화하여 사용자의 입력 조건에 가장 적합한 해석 결과를 찾아 임의의 시간에 사과 내부의 온도분포를 모니터링할 수 있다.

5. 참고문헌

1. ASHRAE. 1989. ASHRAE Handbook.
2. Calslaw, H. S. and J. C. Jaeger. 1959. Conduction of heat in solids, 2th., Oxford Univ. Press, 282-296.
3. Cleland, A. C. and R. L. Earle. 1982. Freezing time prediction for foods a simplified procedure. Int. J. Refrig., 5(3):134-140.
4. Kong, J. Y. et al. 1982. Analysis and prediction of the effective thermal conductivities of meat. Argic. Biol. Chem. 46(5):1235.
5. Pham, Q. T. 1986. Simplified equation for predicting the freezing time of foodstuffs. J. Food Tech., 21:209-219.
6. Singh, R. P. 1982. Thermal diffusivity in food processing. Food Techn. 36(2):87
7. Strang, G. and G. J. Fix. 1973. An Analysis of the Finite Element Method.
8. Swanson Analysis Systems, 1989, Introduction to ANSYS.
9. 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.