

연속 살균기의 장력 및 온도제어에 관한 연구

A Study on Tension and Temperature Control for Continuous Sterilizer

박철재*

Cheol Jae Park*

〈Abstract〉

In this paper, a tension control system is developed to control temperature deviation due to tension fluctuations in a continuous sterilizer. The fluid flow in the sterilizer is expressed by conservation equations, and the tension control system is modeled using the mass flow rate between two transfer rolls. We analyze the elastic and shear deformation of the internal chain in the sterilizer. As a result of the tension control simulation, it is seen that the tension is recovered about 0.3 sec after the tension deviation. Using an experimental test, we show that the average temperature is similar, but the temperature deviation is improved from 3.1°C to 1.2°C.

Keywords : Continuous Sterilizer, Temperature Control, Tension Control, Modeling

* 대구대학교 기계자동차공학부, 교수
E-mail: cjpark@daegu.ac.kr

* Professor, School of Mechanical and Automotive Engineering,
Daegu Univ.

1. 서론

연속 살균공정은 다양한 식품들을 생산하는데 있어서 제품의 위생과 품질을 결정하는 공정이다. 이 공정에서 특히 제품의 안전성과 무결성을 달성하기 위한 정밀 온도제어는 필수적이다.

연속 살균기에서 온도편차를 일으키는 원인으로서는 살균기 내부에 제품용량에 따른 과부하 문제, 발열체 오작동으로 인한 온도편차 문제, 수위의 편차로 인한 온도제어 문제 등 다양하다. 또한 챔버 내 컨베이어 벨트의 처짐에 의한 장력변동으로 온도편차가 발생하고 있다.

연속 살균기의 성능을 나타내는 여러 가지 지표 중 내부의 온도가 얼마나 정밀하게 제어되는가는 중요한 지표이다. 국제적으로는 살균기 내부의 온도편차가 1.7°C 이하가 권장되지만 다양한 원인에 의하여 이를 초과하는 온도편차가 발생한다. 온도편차가 커지면 식품위생 뿐 아니라 안정성에도 큰 문제가 따르게 된다. 본 논문에서는 살균기 내부의 온도편차를 일으키는 원인 중 컨베이어 벨트의 장력을 일정하게 제어하여 온도편차를 줄이는 것을 목표로 한다.

최근까지 연속 살균기의 온도모델 개발과 제어에 관하여 다양한 연구가 진행되었다. 살균기 내부의 목표온도를 다양하게 변동시켜서 제어하는 연구가 실시되었고, 신경회로망 알고리즘을 이용하여 살균기의 공정변수에 대한 최적화 연구가 진행되었다[1,2]. 레토르트 살균 중 온도편차를 온라인으로 교정하기 위하여 온도강하의 크기와 편차의 지속시간을 고려한 새로운 제어문제를 제시하였다[3]. 레토르트 제품의 열처리 시 예상치 못한 공정편차를 온라인으로 수정하기 위하여 수학적 모델을 바탕으로 컴퓨터 기반 배치(batch) 제어시스템을 적용하였다[4,5]. 또한 레토르트 식품을 열처리하는 경우 품질편차를 줄이고 품질유지

를 최대화하거나 공정시간을 최소화하는 최적의 가변 레토르트 온도 프로파일에 대한 연구도 진행되었다[6,7].

본 논문에서 수행한 연구내용은 크게 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, 살균기 내부의 온도를 제어하기 위하여 먼저 연속 살균기와 벨트의 장력제어에 대한 모델링을 실시하였다. 둘째, 살균기 내부 체인의 변형에 대하여 해석하고 장력제어 시스템에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 장력제어 효과를 검토하였다. 셋째, 연속 살균기의 실험장치를 설계하고 제작하였으며, 장력제어의 유무에 따른 온도제어의 정도를 실험을 통하여 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 연속 살균기의 내부를 모델링하고, 제품 이송을 위한 장력제어 시스템을 모델링한다. 3장에서는 살균기 내부 체인의 변형에 대한 해석과 장력제어 방법에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 서술한다. 4장에서는 살균기 실험장치에 대하여 설명하고 테스트 결과를 분석한다. 이 논문의 결론은 5장에서 요약한다.

2. 연속 살균기와 장력제어 모델링

2.1 연속 살균기의 모델링

본 연구에서는 연속 살균기 내부의 장력제어를 통한 온도제어를 위하여 먼저 살균기에 대한 모델링을 하였다. 모델링에 대한 자세한 설명은 저자의 이전 연구[8,9]를 참조하고 여기서는 결과만 간단히 서술한다.

Fig. 1은 연속 살균기의 해석용 모델링을 나타낸다. 살균기는 입구, 출구, 벽면, 롤러와 체인으로 구성되어 있으며, 입출구에 롤러를 구동시킬 수 있는 모터가 설치되어 있다.

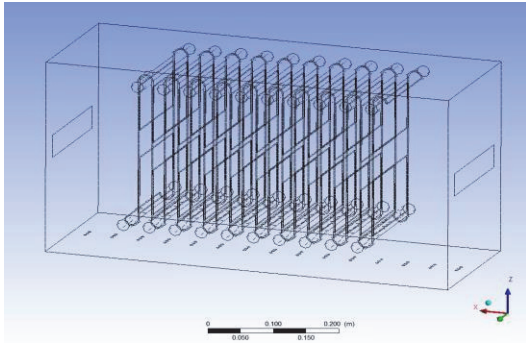


Fig. 1 Modeling of continuous sterilizer

살균기 내부의 유체 유동은 다음과 같은 보존 방정식으로 나타낼 수 있다[10,11].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho w \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = S_\phi \quad (1)$$

여기서 Γ_ϕ , S_ϕ 는 각각 확산계수, 소스항, S_ϕ 및 P 는 각각 x, y, z 방향의 속도와 압력을 나타내며, μ , ρ 는 각각 점성계수, 밀도를 나타낸다.

2.2 장력제어 모델링

연속 살균기의 제품을 이송하는 시스템에서 롤 사이의 장력은 Fig. 2와 같이 스프링과 질량의 직렬 결합 시스템으로 설명할 수 있다.

두 개의 이송롤에서 연속 방정식을 이용하면 질량유량은 다음과 같다[12].

$$\frac{d}{dt} \left[\int_0^{L_2} \rho_2(x,t) A_2(x,t) dx \right] \quad (2)$$

$$= \rho_1(t) A_1(t) v_1(t) - \rho_2(t) A_2(t) v_2(t) \quad (3)$$

$$dx = (1 + \varepsilon_x) dx_u \quad (4)$$

$$h = (1 + \varepsilon_y) h_u \quad (5)$$

$$w = (1 + \varepsilon_z) w_u \quad (6)$$

$$dm = \rho w h dx = \rho_u w_u h_u dx_u \quad (7)$$

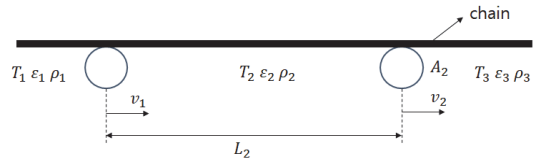


Fig. 2 Layout of tension between two rolls

여기서 ρ , A , v 는 각각 체인의 밀도, 단면적, 속도를 나타내고, L 은 체인의 길이, ε , dm 은 변형률과 미소질량, x , w , h 는 각각 소재의 미소길이, 폭, 높이를 나타내고 아래 첨자 'u'는 압축상태를 나타낸다.

체인의 단면적 변화는 매우 작기 때문에 식 (3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho A = \frac{1}{1 + \varepsilon} \rho_u A_u \quad (7)$$

식 (7)에서 $1/(1 + \varepsilon) \cong 1 - \varepsilon$ 으로 단순화하면 식 (2), (7)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$L_2 \left[\frac{d}{dt} \frac{1}{L} \int_0^{L_2} \varepsilon_2(x,t) dx \right] = (\varepsilon_1(t) - 1)v_1(t) - (\varepsilon_2(t) - 1)v_2(t) \quad (8)$$

체인의 변형률이 균일하다고 하면 식 (8)은 다음과 같다.

$$L_2 \frac{d}{dt} \varepsilon_2(t) = -\varepsilon_2(t)v_2(t) + \varepsilon_1(t)v_1(t) + v_2(t) - v_1(t) \quad (9)$$

식 (9)에 후크법칙을 적용하면 다음과 같은 체인의 장력과 속도 사이의 관계식을 얻을 수 있다.

$$L_2 \frac{d}{dt} T_2(t) = -T_2(t)v_2(t) + T_1(t)v_1(t) + AE(v_2(t) - v_1(t)) \quad (10)$$

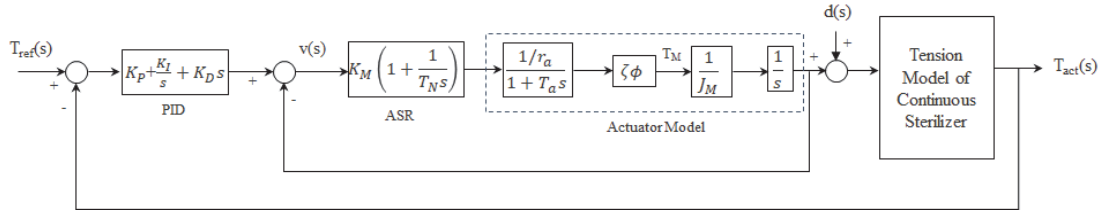


Fig. 3 Block diagram of tension system for continuous sterilizer

여기서 T , E 는 각각 체인의 장력과 탄성계수를 나타낸다.

Fig. 3은 본 논문에서 개발한 장력제어 시스템의 블록선도를 나타낸다. 그림에서 T_{ref} , T_{act} 는 각각 장력 목표값, 장력 실제값, d 는 외란, K_M , T_N 은 ASR(automatic speed regulator)의 이득, r_a , T_a , $\zeta\phi$ 는 체인을 구동하는 모터의 이득, J_M 은 모터의 관성 모멘트를 각각 나타낸다.

3. 해석 및 시뮬레이션

3.1 살균기 내부 체인의 변형에 대한 해석

연속 살균기 내부에서 파우치를 이송시키는 체인의 변형은 설비의 안정성을 크게 떨어뜨릴뿐 아니라 생산성을 악화시키는 원인이 된다. 따라서

살균기 내부 체인의 변형에 대한 해석은 중요하다. 본 절에서는 Table 1과 같은 살균기의 설계 파라미터와 Table 2와 같은 체인의 사양을 이용하여 체인의 변형에 대한 해석을 실시하고 결과를 서술한다.

해석은 CFX-mesh 방법을 사용하였고, 53,785개의 요소(elements)와 18,809개의 노드(nodes), 2mm의 크기로 수행하였다. 체인의 좌, 우측 이동을 제한하기 위하여 초기 설정값은 [0, 0, free]로 설정하였다.

Fig. 4, Fig. 5는 각각 연속 살균기 내부의 최대 및 최소 탄성 변형량에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림에서 보는 것과 같이 최대 탄성 변형량은 1 msec에 약 1.3×10^{-5} mm, 최소 탄성 변형량은 1.6×10^{-8} mm이다. 즉 체인의 길이 방향으로 변형이 가해져도 극히 미세한 정도의 변형이 존재하므로 체인의 탄성 변형량은 생산에 문제를 일으킬 정도는 아닌 것으로 분석된다.

Table 1. Parameters of continuous sterilizer

Parameter	Unit	Specification
Dimension	mm	650×240×340
Hole dia.	mm	5
Nozzle length	mm	600
Number of hole	ea	2 line with 45 holes
Pressure	kg/cm ²	3.5
Flow velocity	m/s	20

Table 2. Specification of chain

Parameter	Unit	Specification
Lenght	mm	170
Width	mm	20
Thickness	mm	2
Hole size	mm	60*18
Material	-	steel

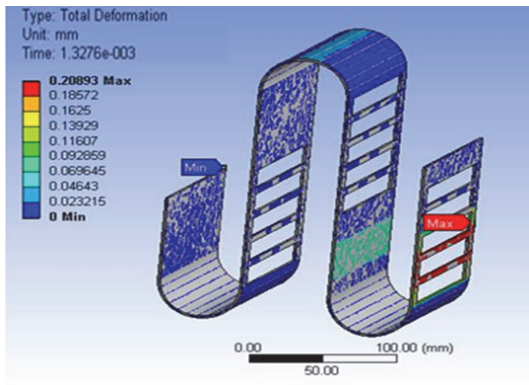


Fig. 4 Max. of elastic deformation in sterilizer

Fig. 6은 연속 살균기 내부의 최대 및 최소 전단 탄성 변형량에 대한 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 체인에 인가되는 전단 탄성 변형량은 약 1 msec에 최대 1.5×10^{-5} mm이고, 최소 1.7×10^{-8} mm이다.

따라서 본 연구에서 설정한 연속 살균기의 설계 파라미터와 체인의 사양은 탄성 변형량과 전단 변형량을 적게 발생시킴으로써 안전한 생산 작업을 할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 살균기 내부 체인의 장력 시뮬레이션

본 절에서는 살균기 내의 장력을 설정하고 외란에 의한 모터 속도와 장력의 변화를 시뮬레이션으로 검증한 결과를 서술한다.

Fig. 7은 목표 장력을 5 N/mm²로 인가했을 때의 장력 거동을 나타내었다. 비정상부에서 약 2.5 N/mm²의 오버슈트가 발생한 것을 볼 수 있으나 빠른 시간 내에 정상 장력으로 수렴하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 3에서 보는 것과 같이 모터 속도에 6 sec에 외란을 인가하는 경우에 속도 변화를 나타낸다. 속도 설정치는 6 sec부터 약 2 mm/sec 만큼 감소하고 있으며 속도 피드백도 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 속도 외란이 지속되는 경우에 대한 장력 변동을 나타낸다. 그림과 같이 6 sec에서 장력이 변동하고 있으나 장력 제어기에 의하여 약 0.3 sec 후에 장력이 회복하는 것으로 볼 수 있으며 개발된 장력 제어기의 성능이 우수함을 알 수 있다.

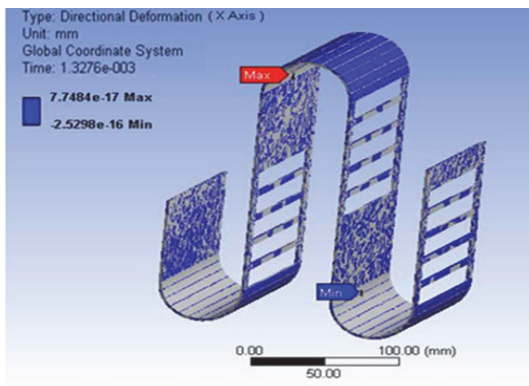


Fig. 5 Min. of elastic deformation in sterilizer

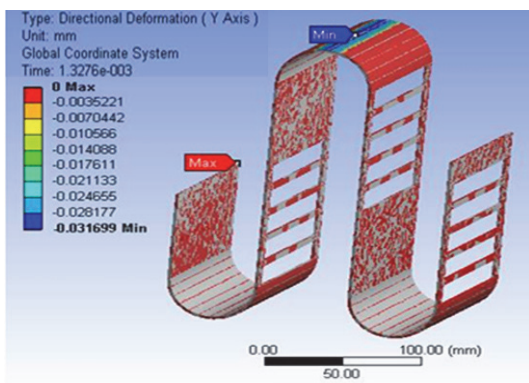


Fig. 6 Max. and min. of shear elastic deformation in sterilizer

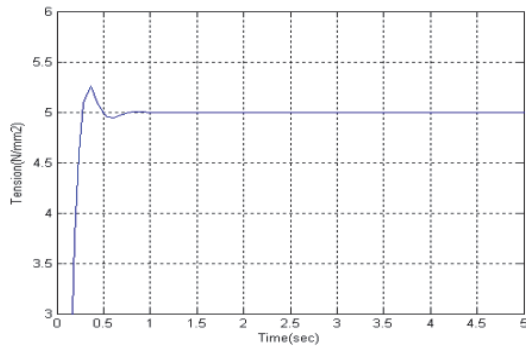


Fig. 7 Simulation of tension reference 5 N/mm^2

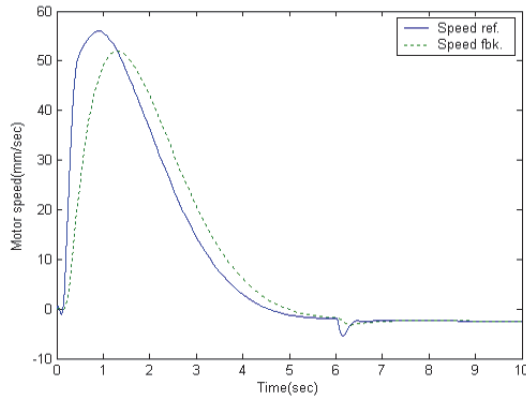


Fig. 8 Motor speed for disturbance at 6 sec

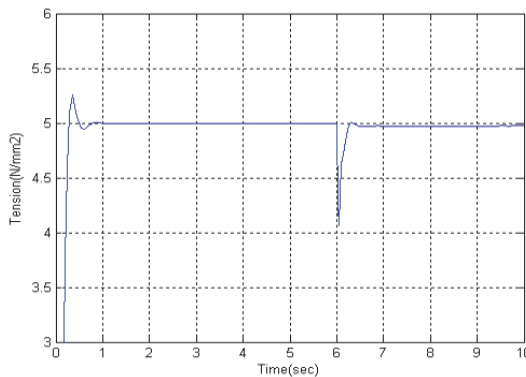


Fig. 9 Tension simulation for disturbance at 6 sec

4. 실험결과 및 분석

본 논문에서는 연속 살균기의 장력제어에 의한 온도제어의 결과를 검증하기 위하여 실험장치를 Fig. 10과 같이 개발하였다. 실험장치의 사이즈는 650×340×240 mm, 재질은 SS41이며, 온도센서는 살균기의 상부, 하부, 중앙에 3개를 설치하였다.

실험장치를 이용하여 모든 조건은 동일하며 장력제어 유무에 따른 살균기의 온도편차를 테스트 하였다. Fig. 11은 200 g의 제품에 물을 충전하여



Fig. 10 Experimental apparatus of sterilizer

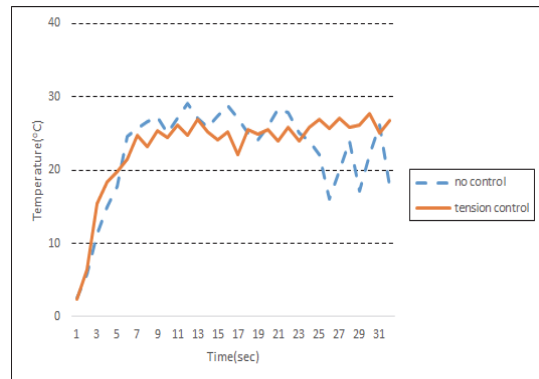


Fig. 11 Test result of temperature

온도센서를 삽입하여 측정한 결과이다. 그림에서 점선은 장력 제어가 없는 경우이며 컴퓨터 시뮬레이션으로 확인한 장력의 변동이 온도 편차로 나타나는 것을 볼 수 있다. 장력제어가 없는 경우, 평균온도는 25.4℃, 편차는 3.1℃ 이며, 장력제어를 실시한 경우, 평균온도는 25.1℃, 편차는 1.2℃로써 평균온도는 유사하지만, 온도편차는 61.3% 향상된 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 연속 살균기의 컨베이어 벨트 장력변동에 따른 온도편차를 제어하기 위하여 장력제어 시스템을 개발하였다.

살균기 내부의 유체 유동은 보존방정식 등으로 나타내었으며, 장력제어 시스템은 두 개의 이송물에서의 질량유량을 이용하여 모델링하였다.

살균기 내부 체인의 변형에 대한 해석 결과 탄성 및 전단 변형량은 무시할 수 있었다. 장력제어 시뮬레이션 결과 장력 변동 후 약 0.3 sec 후에 장력을 회복하는 것을 볼 수 있었다.

본 연구에서 개발한 살균기의 실험장치에서 테스트 결과 평균온도는 유사하지만 온도편차는 3.1℃에서 1.2℃로 61.3% 향상되어 온도편차 기준인 1.7℃를 만족하였다.

후 기

이 논문은 2023학년도 대구대학교 연구년 결과물로 제출됨.

참고문헌

- [1] C. R. Chen and H. S. Ramaswamy, "Modeling and Optimization of Variable Retort Temperature (VRT) Thermal Processing using Coupled Neural Networks and Genetic Algorithms," *Journal of Food Engineering*, vol. 53, iss. 3, pp. 209-220, (2002).
- [2] Y. A. Llave, T. Hagiwara, and T. Sakiyama, "Artificial Neural Network Model for Prediction of Cold Spot Temperature in Retort Sterilization of Starch-Based Foods," *Journal of Food Engineering*, vol. 109, iss. 3, pp. 553-560, (2012).
- [3] C. R. Chen and H. S. Ramaswamy, "Multiple Ramp-Variable Retort Temperature Control for Optimal Thermal Processing," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 82, iss. 1, pp. 78-88, (2004).
- [4] R. Simpson, I. Figueroa, and A. Teixeira, "Simple, Practical, and Efficient On-Line Correction of Process Deviations in Batch Retort through Simulation," *Food Control*, vol. 18, iss. 5, pp. 458-465, (2007).
- [5] A. Ryfa, R. Buczynski, M. Chabinski, A. Szlek, and R. A. Bialecki, "Decoupled Numerical Simulation of a Solid Fuel Fired Retort Boiler," *Applied Thermal Engineering*, vol. 73, iss. 1, pp. 794-804, (2014).
- [6] R. Simpson, A. Abakarov, and A. Teixeira, "Variable Retort Temperature Optimization using Adaptive Random Search Techniques," *Food Control*, vol. 19, iss. 11, pp. 1023-1032, (2008).
- [7] G. Chen, O. H. Campanella, C. M. Corvalan, and T. A. Haley, "On-Line Correction of Process Temperature Deviations in Continuous Retorts," *Journal of Food Engineering*, vol. 84, iss. 2, pp. 258-269, (2008).
- [8] C. J. Park, "Study on Temperature Control and Optimal Design for Continuous Sterilizer," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, vol. 39,

- no. 8, pp. 813-821, (2015).
- [9] C. J. Park, "Design of Continuous Sterilizer for Retort Pouch," *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 57-63, (2015).
- [10] N. Dukhan, M. A. Al-Rammahi, and A. S. Suleiman, "Fluid Temperature Measurements inside Metal Foam and Comparison to Brinkman-Darcy Flow Convection Analysis," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 67, pp. 877-884, (2013).
- [11] J. H. Lee, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Taehun Publishing, Seoul, pp. 54-109, (2002).
- [12] K. H. Shin, T. H. Kim, S. O. Kwon, and M. W. Lee, "An Experimental Study on the Characteristics of Tension in a Multi-Span Web Transport System," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, vol. 22, no. 12, pp. 2196-2202, (1998).

(접수: 2024.06.11. 수정: 2024.07.21. 게재확장: 2024.07.30.)