



초고압 가공처리의 가열 효과

홍석인
식품유통연구본부

초고압 가공처리는 별도의 화학 보존제를 사용하지 않고도 저온에서 식품유래 미생물을 사멸시킬 수 있기 때문에 식품분야에서 주목받는 새로운 가공기술이다. 이러한 초고압 처리의 장점 덕분에 관능적 특성이 우수하고 영양성분이 그대로 보존되는 고품질 식품의 제조도 가능하다. 고압 조건에서의 미생물 사멸정도를 측정하기 위해서는 흔히 실험실 규모의 장비(그림 1)을 사용하여 소량의 미생물 접종액을 처리함으로서 대량 처리 시(그림 2)의 양상을 예측할 수 있다. 초기에 개발된 실험실 규모의 초고압 처리장비에는 일반적으로 고압용기 내부에 온도감지 장치가 부착되어 있지 않아, 압력 조건 하에서의 압축(壓縮)발열 및 순간 감압(減壓)냉각 효과가 제대로 보고되지 않았다. 그러나 가열효과를 고려하지 않으면 초고압 처리기 특유의 가압 특성 때문에 실험 결과의 재현성을 얻기가 힘들고, 특히 대용량 생산설비의 경우 더욱 그러하다. 이론적으로 초고압 처리는 매우 예측 가능한 공정이다. 즉 고압용기 내부에서는 어느 지점이던 간에 압력이 고르게 분포되고, 가열 확산에 근거한 처리공정과는 달리 압력이 모든 지점에 순간적으로 전달되기 때문에 제품의 크기에 관계없이 압력 처리 시간과 정도가 동일하다. 따라서 공정상 불균일이 야기될 소지가 있는 부분은 오직 압축(壓縮)에 따른 발열과 열 전달에 의한 온도 편차에 기인한다. 실제로 처리 대상 제품과 압력 전달매체의 압축시 발열정도 차이와 시료, 매체, 고압용기 간의 열 손실 또는 열 흡수 때문에 고압처리 공정에서 온도가 일정하지 않을 수 있다.

1. 압축발열

Bridgman(1912)의 초창기 연구 이후 물의 단열 압축(adiabatic compression) 거동특성은 잘 알려지게 되었으며, 이러한 단열 온도변화는 매우 예측 가능하다. 단열 상태에서 압력변화에 따른 결과로서 수온변화를 그림 3에 나타내었다. 모든 수축 가능한 물질은 물리적인 압축과정에서 온도가 변하는데, 이는 피할 수 없는 열역학적인 원리이다. 이때 온도변화의 크기 정도는 주로 해당 물질의 압축성과 비열

에 따라 달라진다. 예를 들어 기체의 경우 엄청나게 큰 압축 발열을 일으키며, 이러한 원리에 근거하여 디이젤 엔진이 작동하는 것이다. 그러나 물과 같은 액체는 훨씬 압축성이 작기 때문에 매우 고압이라 할지라도 압축에 의한 온도변화가 상대적으로 적다. 이러한 압축거동은 이론적으로 잘 설명되며 소프트웨어 프로그램(Harvey 등, 1996) 형태로도 나와 있다. 초고압 처리에 사용되는 전형적인 압력 범위 ($400\text{--}1,000 \text{ MPa} = 4,000\text{--}10,000 \text{ 기압}$)에서 상온 부근의 단열 조건일 경우, 물은 통상적으로

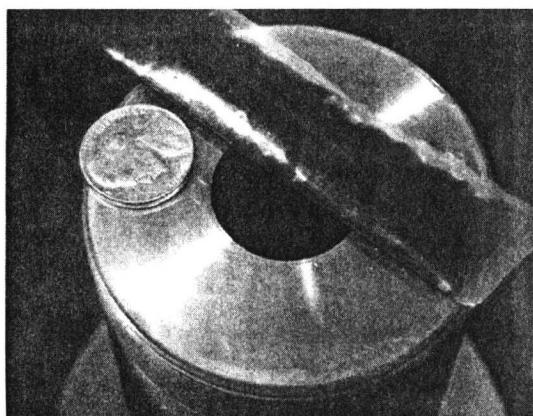


Fig. 1. Typical small-size pressure vessel and sample pouch used for HPP inactivation studies.

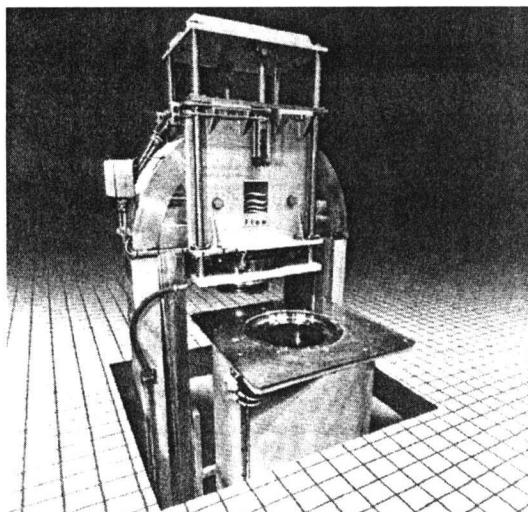


Fig. 2. Standard production-size high-pressure system

100 MPa씩 압력이 변할 때마다 3°C의 온도변화를 일으키며 당연히 가압(加壓)시 온도가 증가하고 감압(減壓)시에 온도가 떨어진다.

2. 압축발열 차이

식품의 주성분은 물이기 때문에 대부분의 식품 역시 압축과정에서 물과 같은 단열 온도변화를 나타낸

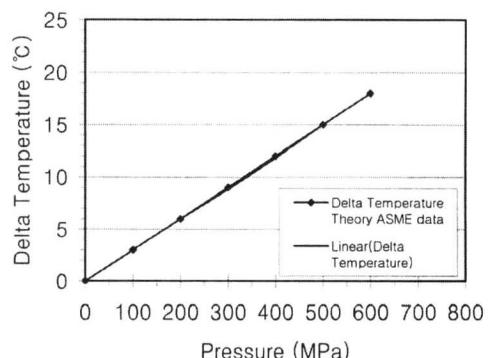


Fig. 3. Change in temperature of water

Table 1. Temperature change due to adiabatic compression for selected substances. From Vasuhi et al. (2000).

Substance at 25°C	Temperature change per 100MPa(°C)
Water	~3.0
Mashed potato	~3.0
Orange juice	~3.0
Tomato salsa	~3.0
2%-Fat milk	~3.0
Salmon	~3.2
Chicken fat	~4.5
Water/glycol(50/50)	From 4.8 to <3.7 ^a
Beef fat	~6.3
Olive oil	From 8.7 to <6.3 ^a
Soy oil	From 9.1 to <6.2 ^a

^a Substances exhibited decreasing T as pressure increased

다(표 1). 그러나 유지와 알코올은 전혀 다른 양상을 보인다(Rasanayagam 등, 2001). 초기에 개발된 실험용 초고압 장비는 고압용기 등을 스테인레스 강철로 만들지 않아 압력 매체로서 오일류를 사용해야 했는데, 주로 castor 오일, 실리콘 오일, sodium benzoate와 glycerol 혼합용액을 압력 전달유체로 사용했다. 만일 압력 매체로 압축 발열량이 많은 물질을 사용했을 경우, 미생물 살균 실험결과는 본의

아니게 가열효과까지도 포함하게 된다. 예를 들어 상당수의 오일류는 물에 비해 3배 가량 높은 최대 압축발열 온도를 지니고 있어 고압 처리과정에서 시료를 가열시킬 가능성이 있고, 이로 인해 미생물 살균 해석에 있어 오류를 유발시킬 수 있다(Balasubramaniam, 1999). 특히 압력 매체의 부피에 비해 매우 적은 소량의 시료를 가지고 실험할 경우 이러한 오류의 가능성은 더 커진다.

압력 매체 발열에 의한 시료의 가열효과를 방지하기 위해서는 시료와 동일한 압축 발열특성을 갖는 매체를 사용하여야 하는데, 물은 안전성이나 경제적인 측면에서뿐만 아니라 압축 발열거동 측면에 있어서도 가장 유리하기 때문에 압력 전달매체로 자주 사용된다. 물론 유지 함량이 매우 높은 식품의 경우에는 다소 예외가 되지만, 앞서 언급하였듯이 대부분의 식품은 수분이 주성분이므로 이를 식품과 물과의 압축거동 차이는 상대적으로 미미하고 따라서 식품과 압력 매체로서의 물은 고압용기 내에서 균일한 내용물로 간주하여 처리할 수 있다.

실제로 고압용기와 시료를 포함한 압력 매체는 같은 온도에서 출발하지만, 가압(加壓) 과정에서 압축된 액체는 주위를 둘러싼 금속제 고압용기보다 더 뜨거워진다. 고압용기의 금속재질은 압축 발열을 거의 일으키지 않으므로 단열 조건을 가정할 때 고압

처리시 온도 상승은 시료를 포함한 압력 매체의 단열 압축발열에 의한 것으로 볼 수 있다. 이러한 고압용기 벽면과 내용물의 온도 차이는 이들간의 열전달을 유발하여 가공처리 중 온도를 낮추는 효과가 있다. 그러나 고압 처리시간이 충분히 길어지면 압축 매체의 온도와 고압용기 벽면온도가 결국 같아지게 된다. 일반적으로 미생물 사멸은 높은 온도에서 더 촉진되므로 온도가 일정하게 조절되지 않은 상태에서 고압에 오랫동안 유지될수록 열 전달에 따른 온도 저하로 인해 얻을 수 있는 부가효과가 더 적어진다. 이러한 형태의 장비를 사용하여 얻은 미생물 사멸 실험결과를 1차 반응식에 근거하여 분석하면 tailing 효과가 나타날 수 있다.

3. 가열효과의 사례

가압 발열 및 감압 냉각의 효과를 그림 4에 나타내었다. 초고압 처리과정에서 고압 유지시 내용물의 온도 감소를 입증하고자 고압용기의 용량이 작은 시험용 장비를 사용하였다. 급속히 압력을 높이면 열손실이 미미하여 단열 압축에 의한 최대 상승 온도를 측정할 수 있다. 그러나 어느 정도 처리시간이 길어지면 내용물의 압축 발열에 의해 상승했던 온도가 고압용기로의 에너지 손실로 인해 급격히 저하됨을 알 수 있다. 그로 인해 감압시 내용물의 온도가 시험 초기 운전시작 온도에 비해 더 낮아지며, 본질적으로 고압용기 내부의 내용물이 냉각제로 작용하는 냉각 싸이클이 작동된다. 구체적인 온도 수치는 사용하는 장비에 따라 달라지기 때문에 시험 장비의 열 전달특성을 조절함으로서 온도를 변화시킬 수 있다.

4. 초고압 처리시 이력보고

이상에서 살펴본 바와 같이 초고압 처리를 이용한 모든 연구에 있어 압력과 함께 온도 이력을 보고할 필요가 있다. 실제 처리시간 대비 압력과 온도 변화를 제출하기 어려운 경우에는 그림 5에 나타낸 것처럼 P_s , P_1 , P_2 , P_t , T_s , T_1 , T_2 , T_t , t_s , t_1 , t_2 , t_t

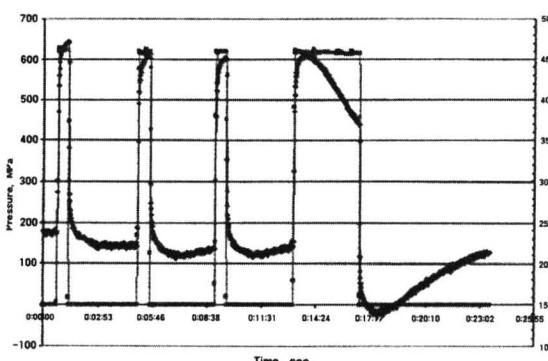


Fig. 4. Rapid pressure changes are superimposed with resultant temperature changes in a small test cell containing a 50/50 water/glycol medium at 25°C

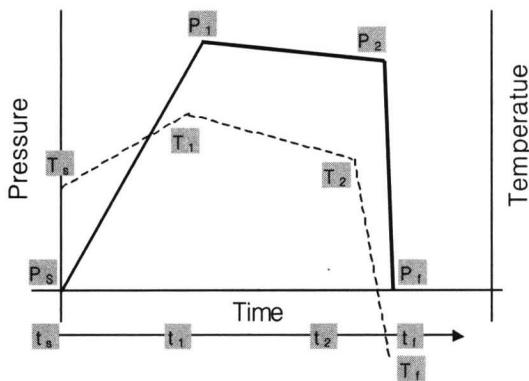


Fig. 5. Pressure, temperature, and time point that should be reported to indicate conditions of HPP testing

등의 수치를 보고해도 무방할 듯하다. 이것도 불가능한 경우에는 사용한 고압 장비를 정확하게 설명하여 다른 이로 하여금 실험조건을 명확히 이해할 수 있도록 도와야 할 것이다. 특히 고압용기의 부피, 펌프 용량, 고압용기 벽면 온도 등의 사항을 표시하여야 하며, 어떤 종류의 압력 매체를 실험에 사용했는지를 반드시 명시해야 한다.

압력 매체의 압축발열에 따른 시료의 가열효과를 그림 6에 나타내었다. 수용액 성분의 시료를 물 또는 올리브 오일의 압력 매체에 넣고 초고압 처리했을 때 온도변화를 표시하였는데, 그림에서 볼 수 있듯이 동일하게 600 MPa에서 가압하더라도 오일에 넣고 처리한 시료는 물에 넣은 것과 비교하여 현저하게 다른 온도 이력을 보여 주었다. 이러한 온도 이력은 사용된 실험조건을 반영하는 것으로 실험장치의 열 전달특성을 조절함으로서 달라질 수도 있다. 따라서 압력 매체로는 가급적 시료와 유사한 압축발열 거동을 나타내는 것을 사용하도록 권장하며, 대부분의 경우 수용액과 같은 시료에 대해서는 오일 성분의 매체를 쓰지 않도록 권장하는 바이다. 소형 실험실용 초고압 장비의 경우 시료 처리시 압축에 따른 가열을 피할 수 없기 때문에 미생물 살균 실험 결과가 현저하게 다르게 나타날 수 있음을 감안하여야 한다.

초고압 처리시 온도의 역할에 대해 명확히 구명하

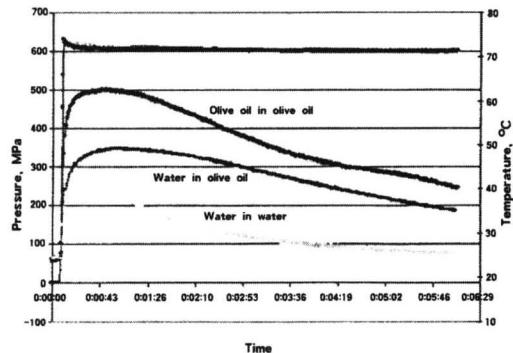


Fig. 6. Pressure-temperature history of water and oil sample in different pressure media (water or oil)

고자 연구가 계속되고 있으므로, 수행한 연구 결과를 정확하게 이해하기 위해서는 처리시간을 기준으로 한 압력, 온도 변화자료를 반드시 함께 표시할 필요가 있다. 다만 본고에서 제기한 가열효과는 소량의 시료를 사용하여 열 손실이 일어나도록 만든다소 인위적인 실험 조건임을 밝혀두고자 한다. 실제로 대규모 생산장비를 사용할 경우 초고압 처리시 온도 변화는 매우 미미할 것이며 가공공정 본연의 목적을 수행하는데 있어 주요 고려사항이 되지 않을 수도 있겠으나, 그럼에도 불구하고 재현 가능한 실험조건을 설정하기 위해서는 가열효과가 무시할 수 없는 요소임을 인지하여야 한다.

5. 참고문헌

- Balasubramaniam, V.M. Safety considerations during high pressure processing of foods. Annual Rept., Natl. Ctr. for Food Safety and Technology, Summit-Argo, IL. (1999)
- Bridgman, P.W. Water under pressure. Proc. of Am. Acad. of Arts and Science 48: 450-558 (1912)
- Harvey, A.E., Peskin, A.P., Klein, S.A. NIST/ASME steam program. Physical and

- Chemical Properties Div., Natl. Inst. of Standards and Technology, U.S. Dept. of Commerce, Boulder, CO. (1996)
4. Rasanayagam, V., Balasubramaniam, V.M., Ting, E., Sizer, C.E., Bush, C., Anderson, C. Compression heating of selected food substances during high pressure processing. Presented at 2001 Annual Mtg., Inst. of Food Technologists, New Orleans, LA. June 23-27 (2001)
- 〈출처 : Food Technology, 56(2), 31-35, 2002〉
-