

# 초고압 식품가공기술

홍 석 인 · 유 경 미

김 치 연구 사업 부

## 1. 서론

대부분의 가공식품은 가열 또는 비가열 처리에 의해 저장이 가능하도록 만들어지는데, 일반적으로 가열처리(가열 및 조리)는 미생물의 생육을 억제할 뿐만 아니라 식품 자체의 품질에도 영향을 미칠 수 있다. 이에 반해 최근 들어 더욱 주목받고 있는 비가열처리는 식품의 품질에는 영향을 미치지 않으면서 부패 미생물을 억제할 수 있는 장점이 있다. 그 가운데에서도 초고압(Ultra high hydrostatic pressure) 가공기술은 미생물 및 효소의 불활성화에 매우 뛰어난 효과를 갖고 있어 고품질의 제품 생산이 가능하므로 식품산업에서 중요성이 날로 부각되고 있다<sup>(1)</sup>.

이러한 초고압 가공기술은 원래 요업재료(ceramics), 강철금속 및 초합금(superalloys)의 생산에 이용되어 왔으나, 지난 10여년전부터 점차적으로 식품산업에서도 활용 가능성을 탐색해 왔다. 물론 20세기초에 이미 초고압에 의한 미생물 억제효과를 확인한 바 있었으나, 식품산업에서 본

격적으로 상업적 규모의 초고압 가공기술에 대한 기술 검토를 시작한 것은 아주 근래의 일이다. 알려진 바와 같이 4000~9000 atm의 초고압에서 효소와 미생물은 불활성화되지만 식품의 향미는 거의 영향을 받지 않으며, 또한 압력이 식품 전체에 골고루 가해지므로 국부적인 변질 가능성이 없어 균일한 상태로 식품을 보존할 수 있고, 가열처리와 달리 1회 처리량에 대한 시간 의존성이 없어 결과적으로 처리시간을 단축시킬 수 있다<sup>(2)</sup>.

본 고에서는 비가열처리로서 식품가공분야에 무한한 잠재력을 갖고 있는 초고압 처리기술을 국내 식품업계에 소개하고 아울러 한국식품개발연구원이 농림부의 연구장비비 지원에 의해 보유하고 있는 초고압 처리기(ABB QFP-6, USA)의 활용도 증진을 목적으로, 초고압 처리기술의 공학적 측면 및 식품가공에의 적용 가능성 등을 중심으로 살펴보고자 하였다. 다만 초고압 처리에 의한 미생물 및 효소의 불활성화는 익히 잘 알려져 있으므로 발표된 관련 자료를 참고하는 편이 좋을 듯하여 본 고에서 큰 비중을 두지 않았음을 밝힌다.

## 2. 공학적 측면에서의 초고압 처리기술

초고압 처리란 일정한 온도에서 제품 전체에 균일하게 높은 압력을 가하는 공정기술로서 기본적으로 isostatic pressing, quartz growing, chemical reactors, simulator 등에 활용되고 있는 기술이다<sup>(3)</sup>.

예를 들어 수정 결정체(quartz crystal)는 sodium hydroxide가 용존된 강 알칼리용액에서 2000 atm, 420℃로 처리하여 생성된다. 일부 화학반응은 고압조건에서 반응수율이 더욱 증가하는데 저밀도 폴리에틸렌의 경우 2000 atm, 350℃에서 합성된다.

또한 초고압 장치는 고압 환경(해저 심해)에서 사용되는 장비를 점검하는 simulator로도 사용된다. 식품산업에서 이용 가능한 초고압 처리는 isostatic pressing 기술로서 식품에 대해 상대적으로 낮은 온도에서 높은 압력을 가하는 것이다.

### 2.1 초고압 일반론

고압에 견딜 수 있는 압력용기(pressure vessel)는 주로 요업 및 금속 산업에서 이용되고 있으나, 식품산업에서는 더 높은 압력(약 4000 atm)에서 약 100,000 회/년의 사용 주기를 견딜 수 있는 고효율의 압력용기가 요구된다. 이러한 고압의 생성원리를 살펴보면 다음과 같다<sup>(3)</sup>.

#### 2.1.1 직접 압축(direct compression)

그림 1에 나타난 바와 같이 직경이 작은 피스톤의 끝부분으로 가압매체(pressure medium)를 직접 눌러 그 힘에 의해 압력을 생성시킨다. 이때 직경이 큰 피스톤의 반대편은 상대적으로 낮은 압축 펌프에 의해 작동된다. 이러한 직접 압축방식은 매우 빠르게 고압을 생성시킬 수 있지만, 피스톤과 압력용기 내부표면 사이의 밀봉(dynamic seal)에 제한을 받기 때문에 소규모의 실험용이나 pilot plant 시스템에만 적용 가능한 단점이 있다.

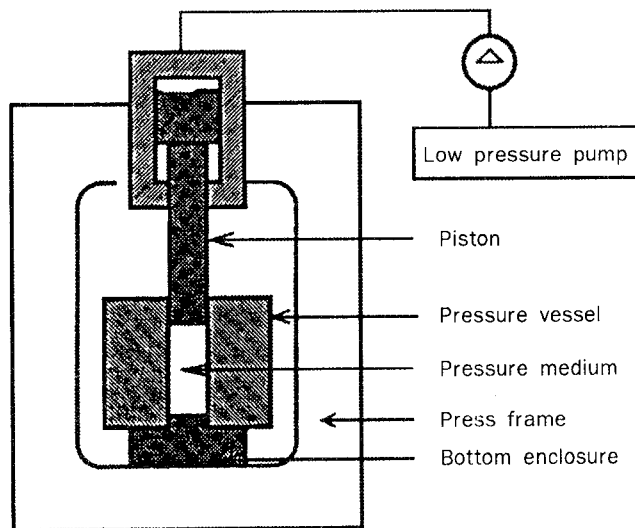


그림 1. Generation of high pressure by direct compression of the pressure transmitting medium. (From Ref.4.)

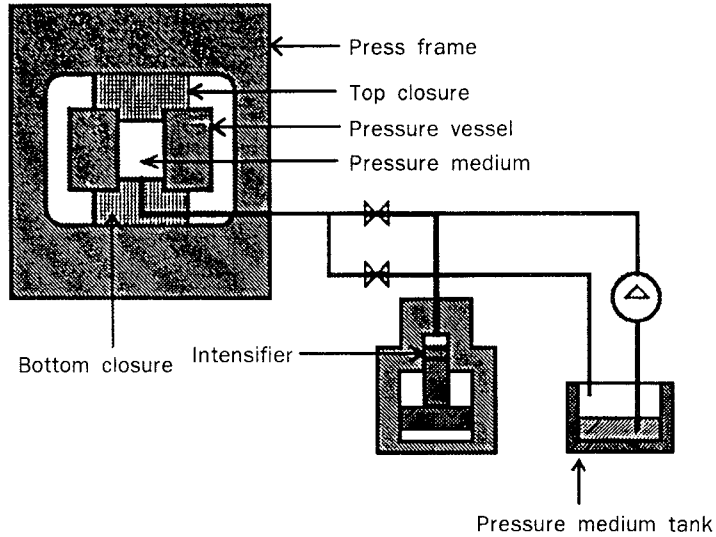


그림 2. Generation of high pressure by indirect compression of the pressure trasmitting medium. (From Ref.4.)

2.1.2 간접 압축(indirect compression)

압력 증강기구(pressure intensifier)를 사용하여 목적하는 고압에 도달할 때까지 압력매체를 밀폐된 고압용기 내부로 밀어주는 방법으로(그림 2), 대부분의 산업체용 isostatic pressing 시스템에 사용되는 방식이다.

2.1.3 압력매체 가열(heating of the pressure medium)

온도를 높이면 압력매체의 부피가 팽창되는 원리를 이용하여 고압을 생성시킨다. 따라서 고압과 고온이 함께 적용되는 경우에만 사용 가능하며 압력용기 내부의 온도를 매우 정확하게 조절할 필요가 있다.

한편 대용량 처리에 적합한 정온 가압(isostatic pressing) 시스템은 작동 온도에 따라 저온, 중온, 고온용으로 구분할 수 있다<sup>(4)</sup>.

2.1.4 저온 가압(cold isostatic pressing, CIP)

금속, 요업, 흑연, 플라스틱 산업에서 주로 사용되는 성형기술로서 적용 압력은 500~6000 atm 수

준이다. 분말 재료를 유연성 형판(elastomer mold)에 채운 다음 가압하는데 유연성 형판의 사용 방법에 따라 wet bag 또는 dry bag 방법을 나뉜다. Wet bag 방법(그림 3)은 형판을 외부에서 채운 후 압력용기 내부에 넣고 압력매체를 주입하는데 반해, dry bag 방법은 압력용기 내부에 형판이 고정되어 있고 유연재(elastomer tool)에 의해 압력매체와 분리된다. 일회 운전시간(cycle time)에 있어 wet bag 방법은 몇 분이 소요되지만 dry bag 방법은 20~60초가 걸린다. 이러한 CIP는 식품 산업에서도 매우 유용하게 사용될 수 있는 기술이다.

2.1.5 중온 가압(warm isostatic pressing, WIP)

CIP와 마찬가지로 성형기술로서 상온 내지 200℃의 온도를 사용하며 가압시 화학반응이 일어나는 공정에 주로 사용된다.

2.1.6 고온 가압(hot isostatic pressing, HIP)

금속 및 요업 공업에서 주로 사용하는 방식으로 재료를 균일하게 가열하면서 동시에 압력을 가한

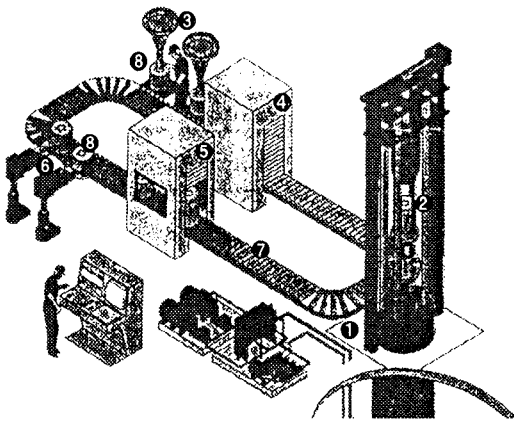


그림 3. A wet bag isostatic plant. 1) Automated wet bag isostatic press, 2) equipment for loading mould into pressure vessel, 3) powder dosing and mould filling equipment, 4) wash booth, 5) drying booth, 6) compact removal unit, 7) tooling conveyor, 8) tooling. (Courtesy of Engineered Pressure Systems, Inc.)

다. 이에 적용되는 온도는 약 2200℃까지, 가압범위는 1000~4000 atm이고 압력매체로서 argon, nitrogen, helium, 공기 등의 기체를 사용하며 일회 운전시간은 대개 6~12시간으로 가변적이다.

요업분야에 적용하기 위해 개발된 CIP를 식품산업에서 활용하기 위해서는 몇 가지 보완이 필요한데, 우선 가압매체의 경우 CIP 압력용기의 부식을 방지하기 위해 방청제나 합성 오일을 물에 섞어서 사용하고 있으나 식품산업에서는 음용수만을 사용해야 한다. 또한 사용 압력 및 처리시간에 있어서도 요업분야는 1000~3000 atm, 수십 초에서 1분 범위로 충분하지만 식품산업에서는 4000 atm 이상, 5~20분의 고압과 장시간을 필요로 한다.

## 2.2 초고압 장비

초고압 장비를 구성하는데 있어 가장 요체라 할 수 있는 압력용기의 생산은 일본이 주도하고 있다. 주요 제조회사로는 일본의 미쓰비시 중공업 (Mitsubishi Heavy Industry Ltd.), 고베 철강

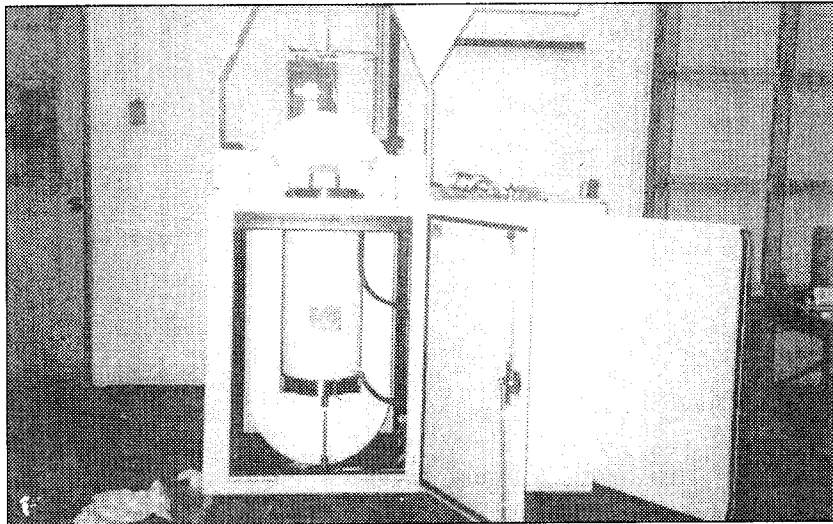


그림 4. (A) Laboratory scale pressure vessel. (B) Mobile pressure vessel. (Courtesy of ABB Autoclave Systems, Inc.)

표 1. Specifications of High Pressure Vessels Manufactured by Mitsubishi Heavy Industries

Mitsubishi Model	Diameter (m)	Length (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Maximum Operating Pressure(atm)
MFP 700	0.06	0.2	0.6	7000
MCT 150	0.15	0.3	6.0	4200
FP-30V	3.0	7.0	50	4200
FP-40L	4.0	17.0	210	4000

Source : From Ref. 6.

(Kobe Steel Ltd.), 일본 철강(Nippon Steel Ltd.)이 있으며, 그밖에 구미의 Engineered Pressure Systems, ABB Autoclave System Inc.(그림 4), ACB, NKK Corp., Autoclave Engineers 사가 있다<sup>(5)</sup>. 식품가공에 최초로 사용된 초고압 장비는 미쓰비시 중공업에서 제작하였으며, 표 1에는 미쓰비시 중공업에서 제조하는 초고압 장비들의 간단한 사양 명세를 나타내었다<sup>(6)</sup>.

미쓰비시 사는 압력용기의 반복적인 사용으로 인한 장비의 수명 감소를 최소화하기 위해 이중 실린더(double cylinder)로 구성된 압력용기를 개발하였는데, 압력용기의 내부 표면을 고압 스트레스로 미리 단련하고 압력매체와 접촉하는 부분은 스테인

레스 강철로 제조하였다. 가압과 감압의 반복주기가 매우 빨라 최대 압력에 도달하는 데 약 90초가 소요된다. 매우 높은 압력을 오랫동안 지속시킨다는 것은 압력용기의 밀폐 부위에 엄청난 하중이 부과되는 것을 의미하므로 뛰어난 내구성과 신뢰도를 지닌 자체 밀폐장치(self-seal packing)가 필요하다(그림 5). 즉, 압력용기를 여러 차례 반복하여 열고 닫더라도 고압처리시 압력이 누출되지 않고 견딜 수 있어야 한다.

한편 회분식(batch system) 초고압 처리기의 생산성은 가압 및 감압 반복주기의 감소에 의해 높일 수 있다. 즉, 가압시간은 펌프의 압력매체 운송 속도를 증가시켜 감소시키며 원하는 압력에 도달하

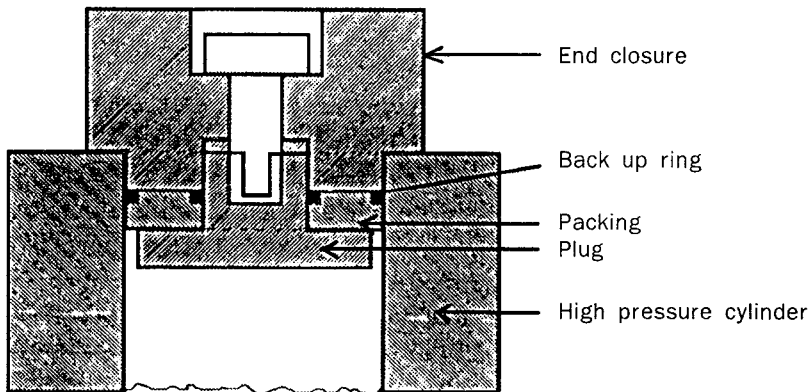


그림 5. A self-seal packing used in high pressure vessels. (From Ref. 7.)

면 이송속도를 줄이고 일정한 압력 지속기간 (holding time)이 지난 다음 압력매체가 갑자기 방출되는 것을 방지하기 위해 2단계로 압력을 떨어뜨리는 방식으로 작동된다<sup>(7)</sup>.

2.2.1 회분식 및 연속식 처리장비

회분식 시스템에서는 제품을 1회 처리 분량씩 차례로 가압 및 감압하므로 운할유나 파손된 입자에 의해 다량의 제품이 한 번에 오염될 위험을 방지하여 손실을 줄일 수 있고, 각기 종류가 다른 식품을 오염시키지 않고 처리할 수 있으며, 매번 작동 때마다 장비를 청소할 필요가 없는 장점이 있다. 뿐만 아니라 4000~9000 atm 수준에서 작동할 경우 연속식 장비와 비교했을 때 제작이 간단한 기술적 이점도 갖는다<sup>(4)</sup>. 일본에서는 최대 작동 압력 4200 atm에서 처리용량 600 L/h인 초고압 장비를 사용하여 자몽 주스를 상업적으로 생산하였는데, 이 제품은 쓴맛이 없으며 신선한 풍미를 유지한다고 알려져 있다<sup>(7)</sup>. 이러한 회분식 장치의 생산성을 높이기 위해서는 처리장치를 병렬로 배열하여 처리시간에 지체가 없도록 운전하는 방법을 적용할 수 있다(그림 6). 이때 처리 대상제품인 액체는 free piston에 의해 압력매체인

물로부터 분리된다.

각 제조사에서 개발한 초고압 처리장치를 간단히 살펴보면, 고배 철강사는 대용량 처리기 외에 소형 시험용 초고압 처리기를 개발하였는데, 이 장비의 간단한 제원을 표 2에 나타내었다. 이 장비 역시 가압용 피스톤을 사용하고 유압시스템과 작동 계기판이 장비에 탑재되어 있어 완전 자동으로 압력용기 내부의 온도를 측정할 수 있고 압력조절 프로그램도 사용 가능하다<sup>(8)</sup>.

스웨덴의 ABB Autoclave System 사에서 개발한 연구용 초고압 처리기는 process module과 control module로 나뉘어 있다. Process module은 Quintus<sup>TM</sup> prestressed wire-wound pressure vessel(그림 7), electrohydraulic pumping system, water circulation system으로 구성된 'cabinet' 형태로써 압력용기의 chamber size는 지름 90 mm × 길이 225 mm 이고 80℃에서 9000 atm까지 견딜 수 있으며 4분 내에 최대 압력에 도달 가능할 뿐만 아니라, wire winding과 압력용기 실린더 벽 사이의 공간으로 물을 순환시키므로써 온도 조절이 가능하다. 또한 programmable control module은 처리 시간, 압력, 온도 등을 감지하는 동시에 조절할 수 있는

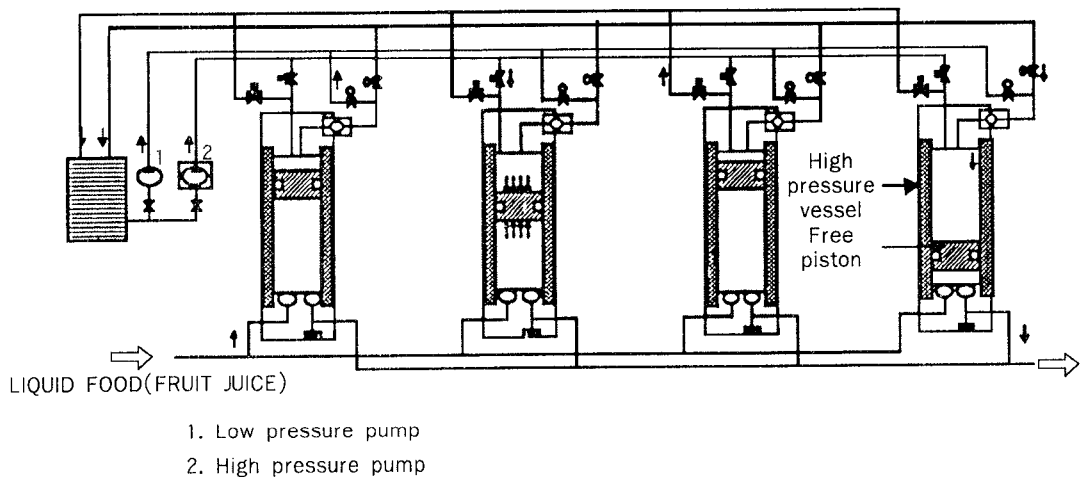


그림 6. High pressure system for processing liquid foods. (From Ref. 7.)

표 2. Specifications of High Pressure Vessels Manufactured by Kobe Steel Ltd.

Diameter (m)	Length (m)	Volume (liter)	Maximum Operating Pressure(atm)	Maximum Temperature
0.06	0.2	N.A.	7,000	80 °C
2.0	3.0	9400	1,960	80 °C

N.A.: not available.

Source: From Ref. 8.

데, 내장된 microprocessor를 이용하여 처리 대상물을 압력용기 내부로 탑재(loading)하고 가압처리(press cycling)한 후 방출(downloading)할 수 있도록 조절한다<sup>(9)</sup>. 일회 처리당 비용은 100 L 규모의 시스템인 경우 약 25 cents, 500 L 규모는 약 7 cents가 소요되는 것으로 알려있는데<sup>(10)</sup>. 표 3에는 ABB Autoclave system에서 제조하는 초고압 처리기의 내부 용량 및 최대 작동 압력을 나타내었다. 표에 나타낸 제품 이외에도 다양한 규모의 초고압 처리기를 주문 제작할 수 있다. 마모된 liner는 작동횟수 30,000 회마다 교체하여 장비의 피로도를 조절하므로써 영구적으로 사용 가능

하다. 연구용 초고압 처리기의 경우 최대 압력 17,000 atm까지 가능하도록 설계되었으며, 이때 압력용기의 내부 지름(ID)은 0.076 m, 내부 높이(IH)는 0.18 m이다<sup>(11)</sup>.

미국 National Forge Co.의 자회사인 Engineered Press System Inc.(ESPI)는 중용 isostatic pressing system을 제조하는데(표 4), plug closure가 장착된 이중 압력용기(double-ended, lined pressure vessel)로 구성되어 있다. 최근 ESPI가 개발한 실험용 초고압 처리기는 내경 0.1 m × 높이 2.5 m의 압력용기로서 최대 작동압력 6800 atm, 최대 온도 90°C이

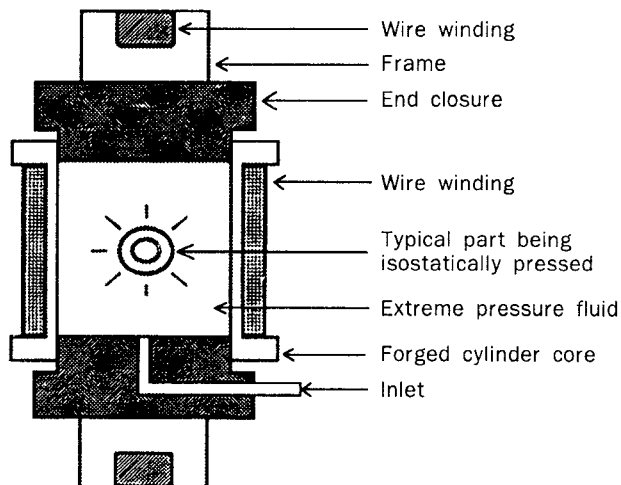


그림 7. Quintus prestressed pressure vessel. (Courtesy of ABB Autoclave Systems, Inc.)

표 3. Specifications of High Pressure Vessels Manufactured by ABB Autoclave Systems

Model	Diameter (m)	Length (m)	Maximum Operating Pressure(atm)	Volume (liter)	Maximum Temperature
Quintus	0.09	0.225	9,000	N.A.	80 °C
Quintus	0.3	1.25	9,000	100	80 °C
Quintus	0.5	2.5	9,000	500	80 °C

N.A. :not available.

Source : From Ref. 9.

표 4. Specifications of High Pressure Vessels Manufactured by Engineered Pressure Systems

Diameter (m)	Length (m)	Maximum Operating Pressure(atm)	Volume (liter)
1.7	4.0	1,000	9,000
1.0	4.0	2,000	3,150
0.6	4.5	4,100	1,250
0.6	2.5	5,500	7,00
0.25	0.75	6,900	37
0.1	1.0	10,300	8.5
0.09	0.55	13,800	3.5

Source : From Ref. 4.

다. 이때 최대 작동압력 6800 atm은 이론상 7500 atm으로 설계했을 때 얻을 수 있는 수치이며, 전동기가 부착된 유압식 증폭펌프(electrohydraulic intensifier pump)는 5분 이내에 운전압력까지 가압할 수 있다<sup>(12)</sup>.

또한 보다 발전된 형태의 실험용 장비(지름 0.024 m, 길이 0.04 m, 최대 압력 8000 atm)도 제작하고 있다. 초고압 처리기에 있어 최대 작동압력이 낮아질수록 장비의 제작 경비는 현저하게 감소할 수 있으며, 특히 고압처리시 적절히 고온과 병용하여 이용할 경우 작동 압력이 매우 높지 않아도 되는 장점을 갖는다<sup>(13)</sup>.

## 2.3 공정 기술

### 2.3.1 초고압 처리기의 운전

우선 멸균된 포장재 또는 용기에 식품을 넣고 밀봉한 후 압력용기의 chamber 내에 바르게 놓는데, 이때 포장재로는 ethylene-vinyl alcohol (EVOH) 필름이나, polyvinyl alcohol(PVOH) 필름을 사용하는 것이 바람직하다<sup>(14)</sup>. 초고압 처리시 압력이 균일하게 가해지므로 식품의 형태 변형은 없다고 보아도 무방하다<sup>(10)</sup>. 일단 포장된 식품을 넣고 장비를 닫으면 압력용기 내부에는 압력매체가 채워지는데(그림 8), 근래에 사용되는 장비의



압력매체는 소량의 가용성 유지(윤활제 및 부식 방지제)가 섞여진 물이 사용된다.

식품의 초고압 처리는 기본으로 식품을 둘러싸고 있는 물을 압축하는 것으로서, 상온에서 물의 부피는 1000 atm으로 가압시 약 4%가 감소하고, 2000 atm으로 가압시 약 7% 감소, 4000 atm으로 가압시 약 11.5% 감소, 6000 atm으로 가압시 약 15%가 감소한다<sup>(15)</sup>. 따라서 액체를 압축시키는 경우 소량의 부피 변화만 일어나므로 물을 사용하는 초고압 처리는 기체를 압축하여 사용하는 것보다 작동 위험이 훨씬 작다고 볼 수 있다<sup>(16)</sup>.

식품을 고압으로 처리할 때 적절한 처리시간은 매우 중요한 공정변수로서 압력 chamber 내에서의 유지시간(holding time)은 식품의 형태와 처리 온도에 따라 달라진다. 정해진 처리시간이 지나고 나면 chamber의 압력이 풀리고 압력이 대기압으로 떨어진 다음 내용물을 꺼내고, 다시 새로운 처리대상 식품을 채워주므로써 cycle을 반복한다<sup>(2)</sup>.

기본적으로 초고압 처리를 식품분야에 활용하기 위해서는 비교적 대량의 식품을 처리할 수 있으며 동시에 고압에도 잘 견딜 수 있는 장치의 제작이

가장 관건이라 볼 수 있다. 또한 식품용 초고압 처리기는 반복 처리시간(cycle time)이 짧고, 청소하기 용이하며, 작동이 안전하고, 정확한 공정 조절이 가능해야 하며, 아울러 실제 제품 생산용으로 사용하기 위해서는 운전비용이 적게 드는 보다 합리적인 저가의 장비가 개발되어야 할 것이다<sup>(3)</sup>.

### 3. 식품가공 공정으로서의 초고압 처리 기술

초고압 처리기술은 미생물과 효소의 불활성화에 따른 식품의 저장성 증대는 물론 식품의 조직감과 관능적 특성을 조절하는데 적용할 수 있다. 표 5와 6에는 식품산업에서 고압 처리공정의 적용가능 사례를 제시해 놓았다. 고압처리에 의한 식품의 저장성 연장은 적절한 압력을 가하여 미생물, 곰팡이 및 효소를 불활성화시키므로써 가능하다. 고압처리 는 특히 냉동식품을 균일하게 해동하는데에도 유용하며, 이러한 압력에 의한 해동은 염분이나 당류와 같은 수용성 고형물을 포함한 식품인 경우 더욱 빠르게 진행된다<sup>(17)</sup>.

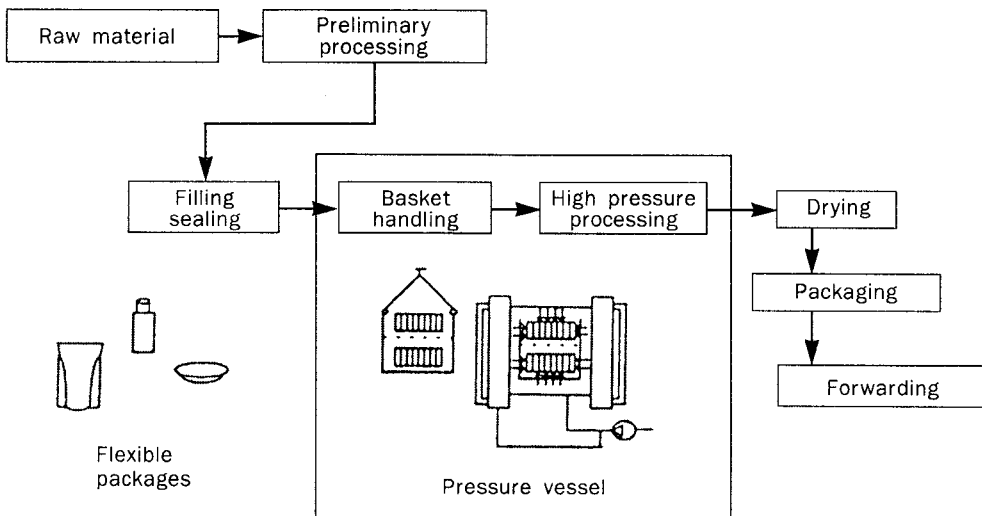


그림 8. High pressure system for processing packaged foods. (From Ref. 7.)

표 5. Applications of High Pressure Technology to Processed Foods

Effect	Desserts	Pickles	Cheese	Seasonings	Spices
Prolongation of storage time	● <sup>a</sup>	●	●	●	●
Prevention of microbial contamination	◆ <sup>b</sup>	◆	◆	◆	◆

●<sup>a</sup> Applicability is large.  
 ◆<sup>b</sup> Application exists.  
 Source : From Ref. 6.

표 6. Applications of High Pressure Technology to Food Processing

Effect	Solid Food					Liquid Food	
	Fish	Meat	Eggs	Rice, starches	Soy bean protein	Milk	Natural Juice
Prolongation of storage time						● <sup>a</sup>	●
Prevention of microbial contamination	◆ <sup>b</sup>	◆	◆	◆	◆	◆	●
Development of new foodstuffs	●	●	●	●	●		
Manufacture of partially cooked food	●	●	●	●			

●<sup>a</sup> Applicability is large.  
 ◆<sup>b</sup> Application exists.  
 Source : From Ref. 6.

3.1 식품의 관능적 품질(sensory quality)

고압처리에 의한 관능적 품질변화는 식품의 형태에 따라 다양하다. 예를 들어 토마토의 내부 구조는 단단해지며, 닭고기의 근육조직과 생선살은 유백색으로 불투명해지고, 소고기는 연해진다<sup>(18)</sup>. 일반적으로 신선한 고기는 다소 질기기 때문에 약 2주간 냉장온도에서 저장하여 연화시킬 필요가 있는

데, 고압처리로 신선육을 연화시킬 경우 단 10분이면 충분하다<sup>(19)</sup>.

고압처리한 소의 longissimus 근육은 근원섬유분절(sarcomere)길이가 짧아지고, pH가 낮아지며, Warner-Bratzler 값이 감소한다. 고압에 의한 근육조직의 물리적 변화는 근초(sarcolemmal)와 근 섬유막(endomysial sheath)의 분리, 힘줄(bands)의 수축, 근원섬유(myofibrilla)와 근원

섬유간 공간(intermyofibrillar space)의 분해 등이 일어난다. 또한 가압처리후 glycogen 입자는 없어지고, 팽창된 mitochondria와 sacroplasmic reticulum이 나타나고, 어떤 경우에는 mitochondria가 분해되기도 한다. 이와 같이 고압처리에 의한 근육조직의 물리화학적 상호작용에 의해 고기의 연화효과가 나타나는 것이며<sup>(20)</sup>, 한편으로 고압에 의해 근육내부의 단백질 분해효소가 활성화되어 육질의 연화를 유발하기도 한다<sup>(21)</sup>.

고압에 의해 전분과 단백질의 구조가 변화하는 것을 이용하여 쌀을 몇 분내에 조리할 수도 있고<sup>(18)</sup>, 자몽 주스를 고압처리하여 기존의 가열처리에서 나타나는 limonene에 의한 쓴맛이 나타나지 않도록 하며<sup>(19)</sup>, 복숭아와 배를 4100 atm에서 30분간 처리하여 5년간 무균상태로 유지하기도 하였다<sup>(18)</sup>. 살균하지 않은 오렌지 주스를 고압처리할 경우 매우 신선한 풍미를 그대로 유지하는 동시에 vitamin C의 손실 없이 약 17개월 동안 저장할 수 있었다<sup>(16)</sup>. 한편 일본에서는 딸기 쥬스나 소오스, 오렌지 마말레이드를 제조하는데 고압처리를 이용하기도 한다. 즉, 적당한 플라스틱 용기에 과일, 과일 주스, 설탕, 산미제(acidulant) 등의 원 재료를 섞어 넣고 덮개를 덮은 후 4000~6000 atm으로 1~30분간 가압한다. 딸기 쥬스의 경우 4000 atm에서 15분, 딸기 퓨레(puree)는 4000 atm에서 10분간 가압하면 된다. 고압처리로 만든 쥬스는 가열에 의해 만든 쥬스와 달리 신선한 과일의 맛과 색을 그대로 지니며, 기존의 상품화된 쥬스와 마찬가지로 고압에 의해 설탕 용액이 과일 내부로 침투하게 된다<sup>(22)</sup>.

가압처리시 감과 같은 과일은 연화되면서 투명해지고 단맛이 증가하는 반면, 사과, 배, 감자, 고구마 등의 과일 채소류는 고압처리후 급속히 검게 변색된다. 예를 들어 얇게 썰은 배를 4000 atm으로 25℃에서 10분간 고압처리하면 30분 이내에 검은 색으로 변하는데, 이는 과육에 존재하는 갈변효소의 활성화와 관련이 있는 듯하다. 즉, 고압처리한 과일, 채소의 polyphenol oxydase(PPO) 활성화는 신선한 것에 비해 약 5배 가량 증가하며, PPO의

활성은 가압처리를 반복하더라도 증가하지 않는다<sup>(23)</sup>. 한편 감자, 근채류, 고구마 등의 조직감은 상온에서 5000 atm으로 15분간 고압처리했을 때 상당히 연화되지만, 감자의 경우 효소적 갈변도 촉진되었다<sup>(29)</sup>.

압력에 의해 PPO가 불활성화되는 것은 처리시 가압매체, 과일 및 채소의 종류에 따라 다르다. 예를 들어 4000 atm, 50℃에서 탈이온수(deionized water), Ca<sup>2+</sup>나 CO<sub>2</sub>를 함유한 물에서는 PPO가 불활성화되지 않지만, 0.5% 구연산 용액에서는 불활성화되어 4000 atm, 20℃에서 10분간 처리시 완전히 불활성화되었다<sup>(24)</sup>. 이상에서 언급한 것 외에 고압처리에 의해 과일의 benzaldehyde 함량이 증가할 수도 있는데, 이와 같은 benzaldehyde의 증가는 과일의 향미 품질에 영향을 줄 수 있다<sup>(25)</sup>.

### 3.2 단백질의 겔화(gelation)

계란의 난황부분을 25℃, 4000 atm으로 30분간 가압처리하면 gel을 형성하고, 5000 atm에서는 난백이 부분적으로 응고하면서 불투명해지다가 6000 atm에서는 완전한 gel을 형성한다. 압력에 의해 형성된 gel은 본래의 향미를 지니며, 비타민이나 아미노산의 손실이 없고, 열에 의해 형성된 gel에 비해 소화하기도 쉽다. 특히 압력에 의해 형성된 난황과 난백의 gel은 열에 의해 형성된 gel에 비해 본래의 색을 그대로 유지하면서 광택을 띠고 부드러우며 점착성(adhesiveness)을 지닌다. 이때 압력이 증가할수록 gel의 강도는 증가하는 반면 점착성은 감소하는데, 가장 강한 gel은 5000 atm에서 형성되며 가열로 형성된 gel과 비교하면 1/6배의 강도를 지닌다. 또한 압력에 의해 생성된 gel은 가열 gel에 비해 껌성질(gumminess)이 현저하게 작고, 6000~7000 atm에서 형성된 난백 gel은 부서지지 않으면서 신속하게 변형되며, 압력이 증가할수록 응집성(cohesiveness)이 증가한다. 압력과 가열에 의해 형성된 난황 및 난백 gel의 힘-변형 곡선(force deformation curve)은 각각 그림 9과 10에 나타낸 바와 같다<sup>(26)</sup>.

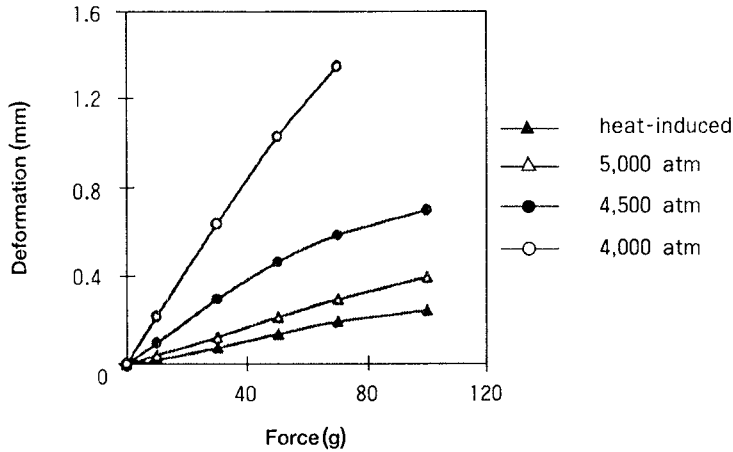


그림 9. Force deformation curves of pressure (4000 to 5000 atm) and heat-induced gels of egg yolk. (From Ref. 26.)

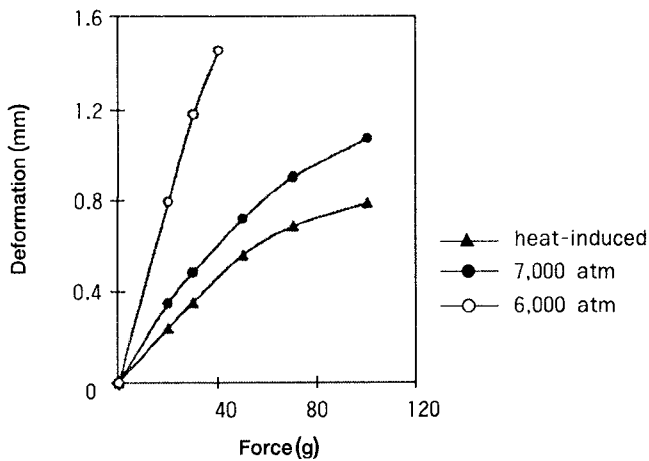


그림 10. Force deformation curves of pressure (6000 to 7000 atm) and heat-induced gels of egg white. (From Ref. 26.)

삶은 계란은 종종 황(sulfur) 냄새를 풍기며 조리시 생성되는 lysinoalanine을 함유하지만, 가압처리한 계란은 황 냄새나 lysinoalanine을 함유하지 않는다. 특히 lysinoalanine은 장에서 3차원 구조물을 형성하여 단백질 분해 효소의 작용을 방해하고, 이로 인하여 인체 내에서 아미노산의 이용률이 떨어지기도 한다. 더욱이 삶은 계란에서는 riboflavin, folic acid, thiamine 등의 비타민류

가 파손되지만 고압처리한 계란에서는 이들 비타민이 아무런 영향을 받지 않는다<sup>(15)</sup>.

한편 carrageenan, ovalbumin, 콩 단백질 gel의 녹는점은 처리압력이 증가할수록 감소하는데, 이는 고압에서 불안정한 gel을 형성한다는 것을 나타낸다. 이에 반해 agarose나 gelatin gel은 압력이 증가할수록 녹는점이 증가한다<sup>(27)</sup>.

일본에서는 대구, 정어리, 가다랭이, 참치 등을

원료로 하는 surimi의 겔화에 4000 atm의 정수압을 이용한다. 오징어를 이용한 surimi의 경우 추출한 근육 단백질을 6000 atm으로 가압하여 얻을 수 있는데, 압력에 의해 생성된 surimi gel은 가열 형성한 gel에 비해 관능적으로 우수하다고 한다<sup>(16)</sup>. 일반적으로 이러한 겔화 반응은 작은 크기의 고기나 생선살을 멩치는데 사용할 수 있고, 잘게 다진 생선살이나 뼈를 제거한 고기의 재성형시, 또는 surimi나 surimi 조각을 성형하여 유사 해산물(seafood analogue) 제품을 제조하는데에도 이용될 수 있다. 0℃ 이하에서 gel을 형성하면서 동시에 상업적 멸균이 가능하도록 하는 방법으로서 초고압 처리에 대한 관심이 증가되고 있다<sup>(5)</sup>.

고압에 의한 gelation 기작은 가열에 의한 것과는 다르다. 즉, 고압처리에 의한 gelation은 단백질 용액의 부피 감소에 기인하는 반면, 가열 gelation은 단백질 분자의 활발한 움직임에 의해 비공유결합이 분해되고 변성되면서 무작위적인 망상구조를 형성한다. 이때 가열에 의한 gel은 불투명하지만, 압력에 의한 gelation에서는 아미노산 잔기를 둘러싸고 있는 물 분자가 재배치되므로서 광택이 나고 투명한 gel을 형성할 수 있다<sup>(26)</sup>.

### 3.3 품질 및 기능성 향상

고압처리의 영향으로 식품 분자내 공유결합은 남아있으나 비공유결합은 파괴된다. 따라서 가압처리는 육류 단백질의 소화성(digestibility)을 증가시키며, 단백질의 생물학적 가치나 이용효율을 상압에서 연화처리한 육류 단백질과 동일하게 만든다<sup>(28)</sup>.

일반적으로 채소를 뜨거운 물로 데치기(blanching)할 때 효소는 불활성화되지만, 가열에 의해 조직이 손상될 뿐만 아니라 영양소가 용출되어 BOD가 높은 폐수를 발생시키고 그로 인해 환경오염의 원인이 된다. 이러한 기존의 데치기 공정에서는 미생물 총균수가 3 log cycle 감소하는 반면, 초고압(UHP) 처리의 경우 대개 4 log cycle 감소한다. 내용물 용출 측면에서 감자를 열수로 데치기

할 때 potassium은 계속 용출되며, 특히 물로 처리할 때 가장 많이 손실된다. 물의 온도가 증가할수록 potassium 이온의 용출은 감소하지만, CaCl<sub>2</sub> 용액에서는 온도가 증가할수록 용출량이 증가하였다. 이에 반해 UHP 처리는 무기질의 용출을 감소시키고 낭비되는 물을 절약하면서도 열수로 데치기하는 효과를 얻을 수 있는데, 특히 고압처리 열수로 데치기하는 것에 비해 적은 양의 물이 소요되므로 폐수량이 적고 진공 포장한 식품에도 이용 가능한 장점이 있다<sup>(29)</sup>.

신선한 향초나 향신료 또는 이들의 동결 건조품을 살균할 때 CO<sub>2</sub>의 미생물 억제 효과를 병용하여 초고압 처리를 이용할 수도 있다. 일반적으로 건조 상태의 향신료는 미생물 살균이 불가능한데, CO<sub>2</sub>의 항균 작용에 있어 수분은 매우 중요한 역할을 한다. 신선한 꿀파(chive), 백리향(thyme), 파슬리, 박하 등의 향신료를 55 atm, 45℃에서 2시간 동안 CO<sub>2</sub>로 가압처리하면 상당수의 미생물은 불활성화된다. 특히 백리향, 박하, 꿀파는 가압처리후 향미가 개선되기도 한다<sup>(30)</sup>. 또한 신선한 셀러리에 접종한 미생물을 고압 CO<sub>2</sub>로 처리한 경우에도 매우 효과적으로 살균할 수 있었다고 한다<sup>(31)</sup>.

고압으로 냉동 식품을 해동하면 기존의 대류(convection) 해동방법에 비해 더 빠르게 처리할 수 있다. 예를 들어 2 kg의 냉동 쇠고기를 2000 atm으로 가압하면 해동에 약 80분이 소요되는데, 이에 반해 상온에서는 7시간이 걸린다. 이렇게 고압을 이용하여 해동한 소고기는 습도가 낮은 5℃에서 해동한 고기와 비교했을 때 향미나 다즙성(juiciness) 측면에서 거의 차이가 없으나, 고기의 표면이 다소 변색되었다. 한편 2000 atm으로 20분 가압처리한 후 3℃에 저장한 육류는 2일이 지나면서 부패하기 시작하였고, 3000 atm으로 가압하면 6일 후, 4000~4500 atm으로 가압했을 때에는 6~13일 후부터 부패하기 시작하였다. 그러나 5400 atm, 52℃에서 1시간 가압 후 냉장 저장한 육류는 미생물에 의해 부패되지 않았다<sup>(32)</sup>.

전분의 호화(gelatinization)는 전분 입자가 복굴절 결정(birefringent crystalline) 상태에서

비복굴절(non-birefringent)의 팽창상태로 이행되는 현상을 말하는데, 전분은 가열 또는 압력에 의해 호화된다. 전분을 호화시키는 압력은 전분의 종류에 따라 다르며, 고온 가압시 호화가 촉진된다(33). 또한 압력에 의해 호화 온도가 1000 atm당 약 3~5℃정도 상승되지만, 1500 atm 이상 가압하면 호화 온도는 더 이상 증가하지 않는다. 이러한 고압이 호화에 미치는 영향은 전분 입자가 본래의 상태를 유지하는데 필요한 수소 결합을 안정화시키는 것이다(34). 따라서 압력에 의해 호화된 전분은 저온 저장시, 가열 호화된 전분보다 더 천천히 변화한다. 일반적으로 가열처리에 의한 호화과정중 전분 입자는 본래의 구조가 파괴되는데, 저온 저장할 경우 부분적으로 본래의 구조로 재배치된다. 이에 비해 가압처리된 전분 입자의 입자구조를 그대로 유지하면서 팽창되므로 구조변화가 매우 느리게 진행된다(35).

고압에 노출되면 단백질 분자는 원래의 결합구조가 풀어지며, 이러한 폴림현상(unfolding)은 단백질의 기능적 특성에 변화를 가져온다(36). 즉, 단백질의 거품성, 유화력, gel 형성능력, 수분결합력 등의 특성이 영향을 받는다. 따라서 고압처리된 단백질은 폴림현상을 조절함으로써 식품 단백질을 기능성 식품의 성분으로 개발하는데 이용될 수 있다(36). 예를 들어 압력처리한 단백질의 유화력은 pH에 영향을 받아 증진되는데, ovalbumin 용액은 25℃, 6000 atm으로 가압처리시 pH 12.5에서도 높은 유화 안정성과 유화력을 나타내었으나 ovalbumin의 등전점인 pH 5.5로 낮아질수록 감소하였다. 그러나 가압처리한 casein이나 소 혈청 albumin의 경우 유화력이 유의적으로 증가하지 않았는데, 이와 같은 단백질 종류에 따른 차이는 단백질내 S-S 결합의 차이에 기인한 것으로 판단된다(37).

### 3.4 기타 효과

고압은 상온에서 향미성분이나 색소와 같은 주요 대사산물의 추출 효율을 향상시키는데 사용될 수

있다. 예를 들어 amaranth 색소는 *Chenopodium rubrum* 세포를 가압하여 추출할 수 있는데, 2500 atm으로 10분간 처리시 세포로부터 약 99%의 색소가 추출되어 배양액으로 유출되었다(38). 한편, 고압은 미생물의 색소 생성을 지연시키기도 하는데, *Serratia marcescens*와 *Staphylococcus aureus*를 2900 atm, 30℃에서 가압하면 색소의 생성이 가역적으로 지연된다. 보통 *Serratia marinarubra*는 상압에서 red, orange, yellow, cream, white 순으로 색소를 생성하지만, 300 atm에서는 white가 많아지거나 무색을 띠며 red는 거의 생성하지 않는다(39).

단백질을 선택적으로 분해시키고자 할 때에도 고압을 사용할 수 있다. 즉,  $\beta$ -lactoglobulin은 2000 atm으로 가압처리후 thermolysin에 의해 우선적으로 분해되지만  $\alpha$ -lactalbumin은 분해되지 않는다. 유청(milk whey)에서  $\alpha$ -lactalbumin은 그대로 남아있게 하면서  $\beta$ -lactoglobulin만을 선택적으로 제거하는 것은 중요한 의미를 갖는데, 이는 유청 농축액을 유아용 조제 우유의 첨가물로 사용할 때에 매우 유용하게 사용될 수 있다(40).

빙핵 활성(ice nucleation-active) 세균이 존재할 경우 저온에서 서리에 의한 농작물의 손실이 증가하기 때문에 이들 미생물의 활성을 직접적으로 억제하는 방법에 대해 많은 연구가 이루어졌다. 그중의 하나로서 3000 atm 이상의 고압처리하는 빙핵 활성 세균세포를 불활성화시킬 수 있다(41).

압력이 증가할수록 triglyceride의 녹는점은 증가하므로 상온에서 액체인 지방이 고압처리시에는 결정질(crystal)을 형성한다. 특히 고압에 의해 밀도가 높고 안정적인 지방 결정(fat crystal)의 형성이 촉진되는데, 이때  $\alpha$ -결정형에 비해서는  $\beta$ -결정형이,  $\beta$ -결정형에 비해  $\beta$ -결정형이 우선적으로 형성된다고 한다(17).

고압처리를 하면 단백질의 산 가수분해가 촉진되는 반면 옥수수 전분이나 로커스트콩 껍질(locust bean gum)의 분해는 영향받지 않는다. 또한 xylose와 lysine xylose와  $\beta$ -alanine, glutar-

aldehyde와  $\beta$ -alanine이 관련된 마이알 반응 (maillard reaction)은 고압처리에 의해 억제 된다<sup>(17)</sup>.

한편 4~20℃에서 30분간 1000~4000 atm으로 가압처리시 정어리살에 존재하는 lipase는 불활성화되고, 이로 인해서 이취(off-flavor)의 원인을 제공하는 자유 지방산(fatty acid)의 축적을 방지할 수 있다. Carotenoid, chlorophyll, anthocyanin 등의 색소는 가압처리에도 불구하고 별다른 변화가 없지만, myoglobin은 압력에 민감하므로 육류를 고압처리하게 되면 밝은 선홍색이 감소된다<sup>(17)</sup>.

#### 4. 결론

초고압 처리기술은 비가열 식품 보존방법으로서 매우 전망이 밝은 분야라고 생각된다. 특히 고압처리는 본문에서 살펴본 바와 같이 식품의 보존뿐만 아니라 식품의 물성적, 기능적 특성을 향상시키는 데에도 이용 가능하다. 또한 초고압 처리기술의 중요한 일면으로는 식품이 본래 지니고 있는 영양성분과 향미를 그대로 유지하면서도 효소를 불활성화시키므로써 아무런 가공처리도 하지 않은 듯이 신선한 풍미와 조직감을 지킨다는 것이다. 아직까지는 매우 높은 고압에 견딜 수 있는 압력용기를 제조하는 기술적인 측면에서 다소 어려움이 있어 초고압 처리기술을 산업화하는데 제한을 받고 있으나, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 많은 노력들이 시도되고 있는 만큼 빠른 시일 내에 상당한 진전이 있을 것으로 예상된다.

#### 참 고 문 헌

- A. Carlez, J. P. Rosec, N. Richard, and J. C. Cheftel, Bacterial growth during chilled storage of pressure treated mincemeat. *Lebensm. Wiss. U. Technol.* 27: 48-54 (1994).
- A. Denda and R. Hayashi, Emulsifying properties of pressure-treated proteins. *High pressure and Biotechnology* (R. Hayashi, K. Heremans, and P. Masson, eds.), Colloque INSERM John Libbey Eurotext Ltd., 1992. Vol. 224, p. 333.
- Anonymous, ABB Autoclave Systems, Technical Data (1994a).
- Anonymous, Engineered Pressure Systems, Technical Data (1994b).
- Anonymous, ABB Autoclave Systems, Technical Data (1993).
- Anonymous, Mistubishi Heavy Industries, Technical Data (1992).
- B. Mertens and G. Deplace, Engineering aspects of high pressure technology in the food industry. *Food Technol.* 47(6): 164-169 (1993).
- B. Mertens and D. Knorr, Development of non thermal processes for food preservation. *Food Technol.* 46(5): 124-133 (1992).
- C. E. Morris, High pressure builds up. *Food Eng.* Oct.: 113-120 (1993).
- C. E. Zobell, Pressure effects on morphology and life processes of bacteria. *High pressure effects on cellular processes* (A. M. Zimmerman, ed.), Acad. Press., New York and London (1970).
- D. E. Johnston, B. A. Austin, and R. J. Murphy, Effects of high hydrostatic pressure on milk. *Milchwissenschaft* 47(12): 760-763 (1992).
- D. Farr, High pressure technology in the food industry. *Trends Food Sci. Technol.* 1: 14-16 (1990).
- D. Knorr, Effects of high hydrostatic pressure on food safety and quality.

- Food Technol.* 47(6): 156-161 (1993).
- D. G. Hoover, C. Metrick, A. M. Papineau, D. F. Farkas, and D. Knorr, Biological effects of high hydrostatic pressure on food microorganism. *Food Technol.* 43(3): 99-107 (1989).
- E. A. Elgasim and W. H. Kennick, Effect of hydrostatic pressure on meat microstructure. *Food Microstructure* 1: 75-82 (1982).
- E. A. Elgasim and W. H. Kennick, Effect of pressurization of pre-rigor muscles on protein quality. *J. Food Sci.* 4: 1122-1124 (1980).
- F. Zimmerman and C. Bergman, Isostatic pressure equipment for food preservation. *Food Technol.* 47(6): 162-163 (1993).
- G. Deplace and B. Mertens, The commercial application of high pressure technology in the food processing industry. *High Pressure and Biotechnology* (R. Hayashi, K. Heremans, and P. Masson, eds.), Colloque INSERM John Libbey Eurotext Ltd., 1992, Vol. 224, p. 469.
- G. J. Haas, H. E. Prescott, Jr., E. Dudley, R. Dik, C. Hintlian, and L. Keane, Inactivation of microorganisms by carbon dioxide under pressure. *J. Food Safety* 9: 253-265 (1989).
- H. Iwahasi, S. C. Kaul, K. Obuchi, and Y. Komatsu, Induction of barotolerance by heat shock treatment in yeast. *FEMS Microbiol. Lett.* 80: 325-328 (1991).
- H. Sumitani, S. Suekane, A. Nakatani, and K. Tatsuka, Changes in composition of volatile compounds in high pressure treated peach. *J. Agric. Food Chem.* 42: 785-790 (1994).
- J. C. Cheftel, Application des hautes pression en technologie alimentaire. *Ind. Alim. Agric.* 108: 141-153 (1991).
- J. C. Chftel, Effects of high hydrostatic pressure on food macromolecules: an overview. *High pressure and Biotechnology* (R. Hayashi, K. Heremans, and P. Masson, eds.), Colloque INSERM John Libbey Eurotext Ltd., 1992, Vol. 224, p. 195.
- J. M. Thevelein, J. A. Van Assche, K. Hereman, and S. Y. Gerlisma, Gelatinization temperature of starch, as influenced by high pressure. *Carbohydrate Res.* 93: 304-307 (1981).
- K. Gekko, Effects of high pressure on the sol-gel transition of food macromolecules. *High pressure and Biotechnology* (R. Hayashi, K. Heremans, and P. Masson, eds.), Colloque INSERM John Libbey Eurotext Ltd., 1992, Vol. 224, p. 105.
- K. Hori, Y. Manabe, M. Kaneko, T. Sekimoto, Y. Sugimoto, and T. Yamane, The development of high pressure processor for food industries. *High Pressure and Biotechnology* (R. Hayashi, K. Heremans, and P. Masson, eds.), Colloque INSERM John Libbey Eurotext Ltd., 1992, Vol. 224, p. 499.
- K hne and D. Knorr, Effects of high pressure carbon dioxide on the reduction of microorganisms in fresh celery. *Eur. Food Sci.*, 41: 55-57 (1990).



- M. Asaka and R. Hayashi, Activation of polyphenol oxidase in pear fruits by high pressure treatment. *Agric. Biol. Chem.* 55(9): 2439-2440 (1991).
- M. N. Eshtiaghi and D. Knorr, Potato cubes response to water blanching and high hydrostatic pressure. *J. Food Sci.* 58(6): 1371-1374 (1993).
- M. Masuda, Y. Saito, T. Iwanami, and Y. Hirai, Effects of hydrostatic pressure on packaging materials for food, *High pressure and Biotechnology* (R. Hayashi, K. Heremans, and P. Masson, eds.), Colloque INSERM John Libbey Eurotext Ltd., 1992, Vol. 224, p. 545.
- M. Okamoto, Y. Kawamura, and R. Hayashi, Application high pressure to food processing: textural comparison of pressure- and heat-induced gels of food proteins. *Agric. Biol. Chem.* 54(1): 183-189 (1990).
- M. Watanabe, T. Makino, K. Kumeno, and S. Arai, High pressure sterilization of ice nucleation-active bacterial cells. *Agric. Biol. Chem.* 55(1): 291-292 (1991).
- N. Homma, Y. Ikeuchi, and A. Suzuki, Effect of high pressure treatment on the proteolytic enzymes in meat. *Meat Sci.* 38: 219-228 (1994).
- R. Hayashi, Application of high pressure to food processing and preservation: philosophy and development, *Engineering and Food* (W. E. L. Spiess and H. Shubert, eds.), Elsevier Appl. Sci., London, 1989, Vol. 2, p. 815.
- R. Hayashi and A. Hayashida, Increased amylase digestibility of pressure-treated starch. *Agric. Biol. Chem.* 53: 2543-2544 (1989).
- R. Hayashi, Y. Kawamura, and S. Kunugi, Introduction of high pressure to food processing: preferential proteolysis of  $\beta$ -lactoglobulin in milk whey. *J. Food Sci.* 52(4): 1107-1108 (1987).
- R. J. Swientek, High hydrostatic pressure for food preservation. Technologies for tomorrow. *Food Processing*, Nov. (1992).
- S. Ezaki and R. Hayashi, High pressure effects on starch: structural change and retrogradation, *High pressure and Biotechnology* (R. Hayashi, K. Heremans, and P. Masson, eds.), Colloque INSERM John Libbey Eurotext Ltd., 1992, Vol. 224, p. 163.
- S. Nagatsuji, The fat of the land under pressure. *Look Japan*, Oct.: 28-29 (1992).
- T. Kanda, T. Yamauchi, T. Naoi, and Y. Inoue, Present status and future prospects of high pressure food processing equipment, *High Pressure and Biotechnology* (R. Hayashi, K. Heremans, and P. Masson, eds.), Colloque INSERM John Libbey Eurotext Ltd., 1992, Vol. 224, p. 521.
- Y. N. Horie, K. I. Kimura, and M. S. Ida, Jams treated at high pressure. U. S. Patent 5,075,124 (1991).