

압출성형에 의한 식물 세포벽의 수용화

- 총 설 -

황재관[†] · 김종태 · 홍석인 · 김철진

한국식품개발연구원

Solubilization of Plant Cell Walls by Extrusion

Jae-Kwan Hwang[†], Chong-Tai Kim, Seok-In Hong and Chul-Jin Kim

Korea Food Research Institute, Kyonggido 463-420, Korea

Abstract

Plant cell walls consist of a variety of chemical constituents such as cellulose, hemicelluloses, pectins, lignin, glycoproteins, etc. These components are strongly linked through hydrogen, covalent, ionic and hydrophobic bondings, which thus confers the self-protection capability on plants. Some processing by-products (hulls, brans, pomaces) of cereals, fruits and vegetables are very limited in further utilization due to their compact structural rigidity. In view of the fact that the plant cell walls are essentially composed of dietary fiber components, solubilization of the strong intermolecular linkages can contribute to increasing the soluble dietary fiber content and thus diversifying the functional and physiological role of plant cell walls as dietary fiber sources. This article reviews the chemical constituents of cereals, fruits & vegetables and brown seaweeds with reference to their intermolecular linkages. An particular emphasis will be placed on the solubilizing phenomena of rigid plant cell walls by extrusion and the resulting changes of functional properties. It is suggested that underutilized food resources, typically exemplified by various food processing by-products and surplus seaweeds, can be successfully modified toward improved functional performance by extrusion.

Key words : extrusion, cell wall, solubilization, by-products, fiber

서 론

식물 세포벽은 셀룰로오스 (cellulose), 헤미셀룰로오스 (hemicellulose), 펙틴 (pectin), 리그닌 (lignin) 및 당단백질 (glycoprotein) 등의 구성성분으로 이루어져 있다¹⁾. 그런데 이들 구성성분들은 서로 유리된 상태로 존재하는 것이 아니라 대부분 공유결합, 수소결합, 이온결합, 소수결합 등을 통하여 강하게 연결되어 식물조직에 외부로부터의 공격에 대한 자체 방어능력을 부여한다²⁾. 이들의 결합정도는 식품의 종류나 이용방법에 따라 식품체계에 미치는 영향이 다르다. 예를 들어 과일이나 야채의 경우 저장기간 중에 주로 펙틴 분해효소 (pectinases), 헤미셀룰로오스 분해효소 (hemicellulases) 등의 효소작용에 의하여 이들 결합이 분해되면서 조직감과 관능적 특성이 저하되므로 신선도를 유지하기 위

하여 원래의 결합조직을 유지할 필요가 있다^{3,4)}. 반면에 곡류의 경우에는 세포벽의 구성물질들이 서로 조밀한 결합구조를 갖고 있어 생체상태에서는 소화흡수나 가공공정에서의 이용이 용이하지 않기 때문에 오히려 가열과정 등을 통하여 이들의 결합력을 약화시키는 경우가 많다^{5,6)}. 물론 과채류의 경우에도 생체로 이용하지 않고 열처리에 의해 가공하는 경우에는 상당한 양의 불용성 성분이 가용성 성분으로 전환된다^{7,8)}.

영양학적인 측면에서 보면 이들 세포벽 구성물질의 대부분은 인체내에서 소화되지 않으면서 다양한 생리 기능을 제공해 주는 식이섬유 (dietary fiber) 성분으로서 분류된다⁹⁻¹¹⁾. 식이섬유의 생리적인 기능성을 결정하는 가장 중요한 요인은 용해도로써 식이섬유 성분은 용해도에 따라 크게 수용성 식이섬유 (water-soluble dietary fiber)와 불용성 식이섬유 (water-insoluble dietary fiber)로 분류되는데, 이들에 의해 제공되는 생리특성

[†]To whom all correspondence should be addressed

이 각각 다르다¹⁴⁻¹⁹. 즉 불용성 식이섬유는 소화기관을 통과할 때 다량의 수분흡수에 따라 대변의 용적증가, 장내 통과시간 단축, 전분의 가수분해 억제 및 포도당의 흡수 지연 등의 생리작용을 한다. 반면에 수용성 식이섬유에 의하여 형성된 3차원 구조의 젤은 식품의 통과를 지연시키고 포도당의 흡수를 저해하며, 특히 혈중의 콜레스테롤 함량을 저하시키는 역할을 하는 것으로 밝혀진 바 있다.

불용성 상태로 존재하는 식물 세포벽의 구조를 수용화하는 것은 수용성 식이섬유의 함량을 증가시킴으로써 식이섬유의 생리특성을 다양화할 수 있다는 장점이 있다. 식물 세포벽의 수용화는 여러가지 방법에 의하여 성취할 수 있다. 즉 화학적인 방법으로서 산이나 알칼리를 사용하거나, 혹은 세포벽 성분을 가수분해할 수 있는 효소를 사용하는 효소적 처리 방법이 있다²⁰. 이 밖에도 물리적인 처리방법으로서 autoclaving, popping, blanching, 압출성형 등 주로 가열처리에 의하여 식물조직의 결합력이 약화되어 수용화가 이루어진다²¹⁻²⁴. 특히 압출성형기는 단시간 고온처리에 의한 가열효과 뿐만 아니라 고압 및 강한 전단력을 동반하여 혼합, 절단, 파쇄, 가압, 성형, 팽화, 건조, 살균 등의 각종 단위 공정을 단일 기계에 의해서 행할 수 있는 다목적 식품 기계로서 각종 식품제조에 활발히 사용되고 있다²⁴⁻²⁷.

식품을 가공하는 과정에서는 각종 부산물(by-products)이 생산된다. 예로서 곡류의 탈곡과정에서 발생하는 외피나 과채류 주스를 생산할 때 착즙 후에 잔류하는 착즙박 등의 부산물은 기본적으로 세포벽의 강한 결합구조를 유지하고 있다. 즉 이들은 대부분 불용성 상태로 존재하므로 자연상태로는 소재로의 이용가능성이 매우 제한된다. 그런데 이들 가공부산물은 많은 섬유질을 포함하고 있어 이를 식품소재화하기 위한 여러가지 가공방법들이 연구되고 있는데, 특히 압출성형은 일반적인 식품가공 공정과 달리 열, 물리적 변형력 및 압력을 동시에 수반하기 때문에 이들 가공 부산물의 활용에 효율적으로 이용될 수 있다^{28,29}.

본 총설에서는 식물조직 가운데 그 구조적 특징이 뚜렷히 구분되는 곡류, 과채류 및 해조류의 세포벽 구성성분의 화학적 특징과 이들의 유기적인 상호결합에 관하여 논하고자 한다. 또한 곡류, 과채류의 가공부산물과 일부 해조류는 사실상 그 이용이 매우 제한되어 있는 저이용 식량자원(underutilized food resources)으로서 이들의 세포벽 구조가 압출성형 공정에 의하여 수용화되는 현상과 이에 따른 물성의 변화를 조사하여 이들의 활용가능성을 제시한다.

식물 세포벽의 구조적 특징

식물조직 가운데 식품의 원료로서 사용되는 것은 과채류, 곡류, 두류 및 해조류 등으로서 이들의 세포벽을 형성하는 대표적인 화학적 구성성분을 Table 1에 나타내었다. 이들 성분들은 크게 세가지 군 즉 (1) microfibril 물질로서 β -(1,4)-glucan 다당류인 셀룰로오스, (2) matrix 물질인 헤미셀룰로오스, 펙틴, 당단백질 그리고 (3) enclusting 물질인 리그닌으로 분류할 수 있다³⁰. 따라서 식물의 세포벽은 일부 리그닌과 단백질 성분을 제외하면 비전분 다당류(non-starch polysaccharides)로서 이루어져 있다는 것을 알 수 있다.

식물 세포벽의 상세한 구조적 특징을 구명하려는 노력은 지난 수십년 동안 식물학자들에 의하여 계속 연구되어온 연구주제로서 식물의 종류, 숙성정도에 따라 다르며 또한 추출방법, 분석방법 등 연구방법에 따라 서로

Table 1. The macromolecular constituents of cell walls from edible plants³⁰

Sources	Tissue types	Main constituents
Fruits and vegetables	Growing cells and parenchymatous tissues	Cellulose, hemicelluloses (e. g. xyloglucan), pectic substances and some glycoproteins
	Lignified tissues	Cellulose, hemicelluloses (e. g. glucuronoxylans), lignin and some glycoproteins
Cereals	Parenchymatous tissues	Arabinoxylans, β -D-glucans, cellulose, phenolic esters, proteins (and pectic substances-rice)
	Lignified tissues	Glucuronoarabinoxylans, cellulose, lignin, phenolic esters and protein
Seeds other than cereals (legumes)	Parenchymatous tissues	Cellulose, hemicelluloses (e. g. xyloglucans), pectic substances and glycoproteins
	Some cells with thickened walls (endosperm)	Galactomannans, cellulose pectic substances and glycoproteins
Brown seaweeds	Multicellular thallus structure	Alginate-cellulose and fucose-containing polysaccharides (e. g. sulphated fucan and sulphated glucuronoxylofucan)

변화가 심하다. 이같은 복잡한 구조적 특성때문에 본 층설에서 세포벽의 미세구조를 전부 다루기는 어려우므로 주로 압축성형의 물리적 변형에 의한 세포벽의 수용화 현상을 다루고자 한다. 따라서 여기서는 식물 세포벽의 구성성분과 이들의 결합적 특징을 개략적으로 논하며, 상세한 것은 문헌을 참조하기 바란다.³²⁻⁴⁹⁾

과채류 (Fruits and vegetables)

쌍떡잎 식물(dicotyledonous plants)의 일종인 과채류의 세포벽을 구성하는 성분의 종류와 함량은 조사된 식물의 종류나 숙성정도에 따라 다르지만 목화(lignification)되어 있지 않은 조직의 경우 건량기준으로 대개 셀룰로오스 35~40%, 헤미셀룰로오스 10~15%, 펙틴 35~40%, 리그닌 5~10%, 단백질 5% 정도의 분포를 보인다.⁵¹⁾ 그런데 실제로 과채류에 가장 많이 존재하는 성분은 수분으로서 습량기준인 경우 수분함량은 세포벽 중량의 약 1/2~2/3을 차지하고 있는데⁵²⁾, 세포벽내에서 수분의 분포는 matrix 성분 특히 펙틴에 의하여 영향을 받는 것으로 보고된 바 있다⁵⁰⁾. 한편 목화된 과채류 조직인 경우에는 펙틴함량이 매우 적은 반면에 리그닌의 함량이 약 15~35%로 증가하는 경향을 보인다.⁵¹⁾

과채류의 경우 대부분 목화되지 않은 상태에서 사용되기 때문에 여기서는 목화되지 않은 과채류 세포조직의 결합을 살펴보기로 한다. Fig. 1(A)는 Keegstra 등⁵³⁾과 Albersheim⁵⁴⁾의 연구결과를 토대로 쌍떡잎식물의 일종인 과채류의 1차 세포벽(primary cell wall)을 개략적으로 나타낸 것이다. 그림에서 xyloglucan은 세포벽내에 존재하는 가장 대표적인 헤미셀룰로오스의 일종이며, rhamnogalacturonan과 arabinogalactan은 각각 펙틴의 주골격(main backbone)과 대표적인 측쇄(side chain)의 구성성분이다⁵¹⁾. 지금까지의 연구결과에 의하면 식물의 종류에 따라 차이가 있기는 하지만 xyloglucan은 xylan 주골격을 통하여 셀룰로오스와 수소결합을 하며, 반면에 펙틴과 xyloglucan은 펙틴의 arabinogalactan 측쇄를 통하여 공유결합에 의하여 서로 연결되어 있는 것으로 알려져 있다^{43,54)}. 즉 펙틴의 rhamnogalacturonan 주골격과 공유결합에 의하여 연결되어 있는 arabinogalactan 측쇄는 펙틴을 다른 세포벽 구성물질, 즉 xyloglucan 및 cellulose와 연결하는 가교(bridge)로서의 역할을 수행한다^{49,55)}. 또한 일부 펙틴은 분자내에 존재하는 음이온의 galacturonic acid에 의해 Ca^{+2} 와 이온결합을 이루고 있는데, 안정적인 이온결합을 이루기 위해서는 약 15~20개 정도의 연속적인 galacturon-

ic acid 잔기를 필요로 한다⁵⁾. 한편 과채류의 세포벽에는 상당한 양의 당단백질이 존재하는데, 가장 대표적인 것으로는 고함량의 hydroxyproline을 포함한 extensin으로서 주로 세포벽 내의 arabinogalactan과 결합되어 있는 것으로 보고되었다^{3,56)}. 일반적으로 당단백질의 분자량은 약 40,000이며, 총 중량 기준으로 약 40%가 당단백질로 이루어져 있다⁵⁾. 세포벽내에는 앞에서 열거한 수소, 공유, 이온결합 이외에도 소수결합이 존재하는데, 주로 펙틴의 galacturonic acid에 에스테르화되어 있는 메탄올 사이에서 발생하며, 일부는 세포벽내의 단백질끼리 혹은 단백질과 리그닌 사이에서 발생한다^{3,57)}. Fig. 1(A)에서 세포벽의 모든 구성성분이 서로 강하게 연결되어 있는 것으로 보이나 실제로 상당부분은 세포벽 내에서 유리된 상태(free state)로 존재하며, 이들이 세포벽 성분의 수용성 정도를 결정한다.

곡류(Cereals)

곡류의 배유(endosperm)와 호분층(aleurone layer)에는 과채류에 비하여 펙틴이 거의 존재하고 있지 않으며 셀룰로오스의 함량도 낮은 경향을 보이는 반면, 상대적으로 주로 arabinoxylan과 β -glucan으로 이루어진 헤미셀룰로오스의 함량이 높다⁵⁸⁾. 그러나 예외적으로 쌀의 경우에는 배유에 약 10% 정도의 펙틴성분이 존재한다고 보고되었다^{59,60)}. 한편 곡류의 외층을 이루는 브랜(bran)부분은 epidermis, hypodermis, crosscells의 3층으로 이루어져 있는데, 상대적으로 셀룰로오스와 리그닌의 함량이 높다. 또한 이 부분에는 배유와 호분층에 비하여 β -glucan의 함량이 낮으며, arabinoxylan이 glucuronic acid이나 4-O-methylglucuronic acid와 연결되어 있다³⁰⁾.

Fig. 1(B)는 곡류와 같은 외떡잎 식물(monocotyledonous plants)의 세포벽 구조를 개략적으로 나타내고 있다. 셀룰로오스 microfibrils은 주로 glucuronoarabinoxylan(GAX)과 혹은 일부 xyloglucan과 연결되어 있으며, 이들은 phenolic ester에 의하여 고정된다. 다른 GAX들은 서로 수소결합에 의하여 연결되어 matrix를 형성하며, GAX의 일부는 상호간의 엉킴이 느슨하여 공간(pores)을 형성하는데 이는 Fig. 1(A)에서의 펙틴과 비슷한 역할을 한다⁶¹⁾. 곡류는 과채류와 비교하여 이같은 화학적 성분의 차이뿐만 아니라 상대적으로 수분함량이 매우 낮아서 구성성분간의 결합이 매우 조밀하다. Brett와 Waldron⁶⁾은 수분이 세포벽 내에서 다당류-수분간의 수소결합을 형성하여 다당류-다당류간의 수소결합을 감소시킴으로서 세포벽의 강도를 약화시킨

다고 하였다. 따라서 곡류는 과채류에 비하여 수용성 성분이 낮은 것으로 알려져 있으며, 또한 화학적, 효소적, 물리적 처리에 의해서도 상대적으로 분해되기 어렵다.

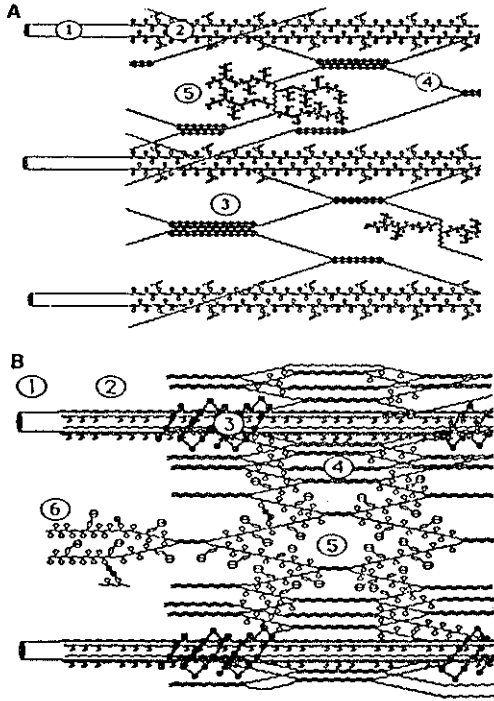


Fig. 1. Comparison of models of primary cell walls of dicot and monocot⁽⁴⁵⁾.

(A) Dicot cell wall : Cellulose microfibrils [①] are coated with a monolayer of xyloglucan [②]. Not shown is additional xyloglucan and arabinoxylan that may span the cellulose microfibrils. The cellulose-xyloglucan framework is embedded in a gel matrix of polygalacturonic acids crosslinked by Ca^{+2} [③]. Additional polymers containing mostly neutral sugars, i.e., typically arabinogalactan [④], constitute the major side groups and are attached to the rhamnosyl units of rhamnogalacturonan [⑤]. Not shown is the hydroxyproline-rich glycoprotein, namely extensin, that can cross-stitch the cellulose fibrillar network. (B) Monocot cell wall : Cellulose microfibrils [①] are coated primarily with glucuronoarabinoxylans (GAX) [②], a portion of which are immobilized by phenolic ester cross stitches [③]. Other acidic arabinoxylans are hydrogen bonded to each other and may span the matrix [④], and additional GAX may define the pores of the matrix [⑤], replacing the function of pectic substances in these species. The highly substituted GAX may be the newly synthesized GAX crosslinked loosely by diferulic acid [⑥]. Not shown is the developmental stage-specific β -D-glucan that is synthesized when cell expansion begins.

해조류(Seaweeds)

해조류는 크게 갈조류(brown algae), 홍조류(red algae) 및 녹조류(green algae)로 분류할 수 있는데 본 총설에서는 갈조류(*Phaeophyta*)의 세포벽 구조를 논하고자 한다. 갈조류의 세포벽도 과채류 및 곡류의 식물 세포벽과 마찬가지로 골격(skeleton)을 이루는 부분은 셀룰로오스로서 결정상(crystalline phase) 상태로 존재하고, 기타 다른 구성성분들은 matrix를 형성하면서 무정

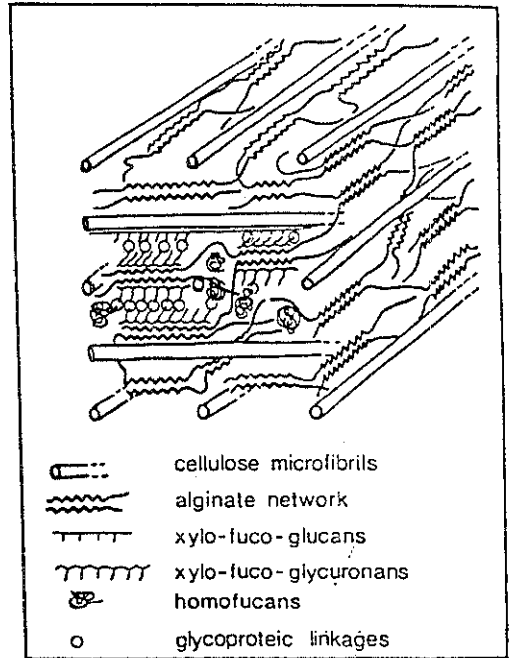


Fig. 2. Hypothetical model of the biochemical organization of cell walls of brown algae⁽⁴⁵⁾.

The cellulose chains are organized in crystalline, parallel microfibrils which lay tangentially to the cell surface and cross each other at a few definite angles (set arbitrarily 90° here). Among the microfibrils or bundles of microfibrils, extends a three-dimensional continuous alginate network, constituted by calcium bridged polygulcuronate blocks and more or less entangled polymannuronate chains. The fucose-containing polymers probably play a role in cross-linking cellulose and alginate. Hypothetically, to the cellulose microfibrils are firmly bound xylofucoglucans (or galactans) in the same way as hemicellulose to cellulose in high plants; to alginate are linked xylofucoglycuronans (ascophyllans) by conformational association between their polyglycuronic backbone and the highly ordered polygulcuronate sequences; eventually, the linkage between alginate and cellulose would involve glycoprotein linkages between the sidechains of ascophyllans and those of xylofucoglucans. Homofucans (fucoidans) are either or both free and part of an acid-labile supramolecular complex with ascophyllan.

형상 (amorphous phase) 상태로 존재하여 전체적으로는 2상체계 (two phase system)를 이루고 있다⁶⁰. 해조류의 세포벽 구성성분의 특징으로는 matrix 성분이 상대적으로 많이 존재하고 있으며, 특히 음이온의 다당류가 다량 포함되어 있다는 점이다. 갈조류의 경우 matrix를 형성하는 대표적인 다당류로는 mannuronic acid와 guluronic acid로 이루어진 알지네이트 (alginate)와 고농도의 fucose를 함유하고 있는 fucoidan이다⁶².

갈조류의 세포벽 구조를 개략적으로 Fig. 2에 나타내었다. 셀룰로오스는 결정성의 microfibrils로서 분포하고 있고 이들 주위에 알지네이트들이 연속적인 그물구조 (continuous network)의 형태로써 덮혀있다. 이들 알지네이트들은 분자내의 polyguluronic acid 부분이 Ca²⁺ 이온들에 의해서, 그리고 polymannuronic acid 부분의 분자상호간 엉킴 (intermolecular entanglements)에 의하여 결합되어 있어 연속적인 그물구조를 형성하게 된다⁶⁴. 한편 xylofucoglucan은 셀룰로오스 microfibrils와 공유결합이나 수소결합에 의하여 연결되어 있는데, 이는 Fig. 1(A)에 나타난 바와 같이 과채류의 세포벽에서 xyloglucan과 셀룰로오스의 연결방식과 비슷하다는 것을 알 수 있다^{52,63}. 또한 xylofucoglycuronan (혹은 ascophyllan)은 알지네이트와 연결되어 있는데, 즉 ascophyllan의 polyglycuronan backbone과 알지네이트의 polyguluronic acid 부분이 서로 결합되어 있다. 알지네이트와 셀룰로오스의 결합은 ascophyllan과 xylofucoglucan의 가지부분이 당단백질 결합 (glycoprotein linkages)을 함으로서 이루어진다⁶⁶. 반면에 Doubet⁶⁵는 homofucan인 fucoidan (F2)의 경우 세포구조에 공유결합으로 연결되어 있지 않다고 보고하였다. 한가

지 유의할 것은 위에서 서술한 갈조류의 세포벽 구조는 다른 식물에서와 마찬가지로 갈조류의 종류나 기타 다른 자연적 요인에 의하여 때로 상당한 구조적 차이가 있다는 점이다. 따라서 세포벽 분해효소나 세포벽 다당류에 대한 항체 연구를 통하여 세부적 구조의 연구가 필요하다^{65,67}. 특히 최근에는 해조류로부터 항종양 등의 특수 생리활성 물질을 생산하는 연구가 진행되고 있는데⁶⁸, 이들의 효율적인 분리를 위해서는 세포벽 구조의 정확한 이해가 필수적이다.

압출성형에 의한 식물 세포벽의 구조 및 물리화학적 특성의 변화

압출성형에서 제공되는 고온, 고압, 고전단력은 식품 원료의 분자적 구조특성을 효율적으로 변화시켜 최종적인 조직특성을 유도할 수 있다. 특히 식품의 가공부산물이나 생산과잉으로 인하여 그 이용이 제한되어 있는 해조류는 압출성형에 따른 조직특성의 변화에 의하여 그 물성과 부가가치가 뚜렷하게 향상될 수 있는 식량자원으로 관주된다. 여기서는 압출성형에 의하여 이들 가공부산물과 해조류와 같은 저이용식량자원의 세포벽 구조가 수용화되는 현상과 수용화에 따른 물성의 변화를 논하기로 한다.

곡류 및 두류 가공부산물

곡류 및 두류의 가공 중에 발생하는 대표적인 가공부산물은 탈곡과정에서 발생하는 껍질 (hull 또는 husk), 브랜 (bran) 또는 대두의 가공부산물인 대두박 등을 들 수 있다. 이들은 풍부한 식이섬유 물질을 포함하고 있

Table 2. Extrusion conditions and physicochemical properties of raw and extruded pea hulls⁶⁹

Samples	Temperature (°C)	Screw speed (rpm)	Water added (% of dry weight)	SME* (kWh/t)
Raw			None	
RF1	100	200	60	115
RF2	100	200	45	192
RF3	100	247	45	232
RF4	100	247	30	278

Samples	Solubility (%)	DF (% of dry matter)		Swelling (ml/g)	Water holding (ml/g)
		Soluble	Insoluble		
Raw	1.4	4.1	87.4	6.0	2.4
RF1	3.5	6.9	82.6	5.6	2.7
RF2	8.5	11.6	77.7	5.2	2.5
RF3	11.5	11.4	77.0	4.9	2.3
RF4	15.3	13.1	73.4	5.0	2.1

*SME : specific mechanical energy

어 적절한 가공처리 후 식품소재로서 많이 사용되고 있다. 가공방법 중 압출성형은 상당한 물리적 변형력을 제공하기 때문에 지금까지 압출성형에 의한 조직의 변화는 강한 결합력을 보유한 곡류의 껍질이나 브랜을 중심으로 활용되어 왔다.

Ralet 등⁶⁹⁾은 완두콩 껍질 (pea hull)을 압출성형한 후 물리화학적 성질의 변화를 연구하였는데, Table 2에는 원료에 대한 압출성형 조건과 압출성형에 따른 용해도, 식이섬유 함량 및 기능성의 변화를 나타내었다. 먼저 압출성형의 기계적 에너지 소모율 (SME)이 증가함에 따라 용해도가 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 압출성형 과정 중에 발생하는 고온, 고압, 고전단력에 의하여 세포벽 성분간의 결합이 이완되면서 수용성 성분의 용출이 용이해지기 때문이다. 따라서 수용성 식이섬유의 함량도 압출성형에 의하여 원료기준으로 68%에서 220%까지 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 팽창도 (swelling)는 압출성형에 의하여 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이는 압출성형에 의하여 구성성분들을 연결하고 있는 섬유질 망사구조 (fiber matrix)가 붕괴됨으로서 입자크기가 감소하기 때문으로 해석되었다. 또한 보수력 (water holding capacity)은 완만한 압출성형 조건 (RF1, RF2)에서 증가하였으나, 격렬한 압출성형 조건 (RF3, RF4)에서는 감소한다는 것을 알 수 있다. RF1과 RF2에서는 입자크기의 감소로 물과 접촉할 수 있는 총표면적이 증가하므로써 보수력이 증가하나, 반면에 RF3과 RF4에서는 구조자체의 붕괴로 인해 보수력이 감소하는 것으로 해석되었다. 이같은 결과는 압출성형의 조건에 따라 세포벽 성분의 물성을 변화시킬 수 있음을 의미하는데, 비슷한 현상이 밀브랜에서도 관찰된 바 있다⁷⁰⁾.

곡류는 셀룰로오스의 함량이 높을수록 조직이 딱딱하지만 반면에 헤미셀룰로오스 성분과 같은 비전분성 다당류 (nonstarch polysaccharides)의 함량이 높을 경우 부드러운 조직을 갖는 것으로 알려져 있다⁷¹⁾. 셀룰로오스는 β -(1,4)-glucan들이 수소결합에 의해서 서로 결합되어 조밀한 결정형 구조 (compact crystalline structure)를 이루나, 헤미셀룰로오스는 셀룰로오스에 비해 상대적으로 결합이 느슨한 무정형 구조 (loose amorphous structure)를 갖는다³⁰⁾. 한편 곡류의 브랜층은 배유와 비교하여 셀룰로오스 성분이 많으므로 압출성형에 의한 변형에 상대적으로 강하게 저항하여 배유보다 수용화 경향이 낮을 것으로 예상할 수 있다.

Björck 등²⁸⁾은 밀가루와 통밀가루의 압출성형에 따른 수용성 식이섬유의 변화를 연구하였는데, 밀가루의

수용성이 압출성형에 의하여 40%에서 50~75%로 증가한 반면에 통밀가루의 경우에는 15%에서 압출성형 후 19~23%로 증가하여 수용화 경향이 밀가루에 미치지 못하였다고 보고하였다. 이는 통밀가루에 함유되어 있는 브랜층이 밀가루보다 상대적으로 압출성형에 의한 수용화가 용이하지 않은 것을 의미한다. Sandberg 등⁷²⁾도 곡류의 브랜은 일반적인 압출성형 조건하에서는 큰 영향을 받지 않는다고 보고하였으며, Artz 등⁷³⁾은 옥수수 브랜에 대하여 그리고 Akiyama 등⁷⁴⁾은 탈지미강 및 귀리브랜에 대하여 비슷한 결과를 발표한 바 있다. 반면에 Aoe 등⁷⁵⁾은 압출성형에 의해서 밀 브랜의 수용성이 압출성형의 조건에 따라 27~55% 증가한다고 하였다. 이같이 압출성형에 의한 곡류 브랜의 수용화 효과는 상당한 차이를 보이는데, 이는 압출성형 조건에 따른 변형력 정도와 브랜의 종류에 따라 수용화 경향이 다르다는 것을 의미하므로 최적 압출성형 조건을 찾는 것이 매우 중요한 연구과제이다.

곡물의 세포벽은 압출성형과 같은 물리적 처리방법 뿐만 아니라 조직의 특성에 따라 화학적 처리⁷⁶⁻⁸⁰⁾나 효소적 처리^{77,81-86)}에 의해서도 수용화될 수 있는데, 가장 적당한 방법을 선택하기 위해서는 공정상의 효율성과 생산소재의 기능성을 고려할 필요가 있다. 곡물의 껍질이나 브랜 성분을 수용화하는데 있어서 압출성형과 기타 다른 처리방법을 병행하는 경우 더욱 효과적인 결과를 기대할 수 있다. Ning 등⁸⁷⁾은 옥수수 브랜을 원료로 하여 산 (6N HCl), 알칼리 (6N NaOH) 처리와 압출성형 (압출온도 120°C, 원료수분함량 50%, 시료주입속도 200g/min, screw속도 350rpm)을 병행하였을 때 수용성성분과 보수력의 변화를 연구하였다. Table 3의 결과에서 알 수 있듯이 단순한 압출성형에 의해서는 옥수수 브랜의 구조적 변화에 큰 영향을 주지 않아 수용화나 보수력이 큰 차이를 보이지 않았다. 주사현미경 (scanning electron microscope)에 의한 표면 관찰결과도

Table 3. Effect of different treatments on water-holding capacity (WHC), soluble fiber content, and insoluble fiber content of corn bran⁸⁷⁾

Corn fiber	WHC (g water/g)	Soluble fiber (%)	Insoluble fiber (%)
Native	2.94	1.38	81.27
Extruded	2.56	1.39	74.22
Acid-treated	4.62	1.70	90.57
Acid-treated -extruded	4.34	2.13	84.31
Alkaline-treated	3.64	3.36	77.01
Alkaline-treated -extruded	3.45	3.64	73.37

매끄럽고 치밀한 구조의 비압출성형 원료 표면은 압출 성형 후에도 큰 변화를 보이지 않았다. 반면에 산이나 알카리를 처리하면 옥수수브랜의 수용화가 크게 증가하는 경향을 보였다. 즉 산이나 알카리의 작용에 의하여 주로 헤미셀룰로오스 부분이 쉽게 분해되는데, 결과적으로 분자크기의 감소에 따른 운동성(mobility) 증가로 물과의 결합이 용이해져 용해도가 증가하게 된다. 이같은 결과는 알카리 처리하에서 압출성형을 행하는 경우 옥수수 브랜으로부터 효율적으로 수용성 헤미셀룰로오스를 용출시킬 수 있었다는 Yamaguchi 등¹⁰⁰⁾의 보고와 일치하였다.

한편 물리적 성질의 변화를 살펴보면 Table 3에 나타낸 것 처럼 산이나 알카리 처리에 의하여 보수력이 증가하는 것을 알 수 있는데, 화학적 작용에 의하여 표면 기공(surface porosity)이 증가하고 결과적으로 섬유질 망상구조(fiber matrix) 사이로 수분의 침투와 흡착이 용이해지기 때문이다. 이같은 표면구조의 변화는 물성에 대한 영향 뿐만아니라 인체의 장내 미생물에 의한 이용도에도 영향을 준다⁹⁹⁾. Gould 등⁹⁰⁾도 밀, 옥수수 및 쌀 브랜에 알카리성 과산화수소(hydrogen peroxide) 처리를 한 경우 보수력이 크게 증가하였다고 보고하였다. 한편 Table 3에서 알카리 처리의 경우 산처리와 비교하여 수용성 성분은 증가하는 반면에 보수력은 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 알카리 처리에 의하여 섬유질 망상구조의 분해정도가 적정규모 이상으로 증가하여 수분을 포집(entrapment)하는 능력이 상대적으로 감소하였기 때문으로 해석된다. 또한 Table 3에서는 화학적 처리와 압출성형을 병행하는 경우 수용성 성분이 증가하는 반면에 보수력은 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 산이나 알카리 처리에 의하여 확장된 표면기공이 압출성형 공정시 전단력과 고압에 의해 변형되어 섬유구조가 분해되면서 수용성은 증가하나 섬유구조의 붕괴에 따라 수분의 포집능력은 감소하기 때문이다. 이러한 결과는 식이섬유의 입자크기 감소가 보수력을 저하시킨다는 Cadden¹⁰¹⁾의 보고와 일치한다.

한편 입자크기는 식이섬유의 생리특성⁹²⁻⁹⁶⁾, 제품특성⁹⁷⁻¹⁰⁰⁾ 및 공정특성¹⁰¹⁾에 큰 영향을 미치는 중요한 인자로서 보고된 바 있다. Akiyama 등⁷⁹⁾과 Hayakawa 등¹⁰²⁾은 밀, 보리, 옥수수 브랜을 압출성형하였을 경우 식이섬유의 장내통과시간, 무기질 흡수 등의 생리작용이 영향을 받으며, 이러한 변화는 압출성형에 의한 식이섬유의 입자크기 변화와 밀접한 관계가 있다고 보고하였다. 따라서 압출성형은 1차적으로는 식물세포벽의 식이섬유로서의 기능성을 변화시키고 결과적으로는

생리적 기능성, 가공특성 등에도 큰 영향을 주게 된다^{29,103)}. 또한 식이섬유 성분의 첨가는 압출성형의 중요한 물리적 현상인 팽창(expansion)에도 영향을 미쳐 압출물의 형상, 크기, 압출물 표면의 구멍수(aperture number) 등은 결정한다¹⁰⁴⁻¹⁰⁸⁾. 한편 압출성형 중의 에너지 소모도 식이섬유의 첨가정도에 의하여 영향을 받으므로¹⁰⁹⁾, 앞으로 수용성 성분의 함량과 압출물의 팽창특성과의 상관관계에 관한 연구가 필요하다.

식이섬유를 식품에 첨가하는 경우 영양적인 보완효과라는 장점이 있는 반면에 색깔의 변화, 조직감과 관능성의 저하 등과 같은 문제점이 발생한다⁷⁷⁾. 또한 압출성형에 의한 곡류 브랜의 수용화는 기능성의 변화뿐만이 아니라 그 관능성에도 영향을 미치게 된다. Fulger와 Bradbury¹¹⁰⁾는 옥수수 브랜을 압출성형하였을 경우 수용성의 증가로 관능특성이 향상되었다고 보고하였으며, 이는 완두콩껍질과 사과박을 효소처리하여 수용성 성분을 증가시킴으로서 관능성과 가공성이 증가하였다는 Caprez 등¹¹¹⁾의 결과와도 일치하였다. 따라서 압출성형에 의한 수용화와 이에 따른 기능성의 변화는 결과적으로 관능성에도 긍정적인 효과를 줄 수 있다.

과채류 가공부산물

과채류의 세포벽에 대한 압출성형의 수용화 효과는 가공공정 후에 발생하는 가공부산물의 효율적 이용이라는 측면에서 연구가 이루어져 왔다¹¹²⁾. 예를 들어 사과주스 생산 과정에서 수용성 성분의 대부분은 주스로 용출되기 때문에 사과박은 주로 불용성 상태로 남게 된다¹¹³⁾. 마찬가지로 사탕무를 이용하여 설탕을 생산하는 경우에도 수용성성분을 제거하면 불용성의 사탕무(sugar beet)박을 얻게 된다¹¹⁴⁾. 이들 사과박, 사탕무박 또는 유사한 공정 후에 발생하는 과채류 부산물에는 다량의 불용성 섬유질 성분이 포함되어 있는데, 이들의 불용성은 분자 자체의 구조적인 특성이 아니라 서로간의 밀접한 결합 때문이다. 이러한 불용성 섬유질의 기능성은 다양화하기 위해서는 결합구조의 이완을 통한 수용화의 노력이 필요한데, 압출성형은 이러한 불용성 성분의 수용화에 효율적으로 사용되어 왔다.

Ralet 등¹¹⁵⁾은 여러가지 압출성형 조건(처리온도범위 100~180°C, 스크류 회전속도 150~250rpm, 사탕무박에 대한 수분 20~30%)에 따른 사탕무박의 수용성 및 물리화학적 특성의 변화에 관하여 보고하였는데, 그 결과를 Table 4에 요약하였다. 먼저 사탕무박 원료의 용해도(16.6%)가 압출성형 후에 24.4~47.5%로 증가한 것을 알 수 있다. 압출성형 조건 가운데 압출온도보

Table 4. Extrusion conditions and physicochemical properties of raw and extruded sugar-beet pulp¹¹⁶⁾

Samples	Temperature (°C)	Screw speed (rpm)	Water added (% of dry weight)	SME* (kWh/t)
Raw				
B1	100	150	30	155
B2	180	150	30	194
B3	100	250	30	246
B4	100	150	20	211
B5	180	250	20	271
B6	180	250	20	287

Samples	Solubility (%)	Swelling (ml/g)	Water holding capacity (ml/g)	Cation-exchange capacity (meq/g)
Raw	16.6	19.3	32.9	0.44
B1	24.4	17.1	nd**	nd
B2	35.7	18.7	nd	nd
B3	37.5	18.9	nd	nd
B4	37.9	19.8	nd	nd
B5	45.2	14.4	28.2	0.39
B6	47.5	13.4	nd	nd

*SME : specific mechanical energy

**nd : not determined

다는 screw speed의 변화에 따른 전단력의 차이가 수용화에 더 큰 영향을 주는 것으로 밝혀졌다. 또한 Table 4에서 팽화 (swelling) 정도가 감소하는 것을 알 수 있는데 이는 압출성형에 의하여 세포벽 성분이 용출되면서 세포벽의 응집성 (cohesiveness)이 부분적으로 저하되기 때문이다. 반면에 보수력과 양이온 교환 능력 (cation exchange capacity)은 큰 차이를 보이지 않았다. 한편 사탕무의 압출성형에 의한 용해도는 완두콩 껍질⁶⁹⁾보다 높은 것으로 나타났다. 이는 근본적인 세포벽 구조의 차이로서 사탕무의 경우에는 주로 약한 구조적 강도를 갖는 1차세포벽 (primary cell wall)으로 이루어져 있어 압출성형에 매우 민감하다. 이 경우 펙틴의 가지부분에 해당하는 rhamnolacturonic hairy region이 주로 분해되는데, 압출성형에 의한 펙틴추출은 산추출법에 비해 수율은 높은 반면에 펙틴의 중합도 (degree of polymerization) 즉 분자량은 감소하는 것으로 나타났다¹¹⁶⁾. 이와는 달리 완두콩 껍질이나 밀브랜 등은 상대적으로 2차세포벽 (secondary cell wall)이 발달하여 압출성형 공정에 덜 민감하게 반응하여 구조적 붕괴가 용이하지 않다⁶⁹⁾.

Arrigoni 등¹¹⁷⁾은 사과박을 압출성형할 경우 보수력이 2.3ml/g에서 3.0ml/g으로 증가한다고 보고하였다. 그러나 감자껍질의 경우에는 압출성형에 의하여 오히려 보수력이 감소된다고 보고된 바 있다^{118,119)}. 즉 식물의 종류에 따라 보수력에 미치는 압출성형의 효과가 매우 다른 것을 알 수 있다. 이는 식물조직의 결합방식과 구성성분의 차이에 기인한 것으로 추측되는데, 압

출성형 정도, 식물조직의 결합정도 및 결과적인 기능성의 변화에 대한 좀 더 체계적인 연구가 필요하다.

과채류의 세포벽은 곡류와 마찬가지로 cellulases, hemicellulases, pectinases 등을 이용한 효소적 처리¹²⁰⁻¹²²⁾나 화학적 처리^{123,124)} 방법에 의하여 수용화될 수 있다. 효소에 의한 세포벽 성분의 가수분해는 일반적인 화학적 처리방법과 비교하여 각 효소의 기질에 대한 선택적 분해를 기대할 수 있어서 전체적인 가수분해의 정도나 생산되는 수용성 성분의 기능성 정도를 조절할 수 있다. 이러한 효소작용을 위해서는 효소가 기질에 용이하게 접근할 수 있는 구조를 필요로 한다^{69,125,126)}. 곡류의 껍질이나 브랜은 다량의 셀룰로오스로 구조 자체가 조밀한 반면에 과채류의 경우에는 셀룰로오스 성분보다 펙틴과 헤미셀룰로오스의 함량이 많아서 상대적으로 조직 자체가 느슨하기 때문에 곡류에 비해 효소에 의한 수용화 방법이 효율적으로 사용될 수 있다. 또한 곡류의 경우와 마찬가지로 과채류의 경우에도 효소적 처리를 압출성형과 병행하면 일부 단단한 조직을 갖는 세포벽도 효율적으로 수용화할 수 있을 것으로 예상된다.

해조류

지금까지 압출성형에 따른 식물조직의 변환에 관한 연구는 주로 곡류와 일부 과채류 가공부산물에 대하여 이루어져 왔다. 이에 반해 해조류 조직의 수용화에 관한 연구는 주로 화학적 및 효소적 처리에 의하여 세포벽으로부터 기능성 다당류인 알지네이트, 카라기난,

한천 등을 추출하는 연구가 주종을 이루어 왔으며¹¹⁷⁾ 필자들의 문헌조사에서는 아직 해조류에 대한 압출성형 효과를 찾아볼 수 없었다. 이는 한국, 일본, 중국 등 동양의 일부국가들 제외하면 해조류를 생식으로 이용하기 보다는 기능성 생물소재를 생산하는 원료로서 인식하기 때문이다¹¹⁸⁾. 물론 최근에는 해조류의 영양학적 장점이 인식되면서 서방국가에서도 이를 이용한 각종 가공식품의 개발이 활발히 추진되고 있다¹¹⁹⁾.

곡류나 과채류의 세포벽 수용화에 있어 압출성형이 매우 효율적인 시스템인 것을 고려할 때 해조류의 경우에도 압출성형에 의한 세포벽 구조의 변환을 통하여 그 물성을 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 곡류나 과채류의 가공부산물과는 달리 해조류는 생산량이 수요를 훨씬 초과한다는 점에서 대표적인 저이용 식량자원의 하나로서 분류할 수 있는데, 압출성형에 의한 물성의 개량은 해조류의 식품소재로서의 이용을 더욱 확대할 수 있을 것으로 예상된다.

결 론

압출성형의 식물 세포벽에 대한 가장 뚜렷한 공정효과는 구성성분의 결합구조를 약화시켜 수용화시킨다는 것이다. 이같은 수용화 효과는 지금까지의 연구보고를 종합하면 다음의 세가지 즉 (1) 수용성 성분의 증가에 의한 물성의 변화와 이에 따른 가공특성의 다양화, (2) 수용성 식이섬유 성분의 증가에 따른 생리활성의 다양화, (3) 관능특성의 향상으로 요약될 수 있다. 한편 압출성형의 수용화에 대한 뚜렷한 효과에 비하여 압출성형 후의 물성, 즉 보수력, 양이온 교환능력 등의 경우에는 식물의 세포벽 구조나 압출성형 정도에 따라 그 경향이 매우 다르다. 따라서 식물 세포벽의 3차원적인 상세한 구조적 특징의 이해와 압출성형에 따른 구조적 변화에 의해 결정되는 수용화 및 물성과의 상호유기적인 상관관계는 매우 중요한 연구과제이다. 식이섬유를 이용하여 식품을 개발하는 경우 고려해야 하는 가장 중요한 요인은 용해도이다^{11,112-115)}. 일반적으로 불용성 성분을 포함하는 식이섬유 소재는 완전한 수용화란 요구하지 않는 시리얼, 빵, 쿠키 등의 식품에 이용되며, 각종 검류 등을 포함한 수용성 식이섬유는 뛰어난 용해도를 필요로 하는 음료, 수프, 젤 식품 등에 광범위하게 사용된다¹¹⁶⁾. 식이섬유는 용해도나 분자량에 따라 식이섬유로서의 생리효과가 상이함으로 식이섬유 제품을 다변화하기 위한 소재의 개발이 필요하다. 따라서 압출성형의 수용화 효과를 적용하면 각종 저이

용 식량자원으로부터 기능성이 향상된 식이섬유 소재를 생산할 수 있을 것으로 기대된다.

문 헌

1. Aspinnall, G. O. : Chemistry of cell wall polysaccharides. In "The biochemistry of plants" Preiss, J. (ed.), Academic Press, New York, p.473 (1980)
2. Dey, P. M. and Brinson, K. : Plant cell walls. *Adv. Carbohydr. Chem. Biochem.*, **42**, 265 (1984)
3. Brett, C. and Waldron, K. : *Physiology and biochemistry of plant cell walls*. Unwin Hyman, London, p.4 (1990)
4. Van Buren, J. P. : The chemistry of texture in fruits and vegetables. *J. Tex. Stud.*, **10**, 1 (1979)
5. Brady, C. J. : Fruit ripening. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, **38**, 155 (1989)
6. Shewfelt, R. L. : Quality of fruits and vegetables. *Food Technol.*, **44** (6), 99 (1990)
7. Lorenz, K. and Johnsson, J. A. : Starch hydrolysis under high temperature and pressures. *Cereal Chem.*, **49**, 616 (1972)
8. Schulerud, A. : The baking of cereals. In "Physical, chemical and biological changes in food caused by thermal processing" Applied Science Publishers, London, p.290 (1977)
9. Matthee, V. and Appledorf, H. : Effect of cooking on vegetable fiber. *J. Food Sci.*, **43**, 1344 (1978)
10. Nyman, M., Pålsson, K. E. and Asp, N. G. : Effects of processing on dietary fiber in vegetables. *Lebensm. Wiss. Technol.*, **20**, 29 (1987)
11. Selvendran, R. R., Stevens, B. J. H. and Du Pont, M. S. : Dietary fiber : chemistry, analysis, and properties. *Adv. Food Res.*, **31**, 117 (1987)
12. Melton, L. D. : A review of recent development in dietary fibers with emphasis on the plant cell walls of fruit and vegetables. *Food Technol. (New Zealand)*, **1992**, 26 (1992)
13. Theander, O., Westerlund, E. and Aman, P. : Structure and components of dietary fiber. *Cereal Food World*, **38** (3), 135 (1993)
14. Scheneeman, B. O. : Soluble vs insoluble fiber—different physiological responses. *Food Technol.*, **41** (2), 81 (1987)
15. Scheneeman, B. O. : Dietary fiber. *Food Technol.*, **43** (10), 133 (1989)
16. Kritchevsky, D. : Dietary fiber. *Ann. Rev. Nutr.*, **8**, 301 (1988)
17. Ebihara, K. and Kiriyama, S. : Physico-chemical property and physiological function of dietary fiber. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, **37**, 916 (1990)
18. Schweizer, T. F. and Wüsch, P. : The physiological and nutritional importance of dietary fibre. *Experientia*, **47**, 181 (1991)
19. Asp, N. G., Björck, I. and Nyman, M. : Physiological effects of cereal dietary fibre. *Carbohydr. Polym.*, **21**, 183 (1993)

20. Renard, C. M. G. C., Vorgen, A. G. J., Thibault, J. F. and Pilnik, W. : Comparison between enzymatically and chemically extracted pectins from apple cell walls. *Anim. Feed Sci. Technol.*, **32**, 69(1991)
21. Siljeström, M., Westerlund, E., Björck, I., Holm, J., Asp, N. G. and Theander, O. : The effects of various thermal processes on dietary fibre and starch content of whole grain wheat and white flour. *J. Cereal Sci.*, **4**, 315(1986)
22. Nyman, M., Schweizer, T. F., Pålsson, K. E. and Asp, N. G. : Effects of processing on fermentation of dietary fibre in vegetables by rats. *Lebensm. Wiss. Technol.*, **24**, 433(1991)
23. Guillon, F., Barry, J. L. and Thibault, J. F. : Effect of autoclaving sugar-beet fibre on its physico-chemical properties and its *in vitro* degradation by human fecal bacteria. *J. Sci. Food Agric.*, **60**, 69(1992)
24. Harper, J. M. : *Extrusion of foods*. Vol I. CRC Press, Boca Raton, FL., p.1(1981)
25. Linko, P., Colonna, P. and Mercier, C. : High-temperature, short-time extrusion cooking. In "Advances in cereal science and technology" Pomeranz, Y.(ed.), AACC, St. Paul, MN., Vol 4., p.145(1981)
26. 최홍식, 김철진 : 곡류식품가공을 위한 extrusion 공정. *식품과학*, **14**, 26(1981)
27. Wiedman, W. and Strobel, E. : Processing and economic advantages of extrusion cooking in comparison with conventional processing in the food industry. In "Extrusion technology for the food industry" O'Connor, C.(ed.), Elsevier Applied Science, New York, p. 132(1987)
28. Varo, P., Laine, R. and Koivistoinen, P. : Effect of heat treatment on dietary fiber : interlaboratory study. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.*, **66**, 933(1983)
29. Björck, I., Nyman, M. and Asp, N. G. : Extrusion cooking and dietary fiber : effects on dietary content and on degradation in the rat intestinal tract. *Cereal Chem.*, **61**, 174(1984)
30. Selvendran, R. R. : The chemistry of plant cell walls. In "Dietary fiber" Birch, G. G. and Parker, E. J.(eds.), Applied Science Publishing, London, p.108(1983)
31. Northcote, D. H. : Chemistry of plant cell wall. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, **23**, 113(1972)
32. Hall, M. A. : *Plant structure, function and adaptation*. Macmillan, London, p.49(1976)
33. Darvill, A., McNeil, M., Albersheim, P. and Delmer, D. P. : The primary cell walls of flowering plant. In "The biochemistry of plants" Tolbert, N. E.(ed.), Academic Press, New York, p.91(1980)
34. Selvendran, R. R. and O'Neil, M. A. : Plant glycoproteins. *Encycl. Plant Physiol. New Ser.*, **13A**, 515(1982)
35. Lamport, D. T. A. and Epstein, L. : A new model for the primary cell wall : a concatenated extensin-cellulose network. *Curr. Topics Plant Biochem. Physiol.*, **2**, 73(1983)
36. Dugger, W. M. and Bartnicki-Garcia, S. : *Structure, function and biosynthesis of plant cell walls*. American Society of Plant Physiologists, Rockville, MD.(1984)
37. Jarvis, M. C. : Structure and properties of pectin gels in plant cell walls. *Plant Cell Env.*, **7**, 134(1984)
38. McNeil, M., Darville, A. G., Fry, S. C. and Albersheim, P. : Structure and function of primary cell walls of plants. *Ann. Rev. Biochem.*, **53**, 625(1984)
39. Mackie, W. : *Polysaccharides-topics in structure and morphology*. MacMillan, London, p.73(1985)
40. Brett, C. T. and Hillman, J. R. : *The biochemistry of plant cell walls*. Society of Experimental Biology. Cambridge University Press, Cambridge(1985)
41. Selvendran, R. R. : Developments in the chemistry and biochemistry of pectin and hemicellulosic polymers. *J. Cell Sci. Suppl.*, **2**, 51(1985)
42. Fry, S. C. : Cross-linking of matrix polymers in the growing cell walls of angiosperms. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, **37**, 165(1986)
43. John, M. A. and Dey, P. M. : Post harvest changes of fruit cell wall. *Adv. Food Res.*, **30**, 139(1986)
44. York, W. S., Darvill, M., McNeil, M., Stevenson, T. T. and Albersheim, P. : Isolation and characterization of plant cell walls and cell wall components. *Met. Enzymol.*, **118**, 3(1986)
45. Carpita, N. C. : The biochemistry of growing cells. In "Physiology of cell expansion during plant growth" Cosgrove, D. J. and Knievel, D. P.(eds.), Academic Society of Plant Physiology, Rockville, MD., p.28(1987)
46. Bacic, A., Harris, P. J. and Stone, B. A. : Structure and function of plant cell walls. In "The biochemistry of plants" Preiss, J.(ed.), Academic Press, New York, p. 297(1988)
47. Hayashi, T. : Xyloglucans in the primary cell wall. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, **40**, 139(1989)
48. Chang, C. Y., Tsai, Y. R. and Chang, W. H. : Models for the interactions between pectin molecules and other cell-wall constituents in vegetable tissues. *Food Chem.*, **48**, 145(1993)
49. Hwang, J., Pyun, Y. R. and Kokini, J. L. : Sidechains of pectins : some thoughts on their role in plant cell walls and foods. *Food Hydrocoll.*, **7**, 39(1993)
50. Haard, N. F. : Characteristics of edible plant tissues. In "Food chemistry" Fennema, O. R.(ed.), Marcel Dekker, Inc., New York, p.860(1985)
51. Azuma, J. I., Takahashi, N. and Koshijima, T. : Isolation and characterization of lignin-carbohydrate complex from milled-wood lignin fraction of *Pinus densiflora*. *Carbohydr. Res.*, **93**, 91(1981)
52. Keegstra, K., Talmadge, K. W., Bauer, W. D. and Albersheim, P. : The structure of plant cell walls. III. A model of the walls of suspension-cultured sycamore cells based on the interactions of the macromolecular components. *Plant Physiol.*, **51**, 188(1973)
53. Albersheim, P. : The primary cell wall and central control of elongation growth. In "Plant carbohydrate chemistry" Pridham, J. B.(ed.), Academic Press, New York, p.145(1974)
54. Albersheim, P. : The walls of growing plant cells. *Scientific American*, **232**, 81(1975)

55. Talmadge, K. W., Keegstra, K., Bauer, W. D. and Albersheim, P. : The structure of plant cell walls. 1. The macromolecular components of the walls of suspension cultured sycamore cells with a detailed analysis of the pectic polysaccharides. *Plant Physiol.*, **51**, 158 (1973)
56. Clarke, A. E., Anderson, R. L. and Stone, B. A. : Form and function of arabinogalactans and arabinogalactan-proteins. *Phytochemistry*, **18**, 521 (1979)
57. Rolin, C. and DeVries, J. : Pectin. In "Food gels" Harris, P.(ed.), Elsevier Applied Science, New York, p.422 (1990)
58. Burke, D., Kaufman, P., McNeil, M. and Albersheim, P. : The structure of plant cell walls. VI. A survey of the walls of suspension-cultured monocots. *Physiol.*, **54**, 109 (1974)
59. Shibuya, N. and Iwasaki, T. : Polysaccharides and glycoproteins in the rice endosperm cell wall. *Agri. Biol. Chem.*, **42**, 2259 (1978)
60. Shibuya, N. and Misaki, A. : Structure of hemicellulose isolated from rice endosperm cell wall : mode of linkages and sequences in xyloglucan, β -glucan and arabinoxylan. *Agric. Biol. Chem.*, **42**, 2267 (1978)
61. Carpita, N. C. : Cell wall development in maize coleoptiles. *Plant Physiol.*, **76**, 205 (1984)
62. Ito, K. and Hori, K. : Seaweed : Chemical composition and potential food uses. *Food Reviews International*, **5**, 101 (1989)
63. Kloareg, B., Demarty, M. and Mabeau, S. : Polyanionic characteristics of purified sulfated homofucans from brown algae. *Int. J. Biol. Macromol.*, **8**, 380 (1986)
64. Kloareg, B. and Quatrano, R. S. : Structure of the cell walls of marine algae and ecophysiological functions of the matrix polysaccharides. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.*, **26**, 259 (1988)
65. Doubet, R. S. : Ph.D. Dissertation, Oregon State University, Corvallis, OR., U. S. A. (1983)
66. Medcalf, D. G. : *Carbohydrate sulfates*. ACS Symp. Ser., **77**, p.225 (1978)
67. Vreeland, V. and Laetsch, W. M. : *Biotechnology of marine polysaccharides*. Hemisphere Publishing Co., New York, p.300 (1985)
68. Yoshizawa, Y., Enomoto, A., Todoh, H., Ametani, A. and Kaminogawa, C. : Activation of marine macrophages by polysaccharide fractions from marine algae (*Porphyra yezoensis*). *Biosci. Biotech. Biochem.*, **57**, 1862 (1993)
69. Ralet, M. C., Della Valle, G. and Thibault, J. F. : Raw and extruded fibre from pea hulls. Part I : Composition and physico-chemical properties. *Carbohydr. Polym.*, **20**, 17 (1993)
70. Ralet, M. C., Thibault, J. F. and Della Valle, G. : Influence of extrusion-cooking on the structure and properties of wheat bran. *J. Cereal Sci.*, **11**, 249 (1990)
71. Kavitha, R. and Chandrashekar, A. : Content and composition of nonstarch polysaccharides in endosperms of sorghums varying hardness. *Cereal Chem.*, **69**, 440 (1992)
72. Sandberg, A., Andersson, H., Kivist, B. and Sandström, B. : Extrusion cooking of a high-fibre cereal product. 1. Effects on digestibility and absorption of protein, fat, starch, dietary fibre and phytate in the small intestine. *Brit. J. Nutr.*, **55**, 245 (1986)
73. Artz, W. E., Warren, C. and Villota, R. : Twin-screw extrusion modification of a corn fiber and corn starch extruded blend. *J. Food Sci.*, **55**, 746 (1990)
74. Akiyama, T., Hayakawa, T., Nakamura, K., Takita, T. and Innami, S. : Influence of extrusion cooking of cereal brans on their properties and physiological action in rats. *J. Japan Soc. Nutr. Food Sci.*, **44**, 19 (1991)
75. Aoe, S., Nakaoka, M., Ido, K., Tamai, Y., Ohta, F. and Ayano, Y. : Availability of dietary fiber in extruded wheat bran and apparent digestibility in rats of coexisting nutrients. *Cereal Chem.*, **66**, 252 (1989)
76. Conrad, E. : Process for the preparation of a hydrolyzed product from whole wheat. U. S. Patent 4,282, 319 (1981)
77. Rasco, B. A., Borhan, M., Yegge, J. M., Lee, M. H., Siffing, K. and Bruinsma, B. : Evaluation of enzyme and chemically treated wheat bran ingredients in yeast-raised breads. *Cereal Chem.*, **68**, 295 (1991)
78. Shiba, K., Ijitsu, T., Hara, H. and Okada, K. : Preparation and characterization of water-soluble hemicellulose (arabinoxylan) from wheat bran. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, **39**, 1147 (1992)
79. Aoe, S., Oda, T., Tatsumi, K., Yamauchi, M. and Ayano, Y. : Extraction of soluble dietary fibers from defatted rice bran. *Cereal Chem.*, **70**, 423 (1993)
80. Yamada, H., Itoh, K., Morishita, Y. and Taniguchi, H. : Advances in cereal chemistry and technology in Japan. *Cereal Chem.*, **38**, 490 (1993)
81. Morley, R. C. and Sharma, S. C. : Dietary fiber products and method of manufacture. U. S. Patent 4,565, 702 (1986)
82. Sharma, R. C. : Dietary fiber composition and process of manufacture. U. S. Patent 4,619,831 (1986)
83. Fulger, C. V. and Gum, E. K. : All natural, ready-to-eat enzyme-saccharified cereal derived from whole grain cereal. U. S. Patent 4,710,386 (1987)
84. Holmgren, L. : Method of preparing a water absorbing dietary fiber product. U. S. Patent 4,765,944 (1988)
85. Mulder, M. M., Hotten, P. M., Cowie, E., Lomax, J. A. and Chesson, A. : Digestion of wheat aleurone by commercial polysaccharides. *Anim. Feed. Sci. Technol.*, **32**, 185 (1991)
86. Düsterhöft, E. M., Bonte, A. W. and Voragen, A. G. J. : Solubilization of non-starch polysaccharides from oil-seed meals by polysaccharide-degrading enzymes. *J. Sci. Food Agric.*, **63**, 211 (1993)
87. Ning, L., Villota, R. and Artz, W. E. : Modification of corn fiber through chemical treatments in combination with twin-screw extruder. *Cereal Chem.*, **68**, 632 (1991)
88. Yamaguchi, F., Shimizu, N., Kawada, M., Takagi, Y. and Maeda, S. : Extraction of hemicellulose in alkaline extruder. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, **39**,

- 625 (1992)
89. Stevens, B. J. H., Selvendran, P. P., Bayliss, C. E. and Turner, R. : Degradation of cell wall material of apple and wheat bran by human faecal bacteria *in vitro*. *J. Sci. Food Agric.*, **44**, 151 (1988)
 90. Gould, J. M., Jasberg, B. K., Dexter, L. B., Hsu, J. T., Lewis, S. M. and Fahey, G. C. : High-fiber, noncaloric flour substitute for baked foods. Properties of alkaline peroxide-treated lignocellulose. *Cereal Chem.*, **66**, 201 (1989)
 91. Cadden, A. M. : Comparative effects of particle size reduction on physical structure and water binding properties of several plant fibers. *J. Food Sci.*, **52**, 1595 (1987)
 92. Brodribb, A. J. M and Grovers, C. : Effect of bran particle size on stool weight. *Gut*, **19**, 60 (1978)
 93. Mongeau, R. and Brassard, R. : Insoluble dietary fiber from breakfast cereals and brans : bile salt binding and water-holding capacity in relation to particle size. *Cereal Chem.*, **59**, 413 (1982)
 94. Dreher, M. L. : Dietary fiber ingredients and food uses. In "Handbook of dietary fiber" Dreher, M. L. (ed.), Marcel Dekker, New York, p.149 (1987)
 95. Klopfenstein, C. F. : Nutritional properties of coarse and fine sugar beet fiber and hard red wheat bran. I. Effects on rat serum and liver cholesterol and triglycerides and on fecal characteristics. *Cereal Chem.*, **67**, 538 (1990)
 96. Cherbut, C., Salvador, V., Barry, J. L., Doulay, F. and Delort-Laval, J. : Dietary fibre on intestinal transit in man : involvement of their physicochemical and fermentative properties. *Food Hydrocoll.*, **5**, 15 (1991)
 97. Pomeranz, Y., Shogren, M., Finney, K. F. and Bechtel, D. B. : Fiber in breadmaking-effect on functional properties. *Cereal Chem.*, **54**, 25 (1977)
 98. Galliard, T. and Gallagher, D. M. : The effect of wheat bran particle size and storage period on bran flavor and baking quality of bran/flour blends. *J. Cereal Sci.*, **8**, 147 (1988)
 99. Lai, C. S., Hoseney, R. C. and Davis, A. B. : Effects of wheat bran in breadmaking. *Cereal Chem.*, **66**, 217 (1989)
 100. Posner, E. S. : Mechanical separation of a high dietary fiber fraction from wheat bran. *Cereal Foods World*, **36**, 553 (1991)
 101. Hsieh, F., Huff, H. E., Lue, S. and Stringer, L. : Twin-screw extrusion of sugar beet fiber and corn meal. *Lebensm. Wiss. Technol.*, **24**, 495 (1991)
 102. Hayakawa, T., Nakamura, K., Takita, T., Innami, S., Yamada, K., Yoshioka, T. and Kawamura, S. : Influence of extrusion on the physiological effects of brans in rats. *Agric. Biol. Chem.*, **54**, 1285 (1990)
 103. Heinrich, G. : Enrichment of bakery product with fibre. *Brot & Backwaren*, **37**, 277 (1989)
 104. Andersson, Y., Hedlund, B., Jonsson, L. and Svensson, S. : Extrusion cooking of a high-fiber cereal product with crisp bread character. *Cereal Chem.*, **58**, 370 (1981)
 105. Moore, D., Sanei, A., Hecke, E. and Bouvier, J. M. : Effect of ingredients on physical/structural properties of extrudates. *J. Food Sci.*, **55**, 1383 (1990)
 106. Lue, S., Hsieh, F., Peng, I. C. and Huff, H. E. : Expansion of corn extrudates containing dietary fiber : a microstructure study. *Lebensm. Wiss. Technol.*, **23**, 165 (1990)
 107. Lue, S., Hsieh, F. and Huff, H. E. : Extrusion cooking of corn meal and sugar beet fiber : effects on expansion properties, starch gelatinization, and dietary fiber content. *Cereal Chem.*, **68**, 227 (1991)
 108. Huber, G. R. : Carbohydrates in extrusion processing. *Food Technol.*, **45**, 160 (1991)
 109. Grenus, K. M., Hsieh, F. and Huff, H. E. : Extrusion and extrudate properties of rice flour. *J. Food Eng.*, **18**, 229 (1993)
 110. Camire, M. E., Camire, A. and Krumhar, K. : Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Critic. Rev. Food Sci. Nutr.*, **29**, 35 (1990)
 111. Fulger, C. V. and Bradbury, A. G. : Modification of bran by extrusion. U. S. Patent 4,500,558 (1985)
 112. Caprez, A., Arrigoni, E., Neukom, H. and Amado, R. : Improvement of the sensory properties of two different dietary fibre sources through enzymatic modification. *Lebensm. Wiss. Technol.*, **20**, 245 (1987)
 113. Thibault, J. F., Valle, G. D. and Ralet, M. C. : Process for treatment of products rich in plant cell walls, especially rich in pectins, these pectins, the extraction residues, their utilization, and products containing them. French Patent Application, FR 2,638, 331 A1 (1990)
 114. Hang, Y. D. : Production of fuels and chemicals from apple pomace. *Food Technol.*, **41**, 115 (1987)
 115. Michel, F., Thibault, J. F., Barry, J. L. and DeBaynast, R. : Preparation and characterization of dietary fibre from sugar beet pulp. *J. Sci. Food Agric.*, **42**, 77 (1988)
 116. Ralet, M. C., Thibault, J. F. and Della Valle, G. : Solubilization of sugar-beet pulp cell wall polysaccharides by extrusion-cooking. *Lebensm. Wiss. Technol.*, **24**, 107 (1991)
 117. Arrigoni, E., Caprez, A., Amado, R. and Neukom, H. : Chemical composition and physical properties of modified dietary fibre sources. *Food Hydrocoll.*, **1**, 57 (1986)
 118. Camire, M. E. and Flint, S. I. : Thermal processing effects on dietary fiber composition and hydration capacity in corn meal, oat meal, and potato peels. *Cereal Chem.*, **68**, 645 (1991)
 119. Arora, A., Zhao, J. and Camire, M. E. : Extruded potato peel functional properties affected by extrusion conditions. *J. Food Sci.*, **58**, 335 (1993)
 120. Vorägen, F. G. J., Heutink, R. and Pilnik, W. : Solubilization of apple cell wall with polysaccharide-degrading enzymes. *J. Appl. Biochem.*, **2**, 452 (1980)
 121. Massiot, P., Thibault, J. F. and Rouau, X. : Degradation of carrot (*Daucus carota*) fibres with cell-wall polysaccharide-degrading enzymes. *J. Sci. Food Agric.*, **49**, 45 (1989)

122. Eila Missang, C., Massiot, P., Baron, A. and Drilleau, J. F. : Effect of oxidative browning of apple pulp on the chemical and enzymatic extraction of cell wall polysaccharides. *Carbohydr. Polym.*, **20**, 131 (1993)
123. Auffret, A., Barry, J. L. and Thibault, J. F. : Effect of chemical treatments of sugar beet fibre on their physico-chemical properties and on their *in vitro* fermentation. *J. Sci. Food Agric.*, **61**, 195 (1993)
124. Dongowski, G. : Extraction of dietary fibre from sugar beet cossettes. *Nahrung*, **37**, 364 (1993)
125. Morrison, I. M. : Changes in the biodegradability of ryegrass and legume fibres by chemical and biological pretreatments. *J. Sci. Food Agric.*, **54**, 521 (1991)
126. Wilson, J. R., Mertens, D. R. and Hatfield, R. D. : Isolates of cell types from sorghum stems : digestion, cell wall and anatomical characteristics. *J. Sci. Food Agric.*, **63**, 407 (1993)
127. San Martin, R., Aguilera, J. M. and Hohlberg, A. I. : Effect of cellulase pretreatments on red algae agar extractability. *Carbohydr. Polym.*, **8**, 33 (1988)
128. Gacesa, P. : Alginates. *Carbohydr. Polym.*, **8**, 161 (1988)
129. Magda, R. R. : Raising seaweeds for industrial coll-oids. *Food Marketing & Technology*, **3**, 14 (1989)
130. Pedersen, J. K. : Seaweed extracts—sources and production methods. In "Gums and stabilizers for the food industry 5" Philips, G. O., Williams, P. A. and Wedlock, D. J. (eds.), IRL Press, Oxford, p.475 (1990)
131. 최희숙, 김우정 : 다당류 분해효소의 첨가가 미역 추출액의 수율 및 점도에 미치는 영향. *한국식품과학회지*, **25**, 589 (1993)
132. Mabeau, S. and Fleurence, J. : Seaweed in food products : biochemical and nutritional aspects. *Tren. Food Sci. Technol.*, **4**, 103 (1993)
133. Andon, S. A. : Applications of soluble dietary fiber. *Food Technol.*, **41** (1), 74 (1987)
134. Anderson, D. M. W. and Andon, S. A. : Water-soluble food gums and their role in product development. *Cereal Food World*, **33**, 844 (1988)
135. 황재관 : 식이섬유의 구조, 기능성 및 산업적 이용 전망. *식품기술*, **6**, 12 (1993)
136. Gordon, D. T. : Functional properties vs physiological action of total dietary fiber. *Cereal Food World*, **34**, 517 (1989)

(1994년 2월 16일 접수)