

- 총 설 -

식이섬유의 물리화학적 특성

황 재 관

한국식품개발연구원 산업화연구부

Physicochemical Properties of Dietary Fibers

Jae-Kwan Hwang

Korea Food Research Institute, Kyonggido 463-420, Korea

Abstract

Dietary fibers consist mostly of complex carbohydrates such as cellulose, hemicelluloses and pectins, and also included are carbohydrate-based gums or hydrocolloids exemplified as alginate, carrageenan, galactomannan, xanthan, etc. Due to structural diversity, dietary fibers can be classified by various ways, i.e., source, plant function, solubility, charge and topology. Understanding on the plant cell wall structure is of primary importance, since physicochemical properties of dietary fibers are dependent on the existence patterns in the cell wall. Depending on the four distinct observational dimensions, the physical parameters of dietary fibers were discussed in terms of raw sources, bulky & complex plant cell wall materials, individually separated hydrocolloid materials and specifically designed materials. Each existence state possesses the distinct physical parameters governing a variety of physiological properties of dietary fibers.

Key words: dietary fiber, plant cell wall, properties

서 론

1960년대 이후 식이섬유가 인체에 각종 유용한 생리작용을 제공한다는 연구결과가 발표되면서 이에 대한 많은 연구와 함께 각종 식이섬유 제품의 개발이 활발하게 진행되어 왔다(1,2). 지금까지 식이섬유는 다양한 구성성분으로 이루어진 복합체로서 인식되면서 주로 분석상의 기술개발이나 일정량의 식이섬유 섭취에 따른 생리기능성의 변화에 대한 연구가 주를 이루어 왔다. 이러한 연구경향은 식이섬유의 복잡한 구조적 특징을 고려할 때 불가피한 점이 없지 않으나, 결과적으로 식이섬유에 대한 세부적인 물리화학적 특성을 고려하지 않고 연구가 진행되므로써 결과 해석의 일관성을 유지하기 어려운 경우가 많았다.

기본적으로 식이섬유를 포함하는 모든 생고분자 물질들의 식품 및 생리학적 기능성은 그 구성성분의 구조적 특징에 의하여 결정된다(3,4). 여기서 구조적 특징이란 구성성분의 종류 및 결합방법, 전하(charge)의 종류와 밀도, 측쇄(sidechains)의 존재 등과 같은 화학적 특징 뿐만 아니라 분자량, 분자간 상호 결합력 등과 같은 물리적 특징을 포함한다. 식이섬유의 경우 여러

가지 복합적인 구성성분으로 이루어져 있고, 아울러 각 구성성분이 자기 독특한 구조적인 특징을 갖고 있다(5). 그러나 지금까지 식이섬유에 대한 연구는 이들 각각을 세부적으로 고려하기 보다는 단순히 복합체로 간주되어 왔다. 특히 물성학적인 측면은 실제적으로 식이섬유의 생리기능성을 결정할 수 있는 중요한 요인임에도 불구하고 식이섬유를 다루는 경우에 있어서 비교적 경시되어 온 면이 많았다.

따라서 본 논문에서는 식이섬유의 구조적 다양성과 이에 따른 식이섬유의 분류에 대해서 다루며, 자연적인 식이섬유의 존재방식을 세분화하여 각각에 대한 물성학적인 요인을 보다 상세히 논의한다. 궁극적으로 이와 같은 세부적인 식이섬유의 물리화학적 특성에 대한 올바른 이해를 통하여 관련 생리활성 연구 및 결과 해석에 유용하게 이용될 것을 기대한다.

식이섬유의 분류 및 화학적 구조

식이섬유는 대개 식물 세포벽을 형성하고 있는 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 펙틴, 알긴산, 카라기난 등의 물질로 이루어져 있다(6). 또한, 비구조적 물질 가운

Table 1. Classification of dietary fibers

Classification	Dietary fiber components
Source	Fruits and vegetables <i>cellulose, pectin, hemicelluloses, lignin</i>
	Cereals and legumes <i>cellulose, hemicelluloses, lignin</i>
	Seaweeds <i>cellulose, alginate, carrageenan, hemicelluloses</i>
	Gums <i>galactomannan, xanthan, gum acacia</i>
	Resistant starch(RS)
Plant function	Structural polysaccharides <i>cellulose, pectin, alginates, hemicelluloses</i>
	Structural nonpolysaccharides <i>lignin</i>
	Nonstructural polysaccharides <i>gums, mucilages, RS</i>
Solubility	Insoluble <i>cellulose, hemicelluloses, lignin, pectin(bound to cell wall), RS</i>
	Soluble <i>pectin(free molecule), gums, mucilages</i>
Charge	Neutral <i>cellulose, hemicelluloses, galactomannan, RS</i>
	Anionic <i>pectin, alginate, carrageenan, xanthan</i>
	Cationic <i>chitosan</i>
Topology	Linear <i>cellulose, alginate, carrageenan</i>
	Branched <i>pectin, galactomannan, gum acacia, xanthan</i>

데 식품의 증점안정제나 겔화제로서 광범위하게 사용되고 있는 갈락토만난, xanthan 등의 각종 검류(gums)도 식이섬유 물질로서 분류된다(7). 구조적으로 식이섬유는 복합다당류(complex polysaccharides)로서 각각 다른 화학적 구성성분으로 이루어져 있다. 식이섬유의 이러한 구조적 복잡성으로 식이섬유를 어떤 일률적인 방법에 의하여 분류하기는 어렵다. 따라서 필자는 식이섬유를 Table 1에 식이섬유의 근원, 식물체에 서의 기능, 수용성, 전하, 위상학(topology)적인 측면에 따라 분류하였다. 표에서 식이섬유의 종류에 따라 구성당의 종류, 결합방법, 전하, 측쇄 등과 같은 여러 가지 구조적 요인이 상이하게 나타난다는 것을 알 수 있다.

식이섬유의 각종 기능성과 물리적 특성은 기본적으로 구성성분의 구조적 특징에 의하여 결정되므로 식이섬유를 형성하고 있는 물질의 세부적인 구조특성을 알아야 한다. Table 2는 식이섬유 물질들을 형성하고 있는 구성성분을 요약한 것이다. 여기서 이러한 식이섬유 성분은 단독적으로 존재하기 보다는 다른 성분과

밀접하게 결합되어 있다는 것을 기억할 필요가 있다. 즉, 과채류, 곡류, 해조류 등 식물의 종류에 따른 식이섬유 물질의 3차원적 결합방법이나 결합정도에 대한 정보는 매우 중요하다. 따라서 식이섬유의 구조적 특징을 구성성분의 분자내 결합(intramolecular linkage)에 의하여 결정되는 분자수준의 특성 뿐만 아니라 분자간 결합(inter-molecular association)에 의한 supermolecular assembly의 구조 특성도 정확히 이해해야 한다. 식이섬유 물질이 주로 존재하는 식물 세포벽의 구조적 특징은 황 등(8)에 의하여 상세히 서술된 바 있다.

식이섬유의 물성

식이섬유 물질은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 자연적인 존재방식에 따라 크게 4가지 즉, 근원적인 원료상태, 식물 세포벽 성분으로 분리되어 복합적 성분으로 이루어진 상태, 복합 구조로부터 개개의 특정성분으로 분리 정제된 상태, 화학적 또는 효소적 방법에 의하여 특이 기능성을 갖는 분자구조로 조절된 상태로 나눌

Table 2. Structural characteristics of dietary fiber constituents

Polysaccharides	Constituents		Charge
	Main backbone	Side chain	
Agar	β -D-galactose and 3,6-anhydro- β -L-galactose	-	neutral
Alginate	β -(1,4)-mannuronic acid, α -(1,4)-guluronic acid	-	anionic
Carrageenan	Mixture of sulfated polysaccharides of α -D-galactose and 3,6-anhydro-D-galactose	-	anionic
Cellulose	β -(1,4)-D-glucose	-	neutral
Chitosan	β -(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose	-	cationic
Galactomannan(Guar, Carob)	β -(1,4)-D-mannose	D-galactose	neutral
β -Glucan	β -(1,3)-D-glucose, β -(1,4)-D-glucose	-	neutral
Gum arabic	β -(1,3)-D-galactose	L-rhamnose L-arabinose, D-glycuronic acid	anionic
Konjac glucomannan	β -(1,4)-D-mannose, β -(1,4)-D-glucose	-	neutral
Pectin	α -(1,4)-galacturonic acid and α -(1,2)-L-rhamnose	L-arabinose D-galactose D-xylose, etc	anionic
Resistant Starch	D-glucose	-	neutral
Xanthan	β -(1,4)-D-glucose	D-mannose D-glucuronic acid	anionic

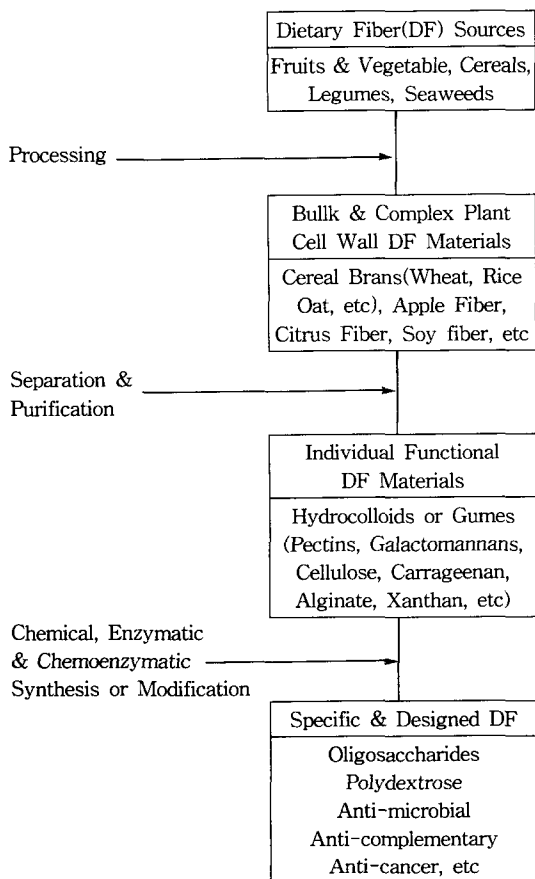


Fig. 1. Classification of dietary fibers by observational dimension.

수 있다.

첫째, 근원적인 원료상태의 과채류, 곡류, 두류, 해조류 등을 식품학적인 측면에서 보면 총 식이섬유 함량이나 수용성 및 불용성 성분의 함량비 등이 주요 관심 사항이 된다. 각종 식품류의 식이섬유 함량에 자료는 지금까지 많이 발표된 바 있으며(1,9,10), 현재 제시되고 있는 식이섬유의 1일 소비 권장량에 대한 표준자료로서 많이 활용되고 있다. 둘째, 앞서서도 논의한 바와 같이 식이섬유 성분은 대개 식물체의 세포벽에 많이 존재하게 된다. 이러한 세포벽 성분은 산업적으로 각종 식품의 가공과정에서 많이 발생한다(8). 예를 들어 밀기울은 밀의 제분과정에서, 사과박은 사과를 이용한 주스 생산과정에서 발생하게 된다. 이러한 가공 부산물은 각종 식이섬유 식품의 제조에 매우 유용하게 사용되고 있다. 셋째, 앞서서의 복합 식이섬유 성분으로 구성되어 있는 세포벽 성분과는 달리 특정 성분으로 분리정제 되어 있는 경우이다. 이러한 경우는 대개 수용화되어 식품내에서 증점제, 안정제, 겔화제 등으로 많이 사용되고 있는 하이드로콜로이드가 해당된다(11, 12). 넷째, 식이섬유 성분을 화학적, 효소적, 효소화학적 방법에 의하여 특별한 구조를 갖도록 조절된 경우에는 일반적 식이섬유 물질의 상태에서 제공되지 않는 각종 생리활성 작용을 나타낸다.

식이섬유는 위에서 설명한 네 종류의 존재방법에 따라 각각 다른 물성요인을 갖는다(Table 3). 먼저, 원료상태에서의 식이섬유는 물질의 종류 및 결합방식에 따라 식물 세포벽의 integrity에 필요한 각종 물성 요인

Table 3. Physical parameters of dietary fibers on the existence states

Existence of dietary fibers	Major physical parameters
Raw materials	Mechanical strength texture
Isolated bulky & complex plant cell wall materials	Solubility, Water holding capacity, Swelling, Particle size, Cation exchange capacity, Binding capacity
Individual soluble molecules	Molecular weight, Concentration viscosity, Gelling(Network)
Specifically designed structure	Molecular size, Intrinsic viscosity, Fine structure

들에 대하여 많은 영향을 미친다(13). 이들 물성요인은 식물 세포벽의 수용화 현상과 수용성 식이섬유의 함량과도 밀접한 관계를 갖으며, 식품학적으로는 조직의 경도나 관능특성에도 많은 영향을 미치게 된다(14,15). 다음, 원료로부터 식물 세포벽 성분을 분리하여 사용하는 경우에는 용해도, 수분흡착력, 입자크기, 팽윤력, 이온결합능력 등의 물성요인이 중요하게 작용한다(16). 이들을 정확히 이해하기 위해서는 세포벽 성분의 분리과정에서 필연적으로 수반되는 각종 가공공정의 영향과 구성성분의 조성 및 성분간 결합에 대한 상호유기적인 관찰이 요망된다. 한편, 식이섬유 성분이 각각의 특정 성분으로 분리정제되어 있는 수용성의 하이드로콜로이드인 경우에는 분자량이나 농도 등의 원인에 따른 점도와 겔화 능력 등이 주요 물성요인으로 작용한다(17). 마지막으로, 인체 기능상 기본적으로 소화흡수되지 않는 식이섬유성 물질 가운데 올리고당, 항보체활성물질, 항균제, 항암제 등의 특별한 생리 기능성을

갖는 물질이다(18,19). 이들의 생리활성은 세부구조(fine structure)와 분자의 크기(molecular size)에 따라 큰 영향을 받는다.

식이섬유 물질은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 수용성과 불용성 성분으로 나뉘어진다. 수용성 성분은 수용화되면서 점도를 증가시키거나 3차원의 겔을 형성하게 된다. 점도가 증가하게 되면 물질의 이동속도가 감소하면서 각종 영양성분의 흡수율이 감소하게 된다. 한편, 겔의 경우에는 3차원의 매트릭스(matrix)내에 각종 영양성분이 존재하여 실질적인 흡수가 어렵다. 이와 같은 점증 및 겔 형성에는 수용성 성분의 분자량, 농도 및 분자구조가 큰 영향을 미치게 된다(20). 따라서 수용성 식이섬유의 생리특성을 연구하는데 있어서 단순한 양적인 개념은 실제적인 수용성 식이섬유의 기능특성을 전부 반영하기 어려우며, 반듯이 물성적인 측면을 고려한 연구 및 결과해석이 필수적이다. 수용성 식이섬유의 물성에 대한 일반 개념은 황(21,22)에 의하여 보고된 바 있다. 한편, 불용성 식이섬유의 경우에는 보수력이 생리특성에 영향을 미치는 가장 중요한 물성요인으로 작용한다(23). 그런데 보수력의 경우에는 분자의 미세구조(microstructure)가 얼마나 물을 잘 보유할 수 있느냐에 따라 결정되며, 이 때 입자의 크기와 팽윤도가 중요한 요인으로 작용한다. 따라서 전체적으로 수용성 및 불용성 성분을 모두 포함하고 있는 복합 식이섬유 물질의 경우에는 각 성분을 지배하는 물성 및 구조적 요인을 고려하는 노력이 매우 중요하다.

Table 4는 각 물성요인에 의해 영향을 받는 생리특성을 정리한 것으로, 위에서 설명한 물성요인들은 실제적으로 식이섬유의 생리특성에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 결과적으로 식이섬유의 구조적 특성과 존재방식은 거시적(macroscopic)인 측면으로부터 분자수준에서의 미시적(microscopic)인 구조까지 다양하므로 관찰대상에 따라 물성에 대한 깊은 이해를 갖고 접근할 필요가 있다.

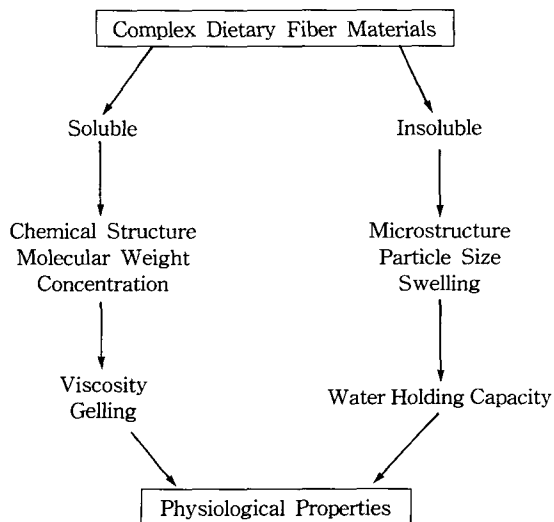


Fig. 2. Physicochemical parameters and physiology of dietary fibers.

Table 4. Physical properties of dietary fiber and their significance(24)

Property	Physiological process affected
Solubility/Viscosity	Carbohydrate and sterol absorption in small intestine
Water holding capacity	Rate of fermentation ; Gastrointestinal transit time ; Stool weight
Particle size	Rate of fermentation ; Gastrointestinal transit time ; Stool weight
Surface charge	Cation binding ; Mineral absorption ; Bile acid metabolism
Effect on food structure	Chewing ; Gastric emptying ; Satiety ; Rate of nutrient release

결 론

식이섬유는 지금까지 대개 생리화학적 측면에서 중점적으로 다루어져 왔으며, 이러한 과정에서 구조적인 측면이나 물성화학적 요인을 고려한 연구는 매우 부족하였다. 실질적으로 식이섬유는 일반적인 영양학적인 장점 이외에도 식품 기능화학적 특성과 각종 생리활성 소재의 기본이 되는 다기능성 생물소재(multi-functional materials)로서 이해할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서 논의된 바와 같이 식이섬유의 존재방식에 따른 각종 물성요인들은 실질적으로 식이섬유의 다기능성을 제공하는 원인으로 작용하기 때문에 이들에 대한 세부적인 이해가 필요하다.

문 헌

1. Spiller, G. A. : *Dietary fiber in human nutrition*. 2nd ed., CRC Press, London(1992)
2. Przybyla, A. E. : Formulating fiber into foods. *Food Engineering*, **60**, 77(1988)
3. Eads, T. M. : Molecular origins of structure and functionality in foods. *Tren. Food Sci. Technol.*, **5**, 147(1994)
4. Aguilera, J. M. and Stanley, D. W. : *Microstructural principles of food processing & engineering*. Elsevier Applied Science, London(1990)
5. Theander, O., Westerlund, E. and Aman, P. : Structure and components of dietary fiber. *Cereal Food Worlds*, **38**, 135(1993)
6. Schneeman, B. O. : Dietary fiber. *Food Technol.*, **43**, 133(1989)
7. Selvendran, R. R., Stevens, B. J. H. and Du Pont, M. S. : Dietary fiber : chemistry, analysis, and properties. *Adv. Food Res.*, **31**, 117(1987)
8. 황재관, 김중태, 홍석인, 김철진 : 압출성형에 의한 식물 세포벽의 수용화. *한국영양식량학회지*, **23**, 358(1994)
9. Anderson, J. W. : *Plant fiber in foods*. HCF Nutrition Research Foundation, Inc., Lexington, Kentucky (1986)

10. Englyst, H. : Classification and measurement of plant polysaccharides. *Ann. Feed Sci. Technol.*, **23**, 27(1989)
11. Glicksman, M. : Functional properties. In "*Food hydrocolloids*" CRC Press, Boca Laton, FL, Vol. 1, p.47 (1982)
12. 황재관 : 식품 물성개량제의 구조와 기능. 1995년 한국 식품위생학회 식품위생 및 안전성에 관한 최신연구 프 로시딩, p.3(1995)
13. McDougall, G. J., Morrison, I. M., Stewart, D. and Hillman, J. R. : Plant cell walls as dietary fibre : range, structure, processing and function. *J. Sci. Food Agric.*, **70**, 133(1996)
14. Capita, N. C. and Gibeau, D. : Structural models of primary cell walls in flowering plants : consistency of molecular structure with the physical properties of the walls during growth. *The Plant J.*, **3**, 1(1993)
15. Jackman, R. L. and Stanley, D. W. L. : Perspectives in the textural evaluation of plant foods. *Tren. Food Sci. Technol.*, **6**, 187(1995)
16. Mongeau, R. : Dietary fibre. In "*Encyclopedia of food science, food technology and nutrition*" Macrae, R., Robinson, R. K. and Sadler, M. J.(eds.), Academic Press, New York, Vol. 3, p.1362(1993)
17. 황재관 : 하이드로콜로이드 용액의 리올로지 특성. 1993년 식품물성과 압출성형 기술 워크숍 프로시딩, p.137 (1993)
18. 宮崎利夫 : 多糖의 構造と 生理活性. 朝倉書店(1990)
19. 박준태 : Carbohydrates/polysaccharides의 의학적 이용 및 현재의 개발현황. *Biotechnology News*, **1**, 31(1994)
20. Szczesniak, A. S. : Rheological basis for selecting hydrocolloids for specific applications. In "*Gums and stabilizers for the food industry 3*" Philips, G. O., Wedlock, D. J. and Williams, P. A.(eds.), Elsevier Applied Science Publishers, London, p.311(1986)
21. Hwang, J. K. : Function of dietary fibers as food ingredients. *Kor. J. Food Hygiene*, **7**, S53(1992)
22. 황재관 : 식이섬유의 구조, 기능성 및 산업적 이용전망. *식품기술*, **6**, 12(1993)
23. Dreher, M. L. : *Handbook of dietary fiber*. Marcell Dekker, Ind., New York, p.141(1987)
24. Cummings, J. H. and Englyst, H. N. : What is dietary fiber? *Tren. Food Sci. Technol.*, **45**, 99(1991)

(1996년 7월 11일 접수)