

# 박테리아 셀룰로오스의 특징과 제조 연구 동향

중앙대학교 윤옥자  
(yokk777@hanmail.net)

# 1. 서론

## ➤ 박테리아아 셀룰로오스 (bacterial cellulose; BC)의 특징<sup>1-7</sup>

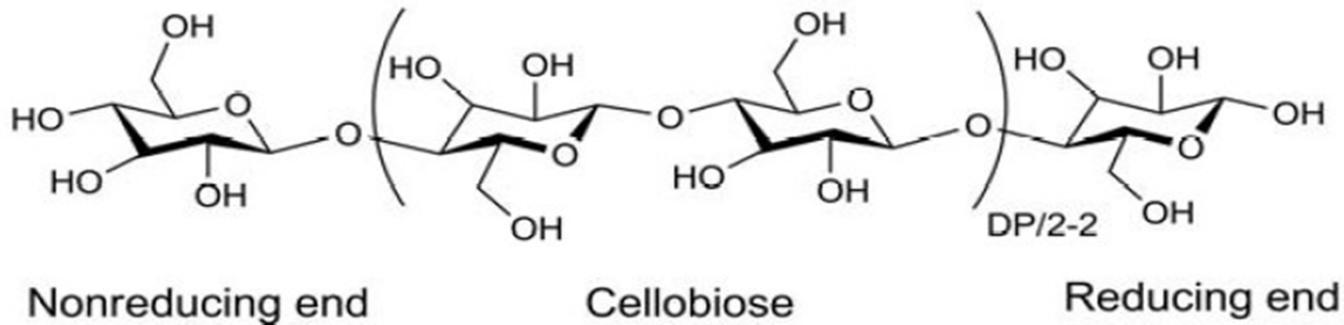
- 1886년에 Brown이 셀룰로오스가 식물로부터 뿐 아니라 초산균 등의 미생물에 의해서 생산될 수 있음을 보고함.
- 대표적인 균주로는 Acetobacter속, Rhizobium속, Agrobacterium속 등이 알려져 있으며, 그 중에서 생산 수율이 가장 우수한 미생물은 Acetobacter xylinum으로 gram 음성, 호기성 균으로 박테리아 셀룰로오스의 연구 대상이 되어왔음.
- 박테리아는 D-glucose를 탄소원으로 하여 셀룰로오스를 생합성 하게 되는데, glucose를 세포안으로 받아들이고, 이러한 glucose는 대사과정을 거쳐 박테리아의 세포막에 있는 셀룰로오스 중합 효소(Cellulose synthase)에 의해서 생합성 되어 세포 밖으로 나노 섬유 형태의 형태로 배출됨.
- 직경  $0.1\mu\text{m}$  이하의 섬유소로 구성된 ultrafine의 3차원 망상구조를 가지고 있어 식물 셀룰로오스에 비해서 200배 이상의 표면적을 가지고 있음.
- 헤미셀룰로오스(hemicellulose)나 리그닌(lignin)과 함께 복합체를 형성하고 있는 식물 셀룰로오스와는 달리 90% 이상 순수한 셀룰로오스로 생산되며, 식물 셀룰로오스와는 다른 많은 물리·화학적 장점을 나타내고 있음.
- 높은 기계적 강도(인장 강도와 영률), 고보습성, 고결정성 및 생분해성 등의 뛰어난 물적 특성을 보임.
- **장점:** 모폴로지, 인장강도, 흡착특성 등의 특성을 박테리아의 배양 방법 및 조건에 따라서 변화시킬 수 있다는 장점을 가지고 있음.
- **단점:** 생산성이 높지 않기 때문에, 대량 생산법에 대한 연구가 진행되고 있음.  
제조 과정에서 화학처리 시 강한 황산 등을 사용하고 있어 환경에 악영향을 키치고 있음.

➤ **박아 셀룰로오스 (bacterial cellulose; BC)의 구조<sup>6-7</sup>**

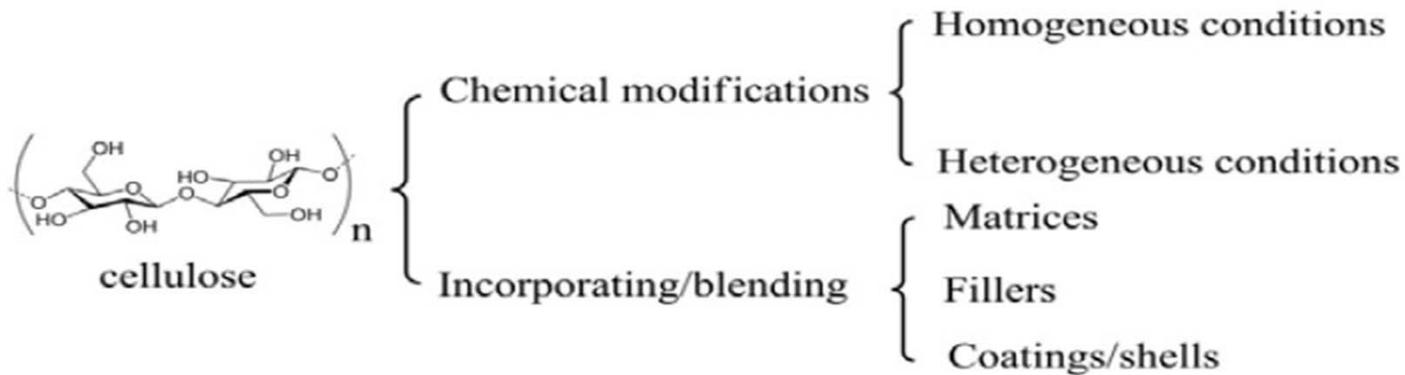
- Acetobacter xylinum의 cellulose의 nano-fiber 생산 이미지



- Molecular structure of cellulose.

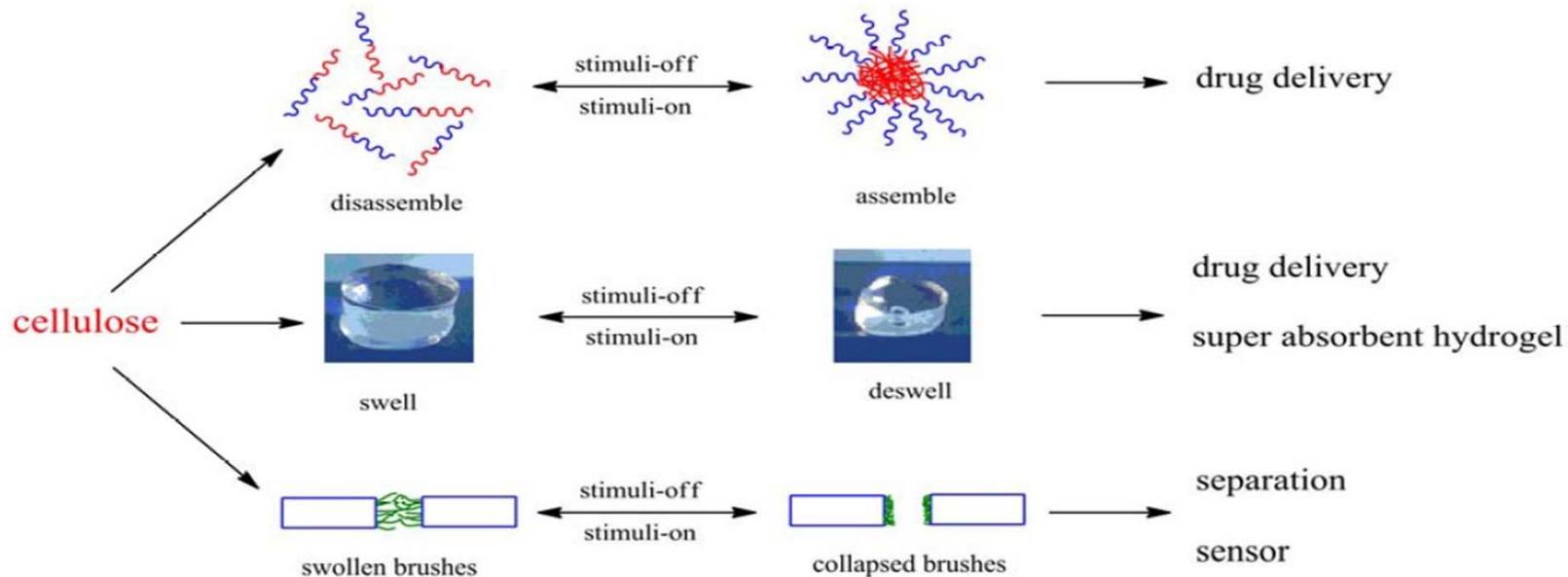


- Cellulose 기반 "smart" materials 준비과정



## ➤ 응용<sup>1-7</sup>

- 고성능 진동판, 고품질 제지, 화장품 등으로 이용
- 식이 식품으로 'Nata de coco'라고 하여, 식이 섬유 섭취를 위한 디저트 식품으로 이용되어 왔으며, 국내의 음료회사에서도 *Nata de coco*를 첨가한 음료를 생산하고 있음.
- 의약품 첨가제뿐 아니라 wound dressing, 인공 피부, 인공 혈관, 스캐폴드 등 다양한 의료용 소재로 관심이 높음.
- 전기전자 소재로써 리튬이온전지용 분리막, 디스플레이, 태양전지, 전자종이, 센서 등에 이용가능성이 높음.
- cellulose 기반 "smart" materials로의 응용



## 2. 박테리아 셀룰로오스 제조 연구동향

### ➤ Overview of Bacterial Cellulose Production and Application<sup>9</sup>

#### 1. Introduction

• 유전적 규정(genetic regulations), 발효변수(fermentation parameters), 그리고 생물반응기 설계(bioreactor design)등에 따른 박테리아 셀룰로오스(BC) 생산의 향상과 개선된 재료특성을 제어하기 위한 BC 구조, 생합성, 응용, 최첨단 소재개발 가능성의 개요를 다음과 같이 제공하고 있음.

#### 2. Bacterial cellulose(BC) biosynthesis

• BC는  $\beta$ -1→4 glucan chain의 분자식( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub> 형태를 가지는 fibril의 구조이고, Fig. 1과 같이 hydrogen bonding을 이루고 있으며 식물 셀룰로오스 보다 100배 작은 나노 파이버의 3차원 하이드로겔 형태를 갖추고 있어, 넓은 표면적과 다공성을 가지고 있음.

• *Acetobacter xylinum*은 Fig. 2에서와 같이 cellulose I (ribbon-like polymer)와 cellulose II (thermodynamically stable polymer)를 생산함.

• BC 합성공정은 박테리아 세포벽으로 부터 glucoes chain의 protofibrils가 분비되면서 nanofibrils cellulose ribbons들이 응집되어 높은 다공성 매트릭스 네트워크 구조를 만듦.

• BC는 표면에 풍부한 hydroxyl groups을 가지고 있어 hydrophilicity, biodegradability, 그리고 chemical-modifying capacity등의 특징을 가지고 있음.

Fig. 1 Inter- and intra-hydrogen bonding of bacterial cellulose

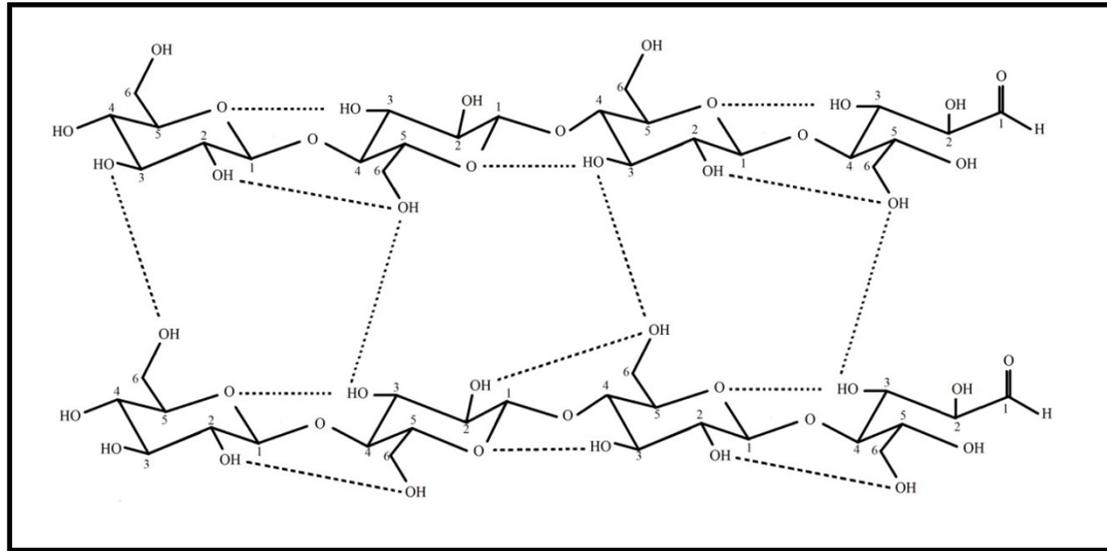
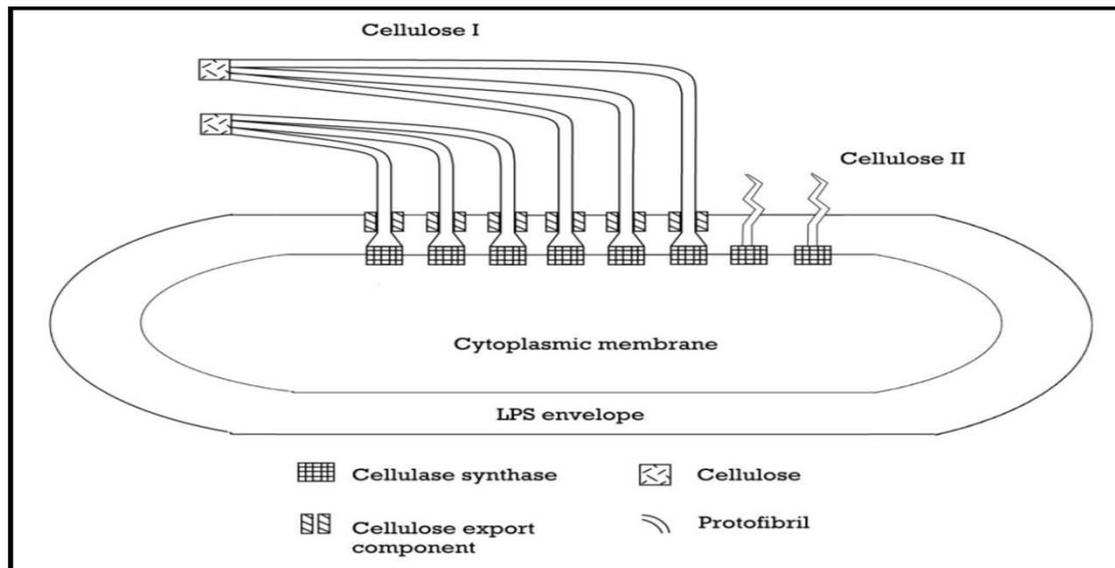


Fig. 2 Inter- and intra-hydrogen bonding of bacterial cellulose



### 3. Fermentation process

#### 3.1 Culture condition

- BC 생산의 발효는 정치 배양, 교반 배양 조건에서 이루어 지고 있으며, 정치 배양 조건에서는 3차원 망상 박막 형태를 형성하고, 교반 배양 조건에서는 fibrous suspension, spheres, pellets 또는 irregular masses 등과 같은 불규칙한 형태의 셀룰로오스 입자들로 형성됨.
- 정치 배양 조건에서의 BC 생산과정은 배지 표면 위의 공기 공급에 의해 조절되고 있으며 수율은 적당한 카본 소스 농도에 의존하고 있음.
- BC 성장 시간의 증가는 hydrogen과 C-H bonding으로 BC 형성을 증가 시키나 형성된 박막이 밑으로 내려앉게 되면 박테리아는 불충분한 산소 공급에 활동이 저해 되어 합성이 중단됨.
- 산업화에 있어서 정치 배양조건에서 semi-continuous process를 추천하고 있으나 낮은 수율의 생산성을 보완하기 위해서 교반 배양 조건을 병합하여 개발하고 있음.
- 교반 배양 조건에서의 BC들은 낮은 crystallinity, mechanical strength, polymerization 등이 불규칙한 형태의 셀룰로오스를 형성함.
- Microfibrils organization의 변화는 셀룰로오스 사이의 hydrogen 결합 형성 시 공기의 영향에 관계하고 있으며 교반 배양 조건에서의 불규칙한 형태의 셀룰로오스 형성은 처음 glucose 농도가 불규칙한 구형의 셀룰로오스의 평균 직경에 영향을 주어 접종원(inoculums)의 부피 증가에 따라 감소한다고 보고되고 있지만 정확한 규명은 알려지고 있지 않음.

### **3.2 Culture medium**

- 자원화 개념에서 BC의 산업화 생산력을 갖추기 위한 경제적인 새로운 배지용액을 발견하기 위하여, 많은 연구자들이 잠재적인 매체 개발로 농업 폐기물과 산업 폐기물을 이용하는 연구에 전념하고 있으며 폐기된 맥주 효모, 드라이 오일 밀 잔류물, thin stillage, 포도 껍질과 메이플 시럽등을 BC 생산의 유용한 카본 소스로 입증하고 있음.
- 이러한 생산 방법은 폐기물 처분과 관련하여 환경 문제를 감소시키는 장점을 가지며 nitrogen과 phosphorus sources를 보충한 배지는 BC 생산을 증가시킨다는 것이 확인 되었음.
- BC가 생산되는 동안 카본 소스로써 glucose의 사용은 배지용액안에서 부산물으로써 gluconic acid의 형성에 연관이 있으며 그 부산물은 배지용액의 pH를 감소 시켜 BC 생산에 부정적인 영향을 미친다고 보고되고 있음. 또한 산화 방지제나 polyphenolic compounds는 gluconic acid 형성을 방해한다고 보고되고 있음.

### **4. Bacterial cellulose composite**

- BC는 wound dressing, blood vessel regeneration, 그리고 paper restoration과 같은 다양한 분야에 응용되고 있음.
- BC는 antibacterial properties, optical transparency, stress bearing capability등의 부족한 성질들을 가지고 있어 이러한 단점을 극복하기 위하여 보강재와의 BC 복합체 개발이 도입되고 있음.
- BC 복합체는 in situ 또는 ex situ 방법 등과 같이 다양한 방법으로 만들어지며 nature biological 과 physiochemical properties 등의 부가 적인 성질등으로 기능화 됨을 Table 1.에 보여 주고 있음.

- BC 복합체의 보강재로는 polymers, metal 또는 metal oxides, solid materials 등과 같은 organic 또는 inorganic material들을 사용하고 있음.

Table 1. Bacterial cellulose composites and application.

No.	Application field	Reinforcement material	Function
1.	Electronic	Graphite nanoplatelet	Electrical conductivity
2.	Electronic	Poly-4-styrene sulfonic acid	Redox flow battery
3.	Biomedical / Industrial	Chitosan	Nanofilm
4.	Biomedical	Hydroxyapatite	Bone tissue engineering
5.	Biomedical	Silver nanoparticles	Antimicrobial wound dressing
6.	Biomedical	Paraffin	Bone scaffolding
7.	Electronic	Polyurethane	Film substrate of light emitting diode

## 5. Application of bacterial cellulose in food industry

- BC는 전통적으로 동남아시아에서 생산되는 토착 식이섬유로써 젤리같은 정육면체 모양의 Nata de coco를 만드는데 사용됨. Nata de coco는 부드럽고 매끄러운 표면, 꼭꼭씹어야하는 textural properties를 가지고 있으며 콜레스테롤이 없어 낮은 칼로리, 낮은 지방 함량을 지니고 있음.
- Nata de coco는 코코넛 물에서 정치 배양 조건으로 생산하고 있으며 코코넛 물은 *Acetobacter xylinum*에 대한 카본 소스를 제공함. 생산된 BC는 잘 세척한 후 디저트, 과일 칵테일 그리고 젤리 등과 같은 식품 가공에 응용되고 있음.
- Nata de coco와 시리얼과 같은 높은 식이 섬유 보충 혼합물은 소비자들의 체지방을 감소시킨다고 보고되고 있으며 구조적 강도(structural strength)와 효율적인 비용 측면에서 지속적인 bioethanol production을 위한 매우 유망한 매체임을 보고하고 있음.

- 바이오 기반 재료를 이용한 식품 포장재로써 BC의 응용은 미세한 네트워크, 생분해성 (biodegradable), 높은 방수성 등을 가지고 있어 오늘날 선호하고 되고 있으나 식품 오염을 방지할 수 있는 antibacterial과 antioxidant 등의 성질은 가지고 있지 않아 이러한 성질 등을 보완하기 위하여 Table 2. 에서와 같이 BC 복합체의 응용 연구 등을 보고하고 있음.

Table 2. Application of modified bacterial cellulose (BC) and its composites in food industry.

No.	Materials	Function	Types of food
1.	BC/nisin	Antimicrobial food packaging	meat
2.	BC/polylysine	Biodegradable food packaging	sausage
3.	BC	Emulsifier	surimi
4.	Carboxymethylcellulose	Regulate gough rheology	Flour dough
5.	Hydroxypropyl methyl cellulose	Texture enhancer	Whipped cream
6.	Methyl cellulose	Enhancing shelf life	Egg
7.	Methyl cellulose	Enhance bioavailability	Vitamin C

## 6. Conclusion

- Acetic acid bacteria는 정치 또는 교반 배양조건에서 산화 발효를 통한 셀룰로오스 생산으로 식물에서 생산되는 셀룰로오스 보다 높은 순도로 대체 할 수 있으나 생산과정에서 발생하는 높은 비용, 낮은 수율 등의 단점이 있어 산업화 하는데 제한적인 측면이 있음을 보고함.
- 향후 이러한 문제들을 보완하기 위하여, 연구자들은 낮은 비용의 카본 소스로써 농업 폐기물이나 사업 부산물을 이용하는 연구를 진행하고 있으며 다양한 분야에 응용하고 산업화 하기 위하여 BC matrix를 기능화 하거나 복합화하는 새로운 재료 개발에 주력하고 있음.

## 3. 결론

- 친환경적으로 생산이 가능한 나노 셀룰로오스인 BC 소재의 응용 분야는 새롭게 주목 받는 연구영역으로 활발하게 연구가 진행되고 있음.
- BC의 높은 기계적 물성, 결정화도, 3D 나노 구조를 가지는 순수한 셀룰로오스로서 의료용, 미용, 식용, 전기전자 분야 등 다양하게 적용되고 있음.
- BC는 농업부산물을 이용하여 고부가가치 상품 개발 및 산업화 성과가 주목 받고 있어, 앞으로 산업 적용성을 극대화 하고 미래의 첨단 신소재로서의 이용이 기대됨.
- BC 생산에서 낮은 전단력의 개선과 높은 산소전달 능력이 요구되고 있으며, 상업용 복합 배지를 사용하고 있어 원료비용을 대폭 낮출 수 있는 생산 기술 개발이 필요함.<sup>10</sup>
- 향후 BC의 다양한 기능을 살릴 수 있는 경제적인 대량 생산의 배양기술 확립이 필요함.<sup>10</sup>

## 4. 참고 문헌

1. Cannon R. E., Anderson S. M., "Biogenesis of bacterial cellulose", *Crit. Rev. Microbiol.* 1991, 17, 435-447
2. Chao Y., Ishida T., Sugano Y., Shoda M., "Bacterial cellulose production by *Acetobacter xylinum* in a 50-L internal-loop airlift reactor," *Biotech. Bioeng.*, 2000, 68(3), 345-352
3. Klemm D., Schumann D., Udhardt U., Marsch S., "Bacterial synthesized cellulose-artificial blood vessels for microsurgery Review", *Prog. Polym. Sci.* 2001, 26, 1561-1563.
4. Bielecki S., Krystynowicz A., Turkiewicz M., Kalinowska H., "Chapter 11. Bacterial cellulose Biopolymers for Medical and Pharmaceutical Applications." Edited by Steinbuchi A., Marchessault R. H. 2005
5. 송효정, 서진호, 차규석, 김성준, "50L 공기순환배양기에서 당화액을 이용한 박테리아 셀룰로오스의 생산", *한국도시환경학회지*, 2006, 6(2), 21-27
6. 강태진, 차재영, "Cellulose의 특징과 이용", *BioWave*, 2007, 9(7), 1-11
7. Xiaoyun Q., Shuwen H., "Smart Materials Based on Cellulose: A Review of the Preparations, Properties, and Applications", *Materials*, 2013, 6, 738-781
8. 전세라, 박지원, 김현중, "박테리아 셀룰로오스의 제조와 활용분야", *KIC News*, 2013, 16(4), 37-45
9. Faezah E., Siti M. T., Norliza A. R., "ST26943", 2nd International Conference on Agricultural and Food Engineering, *CAFEi2014*, Overview of Bacterial Cellulose Production and Application", *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2014, 2, 113-119
10. 김성준, 최창남, 리홍선, 서진호, 송효정, 김성덕, 장미하, "박테리아 셀룰로오스 대량생산요소기술 및 환경응용제품 개발", 2007, 환경부