

〈總 說〉

생체 계면 활성제의 구조, 특성 및 응용

임 경 희

중앙대학교 공과대학 화학공학과



Biosurfactants: Their Structures, Properties, and Applications

Lim, Kyung-Hee

Department of Chemical Engineering, Chung Ang University, Seoul, Korea

(Received July, 28, 1996)

ABSTRACT

Surfactants are the surface-active molecules that display amphiphilicity. Because of this surface activity and amphiphilicity, surfactants have been used in wide industrial applications such as foods, detergents, cosmetics, medicine, polymers, paints, flotation, textiles. These days, their applications extend to high-technology industries such as microelectronics, magnetic recording material, advanced batteries, novel separations, etc.

As new applications of surfactants are found and the demand of the surfactants increases, surfactant industry has been more pressed to face a formidable challenge, which is to develop surfactants that are environmentally friendly.

In this regard biosurfactants may be alternatives to chemical surfactants, since biosurfactants are biologically compatible, more biodegradable, less toxic, and highly specific. Because of these excellent advantages over those of chemical surfactants, much efforts have been made in biosurfactant research.

This article reviews biosurfactants in several aspects, that is, their definition, structures, properties, applications, and prospects.

I. 서 언

계면활성제는 식품, 의약품, 화장품, 세제, 섬유, 금속, 고분자, 도료 등 산업 전반에 걸쳐서 폭넓게 사용되고 있다. 따라서 "계면활성제를 사용하지 않는 공업은 없다"¹⁾는 보도는 계면활성제의 영역이 매우 넓은 것을 잘 설명해 준다고 하겠다. 요즘에는 이의 영역이 확장되어서 microelectronics, 자기 기록 매체, 고급 전지, 최신 분리 기술, 배기 가스 중 탄화수소의 제어, 전자 인쇄용 액체 인화제 등의 개발과 연구에도 활

용되고 있다.²⁾ 이와같은 추세를 반영하여 미국에서는 계면활성제 산업이 괄목할 만한 성장을 이루었다. 1980년대에는 300%가 성장하였으며, 1989년 한 해에는 14%의 성장율을 기록하며 총 매출액도 36억 5천만 달러(2조 9천억원)에 이르렀고 전 세계적으로는 76억 파운드가 생산되었다.

그러나 계면활성제의 영역이 확장되면서 계면활성제에 대한 새로운 기준이 제시되었다. Green Round의 여파로 환경에 관한 규제가 강화되면서 계면활성제가 수질 오염에 미치는 영향을 최소화하고 환경 친화성 물질이 되도록 하는 것이었다. 따라서 계면활성제

산업에서는 "Mild, Green, and Clean"이라는 구호 아래 환경과 조화를 이루는 계면활성제, 더 나아가서는 특정한 성질을 나타내는 기능성 계면활성제의 개발과 생산을 유도하게 되었다. 이와 같은 추세는 환경 문제가 심각해짐에 따라 점차 강화되어 질 것이므로 계면활성제를 주조로 하는 산업계도 이에 상응하는 대책을 마련하여야 할 것이다. 생체계면활성제(biosurfactants)는 이와 같은 점에서 비추어 볼 때 환경에 해를 끼치지 않을 뿐만 아니라 환경의 일부이므로 앞으로 이 분야의 연구와 개발에 더욱 많은 노력을 기울여야 할 것으로 전망된다.

생체계면활성제는 자연과 조화를 이루고 또 여러가지 장점을 가지고 있어서 화학계면활성제를 대체할 수 있다. 생체계면활성제는 생물학적 친화성이 있어서 생태계에도 영향을 주지 않으며, 생분해도가 높고 독성이 적어서 환경과 훌륭하게 조화를 이룬다. 또한 재생 자원을 기질로 하여 미생물이나 효소에 의하여 생합성되므로 환경오염 물질을 줄여서 환경 보존 뿐만 아니라 환경 문제의 해결에도 기여할 수 있다.

생체계면활성제의 또하나의 장점은 구조가 다양하다는 것이다. 이것은 생체계면활성제의 친유성(지방산의 탄화수소 사슬)과 친수성(알코올, 카르복실기, phosphate, 탄수화물 등)을 이루는 성분들이 많은 화합물을 포괄하고 있기 때문이며, 이들이 배합되어서 더욱 많은 구조가 나타날 수 있다. 생체계면활성제의 생합성에는 박테리아, 곰팡이, 효모, 효소 등이 쓰이는데 이들이 생체계면활성제를 생성하는 경로가 다양하여 여러 다른 구조를 갖게 할 뿐만 아니라, 이제까지 알려지지 않은 특정한 기능을 갖는 생체계면활성제를 얻을 수 있는 여지도 갖게 해준다.

이와같은 생체계면활성제의 구조는 생체계면활성제의 물리 화학적, 생화학적, 계면 과학적 성질에 많은 영향을 미친다. 현재로서는 구조와 특성간의 관계에 있어서 많은 부분이 알려져 있지 않지만 앞으로의 연구 결과에 따라서 이에 대한 이해가 깊어질 것으로 생각된다. 이제 생체계면활성제의 다양한 구조와 특성을 개괄하고 이런 특성이 어떻게 쓰여질 수 있는지 생체계면활성제의 용도를 살펴 보고자 한다. 이러한 일은 생체계면활성제의 앞으로의 나아갈 바를 알려주는 지표가 될 수 있을 것이다.

II. 생체계면활성제의 정의, 생성 방법 및 종류

생체계면활성제의 정의는 이 슬어를 이루는 생체(bio)와 계면활성제(surfactant) 각각의 의미로부터 살펴 보는 것이 타당하다고 생각된다. 먼저 계면활성제에 대해서 간단히 살펴 보자.

계면활성제는 양친매성 즉 친수성(親水性)과 친유성(親油性) 부분으로 되어 있으며, 서로 섞이지 않는 평형상(equilibrium phases) 사이의 계면에서 활성을 나타내는 물질이다. 이와 같이 계면활성제는 양친매성(amphiphilicity) 구조와 계면성질로 정의된다. 여기에서 말하는 계면성질 또는 계면활성은 계면(표면)장력 강하와 micelle을 이루는 최초의 농도인 임계 micelle농도(critical micelle concentration, CMC)를 의미한다. 이런 성질은 계면활성제의 양친매성 구조와 독립적이지 않으며 오히려 이런 구조로 인해서 야기된다. 표면장력 강하는 계면활성제가 표면에 흡착되어서 일어나며 micelle의 형성은 친매성의 회합에 의해서 일어난다. 따라서 계면활성제의 성능에 대해서 이야기 할 때에는 반드시 표면 장력 강하와 CMC를 언급하여야 하며 전자를 effectiveness, 후자를 efficiency라고 한다.³⁾ 일반적으로 계면활성제로서 성능이 좋은 것은 CMC는 매우 작고, 표면 장력은 30mN/m(계면 장력은 1mN/m) 정도로 낮출 수 있는 것을 말한다.

생체계면활성제의 다른 하나의 단어인 "생체"의 의미는 생체계면활성제의 정의에서 쉽게 이해될 수 있다. 문헌에서는 보편적으로 생체계면활성제란 (가) 양친매성을 갖는 천연물이거나 (나) 천연물을 기질(substrate)로 하여 미생물이나 효소의 작용에 의하여 생성된(양친매성)화합물을 일컫는다. 따라서 "생체"란 천연물, 미생물, 효소와 관련된 사항을 알 수 있다. 생체계면활성제의 두 가지 정의 중에서 요즈음에는 후자의 정의를 채택하는 경향이 있다. 생체계면활성제의 친유성 부분은 지방산의 긴 탄화수소 사슬이며 친수성 부분은 천연 지질의 알코올기 혹은 에스테르기, 지방산 혹은 아미노산의 카르복실기, 인지질의 인산기, 당 지질의 탄수화물 등이다.

그 이유는 아직 정확히 알려져 있지 않으나 미생물이 대사 물질로서 생체계면활성제를 생성하는 것은 오

래 전부터 알려져 왔다. Mioshi⁴⁾는 1895년에 미생물에 의해서 탄화수소가 분해되는 것을 처음으로 관찰하였다. 이와같은 사실이 더욱 주목받은 것은 바다에 유출된 기름을 생분해에 의해서 처리하고자 하는 노력으로부터 비롯되었다. 탄화수소를 기질로 하여 이를 분해하고 대사 물질로 생체계면활성제를 얻는 것은 매력적인 일이 아닐 수 없었다. 미생물이 성장할 수 있는 기질은 탄소, 질소, 인 등이 제공될 수 있는 원천으로서 탄화수소, 당류, 동물油, 식물油, 질산염, 암산염 등 참으로 많다. 많은 미생물은 이와 같은 기질에서 성장할 때 여러 종류의 생체계면활성제를 생성한다. 이들은 효모, 곰팡이, 박테리아 등인데 박테리아가 가장 많이 사용되며, 효소에는 lipase와 같은 효소를 사용하기도 한다. 생체계면활성제의 합성에 사용되는 미생물과 효소의 예를 Table 1에 나타내었다.

미생물은 부피에 대한 면적의 비가 크고 여러 가지 기질을 통한 다양한 생화학적 경로를 제공하기 때문에 생체계면활성제 합성에 사용될 수 있는 좋은 대상이다. 미생물에 의한 생체계면활성제의 생성 방법은 미생물과 생체계면활성제의 성질에 따라 좌우되지만 대체로 다음과 같은 과정들이다.⁵⁾

1. 성장 세포에 의한 생성(Growth-associated

production)

이 경우에는, Fig. 1a에 나타낸 바와 같이, 기질의 이용, 성장 및 생체계면활성제의 생성이 평행적으로 일어난다. 즉 생체계면활성제가 세포의 성장기에 생성된다. 생체계면활성제의 생성에 탄소원이 매우 중요한 역할을 하며, 탄소원으로는 n-alkane, glycerol, glucose, ethanol, lactose, olive oil 등 여러가지가 있다. 이들 탄소원 중에서는 특정한 미생물에 대하여 효율적인 것이 있는데, *Pseudomonas* spp. 박테리아를 이용한 rhamnolipid(당지질계 생체계면활성제)의 합성에서는 n-alkane이 가장 효과적이었으며 특히 탄소 사슬의 길이가 중요한 변수인 것으로 알려졌다.

2. 제한 성장하의 생성(Production under growth-limiting conditions)

성장 배지에서 한, 두 원소의 농도를 제한하였을 때 생체계면활성제의 생성이 상당히 증가하는 경우가 있다. Fig. 1b에서는 질소원을 넣어 주었을 때 생체계면활성제의 농도가 현저히 증가함을 보여주고 있다. *Pseudomonas aeruginosa* 박테리아에 의한 rhamnolipid의 생합성에서는 질소원의 농도를 제한함으로써 rhamnolipid가 세포의 성장 휴지기에 많이 생성될 수 있었다.

Table 1. Microbes and enzymes used for biosyntheses of biosurfactants

박테리아	효모	곰팡이	효소
<i>Acinetobacter</i>	<i>Candida</i>	<i>Ustilago</i>	<i>Lipase</i>
<i>Agrobacterium</i>	<i>Torulopsis</i>	<i>Shizizella</i>	<i>Glycosidase</i>
<i>Arthrobacter</i>	<i>Endomycopsis</i>		<i>Phospholipase</i>
<i>Bacillus</i>			
<i>Brevibacterium</i>			
<i>Corynebacterium</i>			
<i>Gluconobacter</i>			
<i>Micrococcus</i>			
<i>Micromonospora</i>			
<i>Mycobacterium</i>			
<i>Norcadia</i>			
<i>Pseudomonas</i>			
<i>Rhodococcus</i>			
<i>Streptomyces</i>			
<i>Thiobacillus</i>			

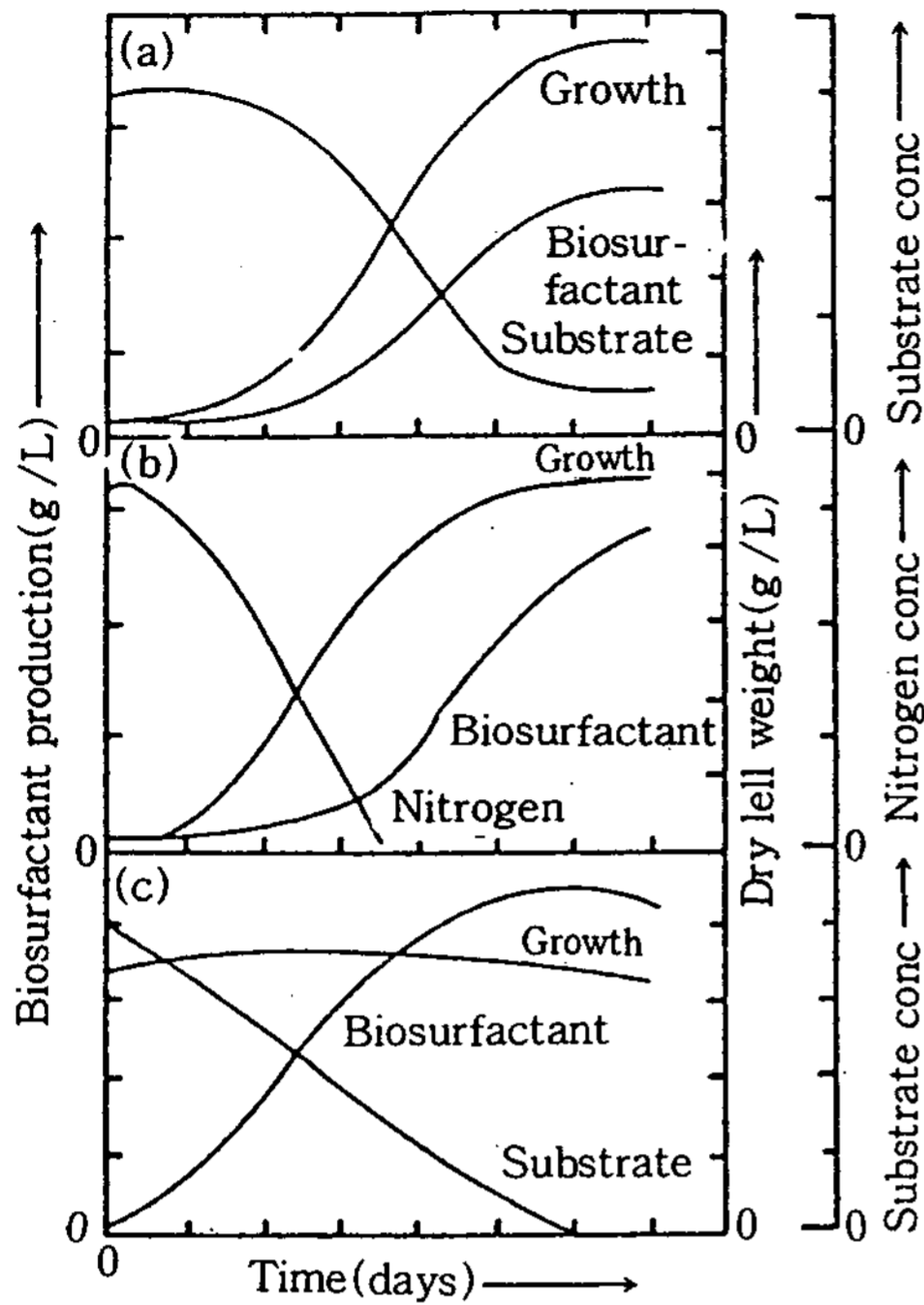


Fig. 1. Patterns of biosurfactants' production. (a) Growth-associated production, (b) Production under growth-limiting conditions, and (c) production by resting cells.

3. 휴식 세포에 의한 생성(Production by resting cells)

이 경우에는 생합성에 사용되는 세포를 생체계면활성제를 생성하는 단계에서 거두어 들여서 그 상태로 유지한다. 따라서 세포가 기질을 사용하여 증식을 하지 않고 생체계면활성제를 생산하도록 하는 것이다 (Fig. 1c). *Pseudomonas* sp.에 의한 rhamnolipid, *Torulopsis bombicola*에 의한 sophorolipid, *Ustilago maydis*에 의한 cellobiose lipid, *Rhodococcus erythropolis*에 의한 trehalose tetraester 등이 이 방법으로 생합성되기도 한다.

이와같이 미생물과 효소를 이용하여 얻은 생체계면활성제는 종류가 매우 많아서 이를 분류하는 것이 간단하지는 않다. 그러나 이들을 생화학적 성질이나 사용된 기질에 따라서 대략 (가) 지질(Lipids), (나) 지방산(Fatty acids), (다) 당지질(Glycolipids), (라) 지단백(Lipoproteins) / 리포펩타이드(Lipo-peptide-

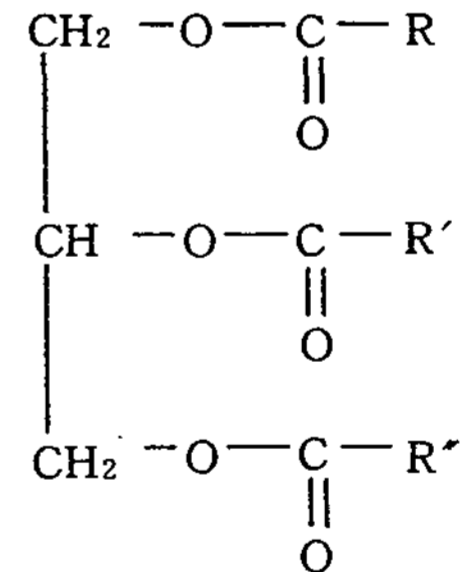
s), (마) 지다당(Lipopolysaccharides), (바) 인지질(Phospholipids), (사) 당에스테르(Sugar esters)의 8가지로 나눌 수 있다. 이들은 구조가 서로 다르며 물리·화학적 및 생화학적 성질에서도 차이를 나타낸다. 이들의 구조와 성질을 살펴보기로 한다.

III. 생체계면활성제의 구조

1. 지 질(Lipids)

지질을 정확히 정의하기란 어렵지만, 천연으로 존재하는 고분자량 에스테르 화합물을 지칭하는 것으로 볼 수 있다. 더 정확히는 에테르나 클로로포름과 같이 극성이 낮은 유기 용매에 의해서 세포로부터 추출되는, 물에 녹지 않는 물질을 말한다.⁶⁾ 지질은 지방(fats), 기름(oils), 왁스, 스테로이드, 테르펜(terpenes) 등을 포괄하는데, 이 중에서 지방이 가장 중요하게 취급됨으로 지질은 곧 지방으로 여겨지곤 한다.

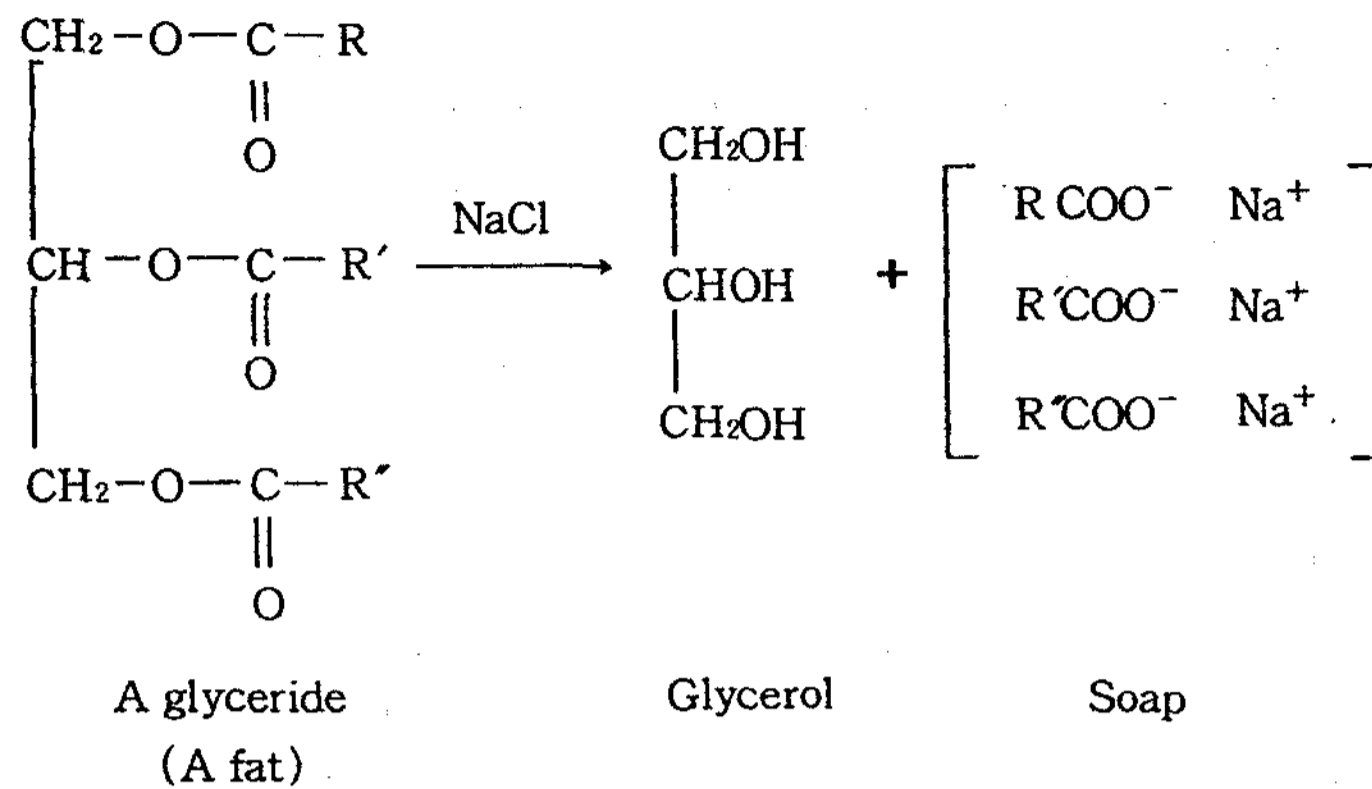
지방은 글리세롤(glycerol)의 카르복실산 에스테르 즉 글리세라이드(glyceride)를 말한다. 좀더 정확히 말하면 아래와 같은 구조식을 갖는 triacylglycerol이다.



A triacylglycerol (A glyceride)

지방은 세 개의 지방산($R\text{-COOH}$, $R'\text{-COOH}$, $R''\text{-COOH}$)이 같지 않은 경우가 보통이며 지방은 카르복실산의 종류가 다양하므로 많은 종류가 있다. 지방의 특성은 지방을 이루는 지방산에 의해서 결정된다.

지방은 산, 알코올, 비누, 세제 등의 원료로서 엄청난 양이 공업에 쓰인다. 지방이 계면활성제와 밀접한 관련이 있는 것은 비누와 세제이다. 지방을 가수분해하면 글리세롤과 염이 생성되는데 이 때 생성되는 염 중에서 Na-염을 비누라 부른다.



지방의 가수 분해에 의한 비누의 합성은 가장 오래 된 화학 합성의 하나이다. 이미 고대 로마 시저의 시대에 독일 지방의 한 부족인은 나무를 태운 재에서 얻은 잿물과 염소 기름을 함께 끓여서 비누를 얻었는데 이 방법은 요즈음의 비누 대량 생산 방법과 거의 유사하다. 비누는 화장품, 치료제, 사치품으로 간주되어 오다가 100년 전부터 일반 세제로 사용되기 시작하였으나 근세기 들어서는 화학 합성 세제(detergent)에 밀려서 이의 화려한 위치를 잃어 가고 있다.

Detergent는 비누와 같이 양친매성 구조를 가지고 있는 물질이다. 지방으로부터 얻어진 직쇄형 1급 알코올 중에서 C₈와 C₁₀ 알코올은 octyl phthalate와 같이 가소제를 만드는데 사용되고 C₁₂-C₁₈ 알코올은 detergent를 만드는데 사용된다.⁶⁾ 그러나 요즈음에는 동물 지방의 가격이 상대적으로 비싸서 이를 사용하지 않고 원유 정제 부산물로부터 만들고 있다.

2. 지방산(Fatty acids)

지방산은 원래 동·식물의 기름에서 분리된 카르복실산을 지칭하는 것이었으나 오늘날에는 탄소수가 C₈-C₂₂인 직쇄형 카르복실산을 말한다.⁶⁾ 이들을 화학식으로 표시하면 다음과 같다.



위 구조에서 알 수 있듯이 친유성 부분은 탄화수소 사슬, CH₃-(CH₂)_n-, 이고 친수성 부분은 카르복실기, -COOH이다. 통상적으로 많이 쓰이는 지방산을 Table 2에 나타내었다. 지방산은 Table 2에서와 같이 탄소수가 짝수인데 이것은 지방산의 생합성에서는 아세

테이트기로부터 탄소가 2개씩 붙기 때문에 발생하는 자연적인 결과이다. (ADD!!!)Fatty acid synthesis

지방산은 포화산 뿐만 아니라 불포화산으로도 존재하는데 이 때 불포화 결합은 하나 이상일 수 있다. 불포화 지방산 중에서 가장 보편적인 것이 oleic acid, linoleic acid, linolenic acid인데 이들 산에서의 이중 결합은 거의 틀림없이 좀 더 불안정한 cis 형태를 이루고 있다. 이와같은 기하학적 모양은 생물학적으로 아주 중요한 의미를 갖는다. 불포화 지방산의 탄소 사슬이 이중결합 부분에서 구부러져서 다른 분자와 기하학적으로 잘 맞추어지지 않기 때문에 cis형 불포화 지방산은 용융점이 낮다.

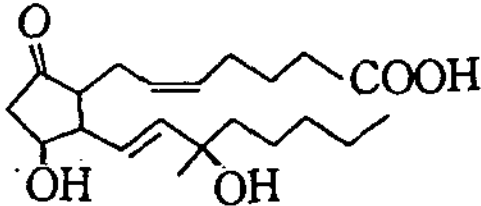
3. 당지질(Glycolipid)

당지질은 이름이 의미하고 있듯이 지질(脂質, lipid)에 당(糖, glyco)이 결합된 것이다. 다시 말하면 당지질은 탄수화물과 사슬이 긴 aliphatic acid(또는 hydroxy aliphatic acid)가 결합된 것이다. 당지질은 생체계면활성제 중에서 가장 흔히 발견되는 것이며, 박테리아의 세포막에 존재하는 glycosyl diglyceride는 가장 보편적인 당지질이다. 당지질은 생체계면활성제로도 여러 종류의 미생물을 사용하여 가장 많이 연구되었다.

당지질계의 생체계면활성제는 결합되는 지질의 종류와 당류만큼 많은 종류가 있을 수 있으나 많이 연구되는 것으로는 trehalose lipid, rhamnolipid, sophorose lipid, cellobiose lipid 등이다. 이들의 생합성에 사용된 미생물을 Table 3에 나타내었다.

Sophorose lipid는 그림 2에서와 같이 이당류인

Table 2. Common fatty acids

Acid	Structure
Saturated fatty acids	
Acetic acid	CH ₃ COOH
Propionic acid	CH ₃ CH ₂ COOH
Butyric acid	CH ₃ (CH ₂) ₂ COOH
Caproic acid	CH ₃ (CH ₂) ₄ COOH
Decanoic acid	CH ₃ (CH ₂) ₈ COOH
Lauric acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ COOH
Myristic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₂ COOH
Palmitic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₄ COOH
Stearic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COOH
Arachidic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₈ COOH
Behenic acid	CH ₃ (CH ₂) ₂₀ COOH
Lignoceric acid	CH ₃ (CH ₂) ₂₂ COOH
Monoenoic fatty acids	
Oleic acid	CH ₃ (CH ₂) ₇ <u>cis</u> CH(CH ₂) ₇ COOH
Dienoic fatty acid	
Linoleic acid	CH ₃ (CH ₂) ₇ <u>cis</u> CHCH ₂) ₂ (CH ₂) ₆ COOH
Trienoic fatty acids	
α-Linolenic acid	CH ₃ CH ₂ CH <u>cis</u> CHCH ₂) ₃ (CH ₂) ₆ COOH
γ-Linolenic acid	CH ₃ (CH ₂) ₄ (CH <u>cis</u> CHCH ₂) ₃ (CH ₂) ₃ COOH
Tetraenoic fatty acid	
Arachidonic acid	CH ₃ (CH ₂) ₄ <u>cis</u> CHCH ₂) ₄ (CH ₂) ₂ COOH
Unusual fatty acids	
Tariric acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ C ≡ CH(C ₂) ₄ COOH CH ₂
Lactobacillic acid	CH ₃ (CH ₂) ₅ - CH(CH ₂) ₉ COOH
Prostaglandin (PGE ₂)	

sophorose, β-D-Glcp-(1→2)-D-Glc에 지질이 결합된 것이다. Sophorose lipid는 이들이 결합된 형태에 따라 락톤형(Fig. 2a, 2c, 2d)과 非락톤형(Fig. 2b)으로 나뉘어 진다. 락톤형은 C1'(1' 탄소 자리를 의미함, 2d 참조)와 C4'에 지질이 결합되어 고리 형태의 구조를 이룬 것이며, 非락톤형은 C1'에 지질이 결합된 구조를 가진다. Sophorose lipid (SL)에는 치환될 수 있는 세 개의 알킬기 R₁(C6'), R₂(C6'), R₃(지방 탄소 사슬의 -COOR₃의 형태)가 있는데 이들은 수소(H), 메틸기(Me), 아세틸기(Ac) 중의 하나이다.

이 세 알킬기가 H, Me, Ac로 치환된 모습에 따라 다음과 같은 sophorose lipid(SL)의 구조 12가지(SL-1부터 SL-12)가 나타난다.

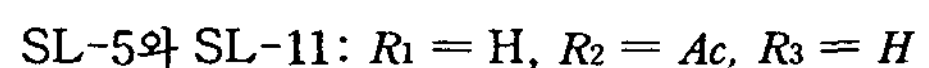
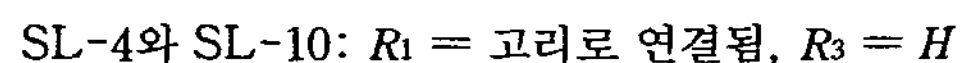
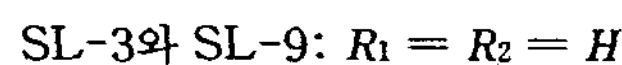
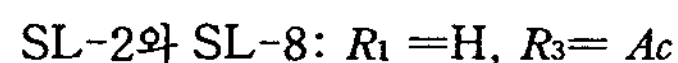
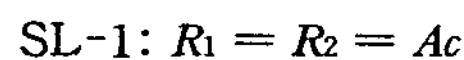


Table 3. Glycolipids and microbes used for syntheses of glycolipids

Biosurfactants	Organisms (genus) or Enzymes
<i>Trehalose mycolates</i>	<i>Arthrobacter paraffineus</i> , <i>Mycobacterium phlei</i> , <i>Rhodococcus erythropolis</i>
<i>Trehalose esters</i>	<i>Mycobacterium fortitum</i> <i>Mycobacterium smegmatis</i> <i>Mycobacterium paraffineus</i> <i>Micromonospora spp.</i> <i>Rhodococcus erythropolis</i>
<i>Mycolates of mono-, di-, and trisaccharides</i>	<i>Corynebacterium diphtheriae</i> <i>Mycobacterium smegmatis</i> <i>Arthrobacter spp.</i>
<i>Sophorolipids</i>	<i>Torulopsis bombicola</i> <i>Torulopsis petrophilum</i> <i>Torulopsis apicola</i> <i>Candida bogoriensis</i> <i>Bacillus subtilis</i> <i>Cornebacterium lepus</i> <i>Rhodococcus erythropolis</i> <i>Mycobacterium</i> , <i>Pseudomonas</i> ,
<i>Cellobiose lipids</i>	<i>Ustilago maydis</i> <i>Ustilago zeae</i>
<i>Rhamnolipids</i>	<i>Pseudomonas spp.</i> <i>Arthrobacter</i> , <i>Corynebacterium</i> , <i>Norcadia</i> ,

SL-7: $R_1 = R_2 = Ac$, 지방 탄소 사슬에 이중 결합이 있음.

非락톤형 구조의 SL-6를 SL의 acidic form이라고 부르고 $R_3=Me$ 인 것을 methyl-SL이라고 부른다. SL-4(-10)은 C1'와 C6'가 지질과 결합하여 고리를 형성하므로 다른 락톤형 SL과 다른 점을 나타낸다. SL 중 SL-1, SL-7, SL-2(-8)은 Tulloch 등⁷⁾이 glucose/octadecane을 기질로 사용한 배양에서, SL-3(-9), SL-4(-10), SL-5(-11)은 Asmer 등⁸⁾이 glucose/oleic acid를 기질로 사용한 배양에서 그 구조를 확인하였다.

Trehalose lipid는 이당류인 trehalose(Fig. 3a)에

지질이 결합한 것이다(Fig. 3b). 이들의 예로서 trehalose dicorynomycolate 와 trehalose tetraester를 Fig. 3c와 3d에 나타내었다. 이 두 trehalose lipid는 박테리아인 *Arthrobacter sp*를 사용하여 얻어졌다.^{9, 10)} Trehalose tetraester의 구조에 있어서 succinate 그룹의 정확한 위치는 최근까지 잘 알려져 있지 않았으나 요즈음에 화학적 방법(hydroboration, acidic hydrolysis)와 NMR(1H, 1D & 2D COSY) 분석에 의해서 succinate 그룹이 C2에 붙는 것이 밝혀졌고, 고자력장 NMR 분석에서 이것이 확인되었다.^{11~13)} C2', C3, C4에 결합하는 지방산은 octanoic(37.8%), nonanoic(5.7%), decanoic(53.3%)이며 나머

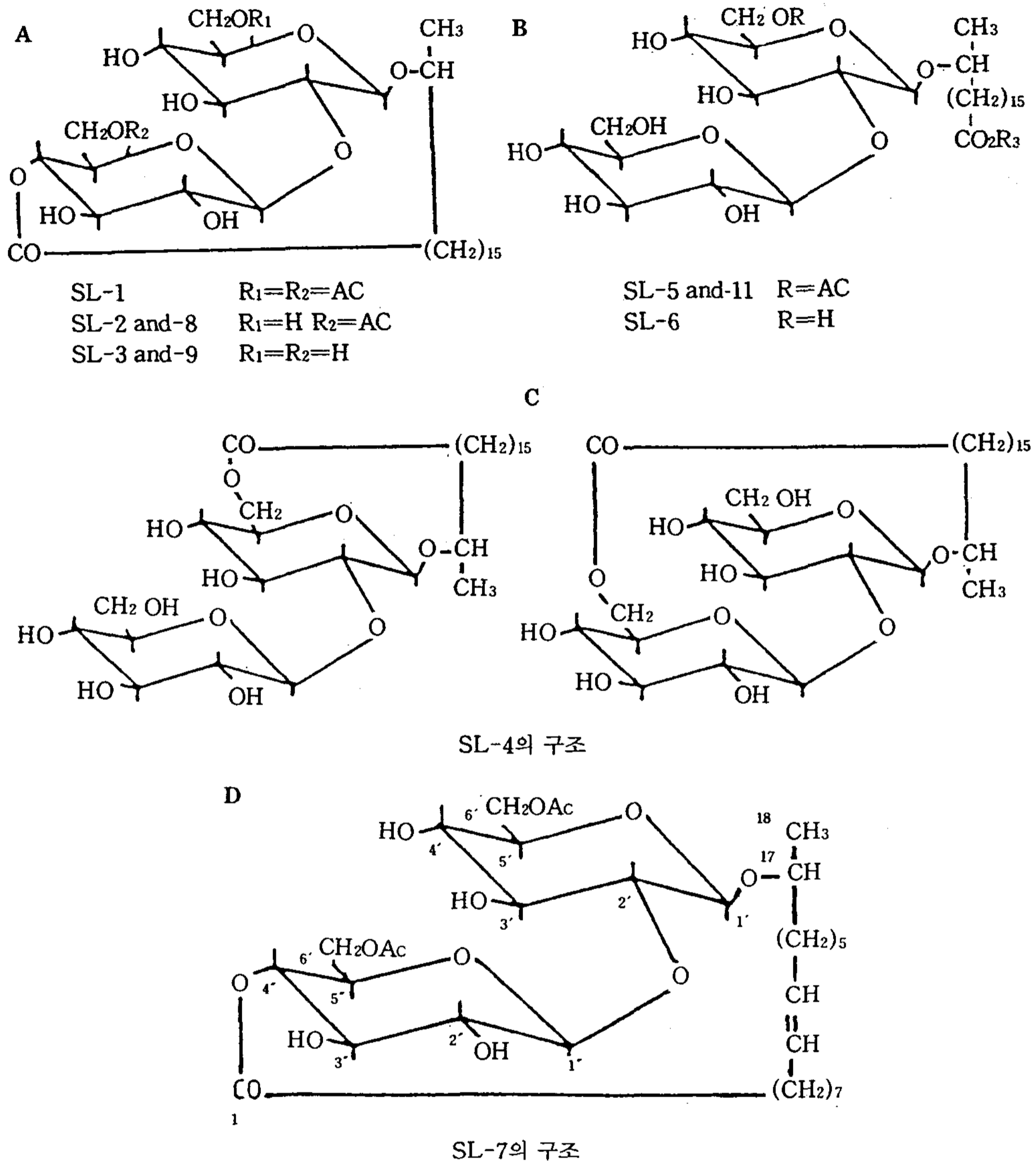


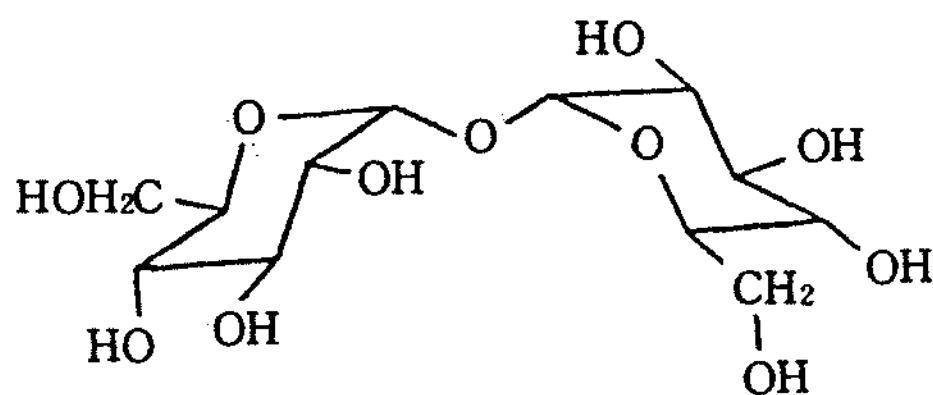
Fig. 2. Structures of sophorose and sophorolipids.

지 3%는 undecanoic, lauric, myristic이다. C6와 C6'에 mycolic acid가 결합한 trehalose lipid는 *Mycobacterium*, *Nocardia*, *Corynebacterium* 박테리아의 세포벽의 구조에 관계한다.

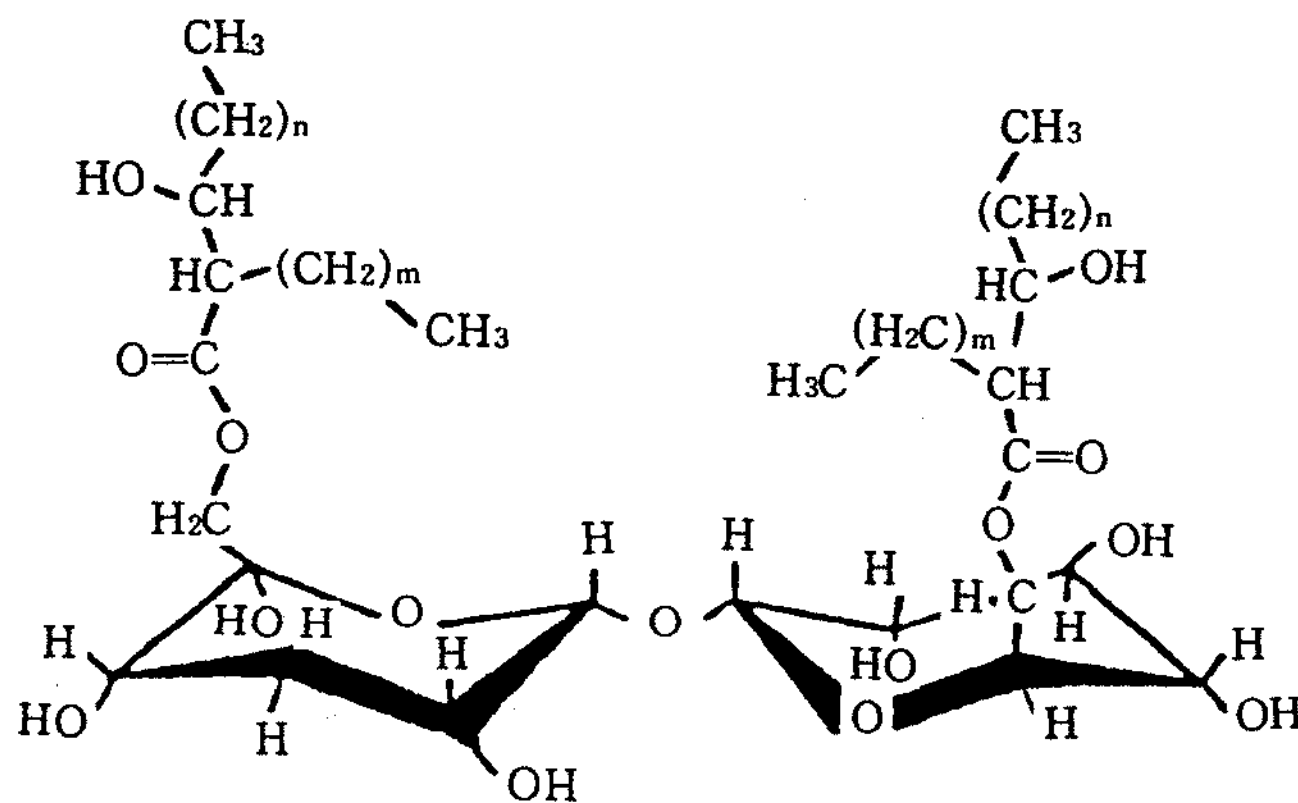
Pseudomonas 박테리아류는 성장 제한 조건에서 음이온성 rhamnolipid를 상당량 생성하는 것으로 알려져 있다.¹⁴⁾ 생성된 rhamnolipid는 단당류인 L-rhamnose(Fig. 4a)에 β -hydroxydecanoic acid가 결합

된 것이다. L-rhamnose 하나에 β -hydroxydecanoic acid 하나와 둘이 결합된 구조를 각각 rhamnolipid 2(RL-2)와 rhamnolipid 1(RL-1)이라 하고, L-rhamnose 둘에 β -hydroxydecanoic acid 하나와 둘이 결합된 구조를 각각 rhamnolipid 4(RL-4)와 rhamnolipid 3(RL-3)이라 한다(Fig. 4b). 미생물 배양으로부터 얻어지는 이 생체계면활성제는 대부분이 RL-3(90%)와 RL-1(10%)이고 RL-2와 RL-4는 미

A

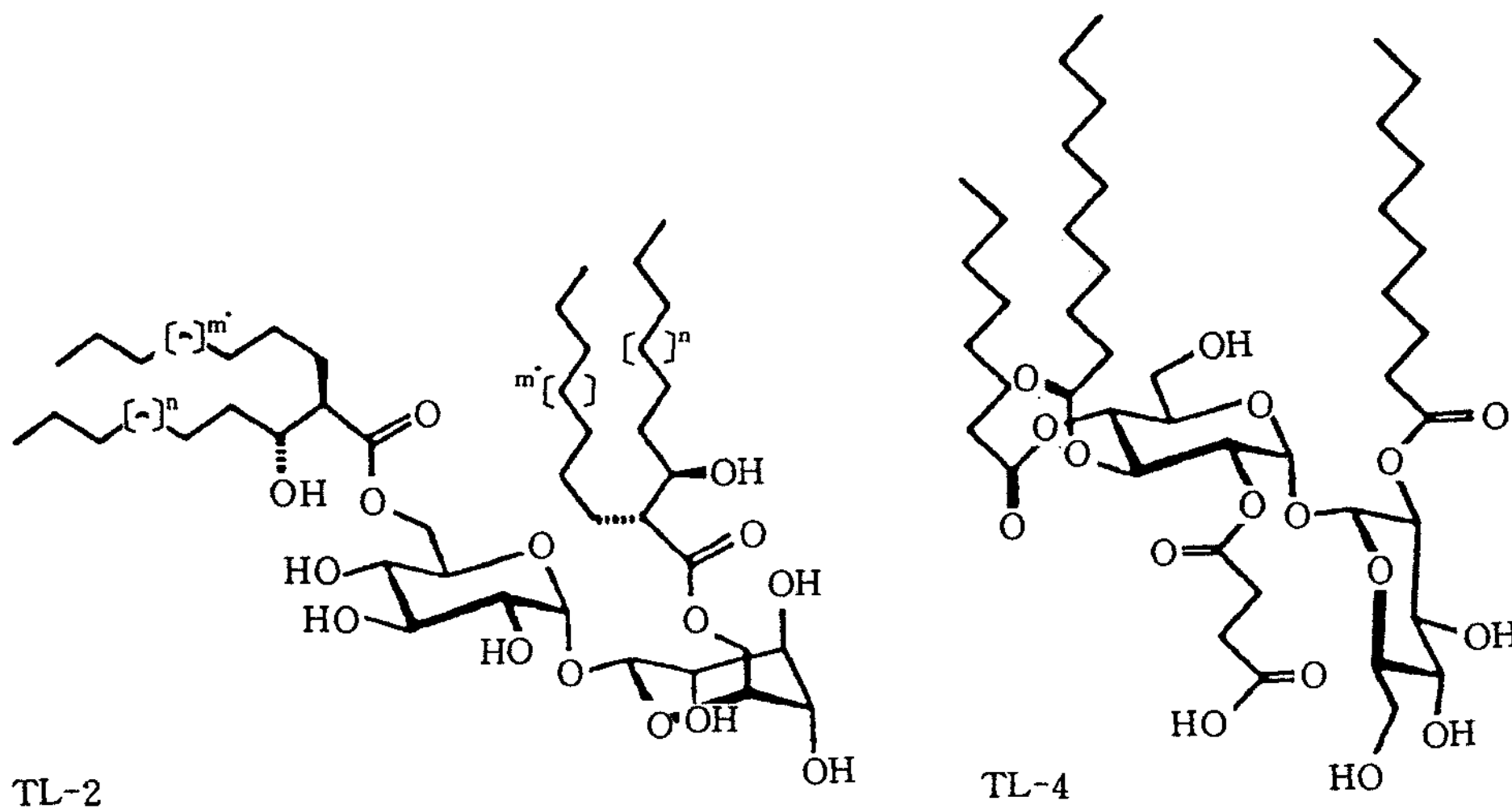


Trehalose



Trehalose Lipid(TL)

B



Trehalose dicorynomycolate (TL-2)와 Trehalose tetraester(TL-4)

Fig. 3. Structures of trehalose and trehalose lipids.

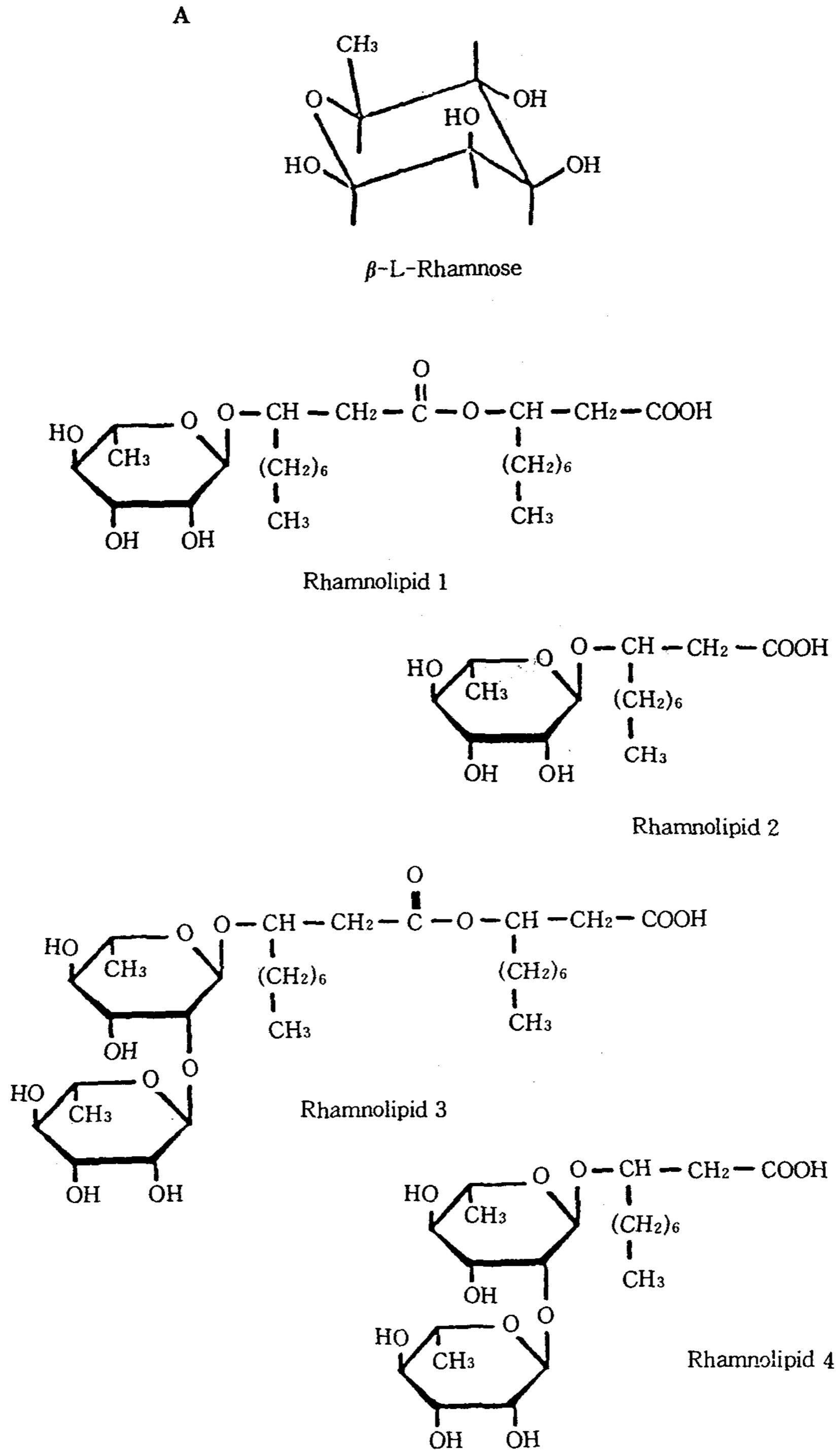


Fig. 4 Structures of rhamnose and rhamnolipids.

량 존재한다.¹⁵⁾

Cellobiose lipid는 이당류인 cellobiose에 지질이 결합된 것이다(Fig. 5). 이 생체계면활성제는 옥수수 의 감부기에서 채취되는 곰팡이인 *Ustilago*를 이용하여 생성된다.¹⁶⁻¹⁸⁾ *Ustilago maydis*를 glucose를 탄소원으로 하여 배양했을 때 친유성 부분은 대부분이 C₆ 지방산이며, coconut oil을 탄소원으로 하였을 때는 C₆ 지방산(37%), C₁₂ 지방산(27%), C₁₄ 지방산(16%)이 주성분이다.

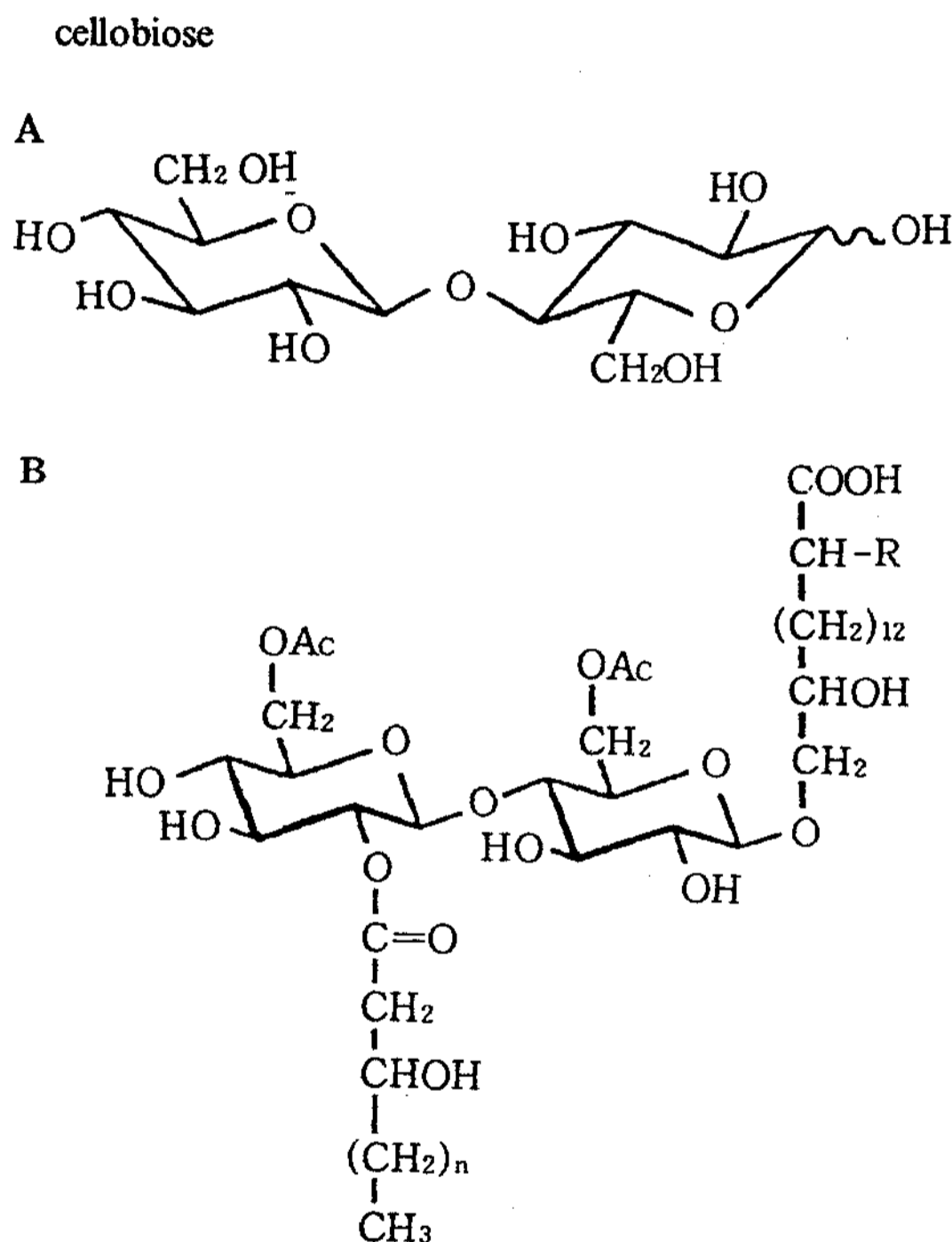


Fig. 5 Structures of cellobiose and cellobiose lipids.

4. 지단백(Lipoproteins)/ 리포펩타이드 (Lipopeptides)

이 부류에 속하는 생체계면활성제는 항생 작용과 같은 생물학적 및 생화학적 특성을 이용할 수 있는 잠재력이 인식되어서 많이 연구되고 있다.

*Bacillus licheniformis*에 의해서 생성되는 리포펩타이드^{19, 20)}는 iturin 그룹의 iturin, mycosubtilin, bacillomycin이거나 락톤형의 surfactin, esperin, polypeptin 등이다.²¹⁾ 이들 중에서 surfactin의 구조

를 Fig. 6a에 나타내었다. Iturin그룹과 락톤형의 리포펩타이드는 유사한 구조를 가지고 있다. 친수성 부분은 7개의 아미노산으로 된 cyclic peptide이며²²⁾ 이 부분이 지방산과 hydroxy 혹은 ester 결합으로 연결되어 있다. Surfactin의 7개 아미노산은 Glutamic acid, Valine, Aspartic acid와 4개의 Leucine이며 친유성 부분은 C₁₄ 지방산이다. Surfactin은 항생 작용뿐만 아니라 계면활성도 나타내는 물질이어서^{23, 24)} 리포펩타이드 중에서 가장 많이 연구되었다. Surfactin은 생화학적인 연구에도 사용될 수 있는데 이는 혈액의 응고와 단백질의 denaturization을 억제하는 능력이 있기 때문이다. Surfactin은 또한 土炭의 탈수에도 사용될 수 있다.

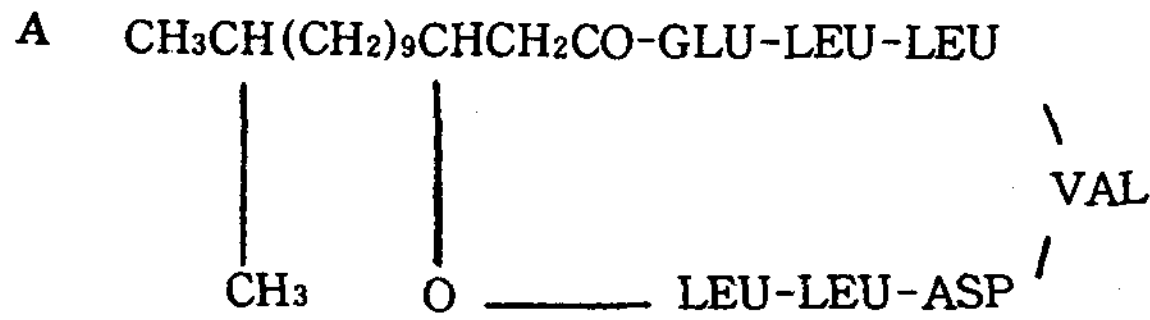
*Streptomyces fradiae*에 의해서 생성되는 락톤형 리포펩타이드²⁵⁾는 Fig. 6b에서와 같이 8개의 아미노산이 고리를 이루고 이 부분이 3개의 아미노산과 아민에 결합되어 있는 구조를 갖는다. 이 구조에서의 X, Y와 R은 여러 종류의 아미노산과 탄화수소로 치환될 수 있어서 이에 따라 여러 다른 구조가 나타난다. 이와 같은 생체계면활성제는 항박테리아 작용이 있어서 가축의 사료에 첨가하여 사용할 수 있다.^{26, 27)}

리포펩타이드는 락톤형 구조 이외에 cyclic 구조를 나타낸다. *Empedobacter halabium*, *Fusarium roseum*, *Halicoma ambiens* 등에 의하여서는 cyclopeptide인 empedopeptin이 생성된다. 후자의 미생물에 의해서 생성되는 traposin A와 traposin B²⁸⁾를 Fig. 6c와 6d에 나타내었다.

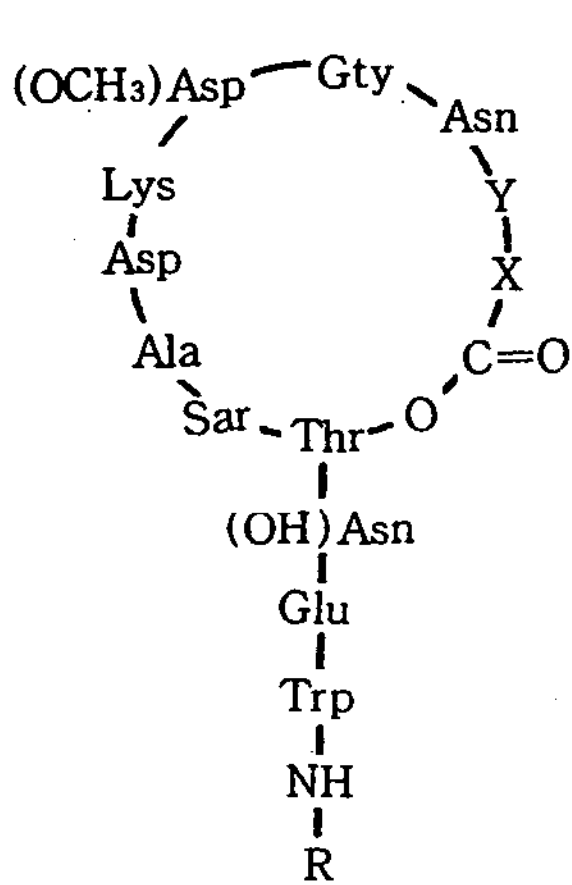
*Aspergillus sydowi*에 의해서 생성되는 mulundocandin^{29, 30)}은 enchinocandin의 일종이며 이의 구조는 Fig. 6e에서와 같다. 이 생체계면활성제는 항곰팡이 및 항효모 작용이 있는 것으로 알려져 있다. 이외에도 여러 미생물을 이용하여 다양한 구조의 리포펩타이드가 합성되고 있다.

5. 지다당(Lipopolysaccharides)

지다당은 일반적으로 다당류(polysaccharide)가 지질에 공유 결합한 구조를 갖는다. 이 때 결합된 지질을 lipid A라고 부르며, 다당류 부분은 O-antigen(혹은 O-specific)과 중심 올리고당류(core oligosaccharide) 부분으로 나뉘어진다. Lipid A 부분은 O-antigen 사슬과 hydrophobic interaction에 의하여

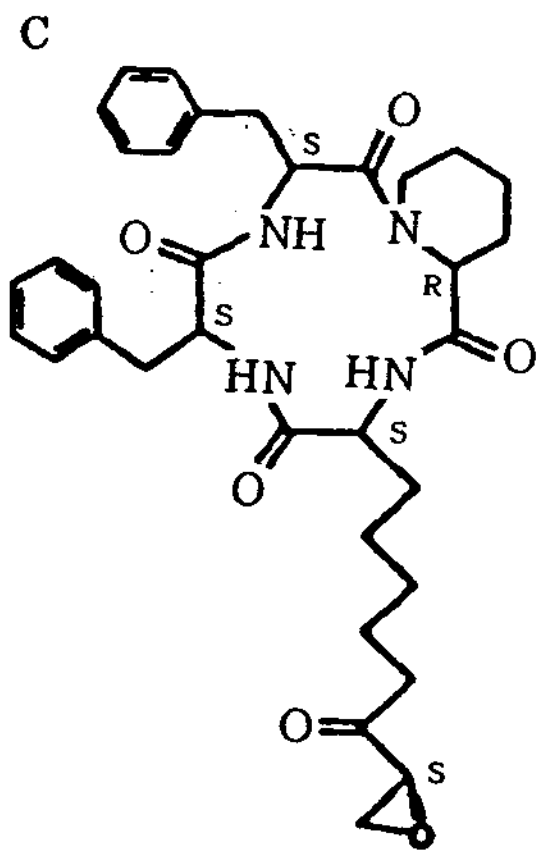


Surfactin

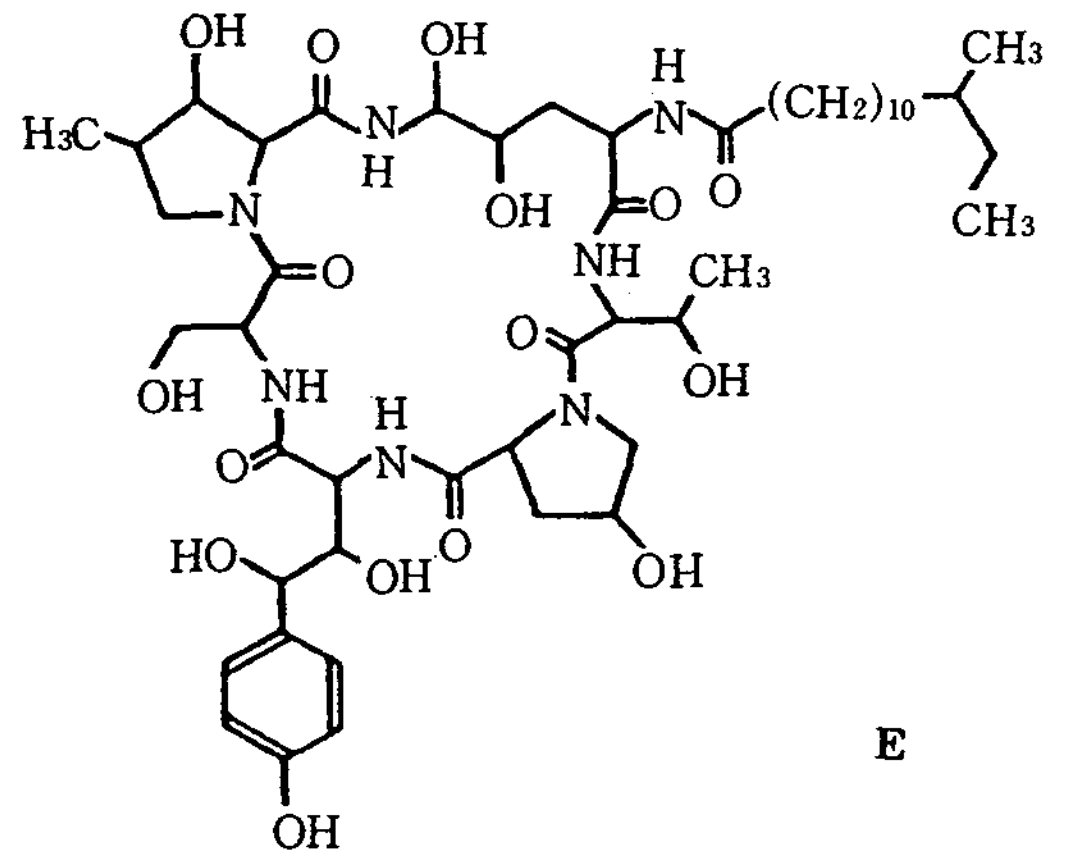
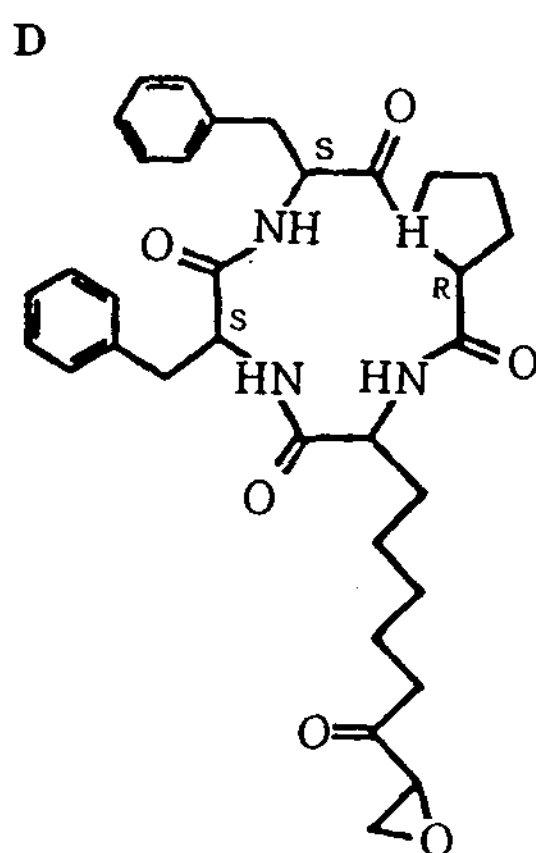


Factor	X	Y	R
A	Ile	Glu	8-Methylnonanoyl (<i>i</i> C ₁₀)
A ₁	Ile	Glu	<i>n</i> -Decanoyl (<i>n</i> C ₁₀)
B	Ile	3-MethylGlu	<i>n</i> -Decanoyl (<i>n</i> C ₁₀)
B ₁	Ile	3-MethylGlu	8-Methylnonanoyl (<i>i</i> C ₁₀)
C	Val	3-MethylGlu	8-Methyldecanoyl (α C ₁₁)
D	Ile	Glu	8-Methyldecanoyl (α C ₁₁)
E	Ile	3-MethylGlu	8-Methyldecanoyl (α C ₁₁)
F	Val	Glu	8-Methylnonanoyl (<i>i</i> C ₁₀)

A lactic lipopeptide form *Streptomyces fradiae*



Trapsin A and Trapsin B



Mulundocandin

Fig. 6. Lipopeptides.

박테리아의 세포 외막의 바깥 쪽으로 배향되어 있다.

지다당의 한 예로서 emulsan의 구조를 Fig. 7에 나타내었다. Emulsan의 repeating unit는 3개의 서로 다

른 glycolipid되어 있는 heterolipopolysaccharide 이다.³¹⁾ Repeating unit의 수에 따라 분자량이 달라질 수 있으며 대개 10⁶ 정도로 매우 크다. 이것은 생체계

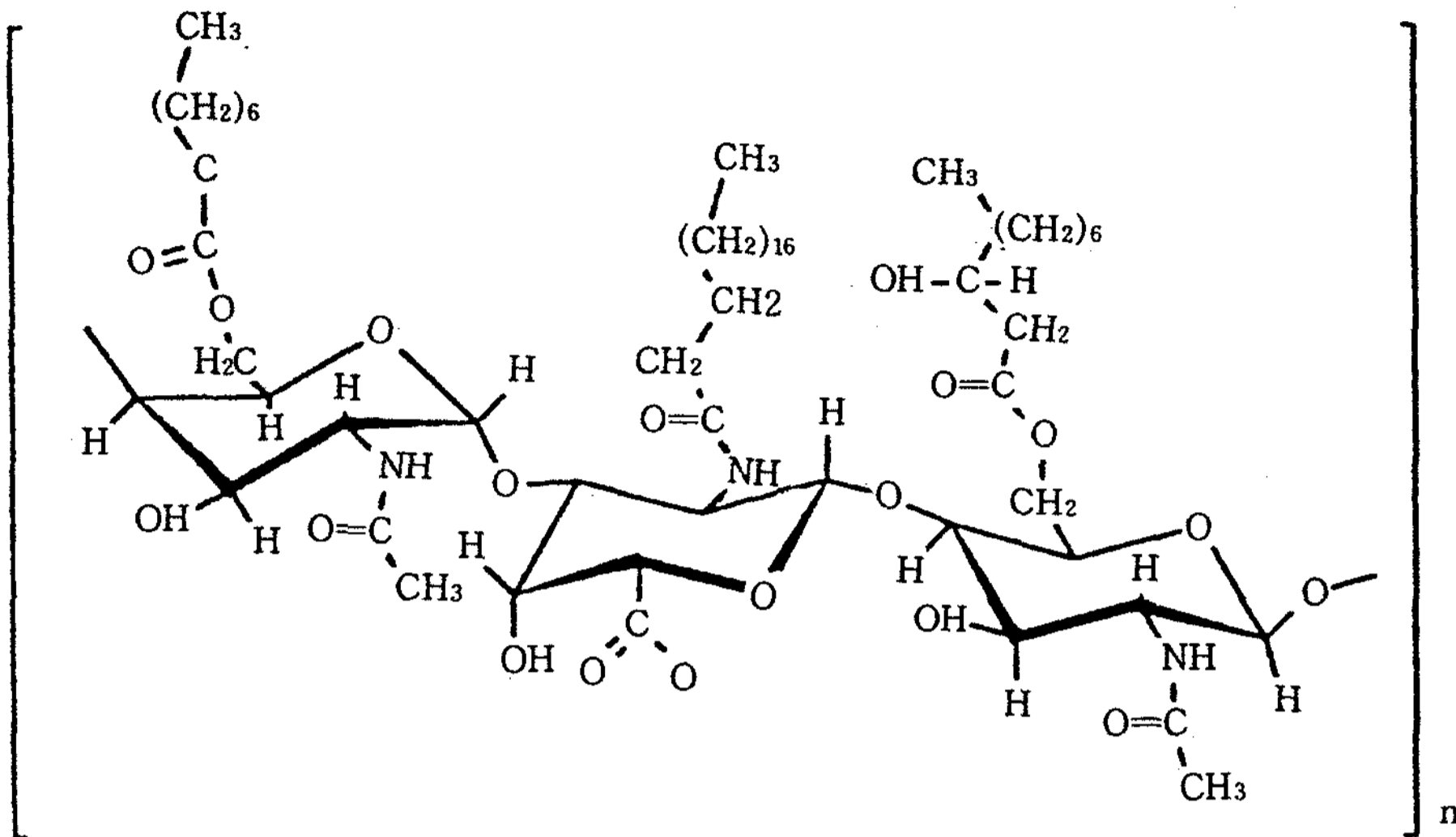


Fig. 7. Emulsan.

면활성제 중에서 유일하게 상업화되어 있는 것이며, 해상에 유출된 기름의 처리, 기름 용기의 세척 및 원유 회수(enhanced oil recovery, EOR) 등에 쓰인다. EOR의 경우에는 emulsan이 계면활성은 없지만 에멀전 입자의 농도가 매우 높아도 에멀전의 구조가 바뀌어지지 않게 한다.^{32, 33)}

6. 인지질(Phospholipids)

인지질은 membrane lipid의 하나로서 glycolipid, cholesterol과 같이 모든 살아있는 미생물의 세포막을 형성하는데 참여한다.³⁴⁾ 인지질은 glycerol, sphingosine, 혹은 보다 복잡한 알콜로부터 유도된다. Glycerol로부터 유도된 phospholipid를 phosphoglyceride라고 하는데 이것이 가장 중요함으로 이의 구조에 대하여 살펴보기로 한다.

Phosphoglyceride는 glycerol 뼈대에 phosphorylated alcohol과 2개의 지방산이 결합되어 있는 구조(Fig. 8a)로 되어 있다.³⁴⁾ Phosphate 그룹은 phosphatide이며 알코올 부분은 serine, ethanolamine, choline, glycerol, inositol 등이다. 이들로 이루어진 phosphoglycerides의 구조를 Fig. 8b에 나타내었다.

인지질은 두 가지 경로를 통하여 얻어진다. 하나는 박테리아를 이용하는 것이고 다른 하나는 효모(또는

다른 진핵 세포)를 이용하는 것이다. 박테리아에 의해서는 주로 phosphatidylserine과 phosphatidylethanolamine이 생성되고 phosphatidylcholine은 생성되지 않는 것으로 알려졌다. 효모에 의해서는 중요한 중간체인 diacylglycerol을 생성하며 이것이 phosphatidylethanolamine, phosphatidylcholine으로 전환될 수 있다.

Phospholipid의 C1 혹은 C2 위치에 acyl 그룹이 없는 인지질을 lysophospholipids라고 하는데 phosphoglycerides보다 계면활성이 좋은 것으로 알려졌다. 이런 계통의 하나인 lysolecithin은 유화제로써 상업적으로 쓰이고 있다.

Phospholipid는 계면활성제로서 뿐만 아니라 liposome(phospholipid vesicle)을 만드는데 사용될 수 있다. 인지질은 순하고 피부에 자극을 주지 않아서 화장품과 의약품에 유용하게 쓰일 수 있다. Liposome은 피부를 통하여 침투할 수 있으며 특정한 피부 층에 도달하게 할 수 있으므로 liposome 내부에 활성 물질을 집어 넣어 피부를 통하여 흡수시키면 효과적이라는 것이 밝혀졌다.³⁵⁾ Liposome의 이와 같은 성질과 더불어 liposome을 제조하는데 사용될 수 있는 새로운 물질이 등장하여서 liposome은 화장품과 의약 산업에서 더욱 중요하게 될 것이다.

지방산과의 에스테르 화합물은 계면활성제로 사용될 수 있는데, 당에스테르의 하나인 sucrose ester의 구조를 Fig. 9에 나타내었다.

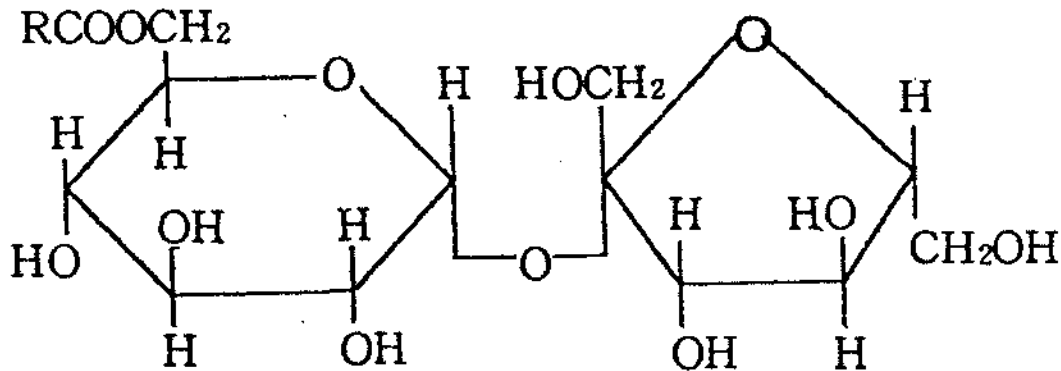


Fig. 9 Sucrose monoester (RCOOCH₂ indicates an ester bond with a fatty acid).

당에스테르는 transesterification에 의해서 만들어질 수 있다.³⁶⁾ 효소인 pancreatic lipase를 사용하여 6-O-acylmonosaccharide를 얻을 수 있었으며, *Candida cylindracea* lipase에 의해서는 sugar diester의 C6 위치가 가수분해 되어서 C₂와 C₃ monoester가 얻어졌다.³⁷⁾ 당류 뿐만 아니라 당알코올로부터도 lipase에 의하여 ester가 얻어진다.³⁸⁾ *Chromobacterium viscosum*의 pancreatic lipase가 triglycerides와 hexitol의 transesterification에 사용되어 92%의 sugar monoester를 생성하였다. 이런 방법으로 얻은 sorbitol monoester의 계면활성이 상업적으로 많이 쓰이는 sorbitan monoester의 계면활성보다 우수한 것으로 조사되었다.

당에스테르는 순하며 피부나 눈에 자극성과 독성이 적고 또한 거의 전 영역의 HLB값을 나타내므로 화장품에 이용될 수 있는, 잠재력이 큰 화합물이다.

IV. 생체계면활성의 특성

화학합성계면활성제의 광범위한 사용과 생태계에 대한 이의 영향으로 말미암아 계면활성제의 독성과 생물학적 조사는 필요불가결한 요소의 하나가 되었다. 지난 15년간 많은 관심을 불러 일으킨 생체계면활성제 종래의 화학계면활성제를 전적으로 대체할 수 있으므로 생체계면활성에 대해서도 이와같은 조사가 이루어졌다.

생체계면활성은 계면과학 분야에서 보다는 생물 관련 분야에서 보다 많은 연구가 행하여져서 양친매성

구조를 갖는 물질을 생체계면활성으로 보는 경향이 있다. 그러나 계면활성제는 effectiveness와 efficiency로 표시되는 계면활성을 나타내어야 한다. 특히 생체계면활성제가 이용될 때, 즉 화장품, 의약품, 식품, 세제, 폐유 처리 등에서는 에멀전과 같은 콜로이드 분산계를 이루어야 하므로 계면활성은 중요하지 않을 수 없다. 이러한 점을 고려하여 생체계면활성의 생물학적, 물리·화학적 및 계면 특성을 살펴보기로 한다.

1. 생물학적 특성

생합성된 여러 종류의 glycolipid는 항생 작용을 나타낸다. 이들 중 어떤 것은 박테리아 피부의 샘(sebaceous glands)을 공격하여 호흡을 방해함으로써 항박테리아 작용을 나타내기도 한다.³⁹⁾ Rhamnolipid의 RL-1 과 RL-3의 혼합물은 농도 35µg/mL(minimum inhibitory concentration, MIC)에서 *B. subtilis*의 성장을 억제하였으며, antibacterial, mycoplasmaicidal, antiviral작용을 나타내는 rhamnolipid는 pesticide로 사용될 수 있다. *R. erythropolis*에 의해서 생성된 succinyl-trehalose lipid의 LD₅₀은 herpes simplex virus에 대해서는 11µg/mL, influenza virus에 대해서는 33µg/mL이므로^{40), 41)} 항바이러스 기능을 효과적으로 수행할 수 있다. Trehalose lipid 중 2, 2', 3, 3'-tetra-O-alkyl-α, α'-trehalose는 항암 작용이 있는 것으로 보고되었다.

Fig. 6에 소개된 lipopeptides는 모두 항생작용을 나타낸다. Surfactin은 혈액 응고를 억제하고 적혈구를 용해시키며 어떤 박테리아의 spheroplast와 원형질을 용해시킨다.^{42) 43)} Surfactin은 또한 *Mycobacterium*屬의 미생물의 성장을 억제하며(minimum inhibitory concentration, MIC=5000µg/mL), pyrrolnitrin과 함께 사용하면 *Tricophyton mentagrophytes*에 대하여 항곰팡이작용을 나타낸다.⁴⁴⁾ Iturin A, bacillomycin, mycosubtilin은 항곰팡이제로 사용될 수 있으며, bacillomycin-F는 *Aspergillus niger*와 *Saccharomyces cerevisiae*에 대하여 항박테리아작용을 한다. Trapoxin A와 B는 항암작용이³⁰⁾, mulundocandin은 항곰팡이와 항효모작용³¹⁾을 나타낸다. 이외에도 많은 종류의 lipopeptide가 항생작용 등 여러 생물학적 작용을 나타낸다.

Phospholipid는 허파 파리의 공기/액체 계면에서

발견되는데, 이 생체계면활성의 작용으로 허파 파리가 쭉그러 들지 않아야 정상적인 호흡을 할 수 있다. 조산아 중에는 이 생체계면활성이 부족하여 호흡곤란으로 사망하는 경우가 있는데 이를 sudden infants death syndrome이라고 한다. 이와같은 경우에는 bovine-based surfactant를 흡입케 하여 치료할 수 있다.

2. 물리·화학적 특성

Glycolipid는 물에는 거의 녹지 않고 유기 용매에 녹는 경우가 있다. Trehalose-6, 6'-dicorynomyc-메탄올 혼합물에 녹는다. Rhamnolipid RL-1과 RL-3는 메탄올, 클로로포름, 에틸아세테이트, 에틸에테르에 용해되지만 n-hexane에는 용해되지 않는다.⁴⁵⁾ Sucrose lipid는 상온에서는 n-hexane, 에테르, 클로로포름에, 조금 높은 온도에서는 아세톤과 메탄올에 용해된다.

Surfactin은 알칼리 수용액, 메탄올, 에탄올, 아세톤, 에틸아세테이트, 클로로포름, 클로로메탄, 아세트산에 용해되지만 물, 헥산, petroleum ether에는 용해되지 않는다.

생체계면활성은 여러 분야에서 이용될 수 있으므로 이의 반응성과 안정성이 중요하지 않을 수 없다. 화학 반응으로는 glycolipid에 대하여 구조 판명의 목적으로 가수분해, 산화 반응, 에스테르화 반응이 조사되었는데 아무런 어려움이 없이 진행되었으며, 안정도에 대하여서는 현재로서는 자료가 미미하다.

3. 계면 특성

생체계면활성의 계면 특성은 이미 언급한 바와 같이 micelle을 형성하기 시작하는 농도인 CMC와 표면(계면)장력으로 살펴 볼 수 있다. CMC가 작으면 효과적(effective)이고 표면 장력이 30mN/m(계면 장력이 1mN/m) 정도이면 효율적(efficient)인 생체계면활성라 할 수 있다. 생체계면활성의 CMC와 표면(계면)장력의 예를 Table 4에 실었다. Table 4에 나타난 생체계면활성은 CMC가 1-200ppm로서 비교적 낮은 값을 나타내므로 효과적이라고 할 수 있으나, 표면(계면)장력의 관점에서는 rhamnolipid가 효율적이라고 할 수 있다. Rhamnolipid는 이와같이 계면활성이 좋아서 Exxon사의 Valdez호에 의해서 원유가 유출 되었을 때 이를 처리하는데 사용되었다.

Surfactin도 표면 장력이 27mN/m, 계면 장력이 1mN/m⁴⁶⁾로서 우수한 계면활성을 나타내어서, surfactin의 생물학적 특성과 더불어 이의 활용이 기대된다.

계면 특성으로는 또한 유화능, 가용성, 습윤성 등도 중요시된다. Sophorolipid는 효율성과 효과성에서는 우수하지만 유화능이 나빠서 화장품과 같은 에멀전 제품에 이용되지 못하고 있다. Sopholipid /decane /water 3성분계 에멀전에서 에멀전이 30분 만에 상분리가 일어나는 것을 관찰할 수 있었다.⁴⁷⁾

V. 생체계면활성의 활용

생체계면활성은 이미 언급한 계면활성제의 모든 영역에서 사용될 수 있으나 생체계면활성의 역할이 부각되는 화장품, 식품, 의약, 환경에의 응용을 중심으로 살펴보고자 한다.

생체계면활성은 독성과 자극성이 적고 보습성이 좋아서 화장품에 사용되기에 적합한 원료이다. 당지질계의 sophorolipid(SL)은 stick make-up으로 사용될 수 있으며, 보습력이 좋아서 피부나 두발용 화장품으로도 사용될 수 있다. 일본의 Kao Soap Ltd에서는 1mol SL과 12mol propylene glycol을 주조로 하는 보습 화장품을 개발하기도 하였다. 또한 지다당류의 emulsan을 알로에 추출물 및 다른 계면활성제와 혼합하여 cleansing cream으로 사용할 수 있으며, 인지질 liposome은 피부를 통하여 침투가 잘 되는 성질을 나타내어서 화장품에 사용되었는데 Capture는 liposome을 사용한 최초의 상업화 된 화장품이다. 이 밖에 N-acylaminoacid는 피부와 두발의 보습용 화장품과 피부 보호용 화장품에 사용될 수 있다.

식품에 사용될 수 있는 생체계면활성로는 당지질이 유망할 것으로 생각된다. 이것은 당지질계 생체계면활성가 단당류나 oligosaccharide의 지방산 ester를 합성에 의해서 얻은 것과 아주 유사하기 때문이다. Sophorolipid는 감미료로 사용될 수 있으며, 밀가루에 첨가하면 빵과 과자를 만들었을 때 품질이 좋아지고 shelf life도 늘어나게 한다.⁴⁸⁾ 또한 mannosylerythrytol lipid도 식품에 사용될 수 있는 생체계면활성제이다.

생체계면활성은 항균력과 항생력이 있어서 의약품

Table 4. CMC and interfacial tensions of some biosurfactants

Biosurfactant	Microorganism	C-source	Tension	Surface tension (mN/m)	Interfacial CMC (mN/m)
Glycolipid					
Glycolipids	<i>Rhodococcus aurantiacus</i>	n-alkane	26	0.35	na
Glycolipids	<i>Rhodococcus sp. H13A</i>	hexadecane	na	0.02 ^b	1.5g /L
Glycolipids	<i>Torulopsis apicola</i>	alkane /carbohydrate	30	<0.9 ^b	na
Pentasaccharide lipid	<i>Nordica corynebacteriodes</i>	alkane	26	<1 ^a	25mg /L
Rhamnolipid	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	glucose	29	0.25	na
Rubiwetins	<i>Serratia rubidaea</i>	glycerol	25.5	na	10mg /L
Sophorose lipid	<i>Torulopsis bombicola</i>	glucose /oleic acid	35	1.8	na
Trehalose-mono, dicorynomycolates	<i>Nordica corynebacteriodes</i> <i>Rhodococcus erythropolis</i>	n-alkane	32-36	14-17	4mg /L
Lipopeptide / Amino lipids					
Lipopeptides	<i>Bacillus licheniformis JF2</i>	glucose	27	0.016 ^b	0.02mg /L
Lipopeptides	<i>Bacillus licheniformis 86</i>	glucose	27		
Viscosin	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	glycerol	26.5	na	150mg /L
Serrawettin	<i>Serratia marcescens glycerol</i>	28-34	na	na	
Fatty acid /Neutral lipids					
Fatty acid	<i>Corinebacterium lepus</i>	kerosene /alkane	na	2 ^c	150mg /L
Fatty acid ⁺ Neutral lipids	<i>Nocardia erythropolis</i>	hexadecane	32	<3	na
Others					
Protein-Carbohydrate Complex	<i>Pseudomonas fluorescens</i> 378	sucrose	27	na	< 10mg /L
Phosphatidylethanol amines na	<i>Rhodococcus erythropolis</i> <i>Corynebacterium insidiosum</i>	n-alkane hexadecane	30 28.5	<1 0.55 ^a	39mg /L na

a : Interfacial tension measured against hexadecane. b : against decane. c : against kerosene.
na : Not Available

에 사용될 수 있는 물질이다. 소(牛)의 허파에서 얻어지는 생체계면활성과 같은 인지질은 미숙아의 사망률을 줄이기 위하여 사용되는 유용한 물질이다. 미숙아로 태어나는 갓난 아기에게는 폐포(肺胞)의 형태를 유지시켜주는 계면활성제가 분비되지 않아서 미숙아는 사망하게 되는데 이를 영아 돌연사(Sudden Infants Death Syndrome)라고 한다. 미숙아의 폐포의 형태를 일정 기간 유지시켜 주면 계면활성제가 신체에서 자연적으로 생성되어 돌연사를 막을 수 있으므로 이를 위하여 생체계면활성을 에어로졸 형태로 만들어 흡입

하게 한다.

당지질계의 생체계면활성은 항종양성과 항바이러스성을 나타내는 것도 있다. Nagashima 등⁴⁹⁾은 2, 2', 3, 3'-tetra-O-alkyl- α , α' -trehalose를 종양을 가진 쥐에 대해서 실험했을 때 항종양성이 있음을 관찰하였으며, Kawai 등⁵⁰⁾은 succinylated trehalose lipid가 Herpes simplex type I virus에 대하여 항바이러스성이 있음을 관찰하였다.

지단백 /lipopeptide 계통의 생체계면활성은 의약 및 생화학 분야에서 이용될 수 있는 잠재력이 큰 물질

이다. 이미 언급한 바와 같이 surfactin은 용혈 작용이 있으며, fusol은 혈관 성형 동안에 국소 빈혈을 완화시키는 효과가 있음이 알려졌다. 또한 poloamer 407은 대체 혈액 표면의 흡착을 도와 주고 delmoponol은 충치 예방효과가 있음이 알려졌다. 이외에도 arthrofactin, serrawettin이 생체계면활성로서의 역할을 훌륭히 수행할 것으로 기대되고 있다.

생체계면활성은 이의 연구가 활성화된 원인을 제공한 환경 개선 분야에 잘 활용될 수 있다. 지다당류인 emulsan은 해수에 유출된 원유를 처리하는 계면활성제로서의 우수한 효능이 인정되어서 상업화되었다. 생체계면활성 중에서 상업화된 것은 현재 emulsan 뿐이다. Emulsan은 미국의 Petroferm사에 의하여 상업화되었고, 캐나다의 Geodyne Technologies의 계열사인 Multi-Biotech은 emulsan을 이용한 원유 회수 (enhanced oil recovery)의 상업화 공정을 연구 중에 있다.

Emulsan은 또한 높은 농도의 분산상을 갖는 에멀전에서 형태 변환이 일어나지 않는 것으로 알려져서 우수한 유화제로 사용될 수 있으며 이외에도 succinoyl trehalose lipid, emulcyan등도 분산제로서 우수한 잠재력을 가지고 있는 것으로 알려졌다.

VI. 생체계면활성의 전망

생체계면활성은, 이미 살펴 본 바와같이, 우수한 생분해도, 낮은 독성, 환경 친화성과 같은 여러 장점이 있다. 그러나 이와같은 장점에도 불구하고 생체계면활성이 실제적으로 이용되는 예가 적은 것은 무엇보다도 가격이 비싸기 때문이다. 일반적으로 널리 쓰이는 화학합성계면활성제는, Table 5에서와 같이, 1990년의 가격으로 kg당 1달러 정도이나 생체계면활성은 이보다 훨씬 비싸다.⁵¹⁾ 따라서 생체계면활성 실용화의 성패를 좌우하는 것은 가격이 비싼 단점을 극복하는 일이며 이를 위하여 여러 방안이 고려되고 있다.

우선 생체계면활성의 수율을 높이는 일이 중요하다. 생체계면활성은 미생물과 효소에 의해서 생합성되므로, 우수한 성질을 나타내는 종균을 찾아내거나 개발하고, 이들 미생물과 효소가 살아가는 환경인 배지를 개발하는 일이 중요하다. 또한 발효는 미생물, 기질, 배지의 비균질계에서 일어남으로 미생물이 기질에 효과적으로 부착할 수 있도록 계면 과학적인 고찰도 시행하여야 한다.

생체계면활성 생산 단가의 절반 정도는 발효 공정에

Table 5. Comparison of biosurfactants with synthetic surfactants

Producing organism	Surface tension (mN/cm)	Critical micelle concentration(mg/L)	1990 Cost (\$/kg) ^a
<i>R. erythropolis</i>	37	15	12.20
<i>P. aeruginosa</i>	29	15	5.90
<i>T. bombicola</i>	37	82	2.80
<i>B. subtilis</i>	27	11(0.01mM)	20.32
Anionic synthetics			
Detergent alkylate			
Dodecylbenzene(LABS)	47	590(1.2mM)	1.03
Sodium lauryl sulfate			
(SLS or SDS)	37	2023-2890 (7-10 mM)	0.95(30%) 26.00(98%)

a : Biosurfactant costs are calculated on the basis of raw material accounting for 35% of the total cost, assuming kerosene, molasses and meal as substrates.

b : Accurate Chemical and Scientific Corp., Westbury, NY.

Source : Ref. 51.

기인하기 때문에 발효 공정의 단가를 낮추어야 한다. 이를 위하여는 생체계면활성 생합성 과정의 유전적 분석, 미생물 고정화에 의한 생산, 미생물 대신 효소를 쓰는 공정 등을 살펴보아야 한다.

위와같은 방법을 통하여 값이 싼 생체계면활성을 생산하였다고 하더라도 생체계면활성계면활성제로서의 기능을 나타내어야 한다. 대부분의 생체계면활성은 이미 지적인 바와 같이 표면장력 강하능이 우수하고 CMC가 낮아서 계면활성제로서 효율적이고 효과적이라고 할 수 있으나 유화능, 가용성, 습윤성, detergency 등은 만족스러운 수준에 이르지 못하고 있다. Table 5에서 보는 바와같이 *T. bombicola*에 의해서 생합성되는 생체계면활성 sophorolipid는 가격이 kg당 2.8달러로 다른 생체계면활성보다 훨씬 싸며 alkylate detergent와도 가격 경쟁력이 있어 보인다. 뿐만 아니라 습윤성이 좋아서 화장품에 상용화될 수 있으나 유화능이 나빠서 안정한 에멀전을 형성하지 못하므로 상용화를 위하여서는 유화능에 대한 연구가 더 이루어져야 할 것이다.

위에서 살펴본 바와같이 생체계면활성의 가격 경쟁력을 높이기 위해서는 (가) 미생물의 개발, (나) 배지의 개발, (다) 고도의 특성과 선택성을 갖는 생체계면활성의 합성, (라) 보다 저렴한 발효 공정의 개발, (마) 우수한 계면 과학적 성질과 같은 요소가 두루 고려되어야 한다. 따라서 생체계면활성의 실용화는 biology, biotechnology, interfacial science 세 분야의 전문가들이 상호 협동을 통해서 더욱 효율적으로 또한 더욱 빠르게 이루어질 수 있을 것이다.

문 헌

1. Greek, B. F. : *Chem. Eng. News*, 68, 37 (1990).
2. Milton, M. J. : *Surfactants in Emerging Technology*, Surfactant Science Series, 26, Marcell Dekker, New York, (1987).
3. Rosen, M. J. : *Surfactants and Interfacial Phenomena*, 2nd ed., Wiley, New York, (1989).
4. Beerstecher : E., *Petroleum Microbiology*, Elsevier, Houston, (1954).
5. Desai, J. D. ; Desai, A. J. : in *Biosurfactants and Biotechnology*, Surfactant Science Series, 48, Marcell Dekker, New York, pp 65-97, (1993).
6. Morrison, R. T. ; Boyd, R. N. : *Organic Chemistry*, Allyn and Bacon, Boston, (1973).
7. Tolluch, A. P. ; A. Hill ; Spencer, J. F. T. : *Can J. Chem.*, 46, 3337 (1968).
8. Asmer, H. J. ; Lang, S. ; Wagner, F. ; Wray, V. : *JAOCS*, 65, 1460 (1988).
9. Schulz, D. ; Passeri, A. ; Schmidt, M. ; Lang, S. ; Wagner, F. ; Wray, V. ; Gunkel, W. ; *Z. Naturforsch.*, 46c, 197 (1991).
10. Passeri, A. ; Lang, S. ; Wagner, F. ; Wray, V. : *Z. Naturforsch.*, 46c, 204 (1991).
11. Rapp, P. ; Block, H. ; Wray, V. ; Wagner, J. : *Gen. Microbiol.* 115, 491 (1979).
12. Ristau, F. ; Wagner, F. : *Biotechnol. Lett.*, 5, 95 (1983).
13. Kim, J. S. ; Powalla, M. ; Lang, S. ; Wagner, F. ; Lunsdorf, H. ; Wray, V. : *J. Biotechnol.*, 13, 257 (1990).
14. Syldatk, C. ; Lang, S. ; Matulovic, U. ; Wagner, F. : *Z. Naturforsch.*, 40c, 65 (1985).
15. Syldatk, C. ; Thesis, Ph. D. ; Stuttgart, U., (1990).
16. Lemieux, R. U. ; Thorn, J. A. ; Bauer, H. : *Can J. Chem.*, 31, 1054 (1953).
17. Bhattacharjee, S. S. ; Haskins, R. H. ; Gorin, P. A. : *Carbohydrate Res.*, 13, 232 (1970).
18. Frantz, B. ; S. Lang ; Wagner, F. : *Biotechnol. Lett.*, 11, 757 (1986).
19. Lang, S. ; Wagner, F. : in *Biosurfactants and Biotechnology*, Surfactant Science Series, 48, Marcell Dekker, New York, pp 251-268, (1993).
20. Jenny, K. ; Deltriev, V. ; Kappeli, O. : in *Biosurfactants and Biotechnology*, Surfactant Science Series, 48, Marcell Dekker, New York, pp 136-156 (1993).
21. Umezawa, H. ; Takita, T. ; Shiba, T. : *Bioactive Peptides Produced by Microorganisms*, Hanser Press, Tokyo, (1978).

22. Kakinuma, K. ; Oachida, A. ; Shima, T. ; Suginoh, H. ; Isono, M. ; Tamura, G. ; Aarima, K. : *Agr. Biol. Chem*, **33**, 1669 (1969).
23. Arima, K. ; Kakinuma, K. ; Tamura, G. : *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, **31**, 488 (1968).
24. Bernheimer, A. W. ; Avigad, L. S. : *J. Gen. Microbiol.*, **61**, 361 (1970).
25. Fukuda, D. S. ; Debono, M. ; Molloy, R. M. ; Mynderse, J. S. : *J. Antibiot.*, **43**, 594 (1990).
26. Lilly, U. S. patent No. EP 337-331 (1988).
27. Counter, F. T. et al : *J. Antibiot.*, **43**, 616 (1990).
28. Itazaki, H. et al : *J. Antibiot.*, **43**, 1524 (1990).
29. Roy, K. ; Mukhopadhyay, T. ; Reddy, G. C. S. ; Desikan, K. R. ; Ganguli, B. N. : *J. Antibiot.*, **40**, 275 (1987).
30. Mukhopadhyay, T. ; Ganguli, B. N. ; Fehlh-
aber, H. W. ; Kogler, H. ; Vertesy, L. : *J. Antibiot*, **40**, 281 (1987).
31. Rosenberg, E. ; Zuckerberg, A. ; Rubinovitz, C. ; Gutnick, D. L. : *Appl. Environ. Microbiol.*, **37**, 402 (1979).
32. Belsky, I. ; Gutnick, D. L. ; Rosenberg, E. : *FEBS Lett.*, **49**, 192, (1985).
33. Gutnick, D. L. ; Shabtai, Y. : in *Riosurfactants and Biotechnology*, Surfactant Science Series, **25**(Kosaric, N. ; Cairns, W. L. ; Gray, N. C. C. eds.). Marcel Dekker, New York, pp. 211, (1987).
34. Stryer, L. : *Biochemistry*, 3rd. ed., Freeman, New York, (1988).
35. Lautenschlager, H., : *Cosmet. Toilet.*, **105**, 89 (1990).
36. Desai, N. : *Cosmet. Toilet.*, **105**, 99 (1990).
37. Therisod, M. ; Kilbanov, A. M. : *J. Am. Chem. Soc.*, **109**, 3977 (1987).
38. Chopineau, J. ; Mccafferty, F. D. ; Therisod, M. ; Kilbanov, A. M. : *Biotechnol. Bioeng.*, **31**, 208 (1988).
39. Lang, S. ; Katsiwsela, E. ; Wagner, F. : *Fat Sci. Technol.*, **91**, 363 (1989).
40. Uchida, Y. ; Tsuchiya, R. ; Chimo, M. ; Hirano, J. ; Tabuchi, T. : *Agr. Biol. Chem.*, **53**, 757 (1989).
41. Uchida, Y. ; Misawa, S. ; Nakahara, T. ; Tabuchi, T. : *Agr. Biol. Chem*, **53**, 765 (1989).
42. Bernheimer, A. W. ; Avigad, L. S. : *J. Gen. Microbiol.*, **61**, 361(1970).
43. Kakinuma, K. ; Hori, H. ; Isono, M. ; Tamura, G. ; Arima, K. : *Agr. Biol. Chem.*, **33**, 971 (1969).
44. Arima, K. ; Tamura, G. ; Kasinuma, A., DE-OS 1803 987 (1968).
45. Itoh, S. ; Honda, H. ; Tomoto, F. ; Suzuki, T. : *J. Antibiot.*, **24**, 855 (1971).
46. Cooper, D. G. ; MacDonald, C. R. ; Duff, S. J. B. ; Kosaric, N. : *Appl. Environ Microbiol.*, **65**, 408 (1986).
47. 강창범 ; 석사 논문, 중앙대학교 화학공학과, 1996.
48. Kitahata, S. ; Okada, S. ; Edakawa, S. : Japanese Patent Kokai 63-116,668 (1988).
49. Nagashima, N. ; Matsuda, H. ; Kuraishi, T. ; Katori, T. ; Kukita, K. : Japanese Patent Kokai 63-19,598 (1987).
50. Kawai, A. ; Kayano, M. ; Funada, T. ; Hirano, J. : Japanese Patent Kokai 63-126,493 (1988).
51. Cooper, D. G. ; Paddock, D. A. : *Appl. Environ. Microbiol.*, **47**, 173 (1984).

감 사

이 논문은 1995년도 중앙대학교 교내 학술 연구비에 의하여 연구 되었음.