

Lignin을 分解하는 *Streptomyces strains*에 의한 페놀화합물의 分解

金 泰 田[†]

서울保健大學 臨床病理科

The Degradation of Phenolic Compounds by Lignolytic *Streptomyces strains*

Tai Jeon Kim[†]

Dept. of Medical Technology, Seoul Health College, Korea

(Received 30 July 2000 ; Accepted 10 September 2000)

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the degradation efficiency of phenol compounds(catechol, ferulic acid, protocatechuic acid, syringic acid, and vanillic acid) by *Streptomyces halstedii scabies* SAI-36, *Streptomyces avendulas* SA2-14, and *Streptomyces badius* (ATCC 39117, control group). The results were as follows: Catechol showed the degradation efficiency that is lower than 50% in three strains. Ferulic acid and vanillic acid showed high degradation efficiency of 98.8% and 94.5% respectively by *Streptomyces lavendulas* SA2-14. protocatechuic acid and syringic acid showed high degradation efficiency of 89.6% and 77.9%. The degradation efficiency of catechol by *Streptomyces halstedii scabies* SAI-36, *Streptomyces lavendulas* SA2-14 and *Streptomyces badius*(ATCC 39117) was low as 49.2%, 40.2% and 20.2% respectively. But the degradation of other phenolic compounds except catechol by *Streptomyces lavendulas* SA2-14 showed relatively high degradation efficiency that was 4-10% higher than these by *Streptomyces halstedii scabies* SAI-36 and *Streptomyces badius* (ATCC 39117). The results demonstrated that two experimental strains are superior ability to control group in degradation of phenol compounds and *Streptomyces lavendulas* SA2-14 was superior of two experimental strains. This results were consistent with previous research results that *Streptomyces lavendulas* SA2-14 was the best strain in degradation ability for lignin, decoloration abilities for variousdyes, and various enzyme production abilities. Therefore, it is suggested that lignin can be used as a indicator when selecting *Actinomycetes* for degradation of non-degradable materials such as phenol compounds.

Keyword : Lignin, *Streptomyces*, Catechol, Ferulic acid, Protocatechuic acid, Syringic acid, Vanillic acid, Polynuclear aromatic hydrocarbons(PAHs)

I. 서 론

식물조직내의 세포막에 존재하여 결합제(cementing substances)로서 작용하고, 또한 목질화를 가져오는 주요성분으로 작용하는 리그닌(lignin)은 무정형의 노란색 혹은 갈색을 띠며 벗짚, 밀짚, 겨 등에는 10-20%, 칩엽수나 낙엽수의 목질부에는 18-28% 가량 함유되어 있다.^{1,2)} 그리고 리그닌은 단량체(monomeric unit)들 즉, 코니페릴 알콜(coniferyl alcohol), 유우제놀(eugenol), 카테콜(catechol), 페놀(phenol), n-프로필 구아이아콜(n-propyl guaiacol), 메칠알콜(methyl alcohol)등이 무질서하게 배열되어 3차원의 구조를 형성하고 있는 난분해

성의 물질이다.^{1,3)}

리그닌을 분해하는 미생물로는 백색부후균인 *Phanerochate chrysosporium*가 리그닌 분해연구의 모델이 되어 왔다.^{4,5)} 그러나 방선균의 여러 균주에서도 식물 세포벽에 있는 리그노셀룰로오스(lignocellulose)를 분해할 수 있다는 사실이 밝혀졌다.^{6,7)} 방선균에 의한 리그닌 분해는 대부분 *Streptomyces*에 속하는 균들로 *Streptomyces viridosporus* T7A(ATCC 39115),^{6,8-12)} *Streptomyces badius* 252,¹¹⁾ *Streptomyces cyaneus*,¹³⁾ *Streptomyces chromofuscus*,¹³⁾ *Streptomyces rochei*,¹³⁾ *Streptomyces diastaticus*¹³⁾를 비롯하여 토양에서 분리된 여러 *Streptomyces* 아종⁸⁾들과 그밖에 *Thermomonospora*,^{6,12,14)} *Nocardia*, *Rhodococcus*^{15,16)}등이 소개되었다. 그들이 리그닌을 분해하는 기전은 잘 알려져 있지 않지만 *Streptomyces virido-sporus* T7A는 셀룰로오스를 분해하는 동안에 리그닌을 탈중합화하여 중요산물

[†]Corresponding author : Department of Medical Technology, Seoul Health College, Korea
Tel: 031-740-7154, Fax: 031-740-7268
E-mail: taijeon@www.shjc.ac.kr

로 수용성 APPL(acid precipitable polymeric lignin)을 생산함이 보고되어 왔으며,^{8,17-19)} 이와 비슷한 분해기전은 *Thermomonospora mesophila*에서도 발견되었다.¹²⁾ 또한 리그노 셀룰로오스를 분해하는 동안에 APPL과 더불어 한개의 벤젠고리를 가진 방향족 페놀물질을 방출하는 *Streptomyces*에 속하는 균들도 있는 것으로 보고되었다.¹⁸⁾ 특히 Ramachandra 등^{10,20)}은 *Streptomyces*에 의한 리그닌 분해에 리그닌 분해를 유도하는 peroxidase(lignin inducible peroxidase)가 관여함을 주장하였다. 이것은 peroxidase가 H₂O₂에 의존하는 여러 페놀화합물들의 산화를 촉매하고 있음이 밝혀지고, 리그닌 분해능이 강한 균주들에서 보다 많은 peroxidase가 생산되고 또한 APPL을 많이 생산하는 균주들에서 peroxidase의 수치가 높다는 것이 발견됨으로서 입증되었다.¹⁰⁾ 이런 사실들은 본 저자들이 리그닌의 분해능이 우수한 방선균으로 선정된 한국 토양에서 새로 분리한 두 *Streptomyces* 아종, *Streptomyces halstedii scabies* SAI-36과 *Streptomyces lavendulus* SA2-14에 서로 관찰할 수 있었다.^{21,22)}

따라서 본 실험은 새로 분리된 이 두 방선균주를 이용하여 페놀화합물의 분해능을 조사하고, 앞서 발표된 리그닌의 분해능,²¹⁾ 각종 염료의 탈색능,^{21,23,24)} 그리고 각종 효소생산능²²⁾과의 관계를 비교 검토하여 난분해성 물질인 페놀화합물들의 미생물학적 분해균주의 선정에 리그닌의 활용여부를 알아보고자 하는데 있다.

II. 재료 및 방법

1. 사용균주 및 균주보존²¹⁻²⁴⁾

균주로는 김²¹⁾과 김 등에²²⁻²⁴⁾의해 앞서 리그닌 분해 우수 균주로 선정된 *Streptomyces halstedii scabies* SAI-36과 *Streptomyces lavendulus* SA2-14를 사용하였고 대조균으로는 *Streptomyces badius*(ATCC 39117)을 사용하였다. 선정된 균주는 Bennett's 한천배지에서 증균시켜 냉장고에 보존하고 2개월마다 계대 배양하여 보관하였다.

2. 균액의 제조²¹⁻²⁴⁾

100 ml의 삼각플라스크에 25 ml Bennett's 액체배지를 넣고 멸균한 후 보관된 각각의 균주를 한 loop씩 접종하여 30°C에서 7일간 진탕 배양(100 rpm, shaking incubator, Model SI-1, 우주과학공사)시킨 후 배양액을 원침(5000 rpm, 5분)시켜 2회 멸균 증류수로 세척한 다음 660 nm에서 흡광도(OD)가 0.85되게 균액을 만들었다.

3. 페놀화합물의 분해

(1) 페놀화합물의 종류 및 용액 제조

본 실험에 사용된 페놀화합물은 catechol, ferulic acid, protocatechuic acid, syringic acid, vanillic acid였으며, 이들은 N-N-dimethylformamide로 용해(최종농도 10 mg/ml)시켜 은박지로 포장하여 냉암소에 보관하여 사용하였다.

(2) 페놀화합물들의 최대흡수파장 조사²¹⁻²⁴⁾

최적 배지액 1 ml당 페놀화합물인 catechol, ferulic acid, protocatechuic acid, syringic acid, vanillic acid 각각 0.1 mg씩 포함되게 페놀화합물에 용액을 혼합하여 그들의 최대흡수 파장을 분광광도계(UV-2000,

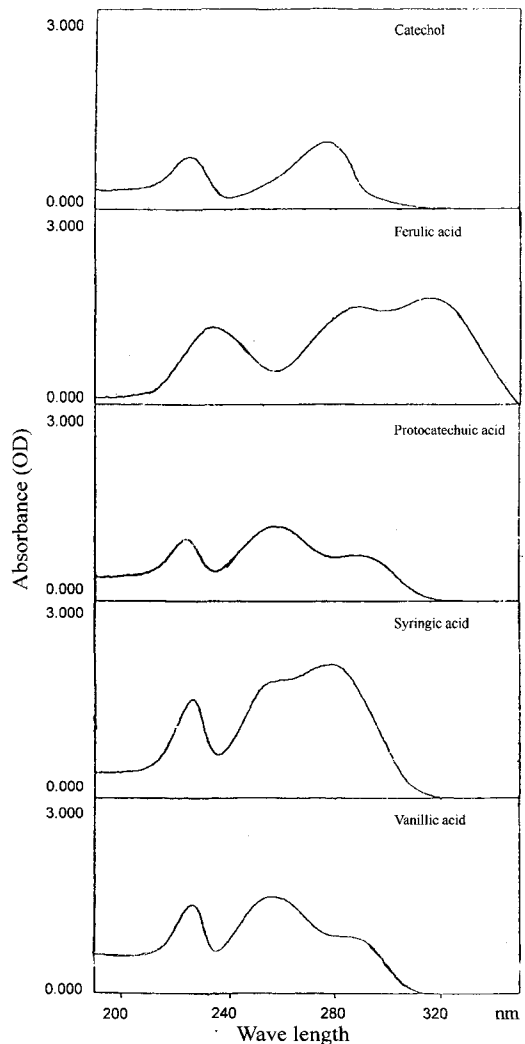


Fig. 1. The maximum wave length scanning of phenolic compounds in culture fluid.

Spectrophotometer, Hitachi, Co., Japan)를 이용하여 200 nm에서 350 nm까지 검색한 결과 각각 276 nm, 387nm, 255 nm, 270 nm, 255 nm에 최대 흡수파장을 얻을 수 있었다(Fig. 1 참조).

(3) 배양

김 등에²²⁻²⁴⁾의해 제조된 최적 분석배지를 100 ml의 삼각플라스크에 25 ml씩 넣고, 제조된 균액을 0.2 ml씩 접종하여 30°C에서 2일간 진탕 배양(100 rpm)한 후 페놀화합물들을 배지액 1 m³당 0.1 mg이 되도록 페놀화합물 용액 0.25 ml를 첨가하여 20일 동안 배양시켰다. 또한 각 균주들에 대한 페놀화합물들의 대조구에는 제조된 생균액을 121°C에서 15분간 멸균시킨 사균액 0.2 ml씩을 접종하여 배양시켰다.

(4) 페놀화합물의 분해를 측정

페놀화합물의 분해율은 Leatham 등²⁵⁾의 방법을 변형하여 조사하였다. 각각의 배양액을 채취하여 원침(100 rpm, 5분)시켜 얻은 상층액 1 ml를 5 ml의 85% Ethanol과 혼합하여 4시간 동안 실온에 방치한 후 앞서 조사된 각 페놀화합물의 최대흡수파장과 분광광도계(UV-2000, Spectrophotometer, Hitachi, Co., Japan)을 이용하여 동일한 균주와 동일한 페놀화합물을 포함한 배양에서 생균을 접종한 배양액과 사균을 접종한 대조구의 배양액 사이에 최대 흡수파장에서의 흡광도치를 대조구의 흡광도로 나눈 것을 %로 나타낸 것을 그 페놀화합물의 분해율로 하였다.

즉, 페놀화합물의 분해율(%) =

$$\frac{\text{대조구의 OD} - \text{실험 검체의 OD}}{\text{대조구의 OD}} \times 100$$

분해율을 2회 중복 측정하여 그 차가 10% 이하인

것만을 채택하고, 20%이상 차이가 있는 것은 실험을 다시 하여 측정하였다.

III. 결 과

본 저자 등에 의해 우리 나라 토양에서 새로 분리된 방선균들 중 리그닌의 분해능이 좋고, 각종 염료의 탈색능이 좋고, 그리고 그들에 의해 생산되는 각종 효소들의 측정치도 높은 것으로 조사된 두 방선균 *Streptomyces halstedii scabies* SA1-36과 *Streptomyces lavendulus* SA2-14 그리고 대조구인 *Streptomyces badius*(ATCC 39117)를 이용하여 페놀화합물들의 분해능을 조사한 결과들은 다음과 같다.

1. 균주별 페놀화합물의 분해

(1) *Streptomyces*(S.) *halstedii scabies* SA1-36에 의한 페놀화합물들의 분해

S. halstedii scabies SA1-36에 의한 페놀화합물들의 분해율은 Table 1에서 보는 바와 같이 배양 20일에 vanillic acid가 90.1%로 가장 높은 분해율을 나타냈고, 다음으로 ferulic acid가 89.8%, protocatechuic acid가 76.5%, syringic acid가 73.3%, catechol은 49.2%의 분해율을 나타내어 catechol이 잘 분해되지 않는 것으로 나타났다. 배양일에 따른 이들의 분해율은 5종류의 페놀화합물 중 catechol을 제외한 다른 페놀화합물은 배양 5일째 이미 20일째의 분해율에 2/3이상의 분해율을 나타내 배양 초기에 분해가 활발한 것으로 나타났다.

(2) *Streptomyces*(S.) *lavendulus* SA2-14에 의한 페놀화합물들의 분해

S. lavendulus SA2-14에 의한 페놀화합물들의 분해율

Table 1. The biodegradation of phenolic compounds by *S. halstedii scabies* SA1-36, *S. lavendulus* SA2-14, and *S. badius*(ATCC 39117) according to cultural days

Phenolic Compounds	Strains Days	<i>S. halstedii scabies</i> SA1-36				<i>S. lavendulus</i> SA2-14				<i>S. badius</i> (ATCC 39117)			
		5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
Catechol	L.C Absorbance(OD)	0.619	0.607	0.451	0.407	0.575	0.544	0.48	0.500	0.746	0.760	0.701	0.655
	Biodeg. R.(%)	20.1	24.4	37.4	49.2	29.7	31.3	35.2	40.7	8.5	9.6	12.2	20.2
Ferulic acid	L.C Absorbance(OD)	0.466	0.409	0.365	0.190	0.229	0.188	0.133	0.023	0.572	0.406	0.456	0.378
	Biodeg. R.(%)	74.8	77.6	80.4	89.8	87.8	90.1	92.7	98.8	69.6	78.2	75.2	80.4
Protocatechuic acid	L.C. Absorbance(OD)	0.346	0.270	0.268	0.257	0.194	0.161	0.196	0.119	0.392	0.347	0.312	0.280
	Biodeg. R.(%)	67.3	73.4	74.8	76.5	83.2	85.1	85.5	89.6	67.1	70.1	73.4	76.2
Syringic acid	L.C. Absorbance(OD)	0.507	0.380	0.415	0.404	0.383	0.389	0.372	0.368	0.500	0.475	0.470	0.453
	Biodeg. R.(%)	66.9	69.2	70.9	73.3	74.9	75.4	76.2	77.9	65.7	68.2	68.5	70.4
Vanillic acid	L.C. Absorbance(OD)	0.411	0.326	0.264	0.186	0.200	0.161	0.080	0.023	0.419	0.306	0.232	0.142
	Biodeg. R.(%)	78.1	82.7	85.9	90.1	86.7	89.3	94.5	98.5	77.6	84.3	87.8	92.3

Biodeg. R. (%) : Biodegradation ratios. L.C. : Living cell. S. : *Streptomyces*.

은 Table 1과 같이 ferulic acid가 98.8%, vanillic acid가 98.5%, protocatechuic acid가 89.6%, syringic acid가 77.9%, catechol은 40.7%로 나타났다. 이 결과에 따르면 ferulic acid와 vanillic acid는 100%에 가까운 높은 분해율을 나타냈으나 catechol은 매우 적은 분해율을 보였다. 배양일에 따른 이들의 분해율은 5종류의 페놀화합물 중 catechol을 제외한 것들은 *S. halstedii* *scabies* SA1-36과 비슷한 분해율을 나타냈다.

(3) *Streptomyces*(*S.*) *badius*(ATCC 39117)에 의한 페놀화합물들의 분해

대조구인 *S. badius*(ATCC 39117)에 의한 5종류의 페놀화합물의 분해율을 측정할 결과는 Table 1과 같으며 배양 20일에서 vanillic acid 92.3%, ferulic acid는 80.4%, protocatechuic acid는 76.2%, syringic acid는 70.4%, catechol은 20.2%로 분해되어 vanillic acid가 가장 좋은 분해율을 보였고 catechol은 가장 낮은 분해율을 보였다. 배양일에 따른 분해율은 배양초기 보다는 후기에 좋은 것으로 나타났다.

이와같은 결과들에서 보면 두 실험균주가 대조구보다 높은 페놀화합물들에 대한 분해율을 나타냈고, 그리고 두 실험균주간에는 *S. lavendulus* SA2-14가 높은 분해율을 나타냈다.

IV. 고 찰

담자균인 *Phanerochate chryso sporium*에 의한 리그닌의 분해에 가장 중요한 것은 리그닌의 방향족 고리를 자르는 일로, 이는 페놀화합물들의 분해에서도 같은 기전으로 알려져²⁶⁾ 미생물에 의한 리그닌 분해에 관한 연구에서는 리그닌과 관련된 적은 분자량을 가진 페놀화합물들을 기질로 종종 이용하여 왔다.²⁵⁾ 바로 본 실험에 이용한 균주들은 리그닌 분해능이 우수한 방선균들로 리그닌 분해에 중간산물들에 해당하는 5종류의 페놀화합물인 catechol, ferulic acid, protocatechuic acid, syringic acid, vanillic acid를 최적 배지액 1 ml당 0.1 mg되게 하여 *Streptomyces halstedii* *scabies* SA1-36과 *Streptomyces lavendulus* SA2-14 그리고 대조구인 *Streptomyces badius*(ATCC 39117)을 접종하여 분해율을 조사한 결과 *Streptomyces halstedii* *scabies* SA1-36은 각각 49.2%, 89.8%, 76.5%, 73.3%, 90.1%의 분해율을 보였고, *Streptomyces lavendulus* SA2-14은 40.7%, 98.8%, 89.67%, 77.9%, 98.5%, 대조구인 *Streptomyces badius*(ATCC 39117)은 20.2%, 80.4%, 76.2%, 70.4%, 92.3%의 분해를 각각 나타냈다. 이 결과들에서 보면 *Streptomyces lavendulus* SA2-14는 대

조구인 *Streptomyces badius*(ATCC 39117) 보다 5종류의 페놀화합물들에 대한 분해율이 매우 우수하였으나 *Streptomyces halstedii* *scabies* SA1-36은 catechol의 경우만 분해율에 큰 차를 보였고, 나머지 페놀화합물에서는 비슷한 수준의 분해율을 나타내 *Streptomyces lavendulus* SA2-14가 가장 우수한 균주임을 나타냈다. 본 실험과 같은 방법으로 백색부후균인 *Phanerochate chryso sporium*에 의한 페놀화합물들의 분해율은 catechol 22%, ferulic acid 100%, protocatechuic acid 94%, syringic acid 79%, vanillic acid 100%로 보고된 바 있다.²⁵⁾ 이는 각종 염료 탈색과 효소에 관한 설명에서 이미 언급한 것과²²⁻²⁴⁾ 같은 현상이라 하겠지만 *Phanerochate chryso sporium*나 방선균에 의한 방향족 화합물의 분해는 그들을 수산화된 중간산물들(hydroxylated intermediates)로 산화시킨 후 고리분열 dioxygenase로 핵을 분열시키는 것으로 알려져 있다.²⁵⁾ 특히 방선균목(*Actinomycetales*) 중에서는 *Nocardia*에서만 이런 과정이 다소 알려져 있을 뿐 *Streptomyces*과(*Streptomyces*)에 있어서는 거의 알려져 있지 않은 상태이다.²⁷⁾

*Rhodococcus spp.*에서 새로이 분류된 *Nocardia spp.*는 catechol을 benzoate²⁸⁾로, protocatechuic acid를 p-anisate, p-hydrobenzoate, vanillate, veratrate로,^{28,29)} 그리고 gentisate를 m-anisate와 m-hydroxybenzoate로 분해시키며,³⁰⁾ vanillate와 veratrate은 *Streptomyces* 균주들에 의해 guaiacol로 산화되는 것으로 알려져 있다.³¹⁾ 이같은 방향족 화합물들의 분해에 있어 가장 중요한 것은 dioxygenase이며,^{25,27)} 방선균목에서 생성되는 dioxygenase로는 catechol을 분해할 수 있는 *Rhodococcus spp.*에서 생성되는 1.2 dioxygenase 내지 2.3 dioxygenase이고,³²⁾ protocatechuic acid와 gentisate는 *Rhodococcus spp.*와 *Streptomyces spp.*에서 생성되는 3.4 dioxygenase와 1.2 dioxygenase에^{28,33)} 의해 분해되며, protocatechuic acid는 *Nocardia spp.*에서 발견된 4.5 dioxygenase에³⁴⁾ 의해 분해된다. 그리고 homogentisate는 *Rhodococcus spp.*에서 생성되는 1.2 dioxygenase에 의해서 분해되는 것으로 알려져 있다.³³⁾ 또한 이런 dioxygenase들의 생성은 균종이나 배양 배지의 환경, 즉 배지내에 여러 종류의 유도체들에 따라 다른 것으로 나타났다.²⁷⁾

본 실험에서 사용된 UV 분광광도계 분석법의 단점은 분해 산물들이 출발물질들과 구분되지 않는다는 것과 또 하나의 단점은 배양배지에서 어떤 dioxygenase도 검출되지 않는다는 것이다. 그것은 중간 분해 산물들이 출발물질보다도 높은 흡광도를 나타내기 때문이며,²⁵⁾ dioxygenase검출 실패는 이 효소 측정을 위한 배양 배

지의 축출이 지나치게 손실 되었거나, 분석법 그 자체가 충분한 예민도를 갖고 있지 못했기 때문이라 생각된다. 따라서 최근에는 감응이 좋은 등위원소 trapping 방법들이 개발되었다.²⁵⁾ 그러나 UV 분광광도계법은 보다 간편하고 경제적인 방법으로 페놀화합물들의 생물학적 분해의 유무를 가리는 방법으로는 훌륭한 방법이라고 생각된다.

V. 요약 및 결론

Streptomyces halstedii scabies SA1-36과 *Streptomyces lavendulus* SA2-14 그리고 대조구인 *Streptomyces badius*(ATCC 39117)를 이용하여 페놀화합물들의 분해능을 조사한 결과들을 요약하면 다음과 같다.

페놀화합물인 catechol의 분해는 세균주 모두에서 50% 미만의 분해를 보였고, ferulic acid와 vanillic acid는 *Streptomyces lavendulus* SA2-14에 의해 98.8%와 94.5%의 아주 높은 분해율을 보였다. protocatechuic acid와 syringic acid도 89.6%와 77.9%의 높은 분해율을 나타냈다. 그리고 *Streptomyces halstedii scabies* SA1-36와 대조구인 *Streptomyces badius*(ATCC 39117)에 의한 페놀화합물의 분해도 *Streptomyces lavendulus* SA2-14와 같은 현상으로 catechol에서는 49.2%와 20.2%로 매우 저조하나 나머지 페놀화합물들에 대해서는 *Streptomyces lavendulus* SA2-14보다는 약 4-10% 정도 낮지만 비교적 높은 분해율을 나타냈다.

이상의 결과에서 보면 두 실험균주가 대조구보다 페놀화합물의 분해에 있어 보다 좋은 균주로 그리고 두 실험균주간에는 *Streptomyces lavendulus* SA2-14가 좀 더 우수한 균주로 사료된다.

따라서 페놀화합물과 같은 난분해성 물질들의 분해와 관련된 방선균의 분리선정에 리그닌을 표시자(indicator)로 사용함이 좋을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문의 실험을 위해 애써준 강릉 현대 중앙병원 임상병리과 진승효 선생에게 깊은 감사의 마음을 표하고자 합니다.

참고문헌

- 1) 김동훈 : 식품화학, 탐구당, 서울, 331-333, 1990.
- 2) 한문희, 최양수, 박명옥 : Hemicellulose의 효소 분해와 발효. 주요공업, 1, 64-73, 1981.
- 3) Tien, M., and Kirk, T. K.: Lignin-degrading enzyme from the hymenomycetes *Phanerochate chrysosporium* Burds. Science, **221**, 661-663, 1983.
- 4) Field, J. A de Jong, E., Feijoo-Costa, G., and de Bont, J. A. M.: Screening for ligninolytic fungi applicable to the biodegradation of xenobiotics. TIBTECH., **11**, 44-49, 1993.
- 5) Orth, A. B., Royse, D. J., and Tien, M.: Ubiquity of lignin-degrading peroxidase among various wood-degrading fungi. *Appl. Environ. Microbiol.* **59**, 4017-4023, 1993.
- 6) Carlos Trigo and Andrew S. Ball: Is the solubilized product from the degradation of lignocellulose by actinomycetes a precursor of humic substances ?. *Microbiol.*, **140**, 3145-3152, 1994.
- 7) McCarthy, A. J.: Lignocellulose-degrading actinomycetes. *FEMS. Microbiol. Rev.*, **46**, 145-163, 1987.
- 8) Don L. Crawford, Anthony L. Pometto III. and Ronald L. Crawford: Lignin degradation by *streptomyces viridosporus* : Isolation and characterization of a new polymeric lignin degradation intermediate. *Appl. Environ. Microbiol.*, **45**, 898-904, 1982.
- 9) Sylvester P. Antal and Don L. Crawford: Degradation of softwood, hardwood, and grass linnocelluloses by two *Streptomyces* strains. *Appl. Environ. Microbiol.*, **42**, 378-380, 1981.
- 10) Ramachandra, M., m D. L. Crawford, and A. L. Pometto III.: Extracellular enzyme activities during lignocellulose degradation by *streptomyces spp.*: a comparative study of wild-type and genetically manipulated strains. *Appl. Environ. Microbiol.*, **53**, 2754-2760, 1987.
- 11) Phelan, M. B., D. L. Crawford, and A. L. Pometto III.: Isolation of lignocellulose-decomposing Actinomycetes and degradation of specifically C¹⁴-labelled lignocellulose by six selected *streptomyces* strains. *Can. J. Microbiol.*, **25**, 1270-1276, 1979.
- 12) McCarthy, A. J., A. Paterson, and P. Broda.: Lignin solubilization by *Thermomonospora mesophila*. *Appl. Environ. Microbiol. Biotechnol.*, **24**, 347-352, 1986.
- 13) Maria B. Pasti, Anthony L. Pometto III, Marco P. Nuti, and Don L. Crawford: Lignin-Solubilizing Ability of Actinomycetes Isolated from Termite(Termitidae) Gut. *Appl. Environ. Microbiol.*, **56**(7), 2213-2218, 1990.
- 14) McCarthy, A. J. and Cross, J.: A taxonomic study of *Thermomonospora* and other monosporic actinomycetes. *J. Gen. Microbiol.*, **130**, 5-25, 1984.
- 15) Rojanowski, J., Haider, K. and Sundamn, V.: Decomposition of C¹⁴-labelled lignin and phenols by a *Nocardia spp.* *Arch. Microbiol.*, **114**, 149-153, 1977.
- 16) Haider, K., Trojanowski, J. and Sundamn, V.: Screening for lignin degrading bacteria by means of C¹⁴-labelled lignins. *Arch. Microbiol.*, **119**, 103-106, 1978.
- 17) Crawford, D. L.: Lignocellulose decomposition by selected *Streptomyces* strains. *Appl. Environ. Microbiol.*, **35**, 1041-1045, 1978.
- 18) Crawford, D. L.: Microbial conversions of lignin to

- useful chemicals using a lignin-degrading *Streptomyces*. *Biotechnol. and Bioengine. Sym.*, **11**, 275-291, 1981.
- 19) Crawford, D. L. and Crawford, R. L.: Microbial degradation of lignocellulose : The lignin component, *Appl. Environ. Microbiol.* **31**, 714-717, 1976.
 - 20) Muralidhara Ramachandra, Donc L. Crawford, Greg Hertel: Characterization and extracellular lignin peroxidase of the lignocellulolytic Actinomycete *Streptomyces viridosporus*. *Appl. Env. Microbio.*, **54**(12), 3057-3063, 1988.
 - 21) 김태전 : 한국토양에서의 방선균분리와 PAH화합물의 분해능에 관한 연구(Rimazol Brilliant Blue R 염료의 탈색을 중심으로). 서울보건전문대학 논문집, **15**, 51-72, 1995.
 - 22) 김태전, 윤경하 : 두 *Streptomyces* strains에 의한 몇몇 염료들의 탈색과 그들에 의해 생산된 각종 효소들에 관한 연구. 한국환경위생학회지, **25**(2), 54-64, 1999.
 - 23) 김태전, 김승곤, 윤경화 : 토양에서 분리된 방선균들에 의한 Rimazol Brilliant Blue R 염료의 탈색에 질소원과 pH가 미치는 영향, 서울보건전문대학 논문집, **17**, 21-33, 1997.
 - 24) 김태전, 윤경하, 최한영 : *Streptomyces* strains에 의한 Polymeric 염료와 Azo 염료들의 탈색에 관한 연구. 서울보건대학 부설 한국보건과학연구소 논문집, **5**, 1-18, 1998.
 - 25) Gary F. Leatham, R. L. Crawford, and T. Kent Kirk.: Degradation of Phenolic Compounds and Ring cleavage of catechol by *Phanerochate chryso sporium*. *Appl. Environ. Microbiol.*, **46**, 191-197, 1983.
 - 26) Kirk, T. K., and H-M. Chang.: Decomposition of lignin by white-rot fungi. II. characterization of heavily degraded lignins from decayed spruce. *Holzforchung* **29**, 56-64, 1975.
 - 27) John. B. Sulherland. Don. L. Crawford, and Anthony L. Pometto III: Catabolism of substituted Benzoin acids by *Streptomyces* Speciest, *Appl. Environ. Microbiol.*, **41**, 442-448, 1981.
 - 28) Cartwright, N. J., and R. B. Cain: Bacterial Degradation of the nitrobenzoic acids. *Biochem. J.*, **71**, 248-261, 1959.
 - 29) Rann, D. L., and R. B. Cain: Regulation of the enzymes of aromatic ring fission in the genus *Nocardia*, *Biochem. Soc. Trans.*, **1**, 658-681, 1973.
 - 30) Eggeling, L., and H. Sahn: Degradation of chnifferyl alcohol and other lignin-related aromatic compounds by *Nocardia* spp. DSM 1069. *Arch. Microbiol* **120**, 141-148, 1980.
 - 31) Crawford, R. L., and P. P. Olson: Microbiological catabolism of vanillate : decarboxylation to guaiacol. *Appl. Environ. Microbiol.*, **38**, 239-543, 1978.
 - 32) Cain R. B., and N. J. Cartwright: On the properties of some aromatic ring-opening enzymes of species of the genus *Nocardia*. *Biochim. Biophys. Acta.*, **37**, 197-210, 1960.
 - 33) Engelhardt, G., H. G. Rast, and P. R. Wallnofer: Degradation of aromatic carboxylic acids by *Nocardia* species. DSM 43251. *FEMS Microbiol. Lett.*, **5**, 245-251, 1979.
 - 34) Kiages, U., and F. Lingens: Degradation of chlorobenzoic acid by a *Nocaria* species. *FEMS Microbiol. Lett.*, **6**, 201-203, 1979.