

## 환경 조건에 따른 셀룰로스계 섬유의 생분해성 - 토양 수분율을 중심으로 -

강연경<sup>†</sup> · 박정희

서울대학교 의류학과

### Effect of Environmental Conditions on the Biodegradation of Cellulose Fibers - Effect of Humidity in Soil -

Yun Kyung Kang<sup>†</sup> · Chung Hee Park

Dept. of Clothing and Textiles, Seoul National University  
(2005. 3. 29. 접수)

#### Abstract

Based on the correlation analysis result of preceding research, the biodegradabilities of cellulose fibers were closely related to the moisture regain of the samples, which reflects the hydrophilicity and internal structure of the fibers. In addition to this factor, it was expected that the biodegradation conditions influence the biodegradability of fibers. In this study, widely used cellulose fibers including cotton, rayon, and acetate were used. The biodegradabilities of cellulose fibers were measured by soil-burial test, and then the degradation behaviors based on each condition were compared. Moreover, the effects of degradation conditions such as humidity of the soil were investigated. Changes in the internal structure of samples were also observed by X-ray analysis according to the soil burial time. It was shown that humidity of soil facilitated the degradation of cotton, rayon, and acetate fibers, showing higher degradation rate with higher humidity in soil. This effect was shown to be much greater in the fibers of high moisture regain such as cotton and rayon. In respect of microstructure change, crystallinities and their crystal size of fibers decreased remarkably in the soil of higher humidity. It was revealed that degradation of crystalline area was more dependent on the soil humidity than that of amorphous area.

**Key words:** Biodegradability, Degree of crystallinity, Moisture regain; 생분해성, 결정화도, 수분율

#### I. 서 론

섬유가 생태계에 존재하는 미생물에 의해 분해 되

<sup>†</sup>Corresponding author

E-mail: fabrika@hanmail.net

본 연구는 한국과학재단의 기초과학연구사업 연구비 지원(R01-1999-00194)으로 수행된 결과로서 연구비지원에 감사드립니다.

본 연구는 서울대학교 생활과학연구소에서 지원된 연구비로 수행된 결과로서 연구비 지원에 감사드립니다.

는 것을 섬유의 생분해라고 하며, 섬유의 생분해 정도는 그 섬유로 만든 제품의 환경 친화성의 척도로 사용된다. 지금까지 사용되어온 섬유 제품은 사용 중 이상적인 상태를 지속적으로 유지하는 성질인 내구성이 품질의 매우 중요한 요소로서 생각되어왔다. 하지만 최근 환경 문제에 대한 인식이 높아지면서 점차 섬유 제품의 내구성뿐만 아니라 폐기 후 환경에 미치는 악영향을 최소화하는 환경 친화성이 더욱 중요한 요소로 여겨지고 있다. 이에 따라 폐기된 섬유 제

품이 환경에 해를 미치지 않도록, 또는 동화된 환경에 오히려 이로운 역할을 하는 물질로 변환시키는 방법으로서 섬유의 생분해가 끊임없이 연구되고 있다.

지금까지 이루어진 섬유를 포함한 고분자의 환경 친화성에 대한 여러 연구를 통해 고분자의 물성 중에서는 결정화도와 배향도, 분자의 충합도, 섬유의 친수성과 소수성 정도 등이 생분해성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(김인범 외, 1995; 박영환, 1991; 박태규, 1994; Doi, 1994; Fukuda, 1994). 그리고 생분해에 유리한 환경 조건을 찾는 연구에 있어서는 습도, 온도, 산소 접근성 등의 적절한 분해 환경이 갖추어지면 생분해성이 상대적으로 높아진다고 하였다(Park, et al., 2003).

지금까지 보고 된 연구결과들은 대체로 생분해에 영향을 미치는 물질 자체의 물성에 초점을 맞추어 이루어졌으며, 최근 이루어지고 있는 분해 환경에 관련된 연구는 광원에 의한 광분해 환경 조건, 활성하수 슬러지를 통한 생분해에서 슬러지의 조건, 또는 열분해 작용에 의한 퇴비화 조건 등 생분해를 촉진시키는 적절한 환경을 고찰한 연구 등이 있어왔다(Lott, et al., 2004; Mezzanotte, et al., 2005; Jung, et al., 1999). 그러나 실제 제품 폐기에 주로 사용되는 매립법에서의 토양 환경 조건별 생분해성에 대한 고찰은 미흡하다고 할 수 있다. 또한 지금까지 고분자의 생분해성 평가 기준에 있어서는 ISO, ASTM, CEN, JIS 등의 다양한 표준 시험법들이 개발되어 사용되고 있지만 생분해 전, 후 과정의 분석을 통해 시료에 따라 더욱 적합한 시험법을 모색하는 것이 필요한 실정이다.

셀룰로스계 섬유의 생분해성에 대한 기초자료 수집을 위해 실시한 Park et al.(2004)의 연구 및 면직물의 실리콘 가공에 따른 생분해성을 살펴 본 김보형 외(2004)의 연구에서 생분해성과 섬유의 특성과의 상관관계를 분석한 결과에 의하면, 섬유의 친수성과 내부 구조를 반영하는 특성인 수분율, 흡습성 등의 수분 특성이 셀룰로스 섬유의 생분해성에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 또한, 생분해성 고분자 내부의 친수기를 변화시킨 Park et al.(2003)의 연-

구와 산소 플라즈마를 이용하여 생분해성 고분자의 친수성을 높인 김수민 외(2002)의 연구에서도 시료의 친수성이 생분해에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

이러한 선행연구의 결과를 바탕으로 본 연구에서는 생분해 환경 내의 수분량이 섬유의 생분해 결과에 상당한 영향을 미치는 환경 요소가 될 것으로 예상하였다. 따라서 토양의 수분율을 조절한 토양 매립 생분해 실험을 통하여 생분해 환경 요소 중 토양 수분율이 셀룰로스계 섬유의 생분해성에 미치는 영향을 알아보고, 생분해에 적합한 토양 수분율 조건에 대해서 고찰하고자 하였다.

## II. 실험

### 1. 시료

주 성분이 셀룰로스계이면서 결정화도와 수분율이 각각 상이한 섬유인 면, 레이온, 아세테이트 표준 시험포를 시료로 사용하였다. 시료의 자세한 특성은 <Table 1>에 나타내었다.

### 2. 실험방법

#### 1) 토양 매립

시료의 생분해성 측정 방법은 AATCC technical method 30-1993에 제시된 실험 방법을 참고한 토양매립법(Soil Burial Test)을 사용하였다. 토양은 서울대학교 교내에서 채취한 것을 사용하였다. 생분해 환경 조건으로 상온의 상태에서 매립 토양 내 수분율을 변화시켰으며, 이에 의해 달라지는 생분해성 결과를 측정하였다. 실험에 사용된 토양은 실험 조별로 공급하는 수분량을 각각 다르게 하여 토양 무게의 최소 10% 이하~최대 50% 이상의 수분율 분포를 갖도록 조절하였다. 실험에 사용된 토양이 AATCC technical method 30-1993에 제시된 적정 수분율인 25±5%를 유지하기 위해서는 매일 약 150ml의 수분 공급이 필요하였다. 토양 수

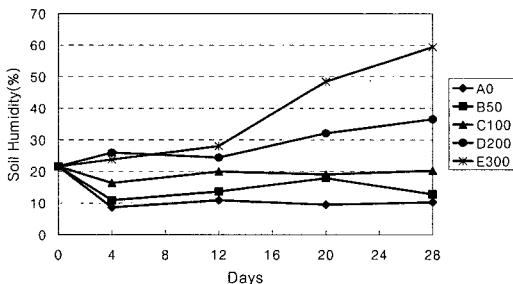
Table 1. Specification of specimens

	Yarn Type	Yarn Number		Yarn Count ( $5 \times 5\text{cm}^2$ )		Weight ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	Thickness (mm)	Weave Structure
		Weft	Warp	Weft	Warp			
Cotton	Staple	20tex	20tex	141	135	100±5	0.29	Plain
Rayon	Filament	13tex	13tex	175	109	75±5	0.19	Plain
Acetate	Filament	11tex	11tex	228	151	83±5	0.13	Plain

**Table 2. Amount of supplied moisture**

A0	B50	C100	D200	E300
0ml/day	50ml/day	100ml/day	200ml/day	300ml/day

\*150ml/day of water is needed to maintain standard humidity of soil(25±5%).

**Fig. 1. Changes of humidity in soil.**

분율 변화를 위해 매일 공급한 실험 조별 수분량은 <Table 2>에 나타나 있다. A0는 실험 기간 동안 수분 공급을 전혀 하지 않은 상태의 토양 실험이며, B50, C100, D200, E300은 매일 각각 50, 100, 200, 300ml 씩 수분을 공급한 것이다. <Fig. 1>은 실험 기간 중 수분 공급량에 따라 변화된 토양 수분율을 나타낸 그림이다.

## 2) 생분해성 평가

### (1) 인장 강도 저하율

일정 기간동안 분해 후 시료를 꺼내어 증류수로 가볍게 세척하고 건조시킨 후, KS K 0520의 ravelled strip method에 따라 crosshead speed 10cm/min, 하중 50kg인 조건에서, Instron(Universal Testing Instrument, Table Model 1130)을 사용하여 토양 매립 전, 후의 시료의 절단강도를 측정하였다. 생분해도는 인장 강도 저하율로써 평가하였다.

### (2) 무게 변화

생분해 시간 경과에 따른 시료의 무게 감소를 측정하여 생분해도를 계산하였다. 일정 기간동안 분해 후 시료를 꺼내어 증류수로 가볍게 세척하고 오븐에서 완전 건조시킨 시료의 무게를 측정하였다. 무게 감소에 의한 분해도는 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{weight loss (\%)} = \frac{A - R_s}{A} \times 100$$

A : 분해 전 시료의 완전 건조 무게

R<sub>s</sub> : 분해 후 시료의 완전 건조 무게

### (3) 외관 변화 관찰

생분해 전, 후의 시료 표면 구조의 변화와 전체 외관 변화를 비디오 마이크로스코프 시스템(iCamscope, Sometech, 300배율)과 디지털 카메라(Digimax, S.E.C.)를 사용하여 관찰하였다.

### 3) 내부 구조 분석

생분해 전, 후 시료의 내부 구조의 변화를 알아보기 위해 X-ray Diffractometer(M18XHF-SRA, Mac Science Co.)를 사용하여 시료의 회절 패턴을 얻어내었다. 얻어진 회절 패턴을 이용하여 생분해 전과 생분해 시간 경과에 따른 결정화도를 각각 계산하여 생분해 시 시료 내부에서 일어나는 구조의 변화를 관찰하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 토양 수분을 변화에 따른 생분해성

#### I) 면

<Fig. 2>는 면 시료의 토양 수분을 변화에 의한 생분해성 평가 결과를 시료의 인장 강도 소실률(A)과 무게 감소율(B)로 나타낸 것이다. 면은 실험 기간 동안 수분율이 10% 이하로 나타나는 실험 토양 A0에서도 20일 이후에는 인장 강도가 거의 소실되었다. 면은 생분해가 잘 일어나는 시료로, 인장 강도 소실률이 토양의 수분율에 따라 현저하게 차이를 나타내지는 않았다. 그러나 수분량이 가장 높은 E300 실험조의 무게 감소가 가장 빠른 것으로 나타났다(Fig. 2(B)). 실제 시료는 실험조 E300에서는 거의 형체를 찾아보기 힘들 정도로 분해되었지만 A0와 B50의 시료는 무게 감소율은 크지 않은 채로 인장 강도만 줄어드는 경향을 보여 AATCC technical method 30-1993에 제시된 적정 토양 수분율(25±5%)보다 수분이 부족한 경우 전체적인 분해가 상당히 느려짐을 알 수 있었다.

#### 2) 레이온

<Fig. 3>은 레이온 시료의 토양 수분율 변화에 따른 생분해성 평가 결과이다. 레이온의 생분해성 측정 결과는 면과 유사하여, 전체적으로 모든 시료에서 생분해가 잘 일어나며 수분율이 낮은 실험조의 시료일수록 생분해 속도가 다소 느리게 나타났다. 면과 레이온 시료의 생분해 결과를 통해 무게 감소가 크지 않은 생분해 초기에는 인장 강도 감소율이 시료의 생

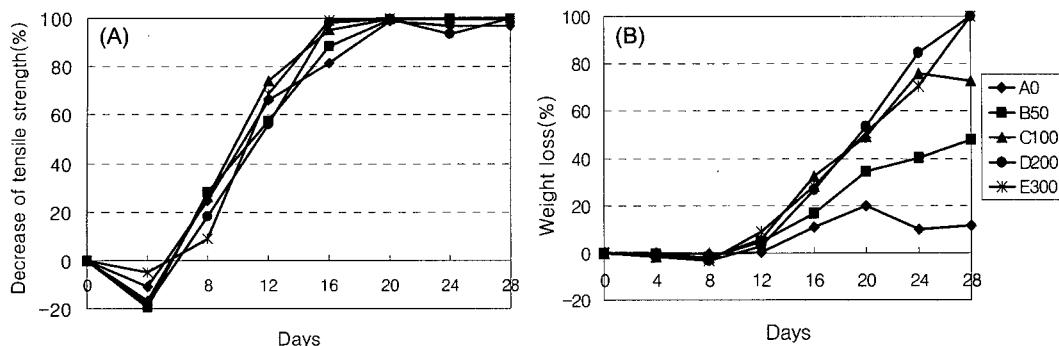


Fig. 2. Biodegradability of cotton fibers determined from decrease of tensile strength(A) and weight loss(B).

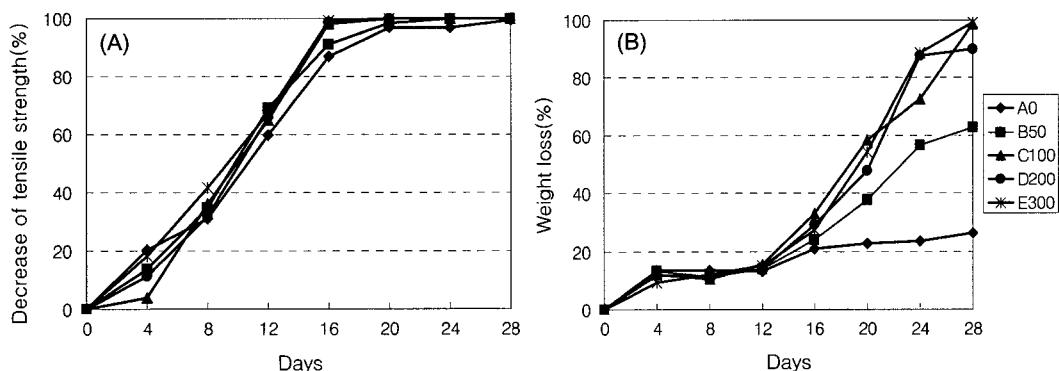


Fig. 3. Biodegradability of rayon fibers determined from decrease of tensile strength(A) and weight loss(B).

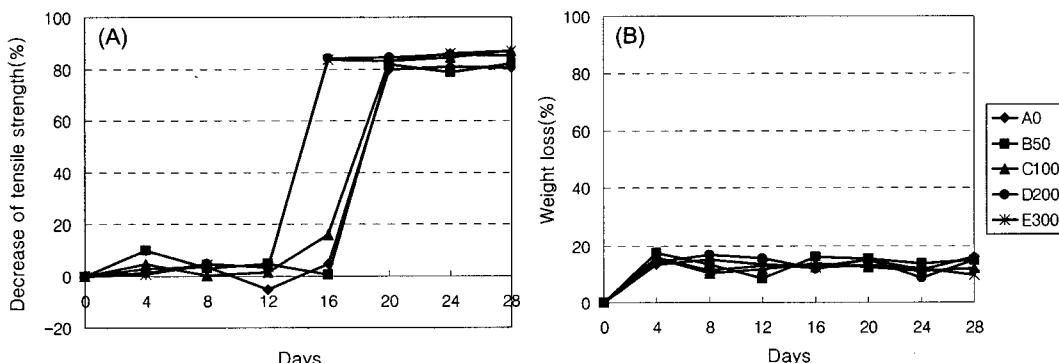


Fig. 4. Biodegradability of acetate fibers determined from decrease of tensile strength(A) and weight loss(B).

분해성을 나타내는데 더욱 민감한 척도로 사용될 수 있지만 인장 강도 감소가 100%에 도달한 분해 후기의 경우 무게 감소율이 생분해성 측정에 더욱 변별력 있는 척도로 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

### 3) 아세테이트

아세테이트 시료에서는 수분량이 가장 높은 실험

토양인 E300의 인장 강도 저하가 가장 빠른 경향을 보였다. B50와 D200의 결과는 각각 A0와 E300의 결과와 유사하였다. 이 실험에서 약 12~16일 경까지 시료의 강도 변화가 크지 않다가 그 이후로 갑자기 강도 저하가 커지는 현상이 나타났다. 선행연구(Park, et al., 2004)의 결과에서도 볼 수 있었듯이, 아세테이트는 친수기가 적어 면이나 레이온에 비해 생분해가

잘 일어나지 않는 시료이다. 그러나 본 실험 결과에서 토양 내 수분이 많은 실험조 E300와 D200의 시료에서 강도 저하가 더 빨리 일어나 토양 수분율이 높은 경우 아세테이트의 생분해 거동도 영향을 받는 것으로 사료된다.

## 2. 생분해 시료의 내부 구조 변화

### 1) X-ray 회절 곡선

<Fig. 5>는 면 시료의 X-ray 회절 곡선이다. 이를 통해 결정의 양과 결정 격자의 크기를 계산할 수 있는데 일반적으로 결정 화도가 높을수록 피크 높이가 높아지며, 결정 입자의 크기가 작을수록 결정 피크의 폭이 좁아지는 결과가 나타난다. A0 토양의 시료는 인장 강도

가 거의 소실되는 20일 이후에도 결정 피크의 높이가 거의 유지되었다. 따라서 A0의 시료는 분해가 일어나더라도 결정의 양과 크기가 크게 변화하지 않은 것을 알 수 있었다. 반면 토양 내의 수분율이 커질수록 분해 시일이 지남에 따라 결정 피크의 강도가 낮아지며 피크 자체가 완만하게 되는데, 이는 결정 양이 줄어드는 것 뿐 아니라 결정 크기가 작아지는 것이 회절 곡선에 반영되었다고 할 수 있다(홍성권, 1996). 따라서 수분이 부족한 토양에서 면의 생분해는 결정 구조를 거의 유지하면서 결정과 비결정 영역에 관계없이 균일하게 일어난다. 반면, 수분이 많은 토양일수록 비결정에 침투한 수분으로 인해 비결정 영역이 먼저 분해되어 분해 초기에 결정 피크 회절 강도가 커져 결정화도 값이 높아지는 현상이 나타나며, 분해가 진행될수록 결정

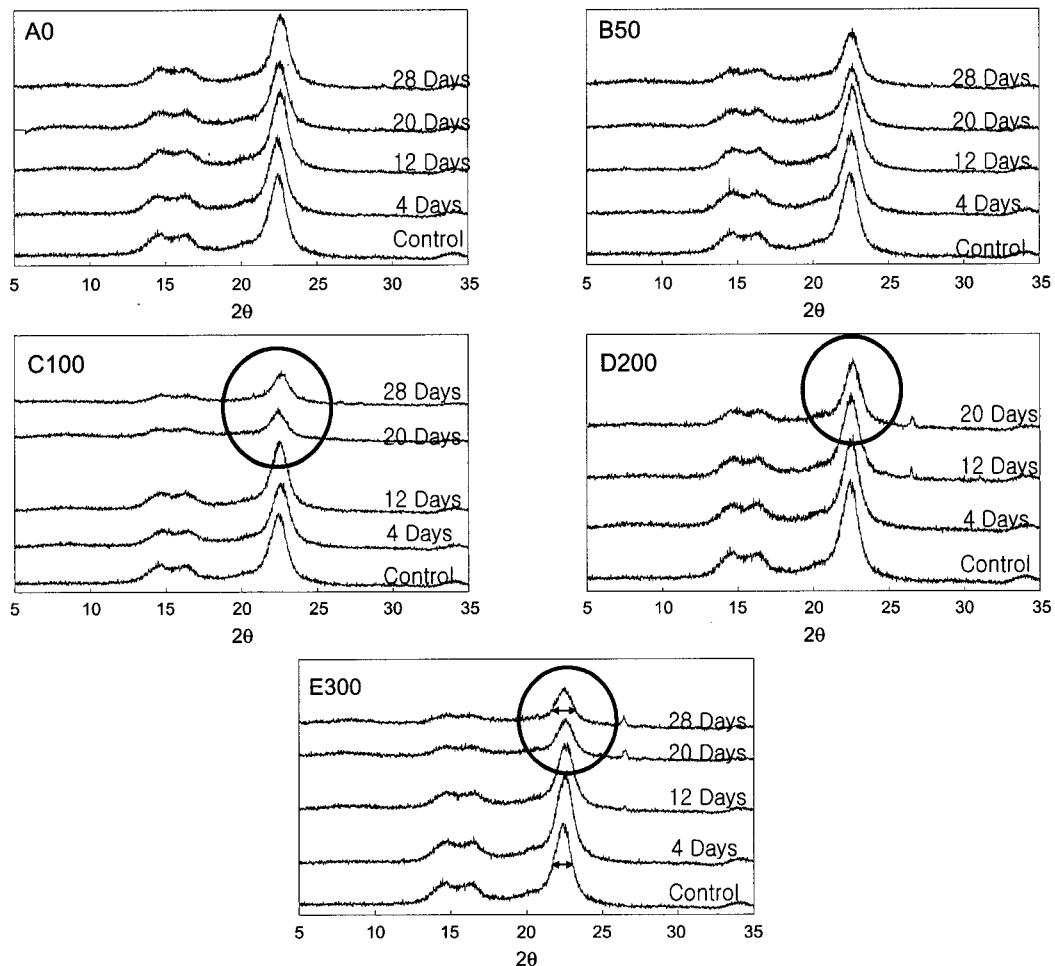


Fig. 5. X-ray diffraction patterns of cotton fibers buried in soil.

**Table 3. Changes in crystallinity of cotton fibers with burial time**

	0 day	4 days	12 days	20 days	28 days
A0	68.4	64.4	65.5	71.4	74.0
B50	68.4	74.3	72.3	72.2	68.7
C100	68.4	72.8	73.0	62.4	59.2
D200	68.4	72.5	72.7	65.0	*
E300	68.4	70.6	71.5	62.6	52.8

\*X-ray diffraction curve could not be obtained due to severe damage in shape.

영역에서의 붕괴도 빨리 일어나는 것을 알 수 있다.

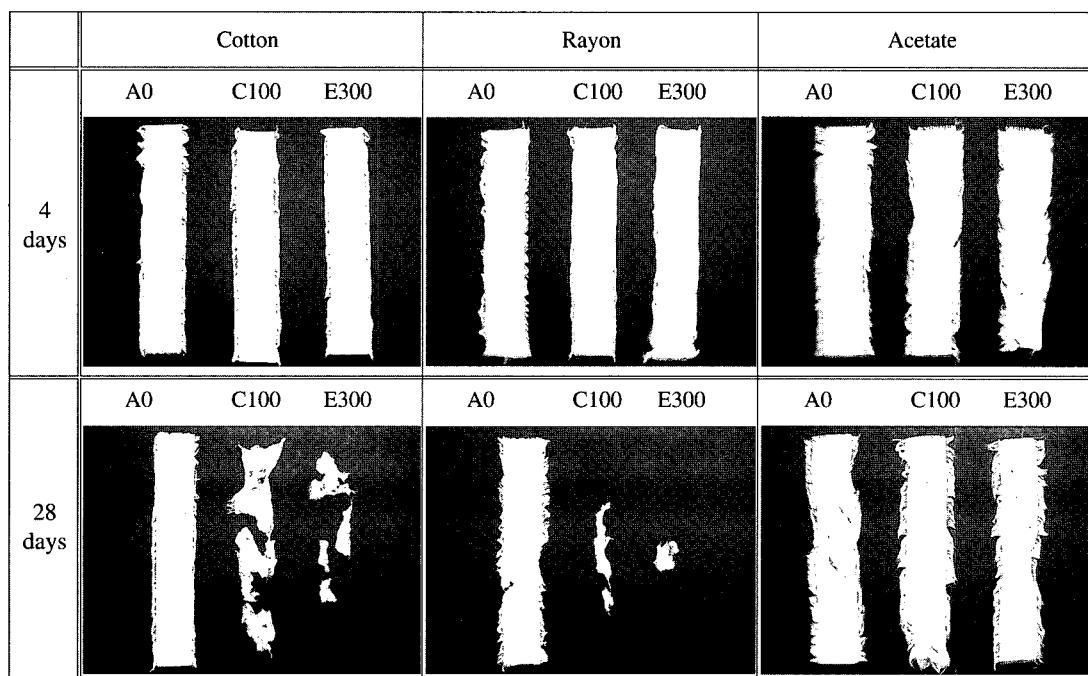
## 2) 결정 화도

<Table 3>은 면 시료의 결정 화도를 계산한 결과이다. 수분이 실험법에 제시된 적정량 및 그 이상으로 공급된 C100, D200, E300의 시료는 생분해 시일 경과에 따라 초기에 다소 높아졌다가 점차 낮아진다. 반면 수분이 부족한 실험조인 A0, B50의 시료는 결정화도의 변화가 경미하고 분해 시일이 경과해도 분해전보다 결정화도가 높아지는 현상을 나타낸다. 수분이 부족한 분해 환경에서는 수분이 충분한 환경의 시료에 비해 분해과정이 느리게 진행되어 결정화도가 저하되지 않고 오히려 다소 상승하는 현상이 나타

나는 것으로 생각되며, 수분이 적정량 이상 공급된 분해 환경에서는 분해 초기부터 미생물이 비결정 뿐 아니라 결정 부분에도 충분히 침투하여 분해가 비교적 신속히 진행된다고 할 수 있다.

## 3. 토양 수분율과 생분해 시간 경과에 따른 시료의 외관 변화

<Fig. 6>는 디지털 사진을 통한 시료의 외관 변화를 나타낸 것이다. 면 시료의 외관 변화에서는 인장 강도나 실험 토양의 수분율에 따른 차이가 X-ray 데이터에서 보다 현저하게 나타났다. 수분이 부족한 A0의 경우 인장 강도 소실률 결과에 비해 외관 변화는 거의 없었

**Fig. 6. Photographs of specimens burial in soil.**

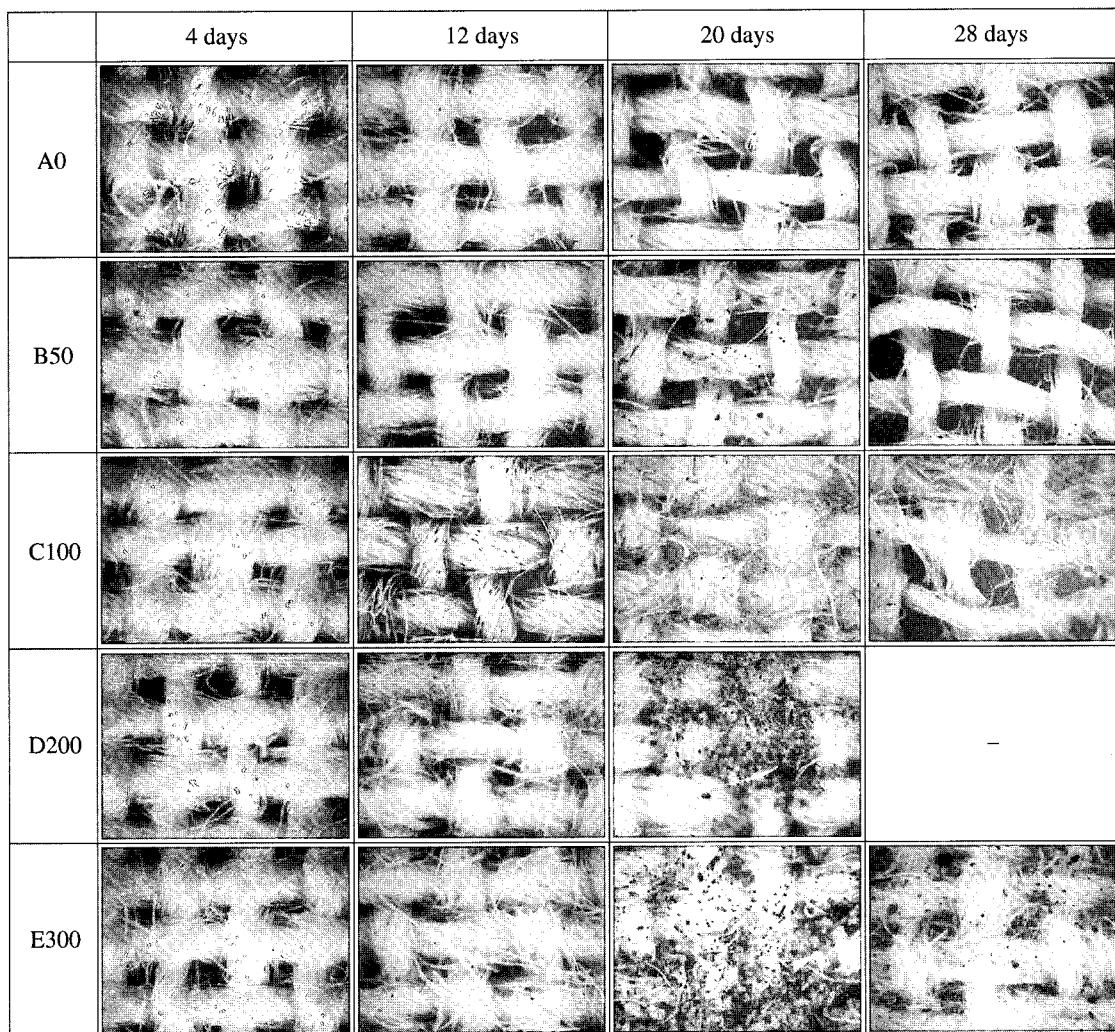


Fig. 7. Microscopic photographs of cotton fibers buried in soil ( $\times 300$ ).

으며 두께가 얇아지거나 황변 현상이 나타났다. 반면 수분이 크게 부족하지 않았던 C100의 경우 20일 이후에는 시료가 강도 측정이 불가능할 정도로 조각났으며, 수분이 과잉 공급되었던 E300는 시료 황변이 더욱 심하였으며, 훨씬 빨리 작은 조각으로 분해되었다.

레이온 역시 면과 유사한 결과를 나타내지만 면보다 결정 화도가 낮으므로 분해가 더욱 빠르게 일어나는 것을 관찰할 수 있었다.

아세테이트 시료는 시일 경과에 따라 시료의 두께 및 탄력이 떨어지고 광택 감소와 황변이 일어났으며, 수분이 과잉 공급된 실험조일수록 이러한 변화가 더욱 가시적으로 나타났다. 이는 소수성 섬유인 아세테

이트에서도 토양 수분율에 영향을 받아 토양 수분율이 높을수록 생분해가 촉진되는 것으로 볼 수 있다.

<Fig. 7~9>는 비디오 마이크로스코프를 통해 300배 확대된 직물 구조를 나타낸 것이다. 면은 분해가 진행됨에 따라 실에서 섬유가 풀어져 나오고 실이 가늘어지면서 조직이 느슨해지는 것이 관찰되었다. 면은 레이온이나 아세테이트에 비해 곰팡이와 토양 고형 물질 등의 불순물 부착이 많은데, 여기서 사용하면 시료는 스테이플 섬유로 표면에 잔털이 많고, 분해가 진행되면서 끊어진 섬유가 실 밖으로 풀어져 나오기 때문에 필라멘트 섬유 시료인 레이온과 아세테이트보다 불순물 부착이 쉬운 것으로 생각된다.

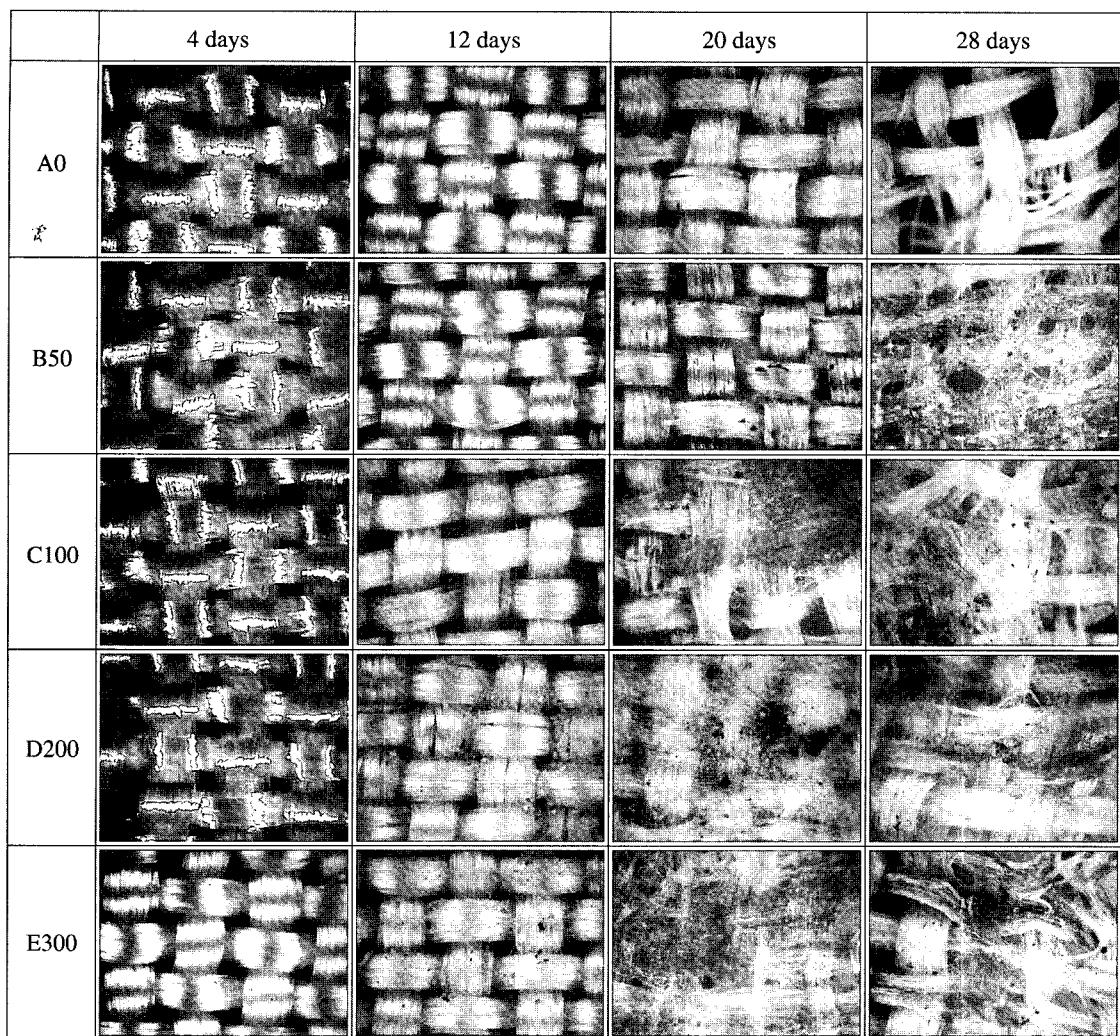


Fig. 8. Microscopic photographs of rayon fibers buried in soil ( $\times 300$ ).

레이온은 분해가 진행될수록 광택이 사라지며 심하게 분해된 경우는 직물 조직이 불분명해지고 남아 있는 섬유끼리 얹히는 것이 관찰 되었다. 면과 레이온 시료 둘 다 토양 수분율이 높을수록 분해가 빠르게 진행되었다.

아세테이트는 외관의 큰 변화는 나타나지 않으나 분해가 진행됨에 따라 시료가 황변되고 초기에 나타난 광택이 점차 사라지는 것을 볼 수 있었다.

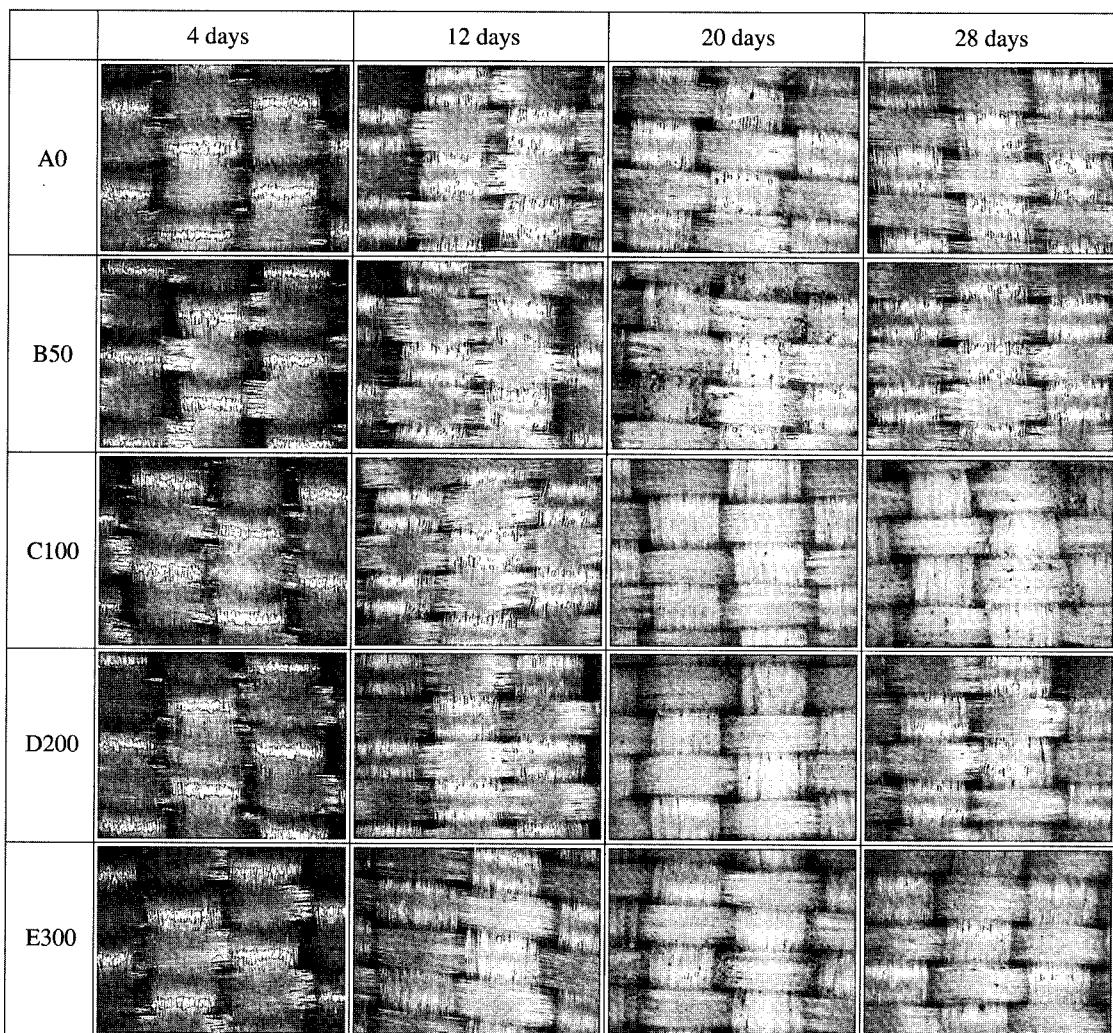
#### IV. 결론 및 제언

본 연구에서는 생분해 환경 내의 수분량이 섬유의

생분해 결과에 상당한 영향을 미치는 환경 요소가 될 것으로 예상하고, 토양의 수분율을 조절한 매립 생분해 실험을 통하여 생분해 환경 요소 중 토양 수분율이 셀룰로스계 섬유의 생분해성에 미치는 영향을 알아보고, 생분해에 적합한 토양 조건에 대해서 고찰하였다.

이상의 결과에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 전반적으로 시료가 매립된 토양의 수분율이 높을수록 생분해성은 높게 나타났다.
2. 토양 내 수분의 영향에 의한 생분해성은 수분율이 높은 친수성 시료인 면과 레이온에서 더욱 두드러

Fig. 9. Microscopic photographs of acetate fibers buried in soil ( $\times 300$ ).

지게 촉진 되었다.

3. 소수성인 아세테이트 시료는 토양 수분율이 높을 때 인장 강도 저하율이 다소 증가되는 경향을 보였으나 무게 변화로 본 전체적인 시료의 분해 정도에서는 토양 수분율의 영향이 거의 나타나지 않았다.

4. 면의 내부 구조 분석 결과, 분해 초기에 비결정 영역이 먼저 침해되면서 결정 화도가 다소 상승하다가 분해가 진행될수록 결정 영역까지 침해를 받으면서 결정 화도가 점차 줄어드는 경향을 나타내었다.

이상으로, 생분해 토양의 수분율은 시료의 생분해 성을 원활하게 평가할 수 있는  $25 \pm 5\%$ 가 적절한 수분율인 것을 확인하였다. 그리고 토양 수분율은 시료

의 생분해 속도와 생분해 정도를 좌우하는 요소로서, 맵 토양의 수분율에 따라 비결정 영역에서부터 시작된 생분해가 결정 영역까지 확장되는 시점이 달라지는 것을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- 김보형, 박정희, 임승순. (2004). 실리콘 처리한 면직물의 생분해성. *한국의류학회지*, 28(8), 1048-1056.
- 김수민, 박정희, 임승순. (2002). 산소 플라즈마 처리가 폴리부틸렌숙시네이트의 친수성과 생분해성에 미치는 영향. *한국섬유공학회지*, 39(4), 396-406.
- 김인범, 이명천, 서인선, 신평균. (1995). 물성에 따른 고분

- 자의 생분해도 영향. *Polymer(Korea)*, 19(6), 727–733.
- 박영환. (1991). 생분해성 고분자–생분해성에 대한 화학적 구조 및 형태학적 미세구조의 효과. *한국섬유공학회지*, 28(1), 9–17.
- 박태규. (1994). 생분해성 합성수지. *력키고분자기술*, 31(12), 7–18.
- 홍성권. (1996). X-선 회절을 이용한 고분자 구조 해석(제2 보). *고분자과학과 기술*, 6(3), 279–288.
- AATCC Technical Method 30-1993 Antifungal activity. Assessment on textile materials: Mildew and Rot resistance of textile materials. Milde and Rot resistance of textile materials: Mildew and Rot resistance of textile materials.
- Chandra, R., & Rustgi, R. (1998). Biodegradable Polymers. *Progressive Polymer Science*, 23, 1273–1335.
- Copinet, A., Bertrand, C., Govindin S., Coma, V., & Couturier, Y. (2004). Effect of ultraviolet light (135nm), temperature and relative humidity on the degradation of polylactic acid plastic films. *Chemosphere*, 55, 763–773.
- Doi, Y., & Fukuda, K. (1994). *Biodegradable plastics and polymers*. Elsevier.
- Lottip, N. T., Calil, M. R., Guedes, C. G. F., & Rosa, D. S. (2004). The effect of temperature on the biodegradation test. *Materials Science and Engineering C*, 24, 659–662.
- Mezzanotte, V., Bertani, R., Innocenti, F. D., & Tosin, M. (2005). Influence of inocula in the results of biodegradation tests. *Polymer Degradation and Stability*, 87, 51–56.
- Jung, E. J., Shin, P. K., & Bae, H. K. (1999). Effect of temperature and compost conditions on the biodegradation of degradable polymers. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 9(4), 464–468.
- Park, C. H., Kim, E. Y., Yoo, Y. T., & Im, S. S. (2003). Effect of hydrophilicity on the biodegradability of poly-esteramides. *Journal of Applied Polymer Science*, 90(10), 2708–2714.
- Park, C. H., Kang, Y. K., & Im, S. S. (2004). Biodegradability of cellulose fabrics. *Journal of Applied Polymer Science*, 94(1), 248–253.
- Yang, H. S., Yoon, J. S., & Kim, M. N. (2005). Dependence of biodegradability of plastics in compost on the shape of specimens. *Polymer Degradation and Stability*, 87, 131–135.