

지오멤브레인의 역학적특성에 대한 해석학적 고찰

유중조, 전한용, 조삼덕*, 정하익*

전남대학교 섬유공학과

*한국건설기술연구원 지반연구실

1. 서론

토목섬유중에서 차수막의 역할을 하는 지오멤브레인은 저수지, 담수의 저장탱크, 배수로, 운하시설, 매립장의 라이너로 주로 이용되며 지오멤브레인이 가지는 성질의 시간의존성이나 환경의존성을 평가기준으로 일축 인장하중 시험을 실시한다.

본 연구에서 지오멤브레인의 일축인장 거동의 평가에 있어서 주요 특성인자인 항복점과 초기탄성계수사이의 관계를 모델을 통하여 정량적 관계 해석이 가능한지를 고찰하고, 초기탄성계수와 2% 시컨트 탄성계수에서 이론값과 실험값의 비교를 통하여 모델의 타당성을 평가하였다.

2. 이론적 배경

지오멤브레인의 응력-변형률 곡선의 항복점까지의 곡선의 형태는 포물선의 식과 유사함을 알수 있으며, 여기서 지수 n 를 가지는 n 차 포물선의 방정식으로서 모델 설정이 가능하다. 그 형태는 식(1)과 같다.

$$\sigma = \sigma_Y \left(1 - \left(1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_Y}\right)^n\right) \quad (1)$$

지수 n 은 상수와 변형률의 함수로 설정가능하며 변형률의 함수는 아래의 식(2)와 같다.

$$n = n_0 \left(1 - m \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_Y}\right)^p\right) \quad (2)$$

여기서 n_0 , $m < 1$, p 는 상수이다.

항복점에서 시컨트 모듈러스는 식(3)과 같다. 식(1)을 미분하여 접선의 식을 구하면 곡선상의 임의의 점에서 E_{tan} 을 의미하며 변형률, ϵ ,이 0일 때 값은 초기 탄성계수이다.

$$E_{sec Y} = \frac{\epsilon_Y}{\sigma_Y} \quad (3)$$

$$E_{tan} = \frac{d\sigma}{d\epsilon} = \frac{n_0 \sigma_Y}{\epsilon_Y} \left(1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_Y}\right)^{n-1} \left[1 - m \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_Y}\right)^p + m p \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_Y}\right)^{p-1} \left(1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_Y}\right) \ln \left(1 - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_Y}\right)\right)\right] \quad (4)$$

$$E_{tan 0} = E_0 = n E_{sec Y} \quad (5)$$

이상으로 초기탄성계수는 항복점에서의 시컨트 모듈러스의 n 배임을 알 수 있다.

3. 실험

실험에 사용된 시료는 플랫 다이(Flat Die)법으로 제조된 두께 1.5mm의 HDPE 지오멤브레인의 MD, CD양 방향에 따른 2종류와 2.0mm의 ECB, 1.2mm EVA의 지오멤브레인이며 시료의 형태는 ASTM D 638의 IV형태를 취하였다.

SHIMADZU AUTOGRAPH 500의 인장시험기로 시험속도는 50mm/min으로 하였으며 시험방법은 ASTM D 638을 기준으로 하여 각 시료마다 8회의 시험, 평균값을 구하였다.

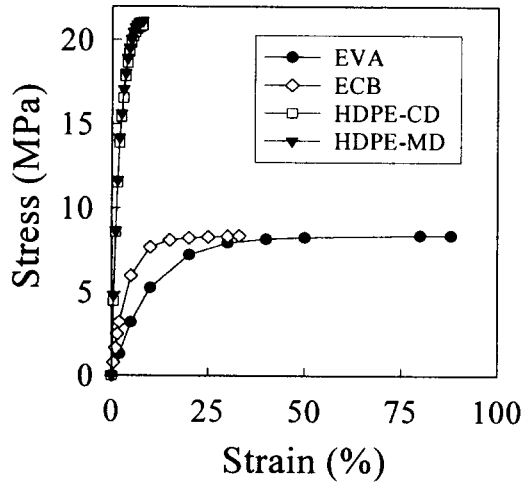


Figure 1. The stress-strain curves of geomembranes from 0 to yield point

4. 결과 및 고찰

4.1 항복변형거동

실험에서 구한 항복응력, 항복 변형률, 초기 탄성계수, 2% 시컨트 모듈러스와 항복점에서 시컨트 모듈러스 값을 Table 1에 제시하였다.

Table 1. The tensile test results of geomembranes

	σ_Y (MPa)	ϵ_Y (%)	E_0 (MPa)	E_{secY} (MPa)	$E_{sec2\%}$ (MPa)
HDPE-MD	21.14	7.9	9.8	2.68	7.01
HDPE-CD	20.85	7.86	9.21	2.66	6.72
EVA	8.41	88.6	0.69	0.1	0.64
ECB	8.38	33.13	1.797	0.254	1.61

HDPE 지오멤브레인의 경우 8~15%에서 항복현상을 보이고, EVA는 80~90%, ECB는 30

~40%에서 항복현상을 보임을 알 수 있었다. Fig. 1에 각 재료의 항복점까지 값을 응력-변형률 곡선으로 나타내었다.

4.2 지수 n의 결정

식(1)~(5)를 통하여 초기탄성계수는 항복점에서 시컨트 모듈러스의 n배임을 알 수 있다. n 차 포물선의 모델에서 지수 n이 결정되고 항복점을 안다면 초기탄성계수를 이론적으로 얻을 수 있다. 식(1)과 (2)에서 보인바와 같이 지수 n은 상수와 변형률의 함수로 표현된다.

실험을 통하여 상수의 n값은 HDPE의 경우 MD; 3.69, CD; 3.5 정도였으며 EVA, ECB의 경우는 약7과 7.1로 구하여졌다. n이 상수로 표현될 때 식(1)를 통해 구한 각 재료의 이론값과 실험값이 Table 2에 나타내었다.

n이 변형률의 함수로 표현될 때 식(2)에서 보이는 상수 n_0 , m, p 등의 결정은 식(6),(7)를 통한 시행착오법에 의해 구할 수 있다.

$$p = \frac{\log \frac{n_0 - n_2}{n_0 - n_1}}{\log \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} \quad m = \frac{1 - \frac{n_1}{n_0}}{\left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_Y}\right)^p} = \frac{1 - \frac{n_2}{n_0}}{\left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_Y}\right)^p} \quad (6)$$

$$n_1 = \frac{\log\left(1 - \frac{\sigma_1}{\sigma_Y}\right)}{\log\left(1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_Y}\right)} \quad n_2 = \frac{\log\left(1 - \frac{\sigma_2}{\sigma_Y}\right)}{\log\left(1 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_Y}\right)} \quad (7)$$

여기서 $\sigma_{1,2}$, $\epsilon_{1,2}$ 는 응력-변형률 곡선상의 임의의 점에서 값이다.

각 재료에 대한 식(2)의 상수들을 결정하면 HDPE의 MD 경우, $n_0 : 4$, $m : 0.35$, $p : 1.2$ 이고, CD 경우 $n_0 : 4$, $m : 0.35$, $p : 1.2$ 이며 EVA의 경우 $n_0 : 7.5$, $m : 0.35$, $p : 1.2$, ECB의 경우 $n_0 : 7.5$, $m : 0.35$, $p : 1.2$ 이다. 이때의 이론값과 실험값이 Table 2에 제시되어 있다. Table 2에 제시된 값에서 실험값과 이론값은 그 차이가 10% 정도이다. Fig. 2에 각 재료의 실험값과 이론값을 도시하였다. 실험값의 분포편차와 이론값과 실험값의 오차가 거의 10% 정도로 유사였다. 이론값이 실험값의 분포편차내에 존재하는 하나의 실험데이터로 간주할 수 있으므로, 이론을 통한 인장거동의 해석이 타당함을 알 수 있다. Fig. 3에 실험데이터의 분포가 제시 되어 있다. 지수 n이 주어진 3.69 나 3.5 대신 정수인 4로 표현되었을 때 실험값과 오차는 거의 없었으며 2% 시컨트 모듈러스에서 오차는 5% 미만이었다.

4.3 초기탄성계수와 2% 시컨트 탄성계수

지오멤브레인의 종류에 따라 정수형태의 상수로 정하여진 n값을 적용하였을 때 이론적인 초기탄성계수와 실험값과 오차가 Table 3에 비교 제시되어 있다.

HDPE의 경우 초기탄성계수의 실험값과 지수 $n = 4$ 로 하였을 때 이론값과 오차가 약 8-15%정도를 보이며 ECB, EVA에서는 $n = 7$ 로 하였을 때 거의 근사적으로 실험값과 이론값이 일치함을 확인할 수 있었다. HDPE의 오차가 10%를 넘어서는 부분은 cross direction 방향에서 분자쇄의 배향이 시트상 전체적으로 균일하지 균일하지 못한데서 나타나는 것으로

생각되어진다.

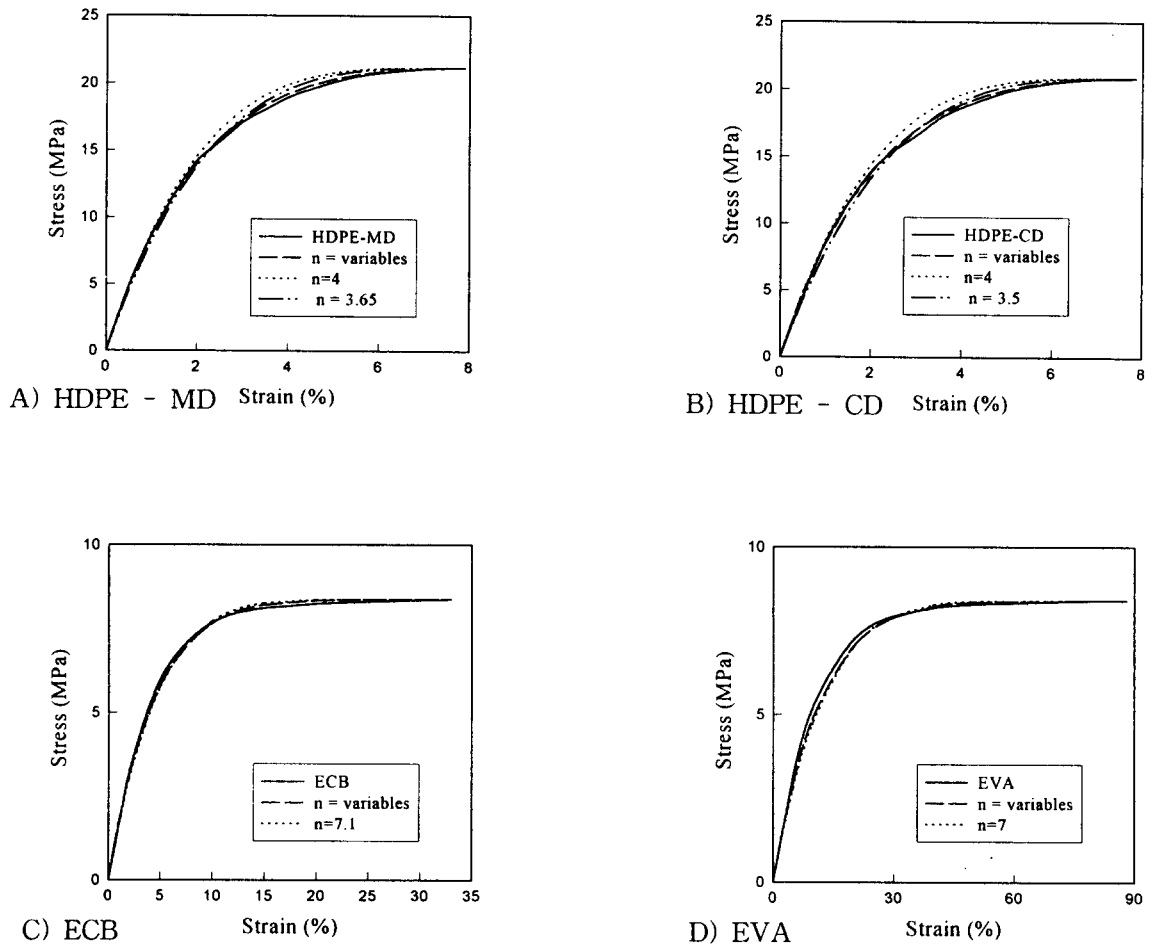


Figure 2. The stress-strain curves of geomembranes

Table 2. Comparison of experimental data and theoretical data of geomembranes

Strain (%)	HDPE-MD				HDPE-CD			
	실험값	이론값			실험값	이론값		
		n=3.69	n= 4	n= 변수		n=3.5	n= 4	n= 변수
0.5	4.81	4.532 (6)	4.87 (1)	4.81 (0)	4.46	4.29 (4)	4.82 (8)	4.77 (7)
1	8.67	8.31 (4)	8.84 (2)	8.64 (0)	8.6	7.90 (8)	8.75 (2)	8.56 (0)
1.5	11.68	11.42 (2)	12.03 (3)	11.66 (0)	11.5	10.91 (5)	11.91 (4)	11.54 (0)
2	14.2	13.94 (2)	14.56 (3)	14.03 (1)	13.88	13.39 (4)	14.41 (4)	13.87 (0)
4	18.93	19.58 (3)	19.88 (5)	19.2 (1)	18.64	19.12 (3)	19.64 (5)	18.96 (2)
6	20.74	21.04 (2)	21.07 (2)	20.84 (5)	20.47	20.72 (1)	20.79 (2)	20.57 (1)
YP	21.14/7.9	21.14	21.14	21.14	20.9/7.86	20.85	20.85	20.85

(continued)

Strain (%)	EVA			Strain (%)	ECB		
	실험값	이론값			실험값	이론값	
		n=7	n=변수			n=7.1	n=변수
2	1.29	1.25 (3)	1.33 (3)	0.5	0.78	0.86 (10)	0.9 (15)
5	3.2	2.83 (11)	2.96 (8)	1	1.65	1.65 (0)	1.7 (3)
10	5.26	4.8 (9)	4.93 (6)	1.5	2.5	2.36 (6)	2.45 (0)
20	7.25	7.03 (3)	7.05 (3)	2	3.22	3.00 (7)	3.1 (3)
30	7.96	7.96 (0)	7.91 (1)	10	7.7	7.7 (0)	7.74 (0)
50	8.3	8.39 (1)	8.36 (1)	20	8.26	8.37 (1)	8.37 (1)
80	8.40	8.41 (0)	8.41 (1)	30	8.36	8.38 (0)	8.38 (0)
YP	8.41/88	8.41/88	8.41	YP	8.384/33	8.384/33	8.384

또한 2% 시컨트 모듈러스는 식(1)에 지수 4와 7를 적용하여 구하였을 때 각 지오멤브레인에 대해 실험값과 이론값의 오차는 3~8%로 Fig. 3에서 보이는 실험데이터의 분포편차내에 존재하는 허용가능한 범위임을 확인할 수 있었다.

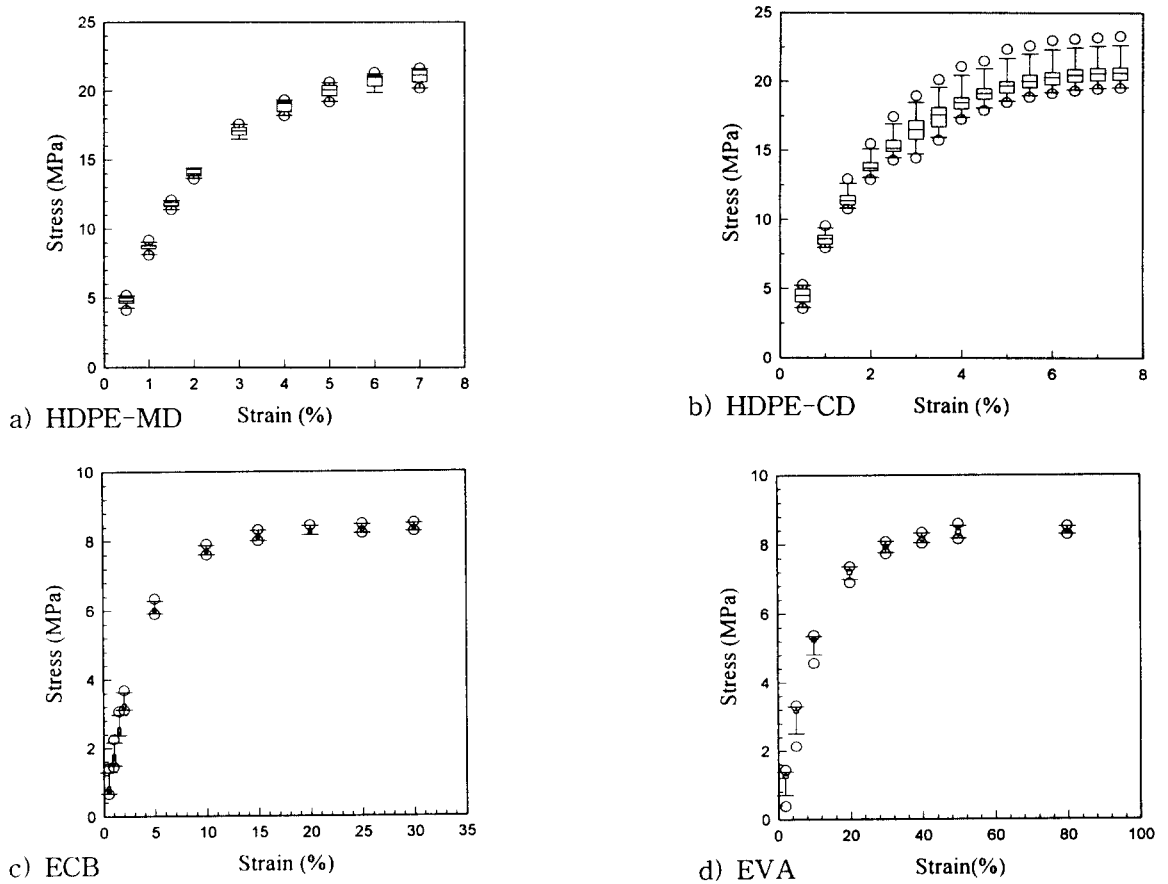


Figure 3. Deflection of experimental data of geomembranes

Table 3. The experimental and theoretical moduli of geomembranes (MPa)

	$E_0(\text{experi})$	$E_0(\text{theori})$	$E_{\text{sec}2\%}(\text{experi})$	$E_{\text{sec}2\%}(\text{theori})$	$E_{\text{sec}Y}$
HDPE-MD	9.87	10.72 (8%)	7.01	7.225 (3%)	2.68
HDPE-CD	9.21	10.56 (14%)	6.72	7.2 (7%)	2.64
ECB	1.8	1.78 (1%)	1.61	1.48 (8%)	0.254
EVA	0.69	0.70 (1%)	0.64	0.62 (3%)	0.1

5 결론

본 연구에서 알아보고자 하였던 n 차 포물선의 식을 통한 응력-변형을 곡선에서 초기탄성계수와 항복점사이의 정량적인 관계해석에서 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) HDPE 지오멤브레인은 8~15% 에서 항복현상을 보이며 초기 탄성계수는 $E_{\text{sec}Y}$ 의 MD ; 3.69, CD ; 3.5배임을 알 수 있었다. 그리고 $n=4$ 인 경우 이론값과 실험값의 차이는 실험값의 분포편차내에 포함되었으며 초기 탄성계수는 $E_{\text{sec}Y}$ 의 약 4 배로 설정가능 하였다.
- 2) EVA와 ECB역시 각각 30~40%, 80~90%에서 항복현상을 보이며 초기 탄성계수는 $E_{\text{sec}Y}$ 의 약 7 배임을 알 수 있었다.
- 3) 2% 시컨트 모듈러스의 해석에서 지수 $n = 4$ 인 경우 HDPE 경우 실험값과 이론값의 오차가 3~7%, $n = 7$ 인 경우 ECB와 EVA도 각각 오차가 8%, 3%이었다. 이로부터 n 차 포물선의 식의 모델을 통해 구한 이론값과 실험값의 오차가 10% 정도가 허용한계 이므로 내화학적, 내UV성등 시간의 함수로 표현되는 기계적 성질의 평가에서 기준값으로 2% E_{sec} 가 초기 탄성계수보다 타당성이 있음을 알 수 있었다.

감사의 글 : 이 연구는 환경부 G-7프로젝트 환경공학기술 개발사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. R. M. Koerner, Designing with Geosynthetics, 3rd Ed., 426-623, Prentice Hall, (1994)
2. J. P. Giroud, Geotextiles and Geomembranes, 13, 1-22, Elsevier Science Limited, (1994)
3. J. P. Giroud, M. Monroe and R. M. Charron, Strain measurement in geomembrane tensile tests. *Geotech. Test. J.*, ASTM, 17(1), (1994)
4. J. P. Giroud, Analysis of stress and elongations in geomembranes. *Proceedings of the International conference on Geomembranes*, Vol II, Denver, CO, USA, 481-486
5. R. M. Koerner(Ed.), Geosynthetic Testing for waste coainment applications, 1-70
6. R. Veldhuijzen Van Zanten, Geotextiles and Geomembranes in civil engineering,