

폐기물매립장 차수재의 꿰뚫림 하중에 의한 응력-변형 Stress-Strain of Geomembranes in Landfill Under Punctiform Loads

이광열¹⁾, Kwang-Yeal Lee, 정진교²⁾, Chin-Gyo Chung

¹⁾동서대학교 건설공학부 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Dongseo.

²⁾부산정보대학 건설공학부 교수, Professor, Dept. of Architecture & Civil Engineering, Pusan College of Information Technology.

SYNOPSIS : Geotextiles are usually constructed as a protective layer of geomembranes in liner systems for the solid waste landfill. A protective layer and geomembrane are susceptible to mechanical damage by coarse grains in the overlying drainage layer. In this study, therefore, the strain behavior of geotextile protective layers was investigated using three different types of devices for developing punctiform loads. The results of the study showed that the rates of strain was different depend upon device types for functiform loads. Also, It was found that the increases in strain was approximately linear in range 20 to 60°C, and pp-filament non-woven geotextiles yielded a better efficiency than pp-staple fiber non-woven geotextiles.

Key words : Geotextiles, Liner, Landfill, Punctiform strains, Protective layers

1. 서 론

폐기물매립장의 차수구조는 상부로부터 보호층, 배수층, 차수재(HDPE) 및 불투수층으로 구성되며 배수층과 차수재(HDPE) 사이에는 차수재인 지오멤브레인을 보호하기 위하여 보호재를 설치한다(fig.1). 배수층의 재료는 일반적으로 모래를 사용하나 모래알갱이가 침출수 이송관으로 유입되어 이송관의 막힘현상을 발생시키고 이로인해 침출수의 원활한 배수가 이루어지지 않는 사고가 빈번하다. 이러한 점을 고려하여 최근에는 잡석이나 강자갈 등과 같은 입경이 큰 재료를 배수층에 사용하는 현상이 늘고 있다. 이와 같이 굵은 입자의 재료를 배수층에 사용하는 경우, 매립하중에 의한 응력은 굵은 자갈을 통하여 차수재인 지오멤브레인에 꿰뚫림하중으로 작용하고 지오멤브레인에서는 응력의 크기에 따라 변형이 발생하며 결국에는 파손으로 이어진다(fig.1). 이러한 배수층 내의 입자에 의한 차수재에 미치는 부정적인 현상을 방지하기 위하여 배수층과 차수재 사이에 보호재를 설치하게 되는데 이 보호재의 역할은 배수층과 차수재 사이에서 매립하중에 의한 꿰뚫림하중에 저항하여 차수재에 전달되는 응력을 감소시켜주는 것이다. 매립하중의 증가에 따라서 보호재가 파손되는 경우 보호층 내의 골재가 차수재와 직접 접촉하게 되어 차수재에 손상을 입히게 된다. 따라서 꿰뚫림하중에 의한 보호재의 강도는 차수재의 보호기능에 대한 성능을 평가할 수 있는 기준으로 사용할 수 있다. 보호재로 사용되는 재료에는 PP-장섬유 부직포, PP-단섬유 부직포 등이 있는데 매립하중의 크기와 배수층의 재료 그리고 현장의 조건에 따라서 적

합한 재료를 선정하여 사용한다.

폐뿔립 하중에 의한 차수재의 응력-변형에 대한 연구는 소수의 연구자에 의해 수행되었는데 배수층 내의 골재에 의해 보호재에 전달되는 응력을 재현하기 위하여 여러 가지 형태의 하중 재하형식을 사용하였다. Pape와 Huang(1990, 1992)은 압축공기 또는 수압을 배수층에 가함으로서 지오멤브레인의 폐뿔립 강도를 측정하였으며, Saathoff(1991), Brummermann et al.(1993) 등은 하중재하 형식에서 하나의 원추형의 관입추를 사용하여 보호재에 하중이 전달되도록 하였고, Sehrbrock(1993)은 보호층에 하중을 재하하여 배수층을 통해 지오멤브레인에 응력이 전달되도록 하였다. 기존의 연구에서는 지오멤브레인의 하부지지층의 영향과 배수층 내의 골재 형상의 불규칙성 그리고 온도변화 등을 고려하지 않았다.

본 연구에서는 매립하중에 의한 지오멤브레인 상부에 설치하는 보호재의 폐뿔립하중에 의한 응력-변형 특성을 실험적 연구를 통하여 분석하였으며, 폐뿔립하중을 재현하기 위하여 골재(강자갈), 첨정없는 원추(truncated cone), 그리고 하중판을 사용하였다. 또한, 본 연구에서는 현장에서의 일반적인 차수구조의 모형을 적용하였으며, 하부지지층의 영향을 최소화 하기 위하여 지오폴을 사용하였으며, 또한 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 열선을 하부지지층에 설치하였다.

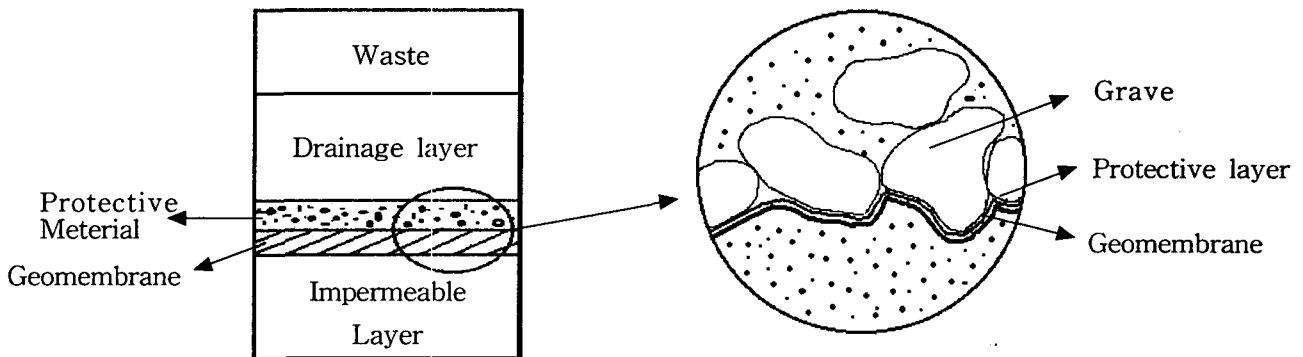


Fig. 1 Liner System and Deformation of Protective material

2. 실험

2.1 실험재료

차수구조 내에서 매립하중에 의한 보호재 및 지오멤브레인의 변형상태를 알아보기 위하여 차수재료는 두께가 2.0mm인 매끄러운 표면의 HDPE를 사용하였고 보호재는 일반적으로 많이 사용하고 있는 토목섬유 중에서 2가지의 부직포형 지오텍스타일을 선정하였다. 보호재로서 부직포는 각각 장섬유 2가지 와 단섬유 4가지를 선정하여 시험하였다. 시험에 사용한 토목섬유의 종류와 역학적 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Properties of Materials Used for the Test

Materials	Size	Tensile strength (kg)	비고
PP 장섬유	500g/m ²	56.7	ASTM 4632
	1000g/m ²	190.5	
PP 단섬유	500g/m ²	152	KS K 0520
	1000g/m ²	280	
	1500g/m ²	355	
	2000g/m ²	430	
HDPE	2.0mm	170 kg/m ²	ASTM D 632

실제의 현장에서 사용하는 배수층의 재료는 강자갈 또는 쇄석으로 입자의 형태와 크기가 일정하지 않으므로 특정의 모양과 규격을 제시할 수는 없으나 보호재와 지오멤브레인에 꿰뚫림 하중으로 작용하는 것은 굵은 재료에서 크게 나타난다. 꿰뚫림하중을 발생시키기 위하여 자연적인 재료로서 체가름을 이용하여 준비한 19mm~25mm의 강자갈을 사용하였으며, 25mm 크기의 자갈에 의해 발생하는 꿰뚫림하중을 모사하기 위해 관입기구를 제작하여 사용하였다. 관입기구는 25mm 직경의 자갈이 보호재의 표면과의 접촉면적을 고려하여 원추의 첨정을 절단하였다. 첨정없는 원추와 첨정없는 원추를 부착한 하중판이며 강자갈 및 이들 관입기구를 규격과함께 도시하면 Fig. 2와 같다.

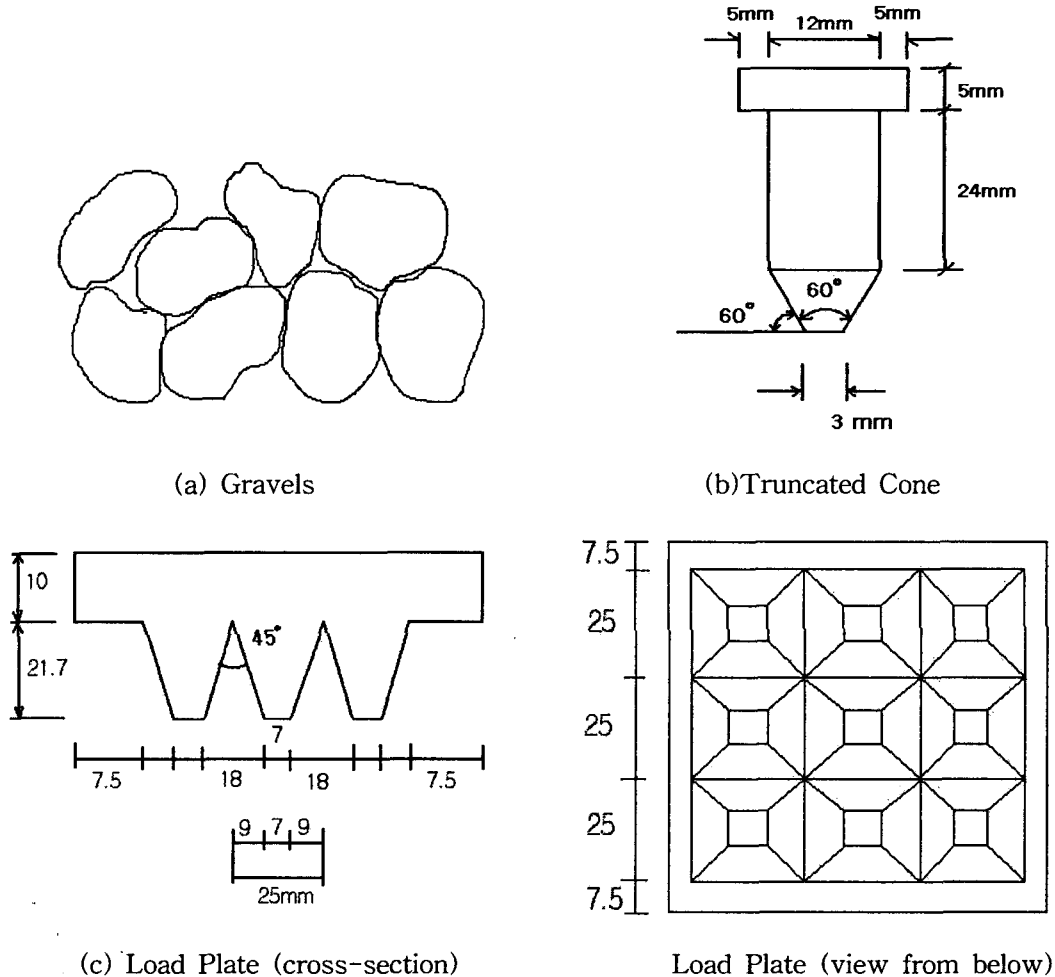


Fig. 2 Gravels and Penetrators for Punctiform Loads

2.2 실험장치

시험장치는 하중 재하장치와 차수구조 모형으로 구성된다. 하중재하장치는 CBR시험용 하중재하장치를 이용하였고 차수구조 모형은 아크릴 재료로서 직육면체의 상자로서 상부상자와 하부상자가 분리될 수 있도록 제작하였다. 하중 재하시 모형토조의 측방변형을 방지하기 위하여 외곽에는 보조장치를 부착하였고 보호재의 변형량 측정을 위하여 다이얼게이지를 부착하였다. 하중재하장치 및 차수구조 모형은 Fig. 3와 Fig. 4에 도시하였다. 모형상자는 차수구조(Liner System)를 모사하기 위한 모형으로 제작되었으며, 차수구조는 상부로부터 보호재(Geotextile), 차수재(HDPE), 지지층(지오포름; EPS)의 순으로 구성되었으며 일정한 온도를 유지하기 위하여 지지층 내에 열선을 이용한 온도 조절장치를 설치하였다. 차수구조 및 모형단면 및 꿰뚫림하중을 위한 관입기구 설치단면을 그림으로 도시하여 Fig. 5에 나타내었다.

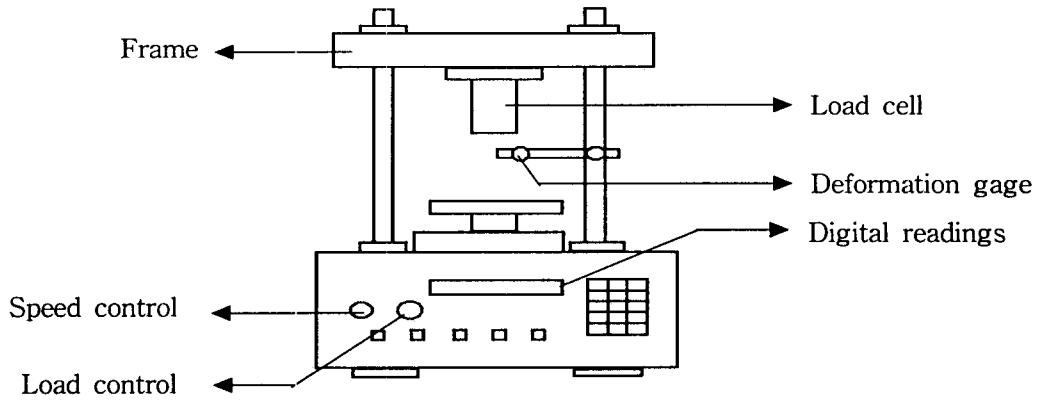


Fig. 3 Schematic of Loading System

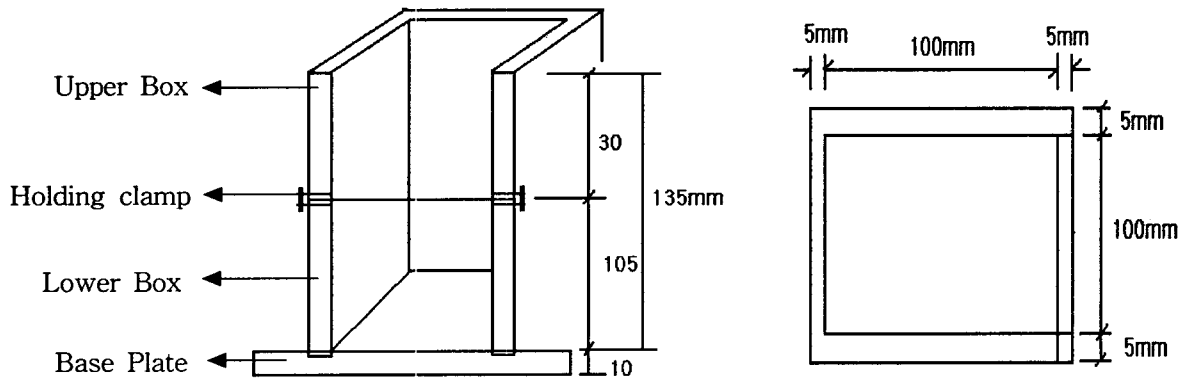
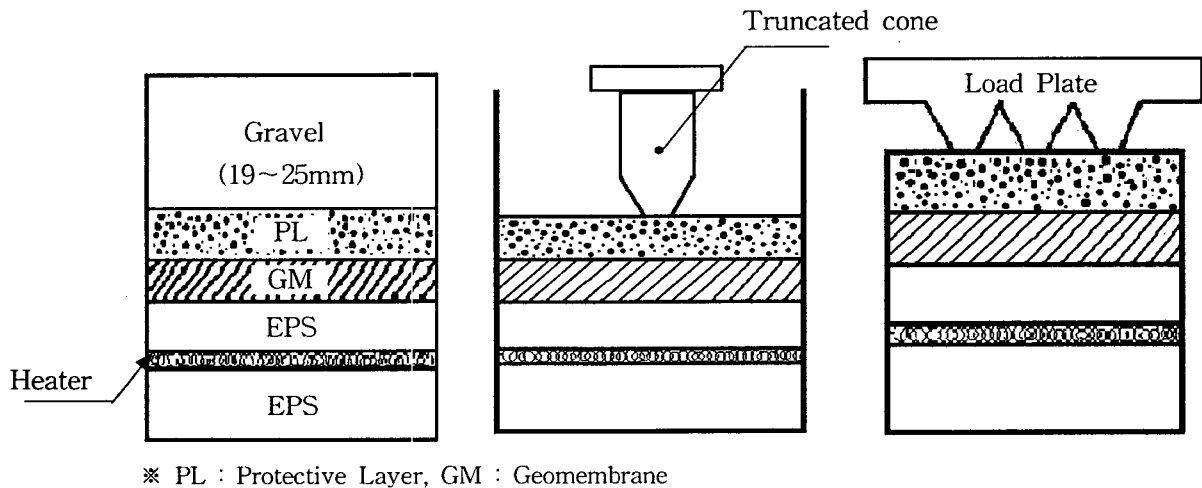


Fig. 4 Schematic of Liner Simulation Box



※ PL : Protective Layer, GM : Geomembrane

(a) 배수재료(Drainage materials) (b) Single truncated cone (c) Structured loading plate

Fig. 5 Section View of Liner System and Punctiform Loading

2.3 실험 및 측정

실험의 목적은 차수구조에서 매립하중으로 인하여 발생하는 꿰뚫림하중에 의한 보호재와 차수재의 변형을 측정하는 것이다. 모형상자 내에서 보호재(geotextile)와 차수재(HDPE)는 상부상자와 하부상자가 연결되는 부분에서 사면이 고정되도록 설치하였다. 차수재 하부에는 지오폴(geoform)을 설치하여 변형 발생 후 원형복귀가 불가능하도록 비중이 낮은 재료를 설치하였다. 지오폴과 차수재 사이에는 마찰저항을 최소로 하기 위한 방법으로 장력이 무시할 정도로 작은 얇은 종이를 물에 적셔서 사용하였으며 그 외의 모든 재료는 건조한 상태에서 사용하였다. 재하중은 시험중에 변형량에 관계없이 일정하게 유지되도록 하중통제방법을 적용하였다.

하중을 일정하게 유지하면서 하중 재하시간과 그에 따른 연직방향 변형량을 측정하였으며, 온도는 지오폴 내의 온도를 측정하였다. 침정없는 원추(truncated cone)와 하중판(load plate)은 변형측정은 연직방향의 변형(h)을 측정하여 수평방향의 변형을 산정하였으며, 자갈의 경우는 시험 종료 후 “h(연직방향 변형량)” 측정값에 따른 “d(꿰뚫림 직경)”값을 측정하였으며 5개소 이상의 측정값을 평균하여 사용하였다. 원추끝의 직경을 “b”, 원추의 경사각을 “ β ”라고 한다면, 변형량과 그에 따른 꿰뚫림 폭과의 관계는 다음의 그림 Fig. 6와 같다.

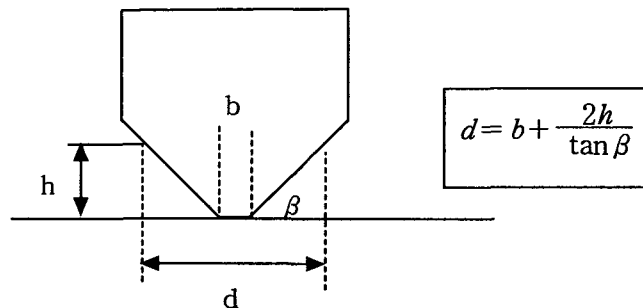


Fig.6 Mechanism of measurement of the deformation

3. 시험결과 및 분석

3.1 변형을 계산모델

꿰뚫림 하중을 받는 평면 상태의 재료는 연직방향 뿐만 아니라 수평방향으로도 변형이 발생한다. 또한 연직방향과 수평방향에서의 재료의 응력은 서로 영향을 미치는 관계를 가지고 있기 때문에 변형율의 산정에서는 양방향의 변형과 응력을 모두 고려해야 한다. 이렇게 양방향을 모두 고려한 변형을 산정방법은 보호재가 상부의 하중에 의해 변형이 발생한 경우 곡면(circle)으로 가정한 경우와 다각면(polygon)으로 가정한 경우로 일반적으로 두 가지의 모델이 사용된다. 곡면모델(circle model)을 이용한 변형을 계산식은 식(1)과 같으며 다각면모델(polygon model)을 사용한 변형을 계산식은 식(2)와 같다. 이 두 모델의 원리와 변형형태를 도시하면 Fig. 7 과 같다.

$$\epsilon_c = \frac{l-d}{d} \times 100(\%) \quad \dots \dots \dots (1)$$

여기서, $l = \sqrt{d^2 + \left(\frac{16}{3}\right) \times h^2}$

$$\epsilon_p = \frac{\sqrt{(h_{i+1} - h_i)^2 + c^2} - c}{c} \times 100(\%) \quad \dots \dots \dots (2)$$

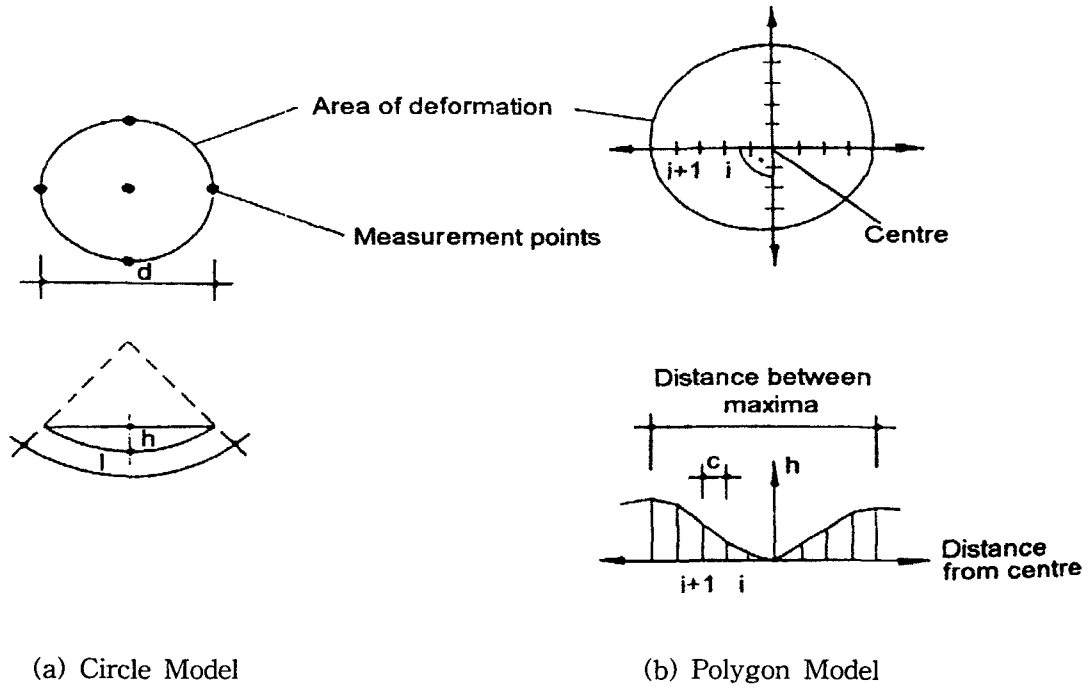


Fig. 7 Deformation Profile of Strain Model

3.2 재하중-변형률 관계

시험결과에 따르면 꿰뚫림하중을 가하는 재료와 형태는 하중-변형률관계에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 꿰뚫림하중 발생 기구가 하중과-변형률 관계에 미치는 영향은 큰 차이가 없으나, 자갈을 이용한 시험결과가 모형 하중판을 이용한 결과보다 약간 적은 변형률을 나타내 보이고 있으며, 그 차이는 하중의 크기가 클수록 더욱 크게 나타나고 있다. 꿰뚫림 하중 발생기구로서 자갈을 사용한 경우와 모형 하중판을 사용한 경우에 대하여 장섬유 부직포에 대하여 장시간(100hrs) 시험한 결과를 Fig 8.에 나타내었다. 이 두가지 경우 모두에서 하중-변형률 관계는 선형적인 변화를 하고 있음을 알 수 있다.

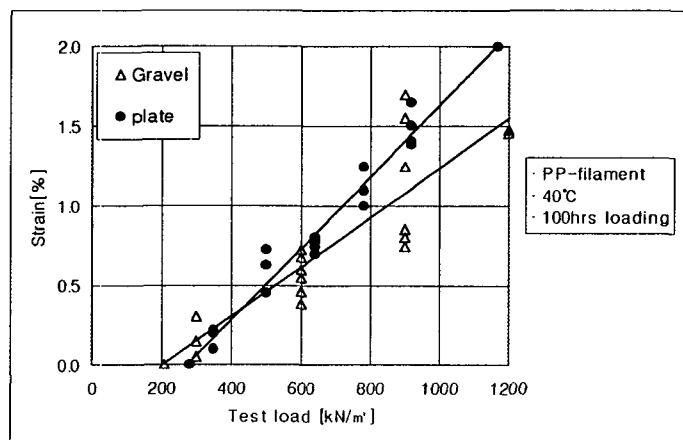


Fig 8. Strain of materials for different Loading conditions

재료의 규격에 따른 변형율을 알아 보기 위하여 장섬유(PP-filament)와 단섬유(PP-staple fiber) 모두에 대하여 여러 가지의 규격을 가지고 변형을 시험을 수행하였으며, 웨스팅 하중 발생기구는 첨정없는원추 (Truncated cone)를 사용하였다. 시험시 온도는 40℃를 유지하였으며 24시간 동안 하중을 재하하여 재하하중에 따른 변형율을 측정하였다. 장섬유와 단섬유 모두 선형적인 변형율의 변화를 보였으며, 장섬유보다는 단섬유에서 무게에 따른 변형율의 차이가 크게 나타났다. 특히 500g/m²의 규격에서는 장섬유와 단섬유의 변형율이 거의 유사하게 나타 났으나 무게가 증가할수록 단섬유의 변형율이 작게 나타나고 있다, 재하중이 작은값에서는 장섬유와 단섬유의 변형율이 거의 동일하지만, 하중이 증가할수록 변형율의 차이가 달라지고 있는데 이와 같은 관계를 Fig 9.에 나타내었다.

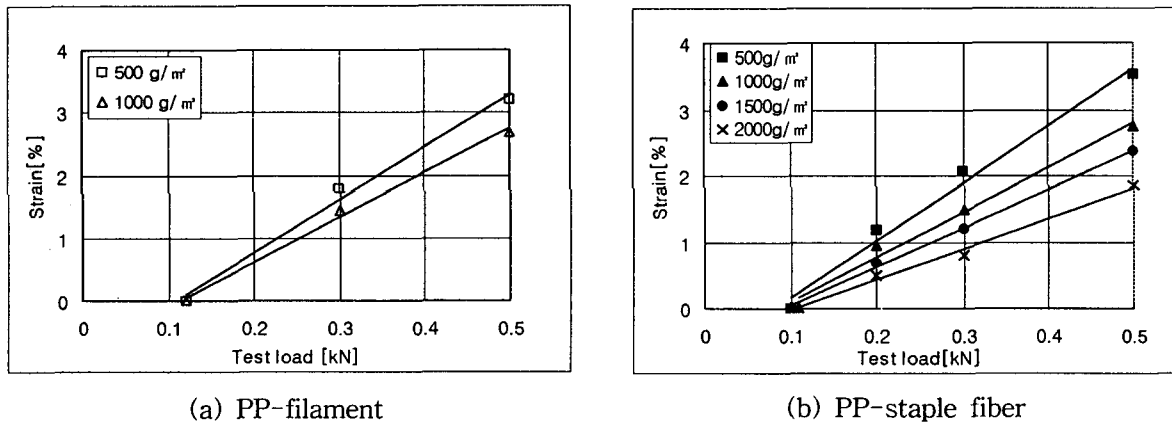


Fig 9. Strain of protective materials for short term loading (40°C, 24hrs, Truncated cone)

하중 재하 시간을 100시간으로 하고 하중기구는 하중판을 이용하여 장섬유와 단섬유의 장기적 변형거동을 알아보았는데 두가지 모두에서 섬유규격(무게)이 증가할수록 변형율이 작게 나타났다. Fig 10.에서 보는바와 같이 장기적 변형을 면에서도 단섬유보다는 장섬유의 변형이 적게 나타나고 있다. 특히, 변형 초기의 하중강도가 단섬유(PP-staple fiber)에서보다 장섬유(PP-filament)에 더 작게 나타나고 있다.

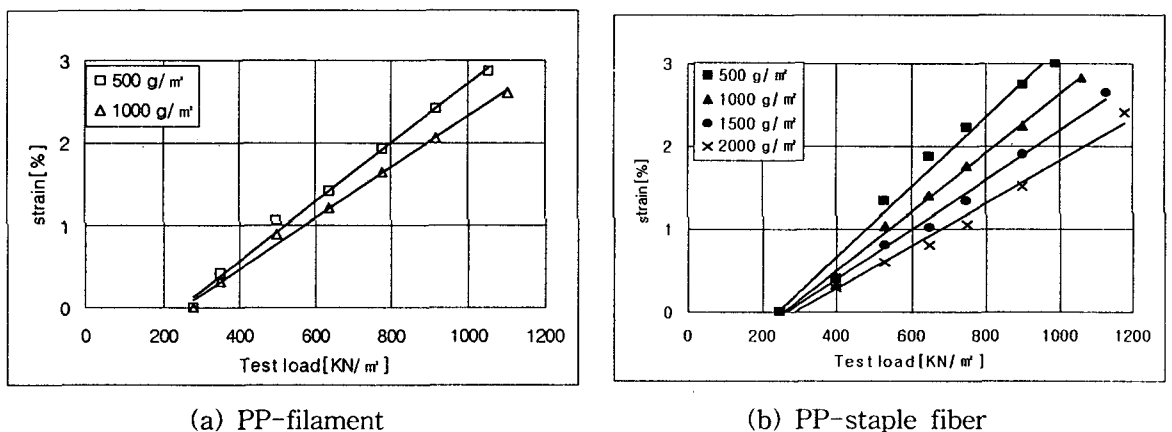
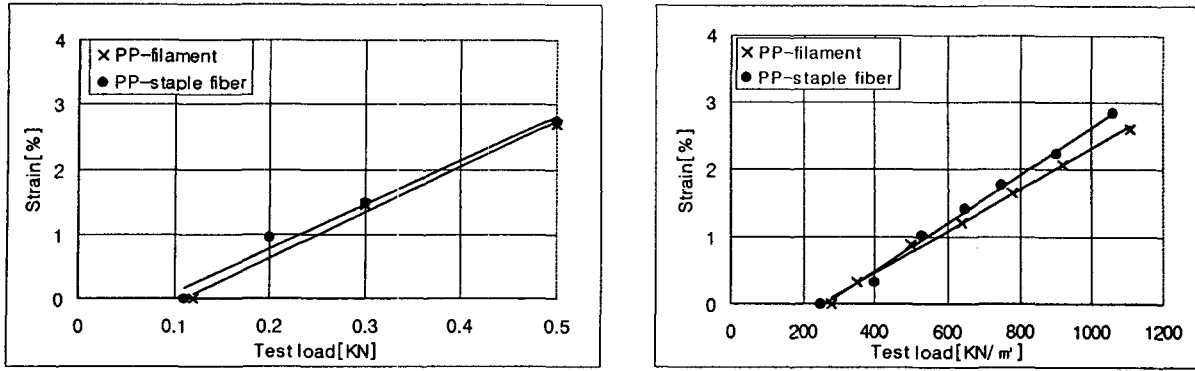


Fig 10. Strain of protective materials for Long term loading (40°C, 100hrs, load plate)

장섬유와 단섬유 두 가지 재료에 대하여 하중에 따른 변형율의 거동을 비교하여 Fig 11.에 나타내었다. 여기서는, 단기간(24시간)거동은 첨정없는 원추(truncated cone)를 사용하였고 장기간(100시간)거동은 하중판(load plate)을 사용하여 각각의 웨스팅 하중 조건에 대하여 비교하였다. 보호재 재료는 장섬유와 단섬유 모두 1000g/m²를 사용하였다. 첨정없는 단일 원추(truncated cone)를 사용했을 때 두 재료 모두 거의 동일한 변형거동을 나타냈다. 그러나 하중판을 사용한 결과는 단섬유(PP-staple fiber)의 변형율이 장섬유(PP-filament)의 변형율보다 더 크게 나타나고 있다.



(a) Truncated cone (b) Load plate
 Fig 11. Strains of two different materials(40°C, 1000g/m²)

섬유의 변형거동은 온도변화에 민감한 것으로 보고되고 있으며 일반적으로 온도 증가에 따라 일정하중에서의 변형율이 증가하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 0.3KN의 일정하중을 침정없는 원추(truncated cone)를 이용한 꿰뚫림하중으로 적용하여 장기적 거동을 조사하였다. 시험결과를 Fig 12.에 제시하였는데 Fig 12.에서 보는바와 같이 변형율을 온도 증가에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 단섬유(PP-staple fiber)에서의 변형율 증가가 장섬유(PP-filament)에서의 변형율 증가량보다 크게 나타났다.

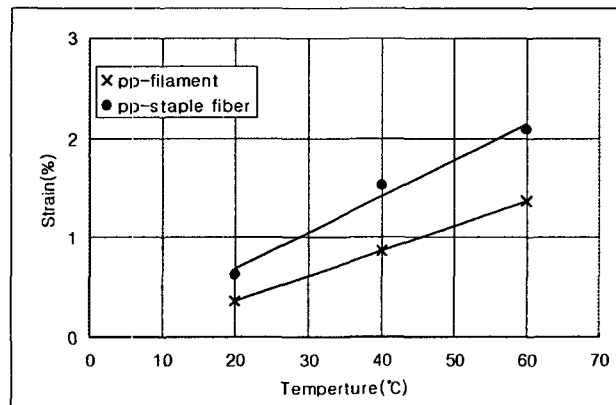


Fig 12. Strains depend on temperatures (0.3kN하중, Truncated cone, 100hrs 재하시간)

4. 결론

매립장 차수재(HDPE)의 보호를 위해 그 상부에 설치되는 보호재(주로 부직포를 많이 사용함)의 설치 목적은 배수층으로부터 발생하는 꿰뚫림하중에 의한 응력을 감소시켜 차수재의 파손을 방지하는 것이다. 본 연구에서는 자갈과 모형기구를 사용하여 매립하중에 의해 발생하는 응력이 보호재에 미치는 영향과 보호재 규격에 따른 변형율의 차이와 변화에 대하여 실험을 수행하고, 그 결과로서 다음과 같은 결론을 제시하고자 한다.

1. 차수구조에서 보호재의 역할은 괄목할만할 정도로 나타나고 있으며, 보호재의 규격에 따라서는 호수성에 큰 영향을 미치는데, 규격이 클수록 높은 매립하중에서 변형율 감소에 좋은 효과가 나타났으나, 작은하중에서는 큰 차이가 없었다. 따라서 매립하중(매립규모)에 따라 적합한 보호재의 규격을 사용하여야 할 것으로 판단된다.

2. 꿰뚫림 응력 발생은 사용기구의 형태에 따라 큰 차이를 나타내었으며, 자갈을 사용한 결과와 모형하중판을 사용한 결과는 거의 유사한 변형율의 변화를 보였다. 따라서 꿰뚫림에 대한 실험은 모형하중판을 사용하여 시험하는 것이 실제 현상의 묘사에 더 적합한 것으로 판단된다.

3. 꿰뚫림 하중에 의한 변형율은 장섬유와 단섬유 모두에서 비슷한 현상을 보였다. 또한, 장섬유와 단섬유 부직포는 온도의 영향을 크게 받으며 장섬유 보다는 단섬유가 온도의 영향이 더욱 크게 나타났다.

토목섬유의 변형은 응력의 크기에 따라 크게 영향을 받고 있음은 본 연구결과를 통하여 확인 되었다. 그러나 동일한 하중강도에서도 하중재하시간에 따라서도 큰 차이가 있음을 기존의 연구에서 알 수 있는데, 폐기물매립장에서는 매립하중이 장기적으로 작용하는 것을 고려할 때 꿰뚫림응력에 의한 토목섬유의 장기적 거동에 대한 연구가 향후 필요한 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Bummermann, K.; Kohlhasse, S.; Saathoff, F.(1993), "Puncture loads on geomembranes in composite liners", *Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium*, Proceedings Vol. 1, pp. 357-367.
2. Federal Institute for Materials Research and Testing (1994): "Guidelines for the Certification of Geomembranes as a Component of Composite Liners for Municipal and Hazardous Waste Landfills as well as for Lining Contaminated Land." Berlin (original German edition published in 1992).
3. Pape, J.T.;Huang, L.(1990): Large-scale testing of waste containment sealing under point loading in high pressure testing device. In: *4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Den Haag, pp. 585-587
4. Pape, J.T.; Huang, L.; Boehm, W.(1992): Schutzlagenprüfung für Deponiebasisabdichtungen mit dem Hochdruckprüfbehälter für Abdichtungssysteme, Wasser und boden, NO 12, pp. 797-799
5. Saathoff, F.(1991): Geokunststoffe in Dichtungssystemen - Laboruntersuchungen zum Verhalten von Geotextilien und Kunststoffdichtungsbahne, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, NO. 72