

지오멤브레인의 파열거동에 미치는 스크래치의 영향 (I) : 단시간 거동 The Effect of Scratch on Bursting Behavior of Geomembrane (I) : Short-term Behaviors

유중조¹⁾, Jung-Jo Yuu, 정진희²⁾ Jin-Hee Jeong, 전한용³⁾, Han-Yong Jeon

¹⁾ 전남대학교 섬유공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Textile Eng., Chonnam National Univ.

²⁾ 전남대학교 섬유공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Textile Eng., Chonnam National Univ.

³⁾ 전남대학교 섬유공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Textile Eng., Chonnam National Univ.

SYNOPSIS : In this paper, the effect of scratch to be induced by modified-shear test method(MSTM) on the bursting behaviors of HDPE geomembrane was assessed and the bursting properties of HDPE geomembrane were tested by according to 'Ball bursting test(ASTM D 3787)'. The scratch parameters which affect the bursting behaviors were normal loads(8, 18, 28kgf), scratch-induced media(sand-paper; Cw60, Cw120) and shear speeds(1, 10, 100, 500, 1000mm/min). From the experimental results, it was known that MSTM was good method to induce scratch on the surface of HDPE geomembrane. The bursting behaviors of HDPE geomembrane were not affected by the shear speed but were strongly dependent on the type of scratch-induced media and the normal stress to the applied loads.

KEYWORDS : Geomembranes, Bursting behavior, Scratch, Modified-shear test method(MSTM), Scratch-induced media.

1. 서론

토목용 섬유 고분자재료에 대한 다양한 시험방법이 소개되어지고 있으며, 새로운 재료의 출현에 따라 물성의 평가방법에 대한 연구 및 개발이 요구되고 있다. 선진외국의 경우, 다양한 사용환경에서의 토목용 섬유 고분자재료의 거동에 대한 평가방법에 대해 많은 연구가 행하여지고 있으며, 많은 수의 평가방법이 국제적 공인을 얻어 ASTM, GRI standard, NSF standard 등에 제시되어 있다(Koerner, 1994).

한편, FML(Flexible Membrane Liner)로 폐기물 매립장에 적용되는 지오멤브레인은 생산된 후 저장, 이동, 시공 그리고 시공 후, 다양한 메카니즘에 의해 재료의 표면에 스크래치가 발생하게 된다. 이러한 스크래치는 지오멤브레인의 역학적 강도의 감소를 초래하여 재료의 파괴를 유도, 결국 시스템의 안정성에 문제를 일으킨다(Hanson,1989; Giroud and Bonaparte,1989). 이러한 스크래치의 일축 인장강도에 미치는 영향은 NCTL(Notched Constant Tensile Loading) 방법에 의해 평가 되어지고 있으나(Hsuan, Koerner and Lord, Jr.,1993; Koerner, 1990), 다른 역학적 거동에 대해서는 연구가 이루어지지 않고 있는 실정이며, 특히 파열거동에 미치는 스크래치의 영향에 대한 연구는 거의 발표되지 않고 있다. 이러한

점을 감안하여 본 연구에서는 차수재인 지오멤브레인의 파열거동에 미치는 스크래치의 영향을 평가하기 위해 정성적, 정량적인 스크래치 부여방법을 제시하였으며, 제시한 방법에 의해 유도된 스크래치의 파열거동에 대한 영향을 평가, 고찰하였다.

2. 실험

2.1 시료

폐기물 매립지용으로 시판되는 두께 1.5mm, 밀도 0.945g/cm³의 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 지오멤브레인을 사용하였다.

2.2 스크래치 유도

지오멤브레인에 스크래치를 유도하기 위해 고안한 장치는 그림 1과 같다. 제시한 방법은 토목용 고분자재료의 토양과의 마찰특성을 평가하는 직접전단 시험방법을 응용한 방법으로(Martin, koerner and Whitty, 1989), 균일한 스크래치의 유도를 위해 사용한 스크래치 발생 매체는 샌드페이퍼(sand paper)를 사용하였으며 거침정도는 임의로 선택하였다. 본 연구에서는 Cw120(A type), Cw60(B type)의 거침정도를 보이는 샌드페이퍼를 이용하였으며, 샌드페이퍼의 SEM 사진을 그림 2에 나타내었다. 상부의 부가하중은 8, 18, 28kgf로 하였으며, 각 전단속도에 따른 영향을 보기위하여 1, 10, 100, 500, 1000mm/min의 전단속도로 스크래치를 부여하였다.

하중을 부가하는, 즉 지오멤브레인과 마찰이 발생하는 부분의 크기는 16cm×20cm, 지오멤브레인은 20cm×50cm로 절단하여 지지대에 고정시켰다. 샌드페이퍼를 하중을 부가하는 부분의 하부에 부착시킨 후, 일정 전단속도로 지오멤브레인 위를 이동하므로써 마찰에 의한 스크래치를 유도하는 방법을 이용하였다. 또한 직접전단 시험법에 의한 마찰시험을 행한 후의 토양에 의한 스크래치가 발생한 지오멤브레인의 시료를 위 방법으로 스크래치가 유도된 지오멤브레인과 비교하였다. 이때 직접전단시험에 이용된 토양은 화강풍화토였으며 전단속도는 1mm/min이었다.

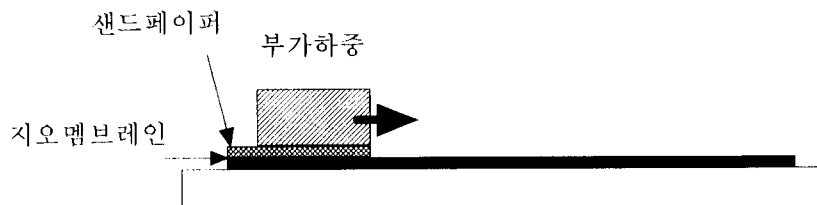
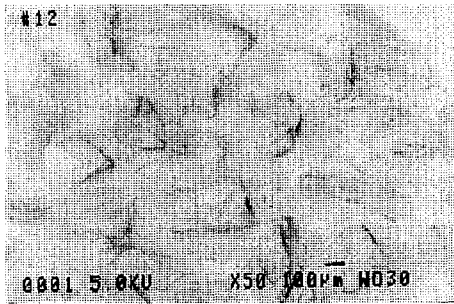


그림 1. 스크래치 유도 장치

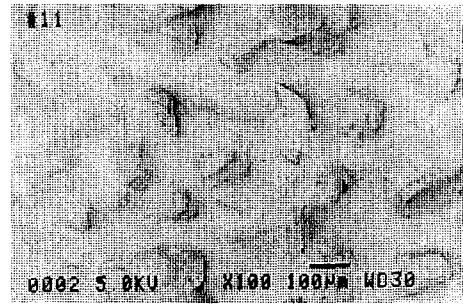
2.3 파열강도의 측정

지오멤브레인의 파열강도의 측정방법은 Mullen bursting 시험법과 Ball bursting 시험법의 2가지로 분류되는데(Norbert, 1993), 본 연구에서는 만능인장기에 의한 Ball bursting 시험법(ASTM D 3787)에 의거하여 파열강도를 구하였다. 실험속도는 스크래치의 크랙으로의 성장 등을 평가하기 위해 2~500mm/사의 다양한 속도에서 스크래치 발생 전후의 파열거동 변화를 평가하였다. 또한 표면의 변화를 고찰하

기 위해 주사 전자현미경(SEM, Scanning Electric Microscope) 사진을 통하여 지오멤브레인의 변화를 평가하였다.



(a) Type A : Cw120



(b) Type B : Cw 60

그림 2. 샌드페이퍼의 전자현미경 사진

3. 결과 및 고찰

3.1 스크래치 미발생 지오멤브레인의 파열강도

스크래치가 발생하지 않은 지오멤브레인의 파열거동에 대한 결과를 표1에, 그리고 신장-하중곡선을 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 신장의 20mm부근에서 나타나는 변곡점은 HDPE 지오멤브레인의 탄성 거동에서 소성거동으로 전이되는 점(항복점)으로 해석할 수 있으며, 이 항복점을 넘어선 영역은 파괴현상이 시작되는 부분으로 지오멤브레인의 파열거동에서 중요한 파라미터라 간주될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 스크래치에 의한 영향을 받는 파라미터로서 항복점을 평가 대상으로 선택하였다. 그림 3과 표 1를 통해 항복점에서의 강도가 전단속도의 증가에 따라 점차 증가함을 알 수 있으며 신장은 미세하게 증가하지만 큰 차이를 보이지 않음을 확인할 수 있다.

표 1. 고밀도 지오멤브레인의 파열강도

전단속도 (mm/min)	항복하중 [kgf]	항복신장 [mm]
2	180.6	20.5
30	197.4	20.4
500	217.2	20.1

이러한 결과는 지오멤브레인에 연신이 진행되면서 나타나는 결정화도 및 배향의 차이가 파열시험속도에 의해 영향을 받기 때문이라 생각된다. 즉 파열시험속도가 클때(500mm/min이상), 분자쇄의 연신 즉 재배열되는 속도가 시험속도보다 느리게 되어 항복점이전에 충분한 연신효과가 발생하지 않은 상태에서 항복점에 도달하므로 아직 연신되지 않은 무정형 영역의 분자쇄의 이웃하는 분자쇄와의 마찰에 의한 slip 저항에 의해 큰 하중이 나타나게되며 항복점을 넘어서면 이러한 미연신된 무정형영역의 분자쇄가 급격

히 slip되어 하중의 감소가 낮은 시험속도에서의 감소폭보다 크게 나타나는 것으로 사료된다. 마찬가지로 항복점이후에 다시 상승하는 부분에서 나타나는 500mm/min에서의 조기파단현상은 결정영역의 재배열과정에서의 속도차에 의해 나타나는 것으로 생각된다. 즉, 결정영역의 재배열이 한 개의 라멜라의 재배열이 충분히 이루어진후 다음 라멜라의 재배열이 이루어져야 하는데, 충분한 재배열이 이루어지지 않은 상태에서 다음 라멜라의 재배열이 시작되어 미배열된 부분-배열각도가 다른 부분 혹은 entangle 된 부분-에 외력의 집중으로 조기파단이 발생하는 것으로 생각된다.

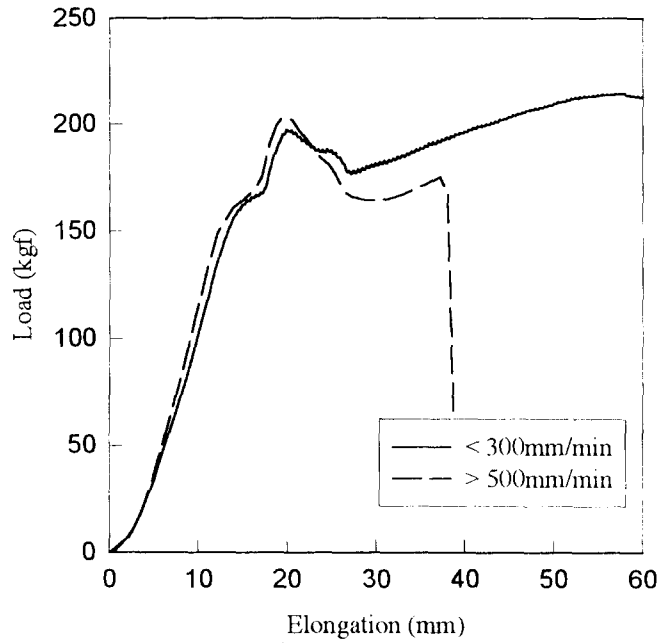
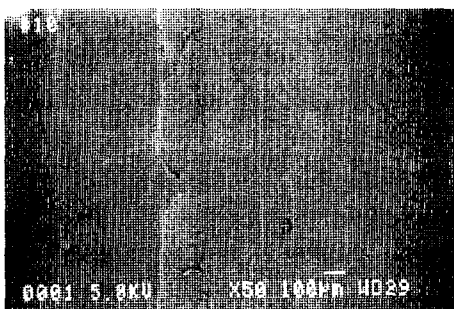


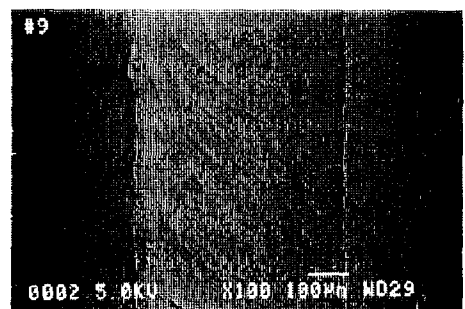
그림 3. 지오멤브레인 파열거동의 신장-하중 곡선

3.2 스크래치의 영향

그림 4와 5에 크랙으로 성장한 스크래치와 스크래치가 발생한 지오멤브레인 표면 SEM사진을 나타내었다.

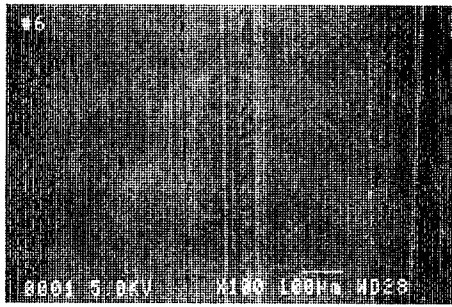


(a) 스크래치의 성장

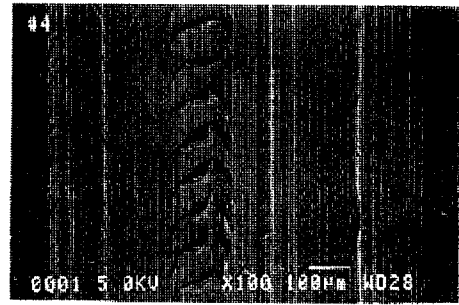


(b) 크랙의 성장

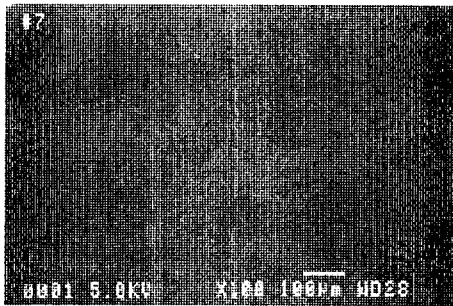
그림 4. 스크래치의 크랙으로 성장된 모습



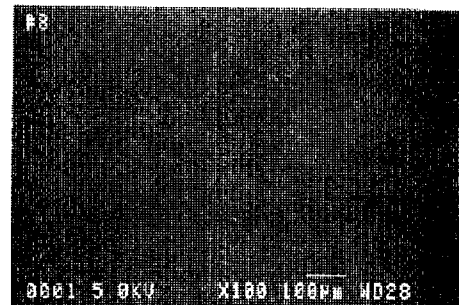
(a) 직접전단 시험 후



(b) 부가하중 28kgf



(c) 부가하중 8kgf, Type A



(d) 부가하중 8kgf, Type B

그림 5. 스크래치 발생한 지오멤브레인의 표면 전자현미경 사진

그림 4는 지오멤브레인에 충분히 큰 스크래치가 발생하여 파열거동과정중 스크래치의 크랙 성장에 의한 조기파단현상이 발생하는데 이때 크랙의 성장된 모습을 SEM사진을 통하여 나타내었다. 이러한 크랙의 성장은 스크래치의 크기에 따라 발현여부가 결정되며 스크래치의 크기는 스크래치의 부가매체보다는 부가하중에 영향을 받는 것으로 확인되었다.

또한 그림 5(a)는 직접전단시험한 후의 스크래치 발생 사진을 보이고 있으며, (b)는 부가하중이 클 때, (c)와 (d)의 경우는 부가매체에 의한 스크래치의 영향을 나타내고 있는 것으로 낮은 부가하중의 경우에는 매체의 영향을 크게 받지 않음을 확인할 수 있었다.

3.2.1 스크래치 부여매체 형태, 부가횟수 및 전단속도의 영향

실제 지오멤브레인에 나타날 수 있는 스크래치의 형태는 다양하다. 지오멤브레인의 제조 후에 시공현장으로 이동에서 발생할 수 있는 스크래치, 다른 종류의 토목용 섬유 고분자재료와 함께 사용될 때 발생할 수 있는 상호마찰에 의한 스크래치, 토양과의 마찰에 의한 스크래치-모든 사용분야에서 지오멤브레인 하나만 단독으로 사용되는 경우가 드물어 직접적인 토양과의 마찰에 의한 스크래치의 발생가능성은 작다고 할 수 있으나 고려 대상에 포함하였음- 등으로 각각의 경우를 정확히 고려한 인위적인 스크래치 부여 방법이 정립되지 않아 사용한 샌드페이퍼의 거침정도를 2종류로 분류하여 작은 부가하중에서의 스크래치 부여횟수의 영향을 고려하였다. 이때의 부가하중은 약 8kgf이었으며 전단속도는 1000mm/min으로 스크래치 부여횟수를 각 1, 3, 7회씩 실행한 후 지오멤브레인의 파열강도를 구하였으며 그 결과를 그림 6에 나타나있다. 그림 6를 통하여 낮은 부가하중의 경우에는 스크래치의 부여횟수의 영향은 무시가능함을 알 수 있다.

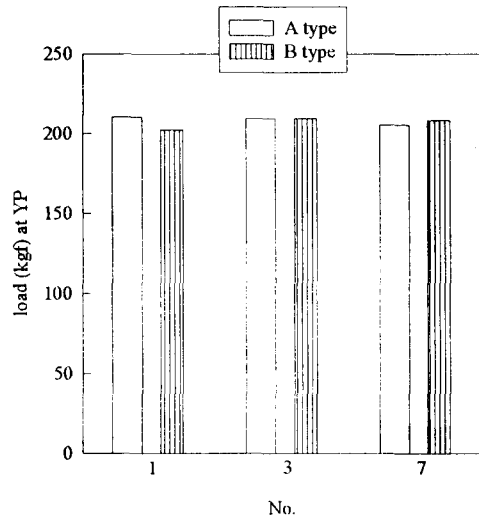


그림 6. 스크래치 부여 매체 및 부여횟수의 파열강도에 미치는 영향

또한, 스크래치 부가형태(본 연구에서 설정한 샌드페이퍼의 형태)의 영향도 작음을 확인하였다. 부여횟수가 10회를 넘어서는 경우는 실제 지오멤브레인의 사용분야에서는 발생할 수 없는 형태의 스크래치를 보였음이 예비실험을 통해 밝혀졌으며 제시한 7회의 경우에도 지오멤브레인에 발생할 수 있는 극한의 경우를 고려하여 설정한 값이다.

표 2. 전단속도의 파열강도에 미치는 영향

전단속도(mm/min)	항복하중 (kgf)	항복신장 (mm)
1	209.3	22.1
10	205.9	20.8
500	207.2	21.8
1000	210.0	21.7

또한 스크래치를 부여하는 매체의 전단속도의 영향을 평가하기 위하여 전단속도를 1, 10, 500, 1000mm/min으로 하였을 때 파열강도를 측정하였다. 마찬가지로 나타나는 물성치는 스크래치 미발생 지오멤브레인의 파열강도와 거의 유사한 값을 보였으며, 스크래치발생에 있어 전단속도의 영향은 크지 않음을 확인할 수 있었다. 이때의 부가하중은 8kgf이었으며, 파열시험 속도는 500mm/min이었다. 그 결과를 표 2에 나타내었다.

3.2.2 파열시험 속도 및 부가하중의 영향

스크래치가 발생한 후 파열시험과정에서 지나치게 빠른 시험속도에 의해서 스크래치가 크랙으로 성장할 수 없는 경우가 발생할 수 있다는 관점에서, 스크래치가 발생한 지오멤브레인의 파열시험에서 시험속도의 영향을 평가하기 위하여 각 시험속도를 2, 30, 500mm/min으로 설정한 후 파열시험을 실시하였으며, 또한 스크래치 발생시의 부가하중의 영향을 평가하기 위하여 부가하중을 8, 18, 28kgf로 설정하여 파열시험을 실시한 후 각각의 영향을 고찰하였다. 이때 스크래치 매체의 형태는 A형태이었으며, 부여횟수는 1회, 전단속도는 1mm/min이었다. 실험결과를 표 3에 나타내었다.

실험을 통하여 스크래치가 발생한 지오멤브레인의 파열거동에 미치는 시험속도의 영향은 부가하중이

8kgf로 낮은 경우-미세한 스크래치가 발생한 경우-에서는 지오멤브레인의 short-term 파열거동에 스크래치의 영향이 크지 않기 때문에 스크래치 미발생 지오멤브레인과 같은 경향을 보이거나 부가하중이 18kgf 이상인 경우 파열시험속도에 영향을 받는 것으로 나타났다.

표 3. 파열시험 속도 및 부가하중의 영향 (YP에서 하중/신장)

파열시험속도 (mm/min)	부가하중(kgf)			
	스크래치 미발생	8	18	28
2	181.1/20.5	183.6/21.0	163.9/20.6	165.4/20.8
30	197.3/20.3	201.1/20.0	190~210/20.2	192.6/19.6
500	216.2/20.7	209.3/22.1	210.8/17.5	208.0/17.5

표 3에서 18과 28kgf의 결과값이 파열 시험속도 500mm/min의 경우에는 스크래치 미발생 지오멤브레인의 값과 거의 유사한 값을 보이거나, 파열시험속도 2, 30mm/min에서는 상당한 차이를 보이는데, 이러한 현상은 낮은 시험속도에서는 스크래치부분에 하중이 집중되어 스크래치가 크랙으로 성장이 가능하였기 때문으로 생각된다. 또한 파열시험속도가 500mm/min의 경우에서 마찬가지로 크랙성장이 가능하나 충분한 성장이 이루어지지 않은 관계로 시험속도가 낮은 경우도 비해 파열강도값의 감소폭이 작은 것으로 사료된다. 물론 여기에 부가하중의 증가에 의한 스크래치의 크기(깊이)의 증가의 영향도 함께 고려할 수 있다. 그러나 18kgf의 30mm/min의 시험속도의 경우를 보면 스크래치의 크기가 균일하지 않은 관계로 시험속도에 의한 크랙성장에 차이가 있음을 확인할 수 있다. 이러한 관계를 하중-신장곡선을 통하여 고찰하면 더 쉽게 각각의 영향을 파악할 수 있으며, 그림 7에 이러한 관계를 나타내었다.

그림 7에서 부가하중이 28kgf인 경우에는 파열시험속도에 상관없이 항복점 이후에서 바로 파단현상을 보이고 있으며 부가하중이 8kgf인 경우에는 스크래치 미발생한 지오멤브레인과 같은 경향의 거동을 보이는데, 그 이유는 부가하중에 의한 스크래치의 크기 차이 때문이라고 생각된다. 한편, 부가하중이 18kgf인 경우의 스크래치 크기는 파열시험속도의 영향이 나타나는 임계값으로 생각되며, 스크래치 크기의 분산에 의해 항복점 이후에 조기 파단이 나타나는 경우와 약간의 상승이후에 파단이 나타나는 경우 등의 경향을 보이고 있다.

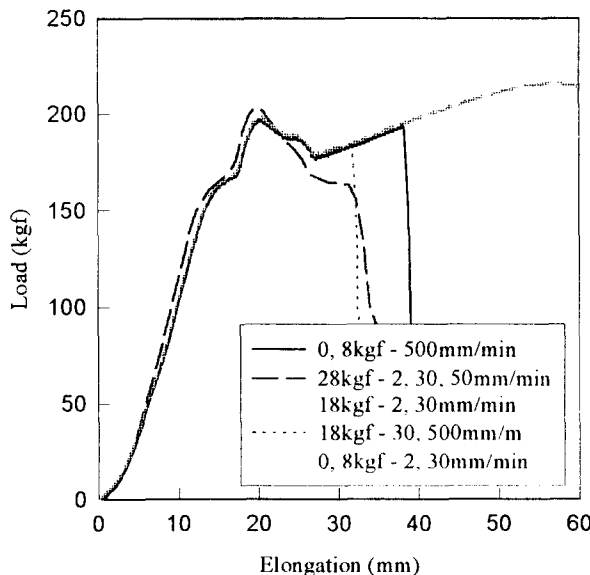


그림 7. 파열시험 속도 및 부가하중의 파열거동에 미치는 영향

4. 결론

HDPE지오멤브레인의 파열강도에 미치는 스크래치의 영향을 평가하기 위한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 내릴수 있었다.

- (1) 지오멤브레인에 정량적, 정성적 인위적인 스크래치 부여가 가능하였다.
- (2) 스크래치가 발생한 지오멤브레인의 경우 파열속도가 느릴수록 크랙성장 가능성이 커져 short-term 파열거동에 영향을 미치고 있다.
- (3) 부가하중이 18kgf이상인 경우 스크래치 부여 매체, A형태에서 파열거동은 스크래치에 의해 큰 영향을 받고 있다.
- (4) 지오멤브레인의 파열거동에 미치는 스크래치의 영향을 인위적인 스크래치 부여장치를 통하여 평가 가능하였다.

감사의 글 : 본 연구를 위해 시료를 제공해주신 대림산업 주식회사와 직접전단시험에 협조해 주신 인천대학교 토목공학과 지반연구실 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Koerner, R. M. (1994), "Designing with Geosynthetics", 3rd Ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, pp.426~623.
2. Koerner, R. M. (1990), " Geosynthetics Testing for Waste containment Applications", ASTM, pp.1~70.
3. "Flexible Membrane Liners", NSF 54, National Sanitation Foundation, Ann Arbor, MI.
4. Norbert, J. (1993), "The Use of Multi-Axial Burst Test to Assess the Performance of Geomembranes", *Proc. Geosynthetics '93*, t. Paul, MN:IFAI, pp.685-702.
5. Martin, J. P., koerner, R. M. and Whitty, J. E. (1989), "Experimental Friction Evaluation of Slippage Between Geomembrane, Geotextiles and Soils", *J. Geotex. and Geomem.*, Vol. 4, No. 1, pp.2.
6. Hsuan, Y. G., Koerner, R. M. and Lord, A. E. Jr. (1993), "Notched Constant Tensile Load(NCTL) Test for HDPE Geomembranes", *ASTM Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 16, NO. 4, pp.450-457.
7. Hanson, D. J. (1989), "Hazardous Waste Management: Planning to Avoid Future problems", *Chemical and Engineering News*.
8. Giroud, J. P. and Bonaparte, R. (1989), " Leakage Through liners Constructed with Geomembranes-part II. Composite Liners", *J. Geotex. and Geomem.*, Vol. 8, No. 2, pp.71-1129.