

폐기물매립지에서 표면결함이 있는 지오멤브레인의  
열적 안정성 및 응력균열저항성 평가

전 한 용 · 이 광 열\* · 이 재 영\*\*

전남대학교 섬유공학과, \*동서대학교 토목공학과, \*\*서울시립대학교 환경공학부

**The Evaluations of Thermal Stability and Stress Crack Resistance of  
Geomembranes with Surface Defects in the Landfill**

**Han-Yong Jeon · Kwang-Yeol Lee\* and Jai-Young Lee\*\***

*Dept. of Textile Eng., Chonnam National University*

*\*Dept. of Civil Eng., Dongseo University*

*\*\*Dept. of Environmental Eng., University of Seoul*

**ABSTRACT**

Effects of surface defect on thermal stability and stress crack resistance of high density polyethylene geomembranes in environmental conditions were examined by comparing the mechanical properties, chemical resistance and failure times of geomembranes between defective cases under different temperatures. Artificial surface defects were added to the surface of geomembranes by scratch apparatus designed specially. The number of surface defects was increased with the smaller size of scratch induced particles, and the more scratch addition numbers at the shear rate of scratch induced mechanism, 100mm/min. The tensile strength were decreased but the tensile strain was increased with the above conditions. In chemical resistance of defective geomembranes, the tensile strength were decreased but the tensile strain was increased with the longer immersion period and the higher temperature under the same scratch induced conditions. Finally, failure times of defective geomembranes by ESCR test were shifted to the shorter time ranges by increasing temperatures.

## 요약문

표면결합이 고밀도 폴리에틸렌 지오멤브레인의 열적 안정성과 응력균열저항성에 미치는 영향을 온도와 표면결합 부여조건을 달리한 환경조건에서 역학적 특성, 화학저항성 및 피로시간을 측정하여, 조사하였다. 특별 고안된 장치를 사용하여 인위적으로 지오멤브레인 표면에 결합을 부여하였다. 표면결합은 표면결합 유도매체의 전단속도 100mm/min에서 표면결합 유도매체의 크기가 작을수록, 표면결합 부여횟수가 커질수록 증가하였다. 또한 이 조건에서 인장강도는 감소하였지만 인장신도는 증가하였다. 표면결합 부여조건이 같을 경우 고온으로 갈수록 그리고 침지시간이 길어질수록 인장강도는 감소되고 인장신도는 증가하여 표면결합이 부여된 지오멤브레인의 화학저항성은 저하되었다. 끝으로 응력균열저항성 시험 결과 온도가 높아질수록 표면결합이 부여된 지오멤브레인의 피로시간은 단시간 영역으로 이동되었다.

## 1. 서론

토목합성재료(geosynthetics)는 1970년대 초기 주로 토사의 세굴 방지 및 여과 목적으로 이용되었다가 그 후에는 지반의 분리, 보강 또는 배수기능 등의 목적으로 그 응용분야가 점차 확대되었으며, 최근에는 방수, 균열방지, 지반 구조물의 보호, 충격흡수 등의 목적으로 사용되어지고 있다. 이중에서도 특별히 폐기물 매립장에 사용되는 토목합성재료는 폐기물의 종류가 음식쓰레기가 대부분인 우리나라의 경우 자체 발효 및 빗물 등의 유입으로 인하여 액체화되기 때문에 침출수를 발생하게 되며, 여름철에는 고온으로 침출수의 온도가 상승하게 된다. 특히, 음식물 폐기물 매립장의 경우에는 보호/보강, 분리용의 지오텍스타일(geotextiles), 차수용의 지오멤브레인(geomembranes), 보강용의 지오그리드(geogrids), 배수용의 지오컴포지트(geocomposites) 등 여러 종류의 토목합성재료들이 사용되고 있지만, 주된 차수기능을 갖는 지오멤브레인의 경우 침출수의 온도상승에 의한 성능저하가 발생할 경우 매립지 구조의 안정화에 심각한 영향을 미치게 된다<sup>1,2</sup>. 이와 같이 지오멤브레인은 주로 액체의 흐름을 차단하는 차수재로 사용되기 때문에 음식물 폐기물 매립지에 사용되는 지오멤브레인의 경우 손상이 발생하였을 때 폐기물로부터 발생하는 침출수를 효과적으로 제어할 수 없으므로, 2차적인 환경훼손의 문제가 야기될 수 있다. 침출수는 자체가

화학적으로 독성을 지닌 것이므로 이러한 화학적 환경에 대한 지오멤브레인의 장기 안정성과 연관된 문제의 평가는 중요한 것이라 할 수 있다<sup>3</sup>. 한편, 음식물 폐기물 매립지의 경우 폐기물 분해과정에서 발생하는 침출수 온도는 계절에 따라 다르지만, 여름의 경우는 최고 80~90℃에 이르게 되어 노출환경과 온도변화에 대한 지오멤브레인의 안정성은 매우 중요하다고 볼 수 있다. 또한 지오멤브레인의 매립과정 중 흙이나 모래 등과의 마찰에 의해 발생할 수 있는 표면결합이 응력균열저항성에 미치는 영향도 매우 중요하며, 표면결합에 대한 응력균열저항성은 지오멤브레인의 장기성능평가에 직접적인 영향을 미치게 된다. 이러한 점을 감안하여 본 연구에서는 폐기물 매립지에서 발생하는 침출수와 직접적으로 접하게 되는 지오멤브레인의 노출환경과 온도변화에 따른 안정성을 평가, 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시료의 준비

카본블랙 및 첨가제가 약 3%정도 포함되어 있는 밀도 0.945g/cm<sup>3</sup>, 결정화도 60%정도인 두께 1.5mm의 고밀도 폴리에틸렌(High Density Polyethylene, HDPE) 지오멤브레인을 시료로 사용하였다.

### 2.2 표면결합의 유도

지오멤브레인의 표면에 결함을 유도하기 위해 특별히 설계한 표면결합 유도장치를 인장시험기에 부착하여 사용하였으며, 폐기물 매립지 내의 흙 입자 분포 크기와 유사한 샌드페이퍼를 표면결합 유도매체로 사용하였다. 한편 샌드페이퍼의 표면 거칠음 정도는 각각 cw100, cw180, cw400이며, 표면결합을 유도하기 위한 상대하중은 23kgf이었으며, 전단속도에 대한 10, 100, 500, 1000mm/min으로 변화시켜 표면결합을 부여하였으며, 쓰레기 매립의 계속적인 진행에 의한 표면결합의 유도를 고려하여 표면결합 부여회수를 각각 1회와 10회로 행하였다.

### 2.3 지오멤브레인의 물성 측정

#### 2.2.1 인장특성의 온도의존성

HDPE 지오멤브레인에 요구되는 기본적인 인장성질을 측정하기 위하여 ASTM D638 Type IV에 의거하여 시료를 준비한 후, ASTM D 4632에 의해 일축 인장 실험을 실시하였다. 그리고 인장특성의 온도의존성을 평가하기 위하여 인장시험기의 heating chamber(온도범위 40~120℃)내에서 ASTM D 4632에 의해 인장강도를 측정, 검토하였으며, 주사전 자현미경 사진을 통하여 지오멤브레인의 표면 변화를 확인하였다. 또한 침출수에서의 인장강도는 EPA 9090 Test Method을 참조하여 40~120℃에서 120일 동안 침지시킨 후 꺼내어 ASTM D 4632에 의해 측정된 다음, 강도보유율을 구하여 분석하였으며, 침출수는 국내 폐기물 매립장에서 발생한 실제 침출수 용액을 사용하였다.

#### 2.2.3 화학적 저항성

차수기능이 요구되는 지오멤브레인이 사용되는 현장의 주된 환경은 용액상태이며, 특히 매립지의 경우 침출수와 주로 접하게 되는데, 침출수의 경우, 폐기물의 종류와 대기, 토양조건 등의 차이에 따라 다양한 성분을 보인다. 미국의 경우 EPA(Environmental Protection Agency, USA)에서 침출수의 성분에 대한 분석을 통해 그 성분을 제시하고 있으며, 많은 환

경관련 연구소에서도 특정지역 매립지의 침출수에 대한 성분분석을 제시하고 있다. 그러나 아직 정량, 정성적으로 표준화된 침출수의 성분은 알려지지 않고 있으며, 대부분의 연구들은 실제 매립지에서 채취한 침출수를 사용하여 지오멤브레인의 거동을 평가한 시험방법이 주류를 이루고 있다. 본 연구에서도 EPA 9090법을 참조하여 음식물 폐기물 매립지에서 채취한 침출수를 각각 50, 70, 90℃에서 각 조건마다 매 30일 단위로 120일까지 시료를 채취하여 인장강도 변화율을 평가하였다.

#### 2.2.4 표면결합에 대한 응력균열저항성

지오멤브레인의 장기성능평가를 위한 응력균열저항성 실험은 ASTM D 5397의 'Notched Constant Tensile Load Test'에 의거, 실시하였다(4, 5). 그리고 온도에 따른 Applied Stress-Failure Time 곡선으로부터 Ductile→Brittle Transition Time을 평가하였다. 이때 하중은 지오멤브레인의 항복응력을 기준으로 각각 20~65%에 해당하는 응력범위내에서 5% 간격으로 하중을 변화시키면서 부가하였다.

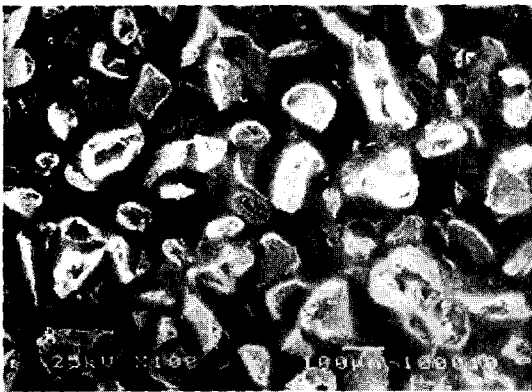
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 형태학적 구조 변화

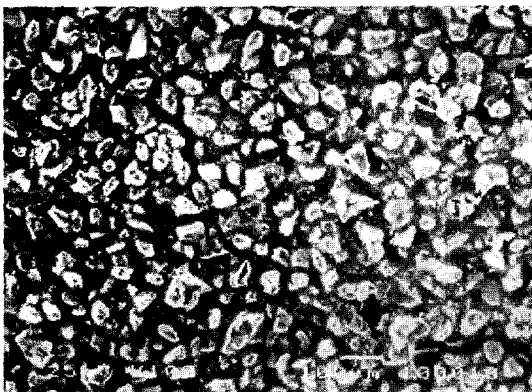
표면결합 유도조건에 의한 지오멤브레인의 표면상태를 Figure 1과 2에 각각 나타내었다. 일반적으로 차수용 지오멤브레인이 사용되는 폐기물 매립지의 경우 폐기물 매립이 진행되면서 입자크기가 일정하지 않은 흙을 사용하여 매일 복토하게 되어 있다. 이때 지오멤브레인은 입자크기가 크고 불규칙한 흙보다는 입자크기가 작고 균일한 흙과의 마찰에 의해 더 많은 표면결합이 발생하게 되므로 입자크기가 작고 균일한 흙에 더 큰 영향을 받게 된다. 본 연구의 결과 표면결합의 부여 매체의 입자크기에 따라 지오멤브레인의 표면에 발생하는 결함이 다르게 나타남을 알 수 있었고, 샌드페이퍼의 표면 입자 크기가 더 큰 cw100의 경우 깊은 표면결합이 나타남이 관찰되었으며, 입자 크기가 작을수록 표면에는 더 많은 표면결합이 발생됨이 관찰되었



(a) cw100



(b) cw180



(c) cw400

**Fig. 1. SEM photographs( $\times 100$ ) of sandpapers for scratching geomembranes surfaces**

다. 한편, 표면결합이 많을수록 이 부분에서 지오멤브레인이 쉽게 파괴되어 역학적 성능이 저하되므로 본 연구에서는 cw400의 경우 표면결합 부여속도에 대한 표면결합을 고찰하였고, 일관된 경향은 발견할 수 없었으나, 표면결합 부여속도가 100mm/min일 때 지오멤브레인의 표면에 표면결합이 가장 많이 발생함을 관찰할 수 있었다.

### 3.2 지오멤브레인의 온도의존성

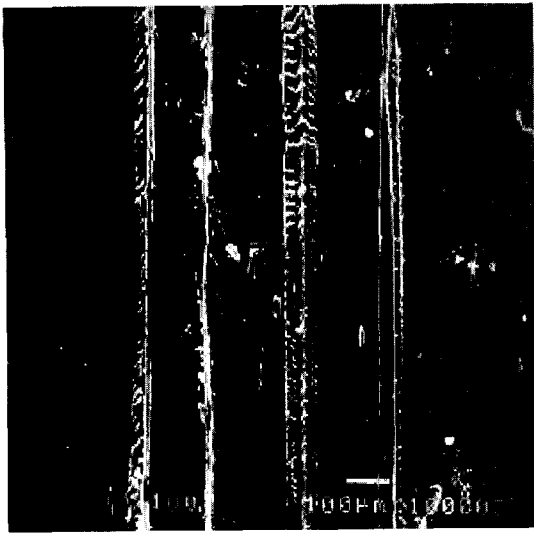
표면결합 유도 매체의 입자크기 cw400, 표면결합 부여속도 100mm/min, 표면결합 부여 횟수 10인 지오멤브레인의 경우 공기 중 온도범위 40~120℃에서 machine direction에서의 인장강도를 Figure 3에 나타내었다. 여기서 80℃이상에서는 용융상태로 전이되기 때문에 급격한 감소를 보이며 140℃에서는 완전히 용융되어 인장강도 측정이 불가능하였다.

한편, 침출수 온도에 대한 강도보유율을 Figure 4에 나타내었다. 온도상승 시 지오멤브레인의 강도보유율이 현저하게 저하되었으며, 100℃이상에서는 거의 파괴상태에 가까운 거동을 보이는데, 이는 고온의 침출수에 의한 취화에 기인한 결과라고 볼 수 있다. 따라서 폐기물 매립장에 적용되는 지오멤브레인 제품들은 온도의존성은 안정성 차원에서 반드시 검증된 후 사용되어야만 할 것으로 생각된다.

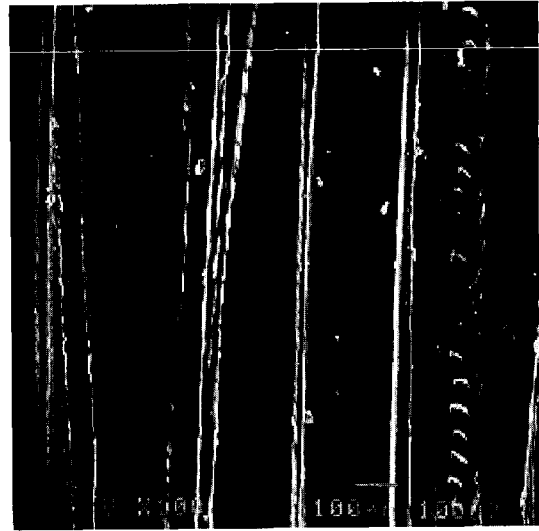
### 3.3 지오멤브레인의 역학적 성질

#### 3.3.1 표면결합 부여매체에 의한 영향

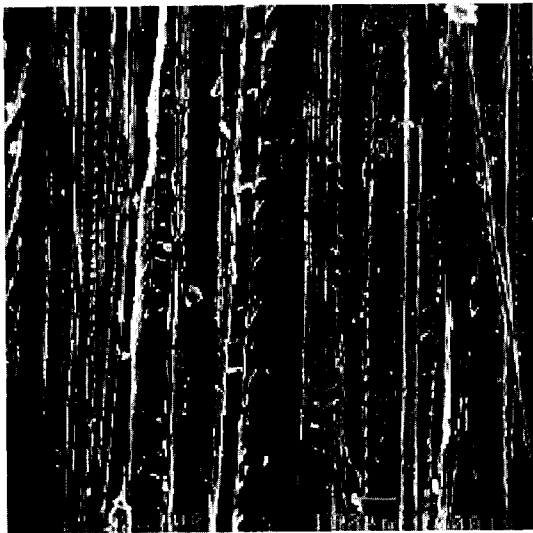
표면결합 부여매체가 물성에 미치는 영향을 평가하기 위해서 표면결합을 부여하지 않은 지오멤브레인과 각기 다른 입자 크기를 가진 샌드페이퍼로 표면결합을 부여한 지오멤브레인을 비교 평가하였다. Figure 5는 각각의 샌드페이퍼로 표면 결합을 부여한 지오멤브레인의 인장 강신도를 나타내었다. 샌드페이퍼의 입자크기가 작을수록 표면결합을 부여한 지오멤브레인의 인장강도는 저하되었으며 그 이유는 표면결합의 양이 많아지므로 인장저항력이 감소되기 때문이라고 생각된다. 이와 반면에 인장신도는 약간 증가함을 보이는데



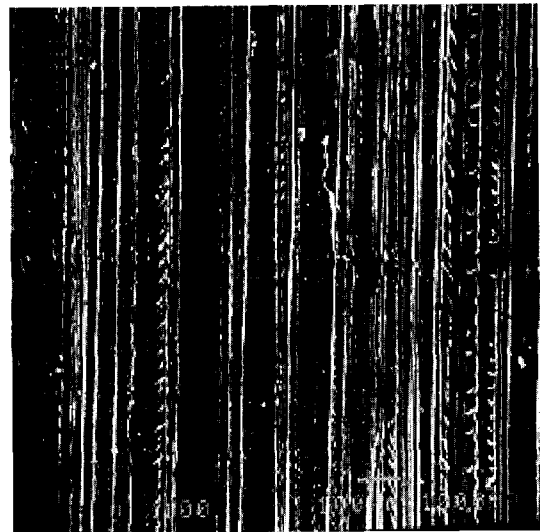
(a) 500mm/min



(b) 1000mm/min



(c) 10mm/min



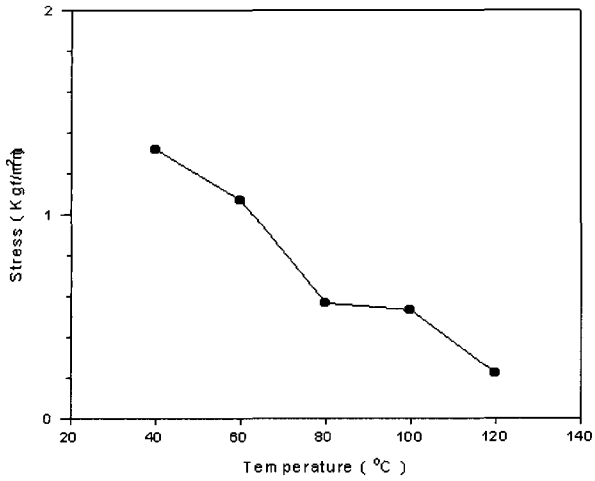
(d) 100mm/min

**Fig. 2. SEM photographs( $\times 100$ ) of sandpapers for scratching geomembranes surfaces**

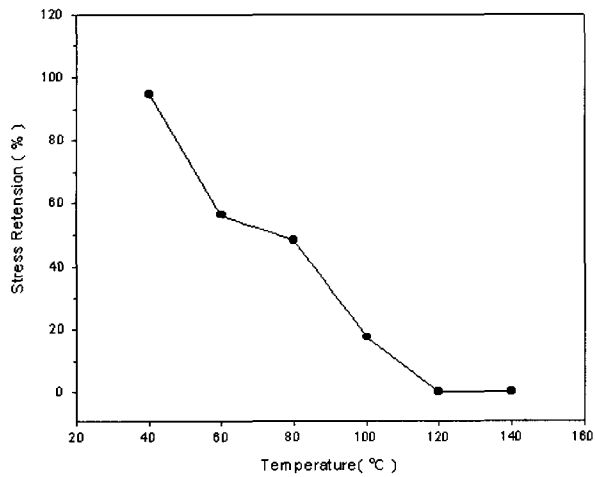
이는 샌드페이퍼의 입자크기가 작을수록 단위 면적 당 모래입자수가 많아져서 더 많은 표면결합이 부여되어 두께의 균제성이 불량해지기 때문에 인장력이 같을 경우 표면결합이 적은 지오멤브레인에 비해 쉽게 신장된다고 생각한다.

### 3.3.2 표면결합 부여속도에 의한 영향

표면 입자크기가 가장 작은 cw400의 경우 표면결합 부여속도가 지오멤브레인의 인장 강신도에 미치는 영향을 Figure 6에 나타내었다. 여기서 표면결합 부여 속도에 따른 인장강신도의 일관성은 발견할 수 없었지



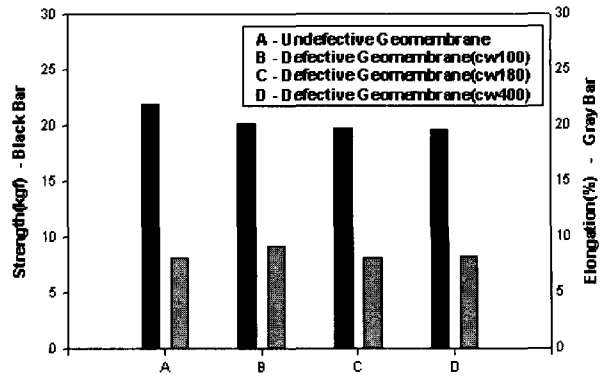
**Fig. 3. Stress-temperature curves of geomembrane in air**



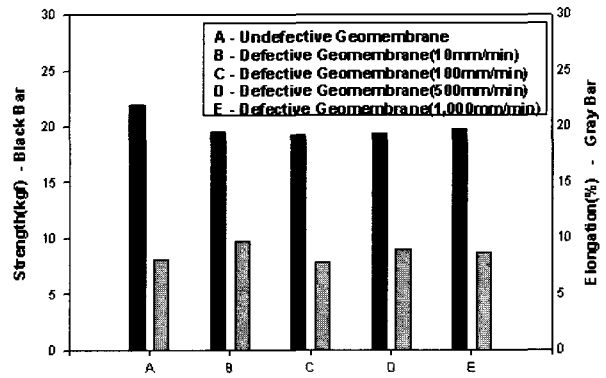
**Fig. 4. Strength retention curves of geomembrane in leachate solution**

만 100mm/min의 경우 인장강도는 가장 작았으며, 인장신도 역시 가장 작은 값을 나타내었다. 이들 인장 강신도로 부터 지오멤브레인의 표면결함이 많을 경우 표면결함 부여속도와는 무관하지만 100mm/min인 경우 역학적 성능저하가 가장 큰 것으로 나타났다.

3.3.3 표면결함 부여횟수에 의한 영향



**Fig. 5. Tensile properties of geomembranes scratched with various sandpapers**



**Fig. 6. Tensile properties of geomembranes scratched with various shear rate**

앞서 살펴본 바와 같이 지오멤브레인의 인장성질이 가장 큰 영향을 미치는 조건인 표면 입자크기가 가장 작은 cw400과 표면결함 부여속도 100mm/min에서의 표면결함 부여횟수에 의한 지오멤브레인의 인장강도를 Figure 7에 나타내었다. 여기서 표면결함 부여횟수가 많아질수록 인장강도가 감소함을 보이고 있는데, 이는 표면결함 부여횟수가 많을수록 입자크기 cw400과 표면결함 부여속도 100mm/min에서 이미 생성된 표면결함부분이 더 깊게 파이거나 표면결함이 증가하기 때문에 이 부분에 응력이 집중되어 인장에 대한 저항성이 감소되었다고 생각된다.

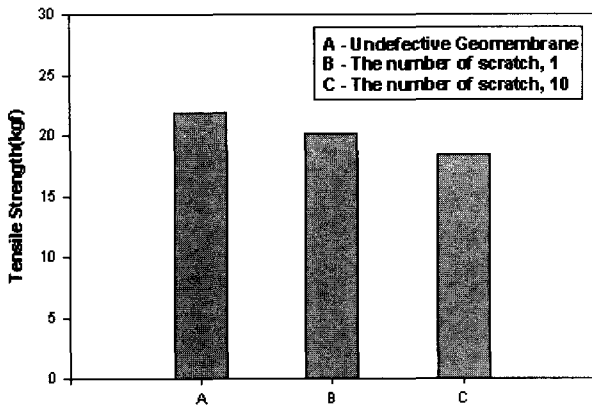
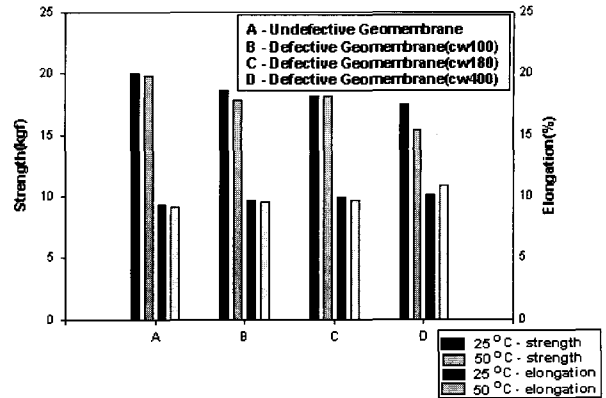


Fig. 7. Tensile strength of geomembranes according to the number of scratch

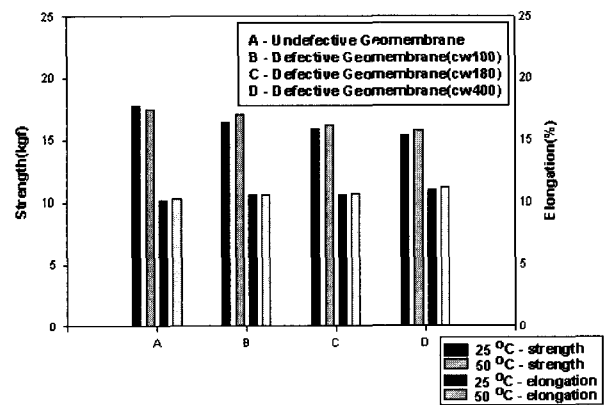
3.4 지오멤브레인의 내화학적성

3.4.1 표면결함 부여매체에 의한 영향

표면결함이 지오멤브레인의 내화학적성에 어떠한 영향을 미치는지 비교 평가하기 위해 표면결함을 부여하지 않은 지오멤브레인과 입자크기가 다른 샌드페이퍼로 표면결함을 부여한 지오멤브레인 시료를 30, 60, 90, 120일 동안 침출수에 침지한 후, 지오멤브레인의 인장강신도를 측정하여 Figure 8에 나타내었다. 여기서 (a)는 30일 동안의 침지 결과를, (b)는 120일 동안의 침지 결과를 각각 나타내며, (a)와 (b)를 비교한 결과 침지 시간이 길수록 또한 침지 온도가 높을수록 인장강도가 크게 저하됨을 알 수 있었다. 침지 시간이 30일인 (a)의 경우 25℃와 50℃ 두 가지 경우 모두 표면결함을 부여한 지오멤브레인의 인장강도는 표면결함을 부여하지 않은 지오멤브레인에 비해 작은 값을 나타내었으며, 침지 시간이 120일인 (b)의 경우 감소경향이 커짐을 알 수 있었다. 그러나 인장신도는 표면결함의 증가로 증가하였으며, 침지시간이 길어질수록 증가함을 보이고 있다. 그 이유는 지오멤브레인의 원료인 HDPE는 라멜라 구조를 이루고 있으며 하중이 가해지면 R. M. Koerner(1990) 등이 고찰한 바와 같이 Figure 9에서 처럼 내부의 tie molecules이 신장되는 연성 변형을 일으키게 되고, 시간이 경과하고 온도가



(a) 30 days



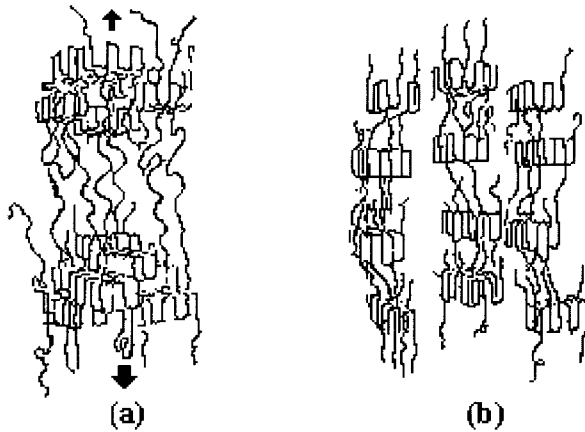
(b) 120 days

Fig. 8. Tensile properties of geomembranes in leachate at various conditions

높아질수록 작은 하중 부가에도 취성 변형으로의 전이가 일어나기 때문이다. 따라서 표면결함이 부여된 지오멤브레인의 경우 내부의 tie molecules의 신장에 의한 파괴가 침지시간, 온도 등에 더 큰 영향을 받게 되어 인장 강도는 감소되고 상대적으로 인장신도는 증가되는 것으로 생각된다.

3.4.2 표면결함 부여속도에 의한 영향

표면 입자크기가 가장 작은 cw400의 경우 표면결함 부여속도를 달리한 지오멤브레인의 인장 강신도를 측정하여 Figure 10에 나타내었다. 여기서도 Figure 8



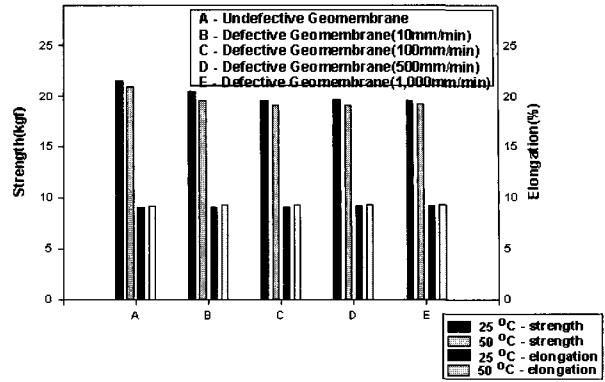
**Fig. 9. Schematic diagrams of deformations of HDPE structure**

(a) Ductile deformation (b) Brittle deformation

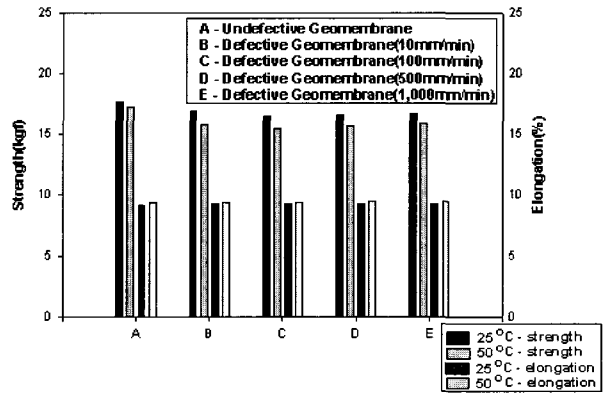
에서 고찰한 바와 같이 25℃와 50℃ 두 경우 모두 표면결함을 부여하지 않은 지오멤브레인의 인장 강신도는 일관된 경향을 보이지는 않지만 100mm/min인 경우 제일 작은 인장강도를 나타내고 있다. 이러한 이유는 Figure 9에서와 같이 HDPE 지오멤브레인의 구조특성과 관련하여 해석하기 어렵지만, 표면결함 부여속도가 화학저항성의 결과에 미치는 영향에서의 일관성을 발견할 수 없었다.

3.4.3 표면결함 부여횟수가 미치는 영향

Figure 11에 표면 입자크기가 가장 작은 cw400과 표면결함 부여속도 100mm/min에서의 표면결함 부여횟수에 의한 지오멤브레인의 인장 강신도를 나타내었다. 여기서 인장강도는 표면결함 부여횟수가 많아질수록 감소함을 알 수 있고, 침지 시간이 길고 침지 온도가 높을수록 감소정도가 커짐을 알 수 있다. 한편, 인장신도는 표면결함 부여횟수가 많아질수록 증가하였고, 침지 시간이 길고 침지 온도가 높을수록 증가함을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 표면결함 부여횟수가 많을수록 표면결함이 증가하게 되며, 그 결과 침지 시간이 길어지고 침지 온도가 높을수록 HDPE 지오멤브레인의 내부구조 변화로 인하여 인장 및 파열에 대한 저항성이 감소되기 때문이라 생각된다.



(a) 30 days



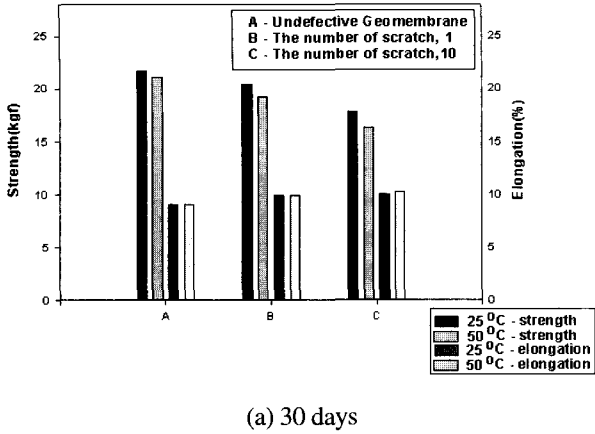
(b) 120 days

**Fig. 10. Tensile properties of geomembranes in leachate at various conditions**

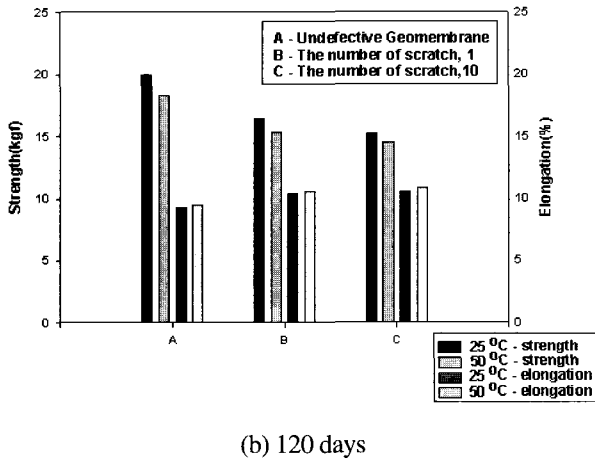
3.5 응력균열저항성

표면결함 유도 매체의 입자크기 cw400, 표면결함 부여속도 100mm/min, 표면결함 부여 횟수 10인 지오멤브레인의 경우 10% igepal/90% tap water solution에서 실시한 응력균열저항성 시험 결과 얻어진 Applied Stress-Failure Time 곡선을 Figure 12에 나타내었다. 여기서 온도가 올라갈수록 Ductile → Brittle Transition Time이 단시간 영역으로 이동됨을 확인할 수 있으며, R. M. Koerner(1988) 등과 Y. G. Hsuan(1993) 등이 보고한 지오멤브레인의 장기성능과 관련된 failure time(200시간 이상) 보다





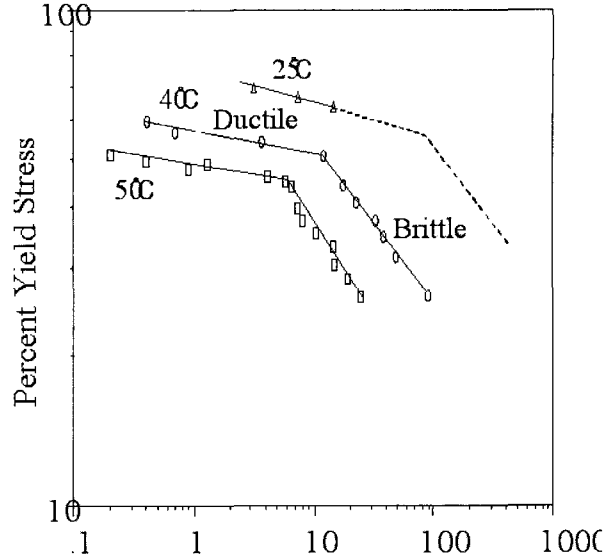
(a) 30 days



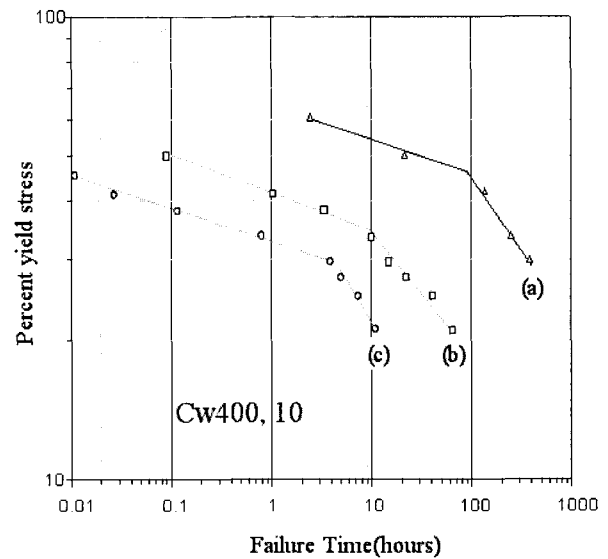
(b) 120 days

**Fig. 11. Tensile properties of defective geomembranes in leachate according to the number of scratch**

짧은 시간 영역에 존재하는 온도에서는 지오멤브레인의 파괴위험성이 매우 크고 지오멤브레인의 장기성능도 크게 감소할것으로 예측할 수 있다. 표면결함 부여 횟수와 유도매체의 입자크기, 표면결함 부여속도에 따른 failure time을 각각 Figure 13~15에 나타내었으며, 지오멤브레인의 표면에 손상이 심할수록 failure time이 단축되는 경향을 보이고 있다. 이로부터 폐기물 매립지에 적용되는 지오멤브레인의 경우 시공 시 발생하는 표면결함이 장기성능 및 lifetime에 심각한 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었으며,

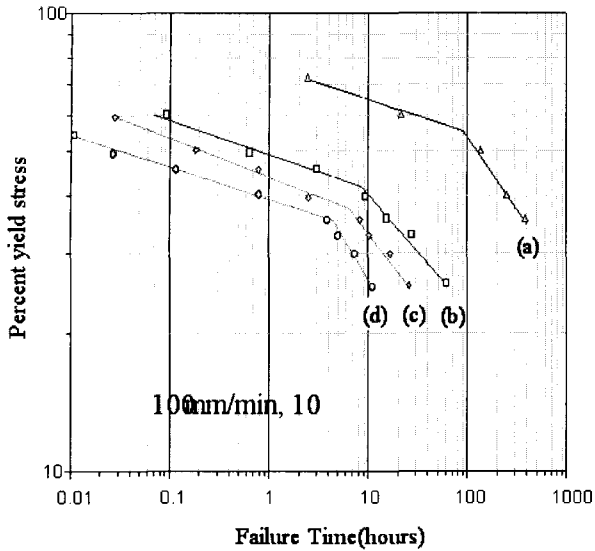


**Fig. 12. Notched constant load tests on HDPE geomembrane in 10% igepal/90% tap water solution.**



**Fig. 13. Percent yield stress-failure time curves of geomembrane with scratch addition numbers : (a) 0, (b) 1, (c) 10**

CQA/CQC와 관련된 엄격한 대비책이 마련되어야 할 것으로 생각된다.

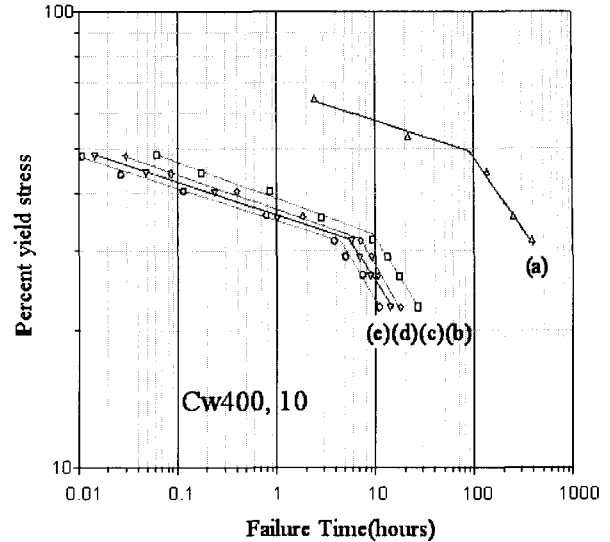


**Fig. 14.** Percent yield stress-failure time curves of geomembrane with particle size of sandpapers : (a) 0, (b) 100, (c) 180, (d) 400

## 5. 결론

폐기물 매립지에 차수재로 적용되고 있는 HDPE 지오멤브레인의 표면결합이 온도에 대한 안정성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 지오멤브레인 표면에 인위적으로 표면결합을 부여한 후, 침출수에서의 역학적 성질, 내화학성 및 응력균열저항성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 표면결합 유도 매체의 입자크기 cw400, 표면결합 부여속도 100mm/min, 표면결합 부여 횟수 10인 경우 역학적 성능저하가 제일 크게 나타났다.
- (2) 화학저항성의 경우 침지시간 및 온도가 커질 때 표면결합 입자크기가 작고 많을수록, 그리고 표면결합 부여속도 100mm/min인 경우 표면결합 횟수가 많을수록 인장 강도는 감소하였고, 인장신도는 증가하였다.
- (3) 응력균열저항성 실험결과로부터 온도가 올라갈수록 Ductile→Brittle Transition Time이 단



**Fig. 15.** Percent yield stress-failure time curves of geomembrane with shear rates(mm/min) : (a) 0, (b) 1,000, (c) 10, (d) 500, (e) 100

시간 영역으로 이동되었으며, 표면에 손상이 심할수록 failure time이 단축되는 경향을 나타내었다.

## 참고 문헌

1. Koerner, R. M., "Geosynthetics Testing for Waste Containment Applications", ASTM, pp.1~70(1990).
2. Koerner, R. M, Koerner, G. R, and Hwu, B. L, "Three Dimensional Axi-Symmetric Geomembrane Tension Test," ASTM STP 1081, Philadelphia, ASTM, pp.170~184(1990).
3. Koerner, R. M, "Designing with Geosynthetics", 4th Ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, pp.416-601(1998).
4. Husan, Y. G, Koerner, R. M, and Lord Jr., A. E, *ASTM Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 16, 450(1993).
5. Husan, Y. G, Koerner, R. M, and A. E. Jr. Lord, *J. of Geotechnical Engineering*, ASCE, 119, 1840(1993).