

연성 지오그리드의 내구성 및 장기설계인장강도 평가

Evaluation of Durability and Long-term Design Tensile Strength of Flexible Geogrids

조삼덕¹⁾, Sam-Deok Cho, 김진만²⁾, Jin-Man Kim, 안주환³⁾, Ju-Hwan Ahn, 전한용⁴⁾ Han-Young Jeon, 조성호⁵⁾, Seong-Ho Cho

¹⁾한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원, Research Fellow, Civil Eng. Div., KICT

²⁾한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Eng. Div., KICT

³⁾한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, Civil Eng. Div., KICT

⁴⁾전남대학교 섬유공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Textile Eng., Chonnam National Univ.

⁵⁾(주)삼양사 중앙연구소 섬유재료그룹 선임연구원, Associate Senior Scientist, Samyang R&D Center.

SYNOPSIS : Engineering properties of most polymers used in geosynthetics such as geogrid can be degraded by the chemical reaction (e.g., oxidization, ultraviolet rays, hydrolysis etc.), chemical and mechanical load, microorganism, and so on. In addition, polymer can be damaged by the compaction during construction, and the characteristic of tensile strength of polymer can be changed by the long-term creep effect. In this study, engineering properties of flexible geogrids which are manufactured by weaving/knitting the high-tenacity polymers such as polyester formed in a very open, grid-like configuration, coated with any one of a number of materials (e.g., PVC, latex, etc.), are investigated. Through the analysis of test results, the durability and the long-term design tensile strength of flexible geogrids are evaluated.

KEYWORDS : Flexible Geogrid, Durability, Long-term design tensile strength

1. 서 론

지오그리드는 합성 고분자 재질로 만들어진 인장부재를 격자형태로 구성한 평면구조의 토목섬유 (geosynthetics) 제품으로, 제조방법에 따라 일체형 지오그리드와 결합형 지오그리드로 구분된다. 일체형 지오그리드는 폴리에틸렌, 폴리프로필렌 등의 고분자 폴리머를 판상으로 압출시킨 후 격자형태로 구멍을 내고, 1방향 또는 직교하는 2방향으로 연신하여 제조하며, 결합형 지오그리드는 폴리에스테르 등의 고강도 섬유를 격자형태로 교차시켜 제작/편직한 후 PVC 등으로 코팅하여 제조한다. 일반적으로 강성도를 기준으로, 일체형 지오그리드는 강성 지오그리드로, 결합형 지오그리드는 연성 지오그리드로 불린다. 국내에서는 1990년대에 들어 지오그리드의 사용을 모색해 왔으며, 1993년도에 보강토옹벽 설계시 지오그리드를 처음 적용하면서부터 지오그리드의 사용이 활성화되고 있다. 그러나 현재까지 국산 지오그리드가 개발되지 않아 전부 미국 및 유럽산 지오그리드를 수입하여 사용하였다. 최근 보강토 옹벽에 사용하는 지오그리드 물량이 급증하고 있는 추세에 발맞춰 국내 몇몇 섬유업체 등에서 연성 지오그리드

를 개발하고 있다.

본 연구에서는 국내에서 개발한 연성 지오그리드에 대한 공학적 특성 규명과 내구성 평가를 목적으로 인장특성, 크리프특성, 내충격성, 내화학성, 내미생물성, 내열성, 내후성 등의 다양한 공학적 특성 평가시험을 수행하고, 그 시험결과를 분석하여 장기설계인장강도를 평가하였다.

2. 지오그리드의 공학적특성 평가시험

2.1 인장강도시험

(1) 광폭인장강도시험

광폭인장강도시험(Wide-Width Strip Tensile Strength Test)은 성토 및 지반 보강공법의 설계시에 필요한 지오그리드 보강재의 설계인장강도를 산정하는데 기초가 되는 최대인장강도와 인장변형 등의 인장특성을 평가하기 위해 광폭시료를 사용하여 수행하는 인장시험이다. 이 시험은 ASTM D 4595에 규격화되어 있다.

본 연구에서는 한국원사직물시험연구원(FITI)의 10t용량 인장시험기 (Instron 4206)를 사용하여 광폭인장강도시험을 수행하였다. 지오그리드 시료는 고강도의 재료이므로 본 시험에서는 어느 정도의 미끄러짐을 허용하면서 안정된 시료장착이 이루어지는 롤 타입의 클램프를 사용하였다. 또한, 지오그리드 시료가 클램프내에서 손상되는 것을 방지하기 위해 고무나 섬유재 등의 충전재를 삽입하였으며, 클램프사이의 시료과지길이를 30cm로 하고, 지오그리드 시료 중심부 10cm를 대상으로 인장변형을 측정하기 위해 다이얼게이지를 사용하였다. 인장속도는 $10 \pm 3\%/min$ 으로 하였다. 그리고, 시험시에 클램프의 물림부분(Jaw)안에서 미끄러짐이 발생하거나 물림부분의 안이나 가장자리에서 시료과파가 일어나는 시험결과는 버리고 재시험을 실시하였다. 그림 2.1에서는 광폭인장강도시험 모습을 보여준다.

(2) 리브인장강도시험

리브인장강도시험(Single Rib Tensile Strength Test)은 지오그리드 제품의 품질을 검사하기 위해, 1개의 리브를 사용하여 수행하는 인장시험이다. 이 시험은 미국 Drexel 대학의 토목섬유연구소(GRI ; Geosynthetics Research Institute)에서 제안한 시험방법중 GRI-GG1에 규정되어 있다.

본 연구에서는 (주)삼양사 중앙연구소의 5t용량의 인장시험기 (Instron 4204)를 사용하여 리브인장강도시험을 수행하였다. 본 시험에서도 광폭인장시험과 마찬가지로 롤 타입의 클램프를 사용하였고, 시료가 클램프내에서 손상되는 것을 방지하기 위해 고무나 섬유재 등의 충전재를 삽입하였으며, 클램프사이의 시료과지길이를 25cm로 하고 시료 중심부 5cm를 대상으로 Extensometer를 이용하여 인장변형을 측정하였다. 인장속도는 5cm/min으로 하였다. 그림 2.2에서는 리브인장강도시험 모습을 보여준다.

2.2 크리프시험

크리프시험(Unconfined Tension Creep Test)은 일정한 온도조건에서 지속적인 인장하중이 작용할 때 지오그리드의 불구속 인장 크리프거동을 평가하여, 장기 설계인장강도 산정시 고려되는 크리프에 의한 인장강도 감소계수를 결정하기 위해 수행한다. 이 시험은 ASTM D 5262에 규격화되어 있다. 크리프특성 평가를 위한 재하하중으로는 지오그리드 시료의 최대인장강도에 대한 20%, 30%, 40%, 60%의 하중을, 인장변형 측정은 자동측측시스템을 사용하여 10,000시간 이상 측정하는 것을 추천하고 있다.

본 연구에서는 높이 200cm×길이 200cm×폭 80cm의 강제 프레임(frame)상에 4개의 시료를 동시에 시험할 수 있는 크리프시험장비를 제작하여 크리프시험을 수행하였으며, 시료 중심부 10cm에 LVDT를 부착하여 시간경과에 따른 인장변형을 자동으로 측정하였다. 또한, ASTM D 5262에 규정되어 있는 장기 크리프시험과 병행하여 온도효과를 고려한 단기 크리프가속시험을 수행하였다. 단기 크리프가속시험에 사용한 온도변화는 20℃, 35℃, 50℃로 하였다. 그림 2.3에서는 크리프시험 모습을 보여준다.

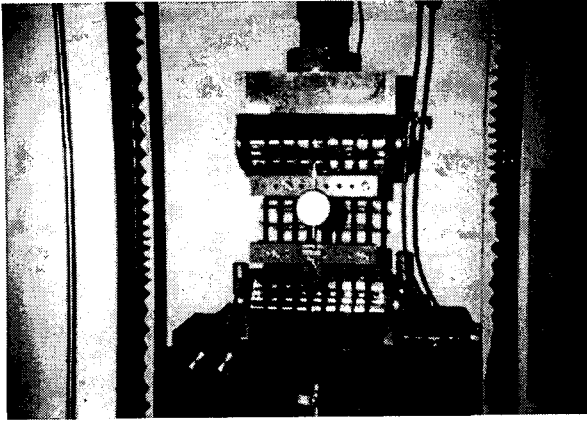


그림 2.1 광폭인장강도시험 모습

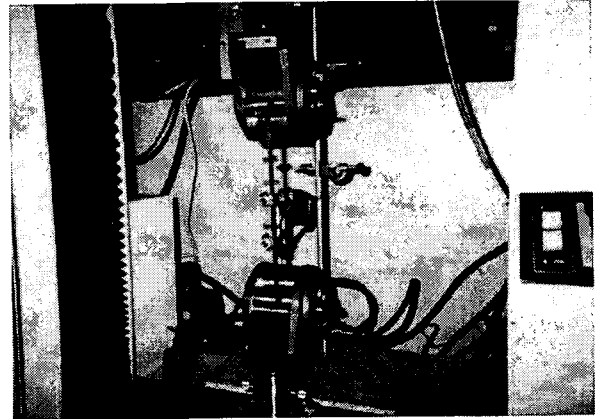


그림 2.2 리브인장강도시험 모습

2.3 내충격성(내시공성)시험

내충격성시험(Installation Resistance Test)은 현장에 포설된 지오그리드 시료 상부에 성토재가 포설되고 다짐작업이 시행될 경우, 이러한 시공에 의해 지오그리드가 손상되는 정도를 평가하기 위해 수행한다. 이 시험은 ASTM D 5818에 규격화되어 있다.

본 연구에서는 단지조성 시공현장내 부지에서 비교적 견고한 원지반 위에 성토재를 30cm두께로 포설·다짐한 후 200cm×500cm크기의 지오그리드 시료를 포설하고, 그 상부에 동일한 성토재를 30cm두께로 포설하여 10t용량의 진동로울러로 4회 왕복다짐하였다. 다짐 후 상부 흙을 제거하여 지오그리드 시료를 추출하고, 이 시료를 대상으로 광폭인장강도시험을 수행하였다. 그림 2.4에서는 내충격성시험 모습을 보여준다.

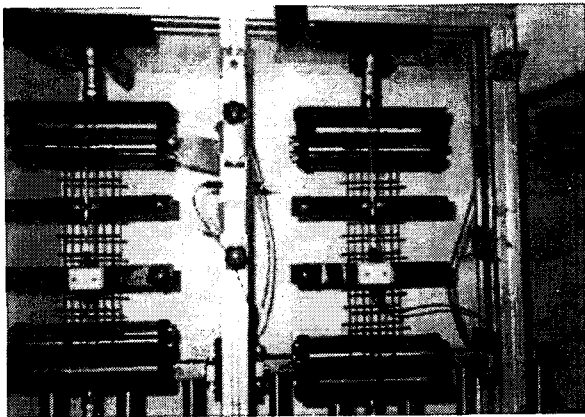


그림 2.3 크리프시험 모습

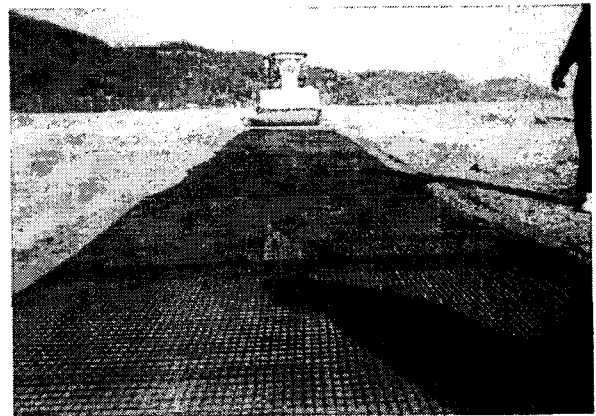


그림 2.4 내충격성시험 모습

2.4 내구성시험

(1) 내화학성시험

내화학성시험(Cheical Resistance Test)은 현장에 포설된 지오그리드 시료가 주위의 화학적 환경과 접촉되었을 때 지오그리드가 손상되는 정도 및 인장특성의 변화정도를 평가하기 위해 수행한다. 이 시험은 ASTM D 5322, GRI-GG4에 규격화되어 있다. 시험방법은 지오그리드 시료를 화학용액 속에 각각 1, 2, 3, 4개월 동안 침지시킨 후 채취하여 인장강도시험을 수행하여 원시료의 인장강도와 비교한다. 시험시 사용하는 화학용액은 현장여건을 고려하여 결정하며, 그렇지 않은 경우는 표준화학용액(ASTM D

543)을 참조하여 결정한다. 지오그리드 시료의 침지온도로는 23℃와 50℃를 추천하고 있다.

본 연구에서는 화학용액으로 강산성용액(염산, pH=2), 약산성용액(염산, pH=5), 강알칼리성용액(수산화나트륨, pH=13), 약알칼리성용액(수산화나트륨, pH=9)의 4가지 용액을 사용하였고, 침지후 시료에 대해서는 리브인장강도시험을 수행하였다. 그림 2.5에서는 화학용액 속에 지오그리드 시료를 침지시킨 용기 내 화학용액의 pH를 측정하는 모습을 보여준다.

(2) 내한성 및 내열성시험

내한성(Low Temperature Resistance) 및 내열성시험(High Temperature Resistance Test)은 온도변화에 따른 지오그리드 시료의 인장특성 변화와 손상정도를 평가하기 위해 수행한다. 이 시험은 ASTM D 4594에 규격화되어 있다. 표준시험방법은 변형제어식 인장시험기에 장착한 온도챔버(temperature chamber)내에 지오그리드 시료를 설치하고, 온도챔버 내의 온도를 일정하게 유지하면서 인장강도시험을 수행하여 원시료의 인장강도와 비교한다.

본 연구에서는 내한성시험시 냉매제로 액화질소(Liquid N₂)를 사용하여 온도챔버 내의 온도를 -20℃로 조절하고 약 10분 경과후 리브인장강도시험을 수행하였다. 또한, 내열성시험을 위해서 내화학성시험과 유사한 방법으로 증류수를 채운 용기내에 지오그리드 시료를 넣고 50℃의 항온항습조에 방치한 후 시간경과에 따른 리브인장강도를 측정하는 방법과 온도챔버의 온풍기를 이용하여 챔버 내의 온도를 50℃로 유지시켜 리브인장강도를 측정하는 방법 두가지를 이용하였다.

(3) 내미생물성시험

내미생물성시험(Biological Resistance Test)은 흙 속에 존재하는 미생물들이 지오그리드 시료의 인장특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 수행한다. 이 시험에 대한 표준화된 시험규격은 아직까지 제시되어 있지 않다.

본 연구에서는 지오그리드의 내미생물성을 평가하기 위해 연구원 실험부지에서 원지반을 3m길이로 50cm정도 굴착한 후 성토재로 많이 사용되는 화강풍화토와 유기질이 풍부한 하수슬러지를 영역을 구분하여 채우고, 그 중간에 지오그리드 시료를 설치하여 방치하였으며, 시간경과에 따라 시료를 채취하여 리브인장강도시험을 수행하였다. 그림 2.6에서는 내미생물성시험 모습을 보여준다.



그림 2.5 내화학성시험 모습

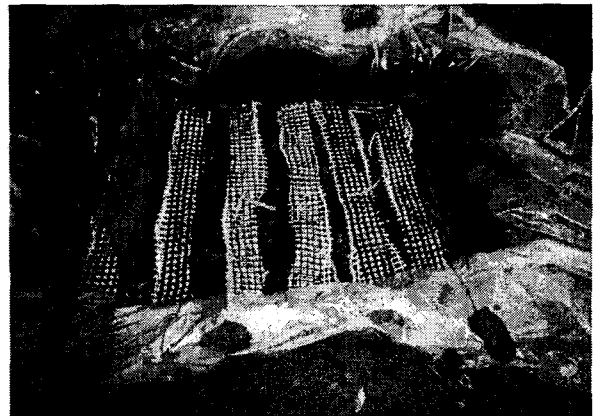


그림 2.6 내미생물성시험 모습

(4) 내후성시험

내후성시험(Outdoor Exposure Resistance Test)은 지오그리드가 흙 속에 묻혀 있지 않고 대기중에서 노출되어 있는 경우에 대한 인장특성 변화정도를 평가하기 위한 시험이다. 내후성은 태양광선, 바람, 강우 등의 대기중 노출영향에 대한 내구성을 의미하는 것으로 아직까지 합리적인 시험방법이 규격화되어 있지 않다. 본 연구에서는 건물 옥상에 지오그리드 시료를 펼쳐 놓은 채로 방치한 후, 일정 시간경과에 따라 시료를 채취하여 리브인장강도시험을 수행하여 원시료의 인장강도와 비교하였다.

3. 지오그리드 시료

본 연구에 사용된 지오그리드는 인장강도가 서로 다른 3종류의 연성 지오그리드로서 재질은 폴리에스테르 고강력 원사이고, 그리드 조직은 결합형(Weft Insertion Warp Knitted법)이다. 그 물리적 특성은 표 3.1과 같다. 그림 3.1에서는 시험 지오그리드의 전형적인 형상 및 그리드 외관규격을 보여준다.

표 3.1 시험 지오그리드의 물리적 특성

항 목	내 용	Trigrid 4T		Trigrid 8T		Trigrid 20T	
		A×B	C×D	A×B	C×D	A×B	C×D
지오 그리드 외관규격	그리드 구멍크기 (A×B, C×D) (mm)	23.4×26.8	20.1×22.6	23.8×25.8	19.8×21.6	27.0×26.6	19.2×20.0
	두께(mm)	주리브 1.1	보조리브 1.5	주리브 1.5	보조리브 1.7	주리브 1.9	보조리브 1.8
	접점두께(mm)	1.5		1.8		2.3	
그리드 밀도	리브수/m	주리브 42±1	보조리브 38±1	주리브 42±1	보조리브 39±1	주리브 37±1	보조리브 39±1
		2m		2m		2m	
롤(Roll) 크기	롤 폭	2m		2m		2m	
	롤 길이	50m, 100m					

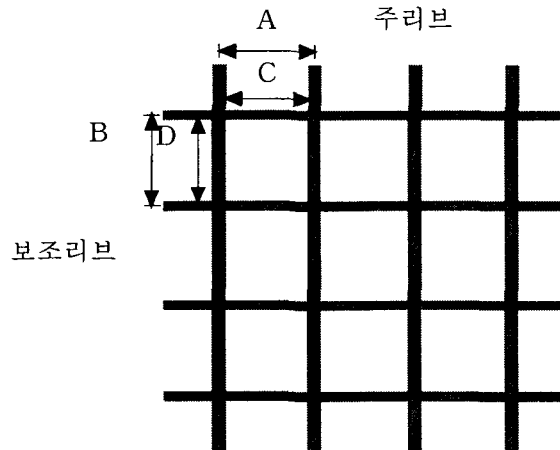


그림 3.1 시험 지오그리드의 전형적인 형상 및 외관규격

4. 시험결과 및 분석

4.1 인장강도 특성

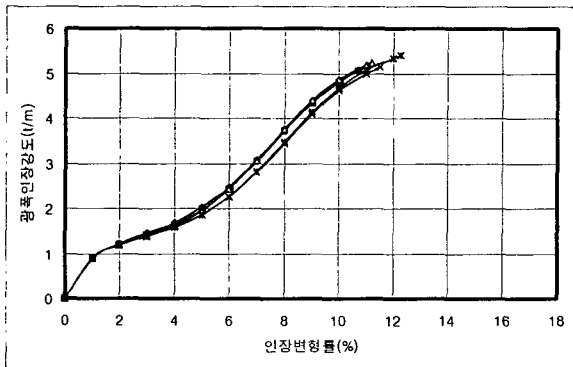
지오그리드 보강재의 설계인장강도를 산정하는데 기초가 되는 최대인장강도와 인장변형률을 평가하기 위해, 3종의 시험 지오그리드를 대상으로 하여 광폭인장강도시험을 실시하였다. 또한, 내충격성의 비교를 위해서 국내의 현장에서 적용되는 연성 지오그리드인 외국제품 2종의 임의 시료 A그리드, B그리드에 대해 광폭인장강도시험을 실시하였다. 표 4.1에서는 시험 지오그리드의 경사방향(기계방향) 광폭인장강도시험 결과를 보여준다. 광폭인장시험 결과는 시험시 사용한 20cm폭 시료의 리브수에 대한 단위 폭

(1m)당 리브수의 비율을 고려하여 단위폭당 인장강도로 환산한 값이다.

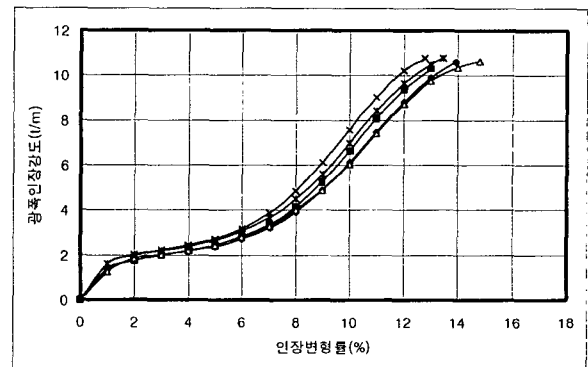
표 4.1에서 보듯이 3종의 시험 지오그리드는 제조업체에서 설정한 제품규격의 인장강도보다 실제 인장강도가 20% 이상 크게 설계·제조되어 있어, 그 값만큼의 추가 안전율이 내포되어 있음을 알 수 있다. 또한, 최대인장강도에서의 인장변형률도 11.0%~14.0% 범위에 있어 양호한 인장변형특성을 보여준다. 그림 4.1에서는 경사방향의 광폭인장강도시험에 의한 광폭인장강도-인장변형률 곡선을 보여준다.

표 4.1 광폭인장강도시험 결과(경사방향)

항목 시험 횟수	Trigrid 4T		Trigrid 8T		Trigrid 20T	
	광폭인장강도 (t/m)	인장변형률 (%)	광폭인장강도 (t/m)	인장변형률 (%)	광폭인장강도 (t/m)	인장변형률 (%)
1	5.16	11.1	10.59	13.9	22.88	13.5
2	5.06	10.7	10.28	13.0	22.75	13.0
3	5.24	11.2	10.65	14.8	22.67	12.3
4	5.14	11.5	10.79	12.8	22.24	12.3
5	5.40	12.3	10.79	13.5	22.51	12.7
평균	5.20	11.4	10.62	13.6	22.61	12.8



(a) Trigrid 4T



(b) Trigrid 8T

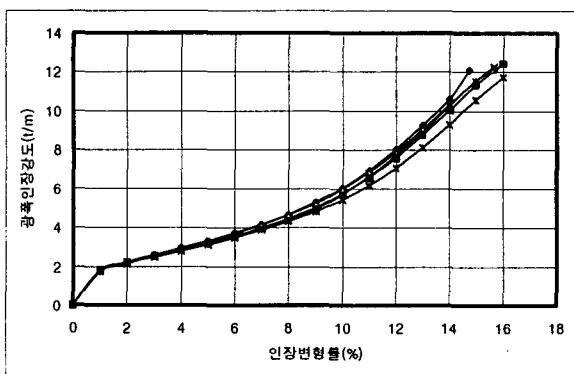
그림 4.1 시험 지오그리드의 광폭인장강도-인장변형률 곡선(경사방향)

표 4.2에서는 외국제품(A그리드, B그리드)의 경사방향에 대한 광폭인장강도 시험결과를 보여주는데, 경사방향 최대인장강도에서의 인장변형률은 10.0%~15.0% 정도로서 시험 지오그리드와 유사한 결과를 보여주고 있다. 그림 4.2에서는 외국제품의 경사방향에 대한 광폭인장강도시험에 의한 인장강도-인장변형률 곡선을 보여준다.

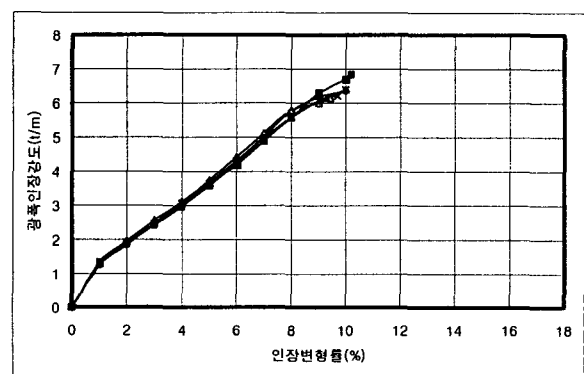
한편, 본 연구에서는 화학용액, 미생물, 온도, 자외선 등이 지오그리드의 인장강도 및 인장변형에 미치는 영향을 평가하기 위해 리브인장강도시험을 수행하였으며, 표 4.3에서는 3종의 시험 지오그리드 원시료에 대한 리브인장강도시험의 결과를 보여주며, 표 4.4에서는 2종의 외국제품의 그리드 원시료에 대한 리브인장강도시험의 결과를 보여준다. 시험 지오그리드의 리브인장강도와 광폭인장강도 시험결과를 비교해 볼 때, 각 제품의 최대인장강도와 인장변형률 결과는 외국제품과 마찬가지로 약간의 차이가 발생하고 있다. 이것은 인장강도시험시 클램프의 종류, 인장속도, 시편의 균일성 정도 등 여러 원인이 복합적으로 작용하여 나타난 결과로 판단된다.

표 4.2 외국제품의 광폭인장강도시험 결과(경사방향)

시험 횟수	A그리드		B그리드	
	광폭인장강도(t/m)	인장변형률(%)	광폭인장강도(t/m)	인장변형률(%)
1	12.09	14.8	6.34	10.0
2	12.66	16.4	6.84	10.2
3	12.14	15.6	6.14	9.43
4	12.25	15.7	6.22	9.7
5	12.94	17.2	6.40	10.0
평균	12.42	15.9	6.39	9.9



(a) A그리드



(b) B그리드

그림 4.2 외국제품의 광폭인장강도-인장변형률 곡선(경사방향)

표 4.3 시험 지오그리드의 리브인장강도시험 결과

시험 횟수	Trigrid 4T		Trigrid 8T		Trigrid 20T	
	리브인장 강도(t/m)	인장변형률 (%)	리브인장 강도(t/m)	인장변형률 (%)	리브인장 강도(t/m)	인장변형률 (%)
1	5.50	12.48	10.26	13.63	21.79	12.33
2	5.64	12.89	10.11	13.06	22.78	13.01
3	5.48	12.56	10.06	13.13	21.20	13.83
4	5.42	11.46	10.38	13.53	22.81	13.24
5	5.55	12.63	10.12	13.27	22.28	13.15
평균	5.52	12.35	10.19	13.32	22.17	13.11

4.2 크리프 특성

본 연구에서는 현재 ASTM D 5262에 규정되어 있는 장기 크리프시험을 수행 중에 있으며, 이와 병행하여 온도효과를 고려한 단기 크리프가속시험을 수행하였다. 단기 크리프시험에서는 시간온도 중첩원리에 의한 master curve를 작성하기 위해, 20℃, 35℃, 50℃의 3가지 온도구간에서 하중재하 후 시간에 따른 인장변형률을 측정하였다. 크리프 하중 재하는 시험 지오그리드 시료의 광폭인장강도(표 4.1 참조)를 기준으로 40%, 50%, 60%의 하중을 사용하였다.

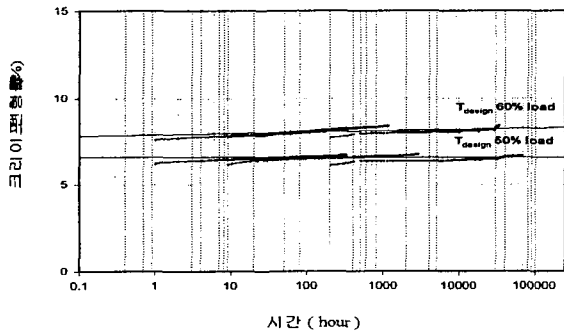
표 4.4 리브인장강도시험 결과(외국제품)

시험 횟수	항목	A그리드		B그리드	
		리브인장강도(t/m)	인장변형률(%)	리브인장강도(t/m)	인장변형률(%)
1		11.98	15.57	7.08	10.17
2		10.70	15.03	6.64	9.72
3		11.47	14.50	6.68	9.31
4		12.06	16.21	7.28	10.00
5		12.00	15.11	7.38	10.17
	평균	11.64	15.28	7.01	9.87

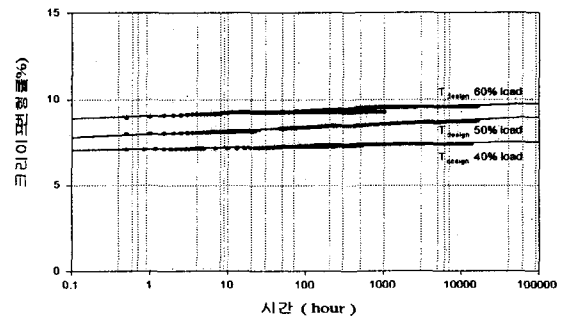
지오그리드의 크리프 특성 평가를 위하여 시간온도 중첩원리를 이용하여 실시간 시험에서의 결과치를 시간축으로 외삽하여 장시간 후의 지오그리드의 특성변화를 예측하였다.

시험 지오그리드 Trigrid 4T와 Trigrid 20T는 광폭 인장강도의 각 50%, 60%에 대해, Trigrid 8T는 광폭 인장강도의 40%, 50%, 60%에 대하여 단기 크리프가속시험을 행한 후 시간축으로 외삽하여 얻은 장기간 예측치가 그림 4.3에 보여준다. Trigrid 4T의 경우 광폭하중의 60%에 대하여서도 8.5% 미만의 장기 크리프 변형률, Trigrid 8T는 10% 미만의 장기 크리프 변형률 나타내었다. 그리고, Trigrid 20T의 경우 광폭하중의 60% 하중에 대하여 9% 미만의 장기 크리프 변형률 나타내었음을 알 수 있다.

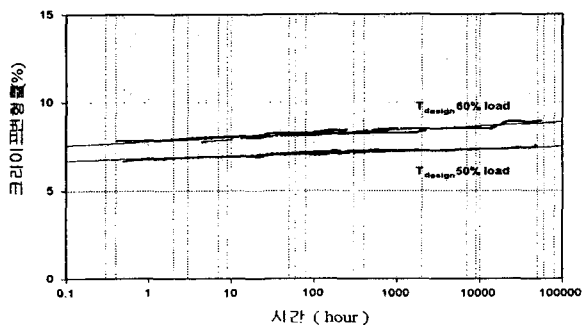
그리고, 시험 지오그리드 Trigrid 4T에 대하여 행한 60% 하중에서의 장기크리프 거동을 살펴보면, 10000 시간에서 10% 미만의 크리프 변형률을 나타내며 차츰 수렴하는 경향을 보이고 있다. 광폭 인장강도 시험의 시료 편차를 고려할 때 10% 변형률을 벗어나지 않는 안정적인 크리프 특성을 가질 것으로 예상된다. 그림 4.4에서는 Trigrid 4T의 장기 크리프 시험에 대한 결과를 나타내고 있다.



(a) Trigrid 4T



(b) Trigrid 8T



(c) Trigrid 20T

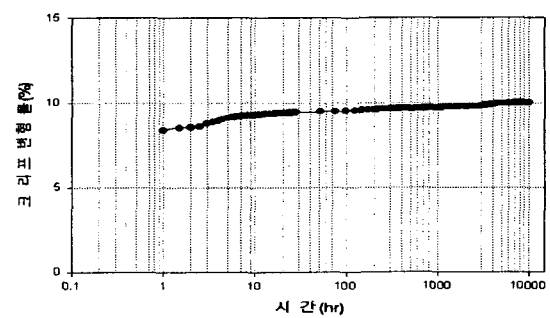


그림 4.4 장시간 크리프 변형률 곡선 (장기 크리프시험, Trigrid 4T)

그림 4.3 시간-크리프 변형률 곡선 (단기 크리프가속시험)

4.3 내충격성(내시공성)

현장에 포설된 지오그리드는 상부 성토재 포설 후 다짐작업에 의해 손상을 받을 수 있으며, 그 손상 정도는 성토재의 종류에 따라 상당한 차이를 보인다. 국내에서 성토재로 가장 널리 사용되는 화강풍화토를 대상으로 하여 지오그리드의 내충격성시험을 수행하였다. 표 4.5에서는 시험에 사용한 성토재의 물리적 특성을 보여주며, 그림 4.5에서는 성토재의 입도분포곡선을 보여준다. 표 4.5와 그림 4.5로부터 시험에 사용한 화강풍화토는 입경 19mm이하의 입자들로 구성된 양입도의 모래질흙으로 평가될 수 있다.

표 4.6에서는 화강풍화토를 성토재로 사용한 경우의 시험 지오그리드의 내충격성 시험결과를 보여준다. 표 4.6에서 보듯이 내충격성 시험후 시험 지오그리드의 인장강도 감소율이 경사방향은 6.73~10.79%의 범위를 보였다. 이러한 인장강도의 감소는 다짐작업시 성토재 입자와 지오그리드 사이의 마찰과 충격으로 인한 그리드 원사의 손상 때문이며, 성토재의 입자직경과 모난 정도, 다짐장비에 의한 다짐도 등에 의해 감소율은 변화될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 내충격성에 의한 지오그리드의 인장강도 감소를 최소화하기 위해서는 굵은 자갈 이상의 입자들은 제거한 성토재를 사용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

표 4.7에서는 화강풍화토를 성토재로 사용한 경우의 외국제품 내충격성 시험결과를 보여준다. 표 4.7에서 보듯이 내충격성 시험후 외국그리드의 B그리드는 5% 이내의 인장강도 감소를 보였으며, A그리드는 11.8% 정도의 강도감소율을 보여준다. 경사방향의 강도감소율의 경우에는 외국제품이 시험 지오그리드에 비해 유사하거나 약간 낮은 결과를 보여준다.

표 4.5 시험 성토재의 물리적 특성 (내충격성 시험)

항목 종류	입도분포			액성 한계	소성 지수	비중	통일 분류
	실트 점토	모래	자갈 이상				
화강 풍화토 (성토재)	4%	61%	35%	-	NP	2.64	SW

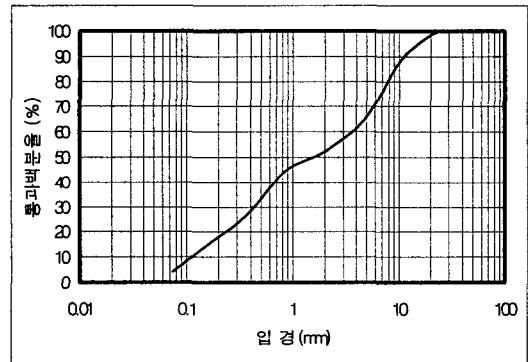


그림 4.5 성토재의 입도분포곡선

표 4.6 내충격성시험후 시험 지오그리드의 광폭인장강도시험(경사방향)

항목 시험 횟수	Trigrid 4T		Trigrid 8T		Trigrid 20T	
	광폭인장 강도(t/m)	인장 변형률(%)	광폭인장 강도(t/m)	인장 변형률(%)	광폭인장 강도(t/m)	인장 변형률(%)
1	4.66	10.4	9.34	13.4	20.90	12.3
2	4.73	10.7	10.06	14.9	19.90	12.2
3	4.79	10.3	9.82	13.5	19.73	11.2
4	4.78	10.6	9.78	13.7	20.08	12.7
5	5.29	10.9	9.91	13.7	20.23	11.5
평균	4.85	10.58	9.78	13.84	20.17	11.98
강도 감소율(%)	6.73		7.90		10.79	

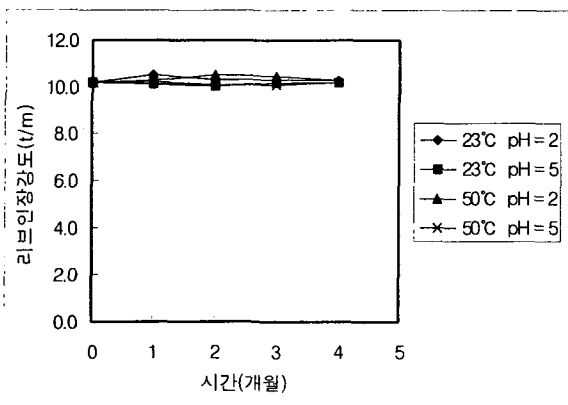
표 4.7 내충격성시험후 외국제품의 광폭인장강도시험(경사방향)

시험 횟수	A그리드		B그리드	
	광폭인장강도(t/m)	인장변형률(%)	광폭인장강도(t/m)	인장변형률(%)
1	10.86	14.7	6.32	9.3
2	10.66	15.4	6.27	8.9
3	10.84	15.2	6.20	9.0
4	11.43	15.7	6.38	9.1
5	11.01	14.4	6.02	8.9
평균	10.96	15.1	6.24	9.0
강도 감소율(%)	11.8		2.3	

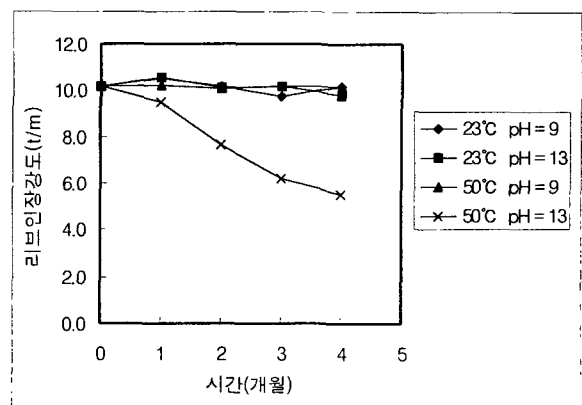
4.4 내구성

(1) 내화확성

강산, 약산, 강알칼리, 약알칼리 등 4가지 pH조건으로 조절된 용기 내에 시험 지오그리드를 넣고 각각 23°C와 50°C의 항온항습조에 방치한 후 시간경과에 따른 리브인장강도를 측정된 결과는 그림 4.6과 같다. 그림 4.6에서 보듯이 강산, 약산, 약알칼리 용액에 침지된 시험 지오그리드는 23°C, 50°C 온도하에서 1~4개월 침지 후 리브인장강도가 시간경과에 따라 원시료에 비해 5% 이하의 강도감소를 나타낸다. 반면에, 50°C 온도하에서 강알칼리 용액에 침지된 경우는 시간경과에 따라 원시료에 비해 20% 이상의 인장강도감소를 보였다. 이는 그리드의 코팅부분을 침투한 알칼리성분이 내부원사(PET)의 가수분해현상을 일으켜 원사재질의 공학적 특성이 약화되었기 때문에 급격한 강도감소가 발생하였다고 판단된다. 따라서, pH>9되는 강알칼리의 특수환경에서 PET를 원사로 사용한 지오그리드를 적용하고자 하는 경우에는 강도감소를 고려한 장기설계인장강도 평가에 있어 특별한 고려가 요구되거나 원사 혹은 코팅재질의 변경, 검토가 요구된다.



(a) 산성용액(HCL)



(b) 알칼리용액(NaOH)

그림 4.6 내화확성시험 결과(Trigrid 8T)

(2) 내한성

ASTM D 4594에 준하여, -50°C ~ +300°C 범위로 온도조절이 가능한 챔버를 사용하여 -20°C의 조건에

서 수행한 내한성시험 결과는 표 4.8과 같다. 표 4.8에서 보듯이 -20℃ 조건에서 수행한 시험 지오그리드의 리브인장강도는 원시료에 비해 13.0~18.7% 정도 강도증가 현상이 나타났다. 그리고, 내한성시험에서 정확한 인장변형률의 측정은 이루어지지 않았으나, 상황을 판단해 볼 때 파괴시 인장변형률은 대체로 작은 폭으로 감소하였을 것으로 추측된다.

표 4.8 내한성시험 결과(-20℃)

항목 시료	원시료 리브인장강도(t/m)	시험횟수	내한성시험 리브인장강도(t/m)
Trigrid 4T	평균: 5.52	5회 평균	6.24
		강도증가율 : 13.0%	
Trigrid 8T	평균:10.19	5회 평균	12.10
		강도증가율 : 18.7%	
Trigrid 20T	평균:22.17	5회 평균	25.99
		강도증가율 : 17.2%	

(3) 내열성

증류수를 채운 용기내에 시험 지오그리드를 넣고 50℃의 항온항습조에 방치한 후 시간경과에 따른 리브인장강도를 측정된 결과를 그림 4.7에서 보여주는데, 침지 후 1~10개월 후의 리브인장강도가 시간경과에 따라 큰 변화없이 원시료에 비해 3.1~4.0% 감소된 것을 알 수 있다. 또한, 내한성시험에서 사용한 챔버 속에 시험 지오그리드를 넣고 50℃의 온도조건하에서 리브인장강도를 측정된 결과를 표 4.9에서 보여준다. 표 4.9에서 보듯이 50℃ 조건에서 수행한 시험 지오그리드의 리브인장강도는 원시료에 비해 2.8% 정도 강도감소가 나타났다.

표 4.9 내열성시험 결과(챔버, 50℃)

항목 시료	원시료 리브인장강도(t/m)	시험횟수	내열성시험 리브인장강도(t/m)
Trigrid 4T	평균:5.52	5회 평균	5.34
		강도감소율 : 3.3%	
Trigrid 8T	평균:10.19	5회 평균	9.90
		강도감소율 : 2.8%	
Trigrid 20T	평균:22.17	5회 평균	21.53
		강도감소율 : 2.9%	

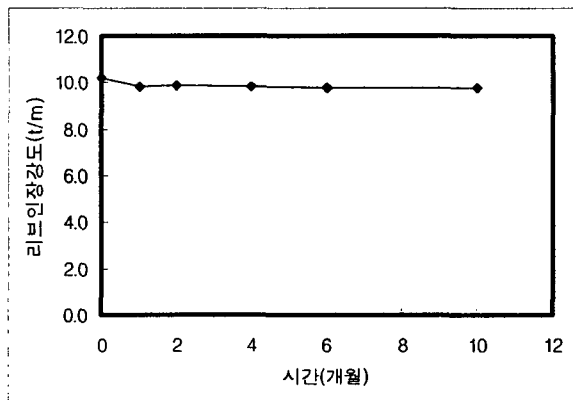


그림 4.7 내열성시험 결과(Trigrid 8T)

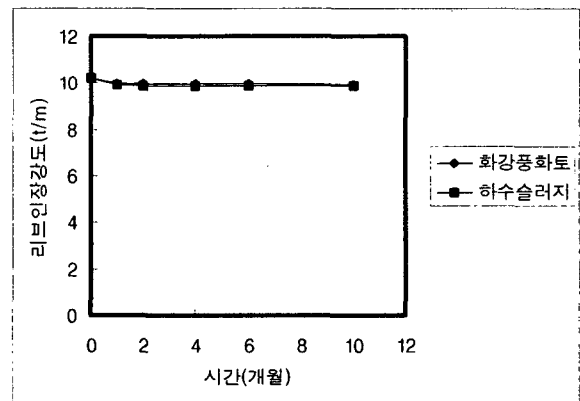


그림 4.8 내미생물성시험 결과(Trigrid 8T)

(4) 내미생물성

현장에서 원지반을 굴착하여 화강풍화토와 하수슬러지를 각각 채우고, 그 중간에 시험 지오그리드를 묻은 채 방치한 후 시간경과에 따라 리브인장강도를 측정된 결과는 그림 4.8과 같다. 그림 4.8에서 보듯이 화강풍화토와 하수슬러지에 매립된 시험 지오그리드의 리브인장강도는 흙 종류 및 시간경과에 따라 큰 변화없이 원시료에 비해 3.0% 미만의 강도감소를 나타낸 것을 알 수 있으며, 이러한 미미한 감소율은 제품편차, 실험오차범위에 포함되므로 강도감소계수에는 반영시키지 않아도 무방할 것으로 판단된다.

(5) 내후성

시험 지오그리드의 태양광선, 바람, 강우, 기온 등에 대한 내후성을 규명하기 위해 옥외에 일정시간동안 방치한 시료를 대상으로한 리브인장강도 시험결과를 그림 4.9에 보여준다. 그림 4.9에서 내후성에 대해서 시험 지오그리드의 리브인장강도는 30일까지의 시간경과에 따라 원시료에 비해 1.3~2.7% 정도 감소된 것을 알 수 있으며, 이러한 미미한 감소율은 제품편차, 실험오차범위에 포함되므로 강도감소계수에는 반영시키지 않아도 무방할 것으로 판단된다.

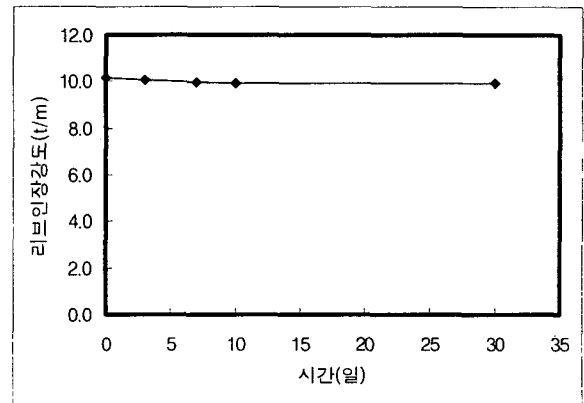


그림 4.9 내후성시험 결과(Trigrid 8T)

5. 연성 지오그리드의 설계인장강도 평가

일반적으로 지오그리드의 인장특성은 크리프(creep), 시공시 손상, 온도, 화학용액, 미생물 등과 같은 환경적인 요인에 의해 영향을 받는다. 따라서, 지오그리드 보강재의 장기설계인장강도는 지오그리드의 허용인장변형과 크리프특성 및 가능한 모든 강도저하요인 등을 고려하여 결정하여야 한다.

전세계적으로 널리 사용되는 지오그리드의 장기설계인장강도 산정방법은 장기간 현장에 적용된 지오그리드에 영향을 줄 수 있는 여러 인자들에 대한 지오그리드의 인장강도 감소계수를 적용하는 방법이다. 식 (5.1)에서는 지오그리드의 장기 설계인장강도, T_d 를 산정하는 식을 보여준다.

$$T_d = \frac{T_{ult}}{RF \cdot FS_{uc}} \quad (5.1)$$

여기서, T_{ult} = 지오그리드의 최대(극한) 인장강도

RF = 지오그리드의 장기간 강도손실을 고려한 총 감소계수 ($RF = RF_{CR} \times RF_{ID} \times RF_D$)

RF_{CR} = 크리프 감소계수. 실내 크리프시험에서 얻은 지오그리드의 크리프 한계인장강도에 대한 최대인장강도의 비

RF_{ID} = 시공성 감소계수. 시공중 지오그리드의 손상에 따른 인장강도 손실정도를 나타냄.

RF_D = 내구성 감소계수. 화학약품, 미생물, 온도 등에 의한 지오그리드의 인장강도 손실정도를 나타냄.

FS_{uc} = 구조물의 형상과 뒤채움재의 특성, 외부 작용하중 등의 불확실성 및 구조물의 중요도 등을 고려한 안전율로 설계자의 판단에 의해 1.0~1.5의 범위에서 사용하는 것이 추천되지만, 특별한 경우를 제외하고는 $FS_{uc} = 1.0$ 을 사용한다.

5.1 인장강도 감소계수 산정

(1) 크리프에 의한 감소계수

미국 GRI-GG4 방법에 의하면 지오그리드의 크리프 감소계수(크리프에 의한 감소계수), RF_{CR} 은 식 (5.2)와 같이 산정한다.

$$RF_{CR} = T_{ult} / T_{10} \quad (5.2)$$

여기서, T_{ult} = 지오그리드의 최대(극한) 인장강도 (t/m)

T_{10} = 시간-크리프 변형률 곡선에서 10% 이하의 크리프 변형률에 접근하게 되는 최대 재하하중을 고려한 인장강도 (t/m)

단기 크리프시험 결과를 토대로 시험 지오그리드의 T_{10} 을 구해 보면, 그림 4.3에서 보듯이 Trigrid 4T, Trigrid 8T, Trigrid 20T 모두 광폭인장강도의 60%를 최대 크리프 재하하중으로 고려할 수 있다. 이러한 결과를 토대로 3종의 시험 지오그리드에 대한 크리프 감소계수를 산정하면 1.67로 평가할 수 있다.

(2) 시공시 감소계수

지오그리드의 시공시 감소계수, RF_{ID} 는 식 (5.3)과 같이 산정한다.

$$RF_{ID} = T_{ult} / T_{exh} \quad (5.3)$$

여기서, T_{ult} = 지오그리드의 최대(극한) 인장강도 (t/m)

T_{exh} = 다짐시공 등에 의해 손상된 지오그리드의 인장강도 (t/m)

내충격성(내시공성)시험 결과로부터 시험 지오그리드의 T_{exh} 를 구해 보면 Trigrid 4T의 경우 4.85 t/m, Trigrid 8T의 경우 9.78 t/m, Trigrid 20T의 경우 20.17 t/m이며, 이 값을 사용하여 시공시 감소계수를 산정하면 RF_{ID} 는 각각 1.07, 1.09, 1.12로 된다. 따라서, 지오그리드 제품의 편차 등의 안전율을 고려하여 성토재로 화강풍화토를 사용시 3종의 시험 지오그리드에 대한 시공시 감소계수는 1.12를 적용하였다. 내충격성시험시 성토재로 양질의 화강풍화토를 사용하였으므로 이러한 적은 값의 감소계수를 나타낸 것으로 사료되며, 성토재로 19mm 이상의 자갈 또는 암석조각들이 많이 포함되어 있는 재료를 사용한다면 시공시 감소계수가 크게 나타날 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 내구성을 고려한 감소계수

지오그리드의 내구성 감소계수 (내구성을 고려한 감소계수)는 지오그리드와 접촉되는 화학약품, 미생물, 온도 등에 의한 지오그리드의 인장강도 손실정도를 모두 고려하여 산정하여야 한다. 따라서 지오그리드의 내구성 감소계수, RF_D 는 식 (5.4)~식 (5.6)과 같이 산정할 수 있다.

$$RF_D = RF_{CD} \times RF_{BD} \quad (5.4)$$

$$RF_{CD} = T_{ult} / T_{CD} \quad (5.5)$$

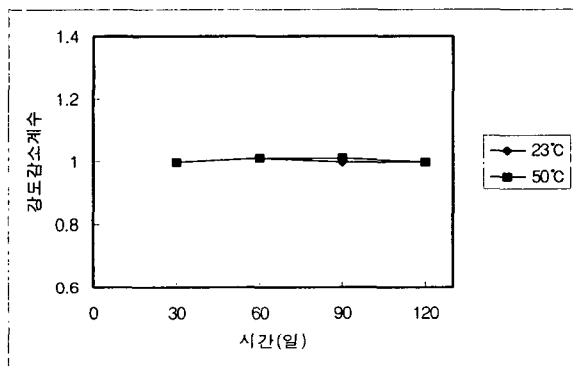
$$RF_{BD} = T_{ult} / T_{BD} \quad (5.6)$$

여기서, T_{ult} = 지오그리드의 최대(극한)인장강도 (t/m)
 T_{CD} = 화학약품에 의해 손상된 지오그리드의 인장강도 (t/m)
 T_{BD} = 미생물에 의해 손상된 지오그리드의 인장강도 (t/m)

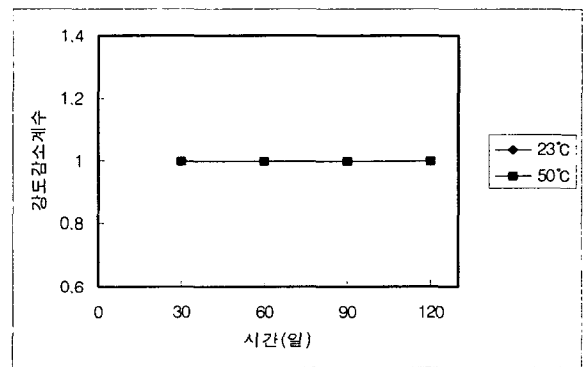
시험 지오그리드를 대상으로 하여 수행한 내한성시험 결과에 의하면 -20℃ 조건에서 측정된 리브인장 강도값이 원시료보다 크게 나타났으며, 50℃ 고온에서의 영향은 내화학성시험에서 화학용액과 동시에 고려하였으므로, 내화학성에 의한 강도 감소계수에 포함하여 평가하였다.

GRI-GG4 방법에 의하면 지오그리드의 내화학성 및 내미생물성에 대한 강도 감소계수 결정은 4개월 간의 시간경과에 따른 강도 감소계수 변화를 고려하여 결정하도록 되어 있으며, 본 연구에서는 내화학성은 4개월간, 내미생물성은 10개월간의 강도 감소계수 변화를 도시화하였다.

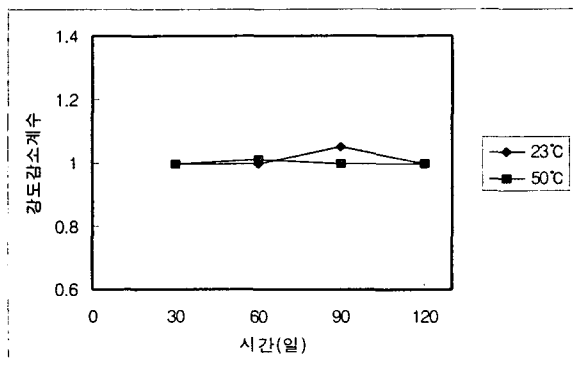
그림 5.1과 그림 5.2에서는 각각 내화학성 및 내미생물성 시험결과로부터 추출한 시간-강도 감소계수 곡선을 보여준다. 그림 5.1 및 그림 5.2로부터 강산, 약산, 약알칼리 용액에 대한 시험 지오그리드의 강도 감소계수는 1.05 정도로 평가할 수 있으며, 10개월간의 실험결과 미생물에 대한 시험 지오그리드의 강도 감소율은 3.0% 미만으로 이러한 감소율은 제품편차, 실험오차범위에 포함될 수 있어 미생물에 대한 강도 감소계수는 1.0으로 평가하였다. 이 값들을 사용하여 내구성 감소계수를 산정한 결과는 표 5.1 과 같다. 또한, 고온의 강알칼리성 환경에 대한 강도 감소계수는 상당히 크게 나타나는데, 실제 현장에서는 거의 일어날 수 없는 최악의 조건이므로 설계인장강도 평가에서는 제외하였다. (1)~(3)항의 감소 계수를 고려하여 시험 지오그리드의 총 감소계수, RF 를 산정한 결과는 표 5.2와 같다.



(a) 강산용액 (pH = 2)



(b) 약산용액 (pH = 5)



(c) 약알칼리용액 (pH = 9)

그림 5.1 내화학성을 고려한 지오그리드의 시간-인장강도 감소계수 곡선

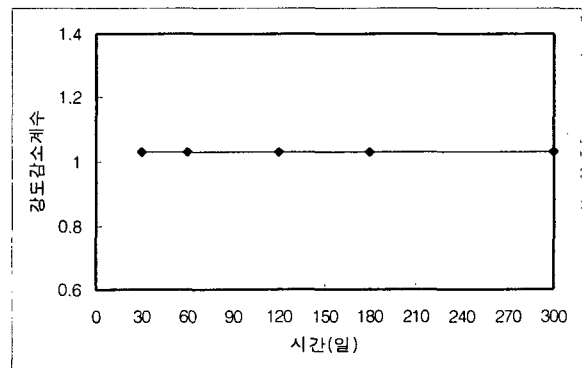


그림 5.2 내미생물성을 고려한 지오그리드의 시간-인장강도 감소계수 곡선

표 5.1 시험 지오그리드의 내구성 감소계수

종류		Trigrid 4T	Trigrid 8T	Trigrid 20T
		감소계수		
RF_{CD}	pH≤9	1.05		
RF_{BD}		1.0		
RF_D (pH≤9)		1.05		

표 5.2 시험 지오그리드의 총 감소계수

종류		Trigrid 4T	Trigrid 8T	Trigrid 20T
감소계수				
RF_{CR}		1.67		
RF_{ID}		1.12		
RF_D		1.05		
RF		1.96→2.0		

5.2 장기설계인장강도 산정

앞서 산정한 총 감소계수와 식 (5.1) 및 제조사에서 제시한 제품 인장강도를 고려하여 3종의 시험 지오그리드에 대한 장기간 설계인장강도를 산정하면 표 5.3과 같다. 제조사에서 제시한 3종의 시험 지오그리드에 대한 제품 인장강도(최대 인장강도)는 본 연구에서 수행한 광폭 인장강도 값보다 작은 값으로서, 제품의 편차고려 및 안전을 증가를 목적으로 광폭인장강도 값 대신 장기간 설계 인장강도 산정시 사용되었다.

표 5.3 시험 지오그리드의 장기설계인장강도

종류		Trigrid 4T	Trigrid 8T	Trigrid 20T
감소계수				
최대인장강도(t/m) (제품 인장강도)		4	8	20
총 감소계수		2.0		
장기설계인장강도 (t/m)		2.0	4.0	10.0

6. 결론

본 연구에서는 국내에서 개발한 연성 지오그리드를 대상으로 다양한 공학적 특성시험을 수행하여 인장특성, 크리프특성, 내충격성, 내화학적, 내미생물성, 내열성, 내후성 등을 평가하고, 각종 환경요인들에 의한 인장강도감소계수를 고려하여 장기설계인장강도를 제시하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 크리프 특성, 내충격성, 내구성 등을 모두 고려한 시험 지오그리드의 인장강도 총 감소계수는 2.0 정도로 평가되었다.
- 2) 시험 지오그리드의 최대인장강도에서의 인장변형률은 11.0%~14.0% 범위로, 양호한 인장변형특성

을 보여주며, 국내에서 적용되고 있는 외국제품들과 유사한 결과를 보여준다.

- 3) 시간-온도 중첩원리를 이용하여, 단기간 크리프시험 결과로부터 장기간 후의 크리프 특성을 예측해 보면, 시험 지오그리드는 최대인장강도의 60% 하중에 대하여도 장기적으로 10% 크리프 변형률을 벗어나지 않는 양호한 크리프 특성을 보여주며, 10000시간 까지의 장기 크리프시험에서도 유사한 크리프 특성을 나타내고 있다.
- 4) 최대입경 19mm 이하의 입자들로 구성된 양입도의 화강풍화토를 성토재로 사용시의 내충격성 시험에 의한 시험 지오그리드의 인장강도 감소율은 6.0%~11.0% 정도로 양호하게 나타났다.
- 5) 시험 지오그리드는 강산, 약산, 약알칼리에서는 장기적으로 5.0% 이하의 인장강도 감소를 보여주나, 50℃ 고온 하에서의 강알칼리 환경(pH>9)에 노출되면 매우 큰 강도감소를 나타내므로 이런 환경에 적용하고자 하는 경우에는 장기설계인장강도 평가에서 특별한 고려가 요구되거나 원사 혹은 코팅재질의 변경, 검토가 요구된다.
- 6) 시험 지오그리드의 내미생물성, 내한성, 내열성 등은 매우 우수한 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. ASTM D 4354, "Practice for Sampling of Geosynthetics for Testing", *ASTM Standard on Geosynthetics*.
2. ASTM D 4595, "Test Method for Tensile Properties of Geotextile by the Wide-Width Strip Method", *ASTM Standard on Geosynthetics*.
3. ASTM D 5199, "Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextile and Geomembranes", *ASTM Standard on Geosynthetics*.
4. ASTM D 5262, "Test Method for Evaluating the Unconfined Tension Creep behavior of Geosynthetics", *ASTM Standard on Geosynthetics*.
5. ASTM D 5322, "Practice of Immersion Procedures for Evaluating the Chemical Resistance of Geosynthetics to Liquids", *ASTM Standard on Geosynthetics*.
6. British Standards Institution, "British Standards Methods of test for Geotextiles", 1987.
7. Farrag, k., "Development of an Accelerated Creep Testing procedure for Geosynthetics", in review, *Geotechnical Testing journal*, ASTM.
8. GRI Test Methods GG1, "Geogrid Rib Tensile Strength", *Geosynthetic Research Institute Standard Test Method*.
9. GRI Test Methods GG4(b), "Determination of the Long-Term Design Strength of Flexible Geogrids", *Geosynthetic Research Institute Standard Test Method*.
10. Ingold T. S., "The Geotextiles and Geoemembranes Manual", *Elsevier Advanced Technology*, pp. 71~246, 1981.
11. Koerner R. M., "Designing with Geosynthetics", *Prentice Hall Co.*, pp 328~393, 1994.
12. Rimoldi, P. and Montanelli, F., "Creep and Accelerated Creep testing For Geogrids", *Geosynthetics93*, Vancouver, Canada, pp 773~787, 1993.
13. TRI, "Laboratory Testing of Geomembrane for Waste Containment EPA Method 9090", 1995.