

해저터널용 복합신소재 배수복합관 부재의 정적거동에 관한 실험적 연구

신종호¹ · 김강현² · 김두래¹ · 지효선^{3*}

¹정회원, 건국대학교

²비회원, 건국대학교

³비회원, 대원대학교

An experimental study on the static behavior of advanced composite materials drainage pipe member for an undersea tunnel

Jong-Ho Shin¹, Kang-Hyun Kim², Doo-Rae Kim¹, Hyo-Seon Ji^{3*}

¹Korea, Konkuk university, 120 Neungdong-ro, Seoul 143-701

²Korea, Konkuk university, 120 Neungdong-ro, Seoul 143-701

³Korea, Daewon university college, 316 Daehak-ro, Jecheon 390-702

ABSTRACT: In order to design an advanced composite materials drainage pipe structures for an undersea tunnel, mechanical properties for the lamina types of the structural member must be predetermined. It is also reported that the size effect of the specimen is significant. In this study the tensile tests for the lamina types of the structural member are conducted at the room temperature (20°C) and the seawater temperature (0°C). In addition, the mechanical properties are predicted by theory based on the rule of mixtures and elasticity solution technique. The predicted mechanical properties are compared with test results obtained by a test method. In the design of an advanced composite materials drainage pipe structural members for an undersea tunnel, the used mechanical properties must be applied at the room temperature with considering the modified factors. These are to be offered the datum for the design an advanced composite materials drainage pipe structures for an undersea tunnel.

Keywords: Advanced composite materials, Drainage pipe structures, Lamina types, Mechanical properties, Tensile test

초 록: 해저터널용 복합신소재 배수관구조를 설계하기 위해서는 복합신소재 구조부재의 적층형태별 역학적 성질을 결정하는 것이 필수적이다. 복합신소재는 일반적으로 등방성 재료와 달리 치수효과가 매우 큰 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 복합신소재 부재의 적층형태별 인장시험을 상온(20°C)과 해수온도(0°C)에서 각각 수행하였다. 또한, 이론적 해석방법인 혼합물의 법칙과 탄성해법을 적용하여 재료의 역학적 성질을 추정하고 시험결과와 비교를 하였다. 해저터널 복합신소재 배수관 구조부재를 설계할 때 사용되는 역학적 성질의 값은 상온에서 얻어진 값을 보정하여 적용하여야 된다. 이러한 자료는 향후 해저터널용 복합신소재 배수관구조의 설계의 기초자료로 제공하고자 하였다.

주요어: 복합신소재, 배수관 구조물, Lamina 종류, 역학적 물성치, 인장시험

1. 서 론

해저터널은 무한정의 해수가 상부에 존재하여 터널

시공 및 운영 중 유입되는 지하수의 양과 그 특성이 육상터널의 유입수와는 다르므로, 해저터널의 유입수 제어 및 관리 방안을 설계함에 있어 이러한 특수성을 고려하여야 한다. 또한, 비배수형식의 터널일지라도 시공단계 뿐만 아니라 운영 중에도 지하수는 계속해서 유입되기 때문에 유입수 제어 및 관리 방안은 매우 중요하다. 일반적인 터널의 유입수 제어 및 관리 시스

***Corresponding author:** Hyo-Seon Ji
E-mail: hsjj@mail.daewon.ac.kr

Received December 5, 2014; **Revised** February 10, 2015;
Accepted March 16, 2015

템으로는 유입된 지하수를 하향 경사의 배수관을 통해 집수해서 펌프 등을 이용하여 강제로 배출시키는 방식을 적용하고 있다. 즉, Fig. 1과 같이 터널 내부로 유입된 지하수가 종배수관 및 횡배수관을 통해 흐르다가 집수정에 모여 펌프로 배출되는 방식이다. 이와 같이 터널의 배수시스템에 있어서 관형소재가 차지하는 비중을 고려하면, 배수기능이 저하되지 않도록 터널에 사용되는 배수관의 재료 및 구조를 설계하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다.

염수의 영향을 받는 해저터널에서 요구되는 장기간의 내구연한을 만족시키기 위해서 염해환경에서도 지속가능한 새로운 건설재료인 복합신소재를 채용한 터널의 유입수 제어 및 관리시스템 개발이 매우 중요하다(Bakis et al., 2002). 이러한 복합신소재 부재의 설계는 재료설계, 적층설계 및 단면설계로 구분할 수 있는데 비등방성인 복합신소재의 특성상 재료설계 단계에서 강화재료인 섬유방향별 탄성계수(E_1 , E_2), 포아슨비(ν_{12}) 및 전단 탄성계수(G_{12})와 같은 재료의 역학적 성질이 우선적으로 결정되어야 한다(Clarke, 1996; Jones, 1975).

본 연구에서는 상온과 해수온도에서 해저터널용 복합신소재 배수관 부재의 섬유방향에 따른 각각의 재료의 역학적 성질을 정적 성능시험을 통해 평가하였다. 정적 성능평가인 인장시험은 대표적 시험기준인 미국의 ASTM (American Society for Testing and

Materials) 시험기준에 의거하여 실시하였다. 시험시편은 무공과 유공으로 나누어 실시하였으며, 특히 상온(20°C)과 해수온도(0°C)에서 복합신소재의 시험결과를 비교 분석하여 온도에 따른 재료의 역학적 성질의 변화에 대해서 고찰하였다. 또한 시험시편 결과를 이론적인 해석방법에 의한 결과와 비교하여 분석하였다. 이러한 재료의 역학적 성질에 대한 연구가 추후 해저터널용 복합신소재 배수관의 해석 및 설계기준에 대한 기초자료를 제공하는 데 그 목적을 두고 있다.

2. 복합신소재 부재의 인장시험

복합신소재를 구성하는 섬유(fiber)와 기지(matrix) 그 자체로서는 역학적 성질이 균질한 재료로 알려져 있다. 그러나 역학적 성질이 전혀 다른 두 재료의 합성으로 만들어지는 복합신소재는 그 제조방법, 첨가제, 작업자의 숙련도 및 장비, 제작 환경 등에 따라 그 역학적 물성이 복합재료라는 특성상 기존의 콘크리트나 강재 등이 갖는 불확실성에 비해 상당히 크다. 따라서 기존재료의 설계에서와는 다르게 복합신소재의 설계에서는 기본 역학적 물성을 시험을 통해 파악하여야 한다. 또한 설계된 단면의 검증을 위해서 반드시 재료시험이 수반되어야 한다. 본 시험에서는 해저터널용 복합신소재 배수관 부재로 사용하기 위한 복합신소재 시험시편을 사용하여 ASTM-D3039 (ASTM, 2000)에서 추천하는 인장시험을 통해 재료설계의 시편에 대한 재료의 인장강도를 얻었으며, 상온(20°C)과 해수온도(0°C)에서 각각 인장시험을 실시하여 재료의 성능 변화를 고찰하였다.

3. 시험내용

3.1 시험시편 설계 및 제작

섬유(fiber)는 현재 국내에서 생산되어지는 D사의 유리섬유(glass fiber)를 이용하였으며, 기지(matrix)는 내염해에 우수한 비닐에스터(vinyl ester)를 사용하

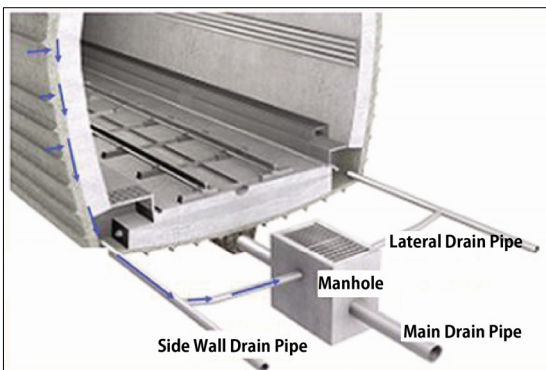


Fig. 1. System of management and control for the tunnel drainage

여 재료 설계하였다. Fig. 2와 같이 lamina의 적층형태에 따라 7가지 lamina 적층형태(0° , 90° , $0^\circ/90^\circ$, $+45^\circ/-45^\circ$, $0^\circ/+45^\circ/-45^\circ$, $+45^\circ/90^\circ/-45^\circ$, $0^\circ/+45^\circ/90^\circ/-45^\circ$)에 대한 시험시편을 제작하였다. 여기서 Lamina의 적층형태는 섬유방향(L; Longitudinal, 0°), 섬유직각방향(T; Transverse, 90°) 그리고 섬유사선방향(DB; Doble Bias, $\pm 45^\circ$)로 나타낼 수 있다.

각각 lamina 적층형태의 시편에 구멍이 없는 무공, 직경 5 mm의 구멍을 갖는 유공의 시편을 각각 3개씩

상온 및 해수온도에서 사용하기 위해 7가지 lamina 적층형태에 대한 총 84개의 시편을 Fig. 3과 같이 제작하였다. 본 시험시편의 섬유함유율(fiber volume fraction)은 30%로 하였으며, 이는 다른 섬유함유율을 가지는 구조부재를 설계할 때 실제 시편시험을 하지 않고도 이론적 해석결과를 통해 간단하게 역학적 성질을 추정할 수 있도록 기초자료로 사용될 수 있을 것이다. 시편은 수적층(hand lay-up)방식으로 제작되었지만, 시편들 간의 길이 및 단면 크기의 차이가 최소화되도록 하여 제작상의 오차를 줄일 수 있도록 고려하였다.








Layer Construction	
Uniaxial	L series  0° T series  90°
Biaxial & Double Bias	LT series  $0^\circ/90^\circ$ DS series  $+45^\circ/-45^\circ$
	DBL series  $0^\circ/+45^\circ/-45^\circ$ DBT series  $0^\circ/+45^\circ/-45^\circ$
Triaxial	DBLT series  $0^\circ/+45^\circ/90^\circ/-45^\circ$
Quadriaxial	

Fig. 2. Layer construction type of lamina

3.2 시험방법

ASTM 시험기준에 따라 제작된 7가지 lamina 적층형태에 대한 총 84개의 시편의 인장강도 시험을 수행하였다. 시편시험은 정부 공인기관(KOLAS)인 계명대학교 분산공유형 첨단건설재료실험센터에서 상온과 특정온도를 유지할 수 있는 Chamber를 갖춘 322 Test Frame과 647 Hydraulic Wedge Grip을 장착한 MTS 장비(250 kN)를 사용하여 시험을 수행하였다. 시편 인장-파단하중시험을 위해서 하중재하속도는 1 mm/min으로 가력하였다. 시편 인장시험을 통하여 극한하중, 변형률을 측정하였다. 여기서 탄성계수와 포아슨비의 계산은 응력-변형률 곡선의 초기 직선구간인 변형률 1,000~3,000 $\mu\epsilon$ 범위 내에서 구하도록 규정하고 있다. 다음 절은 각 lamina 적층형태에 대한 상온 및 해수온도 상태에서 시험전경과 방법에 대해서 기술하고자 한다.



Fig. 3. Coupon specimen for tensile tests

3.2.1 상온 시편시험

Fig. 4는 상온(20°C)상태에서 시편의 인장 파단하중의 시험전경을 보여주고 있다. 3.1절에 기술되어 있는 것처럼 7가지 lamina 적층형태에 대해 무공시편과 유공시편 각각 3개씩 총 42개의 시편에 대해 인장-파단하중 시험을 수행하였다.

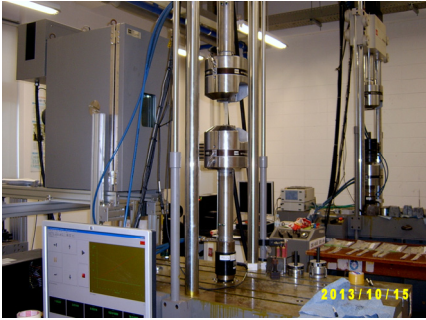


Fig. 4. Tensile-fracture load test (GFRP coupon specimens at room temperature)



Fig. 5. Tensile-fracture load test (GFRP coupon specimens at sea water temperature)

3.2.2 해수온도 시편시험

Fig. 5는 해수온도 상태에서 시편시험을 위해 Chamber를 이용한 해수온도(0°C)에 노출된 상태에서 시편의 인장 파단하중의 시험전경을 보여주고 있다. 앞서 상온 시편시험처럼 7가지 lamina 적층형태

에 대해 무공시편과 유공시편 각각 3개씩 총 42개의 시편에 대해 인장-파단하중 시험을 수행하였다. Chamber 를 이용한 해수온도에서 시험을 수행하기 위해서 시험체의 노출시간은 20분~60분 범위로 하였다.

4. 시험결과 및 고찰

상기 Fig. 3과 같은 7가지 lamina 적층형태에 대해 무공시편과 유공시편 각각 3개씩 총 42개의 시편에 대해 인장-파단하중 시험을 수행하여 얻어진 응력-변형률, 하중-변위 및 시편의 파괴양상을 분석하였다. 시험결과 데이터의 분석은 계측된 데이터 중에서 ASTM 시험기준에 따라 시편 파괴가 시편 게이지 길이 범위 외에서 파괴된 시험시편의 데이터는 제외하였다. 그 외 정상적으로 시편게이지 길이 범위 내에서 파괴된 시험시편의 데이터에 대해서는 최대, 최소 값을 제외한 데이터를 이용하여 각 역학적 성질의 값인 극한하중, 변형률, 탄성계수, 포아슨비 등을 통계 처리 기법을 이용하여 추출하였다.

4.1 상온 시험

상온에서 각 lamina의 적층형태 별 상온 인장시험의 결과를 구멍이 없는 시편과 구멍이 있는 시편에 대해서 극한강도, 최대변형률, 탄성계수, 최대 파단하

Table 1. Test results for lamina types without hole at room temperature

Classification		Room Temperature			
		Lamina without Hole			
		Ultimate Strength (MPa)	Max Strain (%)	Tensile Modulus (MPa)	Max Load (kN)
Uni-axial	0°	196.92	1.968	11,112	7.03
	90°	172.90	1.575	8,552	6.17
Bi-axial	0° / 90°	407.77	3.165	12,884	14.77
Double Bias	+45° / -45°	258.33	2.182	11,839	7.98
Tri-axial	0° / +45° / -45°	136.16	2.112	6,447	5.58
	+45° / 90° / -45°	121.99	1.893	6,444	4.54
Quadri-axial	0° / +45° / 90° / -45°	24.82	4.321	574	1.94

Table 2. Test results for lamina types with hole at room temperature

Classification		Room Temperature			
		Lamina with Hole			
		Ultimate Strength (MPa)	Max Strain (%)	Tensile Modulus (MPa)	Max Load (kN)
Uni-axial	0°	20.51	1.470	2,066	1.56
	90°	83.55	1.960	4,889	6.38
Bi-axial	0° / 90°	60.41	1.372	4,403	4.89
Double Bias	+45° / -45°	77.96	2.172	3,589	6.42
Tri-axial	0° / +45° / -45°	63.57	1.742	3,649	5.54
	+45° / 90° / -45°	75.25	2.616	2,877	6.34
Quadri-axial	0° / +45° / 90° / -45°	49.77	1.636	3,042	4.37

중을 측정하여 Table 1, 2과 같이 나타내었다.

상온 인장시험에서 구멍이 없는 Uni-axial 섬유방향 3개 시험체의 파괴시 평균 최대하중은 7.03 kN으로 측정되었으며, 구멍이 있는 시험체의 섬유방향 3개 시험체의 파괴시 평균 최대하중은 1.56 kN으로 측정되었다. 그리고 섬유방향 3개 시험체의 파괴시 평균 최대응력은 196.92 MPa으로 측정되었으며, 구멍이 있는 시험체의 섬유방향 3개 시험체의 파괴시 평균 최대응력은 20.51 MPa으로 측정되었다. 배수관이 유공관 형태로 제작 시공됨을 감안할 때 섬유방향을 섬유직각방향으로 배열하여 설계하는 것이 역학적으로 보다 유리할 것으로 사료된다. 시험체의 파단은 상, 하 Grib 중 상부쪽에서 파단이 주로 발생되었다. 또한 상온 인장시험의 결과를 구멍이 없는 시편과 구멍이 있는 섬유방향 시편에 대해서 응력-변형률

선도를 Fig. 6, 7과 같이 나타내었다. 응력-변형률 곡선은 시험체 제작시의 불균일성 등으로 강도의 차이를 보이고 있지만 변형률 0.005 범위내외에서는 선형으로서 유사한 탄성계수를 나타내 보이고 있다.

4.2 해수온도 시험

해수온도에서 각 Lamina의 적층형태 별 상온 인장시험의 결과를 구멍이 없는 시편과 구멍이 있는 시편에 대해서 Table 3, 4과 같이 나타내고 있다. 4.1절처럼 해수온도에서 시험에서 구멍이 없는 시험체의 파괴시 최대하중은 Uni-axial 섬유방향 3개 시험체의 파괴시 평균 최대하중은 5.62 kN으로 측정되었으며, 구멍이 있는 시험체의 섬유방향 3개 시험체의 파괴시 평균 최대하중은 1.83 kN으로 측정되었다. 그리고 섬유방

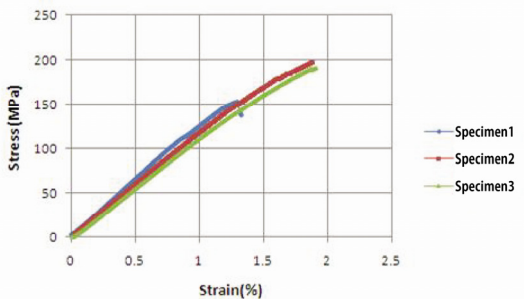


Fig. 6. Stress-strain curves of GFRP coupon specimens at room temperature without cutting hole (0°)

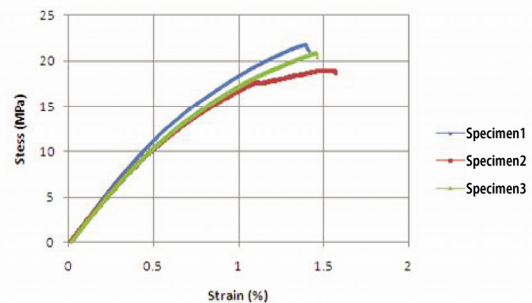


Fig. 7. Stress-strain curves of GFRP coupon specimens at room temperature with cutting hole (0°)

향 3개 시험체의 파괴시 평균 최대응력은 73.56 MPa
으로 측정되었으며, 구멍이 있는 시험체의 섬유방향
3개 시험체의 파괴시 평균 최대응력은 24.05 MPa

으로 측정되었다. 구멍이 있는 시험체의 역학적 성질
이 섬유방향보다 섬유직각방향 보다 큰 값을 보이고
있어 상온시험처럼, 해수온도시험에서도 섬유배열을

Table 3. Test results for lamina types without hole at sea water temperature

Classification		Sea Water Temperature			
		Lamina without Hole			
		Ultimate Strength (MPa)	Max Strain (%)	Tensile Modulus (MPa)	Max Load (kN)
Uni-axial	0°	73.56	1.610	5,280	5.62
	90°	77.04	1.650	5,713	5.88
Bi-axial	0° / 90°	187.78	3.364	5,582	19.26
Double Bias	+45° / -45°	143.88	2.952	4,873	12.87
Tri-axial	0° / +45° / -45°	49.96	1.591	3,140	5.30
	+45° / 90° / -45°	58.20	2.034	2,861	5.28
Quadri-axial	0° / +45° / 90° / -45°	27.25	2.606	1,045	2.03

Table 4. Test results for lamina types with hole at sea water temperature

Classification		Sea Water Temperature			
		Lamina with Hole			
		Ultimate Strength (MPa)	Max Strain (%)	Tensile Modulus (MPa)	Max Load (kN)
Uni-axial	0°	24.05	1.640	2,508	1.83
	90°	69.49	1.650	4,896	15.93
Bi-axial	0° / 90°	63.71	1.429	4,458	5.76
Double Bias	+45° / -45°	84.79	2.345	3,616	7.15
Tri-axial	0° / +45° / -45°	69.21	1.805	3,834	5.62
	+45° / 90° / -45°	84.69	2.998	2,825	6.78
Quadri-axial	0° / +45° / 90° / -45°	59.52	1.830	3,252	4.80

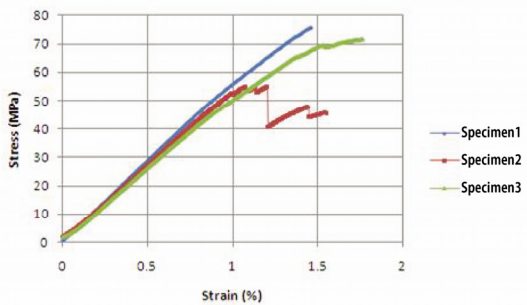


Fig. 8. Stress-strain curves of GFRP coupon specimens at sea water temperature without cutting hole (0°)

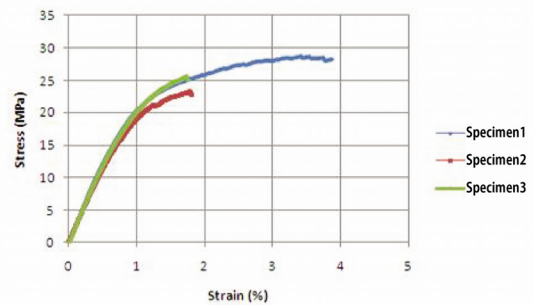


Fig. 9. Stress-strain curves of GFRP coupon specimens at sea water temperature with cutting hole (0°)

섬유직각방향으로 설계하는 것이 역학적으로 보다 유리할 것으로 사료된다. 마찬가지로 상온시험처럼 시험체의 파단은 상, 하 Grib 중 상부 쪽에서 파단이 주로 발생되었다. 또한 해수온도 인장시험의 결과를 구멍이 없는 시편과 구멍이 있는 섬유방향 시편에 대해서 응력-변형률 선도를 Fig. 8, 9와 같이 나타내었다.

4.3 상온과 해수온도 시험결과의 비교

섬유방향과 섬유직각방향의 lamina 적층형태에 대한 상온 및 해수온도 상태에서 시험결과를 비교하여 무공 및 유공 시편에 대해 Table 5, 6과 같이 비교하여 나타내었다. 각 표에서 나타났듯이 각 lamina 적층형태별로 역학적 성질이 구멍이 없는 섬유방향의 시험체에서 해수온도에서의 물성값이 상온에서의 물성값의 37.3%의 강도로 발현되는 것으로 나타내 보였으며, 섬유직각방향에서는 44.5%의 강도로 발현되는 것으로 나타내 보였다. 한편, 구멍이 있는 섬유방향의 시험체에서 해수온도에서의 물성값이 상온에서의 물성값의 117.3%의 강도로 발현되는 것으로 나타내 보였으며, 섬유직각방향에서는 83.17%의 강도로 발현되는 것으로 나타내 보였다.

복합신소재를 이용한 해저터널용 무공관 부재의 해석 시 적용되는 탄성계수 E 값은 섬유방향으로 적층한 경우 상온에서 얻어진 물성 값 E 에 비해 약 52.5% 감소하고, 섬유직각방향으로 적층한 경우에는 상온의 물성 값보다 약 33.2% 감소하는 것을 고려하여 설계하여야 한다. 그러나 유공관 부재인 경우 섬유방향으로 적층한 경우 E 값이 상온에 비해 약 21.4% 증가하고, 섬유직각방향으로 적층한 경우는 약 0.1% 증가하는 것을 고려하여야 한다.

5. 이론값과의 비교분석

복합신소재를 이용한 구조물을 설계할 때 설계변수인 탄성계수, 포아슨비를 이론적 해석을 통해 계산할 수 있다. 본 장에서는 시편시험의 결과를 통해 얻은 시험결과와 이론으로 구한 값과 비교 분석하여 역학적 성질의 차이를 규명하고자 하였다. 향후 해저터널용 복합신소재 배수관 해석 시 기초 자료로 활용할 수 있도록 하였다. 일반적으로 사용되는 lamina 적층형태별 역학적 성질을 추정하는 이론적 해석방법인 혼합물의 법칙(rule of mixtures)과 탄성해법의 이론(Elasticity solution)을 사용하여 비교분석하였다

Table 5. Comparison of test results at room temperature and sea water temperature for lamina types without hole

Classification		Lamina without Hole				
		Max Stress (MPa)			Max Strain(%)	
		Room Temperature	Sea Water Temperature	$\sigma_{sea\ water}/\sigma_{room}$	Room Temperature	Sea Water Temperature
Uni-axial	0°	196.92	73.56	37.3%	1.968	1.610
	90°	172.90	77.04	44.5%	1.575	1.650

Table 6. Comparison of test results at room temperature and sea water temperature for lamina types with hole

Classification		Lamina with Hole				
		Max Stress (MPa)			Max Strain (%)	
		Room Temperature	Sea Water Temperature	$\sigma_{sea\ water}/\sigma_{room}$	Room Temperature	Sea Water Temperature
Uni-axial	0°	20.51	24.05	117.3%	1.470	1.640
	90°	83.55	69.49	83.1%	1.960	1.650

Table 7. Material properties of fiber and resin

classification	$E(GPa)$	$G(GPa)$	$\rho(g/cm^3)$	ν
fiber	72.4	27.6	2.54	0.22
resin	3.91	1.43	1.15	0.37

(Kim, 1995; Matthews, 1994). 본 연구에서 제시한 해저터널용 복합신소재 배수관의 구조는 유리섬유와 비닐 에스터 수지를 사용하는 것으로 하였다. 따라서 섬유와 수지의 재료 물성 값은 Table 7과 같다.

5.1 혼합물의 법칙

미시역학(micro-mechanics)에 기초하여 다음과 같이 식 (1), (2)로 혼합물의 법칙(rule of mixtures)을 나타낼 수 있다.

$$V_f = \frac{\frac{w_f}{\rho_f}}{\left\{ \frac{w_f}{\rho_f} + \frac{w_m}{\rho_m} \right\}}, V_m = 1 - V_f \quad (1)$$

여기서, w_f, w_m 은 섬유와 수지의 무게비를 나타내며, ρ_f, ρ_m 은 비중을 나타낸다. 그리고 V_f, V_m 은 섬유와 수지의 부피비를 나타낸다.

혼합법을 이용하여 계산되는 Lamina의 재료물성은 식 (2)로 구할 수 있다.

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m, E_2 = \frac{1}{\left\{ \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \right\}} \quad (2a)$$

$$G_{12} = \frac{1}{\left\{ \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \right\}}, \nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (2b)$$

위 식에서, E_1, E_2 는 각각 Lamina의 섬유방향 및 섬유직각방향의 탄성계수를 말하며 G_{12}, ν_{12} 는 lamina의 면내 전단탄성계수 및 주방향 포아슨비를 나타낸

Table 8. Material properties of Lamina by the rule of mixture

$E_1 (GPa)$	$E_2 (GPa)$	$G_{12} (GPa)$	ν_{12}
15.07	4.63	1.69	0.345

다. 그리고 E_f, E_m 은 섬유와 수지의 탄성계수를 나타내며, G_f, G_m 은 섬유와 수지의 전단탄성계수를 나타낸다. ν_f, ν_m 은 섬유와 수지의 포아슨비를 나타낸다.

섬유의 함유량이 30%, 수지의 함유량이 70%인 경우에 대해서 재료의 물성을 계산하는 방법인 혼합법(rule of mixtures)을 이용하여 섬유방향(0°)과 섬유직각방향(90°)의 Lamina의 물성을 계산하여 Table 8과 같이 나타내었다.

5.2 탄성해법

실제 섬유배치 상태를 변수화에 기초하여 다음과 같은 탄성해법(Elasticity solution)의 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (3a)$$

$$E_2 = 2[1 - \nu_f + (\nu_f - \nu_m)V_m] \times \left[(1 - C) \frac{K_f(2K_m + G_m) - G_m(K_f - K_m)V_m}{(2K_m + G_m) + 2(K_f - K_m)V_m} + C \frac{K_f(2K_m + G_f) + G_f(K_m - K_f)V_m}{(2K_m + G_f) - 2(K_m - K_f)V_m} \right] \quad (3b)$$

$$\nu_{12} = [(1 - C) \frac{K_f \nu_f (2K_m + G_m) + K_m \nu_m (2K_f + G_m)V_m}{K_f(2K_m + G_m) - G_m(K_f - K_m)V_m} + C \frac{K_m \nu_m (2K_f + G_f) + K_f \nu_f (2K_m + G_f)V_f}{K_f(2K_m + G_m) - G_f(K_m - K_f)V_m}] \quad (3c)$$

$$G_{12} = (1 - C) G_m \frac{2G_f - (G_f - G_m)V_m}{2G_m + (G_f - G_m)V_m} + C G_f \frac{(G_f + G_m) - (G_f - G_m)V_m}{(G_f + G_m) + (G_f - G_m)V_m} \quad (3d)$$

여기서,

$$K_f = \frac{E_f}{2(1 - \nu_f)}, K_m = \frac{E_m}{2(1 - \nu_m)}$$

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 + \nu_f)}, G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad (3d)$$

Table 9. Material properties of Lamina by the elasticity solution

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}
15.07	6.60	1.92	0.355

5.1절과 같이 섬유 함유량이 30%, 수지의 함량이 70%인 경우에 대해서 탄성해법을 이용하여 섬유방향(0°)과 섬유직각방향(90°)의 Lamina의 물성을 계산하여 Table 9와 같이 나타내었다.

Table 8, 9에서 표시된 E_1 , E_2 는 각각 Lamina의 섬유방향(0°)과 섬유직각방향(90°)의 탄성계수를 말하며 G_{12} , ν_{12} 는 lamina의 면내 전단탄성계수 및 주방향 포아슨비를 나타낸다.

5.3 시험결과와 이론값의 비교 분석

상기 5.1 및 5.2 절의 두 가지 이론식으로 구한 복합신소재의 섬유방향 및 섬유직각방향의 탄성계수 값(E_1, E_2)과 상온에서의 무공시편(Uni-axial: 0°, 90°)의 시험 결과 값으로 구한 탄성계수 값(E'_1, E'_2)을 비교하여 Table 10에 나타내었으며, 분석한 내용을 다음과 같이 기술하였다. 혼합법칙 및 탄성해법으로 구한 섬유방향에서의 이론 값(E_1)은 시험 값(E'_1)에 비하여 135.6%로 크게 나타났으며, 섬유직각방향에

Table 10. Comparison of theory and testing value (GPa)

Classification		Room Temperature		
		Lamina without Hole		
		Rule of Mixtures	Elasticity Solution	Coupon Test
Uni-axial	E_1	15.07 (135.6%)	15.07 (135.6%)	-
	E_2	4.63 (54.15%)	6.60 (77.19%)	-
	E'_1	-	-	11.11
	E'_2	-	-	8.55

$$() = (\text{theory value})/(\text{testing value}) \times 100 (\%)$$

서의 이론 값(E_2)은 시험 값(E'_2)에 비하여 혼합법칙에 있어서는 54.15%, 탄성해법의 결과와는 77.19%의 차이를 보였다. 이러한 차이는 시편제작 시 섬유방향 시편의 섬유길이가 섬유직각방향보다 길기 때문에 충분히 긴장되지 못함에 기인된 것으로 판단된다. 향후 배수관 제작방법에 있어서 방향에 따른 섬유의 긴장확보가 중요할 것으로 사료된다.

6. 결론

본 연구는 해저터널 복합신소재 배수관의 개발 및 실용화 관련 연구로서, 복합신소재의 구조재 활용을 위한 기초자료를 제공하기 위하여 수행하였다. 유리 섬유와 비닐 에스터를 사용하여 제작된 시편에 대하여 상온과 해수온도에서 각각 인장-파단하중 시험을 수행하였다. 시편시험을 통해서 얻은 재료 물성값은 이론적 해석방법으로 구한 물성값과 비교 분석하였다.

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 적층형태별 역학적 성질을 파악하기 위해 진행한 시험을 통해 얻은 결과에서, 해수온도에서의 구멍이 없는 섬유방향의 시험체의 최대 응력 값은 상온에서의 시험체의 최대 응력 값의 약 37.3%의 강도로 발현되는 것으로 나타났으며, 섬유직각방향에서는 약 44.5%의 강도로 발현되는 것으로 나타났다. 한편, 해수온도에서의 구멍이 있는 섬유방향의 시험체의 최대 응력 값은 상온에서의 시험체의 최대 응력 값의 약 117.3%의 강도로 발현되는 것으로 나타났으며, 섬유직각방향에서는 약 83.17%의 강도로 발현되는 것으로 나타났다.
2. 해저터널에 사용되는 복합신소재 배수관 설계 시 해수온도(0°C)라는 저온의 영향을 받아 부재의 물성 값이 상온에 비해 변화하는 것을 고려하여야 한다. 무공 배수관 부재의 경우 적용되는 탄성계수 E 값은 섬유방향으로 적용한 경우 상온에 비해 약 52.5% 감소하고, 섬유직각방향으로 적용한 경

우는 상온의 탄성계수 E 값에 비해 약 33.2% 감소하였다.

유공관 부재의 경우, 섬유방향의 적층구조의 탄성계수 E 값은 상온에 비해 약 21.3% 증가하였지만, 섬유직각방향의 적층구조는 약 0.1%의 증가를 보여 그 차이가 거의 없다고 보아도 무방하다.

3. 상온에서의 적층구조별 시험체의 탄성계수 값(E)을 이론해석 값과 비교한 결과, 섬유방향에서의 이론해석 값이 혼합법칙과 탄성해법을 적용한 두 경우 모두에서 135.6%로 시험결과보다 크게 나타났으며, 섬유직각방향에서의 이론해석 값은 혼합법칙을 적용한 경우 54.15%, 탄성해법을 적용한 경우 77.19%로 시험결과 값보다 작게 나타났다. 이러한 차이는 시편제작 시 섬유방향 시편의 섬유 길이가 섬유직각방향보다 길기 때문에 충분히 긴장되지 못한 것이 원인으로 판단된다.
4. 해저터널용 복합신소재 배수관 부재를 설계할 때 재료의 역학적 성질이 동일한 재료로 제작된 구조 부재라도 구멍(hole)의 유무와 온도의 영향을 고려하여 각 부재별 용도에 따라 적합한 섬유의 적층각도를 선택하여야 하며, 설계 시 극한한계상태에 이르기 전에 충분한 파괴예고를 보이도록 고려하는 것이 바람직하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발, 13건설연구T01)과 2014학년도 건국대학교 연구년 교육지원을 통해 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. ASTM D3039 (2000), "Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials", American Society for Testing and Materials.
2. Bakis, C.E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesko, J.J., Machida, A., Rizkalla, S.H., Triantafillou, T.C. (2002), "Fiber-reinforced polymer composites for construction-state-of-the art review", ASCE Journal of Bridge Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 73-87.
3. Clarke, J.L.(Ed) (1996), "Structural design of polymer composites - EUROCOMP design code and handbook", E&FN Spon, London, England.
4. Jones, R.M. (1975), "Mechanics of composite materials, scripta book company", Washington, D.C.
5. Kim, D.H. (1995), "Composite structures for civil and architectural engineering", E&FN Spon, London, England.
6. Matthews, F.L., Rawlings, R.D. (1994), "Composite materials : engineering and science", Chapman & Hall.