

터널보강재로서 FRP재료의 적용성 검토

The applicability of FRP material for tunnel support



최용기*
Choi, Yong-Ki



권오엽*
Kwon, Oh-Youb



배규진*
Bae, Gyu-Jin



조만섭*
Cho, Mahn-Sup

Abstract

The purpose of this study is to improve the problems in Umbrella Arch Method, such as the oxidation, the difficulties in installation and cutting of the steel pipe. The applicability of the high strength FRP (Fiber-Reinforced-Plastic) materials composed of glass fiber as a substitute of steel pipe was investigated in this study. The results of this study show that FRP material is better than steel pipe in work performance and the durability of material except for its price. From the numerical analysis with various types of FRP, it was evaluated that the equiangular curve type is more efficient than the flat type developed abroad, and the supporting effect of FRP-grout mixture is similar to that of steel-grout mixture in results of bending strength test.

Keywords : FRP, Umbrella Arch Method, Bending Strength Test

요 지

이 연구는 강관 보강형 다단 그라우팅공법의 설치 및 절단 시 어려움, 부식에 취약한 문제점 등을 개선하는데 목적이 있으며, 강관 대신에 고강도 유리섬유(fiberglass)를 이용한 FRP(Fiberglass Reinforced Plastic)의 적용성에 대한 연구를 수행하였다. 연구결과는 강관에 비하여 FRP 보강재의 가격이 높긴 하지만 시공성 및 내구성 등에서 우수한 것으로 파악되었다. 그리고 FRP 보강재의 형상에 따른 수치해석 결과에서는 국외에서 상용화 된 판상형 보강재 보다 등각곡선형 보강재가 더 구조적 측면에서 효율적임을 알 수 있었

*1 정회원, 건국대학교 토목공학과 박사수료

*2 정회원, 건국대학교 토목공학과 교수

*3 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부장

*4 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원

고, 그라우트 복합체에 대한 굴곡강도시험 결과에서는 강관과 FRP 보강재의 지보효과가 유사한 것으로 평가되었다.

주요어: FRP, 강관 보강형 다단 그라우팅공법, 굴곡강도시험

1. 서론

터널의 시공 중 지하수 유출에 의한 지반 침하가 예상되거나 지반의 이완영역이 넓은 경우에는 터널의 굴착과 병행하여 적절한 보조공법들을 사용하고 있으며, 특히 강관 보강형 다단 그라우팅공법과 약액주입공법, 휘폴링 공법 등이 널리 적용되고 있다(배규진 등, 1998; 한국건설기술연구원, 1986; 한국건설기술연구원, 1994).

이들 보조공법 중에서 강관 보강형 다단 그라우팅공법은 대표적으로 서울지하철 5-18공구의 한강하저 통과구간에서 약액주입공법과 병행하여 적용되었고, 보강효과가 확인된 바 있다(서울특별시 지하철건설본부, 1997). 그러나 이 공법은 강관의 설치 및 절단 시 취급이 용이하지 않고, 부식에 취약한 문제점들을 가지고 있기 때문에 이에 대한 개선이 요구되고 있는 실정이다. 이러한 문제의 해결 방안으로, 외국에서는 강관 대신에 고강도 유리섬유(fiberglass)를 이용한 FRP (Fiberglass Reinforced Plastic)를 적용한 사례가 있다(Sireg S.P.A.).

따라서 FRP 재료를 이용한 지반보강 공법을 국내의 토목분야에 적용하기 위한 목적으로 본 연구에서는 다음과 같은 요소기술연구를 수행하였다. 먼저, 효율성을 보다 극대화시키기 위하여 FRP 보강재의 구조적 특성에 대한 수치해석을 수행하였다. 그리고 FRP 및 강관 그라우트 복합체에 대하여 굴곡강도시험을 실시하였고, FRP 보강재의 적용 가능성을 평가하여 보았다.

2. FRP 보강형 다단 그라우팅 공법의 특성

2.1 FRP 보강재의 특성 및 강관과의 비교

FRP 그라우팅 공법은 1980년대 중반 이후부터 이탈리아에서 소개된 보조공법으로서 신소재 강화플라스틱의 재료적 특성을 터널 보강재에 적합하도록 개발하였다(Sireg S.P.A.).

그림 1은 FRP를 이용한 그라우팅 장치를 도시한 것으로, 이 장치의 구성은 그라우트재의 주입을 위한 주입관, 상재하중과 토압을 분산·감소시키는 FRP 보강재, FRP 보강재의 위치를 고정시켜주는 간격재 등으로 구성되어 있다.

표 1은 FRP 보강재의 역학적 특성을 보여 주는 것으로, 유리섬유 함유율이 70%인 매우 고강도 플라스틱 신소재이며, 경량성, 내화학성, 내마모성 등을 모두 만족시킬 수 있는 보강재료이다(한국건설기술연구원, 1999).

FRP 보강형 다단 그라우팅공법의 기본 원리는 강관 보강형과 유사하며, 터널 굴착 전에 강관 대신 FRP 보강재를 적절한 형상으로 배열·설치한다. 그리고 주입관 내에

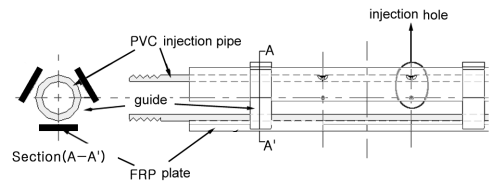


그림 1. FRP 보강형 다단 그라우팅공법의 구성

표 1. FRP 보강재의 역학적 특성

비 중	1.9 g/cm ³	ASTM D 792
fiberglass content	70 %	
tensile strength	1,000 MPa	ASTM D 3916
bending elastic modulus	40 GPa	ASTM D 3916
shear strength	250 MPa	

표 2. 강관 및 FRP 보강형 다단 그라우팅공법의 특성 비교

		강관 보강형 다단 그라우팅공법	FRP 보강형 다단 그라우팅공법
재료적 측면	장점	<ul style="list-style-type: none"> · 강관 제작 및 취급이 용이 · FRP 보강재에 비해 강관 재료비가 저렴 	<ul style="list-style-type: none"> · FRP 보강재 중량이 적음 · 부식성에 강함 · 그라우트재의 단면적이 크므로 보강효과가 높음
	단점	<ul style="list-style-type: none"> · 강관 자체의 중량이 크므로 시공성 결여 · 부식성에 약함 · 강관의 절단이 어려움 	<ul style="list-style-type: none"> · 강관에 비해 재료비가 고가
시공성 측면	장점	<ul style="list-style-type: none"> · 천공 홀이 붕괴될 경우, 강관의 단면적이 비교적 적기 때문에 강관의 삽입이 용이 · 별도의 조립공정 없이 단위 강관들을 연결하여 시공 	<ul style="list-style-type: none"> · FRP 보강재의 절단이 용이하여 공기 단축 · FRP의 내화학적, 내부식성이 우수함 · 강관에 비해 중량이 적으므로 취급이 용이 · 간격재에 의해 주입관과 천공표면이 일정한 간격을 유지함으로 분사구 막힘이 적음 · 천공 홀의 중심에 근접하여 주입관을 위치시킬 수 있어 그라우트 품질의 향상 효과 · FRP의 표면이 거칠어 그라우트와의 부착강도가 큼
	단점	<ul style="list-style-type: none"> · 강관 절단의 어려움으로 인해 시공성 저하 · 부식성에 약함으로써 영구 보강재로서 결함이 있음 · 지반 상태와 터널 단면 크기에 따라 천공길이가 길어지면 강관의 과대한 중량으로 인해 천공홀 삽입이 곤란 	<ul style="list-style-type: none"> · 천공홀이 붕괴될 경우, 보강재의 단면적이 커서 보강재 삽입이 어려울 수 있음 · FRP 보강재, 주입관, 연결재 등을 현장에서 조립사용하는 추가 공정이 필요

패커를 설치하여 그라우트재를 주입함으로써 주입재에 의한 지반의 고결로 인하여 FRP 보강재와 지반을 일체화 한다.

기존의 강관 보강형 다단 그라우팅공법과 FRP 보강형 다단 그라우팅공법에 대해서 재료적 측면과 시공성 측면의 비교를 수행하였고, 그 결과를 표 2에 제시하였다.

2.2 FRP 보강재의 개선

국외에서 개발된 FRP 보강재의 단면 형상은 일반적으로 3개의 판상형 보강재를 사용하고 있으나, 이는 조립 후의 단면이 비교적 크며, 그라우트 복합체의 구조적 기능을 고려할 때 다소 개선의 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 판상형 보강재의 형상을 변화시켜 보강효과 및 시공성을 높일 수 있도록 등각곡선형(표준형)과 특수곡선형을 개발하였고, 여러 가지 특성들을 상호 비교·검토하여 보았다.

그림 2(a), (b)에는 각각 등각곡선형(표준형) FRP 보강재 및 특수곡선형 FRP 보강재의 개요도를 나타내었다. 그림 2(a)의 등각곡선형 FRP 부재는 플라스틱 파이프 주변에 동일한 두께와 원주를 갖는 FRP 보강재를 설치하는 것이고, 그림 2(b)의 특수곡선형 FRP 부재는 두께와 원주가 동일한 2개의 FRP 보강재 및 두께는 같으나 원주가 긴 1개의 FRP 보강재를 설치하는 방법을 나타낸다. (b)의 특수곡선형은 주입파이프에 설치된 분사구의 위치나 크기를 달리하여, 향후 주입방향의 조절에 사용할 수 있도록 고안한 것이다.

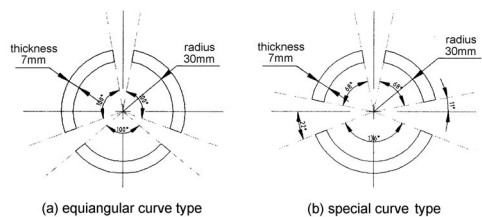


그림 2. 개선된 FRP 보강재의 단면도

3. FRP 보강재의 최적 단면형상 결정

FRP 보강재의 단면형상에 대한 효과를 검증하기 위하여, 판상형, 등각곡선형 그리고 특수곡선형 등의 3가지 FRP 보강재를 포함하는 그라우트 복합체에 대한 수치해석을 수행하였고, 복합체내의 구성요소인 FRP 부재 및 복합체에 작용하는 응력 집중현상을 상호·비교하여 보았다.

본 해석에 사용된 프로그램은 "Sigma-2D"이며, 이 프로그램은 현재 국내, 일본 기타의 여러 나라에서 터널, 사면, 굴착, 댐 등의 해석에 많이 이용되고 있는 유한요소해석 프로그램으로서 토사, 암석, 콘크리트 재료 등의 선형(linear) 및 비선형(nonlinear)거동에 대한 해석이 가능한 프로그램이다.

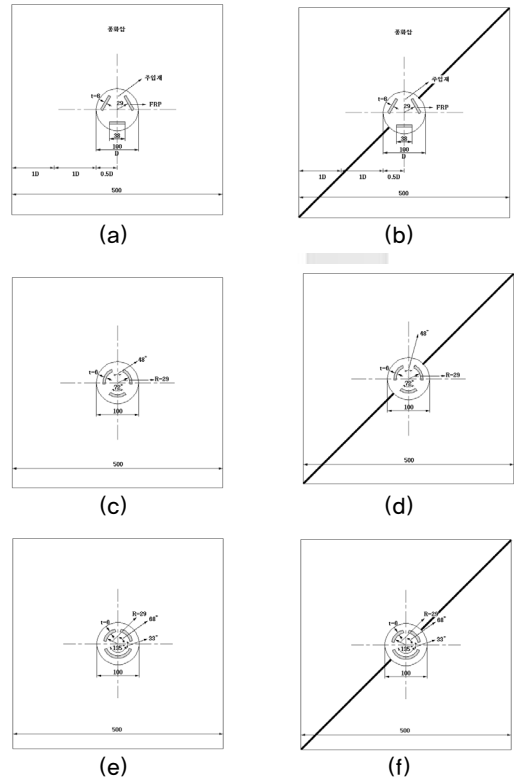
3.1 해석조건 및 해석모델

본 해석의 대상 모델인 FRP 복합체는 그림 3에 나타난 바와 같고, FRP 부재는 중심으로부터 29 mm 거리에 위치하고 있고, 주입재의 물성영역은 FRP 부재의 형상별 천공 경과 동일한 $\phi 100\text{mm}$ 로 가정하였다.

- Case 1 (그림 3(a), (b)): Case 1은 삼각형 복합체로서 동일한 크기의 판상형 FRP 부재가 3개 1조로 구성되어 있고, FRP 부재의 조립 형태가 truss 구조로 되어 있다.
- Case 2 (그림 3(c), (d)): Case 2는 등각곡선형 복합체로서 동일한 크기의 곡선형 FRP 부재가 3개 1조로 구성되어 있고, FRP 부재의 조립 형태가 원형으로 되어 있다.
- Case 3 (그림 3(e), (f)): Case 3은 특수곡선형 복합체로서 곡선형 FRP 부재가 3개 1조로 구성되어 있고, 등각곡선형 FRP 부재와 동일한 단면적을 가지고 있다. 그러나 Case 2와 달리 FRP 부재의 크기가 2개는 동일하나 1개는 상이하게 구성되어 있으며,

이는 주입방향 조절(controlled grout)을 위하여 고안되어진 것이다.

그리고 이상의 모델 Case 1, Case 2, Case 3에 대하여, 여러 조건들에 따른 영향을 비교·분석하고자 파라미터 해석을 수행하였는데, 균질 등방성 지반(HIM: Homogeneous Isotropic Model)의 경우와 불연속면을 포함하고 있는 지반(HJM: Homogeneous Jointed Model)으로 구분하여 해석을 수행하였다.



model	FRP types	복합체 형상	parameter
Case 1	평판형	triangular	HIM, HJM
Case 2	등각곡선형	circular	
Case 3	특수곡선형	circular	

그림 3. 수치해석을 위한 FRP-복합체 모델들의 규격과 파라미터

3.2 입력물성치 및 경계조건

해석대상의 지반은 굴착 후 지지력이 급격하게 저하되는 풍화암으로 가정하고, 한국건설기술연구원(1998)에서 제안한 풍화암의 일반적인 물성치를 적용하였다. 그리고 보강형 FRP의 물성치는 한국건설자재시험소에 의뢰한 시험성적 결과(탄성계수)를 사용하였으며, 표 3에는 입력 물성치들을 나타내었다.

불연속면(HJM)을 고려한 모델의 물성치는 실제 현장 자료를 구할 수 없었기 때문에 기존의 수치해석 연구논문에서 적용되었던 물성치를 사용하였고, 불연속면의 방향은 약 45° 각도로 FRP 복합체를 관통하도록 모델링하였다. 본 해석대상의 영역선정은 천공경을 중심으로 좌·우·상·하 각각 천공경의 2.5배로 설정하였고, FRP 부재가 지표면에서 40 m 하부의 풍화암 지역에 위치하는 것으로 가정하였다.

그리고 40 m의 토피고를 고려하여 지반의 자중을 8 kg/cm²의 등분포 상재하중으로 적용시켰으며, parameter에서의 외압(P)의 크기는 복합체 하부에서 8 kg/cm²로 적용하였다.

3.3 해석 결과 및 분석

3.3.1 균질한 지반(Homogeneous Isotropic Model: HIM)의 경향 분석

균질한 등방성 지반 내에서 3가지 Case에 대하여 탄소성 유한요소해석을 수행한 결과, 그림 4에 나타난 바와 같이 모든 Case에 대하여 최대주응력은 대부분 압축방향(⊖)의 응력이 발생되었다.

각각의 Case에 대하여 최대주응력의 분포 경향을 보다 상세하게 기술하면 다음과 같다.

가. Case 1: 판상형 FRP 복합체

그림 4(a)와 같이 판상형 FRP 복합체의 경우는 주로 수직응력(σ_v)에 의해 상부 2개 FRP 부재 사이의 가운데 부분에 최대주응력 집중현상이 발생하였고, 하중방향에 직각으로 배열되어 있는 하부 1개 FRP 부재에는 최대주응력 집중이 적게 나타나고 있다. 이와 같이 최대주응력이 상부 2개 FRP 부재에 편중되는 경향은 판상형 FRP 부재의 지지효과가 다소 불리한 구조임을 나타내며, 그라우트부분 및 지반부분까지 넓은 범위의 응력분포가 발생되고 있어 그라우트재의 파괴가 일어날 수 있을 것으로 사료된다.

나. Case2 : 등각곡선형 FRP 복합체

(b)는 등각곡선형 FRP 복합체의 경우로서, 주로 수직응력(σ_v)에 의해 상부 2개 FRP 부재의 하중축 방향과 평행한 부분에 최대주응력 집중현상이 발생하였고, 등각곡선형 FRP 부재의 기하학적 형상으로 인해 (a)의 판상형 구조와 달리 하부 1개의 FRP 부재에도 응력의 집중현상이 발생되었다.

표 3. 해석모델의 입력변수 값

unit: kg/cm²

	elastic modulus	Poisson's ratio	unit weight (kg/cm ³)	cohesion	friction angle	residual cohesion	residual friction angle
weathered rock	400	0.33	0.002	1	30°	0.8	20°
grout	2,000	0.25	0.0023	10	36°	5	20°
FRP	250,000	0.25	0.002	50	20°	20	10°
interface properties	interface strength	friction angle	residual friction angle	tensile strength	interface thickness		
	1	15°	1°	0.5	1		

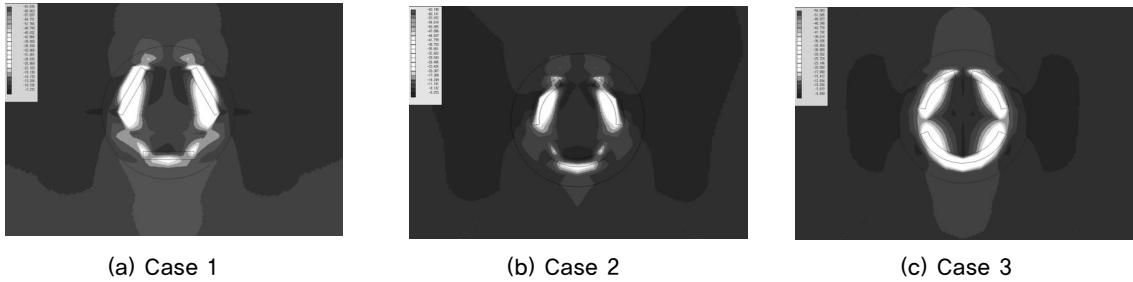


그림 4. 균질한 지반 내에서의 최대주응력 분포(HIM)

그리고 그라우트부분의 응력집중보다는 FRP 부재에 응력집중이 현저하여 보강재로서의 역할이 충분하고 또한 그라우트재의 파괴 가능성이 Case 1의 경우보다 적을 것으로 사료되었다.

이와 같이 등각곡선형 FRP 부재의 기하학적 형상과 원형에 가까운 배열에 의하여, Y-축방향 하중뿐만 아니라 어떠한 하중방향에 대하여도 3개 FRP 부재 모두에 응력의 집중현상이 예상되어 FRP 부재의 지지효과가 큰 것으로 판단된다.

다. Case 3: 특수곡선형 FRP 복합체

Case 2의 경우와 마찬가지로 수직응력(σ_v)에 의해 3개 FRP 부재의 하중축 방향과 평행한 부분에 최대주응력 집중현상이 발생하였고, 곡선형 FRP 부재의 기하학적 형상으로 인해 FRP 부재에 대부분의 응력 집중현상이 발생되었다. 그리고 그라우트부분의 응력집중 현상이 Case 2보다도 적게 분포하여 파괴 가능성이 다소 적음을 알 수 있었다.

3.3.2 불연속면을 포함한 지반(Homogeneous Jointed Model: HJM)에서의 경향 분석

불연속면을 포함하고 상재하중의 반대방향으로 외압(P)이 작용하는 경우, 그림 5에 나타난 바와 같이 공통적으로 모든 Case에 대하여 최대주응력의 방향은 대부분 압축응력(\ominus)이 발생됨을 알 수 있었다. 각각의 Case에 대하여 최대주응력의 분포 경향을 보다 상세하게 기술하면 다음과 같다.

가. Case 1: 판상형 FRP 복합체

그림 5(a)와 같이 판상형 FRP 복합체의 경우는 하중축 방향과 평행한 최대주응력과 외압(P)의 영향으로 모든 FRP 부재에 응력집중현상이 발생하였고, 상부 2개 FRP 부재의 경우는 상하 모서리에 응력이 집중되는 현상을 보이고 있어 판상 FRP 부재의 비틀림 현상을 예상할 수 있었다.

나. Case 2: 등각곡선형 FRP 복합체

(b)는 등각곡선형 FRP 복합체의 경우로서, 응력분포의 경향은 Case 1과 유사하게 모든 FRP 부재에 응력집중현상이 발생하였으나 전체적으로 응력수준이 높게 나타났다. 또한 주로 FRP 부재에 최대주응력이 집중되어 있으므로 Case 1의 경우에 비하여 그라우트부분에 분포된 응력범위가 감소되어 임의의 하중방향에 대해 다소 유리한 기하학적 구조임을 알 수 있었다.

다. Case 3: 특수곡선형 FRP 복합체

Case 3의 경우, 전체적인 응력수준은 Case 1보다는 크고, Case 2보다는 적은 중간정도의 수준을 나타내고 있으며, 응력집중 현상은 외압(P)의 영향으로 하부 FRP 부재에 한정하여 발생되었다.

이와 같이 하부 FRP 부재에만 응력이 집중되는 현상을 유발하게 되므로 임의의 하중방향에 대해서는 다소 불리한 기하학적 구조임을 알 수 있었다.

이상의 균질한 지반조건 및 불연속면과 외압조건 하에서 각각의 Case별로 최대주응력의 분포와 이들의 특징을 요약하면 표 4에 나타난 바와 같다.

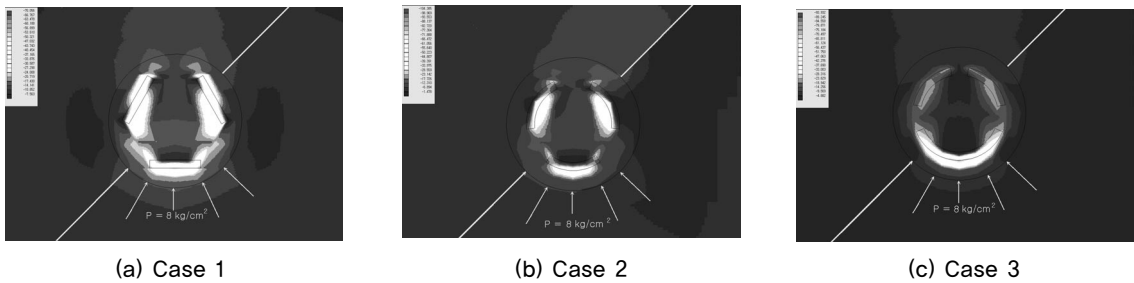


그림 5. 불연속면을 포함한 지반에서의 최대주응력 분포(HJM)

표 4. 각 형상별 수치해석의 결과의 요약

Parameter		응력집중 부재	응력집중 범위	특 징	구조적 안정성
HIM	Case 1	상부 2개 FRP 부재	FRP 및 그라우트	- 비틀림, 분리현상 예상	△
	Case 2	3개 FRP 부재	FRP 및 그라우트	- 임의 하중방향에 유리	○
	Case 3	3개 FRP 부재	주로 FRP 부재	- 임의 하중방향에 유리	○
HJM	Case 1	모든 FRP 부재	FRP 및 그라우트	- 비틀림 현상 예상 - 임의 하중방향에 유리	△
	Case 2	모든 FRP 부재	주로 FRP 부재	- 임의 하중방향에 유리	○
	Case 3	하부 1개 FRP 부재}	주로 FRP 부재	- 임의 하중방향에 불리	△

4. FRP-그라우트 복합체의 굴곡강도특성 분석

$$M = \frac{3pl}{2bd^2} \tag{1}$$

본 장에서는 FRP-그라우트 복합체와 강관 그라우트 복합체의 굴곡강도를 상대 비교하기 위해 KS F 2407 규정에 따라 실내 굴곡강도실험을 수행하였다.

4.1 실험방법 및 시료제작

그림 6은 3점 재하실험의 개요도이며, 본 실험에서는 FRP와 강관을 사용하여 제작된 그라우트 복합체의 길이 방향 중앙에 집중하중을 작용시켜 하중과 변위를 동시 측정하였다. 하중 재하속도는 1 mm/min로 하였으며, 지지간의 거리는 450 mm이다.

실험결과를 그라우트 복합체에 재하되는 최대하중을 하중-변위곡선으로부터 산출하고, 아래 식 1로부터 각 시편의 굴곡강도(M)을 비교· 분석하였다.

여기서 M : 굴곡강도 (kg/cm^2)
 p : 최대하중 (kg)
 l : 지지간 길이 (cm)
 b : 시편의 평균 너비 (cm)
 d : 시편의 평균 두께 (cm)

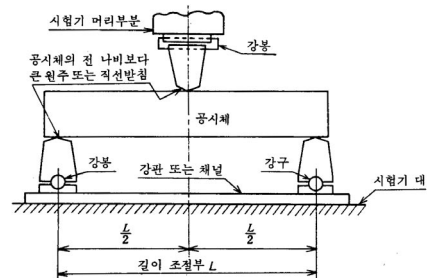
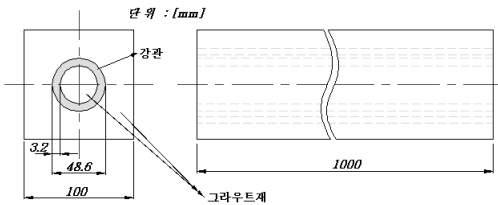


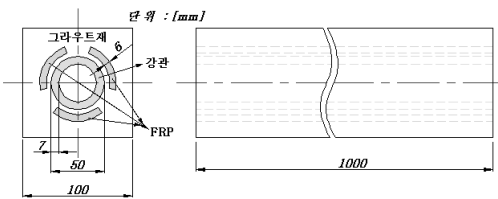
그림 6. 굴곡강도시험의 개요

표 5. 시료 제작을 위한 복합체의 혼합비

	1,000 l per BATCH	
	cement(kg)	water(l)
compound 1	500	841
compound 2	450	857
compound 3	400	873
compound 4	350	889



(a) steel pipe-grout



(b) FRP-grout

그림 7. 시료의 규격

그라우트재의 배합비는 국내의 터널현장에서 널리 사용되고 있는 배합비 중 상부하중에 대하여 지지력이 가장 큰 배합비로 시편을 제작하였다. 표 5는 국내 터널현장에서 사용되고 있는 그라우트재 배합비의 한 예이며, 본 실험에서 선정한 배합비는 1 배합이다.

그라우트재를 사각몰드안에 강관 또는 FRP 보강재를 설치한 후, 그라우트재를 몰드에 채웠으며, 시편은 그림 7(a), (b)에서 보는 바와 같이 150×150×500 mm인 정사각형 단면으로 제작하였다.

그라우트재를 다 채운 후 48시간 경과 후에 몰드에서 분리하여 7일 동안 수중 양생하였다.

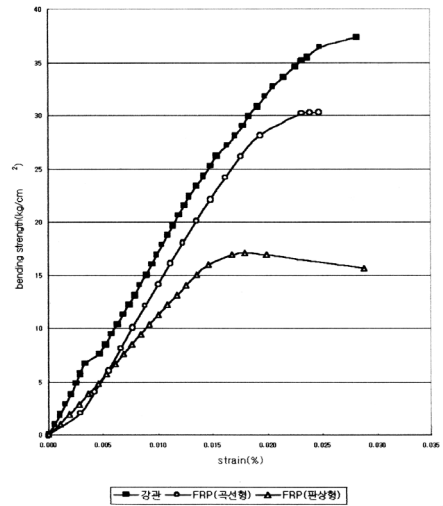


그림 8. 각 그라우트 복합체의 굴곡강도시험 결과

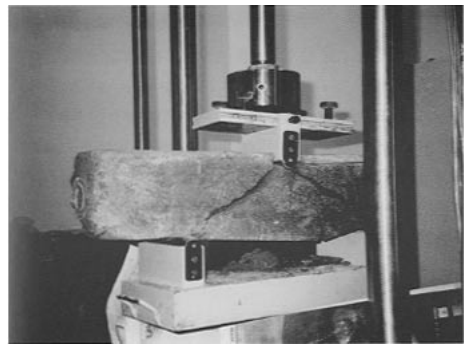


그림 9. FRP-그라우트 복합체의 파괴형상

4.2 실험 결과 및 분석

그림 8은 각 그라우트 복합체에 대한 굴곡강도 실험 결과를 도시한 것이며, FRP-그라우트 복합체의 굴곡강도 특성이 단면형태에 따라 차이가 있음을 알 수 있다. 등각 곡선형 FRP의 굴곡강도는 30.3 kg/cm²으로 강관 굴곡강도의 약 81% 정도를 나타내었으나, 평상형 FRP의 굴곡강도는 17.1 kg/cm²로 약 45.7%를 나타내었다. 이는 수치해석 결과에서 이미 언급한 바와 같이 보강재의 형상

에 따른 지보효과의 영향으로 사료된다.

그리고 시료의 파괴형상을 살펴보면 강관의 경우, 균열이 시료의 하부로부터 발달하고 강관에 도달한 후 접촉면과의 결합력을 상실하여 그라우트재와 강관이 완전하게 분리되는 경향을 보였다. 그러나 등각곡선형 및 판상형 FRP-복합체의 경우에는 그림 9에서 보는 바와 같이 최종 파괴 이후에도 그라우트재와 FRP 부재와의 분리현상이 강관에 비하여 적었다.

특히 등각곡선형 FRP의 경우는 강관 그라우팅 공법과 유사한 굴곡강도를 발휘하고 있다. 따라서 적절한 FRP 재료의 선정과 함께 최적의 단면설계가 이루어진다면 터널굴착 보조공법으로써 강관을 사용하는 그라우팅 공법과 유사한 효과를 기대할 수 있을 것이다.

5. 결론

연약한 충적토층이나 토사를 포함한 풍화암층에서의 터널굴착시 지하수 흐름을 차단하고, 지반의 지지력을 향상시키기 위한 목적으로 FRP 보강형 다단 그라우팅 공법의 적용성 검토를 수행한 결과는 다음과 같다.

강관 다단 그라우팅 공법의 재료적 문제점과 시공상의 문제점들을 비교·분석하고 이에 대한 개선방법으로서 FRP를 이용한 그라우팅 공법을 개발하였으며, 특히 내화학적 및 내부식성, 저중량, FRP 보강재와 그라우트재와의 부착강도 등에서 보다 효율성이 높은 것으로 분석되었다.

FRP 보강재의 개선된 단면형태들에 대하여 보강효과를 수치해석적 방법으로 비교한 결과, 등각곡선형 단면이 판상형 단면에 비하여 다양한 주변 조건들에 대하여 비교적 안정된 기하학적 구조임을 확인할 수 있었다.

강관과 FRP-그라우트 복합체에 대한 굴곡강도실험을 수행한 결과, 등각곡선형 FRP 보강재의 경우는 판상형 FRP에 비해 굴곡강도가 2배정도 증가된 결과를 얻었다. 그리고 강관의 경우와 비교할 때에도 80%이상의 굴곡강도가 발휘되었다.

이러한 결과는 FRP 보강재의 단면형태에 대한 유한요소해석 결과와 일치하는 것으로 적절한 FRP 재료선정과 함께 최적의 단면설계가 이루어진다면 터널굴착 보조공법으로써 강관을 사용하는 그라우팅 공법과 유사한 효과를 기대할 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. 배규진 등 (1998), "직천공 강관 보강형 다단 그라우팅 시공 방법 및 직천공 장치", 특허 제166423호
2. 서울특별시 지하철건설본부 (1997), "서울지하철 5호선 5-18공구 건설공사 한강하저터널 건설현황", 서울특별시 지하철건설본부, 서지97-건기술-1, pp. 16-48
3. 한국건설기술연구원 (1986), "지하굴착보조공법의 설계와 시공에 관한 연구", 86년 연구보고서, pp. 200~236
4. 한국건설기술연구원 (1994), "강관 보강형 다단 그라우팅공법의 개발", 94년 연구보고서, pp. 9~25
5. 한국건설기술연구원 (1998), "국내 터널설계 기술력 향상을 위한 신기술 연구", 건기연 98-009, pp. 23~57
6. 한국건설기술연구원 (1999), "터널 보강재로서 FRP 적용성 검토", 99-09, pp. 4-53
7. 한국지반공학회 터널분과위원회 (1997), "97 터널기술 Work Shop-II (정보화시대의 터널기술의 위상)", 한국지반공학회, pp. 143~240
8. Zienkiewicz, O. C. (1997), "The Finite Element Method 3rd.", McGraw-Hill
9. Cook, R. D. (1981), "Concepts" and Applications of Finite Element Analysis", 2nd Ed., John Wiley & Sons
10. Sireg S.P.A., "DURGLASS FL", pamphlet, Italy