

# 터널 라이닝 구조체로서 곡면 섬유강화 복합재료의 적용성 검토를 위한 수치해석적 연구

이규필<sup>1</sup>, 신휴성<sup>2\*</sup>

## A numerical study on feasibility of the circled fiber reinforced polymer (FRP) panel for a tunnel lining structure

Gyu-Phil Lee, Hyu-Soung Shin

**Abstract** Utilization of the fiber reinforced polymer (FRP) material has been enlarged as a substitution material to the general construction materials having certain long-term problems such as corrosion, etc. However, it could be difficult to apply the FRP material, which has a linear shape generally, to an arch-shaped tunnel structure. Therefore, an attempt has been made in this study to develop a device to form a designed cross section of FRP material by pulling out with a curvature. A sample of the circled FRP product was successfully produced and then the sample has been tested to identify its physical characteristics. Then, intensive feasibility studies on the circled FRP panel to be used for a tunnel lining structure have been carried out by numerical analyses. As a result, it appears that the new circled FRP-concrete composite panel has a high capability to be used for a tunnel lining material without any structural problem.

**Keywords:** Glass fiber, fiber reinforced polymer (FRP), circled panel, composit member

**요 지** 장기 부식 등 일반적인 건설재료의 문제점을 보완할 수 있는 대체재료로서, 섬유강화 복합재료의 활용이 증대되고 있다. 하지만 일반적으로 선형의 섬유강화 복합재료를 아치형인 터널구조물의 부재로서 활용하는 데는 많은 문제점이 대두된다. 따라서, 본 연구에서는 섬유강화 복합부재를 일정곡률로 인발성형 할 수 있는 신개념의 곡면 FRP 부재 성형장비를 개발하고 시제품을 생산하였으며, 시제품에 대한 물리적 특성 시험을 수행하였다. 이어, 곡면 FRP 시제품과 합체되어 제작된 콘크리트 복합부재에 대한 수치해석 검토 및 분석을 통하여 시제품의 터널 구조체로서의 적용성을 평가하였다. 수치해석적 적용성 검토 결과, 곡면 FRP 부재를 터널 구조물로 적용함에 있어서 터널 안정성을 충분히 확보할 수 있는 것으로 파악되었다.

**주요어:** 유리섬유, 섬유강화 복합재료, 곡면부재, 합성부재

### 1. 서 론

강재와 콘크리트는 구조물 시공에 가장 일반적이고 보편적으로 활용되고 있으나, 최근 구조물의 대형화, 장대하 추세와 함께 이들 전통적인 재료가 가지고 있는 부식 및 중량의 문제를 보완할 수 있는 대체 건설재료에 대한 요구가 증가하고 있다.

항공우주분야의 첨단소재로 개발된 섬유강화 복합재료(Fiber Reinforced Polymer; 이하 FRP)는 고분자 수지를 지지(matrix)로 사용하고, 이것에 유리섬유(glass fiber) 등을 섬유형태로 보강하여 제작된 복합재료로서,

부식에 대한 뛰어난 저항력과 자중 대비 높은 강도 등과 같은 장점으로 강재를 대체할 재료로 최근 각광받고 있다(Hollaway, 2010).

FRP는 1980년대 이후 건설분야의 보수·보강 시장을 중심으로 도입되기 시작했다. 철근 또는 H 형강 등과 같은 강재에 비해 초기 재료비가 상대적으로 고가인 FRP는 직선형 부재를 인발성형법(pultrusion method)을 통하여 대량·연속생산을 할 수 있으며, 최근에는 철근 및 긴장재의 대체재로나 교량 바닥판 구조부재로 사용하는 등 신설 구조물에서의 활용도가 증가하고 있다.

그러나 터널구조물에 FRP 부재의 활용을 위해서는 아치형의 터널 내공 단면형상에 따라 일정한 곡률반경을 갖는 곡면부재가 요구되나, 현재까지 FRP 곡면부재

<sup>1</sup>정회원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 수석연구원

<sup>2</sup>정회원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 연구위원

\*교신저자: 신휴성 (E-mail: hyushin@kict.re.kr)

는 수작업(hand-lay-up) 또는 필라멘트 와인딩(filament winding) 작업에 의해서만 생산이 가능하였으며, 대량·연속생산에는 한계가 있었다. 이러한 재래식 방식으로 생산된 곡면 FRP 부재는 직선형 부재 대비 물리적 특성도 매우 낮기 때문에, 터널구조물의 지보재료로 활용하기에는 적합하지 않다. 따라서 한국건설기술연구원에서는 FRP 부재를 일정곡률을 유지하며 인발로 뽑아낼 수 있는 신개념의 곡면 FRP 부재 인발성형법을 제안하고, 성형장비를 개발, 시제품을 생산하였다. 따라서 본 논문에서는 터널 지보구조물로서 곡면 FRP 부재 시제품의 활용성을 분석하기 위하여, 시제품의 물리적 특성분석을 위한 인장, 압축, 전단실험을 실시하였으며, 실험결과를 토대로 수치해석적 과정을 거쳐 터널 지보구조물로서 곡면 FRP 부재의 활용성에 대해 고찰하였다.

## 2. 곡면 FRP 부재 시제품의 제작

### 2.1 FRP 개요 및 관련 연구동향

FRP는 유리섬유·탄소섬유·케블라 등의 방향족 나일론 섬유와 불포화 폴리에스터·에폭시수지 등의 열경화성 수지를 결합한 물질로서, 핸드 레이업법, 스프레이 레이어(spray lay-up)법, 레진 인젝션(resin injection)법, 냉간가압(cold press)법, 압축 성형법, 필라멘트 와인딩법, 인발성형법 등 다양한 방식으로 생산된다. 이 가운데 인발성형법은 성형 속도가 빠를 뿐만 아니라 수지의 정확한 함량조절, 치수 정밀도가 양호할 뿐만 아니라 생산 제품의 물리적 특성이 우수하고 대량·연속 생산이 가능하여 건설부재 생산에 가장 일반적으로 활용되는 성

형방법이다. 생산 공정은 그림 1에서 보이는 바와 같이 연속섬유(유리섬유)를 수지에 함침 후 단면이 일정한 형상의 가열된 몰드 통과 및 경화과정을 연속적으로 수행하여 성형한다.

인발성형법은 일반적으로 직선형태의 제품만 제작 가능한 방식이었으나 최근 B-stage 상태(경화전 상태)로 생산된 제품을 곡면으로 가공하기 위한 연구도 일부 시도되고 있다. 그러나 일부의 이러한 시도는 그림 2에서와 같이 12 mm × 12 mm(가로×세로) 내외의 소형제품 생산에 국한되어 왔다(한국건설기술연구원, 2010).

### 2.2 곡면 FRP 부재 시제품 제작

본 연구에서 제작된 시제품의 제원 및 물리적 특성은 다음과 같다.

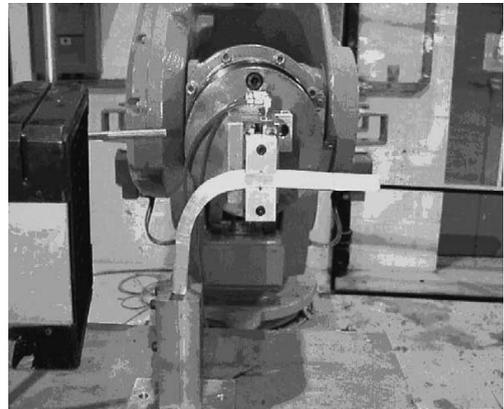


그림 2. 소형 곡면 FRP 인발성형 전경(미국)

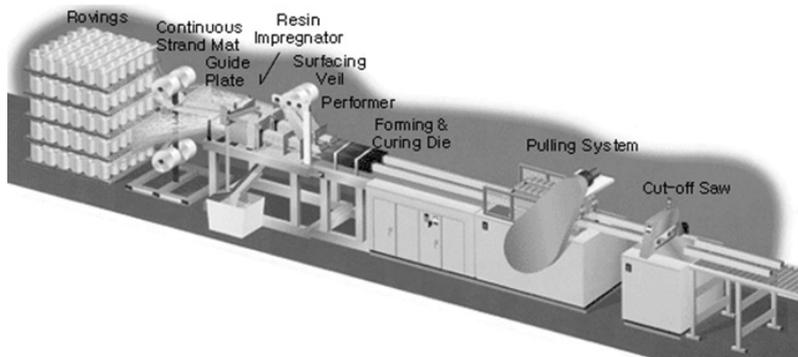


그림 1. FRP 인발성형 공정

www.kci.go.kr

2.2.1 시제품 제원 및 생산

곡면 FRP 부재 시제품의 제원은 그림 3에서 보이는 바와 같이 휨저항이 우수한 I 형 단면으로 결정하였다. 곡면 FRP 부재의 단면높이는 일반적으로 시공되는 콘크리트 라이닝의 두께가 300~400 mm 이고, 콘크리트 현장타설 등 시공성을 고려하여 150 mm 결정하였으며, 폭은 생산설비의 규모 등을 고려하여 약 375 mm로 결정하였다. 또한 부재의 각 부분별 두께는 시공 중 작용한 현장콘크리트 타설 압력 및 공용 중 작용하는 이완하중, 수압 등을 고려하여 결정하였으며, 연속시공이 가능하도록 접합부의 두께를 조정하였다(그림 3 참조).

현재 국내에는 곡면 FRP 전용 생산설비가 구축되어 있지 않다. 따라서 곡면 FRP 부재 생산을 위한 기존의 직선 FRP 부재 생산설비에 곡면 성형몰드 및 인발지그를 별도로 설치하여 제작하였다(그림 4~그림 5 참조).

곡면 성형몰드를 통하여 생산된 시제품이 일정 곡률을 갖고 생산되었으나, 인발지그가 장착된 프레임이 수평이동만 가능한 기존 직선 FRP 부재 생산설비의 한계로 인하여, 생산과정 중 상부 플렌지 부분과 복부판부분이 쪼개지는 현상이 발생하였다(그림 6 참조). 이러한 문제점은 생산속도, 1회 인발길이 조정 등을 통하여 해결하였으며, 결과적으로 그림 7에서와 같이 곡률반경 (R) 6,500 mm의 시제품을 제작할 수 있었다. 그러나 다양한 곡률반경을 갖는 곡면 FRP 부재 생산을 위해서

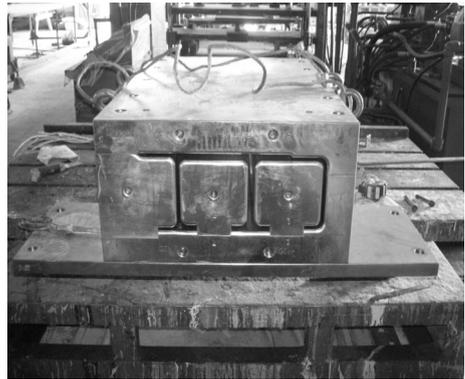


그림 4. 곡면 성형몰드



그림 5. 시제품 제작용 인발 지그

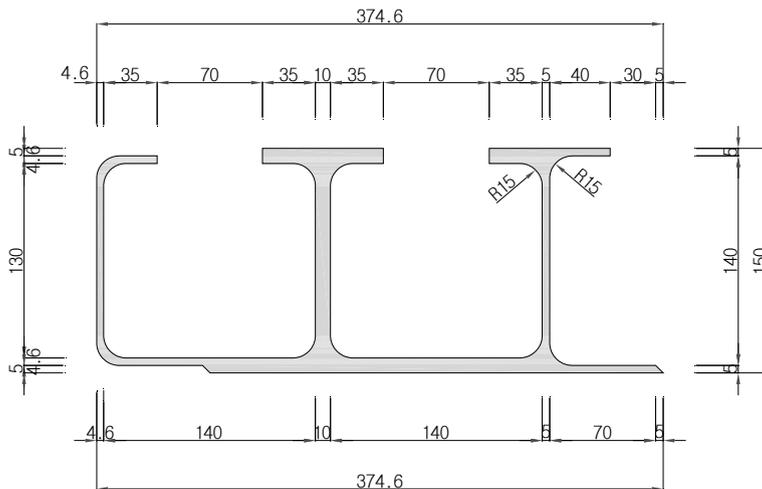


그림 3. 제작된 곡면 FRP 부재 제원

www.kci.go.kr

는 곡률별 인발속도와 반경을 조절할 수 있는 전용 곡률 부재 인발설비 구축이 요구된다.

### 2.2.2 시제품의 물리적 특성

FRP 재료는 생산에 사용된 섬유, 수지 등에 따라 물리적 특성이 변화하므로 각각에 대한 시험 평가가 요구되며, 또한 FRP 재료는 강재와 같은 등방성 균질재료가 아닌 이방성 비 균질 재료이므로 부재의 각 임의 부위별 평가가 요구된다. FRP 재료에 대한 시험방법은 항공, 우주분야를 중심으로 시험방법이 정립되어 있다. 기본적으로 인장, 압축, 전단, 휨에 대한 시험으로 구분되며, 다음과 물리적 특성을 평가하여야 한다(표 1 참조).

#### (1) FRP 부재의 종방향(섬유방향) 재료특성

- ① 종방향 인장강도 및 인장탄성계수
- ② 종방향 압축강도 및 압축탄성계수
- ③ 종방향 포아송 비
- ④ 전단강도 및 전단탄성계수
- ⑤ 휨강도

#### (2) FRP 부재의 횡방향(섬유와 직각방향) 재료특성

- ① 횡방향 인장강도 및 인장탄성계수
- ② 횡방향 압축강도 및 압축탄성계수

#### (3) 기타 FRP 부재의 열적특성(열팽창계수, 열전도율, 내열성 등) 및 내약품성, 내후성 등

본 연구에서는 곡면 FRP 부재의 상부플랜지, 하부플랜지 및 복부판 부분에서 시편을 채취(그림 8 참조), 섬유방향 및 섬유직각방향 각각의 인장강도, 인장탄성율,

압축강도, 압축탄성율 및 전단강도 실험을 수행하였으며 실험결과는 표 2와 같다.

시험방법은 인장 및 전단시험은 KS 기준을 준용하였으며, 압축 및 휨시험은 ISO 기준을 준용하였다.

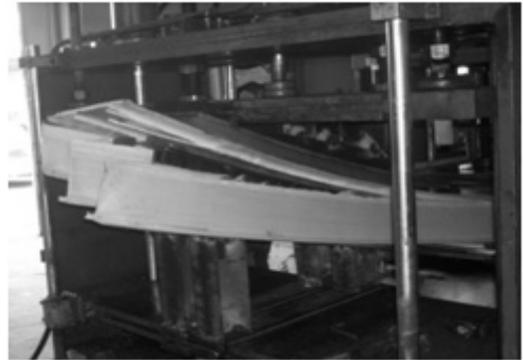


그림 6. 인발성형 중 시제품 파손 전경



그림 7. 1차 곡면 FRP 시제품

표 1. FRP 부재 물리적 특성 시험에 관한 주요 기준

구 분	시 험 법			
	인장시험	전단시험	압축시험	휨시험
ISO(국제표준)	527-5	14129	14126	14125
ASTM(미국)	D3039	D5379 (v-notch) D3518	D3410	D790
BS(영국)	EN 2782	EN 14129	EN ISO 14126	EN 2562
JIS(일본)	K7054	K7079	K7018	K7017
KS(한국)	M 3006 : 2003	M 3386	M 3383*	M 3382*

(주) \* : 2009년 12월 28일 폐지

표 2. 곡면 FRP 부재 시제품 물리적 특성

시험항목	단위	시료채취부위	결과치
인장강도(섬유방향)	MPa	상부플랜지	419
인장강도(섬유방향)	MPa	하부플랜지	426
인장강도(섬유방향)	MPa	복부판	413
인장강도(섬유방향)	MPa	옆1	614
인장강도(섬유방향)	MPa	옆2	539
인장탄성률(섬유방향)	GPa	상부플랜지	33.6
인장탄성률(섬유방향)	GPa	하부플랜지	37
인장탄성률(섬유방향)	GPa	복부판	30
인장탄성률(섬유방향)	GPa	옆1	31.4
인장탄성률(섬유방향)	GPa	옆2	27.6
압축강도(섬유방향)	MPa	상부플랜지	561
압축강도(섬유방향)	MPa	하부플랜지	674
압축강도(섬유방향)	MPa	복부판	562
압축강도(섬유직각방향)	MPa	상부플랜지	140
압축강도(섬유직각방향)	MPa	복부판	153
압축탄성율(섬유방향)	GPa	상부플랜지	27.7
압축탄성율(섬유방향)	GPa	하부플랜지	33.3
압축탄성율(섬유방향)	GPa	복부판	28.8
압축탄성율(섬유직각방향)	GPa	상부플랜지	8.24
압축탄성율(섬유직각방향)	GPa	복부판	9.79
면내전단강도	MPa	상부플랜지	226
면내전단강도	MPa	하부플랜지	254
면내전단강도	MPa	복부판	256
면내전단강도	MPa	옆1	339
면내전단강도	MPa	옆2	298



그림 8. 곡면 FRP 시제품 물리적 특성 평가를 위한 시편 채취

### 3. 곡면 FRP 부재의 터널구조물 활용성 평가를 위한 수치해석

본 연구에서는 곡면 FRP 부재의 콘크리트 라이닝 활용성 평가를 위한 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 위한 터널 단면형상 및 크기는 곡면 FRP 시제품의 곡률 반경이 6,500 mm이므로, 직경 13,000 mm의 원형터널 단면을 가정하였다.

수치해석시 곡면 FRP 시제품은 각각의 부재 부위마다 탄성계수가 다르므로 등가탄성계수 산정하였으며, 콘크리트와 일체화된 조건을 가정하였다. 터널구조물에 발생하는 축력, 휨모멘트 및 전단력에 분담율을 곱하

여 곡면 FRP와 콘크리트에 작용하는 축력, 휨모멘트 및 전단력을 계산하였다.

### 3.1 수치해석 기본 입력자료

#### (1) 지반 및 콘크리트 물성 선정

수치해석을 위한 지반조건은 원형터널 가정단면과 규모가 유사한 ○○댐 보조여수로 설계시 적용된 자료를 활용하였다. 곡면 FRP 부재는 시공시 철근과 같이 인장 부재의 역할을 수행하므로, 일반적으로 콘크리트 라이

닝 시공시 철근배근이 고려되는 조건인 풍화암 조건에 대한 물성값을 적용하였다(표 3 참조). 또한 콘크리트 라이닝의 설계강도( $f_{dk}$ )는 24 MPa, 단위중량은  $23.5 \text{ kN/m}^3$  탄성계수는 26,986 MPa( $E_c = 8,500 \sqrt{f_{ck}}$ ) 이다.

#### (2) 하중조건

콘크리트 라이닝에 작용하는 하중은 이완하중, 수압, 상재하중, 편압, 크리프압력(creep pressure), 온도하중 등이 있으며 지반조건, 터널단면의 형상과 크기, 토피,

표 3. 수치해석을 위한 지반 입력자료(풍화암 조건)

변형계수(MPa)	단위중량(kN/m <sup>3</sup> )	점착력(kPa)	내부마찰각(°)	포아송비( $\nu$ )
1,800	24.0	300	36.0	0.26

표 4. 하중조건별 하중량 산정방법

구분	산정방법 및 결과	비고
이완하중고( $H_p$ )	$H_p = 0.2 \times (B + H_t) = 0.2 \times (13.0 + 13.0) = 5.2 \text{ m}$	B : 터널 폭(m) Ht : 터널 높이(m)
잔류수압( $P_w$ )	$P_w = H_w \times \gamma_w = 4.33 \times 10 = 43.3 \text{ kN/m}^2$ 잔류수두 $H_w = \frac{1}{3} \times H_t = 4.33 \text{ m}$	Hw : 전수두
내수압( $P_{wi}$ )	$P_{wi} = 0.75 \times H_t \times \gamma_w = 0.75 \times 13.0 \times 10 = 97.500 \text{ kN/m}^2$	Ht : 터널 내부 수위
온도하중	건조수축 하중 : $\Delta T_x = -15^\circ\text{C}$	

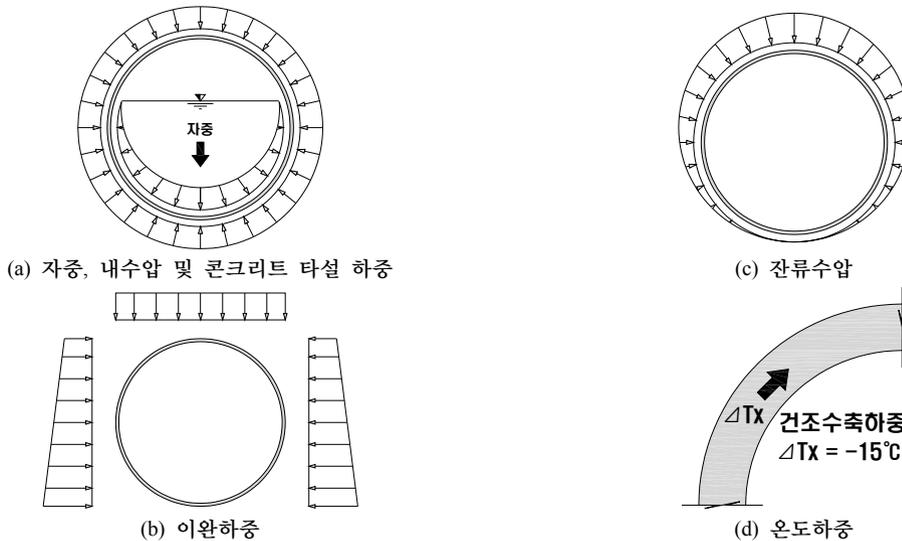


그림 9. 적용하중 모식도 및 하중조합

www.kci.go.kr

시공방법, 지보재 및 콘크리트 라이닝의 시공시기, 방수 및 배수 형식 등을 고려하여 하중조합을 결정하여야 한다.

본 연구에서는 그림 9에서 보이는 바와 같이 자중, 이완하중, 잔류수압 및 온도하중을 고려하였다. 이완하중( $H_p$ )는 Terzaghi 분류표(Bieniawski, 1989)를 참조하여, ○○댐 보조여수로 설계시 활용된 자료와 동일한 조건으로 산정하였으며, 곡면 FRP 설치 후 현장 콘크리트 타설시 작용하는 하중 및 수로터널 가정조건에 맞게 수로터널 내 수위 0.75D를 적용하여 자중과 함께 상시하중으로 내수압을 고려하였다. 본 연구에서 적용된 하중 조건별 하중량 산정방법을 정리하면 표 4와 같다.

### 3.2 수치해석을 위한 등가물성치 산정

본 연구에서는 곡면 FRP 시제품은 상부플랜지, 하부플랜지, 복부판 등 각각의 부재 부위마다 탄성계수가 다르므로, 곡면 FRP 합성부재 시제품의 합성 탄성계수를 대표하는 등가탄성계수를 부재 부위 각각의 탄성계수와 단면적으로 고려하여 산정하고 수치해석에 반영하였다.

### 3.2.1 곡면 FRP 시제품의 등가탄성계수 산정

곡면 FRP 시제품의 등가탄성계수( $E_f$ )는 곡면 FRP 시제품의 각 부위별 실험결과 중 인장탄성율(섬유방향)에 대한 값을 토대로 다음 식 (1)과 같이 산정하였다(표 5 참조).

$$E_f = \left[ \frac{(E_1 \times A_1) + (E_2 \times A_2) + (E_3 \times A_3)}{(A_1 + A_2 + A_3)} \right]$$

$$= \left[ \frac{(33.6 \times 8.0) + (37.0 \times 15.0) + (30.0 \times 14.93)}{(8.0 + 14.93 + 15.0)} \right]$$

$$= 33,527,551 \text{ kN/m}^2 \quad (1)$$

### 3.2.2 합성부재 등가물성치 산정

본 연구에서는 곡물 FRP 부재 자체의 등가물성 산정에 이어 2단계로 콘크리트와 FRP 합성부재의 등가물성을 산정하여 수치해석에 반영하였다. 그림 10에서 보이는 바와 같은 곡면 FRP와 콘크리트 합성부재의 등가입력물성치를 산정하기 위해 콘크리트 및 곡면 FRP 부재에 대한 탄성계수, 단면적, 단면 2차모멘트, 중립축거리를 각각 산정한 후 합성부재에 대한 등가물성치를 산

표 5. 등가 탄성계수 산정을 위한 곡면 FRP 단면 및 특성

해 석 단 면	구 분	인장탄성율(섬유방향) (GPa)	단면적 (cm <sup>2</sup> )
	① 상부플랜지	33.6 ( $E_1$ )	8.00 ( $A_1$ )
	② 하부플랜지	37.0 ( $E_2$ )	15.0 ( $A_2$ )
	③ 복 부 판	30.0 ( $E_3$ )	14.93 ( $A_3$ )
	총 단면적( $A_{f0}$ )	-	37.93

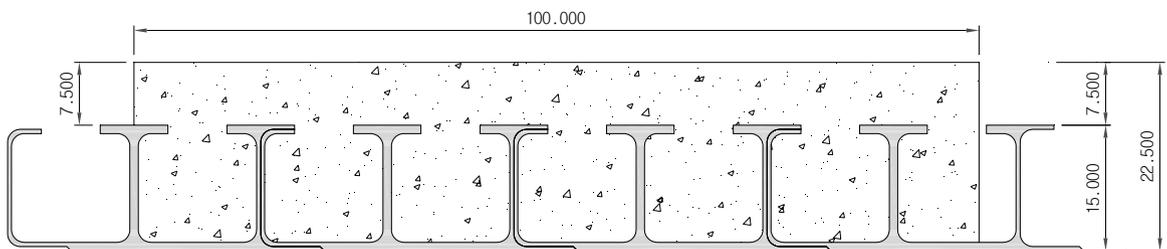


그림 10. 합성부재 단면(unit: cm)

표 6. 곡면 FRP 합성부재의 특성치

구 분	곡면 FRP 부재		콘크리트 부재	
단위중량	$\gamma_f$	19 kN/m <sup>3</sup>	$\gamma_c$	23.5 kN/m <sup>3(2)</sup>
탄성계수	$E_f$	33,528 MPa <sup>(1)</sup>	$E_c$	26,985.82 MPa <sup>(3)</sup>
단 면 적	$A_f$	0.0247 m <sup>2</sup>	$A_c$	0.2003 m <sup>2</sup>
복부판 단면적	$A_{fw}$	0.00955 m <sup>2</sup>	-	-
중립축거리	$y_f$	0.0614 m	$y_c$	0.1188 m
단면 2차모멘트	$I_{xx_f}$	0.000086472 m <sup>4</sup>	$I_{xx_c}$	0.000790165 m <sup>4</sup>
단면 2차모멘트	$I_{yy_f}$	0.002009417 m <sup>4</sup>	$I_{yy_c}$	0.016738419 m <sup>4</sup>

(주): (1) 등가탄성계수, (2) 무근콘크리트, (3)  $8500 \times \sqrt[3]{f_{cu}}$ ,  $f_{cu} = f_{ck} + 8(f_{ck} = 24 \text{ MPa})$

정하였다.

곡면 FRP 및 콘크리트 합성부재의 단위중량, 탄성계수, 단면적, 단면2차모멘트, 중립축거리 등 특성치를 정리하면 다음 표 6과 같다.

합성부재의 등가탄성계수 산정시 축력은 콘크리트와 곡면 FRP 부재가 각각 분담하므로 콘크리트와 곡면 FRP 부재의 강성을 모두 고려하였으며, 등가 단면 2차 모멘트 산정시 모멘트는 곡면 FRP 부재가 모두 부담하는 것으로 가정하여 콘크리트의 강성은 고려하지 않았다. 따라서 합성부재의 등가 탄성계수 및 등가 단면2차 모멘트 산정식은 식 (2)~(4)와 같다.

$$E_{eq} = \left[ \frac{(E_f \times A_f) + (E_c \times A_c)}{(A_f + A_c)} \right]$$

$$= \left[ \frac{(33,528 \times 0.0247 + 26,985.82 \times 0.2003)}{(0.0247 + 0.2003)} \right]$$

$$= 27,704 \text{ MPa} \quad (2)$$

$$I_{xx_{eq}} = \left[ \frac{(E_f \times I_{xx_f}) + (E_c \times I_{xx_c})}{E_{eq}} \right]$$

$$= \left[ \frac{(33,528 \times 0.000086472 + 0.0 \times 0.0)}{27,125} \right]$$

$$= 1.0688E-04 \text{ m}^4 \quad (3)$$

$$I_{yy_{eq}} = \left[ \frac{(E_f \times I_{yy_f}) + (E_c \times I_{yy_c})}{E_{eq}} \right]$$

$$= \left[ \frac{(33,528 \times 0.002009417 + 0.0 \times 0.0)}{27,125} \right]$$

$$= 2.48E-3 \text{ m}^4 \quad (4)$$

합성부재에 대하여 모델링 수행 후 구조해석을 통하여 작용하중에 대한 부재력을 산정하고, FRP 합성부재의 경우 FRP재료의 취성파괴 특성상 허용응력설계법으로 설계하는 것이 일반적이므로 본 연구에서는 허용응력설계법을 통해 합성부재 중립축 및 탄성계수비 등을 산정하였다. 이를 정리하면 다음과 같다(한국건설기술연구원, 2006).

- 탄성계수비  $n = \frac{E_f}{E_c} = \frac{33528}{26985.82} = 1.2424$
- 중립축거리

$$\bar{y} = \left[ \frac{(A_c \times y_c) + (n \times A_f \times y_f)}{A_c + (n \times A_f)} \right]$$

$$= \left[ \frac{(0.2003 \times 0.1188) + (1.2424 \times 0.0247 \times 0.0614)}{(0.2003 + 1.2424 \times 0.0247)} \right]$$

$$= 0.112 \text{ m}$$

- 곡면 FRP 부재 중립축거리( $\bar{y}_f$ ) = 0.1112 m
- 콘크리트 중립축거리( $\bar{y}_c$ ) = 0.225 - 0.1112 = 0.1138 m

### 3.3 결과분석방법

본 연구에서는 곡면 FRP와 콘크리트 복합부재를 이용한 터널구조물의 수치해석 및 결과분석을 위하여, 콘크리트 및 곡면 FRP 부재에 대한 각각의 분담율을 산정

하였다. 해석결과, 터널구조물에 발생하는 축력, 휨모멘트 및 전단력에 분담율을 곱하여 곡면 FRP와 콘크리트에 작용하는 축력, 휨모멘트 및 전단력을 계산하였으며, 이렇게 산정된 결과를 허용응력설계법으로 검토하였다. 축력은 콘크리트와 곡면 FRP부재가 각각 분담하고, 휨모멘트와 전단력은 곡면 FRP 부재가 모두 부담하는 것으로 가정하였으며, 분담율 계산법 및 결과를 정리하면 다음과 같다(표 7 참조).

(1) 축력 분담율( $\alpha$ )

- 곡면 FRP 부재의 축력 분담율( $\alpha_f$ )

$$\alpha_f = \frac{(E_f \times A_f)}{(E_f \times A_f + E_c \times A_c)} = \frac{(28249 \times 0.0247)}{(28249 \times 0.0247 + 26985.82 \times 0.2003)} = 0.115 \quad (5)$$

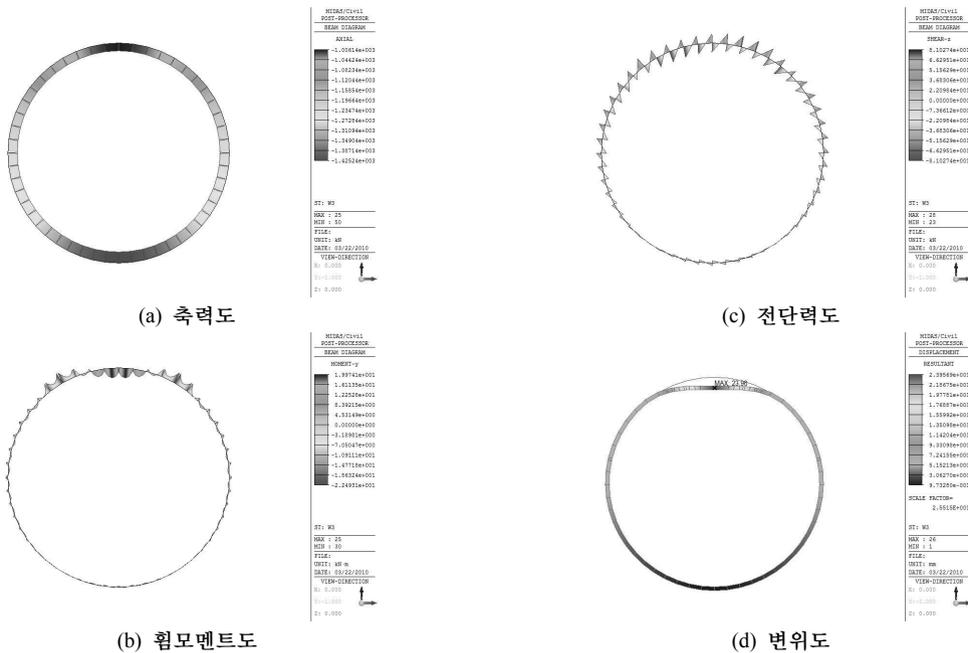


그림 11. 곡면 FRP와 콘크리트 합성부재의 수치해석 결과

표 7. 곡면 FRP 및 콘크리트 합성부재의 각 재료별 분담율

구 분	축력( $\alpha$ )	휨모멘트( $\beta$ )	전단력( $\delta$ )
콘크리트	0.885	0.0	0.0
곡면 FRP	0.115	1.0	1.0

표 8. 곡면 FRP 및 콘크리트 재료의 허용응력

구 분	곡면 FRP	콘크리트
허용 휨압축응력	112.2 MPa	$1.15 \times 0.4 \times f_{ck} = 11.04 \text{ MPa}$
허용 휨인장응력	82.6 MPa	$1.15 \times 0.13 \times \sqrt{f_{ck}} = 0.732 \text{ MPa}$
허용 전단응력	45.2 MPa	$1.15 \times 0.08 \times \sqrt{f_{ck}} = 0.450 \text{ MPa}$

- 콘크리트의 축력 분담율( $\alpha_c$ )

$$\alpha_c = \frac{(E_c \times A_c)}{(E_f \times A_f + E_c \times A_c)}$$

$$= \frac{(26,985.82 \times 0.2003)}{(28,249 \times 0.0247 + 26,985.82 \times 0.2003)}$$

$$= 0.885 \quad (6)$$

**(2) 휨모멘트 분담율( $\beta$ )**

- 곡면 FRP 부재의 휨모멘트 분담율 ( $\beta_f$ ) = 1.0
- 콘크리트의 휨모멘트 분담율 ( $\beta_c$ ) = 0.0

**(3) 전단력 분담율( $\delta$ )**

- 곡면 FRP 부재의 전단력 분담율 ( $\delta_f$ ) = 1.0
- 콘크리트의 전단력 분담율 ( $\delta_c$ ) = 0.0

또한 허용응력설계법 검토를 위한 콘크리트 재료의 허용응력은 콘크리트구조설계기준(2007)에 명시되어 있는 ‘온도변화나 건조수축을 다른 주요하중과 함께 고려하는 경우 허용응력을 1.15배 높일 수 있다’라는 규정에 의거하여 산정하였다(표 8 참조).

국외에서는 FRP 부재의 허용응력계산을 위한 안전계수로 3.0 ~ 5.0을 토목구조물에 적용하고 있다(한국건설기술연구원, 부록 A, pp. 17 ~ 18, 2006). 본 연구에서는 곡면 FRP 제작경험과 현장적용 사례가 전무한 실정을 감안하여, 안전계수 5.0을 적용하여 곡면 FRP 부재의 허용응력을 계산하였다.

곡면 FRP 부재 시제품에 대한 인장강도, 압축강도 및 전단강도 실험결과(표 2 참조) 가운데 최소치를 기준으로 안전계수 5.0을 적용한 곡면 FRP 부재의 허용응력 및 콘크리트 재료의 허용응력을 정리하면 표 8과 같다.

**4. 수치해석 결과 및 분석**

**4.1 수치해석 결과**

곡면 FRP와 콘크리트를 이용한 합성부재의 터널구조물 활용성 분석을 위한 수치해석결과, 최대 축력, 최대 휨모멘트 및 최대 전단력은 각각 1,061.47 kN, 22.49 kN·m, 81.03 kN으로 나타났다. 또한 전단부에 발생하는 곡면 FRP 부재의 최대 처짐은 약 24mm인 것으로 나타났으며(표 9 참조), 수치해석결과, 터널구조물에 발

**표 9. 수치해석결과**

축력(kN)	모멘트(kN·m)	전단력(kN)	최대 변위(mm)
1,425.24	22.49	81.03	23.96

**표 10. 콘크리트 허용응력 검토**

구 분	발생 부재력			검토결과		
	축력(kN)	휨모멘트(kN·m)	전단력(kN)	응력(MPa)	허용응력(MPa)	검토
휨압축응력	1,425.24	22.49	17.84	6.3	11.040	O.K

$$\ast \sigma_c = \frac{\alpha_c \cdot P}{A_c} + \frac{\beta_c \cdot M}{I_c} y_c$$

**표 11. 곡면 FRP 허용응력 검토**

구 분	발생 부재력			검토결과		
	축력(kN)	휨모멘트(kN·m)	전단력(kN)	응력(MPa)	허용응력(MPa)	검토
휨인장응력	1,425.24	22.49	-	35.817	42.6	O.K
휨압축응력	1,425.24	22.49	-	22.546	112.2	O.K
전단응력	-	-	81.03	8.485	45.2	O.K

$$\ast \text{휨압축} \cdot \text{휨인장 응력 검토 } \sigma_f = \frac{\alpha_f \cdot P}{A_f} \pm \frac{\beta_f \cdot M}{I_f} y_f, \text{ 전단응력 검토 } v_f = \frac{\delta_f \cdot V}{A_{fw}}$$

생하는 축력, 휨모멘트, 전단력 및 변위도는 그림 11과 같다.

#### 4.2 결과분석

본 연구에서는 곡면 FRP와 콘크리트 복합부재를 허용응력설계법으로 검토하기 위하여 축력, 휨모멘트 및 전단력에 대하여 콘크리트와 곡면 FRP부재가 각각 부담하는 부담율을 산정하였다. 수치해석결과 터널구조물에 작용하는 부재력 및 가정된 부담률에 의한 곡면 FRP 및 콘크리트 부재에 대한 허용응력설계법 검토결과를 정리하면 다음 표 10~11과 같다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 곡면 FRP 부재 시제품에 대한 인장, 압축 및 전단실험결과를 토대로 수치해석기법을 이용하여 터널구조물 활용성분석을 위한 역학적 거동분석을 수행하였으며, 상기 내용을 정리하면 다음과 같다.

1. 곡면 FRP 및 콘크리트 복합부재에 대한 수치해석결과 콘크리트에 작용하는 응력은 최대 6.3 MPa, 곡면 FRP에 작용하는 최대 휨압축응력 35.817 MPa, 최대 휨인장응력 22.546 MPa, 최대 전단응력 8.485 MPa로 모두 허용응력 이내로 나타났다. 따라서 곡면 FRP 부재의 터널구조물 적용시 구조적 안정성 확보가 가능한 것으로 판단된다.
2. 수치해석 검토 결과, 터널구조물 천단부에 최대 약 24 mm의 수직변위가 발생할 수도 있는 것으로 나타났다. 곡면 FRP를 이용한 터널구조물 시공시 이러한 변위 발생수준을 저감시킬 필요가 있을 시에는 콘크리트 타설 이전 단계에 록볼트 등을 이용하여 곡면 FRP 부재와 원지반을 일체화 시키는 등의 조치를 통

해 제어가 가능할 것으로 판단된다.

3. 본 연구에서 수행한 FRP-콘크리트 합성 터널 라이닝 구조물의 수치해석적 적용성 검토를 기반으로, 향후에는 곡면 FRP 생산을 위한 전용설비 구축, 생산기술력 증진을 통하여 합성부재의 품질 및 성능을 지속적으로 향상시키고, FRP 복합부재에 대한 허용응력 설계법 적용을 위한 안전계수 정립 등과 같은 추가 연구를 수행할 계획이다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2009년도 건설기술혁신사업(과제번호09기술혁신C01, 과제명 : 프리캐스트 복합소재 곡면패널 개발 및 수로터널 활용기술 개발)에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

#### 참고문헌

1. 국토해양부(2007), 콘크리트구조설계기준
2. 한국건설기술연구원(2006), 장수명 합리화 바닥판 개발-무강재 바닥판, 연구보고서
3. 한국건설기술연구원(2010), 프리캐스트 복합소재 곡면패널 개발 및 수로터널 활용기술 개발, 연구보고서
4. Bieniawski, Z.T. (1989), Engineering Rock Mass Classifications, pp. 29-49.
5. Hollaway, L.C. (2010), A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties, Construction and Building Materials, Vol. 24, pp 2419-2445.

접수일(2010.10.20), 수정일(2010.11.2), 게재확정일(2010.11.15)