

# 탄소섬유그리드 보강 콘크리트 부재의 거동에 대한 수치해석적 연구

김학군\* · 정재호\*\* · 정상균\*\* · 윤순종\*\*\*

## Numerical Analysis on the Behavior of Carbon Fiber Grid Reinforced Concrete Members

Kim, Hak-Goon\* · Jung, Jae-Ho\*\* · Jeong, Sang-Kyo\*\* · Yoon, Soon-Jong\*\*\*

**Key Words:** carbon fiber grid, polymer mortar, finite element, analytical

### Abstract

In this paper we present the results of an analytical investigation on the existing concrete structures which are reinforced with carbon fiber grid. The carbon fiber grid and polymer mortar are utilized in the reinforcement of concrete column, beam, and tunnel lining. The physical and mechanical properties of the carbon fiber grid and polymer mortar were obtained experimentally and then used in the analytical investigation. In the analysis concrete structures are modeled with 3-D solid finite elements and the carbon fiber grid is modeled with space frame elements. Through the investigation reinforcing effect of carbon fiber grid on the existing concrete structures is confirmed.

### 1. 서론

콘크리트는 건설재료로서 우수한 역학적 특성에도 불구하고 취약한 주변여건과 환경변화 그리고 인위적, 물리적 작용 등에 의한 각종 유해한 환경으로 인해 콘크리트 구조물에 심각한 손상이나 노후화가 발생하고 있다. 따라서, 손상되고 노후화한 콘크리트 구조물을 보수보강하여 구조물에 부여된 기능을 유지하도록 하는 공법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>(1)</sup>.

콘크리트 구조물의 대표적인 보수보강공법으로는 보강재접착공법, 단면증대공법, 프리스트레싱공법, 부재증설공법 등이 있다<sup>(2)</sup>. 본 연구는 보수보강

공법 중 탄소섬유그리드를 이용하여 콘크리트 구조물을 보수보강하는 공법에 관한 것으로 적절한 보수보강 설계 및 시공이 이루어지기 위해서는 실험적 이론적 연구가 필요하다.

그러나, 실제 구조물을 실험적으로 연구한다는 것은 사실상 현실적으로 불가능하다. 따라서 설계와 시공에 앞서 수치해석적인 방법을 이용하여 구조물의 거동과 보수보강효과를 검토하는 것은 필수적이라고 할 수 있다.

본 연구는 탄소섬유그리드 보강 콘크리트 부재의 거동에 관한 연구의 일부로서 최근 콘크리트 부재의 보강에 많이 사용되고 있는 탄소섬유그리드로 콘크리트 구조물을 보강하였을 경우 탄소섬유그리드의

\* 홍익대학교 대학원 토목공학과 석사과정

\*\* 홍익대학교 대학원 토목공학과 박사과정

\*\*\* 홍익대학교 공과대학 토목공학과 조교수

콘크리트 구조물에 대한 보강효과를 유한요소해석을 수행하여 검토하였다.

탄소섬유그리드의 보강효과 검토에 사용된 콘크리트 구조물은 압축부재와 휨부재, 그리고 터널의 라이닝 콘크리트 구조이며, 각각 3차원 유한요소를 사용하여 모델링하고 탄소섬유그리드는 스페이스 프레임요소로 모델링하여 수치해석을 수행하였다.

탄소섬유그리드의 보강효과는 보강 전과 보강 후 응력과 처짐의 감소율을 계산하여 검토하였으며, 유한요소해석을 수행하기 위해 사용된 프로그램은 범용구조해석 프로그램 중의 하나인 GTSTRUDL<sup>(3)</sup>이다.

## 2. 유한요소 모델링

콘크리트 부재의 모델링을 위해 3차원 유한요소인 TRIP요소와 IPLS요소를 사용하였으며, 탄소섬유그리드는 스페이스 프레임요소를 사용하여 모델링을 하였다.

그림 1, 2, 3은 각 유한요소를 이루는 절점 및 한 개의 절점에서의 자유도(degree of freedom)를 나타낸다.

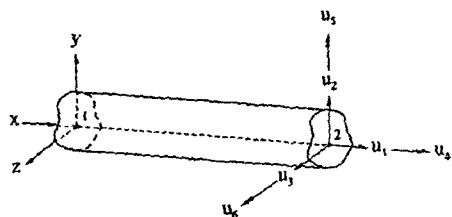


그림 1. 스페이스 프레임요소와 절점 2에서의 자유도

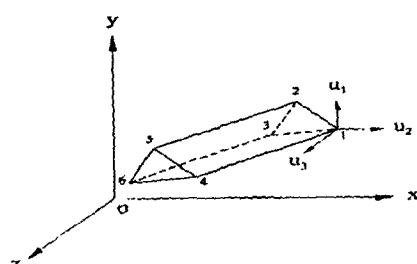


그림 2. TRIP요소와 절점 1에서의 자유도

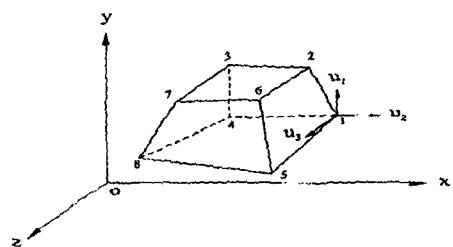


그림 3. IPLS요소와 절점 1에서의 자유도

### 2.1 압축재

압축재는 200개의 TRIP요소와 800개의 IPLS요소를 사용하여 지름 1.5m, 높이 3m의 원형단면기둥으로 모델링 하였다. 또한 탄소섬유그리드는 380개의 스페이스 프레임요소를 사용하여 격자형으로 모델링 하였으며 기둥의 외벽에서 3cm만큼 안쪽에 배치하였다.

기둥의 경계조건은 양단이 고정지지된 것으로 가정하였으며, 기둥의 상단부 자점의 y축 방향으로의 변위를 허용하였다. 그리고 하중은 상단부 각 절점에 1.0ton의 집중하중을 작용시켰다.

그림 4는 콘크리트 압축재(콘크리트 단주)를 모델링한 것이다.

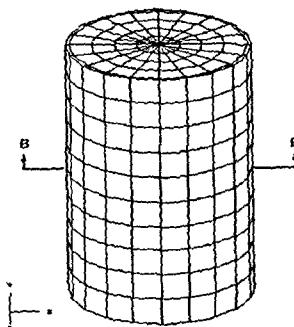


그림 4. 콘크리트 원형단면 기둥

### 2.2 휨부재

휨부재에는 총 500개의 IPLS요소를 사용하여 표준콘크리트 휨공시체의 규격인  $15 \times 15 \times 50\text{cm}$ 로 모델링하였다.

탄소섬유그리드로 보강한 경우 보강재를 밀면 (콘크리트 인장부)에서 3cm 떨어진 위치에 배치하였으며 총 175개의 스페이스 프레임요소를 사용하여 탄소섬유그리드를 모델링하였다.

경계조건과 하중조건은 KS F 2408의 콘크리트의 휨강도 시험방법(단순보의 3등분점 하중법, 4-point bending test)<sup>(4)</sup>과 동일하게 하였다. 단순 지지된 지점사이의 거리는 45cm이고, 하중은 지점 사이를 3등분하여 안쪽 두 경계부분의 각 절점에 1.0ton의 하중을 작용시켰다.

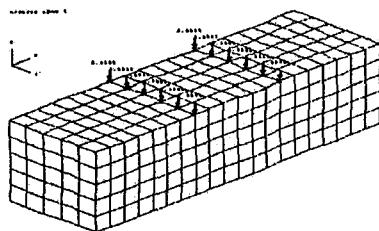


그림 5. 콘크리트 휨부재 유한요소 모델

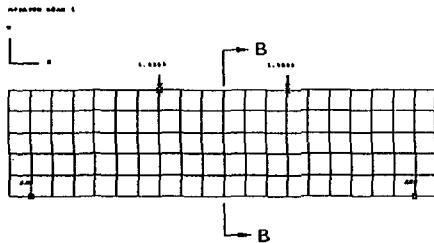


그림 6. 콘크리트 휨부재의 하중 작용점 및 지지점

그림 5는 휨부재를 모델링한 모양이고 그림 6은 하중과 지지점 위치, 그리고 B-B단면의 위치를 나타낸다.

### 2. 3 터널단면

터널단면의 콘크리트 라이닝은 총 3600개의 IPLS요소를 사용하여 모델링하였으며, 콘크리트 라이닝의 내경은 10m이고, 라이닝 두께는 20cm이

다. 라이닝의 두께는 3층으로 나누었으며 각 층은 내측으로부터 3cm, 8.5cm, 8.5cm에 있도록 모델링 하였다. 또한 터널의 형상은 편의상 반원으로 가정 하였으며 터널 라이닝의 폭은 단위폭으로 모델링 하였다.

실제 시공에서와 같이 터널 내측에서 3cm 떨어진 위치에 2270개의 스페이스 프레임요소를 사용하여 탄소섬유그리드를 배치하였다.

하중조건은 단지 탄소섬유그리드의 보강효과만을 검토하기 위한 것이므로 단순화시켜 작용시켰다. 즉, 상부에는 중력방향으로 모든 절점에 1.0kgf/cm의 등분포하중을 작용시켰으며, 토압 및 수압 등을 포함한 측면의 하중은 상단에 0.55kgf/cm, 하단에 1.0kgf/cm인 사다리꼴 형태로 작용한다고 가정하였다.

경계조건은 실제로는 탄성지지된 것으로 간주하여 해석하지만 본 연구에서는 편의상 콘크리트 라이닝의 양 단부가 고정지지된 것으로 가정하였다. 이와 같이 유한요소로 모델링한 터널 콘크리트 라이닝은 다음 그림 7과 같다.

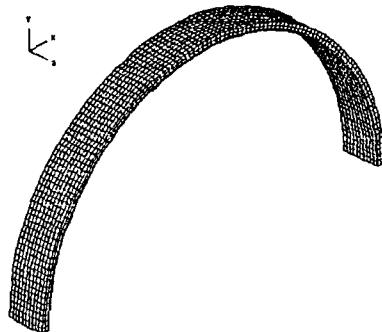


그림 7. 터널 콘크리트 라이닝 유한요소 모델

### 3. 결과분석 및 검토

유한요소해석에 사용된 재료의 역학적 성질은 각 부재에 대해서 일반적인 값을 사용하였으며, 탄소섬유그리드의 포아슨비는 탄성계수에 비해서 유한요소해석의 결과에 미치는 영향이 상대적으로 작기 때문에 일반적인 비닐에스터에 합침된 탄소섬유 보강 플라스틱의 값인 0.33을 사용하였다<sup>(5)</sup>.

해석에 사용된 콘크리트와 탄소섬유그리드의 역학적 성질은 표 1<sup>(6)</sup>과 같다.

표 1. 유한요소해석에 사용된 재료의 역학적 성질

재료	탄성계수 (kgf/cm <sup>2</sup> )	포아슨비
콘크리트	$2.5 \times 10^9$	0.17
탄소섬유그리드	$1.0 \times 10^9$	0.33

### 3.1 압축재

압축재의 보강에 사용된 탄소섬유그리드의 종류는 C6, C10, C13, C16, C19이며 서로 역학적 성질이 같다. 이 재료를 나타내는 기호에서의 숫자는 단면적 크기의 증가를 의미한다. 그림 4의 B-B단면에서 탄소섬유그리드로 보강하기 전과 보강한 후의 중앙부와 외측의 응력결과는 각각 표 2 및 3과 같다.

표 2. 탄소섬유그리드 보강 전과 후의 중앙부 응력

보강여부 및 종류	중앙부 압축응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	응력 변화율 (%)
콘크리트 기등 (보강전)	5.249	-
C6보강	5.283	+0.65
C10보강	5.278	+0.55
C13보강	5.271	+0.42
C16보강	5.263	+0.27
C19보강	5.252	+0.06

표 3. 탄소섬유그리드 보강 전과 후의 외측 응력

보강여부 및 종류	외측 압축응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	응력 변화율 (%)
콘크리트 기등 (보강전)	5.210	-
C6보강	4.765	-8.54
C10보강	4.760	-8.64
C13보강	4.754	-8.75
C16보강	4.747	-8.89
C19보강	4.736	-9.10

위의 표에서 알 수 있듯이 탄소섬유그리드로 보강을 한 경우 중앙부 압축응력은 1%미만의 미소한 응력변화를 보였으나 외측부의 압축응력은 8%

이상 감소된 것을 확인할 수 있다. 여기서 응력의 감소는 동일한 크기의 하중에 대해서 탄소섬유그리드 보강효과로 인해 콘크리트 부재가 받는 응력이 감소되었다는 것을 의미한다.

### 3. 2 휨부재

휨부재에 대해서도 압축재에서와 같이 탄소섬유그리드의 종류를 변화시켜가며 B-B단면 인장부에서의 최대응력 및 최대처짐을 유한요소해석으로 구하였다. 또한, 유한요소해석 결과로부터 최대응력 및 최대처짐값의 변화를 그림 8에 나타내었다.

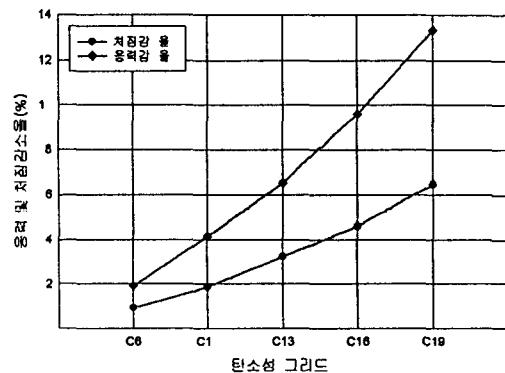


그림 8. 탄소섬유그리드 보강에 따른 콘크리트의 최대응력 및 최대처짐감소율

그림 8에서 휨부재의 경우 탄소섬유그리드의 단면이 커질수록 콘크리트 휨부재에 대한 탄소섬유그리드의 보강효과는 급속히 증가함을 알 수 있다.

### 3.3 터널단면

터널단면의 경우에도 압축부재 및 휨부재에서와 같이 탄소섬유그리드 C6, C10, C13, C16, C19를 종류별로 각각 보강하여 유한요소해석을 수행하였다.

표 4는 탄소섬유그리드 보강 전과 보강 후의 그림 9의 B-B단면과 C-C단면의 인장측 하단의 응력을 구한 결과를 정리한 것이며, 단면이 증가함에 따라 응력이 감소함을 알 수 있다.

그림 10은 탄소섬유그리드로 보강하기 전과 후의 B-B단면의 수직처짐을 나타낸 것으로 보강한 후 수직처짐 값이 감소함을 알 수 있다.

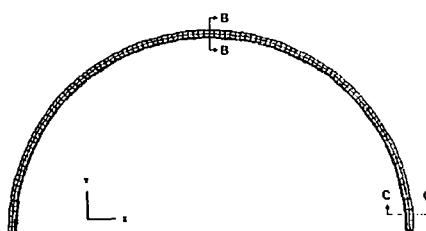


그림 9. 반원형 터널 콘크리트 라이닝

표 4. 탄소섬유그리드 보강 전과 후의 터널 단면의 인장응력 변화

보강여부 및 종류	B-B단면 하단의 X축 방향으로의 응력 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	응력감소율 (%)	C-C단면 하단의 y축 방향으로의 응력 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	응력감소율 (%)
콘크리트 터널단면	59.848	—	289.682	—
C6 보강	59.372	0.759	287.767	0.661
C10 보강	58.791	1.766	285.431	1.467
C13 보강	58.115	2.896	282.705	2.409
C16 보강	57.221	4.389	279.097	3.654
C19 보강	56.047	6.351	274.341	5.296

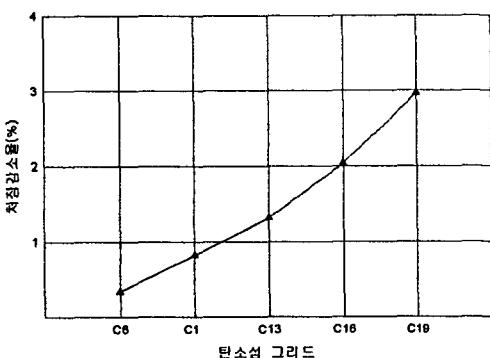


그림 10. 탄소섬유그리드 보강에 따른 처짐감소율

위의 결과에서 응력 및 수직처짐의 감소 정도가 앞의 휨부재의 감소 정도보다 상대적으로 작게 나온 이유는 작용한 하중 및 구조물의 크기에 비해 보강에 사용된 탄소섬유그리드의 치수가 상대적으로 작기 때문이다.

다음 그림 11은 구조물별 보강효과를 검토하기 위해 앞에서 유한요소법으로 해석한 압축부재, 휨부재 및 터널 라이닝에 대해 탄소섬유그리드의 보강효과를 그래프로 나타낸 것으로써, 보강에 사용된 탄소섬유그리드의 단면이 증가에 따른 콘크리트부재 단면의 응력감소율을 나타낸 것이다.

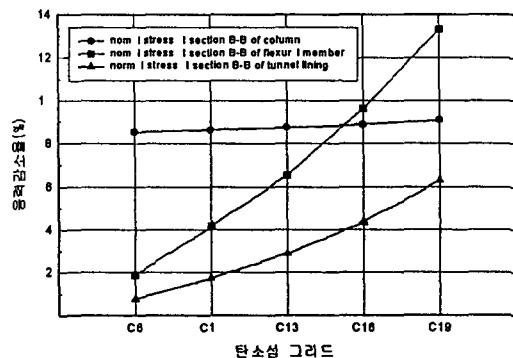


그림 11. 탄소섬유그리드의 단면 증가에 따른 부재별 응력감소율

위 그래프에서 알 수 있듯이 압축부재는 탄소섬유그리드 단면치수의 변화와는 상관없이 8% 이상의 응력감소율을 나타냈으나, 휨부재나 터널단면의 경우에는 탄소섬유그리드 단면치수가 증가됨에 따라 인장부의 응력감소율이 급격하게 증가됨을 알 수 있다. 특히, 휨부재에 대해서는 13% 이상의 보강효과를 나타냈다.

#### 4. 결론

탄소섬유그리드를 사용하여 수치해석적으로 보강 효과를 검토한 결과 압축부재는 8%, 휨부재는 13%, 터널 라이닝 단면은 6% 이상의 응력감소율을 나타냈다. 또한 최대처짐값은 약 3~6% 감소하였다.

콘크리트는 인장강도가 매우 작고(압축강도의 1/9~1/13), 콘크리트의 인장변형률이 철근의 인장변형률에 비하여 현저히 작기 때문에 인장측의 콘크리트에는 일반적으로 균열이 발생한다<sup>(7)</sup>. 그러므로 콘크리트의 압축측 보다는 인장측에 보수 및 보강이 필요하다.

유한요소해석 결과에 따르면 콘크리트 단면을 탄소섬유그리드로 보강할 경우 콘크리트는 기존의

단면치수를 유지하면서 콘크리트의 취약부인 인장 부분의 용력을 감소시킬 수 있다. 따라서, 보수 및 보강을 하기 전 구조물의 상태 및 하중조건 등을 정확히 파악하여 보강정도 및 범위를 결정한 후 유한요소해석을 통해 보강효과를 확인한 후 보수 보강 설계 및 시공을 수행한다면 좀더 합리적인 구조물 관리가 이루어질 것으로 판단된다.

본 연구에서는 탄소섬유그리드를 구조물의 인장 측에 1단으로 보강하는 것만을 해석의 대상으로 하였으나 2단 또는 3단으로 시공하는 것이 가능하므로 필요할 경우에는 2~3단으로 보강하는 방안도 고려해 보아야 할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 M. S. Asia의 재정적 지원에 의해 이루어진 것으로 지원에 대해 감사의 뜻을 표한다.

### 참고문현

- (1) 대한토목학회지, 특집 구조물의 보수, 보강, Vol. 47, No.4, 1999년 4월, pp. 24~33.
- (2) 조병완, 태기호, 최용환, “탄소격자섬유로 보강한 철근 콘크리트보의 흡파괴 특성에 관한 연구”, 한국구조물진단학회, 1999년 10월, pp. 239~244.
- (3) GTSTRUDL, GTSTRUDL User's Manual, Latest Revision, K. May, GTICS Systems Laboratory, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, 1989.
- (4) 한국산업규격 KS F 2408 "콘크리트의 흡강도 시험방법(단순보의 3등분점 하중법).
- (5) 시험결과 보고서, M. S. Asia, 1999.
- (6) 콘크리트 구조물의 보수, 보강 New Fiber Grid-NEFMAC공법, M. S. Asia, 1999.
- (7) Neville, A. M., Properties of Concrete, Pitman Publishing Co. Inc., London, 1981.