

## 볼트 조임력에 의한 와이어로프의 휨 보강

Flexural Strengthening with Wire Rope Using the Tightening Force of Bolts

김 선 영\*      송 진 규\*\*      이 영 옥\*\*\*      변 항 용\*\*\*\*  
Kim, Sun-Young      Song, Jin-Gyu      Lee, Young-Wook      Byun, Hang-Yong

### Abstract

This paper deals with the experiment and construction case of concrete beams strengthened with wire rope using the tightening force of bolts. The mechanical bolting of wire rope for prestressing force is adopted, which is very easy for construction. For the flexural strengthening effect of the proposed method, the experiment was proceeded as follows. The main parameters of specimens, concrete strength is 24MPa, are initial prestressing forces of wire rope and the number of saddle. The flexural strengths of strengthened specimens compared with non-strengthened test piece were increased about 160%. Also, as the initial prestressing forces were increased, the crack and ultimate moments were increased. The number of saddle did not play an important role for the moment capacity. This proposed method as a construction example showed a more competitive method than any others.

### 요 지

본 연구는 볼트의 조임력을 이용한 와이어로프의 휨보강 효과에 대한 실험 및 사례에 대한 것이다. 본 공법은 와이어로프에 볼트와 너트를 이용해 긴장응력을 도입하며, 이 방법은 시공성이 매우 우수하다. 제안된 방법에 대한 휨보강 효과에 대한 검증을 위해 실험을 수행하였다. 콘크리트 압축강도는 24MPa이고 전단스팬비 ( $a/d$ )가 2.8인 실험체의 주요변수로는 초기 긴장응력과 새들 수량으로 하였다. 실험결과, 무보강 실험체에 비해서 휨내력은 약 160% 증가하였으며, 초기 긴장력에 따라서 균열 및 극한모멘트가 증가하였다. 그러나 새들의 수량은 균열 및 극한모멘트에는 영향을 주지 않았다. 실제 구조물의 보강공사에 적용한 사례를 통해서 제안된 공법은 다른 보강방법보다 매우 경쟁력 있는 방법임을 알 수 있었다.

**Keywords :** Wire Rope, Bolt, Nut, Prestressing Force, Saddle, Flexural Strength

**핵심 용어 :** 와이어로프, 볼트, 너트, 긴장력, 새들, 휨강도

\* 정희원, 전남대학교 바이오하우징 연구사업단 연구교수  
\*\* 정희원, 전남대학교 건축학부 교수  
\*\*\* 정희원, 군산대학교 건축공학과 교수  
\*\*\*\* 정희원, 고려E&C 대표, 기술사

Corresponding Author : 송진규

E-mail : jgsong@chonnam.ac.kr 062-530-1640

• 본 논문에 대한 토의를 2006년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2006년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

### 1.1 구조보강 공법 개요

콘크리트 구조물은 염해 또는 알칼리골재반응과 같은 조기 열화뿐만 아니라 시간이 경과함에 따라 예상치 못한 영향에 의해 손상을 입거나 용도변경과 같은 기능 또는 설계하중의 변화 등으로 목표했던 성능을 만족하지 못하는 결과를 가져올 수 있다. 이렇게 손상에 의하거나 기능 및 사회적 요구에 의해 구조물을 보수공법이나 보강공법을 이용하여 소정의 목적에 맞게 향상시킬 수 있다. 콘크리트 구조물에 있어서도 유지관리는 설계나 시공과 맞먹는 중요한 업무의 하나라는 인식이 생겨났고, 또한 각처에서 열화구조물의 내구성을 회복하기 위한 보수·보강대책이 지난 수십년 동안 연구되어 왔으며, 실제로 열화된 구조물의 성능향상을 위해 적용되어왔다.

1995년 '시설물의 안전관리에 관한 특별법'이 제정된 이후 철근콘크리트 구조물에 대한 구조보강방법으로 에폭시를 접착제로 하는 강판 및 탄소섬유 보강공법<sup>(1),(2)</sup> 등이 매우 짧은 기간에 전국적으로 확산되어 지난 10여년 동안 수많은 구조물에 시공되었다. 그러나 기존 구조물의 구조 보강방법에 대한 자료가 거의 없었던 시기에 도입되어 보강 구조물의 내구성에 대한 충분한 검토 없이 붓물 터지듯 사용되어왔다. 그런 결과로 최근 에폭시를 사용하는 일부 공법들에 대한 의구심을 갖는 기술자들이 늘어나기 시작하였으며, 일각에서는 사용을 자제 또는 금지시키고 있다. 아울러서 이러한 구조 보강공법에 대한 문제점들을 해결하기 위한 연구나 노력도 다양한 분야에서 진행 중에 있다.

### 1.2 볼트 조임력을 이용한 휨 보강

최근에 건물의 리모델링에 대한 사회적 욕구가 커지면서 기존의 에폭시를 이용하는 접착공법뿐만 아니라 에폭시 접착공법의 단점을 해결할 수 있는 새로운 구조 보강방법에 대해서 관심이 증대되고 있다. 에폭시를 대체할 대안으로 포스트텐션을 이용한 보강공법이 구조적 장점 및 경제적 측면의 여러 장점이 있어 구조

체의 효과적인 보강공법으로 대두되고 있다.<sup>(3),(4)</sup> 이 방법역시 갑자기 튀어나온 것이 아니고 오래전부터 구조물의 신축 및 보강방법으로서 자리를 잡고 있던 방법이었다. 내부 프리스트레싱(internal prestressing) 방식은 신축공사에 주로 적용하고 있으며, 보강공사에는 외부 프리스트레싱(external prestressing)방식을 주로 사용하며 그 적용방법도 다양하다.<sup>(5)</sup> 포스트텐션을 이용한 구조물의 보강을 위해서는 보강재에 적절한 긴장력을 도입할 수 있어야 하며, 도입된 긴장력을 지지시킬 수 있는 정착단의 개발이 필수적이다. 기존의 신축 및 보강에 적용되었던 포스트텐션 공법들의 경우 대부분 정착단에 큰 하중을 전달하기 위한 방식으로 유압에 의한 췌기형의 정착장치들을 사용한다. 그러나 이러한 방법은 콘크리트 또는 철골 구조물에 적용하는 데에 시공성, 경제성, 작업의 정밀도 등을 요구한다.

최근 제안된 볼트의 조임력을 이용한 포스트텐션 보강방법<sup>(6)</sup>은 작업이 매우 편리하며, 작업의 숙련도도 크게 필요하지 않는다. 볼트와 너트를 토크 렌치 등을 이용하여 와이어로프에 긴장력을 도입하는 것은 그리 어려운 작업이 아니다. 물론 이때, 도입된 긴장력과 볼트 체결력과의 관계가 중요한 사항이 된다. 또한, 와이어로프의 단면적이 작더라도 충분히 보강효과를 발휘할 수 있으므로 더불어서 단부의 정착장치에 전달되는 하중도 크지 않게 되어 기존의 포스트텐션 공법에서 가장 민감한 문제였던 정착단이 쉽게 해결되는 장점이 있으며, 실을 계속 사용하면서 필요한 작업구간 즉, 휨재의 단부 쪽만 천장마감재를 제거하고 곧바로 작업이 가능하다. 결과적으로 보강공사비의 절감과 공사기간을 크게 단축시킬 수 있는 친환경적인 공법으로 콘크리트 구조물뿐만 아니라 철골, 목구조 등 다양한 구조물에 적용할 수 있는 방법이다.

### 1.3 연구의 의의 및 목적

콘크리트 구조물의 휨재 보강방법으로 와이어로프를 비부착 외부 노출형식으로 보의 밑면 하부에서 긴장시킨 실험을 수행하여 그 보강효과를 확인하고자 한다. 그리고 이와 같은 새로운 보강방법을 설계규준<sup>(7),(12)</sup>에

서 제시하는 프리스트레스트 보의 휨강도 계산 방법으로 평가하여 그 타당성을 살펴보고자 한다. 또한, 실제 구조물의 보강에 적용된 사례를 통해서 이 공법이 갖는 경제성, 시공성, 공기단축 등과 같은 장점을 확인한다.

## 2. 볼트 조임력에 의한 보의 휨강도

### 2.1 설계기준(KCI, ACI)에서의 휨강도

외부 노출된 와이어로프의 조임력은 보의 하부 단면에 압축력을, 상단에 인장력을 발생시킴으로써 프리스트레스트 보와 같은 역학적 거동을 한다. 프리스트레스트 보의 포스트텐션과 같은 매카니즘이므로 외부 노출된 와이어로프에 의한 휨 강도 계산을 설계기준에서 프리스트레스트 보에 적용하는 휨강도 계산 방법을 준용한다.

초기균열 발생 후 지속적인 하중 증가로 균열 진행이 계속되고, 콘크리트 압축연단으로부터의 중립축 거리는 작아진다. 이 때, 와이어로프에도 응력이 크게 작용하면서 휨 내력의 증진에 기여한다. 단면의 극한 상태에서 힘의 평형조건에 의한 식 (1)과 식 (2)와 같은 변형적합조건을 이용하여 중립축 깊이를 구한다.

압축철근이 항복할 경우에는 등가응력블록의 깊이를 식 (3)과 같이 구할 있으며, 압축철근이 항복하지 않은 경우에는 등가응력블록의 깊이에 대한 2차방정식의 해로 구할 수 있다. 따라서 비부착 포스트텐션 보강 보의 극한모멘트( $M_n$ )는 식 (4)와 같이 구할 수 있다. 식 (4)의 극한모멘트는 와이어로프의 긴장응력( $f_{ps}$ ) 값에 따라서 영향을 받는다. 따라서 규준에서는 긴장응력을 근사식에 의한 약산법과 반복법을 이용하여 긴장응력을 계산하는 정밀해법을 제시하고 있다.

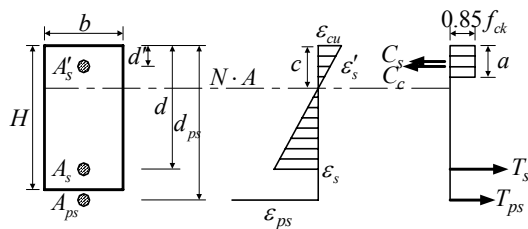


Fig. 1 극한상태에서의 응력과 변형률(KCI)

$$C_c + C_s = T_s + T_{ps} \quad (1)$$

$$\epsilon'_s = \frac{c-d'}{c} \epsilon_{cu} \quad (2)$$

$$a = \frac{(A_s - A'_s)f_y + A_{ps}f_{ps}}{0.85f_{ck}b} \quad (3)$$

$$M_n = C_c \left( c - \frac{a}{2} \right) + C_s(c - d') + T_s(d - c) + T_{ps}(d_{ps} - c) \quad (4)$$

여기서,  $C_c = 0.85 f_{ck} a b$

$$C_s = A'_s f_y, \text{ 또는 } C_s = A'_s f'_s$$

$$T_s = A_s f_y$$

$$T_{ps} = A_{ps} f_{ps}$$

### 2.2 Warwaruk의 제안 방법<sup>(7),(12)</sup>

Warwaruk은 비부착 내부 프리스트레싱 방식의 콘크리트 보의 해석을 위해 콘크리트의 종곡변형률과 강선의 변형률이 선형관계를 갖지 않으며, 이 비선형 관계를 해결하기 위해 추가적인 요소  $F$ 를 사용하여 콘크리트의 압축축 변형률을 식 (5)와 같이  $F \epsilon_{cu}$ 로 제안하였다. 와이어로프의 긴장응력( $f_{ps}$ )은 Warwaruk이 ACI Bull. 464에 제안한 식을 이용하였다. 따라서 Fig. 2의 포물선 형태의 콘크리트 압축응력을 Fig. 1과 같이 등가응력블록으로 가정하면 식(2)와 (3)을 이용하여 휨강도를 계산할 수 있다.

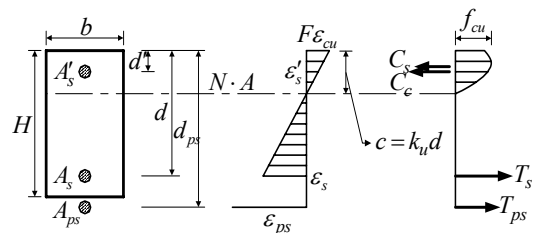


Fig. 2 극한상태에서의 응력과 변형률(Warwaruk)

$$F\epsilon_{cu} = C_1 C_2 \frac{1 + 2k_u}{600} \quad (5)$$

여기서,  $k_u = c/d$

$C_1$  = 일정 모멘트도 부위의 길이/스팬

$C_2$  = 응력집중 요소 (모두 비부착 강선일 경우 0.5, 부착강선일 경우 1.0)

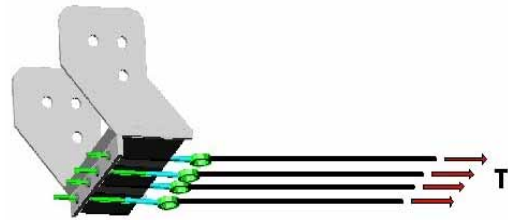


Fig. 3 볼트와 너트를 이용한 긴장응력전달 개념

### 3. 실험

#### 3.1 볼트에 의한 긴장응력 도입 및 상세

Fig. 3과 같이 보강이 필요한 철근콘크리트 보에 와이어로프(Wire Rope)를 전용 정착기구를 통해서 긴장력을 도입하여 구조 내력을 보강한다. 긴장력 도입은 Fig. 4의 특수 제작한 볼트와 너트를 토크 렌치를 이용하여 목표 토크 값까지 조인다. 건축공사 표준시방서(KASS)에서 고력볼트의 조임력과 토크 값과의 관계는 식 (6)과 같이 결정한다. 여기서,  $T$ 는 조임력,  $d$ 는 볼트나사 바깥지름의 기준치수,  $N$ 은 볼트 도입 축력, 그리고  $k$ 는 토크계수 값으로 0.11~0.19를 사용한다. 그러나 아이볼트에 와이어로프를 연결한 상태에서 토크 렌치로 조이기 때문에 표준시방서에서 제시한 토크계수 값을 사용할 수 없다. 따라서 별도의 실험을 통해서 구한 토크 계수 값은 약 0.3이었다.

$$T = k \cdot d \cdot N \quad (6)$$

프리스트레스트 보에 사용되는 PC 강선도 크리프, 건조수축 등에 의한 응력이완이 저이완 강선인 경우에 3%, 중이완 강선인 경우에 10~12% 감소시킨다.<sup>(7),(9)</sup> 고 알려져 있다. 와이어로프도 이와 같은 응력이완이 발생할 수 있지만 긴장응력을 도입하는 방법이 췌기형이 아닌 외부에 노출된 볼트와 너트를 이용하기 때문에 초기에 도입된 긴장응력을 토크 렌치를 사용하여 그 값을 유지시킬 수 있다.

볼트와 너트는 정착앵글과 보 옆면과 밑면에 걸쳐 정착되는 정착 Plate로 고정되고, 정착 Plate는 앵커

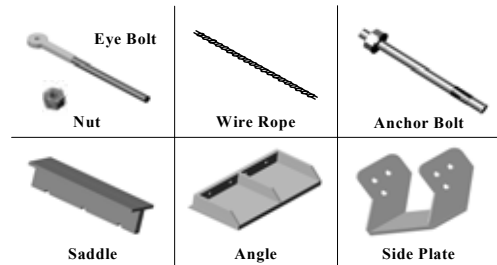


Fig. 4 제안된 보강공법의 상세

를 이용해 최종적으로 정착된다. 정착 Plate와 앵커는 와이어로프가 충분히 내력을 발휘할 수 있도록 제작되며, 와이어로프의 고정 및 원활한 하중전달을 위해 보강 구간에 새들(Saddle)을 설치한다. 볼트는 아연도금 처리되어 내식성이 매우 우수한 SCM 435이며, 정착앵글과 새들은 자동차용 강판인 PO COIL로 제작하고, 정착 Plate는 SS400의 구조용 강재로 제작한 후 부식방지를 위해 아연도금 처리한다.(Fig. 3, 4)

#### 3.2 실험계획

외부 노출된 와이어로프로 보강한 보의 휨보강 효과를 검증하기 위한 실험의 주요 변수로는 Table 1과 같이 와이어로프의 초기 긴장응력(와이어로프 인장강도의 7.8, 9.4, 11, 40%)과 새들수량(0, 1, 3개)으로 하였다. 실험체의 배근 및 형상은 Fig. 5와 같이 실험체의 단면크기( $b \times H$ )는 200×300mm이고, 전단 스펠비( $a/d$ )는 2.8로 지점 간 실험체의 길이는 2,000mm로 하였다. 압축철근은 2-D13, 인장철근은 2-D16으로 배근하였으며, 와이어로프 4개를 Fig. 3과 같이 보강하였다. 또한, 전단파괴를 막고 휨파괴를 유도하기 위해 전단 보강근을 D10@100으로 배근하였다.

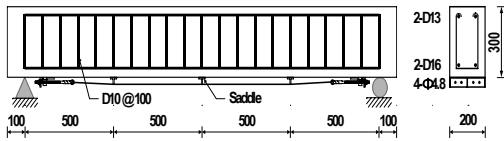


Fig. 5 실험체 형상

Table 1 실험변수

Specimens	초기 긴장율(%)	Saddle
NSOT0(prototype)	0	0
US1T7.8	7.8	1
US3T9.4	9.4	3
US0T11	11	0
US1T40	40	1

US1T40  
 — The Ratio of Prestressing Stress to Tensile Strength of Wire Rope :40%  
 — The Number of Saddle : 1ea  
 — Unbonded Specimens

### 3.3 실험재료

본 실험에 사용한 콘크리트의 압축강도는 24MPa인 보통콘크리트이며, 콘크리트 타설 후 충분한 살수를 하여 강도발현이 잘 되고 건조수축과 같은 균열이 발생하지 않도록 유의하였다. 양생은 양생포로 덮은 상태로 기건양생을 하였다. 철근의 재료시험결과, 주철근 D13과 D16의 항복강도( $f_y$ )는 각각 350, 320MPa이며, 전단보강근 D10의 항복강도( $f_y$ )는 450MPa이었다.

보강재료인 와이어로프는 항공케이블 또는 과수원용 등으로 널리 사용되는 GAC(Galvanized Aircraft Cable) 와이어로프로 Fig. 6(a)와 같이 Wire라고 하는 소선을 꼬아서 Strand를 만들며, 다시 Strand를 꼬아서 와이어로프를 만든다. Fig. 6(b)는 실험에 사용한 와이어로프의 단면으로 직경은 4.76mm이고, 단면의 규격은 7×19이다. 여기서, 7은 Strand 개수이며, 19는 Strand를 구성하는 소선의 개수이다. 와이어로프의 인장시험결과는 Fig. 7과 같다.

새들은 Fig. 4와 같이 T자 형태로 Plate의 두께 2.4mm이며, 높이는 25mm로 재료시험결과 항복강도는 335MPa이었다.

### 3.4 재하 및 측정방법

철근콘크리트 보의 휨 실험을 위한 하중재하는 프레임을 유압잭으로 4점 재하 하였으며, 유압잭 하부면에 로드셀(Load Cell)을 설치하였다. 보 실험체의 변위를 측정하기 위하여 중앙부에 변위계(LVDT)를 설치하였고, 콘크리트를 타설하기 전에 인장철근과 압축철근에 스트레인 게이지(Strain Gauge)를 2개씩 설치하였으며, 전단철근에는 스트레인 게이지(Strain Gauge)를 3개 설치하여 변형률을 측정하였다.(Fig. 8) 또한, 와이어로프의 긴장력을 측정하기 위해 와이어 텐션미터를 설치하였다.



(a) 형상 및 구조 (b) 단면(규격 7×19)  
 Fig. 6 와이어로프

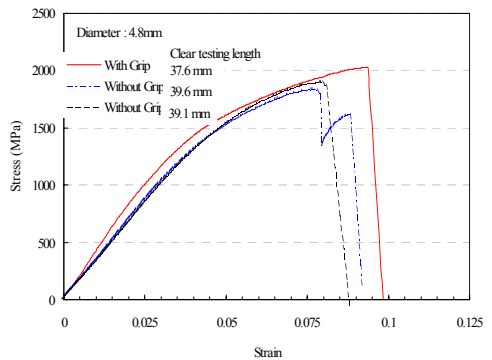


Fig. 7 와이어로프 인장시험 결과

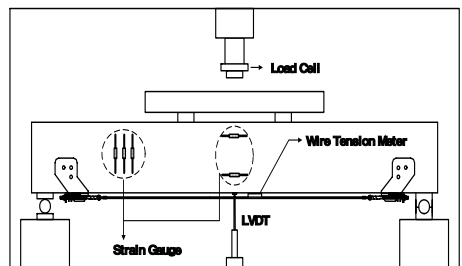


Fig. 8 가력 및 측정

### 3.5 실험결과

#### 3.5.1 모멘트-변위관계

Fig. 9는 작용모멘트에 대한 부재 중앙에서의 처짐을 나타낸 것으로 최대하중 이후에도 점진적인 증가현상이 나타난다. 이는 인장강도(1800~2100MPa)가 매우 큰 와이어로프에 의해서 계속 저항하기 때문으로 판단된다. 그러나 압축측 콘크리트가 압괴등이 발생한 이후의 증가는 큰 의미가 없다고 판단하여 압축측 콘크리트 변형률이 0.3%에 도달할 때의 내력을 최대 휨 내력으로 하였다. Fig. 10은 와이어로프에 설치한 텐션미터로 측정된 값을 나타낸 것으로 초기 긴장응력 도입이후 항복모멘트까지는 큰 증가가 없다가 그 이후 크게 증가함을 알 수 있다.

무보강 실험체(NSOT0)에 대해서 보강한 실험체는 모두 휨 내력이 증가함을 보여준다. 이것은 프리스트레싱에 의한 긴장력에 의해서 보 하부가 압축응력상태

에서 하중이 작용하므로 초기 휨 강성의 증진 효과에 의해서 균열 및 최대 휨모멘트가 증가하였다. Fig. 11은 무보강 실험체인 NSOT0의 극한모멘트에 대한 보강 실험체의 극한모멘트 증가비를 나타낸 것이다. 와이어로프에 도입된 긴장력이 증가할수록 휨내력의 증가비가 1.47, 1.51, 1.53, 1.8과 같이 증가하였다.

한편, Table 2에서 ACI에서 제안하는 근사해법과 정밀해법, 그리고 Warwaruk이 제안한 방법에 의한 극한모멘트 값에 대한 실험값을 비교한 결과, ACI 정밀해법은 실험결과와 비교할 때 약 20~30%, ACI 근사해법은 약 50~60%, 그리고 Warwaruk의 제안 방법은 약 60~70% 더 낮게 예측함을 알 수 있다. 와이어로프를 이용한 보강설계를 위해서 기존 설계기준에서 제시하고 있는 방법을 사용해도 안전측임을 알 수 있다. 그러나 정확한 휨강도의 평가 및 설계를 위해서는 추가적인 실험 및 연구가 필요할 것으로 사료된다.

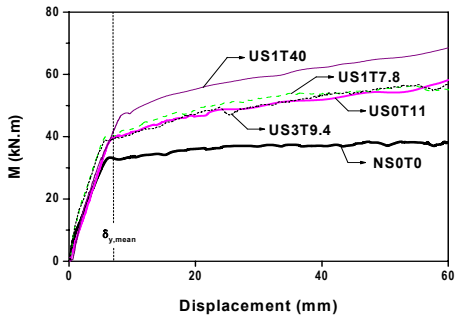


Fig. 9 모멘트-변위관계

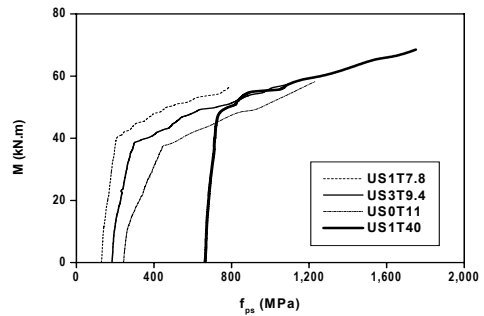


Fig. 10 와이어로프의 긴장응력

Table 2 실험결과(unit : kNm, MPa)

Specimen	$M_{n,w}$	$M_{n,A}$	$M_{n,E}$	$M_{u,exp}$	$\frac{M_{u,exp}}{M_{u,p}}$	$\frac{M_{u,exp}}{M_{n,w}}$	$\frac{M_{u,exp}}{M_{n,A}}$	$\frac{M_{u,exp}}{M_{n,E}}$
NSOT0	27.73			38.0	-	1.37		
US1T7.8	32.1	35.3	46.5	56.5	1.47	1.76	1.60	1.21
US3T9.4	32.8	36.0	46.8	57.4	1.51	1.75	1.59	1.22
US0T11	33.3	36.5	47.0	58.2	1.53	1.75	1.59	1.24
US1T40	42.1	45.2	51.3	68.5	1.80	1.63	1.52	1.34

여기서,  $M_{n,w}$ ,  $M_{n,A}$ ,  $M_{n,E}$ ,  $M_{u,exp}$  : ultimate moments by Warwaruk, ACI approximate method, ACI exact method, and experiment respectively.  $M_{u,p}$ : ultimate moment of NSOT0

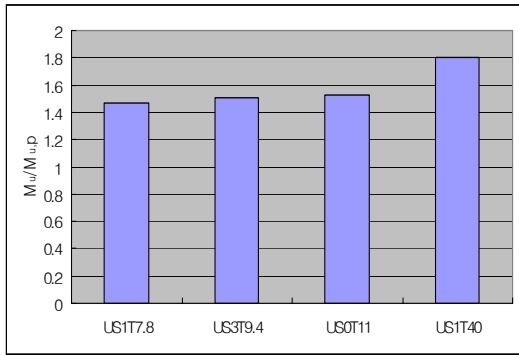


Fig. 11 보강효과

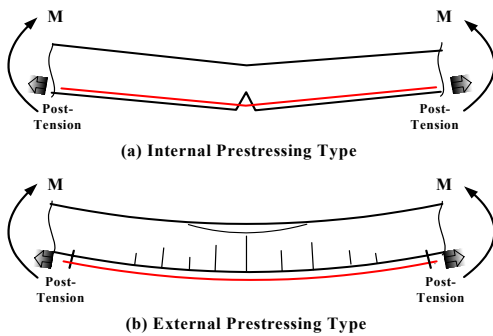


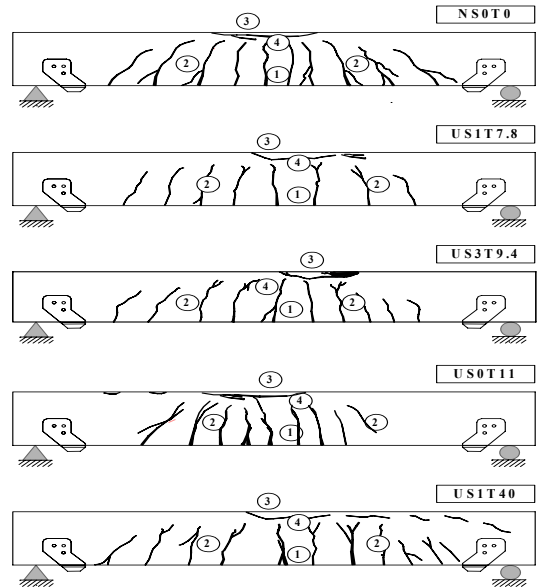
Fig. 12 파괴유형

### 3.5.2 균열 및 파괴형태

보 단면의 내부에 포스트텐션 방식을 도입하는 경우 일반적인 균열의 형태는 비부착 보의 경우 Fig. 12(a)와 같이 단수의 큰 균열이 발생되며, 부착보의 경우 소형의 많은 균열이 발생된다고 알려져 있다.<sup>(7)</sup> 외부에서 긴장력을 도입한 본 실험결과에서는 Fig. 12(b)와 같은 파괴유형으로 중앙에서 단부로 진행하는 전형적인 휨 균열 형태를 나타내었다.

### 3.5.3 새들(saddle)의 영향

실험체에 하중전달을 원활하게 하기 위해서 새들을 실험체의 중간에 1개를 설치한 경우와 실험체를 4등분하여 3개를 설치한 경우에 대한 실험결과는 Fig. 14와 같이 새들은 균열 및 극한모멘트에는 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 이는 본 실험에 사용된 새들의 높이가 25mm로 매우 낮았기 때문으로 판단되며, 추후에 새들의 높이가 달라질 경우에 대한 연구가 필요할 것



- ① 초기 휨 균열, ② 휨 균열 진행, ③ 압축측 콘크리트 압괴, ④ 최종 휨 파괴

Fig. 13 균열도

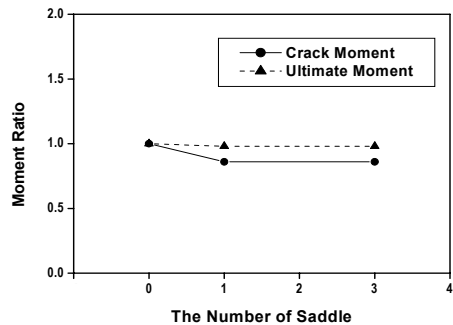


Fig. 14 새들 개수에 따른 영향

으로 판단된다.

## 4. 공법적용

### 4.1 보강 개요

와이어로프를 이용한 휨보강 공법을 서울시 강남구에 위치한 OO교회에 적용한 사례를 소개하고자 한다.

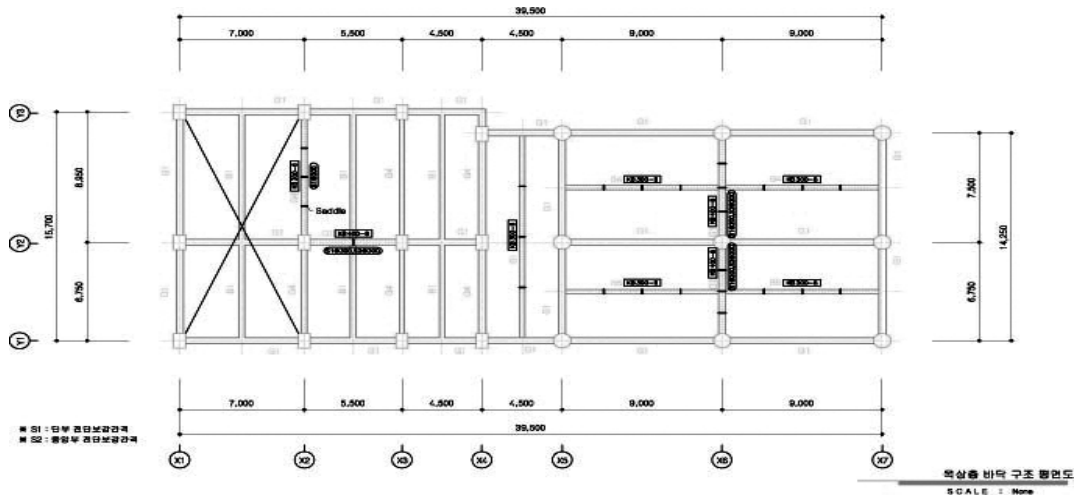


Fig. 15 구조평면도

해당 건물은 옥상층에 증축을 목표로 정밀안전진단을 수행하였으며, 그 결과로 예측시를 이용한 강판보강공법으로 구조 보강을 하도록 되어 있었다. 그러나 강판보강공법은 콘크리트 표면에 도장된 페인트를 제거하여야만 하고, 이때 발생하는 분진 및 소음 때문에 사용 중인 4층을 폐쇄시켜야 한다. 또한 콘크리트 표면에 강판을 접착하기 전에 실시하는 앵커천공을 할 경우 철근의 위치를 피할 수 없었으며, 도심지 특성상 소음 및 먼지 등의 환경문제를 발생시킬 수 있어 민원의 문제가 될 수 있었다. 대개 증축 대상 건물들은 대개 낮은 예산으로 문제가 되는 경우가 많은 데 해당 건물도 마찬가지였다. 저렴한 비용으로 짧은 공기에 구조보강공사를 할 필요성이 대두되었으나 종합적인 측면에서 대안이 없는 상황에 처해 있었다. 이때 와이어로프를 이용한 휨 보강 실험결과를 통해 보강효과에 확신을 갖고 해당 건물에 적용할 수 있었다.

#### 4.2 보강 설계 및 공사

증축을 위해 구조보강이 필요한 옥상층 바닥구조의 보는 Fig. 15와 같이 총 9개로 단면의 성능 및 보강 전과 후의 휨강도는 Table 3과 같으며, 휨보강 설계는 비교적 실험결과를 잘 예측했던 ACI 정밀해법을 이용하였다. 계산에 사용된 콘크리트의 압축강도와 철

근의 항복강도는 정밀안전진단보고서에 따라 각각 21 MPa, 300 MPa이고, 와이어로프에 도입된 토크 값은 35Nm이며, 직경은 4.76mm이다. 총 9개의 보에 대해서 휨 및 전단보강을 수행하였다. 정밀안전진단 보고서도 있었지만 현장 사전조사로 부재치수 및 작업 여건 등의 조사를 위한 0.5일이 소요되었으며, 실측된 자료를 토대로 포스트텐션 상세 장치들에 대한 제작 및 구입에는 1일이 소요되었다. 그러나 공법 개발과 관련하여 산업화의 목표가 unit화, 건식화 등을 통한 경쟁력 재고에 있으므로 제작에 필요한 장치들은 이미 제작하여제품으로 확보한 상태가 되므로 실제 다른 공사에 적용될 경우 이 과정은 건너뛸 수 있다. 모든 준비가 완료된 후 실제 현장에서 작업 소요시간은 1.5일이 걸렸으며, 이때 앵글 및 정착 플레이트를 고정시키기 위한 천공시간이 대부분을 차지하였다. 따라서 보강 공사에 소요된 총 시간은 3일로 짧은 시간에 소기의 목적을 마칠 수 있었다.

Table 3 보강단면

Name	Section (b×h)	인장 철근	압축 철근	$\phi M_n$ (kNm)		보강 와이어로프
				보강전	보강후	
B1, B4, B5	300×500	3-D19	3-D19	100	117.2	6- $\phi$ 4.76
G4	300×700	3-D19	3-D19	150	183.0	6- $\phi$ 4.76
G1	400×700	3-D22	3-D22	200	230.6	8- $\phi$ 4.76



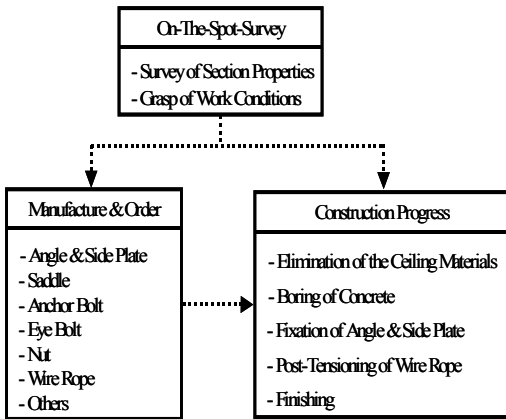


Fig. 16 작업 흐름도

Table 4 소요 보강면적 및 개소 산출

Name	Span (m)	개소	강판 보강면적(m <sup>2</sup> )	탄소섬유 보강면적(m <sup>2</sup> )	제한공법	
G1	5.5	1	2.75	2.20	40만원/ 개소	
	6.7	1	3.35	2.68		
	7.5	1	3.75	3.00		
G4	9.0	1	3.60	2.70		
B1	15.0	1	6.00	4.50		
B4	9.0	2	7.20	5.40		
B5	9.0	2	7.20	5.40		
소계			33.85	25.88		9개소

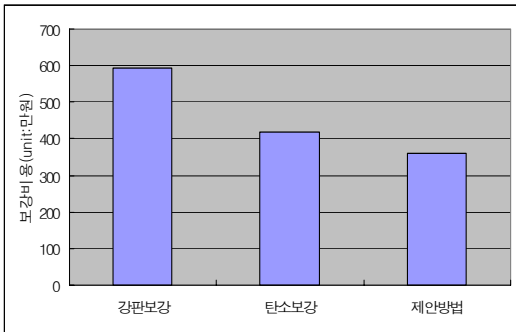


Fig. 17 공사비 비교

일반적인 작업 흐름도는 Fig. 16과 같다.

Table 4에 강판과 탄소에 대한 소요보강면적을 산출하였으며, Table 5의 적산자료<sup>(8)</sup>를 토대로 Fig. 16과 같이 경제성 평가를 수행하였다. 이때, Table 5의 내용은 적산자료에서 제공하는 자료로 보강 면적당 단가가 모두 다르지만 가장 낮은 단가를 기준으로 평

Table 5 기준 면적(m<sup>2</sup>)당 단가(적산자료)

년도	강판접착보강(Thk 4.5mm)		탄소섬유보강(200g/2겹)	
	단가	비고	단가	비고
2005	470,824	p.245 [1007191202]	-	-
	292,759	p.602 [엠프로]	-	-
	<b>175,757</b>	p.610 [중앙케미콘]	161,959	p.610 [중앙케미콘]
2004	461,231	p.250 [1007191202]	-	-
	377,652	p.248 [이레건설]	276,516	p.248 [이레건설]
	213,782	p.580 [엔트구조건설]	<b>161,180</b>	p.580 [엔트구조건설]
	327,807	p.584 [청원화학]	302,974	p.584 [청원화학]
	266,095	p.592 [엠프로]	-	-
	181,986	p.599 [중앙케미콘]	175,490	p.599 [중앙케미콘]



(a) 휨보강



(b)휨 및 전단보강

Photo 1 와이어로프를 이용한 보강

가하였다. 제한한 공법의 공사비는 강판과 탄소섬유 보강방법에 대해서 각각 공사비의 61, 86% 수준이었다.

#### 4. 결 론

볼트와 너트의 조임력을 이용하여 콘크리트 보의 보강효과에 대한 실험 및 보강 공사에 대한 결과는 다음과 같다.

- 1) 볼트와 너트를 이용한 기계적 정착방법에 의한 비부착 포스트텐션 보강방법은 휨보강 효과가 무보강 실험체에 비해 초기 긴장력에 따라서 약 160% 증가하였다.
- 2) ACI 정밀해법에 대한 실험결과에 의한 극한모멘트 비는 1.2~1.3이고, ACI 근사해법에 대한 극한모멘트 비는 1.5~1.6이며, Warwaruk의 방법에 대한 극한 모멘트 비는 1.6~1.7이었다.
- 3) 와이어로프에 도입되는 초기 긴장응력에 따라서 균열 및 극한모멘트가 증가하였다.
- 4) 보 하부에 설치한 새들의 수량은 균열 및 극한모멘트에 영향을 주지는 않았지만 항복모멘트 이후의 균열거동에 영향을 주어서 외부 프리스트레싱 방식의 본 실험체에서는 휨 균열이 중앙에서 단부까지 골고루 발생하는 일반적인 휨 부재와 같은 파괴거동을 나타냈다.
- 5) 제안된 공법을 실제에 적용할 경우, 공사기간의 단축뿐만 아니라 주변 환경문제들을 발생시키지 않으며, 다른 구조보강방법보다 경제성면에서도 경쟁력이 있음을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 “2005년도 교육인적자원부 지방연구중심대학 육성사업”의 일환으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. 박윤제, 신동혁, 이광명, 신현목, “강판으로 보강된 RC 보의 에폭시-콘크리트 계면의 부착특성”, 한국콘크리트학회논문집 제13권 3호, 2001.6, pp.221~227.
2. 박현정, 이홍주, 박성수, “탄소섬유시트로 보강된 철근 콘크리트 보의 시공불량시 휨거동에 관한 연구”, 한국구조물진단학회지, 제6권 1호, 2002.1, pp.95~102.
3. 박상렬, “외부 프리스트레싱으로 보강된 R.C보에서 강재량 및 텐던깊이에 따른 프리스트레싱 강재의 극한응력”, 한국콘크리트학회논문집 제15권 4호, 2003.8, pp.585~593.
4. 박순규, 이상윤, “합성섬유로프 인장재로 보강된 RC보의 휨거동”, 대한건축학회, 제20권 8호, 2004.8, pp.19~26.
5. 민락기, 오창렬, “포스트텐셔닝을 이용한 기존 구조물 보강”, 콘크리트 학회지, 제8권 4호, 1996.8, pp.65~75.
6. M&S(주), (주)고려E&C, “콘크리트 구조물 보수용 보강재 및 그것을 이용한 콘크리트 구조물의 보수보강 공법” 특허 제 0414448호(2003.12.24)
7. 대한건축학회, “콘크리트 구조설계기준 건축구조물 설계예제집”, 20040
8. 적산자료 2004, 2005, 사단법인 한국물가협회(재경부 허가 제 24호)
9. ACI 318-05, “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary,” American Concrete Institute, 2005.
10. Harajli. Muhamed H., Hijazi. Samir A., “Evaluation of the Ultimate Steel Stress in Partially Prestressed Concrete Members”, PCI Journal, Jan.-Feb., 1991, pp.62~82.
11. “Wire Rope”, 천기제강주식회사, 1999.
12. Warwaruk,J., Sozen.M.A. and Siess.C.P., “Investigation of Prestressed Concrete for Highway Bridges, Part III:Strength and Behavior in Flexural of Prestressed Concrete Beams”, University of Illinois Engineering Experiment Station Bulletin 464, 1962.

급행 (접수일자 : 2005년 10월 19일)