



김창호 총무이사  
(주)충구조 대표이사  
Ch970106@chollian.net

# 有孔웨브 合成보 强度式의 提案

## 1. 서론

철골보 웨브(Web)에 덕트(Duct)나 배관을 통과시키기 위하여 개구부를 설치하는 접근 방법은 건물의 층고를 감소시키는 효과가 있어 결과적으로 건물의 전체높이를 줄이게 된다. 하지만 전단력이 큰 부분의 웨브에 개구부를 설치하는 것은 보의 심각한 극한 내력저하를 가져오게 된다. 그러나 개구부 주위를 보강하는 것은 용접 등의 작업으로 인하여 높은 비용이 소요되어 결과적으로 층고를 줄임으로써 얻은 경제적 이득을 상쇄하게 된다.

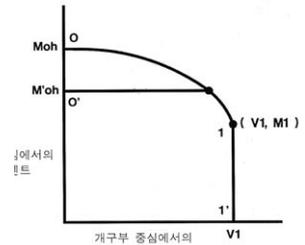
그런데 최근의 연구에서는 콘크리트 슬래브와 쉬어코넥터가 개구부 위치에서 상당한 전단내력을 보지하고 있다고 보고하고 있으며 슬래브의 전단지지 능력을 적절하게 고려하면 철골보 개구부 주위의 보강을 생략할 수 있게 된다. 개구부를 갖는 유공 합성보의 최대내력에 대해서는 여러가지 강도식이 제안되었다. 그러나 제안된 관련식이 반복적인 계산을 요구하고 있어 실무에 적용하기에는 다소 어려움이 따르며 또한 이를 유도하기 위한 파괴양상은 실제의 파괴양상과 일치하지 않는 문제점이 있다. 그런데 이러한 식들이 유도된 실험결과는 슬래브 폭이 유효 폭 이내의 작은 시험체를 포함하고 있으므로 실제의 상황을 제대로 반영하지 못한 단점이 있다. 본 연구에서는 기존의 리브(Rib)형 유공 합성보의 강도식들을 분석하고 콘크리트와 쉬어코넥터의 역할을 고려한 합리적인 설계식을 제안하고자 한다.

## 2. Redwood의 강도식

Redwood는 전단력과 모멘트를 동시에 받는 유공 합성보의 최대 내력을 구하기 위해 그림1과 같은 형태의 상관 관계도를 채택하였다. 이 상관 관계도는 O점과 1점 사이가 타원형이고 1점과 1점 사이가 직선으로 연결되어 있다.

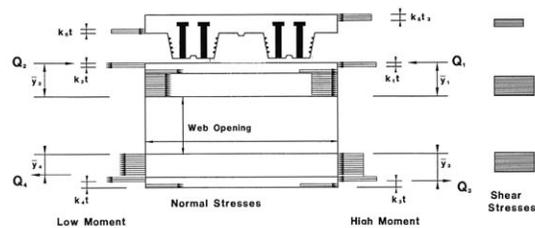
O점은 순수 휨만이 작용할 때의 최대 휨 내력을 나타낸 것으로 값은 완전 합성의 가정하의 응력 분포로부터 구해진다. O점의 모

멘트는 부분 합성의 효과를 고려한 최대 휨 내력값이다. 1점은 파괴의 모드가 휨에서 전단으로 바뀌는 것을 나타내는 점이며 1점은 1점에서 수직선을 내렸을 때 수평축과 만나는 점으로 모멘트가 작용하지 않는 순수 전단하에서의 최대 전단내력을 나타내는 점이다.



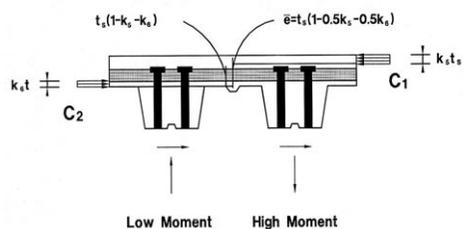
[ 그림 1 모멘트 전단력 상관관계도(Redwood) ]

그림 2의 응력해석 모델 및 그림3의 콘크리트에 작용하는 힘의 체계(Force system)를 사용하였다. 철골의 항복은 Von Mises의 항복 조건에 일치하게 가정한 것이다. 계수  $k_1 - k_6$ 은 0 과 1 사이의 값으로서 플랜지나 웨브 혹은 슬래브의 압축 또는 인장 응력 부분의 응력장 비율을 나타내는 수치이다.



[ 그림 2 Redwood의 응력분배모델 ]

개구부 주위 콘크리트 슬래브에 작용하는 힘을 그림3과 같이 상하부 압축력 사이에 최대 편심으로 가정된 것이며 이때의 압축력은 쉬어코넥터(Shear connector)의 내력과 일치하게 가정된 값



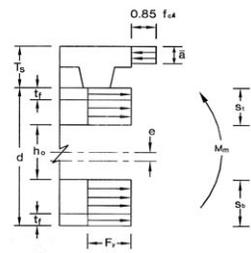
[ 그림 3 콘크리트에 작용하는 힘의 체계(Redwood) ]

을 취하고 있다. 또한 콘크리트 슬래브에 있어서의 전단력에 저항하는 부분(Shear area)로 회색부분을 가정하였다.

그러나 Redwood의 강도식은 전단내력에 관한 쉬어코넥터의 역할을 고려하지 않았으며 전단내력에 기여하는 콘크리트 단면을 임의로 산정한 단점을 가지고 있다. 또한 부재내력을 검토하기 위해 각각의 경우에 대한 상관관계 곡선을 그려야 하는 번거로움이 있다.

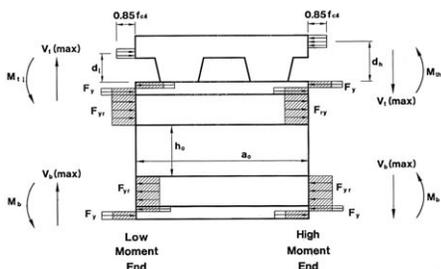
### 3. Darwin의 강도식

Darwin 등은 순수 휨만이 작용할 때의 최대 휨 내력과 순수 전단만이 작용할 때의 최대 전단 내력을 구한 후 이 두 값을 사용하여 휨 모멘트와 전단력이 동시에 작용하는 유공 합성보의 내력을 구하는 상관관계식을 제안하였다. 그림4는 순수 휨만이 작용할 때의 극한상태의 응력분포를 중립축이 슬래브 내에 있는 경우에 대해 나타낸 것이다. 여기서 콘크리트에 작용하는 힘은 콘크리트 단면의 내력, 개구부 High moment 단에서 지점까지의 쉬어코넥터의 내력, 개구부 부분을 뺀 보 단면의 인장 내력에 의하여 제한된다. 이러한 응력분포로부터 순수 모멘트가 작용하는 경우의 최대 휨 내력을 구할 수 있다.

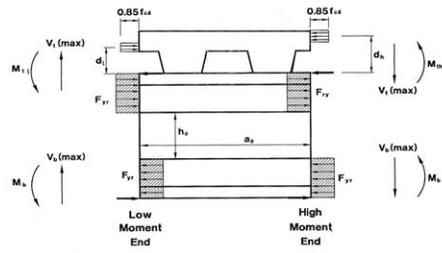


[ 그림 4 최대 모멘트(Mm)에서의 응력분포 (슬래브 내에 중립축이 있는 경우) ]

순수 전단만이 작용할 때의 최대 전단 내력은 그림 5 및 그림 6과 같은 극한응력 분포로부터 세 가지의 해를 통하여 구한다. 즉 콘크리트 슬래브와 개구부 상부의 T형 단면의 합성단면과 하부 T형 단면으로 나눈 후 각각의 단면에 대해 비렌디일 거동을 고려하여 극한 응력상태를 일으키는 전단력을 구함으로써 순수 전단에 대한 최대 전단 내력을 구할 수 있다.

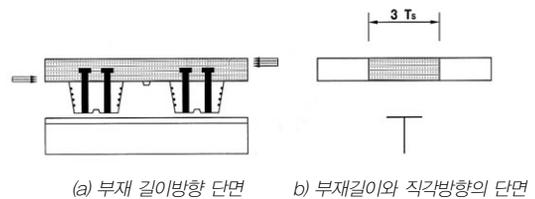


[ 그림 5 최대 전단력(Vm)에서의 응력분포(해1):Darwin ]



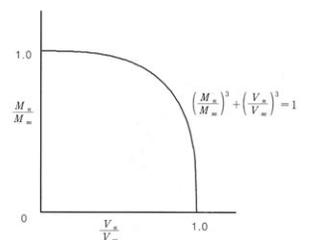
[ 그림 6 최대 전단력(Vm)에서의 응력분포(해2, 해3):Darwin ]

그림 5는 Von Mies 항복조건을 단순화하고 철골 T단면내의 중립축의 위치를 특정범위로 제한시킨 해1의 응력분포를 나타내고 그림6은 T단면 내의 국부 평형조건을 무시한 해2 및 해3의 응력분포를 나타낸다. 또한 그림 7과 같이 콘크리트 슬래브 전체두께(T<sub>s</sub>)의 3배를 전단내력에 저항하는 부분(Shear area)로 가정하였다.



[ 그림 7 콘크리트 슬래브에서의 전단면적(Shear area) : DARWIN ]

그림 8은 Darwin 등이 전단력과 모멘트를 동시에 받는 유공 합성보의 최대 내력을 구하기 위해 제안한 상관관계곡선을 나타낸다. 여기서는 모멘트가 전혀 작용하지 않은 경우의 순수 전단내력을 나타내며 은 전단력이 전혀 작용하지 않은 경우의 순수 모멘트 내력을 나타낸다. Darwin의 강도식 역시 전단내력 산정시 쉬어코넥터의 역학적 거동이 고려되지 않았으며 전단내력에 기여하는 콘크리트 단면을 임의로 가정하였다. 또한 강도식이 근거로 하는 극한상태의 역학구조 (Mechanism)이 실제의 파괴 양상과 다르다는 점에서 실제의 거동을 충분히 나타내지 못하는 단점을 가지고 있다.



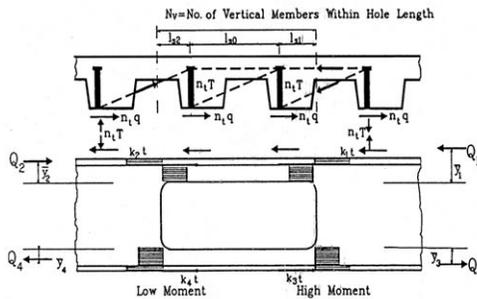
[ 그림 8 모멘트 전단력 상관관계곡선(Darwin) ]

### 4. Cho의 강도식

Cho는 전단력과 모멘트를 동시에 받는 유공 합성보의 최대 내력을 구하기 위해 Redwood가 제시한 그림1과 같은 형태의 상관

관계도를 채택하였다. Cho는 1점에 해당하는 V1과 M1의 값을 그림9와 같은 트러스 모델을 사용하여 구하였다. Cho는 극한 상태에 도달했을 때의 콘크리트 슬래브와 스티드에 작용하는 힘을 콘크리트의 단면은 사방향 및 수평방향 압축응력을 부담하고 스티드(Stud)는 수직 인장응력에 저항하는 스트럿-타이(Strut-tie)모델을 이용하여 나타내었다. 또한 철골의 항복은 Von Mises의 항복 조건에 일치하게 가정한 것이다. 계수 k1-k6는 0과 1사이의 값으로서 플랜지나 웹 혹은 슬래브의 압축 또는 인장 응력 부분의 응력장 비율을 나타내는 수치이다.

트러스 모델에서 수평력  $n_t \cdot T_q$ 를 가정한 다음 트러스 작용에 의한 콘크리트의 수직력  $n_t \cdot T$ 를 구한다. 이 때  $n_t \cdot T$ 는 쉬어코넥터의 Pullout 내력 이내로 제한된다. 그런 다음 위의 수평내력과 수직내력을 합성 응력으로 동시에 작용할 때의 쉬어코넥터의 내력을 검증하게 된다. 이때 최종적인 수직내력은 콘크리트 단면의 전단내력이 되게 되고 이 값에 개구부 상하부의 철골 T단면의 전단내력을 더하여 최종적인 전단내력 V1이 되게 된다. 또한 트러스 모델의 기하학적인 형태에 따른 응력 해석 모델과 쉬어코넥터의 배치에 따라 M1이 구해지게 된다.



[ 그림 9 Cho의 트러스 해석 모델 ]

트러스 해석은 웹 개구부 부분의 슬래브와 쉬어코넥터의 구조적 작용을 분명히 하는데 매우 유효한 방법이다. 트러스 해석에서 쉬어코넥터는 수평력 및 수직력을 동시에 지지하게 되며 개구부 주변의 쉬어코넥터만이 해석에 고려된다. 또한 파괴기구에 근거하여 자동적으로 및 가 결정되게 된다. 그러나 트러스 모델은 스트럿-타이 모델을 적용하는데 있어 쉬어코넥터 위치에서 발생할 수 있는 다양한 응력장(Stress field)를 일반화하여 고려하는데 큰 어려움이 있다. 또한 중실형(Solid) 슬래브에는 비교적 합리적이거나 리브형(Ribbed) 슬래브에는 스트럿의 방향이 리브의 형태를 고려

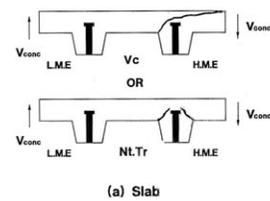
할 때 불합리한 측면이 있다. 그리고 트러스 모델은 슬래브 폭의 변화에 대한 거동의 변화가 충분히 고려되지 못한 단점이 있다.

## 5. 제 안 식

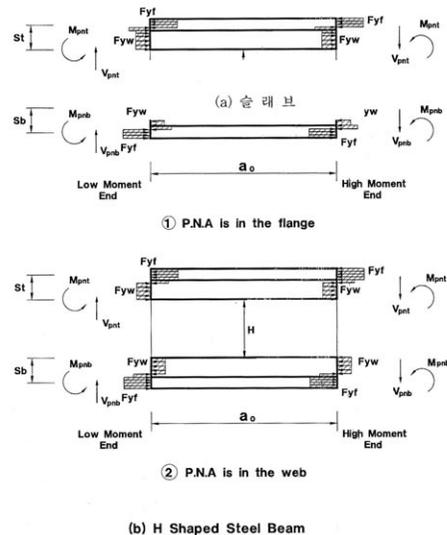
### 5.1 최대 전단내력

#### (1) 해석모델의 제시

본 연구의 해석모델은 그림 10과 같이 제시한다



(a) Slab



(b) H Shaped Steel Beam

[ 그림 10 최대전단력(Vm)에서의 응력분포 ]

#### (2) 콘크리트 단면의 전단내력

콘크리트 단면이 기여하는 전단내력은 다음과 같이 개구부 High moment 단부에 인접한 쉬어코넥터의 Pullout 내력과 국부 휨모멘트 효과가 고려되어 저감된 슬래브의 1면 전단강도 (Reduced 1way shear capacity)중 작은 값으로 한다.

$$T_{max} = N_i T_r = 1.1 \sqrt{f_{ck}} A_c \quad (1)$$

$$V_c = R_o \times 0.53 \sqrt{f_{ck}} \times B \times t_s \quad (2)$$

$$V_{conc} = \min [ T_{max}, V_c ] \quad (3)$$

여기서  $R_o \times 0.85$  (국부 휨모멘트 효과가 고려된 저감계수)

(3) 철골단면의 전단내력

철골단면의 전단내력은 기존의 연구를 인용하여 다음과 같은 값으로 한다.

■ T형 단면의 소성 모멘트

소성 응력으로부터 T형 단면의 소성 모멘트를 구할 때 중립축의 위치를 조사하여 아래와 같이 각 중립축에 해당하는 소성 모멘트를 산출하게 된다.

① 소성 중립축(P.N.A)이 플랜지에 있는 경우

$$(bt_f F_{yf} \geq S t_w F_{yw})$$

$$\Sigma F = 0 \quad bt_f F_{yf} - b(1-k)t_f F_{yf} - st_w F_{yw} = 0 \quad (4)$$

따라서  $k = \frac{A_f F_{yf} + A_w F_{yw}}{2A_f F_{yf}}$  (5)

$$+ A_w \left( \frac{S}{2} + (1-k)t_f \right) F_{yw} \quad (6)$$

$$M_{pn} = \frac{A_f F_{yf}}{2} t_f (k^2 + (1-k)^2)$$

② 소성 중립축(P.N.A)이 웨브에 있는 경우

$$(bt_f F_{yf} < S t_w F_{yw})$$

$$\Sigma F = 0 \quad A_f F_{yf} + kS t_w - (1-k)S t_w F_{yw} = 0$$

따라서  $k = \frac{A_f F_{yf} + A_w F_{yw}}{2S t_w F_{yw}}$  (7)

$$M_{pn} = A_f F_{yf} \left( kS + \frac{t_f}{2} \right) + \frac{1}{2} (k^2 + (1-k)^2) S A_w F_{yw} \quad (8)$$

■ 소성 모멘트에 의한 최대 철골단면의 전단력

식(7), 식(8)로부터 구한을 개구부의 길이의 반인로 나누어주면 비렌디일(Vierendeel)작용에 의한 최대 전단내력을 구할 수 있다.

$$V_{pn1} = \frac{M_f}{a} \quad (9)$$

■ 웨브의 전단항복

T형 단면의 웨브의 항복 전단력은 다음과 같이 구해진다.

$$V_{pn2} = \frac{S t_w F_{yw}}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

■ 철골단면의 전단내력

식(9)와 식(10)의 값 중 작은 값을 택하여 2배한 값이 개구부의

최대 전단내력이 되면 이는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_c = R_o \times 0.53 \sqrt{f_{ck}} \times B \times t_s \quad (11)$$

(4) 최대 전단내력

전단면의 최대 전단내력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{전단내력합계 } V_{CAPACITY} = V_{STEEL} + V_{CONC} \quad (12)$$

5. 2 최대 모멘트 내력

합성보의 웨브 개구부 위치에서 최대 모멘트 내력은 Slutter와 Driscoll에 의하여 개발된 강도모형을 통하여 구할 수 있다. 그림 11에 순수휨만이 작용할 때의 응력도(Stress diagram)이 나타나 있다. 철골부재는 인장과 압축에서 모두 완전소성 상태가 된 것으로 가정된다. 또한 콘크리트에 있어서의 압축력,  $V_{ch}$ 는 1) 슬래브의 파괴강도(Crushing capacity),  $P_c$  2)개구부 High moment와 지점사이의 쉬어코벡터의 전단강도,  $V_{studs}$  그리고 3)철골부재 순단면의 항복강도,  $T'$ 에 의하여 제한된다.

$$P_{ch} \leq P_c \quad (13a)$$

$$\leq P_{studs} \quad (13b)$$

$$\leq T' \quad (13c)$$

콘크리트 응력블럭(Stress block)은 전층에 걸쳐서  $0.85 f_{ck}$ 로 가정된다. 그래서 슬래브의 파괴강도(Crushing capacity)는 식(14)가 된다.

$$P_c = 0.85 f_{ck} \cdot b_e \cdot t_e \quad (14)$$

여기서  $f_{ck}$ 는 콘크리트의 압축강도(kgf/cm<sup>2</sup>),  $t_e$ 는 슬래브의 유효층 보길이와 직각방향의 리브형 슬래브(Ribbed slab)의 경우  $t_e = t_s$  슬래브의 얇은 판 두께

쉬어코벡터의 전단내력은 식(15)가 된다.

$$P_{studs} = N \cdot R \cdot Q_n \quad (15)$$

여기서 N = 개구부 High moment단과 지점사이의 스티드

R = 리브형 슬래브의 스티드에 대한 감소계수

$Q_n$  = 중실형 슬래브에 삽입된 스티드의 공칭감도

보길이와 직각방향의 리브에 대한 R은 식(16)로부터 얻게 된다.

$$R = \frac{0.85}{\sqrt{N_t}} \left( \frac{W_r}{h_r} \right) \left( \frac{H_s}{h_r} - 10 \right) \leq 1.0 \quad (16)$$

여기서  $h_r$  = 리브의 공칭높이,  $H_s$  = 용접후의 스테드의 높이  
 $N_t$  = 리브당 스테드 수,  $W_s$  = 리브의 평균폭

순수 휨 아래에서는 전단력이 0 이므로 웨브의 항복강도는 저감 되지 않는다. 철골보 순단면의 항복강도는 식(17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T' = F_y [2(b-t_w)t_f + S_t \cdot t_w + S_b \cdot t_w] \quad (17)$$

그리고 응력블럭(Stress block)을 식(18)로 나타낼 수 있다.

$$a = \frac{P_{ch}}{0.85 f_{ck} \cdot b \cdot c} \quad (18)$$

$P_{ch}$  는 플랜지 상부로부터  $d_h$  떨어진 거리에서 작용하게 되고

$$d_h = T_s - \frac{a}{2} \quad (19)$$

로 나타낼 수 있다.

$d_h$  는 철골텍크의 상부아래의 콘크리트를 고려하여 계산하여야 한다.

$P_{ch} = T'$  이면 그림 11의 (a)와 같이 중립축이 슬래브 내에 있게 되고 최대 모멘트 내력은 식(20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_m = P_{ch} \cdot d_h + F_y(b-t_w)t_f \cdot d + F_y \cdot t_w \left( S_t^2 - \frac{S_b^2}{2} + S_b \cdot d \right) \quad (20)$$

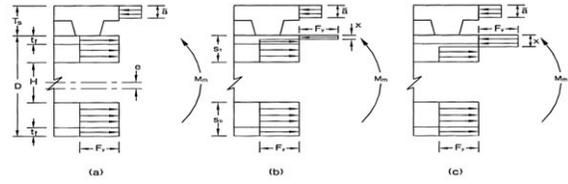
$P_{ch} < T'$  만일 이면 중립축은 철골재의 T단면 내에 있게 되고 철골단면의 압축력은 식(21)과 같이 된다.

$$C' = \frac{T' - P_{ch}}{2} \quad (21)$$

상부 T단면에 있어서 중립축의 위치 X는 철골단면의 상부로부터 측정된다. 만일  $C' \leq F_y \cdot b \cdot t_f$  [그림 11(b)]이면  $X < T_f$  이고 다음식(22)로부터 얻게 된다.

$$X = \frac{C'}{F_y \cdot b} \quad (22)$$

(a)중립축이 슬래브내에 있는 경우 (b)중립축이 플랜지에 있는 경우 (c)중립축이 웨브에 있는 경우



[그림 11 최대모멘트에서의 응력도]

그리고  $M_m = P_{ch} \cdot d_n + F_y(b-t_w) (t_f \cdot d - X^2) + F_y t_w (S_t^2 - \frac{S_b^2}{2} + S_b \cdot d - X^2)$  (23) 이 된다. 만일  $C' > F_y \cdot b \cdot t_f$  [그림 11 (c)]이면,  $X > t_f$  이고 다음식 (24)로부터 얻게된다.

$$X = \frac{C'}{F_y \cdot t_w} - \frac{(b-t_w)t_f}{t_w} \quad (24)$$

그리고  $M_m = P_{ch} \cdot d_n + F_y(b-t_w) (t_f \cdot d - t_f^2) + F_y t_w (S_t^2 - \frac{S_b^2}{2} + S_b \cdot d - X^2)$  (25) 이 된다.

### 5.3 모멘트-전단력 상관관계식

단면의 최대 모멘트내력 과 최대 전단내력 이 구해지면 모멘트 와 전단력이 동시에 작용하는 중간 값들은 다음과 같은 3차식을 적용하였을 때

기존의 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

$$\left( \frac{M_m}{M_n} \right)^3 + \left( \frac{V_m}{V_n} \right)^3 = 1.0 \quad (26)$$

여기서  $M_m$  : 단면의 최대 모멘트(tonf · m)

$V_m$  : 단면의 최대 전단력(tonf)

$M_n$  : 단면의 공칭 모멘트(tonf · m)

$V_n$  : 단면의 공칭 전단력(tonf)

식(26)에 을 곱하면  $\left( \frac{V_n}{V_m} \right)^3$  을 곱하면

$$\left( \frac{M_m}{M_n} \right)^3 + \left( \frac{V_n}{V_m} \right)^3 + I = \left( \frac{V_n}{V_m} \right)^3 \quad (27) \text{ 이 된다.}$$

$M_n/V_n = M/V$  로 하고 이 식을  $V_n$  에 관하여 정리하면 다음과 같다

$$V_n = V_n \left\{ \left( \frac{M}{V} \right)^3 + I \right\} \quad (28)$$