

# Head Reinforcement 인발강도를 위한 파괴 메커니즘

## Failure Mechanism for Pull-Out Capacity of Headed Reinforcement

홍 성 곁\*  
Hong, sung gul

최 동 욱\*\*  
Choi, Dong-Uk

권 순 영\*\*\*  
Kwon, soon young

### ABSTRACT

This study presents failure mechanisms for the pull-out strength of headed reinforcement for upper bound solution based on the limit theorem. The failure mechanisms to be presented follow the failure surface pattern of punching shear failure found in the joints of slab with a column. Several failure surfaces of the mechanisms have different characteristics for dissipation works and these mechanisms are able to interpret the role of bar details surrounding headed reinforcement.

### 1. 서론

#### 1.1 연구배경 및 목적

Head reinforcement는 비교적 새로운 구조재로 철근의 정착능력을 증강시킬 수 있어 근래에 기초 슬래브, 기둥-보 접합부, 코벨, 전단벽 등에 활용도가 확대됨으로써 연구가 활발히 진행 중이다. 예를 들어 기존 철근콘크리트 구조물의 외부 기둥-보 접합부에서 보 인장 철근의 정착에 사용되는 90° 및 180° 갈고리(hook)는 콘크리트 구조설계기준에 의하여 적절히 제작 및 시공되는 경우, 보의 주 철근을 정착에 의한 인장파괴시킬 수 있는 효과적인 방법이지만, 갈고리는 현장가공 및 철근 조립 과정에서 시공성을 감소시키는 경향이 있다. 또한, 최근 설계기준강도 270 kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 콘크리트 사용이 일반화됨으로 인하여 철근 콘크리트 부재 단면, 특히 기둥 단면이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이에 따라서 제한된 기둥 단면에 철근이 동시 시공됨으로 인하여 기둥 내부의 철근이 고밀화 되고 이는 다시 콘크리트 타설 및 진동 다짐 등에 큰 불편을 초래하고 있으며 현장 시공성 및 경제성이 필연적으로 감소된다. 따라서 Head reinforcement를 사용으로 철근 배근의 밀집정도를 줄이고 시공성을 높이는데 효과적인 대체 방법이 될 수 있다. 최근 캐나다를 중심으로 'Headed Reinforcement'의 개발 및 그 구조적 성능에 대한 연구결과가 발표되고 있으며, 기계적 정착기구의 사용에 따른 구조설계식도 점차 제안되고 있다.

기존의 Head reinforcement의 부착 및 인발강도 산정식은 ACI 규준과 CCD (Concrete Capacity Design Method)방법을 주로 이용하고 있으나 이러한 규준 식들은 실험적인 결과에 많이 의존하므로 기본적인 배근 유형이나 주변의 보강 배근에 대한 영향분석에 어려움이 있다. 본 논문의 목적은 파괴 메커니즘을 분석하고 이를 한계이론을 이용하여 여러 가지 변수들을 고려한 강도 산정식을 유도한다. 이는 주변의 보강된 배근의 영향을 분석하여 Strut-Tie Model을 통한 Head reinforcement의 설계의 효과적인 방법을 제시하는 데 있다.

\* 서울대학교 건축학과 조교수

\*\* 한경대학교 건축학과 교수

\*\*\* 서울대학교 건축학과 석사과정

## 1.2 기본 가정

소성이론에 의거한 강도 산정 식을 구하기 위해 다음과 같은 가정이 필요하다.

- 1) 재료의 소성학적 이상화 : 콘크리트에 적절한 유효계수를 도입하여 재료는 탄성-완전소성 재료로 이상화 한다. 본 논문에서는 M .P .Nielsen이 제시한 계수를 사용한다.
- 2) Normality Condition : 파괴 메커니즘 발생시 소성변위는 소성에너지가 최대 값 일 때 항복곡선에 대해 직각 방향의 벡터를 설정한다.
- 3) 항복조건 : 콘크리트의 항복 조건은 모어-쿨롬 파괴 범주에 따르며 인장강도를 무시한 간편한 정사각형 모양의 항복 조건식을 이용 한다.

## 2. 기존 강도 산정식

ACI 기준에서 정하고 있는 강도 산정식과 CCD 산정식을 가지고 변수들을 비교 분석하고 한계 이론을 이용한 강도 산정 식에 적용할 수 있는 변수 및 기하학적 조건을 고려해 본다.

### 2.1 ACI 349-90 "Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures"

ACI Committee 349는 콘크리트의 파괴 모드를 콘(Cone)모양의 모델로 제시하고 있으며 인발강도는 다음과 같다.

$$N_{no} = \frac{A_N}{A_{NO}} 0.96 \sqrt{f'_{cc}} h_{ef}^2 \left(1 + \frac{d_u}{h_{ef}}\right) N \quad (1)$$

$A_N$  : 실 투영 면적

$A_{NO}$  : 총 투영면적

$$\sqrt{f'_{cc}} = 1.18 \sqrt{f'_c}$$

$f'_{cc}$  : 200 mm 입방체 콘크리트 압축강도

$d_u$  : 앵커 철근 직경

$h_{ef}$  : 유효 매립 깊이

### 2.2 CCD Method (Concrete Capacity Design Method)

CCD방법 또한 ACI349처럼 물리적인 파괴 모델에 기본을 두고 유도하였으며 강도식은 다음과 같다.

$$N_{no} = \frac{A_N}{A_{NO}} \psi_2 k_{nc} \sqrt{f'_{cc}} h_{ef}^{1.5} N \quad (2)$$

$k_{nc} = 13.5$  , Post-installed fasteners     $k_{nc} = 15.5$  , cast-in situ headed studs and headed anchor bolts

$\psi_2$  : 연단부 앵커의 경우 비대칭 응력분포 고려한 보정 계수

$$\psi_2 = 1 \quad \psi_2 = 0.7 + 0.3 \frac{c_1}{1.5h_{ef}} \quad \text{if } c_1 < 1.5h_{ef}$$

$c_1$  : 가장 가까운 연단에서 앵커 중심간 거리

(1),(2)식에서 볼 수 있듯이 앵커의 인발강도를 좌우하는 변수는 콘크리트의 압축강도와 앵커의 산입깊이임을 알 수가 있다. 그 외에도 연단이나 코너부분에 위치해 있을 때 강도는 외부적인 경계조건에 따라 강도가 저감된다는 것을 알 수가 있다. Alan DeVries의 박사 논문<sup>2</sup>을 보면 인발 강도에 영향을 미치는 요소로 유효 산입 깊이, 콘크리트 강도, 수평 보강근 여부, Development Length, 연단거리 등을 언급하였으며 주요 요소로는 유효 산입깊이와 콘크리트 강도를 들고 있다.

## 3. 한계 이론을 이용한 인발 강도 산정식 유도

### 3.1. 기본 사항 및 가정

Head reinforcement의 파괴 형상은 슬래브의 풀립 전단파괴의 형태와 매우 유사하다. 그림.1에서 볼 수 있듯이 파괴 형태가 앵커 인발의 경우와 매우 일치하므로 적절한 접근을 통하여 기존의 연

구결과를 쉽게 적용할 수 있다. 뚫림 전단파괴에 대한 이론적 접근에서 파괴면 형태의 가정이 매우 중요한 요소로 가장 작은 값을 갖는 Upper-bound Solution을 위하여 변분법(Calculus of Variation)을 통해 구할 수 있다 (Nielsen<sup>1</sup>). 일반적으로 Support Diameter와 Punching Diameter가 정해지면 콘크리트의 인장력  $f_t$  를 고려하지 않을 때 Optimum Opening Diameter를 구할 수 있고 그중 가장 큰 인발강도를 갖는 것은 콘크리트 파괴 면을 직선으로 가정했을 때이다 (그림.2). 물론 곡선으로 해석하여 구할 수 있으나 본 논문에서는 우선 간단한 해를 구하기 위해 콘 모양의 파괴 모드를 가정한다.

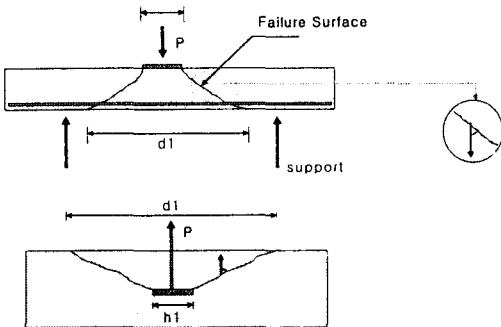


그림1 슬래브와 Head 철근의 파괴 형태

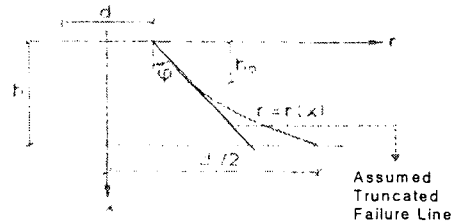


그림2 슬래브 뚫림 전단의 가정 파괴면

### 3.2. 상한계 해법(Upper-Bound Solution)

앵커 인발시 파괴되는 메커니즘을 슬래브 해석에 사용되는 콘 형태와 피라미드 형태로 가정한다.

#### 3.2.1 Simple Pull-out Failure 메커니즘

여러 가지 파괴 메커니즘을 가정해 볼 수 있겠지만 그림.3 (b), (c)의 파괴 형태는 실험에서도 나타나지 않아 신빙성이 없고 결과 값도 콘 파괴 메커니즘보다 상한값을 나타내기 때문에 단순 인발 시험에선 (a) 콘 형태의 파괴 모드가 지배적이다.

얕은 산입 깊이(Shallow-Embedment Depth)에서 가장 지배적인 파괴 모드인 단순 Pull-out 메커니즘(그림.3 (a))은 슬래브 뚫림 전단력 산정 공식과 같이 적용할 수 있다. 즉 부재가 파괴 되면서 소산된 에너지는 외부의 앵커에 걸리는 인장력의 에너지와 같기 때문에 파괴하중은 다음과 같이 유도할 수 있다.

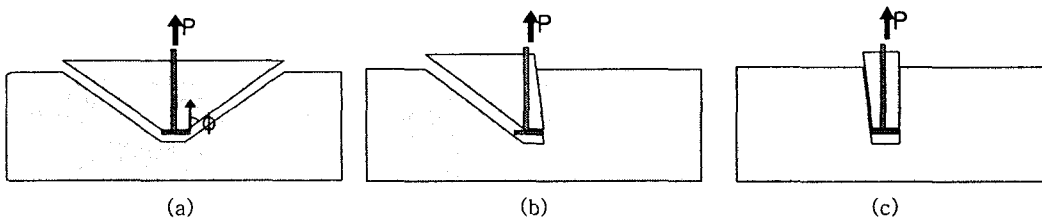


그림3 단순 인발 파괴 메커니즘(Simple Pull-out Failure)

파괴 면을 원형 콘으로 가정한 경우 :

$$P = \pi f_c \frac{h_d}{2} (d_b + h_d \tan \alpha_0) \frac{(1 - m \sin \alpha_0)}{\cos \alpha_0} \quad (3)$$

파괴면을 피라미드로 가정한 경우 :

$$P = f_c [h_d (h_1 + h_2) + 2h_d^2 \tan \alpha_0] \frac{(1 - m \sin \alpha_0)}{\cos \alpha_0} \quad (4)$$

$h_d$  : 앵커 산입 깊이

$d_b$  : 앵커 직경

$f_c$  : 콘크리트 압축 강도

$\alpha_0$  : 콘크리트 표면과 파괴면 각도

$$l : 1 - 2 \frac{f_t}{f_c} \frac{\sin \mu}{1 - \sin \mu}$$

$$m : 1 - 2 \frac{f_t}{f_c} \frac{1}{1 - \sin \mu}$$

$h_1, h_2$  : Head Dimension ( $h_1$  : 장변  $h_2$  : 단변)

위의 식.1 과 식.2 로 구한 결과 값은 3.2.2절의 회전 메커니즘으로 구한 결과 값과 함께 비교한다.

### 3.2.2 회전 메커니즘

회전 메커니즘은 파괴 형상이 그림.4 과 같다고 가정하고 그림.5에서 볼 수 있듯이 발생하는 변위 ( $a$  점 중심의 회전각  $w$ )를 잡아 외력이 한 일과 Dissipation의 평형관계를 이용하여 유도 하였다. 회전각은 아래에서 볼 수 있듯이  $a$  지점을 기준으로 회전하는 것으로 가정하며 강도 산정 식을 유도 하면 외력 하중  $P$  가 한일은 다음과 같다.

$$W_E = \frac{P}{2} u_d \quad (5)$$

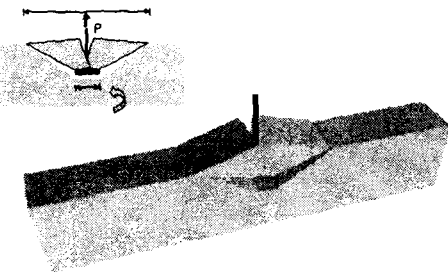


그림4 회전 메커니즘

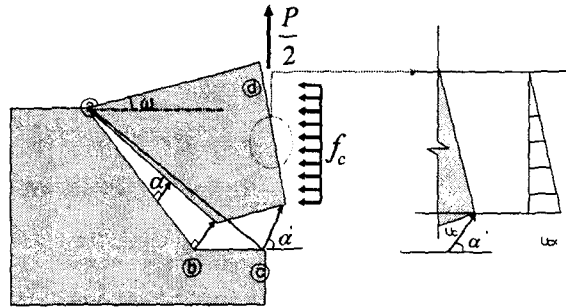


그림5 회전메커니즘의 변위와 회전각

그림.7에서 보면 내부 소산 에너지가 발생하는 3부분의 영역이 나타나 있으며 각각의 소산에너지가 외력이 한일과 평형을 이루게 된다. ①번 영역은 압축력으로 ③번 영역은 미끄러짐 파괴로 인한 소산에너지로 산정한다.

$$D = D_1 + D_2 + D_3 \quad (6)$$

압축을 받는 ①번 영역의 소산에너지는 변위  $u_{dy}$ 를 미소하다고 가정하고 압축대의 길이를 산입깊이 ( $h_d$ )로 가정하여 산출하면 다음과 같다.

$$u_{dy} = \overline{adw} \quad u_{\alpha} = \overline{acw \cos \alpha} \quad \alpha' = \tan^{-1} \left( \frac{\frac{h_1}{2} + h_d \tan \alpha}{h_d} \right)$$

$$D_1 = f_c u_\alpha [h_2 h_d + (2 \tan \alpha - \frac{h_2}{h_d}) \frac{h_d^2}{2} - \frac{2}{3} h_d^2 \tan \alpha] \quad (7)$$

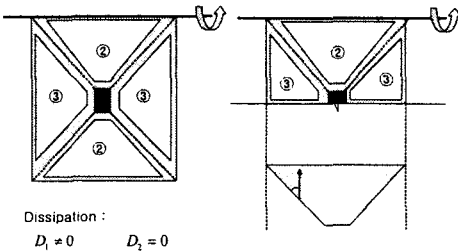


그림6 회전메커니즘 평면도

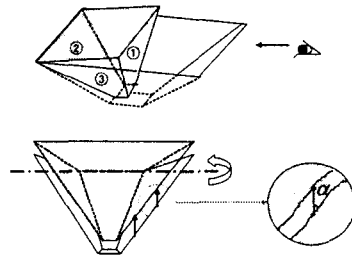


그림7 회전 메커니즘의 입체도

그림.5와 그림.6 을 보면 파괴메커니즘이 a 지점을 중심으로 회전 하므로 ②번 영역은 Dissipation 각이 90가 되어 콘크리트의 인장력 ( $f_t$ )을 고려지 않을 때 단위 면적당 소산 에너지  $D_u$  (Dissipation of Unit Area)가 0이 된다.

$$D_2 = 0 \quad (8)$$

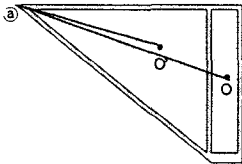


그림8 ③번 영역의 측면도

$$\bar{a}o = \sqrt{(\frac{2}{3} h_d \tan \alpha)^2 + (\frac{h_d}{3 \cos \alpha})^2}$$

$$\bar{a}o = \sqrt{(\frac{h_d}{2})^2 + (\frac{h_1}{4} + h_d \tan \alpha)^2}$$

그림.7은 그림.6의 평면도를 입체적으로 그린 그림이며 그림과 같은 시점으로 메커니즘을 바라보면 쉽게 ③번영역의 Dissipation각을 인식 할 수 있다. 전 영역에 걸쳐 Dissipation 각이  $\alpha$ 로 일정하므로 소산에너지는 다음과 같다.

$$D_3 = \frac{1}{ad} f_c (1 - \sin \alpha_0) (\frac{\bar{a}o h_1 h_d}{2 \cos \alpha} + \frac{\bar{a}o' h_d^2 \tan \alpha}{2 \cos \alpha}) \quad (9)$$

따라서 식.7 ~ 식.9 의 소산에너지와 식.5 의 외력이 한일을 동일하게 놓아 인발 강도 식을 유도하면 다음과 같다.

$$P = \frac{1}{ad} [2f_c \bar{a}c \cos \alpha (h_2 h_d + (2 \tan \alpha - \frac{h_2}{h_d}) \frac{h_d^2}{2} - \frac{2}{3} h_d^2 \tan \alpha) + 2f_c (1 - \sin \alpha_0) (\frac{\bar{a}o h_1 h_d}{2 \cos \alpha} + \frac{\bar{a}o' h_d^2 \tan \alpha}{2 \cos \alpha})] \quad (10)$$

위에서 구한 산정 식을 가지고 Test 결과 및 CCD 방법으로 구한 결과 값을 비교해 보면 다음과 같다. 그림.9를 보면 CCD Method 는 실험 결과 값을 다소 과소평가 하고 있으며, 본 논문에서 구한 Upper-Bound Solution은 테스트 결과 보다 상한계 해를 구한 것을 볼 수 있다.

<표.1> 실험체 규격

단위 (mm)

Test ID	1	2	3	4	5	6	7	8
철근직경( $d_b$ )	20	20	20	20	35	35	35	20
Head	50x50	70x35	50x50	70x35	90x90	100x55	90x90	50x50
산입깊이( $h_d$ )	36	36	113	113	80	80	209	229

테스트 결과 값 중 3, 4번 실험체와 6,8번 실험체는 한계이론으로 구한 산정식이 철근의 종국 강도를 넘었기 때문에 철근의 종국강도를 산입하여 그래프로 나타내었다. 철근의 항복 강도를 고려하지 않고 콘 형태, 피라미드 형태, 회전 메커니즘의 결과 값을 비교해보면 그림10에서 볼 수 있듯이 실험 결과 값 보다는 상한계 값을 산출하고 있으며 콘 형태의 메커니즘이 가장 낮은 값을 보이는데 이는 가정 파괴면의 면적이 피라미드 형태 메커니즘 보다 작기 때문이며 회전 메커니즘이 가장 큰 값을 나타내고 있는데 이는 단순 인발 시험의 파괴 형태가 콘 모양으로 파괴되기 때문이며 회전 메커니즘의 파괴 형태가 일어나기 어렵다는 것을 단적으로 보여 주고 있는 것이다. 하지만 앵커 철근이 연속적으로 배치되어 인발력을 받을 경우에는 콘 형태의 파괴 형상보다는 회전 메커니즘의 형상으로 파괴되어지기 때문에 각각의 철근의 위치 및 외부 형태적인 변수를 고려한 적절한 메커니즘을 선택하여 산정식을 산출해야 하는 것이다.

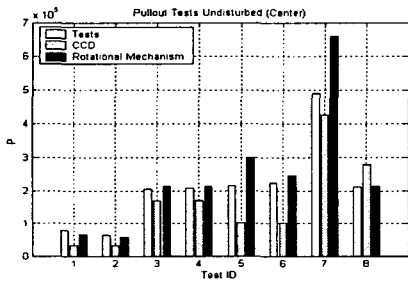


그림.9 실험결과, CCD, 회전메커니즘 결과 비교

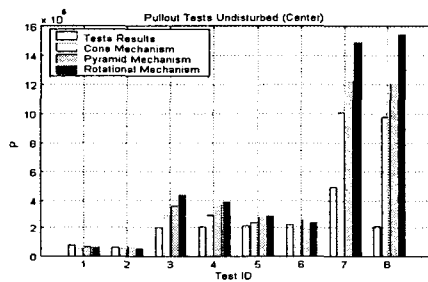


그림.10 콘 및 피라미드메커니즘, 회전메커니즘 결과비교

#### 4. 결론

한계 이론을 통해 적절한 메커니즘을 가정하여 구한 앵커의 단순 인발 강도 산정 식은 신뢰할 만한 결과 값을 산출 하였으며, 특히 보강 철근이 배근되는 경우 위의 메커니즘에 철근의 소산에너지만 추가하여 인발강도를 산출할 수 있기 때문에 충분히 실용적이라 하겠다. 따라서 Head 철근이 사용되는 구조물의 각 부분에 대해 실험 데이터를 기반으로 한 적절한 메커니즘을 구성하고 구체적인 구조설계식의 제안하는 것이 본 논문의 최종 목표이다.

#### 참고문헌

1. Nielsen M.P. Limit analysis and concrete plasticity . Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984.
2. DeVries, R.A.; Jirsa, J.O.; and Bashandy, T., "Anchorage Capacity in Concrete of Headed Reinforcement with Shallow Embedments," ACI Structural Journal, Vol.96, No.5, Sep.-Oct. 1999, pp.728-736.
3. Fuchs, W.; Eligenhausen, R.; Breen, J.E., "Concrete Capacity DDesign (CCD) Approach for Fastening to Concrete," ACI Journal , Vol.92, No.1, Jan.-Feb. 1995, pp.73-94.