

## 컷오프 구간에 정착된 대구경 확대머리철근에 대한 횡보강근의 효과

정형석<sup>1\*</sup>

### Effects of Transverse Reinforcement on Headed Bars with Large Diameter at Cut-off Points

Hyung-Suk Jung<sup>1\*</sup>

**Abstract :** The nuclear structures are composed of large diameter bars over No.36. If the hooked bars are used for anchorage of large diameter bars, too long length of the tail extension of the hook plus bend create congestion and make an element difficult to construct. To address those problems, headed bars were developed. Provisions of ACI 318-08 specify the development length of headed bars and ignore the effect of transverse reinforcement based on the background researches. However, if headed bars are used at the cut-off or lap splice, longitudinal reinforcements, which are deformed in flexural members, induce tensile stress in cover concrete and increase the tensile force in the transverse reinforcement. The object of this research is to evaluate the effects of transverse reinforcement on the anchorage capacity of headed bar so anchorage test with variable of transverse rebar spacing was conducted. Specimens, which can consider the behavior at the cut-off, were tested. Test results show that failure of specimen without transverse reinforcement was sudden and brittle with concrete cover lifted and developed stress of headed bars was less than half of yield strength of headed bars. On the other hand, in the specimen with transverse reinforcement, transverse rebar directly resist the load of free-end so capacity of specimens highly increased.

**Keywords:** Cut-off, Headed bar, Large diameter, Transverse reinforcement

## 1. 서 론

원자력 발전소의 철근콘크리트 구조물은 그 특수성에 따라, 대구경 철근(직경 43mm 이상)을 주근으로 사용한다. 하지만 접합부와 같이 배근이 집중되는 곳에서 대구경 철근으로 갈고리 정착을 하게 될 경우, 기준에서 요구하는 구부림 및 갈고리 길이로 인해 설계 및 배근에 있어 큰 어려움을 겪을 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로, 확대머리철근을 사용할 수 있다.

대구경 철근이 주로 사용되는 원자력 발전소의 설계기준으로는 ACI 349-06(2006) 및 ASME III div.2(2010)가 주로 활용되고 있으며, 두 기준 모두 확대머리철근의 사용을 허용하고 있다. ACI 기준의 경우 Appendix D에 명시된 CCD (Concrete Capacity Design) 설계법을 이용하여 기계적

정착의 설계를 하도록 권고하고 있다(ACI 349, 2006). 그러나 이러한 설계법은 앵커의 지압력만을 고려하여 만들어진 설계법으로, 이를 확대머리철근에 적용할 경우 이형철근의 부착력을 고려하지 못함에 따라 과도한 정착길이를 요구하게 된다. ASME III Div.2 기준의 경우 확대머리철근의 사용을 허용하고 있으나, 정착길이, 확대머리 치수와 같은 설계 방법에 대한 구체적인 언급이 없어 실질적인 적용에는 어려움이 있다(ASME, 2010).

ACI 318-08(2008)에서는 식 (1)과 같은 확대머리철근의 정착길이 설계식을 도입하였다. 이는 갈고리 정착길이 설계식과 유사한 형태를 가지고 있으며, 확대머리철근의 정착길이는 갈고리 정착길이의 80% 정도를 요구하고 있다.

$$l_{dt} = 0.19 \frac{f_y}{\sqrt{f_{ck}}} d_b \quad (1)$$

여기서,  $f_y$ 는 철근의 항복강도,  $f_{ck}$ 는 콘크리트 설계기준 압축강도,  $d_b$ 는 철근의 지름이다.

이러한 정착길이 설계식은 DeVries(1996)의 인발실험 및

<sup>1</sup>정회원, 가톨릭관동대학교 건축공학과 조교수

\*Corresponding author: junghs@cku.ac.kr

Department of Architectural Engineering, Catholic Kwandong University, Gangneung-si, Gangwon-do, 25601, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Thompson et al.(2005; 2006)의 CCT 절점 실험과 겹침이음 실험의 결과를 바탕으로 제정되었다. 또한, 실험에 사용된 변수의 범위를 바탕으로 ACI 318-08(2008)에서는 철근 직경(36mm 이하), 철근 항복강도(420MPa 이하) 및 콘크리트 압축강도(42MPa), 순피복두께( $2d_b$  이상) 및 철근 순간격( $4d_b$  이상) 등에 대한 제한규정을 두고 있다. 이러한 제한규정에 따라 확대머리를 대구경 철근에 적용하는 것이 현실적으로 불가능한 실정이다.

또한 확대머리철근 정착길이 설계식에서는 횡보강근의 영향력을 고려하지 않고 있다. DeVries(1996)는 문힘길, 피복두께, 횡보강근을 변수로 인발실험을 수행하였으며, 횡보강근은 내력에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. Thompson et al.(2005)의 CCT 절점 실험에서는 횡보강근의 유/무에 따라 파괴거동의 형태는 달라졌지만, 횡보강근이 확대머리철근의 정착성능에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 그러나 Thompson et al.(2006)의 겹침이음실험에서는 횡방향 구속상세에 따라 정착성능이 향상되는 결과를 나타났다. Tie-down 철근을 사용한 경우 11%의 내력 증가가 나타났으며, hairpin 철근을 사용한 경우 최대 50% 까지 내력이 증가하는 경향을 보였다. Lee(2008)의 겹침이음실험에서도 구속상세에 따라 정착성능이 향상되는 결과를 보였다. 횡방향 철근이 없는 경우와 비교하였을 때, 횡보강근만 배근된 경우에는 최대 36%의 내력상승이 나타났고, 횡보강근과 tie-down 철근을 같이 배근한 경우에는 최대 47%의 내력상승이 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 확대머리철근의 정착 조건에 따라 횡보강근의 영향력이 달라짐을 확인할 수 있다.

인발실험 및 CCT 절점 실험에서 확대머리철근은 순수 인장상태이며, 겹침이음실험에서 확대머리철근은 휨-인장 상태이다. 겹침이음실험과 같이 부재의 휨변형에 의해 철근이 변형하게 되면, 철근에 작용되는 인장력이 동일 선상에 존재하지 않기 때문에 철근에 직각방향의 분력이 발생하게 되며, 인장재 자체의 휨강성에 의해서도 인장재를 원래 직선 상태로 회복하려는 힘이 발생하게 될 것으로 예상된다. 이러한 2가지 힘이 피복콘크리트를 탈락시키는 힘으로 작용하여, 콘크리트에 추가적인 인장응력이 발생하게 될 것으로 예상된다. 이에 따라 Fig. 1과 같이 횡보강근에 작용하는 인장응력도 함께 증가하게 되며, 이러한 이유로 확대머리철근이 휨변형이 발생하는 겹침이음구간이나 컷오프구간에 정착될 경우에는 휨변형이 나타나지 않는 정착 조건에 비하여 횡보강근의 영향력이 더 크게 나타나게 될 것으로 예상된다. 따라서 휨을 받는 부재 내에 정착된 확대머리철근의 경우, 횡보강근에 의한 정착성능 향상 효과를 기대할 수 있으며, 이러한 효과는 철근 직경이 증가할수록 더 크게 나타날 것으로 예상된다.

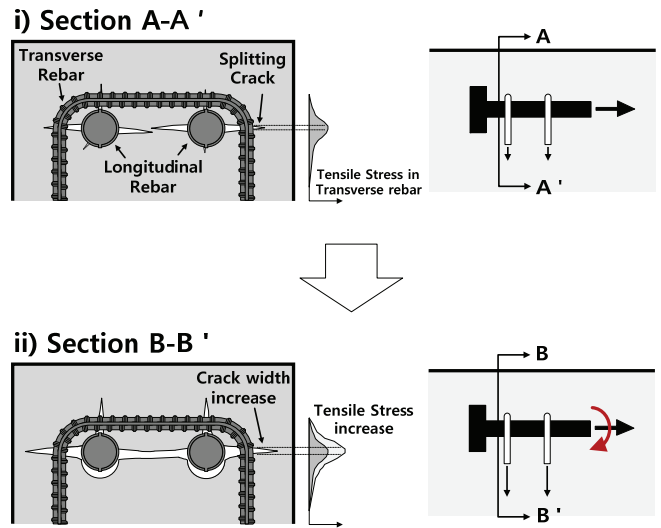


Fig. 1 Increasing the tensile stress in transverse ties in the flexural members

이에 본 연구에서는 컷오프 구간에 정착된 대구경 확대머리철근의 정착실험을 통하여 휨을 받는 부재 내에 정착된 대구경 확대머리철근의 정착성능을 평가하고, 대구경 확대머리철근의 정착성능에 대한 횡보강근의 영향력을 평가하고자 한다.

## 2. 실험 계획

### 2.1 실험체 계획

Fig. 2는 휨부재 내에 형성되는 정착 구간을 나타낸다 (Fib, 2000). 컷오프 구간이나 겹침이음 구간의 경우 정착부에 지점 반력과 같은 구속력이 작용하지 않고 부재의 휨변형이 발생함에 따라, 횡보강근의 영향력이 크게 나타날 것으로 예상된다. 겹침이음 실험의 경우 이러한 부재 휨변형을 고려해 줄 수 있는 실험방법으로, 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔다.

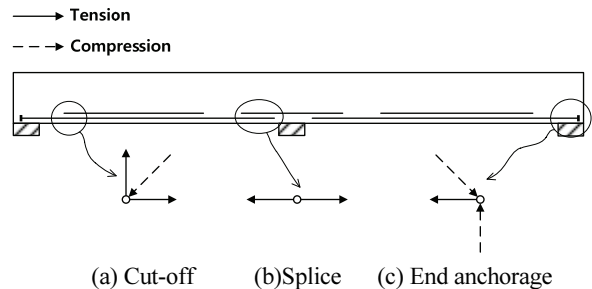


Fig. 2 Special anchorage regions in flexural members

그러나 실제 부재의 휨변형이 발생할 경우 전단력이 발생하는데 비해, 겹침이음 실험방법은 전단력의 영향을 배제함으로써, 실제 부재 내 정착조건과는 상이한 조건을 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 실제 휨 부재의 정착조건과 유사한 조건에서 정착성능 평가가 이루어 질 수 있도록 컷오프 구간을 모사한 실험을 계획하였다.

Ferguson and Thompson(1965)은 Fig. 3와 같은 4점 가력 보 실험을 통해 컷오프 구간에서 직선 철근의 정착성능을 평가하였다. 이 실험에서는 정착길이, 횡보강근 간격, 철근 직경, 피복두께, 콘크리트 압축강도 등을 변수로 하였으며, 횡보강근이 배근됨에 따라, 부착강도가 크게 향상되었다고 보고하고 있다. 본 연구에서도 이와 같은 4점 가력 보 실험을 실시하여, 확대머리철근의 정착성능을 평가하였다.

대구경 확대머리 철근의 정착성능을 평가하기 위한 실험체는 총 3개로 계획되었으며, 실험체 상세와 설계 변수는 Table 1에 나타내었다. 정착부의 성능을 시험하는 대구경 확대머리철근은 D43 철근 2개 사용하였으며, 철근의 항복강도는 420MPa이다. 실험에 사용된 확대머리는 AS TM A 970M(2009) 기준에 따라, 이음부의 지름이 철근 직경의 1.5배가 되도록 하였으며, 확대머리 크기는 ACI 318-08(2008) 기준의 제한값에 따라, 순지압면적( $A_{brg}$ )이 철근 단면적의 4배가 되도록 하였다.

본 연구는 확대머리철근의 정착성능 평가를 위한 목적으로 수행되었기 때문에 전단파괴가 발생하지 않도록, SD400/D16의 전단철근을 정착구간을 제외한 전 구간에 배치하였다. Fig. 4와 같이 정착구간은 횡보강근이 없는 실험체를 고려하여, 전단철근을 주근 길이 방향으로 배치하였다. 또한 피복두께( $c_b$ )대 순간격( $2c_{si}$ ) 비가 작음에 따라 Fig. 4와 같이 확대머리철근 주변에서 횡방향의 쪼갬 균열이 발생할 것으로 예상된다. 이에 따라 전단보강근이 정착성능

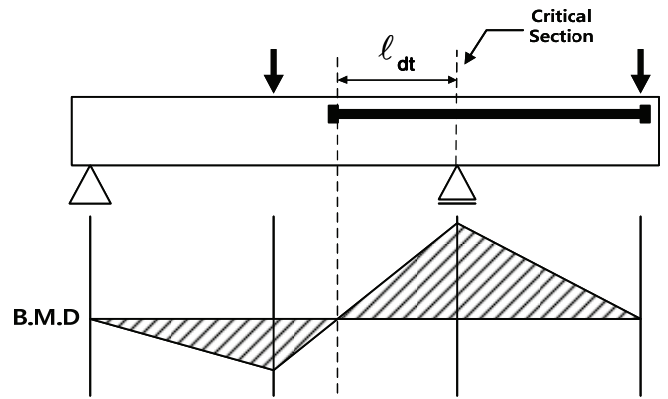


Fig. 3 Concept of Cut-off tests

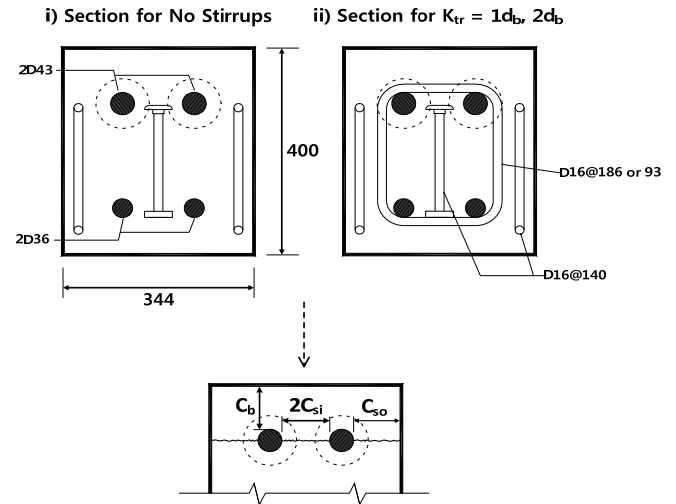


Fig. 4 Specimen sections and expected splitting crack

에 영향을 미치지 않도록 정착구간 내 전단보강근을 모두 확대머리철근 중심 아래로 설치하였다. 횡보강근된 실험체

Table 1 Properties of test specimens

Specimens ID	$f_{cu}$ (MPa)	b (mm)	h (mm)	$l_d$ (mm)	Rebar			Head			Cover and bar spacing			transverse bar		$\frac{(c + K_{tr})}{d_b}$
					$f_y$ (MPa)	$d_b$ (mm)	$A_b$ (mm <sup>2</sup> )	$d_h$ (mm)	$A_{h_2}$ (mm <sup>2</sup> )	$\frac{A_h - A_b}{A_b}$	$c_b$ (mm)	$c_{so}$ (mm)	$c_{si}$ (mm)	$K_{tr}$ (mm)	s (mm)	
#14-15-2-0-42	54.4	344	400	645 (15 $d_b$ )	514	43	1,452	95	7,088	3.88	86 (2 $d_b$ )	86 (2 $d_b$ )	43 ( $d_b$ )	-	-	1.5
#14-15-2-1-42														43 (1 $d_b$ )	186	2.5
#14-15-2-2-42														86 (2 $d_b$ )	93	3.5

$f_{cu}$ : measured concrete strength,  $b$ : width,  $h$ : height,  $l_d$ : anchorage length,  $f_y$ : headed bar yield strength  
 $d_b$ : headed bar diameter,  $A_b$ : headed bar section area,  $d_h$ : head diameter,  $A_h$ : gross area of head,  $c_b$ : clear bottom cover,  
 $c_{so}$ : clear side cover,  $c_{si}$ : half of clear spacing,  $K_{tr} = 40A_{tr}/sn$ : transverse reinforcement index,  $s$ : spacing of transverse bar  
 $n$ : number of bars  $(c + K_{tr})/d_b$ : confinement term in ACI 318-08 12.2.3

의 경우 횡보강근이 없는 실험체와 비교가 가능하도록, 정착구간에 똑같이 주근방향으로 전단보강근을 설치하였다.

모든 실험체의 정착길이는 ACI 318-08(2008) 기준의 확대머리철근 정착길이 설계식을 사용하여 설계하였다. 실험에 사용된 확대머리철근의 내력이 충분히 발휘될 것으로 가정하고, 항복강도( $f_y$ ) 500MPa, 콘크리트압축강도( $f_{ck}$ ) 42MPa를 적용하여, 식 (1)에 따라 정착길이를  $15d_b$ 로 계획하였다. 확대머리철근의 정착길이는 위험단면에서 확대머리의 지압면까지의 거리로 측정되는데, 본 연구의 모든 실험체는 확대머리의 지압면이 변곡점에 오도록 하여, Fig. 3과 같이 부모멘트 최대 지점에서 변곡점까지의 거리가 정착길이가 될 수 있도록 실험체를 계획하였다. 또한 확대머리철근을 모두 부모멘트 영역 안에 배치함으로써, 정착구간이 모두 인장영역에 들어오도록 계획하였다.

실험 변수인 횡보강근의 간격은, ACI 318-08(2008)의 인장 이형철근 정착길이 설계식에 포함된 횡방향 철근지수  $K_{tr}$ 에 따라 결정하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$K_{tr} = \frac{40A_{tr}}{sn} \quad (2)$$

여기서,  $A_{tr}$ 는 정착된 철근을 쪼개질 가능성이 있는 면을 가로질러 배근된 횡보강근의 전체단면적,  $s$ 는 정착구간 내의 횡보강근 배근 간격,  $n$ 는 쪼개지는 면을 따라 정착된 철근의 수이다.

SD400/D16 철근을 횡보강근으로 사용하여, 횡방향 철근지수  $K_{tr}$ 을  $1d_b(186\text{mm})$ ,  $2d_b(93\text{mm})$  및 무보강 상태로 계획하였다. 피복두께의 경우 ACI 318-08(2008)의 확대머리철근 규정에 제시된 제한사항을 만족하도록, 상부피복두께와 측면피복두께 모두 철근 직경의 두 배로 설계하였다. 인장 이형철근 정착길이 설계식에서는 횡보강근과 콘크리트 피복에 의한 구속효과를  $(c+K_{tr})/d_b$ 로 나타내고, 뿔힘 파괴를 고려하여 이것의 최대값을 2.5로 제한하고 있다. 확대머리철근 규정에서는 순간격을 철근직경의 4배 이상으로 제한하고 있으나, 본 연구에서는 횡보강근의 영향력을 보다 적절히 평가하기 위해, 순간격을 기준 제한값의 절반인 철근 직경의 2배로 설계하였다. 이에 따라 실험체의  $(c+K_{tr})/d_b$ 가 1.5, 2.5, 3.5가 되도록 하였다.

## 2.2 가력 및 계측계획

모든 실험체는 끝에서 240mm 떨어진 지점을 가력 및 지지 하였으며, 지점에서 수평반력이 발생하지 않도록 롤러 지점을 두었다. 4점 가력을 수행하기 위해 2,000kN과 1,000kN

용량의 2대의 가력장치가 동시에 사용되었다. 변곡점이 확대머리의 지압면에 위치하도록 하기 위해 중앙부와 단부의 가력비율을 일정하게 유지시키기 위하여 하중 제어를 하여 실험을 수행하였다. 가력속도는 ASTM E8M- 11(2011) 인장 시험 기준을 고려하여 철근 응력이 1~2MPa 씩 일정하게 증가하도록 설정하였다.

철근 변형률 게이지의 경우 확대머리의 지압면에서  $1d_b$  떨어진 곳과 위험단면인 부모멘트 최대지점에 설치하였다. 대구경 철근의 경우 철근 직경이 커서 상부와 하부의 변형률 차가 크게 나타날 수 있으므로 철근 변형률 게이지를 상·하단에 부착하였다. 계측값의 신뢰성을 확보하기 위해 정착된 2개의 확대머리철근의 정착구간에 모두 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다.

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 재료시험 결과

철근 재료시험은 확대머리철근으로 사용된 D43 철근에 대해 수행되었으며, 시험편 3개로 인장시험을 실시하였다. 철근의 재료특성은 Table 2에 정리하였으며, 실험에 사용된 철근의 대표적인 응력-변형률 곡선은 Fig. 5와 같다. 실험 수행일의 콘크리트 압축강도 시험결과는 54.4MPa로 평가되었다.

Table 2 Mechanical properties of headed bar

Nominal diameter (mm)	Cross section area (mm <sup>2</sup> )	Yield Strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Yield strain ( $\times 10^{-6}$ )
43	1452	556.64	198,625	2909

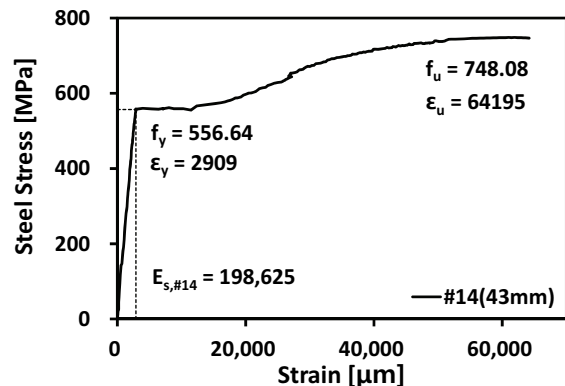


Fig. 5 Stress-strain relationship of headed bar

### 3.2 파괴모드

각 실험체의 파괴모드는 횡보강근의 배근 유무에 따라 다른 양상을 보였으며, 실험체별 파괴모드는 Fig. 6에 나타내었으며, 실험체별 하중-변위 곡선은 Fig. 7에 나타내었다. 모든 실험체의 균열 발생 시점은 단부 가력장치의 하중 ( $P_{end}$ )을 기준으로 나타내었다.

무보강 실험체인 #14-2-0-42(Fig. 6(a))의 경우,  $P_{end} = 22kN$  일 때, 모멘트 최대지점에 초기 균열(a-①)이 발생하게 되었다. 이후 지속적으로 휨 균열이 진전되다가,  $P_{end} = 140kN$  일 때, 확대머리철근 주변에 수평균열(a-②)이 나타났다.  $P_{end} = 150kN$  일 때, 확대머리 부근에 경사 균열(a-③)이 나타남과 동시에 콘크리트 상부 피복이 부재에서 탈락하면서 취성적인 파괴형태가 나타났다.

$K_{tr}$ 이  $1d_b$ 인 #14-2-1-42(Fig. 6(b))의 경우, 초기 균열(b-①) 발생이후 수평 균열(b-②) 발생까지는 무보강 실험체와 유사한 거동을 보였다.  $P_{end} = 206kN$  일 때, 확대머리 부근에서 경사균열(b-③)이 나타났으나 횡보강근이 없는 실험체와 다르게, 콘크리트 상부 피복이 탈락되지 않고 하중이 계속 증가하였다.  $P_{end} = 256kN$  일 때, 확대머리 부근의 균열(b-④)폭이 크게 확장되며, 급격히 내력이 저하되는 취성적인 파괴형태가 나타났다.

$K_{tr}$ 이  $2d_b$ 인 #14-2-2-42(Fig. 6(c))의 경우도  $P_{end} = 227kN$ 에 확대머리 부근에 경사균열(c-③)이 나타난 이후 하중이 계속 증가하였다. 그러나  $K_{tr}$ 이  $1d_b$ 인 실험체와 달리,  $P_{end} = 279kN$ 에서부터 단부의 처짐이 급격히 증가하며 연성적인 파괴형태가 나타났다.

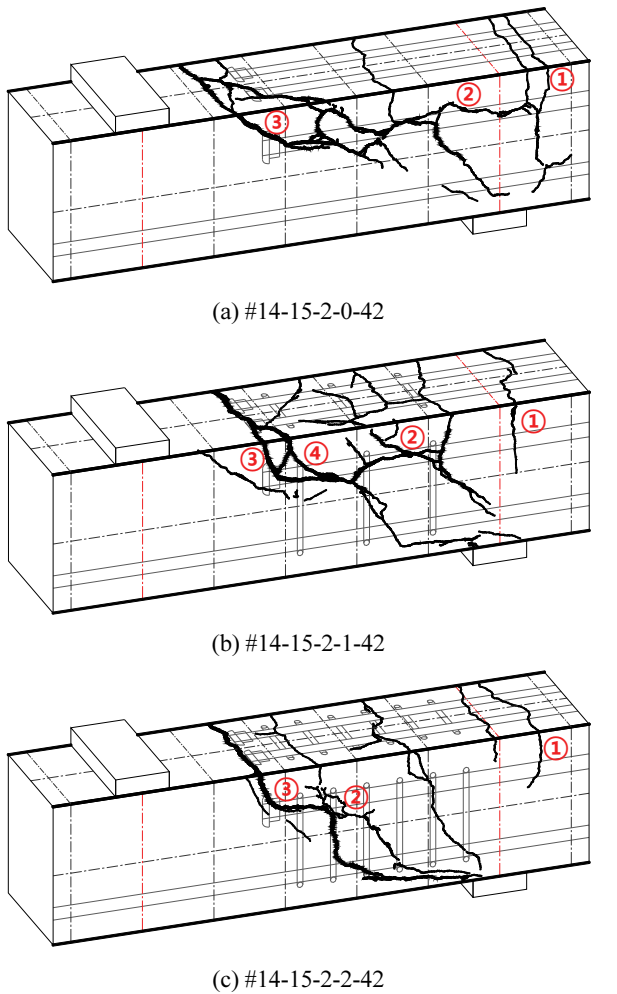


Fig. 6 Failure modes of test specimens

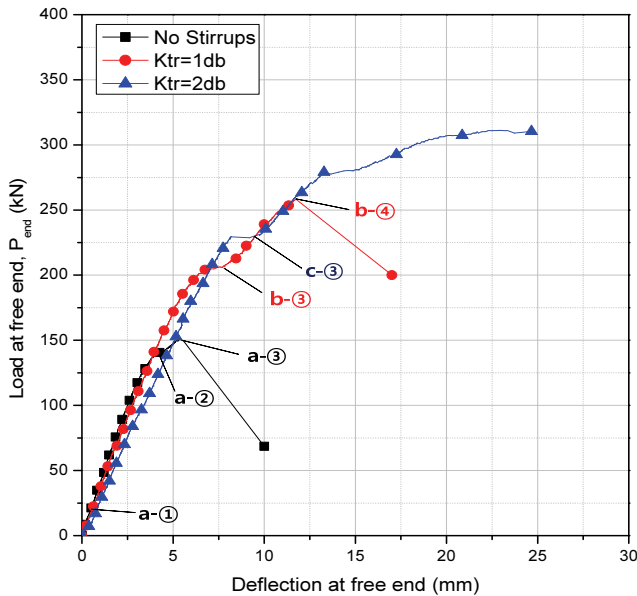


Fig. 7 Load-deflection relationship of specimens

### 3.3 지압력 및 부착력의 기여도

확대머리철근의 정착성능은 일반적으로 부착력과 지압력의 합으로 평가됨에 따라, Fig. 3의 위험단면에서 발현된 철근 응력에 대하여 부착에 의해 발현된 응력과 지압에 의해 발현된 응력으로 나누어 평가하였다. 지압에 의해 발현된 응력의 경우, 확대머리 부근에서 측정한 변형률 값을 이용하였다. 부착에 의해 발현된 응력의 경우, 위험단면의 철근응력에서 지압에 의해 발현된 철근 응력을 소거하여 산정하였다. 각 실험체의 지압력 및 부착력에 의해 발현된 철근 응력의 관계를 Fig. 8에 나타내었다.

세 개의 실험체 모두 초기에는 부착력에 의해 대부분의 철근 응력이 발현되었다. 무보강 실험체의 경우, 확대머리 철근 주변에 수평균열이 발생하기 시작하면서 부착력에 의해 발현되는 응력이 급격히 감소하기 시작하였으며, 최종

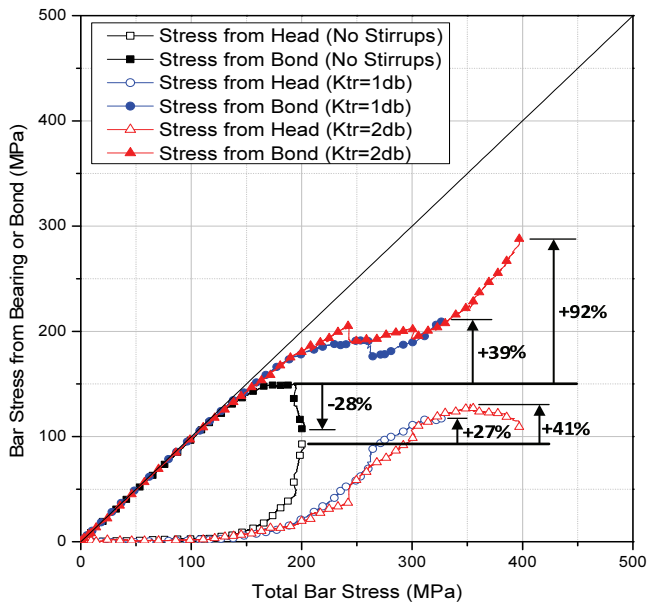


Fig. 8 Components of bar stress provided by bond and head bearing

파괴시에는 부착에 의한 철근 응력이 최대값에서 28% 감소되었다. 이에 따라 지압력에 의한 철근 응력이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

반면  $K_{tr} = 1d_b$ 인 실험체의 경우, 부착에 의한 철근 응력이 감소하지 않고, 무보강 실험체의 최대값에 비해 39% 증가하였으며, 지압에 의한 철근 응력 또한 27% 증가하였다.  $K_{tr} = 2d_b$ 인 실험체 또한, 부착에 의한 철근 응력이 감소하지 않고, 횡보강근이 없는 실험체의 최대값에 비해 92% 정도의 매우 큰 상승을 보였다. 이에 반해 지압에 의한 철근 응력은 41% 증가함에 따라 상대적으로 작은 증가폭을 보였다. 그러나  $K_{tr} = 1d_b$ 인 실험체와 달리, 지압에 의한 철근 응력이 최대값에 도달한 이후에도 실험체는 최종 파괴되지 않고, 지압에 의한 철근 응력이 서서히 감소되며 위험단면의 철근 응력은 계속 증가하는 경향을 보였다.

### 3.4 확대머리철근의 거동

휨 변형이 발생하는 부재 내에 정착된 확대머리철근의 거동을 살펴보기 위해 부재와 확대머리철근의 곡률을 각각 계산하여 비교하였다. 부재의 곡률은 실험체 하부에 설치된 LVDT에서 측정되는 처짐값을 통해 계산하였으며, 확대머리철근의 곡률은 위험단면 상하부에 부착한 변형률 게이지 값을 통해 산정하였다.

각 실험체의 부재 곡률과 확대머리철근의 곡률을 Fig. 9에 나타내었다. 무보강 실험체의 경우, 초기에는 부재와 확

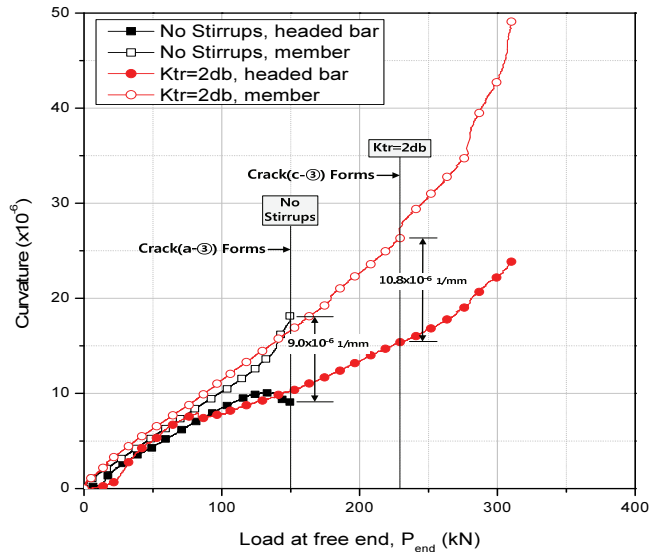


Fig. 9 Curvature of headed bar and members

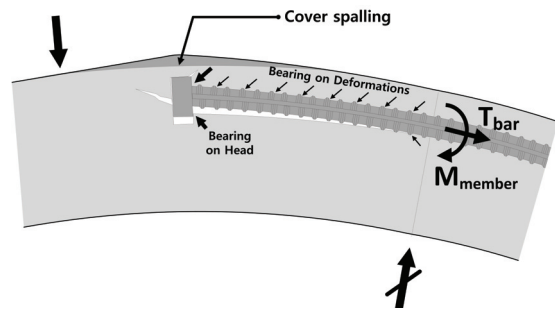


Fig. 10 Failure by curvature of headed bar and members

대머리철근의 곡률이 유사하게 나타나다가,  $P_{end} = 140kN$ 에서부터는 확대머리철근의 곡률이 감소함에 따라 부재와 철근 간에 곡률차가 크게 증가하였다. 확대머리 부근에 균열이 발생하여 최종 파괴될 때의 부재와 철근간의 곡률차는  $9.0 \times 10^{-6}$  (1/mm)로 나타났다.  $K_{tr} = 2d_b$ 인 실험체의 경우 초기에는 부재와 철근 간에 곡률이 유사하게 나타나다가  $P_{end} = 80kN$ 에서부터는 확대머리철근의 곡률 증가량이 감소하기 시작하였다. 그러나 무보강 실험체와 달리 지속적으로 확대머리철근의 곡률이 증가하였다. 확대머리 부근에 균열이 나타난 시점의 곡률차는  $10.8 \times 10^{-6}$  (1/mm)로, 무보강 실험체에서 확대머리 부근에 균열이 발생할 때와 유사한 곡률차를 보였으며, 최종 파괴 시점의 곡률차는  $25.2 \times 10^{-6}$  (1/mm)로 확대머리 부근에 균열이 발생한 이후에도 곡률차가 두 배 이상 증가하였다.

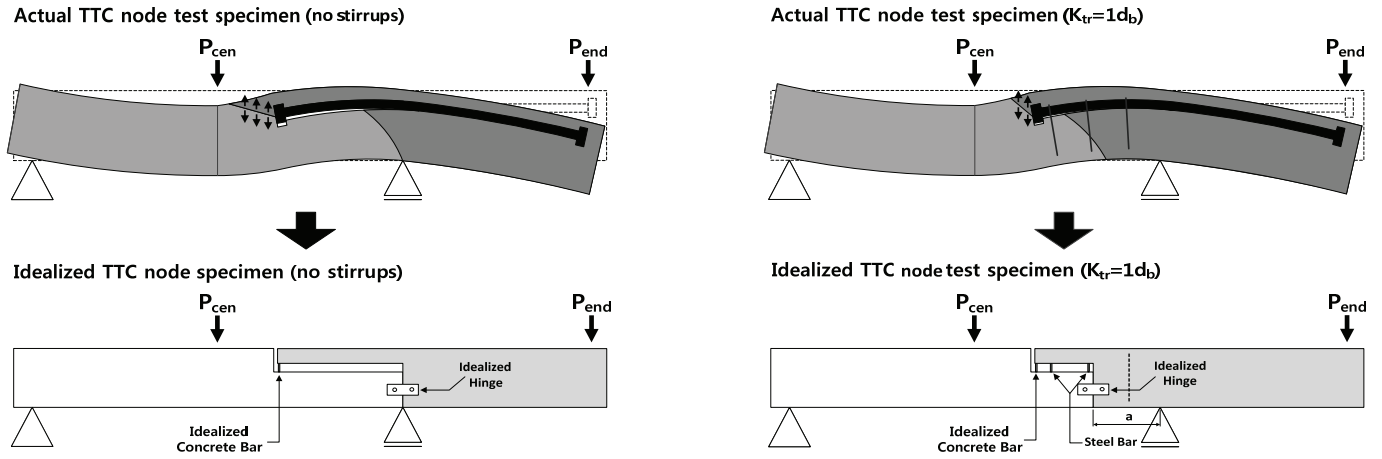


Fig. 11 Idealized cut-off test specimens

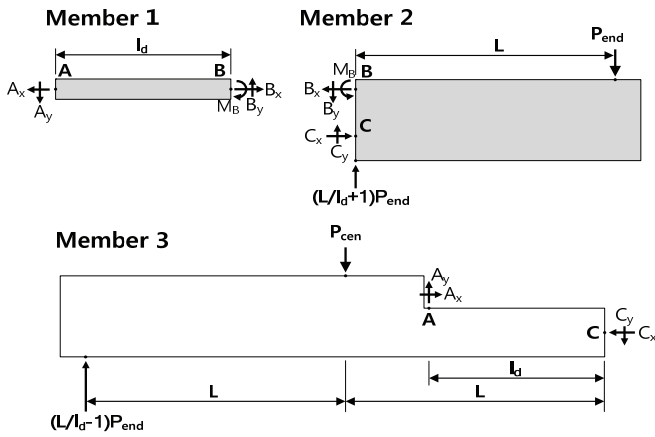


Fig. 12 Free body diagram of the specimen without transverse bars

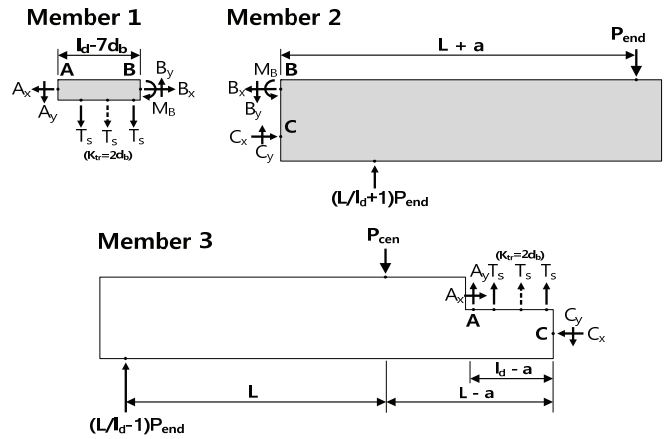


Fig. 13 Free body diagram of the specimen with transverse bars

부재와 확대머리 철근 사이에 곡률차가 발생할 경우 Fig. 11과 같이 철근과 콘크리트 사이에 쪼갬균열이 발생함과 동시에 확대머리 철근의 하부 면이 콘크리트에서 탈락 되면서 철근의 부착강도와 확대머리의 지압강도가 크게 저하되게 된다. 또한 Fig. 4에 나타난 확대머리 철근을 따라 발생하는 쪼갬 균열이 정착구간 전체에 걸쳐 발생할 경우, Fig. 11과 같이 힌지(hinge)로 연결된 두 개의 구조물과 같이 거동하게 된다.

정착구간의 실제 균열양상을 통해 이러한 가상 힌지의 위치를 가정할 수 있는데, 횡보강근이 없는 실험체의 경우 지지점을 기준으로 단부의 실험체에 큰 회전이 발생하였기 때문에 가상 힌지의 위치를 지지점 부근으로 가정할 수 있다. 이러한 가상 힌지를 가진 이상화된 실험체의 자유물체도(free body diagram)를 Fig. 12와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 각 부재의 평형방정식을 이용하여 각각의 내력을 계산하면 다음과 같다.

$$A_x = B_x = C_x = C_y = 0 \quad (3)$$

$$A_y = B_y = (L/l_d)P_{end} \quad (4)$$

$$M_B = P_{end}L \quad (5)$$

여기서  $A_y$ 는 콘크리트에 작용하는 인장력으로, 콘크리트의 인장강도( $f_{ct}$ )와 균열면적( $A_c$ )을 이용하여 콘크리트에 작용하는 인장력을 계산하고 이를 식 (4)에 적용하면, 식 (6)과 같이  $P_{end}$ 에 대해 정리할 수 있다.

$$P_{end} = (f_{ct} \cdot A_c) / (L/l_d) = (0.5 \sqrt{f_{ck}} b c_b / \sin \alpha) / (L/l_d) \quad (6)$$

여기서  $b$ 는 보의 폭,  $c_b$ 는 확대머리 철근 중심부터 측정된 피복두께,  $\alpha$ 는 확대머리 부근에 발생된 대각균열 각도,  $l_d$ 는 정착길이,  $L$ 는 경간거리이다.

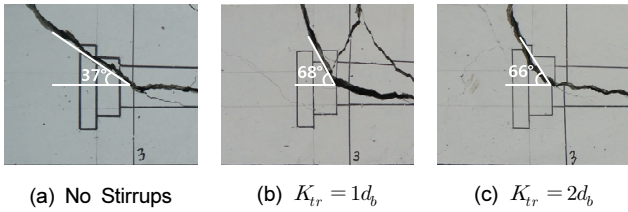


Fig. 14 Crack angle at the head

Fig. 14에 나타난 실제 균열각을 고려하여 계산할 경우  $P_{end}$ 의 계산 값은  $146.3kN$ 이며, 이는 실제 실험에서 측정된 값과 2.5%의 오차를 보이며 거의 유사하게 나타난다. 이와 같은 결과를 통해, 무보강 실험체의 경우 확대머리 부근의 콘크리트 인장파괴에 따라 최종적으로 파괴되었음을 판단할 수 있었다.

횡보강근된 실험체의 경우, 확대머리철근 부근의 쪼갬 균열에서 이어지는 대각균열이 정착구간 내에서 발생함에 따라, 가상 힌지의 위치가 지지점에서 약  $7d_b(300mm)$  정도 떨어진 부근에 발생하였다. 이를 바탕으로 이상화된 실험체의 자유물체도를 Fig. 13에 나타내었다.

$K_{tr} = 1d_b$ 인 실험체의 경우  $P_{end}$ 가 실험에서 계측된 최대값 일 때  $A_y$ 가 콘크리트 최대 인장력에 도달하였다고 가정하여, 횡보강근에 유발되는 인장력을 추정할 수 있었다. 계산 결과, 횡보강근의 인장력  $T_s$ 가  $126.4kN$ 으로 나타나며, 응력으로 계산할 경우 횡보강근에  $316MPa$ 의 인장응력이 유발된 것으로 나타났다. 그러나 콘크리트에 작용하는 인장력  $A_y$ 가 최대 인장력에 도달한 이후 곧바로 0으로 떨어졌다고 가정하고 재산정 할 경우, 횡보강근의 인장력  $T_s$ 가  $200.0kN$ 으로 급격히 증가하게 되며, 응력으로 산정할 경우 횡보강근에 약  $508MPa$ 의 인장응력이 유발된 것으로 나타났다. 이에 따라 SD400의 횡보강근이 항복하여, 단부의 하중이 더 이상 증가하지 않게 된다. 따라서  $K_{tr} = 1d_b$ 인 실험체의 경우 확대머리 부근의 콘크리트 인장파괴가 선행 된 후 횡보강근이 항복하면서 최종적으로 파괴되었음을 확인할 수 있었다.

$K_{tr} = 2d_b$ 인 실험체의 경우, 콘크리트에 작용하는 인장력  $A_y$ 가 최대 인장력에 도달하였을 때는  $280MPa$ 으로 나타났으며,  $A_y$ 가 최대 인장력에 도달한 이후 0으로 떨어졌다고 가정하고 재계산 했을 때에는 약  $414MPa$ 로 나타났다. 따라서  $K_{tr} = 2d_b$ 인 실험체의 경우도 횡보강근이 항복함에 따라 최종적으로 파괴되었음을 알 수 있다.

이와 같이 횡보강근된 실험체의 경우, 횡보강근이 실험체 단부의 하중에 직접적으로 저항함에 따라 실험체 내력이 큰 폭으로 증가하였으며, 횡보강근의 항복 여부에 의해 실험체의 파괴가 결정되었다. 이러한 파괴형태는 정착구간

내에 쪼갬파괴가 선행됨에 따라 나타난 파괴형태로, 피복 두께( $c_b$ ) 대 순간적( $2c_{si}$ ) 비가 작고 힘을 받는 부재 내에 정착이 이루어져 있을 경우 발생할 수 있다. 확대머리 철근의 경우 직선 정착길이에 비해 짧은 정착길이를 가짐에 따라, 콘크리트에는 더 큰 수직력이 유발될 수 있기 때문에, 이와 유사한 정착조건을 가질 경우, 이러한 파괴 형태를 고려해 주어야 하며, 횡보강근의 영향력 또한 반드시 고려해 주어야 한다고 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 힘을 받는 부재 내에 정착된 대구경 확대머리철근의 정착성능에 대한 횡보강근 영향력을 평가하기 위해, 횡방향 철근지수  $K_{tr}$ 을 기준으로 변수를 설정하고 컷오프 모사 실험을 수행하였다. 이러한 실험으로부터 다음과 같은 연구 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 무보강 실험체의 경우, 확대머리 부근에 경사 균열이 나타남과 동시에 콘크리트 상부 피복이 부재에서 탈락하면서 내력이 급격히 감소하는 매우 취성적인 파괴형태가 나타났다. 반면 횡보강근된 실험체의 경우, 확대머리 부근에 경사 균열이 발생한 이후에도 하중이 계속 증가하는 경향을 보였다.
- 2) 횡보강근이 배근됨에 따라 확대머리 철근의 지압에 의해 발생하는 철근 응력과 부착에 의해 발생하는 철근 응력 모두 증가하였다. 부착력에 의해 발생하는 철근 응력의 경우  $K_{tr} = 2d_b$ 일 때, 최대 92%까지 증가하였으며, 지압력에 의해 발생하는 철근 응력의 경우  $K_{tr} = 2d_b$ 일 때, 최대 41%까지 증가하였다.
- 3) 하중이 증가함에 따라 위험단면에서의 확대머리 철근과 부재 간의 곡률차가 계속 증가하는 것으로 보아 컷오프 구간에 정착된 확대머리철근이 확대머리철근 상부의 피복 콘크리트를 밀어내는 힘이 지속적으로 작용하였음을 확인할 수 있었다.
- 4) 실험체를 부재 내부에 힌지를 가진 구조물로 이상화 시켜 구조해석을 수행하였을 때, 횡보강근이 없는 실험체의 경우 확대머리 부근의 콘크리트 인장파괴를 통해 최종적으로 파괴되었음을 알 수 있었다.
- 5) 횡보강근이 있는 실험체의 경우, 횡보강근이 실험체 단부의 하중에 직접적으로 저항함에 따라 실험체 내력이  $K_{tr} = 2d_b$ 일 때, 최대 108%까지 증가하였으며, 횡보강근의 항복 여부에 의해 실험체의 파괴가 결정됨을 확인할 수 있었다.



## 감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(과제번호 : NRF-2017R1C1B5018070)

## References

1. ACI Committee 349 (2006), Code Requirements for Nuclear Safety-Related Concrete Structures (ACI 349-06), ACI, Farmington Hills, Mich., USA, 465 pp.
2. ASME (2010), ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 2, American Society of Mechanical Engineers, New York, USA, 156 pp.
3. ACI Committee 318 (2008), Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary, ACI, Farmington Hills, Mich., USA, 216 pp.
4. DeVries, R. A. (1996), Anchorage of Headed Reinforcement in Concrete, PhD dissertation, The University of Texas at Austin, Austin, 294 pp.
5. Thompson, M. K., Ziehl, M. J., Jirsa, J. O., and Breen, J. E.(2005), CCT Nodes Anchored by Headed Bars-Part 1: Behavior of Nodes,

ACI Structural Journal, V. 102, No. 6, Nov.-Dec., pp. 808-815

6. Thompson, M. K., Ledesma, A., Jirsa, J. O., and Breen, J. E.(2006), Lap Splices Anchored by Headed Bars, ACI Structural Journal, V. 103, No. 2, Mar.-Apr., pp. 271-279
7. Lee, Y.T, (2008), An Experimental Study on the Lap Splice Performance of Headed Steel Reinforcements with Confinement Details, Journal of the Architectural Institute of Korea, Structural Section, V. 24, No. 5, May., pp. 59-66
8. Fédération Internationale du Béton (2000), Bond of reinforcement in concrete : state-of-art-report, Bulletin 10. Lausanne: fédération internationale du Béton(fib), pp. 104
9. Ferguson, P. M., and Thompson, J. N. (1965), Development Length of Large High Strength Reinforcing Bars, ACI Journal, V. 62, No. 1, Jan, pp. 71-94
11. ASTM A970/A970M-09 (2009), Standard Specification for Headed Steel Bars for Concrete Reinforcement, West Conshohocken, PA., pp. 8
12. ASTM E8/E8M-11 (2011), Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, American Society of Testing and Materials, pp. 15

Received : 05/30/2018

Revised : 06/14/2018

Accepted : 06/19/2018

---

**요 지 :** 원자력 발전소에는 No.36(D36)이상의 대구경 철근이 사용되는데 이러한 대구경 철근으로 갈고리 정착을 할 경우, 기준에서 요구하는 구부림 및 갈고리 길이로 인해 설계 및 배근에 있어 큰 어려움을 겪을 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 확대머리 철근을 사용할 수 있다. 2008년 개정된 ACI 318에서는 확대머리 철근의 정착길이식을 도입하였으며, 제정 배경 연구를 근거로 하여 횡보강근의 영향력을 무시하고 있다. 그러나 확대머리 철근이 겹침이음이나 컷오프 구간에서 사용될 경우, 인장재에 의해 피복 콘크리트를 밀어내는 힘이 발생하여 횡보강근에 작용하는 인장력이 크게 증가한다. 본 연구의 목적은 힘을 받는 부재 내에 정착된 확대머리 철근의 정착성능에 대한 횡보강근의 영향력을 평가하는 것으로, 이를 위해 횡보강근의 간격을 변수로 한 대구경 확대머리 철근의 정착실험을 수행하였다. 실험방법으로는 컷오프 구간을 모사한 실험을 수행하였으며, 확대머리 철근으로는 D43의 대구경 철근을 사용하였다. 실험 결과, 횡보강근이 없는 실험체의 경우 정착구간의 쪼갬파괴에 이어 단부의 하중이 확대머리 부근의 콘크리트에 직접적으로 작용하면서 상부 피복 콘크리트가 부재에서 탈락하는 취성적인 파괴형태가 나타났다. 또한 확대머리 철근의 발현강도가 항복강도의 절반밖에 못 미치는 매우 낮은 내력을 보였다. 이에 반해 횡보강근이 배근된 실험체의 경우 횡보강근이 실험체 단부의 하중에 직접적으로 저항함에 따라 실험체 내력이 큰 폭으로 상승하였다.

**핵심용어 :** 컷오프, 확대머리 철근, 대구경 철근, 횡보강근

---