

고강도 확대머리 이형철근의 정착길이 효과에 관한 실험적 연구

문정호¹, 오영훈^{2*}

Development Length Effects of High Strength Headed Bar

Jeong-Ho Moon¹, Young-Hun Oh^{2*}

Abstract: An experimental study has been carried out to examine development length effects for high strength headed deformed bars. Current design codes limit the specified yield strength of headed bars to 400 MPa. Such the limit is due to the lack of experimental studies on headed bars made of high strength materials. Thus a test program was planned with headed bars with the yield strength of 600 MPa. The threaded head type with head shapes of round plate and circular cone was selected in this study. The experimental variables were development length, number of bars, and head shape. Specimens were classified into L-type and S-type depending on the development length. The development length of L-type was computed according to the design code without considering the limit. S-type specimens had shorter development lengths than the L-type. Further classification was made depending on the shape of heads. A-types have the head shape of round plate and B-types have the shape of circular cone. Three L-type specimens were fabricated with the variable of number of bars (1, 2, and 3). Four specimens for each of SA and SB types were made with development lengths of 50%, 45%, 40%, and 35% compared with L-type. Pullout tests were carried out with 11 specimens. The test results were compared with computed strengths with the design code equations (Appendix II). Based on the current studies, it can be said that high strength headed deformed bars used in this study be able to provide such strengths computed with the current design code without considering the yield strength limit.

Keywords: Headed deformed bar, Development length, Anchor, Specified yield strength, Tension failure, Blockout, Pullout

1. 서 론

확대머리 이형철근은 철근의 정착길이를 상대적으로 짧게 할 수 있어서 철근 정착방법으로 다양하게 적용할 수 있다 (Ghali & Youakim, 2005). 확대머리 이형철근은 철근을 구부리지 않고 정착하는 경우나 표준갈고리를 사용하는 경우에 비해서 정착길이를 짧게 할 수 있기 때문이다. 따라서 공간이 충분하지 않은 위치에서 정착을 하고자 할 때에 효율적으로 사용할 수 있다. 그러나 콘크리트구조기준(8.2.6절)(2012) 이나 ACI(25.4.4절)(2014)에서는 철근의 설계기준항복강도를 400 MPa로 제한하고 있다. 그러나 최근 철근콘크리트 구조물에 고강도 철근을 사용하는 시도가 증가하고 있다. 따라서 고강도 철근을 사용하면서 정착길이를 짧게 하고자 하는 경우 적절한 설계식이 없는 것이 현실이다. 이는 설계기준이 실무의 요구를 따라가지 못해서 불필요한 제약으로 작용할 수 있다고 볼 수 있다.

확대머리 이형철근은 건물의 기둥이 기초와 만나는 부위에서 기둥과 기초 사이의 연속성을 위한 방안으로도 사용할 수 있다. 이 경우 접합부의 설계는 콘크리트구조기준의 8장 및 부록 II나 ACI 기준(2014)의 17장에 따라 설계하게 된다. 이때 철근의 정착 혹은 정착길이는 중요한 설계변수가 된다. 특히 PC 구조의 경우 주각부에서 접합되는 철근의 수를 줄이기 위하여 고강도의 대구경 철근(D32나 D35)을 사용하는 경우가 많다(PCI, 2004). 그러나 고강도이며 대구경의 확대머리 이형철근을 주각부에 사용하고자 할 경우, 적절한 기준식의 부족으로 인하여 어려움을 겪고 있다.

확대머리 이형철근에 대한 기존연구는 고강도 철근의 사용보다 콘크리트의 파괴(블록파괴 등)를 방지하는 연구에 주안점을 두어 왔다(Thompson et al 2005, 2006, Zamora et al 2003, Mihaylov et al 2013, Eligenhausen et al 2006). 따라서 본 연구에서는 고강도 철근을 사용한 확대머리 이형철근이 연결철근으로 사용될 때 인발거동에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 확대머리 이형철근의 개수, 형상, 정착길이를 변수로 한 실험체의 인발실험을 수행하였으며, 현행 설계기준을 확대 적용하여 정착성능을 평가하였다.

¹정희원, 한남대학교 건축학부 교수

²정희원, 건양대학교 의료공간디자인학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: youngho@konyang.ac.kr

•본 논문에 대한 토의를 2015년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2015년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 확대머리 이형철근의 설계강도 및 정착길이

확대머리 이형철근이 인장력을 받는 경우 발생 가능한 파괴형태의 종류는 세 가지로 분류해 볼 수 있다. 각각의 파괴형태는 철근의 인장파단(tension failure), 콘크리트의 파괴(breakout failure), 그리고 철근의 뽑힘파괴(pullout failure)이다. 철근의 인장파단이란 충분한 정착으로 인하여 철근이 파단되면서 최대강도에 도달하는 경우이며, 블록파괴는 철근이 파단되지 않고 콘크리트가 블록 형태로 뽑히는 파괴를 의미한다. 그리고 뽑힘파괴는 정착강도의 부족으로 인하여 철근이 뽑혀 나오는 파괴를 의미한다.

콘크리트구조기준의 부록 II(2012)에서는 각각의 파괴 형태에 대하여 강도 계산식을 제시하고 있다. 철근의 인장파단 강도(N_{sa})는 식 (1), 콘크리트 블록파괴 강도(N_{cbg})는 식 (2), 철근의 뽑힘파괴 강도(N_{pm})는 식 (3)에 의해서 평가한다.

$$N_{sa} = n f_{uta} A_{se,N} \quad (1)$$

여기서 n 은 앵커의 수, f_{uta} 는 앵커 강재의 설계기준 인장강도, $A_{se,N}$ 는 앵커의 유효단면적이다.

$$N_{cbg} = \frac{A_{NC}}{A_{NCO}} \psi_{ed,N} \psi_{c,N} N_b \quad (2)$$

여기서 A_{NC} 는 단일앵커 혹은 앵커그룹의 콘크리트 파괴면 투영면적, A_{NCO} 는 연단거리나 간격의 제한을 받지 않는 단일앵커의 콘크리트 파괴면 투영면적, $\psi_{ed,N}$ 은 연단거리 영향에 따른 인장강도에 대한 수정계수, $\psi_{c,N}$ 은 수정계수, N_b 는 단일앵커의 기본 콘크리트 파괴강도이다.

$$N_{pm} = 8 A_{brg} f_{ck} \quad (3)$$

여기서 A_{brg} 는 앵커헤드의 지압면적이다.

콘크리트의 블록파괴 산정식 (2)에서 N_b 는 식 (4)와 같이 산정된다.

$$N_b = 10 \sqrt{f_{ck}} h_{ef}^2 \quad (4)$$

여기서 h_{ef} 는 앵커의 유효문힘깊이이다.

확대머리 이형철근이 항복강도를 발현하기 위해서는 충분한 정착길이를 확보하여야 하며, 설계기준(8장)에서 요구하는 정착길이는 다음과 같이 계산된다.

$$\ell_d = \alpha \frac{f_y}{\sqrt{f_{ck}}} d_b \quad (5)$$

여기서 α 는 정착철근의 종류에 따르는 값으로, 확대머리 이형철근인 경우 0.19, 표준갈고리의 경우 0.24, 그 외 철근의 구부림이나 확대머리가 없는 경우는 0.6을 사용하게 된다.

따라서 확대머리 이형철근의 소요 정착길이는 철근의 구부림이나 확대머리가 없는 경우에 비하여 소요 정착길이가 1/3 정도로 줄어들 수 있음을 알 수 있다. 그러나 설계기준에서는 식 (5)를 사용할 때 철근의 설계기준항복강도 f_y 를 400 MPa로 한정하고 있다.

따라서 본 연구에서는 항복강도 600 MPa의 고강도 철근을 사용한 확대머리 이형철근을 대상으로 식 (5)의 적용 가능성을 실험을 통해서 평가하고자 한다.

3. 실험계획 및 제작

본 연구에서는 철근의 설계기준항복강도 600 MPa를 대상으로 인발실험을 계획하였다. 대상 철근은 D32로 하였으며, 콘크리트의 설계기준압축강도는 27 MPa로 하였다. 실험변수는 확대머리 이형철근의 철근의 개수, 확대머리의 형상, 정착길이를 하였다. 확대머리는 철근에 나사산을 가공하여 너트 형태의 강판을 끼우는 방법을 대상으로 하였다. 실험체는 정착길이가 긴 L형과 길이가 짧은 S형, 확대머리의 형상은 Fig. 1과 같이 원판 형태인 A형과 원추 형태인 B형으로 구분하였다. B형 확대머리는 인장력 방향으로 단면적이 좁아지는 원추형이며, 주물 등으로 확대머리를 제작하는 경우를 대비하여 B형의 확대머리도 실험변수에 포함하였다.

L형 실험체는 A형 확대머리가 사용되었으므로, LA라는 기호로 시작한다. LA형은 세 개의 실험체로 구성되며, 철근의 수에 따라 LA-1-100, LA-2-100, LA-3-100으로 구분된다. 여기에서 영문(LA) 다음의 숫자는 철근의 개수를 나타내며, 마지막의 숫자 100은 식 (5)에 의한 정착길이를 100% 확보한 것을 의미한다. LA-2-100과 LA-3-100은 철근이 인접하여

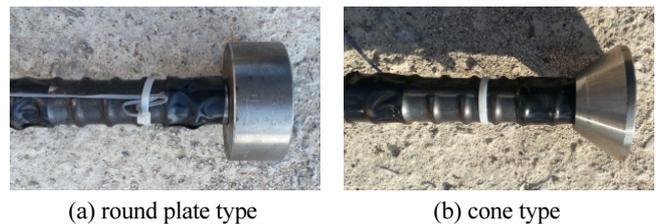


Fig. 1 Head shapes

Table 1 Specimens and predicted strengths

specimen	type	embed. length (mm)	no. of bars	calculated strength (kN)		
				TF	BF	PF
LA-1-100	A	710	1	476	983	858
LA-2-100	A	710	2	953	1,038	1,715
LA-3-100	A	710	3	1,429	1,094	2,573
SA-1-50	A	360	1	476	355	858
SA-1-45	A	320	1	476	297	858
SA-1-40	A	280	1	476	243	858
SA-1-35	A	250	1	476	205	858
SB-1-50	B	360	1	476	355	858
SB-1-45	B	320	1	476	297	858
SB-1-40	B	280	1	476	243	858
SB-1-35	B	250	1	476	205	858

러 개 배치되는 경우에 그에 따른 파괴강도 및 파괴형태를 분석하기 위하여 철근을 2개와 3개가 각각 묻히도록 한 실험체이다. 이때 철근 사이의 간격은 설계기준의 허용 최소간격 160 mm를 유지하면서 일렬로 배치하였다.

S형 실험체는 모두 1개의 철근이 사용되었으며, A형 확대머리와 B형 확대머리를 사용하여 각각 4개씩 실험체를 계획하였다. 철근의 정착길이는 L형 대비 50%, 45%, 40%, 35%로 짧아지도록 실험변수를 선정하였다. 따라서 실험체 이름은 SB-1-45 등과 같은 형태를 가지고 있으며, 이름을 명명하는 방법은 L형과 동일하다. S형 실험체는 소요 정착길이 보다 작은 정착길이를 사용하였기 때문에 콘크리트가 파괴되는 경우를 대상으로 계획한 실험체가 된다. 각 실험체에 대한 실험변수와 예상강도는 Table 1에 나타내었다.

각각의 실험체는 철근의 인장파단(TF), 콘크리트의 파괴(BF), 철근의 뽑힘파괴(PF)에 대한 설계기준식을 적용하여 강도를 산정하고, 가장 작은 계산값으로 파괴모드를 예측하였다. 표에서 음영으로 표시된 값은 해당 파괴모드에 의해 실험체의 강도를 지배할 것으로 추정된 예상강도를 의미한다. 정착길이가 짧은 SA와 SB 실험체는 모두 콘크리트의 파괴가 예상되었다.

실험체는 콘크리트 블록에 철근을 묻힌 상태에서 철근에 인장력을 가해야 한다. 이 때 인장 가력을 위한 지지점이 콘크리트 블록파괴 영역 바깥에 놓여야 하기 때문에 기준에서 요구한 정착길이의 1.5배 거리 바깥에 지지점을 설치하는 것으로 계획하였다(Fig. 2 참조).

L형 실험체는 정착길이가 710 mm이므로 최소한 반경 1.07 m(직경 2.13 m)와 깊이 0.71 m 이상의 콘크리트 블록이 필요하며, 여기에 가력장치의 지지에 필요한 면적을 확보하기 위

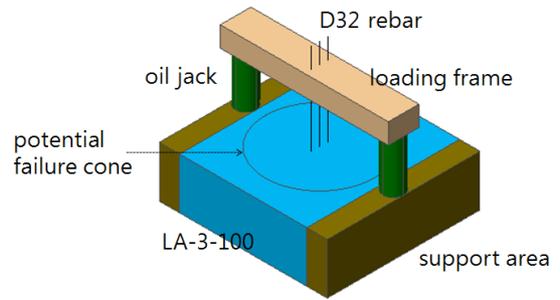


Fig. 2 test concept



Fig. 3 Specimen manufacture

해서는 보다 더 큰 크기의 콘크리트 블록이 필요하다. L형 실험체 중에서 가장 큰 실험체인 LA-3-100의 크기는 3.3 m x 3 m x 1.0 m, S형은 모두 1.3 m x 1.3 m x 0.5 m 로 계획하였다. 실험체는 무게와 크기 등의 문제로 인하여 실험실로 운반하기 어렵기 때문에 야외 공간을 활용하여 현장에서 직접 실험체를 제작하고, 실험을 수행하는 것으로 계획하였다.

확대머리에 대한 설계기준의 요구조건은 순 지압면적이 철근면적의 4 배 이상 되도록 하고 있다. D32 철근의 단면적이 794 mm² 이므로, 외부 직경 78 mm의 너트 형태로 확대머리를 제작하였다. 이 경우 순 지압면적은 철근면적의 5배가 된다.

실험체의 제작은 Fig. 3과 같이 철판 거푸집을 사용하여 제작하였으며, 각 실험체를 분할하는 철판을 삽입하여 개별 실험체로 분리되도록 하였다. 철판은 콘크리트 타설 도중 측압에 의한 변형이 발생하지 않도록 충분히 보강하였다. 그리고 콘크리트타설 중에 철근이 움직이지 않도록 앵글 등을 사용하여 철근을 고정된 후, 실험 시작 전에 앵글을 제거하고 실험을 실시하였다.



Fig. 4 Tensile test for headed deformed bar

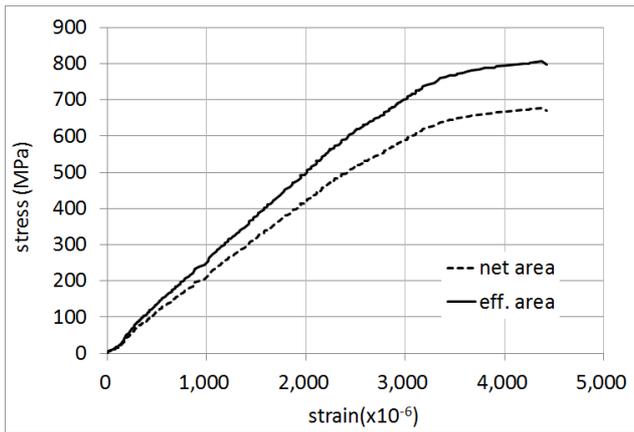


Fig. 5 material property of reinforcement

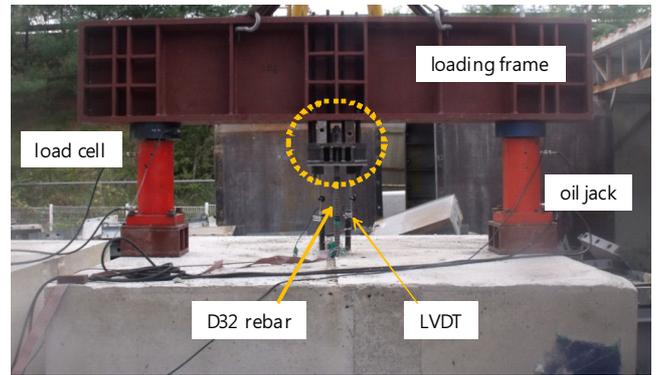
4. 재료실험

확대머리 이형철근에 대한 재료실험은 실제 구조실험과 동일한 조건을 사용하여 실시하였다. Fig. 4와 같이 시험편의 양 단부에 원판형의 A형 확대머리를 설치하고, 미리 제작된 인장장치(terminator)를 상하단에 부착하여 인장시험을 실시하였다.

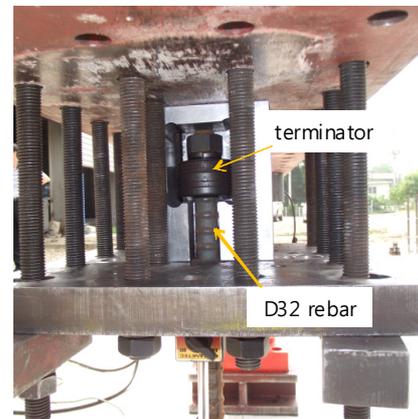
재료시험 결과 철근에 나사산을 낸 위치에서 파단되는 결과를 보였으며, 최대응력의 평균은 642.1 MPa로 나타났다. 그러나 나사산의 가공으로 인한 단면결손을 반영하면, 742.9 MPa에 해당한다. 철근에 대한 재료실험 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 한편 총 6개의 콘크리트 공시체에 대한 압축강도 실험결과는 평균 33.7 MPa로 나타났다.

5. 구조실험

실험체에 대한 구조실험은 Fig. 6과 같은 방법으로 실시하였다. Fig. 6의 (a)에서 점선 원 안쪽 부분의 상세는 (b)와 같은 형태이다. 철근의 유효문힘깊이 h_{ef} 의 1.5배에 해당하는 투영면(반지름이 $1.5h_{ef}$ 인 원형) 바깥에 오일잭을 설치하고, 가력



(a) test set-up



(b) details of dashed circle line

Fig. 6 Test set-up and measurement plan

프레임과 오일잭 사이에 로드셀(load cell)을 설치한 상태에서 가력하였다. 콘크리트 면과 가력 프레임 사이에 LVDT를 설치하였고, 철근에는 변형률 게이지를 부착하였다. 모든 철근에는 6개씩의 변형률 게이지를 부착하였다. 총 6개 중에서 4개는 콘크리트에 묻히는 곳에 설치하였으며, 나머지 두 개는 노출된 부위에 부착하였다.

6. 실험결과

실험체의 파괴 형태는 철근의 파단과 콘크리트 쪼갬파괴의 두 가지 형태로 발생하였다. 정착길이가 긴 실험체 중에서 LA-1-100과 LA-2-100은 Fig. 7과 같이 철근이 파단되면서 최종 강도에 도달하였으며, LA-3-100은 Fig. 8과 같이 콘크리트가 쪼개지면서 최종강도에 도달하였다. LA-1-100과 LA-2-100은 철근의 파단 직전에 Fig. 7의 (b)와 같이 철근 주변이 부서지는 형상을 보였다. 그리고 철근이 두 개 묻힌 LA-2-100 실험체는 하나의 철근이 끊어지면서 최종 파괴에 도달하였다. LA-3-100의 경우에는 콘 형태의 콘크리트 파괴가 예상되었

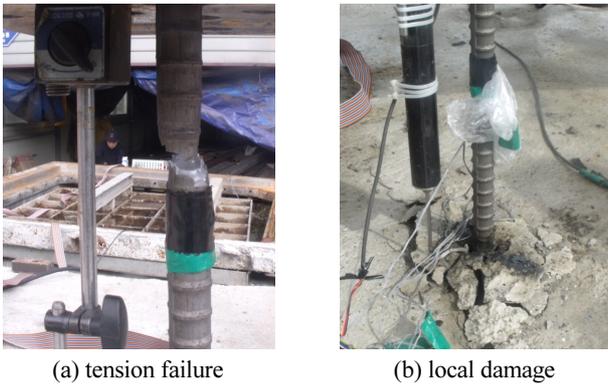


Fig. 7 Failure of LA-2-100



Fig. 8 Splitting failure of LA-3-100

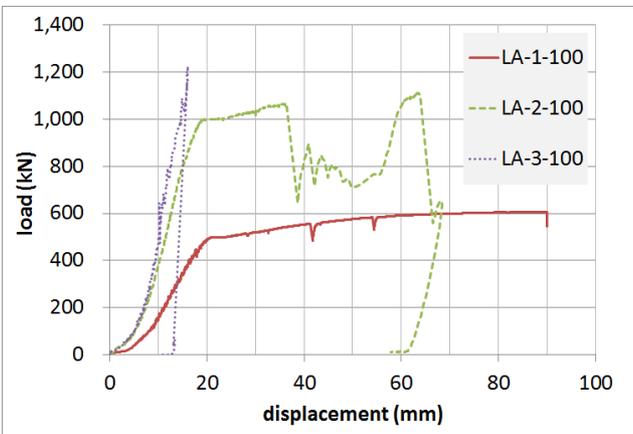


Fig. 9 Load-displacement curves of LA type

지만, Fig. 8과 같은 형태의 쪼갬파괴가 발생하였다. 철근의 정착길이가 짧은 S 시리즈 실험체도 LA-3-100 실험체와 같은 형태인 쪼갬파괴가 발생하면서 최종강도에 도달하였다. 또한 LA-2-100을 제외하고는 철근이 노출되는 부분에서 콘크리트의 국부적 균열은 거의 나타나지 않았다. LA-2-100도 철근이 항복한 상태에서 국부적 균열이 발생하였으며, 이로 인한 강도 저하 등과 같은 현상을 나타나지 않았다.

철근의 정착길이가 100%인 실험체에 대한 하중-변위 관계는 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 철근의 수가 증가할수록 강

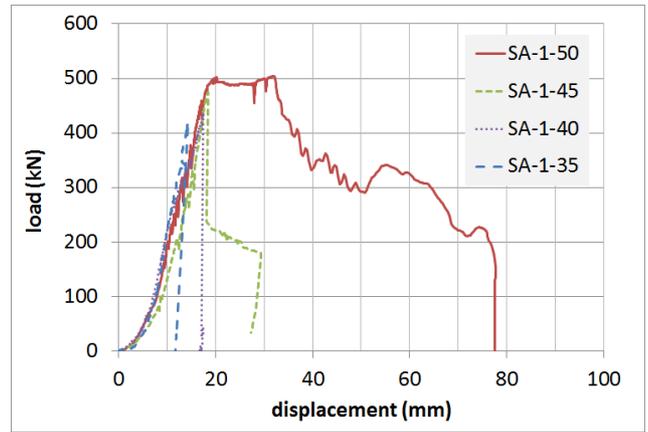


Fig. 10 Load-displacement curves of SA type

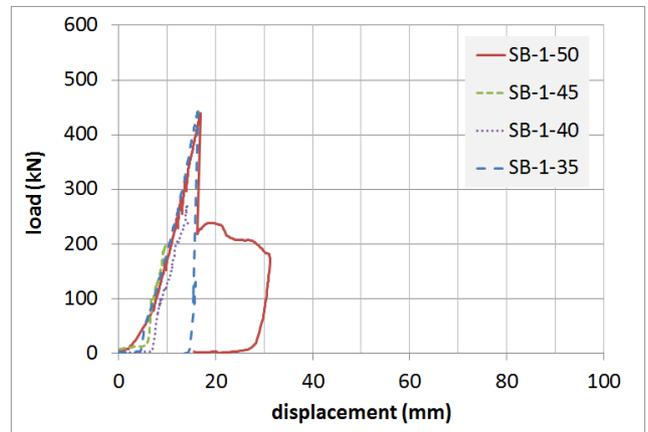


Fig. 11 Load-displacement curves of SB type

도가 증가하지만, 철근이 3개인 경우에는 철근의 수에 비례하여 강도가 증가하지는 않았다. 실험체의 파괴모드에서 알 수 있었던 것처럼 LA-1-100과 LA-2-100은 철근의 파단으로 강도가 결정되었지만, LA-3-100은 콘크리트의 쪼갬파괴로 실험체가 파괴되었기 때문이다. LA-2-100은 철근의 항복강도 근처까지 하중을 저항하다가 미끄러짐도 조금 발생하였고, 최종적으로는 하나의 철근이 파단된 현상을 하중-변위 그래프에서도 확인할 수 있었다.

Fig. 10과 11은 SA와 SB형 실험체에 대한 하중-변위 관계를 나타내고 있다. 정착길이가 L형의 50%인 실험체들을 보았을 때, SA 실험체가 SB 실험체보다 강도 및 연성에서 좀 더 우수한 것으로 나타났다. 그러나 정착길이가 더 짧아지는 경우에는 SA와 SB의 거동에는 큰 차이를 보이지 않았다. 정착길이가 짧은 SA와 SB 실험체들은 모두 콘크리트의 쪼갬에 의해서 파괴되었기 때문에 취성적 파괴거동을 보였음을 알 수 있다. 그러나 정착길이가 50%인 실험체의 경우 SA형에서 좀 더 연성적 거동을 보인 점으로 미루어 볼 때 정착길이가 증가할수록 연성 거동 특성이 더 크게 발생할 수 있을 것으로 예상해

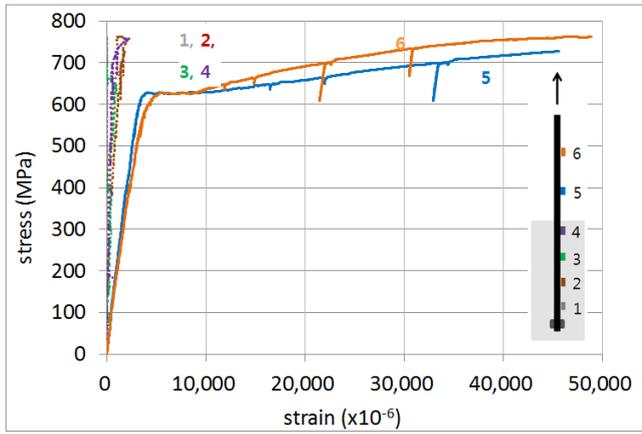


Fig. 12 Stress-strain relation of LA-1-100

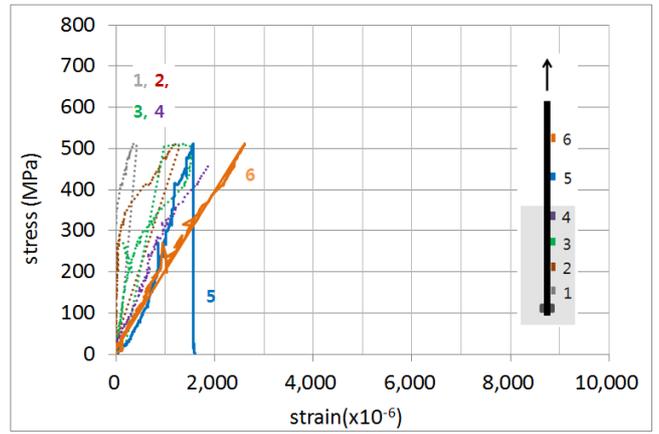


Fig. 14 Stress-strain relation of LA-3-100

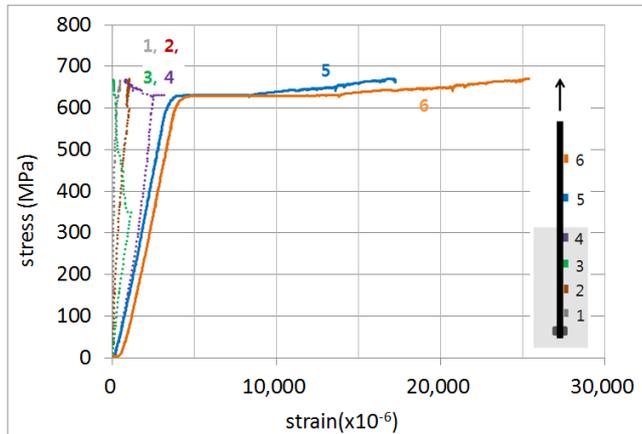


Fig. 13 Stress-strain relation of LA-2-100

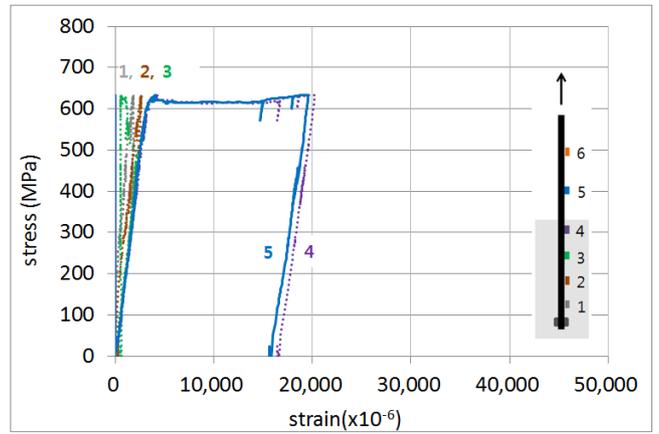


Fig. 15 Stress-strain relation of SA-1-50

볼 수 있다.

정착길이가 긴 LA 실험체들에 대한 철근의 응력-변형률 관계는 Fig. 12~14에 나타내었다. 이 때 철근이 두 개 이상인 LA-2-100과 LA-3-100의 경우에는 가장 변형이 많이 발생한 철근에 대한 측정결과를 Fig. 13과 14에 나타내었다. 그래프의 세로축의 값은 하중값을 철근의 응력값으로 환산하여 나타냈다. 이 때 철근의 단면적은 반영하지 않았다. 철근이 단면적의 위치에서 파단되지는 않았기 때문이다.

실험체 LA-1-100과 LA-2-100에서 노출된 철근에 부착한 변형률을 보면, 철근들이 모두 항복한 이후에도 상당한 연성 거동을 보인 후에 파괴되었음을 알 수 있다. 반면에 콘크리트에 묻힌 확대머리 쪽의 철근 변형률은 매우 작게 나타났다. 따라서 철근이 파단될 때까지도 철근의 정착단에서는 거의 변형이 발생하지 않았으며, 두 개의 철근이 사용된 경우에도 철근과 콘크리트 사이에서 충분한 부착성능이 발휘된 것으로 판단할 수 있었다. 반면 3개의 철근이 사용된 LA-3-100 실험체는 철근의 파단에 의하지 않고 콘크리트 쪼갬파괴가 발생한 결과가 응력-변형률 관계에도 나타났다. 그러나 Fig. 14에

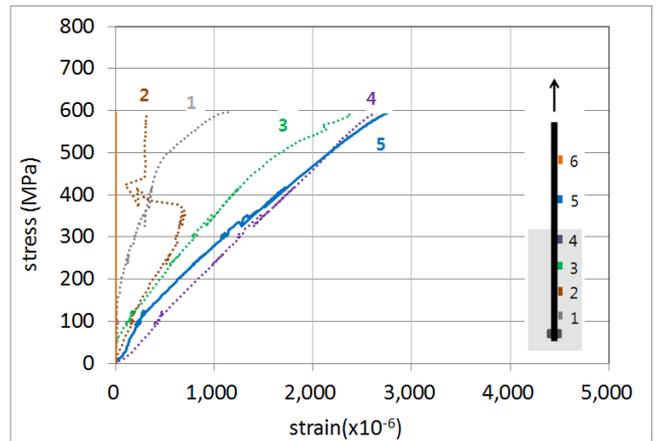


Fig. 16 Stress-strain relation of SA-1-45

의하면 6번 위치의 변형률이 항복변형률인 $3,000 \times 10^{-6}$ 에 도달하는 시점에 최종파괴에 도달했음을 알 수 있다. 따라서 철근이 3개 사용된 실험체도 상당한 부착성능을 발휘한 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 15~18은 S형의 실험체들에서 철근의 변형률을 측정

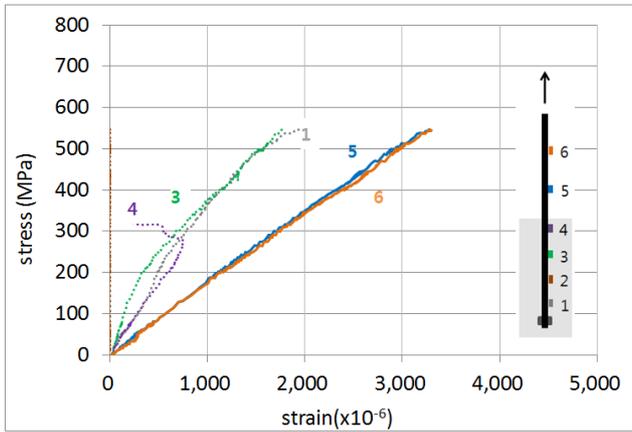


Fig. 17 Stress-strain relation of SA-1-40

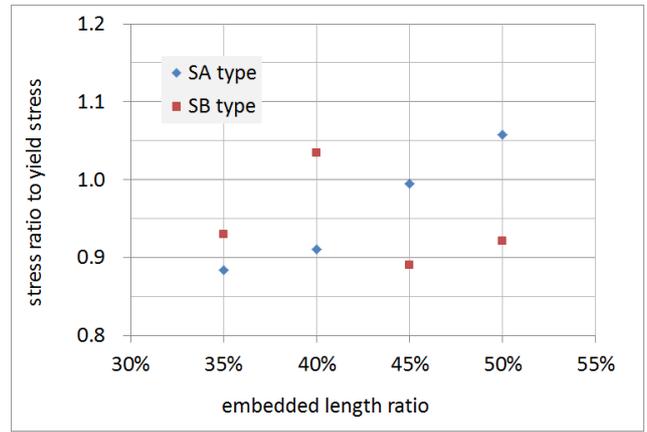


Fig. 19 Development length vs. stress ratio

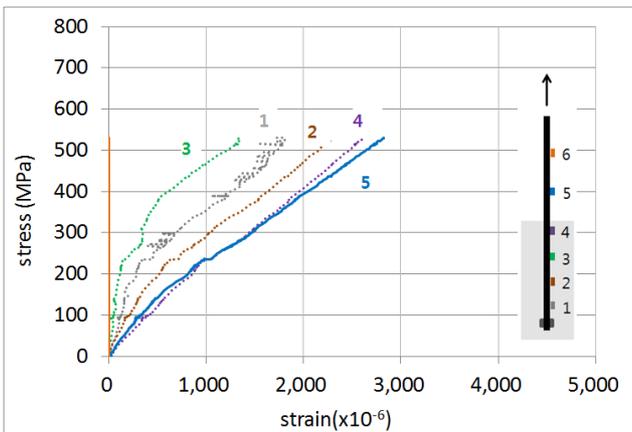


Fig. 18 Stress-strain relation of SA-1-35

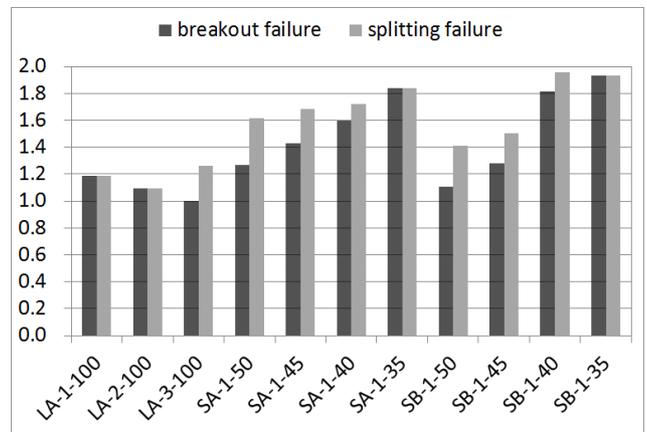


Fig. 20 Test vs. calculated strength

한 결과를 나타낸 것이다. 정착길이 비율이 50%인 실험체는 철근이 항복한 후에 콘크리트가 파괴되었음을 알 수 있다. 그 밖의 실험체도 철근에서 상당한 변형이 발생했음을 알 수 있다. 철근의 항복변형률이 $3,000 \times 10^{-6}$ 정도임을 고려해 볼 때, 항복 직전까지 정착성능을 유지하면 인장력에 저항하고 있다.

Fig. 19는 정착길이에 따른 응력변화의 경향을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것은 SA형의 경우 정착길이가 증가할수록 철근의 응력이 증가하고 있다는 점이다. 그러나 SB형은 그러한 경향을 찾을 수 없었다.

실험 결과 L형 실험체 중에서는 LA-3-100을 제외한 대부분의 실험체가 철근의 항복강도 이상 혹은 그에 근접하는 강도를 보였음을 알 수 있다. LA-3-100 실험체의 경우에도 철근의 응력이 500 MPa 이상의 결과를 보였기 때문에 쪼갬파괴가 발생하지 않았다면 강도증가가 있었을 것으로 예측해 볼 수 있었다.

Fig. 20은 블록파괴와 쪼갬파괴 강도에 대한 실험강도의 비율을 나타낸 것이다. 강도 계산값은 재료시험에서 얻어진 실제 재료강도를 사용하여 산정하였으며, 블록파괴로 파괴된

실험체들의 강도는 식 (4)로 강도를 계산한 것이다. 쪼갬파괴 강도는 Eligenhausen⁹ 등이 제안한 계수식 (6)을 식 (4)에 곱하여 산정하였다.

$$\psi_{u,sp} = \left(\frac{h}{2h_{ef}} \right)^{2/3} \quad (6)$$

여기서 h 는 실험체의 높이이다.

모든 실험체는 파괴모드와 관계없이 Fig. 20에 나타난 바와 같이 계산강도 보다 큰 값의 실험강도를 나타내고 있다.

7. 결론

본 연구에서는 고강도 철근에 확대머리를 사용하는 경우에 철근의 정착길이에 인장거동의 관계를 평가하고자 하였다. 현행 설계기준은 정착길이의 산정식에서 항복강도의 제한규정을 두고 있으므로 고강도 철근에 대해서 확대 적용될 수 있

는지를 평가하는 실험연구를 수행하였다. 실험연구는 총 11개의 실험체를 대상으로 확대머리 이형철근의 개수, 형상, 정착길이 등을 변수로 하였다. 본 연구의 확대머리 이형철근은 설계기준의 요구조건을 충족하는 확대머리를 이형철근에 부착한 제품이다. 이와 같은 연구결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 현행 설계기준을 확대 적용하여 정착길이를 산정하여 적용한 L형 실험체 중에서 인장파단으로 파괴모드가 예상되었던 실험체(LA-1-100과 LA-2-100)들은 충분한 내력을 보이면서 철근 파단으로 최대강도에 도달하였다.
- 2) L형 실험체 중에서 철근이 3개 사용된 LA-3-100 실험체는 콘크리트의 블록파괴가 예상되었으나, 콘크리트 쪼갬파괴로 최대강도에 도달하였다. 그러나 LA-3-100 실험체가 쪼갬파괴 될 때 철근의 응력은 500 MPa까지 도달하였다.
- 3) 정착길이를 L형의 50%~35%로 계획한 S형 실험체는 모두 콘크리트 쪼갬파괴로 최대강도에 도달하다. 그러나 SA-1-50은 철근이 항복한 후에 쪼갬파괴가 발생하였다.
- 4) SA형 실험체의 경우 정착길이가 L형의 35%~50%로 변할 때, 철근의 응력은 항복강도의 88%~106%로 비례적으로 증가하는 경향을 보였다. 반면에 SB형은 항복강도의 89%~103%의 응력 분포를 응력분포를 보였지만, 비례적 관계를 보이지는 않았다.
- 5) 정착길이를 변수로 한 L형과 S형 모두 현행 설계기준(부록 II)의 강도계산 값을 상회하는 최대강도를 나타내고 있다.

감사의 글

본 논문은 PCS Solution의 연구비 지원에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

References

1. A. Ghali and S. A. Youakim (2005), Headed Studs in Concrete: State of the Art, *ACI Structural Journal*, 102(5): 657-667.
2. Korea Concrete Institute (2012), *Design Requirements for Concrete Structures*, 239-256.
3. Committee 318 (2014), *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-14)*, ACI.
4. *Precast and Prestressed Concrete (2004), Design Handbook*.
5. K. Thompson, J. O. Jirsa, and J. E. Breen (2005), CCT Nodes Anchored by Headed Bars-Part 2: Capacity of Nodes, *ACI Structural Journal*, 102(6): 65-73.
6. K. Thompson, J. O. Jirsa, and J. E. Breen (2006), Behavior and Capacity of Headed Reinforcement, *ACI Structural Journal*, 103(4): 522-530.
7. N. A. Zamora, R. A. Cook, R. C. Konz, and G. R. Consolazio (2003), Behavior and Design of Single, Headed and Unheaded Grouted Anchors under Tensile Load, *ACI Structural Journal*, 100(2): 222-230.
8. B. I. Mihaylov, E. C. Bentz, and M. P. Collins (2013), Behavior of Deep Beams with Large Headed Bars, *ACI Structural Journal*, 110(6): 1013-1022.
9. R. Eligenhausen, R. Mallee, J. F. Silva (2006), *Anchorage in Concrete Construction*, Ernst & Sohn.

Received : 05/03/2015

Revised : 06/08/2015

Accepted : 07/16/2015

요 지 : 본 연구는 고강도 철근을 확대머리 이형철근으로 사용하는 경우 정착길이 효과에 관한 실험 연구이다. 현행 기준에서는 확대머리 이형철근의 정착길이를 산정하는 식에서 철근의 설계기준강도를 400 MPa로 한정하고 있다. 고강도 철근에 대한 연구결과가 충분하지 않기 때문에 이러한 규정이 명시된 것이다. 따라서 본 연구에서는 설계기준 항복강도 600 MPa의 철근으로 확대머리 이형철근을 제작하여, 변수별 실험연구를 수행하였다. 실험은 철근의 정착길이, 철근의 개수, 그리고 확대머리의 형상 등의 변수로 계획하였다. 실험체는 정착길이가 긴 L형과 정착길이가 짧은 S형으로 분류하고, 확대머리의 형상은 원판형(A형)과 원뿔형(B형)으로 구분하였다. L형 실험체는 원판형 확대머리를 대상으로 철근 개수가 1~3으로 변하는 3개의 실험체와 S형 실험체는 원판과 원뿔형 확대머리 형상에 대하여 정착길이를 L형의 50%, 45%, 40%, 35%로 변화한 실험체를 계획하였다. L형(LA형) 3개, SA형 4개, SB형 4개 등 총 11개의 실험체를 인발실험을 하였다. 실험결과는 콘크리트구조기준(부록 II)의 정착길이 산정 규정에 따라 평가하였으며, 그 결과 항복강도 600 MPa의 철근을 사용한 확대머리 이형철근은 현행기준의 설계식을 적용하여 설계할 수 있음을 보였다.

핵심용어 : 확대머리 이형철근, 정착길이, 설계기준항복강도, 철근파단, 블록파괴, 뿔침파괴