



SD500 철근용 충전식 슬리브 철근이음에 대한 해석 및 실험적 연구

오영훈^{1)*} · 문정호²⁾

¹⁾건양대학교 건축학과 ²⁾한남대학교 건축학부

Analytical and Experimental Studies on Splice Sleeves for SD500 Rebars

Young-Hun Oh^{1)*} and Jeong-Ho Moon²⁾

¹⁾Dept. of Architecture, Konyang University, Nonsan 320-711, Korea

²⁾Division of Architecture, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea

ABSTRACT Splice sleeves for HD25 and HD32 rebars with yield strength 500 MPa were studied experimentally and analytically. The shapes of sleeve was examined with nonlinear finite element analyses. A total of 18 specimens were tested with test variables of rebar types, sleeve lengths, mortar compressive strengths, and rebar development lengths. Three identical specimens per each variable were tested in order to prevent any test errors. After tests, numerical studies with a nonlinear finite element method were conducted to evaluate the test results. Experimental studies with 18 specimens showed that the sleeves of this study satisfies the code requirement. It was found that the strength of mortar and the bar development length within the sleeves did not affect to the load-carrying capacity of sleeves.

Keywords : splice sleeve, rebar type, development length, mortar strength, nonlinear analysis

1. 서 론

PC 공법은 부재를 분할하여 제작하기 때문에 현장에서 접합부를 연결하여 일체성을 확보하게 된다. 따라서 철근의 연속성 확보가 매우 중요한 문제가 된다. 철근의 일체성은 구조체의 강성 및 강도에 큰 영향을 미치므로, 현장타설 구조체와 동등한 성능을 발휘하게 하는 것이 필수적이 된다.

철근을 일체화하는 방법에는 철근의 겹침이음, 커플러 이음, 용접 이음 등 다양한 방법이 있지만, 각각의 방법은 장단점이 있다. 철근의 겹침이음은 기준에서 요구되는 겹침이음 길이(1.5 m 내외)가 상당히 길어져서 시공성이 좋지 않다. 특히 긴 길이의 철근이 돌출되어 있어야 하기 때문에 운반 및 조립을 위한 작업이 매우 어렵고, 사고의 위험도 있다. 커플러 이음의 경우 철근을 맞대어서 연결해야 하므로 조립 단계에서 발생할 수 있는 오차를 흡수하기 어려우며, 접합부의 좁은 공간에서 커플러 연결 작업을 해야 하는 문제도 있다. 그리고 용접 이음 역시 커플러 이음과 유사한 단점을 가지고 있으며, 용접

부위의 품질 확보에도 어려움이 있다.

PC공법에서는 철근의 일체성 확보와 함께 현장 작업의 용이성 및 안전성을 확보할 수 있어야 한다. 이러한 점들을 고려하여 개발된 스플라이스 슬리브(splice sleeve)는 주물을 이용하여 제작된 연결장치에 철근을 삽입하고, 슬리브에 고강도 그라우트를 주입하는 연결장치이다. 주입된 그라우트는 슬리브 구체에 의해서 팽창이 구속되므로 철근의 부착성능을 크게 높일 수 있게 된다. 따라서 스플라이스 슬리브는 철근의 정착길이를 짧게 할 수 있는 장점이 있고, 결과적으로 PC 단부에서 돌출되는 철근의 길이가 짧아져서 운반 및 조립이 용이해 진다. 또한 슬리브의 구멍에 철근을 삽입하게 되므로 철근의 직경보다 슬리브의 구멍을 크게 하여, 현장 조립단계에서 발생할 수 있는 시공오차를 흡수 할 수 있는 장점도 있다. 이상과 같은 장점으로 인하여 이 연구에서는 SD500 철근의 연결장치로 사용될 스플라이스 슬리브에 대하여 구조 해석과 실험을 실시하여 그 성능을 평가하고자 하였다.

2. 연구 방법

스플라이스 슬리브는 경제성 및 시공성을 고려했을 때, 대구경의 철근을 사용하는 것이 바람직하다. 따라서 이 연구에서는 직경 25 mm와 직경 32 mm의 철근에 적합한 슬리브를 개발하고자 하였다. 철근의 설계기준 항

*Corresponding author E-mail : youngoh@konyang.ac.kr

Received September 7, 2012, Revised December 9, 2012,

Accepted February 1, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

복강도는 500 MPa로 하였으며, 슬리브의 재질은 제작 및 경제성을 고려하여 주물로 선정하였다.

슬리브를 제작하기 위해서는 주형을 제작하여야 하는데 주형제작에는 많은 비용이 소요된다. 따라서 이 연구에서는 슬리브를 제작하기 이전에 슬리브의 적절한 형상을 결정하기 위한 구조해석을 수행하였다. 이를 위하여 적용 대상 슬리브를 대상으로 비선형해석을 실시하여 취약부위 혹은 응력이 작게 작용하는 부위들을 찾아 시행착오 방법으로 수정하면서 적절한 형상의 주형을 선정하였다. 실험 연구에서는 선정된 형상의 슬리브를 주물로 제작하고, 적절한 변수로 실험체를 완성하여 각 변수들이 미치는 영향을 파악하도록 하였다. 그리고 실험체를 대상으로 비선형 구조해석을 수행하여 실험 결과의 적절성을 평가하였다. 또한 구조실험 및 구조해석 연구로부터 얻어진 결과를 구조설계기준과 비교하여 기준에서 요구하고 있는 조건을 만족하는지를 평가하였다. 건축구조기준에 따르면 기계적 이음은 철근의 설계기준항복강도의 125% 이상을 발휘할 수 있는 완전 기계적 이음이어야 하는 것으로 규정하고 있다.^{1,2)} 끝으로 실험 결과를 일본의 AIJ 기준과 비교하여 슬리브 성능의 등급도 평가하였다.

3. 슬리브에 대한 해석적 분석

3.1 슬리브의 형상 및 재질

연구 대상 슬리브는 Fig. 1과 같은 직경 25 mm 철근용(H25형)과 직경 32 mm 철근용(H32형)이다. 슬리브의 형태는 구멍 직경이 큰 광구부와 직경이 작은 협구부로 이루어져 있으며, PC부재의 바깥쪽에 광구부가 위치한다. 광구측이 바깥쪽에 위치하는 이유는 조립과정에서 작업을 용이하게 하기 위함이다. 슬리브의 내부에서는 그라우트를 통하여 철근과 슬리브가 연속성을 유지하기 때문에, 슬리브 내부면에 요철을 두어 접합면에서 미끄러짐을 방지하는 역할을 하도록 한다.

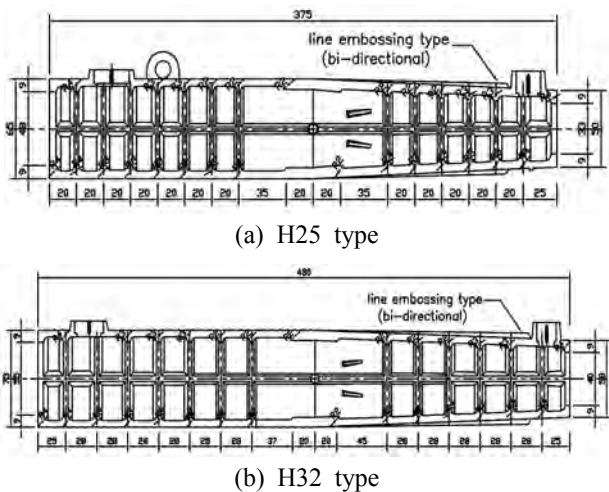


Fig. 1 H25 and H32 type splice sleeve (unit: mm)

이 연구에서는 연구 대상의 슬리브 형상에 변수들의 의미가 포함하도록 하였다. 예를 들면 H25-7065-75-1은 철근의 직경이 25 mm, 광구와 협구측에서 철근의 정착 길이가 7.0D와 6.5D, 그라우트의 강도는 75 MPa임을 의미한다. 여기에서 D는 철근의 직경을 의미한다. 그리고 마지막 숫자는 동일한 변수를 가진 연구 대상의 슬리브 형상(혹은 실험체)에 부여된 일련번호를 나타낸다.

3.2 유한요소해석 모델

해석연구를 위한 모델은 Fig. 2(a)와 같으며, 대칭성을 반영하여 1/2 만을 모델 하였다. 슬리브, 철근, 그라우트 모두 유한요소 자동생성을 통하여 입체요소로 모델 하였으며, 접촉면은 마찰이 발생하지 않는 완전 일체로 가정하였다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 철근은 선요소로 모델하지 않고, 입체요소(solid element)로 세분하여 모델 하였다. Fig. 2(b)는 그라우트를 보이지 않게 한 모델형상이며, (c)는 그라우트만을 별도로 보여준다.

슬리브가 기둥에 설치된 상태에서 응력상태는 철근부분과 슬리브부분으로 구분할 수 있다. 슬리브부분에서는 철근이 슬리브에 삽입된 상태에서 힘을 받으며, 슬리브가 끝나는 부분부터는 철근 단독으로 힘을 받는다.

콘크리트구조설계기준에 따르면, 기계적 이음장치는 철근의 설계기준항복강도의 125% 이상을 받을 수 있어야 하는 것으로 규정하고 있다. 따라서 슬리브부분이 이와 같은 강도를 발휘할 수 있는지를 평가할 수 있어야 하지만, 실제 실험을 통하여 이를 평가하기는 매우 어렵거나 복잡한 실험 장치를 사용하여야 한다. 이러한 이유로 이 연구에서는 첫 단계로 비선형 유한요소해석을 실시하여 슬리브 부분이 설계기준을 만족하는지 평가하였다.

슬리브의 구조 특성을 평가하기 위하여 두 가지 종류의 구조해석 모델을 사용하였다. 두 가지 모델은 Fig. 3과 같이 철근이 연결되지 않은 슬리브 자체 만에 대한 모델(USB, unconnected sleeve body)과 철근이 연결된 모델(CSB, connected sleeve body)이다. USB는 그라우트와 철근이 없는 슬리브 자체 만에 대한 모델이며, CSB는 슬리

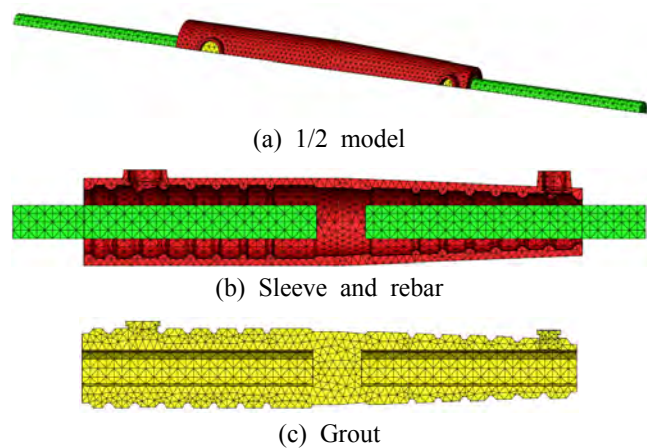


Fig. 2 FEM model

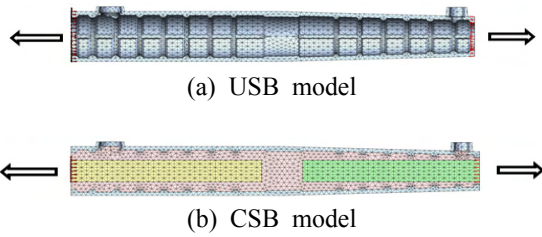


Fig. 3 Preliminary analysis models

브가 끝나는 부위에서 철근을 제외한 모델이다. USB 모델에서는 광구측 끝단을 구속한 상태에서 협구측에 변위 하중을 가하였다. CSB 모델에서는 광구측에서 철근 단부를 구속한 상태에서 협구측 철근 끝단에 변위하중을 가하였다. 변위의 최대값은 5%의 연신율에 해당하는 값이 되도록 선정하였다.

USB에 대한 해석목적은 슬리브 자체만의 구조적 거동을 평가하기 위한 것이며, CSB는 철근의 항복강도 대비 어느 정도의 강도를 발휘할 수 있는지를 평가하기 위함이다. USB에 대한 해석에서는 슬리브에 취약부위가 있는지를 검토하여, 보완이 필요한 부위를 찾고자 하였다. 그리고 슬리브가 구조체에서 사용될 때에는 철근 및 그라우트 와 함께 복합체로 거동할 것이므로, 이때에는 철근이 없는 슬리브 중앙부위와 단면의 크기가 작은 협구측에서 충분한 강도를 가질 수 있는지를 평가하고자 하였다.

3.3 재료모델

유한요소해석은 재료의 비선형성을 고려하기 위하여 슬리브, 철근, 그라우트 각각에 대한 재료의 비선형 특성을 반영하여 수행하였다. 해석에 사용된 프로그램은 midas FEA로 하였다. 해석에서 그라우트에 대한 재료모델은 전변형률 균열모델(total strain crack model)을 사용하였다. 콘크리트의 균열각은 초기 균열에서 발생한 균열각이 변하지 않는 고정균열각모델(fixed crack model)을 사용하였으며, 균열발생 후 변형도 연화현상(strain softening)을 반영하지 않은 취성과괴(brittle failure) 모델을 사용하였다. 그라우트의 압축강도(f_{ck})는 75 MPa이며, 전단지연 계수(shear retention coefficient)는 0.5를 사용하였다. 철근과 슬리브에 대한 물성값은 Table 1과 같다. 재료의 항복 특성은 폰 마이세스(Von Mises) 항복조건을 사용하였으며, 항복 후에는 변형경화 현상을 고려하였다.

3.4 비선형해석 결과

H25형과 H32형 슬리브에 대한 USB 및 CSB 해석의 결과는 Fig. 4와 5에 나타내었다. 해석 결과는 철근의 변

Table 1 Material properties of sleeve and rebar (unit: MPa)

	Elastic modulus	Yield stress	Ultimate stress
Sleeve	2×10^5	407	582
Rebar	2×10^5	500	670

형경화를 고려하지 않은 설계기준항복강도에 대한 비율로 나타내어, 설계기준에 대한 상대적인 강도 특성을 평가하고자 하였다. 그림에는 철근의 이상적인 응력-변형률 관계도 함께 표현하였다.

USB 해석과는 Fig. 4에 나타난 것처럼 철근 항복강도 대비 1.25배 이상의 충분한 강도를 발휘할 수 있는 것으로 나타났다. 구조해석에서 H25형은 2.3배 이상, H32형은 1.75배 정도의 강도를 발휘할 수 있는 것으로 예측되었다. H32형의 강도를 낮게 계획한 이유는 향후 추가적인 개발을 고려하여 최대강도를 1.75까지 낮게 제작하여도 문제가 없는지를 미리 확인하고자 하였기 때문이었다. 그래프의 초기 기울기와 철근 항복 이전의 변형률 상태는 슬리브와 철근의 상대적인 항복 특성을 예측하게 해준다. 철근이 항복할 때의 변형률이 0.25% 정도에 해당하므로, 슬리브는 높은 강성을 발휘하고 있음을 알 수 있다. 따라서 슬리브가 철근과 함께 거동할 때에도 슬리브 측에서는 변형이 크게 발생하지 않을 것이며, 변형이 주로 철근에서 발생할 것임을 예측할 수 있다.

CSB에 대한 해석 결과도 Fig. 5에 나타난 것처럼, 슬리브는 철근 항복강도 대비 1.25배 이상의 충분한 강도를 발휘할 수 있는 것으로 나타났다. CSB는 슬리브에 철근이 연결되어 있는 상태이므로, 철근과 슬리브가 그라우트를 통해서 하중전달 작용을 하게 된다. 따라서 응력을 가장 크게 받는 부분은 철근이 없는 슬리브 중앙부와 단면의 크기가 작은 협구측이 된다.

해석 결과는 H25형 및 H32형 실험체에 대한 CSB 해석의 비교는 두 실험체 모두 거의 유사한 거동을 보여 준다.

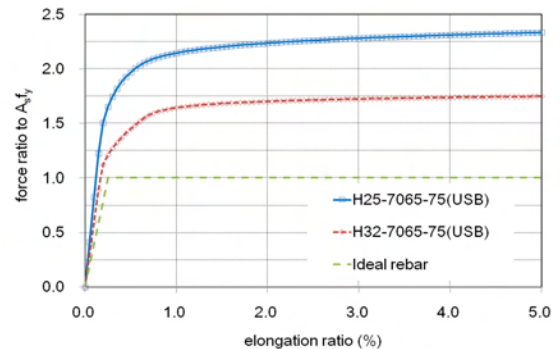


Fig. 4 USB (unconnected sleeve body) analysis

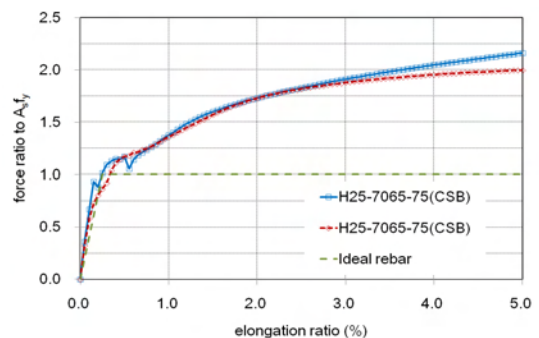


Fig. 5 CSB (connected sleeve body) analysis

이는 USB 해석과는 다르게 슬리브가 달라지더라도 슬리브 부분의 강도는 동일하게 나타났다. 이와 같은 현상이 발생하는 이유는 USB와 CSB에서의 취약 부위가 각각 다르기 때문이다. 이상적인 철근의 거동과 비교해 보았을 때, CSB 해석에서도 슬리브 부분은 철근에 비하여 높은 강성과 강도를 가지고 있을 것으로 예측해 볼 수 있다. 또한 CSB의 강도가 2.0 이상이었던 때문에 기준 요구사항인 철근항복강도의 1.25배를 훨씬 초과하는 것으로 나타났다. 그리고 항복점 변형률도 철근보다 낮게 나타났기 때문에 철근이 먼저 항복할 것으로 사료된다. 따라서 실제의 경우에도 철근이 먼저 항복하고, 그 이후 철근이 파단 될 때까지 슬리브는 충분한 강도를 가질 것으로 예측해 볼 수 있다.

이상과 같은 CSB 및 USB 해석을 통하여 HD25 철근과 HD32 철근용으로 개발하고자 하는 스플라이스 슬리브는 콘크리트구조설계기준을 충분히 만족하는 거동을 보여줄 것으로 예상할 수 있다. 그러나 해석 결과는 슬리브와 철근이 완전 일체로 거동을 할 것으로 가정한 상태에서 얻어진 결과이다. 따라서 슬리브와 철근 사이의 일체성 거동 여부는 실험을 통해서 검증하도록 계획하였다.

4. 실험

이 연구에서 개발하고자 하는 슬리브는 SHD25 철근용인 H25형과 SHD32 철근용인 H32형 두 가지이다. 실험 변수는 광구 및 협구측에서 각각의 정착길이가와 그라우트의 압축강도로 하였다. Table 2에는 각 실험체에 대한 변수를 정리하여 나타내었다. 약식이름 (1-1)부터 (3-3)까지의 실험체는 SDH25용 철근의 슬리브에 대한 실험체이며, (4-1)부터 (6-3)까지의 실험체는 SDH32용 철근의 슬리브에 대한 실험체이다. 약식이름이 2와 5로 시작하는

실험체는 그라우트의 강도가 95 MPa인 실험체이며, 약식 이름이 3과 6으로 시작하는 실험체는 정착길이가 다른 실험체에 비하여 짧은 실험체들이다. 정착길이가 짧은 실험체는 정착길이가 강도에 미치는 영향을 분석하고자 계획한 실험체이다.

실험체 형상은 Fig. 6 및 7과 같다. 슬리브는 길이 375 mm의 H25형과 길이 480 mm의 H32형으로 두 가지이다. 정착길이는 광구측이 협구측에 비하여 0.5d 만큼 길도록 설계하였다. 정착길이가 긴 실험체는 광구측 7.0d와 협구측 6.5d이며, 정착길이가 짧은 실험체는 광구측 6.5d와 협구측 6.0d이다. 실험체에 사용된 슬리브 철물과 철근에 대한 물리적 특성은 Table 3에 나타내었다. 모르타르의 압축강도는 각각 75.8 MPa와 98.7 MPa로 실험체 계획 단계에서의 강도와 거의 일치하였다.

실험은 UTM에 슬리브 실험체를 설치하고 인장력을 가하는 방법으로 실험을 수행하였다. 가력하는 방법은 초기하중으로 철근 설계기준항복강도의 95%까지 가력한 후 하중을 제거하고, 다시 파괴 때까지 가력하는 방법을 사용하였다.³⁻⁵⁾ 철근과 슬리브의 변형거동을 측정하기 위하여 LVDT와 변형률 게이지를 사용하였다. 변위의 측정을 위해서 슬리브가 끝나는 부위에서 20 mm 이격된 위치사이에서 늘어난 길이를 측정하기 위한 LVDT를 설치하여 측정하였다. LVDT는 좌우 양측에 설치하여 평균값을 사용하도록 계획하였다. H25-7065-75-1(1-1), H25-7065-95-1(2-1), H32-7065-75-1(4-1), 그리고 H32-7065-95-1(5-1) 실험체는 변형률 게이지를 Fig. 8과 같은 방법으로 부착하여 변형률 측정에 사용하였다. 철근에는 일방향 변형률 게이지를 부착했으며, 슬리브 표면에는 이방향 변형률 게이지를 부착하였다. 철근에 부착하는 변형률 게이지는 슬리브에 묻히는 부분이며, 리드선이 슬리브

Table 2 Test specimens

Names		Test variables				
Brief	Extended	Sleeve type	Sleeve length (mm)	Development length		Mortar strength (MPa)
				wide hole side	Narrow hole side	
1-1	H25-7065-75-1	H25	375	7.0d (175 mm)	6.5d (163 mm)	75
1-2	H25-7065-75-2					
1-3	H25-7065-75-3					
2-1	H25-7065-95-1			6.5d (163 mm)	6.0d (150 mm)	95
2-2	H25-7065-95-2					
2-3	H25-7065-95-3					
3-1	H25-6560-75-1	H32	480	7.0d (224 mm)	6.5d (208 mm)	75
3-2	H25-6560-75-2					
3-3	H25-6560-75-3					
4-1	H32-7065-75-1			6.5d (208 mm)	6.0d (192 mm)	95
4-2	H32-7065-75-2					
4-3	H32-7065-75-3					
5-1	H32-7065-95-1			6.5d (208 mm)	6.0d (192 mm)	75
5-2	H32-7065-95-2					
5-3	H32-7065-95-3					
6-1	H32-6560-75-1					
6-2	H32-6560-75-2					
6-3	H32-6560-75-3					

구멍을 통하여 밖으로 나오도록 하기 위하여 철근에 가는 홈을 절삭하여 그 공간을 이용하였다. 길이 4 mm의 가는 홈을 판 후 이 부위에 게이지를 부착하고, 리드선도 이 홈에 묻히도록 하였다. 슬리브 표면에는 길이(longitudinal) 방향과 원주(circumferential)방향의 변형률을 측정하기 위하여 양방향 게이지를 부착하였다.

5. 실험 결과

5.1 강도 및 연신율

실험체에 대한 LVDT 측정 결과는 하중변위의 관계로 Fig. 9와 10에 나타내었다. 설계기준에서 기계적 이음장치인 슬리브는 철근의 설계기준항복강도보다 1.25배 이상의 강도를 발휘해야 하는 것으로 규정하고 있기 때문에, 세로축은 철근의 항복강도에 대한 비율로 표현하였다. 그리고 가로축의 값은 연신율을 사용하여 나타내었다.

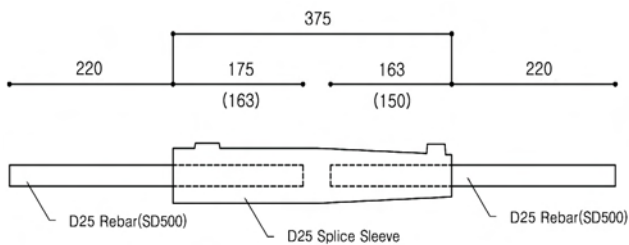


Fig. 6 H25-7065 (H25-6560) type (unit: mm)

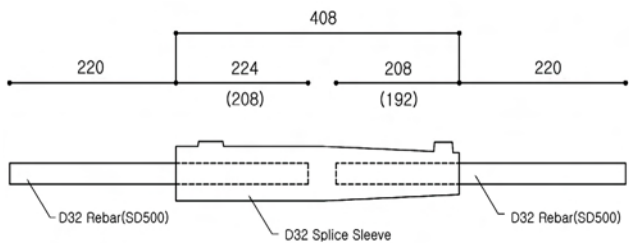


Fig. 7 H32-7065 (H25-6560) type (unit: mm)

Table 3 Material properties (unit: MPa)

	Yield stress	Ultimate stress
H25 sleeve	416	594
H32 sleeve	407	582
SHD25 rebar	525	723
SHD32 rebar	545	673



Fig. 8 Grooved rebar and strain gage attachment on sleeve

실험 결과 이 연구의 모든 실험체는 구조설계기준을 만족하는 것으로 나타났다. 다만 실험체 H25-7065-75-1(1-1)의 경우 다른 실험체에 비하여 조기에 항복하는 것으로 나타났으며, 실험체 H32-7065-75-2(4-2)는 측정이 끝까지 이루어지지 못한 결과를 보여주고 있다. 그러나 모든 실험체들이 설계기준을 만족하였고, 대부분의 실험체들이 충분한 강성을 보인 점으로 미루어 볼 때, 실험체 H25-7065-75-1(1-1)은 제작 혹은 철근 자체의 문제로 인하여 조기 항복처럼 보이는 결과가 얻어진 것으로 사료된다. 그리고 정착길이가 짧은 실험체는 정착길이가 긴 실험체에 비하여 상대적으로 낮은 연신율에서 파괴되는 경향을 보였으며, 그라우트의 강도가 슬리브의 거동에 미치는 영향은 매우 낮은 것으로 나타났다.

5.2 슬리브 및 철근의 변형률 분포

철근과 슬리브의 변형률 분포는 철근과 슬리브에 부착한 변형률 게이지를 통하여 측정하였다. 철근의 축방향 변형률 분포는 거의 유사하였기 때문에 H25-7065-75-1(1-1) 실험체에 대한 실험 결과만을 Fig. 11에 나타내었다.

그리고 슬리브 표면에서의 축방향 및 원주방향 변형률 역시 동일한 실험체에 대한 실험 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 철근의 변형률 분포는 광구측과 협구측에서 유사하게 발생하였다. 그러나 실험체 H32-7065-75-1(3-1)에

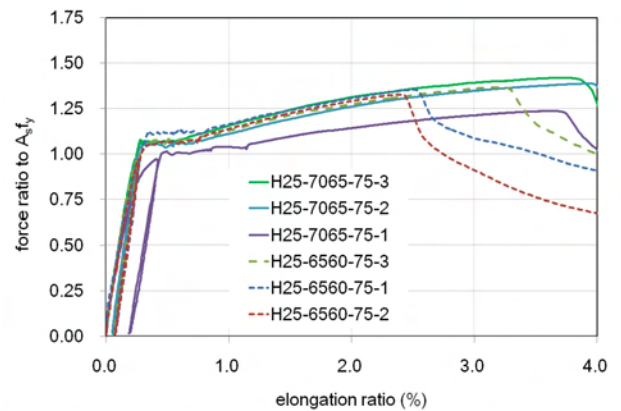


Fig. 9 Force-elongation ratios of H25

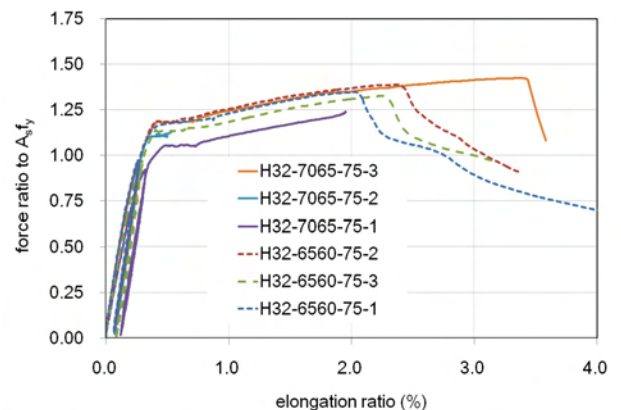


Fig. 10 Force-elongation ratios of H32

Table 4 Summary of test results

Name	Item	Values	Name	Item	Values
H25-7065 -75-1 (1-1)	f_y	505	H32-7065 -75-1 (4-1)	f_y	517
	f_u	607		f_u	648
	f_u/f_y	1.21		f_u/f_y	1.30
	AIJ class	SA		AIJ class	SA
H25-7065 -75-2 (1-2)	f_y	517	H32-7065 -75-2 (4-2)	f_y	542
	f_u	681		f_u	669
	f_u/f_y	1.36		f_u/f_y	1.34
	AIJ class	SA		AIJ class	SA
H25-7065 -75-3 (1-3)	f_y	526	H32-7065 -75-3 (4-3)	f_y	580
	f_u	696		f_u	699
	f_u/f_y	1.39		f_u/f_y	1.40
	AIJ class	SA		AIJ class	SA
H25-7065 -95-1 (2-1)	f_y	518	H32-7065 -95-1 (5-1)	f_y	518
	f_u	637		f_u	655
	f_u/f_y	1.27		f_u/f_y	1.31
	AIJ class	SA		AIJ class	SA
H25-7065 -95-2 (2-2)	f_y	550	H32-7065 -95-2 (5-2)	f_y	561
	f_u	719		f_u	687
	f_u/f_y	1.44		f_u/f_y	1.37
	AIJ class	SA		AIJ class	SA
H25-7065 -95-3 (2-3)	f_y	524	H32-7065 -95-3 (5-3)	f_y	548
	f_u	707		f_u	677
	f_u/f_y	1.41		f_u/f_y	1.35
	AIJ class	SA		AIJ class	SA
H25-6560 -75-1 (3-1)	f_y	551	H32-6560 -75-1 (6-1)	f_y	578
	f_u	664		f_u	661
	f_u/f_y	1.33		f_u/f_y	1.32
	AIJ class	A		AIJ class	A
H25-6560 -75-2 (3-2)	f_y	524	H32-6560 -75-2 (6-2)	f_y	582
	f_u	651		f_u	680
	f_u/f_y	1.30		f_u/f_y	1.36
	AIJ class	A		AIJ class	A
H25-6560 -75-3 (3-3)	f_y	529	H32-6560 -75-3 (6-3)	f_y	559
	f_u	671		f_u	650
	f_u/f_y	1.34		f_u/f_y	1.30
	AIJ class	SA		AIJ class	A
Average	f_y	526	Average	f_y	554
	f_u	670		f_u	670
	f_u/f_y	1.34		f_u/f_y	1.34

대한 측정 변형률은 측정상의 문제로 인하여 그 값이 다른 실험체들에 비하여 비정상적으로 나타났다. 슬리브의 축방향 변형률 분포는 슬리브 중앙부에서 큰 변형이 발생하였음을 보여주며, 포아송효과로 인하여 원주방향 변형률은 이 부위에서 작게 나타났다. 슬리브의 항복강도는 416 MPa 및 407 MPa 이므로 항복변형률은 0.002 정도이며, 철근은 항복강도가 525 MPa과 545 MPa 이므로 항복변형률은 0.0025이다. 따라서 철근과 슬리브 모두에서 항복이 발생한 것임을 알 수 있다.

5.3 실험 결과 요약

총 18개의 실험체에 대한 실험 결과는 Table 4에 나타나 있으며, 실험체들이 구조설계기준을 만족하는지를 평가한 결과를 표현하였다. 표에서도 알 수 있듯이 모든 실험체가 설계기준에서 요구하는 조건을 만족함을 알 수 있다. 철근

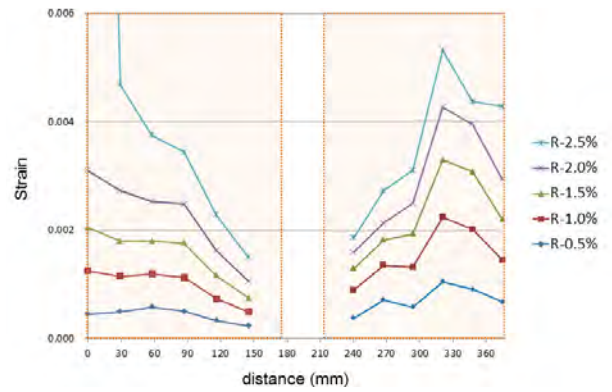
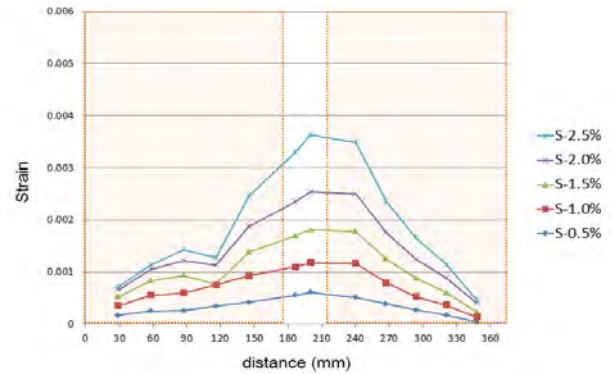
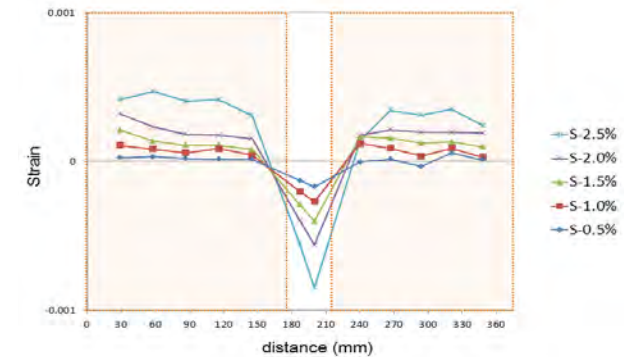


Fig. 11 Strain distributions on rebar surface of H25-7065-75-1 (1-1)



(a) Longitudinal strain distribution



(b) Circumferential direction strain distribution

Fig. 12 Strain distributions on sleeve surface of H25-7065-75-1 (1-1)

의 설계기준항복강도에 대한 최대강도의 평균비율이 H25형과 H32형 모두 1.34로 나타났다. 이러한 결과는 그라우트의 강도와 철근의 정착길이에 의한 차이는 보이지 않았다.

6. 실험과 해석의 비교

구조실험을 통하여 모든 실험체들이 설계기준을 만족함을 보였지만, 전체적인 거동에 대한 평가는 구조해석 결과와 비교하여 검토할 수 있다. 앞에서 검토한 바와 같이 그라우트의 압축강도나 철근의 부착길이는 구조해석

의 결과에 거의 영향을 미치지 않음을 보였기 때문에 해석은 H25-7065-75 실험체와 H32-7065-75 실험체 두 가지에 대하여 Fig. 13과 같은 모델로 해석을 수행하였다.

실험 결과에 대한 해석 결과는 Fig. 14~17에 나타내었다. 실험체 강성에 대한 비교를 보면, 실험체의 강성이

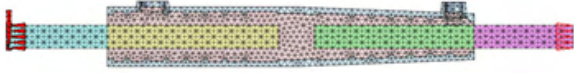


Fig. 13 Comparison of H32 type

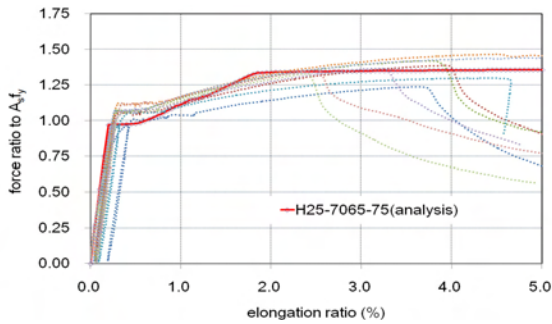


Fig. 14 Comparison of H25 type

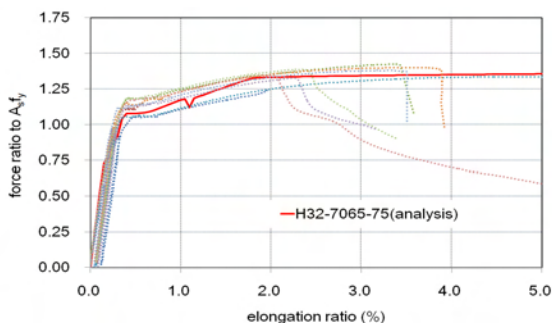


Fig. 15 Comparison of H32 type

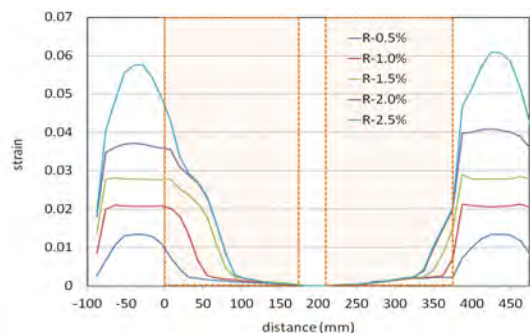


Fig. 16 Strain distribution on rebar surface

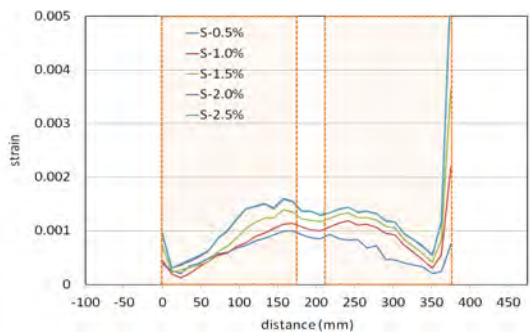


Fig. 17 Von Mises strain distribution on sleeve surface

유사함을 알 수 있다. 특히 실험체에 대한 가력과 재가력의 기울기가 해석 결과와 거의 유사함을 보였기 때문에 항복 전까지 철근과 슬리브 사이의 미끄러짐은 거의 발생하지 않았을 것으로 사료된다.

항복점의 위치는 실험과 해석이 거의 유사함을 보이고 있다. 해석에서는 철근과 슬리브가 완전 부착인 것으로 가정하였기 때문에 항복점이 유사하다는 것은 철근의 항복시점까지도 철근과 슬리브 사이의 미끄러짐은 거의 발생하지 않았을 것으로 생각할 수 있다. 또한 항복 후 최대강도까지의 기울기 및 최대강도 역시 실험과 해석이 매우 유사한 거동 특성을 나타내고 있다.

Fig. 16과 17에는 철근의 축방향변형률 분포와 슬리브 표면에서의 폰 마이세스 변형률 분포를 나타내었다. 이들 변형률 분포는 실험 결과와 유사한 경향을 보였음을 알 수 있다. 철근은 단부로 갈수록 변형률이 증가하는 반면에 슬리브는 중앙부 영역에서 보다 큰 변형률 분포를 보이고 있다. 다만 실험에서는 슬리브가 항복하는 것으로 나타났지만, 해석에서는 슬리브가 항복하기 직전까지만 변형한 것으로 나타났다.

7. 일본의 AIJ 규준식과의 비교

일본의 AIJ 규준에서는 기계식 철근이음의 구조성능을 연성능력에 따라 SA급, A급, B급으로 구분하여 그 적용 범위를 한정하고 있다. 철근의 설계기항복강도를 초과하여 변형경화 거동을 보인 후 다시 항복강도로 응력이 저감될 때의 연신율이 4% 이상이면 SA등급, 2% 이상이면 A등급, 그 이하이면 B 등급으로 구분된다. 이 연구에서 실시된 슬리브는 총 18개 중에서 4개가 A등급이었으며 나머지 14는 SA등급이었다. 이상과 같은 등급은 Table 4에 나타내었다. 김형기⁶⁻⁹⁾는 다음과 같은 파괴모드 예상식을 사용하여 일본의 실험 결과를 분석하였다.

$$f_g = \frac{5f_{su} - 2f_{sy}}{6(L/D - 0.7)} \quad (1)$$

$$f_g = \frac{f_{sy}}{2(L/D - 0.7)} \quad (2)$$

여기서, f_g 는 그라우트의 압축강도, f_{sy} 와 f_{su} 는 각각 철근의 항복 및 파괴강도이다. 그리고 L 과 D 는 철근의 정착길이와 직경을 나타낸다. 식 (1)과 (2)에 의한 파괴모드 예상식을 Fig. 18에 나타내었다.

식 (1)은 철근의 파단영역을 나타내는 식이며, 식 (2)는 철근의 항복에 의해서 슬리브의 강도가 결정되는 경우를 나타내는 식이다. 따라서 그림에서 식 (1)의 우측은 철근파단 영역(SA등급), 식 (1)과 (2) 사이의 구간은 철근이 항복한 후 부착파괴가 발생하는 구간(A등급), 식 (2)의 좌측은 철근의 항복 전에 부착파괴가 발생하는 구간(B등급)이다. 일본 실험자들이 사용한 슬리브 형상의 종류나 실험자 등에 따라 상당한 차이가 있지만, 이러한 예상식과 이 논문에

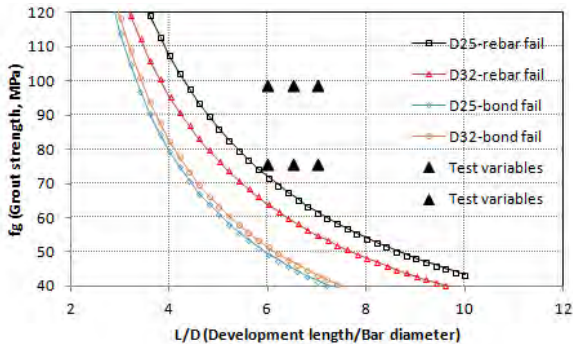


Fig. 18 Prediction method of failure mode

서 사용한 정착길이를 비교하여 Fig. 18에 나타내었다.

그림에서 볼 수 있는 것처럼 이 연구의 실험체들은 모두 철근의 파괴영역에 있도록 설계되었음을 알 수 있다. 그러나 그림에 따르면 압축강도 95 MPa인 그라우트를 사용하는 경우 정착길이를 더 줄일 수 있는 것처럼 보인다. 이 연구에서는 압축강도가 높은 경우 정착길이를 더 줄이는 변수를 사용하지 않았기 때문에 이 경우에 정착길이를 줄일 수 있을지는 판단하기 어렵다. 그러나 그라우트 압축강도 75 MPa이며 정착길이가 짧은 실험체들이 주로 A등급의 성능을 보인 것으로 미루어 보았을 때, 95 MPa인 그라우트를 사용한 경우라도 예상식에 따라 정착길이를 줄이는 것은 어려운 것으로 예상된다.

8. 결 론

이 연구에서는 설계기준항복강도 500 MPa의 SHD25 철근과 SHD32 철근에 사용할 수 있는 스플라이스 슬리브에 대한 실험 및 해석 연구를 수행하였다. 주물로 제작하게 되는 슬리브의 형상을 결정하기 위하여 사전에 비선형 유한요소해석을 실시하여 구조성능을 검증하였다. 선정된 슬리브는 철근의 종류 및 그에 따른 슬리브의 길이, 그라우트 강도, 철근의 정착길이 등을 변수로 하여 총 18개의 실험체를 제작하여 구조실험을 실시하였다. 이 때, 동일한 변수의 실험체를 3개씩 제작하여 실험에서 발생할 수 있는 오차를 해소하고자 하였다. 그리고 실험이 종료된 후에는 실험체에 대한 비선형 유한요소해석을 다시 실시하여 구조실험 결과와 비교하였다. 이상과 같은 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 철근이 연결되지 않은 상태에서 슬리브가 가질 수 있는 강도를 검토하기 위하여 슬리브 자체 만에 대한 구조해석(USB 해석)을 수행하였으며, 그 결과 슬리브는 철근의 설계기준항복강도를 1.75배 이상 초과하는 충분한 강도를 발휘할 수 있음을 알 수 있었다.
- 2) 철근이 파괴되기 전에 슬리브가 충분한 강도를 발휘할 수 있는지를 검토하기 위하여 철근이 연결된 상태에서 슬리브 구조체 만에 대한 구조해석(CSB 해석)을 행하였으며, 그 결과 슬리브는 철근의 설계기준항복강도를 2.0배 이상 초과하는 충분한 강도를 발휘할 수 있음을 알 수 있었다.

- 3) 총 18개의 실험체에 대한 인장실험 결과 모든 실험체가 구조설계기준에서 요구하는 철근의 설계기준 항복강도에 대한 한계 강도비 1.25배를 초과하는 평균 1.34배의 초과강도를 보였다. 따라서 개발한 슬리브는 설계기준을 만족하는 것으로 판단할 수 있다.
- 4) 이 연구에서 사용한 실험변수인 그라우트의 강도와 철근의 정착길이는 슬리브 실험체의 강성 및 강도에 거의 영향을 미치지 않았다.
- 5) 구조해석 결과 슬리브는 철근에 비하여 높은 강성을 가지고 있으므로 대부분의 변형이 철근에서 발생할 것임을 예측할 수 있었으며, 실험에서도 동일한 결과를 얻었다.
- 6) 철근의 변형은 광구측에서 더 크게 발생할 수 있는 반면에 슬리브의 변형은 협구측에서 더 발생할 수 있다. 그러나 철근이 항복할 때에 슬리브는 아직 탄성범위를 벗어나지 않은 상태에 있었다.
- 7) 비선형 유한요소해석에 의한 해석 결과로 얻어진 슬리브의 강성이 실험 결과와 매우 유사하게 나타났기 때문에 철근과 슬리브 사이의 미끄러짐이 발생하지 않을 것으로 판단되었다.
- 8) 일본의 AIJ 기준의 평가방법에 따라 평가한 결과 정착길이가 긴 실험체 12개는 모두 SA등급을 보였으며, 정착길이가 짧은 실험체는 6개 중에서 4개는 A등급의 성능을 보였다.

참고문헌

1. Architectural Institute of Korea, *Building Structure Design Code*, 2009, 769 pp.
2. ACI Committee, 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington hills, Michigan, 2008, 473 pp.
3. Kim, H. K., "Study on Load Transfer Process and Design of Mortar Grouted Splice Sleeve," *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 20, No. 12, 2004, pp. 19-26.
4. Daedong MS and Kangwon University, *Development of Splice Sleeves for SD500 Rebars*, 2007, 124 pp.
5. Ahn, B. I., Kim, H. K., and Park, B. M., "Confining Effect of Mortar Grouted Splice Sleeve on Reinforcing Bar," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 15, No. 1, 2003, pp. 102-109.
6. Kim, H. K., "Comparative Evaluation of Ductility in Mechanical Sleeve Reinforcing Bar Splice Filling High-Strength Mortar," *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 28, No. 7, 2012, pp. 41-48.
7. Kim, H. K., "Analysis about the Estimation Method of Failure Mode in Steel Pipe Sleeve Splice," *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*, Vol. 12, No. 4, 2010, pp. 279-286.
8. Kim, H. K., "Evaluation on Stiffness of Mechanical Sleeve Bar Splice Filling High-strength Mortar Under

Monotonic Loading,” *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 16, No. 4, 2012, pp. 79-88.

9. Kim, H. K., “Evaluation on Stiffness of Mortar-filled Sleeve

Splice Using Estimation Method of Failure Mode,” *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 16, No. 1, 2012, pp. 27-34.

요 약 이 연구에서는 설계기준항복강도 500 MPa의 HD25 철근과 HD32 철근에 사용할 수 있는 스플라이스 슬리브에 대한 실험 및 해석 연구를 수행하였다. 비선형 유한요소해석을 실시하여 적정 형상을 선정하였으며, 총 18개의 실험체를 제작하여 구조 실험을 실시하였다. 실험체는 철근의 종류, 슬리브의 길이, 그라우트 강도, 철근의 정착길이 등을 변수로 하였다. 동일한 변수의 실험체를 3개씩 제작하여 실험에서 발생 할 수 있는 오차를 해소하고자 하였다. 그리고 비선형 유한요소해석을 실시하여 구조실험 결과와 비교하였다. 총 18개의 실험체에 대한 인장실험 결과 모든 실험체가 구조설계기준에서 요구하는 조건을 만족함을 보였다. 그라우트의 강도와 철근의 정착길이는 슬리브 실험체의 강성 및 강도에 거의 영향을 미치지 않았다.

핵심용어 : 스플라이스 슬리브, 철근 유형, 정착길이, 모르타르 강도, 비선형 해석