

하이브리드 해상풍력발전 지지구조물의 콘크리트 베이스-슬리브 연결부에 대한 실험 연구

이정화¹, 변남주¹, 김성환², 박재현³, 강영종^{*}

¹고려대학교 건축사회환경공학부, ²동명기술공단종합건축사사무소 부설연구소, ³한국건설기술연구원 지반연구소

Experimental Study for Concrete Base to Sleeve connection of Hybrid Substructure for Offshore Wind Turbine

Jeong-Hwa Lee¹, Nam-Joo Byun¹, Seong-Hwan Kim², Jae-Hyun Park³,
Young-Jong Kang^{*}

¹School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University,

²DONG MYEONG engineering consultants & architecture co.,LTD.,

³Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 본 논문에서는 하이브리드 해상풍력발전 지지구조물의 콘크리트베이스와 파일기초를 연결하는 베이스-슬리브 연결부를 제시하고 이를 실험적으로 검증하였다. 베이스-슬리브 연결부의 펀칭 전단 강도와 구조거동을 분석을 위하여, 철근비와 하중조건을 변수로 하는 3개의 연결부 실험체에 대하여 펀칭전단실험이 실시하였다. 실험 결과, 베이스-슬리브 연결부의 펀칭전단강도와 강성은 베이스의 철근비에 주로 영향을 받는 것으로 나타났다. 축력과 모멘트가 동시에 작용되는 하중 조건은 연결부의 강성에는 영향을 미치지 않으나 축력-모멘트 상호작용에 의하여 강도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 각 실험체의 파괴거동과 펀칭전단의 위험단면에 대해 검토되었다.

Abstract In this paper, concrete base to sleeve connections of hybrid substructures for offshore wind turbines were suggested and investigated experimentally. Punching shear strength tests with well-instrumented three connections under different reinforcement ratios and loading conditions were conducted to investigate the punching shear strength and the behavior of the concrete base to a sleeve connection. The test results showed that the punching strength and stiffness of the connections are affected mainly by the reinforcement ratios. The loading conditions with an axial load and proportional moment cannot affect the stiffness but affect the strength of the connections because of the axial load-moment interaction. The punching shear failure and critical section of the each test specimen are also discussed.

Keywords : Connection, Critical section, Hybrid substructure, Offshore wind turbine, Punching failure

1. 서론

풍력발전단지의 건설에서 연중 일정한 풍력에너지 자원을 확보하는 것은 매우 중요하다. 그동안 우리나라에서는 육상풍력발전단지의 건설에 의존하였으나, 강원도,

제주도 등 일부지역을 제외하면 연중 일정한 풍력에너지 자원을 확보할 수 있는 장소는 매우 한정적이다. 이러한 이유로, 풍부한 풍력자원을 확보할 수 있는 해상풍력발전단지과 풍력발전 설비의 대형화에 대한 관심이 급증하는 추세이다.

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 제원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No.20123010020110)입니다. 이에 감사드립니다.

*Corresponding Author : Young-Jong Kang(Korea Univ.)

Tel: +82-2-927-7715 email: yjkang@korea.ac.kr

Received November 30, 2015

Revised December 22, 2015

Accepted January 5, 2016

Published January 31, 2016

해상풍력발전의 지지구조물은 수심에 따라 중력식, 모노파일, 자켓식, 부유식 등으로 구분할 수 있다. 이러한 지지구조물의 적용형식은 경제적인 논리에 의해 결정되기 때문에, 설계 시 단지 주변의 환경에 대한 분석 수행이 매우 중요하다. 최근에는 우리나라 실정에 적합한 수심 30m에서 60m에 건설하기 위한 신형식 하이브리드 해상 풍력 발전 지지구조물에 대한 연구개발이 지속적으로 이루어지고 있다[1], [2], [3].

Fig. 1은 Park et al.[2]에 의하여 제안된 5MW급의 하이브리드 해상 풍력발전 지지구조 시스템으로, 해양 환경 조건에 대한 구조성능 및 거동 향상을 목적으로 개발되었다. 본 하이브리드 해상풍력발전 지지구조시스템은 전체적인 구조물이 조립식으로 시공이 된다. 각 구조 부재는 해상 파일기초, 콘크리트베이스, 콘크리트충진 멀티파일과 타워 연결부 구성부재로 나눌 수 있으며, 합성 단면 등을 사용하여 매우 경량하게 제작되는 특징이 있다. 또한, 콘크리트 기초도 경제성과 운반능력을 확보하기 위하여 경량한 구조로 개발되었다.

제안된 하이브리드 해상풍력 지지구조물의 콘크리트 베이스-파일 연결부에는 다양한 하중 조건이 발생할 수 있는데, 베이스의 전도모멘트에 의하여 말뚝에는 인장과 압축이 지배적으로 발생하게 된다. 또한, 수평력과 접합부 콘크리트 베이스 연결부의 기하학적인 비대칭성으로 인하여 휨모멘트도 함께 발생할 수 있다. 그러므로 콘크리트 베이스-파일 연결부의 성능을 검토하기 위해서는, 축력이 재하된 경우 뿐 아니라 축력과 모멘트가 동시에 발생하는 경우에 대한 검토가 필요하다.

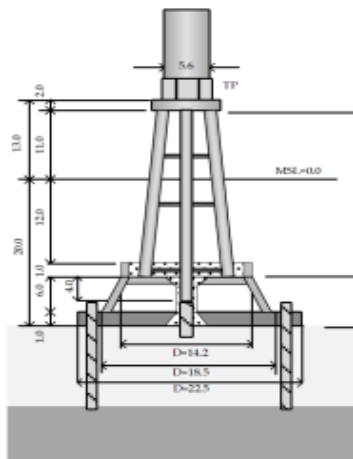


Fig. 1. Hybrid substructure for offshore wind turbine (Park et al.[2]).

본 연구에서는 하이브리드 해상풍력발전 지지구조시스템의 구조부재 중에서 콘크리트 베이스와 해상파일말뚝의 급속시공을 위한 연결부 형식을 제안하고 이를 실험을 통하여 검증하였다. 실험의 변수로 하중조건과 주철근의 간격이 다른 실험체를 제작하였으며, 실험 결과를 이용하여 접합부의 구조적 성능과 파괴거동에 대한 분석을 수행하였다.

2. 하이브리드 풍력발전지지구조물의 콘크리트 베이스-슬리브 연결부

Fig. 2는 하이브리드 해상풍력발전지지구조물의 기초와 말뚝 연결부의 상세구조를 보여준다. 본 연구에서 제안된 연결부의 형식은 말뚝과 슬리브를 연결하기 위한 그라우트 연결부(Pile to sleeve grouted connection)와 콘크리트 베이스-슬리브 연결부(Concrete base to Sleeve connection)로 구분된다.

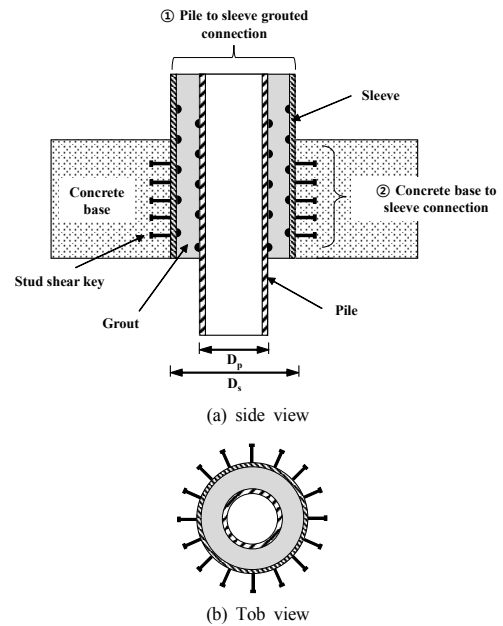


Fig. 2. Suggested base to pile connection method of hybrid substructure for offshore wind turbine.

그라우트 연결부는 Fig. 2(a)와 같이 말뚝기초와 슬리브강관을 연결하는 연결부로 파일과 슬리브강관 사이에 링 모양의 전단키가 선설치되며, 그 사이를 그라우트로

채우게 된다. 따라서 그라우트 연결부는 말뚝에서 발생 되는 반력을 슬리브강관으로 전달하는 역할을 수행하게 된다.

두 번째로 콘크리트 베이스-슬리브 연결부는 슬리브 강관과 콘크리트 베이스 사이의 연결부로서 합성을 위하여 스테드형식의 전단연결재로 연결된다. 콘크리트 베이스-슬리브 연결부는 그라우트 연결부로부터 전달되는 반력하중을 전단 연결재에 의하여 베이스로 전달하는 역할을 하며, 이때 발생하는 전단력은 기초부의 편칭전단을 발생시킬 수 있으므로, 연결부 설계 시 이에 대한 검토가 필수적일 것이다.

본 접합부의 장점은 베이스와 외측 슬리브강관이 스테드 형식의 전단연결재로 선설치되어 프리캐스트로 제작되기 때문에, 현장에서는 파일과 외측 슬리브강관 사이에 그라우트만 채움으로써 시공을 간편하게 할 수 있다.

파일-슬리브 그라우트 연결부는 DNV-OS- J101[4], API-RP 2A-WSD[5], ISO-19902[6]에 제시된 그라우트 연결부 설계법으로 설계가 가능하기 때문에, 베이스와 슬리브에 대한 연결부의 성능 검증이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 베이스와 슬리브간의 합성거동 및 연결부의 성능에 초점을 맞추어 실험이 수행되었다.

3. 실험체의 설계 제작 및 세팅

3.1 실험체의 설계 및 제작

하이브리드 해상풍력발전 지지구조물의 콘크리트 베이스-슬리브 연결부 실험체의 설계제원은 Table. 1과 같다. 또한, 사용된 강재와 그라우트 및 콘크리트의 물성치는 Table. 2에 정리되어있다. 실험체의 콘크리트 베이스

부는 27MPa로 설계하여 28일 양생 후 압축강도 실험을 수행한 결과 26.8MPa로 나타났다. 파일과 슬리브 사이에는 실제 구조물과 유사한 실험체의 조건을 만들기 위하여 그라우트를 채워넣었으며, 28일간의 습윤양생조건에서의 강도는 122.8MPa로 측정되었다.

실험체에 사용한 파일의 직경은 508mm이며, 콘크리트와 합성되는 외측 슬리브 강관의 지름은 609mm이다. 강관은 SM400강재로, 인장 실험을 통해 계측된 평균 항복강도와 극한 강도는 각각 316.5MPa, 460.8MPa이다. 주철근과 전달철근은 각각 D13와 D10 규격의 철근을 사용하였으며, 철근의 평균 항복강도와 극한강도는 각각 521.1MPa, 655.6MPa로 측정되었다. 외측 슬리브 강관은 콘크리트 기초와 합성을 위하여, 13mm직경의 스테드가 길이방향을 따라 2개의 열로 설치되었다. 1열당 16개씩 설치하여 실험체당 총 32개의 스테드가 설치되었다. 이 때, 스테드는 인장강도가 400MPa이상인 HS1 타입의 표준 스테드(KS B 1062)를 사용하였다.

본 실험체의 경우 접합부 기초의 편칭과피 거동을 분석하기 위하여 스테드에서 파괴가 일어나지 않도록 충분한 양의 스테드를 설치하였다.

스테드의 한 개당 전단 성능은 약 186kN으로 스테드에 의한 설계강도는 총 5,952kN이다.

풍력발전설비 지지구조물 설계지침 · 동해설(2010)[7]에서는 CFT기둥의 기초 매입 깊이를 기둥 직경(D)의 약 2배 이상으로 규정되어 있다. 하지만, 하이브리드 기초의 경우 조립식으로 경량하게 제작되어야 하기 때문에 2D이상의 매입깊이를 충족시키기 어렵다. 따라서, 본 연결부 실험체는 기초부의 주철근과 전단철근의 보강효과에 대한 성능 분석을 위해 매입깊이를 0.54D인 330mm로 비교적 얇게 제작하였다.

Table 1. Dimensions of specimens

Specimens	SC-AL-S100	SC-EL-S100	SC-AL-S140
Diameter of pile(mm)	508	508	508
Thickness of pile(mm)	12mm	12mm	12mm
Diameter of sleeve(mm)	609	609	609
Thickness of sleeve(mm)	12mm	12mm	12mm
Embedded length(mm)	330	330	330
Spacing of rebars	100	100	140
rebars	D13 / D10	D13 / D10	D13 / D10
Stud	HS1(fy=235, fu=400)		
Dimenstions of stud	Φ13 / Length=100mm / 32EA		

Table 2. Material properties of specimens

(Unit: MPa)		
Steel tube	Young's modulus(E_s)	154,909
	Yielding strength(f_y)	316.5
	Ultimate strength(f_u)	460.8
Grout	Young's modulus(E_g)	47,670
	Compressive strength(f_{ck})	122.8
Concrete	Compressive strength(f_{ck})	26.8
Steel reinforcement	Young's modulus(E_s)	180,806
	Yielding strength(f_y)	521.1
	Ultimate strength(f_u)	655.6

Table. 1에서 SC는 Sleeve connection, AL과 EL은 각각 Axial loading, eccentric loading, S는 주철근의 간격으로 S100은 간격 100mm를 뜻한다. 따라서, SC-AL-S100은 주철근의 간격이 100mm인 스테드 연결 부로 Axial loading이 작용하는 실험체를 나타낸다.

Fig. 3은 기초부의 배근 상세, 반력 지점의 위치, 계이 지 설치 위치를 나타낸 실험체의 상세 도면이다.

주철근의 배근간격이 변수인 SC-AL-S100과

SC-AL-S140은 위험단면내의 철근의 배근 간격이 각각 100mm, 140mm이다. 하중조건을 변수로 하는 실험체 SC-AL-S100과 SC-EL-S100은 동일한 제원으로 설계되었으나 하중조건만 달리 하여 실험체를 계획한 경우이다. 그 밖의 스테드의 치수와 사용된 강재 및 콘크리트 재료의 물성치는 모두 동일하다.

또한 주철근이 서로 교차하는 지점에는 10mm직경의 전단철근을 설치하였다.

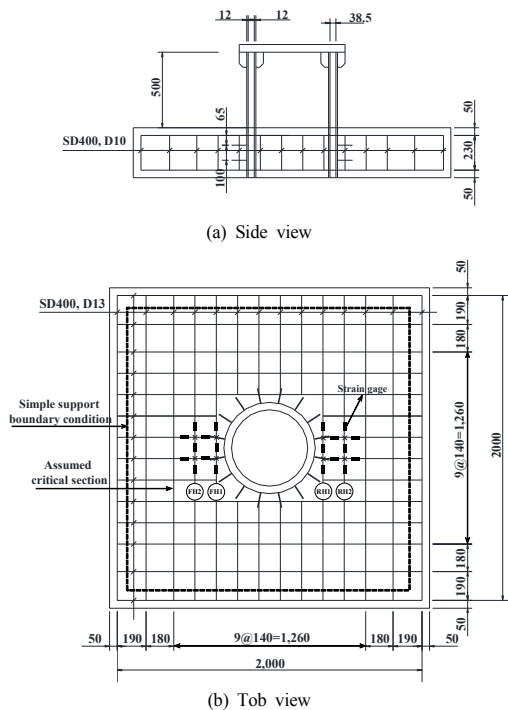


Fig. 3. Dimensions of test specimen SC-AL-S140

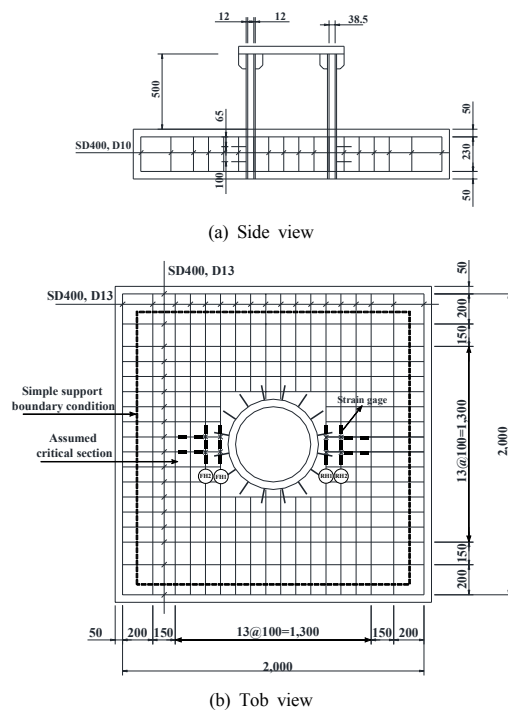


Fig. 4. Dimensions of test specimen SC-AL-S100 & SC-EL-S100

압축이나 인장력이 지배적으로 발생하는 기둥-바닥판 접합부는 편칭전단에 대해 기둥에 접하는 일정영역을 위험단면으로 고려하여 설계에 적용되고 있다. 본 접합부도 동일한 접근법을 통하여 실험에서 예상되는 위험단면에 철근을 집중적으로 배근하였으며, 배근된 철근에 변형률 게이지를 설치하였다.



(a) Production of test specimen



(b) Setting of specimen

Fig. 5. Test specimen

도로교 설계기준 한계상태설계법 2012[8]에서는 편칭전단의 위험단면을 5.5.4절에 규정하고 있다. 이 때, 위험단면을 최하단 철근으로부터 기둥이 설치되는 상단 까지의 거리를 d 라고하면, $2d$ 만큼을 유효단면으로 정의하고 있다.

본 실험체의 경우, 하중은 스티드에 의하여 기초에 전달되므로 최상단 스티드에서부터 기초부의 최하단 철근까지의 거리를 유효깊이(effective depth, D_e)로 가정하였다. 따라서, 위험단면을 슬리브강관의 면으로부터 슬래브 유효깊이의 2배인 $2D_e(330\text{mm})$ 로 가정하여 철근을 배근하였다.

Fig. 5는 설계된 도면을 토대로 제작된 실험체사진이다. 스티드가 설치된 슬리브와 기초부의 편칭전단강도를 실험적으로 검증하기 위하여, 하중의 가력부는 하중이 모두 슬리브에 전달되도록 슬리브와 파일에 강결로 설치하였다.

3.2 실험체의 세팅

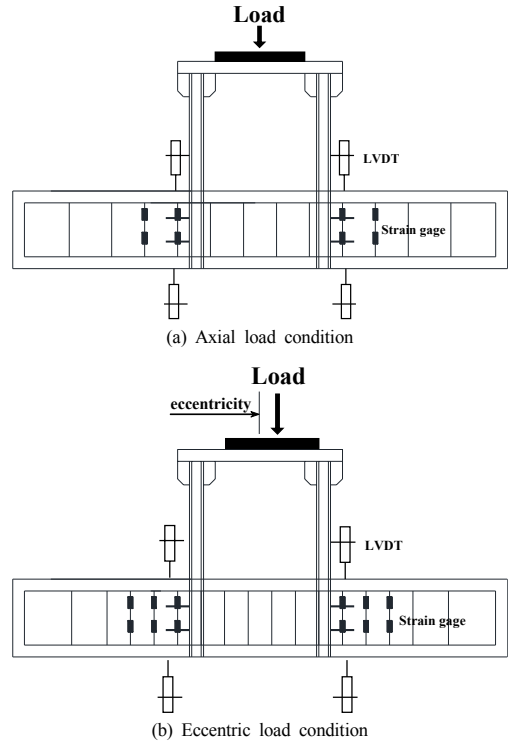


Fig. 6. Loading condition of specimens

Fig. 6은 실험체의 하중 가력방법을 정의한 그림이다. 그림 6(a)는 이심률이 없는 상태의 하중조건으로 SC-AL-S100과 SC-AL-S140실험체의 하중 가력방법을 나타낸 것이다. 그림 6(b)는 축력과 축력에 비례적으로 증가하는 모멘트의 효과를 동시에 모사하기 위한 하중조건으로 SC-EL-S100실험체에 적용된 하중조건이다. 경계조건은 기초부 하단의 연단부 4면에서 내측으로 150mm 떨어진 지점에 롤러를 설치하여 단순지지상태의 반력조건으로 실험을 수행하였다. 가력 하중은 2,000kN 용량의 액츄에이터를 이용하여 약 0.02mm/s 속도로 변위하중을 재하하였다. 기초부와 슬리브강관 사이의 m 과

러짐을 측정하기 위하여 상단 접합부 근처에 총 4개의 LVDT를 설치하였고, 기초의 전체 처짐을 측정하기 위하여 하단부에도 LVDT를 4개 설치되었다. 단조하중을 천천히 가함과 동시에 하중, 처짐, 철근의 변형률이 측정 되도록 실험장비를 세팅하였다. 최하단부에는 편칭전단에 의한 콘크리트 기초의 균열발생이 예상되었으나, 실험 중 측정이 어려워 최종 상태에서의 균열양상을 검토하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 실험결과

Table. 3은 실험체의 최대강도, 최대강도의 변위 및 상대변위를 나타낸 결과이다.

Table 3. Test results

Specimens	P_{max}	Δ_{max}	$\Delta_{max, slip}$
SC-AL-S100	1,360.06	12.73	3.73
SC-AL-S140	1,126.58	11.74	3.03
SC-EL-S100	1,240.46	10.31	3.52

실험체별 최대 강도는 SC-AL-S100, SC-AL-S140, SC-EL-S100 실험체별로 각각 1,360.06kN, 1,126.58kN, 1,240.46kN이며, 이때 최대 강도에서의 변위는 각각 12.73mm, 11.74mm, 10.31mm로 유사하게 나타났다. 슬리브와 콘크리트 베이스의 슬립은 약 3.03mm에서 3.73mm으로 나타나 매우 미소한 슬립이 발생하였다.

4.2 철근비의 변화에 따른 결과 분석

Fig. 7은 주철근비의 변화에 따른 접합부의 편칭전단 강도의 영향을 비교하기 위하여, 실험체의 하중-변위 곡선을 비교한 결과이다. 그래프를 통해 얻어낸 최대 강도, 최대 강도에서의 변위, 최대 강도의 75%로 정의된 항복 강도와 이때의 변위를 Table. 3에 나타내었다. 주철근 비가 큰 SC-AL-S100 실험체의 경우 SC-AL-S140 실험체에 비하여 최대 강도는 약 20.7% 크게 나타났다. 이때의 변위는 각각 12.73mm, 11.74mm로 유사하게 나타났다. 철근배근에 따른 효과를 Fig. 7을 통해 고찰해보면, 약 10mm까지의 초기 변위 발생시 실험체의 강성에서 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 최대강도도 상이

한 것으로 보아 철근비는 연결부의 강성과 강도에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

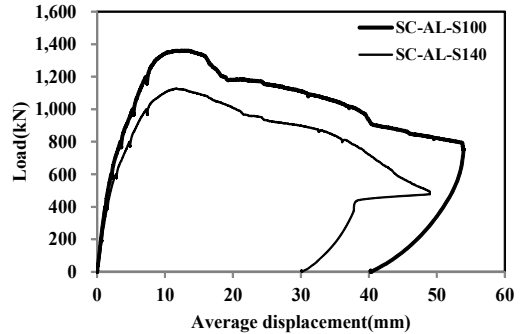


Fig. 7. Load and displacement curve considering different rebar ratio.

4.3 하중조건에 따른 결과 분석

하중조건에 따른 실험결과를 분석하기 위하여 실험체 SC-AL-S100와 SC-EL-S100의 하중 변위 곡선을 비교하였다. SC-EL-S100 실험체는 축력과 축력에 비례하는 모멘트의 영향을 동시에 분석하기 위하여 하중을 약 90mm 편재하한 경우이다. Fig. 8로부터 축력만 재하된 실험체가 하중이 편재하 된 실험체보다 최대 강도가 약 9.6%크게 나타났으나, 철근비가 다른 실험체의 결과와는 달리 약 8mm의 변위가 발생할 때까지 거의 유사한 하중-변위 곡선을 보여 초기강성이 유사했다.

따라서, 하중조건은 구조물의 강성에 큰 영향을 미치지 않으나 축력-모멘트 상호작용에 의하여 강도에 영향을 미치며, 초기 강성에는 기초부에 설치되는 철근의 배근이 가장 큰 영향을 미치는 변수임을 확인하였다.

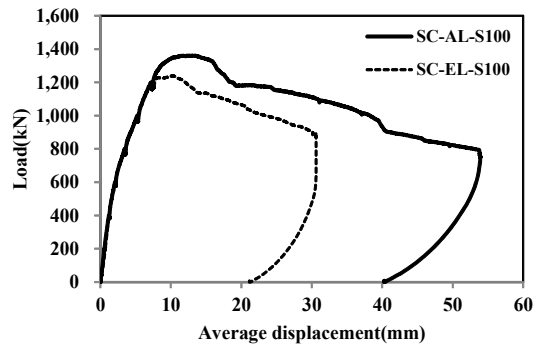


Fig. 8. Load and displacement curve considering different loading conditions.

4.4 하부 주철근의 변형을 분포

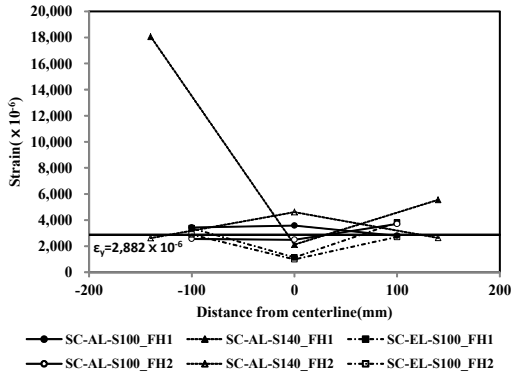


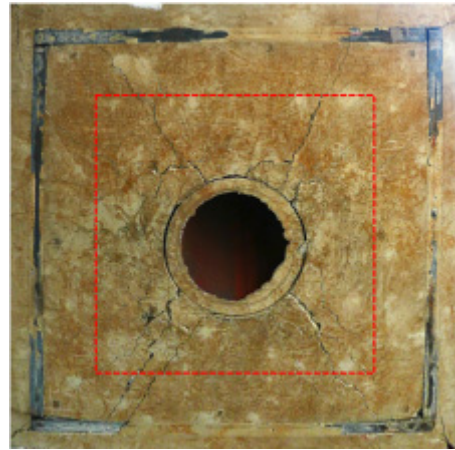
Fig. 9. Strain distributions at bottom main reinforcement near the sleeve.

Fig. 9은 접합부에 인접한 하단부 횡방향 주철근의 첫 번째(FH1), 두 번째열(FH2)의 변형을 분포를 나타내며, 각 실험체의 최대 강도 도달 시점에서 측정된 결과이다. 슬리브 강관에서 가장 근접한 첫 번째 열의 변형률이 두 번째 열의 변형률보다 대체로 높게 나타났다. 이는 첫 번째 열의 주철근이 스티드로부터 전달되는 국부적인 하중에 가장 큰 영향을 받기 때문인 것으로 예상된다. 따라서, 스티드와 인접한 부근의 철근 배근이 전체 강도에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한, 철근 배근 간격이 비교적 넓었던 SC-AL-S140 실험체의 변형률은 최대 $18,053 \cdot 10^6$ 으로 나타나 철근의 항복변형률 $2,882 \cdot 10^6$ 를 크게 상회하는 것으로 나타났다. 주철근의 배근간격이 좁을수록 연결부의 펀칭전단강도가 상승하므로 설계 시 적절한 철근비제시가 필요할 것으로 판단된다.

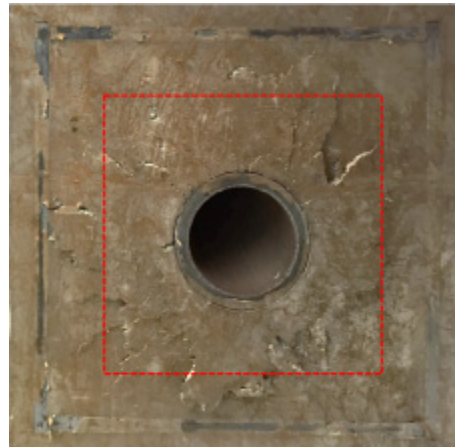
4.5 파괴 거동 분석

Fig. 10는 파괴 양상을 확인하기 위하여 실험 종료 후 기초부 하단의 균열 및 파괴 형태를 나타낸 사진이다. 사진에서 빨간색 점선은 예상되는 위험단면을 나타낸다. SC-AL-S100 실험체의 경우, 균열은 예상되는 위험단면을 넘어서 철근배근이 취약한 대각선방향으로 큰 균열이 발생하였다. 반면에, 철근배근 간격이 140mm인 SC-AL-S140 실험체는, 기초부의 펀칭 현상이 가장 뚜렷하게 나타났으며, 펀칭 파괴의 형상은 예상되는 위험단면보다 큰 원형분포로 발생하였다. 하중이 편재하된 SC-EL-100 실험체의 경우 하중의 편재하 방향으로 더 큰 균열이 발생하면서 반원모양의 펀칭파괴가 위험단면

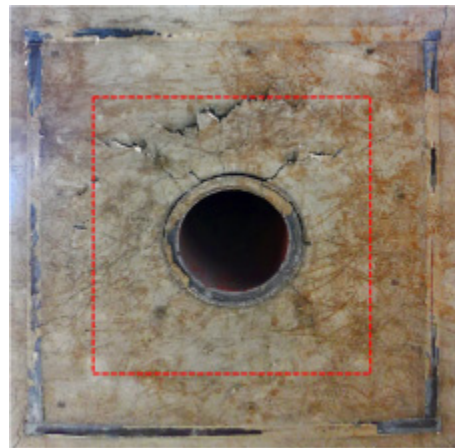
내에서만 발생하였다.



(a) Failure mode of SC-AL-S100



(b) Failure mode of SC-AL-S140



(c) Failure mode of SC-EL-S100

Fig. 10. Crack pattern and failure mode of specimens.

전체적인 균열양상을 분석해보면, 모든 경우에 사선 방향으로 균열패턴을 보이는데 이는 종철근이 직각방향으로 배근되어 사선방향으로 취약하기 때문이라고 판단된다. 이러한 사선 방향의 균열은 전체 파괴거동에서 매우 중요할 것으로 판단되므로 이에 대한 적절한 보강 방안이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 신형식 하이브리드 해상풍력발전 지지구조물의 콘크리트 베이스-슬리브 연결부 형식을 제안하고, 철근비와 하중조건에 따른 연결부의 편칭전단강도와 초기 강성, 변형률, 처짐 등을 실험적으로 분석하였다. 이에 대한 결과를 요약하면 아래와 같다.

1. 콘크리트 베이스에 배근되는 철근은 접합부의 전체 강성과 강도에 영향을 주는 것으로 나타났다. 배근간격이 100mm인 SC-AL-S100 실험체가 배근간격이 140mm인 SC-AL-S140 실험체보다 최대 강도와 초기 강성이 크게 나타났다. 본 연결부의 설계에서 강성은 전체 구조물에 큰 영향을 미칠 수 있으므로, 적절한 강성을 발휘할 수 있는 배근상세가 필요할 것으로 판단된다.
2. 축력과 축력에 비례하는 모멘트가 동시에 재하되는 실험체(SC-EL-S100)의 경우에 편재하방향으로 더 큰 파괴가 발생하였으며, 축력 및 모멘트의 상호작용으로 인하여 강도가 저하된 것으로 판단된다. 반면에, 초기 탄성영역의 강성은 하중 조건에 따른 영향은 크지 않다 판단된다. 따라서, 본 접합부의 강성에 영향을 미치는 변수는 주철근비가 지배적인 것으로 확인되었다.
3. 실험결과로 밝혀진 위험단면은 예상된 위험단면에 인접하여 발생하였으나, 전형적인 파괴형태를 보이는 SC-AL-S140 실험체의 경우 더 큰 편칭 파괴 범위를 보이는 것으로 나타났다. 따라서, 적절한 유효 깊이(D_e)의 산정 방법 제시가 필요할 것으로 판단된다.
4. 본 접합부는 스티드에 의해 연결되는 상세로 인하여 스티드와 인접한 철근에서 가장 큰 변형률이 발생하였다. 따라서, 위험단면 내에서의 철근 상세가 연결부의 강도에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

References

- [1] H. G. Kim, B. J. Kim, K. D. Kim, "New Development of Hybrid Concrete Support Structure with Driven Piles for Offshore Wind Turbines.", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 25, No. 3, pp. 307-320, June, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7781/kjoss.2013.25.3.307>
- [2] M. S. Park, Y. J. Jeong, Y. J. You, "Numerical analysis of hybrid substructure with multi-cylinder for wind turbines.", The 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics, Jeju, pp. 2355-2369.
- [3] M. S. Park, A. N. Song, Y. J. Jeong, Y. J. You, "Dynamic Response Analysis of a Hybrid Substructure for Offshore Wind Turbines due to Wave forces.", 2014 Conference of Korean Society of Civil Engineers, 2014.
- [4] DNV-OS-J101, Design of Offshore Wind Turbine Structures, Det Norske Veritas As, 2014.
- [5] API Recommended Practice 2A-WSD, Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working stress Design, American Petroleum Institute, 2007.
- [6] ISO 19902, Petroleum and natural gas industries-fixed steel offshore structures, ISO, 2007.
- [7] JSCE, "Wind power plant support structures design guidelines and commentary", 2010.
- [8] KHBDC, "Korean Highway Bridge Design Code(Limit State Design)", Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2014.

이 정 화(Jeong-Hwa Lee)

[준회원]



- 2011년 8월 : 서울과학기술대학교 건설공학부 토목공학 (공학사)
- 2013년 8월 : 고려대학교 건축사회 환경공학과 (공학석사)
- 2013년 9월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학부 (박사과정)

<관심분야>

비선형해석, 합성재료, 합성구조, 해양구조

변 남 주(Nam-Joo Byun)

[준회원]



- 2007년 3월 : 고려대학교 건축사회 환경시스템공학과 (학사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학부 (석박통합과정)

<관심분야>

비선형해석, 강교, 좌굴

강 영 종(Young-Jong Kang)

[정회원]



- 1979년 3월 : 고려대학교 토목환경 공학과(공학사)
- 1983년 3월 : 고려대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 1987년 9월 : Auburn univ(공학박사)
- 1983년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학부 정교수

<관심분야>

비선형해석, 구조물건전도모니터링, 구조공학

김 성 환(Seong-Hwan Kim)

[정회원]



- 1998년 2월 : 강원대학교 일반대학원 토목공학과 (토목공학석사)
- 2005년 8월 : 강원대학교 일반대학원 토목공학과 (구조공학박사)
- 2006년 2월 ~ 현재 : ㈜동명기술공단 부설연구소 수석연구원

<관심분야>

콘크리트 공학, 구조공학, 도로공학

박 재 현(Jae-Hyun Park)

[정회원]



- 2003년 2월 : 서울대학교 건설환경 공학부 (공학석사)
- 2011년 2월 : 서울대학교 건설환경 공학부 (공학박사)
- 2002년 12월 ~ 2006년 4월 : 한국 건설기술연구원 연구원
- 2006년 4월 ~ 2013년 4월 : 한국 건설기술연구원 수석연구원
- 2013년 5월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구위원

<관심분야>

기초공학, 신뢰성평가, 상하부구조 연결부, 기초세굴