



# 해상풍력용 모노파일 그라우트 연결부의 설계민감도 분석 - 전단키를 중심으로

이대용<sup>1)\*</sup> · 김찬영<sup>2)</sup>

## Design Sensitivity of Monopile Grout Joint for Offshore Wind – Focusing on Shear Key

Dae-Yong Lee<sup>1)\*</sup> · Chan-Young Kim<sup>2)</sup>

Received 1 August 2025 Accepted 10 August 2025 Published online 11 September 2025

**ABSTRACT** For offshore wind monopile substructures, the grout joint is an important structural element for securing the transition piece at the pile top. One of the most important design factors for grout joints is shear key. The shear key is a key element attached to the steel member (pile or transition piece) surface to transmit the load between the steel and grout in the form of shear resistance. Its shape, installation number, installation intervals, etc., should be designed meticulously to safely support the upper offshore wind turbine over its service life. Despite its structural importance in joints, studies on shear-key design optimization have not been sufficiently conducted thus far. Therefore, a parametric study of design elements constituting the shear key is conducted in this study for a monopile grout connection for a 5 MW offshore wind.

**Key words** Offshore wind(해상 풍력), Monopile(모노파일), Transition piece(트랜지션피스), Grout joint(그라우트 연결부), Shear key(전단키), Sensitivity analysis(민감도 해석)

### Nomenclature

$L$  : total length of grouted connection  
 $L_g$  : effective length of grouted connection  
 $R_p$  : outer radius of pile  
 $t_p$  : wall thickness of pile  
 $R_{tp}$  : outer radius of transition piece  
 $t_{tp}$  : wall thickness of transition piece  
 $P_d$  : design axial load for grouted connection

$M_d$  : design moment for grouted connection  
 $f_{bk}$  : characteristic interface shear capacity  
 $R_g$  : outer radius of grout  
 $t_g$  : thickness of grout  
 $w$  : width of shear key  
 $h$  : height of shear key  
 $s$  : vertical distance between two shear key centers  
 $s_{eff}$  : effective vertical distance between two shear keys  
(=  $s - w$ )  
 $\Psi$  : design coefficient  
 $E$  : Young's modulus for steel  
 $P_{nom,d}$  : maximum nominal radial contact pressure  
 $k_{eff}$  : effective spring stiffness for shear keys  
 $k$  : radial stiffness parameter

1) Professor, Department of Wind Energy, The Graduate School, Kunsan National University

2) Researcher, Institute of Offshore Wind Energy, Kunsan National University

\*Corresponding author: daeyong.lee@kunsan.ac.kr  
Tel: +82-63-469-8944

### 1. 서론

모노파일 하부구조물은 수심 25 m 이하의 해양조건에서 우수한 경제성을 보이는 경우가 많아 전세계적으로 가장 많이 선호되고 있는 해상풍력용 지지구조 형식이다. 상부 타워와의 강결을 위해 모노파일 상단부에는 트랜지션피스가 추가로 설치되는데, 이 구조물은 주로 그라우트 소재를 이용하여 해상에서 모노파일과 일체가 되도록 연결작업이 이루어진다. 그라우트 연결부는 상부 타워로부터 전달되어 내려오는 여러 하중 성분들을 하부 모노파일에 안전하게 전달하는 역할을 담당하므로, 설계 과정에서 매우 중요하게 고려되어야 하는 핵심 구조 요소이다.

그라우트 연결부에 대한 여러 연구가 국내외에서 수행된 것으로 조사되었다. Lee *et al.*<sup>[1]</sup>은 실험을 통하여 고강도 모르타르가 사용된 그라우트 연결부의 피로 성능을 평가하고, 그 결과를 관련 설계기준과 비교하는 연구를 수행하였다. 또한 Seo *et al.*<sup>[2]</sup>은 고성능 시멘트 그라우트를 개발하여 그라우트 연결부에 적용하기 위한 연구를 수행하였는데, 실험연구를 통해 최대 정적 강도를 보이는 전단키의 형상비, 섬유혼입율, 그리고 섬유형상비를 도출함은 물론 해당 조합에 대한 피로 성능까지도 함께 검토하였다. 연구팀은 이 연구 결과를 바탕으로 전단키 유·무와 형상에 따라 그라우트의 부착강도에 큰 차이가 나타날 수 있음을 확인하였다.

한편, Tziavos<sup>[3,4]</sup>는 실험 결과와의 비교를 통해 신뢰성이 검증된 그라우트 연결부 유한요소해석 모델을 활용하여 설계 변수(전단키 수, 전단키 간격, 그라우트 연결부 길이 등) 연구를 수행하였으며, 이를 바탕으로 연결부 설계 개선에 관한 의견을 정리하여 발표하였다. 그리고 Lin *et al.*<sup>[5]</sup>은 기존 그라우트 연결부 형식의 약점에 대한 기술 검토 연구 결과를 바탕으로 해상풍력 모노파일용으로 적합한 개선된 그라우트 연결부 형식을 새로 제안하였다.

그라우트 연결부에서 전단키는 그라우트와 강구조물 표면 사이의 슬라이딩 저항을 증가시키기 위해 모노파일 강재 외부 표면과 트랜지션피스 강재 내부 표면에 일정한 간격으로 배치되는데, 전단키 성능검증을 위한 실험 연구는 몇몇 연구자들<sup>[6~8]</sup>에 의해서도 수행된 바가 있다. 이들 실험 연구들은 주로 전단키와 관련한 실험 변수들이 그라우트 연결부 거동에 어떤 영향을 미치는지에 주로 역점을 두

고 진행된 것으로 파악되었다.

상기 선행연구들에 대한 조사로부터 그라우트 연결부에 설치되는 전단키는 구조적인 측면에서 매우 중요한 요소로 인식되고 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 한가지 아쉬운 점은 기 수행된 연구들의 경우 전단키와 관련된 변수들의 영향을 알아보기 위한 실험 평가 연구가 대부분으로, 현재 사용되고 있는 그라우트 연결부 설계기준 하에서 최적의 전단키를 설계하기 위한 변수연구는 아직까지 수행된 바가 없다는 사실이다. 이에 본 연구에서는 해상풍력 지지구조물 전용 설계기준인 DNVGL-ST-0126<sup>[9]</sup>을 기반으로 5 MW급 해상풍력용 그라우트 연결부에 설치되는 전단키의 주요 설계 인자들(즉, 전단키 폭, 전단키 높이, 전단키 간격)의 변화에 따른 설계작용력과 설계강도 값의 변화를 관찰하고, 이를 바탕으로 전단키 설계시 우선적으로 고려해야 할 설계 인자들에 대해 검토해 보고자 한다.

### 2. 그라우트 연결부 제원 및 설계하중

본 연구를 위한 5 MW급 그라우트 연결부 상세 및 기호는 Fig. 1과 같다. 각 기호의 의미는 앞의 Nomenclature를 참고하도록 하고, 해당 치수는 Table 1의 정리된 내용과 같다.

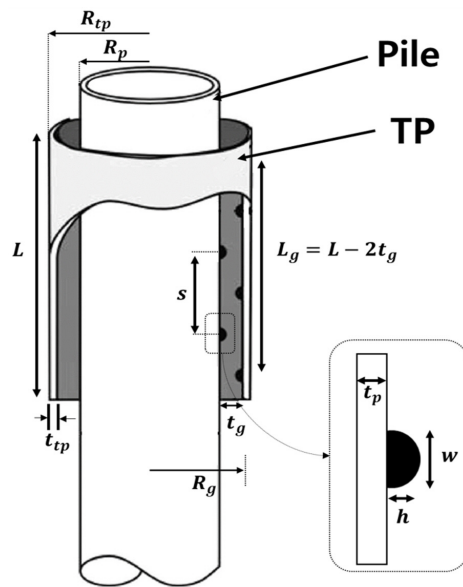


Fig. 1. Grout joint detail

Table 1. Design parameters and values

Description	Value	Description	Value
$L$ [mm]	12,000	$R_{tp}$ [mm]	3,000
$L_g$ [mm]	11,720	$t_{tp}$ [mm]	60
$R_p$ [mm]	2,800	$R_g$ [mm]	2,940
$t_p$ [mm]	70	$t_g$ [mm]	140
$s_{eff}$ [mm]	290	$E_s$ [MPa]	210,000
$\mu$	0.7	$E_g$ [MPa]	15,000
$\Psi$	1.0	$f_{ck}$ [MPa]	100
$v$	0.3		

Table 1에서  $\mu$ 는 강재와 그라우트 사이의 마찰계수,  $v$ 는 강재의 포아송비,  $E_s$ 는 강재의 탄성계수,  $E_g$ 는 그라우트의 탄성계수, 그리고  $f_{ck}$ 는 그라우트의 압축강도를 의미한다.

또한, 연구 대상 모노파일 그라우트 연결부 중심 위치에 작용하는 설계하중은 아래 Table 2의 값을 사용하는 것으로 하였다.

Table 2. Design loads

Description	Value
$M_d$ [kNm]	177,390
$P_d$ [kN]	12,757

최적의 전단키 설계를 위한 본 설계 변수 연구에서 Table 1의 설계 제한들은 변하지 않는 것으로 가정하였으며, 전단키 폭( $w$ ), 전단키 높이( $h$ ), 전단키 간격( $s$ ), 그리고 전단키 개수( $n$ , 전단키 간격에 따라 결정) 등 총 4개의 설계인자 값들만 변화시켜 가면서 그라우트 연결부의 설계 안전율(= Demand / Capacity)에 어떤 변화가 발생하는지 관찰하였다.

### 3. 설계식 및 설계범위

모노파일 그라우트 연결부의 설계를 위해서는 전단키 1개 분에 해당하는 설계작용력( $F_{V1,Shk,d}$ )과 이에 대응하는 설계강도( $F_{V1,Shk,cap}$ )를 계산해야 하는데, 본 연구에서는 DNVGL-ST-0126<sup>[9]</sup>에서 제공하고 있는 설계식들을 사용하여 이 값들을 계산하였다.

또한, DNVGL-ST-0126<sup>[9]</sup>에는 전단키 폭( $w$ ), 전단키 높이( $h$ ), 그리고 전단키 간격( $s$ ) 관련 제한 규정들이 제시되어 있는데, 이들을 정리해 보면 아래 식 (1)~(4)와 같다. 이 네 가지 기준들에 더해 전단키의 설치는 유효 그라우트 길이( $L_g$ )의 50% 구간에만 설치하도록 제한되었다.

$$h \geq 5mm \tag{1}$$

$$1.5 \leq w/h \leq 3.0 \tag{2}$$

$$h/s \leq 0.1 \tag{3}$$

$$s \geq \min \left\{ \begin{array}{l} 0.8 \sqrt{R_p t_p} \\ 0.8 \sqrt{R_{tp} t_{tp}} \end{array} \right\} \tag{4}$$

식 (1)~(4)의 제한조건과 실제 그라우트 연결부 설계 사례들을 근거로 전단키의 설계 가능 범위는 아래 식 (5)~(7)의 범위가 고려되었다.

$$20mm \leq h \leq 45mm \tag{5}$$

$$30mm \leq w \leq 135mm \tag{6}$$

$$340mm \leq s \leq 5830mm \tag{7}$$

본 연구에서는 전단키 높이( $h$ )를 20 mm, 25 mm, 35 mm 의 세 가지 경우로 구분하고, 각각에 대해 전단키 폭( $w$ )과 전단키 간격( $s$ )의 변화에 따른 설계작용력( $F_{V1,Shk,d}$ )과 설계강도( $F_{V1,Shk,cap}$ )의 변화를 검토하였다. 또한 이를 근거로 그라우트 연결부 설계 안전율의 변화를 함께 관찰하였다.

## 4. 설계 변수 연구 결과

### 4.1 전단키 높이( $h$ ) 20mm인 경우(CASE 1)

전단키 높이( $h$ )가 20 mm인 경우에 있어, 전단키 폭( $w$ )과 전단키 간격( $s$ )의 변화에 따른 설계작용력 및 설계강도의 변화를 Fig. 2 및 Fig. 3에 각각 나타내었다.

Fig. 2에서 전단키 간격( $s$ )이 작아짐에 따라 설계작용력이 급격하게 감소함을 알 수 있는데, 이는 전단키 간격( $s$ )이

작아지면 전단기 수( $n$ )가 증가하게 되고 이로 인해 설계작용력이 전단기 수( $n$ )에 반비례하여 작아지기 때문인 것으로 확인되었다. 또한, 전단기 폭( $w$ )의 변화에 따라 설계작용력에는 큰 변화가 없음을 관찰할 수 있는데, 이는 설계작용력 계산식이 전단기 폭( $w$ )의 변화에는 민감하지 않기 때문이다.

한편, Fig. 3에서 전단기 간격( $s$ )이 작아짐에 따라 설계강도 값도 같이 감소하는데, 그 감소 기울기는 설계작용력 대비 크지 않음을 알 수 있다. 이는 설계강도가 전단기 간격( $s$ )이 작아지더라도 크게 변화하지 않는다는 사실에 기인한다. Fig. 3은 또한 설계작용력과 마찬가지로 설계강도도 전단기 폭( $w$ )의 변화에는 민감하게 반응하지 않음을 잘 보여주고 있다.

위의 관찰로부터 전단기 간격( $s$ )이 줄어드는 경우 설계작용력과 설계강도 값 모두 감소하게 되나, 설계강도의 감소 기울기가 설계작용력 대비 작음에 따라 설계 안전을 측

면에서는 전단기 간격( $s$ )이 작아지도록 설계하는 것이 더 유리하다는 사실을 확인할 수 있었다.

### 4.2 전단기 높이( $h$ ) 25 mm인 경우(CASE 2)

전단기 높이( $h$ )가 25 mm인 경우에 있어, 전단기 폭( $w$ )과 전단기 간격( $s$ )의 변화에 따른 설계작용력 및 설계강도의 변화를 Fig. 4 및 Fig. 5에 각각 나타내었다. CASE 2는 앞의 CASE 1 대비 전단기 높이( $h$ ) 변수가 5 mm 더 증가된 것이 특징이나, 식 (2)의 제한조건에 따라 전단기 폭( $w$ )의 검토 범위도 같이 증가하게 됨을 관찰할 수 있었다.

Fig. 2와 Fig. 4의 비교로부터 전단기 높이( $h$ ) 값이 변함에도 불구하고 설계작용력 최댓값에는 변화가 없음을 알 수 있는데, 이는 전단기 높이( $h$ )가 설계작용력 계산식에서 변수로 사용되지 않기 때문이다. 반면, Fig. 3과 Fig. 5의 비교로부터 설계강도 최댓값의 경우는 CASE 2가 CASE 1

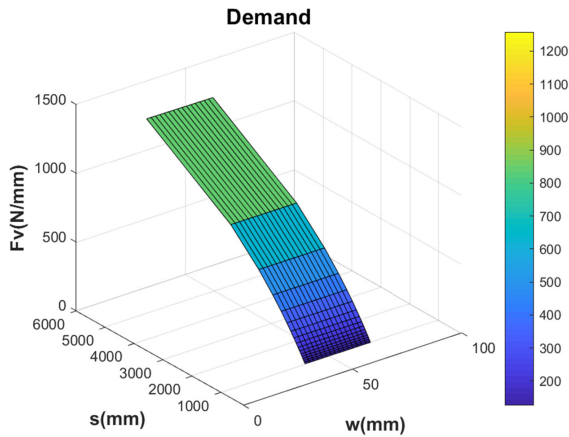


Fig. 2. Effects of  $s$  and  $w$  changes on design demand( $F_{V1Shk,d}$ )

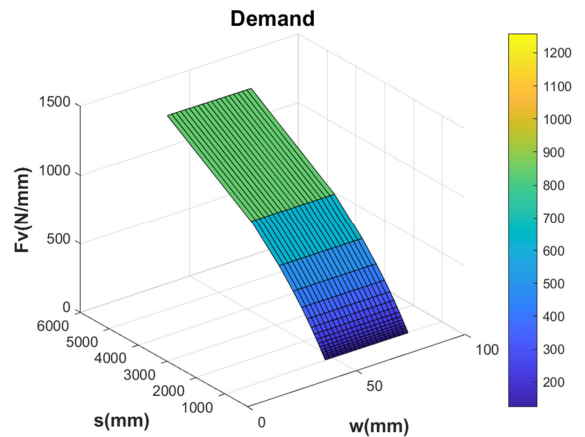


Fig. 4. Effects of  $s$  and  $w$  changes on design demand( $F_{V1Shk,d}$ )

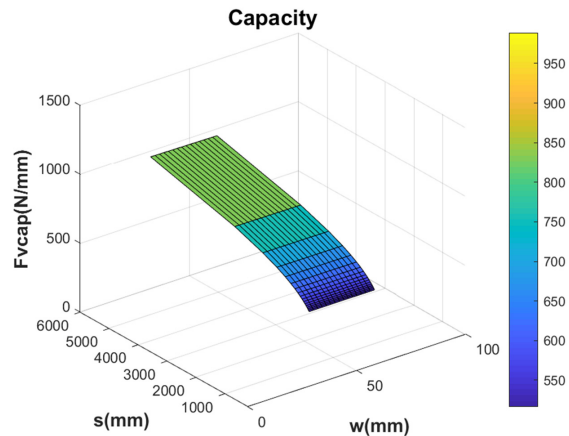


Fig. 3. Effects of  $s$  and  $w$  changes on design capacity( $F_{V1Shkcap}$ )

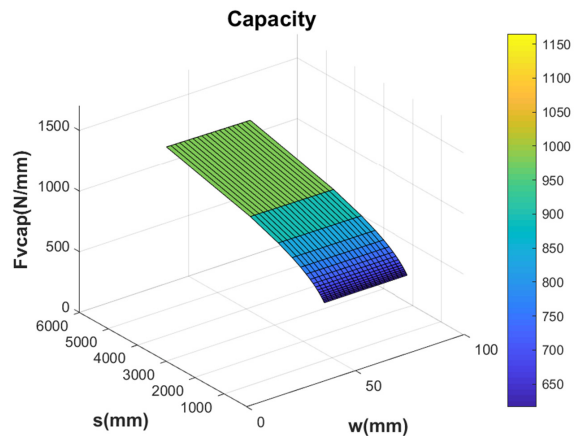


Fig. 5. Effects of  $s$  and  $w$  changes on design capacity( $F_{V1Shkcap}$ )

대비 약 18% 증가했음을 알 수 있다. 이러한 경향은 전단키 높이( $h$ ) 증가가 강재와 그라우트 경계면에 작용하는 전단강도 특성값에 직접적인 영향을 주고, 이로 인해 설계강도의 크기가 증가하기 때문인 것으로 파악되었다.

CASE 1의 경우와 마찬가지로 CASE 2의 경우에서도 전단키 간격( $s$ )의 감소에 따라 설계작용력과 설계강도의 값이 같이 감소하는데, 전단키 간격( $s$ )이 3 m 이내 범위에서는 설계강도 값이 설계작용력 대비 크게 계산됨에 따라 설계 안전율이 1.0 이상 나오는 것을 알 수 있었다. 하지만, 전단키 간격( $s$ )이 3 m를 초과하는 경우에 있어서는 설계작용력의 값이 크게 증가하게 됨에 따라 설계 안전율이 불충분한 구간으로 진입하게 된다는 사실을 관찰할 수 있었다.

### 4.3 전단키 높이( $h$ ) 35mm인 경우(CASE 3)

전단키 높이( $h$ )가 35 mm인 경우에 있어, 전단키 폭( $w$ )

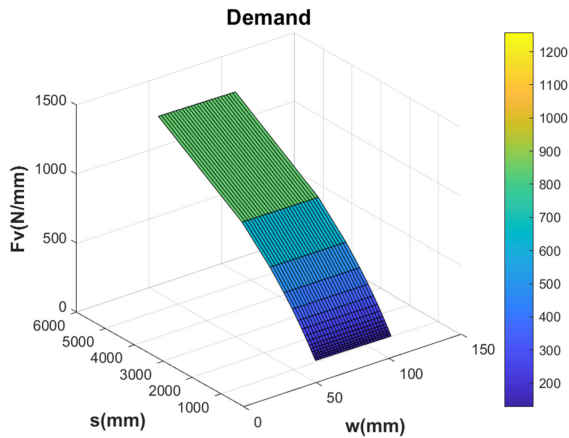


Fig. 6. Effects of  $s$  and  $w$  changes on design demand( $F_{V1.Shk,d}$ )

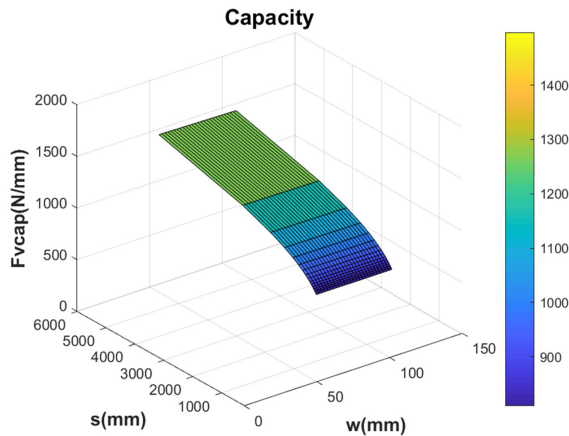


Fig. 7. Effects of  $s$  and  $w$  changes on design capacity( $F_{V1.Shk,cap}$ )

과 전단키 간격( $s$ )의 변화에 따른 설계작용력 및 설계강도의 변화를 Fig. 6 및 Fig. 7에 각각 나타내었다. CASE 3는 앞의 CASE 1 대비 전단키 높이( $h$ ) 변수가 15 mm 더 증가되고, CASE 2 대비해서는 10 mm 더 증가된 것이 특징이다.

앞의 CASE 2에서 이미 확인된 바와 같이, CASE 3의 경우에서도 전단키 높이( $h$ ) 변화에 따른 설계작용력 최대값 변화는 없는 것으로 계산되었다. 하지만 설계강도 최대값은 CASE 3의 경우 CASE 1 대비 약 66% 증가되었음이 관찰되었는데, 이로써 검토된 전단키 폭( $w$ )과 전단키 간격( $s$ ) 전 범위에서 설계강도 값이 설계작용력 값을 초과하는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 검토된 전단키 폭( $w$ )과 전단키 간격( $s$ ) 전 범위에서 설계 안전율이 1.0 이상으로 계산됨을 의미한다.

## 5. 설계 민감도 분석

앞의 변수연구에서 사용된 전단키 높이( $h$ ), 전단키 폭( $w$ ), 그리고 전단키 간격( $s$ ) 범위보다 좀 더 확대된 설계 범위를 대상으로 설계작용력과 설계강도의 값이 상대적으로 어떻게 변화되는지를 Fig. 8~10에서 살펴보았다. 여기서 설계 변수들 사이의 상호 간섭을 없애기 위해 검토 대상 이외의 설계 변수값들은 동일하게 유지되는 것으로 가정하였다.

먼저, Fig. 8에서 전단키 높이( $h$ ) 증가에 따라 설계작용력 값은 변화 없이 유지가 되나 설계강도 값은 전단키 높이( $h$ ) 5 mm 증가시 약 12%씩 선형적으로 증가한다는 사실을

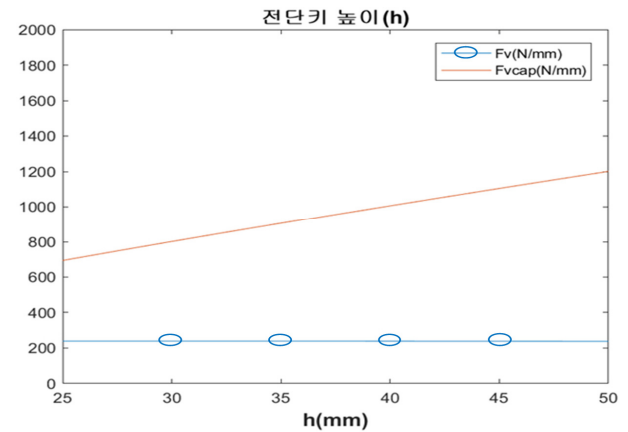


Fig. 8. Change of design safety with a change of  $h$

알 수 있다. 이는 전단키 높이( $h$ )가 증가함에 따라 설계 안전율(=설계강도/설계작용력)도 일정 비율로 증가함을 의미하며, 동시에 전단키 높이( $h$ )가 그라우트 연결부 설계에서 중요한 설계 인자임을 확인해 주는 결과이다.

다음으로 Fig. 9는 전단키 폭( $w$ )의 변화에 따른 설계작용력과 설계강도 값의 변화를 나타낸다. 여기서 설계작용력은 전단키 폭( $w$ )의 변화에 거의 반응하지 않음을 알 수 있다. 설계강도 또한 전단키 폭( $w$ )의 값이 75 mm 이내 구간에서는 전단키 폭( $w$ )의 변화에 따라 값의 차이가 나타나지 않으나, 75 mm 이상에서는 선형적으로 증가함이 관찰되었다. 이 선형적 증가는 앞의 식 (1)~(4)의 전단키 기하형상 관련 제한조건에 의한 것으로, 전단키 폭( $w$ ) 증가시 일정 구간에서 전단키 높이( $h$ ) 값도 함께 증가하기 때문인 것으로 파악되었다. 따라서, 전단키 폭( $w$ )은 그 설계검토 범위에 따라 설계 안전율(=설계강도/설계작용력)에 미치

는 영향이 달라질 수 있음을 알 수 있다.

마지막으로 Fig. 10에서, 전단키 간격( $s$ )의 증가에 따라 설계작용력과 설계강도 값도 함께 증가한다는 사실을 알 수 있다. 전단키는 유효 그라우트 길이의 50% 구간에만 설치하도록 제한되기 때문에, 전단키 간격( $s$ )이 변할 때마다 전단키 개수도 같이 변하게 된다. 본 변수연구 범위에서는 전단키 개수가 감소함에 따라(즉,  $s$ 가 증가함에 따라) 설계작용력은 약 15%의 기울기로 증가하는 것으로 관찰되었으며, 설계강도는 전단키 개수의 감소에 따라(즉,  $s$ 가 증가함에 따라) 약 1.5%의 기울기로 증가하는 것인 관찰되었다. 결과적으로, 설계작용력과 설계강도 증가 기울기의 차이로 인해 전단키 간격( $s$ )이 증가할수록 설계 안전율(=설계강도/설계작용력)은 조금씩 줄어들게 됨을 알 수 있다.

## 6. 결론

5 MW급 해상풍력용 모노파일 그라우트 연결부를 대상으로 전단키 설계 시 필요한 설계 인자들의 민감도에 관한 변수연구를 수행하였으며, 이를 통해 도출된 결론들을 요약하면 다음의 내용과 같다.

- (1) 전단키 높이( $h$ )의 경우, 그 값의 증가에 따라 설계작용력에는 변화가 발생하지 않으나 설계강도가 일정 기울기로 증가하게 됨에 따라 설계 안전율(=설계강도/설계작용력)에 미치는 영향이 비교적 크다는 사실을 알 수 있었다.
- (2) 전단키 폭( $w$ )은 그 설계검토 범위에 따라 설계 안전율(=설계강도/설계작용력)에 미치는 영향이 달라질 수 있는데, 이는 식 (1)~(4)의 전단키 기하형상 관련 제한조건에 의해 전단키 폭( $w$ ) 증가시 일정 구간에서 전단키 높이( $h$ ) 값도 함께 증가하는 현상이 나타나기 때문인 것으로 파악되었다.
- (3) 전단키 간격( $s$ )의 경우, 그 값이 감소함에 따라 설계작용력과 설계강도 값도 함께 감소하게 되나, 설계작용력의 감소 기울기가 설계강도의 경우 대비 상대적으로 작음에 따라 설계안전율 측면에서는 전단키 간격( $s$ )이 작아지도록 설계하는 것이 더 유리하다는 사실을 확인할 수 있었다.

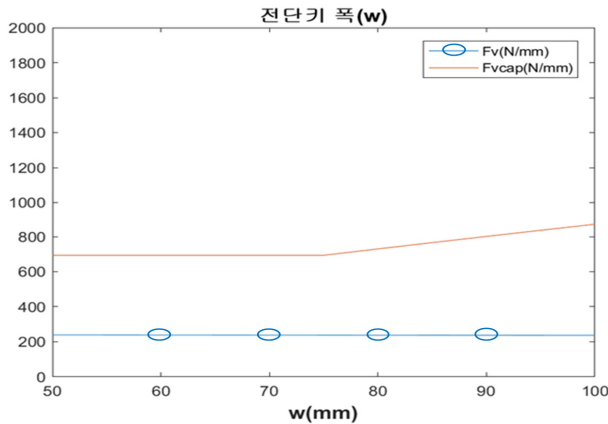


Fig. 9. Change of design safety with a change of  $w$

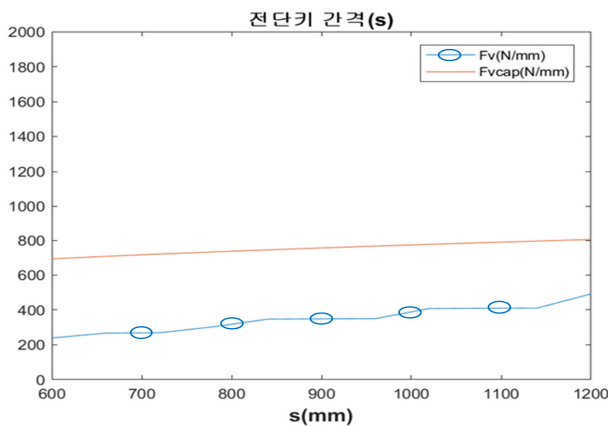


Fig. 10. Change of design safety with a change of  $s$

결론적으로, 해상풍력용 그라우트 연결부를 설계함에 있어 안전율을 제고하기 위해서는 전단키 높이( $h$ )의 증가와 전단키 간격( $s$ )의 감소를 우선적으로 검토하는 것이 바람직하다는 사실을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE) 재원을 사용하는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(RS-2021-KP002506)을 받아 수행되었습니다.

## References

- [1] Lee, J.H., Kang, S.Y., UY, L., Eom, Y.H., Kim, S.H., and Kang, Y.J., 2016, "An Experimental Study on Fatigue Strength of Pile to Sleeve Grouted Connection using High Strength Mortar", *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, **16**(6), 297-308.
- [2] Seo, K., Kim, S.H., and Oh, H.S., 2016, "A Static and Fatigue Bond Characteristic of TP Connection for Wind Turbine Tower using High-Performance Cement Grout", *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, **16**(6), 281-288.
- [3] Tziavos, N., 2019, "Experimental and numerical investigations on grouted connections for monopile offshore wind turbines", Ph. D. thesis, University of Birmingham, UK.
- [4] Tziavos, N.I., Hemida, H., Metje, N., and Baniotopoulos, C., 2019, "Non linear finite element analysis of grouted connections for offshore monopile wind turbines", *Ocean Eng.*, **171**, 633-645.
- [5] Lin, Y.H., Tsai, C.H., Lian, C.J., Lin, H.J., and Huang, H.H., 2014, "Design and analysis for improve grout joint of offshore monopile foundation", *Proc. of the OCEAN* **2014**, 1-6.
- [6] Lotsberg, I., 2013, "Structural mechanics for design of grouted connections in monopile wind turbine structures", *Mar. Struct.*, **32**, 113-135.
- [7] Anders, S., and Lohaus, L., 2008, "Optimized high-performance concrete in grouted connections", *Taylor Made Concrete Structures-Walraven & Stoelhorst* (eds), 369-374.
- [8] Seo, G., Oh, H.S., Go, S.J., and Kim, S.H., 2015, "A study of the bond performance of wind turbine tower to joint connection according to the height and spacing ratio of shear key", *Proc. of the Korea Concrete Institute 2015 Spring Conference*, 335-336.
- [9] DNVGL, 2018, "Support structures for wind turbines", DNVGL-ST-0126.