

해양 스테빙 가이드 설계 고찰 Study on Offshore Stabbing Guide design

조철희* 홍성근**
Jo, Chul-Hee Hong, Sung-Guen

ABSTRACT

The stabbing guide is often used to guide an add-on pile into an existing pile in offshore jacket installation. It provides a pile alignment for a welding tie-in in static condition as well. Even stabbing guide is an essential component in pile installation, it is not considered as a permanent offshore structure. In this regard, there is not a define design guideline proposed. In API RP 2A WSD, it briefly define the design considerations of stabbing guide. The failure of stabbing guide can cause a great economical loss and a serious impact to the project schedule. Stabbing guide design should consider many factors considering actual work conditions for both static and dynamic situations. In the paper, a design method is proposed by applying the plate theory and it is confirmed numerically with FEM modeling. The geometry of stabbing guide is assumed as a cylinder shape with various wall thickness and effective length. The various thickness, effective length and pile size are compared for stable stabbing guide design.

1. 서 론

대표적인 해양 구조물인 자켓(jacket)은 해양 플랫폼(platform)의 하부구조물로 널리 사용되고 있으며 외부 환경하중에 대하여 광범위한 구조 해석이 요구된다. 대부분의 해양 구조물은 기능과 조건에 의해 구체적으로 통용되는 설계 코드에 따라 설계되어 진다. 자켓을 해양에 고정시키기 위해 파일을 해저에 관입하고 파일 관입 길이는 구조물에 작용되는 외력, 구조물 사양, 해저 토질에 따라 결정된다.¹⁾ 그러나, 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)와 같은 가지지용 구조의 중요성은 다른 영구 해양 구조물에 비해 상대적으로 작게 인정되어 그에 대한 연구도 미비하며 API(1993), DnV 코드에서도 상세한 지침을 제공하지 못하고 있다. 육상 공사와 달리 각 공정이 단계별로 이루어지는 해상 공사의 특성상 실제 해양 공사에서 복합 하중 상태에 의한 해양 스테빙 가이드 파손이 발생하면 그에 따른 후속 공정이 이루어 질 수가 없어 공기 지연 및 큰 경제적 손실이 유발되어 진다. 스테빙 가이드의 파손의 원인을 정적, 동적, 공정 하중 상태의 3가지로 구분하고 파손에 지배적인 영향을 미치는 요소들을 스테빙 가이드의 두께(wall thickness), 길이(effective length), 파일의 기울어진 각도, 바지 및 크레인의 운동등으로 정의내려 설계 시 반영되어야 한다고 피력하였다.³⁾ 본 연구의 목적은 해양 스테빙 가이드의 구조 해석을 통해 적용 가능한 이론을 소개함으로써 안전한 설계를 할 수 있는 방법을 제시함에 있다. 본 연구는 실제 해양 공사에서 파손이 발생된 해양 스테빙 가이드의 조건과 수치에 근거하여 평판 이론을 응용한 이론식을 유도하였다. 또한, 다양한 관입 각도에 따라 해양 스테빙 가이드의 두께 및 길이를 변화시키면서 유한 요소 프로그램(FEM program)을 사용하여 구조 해석을 수행하였다.

* 인하대학교 선박해양공학과 조교수

** 인하대학교 선박해양공학과 석사과정

2. 평판 이론을 응용한 이론 전개

해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 형상은 3차원적으로 복잡하기 때문에 수계산으로 정확한 구조 해석을 수행하기가 곤란하다. 본 연구에서는 수계산을 가능하게 하기 위하여 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 형상을 간단한 원통형으로 가정하여 구조 해석을 수행하였으며 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 일부분을 전개한 평판으로 가정하여 평판 이론을 적용하였다. 평판 이론의 식은 Roack, 'Formula For Strain And Stress'에서 참고하였으며 식은 (1)과 같다.²⁾

$$\sigma = \frac{\beta q b^2}{t_s^2} \quad (1)$$

q	: Distribution Load in Stabbing Guide	(MN/m ²)
σ	: Stress in Stabbing Guide	(MN/m ²)
β	: Stress Coefficient	
b	: Longer Length of Stabbing Guide	(m)
t_s	: Wall Thickness of Stabbing Guide	(m)

해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 강도를 증가시키는 방법으로 길이와 두께를 변화시켜가며 수계산을 수행하였다. 이 식을 응용하기 위해서 사용한 가정과 조건은 다음과 같다.

2.1. 정적 하중

해양 스테빙 가이드(stabbing guide)에 작용하는 하중은 파일의 단계적 관입 설치 시 윗 파일의 기울어진 각도에 의한 자중 모멘트(moment)에 의해 발생한다. 이 자중 모멘트는 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 끝단에서 최대값을 가지며 기울어진 각도에 의해서 모멘트 암(moment arm)이 결정된다. 그림 1은 파일의 기울어진 각도와 해양 스테빙 가이드의 정적 모멘트의 관계를 보여주며 그 관계식은 식(2)와 같다.

$$M = W \times \left(\frac{L}{2} + b \right) \times \sin \theta \quad (2)$$

M	: Moment due to Weight	(MN-m)
θ	: Rotated Angle	(°)
W	: Weight of Upper Pile	(ton)
L	: Length of Upper Pile	(m)
b	: Longer Length of Stabbing Guide	(m)

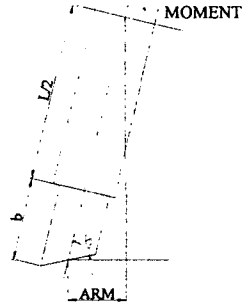


그림 1 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 정적 모멘트

2.2. 적용 하중

(2)식의 기본적인 하중은 평판 이론식(1)을 응용하고 다음의 가정과 조건을 적용시킴으로서 실제 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)에 작용하는 하중을 계산하는 식은 다음 식(3)과 같다.

$$q = \frac{F}{A} \quad (3)$$

- q : Distribution Load in Stabbing Guide (MN/m²)
 F : Moment per Unit Length (MN)
 A : Area of Stabbing Guide (m²)

위의 자중 모멘트는 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 길이 b 에 작용하는 단위 모멘트 F 로 치환하고 단위 모멘트 F 는 평판의 전 면적에 작용하는 분포하중으로 치환하는 관계식은 (4), (5)이며 그림 2는 그 관계를 잘 보여준다.

$$F = \frac{M}{b} \quad (4)$$

$$A = \pi \times O.D_s \times b = C \times b \quad (5)$$

- F : Moment per Unit Length (MN)
 M : Moment due to Weight (MN-m)
 A : Area of Stabbing Guide (m²)
 C : Circumferential Length of Stabbing Guide (m)
 b : Longer Length of Stabbing Guide (m)

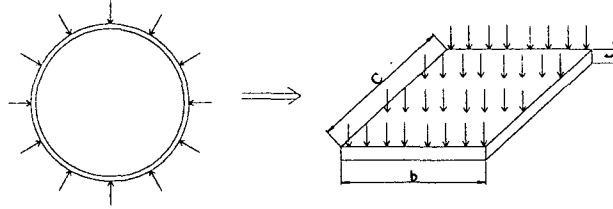


그림 2 분포하중으로의 치환

2.3. 경계 조건

실제 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)는 평판을 구부려 용접함으로써 원통형으로 제작되어지므로 이 용접부분은 모두 고정단(fix)으로 가정하였고 끝단은 어느 정도 아래 파일에 의해 변형이 억제됨을 고려하여 단순지지단으로 가정하였다. 경계 조건은 다음의 그림 3과 같다.

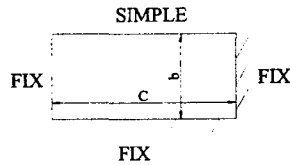


그림 3 해양 스테빙 가이드의 경계 조건

2.4. 하중 계수

실제 하중의 분포는 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 시작부분부터 끝단까지 일정하다고 볼 수 없다. 기울어진 각도와 설치 시의 조건을 고려하여 다음과 같이 용력의 분포를 가정하였다. 하중 계수는 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 길이와 직경의 비에 따라 달라진다.

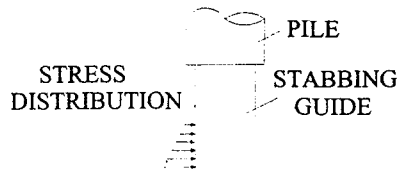


그림 4 해양 스테빙 가이드의 하중 분포

해양 스테빙 가이드(stabbing guide)에 작용하는 하중의 분포상태를 그림 4와 같이 가정하고 다음의 표 1의 하중 계수를 적용하였다.

표 1 하중 계수

C/b	β	C/b	β
1.0	0.0610	2.1	0.0802
1.1	0.0638	2.2	0.0804
1.2	0.0666	2.3	0.0806
1.3	0.0694	2.4	0.0808
1.4	0.0722	2.5	0.0810
1.5	0.0750	2.6	0.0812
1.6	0.0760	2.7	0.0814
1.7	0.0770	2.8	0.0816
1.8	0.0780	2.9	0.0818
1.9	0.0790	3.0	0.0820
2.0	0.0800	More	0.0820

2.5. 응용된 일반식

평판 이론 식 (1)를 응용하여 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)에 작용하는 하중을 해석하고 이를 바탕으로 하여 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 길이와 두께를 산출해낼 수 있는 일반적인 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{\beta q b^2}{t^2} = \frac{\beta \times M}{\pi \times O.D_s \times t_s^2} \quad (6)$$

- β : Stress Coefficient
- M : Moment due to Weight (MN-m)
- $O.D_s$: Outside Diameter of Stabbing Guide (m)
- t_s : Wall Thickness of Stabbing Guide (m)

식 (6)은 자중에 의한 모멘트만을 고려한 식으로 설치 시 다양하게 작용되는 동적 하중은 고려하지 않았다. 이 동적 하중은 바람, 조류, 파도와 같은 외부의 환경조건과 설치 시 작용하는 햄머의 영향(hammer effect), 크레인의 조정 기술, 파일의 움직임등을 복합적으로 고려하여야 하는 어려움이 있다. 동적 하중의 작용을 최소화하여 가장 안전한 조건하에서 작업을 수행하여야 하며 파일의 관입시 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 단면 계수가 가장 큰 부분에 최대 응력이 작용하도록 방향과 각도를 조정하여야 한다.

3. 유한 요소 모델링

평판 이론을 응용한 식(6)의 정확성을 증명하기 위하여 실제 해양 플랫폼(offshore platform) 공사에서 사용된 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 데이터를 확보하여 유한 요소 프로그램(F.E.M Program)을 이용하여 해석하였다. 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 기하학적 형상은 일정한 두께를 가지고 관입이 용이도록 끝단에 기울임을 가진 원통형 실린더로 가정하여 모델링하였으며 그림 5에 나타내었다.

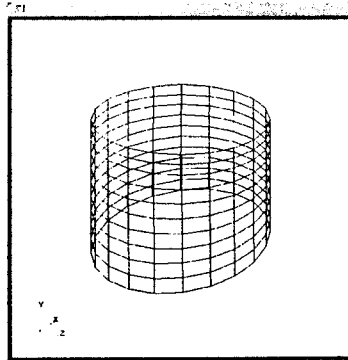


그림 5 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 유한 요소 모델링

3.1. 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 세부 치수

모델링에 이용된 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 세부 치수는 다음과 같다.

파일(pile)		해양 스테빙 가이드(stabbing guide)	
Length	70 M	Length of Long Side	1.5 M
Outside Diameter	84 in	Length of Short Side	1.0 M
Wall Thickness	1 in	Outside Diameter	82 in
Angle of Rotating	5, 7 Degree	Wall Thickness	1 in
		S.M.Y.S	35 ksi

4. 유한 요소 모델링의 조건

유한 요소 프로그램(FEM program)은 MAD NASTRAN R6.8을 사용하여 구조 해석을 수행하였으며 수치적으로 해를 구하는 기본적인 방법은 다음과 같다.

- Convergence test
- Divergence criteria test
- Adaptive stiffness matrix update strategies
- Selective BFGS updates
- Adaptive bisection and recovery of load increment
- Reiteration process

4.1. 경계 조건

1) 용접부 (스테빙 가이드와 윗 파일과의 접합부)

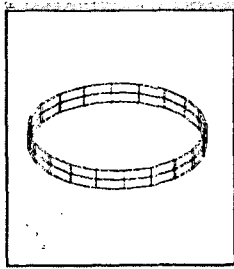
해양 스테빙 가이드(stabbing guide)와 윗 파일과의 용접 접합 부분은 6자유도를 모두 고정(fix)하여 모델링하였다. 이 부분에 대해서는 어떠한 변형도 발생하지 않으며 그 형상은 그림 6 (a)와 같다.

2) 접촉부 (스테빙 가이드와 아랫 파일과의 접촉부)

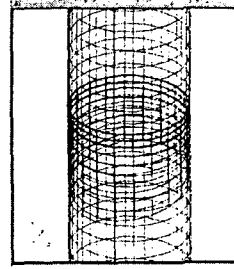
해양 스테빙 가이드(stabbing guide)와 아랫 파일의 접촉부분은 모델링을 간단화하기 위하여 MPC(multi point constraint)의 경계 조건을 적용하였다. 이 방법의 기본적인 가정은 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)가 파손되더라도 파일에는 어떠한 영향도 미치지 않는다는 것으로 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 길이 방향으로의 변형을 고정하였다. 그 형상은 그림 6 (b)와 같다.

3) 아랫 파일

아랫 파일은 어떠한 변형도 일어나지 않기 때문에 6자유도를 모두 고정(fix)한 하나의 고정 원통형으로 모델링하였다.



(a) 용접부



(b) 접촉부

그림 6 유한 요소 모델링의 경계 조건

4.2. 하중 조건

윗 파일의 관입 각도는 5° 와 7° 의 두 가지 경우에 대하여 수행하였으며 이에 대하여 각각 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 두께와 길이를 변화시켜 가면서 연구를 수행하였다.

5. 해석결과의 분석

5.1. 길이(effective length)의 변화

해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 길이(effective length)를 1.5 m, 1.7 m, 2.0 m의 세 가지 경우로 변화시키면서 연구를 수행하였다. 길이가 증가할수록 힘을 받는 면적의 증가로 인해 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)에 작용하는 하중은 감소하나 모멘트 암(moment arm)의 증가를 초래하여 모멘트 또한 증가하는 이중적 요인을 포함한다. 실제 공정에서는 단면 계수가 가장 큰 부분이 최대 응력을 받도록 관입을 조절하여야 한다. 그림 7과 그림 8은 길이의 증가와 해양 스테빙 가이드의 안전성과의 관계를 보여준다.

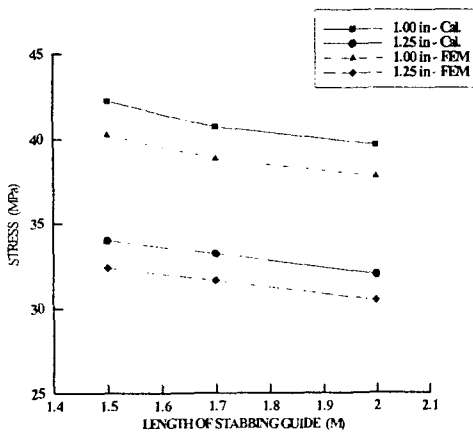


그림 7 길이와 하중의 관계 (관입 각도 5°)

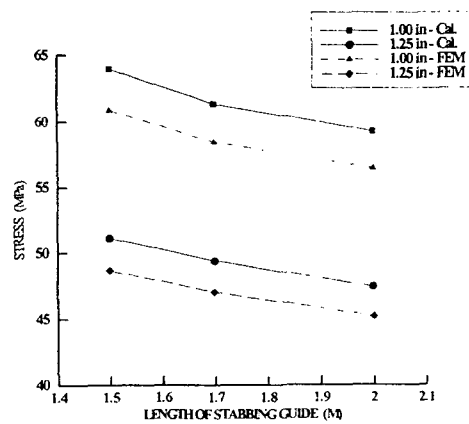


그림 8 길이와 하중의 관계 (관입 각도 7°)

5.2. 두께(wall thickness)의 변화

해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 두께를 1.0 in, 1.25 in의 두 가지 경우로 변화시키면서 연구를 수행하였다. 두께의 증가는 길이의 증가와는 달리 이중적 요인이 적용되지 않기 때문에 두께가 증가할수록 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 안정성이 크게 증가한다. 그림 9와 그림 10은 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 작용하는 하중과 두께의 관계를 잘 보여준다.

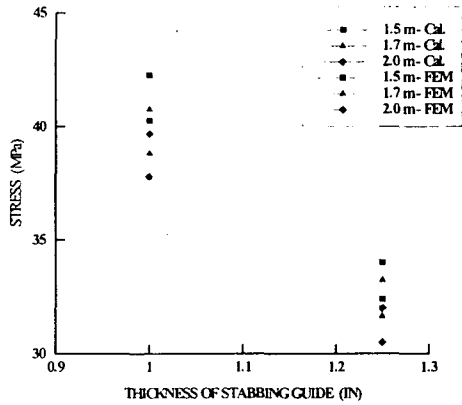


그림 9 두께와 하중의 관계 (관입 각도 5°)

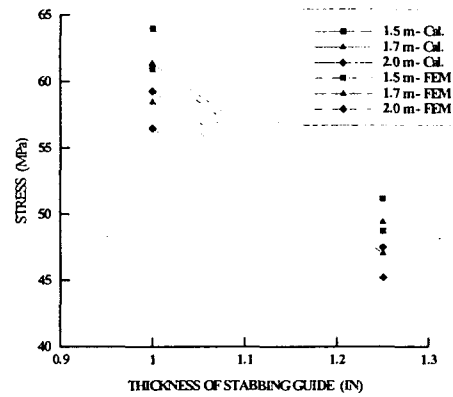


그림 10 두께와 하중의 관계 (관입 각도 7°)

5.3. 유한 요소 프로그램(FEM program)을 이용한 분석

파일의 관입 각도가 7° 일 때 유한 요소 프로그램(FEM program)을 이용하여 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 길이와 두께의 변화에 따른 구조 해석의 결과는 그림 11, 12, 13과 같으며 이론식에 의한 결과와 잘 일치한다. 그림 9에서부터 그림 13까지는 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 안정성을 증가시키기 위해서는 두께를 증가시키는 것이 효율적임을 보여준다.

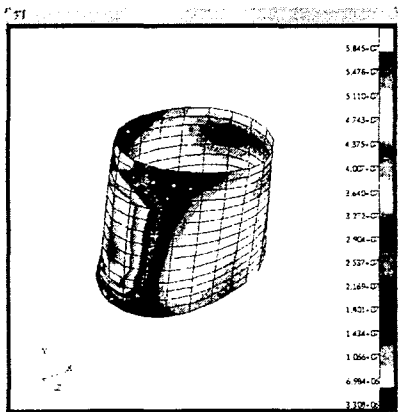


그림 11 하중 분포 (길이 2.0 m, 두께 1 in)

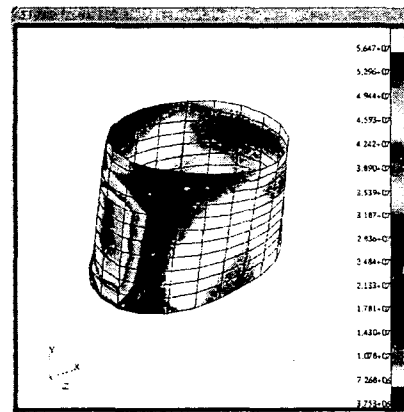


그림 12 하중 분포 (길이 1.7 m, 두께 1 in)

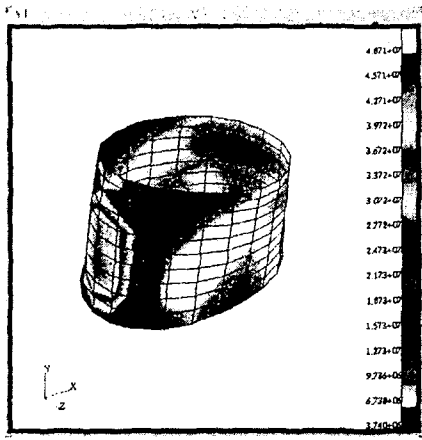


그림 13 하중 분포 (길이 1.5 m, 두께 1.25 in)



그림 14 파손된 해양 스테빙 가이드

5. 결 론

본 연구에서는 평판 이론(plate theory)을 응용한 이론식을 해양 스테빙 가이드(stabbing guide) 해석에 적용하였고 다양한 길이(effective length)와 두께(wall thickness)를 변화시켜 적용한 결과를 유한 요소 프로그램(FEM program)을 수행함으로써 증명하였다. 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 안정성 확보를 위하여 길이를 증가시키는 것보다는 두께를 증가시키는 것이 더욱 효율적임이 입증되었다. 대부분의 해양 공사에서는 항복 응력의 72%만을 정적 설계에 적용시킴으로서 발생 가능성이 있는 동적 거동에 대비하는 것이 일반적이다. 그러나, 그림 14 와 같이 실제 공사의 경험을 바탕으로 보면 해양 스테빙 가이드(stabbing guide)의 경우에는 복잡하고 다양한 동적 요인들로 인해 정적 하중에 4 내지 5 이상의 안전 계수의 적용 필요성이 실제 공사 경험과 비교하여 제안되었다. 앞으로 좀 더 많은 경우의 구조 해석과 실제 공사의 여건과 유사한 실험을 통해 보다 정확한 식을 유도해 내는 연구가 필요하다고 판단된다.

6. 참고문헌

1. API (1993) Recommended Practice 2A-WSD(RP 2A-WSD),
"Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design", Twentieth Edition
2. Roack, Raymond J. and Young, Warren C. (1975), "Formulas for Stress and Strain", Fifth Edition, McGRAW-HILL
3. Jo, Chul H. (1996), "Detail Investigation on Offshore Stabbing Guides", Proc. of 6th International Offshore and Polar Engineering Conferences, Vol.1 pp 331 - 336
4. Timoshenko, Stephen P. (1959), "Theory of Plates and Shells", Second Edition, McGRAW-HILL
5. Timoshenko, Stephen P. and Gere, James M. (1961), "Theory of Elastic Stability", Second Edition, McGRAW-HILL