

등표구조물의 설계 및 시공 방법에 관한 소고

A Note on the Design and Construction Methods of Light Beacon Structures

오상호¹, 오영민², 권오순³, 이진학⁴

Sang-Ho Oh¹, Young Min Oh², O-Soon Kwon³ and Jin-Hak Yi⁴

1. 서 론

항로표지(Aids to Navigation)는 선박 운항의 안전성을 도모하고 능률을 증진시키기 위해 해상에 설치되는 시설이다. 항로표지는 식별 수단에 따라서 광파표지, 전파표지, 음파표지, 형상표지 등으로 구분된다. 등표(燈標, light beacon)는 야간에 등화(燈火)를 이용하여 그 위치를 표시하는 광파표지의 일종으로서, 암초나 수심이 얇은 곳 등에 설치되어 주변을 항해하는 선박에게 항로의 소재, 장애물 및 항행금지점 등을 알리기 위한 구조물이다. 구조 형식은 등표와 비슷하나 등화가 설치되지 않는 구조물은 입표(立標)라고 칭하며, 이는 형상표지에 해당된다. 2007년 2월 기준으로 전국에 설치되어 있는 국가관리 등표 및 입표는 각각 257개 및 31개이며, 90% 이상이 서·남해안에 분포하고 있다. Fig. 1에 등표(인천지방 해양항만청 관할 통서등표)의 설치 사례를 제시하였다.

등표는 주변 지역에 비해서 수심이 급격하게 얕아지는 해상 노출암 또는 수심 5 m 내외의 수중암이나 간출암에 고립되어 설치되기 때문에 최악의 파랑 조건에 놓이게 된다. 특히, 구조물이 위치한 암초 주변의 수심이 깊기 때문에 파 에너지가 감소되지 않은 채로 또는 쇄파에 따른 충격과 형태로 암초 및 그 위에 설치된 등표에 직접 부딪치게 되며, 또한 암초의 형상에 따라서는 파 에너지가 집중되어 비정상적으로 큰 파력이 작용하게 되기도 한다. 이러한 경우 등표구조물이 도괴, 유실, 파손 등 여러 형태의 피해를 입게 되

기도 한다. 실제로 2003년 태풍 매미가 경남 마산 지방에 내습하였을 때, 마산지방 해양항만청(당시 해양수산청) 관할 등표 10여기가 피해를 입어 항로표지로서의 기능을 상실하게 된 바 있다.



Fig. 1. An example of the light beacon (Tongseo light beacon)

우리나라는 등표의 설치 및 유지관리 업무를 국토해양부의 해양교통시설과에서 담당하고 있다. 참고로, 일본은 해상보안청에서, 미국은 U.S. Coast Guard에서 같은 업무를 수행하고 있다. 등표구조물의 설계는 항로표지업무편람(해양수산부, 2006b)에 제시된 기준에 따르고 있으며, 이 내용의 일부가 항로표지시설 설계기준 및 항로표지공사 적산표준(예)(해양수산부, 2006a) 및 항만 및 어항 설계기준(해양수산부, 2005)에도 기재되어 있다. 이처럼 등표구조물이 주요 연안구조물임에도 불구하고, 공사 규모가 작고 독립적으로 설치되기 때문에 해안 및 항만공학자들의 관심은 비교적 높지 않은 편이다.

그러나 매년 10기 내외의 등표가 신설 또는 개·보

1 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부 연수연구원

2 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부 책임연구원

3 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부 책임연구원

4 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부 선임연구원

수되어 설치되고 있으며, 특히 신설 등표의 경우 지형적 여건이 좋지 않거나 주변 해역의 파고가 높아서 지금까지 설치가 곤란했던 곳에 위치하게 될 가능성이 높다. 더구나 최근 컨테이너 선박의 대형화 추세등과 맞물려 선박의 연안 항행 안정성을 높이기 위해서는 더 외해쪽의 깊은 수심에 등표가 설치될 필요가 있어서, 이에 따라 등표구조물의 설계 단면이 커지고 공사비도 증가하고 있는 추세이다. 따라서 현재 시행되고 있는 등표구조물의 설계 및 시공 방법을 검토하여 개선의 여지가 있는 부분에 대해서는 효과적인 방안 도출에 관하여 논의해 볼 필요성이 있다. 이러한 맥락에서 이 논문에서는 등표 구조물에 작용하는 파력을 산정하는 방법과 등표 기초의 설계 및 시공방법에 관련된 사항을 중심으로 논의를 진행하고자 한다.

2. 등표구조물에 작용하는 파력

등표구조물 설계시에 고려하는 외력은 지진력, 파력, 풍력, 부력 등이 있으며, 이 논문에서는 파력에 관한 내용만 설명한다.

2.1 설계파고

설계파고 H_d 는 구조물에 작용하는 최대파고 (H_{max})를 취하며, 다음 식으로 계산한다.

$$H_d = H_{max} = \min\{2H'_{1/3}, H_b\} \quad (1)$$

여기에서 $H'_{1/3}$ 은 현장심해유의파고, H_b 는 등표구조물 설치 위치로부터 $10H'_{1/3}$ 외해 쪽으로 떨어진 지점에서의 쇄파한계파고이다. 현장심해유의파고는 지리적 영향에 의해 발생할 수 있는 파의 회절을 고려한 것으로 다음과 같이 계산된다.

$$H'_{1/3} = K_d H_{1/3} \quad (2)$$

여기에서 K_d 는 회절계수, $H_{1/3}$ 은 심해유의파고이다.

2.2 파압력

등표의 설치위치가 암초상이 아닌 경우 또는 암초상이라도 암초의 최고점이 최고고조위(H.H.W.L) 이하에 잠겨 있고, 설계파고 H_d 가 구조물 설치지점의 수심의 0.6배 이하일 때는 다음 식에 의하여 파압력을 계산한다.

$$P_s = \gamma(Z/H_d) w_o H_d \quad (3)$$

여기에서 Z 는 정지수면을 원점으로 했을 때의 연직방향 거리, w_o 는 해수의 단위체적당 중량, H_d 는 설계파고이다. $\gamma(Z/H_d)$ 의 값은 Fig. 2에 보인 그림으로부터 구한다. $\gamma(Z/H_d)$ 의 값은 $Z/H_d=0.75$ 일 때 약 1.1이며 수심이 감소함에 따라 급격하게 감소하여 $Z/H_d=0$ 일 때는 0.2 정도가 된다.

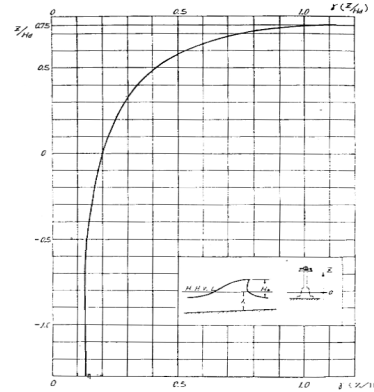


Fig. 2. Values of $\gamma(Z/H_d)$ as a function of Z/H_d (해양수산부, 2006b)

한편, 위 조건에 해당되지 않는 암초 상에 설치되는 등표에 작용하는 파압력은 다음 식으로 계산하며, 이 경우 파압은 수면으로부터의 높이에 관계없이 일정하게 분포하게 된다.

$$P_s = 0.5 w_o H_d \quad (4)$$

2.3 파의 작용고

암초의 최고점이 최고고조위(H.H.W.L)보다 높은 노출암(수상암) 위에 설치되는 등표의 경우 파의 작용고 η_d 는 다음과 같이 계산한다.

$$\eta_c = 0.75 H_d \quad (5)$$

$$\eta_h = 0.55 H_d + 0.7 R_h \quad (6)$$

$$\eta_d = \max\{\eta_c, \eta_h\} \quad (7)$$

여기에서, R_h 는 최고고조위로부터 파의 정상고까지의 높이를 의미한다. 단, η_h 는 암초 전면의 평균경사각 θ 에 따라서 Table 1에 제시된 값 이하로 한다. 한편, 노출암 이외의 암초상 등표에 작용하는 파의 작용고는 식(5)에 의해서 구한다.

Table 1. Values of η_h according to θ

θ	η_h
90°	1.00 H_d
60°	1.23 H_d
45°	1.42 H_d
30°	1.74 H_d

2.4 파력 계산에 관한 검토

현재 등표구조물의 설계 기준으로 사용되고 있는 파력 산정방법은 대부분 습田良実(1972)의 수리모형 실험 연구 결과를 기초로 하여 수립된 것이다. 이 수리모형실험은 기본적으로 규칙파 실험이며, 쇄파에 의한 충격파가 구조물에 작용할 때의 압력은 엄밀하게 측정하지 않았다. 그럼에도 불구하고 일본에서도 최근까지 이 산정식을 기본적으로 사용하여 등표구조물을 설계하고 있다. 향후 불규칙파 수리모형실험을 통해 구조물에 작용하는 충격파압을 계측하여 습田良実(1972)에 의해 제안된 파력 산정식을 보다 엄밀하게 검토해 볼 필요성이 있다.

3. 등표 기초의 설계 및 시공

등표구조물은 크게 등명기, 태양광전지 등 항로표지로서의 기능을 수행하는 데 필요한 각종 설비가 설치되는 등탑부 및 등표구조물을 암초 상에 고정시키는 기초부로 구성된다. 등표 기초는 파력을 비롯한 외력에 의한 전도 및 활동에 대해서 안정하도록 설계되어야 한다. 등표 기초의 형식에는 중력식, 부착식, 반력식의 세 가지 형식이 있는데 기초의 매몰깊이가 기초 직경의 10% 이하이면 중력식, 10~30% 범위이면 부착식, 30% 이상이면 반력식 기초로 구분한다. 기초의 형식은 지반의 강도, 등탑의 규모, 외력의 대소, 시공성 등을 종합적으로 고려하여 결정되지만, 우리나라의 경우 외해에 설치되는 일부 자켓식 등표를 제외한 대부분의 등표는 중력식 기초 형식을 채택하여 설계되고 있다.

3.1 중력식 등표의 기초 설계

중력식 기초는 외력의 휨모멘트에 대해서는 자중으로서, 수평력에 대해서는 저면마찰로서 구조물의 안정을 유지하는 기초 형식으로서, 중력식 기초의 전도 및 활동에 대한 안정 계산은 각각 다음과 같이 이루어진다.

$$F = \frac{M_r}{M} \geq 1.5 \quad (8)$$

$$F = \frac{P_r}{P} \geq 1.5 \quad (9)$$

여기에서 F 는 안전율, M_r 은 기초저면에서의 저항모멘트, P_r 은 기초저면과 지반과의 마찰력, M 은 기초저면에서의 휨모멘트, P 는 기초저면에 작용하는 수평력을 각각 의미한다. 한편, 등표 기초의 접지압력이 지반의 허용지내력도를 넘지 않도록 침하에 대한 안정도 설계시 고려해야 한다.

3.2 등표 기초의 세굴

중력식 등표 기초는 일반적으로 암초의 암석을 일정 깊이만큼 굴착하고 그 위에 콘크리트 구조물을 설치하는데, 암석과 콘크리트 간의 결합이 완벽하지 않으면 틈새로 균열이 발생하고 장기간에 걸친 파랑과 조류 등의 작용으로 인하여 기초 세굴이 발생하기 쉽다. 세굴이 진행된다면 Fig. 3에 보인 것처럼 기초 하부와 암석이 분리되어 구조물의 안정성이 저하되며 태풍과 같은 고파랑 내습시에는 등표 구조물이 전도될 위험성이 높아진다.

특히, 암초가 항상 해수면 아래에 있는 수중암 또는 해수면 위로 노출되는 시간이 제한적인 간출암에 시공되는 등표의 경우에는 해상 시공에 상당한 어려움이 따른다. 이러한 경우 기상 및 해상조건에 따라 시공을 위한 선박 및 장비의 운용에 제약이 많기 때문에 시공이 완벽하게 이루어지지 못하는 경우가 많으며, 추후 기초 세굴이 쉽게 발생하는 원인이 된다.



Fig. 3. Foundation scouring of a light beacon

3.3 등표의 보수·보강

등표는 설계 및 시공이 적절하게 이루어지더라도 파랑과 조류에 오랜 기간 노출되어 있기 때문에 시간 경과에 따라서 어느 정도의 구조적 손상은 피할 수 없다. 실제로 매년 평균적으로 10개 미만의 등표에 대한 보수·보강 공사가 시행되고 있다.

지금까지는 대체로 육안조사 및 실무자의 주관적 판단에 근거하여 등표구조물의 보수·보강 시기 및 방

법을 결정해왔지만, 최근에는 보다 정량적인 안정성 평가 기법을 도입하여 등표구조물의 보수·보강을 진행하려는 노력이 이루어지고 있다. 이래철 등 (2004)은 손상이 발생한 등표구조물에 대하여 수중잠수를 비롯한 다양한 내구성 및 안정성 평가를 실시하여 대상 구조물의 적절한 보수·보강 공법을 제시한 바 있다. 이진학 등(2007)은 교량을 비롯한 육상구조물의 건전성 평가에 널리 활용되는 상시미진동 계측 결과를 토대로 등표 기초의 세굴을 정량적으로 평가하는 연구를 수행하였다. 특히 이 방법은 수중잠수가 아닌 육안조사만으로는 세굴 정도를 판단하기 어려운 수중 암초상에 설치된 등표 기초의 세굴 상태를 비교적 간단하게 정량적으로 평가할 수 있다는 장점이 있다.

한편, 등표의 보수·보강 공법은 체계적으로 확립되어 있지는 않은 실정이다. 등표 기초가 손상을 입거나 파손된 경우에는 에폭시, 초속경 콘크리트 등의 재료를 활용하여 균열 및 손상부위를 보수·보강하고 있지만, 파손 원인을 정확하게 파악하여 대책을 마련하지 못하여 여러 차례 반복적으로 보수·보강이 이루어지는 사례도 있다. 따라서, 구조적 손상이 발생한 등표에 대한 체계적인 보수·보강기법 및 유지관리 체계를 수립할 필요성이 있다.

3.4 신형식 기초 등표구조물 개발

기존에 많이 시공되었던 중력식 등표는 기초가 놓아지게 될 위치의 모암(母巖)을 전면 굴착 또는 발파하는 과정에서 암석의 강도가 저하되고 시공 후 시간이 경과함에 따라 풍화, 변질될 가능성이 높다. 따라서 파랑과 조류에 의한 기초 세굴 발생을 근본적으로 차단하기는 어렵다. 따라서 모암을 가능한 적게 손상시키면서 등표 기초가 암초에 고정될 수 있는 형식의 등표구조물을 개발할 필요성이 있다.

이러한 측면에서 앵커의 지지력을 활용하는 깊은 기초(말뚝식 기초)를 등표 기초에 활용하는 방안을 고려해 볼 수 있다. 현행 등표 기초 설계기준에서도 봉강을 지반에 부착(anchoring)시키는 것을 고려하고 있으나, 이는 기초의 안정성을 추가로 높이기 위해 사용하는 것으로서 기초 안정계산시에는 포함하지 않고 있다. 따라서 등표 기초 설계 및 시공에서 봉강의 설치가 고려되더라도 다소 형식적으로 이루어지고 있는 실정이다.

육상공사의 경우 말뚝식 기초의 설계 및 시공방법이 잘 확립되어 있는 반면, 해상공사의 경우 상대적으로 시공의 제약 사항이 많아서 말뚝식 기초의 활용 빈도가 낮은 편이다. 그러나 최근 해상공사에 적합한 천공장비 및 시공기술의 개발이 활발하게 이루어지고

있어서 말뚝식 기초를 적용한 등표구조물을 시공할 수 있는 여건은 충분히 마련되어 있다. 말뚝식 기초로 등표 기초를 설계하게 되면 구조물의 단면을 감소시킬 수 있어 암 굴착 면적도 감소하며, 전면 굴착을 하지 않고 등표 기초를 모암에 고정시키는 방법을 개발하게 되면 모암을 거의 원형 그대로 보존하면서 등표구조물을 설치할 수 있어서 등표 기초의 세굴 방지에 효과적일 것으로 기대된다.

4. 결 론

이 논문에서는 암초나 수심이 얇은 곳 등에 설치되어 주변을 항해하는 선박에게 항로의 소재, 장애물 및 항행금지지역 등을 알리기 위한 구조물인 등표 구조물의 설계 및 시공방법에 관하여 논의하였다. 등표구조물에 작용하는 파력을 산정하는 방법 및 등표 기초의 설계 및 시공방법에 관련된 사항을 중심으로 현재 시행되고 있는 방법들을 검토하고, 앞으로의 개선방향에 관해 언급하였다. 특히 등표 기초의 세굴은 앞으로 지속적으로 발생할 수 있는 현안 문제인만큼 연구 개발을 통해 효과적인 보수·보강 공법 지침을 마련하고, 세굴 피해를 저감시킬 수 있는 새로운 형식의 등표 기초 설계 및 시공기술을 도입할 필요성이 있다.

감사의 글

이 논문의 내용은 국토해양부 연구개발사업인 “첨단항로표지 수중구조물 설계기술”과제의 일부이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 이래철, 임성순, 박윤제, 신철식, 이상범 (2004). 등표 구조물 거동에 따른 보수·보강 방안에 관한 연구. 한국구조물진단학회 학술발표회논문집, 21-34.
- 이진학, 권오순, 오영민 (2007) 상시미진동계측에 의한 수중암초상의 등표구조물에 대한 세굴평가. 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 발표논문집, 1892-1895.
- 해양수산부 (2005). 항만 및 어항 설계기준.
- 해양수산부 (2006a). 항로표지시설 설계기준 및 항로표지공사 적산표준(예).
- 해양수산부 (2006b). 항로표지업무편람.
- 合田良実, 池田龍彦, 笹田 正, 岸良安治 (1972) 岩礁上の円柱の設計波力に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第11巻, 第4号, 45-81.