

근입식 강판셀 구조 설계표준화 및 최적제원 결정에 관한 연구

A Study on Standard Design Procedure and Optimum Dimension of Embedded Steel-Plate Cell Structure

박 용 명¹⁾ · 김 태 진²⁾

Park, Yong Myung Kim, Tae Jin

요 약 : 본 연구에서는 대수심 해안에서 호안 구조물의 조성에 적합한 근입식 강판셀 구조의 표준설계절차를 확립하고 최적제원 결정을 위한 연구를 수행하였다. 최적 제원의 결정을 위해 셀 안전성 검토용 전산프로그램을 개발하고 강도가 다른 사질토 지반에 대해 수심별로 가능한 제원을 프로그램을 사용하여 도출한 뒤 최적 강판셀 제원 결정을 위한 일반식을 제안하였다. 아울러 강판셀의 관입을 위한 진동햄머 시스템의 소요 기진력 산정식의 타당성을 확인하는 모형실험을 수행하였으며, 제안한 셀제원에 대한 소요 기진력의 데이터를 제시하였다.

ABSTRACT : In this study, establishment of standard design procedure and optimum dimension of the embedded steel-plate cellular bulkheads for seawall structures in deep water sites has been presented. A computer program was developed to asses feasible dimensions of steel-plate cell, and general equations to determine optimum cell diameter and embedment depth are derived for sand. A model experiment to verify the necessary driving force of vibratory hammer system was also performed and driving force data pertinent to optimum cell dimension are presented.

핵심용어 : 근입식 강판셀, 표준설계절차, 적정 셀제원, 진동햄머기진력, 모형셀 관입실험

KEYWORDS : Embedded steel-plate cell, Standard design procedure, Optimum cell dimension, Vibratory forces of hammer, Cell model penetration test

1) 정회원, (재) 포항산업과학연구원 강구조연구소 책임 연구원, 공학박사
2) 정회원, (재) 포항산업과학연구원 강구조연구소 선임 연구원

본 논문에 대한 토의를 1999년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

셀(cell)식 구조물은 외각체 속에 속채움을 하여 양자가 일체로 파압 또는 배면 토압 등의 외력에 저항하는 구조 형식이다. 근입식 강판셀 공법은 호안 및 방파제 등의 항만구조물의 조성을 위한 새로운 방법으로서 육상에서 강판을 사용하여 용접 제작한 원통형상의 셀을 해상기중기선으로 현장까지 운반하여 소정의 위치에 일렬로 관입하고 셀과 셀 간은 원호형상의 아크셀(arc cell)로 연결한 후 셀 및 아크셀 내부에 속채움을 실시하여 벽체 구조물을 축조하는 공법이다(그림 1 참조).

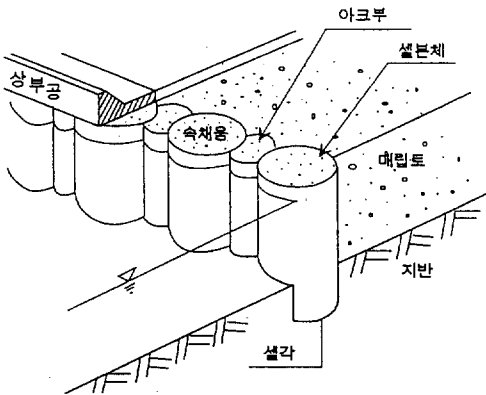


그림 1. 근입식 강판셀공법 개념도

본 공법은 강판셀을 해저 지반에 직접 근입시키는 방식으로 종래의 케이슨식 공법에 비해 다음 장점이 있다.

- 1) 급속시공이 가능하다.
- 2) 체체의 중량이 가벼우므로 취급이 용이하여 소형 해상기중기선으로 시공이 가능하며, 특히 대수심 부지에서 유리하다.
- 3) 사석마운드가 불필요하므로 경제성 및 환경보호 측면에서 유리하다.
- 4) 차수성이 우수하다.

본 공법은 주로 시험시공 등의 실험적인 연구를 통하여 외국에서는 간사이 국제공항 인공

섬 안벽 조성 등에 다수 적용되었으나, 국내에서는 아직 적용된 사례가 없다.

본 연구에서는 국내 항만시설물 설계기준과⁽¹⁾ 외국의 설계기준⁽³⁾을 토대로 하되 미비한 사항을 보완하여 근입식 강판셀 구조물의 표준설계 절차를 제시하였다. 여기에는 체체 안정성의 검토, 적정 제원 및 근입장의 결정 및 지반강도에 따른 진동햄머기진력의 산정기법이 포함된다. 한편, 최적 셀 제원의 제안을 위해 전산프로그램을 작성하고 수심 DL-7.5m ~ DL-17.5m 조건에서 지반 강도별로 강판셀의 소요 직경 및 근입장을 도출하여 적정 제원의 결정을 위한 일반식을 제시하였다. 아울러, 강판셀의 관입을 위한 진동햄머 소요기진력 산정식⁽³⁾의 타당성을 모형 관입실험을 통해 확인하고자 하였으며, 지반강도 및 수심별로 진동햄머의 소요 기진력을 결정하여 제시하였다.

2. 설계 절차

2.1 벽체에 작용하는 외력

근입식 강판셀의 벽체에 작용하는 외력은 구조물의 시공 및 사용 상태에 따라 다르며 배면 토압, 잔류수압, 속채움재의 중량 및 상재하중을 고려하여야 한다. 단, 지진력은 현재 국내 설계기준⁽¹⁾에서 명시하지 않은 관계로 포함하지 않았다. 근입식 강판셀의 설계시 고려하는 상하중의 작용 형상은 그림 2와 같다.

2.2 안정성 검토

강판셀이 구조물로서 안정성을 확보하기 위해서는 외력에 의해 전도되거나 심한 변형이 발생해서는 안된다. 따라서, 안정성 검토항목은 1) 전도에 대한 안정성 확보를 위한 전단변형의 검토와 2) 지반반력, 활동 및 셀마루 변위에 대한

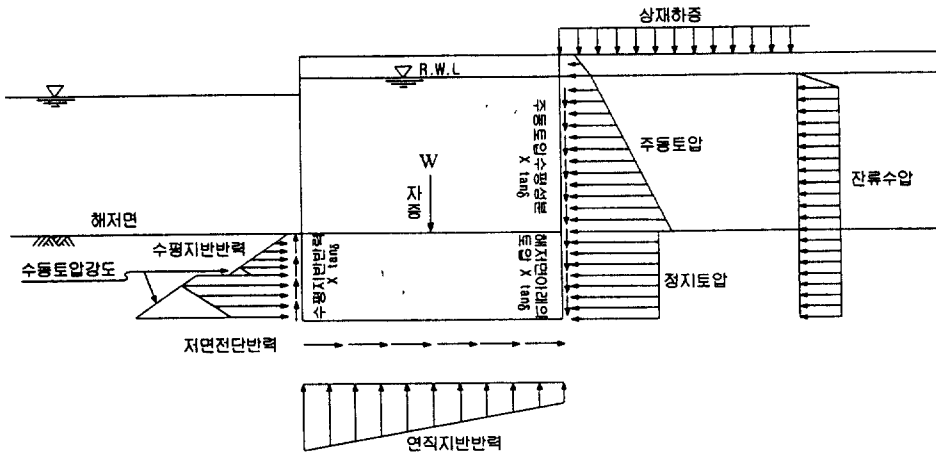


그림 2. 근입식 강판셀 설계 하중

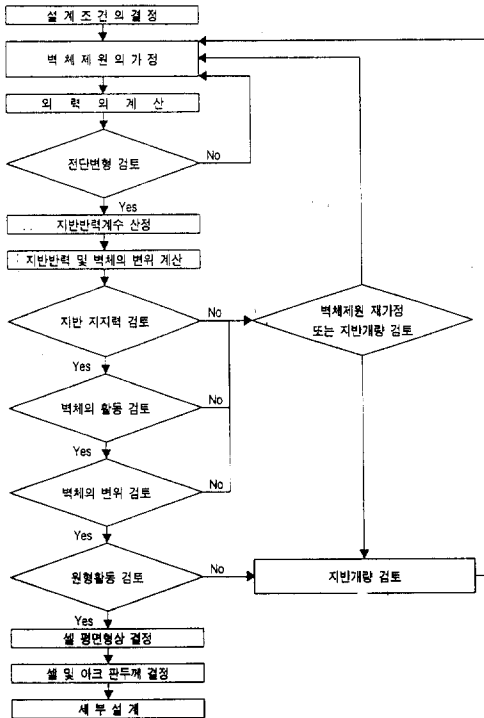


그림 3. 근입식 강판셀 구조설계 절차

안정성 확보를 위한 중력식 벽체로서의 안정검토가 있다. 이상의 안정성이 확보되면 상재 구조설계를 수행한다. 근입식 강판셀의 구조설계 절차는 그림 3과 같다. 현재 국내기준에서

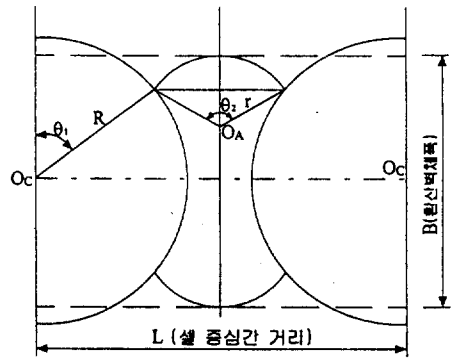


그림 4. 환산벽체폭

는 그림 3의 절차에서 지반지지력, 벽체의 활동, 벽체 변위의 계산과 관련한 안정성 검토 기법이 정립되어 있지 않아 본 논문에서는 이의 결정을 위한 세부절차를 구축하여 제안한다.

안정성의 검토는 계산의 편의를 위해 정의한 양인 환산벽체폭 B에 대해 수행한다(그림 4).

2.2.1 전단변형 검토

셀 본체의 변위가 무시할 수 있을 정도로 작은 경우에는 강판셀과 속채움재는 일체로 거동하는 것으로 간주할 수 있다. 즉, 전도에 대한 안정성 확보 요건으로서 속채움 재료면에 전단

파괴가 발생하지 않아야 한다. 셀 구조의 전단 변형에 대한 이론은 Terzaghi, Cummings, Schneebeli, 北島 등이 제안한 식이 있다.⁽⁴⁾

국내 기준⁽¹⁾은 北島의 식을 채택하고 있다.

강판셀의 전단변형에 대한 안정성은 그림 2에서 해저면에서 셀마루까지의 속채움재에 의한 변형저항모멘트 M_{rd} 와 해저면보다 위에서 작용하는 평상시의 배면 주동토압과 잔류수압 등의 하중에 의한 변형모멘트 M_d 의 비율로 검토한다. 즉,

$$M_d = P_a h_a + P_w h_w \geq M_{rd} = \frac{1}{6} \gamma_o H_d'^3 R_d \quad (1)$$

여기서,

$$R_d = \nu_d^2 (3 - \nu_d \cos \phi) \sin \phi \quad (2)$$

식(1)에서 P_a 와 P_w 는 해저면 위에 작용하는 주동토압 및 잔류수압, h_a 와 h_w 는 주동토압 및 잔류수압 작용점 높이이다. γ_o 는 속채움 재료의 환산단위체적중량(1.0 tonf/m^3), H_d' 는 환산벽체높이, R_d 는 변형저항계수, ν_d 는 전단변형을 검토할 때의 환산벽체높이와 폭의 비(H_d'/B), ϕ 는 속채움 재료의 내부마찰각을 각각 나타낸다.

전단변형에 대한 안정 여부는 셀의 직경과 관련되며, 평상시 안전율은 1.2 이상이다.

2.2.2 중력식 벽체로서의 안정 검토

전체 안정 검토는 근입된 강판셀이 해저 지반에 탄성지지된 강체로 가정하여 외력에 대한 지반반력 및 셀의 변위를 구한다. 지반반력은 지반의 탄성영역을 초과하지 않은 범위에서는 지반반력계수와 변위량을 곱하여 구한다. 지반반력 및 셀의 변위가 각각 허용치를 초과하지 않으면 중력식 벽체로서의 안정이 확보되는 것으로 하며, 이는 근입장과 직접적으로 관계된다. 한편, 점성토 지반에서는 지반개량을 실시하고(샌드컴팩션파일 등), 개량지반의 내부마찰

각은 치환내부마찰각으로 환산하여 사질지반에 준하여 지반반력계수를 구한다.

(1) 지반반력계수

지반반력계수는 수평방향(K_H), 연직방향(K_V), 전단지반반력계수(K_S)가 있으며 지반의 N 치와 관계된다. 각 지반반력계수는 항만시설물 설계기준⁽¹⁾에 따라 다음 식으로부터 구한다.

$$K_H = 1.2(0.2N), K_V = 0.2N, K_S = \frac{1}{3} K_V \quad (3)$$

(2) 지반반력 및 변위의 계산

지반반력 및 변위는 해저면 위에서 셀에 작용하는 모멘트 M , 수평력 H , 그리고 연직자중 V 와 해저면 하부 지반 반력을 고려하여 계산한다. 그림 5는 성질이 다른 세 층의 지반에 대한 지반반력 계산모델이다.

국내 설계기준⁽¹⁾에서는 지반반력 및 변위량의 계산방법이 정의되어 있지 않으므로, 본 연구에서는 도로교표준시방서⁽²⁾의 케이슨 기초 설계에 적용하는 기법을 준용하기로 한다. 이 때 그림 5의 계산모델에서 셀의 회전각 θ 와 회전 중심깊이 h 는 다음 식으로부터 계산한다.

$$\theta = \frac{MK_1 + HK_2}{K_1K_3 - K_2^2}, h = \frac{MK_2 + HK_3}{MK_1 + HK_2} \quad (4)$$

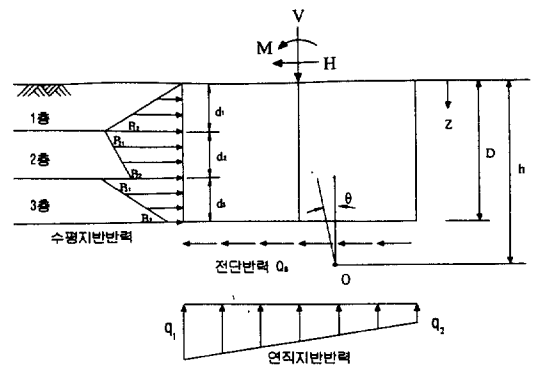


그림 5. 지반반력 계산모델

지반반력이 사다리꼴 분포일 경우 계수 K_1 , K_2 , K_3 는 다음과 같다.

$$K_1 = \frac{1}{2} K_{H1} d_1 + K_{H2} d_2 + K_{H3} d_3 + K_S B \quad (5a)$$

$$K_2 = \frac{1}{3} K_{H1} d_1^2 + K_{H2} d_2 (d_1 + \frac{1}{2} d_2) + K_{H3} d_3 (d_1 + d_2 + \frac{1}{2} d_3) + K_S B D \quad (5b)$$

$$K_3 = \frac{1}{4} K_{H1} d_1^3 + \frac{1}{3} K_{H2} d_2^3 + \frac{1}{3} K_{H3} d_3^3 + K_{H2} (d_1 + d_2) d_1 d_2 + K_{H3} (d_1 + d_2 + d_3) (d_1 + d_2) d_3 + K_S B D^2 + \frac{1}{12} B^3 K_V \quad (5c)$$

식 (5)에서 B는 환산벽체폭, D는 근입장이다. 식 (4)로부터 셀의 변형형상이 구해지면 지반반력계수와 각 위치에서의 변위의 곱으로부터 수평반력, 연직반력 및 전단반력을 계산할 수 있다. 계산된 변형형상 및 지반반력으로부터 지반지지력에 대한 검토, 활동에 대한 검토, 셀마루의 변위검토 및 원호활동에 대한 검토를 수행한다.

(3) 지반지지력에 대한 검토

지반의 연직반력은 다음 식으로부터 구한다.

$$q_{1,2} = \frac{V}{B} \pm \frac{K_v B \theta}{2} \quad (6)$$

호안 및 방파제 구조물에는 자중, 토압 및 파압 등의 외력이 작용하고, 이들의 합력은 보통 편심 또한 경사하중으로 작용한다. 항만시설물 설계기준에서는 편심하중이 작용하는 얇은 기초의 지지력 검토시 다음 식으로 정의되는 하중경사율이 0.1 이상인 경우에는 Bishop의 원호활동 계산법에 의한다.

$$H/V = Q_s / \left(\frac{q_1 + q_2}{2} B \right) \quad (7)$$

한편, 식 (7)로부터 구한 하중경사율이 0.1보다 작은 경우는 다음 식으로 정의되는 사질토 지반에 대한 Terzaghi의 얇은 기초의 지지력으로 검토한다.

$$q_a = \frac{1}{F} (\beta \gamma_1 B N_r + \gamma_2 D N_q) + \gamma_2 D \quad (8)$$

여기서, F는 안전율(2.5), β 는 기초의 형상계수(0.5), γ_1 , γ_2 는 각각 셀저면 아래 및 위의 흙의 단위중량(또는 수중단위중량)이며, N_r , N_q 는 지지력계수이다.

(4) 활동에 대한 검토

셀 저면의 전단반력은 다음 식으로 계산되며,

$$Q_s = K_S (h - D) \theta B \quad (9)$$

다음 식으로 정의되는 활동에 대한 평상시 안전율은 1.5이상으로 한다.

$$S.F. = \frac{(W + P_V) \tan \phi}{Q_s} \quad (10)$$

여기서, W는 셀 체체의 중량, P_V 는 전면 및 배면에 작용하는 전 연직력이다.

(5) 허용변위량

셀마루의 수평변위는 다음 식으로 구한다.

$$\delta_z = (h - z) \theta \quad (11)$$

허용 수평변위량은 일반적으로 구조물의 용도에 의해서 결정되지만 항만구조물에서는 그 값이 정해지지 않은 것이 많다. 과거 지진피해 보고서⁽⁵⁾ 등에서 얻은 중력식 및 강널말뚝셀식 구조물의 셀마루의 수평변위량과 재해도를 분석한 결과에 의하면 셀 마루의 수평허용변위량을 제체높이의 1.5% 이내로 설정하는 것이 바람직하다.

2.3 강판 두께 및 보강재 설계

속채움에 의해 셀본체 및 아크셀에 작용하는 원주방향 최대인장력 T는 다음과 같다.

$$T = ((\gamma_o H_d' + w)K + \gamma_w h_w) R \quad (12)$$

여기서, K는 속채움토압계수로서 셀본체에

대해서는 $K = \tan \phi$, 아크셀에 대해서는 $K = \frac{1}{2} \tan \phi$ 로 한다. 한편, R은 셀 또는 아크셀의 반경이고, γ_w 는 해수의 단위중량이다. 셀 본체 및 아크셀의 최종 강판두께는 식 (12)에 의한 소요 두께에 강재의 부식량을 고려하여 결정한다. 한편, 근입식 강판셀은 진동관입시 좌굴을 유발하지 않도록 원통형 셀의 좌굴강도와 진동관입시 지반의 동적주면마찰력을 고려하여 결정한 다음 식으로 최소 두께를 확인하여야 한다.⁽⁶⁾

$$t \geq 0.322 \sqrt{\frac{RND}{E}} \quad (13)$$

여기서, \bar{N} 는 타설 심도의 평균 N치, D는 셀 근입장이며 E는 지반의 Young 계수이다. 강판셀 두께의 결정에서 지배적인 항목은 부식량을 고려하고 식 (12)에 의한 속채움 인장응력인 것으로 나타났으며, 근입시 좌굴강도는 식(13)으로 검토시 충분한 여유가 있는 것으로 밝혀졌다. 한편, 셀 및 아크셀은 제작 및 시공시에 발생하는 처짐과 응력에 대비하여 수직보강재, 수평보강재, 상하단의 보강을 위한 보강판을 부착하여야 하며, 그림 6에 보강재의 배치를 예시하였다.

먼저, 수직보강재는 주로 진동관입시 진동행

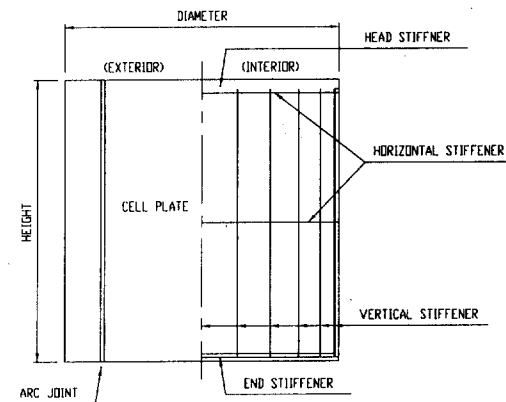


그림 6. 보강재 배치 예

머의 기진력에 의한 국부 좌굴을 방지하기 위한 것이다. 수평보강재는 제작시 형상의 유지 및 시공시 속채움이 완료되지 않은 상태에서 파압이 작용할 때 구조적 안전성을 확보하기 위한 것으로 파압에 대한 좌굴여부를 검토한다. 마지막으로 두부 및 단부는 보강판을 덧대어 진동관입시 양단부의 국부적 파손에 대비한다. 이때 보강판이 두꺼워지면 진동관입시 선단저항면적이 커지게 되므로 10 mm 내외로 제한한다.

2.4. 설계자동화 프로그램 개발

본 연구에서는 앞에서 제시한 근입식 강판셀 구조의 설계 과정을 자동화한 전산프로그램 EMCELL을 개발하였다. 본 프로그램의 특징은 사질지반 및 샌드컴팩션파일에 의한 개량지반 여건에 대해서 안정성 검토 및 적정 단면의 결정이 가능하다. 또한, 해저 지반, 속채움 및 뒷채움 등이 여러 층으로 이루어져 있는 경우에도 적용할 수 있도록 구성하였다. 데이터의 입력은 화면 상에서 수행하며 본 프로그램의 입력 화면의 예는 그림 7과 같다.

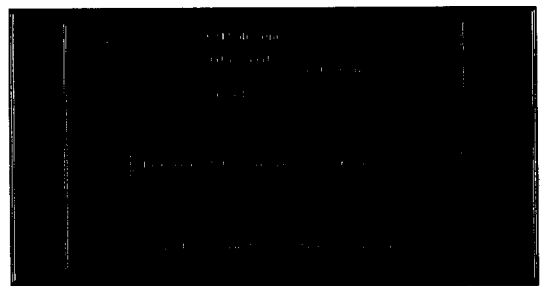


그림 7. EMCELL 입력화면 예

3. 적정 셀제원 결정 연구

3.1 셀의 배치 기법

근입식 강판셀의 형상은 셀 직경, 벽체 높이,

근입장, 셀 본체의 중심간 간격, 아크 반경, 아크 이음부의 위치 등에 따라 결정된다. 일반적으로 셀 본체의 중심간 거리는 셀 직경 대비 10~15% 정도 크게 하는 것이 좋다. 아크셀은 셀 본체에 직각으로 접속하도록 배치하며, 반경은 셀 본체의 반경보다 작게 하는 것이 바람직하다.⁽³⁾

3.2 수심-지반조건별 가능 제원

강판셀의 제원은 그림 3의 설계 절차를 따라 여러차례 시산을 거쳐 적정 단면을 결정한다. 이 중에서 셀의 소요 직경은 벽체의 전단변형에 대한 안정성과 관계되고, 소요 근입장은 중력식 벽체로서의 안정성과 관계된다. 근입식 강판셀의 최소 근입장은 모형실험에 의하면 $H/8$ (H는 해저면에서 셀마루까지의 높이)인 것으로 제안되고 있다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 지반 조건 및 수심별로 적정 셀 제원의 제시를 위해 그림 8의 단면을 표준 호안단면으로 가정하고 그림 4에서 셀의 중심간 간격 L은 셀 직경보다 12.5% 크게 하고, $\theta_1 = 40^\circ$, $\theta_2 = 100^\circ$ 로 하였다. 셀마루의 계획고는 최저해수위보다 3.0 m 높게 가정하고, 조

수간만차는 1.8 m로 하였다. 수심은 최저해수위에서 해저 지반면까지 깊이를 DL-7.5m에서 DL-17.5m까지 고려하였다. 속채움 및 뒷채움재는 사질토를 사용하는 것으로 하여 내부마찰각은 30° 로 하였다. 한편, 안정성 검토에서 벽체의 전단변형에 대한 안전율은 1.2 이상, 활동에 대한 안전율은 1.5 이상, 셀마루의 변위는 1.5%이내, 그리고 하부지반의 연직반력은 사다리꼴 분포가 되도록 하였다. 한편, 근입장이 셀 직경보다 작은 경우로 한정하였고 따라서, 지반의 허용지지력은 식 (8)의 알은 기초의 지지력공식을 사용하였다.

고려한 해저 지반 종류는 내부마찰각 및 N치가 1) $\phi = 27^\circ$, $N = 10$; 2) $\phi = 30^\circ$, $N = 20$; 3) $\phi = 35^\circ$, $N = 30$ 의 세가지 사질지반을 상정하였으며 EMCELL 프로그램을 사용하여 구한 소요 셀 직경 대비 근입장의 관계는 그림 9와 같다. 지반조건 1 및 2에 대한 그림 9(a) 및 (b)에서 수심별로 제시한 각 곡선의 좌상단 끝은 셀의 최소 소요 직경과 그 때의 근입장에 해당하며, 우하단 끝은 최소근입장($H/8$) 적용시 소요 직경에 해당된다. 한편, 내부마찰각이 35° 인 지반조건 3의 경우에는 최소근입장만을 근입하면 지반지지력이 충분한 것으로 밝혀 졌고,

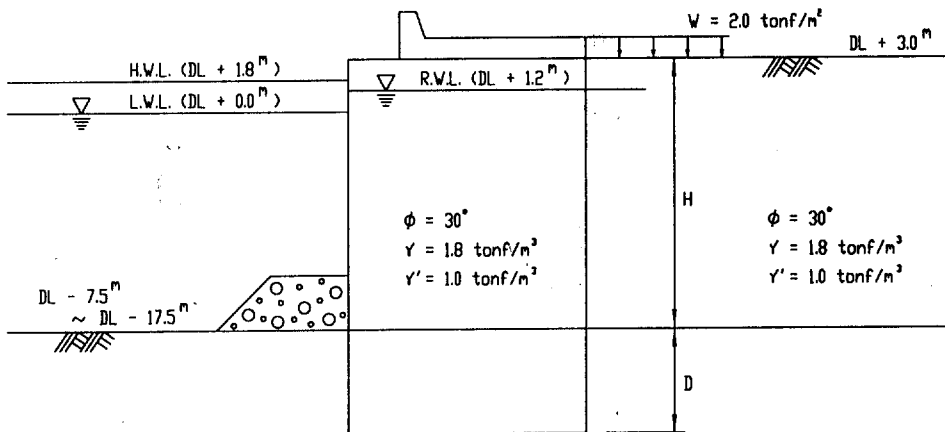


그림 8. 표준 호안 단면도

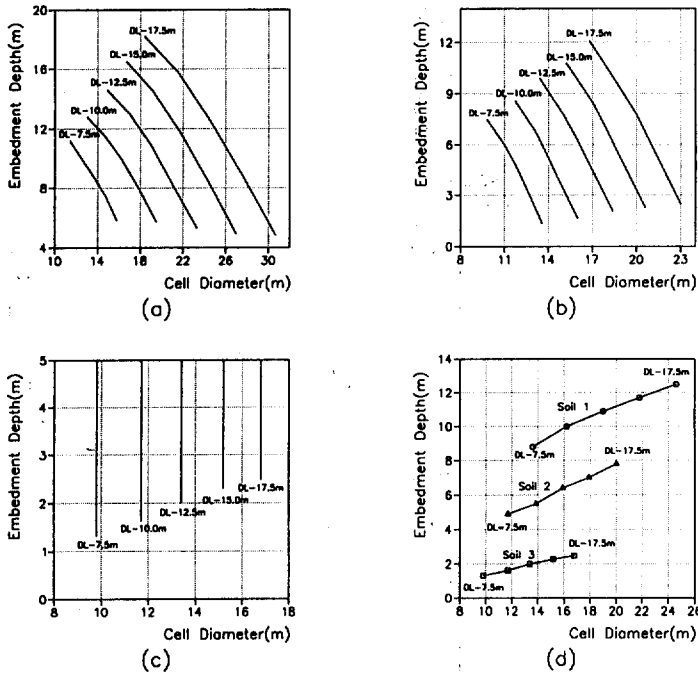


그림 9. 지반조건별 수심에 따른 소요 셀 직경 및 근입장; (a) 지반조건 1, (b) 지반조건 2, (c) 지반조건 3, (d) 지반조건별 적정 제원.

따라서 그림 9(c)는 각 수심별로 최소 소요 직경에 해당한다. 그림 9(d)는 지반조건별 비교를 위해 지반조건 1 및 2에 대해서는 가능한 제원 중에서 중간 직경을, 지반조건 3은 최소 직경을 선정하여 도시한 것이다.

강판의 두께는 식 (12)의 원주방향 인장력과 부식량을 0.02 mm/년/면(방식 적용 가정)으로 하여 1mm 단위로 산정한 후 식 (13)으로 부터 좌굴을 검토하여 최종 결정하였다. 표 1에

는 지반조건 2의 DL-12.5m 경우에 대한 해석 결과를 제시하였다. 표 1에서 알 수 있는 바와 같이 셀 제원의 결정에서 직경을 최소화하고 근입을 깊게 할수록 벽체의 전단변형에 대한 안전율은 최소가 되고 활동에 대한 안전율은 최대가 되며, 반대로 최소근입장(H/8)을 적용하고 셀의 직경을 크게 할수록 전단변형에 대한 안전율은 최대가 되고 활동에 대한 안전율은 감소한다.

표 1. 지반조건 2, DL-12.5m 조건의 셀 제원.

셀직경 (m)	근입장 (m)	유효폭 (m)	셀 중심간 거리(m)	허용지식력 (tonf/m ²)	지반반력 (tonf/m ²)	안전율		셀마루 변위(%)	강판두께(mm)	
						전단변형	활동		셀	아크셀
13.4	9.9	12.39	15.07	60.90	60.06	1.205	11.74	0.36	9	8
15.0	7.8	13.87	16.87	53.73	53.31	1.468	4.96	0.27	10	8
15.9	6.4	14.70	17.89	48.73	48.17	1.623	3.75	0.22	10	8
16.7	5.0	15.44	18.79	43.60	42.98	1.765	3.09	0.18	11	8
18.4	2.0	17.01	20.70	32.83	32.31	2.076	2.65	0.11	11	8

3.3 적정 제원 제안

적정 셀 제원의 결정은 주어진 수심과 지반 조건에 대해 적절한 직경과 그에 해당하는 근입장을 결정하는 것이다. 셀의 직경이 너무 작으면 전단변형에 대한 문제가 발생하고, 셀 직경이 커지게 되면 속채움재 양이 증가하고 원주방향 인장력의 증가로 인해 강판의 두께도 증가한다. 본 연구에서는 전단변형에 대한 최소 안전율 1.2보다 적절한 여유를 고려하여 1.5를 기준으로 하였다. 전단변형의 검토는 셀 직경에만 관계되고 지반조건에는 무관하므로 3.2절의 해석 결과를 바탕으로 적정 셀 직경은 다음 식으로 결정 가능하다.

$$Dia_{cell} = 0.791H + 2.85 \quad (14)$$

여기서, H는 해저 지반면에서 셀마루까지의 높이이다(그림 8).

한편, 식 (14)에서 결정된 직경에 대한 소요 근입장은 지반의 내부마찰각 및 벽체높이 H와 관계된다. 3.2절의 해석 결과를 바탕으로 하여 커브피팅(curve fitting) 기법으로 구한 식은 다음과 같고 이를 도시하면 그림 10과 같다.

$$D = 19.8 - 0.67452\phi + 0.00328\phi^2 + 11.3782H - 0.64794\phi H + 0.00932\phi^2 H \quad (15)$$

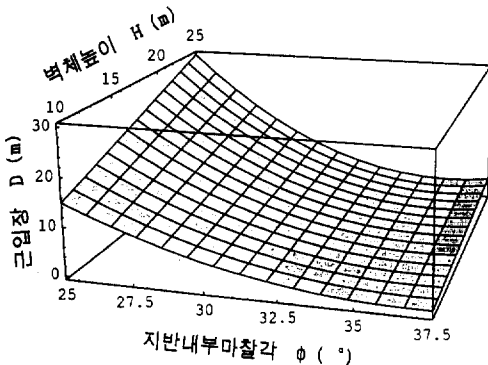


그림 10. 지반의 내부마찰각 및 벽체높이에 따른 소요 근입장.

예를 들어, $\phi = 32^\circ$, $H = 15m$ 인 호안조건에 대해 식 (14) 및 (15)을 이용하면 소요 셀직경 및 근입장은 $Dia_{cell} = 14.72m$, $D = 4.40m$ 가 구해진다.

3.4 소요 강재 중량

그림 9에 제시한 각 지반조건별로 수심에 따른 강판셀의 소요 제원에 대해 호안 1m 조성에 필요한 소요 강재 중량을 계산하여 그림 11에 도시하였다. 그림 11은 각 지반조건별로 가능한 셀 제원 중에서 최대 물량치를 수심에 따라 비교, 도시한 것이다. 강재량의 계산에서는 셀 본체 및 아크셀의 중량과 보강재의 중량을 포함하였으며, 보강재 중량은 각각 셀 본체와 아크셀 중량의 25%로 하였다.

그림 11에서 알 수 있는 바와 같이 수심이 깊은 영역(DL-12.5m 이상)에서 강재량은 수심에 거의 직선적으로 변함을 알 수 있어 대수심 조건에 대해서도 강재량의 증가는 예측이 가능하며, 본 공법이 대수심에 유리함을 알 수 있다.

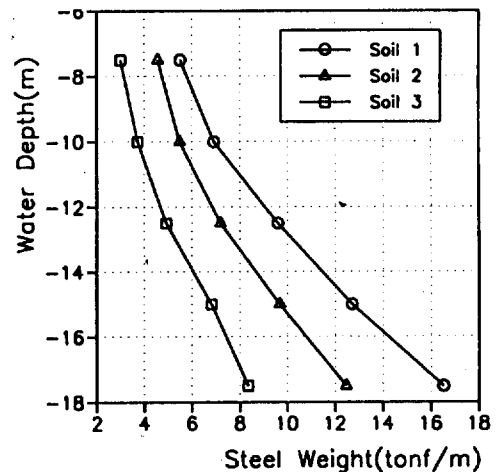


그림 11. 호안 1m 조성에 소요되는 지반조건별 강재량.

4. 진동햄머 소요기진력 및 모형관입 실험

4.1 진동 관입 기준

강판셀 및 아크셀의 관입을 위한 진동햄머의 소요 기진력은 해저지반의 토질조건, 견고한 정도로부터 필요 진폭을 추정하여 총진동중량, 편심모멘트, 기진력 등으로부터 결정되며, 1질점 1자유도 운동방정식으로부터 다음 식을 만족하도록 결정한다.⁽³⁾

$$a = nK_o/Q_o \geq a', \quad nP_o \geq T_V, \quad Q_o > R_d \quad (16)$$

여기서, a 는 진폭(cm), a' 은 소요진폭(3.0 mm 이상)이고 n 은 진동햄머의 대수이다. K_o 및 P_o 는 진동햄머 한 대당 편심모멘트(kgf·cm) 및 기진력(kgf)이고, Q_o 는 총진동중량(kgf)이다. 총진동중량은 강판셀, 진동햄머, 그리고 진동햄머의 기진력을 강판셀에 전달하는 베이스링 등으로 이루어진다. 한편, T_V 는 셀 근입부의 주면동마찰력(kgf)으로 다음 식으로 정의된다.

$$T_V = \mu_s \cdot \Sigma \frac{\bar{N}}{50} \cdot L_s \cdot A_s + \mu_c \cdot \Sigma c \cdot L_c \cdot A_s \quad (17)$$

여기서, μ_s , μ_c 는 사질토, 점성토의 진동가속도에 의한 마찰력의 저감률으로서 실험으로부터 추정된 값은 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$\begin{aligned} \mu_s &= 0.05 + 0.95 e^{-0.77\eta} \quad (\text{사질토}) \\ \mu_c &= 0.13 + 0.87 e^{-0.77\eta} \quad (\text{점성토}) \quad (18) \\ \eta &= n \cdot P_o / Q_o \end{aligned}$$

식 (17)에서 L_s , L_c 는 각각 사질토, 점성토의 근입층 두께(cm)이고, \bar{N} 및 c 는 사질지반의 평균 N 치 및 점성지반의 점착력이며, A_s 는 셀각의 주면적(내외 양면 : cm^2/cm)이다. 한편, 식 (16)에서 R_d 는 셀 관입시의 선단저항력(kgf)으로서 다음과 같다.

$$R_d = \alpha \cdot N \cdot A_p \cdot e^{-0.0652\sqrt{T}} \quad (19)$$

여기서, α 는 지지력계수(사질토 : 4, 점성토 : 8), N 은 셀 선단의 N 치, A_p 는 셀 선단면적(cm^2), T 는 진동햄머의 역적(= $nK_o\omega/g$), ω 는 각속도(rad/sec), $e^{-0.0652\sqrt{T}}$ 는 동선단저항저감율, g 는 중력가속도이다.

4.2 모형 실험 및 소요 기진력 산정

본 연구에서는 참고문헌 3 및 8에서 제시한 진동관입 기준의 타당성을 확인하기 위해 모형 관입시험을 수행하였다. 강판셀 모형의 재원은 직경 1.0m, 높이 1.2m, 판 두께 3.2mm이고 진동햄머는 편심모멘트 20 kgf·cm, 각속도(ω) 120 rad/sec, 기진력 300 kgf인 진동햄머 4대를 제작하였다. 진동햄머, 베이스링 및 강판셀로 구성되는 총 진동중량은 약 600 kgf이다. 모형실험에서 지반의 N 값이 10일 때 식 (16)은 다음과 같이 계산되며 소요진폭과 총중량이 부족함을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} a &= 1.3 \text{ mm} < a' = 3.0 \text{ mm}, \\ nP_o &= 1,200 \text{ kgf} > T_V = 940 \text{ kgf}, \\ Q_o &= 600 \text{ kgf} < R_d = 1,500 \text{ kgf} \end{aligned}$$

이는 축소 모형 설계시 소요 진폭의 만족을 위해서는 셀 모형에 비해 진동햄머 모형이 지나치게 크게 되었기 때문이다. 그러나 사진 1에서 알 수 있듯이 강판셀 모형은 약 30 cm 관입이 가능하였다.

그림 9(d)에서 제시한 재원의 강판셀 관입을 위해 지반조건 별로 필요한 진동햄머 소요 기진력을 산정하여 그림 12에 제시하였다. 그림 12는 각 지반조건에 대해 최대 소요기진력을 비교한 것으로서 지반의 N 치가 30 이하로 매우 단단한 지반이 아니라면 진동햄머의 소요기진력은 총진동중량에 거의 비례함을 알 수 있다.



사진 1. 모형 셀 관입 시험 장면

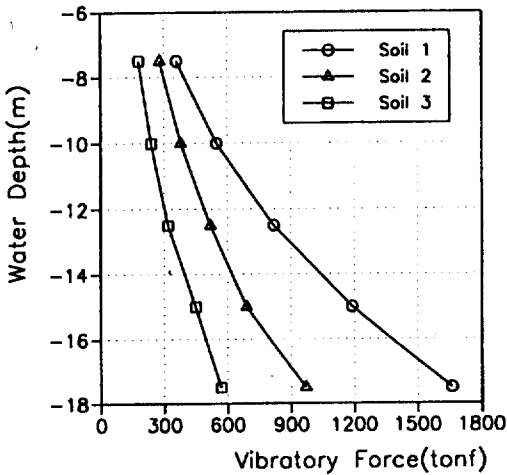


그림 12. 진동햄머 소요기진력

5. 결 론

본 연구에서는 향후 항만 시설물의 건설 수요가 지속적으로 발생하고 있는 시점에서 종래의 방법에 비해 급속 시공, 경제성의 확보, 건설시 해양 오염의 최소화와 더불어 점차 대수심화되어 가는 입지 조건에 적합한 근입식 강판셀

공법의 표준설계절차를 제안하고 최적제원의 결정 방안을 제시하였다. 본 연구의 수행 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 국내의 설계 기준 및 실험 연구 결과를 토대로 근입식 강판셀 구조의 국내 설계표준화 절차를 구축하고, 효율적인 설계를 위한 전산 프로그램 EMCELL을 개발하였다.

2) 개발된 프로그램을 사용하여 N치 30 이하의 사질토 지반조건에 대해 DL-7.5m ~ DL-17.5m 까지의 수심 조건에서 적정 셀 제원을 결정할 수 있는 일반식을 제시하였다. 점성토 지반의 경우에는 샌드 컴팩션 파일 공법 등으로 지반개량을 실시하고 등가 사질토 지반정수를 구한 후 본 연구에서 제시한 제원을 채택할 수 있다.

3) 셀 근입을 위한 진동햄머 소요기진력 산출식의 타당성을 확인하기 위한 모형실험을 수행하였다. 제한적인 실험결과로 타당성 여부를 판정하는 것은 무리이지만 강판셀의 근입을 위해 지반조건 및 셀 제원에 따른 진동햄머의 소요 출력을 결정하여 제시하였다. 소요출력의 결정은 지반의 N치 30 이하인 경우에 총진동중량이 지배 변수가 됨을 알 수 있었다.

최적 강판셀의 제원은 조수간만차, 지반조건, 속채움 및 뒷채움재의 성질 등에 따라 결정되어야 하지만 초기 제원 및 이의 관입을 위한 진동햄머의 개략적인 소요 기진력 산정은 본 연구에서 제안한 결과를 활용하여 결정 가능하다. 한편, 본 연구에서는 주로 호안구조물에 대해 수행하였으나 방파제 구조에도 준용이 가능하다.

참 고 문 헌

- (1) 해운항만청: 1993, 항만시설물 설계기준서
- (2) 건설교통부: 1996 도로교 표준시방서
- (3) 根入れ式鋼板セル協會: 1990, 根入れ式鋼板セル工法(設計・施工マニュアル)

- (4) 土質工學會: 1987, 土と基礎實用數式・圖表の解説
- (5) 北島昭一, 上部達生: 1979, 矢板岸壁地震時被災の分析, 運輸省港灣技術研究所報告, 제18권, 제1호, pp.67-127
- (6) 伊藤義博, 飯村修, 後藤雅行, 城江利彦, 飯田毅: 1982, 根入れ式鋼板セルの施工について, 住友金屬, Vol. 34, No. 2, pp.93-105
- (7) 中山種清, 高瀬辛紀, 才村辛生, 森本精洋, 三好博嗣: 1982, 根入れ式鋼板セルの靜的舉動と設計法, 住友金屬, Vol.34, No.2, pp.67-92
- (8) 高正俊郎, 今野建太郎, 狹野秀雄, 中村正邦: 1990, セル體の振動貫入に関する研究, 土木學會論文集 第 415號, pp.53-62

(접수일자 : 1999년 1월 27일)