

대형 뉴매틱케이슨의 주면마찰력 산정

Evaluation of Skin Friction to Large Size Pneumatic Caissons

홍 원 표¹ Hong, Won-Pyo
여 규 권² Yea, Geu-Guwen
김 태 형³ Kim, Tae-Hyung

Abstract

In this study, skin friction evaluation methods developed for deep foundation system were investigated and a method that can properly evaluate the skin friction of large size pneumatic caisson was proposed. Especially, based on Hong Won-Pyo's method, new technique (Kn parameter method) was suggested for estimation of the skin friction. The λ method used widely to pile foundation was also investigated for the applicability of estimation of the skin friction of large size pneumatic caisson. To do this, the data measured from the pneumatic caissons installed as a substructure of main tower in the suspension bridge part of Youngjong Grand Bridge were utilized. The data show that the skin friction is proportional to the rate of sinking, and the skin friction distribution with depth is similar to parabolic type rather straight line, which is a type generally observed in pile foundation. The skin frictions predicted by the Kn and λ methods were plotted with the measured data for comparisons. It is clearly shown that the skin frictions estimated by the proposed Kn parameter method are well matched with the measured data. That is, for the large size pneumatic caisson having wide base, the new technique developed from Hong Won-Pyo's method is more suitable for estimation of the skin friction rather than the λ method.

요 지

본 연구에서는 현재까지 연구된 깊은 기초의 주면마찰력 산정법에 의해 제안된 방법들을 검토하여 대형기초인 케이슨(우물통)기초에 대하여 주면마찰력을 적절히 산정할 수 있는 산정법을 제시하였다. 특히 홍원표(1987)가 제안한 주면마찰력 산정법을 기본 토대로 하여 새로운 주면마찰력 산정방법(Kn계수법)을 제시하였다. 그리고 깊은기초인 말뚝의 주면마찰력을 합리적으로 산정할 수 있다고 알려진 λ 법을 이용한 케이슨의 주면마찰력 산정에 대해서도 검토하였다. 이를 위해 영종대교 주탑하부구조인 뉴매틱케이슨 기초의 시공시 계측된 주면마찰력 데이터를 이용하였다. 주면마찰력은 침설속도에 비례하며 주면마찰력의 분포양상은 직선분포보다 포물선분포에 가깝다. 저부가 확대되는 대규모 케이슨기초 침설시 발생하는 주면마찰력 산정결과 일반적인 말뚝기초의 주면마찰력과는 상이하다. 제안된 Kn계수법과 λ 법을 각각 사용하여 산정한 케이슨의 주면마찰력을 실제 케이슨의 계측값으로부터 산정한 주면마찰력과 비교한 결과, Kn계수법을 이용하여 산정한 케이슨의 주면마찰력은 λ 법에 의해 산정된 주면마찰력보다 실측값에 훨씬 근접하다. 즉, 저부가 확대된 형상의 대형의 케이슨기초의 주면마찰력을 산정하기에는 홍원표가 제안한 식을 이용한 Kn계수법이 λ 법보다 더 적절한 방법임을 알 수 있다.

1 정회원, 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수 (Member, Prof. Dept. of Civ. and Environ. Engrg., Chung-Ang Univ.)

2 정회원, 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 박사과정수료 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil & Environ. Engrg., Chung-Ang Univ.)

3 정회원, 한국해양대학교 공과대학 토목환경시스템공학부 전임강사 (Member, Full Time Instructor, Division of Civ. and Environ. System Engrg., Korea Maritime Univ., kth67399@hotmail.com)

1. 서론

최근 장대교량공사에서 상부의 대규모 하중을 지지하기 위하여 하부구조로 케이슨(우물통)기초의 시공이 증대되고 있다. 케이슨 기초공법은 해상 및 육상공사에서 견고한 지지층에 기초를 착저하거나 근입시키기 위하여 인력 및 기계굴착으로 소요심도까지 침설시키는 공법이다.

케이슨 시공성 검토시 형상과 치수가 하중규모와 지반조건등에 의해 결정되면 침하관계도를 작성하여 침설작업에 지장이 있는지 여부를 예측할 필요가 있다(도로교 설계기준 해설, 2001). 즉, 자중에 의한 침설이 가능한지, 추가하중 또는 보조공법이 필요한지 검토가 시공전에 선행되어야 한다. 이는 기초공사비용 굴착침하공정이 차지하는 공사비의 비중이 60~80%로 크기 때문이다. 그러므로 침하관계도를 작성하기 위하여 케이슨 구체의 중량, 양압력 및 침하저항력 등에 대한 정량적인 평가가 이루어져야 한다. 하지만 이중에서 침하저항력의 정확한 산정이 어려운 실정이다.

케이슨의 연직방향 설계 허용지지력 산정시 연직하중은 케이슨 저면 지반의 연직 지반반력만으로 저항하는 것으로 한다. 케이슨 기초의 주변지반이 양질이어서 케이슨 시공에 의한 교란이 작은 경우에는 주변지반에 의한 마찰저항력을 고려할 수 있다고 “도로교 설계기준 해설”에 제시되어 있다. 이 기준에 제시되어있는 주변마찰력은 기존 산정식과 비교할 때 지층의 비배수전단강도 및 유효연직압등에 대한 역학적인 특성이 고려되어 있지 않고, 단지 점성토, 사질토 및 모래자갈층에 대한 심도만 고려하여 단위주면마찰력을 제시하고 있다.

본 연구에서는 현재까지 연구된 주변마찰력 산정법(α 법, β 법, λ 법, 홍원표 제안식)에 의해 제안된 주변마찰력 산정법을 검토하여 대형기초인 케이슨기초에 대하여 주변마찰력을 적절히 산정할 수 있는 산정법에 대한 연구를 실시하였다. 특히 홍원표(1987)가 제안한 주변마찰력 산정법을 기본 토대로 하여 새로운 주변마찰력 산정방법을 제시하였다. 그리고 깊은기초인 말뚝의 주변마찰력을 가장 합리적으로 산정할 수 있다고 알려진 λ 법이 대형의 케이슨기초의 주변마찰력을 산정하는데 적절한 방법인가에 대해서도 검토되었다. 이를 위해 우리나라에서 최초로 시공된 무인 기계굴착 뉴메틱 케이슨 기초시공에서 실측된 현장계측자료를 이용하였다.

2. 주변마찰력 산정

깊은기초에서 극한지지력(Q_u)는 일반적으로 선단지지력과 주변마찰력의 합으로 나타낸다.

$$Q_u = Q_{su} + Q_{bu} - W \quad (1)$$

여기서, Q_{su} : 주변마찰력
 Q_{bu} : 선단지지력
 W : 말뚝의 자중

식 (1)에서 주변마찰력(Q_{su})은 Coulomb의 공식을 사용하여 흙과 말뚝사이의 전단강도(τ_a)를 말뚝길이에 대해 적분하여 다음과 같이 구한다.

$$Q_{su} = \int_0^L u \cdot \tau_a dz \quad (2)$$

$$= \int_0^L u \cdot (c_a + \sigma_v \cdot K_s \cdot \tan \phi_a) dz$$

여기서 c_a : 말뚝과 지반사이의 부착력
 σ_v : 지중연직응력
 ϕ_a : 말뚝과 지반사이의 마찰력
 K_s : 토압계수
 u : 말뚝의 주상
 L : 말뚝의 길이

그러나 점토지반의 경우 내부마찰각(ϕ)과 벽면마찰각(ϕ_a)을 영으로 보면 식 (2)는 다음과 같이 수정된다.

$$Q_{su} = \int_0^L u \cdot c_a dz \quad (3)$$

여기서 점토의 부착력(c_a)은 말뚝의 단위주면마찰력(f_s)과 같으므로 식 (3)의 말뚝의 마찰저항력을 계산하기 위해서는 말뚝의 단위주면마찰력(f_s)을 결정하여야 한다. 말뚝의 단위주면마찰력(f_s)를 결정하기 위하여 사용하는 방법으로 지반의 비배수 전단강도나 유효연직압 또는 둘 다를 이용하여 산정하는 방법이 있다. 특히, α 법, β 법, λ 법과 본 논문의 중점 연구 과제인 홍원표(1987) 제안식 등이 있다.

(1) α 법

Tomlinson(1971)은 말뚝을 0.5kg/cm^2 이상의 비배수 전단강도를 가지는 견고한 점토지반에 설치할 때 말뚝사이의 마찰저항을 규명하기 위하여 지반의 층상에 따라 세 가지 경우로 나누어 말뚝의 관입길리와 직경의

표 1. 견고하거나 아주견고한 점성토에 향타된 말뚝의 부착계수(Tomlinson, 1971)

분 류	지반조건	관입비, PR ^{*1}	부착계수, a
1	견고하거나 아주견고한 점성토위에 놓인 모래나 모래질 자갈	<20 >20	1.25 그래프 사용 ^{*2}
2	견고하거나 아주견고한 점성토위에 놓인 연약한 점토 및 실트	8 < PR ≤ 20 >20	0.40 그래프 사용 ^{*2}
3	전체층이 견고하거나 아주견고한 점성토	8 < PR ≤ 20 >20	0.40 그래프 사용 ^{*2}

*1) PR = 점성토에 관입된 말뚝길이 / 말뚝직경

*2) 참조 : 참고문헌 7

비를 고려하면서 지반의 비배수전단강도로부터 마찰저항력(f_s)을 산출하는 방법을 다음과 같이 제안하였다.

$$f_s = a \cdot c_u \quad (4)$$

여기서, a : 말뚝과 점성토 사이의 부착계수

c_u : 비배수전단강도

Tomlinson에 의해 보고된 부착계수 a 는 지반의 층상 및 관입비에 따라 세 가지로 분류하였고 그 값은 표 1과 같다.

(2) β 법

많은 연구기관에서 현존하는 자료의 재분석과 더 많은 최근의 시험자료를 보충하여 유효연직압을 매개변수로 하는 새로운 지지력 산정법을 제안하였다. 이는 말뚝을 지반에 관입시킬때 말뚝 향타로 인해 주변 지반이 심하게 교란되어 지반속에 과잉간극수압이 발생하게 되며, 이 과잉간극수압은 말뚝시공이 끝나면 시간과 함께 점차 소멸되어 원지반은 정상적으로 압밀되기 때문이다.

그러나, 흐트러진 말뚝주변 지반이 본래의 압력 상태로 되돌아가더라도 말뚝 근처의 지반은 과압밀되어 말뚝표면이나 그 근처지반의 비배수전단강도는 원래지반의 비배수 전단강도와는 달라지게 된다. 그러므로 주변 마찰저항은 유효연직응력에 의해 다루어져야 한다는 이론이다.

Burland(1973)는 기존의 주변마찰력 산정방법들의 상대오차를 최소화하기 위하여 유효응력으로 표현되는 점성토와 사질토에 적용가능한 주변마찰력 공식을 다음과 같이 제안하였다.

$$f_s = K_s q' \tan \delta \quad (5)$$

여기서, K_s : 수평토압계수로 K_0 가 보통 사용

q' : 유효상재하중

δ : 지반과 말뚝사이의 마찰각

식 (5)에서 $K_s \tan \delta$ 를 합쳐서 β 로 나타내면 식 (5)는 식 (6)과 같이 쓸 수 있다.

$$f_s = \beta q' \quad (6)$$

유효응력원리를 사용하는 이 방법은 말뚝향타시 주변지반의 교란으로 발생하는 과잉간극수압이 재하시험이나 설계하중이 작용할 시점에는 말뚝 주변에서 거의 소산된다는 가정에 근거한 해석법이다. 일반적으로 K_0 값과 $\delta = \phi'$ 적용시 β 값은 0.25~0.40 범위에 있다.

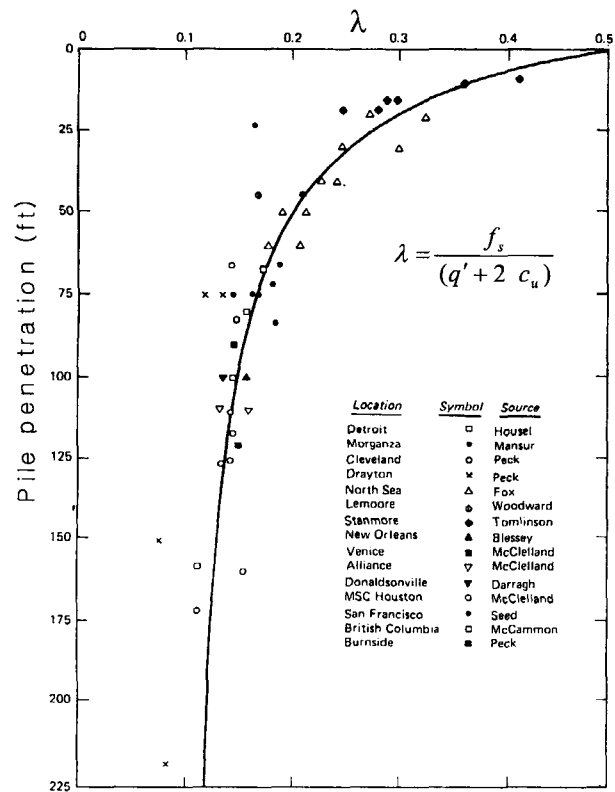


그림 1. 관입깊이에 따른 λ 값

(3) λ 법

Vijayvergiya와 Focht(1972)는 점토지반에서 말뚝의 주변마찰저항력을 계산하기 위하여 다음과 같은 식(7)을 제안하였다.

$$f_s = \lambda(q' + 2c_u) \quad (7)$$

여기서, λ : 무차원계수

이 방법은 유효응력과 비배수전단강도를 고려한 것으로 해양 점성토에 관입된 강관말뚝의 시험결과를 분석하여서 만든 것이다. λ는 말뚝의 근입깊이에 관계되는 것으로서 Vijayvergiya와 Focht가 수많은 말뚝시험자료로부터 회귀분석해서 도식한 그림 1로부터 구할 수 있다.

그림 1에 의하면 λ 값은 말뚝길이, 말뚝직경, 토질 등에 관계하지 않고 깊이방향에 대해 하나의 곡선으로 주어지고 있음을 알 수 있다.

(4) 홍원표(1987) 제안식

Vijayvergiya와 Focht(1972)는 일명 λ 법을 제안하여 비배수전단강도와 유효연직압을 모두 고려한 주변마찰력 산정법을 제시하였다. 홍원표(1987, 1999)은 비배수전단강도와 유효연직압을 모두 고려한 점토의 주변마찰저항 산정식을 점토의 압밀이력에 따라 구분하여 세

로운 산정방법을 제시하였다.

홍원표 등(1987)에 의해 이미 확인된 주변마찰력 산정법을 기본토대로 하여 케이슨의 침설시 발생하는 주변마찰력 산정식을 다음과 같은 형태로 정의하였다.

$$f_s = Kn\sqrt{(\sigma' \cdot c_u)} \quad (8)$$

여기서, Kn은 침설깊이에 관계되는 마찰계수, σ'는 유효연직압(t/m²), c_u는 지반상태에 따른 비배수전단강도(t/m²)이다. 식 (8)의 Kn는 무차원의 마찰계수로서 침설시 발생하는 주변마찰력, 유효연직응력 및 비배수전단강도에 의해 결정되어진다.

3. 사용자료

3.1 현장시공

본 연구는 2000년 토목학술발표회(홍원표 외 3인, 2000)에서 발표된 “영종대교 주탑 하부구조의 설계와 시공에 대한 연구”에서 현수교 구간 하부 주탑기초공법으로 시공된 뉴매틱케이슨의 시공관리를 위하여 실측된 계측자료를 활용하였다. 케이슨 구조 및 지질주상도는 그림 2와 같으며, 케이슨 계측평면도는 그림 3과 같다. 시추조사는 각 기초 6개소로 총 12곳을 대상으로 실시하였고 지층의 구성상태는 상부로부터 해성퇴적층,

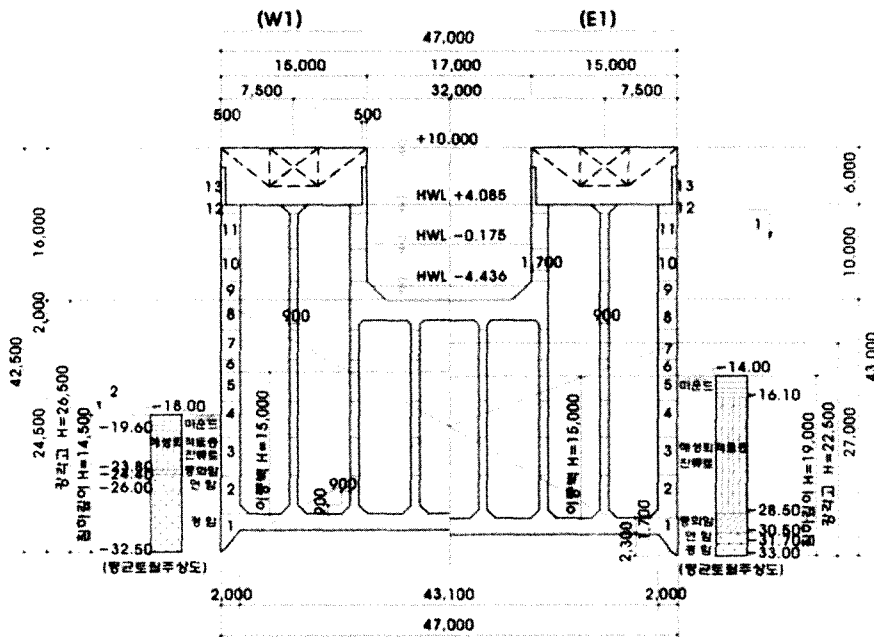


그림 2. 케이슨 구조 및 지질주상도

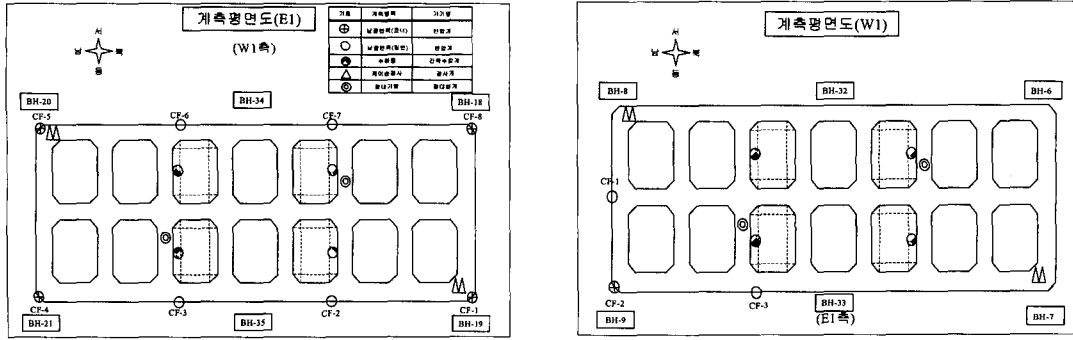


그림 3. 케이스 계측평면도

풍화토, 풍화암 및 기반암의 순으로 분포되어 있다.

해성퇴적층의 분포심도는 교량의 서측(영종도측)방향 케이스 W1지역이 3.0~6.0m, 동측(인천항측)방향 케이스 E1 지역이 7.9~14.4m의 층두께를 나타내고, 풍화토층은 해성퇴적층 하부에 부정합 관계로 피복되어 있으며 층두께는 1.6~4.5m의 범위로 분포한다. 그리고 풍화암층은 풍화토 하부에 약 0.6~8.7m의 층두께를 보이고 있다. 기반암은 W1주탑지역에서 3.0~7.0m, E1주탑지역에서 14.8~19.0m로 나타났다. 따라서, 조사지역의 서측부(영종도측)인 W1주탑지역보다 동측부(인천측)인 E1주탑지역의 기반암이 비교적 깊은 심도에서 나타난다.

본 연구에서 케이스의 제원은 길이18m×폭47m×높이43m(W는 42.5m)로 대형이며 케이스 거치로부터 기초지반 착저, Lot별 콘크리트 타설, 침하굴착 및 최종심도에 근접까지 시공관리 계측을 수행하였다.

계측항목은 자세계측, 외하중계측 및 함내환경계측으로 구분하여 실시하였다. 케이스의 자세계측에 있어 굴착침하시의 현저한 변화는 연직변위와 2개의 수평측 방향의 회전변위이므로 이것만 측정하기로 했다.

케이스에 작용하는 외력은 연직방향의 힘(케이스자중, 수하중, 공기압(부력), 케이스날끝부반력, 케이스주면마찰력)과 수평방향의 힘(수평방향 유효토압, 수압)으로 나누는데 케이스 굴착관리는 연직방향의 힘과 관련이 많으므로 연직방향의 힘만 측정하는 것으로 하였고 케이스자중은 콘크리트 타설 높이로 계산할 수가 있었다. 그리고 함내환경계측은 기압측정에 의해 함내 작업자의 작업환경을 파악 관리하는 것을 목적으로 실시하였다. 또한 케이스주면마찰력은 측정이 어려울 뿐만 아니라 다른 힘들로부터 계산이 가능한 이유로 제외하였다. 따라서 본 케이스 계측에서는 외력측정을 위하여 수하중, 공기압(부력), 날끝부반력의 측정을 실시하였다.

3.2 현장계측결과

본 사례 현장은 케이스 침설시 계측관리는 1997년 9월 10일부터 침설 완료시기인 1998년 4월 3일까지 계측한 결과로 다음과 같다.

3.2.1 지반반력

케이스 날끝부 반압계로 측정된 측정치는 하중이 지반에 작용할 경우 기초와 지반사이의 접지면에 발생하는 지반반력을 의미한다. 이 지반반력은 기초의 강성, 지층종류, 침설속도나 시공조건 및 현장여건에 따라 상이하나, 이 반력을 활용하면 케이스의 접지압의 크기와 분포형태를 결정할 수 있다.

E1, W1 케이스에 설치된 반압계를 이용하여 일반부와 모서리부에서 각각 지반반력 측정하였으며 그 결과는 표 2에 정리하였다. 여기에서 일반부는 그림 3과 같이 모서리부를 제외한 지점에서 측정된 값을 기준으로 한 것으로 E1 케이스의 경우 시추위치 BH-34지점에 대해서 CF-6과 CF-7의 평균치를 적용하였고, 시추위치 BH-35 지점은 CF-3과 CF-2의 평균치를 사용하였다. W1 케이스의 경우, 시추위치 BH-8은 CF-1, 시추위치 BH-33은 CF-3의 값을 사용하였다.

계측결과 표 2에 의하면 해성퇴적토층과 풍화토층에서 모서리부가 일반부보다 날끝부 지반반력의 변화가 큰 것으로 측정되었고, 또한 지반반력은 하부로 갈수록 전반적으로 증가하다가 풍화암층 하부에서는 급격히 감소하였다. 이와 같이 날끝부 반압계에 의해 측정된 지반반력의 증감의 원인은 케이스기초 모서리부에 하중이 집중하는 경향이 있으며, 기초규모가 크므로 침설심도에 따라 선단지층의 연경도 변화가 크고 침설시 편심이 발생하기 때문이다. 그리고 침설초기에는 침설속도가 커서 하부지반으로 내려갈수록 지반반력이 증가하

표 2. 케이슨 지층별 날끝부 지반반력 집계표

(단위:t/m²)

구분	E1 케이슨						W1 케이슨		
	모서리부				일반부		모서리부	일반부	
	BH-18	BH-19	BH-20	BH-21	BH-34	BH-35	BH-9	BH-8	BH-33
점토 혼합모래	22~207	59~75	-	-	-	24~72	94~ 575	46~ 92	48~ 172
실트 혼합모래	42~345	60~370	59~207	6~383	18~119	-	-	-	56~ 65
점성토	-	-	-	-	24~96	28~92	-	-	-
실트	-	127~281	81~148	74~137	-	39~70	-	-	41~167
풍화토	26~356	-	125~174	27~308	19~92	26~123	-	-	-
풍화암	28~42	6~192	30~344	-	13~58	22~43	-	-	50~391
연암	31~42	-	-	10~43	-	22~53	-	-	34~121
경암	30~108	6~86	30~74	9~226	-	18~33	-	-	43~148

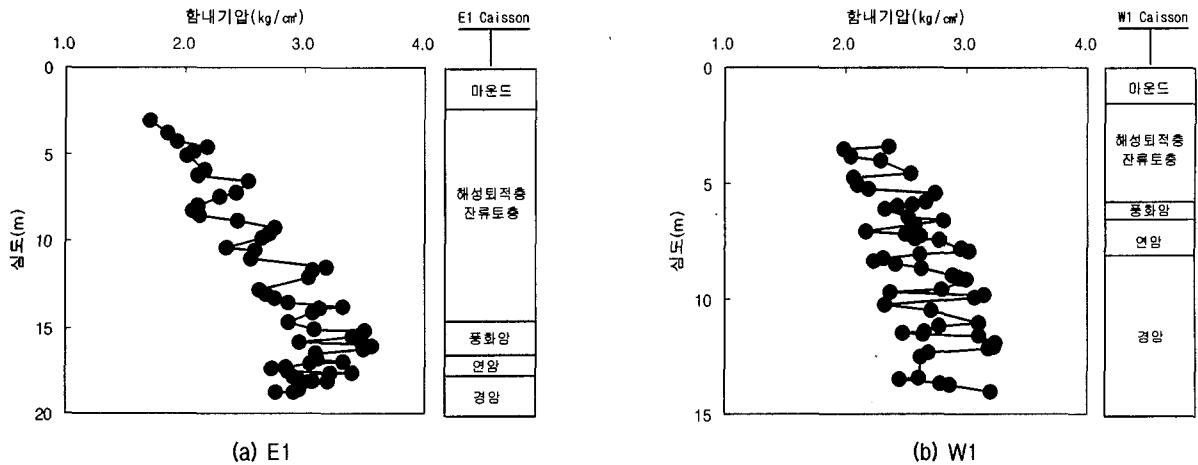


그림 4. 케이슨의 함내기압

나 풍화암층부터는 일반굴착이 이루어지지 않고 날끝부 근처에 천공을 하여 암반을 발파하고 침설속도 또한 작기 때문에 지반반력은 감소하게 된다.

3.2.2 기압

그림 4는 굴착심도에 따른 함내기압의 측정결과를 도시한 결과이다. 함내기압 측정은 케이슨을 2구역으로 분할하여 각각 2개소에 측정장치를 설치하여 심도별 함내기압을 측정하였다. 그리고, 각 지층에서 함내기압의 증감은 본 케이슨기초가 설치되는 서해지역의 조수간만의 차를 반영하고 있다.

그림 4와 같이 함내기압의 실측치는 해수면에서 날끝부까지 전부 물로 가정한 경우 물의 압력을 이론적으로 계산한 이론기압과 같이 선형적으로 증가하지 않는다는 것을 알 수 있다. 즉, 함내기압은 지층의 종류에 따라 발생하는 간극수압의 크기는 토층일 경우 심도의 증가

와 비례하나, 암반층 굴착시 함내기압은 굴착심도보다 절리사이에 존재하는 공극수에 의한 간극수압에 상응하기 때문이다. 그러므로 암반층 구간에서는 간극수압에 의한 함내기압의 증가율은 일반적으로 토층보다 감소한다. E1 케이슨의 함내기압은 풍화암층 이하에서는 일정한 양상을 보이고 있고, W1 케이슨의 함내기압은 풍화암층, 연암층 및 경암층 구간에서 함내기압의 증가량이 다소 둔화된다는 것을 알 수 있다.

3.2.3 수하중

침설시 수하중 제어는 침하축진 및 경사수정등 침하관리상 중요한 사항이다. 수하중은 측정된 계측값을 활용하여 산정하였으며 케이슨의 각 4개소에 설치하여 심도별 간극수압을 측정하였다. 케이슨 굴착시 계측된 수압에서 수두를 구하고 주수량을 계산하였다. 그림 5는 각 굴착심도에 따른 수하중을 도시한 결과이다. 그림

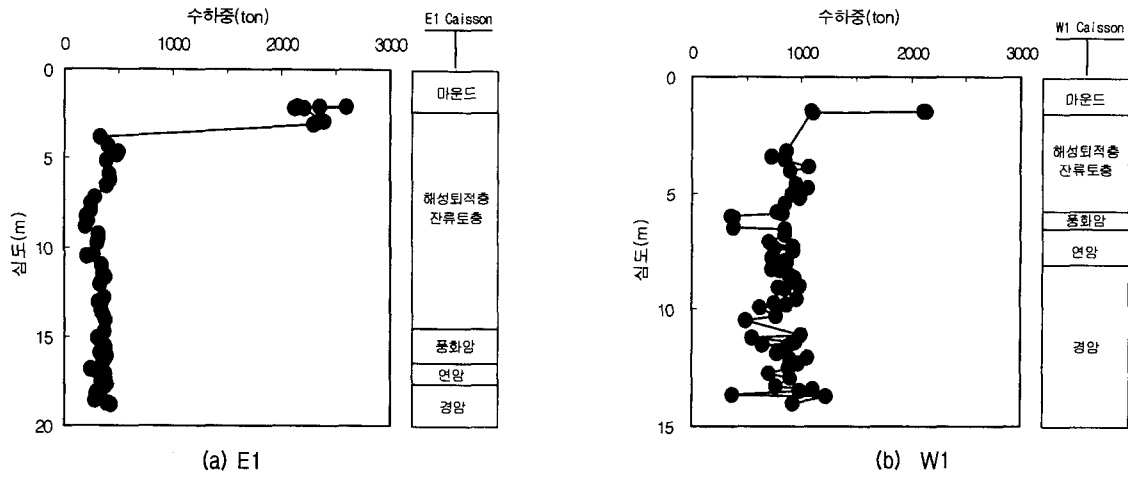


그림 5. 케이슨의 수하중

표 3. 토질정수 값

토 질	지역	실험치	
		W1	E1
해성퇴적토	단위중량 γ (t/m ³)	1.8	1.8
	내부마찰각 ϕ (°)	30	30
	점착력 c (t/m ²)	13.5	11.2
풍화암	단위중량 γ (t/m ³)	2.0	2.0
	내부마찰각 ϕ (°)	30	30
	점착력 c (t/m ²)	15.9	11.9
연암	단위중량 γ (t/m ³)	2.1	2.1
	내부마찰각 ϕ (°)	35	35
	점착력 c (t/m ²)	15.9	11.9
경암	단위중량 γ (t/m ³)	2.2	2.2
	내부마찰각 ϕ (°)	40	40
	점착력 c (t/m ²)	50	50

5(a)는 E1 케이슨 시공중 적용한 수하중을 굴착심도별로 도시한 결과이다. 이 결과에 의하면 마운드 및 해성퇴적층 상부에서는 2200~2600ton의 큰 수하중이 재하되었다가 심도가 깊어짐에 따라 약 500ton 정도의 수하중에서 거의 일정한 상태를 보이고 있다. 즉, 굴착초기에는 케이슨을 침하시키기 위하여 큰 수하중이 필요하였으나 어느 심도 이하에서는 케이슨 자체의 중량이 크므로 상대적으로 적은 수하중으로도 시공이 가능함을 보여주고 있다.

그림 5(b)는 W1 케이슨 시공중 적용한 수하중을 굴착심도별로 도시한 결과로 마운드에서 최고 2200ton의 수하중이 재하되었다가 굴착 심도가 깊어짐에 따라 700~1150ton 범위에서 거의 일정한 상태를 보이고 있다.

4. 고 찰

4.1 주변마찰력 산정

뉴매틱케이슨 침설시 발생하는 주변마찰력은 케이슨의 침하과정에서 발생하는 흡과 케이슨과의 전단저항력이다. 주변마찰력은 침하저항력으로 작용하기 때문에 침하력이 이보다 큰 하중을 갖도록 설계되어야 한다. 그렇지 않으면 케이슨을 침하시키기 위해서 추가하중을 재하하여야 되므로 주변마찰력을 합리적으로 산정할 필요가 있다.

케이슨 침설시 작용하는 외력에는 침설방향에 따라 상향력과 하향력으로 구분할 수 있다. 상향력은 케이슨의 침설을 저항하는 외력으로 합내기압, 날끝부 반력,

주면마찰력이 작용한다. 하향력은 케이슨의 침설방향과 동일한 방향으로 작용하는 외력으로써 수하중과 케이슨본체의 구체자중이 있다.

본 현장에서는 뉴매틱케이슨의 침설시 발생하는 주면마찰력을 산정하기 위하여 케이슨 침설시 작용하는 상향력과 하향력을 각각 구분하여 측정하였다. 즉, 상향력으로 작용하는 함내기압과 날끝부반력을 절대압계와 반압계에 의하여 실측하였으며, 하향력으로 작용하는 수하중은 간극수압계로 측정하였다. 케이슨본체의 구체자중은 콘크리트 타설높이로 계산할 수 있다.

케이슨의 침하는 침설방향과 동일한 방향으로 작용하는 하향력이 상향력 보다 클 경우에 발생한다. 즉 케이슨 $[구체자중+수하중] \geq [함내기압+날끝지력+주면마찰력]$ 의 조건일 경우 침설은 발생하며, 이 조건을 이용하면 케이슨 침설시 발생하는 주면마찰력을 산정할 수 있다. 주면마찰력의 계산시 이용된 계측치는 1일 단위로 케이슨의 침설과정에 따라 측정하였다. 표 3은 주면마찰력산정을 위하여 필요한 지층별 점착력과 단위중량을 정리한 것이다.

4.2 산정된 주면마찰력의 분포

4.1절에서 설명한 뉴매틱케이슨의 침설시 발생하는 주면마찰력의 산정방법을 이용하여 케이슨의 초기 침설단계부터 침설 완료시점까지의 주면마찰력을 산정하였다.

그림 6은 종축을 심도, 횡축을 케이슨이 침설되는 동안 임의의 심도에 대해 침하저항력으로 작용하는 주면마찰력의 분포를 E1, W1케이슨에 대해 각각 나타낸 것이다. 여기서, 주면마찰력계산시 케이슨이 마운드공에 착저하여 초기침하를 실시할 때까지의 주면마찰력은 계산에서 제외시켰다. 이는 케이슨이 마운드공에 착저시 굴착작업을 위한 기계의 설치 및 계측기의 설치등으로 인한 작업의 지연과 파압등으로 인한 케이슨의 경사등으로 인해 계측값의 신뢰도가 낮기 때문이다.

E1 케이슨의 경우 침하저항력으로 작용하는 주면마찰력이 토사층, 풍화암, 연암 및 경암에서 발생하는 비율은 11.61:2.20:1.37:1이다. W1케이슨의 경우에는 침하저항력으로 작용하는 주면마찰력이 토사층, 풍화암, 연암 및 경암에서 발생하는 비율은 4.89:2.70:1.91:1로 나타났다.

그림 6과 같이 주면마찰력은 케이슨 침설에 따라 토

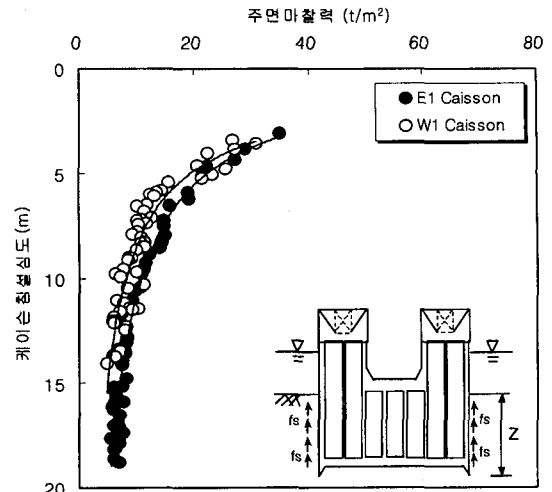


그림 6. 케이슨의 심도에 따른 주면마찰력

사층에서 가장 큰 값을 나타내고 풍화암, 연암 및 경암으로 침설이 진행됨에 따라 주면마찰력은 약간 감소하다가 기반암 구간에서는 일정해진다는 사실을 알 수 있다. 주면마찰력의 분포양상은 직선분포보다 포물선분포에 근접한다는 사실 또한 알 수 있다. 즉, 깊은기초로 분류되는 말뚝기초는 말뚝을 관입시 주면마찰력이 증가하거나 혹은 일정해 진다(Vesic, 1997)는 것과 상이하다는 것을 분명히 알 수 있다.

본 현장에서 시공된 뉴매틱케이슨의 경우는 말뚝기초와 형태가 다르다. 케이슨은 저부가 확대되어 있어 침설시 해성퇴적층 주위지반을 교란시키고, 기반암 구간에서도 천공 및 발파작업 등을 실시하여 암과 케이슨벽체의 마찰을 제거시켰다. 이것은 케이슨이 지반에 관입시 하단부가 지반과의 전단저항력을 없애주는 효과를 가져온다. 또한 케이슨 선단부는 침설시 마찰저항력을 감소하기위하여 구체보다 직경이 확대된 Friction Cut을 설치하였다. 그래서 초기에는 케이슨 구체 외주면과 주면지반에 공극이 발생되나 침설이 진행됨에 따라 상부해성퇴적층이 케이슨 주면부에서 재성형되어 부착되므로 마찰저항효과를 가져오게 된다. 하지만 하부지층으로 내려갈수록 지반 강성이 증가되어 선단저항력에 의한 상부하중 분담효과가 증가되어 상대적으로 주면마찰저항력의 분담률은 감소한다. 그래서 케이슨 최종침설시 주면마찰력이 포물선 형태로 감소하는 경향을 보인다. 본 현장에서 약 7개월 동안 케이슨기초 굴착침하공정이 실시되었다. 일반적인 깊은기초는 거의 하루만에 시공이 완료되므로 시공속도에 대한 주면마찰거동특성에 대한 연구는 의미가 없으나 실제 뉴매틱케이슨

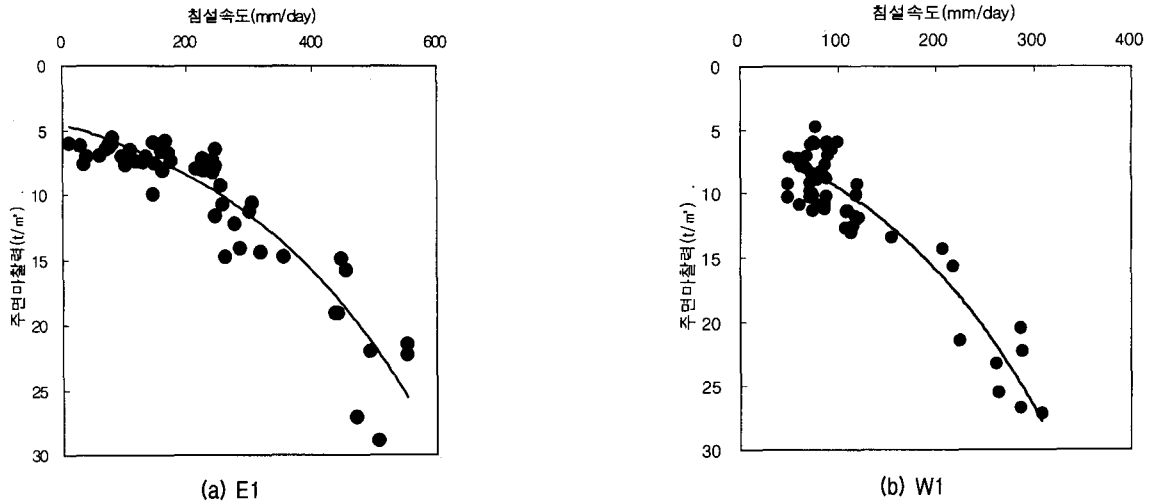


그림 7. 케이슨의 침설속도에 따른 주면마찰력

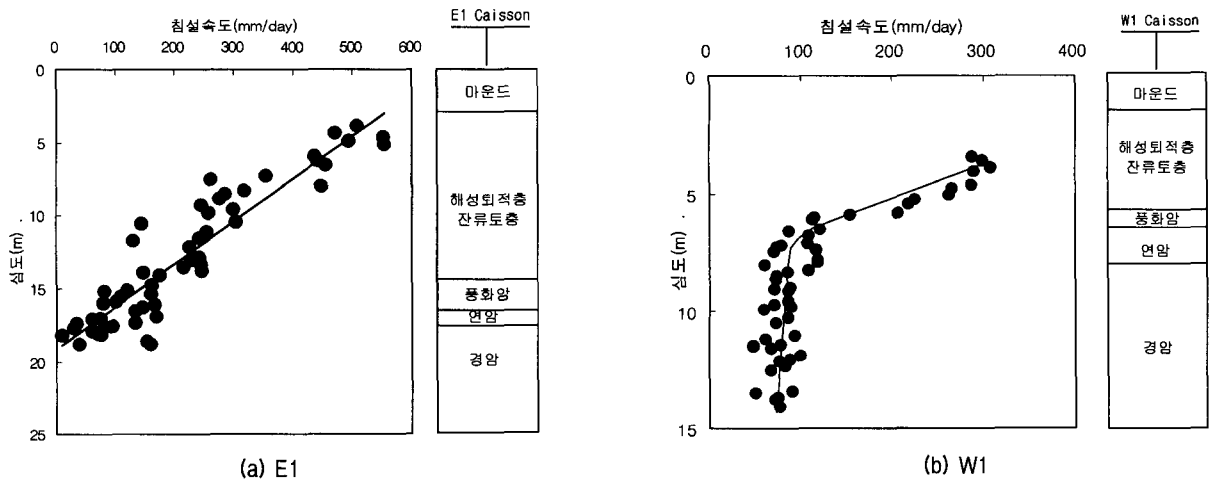


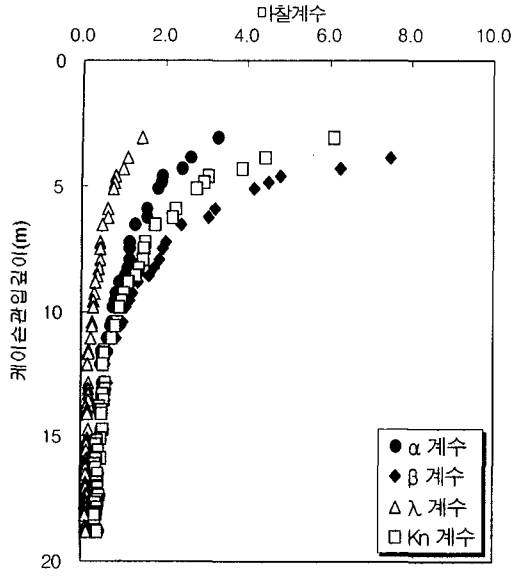
그림 8. 케이슨 심도에 따른 침설속도

기초 또는 우물통기초같은 대형기초 시공시 다층지반을 대상으로 하고 있고 대부분 연암이상 지반에 선단부를 근입시키고 있으므로, 계획 소요심도까지 침설시키기 위하여 장기간이 요구된다. 그러므로 침설속도와 침설심도에 의한 주면마찰력의 거동특성을 연구하기 위하여 그림 7과 그림 8은 E1 케이슨과 W1 케이슨의 침설속도와 주면마찰력과 침설심도와 주면마찰력의관계를 도시하였다. E1 및 W1 케이슨의 경우 침설속도가 클수록 주면마찰력은 크게 발휘되고, 침설속도는 침설심도가 깊어질수록 작아지는 것을 알 수 있다. 침설속도는 해성퇴적층 구간에서 굴착이 용이하여 침설이 빠르게 진행되고, 기반암층에서는 발파작업등으로 침설속도가 작게 나타나고 있다. W1 케이슨의 경우 암반의 출현심도가 E1 케이슨에 비해 상당히 빨리 나타나기 때문에 침설속도가 저하되고 있다.

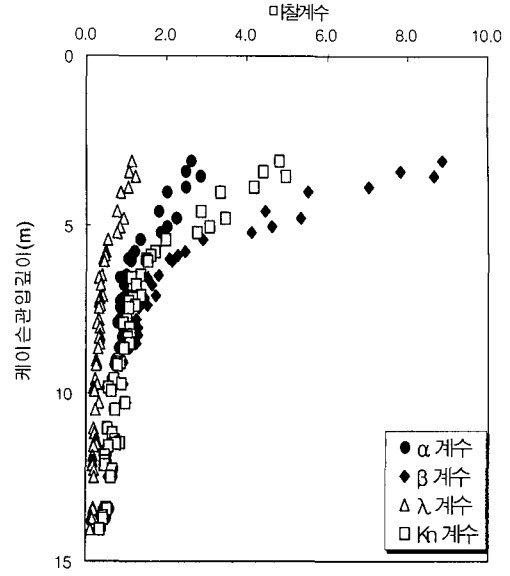
4.3 마찰계수 산정 및 비교

그림 9(a), (b)는 E1 케이슨과 W1 케이슨 침설시 현장 측정결과로부터 산정된 주면마찰력(그림 6)과 Tomlinson의 비배수전단강도를 이용한 식 (4)의 α 법, Burland의 유효응력을 사용한 식 (6)의 β 법, 혼합법인 Vijayvergiya와 Focht의 식 (7)의 λ 법과 본 논문의 중점 연구과제인 홍원표(1987) 제안된 식 (8)의 Kn계수법등의 각 방법에 의한 마찰계수를 E1과 W1 케이슨에 대하여 계산한 결과이다.

산정된 마찰계수(α 법, β 법, λ 법과 Kn계수법)와 심도와의 상관성을 분석한 결과이다. 4가지 방법 모두 다 지층의 종류와 상관없이 케이슨 침설심도에 따라 비선형적으로 감소하다가 하부로 내려갈수록 거의 일정한 값으로 수렴됨을 알 수 있다. 이러한 분포양상은 그림



(a) E1



(b) W1

그림 9. 관입심도에 따른 실측 계수값의 변화

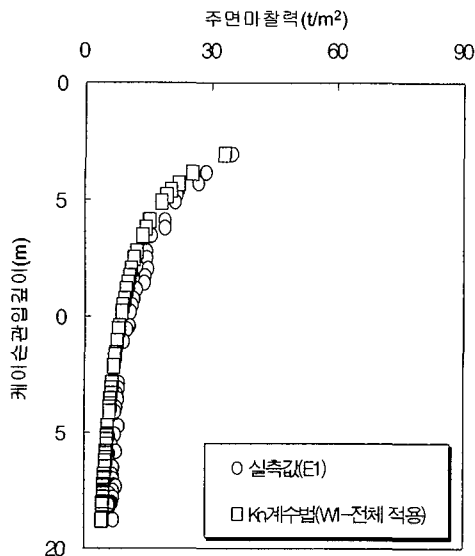


그림 10. W1의 Kn계수를 이용한 E1주면마찰력

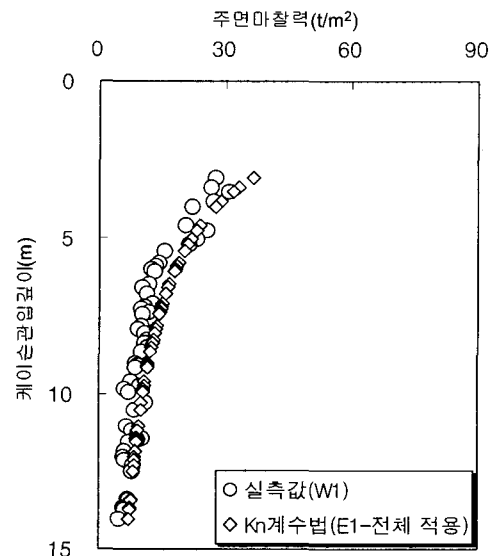


그림 11. E1의 Kn계수를 이용한 W1주면마찰력

1과 같이 관입깊이에 따른 λ 값의 변화와 거의 같은 경향을 나타내는 것으로 케이슨기초의 마찰계수 분포는 지층의 깊이에 영향을 받음을 알 수 있다.

그림 10과 그림 11은 E1과 W1 케이슨기초에서 계측 결과에 의해 산정된 주면마찰력을 근거로하여 산정된 Kn계수(그림 9)의 신뢰성을 확인하기 위하여 W1 케이슨에서 구한 Kn계수를 E1 케이슨 주면 마찰력 산정시 활용하고(그림 10), E1 케이슨에서 구한 Kn계수를 W1 케이슨 주면마찰력 산정에 이용하여(그림 11), 계산된 값을 실측값과 비교하였다. 물론 근접한 지역에 대한 비교 및 적용이라는 한계가 있지만 그림 10과 11에서 볼

수 있듯이 실측값과 계산된 값이 서로 잘 일치하는 것으로 봐서 Kn계수값의 신뢰성을 확인할 수 있다.

따라서 그림 12는 그림 10과 11의 결과를 종합하여 E1, W1 케이슨의 침설심도에 따른 Kn계수값의 나타낸 것이다. 두 케이슨의 Kn계수값을 산정하기 위하여 회귀 분석한 결과 $Kn=36z^{-1.6}$ 의 관계가 있음을 알 수 있었다. 이 결과를 이용하여 4.4절에서 케이슨 관입에 따른 주면마찰력을 산정하여 실측값과 비교하였다.

표 4는 주면마찰력을 산정하는데 있어 지층별 평균 Kn계수값을 제시한 것으로 이는 침설속도와 상관없이 입의 지층에 해당하는 심도별 Kn계수값의 평균치이

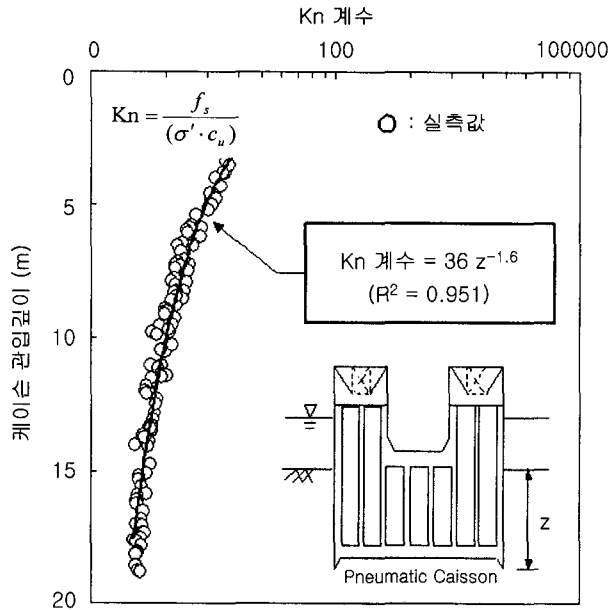


그림 12. E1, W1케이슨의 Kn 계수

다. 평균 Kn계수값을 산정하는데 있어 제한적인 데이터의 한계를 극복하고 평균 Kn계수값의 신뢰성을 높이기 위하여 통계처리법인 Monte Carlo Simulation 기법을 이용하였다. 본 방법은 지층의 각 Kn계수값을 이용하여 평균과 표준편차를 구하고 표준편차 범위내에서 500개의 난수를 발생하여 각 값에 대한 자료를 500개 계산하였다. 그리고 정규분포의 출력치를 평균 표준편차의 형태로 대표치를 산정하였다. 침설심도와 상관없이 임의의 지층에 해당되는 평균 Kn계수값을 사용하여 케이슨 침설속도에 따른 주면마찰력 또한 4.4절에서 실측값, λ 법 및 Kn계수법과 비교하였다.

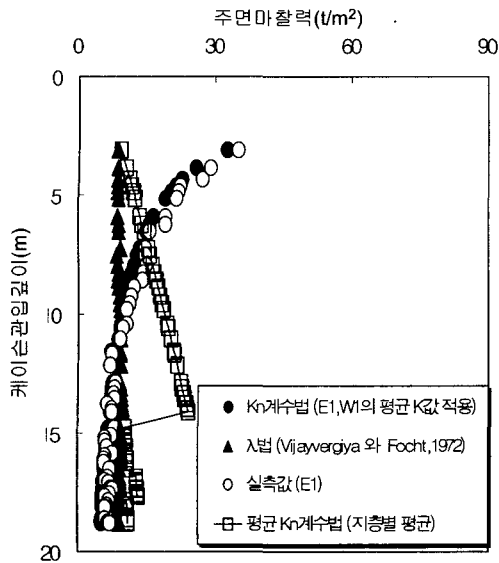
4.4 λ 법, Kn계수법 및 평균 Kn계수법에 의한 주면마찰력 비교

그림 13은 본 연구의 중점과제인 Kn계수법, 지층별 평균 Kn계수법과 현재 가장 많이 이용되고 있는 λ 법을 이용하여 산정한 E1과 W1 케이슨의 주면마찰력과 실제 두 케이슨의 계측값으로부터 산정된 주면마찰력을 함께 도시한 결과이다. 이 결과에 의하면, Kn계수를 이용하여 산정한 각 케이슨의 주면마찰력은 Vijayvergiya와 Focht(1972)가 제안한 λ 법에 의해 산정된 주면마찰력보다 실측값에 훨씬 근접한다는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 9에서 제시된 바와 같이 마찰계수는 심도가 깊어짐에 따라 감소하므로 이에 의하여 주면마찰력 또한 감소하는 결과로 나타났다. 이것은 현재까지 가장 합리적인 주면마찰력 산정법이라고 하는 λ 법이 본 현장과 같은 저부가 확대된 형상의 대형 케이슨기초의 주면마찰력을 산정하기에는 적절한 방법이 아니라는 것을 나타낸다. 그리고 이 결과는 대구경 말뚝재하시험에 의한 하중전이 시험결과 주면마찰력이 심도에 따라 감소하는 것으로 나타난 현장사례 분석결과와 동일하다(최용규, 2002).

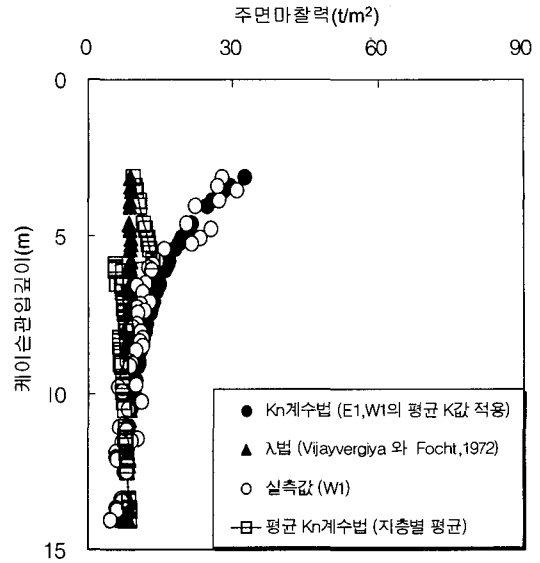
심도와 상관없이 표 4에 제시된 지층별 평균 Kn계수값을 사용하여 주면마찰력을 산정한 결과, 평균 Kn계수법에 대하여 그림 13(a), (b)의 그래프를 분석해보면, 해성퇴적토층의 두께가 얇던 두껍던 상관없이 해성퇴적토층이 존재하면, 깊이에 따라 평균 Kn값은 증가한다. 그러나 이는 지층심도를 고려하지 않고 표 4와 같이 지층에 따른 평균 Kn계수값만을 사용하여 주면마찰력을 산정하면 그 값이 과대평가됨을 보여준다. 실제 계측결과에 의해 산정된 마찰계수는 그림 9에 도시된 바와 같이 심도가 증가할수록 감소하고, 주면마찰력 또한 그림

표 4. Monte Carlo Simulation 기법에 의한 평균 Kn계수값 산정결과

구분	해성퇴적층	풍화암	연암	경암
평균 Kn계수값				
	평균 : 1.61 표준편차 : 0.83	평균 : 0.67 표준편차 : 0.36	평균 : 0.78 표준편차 : 0.36	평균 : 0.63 표준편차 : 0.23

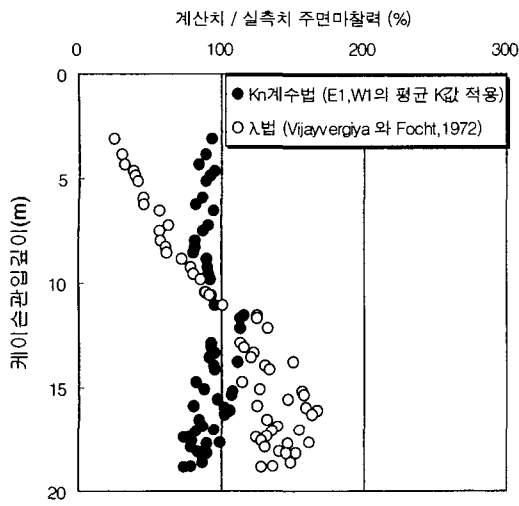


(a) E1

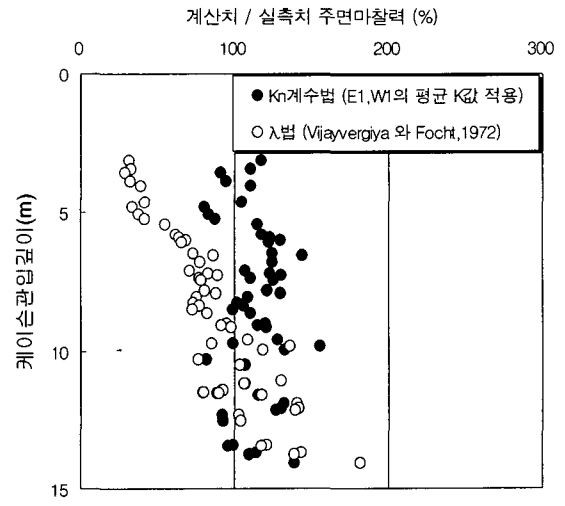


(b) W1

그림 13. Kn계수법, 평균 Kn계수법 및 λ법에 의한 주면마찰력과 실측주면마찰력



(a) E1



(b) W1

그림 14. 케이스의 주면마찰력 빈도곡선

10과 그림 11과 같이 감소한다. 그러므로 그림 13(a)와 같이 평균 Kn계수법을 사용할 경우 해성토적층의 두께가 증가함에 따라 역삼각형의 관계를 나타내며 지지층에서는 일정하게 나타남을 알 수 있었다.

그림 14는 E1, W1 케이스의 주면마찰력 빈도곡선을 Kn계수법과 λ법을 실측주면마찰력에 적용하여 구한 결과이다. 그림 14(a)의 빈도곡선을 살펴보면 λ법에 의한 마찰저항이 30%에서부터 170%까지 상당히 넓게 분포되어 분산도가 크게 나타나고 있지만, 제안된 식(8)은 80~115%사이의 분포를 보이며 특히 90~110%의 사이에서는 높은 빈도를 보여 그 분산도가 λ법과 비교하

여 볼 때 좋음을 알 수 있다. 또한 그림 14(b)의 빈도곡선에 의하면 기존의 λ법에 의한 주면마찰저항이 30%~180%까지 상당히 넓게 분포되어 있다. 반면 제안산정식에 의한 경우는 대부분 85~125%의 범위로 실측치(100% 일때)와 가까워져 있으므로 λ법 보다 제안된 식에 의한 주면마찰저항 산정이 더욱 적합함을 알 수 있다. 따라서, 본 현장과 같이 저부가 확대되고 규모가 큰 케이스의 침설시 발생하는 주면마찰력 산정은 홍원표(1987)가 제시한 산정식(식 (8))과 4.3절에 제안된 산정방법을 이용하여 구하는 것이 가장 합리적이다 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 홍원표(1987)가 제안한 주면마찰력 산정법을 기본 토대로 하여 대형의 케이슨기초에 대한 새로운 주면마찰력 산정방법(Kn계수법)을 제시하였다. 그리고 깊은기초인 말뚝의 주면마찰력을 가장 합리적으로 산정할 수 있다고 알려진 λ 법이 대형의 케이슨기초의 주면마찰력을 산정하는데 적절한 방법인가에 대해서도 검토되었다. 이를 위해 영종대교 주탑하부구조인 뉴매틱케이슨 기초의 시공시 계측된 주면마찰력 데이터를 이용하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 주면마찰력은 침설속도에 비례하며 주면마찰력의 분포양상은 직선분포보다 포물선분포에 가깝다.
- (2) 제안된 Kn계수법과 λ 법을 각각 사용하여 산정한 케이슨의 주면마찰력을 실제 케이슨의 계측값으로부터 산정한 주면마찰력과 비교한 결과, Kn계수법을 이용하여 산정한 각 케이슨의 주면마찰력은 Vijayvergiya와 Focht(1972)가 제안한 λ 법에 의해 산정된 주면마찰력보다 실측값에 훨씬 근접하다. 케이슨의 주면마찰력 빈도곡선 비교 결과 또한, λ 법에 의한 마찰저항의 분산도가 제안된 Kn계수법을 이용한 것보다 훨씬 크게 나타났다. 즉, 저부가 확대된 형상의 대형의 케이슨기초의 주면마찰력을 산정하기에는 홍원표가 제안한 식을 이용한 Kn계수법이 λ 법보다 더 적절한 방법이다.
- (3) 주면마찰력 산정시 관입심도와 상관없이 평균 마찰

계수(평균 Kn계수법)를 사용할 경우 지층이 두꺼울수록 일반적으로 증가하는 유효연직압과 비배수전단강도에 의하여 과대평가될 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 하반기 중앙대학교 Post-Doc. 지원프로그램에 의해 진행된 과제임.

참 고 문 헌

1. (사)대한토목학회 (2001), “도로교 설계기준(하부구조편)”, pp.156.
2. 홍원표 (1999), 기초공학특론(I), 중앙대학교 출판부, pp.283-286.
3. 홍원표, 성안제 (1987), “점토지반속 말뚝의 마찰저항 산정법”, 대한토목학회 학술발표회 논문집(I), pp.427-443.
4. 홍원표, 박현구, 여규권, 정광민 (2000), “영종대교 주탑하부 구조의 설계와 시공에 대한 연구”, 2000년도 대한토목학회 학술발표회, pp.181-184.
5. 한국도로공사 (1999), 뉴매틱케이슨 시공보고서, 한국도로공사 인천국제공항 건설사업소.
6. Burland, J. B. (1973), “Shaft friction of piles foundation in clay - A simple fundamental approach ground eng.”, Vol.6, No.3, pp.30-42.
7. Joseph. E., Bowles (1988), “Foundation Analysis and Design”, 4th Edition, pp.733-738.
8. Tomlinson, M. J. (1971), “Some effects of pile driving on skin friction”, *Proc. Conference on Behavior of piles*, ICE, London, pp.107-114.
9. Vesic, A.S. (1977), “Design of Pile Foundations”, Transportation Research Board National Research Council, Washington, DC
10. Vijayvergiya, V. N. and Focht, J. A. Jr. (1972), “A new way to predict the capacity of piles in clay”, 4th Annual Offshore Tech. Conf., Houston, Vol.2, pp.865-874.

(접수일자 2003. 11. 13, 심사완료일 2004. 5. 14)