

공내재하시험을 이용한 제주 현무암의 p-y 곡선 연구

A Study on p-y Curves with Pressuremeter Tests in Jeju Basalt Rock

양기호¹, 허종철², 박정준^{3*}

Ki-Ho Yang¹, Jong-Chul Huh², Jeong-Jun Park^{3*}

¹Non-Member, Ph. D Student, Graduate School of Specialized Wind Energy, Jeju National University, 102, Jejudaehakno, Jeju-si, Jeju Special Self-Governing Province, Korea

²Non-Member, Professor, Dept. of Mechanical Engng, Jeju National University, 102, Jejudaehakno, Jeju-si, Jeju Special Self-Governing Province, Korea

³Member, Director of headquarters, Research Institute, GK Engineering Co. Ltd., 91, LS-ro, Dongan-gu, Anyang City, Kyunggi Province, Korea

ABSTRACT

Recently, offshore wind farms are increasingly expected, because there are huge resource and large site in offshore. Jeju island has optimum condition for constructing a wind energy farm. Unlike the mainland, Jeju island has stratified structure distribution between rock layers sediments due to volcanic activation. In these case, it can be occur engineering problems in whole structures as well as the safety of foundation as the thickness and distribution of sediment under top rock layer can not support sufficiently the structure. One of the most obvious applications of the pressuremeter test is the solution of the problem of laterally loaded piles. A hyperbolic non-linear p-y criterion for rock is developed in this study that can be used in LPILE program, to predict the deflection, moment, and shear reponses of a shaft under the applied lateral loads. Finally, a comparison between the predicted and measured response at two different sites is shown to give an idea of the accuracy of the IFP method.

요 지

최근 해상풍력발전 단지 조성은 많은 양의 에너지를 창출할 수 있어 그 기대는 점차적으로 증가하고 있다. 특히 제주도는 풍황이 우수하여 해상풍력발전 시스템 운영을 위한 최적의 대상지이기는 하나, 화산활동에 의해 형성된 지형으로 육지부와 달리 현무암층 사이에 연약층인 화산쇄설물 및 공동이 불규칙하게 발달된 층상구조로 이루어져 있다. 이에 본 연구에서는 프레스미터 시험으로부터 제주 현무암에 근입된 수평재하말뚝의 p-y 곡선을 유도하기 위하여 프랑스석유협회(IFP, 1983)과 Briaud et al.(1983)의 방법을 이용하였다. 이들의 방법을 이용하여 유도된 p-y 곡선을 LPILE 프로그램에 입력하여 말뚝두부에서 하중-변위 관계를 분석한 후 재하시험으로 측정된 하중-변위 곡선과 비교하였다. 결과, pressuremeter test로부터 제주 현무암에 근입된 수평재하말뚝의 p-y 곡선을 유도할 때 IFP 방법은 매우 합리적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Laterally loaded pile, p-y curve, Pressuremeter test, Deformation modulus, Basalt rock

1. 서 론

화석연료의 사용량 증가로 인한 지구 온난화는 가뭄, 홍

수, 폭염 등 환경파괴와 이로 인한 생태계 파괴의 주요 원인으로 지목되고 있으므로 해외 선진국뿐만 아니라 우리나라는 신재생에너지에 대한 관심이 높으며, 특히 제주도는 바람자원이 풍부하여 풍력발전산업을 미래의 성장 동력으로 계획하고 있다.

해상풍력터빈의 대표적인 기초형식으로 말뚝기초 형식에서는 모노파일(monopile), 자켓(jacket), 트라이포드(tripod)

Received 1 Dec. 2015, Revised 17 Dec. 2015, Accepted 18 Dec. 2015

*Corresponding author

Tel: +82-31-343-1005; Fax: +82-31-343-1004

E-mail address: smearjun@hanmail.net (J. J. Park)

등이 있으며 해저지반의 종류와 특성, 수심, 조류, 파도와 바람, 경제성을 고려하여 기초형식을 선정한다.

말뚝기초는 수직 및 수평하중을 지지하기 위한 기초구조물로 지반이 연약하여 상부 구조물 하중을 지지할 수 없거나 수위가 너무 높아 직접기초 설치가 곤란한 경우에 고려하는 기초공법으로 주로 축방향 하중에 저항하도록 설계된다. 그러나 해상풍력터빈은 바람, 파도, 선박의 충돌에 의해 유발되는 큰 수평하중을 받을 수 있다. 따라서 해상풍력터빈에 이용되는 말뚝기초는 축방향 하중뿐만 아니라 수평방향 하중에 저항할 수 있도록 설계되어야 한다.

제주도는 반복적인 화산활동에 의해 형성된 섬으로 육지부는 화산암인 현무암과 화산쇄설물이 불규칙하게 층상구조를 이루고 있는 반면에 제주도 해저지반은 화산암인 현무암이 기저를 이루고 있으며, 제주 해역에 설치되는 해상풍력터빈은 지반조건이 양호함에도 불구하고 깊은 수심 때문에 자켓 또는 모노파일과 같은 말뚝기초 형식을 채택하고 있으나 말뚝기초에 대하여 입증된 합리적인 분석 및 설계방법은 부족한 실정이며 기초지반이 암반인 경우 특히 더욱 그러하다.

이를 위해 국내에서는 대부분 Goodman Jack 시험과 프레스미터(pressuremeter) 시험을 실시하여 암반의 변형계수를 결정하고 있다. 한편, 공내재하시험으로부터 p-y 곡선을 유도하기 위하여 시험중 발생하는 압력-변형 관계를 이용하고 있다. 그러나 공내재하시험으로부터 유도된 p-y 곡선은 거의가 토사층에 대한 분석법으로 암반층에 대한 적용성은 검증되지 않았다.

공내재하시험은 암반의 변형계수를 측정하기 위한 시험으로 시추공을 이용하여 실시한다. 암반은 내부에 존재하는 불연속면 때문에 탄성거동을 하지 않으므로 탄성계수라는 용어 보다는 변형계수라는 용어를 사용하고 있으며, 국제암반학회(ISRM)에서는 암반에 하중이 작용할 때 탄성과 비탄성거동을 포함하여 변형에 대응하는 응력의 비로 정의하였다. 암반의 변형계수(E_m)는 현장시험 또는 실내시험결과를 이용한 경험식으로부터 결정할 수 있다. 현장시험으로 암반의 변형계수를 결정하는 방법은 여러가지가 있으나 일반적으로 시추공을 이용한 공내재하시험이 많이 실시되고 있다.

이에 본 연구에서는 프레스미터 시험으로부터 제주 현무암에 근입된 수평재하말뚝의 p-y 곡선을 유도하기 위하여 프랑스석유협회(IFP, 1983)과 Briaud et al.(1983)의 방법을 이용하였다. IFP 방법과 Briaud et al.의 방법을 이용

하여 유도된 p-y 곡선을 LPILE 프로그램에 입력하여 말뚝두부에서 하중-변위 관계를 분석한 후 재하시험으로 측정된 하중-변위 곡선과 비교하였다.

2. 암반의 변형계수 결정방법

2.1 Goodman Jack 시험

Goodman Jack 시험은 NX 시추공에서 암반의 변형계수를 측정하기 위하여 고안된 장비이며 Goodman Jack의 가압 개요도는 Fig. 1과 같다(Heuze, 1984). Goodman Jack 장비는 시추장비에 부착되어 시추공 속으로 삽입되며, 피스톤에 의해 강관을 통하여 공벽에 균등한 압력이 전달된다. 압력을 가하여 발생하는 시추공벽의 변형은 시험기에 내장되어 있는 두 개의 LVDT에 의해 측정된다.

Goodman Jack이 도입된 이후 시험 데이터에 영향을 주는 요소에 대하여 다양한 분석이 이루어졌다. Goodman et al.(1972)은 암반의 포아송비가 변형계수에 미치는 영향에 대하여 분석하였으나, 그 영향은 크지 않음을 제시하였다. Heuze and Amadei(1985)는 크기가 서로 다른 시추공에 대한 Shuri(1981)의 연구를 재평가하여 NX 크기보다 큰 시추공에 대해서 Shuri의 접근 방법은 정확함을 나타내었으나, NX 크기보다 작은 시추공에 대한 Shuri의 접근 방법은 다소 신뢰성이 떨어짐을 보고하였다. 또한 암반이 항복을 일으키는 경우에는 재하판이 휘어지는 영향을 고려하여야 하므로 Heuze and Amadei(1985)는 T^* 를 이용하여 변형계수를 다시 계산하였다. 식 (1)을 이용하여 시험 데이터로부터 변형계수를 결정할 수 있다.

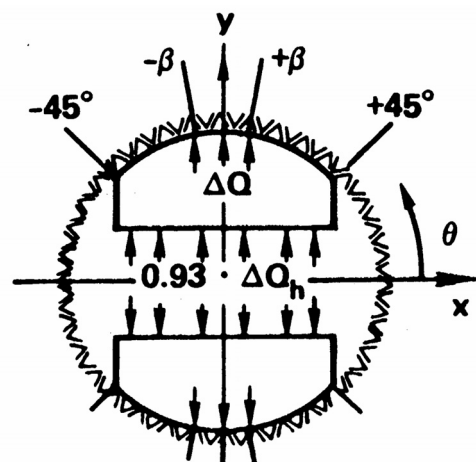


Fig. 1. Schematic of loading of Goodman Jack (Heuze, 1984)

Table 1. Values of T* (Heuze and Amadei, 1985)

ν	0.1	0.2	0.25	0.3	0.33	0.4	0.5
T*	1,519	1,474	1,438	1,397	1,366	1,289	1,151

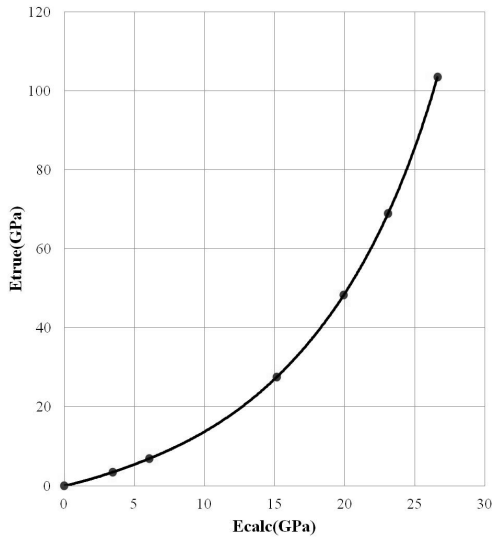


Fig. 2. Correction for platen bending of the jack (Heuze and Amadei, 1985)

$$E_{calc} = (0.86)(0.93)(d) \frac{\Delta Q_h}{\Delta u_d}(T^*) \quad (1)$$

여기서, ΔQ_h 는 재하판에 작용하는 수압의 변화량, Δu_d 는 잭 직경의 증가량, d 는 시추공 직경, T^* 는 포아송비에 의존하는 상수를 나타낸 것으로 Table 1에 제시하였다. 또한 상수 0.86은 3차원의 영향, 상수 0.93은 수압의 효율을 고려한 값이다.

식 (1)로부터 계산된 변형계수는 시추공벽에 가하는 압력증가에 따른 재하판이 휘는 영향을 고려하지 않은 값이다. 따라서 Fig. 2의 보정곡선을 이용하여 변형계수를 수정한다.

2.2 프레셔미터 시험

현재 국내에서 암반의 변형계수를 결정하기 위한 프레셔미터 시험기로는 일본 OYO사에서 개발한 Elastmeter-2가 주로 사용된다. Elastmeter-2는 가압한계가 20 MPa로서 연암~보통암의 변형계수를 결정하는데 적합한 시험기이다. 시험전에 지상에서 3회정도 팽창과 수축을 반복하여 기포를 제거하고 수압을 가하는 호스에서 누수가 되는 곳은 없는지 확인한 후 시추장비를 이용하여 시추공 속으

로 시험깊이까지 삽입한 후 시험을 실시한다.

시험중에 판독기에서 읽은 값은 프루브(probe) 외경이 아니므로 식 (2)에 나타낸 바와 같이 지반에 작용하는 프루브의 실제 외경으로 변환하여야 하며, 이때 압력증가에 따른 고무 패커의 두께 변화를 고려하여야 한다.

$$R = [((R_n + 23.5) - (P - 10)/K)^2 + S/\pi] \quad (2)$$

여기서, R 은 프루브의 외반경, R_n 은 판독기에서 읽은 값, K 는 두께 보정 구배, S 는 패커의 단면적($=\pi \cdot (R^2 - (RP_{10} + 23.5)^2)$), RP_{10} 은 1.0MPa의 압력을 가하였을때 내반경 변화량이다.

변형계수(E_m)는 압력-반경 곡선에서 직선구간의 기울기이며, 식 (3)으로부터 결정할 수 있다.

$$E_m = (1 + \nu) \cdot K \cdot R_m \quad (3)$$

여기서, ν 는 암반의 포아송비, K 는 반력계수($=\Delta P/\Delta R$), $\Delta P = P_y - P_0$, $\Delta R = R_y - R_0$, $R_m = (R_0 + R_y)/2$ 이다.

2.3 현장시험

현장에서 시추공을 이용하여 변형계수를 측정하는 시험법인 Goodman Jack과 Elasmeter-2를 비교하였을 때, Goodman Jack은 시추공벽에 재하판을 통하여 수평방향으로 압력을 가하지만 Elasmeter-2는 고무 패커로 시추공벽에 균일한 압력을 가할 수 있다. 또한, Elasmeter-2는 20 MPa이 가압력의 한계이나 Goodman Jack은 70MPa 까지 압력을 가할 수 있으므로 암반의 탄성범위를 초과하여 시험할 수 있다. Elasmeter-2는 고무 패커를 사용하므로 균열이 심한 암반에서 시험할 경우 멤브레인에 구멍이 뚫려 시험에 실패할 수 있다. 따라서, 제주도 현무암의 변형특성은 공극의 크기와 형상 및 방향성 등 다양한 요인에 지배되기 때문에 이에 적합한 Goodman Jack 시험장비를 이용하였다.

본 연구에서는 제주도 북서부 한경면 해안가 현무암 암반층에서 재하시험을 실시하였다. Fig. 3에서와 같이 시험

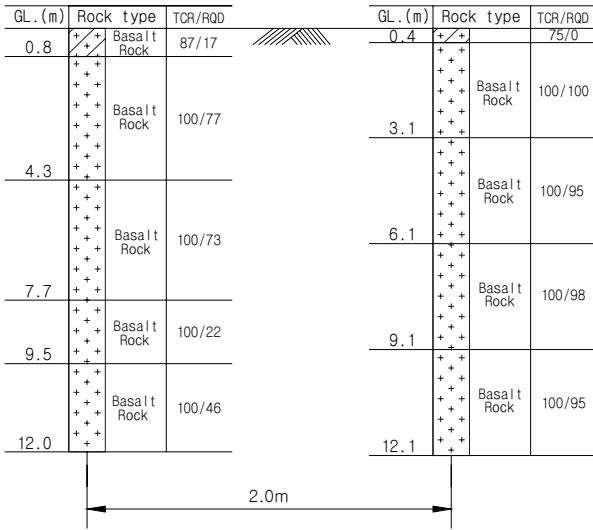


Fig. 3. Rock layer profiles at test site

위치를 선정하기 위하여 제주도 육상 및 해상에 대한 시추 조사를 실시하였으며, 제주도 해상에 분포하는 현무암과 물리·역학적 특성이 유사한 장소를 선정하였다. NX구경으로 시추조사와 암반의 변형특성을 파악하기 위한 공내 재하시험을 깊이별로 실시하였다.

3. 공내재하시험 결과로부터 암반의 p-y 곡선 유도

프레셔미터 시험 결과로부터 p-y 곡선을 유도하기 위한 방법이 제안되었는데 이 방법들은 전부 토사층에 대한 연구결과이며, 암반에 대한 적용성은 아직까지 입증되지 않았다.

Menard et al.(1969)은 선굴착 프레셔미터 시험(preboring pressuremeter test)로부터 p-y 곡선을 유도하기 위한 방법을 연구하였다. 이 방법은 영국에서 Baguelin et al.(1978)에 의해 발표되었으며 p-y 곡선은 선형 탄성구간과 완전 소성구간으로 구분하고 있다. 연속기초의 침하에 대한

Menard의 분석법을 기초로 하여 p-y 곡선의 첫 번째 경사 (k)는 식 (4)와 (5)로 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{k} = \frac{2}{9E} D_o \left(2.65 \frac{D}{D_o} \right)^\alpha + \frac{\alpha}{6E} D \quad (D > 0.6 \text{ m or } 2 \text{ ft}) \quad (4)$$

$$\frac{1}{k} = \frac{D}{E} \frac{4(2.65)^\alpha + 3\alpha}{18} \quad (D < 0.6 \text{ m or } 2 \text{ ft}) \quad (5)$$

여기서, D는 말뚝의 직경, D_o는 기준 직경(0.6m or 2 ft), E는 프레셔미터로 측정된 흙의 탄성계수, α는 흙의 종류와 E/P₁^{*}(P₁^{*}=순 극한압력)의 비에 의존하는 계수이다 (Table 2).

지표부근에서 흙의 반력은 흙이 항복 가능성 때문에 깊은 심도에서보다 작다. 한계깊이 z_c보다 상부에 위치하는 흙의 경우 점착력이 있는 흙은 대략 2D, 조립토의 경우 대략 4D 이내이고 지반반력은 식 (6)에 나타낸 계수 λ_z에 의해 감소한다.

$$\lambda_z = \frac{1 + (z/z_c)}{2} \quad (6)$$

Menard et al.(1969)에 의해 제안된 p-y 곡선이 Fig. 4에 나타나 있다. 흙의 압력(p/D, p = 말뚝의 단위길이당 흙의 반력, D = 말뚝의 직경)이 항복압력(P_y)에 도달하면, 첫 번째 직선은 이 점에서 멈춘다. 두 번째 직선부의 경사 k_p는 첫 번째 직선 경사의 절반이다. 극한 단위지반반력 (P_u/D)은 한계깊이보다 더 깊은 심도에서 프레셔미터 시험으로 구한 극한압력(P₁)과 같다. 한계깊이 상부의 흙의 경우 k, k_p, P_u의 값은 계수 λ_z에 의해 감소한다. 이 방법은 계수 α와 E/P₁^{*}를 사용하여 계산된 변위는 측정된 변위보다 더 큰 경향을 나타낸다(Baguelin et al., 1978).

Table 2. Rheological factor α for various soils (Baguelin et al., 1978)

Soil type	Peat		Clay		Silt		Sand		Sand and gravel	
	E/P ₁ [*]	α	E/P ₁ [*]	α	E/P ₁ [*]	α	E/P ₁ [*]	α	E/P ₁ [*]	α
Over consolidated			>16	1	>14	2/3	>12	1/2	>10	1/3
Normally consolidated		1	9-16	2/3	8-14	1/2	7-12	1/3	6-10	1/4
Weathered and/or remolded			7-9	1/2		1/2		1/3		1/4
Rock	Extremely fractured			Other			Slightly fractured or extremely weathered			
	α = 1/3			α = 1/2			α = 2/3			

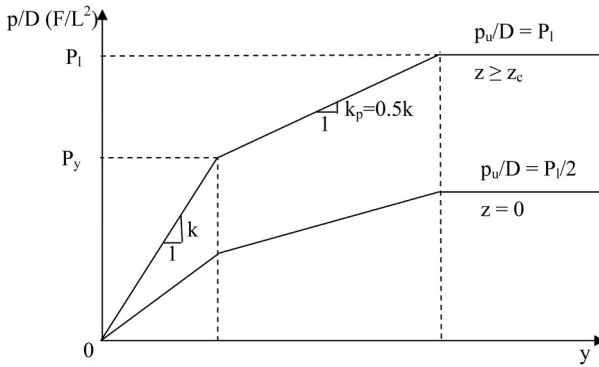


Fig. 4. P-y curves from pressuremeter (Baguelin et al., 1978)

Baguelin et al.(1978)의 방법은 프랑스 석유협회(IFP, 1983)의 설계 매뉴얼에 완전한 형태로 제시 되었으며, 자기굴착 프레스미터 시험(self-boring pressuremeter test) 결과를 이용하고 있다. 말뚝에 대한 깊이 z에서 p-y 곡선은 동일한 깊이 z에서 프레스미터 팽창곡선으로부터 식 (7)과 (8)이 얻어진다.

$$p = \eta \Delta P^* D \quad (7)$$

$$y = \frac{1}{2} \frac{\Delta V}{V_o} R \quad (8)$$

여기서, p는 말뚝의 단위길이당 지반반력, y는 말뚝의 수평변위, $\eta = 1/3 \sim 3$ 까지 변화하는 수평저항 계수, ΔP^* 는 프레스미터 곡선에서 순압력($P_i - P_0$), R은 말뚝의 반경, V_o 는 Probe의 초기 체적, ΔV 는 프루브에 주입된 체적, P_0 는 시험위치에서의 수평정지토압이다.

Robertson et al.(1983)은 프레스미터 시험으로부터 직

접 p-y 곡선을 유도하기 위하여 Hughes et al.(1979)에 의해 제안된 방법을 개선하였으며, 프레스미터 시험과 말뚝의 수평재하시의 유사성을 고려하였다. 흙 속에 박힌 말뚝의 거동은 자기굴착 프레스미터 시험 결과를 이용하여 시뮬레이션 하였다.

점토에 근입된 수평지지 말뚝의 경우 극한저항력은 개략적으로 $9S_u$ (비배수전단강도)이다. 그러나 프레스미터 시험의 경우 극한압력($P_i - P_0$)은 개략적으로 $5S_u$ 이다. 극한저항력과 점토의 비배수전단강도의 관계에 대한 이들 가정을 근거로 식 (9)와 (10)이 Robertson et al.(1986)에 의해 제안되었고, Fig. 5는 프레스미터 시험으로부터 p-y 곡선을 작도하는 과정을 나타낸 것이다.

$$p = \alpha \Delta P^* D \quad (9)$$

$$y = \frac{1}{4} \frac{\Delta V}{V_o} D \quad (10)$$

여기서, D는 말뚝의 직경, α 는 계수로서, 점토일 경우에는 2, 모래일 경우에는 1.5를 적용한다 (Robertson et al., 1986). 이 방법은 계수 α 또는 η 의 값이 다르다는 것을 제외하면 Baguelin et al.(1978)의 방법과 유사하다.

또한 Briaud et al.은 프레스미터 시험 결과로부터 p-y 곡선을 유도하기 위한 방법을 개발하였는데 이 방법은 말뚝의 저항력을 전면저항력을 나타내는 Q-y 곡선과 마찰저항력을 나타내는 F-y 곡선으로 구분하여 고려하였으며 dilatometer 시험(dilatometer test) 결과도 적용할 수 있다. Q-y와 F-y 곡선은 프레스미터 곡선으로부터 식 (11)과

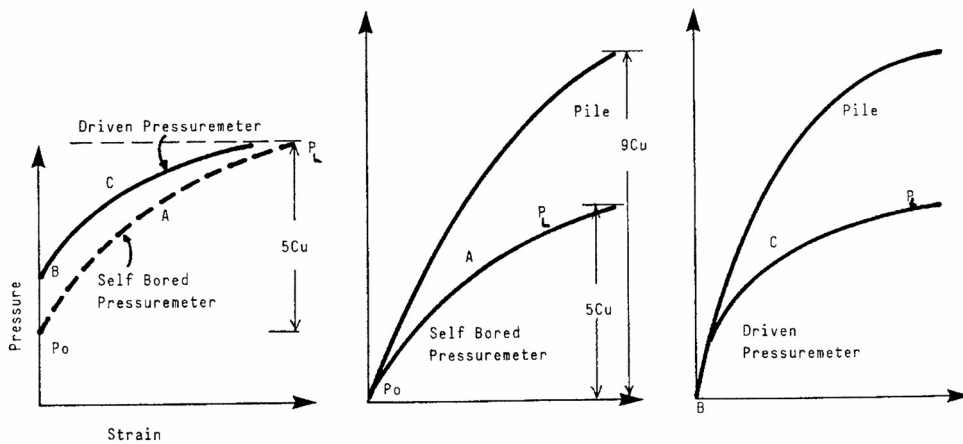


Fig. 5. Steps for constructing p-y curve from pressuremeter test

(12)를 얻을 수 있다.

$$Q = (SQ)(P^*)(D) \quad (11)$$

여기서, Q는 말뚝전면에 작용하는 흙의 저항력, D는 말뚝의 직경 또는 폭, $\Delta P^* = \text{순압력 증가량}(P - P_0)$, SQ는 반력에 대한 형상계수(원형말뚝 : $\pi/4$, 정방형 말뚝 : 1.0)이다.

$$F = (SF)(D)(X)(1+X) \frac{\Delta P^*}{\Delta X} \quad (12)$$

여기서, F는 말뚝에 작용하는 흙의 마찰저항력, SF = 전단반력에 대한 형상계수(원형 말뚝 : 0.79, 정방형말뚝 : 1.76), $\Delta P^* = \text{순압력 증가량}(P_1 - P_0)$, $X = \Delta V' / V'_0$ ($V'_0 = V_0 + V_1$, $\Delta V' = V'_0$ 로부터 프루브에 주입된 체적이다.

압력-체적곡선의 각각의 데이터 포인트에 대응하는 Q, F값을 구한 후 지반반력(p)은 식 (13)로부터 산정할 수 있으며 수평변위(y)는 공동의 팽창이론으로부터 식 (14)로부터 산정할 수 있다.

$$p = Q + F \quad (13)$$

$$y = \frac{D}{4} \frac{\Delta V'}{V'_0} \quad (14)$$

지표면에서 가까운 부분은 연직방향 구속력이 적기 때문에 프레스미터 시험의 결과뿐만 아니라 수평 재하된 말뚝에서 흙의 저항력에도 영향을 미친다. Smith(1983)는 지표면에 가까운 부분에서 연직방향 구속력이 작게 미치는 영향을 고려하였으며, F-y 곡선에 대한 영향을 고려하지 않은 반면에 Q-y 곡선의 경우, 한계깊이 D_c 는 Fig. 6으로부터 결정되고 그 깊이 안에서 Q는 Fig. 7로부터 감소계수 RF를 곱하여 산정한다. 이와 같이 지표면에 가까운 부분에서 Q 값이 감소하는 영향은 흙에 대한 것이며 암반위에 두꺼운 토사층이 존재하는 경우에는 암반에 대한 Q 값의 감소는 고려하지 않아도 된다.

Briaud et al. 방법은 토사층의 p-y 곡선을 유도하기 위하여 고안된 방법이지만 경형계수가 필요 없고 항복과 극한압력을 결정하는 어려움을 피할 수 있다. 또한 지반 또는 암반과 말뚝의 상호작용에 대한 전단응력과 법선응력

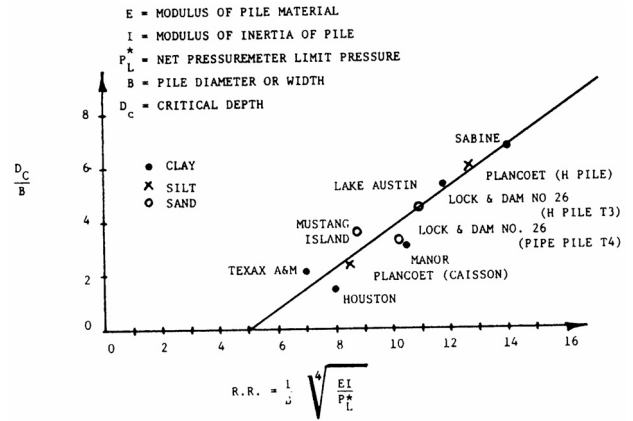


Fig. 6. Determination of the critical depth

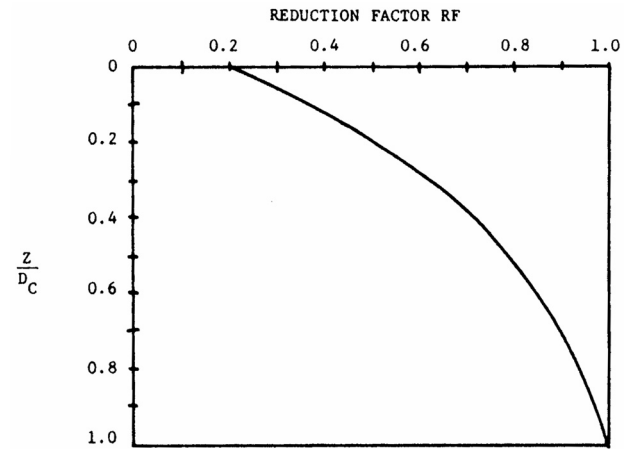


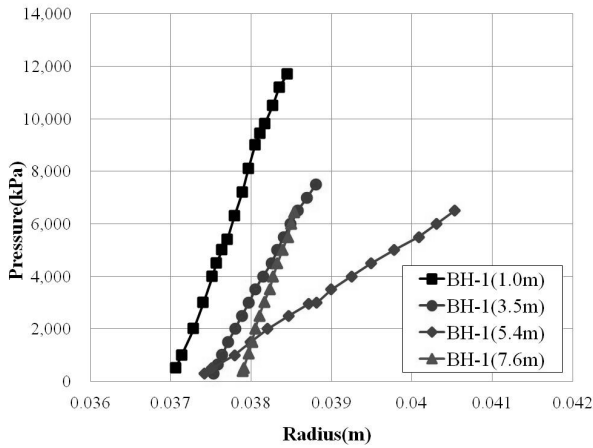
Fig. 7. Reduction factor for depth within critical depth

을 모두 고려하고 있다.

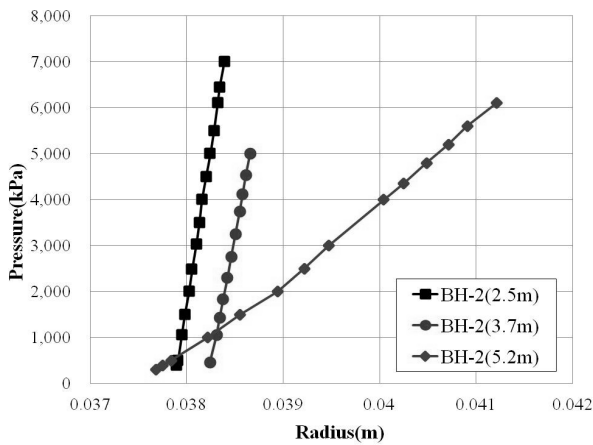
본 논문에서는 IFP 방법과 Briaud et al.의 방법으로 제주도 현무암에 대한 p-y 곡선을 유도한 후 말뚝두부에서 하중-변위관계를 LPILE 프로그램을 이용하여 말뚝재하시험결과와 비교 평가하였다.

4. 공내재하시험 결과로부터 p-y 곡선 평가

p-y 곡선 유도에 이용된 자료는 수평재하시험 위치와 지층조건의 매우 유사한 지역으로 시험위치에서 약 6.0 km 정도 떨어진 한림읍 월령리 해안가 현무암 지층에서 실시한 공내재하시험 결과를 이용하였다. 공내재하시험에 이용된 장비는 일본 OYO사에서 개발한 Elastmeter-2이며 암반의 변형계수를 결정하기 위한 일종의 프레스미터 시험장치이다. Elastmeter-2를 이용하여 BH-1과 BH-2 시추공내에서 측정된 프루브의 압력증가에 따른 반경의 증가량 관계가 각각 Fig. 8에 나타내었으며, 압력-반경 관계



(a) BH-1



(b) BH-2

Fig. 8. Pressure-radius curves of pressuremeter test

곡선으로부터 결정된 변형계수는 Table 3과 Table 4에 제시하였다. 즉, BH-1과 BH-2의 변형계수는 273~632MPa 연암에 가까운 변형거동을 나타내고 있으며, 암반의 변질이 매우 심한 일부구간에서 변형계수는 100MPa 이하로 매우 작게 나타나는 구간도 있다.

프레셔미터 시험으로부터 p - y 곡선을 유도하기 위하여 3절에 제시된 IFP 방법과 Briaud et al.의 방법을 이용하였다.

Fig. 9는 각각 BH-1과 BH-2에서 실시한 프레셔미터 시험곡선에 대하여 IFP 방법과 Briaud et al.의 방법으로 유도한 p - y 곡선을 나타내고 있으며, 동일변위에서 지반반력 즉 p - y 곡선의 기울기는 IFP 방법으로 구한 값이 Briaud et al.의 방법으로 구한 값보다 상대적으로 작게 나타나고 있다.

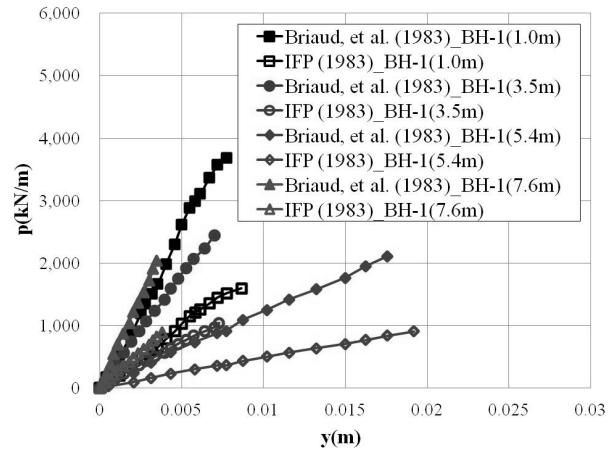
IFP 방법과 Briaud et al.의 방법으로 구한 지반반력(p)과 수평변위(y)는 시험말뚝의 하중-변위곡선과 비교하기 위하여 LPILE 프로그램에 입력하였다. Fig. 10은 시추공

Table 3. Deformation modulus of BH-1

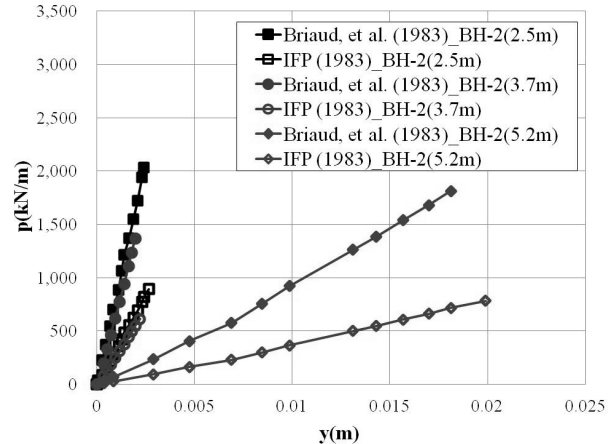
Depth(GL, m)	1,0	3,5	5,4	7,6
$E_m (\times 10^3 \text{ kPa})$	387,2	273,6	95,2	440,8

Table 4. Deformation modulus of BH-2

Depth(GL, m)	2,5	3,7	5,2
$E_m (\times 10^3 \text{ kPa})$	632,4	518,6	79,8



(a) BH-1

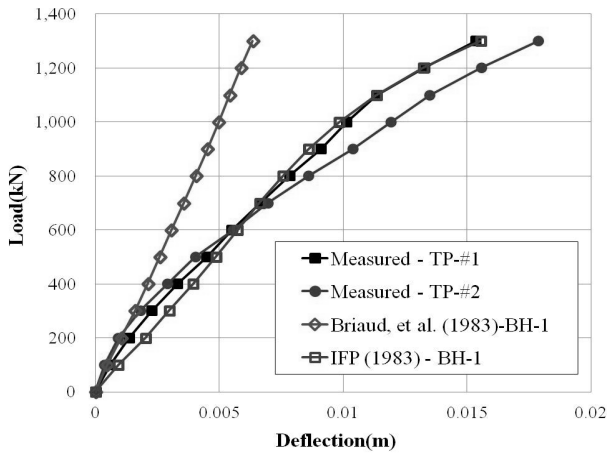


(b) BH-2

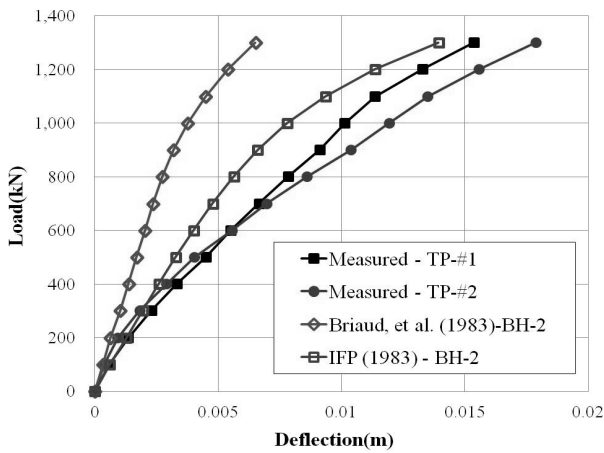
Fig. 9. Comparison of p - y curves from pressuremeter test

BH-1과 BH-2의 각각의 깊이에서 p - y 을 입력하여 해석한 말뚝두부에서 하중-변위 곡선을 말뚝두부에서 측정된 하중-변위 곡선과 비교하여 나타낸 것이다.

여기서, 수평재하시험을 위해 TP-#1과 TP-#2 위치에 사용된 말뚝은 직경 406mm, 두께 12mm, 길이 10m 인 강관말뚝 2개를 사용하였으며 항복강도는 390MPa 이다. 직경 510mm로 9m 깊이까지 암반을 천공한 후 시험말뚝을 삽입하고 말뚝 내부와 외부는 몰탈로 채워 고정시켰으며 몰탈의 28일 압축강도는 대략 40MPa 이다. 시험말뚝의 중심간 거리는 2m 이다. 말뚝 두부에서 하중 단계별



(a) BH-1



(b) BH-2

Fig. 10. Back-analysis of load-deflection curves using p-y curves from pressuremeter test

수평변위를 측정하기 위하여 각각의 말뚝에 LVDT를 2개씩 설치하였다. 깊이에 따른 말뚝의 변위를 측정하기 위하여 말뚝중심에 경사계 튜브를 설치하였다. 수평하중 재하시 말뚝의 변형을 측정하기 위하여 각각의 말뚝에 26개씩 총 52개의 전기저항식 스트레인게이지를 깊이에 따라 0.5 ~ 1.5m 간격으로 설치하였다.

결과, Briaud et al. 방법은 말뚝두부에서 예측된 수평변위가 측정된 변위보다 상대적으로 작은 반면에 IFP 방법으로 예측된 하중-변위 곡선은 측정된 하중-변위 곡선과 거의 일치하고 있다. 따라서 프레스미터 시험으로부터 제주 현무암에 대한 p-y 곡선을 유도할 때 IFP 방법은 매우 합리적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 프레스미터 시험으로부터 제주 현무암에

근입된 수평재하말뚝의 p-y 곡선을 유도하기 위하여 IFP 방법과 Briaud et al.의 방법을 이용하였다. 이 방법을 이용하여 유도된 p-y 곡선을 LPILE 프로그램에 입력하여 말뚝두부에서 하중-변위 관계를 분석한 후 재하시험으로 측정된 하중-변위 곡선과 비교하였다.

따라서, Briaud et al.의 방법으로 예측된 말뚝두부에서 수평변위는 측정된 수평변위보다 작은 반면에 IFP 방법으로 예측된 수평변위는 측정된 수평변위와 거의 일치하고 있다. 즉, pressuremeter test로부터 제주 현무암에 근입된 수평재하말뚝의 p-y 곡선을 유도할 때 IFP 방법은 매우 합리적인 결과를 나타낼 수 있다.

향후 제주 현무암에 적합한 p-y 모델을 제안하기 위하여 기존에 제안된 쌍곡선 모델과 수평재하시험과 비교하여 적용성을 평가하고, p-y 곡선을 작도하는데 필요한 암반의 변형계수를 결정하기 위하여 기존에 제안된 방법에 대하여 분석할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 한국산업기술평화 제주지역 사업평가원의 광역경제권 선도산업 육성사업(R0001524)의 지원 및 제주대학교 대학원 풍력공학부 「한국남부발전 발전기금」의 지원을 받아 수행한 연구결과입니다.

References

1. Baguelin, F., Jezequel, F. F., and Shields, D. H. (1978), *The Pressuremeter and Foundation Engineering*, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.
2. Briaud, J. L., Smith, T. D., and Meyer, B. J. (1983), "Using the Pressuremeter Curve to Design Laterally Loaded Piles." *Proceedings of Annual Offshore Technology Conference*, Vol.8, pp.495-502.
3. Goodman, R.E., T.K. Van, and F.E. Heuze (1972), "Measurement of Rock Deformability in Boreholes", *Proceedings, 10th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York, pp.523-545.
4. Heuze, F.E., (1984), "Suggested method for estimating the in-situ modulus of deformation of rock using the NX-borehole jack" *Geotechnical Testing Journal*, Vol.7, No.4, pp.205-210.
5. Heuze, F.E. and Amadei, B. (1985), "The NX-borehole jack: A lesson in trial and error", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol.22, No.2, pp.105-112.
6. Hughes, J. M. O., Goldsmith, P.R., and Fendall, H.D.W. (1979), *Predicted and Measured Behavior of Laterally*

Loaded Piles for the Westgate Freeways Melbourne, Victoria
Geomechanics Society, Australia, August 1979.

7. Institut Francais du Petrole (1983), *Recommended Practice for Application of Pressuremeter Test Result to Designing of offshore Foundation*, Ref. 31763, Paris.
8. Menard, L., Bourdon, G., and Gambin, M. (1969), "Methode Generale de Calcul d'un Rideau ou Pieu Sollicite Horizontalement en Fonction des Resultats Pressiometriques", *Sols-Soils*, No. 22/23.
9. Robertson, P. K., Hughes, J. M. O., Campanella, R. G., and Sy, A. (1983), "Design of laterally loaded displacement piles using a driven pressuremeter." *ASTM SPT Symposium*, Design & Performance of Laterally Loaded Piles and Pile Groups.
10. Robertson, P. K., and Hughes, J. M. O. (1986), "Determination of properties of sand from selfboring pressuremeter tests", *The pressuremeter and its Marine Applications: Second International Symp.*, ASTM STP 950, Texas A&M University.
11. Shuri, F.S. (1981), "Borehole diameter as a factor in borehole jack results", *Proc. 22nd U.S. Symp. On Rock Mechanics*, Cambridge, Massachusetts, pp.392-397, MIT Press, Cambridge.
12. Smith, T. D. (1983), *Pressuremeter Design Method for Signal Piles Subjected to static Lateral Load*, Ph. D. Thesis Texas A&M University.