

## 해안연약 지반 조사를 위한 4전극 전기비저항 프로브

### 4 Electrical Resistivity Probe for Investigating soft offshore soils

김준한<sup>1)</sup>, Joon-Han Kim, 윤형구<sup>2)</sup>, Hyung-Koo Yoon, 배명호<sup>1)</sup>, Myeong Ho Bae, 정순혁<sup>1)</sup>, Soon-Hyuck Jung, 이종섭<sup>3)</sup>, Jong-Sub Lee

<sup>1)</sup> 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정, Graduate. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.

<sup>2)</sup> 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정, Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.

<sup>3)</sup> 고려대학교 건축·사회환경공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.

**SYNOPSIS** : Electrical resistivity can be used for porosity estimation. In order to improve previously developed ERCP(Electrical Resistivity Cone Probe), 4ERP(4 Electrical Resistivity Probe), which has Wenner array at the tip of probes, has been developed. In properties of current flow Wenner array measures electrical properties of undisturbed area during penetration and relatively correct measurements are guaranteed without polarization. Furthermore, Wenner array equation can estimate electrical resistivity without extra calibration. 4ERP is developed into 2 types, penetration and fixation. Penetration type has wedge-shaped tip. Considering disturbance minimization, fixed type has plane tip. Fixed type 4ERP in consolidation cell measure electrical resistivity increment along porosity decrease, and penetration type 4ERP measured resistivity profile along the depth in chamber. Applying Archie's law, porosity profile was estimated with electrical resistivity. The tests result suggests that 4ERP can be new site investigation equipment with little disturbance.

**Keywords** : ERCP, 4ERP, Wenner array, Archie's law

## 1. 서론

전기비저항탐사는 1900년대에 개발되어 지층의 구조, 대수층내 염분농도, 그리고 지하의 공동 등의 탐지를 수행하는 기술로 적용되어 탐사방법에 따라 1차원 및 2·3차원 탐사로 분류된다. 1차원 탐사는 콘의 마찰관에 전극을 설치하여 수직방향의 탐사를 수행하는 방법이며 (Campanella and Weemes 1990), 2·3차원 탐사는 전극간의 간격을 조절하여 수직 및 수평 방향의 포괄적인 지층 특성을 분석하는 방법이다. 김준한 외. (2008)은 기존에 국부적인 지반 탐사가 가능한 고해상도 1차원 전기비저항 탐사장비를 (Electrical Resistivity Cone Probe: ERCP) 개발하고 현장적용성도 평가하였다. 하지만, 전극 배열 특성상 발생하는 지반 교란 및 전기화학적 반응을 최소화 시키기 위하여 본 연구에서는 전극배열법을 변경하여 새로운 탐사장비인 4 Electrode Resistivity Probe (4ERP)를 개발하였다. 4ERP는 웨너배열 전극을 적용하여 다양하게 발생하는 전기적인 잡음을 제거해 신뢰성 높은 데이터를 측정하고자 하였다.

본 논문은 전기비저항의 이론적 배경에 대해 간략히 서술한 후, 개발된 4ERP의 특징, 실내 실험, 그리고 실험 결과에 대해 서술하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 전기비저항과 간극률

포화된 지반의 전기비저항은 흙 입자, 간극수, 그리고 흙입자 표면에 의해 결정되지만, 해안연약지반의 경우 일반적으로 간극수의 농도가 진하여 상대적으로 나머지 변수가 무시된다 (Lee et al. 2008). 따라서 Archie (1942)는 실제 흙 입자의 구조와 크기를 고려하여 포화된 지반의 전기비저항을 식 (1)과 같이 표현하였다.

$$F = \rho_b / \rho_f = a \cdot n^{-m} \quad (1)$$

여기서,  $F$ 는 흙의 비저항 ( $\rho_b$ )과 간극수의 비저항 ( $\rho_f$ )의 관계를 나타내는 변수(formation factor),  $n$ 은 간극률,  $a$ 와  $m$ 은 흙에 따라 변하는 상수이다.  $a$ 값은 비압밀 지반의 경우  $a \approx 1$ 의 값을 갖는 것으로 알려져 있으며,  $m$ 값은 모래, 점토 그리고 글라스비드에서 각각 1.5, 1.8~3, 그리고 1.3으로 제안되고 있다 (Jackson et al. 1978; Salem and Chilingarian 1999).

### 2.2 웨너배열

웨너 배열법은 1915년 Frank Wenner가 개발한 전극 배치법으로 그림 1과 같이 전극 4개를 동일간격으로 배열하는 방법이다. 이는 4개의 전극 중 두 개의 외부전극( $C_1, C_2$ )으로 전류( $I$ )를 보내고 내부전극( $P_1, P_2$ )에서 발생한 전압강하( $V$ )를 측정하는 기법이다. 따라서 저항(Resistance)은 옴의 법칙(Ohm:  $V=IR$ )으로 계산되며, 전기비저항 (Resistivity)은 식 (2)를 이용하여 산정된다.

$$\rho = 2\pi aR \quad (2)$$

여기서,  $\rho$ 는 전기비저항,  $a$ 는 전극간격, 그리고  $R$ 은 측정된 저항이다.

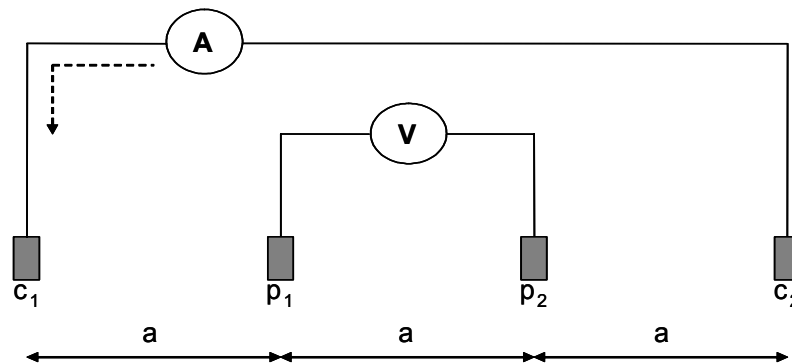


그림 1. 웨너배열

### 3. 설계 및 제작

#### 3.1 형상

4ERP는 그림 2와 같이 관입용과 실내시험기구의 설치용으로, 썸기모형의 Wedge-type Electrical Resistivity Probe(WERP)와 평면형의 Plane-type Electrical Resistivity Probe(PERP)로 제작되었다. WERP는 관입시 충분한 강도가 발휘되도록 항타 해머 쿠션재로 사용되는 고강도 절연체인 베크라이트를 이용하였으며, PERP는 기계가공이 용이한 아세탈을 사용하였다. 또한 전극은 부식에 강하고 자체 강도가 뛰어난 스테인레스 스틸을 적용하였다.

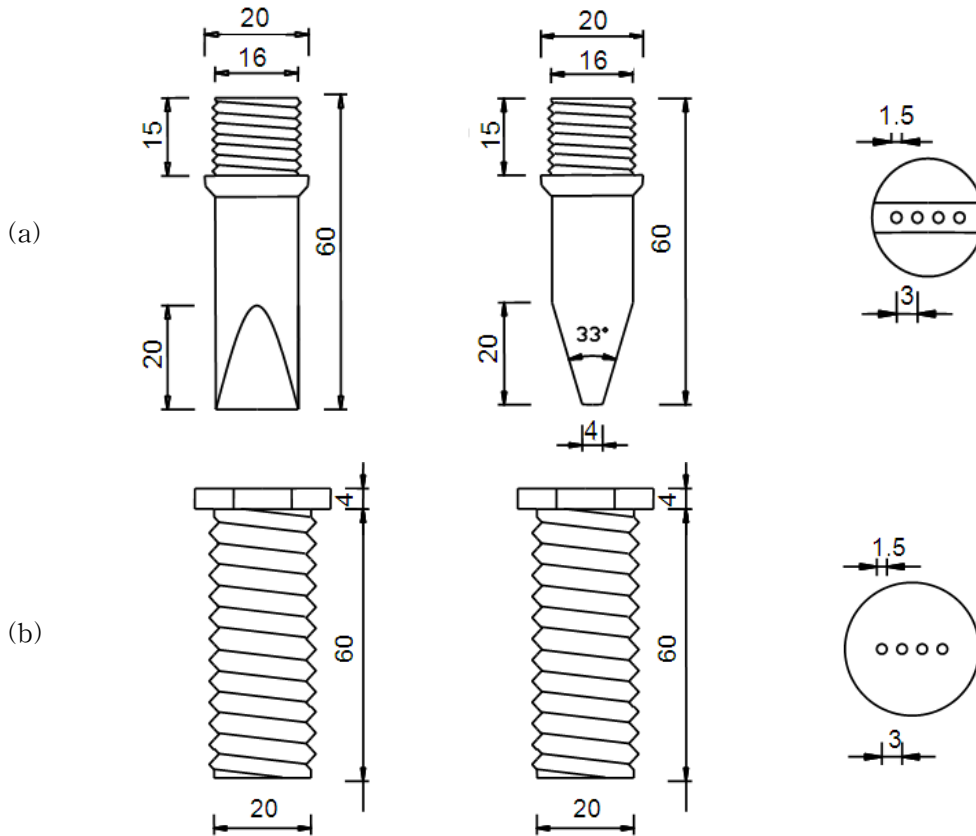


그림 2. 4ERP모식도: (a) WERP; (b) PERP

#### 3.2 웨너배열의 선정

전기비저항 탐사에 사용되는 전극 배열법은 일반적으로 웨너 배열, 슐럼버저 배열, 그리고 쌍극자 배열이 있으며 배열 방법에 따라 다양한 특성을 보여준다. 본 연구에서는 웨너배열법을 선정하였으며 각각의 특성은 다음과 같다.

첫째, 웨너배열법의 전기비저항은 식 (2)와 같이 전극간격과 각 상수들을 이용하여 별도의 보정과정 없이 산정 가능하다.

둘째, 웨너배열법은 다른 배열법보다 관입식 수직탐사에 유리한 분해능을 가지고 있다. 그림 3에서 슐럼버저 배열과 웨너배열은 수직 분해능은 비슷하지만, 수평분해능은 웨너 배열의 경우 비저항 영향이 거의 수평을 형성하므로 수평층 탐지에 더욱 유리할 것으로 판단된다. 쌍극자 배열의 경우는 그림 1(c)와 같으며 감도분포가 날개형이어서 수직 탐사에는 적당하지 않은 것으로 알려져 있다 (Bhattacharya

and Patra 1968).

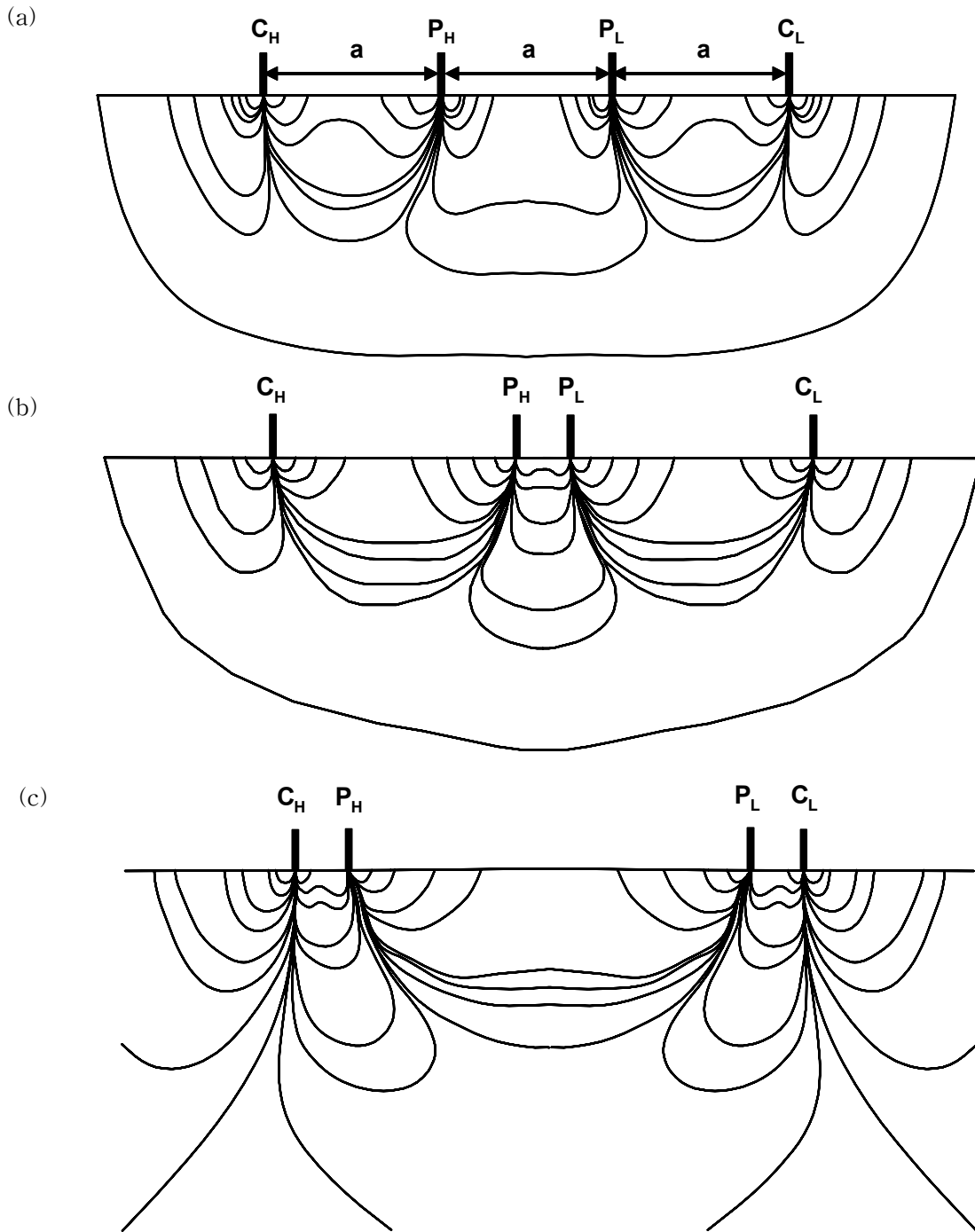


그림 3. 감도분포도: (a) 웨너배열; (b) 슬럼버저배열; (c) 쌍극자배열

셋째, 프로브 선단의 형상은 전류의 흐름으로 탐침의 영역을 결정한다. 따라서 그림 4 (a)와 같이 기존에 개발된 ERCP는 프로브 선단의 형상이 콘모양으로 뽀족하기 때문에 관입에 의해 교란이 발생한 영역을 측정하게 되며, 4ERP는 그림 4 (b)처럼 전극이 선단의 동일 평면상에 일렬로 배열되어 있어 비교란 영역의 특성 파악이 가능하다. 즉, 4ERP를 이용하여 측정한 전기비저항은 ERCP보다 상대적으로 교란의 영향이 적어 신뢰성이 높은 측정값을 반영한다.

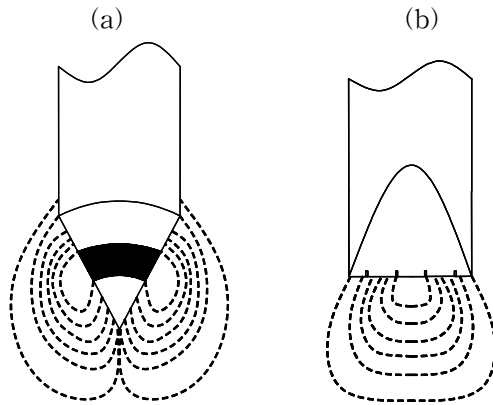


그림 4. 전류흐름영역 비교; (a) ERCP의 전류흐름; (b) 4ERP의 전류흐름

넷째, 웨너배열은 기존의 ERCP에 비하여 전기화학적 반응에 의한 측정오차의 확률이 낮다. 두 프로브 모두 교류 전류를 사용하므로 전기화학적 반응의 가능성은 적지만, ERCP의 경우 측정시간이 길어지면 산화-환원반응으로 전극 주위에 이온축적이 발생한다 (Keller 1982). 반면에, 4ERP는 내부 전극에서만 측정이 이루어지고 전극사이에 흐르는 전류의 크기가 매우 작아 이온 축적 발생 가능성이 낮다.

### 3.3 전극 크기의 영향

웨너 배열법은 식 (1)의 전극 면적을 '0'으로 가정하고 있다. 하지만, 실질적으로 전극은 단면적을 가지고 있기 때문에 전극 크기가 전기비저항 산정에 미치는 영향을 고려하여야 한다.

전극의 크기 영향을 측정하기 위해 전극의 중심간 거리가 3mm이고 서로 다른 직경(D=0.6mm, D=1.5mm)을 가지고 있는 두 개의 PERP가 이용되었다. 그림 5와 같이 농도에 따른 전기비저항 값을 전기전도도계와 두 PERP를 이용하여 측정 후 비교하였으며, 전기전도도가 동일한 전해질 용액에서 전극의 크기가 증가할수록 상대적으로 작은 전기비저항이 측정되었다. 본 연구에서는 전극의 직경을 최소화시켜 실제값을 측정하여 데이터의 신뢰성을 증가시키고자 하였다.

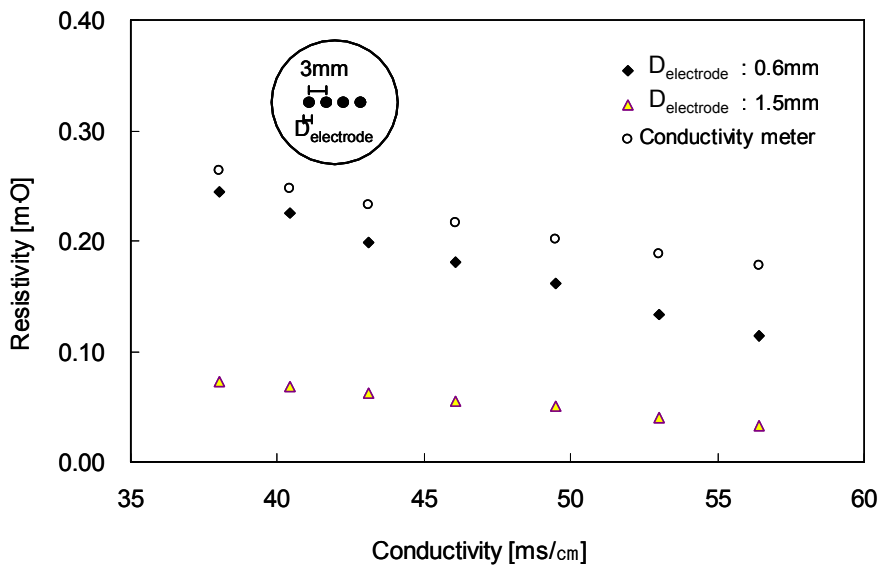


그림 5. 전극크기효과 (INTEC LCR-819; 1V, 100kHz, 15°C)

### 3.4 전극배열 형상의 영향

4ERP는 제작과정에서 발생하는 배열 오차에 의해 측정값의 신뢰성이 떨어질 가능성이 있다. 따라서 그림 6(a)와 같이 배열이 비틀어진 PERP-A와 규격에 맞추어 제작된 4ERP-B를 이용하여 전극배열 형상에 따른 영향을 분석하였다. 측정된 저항은 전기전도도계를 이용하여 계산된 보정식과 식 (1)을 이용하여 전기비저항으로 환산하였다. 전극이 동일한 간격에 일직선으로 배열된 경우 그림 6(b)와 같이 보정법과 식 (1)로 계산한 두 전기비저항은 거의 일치하였으나, 그림 6(a)는 불일치 하는 것을 확인하였다. 즉, 전극이 동일간격으로 일직선상에 설치되면 어떠한 보정과정 없이 식 (1)을 통해 정확한 전기비저항 산정이 가능하다.

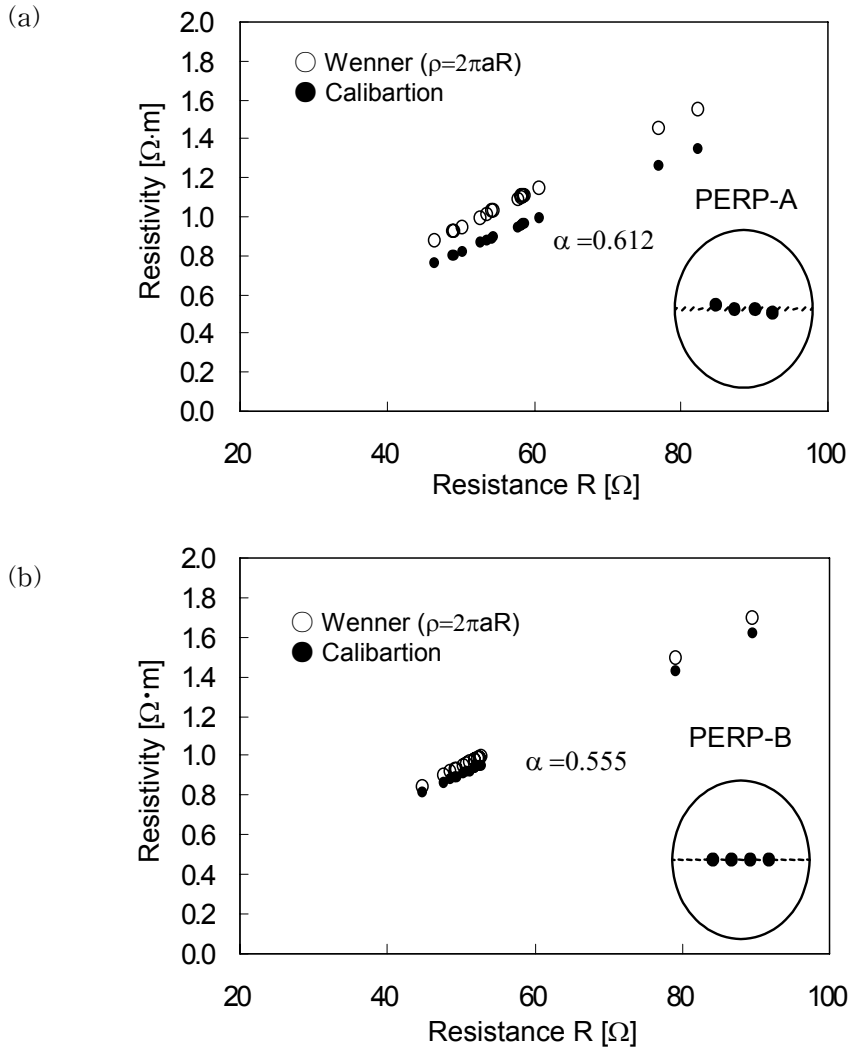


그림 6. 전극형상에 따른 보정법과 웨너레이법의 전기비저항 비교 (Intec- LCR-819; 1V, 100kHz, 15°C)

### 4. PERP를 이용한 압밀실험

본 실험의 목적은 하중재하 동안 시료의 연속적인 전기비저항의 변화를 측정하고 Archie(1942)의 경험식을 이용하여 계산된 전기비저항간극률과 시료의 부피를 이용하여 도출되는 부피간극률을 비교하는 것이다. 또한, 각시료에 적합한 m값을 제시하였으며, 이를 선행연구와 비교하였다.

### 4.1 압밀셀

전기적인 간섭을 최소화시키기 위하여 압밀셀은 그림 7과 같이 내경 74mm, 두께 10mm, 높이가 75mm인 플라스틱재질로 제작되었다. 시료의 압밀을 촉진시키기 위하여 양면배수 조건으로 실험이 진행되었으며 PERP는 하부 다공질판에 설치되었다.

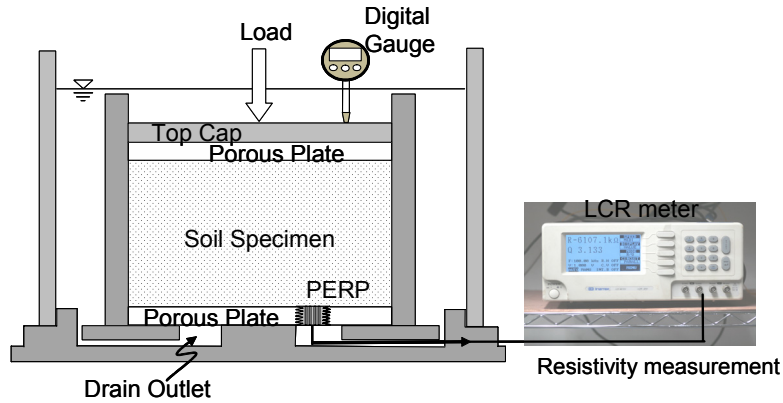


그림 7. Modified Oedometer Cell(플라스틱 재질의 압밀셀)

### 4.2 글라스비드 압밀실험

표 1과 같이 입자의 크기가 다른 6종류의 글라스비드를 이용하여 실험을 수행하였다. 균일한 시료의 조성을 위해 수중강하법이 사용되었으며 사용된 간극수의 전기전도도는 15.8ms/cm이었다.

표 1. 시료의 물성치

	글라스비드						주문진사		
	3	2.25	1.8	1.3	1.1	0.7	1.425	0.725	0.3625
D <sub>50</sub>	3	2.25	1.8	1.3	1.1	0.7	1.425	0.725	0.3625
D <sub>10</sub>	2.7	2.05	1.65	1.23	1.05	0.62	0.92	0.565	0.3
Specific Gravity	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.62	2.61	2.62
Roundness	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.3
Sphericity	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.7	0.7	0.5
곡률계수	1.19	1.12	1.12	1.10	1.10	1.19	1.65	1.29	1.43
균등계수	0.97	1.00	0.95	0.99	0.95	0.98	0.90	1.07	0.84
e <sub>max</sub>	0.76	0.73	0.65	0.61	0.79	0.79	0.81	0.92	0.93
e <sub>min</sub>	0.84	0.91	0.79	0.67	0.95	0.89	1.15	1.05	1.01
통일분류법	-	-	-	-	-	-	SP	SP	SP

하중재하는 표준압밀실험과 동일하게 응력증가비를 1로 하였으며, 즉시침하와 과잉간극수압의 소산을 고려하여 재하시간은 40분으로 결정하였다. 실험은 매 하중 증가 전 시료의 침하량과 전기비저항을 측정하였으며 다양한 시료 입경에 따라 진행되었다.

그림 8(a)는 측정된 전기비저항과 부피를 이용하여 계산된 간극률 간의 관계가 반비례관계인 것을 나타내며, Archie의 경험식과 일치함을 보여준다. 각 입자크기에 따라 수행된 압밀실험의 전기비저항 간극률과 부피간극률은 그림 8(b), (c), (d), (e), (f), (g)와 같다. 본 실험에서 m값은 Wyllie 외(1953)가 제안한 m=1.3을 이용하였으나 부피간극률과 차이가 발생하여 전기비저항간극률과 부피간극률을 유사하게

하는 글라스비드의 크기에 따른 m값을 표 2와 같이 제안하였다.

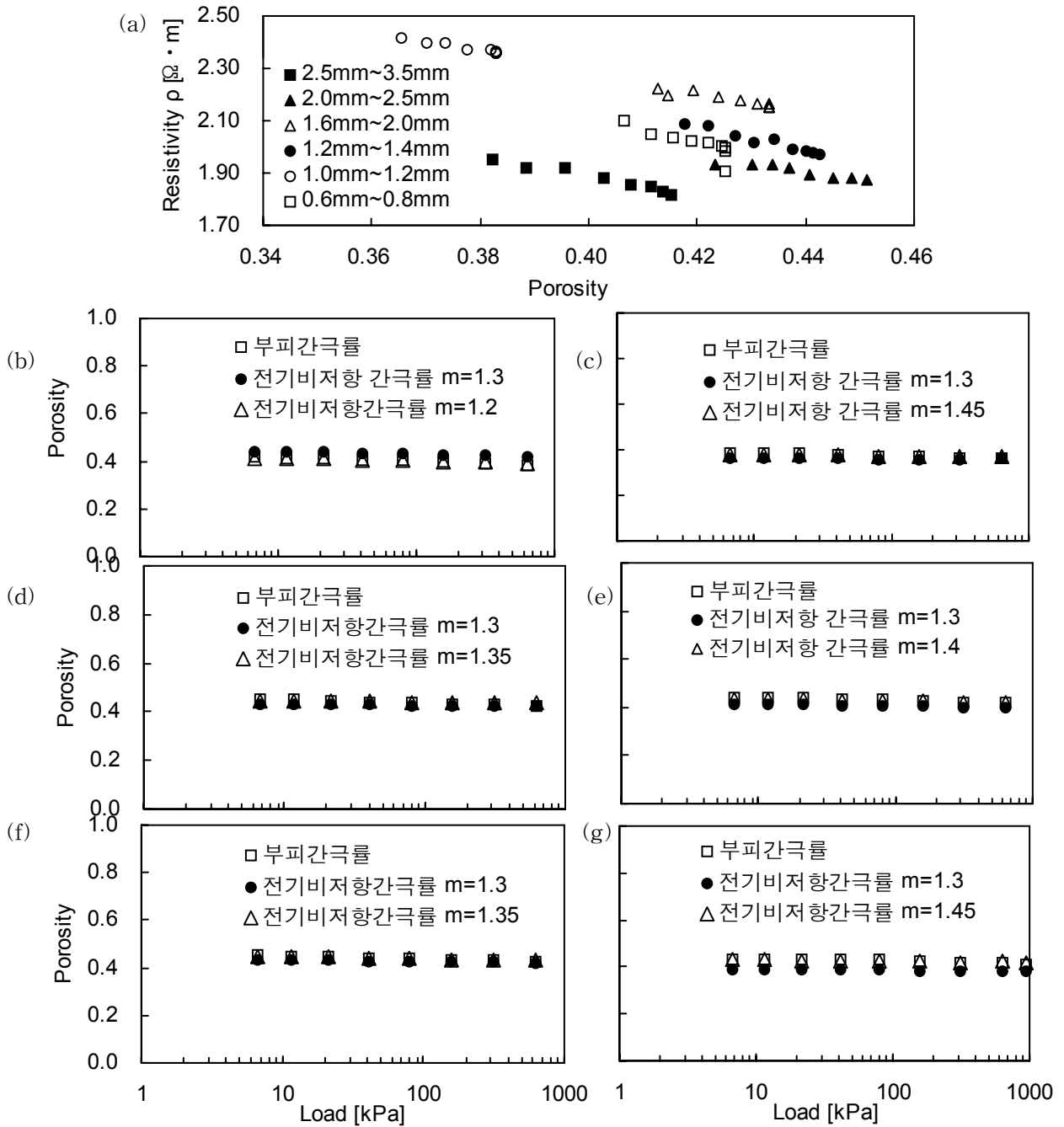


그림 8. 글라스비드 압밀실험: (a) 간극률과 전기비저항; (b)  $D_{50}=3mm$ ; (c)  $D_{50}=2.25mm$ ; (d)  $D_{50}=1.8mm$ ; (e)  $D_{50}=1.3mm$ ; (f)  $D_{50}=1.1mm$ ; (g)  $D_{50}=0.7mm$

표 2. 글라스비드의 Archie 실험상수  $m$

입자크기 $D_{50}$ [mm]	3	2.25	1.8	1.3	1.1	0.7
$m$	1.2	1.45	1.35	1.4	1.35	1.45



### 4.3 모래 압밀실험

표 1과 같이 입자의 크기가 서로 다른 3종류의 주문진사를 이용하여 실험이 진행되었다. 글라스비드의 시료조성 방법과 동일하게 수중강하법을 이용하여 균일한 모래시료를 조성하였고 전기전도도가 약 32.05ms/cm인 간극수를 이용하여 포화시켰다.

$D_{50}=1.425\text{mm}$ 의 경우 표준압밀실험과 동일 하중재하시 간극률의 변화가 작아 간극률 변화에 따른 전기비저항 변화를 명확하게 관찰하기 위하여 40kPa을 초기응력으로 응력을 2배씩 증가시키며 하중을 재하였다.  $D_{50}=0.725\text{mm}$ 과  $D_{50}=0.3625\text{mm}$ 의 경우는 간극률 변화량이 크기 때문에 표준압밀실험과 동일한 하중 단계를 적용하여 하계 실험이 진행되었다. 하중재하 시간은 모래 지반에서 즉시침하가 일어나는 점을 고려하여 모든 시료에서 40분을 유지하였다.

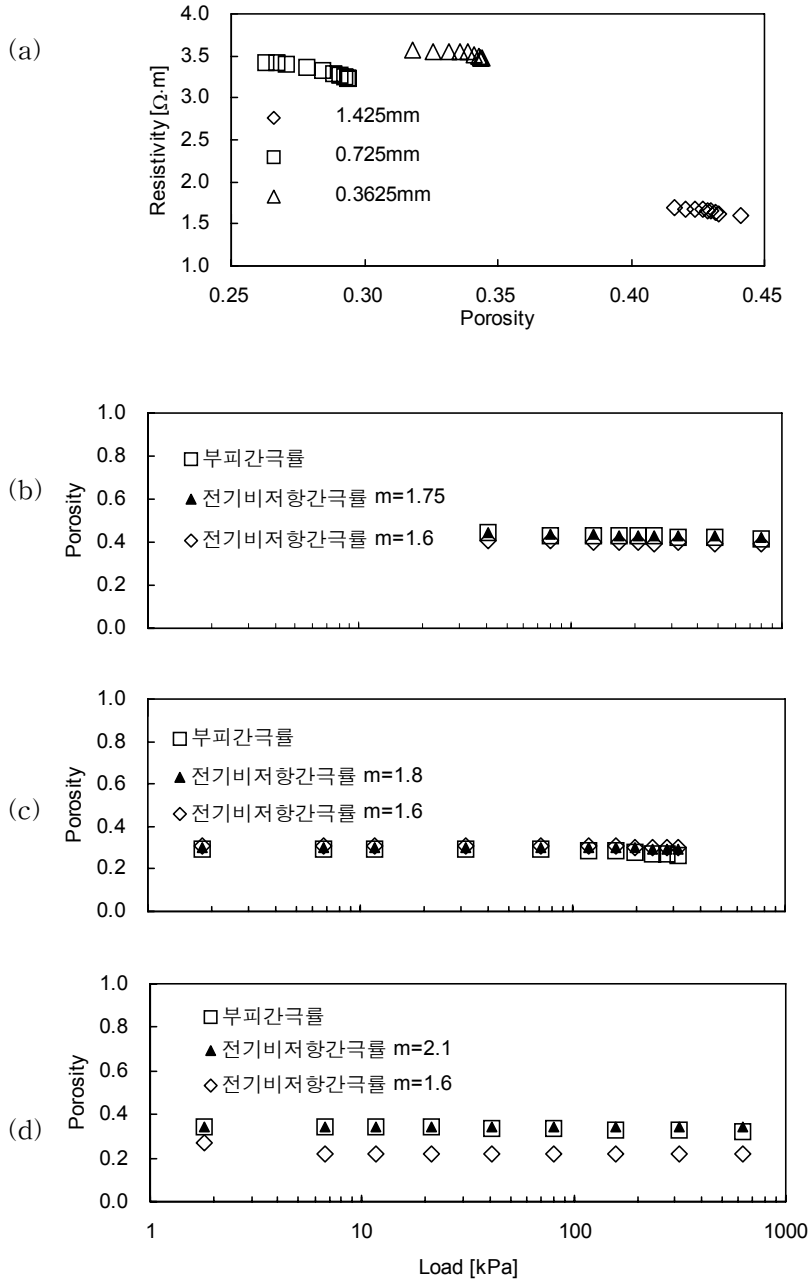


그림 9. 모래 압밀실험: (a) 간극률과 전기비저항; (b)  $D_{50}=1.425\text{mm}$ ; (c)  $D_{50}=0.725\text{mm}$ ; (d)  $D_{50}=0.3625\text{mm}$

모래의 압밀실험 결과는 그림 9와 같다. 모래실험도 글라스비드 실험과 동일하게 제안된  $m(=1.6)$ 값(Archie 1942)을 이용하여 분석된 전기비저항 간극률과 부피간극률간에 차이가 발생하여 표 3과 같이 입자 크기에 따라  $m$ 값을 제시하였다. 1.75와 1.8은 Archie (1942)가 제시한 1.6과 Jackson (1978)이 제시한 1.5에 근사하며 2.1은 Salem and Chilingarian(1999)이 제시한 2~2.3의 범위에 속한다.

표 3. 주문진사의 Archie 실험상수  $m$

입자크기 $D_{50}$ [mm]	1.425	0.725	0.3625
$m$	1.75	1.8	2.1

## 5. 대형캘리브레이션 챔버 실험

관입실험을 수행하기 위해 대형 캘리브레이션 챔버를 이용하여 실험을 수행하였다. 시료 조성 후 WERP를 관입하여 깊이에 따른 전기비저항 분포를 측정하였다.

### 5.1 대형캘리브레이션 챔버

대형캘리브레이션 챔버는 그림 10과 같이 높이가 각각 1.8m, 1.2m이며, 상부에 설치된 피스톤의 유압을 조정하여 시료에 하중이 가해진다. 시료의 침하량은 상부에 부착되어 있는 눈금계이치를 통해 상부판의 침하량으로 측정한다.

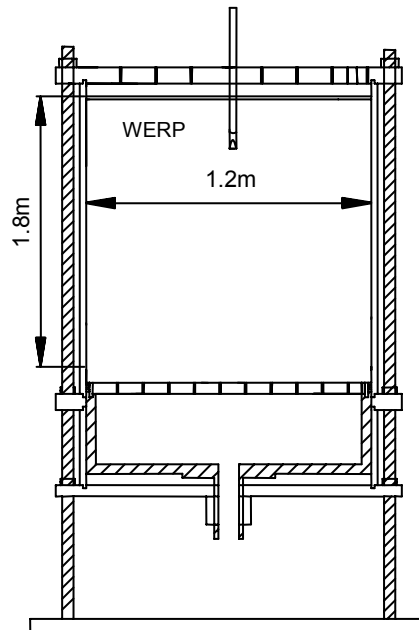


그림 10. 대형 캘리브레이션 챔버

### 5.2 시료조성

규암을 파쇄하여 만든 K-7 Sand와 카올리나이트 계열의 점토를 1:1의 무게비로 조성하여 전기전도도

가 32.08ms/cm인 소금용액과 혼합하였다. 재료분리를 방지하기 위하여 액성한계의 2배인 46%로 맞추어 시료를 조성하였다(Kim 2004). 혼합된 시료는 기포가 형성되지 않도록 주의하여 셀에 주입하였으며 배수면에 부직포와 모래를 이용하여 양면배수를 유도하였다. 조성된 시료는 1.72kPa, 3.45kPa, 5.17kPa, 6.89kPa, 8.62kPa, 10.34kPa, 12.07kPa 순서대로 한 달 동안 가압되었다.

### 5.3 관입실험

시료의 압밀과정 종료 후 깊이에 따른 간극률 분포를 측정하기 위하여 WERP 관입실험을 실시하였다. WERP는 유압기를 이용하여 2mm/sec의 속도로 관입되었으며 데이터는 1mm당 1개의 고해상도로 측정되었다.

측정결과는 그림 11(a)와 같으며,  $m=1.7$ 과 간극수의 전기전도도 32.86ms/cm를 적용하여 그림 11(b)와 같이 깊이에 따른 간극률 분포를 도출하였다. 분석된 간극률 값은 0.24~0.25의 범위에 속하며 상당히 균질하게 시료가 조성된 것을 나타낸다.

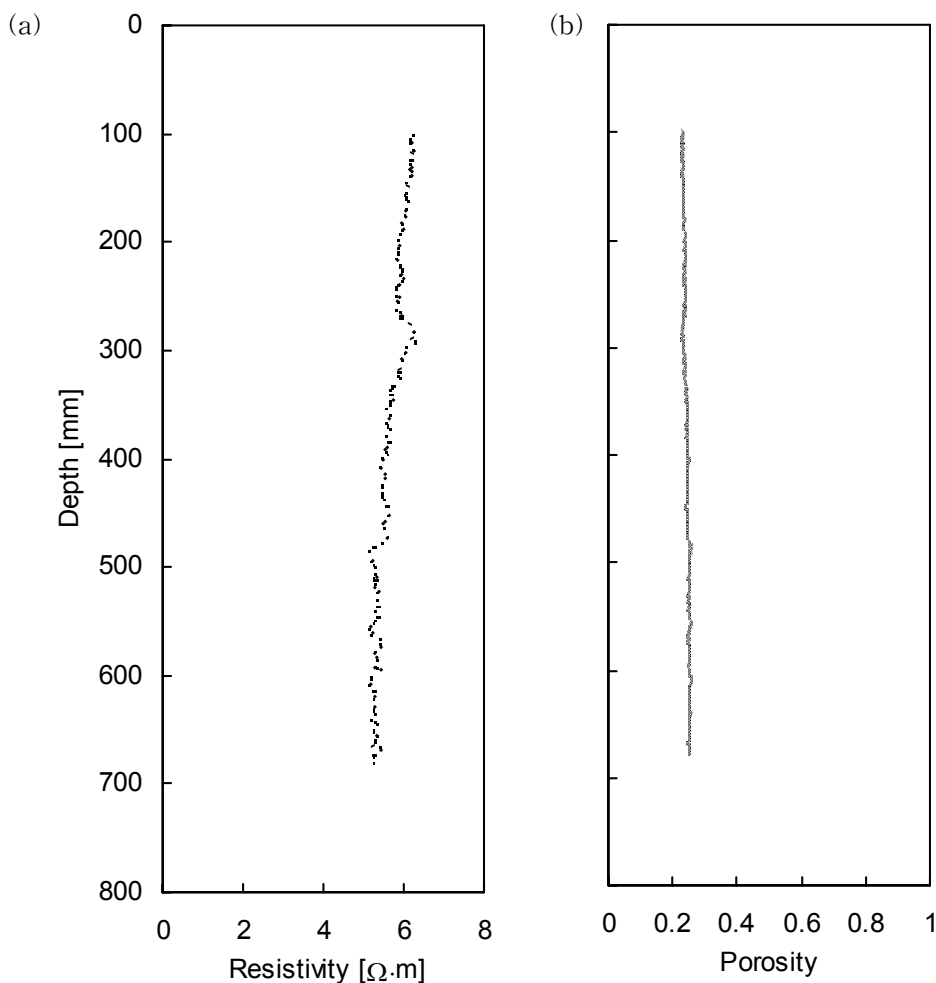


그림 11. 챔버관입실험 전기비저항 분포(Intec LCR-819, 100kHz, 1V): (a)전기비저항주상도; (b)간극률주상도

## 6. 요약 및 결론

본 논문에서 개발된 4ERP는 기존 ERCP의 전극 특성을 보완하여 현장관입용 전기비저항 탐사장비로

4개의 전극을 사용하는 웨너 배열법으로 제작되었다. 4ERP는 현장실험용 WERP와 실내실험용 PERP로 분류되며, 실내실험을 통해 적용성을 평가하여 다음과 같은 요약 및 결론을 얻었다.

1. 4ERP는 웨너 배열법의 공식을 적용하여 일정한 전극간격과 측정된 저항값으로 쉽게 대상지반의 비저항을 산정이 가능하다.
2. PERP를 적용한 모래와 글라스비드의 압밀실험은 간극률의 감소에 따라 전기비저항이 증가하는 경향으로 나타났으며 이는 선행연구와 유사한 결과를 보여준다. 부피간극률과 전기비저항간극률을 유사하게 산정하도록 실험상수  $m$ 을 제시하였다. 선행연구와 유사하게 나타났다.
3. 대형캘리브레이션 챔버를 이용하여 WERP의 관입에 따른 전기비저항 주상도를 도출하였다. 측정된 전기비저항은 간극률로 환산되었으며 시료는 상당히 균질하게 조성된 시료의 균질성을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2005년도 지역특성화 연구개발사업 (과제번호: B04-01)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김준한, 윤형구, 최용규, 이종섭 (2008), "전기비저항 콘 프로브를 이용한 해안 연약지반의 간극률 평가", 한국지반공학회 (심사중).
2. Archie, G. E. (1942), "The electrical resistance log as an aid in determining some reservoir characteristics", Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 146, pp.54-62.
3. Barker, R. D.(1979), "Signal contribution sections and their use in resistivity studies", Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 59(1), pp.123-129.
4. Bhattacharaya, P. K. and Patra, H. P. (1968), Direct and Current Electrical Sounding, Amsterdam: Elsevier.
5. Campanella, R. G, and Weemees, I. (1990), "Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies", Candian Geotechnical Journal, 27, pp.557-567.
6. Jackson, P. D., Taylor-Smith, D., and Stanford, P. N. (1978), "Resistivity-porosity-shape relationships for marine sands", Geophysics, 43(6), pp.1250-1268.
7. Keller, G. V. (1982), "Electrical properties of rocks and minerals, In Handbook of Physical properties of rocks". Edited by R.S Carmichael. CRC Press, Boca Raton, FL, pp.219-293.
8. Lee, C., Lee, J. S., Lee, W., and Cho, T. H. (2008), "Experiment Setup for Shear Wave and Electrical Resistance Measurements in an Oedometer", Geotechnical Testing Journal, ASTM, 31(2), pp.149-156.
9. Salem, H. S. and Chilingarian, G. V. (1999), "The cementation factor fo Archie's Equation for shaly sandstone reservoirs", J. Pet. Sci. Eng. 23 pp.83-93.
10. Kim, T. J. (2004), "Dissipation of pore water pressure due to piezocone penetration in OC clay, Ph.D thesis", Korea University.
11. Willie, M. R. J. and Spangler, M. B. (1953). "Formation factors of unconsolidated porous media: Influence of particle shape and effects of cementation", Petrol. Trans. AIME, v.198, pp.103-110.