

## 개량된 머드포오크 관입시험 장치의 개발 및 적용 Improved MudFork Penetration Test and its Application

김학성<sup>1)</sup>, Hak-Sung Kim, 목영진<sup>2)</sup>, Young-Jin Mok

<sup>1)</sup> 경희대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyunghee University, 정회원

<sup>2)</sup> 경희대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyunghee University, 정회원

**SYNOPSIS** : A new s-wave probe, called "MudFork", has been recently developed and is used in accurate measurements of shear wave velocities of soft soils. In previous researches, some instrumental defects of the probe have been reported. Bending deformation of probe is caused by small section modulus of blades, and open-ended bender elements are vulnerable to damage during penetration. Herein, we improved the MudFork to solve these problems. Field tests at Sinan, Jeollanamdo using the improved MudFork were conducted. Results from MPT are compared with the results from CPT.

**Keywords** : mudfork, shear wave velocity, stiffness, bender element

### 1. 서론

최근 벤더 엘리먼트의 특성과 크로스홀 탄성과 시험의 장점을 조합한 연약지반의 강성 측정 장치인 머드포오크(MudFork)를 개발하였고 인천의 연약지반 현장에서 깊이별 전단파를 계측해 보았다(정재우 외, 2008). 벤더 엘리먼트를 이용한 연약지반 강도 측정 시험인 머드포오크 관입시험(MudFork Penetration Test, MPT)는 연약지반의 비배수 강도 측정 및 현장의 밀도추정이 가능하다(Mok et al., 2009). 하지만, 현장적용에 있어 기존의 머드포오크 장비는 몇 가지 단점이 있었다. 기존의 머드포오크에서는 프로브의 프레임(Frame)을 따라 전달되는 기계적인 진동 노이즈를 주변지반으로 소산시키기 위하여 판상형의 프레임을 사용하였다(목영진 외, 2007; Jung et al., 2008). 판상형 프레임을 사용한 프로브는 연약한 점토에서는 수월한 관입이 가능하나, 경질 토층에 도달하면 그림 1과 같이 블레이드(blade)와 스템(stem) 사이의 단면이 바뀌는 부분에서 휨변형이 발생할 수 있다. 또한, 기존 장비에서는 대상매질(지반)의 전단파를 측정하기 위하여 벤더 엘리먼트를 블레이드에서 돌출시켜 설치하였으나, 이로 인해 프로브 관입도중 벤더 엘리먼트가 쉽게 손상되는 단점이 있다. 따라서 머드포오크의 원활한 현장적용을 위하여 장비의 개량이 시급하였다. 본 연구에서는 머드포오크 개량을 위한 일련의 실내시험을 실시하였고, 실내 실험 결과를 통해 개량된 머드포오크를 전라남도 신안의 연약지반 현장에 적용하였다.

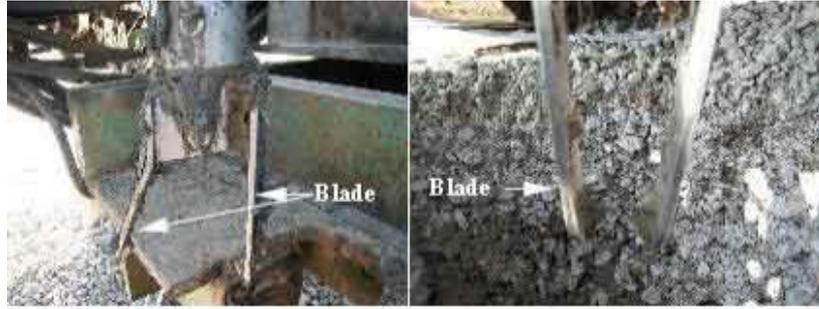


그림 1. 현장 시험 도중 변형된 머드포오크

## 2. 프로브 개량

머드포오크의 개량에는 크게 두 가지 특징이 있다. 첫 번째는 관상형 블레이드의 휨 변형을 억제하기 위하여 블레이드의 단면을 증가시킨 것이고, 두 번째는 블레이드에서 돌출된 벤더 엘리먼트를 블레이드 안쪽으로 매립시키는 것이다.

### 2.1 기존 프로브와의 비교

기존 머드포오크는 그림 2(a)와 같이 두 개의 블레이드로 이루어진 소규모 크로스홀 탄성과 시험 형태의 진단과 측정 프로브이다. 그림 3(a)의 상세도와 같이 기본적으로 하나의 블레이드에 하나의 스템이 부착되어서 몸체를 이루고 서로 상반된 두 개의 블레이드가 나일론 재질의 댐퍼(Damper)를 사이에 두고 연결되어진다. 그림 2(b)는 개량된 머드포오크의 사진이고, 그림 3(b)는 개량된 머드포오크의 상세도이다. 기본적으로 머드포오크의 개량에 있어서 진단과 측정 기본 원리의 변화는 없다. 그림 3(b)와 같이 블레이드의 단면을 증가시켜 휨 변형을 억제하였고, 벤더 엘리먼트를 단면이 증가된 블레이드 안쪽으로 매립하였다. 벤더 엘리먼트의 매립을 통해 프로브의 관입도중 벤더 엘리먼트가 손상되는 것을 막을 수 있다. 하지만 내부로 삽입된 벤더 엘리먼트의 진단파를 효율적으로 지반에 전달시켜야 하는 문제가 발생하였다.

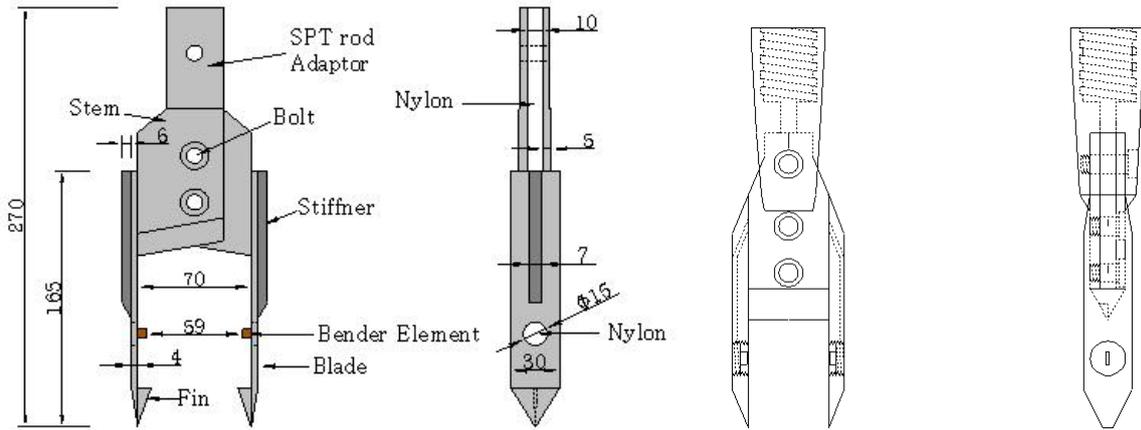


(a)기존 머드포오크



(b)개량된 머드포오크

그림 2. 기존 머드포오크와 개량된 머드포오크 사진

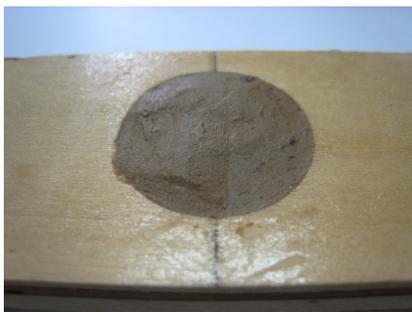


(a) 기존 머드포오크 상세도 (b) 개량된 머드포오크 상세도

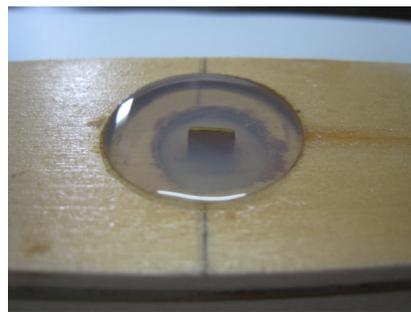
그림 3. 기존 및 개량 머드포오크의 상세도

### 3. 실내 시험

블레이드 안쪽으로 벤더 엘리먼트를 매립하기 위하여 여러 가지 채움재를 적용하여 보았다. 먼저 그림 4(a)와 같이 나무로 모형 블레이드를 만들고, 빈 공간을 찰흙으로 채운 후, 카올리나이트(Kaolinite) 슬러리 토조에서 모형 블레이드의 작동성을 확인해 보았다. 찰흙의 경우, 벤더 엘리먼트와 채움재 간의 밀실한 접촉이 육안으로 확인하기 어려웠고, 채움재의 표면에서 대상 지반으로의 전달과 전달이 상대적으로 어려웠다. 찰흙 대신에 그림 4(b)와 같이 실리콘을 채움재로 적용하여 보았다. 실리콘의 경우에는 찰흙과는 달리 벤더 엘리먼트에서 발생된 전단파의 전달 및 매질을 통과한 전단파의 수신이 가능하였다. 여러 종류의 실리콘을 시험해 본 결과, 경도 및 강도가 높은 실리콘은 전단파의 전달에 효율적이지 못하였다. 이는 실리콘의 강성으로 인해 벤더 엘리먼트의 발전시에 실리콘 채움재의 공진 변형량이 제한받기 때문이다. 최종 채움재로 실리콘을 선택하였으나, 보다 효과적인 전단파의 전달을 위하여 추가의 연구가 필요하다. 그림 4(c)는 카올리나이트 슬러리 토조에 실리콘 채움재를 이용한 모형 머드포오크와 기존 머드포오크 장비 간의 비교 시험을 실시하는 사진이다.



(a)찰흙 채움



(b)실리콘 채움

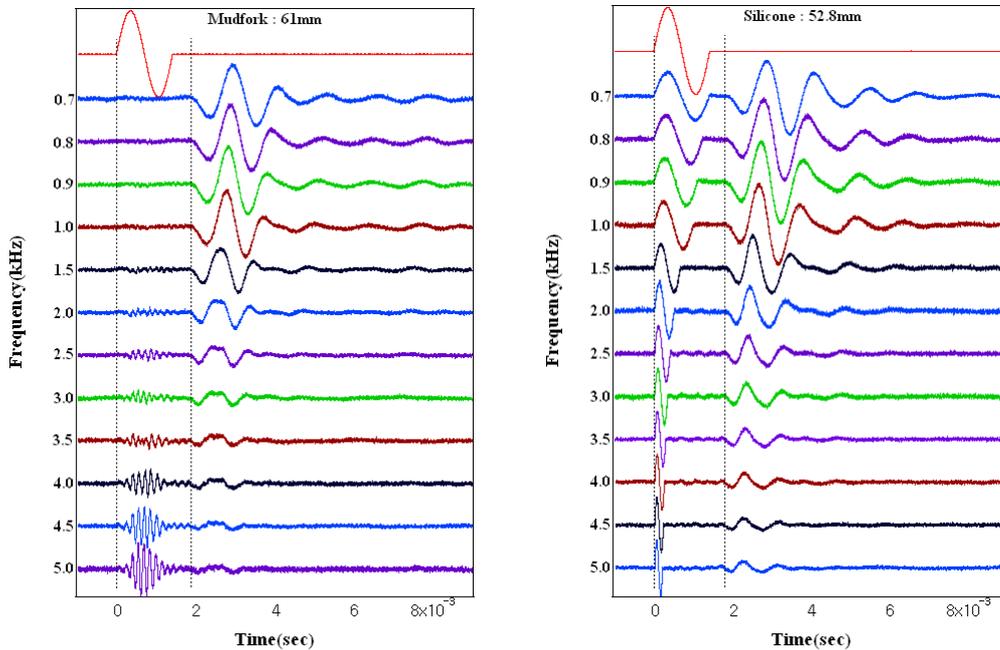


(c)실내토조 비교 시험

그림 4. 찰흙 채움(a), 실리콘 채움(b) 및 머드포오크와의 실내토조 비교 시험(c)

그림 5는 실내토조 비교 시험을 통해 획득한 주파수(Frequency) 영역에 따른 전단파 신호이다. 그림 5(a)는 벤더 엘리먼트의 양단 거리가 61mm인 기존 머드포오크를 통하여 획득한 신호이고, 그림 5(b)는 벤더 엘리먼트 양단 거리가 52.8mm인 실리콘을 채운 모형 머드포오크를 통해 획득한 신호이다. 그림 5(a)의 초기 진동으로부터 머드포오크의 프레임에 타고 들어오는 노이즈로 인해 주파수가 증가할수록 철제 프레임의 공진이 커지는 것을 확인할 수 있다. 그림 5(b)에서는 그림 5(a)와 달리 초기 신호에서

전기적 노이즈(crosstalk)가 발생한 것을 확인 할 수 있다. 이러한 현상은 벤더 엘리먼트의 절연상태 불량이나 측정장비의 접지 상태 불량에 의해 발생한 것으로 추정된다. 개량 머드포오크 장비에서는 기존 장비의 결과에 비해 높은 주파수에서도 뚜렷한 전단파 수신이 가능하였다.



(a) 기존 머드포오크의 전단파 신호      (b)모형 모드포오크의 전단파 신호  
 그림 5. 기존 머드포오크와 실리콘 채움재를 이용한 크로스홀 전단파 신호

#### 4. 현장 적용

실내 시험을 통하여 실리콘 채움재의 성능을 확인하였고, 이를 토대로 그림 2(b)와 같이 개량된 머드포오크를 제작하였다. 개량된 머드포오크의 현장 적용을 위하여 전라남도 신안의 연약지반 현장에서 MPT 관입시험을 수행하였다. 현장 적용은 두 지점에서 이루어졌으며, 한 지점은 농경지가 형성되어 있는 육상지역이고, 다른 한 지점은 갯벌(해상)이다. 육상지점 및 해상지점에서 MPT를 수행 시, 프로브의 손상을 방지하기 위하여, 지표로부터 1m를 천공하였고, 천공에 의한 지반교란을 감안하여 1.5m부터 전단파 신호를 측정하였다.

육상지점에서는 심도 1.5m~5.75m까지 매 0.25m마다 전단파 신호를 측정하였고, 이후 단단한 토층의 출현으로 5.9m, 6.0m에서 전단파 신호를 측정하고 MPT를 종료하였다. 또한 MPT 결과의 비교를 위하여 별도의 콘관입시험(CPT)를 실시하였다. 해상지점에서의 MPT는 파랑에 의한 관입장비의 흔들림으로 MPT 수행도중 대상지반을 교란시킬 우려가 있어, 바닷물이 완전히 빠져나간 간조 시에만 시험 수행이 가능하였다. 해상 시험에서는 심도 1.5m~6.0m까지 0.5m 간격으로 전단파 신호를 측정하였고, 6.0m에서 경질 점토층에 접하여 시험을 종료하였다.

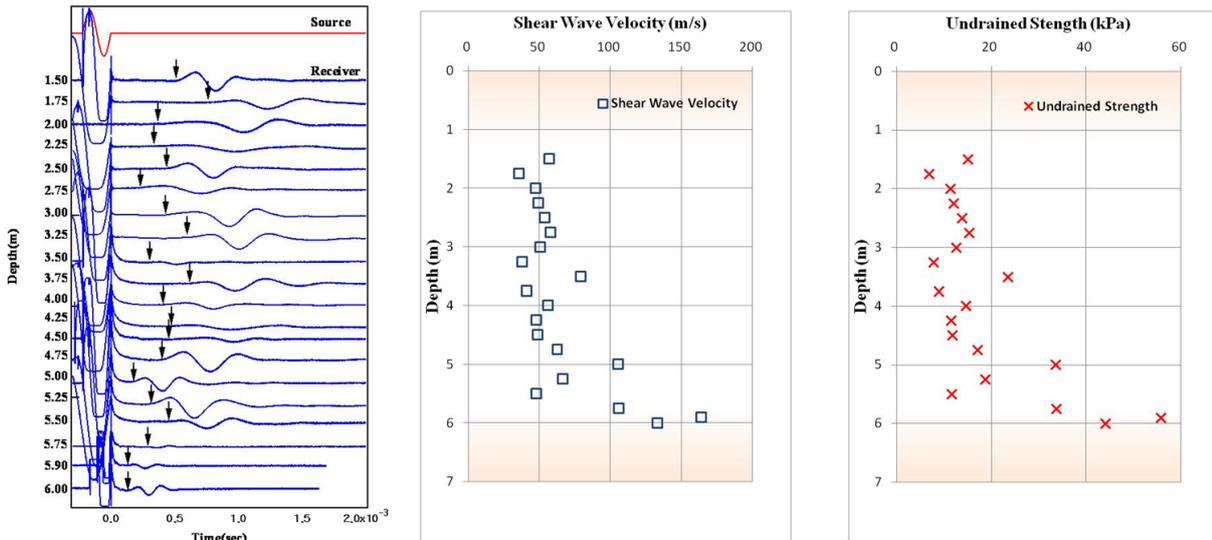
그림 6(a)는 육상지점에서 획득한 깊이별 전단파 신호이다. 획득한 전단파 신호 앞부분의 파형은 전기적 노이즈이고, 화살표로 표시된 부분이 지반을 통해 전달된 전단파 신호의 초동(First arrival)이다. 그림 6(b)는 획득한 전단파 신호를 통해 계산된 육상지점의 전단파 속도 분포이다. 육상지점 및 해상지점의 시추를 통해 대상 지층이 실트질 점토층으로 이루어져 있음을 확인하였다. 육상 지점에서 채취한 시료의 기본물성 결과는 표 1과 같다. MPT를 통해 획득한 전단파 속도를 인천 지역의 실트질 세립토(박동선, 2008)에 대해 제안된 식(1)에 대입하여 산출한 비배수 전단강도를 그림 6(c)에 도시하였다.

표 1. 육상구간 기본물성시험 결과

Depth(m)	$G_s$	$w_n$ (%)	LL(%)	PI(%)	USCS
4.0~4.8	2.72	48.5	51.3	31.2	CH

$$C_u(S_u) = 0.38 V_s - 6.65 \quad (1)$$

여기서,  $C_u$ 의 단위는  $kPa$ 이고,  $V_s$ 는  $m/sec$ 이다.



(a) 깊이별 전단파 신호 (b) 전단파 속도 분포 (c) 비배수 전단강도

그림 6. 육상지점의 깊이별 전단파 신호와 전단파 속도, 비배수 전단강도 분포

그림 7은 MPT를 통해 산출한 비배수 전단강도와 CPT를 통해 산출한 비배수 전단강도 분포이다. 여기서 콘관입시험의 콘지수  $N_{kt}$ 는 13.1을 사용하였다. 그림 7에서 MPT와 CPT를 통한 비배수 전단강도는 매우 유사한 값을 나타내며, 이를 통해 MPT 시험의 적용성을 확인하였다.

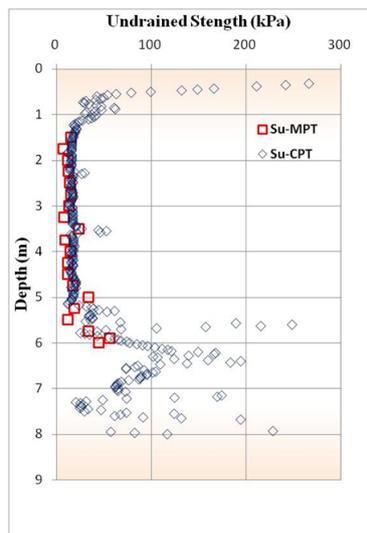
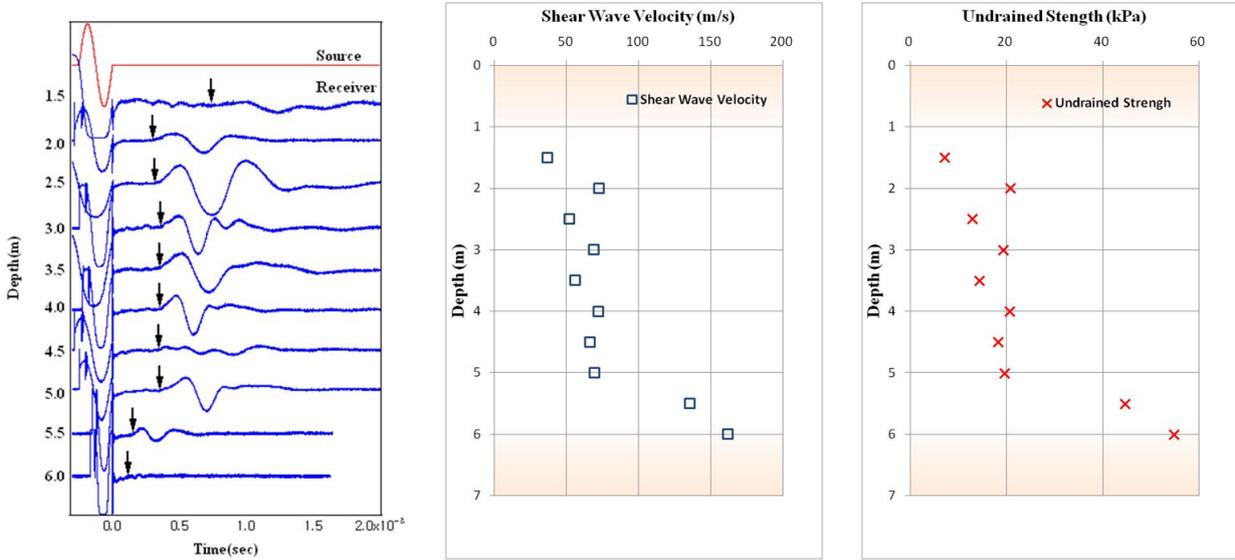


그림 7. MPT, CPT를 통해 얻은 비배수 전단강도 profile

그림 8(a)는 해상지점의 깊이별 전단파 신호이고, 그림8(b)는 전단파 속도 분포, 그림 8(c)는 식(1)을 통하여 산출한 비배수 전단강도 분포이다. 해상지점에서는 현장 사정으로 인해 별도의 콘관입시험을 병행하지 못하였다.



(a) 깊이별 전단파 신호 (b) 전단파 속도 profile (c) 비배수 전단강도

그림 8. 해상지점의 깊이별 전단파 신호와 전단파 속도, 비배수 전단강도 분포

## 5. 결론

기존의 머드포오크의 휨변형 문제와 벤더 엘리먼트의 손상 문제를 해결하고 현장에서의 수월한 MPT 수행을 위하여 머드포오크를 개량하여 전라남도 신안의 연약지반 현장에 적용하였다. 개량된 머드포오크는 현장의 전단파를 계측하여 비배수 전단강도의 깊이별 분포를 얻었다. 또한 별도로 수행한 콘관입 시험 결과와의 비교를 통하여 개량된 머드포오크의 현장 적용성을 검증하였다. 이에 도출된 결론과 향후 연구방향은 다음과 같다.

1. 효과적인 전단파 계측을 위한 지속적인 벤더 엘리먼트 프로브의 개량이 필요하다.
2. 개량된 프로브는 현장시험을 통해 효율적으로 전단파를 발생, 수신하는 것으로 확인되었다
3. 다양한 현장에서의 MPT 적용 및 실내 시험 비교를 통하여 지반 특성에 따른 비배수 전단강도와 전단파와의 신뢰성 있는 상관관계 도출이 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 일부 토지공사 중소기업지원과제 사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

목영진, 정재우, 한만진(2007) 연약지반 강성측정을 위한 벤더 엘리먼트의 현장 적용성 연구. 한국지반 공학회 논문집, 한국지반공학회, 제22권, 제11호, pp.37-45.

- 박동선(2008) 실트질 세립토의 비배수강도와 전단 탄성계수의 상관관계. 박사학위논문, 경희대학교
- 정재우, 오상훈, 김학성, 목영진(2008) 연약지반 강성측정을 위한 벤더 엘리먼트 프로브. **대한토목학회논문집**. 대한토목학회, 제28권, 제2c호, pp. 125-131.
- Mok, Y.J., Jung, J.W., Park, D.S. and Kim, H.S.(2009) Spanning static properties of a normally consolidated silt with dynamic stiffness. *Proceedings of the International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering(IS-Tokyo 2009)*, Tokyo, Japan
- Jung, J.W., Park, C.S. and Mok, Y.J.(2008) Development of buried sensors for stiffness measurements of soft clays using bender elements. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV*, Sacramento, USA