해저 표준관입시험 장비의 밀폐형 항타부 CFD 해석

고진환 · 장인성 · 김우태 · 권오순 · 백원대
한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구부

CFD Analysis of Underwater Standard Penetration Test Equipment

Jin Hwan Ko, In Sung Jang, Woo Tae Kim, O Soon Kwon and Won Dae Baek
Coastal Development and Ocean Energy Research Division, KIOST, Ansan, Korea

KEY WORDS: Offshore geotechnical investigations 수중지반조사, SPT(Standard Penetration Test) equipment 표준관입시험 장치, Closed penetration part 밀폐형 항타부, CFD analysis CFD 해석

ABSTRACT: In our study, a closed-type penetration unit for standard penetration test (SPT) equipment was developed in order to operate in an underwater environment. This type causes energy dissipation, mainly due to the small gap between an airtight case and moving hammer. The dissipation was estimated through a CFD analysis. The computed dissipated energy was less than 1.2% compared to the potential energy of the hammer with the given gap. Subsequently, the impact energy of the underwater SPT equipment was within 1.2% of that for the SPT equipment on land.

1. 서 론

최근 들어 초장대 교량이나 인공섬, 해상풍력기초, 해양에너지 발전구조물, 그리고 해저터널 등 대수심에 대한 해양구조물의 수요가 점차적으로 증대되고 있다. 이렇듯 다양한 분야에서 시도되고 있는 해양 구조물을 안전하게 건설하기 위해서는 구조물을 지지하고 있는 해저지반의 특성을 정확하게 평가하는 것이 상당히 중요하다.

지금까지 국내 해양구조물은 대부분 항만 구조물로, 수심 20m 내외의 저수심에서 바지선을 활용하여 일반 육상용 보링 장비 및 원위치 시험 장비를 그대로 적용하고 있다. 하지만 조류가 센 지역이나 높은 수심에 대해서는 시험 결과의 부정확성뿐만 아니라 시험 자체가 어려워지는 경우가 다수 있다. 이에 따라 대수심 조건에서 신뢰성 높은 지반조사를 수행할 수 있는 해저지반조사 장비의 개발이 필요하다. 해외의 경우에는 대수심 석유시추개발을 위한 목적으로 다운홀(Downhole) 방식과 착저식(Seabed) 방식 등으로 구분하여 많은 장비가 개발되어 실제 현장에서 활용되고 있지만(MLTM, 2007; Cho, 2007; Freudenthal, 2006), 국내에서는 연약지반에 국한되는 착저식 해양콘관입시험기(MLTM, 2007; Jang et al., 2007) 이외에 모든 지반조건에 활용될 수 있는 보링장비가 없는 실정이다.

이에 따라 초장대 교량을 비롯한 해양구조물 건설시 대수심

용 지반조사를 수행하고자 하는 목적으로 최근 착저식 지반조사 장비의 개발이 진행되고 있다(Kim et al., 2011a; Kim et al., 2011b). 이 장비를 활용하면 해상 작업선으로부터 해양구조물이 설치되는 지점으로 이동하여 목표 수심으로 내려진 후 해저면에 착저하여 원격 조종을 통해 지반조사 작업을 하게 된다.

여기서 지반의 물성을 파악하기 위한 원위치 시험으로 표준관입시험(SPT)을 활용하게 되는데, 말뚝기초를 비롯하여 다양한 해양 구조물의 설계기준에서 조사시험항목으로 포함되어 있다. 이에 따라 수중에서 SPT를 수행할 수 있는 장비는(Kim et al., 2011b) 초장대 교량뿐만 아니라 다양한 해양 개발에서 필수적인 장비라 할 수 있다.

기존의 SPT 장치는 육상 조건으로 개발 및 활용되고 있는 것으로 수중 조건에서는 물의 저항 등으로 인해 육상에서와 동일한 조건으로 시험하기 어려운 문제점이 있다. 본 연구에서 개발되는 SPT 장치는 수밀된 케이스 내에 재하 해머를 설치하는 방식으로 육상 조건과 동일한 시험 과정을 구현할 수 있다.

한편, SPT의 결과인 N값(63.5kg 해머를 76cm 높이 자유낙하 조건에서, SPT 샘플러가 지중으로 30cm 관입될 때까지의 타격 회수)을 산정하는데 있어 해머가 로드로 전달되는 에너지가 중요하다(Korea highway corporation, 2002). 이에 따라 수밀된 케이스와 재하해머 사이의 간격이 로드 전달에너지에 미치는 영향을 파악하는 것이 필요하다.

Received 2 May 2012, revised 28 September 2012, accepted 11 December 2012

Corresponding author In Sung Jang: +82-31-400-7810, isjang@kiost.ac

© 2012, The Korean Society of Ocean Engineers

본 연구에서는 SPT 해머를 감싸고 있는 밀폐케이스의 존재 유무에 따라 자유낙하하는 해머가 받는 힘(중력방향 힘)의 상대비교와 함께 소모되는 에너지량을 추출하는 것을 주 목적으로 하고 있다. 유체와 구조물의 상대거동 분석에 주로 활용되고 있는 CFD(Computational fluid dynamics) 해석을 통해 일반적인 육상 SPT 조건과 개발장비를 활용한 수중에서의 SPT 조건을 서로 비교하고 소모되는 에너지량을 예측하고자 한다.

2. 해저 착저형 지반 조사 장비

2.1 전체구성도

Fig. 1은 본 연구에서 개발 중인 해저 착저형 지반조사 장비로서 수심 100m 조건에서 심도 50m까지의 지반굴착을 할 수 있는 장치와 표준관입시험(Standard penetration test, SPT)을 위하여 자동 착탈식 로드, 토사 지반공벽 보호용 케이싱 장치, 로드 및 케이싱 자동 연결 및 분리 시스템, 로드 및 케이싱 자동 공급 및 수납 시스템, 무인 원격 조정이 가능한 장비 제어 시스템, 다양한 해저지반에 착저가 가능한 프레임 장치 기술을 포함하고 있다.

해저착저형 지반조사장비의 모식도는 Fig. 1과 같고 전체적인 운용 매커니즘은 다음과 같다. 해저면에 장비를 착저하여 50m 심도로 보링을 하기 위해서는 연결용 로드(Dirll rod)나 케이싱을 지중 속으로 관입하여야 한다. 여기서 케이싱은 지반 시추 시 토사로 이루어진 공벽이 무너지는 것을 막는 역할을 한다. 본 장비에는 89mm 외경의 케이싱, 73mm 외경의 케이싱, SPT를 수행하기 위한 연결용 45mm 외경의 연결 로드, 45mm 외경의 연결 로드+ SPT 샘플러 등 4종류의 로드가 활용되는데, 로드보관모듈(⑤)에는 보링시 로드나 케이싱을 공급하고 회수시키 다시 보관하는 모듈이다. 로드공급모듈(③)은 2기의 그리퍼(Gripper)를 장착하고 있으며 이 그리퍼를 이용하여 로드보관모듈에서 케이싱이나 로드를 잡아서 자동관입모듈(④)에 로드를 공급하고 회수하게 된다. 여기서의 자동관입모듈은 로드나 케이싱을 지중 속으로 관입하기 위해 회전이나 상하 왕복, 순환수 공급 등의 역할을수행한다. 보링작업시 로드공급모듈(③)로 공급된 케이싱을 자동관입모듈(④)에서 보링작업을 하고 표준관입시험 작업시에는 AW로드+SPT샘플러를 공급받아 표준관입시험 재하장치(②)에 공급하여 SPT 향타를 하게 된다. 향타 후 샘플

Fig. 1 Schematics of offshore geotechnical investigation equipment

러를 회수하고 연장되는 케이싱을 공급받아 굴착작업을 진행한다. 이와 같은 작업을 반복수행하여 심도 50m까지 보링 및 표준관입시험을 수행하게 된다. 한편, 내압탱크(①)는 각 모듈의 유압시스템과 전기제어 시스템 그리고 장비로부터 얻어지는 데이터의 송수신 장치를 장착하고 있으며, 수심 100m 조건에서도 수압을 견딜 수 있는 구조로 되어 있다.

2.2 표준관입시험 장치 소개

Fig. 2는 해저착저형 지반조사장비를 개발하기 위한 중요모듈 중의 하나인 표준관입시험 모듈로 해저 지질 조사용 표준관입시험 장치이다. 기존의 육상에서 사용되는 표준관입시험 장치를 수중에서도 동일한 조건에서 표준관입시험을 수행할 수 있도록 제작을 하였다.

수중 표준관입시험을 위한 향타부를 Fig. 2(a)와 같이 밀폐 케이스를 제작하여 물이 들어오는 것을 막고 또한 육상과 동일한 조건의 자유낙하가 가능하도록 제작을 하였으며 하부의 연결부는 수밀처리와 방식처리를 하여 물의 유입을 차단하였다. Fig. 2(b),(c)에서와 같이 유압 액추에이터(Actuator)의 상승으로 무게 63.5kg의 해머를 일정한 76cm 높이까지 들어 올려 자유낙하시키며 가이드 라인에 의하여 연결 로드로 수직낙하를 유도한다. 이와 같은 운동을 반복하여 표준관입시험을 하게 되며, 표준관입시험의 결과인 N값은 지반의 설계정수 산정에 활용하게 된다. N값을 육상과 동일하게 산정하기 위하여 해머가 자유낙하하여 얻어지는 결과와 수밀된 케이스와 재하해머 사이의 간격에 따른 에너지 전달에 미치는 영향을 파악하는 것이 중요한 요소 중의 하나이다. 본 연구에서는 이 영향을 CFD 해석을 통해 예측하고자 한다.

Fig. 2 Underwater standard penetration test equipment(Kim et al., 2011a)

3. 항타부 CFD 모델링과 해석

전산유체역학(CFD)은 유체 현상을 수학적으로 모델링한 나비에-스토크스 방정식(Navier-stokes equation)을 유한차분법, 유한요소법, 유한 체적법 등의 방법들로 이산화하여 수치적으로 유체 유동문제를 풀고 해석하는 방법을 나타낸다(Anderson, 1995). 이산화를 앞서 먼저 다음의 형상 모델링이 요구된다.

3.1 치수 및 형상 모델링

계산량 저감과 해석 편이성을 위해 실제 모델의 단순화가 필요하다. Fig. 3과 같이 위쪽의 그리퍼(Gripper) 시스템을 삭제하여 단순화되었으며 이는 해석에 직접적으로 미치는 영향이 적다고 가정되었다. 해머와 밀폐 케이스와의 간격은 그림과 같이 40mm가 되며 낙하 시 아래 부분의 공기가 위 부분으로 유통하는데 저항이 적도록 설정된 값이다.

Fig. 4는 개방된 형태의 경우 해머와 전체 형상을 나타낸 것

Fig. 3 Geometric modeling of the closed-type penetration part

Fig. 4 Geometric modeling of the open-type penetration part

으로, Fig. 4(a)는 입체도를, Fig 4(b)는 해머 부분을 중심으로 단면을 나타내었다. 바닥에서 해머까지의 위치는 760mm로써, 밀폐형의 자유낙하 높이와 같도록 형상을 설정하였다.

3.2 격자구성도

Fig. 5는 유체 격자 형태를 보여주고 있는데 밀폐형의 경우는 Wedge cell로 격자가 구성되어 있고 4개의 파티션으로 나누어져 있다. Wedge cell은 삼각 기둥형태이며 해석에서 Dynamic layering을 적용하기 위해 위와 아래 표면을 삼각형으로 격자를 만들고 이를 진행방향으로 층을 쌓으면서 생성된 형태이다. 격자수는 235,222개이고 절점수는 128,731이며 Fig. 5의 왼편에 해머와 단면의 격자 형태를 도식하였다. 개방형의 경우는 Mixed cell로 격자가 구성되어 있고 역시 4개의 파티션으로 나누었다. Mixed cell은 위와 아래 표면을 삼각형과 사각형 격자를 만들고 진행방향으로 층을 쌓으면서 생성된 형태이다. 격자수는 404,094이고 절점수는 326,990이며 Fig. 5에 해머와 단면의 격자 형태를 나타내었다.

3.3 해석조건

해석에는 ANSYS FLUENT ver. 13 (ANSYS, 2010a)이 활용되었고 시간에 따라 변화가 있으므로 비정상 해석을 수행하였다. 자세한 적용 조건은 다음과 같다.

- 이상기체방정식 적용
- $k-\epsilon$ 난류모델 적용
- 압축성 유체 해석 적용
- Time step size : 0.002(s) (196 steps)
- Moving deforming mesh (dynamic layering 기법)
- User defined function(ANSYS, 2010b)을 통해 등가속도 조건 적용

Fig. 5 Detailed grid meshes

Fig. 6 Boundary conditions

마지막에 주어진 등가속도 조건은 유체 저항에 의한 감속 효과를 무시하고 중력 가속도 9.8m/s^2 에 의해 가속되는 조건을 주었다. 이는 밀폐형에 대해서는 실제의 경우보다 시간별 속도가 더 크게 되는 조건으로 에너지 감쇠량이 더 많은 조건이 된다. 즉 실제의 에너지 감쇠량은 해석 결과의 감쇠량보다 적게 되는 것이다. 격자 시스템의 경우 물체 근처의 격자 형태의 변형 정도에 따라 해의 정확성에 지대한 영향을 미치게 된다. 따라서 움직이는 물체인 해머 근처의 격자의 질 향상을 위해 FLUENT의 Dynamic layering, Smoothing, Remeshing 기법이 이용되었다. 이 기법은 지하철이 터널을 통과할 때 유발되는 유동 해석 등에 사용되었으며 (Huang, 2010) 본 문제의 해머 움직임에 의해 발생하는 유동 해석에 적합하다고 판단되었다. Dynamic layering의 경우는 격자를 진행방향으로 층을 이루게 하고, 해머가 특정층을 지나가면 그 층은 진행 방향 반대쪽으로 위치하게 하는 방식이다. Smoothing은 스프링 계수를 이용하여 격자의 질을 향상시키며 Remeshing은 해머주위의 격자만 국부적으로 다시 구성하는 방식으로 격자 질을 향상시키게 된다.

본 비정상 해석은 해머의 이동거리 760mm 직전까지 해석이 진행되며 밀폐형의 경우 공기의 유출은 없다고 가정된다. Fig. 6의 왼쪽, 밀폐형의 경우에서 케이스 내부, 해머, 그리고 연결 룯드는 No slip wall 조건을 주었고 오른쪽 개방형의 경우는 해머의 경우만 No slip wall 조건이고 나머지는 대기압으로 Pressure inlet 조건을 주었다.

4. 해석결과 및 분석

해머가 바닥에 닿기까지 시간은 0.393초이고, 자유낙하 동안의

Fig. 7 Comparison of drag forces on hammers

시간별 항력의 크기는 Fig. 7과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 개방형의 경우, 해머가 받는 힘은 상당히 미미함을 확인할 수 있다. 0.35초까지는 하부 공기의 압축성 효과에 의해 점진적으로 증가하다가 그 이후는 하부공기가 거의 다 빠져나가 감소하는 결과를 보였다. 밀폐형의 경우 상대적으로 가파르게 증가하다가 해머가 바닥에 거의 닿기 직전 항력이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 밀폐형에서 해머와 실린더 간의 좁은 간격에 의한 유체의 흐름이 제한적이 되면서 상하 간 큰 압력차가 생겨 주도적인 영향을 준다 할 수 있다. 시작, 중간 지점, 그리고 충돌 직전의 현상을 자세히 보기 위해 동일한 시점들 ($t=0.01, 0.2$, 그리고 0.39s)에서 압력분포를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 8에 나타난 밀폐형의 경우는 0.01초에서 상부와 하부의 압력분포가 진행방향에 따라 층을 이루면서 차이가 나기 시작하다가 0.2초에서 그 차이가 커지면서 상 하간 압력차가 극명하게 나는 것을 확인할 수 있다. 이런 압력차의 증가에 의해 항력이 점진적으로 증가하다가 0.39초에서는 연결로드와의 간격이 최소화 되면서 연결로드 부분의 압력이 크게 증가하게 됨으로써 Fig. 7과 같이 항력이 급격히 증가하게 된다. 반면 Fig. 9의 개방형의 경우는 0.01초에서 진행방향으로 압력차가 있으나 하부의 공기가 사방으로 퍼질 수 있기 때문에 압축 정도가 적으며 또한 밀폐형과 다르게 층 형태는 아니고 넓게 퍼진 형태를 보이고 있다. 0.2초에서는 속도 증가에 의해 압력차가 커지기는 하나 공기의 압축 정도가 적기 때문에 밀폐형과 비교하여 최대 압력이 1/10보다 작게 나타났다. 0.39초에서는 충돌 전 하부의 공기가 급하게 빠져나가면서 해머 밑면의 가장자리에서 다소 높은 압력이 발생하지만 압축 공기가 이미 많이 유출되면서 Fig. 7과 같이 항력이 줄어들게 되었다.

한편, Fig. 7의 그래프에 보는 바와 같이 밀폐형의 항력에 의한 에너지소모가 개방형의 비해 월등히 클 것으로 예상할 수 있다. 그러면 다음으로 밀폐형의 에너지 소모량은 어느 정도가 되며 얼마 정도를 허용할 수 있는지 기준이 필요하다. 먼저 에너지 소모량은 각 시간 스텝에서의 항력과 이동거리를 곱하고 이를 전 시간에 대해 합치게 되면 식(1)과 같이 계산될 수 있다.

$$\text{에너지 소모량} = \sum_{i=1}^{NTS} (F_D^i \times l^i) = 5.52 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (1)$$

Contours of Static Pressure (pascal) (Time=1.0000e-02) Sep 05, 2012
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

(a) $t=0.01\text{sec}$

Contours of Static Pressure (pascal) (Time=2.0000e-01) Sep 05, 2012
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

(b) $t=0.2\text{sec}$

Contours of Static Pressure (pascal) (Time=3.9000e-01) Sep 05, 2012
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

(c) $t=0.39\text{sec}$

Fig. 8 Pressure distributions at various time for closed type condition

여기서 NTS는 시간 스텝 수, F_D 는 항력, 그리고 l 는 이동거리이다. 개방형의 경우의 에너지 소모량을 위 식을 통해 계산하면 $0.436\text{N} \cdot \text{m}$ 이 된다. 계산된 밀폐형의 에너지 소모량을 해머가 가지는 위치에너지로 나누면 상대적인 양으로 식(2)과 같이 비교할 수 있다.

Contours of Static Pressure (pascal) (Time=1.0000e-02) Sep 05, 2012
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

(a) $t=0.01\text{sec}$

Contours of Static Pressure (pascal) (Time=2.0000e-01) Sep 05, 2012
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

(b) $t=0.2\text{sec}$

Contours of Static Pressure (pascal) (Time=3.9000e-01) Sep 05, 2012
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

(c) $t=0.39\text{sec}$

Fig. 9 Pressure distributions at various time for open type condition

$$\frac{\text{에너지소모량}}{\text{위치에너지}(m \cdot g \cdot h)} \times 100 = \frac{5.52}{63.5 \cdot 9.8 \cdot 0.76} \times 100 < 1.2\% \quad (2)$$

앞에서 기술한 바와 같이 항력에 의한 속도감소를 고려하지 않았으므로 계산된 에너지 소모량은 속도감소가 있는 경우보다 큰 값으로 간주할 수 있어, 1.2%보다 적은 소모량을 예측할 수

있다. 또한 밀폐형과 개방형의 전달되는 에너지 차이도 1.2% 미만임을 알 수 있다. 이는 표준관입시험(SPT)의 허용 오차 안에 있는 수준으로 판단된다. 만약 해머와 밀폐 케이스의 간격을 줄인다면 에너지 소모량이 늘어날 수 있는 반면, 전체 무게와 부피 및 비용을 줄일 수 있는 효과가 있으므로 양 측면을 고려해서 결정할 필요가 있을 것으로 보인다.

5. 결 론

해저 착저형 지반 조사 장비의 핵심 모듈인 표준관입시험(SPT) 향타부는 수중이라는 조건에 적용하기 위해 밀폐형으로 설계 되었다. 육상의 개방형 향타부와 비교해서 큰 차이점은 내부가 밀폐가 되어 있어 해머가 낙하할 때 밀폐 케이스와 해머 사이 간격으로 유체 흐름이 제한적이 되는 이유로 상하 압력차가 생기고 이로 인해 높은 항력이 발생한다는데 있다. 이런 항력에 의한 에너지 소모량을 예측하기 위해 ANSYS FLUENT를 활용하여 CFD 해석을 하였고 이 때 layering/smoothing/remeshing 옵션과 User Defined Function 기능을 활용하여 진행하였다. 예상대로 밀폐형의 경우 실린더와 해머 사이 간격 효과가 주요 항력의 원인이 되었고 개방형에 비해 에너지 소모가 많은 것이 확인 되었다. 다음으로 밀폐형의 에너지 소모량을 해머의 위치 에너지와 비교하였고 주어진 간격에서 1.2% 보다 낮은 것을 계산을 통해 알 수 있었다. 이는 표준관입시험(SPT)에서 허용할 수 있는 범위이며 본 연구에서 진행된 수치적인 접근법은 밀폐형 향타부 설계에 도움을 줄 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 초장대교량사업단 제3핵심 과제를 통해 지원된 국토해양부 건설기술혁신사업(08기술혁신E01)에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Anderson, J.D. 1995. Computational Fluid Dynamics: The Basics With Applications, McGraw-Hill Science.
- ANSYS, inc., 2010a. ANSYS FLUENT User's guide.
- ANSYS, inc., 2010b. ANSYS FLUENT UDF Manual.
- Cho, S.M., 2007. Technical Trend of Offshore Geotechnical Site Investigations. 2007 Fall Korean Geotechnical Society Geotechnical Engineering Conference, 639-653
- Freudenthal, T., and Wefer, G., 2006. "The Sea-floor Drill Ring "MeBo": Robotic Retrieval of Marine Sediment Cores, PAGES News, 14(1), 10.
- Huang, Y-D, Gao, W., and Kim, C-N., 2010. A numerical study of the train-induced unsteady airflow in a subway tunnel with natural ventilation ducts using the dynamic layering method, Journal of hydrodynamics, Ser. B, 22(2), 164-172.
- Jang, I.S, Kwon, O.S., Chung, C.K., 2007. Development of Unmanned Seabed type Marine Cone Penetration Testing System. 2007 Fall Korean Geotechnical Society Geotechnical Engineering Conference, 611-622
- Kim, W.T., Jang, I.S., Kwon, O.S., Lee, B., Hwang, I.C., 2011a. Development of unmanned underwater SPT(Standard Penetration Test) equipment. 2011 Fall Korean Geotechnical Society Geotechnical Engineering Conference, 305-311.
- Kim, W.T., Jang, I.S., Lee, B., Hwang, I.C., 2011b. Development of unmanned underwater site investigation equipment, Proceedings on 2011 Korean Association of Ocean Science and Technology Conference, 2013-2016.
- Korea Highway Corporation., 2002. Normalizations of the Standard Penetration Test. 2002 KHC Research Report, 212.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(MLTM), 2007. Development of marine cone penetration testing system(VI). MLTM, 260.