

# 펄스 방전 기술에 의한 지반 확공 현상 수치해석 모사

## Numerical Simulation of Ground Expansion Induced by Pulse Discharge Technology

박 현 구<sup>1</sup> Park, Hyun-Ku

이 승 래<sup>2</sup> Lee, Seung-Rae

김 선 주<sup>3</sup> Kim, Seon-Ju

조 규 연<sup>4</sup> Cho, Gyu-Yeon

### Abstract

In the present paper, a numerical study was carried out to simulate ground expansion induced by an application of pulse discharge technology. Based on laboratory pulse discharge tests, the characteristics of shockwave were investigated, and then the laboratory tests were numerically simulated using underwater explosion model implemented in a coupled acoustic-structural finite element analysis. In addition, for clayey soils, the expansion of ground was also studied using soil properties obtained from empirical correlations with SPT N values. It was found that the calculation results well agreed with the field test results.

### 요 지

본 연구에서는 펄스 방전 기술의 적용에 따른 지반 확공 현상에 대한 수치해석적인 연구를 수행하였다. 실내 펄스 방전 시험을 통하여 충격파 발생을 측정하였으며 수중 폭발 모델을 바탕으로한 유체-구조물 유한요소해석을 통해 실내 시험에서 계측된 충격파를 모사하였다. 이를 바탕으로, SPT N값으로부터 경험적으로 얻어지는 지반 물성이 적용된 점성토 지반에 대한 확공 해석을 수행하였으며 현장 시험과 유사한 예측 결과를 얻을 수 있었다.

**Keywords :** Finite element analysis, Pulse discharge, Shockwave, Standard penetration test, Underwater explosion

## 1. 서 론

도심지에서 이루어지는 근접 굴착 시공은 벽체의 과도한 변형을 억제하여 주변 지반의 침하 및 인접 구조물의 손상을 최소화해야 하며 이를 위해서는 강성이 큰 벽체의 적용 또는 스트러트 및 브레이싱, 그리고 그라운드 앵커 보강 공법 등이 적용된다. 도심지 굴착의 경우 효과적인 토압 지지를 위해 그라운드 앵커가 주로 적용되는데 인접 구조물에 대한 영향을 최소화하기 위

해서는 상대적으로 큰 앵커 인발 저항력이 요구되며 이는 정착장의 길이가 긴 마찰형 앵커의 시공, 고압 주입 및 굴착을 통한 앵커 구근 형성 등을 통해 확보될 수 있다. 그러나 상대적으로 얇은 심도의 지반 및 점성토 층에서 이루어지는 굴착의 경우 큰 앵커 인발력을 확보하기가 쉽지 않을 뿐만 아니라 앵커 인발력을 증가시키기 위해 정착장의 길이를 늘이는 것은 타인의 사유재산(토지)을 침범할 수 있기 때문에 근접 시공 시에는 적합하지 않으며 따라서 상대적으로 정착장의 길이가 길지

1 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST, bowstringnine@gmail.com, 교신저자)

2 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST)

3 정회원, 대우 건설 기술연구소 전임 연구원 (Member, Researcher, Daewoo Institute of Construction Technology)

4 정회원, (주)세원리타 과장 (Member, Manager, Sewonrita Corp.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 9월 30일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

않으면서 높은 인발 저항력을 제공할 수 있는 그라운드 앵커의 필요성이 대두되었으며 이에 가압, 선단 굴착 등의 방법을 통해 앵커의 단면을 확공시키는 기술이 적용되고 있다(FHWA, 1999).

한편, 최근 들어 가압형 확공 기술의 하나로써 펄스 방전 기술(PDT, pulse discharge technology)을 이용하여 시추공을 확공, 앵커의 단면을 증가시키는 것을 통해 인발 저항력을 증가시키는 공법이 신기술로 지정되어 연구 및 활용되고 있으며(김태훈 등, 2007), 김낙경 등(2009)은 펄스 방전 기술의 적용을 통해 단면이 확장된 앵커가 단순 마찰형 앵커에 비하여 큰 앵커 인발 저항력을 제공함을 현장시험을 통해 확인한 바가 있다. 그러나 펄스 방전 기술에 의하여 지반이 확공되는 메커니즘 및 시추공 주변부 지반의 거동에 대한 계측 결과가 충분하지 않아 현재까지는 실험적인 상관관계를 통해 확공 정도를 평가하고 있다(Kim과 Cha, 2008).

따라서 본 연구에서는 유한요소 수치해석을 통해 펄스 방전에 의해 지반이 확공되는 현상을 모사하고 펄스 방전의 적용에 따른 지반 거동에 대해 살펴보고자 하였다. 문헌연구를 통하여 펄스 방전 현상에 대한 이론적 배경 및 현장 적용 사례를 분석하였고 이를 토대로 하여 수중 폭발 모델을 이용한 수치해석을 통해 실내 펄스 방전 시험에서 유발되는 충격파를 모델링하였다. 마지막으로, 유체-구조물 연성해석을 바탕으로 점성토 지반에 대한 확공 해석을 수행하여 현장 시험과의 비교를 통해 해석방안의 적절성을 논의해 보았고, 지반의 체적 변형 특성 변화에 따른 영향을 살펴보았다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 펄스 방전에 의한 충격파 발생 메커니즘

펄스 방전 기술(PDT)은 전기 방전으로 인해 유발되는 매우 큰 에너지를 이용하여 유체에 매우 큰 압력을 갖는 충격파를 발생시키는 기술로써 수중 방전 기술(UED: Underwater Electric Discharge)이라는 명칭으로 통용된다. 지반 확공을 위한 펄스 방전 기술의 적용은 그림 1과 같이 말뚝 및 앵커를 위해 천공된 시추공에 유동성이 매우 큰 모르타르 또는 시멘트 모르타르를 채우고 펄스 방전을 수행하는 것을 통해 이루어지는데, 방전장치의 선단부에서 이루어지는 펄스 방전은 시추공을 채우고 있는 채움 재료에 매우 높은 압력을 갖는 충격파(shockwave)

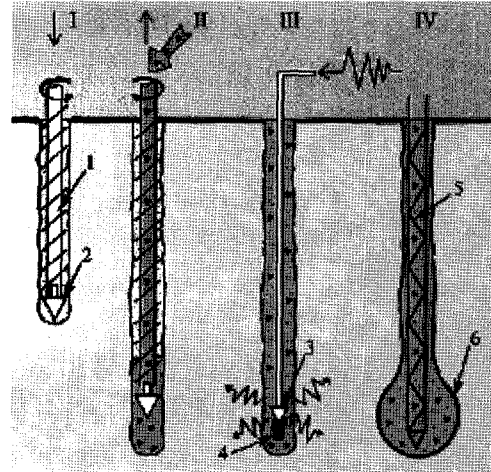


그림 1. 펄스 방전 기술을 이용한 앵커 및 말뚝 확공 원리(Dzhantimirov 등, 2005)

를 발생시키며 이 충격파는 지반의 변형을 유발한다(Dzhantimirov 등, 2005).

Arsentev(1965)에 따르면 수중에서 유발되는 전기 방전은 높은 펄스 에너지를 발생시키게 되며 이 펄스 에너지는 전극 주변의 유체의 상변화를 유발하여 플라즈마 방전 채널(discharge channel)을 형성하게 된다. 방전 중에 발생하는 에너지가 방전 채널에 유입되어 내부에너지가 증가하게 되면 채널의 체적이 급격하게 팽창하게 되고 이로 인해 주변 유체에 충격파가 발생하게 된다. 이러한 메커니즘은 통상적인 수중 폭발 현상과 유사한 것으로써 수중 폭발의 경우 플라즈마 방전 채널의 형성 대신 폭약의 기화를 통해 기포(bubble)가 형성되고 기포의 팽창으로 인해 충격파가 발생한다(Geers와 Hunter, 2002). 일례로 Wakeland 등(2003)은 수중 방전시험으로부터 계측된 구형 충격파 압력을 충격파 예측 모델을 통해 합리적으로 예측한 사례가 있으며 이는 수중 폭발과 수중 방전이 유사한 메커니즘으로 충격파를 발생시키는 것을 의미한다.

### 2.2 수중 폭발에 의한 충격파 발생 및 구조물과의 상호 거동 모델링

#### 2.2.1 수중 폭발 모델

기존의 수중 폭발 현상에 대한 연구는 주로 폭약의 폭발로 인해 발생하는 충격파의 압력, 기포의 진동 주기 등 폭발 특성의 예측에 대해 주로 이루어져 왔으며 이는 크게 기포 동역학(bubble dynamics)에 근거한 유사 관계(similitude relation)를 통해 충격파를 예측하는 방법(Price,

1979)과 폭발 역학 및 수리동역학에 근거한 해석적 방법(이재민 등, 1998)으로 나눌 수 있다. 위의 두 방법은 많은 수치해석 프로그램에 적용되어 충격파 압력의 산정 및 구조물과의 상호작용에 적용되고 있으며(Zhang 등, 2008; Kim과 Shin, 2008), 김재현(2007)에 따르면 구조물의 거동 예측이 주요 관심사일 경우 유사관계에 근거한 해석이 계산 시간을 줄여주면서 합리적인 예측을 제공 하는 것으로 알려져 있다.

본 연구에 사용된 ABAQUS 프로그램에서는 폭발로 인해 유발된 유체의 충격파를 예측하기 위해 Geers와 Hunter(2002)가 제안한 기포 하중 모델을 적용하고 있다(HKS, 2004). Geers와 Hunter(2002)의 모델은 유사 관계를 기본으로 거리와 시간에 따른 구형(spherical) 충격파의 압력을 식 (1)과 같이 예측하며, 식 (1)을 기포의 체적  $V(t)$ 과 관련하여 나타내면 식 (2)와 같다.

$$P(R,t) = P_c \left( \frac{a_c}{R} \right)^{1+A} f \left[ \left( \frac{a_c}{R} \right)^B \frac{v_c}{a_c} \right] \quad (1)$$

$$\begin{aligned} P(R,t) &= \frac{1}{R} \frac{\rho_f}{4\pi} \left( \frac{a_c}{R} \right)^A \ddot{V}(t) \\ &= \left( \frac{a_c}{R} \right)^{1+A} P_c [0.8251 \exp(-1.338t/T_c) \\ &\quad + 0.1749 \exp(-0.1805t/T_c)] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $R$ 은 반지름  $a_c$ 를 갖는 폭약의 중심으로부터의 거리,  $v_c$ 는 폭약의 폭속(detonation speed),  $\rho_f$ 는 충격파 전달 유체의 밀도,  $P_c$ ,  $T_c$ ,  $A$ ,  $B$ 는 폭약의 특성과 관련된 재료 상수이다.  $P_c$ 는 충격파의 최대압력과  $T_c$ 는 충격파의 감쇄특성과 관련한 상수로써 각각 식 (3) 및 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며, 식 (3) 및 식 (4)에서  $K$ 와  $\kappa$ 는 각각 최대압력 및 감쇄특성 관련 상수이고  $m_c$ 는 폭약의 질량을 의미한다.

$$P_c = K \left( \frac{m_c^{1/3}}{a_c} \right)^{1+A} \quad (3)$$

$$T_c = \kappa m_c^{1/3} \left( \frac{a_c}{m_c^{1/3}} \right)^B \quad (4)$$

위의 충격파 압력 예측식과 폭발 전 초기 상태에 대한 조건으로부터, 폭발 후 기포가 진동하는 동안 기포 체적의 변화 및 기포 경계면의 속도가 산정되며 기포의 거동은 이중 점근사법(doubly asymptotic approximation)을 통하여 결정된다. 통상적으로 충격파 전달 유체는 압

력만을 전달하는 음향요소(acoustic element)로 고려되며, 위의 식 (2)로부터 결정되는 기포 거동을 경계조건으로 음향요소에 대한 동적 평형 방정식으로부터 충격파 압력의 시간과 공간에 따른 분포를 계산하게 된다.

### 2.2.2 충격파를 고려한 유체-구조물 상호 거동 모델링

펄스 방전으로부터 발생한 충격파에 의한 지반의 거동을 예측하기 위해서는 충격파를 전달하는 유체와 지반의 상호 거동에 대한 모델링이 요구되며, 본 연구에서는 ABAQUS의 유체-구조물 연성해석(coupled acoustic-structural analysis) 기법을 이용하였다. 본 기법은 앞서 2.2.1절에서 언급한 바와 같이 유체를 압력만을 전달하는 음향요소(acoustic element)로 고려하며, 음향요소와 연속체 요소 각각의 동적 평형 방정식으로부터 각각 경계에서의 가속도 및 압력을 계산하여 이를 요소 간 경계면에 traction으로 적용, 순차적으로 계산하는 staggered scheme을 사용한다. 이 때, 유체와 구조물의 경계면에서는 normal한 방향 압력만이 전달되고, 경계 조건으로 전반사, 자유방사 조건 및 임피던스를 고려한 경계 조건 등을 적용시킬 수 있으며 임피던스 경계조건은 유체와 구조물 경계에 스프링과 dashpot이 달려있는 것으로 모델링 할 수 있다(HKS, 2004).

한편, 유체와 구조물의 상호 거동 시 유체는 어느 수준 이상의 인장 압력을 받을 경우 기포로 변환되는 공동(cavitation) 현상을 겪게 된다. 공동 현상은 크게 구조물 주위에서 반사되어 형성되는 인장력에 의한 국부적 공동(local cavitation)과 자유수면 근방에서 유발되는 광역 공동(bulk cavitation)으로 나눌 수 있으며 깊은 심도에서 폭발 하중에 의한 유체와 구조물의 거동 시에는 광역 공동 현상은 고려하지 않아도 되는 것으로 알려진 반면 구조물과 유체의 상호 거동이 복잡하게 유발되는 경우에는 국부적 공동현상을 고려하여야 하는 것으로 알려져 있다(Klenow와 Brown, 2007). ABAQUS에서는 유체의 인장응력이 공동 압력과 같아지면 유체의 압력을 공동 압력으로 고정하여 계산을 수행한다.

### 2.2.3 방전에너지를 고려한 등가 폭약 질량 산정

앞서 기술한 바와 같이 수중 폭발에 의한 충격파 압력은 폭약의 종류 및 질량에 따라 결정되며 폭약의 질량은 충격파 발생과 관련한 폭발 에너지로 변환될 수 있다. 일반적으로 단위질량의 폭약의 질량에 따른 에너지 발생량을 연소열(specific combustion,  $I$ )이라고 하며

TNT의 경우 연소열 값은 약 4.6MJ/kg으로 알려져 있다 (Price, 1979).

한편, 펄스 방전에 의한 충격파 발생 에너지는 방전 시 유발되는 전기 에너지로써, 유체로 전달되는 전력  $P_{power}$  및 에너지  $E_{discharge}$ 는 방전 회로에서 측정되는 시간 별 전류[ $I(t)$ ] 및 전압[ $V(t)$ ]으로부터 식 (5) 및 식 (6)과 같이 산정될 수 있다.

$$P_{power}(t) = V(t) \times I(t) \quad (5)$$

$$E_{discharge}(t) = \int_0^t P_{power}(\tau) d\tau = \int_0^t V(\tau) \times I(\tau) d\tau \quad (6)$$

따라서, 수중 폭발과 수중 방전에 의한 충격파 발생 메커니즘의 유사성으로부터 방전에 의해 유체로 전달되는 에너지량은 식 (7)로부터 등가의 폭약 질량으로 환산이 가능하다.

$$W = \frac{E_{discharge}}{H} \quad (7)$$

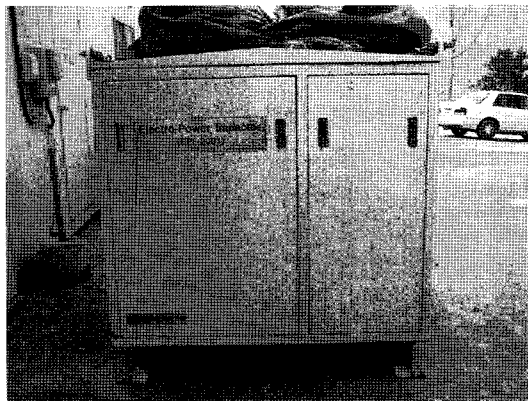
여기서,  $W$ 는 등가의 폭약 질량,  $E_{discharge}$ 는 방전에너지, 그리고  $H$ 는 연소열(heat of combustion)로 단위질량당 폭발에너지를 의미한다.

### 3. 실내 방전 시험에 대한 유한요소해석

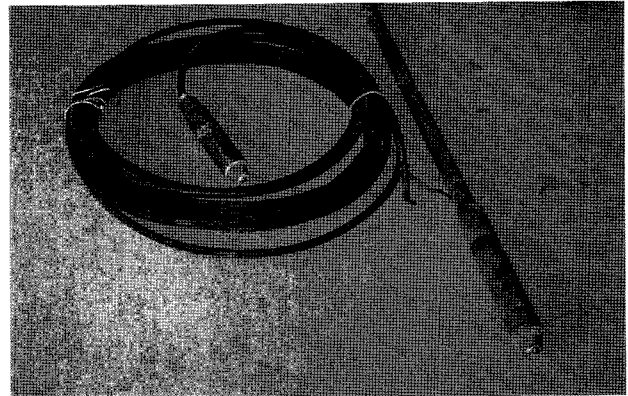
#### 3.1 실내 방전 시험

모르타르를 채운 상태에서 수행한 펄스 방전 시 발생하는 충격파의 크기를 파악하기 위하여 실내 방전 시험을 수행하였다. 펄스 방전 시험 장비는 그림 2와 같다. 6kV 수준의 고전압으로 충전한 후 선단 방전 장치를 직경 250mm의 나일론 챔버에 담긴 시멘트 페이스트에 넣고 스위치를 이용하여 전기 방전하는 순으로 실내 방전 시험을 수행하였다. 선단 방전 장치에서의 전류 및 전압은 방전 장치에 연결된 오실로스코프를 통해 측정하였고 충격파의 압력은 압력 챔버의 내측 벽면부에 설치된 압력셀을 이용하여 약 3.5msec 동안 측정하였다.

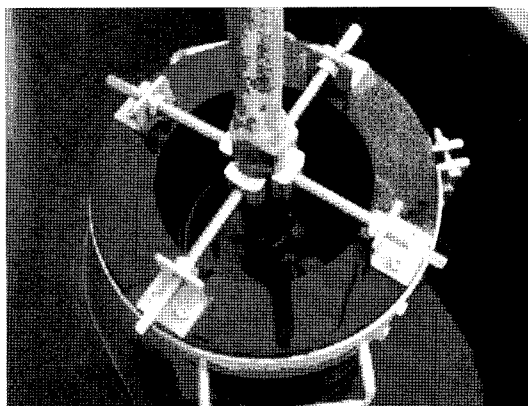
그림 3(a) 및 3(b)는 6kV로 충전한 후 수행한 방전 시



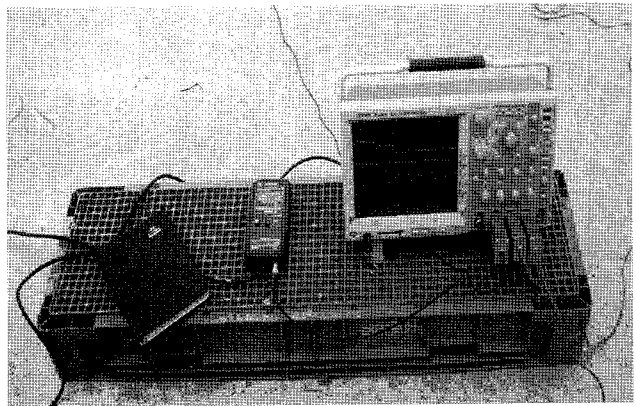
(a) 펄스파워 시스템 장비



(b) 펄스방전 케이블 및 방전 선단

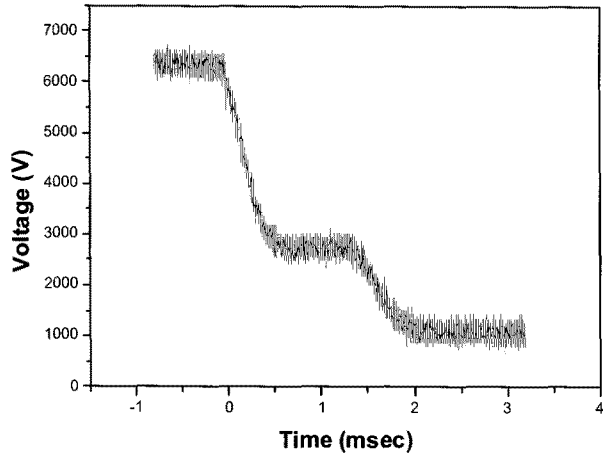


(c) 입력챔버 및 방전 선단 장착

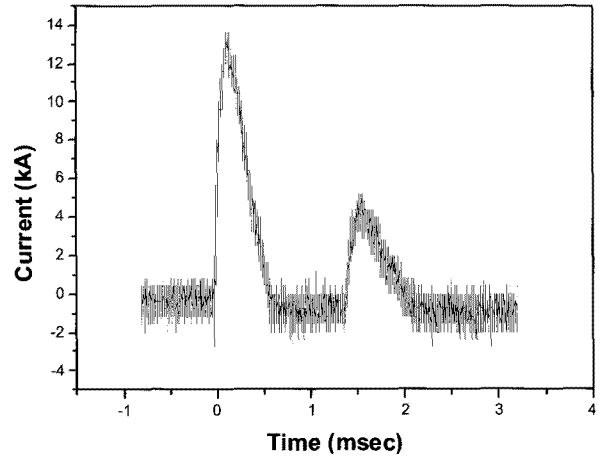


(d) 전압 및 전류 측정 장치

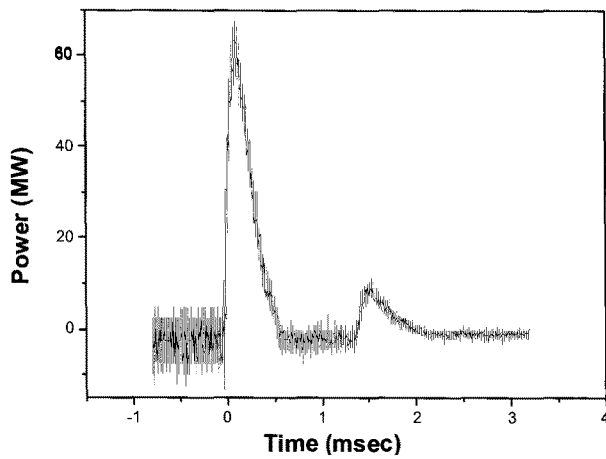
그림 2. 실내 방전 시험 장치



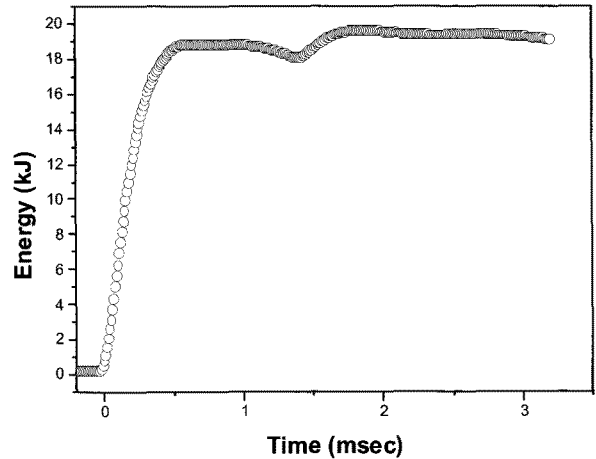
(a) 전류



(b) 전압



(c) 전력



(d) 방전 에너지

그림 3. 실내 방전 시험에서 측정된 전기적 특성

험 중 측정된 전류와 전압을 나타낸 것으로 약 6kV 및 12kA 크기의 고전압·전류가 발생하는 것으로 확인되었으며, 이에 대하여 식 (5)와 식 (6)을 적용하면 그림 3(c) 및 3(d)와 같은 전력 및 전기 에너지 곡선을 구할 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 0.5msec의 짧은 시간동안 최대 70MW 크기의 매우 큰 크기의 펄스 파워와 약 20kJ의 전기에너지가 선단부에서 유발되었음을 알 수 있다. 그림 4는 총 3회 수행된 실내 방전 시험(범례 Test 1, 2, 및 3)으로부터 측정된 충격파 압력을 측정된 결과로써, 0.3msec 정도의 시간에 최대 약 5MPa 크기의 압력이 압력 챔버 내부에 가해지는 것으로 나타났으며 최대 압력이 나타난 이후 급격하게 압력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 신병우 등(2007)이 물에 대하여 펄스 방전을 수행한 결과와 유사한 것으로써 충격파 전달 매질이 시멘트 모르타르이더라도 물과 유사한 충격파 발생 거동이 일어나는 것으로 판단될 수 있다.

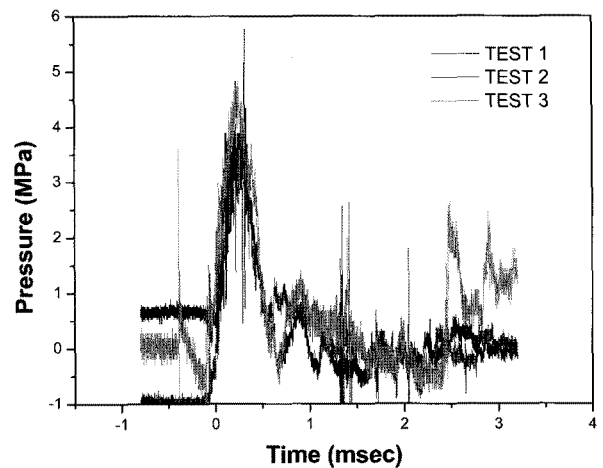
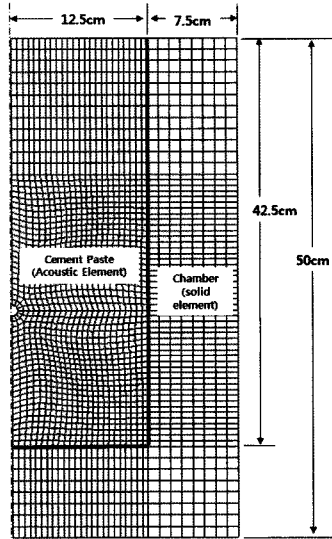


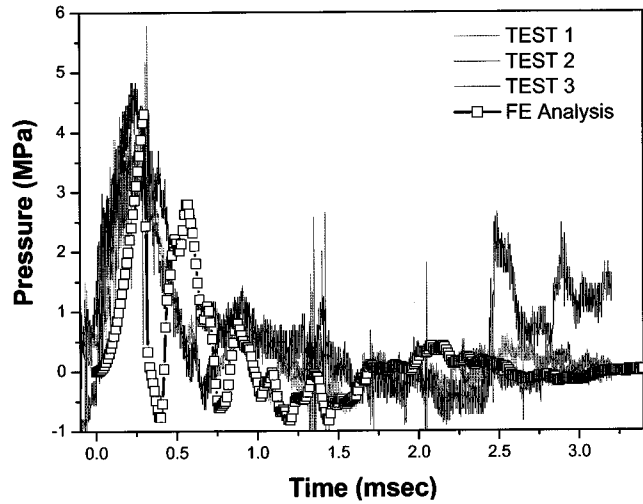
그림 4. 실내 방전 시험에서 측정된 충격파 압력

### 3.2 실내 방전 시험 시뮬레이션

그림 5(a)는 250mm 직경을 갖는 나일론 소재의 챔버



(a) 유한요소망



(b) 수치해석 예측과 실내시험 계속 비교

그림 5. 실내 방전시험 모델링 및 해석 결과

에 모르타르를 채운 실내시험에 대한 유한 요소망을 나타낸 것으로 축대칭 acoustic 요소 및 solid 요소를 이용하여 모르타르와 챔버를 모델링 하였으며 경계조건으로 챔버 하부 절점의 변위를 고정하였다. 방전에너지 20kJ에 해당하는 TNT 폭약 질량은 식 (7)에 따라 산정된 약 0.0044kg을 적용하였고, 그림 4의 실험결과를 참조로 폭발에 의한 기포하중 시뮬레이션 시간  $T_{duration}$  은 0.3msec를 적용하였다. 입력 물성으로 시멘트 페이스트의 밀도는  $20\text{kN/m}^3$ , 체적압축계수  $K_f$ 는 물과 동일한  $1.92\text{GPa}$ 로 가정하였으며 실험에 사용된 챔버를 구성하는 나일론의 밀도는  $13\text{kN/m}^3$ , 탄성계수는  $2\text{GPa}$ , 포아송비 0.35를 적용하였다. 해석 시 모르타르와 챔버의 임피던스(=재료의 밀도×재료의 음파속도)는 각각  $1.96 \times 10^6$  및  $2.04 \times 10^6 \text{kg} \cdot \text{m}/(\text{sec} \cdot \text{m}^3)$  으로 유사한 범위를 갖고 있기에 경계면에서 충격파가 전달되는 것으로 고려한 방사(radiation)경계조건을 부여하였으며 공동 현상을 고려하기 위하여 임계 압력 값으로 일반적인 물과 같다고 가정하여  $-80\text{kPa}$ 을 적용하였다.

그림 5(b)는 3.5msec 동안 챔버의 벽면에 가해지는 radial 방향 압력을 계측결과와 비교한 것으로 수치해석이 최대 압력(약 4.5MPa) 및 시간에 따른 충격파 압력의 변화를 합리적으로 예측하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 실내 방전 실험을 합리적으로 예측한 충격파 모델(기포하중모델의 시뮬레이션 시간  $T_{duration}$ , 모르타르의 단위중량, 체적압축계수  $K_f$ , 임피던스를 고려한 유체-구조물 경계 거동)을 이용하여 실제 지반 확공

현상을 예측하고자 하였다.

#### 4. 지반 확공 현상 시뮬레이션

##### 4.1 대상 문제 및 유한 요소 모델링

본 장에서는 유체-구조물 연성 해석을 통한 충격파에 의한 지반 확공 예측 해석의 적용성 및 적절성을 살펴보

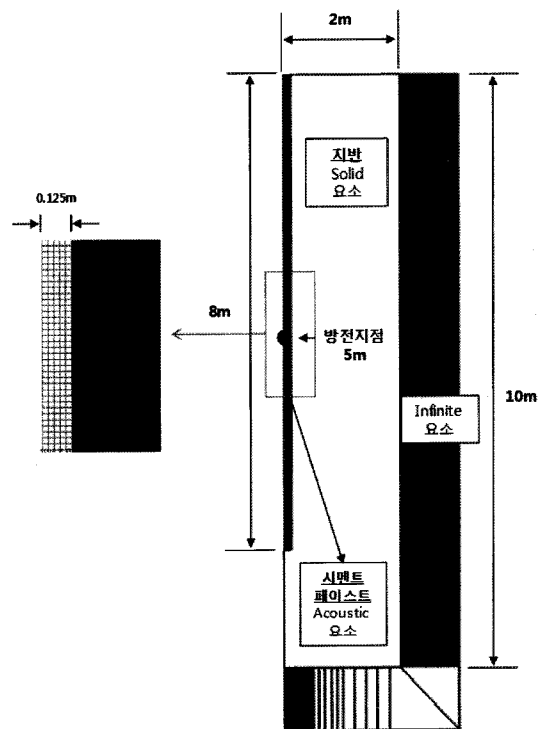


그림 6. 확공해석을 위한 유한요소망

기 위하여 김태훈 등(2007)과 Kim과 Cha(2008)의 현장 실험을 대상문제로 고려하였다. 김태훈 등(2007)과 Kim과 Cha(2008)는 소구경의 연직 말뚝 확공을 위해 펄스 방전 기술을 적용하였고 이 때 천공부의 직경은 250~300mm로, 펄스 방전이 수행되는 깊이는 약 지표면으로부터 3~10m 범위에서 수행한 것으로 나타났다. 이를 참고하여 8m 깊이까지 천공된 250mm의 직경을 갖는 시추공의 확공에 대한 해석을 수행하기 위해 그림 6과 같이 축대칭 조건에 대한 유한 요소망을 작성하였다. 해석의 안정성을 고려하기 위하여 천공부의 유체요소 및 인접 지반 요소를 25mm × 25mm 크기로 세밀하게 분할 하였으며, 방전 위치로부터 횡방향으로 약 2m 및 연직 방향 10m 이후의 해석영역에는 infinite element를 사용하였다. 충격과 발생과 관련되는 입력 자료는 앞서 3장의 실내시험에서 사용한 입력변수를 동일하게 적용하였다.

#### 4.2 지반 입력 물성

본 연구에서는 점성토 지반에서의 확공 현상을 살펴 보고자 하였다. 매우 짧은 시간 동안 확공 거동이 이루어지는 것을 고려하여 확공 현상을 비배수 거동으로 가정하여 자중의 효과를 고려하지 않은 전응력 해석을 적용하였다. 전응력 해석을 위하여 지반의 구성관계는 비교적 단순한 모델인 선형탄성-von-Mises소성 모델을 적용하여 모사하도록 하였다.

위의 흙의 거동모델에 해당하는 입력 물성은 펄스 방전에 의한 지반 확공에 대한 기존의 연구(Kim과 Cha, 2008)가 지반 분류 및 그에 따른 확공 정도를 SPT N값에 따라 표현하고 있음을 고려하여 도출하였다. 펄스 방전에 의하여 확공되는 지반의 영역이 국부적이기 때문에 일반적인 시험방법을 이용한 지반 물성을 얻는 것이 어려움을 고려해 볼 때 시추공 천공 시 측정되는 SPT N값은 근사적으로 지반의 강도 및 강성정보를 제공하는 것으로 판단될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Kim과 Cha(2008)의 시험

이 수행된 지반 분류(CL)을 고려하여 저소성 점토에 대한 SPT N값-일축압축강도관계  $q_u (kg/m^2) = N_{SPT}/6$  [Peck, 한국지반공학회(2002)로부터 재인용] 및 식 (8)의 비배수전단강도-전단탄성계수 관계(Keaveny와 Mitchell, 1986)로부터 각각 비배수 전단강도와 탄성계수를 산정하였다.

한편 비배수 거동을 나타내기 위한 지반의 체적탄성계수  $B$ 는 식 (9)의 근사식을 이용하여 간극율( $n$ )이 0.5인 지반에 대해 산정하였으며, 앞서 SPT N값으로부터 산정한 전단탄성계수와와의 일관성을 유지하기 위한 포아송 비는 식 (10)과 같다. 표 1은 SPT N값이 2, 4, 6, 및 8인 경우에 해당하는  $PF=30$  정도의 정규압밀 점토지반에 대한 해석 물성을 나타낸 것이다.

$$G/s_u = \frac{\exp\left[\frac{137-PI}{23}\right]}{\left[1 + \ln 1 + \frac{(OCR-1)^{3.2}}{26}\right]^{0.8}} \quad (8)$$

$$B = B_{skeleton} + \frac{B_w}{n} \approx \frac{B_w}{n} \quad (9)$$

$$\nu = \frac{3B_w - 2nG}{2nG + 6B_w} \quad (10)$$

여기서,  $G$ 는 전단탄성계수,  $s_u$ 는 비배수 전단강도,  $OCR$ 은 과압밀비,  $B_w$ 는 물의 체적압축계수, 그리고  $B_{skeleton}$ 은 건조된 흙 구조체의 체적압축계수이다.

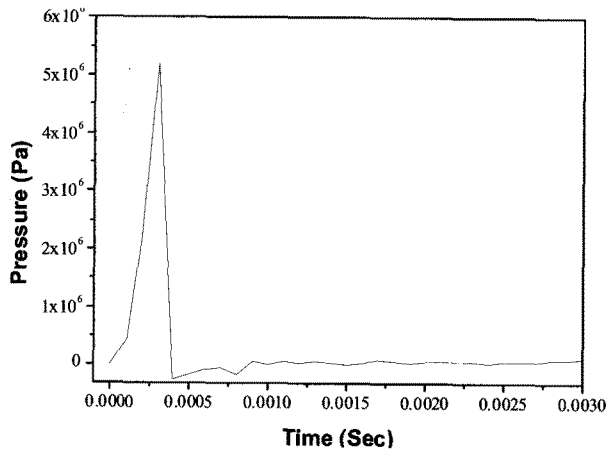
#### 4.3 해석 결과 및 현장 시험과의 비교

##### 4.3.1 펄스 방전에 의한 지반 거동 특성

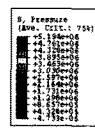
그림 7(a)는  $N_{SPT}=6$ 인 지반에서 1회 펄스 방전에 의해 시추공 벽면에 발생하는 충격과 압력을 예측한 결과를 나타낸 것으로 그림에서 볼 수 있듯이 최대 약 5MPa 압력이 가해지는 것을 확인할 수 있으며 이러한 충격과 압력은 그림 7(b)와 같이 구형과 형태로 지반에 전파되는 것으로 나타났다. 그림 8은 펄스 방전 시 지반의 횡방향 변위를 나타낸 것으로 방전 직후 큰 변위가 발생하

표 1.  $N_{SPT}$ 에 따른 확공해석을 위한 입력 물성

$N_{SPT}$	$n$	Density (kN/m <sup>3</sup> )	$s_u$ (kPa)	$G$ (MPa)	$E$ (MPa)	Poisson's ratio ( $\nu$ )
4	0.5	18	33.3	3.49	10.47	0.4995638444
6			50	5.24	15.71	0.4993452073
8			66.6	6.98	20.92	0.4991279425
10			83.3	8.73	26.13	0.4989094324



(a) 시추공 벽면에 가해지는 충격파 압력



(b) 지반에서의 충격파의 전파형태

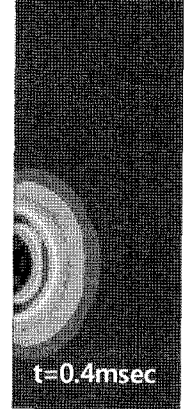


그림 7. 충격파 압력 및 전파 형태

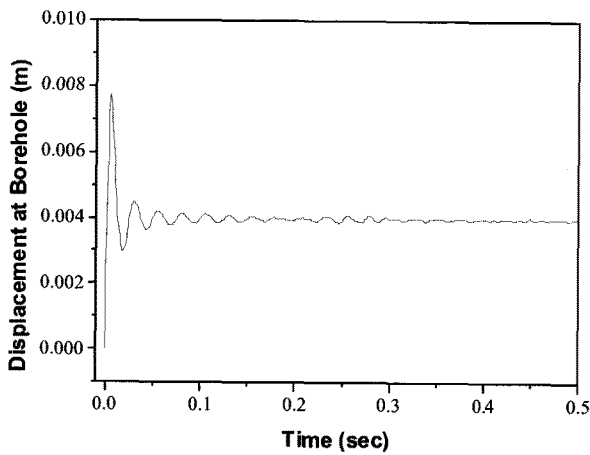


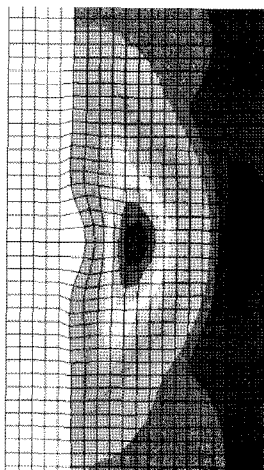
그림 8. 방전위치 깊이의 시추공 벽면에서의 횡방향 변위

지만 충격파 압력이 감소함에 따라 변위가 회복되는 거동을 나타내고 있으며 다소의 진동이 있으나 시간이 지

남에 따라 일정한 값으로 변위가 수렴함을 알 수 있다. 40회 방전 시뮬레이션 후 예측된 변형된 지반의 형상은 그림 9(a)에 도시한 바와 같고, 방전 위치를 중심으로 구형 형태의 구근이 형성됨을 확인할 수 있으며 이는 Kim과 Cha(2008)가 현장시험을 통해 확인한 구형 구근(그림 9(b))과 부합하는 것으로 판단된다.

#### 4.3.2 펄스 방전에 의한 확공 계수 비교

Kim과 Cha(2008)는 펄스 방전에 의한 지반 확공을 정량화하기 위하여 구근이 구형으로 형성된다는 가정 하에 식 (11)과 같은 확공 계수(coefficient of expansion,  $E_c$ )를 제안하였으며 여기서  $d_e$ 는 방전 후 형성된 구근의 직경,  $d_0$ 는 시추공의 초기 직경을 의미한다. 그림 10은  $N_{SPT}=4, 6, 8$ , 그리고 10인 경우에 대해 수치해석으로부



(a) 40회 방전 후 지반 변형 형상(수치해석)



(b) Kim과 Cha(2008)의 현장 시험 확공 형상 사례

그림 9. 펄스 방전에 의한 지반 확공 형상



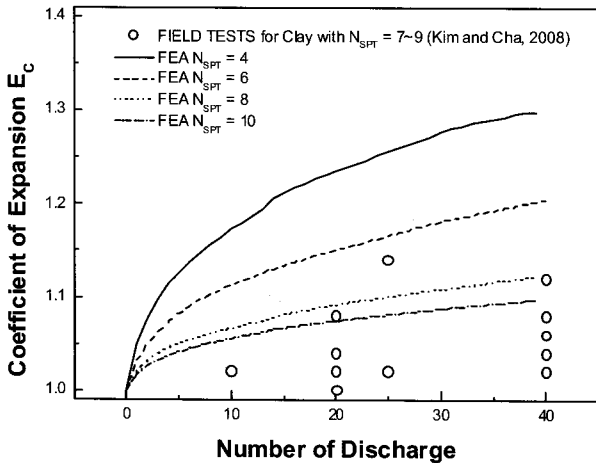


그림 10. 수치해석과 현장 실험에서 얻어진 확공 계수 비교

터 예측된 확공 계수와 Kim과 Cha(2008)가  $N_{SPT}=7\sim 9$ 의 점성토 지반에 대해 수행하여 얻은 확공 계수를 비교한 것이다. 현장 시험 결과가 수치해석에서  $N_{SPT}=6$  이상의 지반에서 예측되는 확공 계수의 범위 내에 분포하고 있음을 알 수 있으며 지반이 상대적으로 연약한 경우 ( $N_{SPT}=4$ )에도 확공 계수는 1.3을 넘지 않음을 확인할 수 있다. 위의 해석 결과는 기존 사례(Dzhantimirov 등, 2005; Kim과 Cha, 2008)에서 확인된 점성토지반에 대한 낮은 확공 효율과 일관된 경향을 나타내고 있으며 이로부터 본 연구에서 제안된 해석 모델 및 입력 물성 추정 방안이 펄스 방전에 의한 점성토 지반 확공 현상을 적절하게 모사할 수 있는 근거가 될 수 있을 것으로 사료된다.

$$E_c = d_e/d_0 \quad (11)$$

#### 4.3.3 체적 변형 특성에 따른 확공 특성

Dzhantimirov 등(2005)에 따르면 점성토에서의 상대적으로 낮은 확공 특성은 매우 낮은 투수계수로 인하여 체적의 압축이 되지 않고 충격파가 간극수에 의해 전달되기 때문으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 체적 변형 특성이 달라짐에 따른 지반의 확공 특성의 변화를 살펴보았으며 그림 11은  $N_{SPT}=6$ 인 지반에 대해 체적압축계수를 3% 및 0.3% 크기로 바꾸어 해석하여 산정한 확공 계수를 나타낸 것으로 체적 변형 특성이 확공 거동에 매우 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

일반적으로 흙의 체적 압축 거동은 포화도와 배수 조건에 의해 영향을 받는 것을 고려해 볼 때, Kim과 Cha(2008)이 사질토에서 확인한 높은 확공 계수는 사질토의 빠른 투수성 또는 포화도에 따른 것으로 사료된다. 한편, 사

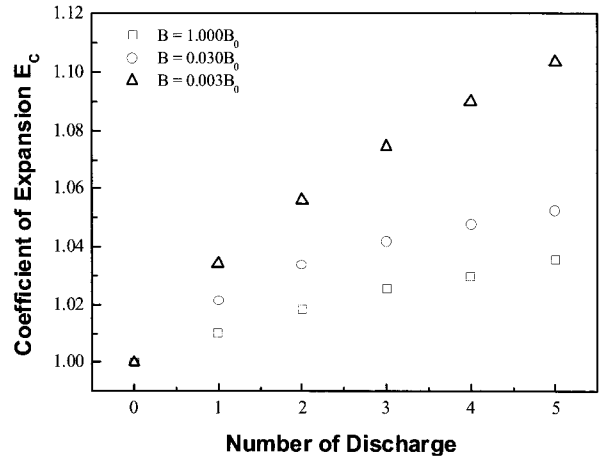


그림 11. 체적 압축 계수 변화에 따른 확공 계수

질토의 경우 점성토와 달리 흙의 강성 및 강도가 응력에 의존하는 특성을 가지므로 이에 대한 고려를 통해 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 펄스 방전에 의한 말뚝 또는 앵커 시추공의 확공 현상을 모사하고자 충격파 발생 및 그로 인한 지반 확공 거동에 대한 유한요소법을 이용한 수치해석연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 수중 방전현상을 수중 폭발로 고려하여 실내 방전 시험을 모사하였으며 그 결과 수치해석이 실내 시험 계측과 유사한 충격파 압력(최대압력 4.5MPa)을 예측함을 확인할 수 있었다.
- (2) 수중 폭발 하중 모델을 이용하여 비배수 탄소성체로 고려된 점성토 지반에 대해 확공해석을 수행하였다. 펄스 방전 시 지반에서의 변형 및 압력 전달을 수치적으로 구현할 수 있었고, 지반 확공이 구 형태로 유발됨을 확인할 수 있었다.
- (3) SPT N값으로부터 점성토 지반 물성을 유추하여 다양한 SPT N값에 대한 해석을 수행한 결과, N값이 클수록 지반의 확공이 작게 유발되는 것을 확인할 수 있었다. 전체적으로 점성토의 경우 확공 정도는 N값이 상대적으로 작은 경우에도 미미한 것으로 나타났다으며 이는 점성토에 대한 기존의 펄스 방전 확공 실험 결과와 부합하는 것으로 파악된다.
- (4) 점성토의 체적압축계수를 변화시켜 해석을 수행해

본 결과 체적압축계수가 확공에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 나타났으며 기존의 사질토에 대한 펄스 방전 실험 결과에 비추어 볼 때, 체적압축계수 및 지반의 배수 등을 고려한 합리적인 유효응력 해석방안이 요구되는 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설핵심기술 연구 개발 사업(06건설핵심C12)의 일환으로써 주관기관 대우건설의 연구비 지원 및 교육과학기술부가 선정한 스마트 사회기반시설 연구센터(생산기반분야, ERC)의 연구비 지원이 있었던 바 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참고 문헌

1. 김낙경, 김성규, 주용선, 서효균, 김선주 (2009), “펄스방전 그라우트 앵커의 확공특성 및 극한 인발력에 관한 연구”, *한국지반공학회 논문집*, Vol.25, No.5, pp.5-10.
2. 김재현 (2007), “ALE기법을 이용한 수중함의 수중폭발 충격응답 해석에 대한 연구”, *한국해양환경공학회지*, Vol.10, No.4, pp.218-226
3. 김태훈, 차경섭, 김선주, 김유석, 김경오, 고부현 (2007), “펄스압에 의한 지반의 확공특성”, *한국지반공학회 가을학술발표회 논문집*, pp.842-851.
4. 신병우, 윤수동, 김철영, 김태훈, 허억준 (2007), “인발력 증대를 위한 앵커 정착부 확공장치 연구”, *한국구조물진단학회 학술발표회 논문집*, pp.305-310.
5. 이재민, 국정현, 최경영, 조용수, 송소영 (1998), “수중 폭발현상에 대한 전산해석”, 한국전산유체공학회, *한국전산유체공학회 학술대회논문집*, pp.1-14.
6. 한국지반공학회 (2002), 지반공학 시리즈 5: 굴착 및 흙막이 공법.
7. Arsentév, V. V. (1965), “On the theory of pulse discharge in a liquid”, *Zhurnal Prikladnoi Mekhaniki I Tekhnicheskoi Fiziki*, Vol.5, No.1, pp.81-57.
8. Dzhantimirov, Kh. A., Krastelev, E. G., Kryuchkov, S. A., Nistratov, V. M., and Smimov, P. V. (2005), “Geotechnical technology based on electrochemical explosion and equipment for its implementation”, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.42, No.5, pp.172-177.
9. FHWA (1999), Ground Anchors and Anchored Systems.
10. Geers, T. L. and Hunter, K. S. (2002), “An integrated wave-effects model for an underwater explosion bubble”, *Journal of Acoustic Society of America*, Vol.111, No.4, pp.1584-1601.
11. HKS (2004), Abaqus User Manual Version 6.5.
12. Keaveny, J. M. and Mitchell, J. K. (1986), “Strength of fine-grained soils using the piezocone”, *Proceedings of the ASCE Specialty Conference In Situ '86: Use of In situ Tests in Geotechnical Engineering*, Blacksburg, pp.668-685.
13. Kim, J. H., and Shin, H. C. (2008), “Application of the ALE technique for underwater explosion analysis of a submarine liquified oxygen tank”, *Ocean Engineering*, Vol.35, pp.812-822.
14. Kim, T. H. and Cha, K. S. (2008), “A study on characteristics of an in-situ pile using pulse discharge technology”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.12, No.5, pp.289-295.
15. Klenow, B. and Brown, A. (2007), “Far-Field Underwater Explosion (UNDEX) Fluid Modeling using Acoustic Elements”, <http://www.aoe.vt.edu/~brown/Papers/pressure%20elementsSAVLAC2007.pdf>
16. Price, R. S. (1979), “Similitude equations for explosives fired underwater”, Technical Report NSWC TR 80-299, NSWC.
17. Wakeland, P., Kincy, M., and Garde, J. (2003), “Hydrodynamic loading of structural components due to electric discharge in fluids”, *14th IEEE International Pulsed Power Conference*, pp.925-928.
18. Zhang, A. M., Yao, X. L., and Li, J. (2008), “The interaction of an underwater explosion bubble and an elastic-plastic structure”, *Applied Ocean Research*, Elsevier Online (<http://www.sciencedirect.com>)

(접수일자 2009. 1. 16, 심사완료일 2010. 3. 22)