

펄스 방전에 의한 충격파 발생 시뮬레이션

Simulation of Shockwave Developed by Pulse Discharge

이승래¹⁾, Seung Rae Lee, 박현구²⁾, Hyunku Park, 김태훈³⁾, Tae Hoon Kim

¹⁾ 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

²⁾ 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

³⁾ (주)대우건설 기술연구원 선임연구원, Senior Researcher, Daewoo Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : Pulse-discharge technology (PDT) is an innovative technology which uses enormous energy developed by electric discharge for a very instant moment of time. Lately, it has been applied to make expanded sections at the ends of piles and anchors. The expanded section is formed by the deformation of bore-hole induced by shockwave energy developed in filling material by the pulse discharge. In this study, considering the phenomenon of pulse-discharge as an underwater explosion, finite element analyses were carried out to model the shockwave development by pulse discharge. The simulation technique was verified by comparing results with underwater discharge test results.

Keywords : pulse discharge, underwater explosion, shockwave, similitude equation

1. 개요

펄스 방전 기술(PDT: Pulse Discharge Technology)은 전기 방전으로 인해 유발되는 매우 큰 에너지를 이용하는 기술로써, 최근 들어 말뚝 및 앵커의 선단 및 정착부 지반을 확공하는데 적용되고 있다(김태훈 등, 2007; 신병우 등, 2007). 펄스 방전에 의한 천공된 지반의 확공은 펄스 방전 에너지가 천공부를 채우고 있는 채움 재료에 충격파(shockwave)를 유발하여 이를 주변 지반을 변형시키는 것을 통해 이루어지게 된다. 따라서, 펄스 방전 기술을 이용한 말뚝 및 앵커 등의 확공 기술을 정성 및 정량화하기 위해서는 방전 에너지와 주변 지반의 변형 거동 간의 상관 관계를 찾는 것이 중요하며 김태훈 등(2007)은 점성토와 사질토에 대해 말뚝 선단부 확공을 위한 현장 실험을 수행하여 방전 에너지 및 방전 횟수에 따른 확공 정도와 확공에 따른 지지력 증가에 대한 연구를 수행하였다.

한편, 현장 실험으로부터 얻은 경험적인 상관관계는 제한적인 범위의 실험 조건에 대한 결과이기 때문에 보편적인 펄스 확공 기준을 마련하기 위해서는 합리적인 방법을 통하여 방전 에너지, 펄스 방전으로 인한 충격파의 특성, 채움재료 및 지반의 특성 등의 다양한 영향 요인에 대한 고려가 요구된다. 이에 본 연구에서는 펄스 방전으로부터 지반이 확공되는 일련의 과정 중에서 확공과 밀접한 관계를 갖고 있는 충격파 발생과정을 폭약의 수중폭발에 의한 충격파 발생으로 고려하여 유한요소 모델링을 수행하였으며, 모델 검증을 위하여 문헌에 보고된 수중 방전 실험을 모사하고 그 결과를 비교해 보았다.

2. 이론적 배경

2.1 펄스 방전으로 인한 충격과 발생 메커니즘

펄스 방전에 의한 충격과 발생은 전기 회로에서의 방전 및 그로 인한 펄스 에너지의 발생, 펄스 에너지로 인한 전극 주변 방전 채널(discharge channel)의 형성, 방전 채널의 내부에너지 증가 및 채널 체적 팽창, 급격한 채널 확장으로 인한 주변 유체 내 충격과 발생의 순으로 나타나게 된다(Arsent'ev, 1965). 따라서 펄스 방전으로부터 형성되는 충격파의 특성을 정량적으로 살펴보기 위해서는 방전 에너지와 전극 주변에 발생하는 방전 채널의 거동 특성 및 주변 유체와의 상호작용을 합리적으로 고려하는 것이 요구되며 이는 방전 에너지와 채널 내부의 압력-부피를 규정하는 에너지 보존식과 주변 유체의 거동을 나타내는 운동방정식 및 유체의 상태방정식을 통해 고려된다(Ioffe와 Naugol'nykh, 1968).

펄스 방전은 전기 회로의 저항(R_{circuit})과 방전 채널의 저항(R_{channel}), 회로 전선의 인덕턴스, 그리고 캐패시터로 구성된 LRC 회로로써(Kosenkov, 1997), 일반적으로 방전 채널의 저항이 회로 저항에 비해 매우 큰 값을 갖고 있다. 방전 채널 내부는 방전으로 인해 주변 유체가 해리되어 형성된 고온과 고압을 갖는 플라즈마로 이루어져 있고 플라즈마의 전도도, 온도, 압력, 부피와 전체 회로의 전류의 크기, 저항 등은 서로 밀접하게 연관되어 있다. Kosenkov(1997)에 따르면 방전 채널의 압력과 체적은 방전으로 인해 채널 내부로 유입되는 에너지에 대해 Helmholtz 포텐셜 관계를 가지고 있는 것으로 알려져 있으며 이를 해결하기 위해서는 방전 채널 내부의 플라즈마 특성 및 온도에 대한 정보를 제공할 수 있는 상태방정식이 요구되거나 이를 정량적으로 나타내기에는 많은 가정이 요구된다(Arsent'ev, 1965).

이에 몇몇 연구자들(Pozdeev와 Semko, 1987; Semko, 1997)은 방전채널 내부의 플라즈마를 이상기체로 고려하는 가정을 통해서 펄스 방전으로부터 충격파가 형성되는 과정을 해석적으로 구현하였으나 방전채널이 전극 주변에 무한한 길이를 갖는 원통형으로 형성되고 채널이 확장되는 속도가 일정하다는 가정을 바탕으로 하고 있다. 또한, Arsent'ev(1965) 및 Grinenko 등(2005)은 플라즈마 및 전기적 특성을 고려한 해석을 수행하였으나 많은 가정 사항과 각 특성 변수를 도출하기 위한 매우 정교한 실내 실험을 수반하기 때문에 본 연구에서 고려하는 앵커 시공 등에 적용하는 상대적으로 큰 규모의 방전에는 적용성이 떨어진다고 할 수 있다.

2.2 펄스 방전에 의해 유발되는 충격파의 특성

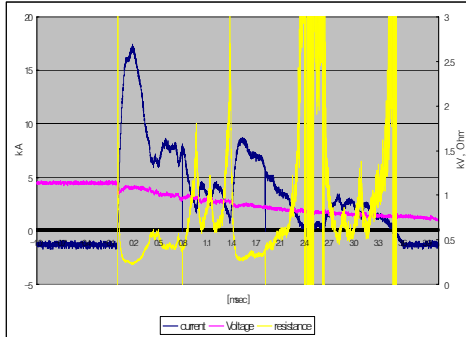
그림 1은 주변 유체가 모르타르인 경우 단일 펄스 방전에 의해 발생하는 방전 전압, 전류 및 저항과 전력 및 충격파의 파형을 나타낸 것이다(신병우 등, 2007). 방전 이후 매우 짧은 시간(수 ms) 이내에 매우 큰 전류가 발생하고 있으며 이로 인해 매우 큰 전력이 유발됨을 알 수 있다. 약 250mm 떨어진 지점에 설치된 압력센서로부터 측정된 충격파 압력 그래프는 그 형태가 전류 및 전압과 매우 유사한 형태를 나타내고 있고 충격파의 전달시간을 고려할 때 전력과 거의 동일함을 확인할 수 있다. 최대 압력 점 이후 지수 감소 형태의 압력의 감소와 증가가 지속적으로 나타나고 있으며 이는 충격파가 압력셀 내부에서 계속적으로 반사되고 방전 채널의 수축과 팽창이 반복되어 나타나는 것으로 사료된다. 이러한 결과는 기존의 수중 방전(그림 2(a))에 대한 실험 연구 결과와 동일한 것으로써 이는 곧 모르타르를 채운 경우에도 펄스 방전에 의한 충격과 발생 메커니즘이 수중 방전과 유사하게 발현되고 있음을 의미한다.

2.3 수중 폭발 이론을 이용한 펄스 방전에 의한 충격과 특성 산정

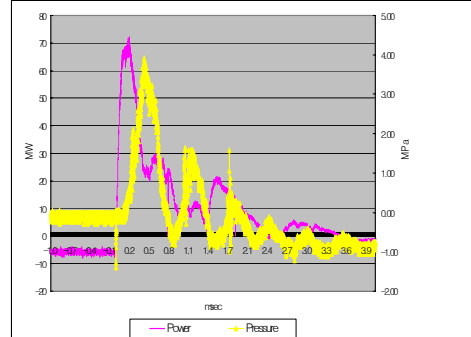
2.3.1 수중 폭발 이론

그림 2(b)에 보이는 바와 같이, 펄스 방전에 의해 발생하는 충격파의 특성은 TNT 등의 폭약의 수중 폭발(underwater explosion)에 의해 발생하는 충격파와 비교해 보았을 때에도 그 형상이 유사함을 알 수 있다. 기본적으로 수중 방전과 수중 폭발 두 방법은 유체 내부에 고온·고압의 방전 채널 또는 버블을

형성시키고 이들의 급격한 팽창을 통해 주변의 유체를 밀어내어 높은 압력을 갖는 충격파를 발생시킨다는 점에서 동일한 메커니즘을 갖고 있으나 수중 방전은 높은 전기에너지로 주변 유체를 해리시켜 플라즈마 방전채널을 형성시키는 반면 폭약의 수중 폭발은 폭약의 폭발을 통한 기체 버블을 형성시킨다는 점에서 차이를 갖고 있다.

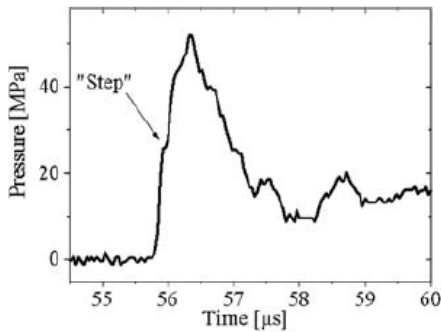


(a) 방전 전압, 전류 및 저항

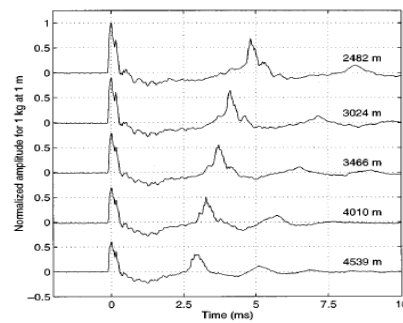


(b) 전력 및 충격파의 파형

그림 1. 단일 펄스 방전에 의해 발생하는 방전 전압, 전류 및 저항과 전력 및 충격파의 파형 (신병우 등, 2007)



(a) Sayapin 등(2006)



(b) Collins 등(1998)

그림 2. 수중 펄스 방전 및 수중 폭발에 의한 충격파

수중 폭발현상에 대한 연구는 주로 폭약의 폭발로 인해 발생하는 충격파의 압력, 기포의 진동 주기 등 수중 폭발 특성의 예측에 대해 주로 이루어져 왔다. 이는 크게 특정 폭발 재료에 대한 원거리 영역(far-field)에서의 충격파에 대한 유사 관계(similitude relation) 계수 산정을 위한 실험(Thiel, 1974; Goertner, 1980)과 폭발역학 및 수리동역학적에 근거한 수치해석적 연구(이재민 등, 1998)로 나뉠 수 있으며, 전자는 폭발 특성을 결정하기 위한 많은 실험이 요구되는 반면, 후자는 정교한 해석을 위한 재료의 상태방정식 계수의 엄밀한 산정이 요구되는 특징을 갖고 있다.

이중 기포 동역학(bubble dynamics)에 근거한 유사 관계(similitude relation)는 수중 폭발에 의해 발생하는 충격파와 구조물의 상호작용을 모델링을 하는데 다양하게 사용되고 있다(Zhang 등, 2008; 김재현과 신형철, 2008). Coles 등(1946)은 위의 유사 관계로부터 폭약에 따른 충격파의 특성을 최대 충격파 압력(P_m), 시간계수(θ), 임펄스(I), 그리고 에너지(E)로 구분되는 변수로 표현하였으며, 표 1은 각 변수의 정의 및 산정 수식을 나타낸 것이다.

표 1. 충격파 특성에 대한 유사 관계 변수의 정의 및 산정 수식(Coles 등, 1946)

case	정의	산정수식
P_m	충격파면에서의 최대 압력 크기	$P_m = k \left(\frac{w^{1/3}}{R} \right)^\alpha$
θ	시간 상수로써 압력 P 가 $P = P_m/e$ 에 도달하는 시간	$\theta = lw^{1/3} \left(\frac{w^{1/3}}{R} \right)^\beta$
I	임펄스	$I = \int_0^{5\theta} p dt$
E	충격파 에너지	$E = \frac{1 - (1.7 \times 10^{-6})}{\rho_f c_f} \int_0^{5\theta} p^2 dt$

단일 수중 폭발 시 시간에 따른 충격파 압력의 변화는 식 (1)과 같은 지수 감소 형태로 나타낼 수 있으며 이를 표 1과 연계하면 폭약을 수중 폭발할 경우 시간과 거리에 따른 충격파 압력은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P(t) = P_m e^{-t/\theta} \quad (1)$$

$$P(R, t) = k \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^\alpha e^{-t/[lW^{1/3} \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^\beta]} \quad (2)$$

따라서 폭발물의 질량, 시간에 따른 충격파 압력에 대한 계측결과가 있을 경우, 표 1에 나타난 수식을 통하여 충격파의 특성을 결정지을 수 있으며(Thiel, 1974; Goertner, 1980; Lawrence, 2002), 이를 이용하여 수중 폭발에 의해 발생하는 충격파를 예측하고 구조물의 상호작용을 모델링하는 근거가 될 수 있음을 알 수 있다.

2.3.2 방전 에너지를 이용한 펄스 충격파 특성 산정

수중 폭발 시 시간과 거리에 따른 충격파 압력을 나타내는 식 (1)과 (2)는 단위 질량을 갖는 TNT폭약이 폭발할 때 유발되는 에너지와 관계된 식으로써 충격파 압력을 예측하는데 있어서 폭발에 의한 에너지가 전체 거동에 있어 중요한 요인임을 의미하고 있다.

펄스 방전의 경우, 유체로 전달되는 전력 및 에너지는 방전 회로에서 측정되는 시간 별 전류[$I(t)$] 및 전압[$V(t)$]으로부터 식 (3) 및 식 (4)와 같이 산정되며 수중 방전을 통한 음파 발생기 개발에 대한 과거의 연구에서도 방전 에너지와 거리별 충격파 압력의 특성은 방전 장치의 효율성과 관련하여 매우 중요한 요소로 고려되고 있다(Ghuman과 Humprey, 1968).

$$P_{power}(t) = V(t) \times I(t) \quad (3)$$

$$E(t) = \int_0^t P_{power}(\tau) d\tau = \int_0^t V(t) \times I(t) dt \quad (4)$$

그림 3은 펄스 방전 시 시간에 따른 방전 에너지(a)와 전력(b), 그리고 유체로 전달되는 에너지(c)를 나타낸 것이다(Grinenko 등, 2005). 그림에서 볼 수 있듯이 방전 에너지가 최대 도달하고 오랜 시간 이후 동안 지속적으로 유체로 전달되는 에너지 변화가 증가함을 알 수 있으며 이는 방전 에너지가 수중

폭발과 유사하게 매우 짧은 시간에 모두 소모되고 그 만큼의 에너지가 방전 채널(수중 폭발의 경우 기포)과 유체로 전달되는 것을 의미한다.

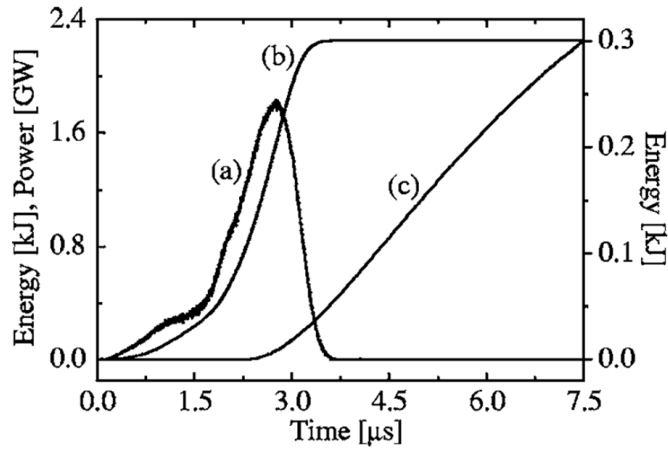


그림 3. 펄스 방전 시 시간에 따른 방전 에너지, 전력, 그리고 유체로 전달되는 에너지

Wakeland 등(2003)은 수중 방전 시 유발되는 충격파의 특성을 정량화하기 위해 등가 에너지 개념을 이용하여 펄스 방전으로 유발되는 최대에너지(35kJ)를 TNT 폭약의 질량(W)으로 환산하였고, 식 (2)로부터 시간과 거리에 대한 충격파 압력을 예측하여 계측된 충격파의 최대 압력 및 충격파의 발현 시간에 대해 유사한 예측값을 얻을 수 있었다. 이는 곧 펄스 방전에 의한 충격파 발생에 대해 수중 폭발 이론의 적용이 가능함을 의미하며 따라서 합리적인 펄스 방전 기술 적용을 위해서는 유체의 종류 및 상태에 따라 충격파와 최대 방전 에너지 간의 유사 관계식을 도출하는 것이 가능하다는 것을 나타낸다.

3. 유한요소해석을 통한 충격파 발생 시뮬레이션

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS/Explicit (HKS, 2004)를 이용하여 펄스 방전으로부터 충격파가 발생하는 과정을 모사하고자 하였다. 펄스 방전 현상을 수중 폭발 현상으로 고려하여 해석을 수행하였으며 충격파면에서의 압력을 예측하기 위하여 ABAQUS 프로그램에서 수중 폭발 현상 시뮬레이션에 대해 제공하는 기포하중(bubble load) 모델(Geers와 Hunter, 2002)을 적용하였으며 Wakeland 등(2003)의 실험에 대해 검증을 수행하여 보았다.

3.1 기포하중 모델

본 연구에 적용된 ABAQUS 해석 프로그램에서는 수중폭발로 인해 발생하는 기포의 거동 및 충격파의 공간적, 시간적 분포를 산정하기 위하여 Geer와 Hunter(2002)의 기포하중 모델을 사용한다. Geers와 Hunter(2002)의 모델은 유사 관계를 기본으로 거리와 시간에 따른 구형(spherical) 충격파의 압력을 식 (5)와 같이 고려하며(Coles 등, 1946; Price 1976), 식 (5)를 기포의 체적과 관련해서 나타내면 식 (6)과 같다.

$$P(R,t) = P_c \left(\frac{a_c}{R} \right)^{1+A} f \left[\left(\frac{a_c}{R} \right)^B \frac{v_c}{a_c} \right] \quad (5)$$

$$P(R,t) = \frac{1}{R} \frac{\rho_f}{4\pi} \left(\frac{a_c}{R}\right)^A \ddot{V}(t) = \left(\frac{a_c}{R}\right)^{1+A} P_c [0.8251 \exp(-1.338t/T_c) + 0.1749 \exp(-0.1805t/T_c)] \quad (6)$$

여기서, R 은 반지름 a_c 를 갖는 폭약의 중심으로부터의 거리, P_c , T_c , A , B 는 폭약의 특성과 관련된 재료 상수로써 P_c 는 충격파의 최대압력과 T_c 는 충격파의 감쇄특성과 관련하며, 식(7) 및 식(8)과 같다.

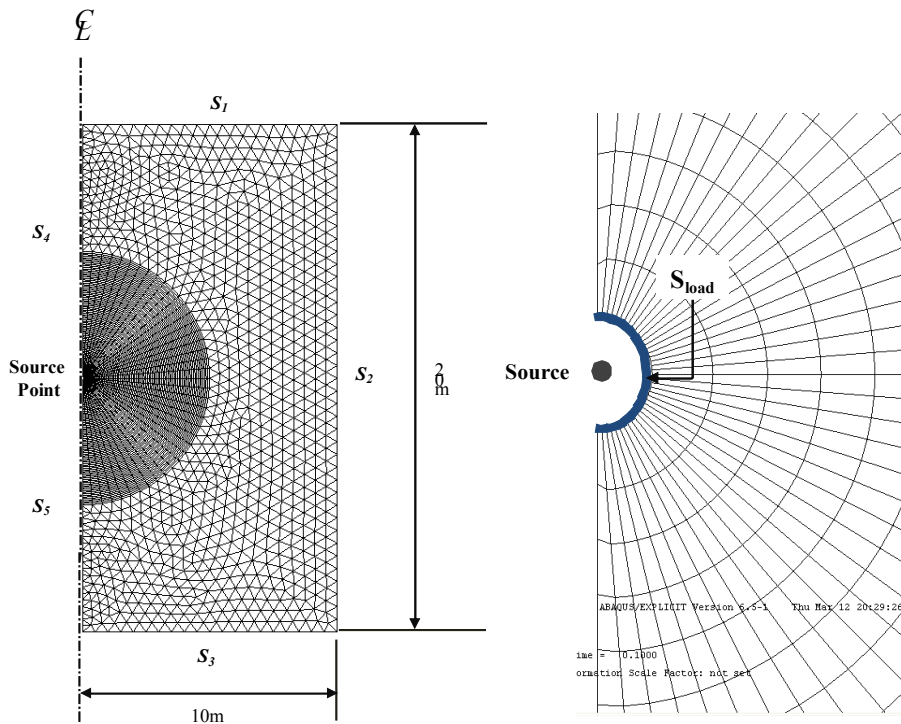
$$P_c = K \left(\frac{m_c^{1/3}}{a_c}\right)^{1+A} \quad (7)$$

$$T_c = \kappa m_c^{1/3} \left(\frac{a_c}{m_c^{1/3}}\right)^B \quad (8)$$

위의 관계와 폭발 전 초기 상태에 대한 조건으로부터, 폭발 후 기포가 진동하는 동안 기포 체적의 변화 및 기포 경계면의 속도가 산정되며 기포의 거동은 DAA(Doubly Asymptotic Approximation) 모델을 통하여 산정된다.

3.2 모델링

수치해석에 적용된 유한요소망은 그림 4(a)와 같다. 본 연구에서는 축대칭 조건에서의 수중 펄스 방진이 일어나는 것을 고려하였으며 3절점 및 4절점 acoustic 요소를 이용하여 유체 요소를 모델링하였다. 그림 4(b)에 나타난 바와 같이, Geers와 Hunter의 모델로부터 계산된 기포의 압력은 유체의 S_{load} 면에 가해지게 되며 그에 따라 유체 운동방정식과 구성방정식으로부터 요소의 압력이 산정된다. 이 때, 유체의 선형 거동을 고려하였으며 공동현상(cavitation)은 일어나지 않는 것으로 가정하였다.



(a) 요소망 및 경계면

(b) 폭발지점 및 하중 부여면

그림 4 충격파 시뮬레이션을 위한 요소 모델링

한편, acoustic 요소는 압력을 계산하는 절점만을 포함하고 있어 변위에 대한 경계조건은 부여되지 않으며 경계에서의 방사(radiation)조건에 대하여 조건이 부여된다. 본 해석에서는 그림 4(a)에 도시된 경계면에 대해 S₄와 S₅면에서 대칭조건으로 인해 충격파가 반사되는 것을 고려하였고, 기타 경계면인 S₁, S₂, 그리고 S₃ 경계면에서는 자유로운 방사(free radiation)조건을 가정하였다.

3.3 등가 에너지 개념을 이용한 폭약 질량 산정

본 연구에서는 등가의 폭약으로 Pentolite 화약(Price, 1979)을 고려하였으며 식 (9)를 이용하여 방전에너지와 등가의 에너지를 제공하는 화약의 질량을 산정하였다.

$$W_{TNT} = \frac{E_{discharge}}{H} \quad (9)$$

여기서, W_{TNT} 는 등가의 폭약 질량, $E_{discharge}$ 는 방전에너지, 그리고 H 는 연소열(heat of combustion)로 단위질량당 폭발에너지를 의미하며 Pentolite의 경우 5.11MJ/kg

구형의 폭약을 고려할 경우 폭약의 반지름 a_c 는 식 (10)과 같이 산정이 가능하며 거리 R 에서의 유체가 겪는 최대 충격파 압력과 충격파의 지속시간은 각각 식 (5)로부터 식 (11) 및 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_c = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi\rho_c}} \cdot W^{1/3} \quad (10)$$

$$P_{max} = P_c \left(\frac{3}{4\pi\rho_c} \right)^{\frac{1+A}{3}} \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1+A} \quad (11)$$

$$T = \frac{\alpha_c}{\nu_c} = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi\rho_c}} \cdot \frac{W^{1/3}}{\nu_c} \quad (12)$$

3.4 Wakeland 등(2003)의 수중 방전 실험 사례 분석

본 연구에서는 해석 모델에 의해 예측되는 충격파 압력의 적절성을 살펴보기 위하여 Wakeland 등 (2003)의 수중 펄스 방전에 의한 충격파 압력 계측 실험에 대하여 수치해석을 수행하였다. 표 2는 실험에 적용된 방전 에너지의 크기와 방전에너지를 식 (9)에 적용하여 산정된 등가의 Pentolite 폭약(Price, 1979)의 질량(m_c)과 이를 통해 작성된 기포 하중 모델 변수를 나타낸 것이다.

그림 5는 Wakeland 등(2003)의 실험결과와 수치해석으로부터 산정된(R=1.25m, R=1.5m, 그리고 R=1.75m) 충격파 압력을 비교한 것으로 실내 시험과 비교하여 수치해석이 각 계측 지점에서의 최대 충격파 압력을 잘 예측하는 것을 확인할 수 있으며 전형적인 펄스 충격파의 형태가 잘 예측되고 있음을 알 수 있다.

표 2. Wakeland 등(2003)의 실험을 모델링하기 위한 기포 하중 모델 입력 자료

방전에너지 (kJ)	입력자료	값	입력자료	값	
35	폭약의 재료 상수	K	5.76×10^7	기체의 비열비	1.35
		k	9.1×10^{-5}	중력가속도(m/sec ²)	10.0
		A	0.194	대기압 (kPa)	101.3
		B	0.257	유체의 밀도(kgf/m ³)	1000
		K_c^*	1045×10^6	유체의 음속(m/sec)	1483
		ρ_c (kgf/m ³)	1600		
		m_c (kgf)	6.84×10^{-3}		

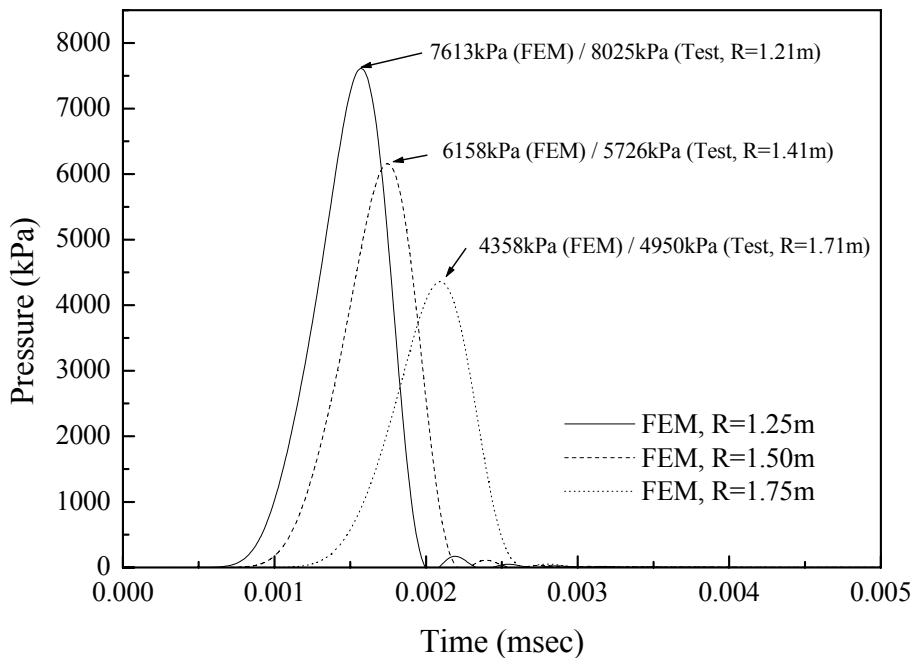


그림 5. 수치해석에서 예측된 시간에 따른 충격파 압력

한편, 그림 6은 충격파가 2차원 요소망 내에서 전파되는 과정을 나타낸 것이다. 전형적인 펄스 충격파의 형태가 예측되고 있음을 알 수 있으며 매우 좁은 범위에서 발생되고 있는 높은 압력의 구형 충격파 면이 적절하게 표현되고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 수중 펄스 방전으로 인해 형성되는 충격파를 예측하기 위하여 수중 폭발 이론과의 유사관계를 기본으로 충격파의 예측을 수행하였다. 폭약의 연소열과 방전에너지 간의 관계를 통해 방전에너지와 등가의 에너지를 제공하는 폭약의 질량을 산정하였고 이를 통해 Geers와 Hunter(2002)의 기포 하중 모델 변수를 결정하여 충격파를 예측할 수 있는 모델링을 통해 Wakeland 등(2003)의 수중 방전

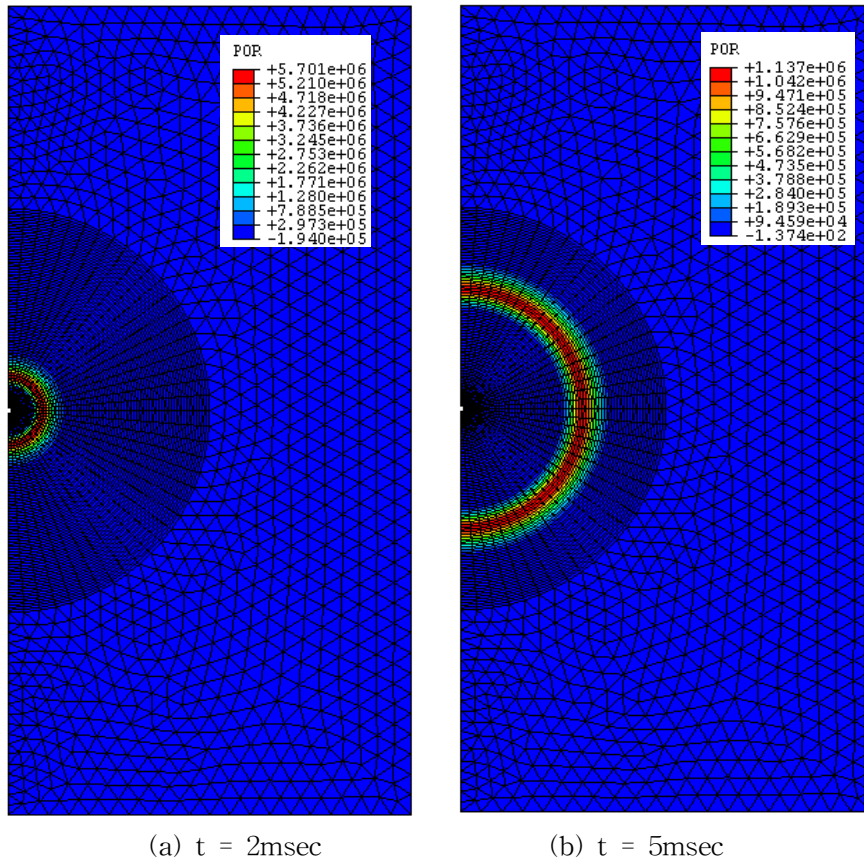


그림 6 수치해석에서 예측된 충격파면 및 진파 형태

시험에 대한 수치해석을 수행하였다. 해석 결과, 실내 시험과 비교하여 수치해석이 각 계측 지점에서의 최대 충격파 압력을 잘 예측하는 것을 확인할 수 있으며 전형적인 펄스 충격파의 형태가 잘 예측되고 있음을 알 수 있었다. 본 연구 결과를 통해 향후 앵커 정착부 확공을 위해 적용되는 실제 펄스 방전 문제에서 확공과 관련된 중요한 요소인 충격파를 예측하고 지반 확공 현상을 시뮬레이션 하는데 적용이 가능할 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.

참고문헌

1. 김재현, 신형철 (2008), "Application of the ALE technique for underwater explosion analysis of a submarine liquified oxygen tank", Ocean Engineering, Vol. 35, pp. 812-822.
2. 김태훈, 차경섭, 김선주, 김유석, 김경오, 고부현 (2007), "펄스압에 의한 지반의 확공특성", 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp. 842-851.
3. 신병우, 윤수동, 김철영, 김태훈, 허억준 (2007), "인발력 증대를 위한 앵커 정착부 확공장치 연구",

한국구조물진단학회 학술발표회 논문집, pp. 305-310.

4. 이재민, 국정현, 최경영, 조용수, 송소영 (1998), "수중 폭발현상에 대한 전산해석", 한국전산유체공학회, 한국전산유체공학회 학술대회논문집, pp. 1-14.
5. A. Grinenko, V. Tz. Gurovich, A. Saypin, S. Efimov, and Ya. E. Krasik (2005), "Strongly coupled copper plasma generated by underwater electric wire explosion", *Physical Review Letter E* 72, 066401, pp. 1-7.
6. A.I. Ioffe and K.A. Naugol'nykh (1968), "Formation of shock waves by electric discharge in water", *Zhurnal Prikladnoi Mekhaniki I Tekhnicheskoi Fiziki*, Vol. 9, No. 1, pp. 134-137.
7. A. M. Zhang, X. L. Yao, and J. Li (2008), "The interaction of an underwater explosion bubble and an elastic-plastic structure", *Applied Ocean Research*, Elsevier Online (<http://www.sciencedirect.com>)
8. A. N. Semko (1997), "Fluid dynamics of an underwater electric discharge on the axis of a shell immersed in a fluid", *Journal of Mathematical Science*, Vol. 84, No. 6, pp. 1548-1551.
9. A. Saypin, A. Grinenko, S. Efimov, Ya. E. Krasik (2006), "Comparison of different methods of measurement of pressure of underwater shock waves generated by electrical discharge", *Shock Waves*, Vol. 15, No. 2, pp. 73-80.
10. G. W. Lawrence (2002), "Shock wave pressure in free water as a function of explosive composition", 12th International detonation symposium, San Diego, California.
11. J. A. Collins, J. E. Broda, G. M. Purdy, J. Gaspin, T. Griffin, C. Peletski, L. Lipton, and B. Baulder (1998), "Source signature measurement of underwater explosives at very high ambient pressures", *Journal of Acoustic Society of America*, Vol. 103, No. 6, pp. 3281-3289.
12. J. F. Goertner (1980), "Scaling underwater explosion shock waves for differences in ambient sound speed and density", NSWC TR 80-491.
13. J. S. Coles, E. A. Christian, J. P. Slifko, C. R. Niffenegger, and M. A. Rogers (1946), "Shock-wave parameters from spherical TNT charges detonated underwater," in *Underwater Explosion Research Office of Naval Research*, Washington, D.C., 1950, Vol. 1, pp. 1085-1105.
14. M. A. Thiel (1961), "Revised similitude equations for underwater shock wave performance of pentolite and HBX-1," Technical Report 7380, NAVWEPS.
15. P. Wakeland, M. Kincy, and J. Garde (2003), "Hydrodynamic loading of structural components due to electric discharge in fluids", 14th IEEE International Pulsed Power Conference, pp. 925-928.
16. R. S. Price (1979), "Similitude equations for explosives fired underwater", Technical Report NSWC TR 80-299, NSWC.
17. T. L. Geers and K. S. Hunter (2002), "An integrated wave-effects model for an underwater explosion bubble", *Journal of Acoustic Society of America*, Vol. 111, No. 4, pp. 1584-1601.
18. V. A. Pozdeev and A.N. Semko (1987), "On the motion of a fluid under electrical discharge in a cylindrical volume", *Aerogazodin Nestats Prots*, pp. 121-124.
19. V. M. Kosenkov (1997), "Mathematical model of the dynamics of porous elastoplastic media saturated with liquid upon electric discharge in water", *Strength of Materials*, Vol. 29, No. 1, pp. 58-65.
20. V. V. Arsen'tev (1965), "On the theory of pulse discharge in a liquid", *Zhurnal Prikladnoi Mekhaniki I Tekhnicheskoi Fiziki*, Vol. 5, No.1, pp. 81-57.
21. W. J. Guman and B. G. Hymprey (1968), "Studies on an Electric Discharge Underwater Sound Source" Technical Report NR-185-706, Office of Naval Research.