

펄스 방전에 의한 사질토지반 시추공 확공에 대한 수치해석

Numerical analysis of borehole expansion induced by PDT in sandy soils

박현구¹⁾, Hyunku Park, 이승래²⁾, Seung-Rae Lee, 김태훈³⁾, Tae-Hoon Kim

¹⁾ 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

²⁾ 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수, Full Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

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

SYNOPSIS : 본 연구에서는 사질토 지반에서 펄스 방전(PDT)에 의한 확공 현상을 평가하기 위한 수치해석 연구를 수행하였다. 수중 폭발 모델을 기반으로 PDT적용을 통해 시추공 내부의 시멘트 페이스트에 발생하는 충격파를 모델링하였고, 이를 바탕으로 사질토 지반에 유발되는 변형을 유체-구조물 연동해석을 통해 예측하였다. 해석 결과, 수치해석을 통한 예측이 문헌에 언급된 지반 확공 정도에 대한 실험 결과와 부합하는 것으로 나타났다. 또한 펄스 방전에 의해 지반의 응력 증가 및 체적 압축 등의 지반 다짐효과를 파악할 수 있었다.

Keywords : pulse discharge, underwater explosion, ground borehole, numerical analysis

1. 서론

펄스 방전 기술(PDT: Pulse Discharge Technology)은 전기 방전으로 인해 유발되는 매우 큰 파워를 이용하는 기술로써, 최근 들어 신기술로 지정되어 말뚝 및 앵커의 저항력 증대를 위해 말뚝 선단 및 앵커 정착장에 구근을 형성하여 다짐 효과를 얻는데 적용되고 있다 (김태훈 등, 2007; Kim & Cha, 2008). 펄스 방전에 의한 천공된 지반의 확공은 펄스 방전 에너지에 의해 천공부를 채우고 있는 채움 재료에 형성된 버블의 팽창이 충격파(shockwave)를 유발하여 주변 지반을 변형시키는 것을 통해 이루어지게 된다.

Dzhantimirov 등 (2005)은 펄스 방전이 포화된 사질토 지반에 액상화를 유발하여 큰 변형을 유발하고 그 이후 간극수압의 소산 및 추가적인 버블 하중을 통해 지반을 다지는 반면에 점성토지반에서의 펄스방전에 의한 하중은 지반의 탄성거동을 주로 유발하여 확공이 거의 유발하지 못하는 것으로 설명하였다. 실례로 김태훈 등 (2007)은 펄스 방전 기술은 사질토에서 효과적인 확공 거동을 나타내고 점성토에서는 확공 정도가 매우 미비한 것을 현장실험으로부터 확인할 수 있었으며 확공 정도를 정량화하기 위하여 식 (1)의 확공 계수 (coefficient of expansion, E_c)를 제안하였다. 확공 계수 E_c 는 펄스 방전에 의해 시추공이 구형으로 확공된다는 가정 하에 제안된 계수로 김태훈 등 (2007)에 의해 확인된 실제 확공된 말뚝의 형태와 비교해 볼 때 합리적으로 확공 정도를 평가할 수 있는 계수임을 알 수 있다.

$$E_c = d_{\text{expanded}} / d_0 \quad (1)$$

여기서, $d_{expanded}$ 는 확공된 시추공의 직경이고 d_0 는 확공전 시추공의 직경을 의미한다.

한편, Kim & Cha (2008)는 사질토 지반에서 SPT N값에 의해 분류된 지반의 강성 및 강도 특성 별로 방전 횟수에 따른 확공 계수 도표를 제안하였다. Kim & Cha (2008)의 도표에 따르면 250mm의 직경을 갖는 시추공에 대해 30~40회의 방전 시 구근의 직경은 초기 시추공 직경의 1.5~2.0배로 증가하고 SPT N값이 작을수록 큰 확공 계수를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 한편 점성토의 경우 1.2 미만의 낮은 확공 계수를 얻는 것으로 확인되었다. 펄스 방전에 의한 지반 확공 현상에 대해 박현구 등 (2009)은 점성토 지반에서 수행되는 펄스 방전에 대해 수중폭발 모델을 이용한 충격파를 모델링과 유체-구조물 연동 해석을 통해 확공 특성을 살펴보았으며 Kim & Cha (2008)의 실험결과와 유사한 점성토지반의 확공특성을 확인하였다.

본 연구에서는 사질토 지반에서의 펄스방전에 의한 시추공 확공현상을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션은 수중폭발모델을 이용한 충격파 모델링과 유체-구조물 연동해석기법을 이용하여 수행되었다. SPT N값에 대한 경험식을 이용하여 사질토 지반의 강성 및 강도 특성을 유추하고, 다양한 지반조건에 대해 매개변수해석을 수행하였으며 그 결과를 Kim & Cha (2008)의 사질토 지반 시험 결과와 비교·분석해 보았다.

2. 확공 현상 시뮬레이션

2.1 충격파에 의한 지반 확공 시뮬레이션 기법

펄스 방전으로부터 발생한 충격파에 의한 지반의 거동을 예측하기 위해서는 충격파를 전달하는 유체와 지반의 상호 거동에 대한 모델링이 요구되며, 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/Explicit UNDEX 모델을 통한 충격파 모델링과 더불어 유체-구조물 연동해석 (coupled acoustic-structural analysis) 기법을 이용하였다. 본 기법은 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 캐비테이션 현상을 겪게 된다. 캐비테이션 현상은 크게 구조물 주위에서 반사되어 형성되는 인장력에 의한 국부적 캐비테이션(local cavitation)과 자유수면 근방에서 유발되는 광역 캐비테이션 (bulk cavitation)으로 나뉠 수 있으며 깊은 심도에서 폭발 하중에 의한 유체와 구조물의 거동 시에는 광역 캐비테이션 현상은 고려되지 않아도 되는 것으로 알려진 반면 구조물과 유체의 상호 거동이 복잡하게 유발되는 경우에는 국부적 캐비테이션을 고려하여야 하는 것으로 알려져 있다 (Klenow & Brown, 2007). ABAQUS에서는 유체의 인장응력이 캐비테이션 압력과 같아지면 유체의 압력을 캐비테이션 압력으로 고정하여 계산을 수행한다.

지반의 초기 자중 조건을 고려하기 위하여 K_0 조건의 초기 조건(initial condition)에 대해 모든 절점의 자유도를 구속시킨 상태에서 지반의 자중을 부여하고, acoustic 요소의 자중은 해석에서 반영되지 않음을 고려하여 시추공 벽면에 시멘트 모르타르 자중에 의한 하중을 가하여 시추공 굴착 후 지반 응력

상태를 구현하였다. 이후 자유도 구속조건을 해제하여 충격파에 의한 변위가 유발되는 것을 시뮬레이션 하였다. 공통적인 경계조건으로, 시멘트 모르타르의 자유 수면에서 수압은 0이 되도록 하였고, 축대칭 조건을 고려하여 대칭축에서 횡방향 변위를 구속하였다.

2.2 대상 문제 및 입력 물성

김태훈 등 (2007)과 Kim & Cha (2008)의 현장 실험 조건을 고려하여 대상문제를 선정하였다. 본 해석에서 고려된 시추공의 직경은 250mm, 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 1과 같이 축대칭 조건에 대한 유한 요소망을 작성하였다. 해석의 안정성을 고려하기 위하여 시추공 내부를 채우고 있는 유체요소 및 인접 지반 요소를 25mm × 25mm 크기로 세밀하게 분할하였으며, 방전 위치로부터 횡방향으로 약 2m 및 연직방향 10m 이후의 해석영역에는 infinite element를 사용하여 boundary effect를 최소화 하였다. 충격파 발생과 관련되는 입력 자료는 앞서 박현구 등(2009)이 사용한 입력변수를 동일하게 적용하였으며 표 1과 같다.

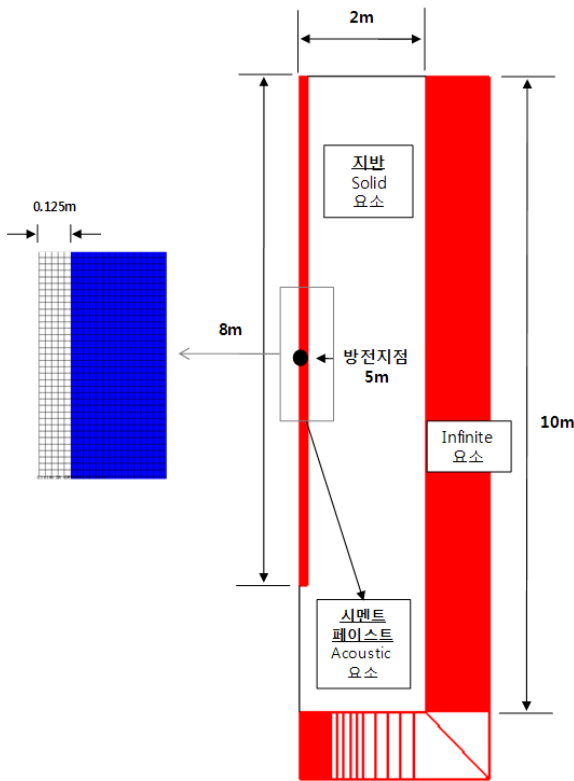


그림 1. 확공해석을 위한 유한요소망

표 1. 수중폭발 모델 입력자료

방전에너지 (kJ)	입력자료	값
20	K	5.76×10^7
	k	9.0×10^{-5}
	A	0.18
	B	0.185
	K_c^*	1045×10^6
	ρ_c (kN/m ³)	16
	m_c (kgf)	6.84×10^{-3}
	폭발 시뮬레이션 시간 T_c (msec)	0.3

사질토의 경우 충격파에 의해 발생하는 과잉간극수압의 빠른 소산을 고려하여 확공 거동이 완전히 건조된 지반에 대해 이루어지는 것으로 고려하였다. 사질토의 강성 및 강도는 응력에 의존적이므로 Janbu (1969)의 수식(식 2)을 이용하여 초기 지반 응력 상태에서부터 탄성계수를 산정하여 적용하였고, 지반의 강도를 표현하기 위해 SPT N값과 Mohr-Coulomb 강도 정수 (ϕ')에 대한 Ohsaki의 상관관계식(식 3)을 적용하였다.

$$E_t = K_h p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (2)$$

$$\phi' = \sqrt{20N_{SPT} + 15} \quad (3)$$

한편, 사질토의 항복규준으로 Drucker-Prager 항복 규준(식 4)을 적용하였으며 삼축 조건에 대한 Mohr-Coulomb 항복규준에 상응하는 Drucker-Prager 규준을 만족하는 강도 정수 (α , k)는 식 (5) 및 식 (6)을 통해 산정하였다.

$$f = \sqrt{J_{2D}} - \alpha J_1 - k \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{2\sin\phi'}{\sqrt{3}(3 - \sin\phi')} \quad (5)$$

$$k = \frac{6c'\sin\phi'}{\sqrt{3}(3 - \sin\phi')} \quad (6)$$

여기서, K_h 는 탄성계수와 관련된 지반 상수, p_a 는 대기압(=1atm=101.3kPa), σ_3 는 평균유효응력, n 은 탄성계수와 관련된 지반 상수, $\sqrt{J_{2D}}$ 는 전단응력 텐서의 2차 불변량 (second invariant of the deviatoric stress tensor), J_1 은 응력 텐서의 1차 불변량 (first invariant of the stress tensor)을 의미한다.

3. 해석 결과

3.1 펄스 방전 시 지반 거동 특성

그림 2는 $N_{SPT}=15$ 인 사질토 지반에서 1회 펄스 방전에 의해 시추공 벽면에 발생하는 충격과 압력을 예측한 결과를 나타낸 것으로 점성토 사례와는 달리 최대 약 1.2MPa 압력이 가해지고 있으며 그림 3에 나타난 바와 같이 충격과 압력이 완전한 구형형태로 전파되지 않는 형상을 확인할 수 있다. 이는 점성토가 시멘트 페이스트와 유사하거나 큰 임피던스 값을 갖는 반면 건조한 사질토는 시멘트 모르타르에 비해 낮은 임피던스 값을 갖기 때문에 지반으로 전달되는 충격과 압력이 감소하는 것으로 이해될 수 있다.

그림 4는 펄스 방전 시 지반의 횡방향 변위를 나타낸 것으로 점성토의 경우와 마찬가지로 방전 직후 큰 변위가 발생하지만 충격과 압력이 감소함에 따라 변위가 회복되는 거동을 나타내고 있으나 잔류 변위량은 훨씬 크게 나타남을 확인할 수 있다. 한편, 40회 방전 시뮬레이션 후 예측된 변형된 지반의 형상은 그림 5에서 볼 수 있듯이 방전 위치를 중심으로 완만한 포물선 형태로 나타나는 것으로 예측되었으며 이러한 결과는 Kim & Cha(2008)의 구형 구근 확공 계수가 실제 최대 확공 직경을 고려한 확공 계수에 비해 큰 이유의 근거가 될 수 있을 것으로 판단된다.

그림 6은 방전 횟수에 따른 지반의 평균 유효 응력 증가량에 대한 contour를 나타낸 것으로, 방전 횟수가 증가함에 따라 방전 위치 주변 지반의 평균 유효 응력이 증가함을 확인할 수 있다. 사질토 등의 조립질 지반재료의 강성 및 강도가 평균 유효 응력과 비례적인 관계를 갖는 것을 고려해 볼 때, 위와 같은 거동은 펄스 방전에 의해 지반이 다져진다는 것을 의미한다. 또한, 그림 7에 도시된 체적변형량

contour 역시 확공 주변 지반의 체적이 압축되는 것을 나타내고 있으며 이는 지반 간극비의 감소를 의미한다.

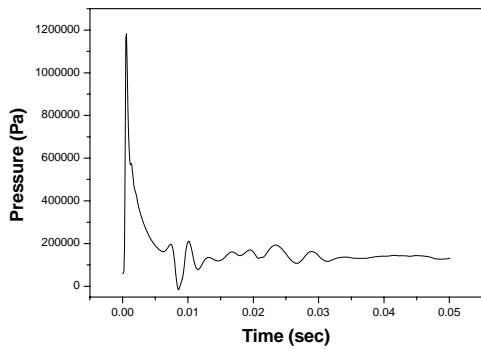


그림 2. 시추공 벽면에 가해지는 충격과 압력

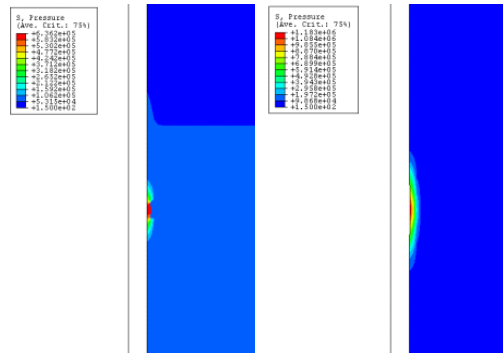


그림 3. 지반에서의 충격파의 전파형태

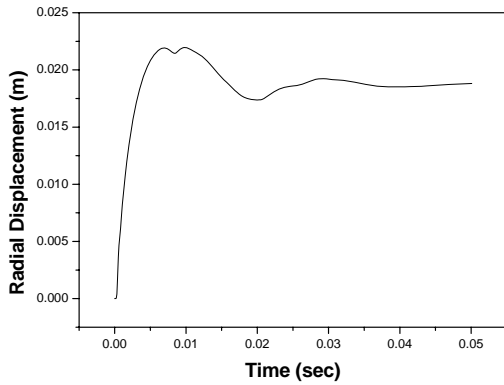


그림 4. 방전위치 깊이의 시추공 벽면에서의 횡방향 변위

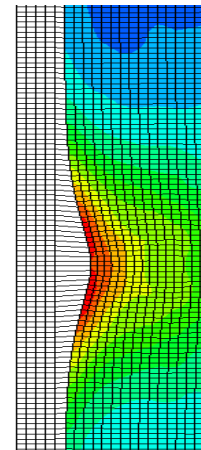
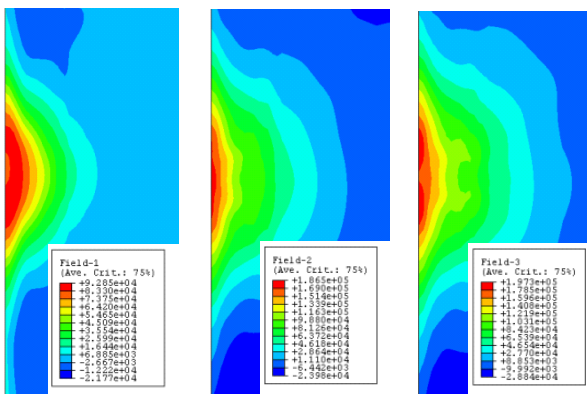
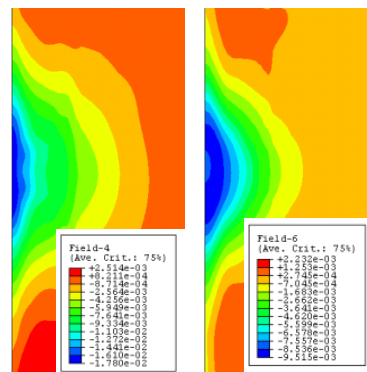


그림 5. 펄스 방전에 의한 지반 확공 형상



방전1회 / 방전 10회 / 방전 20회

그림 6. 방전횟수에 따른 체적응력 Contour



방전1회 / 방전 10회

그림 7. 방전횟수에 따른 체적변형률 Contour

3.2 매개변수해석 및 현장 시험과의 비교 · 검증

수평 토압 계수 K_0 가 0.5이고 단위중량이 18kN/m^3 인 사질토 지반에 대해 SPT N값과 지반 물성 간 상관관계를 바탕으로 SPT N값이 5, 10, 15, 20, 25 및 30인 경우에 해당하는 지반에 대한 해석 물성은 표 2와 같다.

표 2. N_{SPT} 에 따른 확공해석을 위한 입력 물성

N_{SPT}	Density (kN/m^3)	E (MPa)	ϕ' (MPa)	K_0	Poisson's ratio (ν)
5		9	25		
15		14	29		
20	18	19	32	0.5	0.3
25		24	35		
30		34	37		

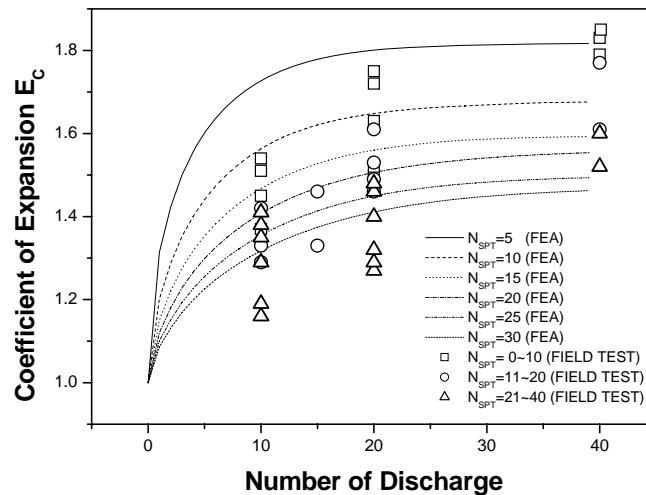


그림 8. 수치해석과 현장 실험에서 얻어진 확공 계수 비교 (사질토)

해석 결과에서 얻어지는 확공계수 E_c 를 Kim과 Cha (2008)가 SPT N값이 0~40사이의 사질토 지반에서 수행한 현장 확공계수와 그림 8과 같이 비교해 보았다. 현장 시험 결과가 수치해석 결과와 잘 부합하고 있음을 알 수 있으며 지반이 상대적으로 연약한 경우 ($N_{SPT}=5$) 확공 계수는 20회 방전에도 1.8에 도달함을 확인할 수 있다. 본 연구에서 제안된 사질토 지반 확공 현상 시뮬레이션 기법이 실제 사질토 지반에서의 확공 현상을 적절하게 모사하고 있는 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 수치 시뮬레이션을 기반으로, 펄스 파워를 이용한 가압형 앵커 시공과 관련하여 펄스 방전에 의한 충격과 발생, 펄스 방전에 의한 사질토 지반 확공 거동에 대한 수치해석을 수행하였으며 매개변수해석 및 실제 시험과의 비교/분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 수중 폭발 모델을 이용한 충격과 모델링과 유체-구조물 연동해석을 통해 사질토 지반에 놓인 시추

공에 대한 확공 해석을 수행하였으며 충격과 전달 및 확공 거동을 통해 본 연구에서 적용된 해석방법이 합당함을 확인할 수 있었다.

(2) SPT N값으로부터 경험적으로 유추된 지반 물성을 이용하여 사질토 지반의 확공 거동에 대한 매개 변수해석 결과, 현장시험과 유사한 경향성을 확인할 수 있었으며 Kim & Cha (2008)이 250mm 시추공에서 수행한 현장 확공 시험과 유사한 확공 거동이 예측됨을 확인할 수 있었다.

(3) 확공 해석 결과에 따르면 펄스 방전은 앵커 구근 주변부 지반의 구속압을 증가시키고 체적을 압축시키는 것으로 나타났으며 이는 곧 지반의 강성 및 강도의 증가, 그리고 간극비의 감소를 유발하는 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김태훈, 차경섭, 김선주, 김유석, 김경오, 고부현 (2007), “펄스압에 의한 지반의 확공특성”, 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp. 842-851.
2. 박현구, 이승래, 김태훈 (2009), “펄스 방전에 의한 시추공 확공 현상에 대한 수치해석”, 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp. 1346-1353
3. Dzhantimirov, Kh. A., Krastelev, E. G., Kryuchkov, S. A., Nistratov, V. M., and Smirnov, 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
4. HKS (2004), Abaqus User Manual Version 6.5
5. Janbu, N. (1969), “The resistance concept applied to deformation of soils”, In Proceedings of the 7th International Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference, Mexico City, August 1969., A. A. Balkema, Rotterdam, Boston. Vol.1, pp.191-196.
6. 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
7. Klenow, B. and Brown, A. (2007), "Far-Field Underwater Explosion (UNDEX) Fluid Modeling using Acoustic Elements", <http://www.aoe.vt.edu/~brown/Papers/pressure%20elementsSAVIAC2007.pdf>