발파하중이 인접 댐에 미치는 진동영향에 대한 연계해석적 검토

Coupled analysis for the influence of blasting-induced vibration on adjacent dam

박인준*[1], 김성인[2], 남기천[3], 곽창원[4]
Park, Inn-Joon • Kim, Sung-In • Nam, Kee-Chun • Kwak, Chang-Won

Abstract

The numerical investigation for the effects of blasting-induced vibration on adjacent dam and pore water pressure fluctuation was conducted through solid-water coupled analysis under dynamic loading. The stability of dam was examined by peak particle velocity of core. Pore water pressure distributions were calculated by steady state flow analysis using coupled analysis on ground water and blasting-induced vibration. The influence of pore water pressure and the effective stress distribution in the ground were also investigated. Furthermore, effective stress alteration was examined by applying Finn & Byrne Model to monitor the generation and dissipation of pore water pressure.

Keywords: Pore water pressure, coupled analysis, peak particle velocity, finn & byrne model

요 지

본 논문에서는 기존댐 인접지에 터널구조물을 건설하기 위한 발파시, 폭괴하중으로 인한 지반진동이 댐 제체와 간극수압에 미치는 영향을 고찰하였다. 댐의 안정성 검토는 발파시 발생하는 코어부의 최대입자속도 (Peak Particle Velocity)를 계산하여 수행하였다. 간극수와 지반진동간의 상호 연계해석을 위하여 댐 제체에 대한 정상상태 흐름해석을 수행하여 간극수압 분포를 파악하고, 유발된 과잉간극수압 및 유효응력분포로 발파하중이 인접지반에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 발파와 같은 급속하중 재하 후 과잉간극수압의 증가 및 소산현상 해석을 위하여 Finn & Byrne Model을 적용하여 하중재하 전후의 유효응력 변화양상을 검토하였다.

주요어: 간극수압, 연계해석, 최대입자속도, finn & byrne 모델

1.서론

발파는 암반의 파쇄를 목적으로 화약류를 암반 (지반) 내에서 폭발시키는 것이며 이 때 암석의 파괴로 그 에너지가 모두 소멸되지 않고 남게 된다. 이 잔여 에너지는 암반 내를 전파하여 매질 내에 진동파를 형성시켜 지반진동을

*1 한서대학교 토목공학과 교수 (geotech@hanseo.ac.kr)
2 (주)태조엔지니어링 지반공학부 상무
3 (주)청석엔지니어링 지반공학부 전무
4 (주)청석엔지니어링 지반공학부 주임

일으키게 되며 이를 발파진동이라 한다. 발파진동은 자연적인 지반진동에 비하여 고주파이며 (수십 Hz에서 수백 Hz) 진동지속시간이 1~2초로 매우 짧은 특성을 가진다. 공사 시 수반되는 이러한 발파진동은 작업 전에 충분한 검토가 요구된다. 이를 위해 시험발파를 통해 발파진동 예측식을 정립하여 현장에 적용하고 있는 실정을 감안할 때 현장 여건에 따라 적용이 곤란한 경우가 발생하므로 수치해석 기법에 의한 지반진동해석은 필수적인 것으로 판단된다. 또한 발파로 야기된 지반진동의 이론적 및 경험적 해석 시 기존의 예측식이나 허용기준도표는 대략적인 범위를 알 수 있을 뿐 구조물이 받는 구체적인 영향은 알 수 없다. 따라서 본 연구에서는 발파하중이 댐 구조물에 미치는 영향을 분석하기 위하여 동적 유한차분해석을 수행하여 간극수압 및 유효응력변화를 파악하고 Finn & Byrne Model을 적용하여 하중재하 직후 과잉간극수압의 유발 및 소산현상을 검토하였다.

토사와 암반이 하나의 토구조물로서 사용될 수 있는 주된 특성은 전단저항이라 할 수 있다. 그러나 이러한 구조물이 포화되면 전단저항은 급속히 감소하며 구조물은 불안정한 상태에 도달할 위험성이 높다. 장기간의 강우로 토사댐 (Earth Dam)이나 옹벽이 붕괴되는 경우나 터널공사 중 지하수압에 의해 터널이 붕괴되는 경우는 구조물 설계 시 지하수압을 고려하지 않은 대표적인 예라 할 수 있다. 더욱이 포화된 토사나 암반이 외부로부터 동적하중을 받을 때 전단되는 총압축력은 대부분 수압으로 작용하고 유효 압축응력은 수압에 비해 미소한 값을 갖는다. 따라서 발파로 인한 지반 내 응력변화는 간극수압의 변화를 동반하여 지반의 유효응력의 감소를 가져와 지반의 하중지지능력을 감소시키고 흙의 체적변화로 인한 지반변형을 증가시킨다 (Zienkienwicz et al, 1988). 이러한 경우, 댐 주변지반의 거동 분석을 위하여 역학적 (mechanical) 측면과 수리학적 (hydraulic) 측면이 고려된 응력-간극수 연계해석 (coupled analysis)이 필요한데, 본 연구에서는 발파하중과 지하수의 상호작용이 고려된 응력-간극수압 연계해석을 지반공학 분야에서 널리 사용되고 있는 유한차분해석 프로그램인 FLAC을 이용하여 수행하였다.

2.발파하중 영향해석 개요

국내 ○○댐 인접 여수로터널 시공을 위한 발파시 급속하중으로 인한 지반진동이 댐 및 주위지반에 미치는 영향을 검토하였다. 댐의 안정성 검토는 발파시 발생하는 최대입자가속도 (Peak Particle Velocity)를 계산하여 수행하였고, 시간에 따른 유효응력 및 간극수압 변화도 함께 검토하였다. 검토흐름도는 다음 그림 1에 나타내었다.

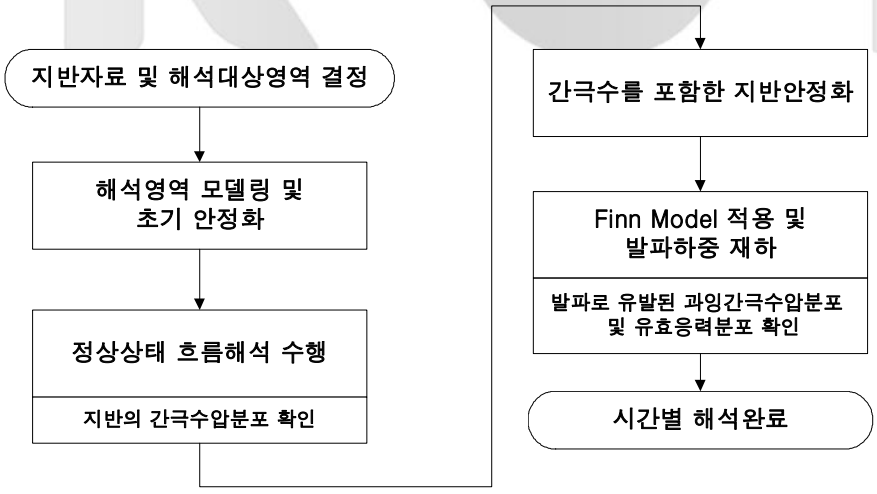

그림 1. 검토흐름도

2.1 Finn & Byrne Model

동적하중-간극수흐름 연계해석은 기본적으로 동적하중 재하에 의한 역학적 계산결과, 간극체적의 변화가 간극수압 변화에 직접적인 영향을 미친다고 본다. 지반의 간극수압이 급속하게 변화할 때 발생하는 현상으로는 지반의 액상화 현상 (Seed et al, 1975)이 있다. 일반적으로 느슨한 포화 사질토에 진동하중이 급속히 가해질 때 간극수압이 증가하여 액상화 현상을 일으키게 되는데 이러한 간극수압의 발생 및 증가현상을 해석하기 위하여 여러 가지 모델들이 제안되었다 (Prevost, 1986). 본 해석에서는 이 중 근래에 비교적 널리 사용되고 있는 Finn & Byrne Model을 이용하여 간극수압 증가 및 소산현상을 모델링 하였다.

동적하중 재하 시 간극수압의 증가현상은 부차적인 것으로서 동적하중 재하시의 일차적인 결과는 지반의 영구적인 체적변형이다. 이 때, 간극이 유체로 채워져 있다면 유체의 압력은 증가하게 될 것이고, 따라서 유효응력은 감소하게 된다. 이러한 영구적인 체적변형률과 전단변형률 크기 사이의 관계를 다음 식 (1)에 나타내었다 (Martin et al, 1975).

$$\Delta \varepsilon_{vd} = C_1(\gamma - C_2 \varepsilon_{vd}) + \frac{C_3 \varepsilon_{vd}^2}{\gamma + C_4 \varepsilon_{vd}} \quad (1)$$

여기서, ε_{vd}는 영구적인 체적변형률, γ는 전단변형률, C_1, C_2, C_3 및 C_4은 상수이다. 만일 전단변형률이 없다면 체적변형률의 변화량도 0이 되므로 식 (1)로부터 다음 식 (2)를 얻는다.

$$C_1 C_2 C_4 = C_3 \quad (2)$$

실질적으로 식 (3)과 같이 Byrne (1991)이 제안한 간편식이 널리 쓰인다.

$$\frac{\Delta \varepsilon_{vd}}{\gamma} = C_1 \exp\left(-C_2 \frac{\varepsilon_{vd}}{\gamma}\right) \quad (3)$$

C_1은 대상 지반의 상대밀도 (Dr)에 의해 결정되는 상수이며 다음 식 (4)에 의해 계산된다 (Byrne, 1991).

$$C_1 = 7600\,(Dr)^{-2.5} \quad (4)$$

상대밀도 (Dr)와 정규화된 표준관입저항치 ($(N_1)_{60}$)와의 실험적 관계는 다음 식 (5)과 같으므로 C_1값은 최
종적으로 식 (6)에 의해 계산되며, 많은 실험을 수행한 결과 C_1 및 C_2의 관계는 식 (7)과 같다.

$$Dr = 15(N_1)_{60}^{0.5} \quad (5)$$

$$C_1 = 8.7(N_1)_{60}^{-1.25} \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{0.4}{C_1} \quad (7)$$

2.2 해석조건

해석 대상위치는 그림 2에서 나타난 바와 같이 ○○댐 기존여수로 상부에 위치한 발파지점을 중심으로 댐 단면 전체 (그림 3)를 그림 4와 같이 모델링 하였다. 경계조건은 반사파에 의한 간섭현상을 피하기 위하여 흡수경계 (Quiet Boundary)를 적용하고 (Day, 2002), 먼저 기존 댐 제체와 지반을 모사하기 위하여 Mohr-Coulumb 탄소성 모델에 의한 정적해석을 수행하고 물에 의한 침투영향과 간극수압 분포를 위한 Steady-State Flow해석을 수행하였다. 발파하중 (그림 5 참조)은 2차원 해석을 위하여 1초 동안 측정된 입자속도를 수평방향으로 재하하여 시간 영역에서의 지반의 속도, 응력분포 및 과잉간극수압 발현 등을 검토하였다.

해석 입력정수는 표 1과 같다.

3. 발파하중 영향해석 결과

3.1 최대입자속도 검토

우선적으로 댐 코어 중심부에서 최대입자속도 (Peak Particle Velocity)를 계산하여 발파가 댐에 미치는 영향을 판단하였다. 최대입자속도에 의한 댐 제체의 안정성 판단기준은 명시된 한계값은 없으나, 국내외 시공 사례들을 기준으로 하여 보수적으로 산정함이 타당하다.

따라서 본 연구에서는 발파진동에 의하여 지하터널, 지상건물 및 진동예민 구조물 등이 받는 영향에 관한 세부적인 기준을 가지고 있는 스위스 진동규제기준을 기초로 기준값을 최저 0.8 Kine, 최대 4 Kine으로 결정하였다.

수치해석 결과에 의한 코어부 최대입자속도는 그림 8에서 나타난 결과와 같이 1초 경과시 0.42 Kine으로 나

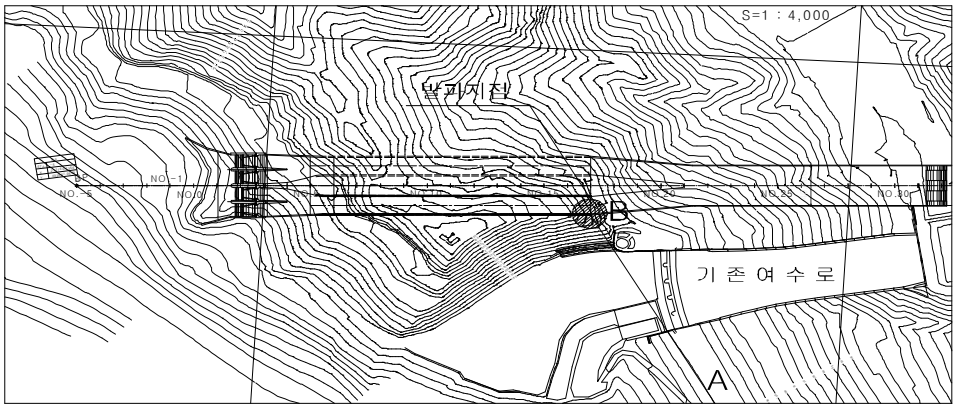

그림 2. 해석위치 및 지형

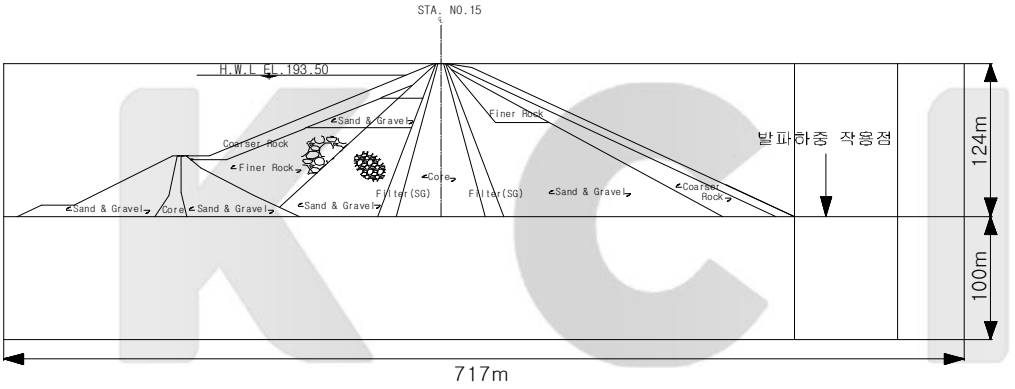

그림 3. 해석 단면도

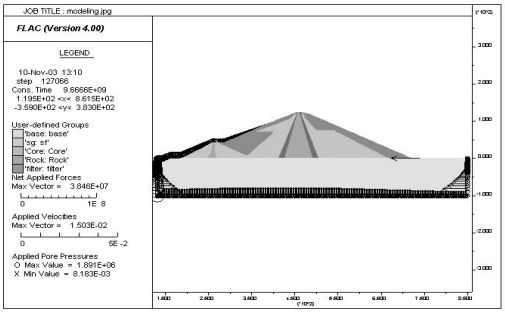

그림 4. 해석 모델링

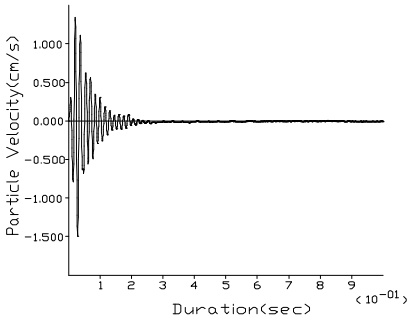

그림 5. 입력하중

타났으며, 그림 6 및 그림 7에서와 같이 0.194초 경과시 댐 코어부의 최대 합변위는 1초간 해석시 1.902mm로

표 1. 해석 입력정수

구 분	변형계수 (tf/m^2)	포아송비 (v)	점 착 력 (tf/m^2)	내부마찰각 (deg)	단위중량 (tf/m^3)
Rock	200,000	0.30	0.0	38.7	2.12
Sand & Gravel	26,500	0.31	0.0	33.8	2.24
Core	30,000	0.31	1.5	21.8	2.12
Filter	26,500	0.31	0.0	33.8	2.24
Base Layer	1,364,900	0.22	980.0	45	2.60

구 분	Porosity	Permeability (m/day)	K-Ratio	투수계수 (m/s)
Rock	0.3015	70.847×10^{-5}	1.0	8.2×10^{-4}
Sand & Gravel	0.2593	2.938×10^{-5}	1.0	3.4×10^{-5}
Core	0.3288	8.64×10^{-5}	1.0	4.6×10^{-9}
Filter	0.2593	2.938×10^{-5}	1.0	3.4×10^{-5}
Base Layer	0.3000	70.847×10^{-5}	1.0	8.2×10^{-4}

표 2. 스위스 진동규제기준

종별	구조물 종류	발파진동	
		주파수 범위 (Hz)	입자속도 (mm/s)
1종	강구조 및 철근 콘크리트 구조물/지하의 터널 및 지하공동 (Chamber) 중 콘크리트 라이닝 처리한 것 또는 라이닝이 없는 것	10~60	30
		60~90	30~40
2종	기초벽이 있고 콘크리트 슬래브 또는 석조재 벽체로 축조된 건물	10~60	18
		60~90	18~25
3종	석조재 벽체와 함께 목재 천장을 가진 건물	10~60	12
		60~90	12~25
4종	역사적 가치가 있는 구조물 및 기타 진동예민 구조물	10~60	8
		60~90	8~12

※ Langefors, U and Kiklstorns. B(1978), "The Mordern Technique of Rock Blasting", 3rd ed. A Haisted Press Book - John Wiley & Sones, 438p.

수평방향 최대 0.194 Kine, 0.29초 경과시 수직방향 최대 0.0604 Kine으로 나타났다. 이는 최저 기준치인 0.8 Kine보다 현저히 낮은 값 (최저 기준치의 53% 수준)을 보이므로 댐은 발파하중에 대해 안정하다고 판단된다. 입자속도 발생경향은 입력하중 지속시간인 1초 이후부터 수렴되는 경향을 보인다.

3.2 변위 검토

서 거의 발생하지 않으며 변위 벡터도에 나타난 바와 같이 본 연구에서 적용된 발파하중이 지반변위에 미치는 영향은 발파지점 근처에서 제한적으로 나타나며 댐 제체부의 지반변위에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다.

3.3 과잉간극수압 및 유효응력검토

본 연구에서는 급속한 반복하중 재하에 따라 유발되는 과잉간극수압의 발생 및 누적과정을 추적할 수 있는

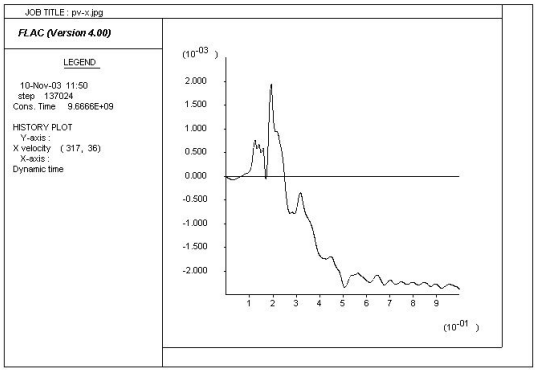

그림 6. 코어 중심부의 수평방향 입자속도

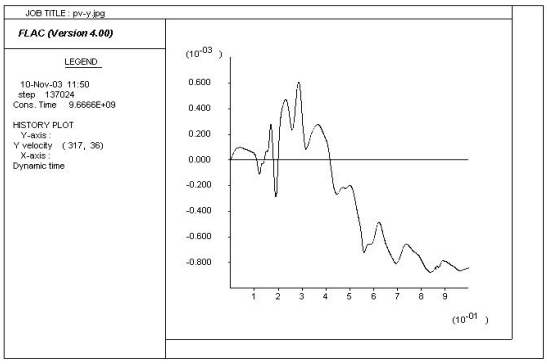

그림 7. 코어 중심부의 수직방향 입자속도

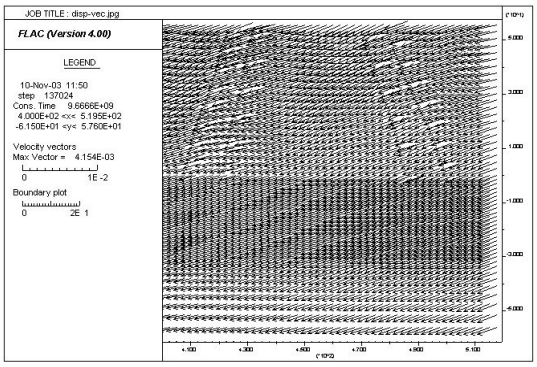

그림 8. 코어 중심부의 속도 벡터도

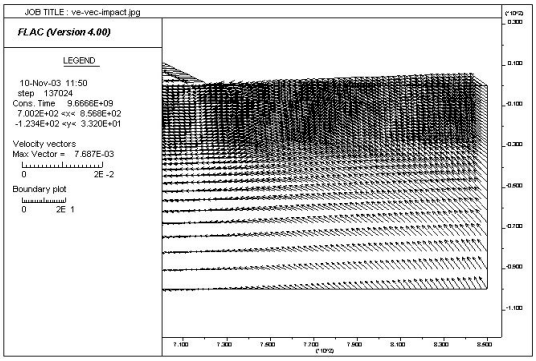

그림 9. 가진점 주위의 속도 벡터도

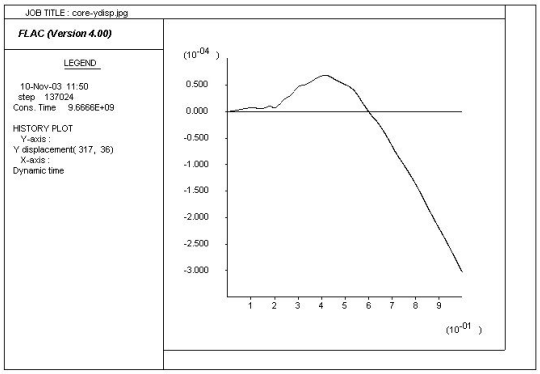

그림 10. 코어 중심부의 수직변위 발생경향

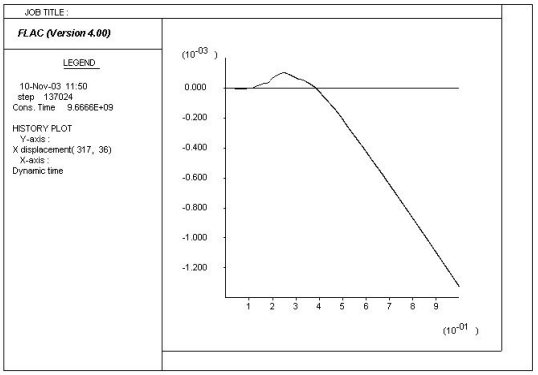

그림 11. 코어 중심부의 수평변위 발생경향

Finn Model을 적용하여 과잉간극수압 발생경향과 유효

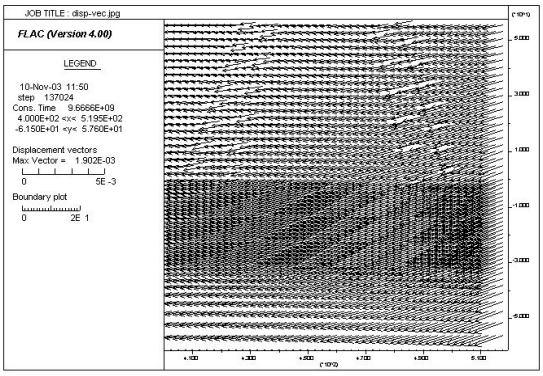

그림 12. 코어 중심부의 변위 벡터도

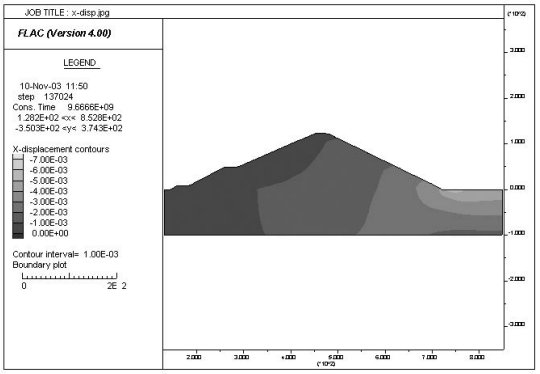

그림 14. 수평 변위도

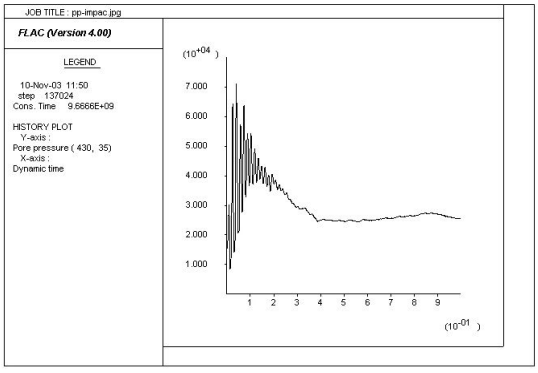

그림 16. 가진점의 과잉간극수압 발생경향 (1초)

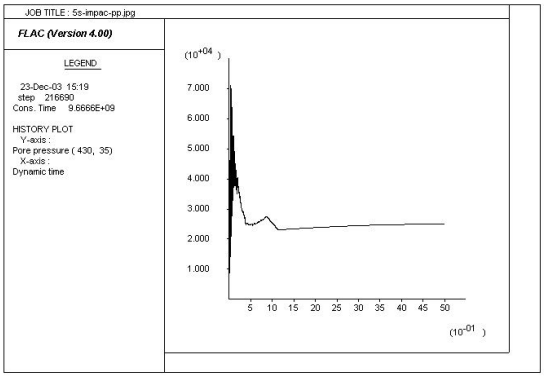

그림 18. 가진점의 과잉간극수압 발생경향 (5초)

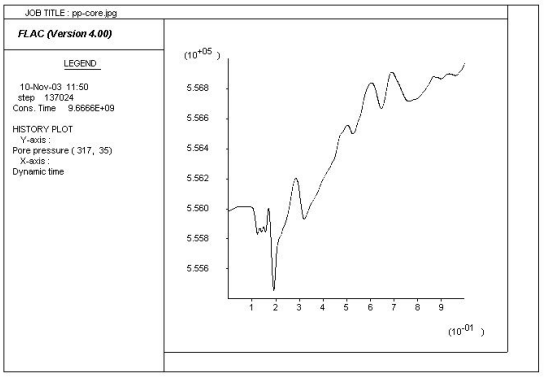

그림 20. 코어부의 과잉간극수압 발생경향

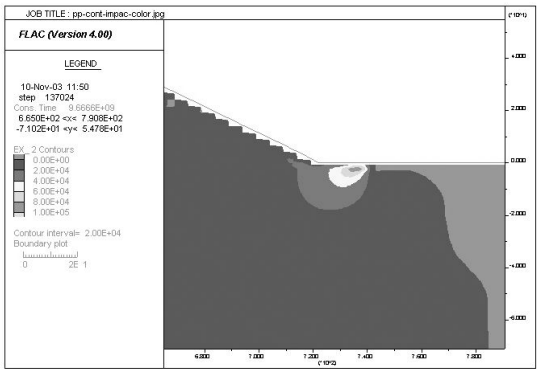

그림 22. 가진점의 과잉간극수압 분포도

응력의 변화를 파악하였다. 해석결과, 과잉간극수압은 발파하중 재하로부터 약 0.8초간 일시적으로 유발되나, 그 증가분이 1kPa 이하로 미미하므로 유효응력의 변화는 거의 없다고 판단된다. 다음 그림 16~19에서는 1초 및 5초간 해석 후 가진점의 과잉간극수압과 유효응력 변화를 나타내었다.

그림 21 및 23에서는 1초 해석 후 댐 코어부에서의 간극수압 변화경향을 나타내었다. 코어부에서는 발파하중의 영향이 미미하여 유발된 과잉간극수압은 약 0.9kPa로 산정되었고 (그림 20 참조), 전체적으로 가진점 주위를 제외한 댐 제체 내의 간극수압의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

4.해석 결과검토 및 결론

본 연구에서는 댐 인접 여수로 터널시공을 위한 발파시 폭괴하중으로 인한 지반진동이 기존 댐에 미치는 영향을 2차원 수치해석을 통하여 검토하였다. 특히, 댐 구조물의 특성상 포화에 의한 토체의 전단강도저항이 우려되고 발파에 의한 지반 내 응력변화가 간극수압 증가를 유발하여 지반의 유효응력을 감소시킴으로써 지반 지지력 감소를 야기하므로 해석의 정확성을 위하여 역학적 측면과 수리학적 측면을 함께 고려한 응력-간극수 연계해석을 수행하였다.

댐 제체의 안정성 검토를 위하여 토체의 최대입자속도 (Peak Particle Velocity) 계산결과, 댐 중심코어에서 유발된 최대입자속도는 1초 경과 시 0.42Kine으로 나타나 허용치인 0.8Kine의 53%에 불과하여 안정하다고 판단된다. 추가적으로, 진동하중 재하에 따라 발생 가능한 과잉간극수압에 의하여 유효응력이 감소할 수 있으나 Finn Model을 적용하여 해석한 결과, 재하 후 0.8초 이내에 일시적인 간극수압 증가가 발생하나 그 크기가 1kPa 이하로서 미소하므로 충분한 지지력을 확보한다고 판단된다.

참고문헌

1. Finn, W. D. L., Martin, G. R., and Lee, K. W. (1977) "An effective stress model for liquefaction." J. Geotech., Div. ASCE, 103 (6), pp. 517-533
2. Byrne, P. (1991) "A Cyclic Shear-Volume Coupling and Pore-Pressure Model for Sand", in Proceedings: Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics (St. Louis, Missouri), Paper No. 1.23, pp. 47-55.
3. Martin, G. R., Finn, W. D. L. and Seed, H. B. (1975) "Fundamentals of Liquefaction Under Cyclic Loading", J. Geotech., Div. ASCE, 101 (GT5), pp. 423-438.
4. Seed, H. B., Martin, P. P. and Lysmer, J. (1975) "The Generation and Dissipation of Pore Water Pressures During Soil Liquefaction", University of California, Berkeley, Earthquake Engineering Research Center, NSF Report PB 252 648.
5. Zienkiewicz, O. C. and Stagg, K. G., Hinton, E. (1988) "Finite Element in Solution of Problem in Rock Mechanics", Proc Int. Symp. Underground Engineering, India.
6. Prevost. J. H. (1986), "Effective Stress Analysis of Seismic Site Response", Internation Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 10, pp. 653-665.
7. Das, Braja M. (1993) "Principles of Soil Dynamics", PWS-KENT Publishing Company, pp. 397-439.
8. Day. R. W. (2002) "Geotechnical Earthquake Engineering Handbook", McGraw-Hill, Chapter 7. 1-7. 27.

박인준
한서대학교 토목공학과 교수
geotech@hanseo.ac.kr

김성인
(주)태조엔지니어링 지반공학부 상무
saint516@freechal.com

남기천
(주)청석엔지니어링 지반공학부 전무
kcnam@cse.co.kr

곽창원
(주)청석엔지니어링 지반공학부 주임
cwkwak@korea.com

KCI