

고분해능 탄성과 반사법을 이용한 댐체 내부구조 모니터링 연구

김중열¹⁾, 김형수²⁾, 오석훈²⁾, 김유성¹⁾

¹⁾(주)소암컨설턴트, soamkijy@empal.com

²⁾한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소

A study on monitoring the inner structure of dam body using high resolution seismic reflection method

Jungyul Kim¹⁾, Hyoungsoo Kim²⁾, Seokhoon Oh²⁾, Yoosung Kim¹⁾

¹⁾Soam Consultant Co., Ltd.

²⁾Groundwater & Geotechnics Research Center
Korea Institute of Water and Environment, KOWACO

요약 : 댐체 안정성 문제는 무엇보다 투수 내지 누수 과정에서 유발될 수 있는 댐체 내부 결함(예: 균열)에 귀결된다고 볼 수 있다. 이러한 댐체 내부 결함은 댐 붕괴를 조장할 수 있기 때문에 우선 적절한 탐사 기법을 이용하여 그에 대한 위치 및 규모가 파악되어야 하며 그 결과에 따라 그라우팅에 의한 보수 작업 및 그에 대한 성과 검증 작업이 철저히 이루어져야 한다.

본 연구의 조사 대상이 된 댐은 중심 코어형 흙 댐으로 댐 소단 사면에는 누수로 인한 여러 형태의 결함이 관찰되고 있어 그에 대한 진단 및 보수 보강이 필요한 상태였다. 본 연구에서는 댐체 진단 및 그라우팅 성과 판단을 위해 그라우팅 이전(2001년 8월) 및 이후(2004년 11월)에 댐 마루 축선 상에서 고분해능 탄성과 반사법 탐사를 수행하였다. 탐사 자료의 질을 향상시키기 위해 표면파를 약화시키고 P파 반사파 에너지를 증대시킬 수 있는 발생원 에너지 방사형 변조 기법(P빔 발생원)도 응용되었다.

그라우팅 이전 탐사 결과(탄성과 중합단면도)에서는 댐체 내부 균열로 판단되는 강한 반사파가 일부 구간에서 인식되었으며, 그라우팅 이후 탐사 결과에서는 상기 강한 반사파가 인식되지 않음으로써 3년의 시차를 둔 두 개의 탄성과 탐사 결과는 댐체 진단 및 그라우팅 성과 판단을 위한 기본 자료로 반영될 수 있었다. 따라서 고분해능 탄성과 반사법 탐사는 댐 모니터링을 위한 하나의 바람직한 탐사 기법으로 크게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 고분해능 탄성과 반사법, 댐체 내부 구조, 모니터링, 그라우팅 성과 판단, 발생원 에너지 방사형 변조기법

Abstract : Defects of dam body which can be induced in seepage or leakage procedure can directly affect dam safety. Therefore, a proper inspection method should be carried out in the first place to find out their positions and sizes. After that, some reinforcement works such as grouting and the corresponding

assessment could be taken in a proper way.

The dam(center core type earth dam) issued in this study has been in need for intensive diagnosis and reinforcement work, because a lot of slumps similar to cracks, seepage and some boggy area have been observed on the downstream slope. High resolution seismic reflection method was performed on the crest profile twice before and after grouting work(Aug. 2001 and Nov. 2004) aimed at the dam inspection and the assessment of grouting efficiency as well. To enhance the data resolution, P-beam energy radiation technique which can reduce the surface waves and hence to reinforce the reflection events was used. Strong reflection events were recognized in the stack section before grouting work, It seems that the events would be caused by e.g. horizontal cracks with a considerable aperture. Meanwhile such strong reflection events were not observed in the section after grouting. That is, the grouting work was dear able to reinforce the defects of dam body. Hence, the section showed an well arranged picture of dam inner structure. In this sense, seismic reflection method will be a desirable technique for dam inspection and for monitoring dam inner structure as well.

Keywords : high resolution seismic reflection method, inner structure of dam, monitoring, assessment of grouting efficiency, controlling technique of seismic source energy radiation pattern

1. 서론

한국수자원공사 통계(Korea & Dams, 2004 KNCOLD, KOWACO)에 따르면 지금까지 우리가 보유하고 있는 댐은 물경 18,000개를 넘어서고 있으며 그 중 대댐(large dams)으로 분류될 수 있는 것만 하더라도 1206개에 달하고 있다. 더구나 약 600개 대댐은 이미 1980년 이전에 완공되었기 때문에 최근 무엇보다도 댐체 안정성 문제는 물론 댐의 환경 친화 문제까지도 크게 부각되고 있음은 당연하다고 하겠다. 댐체 안정성 문제는 투수 내지 누수 과정에서 유발될 수 있는 댐체 내부 결함(예: 균열)에 직접적인 영향을 받는다고 할 수 있다. 즉, 댐체 내부 결함을 그대로 방치하는 경우에는 언젠가는 댐 붕괴로 이어질 수 있다는 것이다. 이러한 문제에 대처하기 위해 댐체 내부 결함을 정확하게 진단하고 보수보강 후에는 그에 대한 성과 검증에 대한 정보도 제공할 수 있는 적절한 비파괴 기법이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

본 연구의 조사 대상이 된 댐은 1970년대에 완공된 대댐으로 중심코어형 흙댐(center core type earth fill dam)으로 분류된다. 약 30년 이상이 경과된 댐의 사면에는 여러 형태의 소규모 결함(예: slump, boggy area, cracks)이 육안으로도 관찰되어 여러 차례의 크고 작은 댐 보수가 이루어져 왔다. 본 연구에서는 상기 댐의 댐마루 측선에 대해 그라우팅 전(2001년 8월)과 후(2004년 11월) 두 번에 걸쳐 고분해능 탄성파 반사법을 수행함으로써 노후화된 댐체 내부 결함을 진단하고, 보수 보강(예: 그라우팅 작업) 이후에는 그에 대한 성과 판단을 위해 바람직한 정보를 제공할 수 있음을 현장 응용 사례를 통해 서술하고 있다.

2. 탄성과 반사법 자료 취득

Fig. 1은 탐사 대상이 된 댐의 내부구조 및 댐 외형에 대한 모식도를 나타내고 있다. 여기에는 2001년 8월 댐체 진단을 위해 댐 마루 측선에서 탄성과 반사법 수행 시 확인된, 누수로 인한 크고 작은 다양한 결함(예: slump, boggy area, cracks)의 위치도 표현되고 있다. 그 이후 부분적인 보수 작업이 진행되어 오던 중 최근 대규모 그라우팅 작업이 이루어진 바 있다. 그라우팅 이후 탄성과 반사법은 2004년 11월 동일한 댐 마루 측선에 대해 수행되었다(김중열 등, 2004). Fig. 2는 2001년 8월 및 2004년 11월에 수행된 탄성과 반사법 측정 과정을 상호 대조하고 있다. 이전에는 수진기 간격이 2m로 도합 30채널인 기본 발생원-수진기 배열이었으나 이번에는 좁은 수진기 간격(1m)으로 50채널 기록을 갖는 배열이었다. 여기서 두 번의 탐사 모두 동일한 측정 장비(SUMMIT system: 독일 DMT사)을 사용하였다. 이 시스템의 특징은 지오폰 바로 옆에 A/D converter(Remote unit)를 배열함으로써 기존의 지오폰 케이블을 사용하는 경우와는 달리 케이블에 의한 잡음이 거의 없으며, 각 채널 별로 24 bit dynamic range를 갖는 고분해능 측정 시스템이다. 이러한 고분해능 측정 장비를 사용하더라도 지면 탄성과 반사법 탐사에서 가장 난제로 남아 있는 것이 바로 표면파 문제이다. 특히 탄성과 반사법 자료에서 천부 지층에 대한 반사파들은 큰 에너지로 발달하고 있는 표면파와 중첩되어 나타나기 때문에 표면파를 근본적으로 약화시키지 못하면 천부 지층에 대한 정보를 획득하기 대단히 어렵다고 하겠다. 이를 해결하기 위해 다음은 상기 표면파를 약화시키고 특히 P파 반사파의 에너지를 증대시킬 수 있는 발생원 에너지 방사형 변조 기법에 대해 서술하고 있다.

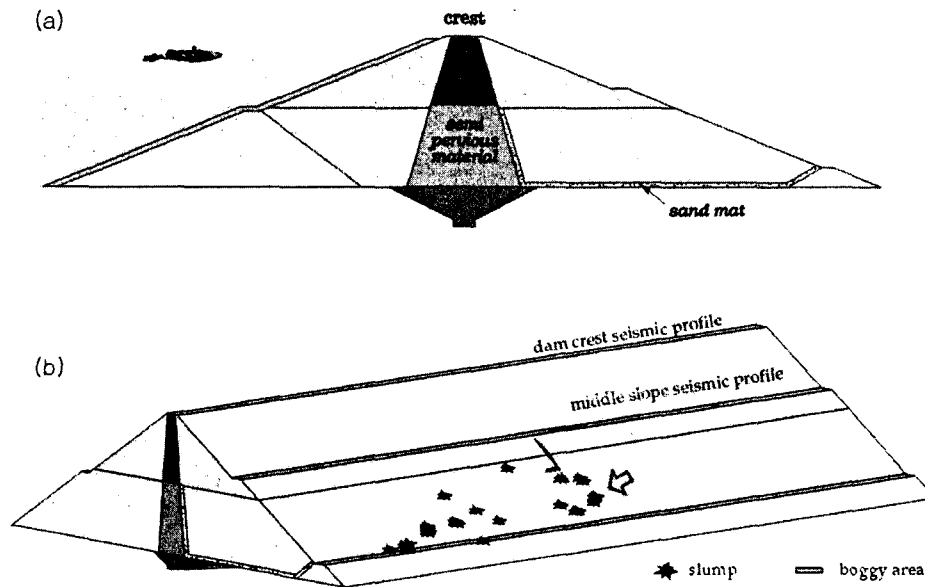


Fig. 1. The cross section of the dam issued in this study (a) and distribution of defects observed on the downstream slope (b).

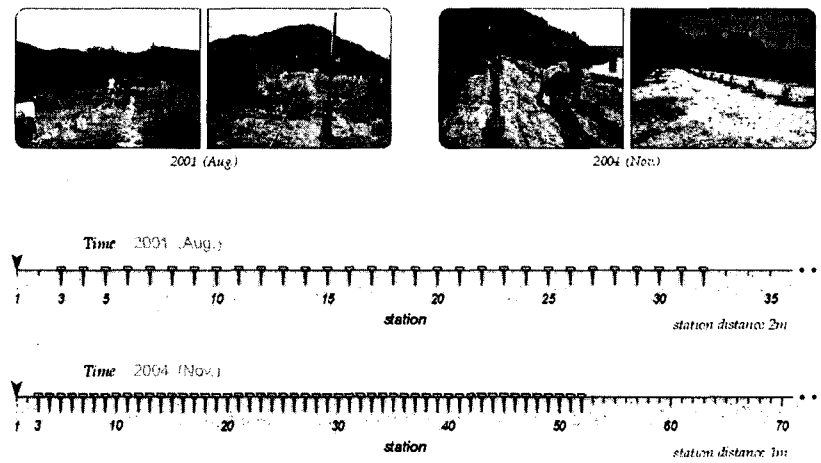


Fig. 2. Comparison of basic source-receiver arrangements between two reflection surveys before and after grouting work.

3. 발생원 에너지 방사형 변조 기법

탄성과 발생원에서 생성된 P파 및 S파는 대체로 그 전달거리 약 1λ 이후에야 비로소 제 모습을 드러내게 되며 그에 따른 탄성과 전달 과정은 이론적인 측면에서 훌륭하게 뒷받침되고 있다. 그러나 전달거리 1λ 이전에서의 탄성과 발달 상태는 아직까지 상당부분 규명되지 않고 있는 실정이다. 더구나 두께 1λ 미만의 표토층에서 레일리파, 다중 반사 및 변환파 등이 흡수성이 큰 매질 내에서 중첩되어 일련의 파군(채널파)이 형성되는 대단히 복잡한 과정은 현 탄성과 이론으로 대처될 수 있는 연구 대상이 아니라 할 수 있다. 이러한 측면에서도 축소 모형실험은 이러한 연구를 위한 훌륭한 수단이 되고 있다(김중열 등, 1990).

Fig. 3의 (b), (c), (d)에 나타난 축소 모형실험 결과는 발생원 배열에 구성된 단일 발생원의 수가 3개, 5개, 7개로 증가됨에 따라 방사되는 S파의 에너지가 작아지고 동시에 좁은 방사각 범위에서 P파의 에너지가 증가하고 있는 상태를 보여주고 있다. 이러한 특이한 에너지 방사형을 갖는 발생원을 편의상 P빔 발생원이라 명명하였다(김중열, 1989, 김중열, 김유성, 2004).

Fig. 4는 그라우팅 이전(2001년 8월)에 취득된, 단일 발생원에 의한 탄성과 기록과 P빔 발생원에 의한 것을 상호 대조하여 예시하고 있다. 기대한 바 단일 발생원 기록에서 지배적으로 관찰되는 표면파(빈 화살표로 표시)는 P빔 발생원 기록에서 상당히 약화됨과 동시에 반사파의 도달(화살표로 표시)이 뚜렷하게 나타나고 있다. 이러한 현상은 그들의 F-K 영역에서도 잘 반영되고 있다(Fig. 5). 여기

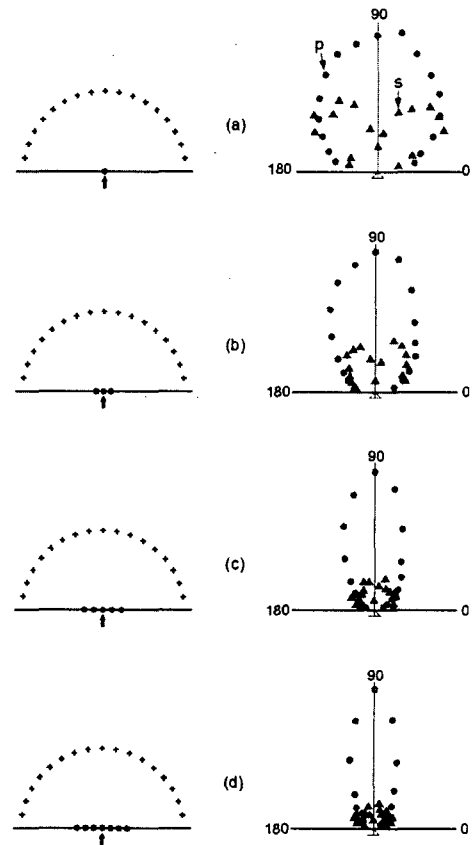


Fig. 3. Generation of P-beam radiation pattern.

서 표면파는 빈 화살표로, P파 반사파는 적색 화살표로 표시하고 있다. 전산처리는 모두 P빔 발생원 기록을 이용하였으며, 그라우팅 전과 후의 탐사자료에 대한 전산처리 과정도 동일하게 하였다. 다음은 동일한 전산처리 과정을 통해 얻게된 그라우팅 전·후 탄성파 중합단면도의 분석 결과에 대해 서술하고 있다.

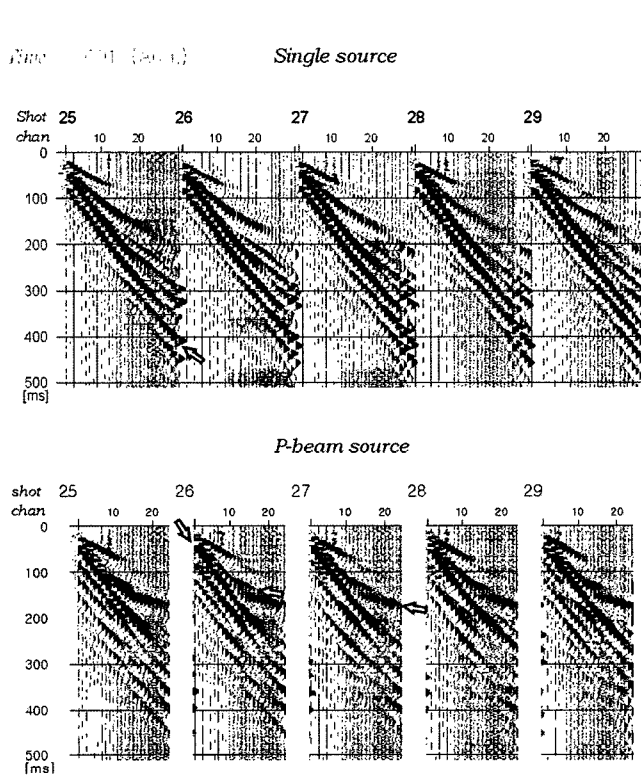


Fig. 4. Examples of shot gathers derived from a single source(upper part) and a P-beam source(lower part).

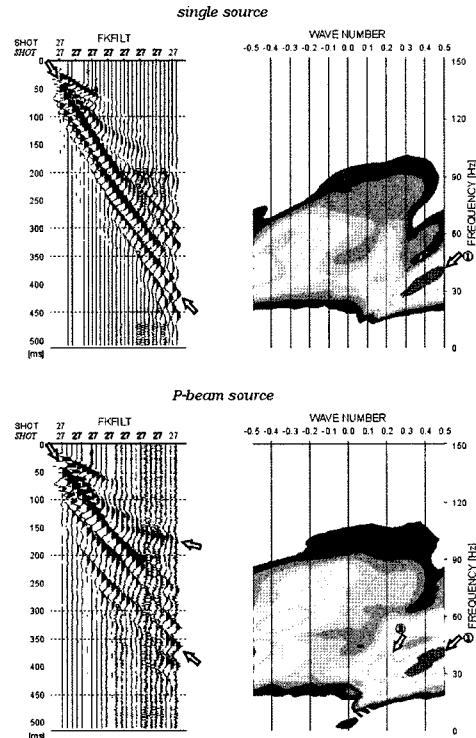


Fig. 5. Examples of shot gathers from a single source(upper part) and a P-beam source(lower part) and the corresponding results in F-K domain.

4. 탄성파 단면도 분석 결과

Fig. 6은 그라우팅 이전(2001년 8월)에 수행된 탄성파 반사법 자료에 대한 다양한 전산처리 후 얻게 된 중합단면도(stack section) 및 해석단면도를 나타내고 있다. 여기에는 댐 사면에서 관찰되고 있는 다양한 결함의 위치가 동시에 표현되고 있다. 전체적으로 댐 하부 경계는 훌륭하게 재현되었다고 할 수 있다. 반면, station No. 55-80 하부에는 강한 반사면(예: cracks)이 존재함을 보여주고 있다. 이는 댐 사면에서 발견된 결함과 상당부분 연계될 가능성도 배제할 수 없을 것으로 사료된다. Fig. 7은 그라우팅 전·후(2001년 8월과 2004년 11월) P빔 발생원 기록을 이용하여 얻게 된 중합 단면도를 상호 대조하여 나타내고 있다. 보강 전 관찰된 강한 반사 반응(화살표로 표시)은 보강 후의 결과에서 인식되지 않고 있음을 볼 수 있다. 이와 같이 3년의 시차를 두고 스냅 촬영된 댐체 구조 단면도(seismic time lapse snapshots)는 그라우팅 성과 판단을 위한 기본 자료로 반영될 수 있었다.

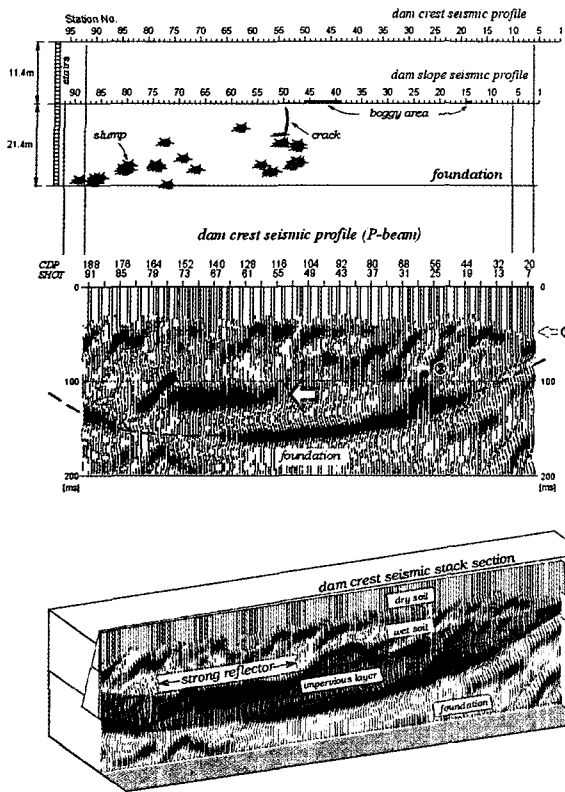


Fig. 6. Stack results derived from P-beam shot gathers before grouting work (Aug.2001).

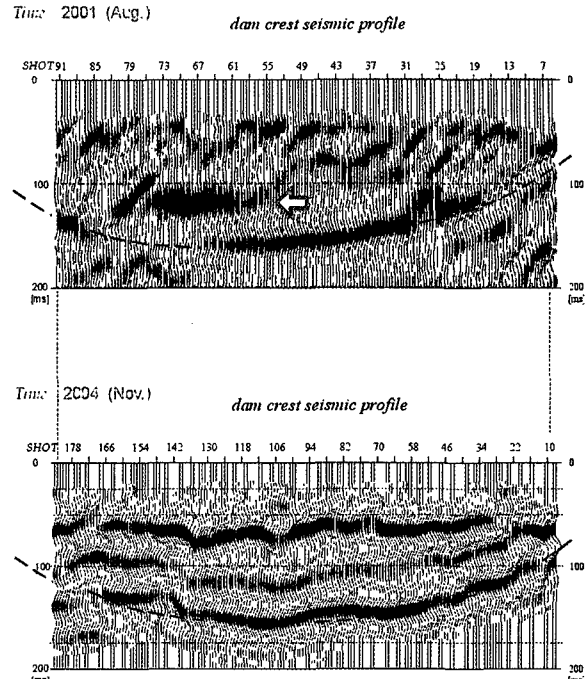


Fig. 7. Seismic time lapse snapshots for dam monitoring.

5. 결론

댐체 투수 내지 누수는 내부 균열을 유발시킬 수 있으며, 그 존재 유무는 댐체 안정성 평가를 위한 하나의 중요한 정보라 할 수 있다. 이러한 댐체 내부 균열 탐지는 탄성과 반사법 탐사 본연의 기능이라 할 수 있기 때문에 바로 탄성과 반사법 탐사는 상기 문제에 접근하기 위한 직접적인 물리탐사법이라 할 수 있다. 한편, 표면파를 약화시키고 반사파 에너지를 증대시키는 P빔 발생원의 탁월한 기능으로 인해 P빔 발생원 기록은 P파 속도 분석은 물론 암층 경계면의 분해능을 근원적으로 향상시킬 수 있는 자료가 되었다. 댐체 보강 전·후에 얻게 된 두 개의 탄성과 중합 단면도에서는 보강 이전의 내부 균열에 의한 강한 반사 반응이 보강 후의 결과에서는 인식되지 않는 것으로 분석되었다. 따라서, 탄성과 반사법 탐사는 그라우팅 성과 판단을 위한 기본 자료로 반영될 수 있음은 물론 댐체 내부구조 모니터링을 위한 하나의 방법으로 크게 활용될 것이 기대된다.

참고문헌

- 김중열, 1989, 탄성과 발생원배열에 의한 P-방사형 편극, 대한광산학회지, 26, 28-38.
- 김중열, 현혜자, 김기석, 김유성, 성낙훈, 구자학, 1990, 탄층연속성 조사를 위한 채널파의 연구 (III), 한국동역자원연구소, 과학기술처.
- 김중열, 김유성, 2004, 지면 탄성과 반사법의 효율성 향상을 위한 탄성과 발생원 에너지 방사형 변조기법, 한국지반공학회 정기학술발표회 논문집, 807-814.
- 김중열, 김유성, 안태봉, 박인준, 민동주, 김재현, 김동범, 2004, 댐체 물성 평가를 위한 비파괴 조사 학술 용역, 사단법인 한국대댐회, 한국수자원공사 수자원연구원.