

## 대형 사력댐에서의 전단파속도 평가를 위한 단축선 빔형성기법

조성호\* · 나디아\*\*

Joh, Sung-Ho\*, Norfarah, Nadia Ismail\*\*

### Short-Array Beamforming Technique for the Investigation of Shear-Wave Velocity at Large Rockfill Dams

**ABSTRACT :** One of the input parameters in the evaluation of seismic performance of rockfill dams is shear-wave velocity of rock debris and clay core. Reliable evaluation of shear-wave velocity by surface-wave methods requires overcoming the problems of rock-debris discontinuity, material inhomogeneity and sloping boundary. In this paper, for the shear-wave velocity investigation of rockfill dams, SBF (Short-Array Beamforming) technique was proposed using the principles of conventional beamforming technique and adopted to solve limitations of the conventional surface-wave techniques. SBF technique utilizes a 3- to 9-m long measurement array and a far-field source, which allowed the technique to eliminate problems of near-field effects and investigate local anomalies. This paper describes the procedure to investigate shear-wave velocity profile of rockfill dams by SBF technique and IRF (Impulse-response filtration) technique with accuracy and reliability. Validity of the proposed SBF technique was verified by comparisons with downhole tests and CapSASW (Common-Array- Profiling Spectral-Analysis-of-Surface-Waves) tests at a railroad embankment compacted with rock debris.

**Key words :** rockfill dam, shear-wave velocity, surface-wave method, seismic analysis, beamforming technique

**초 록 :** 대형 사력댐의 내진성능 평가에서 필히 요구되는 입력상수는 사력재료, 코아매질의 전단파 속도이다. 이를 표면파 시험으로 평가하기 위해서는 사력골재의 불연속, 매질의 비균질, 사면 경계면 등 표면파 시험결과와 신뢰도를 떨어뜨리는 조건을 극복해야 한다. 본 연구에서는 이러한 표면파시험의 한계를 극복하기 위하여 기존 빔형성기법의 원리를 응용한 SBF (Short-Array Beamforming) 기법을 제안하였다. SBF 기법은 3~9 m의 짧은 축선과 원거리 발진원을 이용함으로써, 빔형성기법 고유의 장점인 측정자료의 자동화분석뿐만 아니라 근접장 문제의 해결, 국부적 이상대의 발견 등의 기능을 가지도록 개발되었다. 본 연구에서는 이러한 SBF 기법과 IRF (Impulse-Response Filtration) 기법을 활용하여 대형 사력댐의 전단파속도를 신뢰성 있게 평가하는 방법을 정립하였다. 정립된 기법은 사력댐의 사력재료와 유사한 암반으로 매립 성토된 철도 노반에서 다운홀 시험, CapSASW (Common-Array-Profiling SASW) 시험과의 비교를 통하여 그 신뢰성과 실용성을 검증하였다.

**검색어 :** 사력댐, 전단파 속도, 표면파 기법, 내진 해석, 빔형성기법

\* 정회원 · 중앙대학교 건설환경공학과 교수 (Corresponding Author · Professor, Chung-ang University · [shjoh@cau.ac.kr](mailto:shjoh@cau.ac.kr))

\*\* 중앙대학교 토목공학과 석사과정 ([norfarahnadia@gmail.com](mailto:norfarahnadia@gmail.com))

Received October 15 2012, Revised October 30 2012, Accepted November 5 2012

## 1. 서론

1990대 이후 국내에서는 한반도의 지진활동에 대한 위험성을 인지하고 학계에서나 사회적으로 신규 및 기존 인프라시설의 내진설계 및 내진성능평가 등에 역점을 두고 있다. 지진으로 인하여 발생할 수 있는 인명 및 재산피해의 측면에서 가장 심각하게 피해를 초래하는 구조물로 대형 사력댐을 들 수 있는데, 소양강댐, 밀양댐, 대청댐 등과 같은 경우는 그 규모가 거대하여 구조물의 붕괴시 인접한 중소규모 및 대도시에 초래하게 되는 피해는 상상을 초월할 것으로 우려하고 있는 상황이다. 이들 대형댐의 내진성능 평가에 있어서 가장 중요한 입력상수 중의 하나는 코아매질과 사력재료의 전단파속도 주상도인데, 댐의 안전문제로 인하여 댐의 제체에 시추공을 시굴할 수 없기 때문에 비파괴시험인 표면파시험이 유일한 대안이라고 할 수 있다. 그러나 대형 사력댐의 특성상, 사력골재의 불연속성, 횡방향 변이성, 사면 경계면 등은 표면파 시험결과와의 신뢰도를 떨어뜨리는 조건이기 때문에, 이에 대한 해결책이 제시 않으면, 표면파 시험결과 즉 나아가서는 대형 사력댐의 내진성능 평가결과를 신뢰할 수 없는 문제를 피할 수 없게 된다.

본 연구에서는 대형 사력댐에서의 여러 가지 제약조건을 극복하고 신뢰성 있게 전단파속도를 평가할 수 있는 표면파 기법을 제안하고자 하였다. 본 연구에서 제안한 기법은 전기전자 영역에서 전자기파 신호처리에 활용하던 빔형성기법 (Beamforming Technique; Fuster, 2004; Johnson and

Dedgeon, 1994; Curtis technology, 2011)을 응용한 것으로, 사방으로 방사되는 파 중에서 특정방향으로 전파되는 파를 선택적으로 측정하여 분석할 수 있도록 하는 특징을 가지고 있다. 본 연구에서는 기존의 빔형성기법을 개선하여 짧은 측선의 활용, 근접장 문제점의 인식과 극복, 공간엘리어싱 문제의 극복 등 다양한 기술을 개발함으로써 SBF (Short-Array Beamforming) 기법을 정립하고자 하였다. 본 연구에서 제안한 기법의 신뢰도와 완성도를 제고하기 위하여 수치실험, 현장적용 등을 다양하게 활용하였다.

## 2. 사력재료에 대한 표면파 시험의 문제점들

사력댐은 일반적으로 상류측 사면을 콘크리트로 볼투수층 처리를 한 CFRD 또는 사력댐 중앙부에 점토 코어영역을 설치한 중앙치수벽식 댐의 두 가지 유형을 볼 수 있다. 어느 유형의 사력댐이든지 내진성능 평가를 위해서는 댐의 축조에 사용된 대표적인 재료의 전단파속도를 평가하는 것이 필수적이므로, CFRD의 경우는 성토부의 사력재료, 중앙치수벽식 댐의 경우는 성토부의 사력재료뿐만 아니라 중앙치수벽의 점토재료에 대해서 모두 전단파속도를 평가하여야 한다.

비파괴 기법인 표면파 시험을 사용하여 사력댐에서의 전단파속도를 결정하는 데는 세 가지 어려움이 존재한다. 첫 번째는 사력재료의 불연속성으로 인한 낮은 신호품질, 두 번째는 사면 경계면에서의 다중반사로 인한 표면파신호의 교란, 세 번째는

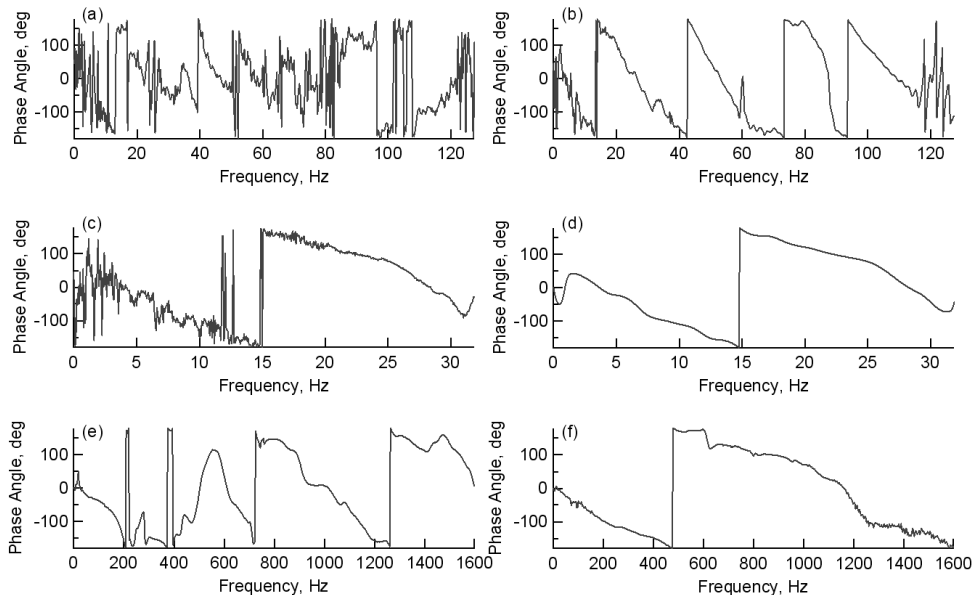


Fig. 1. Problems in Surface-Wave Tests at Rock Debris of Rock-fill Dam: (a) Test Data for Rock Debris, (b) Test Data for Clay Core, (c) Multiple Reflections from a Slope Boundary, (d) Signals after Elimination of Multiple Reflections, (e) Complicated Signals from Inhomogeneous Material, and (f) Clear Signals from Homogeneous Material.

재료의 불균질로 인한 복잡하고 난이한 데이터 해석 등이 표면파 시험의 난관으로 인식되고 있다. 실제 측정된 Fig. 1의 위상차 스펙트럼 경향을 비교하여 보면, 이와 같은 문제점을 더욱 분명하게 이해할 수 있다. 첫 번째로, 사력재료의 불연속성으로 인한 낮은 신호품질의 사례는 Fig. 1(a)와 1(b)의 비교를 통해서 살펴볼 수 있다. 사력재료의 경우는 매질의 불연속성으로 인하여 측정된 표면파 신호는 표면파 전파의 단절 및 회절, 체적파의 간섭 등이 발생하고, 그 결과 Fig. 1(a)에 도시된 것과 같이 거친 신호패턴을 보여주고 있다. 그러나 댐마루에서 측정된 중앙차수벽 점토재료에 대한 신호는 Fig. 1(b)에서와 같이 전형적인 표면파의 신호 패턴을 보여주고 있다. 두 번째로, 사면 경계면에서의 다중반사로 인한 표면파신호가 교란되는 현상은 Fig. 1(c)와 1(d)의 비교를 통해서 확인할 수 있다. 표면파의 파장이 댐마루의 폭을 초과할 정도로 클 경우 댐마루에서 측정된 표면파의 신호는 Fig. 1(c)의 저주파 영역에서 관찰되는 것과 같이 심각한 요철형태의 패턴을 보여주게 된다. 이는 댐 사면에서 지표면을 따라 전파된 표면파의 신호에 다중반사된 체적파의 간섭이 있었기 때문이라고 이해할 수 있다. 또한 Fig. 1(c)의 표면파 신호에서 다중반사된 체적파를 제거한 신호를 검토해보면 (Joh, 1996), 저주파 대역 즉 파장이 큰 영역에서 요철형태의 패턴이 상당히 줄어드는 반면, 고주파 대역 즉 파장이 작은 영역에서는 큰 변화가 나타나고 있지 않다는 사실을 통해서도 저주파 신호의 다중반사 가능성을 확인할 수 있다. 마지막으로, 재료의 불균질로 인한 복잡하고 난이한 데이터 문제는 Fig. 1(e)와 1(f)의 비교를 통해서 살펴볼 수 있다. 즉 Fig. 1(e)의 경우 0~600 Hz의 주파수 영역에서 심한 굴곡을 살펴볼 수 있지만 Fig. 1(f)의 경우 매우 명확한 신호품질을 보여주고 있다. 동일재료와 동일한 다짐 에너지로 축조되었지만, 시험위치에 따라 여전히 그 특성이 달라지는 것으로 인하여 자료해석의 어려움이 존재하고 있는 것은 분명한 사실이다. 이와 같은 표면파 시험의 한계성을 극복하기 위하여 본 연구에서는 빔형성기법 (Beamforming Technique)을 도입하였으며, 기존의 빔형성기법의 특징을 바탕으로 진보된 기술을 구현한 방법, 즉 SBF (Short-Array Beamforming) 기법을 제안하게 되었다.

### 3. 측정자료의 자동화 해석을 위한 빔형성기법

#### 3.1 빔형성기법의 원리와 개념

빔형성기법은 특정 방향으로 신호를 보내거나 수신하기 위하여 개발된 기법으로 전자기파, 탄성파, 광파 등 모든 파에 적용 가능한 기법이다. 복수의 감진기를 사용하여 탄성파 신호를 수신할 때, 각 감진기에 개별적으로 시간차를 두어 신호를 수신

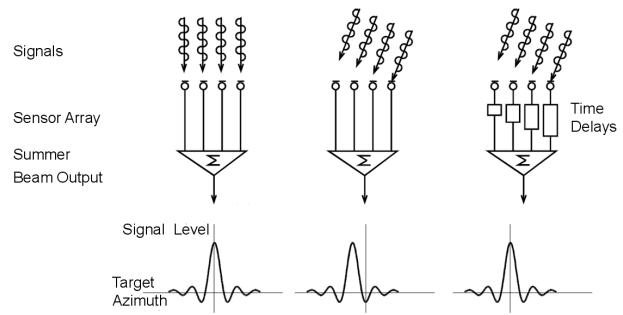


Fig. 2. Schematic Diagram of Beamforming Technique (Curtis technology, 2011)

한다면 전체 탄성파가 마치 광선처럼 하나의 빔을 형성하며 수신되도록 할 수 있다(Fuster, 2004; Johnson and Dedgeon, 1993). 이러한 원리를 이용하면, 탄성파 발진원과 감진기 위치를 알고, 각 감진기에 도입되는 시간차를 알고 있을 때, 그 매질을 통과하여 전파되는 표면파 속도를 결정할 수 있게 된다.

빔형성기법 중에 가장 오랫동안 사용되어 왔던 delay-and-sum(지연후 합산) 기법의 이론을 살펴보면 다음과 같다(Custis technology, 2011). 지연후 합산 기법의 경우 Fig. 2에서와 같이, 상호상관함수의 합이 최대로 결정되도록 각각의 감진기에 적합한 지연시간을 결정하고, 그 지연시간을 이용하여 표면파의 전파시간을 결정할 수 있게 된다. 지연후 합산 기법에서는 감진기 배열에서 m번째 감진기의 신호를  $h_m(t)$ 라고 했을 때, 각 감진기 신호에 지연시간  $\Delta_m$ 과 가중치  $w_m$ 를 적용하고 그 결과 신호를 합산한다. 그리고 그 합산결과에서 최대치를 도출하는 지연시간을 선택하면 탄성파의 전파시간을 계산할 수 있게 된다. 이를 구체적인 식으로 표현하면 다음과 같다. 우선 지연후 합산기법에서 도출되는 결과신호는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$z(t) = \sum_{m=1}^M w_m h_m(t - \Delta_m) \quad (1)$$

식 (1)은 시간영역에서 정의된 것인데, 이를 위상정리(phase theorem)에 의해서 주파수 영역으로 전환하면 시간지연이 위상각의 도입으로 변환되어 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 식 (2)에서  $H_m(\omega)$ 는 시간영역 신호  $h_m(t)$ 의 주파수변환 결과이다.

$$Z(\omega) = \sum_{m=1}^M w_m H_m(\omega) e^{-j\omega \Delta_m} \quad (2)$$

식 (2)를 행렬식으로 표현하면, n번째 주파수에 대해서  $e_{n,i} = w_i e^{-j\omega \Delta_i}$ 이라고 할 때,  $\mathbf{Z}_n = \mathbf{e}_n^T \mathbf{H}_n$ 이 되며, 이에 해당되는 합산신호의 크기  $\mathbf{P}_n$ 는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$P_n = E[Z_n^T Z] = e_n^T R_n e_n \quad (3)$$

여기서  $R_n$ 은 상호스펙트럴행렬 또는 공간상호관계행렬이라고 한다.

### 3.2 기존 빔형성기법에 의한 표면파 속도 결정의 한계

전기전자 영역에서 전자기와 신호에 대해 적용하던 빔형성기법을 표면파 측정에 활용한 대표적인 사례는 Zywicki(2005; 2007) 연구사례라고 할 수 있다. Zywicki는 Fig. 3(a)에 도시한 것과 같이 모두 15개의 감진기를 60 m의 측선에 설치하였는데, 감진기 간격은 균등하지 않고 측선의 후반으로 갈수록 점점 더 커지도록 하였다. 이를테면 첫 번째 감진기와 두 번째 감진기 간격은 0.94 m, 14번째 감진기와 15번째 감진기 간격은 10 m 등으로 측선 끝으로 갈수록 감진기 간격을 점점 더 증가시키는 형식을 취하였다. 결과적으로 0~20 m 측선위치에 모두 10개의 감진기를 배열하게 되어, 전체 측선의 한쪽에 집중적으로 감진기를 배치하는 형식이 되었다. 즉, 전체 60 m 측선 중 초반 20 m 영역에 상대적으로 더 큰 가중치를 두었기 때문에, 이 부분의 매질 특성이 최종 결과에 지배적으로 영향을 주게 되는 결과로 이어지게 된다. 이렇게 균등하지 않은 감진기 간격을 사용한 이유는 공간앨리어싱(spatial aliasing)을 극복하기 위한 대책이었다. 좀 더 정확하게는 파수(wave number)의 크기로 약 6.68까지는 공간앨리어싱 없이 표면파를 측정하고자 하였다. 한편 발진원은 첫 번째 감진기에서 0.94 m 떨어진 곳에 위치하게 되는데, 전체 측선 길이가 60 m라는 것을 고려할 때 현저히 근접장에 위치한 상황이라고 할 수 있다. Yoon and Rix(2009)의 기준에 의하면 Zywicki 배열로 측정할 수 있는 최대 표면파 파장을 약 60 m 정도가 된다. 그러나 최대

60 m에 이르는 파장의 표면파가 전파되어 간다고 했을 때, 발진원에서 가까이 배치되어 있는 (예, 1~15 m) 감진기의 경우는 근접장에 위치하게 되고, 그 이후의 감진기는 비교적 근접장을 벗어난 위치에 존재하기 때문에, 결과적으로 측정된 표면파의 속도는 근접장과 원거리장의 영향을 복잡하게 모두 포함한 정체성이 분명하지 않는 표면파의 속도가 되는 모호한 상황이 될 수도 있다.

약 5 m 심도에 풍화암이 있는 지반에 대해서 Zywicki 배열을 적용하여 빔형성시험을 수치적으로 수행해 보았다. 수치실험을 위하여 동강성행렬법(Kausel and Peek, 1982)을 이용하였고, 15개 감진기 위치에서 Fig. 3(a)의 변위시계열을 결정하였다. 그리고 이 15개의 변위시계열에 대해 빔형성기법을 적용하여 Fig. 3(b)의 f-k 관계를 구하였고, 이 관계와  $v = 2\pi f/k$ 를 이용하여 최종적으로 Fig. 3(c)에 도시한 것과 같은 표면파속도를 결정하였다. Fig. 3(c)에는 동일한 지층구조에 대한 기본모드와 고차모드의 표면파속도도 같이 비교하여 보았다. Zywicki 배열로 결정한 표면파속도는 표면파의 파장이 26.9 m에 이르기까지 기본모드와 일치하였으나, 그보다 큰 표면파의 파장의 경우 Zywicki 배열로 도출한 속도와 기본모드 속도사이에는 큰 차이를 보이고 있고, 어느 모드와도 일치하지 않았다. 즉, 이 경우 60 m의 측선을 사용하였음에도 불구하고, Zywicki 배열로 도출한 속도는 26.9 m보다 큰 파장의 표면파 속도는 특정모드에 귀속되지 않는 겉보기 속도라는 것을 알 수 있다.

또한 Zywicki 배열에서는 60 m에 이르는 긴 측선에 15개의 감진기를 설치하여야 하는 시험구성도 불편하고 실용적이지 못한 요인이 될 수 있다. 즉, 횡방향으로 불균질한 매질이 분포되어 있든지 또는 국부적인 이상대가 존재하는 경우, 또한 측선을 설치할 수 있는 지역이 제한적인 경우, 60 m의 측선은 지나치게

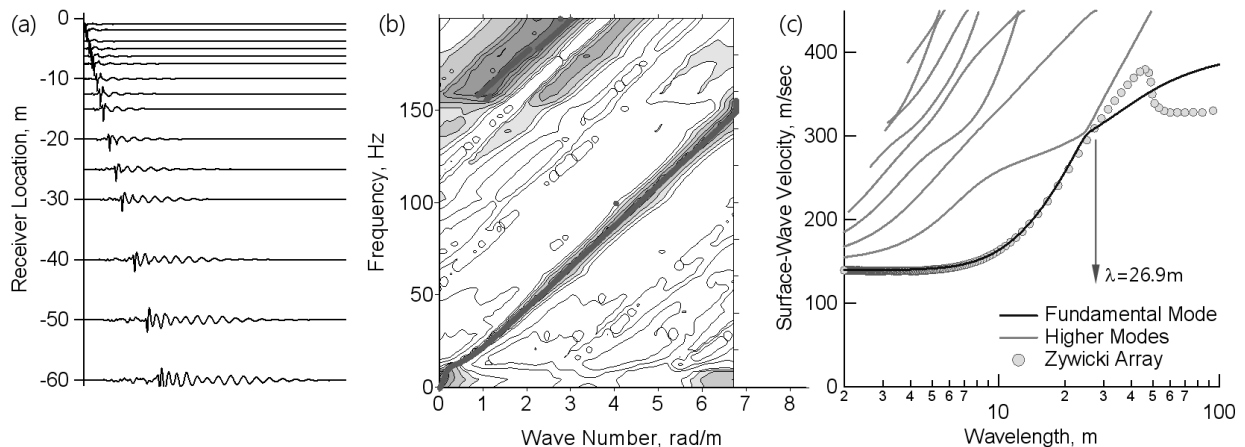


Fig. 3. Beamforming Technique Based on Zywicki Array: (a) Time Traces of 15 Geophones, (b) f-k Diagram Determined by Beamforming Technique, (c) Surface-Wave Dispersion Curves.

길어서 대상지반에 적합한 시험배열이 되지 못하게 된다. 본 연구에서는 Zywicki 배열의 한계, 즉 근접장 문제, 60m에 이르는 긴 축선, 15개의 감진기수 등의 문제 등을 해결할 수 있는 새로운 배열을 사용하는 빔형성기법 SBF (Short-Array Beamforming) 기법을 제안하였다.

### 3.3 짧은 축선을 사용하는 SBF 기법의 제안

본 연구에서는 기존 빔형성기법의 단점을 보완하고 그 장점은 그대로 유지하는 SBF 기법을 제안하였다. 기존 빔형성기법에서는 축선의 길이를 60 m로 하였는데, SBF 기법에서는 3~9 m 정도로 줄여서 시험을 수행하도록 하였다. 빔형성기법에서 시험축선을 줄이게 되면 크게 세 가지 문제가 발생하게 된다. 첫 째는 측정 가능한 최대파장의 크기가 줄어들어 탐사심도가 알아지는 문제가 있고, 그리고 두 번째는 축선길이와 그에 따른 감진기 개수의 감소로 인하여 측정 신호품질의 불량 문제가 발생하게 되고, 마지막으로는 공간엘리어싱 문제의 가능성이 있게 된다. 이러한 축선길이의 축소와 관련한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서 제안한 축선 배열은 Fig. 4와 같다. 즉, 4 개의 감진기를 1~3 m 감진기간 간격으로 설치하여 총 축선길이를 3~9 m 정도로 유지하며, 기존의 빔형성시험에서 발진원의 위치는 한 군데였지만, SBF 기법에서는 다수의 발진원을 도입하여, 감진기배열에서 가까운 발진원에서는 고주파 또는 짧은 파장의 데이터를 얻고, 멀리 떨어진 발진원에서는 저주파 또는

긴 파장의 데이터를 획득하여 측정심도를 깊게 할 수 있도록 하였다. 즉, 축선길이를 R이라고 했을 때, 발진원은 첫 번째 감진기 위치에서 R, 2R, 4R, 8R, 16R, ... 등으로 이격된 거리에서 타격하도록 하였다. 일반적으로 해머를 사용하는 경우는 8R 또는 16R 까지 시험이 가능하고, 불도저와 같이 대형 발진원이 있는 경우는 32R의 위치에서도 시험이 가능하다. 그리고 Joh et. al. (2005)에 의하면, Fig. 4의 시험구성을 사용하는 경우 획득가능한 최대파장( $\lambda_{max}$ )의 길이는 발진원과 첫 번째 감진기간 간격을 S라고 했을 때 식 (4)에 의해서 결정된다.

$$\lambda_{max} = 4 \cdot S \tag{4}$$

따라서 감진기간 간격이 1 m인 경우, 축선길이 R은 3 m, 발진원 위치 S가 R, 2R, 4R, 8R, 16R 등일 때, 획득가능한 최대파장은 각각 12, 24, 48, 96, 192 m 까지라고 할 수 있다.

또한 SBF 기법에서는 공간엘리어싱을 극복하기 위하여 특별히 왜곡된 파수를 회복하는 파수복원기법을 도입하였다(Joh, 2012). 표면파의 전파를 측정하는 감진기간 간격이 d일 때, 주파수영역해석에 의해 최대 측정가능한 위상각차이  $\Delta\phi$ 는  $2\pi$ 이기 때문에 식 (5)에 의해 정의되는 최대 파수  $k_{max}$ 는  $2\pi/d$ 가 된다.

$$k = \frac{\Delta\phi}{r} \quad i.e., \quad k_{max} = \frac{2\pi}{d} \tag{5}$$

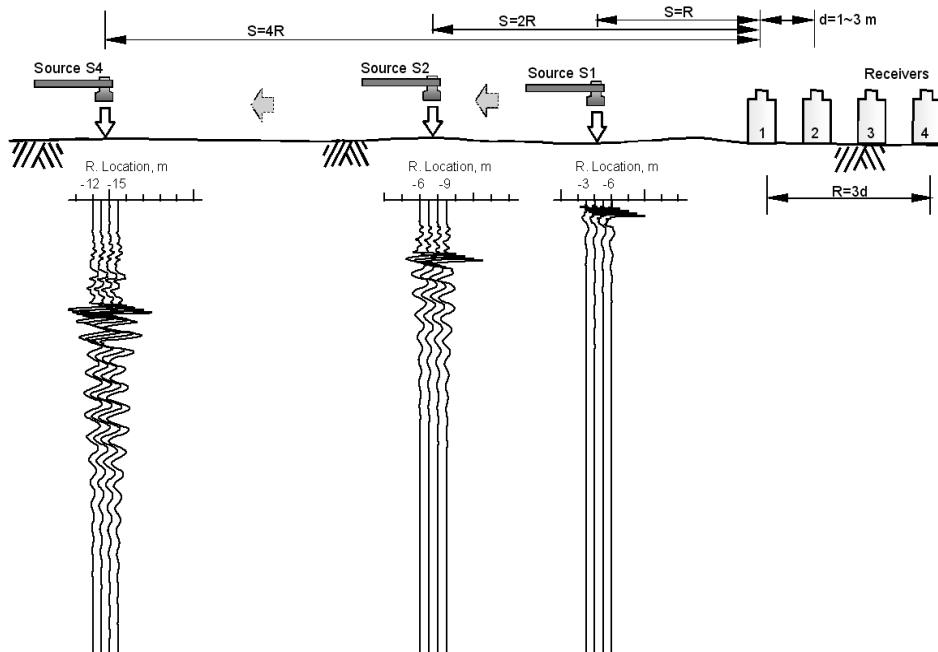


Fig. 4. Schematic Diagram of SBF Technique

즉, 주파수가 상대적으로 큰 경우 파장이 작아져서 감진기간 위상각 차이가 실제적으로 360도보다 커질 수 있게 되는데, 이러한 경우라도 측정가능한 파수는  $k_{max}$  가 되고  $k_{max}$  를 초과한 파수는 절곡되어 다른 값으로 측정되게 된다. 이와 같은 현상이 공간앨리어싱 현상인데, 이렇게 절곡된 파수는 식 (6)에 의해서 복원가능하다.

$$k = \frac{\Delta\phi}{d} = \frac{\tilde{\Delta\phi} + 2n\pi}{d} = \frac{\tilde{\Delta\phi}}{d} + \frac{2n\pi}{d} = \tilde{k} + \frac{2\pi}{d}n, (n=0,1,2,\dots) \quad (6)$$

식 (5)에서  $\Delta\tilde{\phi}$ 는 360도를 초과한 위상각  $\Delta\phi$ 이 동적신호측정기에 의해서 측정된 위상각이고,  $\tilde{k}$ 는 절곡된 파수가 된다. 따라서 절곡되어 측정된 파수를 복원하기 위해서는 식 (6)에서 표시된 것처럼  $2\pi/d$ 의 배수만큼 더해주면 되는 것이다. Fig. 5에 파수복원의 설명을 위한 구체적인 사례를 도시하였다. 일단 감진기간 간격 3m를 이용하여 동강성행렬법으로 결정한 변위 시계열 자료를 구하였고, 이에 대해 빔형성기법을 적용한 결과는 Fig. 5(b)의 f-k 도표와 같이 정리되었다. 그런데 Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 최대 파수는 2.09로서 이를 초과하는 모든 주파수의 파수는 절곡되어 0~2.09의 범위내로만 표시되고 있다. 이렇게 왜곡된 파수에 식 (6)의 관계식, 즉  $2\pi n/d$ 를 이용하여 보정한 결과 Fig. 5(c)의 실선과 같이 원래 파수의 값으로 복원되

는 것을 볼 수 있다. 한편 감진기간 간격 1 m를 이용하여 동일지반에서 수치실험을 하고 그 결과에 파수복원기법을 적용하여 보았다. 파수복원후 f-k 도표는 감진기간 간격 1 m의 f-k 도표와 정확하게 일치하였다. 이러한 사실은 파수복원기법의 신뢰성과 타당성을 반증하는 것이라고 할 수 있다. 이렇게 복원된 파수는 해당 주파수를 이용하여 최종적으로 식 (7)에 의해 표면파 속도,  $v_{ph}$ 를 결정할 수 있게 된다.

$$v_{ph} = \frac{2\pi f}{k} \quad (7)$$

이상에 정리한 바와 같이 빔형성기법에 의해 표면파 속도를 결정하는 단계는 네 개의 감진기로 측정된 시계열자료의 f-k 변환, 왜곡된 파수의 복원, 복원된 파수와 주파수로부터 표면파 속도 계산 등과 같이 정리된다. 이러한 단계는 특별히 전문가적 경험을 요구하지 않고 수리적으로 명확하게 정의되기 때문에 단순한 프로그램에 의해 완전 자동화가 가능하며, 이는 빔형성기법의 큰 장점이기도 한다.

### 3.4 SBF 기법으로 결정한 표면파 속도의 특징

SBF 기법으로 결정한 표면파 속도의 특징을 살펴보기 위하여, CapSASW 기법 (Joh, et. al., 2005; Stokoe et al. 2004)과의 비교를 수행하였다. Fig. 6에는 풍화암이 깊이 5 m에 위치한 지반에 대해 동강성행렬법기반 수치실험으로 수행한 SBF 시험

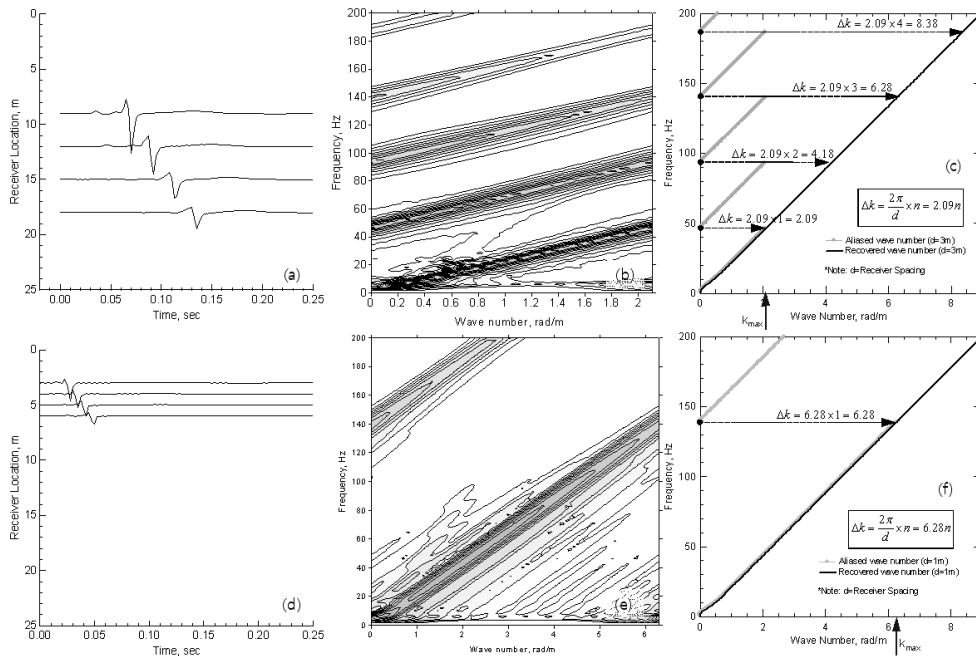


Fig. 5. Wave Number Recovery Technique to Overcome Apatial Aliasing

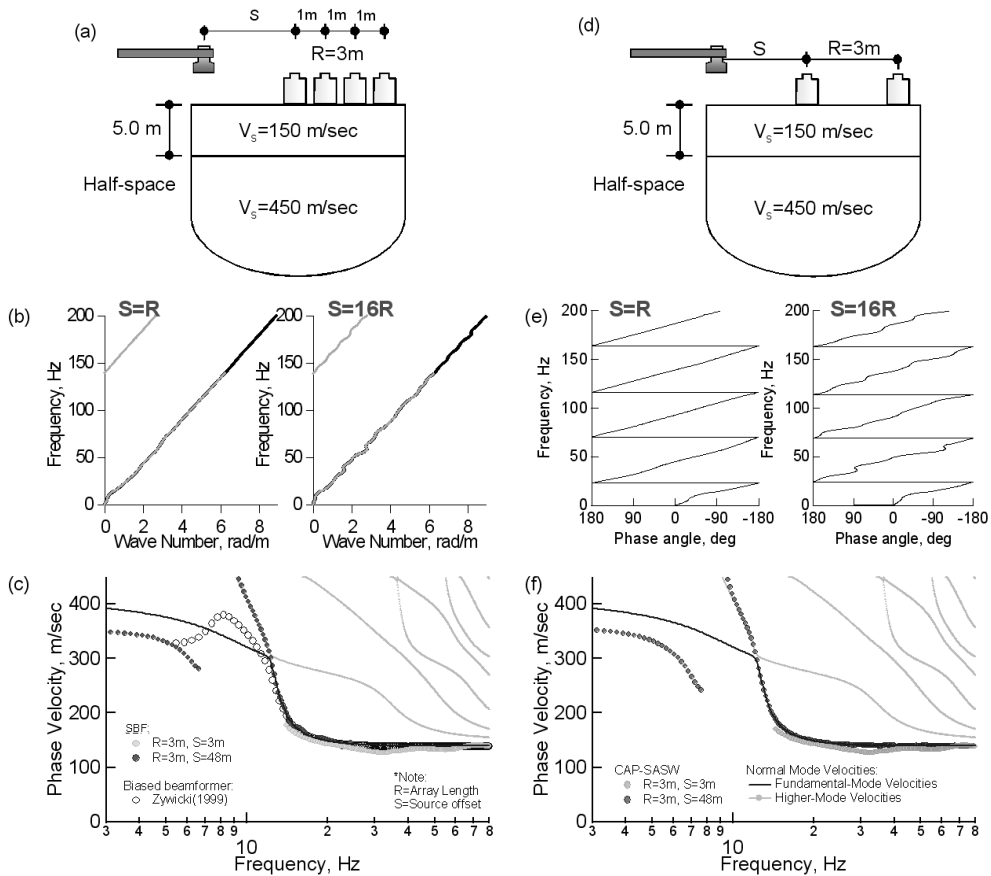


Fig. 6. Comparison of SBF Technique and CapSASW: (a)~(c) Measurement Configuration for SBF Technique, f-k Relationship, Dispersion Curve; (d)~(f) Measurement Configuration of CapSASW Technique, Phase-Difference Spectrum and Dispersion Curve.

과 CapSASW 시험의 결과를 비교하고 있다. Fig. 6(a)~6(c)에는 SBF 기법으로 위상속도를 결정하는 과정을 보여주고 있고, Fig. 6(d)~6(f)에는 CapSASW 시험에 의한 위상속도 결정과정과 그 결과를 보여주고 있다. SBF 기법의 f-k 도표나 CapSASW 기법의 위상각차 스펙트럼이나 모두 다 양호한 경향을 보여주고 있어서 위상속도 결정에는 어려움 없이 진행되어진다. 그러나 표층과 강성차이가 큰 암반이 천층에 존재하고 있어 주파수 12 Hz 이하 영역에서 매우 복잡한 표면파속도의 경향이 발생하고 있다. 기본모드와 고차모드의 경향을 살펴보면 주파수 12.3 Hz에서 급격한 모드변환이 일어나고 있는데, 표면파 시험으로 측정된 겉보기 위상속도에서도 그 영향이 표출되고 있다. SBF 기법과 CapSASW 방법 모두 동일하게 주파수 12.3 Hz에서 기본모드에서 1차 모드로 모드 변환되는 것을 볼 수 있고, 주파수 6.6 Hz 이하에서도 다시 기본모드와 유사한 속도로 급락하는 경향을 공히 관찰할 수 있다.

얕은 기반암부지와 같이 층간 강성차이가 큰 부지에 대한 위상속도의 평가에 있어서 SBF 기법과 CapSASW 방법이

동일한 위상속도를 보여주는 것은 SBF 기법이 CapSASW 방법으로 측정된 겉보기 위상속도와 동일한 겉보기 위상속도를 결정한다는 것을 의미하고 있다. 이는 CapSASW 방법으로 획득한 분산곡선의 역산해석기법 또한 SBF 기법으로 구한 분산곡선을 역산해석하기 위해서 동일하게 사용할 수 있다는 것을 의미하는 것이기도 하다.

#### 4. 사면경계가 존재하는 대입경 조립골재 지반에서의 SBF 기법

동적물성을 측정하는 지반조사의 측면에서 사력댐의 특징은 대입경 조립골재의 사용과 사면경계의 존재 등을 고려할 수 있다. 이러한 측면에서 SBF 기법을 보다 포괄적으로 대입경 조립골재로 조성된 지반구조물까지 확대하여 적용하는 것도 가능하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 SBF기법의 특징을 보다 포괄적으로 설명하기 위해서 사력댐뿐만 아니라 철도의 자갈도상, 대입경 조립골재로 조성된 고성도 철도노반까지 포함하였다.

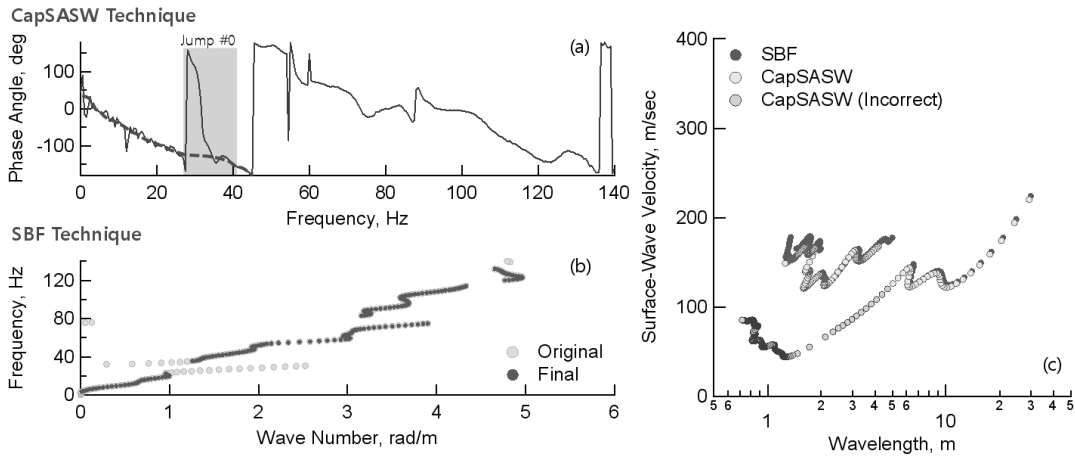


Fig. 7. Automation Incorporated in the SBF Technique: (a) Problem of CapSASW, (b) Automated Analysis by the SBF Technique, (c) Comparisons of Surface-Wave Velocities

#### 4.1 난해한 비균질 지반에 대한 자동화 분석

네 개의 감진기를 이용하여 대상지반의 표면파 전파속도를 자동으로 결정하는 장점이 있는 SBF 기법을 일반철도 자갈도상에 적용하여 보았다. 일반적으로 자갈도상에 사용되는 골재는 약 28~50 mm의 직경으로 구성되어 사력댐의 사력재료와 같이 매질의 비균질성이 매우 심한 곳이어서 시험대상 지반으로 선정하였다. 자갈도상의 지표면에서 CapSASW 시험과 SBF 시험을 수행하여 보았다. CapSASW 시험결과는 Fig. 7(a)의 위상차 스펙트럼에 나타난 바와 같이 매질의 비균질성 때문에 주파수 25~40 Hz 사이의 구간에서 점프가 존재하고 있다. 사실 이 점프의 실체와 관련하여 표면파속도가 현저히 과소평가될 수 있는 가능성이 있기 때문에, 이 점프가 실제로 매질의 특성을 반영한 것인지 아니면 매질의 비균질성 또는 국부적 이상대로 인하여 가공적으로 발생한 허구인지를 밝혀야 한다. CapSASW 경우에는 다른 측정자료와의 상호연관성에 의존하여 난해한 결정을 해야 하지만, SBF 시험의 경우 Fig. 7(b)에 보이는 것처럼 자동으로 대표물성에 대한 결과를 제시해 주고 있다. 결과적으로 Fig. 7(c)의 표면파속도 분산곡선에서와 같이 SBF 기법의 표면파속도는 위상차 스펙트럼의 수정해석에 따른 표면파속도와 일치하고 있음을 알 수 있다. 이처럼 SBF 기법의 자동화분석 기능은 표면파 시험 자료의 분석에 있어서 전문가적 경험이 배제된다는 것을 의미하는데, 이는 표면파기법의 실용성과 일반화의 측면에서 매우 의미 있는 발전이라고 할 수 있다.

#### 4.2 사면경계면 다중반사의 최소화

대형 사력댐에서와 같이 사면의 존재로 인하여 표면파의 전파가 영향을 받게 되는 경우, 표면파속도가 왜곡되어 측정될 수 있다. 일반적으로 표면파 기법에서 가정하는 것은 반무한체

위의 표면과 같은 무한 평면이기 때문에, 사면의 존재는 체적파의 다중반사를 초래하고, 이는 나아가서 표면파 전파를 간섭하게 된다. 이렇게 표면파 전파를 간섭하는 다중반사의 체적파의 영향을 최소화하기 위해서는 다중반사파를 최소화하는 IRF (Impulse response filtration; Joh, 1996) 기법의 적용이 필요하다.

대형댐의 댐마루에서 획득한 표면파 신호를 이용하여 사면경계면 다중반사의 영향을 살펴보았다. Fig. 8(a)는 두 개의 감진기에서 측정된 신호를 이용하여 충격응답(impulse response)을 구한 것인데, 해머 타격후 표면파가 도착하고 이어서 약 0.3초 시점에 표면파와 관계없는 신호가 들어오고 있다. 이렇게 늦게 도착하는 신호의 대부분은 사면경계면에서의 다중반사로 인한 체적파 신호라고 할 수 있다. 이는 Fig. 8(b)의 거보스펙트럼 (Gabor spectrum; Dziewonski, 1969)을 참고해 보았을 때 확인 가능한 것으로서, 늦게 도착하는 신호의 에너지가 대부분 10 Hz 이하의 저주파 범위에 분포하고 있는 것을 볼 수 있다. 즉, 저주파 대역 즉 파장이 큰 대역에는 에너지가 크고, 고주파 대역 즉 파장이 작은 대역에는 에너지가 분포하지 않는다는 것이다. 따라서 사면경계의 존재를 느낄 수 있는 큰 파장의 표면파에서만 다중반사가 존재한다고 이해하는 것은 물리적으로 충분히 합리적이라고 할 수 있다. 이와 같은 측면에서, 늦게 도착하는 다중반사파들을 제거함으로써 사면경계면의 영향을 최소화할 수 있다는 논리를 세울 수 있다. 이러한 논리에 근거하여 Fig. 8(a)에 IRF 기법을 적용한 결과 Fig. 8(c)와 같이 다중반사파가 제거되었고 이에 따른 거보스펙트럼에서도 Fig. 8(d)에 도시한 바와 같이 다중반사파가 보이지 않고 있다. Fig. 9에는 SBF 시험과 CapSASW 시험자료에 대해서 IRF 기법의 적용결과를 IRF 기법을 적용하지 않은 경우와 비교하여 설명하였다. SBF 기법과 CapSASW 기법의 결과 모두에 있어서 저주파 영역, 즉



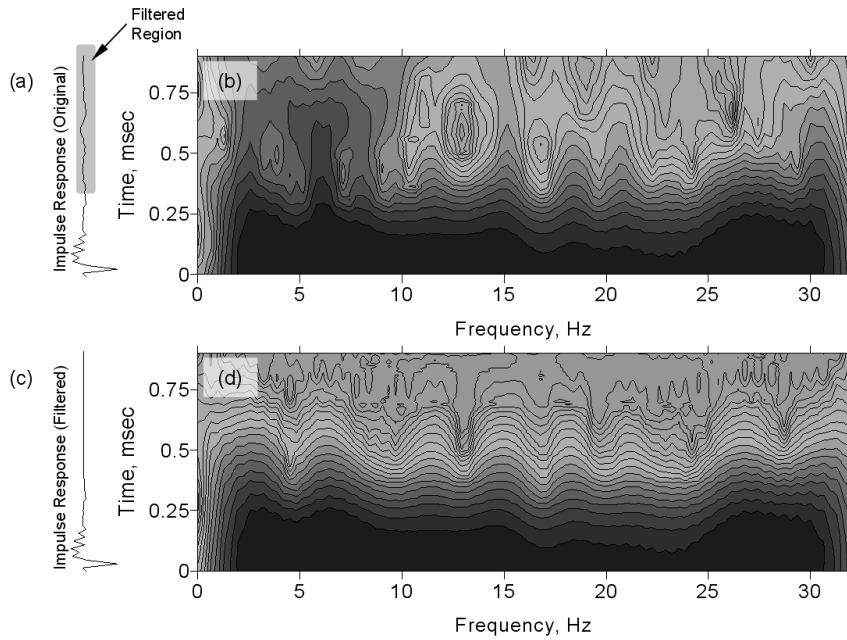


Fig. 8. Effects of Multiple Reflections from a Slope Boundary and Elimination of Multiple Reflections: (a) Impulse Response Function of an Original Signal, (b) Gabor Spectrum for an Original Signal, (c) Impulse Response Function of the Signal with Multiple Reflections Removed, (d) Gabor Spectrum for the Signal with Multiple Reflections Removed.

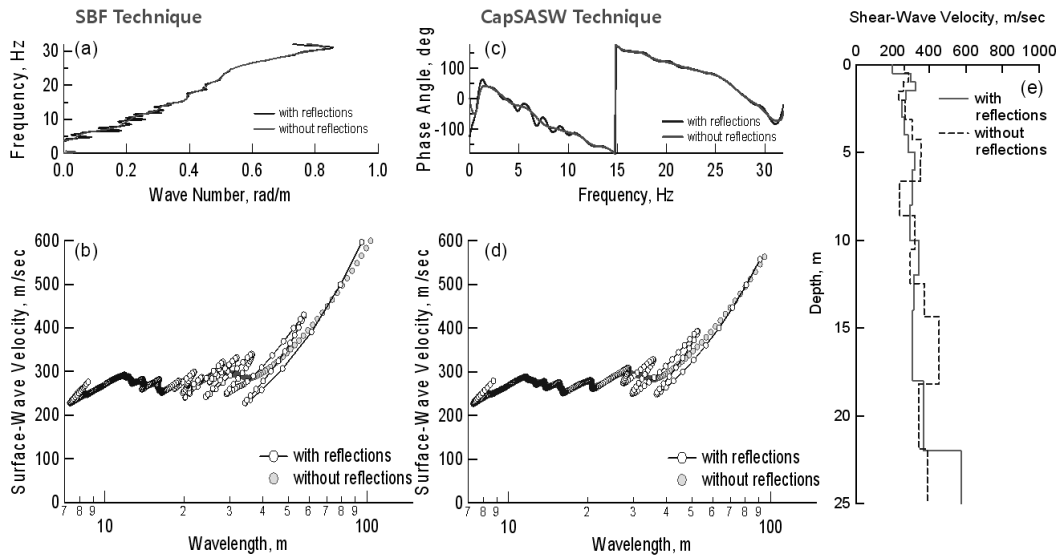


Fig. 9. Effects of Multiple Reflections from a Slope Boundary: (a) f-k Map by the SBF Technique, (b) Surface-Wave Dispersion Curves by the SBF Technique, (c) Phase-Difference Spectrum by the CapSASW Technique, (d) Surface-Wave Dispersion Curves by the CapSASW Technique, (e) Comparison of Shear-Wave Velocity Profiles for the Signals with and without Multiple Reflections.

파장이 큰 영역에서 보이던 심한 굴곡과 요철 패턴이 IRF 기법 적용 후에는 사라진 것을 알 수 있다. 특히 Fig. 9(b)와 9(d)의 표면파속도 분산곡선을 보면, 파장이 큰 영역에서만 다중반사파의 영향이 심각한 것을 볼 수 있는데, 이는 사면경계면의 존재를 확인시켜주는 하나의 좋은 증거라고 할 수 있다. 다중반사파의

영향을 포함한 분산곡선과 배제한 분산곡선에 대해 역산해석을 수행한 결과를 Fig. 9(e)에 도시하였다. 이 두 결과의 비교에서 알 수 있는 것은 사면경계면의 영향을 최소화하였을 때 최종 전단파속도 주상도는 상대적으로 국부적인 요철이 줄어들고 비교적 완만한 변화를 보여준다는 것이다. 대청댐의 댐마루

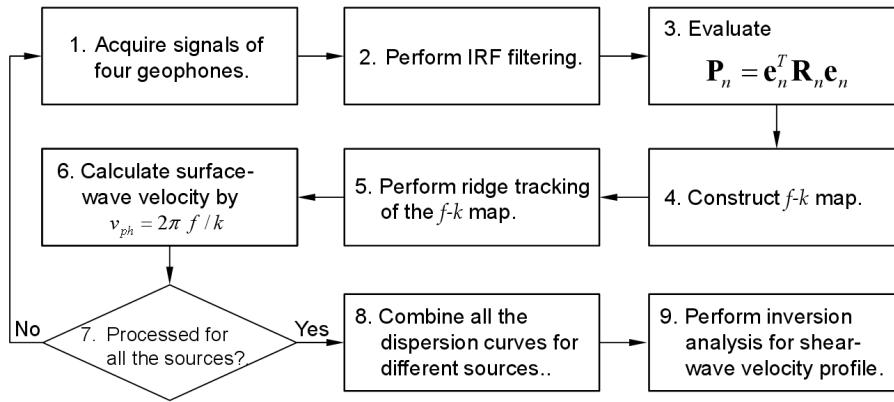


Fig. 10. Procedure of the SBF Technique Using a Short Measurement Array

아래에는 균질한 점토코아 영역이 존재하기 때문에, 이와 같은 경향은 충분히 합리적인 결과라고 할 수 있다.

### 5. 대형 사력댐에서의 전단파속도 측정을 위한 SBF 기법의 절차

본 논문에서는 대형 사력댐의 전단파속도 평가를 위하여 SBF 기법을 제안하였고, 기존 빔형성기법과의 차별화된 특징과 SBF 기법으로 측정된 전단파속도의 특징을 실제 측정사례를 통하여 살펴보았다. 본 절에서는 대형 사력댐에 대한 SBF 기법의 적용과정을 실무자들이 전체적으로 이해할 수 있도록 그 단계별 절차를 정리하여 보았다.

SBF 기법의 적용은 Fig 10에 도시한 것과 같이 모두 9단계의 과정을 거쳐서 진행하게 된다. 전체 9단계 과정 중에서 단계 3에서 단계 6까지가 SBF 기법의 핵심적인 부분이고, 나머지 단계는 일반적인 표면파 기법에 대한 절차와 동일하다. 전체 단계 중에서 단계 1에서 단계 6은 모든 발전원 (R1, R2, R4, R8, R16 위치에서의 발전)에 대하여 반복되어야 한다. 그리고 각 발전원에 대한 측정데이터를 해석하여 표면파속도 분산곡선을 결정하고 나면, 이 표면파속도 분산곡선을 병합하여 전단파속도 추상을 결정하기 위한 역산해석을 수행한다. SBF 기법에서의 역산해석은 Nadia(2012)에 따르면 CapSASW 역산해석과 동일하게 수행되는데, 이는 SBF 기법으로 측정된 표면파 분산곡선이 CapSASW 시험으로 측정된 표면파 분산곡선과 일치하기 때문이다.

### 6. SBF 기법의 검증을 위한 현장적용

본 논문에서 제안한 SBF의 신뢰성, 타당성을 검증하기 위하여 실제 사력댐 지반을 확보하고자 하였으나, 국내 여건상 사력

댐 안전의 이유로 댐에서의 시추가 허용되지 않았고, 결과적으로 사력댐에서의 검증시험이 불가능하였다. 따라서 이에 대한 대안으로 최대입경 300 mm의 암버력을 성토재료로 사용하고 사면경계가 존재하는 고성토 철도노반에서 현장 비교시험을 진행하였다. 본 현장에서는 다운홀시험, CapSASW 시험 결과와 비교하여 보았다. 비교시험을 수행한 곳에서의 원지반은 연약한 점성토로 이루어진 논이었으며, 약 두께 2 m 정도는 양질의 토사로 치환되었고, 그 상부에 최대입경 300 mm의 암버력으로 성토하였다. Fig. 11(a)에는 다운홀 시험자료를 보여주고 있다. 다운홀 시험해석에서는 시계열 자료의 초동을 인식한 후 Snell의 법칙과 역산해석을 이용하여 측정된 초동과 일치하는 전단파속도 추상을 결정하도록 하였다. Fig. 11(b)와 11(c)에는 CapSASW 시험과 SBF 시험으로 결정된 표면파속도 분산곡선을 도시하였고, Fig. 11(d)에는 동일한 위치에서 수행된 다운홀 시험, CapSASW 시험, SBF 시험으로 획득한 전단파속도 추상이 비교하였다. CapSASW 시험은 별도로 수행하지 않고, SBF 시험으로 측정된 감진기 1번과 4번의 시계열 자료를 차용하여 그 해석에 활용하도록 하였다. 세 가지 기법에 의한 시험자료의 해석결과, 전체 심도에 걸쳐서 세 기법 결과들이 거의 일치하고 있다. 단, 심도 7~15 m 구간에서는 다운홀 시험에 의한 전단파 속도는 240~290 m/sec, CapSASW 시험과 SBF 시험에 의한 전단파속도는 심도 10~15m 위치에서 124~140 m/sec의 속도로 결정되는 차이를 보이고 있다. 그런데 10~15 m 심도에 연약지반이 존재하고 있고 연약지층 상단에 약 2 m 정도의 양질토사 치환이 있었다는 사공이력을 참고해 보면, CapSASW 시험과 SBF 시험의 결과가 더 타당한 것으로 판단된다. 이상과 같은 세 가지 시험결과의 비교로부터 SBF 시험은 실용적으로 믿을 수 있을 정도의 정확하고 신뢰성 있는 결과를 제시하는 것을 확인할 수 있었다.

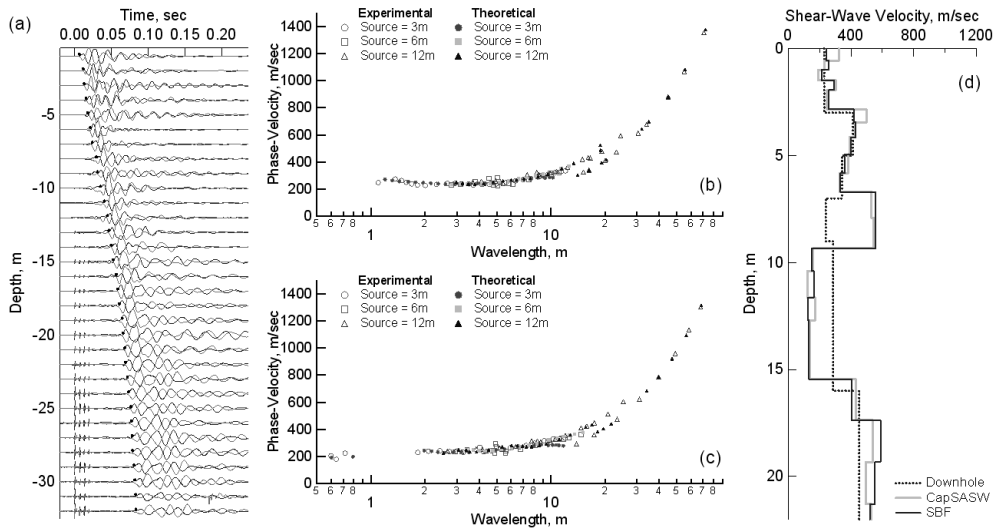


Fig. 11. Verification of the SBF Technique by Comparisons of Shear-Wave Velocity Profiles of the SBF Technique and Downhole Tests: (a) Time-Series Data Measured by Downhole Tests, (b) Representative Experimental Dispersion Curve and Theoretical Dispersion Curves by the CapSASW Technique, (c) Representative Experimental Dispersion Curve and Theoretical Dispersion Curves by the SBF Technique, (d) Comparison of Shear-Wave Velocity Profiles from the CapSASW Tests, SBF Tests and Downhole Tests.

## 7. 요약 및 결론

대형 사력댐의 경우 제체와 점토코아 영역의 전단파속도를 평가하기 위해서는 그 안정성 문제로 인하여 비파괴 시험인 표면파 시험을 수행하는 것이 시추공 시험법에 대한 바람직한 대안이 될 수 있다. 본 연구에서는 대형 사력댐에서 표면파 시험을 신뢰성 있게 수행할 수 있는 방안을 제시하였고, 수치실험과 현장적용 시험을 통하여 제안된 방안의 신뢰성을 확인하였다. 본 연구를 통하여 획득한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 대형 사력댐에서 표면파 시험의 신뢰도를 확보할 수 있는 새로운 기법인 SBF (Short-Array Beamforming Technique) 기법을 제안하였다. SBF 기법은 기존의 빔형성기법에 내재되어 있는 근접장 문제, 측선내 비균질매질과 국부이상대로 인한 문제 등을 최소화할 수 있도록 개발되었다.
- (2) 대형 사력댐의 경우 사력재료의 불연속성으로 인한 낮은 신호품질, 사면 경계면에서의 다중반사로 인한 표면파 신호의 교란, 재료의 불균질로 인한 복잡하고 난이한 데이터 해석 등이 표면파 시험의 신뢰도를 저하시키는 요인이다. 이러한 한계를 SBF 기법과 IRF 기법에 의해서 해결하는 방안을 제시하였고 실제 적용사례를 통하여 확인하였다.
- (3) 대형사력댐 채료와 유사한 압괴 성토제방인 철도상부노반에서 다운홀 시험, CapSASW 시험 등의 결과와 비교하여 SBF기법의 신뢰성과 정확성을 검증하였다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2009~2012년도 “대입경 조립재료 동적물성 산정 표면파기법 개발” 사업과 2011년도 중앙대학교 연구년 지원 프로그램으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

## References

Joh, S.-H., Jang, D. W., Kang, T.-H., Lee, I.-H. (2005). “Evaluation of Stiffness Structure for Geological Segments by CAP SASW Technique,” *Journal of Korean Geotechnical Society*, Korean Geotechnical Society, Vol. 21, No. 4, p.71-81 (in Korean).

Dziewonski, A., Bloch, S., and Landisman, M. (1969). “A technique for analysis of transient seismic signals,” *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol. 59, No. 1, pp. 427-444.

Fuster, J. J. (2004). *A hardware architecture for real-time beamforming*, University of Florida, Master’s thesis, 126 pp.

Joh, S.-H. (1996). *Advances in interpretation and analysis techniques for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) method*. Ph.D. dissertation, The University of Texas at Austin.

Joh, S.-H. (2012). “Refined Beamformer for Directional Surface-Wave Measurements at Geotechnical Structures,” Presented at 91th Annual Meeting of the Transportation Research Board.

Johnson, D. H., and Dudgeon, D. E. (1993). *Array signal processing*, PTR Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.

Kausel, E. and Roesset, J. M. (1981). “Stiffness matrices for layered soils,” *Bull. Seismol. Soc. Am.* Vol. 71, pp.1743-1761.

- Kausel, E. and Peek, R. (1982). "Dynamic loads in the interior of a layered stratum: An explicit solution," *Bull. Seismol. Soc. Am.* Vol. 72, No. 6, pp.1459-1508.
- Norfarah Nadia Ismail (2012). *Refinement of Beamforming Technique for Practical and Reliabile Stiffness Profiling*. Master Thesis, Chung-Ang University. p.145.
- Curtis technology, Principles of sonar beamforming, Retrieved at July 26, 2011 from <http://www.curtistech.co.uk/papers/beamform.pdf>.
- Stokoe, K. H., Joh, S.-H. , Woods, R. D. (2004). "Some contributions of in situ geophysical measurements to solving geotechnical engineering problems," *Proceedings of the second international site characterization*, Vol. 1, Porto, Portugal, pp. 19-42.
- Stokoe, K. H., II, Wright, S. G., Bay, J. A., and Roesset, J. M. (1994). "Characterization of geotechnical sites by SASW method," *Geophysical Characteristics of Sites*, ISSMFE, Technical Committee 10 for XIII ICSMFE, International Science Publishers, New York, pp. 15-25.
- Zywicki, D. J. and Rix, G. J. (2005). "Mitigation of near-field effects for seismic surface wave velocity estimation with cylindrical beamformers," *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol. 131, No. 8, pp. 970-977.
- Zywicki, D. J. and Malladi, S. (2007). "Forward-backward cylindrical beamformer and geometric spreading weighting for seismic surface wave parameter estimation," *Proceedings of Geo-Denver 2007*, pp. 1-10.
- Yoon, S. and Rix, G. J. (2009). "Near-Field Effects on Array-Based Surface Wave Methods with Active Sources," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 3, pp. 399-406.