

국내 인프라스운드 전파특성 연구 Infrasound Wave Propagation Characteristics in Korea

제일영 *	전명순*	전정수*
Che, Il-Young	Jun, Myung-Soon	Jeon, Jeong-Soo
김용성*	박윤경*	김동균*
Kim, Yong-Sung	Park, Yun-Kyung	Kim, Dong-Kyun

ABSTRACT

Korea Institute of Geology, Mining, and Materials (KIGAM) cooperating with Southern Methodist University (SMU) has been operating seismo-acoustic array in Chul-Won area to discriminate man-made explosions from natural earthquakes since at the end of July, 1999. In order to characterize propagation parameters of detected seismo-acoustic signal and to associate these signals as a blast event accompanying seismic and acoustic signals simultaneously, it is necessary to understand infrasound wave propagation in the atmosphere. Two comparable Effective Sound Velocity Structures (ESVS) in atmosphere were constructed by using empirical model (MSISE90 and HWM93) and by aerological observation data of Korea Meteorological Administration (KMA) at O-San area. Infrasound propagation path computed by empirical model resulted in rare arrival of refracted waves on ground less than 200km from source region. On the other hand, Propagation paths by KMA, more realistic, data had various arrivals at near source region and well agreement with analyzed seismo-acoustic signals from Chul-Won data. And infrasound propagation in specific direction was very influenced by horizontal wind component in that direction. Linear travel time curve drawn up by 9 days data of the KMA in autumn season showed 335.6m/s apparent sound velocity in near source region. The propagation characteristics will be used to associate seismo-acoustic signals and to calculate propagation parameters of infrasound wave front.

1. 서 언

한국자원연구소는 미국 SMU(Southern Methodist University)와 공동으로 1999년 7월말부터 철원지역에 지진-공중음파 관측망을 운영하고 있다.^(1,5) 본 관측망은 지진이외의 산업현장에서 발파와 같이 인공적으로 발생한 event를 구별하기 위한 목적으로 설치되었다. 인공발파의 경우 지진파와 함께 음파를 발생하게 되므로, 지진파와 음파를 함께 탐지함으로써 인공발파를 구별할 수 있다. 음파중 약 0.01-5Hz에 해당하는 저주파수의 음파는 인프라스운드(Infrasound wave)로 정의되며, 대기에서 전파하는 저주파수대 음파의 감쇠는 매우 약하여 상부대기층까지 전파가 가능하며, 지표로 반사되어 수 백km 떨어진 지역에서도 관측이 가능하다.⁽⁶⁾ 지진파와 음파를 함께 발생시키는 인공발파에 대한 식별을 위해서는 기본적으로 대기에서 음파전파특성에 의한 전파경로 및 전파시

* 한국자원연구소 지진연구센터

간을 이해해야 한다. 그러나 지진파와 달리 대기를 전파하는 공중음파는 지속적으로 변화하는 대기
 기에 의해 계절적, 시간적으로 다른 전파경로를 거치게 된다. 또한, 음파의 전파경로는 대기에서
 의 음파속도구조와 함께 대기층 바람의 영향으로 상이한 전파경로를 보이게 된다.

본 연구는 철원 지진-공중음파 관측망의 특성을 분석하였으며, 대기경험모델과 기상청 고층기상
 자료를 이용한 유효음파속도구조를 구하여 음파의 전파경로와 전파시간을 계산하고 실제 분석된
 철원 지진-공중음파자료의 주시곡선과 비교하였다.

2. 철원 지진-공중음파 관측망 및 공중음파 스펙트럼

공중음파 관측망은 대기에서 지표로 도달하는 공중음파를 탐지하고, 공중음파면(infrasound
 wave front)의 스펙트럼, 속도 및 입사방향에 대한 정확한 특성을 구하는데 목적을 두고 있다. 본
 관측망은 중심관측소를 포함한 삼각형모양의 4개 관측소로 이루어 졌으며 관측소간의 최대거리는
 약 1.37km로 관측망자료처리(array processing) 시 분석 가능한 주파수는 0.25Hz(340m/s)이상이다.
 관측망은 Beam forming pattern인 관측망 반응함수에 의해 특성화 될 수 있다.⁽²⁾ 그림 1은 본 관측
 망의 구성도와 Beam forming pattern을 도시한 것이다. 관측망 반응함수 중심에 위치한 최대치는
 관측소간의 최소거리에 해당하는 값으로 주위 값들(side lobes)과 연결되어 있으며, 최대치의 너비
 는 관측망의 정밀도를 지시한다. 또한, 중심 최대치의 모양은 입사방향 결정에 대한 정밀도를 지
 시하는 것으로 그 모양이 대체로 원형에 가깝다.

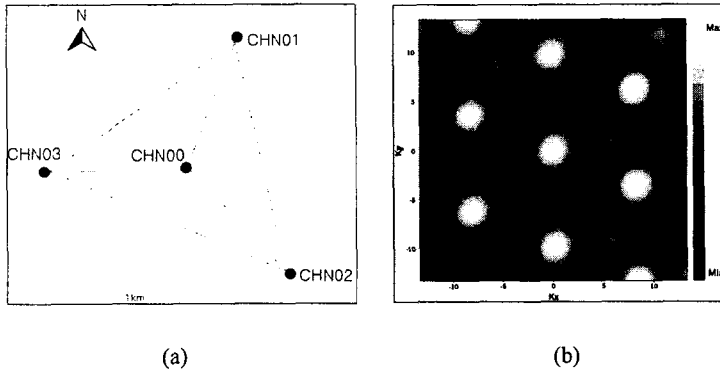
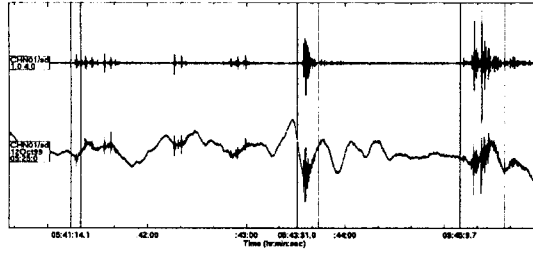


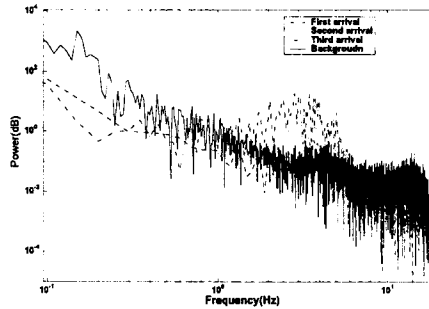
그림 1. 철원 지진-공중음파 관측망 구성도(a) Beam forming pattern(b).

지표근처에서 발생하여 대기로 전파하는 음파는 대류권(troposphere), 성층권(stratosphere), 중간권
 (mesosphere)과 열권(thermosphere)에서의 대기조건에 의해 반사, 굴절되며, 일부는 지표로 되돌아
 오게된다. 음파의 속도는 대기의 온도함수로 변화하며, 고도가 증가하면서 4개의 대기층에서는
 각기 다른 온도변화로 고도에 따른 음파속도구조를 형성하게 된다. 대기로 전파한 음파의 에너지
 는 대기층의 반사면(turning point)과 지표 사이에 형성된 전파통로(propagation duct)를 따라 장거
 리 전파하게 된다. 지표근처에서 발생한 음파는 모든 입사각으로 전파하게 되며, 입사각에 따라
 다른 전파통로를 거치게 된다. 따라서, 하나의 음원에서 발생한 음파로부터 시간차이를 둔 여러
 개의 음파를 지표에서 관측할 수 있으며, 이는 지진파와 같은 개념으로 다른 경로를 거친 공중음
 파 위상(phase)으로 정의될 수 있다.⁽³⁾

그림 2(a)는 1999년 10월 12일 대천 앞 바다에서 발생한 공중폭발과 관련된 3개의 음파신호이고,
 (b)는 배경잡음과 3개 음파신호에 대한 스펙트럼으로 음파신호의 에너지는 1-5Hz사이에서 최대로
 나타난다.



(a)



(b)

그림 2. 1999년 10월 12일 대천앞 바다에서 발생한 공중폭발과 관련된 3개 공중음파 신호(a) 3개 신호에 대한 스펙트럼 분석(b).

3. 지구적 규모의 대기모델에 의한 공중음파의 전파경로

대기중 공중음파의 전파경로를 결정하는 주요 인자는 대기의 음파속도구조와 대기층별 발생하는 바람에 있다. 대기에서 음파속도는 온도, 밀도, 압력 및 대기조건에 영향을 받으나, 근사적으로 $c \approx 331.5 + 0.607 T$ 인 온도함수로 계산되며 대기온도의 상승과 함께 음파의 속도는 증가하게 된다.⁽⁷⁾ 전파경로 계산에 사용되는 유효음파속도구조(effective sound velocity structure)는 온도함수인 음파속도구조와 대기에서 발생하는 바람의 벡터합으로 얻어진다. 지진파가 통과하는 지구내부 구조는 시간에 대해 불변적이거나, 고도별 온도, 풍향 및 풍속은 계절 및 시간대에 따라 지속적으로 변화하게 된다.

본 연구는 기상청 대기관측자료와 지구적 규모의 경험모델인 MSISE90(Mass Spectrometer Incoherent Scatter), HWM93(Horizontal Wind Model 1993)으로 유효음파속도구조와 전파경로를 구하여 비교하였다. MSISE90과 HWM93은 다년간 관측된 기상자료로부터 구해진 경험모델로 각각 고도별 온도와 바람모델을 제공하며, 공중음파를 이용한 음원의 결정 및 전파경로 연구를 위한 대기모델로 이용되고 있다.⁽⁴⁾ 그림 3은 이들 모델로부터 1999년 12월 3일 오후 3시 오산 지역에서 고도별 온도구조로 계산된 음파속도구조, 남북방향 바람(meridian wind), 동서방향 바람(zonal wind)과 유효음파속도구조를 고도 200km까지 도시한 결과이다. 음파속도구조는 고도상승에 따른 온도변화와 일치하며, 전파경로에 영향을 주는 고도 120km 이내에서는 동서방향의 바람이 남북방향의 바람에 비해 강한 것을 알 수 있다. 유효음파속도는 N80°E방향으로의 속도구조 단면이며, 음파속도구조가 바람성분의 영향으로 왜곡되어 나타난다.

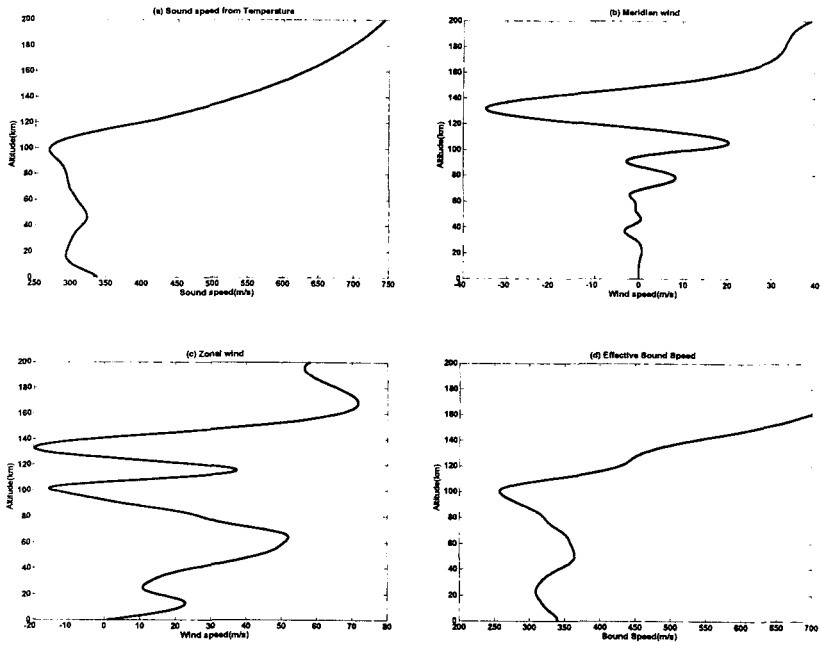


그림 3. (a) 음파속도구조 (b) 남북방향 바람 (c) 동서방향 바람 (d) 유효음파속도구조.

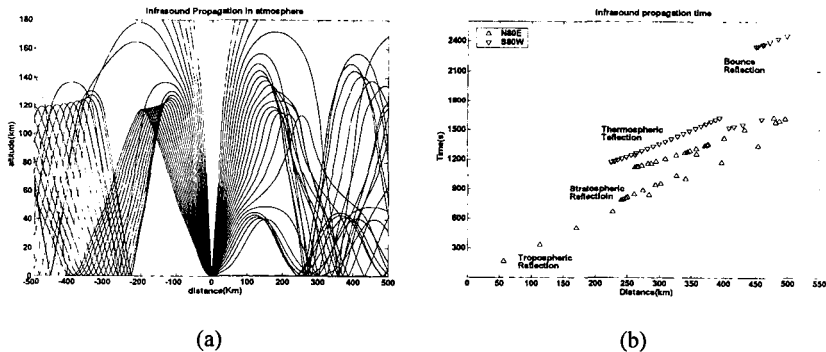


그림 4. 경험모델에 의한 음파의 전파경로(a) 및 전파 시간(b).

그림 4는 유효음파속도구조에서 수직으로부터 15° 에서 87° 사이로 입사하는 음파의 전파경로와 전파시간을 도시한 결과이다. 그림 4(a)에서 음원의 우측은 $N80^\circ E$ 방향으로 전파하는 음파이고, 좌측은 $S80^\circ W$ 방향으로 전파하는 음파들로 서로 다른 전파경로를 보이고 있다. 음파속도구조가 각 방향에서 반대되는 바람에 의해 왜곡되기 때문에 $N80^\circ E$ 방향으로는 바람이 전파방향에 순풍(downwind)으로 작용하여 역풍(upwind)을 받는 $S80^\circ W$ 방향과는 달리 약 40km에서 반사하는 음파와 입사각이 87° 인 1개 음파가 1km에서 반사하게 된다. 입사각이 작은 경우 양방향으로 전파하는 모든 음파는 반사 없이 상부 대기층으로 전파하며 입사각이 커지게 되면서 열권에서 반사하게 된다. 전파시간을 도시한 결과(b)에서는 열권과 성층권에서 반사되어 지표로 도달하는 음파와 지표에서 재 반사되어 도달한 음파 등의 분기선(branch line)을 형성하게 된다. 결과적으로 지구적 규모의 대기모델에서는 대부분의 음파가 대기 상층부인 열권 또는 특정 전파방향에서 바람의 영향

을 받는 성층권에서 반사되며, 10km 이내에서 반사되는 음파는 매우 드물게 나타나게 된다. 또한 높은 반사고도 때문에 음원으로부터 200km이내에서는 음파가 지표에 도달하지 못하게 된다. 그러나, 철원 지진-공중음파 자료분석결과 관측소로부터 200km 이내 events의 음파신호가 관측되고 있다. 그림 5는 공중음파와 지진자료를 동시에 분석하여 인공발파와 같이 지진파와 음파를 동시에 발생시킨 event의 주시곡선이다. 철원 관측망으로부터 50km 이내 events는 경기도 포천, 동두천 일대에 위치한 채석장으로부터 발생한 것이고, 100-150km의 events는 서해 근처(영종도)에서 발생한 events에 해당한다. 대기경험모델로 전파경로를 계산했을 때, 지표에 도달할 수 있는 최단 거리와는 달리 200km 이내 음원에서 발생한 음파가 관측되는 결과를 보이고 있다. 200km보다 가까운 음원의 음파가 도달하기 위해서는 하부 대기층에서 반사되는 경우에 가능하므로, 실제 하부 대기층에서의 음파속도구조는 단순한 구조의 경험모델과는 달리 매우 복잡하다는 것을 지시한다. 따라서, 저층 대기에서의 실제 온도, 풍향 및 풍속을 관측하여 유효음파속도구조와 전파경로를 구해야 할 필요가 있다.

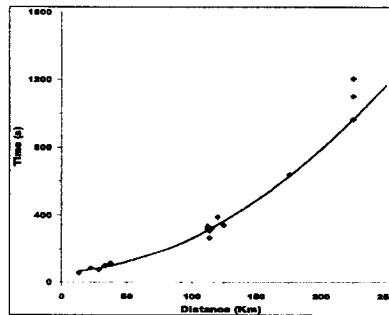


그림 5. 철원 지진-공중음파 관측망에 의한 인공발파의 전파 시간.

4. 기상관측 자료에 의한 공중음파의 전파경로

지구적 규모의 경험모델과 실제 기상관측자료에 의한 모델로부터 전파경로를 구하여 비교하였다. 그림 6(a), (b)는 기상청이 오산지역에서 측정한 온도, 풍향 및 풍속자료로부터 구한 N80°E과 S80°W방향으로의 고도 36km까지의 유효음파속도구조이다. 36km이하의 속도구조는 이론적인 모델에 비해 바람성분에 의해 상당히 왜곡되어 나타난다. 이러한 바람성분은 지구적 규모의 모델이 제공하지 못하는 매우 지역적인 특성을 갖는 자료로 음파의 전파경로를 결정하는데 중요한 역할을 하게 된다. 그림 6(c), (d)는 두 방향(N80°E, S80°W)의 유효음파속도구조에서 수직으로부터 15°에서 87°사이로 입사한 음파의 전파경로이다. N80°E방향으로 전파하는 음파는 36km이내에서 반사가 일어나지 못하고 모두 상부 대기층으로 전파하며, S80°W방향으로 전파하는 음파는 약 1-7km 고도에서 반사되어 되돌아온다. 최저고도 약 1km에서 반사된 음파는 발생지(오산)로부터 약 40km 떨어진 지표에 도달하는 결과를 보인다. 그림 7(a)는 상기 기상관측자료로부터 모든 방향으로의 유효음파속도구조를 구하고 전파경로를 계산하여 지표에 도달하는 모든 음파에 대한 전파거리와 전파시간을 도시한 결과로, 상기 입사각에서 지표에 도달 가능한 최소거리는 약 30km 이내로 나타난다. 그림 7(b)는 10월, 11월, 12월에 측정된 9일의 기상청 자료로부터 구한 주시곡선과 해당 기간동안 철원관측망 자료에서 발파로 분류된 근거리 자료를 함께 도시한 결과이다. 기상자료로부터 구한 주시곡선들은 근거리 지역에서 직선으로 나타나며, 음파의 속도는 약 335.6m/s로 실제 분류된 발파자료와 일치하는 결과를 보인다.

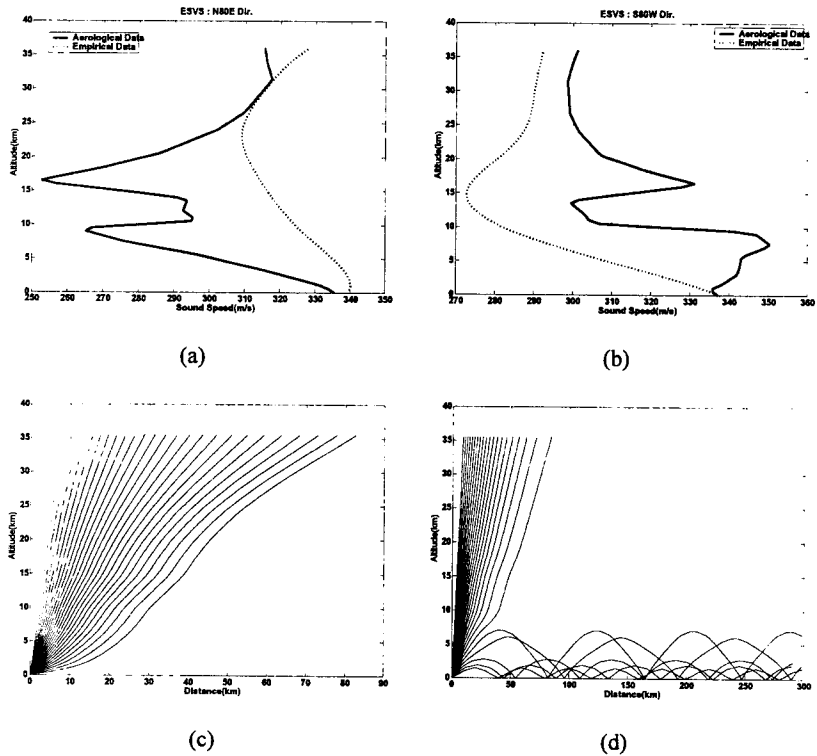


그림 6. N80°E방향과 S80°W방향으로의 유효음파속도구조(a), (b) 및 음파의 전파경로(c), (d)

상기 기상자료에 의한 주시곡선과 음파의 속도는 지진-공중음파자료처리 과정에서 관련성 있는 지진파와 음파에 대한 확인작업에 매우 중요하게 이용될 수 있으리라 본다. 또한 공중음파에 대한 지속적인 연구로 공중음파만을 이용한 음파 발생지에 대한 위치결정에도 이용될 수 있다. 기상관측자료는 고도 약 30km로 제한되므로 근거리 지역에서의 전파경로에 이용될 수 있으며, 동시에 고도 30km 이상에서는 경험모델을 이용하여 장거리 전파경로를 구하는 것이 적절하리라 본다. 또한, 계절별 경향성을 갖는 기상자료에 대한 전파경로와 주시곡선의 작성으로 계절별 획득되는 지진-공중음파에 대한 특성연구가 계속적으로 수행되어야 한다.

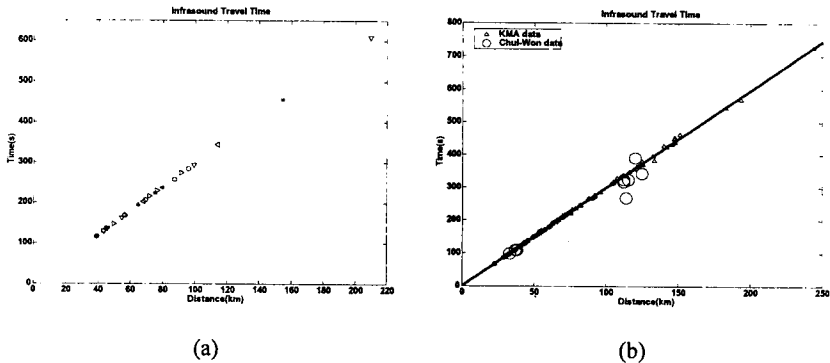


그림 7. (a) 1999년 12월 3일 기상자료에 의한 근거리 전파시간 (b) 10, 11, 12월 기상청 9일 자료의 주시곡선 및 인공발파자료의 전파시간

5. 토의 및 결론

지진-공중음파 관측망은 인공발파와 같이 지진파 및 공중음파를 동시에 발생시키는 event에 대한 식별로 자연지진과 인공발파를 구별하기 위한 목적으로 설치되었다. 지진파를 이용한 진앙의 위치결정과 같이 공중음파 관측망 자료로부터 음원의 위치를 결정하기 위해서는 대기에서 음파의 전파경로를 이해해야 한다. MSISE90과 HWM93 경험모델에 의한 국내 오산지역에서 전파하는 음파의 전파경로를 구한 결과 지표에 도달할 수 있는 음파는 음원으로부터 200km 이상 지역에서만 탐지되는 것으로 나타났다. 그러나, 실제 철원 지진-공중음파 관측망 자료로부터 결정된 인공발파에 해당하는 events는 실제로 근거리 지역에서 발생한 경우를 상당수 포함하고 있다.

기상청이 측정한 오산지역의 대기 자료를 이용하여 36km 이하 저층대기에서 음파의 전파경로와 전파시간을 구하여 경험모델로부터 구한 결과와 비교하였다. 기상자료를 이용한 결과, 경험모델이 제공하지 못하는 10km 이하 하부 대기층에서 반사되는 전파경로를 구할 수 있었다. 음파의 전파경로를 결정하는 유효음파속도는 방사상의 모든 방향에서의 바람성분에 의해 큰 차이를 보이며, 그 결과 하부 대기층에서 반사되는 음파는 일부 방향에서만 반사되는 결과를 보인다. 10월, 11월 및 12월에 해당하는 9일의 기상자료로부터 200km 이하 근거리 지역에서 지표에 도달하는 음파의 주시곡선은 직선으로 나타나며, 평균 전파속도는 335.6m/s이다. 동일 기간동안의 철원 관측망에 탐지된 발파자료의 전파시간과도 일치하는 결과를 보이고 있다. 실제 기상관측자료에 의한 음파의 전파특성으로 지진-공중음파 신호에 대한 확인 및 음파신호를 이용한 음원의 위치결정에 이용될 수 있으리라 본다.

감사의 글

고층기상관측자료를 제공하여 주신 기상청 항공기상과 정준석 연구원께 감사드립니다.

참고 문헌

1. 전명순, 전정수, 신인철, 김동균, 제일영, 김용성, 박정호, B. Stump, C. Hayward, J. McKenna, 1999, "철원 지진-공중음파 관측망 설치," 한국지진공학회 1999년도 추계학술대회는문집, pp. 52-57.
2. Capon, J., 1969, "High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis," Proc. IEEE, 57, 8.
3. Garcés, M. A., R. Hansen, K. Lindquist, 1999, "Variability of the lower atmosphere and its effect on the propagation of infrasonic waves," In Proceedings of the 21st Annual Seismic Research Symposium on Monitoring A Comprehensive Test Ban Treaty, 21-24 September 1999.
4. Garcés, M. A., R. A. Hansen, K. G. Lindquist, 1998, "Traveltimes for infrasonic waves propagating in a stratified atmosphere," Geophys. J. Int., Vol. 135, pp. 255-263.
5. Hayward, C., B. Stump, P. Golden, E. Herrin, M.-S. Jun, and J.-S. Jeon, 1999. "The Korean seismo-acoustic array," In Proceedings of the 21st Annual Seismic Research Symposium on Monitoring A Comprehensive Test Ban Treaty, 21-24 September 1999.
6. Waldemark, K., 1995, "Categorisation of infrasonic spectra using the ART1 network," Proceedings of the International Conference EANN'95.
7. Wessels, H. R. A., C. A. Velds, 1983, "Sound propagation in the surface layer of the atmosphere," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 74, No. 1, pp. 275-280.