

Akaike Information Criterion (AIC)를 이용한 경산 지진관측소 P파와 S파 도착시간 자동추정

권조아¹ · 강수영² · 김광희^{1,*}

¹부산대학교 지질환경과학과, 46241, 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2

²부산대학교 지질재해산업자원연구소, 46241, 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2

Onset Time Estimation of P- and S-waves at Gyeongsan Seismic Station Using Akaike Information Criterion (AIC)

Joa Kwon¹, Su Young Kang², and Kwang-Hee Kim^{1,*}

¹Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Korea

²Institute of Geological Hazard and Industrial Resources, Pusan National University, Busan 46241, Korea

Abstract: The onset times of P- and S-waves are important information to have reliable earthquake locations, 1D or 3D subsurface velocity structures, and other related studies in seismology. As the number of seismic stations increases significantly in recent years, it becomes a formidable task for network operators to pick phase arrivals manually. This study used a simple method to estimate additional P- and S-wave arrival times for local earthquakes when a priori information (event location and time) is available using the Akaike Information Criterion (AIC). We applied the AIC program to the earthquake data recorded at the seismic station located in Gyeongsan (DAG2). The comparisons of automatically estimated phase arrival times with manually picked onset times showed that 95.1% and 93.7% of P-wave and S-wave arrival time estimations, respectively, are less than 0.1 second difference. The higher percentage of agreement presented the method which can be successfully applied to large data sets recorded by high-density seismic arrays.

Keywords: earthquakes, automatic onset time estimation, Akaike Information Criterion (AIC), seismic array

요약: P파와 S파의 도착시간 정보는 지진 발생위치 결정, 1차원 및 3차원 지하구조 등 지진학 연구 수행에 중요한 정보이다. 최근 지진관측소의 수가 비약적으로 증가함에 따라 관측망을 운영하면서 수동으로 지진파의 도착시간을 측정하는 것은 상당한 시간이 소요되는 일이 되었다. 본 연구에서는 진원요소에 대한 사전정보(지진 발생위치와 시간)를 확보할 수 있는 경우 Akaike Information Criterion (AIC)을 적용하여 추가의 관측소에서 국지지진의 P파와 S파의 도착시간을 자동추정하였다. 해당 방법을 경산(DAG2) 지진관측소에 기록된 자료에 적용한 후 수동 측정한 값과 자동 측정한 값을 비교한 결과 P파의 경우 95.1%, S파의 경우 93.7%가 0.1초 이하의 차이를 보이면서 결정되는 것을 확인하였다. 자동추정결과의 높은 정확성은 향후 고밀도 지진관측망 운영에 성공적으로 적용될 수 있음을 시사한다.

주요어: 지진, 초동 자동 추정, Akaike Information Criterion (AIC), 지진관측망 운영

서론

정확한 지진파 도착시간의 측정은 지진 발생위치 결정, 3차원 지진분포로부터 지진유발 단층의 자세 파악, 지하 속도구조 연구 등 지진 연구에서 가장 기본적인 사항이다. 우리나라를 비롯한 전 세계 많은 지역에서 지진관측소의 설치 및 운영이 증가함에 따

*Corresponding author: kwanghee@pusan.ac.kr
Tel: +82-51-510-2250

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

라 지진자료의 양이 크게 증가하고 있다. 지진자료로부터 지진파 도착시간을 정확히 측정하는 작업은 상당한 시간과 노력을 필요로 하는 작업이며, 숙달된 지진자료 분석자라도 비교적 높은 배경잡음 하에서 P파와 S파의 도착시간을 측정하는데 어려움이 있을 수 있다. 경우에 따라서는 지진파 도착시간 측정에 주관적인 견해가 반영될 수도 있다. 그리하여 지진파 도착시간 측정을 자동화하기 위한 기술개발이 꾸준히 진행되고 있다(e.g. Allen, 1982; Baer and Kradolfer, 1987; Li and Peng, 2016; Maeda, 1985; Sleeman and van Eck, 1999; Vandecar and Crosson, 1990; Withers et al., 1998).

지진의 발생사실을 인지하고 가장 먼저 수행되는 작업은 각 관측소에 P파와 S파의 도착시간을 측정하여 지진 발생위치와 시간, 그리고 규모를 결정하는 것이다. 그러나 지진 발생위치 결정을 위하여 모든 지진관측소에서 지진파의 도착시간을 측정해야 하는 것은 아니다. 우리나라와 같이 조밀한 관측소 분포를 갖춘 지진관측망 내부에서 지진이 발생할 경우, 진원 주변에 위치한 5-6개소의 지진관측소에서 측정한 초동 도착시간 만으로도 지진발생위치를 결정할 수 있다. 그러나 지진관측망 운영을 통하여 지진 발생 사실을 확인한 후 지진 발생위치와 시간, 규모만을 결정하는 것은 아니다. 지진 발생위치 결정의 정확성 향상 및 3차원 지하 지진파 속도구조 연구 등을 수행할 수 있고, 이 경우 추가의 관측소에서 P파와 S파의 도착시간 관측이 필요하다. 또한 비교적 큰 규모의 지진이 발생한 지역의 관측망으로부터 확보된 여진 자료를 사용하여 보다 정확한 지진발생위치 결정과 관련연구 수행을 위해 추가적인 관측소에서 지진파의 도착시간을 측정할 필요가 있다.

지진자료 분석자는 연속지진 자료에서 배경잡음보다 큰 진폭의 에너지 도착 혹은 주파수 변화를 통하여 지진파의 도착을 인지하게 된다. 지진파 도착 측정 자동화 기법은 이러한 지진자료 분석자의 경험을 알고리즘화하는 것으로서, 시간 영역 혹은 주파수 영역에서 자료 특성의 갑작스러운 변화를 효율적으로 정량화하여 지진파의 도착을 감지한다. 가장 흔히 사용되는 지진파 도착 검출 방법은 STA/LTA(the short-term average/long-term average) 방법이다(e.g. Allen, 1982; Baer and Kradolfer, 1987). STA/LTA 방법은 지진파의 도착이 배경잡음보다 높은 에너지 도착으로 인지된다는 점에 착안하여 제안된 방법이다. 짧은 시

간 창(short-term window) 동안의 시계열 진폭의 절대값 평균은 지진파형의 도착에 민감하게 반응한다는 점과 비교적 긴 시간 창 동안의 진폭의 절대값 평균은 관측 지점의 배경잡음 정보를 확인 할 수 있다는 점에서 착안하여 그 비를 계산하고 미리 정해진 값 이상일 때 지진파의 도착 가능성을 알리고 분석을 시작하게 된다. STA/LTA 방법은 우리나라 국가지진 관측망을 포함하여 많은 지진관측망에서 일상적으로 적용되고 있다(e.g. Ryoo, 2006). 지진파의 도착시간을 측정하는 다른 방법 중에 하나는 Akaike Information Criterion (AIC)가 최소가 되는 시간을 측정하는 것이다. 이 방법에서는 주어진 시계열 자료를 배경잡음 부분과 신호 도착 후 부분으로 나눌 수 있다고 가정하고, 이 두 부분의 경계에서 AIC 값이 최소가 된다. 지진파 도착시간 측정을 위하여 AIC를 적용한 많은 선행연구가 있으며(e.g. Sleeman and van Eck, 1999; Takanami and Kitagawa, 1988; Zhang et al., 2003), 본 논문에서는 비교적 간단하게 지진자료로부터 AIC를 측정 할 수 있는 Maeda (1985)의 방법을 적용하였다. 자동측정한 결과를 지진자료 분석자의 수작업 도착시간 측정과 비교하여 AIC의 지진파 도착시간 자동 측정에 적용가능성과 정확성을 제시한다.

연구방법 및 자료

지진자료를 수작업으로 분석할 경우 P파는 배경잡음 상황에서 큰 에너지가 도착하므로 비교적 정확하게 그 도착시간을 측정할 수 있다. S파는 수평성분에서 도착시간을 측정하는데 P파 도착 후 지속적으로 큰 진폭이 유지되는 상황 하에서 도착하므로 그 도착시간 측정이 어려울 수 있다. 뿐만 아니라 지진파 전파경로 상에 지진파 전파속도와 매질의 밀도 변화로 인한 위상변화(P-to-S 또는 S-to-P converted phases)가 발생하여 S파의 도착 인지는 더욱 어려울 수 있다. 이러한 이유로 많은 지진관측소에서 S파의 도착시간 측정이 적절히 이루어지지 못하는 경우가 매우 흔하다. S파 도착시간을 보다 정확하게 측정하기 위하여 동서 및 남북 방향의 수평 성분 지진자료를 radial과 tangential 성분으로 회전하여 SV와 SH 성분으로 구분하고, tangential 성분으로부터 S파의 도착시간을 측정함으로써 S-to-P converted phase로 인한 불확실성을 어느 정도 감소시킬 수 있다. 지진

계를 지표에 설치할 경우 수직, 동서 그리고 남북 방향으로 위치시키는 것이 일반적이므로 두 개의 수평 성분 자료를 radial과 tangential 성분으로 변환하기 위해서는 지진 발생위치를 미리 인지하고 있어야 한다. 지진 발생위치와 시간을 미리 인지하고 있는 경우, 해당 지역의 1차원 혹은 3차원 속도모델을 바탕으로 각 관측소에 도착하는 P파와 S파의 도착시간도 미리 예측이 가능하다. 이 경우 진원요소와 지하 지진파 전파 속도모델의 부정확성으로 인하여 예측한 지진파의 도착시간과 실제 관측소에 도착하는 지진파의 도착시간 사이에는 차이가 있을 수 있다.

우리나라에서 규모 2 이상 지진이 발생할 경우 기상청에서는 국가지진관측망을 사용하여 상당히 정확한 진원요소 정보를 실시간 제공하고 있다. 규모 2 이하의 미소지진의 경우에도 기상청으로부터 진원요소 정보를 제공받을 수 있다. 본 논문에서는 지진 발생위치와 시간, 연구지역의 1차원 속도모델 정보 등을 미리 확보하고 있을 때, 관측망 자료의 수직성분으로부터 P파를 자동추정하였다. S파의 도착시간은 두 수평 성분(남북 성분과 동서 성분)과 tangential 성분으로부터 자동 추정된 후 세 값의 중간값을 자동추정치로 선택하였다.

Akaike Information Criterion (AIC)는 가능한 여러 모델 중 최적의 모델을 선택하기 위한 방법으로 제시되었다(Akaike, 1973). AIC를 이용한 지진파 도착시간 자동추정에서는 주어진 지진자료를 지진파가 도착하기 전과 후의 다른 성격의 신호로 구분할 수 있다고 가정한다. Maeda(1985)는 길이 N 인 지진기록 x 의 AIC 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \text{AIC}(k) \\ = k \cdot \log(\text{var}(x[1,k])) + (N-k-1) \cdot \log(\text{var}(x[k+1,N])) \end{aligned}$$

$\text{var}(x[1,k])$ 는 지진기록 $x(1), x(2), \dots, x(k)$ 의 분산을, $\text{var}(x[k+1,N])$ 는 지진기록 $x(k+1), x(k+2), \dots, x(N)$ 의 분산을 표시한다. k 이전에 기록된 신호와 k 이후에 도착한 신호는 서로 다른 특성을 가지고 있으며, AIC를 이용한 지진파 도착시간 자동추정에서는 AIC 값이 최소가 되는 시간(k)을 지진파의 도착시간으로 추정한다.

본 연구에서는 경산(DAG2) 지진관측소 자료에 AIC 기법을 적용하여 P파와 S파의 도착시간을 자동추정하였다(Fig. 1과 2). 선행연구(Kim et al., 2016; Kim et al., 2018)에서 발표한 규모 5.1 경주지진 전

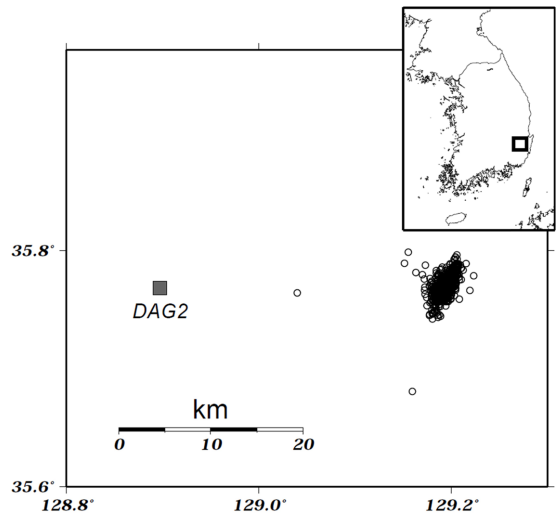


Fig. 1. Seismic station (DAG2) and earthquake epicenters used in the study.

진과 규모 5.8 본진을 포함한 2016년 9월 12일부터 9월 21일까지 10일간 발생한 803회의 지진에 대하여 적용하였다. 자동추정에 앞서 장주기 잡음을 제거하기 위하여 2-30 Hz 대역 통과 필터를 적용하였다. 앞서 기술한 바와 같이 AIC 방법을 적용하기 위해서는 적절한 시간창을 지정해줘야 한다. 이를 위하여 진원으로부터 각 관측소까지의 주파시간을 계산한 후 P파 도착 예상시간 1초 전후(W_p)와 S파 도착 예상시간 1초 전후(W_s)를 시간 창으로 지정하였다. P파와 S파의 도착 예상시간 계산에는 Kim(1999)에서 제시한 P파의 1차원 속도모델과 $V_p/V_s = \sqrt{3}$ 을 가정하여 S파의 속도모델을 계산하여 사용하였다.

결 과

AIC를 이용한 P파와 S파 도착시간 추정을 2016년 9월 12일부터 9월 21일까지 10일간 발생하고 경산(DAG2) 지진관측소에 기록된 지진 자료에 적용하였다. 수작업으로 측정한 P파는 734개이고 S파는 639개이다. Fig.3(a)에 P파 도착시간 자동추정결과를 자동추정 결과와 비교하여 제시하였다. 95.1%의 P파 도착 자동추정 값이 수작업으로 측정한 P파의 도착시간과 ± 0.1 초 이내에서 결정되었다.

두 수평성분(남북 및 동서방향), radial 성분 및 tangential성분의 S파 도착이 예상되는 시간 전후 1초 시간창에 대하여 AIC를 적용하여 S파 도착 시간을

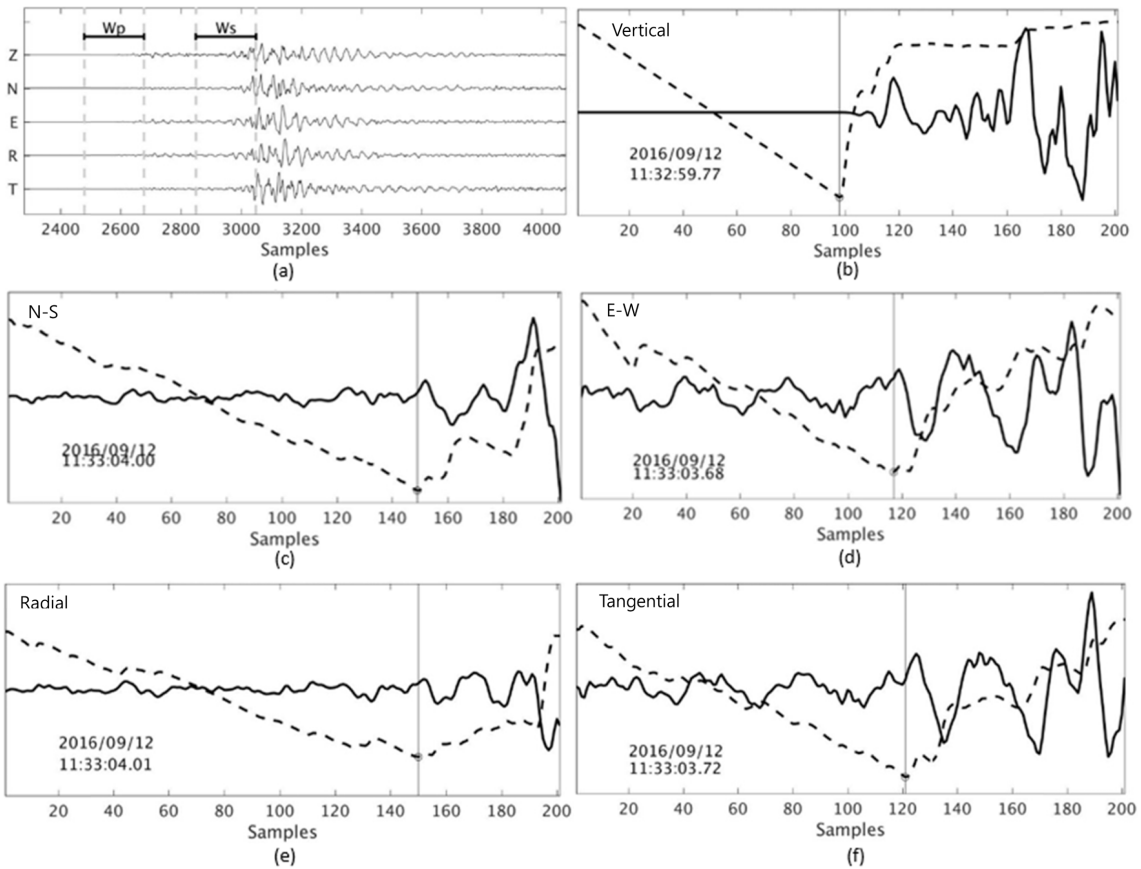


Fig. 2. Seismograms and application of the AIC picker. (a) Three-component (Z-, N- and E-components) seismograms. Radial- and tangential-components after the rotation of two horizontal components are also shown by R and T, respectively. Time windows for P-wave onset estimation (W_p) and S-wave onset estimation (W_s) are marked by broken lines in the figure. (b) Vertical component seismogram around the expected P-wave arrival (solid line) and corresponding AIC value (broken line). P-wave arrival times are chosen where AIC becomes minimum. (c)-(f) N-S, E-W, radial and tangential component seismograms around the S-wave arrival (solid lines). AIC values are shown by broken lines. S-wave arrival time is selected by choosing median value from times when NS, EW and tangential components of AIC become minimum. P- and S-wave onsets from AIC are shown in the lower left corner of each figure.

자동측정하였다. NS 성분과 radial 성분에서 자동측정한 결과가 비교적 큰 잔차(residual)를 보여주고 있는데, 전파경로 상의 불연속면에서 발생한 S-to-P파가 S파 도착 직전에 도착하여 측정된 것으로 생각된다. 이런 이유로 두개의 수평성분과 tangential 성분으로부터 측정된 값들 중에 중간값을 최종 S파 자동측정 값으로 선택하였고, 93.7%의 S파 도착 자동측정값이 수작업으로 측정된 S파의 도착시간과 ± 0.1 초 이내에서 결정되었다. 지진과 관측소 간의 거리가 짧음을 고려하더라도 이 수치는 상당히 정확성을 가지며, P파와 S파의 도착시간이 신뢰할 수준으로 자동 결정되었음을 보여주고 있다.

토 의

본 연구에서는 지진 발생위치 및 발생시간 정보를 확보할 수 있는 경우 추가의 지진관측소에서 AIC를 이용하여 P파와 S파의 도착시간을 자동측정하는 방법을 적용하였다. AIC방법의 적용을 위해서는 적절한 시간창을 지정해 주어야 하며, 기존에 알려진 연구지역의 1차원 속도모델의 활용이 가능하다. 지정된 시간 내에 지진파가 도착해야 자동측정 결과가 유의미하므로 적절한 시간 창 의 선정은 P파와 S파 도착 시간 자동 측정에 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 시간창 지정을 위해 Kim(1999)에서 제시한 1차

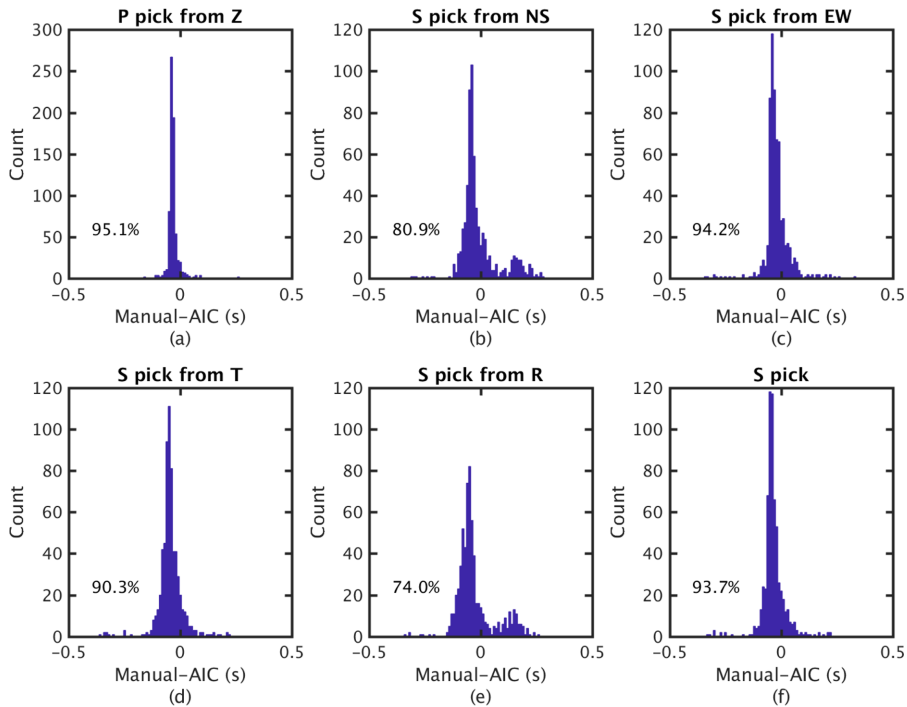


Fig. 3. Histograms of P and S pick residuals. (a) P arrival time residual between manual and AIC estimated picks from the vertical component. (b)-(e) S-wave arrival time residuals between manual and AIC estimated picks from the NS, EW, tangential, and radial components. (f) Median pick values are chosen as final S-wave arrival times from NS, EW and tangential components. Percentile of picks with residuals within 0.1 second is shown at the lower-left corner of each figure. Bin size is 0.01 second.

원 속도모델을 사용하여 지진파의 주파시간을 계산하였으며, 사전에 확보 가능한 진원시간을 고려한 후 지진관측소(DAG2)에 P파와 S파가 도착할 것으로 예상되는 시간 전후 1초를 임의로 AIC 방법 적용의 시간 창으로 지정하였다. 본 연구에서 임의로 지정한 1초는 P파 주파시간의 경우 이론적 주파시간의 약 19.5%, S파 주파시간의 경우 이론적 주파시간의 약 11.2%에 해당한다. 현재까지 우리나라에 적용 가능한 여러 1차원 속도모델이 제시되었으며, 실제 본 연구에서 제시한 방법을 적용하여 지진파 도착시간을 추정하는 경우 속도모델의 불확실성과 선행 속도구조 연구 결과를 고려하여 적절한 시간창 선택이 가능할 것이다.

사전에 확보한 지진 발생위치와 시간 정보의 불확실성 또한 시간 창 지정에 고려해야 한다. Han et al. (2016)은 2010년부터 2014년까지 울산단층 동쪽에서 발생한 지진의 발생위치를 정밀결정하는 과정에서 기존 보고된 지진 발생위치 및 시간과 비교하여 각각 평균 약 2.0 Km와 0.45초의 차이가 있음을 보고하였

고, 3차원으로 변화하는 지하 속도구조가 1차원 속도모델로 제시되면서 발생할 수 있는 부정확성 등을 그 원인으로 제시하였다. AIC를 적용한 초동 측정 과정에서는 이러한 부정확성을 고려하여 적절한 시간창을 지정해야 한다. 부정확한 1차원 속도모델을 바탕으로 제시된 지진발생위치는 본 연구에서 사용한 지진기록을 tangential 성분으로 회전하는 과정과 결과에도 영향을 미칠 수 있다.

남북 성분(Fig. 3b)과 radial 성분(Fig. 3e)으로부터 측정된 S파 도착시간 값은 수동측정 값과 비교하여 비교적 큰 차이를 보이고, 그 차이가 넓게 분포하고 있다. 이러한 관측은 본 연구에 사용된 지진관측소(DAG2)가 대부분의 지진이 발생한 위치로부터 서쪽에 위치하여 지진 기록이 자연스럽게 동서성분은 tangential 성분과 비슷한 방향으로 놓이게 되고, 남북 성분은 radial 성분과 비슷하게 놓이게 되며, 남북 성분과 radial 성분에는 지진파 전파 경로 상 매질의 임피던스(속도×밀도) 차이로 인하여 발생한 전환파(S-to-P 또는 P-to-S phases)의 영향일 수 있다. Fig.

3 (b), (c), (d)와 (e)를 보면 EW수평성분 지진기록으로부터 자동측정한 결과가 tangential 성분으로부터 자동측정한 결과와 보다 일치하는 것으로 나타난다. 그 이유는 수작업으로 S파 도착시간을 측정하는 과정에서 tangential 성분을 고려하지 않고 두 수평성분만을 관찰하여 S파의 도착시간을 측정했기 때문일 수 있다. 또한 앞에서 언급한 바와 같이 지진관측소로부터 진원지의 위치가 동쪽으로 편향되어 있어 자연스럽게 tangential 성분과 radial 성분을 관측하기 적합하게 놓여있기 때문일 수 있다. 그러나 본 연구에서 제안하는 방법을 실제 적용할 경우에는 자연스럽게 tangential 성분과 radial 성분으로 구분되어 있기를 기대할 수 없다. 이러한 이유로 S파의 도착시간을 자동측정하는 과정에서 두 수평성분 혹은 tangential 성분 중 한 성분으로부터 도착시간을 측정하여 사용하기 보다는 세 측정값의 중간값을 S파의 도착시간으로 선정하는 것이 보다 실용적일 수 있다. 이러한 과정은 실제 수작업으로 S파의 도착시간을 측정하는 과정과 보다 유사하다.

수작업으로 P파와 S파의 도착시간을 측정하는 과정에는 통상 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio) 또한 고려된다. 낮은 신호대 잡음비를 보이는 지진파를 분석하는 과정에서는 자동측정한 결과와 수작업으로 측정한 결과에 차이 또한 증가할 것으로 생각된다. 신호대 잡음비가 낮은 경우 수작업으로 도착할 경우에도 정확한 지진파 초동 도착시간에 어려움이 있을 것으로 예상되며, 특히 S파 측정의 경우 거의 항상 P파 도착 후 상당한 수준의 coda파의 도착이 유지되는 상황에서 측정이 이루어지므로 수작업자의 주관적인 견해가 반영된다. 이 경우 자동측정결과와 수작업 결과 중 어느 것이 보다 정확한지 판단하기 어려워질 수도 있다. 향후 S파의 측정을 위한 판단 근거를 S파 측정의 알고리즘에 적용할 수 있다면 보다 객관적인 S파 측정이 가능할 수도 있다. 본 연구에서는 신호대 잡음비를 고려하지 않았지만, 후속 연구에서는 이에 대한 고찰도 이루어질 예정이다.

결 론

본 연구에서는 지진 발생위치와 시간정보가 알려진 경우, 추가의 관측소에서 P파와 S파의 도착시간을 자동측정하기 위하여 AIC를 적용하였다. 본 연구에서 제안하는 방법을 사용하기 위해서는 P파와 S파의 도

착이 예상되는 시간 창을 선택할 수 있어야 하므로, 기존의 STA/LTA 방법과 같은 최초 지진발생사실 인지를 위해서는 사용할 수 없다. P파의 자동 측정은 수직성분으로부터 수행하였고, S파는 두개의 수평성분(동서 성분과 남북 성분)과 tangential 성분으로부터 수행한 후 중간 값을 자동 측정 결과로 선택하였다. 자동 측정한 P파(734개)와 S파(639개)의 도착시간과 수동 측정한 도착시간은 각각 95.1%와 93.7%가 측정차 0.1초 내에 있어서 상당히 높은 일관성을 보여주고 있다. 본 연구에서 사용한 방법은 최소의 관측 자료를 이용하여 지진 발생사실을 인지하고 지진 발생위치와 시간 결정한 후 진원요소 정확성 향상, 지하속도구조 정보 확보 등을 위한 추가의 지진관측소에서의 P파와 S파의 도착시간 정보가 필요할 경우 유용하게 활용될 수 있다. 특히, 최근 진행되고 있는 대규모 임시지진관측망 자료의 처리에 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

심사과정에서 논문을 읽고 의견을 주신 심사위원과 편집위원께 감사드립니다. 이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었습니다.

References

- Akaike, H., 1973, Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, in: Petrov, B.B., Csaki, F. (eds.), 2nd International Symposium on Information theory, Budapest, pp. 267-281.
- Allen, R., 1982. Automatic Phase Pickers: Their Present Use and Future Prospects. Bulletin of the Seismological Society of America, 72, S225-S242.
- Baer, M., Kradolfer, U., 1987, An automatic phase picker for local and teleseismic events. Bulletin of the Seismological Society of America, 77, 1437-1445.
- Han, M., Kim, K.-H., Son, M., Kang, S.Y., Park, J.-H., 2016, Location of Recent Micro-earthquakes in the Gyeongju Area. Geophysics and Geophysical Exploration, 19, 97-104. (in Korean)
- Kim, K.-H., Kang, T.-S., Rhie, J., Kim, Y., Park, Y., Kang, S.Y., Han, M., Kim, J., Park, J., Kim, M., Kong, C., Heo, D., Lee, H., Park, E., Park, H., Lee, S.-J., Cho, S., Woo, J.-U., Kim, J., 2016, The 12 September 2016 Gyeongju earthquakes: 2. Temporary seismic network for monitoring aftershocks. Geoscience Journal, 20, 753-757.

- Kim, K.-H., Kim, J., Han, M., Kang, S.Y., Son, M., Kang, T.-S., Rhie, J., Kim, Y., Park, Y., Kim, H.-J., You, Q., Hao, T., 2018, Deep fault plane revealed by high-precision locations of early aftershocks following the 12 September 2016 M_L 5.8 Gyeongju, Korea, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108, 517-523.
- Kim, W., 1999, P-wave velocity structure of upper crust in the vicinity of the Yangsan Fault region. *Geoscience Journal*, 3, 17-22.
- Li, Z., Peng, Z., 2016, An Automatic Phase Picker for Local Earthquakes with Predetermined Locations: Combining a Signal-to-Noise Ratio Detector with 1D velocity Model Inversion. *Seismological Research Letters*, 87, 1397-1405.
- Maeda, N., 1985, A method for reading and checking phase times in auto-processing system of seismic data. *Zisin*, 38, 365-379.
- Ryoo, Y.-G., 2006, A Study for the Efficient Management Scheme of Seismic Network in Korea and the Realtime Analysis of Earthquake Data, Department of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju, Korea. (in Korean)
- Sleeman, R., van Eck, T., 1999, Robust automatic P-phase picking: an on-line implementation in the analysis of broadband seismogram recordings. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 113, 265-275.
- Takanami, T., Kitagawa, G., 1988, A new efficient procedure for the estimation of onset times of seismic waves. *Journal of Physics of the Earth*, 36, 267-290.
- Vandecar, J.C., Crosson, R.S., 1990, Determination of teleseismic relative phase arrival times using multi-channel cross-correlation and least squares. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80, 150-169.
- Withers, M., Aster, R., Christopher, Y., Beiriger, J., Harris, M., Moore, S., Trujillo, J., 1998, A comparison of Select Trigger Algorithms for Automated Global Seismic Phase and Event Detection. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88, 95-106.
- Zhang, H., Thurber, C.H., Rowe, C., 2003, Automatic P-Wave Arrival Detection and Picking with Multiscale Wavelet Analysis for Single-Component Recordings. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, 1904-1912.

Manuscript received: October 10, 2018

Revised manuscript received: November 23, 2018

Manuscript accepted: December 19, 2018