

시추공 탄성과 자료의 송신기 정보정 알고리즘

지 준¹⁾

A Source Static Correction Algorithm in Crosswell Tomography

Jun Ji¹⁾

요 약 : 시추공간 파선 토모그래피에 있어서 결과물로 얻어지는 지하의 속도구조를 왜곡시키는 요인으로는 source static, 초동발체오차 및 부적절한 초기속도 모델에 의한 국부적인 최소값으로의 수렴 등으로 요약된다. 본 논문에서는 이러한 오차생성 요인들 중에서 source static을 자동으로 보정해주는 알고리즘을 소개하고 있다. 소개된 알고리즘은 발체된 초동자료의 송신기방향으로의 변화를 이용하여 정보정을 자동으로 계산하는 방법으로서, 실제 자료에 대해 적용해 본 결과 매우 만족스러운 결과를 보였으며, 사용자로 하여금 일관되며 자동적인 정보정 적용으로 인해서, 보다 신뢰할 수 있는 속도구조를 얻는데 도움을 줄 수 있을 것으로 예상된다.

Abstract : In crosswell ray tomography, the resultant velocity structure could be affected by source static, first-arrival-time picking errors, convergence to a local minimum due to an inappropriate initial velocity model and etc. In the paper, I propose an algorithm that automatically correct the source static among these error-prone factors. The algorithm automatically corrects source static using the picking times' differences along the source direction. The application of the algorithm to real data produces a quite satisfactory result. The algorithm seems to be helpful for users to apply the source static correction consistently and to acquire accurate velocity structure.

Keywords : source static, first-arrival-time picking, crosswell tomography

서 론

토모그래피는 의학분야의 CT(Computed tomography) 기법을 물리 탐사에 응용한 고 분해능 탐사기법으로서 초동을 이용하는 파선 토모그래피는 국내외 많은 기술적 연구와 함께 최근 턴키 방식으로 수행되는 지반조사 등 물리탐사 현장에서 활발한 적용으로 산업적 측면에서도 보편화된 기술이다. 파선 토모그래피의 경우, 해석의 최종 결과로서 토모그램을 제시하고 시추주상도 등 사전정보를 종합하여 지하구조의 상태를 규명한다. 최적의 토모그램을 얻기 위해서는 자료획득 및 처리 과정에서 지하구조 정보를 왜곡시킬 수 있는 요인들을 적절히 제거해야 한다. 이러한 요인들은 파선 토모그래피의 근본적인 문제와 자료획득 및 처리과정에서 충분히 제어 가능한 것으로 구분할 수 있다. 전자의 요인으로는 초동의 낮은 신호대 잡음비, 파선 커버리지 제한 등이며, 후자로서는 균일치 못한 트리거 시점에 의한 오차(source static), 초동발체오차(first-arrival-time picking error) 및 부적절한 초기 속도 모델에 의한 국부 최소값에의 수렴 문제 등이다.

본 논문에서는 시추공간 파선토모그래피에서 탐사자료에 포

함된 제어 가능한 왜곡 요인들 중에서 가장 큰 영향을 미치는 source static의 보정을 위한 자료처리 알고리즘을 제안하고 있다. 이러한 source static의 보정을 위한 방법론으로서 고광범과 이두성(2002)의 논문에서 반복적 개선의 방법이 제안되고 있으나, 이는 해석자의 주관적인 판단에 의존하여 정보정량을 반복적으로 구하는 것으로, 주관적인 판단으로 인한 비 일관성과 정성적인 판단을 해야하는 한계가 있다고 할 수 있다. 이에 반해서 본 논문에서는 source static의 보정을 자동으로 수행해주는 알고리즘을 소개하여 보다 일관되고 정량적인 정보정을 수행할 수 있는 방법을 제공하고자 한다.

사용된 현장자료

본 논문에서 알고리즘의 설명과 실험에 사용된 시추공간 탄성과 측정자료는 (주)지오텍과 한성대학교 영상화기술 연구실간의 산학협동으로 취득된 자료이다. 조사지역은 지표하부 약 3 m 정도에 지하수위가 형성되어 있는 곳이다.

탐사장비는 시추공 파원으로서 Geotomography 사의 Spark-er™, 측정장비는 Das-1™ 48채널 seismograph 및 24채널 하

*2002년 7월 18일 접수

1) 한성대학교 정보시스템공학과(Hansung University, Dept. of Information System Engineering)

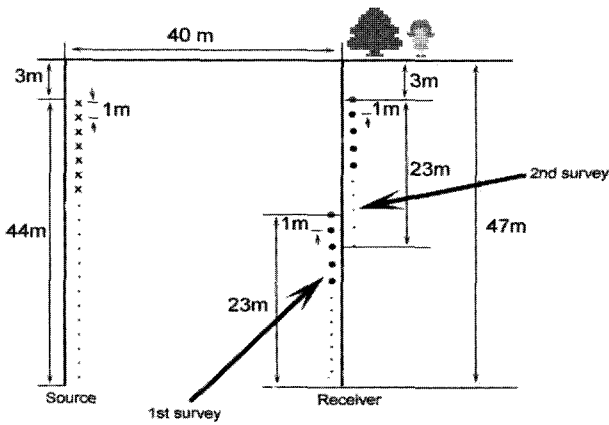


Fig. 1. Acquisition geometry.

이드로폰을 사용하였다. 탄성과 트레이스의 샘플링 간격은 0.125 msec, 기록시간은 0.256 sec 이다. Figure 1은 자료획득 개략도이다. 수신기로 사용한 하이드로폰은 24채널이므로 45 m 길이의 측정구간을 커버하기 위해 2회에 걸쳐 자료를 획득 하였으며, 총 90회의 파원에 대한 24채널 자료를 획득하였다. 자료처리에 사용된 총 트레이스개수는 2160이다. Figure 2에서는 심도 30 m에서의 공통송신원 취합자료(common shot gather)와 공통수신기 취합자료(common receiver gather)를 각각 보여주고 있다.

초동 발체

파선 토모그래피에서 가장 주의를 요하는 단계는 초동 발체 (first arrival time picking)라고 할 수 있다. 비선형 역산에 의

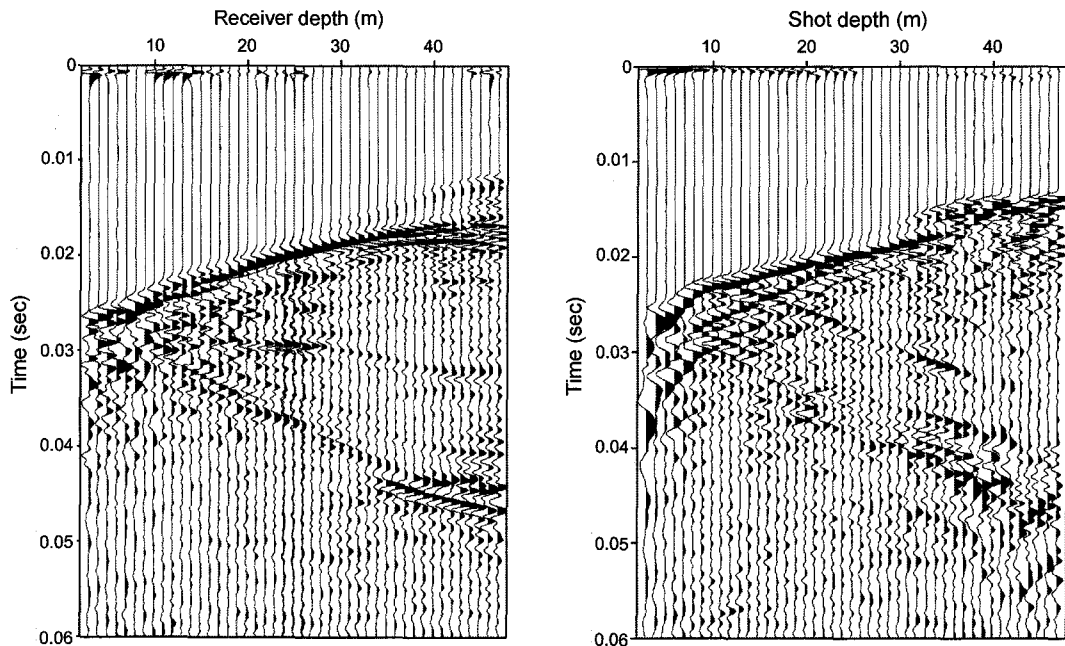


Fig. 2. Crosswell seismic raw data. Left: common shot gather for shot depth of 30 m. Right: Common receiver gather for receiver depth of 30.

한 토모그램을 얻기위해 주어지는 입력자료는 탄성과 자료 자신이 아닌 발체된 초동이기 때문이다. 일반적으로 초동 발체는 공통송신점(common shot gather)나 공통수신점(common receiver gather)으로 취합한 다음 수행되는데, 공통송신점 취합 자료에서 초동을 발체할 경우, 발체된 초동의 타당성을 검토하기 위하여 공통수신점 자료로 재취합한 다음 초동의 변화 양상을 살펴봄으로써 시작시점 발체오류 정도를 알아낼 수 있다. 반면 source static은 하나의 송신원에 대한 각 수신점에서의 기록이므로 모든 탄성과 자료의 일차 초동발체 후에 공통 송신점에 해당하는 초동 양상을 살펴봄으로써 그 존재여부를 파악할 수 있다. 이러한 공통 수신기에 해당하는 초동들의 이상대는 source static에 해당하며, 발체된 초동을 3차원 평면 형태로 도시하면 Figure 3에서 보여주고 있는 것과 같이 보다 명확하게 그 실체를 시각화할 수 있다. Figure 3에서 알 수 있듯이 특정 송신원에 해당하는 발체된 초동들이 주변의 송신원에 비하여 골이 패인 형태 또는 돌출된 형태의 source static을 잘 보여주고 있다. 즉 이러한 source static에 대한 진위 여부는 공통 송신원에 해당하는 발체된 모든 초동들이 인접한 초동들과 같은 크기의 차이를 보이는지 여부에 따라서 판단되며, 이를 찾아내어 보정을 수행하는 알고리즘이 다음에 소개되고 있다.

송신기 정보정 알고리즘

Figure 3과 같이 주어지는 발체된 초동에서 source static에 해당하는 부분을 좀 더 명확히 정량적으로 살펴보기 위해서는 각각의 공통 수신기에 대한 초동자료를 송신기 방향으로 차분을 취하면 된다. 이를 수식적으로 살펴보면 다음과 같다.

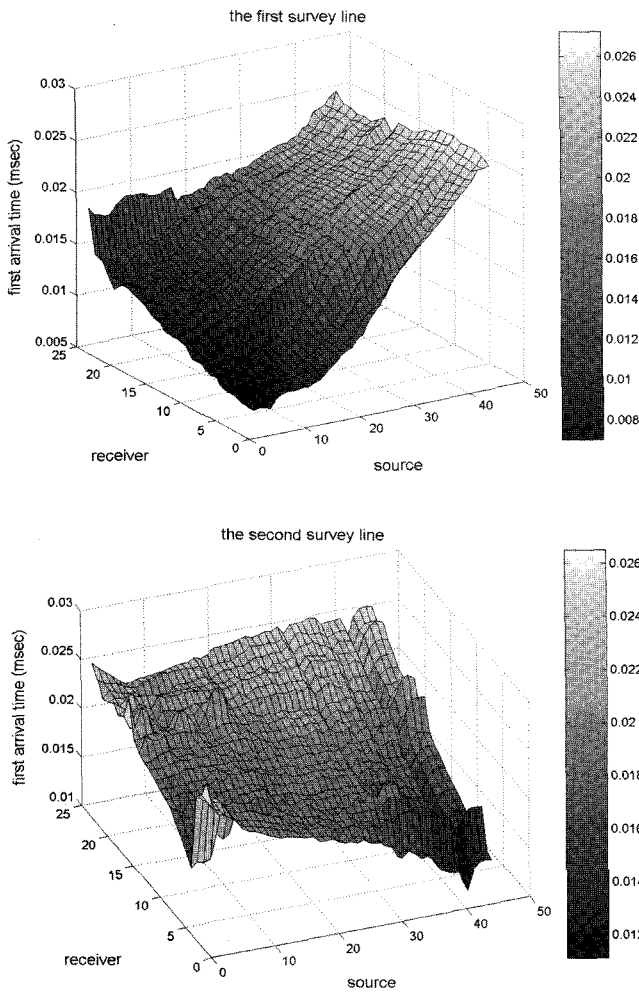


Fig. 3. First-arrival-time picked in the first survey line (upper) and in the second survey line (lower).

$$\Delta data(g, s) = data(g, s) - data(g, s-1) \quad (1)$$

여기에서, $data(g, s)$ 는 발췌한 초동자료를, $\Delta data(g, s)$ 는 인접한 초동과의 차이, 그리고 g 와 s 는 수신기와 송신기 위치를 각각 나타낸다. (본 논문에서는 초동차이 계산을 위해서 후방차분(backward difference)를 사용하였는데, 이는 첫번째 source에는 static이 존재하지 않는다는 가정을 한 것이며, 첫번째 source에 static이 존재할 경우에는 전방차분(forward difference) 식으로 초동차이를 구하는 것이 옳다.) 본 논문에서는 인접한 공통 송신원들과의 차이를 계산하여 Figure 4와 같은 결과를 얻었는데, Figure 4에서 볼 수 있듯이 공통 송신원 취합자료들 간의 차이가 명확하게 보여짐을 알 수 있으며, 이러한 인접한 공통 송신원들 간의 차이들 중에서 source static에 의한 영향에 해당하는 것들은 공통 송신원에 대하여 일정한 크기를 보이는 것들에 해당되며, 이러한 부분을 선정하기 위해서는 공통 송신원에 해당하는 차이들의 평균을 다음과 같이 구해 사용할 수 있다.

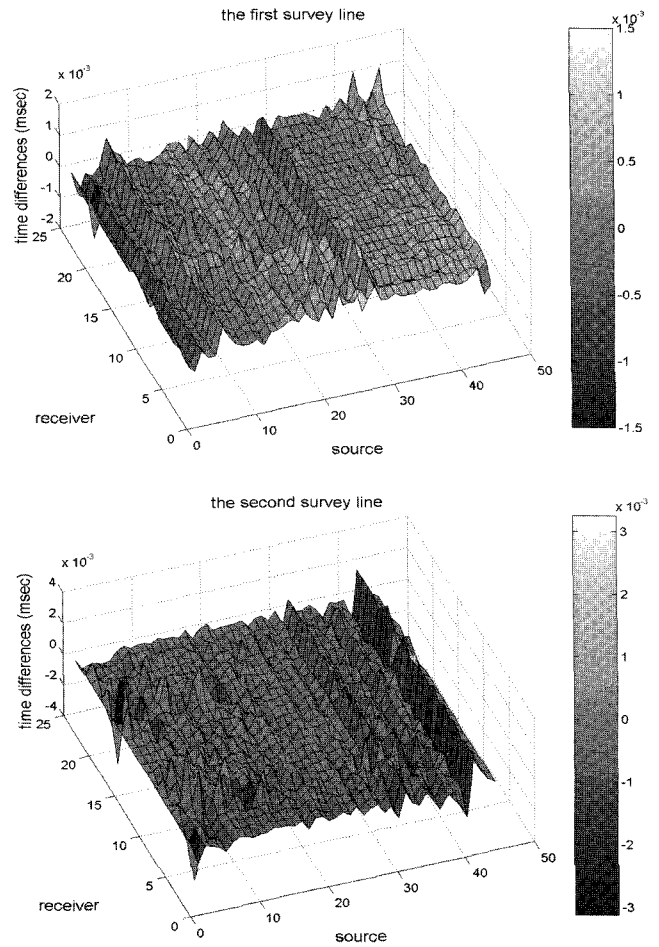


Fig. 4. First arrival time differences along the source direction in the first survey line (upper) and in the second survey line (lower).

$$\overline{\Delta data}(s) = \sum_{g=1}^{ng} \Delta data(g, s) / ng \quad (2)$$

이렇게 얻어진 각 송신원에 해당하는 평균 차이는 Figure 5에서 실선으로 보여지고 있다. Figure 5에서 송신원의 평균 차이는 source static의 영향 뿐만 아니라 속도변화에 따른 발췌된 초동의 송신원 방향으로의 지하매질의 속도변화에 의한 크기 변화도 내포하고 있게 된다. 따라서 source static의 영향에 해당하는 부분을 찾아내기 위해서는 평균차이의 전체적인 경향을 제거한 나머지 부분을 계산해야한다. 본 논문에서는 초동변화의 전체적인 경향을 2차 다항식의 형태로 근사하여 (Figure 5의 파선) 그 초동변화의 경향으로부터의 차이를 다시 계산하였다.

$$\Delta data'(s) = \overline{\Delta data}(s) - fitting(s) \quad (3)$$

여기에서 $fitting(s)$ 는 다음과 같이 최소자승개념으로 초동변화에 근사하는 최적의 2차 다항식을 구한 것이다.

$$0 \approx |(a + bs + cs^2) - \overline{\Delta data}(s)|^2 \quad (4)$$

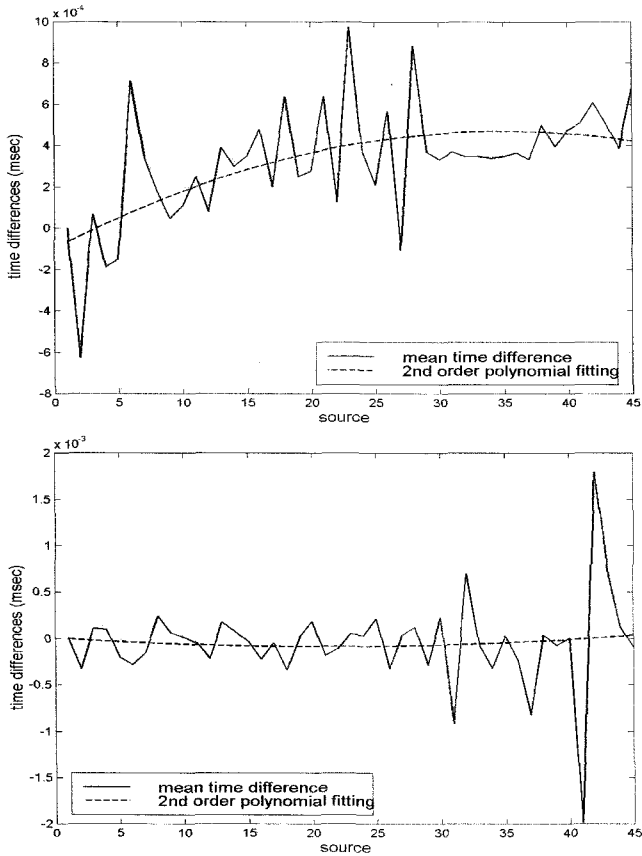


Fig. 5. Average first arrival time differences for each source in the first survey line (upper) and in the second survey line (lower). Dashed line represent the best fitting 2nd order polynomial to the average time differences for each survey.

$$fitting(s) = a + bs + cs^2 \tag{5}$$

이렇게 얻어지는 source static의 영향들은 다양한 크기로 나타나게 되는데, 이를 모두 적용하게 되면 거의 모든 송신원에 대하여 static을 적용하는게 되며, 배경 잡음의 크기를 지정하여 이보다 큰 source static 영향들 만을 선택하여 적용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 본 논문에서는 탄성과 자료의 샘플링간격을 기준으로 해서 이것의 약 3배 정도의 크기 이하에 해당하는 것을 잡음으로 간주하여 이보다 큰 값들만을 사용하였다(Figure 6의 실선). 이와 같은 최대오차허용치의 결정은 자료의 질에 따라 변화될 수 있으며, 적절한 크기는 보정 전과 후의 초동자료를 비교해보면서 결정함이 가장 적절하다고 할 수 있다.

$$\overline{\Delta data'}(s) = \begin{cases} \overline{\Delta data'}(s) & \text{if } > \text{threshold} \\ 0 & \text{if } \leq \text{threshold} \end{cases} \tag{6}$$

이와 같이 구한 값들은 실제 static 값이 아닌 인접한 초동들의 평균적인 차이로서 실제 적용해야 할 static 값은 이를 다시 적

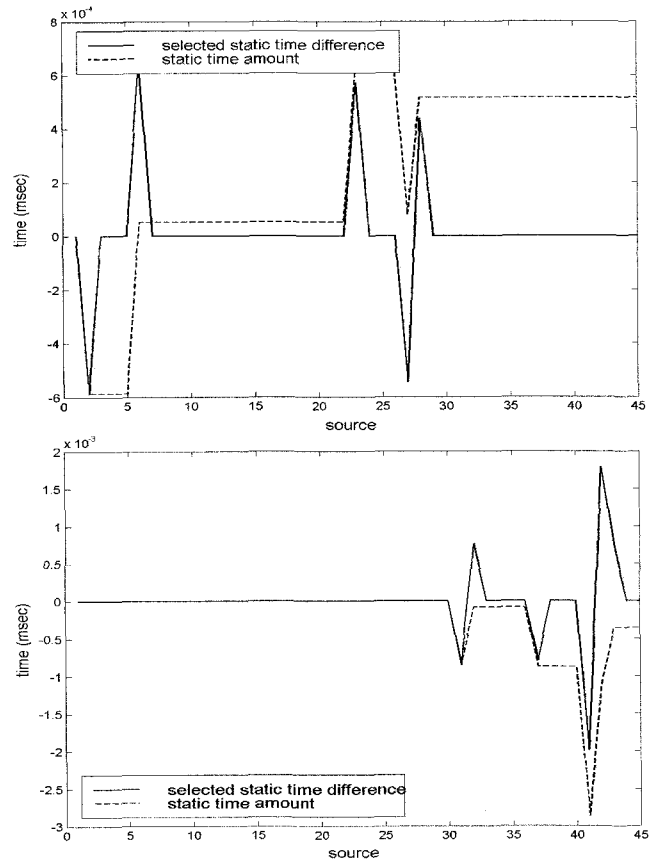


Fig. 6. Thresholded time differences for each source in the first survey line (upper) and in the second survey line (lower). Dashed line represent the source static amount obtained by integrating the differences for each survey.

분함으로써 계산을 할 수 있다(Figure 6의 파선).

$$static(s) = \sum_{is=1}^s \overline{\Delta data'}(is) \tag{7}$$

이상과 같이 얻어진 static 값의 적용은 본래의 발체된 초동으로부터 해당 송신원의 static 값 만큼 다음과 같이 제거해 주게 되며, 이로써 정보정이 수행된다.

$$data_corr(s) = data(s, g) - static(s) \tag{8}$$

Figure 7은 실제 자료에 적용된 결과를 보여주고 있는데, 정보정을 하기 이전의 초동자료인 Figure 3과 비교해 보면 source static 영향으로 의심되던 부분들이 모두 보정되었음을 확인할 수 있다.

알고리즘 요약

마지막으로 본 논문에서 소개하는 시추공 파선 토모그래피에서의 source static 보정 알고리즘을 단계별로 요약해 하면

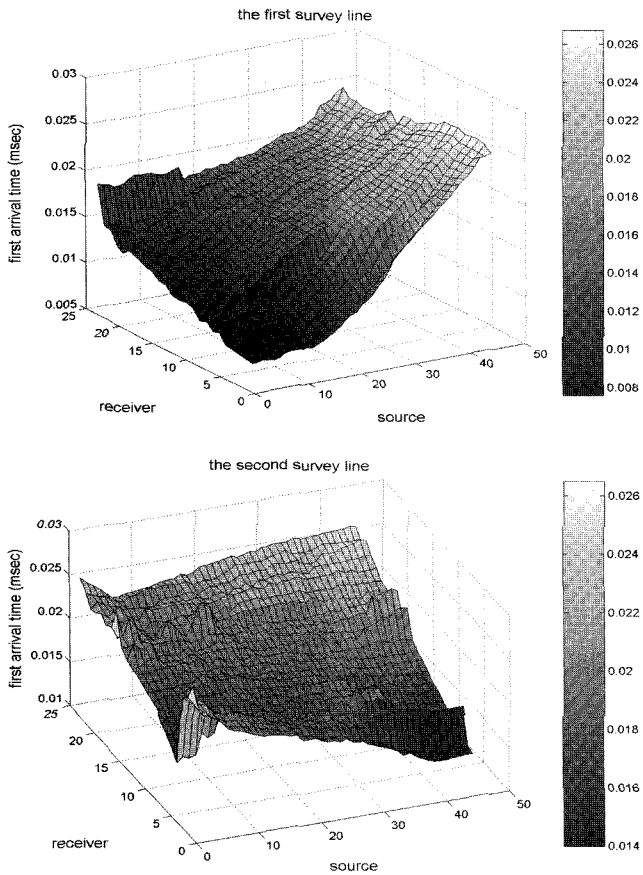


Fig. 7. Source Static corrected first arrival times in the first survey line (upper) and in the second survey line (lower).

다음과 같다.

- step 1: 시추공 자료에서 공통 송신원/수신기 취합자료로부터 초동을 발췌한다.
- step 2: 발췌된 초동들 간의 송신원 방향으로의 차이를 계산한다.
- step 3: 송신원별 초동의 차이의 평균을 구한다.
- step 4: 송신원별 차이에 대한 자료에 적절한 다항식으로

Appendix

```

data=load('picking_time.dat'); % read ascii type picking times
                                %(ng by ns matrix format)
delta_t=0.000125; % trace sampling interval
pick_error = 3. * delta_t % allowable picking time error
poly_order = 2; % polynomial order used to fit

figure; surf(data); rotate3d; % visualize the data in 3D surface
    
```

fitting을 한다.

- step 5: 최적의 fitting 함수와 송신원별 평균 차이와의 차이를 구한다
- step 6: step 5로부터 얻어지는 차이들 중에서 미리 정한 오차 범위보다 큰 값들만을 골라낸다.
- step 7: 이러한 평균 차이들에 대해 적분을 수행하여 실제 오차를 계산한다.
- step 8: 공통 송신원 자료들에 계산된 오차를 적용한다.

이러한 알고리즘의 구현에 대한 보다 명확한 이해를 돕기 위해서 appendix에 matlab에서 구현된 스크립트파일을 첨부하였다.

결 론

본 논문에서는 시추공간 파선 토모그래피에 있어서 source static을 자동으로 보정해주는 알고리즘을 소개하고 있다. 소개된 알고리즘은 발췌된 초동자료의 송신기방향으로의 변화로부터 정보정을 자동으로 계산하는 방법으로서, 해석자의 주관적인 판단에 의존하여 정보정량을 반복적으로 구하는 것보다는 일관되고 정량적인 정보정이 수행될 수 있는 방법이라고 할 수 있다. 실제 자료에 대해 적용해 본 결과 매우 만족스러운 결과를 보였으며, 사용자로 하여금 일관되며 자동적인 정보정 적용으로 인해서 보다 신뢰할 수 있는 속도구조를 얻는데 도움을 줄 수 있을 것으로 예상된다.

사 사

본 연구는 2001년도 한성대학교 교내연구비 지원과제임.

참고문헌

고광범, 이두성, 2002, 최적 토모그램 도출을 위한 시추공간 파선 토모그래피의 사례연구: 한국자원공학회지, 제39권 4호, pp. 266-272.

```

diff_data = zeros(size(data));
static = zeros(1,size(data,2));
ng = size(data,1);
ns = size(data,2);

for i = 2:ns,                                % step 2
    diff_data(:,i) = data(:,i) - data(:,i-1);
end

diff_mean_data = mean(diff_data);           % step 3

static = diff_mean_data;

x = [1:ns];                                  % step 4
[pa,s] = polyfit(x,diff_mean_data,poly_order);
fit_data = polyval(pa,x);

static = static - fit_data;                 % step 5

for i = 1:ns,                                % step 6
    if ( abs(static(i)) < pick_error )
        static(i)=0.;
    end
end

for i = 2:ns,                                % step 7
    static(i) = static(i-1) + static(i);
end

for i = 1:ns,                                % step 8
    data_corr(:,i) = data(:,i) - static(i);
end

figure; surf(data_corr); rotate3d; % visualize the data_corr in 3D surface

fid = fopen('corrected.txt','w');
fprintf(fid,'%12.8f\n',data_corr');
fclose(fid);

```