

수자지진분석에서 지진파와 폭발파를 식별하는 한가지 방법

박치봉, 정경수, 김영일

현재 지진파와 폭발파의 식별분석에서는 여러가지 방법이 제기되고있으나 그에 대한 오차확률이 큰것으로 하여 보다 새로운 방법들이 연구되고있다.

지진파와 폭발파를 식별하는 지표들가운데는 정성지표와 정량지표들이 있다.[1] 수자 지진자료분석방법에서는 지진파 폭발에 대한 1차식별속도가 빠른 반면에 오차가 크고 식별이 명백하지 못한 문제들이 있다. 선행연구[1, 2]에서는 진원기구와 전파경로에서의 차이로부터 지진파와 폭발파의 스펙트르가 차이난다는것을 밝혔지만 정확하게 확정된 지표로 제기된것은 없다.

론문에서는 전국수자지진관측망체계에서 지진파와 폭발파를 정량적으로 식별하기 위하여 출력스펙트르평균주파수비와 선형판별분석법에 기초한 방법을 확정하고 지진파와 폭발파의 P파구역과 S파구역의 출력스펙트르평균주파수비를 비교하여 지진파와 폭발파를 식별하는 한가지 방법을 제기하였다.

수자지진자료분석방법에서 출력스펙트르의 평균주파수는 출력스펙트르분포의 무게중심계산법[2]에 의하여 지진파와 폭발파의 출력스펙트르가 20Hz아래에 기본적으로 집중되어있고 그 이상의 구간에서는 기본출력에 영향을 크게 주지 않는다. 따라서 주파수구간을 20Hz아래로 제한하였다.

자료표본개수가 2^n 이므로 $100/2^n$ 의 간격으로 리산화된 주파수에 대응하는 출력스펙트르의 최대값을 무게값 1로 정하고 리산주파수시계열에 대한 무게평균을 진행하여 평균주파수를 계산하였다. 이때

$$\text{평균주파수} = \frac{\sum_i (Sp_i \cdot f_i)}{\sum_i Sp_i} \quad (1)$$

이다. 여기서 Sp_i 는 i 번째 주파수에 해당하는 무게값, f_i 는 i 번째 주파수이다.

출력스펙트르평균주파수비는

$$(Sp) = \frac{\overline{f_P}}{\overline{f_S}} \quad (2)$$

이다. 여기서 $\overline{f_P}$ 는 P파부분출력스펙트르의 평균주파수, $\overline{f_S}$ 는 S파부분출력스펙트르의 평균주파수이다.

지진파의 출력스펙트르의 평균주파수비를 폭발파와 대비하면 발생기구의 차이로 P파구역과 S파구역에서 출력스펙트르가 집중되는 평균주파수들의 현저한 차이를 가져온다. 스펙트르비의 계산은 분석구역을 P파초동으로부터 S파초동이 들어오기 전까지의 자료구간을 P파의 자료구간으로 설정하고 S파구간은 P파구간길이의 1.5배로 정하며 매 구간에서의 평균주파수를 자동적으로 평가하여 그 비값을 얻는 방법으로 진행하였다. 다음 식별률이 높은 지표들인 초동부호, 진폭비, 에네르기비와 조합하여 선형판별분석방법으로 판별함수를 구하였다.

또한 두 모집단의 표본평균 $\overline{x^{(1)}}$, $\overline{x^{(2)}}$ 을 계산하고 공분산행렬을 구한 다음 지진파와 폭발파모집단에서 각각 뽑은 표본 60건에 대하여 초동부호, 진폭비, 에네르기비, 출력스펙트르의 평균주파수비를 계산하고 그것들의 평균값을 계산하였다. 그리고 지진파 폭발에서 대응하는 지표들끼리 평균값의 차로 얻은 차벡토르를 리용하여련합공분산행렬을 구하였다. 즉

$$S^{(1)} = \frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} \left(x_i^{(1)} - \overline{x^{(1)}} \right) \left(x_i^{(1)} - \overline{x^{(1)}} \right)^T, \quad S^{(2)} = \frac{1}{n_2 - 1} \sum_{i=1}^{n_2} \left(x_i^{(2)} - \overline{x^{(2)}} \right) \left(x_i^{(2)} - \overline{x^{(2)}} \right)^T \quad (3)$$

따라서 련합공분산행렬은 다음과 같이 표시된다.

$$S = \frac{1}{n_1 + n_2 - 2} [(n_1 - 1)S^{(1)} + (n_2 - 1)S^{(2)}] \quad (4)$$

이때 판별추정함수는

$$\hat{L}(x) = x^T S^{-1} \left(\overline{x^{(1)}} - \overline{x^{(2)}} \right) - \frac{1}{2} \left(\overline{x^{(1)}} + \overline{x^{(2)}} \right)^T S^{-1} \left(\overline{x^{(1)}} - \overline{x^{(2)}} \right) \quad (5)$$

이며 판별규칙은

$$\hat{L}(x) > \ln k \Rightarrow x \in \Omega_1, \quad \hat{L}(x) < \ln k \Rightarrow x \in \Omega_2 \quad (6)$$

이다.

$\ln k$ 는 사건이 발생하였을 때 두 모집단이 출현할 확률에 대한 비로서 $k = P_1 / P_2$ 이며 식 (3)에서 (1)은 지진을, (2)는 발파를 의미하며 T 는 전위행렬을 의미한다. Ω_1, Ω_2 는 지진파모집단과 폭발파모집단표시이며 x 는 초동부호, 진폭비, 에네르기비, 출력스펙트르의 평균주파수비로 구성되는 변수행렬 $x = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ 이다. 초동부호가 정(+)이면 1을, 부(-)이면 0을 주고 부호화한 값을 정규화하였다.

관측값 x_{ij} 에 대하여 정규화된 관측값 z_{ij} 는 다음과 같이 표시된다.

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j(\text{최소})}}{x_{j(\text{최대})} - x_{j(\text{최소})}} \quad (7)$$

여기서 $x_{j(\text{최소})}$, $x_{j(\text{최대})}$ 는 j 번째 관측변수의 최소값과 최대값이다. 옷식으로부터 $0 \leq z_{ij} \leq 1$ 임을 알수 있다.

우의 계산공정에 따라 진행한 지진파 폭발관측자료 60건에 대한 계산결과는 표 1과 같다.

우의 계산으로부터 지진파 폭발을 가르는 판별함수는 다음과 같다.

$$L(x) = -3.935x_1 + 1.383x_2 - 3.527x_3 + 5.923x_4 + 1.418 \quad (8)$$

판별함수의 유의성을 F 검정법으로 검정하였다.

F 분포는 자유도가 f_1, f_2 인 χ^2 분포에 따르는 우연량 U 와 V 가 독립일 때 우연량 $F = \frac{U/f_1}{V/f_2}$ 의 분포로서 F_{f_1, f_2} 로 표시한다.

한편 $n_1 + n_2$ 는 총표본화수로서 지진파 폭발자료가 각각 30개이고 자유도는 4개이다. 따라서 f_1 은 4이고 f_2 는 $n_1 + n_2 - P - 1 = 55$ 이므로 유의수준 0.05에 해당하는 F 분포는 $F_{4, 55} = 3.68$ 이다.

판별함수의 유의성결정에서 F 분포에 따르는 통계량 F 는

$$F = \left[\frac{n_1 + n_2 - p - 1}{(n_1 + n_2 - 2) \times p} \right] \times \left[\frac{n_1 \times n_2}{n_1 + n_2} \right] \times D^2$$

이때 $D^2 = \left(\overline{x^{(1)}} - \overline{x^{(2)}} \right)^T S^{-1} \left(\overline{x^{(1)}} - \overline{x^{(2)}} \right)$ 이므로 $F = 3.93$ 이다. 즉 $F = 3.93 > F_{4, 55} = 3.68$ 이므로 판별함수는 $q = 0.05$ 로서 유의하다.

표 1. 지진과 폭발관측자료 60건에 대한 계산결과

구분	초동부호 평균값	진폭비 평균값	에너지 비평균값	출력스펙트르 평균주파수비평균값
지진	0.3	0.455	0.292	0.359
폭발	0.867	0.302	0.5	0.211
차벡토르	-0.567	0.153	-0.208	0.148
합벡토르	1.167	0.757	0.792	0.57
	0.163	-0.001	0.002	0.014
련합공분산	-0.001	0.058	-0.038	-0.011
	0.002	-0.038	0.062	0.012
	0.014	-0.011	0.012	0.044
	6.312	-0.259	0.04	-2.084
거꿀행렬	-0.259	29.088	17.327	2.629
	0.04	17.327	27.356	-3.142
	-2.084	2.629	-3.142	24.904
차	-0.567	0.153	-0.208	0.148
x_1 결수항	-3.935	—	—	—
x_2 결수항	1.383	—	—	—
x_3 결수항	-3.527	—	—	—
x_4 결수항	5.923	—	—	—
상수항	-1.481	—	—	—

x_1 —초동부호, x_2 —진폭비, x_3 —에너지비, x_4 —출력스펙트르평균주파수비

68개의 관측자료에 대하여 적용해보면 65개의 사건이 정확히 판별되고 3개의 사건이 틀리게 판별되었다. 즉 판별률은 95.6%, 오판별률은 4.4%이다.

스지구에서 진행한 폭발파형은 수직향에서 초동부호가 아래로 향하였고 분석층을 통과하면서 전형적인 폭발파형과 다르게 기록되었다. 폭발임에도 불구하고 초동부호가 아래로 향한 원인은 폭발점의 해발고가 관측소보다 높은데 있다. 폭발의 물리적물림새로부터 가까운 거리에서 폭발원이 관측점보다 높은데 있을 때에는 초동부호가 —로 나타난다.

작성한 식별프로그램으로 폭발기록대장과 대조확인한 결과 잘못 평가된 목록에 대한 폭발목록후열결과는 표 2와 같다.

이와 같이 적용결과는 제안된 수법에 의하여 식별이 모호한 사건들을 높은 정확도로 식별할수 있다는것을 보여준다.

표 2. 폭발목록후열결과

잘못된 폭발목록	식별결과	현장폭발기록
1월 13일	지진	폭발없음
5월 2일	지진	폭발없음
6월 28일	지진	폭발없음
7월 29일	지진	폭발없음

맺 는 말

우리가 제기한 방법은 지진파와 폭발파의 진원특성과 전과정로의 특성이 스펙트럼에 반영되는 물리적원리에 기초하여 지진과 폭발을 정량적으로 식별할수 있으므로 파형식별에 효과적으로 리용할수 있다.

참 고 문 헌

- [1] M. Beer et al.; Encyclopedia of Earthquake Engineering, Springer, 661~677, 2015.
- [2] 许忠淮; 识别地震与爆炸的一个新判据, 6, 119, 2012.

주체109(2020)년 3월 5일 원고접수

A Method of Discriminating Seismic Wave and Explosive Wave in a Digital Seismic Analysis

Pak Chi Bong, Jong Kyong Su and Kim Yong Il

We suggested a method to determinate seismic wave and explosive wave, which were based on the power spectra mean frequency ratio and the linear discriminant analyze.

Keywords: seismic wave, explosive wave