

## 연대측정자료를 이용한 단층활동주기 산정 방법 Method of Recurrence Interval Estimation for Fault Activity from Age Dating Data

최원학\*    장천중\*    이종림\*\*  
Choi, Weon-Hack    Chang, Chun-Joong    Lee, Jong-Rim

### ABSTRACT

The estimation of recurrence interval for fault activity and earthquake is an important input parameter for seismic hazard assessment. In this study, the methods of recurrence interval estimation were reviewed and tentative calculation was performed for age dating data which have uncertainty. Age dating data come from previous studies of Ulsan fault system which is a well developed lineament in the southeastern part of Korean Peninsula. Age dating for fault gouges, parent rocks, Quaternary sediments and veins were carried out by several researchers through various methods. Recurrence interval for fault activity was estimated on the basis of the age dating data of minor fault gouge and sediments during past 3Ma. The estimated recurrence interval was about 430-500 ka. Exact estimation of recurrence interval for fault activity need to compile more geological data and fault characteristics such as fault length, amount of displacement, slip rate and accurate fault movement age. In the future, the methods and results of fault recurrence interval estimation should be considered for establishing the criteria for domestic active fault definition.

### 1. 서론

지진의 발생은 주로 단층의 활동에 의한 응력의 표출로서 그 규모에 따라 피해의 정도가 달라진다. 지진에 의한 피해를 줄이기 위해 주요 구조물이나 건축물에 대한 내진설계기준에 따라 시공하여 그 목적을 달성할 수 있으나, 내진설계기준이 되는 지진발생 규모나 확률에 대한 이해가 선행되어야 합리적인 설계기준이 마련되고 경제적인 시공될 수 있을 것이다. 또한 주요 구조물에 대한 지진안전성 평가는 역사 및 계기지진자료를 비롯하여 지진의 규모, 발생빈도 등 지진발생과 관련된 여러 가지 변수를 포함하여 종합적인 평가를 하게 된다. 이들 변수중 하나가 고지진학적 자료와 단층조사자료를 이용한 지진 및 단층의 재발주기로써 과거 선사시대 이전에 활동이 있었던 단층이나 지진의 증거를 찾아 단층의 선후관계, 변위량, 변위속도, 연장성, 암석이나 단층의 연대측정 등을 통해 재발주기를 산정하고, 향후 활동을 예측하는 것이다.

최근 국내에서 양산단층 및 울산단층 주변에서 제4기 단층발견에 따라 단층의 활동성 평가, 최대잠재지진과 재발주기에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 단층 활동성 평가에 있어서 단층운동시기와 반복성이 중요하며 이 논문에서는 단층의 특성중 변위속도, 길이, 변위량, 및 연대측정자료를 이용하여 재발주기 산정방법을 검토하고, 기존 연대측정자료로 재발주기를 산정하였다.

\* 한국전력공사 전력연구원 선임연구원, 정희원

\*\* 한국전력공사 전력연구원 수석연구원, 정희원

## 2. 변위속도를 이용한 재발주기 산정 방법

재발주기(어떤 두 고지진 또는 단층활동간의 시간 간격)는 기본적으로 두 가지 방법으로 산정할 수 있는데, 첫 번째 방법은 여러 번의 단층활동을 결합하여 평균재발주기를 계산하고, 시간간격을 평균화하는 방법과 각 분리된 단층활동을 직접 연대측정한 결과를 이용하는 방법이 있다.

재발주기를 산정하는 기본적인 방법은 평균재발주기를 계산하기 위해 평균 변위속도를 단층활동마다 가정된 변위로 나누는 것이다([1]). 장기적 변위속도 산정은 여러 번의 지진 및 단층 파열에 의해 변위된 퇴적층이나 연대가 결정된 지질구조상에 누적된 변위에 근거하여 이루어진다. 각 활동시 일어난 변위를 산정하기 어렵지만, 대규모 역사지진동안 관찰된 최대 또는 평균변위 또는 지형양상의 일치된 최소변위를 통해 산정할 수 있다.

일반적으로 변위속도는 다음과 같이 계산된다([1]).

$$RI = D/(S-C) \quad (1)$$

여기에서 RI = 평균재발주기 (mean recurrence interval)

D = 사건당 이동량 (displacement during a single, typical faulting event)

S = 지진동시성 변위속도 (coseismic slip rate)

C = 크립변위 속도(creep slip rate)이다.

사건당 이동량과 변위속도의 산정에서 여러 가지 불확실성이 포함되는데 (1) 고지진 변위의 야외 측정 (2) 변위 지형과 퇴적층 연대측정의 오류에서 기인한다. 변위속도 계산에 있어서 이들 불확실성 평가는 중요하다. 예를 들어, 지형이  $5 \pm 0.5m$  변위되고, 연대제한이 25에서 33ka되는 경우를 생각해 보자. 순수 변위의 불확실성은 Gaussian 분포를 따르고, 5m가 최적 변위측정을 나타내고, 측정의 불확실성이 95%라고 가정한다. 이 경우 연대분포가  $\pm 1\sigma$  한계를 갖는다고 가정하면,  $\mu = 29ka$ ,  $\sigma = 4ka$ 이 되며, 변위 속도는 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{\text{Net offset}}{\text{Landform age}} = \frac{5 \pm 0.5 m}{29 \pm 4 ka} \quad (2)$$

동일하지 않은 표준편차를 가진 값에 대한 분할 법칙에 따라([2])

$$t^* \pm \sigma^* = \frac{t_1}{t_2} \pm t^* \sqrt{\left(\frac{\sigma_1^2}{t_1^2}\right) + \left(\frac{\sigma_2^2}{t_2^2}\right)} \quad (3)$$

식 (2)를 식 (3)에 대입하면 다음을 얻을 수 있다.

$$\frac{5 \pm 0.5 m}{29 \pm 4 ka} = 0.17 \pm 0.034 m/ka \quad (4)$$

식 (4)에서 계산된 변위속도는 입력변수와 관계된 불확실성 요소를 유지하게 된다. 식 (4)로부터 변위속도에 대한  $2-\sigma$  제한(0.136에서 0.204m/ka)은 확률분포 95%범위내이고, 식 (2)의 값에서 최대 및 최소로 교차하여 나는 것하고 비슷하다(0.136에서 0.22 m/ka).

각 단층활동마다 변위 산정에 있어 각각의 단층활동내 지형 또는 층 변위의 야외 측정시 불확실성이 포함된다. 이 변위속도를 가지고 전형적인 변위를  $1.5 \pm 0.3m$ 를 일으키고 정규분포를 따른다고 하면 재발주기는 식 (1)을 통해 다음과 같이 계산된다.

$$RI = \frac{1.5 \pm 0.3 m}{0.17 \pm 0.034 m/ka} = 8.82 \pm 2.49ka \quad (5)$$

이 재발 주기는 변위, 지형 연대 및 사건당 변위의 각 변수가 정규분포를 따른다는 가정하에 불확실성이 내재되어 있다. 식 (5)에서 재발주기에 대한  $2\sigma$  한계(3.84ka에서 13.8 ka)는 최대 및 최소 값의 교차 계산보다 상당히 크다(5.88에서 13.23 ka).

이 방법에 의해 계산된 재발주기는 평균값(mean value)이고, 연대측정된 지층을 변위시킨 모든 단층활동 또는 지진의 실제 재발주기를 평균화하는 것이다.

일본의 경우에 지진의 규모( $M_L = (\log L + 2.9)/0.6$ )와 변위속도(S), 단층길이(L)를 이용하여 지진의 재발주기(R)를 다음과 같이 계산한다.

$$\log R = \log(L/S) + 1.9 \quad (8)$$

이 식에 따르면 Class A의 길이 80km, 변위속도 5mm/yr인 활성단층은 규모 8의 지진이 1,300년마다 일어날 가능성을 가지고 있다. Class B의 20km 길이, 변위속도 0.8mm/yr인 활성단층은 규모 7.0의 지진이 평균적으로 2,000년마다 일어난다([3]).

국내에서 연구된 기존의 자료에 의하면 지형변화에 근거하여 단층이나 지형의 평균 변위속도 ([4],[5])를 구한 것이 일부 있으나, 단층활동이나 지진사건에 의한 변위는 역사지진이나 트렌치 등을 통해 직접적인 값을 얻지 못하고 있어 실제적인 적용이 어려운 실정이다. 차후 정밀한 지표단층조사와 트렌치 등을 통해 단층특성이 자세히 알려진다면, 단층의 거동특성 모델을 수립하여 단층 변위에 의한 재발간격예측을 하거나 응력수준변화에 의한 변위 모델을 적용할 수 있으며 해외의 유사사례와 비교하여 국내 지질환경에 맞는 단층재발주기 모델을 구성할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3. 연대측정자료를 이용한 재발주기 산정 방법

단층활동이나 고지진 발생에 대한 시기를 결정하기 위한 암석, 퇴적층, 단층대 물질에 대한 연대측정은 최근 측정기술의 발달과 장비의 첨단화로 정확도가 향상되었고, 그 자료도 축적되고 있다. 단층 활동성 평가를 위한 정밀지질조사와 트렌치 조사시 연대측정을 필수적이며, 이를 이용한 재발주기 산정은 층서학, 퇴적학, 구조지질학, 지형학, 지질연대학 등의 학문간의 학제적 연구가 요구된다. 선사 고지진이나 단층에 대한 연대측정의 주요 목적은 하나의 단층과 층서적으로 관련된 가장 젊은 절단된 퇴적층과 가장 오래된 절단되지 않은 퇴적층의 연대를 측정하여 가능한한 좁게 단층작용의 시기를 밝히는 것이다. 단층대 물질에 대한 직접적인 연대측정을 통하여 단층활동의 정확한 연대가 결정될 수도 있다.

고지진이나 단층의 연대측정을 위한 여러 가지 연대측정기술의 종류를 있으며, 각 방법의 적용성과 한계성은 대상시료와 연대측정범위에 따라 다르다([6], [7]). 단층작용의 연대를 가장 좁은 범위로 결정하기 위하여 다양한 고지진학적 조건에서 연대측정 시료를 어디서 어떻게 수집하는가가 중요하며, 연대측정결과는 각 단층 또는 지역에 대한 지진재발모델의 종류를 결정하는 주요 요소가 된다. 계산된 재발주기의 정밀도는 고지진이나 단층의 연대가 연대오차에 의해 어떻게 범위가 정해지는가에 달려 있다. 변위된 지형이나 단층에 대한 연대측정이 “느슨한(loose)” 연대제한을 하게 된다면 평균 재발주기조차도 정확한 산정을 할 수 없다. 대신에, 변위속도와 사건당 평균변위를 사용하는 방법으로 얻는 것과 마찬가지로 평균 재발 및 허용가능한 재발범위만을 계산할 수 있다.

단층활동연구나 고지진학연구에 있어서 연구 대상단층의 부지 또는 이웃한 단층대간의 단층활동이나 고지진의 동시성(contemporaneity)을 시험할 필요가 있다. 예를 들어, 이웃한 단층분절상의 단층활동이나 고지진 연대가 거의 같은 것으로 나타난다면, 비정상적으로 큰 지진원 크기(dimension)와 규모(magnitude)를 가진 하나의 다중-분절 파열을 나타낼 수 있고 단층활동의 횡수도 제한할 수 있다. 여러 지점에서 규명된 고지진이 동일한 사건이었던지 시험할 수 있다면, 단층 분절과 거동모델을 검증할 수 있다. 복잡한 단층의 운동학적 특성을 이해하기 위하여, 주단층과 부수단층(subsidiary fault)이 항상 동시에 파열되는지를 아는 것이 도움이 된다. 일반적으로, 두 개의 연대측정의 확률분포가 얼마나 겹치는지에 근거하여 이들이 동일하다고 간주할 수 있는지 시험한다([2]). 예를 들어, 주어진 사건수평 상에서 숫자 연대가 가우스분포(Gaussian distribution)을 따른다고 가정하면, 두 연대가 가지는 평균과 표준편차의 겹침을 비교하여 "Z-통계(Z-statistics)"을 이용할 수 있다.

$$Z = (T1 - T2) / \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (9)$$

여기에서 T1 = 오래된 단층의 평균연대

T2 = 젊은 단층의 평균연대

$\sigma_1$  = T1의 표준편차

$\sigma_2$  = T2의 표준편차

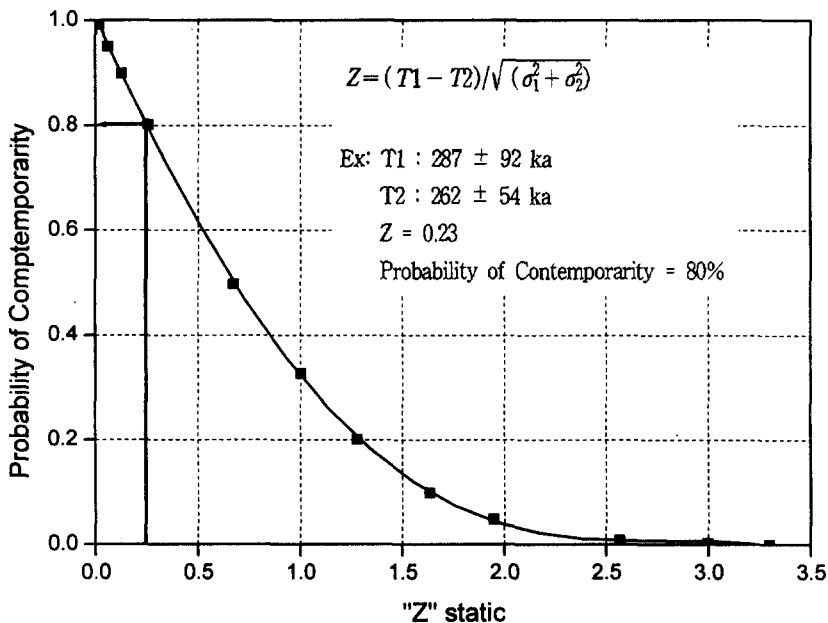


그림 1 Z-통계 함수에 의한 연대측정 오차범위를 고려한 동시성 확률계산. 두 개의 연대측정자료의 평균과 오차범위에 대해 Z-통계를 이용하여 동시성 확률을 결정할 수 있는데, 그림내 연대자료는 80%의 확률로 동시성임을 보여줌.

평균연대간의 차이(분자)가 평균된 표준 편차(분모)에 비하여 작아질수록, 동일한 집합군에서 도출된 연대일 가능성이 커진다. 그림 2는 울산단층 주변의 소단층(그림 3의 A)에서 측정된 단층연대로서 Z 통계의 함수로서 동시성의 확률 그래프를 보여주고 있다. 동일한 단층분절에서 측정된 단층 연대는 각각  $287 \pm 92$  ka와  $262 \pm 54$ ka 이다. 이 두 연대에 대하여 계산된 Z 통계는 0.23으로 두 연대간 동일한 사건일 확률은 80%이다.

#### 4. 단층 연대측정자료를 이용한 재발주기 산정

단층재발주기 산정에 이용한 연대측정자료는 울산단층 주변의 제4기 소단층에 대해 연구된 자료를 이용하였다([8]). 선정된 4개의 소단층에 대한 연대측정방법과 자료에 대한 신뢰성과 지질구조 해석, 운동시기나 횡수에 대한 논란이 있고, 단층의 길이, 폭, 변위속도, 변위량 등에 대한 단층 특성도 자세히 알려지지 않았지만([4],[5],[8]), 각 소단층은 제4기에 단층활동이 있었으며 수 km이내 범위에 위치하고 있어 동일한 단층활동 영역에 속한다고 가정하고, 각 연대측정자료의 신뢰성과 가중치는 별도로 고려하지 않고 분석하였다.

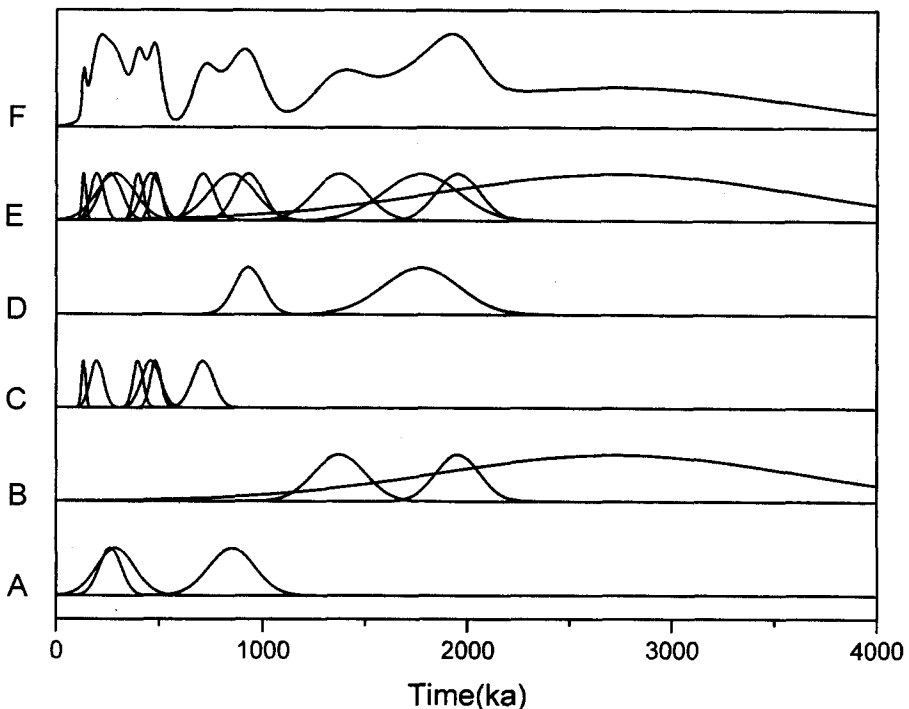


그림 2 울산단층 주변 소단층의 연대측정자료의 시간적 분포. A, B, C, D는 소단층의 연대 측정자료를 오차범위와 함께 도시한 것이며, E는 모든 연대측정자료를 시간축에 도시하였음. F는 연대측정자료의 확률이 동일하다는 가정하에 시간축에 합산하였음.

각 단층에 대한 구체적인 위치와 지질학적 특성은 이미 기술되어 있어([4],[5],[8]) 여기에서는 자세한 설명을 하지 않았으며, 연대측정자료도 시간축에 평균연대와 오차범위만 고려하여 임의로 배열하였다. 4개 단층에 대한 연대측정자료는 평균과 오차범위를 고려하여 4,000ka 기간의 시간축에 그림 2에 도시되어 있으며, 단층 A에서 3개, B에서 3개, C에서 6개, D에서 2개로 총 14개를 이용하였다.

그림 2의 단층 B와 D는 비교적 분리된 단층연대를 보이고 있으나, 단층 A와 C에서는 상당히 중첩되어 나타난다. 단층 A에서 겹치는 단층연대의 동시성을 계산해 보면,  $Z=0.23$ 으로 약 80%의 확률로 동시에 일어났을 가능성을 보여준다. 단층 C에서는 왼쪽부분의 겹치는 부분에서  $Z=1.91$ ,  $P=5\%$ 를 보이나, 중앙부의 겹치는 구간에서 인접한 3개의 연대측정자료간에는 각각  $Z=1.21$ ,  $P=25\%$ 와  $Z=0.416$ ,  $P=68\%$ 를 나타낸다. 단층 A와 단층 D의 비슷한 시기의 연대측정자료간 동시성은  $Z=1.12$ ,  $P=30\%$ 로 나타나고 있다. 이러한 결과를 보면 여러 단층에서 측정된 단층연대가 어느 정도 동시성을 가지고 있고 측정오차를 고려할 때 동일한 시기에 단층활동이 있었음을 추정할 수 있다.

그림 2의 E에서 겹치는 구간을 제외하고 16개 자료에서 12개의 peak를 확인할 수 있는데, 이를 연대측정분석 범위인 3,000ka구간으로 나누면 약 250ka가 된다. 하지만 이들을 종합하여 확률을 더하여 peak를 구해보면 6-7개가 구해지고 3,000ka에 대해서는 428ka와 500ka의 주기를 보인다.

4개 단층의 연대측정자료만 이용하여 활동주기를 산정할 때, 이용된 자료의 수에 의해 peak의 수가 결정되므로 좀 더 많은 자료를 이용하는 경우 그림 2의 E에서 peak는 더 늘어나지만, 단층계 내에서 단층활동이 상호연관되어 있었다면 그림 2의 F에서는 좀 더 집중된 주기를 나타낼 것으로 보인다.

	Present			
	Pre-Historic	Historical	Near future	Further future
Fault A	□	□	■	
Fault B	□		■	
Fault C	□	□ □		□
Fault D	□ □			□

그림 3 시간규모에 대한 단층활동주기와 장래 활동가능성에 의한 위험도 관계([3]으로부터 수정 편집)

지진이나 단층활동의 장기적인 예측은 장래에 일어날 수 있는 지진이나 단층활동의 확률을 평가하는 것으로 일반적으로 역사시대동안 대규모 지진이 발생한 지역은 향후 대규모 지진에 대해 높은 가능성을 가진다. 하지만, 역사시대동안 대규모 지진이 발생한 안정대륙내 활성단층은 가까운 장래에 지진발생 가능성이 낮는데, 이러한 지진은 보통 역사시대보다 긴 재발주기를 가지기 때문이다(그림 3 Fault C). 이에 비해, 역사시대동안 운동기록이 없는 단층은 장래 활동가능성이 높

은데, 이런 단층은 긴 휴지기가 끝나가고 있기 때문이다(그림 3의 Fault B). 재발주기가 아주 긴 경우(그림 3의 D)는 지질학적 환경변화에 따른 응력변화에 의한 단층활동성이 제어된다. 짧은 역사지진과 재발주기가 길지만 휴지기가 끝나는 단층의 활동성에 주의하여야 한다.

단층이나 지진의 활동주기 산정이 장래의 지진위험성을 평가하는 데 중요한 요소가 되며, 평균 재발주기(R) 뿐만 아니라 가장 최근의 활동시기를 고려하여야 한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 단층활동 재발주기 산정에 관한 방법을 검토하고, 그 한계와 필요한 자료에 대하여 고찰하였다. 단층의 변위량과 변위속도를 이용한 단층활동 재발주기는 현재의 울산단층 동측에 분포하고 있는 소규모 제4기 단층노두에서 측정된 연대측정결과를 이용하여 단층활동주기를 시험적으로 산정하였다. 산정결과 단층활동의 주기는 약 430-500ka이었다. 단층활동에 대한 연대측정자료의 불확실성을 고려하여, 한 단층계내에서는 단층활동의 동시성 확률을 계산하여 상호 연관성을 평가하고 단층운동 횟수를 산정할 필요가 있다. 향후 국내 원전부지에 적용될 활성단층 기준을 수립시 단층 변위속도와 연대측정결과를 이용한 단층활동의 주기성을 참고하여 원전의 안전성을 보장하며 경제성을 확보할 수 있는 기준이 마련되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기 계획사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 6. 참고문헌

- [1] R.E.Wallace,(1970), Earthquake Recurrence Intervals on the San Andreas Fault, Geological Society of America, Bulletin, 81, 2875-2890.
- [2] A.A.Geyh and H. Schleicher, (1990), Absolute Age determination, Springer and Verlag.
- [3] The Research Group for the Active Faults of Japan, (1992), Maps of Active Faults in Japan with an Explanatory Text, pp.73.
- [4] Astumasa Okada, (1999), "Yongsan and Ulsan Active Fault Systems in the Southeastern Part of Korean Peninsula", Korea-Japan Geomorphological Conference Proceedings, pp. 13-15.
- [5] Astumasa Okada, et al., (1998), "Active Fault Topography and Fault Outcrops in the Central Part of the Ulsan Fault System, Southeast Korea, Journal of Geography, 107(5), pp. 644-658(in Japanese with English Abstract)
- [6] G.A. Wagner, (1998), Age Determination of Young Rocks and Artifacts, Springer-Verlag, pp. 466.
- [7] U.S.NRC,(1997), Dating and Earthquakes : Review of Quaternary Geochronology and its Application to Paleoseismology, NUREG/CR 5562.
- [8] 최위찬 외,(2000), "신기지각변형연구", 한국자원연구소, 과학기술부, pp. 277.