

지각변동 파라미터의 정밀계산을 위한 2차원 필터링 기법의 적용 Application of Two Dimensional Filtering Technique for the Precision Calculation of Crustal Deformation Parameters

윤 홍 식*
Yun, Hong Sik

요 旨

본 논문에서는 신·구 측지기준점 측량성과를 이용하여 지진활동과 지각운동에 의한 우리나라의 일반적인 변형의 패턴을 조사하기 위한 것으로서 2차원 필터링기법을 적용하여 변형 파라미터들을 계산하였다. 2차원 필터링을 적용하여 계산된 변형 파라미터들중에서도 측량오차를 고려하여 최대전단 변형률과 주응력의 방향만을 고려한 결과로는 최대전단변형률의 평균속도는 0.12 $\mu\text{/yr}$, 주응력 방향은 N80°E로 나타났다.

ABSTRACT

This paper deals with the application of two dimensional filtering technique for strain calculation using old and new geodetic data, and discusses the characteristics of general strain pattern in terms of seismic activity and tectonics. The mean rate of maximum shear strain is 0.12 $\mu\text{/yr}$. The mean direction of principal axes distribution of the compression is about N80°E.

1. 서 론

재래식 측지측량 방법은 오랜 동안 지각변동, 빙하운동 및 지진으로 인한 영년변화 등과 관련된 지진연구에서 중요한 역할을 담당하여 왔는데 그 이유는 측량결과를 이용하여 지각변동의 속도, 방향 및 공간적인 특성을 결정할 수 있으며, 또한 그 원인을 밝히는데 있어서도 중요한 단서를 제공하여 주기 때문이다.

20C 초부터 측지측량 방법에 의한 지각변동연구는 큰 규모의 지진이 자주 발생하는 일본과 미국의 지진연구와 연관되어 부분적으로 수행되어 왔으나 최근 들어 보다 활발하게 사용되고 있다. Rikitake(1982)는 반복 측정된 측지측량 결과를 사용하여 지진활동과 관련된 수평변형률 정보를 추출할 수 있는 방법을 최초로 발표하였으며, 이 후로 거리와 방향 같은 기하학적인 양들을 재 측정하여 지역적인 규모의 지표면 변동량을 결정하는 방법들이 지진예지 연구에서 선구자적인 역할을 하게 되었다.¹⁾

지역적인 규모의 지각변동연구는 일본의 서부지역²⁾과

Kanto-Tokai지역³⁾에서 국가 기준점인 삼각점을 반복 관측하여 수행하였는데 기본형태인 삼각형을 사용하여 변형패턴을 결정하였으며, 또한 고정점과 관련된 변동량을 결정하였다. Australia의 Wellman(1983), New Zealand의 Bibby(1975)와 Reilly(1989)에서도 유사한 연구가 수행되었으며, Reilly는 반복 관측망의 동시망 조정모델에 Continuum Deformation 모델을 적용하여 변형률과 휨을 결정하였다.

현재 지각변동조사는 범 지구위성 측위시스템(GPS), 초 장기선 간섭계(VLBI) 및 Satellite Laser Ranging(SLR)과 같은 우주 측량기술의 도입으로 인해 급속하게 발전하여 대륙간의 지각판의 운동 및 화산활동의 실시간 모니터링 등 다양하게 적용되고 있다.

한반도 지역은 환태평양 지진대 중 지진활동이 매우 활발한 일본열도에 가까이 위치하여 있지만 태평양 지각이 아시아 대륙지각 밑으로 충돌, 침강하는 메커니즘의 직접적인 영향을 받지 않아 지진활동이 활발하지 않은 편이다.¹⁾ 또한, 우리나라는 18C말부터 소수의 매우 미약한 피해지진이 발생하였을 뿐, 파괴적인 지진이 발생한 경우는 없기 때문에 한반도에서는 지진재해로부터 안

*성균관대학교 건축·조경·토목공학부 조교수

전하고, 또한 지질학적인 관점에서도 안정된 구조라고 알려져 왔다. 이러한 이유로 우리나라에서 지각변동 연구에 거의 주의를 기울이지 않았다. 그러나 삼국사기, 조선왕조실록, 증보문헌일기 등과 같은 역사적인 기록에 의하면 6C~7C, 13C 및 16C~18C에 많은 파괴적인 지진이 발생한 기록이 있음을 Kim과 Shu(1977)에서 지적하고 있다. 역사적 자료와 근대적인 지진관측기록을 근거로 지진의 발생 빈도를 살펴보면 북한의 경우, 평안남도 와 황해도, 남한의 경우에는 경상북도와 충청남도에 집중되는 것을 볼 수 있는데 이러한 사실로 보아 남한에서는 경상북도와 충청남도의 측지 기준점들의 위치변화가 있다는 것을 예측할 수 있다.

본 연구에서는 조선토지사업에 의하여 1910년부터 1915년간에 설정된 측지측량 성과와 국립지리원에서는 1975년부터 1994년까지 전국에 균등하게 배점된 1,200여 점의 1등 삼각점과 2등 삼각점을 기초로 하여 재 설정³⁾ 한 정밀 1차 측지측량 성과를 기초로 하여 과거 80년간의 우리나라의 지각의 변동량을 계산하였으며, 그 변동량을 표시하는 변동파라미터의 정밀한 계산을 위하여 2차원 Filtering기법을 적용하였다.

2. 지각변동의 이론

2.1 측지학적인 방법에 의한 지각변동연구

측지학적인 방법으로서 삼각측량과 삼변측량 방법에 의하여 반복 관측된 측지측량 자료들로부터 계산되는 수평 변동량은 지각변동과 지진에지 및 화산활동 등을 조사하는 데에 매우 적합한 것으로 평가되어 왔다. 지각변동을 조사하기 위한 측지측량 성과는 일반적으로 토지의 국부적인 변형을 나타내는 수평곡으로써 표현하거나 삼각점의 변동벡터를 추정하여 표현하는데 이 방법들은 수평 지각변동에 관한 전체적인 양상을 매우 효과적으로 표현할 수 있는 방법들이다.

측지학적인 방법에 의하여 지각의 변동량을 조사하는 일반적인 방법은 (1) 수평각, 거리 등을 반복적으로 측정하는 방법, (2) 여러번의 관측 Epochs에서 관측된 수평각과 거리를 사용하는 방법, (3) 조정된 좌표로부터 변동벡터를 구하는 방법, (4) 조정모델의 모든 파라미터들을 이용하는 방법들이 있다. 방법 (1)은 직접적으로 결과를 얻을 수 있는 방법으로서 측정치의 변화량으로부터 변형을 텐서 성분들을 구할 수 있는 방법이다. 이 방법은 측

정치에 포함된 우연오차들로 인하여 불규칙한 양상의 결과를 얻을 수 있으므로 Smoothing방법을 이용하면 보다 좋은 결과를 얻을 수 있다. 변형률의 정확도는 반복 관측된 관측치의 정확도에 따라서 결정된다.

방법 (2)는 방법 (1)에서 직접 측정된 값이나 관측의 정확도를 사용하는 대신 조정량과 분산-공분산(Variance-Covariance)값들을 사용한다. 이 방법은 동일점에 대하여 관측을 실시하지 않은 경우에 사용할 수 있으며, 추정치의 정확도는 조정된 양에 대응하는 분산-공분산값으로부터 구할 수 있다. Welsch(1983)는 변형 관측망이 구성된 지역에 대하여 자세한 지각변동의 양상을 얻기 위하여 유한요소법을 적용하였다.

방법 (3)은 2회의 관측 Epoch로부터 얻은 좌표값의 차이인 변동벡터 (u, v)를 변형을 텐서 성분과 회전성분 w의 함수로 표시하는 방법인데 변형률텐서 성분들은 최소 구속조건을 전체 변형 관측망에 사용하여 별도로 구할 수 있으며, 회전성분은 방위각을 반복 관측한 경우에만 결정할 수 있다. 방법 (4)는 조정모델에 있는 모든 변형 파라미터들이 포함되는데 변형 파라미터들과 좌표들을 동시에 얻을 수 있는 방법으로서 각 관측치의 관측 시간이 대응하는 관측 방정식에 포함될 수 있기 때문에 연속변형모델을 사용할 수 있다. Reilly는 Taylor의 급수 전개로서 변동벡터를 표현하였고, 대응하는 계수들을 망의 조정으로부터 결정하였다. 이 방법은 변형 파라미터들을 고차항의 다항식으로 표현할 수 있기 때문에 휨과 같은 변형을 파라미터도 얻을 수 있다.

이와 같이 다양한 형태의 반복 관측치들을 사용하여 여러 가지 변형을 파라미터들을 구할 수 있는데 표 1은 2차원의 관측치들로부터 결정할 수 있는 변형률 파라미터들의 결정성을 표시한 것이다.

모든 변형률 파라미터들은 Strain미터나 거리의 반복 관측치들로부터 구할 수 있으며, 반복 관측한 방위각이나 수평각들은 전단변형률과 주 변형률의 방향을 구하는데 사용할 수 있다.²⁾

표 1. 2차원 변형 파라미터의 결정성

반복 관측치	면적 변화량	전단 변형률	주변형률	주변형률의 방향	회전 성분
거리	✓	✓	✓	✓	
Strain미터	✓	✓	✓	✓	✓
방위각		✓		✓	
수평각		✓		✓	

2.2 측지선의 변형을 계산

변형률을 표시하는데 있어 다소 혼동이 있으므로 Jager (1964)의 2차원 극소변형률 공식을 표시하면 다음과 같다.

$$E_{\alpha} = \frac{dS}{S} = E_{xx} \cos^2 \alpha + \gamma_{xy} \cos \alpha \sin \alpha + E_{yy} \sin^2 \alpha \quad (1)$$

$$\tan 2\alpha_m = \frac{\gamma_{xy}}{(E_{xx} - E_{yy})} \quad (2)$$

여기서 S 는 변장, dS 는 방위각이 α 인 선의 변화량이고, E_{xx} , E_{yy} 및 γ_{xy} 는 변형률 성분들이다. 또한, α_m 은 주 변형률의 방위각이다.

40 km 정도의 거리에 대하여 변형률이 0.1 μ 의 정확도를 가진 E_{α} 를 계산하기 위하여는 신·구 측량결과간의 좌표차이에서 1 mm의 정확도를 가지는 dS 의 계산이 필요하므로 dS 를 계산하기 위해서 Rapp(1979)이 제시한 (3)식과 같은 측지선의 미분식을 사용한다.

$$dS = -M_2 \cos \alpha_{12} d\phi_2 - M_1 \alpha_{21} d\phi_1 - N_2 \cos \phi_2 \sin \alpha_{21} (d\lambda_2 - d\lambda_1) \quad (3)$$

여기서 $d\phi_1$, $d\lambda_1$ 과 $d\phi_2$, $d\lambda_2$ 는 각각 1점과 2점에서 경·위도의 미소 변화량을 표시한다. α_{12} 는 1점에서 2점까지의 방위각이고, α_{21} 은 2점에서 1점까지의 방위각이며, M_1 , M_2 와 N_1 , N_2 는 각각 1점과 2점의 자오선 곡률반경과 묘유선 곡률반경이다.

Sato(1984)는 보다 간략화된 Gauss의 증위도공식을 사용함으로써 정밀1차 측지망의 좌표로부터 S 와 α 를 계산하였다.

$$S \cos(\alpha + d\alpha/2) = M_m d\phi \cos \phi_m d\lambda/2 \quad (4)$$

$$S \sin(\alpha + d\alpha/2) = N_m \cos \phi_m d\lambda \quad (5)$$

여기서 $\alpha = (\alpha_{12} + \alpha_{21})/2$, $d\alpha = d\lambda \sin \phi_m$, $\phi_m = (\phi_1 + \phi_2)/2$, $d\phi = (\phi_2 - \phi_1)$ 및 $d\lambda = (\lambda_2 - \lambda_1)$ 이다. N_m 은 각각 ϕ_m 에 대응하는 곡률반경이다. 위 식에서부터 추정된 S 와 α 의 오차는 80 km M_m 의 측지선에 대하여 2 m와 10"로 추정되었다. 이것은 변형률 계산을 위하여 충분히 정확한 값이다.^{4,16)}

2.3 변형률 성분들의 계산

그림 1의 평면상에서 탄성변형으로 인하여 2점 P, Q가 P', Q'로 이동을 하였다면 x방향 및 y방향의 변형은 다음과 같다.

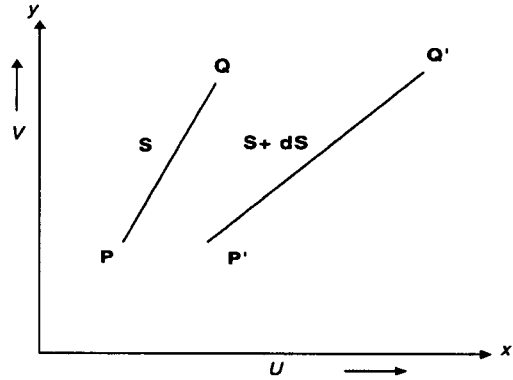


그림 1. 탄성변형으로 인한 x-y평면상에서의 두 점 P, Q의 변동

$$\begin{aligned} u_Q &= u_P + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy \\ v_Q &= v_P + \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\frac{\partial u}{\partial x} = E_{xx}$, $\frac{\partial v}{\partial y} = E_{yy}$, $\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial y} = \gamma_{xy}$ 이다.

$$\epsilon = E_{xx} \cos^2 \theta + \gamma_{xy} \cos \theta \sin \theta + E_{yy} \sin^2 \theta \quad (7)$$

$$\gamma = (E_{xx} - E_{yy}) \sin 2\theta + \gamma_{xy} \cos 2\theta \quad (8)$$

ϵ 은 θ 의 함수로서 ϵ 이 최대 또는 최소의 값을 가지는 θ 를 찾을 수 있다.

$$0 = \frac{d\epsilon}{d\theta} = (E_{yy} - E_{xx}) \sin 2\alpha + \gamma_{xy} \cos 2\alpha \quad (9)$$

위 식으로부터

$$\tan 2\theta = \frac{\gamma_{xy}}{E_{xx} - E_{yy}} \quad (10)$$

이고, 식 (7)은 삼각함수의 관계로부터 아래와 같이 표시된다.

$$\epsilon = \frac{1}{2}(E_1 + E_2) + \frac{1}{2}(E_1 - E_2) \cos 2\theta \quad (11)$$

$$\gamma = (E_1 - E_2) \sin 2\theta \quad (12)$$

주 변형률의 크기는 Mohr의 원으로부터 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$E_1 = \frac{1}{2}(E_{xx} + E_{yy}) + \frac{1}{2}\sqrt{(E_{xx} - E_{yy})^2 + \gamma_{xy}^2} \quad (13)$$

$$E_2 = \frac{1}{2}(E_{xx} + E_{yy}) - \frac{1}{2}\sqrt{(E_{xx} - E_{yy})^2 + \gamma_{xy}^2} \quad (14)$$

식 (10)으로부터 주 변형률의 방향 θ 는

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\gamma_{xy}}{E_{xx} - E_{yy}} \quad (15)$$

식 (12)에서 $\sin 2\theta = 1$ 일 때에 최대 전단변형률(maximum shear strain)과 면적변화률(dilatation)은 각각 다음과 같다.

$$\gamma_{\max} = E_1 - E_2 \quad (16)$$

$$\Delta = E_1 + E_2 \quad (17)$$

식 (16)에서는 측정오차가 소거되는 장점이 있으나 식 (17)은 측정오차가 포함되어 신뢰성이 떨어진다.

3. 지각 변동량의 계산

새로이 설정된 정밀1차 측지망은 구 삼각망의 175점의 정상점을 포함하고 있으므로 본 논문의 목적에 타당한 충분한 정확도를 가진다면 신·구 측지측량 결과의 좌표차이에서 수평변형률을 계산할 수 있다. 구 삼각점의 정확도는 망조정의 차수에 따라 다르다. 일반적으로 IV등급점의 오차는 I등급점의 오차보다 2, 3배 크므로 변형률계산에서는 I, II등급의 정확도와 동일한 정확도의 삼각점을 이용하는 것이 필요하다.⁴⁾ 순차조정의 차수를 알 수 있는 자료가 없기 때문에 변형률 계산을 위하여 다음과 같이 자료처리를 실시하였다.

정밀1차 기준점망은 면적이 약 4,000 km²인 브락을 전국에 걸쳐 18개 브락으로 구분하였고, 각 브락에서 정확도가 높은 점들을 선택하여 변형률 계산을 실시하기 위하여 PPGN을 포함하는 정상점들에 2차원 수치 필터링을 적용하였다. 그림 2에 표시한 바와 같이 최소자승법에 의하여 평균변형률 성분들을 계산하기 위하여 각 브락에서 필터링을 거친 정상점들 중에서 7~9개의 변장으로 구성된 망을 형성하였다. 브락별로 최소 6개의 정상점이 포함되도록 하였으나 정상점이 6개이하인 브락도 있다. 변장의 선택기준은 변장이 40~60 km인 변장들 중에서 방향이 균등한 각도로 분포되도록 하였다. 이러한 기준은 몇 차례의 시험적인 계산을 실시한 후에 구 삼각점의 좌표오차의 영향을 최소화할 수 있도록 결정하였다.

3.1 2차원 필터링

x-y평면의 2차원 탄성변형을 고려하여 그림 1에서 점 P'와 Q'를 각각 탄성변형으로 인한 점 P, Q를 대신하는

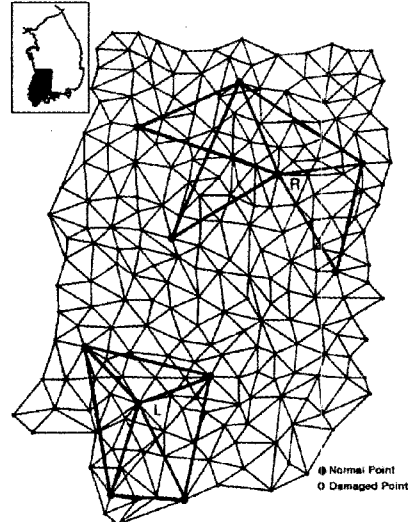


그림 2. 최소자승법에 의하여 변형률을 계산하기 위하여 사용된 브락의 예(R, L 브락)

점이라 하면 Q'의 x, y 변형성분 u_Q 와 v_Q 를 표시할 수 있다. P점을 원점으로 하는 새로운 X-Y좌표를 설정하였을 때에 u_Q , v_Q 의 오차 ϵ_u , ϵ_v 를 고려하여 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} u_Q + \epsilon_u &= a + bX + cY \\ v_Q + \epsilon_v &= d + eX + fY \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 $u_P = a$, $v_P = d$, $\partial u / \partial X = b$, $\partial u / \partial Y = c$, $\partial v / \partial X = e$, $\partial v / \partial Y = f$ 이다.

이 식을 이용하여 u_Q , v_Q 의 회귀면을 최소자승법을 이용하여 다음식으로 표시할 수 있다.

$$Z = A + BX + CY \quad (19)$$

A, B, C는 각 브락의 정상점의 신·구 측량결과로부터 변동벡터를 이용하여 구한다. 2차원 필터는 다음과 같이 ± 0.25 m의 밴드폭을 조정함으로써 구한다.

$$\begin{aligned} Z_1 - 0.25 &\leq u \leq Z_1 + 0.25 \\ Z_2 - 0.25 &\leq v \leq Z_2 + 0.25 \end{aligned} \quad (20)$$

밴드폭은 E_{α} 가 40 km 정도인 경우에 6μ 의 변형률내에서 ϵ_u 와 ϵ_v 의 영향을 고려하여 결정된다. 예로써 그림 3은 브락 E에서 정상점의 변동벡터를 표시한 것이다.

그림 4는 브락E에 필터링을 적용한 결과를 표시한 것이다. 여기서 ●로 표시된 점들은 필터링을 통과한 점들이고, ○로 표시한 점들은 필터링을 통과하지 못한 점들을

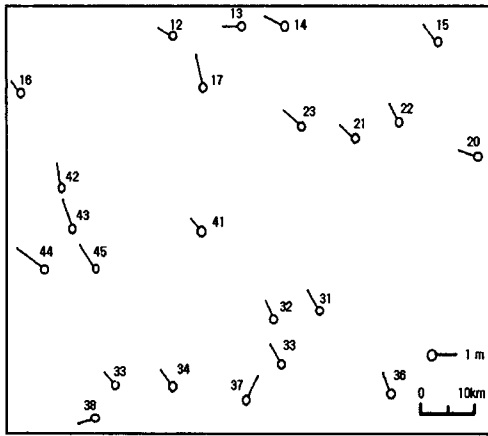


그림 3. 브릭E에 필터링을 적용하기전의 정상점들의 변동 벡터

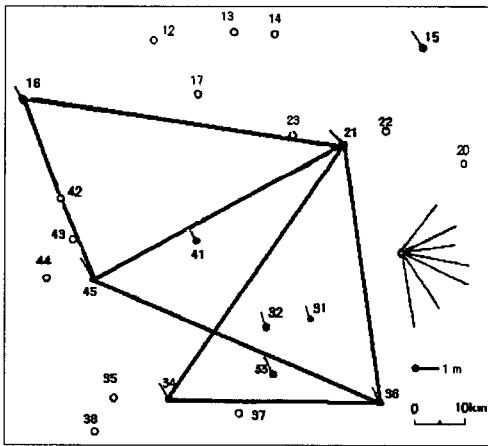


그림 4. 필터링을 적용하여 얻은 결과

표시한 것이다. 굵은 실선은 전술한 기준에 따라서 변형을 계산을 위해 선택한 것이다.

표 2는 그림 4에 대응하는 필터링의 수치적 계산예를 표시한 것이다. 여기서 V_x , V_y 는 벡터 V 의 x , y 성분이다. 표에서 첫째 행의 O표시는 필터를 통과한 점들을 나타낸다.

3.2 한반도 지각의 수평변형률

본 연구에서는 그림 2와 같이 각 브릭에 7-9개의 변장으로 구성된 망을 전국에 걸쳐 18개를 구성하고, 최소자승법을 적용하여 변형률 성분들을 계산하였다. 변장의 수는 정확도와 변형률 계산의 효율성을 고려하여 결정하였다. 조정된 변형률의 표준오차는 $1/(N-3)^{0.5}$ 에 비례하며,

표 2. 브릭E에 필터링을 적용한 후의 결과

No.	x (km)	y (km)	V (cm)	Az (°)	V_x (cm)	V_y (cm)	Z_1 (cm)	Z_2 (cm)	Z_1-V_x (cm)	Z_2-V_y (cm)
12	4.9	9.3	64298	-56.6	30.1	-59.5	62.5	-3.0	32.4	
13	6.3	9.5	79266	-78.8	-5.5	-59.4	59.2	19.4	64.7	
14	7.2	9.6	102301	-87.4	-52.5	-59.3	57.1	28.1	4.6	
○ 15	10.6	9.3	96324	-56.4	74.2	-57.9	50.8	-1.5	-23.4	
○ 16	1.6	8.0	71326	-39.7	58.9	-58.4	72.4	-18.7	13.5	
17	5.6	8.3	147352	-20.5	145.6	-57.8	63.5	-37.3	-82.1	
○ 20	11.5	7.0	71279	-70.1	11.1	-54.2	54.6	15.9	43.5	
○ 21	8.9	7.3	95315	-67.2	67.2	-55.4	59.2	11.8	-8.0	
22	9.8	7.6	84337	-30.2	77.3	-55.6	56.6	-25.4	-20.7	
23	7.7	7.4	113309	-87.8	71.1	-55.8	61.4	32.0	-9.7	

여기서 N 은 변장의 수이다. 정밀 1차측지망에서 정상점들이 매우 불균등하게 분포하고 있으므로 변형률 계산을 위한 브릭의 수는 N 을 크게 취할 경우에 매우 제한적이 된다.

식 (1)로 표현되는 변형률 성분들을 최소자승법으로 계산할 때에는 최대전단 변형률($\gamma_{max}=E_1-E_2$)과 E_2 의 주축의 방위각이라는 두 변형률 파라메타를 얻을 수 있다. 본 연구에서 면적 변화율은 신·구 측량결과의 축척오차로 인하여 사용하지 않았다.

표 3은 변형률계산 결과를 표시한 것으로 4개 브릭의 결과는 $\alpha_{\gamma_{max}}$ 가 γ_{max} 보다 크기 때문에 생략하였다. γ_{max} 의 비율은 신·구측량 결과간에 약 80년이라는 시간간격을 고려하여 계산하였으며, 표 3의 $\sigma_{\gamma_{max}}$ 는 오차전과 법칙을 적용하여 계산하였다. $X_1, X_2, X_3 \dots X_n$ 은 관측방정식 $AX=L$ 의 최소자승해라고 하면 U 를 다음과 같은 해의 선형결합으로 쓸 수 있다.

$$U=f_1X_1+f_2X_2+f_3X_3+\dots+f_nX_n+F \quad (21)$$

여기서 F 와 X 는 f_i 와 X_i 의 벡터들이고, σ_U^2 와 A^{-1} 을 각각 U 의 변수, A 의 역 행렬이며, $\sigma_U^2=\sigma^2 F^{-1} A^{-1} F$ 이다.

E_1 은 $E_{xx}, E_{yy}, \gamma_{xy}$ 의 변형률 성분의 선형결합이므로 $\sigma_{E_1}^2$ 은 다음과 같이 표시 할 수 있다.

$$\sigma_{E_1}^2=\sigma^2 F^{-1} B^{-1} F \quad (22)$$

여기서 B^{-1} 은 변형률계산의 정규방정식의 역 행렬이며, σ 는 E_{α} 의 표준편차이다. 동일한 방법으로 $\sigma_{E_2}^2$ 를 쓸 수 있으므로 $\sigma_{\gamma_{max}}^2$ 는

$$\sigma_{\gamma_{max}}^2=\sigma_{E_1}^2+\sigma_{E_2}^2 \quad (23)$$

표 3. 변형률계산의 결과

No.	γ_{max}	γ_{max}/γ_r	$\sigma_{\gamma_{max}}$	A_{z_2} (deg)	Block	Lon. (deg)	Lat. (deg)
1	15.1	0.1999	8.2	82.8	A	128.94	37.36
2	9.2	0.115	3.2	74.9	B	127.03	36.64
3	9.5	0.1188	7.0	76.6	C	127.00	37.34
4	12.3	0.1538	6.1	70.5	D	127.79	36.50
5	14.2	0.1775	4.3	101.3	E	128.94	36.66
6	5.3	0.0663	5.7	95.7	F	127.15	36.30
7	15.8	0.1975	9.1	69.9	H	128.95	36.31
8	12.9	0.1613	7.9	66.9	J	127.85	35.54
9	14.4	0.18	2.1	81.2	K	128.91	35.36
10	6.5	0.0813	3.5	61.8	L	126.71	34.43
11	5.4	0.0675	4.0	77.6	O	127.67	37.48
12	7.6	0.095	5.2	102.3	P	127.87	37.06
13	3.3	0.0413	2.4	95.8	R	127.15	35.29
14	4.9	0.0613	2.6	67.8	N	127.67	35.91

MEAN 9.743 0.1218 5.093 80.4 ± 12.9
RATE 0.12 ± 0.06

윗 식에서 주 변형률축의 방위각 오차는 고려되지 않았으나 $\sigma_{\gamma_{max}}$ 를 산정하는데 있어서 이러한 오차의 영향은 크지 않다는 것을 확인하였다.

그림 6은 본 연구로부터 계산된 지각의 수평변형률을 표시한 것으로 여기에서 서로 접하는 쌍의 화살의 길이와 방향은 각각 γ_{max} 의 비율과 E_2 의 방위각을 표현한 것이다.

그림 6에서 최대 압축변형률(E_2)에서 주축의 방향은 주로 ENE-WSW라는 것은 주목할만한 결과이다. E_2 방

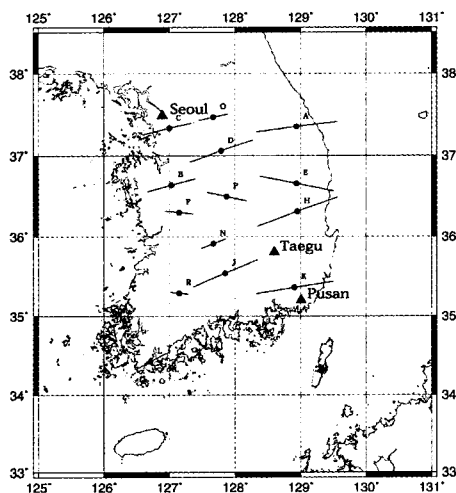


그림 6. 수평변형률의 계산결과

위각의 평균값은 표 2에 표시한 바와 같이 (80.4 ± 12.9)°이며, γ_{max} 의 비율은 $(0.12 \pm 0.06)\mu/\text{yr}$ 이다. 이러한 결과는 Sato(1973)에 의하여 1등 삼각망의 개정측량자료로부터 계산된 일본의 평균 수평변형률에 비하여 약 1/3이다.

4. 연구결과와 고찰

여기서 다른 지구과학적인 연구결과들을 검토하여 본 연구로부터 얻은 특징들과의 관계를 고찰하였다.

그림 7은 한반도와 그 주변에서 지진의 Focal Mechanism Solution으로부터 얻은 P축의 수평투영을 표시한 것이다.⁹⁾ 자료의 수가 적지만 서해안 근처의 진동 하나를 제외하고는 한반도와 그 주변지역의 P축의 방향이 ENE-WSW방향이라는 것을 명백하게 보여주고 있다. 따라서 그림 6에 표시된 응력장은 지진으로부터 유도된 압축장과 함께 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이러한 주축 역시 Coulomb-Mohr의 균열에 대한 기준을 고려하면 그림 8의 단층과 그 방향에 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 압축력으로 인한 균열의 경우에 주축과 균열면 간의 균열각은 $\tan 2\phi = (1/\kappa)$ 이므로 κ 가 0.5이면 ϕ 는 32°이다. 여기서 ϕ 와 κ 는 균열각과 암반의 내부마찰계수를 나타낸다. Jeager(1964)의 이론을 근거하면 이는 거의 압축을 받는 상태에서의 암반균열의 경우와 같다.

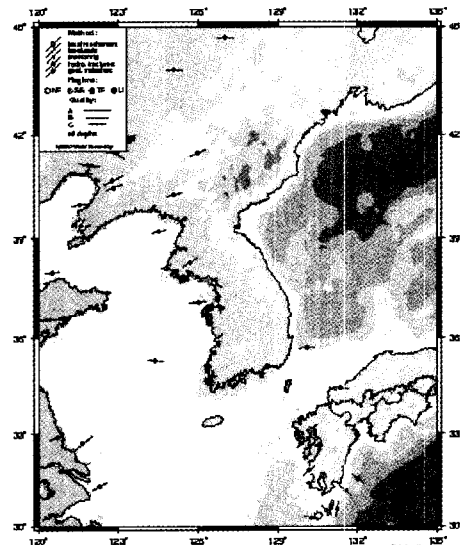


그림 7. 한반도 주변의 지진의 Focal Mechanisms의 P축의 수평투영⁹⁾

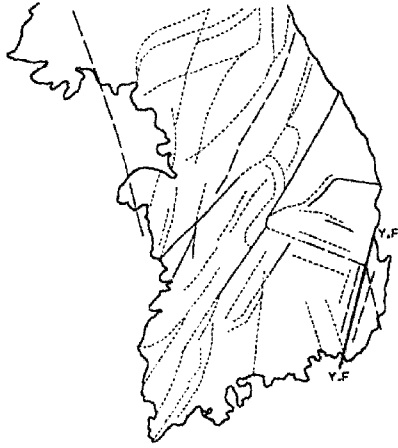


그림 8. 자원연구소의 지질도로부터 추출한 Lineament 분포도¹¹⁾

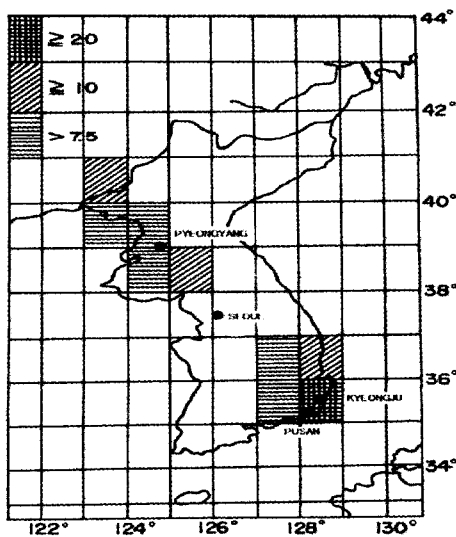


그림 9. 한반도 주변의 지진발생 분포가 높은 지역의 위치도

Sato(1973)는 γ_{max} 의 장기간 지속되는 변화율은 지진활동이 비교적 낮은 일본 남서부의 Chugoku지역에서 0.1 μ /yr 정도임을 발표하였다. 이러한 비율은 일본 중부 Chubu지역의 약 1/3 정도이며, 한국과 비슷하다. Jun (1990)은 Focal Mechanism 해에 관한 논문에서 북동중국, 한반도 및 일본의 Chugoku지역은 지진 지각구조 지역에 속한다고 밝혔다. 이것을 고려하면 본 연구로부터 얻은 우리나라에서의 γ_{max} 평균비율은 신뢰할 만한 결과라고 판단된다.

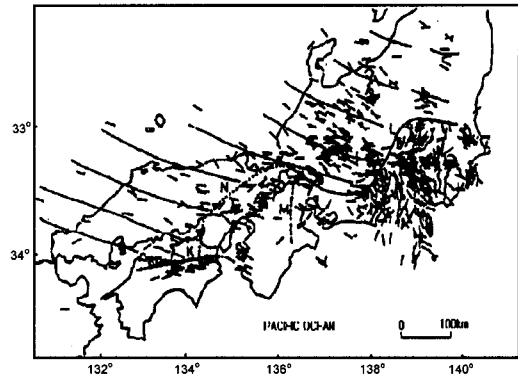


그림 10. 지진의 P-축으로부터 결정한 일본 혼슈 서부의 최대압축 응력의 방향¹⁹⁾

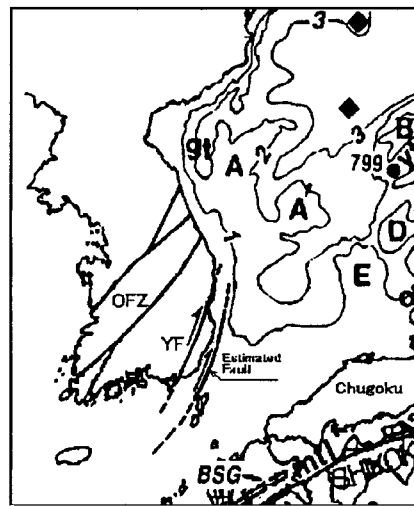


그림 11. 한반도의 지각구조대와 추정되는 지각구조선의 위치도

그림 9는 지진활동도의 격자지도이며, 한반도에서 서기 2년 이래로 지진을 느끼는 한해의 평균회수를 표시한 것이다.¹⁸⁾ 한반도의 동해안 근처의 높은 지진활동지역은 거의 큰 응력비율의 지역과 일치한다는 것은 주목할 만하다. 자료의 수가 충분하지 않으므로 한반도 동해안 근처 지역에서 응력비율이 실제로 큰지 아닌지는 앞으로 연구의 문제이다.

그림 10은 일본 혼슈 서부지역의 P축 분포를 보여준다.¹⁹⁾ 그림에서 동해안 지역의 P축 방향은 WNW-ESE이다. 양 지역에서 지진활동도와 응력비율의 유사성에도 불구하고 한반도와 일본 Chugoku지역의 동해안면간에 응력축의 방향에는 중요한 차이가 있다. 즉, 본 연구의 결과와 Jun(1990)의 지진의 Focal Mechanism 해로부터 얻

은 P-축의 방향은 약 방위각 80°로 나타났으나 일본의 Chugoku지역의 P-축의 방향은 방위각 약 110°로 큰 차이를 보이고 있어 동일한 유라시아판에 속하여 있는 한반도 남부지역과 일본 Chugoku지역간에 그림 11에 표시한 바와 같이 어떠한 지각구조선이 존재하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구로부터 우리 나라에서 1910년부터 1995년까지 약 80년 동안에 발생한 응력변화의 주요 특징은 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 2차원 필터링을 적용하여 정상점들 중에서 가장 정확도가 높은 점들을 선택하여 신뢰도 높은 정밀한 수평변형을 성분들을 계산할 수 있었다.

(2) 최대 압축력의 주축방향은 몇몇 예외가 있기는 하지만 일반적인 경향은 ENE-WSW방향으로 나타났고, 지진의 Focal Mechanism해로부터 얻은 방향과 거의 일치하고 있다.

(3) 최대 응력변화의 평균비율은 $(0.12 \pm 0.06) \mu\text{yr}$ 로서 일본의 연구결과와 비교하여 약 1/3 정도이다.

(4) 본 연구결과와 지진데이터의 해석결과 및 일본의 연구결과를 검토한 결과, P-축방향의 상이한 차이를 고려하면 한반도 남부지역과 일본의 Chugoku지역 사이에 어떠한 지각구조선이 존재하고 있는 것으로 판단된다.

(5) 본 연구결과는 한국 지각의 수평변형의 특성을 나타내며, 향후의 한반도의 지진과 지각구조에 관한 연구에 기여할 수 있을 것이다. 또한, 지진을 고려한 구조물의 설계기준마련을 위한 공학적인 기초자료로서 사용할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Bibby, H. M., "Crustal strain from triangulation in Marlborough". New Zealand. Tectonophysics, 29(1-4), 529-540, Elsevier, 1975.
2. Chen, R., "On the horizontal crustal deformation in Finland", Report of the Finnish Geodetic Institute, 10-14, 1991.
3. Choi, J. H., Y. S. Choi, "Precise Determination of the Geodetic Primary Framework of Korea", Jour. Korean Soc. of Geodesy, Photogrammetry and Cartography, 13, 1-13 (in Korean), 1994.
4. Choi, J. H., H. Sato, "Historical Damaging Earthquakes in the Korean peninsula", Zisin, 48, 483-486(in Japanese), 1995.
5. Choi, J. H., H. Sato, "Horizontal Strain of the Crust in Korea inferred from Geodetic Data", Jour. Geod. Soc. of Japan, 43, 3, 159-180, 1997.
6. Fuji, Y., K. Nakane, "Horizontal crustal movements in the Kanto-Tokai District", Tectonophysics 97, 115-140, Elsevier, 1982.
7. Harada, T., M. Shimura, "Horizontal deformation of the crust in Western Japan revealed from first-order triangulation carried out three times", Tectonophysics 52, 469-478, Elsevier, 1978.
8. Jeager, J. C., Elasticity, Fracture and Flow, Methuen, London, 1964.
9. Jun, M. S., "Tectonic Implication of Shallow Earthquakes in and around the Korean peninsula, Journal of Uppsala University", Sweden, 285, 1-30, 1990.
10. Kim, O. J., J. H. Shu, "A study on the characteristics and causes of earthquakes in Korea", Journal of Korean Mineral and Mining Institute, Vol. 14, 240-268 (in Korean), 1977.
11. Korean Energy Resource Institute, Neo-Tectonic Study in and around the Korean peninsula, Kr-93-(B)-14, 1993.
12. Lee, K. H., H. O. Jung, "A study of Instrumental Data of Earthquakes in the Korean peninsula", Jour. geol. Soc. Korea, 9, 32-45, 1980.
13. Rapp, R. H., "Geometric Geodesy", Vol. 1, The Ohio State University, Ohio, 1979.
14. Rikitake, T., Earthquake fore-casting and warning. Center for Academic Publ. Japan/Tokyo, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht-Boston-London, 1982.
15. Sato, H., "A Study of Horizontal Deformation of the Crust associated with Destructive Earthquakes in Japan", Bull. Geogr. Surv. Inst. 19, 89-130, 1973.
16. Sato H., "Fundamental Geodesy", Sankaido, pp.33-35. (in Japanese), 1984.
17. Takeishi T., "On the Distribution of Earthquakes in Chosun", Bull. Central Bureau of meteorology, Chosun, 19, 167-172 (in Japanese), 1947.
18. Tsuji, H., "Detection of Plate Motion around Japan based on Daily GPS Measurements", Jour. Geod. Soc. Japan, 41, 47-73, 1995.
19. Tsukahara, H., Y., "Kobayashi, Crustal Stress in the Central and Western part of Japan", Zisin 2, 44, 221-231

- (in Japanese), 1991.
20. Wellman, P., Recent crustal movement determined from repeat surveying-results from southeastern and southwestern Australia. *Tectonophysics (Abstract)* 97, 85, Elsevier, 1983.
21. Welsch, W. M., Geodetic analysis of motion at convergent plate boundary, *Proc. Ron Mother Symposium on Four-Dimensional Geodesy, Lecture Notes in Earth Sciences* 29, 139-159, Springer-Verlag, 1989.