

Canada 西海의 Seismicity

李 基 和*

Seismicity of the offshore area of western Canada

Kiehwa Lee*

Abstract

This paper examines the seismicity of the offshore area of western Canada in the light of findings from a detailed study of an earthquake swarm which occurred in the area during November-December in 1971. The distribution of epicenters and focal mechanism solutions of a few main events suggest that the seismicity of the area may largely be interpreted in terms of plate interactions among the Pacific, Juan de Fuca, Explorer and North American plates. Differences between the patterns of seismicity along the transform fracture zones and at their junctions with the ridges were also observed.

1. 序論

1961년 Raff 와 Mason 에 의한 北東太平洋의 magnetic anomaly map 이 출판된 이래로 Mendocino fracture zone 에서 Queen Charlotte Island fault(Fig.1)에 이르는 海底地震帶(submarine seismic zone)는 지구물리학자의 비상한 관심을 끌었고, 海底擴張說(sea floor spreading)과 板構造論(plate tectonics)의 개념 발전에 지대한 기여를 했다(e.g. Vine and Matthews, 1963; Wilson, 1965; Vine, 1966; McKenzie and Parker, 1967; Morgan, 1968; McKenzie and Morgan, 1969; Atwater, 1970).

Juan de Fuca plate (Fig. 1)는 North American plate 와 Pacific plate 사이에 존재하다가 新生代 후기에 North American plate 과의 경계에서 소멸된 Farallon plate (McKenzie and Morgan, 1969)의 잔류물로 여겨지고 있으며 (Atwater, 1970), San Andreas fault 와 Queen Charlotte Island fault 에서 작용하는 North American plate 와 Pacific plate 간의 dextral strike-slip motion 을

저해하고 있다.

Vine (1966)은 Juan de Fuca Ridge system 이 3개의 ridge, 즉 Gorda ridge, Juan de Fuca ridge 그리고 Explorer ridge (Fig.1)로 구성되어 있음을 지적하였다. Blanco fracture zone 은 Gorda ridge 를 Juan de Fuca ridge 에서 분리시키고 Explorer ridge 는 Sovanco fracture zone (Pavoni, 1966)에 의하여 Juan de Fuca ridge 에서 분리되어 있다.

Raff 와 Mason 의 magnetic anomaly map 에 의하여 Explorer ridge 의 北端이 Pacific, Juan de Fuca 그리고 North American plate 가 서로 교차하는 ridge-trench-fault 型의 triple junction 으로 여겨졌으나, Srivastava 등(1971)은 Explorer ridge 北部에 위치하고 北東部로 向하는 짧은 oceanic rise 인 Dellwood Knolls (Fig.1)가 spreading center 일 가능성을 지적하였다. 그들은 Explorer ridge 와 Dellwood Knolls 사이에 존재하는 北西로 向하는 depression 을 위의 두 spreading center 를 연결하는 fracture zone 이라고 생각하고 이를 Revere-Dellwood fracture zone 이라고 命名하였다. 그후로 Bertrand (1972)와 Srivastava (1973)에 의한 연구는 이 가능성을 뒷받침하였다. 최근에 이 지역에서의 ocean bottom seismograph 에 의한 실험 (Hyndman et al., 19

* 서울大學校 사범대학 지구과학과
(Dept. of Earth science, Educational collage, Seoul National University)

77)은 실제로 Dellwood Knolls에서 발생하는 微震(microshock)을 발견하였다. 上記의 연구에 의하여 현재로서는 continental slope에 近接한 Dellwood Knolls의 北端(대략 51°N, 130°W)이 triple junction이라 여겨지고 있다.

Mendocino, Blanco 그리고 Sovanco fracture zone 외에도 Raff와 Mason (1961)은 Juan de Fuca plate에 위치하는 magnetic anomalies를 비스듬이 교차하는 많은 fault가 존재함을 지적하였다. Morgan (1968)은 이들 fault가 서로 독립적으로 운동하는 多數의 small plate의 존재를 시사한다고 지적하였다. Silver (1971)는

Juan de Fuca plate를 3개의 sub-plates 즉 Gorda, Cascadia 그리고 Juan de Fuca plate로 나누고 이들간의 상대적인 운동이 North American plate과의 경계에서의 subduction에 미치는 영향을 論議하였다.

최근에 Riddihough (1977)는 Explorer ridge와 Juan de Fuca ridge에 연관된 magnetic anomalies를 spreading이 이들의 ridge crest에 항상 수직인 방향으로 이루어졌다는 가정하에 재 음미하였다. 그는 Explore ridge 東部の sub-plate (Explorer plate)가 Juan de Fuca ridge 東部の Sub-plate (Juan de Fuca plate)와 별도로 약 8백만년 전부터 독립적인 운동을 시작하였음을 시사하였다(Fig. 2). 그는 Explorer plate와 Juan de Fuca plate간의 경계를 Barr와 Chase의 논문(1974)에서 볼 수 있는 Juan de Fuca ridge 北端에서 北東向으로 향하는 地震帶(Fig. 3)이라고 시사하였다.

板構造論(plate tectonics)에 의하면 지진은 rigid plate의 경계에서 plate간의 相互作用에 의하여 발생한다. 그림 3에서 볼수있는, 1955년 부터 1967년 까지 Canada 西海에서 발생 지진의 震央(epicenter) 본포는 이 지역에서 plate 경계인 Juan de Fuca ridge, Sovanco fracture zone 및 Explorer ridge와 잘 부합하지 않음을 보여주고 있다. 이 진앙의 대부분이 6.25km/sec의 P-wave 速度를 갖는 두께 32km의 單一層의 地殼(crust)이 Pn-velocity가 8.2km/sec인 Moho不連續面(Moho-discontinuity)위에 놓여있는 earth model에 의하여 결정되었다. 실제로 이지역의 earth structure는 上記의 model과 현저하게 다르므로, 진앙지역에 근접한 Canada 西部의 seismic network 즉 PHC (Port Hardy), ALB (Alberni), VIC (Victoria), PNT(Penticton), FSJ(Fort St. James) 및 QCC (Queen Charlotte Island) (Fig. 1)의 data를 이용하여 이지역의 earth structure에 부합하는

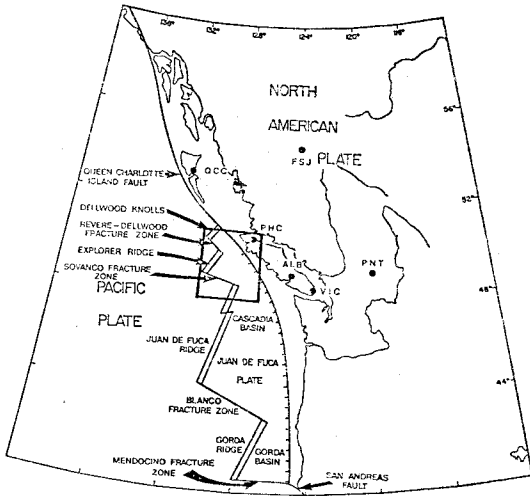


Fig. 1. Plate tectonic setting of the northeastern Pacific. The source area of 12 ISC events are indicated by a rectangle. 6 Canadian stations whose records were used in this study are represented by solid circles.

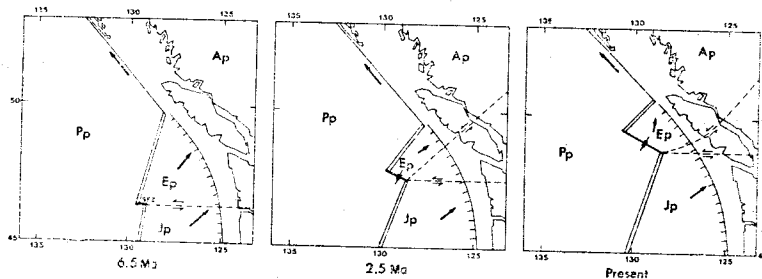


Fig. 2. Schematic reconstruction of past plate movements. P_p, E_p, J_p and A_p represent Pacific, Explorer, Juan de Fuca and North American plates respectively. Dashed lines are proposed faults in the oceanic lithosphere. Heavy arrows are movements relative to North American plate. Light arrows are relative movements across fault lines (after Riddihough, 1977).

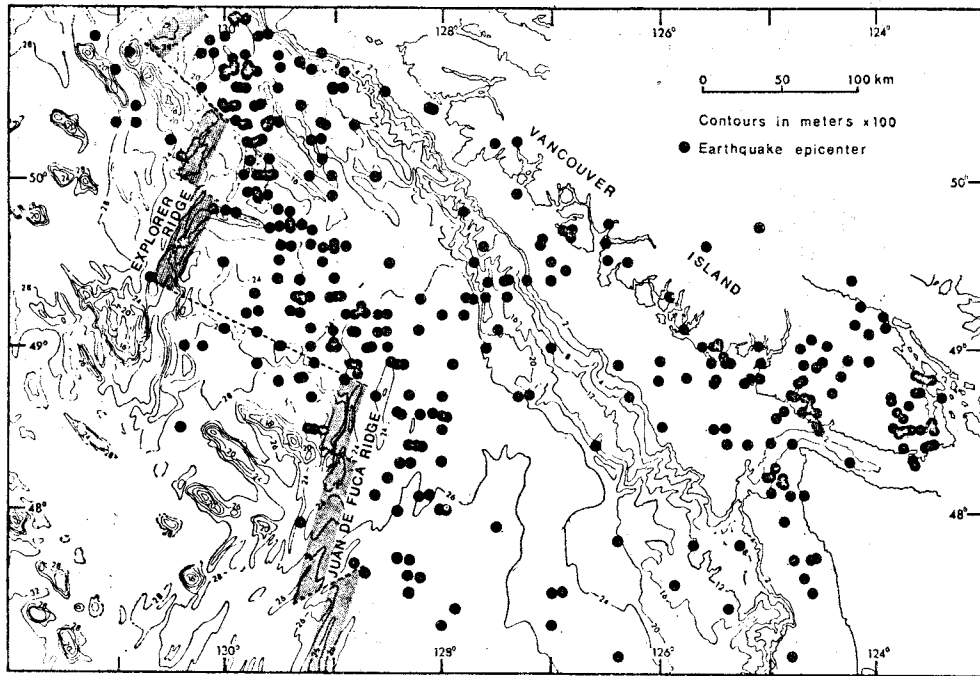


Fig. 3 Epicenters of earthquakes occurred on Vancouver Island and adjacent offshore region during 1955-1967 (after Barr and Chase, 1974).

EVENT NUMBER	DATE	LATITUDE (DEG. N)	LONGITUDE (DEG. W)	ORIGIN TIME (H: M: S:)	DEPTH (KM)	MAGNITUDE
1	NOV. 20	48.79	129.46	21: 24: 42.1	28	5.5
2	25	49.38	129.37	23: 1: 35.0	8	4.4*
3	25	48.76	129.16	23: 40: 13.0	33	5.1
4	DEC. 5	49.53	129.47	5: 50: 7.1	5	5.5
5	5	49.68	129.25	6: 12: 50.8	14	5.1
6	8	49.23	128.41	8: 25: 2.1	33	4.6*
7	8	49.12	128.53	8: 38: 24.6	35	5.3
8	10	49.80	129.0	20: 25: 14.0	41	4.2*
9	11	49.17	128.39	10: 39: 12.3	26	4.5*
10	20	49.20	128.45	9: 15: 8.7	33	3.9*
11	25	49.25	128.48	18: 18: 37.0	1	4.5*
12	30	49.09	128.80	7: 45: 11.0	33	4.2*

* Magnitude determined by National Earthquake Information Center

model로서 이들 진앙의 위치를 더욱 정확히 결정함이 요구된다. Canada 西海에서 지진은 그 대부분이 地震群 (earthquake swarm)의 형태로 발생하고 있으며, Bulletin of International Seismological Center (ISC)는 1971

년 11월 20일부터 12월 말까지 발생한 한 지진군의 主要地震(main events)의 epicentral parameters를 제공하고 있다(Table 1). 그림 1에서 이 지진군의 진앙지가 四角型으로 표시되어있고, 그림 4에서 12개의 주

요지진을 Tiffin 과 Seemann (1975)에 의한 이 지역의 bathymetric map에 표시하였다. 이 지역의 주요한 tectonic feature는 shading으로 표시되어 있다.

2. 震央 決定

진앙의 위치를 결정하는 표준적인 절차는 Bullen(1965)의 著書에 기술되어 있다.

주어진 Earth model에 대하여 특정한 seismic phase의 j 觀測所(station)에의 到達時間(arrival time) (A_j)은 4개의 hypocenter parameters 즉 發生時間(origin time) (H), focal depth (Z), 위도(θ), 경도(λ)와 다음의 함수관계를 갖는다.

$$A_j = H + T(Z, \theta, \lambda) \quad (1)$$

윗식에서 T 는 진앙에서 관측소까지의 도달시간으로 주어진 earth model에 의하여 결정된다. 대체로 first arrival P-phase의 도달시간이 가장 정확히 관측되므로 보통의 진앙결정에 이 phase가 이용된다.

표준적인 진앙결정 방법은, 우선 임의의 preliminary hypocenter를 定하고 이에대한 교정을 δH , δZ , $\delta \theta$, $\delta \lambda$ 라 할 때 j 관측소에서 다음의 equations of condition을 설정한다.

$$R_j = M_j - A_j = \delta H + \delta Z \frac{\partial T}{\partial Z} + (\delta \theta \cos \alpha_j - \delta \lambda \sin \alpha_j) \frac{\partial T}{\partial \lambda_j} + \epsilon_j \quad (2)$$

윗 식에서 R_j , M_j , A_j 는 자기 station residual, 관측된 도달시간, 주어진 earth model에 관해서 (1)에서 결산된 도달시간이고, α_j , A_j , ϵ_j 는 자기 preliminary epicenter에서 관측소에 향하는 方位角(azimuth), 관측소까지의 epicentral distance, M_j 에 포함되는 random reading error이다.

방적식 (2)는 $\sum \epsilon_j^2$ 이 극소화 되도록 least square technique에 의하여 풀고, 새로운 preliminary hypocenter ($H + \delta H$, $Z + \delta Z$, $\theta + \delta \theta$, $\lambda + \delta \lambda$)에 관하여 동일한 과정을 R_j 가 충분히 작은 값을 갖을 때까지 지속한다. 만일 model이 適合하다면 최종의 결과에서 R_j 는 ϵ_j 에 근사한 값을 갖게된다.

上記의 진앙결정 방법에서 진앙은 주어진 earth model에서 각 관측소에 대한 상대적 위치를 변경하면서 결정되므로 이 방법은 earth model의 不適合성에 대한 하등의 교정도 하지 못한다. 만일 Earth model이 부적합하다면 이것은 ϵ_j 보다 훨씬 큰 R_j 에 의하여 반영된다. Earth model의 교정을 위하여 Douglas (1967)는 Joint Epicenter Method를 제시하였다. 이 방법은 制限된 지역에서 발생하는 지진들의 수를 N 이라 할 때 이 지진들

의 진앙을 마치 $4N$ hypocenter parameters를 갖는 單一 지진의 진앙을 결정하는 것 처럼 上記의 方法에 의하여 一時에 결정하는 방법이다. 이러한 과정에서 각 진앙들은 관측소에 대해서 뿐만 아니라 다른 진앙에 대해서도, i 지진의 j 관측소에서의 random reading error를 ϵ_{ij} 라 할 때 $\sum_{i,j} \epsilon_{ij}^2$ 가 극소화 되도록, 상대적인 위치를 변경하게 되므로 결국 earth model의 부적합성을 교정하게 된다.

Canada 西部의 earth model을 이용하여 12개의 ISC 지진들의 진앙을 재 결정하는 자세한 과정은 필자의 다른 논문(Lee, 1977; Lee, 1978 a)에 취급되어 있으므로 本稿에서는 그 결과만을 기술코져 한다.

진앙을 재 결정하는 과정에 수반되는 seismic velocity modelling에서 Cascadia Basin (Fig. 1)에 현저한 upper mantle seismic velocity anisotropy가 발견되었다. Pn velocity는 ISC 지진들의 진앙지에서 PHC 방향으로 약 8.1km/sec, VIC 방향으로 약 8.3km/sec로 변함이 추정되었다. 이 결과는 spreading ridge system과 연관된 일반적인 seismic velocity anisotropy 즉 seismic velocity가 ridge system과 평행인 방향에서 수직인 방향으로 증가하는 사실(Garland, 1972)과 부합한다.

진앙지에 가장 가까운 PHC 관측소의 seismogram을 자세히 읽은 결과, 本稿에서 취급하는 지진군이 실제로 11월 10일 5시 21분 34.5초(UT)에서 시작하여 12월 31일 10시 7분 13.3초(UT)까지 189개의 지진으로 구성되어 있음이 발견되었다. 이중 4개 이상의 관측소에 기록된 23개의 주요지진들의 진앙은 재 결정하였고 그 결과가 그림 5에 표시되어있다. 이들의 진앙은 focal depth를 10km에 고정하고 이 지역의 seismic refraction data와 本稿의 지진군에서 얻어진 이 지역의 earth structure에 관한 정보를 종합한 earth model (Model A)에 의하여 결정되었다. 이 model에 Joint Epicenter Method를 적용한 결과 거의 同一한 결과를 얻었다. 이렇게 결정된 진앙의 正確度(accuracy)를 검증하기 위하여 model A와 相異한 model (model B)을 이용하여 본 결과 다른 진앙의 분포를 얻었다. model B에서 얻어진 station residuals는 model A의 값들에 비하여 훨씬 큰 값을 보여 주었다. 그러나 model B에 다시 Joint Epicenter Method를 적용한 결과 model A의 진앙분포와 거의 비슷한 결과를 보였다. 이것은 model A의 적합성을 傍證하는 것이며 따라서 이 model에 의하여 결정된 진앙의 正確도를 立證하여 주는 것이다. ISC station residuals는 ± 5 sec의 범위에 걸쳤으나 model A에 의하여 결정된 진앙들에 대하여 station residuals는 ± 2 sec, 그 대부분이 ± 1 sec의 범위

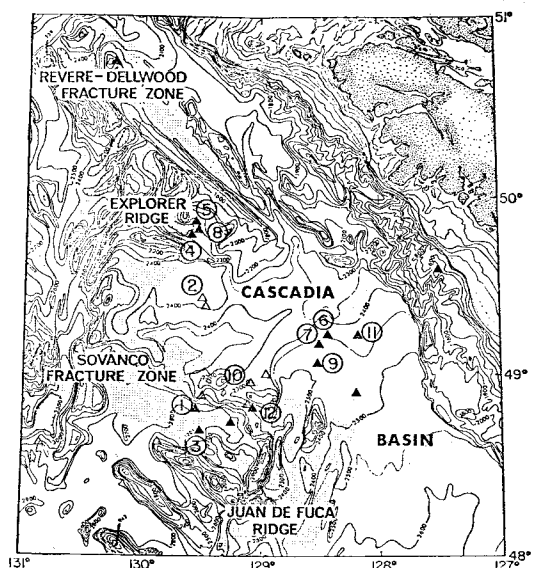


Fig. 4. Epicenters of 12 ISC events on the bathymetric plot of Tiffin and Seemann (1975). All events are indicated by their respective numbers in Table 1. Tectonic elements of the area are shaded.

에 포함되었다.

그림 5에서 solid triangle은 5개 이상의 관측 data에 의하여 결정된 진앙이고, open triangle은 4개의 data에 의하여 결정되었으므로, 전반적으로 solid triangle의 정확도가 더 크다고 할 수 있다. 또 대부분의 관측소가 진앙지에 대하여 北東部에 위치하므로 진앙들의 이 방향에 대한 정확도는 다른 방향에 대한 정확도보다 더 적다고 할 수 있다. 그림 1에서의 12 ISC 주요지진들은 같은 번호에 의하여 표시되어 있다.

그림 4에서 12개의 주요지진 중 ①, ③만이 sovanco fracture zone에 위치해 있고 나머지 지진들은 그외의 tectonic feature와 잘 연관되어있지 않으나, 그림 5에서는 ①, ③, ⑫, ⑩이 sovanco fracture zone, ④, ⑤, ⑧은 Explorer ridge와 Revere-Dellwood fracture zone의 교차점(junction) 그리고 나머지 지진들은 Juan de Fuca ridge 北端에서 北東部로 향하여 帶를 이루며 분포하여 있음을 알 수 있다. 또 그림 5에서 12개의 ISC 주요지진 외의 나머지 11개의 지진들도 대체로 Sovanco fracture zone, Explorer ridge와 Revere-Dellwood fracture zone의 교차점, Juan de Fuca ridge 北端에서 北東으로 향하는 지진대와 연관시킬 수 있음을 볼 수 있다.

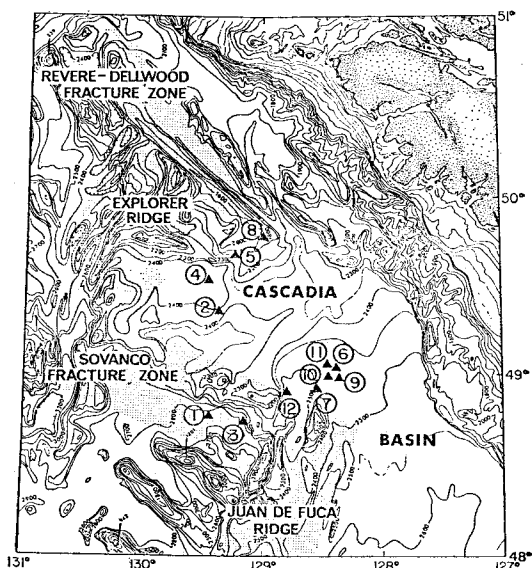


Fig. 5. Relocated epicenters of 23 major events. 12 ISC events are indicated by their respective numbers in Table 1. Open triangles represent events located with 4 station—PHC, FSJ, PNT, either VIC or ALB—data; solid triangles are located with more than 4 station data.

3. Focal Mechanism 解

이 지진들의 分布와 이 지역의 plate tectonics의 관계를 규명하기 위하여 그림 5에서 지진 ⑦, ③, ④의 focal mechanism을 P-wave nodal solution에 의하여 조사하였다. First P-wave motion data는 ISC Bulletin, Chandra의 논문(1974) 그리고 이 지역의 각 관측소의 seismogram을 직접 읽음으로써 얻어졌다. P-wave nodal solution은 Wickens와 Hodgson(1967)의 computer program에 의하여 얻어졌다.

上記 지진들의 focal mechanism을 구체적으로 論議하기 전에 이 지역의 plate interaction에 관한 다음의 고찰을 해보자. Explorer ridge와 Juan de Fuca ridge와 연관된 Bruhnes magnetic anomaly의 方向은 대략 $N20^{\circ}E$, $N39^{\circ}E$ 이고 Riddihough(1977)는上記 두 ridge의 half-spreading rate를 2.1cm/year, 3.1cm/year로 계산하였다. 만일 이들 ridge가 연관된 magnetic anomaly의 方向에 수직으로 spreading한다고 가정하면 Juan de Fuca ridge 北端에서 순간운동 vector(instantaneous motion vector)는 그림 6의 관계를 만족한다. 이 그림에서 J_p , E_p 는 Pacific plate에 대한 Juan

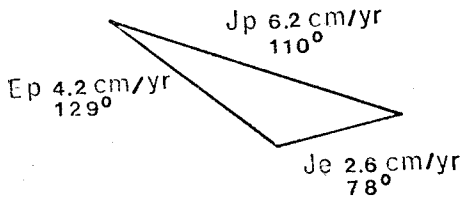


Fig. 6. Instantaneous motion vectors at the northern tip of the Juan de Fuca ridge. J_p and E_p represent the instantaneous motions of the Juan de Fuca and Explorer plates relative to the Pacific plate respectively. J_e represents the instantaneous motion of the Juan de Fuca plate relative to the Explorer plate.

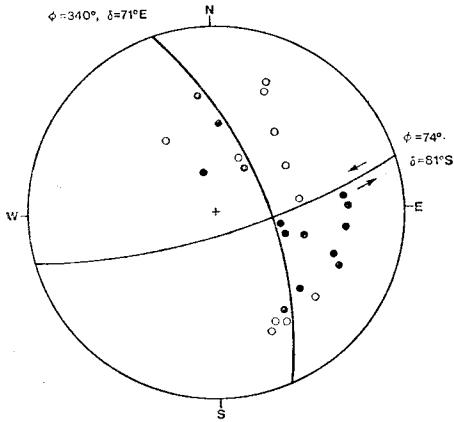


Fig. 7. Focal mechanism solution of the event 7. Projection shows the lower half of focal sphere on equal area net. Solid circles represent compressional first motion for P waves; open circles represent dilatational first motions.

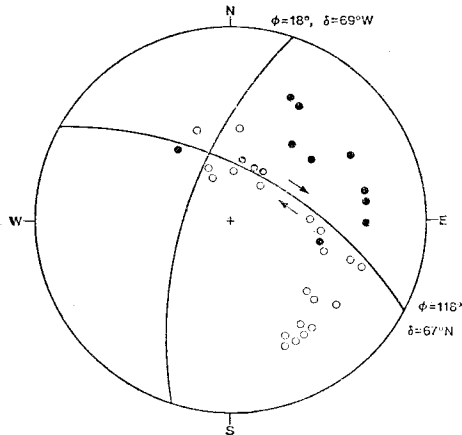


Fig. 8. Focal mechanism solution of the event 3. Symbols are as in Fig. 7.

Fuca plate, Explorer plate (Fig. 2)의 순간운동 (instantaneous motion)을 표시하고 J_e 는 Juan de Fuca plate

plate 사이에 sinistral shear motion이 존재함을 시사한다.

의 Explorer plate에 대한 순간운동을 표시한다. 이 그림은 Juan de Fuca plate의 北端이 fault-fault-ridge型의 triple junction임과, Juan de Fuca plate와 Explorer 그림 7은 ISC 지진 ⑦의 lower half of focal sphere를 equal area net에 투사한 것을 보여준다. 이 투사방법은 다음에도 계속된다. 이 그림의 focal mechanism은 ENE-WSW 혹은 NNW-SSE로 향하는 깊은 경사 (steeply dipping)의 nodal plane 위에서 주로 strike-slip motion이 일어났음을 보여준다. 25 data 중에서 4개가 이 解(solution)와 일치하지 않고 그중 2개는 nodal planes에 매우 近接해 있다. 그림 7과 6을 비교하면, ENE-WSW로 향하는 nodal plane이 fault-plane임을 알 수 있다. 이 nodal plane 위의 sense of motion 및 strike $N74^\circ E$ 는 그림 6의 理論値와 잘 부합한다. 이로부터 vector J_e 즉 Explorer plate와 Juan de Fuca plate 간의 상호 작용이 Juan de Fuca ridge 北端에서 北東으로 향하는 지진대의 원인이 됨을 알 수 있다.

지진 ③의 focal mechanism은 그림 8에 표시되었고 P-nodal solution은 NNE-SSW와 NW-SE로 향하는 두개의 nodal plane 위에 주로 strike-slip faulting이 일어났음을 보여준다. 그림 6과 비교하여 NW-SE로 향하는 nodal plane이 fault-plane임을 알 수 있다. 이 plane 위의 dextral strike-slip motion 및 strike $N118^\circ E$ 는 Sovanco fracture zone에서 예상되는 motion과 그 strike $N110^\circ E$ 와 잘부합된다.

그림 9는 지진 ④의 focal mechanism을 보여준다. 이 지진의 focal mechanism은 원래 Chandra (1974)에

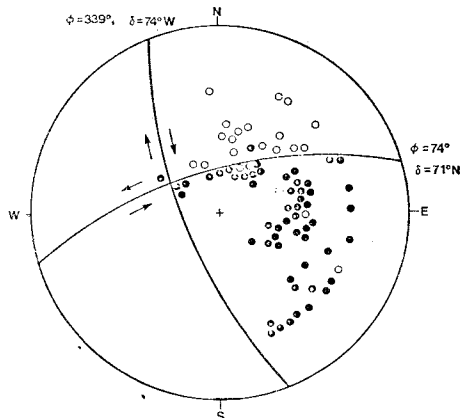


Fig. 9. Focal mechanism solution of the event 4. Symbols are as in Fig. 7.

의하여 얻어졌고, ISC 및 local seismic network data를 첨가한 결과는 Chandra의 解와 거의 同一하였다.

Chandra는 U.S. National Earthquake Information Center (NEIC)에서 준 이 지진의 진앙(49.6°N, 129.5°W)을 교정하지 않았으므로, 이 지진과 주위의 tectonic feature와를 연관시킬 수 없었다. 본 연구에서 재 결정된 이 지진의 진앙은 Explorer ridge와 Revere-Dellwood fracture zone과의 교차점에 위치해 있다. Mechanism은 ENE-WSW와 NNW-SSE로 향하는 nodal plane 위에 주로 strike-slip 型의 faulting이 일어났음을 보여준다. 75 data 중 오직 4개의 data가 이 解와 일치하지 않고, 그중 2개는 ENE로 향하는 nodal plane에 매우 가깝다. ENE로 향하는 nodal plane에서의 sense of motion은 sinistral임에 비하여 NNW로 향하는 nodal plane 위에서는 dextral이다. 그리고 이 두개의 nodal plane은 Revere-Dellwood fracture zone과 Explorer ridge의 trends에 큰 각도를 이루고 있어서 fault-plane을 선택하기에 難點이 있다. 이와 同一한 難點이 Blanco fracture zone과 Gorda ridge 교차점에서 발생한 지진의 focal mechanism에서도 발견되었다(Tobin and Sykes, 1968). 이와 연관해서 유의할 점은, 이 지진의 focal mechanism이 Pacific plate와 North American plate과의 dextral transcurrent motion으로 잘 설명될 수 있다는 점이다. Minster 등 (1974)의 Model RM1에 의하면 현재의 triple junction에서 North American plate와 Pacific plate의 상대운동의 방향은 N26°W이고 이것은 NWN 방향으로 향하는 nodal plane의 Strike (N21°W)와 잘 일치한다. 실제로 이 두 plate 간의 상호작용이 Explorer ridge 북부에 침투할 가능성이 있다. Bolt 등 (1968)은 Gorda Basin (Fig. 1)에서 발생하는 지진들의 진앙을 결정하고 이 지진들의 focal mechanism이 San Andreas Fault System에 연관된 dextral strike-slip motion과 부합함을 보였다. 이것은 triple junction 부근에서는 두개의 plate 간의 상호작용이 나머지 plate에 침투함을 시사한다고 볼 수 있다.

4. 地震群 發生의 時間的 分布 放出 energy.

11월 10일부터 12월 말까지 52일 간에 189개의 지진이 관측되었고, 그림 10은 이 기간중 매일 발생한 지진의 수를 보여준다. 그림 11은 진앙이 결정된 23개의 주요지진과 그들의 body-wave magnitude (m_b)를 보여준다. 이 그림에서 12 ISC 지진들은 자기 그 번호에 의하여 표시되어 있다.

이들 그림으로부터 전 지진 활동을 4개의 기간으로 나눌 수 있다. 즉 (1) 11월 10일—12월 2일 (2) 12월 4

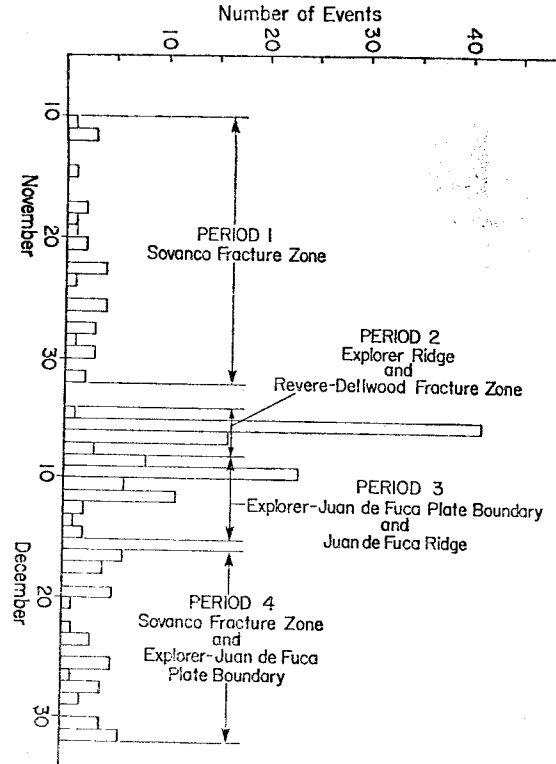


Fig. 10. Histogram showing the number of events per day. The whole episode of swarm activity is divided into 4 periods. Each period is indicated by respective tectonic elements which were predominant sources of seismicity during that period.

일—12월 7일 (3) 12월 8일—12월 15일 (4) 12월 16일—12월 말

첫째 기간에서는 매일의 지진 발생수가 적고 지진활동이 없는 시기가 전 기간에 고루 분포되어 있다. 이 기간 중에 발생한 7개의 주요지진의 진앙을 그림 5에서 보면 이 기간중의 seismicity가 Sovanco fracture zone과 연관되어 있음을 알 수 있다.

둘째기간은 짧은 기간에 다수의 지진이 발생하였다는 점에서 첫째기간과 구분된다. 이 기간에서 발생한 3개의 주요지진은 전부 Explorer ridge와 Revere-Dellwood fracture zone의 교차점 부근에서 발생하였다. Wetmiller (1971)는 이 부근에서 발생한 지진군에 연관해서多數의 微震이 수반되었음을 발견하였다. 따라서 이 기간에 발생한 진앙을 결정할 수 없는 대다수의 미진이 이 교차점 부근에서 발생했다고 추측된다.

세째기간도 둘째기간에 비하여 그 정도는 낮지만 지

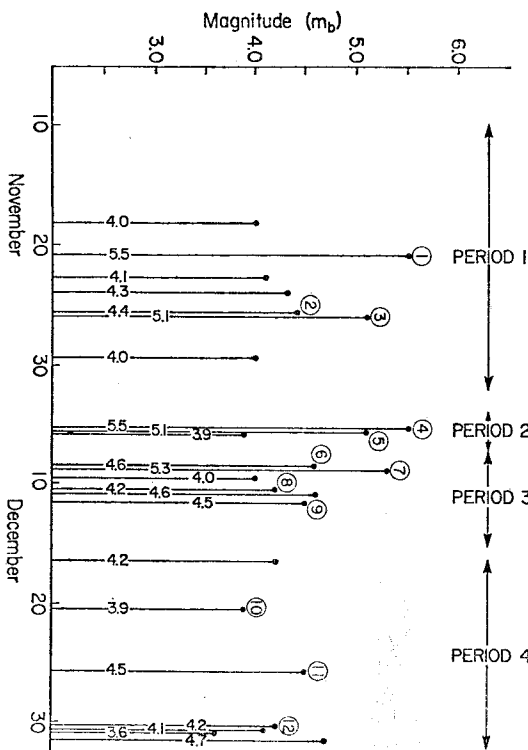


Fig. 11. Magnitudes (m_b) of 23 major events as a function of time. 12 ISC events are indicated by their respective numbers.

속적인 지진활동으로 특징지어진다. 이 기간에 발생한 6개의 주요지진의 4개가 Juan de Fuca ridge 근처와 여기서 北東部로 향하는 지진대 즉 Explorer plate와 Juan de Fuca plate의 경계에 위치해 있다.

네째기간은 매일 발생하는 지진의 수가 적고, 지진활동이 없는 기간이 전기간에 분포되어있는 점에서 첫째기간과 비슷하다. 지진활동의 정도는 첫째기간보다多少 더 세다. 이 기간중 발생한 7개의 진앙이 결정된 주요지진 중 4개는 Sovanco fracture zone에 위치하고 3개는 Explorer plate과 Juan de Fuca plate 경계에 위치한다.

위의 관찰은 strain energy가 transform fault zone과 이와 spreading ridge의 교차점에서 다른 양상으로 방출됨을 보여준다. Sovanco fracture zone과 Explorer와 Juan de Fuca plate 경계의 transform fault에서는 strain energy가 비교적長 기간에 서서히 방출됨에 비하여, Sovanco fracture zone과 Juan de Fuca ridge의 교차점 및 Explorer ridge와 Revere-Dellwood frac-

ture zone의 교차점 부근에서는 짧은 기간에 많은 미진을 수반하고 지속적으로 strain energy가 방출됨을 알 수있다. 이 결과는 Francis (1968)의 발견 즉 mid-Atlantic ridge의 median rift에서 발생하는 지진들은 fracture zone에서 발생하는 지진들에 비하여 훨씬 더 많은 미진을 수반하는 사실과 부합한다.

이들 23개의 주요지진들의 local Richter magnitude (M_L)를 결정하고 이로부터 bodwave magnitude (m_b) 및 방출된 seismic wave energy를 계산하는 방법은 필자의 다른논문(Lee, 1977; Lee, 1978 b)에 기술되어 있다. 여기서는 간단히 그 결과만을 요약키로 한다. 이 지진군의 발생기간 중 방출된 총 wave-energy는 20.9×10^{18} erg에 해당하고 이중 44%가 Sovanco fracture zone에 발생한 지진들에 의했고, 43% 및 13%가 각기 Explorer ridge와 Revere-Dellwood fracture zone의 교차점 부근 및 Explorer와 Juan de Fuca plate 경계에서 발생한 지진들에 의하여 방출되었음이 발견되었다. 上記의 tectonic feature와 연관되지 않은 지진들에 의해서 방출된 energy는 1%에도 미치지 못했다.

5. 結論

1971년 10월~12월 중에 Juan de Fuca Ridge System 北端에 발생한 한 지진군에 대한 多角的인 연구에 의하여 이 지역의 seismicity全般에 새로운 理解를 주는 다음의 결과를 얻었다.

1) ISC 및 이 지역의 earth structure에 부적합한 model에 의하여 결정되어, 이 지역에 광범하게 散在한 지진들의 진앙은 적합한 model을 통한 더 정확한 결정에 의하여 이 지역의 주요 tectonic features 즉 Juan de Fuca ridge, Sovanco fracture zone, Explorer ridge, Revere-Dellwood fracture zone과 Juan de Fuca ridge 北端에서 北東으로 향하는 지진대에 연관시킬 수 있다.

2) Focal mechanism 解는 이 지역에 발생하는 지진들이 Pacific, Juan de Fuca, Explorer 및 North American plate 간의 상호작용에 의한 것임을 보여주었다.

3) Transform fracture zone에서는 strain energy가 장기간에 걸쳐 서서히 방출됨에 비하여 fracture zone과 spreading ridge의 교차점에서는 단기간에 급격하게 방출됨이 밝혀졌다.

4) Juan de Fuca Ridge System의 東部에 위치하는 Cascadia Basin에 spreading ridge system과 일반적으로 관련되는 seismic velocity anisotropy가 발견되었다.

6. 謝辭

본 연구의 대부분이 필자가 Victoria Geophysical Observatory에 연구원으로 재직시 이루어졌으며 이 연구에 도움을 준 W. A. Milne, R. D. Hyndman, R. P. Riddihough 諸博士 및 G. A. McMechan, G. C. Rogers 諸氏에게 감사할 드린다.

References

- Atwater, T. 1970, Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 81, pp. 3513-3536.
- Barr, S.M. and Chase, R.L. 1974, Geology of the northern end of Juan de Fuca ridge and sea-floor spreading. *Can. J. Earth Sci.*, 11, pp. 1384-1406.
- Bertrand, W.G. 1972, A geological reconnaissance of the Dellwood seamount area, northeast Pacific ocean, and its relation to plate tectonics. Unpublished M. Sc. thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada
- Bolt, B.A., Lomnitz, C., and McEvelly, T.V. 1968, Seismological evidence on the tectonics of central and northern California and the Mendocino escarpment. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 58, pp. 1725-1768.
- Bullen, K.E. 1965, An introduction to the theory of seismology. Cambridge University Press, pp. 157-164.
- Chandra, U. 1974, Seismicity, earthquake mechanism and tectonics along the western coast of North America, from 42° to 61°N. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 64, pp. 1529-1549.
- Douglas, A., 1967, Joint epicenter determination. *Nature*, 215, pp. 47-48.
- Francis, T.J.G. 1968, Seismicity of the mid-oceanic ridges and its relation to the properties of the upper mantle and crust. *Nature*, 220, pp. 899-901.
- Garland, G.D. 1972, Introduction to geophysics, mantle core and crust W.B. Saunders Company, pp. 402.
- Hyndman, R.D., Rogers, G.C., and Barrett, D.L. 1977, Earthquakes and seismic refraction results from ocean bottom seismometers off British Columbia *EOS Trans. AGU*, 58, pp. 508.
- Lee, K. 1977, An earthquake swarm near the northern end of Juan de Fuca ridge, Internal Report, Division of Seismology and Geothermal Studies, Earth Physics Branch, Department of Energy, Mines and Resources, Canada
- Lee, K. 1978 a, Relocation of an earthquake swarm west of Vancouver Island. Submitted to *Can. J. Earth Sci.*
- Lee, K. 1978 b, An earthquake swarm west of Vancouver Island and its tectonic implications. Submitted to *Can. J. Earth. Sci.*
- McKenzie, D.P. and Morgan, W.J. 1969, Evolution of triple junctions, *Nature*, 224, pp. 125-133.
- McKenzie, D.P. and Parker, R.L. 1967, The north pacific; an example of tectonics on a sphere, *Nature*, 216, pp. 1276-1280.
- Minster, J.B., Jordan, T.H., Molnar, P. and Haines, E. 1974, Numerical modelling of instantaneous plate tectonics. *Geophys. J.R. Astro. Soc.*, 36, pp. 541-576.
- Morgan, W.J. 1968, Rises, treches, great faults and crustal blocks *J. Geophys. Res.*, 73, pp. 1959-1982
- Pavoni, N. 1966, Tectonic interpretation of the magnetic anomalies southwest of Vancouver Island. *Pure and applied Geophysics* 63, pp. 172-178.
- Raff, A.D. and Mason, R.G. 1961, Magnetic survey off the west coast of North America, 40°N latitude to 52°N latitude. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 72, pp. 1267-1270
- Riddihough, R.P. 1977, A model for recent plate interactions off Canada's west coast. *Can. J. Earth Sci.*, 14, pp. 384-396.
- Silver, E.A. 1969, Late Cenozoic underthrusting of the continental margin off northernmost California. *Science*, 166, pp. 1265-1266.
- Srivastava, S.P., Barrett, D.L., Keen, C.E., Manchester, K.S., Shin, K.G., Tiffin, D.L., Chase, R.L., Thomson, A.G., Davies, E.E., and Lister, C.R.B. 1971, Preliminary analysis of geophysical measurements north of Juan de Fuca ridge. *Can. J. Earth Sci.*, 8, pp. 1265-1281.
- Srivastava, S.P. 1973, Interpretation of gravity and magnetic measurements across the the continental margin of British Columbia, Canada. *Can. J. Earth Sci.*, 10, pp. 1664-1677.
- Tiffin, D.L. and Seemann, D. 1975, Bathymetric map of the continental margin of western Canada, Geological Survey of Canada
- Tobin, D.G. and Sykes, L.R. 1968, Seismicity and tectonics of the northeast Pacific ocean. *J. Geophys. Res.*, 72, pp. 3821-3846.

- Vine, F. J. 1966, Spreading of the ocean floor: New evidence. *Science*, 154, pp.1405-1415.
- Vine, F. G. and Matthews, D. H. 1963, Magnetic anomalies over ocean ridges. *Nature*, 199, pp.947-949.
- Wetmiller, R. J. 1971, An earthquake swarm on the Queen Charlotte Islands fracture zone. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 61, pp.1482-1505.
- Wickens, A. J. and Hodgson, J. H. 1967, Computer reevaluation of earthquake mechanism solutions. *Pub. Dom. Obs.*, 33(1), p.560.
- Wilson, J. T. 1965, Transform faults, oceanic ridges and magnetic anomalies southwest of Vancouver Island. *Science*, 150, pp.482-485.