

# 韓半島 地熱流量에 對한 若干의 考察

金 性 均\*

## Some Considerations on Heat Flow in Korea

Sung Kyun Kim

**Abstract:** The geophysical implications of the observed heat flow in the Korean Peninsula are examined. The Peninsula can be divided into two typical regions of high (Zone 1) and normal heat flows (Zone 2), and anomalous sharp change of heat flow between two zones is noteworthy. Zone 1 (southeastern coast of the Peninsula) to be connected to the East Sea (=Japan Sea) of high heat flow region corresponds with the region of late-Mesozoic to Tertiary igneous activity. With the radioactive elements concentrated in the crust, the observed heat flow in Zone 2 can be almostly explained. While, only a half of the heat flow in Zone 1 is explained.

As a possible explanation of high heat flow in Zone 1, partial melting in the lower crust is examined. The temperature of 800-900°C calculated at the bottom of the crust excludes the possibility of partial melting or magma generation in the crust. Alternatively, a remaining thermal effect of late-Mesozoic to Tertiary igneous activity is considered. However, it appears that the thermal effect already disappeared and that the vertical temperature distribution reached at steady state 30 MY ago (= 10 MY after the igneous activities came to an end).

After all, the existence of some other effective heat transfer in Zone 1 is strongly suggested. The high heat flow to be same kind of anomalous one of the East Sea can be recognized as a result of the trench-back-arc thermal flux. The plate subduction in the Japan Trench will generate an induced flow above the slab of the East Sea, a typical back-arc basin, and hence the induced flow will heat the surrounding lithosphere.

### 서 론

한국의 지열류량에 대한 측정결과는 장정진외(1970)와 Mizutani et al. (1970)에 상세히 기술되어 있으며, 그 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다(그림 1 참조).

1) A-A'를 경계로 하여, 지열류량이 2.0 H.F.U. (1 H.F.U. =  $10^{-6}$  cal/cm<sup>2</sup>/sec = 41.86mW/m<sup>2</sup>) 이상인 지역 (Zone 1)에서 2.0 H.F.U. 이하인 지역 (Zone 2)으로 급변한다.

2) Zone 1은 열류량의 평균치(=2.27 H.F.U.)가 중생대~신생대의 활동지역에서 기대되는 열류량 1.92 H.F.U. (Lee and Uyeda, 1965) 보다 높은 편으로, 고열류 지대인 동해에 접속된다.

3) Zone 2의 평균치(=1.48 H.F.U.)는 대륙지역의 평균열류량 1.41 H.F.U. (Lee and Uyeda, 1965)와 거의 일치하며, 이 지역이 정상 열류지역임을 나타낸다.

\* 한국동력자원연구소

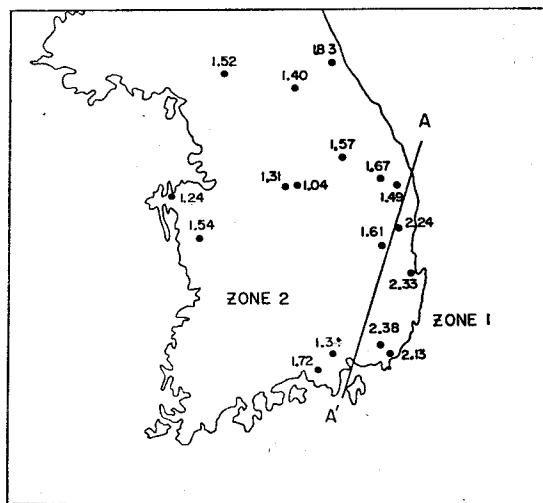


Fig. 1 Observed heat flow in Korea. The unit is H.F.U. (=  $10^{-6}$  cal/cm<sup>2</sup>/sec).

본 논문에서는 관측된 열류량을 이용하여 Zone 1, 2에 대한 지각내의 온도분포 및 열적상태를 추정한다. 또한 「Zone 1의 고열류가, 이 지역내에서 있었던 중생대말~제 3기초의 화성활동의 잔류열에 의한 효과로서 설명될 수 있는가?」에 대하여 검토하며, 고열류가 갖는 지구물리학적 의미에 대하여 간단히 고찰하게 된다.

**Zone 1,2에서의 열평형**

지각내의 온도분포를 계산하기 전에, 먼저 한반도의 지각구조 모델로부터 기대되는 열류량에 대하여 조사하여 보자. 한반도의 지각구조에 대해서는 수개의 모델이 제안되어 있다(Kim, S.K., 1979; Lee, K.H., 1979; 김상조, 1983). Kim, S.K. (1979)는 한반도의 중력자료를 3차원의 sin x/x 법으로 분석하여 지각의 두께 및 연속선편차등을 계산하였다. 그 결과(Kim의 그림 8)에 의하면, Zone 1, 2에서의 지각의 평균두께는 각각 24, 28 Km가 된다. 여기서 지각을 좀 더 세분하기 위하여 밀도가 다른 다음의 2층으로 나누어 생각해 보자.

Upper Crust(Granitic Layer): Density 2.67g/cm<sup>3</sup>

Lower Crust (Basaltic Layer): Density 3.0g/cm<sup>3</sup>

Total Crust: Density 2.84g/cm<sup>3</sup>

위와같은 밀도를 가정할때 상부지각과 하부지각의 두께는 각각 전체지각의 약 1/2이 되며, 이와같이 좀 더 세분된 모델을 그림 2의 MODEL B로서 채용한다. 한편 김상조(1983)는 한반도에서 발생한 울진 및 포항지진을 포함한 수개의 지진기록을 분석하여 지각구조 모델을 제안하였으며, 그 결과(p 36, 그림 8)를 그림 2의 MODEL A로서 채용한다. 또한 Lee, K.H.(1979)의 지각구조를 MODEL C(두께 37Km, 상부지각 18Km, 하부지각 19Km로 가정)로서 채용한다.

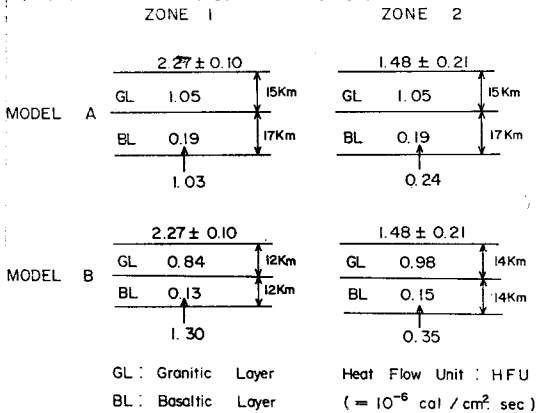


Fig. 2 Crust and mantle contributions to surface heat flow in Zones 1 and 2. According to the crustal structures (MODEL A and B) to be adopted, the mantle contributions become different.

U, Th, K 등의 방사성 원소는 원자의 직경이 커서 olivine, pyroxene 과 같은 용융점이 높은 결정격자속에 들어 가기가 어려워, 맨틀로부터 지각이 분리됨에 따라 지각의 상층부로 이동하였으며, 특히 상부지각에 대부분이 농축되었다는 것은 잘 알려져 있다(Birch, 1965). Shimazu(1972)에 의하면, 지각과 상부맨틀에 대한 방사성 원소의 평균적인 분포로부터 기대되는 발열률은 다음과 같다.

Upper Crust: 7000×10<sup>-16</sup>cal/cm<sup>3</sup>/sec

Lower Crust: 1100×10<sup>-16</sup>cal/cm<sup>3</sup>/sec

Upper Mantle: 1×10<sup>-16</sup>cal/cm<sup>3</sup>/sec

물론 방사성 원소의 붕괴에 의하여 그 농도는 시간에 따라 감소하지만, 붕괴속도가 아주 느리기 때문에 발열 속도는 장기간에 걸쳐 비교적 안정된 값으로 볼 수 있다. 따라서 발열개시후 충분히 긴 시간이 경과하였다고 가정할때 열의 흐름은 정상상태에 도달하게 되므로, 발열률 A(z), 두께 D의 지층에서 관측되는 열류량 Q는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q = \int_0^D A(z) dz \quad (1)$$

위에서 채택한 지각구조 모델 A와 B에 Shimazu (1972)의 발열률을 적용하여 Zone 1, 2에서 관측된 평균열류량±표준편차치(Q<sub>s</sub>±δ)를 다음과 같이 3개의 항으로 분해하여 그림 2에 나타낸다.

$$Q_s \pm \delta = Q_{(GL)} + Q_{(BL)} + Q_M$$

여기서 Q<sub>(GL)</sub>: 상부지각에 의한 열류량

Q<sub>(BL)</sub>: 하부지각에 의한 열류량

Q<sub>M</sub>: 맨틀로부터의 열류량

그림 2에 도시한 바와 같이, Zone 2에서 관측된 평균열류량±표준편차치는 1.48±0.21 H.F.U.로서 지각구조 모델 A,B,C 중 어느 것을 채택하더라도 대부분의 열류량이 지각의 방사성 열원에 의하여 설명된다. 또한 맨틀로부터의 열류량은 MODEL A,B,C에 대하여 각각 관측된 열류량의 16, 24, 2%로서, 정상 열류지역의 값과 거의 같다. 그러나 Zone 1에서 관측된 평균열류량±표준편차치는 2.27±0.10 H.F.U.로서, 지각의 방사성 열원에 의하여 기대되는 열류량은 관측치의 단지 50% 정도밖에 되지 않는다. 가장 조건이 유리한 지각구조 MODEL C를 채용한다 하더라도 지각내의 열원은 관측치의 65% 정도를 설명할 수 있을 뿐이다. 따라서 Zone 1의 지각이 다른 지역의 지각과 비교하여 특이하게 다량의 방사성 원소를 포함한다고 생각하는 것은 불합리하며, 이러한 고열류의 원인으로서는 다음과 같은 것들을 고려할 수 있다.

- 1) 하부지각 또는 상부맨틀의 부분용융

2) 중생대말~신생대초의 화성활동에 의한 잔류열 효과

3) 열전도가 아닌 효과적인 열전달 기구의 존재

지각내의 수직온도 분포

Zone 1에서의 고열류를 설명하기 위한 하나의 가설로서 하부지각 또는 상부맨틀의 부분용융이 전질에서 제안되었다. 이러한 부분용융의 가능성을 검토하기 위하여 먼저 지각내에서의 수직온도분포를 계산하여 보기로 하자. 열전도에 관한 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(K \text{ grad } T) + A \quad (3)$$

여기서  $\rho$ : 밀도

$C$ : 비열

$T$ : 온도

$K$ : 열전도도

$A$ : 열발생률

Zone 1, 2에서 열전도가 이미 평형상태에 도달하였다고 가정하면, (3)식의 좌변은 zero가 된다. 또한, 문제를 좀 더 단순화하기 위하여 수평방향의 열전도를 고려하지 않는 경우, (3)식은 아래와 같은 1차원의 식으로 전환된다.

$$\frac{\partial Q}{\partial z} = -A(z), \quad Q = K \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4)$$

열전도도 및 열발생률이 일정한 두께  $\Delta z$ 의 지층 윗쪽의 온도 및 열유량을  $T_m, Q_m$ 으로 아랫쪽의 온도 및 열유량을 각각  $T_{m+1}, Q_{m+1}$ 으로 할때, (4)식은 다음과 같은 수치계산형으로 표현될 수 있다.

$$T_m = T_{m-1} + \frac{Q_m}{K_m} \Delta z - \frac{A_m}{2K_m} (\Delta z)^2$$

$$Q_m = Q_{m-1} - A_{m-1} \Delta z \quad (5)$$

또한 열전도도는 Birch and Clark (1940)를 참조하여 다음과 같이 온도의 함수를 가정한다.

$$K_m = \left( \frac{600}{300 + T_{m-1}} + 4 \right) \times 10^{-3} \text{ cal / (cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{deg)} \quad (6)$$

결국 지표면의 온도  $T_1 = 15^\circ\text{C}$ 를 경계조건으로 (5)식을 적분하므로써 수직온도분포를 계산할 수 있다. 지각구조 MODEL A, B에 대하여 Zone 1, 2에서 계산된 온도분포를, Yorder and Tilley(1962)의 basalt-eclogite 상평형도위에 나타낸다(그림 3). 정상열류 지역인 Zone 2의 모호면 근처에서의 온도는 지각구조 MODEL A(온도곡선 A2) 또는 MODEL B(온도곡선 B2)의 어느 경우나  $400^\circ\text{C}$  미만이며, 특히 온도곡선 A2의 경우 하부지각에서의 온도가 basalt→eclogite의 상전이 온도에 가까운 것은 지적할만한 사실이다. 또한 고열류 지역

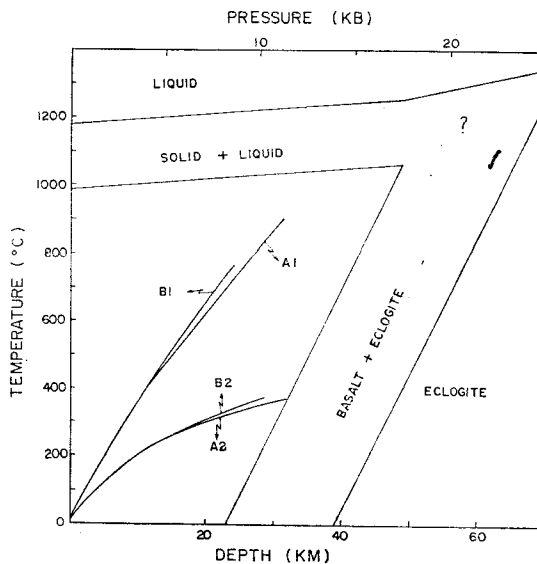


Fig. 3 Vertical temperature distributions overlapped on the phase change diagram of basaltic rocks proposed by Yorder and Tilley (1962). A1 and B1 are the temperature curves in Zone 1 for crustal MODEL A and B, respectively. A2 and B2 are those in Zone 2 for the MODEL A and B, respectively.

인 Zone 1의 모호면 근처에서의 온도는 지각구조 MODEL A(온도곡선 A1)와 MODEL B(온도곡선 B1)의 경우, 각각  $900^\circ\text{C}, 770^\circ\text{C}$  정도로 추정되나 용융온도(약  $1000^\circ\text{C}$ )와는 거리가 멀다.

Zone 1과 2 사이에서 열유량이 급변한다는 사실은, Zone 1에서 고열류의 근원이 지극히 낮은 깊이에 존재함을 시사한다(Mizutani et al., 1970). 그러나 Zone 1에 대해 얻어진 온도곡선은 이러한 얕은 깊이의 열원을 인정하지 않는다. 이 온도곡선을 상부맨틀까지 계산하여 연장할 때 그 온도가 어떤 깊이에서 마그마의 생성온도에 도달될런지 모른다. 그러나 상부맨틀의 열적 물성(열전도도 및 열원의 분포)과 모호면의 성격(상전이면 또는 화학조성 변화면?)에 대해 우리가 알고 있는 지식은 온도곡선을 지각 아랫쪽까지 외삽하기에 충분치 못하다. 또한 온도곡선 A1 또는 B1은 Zone 1의 열류량평균에 대해 얻어진 것이므로, 이 지역내의 특정장소의 지각내에서의 국부적인 용융을 반드시 배제하지는 않는다. 그러나, 이러한 국부적인 용융 또는 지각 아랫쪽의 깊은 열원의 존재로써 이 지역의 고열류를 설명하기는 곤란하다.

화성활동에 의한 잔류열 효과

Zone 1의 고열류를 설명하기 위한 다른 하나의 가설로서, 이 지역내에서 중생대말~신생대초에 걸쳐 있

있던 화성활동의 잔류열을 고려할 수 있다. 이러한 화성활동의 잔류열에 의한 효과를 평가하기 위하여, 먼저 이 지역의 화성활동에 관하여 조사하여 보기로 한다.

화성활동에 관한 정보는 화성암의 생성깊이 및 그 분포를 나타내는 공간적인 정보와, 관입시기를 나타내는 시간적인 정보로 나누어 생각할 수 있다. 먼저 공간적인 정보에 대하여 검토하여 보자. Lee, D.S.(1971)는 육천지향사대에 있어서의 화성활동에 관한 연구에서, 대보화강암(쥬라기)과 불국사화강암(백악기)의 조성차를 분석, 비교하였다. 그 결과는 불국사화강암이 아주 얇은 깊이(0.5kb 이하의 압력)에서 결정된 것을 암시한다(Reedman and Um, 1975). 또한 Jin, M.S. et al.(1981)의 연구도 백악기 화성암의 저압기원설을 지지한다. 한편, Lee, Y.J. (1980)는 경상분지 남부지역의 화강암질 암석류에 관한 K-Ar 연대측정을 통하여, 화강암류를 220~41 MY의 연대를 가진 7개의 group으로 분류하였다. 따라서, 이 지역의 화성활동은 중생대 초~신생대초에 걸쳐, 간헐적이며, 거의 연속적으로 있어 왔다고 볼 수 있겠다. 그러나, 중생대중기에 화성활동이 일시 정지된 기간을 인정할 수 있다.

상기의 화성활동에 관한 시간적, 공간적 정보의 질을 참조하여, 다음과 같은 1차 근사적인 scenario를

가지고 이 지역의 화성활동에 관한 잔류열 효과를 검토하기로 한다.

- 1) 지금부터 80 MY 전에 지표면아래 1~3Km에 두께 2Km의 화강암질 마그마가 관입하여 40 MY 동안 그 상태가 유지되었으며, 관입 화강암체를 덮고 있던 두께 1Km의 지층이 침식에 의하여 점차 제거되었다.
- 2) 초기(80 MY 이전)의 온도분포는 그림 3의 온도 곡선 B1으로써 가정하며, 지표면아래 1~3Km의 온도는 화강암의 용융온도인 900°C(Miyashiro and Kushiro 1977)의 Fig. 25.15)로 고정한다.
- 3) 수평방향의 열전도는 고려하지 않고 수직방향의 열전도만을 고려한다.

위의 scenario를 채용하여 수직온도분포의 시간적 변화를 계산하여 보기로 하자. 물론 위에서 채용한 scenario는 지극히 단순화된 것으로 현실과는 거리감이 있음을 부정할 수 없다. 그러나 화성활동의 잔류열 평가에 있어서 극단적인 조건을 부여한 것임에는 틀림없다.

열전도 방정식 (3)의 1차원형은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{A}{\rho C} \tag{7}$$

단  $k$ : 열확산률  $(= \frac{K}{\rho C})$

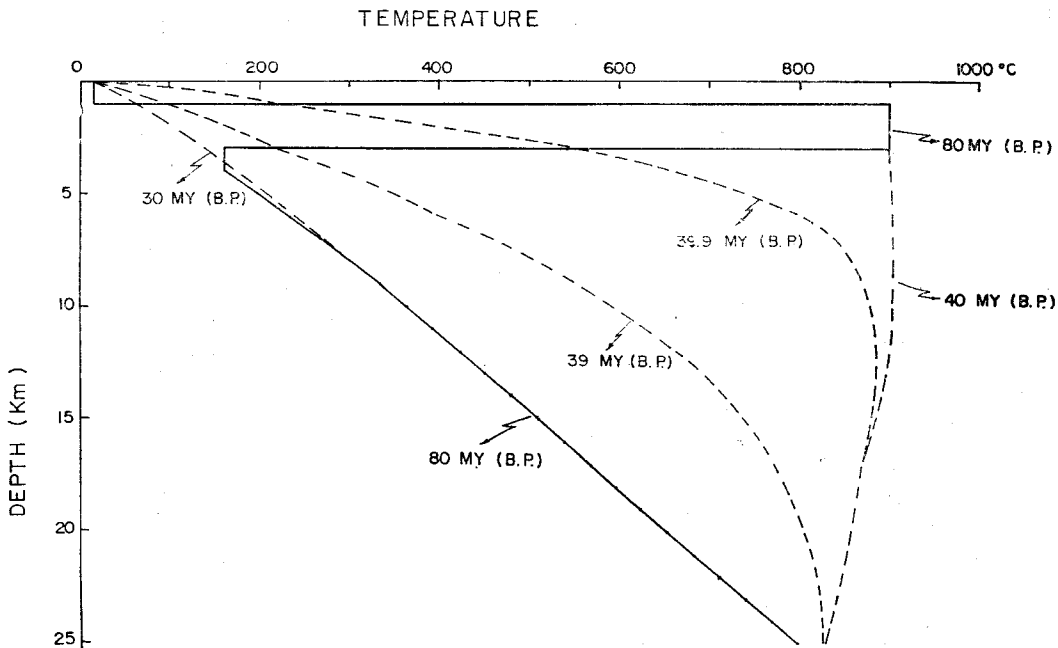


Fig. 4 Changes of vertical temperature distribution simulated by the assumed thermal history in Zone 1. The time unit MY (B.P.) represents million year before present.

여기서, (7)식을 수치적분형으로 전환하여 다음과 같이 나타낸다.

$$T_m^{n+1} = T_m^n + \frac{k\Delta t}{(\Delta z)^2} (T_{m+1}^n + T_{m-1}^n - 2T_m^n) \quad (8)$$

$$\text{단 } z = m\Delta z$$

$$t = n\Delta t$$

$$T = T(m\Delta z, n\Delta t) = T_m^n$$

이때, 안정한 해를 얻기 위해서는  $\frac{k\Delta t}{(\Delta z)^2} \leq \frac{1}{2}$ 의 조건이 만족되어야 한다. (8)식에 화성활동에 관한 scenario를 부여하여 적분함으로써 수직온도분포의 시간적 변화를 계산하게 된다.

$\Delta z = 1 \text{ Km}$ ,  $\Delta t = 10^4 \text{ yr}$ 를 취하여 얻어진 결과를 그림 4에 도시한다. 지금부터 80MY를 출발점으로 하여 40MY가 경과되었을 때의 온도분포는 0~1Km까지가 급격한 온도경사를 보여주게 되며, 1~10Km까지는 화강암의 용융온도인 900°C 정도로 나타난다. 화강암질 마그마의 관입위치를 지표면하 1~3Km로 가정하였음에도 불구하고 1~10Km까지가 용융온도이상으로 상승되었다는 사실은, 40MY 동안 간헐적으로 계속된 화성활동을 지속하기 위해서는 적어도 10Km까지가 magma chamber 또는 통로와 같은 상태를 유지하였음을 의미한다. 화성활동이 종식된 후 시간이 경과함에 따라 온도경사는 점차 완만해지며, 30MY 이전의 온도분포는 거의 정상상태에 도달하여 현재의 온도분포에 근접하게 된다. 다시 말하면, 이 지역내의 화성활동이 끝난 시점(약 40MY 이전)에서 10MY가 경과된, 즉 30MY 이전에 화성활동에 의한 잔류열 효과가 거의 제거되었음을 의미한다. 결론적으로, Zone 1의 고열류는 이 지역내에서 있었던 화성활동의 잔류열 효과로서는 설명될 수 없다.

토론 및 결론

한반도 지각열류량의 지구물리학적 의미에 대하여 고찰하였다. 한반도는 지각열류량이 2.0 H.F.U. 이상인 반도 남동해안지역(Zone 1)과 2.0 H.F.U. 이하인 지역(Zone 2)으로 나눌수 있으며, 두 Zone의 경계에서 열류량은 아주 급격한 변화를 보여준다. Zone 1은 고열류지역인 동해에 접속되며, 중생대말~신생대초의 화성활동지역에 해당된다. 현재 제안되어 있는 지각구조 모델에 대하여, 적절한 방사성원소의 분포를 가정할 때 Zone 2의 열류량은 지각내의 열원에 의하여 대부분이 설명된다. 그러나 Zone 1의 경우, 지각내의 열원으로부터 기대되는 열류량은 관측치의 약  $\frac{1}{2}$ 에 지나지 않으며, 나머지는 맨틀에 의한 기어 또는 다른 효과적인 열전달 기구에 의한 것으로 추정된다.

Zone 1에서의 고열류를 설명하기 위한 하나의 가설로서 지각하부에서의 부분용융의 가능성을 검토하였다. 그러나 제안된 지각구조 MODEL을 채용하여 모호면 부근에서 계산된 온도는 800~900°C 정도로서, 마그마의 발생온도와는 거리가 멀다. 다른 하나의 가능성으로서 이 지역내에서 중생대말~신생대초에 있었던 화성활동의 잔류열 효과가 고려되었다. 그러나 40MY 이전에 화성활동이 끝난후 약 10MY가 경과된 시점에서 화성활동의 잔류열 효과는 사라지고, 수직온도분포는 정상상태에 도달하게 됨이 판명되었다.

결국 Zone 1의 고열류는 인접한 동해의 고열류와 같은 성격의 것으로, 연해(back-arc basin)의 생성 및 성장과 관련이 있을런지 모른다. Toksöz and Hsui(1978)는 연해의 생성을 설명하기 위하여, 그림 5-A와 같은 모델을 제안하였다. 즉 판(Plate)의 침잠(subduction)에 의하여 인접하는 상부맨틀이 심부에 끌려 들어감에 따라, 그 반류로서 상승류가 발생하게 되며, 이러한 상승류가 연해생성의 원동력이 된다고 설명하였다. 한편 Ida and Uyeda(1981)는 판의 침잠에 의하여 맨틀에 끌려 들어가는 퇴적물과 해양성지각이 용융 또는 박탈에 의하여 축적됨에 따라, 반류가 발생되며, 이것이 연해의 생성 및 성장을 촉진하게 됨을 지적하였다.

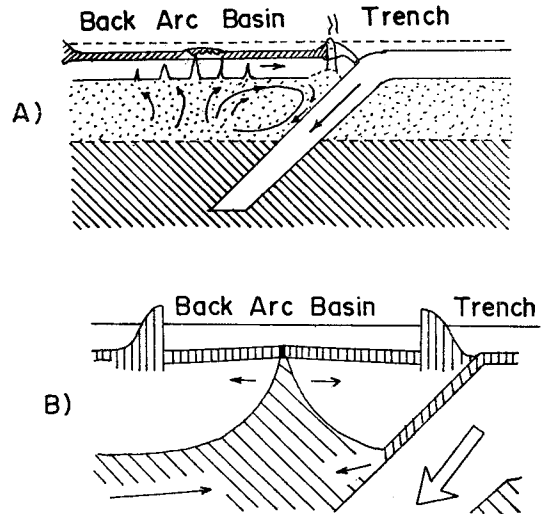


Fig. 5 Models to explain the opening of back-arc basin. A) was proposed by Toksöz and Hsui(1978) and B) by Ida and Uyeda (1981).

결론적으로 연해의 생성과 관련되어 제안된 위의 가설에 의하면, 판의 침잠에 따라 반류가 발생하게 되며, 그 반류는 연해의 중심에서는 상승류로 그 양쪽에

서는 수평류로서 나타나게 된다. 이때 연해를 둘러싼 광역의 응력장이 장력에 지배된다면 연해의 성장은 지속될 것이며, 압축력에 지배된다면 판의 침잠에 따라 발생된 반류는 단지 양측의 육괴를 가열하는데 그치게 된다(Hsui and Toksöz, 1981). Uyeda and Miyashiro

(1982)에 의하면, 동해는 현재 성장이 중지된 상태의 연해에 해당되며, 태평양판이 일본해구에서 침잠하게 됨에 따라 동해밑에서 발생된 반류에 의하여 동해 및 인접지역이 가열되고 있는 상태일 것이다. 결국 이러한 기구에 의하여 Zone 1의 고열류가 설명될 수 있다.

### 참 고 문 헌

- Birch, F. (1965) Speculations on the Earth's thermal history. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 76, p. 133—154.
- Birch, F. and H. Clark (1940) The thermal conductivity of rocks and its dependence upon temperature and composition. *Am. Journ. Sci.*, v. 238, p. 529—558.
- Hsui, A. T. and M. N. Toksöz (1981) Back-arc spreading: Trench migration, continental pull or induced convection. *Tectonophysics*, v. 74, p. 89—98.
- 장정진, 김규호, 공영세 (1970) 한국의 지열류량. 지구 물리화학 탐사연구보고, 제 4 권 1 호, p. 30—37.
- Jin, M. S., S. Y. Kim, and J. S. Lee (1981) Granitic magmatism and associated mineralization in the Gyeongsang Basin, Korea. *Mining Geol.*, v. 31 (4), p. 245—260.
- 김상조 (1980) 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구. 한양대학교 대학원 석사학위논문, 68 p.
- Kim, S. K. (1979) Geodetic and geophysical analyses of gravity data in Korea. *Journ. Korean Inst. Minery Geol.*, v. 12, p. 17—28.
- Lee, D. S. (1971) Study on the igneous activity in the middle Ogcheon Geosynclinal Zone, Korea. *Journ. Geol. Soc. Korea*, v. 7, p. 153—216.
- Lee, K. H. (1979) On the crustal structure of the Korean Peninsula. *Journ. Geol. Soc. Korea*, v. 15, p. 253—258.
- Lee, W. H. K. and S. Uyeda (1965) Review of heat flow data, in *Terrestrial heat flow*. Ed. by W. H. K. Lee, AGU Monograph No. 8, p. 191—210.
- Lee, Y. J. (1980) Granitic rocks from the southern Gyeongsang Basin, Southeastern Korea—Part 1, General geology and K—Ar ages of granitic rocks. *Journ. Japan Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, v. 75, p. 105—116 (in Japanese).
- Miyashiro, A. and I. Kushiro (1977) *Petrology III*. Kyoritsu-shuppan, Tokyo, 245p. (in Japanese).
- Mizutani, H., K. Baba, N. Kobayashi, C. C. Chang, C. H. Lee, and J. S. Kang (1970) Heat flow in Korea. *Tectonophysics*, v. 10, p. 183—203.
- Reedman, A. J. and S. H. Um (1975) *Geology of Korea*. KIER, 139 p.
- Shimazu, Y. (1972) *Physics and chemistry of the solid earth* (4th ed.). Shyokabo, Tokyo, 394 p. (in Japanese).
- Toksöz, M. N. and A. T. Hsui (1978) Numerical studies of back-arc convection and formation of marginal basins. *Tectonophysics*, v. 50, p. 177—196.
- Uyeda, S. and H. Kanamori (1979) Back-arc opening and the mode of subduction. *Journ. Geophys. Res.*, v. 84, p. 1049—1061.