

한반도의 지진지체구조 설정을 위한 지구물리학적 자료

김성균¹⁾ · 김우한²⁾ · 최광선³⁾ · 조봉곤⁴⁾ · 이희권⁵⁾

1. 서론

어떤 지역에서 발생가능한 지진동을 확률적으로 예측하기 위해서는 그 지역을 포함한 광범위한 지역의 지진원(seismic source zone)을 정의하지 않으면 안된다. 지진원이란 동일한 지진학적, 지체구조적, 지질학적 양상을 가지는 지역을 의미하며, 지진활동이 지역내에서 균질로 하나의 지진규모 - 발생빈도 관계식에 의해 표현될 수 있는 지역으로 가정된다. 또한 하나의 지진원 내의 지진활동성은 그 지역 전반에 걸쳐 고르게 분포하고 미래의 지진은 그 지역내의 어떠한 곳에서도 발생할 수 있다고 가정된다. 이러한 지진원은 그 기하학적 형태에 따라 점지진원, 선지진원, 면적지진원으로 나눌 수 있다. 점지진원은 보통 과거에 지진이 발생했던 지점에서 같은 양상으로 지진이 발생할 것으로 가정할 때에 정의되며, 선지진원은 활성단층(active fault or capable fault)과 같이 어떤 선상을 따라 지진이 발생하는 것을 가정할 때 사용된다. 한편 면적지진원은 어떤 범위의 지역내에서 지진활동이 균질일 때 정의된다.

위에서 정의한 지진원을 설정하기 위해서는 대상지역내의 지진활동을 포함한 지체구조 및 지구물리학적 자료를 충분히 검토하지 않으면 안된다. 이 연구의 목적은 한반도를 대상으로 한 지진활동 자료와 지구물리 자료들을 검토하고, 그 자료들 사이의 관련성을 조사하는 것이다.

2. 지진활동 자료

한반도 주변에서 발생한 지진자료를 정리한 지진목록은 다수의 연구자에 의하여 작성되었다(이기화외, 1980; 한국동력자원연구소, 1983; Kim and Gao, 1995; 김성균등, 1996; 건설교통부, 1997; 이기화, 1999). 이 목록들을 비교해 보면, 역사지진의 경우는 자료출처의 차이, 서술적인 역사문헌 해석상의 차이 때문에 시대별 발생지진의 수, 진앙지와 진도에 차가 있다는 사실은 잘 알려져 있다. 예를 들면 출처가 다른 두 개의 문헌에 지진발생 시각이 약간 다른 경우, 또는 거의 비슷한 시간에 지역적으로 다소 떨어진 곳의 지진기사를 별개의 사건으로 취급할 것인가, 동일 사건으로 취급할 것인가에 따라 지진의 수가 달라지게 된다. 또한 어떤 지진기사를 해석하여 진앙지와 진도를 평가하는 경우, 평가기준의 차에 따라 목록이 달라지게 된다. 따라서 개개의 지진목록의 우열을 가리기는 쉽지 않다. 지진활동의 공간 분포를 조사해보면, 삼국시대와 고려시대에는 진앙지가 명시되어 있지 않거나 당시의 정치, 문화의 중심지였던 수도에 거의 집중된다. 이것은 다른 지역에서 발생한 지진의 누락 가능성을 암시한다. 한반도 전체에 걸쳐 지진활동이 나타나는 시기는 조선시대 이후이다. 따라서 지진활동의 지역적인 차이를 검토할 때, 조선조 이전의 자료사용에는 각별한 주의를 요한다.

주요어: 지진원, 지진지체구조, 중력이상, 자력이상, 지열류, 지진활동상수

- 1) 전남대학교 지구환경과학부(kimsk@chonnam.ac.kr)
- 2) 경상대학교 지구환경과학과(wookim@nongae.gsnu.ac.kr)
- 3) 부산대학교 지구과학과(ksunchoi@hyowon.ac.kr)
- 4) 전북대학교 지구환경과학과(bgjo@moak.chonbuk.ac.kr)
- 5) 강원대학교 지구환경과학부(heekwon@kangwon.ac.kr)

계기지진목록도 역사지진의 경우와 같이 목록 작성자에 따라 자료에 차가 있음은 잘 알려져 있다. 계기관측이 시작된 20세기 전반의 자료와 후반의 자료는 자료의 질에 있어 큰 차이를 가지고 있다. 20세기 전반의 자료는 관측소의 밀도가 낮고 관측계기의 정밀도가 떨어지는 관계로 진앙지의 오차가 크다. 그러나 역사지진에 비하면 일정규모 이상의 지진을 선택하면 비교적 누락의 가능성이 작으며, 진앙지의 정밀도도 훨씬 높다고 할 수 있다.

본 연구에서는 건설교통부(1997)의 지진목록을 토대로 북한 경수로 부지보고서(한국전력 기술주식회사, 1996)의 지진 목록을 참조하여 수정, 보완된 지진목록을 사용하였다.

지진활동의 공간분포(그림 1)는 대체로 서해안쪽이 활발하며, 한반도 남동부에서 서북서 방향으로 활발한 양상을 보여준다. 한편 시간적인 지진발생의 빈도를 조사해 보면, 관측초기에 비하여 최근의 발생횟수가 급증하는 것처럼 보인다. 그러나 이것은 지진관측소 밀도의 증가와 지진계 성능의 향상과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 왜냐하면 관측소가 지리적으로 적절히 분포되어 있고 그 수가 많고 지진계의 성능이 좋을수록, 지진관측의 기회가 증가하기 때문이다.

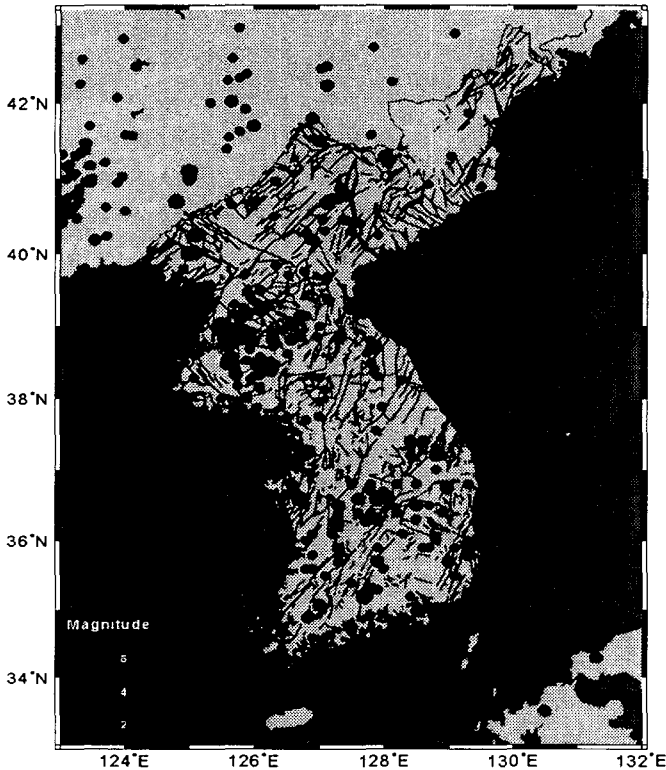


Fig. 1. Instrumental Seismicity of the Korean Peninsula.

3. 기타 지구물리학적 자료

기타 지구물리학적 자료로서는 지진파 속도, 중력, 자력, 지열류등을 들 수 있다. 이러한 지구물리학적 관측량의 공간적 분포는 지각구성물질들의 역학적 물성차를 반영한다고 할 수 있다. 이러한 지각 물성차에 따른 암석의 파괴강도의 차이는 지진발생조건의 차이를 의미한다. 예를 들면, Verma et al.(1976)은 인도 북동부와 미얀마 북부에서 지진활동이 활발한 지역의 중력이 폭 넓게 변화하며, 지각균형 이상이 +100에서 -130 mGal까지 변화한다는 사실을 지적하였다. 그들은 음과 양의 지각균형이상은 각각 지각 하부의 섭입대와 융기대의 존재를 시사하며, 섭입과 융기에 따라 지진활동이 활발해진다고 보고하였다. 한편 Sibson (1982)은 북미대륙에서 열류량의 분포와 지진의 발생깊이와 상관관계가 있음을 지적하였다. 한편, Kyung(1989)은 지진활동과 지형, 선상구조(lineament) 및 중력이상과의 상호 관련성을 조사하였다. 그는 지형을 장주기 성분과 단주기 성분으로 나누기 위하여 지형자료에 대한 2차원의 Fourier변환을 시행하였으며, 지형의 장주기 및 단주기 성분과 지진활동과의 상관을 조사하였다. 그 결과 대부분의 지진활동이 단주기 지형의 변두리 부분에 집중된다는 사실을

알아냈다. 또한 거의 80% 이상의 지진이 주요 선상구조에서 10km이내의 거리에 분포한다고 보고하였다. 한편, Kyung(1989)은 중력이상과 지진활동과의 상관을 조사한 결과, 중력이상의 경사가 급한 곳일수록 지진활동이 활발하다는 사실을 지적하였다.

위에서 고찰한 바와 같이, 지진파 속도구조, 지열류, 중력 및 자력분포가 지진의 발생과 관련이 전연 없는 것은 아니지만, 이러한 요소들만으로 지진원을 설정하기는 어렵다고 할 수 있다. 만일 이러한 요소들이 지역적으로 뚜렷한 특징을 가지고 분포하며, 인접한 지역과 다른 지진활동 특성을 나타낸다면 독립된 하나의 면적지진원으로 설정할 수 있을 것이다.

이하에서는 지구물리학적 요소들에 대하여 한반도를 대상으로 연구한 결과를 간단히 요약, 소개하여 지진원결정을 위한 참고자료로 제시하고자 한다.

3.1 지진파 속도구조

한반도의 지각구조에 관한 초기의 연구는 중력과 지진자료를 이용하여 수행되어 왔다. 중력자료 해석에 의한 연구결과에서는 모호면의 평균심도와 기복이 등치선의 형태로 제시되어 왔다. 지진자료에 의한 최초의 연구결과로서, Lee(1979)는 쌍계사지진의 주시자료를 이용하여 개략적인 지각구조를 얻었다. 또한 김상조(1983)는 쌍계사지진, 홍성지진등의 자연지진기록을 해석하여 지각을 포함한 상부맨틀까지 좀 더 세분된 지진파속도 구조를 제시하였다. 이 연구에서 얻어진 속도구조는 지각이 Conrad 불연속면을 경계로 상부지각과 하부지각으로 나뉘며, 모호면 아래에 저속도층의 존재를 제시하고 있다. 이 지진파 속도구조 모델은 기상청의 진앙지 결정에 널리 이용되고 있다. 김성균(1995)은 중력, 지진파 주시자료 및 표면파 분산자료를 사용하여 지진파 속도구조를 결정하였다. 먼저 중력이상의 2차원 파워 스펙트럼으로부터 지하밀도 불연속면의 깊이를 계산하였으며, 다음으로 인공발파와 지진자료에 의한 주시곡선을 분석하여, 지진파 속도구조를 얻었다. 여기서 얻어진 속도구조는 관측된 레일리파의 분산곡선을 만족하도록 조정되었다. 본 연구결과로 얻어진 모델은 중력, 지진파 주시자료, 표면파의 분산자료를 잘 만족시킨다는 특징이 있다.

한편 이승규, 김소구(1998)는 원격수진함수를 이용하여 인천 광대역 지진관측소와 서울 관측소 부근의 지하 지진파 속도구조를 상세하게 제시하였다. 일반적으로 수진구조함수 분석에 의한 지각구조 역산은 단일 지진관측소 부근에서 기록된 지진파형을 이용하여 관측소 부근의 지진파 속도구조를 상세하게 밝힐 수 있는 방법중의 하나이다. 그러나 여기서 얻어진 구조는 국지적인 구조이므로 한반도 전체에 광역적으로 사용하기에는 부적합하다.

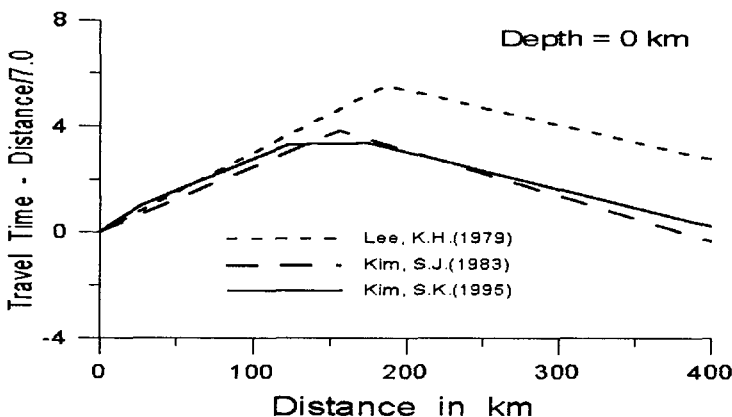


Fig. 2. Reduced travel time - distance curve for various velocity model.

Kim, S.G. and Li, Q.(1998a, 1998b)는 토모그래피기법을 사용하여 한반도 남부와 중부의 3차원적인 지진파 속도구조를 제시하였다. 그러나 사용한 자료의 질과 각 위상의 시각에 대한 해상도가 낮아 얻어진 결과에 상당한 오차가 내재되어 있는 것으로 판단된다.

이상과 같은 관점에서 현재 한반도에서 광역적으로 사용 가능한 지진파 속도구조모델은 김상조(1983)와 김성균(1995)의 모델이라고 할 수 있다. 두 모델과 Lee, K.H.(1979)의 차이를 조사하기 위하여, 이 모델들에 의한 주행시간을 0-400 km의 범위에서 진원깊이 0 km에 대하여 계산하여 거리-주행시간관계를 조사하였다(그림 2). 그 결과 김상조(1983)와 김성균(1995)의 모델은 300 km 이상의 원거리와 진원깊이 20 km에서 진원거리 100 km 전후를 제외하고 큰 차가 없다. 그러나 Lee, K.(1979)는 두 모델과 큰 차를 보여준다.

3.2 중력

최광선 외(2002)는 한반도 일원에서 측정된 기존의 중력자료와 새로이 측정된 자료등을 편집하여 한반도 일원의 부우계 이상도를 작성하였다. 먼저 기존의 중력자료로서는 1) NOAA에 등록된 한반도 일원의 선상자료, 2)과거에 측정된 육상자료(5367지점), 3)일본 동경대 측정 해상자료, 4)Altimetry Satellite 자료, 5)OSU91A 중력모델 자료등이다. 여기에 추가로 1)최근의 Altimetry Satellite 자료, 2)국립해양조사원의 영해지역자료, 3)EGM96 중력모델 자료, 4)북한 육상지역 자료, 5)추가로 측정된 육상지역 자료등을 합성하여, 한반도 일원의 지오이드 분포도와 부우계 이상도를 작성하였다. 중력이상은 NNW-SSE 방향의 태백산맥에서 음의 값을 가지며, 동해쪽으로 급격히 증가한다. 또한 NE-SW 방향의 소백산맥에서 -40mGal까지 내려가며 황해쪽으로 가면서 서서히 증가한다. 한편 경기육괴의 북부지역에서 음의 값을, 평안분지에서 양의 값을 나타낸다.

3.3 자력

한국자원연구소는 1980년 이래 항공자력탐사를 수행하여 한반도 남부의 약 40%에 이르는 지역에 대한 상세한 자력이상도를 출판하였다(한국자원연구소, 1993). 이 자료들은 국지적인 지자기 분포에 관한 정보로서 충분한 가치를 가지고 있으나, 한반도의 광역적인 경향을 알기에는 미흡하다. 한편 국립지리원(1990)은 한반도 남부의 400여 지점에서 지자기 3성분을 측정하였다. 이 측정점들은 고르게 분산되어 있어, 이로부터 한반도 남부의 광역적인 경향을 추출하는 것은 가능하다. 김성균 외(1995)는 국립지리원의 자료로부터 전자력이상도를 작성, 제시하였다. 전자력이상은 경상분지의 동부에서 강한 정의 이상을, 경기육괴의 남서부와 옥천대의 북서부에서 강한 부의 이상을 나타낸다.

3.4 지열류

한반도의 지열에 관한 연구는 1970년대초 한국과 일본 지질조사소의 공동연구에 의하여 시작되었다. 그 후 김성균(1984)은 동해를 포함한 한반도의 동남부지역에서의 고열류를 태평양판이 유라시아판 아래로 섭입함에 따라 생긴 유도반류로서 설명하였다. 또한 Han and Chapman(1985)은 한반도를 포함한 광역적인 지역의 지열류량 분포를 판구조론적 입장에서 해석하였다.

한편 한국자원연구소는 1982년부터 시작된 한반도의 지열자원 잠재성에 대한 기초조사의 일환으로 전국적인 지열류량 조사작업을 지속적으로 추진하여 왔다. 그 결과는 임정웅 외(1997)에 종합, 정리되어 있다. 그들은 한반도 남부의 433개 지점의 시추공에서 온도검층을 수행하였다. 시추공의 대부분은 온천개발을 목적으로 하는 시추공이며, 일부는 지하수개발을

위한 시추공으로서 깊이는 대략 500m 전후이다. 시추공의 분포는 대체로 한반도 남부에 분산되어 있으나, 태백산, 지리산지역과 같은 고지대의 자료가 적은 편이다. 지온경사의 평균은 대략 25-30°C/Km 정도이고, 동해안의 중부와 남부, 경기 서북부, 아산만등지에서 높게 나타나며 충남 서해안, 충북 내륙, 전남 서해안 등지에서 낮게 나타난다.

지온경사에 암석의 열전도도를 곱하여 얻어지는 지각열류량의 분포는 등고선의 형태로 제시되었다. 열류량은 경상분지와 경기육괴의 대부분 지역에서 전반적으로 높은 값을 보여 주며, 국부적으로 일부 높은 값을 나타내는 지역을 제외하고는 50-60 mW/m²의 값을 나타내고 있다. 이러한 지열류량의 분포와 진앙분포와의 사이에 직접적인 관련성을 찾기는 어렵다고 할 수 있다.

4. 지구물리 자료들 사이의 관련성

위에서 검토한 지구물리 자료들중 한반도 전체 또는 한반도 남부에 걸쳐 지역적인 변화를 나타내고 있는 관측량들은 중력이상, 자력이상, 지열류이며, 등치선도로 자료가 제시되어 있다. 이 등치선도와 지진활동 사이의 관련성을 아래와 같은 방법으로 조사하였다.

먼저 모든 자료가 공통적으로 존재하는 위도 35° - 38°, 경도 126.5° - 129.5° 범위의 4각형 지역을 경도 0.5° × 위도 0.5° 의 격자로 세분하여 각 격자의 값을 읽었다. 각 격자의 값은 격자점을 중심으로 경도 1° × 위도 1° 의 지역내에 5×5의 세분된 격자를 만들어 각 격자점의 값을 평균하여 경도 0.5° × 위도 0.5° 격자의 값으로 정하였다. 이러한 방법으로 중력이상, 자력이상, 지열류에 대해 얻은 자료는 7×7의 행렬이 되며, 각 요소의 값들은 평면상에서 이동평균을 취한 것과 같다.

한편 지진활동을 다른 지구물리 자료와 비교하기 위하여, 계기지진의 공간분포로부터 지진활동을 나타내는 상수 a, b 를 위와 같은 격자점에 대해서 얻었다. 좁은 범위의 지역에 대하여 계산된 상수 a, b 가 지진학적으로 의미가 없는 경우가 있으므로, 이 상수들은 경도 2° × 위도 2° 범위의 지역에 대하여 계산하였다. 여기서 상수 a 는 규모 5이상의 지진의 연간 발생률로서 계산하였다.

위와 같은 방법으로 얻어진 지진활동에 관한 자료와 중력이상, 자력이상, 지열류의 자료들은 모두 7×7의 행렬로 표현되나, 각각의 자료들은 그 단위가 다르다. 이와 같은 지도자료를 비교하는 기법으로서 Davis(1973)의 방법을 사용하였다. 먼저 7×7의 행렬로 구성된 자료들의 요소 x_i 는 다음과 같은 식으로 표준편차에 대하여 정규화 하였다.

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (1)$$

여기서 z_i, \bar{x}, σ 는 각각 정규화된 행렬요소, 요소들의 평균값 및 표준편차를 나타낸다. 이 식으로 정규화함으로써 지진활동과 지구물리 자료들은 무차원의 7×7의 행렬이 된다. 표 1은 이 자료들 사이의 상관관계를 구한 것으로서, 일반적으로 상관은 그렇게 크지 않다. 주목할만한 점은 다른 자료와 중력이상 사이에 상관이 상대적으로 크며 지진활동상수 b 와 다른 요소들과는 음의 상관을 보여 준다는 점이다.

한편 지진활동 상수들과 지구물리 자료들의 공간분포의 유사성을 조사하기 위하여 위에서 얻은 각각의 자료들에 대한 7×7 행렬요소들 사이에 차 또는 합을 구하여, 그 값을 등치선도로 나타낸 것이 그림 3이다. 예를 들면 중력이상에서 자력이상을 뺀 좌상의 등치선도에서 +값은 중력이상이 자력이상보다 큰 것을 나타내며, -값은 반대의 경우를, 0는 두 값이 유사함을 나타낸다. 이 등치선도들이 구체적으로 어떤 지구물리학적 의미를 가지는가에 대해서

는 지질구조도등 다른 자료들과 비교를 통하여 앞으로 조사할 예정이다.

Table 1. Correlation Between Seismicity parameter and geophysical data.

	Gravity Anomaly	Geomagnetic Anomaly	Heat Flow	Seismicity Parameter "a"	Seismicity Parameter "b"
Gravity Anomaly	1.0	0.4461	0.6644	0.4905	-0.7030
Geomagnetic Anomaly	—	1.0	0.3701	0.3543	-0.2369
Heat Flow	—	—	1.0	0.3449	-0.2897
Seismicity Parameter "a"	—	—	—	1.0	-0.2332
Seismicity Parameter "b"	—	—	—	—	1.0

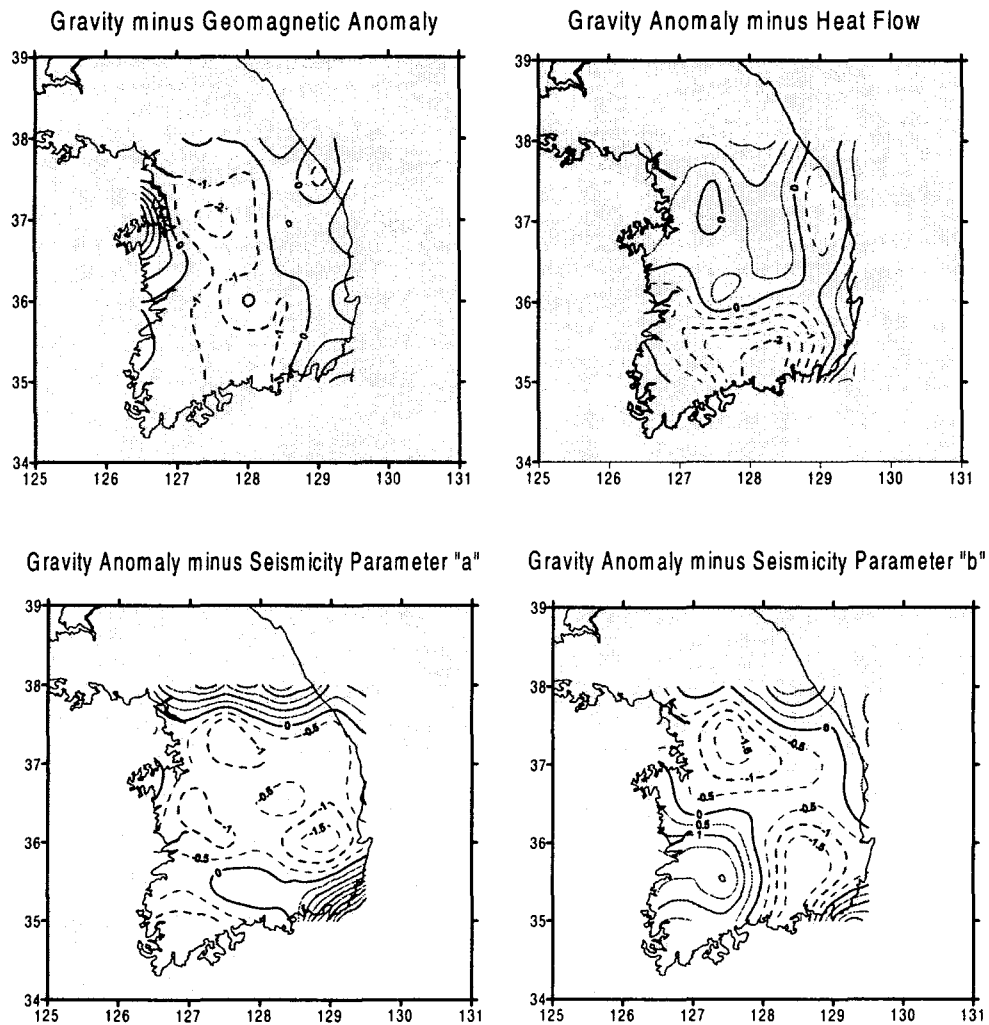


Fig. 3. Similarity maps between geophysical data and seismicity parameters.

사 사

이 연구는 과학재단 특정기초연구 한반도와 한반도 주변의 지진지체구조(R01-1999-0002-0005-0(2002))의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- 건설교통부(1997) 내진설계 기준연구, 건설교통부.
- 국립지리원(1990) 지자기 측량에 관한 연구, 국립지리원, 157p.
- 김상조(1983) 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구, 한양대학교 석사학위논문.
- 김성균(1984) 한국 지열류량에 대한 약간의 고찰, 대한광산지질학회, 17, 109-114.
- 김성균(1995) 한반도의 지각구조에 관한 연구, 지질학회지, 31, 393-403.
- 김성균, 김우한, 김준경, 박창업, 조봉곤(1996) 피해 역사지진의 재검토, 한국자원연구소 위탁 연구보고서.
- 이기화, 정희옥(1980) 한반도의 계기지진 연구, 대한지질학회지, 16, 32-45.
- 이기화(1999) 역사지진 평가 및 목록작성, 한국원자력안전기술원.
- 이승규, 김소구(1998) 원격수신합수를 이용한 서울과 인천관측소 하부의 지각속도구조와 Moho 불연속면 특성연구, 자원환경지질, 31, 339-347.
- 임정웅, 이승구, 염병우, 김형찬(1997) 지열자원조사연구, 한국자원연구소, KR-96(C)-17.
- 최광선, 김정희, 양철수(2002) 우리나라 일원의 중력이상도 작성과 중력자료의 지구물리학적 해석, 부산대학교 연구보고서.
- 한국동력자원연구소(1983) 한반도의 지진위험도, 한국동력자원연구소.
- 한국자원연구소, 1993, 항공방사능 및 자력탐사연구, 한국자원연구소, KR-92-1(A-1).
- 한국전력기술주식회사(1996) 북한경수로 부지 조사보고서. KOPEC.
- Davis, J.C.(1973) Statistics and data analysis in geology. Wiley & Sons, Inc., 548 p.
- Han, W., and Chapman, D.S(1985) On the regional heat flow around Korea and reduced heat flow, Jour. Geol. Soc. Korea, 21, 74-78.
- Kim, S.G. and F. Gao(1995) Korean earthquake catalogue, The Seimological Institute of Hanyang University.
- Kim, S.G. and Li, Q.(1998a) 3-D crustal velocity tomography in the southern Part of the Korean Peninsula, Econ. Environ. Geol. Korea, 31, 89-99.

- Kim, S.G. and Li, Q.(1998b) 3-D crustal velocity tomography in the central Korean Peninsula, *Econ. Environ. Geol. Korea*, 31, 235-247.
- Kyung, J.B.(1989) The characteristics of the seismicity of the Korean Peninsula, Doctor Thesis, Seoul National Univ.
- Lee, K.(1979) On the crustal structure of the Korean Peninsula, *Jour. Geol. Soc. Korea*, 15, 134-150.
- Sibson, R.H.(1982) Fault zone models, heat flow, and the depth distribution of earthquakes in the continental crust of the United States, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 72, 152-163.
- Verma, R.K., Mukhopadhyay, M., and Ahluwalia. M.S.(1976) Seismicity, gravity, and tectonics of Northeast India and Northern Burma, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 66, 1683-1694.