

불연속면의 방향성과 지하수 유동과의 상관성 연구

김병우

부경대학교 환경지질과학과

정상용

부경대학교 환경지질과학과

강동환

부경대학교 환경지질과학과

김성욱

지반정보연구소

요 약

BIPS와 Televiwer를 이용하여 10개의 지하수 관측공에서 획득된 1,591개 불연속면을 분석하여 지하수 유동과의 관계를 비교·분석하였다. 연구지역 내의 지형은 산계가 잘 발달된 계곡형 지형이며, 수계의 발달은 매우 미약하다. 연구지역 주변에는 북북동-남남서 방향의 양산단층과 동래단층이 발달되어 있으며, 연구지역 내에는 EW방향의 선구조도 발달되어 있다. 지하수공내에서 조사된 불연속면의 주 방향은 위성사진에서 판독된 선구조의 방향과 대부분 일치한다.

지구통계기법을 이용하여 작성된 지하수위 등고선도에서 추정된 지하수 유동방향과 유향·유속기에서 측정된 지하수 유향은 거의 일치하지만, 단열암반에 발달된 불연속면의 방향과 지하수 유동방향은 2가지로 해석되었다. 첫째는 단열암반에 발달된 불연속면의 방향과 지하수 유동방향이 잘 일치하는 경우(BH-01, 03, 04, 12공), 둘째는 불연속면의 방향과 지하수 유동방향이 잘 일치하지 않는 경우(BH-02, 05, 07, 11)이다. 지하수 유동방향이 불연속면의 방향과 일치하지 않는 경우는 지형의 변화에 더 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 단열암반 내에서 지하수의 유동은 단열의 방향성에 영향을 받지만, 지형의 특성에도 큰 영향을 받는다.

주요어 : 단열암반, 불연속면, 지하수 유동방향, 지하수위 등고선도, 지형의 변화

1. 서 론

본 연구는 경부철도 대구-부산간 노선이 관통하는 부산 동래구 사직동 일대를 중심으로 단열암반에 발달된 불연속면의 방향성과 지하수 유동의 상관성을 연구하는데 목적을 두고 있다.

우리나라의 암반지하수는 대부분이 단열암반에 발달된 균열에서 용출되고 있으므로, 단열의 발달 특성은 지하수의 산출에 큰 영향을 준다. 1990년 초부터 단열암반에서의 지하수 유동, 지하수 산출, 오염물질의 확산 등, 균열과 관련된 연구가 많이 수행되고 있다.

연구지역의 지형적 특성을 파악하기 위하여 산계와 수계를 분석하였고, BIPS와 Televiwer를 이용하여 단열암반에 발달된 불연속면의 물리적 특성을 파악하였으며, FracMan(Golder Assoc. Inc., 1994)을 이용하여 불연속면의 단열망을 3차원으로 모사하였다. 본 연구에서는 산계, 수계, 선구조, 단열의 분포 및 방향성 등을 파악하고, 유향유속계로 측정된 지하수 유향과 지하수위 등고선도에서 추정된 지하수 유향을 비교하여 단열암반에서의 지하수 유동 특성을 분석하였다.

2. 본 론

2.1. 지 질

본 연구지역은 중생대 백악기에 발달된 경상분지의 남동부에 위치하며, 신생대 제4기 단층계를 이룬 동래단층과 양산단층 사이에 위치한다. 지질은 백악기 하양층군에 속하는 퇴적암층인 이천리층, 유천층군의 안산암류 그리고 이들을 후기에 관입한 화강섬록암으로 구성되어 있다. 이들 암층들의 분포는 북북동-남남서 방향으로 발달된 동래단층과 양산단층 및 이에 수반되는 작은 규모의 단층들에 의해 규제되어 있다(Figure 1(a)). 이천리층은 북서쪽의 금정봉 정상부를 중심으로 상부 지역에 분포하며, 흑색 또는 암회색의 셰일로 구성되어 있고 대체로 화강암의 관입으로 혼펠스화되어 있다. 안산암류는 연구지역 중서부와 남부지역에 분포하며, 상부에 국부적으로 안산암질 응회암 내지 각력암이 산출된다. 화강섬록암은 동·북부 지역에서 이천리층과 안산암류를 관입하여 분포하고 있다(Figure 1(b)).

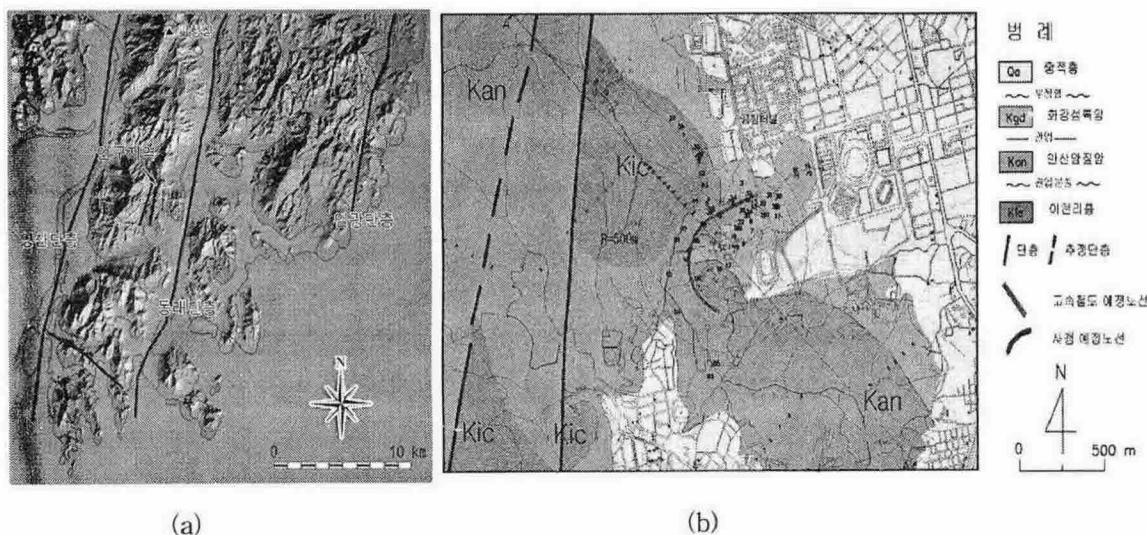


Figure 1. (a) Location map and (b) geological map of study area ((주)대우건설, 2004).

2.2. 산계와 수계

연구지역 주변의 산지의 모양은 북북동-북북서 방향과 남서-남동 방향의 높은 지형으로 배열되어 있다. 본 연구지역의 산계는 남측의 불옹령($\Delta 611.0\text{m}$) 및 백양산($\Delta 641.5\text{m}$)이 발달되어 있으며, 연구지역과 근접하여 부산진구와 연제구를 구분 짓는 금정봉 및 금용상($\Delta 152\text{m}$) 등의 일련의 산계들이 발달되어 있는 계곡 지형이다(Figure 2(a)).

연구지역 주변의 수계의 흐름 방향은 양산단층과 동래단층의 방향과 유사한 수계의 흐름 방향을 보이며, 산지의 지류들은 수지상(dendritic pattern)의 수계를 일부 나타나고 있다(Figure 2(b)). 단열분석이 이루어진 연구지역 내에서 수계의 발달은 매우 미약하다.

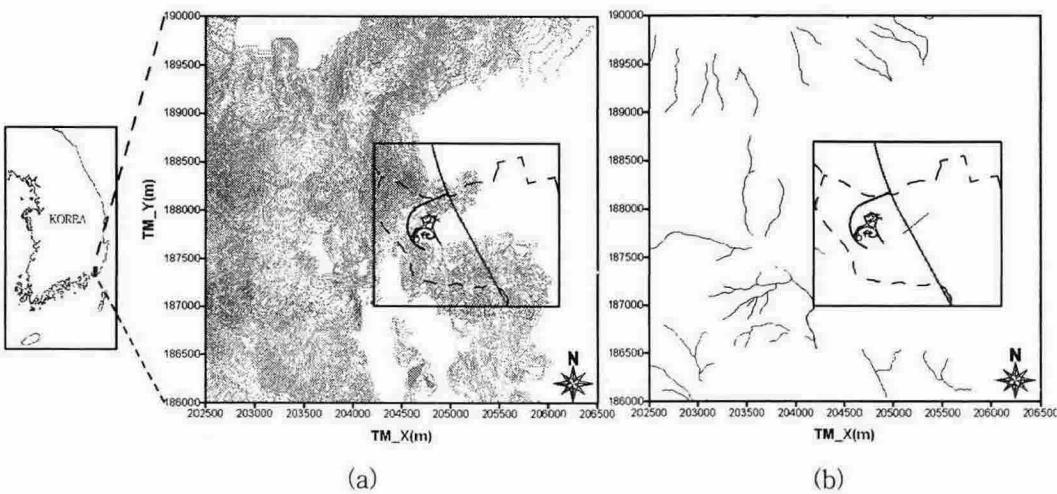


Figure 2. Mountain system and drainage system at the study area.

2.3. 선구조

연구지역의 선구조 분석에는 1:25,000 DEM(Digital Elevation Model) 자료를 이용해 작성한 음영기복도를 이용하였으며, 조사지역을 포함한 중간 규모의 분석에는 1m 고해상도 IKONOS 인공위성영상을 사용하였다.

음영기복도와 인공위성영상에서 추출된 선구조자료를 이용하여 Figure 3의 히스토그램과 Figure 4의 장미도를 나타내었다((주)대우건설, 2004). 그 결과 조사지역에서 가장 우세한 선구조의 주 방향은 NS-N20°E 방향이며, 규모를 고려한 연장길이 분포도에서도 유사하게 나타났다. 다음으로 우세한 방향은 EW 방향이며, 선구조의 발달방향으로 볼 때 이 지역의 광역 단층선인 동래단층, 양산단층 등과 성인적으로 밀접한 연관이 있을 것으로 해석된다.

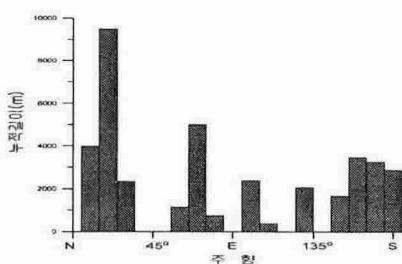


Figure 3. Histogram of lineaments.

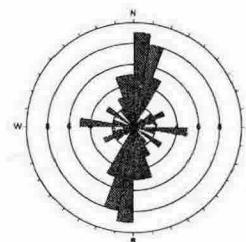


Figure 4. Rose diagram of linearments.

2.4. 단열암반의 특성

10개의 시추공에서 단열분포특성을 조사하기 위하여 BIPS와 Televiever 검증을 실시하였다. 검증 자료는 암반블록규모 내의 조사지점에서 얻어진 단열의 방향성이 동일 불연속면영역의 구조적 특성을 갖는지를 파악한 후, 심부 영역을 구분하여 단열의 확률분포 특성과 단열방향을 해석하였다.

Figure 5와 Figure 6에 나타난 BH-01, 03, 13, 14공 지점은 북북동 방향의 R-전단단열(shear fracture)이 우세하게 나타났으며, BH-02, 04, 07, 11, 12공 지점은 북동방향의 인장단열(tension

fracture)이 우세하게 나타났다.

지하수공 10개 지점에서 BIPS 및 Televiewer에서 조사된 1,591개의 불연속면 자료를 토대로 통계분석을 수행하여 확률론적 특성을 파악하고, 열암반에서의 3차원 지하수유동 모델링에 이용되는 소프트웨어 FracMan의 모듈인 Fracsolve와 Fracview를 이용하여 Figure 7의 3차원 단열망을 생성하였다. 3차원 단열망들은 심도에 따라 불연속면의 공간적 분포특성을 잘 나타내고 있다. BH-01, 03, 05 07, 13, 14공 지점에서는 단열망의 밀도분포가 조밀하게 나타나며, 하부로 내려갈수록 단열의 밀도분포가 증가한다. BH-02, 04, 11공 상부지점에서는 단열의 분포가 적게 나타나는데, 심부로 내려 갈수록 단열의 분포가 증가되었다.

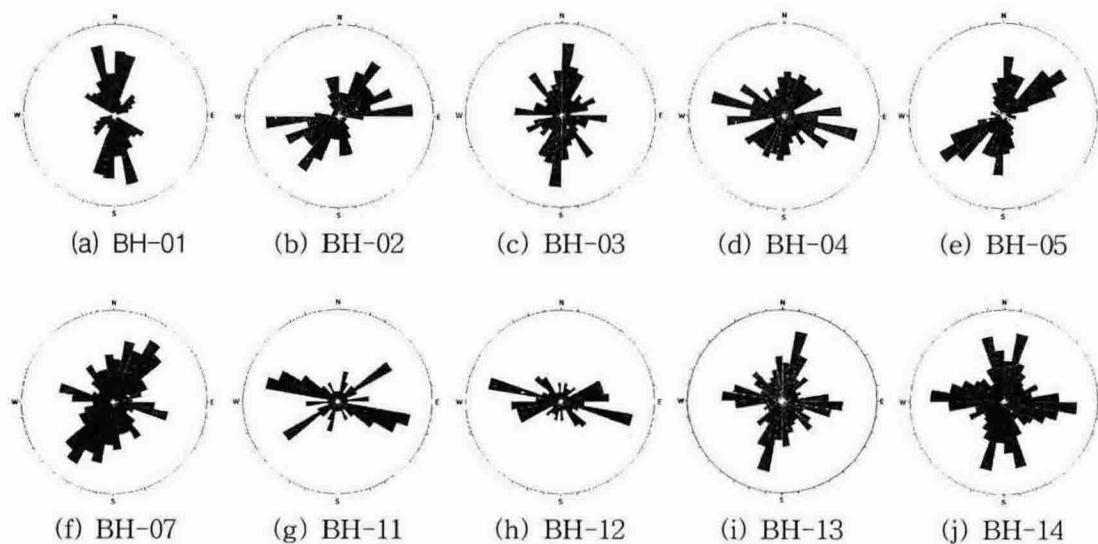


Figure 5. Direction of discontinuities in a fractured rock of the study area.

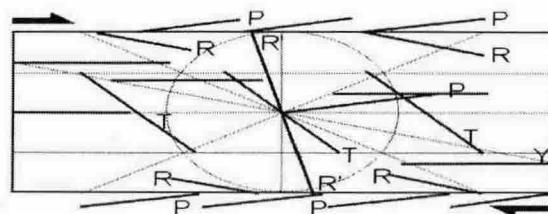


Figure 6. Classification of shear fracture system.

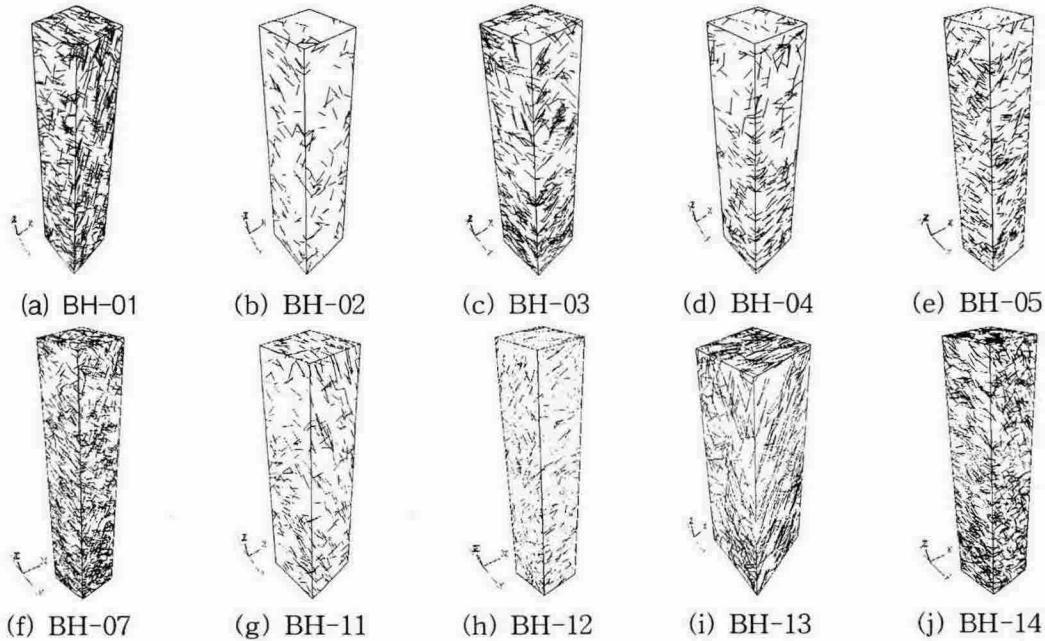


Figure 7. 3-D fracture network model using FracMan.

2.5. 지하수위 분포

연구지역의 지하수위 분포 특성을 파악하기 위하여 2004년 7월 7일부터 8월 31일까지 총 49
공에서 측정된 지하수위 자료에 지구통계기법인 크리깅을 이용하여 지하수위 등고선도를 작성하
였다. 크리깅은 공간상에 분포하는 확률변수들을 이용하여 자료가 없는 지점에서 값을 추정해내는
강력한 지구통계학적 기법이다(Journel and Huijbregts, 1978).

Figure 8(a)는 지하수위를 측정한 지하수공 위치도이며, 고속철도 본선(직선), 사생 노선(곡선), 행정구역(점선)을 표시하였다. Figure 8(b)는 4회에 걸쳐 측정된 지하수위의 평균치를 이용하여 작성된 등고선도이다.

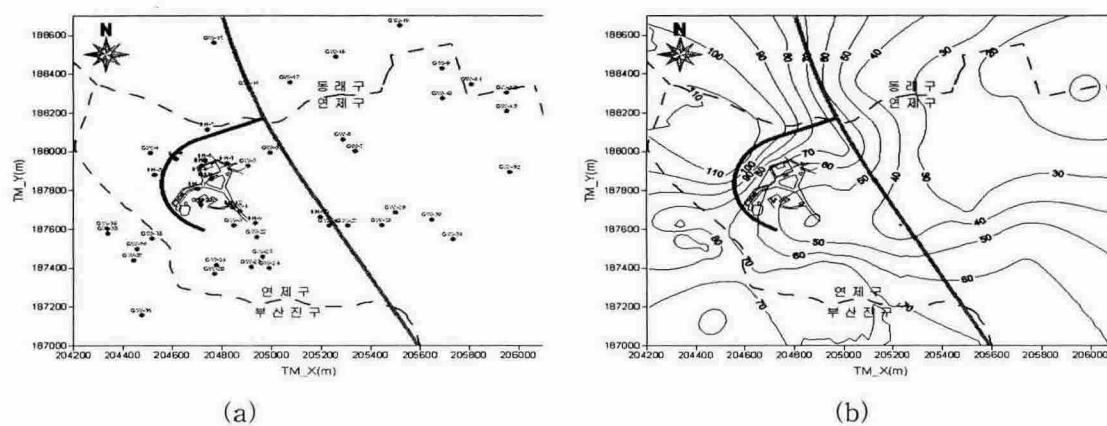


Figure 8. (a) Location map of monitoring wells and (b) Potentiometric map of groundwater levels.

2.6. 지하수 유향·유속 측정

유향·유속 측정장비(Geoflow Model-200)를 이용하여 지하수의 유동방향과 선형유속(linear velocity)을 파악하였다. 지하수의 선형유속은 아래의 식(1)과 같이 수리전도도(k), 수리경사(i) 및 공극율(n)에 따라 결정된다.

$$v = \frac{k \cdot i}{n} \quad (1)$$

8개 지하수공에서 실시되어진 지하수 유향은 $72.2^{\circ} \sim 205.6^{\circ}$ 의 범위를 보이지만, 평균 지하수 유향은 141.6° 이다. 따라서 지하수의 평균적인 유향은 양산단층 및 동래단층의 주 방향과 비슷하다. Figure 8(a)의 BH-12공을 제외한 7개의 지하수공에서 남남동~남동 방향의 지하수 흐름이 뚜렷하게 나타나서, 북서쪽에서 남동쪽으로 낮아지는 지형적인 특성을 잘 반영하고 있다. BH-12공에서는 서쪽에서 동쪽 방향으로 흐르는 지하수 흐름을 나타내고 있다. 유속의 경우 산지역에 위치한 조사공의 유속이 비교적 크게 나타났으며, BH-2, BH-4, BH-12 등의 평지에 위치한 조사공의 유속은 상대적으로 낮은 속도 분포를 나타내었다.

2.7. 불연속면과 지하수 유동

단열암반에 발달된 단열을 분석하여 주 단열들이 가지는 방향성을 분석하였으며, 그 결과 동래단층과 양산단층 사이에 발달하는 북북동 방향과 북동 방향의 전단단열(Shear fracture)과 동서방향 및 서북서방향의 인장단열(Tension fracture)이 일부 관측공 지점에서 나타났다.

Figure 9의 BH-01공은 주 단열방향은 지하수 유향과 일치하며, BH-02공의 주 단열은 동서방향과 서북서방향으로 나타났으며, 지하수 유향은 주 단열과 다른 패턴을 보여 주고 있다. 따라서 지하수 유향은 가파른 지형에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. BH-03공의 주 단열방향은 남북 방향이며, 지하수 유향은 남동 방향의 단열과 지하수 유향이 일치한다. BH-04공의 주 단열은 서북서 방향으로 나타났으며, 지하수 유향은 남북방향의 단열과 일치되었다. BH-05공의 주 단열방향은 북동방향과 남북방향으로 나타났으며, 지하수 유향과 다른 패턴을 보여 주고 있다. 따라서 지하수 유향은 가파른 지형에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. BH-07공의 주 단열방향은 북동방향이며, 지하수 유향은 남동 방향으로 나타나며, 지하수 유향과 다른 패턴을 보여 주고 있다. BH-11공의 주 단열방향은 서북서방향과 북동부방향으로 나타나며, 지하수 유향과 다른 패턴을 보여 주고 있다. BH-11공의 지하수 유향은 경사가 가파른 지형의 영향을 받는 것으로 분석된다. BH-12공의 주 단열방향은 동남동 방향과 동북방향의 단열이 나타나며, 동쪽방향과 비슷하게 나타났다. BH-13공의 주 단열은 북북동 방향과 동서방향의 주 단열군이 발달되어 있으며, 지하수 유향은 북동방향으로 지하수 유향과 다른 패턴을 보여 주고 있다. BH-14공은 주 단열방향은 북북동 방향, 서북부방향 그리고 동서방향의 단열 발달되어 있으며, 지하수 유향은 북북동방향과 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 연구지역의 지하수 유향은 주 단열방향의 영향보다는 산계가 발달된 지형의 영향을 받는 것으로 판단된다.

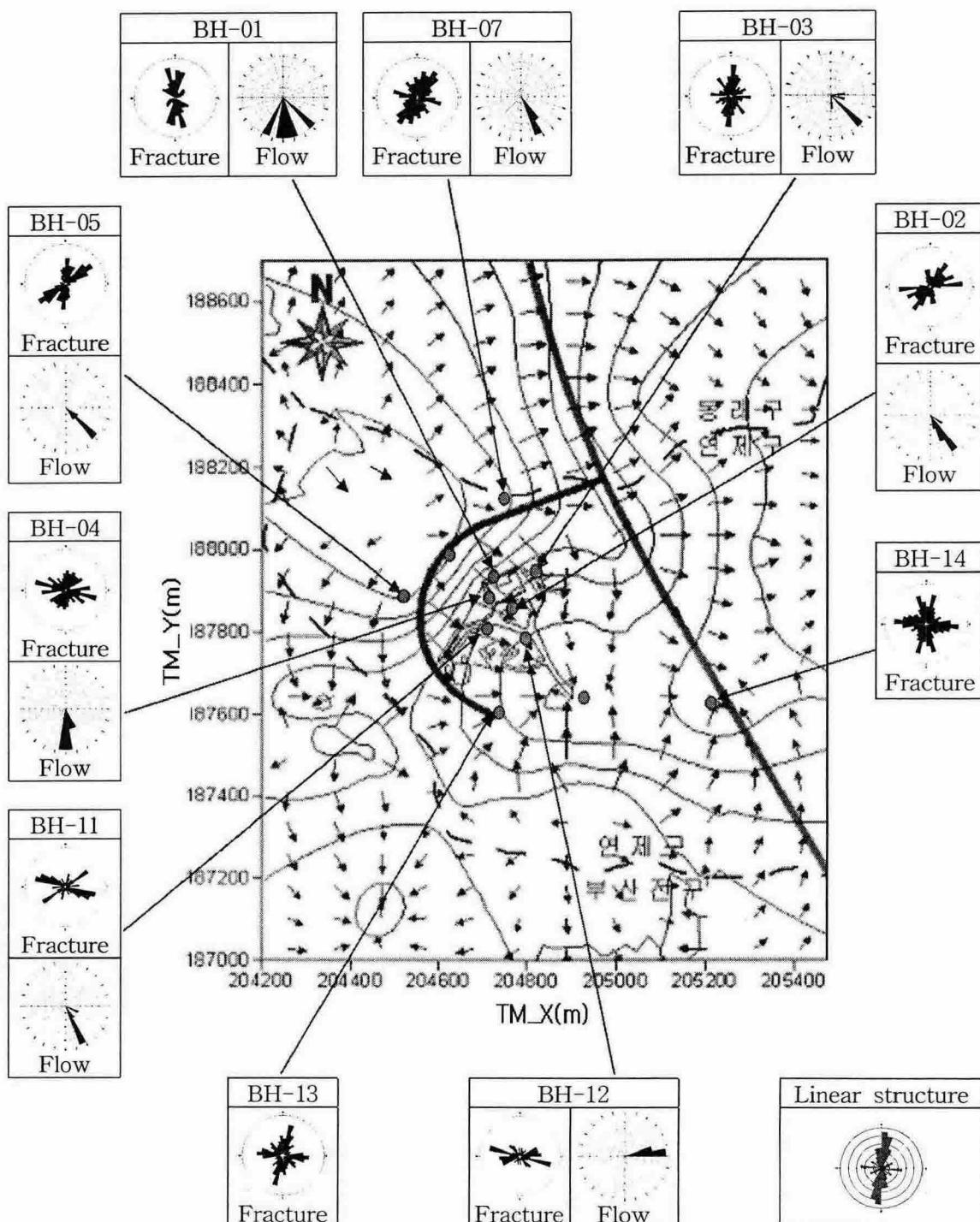


Figure 9. The directions of fracture development and groundwater flow at the study area.

3. 결 론

본 연구에서는 지질구조에 지배되는 단열암반과 지하수 유동의 실험적인 배경에 대해서, 이를 부산시 동래구 사직동 일원에서 BIPS와 Televiewer를 이용하여 10개의 지하수 관측공에서 획득된 1,591개 불연속면을 분석하여 지하수 유동과의 관계를 비교·분석하였다. 연구지역 내의 지형은 산계가 잘 발달된 계곡형 지형이며, 수계의 발달은 매우 미약하게 나타났다. 연구지역 주변에는 북북동-남남서 방향의 양산단층과 동래단층이 발달되어 있으며, 연구지역 내에는 EW방향의

선구조도 발달되어 있다.

지구통계기법을 이용하여 작성된 지하수위 등고선도에서 추정된 지하수 유동방향과 유향·유속기에서 측정된 지하수 유향은 거의 일치하지만, 단열암반에 발달된 불연속면의 방향과 지하수 유동방향은 2가지로 해석되었다. 첫째는 단열암반에 발달된 불연속면의 방향과 지하수 유동방향이 잘 일치하는 경우(BH-01, 03, 04, 12공), 둘째는 불연속면의 방향과 지하수 유동방향이 잘 일치하지 않는 경우(BH-02, 05, 07, 11)이다. 지하수 유동방향이 불연속면의 방향과 일치하지 않는 경우는 지형의 변화에 더 영향을 받는 것으로 나타났다. 이러한 단열암반 내에서 지하수의 유동은 단열의 방향성에 영향을 받지만, 산계가 발달된 지형의 특성에 큰 영향을 받는 것으로 사료된다.

참고문헌

- 강병무, 김천수, 배대석, 김경수, 기정석, 1993, 분리열극개념을 이용한 지하공동주변의 지하수유동해석, 지질공학회, 3권, 2호, 125-148.
- 강성현, 2004, 단층대에 수반된 절개지 사면에 대한 연구, 부경대학교 산업대학원, 이학석사 학위논문.
- 김진웅, 배대석, 강철형, 2001, 화강암반내 단층지역에 위치한 지하 방사성폐기물 처분장 인접지역에서의 열-수리-역학적 연성거동 비교 연구, 지질공학회, 11권, 3호, 255-267.
- (주)대우건설, 2004, 경부고속철도 제 14-2공구 사생설치에 따른 국가기록원 부산지원 지하서고 안전 영향 및 사생도 설치 적정성 검토 보고서.
- 장태우, 김천수, 배대석, 2003, 우리나라 단열구조의 특성, 지질공학회, 14권, 2호, 207,-225.
- 정상용, 유인걸, 윤명재, 권해우, 허선희, 1999, 불균질·이방성 대수층의 지하수 유동분석에 지구통계 기법의 응용, 지질공학회, 9권, 2호, 147-159.
- 한국자원연구원, 1998, 양산단층을 고려한 설계기준지진의 재평가 최종보고서, 제1권, 671 p.
- Journel, A. G., and C. H. Huijbregts, 1978, Mining Geostatistics, Academic Press, 600 p.
- Pierre M. Adler and Jean-Francois Thovert, 1999, Fractures and Fracture Networks, 429 p.
- Gloder Assoc. Inc., 1994, FracMan-Interactive discrete feature feature data analysis, geometric modeling and exploration simulation(Version 2.306).