

## 구조지질학의 국제적 경향 : Neustadt Conference

이진한\*

### 서 언

구조지질학을 연구하는 궁극적인 목적은 변형암체가 겪은 이동경로를 파악하고 변형작용 당시의 조건—온도, 압력, 변형율 (strain rate), 응력 (stress) 등—을 규명하며 특정 변형 조건하에서 암석이 어떻게 거동 (behavior)하는가를 밝히는 것이다. 이러한 궁극적인 목적을 지향하는 연구로부터 얻어지는 결과는 특히 지구동력학 (geodynamics) 전공자들이 지각과 맨틀의 리올로지 (rheology)를 이해하며 판구조운동과 관련된 지각과 맨틀에서의 변형국지화현상 (strain localization)을 규명하고 조산운동을 시뮬레이션 하는데 필수적인 자료로 활용된다.

최근 독일 Neustadt에서 열린 “International Conference on Deformation Mechanisms, Rheology and Microstructures”는 현재 구조지질학과 지구동력학 분야의 발전 속도가 눈부시게 빠르다는 것을 인식시켜주었기 때문에 필자는 이 컨퍼런스에서 논의되었던 중요 사항을 중심으로 세계의 연구 경향을 소개하고자한다. 컨퍼런스는 1999년 3월 22일 부터 24일 까지 3일간 열려 135편의 논문 (구두발표 44편, 포스터발표 91편)이 발표되었으며 연이어 이틀동안 열린 “Workshop on Rheology and Geodynamic Modeling”에서는 17편의 논문이 발표되고 심도 있는 토의가 진행되었다. 컨퍼런스에는 독일, 네덜란드, 스위스, 영국, 프랑스, 미국, 호주, 캐나다 등 22개국에서 약 200여명의 학자들이 참여하였으며 국내에서는 필자와 박영도 박사 (고려대가 참여하여 필자는 “미구조를 이용한 변형시기의 제한: 청산전단대의 예”를 포스터로 발표하였고 박영도 박사는 “Orientation pinning and oriented nucleation: possible mechanisms for the preservation of crystallographic fabric”을 구두로 발표하였다.

이 컨퍼런스는 1976년 네덜란드의 Zwart가 Leiden대학교 재직 당시 “Fabrics, Microstructures and Micro-

tectonics”라는 타이틀로 개최한 “Leiden 컨퍼런스”로부터 유래되어 1980년에는 Gottingen 컨퍼런스 (The Effect of Deformation on Rocks), 1989년 Leeds 컨퍼런스 (Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics), 1991년 Montpellier 컨퍼런스 (Mechanical Instabilities in Rocks and Tectonics) 등을 포함하여 약 2년 간격으로 유럽의 여러 나라를 순회하며 개최되어 왔다. 이번 Neustadt 컨퍼런스에서는 앞으로 컨퍼런스의 타이틀을 “Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics”로 고정하기로 결정되었으며 다음 컨퍼런스는 2001년 Toscana (Italy) 혹은 Utrecht (Netherlands)에서 개최하기로 합의되었다.

### 컨퍼런스의 주요 의제와 구조지질학의 발전 현황

Neustadt 컨퍼런스는 6개의 주요 의제로 나뉘어 진행되었으며 각 의제마다 초청학자의 기조논문 발표가 있는 뒤 참여자의 논문 발표와 토의가 이루어졌다. 이 6개의 주요 의제는 다음과 같다.

- (1) Brittle-Plastic Transition
- (2) Strain Localization
- (3) Melting and Deformation
- (4) Interfaces and Surface Effects
- (5) (Meta-) Stability of Microstructures
- (6) Syn-tectonic Phase Transformation

“Brittle-Plastic Transition” session에서는 미국 Texas A&M 대학교의 Fred Chester의 기조논문 발표에 이어 Engelder와 Jolivet를 비롯하여 6인이 논문 발표를 하였다. 암석의 변형실험과 야외의 전단대 연구 결과 취성-소성 전이는 현재까지 알려진 것과는 달리 복잡한 과정임이 밝혀졌다. 즉, 취성-소성 전이는 (1) 국지적인 파괴에서 광역적으로 균질한 유동으로의 전이 (파괴 양식의 전이), (2) 급격한 응력 낙차

\* 고려대학교 지구환경과학과

(stress drop)를 가진 변형에서 급격한 응력 낙차가 없는 변형으로의 전이 (*기계적 거동의 전이*), 혹은 (3) fracturing과 cataclasis를 포함한 취성변형에서 전위 이동 (dislocation glide)을 포함한 결정소성변형 (crystal plasticity)으로의 전이 (*변형기작의 전이*)로 정의될 수 있는데 이 세 가지의 전이 경계가 압력-변형율의 공간에서 서로 일치하지 않는다는 것이다. 또한 반취성영역 (semi-brittle regime)으로 불리며 지진이 빈번하게 발생하는 이 전이대의 영역에서는 취성변형, 결정소성변형, 압력용해 (pressure solution) 등이 복합적인 변형기작으로 작용하는데 이 각각의 변형기작이 독립적인 과정이 아니라 서로 영향을 주는 과정이며 따라서 반취성영역에서의 만족할만한 유동법칙 방정식 (flow law equation)이 아직까지 구해지지 않고 있다. 그러므로 앞으로 반취성영역에서의 변형기작들이 어떻게 상호 연결되어 있는가를 규명하여 정확한 유동법칙 방정식을 유도하는 것이 이 분야의 당면 과제이다.

“Strain Localization” session에서는 호주 CSIRO의 Bruce Hobbs의 기조논문 발표에 이어 McDonnell과 Faulkner 등 7인의 논문 발표가 있었다. 변형작용시 변형국지화현상은 입자규모에서 지각규모에 이르기까지 다양한 규모에서 공통적으로 일어나는 현상이다. 물질의 변형연화작용 (strain softening)이 변형국지화현상이 일어나기 위한 전제조건이라는 것이 지질학계에서는 널리 받아들여지고 있지만 변형시 팽창이 일어나는 물질에서는 반대로 변형강화현상 (strain hardening)이 일어나는 조건하에도 변형국지화현상이 발생할 수도 있다는 가설이 새롭게 제기되었다. 변형연화작용을 야기하는 기작으로 결정격자 정향배열 (lattice preferred orientation), 재결정작용, 상 전이 (phase transformation) 등이 많이 연구되어 왔지만, 아직도 논란이 되고 있는 기작은 전단가열 (shear heating)이다. 이 전단가열 현상은 재료공학 분야에서 많은 실험적인 예와 이론으로 입증되어 있음에도 불구하고 지질학계에서는 거의 받아들여지지 않고 있기 때문에 앞으로 야외 연구와 미구조 연구가 주의 깊게 시도되어야 할 분야로 인식되었다. 또한 현존하는 유동법칙 방정식에 변형국지화작용의 역할을 어떻게 합리적으로 포함시키는가 하는 것이 시급히 해결해야 할 문제로 대두되었다.

“Melting and Deformation” session에서는 독일 Giessen대학교의 Claudio Rosenberg, 미국 Woods Hole의 Greg Hirth에 의한 2편의 기조 논문에 이어 Bruhn과 Brown 등에 의한 7편의 논문이 발표되었다. 심성암체 (pluton)의 형성에는 용융, 용융물 추출 (melt

extraction), 상승 (ascent), 정치 (emplacement)의 4단계가 필요하다. 최근의 연구 결과에 의하면 변형작용이 용융물 추출을 지배하는 주 요인이며 특정 지체구조 환경 하에서는 하부 대륙지각의 상당부분이 부분용융되어 있을 수 있기 때문에 하부 대륙지각의 리올로지를 정확하게 규명하기 위해서는 부분용융 암체의 리올로지와 변형 특성을 이해하는 것이 중요하다고 인식되었다. 현재까지의 실험에 의하면 부분용융 암체에서 용융물의 특정 임계비율값 (15~35%)을 기준으로 변형기작과 물체의 강도 (strength)가 완전히 달라진다고 알려져 있다. 이 임계비율을 RCMP (Rheological Critical Melt Percentage)라고 하는데 용융물의 비율이 RCMP 이하일 때는 확산포행 (diffusion creep)과 전위포행 (dislocation creep)이 주 변형기작이나 용융물의 비가 RCMP 이상일 때는 암체의 강도가 급격히 저하되면서 입자유동 (granular flow)이 주 변형기작으로 작용한다는 것이 일반적인 견해이다. 그러나 최근 물을 포함하지 않는 부분용융물에 대한 실험연구 결과에 의해 RCMP가 존재하지 않을 수도 있다는 견해도 주장되었다. 따라서 부분용융 암체의 리올로지를 보다 명확하게 이해하기 위해서 RCMP에 관한 심도 있는 연구가 필요하며 용융물의 존재시 입자 규모에서 어떠한 과정들이 상호 작용하는가를 규명하는 것이 시급한 과제이다. 또한 부분용융 암체의 정확한 유동법칙 방정식을 구하는 것도 앞으로 해결해야 할 문제로 인식되었다. 한편 이 session에서는 같이 참석한 박영도 박사의 연구 논문 (Geology, v. 22, p. 323-326; Journal of Structural Geology, v. 18, p. 847-858)이 자주 인용되어 외국의 빠른 발전상황에 위축이 되면서도 어느 정도 자부심을 느낄 수 있었다.

“Interfaces and Surface Effects” session에서는 미국 MIT의 Brian Evans에 의한 기조 논문 외에 Lloyd, Rutter 등 6편의 논문이 발표되었다. 입자경계 (grain boundary), 아입자경계 (subgrain boundary)와 상경계 (phase boundary)의 구조와 특성은 입자경계 확산, 입자 성장, 동력재결정작용, 확산포행, 압력용해, 상전이, 전기전도도, 유체이동 등의 다양한 과정들의 기작과 동역학을 지배하는 주 요인이다. 최근 HRTEM, SEM, AFM (Atomic Force Microscopy), Nanoindenter 등의 최신 기구들의 이용으로 입자와 상경계의 특성과 동역학을 보다 잘 이해할 수 있게 되었다. 특히 SEM과 “Channel”이라는 프로그램을 이용한 EBSD (Electron Backscatter Pattern)의 분석으로 입자/아입자 경계의 특성, 완전한 격자 방향 (complete

lattice orientation), 세밀한 AVA (axial distribution analysis) 등의 해석이 가능하게 되었고 이러한 해석으로부터 재결정작용과 회복작용의 과정, 활동 슬립계 (active slip system), 변형기작 등을 보다 정량적으로 이해할 수 있게되었다. 그럼에도 불구하고 입자/상 경계의 구조와 압체의 특성 사이의 관계에 대한 많은 부분과 보다 자세한 변형과정 (deformation processes)들이 아직도 이해되지 못하고 있기 때문에 앞으로 이에 대한 집중적인 연구가 필요하다는 인식을 함께 하였다.

“(Meta-) Stability of Microstructures” session에서는 프랑스 Paul-Sabatier대학교의 Olivier Jaoul, 스위스 Basel대학교의 Holger Stunitz에 의한 2편의 기조논문 발표에 이어 White, Tullis, 박영도 박사 등에 의한 6편의 논문이 발표되었다. 자연 상태의 변형암과 실험 변형암의 미구조를 경험적으로 비교하여 지각과 맨틀의 리올로지와 변형조건을 규명하는 것이 미구조를 연구하는 주요 목적중의 하나이다. 이러한 목적을 위한 통상적인 접근 방법은 자연 상태의 변형암의 미구조를 관찰하여 주 변형기작을 유추한 후, 실험 자료로부터 만들어진 변형기작도 (deformation mechanism map)를 이용하여 자연상태의 변형조건과 리올로지를 해석하는 것이다. 그러나 변형작용 말기 혹은 변형작용 이후 미구조가 변하게 되면 자연 상태의 변형암에서 관찰되는 현재의 미구조가 변형 당시 그 압체의 리올로지를 지배했던 주 변형기작을 나타내지 않을 수도 있기 때문에 이러한 접근 방법에는 문제점이 있을 수 있다. 변형 당시 우세했던 변형기작을 해석하기 위해서는 주 변형 기작의 산물인 불변상태 미구조 (steady-state microstructure)가 계속되는 변형작용에도 변하지 않는 (즉, 변형양에 둔감한; strain-insensitive) 안정 미구조 (stable microstructure)이어야 한다. 한편 암체가 겪은 변형양을 구하고 변형 경로를 해석하기 위해서는 일단 형성된 미구조가 계속되는 변형작용에 민감하게 (strain-sensitive) 반응하여야한다. 따라서 변형작용의 모든 부분을 제대로 해석하기 위해서는 변형에 둔감한 미구조와 민감한 미구조 모두가 필요하다. 변형에 둔감한 미구조와 민감한 미구조를 어떻게 구별할 수 있으며 민감한 미구조의 민감도 (sensitivity)는 정량적으로 어느 정도인지를 보다 잘 규명하는 것이 이 분야의 당면 과제라는 인식을 함께 하였다. 또한 변형작용의 조건과 운동학 해석에 광범위하게 이용되고 있는 LPO (Lattice Preferred Orientation)가 변형작용 후 열 작용을 받을 때 얼마나 안정한 가에 대한 심도 있는 토의가 있었는데 Brown 대학교의 Jan Tullis는 석영 집

합체를 이용한 삼축압축실험과 어닐링 (annealing) 실험으로 저온/고변형율을 받은 시료는 어닐링 시 LPO의 변화가 약간 있고 고온/저변형율을 받은 시료는 LPO의 변화가 전혀 없다는 필자와 박영도 박사가 암석대체물로 실험하여 최근 Journal of Structural Geology (v. 19, p. 1521-1526)에 발표한 결과와 거의 유사한-결과를 발표하였다. Jan Tullis에 연이어 박영도 박사가 발표한 논문에서는 암석대체물의 실험 결과와 자연 상태의 규암 (충북 제천 지역의 옥천대 규암)의 미구조 해석을 이용하여 어닐링시 LPO의 변화가 없는 이유를 과정 지향적으로 (process-oriented) 설명을 하여 많은 호응을 받았다.

컨퍼런스의 마지막 의제인 “Syn-tectonic Phase Transformation” session에서는 독일 Bayreuth 대학교의 Rubie의 기조논문이 이어 Milsch와 Spiers 등에 의한 4편의 논문이 발표되었다. 변형작용시 상전이가 일어나 새로운 광물이 생겨나면 암체의 연성 강도가 크게 낮아져 변형국지화현상이 일어날 수 있다는 것이 전통적인 생각이다. 그 이유는 첫째, 새롭게 형성된 광물의 입자 크기가 작을 경우 변형기작이 입자 크기에 둔감한 전위포행 (grain size insensitive dislocation creep)에서 입자 크기에 민감한 확산포행 (grain size sensitive diffusion creep)으로 전환될 수 있기 때문이고 둘째, 새롭게 형성된 광물의 강도가 상전이가 일어나기 전의 광물의 강도보다 낮을 경우, 그리고 셋째, 상전이시 체적 변화로 야기되는 전이 소성변형 (transformational plasticity) 때문이다. 섭입대의 410~660 km 깊이에서 일어나는 심발지진의 기작으로도 자주 인용되는 전이 소성변형에 의한 강도의 저하는 지속적이지는 못하고 일시적인 현상이다. 상 전이시 입자 크기의 감소에 의한 강도의 저하가 지속적으로 유지되기 위해서는 계속되는 변형작용시 입자 성장이 일어나지 않아야 한다. 스위스 Basel 대학교의 Stunitz는 상 전이로 인해 새롭게 생겨난 광물들이 떠나 렌즈상으로 모여있지 않고 흩어져 있으면 입자 성장이 저해되어 지속적인 강도의 저하를 기대할 수 있다고 주장하였다. 한편 이 session에서 마지막으로 발표한 Utrecht 대학교의 De Bresser는 동력재결정작용이 입자크기 감소와 입자 성장간의 균형을 유지시켜 변형작용이 전위포행 영역과 확산포행 영역의 경계부에서 일어나며 따라서 다른 요인에 의해서 입자 성장이 방해받지 않는 한 동력재결정작용에 의한 강도의 저하와 변형국지화현상은 기대할 수 없다는 새로운 주장을 하였다. 특히 De Bresser는 전위포행과 확산포행이 직렬

(series)로 연결된 유동법칙 방정식을 구하여 많은 논란을 일으켰다. 즉, 두 변형기작이 직렬로 연결되기 위해서는 변형기작이 서로 독립적이어야 하는데 과연 독립적인 과정인가에 대하여 늦은 밤 사석에서까지 논란이 이어졌다.

컨퍼런스에 이어 이틀간 열린 “Workshop on Rheology and Geodynamic Modeling”에서는 호주 ANU의 Mervyn Paterson, 스위스 Basel 대학교의 Stefan Schmid, 독일 Giessen 대학교의 Mark Handy, 그리고 캐나다 Dalhousie 대학교의 Chris Beaumont 등에 의한 17편의 논문 발표와 심도 있는 토의가 있었다. 이 session에서는 우선 지구동력학자들이 현존하는 지각과 맨틀의 리올로지 자료, 암석 변형 실험로부터 구한 유동법칙 방정식, 지각과 맨틀의 지진학적 구조 (seismic structure), 지각과 맨틀의 P-T 구조 등을 이용하여 압권의 섭입, 충돌형 지체운동 (collisional tectonics), 인장형 지체운동 (extensional tectonics), 트랜스프레이션/트랜스텐션 (transpression/transtension) 지체운동 등을 컴퓨터 모델링한 결과들을 발표한 후 이에 대한 문제점들을 토의하는 순서로 진행되었다 (Fig. 1). 현재의 지체운동 모델링들은 이제 시작 단계이며 전체적으로 각종 조산대의 발달과정을 실제와 유사하게 시뮬레이션 하지만 자세한 부분에서는 아직도 많은 문제점을 내포하고 있다고 공감을 하였다. 이러한 문제점들의 가장 큰 원인으로 (1) 현존하는 유동법

칙 방정식보다는 더욱 더 세밀한 방정식이 필요하며, (2) 지각과 맨틀에서의 변형국지화현상과 관련된 변형 연화/강화 작용을 야기하는 기작의 올바른 선택, (3) 모델링에서 경계조건 (boundary condition)의 올바른 선택, (4) 실험실에서 얻어진 자료를 자연상태에 외삽적용 (extrapolation)할 때의 규모 문제 (scaling problem)의 해결 등이 지적되고 이에 대한 격의 없는 토의가 있었다. 특히 Stefan Schmid는 지구동력학자들이 하부지각의 리올로지를 모델링할 때 전통적인 승법칙 방정식 (power law equation)을 이용하면 지각의 강도가 실제보다 훨씬 크게 계산될 수 있다고 주장하며 알프스 조산대를 예로 들어 상부지각/하부지각의 경계와 하부지각/맨틀의 경계 (즉 Moho)는 강도가 극히 약한 분리층 (decoupling horizon)으로 작용하며 이 곳에서의 주 변형 기작은 광물의 반응으로부터 야기되는 입자크기에 민감한 유동이라고 제안하였고 따라서 이에 대한 정교한 실험이 시급하다는 의견을 피력하였다.

결론적으로 지체운동을 보다 잘 이해하기 위해서 실험구조지질학, 야외구조지질학, 지구동력학 등의 분야에서 더욱 더 정교한 연구가 필요하며 이들 각 분야의 지속적이고 유기적인 협조가 필요하다는데 모든 참석자들의 의견이 일치되며 총5일간의 컨퍼런스와 워크샵이 종료되었다. 필자가 이 컨퍼런스에서 크게 자극을 받은 부분은 각종 미구조 해석을 위하여 구조지질학자들이 이용하는 방법과 기술이 최근 수년간 엄청난 발

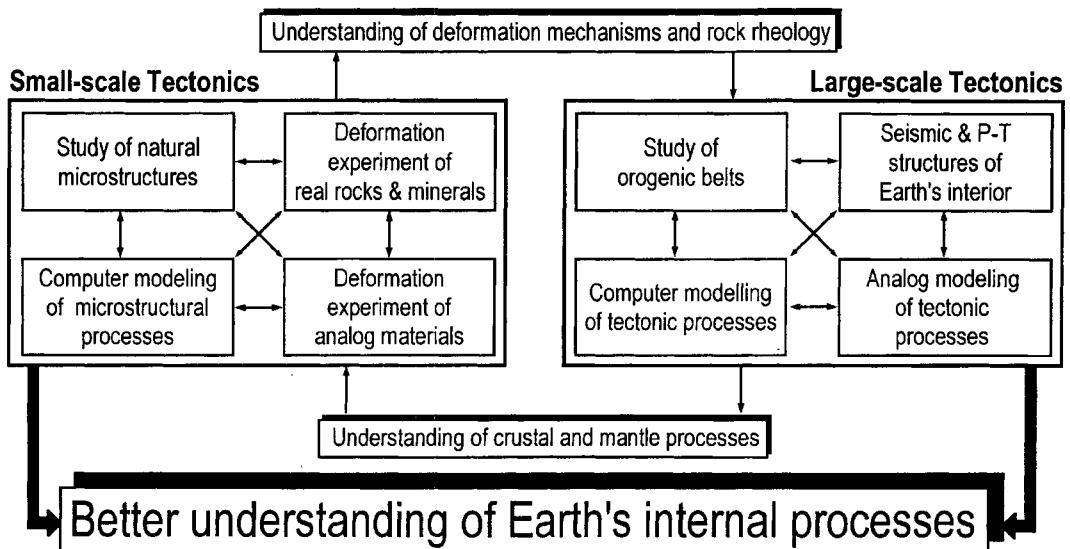


Fig. 1. Schematic diagram illustrating how various branches of Earth science cooperate to work out geodynamic processes of the Earth.

전을 하고 있다는 것이다. 특히 워크샵에서는 구조지질학자들이 왜 미구조를 심도 있게 연구하고 이 자료들이 지체운동을 모델링하는데 매우 중요하게 이용되고 있다는 것을 다시 한번 확인시켜 주었다. 또한 최종 목표인 지체운동 모델링을 위해 각 분야의 분업화와 협조체제가 원활하게 이루어지고 있다는데에 (Fig. 1) 깊은 감명을 받았다.

### 국내의 구조지질학 현황과 대응책

국내에서는 구조지질학분야에서 특히 과정 지향적 미구조 연구가 미약하고 지구동력학분야의 전공자는 전무한 상태이다. 따라서 두 분야의 협조는 차치하고라도 각 분야의 발전조차 현재에는 기대할 수 없는 실정이다. 더구나 필자가 수년전 놀란 것은 국내 지질학자들의 일부가 “지구동력학”이라는 학문이 무엇인지조차 모르고 있다는 점이었다. 또한 국내 지질학자의 대부분은 미구조를 단지 광역구조를 좀 더 자세하게 해석하기 위한 도구 정도로 여기고 있다. 일부 지질학자들은 한반도의 광역구조도 제대로 해석이 안되고 있는데 미구조 연구를 할 필요가 없다고 주장하거나 혹은 한반도의 광역구조를 규명한 후에나 미구조 연구가 필요하다는 의견을 내세우기도 한다. 물론 한반도의 광역구조를 해석하는 것은 동북아시아의 지체운동 진화사를 규명하기 위해 반드시 필요하다. 그러나, 미구조 연구는 광역구조를 제대로 이해하는데 필요한 원리 혹은 이론적 배경을 제공한다. 즉, 변형작용의 원리에 대한 이해 없이 광역구조를 해석할 경우 잘못된 결론이 유도될 수도 있다. 또한 한반도의 광역구조 해석이 완료될 때까지 미구조 연구를 미루고 있다가 그때에 가서야 미구조 연구에 관심을 갖게되면 현재 외국의 미구조 분야 발전 속도를 고려할 때 외국의 수준에 엄청나게 뒤떨어지게 될 것이다. 따라서 국내 구조지질학계의 발전을 위해서는 한반도의 광역구조 연구와 미구조 연구를 병행하는 것이 앞으로 나아갈 바로 생각된다.

이번 컨퍼런스가 열린 독일의 구조지질학 수준은 10여년전에 비해 급속도로 성장하였으며 현재의 발전 속

도로 판단할 때 수년 내에 세계의 선두 주자가 될 것으로 생각된다. 사실 1980년 Gottingen 컨퍼런스가 열렸을 때만해도 독일의 구조지질학 수준은 그 당시 구조지질학 분야에서 유럽을 선도하고 있던 영국, 네덜란드, 프랑스, 스위스에 비해 열악한 수준이었으나 그나마 Gottingen 대학교의 H.-J. Behr과 K. Weber에 의해서 명맥이 유지되고 있었다. 반면 당시 네덜란드에서는 1970년대 중반부터 H. J. Zwart가 (당시에는 Leiden 대학교이였으나 1970년대 말 지질학과의 Utrecht 대학교로 흡수 합병됨) C. W. Passchier, R. L. M. Vissers, 그리고 호주의 G. S. Lister와 P. F. Williams 등을 채용하면서 눈부신 발전을 하고 있었다. 그러나 독일에서도 1980년대 말부터 J. H. Behrmann (Freiburg 대학교), G. Dresen (Potsdam 대학교), M. Handy (Giessen 대학교), J. H. Kruhl (Munchen 공대), C. W. Passchier (Mainz 대학교), J. L. Urai (Aachen 공대) 등이 구조지질학 교수로 채용되면서 이 분야에서 급성장을 해오고 있다. 1980년대 말부터 독일에 채용되기 시작한 구조지질학자의 대부분이 네덜란드 Utrecht대학교 출신이기 때문에 이번 Neustadt 컨퍼런스 중 사석에서 한 구조지질학자가 “1990년대에는 독일의 구조지질학계를 네덜란드가 지배하였으나 현재 독일의 발전 속도로 볼 때 2000년대에는 유럽의 구조지질학계를 독일이 지배할 것”이라고 한 여담은 필자에게 많은 것을 생각하게 해주었다. 결론적으로 국내의 구조지질학계가 국제적으로 더 이상 뒤지지 않기 위해서 야외구조지질학자와 미구조지질학자 모두가 노력을 해야 할뿐만이 아니라 학계에서는 외국의 선두 그룹에 있는 젊은 학자들을 과감하게 채용해야 할 것이다.

### 사 사

이 글을 쓰도록 권한 박영도 박사와 조문섭 교수께 감사를 드린다. 또한 이 글의 초고를 읽고 건설적인 비평을 해 주신 권성택 교수, 조문섭 교수와 박영도 박사, 그리고 그림을 도와준 이준규 군에게 감사를 드린다.