

개량형 점하중강도시험기의 개발

김용필¹⁾, 엄정기^{2)*}

Development of an Improved Point Load Apparatus

Yong-Phil Kim, Jeong-Gi Um

Abstract The accuracy of point load apparatus is depend on point to point coaxial fitting. Also, the estimation of applied point load using the pressure gauge frequently lead to erroneous results. An improved point load apparatus has been developed in this study by mounting linear bearing on polished support rod, and eccentric error of point to point axis has been sustained less than 0.1 mm even under series of extreme work load conditions. Two digital displacement gauges are attached to measure the distance from point to point with sample specimen. A load cell mounted at the end of upper conical platen measure the applied net load on sample instead of pressure gauge. Total of 107 point load tests has been achieved to assure the quality and performance of developed apparatus. This exercise turned out to be successful.

Key words point load apparatus, rock strength

초 록 기존의 점하중시험기는 재하점간 중심축의 일치성에서 문제가 발생하는 경우가 존재하며 압력게이지를 통해서 시료에 가해지는 하중을 산정하기 때문에 정확성이 결여될 수 있는 단점이 있다. 본 연구는 원추판을 저항판과 함께 밀어 올리는 방식을 사용하고 지지 연마봉에 선형베어링을 장착하여 연속적으로 반복되는 시험에도 재하점의 축간 편심오차를 0.1 mm 이하로 유지한 개량형 점하중시험기를 개발하였다. 또한 반복되는 시험에서 재하점간의 거리를 자동으로 측정하고 편심오차를 확인하기 위하여 두 개의 디지털게이지를 부착하였다. 상부 원추판 끝단에 장착한 로드셀은 시료에 가해지는 순수 하중을 측정하여 압력계 방식인 기존의 점하중시험기가 가지는 단점을 보완하였다. 개발된 개량형 점하중시험기는 화성암, 편마암, 셰일에서 선택된 표준 코어시료에 대하여 총 107회의 점하중강도시험을 수행하고 품질과 성능이 검증되었다.

핵심어 점하중시험기, 암석강도

1. 서 론

대형 플랜트, 도로 건설, 택지 조성, 터널 굴착 및 사면의 안정화 등과 같은 대규모 공사 현장은 암석의 지질공학적 특성을 고려해야 되는 상황이 필연적으로 발생한다. 관심대상 암반의 강도정수(Strength Parameters)는 코어시료를 채취하여 실내시험을 통하여 추정하는 것이 통례이다. 실내 역학시험용의 암석코어 채취 및 성형이 가능한 정도의 건전한 암반은 구조물의 지지력이나 침하량에 대한 안정화 대책보다는 오히려 발파로

제거시키는 방법의 선택이 주목적인 경우가 많다. 암반 공학적으로 취약한 암반의 경우는 실내시험에 의해 강도정수를 구하기 위한 코어 채취 및 공시체 제작 등에 어려움이 따르며 시료 채취 및 시험 과정에서 시료가 교란될 수 있으므로 시험 결과로 구해진 강도정수에 대한 자료는 신뢰성이 떨어지는 경우도 존재하므로 실내 시험은 물론 현장시험을 병행해야 하는 어려움이 있다.

현재 강도정수를 추정하기 위한 가장 보편적인 표준 시험법은 점하중강도시험, 일축압축시험, 삼축압축시험, 압열인장시험, 직접전단시험 및 평판 재하 시험 등이다. 이들 중 점하중강도시험은 비교적 간편하게 수행될 수 있는 시험법으로 점하중지수의 결정에 의한 일축 압축시험의 대응으로 일축압축강도 추정과 암반분류를 위해 건설 현장에서 빈번히 사용되고 있다. 특히 점하중강도시험은 일부 퇴적암과 변성암에 특징적으로 나

¹⁾ 울산과학기술대학 공간디자인학부 교수

²⁾ 부경대학교 에너지자원공학과 교수

* 교신저자 : jum@pknu.ac.kr

접수일 : 2009년 12월 8일

심사 완료일 : 2009년 12월 15일

게재 확정일 : 2009년 12월 21일

타나는 이방성의 강도 특성을 비교적 쉽게 파악할 수 있는 장점도 있다. 그동안 점하중강도시험에 대한 연구는 점하중지수와 일축압축강도의 상관성 및 시편의 형상과 크기에 따른 점하중지수의 수정에 관련된 것이 대부분이다. 이 연구는 시험의 방법론 보다는 기존에 점하중시험을 위해 사용된 시험기(point load apparatus)의 미흡한 부분을 검토하고 보완하여 개량형 점하중시험기를 제작하는 데에 중점을 두었으며, 본 논문은 새로이 개발·제작된 개량형 점하중강도시험기의 제원, 특징 및 성능검사에 대한 내용을 수록하였다.

2. 점하중강도

점하중강도시험은 암석의 코어시료나 불규칙한 블록을 상하 두 개의 경구(직경 10 mm인 초경합금)로 제작된 재하점(point) 사이에 끼워 위치시키고 압축하중을 가하여 간접인장강도를 추정하는 방식이다. Fig. 1은 ASTM D 5731-95에 의한 점하중강도시험의 개념을 재구성한 것이다. Reichmuth(1968)는 이러한 인장강도(Tp)에 대하여 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$T_p = 0.96P/D^2 \text{ (또는 일반적으로 } P/D^2) \tag{1}$$

여기서, P와 D는 각각 파단하중과 재하점간의 거리이다. 점하중강도시험은 일반적으로 코어시료의 직경방향 시험(diametral test)을 수행하는데, 코어의 축방향시험(axial test) 또는 현장의 불규칙한 암석블록에 대한 시험(lump test)도 수행할 수 있다. Bieniawski(1975)는 시험과정도 편리하고 시험 결과에 더욱 신뢰성이 있는 직경방향시험을 추천하였다. 슬레이트나 었리 등을 포함하는 암석 같이 이방성이 강한 암석에 대해서는 선구조에 따라 최대강도와 최소강도를 가지는 방향으로 모

두 시험을 수행한다. 시료의 크기에 의한 효과가 시험 결과에 미치는 영향은 중요한 고려대상으로 여러 연구자들(Broch and Franklin, 1972, Bieniawski, 1975, Brook, 1977, Hassani et al., 1980, Forster, 1983, Turk and Dearman, 1985, Nobury, 1986)이 시료의 형상과 크기에 따른 점하중지수의 수정에 관련된 연구 결과를 보고하였다. 특히 Broch and Franklin (1972)은 50 mm 직경의 코어인 경우를 표준점하중강도(Tp50)로 기준을 정하고 다른 크기의 코어에서 측정된 점하중강도를 보정하는 방법을 제시하였으며, 또한, 일축압축강도(σc)와의 관계를 다음 식으로 제안하였다.

$$\sigma_c = 24T_{p50} \tag{2}$$

하지만 모든 암석에서 일축압축강도가 점하중강도의 24배로 취급하는 데에는 불합리한 점이 있으며 Norbury (1986)는 문헌조사를 근거로 일축압축강도가 점하중강도의 최소 8배에서 최고 45배의 비교적 큰 범위를 갖으며 대부분의 값은 16~24배의 범위를 갖는다고 보고하였다. 따라서 점하중강도의 적용이 필요한 개별 현장마다 최소한의 일축압축강도시험을 수행하여 현장의 압반에 부합하는 관계식을 따로 추정하고 점하중강도 값을 사용하는 것은 매우 중요하다고 사료된다.

점하중강도의 측정을 위한 표준시험법과 사용되는 시험편에 관한 사항은 ASTM(미국재료시험협회) 및 ISRM(국제암반역학회)에서 제시하고 있으며 한국암반공학회(2007)에서도 이에 근거하여 제정한 표준시험법에 상세히 기술되어 있다. 기존에 사용되고 있는 대다수의 점하중강도시험기는 원추형으로 이루어진 가압장치와 유압펌프(유압잭)에 장착된 압력계(다이얼게이지 또는 압력센서)로 이루어진 하중측정장치로 구성되어 있다 (Fig. 1).

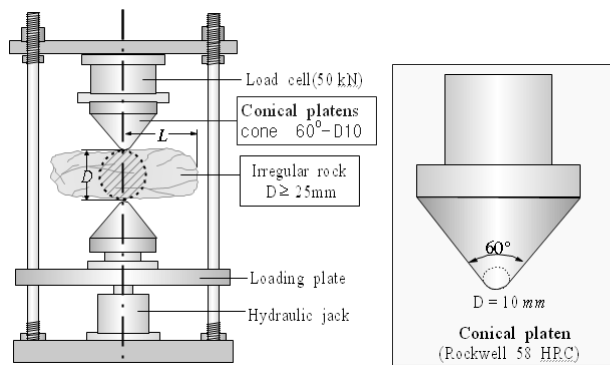


Fig. 1. Point load apparatus(ASTM D 5731-95)

3. 개량형 점하중강도시험기의 제원 및 성능

점하중시험기의 가압장치는 최대 하중의 반복적인 재하에도 두 가압부의 중심축이 편심오차가 0.2 mm 이하로 상하 재하점 간의 중심축이 일치하여야 한다. 그러나 실제 실험실이나 현장에서 반복되는 시험 중에 중심축이 허용오차를 상회하는 경우가 빈번히 발생하며 편심오차를 인지하는 것도 매우 어려운 부분이다. 또한 점하중지수를 산정하기 위한 상하 재하점간의 거리(De, point to point)는 실제 시료에서 재하점이 접촉된 지점이 아니고 시험 전 캘리퍼스 등을 사용하여 측정된 값을 취한다. 한편 코어시료를 대상으로 하는 경우는 시료를 기기에 위치할 때에 재하점간의 거리(D')를 정확히 직경이 되게 조정하는 것도 매우 어려우므로, Fig. 2와 같이 상하 재하점간의 D'이 실측한 코어의 직경(De)보다 작은 곳에서 파단면이 형성되는 수가 빈번히 발생한다. 이에선 점하중강도시험 시 점간 거리 감소를 실측하여 계산에 반영하는 것이 중요할 수 있음을 의미한다. 또한, 현장의 블록시료에서는 정확한 점간 거리를 적용하기 더욱 어려워진다. 점하중강도를 산정하기 위한 파단 시의 하중은 일반적으로 유압잭에 장착한 압력계로 측정하는데, 유압잭 로드(rod)의 마찰저항력으로 인하여 압력계의 값은 실제 시료에 가해진 하중보다 과대평가될 가능성이 존재한다. 이와 같은 기존 시험기의 미흡한 부분을 보완하기 위하여 본 연구는 개량형 점하중시험기를 설계·제작하였다.

점하중강도시험기의 핵심 부품은 원추판(conical platen)으로서 경도 HRC 58인 소재를 사용하였으며 끝단은 직경 10 mm의 구(ball)가 되도록 연마하였다. Fig. 3은 본 연구에서 ASTM D 5731-95에서 추천된 치수(point

tip 각도 60°, 구의 직경 10 mm)에 맞게 제작한 원추판의 설계 제원이다. Fig. 4는 본 연구에서 개발한 개량형 점하중강도시험기의 단면 및 주요 부품의 제원 및 치수를 보여준다.

유압잭의 하중용량은 100 kN으로 충분한 용량을 가지며 스트록이 50 mm인 제품을 사용하였다. 시험기에 양쪽에 부착된 두 개의 다이얼(디지털)계지는 재하점간의 거리를 측정하고 편심오차의 유무와 정도를 확인한다. 하부 원추판은 시험 시 원추판만을 밀어 올리는 기존의 방식을 배제하고 저항판과 함께 밀어 올리는 방식을 채택하였으며 지지 연마봉에 선형베어링을 설치하여 반복되는 시험에 따른 편심오차를 최소화하도록 고안하였다. 파단하중이 전달되는 최종점(terminal point)에는 로드셀(50 kN, t 23.5, bridge $2 \times 10^9 \Omega$, 1.5 mV/V)을 장착하여 압력계 형식의 마찰저항력으로 인한 오차를 해소하고 시료에 작용하는 순수 하중을 측정하는 형식으로 개량하였다. 이와 같이 개량된 점하중강도시험기의 시제품이 Fig. 5에 나타나 있다. Fig. 6은 성능시험을 위해 디지털계지와 로드셀을 데이터로거에 연결하여 시험 준비를 완료한 사진이다.

개발된 기기의 성능검사를 위해서 NX 규격의 코어시료에 대하여 화강암 38회, 편마암 53회 및 세일 16회의 점하중강도시험이 수행되었다. 개발된 개량형 점하중시험기에 의한 성능시험은 데이터로거와 병행하여 수행하였으며, 재하점 간의 거리(D'), 압력센서에 의한 파단하중(P1) 및 로드셀에 의한 파단하중(P2)을 동시에 측정하였다. 연속적인 시험에 의해 데이터로거를 통하여 PC에 저장된 결과는 실시간으로 PC 모니터에서도 확인할 수 있다. 재하점간의 편심오차는 시험기 양쪽에 부착된 디지털계지로 모니터링 하였으며 총 107회의 연속적인 시험에 걸쳐 양쪽 디지털계지의 편차가 0.05

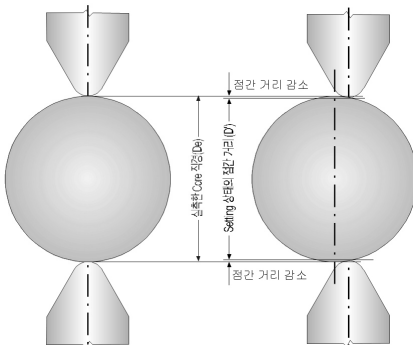


Fig. 2. Illustration of distance from point to point

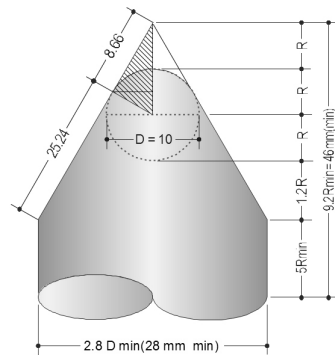


Fig. 3. Dimension of conical platen

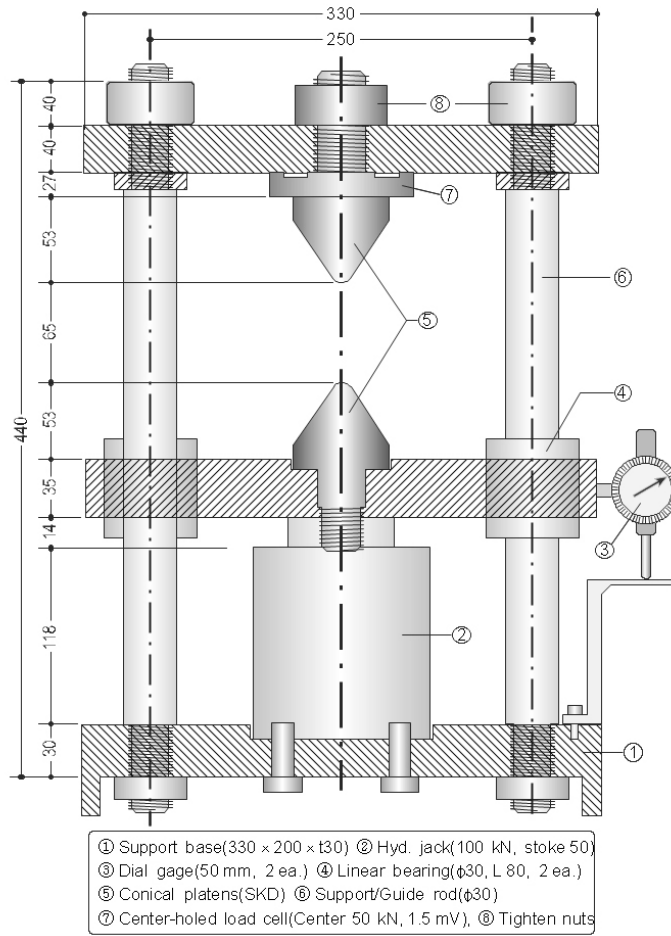


Fig. 4. Specifications of the improved point load apparatus

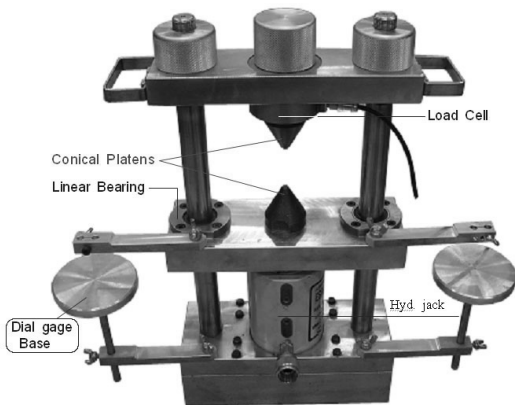


Fig. 5. Prototype of the improved point load apparatus

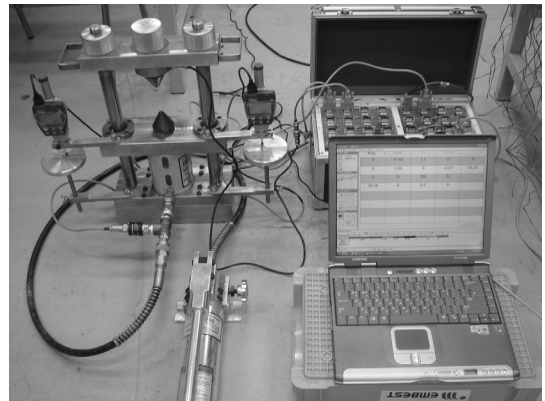
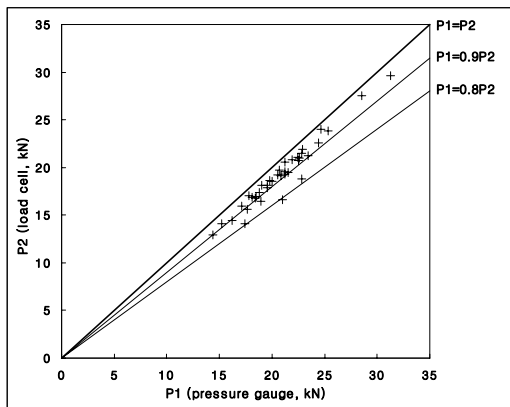


Fig. 6. Test setting to inspect the quality and performance of the apparatus

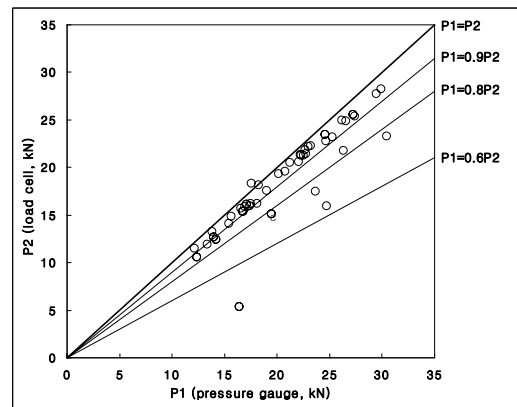
mm 이하로 유지되었음을 확인하였다. 이는 ASTM 규격인 0.1 mm 이내의 오차를 만족한다고 볼 수 있다.

개발된 점하중시험기에 의한 시험 결과가 Fig. 7의 스케터그램에 나타나 있다. 여기서 P1이 P2와 같은 경우, 즉, 암석 코어 시료에 대하여 압력센서에 의한 파단하중과 로드셀에 의한 파단하중이 일치한다면 시험 결과는 그래프에 대각선으로 표시된 P1=P2 선상에 동점될 것이다. P1과 P2의 차이가 클수록 결과 값이 P1=P2 선의 하부 분면에서는 수평적으로, 또한 상부 분면에서는 수직적으로 P1=P2 선으로 부터 멀어지게 된다. 전체적으로 시험 결과는 화강암, 편마암, 셰일 공히 P1=P2 선의 하부 분면에 동점되며, 이에는 P1이 P2보다 큰 값을 갖는다는 것을 의미한다. Fig. 7(a)에 나타난 화강암 시료에 대한 결과는 압력계와 로드셀에 의한 차이가 약 20%까지도 있을 수 있으나 대부분의 경우(전체 시료의 87%) 10% 이내의 차이를 보인다. Fig. 7(b)의 편마암은 전체 시료의 75%가 10% 이내의 차이를 보였으며

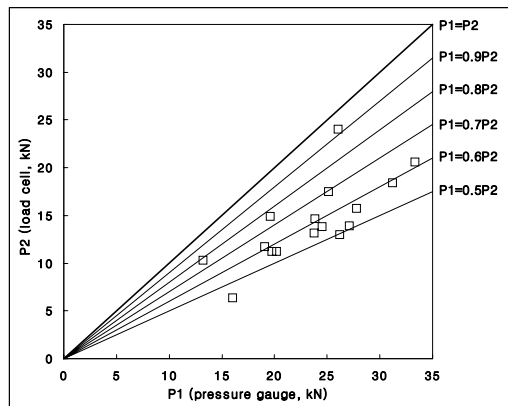
나머지 15%의 시료는 10~40%의 오차영역에 동점되었다. Fig. 7(c)의 셰일은 대략적으로 20~50%의 오차범위에서 분산되어 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 압력계와 로드셀에 의한 차이는 화강암, 편마암, 셰일 순으로 증가하였음을 알 수 있다. 이에는 이방성이 강한 암석일수록 압력계에 의한 파단하중이 로드셀에 의한 파단하중에 비하여 과대평가될 수 있음을 시사하지만 실제로는 압력계가 유압펌프(유압잭)의 로드(rod)에서 발생하는 마찰저항력의 효과를 제거하지 못하므로 점하중강도가 낮은 시료일수록 압력계의 파단하중이 순수한 재하 하중만을 측정하는 로드셀에 비하여 오차가 커지기 때문인 것으로 판단된다. 이방성 지수가 높은 암석은 일축압축강도가 크더라도 방향을 달리한 점재하에 의하여 엽리나 층리 등의 연약면을 따라 파단면이 발생하는 경우가 많은데, 이와 같이 점하중강도가 낮은 경우에는 로드셀에 의한 시험의 중요성이 더욱 증대된다.



(a) granite



(b) gneiss



(c) shale

Fig. 7. Scattergraphs of P1 vs. P2

4. 결 론

이 연구는 기존의 점하중시험기를 보완하여 개량형 점하중시험기를 개발하였다. 화강암, 편마암 및 셰일 등의 표준 코어시료에 대하여 총 107회의 성능시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 개발된 개량형 점하중시험기는 원추판을 저항판과 함께 밀어 올리는 방식을 사용하고 지지 연마봉에 선형베어링을 장착하여 반복되는 시험에 따른 상하 재하점의 축간 편심오차를 0.1 mm 이하로 유지하도록 고안하였다.
- 2) 부착된 디지털게이지는 시료에 작용하는 재하점간의 거리를 자동으로 측정하며 데이터로거에 연결하여 시험업무의 효율을 높일 수 있다. 또한, 표준 코어시료 뿐만 아니라 현장에서 불규칙한 암석블록 시료에 대한 점하중강도 측정에 매우 유용하다.
- 3) 장착된 로드셀은 시료에 가해지는 순수 하중만을 측정하므로 시험 결과의 신뢰도를 높일 수 있다.
- 4) 성능시험 결과 압력계에 의한 파단하중의 측정 결과는 과대평가될 가능성이 매우 높다. 특히, 엽리 및 층리 등의 이방성 요소가 존재하거나 풍화 변질로 인하여 점하중지수가 낮은 암석에서는 압력계의 오차는 더욱 증가되는 경향이 있으며 로드셀에 의한 파단하중 측정은 필수적이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 건설핵심기술개발사업(04핵심기술 A01-01)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 한국암반공학회, 2007, 암석의 점하중강도 표준시험법, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 17, pp. 75-82.
2. ASTM D 5731-95, Standard test method for determination of the point load strength index of rock, American Society for Testing and Materials.
3. Reichmuth, D.R., 1968, Point load testing of brittle materials to determine tensile strength and relative brittleness, Proc. 9th US Symp. Rock Mechanics, pp. 134-159.
4. Bieniawski, Z.T., 1975, The point load test in geotechnical practice, Engg Geol, 9, pp. 1-11.
5. Broch, E. and J.A. Franklin, 1972, The point load strength test, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 9, pp. 669-697.
6. Brook, W.F., 1977, A method of overcoming both shape and size effects in point load testing, Proc. Conf. Rock Engg., Newcastle University, pp. 53-70.
7. Hassani, F.P., M.J. Scoble and B.N. Whittaker, 1980, Application of the point load index test to strength determination of rock and proposals for a new size correction chart, Proc. 21st US Symp. Rock Mechanics, Rolla, pp. 543-553.
8. Forster, I.R., 1983, The influence of core sample geometry on the axial point load test, Int. J. Rock Mech. Min Sci. & Geomech. Abstr., 20, pp. 291-295.
9. Turk, N. and W.R. Dearman, 1985, Improvements in the determination of point load strength, Bull. Int. Ass. Engg. Geol., 31, pp. 137-142.
10. Norbury, D.R., 1986, The point load test, In Site Investigation Practice: Assessing BS 5930, Engineering Geology special Publication, 2, A.B. Hawkins (ed.), Geological Society, London, pp. 326-329.



김 용 필

1972년 고려대학교 공과대학 토목공학과 공학사
 1982년 고려대학교 대학원 토목공학과 공학석사
 1986년 고려대학교 대학원 토목공학과 공학박사
 Tel: 052-230-0632
 E-mail: ypkim@mail.uc.ac.kr
 현재 울산과학기술대 공간디자인학부 교수



엄 정 기

1988년 연세대학교 이과대학 지질학과 이학사
 1990년 연세대학교 대학원 지질학과 이학석사
 1997년 University of Arizona 자원지질공학과 공학박사
 Tel: 051-629-6559
 E-mail: jum@pknu.ac.kr
 현재 부경대학교 에너지자원공학과 교수