

## 암석의 변형 및 파괴거동의 해석을 위한 균열모형 개발에 관한 연구

전 석 원<sup>1)</sup>

### Development of a Mechanical Crack Model to Analyze Deformation and Failure Mechanism of Rock

Seok-Won Jeon

**ABSTRACT** Rock contains discontinuities at all scales. These discontinuities make rock behave in a complex way. This paper discusses a new approach to underground design based on the theory of rock fracture mechanics. The mechanism of deformation and failure of coal was studied by observing the distributions of length, orientation and spacing of the pre-existing as well as stress-induced cracks. Different types of laboratory tests were employed to observe the different scales of cracks and to obtain different types of crack information. The crack information is dependent on the scale used. The cracks propagate along the intersections of the pre-existing cracks, and both extensile and shear crack growth occur depending on the direction of the load relative to the bedding planes. An analytical model that takes into account both shear and extensile crack growth was developed to predict the nonlinear stress-strain behavior of coal including strain-hardening and strain-softening.

#### 1. 서 론

암석은 특성상 각종 크기의 불연속면을 갖는데, 이들이 다른 공학적 재료에서와 달리 해석상·설계상의 어려움을 주는 가장 큰 이유로 현장과 실험실에서 관찰되는 불연속면의 크기가  $10^7 \sim 10^8$ 배에 이르는 큰 차이를 보인다는 것과 불연속면의 크기, 방향, 밀도분포가 불균질하다는 것을 들 수 있다. 이러한 불연속면들로 인하여 발생하는 공학적인 문제들 중 대표적인 것으로 비선형거동, 치수효과, 실험상의 오차, 암석물성의 현지의 존성(site dependency) 등을 들 수 있다.

암석 내의 불연속면은 인장강도를 현저히 저하시킨다. 그러나 광산, 토목, 건축 등의 공학적 분야에서 설계, 시공, 보수 및 유지를 위하여 암석에 적용되는 하중 조건은 대체로 압축하중이므로, 압축하중 하에서의 불연속면의 거동이 주요 관심의 대상이 된다. 정수압상태에서는 불연속면이 닫혀버리는 현상이 관찰되는데, 이로 인하여 불연속면의 두께에 대한 길이의 비, 즉, 종횡비(aspect ratio)가 증가하고, 접촉하게 되는 불연속면 사이의 마찰이 증가하게 되고, 불연속면을 통과하는 유체의 흐름이 감소하게 된다. 그러므로 정수압상태하에

서는 불연속면의 거동이 안정화되며 성장이 어려워진다. 반면에 경계부에 다른 크기의 압축하중이 동시에 작용하는 편차압축응력(deviatoric compressive stress) 하에서는 불연속면이 성장, 상호작용(interaction), 연합(coalescence)하게 된다. 이는 국부적으로 작용하는 인장응력 때문이며, 인장응력은 외부조건에 따라 크기와 방향이 다르게 된다(Shea, 1988; Kemeny, 1987a, 1991a, 1993). 국부적으로 작용하는 인장응력의 크기가 암석의 인장강도보다 큰 경우에는 불연속면이 성장하게 되며(Kranz, 1983; Zheng, 1989) 이러한 인장응력은 입자간의 경계, 공동(cavities), 포획물(inclusions), 역학적 성질의 차이 등의 불균질로부터 발생한다(Zheng, 1989; Wang, 1993).

본 연구에서는 실험실 내에서 압축하중을 받는 암석에 이미 포함되어 있거나 새롭게 형성되는 불연속면들이 성장, 상호작용, 연합하면서 그들의 길이, 방향, 간격분포가 변화하는 양상을 관찰함으로써 암석의 변형 및 파괴거동을 모형화 하였다. 그리고 이 모형은 변형률강화(strain hardening), 변형률연화(strain softening)

1) 정희원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부

등의 비선형 응력-변형률 거동을 예측하는데 사용되었다. 이러한 모형은 사용상 여러 장점을 가진다. 첫째, 치수효과(size effect)가 이미 내재되어 있다. 초기 불연속면의 성질에 대한 통계적인 분포를 사용한다면, 이는 이미 치수에 의한 영향을 고려한 것이 되므로 치수효과를 예측할 수 있게 된다. 둘째, 상호작용(coupled effect)이 이미 내재되어 있다. 불연속면 구조의 진전(evolution)에 따른 열·수리적 성질의 변화는 암석과 파괴역학의 이론을 대입하여 비교적 쉽게 계산될 수 있다. 마지막으로, 이러한 방법으로 얻어진 불연속면의 전파에 대한 모형은 복잡한 기하학적 현상을 갖는 현상에 대하여 유한요소법과 같은 수치해석을 실시할 때 쉽게 대입될 수 있다. 이러한 방법은 이미 화강암(Kemeny & Cook, 1991a), 응회암(Wang & Kemeny, 1993), 사암(Myer *et al.*, 1992) 등 다른 종류의 암석에 성공적으로 사용된 바 있다.

## 2. 실험실 실험을 통한 고찰

앞에서 언급한 바와 같이 암석의 변형 및 파괴거동의 해석을 위하여 압축하중의 증가에 따른 암석 내 불연속면의 거동과 길이, 방향, 밀도의 변화를 관찰하기 위한 일련의 실험을 실시하였다. 이때 관찰하고자 하는 불연속면의 특성과 크기에 따라 여러 가지 다른 종류의 실험을 실시할 필요가 있었다. 실험실 실험의 주요 목적은 다음과 같다. 첫째, 일반적인 불연속면의 특성을 구한다. 둘째, 개발되는 모형에 대입할 입력자료를 구한다. 셋째, 모형이 예측하는 자료와 비교할 수 있는 근거를 제공한다. 이러한 목적에 부합하는 실험을 위하여 우선 불연속면의 크기에 대한 정리가 필요하다.

관심의 대상이 되는 불연속면의 크기는 해석하려는 암반 혹은 암석시료의 크기와 밀접한 관계가 있다. 즉, 실험실 실험에서는 불연속면의 크기가 시료의 크기를 벗어날 수 없다. 또한 절리가 심하게 발달한 암반에서는 미소균열이 암반의 거동에 미치는 영향은 미미하다. 그러므로 불연속면을 고려한 해석시 불연속면의 최대 크기는 해석대상이 되는 암반 혹은 암석의 크기가 되고, 최소크기는 원칙적으로 관찰 가능한 크기이지만, 해석상 효율을 증대하기 위해서 상대적인 영향이 무시되는 크기 이하는 고려되지 않는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 실험실 실험을 통한 거동해석이 목표이므로 불연속면의 최대크기는 암석시료의 크기가 되고 최소크기는 현미경으로 관찰할 수 있는 범위까지로 하였

으며, 본 연구에서는 이러한 실험실에서 관찰되는 불연속면을 통칭하여 “균열”이라 칭하기로 한다. 여기서 균열에 대한 정의는 여러 문헌을 통하여 제시되고 있는데 (Simmons & Richter, 1976; Hadley, 1976; Atkinson, 1991) 이를 종합하면, 암석내에 포함된 공동(혹은 열극, openings)으로 이의 두께가 길이나 폭에 비해서 매우 작은( $10^{-2}$  이하) 것을 의미한다.

본 연구에서는 실험을 위한 시료로 미국 New Mexico 주의 Mckinley Coal Mine과 Colorado 주의 Twenty Mile Coal Mine으로부터 얻은 석탄을 선택하였다. 석탄을 시료로 선택한 이유는 크게 두 가지이다. 첫째로, 석탄은 미국 내 광업계에서 생산되는 단일품목 중 가치나 부피에 있어서 최대를 차지하고 있어서(USBM, 1995), 이를 위한 생산성과 작업안정성 증대를 위한 노력이 계속되고 있다. 특히, 널리 사용되고 있는 기계화 생산에서는 생산성 향상과 안전성 증대가 서로 상반되는 효과를 가져오므로 최적의 탄주(coal pillar)크기를 선택하는 것이 무엇보다도 중요하다. 그러므로 석탄의 역학적 거동에 대한 연구가 요구되고 있는데, 이는 실험실 시료에서도 관찰될 수 있는 규모의 크기를 가진다. 그러므로 실험실에서 석탄의 균열망변화(evolution of fracture network)를 중심으로 한 변형 및 파괴기구를 연구함으로써 이를 절리군(joint set)을 갖는 현상의 암반에 쉽게 적용할 수 있다.

석탄 내 균열의 성장, 전파, 연합 등의 거동은 균열 자체의 성질과 밀접한 관계가 있다(Szwilski, 1985; Singh, 1986; Friesen, 1987; Zipf, 1990). 그 중 층리(層理, bedding plane)는 가장 대표적으로 나타나는 균열로, 퇴적 중 연속적으로 일어나는 층서의 결합이 완전히 이루어지지 않은 것을 지칭한다. 미국 내 무연탄에서 주로 발견되는 다른 불연속면으로 탄리(炭理, cleat)를 들 수 있다. 탄리는 서로 평행한 균열 군(群)으로 주로 층리와 수직인 방향을 이루고 있다. 탄리는 다시 우세한 균을 이루고 있는 주(主)탄리(major or face cleat)와 부(副)탄리(minor or butt cleat)로 나눌 수 있다. 이들의 특징은 주로 면상을 이루고 있으며 주탄리의 경우 여러 층리를 통과하는 뚜렷한 형상을 하고 있다는 것이다. 이들 균열에 대하여 고려되어야 할 중요한 공학적 성질로 균열면을 따른 전단강도와 균열면에 수직한 방향으로의 인장강도가 매우 작음을 들 수 있다.

### 2.1 단축압축실험

석탄은 특징적으로 서로 직교하는 두 탄리군이 층리

에 수직하게 분포하고 있는 비교적 규칙적으로 발달한 균열망을 가지고 있다. 이들 균열들은 석탄의 변형 및 파괴에 큰 영향을 미친다. 대개의 경우, 층리와 탄리는 각각 수평, 수직으로 존재한다. 그러나, 굴착면의 기하학적 형상이나 초기 암반응력의 상태에 따라 최대주응력과 이들 균열들이 이루는 각은 변화를 갖게 된다. 그러므로, 하중의 방향이 층리와 이루는 각도가 다양하도록 하여 단축압축실험을 실시하였다. 이 실험의 가장 중요한 목적은 주응력의 방향과 균열군이 이루는 상대적인 각도가 변화할 때 생기는 변형 및 파괴거동에 변화를 이해하는데 있다. 주응력의 방향과 균열군이 이루는 각의 변화에 따라 생기는 단축압축강도의 변화, 즉, 강도이방성(strength anisotropy)에 대해서는 이미 많은 연구가 이루어진 바 있다(Chappell, 1989; Prucz & Fu, 1989; Goodman, 1976).

미국 New Mexico 주의 McKinley Coal Mine으로부터 얻은 괴상의 석탄으로부터 직경 5 cm의 원주형 표준시료를 성형하였는데, 이때 층리와 시험편의 축이 이루는 각도가 각각 0°, 45°, 그리고 90°를 이루도록 하였다. 이는 시료가 최대강도와 최소강도를 갖는 것으로 알려진 각도를 선택한 것으로서 마찰각이 매우 작다고 가정하여 45°를 선택하였다(Goodman, 1989). 실험으로부터, 변형 및 파괴양상을 세밀하게 관찰하였다. 거의 모든 실험에서, 시료가 파괴되는 순간 전까지 비교적 선형에 가까운 응력-변형률관계를 구하였다. 그러나 하중방향에 대한 층리의 방향이 변화하면서 변형 및 파괴거동의 두드러진 차이가 발생하였다.

시료는 균열면의 교차선을 따른 대규모 균열의 진파를 통해서 파괴에 이르렀다. 층리가 하중의 방향과 수직인 시료의 경우 다른 경우보다 상대적으로 큰 값의 강도를 보였으며, 국부적인 전단으로 인해 형성된 대각선 방향의 파쇄대를 따라서 고운 암석가루(rock powder)가 관찰되었다. 균열은 층리와 탄리의 교차선을 따라 성장하였으며 인장형 균열전파가 현저함이 관찰되었다. 층리가 하중과 45°의 각도를 이루는 시료의 경우 층리를 따른 전단파괴가 관찰되었다. 시료의 상하부에서 국부적인 파쇄대가 관찰되었다. 또한 초기 탄리의 연장에 의한 수직 파괴면도 관찰되었다. 층리가 하중방향과 평행하게 성장된 시료의 경우 초기균열의 인장형 전파에 의해 쪼개짐(splitting) 파괴가 관찰되었다. 이상의 관찰 결과를 종합해 보면, 균열의 진파는 초기 불연속면들의 교차선을 따라 이루어졌고, 불연속면과 하중이 이루는 각도에

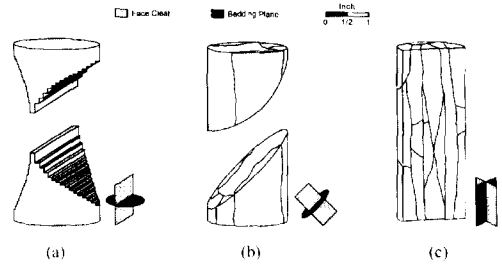


Fig. 1. Failure mode of the test sample with (a) horizontal, (b) 45° and (c) vertical bedding planes under vertical uniaxial compressive load.

따라 전단형 그리고 인장형 파괴가 혼합된 형태임을 알 수 있었다. 시료의 파괴형태는 Fig. 1과 같다.

## 2.2 수지(resin) 주입을 사용한 단축압축실험

수지주입방법은 형광염료를 섞은 수지가 시료의 외부와 연결된 모든 불연속면에 침투되어 고결되고, 절삭된 후 불연속면은 형광빛에 의하여 뚜렷하게 구분이 될 수 있다는 착안에 의한 것으로 이미 Cavanaugh & Knutson(1960), Pittman(1970), Gardner(1980), Wang & Kemeny(1992) 등에 의해 성공적으로 사용된 바 있다. 이들은 수지주입방법을 이용하여 시료에 포함된 초기 불연속면을 관찰하였다. 그러나 본 연구에서는 단축압축하중에 의한 시료 내의 손상(damage)을 관찰하기 위한 새로운 실험방법이 시도되었다. 새로운 실험에서는 직경 5 cm의 원주형 표준 시료에 단축압축하중을 가하는 동시에 형광염료를 섞은 에폭시수지(epoxy resin)를 주입하였다. 주입된 수지가 충분한 시간이 경과한 후 고화되고 나면 시료를 몇 개의 두께가 작은 원반으로 절삭하여 3차원 균열분포를 관찰하였다. 이로부터 하중의 크기를 달리하는 일련의 실험을 통하여 초기 균열의 분포, 하중에 의해 형성된 새로운 균열 분포, 그리고 초기균열의 성장 정도를 통계적으로 관찰할 수 있다.

실험을 위해서 Fig. 2에 보인 바와 같은 투명한 플라스틱 원통으로 제작된 수지주입셀(cell)을 특별히 제작하였다. 셀은 플라스틱 원통, 두 개의 오링(o-ring), 두 개의 배출구로 구성되어 있다. 오링은 셀의 상하에서 시료를 지지해주며 더욱 중요한 역할로 진공압과 수지의 누설을 방지한다. 배출구는 진공펌프와 수지공급통을 셀과 연결시키기 위한 것이다.

실험절차는 다음과 같다. 셀의 높이보다 약간 높은

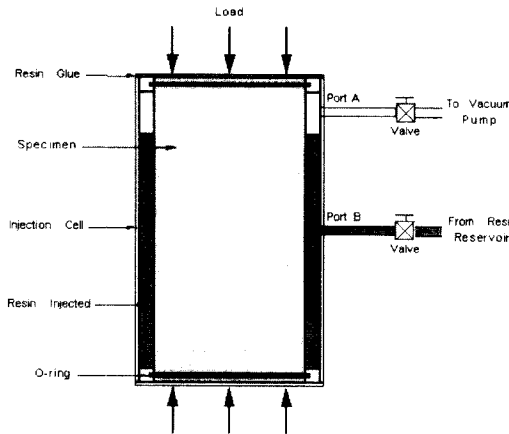


Fig. 2. Special cell devised to inject resin under uniaxial load.

시료를 성형하여 오링 주변에 실리콘 그리스를 바른 후 삽입한다. 셀의 상하부에 급결수지접착제(resin glue)를 사용하여 공기와 수지의 누설을 차단한다. 셀을 압축기로 넣고 가압하기 시작한다. 원하는 하중에 고정시켜 놓고 셀 내에 진공압을 가한다. 사용한 압력은 대략 200 millitorr(=2.632×10<sup>-4</sup> atm)이고 이틀 정도의 기간 동안 이를 유지하였다. 형광염료를 수지에 섞고 혼합물의 점도를 낮추기 위하여 혼합물의 온도를 높여준 후(본 연구의 경우 시료의 온도증가에 따른 물리·화학적 변화 가능성을 고려하여 60°C 까지로 하였다.) methyl ethyl ketone의 용매를 소량 첨가한다. 이 혼합물을 진공압이 작용하고 있는 셀에 주입하면 혼합물은 거품을 내며 극렬하게 시료의 균열사이로 침투하게 된다. 거품의 발생이 상당히 멈추어지면 진공압을 압축질소로 대체한다. 이는 이미 균열 내로 침투한 수지혼합물이 밖으로 나오는 것을 방지하기 위한 것이다.

주입된 수지는 약 3일 동안 고결된 후 다이아몬드 톱을 이용하여 3개의 원반으로 절단되어 6개의 균열을 포함한 면을 제공하였고 이는 고해상도 디지털 비디오 카메라로 촬영되었다. 이 화상들은 256 단계의 명암을 갖는 흑백 화상으로 처리되어 흰색바탕에 검은색 균열로 표시되었다. 이렇게 처리된 화상으로부터 NIH Image(미국국립보건연구소·U.S. National Institutes of Health-에서 개발한 Macintosh용 공용 소프트웨어로 <http://rsb.info.nih.gov/nih-image/>로부터 다운로드 받을 수 있으며 최근 PC용 베타버전도 함께 제공되고 있다.)라는 소프트웨어를 사용하여 각 균열의 위치, 길이,

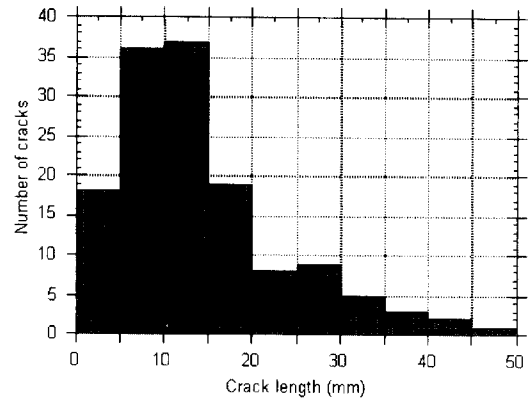


Fig. 3. Histogram of crack lengths from resin injection tests

방향 등이 계산되었다. Fig. 3는 여섯 개의 다른 화상으로부터 얻은 균열의 길이를 종합하여 보여주고 있다. 그림으로부터 30 mm 보다 작은 균열이 대다수였으며 이보다 큰 균열도 간헐적으로 나타남을 알 수 있다. 균열길이는 Poisson 분포를 따르는 것으로 나타나고 있다. 그러나 막대그래프상에서 큰 구간을 사용하여 도시하면 분포는 지수함수(exponential)분포를 따르게 된다. 또한 전자현미경(SEM)을 통한 관찰 결과 수지가 주입된 균열의 최소두께가 수십 μm인 점을 감안할 때, 사용한 디지털 비디오 카메라의 해상도는 미소균열을 모두 관찰하기에는 충분한 것이 아니어서 많은 수의 미소균열이 표시되지 않았다. 그러므로 촬영되지 않은 미소균열을 고려한다면 균열의 길이분포는 지수함수분포를 따른다고 할 수 있다. 이러한 지수함수분포는 이미 Hadley(1976)나 T.F. Wong(1985)으로부터 제안된 바 있다.

Fig. 4는 균열의 방향에 대한 분포를 보여주고 있다. 균열의 방향은 서로 직각을 이루고 있는 두 종류의 탄리를 따라 0°와 90° 방향으로 우수하게 분포함을 알 수 있었다. 즉, 그래프 상의 90° 주위에서 극대값을 갖고 이 주변으로 정규분포를 이룸을 알 수 있었다. 또 다른 극대점은 180° 부근에서 관찰되었는데 이는 90° 부근에서 관찰된 것과 같이 뚜렷하지 않다. 그 이유는 이 부탄리(butt cleat)가 다른 주탄리(face cleat)보다 우세하지 않기 때문이다.

균열의 분포를 표현하는 또다른 변수로 균열밀도를 들 수 있는데 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\chi = N \cdot a^2 / A \quad (1)$$

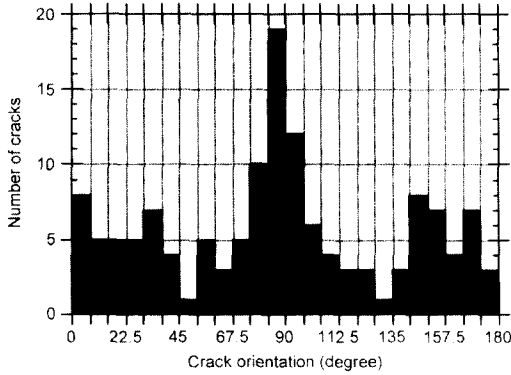


Fig. 4. Histogram of crack orientations from resin injection tests

여기서  $\chi$ 는 무차원의 균열밀도, N은 A의 면적을 갖는 면 위의 균열의 개수, a는 균열의 평균길이를 나타낸다. 수지주입실험으로부터 얻은 평균균열밀도는 1.17이다.

### 2.3 크립(creep)실험

취성재료의 균열 전파를 실험실 실험을 통하여 관찰 하는데 어려움이 따른다. 이는 균열이 매우 짧은 시간 동안 불안정하게 전파되기 때문이다. 압축하중 하에서 균열전파의 속도를 늦추기 위해서 크립실험을 실시하였다. 5 cm×3 cm×3.58 cm의 크기를 갖는 직육면체 시료를 성형하여 실험을 하였으며, 시료내에 층리는 수평으로 위치하고 하중은 층리와 수직인 방향으로 가해지도록 하였다. 예비실험을 통하여 얻은 시료의 강도를 기준으로 하여 초기응력을 13.8 MPa(=2000 psi)로 설정하였다. 압축기의 여건상 하중을 장시간 일정하게 유지하기 어려워 하중 증가방법을 사용하였다.

크립실험 중 시료의 변형거동 및 균열분포의 변화과정은 비디오 카메라를 통하여 기록되었다. 이렇게 기록된 변형 화상으로부터 여섯개의 대표적인 화상을 선택하였다. 이들 여섯 개의 화상은 시간의 경과에 따라 화상 1로부터 화상 6까지 구분하였으며, 화상 1은 시료의 초기상태 그리고 화상 6은 시료가 파괴되기 바로 직전의 상태를 나타낸다. Fig. 5와 Fig. 6는 각각 화상 2와 화상 5를 보여주고 있다. 33일간의 장시간에 걸쳐 비디오 카메라로 기록하였으므로 조명상태나 확대배율이 일정하게 유지될 수 없었다. 이들에 의해 화상에 생긴 명암이나 면적의 변화를 보정하여 주었다. 그리고 수지주입실험에서 사용한 화상처리와 같은 방법을 사용하여 각 단계에서의 균열의 길이와 방향분포를 계산하였

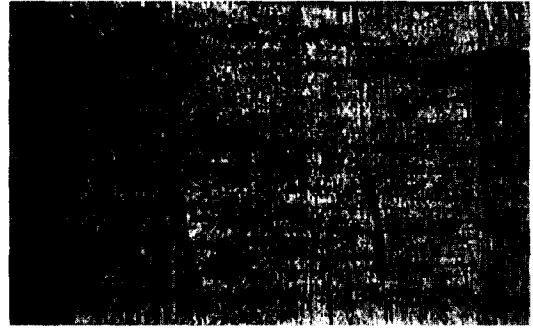


Fig. 5. Image taken at Stage 2 (Height=2.5 cm)

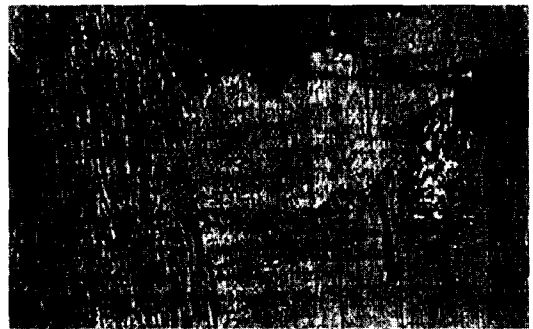


Fig. 6. Image taken at Stage 5 (Height=2.5 cm)

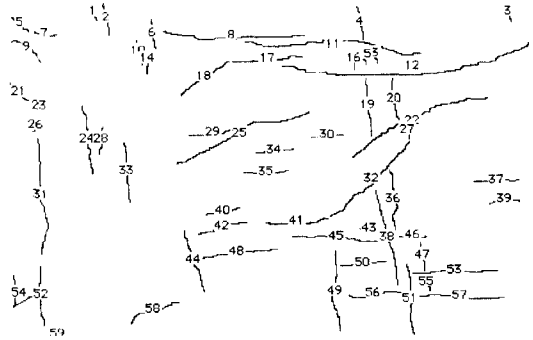


Fig. 7. Binary image of Stage 2 processed by Image

다. Fig. 7은 이러한 보정과 계산을 모두 거친 화상 2를 보여주고 있다. 화상 2와 5에서의 균열의 분포는 비교적 초기 시료와 파괴 전 시료의 균열분포를 나타낸다고 하겠다. 화상 2에서는 대부분의 균열이 층리나 탄리에 평행하게 위치하고 있다. 반면에 화상 5에서는 하중의 방향과 유사한 방향으로 기존의 균열이 성장하였고 새로 생성된 작은 크기의 균열들은 임의의 방향을 가짐이 관찰되었다. 또한 균열은 흑색으로 바탕은 흰색으로 각각 표현되므로 시료 내의 균열이 성장함에 따라 화상의

명도가 점차 낮아지게 된다. 그러므로 평균명도(gray scale)는 하중을 받는 시료 내의 균열의 성장속도를 표현하는 방법으로 사용될 수 있다.

2.4 주사선조사(Scanline survey)

변형 및 파괴거동의 수치모형을 위해서는 균열의 분포에 대한 통계적 자료가 필요하다. 균열의 길이와 방향분포에 대한 자료는 수치주입을 이용한 단축압축시험이나 크립시험 등 일련의 실험을 통하여 얻어졌다. 필요한 또 다른 변수는 균열간격(spacing)으로 이는 주어진 면적이나 체적 내에 포함된 균열의 개수를 의미한다. 본 연구에서 이용한 방법은 주사선조사(scanline survey)로 이는 한 평면에서 일정한 간격을 가진 평행한 직선의 배열이 균열과 이루는 교차점의 개수를 세는 것으로 이루어진다(Underwood, 1970). 측정 배열은 광학현미경을 이용한 10배율을 사용하였다.

우선 하중이 가해지지 않은 140 mm × 120 mm × 120 mm의 직육면체 시료가 사용되었으며 이는 Fig. 8(a)와 같다. 이 시료는 층리가 수평으로, 즉 그림에서와 같이 xy 평면과 평행이 되도록 성형되었다. 이 시료상의 두 평면 A, B에서 조사가 실시되었으며, 각 평면에서는 주로 수직인 두 방향으로 각각 3개의 주사선이 조사되었다. 그리하여 평면 A와 B를 통하여 총 12개의

주사선조사가 실시되었다. 결과는 Table 1과 같다. 그림에서 보이는 바와같이 z 방향의 주사선은 대부분 층리에 대하여 수직방향이므로 층리의 간격과 밀도에 대한 가장 좋은 자료를 제시하고 있다. 마찬가지로, x 방향과 y 방향의 주사선은 두 가지의 다른 탄리(face cleat and butt cleat)의 간격과 밀도를 가장 잘 표현하고 있다. 그러므로 Table 1로부터 탄리의 밀도는 층리의 밀도의 약 절반에 해당한다고 할 수 있다. 즉, 탄리보다는 층리가 더 우세하게 분포함을 알 수 있다.

Table 1. Average crack frequencies and spacings from the scanline surveys

Sample	Plane	Direction	Crack Frequency* (Number of cracks/mm)	Crack Spacing* (mm)
Unloaded	A	z	0.56	1.73
	A	x	0.23	4.11
	B	z	0.59	1.69
	B	y	0.26	3.74
Loaded (Load    BP)		z	1.55	0.0962
		x	0.59	0.131
Loaded (Load ⊥ BP)		z	1.03	0.0628
		x	0.73	0.164

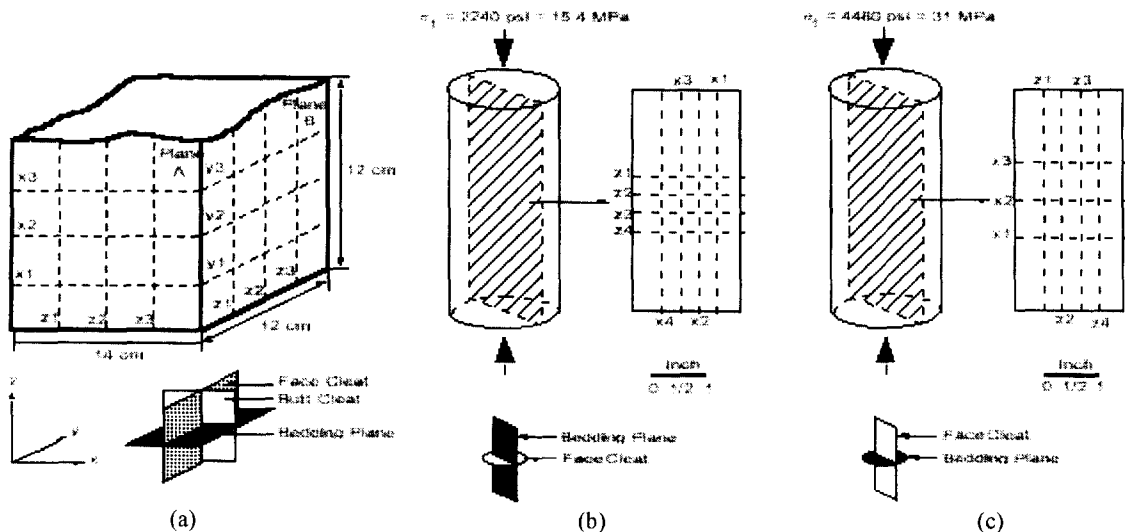


Fig. 8. Scanline survey scheme of (a) an unloaded sample, (b) a loaded sample when the applied uniaxial stress is 15.4 MPa (=2240 psi) and the bedding planes are parallel to the direction of the load, (c) a loaded sample when the applied uniaxial stress is 31 MPa (=4480 psi) and the bedding planes are perpendicular to the direction of the load.

다음으로는 하중의 크기와 방향의 변화에 따른 균열의 간격과 밀도의 변화를 측정하기 위하여 단축압축하중을 받은 시료에 대하여 주사선조사를 실시하였다. Fig. 8(b)에서 보이는 바와 같이 하중방향과 층리의 방향이 평행하도록 성형된 표준 원주형 시험편에 15.4 MPa의 하중을 가한 후 제거하였다. 그리고 시료의 중앙단면을 절단하여 주사선조사를 하였다. 4개의 주사선이 층리와 수직인 방향(z)과 face cleat에 수직인 방향(x)으로 각각 조사되었다. 가해진 하중에 의하여 층리와 평행인 방향으로 많은 균열이 성장하였다. 그리하여 Table 1에 보인 바와 같이 z 방향의 균열밀도가 현저하게 증가하였다. 또한 x 방향의 균열밀도도 증가하였음을 알 수 있다.

다음 시료는 층리가 하중 방향에 직각이 되도록 성형되었다. 그리고 31 MPa의 하중을 가하였다. 시료는 Fig. 8(c)에서와 같이 절단되어 조사되었다. 이 경우에는 Table 1에서와 같이 많은 균열이 탄리와 같은 방향으로 성장되었다.

이상에서와 같이 하중의 영향을 받아 균열의 밀도가 현저하게 증가함을 알 수 있다. 본 연구에서 사용된 시료에서는 층리가 가장 우세하게 관찰되는 불연속면이므로 하중이 층리와 같은 방향으로 작용할 때 작은 하중에서도 균열밀도의 증가가 두드러지게 나타난다. 두 가지의 다른 탄리에 대해서는 균열밀도의 차이가 거의 없음을 알 수 있었다.

### 3. 역학적 모형의 개발

실험실 실험으로부터, 변형 및 파괴에 관한 역학적 거동이 관찰되었다. 초기에는 시료에 층리 그리고 이와 직각을 이루는 두개의 균열(탄리)군이 존재하였다. 시료가 최대응력을 받기 전까지는 최대주응력방향과 유사한(subparallel) 방향으로 비교적 길이가 큰 균열이 성장하였고, 작은 길이의 균열은 상대적으로 이산분포를 가지는 방향으로 생성, 성장하였다. 하중이 최대하중에 도달하면서, 균열밀도가 높아지는 부분에서 국부적인 쪼개짐이 발생하였다. 마지막으로, 최대하중에서 주요 균열들이 전단면을 형성하면서 파괴를 가져오게 된다. 균열의 성장과정을 현미경으로 관찰하여보면, 두 가지의 큰 유형으로 나눌 수 있다. 즉, 초기균열이 최대주응력방향으로 성장하는 인장형 균열의 전파와 초기 균열의 연결이나 방향성이 적당한 균열을 따라 발생하

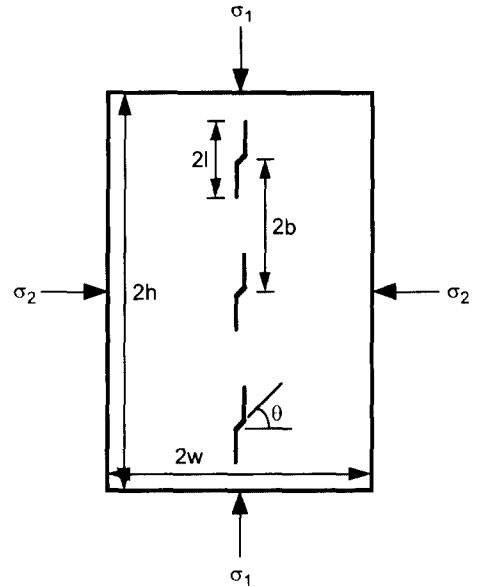


Fig. 9. Sliding crack model consisting of a column of sliding cracks of length  $2l$  and separation  $2b$ .

는 전단형 균열의 전파가 그것이다. 그러므로 사용한 시료의 변형 및 파괴거동은 인장형 균열과 전단형 균열의 혼합으로 모형화된다.

인장형 균열모형은 Fig. 9와 같이 Kemeny(1987b)에 의해 제안된 활주(sliding) 균열모형과 같다. 이 모형은 축방향으로 직선적으로 나열된 일련의 활주균열로 구성되어 있다. 활주균열은 초기길이  $2l_0$ , 방향  $\theta$ , 마찰계수  $\mu$ 를 가지고 있다고 가정한다. 이 균열들은  $l/b$ 의 크기가 1과 같아질 때, 한 개의 균열로 합쳐지게 된다. 여기서  $2l$ 은 균열의 길이,  $2b$ 는 균열의 간격이다. 이 때의 응력확대계수는 식(2)와 같이 구해진다.

$$K_I = \frac{2l_0 \tau' \cos \theta}{\sqrt{b \sin \left( \frac{\pi l}{b} \right)}} - \sigma_2 \sqrt{2b \tan \left( \frac{\pi l}{2b} \right)} \quad (2)$$

여기서

$$\begin{aligned} \tau' &= \sigma_1 (\sin \theta \cdot \cos \theta - \mu \cos^2 \theta) \\ &\quad - \sigma_2 (\sin \theta \cdot \cos \theta + \mu \sin^2 \theta) \end{aligned} \quad (3)$$

$\mu$ 는 마찰계수,  $\sigma_1$ 과  $\sigma_2$ 는 시료의 경계에 작용하는 축응력과 봉압이다. 균열들은  $K_I = K_{Ic}$ 의 관계가 성립할 때 동시에 성장하기 시작한다. 이 때의 축응력  $\sigma_c$ 와 축변

형률  $\epsilon_a^{total}$ 은 Castigliano의 정리를 사용하여 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_c = \frac{\left\{ K_{Ic} + \sigma_2 \sqrt{2b \tan\left(\frac{\pi l}{2b}\right)} \right\} \sqrt{b \sin\left(\frac{\pi l}{2b}\right)} + \sigma_2 (sc + \mu s^2)}{2l_0 c} \quad (4)$$

$$\epsilon_a^{total} = \frac{1-v^2}{E} \left[ \sigma_1 - \frac{v}{1-v} \sigma_2 + \frac{16 \chi (sc - \mu c^2) c}{\pi} \left\{ \tau^* c \ln \frac{\tan(R_1)}{\tan(R_{1,o})} - \sigma_2 \frac{l}{l_0} \ln \frac{\tan(R_2)}{\tan(R_{2,o})} \right\} \right] \quad (5)$$

여기서  $R_1 = \frac{\pi l}{2b}$ ,  $R_{1,o} = \frac{\pi l_0}{2b}$ ,  $R_2 = \frac{\pi}{4} \left( 1 + \frac{l}{b} \right)$ ,

$R_{2,o} = \frac{\pi}{4} \left( 1 + \frac{l_0}{b} \right)$ ,  $\chi = \frac{N \cdot l_0^2}{(2h)(2w)}$ ,  $c = \cos\theta$ ,  $s = \sin\theta$ ,

$K_{Ic}$ 는 모드 I 파괴인성,  $N$ 은 시료 내 포함된 균열의 개수,  $v$ 는 Poisson 비이다.

Fig. 10과 같은 전단형 균열모형에 대해서는 다음과

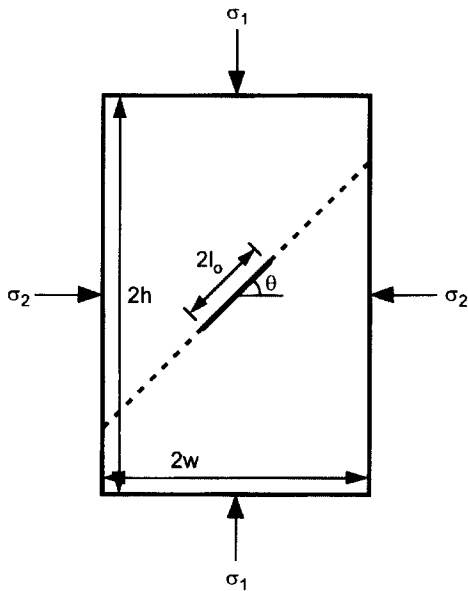


Fig. 10. Shear crack model with a single crack of length  $2l_0$  and angle  $\theta$ .

같은 응력확대계수가 얻어진다.

$$K_I = K_{III} = 0 \quad (6)$$

$$K_{II} = \tau^* \sqrt{\pi l} \quad (7)$$

균열의 성장은  $K_{II} = K_{III}$  일 때 발생하기 시작하며, 이때의 축응력과 축변형률은 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_c = \frac{\sqrt{\frac{G_c E}{(1-v^2) \pi l}} + \sigma_2 (sc + \mu s^2)}{sc - \mu c^2} \quad (8)$$

$$\epsilon_a^{total} = \frac{1-v^2}{E} \left[ \sigma_1 - \frac{v}{1-v} \sigma_2 + 2 \chi \pi \tau^* (sc - \mu c^2) \left\{ \left( \frac{l}{l_0} \right)^2 - 1 \right\} \right] \quad (9)$$

여기서  $s = \sin\theta$ ,  $c = \cos\theta$ , 그리고  $G_c$ 는 한계변형률에너지 지개방률이다.

#### 4. 비선형 응력-변형률 곡선의 계산

실험실 실험으로부터 본 연구에서 사용된 시료의 변형 및 파괴거동은 인장형과 전단형 균열전파의 혼합된 형태로 모형화 될 수 있으며 이는 앞에서 설명한 바와 같다. 또한 이때 필요한 균열분포에 대한 통계적 자료도 제시되었다.

여기서는 모형과 균열분포에 대한 통계적 자료를 이용하여, 실험실 내에서 단축 및 삼축 압축하중을 받는 표준 원주형 시료에 대한 비선형 응력-변형률 곡선을 계산한다. 이는 Fig. 11과 같은 방법을 따른다.

우선 대상 시료의 크기와 이에 포함되어 있는 균열에 대한 입력자료를 설정하여야 하는데, 이는 Table 2에 요약되었다. 시료의 크기는 직경이 5 cm인 표준원주형 시료의 수직 중앙단면의 크기가 된다. 여기에 포함된 균열의 수는 주사선조사에서 구한 초기균열간격(5 mm)을 고려하여 200개로 가정하였다. 각 균열의 길이와 방향은 전체 균열의 분포가 표에 제시된 분포를 갖도록 난수 발생(random number generation)되었다. 나머지 입력 자료는 실험과 문헌조사를 통하여 설정되었다.

다음 단계는 설정된 균열의 길이와 방향에 대해서 균열성장에 필요한 최소응력을 계산하는 것인데 이는 식 (4)와 (8)에 의해서 이루어진다. 이때 계산된 최소응력



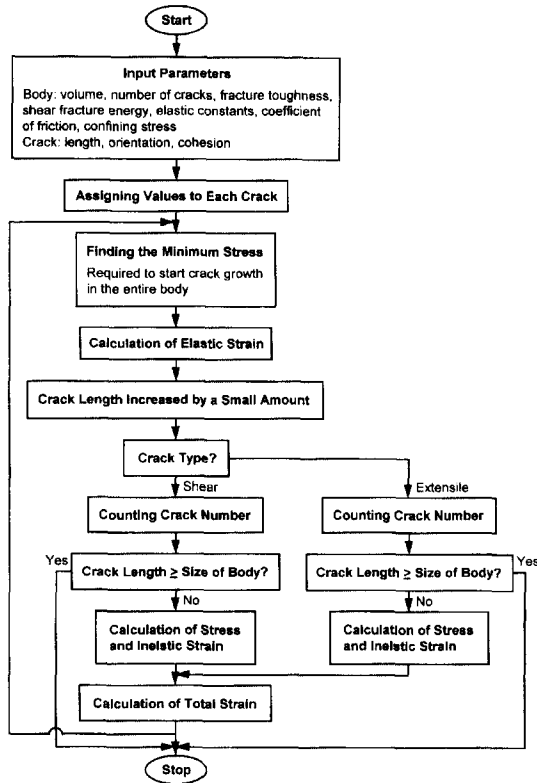


Fig. 11. Flowchart to calculate the nonlinear stress-strain curves

Table 2. Parameter values for coal

Volume	0.005 m <sup>2</sup> (5 cm × 10 cm)
Number of cracks	200
Initial crack length	0.5~5 cm (exponential distribution)
Initial crack orientation	45°~225° (bimodal normal distribution)
Cohesion	0.7~1.5 MPa
Coefficient of friction	0.2
Young's modulus	1 GPa
Poisson's ratio	0.15
Fracture toughness	0.06 MPa · m <sup>1/2</sup>
Shear fracture energy	800 Joules/m <sup>2</sup>

보다 작은 응력에 대해서는 균열이 성장하지 않으므로 이점까지의 거동은 선형거동으로 가정한다. 이때 계산

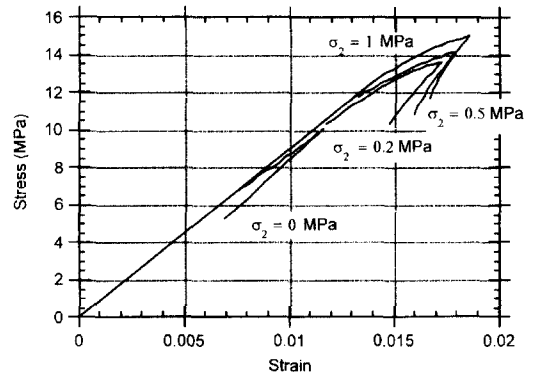


Fig. 12. Nonlinear stress-strain curves for coal.

된 응력에 해당되는 탄성변형률을 계산한다. 이 최소응력에서는 성장이 시작되는 균열(들)이 있으므로 이 균열(들)의 길이를 증가 시켜준다. 이는 모형을 이용할 수 지적 계산상의 편의를 위한 것이다. 균열의 성장이 인장형인지 전단형인지를 판단하여 균열의 성장에 따른 비탄성 변형률을 식(5)와 식(9)를 이용하여 계산한다. 그러면 계산된 응력에 해당하는 탄성변형률과 비탄성변형률의 합인 총변형률을 구할 수 있다. 이제 계산된 응력과 총변형률은 비선형 응력-변형률 곡선상의 한 점이 된다.

성장된 균열을 포함하는 시료에 대하여 앞에서와 같은 방법으로 응력과 변형률을 계산하여 연결하면 시료의 비선형 응력-변형률 곡선을 얻을 수 있다. Fig. 12는 네가지의 다른 봉압이 작용했을 때의 시료의 비선형 응력-변형률 곡선을 보여주고 있다. 선형구간 이후 초기에는 균열의 성장으로 인하여 변형률강화현상이 나타나고 있다. 곡선에서의 변형률강화 구간에서는 응력이 증가하면서 점차로 많은 균열이 성장하기 시작한다. 균열의 길이가 증가함에 따라 다른 균열과 작용하기 시작하여 대규모의 전단형 균열의 전파를 초래한다. 이러한 균열의 상호작용과 전단형 균열의 전파로 시료는 급진적으로 연화되며 최대하중 이후에는 응력의 급격한 감소를 보이는 취성거동을 한다. 단축압축강도는 약 10 MPa이며, 삼축압축강도는 봉압에 민감한 형태를 보여주고 있어 실험실에서 일반적으로 관찰되는 거동과 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 사용한 시료의 압축강도가 작아 1 MPa 보다 작은 봉압에 대한 거동 해석을 하였으며, 봉압을 증가시키면 변형률연화 현상의 예측이 가능하다.

## 5. 결 론

여기서는 압축하중을 받는 석탄시료의 변형 및 파괴 거동에 대한 연구가 이루어졌다. 이 연구는 주로 석탄을 시료로 하였지만 얻어진 결과와 결론은 균열을 포함하고 있는 일반 암석에도 똑같이 적용될 수 있다. 이는 균열을 포함한 취성재료의 거동은 일반적으로 유사한 형태를 보이며, 앞에서 언급한 바와 같이 본 연구에서 이루어진 해석은 균열의 분포에 대한 통계적 자료를 입력자료로 사용하고 있어 이미 시료의 물성에 의존적이기 때문이다.

압축하중 하에서 시료 내에 포함된 기존균열은 대체로 하중방향으로 성장하며 새로운 균열은 비교적 이산된 방향분포를 가지며 생성된다. 시료의 변형 및 파괴 거동은 주요 불연속면인 층리의 방향에 영향을 받으며, 인장형과 전단형 균열전파의 혼합으로 모형화 될 수 있다. 이 모형은 변형률강화, 변형률연화 등 시료의 비선형 거동을 예측하는데 성공적으로 사용되었다. 이러한 모형을 사용할 때 균열분포에 대한 입력자료가 필요한데 이는 일련의 실험실 실험을 통하여 얻어졌다. 우선 균열길이와 방향분포에 대한 자료는 수지주입을 이용한 단축압축실험, 크립실험을 통하여 얻어졌으며, 균열 간격분포는 주사선조사를 통하여 얻어졌다. 본 연구에서 새로이 개발된 하중 하에서의 수지주입방법은 성공적으로 사용되었다.

## 참 고 문 헌

- Atkinson, B. K., 1991, Fracture mechanics of rock, Academic Press, pp.167-215.
- Cavanaugh, R. J., Knutson, C. F., 1960, Laboratory technique for plastic saturation of porous rocks (Geological Notes), Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, Vol. 44, No. 5, pp.628-640.
- Chappell, B. A., 1989, Anisotropy in jointed rock mass breakage, Mining Science and Technology, 8, pp.1-19.
- Friesen, W. I., Mikula, R. J., 1987, Fractal dimensions of coal particles, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 120, No. 1, pp.263-271.
- Gardner, K. L., 1980, Impregnation technique using colored epoxy to define porosity in petrographic thin sections, Canadian Journal of Earth Science, Vol. 17, pp.1104-1107.
- Goodman, R. E., 1976, Methods of geological engineering in discontinuous rocks, West Publishing Company, pp.158-200.
- Goodman, R. E., 1989, Introduction to rock mechanics, Second Ed., John Wiley & Sons, pp. 93-95.
- Hadley, K., 1976, Comparison of calculated and observed crack densities and seismic velocities in Westerly Granite, Journal of Geophysical Research, Vol. 81, No. 20, pp.3484-3494.
- Kemeny, J. M., Cook, N. G. W., 1987a, Determination of rock fracture parameters from crack models for failure in compression, 28th US Symposium of Rock Mechanics, pp.367-374.
- Kemeny, J. M., Cook, N. G. W., 1987b, Crack models for the failure of rocks in compression, Constitutive Laws for Engineering Materials, Theory and Application, Vol. 2. pp.879-887.
- Kemeny, J. M., Cook, N. G. W., 1991a, Micromechanics of deformation in rocks, Toughening Mechanisms in Quasi-Brittle Materials, pp. 155-188.
- Kemeny, J. M., 1991b, A model for non-linear rock deformation under compression due to sub-critical crack growth, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 28, No. 6, pp. 459-467.
- Kemeny, J. M., Jeon, S., 1993, The mechanics of deformation and failure in coal, Proceedings of Eleventh Annual Workshop, Generic Mineral Technology Center, Mine Systems Design and Ground Control, Tuscaloosa, Alabama, October 17-19, pp.15-23.
- Kranz, R. L., 1983, Microcracks in rocks: A review, Tectonophysics, 100, pp.449-480.
- Jeon, S., 1996, Failure and deformation of rocks in compression for underground design, Ph.D. Dissertation, Department of Mining and Geological Engineering, The University of Arizona, Tucson, AZ.
- Myer, L. R., Kemeny, J. M., Cook, N. G. W., Ewy, R., Suarez, R., and Zheng, Z., 1992, Extensile cracking in porous rock under differential compressive stress, Appl. Mech. Rev., 45, pp.263-280.
- Pittman, E. D., Duschatko, R. W., 1970, Use of pore casts and scanning electron microscope to study pore geometry, Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 40, No. 4, pp.1153-1157.
- Prucz, J. C., Fu, S. H., 1989, Prediction of dynamic fracture modes in coal mining (Technical Note), Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 26, No. 2, pp.161-167.
- Shea, V. R., Hanson, D. R., 1988, Elastic wave velocity and attenuation as used to define phases of loading and failure in coal, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 25, No. 6, pp. 431-437.
- Simmons, G., Richter, D., 1976, Microcracks in rocks, The Physics and Chemistry of Minerals

- and Rocks, London, Wiley, pp.105-137.
21. Singh, S. P., 1986, Brittleness and the mechanical winning of coal, Mining Science and Technology, Vol. 3, pp.173-180.
  22. Szwilski, A. B., 1984, Determination of the anisotropic elastic moduli of coal, Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., Vol. 21, No. 1, pp.3-12.
  23. Underwood, E. E. (1970), Quantitative stereology, Addison Wesley.
  24. Wang, R., Kemeny, J. M., 1993, Micromechanical modeling of tuffaceous rock for application in nuclear waste storage, Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., Vol. 30, No. 7, pp.1351-1357.
  25. Wong, T. -f., 1985, Geometric probability approach to the characterization and analysis of microcracking in rocks, Mechanics of Materials, 4, pp.261-276.
  26. Zheng, Z., 1989, Compressive Stress-induced Microcracks in Rocks and Applications to Seismic Anisotropy and Borehole Stability, Ph. D. Dissertation, University of California, Berkeley.
  27. Zipf, R. K., Bieniawski, Z. T., 1990, Mixed-mode fracture toughness testing of coal, Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., Vol. 27, No. 6, pp.479-493.