

화약 발파의 이론과 실제

류창하¹⁾*, 최병희¹⁾

Theory and Practice of Explosive Blasting

Chang-Ha Ryu, Byung-Hee Choi

Abstract Explosive blasting utilizes the energy produced from the explosion of explosive materials. Since the black powder, the first type of explosive, was invented, various types of explosives have been developed until a recent emulsion explosive which is powerful as well as safe in use. The detonators continue to be developed from safety fuse to the recent electronic detonators which allow extremely accurate and flexible control of delay time. However, the good explosives and detonators do not always lead to the good blast results. It entirely depends on the blast engineer. It is necessary to develop the empirical or theoretical models based on the field experience and sound theoretical algorithm. Such models would be very useful for blast design and, furthermore, provide the idea of further technical development. This paper introduces some models used in explosive blasting and attention to be paid for field application.

Key words Explosive blasting, Blast design, Empirical model, Theoretical model

초 록 화약 발파는 물질이 연소할 때 발생하는 에너지를 파괴 동력으로 이용한다. 화약은 흑색화약으로부터 강력한 위력을 가진 다이내마이트에 이어 취급의 안정성도 향상시킨 에밀션 폭약의 개발에까지 이르고 있으며, 또한 뇌관과 같은 화공품도 공업뇌관과 도화선으로부터 전기 뇌관, 비전기 뇌관에 이어 초정밀 시차를 제어할 수 있는 전자뇌관의 개발에까지 발전되어 왔다. 그러나 아무리 성능이 우수한 화약과 뇌관을 사용한다고 하더라도 좋은 발파 결과를 얻을 수 있는 것은 아니다. 실제 현장의 다양한 조건을 어떻게 고려하여 설계 및 시공에 활용할 것인가는 전적으로 발파 기술자의 손에 달려 있다. 암반을 대상으로 하는 발파는 많은 미지의 영향 변수들 때문에 실제 현장에서의 경험에 기초한 접근 방법이 매우 중요하다. 또한 현장에서의 관찰 결과를 분석하고 실험을 통해 정량화된 경험적 모델을 도출하거나, 이론적 근거를 정립하여 이론적 모델로 발전시키는 것은 발파 설계에의 활용뿐만 아니라 새로운 기술 개발에 대한 아이디어를 제공한다는 측면에서도 필요하다. 본 논문에서는 발파 분야에서 개발된 몇 가지 경험적 모델과 이론적 모델들을 통해 활용 시 주의해야 할 사항들이 고찰되었다.

핵심어 화약 발파, 발파 설계, 경험적 모델, 이론적 모델

1. 서 론

화약을 이용한 발파는 물질이 연소할 때 발생하는 에너지를 이용한다. 화약을 구성하고 있는 가연성 물질이

매우 빠른 속도로 연소될 때 부피가 급격히 증가하면서 에너지를 방출하는 현상을 폭발(explosion)이라고 하는데, 화약 발파는 화약이 폭발할 때 발생하는 높은 온도와 가스를 재료의 파괴 동력으로 이용하는 것이다. 역사적으로 보면 화약은 고대 전투에서 강력한 살상 무기로서의 이용을 위해 발명되었지만, 광산에서 채광을 위해 암반을 파괴하는 등 산업용으로 활용되기 시작하면서 사용이 증가됨과 동시에 건설 토목 등 다양한 분야로 그 사용 영역이 크게 확대되었다. 군사용으로 출발하여 산업용으

¹⁾ 한국지질자원연구원 전략기술연구본부 심지층연구단 책임연구원

* 교신저자 : cryu@kigam.re.kr

접수일 : 2016년 12월 7일

심사 완료일 : 2016년 12월 12일

게재 승인일 : 2016년 12월 19일

로까지 사용 영역이 넓어진 화약은 흑색화약으로부터 강력한 위력을 가진 다이내마이트에 이어 강력하면서도 취급의 안정성을 향상시킨 에멀션 폭약의 개발에 까지 이르고 있으며, 또한 화약을 안전하고 효율적으로 사용할 수 있는 뇌관과 같은 화공품도 공업뇌관과 도화선으로부터 전기 뇌관, 비전기 뇌관에 이어 초정밀 시차를 제어할 수 있는 전자뇌관의 개발까지 발전되어 왔다. 폭발력을 이용하는 화약 발파의 특성상 여러 위험 요인이 내재되어 있음에도 불구하고 광업 건설 토목 분야에서 널리 활용되어 온 것은 화약 발파만큼 저렴한 비용으로 파괴에 필요한 에너지를 얻을 수 있는 경제적이고 효율성이 높은 방법이 아직 개발되지 못했기 때문이다. 화약류보다 더 저렴하고 효율적으로 이용할 수 있는 방법이 개발된다면 화약 발파를 대체하게 되겠지만 특별한 경우를 제외하고 일반적 환경에서 그러한 효과를 얻을 수 있는 방법은 아직 보이지 않는다. 더구나 안전성까지 향상된 화약류의 개발로 인해 화약 발파는 앞으로도 오랜 기간 동안 산업 분야에서 그 위치를 유지할 것으로 보인다.

화약의 개발이 강력하면서도 취급이 안전한 제품에 초점을 두어 이루어져 왔다면, 뇌관과 같은 화공품은 안전하면서도 다양한 효과를 줄 수 있는 제품의 개발에 초점을 두고 개발되어 왔다. 발파 기술자는 원하는 목적을 달성할 수 있는 적절한 파괴를 위하여 화약의 양을 나누어 폭발 에너지를 적절하게 분포시키고 뇌관을 이용하여 시차 효과를 주어 기폭 시키는 등의 발파 패턴을 설계하고 발파를 실시한다. 또한 주변 환경에 피해가 없도록 사전에 계획된 발파 설계의 결과를 예측하는 작업도 함께 수행한다. 아무리 좋은 화약과 성능이 우수한 뇌관을 사용한다고 하더라도 좋은(목적을 달성할 수 있는) 발파 결과를 얻을 수 있는 것은 아니다. 발파 결과는 전적으로 발파 기술자의 손에 달려 있다.

2. 발파 분야 연구를 위한 접근방법

초기의 발파 기술 개발은 주로 시행착오적인 경험적 방법에 의존했다. 그 이유는 폭약(이하 법규상 명칭인 ‘폭약’ 용어 사용)을 이용한 발파는 에너지원인 폭약의 특성과 대상 재료인 암반의 특성 및 발파 설계에 관련된 많은 변수들이 상호 관련되어 영향을 주기 때문이다. 폭약의 주요 특성으로는 위력과 관련된 폭굉 속도(VOD), 밀도와 약경, 내수성, 후가스 발생 특성 등이 있으며, 암반의

특성으로는 강도, 변형 등의 역학적 특성과 암반 내 존재하는 불연속면의 특성과 분포, 지하수 조건, 그리고 발파 설계 변수들은 공경, 최소화향선, 공간격, 장약방법, 기폭 방법 등을 들 수 있다. 이러한 변수들은 그림 1과 같이 발파 기술자가 조절하여 설계에 반영이 가능한 변수들과, 조절은 불가능하지만 설계에는 그 영향이 고려되어야만 하는 변수들로 구분할 수 있다. 폭약은 선택이 많은 것은 아니지만 발파조건과 위력을 고려하여 선정할 수 있고, 선정된 폭약을 이용하여 다양한 발파 설계가 가능하다. 그러나 암반은 자연에 존재하는 대상으로 암반과 관련된 특성들은 인간이 조절할 수 있는 변수들이 아니다. 건설 토목 관련 설계라면 불리한 조건의 암반을 피하는 방법도 있겠지만 실제 발파 때문에 암반 구조물 건설 장소의 위치 변경을 고려하는 것은 거의 없는 일이며, 단지 작업 과정에서 자유면을 조절하는 등의 방법을 강구하는 정도가 가능할 뿐이다. 아무튼 발파 기술자는 조절이 어려운 대상 암반이더라도 그 특성이 발파에 어떠한 영향을 미치는 지를 이해해야만 그에 적절한 화약류의 선정과 발파 설계를 통해 주어진 환경 조건 하에서 계획한 발파 목적을 달성할 수 있다.

또한, 이러한 많은 변수들은 상호 연관되어 발파 결과에 영향을 주게 되므로 각 변수의 영향을 실험적 또는 경험적으로 규명하는 것이 쉽지 않다는 문제가 있다. 직접 관찰이나 실험을 통하여 대상 현상에 대한 경험적 자료를 수집하고 분석한 결과를 토대로 해답을 찾는 경험적 실험적 방법에서 요구되는 중요한 조건 중에 하나가 반복 수행이다. 실험적 접근방법은 다른 변수들을 고정시키고 어느 한 변수를 변화시켜가며 그 결과 자료를 체계적으로 수집하고 분석함으로써 그 변수의 영향을 파악하게 되는데 발파 연구의 경우 현장에서의 실규모 실험

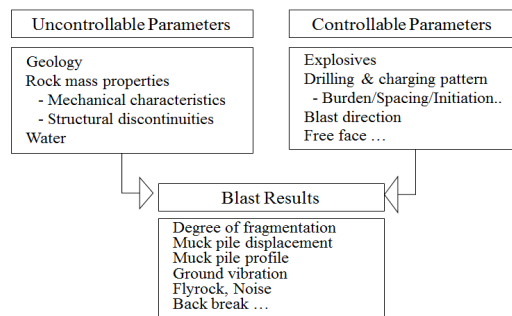


그림 1. 발파 결과에 영향을 주는 변수들.

은 물론이고 실험실 실험에서 반복 시험을 위해 시험 조건을 재현하기가 쉽지 않기 때문이다. 현장 실험의 경우, 대상 암반은 파악하기 어려운 많은 불확실성을 갖고 있으며 같은 조건에서 실험을 반복한다는 것은 거의 불가능하다. 더구나 어떠한 조건의 변화가 있는 지 파악하기도 어렵다. 실험실 실험도 마찬가지로 화약류를 이용하는 실험의 경우, 동일한 화약류를 사용한다고 하더라도 똑같은 하중 조건을 만들기는 거의 불가능하며 따라서 실험을 반복할 수 있는 재현성 확보는 쉽지 않다. 동적 하중의 제어 및 재현성 확보를 위해 물을 매질로 하여 발파 시 방출되는 에너지 전달을 제어하거나, SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar)를 이용한 실험 등 많은 연구자들이 실험적 방법을 개발하는데 노력해 왔다(Hopkinson, 1914; Kolsky, 1949).

발파 연구에 과학적 접근 방법이 어려웠던 또 다른 이유는 발파 과정에 관련된 시간적 요소 때문이다. 노천 발파에서 발파 후 파쇄된 암반이 팽창하고 비산하는 과정은 육안이나 일반 비디오카메라를 이용하여도 어느 정도의 관찰이 가능하지만, 폭약의 작용 및 그 결과 주변 암반의 반응은 micro-sec에서 milli-sec 단위의 매우 빠른 시간 내에 일어나므로 암반 내에 발생하는 과정의 실험적 관찰이나 계측이 어렵다. 계측기류의 성능이 미비하던 과거에는 실험적으로 동적인 현상을 관찰한다거나 계측한다는 것도 거의 불가능하였고 따라서 접근 방법 역시 조건을 변경시켜 가면서 결과를 관찰하여 분석하는 시행착오적인 방법에 의존할 수밖에 없었으므로 학문적인 대상으로서보다는 기능적, 기술적 대상으로 머물러 있었다.

3. 발파 설계에 활용되는 이론적 모델들

3.1 누두공 이론과 발파설계

폭약(장약량=W)을 지중(심도=B)에 설치하고 발파를

하면 지표면을 향하여 그림 2와 같이 깔때기(원뿔) 형상의 누두공(crater)이 형성되는 것을 관찰할 수 있다.

누두공의 반경(r)과 최소저항선(B , burden)의 비를 누두지수($n=r/B$)라고 정의하고, 누두공의 형태에 따라 누두지수가 1인 경우를 표준장약, 1보다 크게 나타난 경우를 과장약, 1보다 작게 나타난 경우를 약장약으로 정의한다. ‘표준장약 발파의 장약량(W)은 누두공의 체적에 비례한다’는 관계를 나타내는 식($W=CB^3$)은 Hauser의 식 또는 Vauban의 식으로 알려져 있다(日本火藥學會, 2001; Langefors & Kihlström, 1978). Hauser 식을 기본으로 해서 과장약이나 약장약의 경우에 적용할 수 있는 식도 유사한 형태로 표현할 수 있다. 누두지수의 변화에 따른 장약량 계산을 위해 Dambrun과 같은 연구자들에 의해 누두지수 함수($f(n)$)가 도입되었다(Dambrun, 1873). Hauser 식에서 계수 C 는 대상 체적(B^3)의 암석을 발파하는데 필요한 장약량을 결정하는 계수로서 발파 계수라 부르며, 발파계수에 크게 영향을 미치는 인자로서 대상 암석의 발파에 대한 저항성(g), 폭약 위력(e), 전색 상태(d)를 고려하여 $C=g \cdot e \cdot d$ 로 표현한다. 따라서 이러한 접근방법을 발파 설계에 적용한다면 체적, B^3 의 암석을 파괴하는데 필요한 장약량(W)은 다음과 같이 표현된다.

$$W = g \cdot e \cdot d \cdot f(n) \cdot B^3 \quad (1)$$

누두공의 관찰 결과를 또 다른 형태로 제시한 모델들도 있다. Beidor는 폭약의 양이 체적에 비례하는 부분과 면적에 비례하는 부분으로 해석하여 식 (2)와 같은 관계식을 제시하였고(Belidor, 1725), Höfer는 면적만으로 표현하고 대신 폭약의 맹도(brisance)에 대한 인자(b_1)와 암석의 강도에 관한 인자(b_2)를 도입하여 식 (3)과 같이 표현하였다.

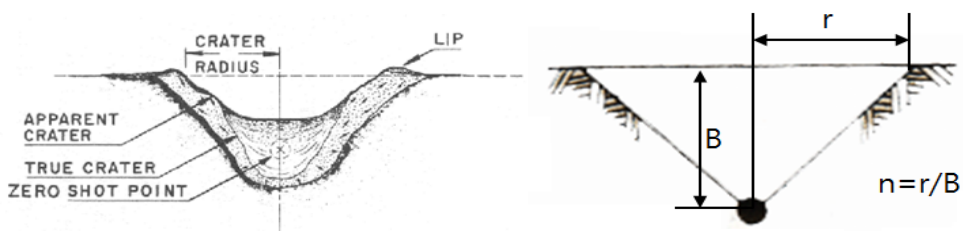


그림 2. 지중 폭발과 누두공 모델.

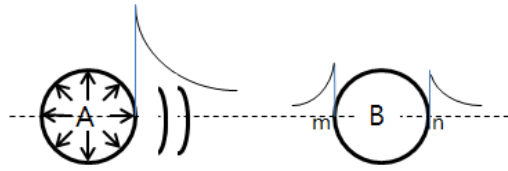


그림 4. 선균열 발파와 시차 효과.

$$W = k_1 \cdot B^2 + k_2 \cdot B^3 \quad (k_1, k_2 : \text{상수}) \quad (2)$$

$$W = b_1 \cdot b_2 \cdot B^2 \quad (3)$$

Langefors & Kihlström (1978)은 Belidor와 같은 관계를 Taylor series와 유사한 형태의 식으로 제시하였다. 차원해석(dimensional analysis) 기법을 이용하여 폭약의 폭발과 누두공 규모와의 관계를 유도한 결과 식들도 있다(Oberbeck, 1971; Holsapple & Schmidt, 1980). 또한 경험적 모델로서 노천 계단식 발파의 설계 인자들을 산정하는 매우 실용적인 식들도 많이 사용된다.

이러한 plug-in 형태의 모델들은 모델을 구성하고 있는 인자들에 대한 적절한 정보만 획득할 수 있다면 발파 설계에서 장약량 계산을 위한 매우 실용적인 도구로 활용할 수 있다. 반면에 암반을 대상으로 하는 경우 발파에 영향을 주는 암반의 특성을 한 두 개의 인자로 대표하기 어려운 조건에서는 많은 오차가 발생할 수 있음을 인지해야 한다.

3.2 충격파 파괴이론과 활용

폭약이 폭발하면 높은 열과 높은 폭굉압이 형성되어 발파공 주위의 암반을 분쇄시키고 균열을 발생시키고 이어 가스압의 팽창으로 균열의 전파와 파쇄대가 형성된다. 누두공 시험은 폭원에서 자유면으로 이어지는 누두공 형상의 파쇄대를 보여주며 폭약의 심도가 깊어짐에 따라 누두공 반경이 작아지고, 어느 심도에 이르면 폭원 주위만 좁은 범위의 파쇄대가 발생할 뿐 자유면까지 파쇄대를 형성하지 못함이 관찰된다. 초기 발파 연구에서는 이러한 관찰로부터 화약 발파에 의한 암반의 파괴의 주 동력원(driving energy)을 폭발 시 발생하는 가스의 팽창압으로 이해했고, 적정 파괴를 일으키는 장약량과 적절한 심도(최소저항선)를 찾아내고 설계에 활용하는데 누두공 시험을 활용했다. 그러나 Duvall 등의 실험적 관찰에서 자유면까지 누두공을 형성하지 못하는 깊은 심도에서 폭약이 폭발할 경우의 파쇄대를 관찰한 결과 그림 3(a)와 같이 폭원에서 자유면까지 균열이나 파쇄대가 형성되지 않았지만, 자유면 근처에서 spalling과 같은 파괴양상이 관찰됨에 따라 가스압과는 다른 동력원에 관심이 집중되기 시작했다. 현장 실험에서 관찰된 암반의 spalling 파괴는 그림 3(b)와 같이 폭약의 폭굉에 의해 암반 중에

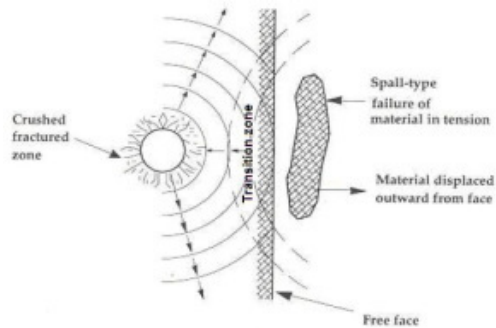
spalling fracture



?



(a)



(b)

그림 3. 자유면 부근에서의 spalling 파괴 양상과 응력파 이론.

전파된 압축 응력파가 자유면에서 인장 응력파로 반사되면서 발생하는 파괴 양상으로서 충격파 파괴이론으로서 설명된다(Hino, 1959). 이러한 파괴 양상은 암석 재료의 인장강도가 압축강도에 비해 1/10~1/20 정도로 작은 취성 재료가기 때문에 발생하는 현상이다.

선균열 발파(Pre-splitting)

제어발파(controlled blasting) 기법 중의 하나인 선균열(pre-splitting) 발파기술은 스무스 발파(smooth blasting) 기법의 기초 위에서 발전한 기술로서 스무스 발파에서는 굴착 예정선의 발파공들을 발파 단계의 가장 마지막에 기폭 시키지만 선균열 발파에서는 이 발파공들을 본 발파에 앞서 발파하든지 또는 본 발파 시 가장 먼저 기폭시켜 미리 파단면을 형성시키는 기술이다. 선균열 발파나 스무스 발파에서 발파공의 시차는 공과 공 사이에 매끈한 파단면을 형성시키는데 중요한 인자로 알려져 있다. 그 메커니즘을 충격파 이론에 기초하여 살펴본다면 다음과 같다(그림 4 참조).

인접한 두 발파공 A와 B를 가정하고 A공이 기폭되어 초기 응력파가 B공에 도달하는 시간을 t_1 이라 하고 A공에 준정적인 가스압이 작용하는 시간을 t_2 , 두 공의 기폭 시차를 t 라고 하면, 1) $t > t_2$ 인 경우 B공이 기폭되기 전에 A공 내의 준정적인 압력은 이미 저하된 상태로서 두 공 사이에 형성되는 응력장은 중첩효과가 나타나지 않고 단일 발파공의 조건과 같게 되므로 부적절하다. 2) $t_2 > t > t_1$ 의 경우, A공 기폭 시 생성된 응력파는 B공이 기폭되기 전에 B공에 도달하지만 A공의 준정적인 압력은 소멸되지 않은 상태이며, 또한 B공이 기폭되기 전이라 하더라도 A공의 영향으로 B공의 공 벽면 m, n 지점에는 인장 응력이 형성되므로 이후 B공 기폭 시 생성되는 응력파와 간섭하여 인장응력 집중 현상을 보일 것이므로 균열의 전파 및 파단면 형성에 매우 유리한 조건이 된다. 3) $t_1 > t > t_0$ 의 경우, 두 공에서 생성된 응력파는 공 사이에서 만나게 될 것이며 가스압에 의한 인장응력과 중첩되어 파단면 형성에 유리하게 작용할 수 있다. 4) $t < t_1$ 에 접근하게 되면, B공은 A공으로부터의 응력파가 도달할 때 기폭하게 되므로 공 벽면에 인장응력의 집중을 최대화할 수 있으므로 공과 공사이의 파단면 형성에 가장 효과적인 조건이 될 수 있다.

공기층 발파(Air-deck blasting)

선균열 발파기술로서 비교적 최근에 많이 활용되고 있는 기술 중 하나가 공기층을 이용한 air-deck 발파기술이다. Air-deck 발파의 아이디어는 1890년대에 도입된 것으로 보고되어 있으며 분산 장약과 유사한 방법에 기초하고 있다. 분산 장약을 이용한 발파 기술은 지중에 공동이나 불연속면의 존재로 인해 폭약 누출될 수 있거나 과도한 진동 및 소음의 발생 등 집중 장약으로 인해 발생할 수 있는 문제점들이 있을 경우 이를 해소하기 위한

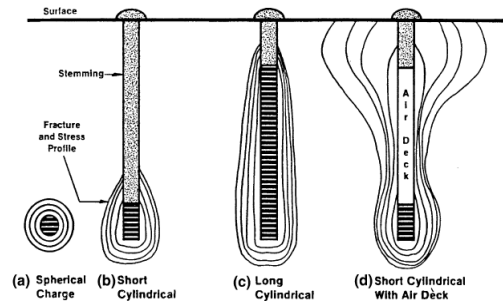


그림 5. 장약 방법에 따른 파쇄대 및 응력 분포.

방법의 하나로 사용되어온 기술이다. Air-deck 발파 기술 역시 장약을 분산시키는 아이디어는 같지만 장약을 분리시키는 전색물이 암분이나 모래가 아니라 공기라는 점이다.

발파공을 모두 폭약으로 채울 경우 초기 압력은 매우 크지만 많은 에너지가 발파공 부근의 압반을 과도하게 분쇄시키는데 소모되고 급격히 떨어지므로 밀장전(coupling charge)이 반드시 파쇄도를 좋게 하고 균열대를 확장시키는데 유리하다고 할 수는 없다. Air-deck 발파의 경우, 폭약의 폭발로 인한 에너지는 공기층으로 인해 바로 주위 압반으로 전달되지 않기 때문에 공벽에 작용하는 초기 압력은 작아지지만, 공기층으로의 팽창된 가스압과 충격파가 공기층 내에서 반복적으로 반사되며 상호작용하면서 주위 압반에 반복 하중으로 작용한다. 이러한 작용은 그림 5와 같이 전체적으로 주위 압반에 형성되는 힘의 분포가 오히려 많은 장약양으로 밀장전한 경우보다 파쇄에 더 유리하게 작용하는 것으로 나타나고 있다(Chiappetta & Memmele, 1987). Air-deck 발파에서 주요 설계 인자는 압반 조건에 따른 공기층의 위치, 길이, 폭약의 위치와 장약량 등이며, 기술의 배경이 되는 이론적 근거를 정립시키고 수치해석적 모델 및 실험적 모델들을 통해 적정 설계를 위한 지침을 제시하고자 하는 노력이 최근에도 이루어지고 있다(Jhanwar, 2011).

공기층을 이용한 발파 기술 개발 사례

공기층을 이용한 양면발파기술은 석재 채취를 위한 발파기술로서 air-deck 발파 개념에 기초하여 개발된 기술 중 하나이다(류창하 외, 2004). 건축용 내장재나 외장재로 사용되는 화강암이나 대리석과 같은 암석 판재들의 생산은 현장 암반(모암)으로부터 큰 암석 껍을 떼어내어 분할하고 가공하는 단계를 거치는데 모암에서 암석 껍(원석)을 추출하는 첫 단계에서는 모암과 원석에 손상을 주지 않고 경제적으로 채취하는 기술이 핵심 기술이다. 과거 열을 이용한 제트 버너로부터 다이아몬드 와이어(diamond wire), 슬롯드릴(slot drill) 등의 기계식 방법에 이르기까지 많은 기술들이 개발되고 활용되었지만 가장 경제적인 방법은 역시 발파 방법이다. 골재 채취를 위한 발파의 목적이 적절한 파쇄도를 얻는 것이라면, 석재용 원석 채취를 위한 발파의 목적은 암반의 손상을 최소화 하고 모암으로부터 떼어내는 것이다. 따라서 폭약의 위력을 저하시켜 발파공 주위의 파쇄대를 최소화하면서도 원하는 파단면을 형성시키는 방법으로서의 air-decking 기술의 활용은 유력한 방법이 될 수 있다. 그림 6의 발파 방법은 초안폭약과 같은 비교적 저폭속의 폭약류를 발파공 내부에서 상부와 하부로 분산 장약하고 두 약포 사이에 공기층을 두어 air-decking 효과를 이용하는 발파 기술이다.

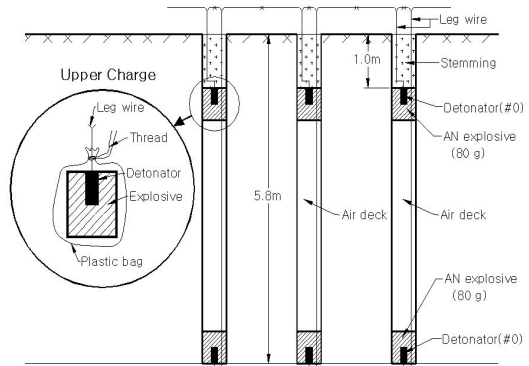


그림 6. Air-decking 효과를 이용한 장약 설계 사례.

4. 수치해석적 방법

계측기류의 발달과 컴퓨터 및 수치해석적 방법의 발달은 발파 연구 및 기술 개발에도 매우 큰 영향을 미치고 있다. 계측기류의 발달로 인해 빠른 시간에 일어나는 물리적, 역학적 현상을 nano-sec의 변화량까지 정량적으로 계측할 수 있게 되었고, 발파 후 거동이나 균열의 전파 양상을 영상으로 추적할 수도 있게 되었다. 대용량, 초고속 연산 능력의 컴퓨터와 수치해석적 방법을 이용하면 많은 변수들을 수치적으로 모델링할 수 있고, 복잡한 물리적, 역학적 계산을 가능하게 함으로써 동적 하중에 대한 응력장 계산이나 발파 결과에 복합적으로 관련된 다양한 변수들의 영향 분석이 가능하다. 또한, 수치해석적 방법은 발파 현상의 이론적 정립과정에서 실험적 방법과 함께 필수적인 검증 도구로도 활용된다. 비교적 최근에 개발된 수치해석적 기법으로서 불연속암반의 역학적 거동해석을 위하여 개발된 개별요소법(Distinct Element

Method)은 재료를 입자 단위의 미시적 규모로 모델링하여 균열과정을 모사할 수도 있고, 발파 후 암반의 거동을 거시적 규모로 모델링하여 파쇄암의 거동과 같이 큰 변위의 현상을 모사할 수 있어서 발파 연구에 유력한 도구로 이용되고 있다. 그러나 수치해석적 방법의 결과를 신뢰할 수 있기 위해서는 수치해석에 적용된 알고리즘이 적정해야 하고, 해석에 사용되는 입력 자료들의 신뢰성이 확보되어야 한다.

4.1 개별요소 알고리즘

개별요소 알고리즘에 기초한 수치해석 프로그램의 개발 과정을 보면, 계산 속도가 느리고 용량이 크지 못한 컴퓨터에서의 처리를 위해 기계어를 사용하여 첫 소프트웨어가 발표된 이후, UDEC에 이르기까지 개선이 이루어져 왔다(Cundall, 1971, 1980). 초기 소프트웨어에서 해석 대상 암반은 절리와 같은 불연속면에 의해 형성된

강성 요소(element)로서 구성되며 요소의 절점과 인접 요소의 면과의 접촉 상태에서부터 변형/변위가 결정된다고 가정한다. 요소간의 경계는 절리면이 되며 절리 강성(joint stiffness)을 도입하여 변위 발생에 따르는 접촉력을 계산한다. 요소간의 상호작용은 절점과 요소면의 접촉조건에 따라 이를 지배하는 구성방정식(friction and stiffness laws)에 의해 결정된다. 구성방정식은 응력과 변형률의 개념보다는 힘과 변위의 개념을 사용하여 요소간의 상호작용을 나타내는 관계로 구성된다. 그림 7과 같이 각 요소에 대해 계산된 합력과 모멘트로부터 요소들의 반응이 계산되며 시간 적분에 의한 explicit 알고리즘으로 해를 구하는 방법이 채택되었다.

이와 같은 강성 블록 개념에 기초를 둔 explicit type 해석방법은 관련 분야에 이용되기 시작하여 BLOCK, DBMS, CBLOCK 등 다양한 컴퓨터 모델들이 개발되었고, PFC (Particle Flow Code)도 같은 접근방법이 채택되었다. 이러한 모델들은 발파 연구에서 국부적인 균열대 형성과정이 나 큰 변위가 발생하는 파쇄암의 이동 등 발파 현상의 시물레이션에 매우 유력한 도구로 활용되고 있다(그림 8 참조).

또 다른 개별요소법으로는 유한요소법과 같이 강성 매트릭스(stiffness matrix)를 구성하여 implicit 알고리즘을 이용하여 해를 구하는 방법이 채택되어 개발된 NURBM 모델이 있다(Plesha, 1984). 개발자들은 NURBM 모델을 절리암반에서의 터널 굴착 문제에 적용하여, 절리의 수직강성과 전단강성의 비인 강성비(stiffness ratio)와 안정성이 확보되는 절리의 마찰계수 등과의 관계를 연구하고 그림 9와 같은 결과를 발표한 바 있다(Belytschko 외, 1984). 이 결과는 절리간의 미끄러짐에 의해 발생하는 불안정성을 방지할 수 있는 마찰계수가 절리강성에 관계없

이 어느 일정 값에 수렴한다는 의미를 보여주는 것이며 Explicit 알고리즘에 기초한 개별요소 해석과는 다른 결론을 주고 있다. 이러한 결과는 대상 수치해석방법에 적용된 알고리즘의 문제로부터 야기된 것으로 판단된다.

이 사례는 동일한 문제에 대한 두 종류의 해석 모델이 상반된 결과를 가져오는 예로서, 수치해석적 방법은 적용된 알고리즘에 따라 이러한 문제가 항상 발생할 수 있

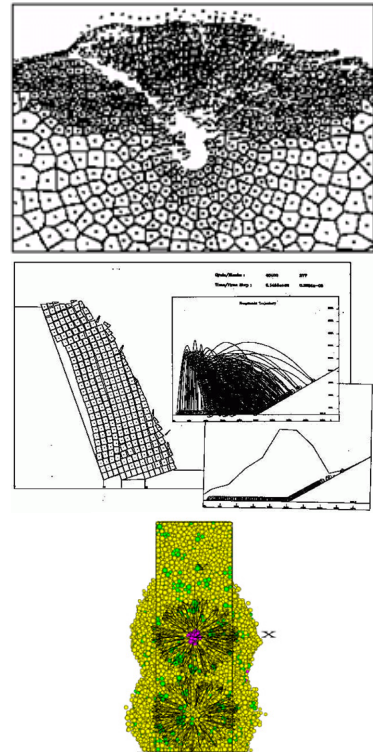


그림 8. 개별요소법의 발파 연구에의 활용.

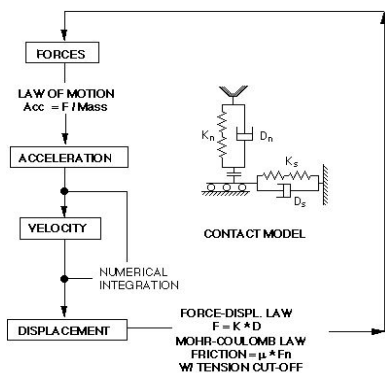


그림 7. 개별요소법 알고리즘.

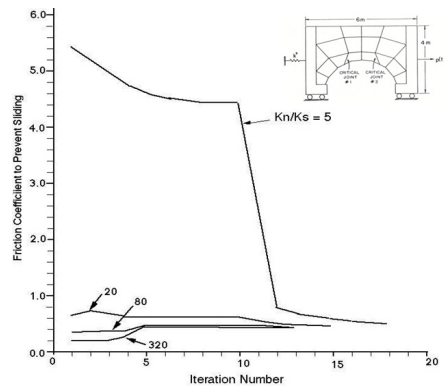


그림 9. Implicit 알고리즘에 기초한 개별요소법의 절리암반 안정성 해석 사례

음을 보여준다. 또한 개별요소법에서 사용하는 절리 강성 값도 실제 현장이나 실험실에서 절리에 대한 실험을 통해 얻어지는 값과는 다른 의미를 가질 수 있다는 점도 입력 변수 설정 시 고려되어야 할 점이다. 입력 변수로서 절리 강성에 따른 수치해석적 불안정성(numerical instability)과 실제 물리적 현상에서 보여주는 불안정성과도 구별하여 이해되어야 하며, 수치해석적 불안정성을 해결하기 위해 절리 강성 값의 조정이 필요할 수 있으며, 이때 입력 변수 조정이 갖는 의미와 영향에 대해서도 고찰되어야 한다(Ryu, 2002a). 개별요소법을 발파 문제에 활용할 때 해결되어야 할 문제점으로는 폭원 부근의 개별 요소들이 초기의 높은 발파하중을 받을 때 나타날 수 있는 수치해석적 불안정성, 암석/암반 및 절리의 동적 구성방정식(constitutive model), 동적 강도 특성 및 동적 파괴 기구 등을 들 수 있으며 이러한 사안은 유한요소법이나 유한차분법에 기초한 수치해석에서도 동일한 문제점들이다. 이러한 문제들은 암석의 동적 거동 특성에 대한 실험적 연구들과 수치해석 모델링기법의 개선 노력 등을 통해서 해결되어 나갈 것으로 기대된다(조상호 외 2009; 최병희 외, 2005; Chen & Zhao, 1998; Zhao et al., 1999; Zhao & Li, 2000; Dai & Xia, 2008; Qian & Wang, 2008; Li et al., 2009; Liu & Xu, 2013).

수치해석적 방법은 plug-in 형태의 모델이 갖는 제한을 해소하기 위해서도 적용된다. 발파진동 예측 모델들은 구조물 피해의 영향 평가를 위한 척도로서 지반의 최대진동속도를 차원해석이론에 근거하여 여러 인자들로 유도된 형태도 있고, 현장 시험을 통해 쉽게 얻을 수 있는 인자들을 이용한 보다 실용적이고 편리한 경험식의 형태로 제시되어 있지만, 구조물에 피해를 주는 인자로서 주파수 특성이나 지속시간 등 파형에 대한 정보를 담지 못하는 단점이 있다. plug-in 형태의 모델이 갖는 단점들은 수치해석적 기법을 통해 보완될 수 있다(Ryu, 2002b). 이러한 접근 방법은 plug-in 형태의 모델이 담지 못하는 정보를 제공해 줌으로써 발파 설계에 도움을 줄 수도 있지만, 그러나 실제 현지 암반의 특성을 수치해석적으로 반영하는데 한계가 있으므로 실용적인 측면에서 경험식에 비해 얼마나 더 유리한 방법인가 하는 것은 여전히 의문이다.

5. 맺는말

암반을 대상으로 하는 발파는 많은 미지의 영향 변수들 때문에 실제 현장에서의 경험에 기초한 접근 방법이 매우 중요하다. 또한 현장에서의 관찰 결과를 분석하고 실험을 통해 정량화된 경험적 모델을 도출하거나, 이론적 근거를 정립하여 이론적 모델로 발전시키는 것은 발파 설계에의 활용뿐만 아니라 새로운 기술 개발에 대한 아이디어를 제공한다는 측면에서도 필요하다. 그러나 역으로 경험적 모델이나 이론적 모델들을 현장에 적용할 때는 세심한 주의가 필요하다. 대부분의 모델에는 발파 조건이나 암반 조건이 단순화 되어 반영되어 있기 때문이다. 따라서 실제 현장의 다양한 조건을 어떻게 고려하여 설계 및 시공에 활용할 것인가는 발파 기술자의 몫이다. 아직 발파와 같은 동적 현상을 지배하는 동적 응력과 변형을 관계나 동적 강도 특성 등 아직 명확히 규명되지 않은 미지의 영역이 많이 남아 있지만, 산학연의 많은 관심 속에서 관련 연구와 기술 개발을 위한 노력들이 활발히 진행되고 있으므로 앞으로 발파 분야의 발전은 지금까지 속도보다 훨씬 빠른 속도로 이루어질 것으로 기대된다.

감사의 말

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인 ‘심부 지오시스템 특성 평가기술 개발(과제코드 GP2015-010)’의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 류창하, 최병희, 선우춘, 홍기표, 2004, 공기충을 이용한 양면발파방법, 제0451817호.
2. 조상호, 조슬기, 김승곤, 박찬, 金子勝比古, 2009, 단계적 충격하중에 의한 암석의 동적손상메커니즘에 관한 실험적 연구 터널과 지하공간, Vol. 19, No. 6, pp. 545-557.
3. 최병희, 양형식, 류창하, 2005, PFC를 이용한 콘크리트 기둥의 발파모델링, 화약발파, Vol. 23, No. 1, pp. 47-54.
4. 日本火薬學會, 2001, 現場技術者のための發破工學ハンドブック, 共立出版株式會社, pp. 548.
5. Belidor, B. F., 1725, Nouveau cours mathématique à l'usage d'Artillerie et du Genie, Paris, pp. 505.
6. Belytschko, T., Plesha, M. and Dowding, C. H., 1984, A Computer Method for Stability Analysis of Caverns in Jointed Rock, Int. J. Numerical Analysis Methods in

- Geomechanics, Vol. 18, pp. 473-492.
7. Chiappetta R. F. and Memmele, M. E., 1987, Analytical high-speed photography to evaluate air-decks, stemming retention and gas confinement in pre-splitting reclamation and gross motion studies. In: Proceedings of the second international symposium on rock fragmentation by blasting, Society for Experimental Mechanics, Bethel, CT, USA, pp. 257-301.
 8. Cundall, P., 1971, A Computer Model for Simulation Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock System, Proc. Int. Symp. Rock Fracture, Nancy, France, Paper II pp. 2-8.
 9. Cundall, P., 1980, UDEC-A Generalized Distinct Element Program for Modelling Jointed Rock, U. S. Army European Research Office and Defence Nuclear Agency, Contract DATA 37-39-C-0548.
 10. Chen, S. G. and J. Zhao, 1998, A study of UDEC modelling for blast wave propagation in jointed rock masses, Int. J. Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 35, No. 1, pp. 93-99.
 11. Dai, F. and K. Xia, 2008, Dynamic Tensile Strength and Fracture Toughness of Anisotropic Rocks, Proceedings of the XIth International Congress and Exposition, pp. 1-8.
 12. Dambrun, 1873, Etude sur les Effects des Mines militaires, Memorial de l'Officier Du Genie, 21, Paris.
 13. Hino, K., 1959, Theory and Practice of Blasting, Nippon Kayaku Co., 1st ed., pp. 189.
 14. Holsapple, K. A. and R. M. Schmidt, 1980. On the Scaling of Crater Dimensions 1. Explosive Processes, J. Geophys. Res. 85, No. B12, pp. 7247-7256.
 15. Hopkinson, B., 1914, A Method of Measuring the Pressure Produced in the Detonation of High Explosives or by the Impact of Bullets, Philos. Trans. R. Soc. London, A, Vol. 213, pp. 437-456.
 16. Jhanwar, 2011, Theory and Practice of Air-Deck Blasting in Mines and Surface Excavations: A Review, Geotech. Geol. Eng. Vol. 29, pp. 651-663.
 17. Kolsky, H., 1949, An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading, Proc. Phys. Soc., London, B, Vol. 62, pp. 676-700.
 18. Langefors, U. and B. Kihlström, 1978, The Modern Technique of Rock Blasting, 3rd ed., John Wiley & Sons, 438p.
 19. Li, X., Z. Zhou, F. Zhao, Y. Zuo, C. Ma, Z. Ye. and L. Hong, 2009, Mechanical properties of rock under coupled static-dynamic loads, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 41-47.
 20. Liu, S. and J. Xu, 2013, Study on dynamic characteristics of marble under impact loading and high temperature, Int. J. Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 62, pp. 51-58.
 21. Oberbeck, V. R., 1971, Laboratory Simulation Impact Cratering with High Explosives, Journal of Geophysical Research, Vol. 76, No. 23, pp. 5732-5749.
 22. Plesha, M. E., 1984, A Method for the Transient Analysis of Jointed Media, Dept. Eng. Mech., Univ. of Wisconsin, pp. 37.
 23. Qian, Q., C. Qi. and M. Wang, 2009, Dynamic strength of rocks and physical nature of rock strength, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 1, pp. 1-10.
 24. Ryu, C. H., 2002a, Review of input parameters of distinct element analysis for modeling the rock mass behavior under quasi-static stress field, ISRM Regional Symposium, Korea-Japan Joint Symp. Rock Engineering Problems and Approaches in Underground Construction, Vol. 2, pp. 801-806.
 25. Ryu, C. H., 2002b, Computer modeling of dynamic ground motion due to explosive blasting and review of some modelling problems, Science and Technology of Energetic Materials, J. of the Japan Explosives Society, Vol. 63, No. 5, pp. 217-222.
 26. Zhao, J. and H. B. Li, 2000, Experimental determination of dynamic tensile properties of a granite, Int. J. Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 37, pp. 861-866.
 27. Zhao, J., H. B. Li, M. B. Wub. and T. J. Li., 1999, Dynamic uniaxial compression tests on a granite, Int. J. Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 36, pp. 273-277.



류창하

한국지질자원연구원

Tel: 042-868-3236

E-mail: cryu@kigam.re.kr



최병익

한국지질자원연구원

Tel: 042-868-3237

E-mail: bhchoi@kigam.re.kr