

발파공학의 세계적 연구동향과 우리나라의 학문적 기술적 수준

류 창하

한국지질자원연구원 제어발파연구실

1. 머리말

화약은 지하자원개발을 위한 갱도굴착 및 광물의 채굴 수단으로부터 터파기, 터널굴착, 도로건설, 댐과 같은 대형 토목구조물 건설 등을 위한 암반의 굴착을 위한 수단으로 널리 이용되고 있다. 또한 광업, 토목분야 외에도 노후한 대형 건물의 해체의 수단으로서의 건설분야나 금속분야에서 폭발용접, 폭발성형과 같은 수단으로 이용되는 등 다양한 목적으로 활용되고 있다. 화약의 폭발력은 적정하게 사용되고, 적절히 제어된다면 다른 어느 방법보다도 경제성 면에서 유리한 도구로 사용될 수 있다.

화약을 이용한 발파기술은 에너지원인 화약의 특성으로부터 주 발파대상인 암반이나 기타 재료에 대한 특성 등에 대한 폭넓은 지식이 요구되고 있다. 화약이 산업계에 적용된 이후로 일찍이 폭발 매커니즘에 대한 연구가 시작되었지만 대부분 시행착오적인 경험적 방법에 의존해 왔으며 발파공학이라는 학문적 위치를 차지하게 된 것은 극히 최근의 일이다. 발파의 주 대상인 암반의 역학적 특성을 다루는 암석역학분야가 학문적으로 체계화되기 시작한 것이 비교적 최근인 1950년대로 본다면 이해할 수 있을 것이다. 암석은 그동안 역학적 거동을 규명하기 위해 많은 실험과 관찰, 수치해석적 연구가 수행되어 왔지만 아직 정적인 하중 조건 하에서도 명확하게 규명되지 않은 독특한 재료이다. 더구나 발파에 사용되는 화약이라는 도구는 반응할 때 엄청난 양의 에너지가 매우 짧은 시간에 방출되므로 힘의 작용과 그에 대한 반응이 정적인 조건과는 상이하며 실험적으로 동적인 현상을 관찰한다거나 계측한다는 것도 과거에는 거의 불가능하였다. 따라서 초기 조건을 변경시켜 가면서 결과만을 관찰하여 분석하는 시행착오적인 방법에 의존할 수밖에 없었고 학문적인 대상으로서보다는 기능적, 기술적 대상으로 머물러야 했다. 그러나 최근 계측기기의 발달, 수치해석 방법의 개발 및 컴퓨터의 보급과 함께 발파분야는 학문적, 기술적인 면에서 새로운 국면을 맞이하고 있다. 본 논고에서는 발파분야의 국내·외 연구동향을 분석하고 선도적인 연구를 해오고 있는 연구팀들을 중심으로 최근 관심의 대상이 되고 있는 연구분야를 살펴본다.

2. 발파공학의 분야

발파공학 관련 참고서적류의 목차를 보면 화약류 (화약류의 역사, 화약류 특성, 폭약류, 화공품, 화약류 성능과 시험), 발파이론, 발파작업, 계단식발파, 터널발파, 조절발파, 수중발파, 기타발파, 발파공해 등이 일반적이고[1] 매우 자세히 분류된 예를 보면 암석의 강도와 파괴특성, 천공, 화약류, 충격파 및 폭굉과 화약류 성능, 기폭시스템, 노천발파에서의 장약량 계산, 터널발파에서의 장약량 계산, 응력파와 암반의 손상 및 파쇄, 제어발파, 컴퓨터를 이용한 계산, 비석, 지반진동, 폭발압 효과, 유해가스, 성형폭약 및 응용기술, 취급의 안전 및 법규 등의 분야로 구분하고 있다.[2]

1991년부터 국제암반역학회(ISRM)의 분과위원회로서 활동하고 있는 Commission of Fragmentation by Blasting은 6개 분야의 working group을 조직하였으나 다음과 같이 8개 분야로 조정되었다.

- Working Group 1 Rock Assessment (Pre- and Post- Blast)
- Working Group 2 Mechanisms and Computer Modelling
(초기 그룹명 : *Fragmentation and Computer Modeling*)
- Working Group 3 Explosives Performance
- Working Group 4 Blast Monitoring Instrumentation
- Working Group 5 Terminology
- Working Group 6 Publications
- Working Group 7 Education
(그룹 6과 7은 초기에 *Education and Publications* 로 구성)
- Working Group 8 Environmental

상기 분류에서 볼 수 있듯이 발파전·후 암반평가기술, 발파메커니즘 및 컴퓨터 모델링 기술, 화약류 성능, 계측기술 분야 등이 발파기술의 주요 관심의 대상이 되고 있는 분야임을 알 수 있다.

3. 국외 연구 동향 분석

3.1 논문발표를 통한 분야별 현황

발파분야의 논문은 AIME, CIM Bulletin 등 광업분야 발간물에 주로 발표되다가 1956년 첫 US Rock Mechanics Symposium이 개최되었을 때 암석역학 관련분야로서 발표되기 시작하였고 연구활동이 활발해 지면서 1983년 발파분야만의 국제규모의 학술대회로 발전하였다. 1981년초 다이너마이트 발명자 노벨의 국가인 스웨덴의 Nitro Nobel사, Swedish Detonics Research Foundation, Lulea 대학 등 산학연 발파관련 엔지니어 및 과학자들이 중심이 되어 국제적인 학술모임을 계획하여 그 결과로 1983년 스웨덴 Lulea 대학에서 세계 각국에서 220여명이 참가한 가운데 첫 국제 학술 심포지엄인 1st Int. Conference on Fragmentation by Blasting이 개최되었고 이후 1987년 Keystone, Colorado, 1990년 Brisbane, Australia, 1993년 Vienna, Austria, 1996년 Montreal, Canada, 1999년 South Africa 등에서 3년 주기로 개최되어 오고 있다. 미국의 Society of Explosives Engineers는 발파관련학회로서 최근 국제학회로 발전하여 매년 국제 학술심포지엄이 개최되고 있다. 가장 최근인 2001년도 참가자 등록 수는 1400여명에 달할 정도로 많은 관련전문가들이 참여하고 있다.

1997년에는 국제학술지로서 FRAGBLAST - The International Journal for Blasting and Fragmentation (Editor-in-Chief: H.P. Rossmannith, Technical University of Vienna, Austria; 계간지)이 *"It is one of the main goals of the FRAGBLAST Journal to create a bridge between theory and practice and to show how theory and practice can cooperate for the benefit of all"* 라는 목표를 갖고 발간되기 시작하였다.

국외 연구동향을 살펴보기 위하여 매년 개최되고 있는 ISEE 국제 심포지엄과 FRAGBLAST의 최근 5년간 발표된 논문들을 분야별로 분류하여 보았다.[3-9] 분야는 ISRM의 Commission of Fragmentation by Blasting에서 구분한 working group을 참조하여 발파진동, 소음, 비산 및 환경영향 관련연구, 파쇄도 및 파괴메커니즘 관련연구, 화약류특성분석 및 적용사례 관련연구, 발파설계변수의 평가 및 발파전·후 평가 관련연구, 제어발파 및 특수발파 관련연구, 기타 등으로 분류하였다. 1996년부터 1999년까지의 논문들을 분류하면 그림 1과 같다. 최근 2개년의 논문들은 그림 2와 같으며

1996년도 FRAGBLAST 국제학술심포지엄의 논문들은 그림 3과 같다.

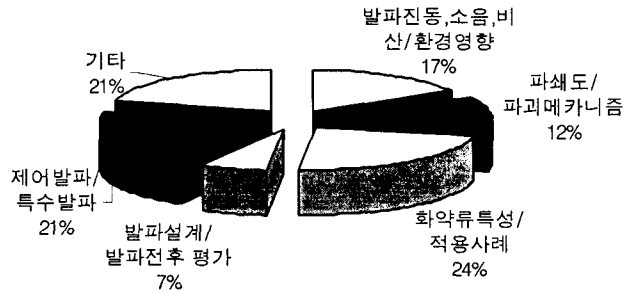


그림 1. 국외 발표논문 분류, ISEE 1996-1999 (242편)

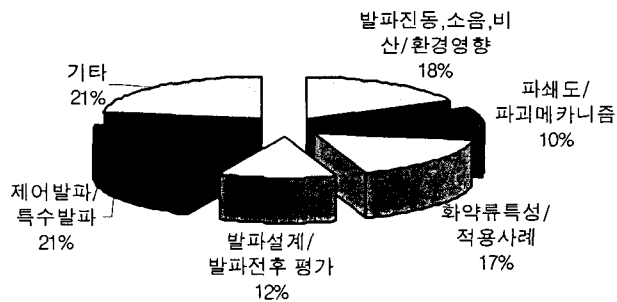


그림 2. 국외 발표논문 분류, ISEE 2000-2001 (134편)

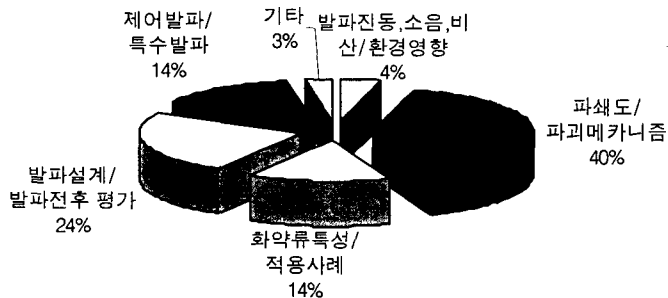


그림 3. 국외 발표논문 분류, FRAGBLAST 1996 (70편)

발표 논문들을 통한 국외의 연구를 보면 과거의 논문들이 파쇄도 관련연구에 집중되었으나 최근에는 화약류로부터 발파기술 전 분야에 걸쳐 다양하게 발표되고 있다. 학술발표회가 어느 한 분야에 치우치지 않도록 조정된 면도 있을 수는 있겠으나 제출된 논문 자체가 다양하고 각 분야의 연구가 활발히 수행되고 있다고 보아도 무방할 것이다. 미국 전문가들이 많이 참가하는 ISEE의 경우 매우 실질적이고 현장 중심적인 사례연구가 많고, 스웨덴, 영국 등 유럽과 호주 등 여러 국가 전문가들이 다양하게 참가한 96년도 FRAGBLAST에서는 발파메카니즘 및 컴퓨터 모델링 분야의 연구들이 많은 것이 특징적이다.

환경영향과 관련하여 발파진동의 저감을 위한 발파설계 및 시공사례는 매년 빠지지 않는 분야이고 특수한 형태의 구조물 발파해체 사례를 비롯한 제어발파 시공사례도 꾸준히 발표되고 있다. 발파과정의 컴퓨터 모델링 기법이 매우 정밀해지고 있는 경향도 눈에 띄는 부분이다. Sandia 국립연구소를 중심으로 개발된 디스크 및 구형 개별요소법(DMC_Blast model)모델은 PFC 모델과 함께 파쇄암의 비산을 다루는 cast blasting 및 파쇄암의 이동특성의 연구에 유력한 tool로서 활용이 기대된다. 암반의 손상범위를 평가하기 위하여 QED model과 같이 손상범위를 추정하기 위한 모델의 개발과 발파설계에 적용하려는 시도들도 최근 관심을 갖고 있는 분야이다. 벤치발파시 물을 이용한 전색방법과 효과에 관한 논문들은 국내의 경우 몇 년 전에 채석장에 이미 보급하였던 기술이지만 최근 미국에서의 사례로서 trim 및 pre-splitting 효과 면에서 좋은 결과가 발표되고 있으며, 영상처리기법을 이용한 파쇄도 분석이나 비산 특성 분석을 통해 적정 발파설계변수를 도출하고자 하는 연구도 기자재 및 소프트웨어 보급과 함RP 보편화 되어가고 있는 경향을 보이고 있다.

3.2 화약류 및 연구기자재

화공품류로서 국내에는 출시되고 있지 않은 전자식 뇌관(Electronic Detonator)의 적용에 관한 논문이 최근 발표되고 있다. 전자식 뇌관은 스웨덴, 미국, 남아프리카 등에서 이미 개발이 완료되어 EDS, EDD, PDD, Smartdet등의 상품명으로 보급되고 있는데 진동의 수준을 저감시키고 주파수 제어가 가능해졌으며 비산, 소음의 제어에도 우수하다고 보고하고 있다. 디지털 Hand Terminal을 이용하여 1ms까지 단차 조정이 가능하고 $\pm 0.1 \sim 0.2ms$ 의 오차를 갖는 전자식 뇌관의 매우 정밀한 초시는 아직 고가이나 다양한 제어발파 기법에 적용될 수 있는 점을 감안한다면 향후 보급이 빠른 기간 내에 증대될 수도 있을 것으로 전망된다.

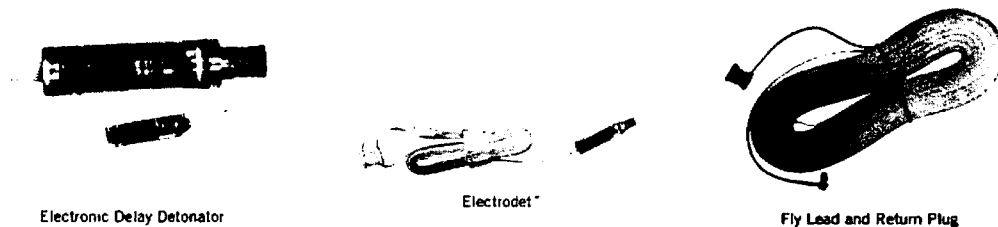


그림 4. AEL(African Explosives Limited) Electronic Initiation Systems

가스 방출을 억제하는 효율적인 전색을 위한 도구로서 Stemming Plug들이 보급되고 있으며 이를 사용한 Air Decking 기술들이 매우 용이하게 되고 있는 것도 관심을 갖게 한다. 과거에도 있었으나 고가 시스템이었던 측량 기구 및 자동화 계산 (벤치면 또는 muckpile 형상, 물량계산) 시스템이 매우 저렴해지고 현장 운반이 쉽게 소형화되고 있다. 고속 카메라와 진동계측 장비류도 소형화되고 있으며, 자료의 무선 전송, 다양한 센서 부착 기능이 포함되어 활용범위가 넓어지고 있고 자료처리 소프트웨어들이 많이 개선되었다.

새로운 제품들로서 천공 정밀도가 매우 높은 천공장비류(HALCO MACH series 외)와, NONEL식으로 여러 개를 동시에 기폭할 수 있도록 고안된 boulder breaker류 제품들이 나오고 있다.

WipFrag와 같은 이미지처리기법을 이용한 파쇄도 분석 소프트웨어와 아직도 많은 개선의 여지가 있지만 발파설계를 위한 소프트웨어들도 계속 upgrade 되고 있다.

3.3 주요연구사례

발파분야 연구를 선도적으로 주도하고 있는 국외 연구기관의 연구수행 사례를 보면 다음과 같다.

3.3.1 New Mexico Tech의 Research Center for Energetic Materials

New Mexico Tech은 NONEL shock tube와 detonator system을 발명한 스웨덴의 Dr. Per-Anders Persson이 1984년에 NMT의 Explosives Technology Research Center의 책임자로 발탁하면서 정부 및 산업체로부터 많은 연구비를 확보하고 활발한 연구가 수행되어 오고 있다. 주로 화약류 관련 연구가 수행되고 있으며 인근에 있는 지하 광산을 실험장소로 하여 실 규모의 실험이 가능하다. Perrson 교수 하에 배출된 학위 논문들을 보면 연구 경향을 파악할 수 있을 것이다.

- 1992-- Albert Van Niekerk, PhD, Chemistry (lead advisor: Professor Kay Brower), "A Study of the Reaction Products from Detonation and Rapid Thermolysis of Emulsion Explosives"
- 1992-- Jaimin Lee, PhD, Materials and Metallurgical Engineering, "Detonation Shock Dynamics of Composite Energetic Materials"
- 1992-- Mark Polster, MS, Engineering Science (Mechanics), "Physical Changes Produced from Low-Amplitude Shock loading of Ammonium Perchlorate Pressings"
- 1993-- Joseph Wang, MS, Engineering Science (Mechanics), "Ignition and Combustion Characteristics of Emulsion Explosives Under Pressure"
- 1995-- Ed O'Connor, MS, Engineering Science (Mechanics), "Shock-Induced Reaction Mechanisms in Metal-Loaded Explosives"
- 1996-- Benjamin O. Garcia, MS, Engineering Science (Mechanics), "The Shock Hugoniot of Liquid Hydrazine in the Pressure Range 3.1 to 21.4 GPa"
- 1996-- Vasant Joshi, PhD, Materials and Metallurgical Engineering, "Bonding Mechanisms in Shock Compaction of Diamond Powder"
- 1996-- Manhong Zhou, MS, Computer Science, "TIGERWIN - A Windows Graphical User Interface for Performance Simulation of Explosives"
- 1996-- Brian Fuchs, PhD, Mechanical Engineering (at New Jersey Tech), "Shaped Charges Having a Porous Tungsten Liner - a Theoretical and Experimental Study of the Mechanisms of Shock Compression, Jet Formation, and Penetration"
- 1996-- Wilem Petr, MS, Minerals and Environmental Engineering, "Dynamic Tensile Fracture in Rock"

3.3.2 University of Missouri-Rolla의 Rock Mechanics and Explosives Research Center

University of Missouri-Rolla는 Rock Mechanics and Explosives Research Center (RMERC)의 책임을 맡고 있는 Dr. Paul Worsey를 중심으로 explosive sensitivity testing, VOD measurements, explosive formulation and testing, replacement of fuel oil in ANFO with soybean oil 분야에서 활발한 연구가 수행되고 있다.

특히 농산물로서 soybean oil의 용도를 개발하기 위하여 착수한 연구사업으로 Fuel Oil을 대체한 새로운 폭약인 ANSoy을 개발이 현실화되고 있다. ANFO가 갖고 있는 물에 대한 취약성과 장기 저장 시 fuel oil의 증발에 따른 폭력감소, 후가스 등을 해결하는 것이 연구의 주요 과제이며 이미 개발 중간 단계에서의 성과 발표가 있었다.

또한 테러에 사용되는 폭약을 추적하기 위해 새로운 재료를 첨가한 폭약을 개발하는 연구도 시대 상황이 요구하는 흥미 있는 연구로서 최근 국내 졸업생이 연구에 합류하였다.



그림 5. ANSoy 폭약 실험

3.3.3 U of Maryland의 Dynamics Effects Laboratory

Maryland 대학의 The Dynamics Effects Lab.은 과거 동적 광탄성 실험을 이용하여 발파로 인해 발생하는 균열 메커니즘 연구를 주도해 오던 Dr. William L. Fourney을 중심으로 활발한 연구가 수행되고 있다. 주로 해군으로부터 연구사업을 확보하고 있으며 주요 연구는 다음과 같다.[10-13]

Response of Polyurethane Foams to Dynamic Loading.

Response of Acoustic Foams to Underwater Detonation.

Response of Low Impedance Materials using a Viscoelastic Split Hopkinson Bar.

가. Split Hopkinson Bar를 이용한 동적 실험

재료의 동적 거동 특성을 고찰하기 위하여 drop weight 형태의 실험장치를 제작하여 실험을 하고 있다. 하중은 4.6kg까지 추로서 충격속도 7.7m/sec를 가할 수 있도록 두종류가 제작되어 있다. 또한 confined 및 unconfined 조건 하에서 충격속도를 100m/sec까지 가할 수 있는 Split Hopkinson Bar 실험장치가 사용되고 있다. 계측은 electromagnetic velocity gage와 PVDF stress gage들과 digital oscilloscope를 이용하고 있다. 본 장치의 기본 원리는 다음과 같다. 알루미늄 또는 유사한 재료로 만든 긴 bar와 bar 사이에 대상 재료를 위치시키고 bar의 한쪽에서 projectile을 이용하여 충격력을 가하면 bar를 따라 응력파가 전달된다. 전달된 응력파는 bar에 접촉하고 있는 재료에 일부는 전달되고 일부는 반사하게 된다. 시간적으로 변화하는 이 동적인 양을 strain gage를 이용하여 계측한 후 입력된 파, 투과된 파(transmission), 반사된 파(reflection)와 재료의 변형으로부터 동적 응력하의 변형거동 특성을 분석한다. 재료의 재질에 따라 bar의 재질을 종래 스테인레스 강으로부터 polycarbonate bar까지 다양하게 사용하여 bar와 재료사이의 acoustic impedance를 좋게 하는 것이 연구실에서 채택된 새로운 개념중 하나로 보인다.

나. 수중발파를 이용한 실험

본 실험에서는 동적 하중을 주는 한 방법으로서 수중에서 화약을 폭파하여 그 충격력을 이용하고 있다. 동적 거동을 계측하기 위하여 pressure gage, pressure bar, strain gage, velocity gage들이 사용되고 있는데 기초실험결과를 보면 하중조건에 반복성이 매우 좋게 나타나고 있다. 하중조건에 반복성은 동적 시험에서 가장 문제되었던 분야중 하나인데 그러한 문제의 하나를 해결한 방법으로 판단된다. 또한 pressure bar를 이용한 동적 하중의 계측은 매우 좋은 idea로 보이며 신뢰성도 높은 것으로 나타나고 있다.

다. 동적 광탄성 실험

정적 하중 하에서의 광탄성 실험은 거의 사용되고 있지 않으나 동적 거동 연구에서는 아직도 활용도가 많다. University of Maryland 동역학 실험실의 광탄성 실험장비는 2차원 및 3차원 실험이 가능한 장비로 발파에 의한 응력파의 전달양상과 균열 생성, 전파 및 기존 균열과의 간섭현상 등을 연구하는데 사용되고 있다. 모델재료는 homalite, plexiglass와 같이 빛이 투과할 수 있는 재료 계통을 사용하고 있으며 화약을 장전할 수 있는 charge containment를 제작하여 사용하고 있다. 보통 약 250 mg 정도의 PETN을 사용하고 steel cap과 O-ring으로 sealing을 하여 발파후 가스가 방출되지 않도록 하고 있다. 균열의 전파속도는 약 10,000 - 8,000 in/sec로 관찰되고 있으며 microsec 단위의 현상을 촬영할 수 있는 고속카메라를 사용하고 있다. 그중 한 모델은 Cranz-Schardin multiple spark gap camera로서 1회에 16 개의 frame을 30,000 fps에서 800,000 fps의 속도로 동적 응력파의 전달과 간섭현상을 촬영하고 있다. 한 연구결과는 노치형태를 가진 38mm 직경의 발파 공으로부터의 균열은 그렇지 않은 경우보다 낮은 속도로 전파되며 stress intensity factor K도 낮은 것으로 관찰되었다. 응력파는 K값의 변화를 주고 균열발생 후 전파는 폭발 후 생성된 가스에 의존하는 것으로 나타났다.

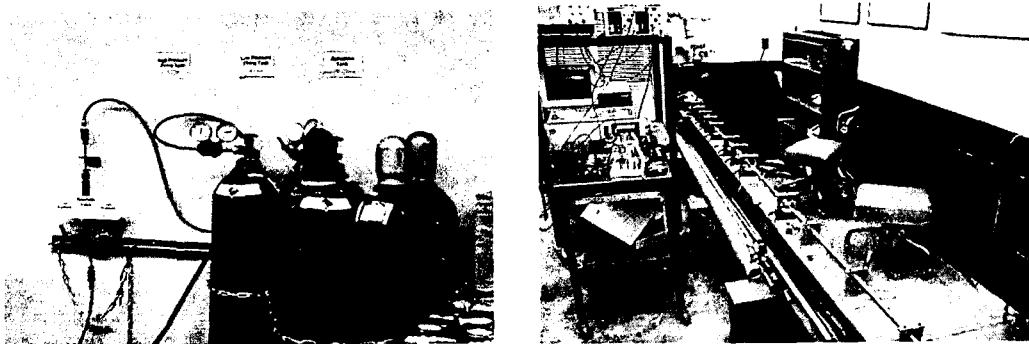


그림 6. Split Hopkinson Bar를 이용한 동적 실험 장치

3.3.4 Sweden의 Swedish Rock Engineering Research Foundation(SveBeFo)

SveBeFo는 Swedish Rock Engineering Research 기관으로서 그 전신은 세계적인 화학회사인 스웨덴 니트로 노벨사에서 1953년도 출자 설립한 SveDeFo (Swedish Detonic Research Foundation)으로 볼 수 있다. 1980년대 스웨덴 정부가 좀 더 효율적인 연구소의 필요성을 느껴 1993년 SveDeFo의 기능을 포함한 새로운 연구소를 만든 것이 SveBeFo이며 스웨덴의 암반공학관련 거의 모든 기관들이 이 연구소를 지원하고 있다. 이 연구소에는 발파분야에서 파괴역학적 접근방법으로 세계적으로 저명한 Dr. Finn Ouchtolony가 활동하고 있다.[14]

균열제어발파에 대한 연구과제로서 여러 폭약과 decoupling ratio, 시차, 암반조건 등을 변수로 하여 현장에서 일련의 실험을 수행하고 있다. 실험결과의 해석방법은 발파한 후 발파 공을 포함하는 부분을 절단하여 dye penetration 기법을 사용하여 암반중의 균열진행 상태를 조사하는 방법을 이용하고 있는데 흥미로운 결과의 하나로서 공과 공사이에 시차를 두지 않고 동시발파로 할 경우가 균열이 거의 발생하지 않고 있으며 1 ms의 시차도 많은 균열발생을 야기하고 있었다. 공간격, 시차가 잘 조절된 발파는 wedge 등의 기구를 사용하는 것이나 유사한 결과를 나타낼 수 있는 것으로 나타나고 있다. 이러한 결과들을 이용하여 파괴역학적 모델링을 시도하고 있다.

기타 수행중인 연구의 주요내용은 암반 중에 발생하는 발파에 의한 균열의 생성과 조절, 파쇄암의 활용 (레이바닥 재료 등), 조절발파방법, LHM gage를 이용한 발파공내의 압력계측, 250-300 mm 직경의 대구경 천공을 이용한 400 m 이상의 장공굴착방법, VOD의 연속계측 등이다.



그림 7. Fracture pattern on a cut rock surface after initiating blast holes simultaneously with electronic detonators.

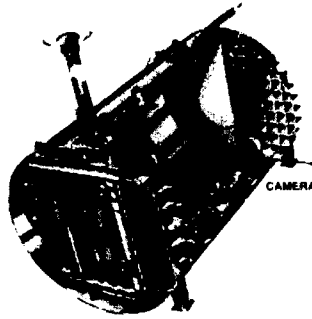
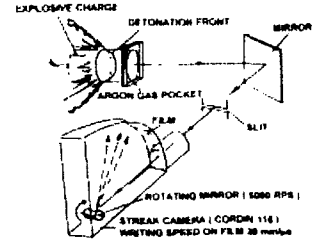


그림 8. Measurement of the detonation front using high-speed photography,



in this case, the curved front in a test charge is swept out over a photographic film at 20,000 m/s by a rotating mirror.

SveBeFo의 2000년도 주요 연구 분야는 다음과 같다

- Geoprognozes and rock mechanical design
- Cautious blasting, crack development, environmental effects
- Fragmentation in quarries and open-pit mines
- Rock support: bearing capacity and durability
- Grouting: sealing and mechanical effects
- Explosives: detonation events and effects

3.3.5 중국 및 기타

중국은 시장경제의 도입과 함께 국가로부터의 연구비가 줄어들고 각 기관에서 자유경쟁 하에서 프로젝트를 유치하여 자체 연구에 수행되는 연구비를 조달하도록 하는 방침에 따라 그동안 기초연구를 통하여 얻은 연구결과들을 산업체에 적용하여 수익을 올리고자 하는 노력이 매우 활발하다. 과거 발파분야 연구가 매우 활발하였으며 북경시만 하여도 중국과학원 역학연구소, 중국광업대학, 북경이공대학 등 여러 기관들이 발파실험동을 보유하고 있다.

중국과학원 역학연구소는 수중발파 및 폭파해체 방면에 특허기술을 보유하고 있으며 x-ray 촬영을 이용하여 암발파시 발생하는 파괴과정의 내부현상을 실험적으로 계측하고 고속촬영장치를 이용하여 발파현상을 계측하는 등의 실험적 연구를 수행한 바 있다. 최근에는 연구비 지원의 부족으로 실험실적 연구보다는 그동안 축적된 결과를 실제 현장에 적용, 활용하는 데 주력하고 있다. 동역학 실험실은 암석이나 금속재료의 충격하중에 대한 거동을 측정하기 위한 긴 파이프 형태의 실험장치를 갖추고 있으며 가스 폭발을 이용하여 projectile에 추진력을 가하고 발사된 projectile이 시험편에 충격을 가할 때 재료의 반응을 계측하도록 설계되어 있다. 200nsec duration의 stress pulse 측정이 가능하며 spall fracture 등 여러 형태의 파괴양상을 측정할 결과를 갖고 있다. 재료의 반응 계측은 stress gage를 이용하고 있다.

중국광업대학은 저온에서 동결된 땅을 굴착하는 특수한 굴착기술과 폭약을 이용 암석을 절단하고 사면에서 지하수를 배수하는 파이프를 폭약을 이용하여 절단함으로써 벤치깊이가 하부로 내려갈 때 이용할 수 있는 발파기술을 보유하고 있다. 제어발파시 공과 공사에 발생하는 균열현상을 동적 광탄성 실험으로 규명하였고 고온 하에서의 폭파방법에 관심을 갖고 있다. 수치해석 분야는 최근 컴퓨터 시뮬레이션 등에 관심을 갖고 연구하고 있으나 양적 및 질적인 수준이 아직 국내 수준에는 미치지 못

하고 있다.

북경이공대학은 주로 군 관련 연구를 하고 있으며 magnetic field의 변화를 이용하여 총탄과 같은 고속도 측정하는 기술, projectile을 이용한 재료의 동적시험 등의 실험적 연구와 고속, 고압 폭발을 이용한 재료의 변화, 폭발해체, 폭발현상의 수치모델링에 관한 연구를 하고 있다.



그림 9. 중국과학원의 발파실험동

미국 유타대학교의 발파실험실은 일반 실험동에 우주발사 로켓 booster 제조회사인 유타주 소재의 Morton Thiocol 회사로부터 특수 복합재료로 만들어진 얇은 두께의 원통형 로켓 booster를 기증 받아 이를 설치하여 이용하고 있다. 저속 및 고속의 고속촬영장치를 갖추고 있고 storage oscilloscope들이 data acquisition system의 주요 골격을 이루고 있다.

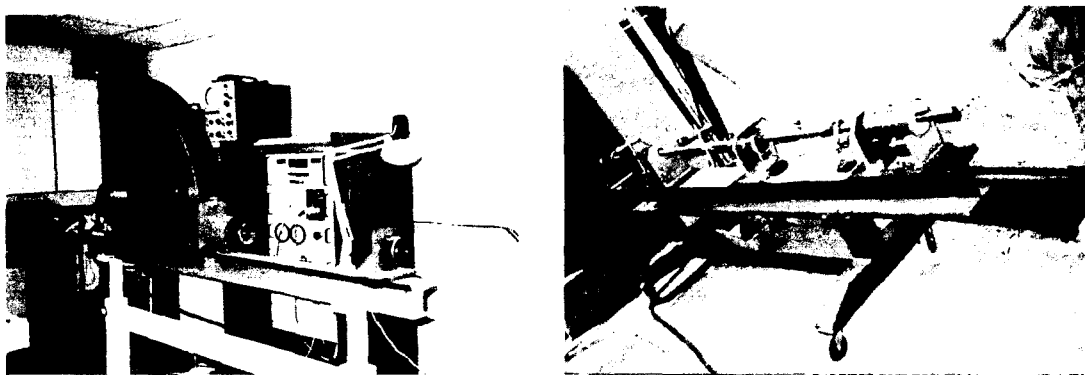


그림 10. 미국 유타대학교의 고속카메라 및 SHB 실험장치

4. 국내 연구 동향 분석

국내에서 1985년부터 2000년까지의 발파관련 학위논문을 분야별로 보면 발파진동, 소음, 비산 등

환경영향 분야 논문이 22편, 파쇄도 및 파괴메카니즘 분야 5편, 기타 5편이었고 이중 수치해석적인 논문이 9편, 실험적 논문이 8편이었다.

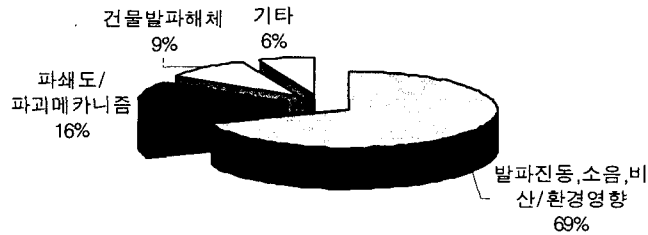


그림 11. 국내 발파관련 학위논문 현황, 1985-2000 (32편)

국내 논문발표현황으로서 1990년부터 2000년까지 암반공학회지에 발표된 논문과 대한화학기술학회지 화학발파에 2000.6-2001.6 기간중 발표된 66편의 논문을 분류해 보면 그림 12와 같다.

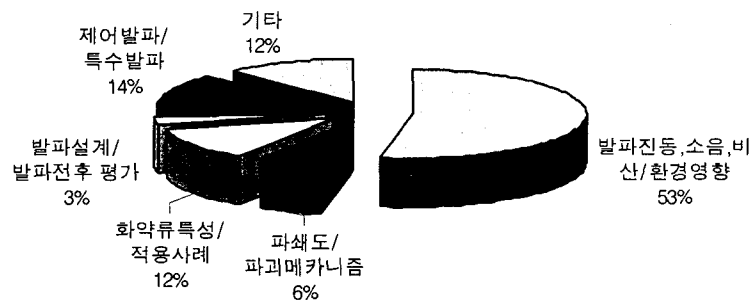


그림 12. 국내 논문발표현황, 1990-2000 KSRM & KSEE (66편)

국내의 경우 발파진동, 소음 등 발파공해 관련 연구가 대부분을 차지하고 있다. 이는 발파진동 및 소음으로 인한 민원의 발생이 많은 이유도 있으며 또한 실험시설이 부족하고 발파현장이 다소 폐쇄적이며, 화약류의 취급이 쉽지 않고, 연구비 투자의 미흡 등 여러 가지 요인에서 다양한 연구가 수행되지 못하고 있는 점도 있다.

국내의 발파관련 연구는 과거 자원공학과를 배경으로 한 대학기관으로서 서울대학교, 강원대학교, 전남대학교, 전북대학교, 상지대학교, 동아대학교, 인하대학교, 한양대학교 등에서 주로 수행되었고 최근에는 토목관련 학과에서도 발파연구에 많은 관심을 보이고 있다.

산업체에서는 많은 건설회사에서 부설연구소를 설립하여 시험터널을 건설하는 등 건설기술과 함께 발파관련 연구도 활발히 수행된 바 있으나 IMF 이후 투자가 이루어지지 못하고 있으며 많은 전문가들이 이직한 것으로 나타나고 있다.

정부출연 연구기관으로는 한국지질자원연구원(KIGAM)의 제어발파연구실이 1990년도 이후 낙후된 발파기술분야의 개선을 위해 많은 노력과 기술보급의 선도적 역할을 해오고 있다.[15-19] 당 연구실은 최근 과학기술부가 국가차원에서 전략적으로 육성 지원할 목적으로 추진하고 있는 2000년도 국가지정 연구실로 선정되어 대표과제로서 제어발파기법을 이용한 구조물 해체기술 개발 연구사업을 수행해 오

고있다. 국가지정연구실 사업으로 개발하고자 하는 기술은 고도의 제어발파기술이 요구되는 고층화된 건물, 대형 지상 및 지하 콘크리트 구조물, 암반 구조물 등의 해체에 적용하기 위한 핵심기술을 확립함을 목표로 하고 있다. 보유 계측기로는 고속카메라, 다단발파기, VOD 계측기, Borehole Deviation Meter, 지반진동 · 풍압 계측기, 진동레벨측정기, 소음계측기, 재료시험기, 탄성파속도측정기, Water Jet 장비 등이 있으며 상용 및 자체개발 Software로서 ANSYS, DYNA3D, FLAC2D&3D, PFC2D&3D, BEAP3D, UDEC, TUNNPLAN, BlastWare, WipFrag, ConWep, CBLOCK 등을 갖추고 있다.

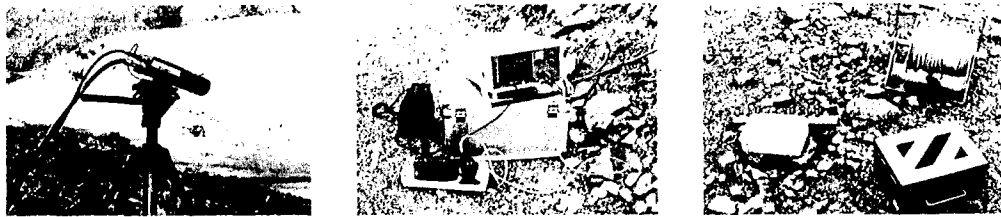


그림 13. 한국지질자원연구원의 고속촬영 시스템과 다단발파기

5. 발파기술의 고도화를 위한 연구과제

5.1 발파진동 관련연구 및 수치해석 분야

발파진동 관련연구는 국내에서 가장 많이 관심을 갖고 수행되고 있는 분야이므로 구체적인 내용은 본 논고에서 생략하고 진동주파수 예측모델의 예와 문제점을 제시한다.

진동예측방법의 하나로서 환산거리 개념이 1979년 국내에 도입된 이후 환산거리를 이용한 예측모델이 널리 사용되고 있다.[20] 모델에 포함되어 있는 상수들은 사전 발파조건(input)과 발파후 결과 관찰(output)로부터 적당한 수학적 분석기법을 이용하여 유도할 수 있는 매우 실용적인 기법이다. 발파진동 예측모델의 경우 시험발파시 장약량, 거리, 최대진동속도를 계측한 자료에 대해 회귀분석을 실시하면 모델에 사용된 상수 k, n을 구할 수 있으며 이로부터 본 발파시의 조건을 plug-in하면 그 조건 하에서의 진동수준을 예측할 수 있으므로 매우 편리하다. 반면에 관계식을 구성하고 있는 변수에서 볼 수 있듯이 거리와 장약량 이외의 매질인 암반의 특성이나 발파원과 같은 변수들의 영향이 모두 n 과 k라는 상수에 반영되고 있다. 따라서 지반진동에 수반되는 주파수나 진동파의 지속시간에 대한 정보를 알 수 없다는 단점을 갖고 있으며 이는 대부분의 plug-in 형태의 식이 갖는 약점의 하나이다.

진동에 대한 구조물의 손상정도는 진동에 수반되는 주파수 특성과 밀접한 관련이 있으므로 주파수에 대한 정보는 매우 중요하다. 발파진동 수준의 예측식과 같이 주파수 특성을 예측할 수 있는 관계식을 얻을 수 있다면 편리하게 사용할 수 있겠으나 현장 계측자료들은 진동수준 예측식과 같이 신뢰성 있는 식을 얻기 어렵다는 것을 보여준다. 따라서 수치해석적 방법과 같은 또 다른 접근방법이 요구된다. 지반진동의 운동을 시간영역으로 예측하는 방법으로서 source identification 기법과 이를 이용하여 계측된 지반응답으로부터 폭원 및 전달함수를 추정하여 계산하는 일련의 해석방법이 개발되었다.[16,21] 기본 개념은 다음과 같다. 발파에 수반되는 진동스펙트럼을 발파원에서의 파괴 메커니즘, 발파원으로부터 계측지점에 이르는 파동전파특성인 전달 메커니즘에 의하여 나타난다고 생각하고 중첩원리가 적용되는 선형구조계를 가정하면, 계측지점의 발파진동 스펙트럼은 발파원 스펙트럼과 전달스펙트럼의 곱의 형태로 표현할 수 있다.

$$U(i\omega) = H(i\omega) V(i\omega)$$

여기서 U와 V는 각각 구조계의 어떤 위치에서 반응 U(t)와 입력운동 V(t)의 복소수 푸리에 스펙트럼이다. 그리고 H는 반응과 입력간의 관계를 나타내는 전달함수이며 w는 주파수이다. 상기 식은 단지 세계의 복소수 성분의 주파수 의존적인 함수로 이루어져 있기 때문에 세계중 두개의 값을 알고 있을 때 나머지 한 개의 값은 쉽게 결정할 수 있다. 즉 Source identification 문제에 있어서 H(iw), U(iw)가 주어져 있을 때 V(iw)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V(iw) = U(iw) / H(iw)$$

해석대상인 지반을 유한요소와 동적무한요소를 이용하여 모형화 한 후, 본 해석모형을 이용하여 예측하고자 하는 각 지점에서의 전달함수를 구하고, 어느 한 지점에서 계측된 속도에 관한 시간이력과 푸리에 변환을 이용하여 그 지점에서의 응답 스펙트럼을 구한다. 그리고 그 지점에서의 전달함수와 응답 스펙트럼을 이용하여 발파원에서의 하중을 산정하며 산정된 하중에 관한 푸리에 스펙트럼과 각 지점에서의 전달함수를 이용하여 역으로 각 지점에서의 응답 스펙트럼과 속도에 관한 시간이력을 구하는 방법이다. 그림 14는 폭원으로부터 20m 지점에서 계측된 지반진동 파형으로부터 FFT를 이용하여 구한 스펙트럼과 해석모델로부터 구한 결과로서 좋은 일치성을 보여주고 있다. 그러나 발파원 하중 산정 예인 그림 15는 물리적으로는 실제 현상과는 차이가 큰 결과를 보이고 있다.

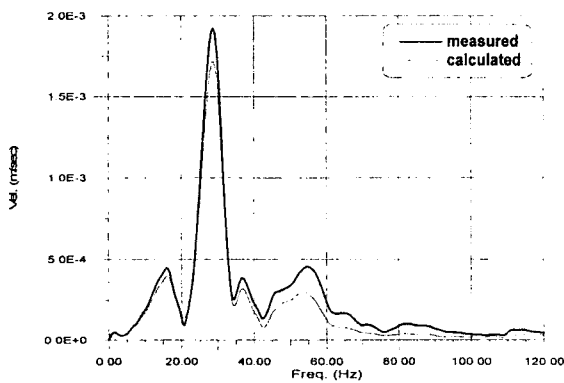


그림 14. 응답스펙트럼 비교, 폭원으로부터 20m

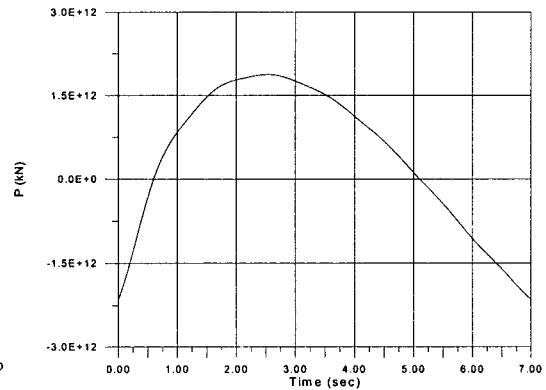


그림 15. 폭원하중의 시간이력곡선

동일한 조건에서 FLAC을 이용하여 발파원 하중을 일반적으로 알려져 있는 다음의 식을 이용하여 산정하여 입력조건으로 하고 20m 지점에서 진동 파형을 계산한 결과는 그림 16과 같다.

$$p = p_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}), \quad \alpha = n\omega/\sqrt{2}, \quad \beta = m\omega/\sqrt{2}$$

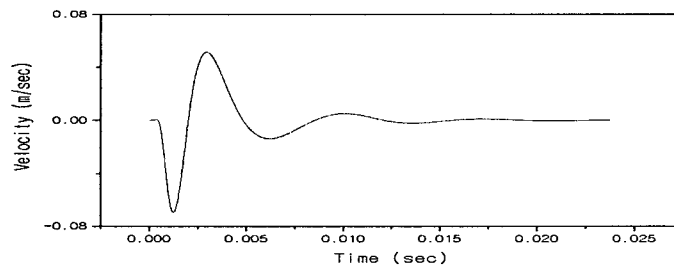


그림 16. FLAC으로 계산한 20m 지점에서의 진동 파형

그림 16의 파형은 주파수 면에서 계측된 파형과는 큰 차이를 보인다. Source identification 기법에서도 동일한 해를 주는 또 다른 경로로서 물리적으로도 의미가 있는 폭원하중과 전달함수의 조합이 있을 것으로 추정되며 그림 16의 결과는 입력자료로서 발파원 경계조건의 설정과 매질의 동적 특성 설정에 문제가 있을 것으로 추정된다.[22] 이러한 문제는 수치해석을 이용한 동적모델링에서 매우 중요한 입력조건 설정과 관련하여 규명되어야 할 분야이다.

5.2 영상처리기법

영상처리기법을 이용한 파쇄도 해석은 점차 보편화되어 가고 있다. 소프트웨어중 하나인 WipFrag는 발파나 파쇄된 암석의 입도분석을 위한 영상분석 시스템으로, 분석단계는 영상입력, 영상처리 및 연산, 결과분석의 출력단계로 나누어진다. 블록의 모서리 인식은 블록 사이의 회미한 그림자를 인식하여 경계선을 찾지만 신뢰도를 높이기 위해 수작업에 의한 수정도 가능하다. 영상처리 기법은 시간적 경제적으로 많은 장점이 있지만, 영상분석은 물체표면만을 대상으로 하고, 분석할 수 있는 입도크기는 영상으로 주어지는 범위 내에서만 한정되기 때문에 많은 오차들이 생기는 경우가 많다. 따라서 측정의 부정확도를 줄이기 위해서는 샘플링의 범주와 서로 다른 물질의 성질에 대처할 수 있는 시스템 특징의 유연성이 필요하다.

앞으로 소프트웨어적으로, 그리고 촬영상 해결되어야 할 문제점들을 요약하면

- 사진의 촬영각도, 거리, 광원의 방향 및 세기 등 사진촬영요소에 따른 파쇄입도 관계
- 대상물의 종류, 거칠기 및 크기 등의 변화에 따른 파쇄입도 관계
- 2차원 영상측정을 통하여 3차원적인 분포를 추정할 수 있는 기하학적 확률에 대한 경험식을 파악하여 누락될 수 있는 세립자들을 보정하는 문제점
- net 수정작업이 쉽게 이루어질 수 있도록 편집도구의 기능의 보강 등이다.

그리고 이러한 분석기법을 이용하여 많은 발파변수와 파쇄입도와의 관계를 파악하여 발파를 효율적으로 수행하기 위한 연구도 필요하다.[23]

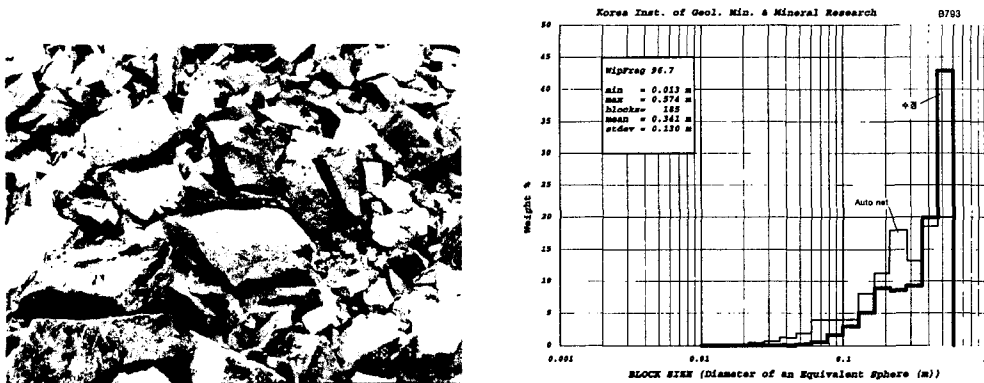


그림 14. 영상처리기법을 이용한 파쇄암 분석

5.3 발파를 위한 암반분류

건설공사에서는 암반의 분류라는 것은 어느 기준에 따라 분류하고 어떤 목적에 이용하기 위해 ① 공사계획 시점에서의 표준적인 설계나 시공기준의 설정, ② 시공중의 공사관리를 위한 기준의 설정, ③ 시공후 계획변경에 따른 당초의 설계 및 시공조건과의 대비 등을 위하여 실시되고 있다. 그러나 실제에 있어서 설계표준화를 위한 암반분류에 관한 연구는 많이 이루어지고 있지만 시공과 관련된 암

반분류의 연구는 거의 없는 상태다. 특히 토목공사에서 발파와 같이 암반을 대상으로 하는 굴착작업이 많기 때문에 공사비를 차지하는 비율이 높음에도 불구하고 굴착을 위한 암반분류가 미발달된 분야이다. 따라서 굴착을 위한 암반평가가 시공분야에서 이루어져야 할 과제중의 하나이다. 여기서 암반의 굴착이라 함은 암석을 대상으로 어느 목적을 위해 암석을 제거하는 작업을 나타내며, 인력, 기계력, 발파 등의 수단을 사용할 수 있다. 암반 굴착의 경우 가장 일반적인 분류방법은 인력에 의한 굴착을 제외하고는 기계굴착과 발파에 의한 굴착으로 구분하고 대상지반을 경암, 연암 그리고 토사로 구분하여 굴착방법과 대응시키는 것이 일반적이다. 이와 같이 굴착작업을 대상으로 하는 암반분류에 있어서는 여러 요소들의 조합에 의한 복잡한 평가보다 하나의 분류요소를 사용하여 단순화하려는 경향이 많다. 그 예가 탄성파속도나 압축강도를 이용한 굴착방법을 결정하기 위한 암반분류 방법이다. 이와 같이 암반의 굴착의 난이도에 관한 요소를 탄성파속도라는 하나의 요소로 집약하여 요소를 단순화한다는 데 있어서는 장점도 있지만 많은 오차가 예상될 수 있으며 이러한 문제를 보완하기 위한 많은 암반분류 방법들이 제안되고 있다.

기존의 일반 암반분류는 안정성과 관련되기 때문에 발파를 위한 암반분류와 같은 요소를 사용할지라도 구조물의 안정성과 발파에 작용하는 영향은 서로 상반될 수 있다. 예를 들면, 일반 암반분류에서는 지하수의 출현은 안전성문제 때문에 나쁜 평점을 받을 수 있지만, 발파에서는 효과가 반대로 작용할 수도 있다. 따라서 발파를 위한 암반분류에서는 이러한 점들이 고려되어 발파설계, 비장약량 산정 등에 적용할 수 있는 새로운 암반분류 기법이 요구된다. 최근 몇 가지 방법들이 제안되고 있지만 아직 현장 계측자료의 축적과 분석을 통한 검증 및 보완 단계가 미비한 상태이다.[24]

5.4 발파에 의한 암반 손상대 평가 기술

발파에 의해 발파대 주변 암반이 필요 이상의 국부적인 손상을 입게 되면 연속적인 발파작업 과정에서 생성되는 충격파에 의하여 굴착터널 주변암반 내에 국부적인 손상이 누적되어 인위적인 손상대가 형성된다. 누적된 손상대는 암반의 변형 특성에 불리하게 작용하면서 반영구적으로 유지되도록 설계 및 건설된 터널의 성능을 위협하는 원인이 되기도 한다. 이러한 장기적인 위협요인은 터널 주변에 설치되는 보강작업 완료 후에도 변형을 일으키는 주요 인자로 작용할 수 있으므로, 터널의 안정성 확보를 위한 보수·보강에 대한 유지비도 상대적으로 증대하게 된다.

현장에서 터널을 굴착하였을 경우 굴착 면의 인접부인 막장 주변에서의 응력집중을 측정하면, 최대 응력은 탄성이론으로 추정된 것과는 다르게, 공동 굴착면 상단에서 생기지 않고 굴착 막장으로부터 일정거리가 이격된 지점에서 발생하고 있다는 계측결과가 발표되었다. 이러한 이유는 굴착과정에서 생성되는 파쇄대가 자연적으로 형성되면서 막장 주변의 암반이 무수한 미세균열의 발달로 인하여 손상대가 형성되고, 이 손상대에 위치한 암석은 비선형 거동을 보여주기 때문이라고 분석할 수 있다. 이러한 손상대의 범위는 화약발파, 암석 물성, 응력분포 상태, creep, 화약발파 진동, 터널 모양 및 크기, 기타 geotechnical factors에 의하여 영향을 받는다. 손상대의 범위를 결정하는 문제는 터널굴착 및 보강 과정에서 적용되는 라이닝이나 지보 방법 등, 터널의 안정성을 결정하는데 중요한 설계변수들 중의 하나로 작용할 수 있다. 터널이나 지하구조물을 굴착함에 있어서 특히 화약발파에 의한 경우 지보 라이닝을 위해서는 소요 단면적 이상으로 굴착해야 하며, 이때 굴착면 부근에는 국부적으로 암석 강도를 넘어 비선형 영역에 들어간 부분도 상당수 있게 된다. 따라서 이러한 이완대 암반 (혹은 손상대 암반)에 대하여 응력변형 해석을 실시하기 위해서는 암석의 변형, 파괴특성 특히 손상대 영역에서의 거동특성을 충실히 고려해서 해석을 실시해야 할 것이다. 그러기 위해서는 우선 손상대 영역에서의 암반거동을 규명해야 한다.

따라서 터널굴착 과정에서 생기는 충격파가 굴착 주변암반에 미치는 영향을 정량적으로 판단할 수 있는 방법을 개발하고, 굴착으로 인한 암반의 손상정도를 측정하는 방법과 측정된 자료를 처리할 수 있는 기법을 개발하는 연구는 중요한 분야이다. 손상대를 규명하기 위해 제안된 하나의 방법으로 손상역학을 활용한 모델이 있다.[19,25] 화약 발파로 생성되는 충격파가 자유면에 도달한 후에, 표면파로 변환된 Rayleigh wave가 자유면을 따라서 전파된다. Rayleigh wave는 음향계수 불일치를 갖는 다수의 층으로 구성된 매질에서 파의 주파수나 파장에 따라서 그 전파 속도가 현저하게 다른 특성을 갖고 있으므로, 이러한 Rayleigh wave의 분산특성을 이용하여 암반 같은 매질의 강성률 또는 전단파 속도를 결정한다. 이렇게 결정된 암반의 강성률은 발파를 전후하여 서로 차이가 있게되며 손상된 암반과 신선한 암반의 강성률을 비교함으로써 손상정도를 정량적으로 평가할 수 있는 역산 연산법(inversion algorithm method)이 개발되었다. 이러한 모델은 잘 계획된 계측계획을 통하여 계측자료의 축적하고 모델의 검증 및 보완을 위한 단계가 필요하다.

5.5 자연지진과 인공발파 식별연구

자연지진과 인공발파를 구별하는 방법으로 시간-주파수 영역에서 미소지진과 인공발파의 주파수특성 연구가 시도되고 있다. 그림 15 및 그림 16은 국내 석회석 광산발파를 이동식 지진계로 측정된 지진파형과 지진파형의 스펙트럼이다. 지발발파의 경우 스펙트럼의 최대치에 해당하는 주파수는 발파지연시간에 해당한다. 스펙트럼의 최대치에서의 주파수는 약 33Hz이므로 발파지연시간은 30ms로 계산되나, 스펙트럼의 분포는 발파지연시간 이외의 공간적인 발파형태, 발파방법, 발파지속시간 등의 영향을 받음을 고려해야 한다. 현장에서 측정된 인공발파의 발파지연특성은 지진관측소에서 관측되는 지진파형의 주파수 특성에 이용되어 향후 자연지진과 인공발파연구에 이용될 수 있다.[26,27]

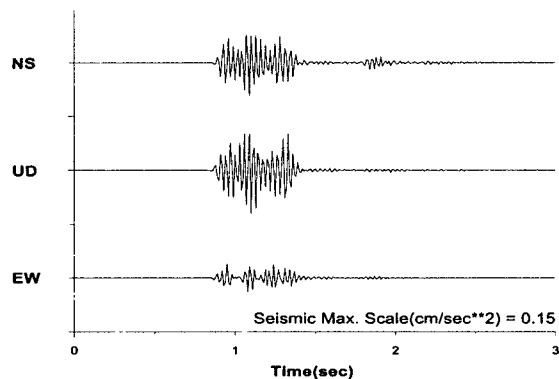


그림 15. 국내 노천 채광발파 진동 파형

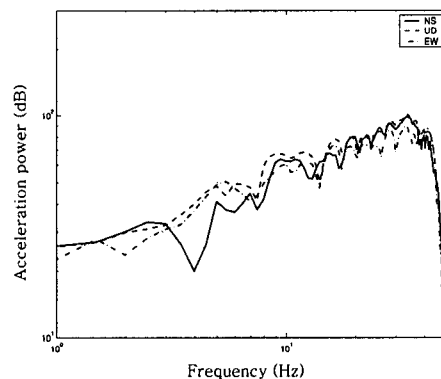


그림 16. 계측된 파형의 스펙트럼

5.6 기타

최근 컴퓨터를 이용한 발파설계 프로그램의 개발도 관심의 대상중 하나이다. 과거 잘 알려진 발파설계용 프로그램으로서 BLASPA (R. Favreau), SABREX (JKMRC, the Julius Kruttschnitt Mineral Research Center) 등으로부터 Dr. Konya가 설립한 Precision Blasting의 발파설계 프로그램들과 화약류 제조회사 및 천공장비회사들에서 보급하고 있는 프로그램 등이 있고 국내에도 대학 및 산업체에서 개발된 프로그램 등 다양한 소프트웨어들이 있다. 상세한 알고리즘은 잘 알려져 있지 않으나 발파

메커니즘을 수치해석적으로 분석하여 최적화 설계를 제시하는 방법이라기 보다는 경험적 설계기법을 프로그램화 한 것이 대부분인 것으로 나타나고 있다. 아직 발파 메커니즘 자체가 연구의 대상이므로 수치해석적 방법에 기초한 프로그램의 개발은 상당한 시간이 걸릴 것으로 보인다.

부분적인 메커니즘은 그 특성에 따라 유한요소법, 유한차분법, 개별요소법 등의 수치해석적 도구를 이용한 모델링과 새로운 알고리즘의 개발들이 시도되고 있다. 개별요소법(Distinct Element Method)은 불연속체 암반의 거동특성을 모델링 하기 위해 개발된 수치해석적 방법으로서 발파에 의한 파괴후 거동 모델링이 매우 유력한 도구이다. 개별요소법은 서로 다른 알고리즘에 기초하여 개발된 두 가지 형태의 수치해석 방법으로 발전해 왔다. 하나는 유한요소법과 같이 강성매트릭스를 구성하여 implicit 알고리즘을 이용하여 해를 구하는 방법을 채택하고 있고 다른 하나는 시간 적분에 의한 explicit 알고리즘으로 해를 구하는 방법을 채택하고 있다. explicit 방법으로 해를 구하는 방법은 Cundall (1971)에 의해 강성 블록을 개별요소로 처리하는 개념이 정립되었고, 개발 초기 속도가 느리고 용량이 크지 못한 컴퓨터에서의 처리를 위해 기계어로 쓰여진 첫 소프트웨어가 발표되었다. 그 후 UDEC (Universal Distinct Element Code)에 이르기까지 Cundall을 중심으로 한 연구팀에 의해 지속적인 개선이 이루어져 왔다.[28-30] 이와 같은 강성 블록 개념에 기초를 둔 접근방법은 관련 분야에 이용되기 시작하여 BLOCK, DBMS, CBLOCK 등 여러 컴퓨터 모델이 개발되었다.[31] 개별요소법은 인접요소와 절점이 격리를 허용하며 큰 변위와 회전도 모델링 할 수 있으므로 파괴이후의 거동을 다루는데 매우 효과적이다. 그러나 실제 현상과 개별요소의 경계로서 도입된 절리의 개념, 동적모델링을 위한 입력변수의 설정, 변수들의 영향 등에 대한 연구가 미비한 부분으로 남아 있다.

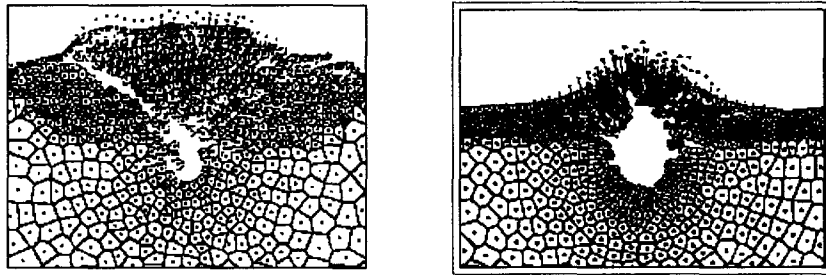


그림 17. 개별요소법을 이용한 cratering 모델링

6. 맺는 말

국내의 발파관련 연구를 보면 발파진동, 소음 등 발파공해 관련 연구는 매우 집중적으로 심도 있게 수행되고 있다고 볼 수 있지만 전반적으로 실험시설의 부족, 화약류 취급의 어려움, 연구비 투자의 미흡 등으로 인하여 외국과 같이 다양한 연구가 이루어지지 못하고 있다. 연구가 활발한 외국 연구기관을 보면 발파실험동과 고속카메라, 동적 계측시스템들을 갖추고 있어 기초 메커니즘의 연구가 활발하고 실 규모의 시험이 가능한 현장을 제공받고 있다. 국내에도 많은 발파현장들이 있지만 다소 폐쇄적이어서 연구를 위한 현장 제공이 어려우며, 현장의 귀중한 자료들이 사장되는 경우가 많다. 현장자료들이 체계적으로 축적되지 않아 설계단계에서 고려되었던 변수들의 문제점이나 발파설계의 문제점들이 현장적용단계에서 어떻게 나타나는 지가 제대로 분석되고 있지 않으며, 따라서 설계 따로 시공 따로의 현상이 반복되고 있는 원인이 되고 있다. 그러나 발파에 관심을 갖고 논문 주제로 채택하는 학

생들의 수가 많아지고 있고, 최근 배출된 엔지니어, 화약기사들이 기술축적에 대한 적극적인 자세를 보이고 있으며 또한 턴키 제도의 실시로 고도의 기술을 확보하려는 노력이 증대하고 있는 것은 국내 발파기술의 발전을 위한 밝은 기대를 갖게 한다.

참 고 문 헌

1. 김재극, 1986, 산업화약과 발파공학, 서울대학교 출판부, 408p.
2. Perrson, P-A, R. Holmberg & J. Lee, 1994, Rock Blasting and Explosives Engineering, CRC press, 540p.
3. ISEE, 1996, Proc. 22nd Annual Conf. on Explosives and Blasting Technique, FL USA.
4. -, 1997, Proc. 23rd Annual Conf. on Explosives and Blasting Technique, NV USA.
5. -, 1998, Proc. 24th Annual Conf. on Explosives and Blasting Technique, LA USA.
6. -, 1999, Proc. 25th Annual Conf. on Explosives and Blasting Technique, v1 & v2, TN USA.
7. -, 2000, Proc. 26th Annual Conf. on Explosives and Blasting Technique, v1 & v2, CA USA.
8. -, 2001, Proc. 27th Annual Conf. on Explosives and Blasting Technique, v1 & v2, FL USA.
9. Mohanty, B., 1996, Rock Fragmentation by Blasting, Balkema, Motreal, Canada.
10. Fourny, W.L. 1993, Mechanisms of Rock Fragmentation by Blasting, Comprehensive Rock Engineering - Principles, Practives and Projects, J.A. Hudson, Editor-in-Chief, Pergamon Press, Vol. , Pergamon Press, pp 39-70.
11. Fourny, W.L., 1995, Explosive Fragmentation", shock Compression of Condensed Mater, Volume IV, Editor R.A. Graham, Volume Editors - Lee Davison, Denis E. Grady, and M. Shahinpoor, Springer-Verlage.
12. Fourny, W.L., 1995, "Response of Oil Shale to Fragmentation by Cylindrical Charges" with R.D. Dick and C. Young, Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 28, No. 1.
13. Fourny, W.L. & R.D. Dick, 1994, "The Utilization of Explosive Loading as an NDE Tool in Geologic Materials", International Journal of Solids and Structures.
14. Ouchtolony F., 1995, Review of Rock Blasting and Explosives Engineering Research at SveBeFo, EXPLO5 Conference, pp. 133-146.
15. 류창하 외, 1993, 제어발파에 의한 구조물 해체기술 개발연구(I), 과학기술처, 258p.
16. 류창하 외, 1995, 발파진동이 구조물에 미치는 영향평가(I), 한국전력공사, 551p.
17. 이경운, 류창하 외, 1995, 진동으로 인한 피해의 인과관계 검토 기준 및 피해액 산정방법에 관한 연구, 중앙환경분쟁조정위원회, 285p.
18. 최수일, 류창하 외, 1996, 건물발파해체를 위한 제어발파 설계기술 개발, 건설교통부, 204p.
19. 류창하, 신희순 외, 1998, 표준발파공법 공동연구(I),(II), 한국석유개발공사, 589p.
20. 류창하, 이정인, 1979, 발파작업에 의한 지반진동이 지상구조물에 미치는 영향에 관한 연구, 대한광산학회지, v.16.

21. Joo K.H., Lee J.R., Ryu C.H., Cho J.S., Yun C.B., 1997, Evaluation of blast-induced vibration effects on structure, Trans. 14th Int. Conf. Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT-97), v6, M. Livolant(ed), LYON, France, 45-55.
22. C. Ryu, S.Cho & H.Yang, 2001, Prediction of Dynamic Response of Ground Due to Blast Loading, Proceedings of the 27th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, v1, Orlando Florida USA, 361-372.
23. 선우춘, 류창하, 최병희, 2001, 영상처리기술에 의한 발파파쇄암의 파쇄도 측정, 화약발파, v19, n2.
24. 류창하, 1999, 지하비축기지 공동 굴착을 위한 발파기술의 고도화에 필요한 요소기술 개발연구, '99 비축기지 건설기술세미나, 한국석유공사, pp49-76.
25. 김달선, 양동우, 류창하, 1999. 10.29, Micro Damage Model과 Rayleigh Wave Inversion에 의한 암반의 손상대 평가, '99 한국암반공학회 발파기술세미나 논문집, 한국암반공학회, p.167-180
26. 전명순, 전정수, 제일영, 2000, 지진과 인공발파의 식별, 화약발파, v.18, n.3
27. Albert T. S., 1989, High-frequency seismic observations and models of chemical explosions: implications for the discrimination of ripple-fired mining blasts, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 79, No. 4, pp. 1089-1110.
28. Cundal, P., 1971, "A Computer Model for Simulation Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock System", Proc. Int. Symp. Rock Fracture, Nancy, France, Paper II 2-8.
29. Cundal, 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.
30. Cundal, P. and Hart, R.D., 1985, "Development of Generalized 2-D and 3-D Distinct Elements Programs for Modeling Jointed Rock", Itasca Consulting Group, Misc. Paper SL-85-1, U.S. Army Corps Engineers.
31. Ryu, C H and Pariseau, W G, 1986, Numerical Simulation of Fragmentation During the Throw Stage of Blasting, Proc. 2nd Symp. on Explosives and Blasting Research, SEE Atlanta, Georgia, pp. 103-117.