T00321090

GOVP1201010275

첨단도시개발사업 최종보고서

R&D/06건설핵심002

발파공해 저감 및 여굴 최소화를 위한 선균열 암굴착 노치장비 및 시공기술 개발

2009. 10. 23.

주관연구기관 / (주)유신코퍼레이션
협동연구기관 / 한국건설기술연구원
/ 선 산 토 건(주)

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

제 출 문

국토해양부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

본 보고서를 "발파공해 저감 및 여굴 최소화를 위한 선균열 암굴착 노치장비 및 시공기술 개발"의 최종보고서로 제출합니다.

2009 . 10 . 23.

주관연구기관 : (주)유신코퍼레이션
대표이사 조 수 원
협동연구기관 : 한국건설기술연구원
원장 우 효 섭
: 선산토건(주)
대표이사 오 태 승

■ 총 괄 연 구 책 임 자	/ 상 무	정 동 호	총 괄 기 획
■ 주관연구기관 참여연구원	/ 부 사 장	문 상 조	설 계 개 발
	/ 차 장	안 대 진	설 계 개 발
	/ 과 장	정 원 준	설 계 개 발
	/ 대 리	이 승 우	설 계 개 발
■ 협동연구기관 참여연구원	/ 수석연구원	배 규 진	노치비트 최적화
	/ 수석연구원	김 창 용	노치비트 최적화
	/ 수석연구원	이 성 원	노치비트 고내구성/고효율
	/ 선임연구원	장 수 호	노치비트 고내구성/고효율
	/ 선임연구원	김 동 규	노치비트 고내구성/고효율
	/ 선임연구원	신 휴 성	노치비트 최적화
	/ 선임연구원	정 재 형	노치비트 고내구성/고효율
	/ 연 구 원	김 광 염	노치비트 고내구성/고효율
	/ 연 구 원	이 규 필	노치비트 최적화
	/ 연 구 원	최 순 욱	노치비트 고내구성/고효율
	/ Post-Doc	서 경 원	노치비트 최적화
	/ Post-Doc	정 호 섭	노치비트 최적화
	/ 대 표 이 사	오 태 승	현장시험
	/ 전 무	임 종 길	현장시험
	/ 이 사	소 용 덕	현장시험
	/ 부 장	김 은 관	현장시험
	/ 주 임	이 창 주	현장시험
■ 위탁연구기관 참여연구원	/ 대 표 이 사	조 해 봉	노치비트제작
	/ 조 교 수	조 상 호	총괄 및 이론적체계화
	/ 석사과정	정 미 희	해석모델개발
	/ 학사과정	양 정 훈	해석수행 및 결과처리

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>06건설핵심
C02</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2008.06.24~
2009.10.23</td><td>단 계 구 분</td><td>3/3</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="4">첨단도시개발사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">발파공해 저감 및 여굴 최소화를 위한 선균열 암굴착 노치장비 및 시공기술 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">정 동 호</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 18명
내부 : 17명
외부 : 1명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td>정부 :
186,000천원
기업 :
213,500천원
계 :
399,500천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 26명
내부 : 23명
외부 : 3명</td><td>총연구비</td><td>정부 :
418,000천원
기업 :
474,000천원
계 :
892,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">(주)유신코퍼레이션
터널부</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">(주)유신코퍼레이션,
선산토건주식회사</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 :</td><td colspan="2">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="3">연구기관명 : 세진테크
연구기관명 : 전북대학교</td><td colspan="2">연구책임자 : 조해봉
연구책임자 : 조상호</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>542</td></tr>
<tr><td colspan="6">o 최근 도로 및 철도 노선 개량사업과 도심지 지하철 공사의 증가와 더불어 터널의 시공 역시 증가하고 있다. 최적의 터널공사라 함은 최소의 굴착으로 필요한 공간을 창출함에 있으므로 여굴로 인한 불필요한 굴착 양을 줄여야 하고, 터널 발파굴착시 발생하는 발파진동, 소음에 대한 피해민원을 최소화 하는 것이 바람직함
o 발파공해 저감 및 여굴제어를 위하여 기존에 적용되고 있는 무진동 암파쇄공법은 공사비가 많이 들며 화강암, 편마암등의 극경암이 분포하고 있는 우리나라의 지질조건에 부적절한 경우가 많아 제한적으로 적용되고 있는 실정임
o 본 연구는 발파공해 저감 및 여굴제어 효과가 우수한 노치비트장비시스템을 개</td></tr>
</table>

발하여 발파진동을 무진동에 가까운 최소기준 이내로 저감시켜 무진동발파가 어려운 구간의 시공성을 향상시키고, 비용을 절감하는데 목적이 있음

o 천공작업의 시공성과 노치시스템의 안정성 확보를 위한 노치모델 연구를 통해 여러번의 시행착오를 거쳐 노치비트 및 아답타, 노치가이드를 최적화 하였음

o 노치비트 시스템의 내구성 확보에 주력하였고 이를 위해 금속재료 및 제작연구에 충실히 수행함

o 초경합금 및 열처리기술 개선으로 노치비트의 파손 및 마모율을 줄여 내구성을 향상시키는 결과를 얻었고 개발된 노치비트 시스템을 가지고 모델발파 시험에 의한 노치효과 검증 연구를 함

o 그 결과는 동일한 장약량 발파조건에서 일반 원형공에 비해 노치공의 균열확장 속도가 더 빠르기 때문에 상대적으로 적은 장약량으로 파단면 형성이 가능하였음

o 이러한 노치공 원리를 이용할 경우 터널 발파의 최외곽공과 같은 조절발파 시 적은 장약량을 사용하여 발파로 인한 암반 손상영역을 최소화 하면서 원하는 방향의 파단면 형성이 가능함

o 그리고 노치공과 일반 발파공에 의해 생성된 파단면 DEM의 거칠기를 면 거칠기 형상 지수(SRp)를 이용하여 비교함

o 일반공 보다 노치공에 의해 생성된 파단면의 거칠기가 상대적으로 완만하게 나타났으며, 특히 노치공에 의해 생성된 파단면의 영역별 거칠기 지수 편차가 일반공에 의한 파단면 보다 훨씬 작게 나타남

o 암반발파에서 노치공 발파의 수치 모델링 연구를 하였고 이를 통해 암반발파에서 손상제어효과를 해명하고 노치공 발파설계에 필요한 기초자료를 획득하였음

o 그리고 최종 몇차례의 현장시험에 의한 노치발파 적용성 연구를 하였음

o 실제 몇몇의 토목공사 현장에서 실시한 실험에서 일반 발파공법에 비해 발파진동은 약 30~50%, 여굴은 약 1/3이 감소하는 결과를 얻었고 이를 통해 실제 현장에 적용할 수 있는 기술이라고 판단할 수 있었음

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	발파, 노치, 터널, 여굴, 진동
	영 어	blasting, notch, tunnel, over-break, vibration

요 약 문

Ⅰ. 제 목 : 발파공해 저감 및 여굴 최소화를 위한 선균열 암굴착 노치장비 및 시공기술 개발

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

최근 도로 및 철도 노선 개량사업과 도심지 지하철 공사의 증가와 더불어 터널의 시공 역시 증가하고 있다. 최적의 터널공사라 함은 최소의 굴착으로 필요한 공간을 창출함에 있으므로 여굴로 인한 불필요한 굴착 양을 줄여야 하고, 터널 발파굴착시 발생하는 발파진동, 소음에 대한 피해민원을 최소화 하는 것이 바람직하다.

발파공해 해소 및 여굴제어를 위하여 기존에 적용되고 있는 무진동 암파쇄공법은 공사비가 많이 들며 화강암, 편마암등의 극경암이 분포하고 있는 우리나라의 지질조건에 부적절한 경우가 많아 제한적으로 적용되고 있는 실정이다.

본 연구는 발파공해 해소 및 여굴제어 효과가 우수한 노치비트장비시스템을 개발하여 발파진동을 무진동에 가까운 최소기준 이내로 저감시켜 무진동발파가 어려운 구간의 시공성을 향상시키고, 비용을 절감하는데 목적이 있다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구개발을 위하여 총 3차년도의 연구계획을 수립하였으며, 최적의 선균열 암굴착 노치장비 및 시공기술 개발을 위하여 문헌조사 및 연구, 요소시험, 현장시험, 데이터분석, 전산시뮬레이션 등을 주요 연구내용으로 계획하였다. 연구내용 및 범위는 크게 다음과 같이 구성되어진다.

1) 발파공법 연구문헌 조사
2) 암굴착용 비트형상에 따른 굴착효율분석
3) 터널발파 설계, 시공시 문제점 분석 및 개선사항 연구
4) 노치비트 기초요소실험
5) 굴착효율에 대한 핵심요소인자 선정

6) 노치비트 내구성 확보를 위한 금속재료 및 제작연구

7) 모델발파 시험에 의한 노치효과 검증

8) 암반발파에서 노치공 발파의 수치 모델링 연구

9) 현장시험에 의한 노치발파 적용성 연구

Ⅳ. 연구개발결과

연구 계획을 통해 연구를 수행한 결과 다음과 같은 성과를 거두었다.

첫째, 천공작업의 시공성과 노치시스템의 안정성 확보를 위한 노치모델 연구이다. 1차, 2차 노치비트 모델을 거치면서 1차 노치비트 모델의 2공정을 1공정으로 간소화함으로써 노치공 형성시간을 기존 일반비트와 비슷한 수준으로 단축시켰다.

둘째, 노치효과를 충분히 발휘할 수 있는 노치공 형성 및 노치비트 파손, 마모율을 최소화하는 노치형상 및 내구성 연구이다. 노치길이, 모양, 몸체의 두께를 최적화하여 노치 홈의 직진성 유지와 천공, 인발시 노치 팁의 파괴를 방지할 수 있도록 하였다.

셋째, 현장 막장면의 굴곡부에 적절히 대응하면서 노치의 방향성을 유지시켜 줄 수 있도록 가이드를 제작하였고, 원활한 슬러지 제거는 물론 가이드 후미부에 부싱을 설치하여 이 부분이 먼저 마모가 일어나도록 유도하여 부싱부를 선 교환함으로써 노치가이드 본체의 교체 횟수를 줄일 수 있도록 하였다.

넷째, 노치비트 내구성 확보를 위한 금속재료 및 제작 연구이다. 초경합금, 열처리기술 개선으로 노치비트의 파손 및 마모율을 줄여 내구성을 향상시켰다.

다섯째, 모델발파 시험에 의한 노치효과 검증 연구이다. 동일한 장약량 발파조건에서 일반 원형공에 비해 노치공의 균열확장 속도가 더 빠르기 때문에 상대적으로 적은 장약량으로 파단면 형성이 가능하였다.

여섯째, 암반발파에서 노치공 발파의 수치 모델링 연구이다. 수치모델링해석으로 파단면 형태와 형성을 고찰하여 암반발파에서 손상제어효과를 해명하고 노치공 발파설계에 필요한 기초자료를 획득하였다.

일곱째, 현장시험에 의한 노치발파 적용성 연구이다. 실제 토목공사 현장에서 실시한 실험에서 일반 발파공법에 비해 발파진동은 약 30~50%, 여굴은 약 1/3이 감소하는 결과를 얻었다.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

본 연구의 주요성과로는 최적의 노치시스템 장비를 개발하여 이론으로 입증된 노치효과를 현장에 적용할 수 있도록 초석을 마련하였다. 향후 노치균열 미진동 파쇄굴착 설계기법 개발이 완료되면 발파민원 예상지역에 적용하여 시공성이 결여된 무진동 굴착을 대체함으로써 발파공해 해소 및 여굴, 낙석 안전사고 등을 최소화할 것이다. 나아가 터널굴착비용을 절감함으로써 터널굴착의 활성화에 기여할 것이다.

S U M M A R Y

Ⅰ. Title : A Study on Notch Bit System for Controlling Blast Vibration and Over-break in Rock Mass

Ⅱ. Research Need

Recently, design and construction of tunnels became rampant due to build metropolitan subway system, electric and communication culvert.Drilling methods for tunnels can be twofold: by machines and by blast using kinetic energy obtained from explosives.Of those methods, blasting is generally used due to its lower price than the machine drilling.However, the blasting method causes problems such as civil petitions induced by the excessive overbreak and blasting pollutions such as vibration and background noise.

In order to address blasting pollution and decrease overbreak, a patent on a blasting method was developed that applied the principle of the method to create pre-split at the contour holes to block the propagation vibration at a cut, and to enlarge contact surface around a cut, it applied short and long charge on the notch split in super holes. Hence, for the study, we appraised the appropriateness of notch equipment system by developing notch equipment system and applying it to construction sites.

Ⅲ. Contents and Scopes of Research Development

To develop this research, the 3rd year research plan was set up. The main research contents such as literature survey, elementary experiments, the field experiments are programmed in order to develop Notch Bit System

1) the literature survey of blast methods
2) the analysis of excavation efficiency by the bit shape on rock excavation
3) the research to improve and solve construction problems

4) the elementary experiments of the notch bit

5) the choice of major factor about excavation efficiency

6) Studies of metal material and manufacture to minimize the abrasion rate

7) Notch effect verification by model scale blasting experiments

8) Numerical analysis of rock blasting using a notch bit

9) Research on field application of notch blasting method

Ⅳ. Research Results

In this study, research results are achieved as below.

The method to develop a notch bit system for making a notch hole and to design a new blasting pattern is researched and examined. In order to make a notch hole effectively, several drilling experiments are carried out as changing length and height of a notch and a comprehensive notch bit system which consists of a normal bit, notch bit, adapter and notch guide is developed for the purpose of improving the speed and precision of drilling. Studies of metal material and manufacture to minimize the abrasion rate. The durability of notch bit was developed. Notch effect verification by model scale blasting experiments. It was possible to split rock between notch holes using the smaller quantity of powder than circle holes. Numerical analysis of rock blasting using a notch bit. We considered a formation of fracture surface by numerical analysis of notch hole blasting. And we explained a damage control capacity in rock blasting and got a source material of notch hole blasting design. Research on field application of notch blasting method. It was proved that vibration is reduced by 30~50% and the quantity of over-break is reduced by 30%.

Ⅴ. Usage Plan of Research Results

In this study, key achievement is to lay the groundwork for field application

of notch effect by development of optimum notch system equipment. In the future, if the development of notch blasting method is completed, we will expect to minimize vibration, noise, over-break and rock falling. And it contribute to revitalize the tunnel excavation by reduction of excavation cost.

C O N T E N T S

Chapter 1. Introduction ····· 1

Ⅰ. Research & development need ····· 1
1. Research & development summary ····· 1
2. The importance of research & development ····· 3

Ⅱ. The ultimate object of research & development ····· 5
1. The ultimate object ····· 5
2. The basis of the ultimate object ····· 6

Ⅲ. The research object and contents ····· 6
1. The research object ····· 6
2. The research contents ····· 7

Chapter 2. The situation of internal and outside research ····· 11

Ⅰ. The situation of internal research ····· 11

Ⅱ. The situation of outside research ····· 11

Ⅲ. Analysis conclusion of the research situation ····· 12

Chapter 3. Contents and conclusion of the research & development ····· 13

Ⅰ. literature survey ····· 13
1. The principle of notch hole ····· 13
2. The outside literature survey ····· 15

3. The internal literature survey ····· 18

Ⅱ. Test blasting according to notch hole and charge condition ····· 22
1. Control effect according to notch's length and angle ····· 22
2. Result of test blasting ····· 27
3. Result of gravity acceleration measurement ····· 30
4. Photographing of fracture process using the ultra high-speed camera ····· 32
5. Result analysis ····· 34

Ⅲ. The research of notch bit optimization ····· 34
1. The development of notch bit model ····· 34
2. The development of notch bit and adaptor ····· 38

Ⅳ. The research of notch guide optimization ····· 45

Ⅴ. Studies of metal material and manufacture to minimize the abrasion rate ····· 47
1. Material of notch bit system ····· 47
2. Manufacture of notch bit ····· 60

Ⅵ. The investigation of over-break using digital photogrammetry ····· 63
1. Trial blasting ····· 63
2. Result analysis of trial blasting ····· 79
3. Creation of DEM ····· 81
4. Evaluation by DEM ····· 100

Ⅶ. Numerical analysis of rock blasting using a notch bit Ⅰ ····· 119
1. Introduction ····· 119
2. Numerical analysis of rock mass breaking process ····· 119
3. Conclusion ····· 120

4. Consideration ····· 122

Ⅷ. Numerical analysis of rock blasting using a notch bit Ⅱ ····· 123
1. Condition of numerical analysis ····· 123
2. Numerical analysis technique ····· 127
3. Result analysis ····· 128
4. Conclusion ····· 135

Ⅸ Optimum blasting pattern design using notch blasting method ····· 137
1. Dynamic numerical analysis and Condition of numerical analysis ····· 137
2. Result analysis of dynamic stress ····· 141
3. Result analysis of rock fracture process using notch blasting ····· 146
4. Consideration ····· 170

Ⅹ. Research on field application of notch blasting method Ⅰ ····· 173
1. Situation ····· 173
2. Application of pre-splitting notch rock blasting method ····· 174
3. Conclusion ····· 176

Ⅺ. Research on field application of notch blasting method Ⅱ ····· 177
1. Outline ····· 177
2. Field test and Conclusion ····· 178

Ⅻ. Conclusion ····· 183

Chapter 4. The achievement of research goal and the contribution to relation field ····· 186

Ⅰ. The achievement of research goal ····· 186
1. The rate of progress of research & development ····· 186
2. The achievement of the research goal ····· 189

3. The goal of the research ·····191

Ⅱ. The contribution to relation field of the research product
·····192

Chapter 5. The application plan of research product ····· 193

Ⅰ. The plan to apply research product ····· 193

Ⅱ. The Expectation result and the expending effectiveness ····· 193
1. The part of technology ····· 193
2. The part of society and economy ····· 193

Ⅲ. The effectiveness to other industry ·····194

Ⅳ. The prospects for the related research ····· 194

Chapter 6. Reference ····· 195

Appendix #1 Pictures for the development of notch bit system
Appendix #2 Pictures of participation at international conference and publicity
Appendix #3 Pictures of field test
Appendix #4 Papers of domestic conference
Appendix #5 Papers of international conference
Appendix #6 Pictures of products
Appendix #7 Papers of technical commercialization
Appendix #8 Papers of technical contract
Appendix #9 Papers of publication in design standard
Appendix #10 Data of field test
Appendix #11 Specification

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1

제 1 절 연구개발의 필요성 ····· 1

1. 연구개발 개요 ····· 1

2. 연구개발의 중요성 ····· 3

제 2 절 연구개발의 최종목표 ····· 5

1. 최종목표 ····· 5

2. 최종목표의 설정근거 ····· 6

제 3 절 연구 목표 및 내용 ····· 6

1. 연구목표 ····· 6

2. 연구내용 및 범위 ····· 7

제 2 장 국내·외 기술개발 현황 ····· 11

제 1 절 국내 관련기술 동향 ····· 11

제 2 절 해외 관련기술 동향 ····· 11

제 3 절 기술동향 분석 결론 ····· 12

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 13

제 1 절 문헌 연구 ····· 13

1. 노치공의 원리 ····· 13

2. 해외 문헌 연구 ·····15
3. 국내 문헌 연구 ·····18

제 2 절 노치공 및 장약 조건에 따른 표준시험발파 ·····22
1. 노치 장약공 노치길이와 각도에 따른 제어효과 ·····22
2. 시험편 발파 후 결과 ·····27
3. 중력가속도 측정결과 ·····30
4. 초고속카메라로 촬영한 균열전파 ·····32
5. 결과분석 ·····34

제 3 절 노치비트 최적화 연구 ·····34
1. 노치비트 모델 개발 ·····34
2. 노치비트 및 아답타 개발 ·····38

제 4 절 노치가이드 최적화 연구 ·····45

제 5 절 노치비트 내구성 확보를 위한 금속재료 연구 ·····47
1. 노치비트시스템 재료 ·····47
2. 노치비트 제작 ·····60

제 6 절 디지털 영상측량에 의한 노치 발파공 파단면 평가 ·····63
1. 파단면 생성을 위한 시험편 시험발파 ·····63
2. 원형공과 노치공의 파단면 생성 결과 분석 ·····79
3. 시험편 발파 파단면의 DEM 생성 ·····81
4. 파단면의 DEM 거칠기 분석 ·····100

제 7 절 암반발파에서 노치공 발파의 수치 모델링 연구 I ·····119
1. 서 론 ·····119
2. 암반파괴과정 해석법 ·····119
3. 해석 결과 ·····120

4. 고 찰 ·····122

제 8 절 암반발파에서 노치공 발파의 수치 모델링 연구Ⅱ ·····123
1. 모델의 수치해석 조건 ·····123
2. 수치해석 기법 ·····127
3. 결과분석 ·····128
4. 결 론 ·····135

제 9 절 노치 선균열 공법을 적용한 최적 발파 패턴 설계 ·····137
1. 동적파괴과정 해석법 및 해석조건 ·····137
2. 동적응력 해석결과 및 분석 ·····141
3. 노치 장약공 발파에 의한 암반의 파괴과정 해석결과 및 분석 ·····146
4. 노치 장약공 발파 설계법에 관한 고찰 ·····170

제 10 절 현장적용 예비실험을 통한 노치발파 적용성 연구Ⅰ ·····173
1. 현장현황 ·····173
2. 미진동 암굴착공법의 적용 ·····174
3. 평 가 ·····176

제 11 절 현장적용 예비실험을 통한 노치발파 적용성 연구Ⅱ ·····177
1. 개 요 ·····177
2. 현장실험 수행 내용 및 결과 ·····178

제 12 절 결 론 ·····183

제 4 장 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도 ·····186

제 1 절 연구목표의 달성도 ·····186
1. 연구개발 수행 진도율 ·····186
2. 연구개발 목표의 달성도 ·····189

3. 연구 목표치 대비 실적치 ·····191

제 2 절 연구 성과의 관련분야 기여도 ·····192

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획 ·····193

제 1 절 연구결과의 활용방안 ·····193

제 2 절 기대성과 및 파급효과 ·····193

1. 기술적 측면 ·····193

2. 사회 · 경제적 측면 ·····193

제 3 절 타 산업에 미치는 효과 ·····194

제 4 절 관련 후속연구개발의 전망 ·····194

제 6 장 참고문헌 ·····195

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 필요성

1. 연구개발 개요

최근 산악구간에서 도로 및 철도의 선형개량사업에 의한 터널건설과 도심지에서 지하철, 전력구, 통신구 등의 지하구조물의 설계 및 시공이 급증하고 있다. 지하구조물의 건설방법은 크게 기계에 의한 굴착, 화약을 이용한 발파굴착으로 나눌 수 있는데, 이중 화약을 이용한 발파굴착법은 기계굴착에 비해 상대적으로 비용이 적게 들어 일반적으로 채택되고 있는 방법이다. 발파굴착의 문제점으로 지나친 여굴 발생, 진동 및 소음으로 인한 민원 등이 있으며 이는 주로 발파효율 향상을 위한 과장약으로 인한 지발당 화약량의 증가에서 발생한다고 할 수 있다.

터널 내 여굴은 발파굴착 시 필연적으로 발생하는 현상으로 과다한 여굴 발생 시 버력처리량의 증가, 숏크리트 사용량의 증가, 라이닝 콘크리트 사용량의 증가, 추가 지보재 발생의 경제적 손실 뿐 아니라 터널 주변 암반의 손상대가 크게 발생하여 터널자체의 안정성에도 영향을 미친다. 따라서 여굴의 발생 및 암반 손상대를 최소화하기 위해서 스무스블라스팅, 프리스플리팅 등 각종 조절발파공법이 이용되고 있다.

스무스블라스팅(smooth blasting)은 터널 굴착선공부 최외곽공에 적용되는 공법으로 천공경보다 작은 약경의 폭약을 장전하여 디커플링 효과를 이용하여 여굴 및 암반의 손상을 최소화하는 방법이며 프리스플리팅(pre-splitting)은 최외곽공을 먼저 발파하여 선균열을 형성시킨 뒤 본 발파로 인한 암반의 손상과 여굴의 발생을 최소화하는 공법이다. 그러나 이러한 공법들은 폭발에너지에 대한 제어의 어려움, 구속력이 큰 터널굴착선부 암반의 절개가 충분히 이루어지지 못하여 여굴제어 및 소음 · 진동 감소 효과가 미흡하다.

노치홀(notch-hole)을 이용한 발파공법은 기존의 제어발파공법의 문제점을 개선할 수 있는 공법으로 최근 국내외적으로 관심을 끌고 있다. 노치홀 발파공법은 노치효과(notch-effect) 이론을 이용한 공법으로 노치효과란 물체표면의 우묵하게 파인 곳에 응력이 집중되는 효과를 말한다. 편평하게 가공한 재료에 부분적으로 오목하게 팬 곳

을 탄성학에서 '노치'라고 하는데, 이 부분에 힘이 주어질 경우 다른 부분보다 훨씬 더 큰 응력의 집중이 발생하여, 반복해서 힘을 받는 경우에 노치부분에 작용하는 응력 집중이 증가하여 노치부분에서 균열 및 파괴가 일어나게 되는 효과를 말한다. 노치홀을 굴착선공부에 배열하여 발파하면 노치효과로 인해 폭약의 폭발력이 노치에 집중되어 노치를 따라 균열이 발생하므로 주변 암반의 손상을 최소화 할 수 있으며 선균열을 형성시켜 소음 및 진동 감소 효과도 기대할 수 있다. 그러나 노치홀 천공이 어려워 시공성이 떨어진다는 단점이 있다.

이러한 단점들을 보완하기 위해 다양한 제어발파공법들이 개발되었다. 그 중하나로 최근국내에서 노치 형태를 만들 수 있는 드릴비트의 개발로 인하여 노치 효과를 이용한 균열제어공법이 주목받고 있다(정동호 외, 2008 , 김광염 외, 2008). 노치장약공을 이용한 발파공법은 응력집중이 노치의 첨단 쪽으로 유도가 가능하여 원하는 파단면 방향으로 노치 선 균열을 생성시켜 균열성장제어를 용이하게 할 수 있는 공법이다. 하지만 노치형태 및 장약지수에 따른 균열전파양상에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

암반의 굴착을 위해 사용되어지는 화약 발파시 주변 암반의 손상을 최소화 시키고 매끄러운 파단면을 만드는 것은 발파로 인해 일반적으로 야기되는 문제점을 상당히 개선시킬 수 있는 중요한 요소이다. 특히, 터널 발파의 최외곽공과 같이 굴착대상의 최외곽부의 발파에 있어서 발파 균열의 제어는 굴착되는 영역을 최적화하여 여굴이나 미굴의 발생을 최소화 시켜 줄 수 있다. 일반적으로 발파공에서 일어나는 파괴메커니즘은 충격파에 의한 미세균열 생성과 자유면, 절리면 등에서 돌아온 반사파에 의해 미세균열 중 가장 응력 집중이 되는 부분의 균열들이 선택적으로 확장되며 이러한 확장된 균열을 통해 가스압이 팽창하여 균열의 급속한 확장으로 파괴에 이르는 것이다. 발파공에 노치 선균열을 주게 되면 응력 집중을 선균열 쪽으로 유도가 가능하기 때문에 원하는 파단면 방향으로 노치 선균열을 생성시켜 발파가 가능하다. 암반의 발파를 통해 생성된 파단면은 이러한 균열의 생성 및 확장 과정을 통해 생성되기 때문에 노치 선균열의 효과를 확인하기 위한 파단면의 분석이 가능하다.

본 연구에서는 최종적으로 노치홀 천공의 효율성을 확보하기 위한 장비개발과 노치홀의 발파설계 적용을 위한 연구를 수행하고자 하였다. 효율적인 노치홀 천공을 위해 노치 비트 및 보조 장비 개발을 위한 요소시험을 계획·수행하였고, 노치홀의 공간

격 결정을 위한 전산시뮬레이션 및 현장 발파시험을 계획·수행하였다. 노치공, 일반원형공으로 천공작업이 수행된 암석 시험편을 발파하여 각 장약공별, 장약량별로 파단면을 생성하는 시험을 하였다. 장약공 형상별로 파단된 암석시험편면을 정성적, 정량적인 비교·평가를 통해 노치공에 의한 선균열 제어 발파공법의 노치효과를 확인하고 본 과제의 기술적 우월성 및 확신성, 현장 적용성을 검증하고자 하였고 정성적 평가를 위해 시험편 발파 후 파단면을 관찰하여 균열방향성의 확인과 장약량에 따른 발파의 적절성을 평가하였다. 정량적 평가를 위하여 암석 파단면을 디지털 영상 계측 기법을 이용한 3D DEM(Digital Elevation Model)으로 가시화하여 파단면의 표면 거칠기를 비교·분석하였다. 노치형태와 장약지수에 따른 발파실험에 앞서 동적파괴해석 프로그램을 이용한 수치해석을 수행함으로써, 노치형상과 장약지수가 파괴에 미치는 효과를 자세히 분석 할 수 있을 뿐만 아니라 노치조건 및 발파조건에 따른 파괴패턴을 예상할 수 있다. 수치실험은 노치의 길이와 노치 폭의 길이 그리고 장약지수를 다르게 모델링하여 동적파괴해석을 수행하였다. 먼저, 노치형상과 장약지수에 따른 노치첨단의 응력 집중도를 알아보기 위하여 응력확대계수를 이용하여 분석하였으며, 노치첨단의 응력집중에 따른 균열성장속도 및 파괴패턴을 분석하여 최적의 조건을 제안할 수 있는 기초자료를 획득하는 것을 목표로 하고 있다. 그리고 장약공 노치형상에 따른 균열제어 효과의 분석을 위해 정량적인 실험을 수행하였다. 정량적인 실험분석을 위해 노치길이와 노치폭이 서로 다른 시험편들을 발파하여 균열양상을 비교하였다. 폭발하중에 의하여 발생된 모르타르 내 충격파의 규모와 전달속도를 파악하기 위하여 충격가속도 측정을 수행하였다.

2. 연구개발의 중요성

가. 기술적 측면

터널의 여굴은 터널 자체의 안정성에 악영향을 미칠 뿐 아니라 여굴 채움을 위한 숏크리트, 콘크리트의 사용량이 증가하므로 경제적 손실을 줄 수 있다. 또한 굴진장을 길게 할수록 lookout에 의해 필연적으로 발생하는 여굴이 많아진다. 따라서 여굴을 최소화하고 화약 사용에 수반되는 진동, 암소음을 획기적으로 제어할 수 있는, 환경 민원 억제 차원에 효과적인 공법의 개발이 필요한 실정이다.

최근 적용되고 있는 무진동 암파쇄공법은 도심지나 주요 보안물건이 근접해 있는

구간에 적용되는 공법으로 유압을 이용한 기계식 파쇄 또는 가스압을 이용한 화학적 파쇄방법 등이 있다. 이들 공법은 소음 및 진동 감소 효과가 뛰어난 것으로 알려져 있으나 비용이 많이 들고 시공성이 떨어져 공기가 길어지는 단점이 있어 제한적으로 적용되고 있다. 또한 우리나라의 지질조건이 주로 극경암인 화강암과 화강편마암으로 이루어져 있어 기존에 무진동 암파쇄굴착으로 설계된 구간도 시공의 어려움으로 변경설계가 증가하고 있다.

반면 노치선균열 암굴착 공법은 기존발파공법과 동일하며 노치효과를 이용해 선균열을 발생시켜 진동 및 암소음을 차단함으로써 경제적이며 시공성과 민원감소 효과를 동시에 얻을 수 있다는 장점이 있다. 기존 허용진동기준치 0.2~0.3cm/sec인 구간은 무진동 암파쇄공법을 적용했으나 본 연구의 노치선균열 암굴착공법으로 대체 가능하며 무진동 암파쇄공법을 적용했을 때에 비해 공사비가 약 6배 절감할 수 있다.

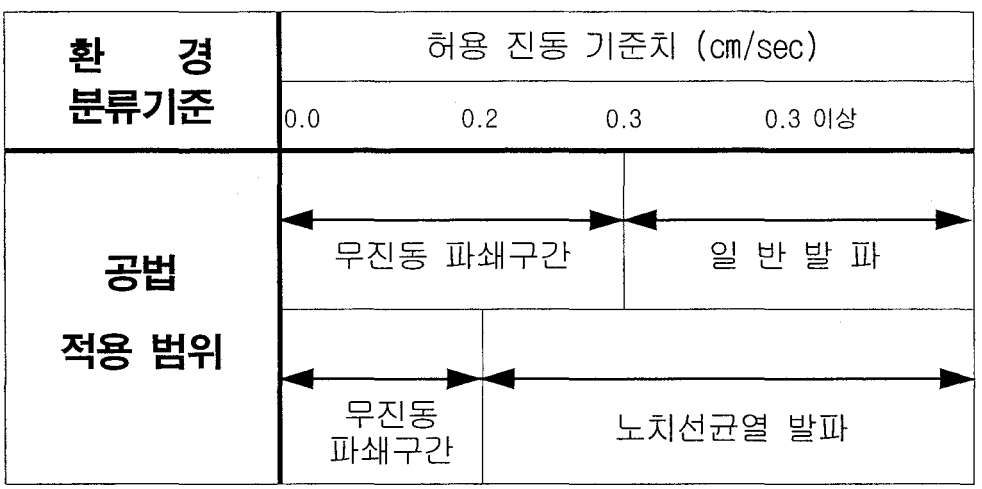


그림 1.1.1 발파공법의 적용 범위

나. 경제·산업적 측면

도로 및 철도의 개량사업, 도심지 지하철 공사 시 터널계획은 필연적이며 주로 발파 굴착이 이루어지고 있다. 노치선균열 암굴착 공법은 터널 시공에 효율적인 기술로 도로 및 철도 선형을 직선화함으로써 각종 물류비용 절감시켜 타 산업 발전에 기여할 수 있다.

다. 사회·문화적 측면

터널 구조물 외에도 구조물 터파기에서의 암발파, 대규모 지하 저장소를 위한 암굴착 등 암굴착이 이루어지는 모든 분야에 적용되어 암굴착 기술을 한층 성숙시킬 수 있어, 각종 혐오시설을 지하화 할 수 있고 지하공간을 이용한 다양한 주민복지시설, 쇼핑몰, 전력구, 통신구 건설을 용이하게 하여 국민의 건강 복지 증진에도 기여할 것으로 판단된다.

제 2 절 연구개발의 최종목표

1. 최종목표

본 연구의 최종목표는 터널 내 여굴 및 진동제어를 위한 노치선균열 발파 기술의 실용화로 설정하였다.

노치홀에 관한 현재까지의 연구는 노치효과의 입증에 집중되어 있고, 이론적으로 입증된 노치효과를 전산실험과 모형실험을 통해 증명한 것에 불과하다. 본 연구에서는 지금까지의 연구에서 입증된 노치효과를 실제 설계에 적용하기 위한 연구를 수행하고자 하였다. 즉, 이를 실용화할 장비의 개발, 발파설계에 중점적으로 연구를 수행하도록 하였다. 충분한 현장시험을 수행하여 데이터를 축적, 정량적 분석을 통해 한국의 지질특성에 맞는 노치비트를 개발하고, 내구성을 향상시키는 것을 목표로 하여 노치선균열 발파기술의 현장 적용성을 입증함으로써 본 기술의 실용화를 완성하도록 하였다.

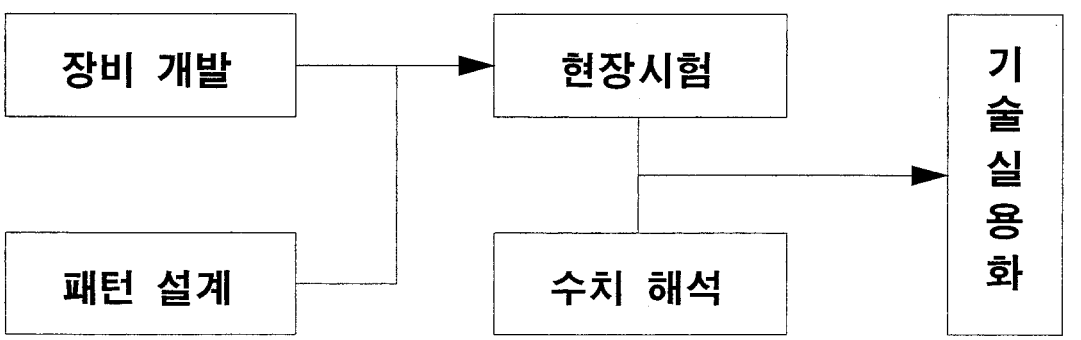


그림 1.2.1 연구개발의 최종 목표

2. 최종목표의 설정 근거

본 연구의 최종목표의 설정 근거는 다음과 같다.

- 최근 도로 및 철도 노선 개량사업과 도심지 지하철 공사의 증가와 더불어 터널의 시공 역시 증가하고 있다.
- 최적의 터널공사라 함은 최소의 굴착으로 필요한 공간을 창출함에 있으므로 여굴로 인한 불필요한 굴착 양을 줄여야 한다.
- 터널발파 굴착 시 발생하는 발파진동, 소음에 대한 피해민원은 항상 문제가 되므로 이를 최소화 하는 것이 바람직하다.
- 기존에 적용되고 있는 무진동 암파쇄공법은 공사비가 많이 들며 화강암, 편마암 등의 극경암이 분포하고 있는 우리나라의 지질조건에 부적절한 경우가 많아 제한적으로 적용되고 있는 실정임
- 노치홀 발파는 터널 내 여굴을 효과적으로 제어할 수 있는 기술로서 실용화를 통해 공사비 절감과 민원해결 등의 효과가 기대됨

제 3 절 연구목표 및 내용

1. 연구목표

초기에는 노치균열공법 문헌 연구, 국내 굴착기종별 노치비트 시스템 최적화 구축, 응력집중 균열파쇄를 위한 노치비트 최적화 개발이라는 목표를 설정하여 노치균열공법 이론 자료 및 관련논문 수집, 노치비트 시스템 3종 제품 개발, 노치비트 최적화 발표 보고서 등의 성과를 얻었고 중기에는 국내 굴착기종별 노치비트 시스템 최적화 구축 보완 및 노치비트 시스템 예비 현장적용 실험, 예비 현장적용실험 분석 등의 목표를 세우고 노치비트 시스템 3종 보완제품 개발 및 현장시험보고서, 관련학회 현장 적용성 실험 최적화보고서 등의 성과를 얻었다. 연구의 마무리 단계에는 노치비트 시스템 선균열 암굴착 현장실험, 노치선균열 공법을 적용한 최적의 암파쇄 패턴설계 개발 및 터널 내 노치선균열 파쇄공법 시공기준을 확립하는 목표를 세우고 이를 통해 노치홀 천공의 우수한 현장 적용성을 확보하여 본 기술의 실용화를 완성하고자 하였다.

2. 연구내용 및 범위

가. 연구내용

연구목표를 달성하기 위하여 목표별로 주요 연구내용으로 나누어 연구를 수행하여 종합적으로 우수한 연구 성과를 이루도록 하였다. 연구목표별 주요 연구내용은 다음과 같다.

연구목표		주요 연구내용
1차년도	▪ 노치선균열발파공법 문헌 연구	▪ 국내외 발파공법 연구문헌 조사 ▪ 국내 암발파 패턴 문헌조사 ▪ 터널 발파패턴설계 문제점 분석 및 개선사항 연구
	▪ 노치비트 시스템의 최적화 구축	▪ 암굴착용 비트형상 조사 ▪ 암굴착용 비트 형상에 따른 굴착효율분석 ▪ 노치비트의 기초 요소 실험에 의한 효율적인 노치비트 시스템 구축
2차년도	▪ 터널발파에 관한 문헌 연구	▪ 현장발파시공에 대한 문헌조사 ▪ 기존 터널발파시공 문제점 분석 ▪ 굴착효율에 대한 핵심요소인자 선정
	▪ 굴착효율 및 내구성이 우수한 노치비트 개발	▪ 노치선균열공법 이론적 고찰 및 발파패턴 적용 연구 ▪ 노치비트에 의한 손상영역 감소 수치모델링 ▪ 노치비트에 의한 발파성능평가 축소모형실험 및 현장실험
	▪ 현장발파실험에 의한 효율적인 노치선균열발파 적용 연구	▪ 노치비트 요소실험에 의한 최적의 비트형상 선정 ▪ 내구성 실험에 의한 노치비트 품질향상 ▪ 노치비트 실용화 제품 개발
3차년도	▪ 터널발파 현장시험 수행 및 적용성 검증	▪ 암반등급별 터널현장시험 및 일반발파와의 비교검토 ▪ 천공간격, 천공수를 고려한 경제성 분석 ▪ 노치공 각도조정의 간편화 연구
	▪ 암석의 동적파괴역학을 고려한 노치균열의 제어설계법 제안	▪ 동적파괴해석법을 위한 노치발파모델의 제안 ▪ 노치공 및 장약조건에 따른 파단면제어의 동적파괴과정 해석 ▪ 파단면 제어를 위한 노치공 및 장약조건의 최적화 연구

3 차 년 도	▪ 최적 노치 균열 성능 검증을 위한 시험발파 및 경제성 분석	▪ 노치공 및 장약 조건에 따른 표준시험발파 결과 검증 ▪ VE/LCC 기법을 이용한 경제성 노치공 발파의 경제성 분석
	▪ 터널 내 노치선균열 발파공법 시공기준 확립	▪ 현장시험결과 데이터 종합검토 ▪ 현장시공 시 문제점 분석 및 보완 ▪ 현장 노치선균열 발파공법 시공기준 확립

나. 연구범위

연구내용에 따른 상세한 연구범위를 다음과 같이 설정하여 효율적인 연구를 수행토록 하여 당초 연구의 목표에 충실하도록 하였다.

일련번호		연구내용	범 위
1 차 년 도	1	■ 여굴최소화 및 진동소음감소를 위한 발파공법 연구 문헌 조사 및 수집	- 국내외 기술도서, 논문지, 학술지를 통한 자료 수집
	2	■ 국내외 암굴착용 비트형상 조사	- 국외 시공자료 및 국내현장 방문 조사
	3	■ 현장발파시공에 대한 연구문헌 조사	- 현장, 해외조사를 통해 관련 자료 및 시험장비 조사
	4	■ 국내 암발파 패턴 문헌조사	- 1발파당 최대 지발당 장약량 조사 - 1발파당 국내 터널 암굴착 시공사례 자료분석 - 국내외 도심터파기 및 터널 암굴착 논문 및 기 술자료 분석
	5	■ 암굴착용 비트 형상에 따른 굴착효율분석	- 일자형, 십자형 비트 형상과 굴착각도 분석 - 노치길이에 따른 천공효율 분석
	6	■ 기존 터널발파시공 문제점 분석	- 여굴제어 문제점 분석 - 진동, 소음 영향 검토
	7	■ 터널 발파패턴 설계시 문제점 분석 및 개선사항 연구	- 기존 발파설계 자료 및 현장변경사항 수집 및 문제점 분석

1차년도	8	■ 노치비트의 기초 요소 실험	- 천공시 암분의 배출여부 확인 - 노치비트 및 특수로드의 형성과 재질의 최적화
	9	■ 굴착효율에 대한 핵심요소인자 선정	- 천공직진성, 천공속도, 노치홀 형상, 비트마모율에 영향을 미치는 노치형상에 대한 분석 - 요소실험을 위한 test비트 제작
2차년도	10	■ 노치선균열공법에 대한 이론적 고찰 및 발파패턴 적용에 관한 연구	- 국외 문헌조사 및 유사 적용사례 분석 - 이론적 고찰에 의한 국내 노천 및 터널 발파패턴 적용성 검토
	11	■ 암등급별 노치비트 형상별 요소실험에 의한 최적의 비트형상 선정	- 영향인자별 요소실험 결과 분석 - 천공효율 및 노치공 형성에 최적인 비트형상 선정
	12	■ 일반발파 및 노치선균열발파의 비교분석을 위한 현장실험 계획 수립	- 암등급별, 노치공간격별 현장실험 계획 수립 - 현장실험 계측 계획 수립
	13	■ 노치선균열공법 적용시 발생되는 기술적 문제점 연구 및 보완	- 노치선균열공법 적용시 발생되는 기술적 문제점 파악 - 문제점에 대한 보완책을 마련하여 현장실험에 적용후 확인
	14	■ 내구성 실험에 의한 노치비트 품질향상 연구	- 비트, 로드, 노치의 마모율 분석 - 내구성 향상을 위한 재질선택 및 장비조합 최적화
	15	■ 케이스별 노천발파 실험 및 일반발파와의 비교 검토	- 케이스별 노천발파실험 실시 - 파단면 여굴 및 미굴 비교 분석 - 진동, 소음 측정 및 영향 감소효과 검토 - 적정 공간격 검토
	16	■ 굴착효율 및 내구성이 우수한 노치비트 개발	- 노치비트에 의한 손상영역 감소 수치모델링 - 노치비트에 의한 발파성능평가 축소모형실험 및 현장실험
	17	■ 수치해석을 이용한 발파 시뮬레이션 연구문헌 조사 및 노치선균열공법 수치해석 적용성 검토	- 수치해석 문헌자료 조사 및 해석기법 연구 - 노치선균열 모델링해석으로 적용성 검증
	18	■ 노치비트 실용화 제품 개발	- 시공성, 경제성, 안정성을 고려한 최적의 노치비트 개발
	19	■ 케이스별 터널현장시험 및 일반발파와의 비교 검토	- 암등급별 터널발파시험 실시 - 일반발파 및 노치선균열발파 결과 비교 검토 - 외곽공 간격 최적화

3차년도	20	■ 동적파괴해석법을 위한 노치발파모델의 제안	- 동적파괴해석을 위한 노치발파모델 파악
	21	■ 노치공 및 장약조건에 따른 파단면제어의 동적파괴과정 해석	- 노치공 직경에 따른 파단면제어의 동적파괴과정 해석 - 장약조건에 따른 파단면 제어의 동적파괴과정해석
	22	■ 파단면 제어를 위한 노치공 및 장약조건의 최적화 연구	- 노치공의 직경 및 장약조건에 따른 파단면 제어의 상관관계 분석 - 파단면 제어의 효율성 검증 - 여굴 감소율 및 진동, 소음 영향 감소 효과 확인 - 파단면 제어를 위한 최적의 노치공 및 장약조건 제시
	23	■ 노치공 및 장약 조건에 따른 표준시험발파 결과 검증	- 표준시험발파 결과를 통한 최적 노치 균열 성능 검증 및 진동, 소음 영향 감소 효과 확인 - 암등급별 적정 공간격 및 노치선균열공법 효과 검토 - 최적 노치 균열 발파의 노치방향, 노치공 간격 및 장약조건의 제시
	24	■ VE/LCC 기법을 이용한 경제성 노치공 발파의 경제성 분석	- VE/LCC 기법을 이용한 노치공 발파의 경제적 분석을 통한 시공 현장에서의 경제적 파급효과 분석
	25	■ 암반등급별 터널현장시험 및 일반발파와의 비교 검토	- 암반등급에 따른 노치 천공간격 연구 - 일반발파대비 노치발파의 효과 및 여굴 감소율 연구 - 진동, 소음 영향 감소 효과 확인 - 기타 장비조합 등의 부적합 개선사항 검토
	26	■ 현장시공 시 문제점 분석 및 보완	- 노치공 각도조정의 간편화 연구 - 현장시험 시 드러난 문제점 분석 및 개선사항 마련
	27	■ 노치선균열공법을 적용한 최적의 발파패턴설계 개발	- 안전성, 시공성, 경제성 및 환경피해 저감을 고려한 노치선균열 발파패턴 개발
	28	■ 현장 노치선균열 발파공법 시공기준 확립	- 시공효율, 작업자 안정성을 고려한 현장 노치선균열 발파공법 시방기준 정립

제 2 장 국내 · 외 기술개발 현황

제 1 절 국내 관련기술 동향

발파로 인한 여굴, 진동, 소음을 제어하기 위해 적용되고 있는 기술로는 크게 발파와 비발파 기술로 나눌 수 있다. 발파기술 중 가장 대표적으로 적용되는 기술은 스무스블라스팅으로 디커플링 효과를 이용한다. 디커플링 효과란 천공경보다 작은 폭약을 장전하여 발파하였을 때 폭굉압은 작으나 폭굉압의 지속시간은 길게 유지되는 현상이다. 따라서 이론적으로는 모암에 폭굉압으로 인한 충격파가 작아 손상이 적고 소음과 진동제어가 가능하다. 그러나 디커플링만으로는 폭발에너지의 제어가 어려워 여굴 제어 및 소음·진동 제어효과가 다소 미흡하다.

비발파 기술로 대표적인 것은 무진동 굴착공법이다. 쐐기에 유압을 가해 암을 파쇄하는 방법과 가스압을 이용하여 암의 균열을 유도하는 방법이 있는데 대괴발생으로 2차 파쇄를 해야 하는 번거로움 뿐 아니라 2차 파쇄 시 브레이커의 지속적인 타격음으로 민원발생 우려가 있다. 또한 공기가 늦어져 공사비 증가의 원인이 되어 실제 현장에서는 제한적으로 적용되고 있다.

제 2 절 해외 관련기술 동향

유럽 및 일본에서는 일찍이 그 지역의 지반에 적합한 노치홀 발파공법을 개발하여 적용하고 있다. 일본에서는 일본의 대표적인 지반인 화산암에 적합한 노치홀 천공 용이성을 위한 장비개발 시험을 실시하였다. 기존에는 원형공 천공 후 워터젯(water-jet)을 이용해 노치를 성형하여 작업이 2공정을 요했으나 천공과 노치성형을 동시에 할 수 있는 윙비트(wing-bit)와 노치의 방향을 수동적으로 제어할 수 있는 노치 콘트롤러(controller)를 개발한 바 있다.

제 3 절 기술동향 분석 결론

최근 서울지하철 9호선, 신분당선 등 도심지를 통과하는 지하구조물 건설이 증가하고 있다. 이에 따라 소음·진동에 대한 민원발생, 인접구조물의 안정성에 악영향이 발생할 가능성이 매우 높다. 기존의 공법인 스무스블라스팅은 민원해소에 미흡하고 무진동 파쇄 공법은 6배 정도의 고가 공사비 임에도 불구하고 터널 폐합시기 지연 및 시공성, 경제성에서 불리한 실정이다. 따라서 본 연구에서 수행할 노치선균열 발파공법은 경제적이며 민원해결에 상당한 효과가 있을 것으로 사료되는바 연구 수행이 필요하다. 또한 노치효과를 이용한 노치선균열 발파공법은 이미 이론적, 실험적으로 그 효과가 입증되어 있어 노치홀 천공을 위한 장비개발과 발파패턴 설계로 손쉽게 현장에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 문헌 연구

1. 노치공의 원리

노치공을 이용한 동적 충격에너지 발파방법은 노치효과 원리를 이용한 공법으로 노치효과란 물체표면의 우묵하게 파인 곳에 응력이 집중되는 효과를 말한다. 편평하게 가공한 재료에 부분적으로 오목하게 팬 곳을 탄성학에서 '노치'라고 하는데, 이 부분에 동적 충격에너지에 의한 힘이 주어질 경우 다른 부분보다 훨씬 더 큰 응력의 집중이 발생하여, 반복해서 힘을 받는 경우에 노치부분에 작용하는 응력 집중이 증가하여 노치부분에서 균열 및 파쇄가 일어나게 되는 효과를 말한다.

선형 탄성 파괴역학을 이용하면 노치가 있는 원형공 내부에 압력이 작용할 경우 노치 첨단에 근접한 한 점에서의 응력을 구할 수 있으며 그 해는 식 3.1.1과 같다.

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2}\left[1 - \sin\frac{\theta}{2}\frac{3\theta}{2}\right]$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2}\left[1 + \sin\frac{\theta}{2}\frac{3\theta}{2}\right] \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{(식 3.1.1)}$$

여기서, $\sigma x, \sigma y$: x 방향의 응력, y 방향의 응력

K_I : 파괴인성

θ : 노치 첨단에서부터 측점이 이루는 각도

r : 노치 첨단에서부터 측점까지의 거리

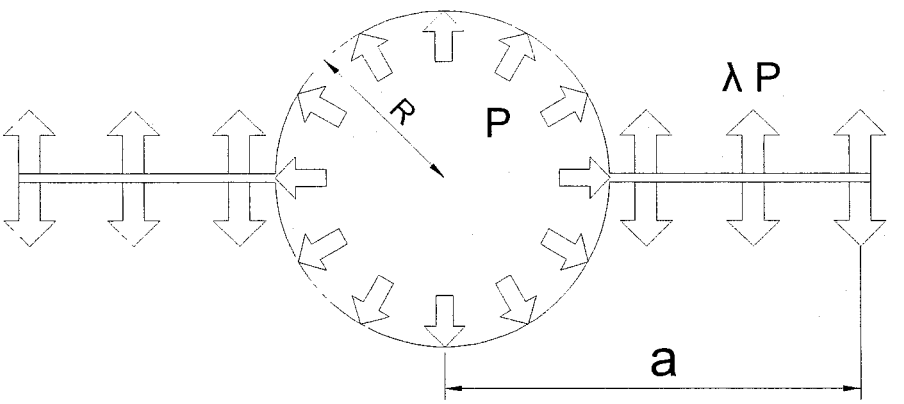


그림 3.1.1 노치공 내부의 압력 분포

그림 3.1.1은 노치가 있는 원형공 내부에 압력이 작용하는 조건을 보여준다. 압력 P가 공벽에 수직인 반경방향으로 작용하고, 압력 λP가 노치 벽면에 수직으로 작용할 경우 K_I는 식 3.1.2에 의해 구해질 수 있다.

$$K_I = \lambda P\sqrt{\pi a} \quad \text{.....(식 3.1.2)}$$

이때 노치의 길이에 따라 공벽면에 작용하는 압력의 크기는 달라지며, 식 3.1.2의 λ는 노치 면에 압력이 작용할 경우 2.24이고, 압력이 작용하지 않은 경우 1.12이다.

장약공 노치를 이용한 발파균열의 제어 원리는 Dally & Fourney(1977)에 의한 그림 3.1.2에 도시되어 있으며, 이에 따르면 화강암의 경우 Ø50mm 지름을 가진 발파공의 벽면에 있는 5mm 길이의 노치에 대해서 균열발생 압력은 1mm 길이의 노치가 있을 때 보다 50% 정도 감소하게 됨을 알 수 있다. 이와 같이 장약공 노치는 노치의 선단에 응력집중을 크게 해서 노치의 선단으로부터 균열이 발생하도록 하며, 균열을 발생시키는데 필요한 압력을 감소시키며 동시에 발파공의 다른 벽면에서 균열이 생성되는 것을 효과적으로 억제한다.

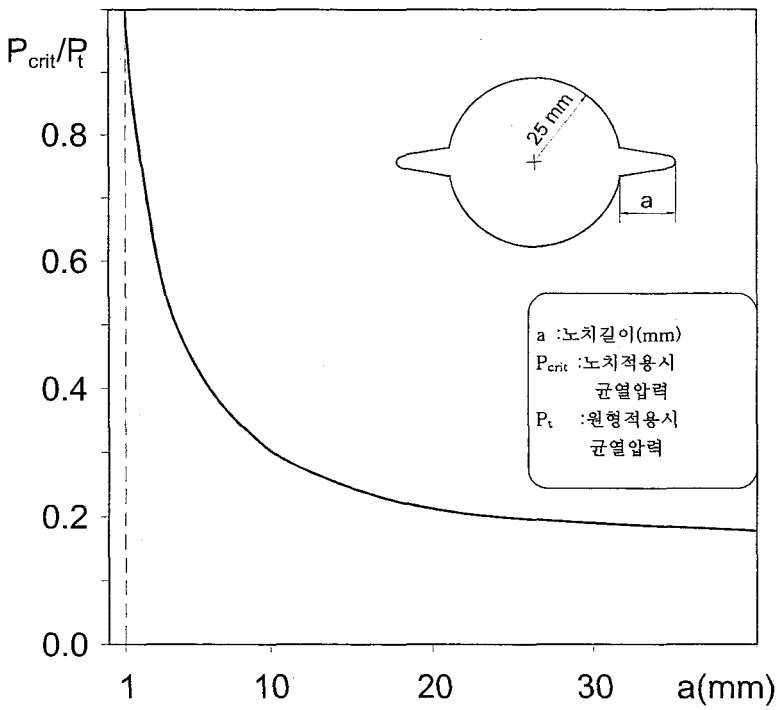


그림 3.1.2 노치길이에 따른 균열 발생 압력의 변화

노치공을 터널외곽 굴착선공부에 배열하면 노치효과로 인해 적은 동적 충격에너지로도 응력을 노치에 집중시킬 수 있고 이에 의해 노치를 따라 선 균열을 발생시켜 주변 암반의 여굴 및 손상 최소화는 물론 심발부, 확대부의 전파진동을 차단시켜 발파공해 해소차원 효과도 기대할 수 있다.

2. 해외 문헌 연구

노치홀에 관한 연구는 국외에서 먼저 시작되었다. 특수한 형태의 장약공을 사용해서 발파균열을 제어하는 방법, 즉 장약공에 노치를 만들어서 발파균열을 제어하는 방법은 Niklasson(1993)에 의해 발표되어 그 효과가 입증되었다. Langerfors & Kihlstrom은 1963년 발파공에 설치된 노치가 균열을 제어하는데 효과적으로 사용될 수 있다는 것을 지적했으며, 그보다 훨씬 이전인 1905년 Foster에 의해 유사한 방법이 최초로 고안된 것으로 알려져 있다. 1972년 Ouchterlony는 발파공 벽면에

있는 균열의 길이에 대해서 균열개시 압력을 조사하였다. 노치는 노치의 선단에 응력집중을 크게 하여 균열을 생성시키는데 필요한 압력을 감소시킬 뿐 아니라 동시에 발파공의 다른 벽면에서 균열이 생성되는 것을 효과적으로 억제한다. 그러나 1974년 Ladefaard-Pederson의 연구에 의해서 발파공에 노치를 설치했더라도 발파에 의해 발생하는 가스압력이 지나치게 높을 경우 노치가 아닌 발파공 벽면의 어느 곳에서도 균열이 시작될 수 있다는 것을 알게 되었다. 즉, 발파에 의해 발생하는 가스압력이 지나치게 낮으면 발파는 무효로 끝날 것이고, 너무 높다면 모든 자연균열에서부터 균열이 시작될 것이므로 적절한 수준의 발파압력을 유지해야만 균열의 발생과 전파를 제어할 수 있게 된다. 장약홀더는 장약홀더의 구조에 의해 발파공의 벽면 일부에 응력을 효과적으로 집중시킨다. 장약홀더의 홈에 집중된 응력은 벽면의 그 지점에서부터 균열을 발생시키고, 장약홀더의 나머지 부분은 벽면에 밀착되어 벽면을 보강함으로써 보강된 벽면에서부터 균열이 발생하는 것을 억제한다. 발파와 동시에 장약홀더의 노치에 집중된 응력은 노치 부분에 균열을 발생시키고, 발생한 균열에 의해 균열의 선단에서는 큰 응력집중이 발생하게 되며 장약홀더에 의해 보강된 다른 벽면에 비해 취약하게 되므로 일단 발생한 균열의 전파능력은 강해진다. 따라서 균열 제어면은 장약홀더에 의해 응력이 집중된 부분에서부터 얻을 수 있다. 즉, 앞서 설명했듯이 장약홀더를 사용하지 않을 경우에 방사상으로 발생하는 균열들과 가스침투 현상을 장약홀더로써 억제하고, 노치 부분으로만 응력을 집중시켜서 발파에 의한 균열을 제어할 수 있게 된다. 그러나 장약홀더와 발파공의 벽면 사이에 어느 정도의 틈이 있다면, 화약의 기폭 시 장약홀더는 빠른 속도로 벽면에 충돌할 것이고 그때의 충격으로 발파공의 벽면에서 불필요한 균열이 발생하게 될 것이다. 일반적으로 균질한 매질에서 발파가 이루어지는 경우는 발파공 주변에 균등한 응력분포가 발생하는 것으로 알려져 있으나, 장약홀더를 사용하는 경우에는 발파공 주변의 매질에서의 응력분포는 더 이상 대칭이 되거나 균등하게 분포하지 못한다. 이런 현상은 Fourney의 광탄성 연구결과에 의해 확인되기도 했다. Zicheng(1991)과 Nakamura(1992)는 전기뇌관과 시멘트 몰탈 시험편을 사용하여 장약홀더의 발파균열 제어효과를 조사하였다.

Niklasson & Keisu(1993)과 Tsoutrelis(1997)는 각각 노치가 가해진 보아 홀을 실제 터널굴착과 석재채취현장에 적용하여 장약공 노치가 발파에 의한 균열을 제어하는데 어느 정도의 효과를 발휘할 수 있는 지에 대해 조사하였다. Junji Mukugi

& Tadashi Ohara(1998) 의해 요소시험과 일부 채석장, 터널에 시험적용 연구된 바 있으나 일본의 암질은 우리나라 암질보다 무른 화산암 지반이 주종을 이루고 있어 Hydro rock splitter 등의 무진동굴착과 일반화약 발파공법 보다는 로드헤더 등의 장비가 발달된 상태이다.

현재 동향을 살펴볼 때 일본의 경우는 일부 현장에서 터널안정성 증대 및 여굴 제어 목적으로 시험적용 된 바는 있으나, 최근 일본의 경우는 민가 2,000m 이내의 지역은 발파 굴착이 사실상 금지되어 있고, 대부분의 암질은 화산암 계통의 무른 암질과 TBM, SHIELD, ROAD HEAD 등의 발달로 전환되어가고 있는 실정이다. 그리고 유럽의 경우는 그림 3.1.3, 그림 3.1.4와 같이 노천에서 우리의 1단계 기초 단계인 일반공 천공 후 노치공 형성하는 수준에 그치고 있는 실정이다.

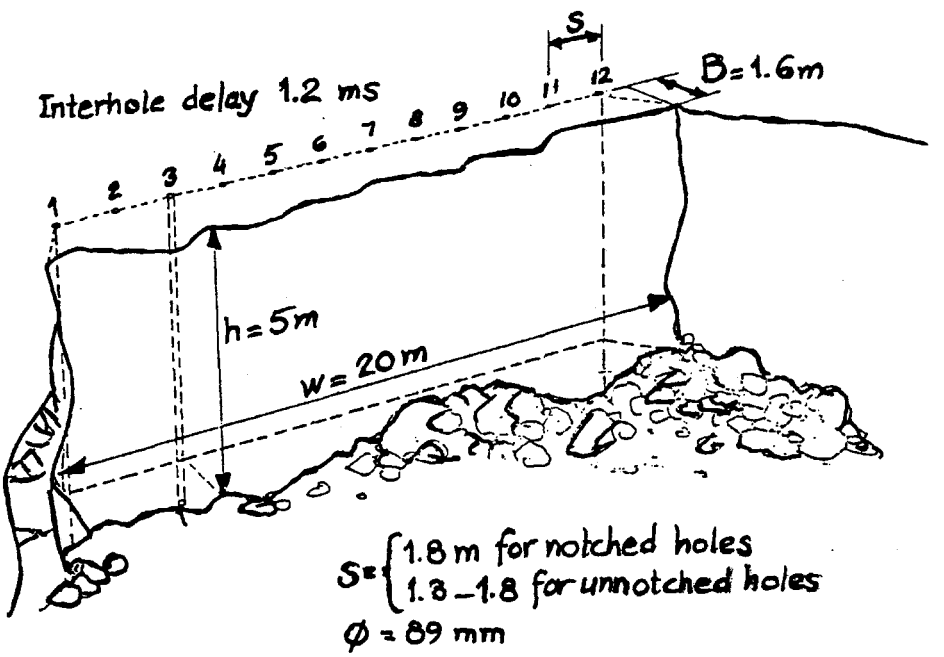


그림 3.1.3 벤치발파 형상

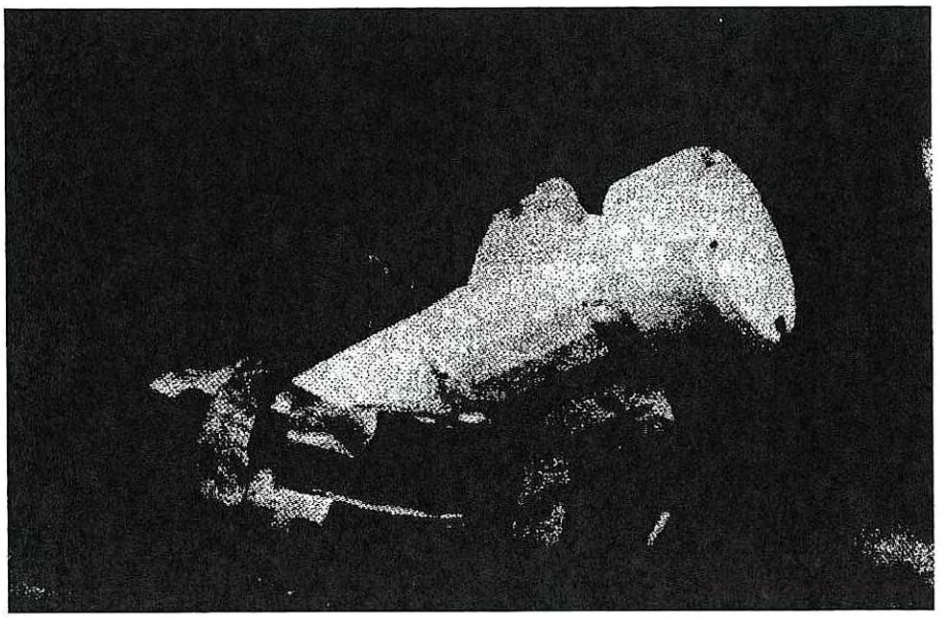


그림 3.1.4 천공 후 노치형성 장비

3. 국내 문헌 연구

국내에서 노치에 관한 연구는 90년대 후반부터 시작되었다. 백승규 등(1999)은 노치성형 발파공을 이용한 방법의 균열발생 특성을 2차원 및 3차원 유한요소법을 이용하여 입증하였다.

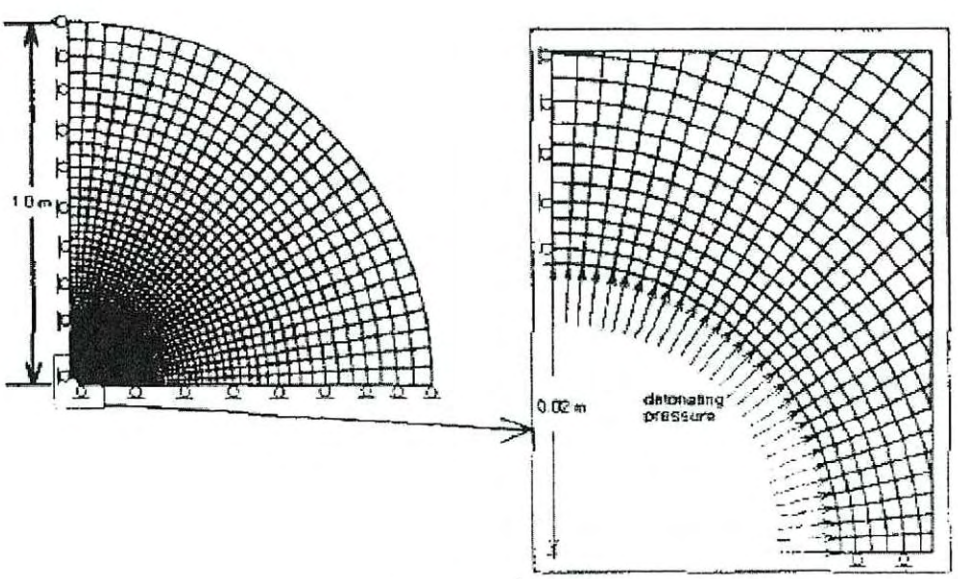


그림 3.1.5 2차원 탄소성 모델

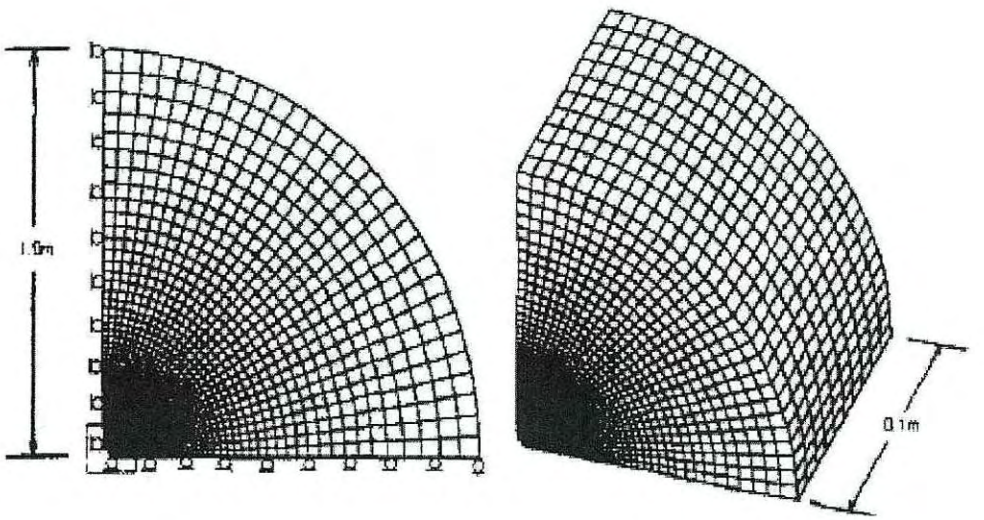


그림 3.1.6 3차원 탄소성 모델

일반발파공과 노치성형발파공에 대해 발파 압력에 대한 암반의 동적 반응, 탄성 및 소성 변형의 발생 특성, 그리고 이로 인한 발파 균열의 성장 전파 특성을 분석하여, 균열의 능동적 제어와 보다 효율적인 발파가 이루어 질 수 있는 조건들을 규명하였다. 또한 노치의 폭과 깊이를 달리하여 해석을 수행하였는데 노치의 깊이가 깊을수록 폭이 클수록 균열 전파가 용이하였지만 적정 노치의 형상은 노치성형 기술에 의해 결정되어야 한다고 결론지었다.

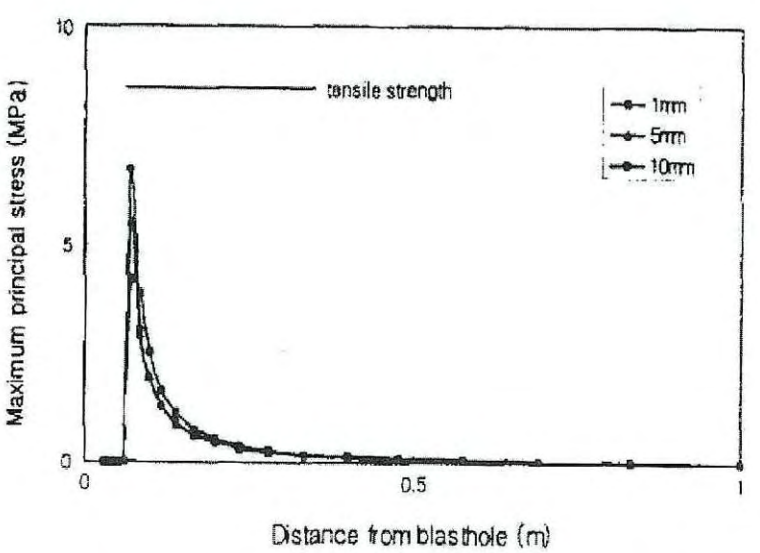


그림 3.1.7 동하중에서 노치의 깊이가 일정할 때 폭을 변화시키며 해석한 결과

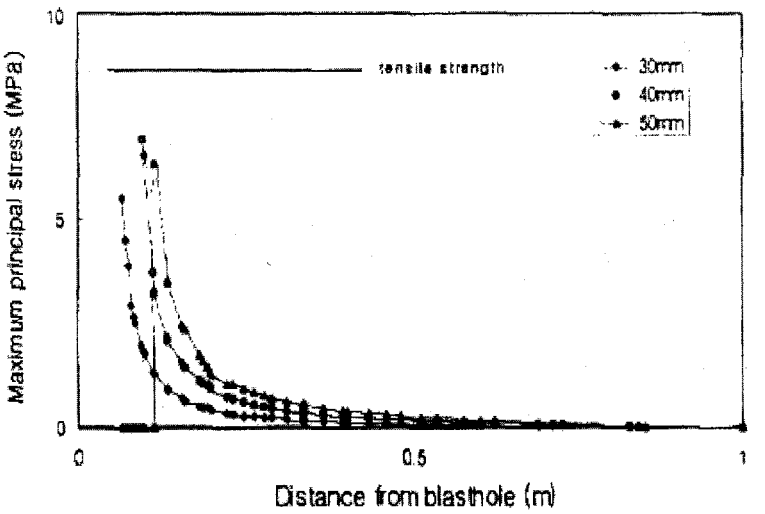


그림 3.1.8 동하중에서 노치의 폭이 일정할 때 길이를 변화시키며 해석한 결과

이정인, 최용근(2000)은 장약공에 균열유도 방향으로 인공균열을 만든 장약공 노치와 화약 폭발력을 일정방향으로 유도하도록 고안된 장약홀더에 의한 균열제어효과를 아크릴 모형 시험편과 원형, 장방형 시멘트 몰탈 시험편을 사용한 발파실험을 통해 조사하였으며, 제어지수개념을 도입하여 균열제어 결과를 평가하였다.

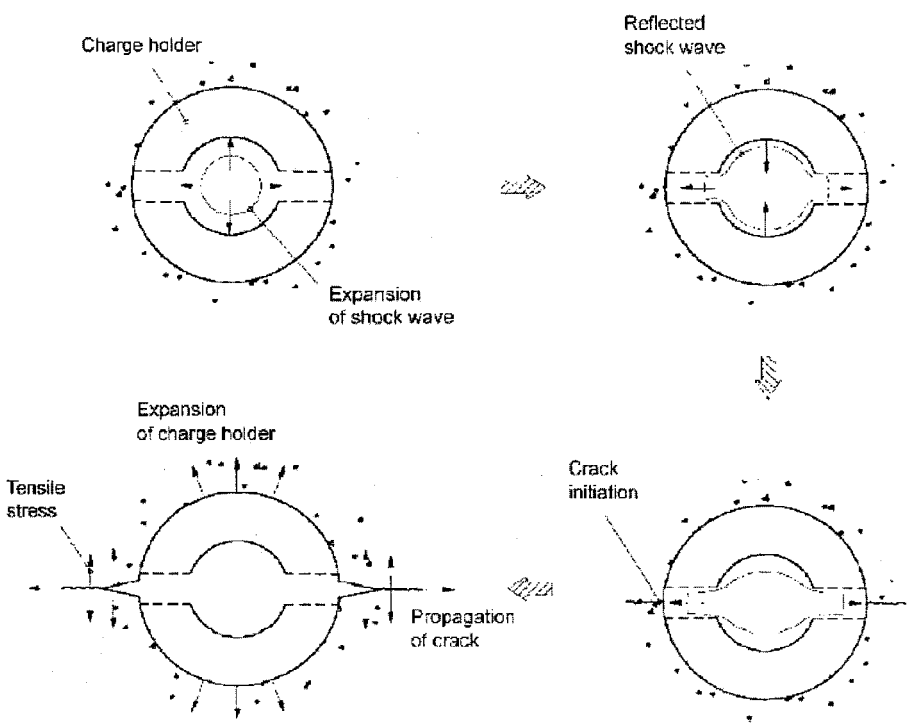


그림 3.1.9 장약홀더에 의한 균열제어 원리

장약홀더와 장약공 노치를 이용하여 발파균열의 제어가 가능하였으나, 장약홀더는 시험편에 따라 제어효과에 차이를 보인 반면 장약공 노치의 경우에는 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한 장약홀더의 발파균열 제어효과는 장약홀더의 재질에 따라 다르게 나타나는 것으로 밝혀져 발파균열의 제어효과는 장약공 노치가 장약홀더보다 우수한 것으로 평가되었다. 물리 실험결과 블록형 시험편에서 발파공으로부터 가장 먼 거리에 있는 자유면 방향으로 장약공 노치를 설치했을 경우 노치 방향의 저항선 거리와 최소 저항선 길이 비가 증가할수록 균열제어 효과는 감소하는 것으로 나타났다.

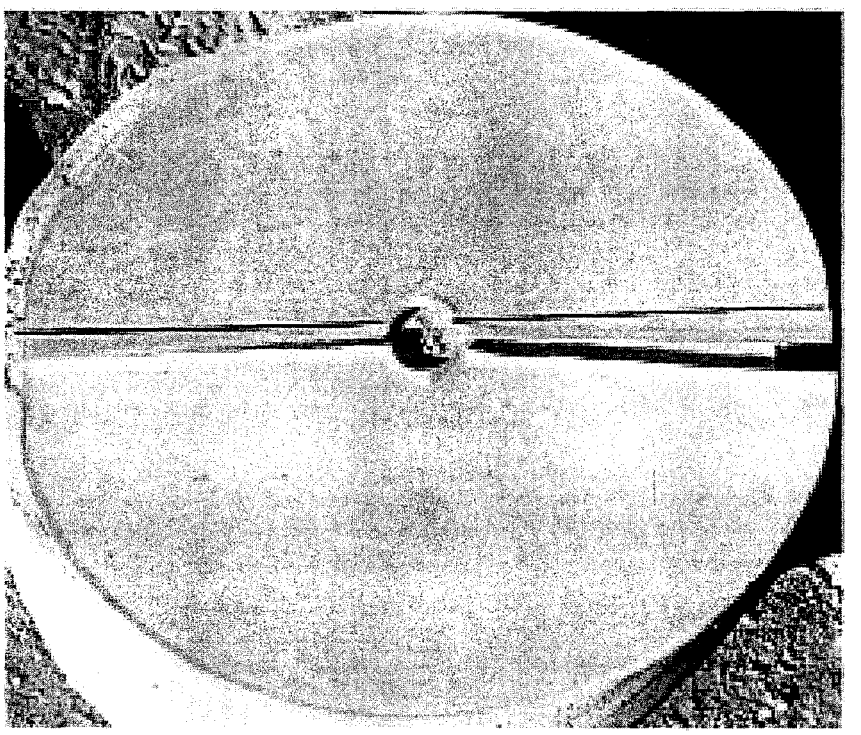


그림 3.1.10 실험 후 원형 시험편의 모습

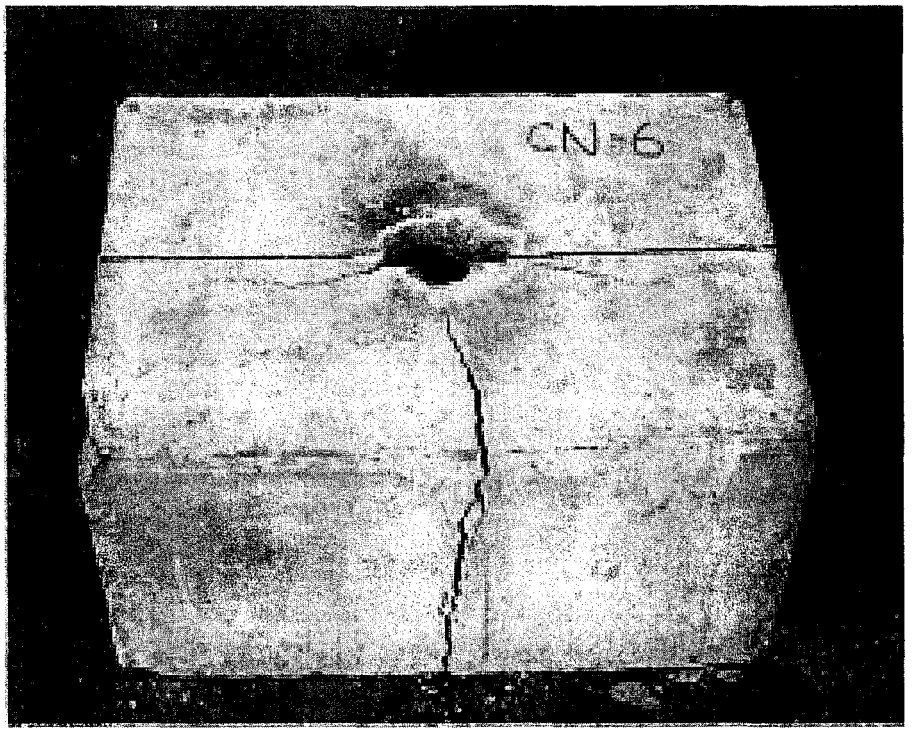


그림 3.1.11 실험 후 블록형 시험편의 모습

제 2 절 노치공 및 장약 조건에 따른 표준시험발파

1. 노치 장약공 노치길이와 각도에 따른 제어효과

가. 실험 개요 및 노치공 블록시험편

노치길이에 따른 균열제어 효과를 평가하기 위해 서로 다른 노치길이와 폭을 가진 노치 장약공을 가진 5개의 모르타르 블록 시험편을 제작하였다(그림 3.2.1). 약 20㎝ 길이의 노치장약공틀과 모르타르를 함께 타설하여 500㎜×500㎜×300㎜의 크기의 블록에 서로 다른 형상의 노치장약공을 가진 시험편으로 제작되었다. 시험편내 충격탄성파의 전달속도와 발파하중에 의한 충격가속도를 측정하기 위하여 동적데이터 획득시스템을 가속도 측정에 적용하였다(그림 3.2.2). 계측 트리거 신호는 뇌관에 부착된 이온게이지에 의하여 발생된 신호를 사용하며, 충격탄성파 전달속도는 뇌관의 기폭시각과 충격가속도센서의 반응시각을 이용하여 측정하였다.

그림 3.2.3은 블록 시험편과 장약공틀의 크기 및 형상 그리고 노치장약공의 위치

방향을 나타낸 것이다. 노치장약공은 그림 3.2.4와 같이 서로 다른 폭과 길이를 가진 틀로 제작되어 모르타르 재료를 사용하여 블록 시험편 제작시 노치형상을 생성하였다. 그림 3.2.5와 표 3.2.1은 서로 다른 노치길이와 노치폭을 가진 장약공틀의 크기 및 형상을 나타낸 것이다.

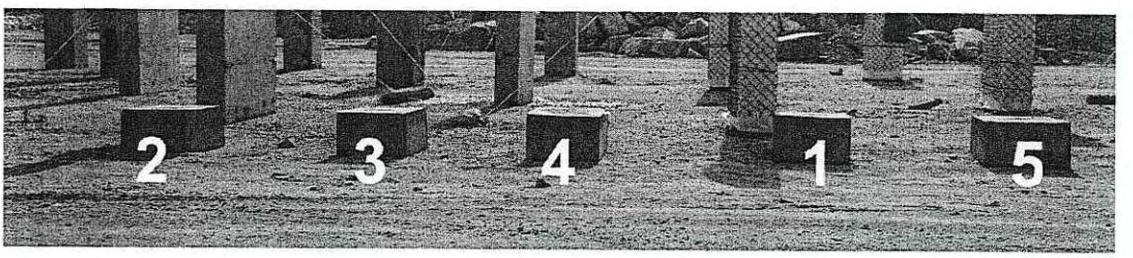


그림 3.2.1 노치장약공 시험편

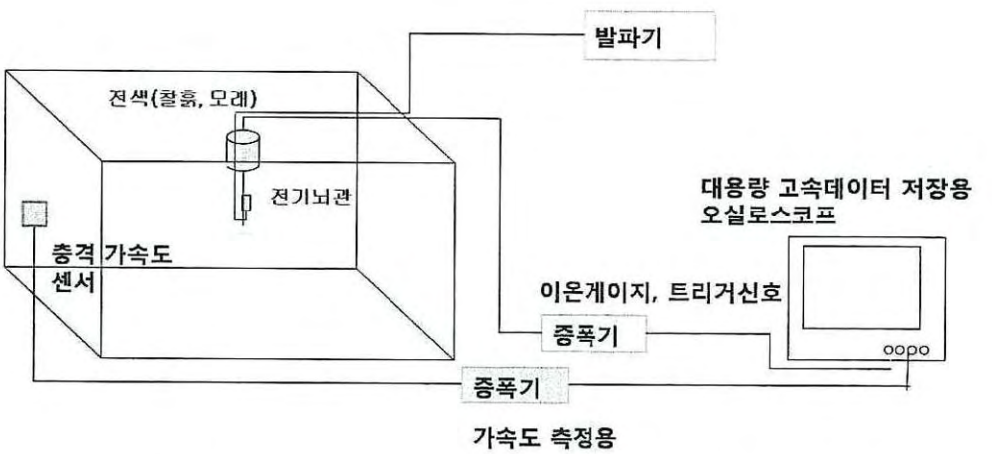
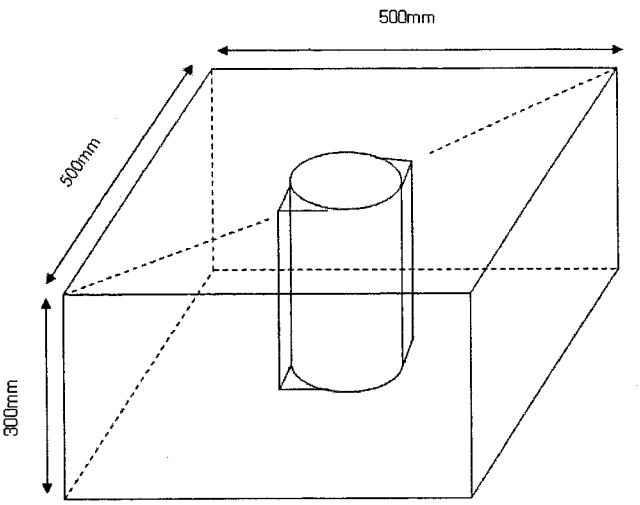
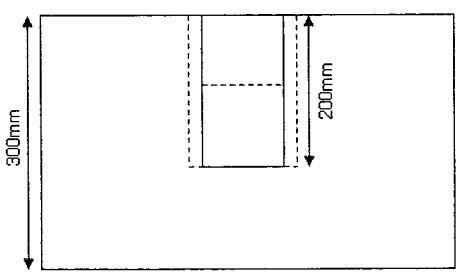


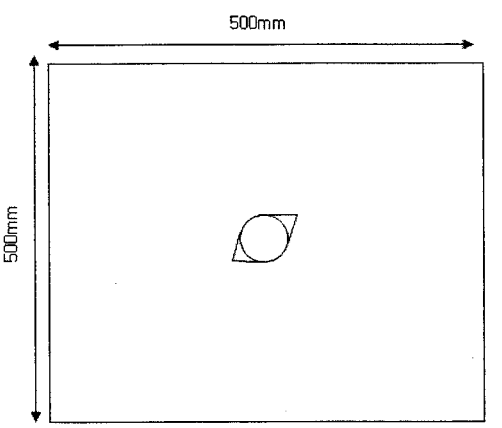
그림 3.2.2 모르타르 블록의 노치장약공 발파실험 개요도



(a) 투영도

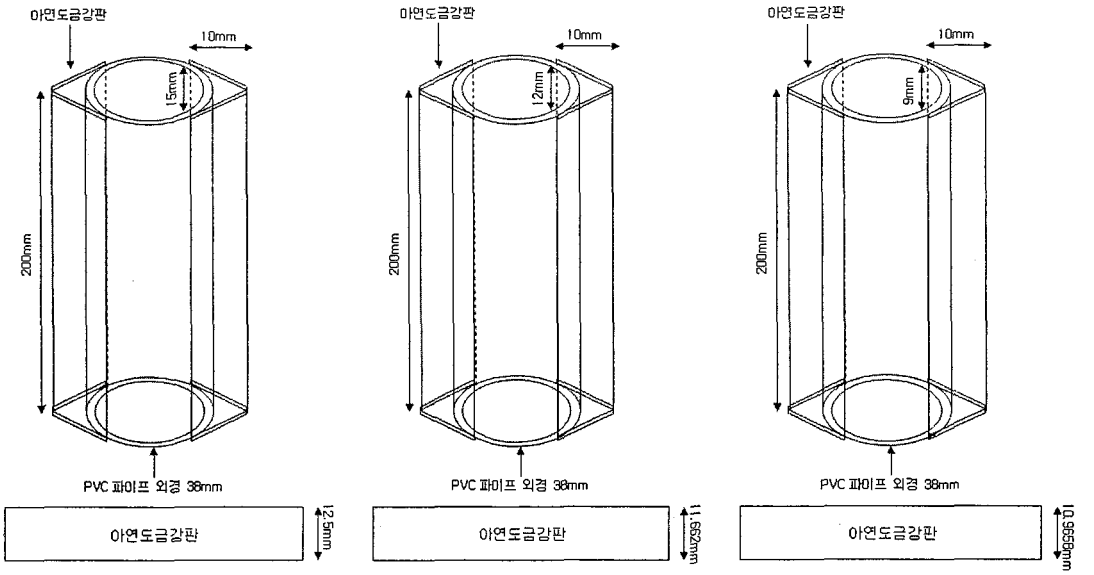


(b) 정면도

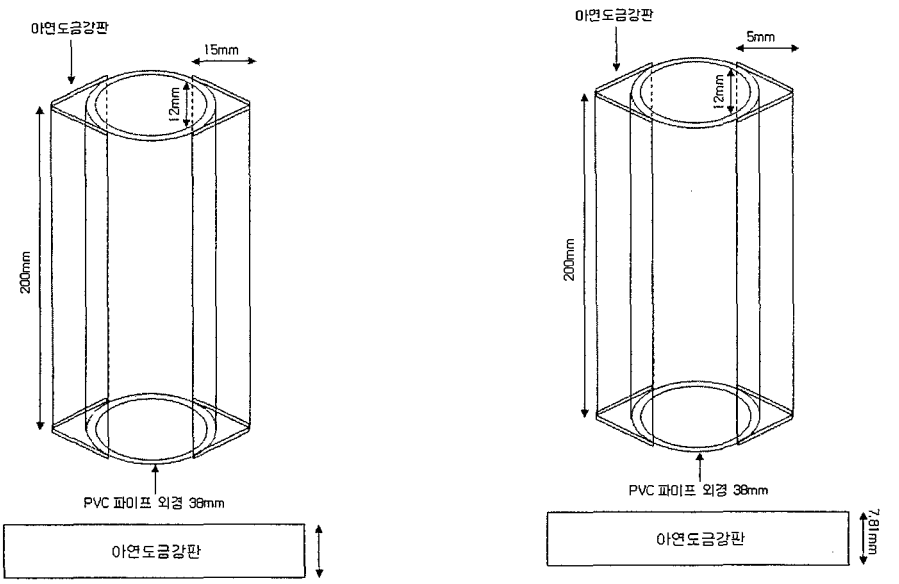


(c) 평면도

그림 3.2.3 블록 시험편 형상 및 크기

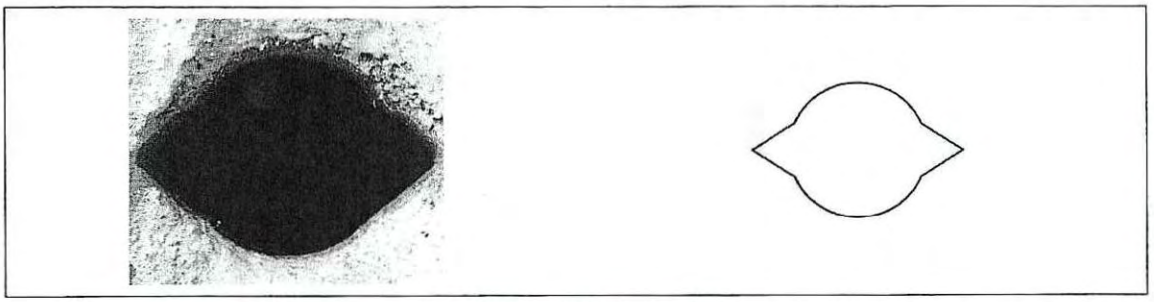


(a) 5번 장약공틀　　(b) 1번 장약공틀　　(c) 4번 장약공틀

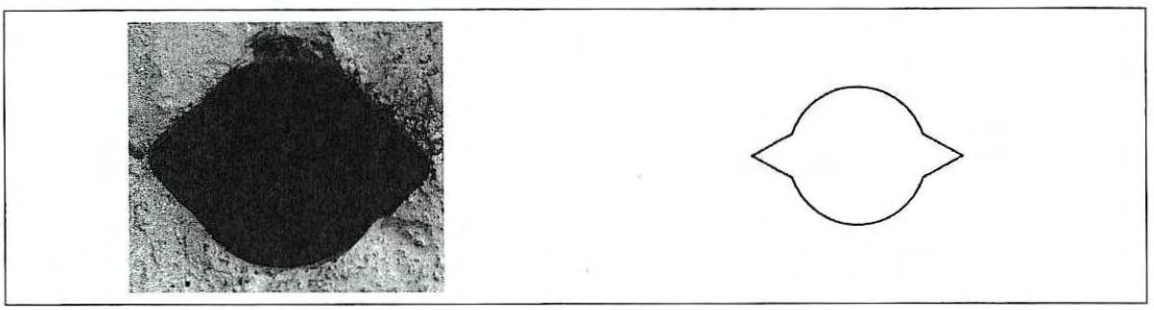


(d) 3번 장약공틀　　(e) 2번 장약공틀

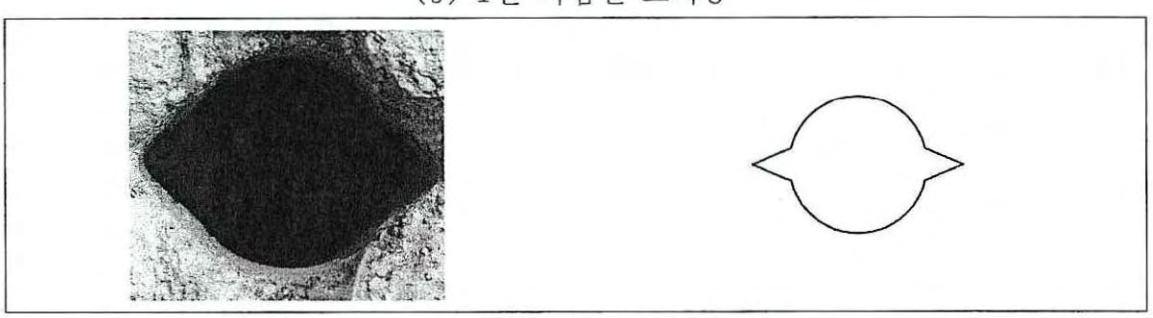
그림 3.2.4 장약공틀 크기 및 형상(설계도)



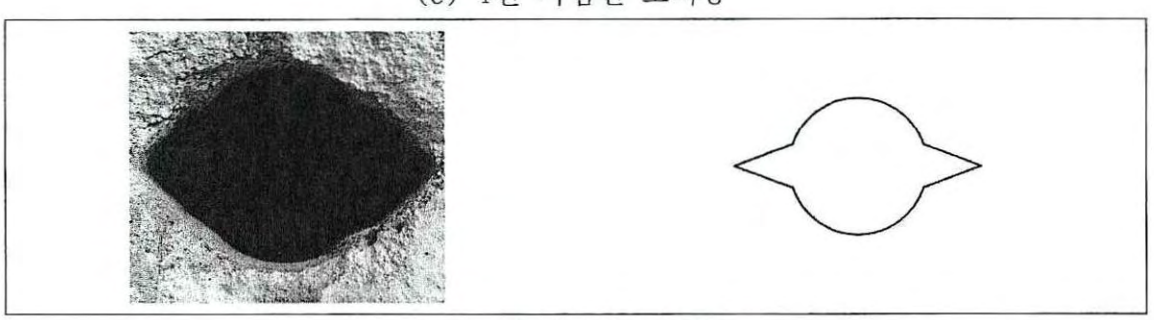
(a) 5번 시험편 노치공



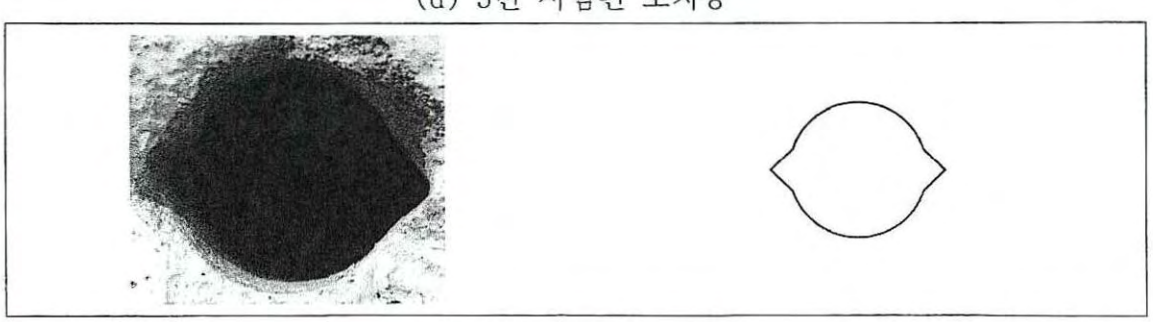
(b) 1번 시험편 노치공



(c) 4번 시험편 노치공



(d) 3번 시험편 노치공



(e) 2번 시험편 노치공

그림 3.2.5 노치장약공 형상

표 3.2.1 노치공의 길이 및 폭

	5	1	4	3	2
장약량(g)	10	5	3	3	3
천공장(㎜)	19	19	19	19	19
노치길이 L (㎜)	10	10	10	15	5
노치폭 W (㎜)	15	12	9	12	12
노치길이비(L/W)	0.6	0.83	1.11	1.25	0.41

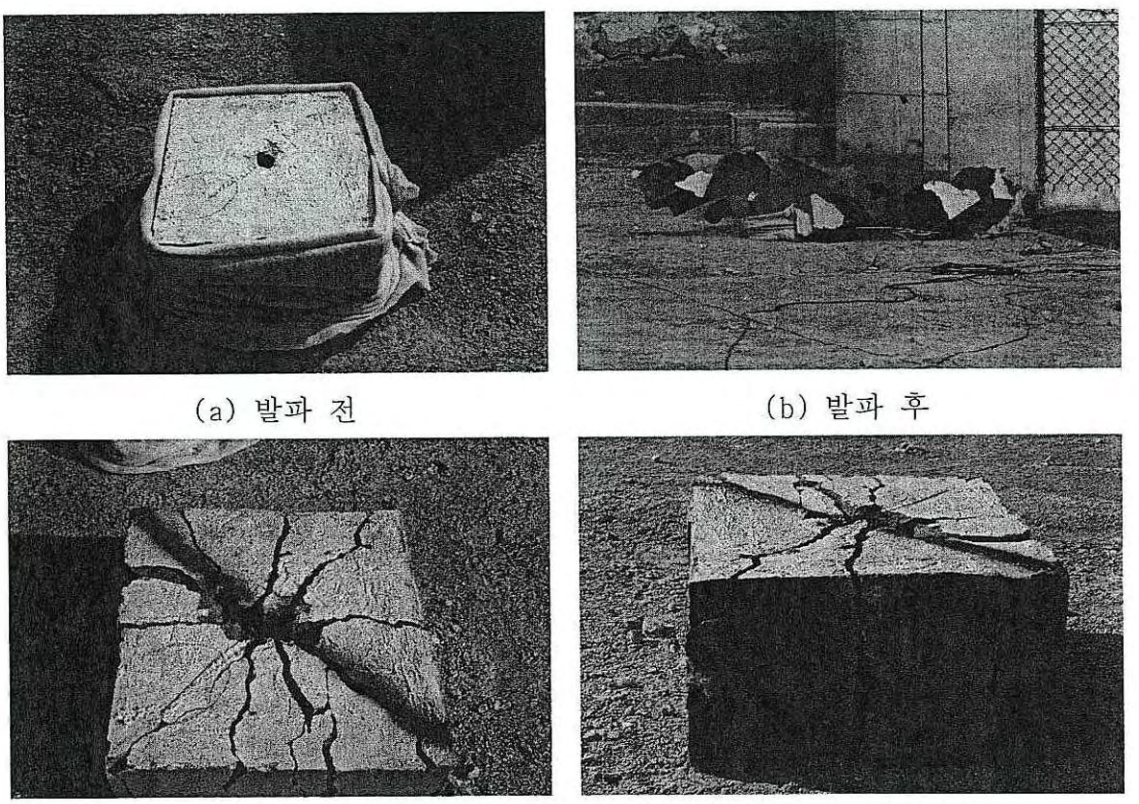
나. 장약

장약은 장약실 내 폭발압력의 디커플링효과를 고려하여 단위길이(m)당 폭약량(g)이 10인 도폭선을 사용하였으며, 종이 캡을 이용하여 장약공 중심에 위치시켰다.

2. 시험편 발파 후 결과

노치장약공이 생성되어있는 블록 시험편의 발파는 5 → 1 → 4 → 3 → 2 시험편 순으로 수행되었다. 모르타르 블록 시험편의 부피, 재료특성을 고려하여 계산된 10g 화약을 장약하여 5번 시험편의 발파를 수행하였다. 5번 시험편의 결과는 그림 3.2.6에 나타나있다. 화약 10g으로 발파수행된 5번 시험편은 그림 3.2.6(b)와 같이 완전 파괴가 발생되었다. 그림 3.2.6(c), (d)는 파괴된 시험편의 조각을 모은 그림이다. 자유면 최단거리(직각방향) 및 대각선 방향으로 파괴가 일어남을 토대로 화약 10g은 적정 화약량이 아님을 알 수 있었다. 따라서 다음 시험편(1번)의 발파는 1/2(5g)으로 발파를 수행하였다. 그림 3.2.7은 1번 시험편의 발파 전과 후를 나타낸 것이다. 5번 시험편의 파괴에 비해 완전 파괴를 보이지는 않았지만 대각선(노치방향) 및 자유면 최단거리 방향으로 파괴전파 방향을 나타내고 있다. 5번과 1번의 발파결과를 바탕으로 노치제어를 위한 표준장약량을 3g으로 결정하였다. 4번, 3번, 2번 시료는 3g의 장약량으로 발파시험을 하였다. 4번 시험편의 파괴전파방향은 자유면 최단거리 방향 및 노치방향과는 반대대각선 방향으로 파괴가 일어났다(그림 3.2.8). 3번 시험편의 발파결과는 그림 3.2.9와 같이 노치방향으로의 파괴를 확인할 수 있다. 3번 시험편은 그림 3.2.9(c), (d)와 같이 노치반대 방향으로의 미세

균열을 보이고 있으며 직각방향으로의 전파 또한 확인할 수 있다. 그림 3.2.10은 2번 시험편의 발파결과를 보여준다. 노치장약공이 있음에도 불구하고 일반원형공의 발파와 비슷하게 자유면 최단거리 방향으로의 균열을 보여준다. 특히 장약량이 동일한 4번, 3번, 2번 시료의 발파결과를 살펴보면, 노치의 길이비가 1 이상일 때 노치에 의한 균열제어효과가 있음을 알 수 있다.



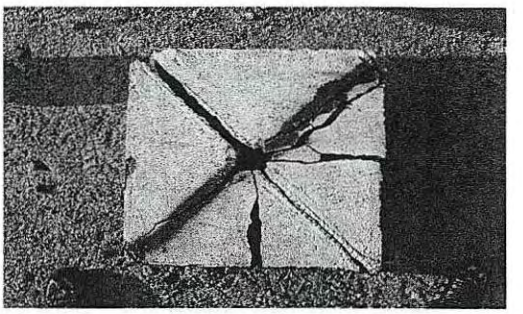
(a) 발파 전 (b) 발파 후

(c) 블록조각 모음 (d) 블록조각 모음

그림 3.2.6 5번 시험편 발파 전/후 결과

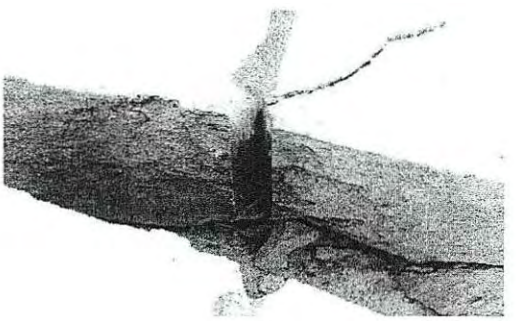


(a) 발파 전

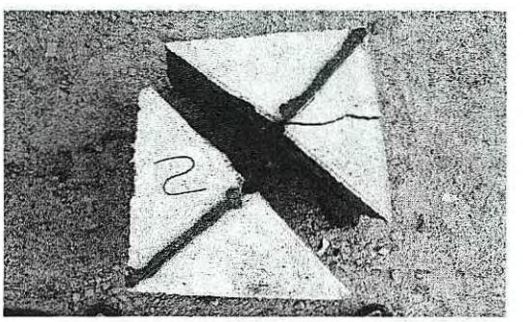


(b) 발파 후

그림 3.2.7 1번 시험편 발파 전/후 결과

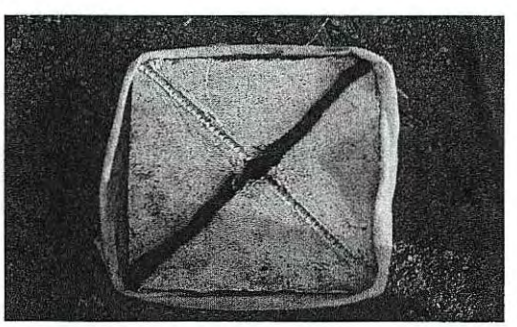


(a)



(b)

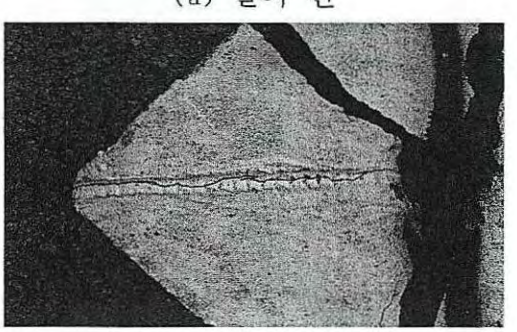
그림 3.2.8 4번 시험편 발파 후 결과



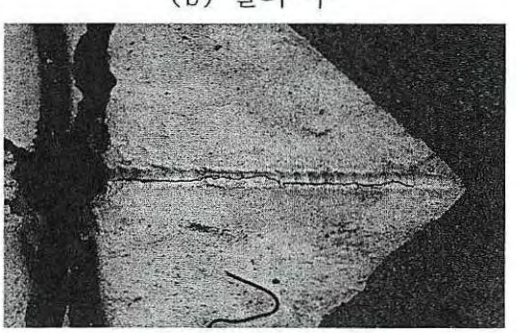
(a) 발파 전



(b) 발파 후



(c) 미세균열 방향



(d) 미세균열 방향

그림 3.2.9 3번 시험편 발파 전/후 결과

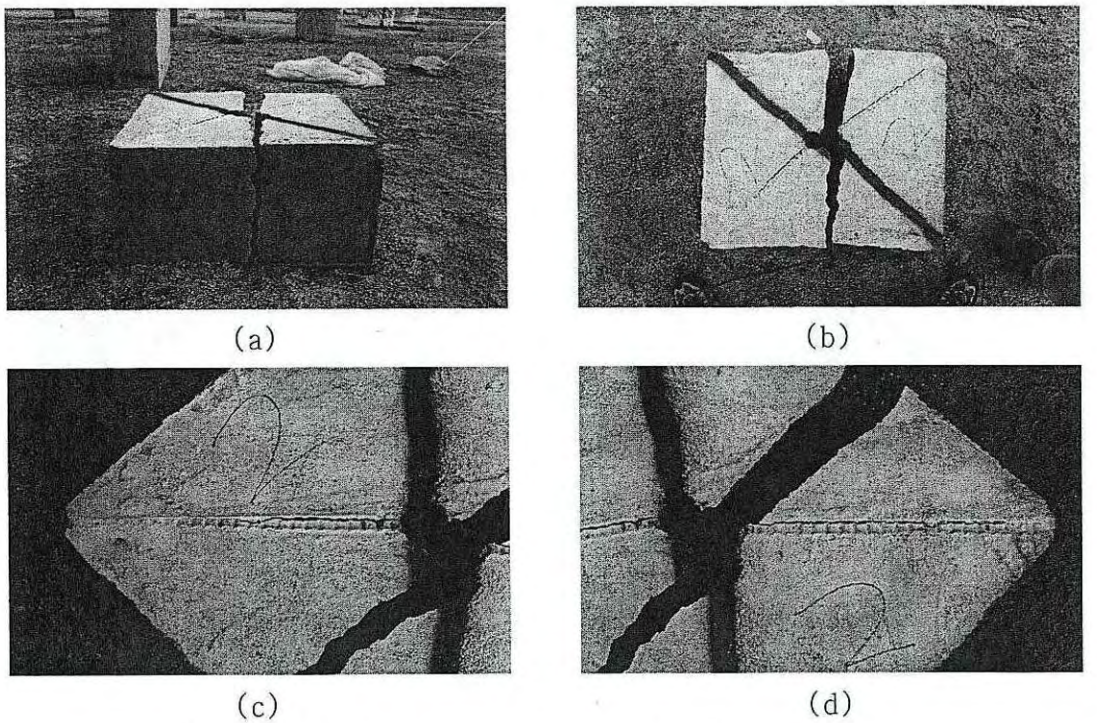
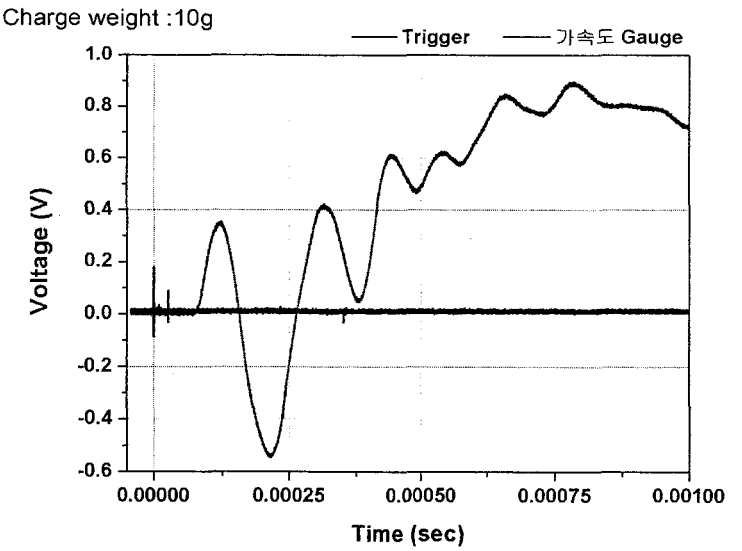


그림 3.2.10 2번 시험편 발파 후 결과

3. 충격가속도 측정결과

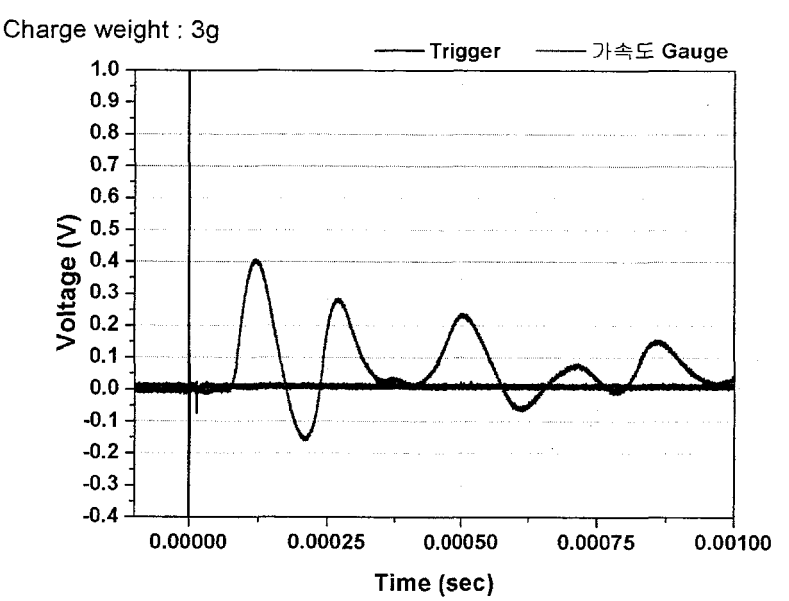
그림 3.2.11과 3.2.12는 장약량이 각각 10g, 3g인 5번 시료와 4번 시료에 대한 충격가속도 시간이력곡선을 보여주고 있다. 충격탄성파의 전파속도는 도달시간 Δt과 장약공벽에서 충격가속도 게이지까지의 거리를 이용하여 산정한 결과, 각각 3250m/sec와 3290m/sec로 높은 재현성을 보여주고 있다. 5번 시료의 가속도 시간이력곡선을 살펴보면 기폭 후 0.12ms에서 160G의 1차 피크값을 보인 후 다시 감소하여 약 0.2ms에서 약 -200G값을 보이다가 750ms에서 360G의 최대값을 보여주고 있다. 이와 같이 가속도 이력곡선이 주기적인 않은 이유는 게이지가 붙어 있는 파쇄편이 비산하였음을 의미하며, 앞에서 보여준 발파 파쇄편과 일치하는 경향을 보여주었다. 적은 장약량을 사용한 4번 시료의 경우에는 160G의 최대값을 보인 후 주기적인 시간이력곡선을 보이고 있다.



자유면 도달시간, △t = 77μsec　　충격탄성응력파 속도,V= 3250m/sec

최대 가속도, a = 360 G　　가속도 보정계수=2000G/5V

그림 3.2.11 5번 시료 충격가속도 시간이력곡선



자유면 도달시간, △t = 76μsec　　충격탄성응력파 속도 V= 3310m/sec

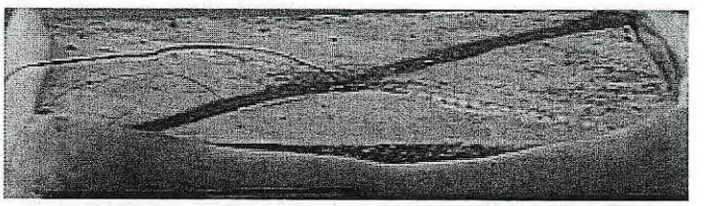
최대 가속도, a = 164 G　　가속도 보정계수=2000G/5V

그림 3.2.12 4번 시료 충격가속도 시간이력곡선

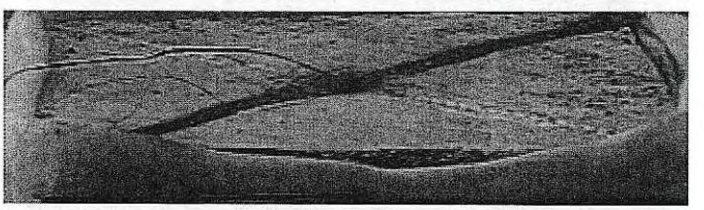
4. 초고속카메라로 촬영한 균열전파

그림 3.2.13은 노치방향으로 균열제어가 된 3번 시료에 대한 고속카메라 촬영화상을 보여 주고 있다. 기폭은 그림 3.2.13(a)와 (b)사이에서 시작되었으며 그림 3.2.13(c)는 노치방향으로의 균열(실선 화살표)과 벽면에서부터 발생된 균열(점선 화살표)를 보여주고 있다. 특히 균열발생 이후 화상을 살펴보면, 노치방향으로 발생된 파단면 내에 폭발가스와 함께 전색재가 흘러들어 밖으로 뿜어 나오고 있음을 보이고 있다. 이것은 다른 균열보다도 노치방향으로 발생된 균열의 개구폭이 가장 넓었음을 의미한다.

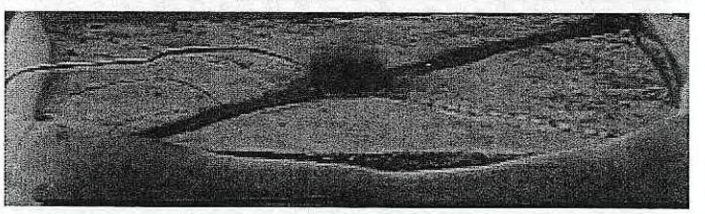
(a)



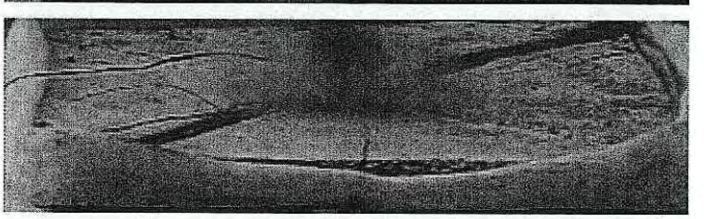
(b)



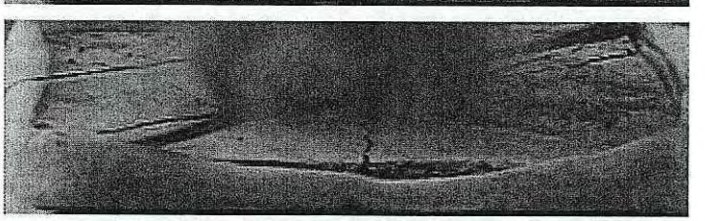
(c)



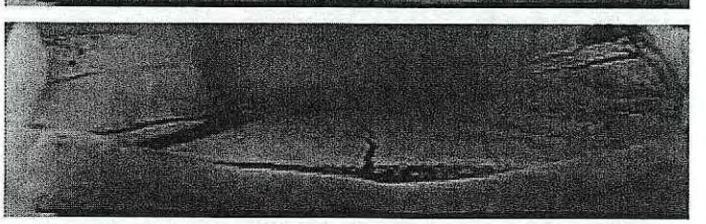
(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



그림 3.2.13 3번시료 고속카메라 화상 (1200fps)

5. 결과분석

1) 본 발파시험에서 노치효과에 의한 균열제어를 나타낸 결과는 1번과 3번 블록 시험편이다. 노치폭 12㎜, 노치길이 10~15㎜로 생성된 노치공에서는 적정 화약량으로 발파가 진행될 경우 노치효과에 의한 균열방향 제어를 할 수 있음이 판단된다.

2) 1번과 4번 시험편의 결과를 통해 일정한 노치길이에서 노치폭이 작은 경우(12㎜ 이하) 노치에 의한 균열방향 전파가 진행이 일어나지 않는다.

3) 2번 시험편의 경우 노치폭(12㎜)에 비해 노치길이(5㎜)가 매우 작은 경우 원형공과 같은 자유면 최단거리방향으로의 균열이 일어나게 된다.

4) 장약량이 동일한 4번, 3번, 2번 시료의 파괴패턴을 살펴보면, 노치의 길이비가 1 이상일 때 노치에 의한 균열제어효과가 있음을 알 수 있다.

제 3 절 노치비트 최적화 연구

이론적, 실내 모형 실험적으로 그 효과가 증명된 노치 균열 제어발파공법을 실제 터널 현장에 적절히 적용하기 위한 노치비트 최적화 실험은 크게 2가지 분야로 나누어 수행되었다. 첫째, 노치 천공작업의 시공성 실험과 둘째, 노치비트시스템의 노치효과를 충분히 발휘할 수 있는 노치공 형성 및 노치비트 파손, 마모율을 최소화하는 실험이다.

1. 노치비트 모델 개발

일반적으로 터널 발파를 위한 천공작업은 타격과 회전력을 복합적으로 가하여 원형 공을 형성시킨다. 노치공을 형성하기 위해서는 노치 팁이 부착된 특수비트에 의하여 노치형상 천공작업이 이루어져야 한다. 1차 모델에서는 먼저 원형 공을 일반비트로 천공하여 형성시킨 후 후퇴시켜 다시 특수 노치비트를 부착하여 재 천공함으로써 노치공을 형성하였다. 이 모델은 1차 천공 후 2차 노치형성의 두 가지 공정을 필요로 하여 작업시간이 기존 일반천공에 비해 2배정도 걸리는 등의 많은 문

제가 야기되었다. 그림 3.3.1은 1차 노치비트 모델을 이용한 천공작업 개념도이고, 그림 3.3.2는 1차 모델 노치비트 사진이다.

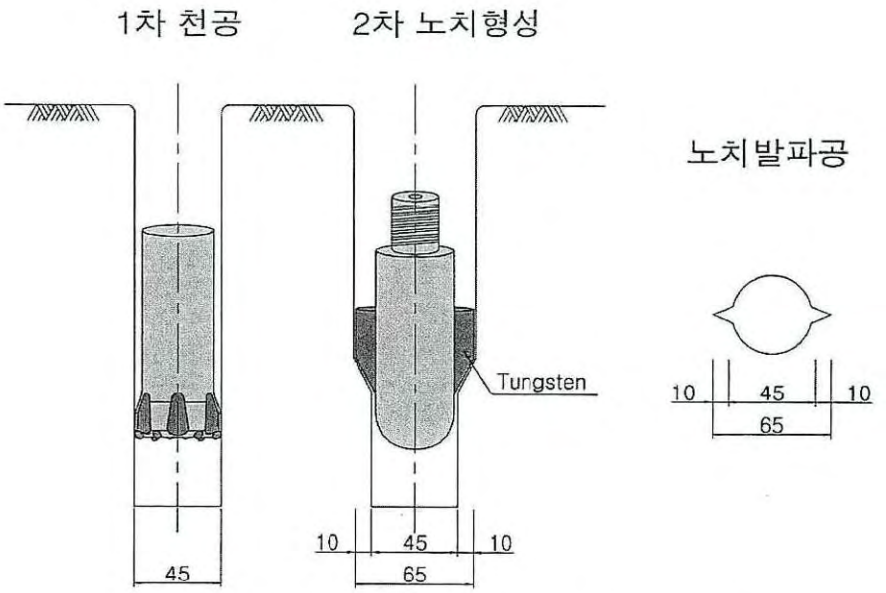
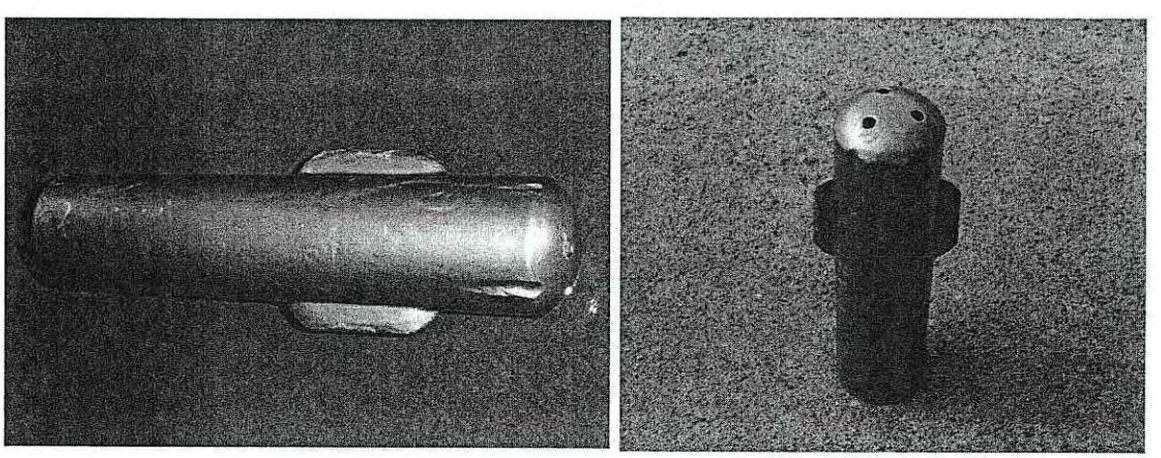


그림 3.3.1 1차 노치비트 모델 천공작업 개념도



(a)1차 모델 측면도 (b) 1차 모델 정면도

그림 3.3.2 1차 모델 노치비트 사진

1차 모델 노치비트의 시공성 결함을 보완하기 위해 그림 3.3.3의 개념과 같은 2

차 모델 노치비트를 고안하게 되었다. 이 모델은 동일공정으로 천공 및 노치 공을 형성할 수 있다는 것이 특징이다. 선단 천공비트는 일반 터널굴착용 천공비트와 같이 충격력 및 회전력을 줄 수 있도록 유지하였다. 후단에 있는 노치비트는 일정한 방향의 노치를 형성할 수 있도록 회전력은 고정시키고 전후 충격력만 전달시켜야 하는데, 이 문제에 대해서 많은 어려움이 있었다. 연구 초기에는 노치비트 회전력 제어차원에서 베어링을 장착하여 실험을 하였다. 그러나 제한적 천공비트의 직경 때문에 작은 베어링이 장착되어지므로 충격력을 견딜 수 없었다. 이 후 기계전문가의 자문을 받아 물의 윤활작용이 노치비트 회전력을 제어할 수 있다는 원리로 동일공정 노치비트 시스템을 개발하게 되었다. 그림 3.3.3은 2차 모델 노치천공 개념도이고, 그림 3.3.4는 개발된 노치비트 시스템 사진이다. 이는 1차 모델 노치비트의 2공정을 1공정으로 간소화함으로써 노치공 형성에 소요되는 시간을 기존 일반 비트와 비슷한 수준으로 단축시켰다.

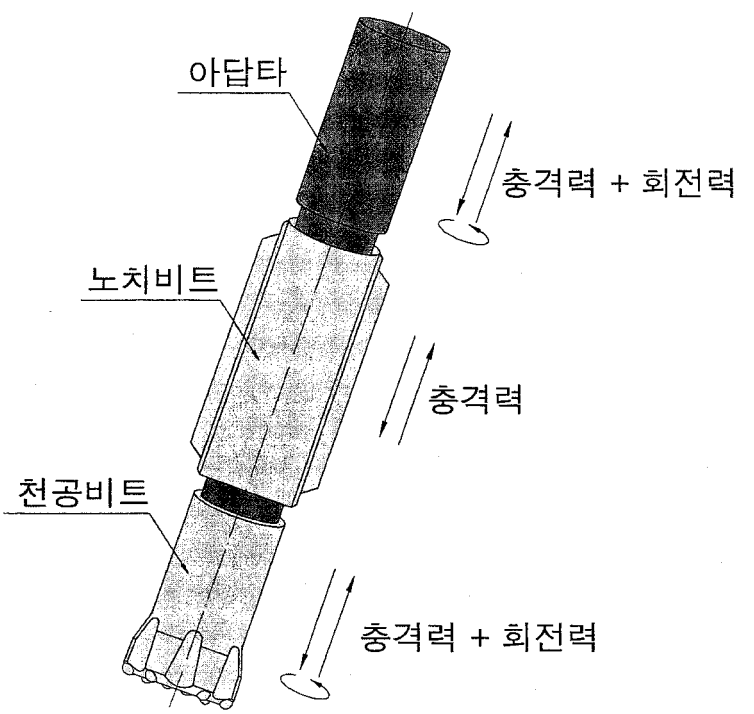


그림 3.3.3 2차 모델 노치천공 개념도

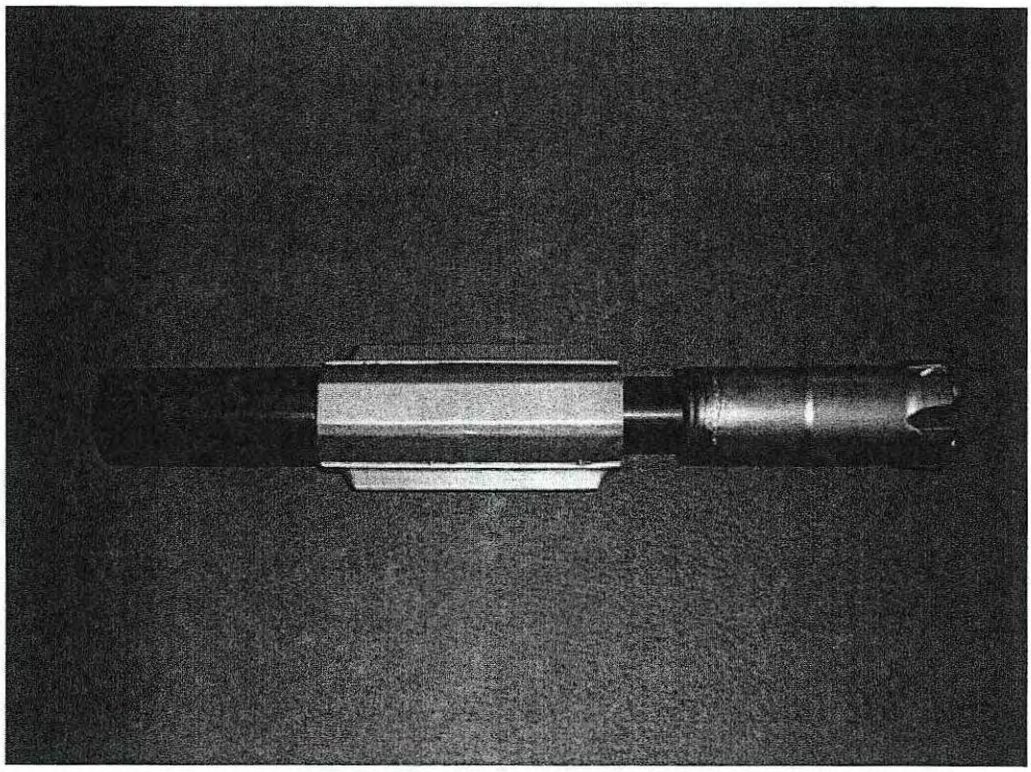


그림 3.3.4 2차 모델 노치비트 시스템

표 3.3.1은 천공효율의 확인을 위해 신공항철도 ○○현장에서 실험 측정한 결과이다. 이 지반의 암질은 화강암질 편마암으로써 일축압축강도 1,350kg/cm^2, RMR 65~80의 대체로 양호한 편이다. 천공패턴은 천공장 1.0m, 1.5m, 2.0m 로 나누었으며, 천공시간 측정은 천공장비 Setting후 실 천공시간 만을 측정하였고, 각 천공장별 10~20회 측정하여 산술평균하였다. 천공장비는 점보드릴(TomRock Power Class) 2 Boom이고, 천공경은 ∅45mm이다.

표 3.3.1 천공장 및 비트종류별 천공시간 비교

천공장	천공시간		
	일반비트 천공	일반+노치 분리천공	노치 동시천공
1.0 m	10본, 0분 58초/본	10본, 1분 30초/본	20본, 0분 59초/본
1.5 m	10본, 1분 22초/본	10본, 2분 15초/본	20본, 1분 25초/본
2.0 m	10본, 1분 51초/본	10본, 2분 42초/본	10본, 1분 53초/본

상기 표에서 나타난 바와 같이 일반공 천공 후 노치형성 분리 시공은 천공시간이 약 1.6배 정도 초과되므로 시공성이 결여된 상태이지만, 노치 동시천공은 일반비트 천공과 거의 같은 천공시간을 유지할 수 있음을 확인하였다.

2. 노치비트 및 아답타 개발

가. 노치비트 형상 개발

노치비트는 일반비트 천공영역을 확대 천공하는 역할을 하기 때문에 노치비트 형상에 따라 천공 효율성이 크게 달라질 수 있다. 따라서 최적의 노치비트 형상을 개발하기 위하여 노치공 성형 용이성, 노치 홈의 직진성, 천공 후 후퇴 시 노치비트 회수 용이성, 노치비트 마모율 최소화의 4가지 사항을 중점적으로 고려하여 test 노치비트를 제작하고 반복 실험을 수행하였다.

(1) 노치팁 높이(H) 및 각도(θ)

앞에서 언급한 노치공의 원리에 따르면 노치높이가 10mm까지는 균열 압력비(노치적용 시 균열압력/일반적용 시 균열압력)가 급격히 감소하다가 10mm이상에서는 완만히 감소하는 것으로 나타났다. 노치효과와 시공효율을 최적화하는 노치팁 높이를 결정하기 위하여 5, 8, 10, 15mm의 경우에 대해서 각각 천공시험을 실시하였다. 노치팁 높이를 5mm로 제작하여 천공작업을 수행한 결과 천공직경보다 크게 홀이 형성되므로 인하여 노치홈 형성이 거의 되지 않아 노치효과를 발휘할 수 없었다. 노치팁 높이가 15mm일 경우에는 상대적으로 노치팁이 커서 천공 시 저항을 많이 받음으로 인하여 천공시간이 다소 증가하였고 인발시 비트의 걸림 현상이 자주 발생하여 파손이 빈번히 일어났다. 따라서 실험결과를 근거로 노치의 효과도 충분히 발휘할 수 있고, 시공성도 좋은 적정 노치높이는 10mm가 가장 적합하다고 판단되었다. 그림 3.3.5는 표 3.3.1과 동일한 조건에서 일반비트와 노치팁의 높이를 변화시켜가며 평균천공속도를 측정한 결과를 나타낸다.

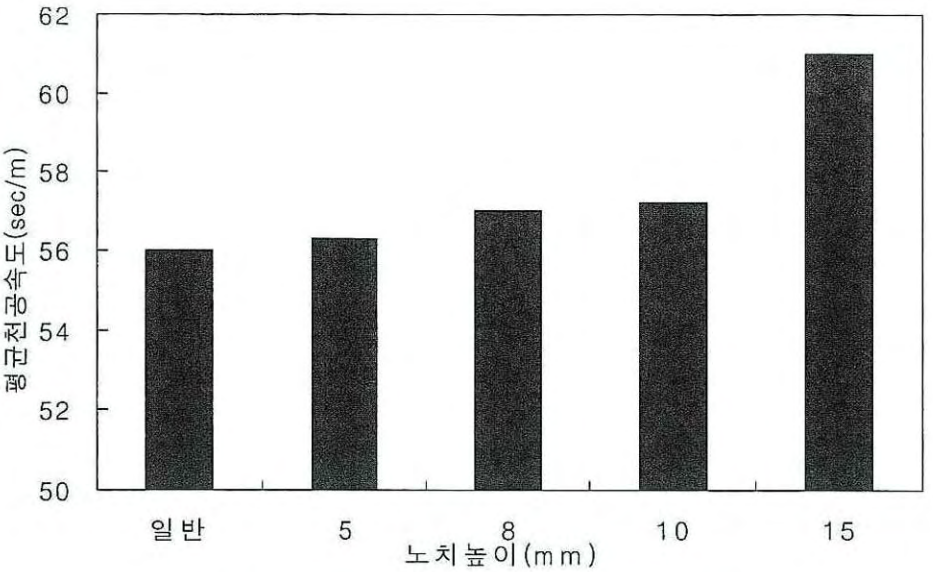


그림 3.3.5 노치팁 높이별 평균천공속도

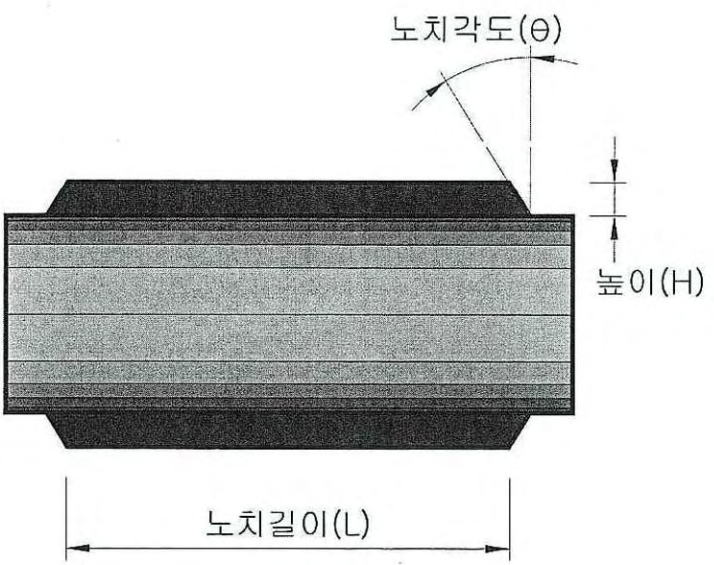


그림 3.3.6 노치비트 형상

노치팁 각도를 결정하기 위하여 45° 전·후로 30° , 70° 의 3가지 종류의 테스트를 실시하였다. 70° 의 경우에는 상대적으로 30° , 45° 에 비하여 노치팁이 작아서 가이드가 노치의 방향을 유지하는데 불리하였다. 30° 의 경우에는 천공 시 저항을 많이 받아 마모율이 크고, 천공속도도 증가했다. 따라서 천공속도, 마모율, 노치의 방향

성을 고려하여 노치팁 각도를 45° 로 선정하였다.

(2) 노치길이 선정(L)

노치비트의 길이는 노치 홈의 직진성에 가장 중요한 영향을 준다. 노치공 천공 시 노치비트의 길이가 짧으면 회전력의 영향을 많이 받아 노치 홈이 직선으로 유지되기 어려워 노치효과를 발휘할 수가 없고, 반대로 비트길이가 필요이상으로 길면 직진성은 유지되나 천공 시 저항이 커져 굴진속도가 떨어지고 후퇴 시 걸림 저항이 커져 비트 훼손을 증가시키는 경향이 있을 것으로 판단되었다. 또한, 암반의 강도에 따라서도 비트의 길이에 영향을 줄 것으로 생각되었다. 따라서 노치비트의 길이를 5, 10, 15cm로 test비트를 제작하여 천공실험을 하였다. 실험결과 3가지 비트 모두 천공관입 시작 후 노치의 방향이 비뚤어지는 현상은 없었다. 하지만, 비트길이가 5cm의 경우 막장면이 울퉁불퉁한 관계로 비트 초기 관입 전에 계획된 방향을 상실해 버려 의도한 노치공을 천공할 수 없었고, 최소한 노치길이가 10cm정도 되어야 계획된 방향의 노치 홈을 형성할 수 있었다.

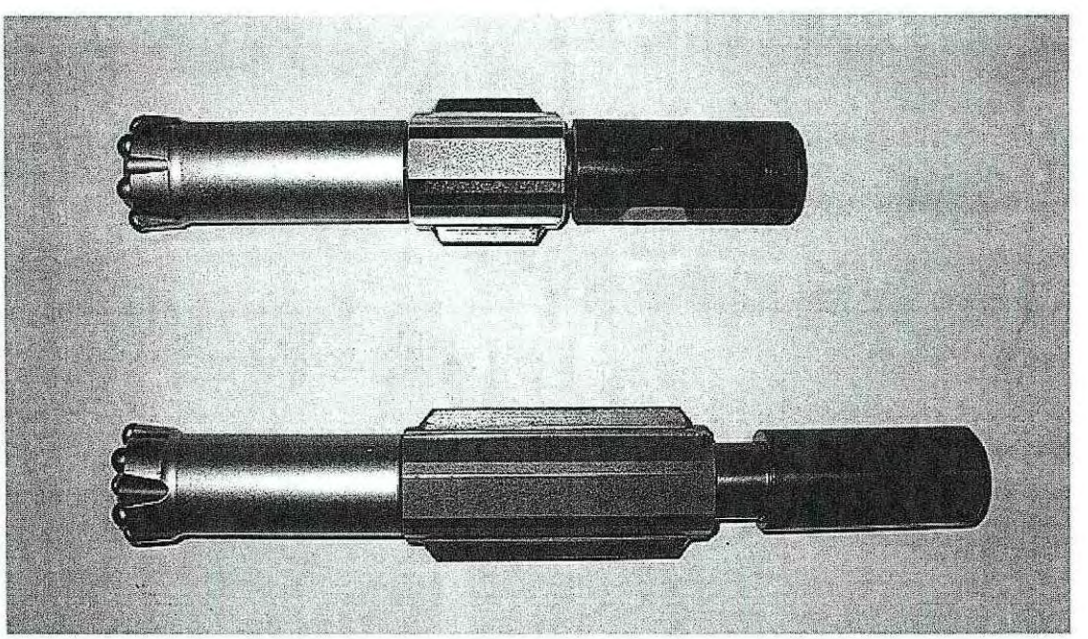


그림 3.3.7 노치길이별 Test비트(5, 10cm)

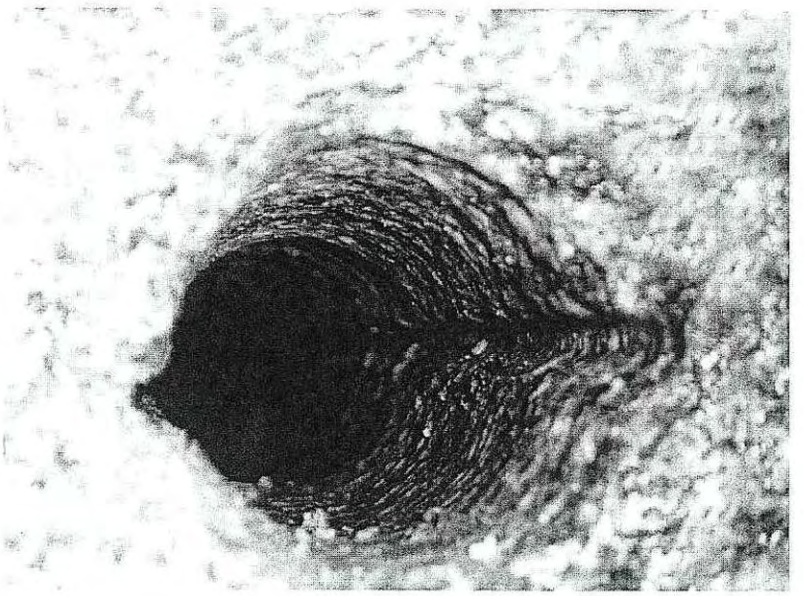
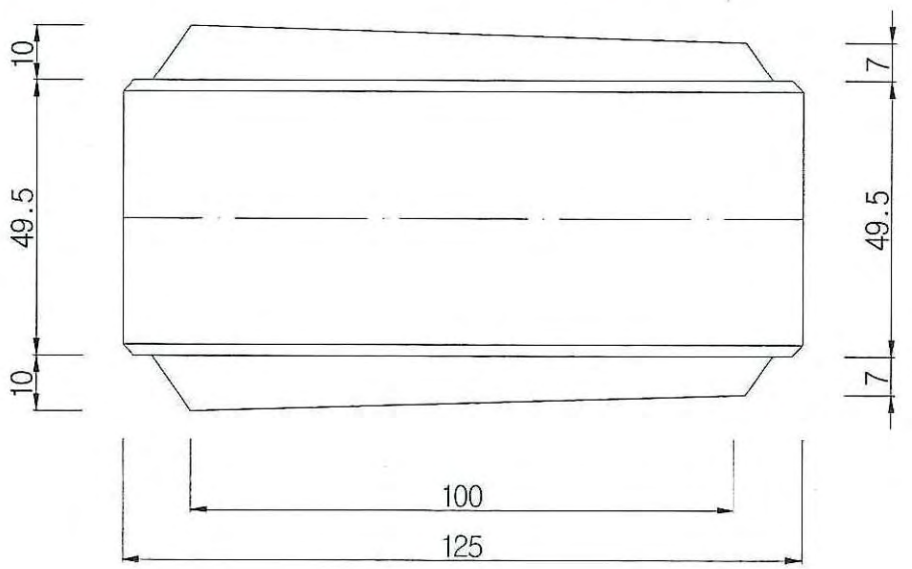


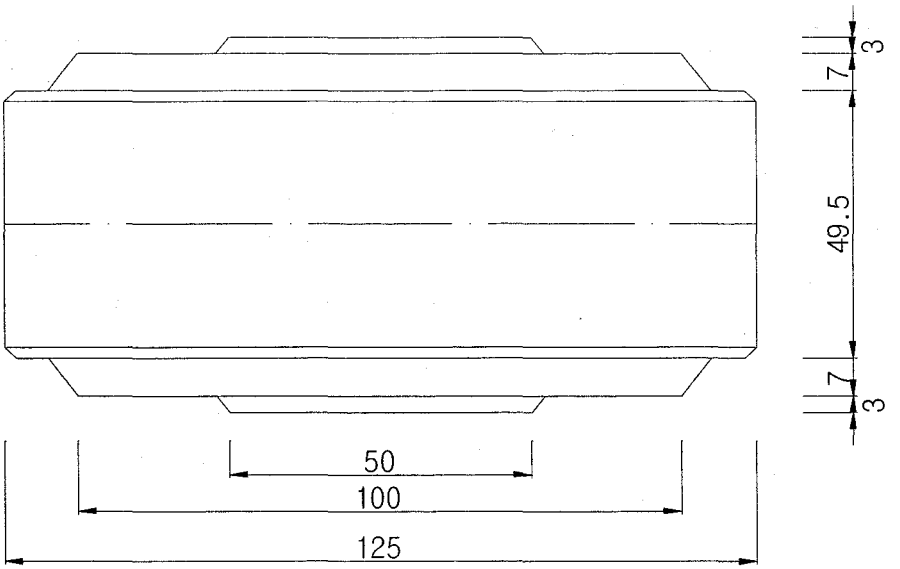
그림 3.3.8 천공된 노치공

(3) 노치모양 선정

노치비트의 노치길이 실험에 의해 노치길이는 5, 10, 15cm 중 10cm 정도가 적당하나 천공 후 후퇴 시 노치면의 슬러지 적체로 인한 저항이 커서 노치 팁의 파괴가 종종 발생하는 경향이 있다. 이를 개선하기 위하여 저항을 적게 받도록 그림. 3.3.9와 같이 노치모양을 변화시켜 천공실험을 실시하였다.



(a) 1단 경사 노치비트



(b) 2단 노치비트

그림 3.3.9 1단 경사 및 2단 노치비트

1단 경사 노치비트의 노치형성 천공속도는 기존 1단 경사가 없는 노치비트와 동일하였으나, 천공 후 인발시 걸림 저항이 다소 해소되어 시공성이 개선되었다. 하지만, 노치비트를 양쪽으로 사용하지 못하고 한쪽만 사용해야 함으로써 비트의 수명이 반으로 단축되는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해서 기존 노치길이 5cm 비트의 인발시 걸림 저항이 없음을 감안하여 중앙부 5cm 노치를 형성한 후 좌 우측에 2.5cm의 노치를 형성하는 2단 노치비트를 개발하였다. 이 2단 노치비트를 개발함으로써 기존 노치비트의 결함을 보완할 수 있었다.

(4) 노치비트의 제작

그림 3.3.10과 같이 노치비트의 제작과정은 Steel Body부와 Notch부로 나눌 수 있다. Steel body부는 선삭과 밀링에 의한 기계 가공을 한 후 내구성 향상을 위해 800~850° C로 단계별 열처리가 필요하다. 이때 너무 높은 열처리는 Steel Body 자체의 강성이 높아 마모율은 적으나 Steel 자체의 깨짐이 발생하고 낮은 열처리는 깨짐은 없으나 무뎌지는 현상이 발생될 수 있다. Notch부는 적정 노치형상 금형을 제작한 후 이 금형기에 Tungsten Carbide 분말을 넣고 프레스기로 적정 압력을 가

한 후 1,400° C 소결로에서 20시간 정도 소결시켜 노치 팁을 제작한다. 그 후 Steel Body에 제작된 초경합금 노치 팁을 접합시킨 후 제차 550~600° C의 열처리를 가하고 마무리 선삭, 밀링과정, 양 끝단 부에 800° C 고주파 경화 열처리 등을 거쳐 노치비트를 제작하지만, 제작과정 중 열처리의 노하우는 고도의 기술을 요하고 있다.

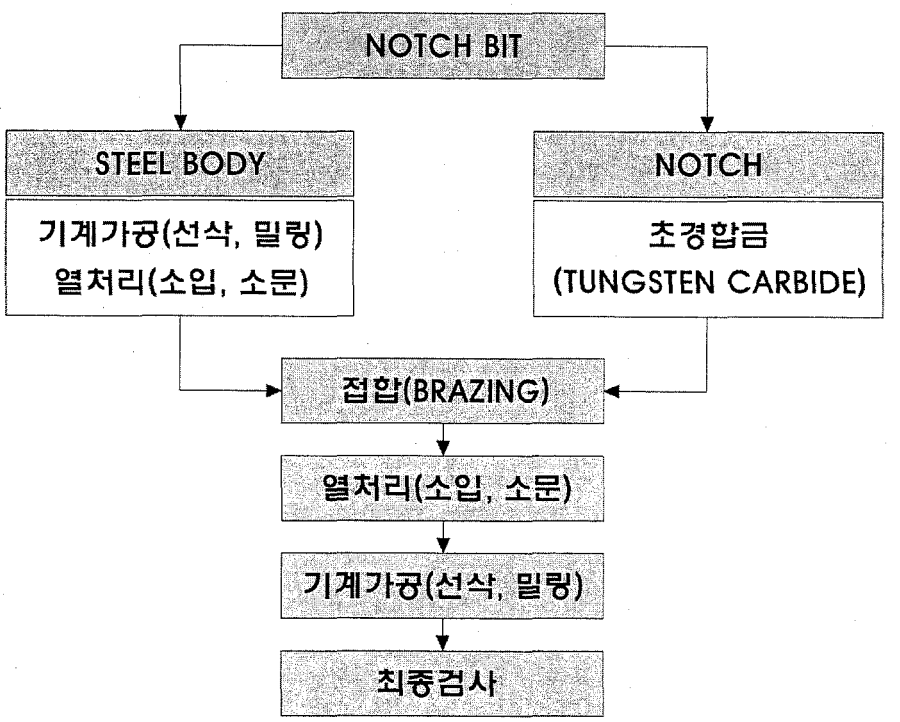
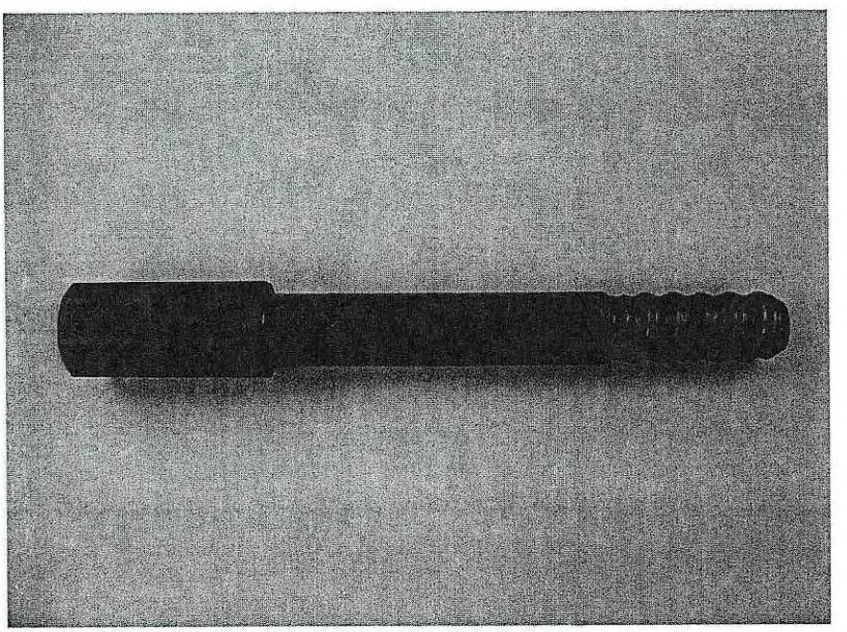


그림 3.3.10 노치비트 제작흐름도

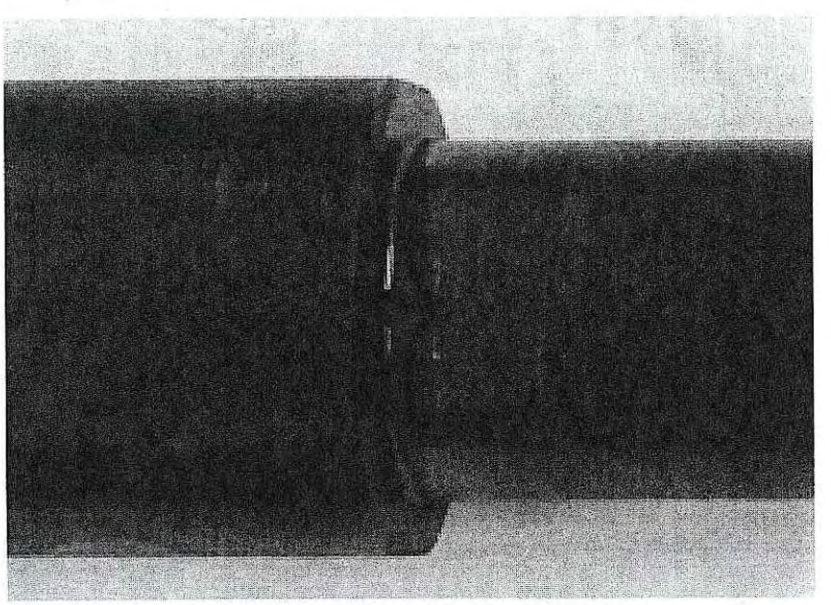
나. 노치 아답타 개발

선단부 비트와 로드사이 노치비트를 장착하기 위해 부착하는 장치를 노치 아답타라 한다. 이 노치 아답타는 충격력, 회전력 중 회전력을 제어하고 충격력만 노치비트에 전달 해 주는 역할을 한다. 그런데 천공 시 타격력으로 인하여 노치비트와 아답타의 접촉 충격이 지속적으로 발생하여 아답타 접촉부와 노치비트 끝단부의 파손이 자주 발생하는 문제점이 발생하였다. 또한 회전력 제어 때 발생된 열로 접촉부의 손상이 쉽게 발생하며, 아답타 외면과 노치비트 내면에 슬러지 끼임이 발생하

는 경향이 빈번했다. 이를 개선하기 위하여 베어링 등의 장착을 시도하였으나 빈번히 실패한 후 아답타 접촉부에 출수구를 만들어 주는 방법을 고안하였다. 이 결과 회전력 제어 윤활작용은 물론 발열감소, 원활한 슬러지 제거를 할 수 있었다. 또한 노치비트와 아답타 접촉부에 순간적인 피막작용으로 접촉부 무뎌짐을 완화하는데 크게 기여할 수 있었다. 그림 3.3.11은 새로 개발된 아답타로써 (a)는 아답타 전면도이고 (b)는 출수구 부분 확대 상세도이다.



(a)아답타 전면도



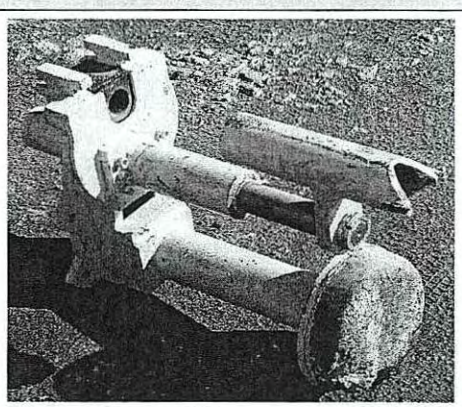
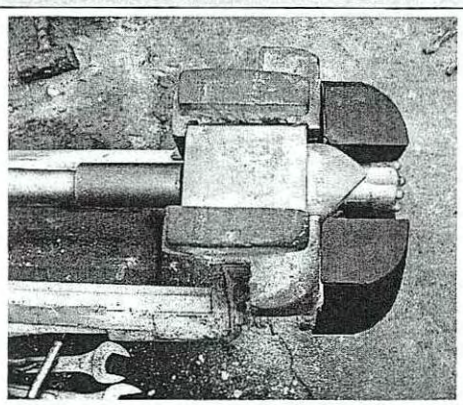
(b) 출수구 상세도

그림 3.3.11 새로 개발된 아답타

제 4 절 노치가이드 최적화 연구

노치공 천공 시 노치비트를 천공장비에 부착하여 쓸 수 있도록 해주고, 비트관입 전에 노치의 방향을 일정하게 유지시켜 주도록 하기 위한 장치가 노치가이드이다. 1, 2차 모델은 표 3.4.1과 같다. 1차 모델은 점보드릴 헤드부를 제거 한 후 1차 모델과 같은 노치가이드를 제작해 부착하여 사용하였다. 그러나 이 모델은 탈부착이 어렵고 암반밀착 받침부와 일체형으로 되어 있어 무게가 약 50kg으로 무거워 사용하기에 불편하였다. 이를 보완하기 위해 표 3.4.1의 2차 모델 사진과 같은 장비를 제작하였다. 이 모델은 기존 점보드릴의 헤드부를 탈착하지 않고 헤드 부싱 장착 U부에 노치가이드 몸체만 삽입하여 노치 홈이 휘어지지 않도록 하는 기능을 유지하도록 하였다. 노치가이드 2차 모델의 장점은 1차 모델에 비하여 장치가 작고 가벼워 탈부착이 쉽다. 단점으로는 기존 U부의 크기가 제한되어 부가기능 추가가 제한되는 점이 있다.

표 3.4.1 노치가이드의 1, 2차 모델의 특징

구 분	노치가이드의 1차 모델	노치가이드의 2차 모델
형 태		
크 기	242mm × 476mm × 440.5mm	80mm × 80mm × 153mm
무 게	약 50kg	약 8kg
특 징	▷ 장치가 크고, 무거움 - 점보 붐의 작동에 지장 - 탈, 부착의 어려움 ▷ 장치 작동상 문제 - 원통내부 스프링 작동 불량 - 축의 전·후진 시 슬러지 유입	▷ 장치가 작고, 가벼움 - 붐에 미치는 영향이 없음 - 탈, 부착이 쉬움 ▷ 작동에 문제가 없음 - 내부에 다른 장치가 없음 - 간단하여 고장 등이 없음

3차 모델은 2차 모델의 단점인 비트 후진 시 완충작용이 없어 노치비트 후단부가 가이드의 노치 유입부에 걸려 비트 팁의 깨짐이 발생되는 경우를 보완한 것이다. 이를 보완하기 위해서는 기존 U부보다 큰 U부를 부착하였고 그림 3.4.1과 같이 비트 후진 시 노치가이드 부에 걸려도 스프링의 완충작용으로 비트의 깨짐이 없도록 하였다. 그러나 3차 모델의 단점은 제작 사진과 같이 4개의 스프링을 사용하여 조립이 복잡하고, 이 4개의 스프링에 의해 배출되는 슬러지 일부가 끼이는 현상이 발생된다는 점이다. 또한, 비트가이드의 유도 홈 부분이 마모되었을 때는 가이드 몸체를 교체해야만 하는 경제적 손실이 발생되었다. 이러한 복합적인 문제를 해결한 것이 4차 모델(그림 3.4.2)이며, 이 모델의 특징은 배출되는 슬러지가 스프링 부분에 끼이지 않도록 1개의 큰 스프링으로 간소화 한 것이다. 그리고 이 새로운 가이드는 노치 유도 홈 부분이 마모되어 전반적인 노치몸체를 교환하는 경제적, 시간적 손실을 고려해 가이드 몸체 후미부에 부싱 부를 장착하여 부싱부가 먼저 마모되면 교체할 수 있도록 제작하였다.

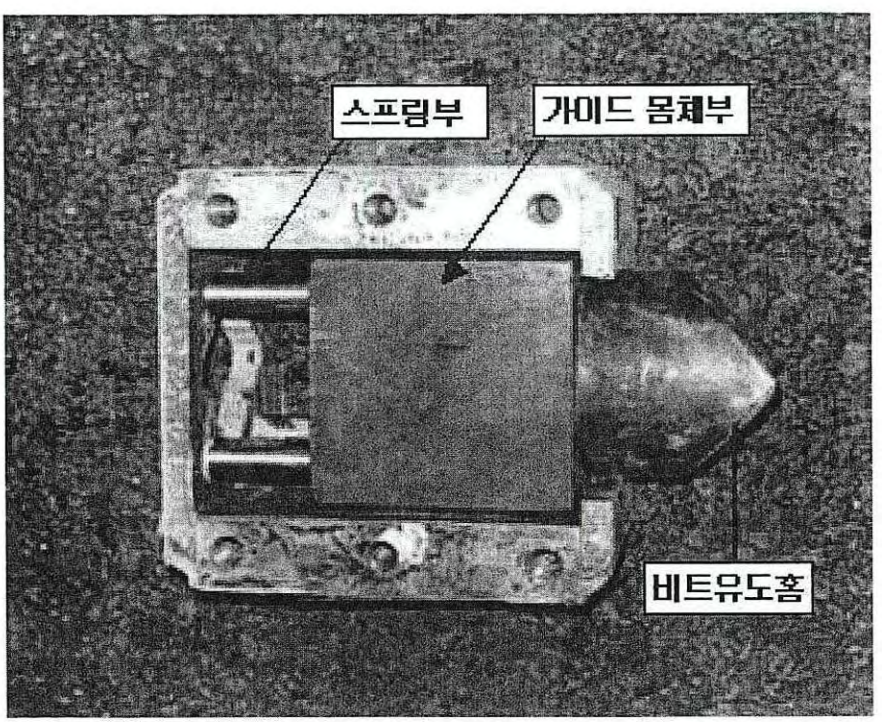


그림 3.4.1 3차 모델비트 가이드

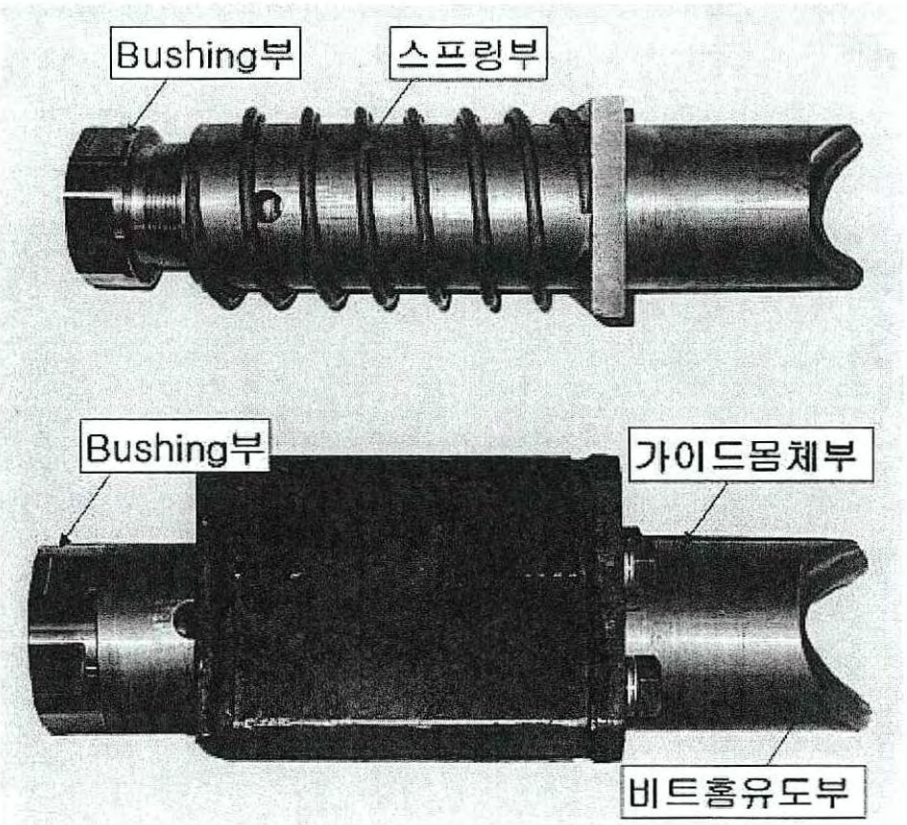


그림 3.4.2 4차 모델비트 가이드

제 5 절 노치비트 내구성 확보를 위한 금속재료 연구

1. 노치비트시스템 재료

노치비트 시스템은 노치비트, 노치아답타, 노치가이드 부분으로 분류된다. 이들의 주재료는 몸체 부분인 합금강과 천공할 수 있는 노치팁부 텅스텐으로 대별될 수 있다. 실제 노치효과(Notch Effect)는 기계분야에서 강의 절개를 용이하게 하기 위해 주로 사용되어 왔다. 이는 금속재료 표면에 요철을 주어 요철부분에 형성된 응력집중에 의하여 인장, 피격을 증대시켜 요구하는 방향으로 절개하는 기술이다.

가. 노치비트 BODY부 합금강 강재

강이란 기본적으로 철(Fe)과 2.0% 이하의 탄소(C)와의 합금을 말하는 것으로 현재 공업, 건축 및 토목용 재료로서 가장 널리 사용되고 있는 금속재료이다. 모든 금속재료의 생산량 중에서 강이 차지하고 있는 비율은 대략 80% 정도이다. 이와 같이 강이 널리 사용되는 이유는 가격이 저렴하고 여러 가지 성질을 다양하게 변화시킬 수 있고, 또 우수한 강도와 함께 소성가공이 용이하므로 원하는 형상의 제품으로 제조하기가 쉽기 때문이다. 즉, 자동차의 차체에 사용되는 강판은 연성이 우수하여야만 하는 반면에 절삭공구에 사용되는 강은 충분히 경화되어 내마모성이 커야만 한다. 또한, 자동차의 축이나 대형선박의 프로펠러 축 등은 강도와 인성을 겸비하여야 한다. 그리고 면도날도 극히 경도가 우수해야만 한다. 이와 같이 매우 연한 강판에서부터 극히 경한 공구강에 이르기까지 여러 가지 다양한 용도에 적합한 성질을 갖추어 주는 것은 주어진 강의 적절한 열처리에 의해서 주로 이루어지고 있다. 일반적으로 강에 열처리를 실시하는 이유는 다음 사항 중 어느 한가지 목적을 달성하기 위함이다.

① 냉간 가공에 의하여 발생된 응력을 제거한다거나 또는 불균일 냉각에 의한 응력을 제거하기 위한 것이다.
② 열간 가공된 강의 결정립 조직을 미세화 시키기 위한 것이다.
③ 바람직한 결정립 조직을 유지하기 위한 것이다.
④ 경도를 감소시키고 연성을 향상시키기 위한 것이다.
⑤ 경도를 증가시켜서 내마모성을 향상시키기 위한 것이다.
⑥ 사용 중 충격에 견딜 수 있도록 인성을 향상시키기 위한 것이다.
⑦ 피삭성을 향상시키기 위한 것이다.
⑧ 공구강의 절삭능력을 향상시키기 위한 것이다.
⑨ 전기적 성질을 향상시키기 위한 것이다.
⑩ 강의 자기적 성질을 개선하기 위한 것이다.

강은 열처리를 통하여 매우 다양한 미세조직과 성질이 얻어지기 때문에 열처리변수의 적절한 조합에 의해서 우리가 원하는 미세조직과 성질을 얻을 수 있다. 여기서 최종적인 미세조직과 성질을 결정해주는 기본적인 열처리변수는

첫째로, 어느 온도로 가열할 것인가 ?

둘째로, 이온도에서 얼마동안 유지할 것인가 ?

셋째로, 냉각은 얼마나 빨리 할 것인가 ?

하는 등의 3가지가 있다.

이러한 변수들을 결정해 주기 위한 자료로서 매우 중요한 역할을 하는 것이 평형상태도(equilibrium phase diagram)이다. 이 상태도는 특히 첫 번째 변수인 열처리온도를 결정하기 위해 없어서는 안 될 결정적인 자료가 된다.

(1) 상태도의 기본적인 의미

상태도란 여러 가지 조성의 합금을 용융상태로부터 응고되어 상온에 이르기까지 상태의 변화를 나타낸 그림을 말한다. 즉 합금의 성분비율과 온도에 따른 상태를 나타내는 그림으로서, 횡축에는 조성(%), 종축에는 온도(℃)로서 표시하고 있다. 그런데 여기서 횡축의 조성 즉 성분비율을 나타내는 데에는 중량비율(wt%)이 보통 사용되지만 경우에 따라서는 원자비율(at%)로 나타낼 때도 있다.

(2) 농도표시법

전술한 바와 같이 일반적으로 합금의 조성은 중량비율로서 나타낸다. 만일 어떤 합금 100g이 80wt%A와 20wt%B로 되어 있다면 이는 80g의 A와 20g의 B를 함유한 것이 된다. 한편 이론적인 계산을 하는 경우에는 원자수의 비율로서 농도를 표시하는 원자비율을 사용하는 일이 있다. 80at%A와 20at%B로 되어 있는 합금에서 A와 B의 원자 비는 80:20=4:1이 된다. 따라서 우리는 중량비율을 원자비율로, 원자비율을 중량비율로 환산해야만 할 때가 많이 있다. 이 wt%와 at%와의 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$W_A = a_A \cdot X_A(a_A \cdot X_A + a_B \cdot X_B)$$

$$X_A = \frac{\frac{W_A}{a_A}}{\frac{W_A}{a_A} + \frac{W_B}{a_B}}$$

여기서 W_A, W_B : 각각 A성분과 B성분의 중량%

X_A, X_B : 각각 A성분과 B성분의 원자%

a_A, a_B : 각각 A성분과 B성분의 원자량

한 예로 Sn의 원자량 Sn=118.69 120이며 Pb의 원자량 Pb=207.19 210이다. Pb의 at% XPb=30%라 할 때 Pb의 중량비율 W_{Pb}는

$$W_{Pb} = \frac{a_{Pb} X_{Pb}}{a_{Sn} \cdot X_{Sn} + a_{Pb} \cdot X_{Pb}} = \frac{210 \times 0.3}{120 \times 0.7 + 210 \times 0.3} = 42\%$$

가 된다.

(3) Fe-Fe3 C상태도와 상

순철은 910℃이하에서는 체심입방격자이고, 910℃ 이상1,390℃까지는 면심입방격자이다. 여기에 탄소원자가 함유되면 두 가지의 변화가 나타난다. 즉 변태온도가 낮아지고 변태가 단일온도에서 일어나는 것이 아니라 어느 온도범위에 걸쳐서 일어나게 된다. 이러한 내용이 그림 3.4.1에 잘 나타나 있다. 엄격하게 말해서 시멘타이트(Fe_3 C)로 불리는 금속간 화합물은 평형상이 아니기 때문에 이 상태도는 평형상태도가 아니다. 어떤 조건하에서 시멘타이트는 더욱 안정한 상인 철과 흑연으로 분해 될 수 있다. 그러나 Fe_3 C는 한번 형성되기만 하며 실질적으로 매우 안정하므로 평형 상으로 간주된다. 이러한 이유로 인해서 그림 3.5.1의 상태도는 준안정 상태도이다. 상(phase)이라는 것은 물리적, 화학적 그리고 결정학적으로 균일한 부분을 말하는 것으로, 이것은 뚜렷한 계면에 의해서 합금의 다른 부분과 구분된다. Fe-Fe_3 C 상태도에 나타나는 고상의 종류에는 4가지가 있다. 즉, α페라이트(ferrite), 오스테나이트(austenite), 시멘타이트 및 δ 페라이트 등이다. 이 각각의 상들을 구체적으로 나타내면 그림 3.5.1과 같다.

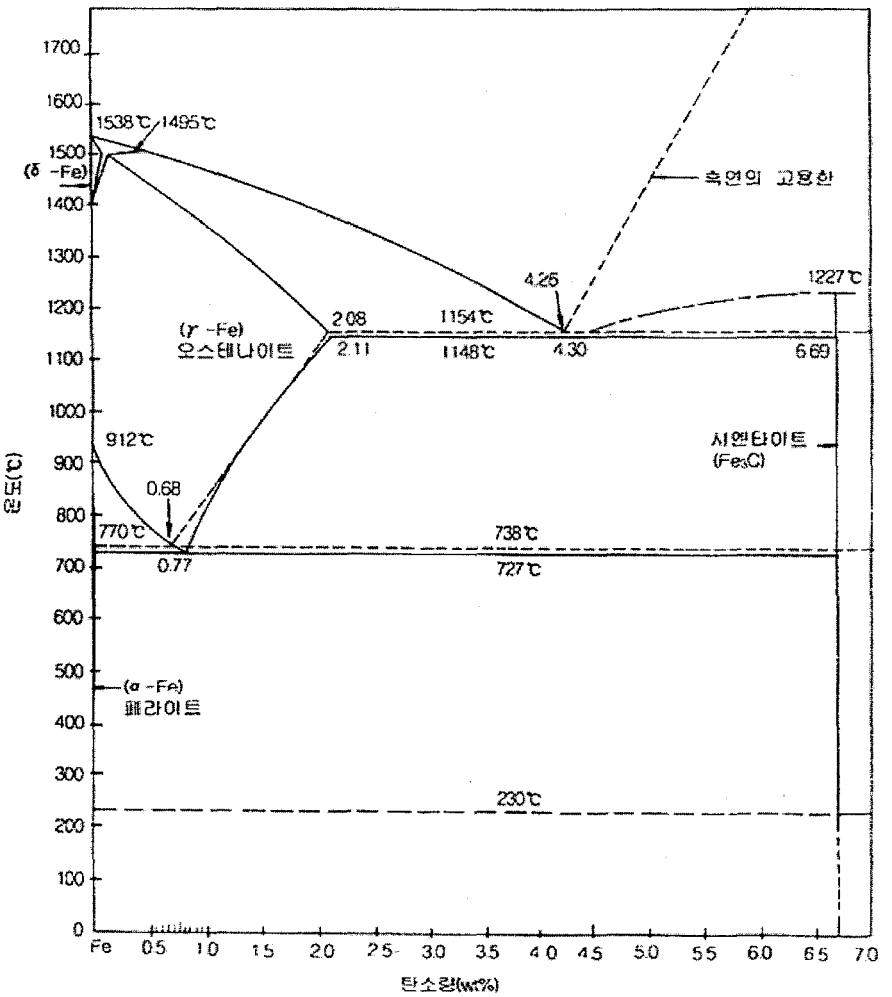


그림 3.5.1 Fe-C상태도 (실선:Fe-Fe_3 C 상태도, 점선:Fe-C상태도)

그림 3.5.1의 Fe-Fe_3C 상태도에는 3개의 불변반응(Invariant reaction)이 있는데, 그 반응은 일정한 온도에서 일어나며 3개의 상을 포함한다.

첫째, 포정반응(Peritectic Reaction)이다. 0.53%C의 조성을 갖는 액상과 0.09%C의 조성을 갖는 δ 페라이트가 1495℃의 일정한 온도에서 0.17%C의 조성을 갖는 γ 오스테나이트로 변화하는 반응이다. 그래프의 왼쪽 윗부분에서 다음과 같은 반응을 파악할 수 있다.

$$\text{액상}(0.53\%C) + \delta\text{ 페라이트}(0.09\%C) \xrightarrow{1495℃} \gamma\text{ 오스테나이트}(0.17\%C)$$

이 반응은 고온에서 일어나며, 정상적으로는 γ 오스테나이트는 상온에서 존재할

수 없다.

둘째, 공정반응(Eutectic Reaction)이다. 4.3%C의 조성을 갖는 액상이 1148℃의 일정한 온도에서 2.08%C의 조성을 갖는 γ오스테나이트와 6.67%C의 시멘타이트로 변화하는 반응이다. 그래프의 중앙부분에서 다음과 같은 반응을 파악할 수 있다.

$$\text{액상(4.3\%C)} \xrightarrow{1148℃} \gamma\text{오스테나이트(2.08\%C)} + \text{시멘타이트(6.67\%C)}$$

일반적으로 탄소강에서는 1.2%C 이상의 탄소를 함유하지 않기 때문에 공정반응이 중요하지 않으나, 2.0%C 이상의 탄소를 함유하는 주철에서는 매우 중요하다.

셋째, 공석반응(Eutectoid Reaction)이다. 0.8%C의 조성을 갖는 γ오스테나이트가 723℃의 일정한 온도에서 0.02%C의 조성을 갖는 α페라이트와 6.67%C의 시멘타이트로 분해되는 반응이다. 그래프의 왼쪽 아랫부분에서 다음과 같은 반응을 파악할 수 있다.

$$\gamma\text{오스테나이트(0.8\%C)} \xrightarrow{723℃} \alpha\text{ 페라이트(0.02\%C)} + \text{시멘타이트(6.67\%C)}$$

① α 페라이트

α철에 탄소가 함유되어 있는 고용체를 α 페라이트 또는 단순히 페라이트라고 부르며, BCC 결정구조를 가지고 있다. 상태도에서 나타내듯이 α 페라이트의 최대 탄소고용도는 723℃에서 0.02%이므로 페라이트에 고용할 수 있는 탄소량은 매우 적은 것을 알 수 있다. 또한 α 페라이트의 탄소고용도는 온도가 내려감에 따라서 감소하여 0℃에서 약 0.008%정도이다. 탄소원자는 철원자에 비해서 비교적 원자크기가 작으므로 철의 결정격자내의 침입형자리(interstitial site)에 위치한다. 침입형자리는 4면체 틈자리(tetrahedral site)와 8면체 틈자리(octahedral site)의 두 종류가 있는데, BCC인 α 페라이트에서는 4면체 틈자리인 $(0\frac{1}{2}\frac{1}{4})$의 크기가 크고, 그 침입형자리에 들어갈 수 있는 구의 최대반경은 0.35Å이다. 따라서 0.77Å의 반경크기를 갖는 탄소원자가 이 침입형자리에 들어가게 되면 탄소원자의 크기가 침입형자리보다 상대적으로 매우 크기 때문에 격자변형을 일으키게 된다. 이것

이 α 페라이트내의 탄소고용도를 적게 하는 중요한 이유이다.

② 오스테나이트

γ철에 탄소가 고용되어 있는 고용체를 오스테나이트(austenite)라고 하며, FCC 결정구조를 가지고 있다. 탄소고용도는 그림 3.5.1에서 볼 수 있듯이 1148℃에서 2.08%로 최대이며, 온도가 내려감에 따라서 감소하여 723℃에서 0.8%로 된다. 따라서 탄소고용도는 α 페라이트보다 매우 크다. 또한 α 페라이트에서와 마찬가지로 오스테나이트중의 탄소는 침입형자리에 위치하는데, FCC의 8면체 틈자리인 $(0\frac{1}{2}0)$의 크기가 8면체 틈자리인 $(\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2})$보다 크고, 8면체 틈자리에 들어갈 수 있는 구의 최대반경은 0.51Å이다. 그러므로 0.77Å의 반경을 갖는 탄소원자가 8면체틈자리에 들어가면 α 페라이트에서와 마찬가지로 격자변형을 일으키게 되지만, 그 변형정도는 α 페라이트보다는 작다. 이것이 오스테나이트의 탄소고용도가 α 페라이트보다 크게 되는 중요한 이유이기도 하다. 한편 이와 같이 오스테나이트와 α 페라이트의 탄소고용도가 차이나기 때문에 대부분의 강을 경화 열처리하는데 있어서의 중요한 근거가 되는 것이다.

③ 시멘타이트

철탄화물(Fe_3C)인 시멘타이트는 고용체라기보다는 금속간화합물로서, 6.67%의 탄소를 함유하고 있다. 결정구조는 그림 3.5.2와 같이 단위격자 당 12개의 Fe원자와 4개의 C원자를 가지는 사방정(orthorhombic)이고, 매우 강하고 취약한 성질을 가지고 있다.

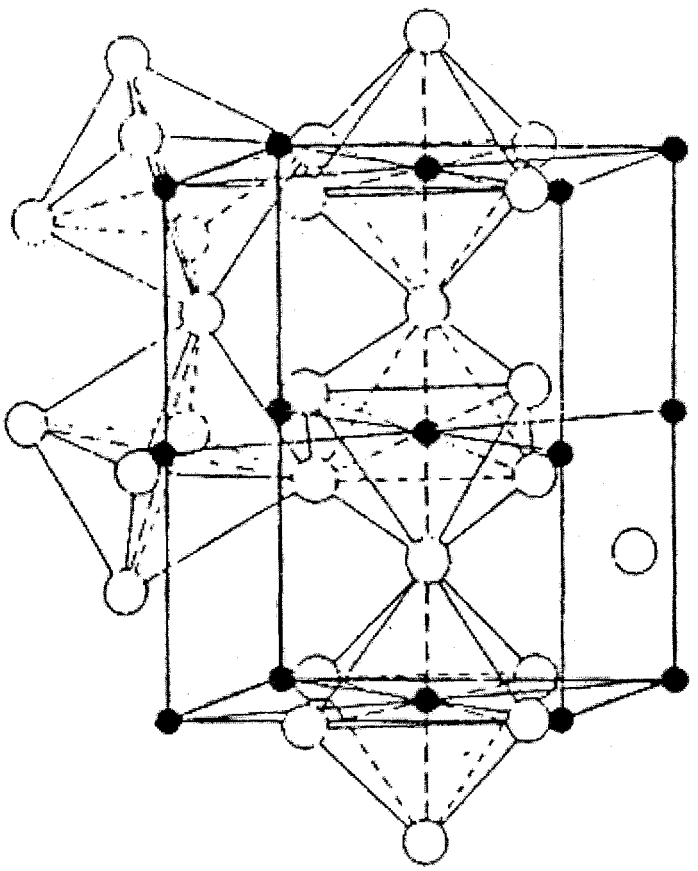


그림 3.5.2 시멘타이트(Fe_3C)의 원자구조 (●:탄소원자, ○:철원자)

④ δ 페라이트

δ 철의 탄소고용체를 δ 페라이트라고 하며, α 페라이트와 마찬가지로 BCC 결정구조를 가지지만 격자상수가 다르다. δ 페라이트내의 최대 탄소 고용 도는 1495℃에서 0.09%이다.

(4) Fe-Fe3 C 상태도의 해설

탄소는 철과 화합하여 시멘타이트(Fe_3C)의 형태로 되는 경우와 또는 탄소단체의 흑연으로 되는 경우가 있다. 강의 경우는 주로 시멘타이트의 형태로 존재하지만 주철에서는 흑연과 시멘타이트의 두 가지 형태가 나타난다. 보통 시멘타이트는 고온으로 가열하면 철과 흑연으로 분해되므로 준안정상이라고 할 수 있고, 오히려 흑연이 안정상으로 간주된다. 그림 3.5.1중에서 실선이 Fe-Fe_3C계 상태도를 나타

내고, 점선이 철-흑연 계 상태도를 나타내는 것이다. 철-흑연 계 상태도는 주철에서 주로 고려되는 것이므로 여기서는 Fe-Fe_3 C 상태도에 대하여만 설명하고자 한다. 한편 실제 열처리작업에서 1200℃ 이상을 사용하는 경우가 극히 드물지만 참고적으로 함께 설명하였다. 특히 1200℃ 이하의 부분은 그림 3.5.3에서 구체적으로 설명하였다.

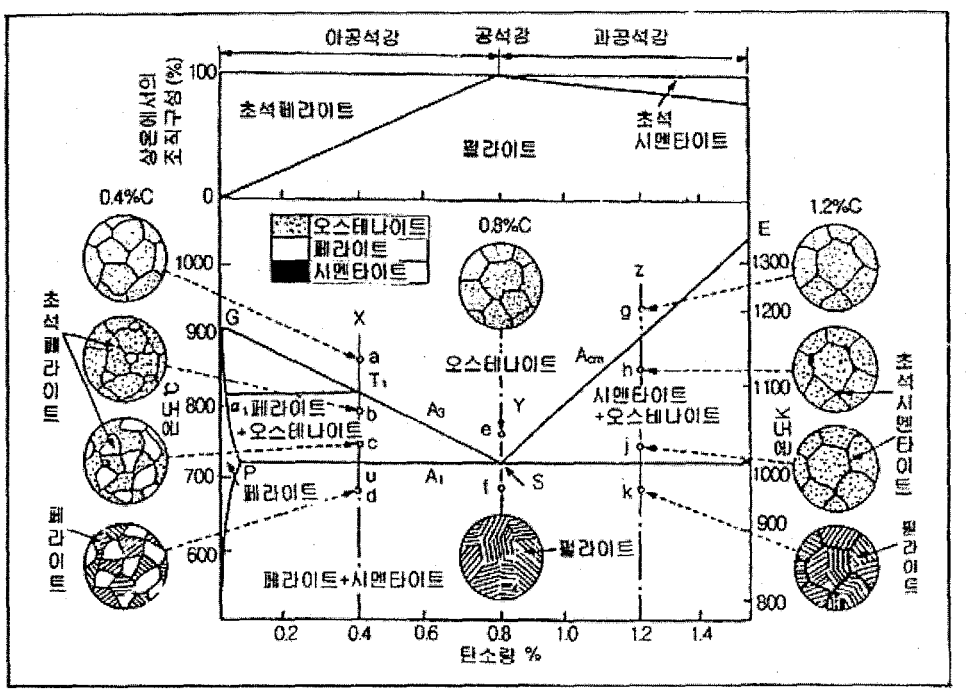


그림 3.5.3 Fe-Fe_3 C계 평형상태도와 변형조직도

탄소강(Carbon Steel)은 대량 생산이 가능하고, 가격이 비교적 저렴하며 기계적 성질이 우수하므로 현재 사용되고 있는 철강 재료의 대부분을 차지하고 있다. 또한 상온 및 고온에서 가공성이 좋고, 탄소함유량에 따라서 성질변화가 현저하며, 특히 여러 가지 열처리 방법에 의해서 기계적 성질을 다양하게 변화시킬 수 있는 장점이 있기 때문에 그 용도가 매우 광범위하다.

그림 3.5.3은 Fe-Fe_3C 상태도의 일부로서, 강의 변태와 조직을 설명하는데 필요한 부을 나타낸 것이다. 0.8%C를 함유하는 조성의 탄소강(S점)이 723℃ 이하로 냉각될 때 오스테나이트가 페라이트와 시멘타이트로 분해되는 공석반응이 일어나므로 공석강(Eu rec toid Steel)이라고 하며, 이 반응이 일어나는 온도를 A1선이라

고 부른다. 또한 공석반응에 의한 변태를 공석변태, 펄라이트(pearlite)변태, 또는 A1변태라고 부른다. 순철이 γ철로 변태하는 온도는 910℃(Ac3점)이지만 아공석강이 γ오스테나이트 단상으로 변태하는 온도는 GS선 이상이므로 이 GS선을 A3선이라고 한다.

상온에서의 조직구성을 보면 탄소 함유량이 0.8%이하는 아공석강, 0.8%는 공석강, 0.8%~2.0%는 과공석강이라 한다. 과공석강의 탄소함유량은 0.8%~2.0% 범위지만 공업적으로 생산되는 과공석강은 대부분이 0.8%~1.2% 범위의 탄소량을 가지고 있다. 탄소량이 1.2% 이상이면 강의 성질이 매우 취약해지므로 거의 사용되지 않고 있다. 탄소강의 기본조직의 종류는 위의 세 가지의 종류로 분류될 수 있고 각 종류의 각각의 조직을 살펴보면 아공석강은 초석페라이트+펄라이트, 공석강은 100% 모두 펄라이트, 과공석강은 초석시멘타이트+펄라이트로 구성되어 있다. 탄소함유량이 2.0% 이상이면 주철이다.

(5) 탄소강의 서냉시 조직변화

여기서 서냉이라 함은 평형냉각에 가까운 냉각속도를 말하는 것으로서 실제적인 열처리에서는 얻을 수도 없고 또 큰 의미도 없는 냉각속도이지만, Fe-Fe3C 상태도를 통하여 평형냉각시의 미세조직의 변화를 이해하는 데는 매우 중요하다.

① 공석강

0.8%C의 공석탄소강을 750℃ 정도로 가열하여 충분한 시간동안 유지하면 조직은 균일한단상의 오스테나이트가 되는데, 이 과정을 오스테나이트화(Austenitizing)라고 한다. 이 공석강을 평형에 가까운 냉각속도로 서냉시킬 때 그림 3.5.3에서 e로 표시된 온도, 즉 공석온도 직상에서는 아직까지 조직은 오스테나이트 상태로 있다. 그러나 온도가 더 내려가서 공석온도 이하로 되면(그림 3.5.3의 f) 오스테나이트는 α페라이트와 시멘타이트(Fe_3C)의 혼합조직으로 변태하게 된다. 이 조직은 페라이트와 시멘타이트가 교대로 반복되어지는 층상조직(lamellar structure)을 형성하고 있으며, 그 형태가 진주(pearl)와 비슷하기 때문에 펄라이트(Pearlite)라고 부른다. 이와 같이 펄라이트는 단상조직이 아니라 페라이트와 시멘타이트의 2상 혼합조직이라는 사실에 유의해야 할 것이다.

② 아공석강

0.4%C의 아공석 탄소강을 900℃(그림 3.5.3의 a)으로 가열하여 충분한 시간동안 유지하게 되면 공석탄소강에서와 마찬가지로 균일한 오스테나이트로 된다. 그리고 이 아공석강을 그림 3.5.3의 b점(약 775℃)까지 서냉시키면 오스테나이트 결정립계에서 초석 페라이트(proeutectoid ferrite)가 우선적으로 핵생성하기 시작한다. 이 강을 다시 c점까지 서냉시키면 초석페라이트는 오스테나이트 속으로 계속해서 성장해간다. 이때 페라이트가 형성된 지역의 과잉탄소는 오스테나이트-페라이트 계면으로부터 오스테나이트 쪽으로 밀려나므로, 남아있는 오스테나이트의 탄소량은 점점 많아지게 된다. 따라서 A1 변태온도 직상인 c점에 도달되면 남아 있는 오스테나이트의 탄소량은0.4%에서0.8%로 증가하게 되고, A1 변태온도인 723℃ 직하인 d점에 도달되면 남아있는 오스테나이트는 공석반응에 의해서 펄라이트로 변태하게 된다. 펄라이트를 구성하고 있는 페라이트는 초석 페라이트와 구별하기 위해서 공석 페라이트(eutectoid ferrite)라고 부른다.

③ 과공석강

1.2%C의 과공석강을 950℃(그림 3.5.3의 g점)에서 충분한 시간동안 유지하게 되면 공석강에서와 마찬가지로 균일한 오스테나이트로 된다. 이 강이 그림 3.5.3의 h점 온도로 서냉되면 오스테나이트 결정립계에서 초석 시멘타이트가 핵생성 되어 성장하게 된다. 다시 이 강이 j점까지 냉각되는 동안에 초석 시멘타이트는 계속 성장해 가면서 오스테나이트에 있는 탄소를 고갈시키게 된다.

따라서 이 오스테나이트는 A1 변태온도 이하로 냉각되면서 공석반응에 의한 펄라이트로 변태하게 된다. 펄라이트를 구성하고 있는 시멘타이트는 초석 시멘타이트와 구별하기 위해서 공석 시멘타이트(eutectoid cementite)라고 부른다. 아공석강에서와 마찬가지로 공석온도인 723℃ 직상에서 남아 있는 오스테나이트는 723℃이하로 냉각 시 펄라이트로 변태한다.

(6) 금속의 열처리 종류

실제적으로 금속의 열처리 종류는 담금질(quenching), 뜨임(tempering), 불림(normalizing), 풀림(annealing), 표면강화 등이 있다. 담금질은 재료의 경도와 강도를 높이기 위한 작업으로써 재료를 일정온도로 가열하여 (오스테나이트화 온도)일정시간 유지한 후에 물이나 기름 (때에 따라서는 공기 중)중에 빠르게 냉각하여 재료의 경도를 높이는 작업이다. 뜨임은 담금질 처리 후 굉장히 경도가 높아져 있기 때문에 인성이 전혀 없다. 너무 강해 부러지기 쉽다는 말이다. 이 재료를 뜨임을 통해 인성을 부여하는 것이다. 일반적으로 150~200℃ 사이에서 이루어지는 저온뜨임, 200~400℃에서 이루어지는 중온뜨임, 500℃ 이상에서 이루어지는 고온뜨임으로 분류 된다.중온 뜨임 시에는 트루스타이트조직을, 고온 뜨임 시 에는 소르바이트조직을 얻는 것이 일반적이다. 불림은 재료를 표준 조직으로 만들기 위한 작업이다. 때로는 가공성을 높이기 위해서 불림처리를 하기도 하지만 일반적으로는 가공 후 담금질 처리 시 변형을 줄이기 위한 작업으로 행해지고 있다. 일반적으로 재료를 일정온도로 가열하여(오스테나이트화 온도) 공기 중에 냉각하여(강제송풍냉각) 재료의 표준조직을 얻을 수 있다. 풀림은 말 그대로 재료를 연하게 하기 위한 처리이다. 가공을 쉽게 하기 위한 풀림(연화풀림), 응력을 제거하기 위한 풀림(응력제거풀림), 완전풀림 등으로 종류가 나뉘어 진다. 풀림처리는 일반적으로 재료를 일정온도로 가열 유지한 후 노 내에서 냉각하여(노냉) 재료를 연하게 만들어 준다. 표면강화는 재료의 표면만을 단단하게 만드는 열처리방법이다. 세부종류에는 침탄(표면의 탄소농도를 높인 후에 담금질하여 경도를 높이는 방법) 고주파, 화염경화(재료의 표면만을 급가열하여 담금질하여 경도를 높이는 방법) 질화(재료의 표면에 질소를 침투시켜 재료를 경하게 만드는 방법) 코팅 및 도금 (재료와는 다른 재료를 표면에 코팅하여 재료를 경하게 만드는 방법) 등이 있다.

표 3.5.1 합금강 강재의 성분 및 기계적 성질

강종류	종류의 기호	화학성분(%)				
		C	Si	Mn	P	S
니켈크롬 몰리브덴 강재	SNCM489	0.36~0.43	0.15~0.35	0.60~0.90	0.03이하	0.03이하
	SNCM489	0.13~0.20	0.15~0.35	0.80~1.20	0.03이하	0.03이하
	SNCM489	0.12~0.18	0.15~0.35	0.35~0.60	0.03이하	0.03이하

나. 노치비트 TIP부 텅스텐 강재

백색 또는 회백색의 백금 비슷한 금속으로 α형과 β형의 두 가지가 있는데, 모두 등축정계에 속한다. α형은 공기 중에서 안정하지만, β형은 불안정하여 자연발화한다. 시중 판매품의 순도는 99.75~99.99%이다. 습한 공기 중에서는 산화된다. 상온의 물과는 반응하지 않지만, 고온에서는 산화물이 된다. 묽은 황산이나 묽은 염산과 가온하면 약간 침식당한다. 진한 질산과는 뜨거울 때 잘 녹고, 왕수와는 반응한다. 알칼리융해로도 잘 녹는다. 텅스텐을 가함으로써 탄소만을 주요 합금원소로 하고 있던 강의 특성을 개선한 일종의 합금강이다. 탄소 0.6% 정도, 텅스텐 2 %까지의 것은 끌이나 자석의 재료, 탄소 1% 이상, 텅스텐 1~2.5%의 것은 절삭공구에 사용되며, 몇 % 이상 텅스텐을 가한 것은 고온용 다이나 신선용 공구 ·단조용 공구로 사용된다. 보통 800℃ 근방에서 물속에 담금질하는데, 공구는 200 ℃ 정도, 고온 다이는 600 ℃ 전후에서 뜨임하여 사용한다. 용도는 전구나 진공관의 필라멘트, 용접용 전극, 전기접점 등에 사용되며 또한 합금으로서는 고속도강에 약 18%, 영구자석강에 5~6%, 스테라이트 계통의 내열 내식 합금에 5~22% 첨가된다. 그리고 탄화물은 대단히 단단하여 소결탄화물 합금으로서 공구에 사용된다.

표 3.5.2 텅스텐특성과 용도 및 화학성분

합금명	순도 (%)	비 중 (gm/㎥)	특징 및 용도
텅스텐 (Tungsten)	99.95	19.3	초고온에서 사용이 가능하고, 높은 경도를 가짐. 단점으로는 가공성이 나쁨. 용도로는 절삭공구, 선반. 전기용접용 아크봉, 전구용 필라멘트 등

2. 노치비트 제작

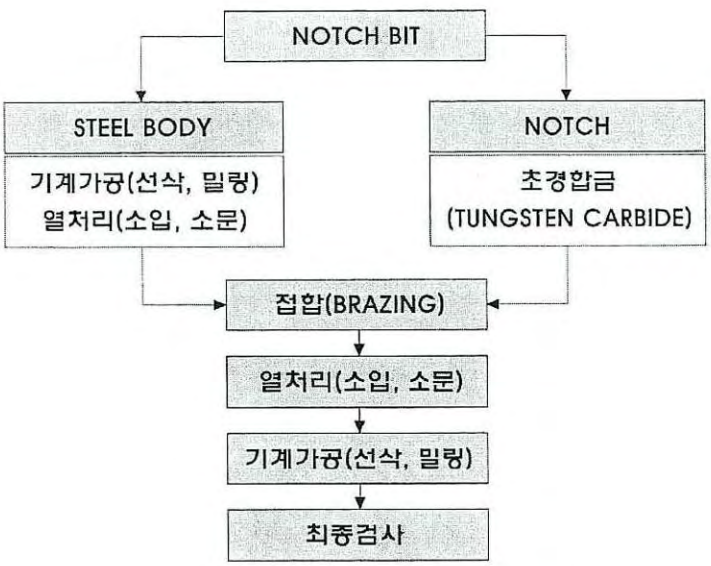


그림 3.5.4 노치비트 제작흐름도

그림 3.5.4와 같이 노치비트의 제작과정은 Steel Body부와 Notch Tip부로 나눌 수 있다. Steel body부는 선삭과 밀링에 의한 기계가공을 한 후 내구성 향상을 위해 1,800~2,500°C 로 단계별 열처리가 중요한 과정이다.

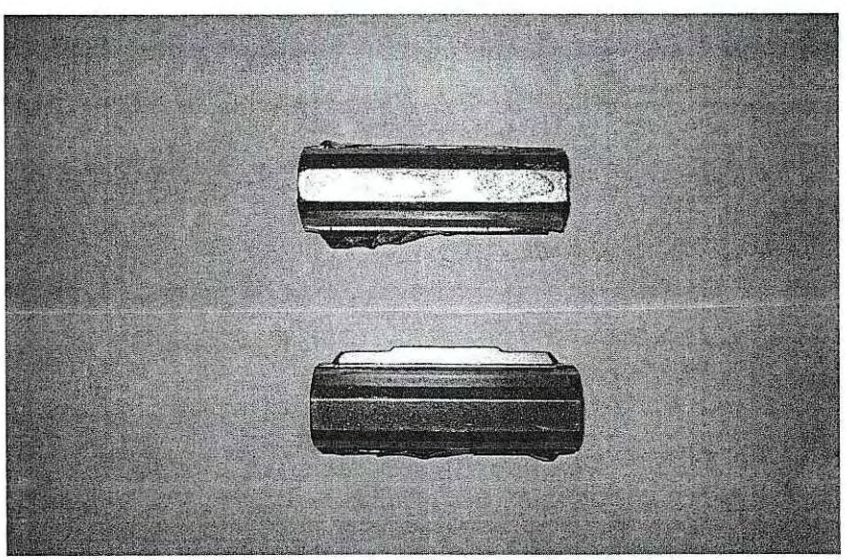


그림 3.5.5 노치비트의 깨짐 현황

이 때 너무 높은 열처리는 Steel Body부 자체의 강성이 높아 마모율은 적으나 Steel 자체의 깨짐이 발생하고 낮은 열처리는 깨짐은 없으나 무뎌지는 현상이 발생됨으로 이의 적절성을 높여주기 위해서는 열처리 기술이 대단히 중요한 과제이다. 또한, 노치팁은 성형 및 소결과정에 결함이 있을 때 그림 3.5.5와 같이 팁이 깨짐이 발생하기도 한다.

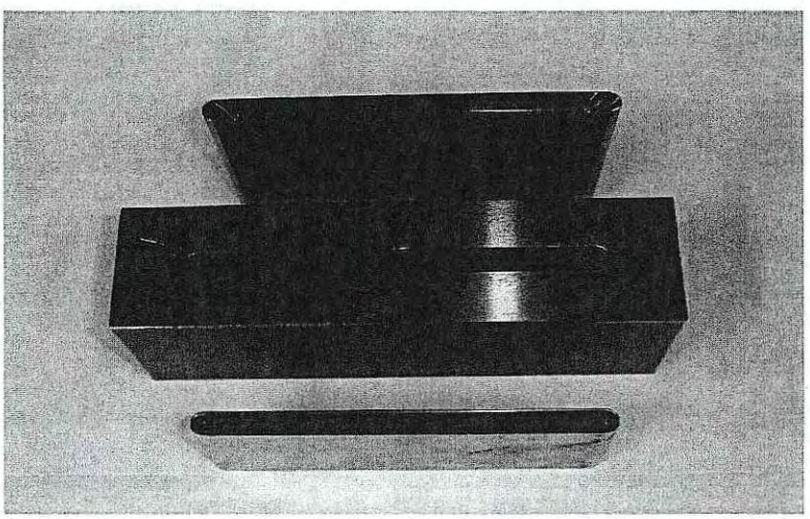


그림 3.5.6 노치비트 성형 금형기

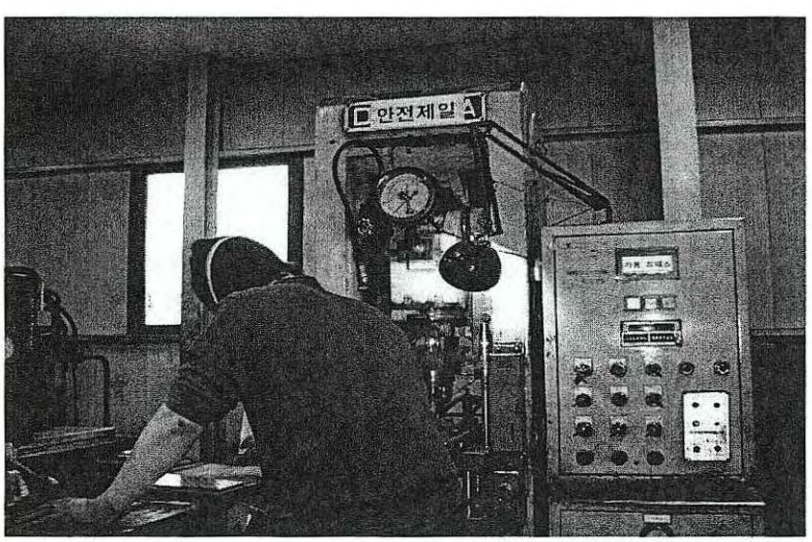


그림 3.5.7 압력기

Notch부는 그림 3.5.6과 같이 적정 노치형상 금형을 제작한 후 이 금형기에 Tungsten Carbide 분말을 넣고, 그림 3.5.7과 같이 압력기에서 일정한 압력을 가

하여 노치비트 팁의 형상으로 성형을 시킨다.

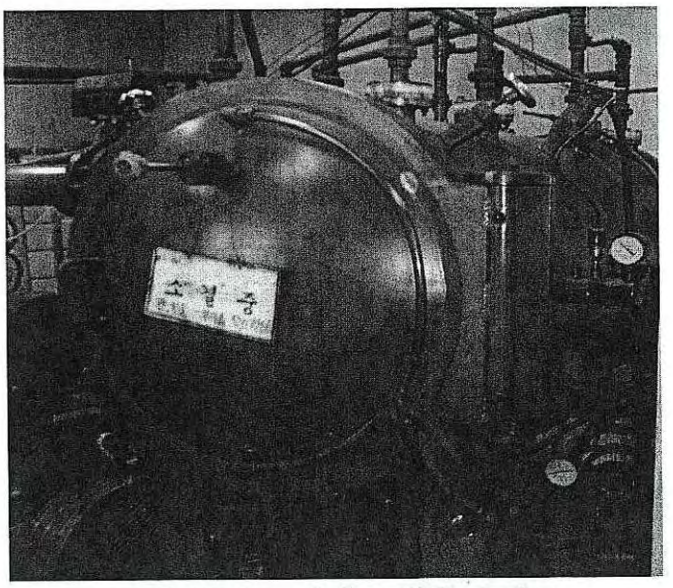


그림 3.5.8 노치비트 성형 소결로

알맞은 압력으로 성형시킨 후 그 형상에 주의를 기울이며, 그림 3.5.8과 같은 소결로에 넣고 고온의 온도로 성형시킨다. 그림 3.5.9는 노치 팁의 최종 성형된 모습이다.

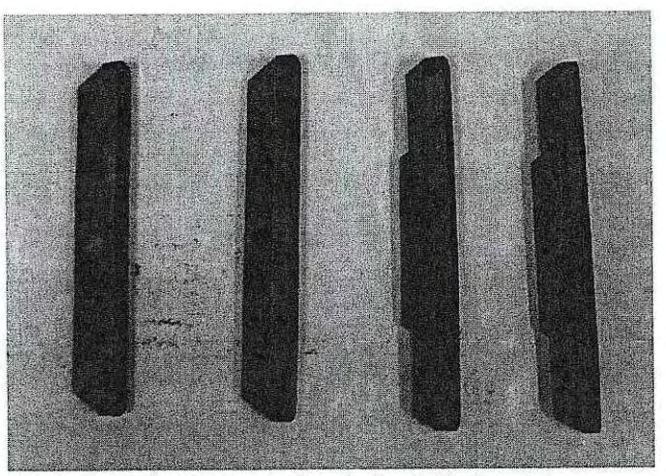


그림 3.5.9 노치 팁의 성형된 모습

이 최종 초경합금 노치 팁을 제작된 Steel Body에 접합시킨 후 제차 500~600°C의 열처리를 가한 후 마무리 선삭, 밀링과정을 거쳐 노치비트를 제작하지만, 제작과정 중 열처리의 노하우는 고도의 기술을 요하고 있다.

제 6 절 디지털 영상측량에 의한 노치 발파공 파단면 평가

1. 파단면 생성을 위한 시험편 시험발파

가. 발파시험용 시험편

장약공 형상별 발파에 의해 생성되는 파단면의 비교·분석을 위해 5개의 암석시험편(포천 화강암)을 제작하였다. 화강암은 국내 석재자원의 90% 이상을 차지하며(한국지질자원연구원, 2007), 포천 화강암은 포천 지역에 생산되는 화강암으로 대부분의 건축재료로 사용되고 있다. 포천 화강암은 조립질의 완정질 암석이며 장석류가 다량 함유되어 연분홍색조를 띠고 있다(그림 3.6.1). 주요 구성성분은 조립질의 석영, 장석류와 흑운모이다. 포천 화강암은 강도 및 마모저항성이 우수하며 박리현상에 의한 것으로 보이는 미세 균열의 방향성을 보여준다(이춘오 외, 2006). 발파시험에 사용된 포천 화강암은 1m × 1m × 1m의 크기를 가진 정육면체 형태로 제작되었다. 각 암석시험편은 서로 다른 천공형상과 장약량으로 발파가 이루어지기 때문에 이를 구분하기 위하여 각 암석 시험편에 번호를 부여하였다. 그림 3.6.2는 발파시험을 위해 번호가 부여된 암석시험편을 나타낸다. 본 발파시험에 앞서 시험용 시험편 채석현장에서 암석을 채집하여 일축압축강도시험을 하였다. 표 3.6.1과 3.6.2는 일축압축강도시험을 통해 얻어진 포천 화강암의 물성이며 그림 3.6.3은 시험 후 시험편의 균열을 스케치한 것을 나타낸다.

시험에 사용된 포천 화강암은 포천의 동일한 지역 내 동일한 채석현장에서 채석되었으며 육안으로 관찰시 절리 및 균열이 관찰되지 않기 때문에 5개의 시험편의 조건은 동일하며 무결한 암석으로 가정을 하였다.

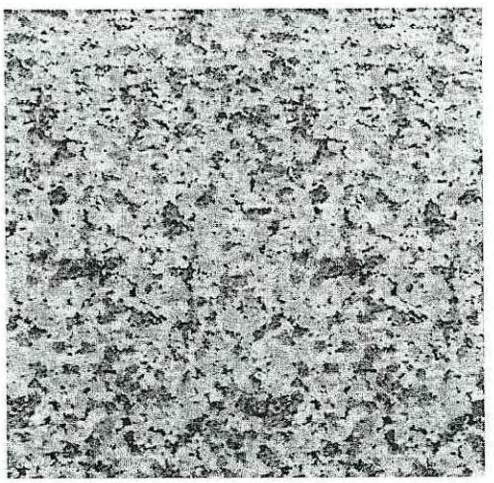
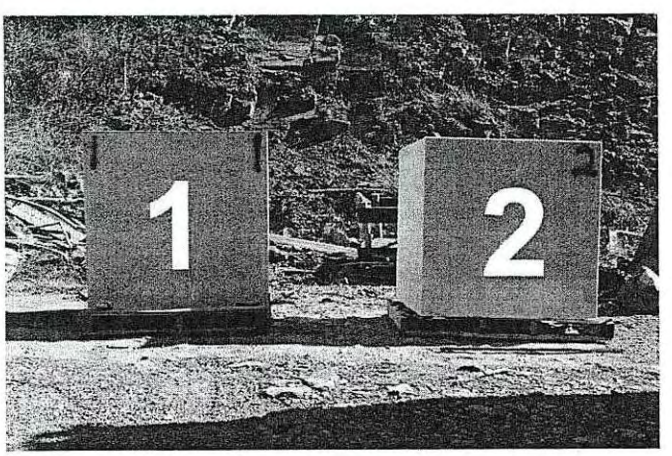
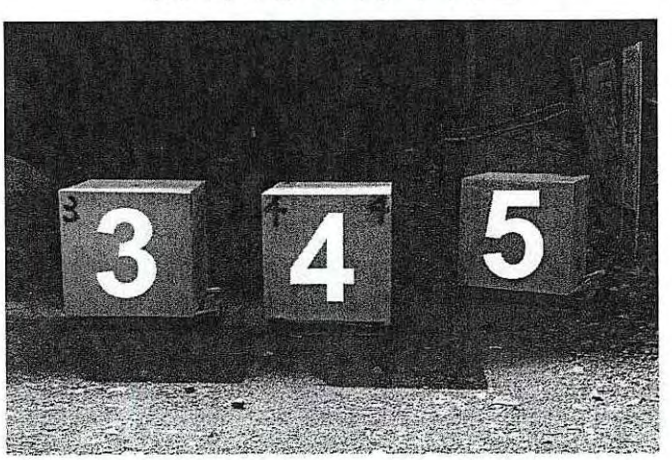


그림 3.6.1 포천 화강암



(a) 1, 2번 발파암석시험편



(b) 3, 4, 5번 발파암석시험편

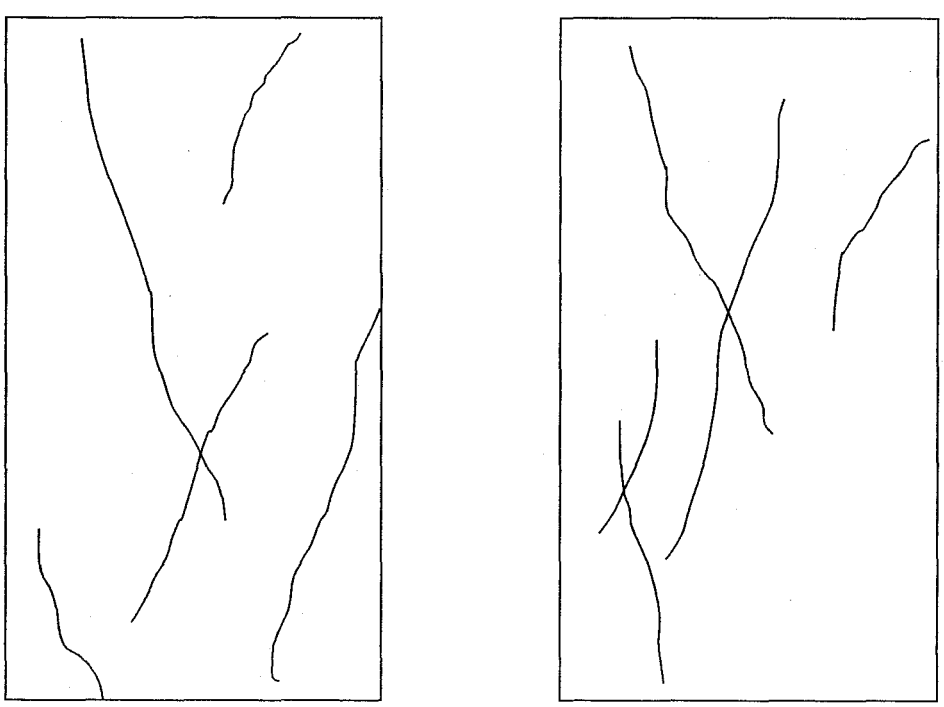
그림 3.6.2 발파시험용 포천 화강암 시험편

표 3.6.1 포천 화강암의 일축압축강도시험 결과데이터(시험편1)

Water Content(%)	0.38	UnitWeight (g/㎤)	unsaturated	2.557
Porosity(%)	1.18		saturated	2.569
Loading rate (kgf/sec)	Poisson ratio	SonicVelocity (m/s)	ElasticModulus (10^5kgf/㎠)	Uniaxial stress (kgf/㎠)
100		3470	1.388	1716

표 3.6.2 포천 화강암의 일축압축강도시험 결과데이터(시험편2)

Water Content(%)	0.37	UnitWeight (g/㎤)	unsaturated	2.555
Porosity(%)	0.99		saturated	2.565
Loading rate (kgf/sec)	Poisson ratio	SonicVelocity (m/s)	ElasticModulus (10^5kgf/㎠)	Uniaxial stress (kgf/㎠)
100	0.0472	3380	1.523	1702



(a) 시험편1 (b) 시험편2

그림 3.6.3 Sketch of failure

나. 천공작업 장비

발파를 위해 준비된 화강암 시험편의 장약공 천공을 위해 유압식 3 Boom 점보드릴을 이용하였다. 장약공의 천공을 위해 사용된 점보드릴 차량은 Atlas Cop 사의 Rocket Boomer 353E(그림 3.6.4)이며 차량에 부착된 착암기는 COP 1838ME (그림 3.6.5)이다. 실험에 사용된 점보드릴은 대형, 중대형 터널 등 100㎡ 크기이상의 천공면적을 가진 굴진면 천공에 사용되며 18㎾의 타격력을 가지고 있다.

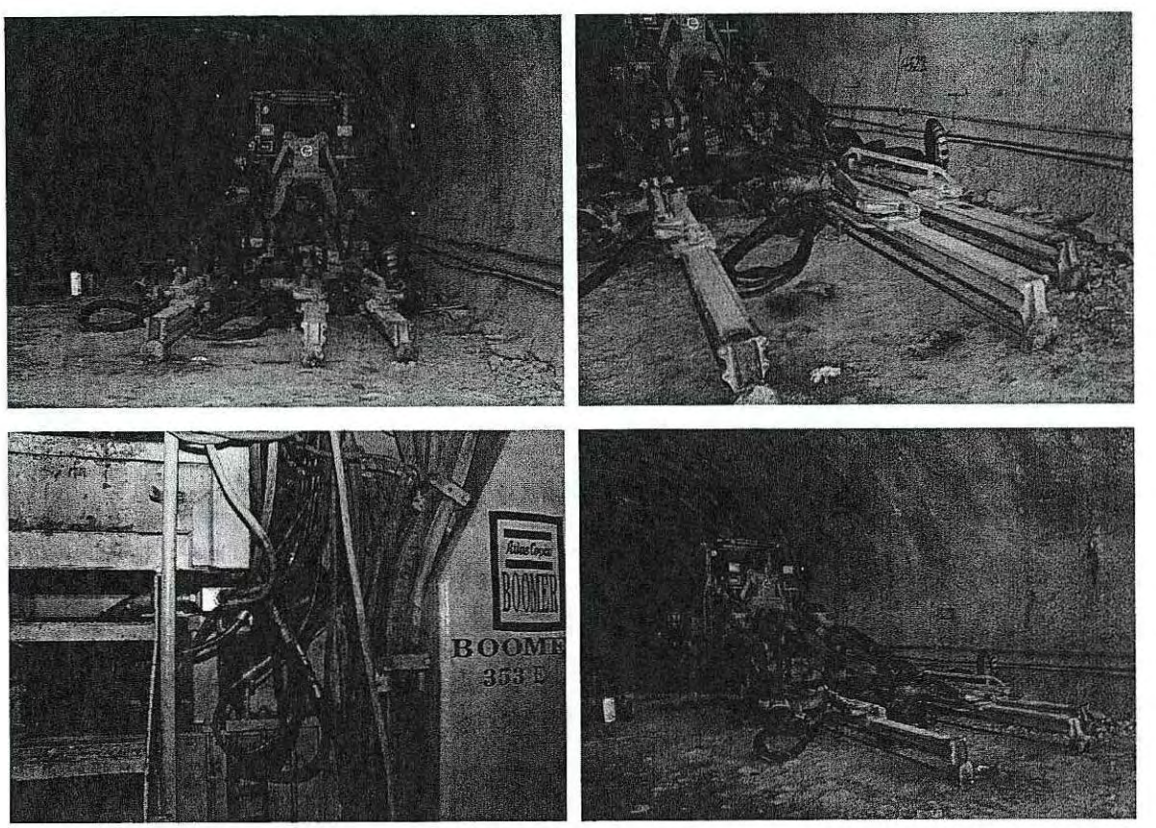


그림 3.6.4 Atlas Copco Rocket Boomer 353E

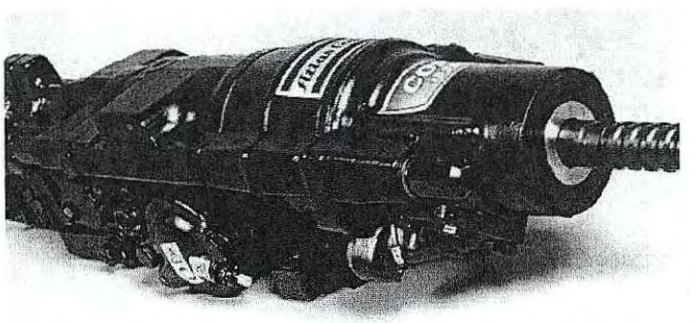


그림 3.6.5 Rocket Boomer 353E에 장착된 착암기 - COP 1838ME

다. 노치비트와 원형비트

노치효과를 확인하기 위해 장약공 형상별로 생성되는 암석시험편 파단면 비교를 위해 점보드릴의 3 Boomer 중 하나의 착암기에 2종류의 비트를 사용하여 시험편에 장약공을 천공하였다. 암석시험편 원형 장약공을 위해 터널 및 광산 등의 발파현장에서 일반적으로 사용되는 45㎜ 직경 크기를 가진 원형비트를 사용하였다.

노치에 의한 선균열을 발생하기 위해 그림 3.6.6과 같은 노치비트 장비를(정동호 외, 2007) 사용하여 암석시험편에 노치날개를 가진 노치공을 천공하였다. 노치비트 장비는 원형비트, 노치비트, 어댑터 그리고 노치비트 고정 홈으로 구성되어 있다. 노치비트 장비를 이용한 천공은 원형비트에 노치비트가 추가로 결합되어 원형비트가 먼저 원형굴착을 하게 되며 뒤를 이어 노치비트에 의해 원형공에 노치날개를 생성하여 암석시험편에 선균열을 발생시킨다. 이댑디는 노치비트가 후방으로 이탈됨을 방지하고 노치비트 고정 홈은 노치날개를 고정함으로써 붐대 및 원형비트의 회전에 의해 노치비트가 회전됨을 방지하는 기능을 한다. 그림 3.6.7은 노치비트 장비의 모식도를 보여준다.

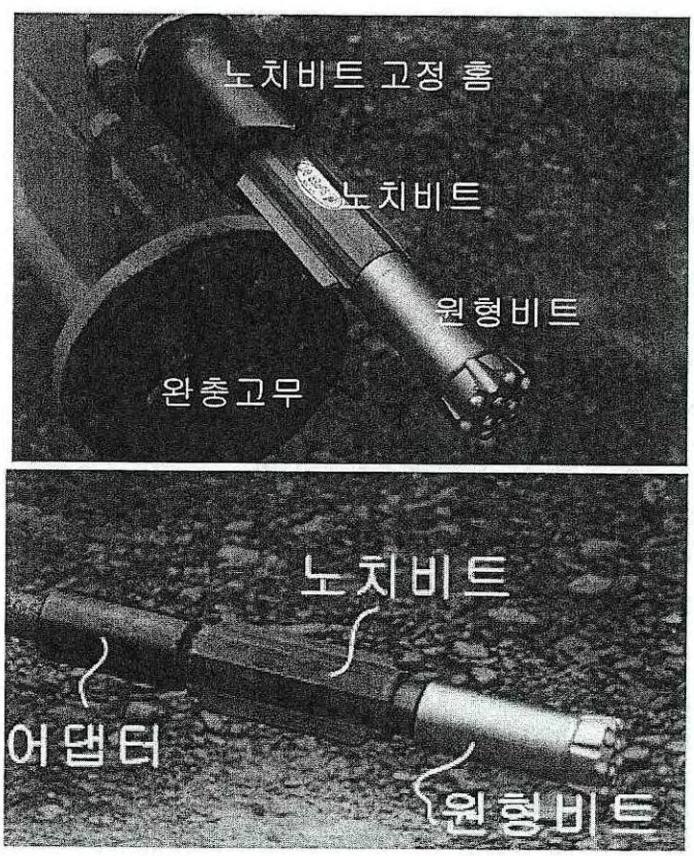


그림 3.6.6 노치비트 장비

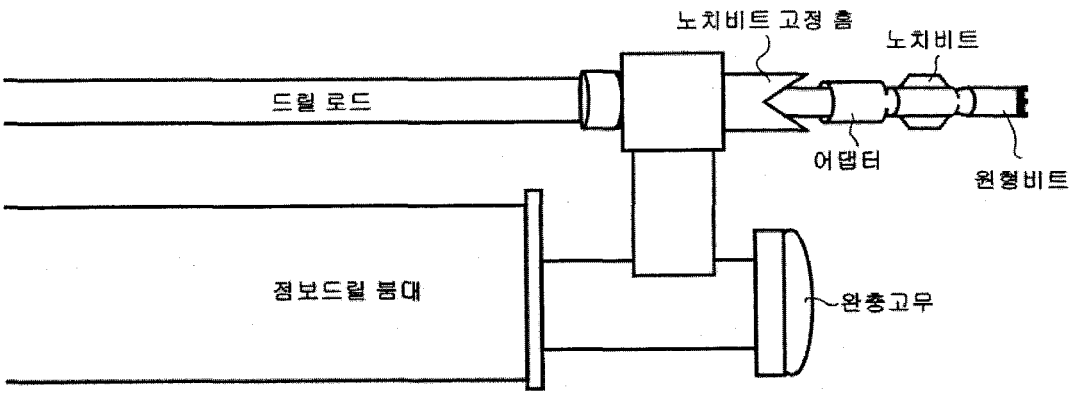


그림 3.6.7 노치비트 장비 모식도

라. 천공 수행절차

(1) 유압식 착암기의 천공메커니즘

일반적으로 점보드릴의 유압식 착암기를 이용한 굴착은 타격굴착을 기본으로 한다. 그림 3.6.8에서 모식적으로 나타낸 것과 같이 굴착이 진행된다. 점보드릴의 유압식착암기에 연결된 로드(rod)와 버턴비트(button bit)는 타격, 회전, 피드(feed)에 의해 암반 굴착에 필요한 에너지를 굴착 대상 암반면에 전달한다. 점보드릴의 로드에 연결된 버턴비트의 타격으로 인해 접촉한 암반은 파쇄되어 암편화된다. 타격에 의해 암편화된 암반은 비트의 회전에 의해 분쇄되고, 천공홀 밖으로 배출되어 공입구까지 운반된다. 또한 이 회전에 의해 버턴비트는 새로운 타격위치로 자리를 잡고 다음 천공작업의 준비가 이루어진다. 타격 및 회전이 유효하게 작용하기 위해서는 암반에 비트가 확실히 밀착될 필요가 있으며, 이것은 피드에 의해 암반에 비트를 밀착시키며 새로운 암반을 타격하여 굴착이 이루어진다(김광염 외, 2008).

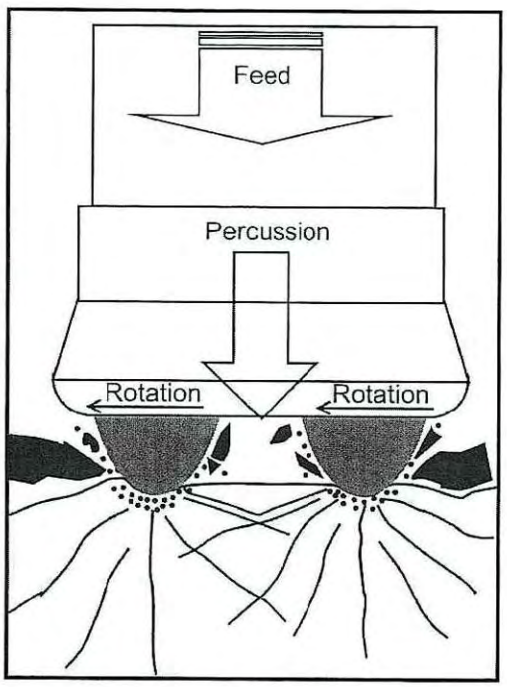
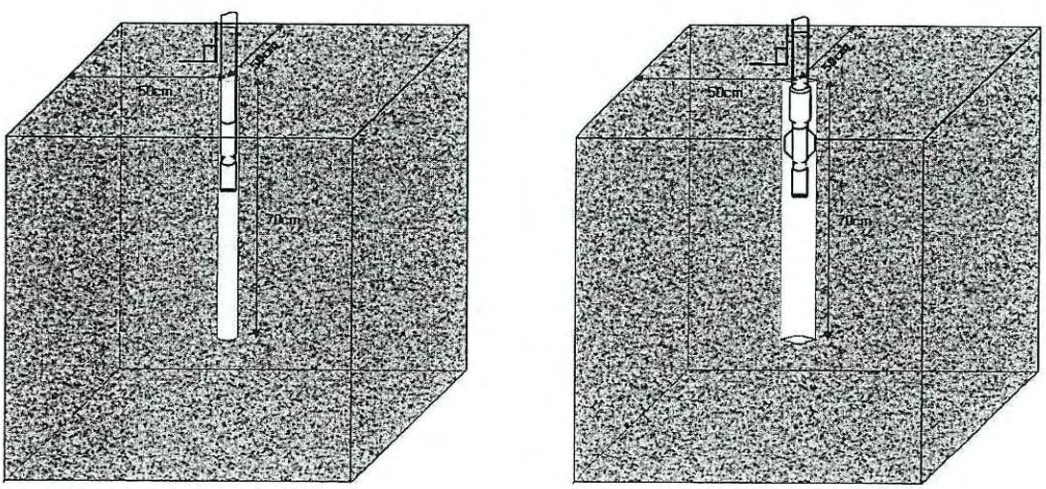


그림 3.6.8 Drilling mechanism of hydraulic rock drill(김광염 외, 2008)

(2) 파단면 생성을 위한 원형공 천공작업

발파에 의한 파단면 생성을 위한 장약공의 생성은 5개의 각 시험편 정중앙에 그림 3.6.9와 같이 원형공 또는 노치공을 천공하게 된다.



(a) 원형공 (b) 노치공

그림 3.6.9 천공수행 모식도

(가) 그림 3.6.10과 같이 비트(착암기)가 장착된 점보드릴의 붐대를 시험편 천공면과 수직을 이루도록 위치시킨다.

(나) 천공면과 붐대가 서로 수직이 되도록 유지를 하면서 붐대에 장착된 비트의 끝이 천공면의 정중앙에 표시된 천공홀 위치에 고정시킨다(그림 3.6.10, 3.6.11).

(다) 위의 절차 후 바로 천공이 들어갈 경우 타격의 충격으로 인해 비트가 천공면 정중앙에서 벗어나게 되므로 1차 타격으로 시험편의 정중앙에 약간의 천공홀을 만들어서 비트가 시험편의 정중앙에 삽입하여 고정이 되도록 한다(그림 3.6.12).

(라) 1차 타격 후 진동과 충격에 의해 붐대와 천공면과 수직이 되지 않으므로 다시 수직이 되도록 조정한다.

(마) 붐대와 천공면이 수직이 이루고 비트가 천공면 중앙에 생성된 홀에 삽입되어 고정이 되었음을 확인하고 천공작업을 수행한다(그림 3.6.13(a)).

(바) 장약공은 암시험편 천공면을 기준으로 약 70㎝ 깊이로 천공한다(그림 3.6.13(b)).

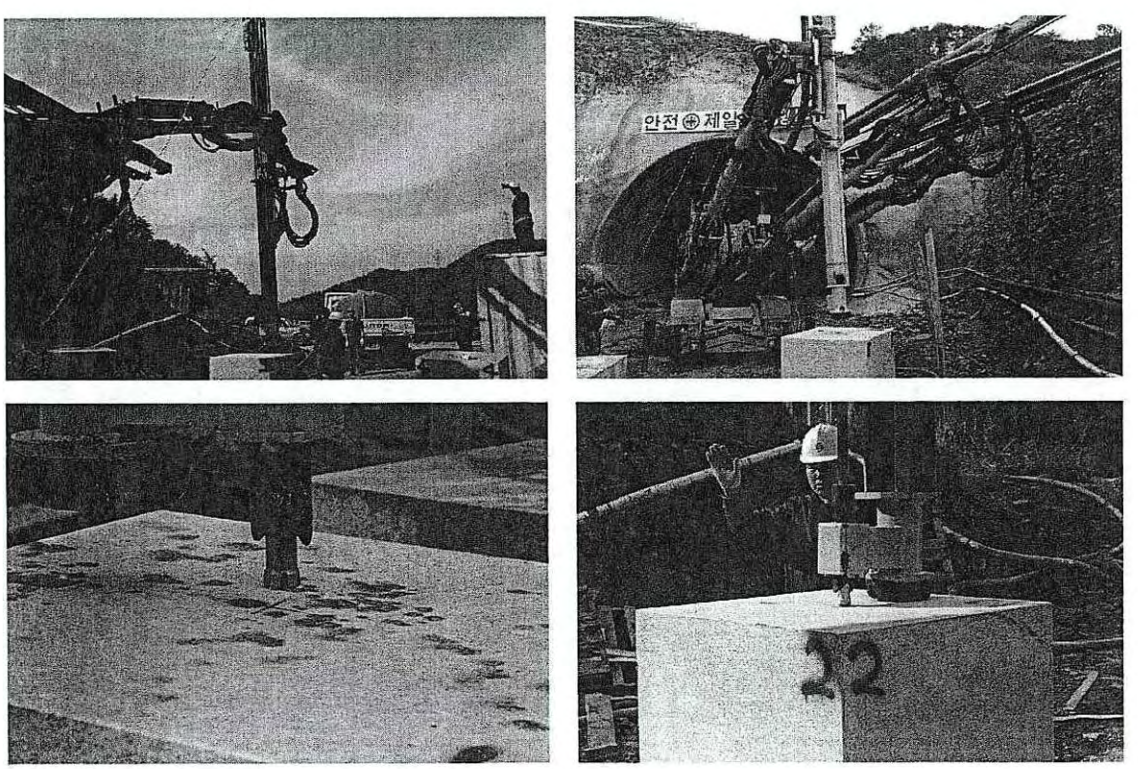


그림 3.6.10 천공 위치 조정

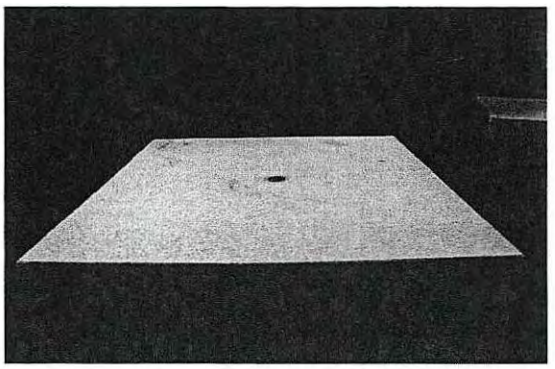


그림 3.6.11 천공홀 위치

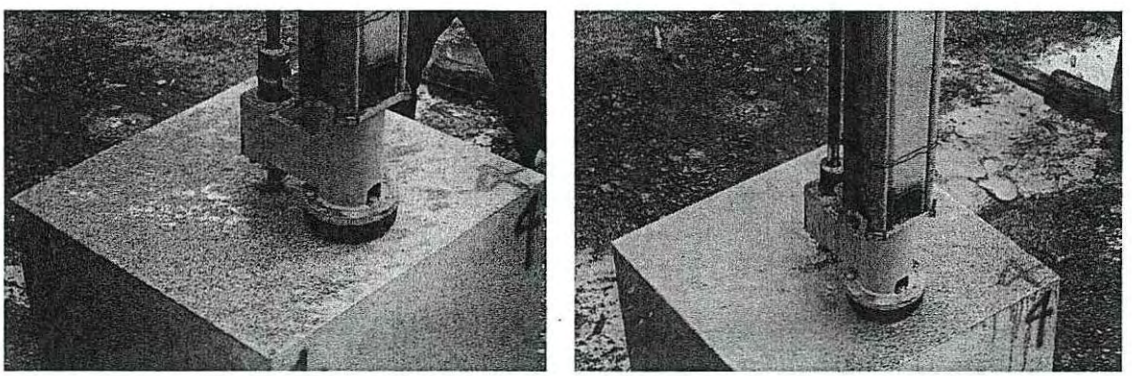
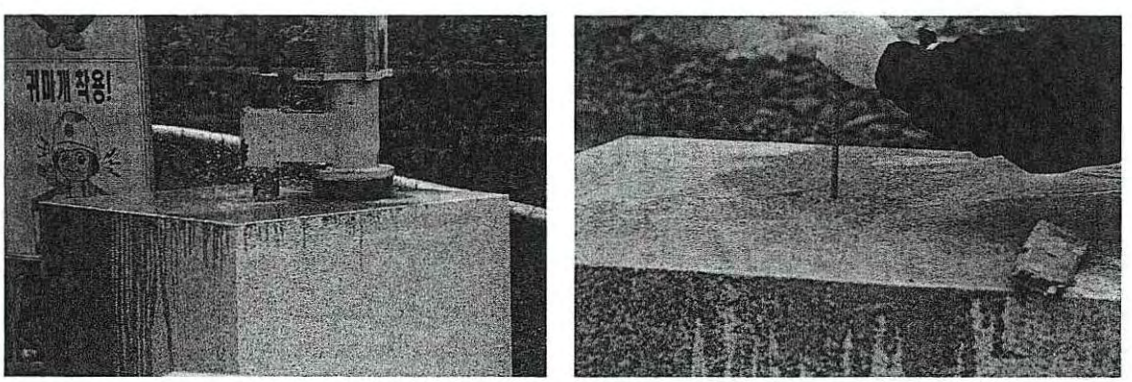


그림 3.6.12 비트의 고정을 위한 1차 타격 및 비트의 고정



(a) 천공 (b) 깊이 측정

그림 3.6.13 장약공의 천공

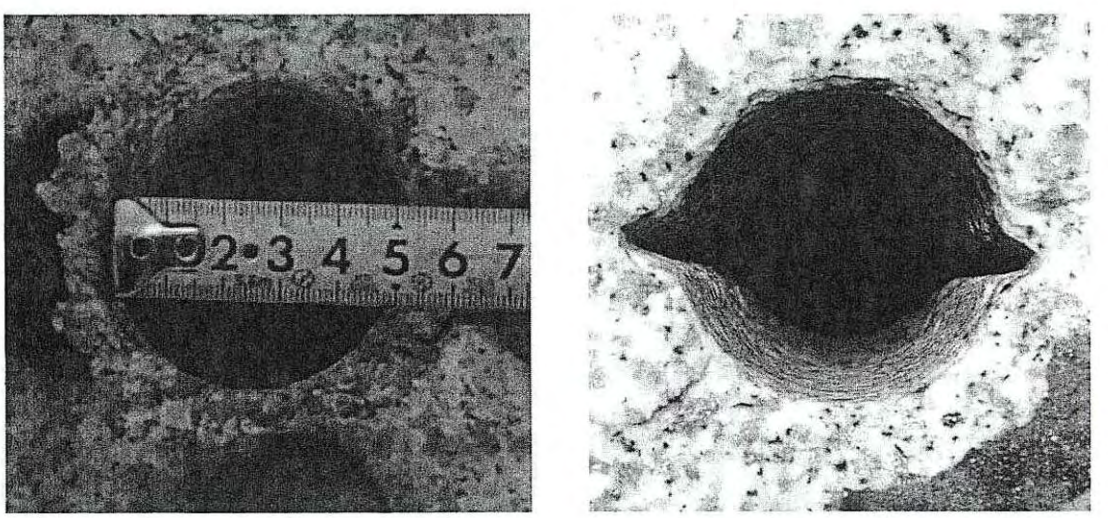
(3) 파단면 생성을 위한 노치공 천공작업

노치공의 천공작업은 원형 장약공의 천공작업과 동일한 절차로 이루어진다. 단,

노치비트 장비를 구성하는 원형비트는 붐대에 결합되어 천공시 착암기의 붐대와 함께 회전, 타격, 피드를 하게 되지만 노치비트의 경우 붐대에 결합되어 있지 않기 때문에 천공시 암석 시험편에 타격과 피드만을 주게 된다.

마. 천공홀 형상

그림 3.6.14는 각각의 비트로 천공되어진 시험편의 장약공(원형공, 노치공)을 나타낸 것이다. 천공된 원형공과 노치공은 약 50㎜(비트의 직경은 45㎜)이며 노치공(그림 3.6.14(b))의 좌우날개의 길이는 각각 약 10㎜의 크기를 가지고 있다. 일반공과 노치공은 천공면 정중앙에 위치하며 노치공의 경우 날개의 방향이 자유면과 가장 가까우며 자유면과 수직을 이루고 있다.



(a) 원형공 (b) 노치공

그림 3.6.14 장약공 형상 및 크기

바. 장약공이 생성된 시험편

발파를 위해 장약공이 생성된 5개의 포천 화강암 시험편 중 2개의 시험편은 원형비트로 일반적인 천공작업을 수행하였고, 3개의 시험편은 원형홀 좌우에 노치날개를 가진 노치천공이 수행되었다. 1, 2, 4번은 노치공을 가진 시험편이며 3, 5번은 원형공을 가진 시험편이다.

사. 화약 장약작업

장약공을 생성한 5개의 포천 화강암 시험편의 발파에는 에멀젼과 정밀폭약을 이용하였다. 그림 3.6.15는 장약공이 생성된 시험편에 화약을 장약하는 작업사진이다. 그림 3.6.15에서 파단면 생성 시험을 위해 장약되고 있는 화약은 한화발파㈜에서 개발되어 시판되고 있는 뉴화이넥스(NewFinex)이다. 뉴화이넥스는 저비중, 저폭속 에멀젼 폭약으로 모암 균열의 최소화, 여굴 방지에 탁월한 성능을 보이는 제어 발파용 폭약이다. 뉴화이넥스의 제원은 표 3.6.3에 나타나있다.

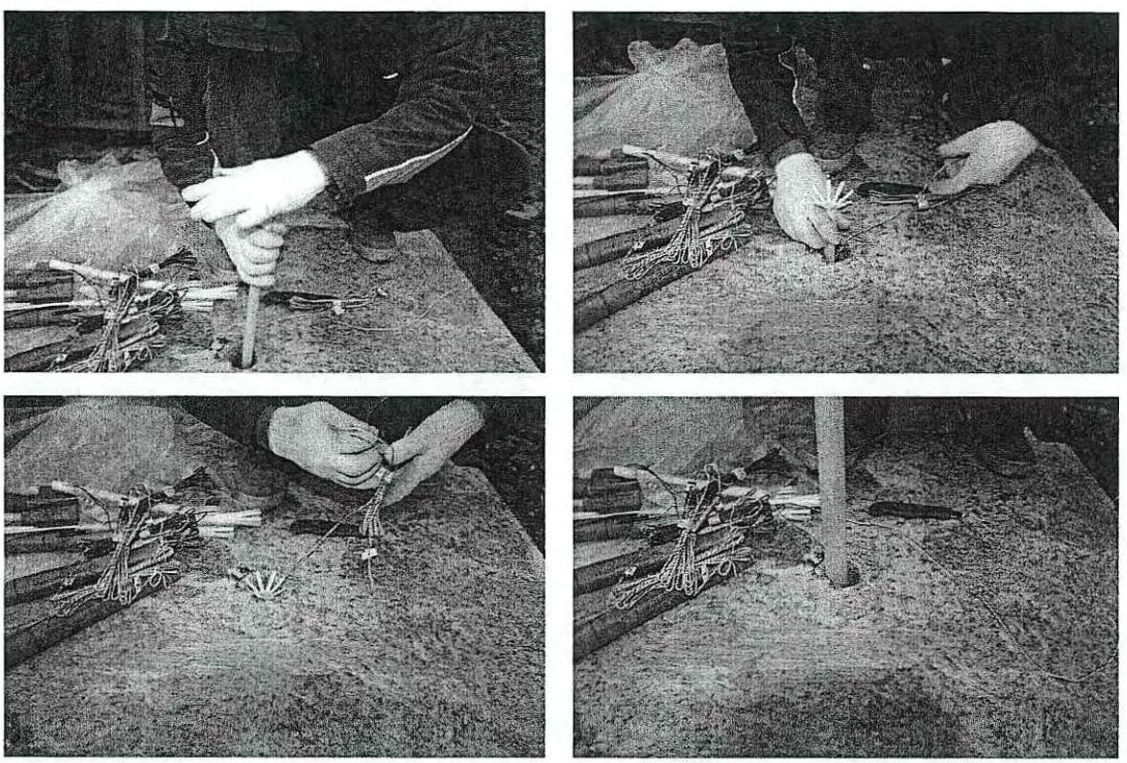


그림 3.6.15 장약작업

표 3.6.3 뉴화이넥스 제원

뉴화이넥스(NewFINEX)	
평균 폭발속도 (m/s)	4400
탄동구포 (%)	90
가비중 (g/cc)	1.0
폭발열 (Kcal/kg)	640
낙추감도 (cm)	100 이상
가스량 (l/kg)	874
내한성 (℃)	- 20
내수성	매우 우수

아. 시험편 발파

발파에 사용된 화약은 에멀젼과 정밀폭약(뉴화이넥스)이다. 장약은 두 종류를 혼합 또는 정밀폭약만을 사용하였으며 정밀폭약만을 장약하더라도 장약량을 달리하여 암석시험편의 발파를 수행하였다. 암석시험편의 발파의 순서는 시험편의 위치 및 실험장소 환경을 고려하여 2 → 4 → 3 → 1 → 5번순으로 발파시험을 수행하였다. 다음에 나오는 표 3.6.4에는 각 시험편에 장약된 화약 및 장약량 그리고 장약공의 형상을 나타낸 것이다.

표 3.6.4 시험편 발파에 사용된 화약 및 장약량

시험편번호	발파공 형상	장약	장약량
1	노치	정밀폭약	4/5(80g)
2	노치	에멀젼, 정밀폭약	에멀젼(250g) ½ +정밀폭약(100g) ½
3	원형	정밀폭약	(100g) 1개
4	노치	정밀폭약	(100g) 1개
5	원형	정밀폭약	4/5(80g)

(1) 암석시험편 발파현장

장약공 형상별 파단면 생성을 위한 시험편의 발파는 진주시에 위치한 ○○터널 현장에서 수행되었다. 천공이 완료된 시편은 지게차로 터널 갱구부로 운반하여 터널을 방호벽으로 이용하여 장약작업과 발파시험을 수행하였다(그림 3.6.16).

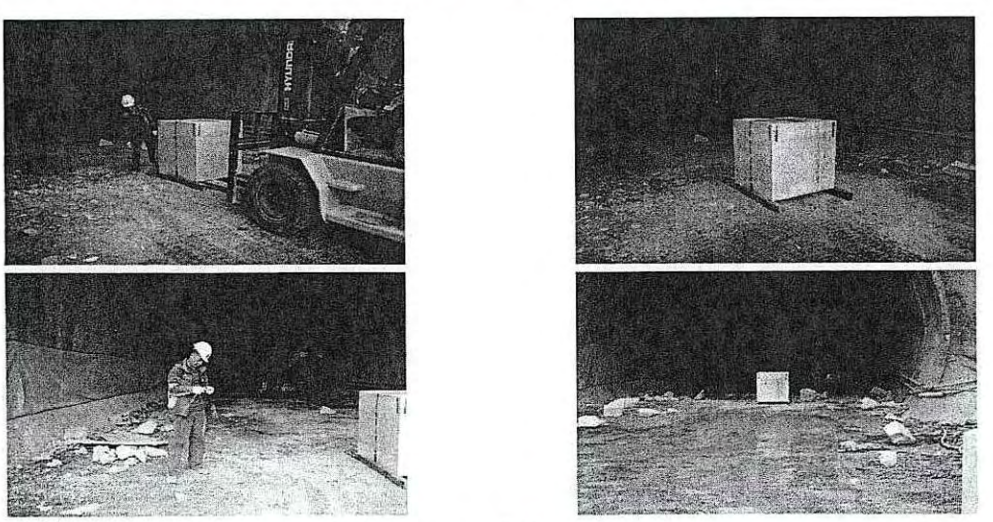
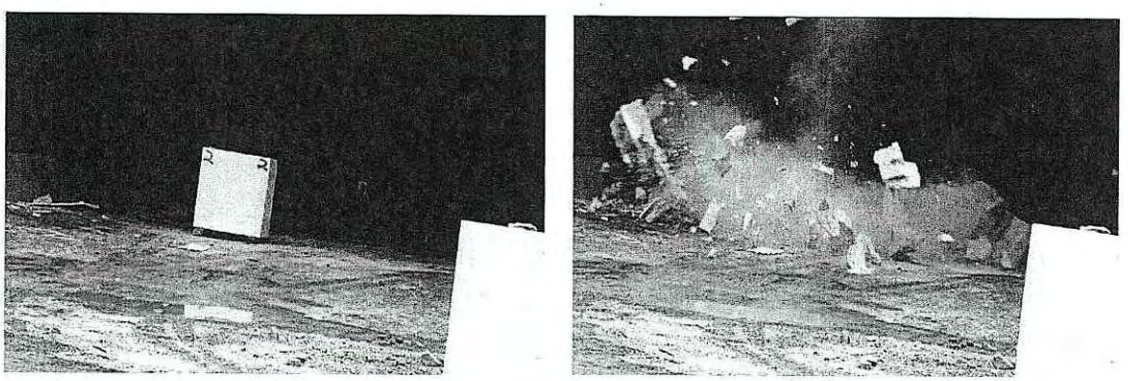


그림 3.6.16 시험 현장조건

(2) 2번 화강암 시험편 발파

적절 장약량 산정을 위해 노치형상공 2번 화강암 시험편을 선택하여 시험 발파를 하였다. 노치에 의한 선균열 제어에는 적당한 양의 화약주입도 필요하므로 자유면, 암석시험편의 부피, 강도특성 등을 고려하여 에멀젼폭약(250g)/2 + 정밀폭약(100g)/2를 시험편에 장약하여 시험발파를 수행하였다. 그림 3.6.17은 시험발파를 수행하는 2번 암석시험편의 발파 전과 발파시 파괴를 나타낸 것이다. 그림 3.6.18과 같이 균열방향 및 본래 형상을 구분할 수 없을 정도의 시험편의 파괴가 발생되었다. 굴착터널 현장에서 발파시 암반 특성을 고려하여 산정된 장약량으로 발파를 수행하였지만 시험편이 완전 파괴가 일어난 원인은 구속압의 미고려로 판단된다.



(a) 발파 전 (b) 발파시 파괴

그림 3.6.17 2번 시험편(노치공)의 발파

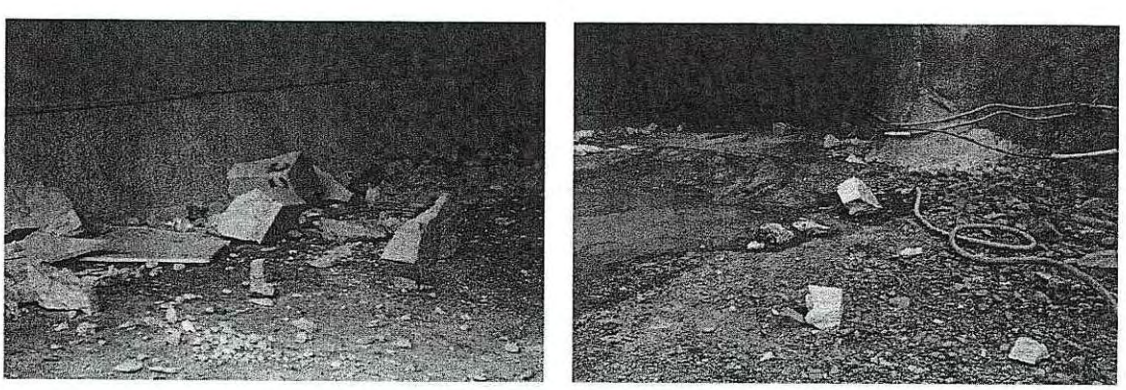
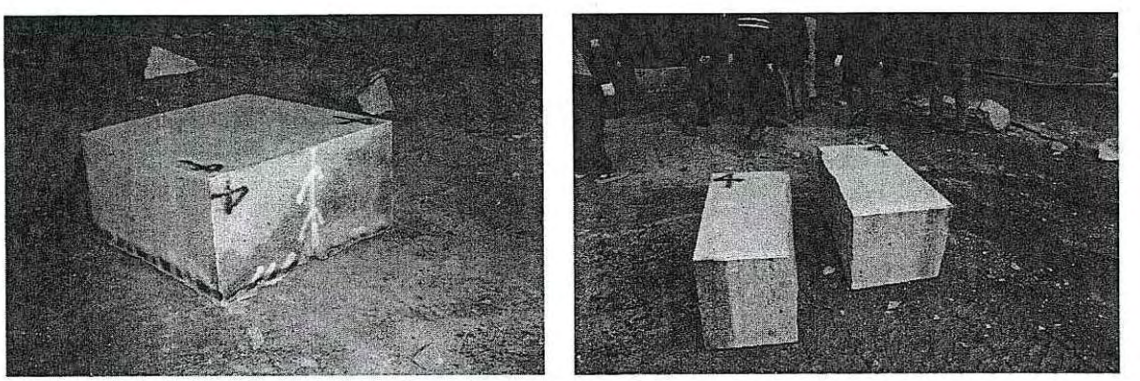


그림 3.6.18 완파된 2번 시험편(노치공)

(3) 3번 화강암 시험편과 4번 화강암 시험편 발파

적정 장약량을 산정하지 못하여 완전 파괴가 발생된 2번 시험편의 발파 후 결과를 통해 에멜젼 폭약의 사용을 포기하고 4번(노치공), 3번(원형공) 시험편은 정밀폭약만을 사용하여 발파시험을 수행하였다. 3, 4번 시험편은 정밀폭약 100g을 사용하여 발파를 수행하였다.

그림 3.6.19는 노치공을 가진 4번 시험편의 발파 후 파괴 모습을 나타낸 것이다. 그림 3.6.19(a)에서 노치날개의 방향으로 균열이 발생되어 암석이 절단된 것을 확인 할 수 있다. 그림 3.6.19(b)는 노치방향 외 자유면과의 최단거리 수직방향으로 균열이 발생하여 절단이 이루어진 것을 나타낸 것이다. 노치공의 날개방향 다음으로 발파공의 중심에서 자유면과 가장 최단거리 방향으로 균열이 발생되어 파단(파괴)이 발생되었음을 확인 할 수 있다.



(a) 노치방향 파단 (b) 자유면 최단거리 파단

그림 3.6.19 4번 시험편(노치공)의 발파 후 결과

3번 시험편 발파는 원형공을 가진 시편에 4번 시험편과 동일하게 정밀폭약 100g을 장약하여 수행된 시험이다. 3번 시험편(원형공)은 발파공 중심에서 자유면의 최단거리로 파단면이 형성하며 이등분이 되었다(그림 3.6.20). 그림 3.6.21은 발파 직후의 파단면을 관찰한 그림이다. 노치공에 의한 4번 시험편의 파단면과 마찬가지로 자유면 최단거리 방향으로 파단되지만 4번 시험편에 비해 자유면 최단거리 직선 방향으로 이등분이 되지 않았다.

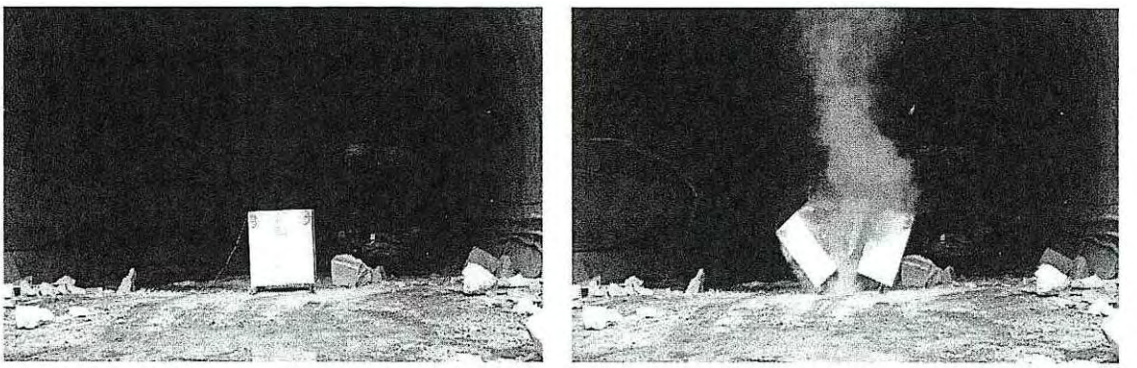


그림 3.6.20 3번 시험편(원형공)의 발파 전/후 결과

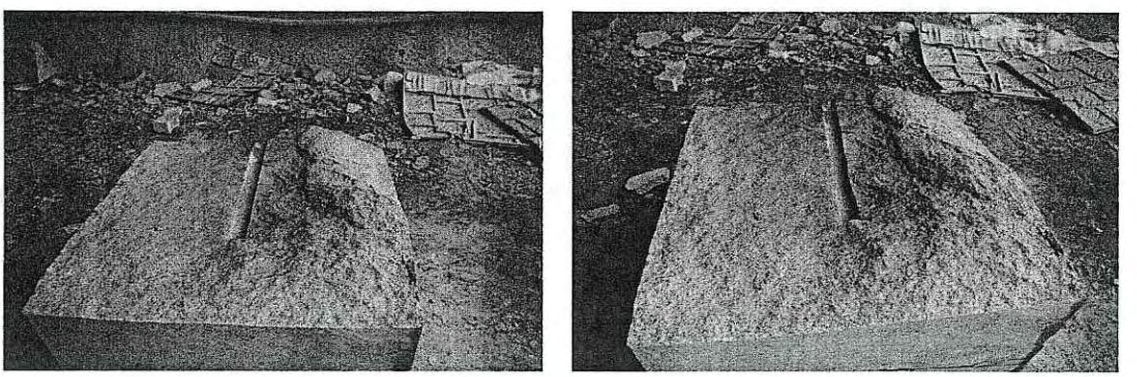


그림 3.6.21 3번 시험편(원형공)의 파단면

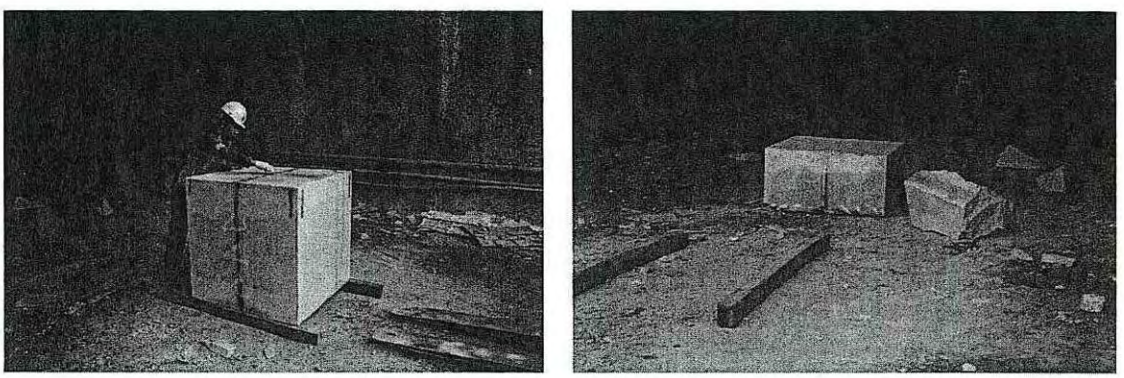
(4) 1번 화강암 시험편과 5번 화강암 시험편 발파

1번(노치공), 5번(원형공) 화강암 시험편은 80g의 정밀폭약을 사용하여 시험발파를 수행하였다. 장약량에 따른 노치효과와 원형공의 차이를 비교하기 위한 실험으로 100g의 정밀폭약을 장약하여 발파된 3번, 4번 시험편과 비교를 하게 된다. 정밀폭약 100g으로 장약하여 이루어진 4번 시편의 경우 노치방향으로 등분되어 생성된 파단면의 결과를 얻을 수 있었지만 노치방향 외의 수직방향으로 파괴방향이 진행되었다. 노치방향으로만 이루어지게 된다는 원하는 결과를 얻을 수 없게 되어 그 원인으로 노치에 의한 제어발파에 필요한 장약량이 많았다고 판단되었다. 이를 확인하기 위해 정밀폭약 100g보다 적은 80g으로 발파시험을 수행하였다.

1번, 5번 시험편을 정밀폭약 80g으로 발파한 결과는 그림 3.6.22, 3.6.23에 나타나있다. 원형발파공 발파된 5번 시험편은 천공면의 최단 자유면 방향으로 약간의

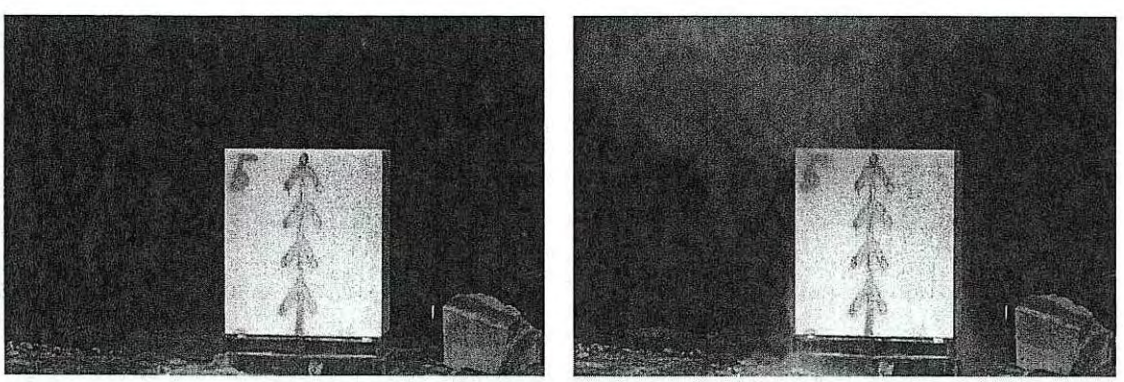
균열만을 발생시키고 시험편의 파괴가 일어나지 않았다. 이는 정밀폭약 80g은 원형공 시험편의 발파시 파괴를 일으킬 수 있는 적정 장약량이 아님을 알 수 있다.

1번 노치공의 경우 그림 3.6.22(b)와 같이 정밀폭약 100g으로 발파 시험한 4번 화강암 시험편과 마찬가지로 최단 자유면 방향인 노치방향으로 파단면을 생성시키고 파괴되었다. 그러나 4번 시편 발파의 결과와 다르게 노치방향으로만 파괴가 진행되어 암석의 시편을 노치방향으로 정확히 이등분시키는 결과를 보여주었다.



(a) 발파 전 (b) 발파 후

그림 3.6.22 1번 시험편(노치공)의 발파 전/후 결과



(a) 발파 전 (b) 발파 후

그림 3.6.23 5번 시험편(원형공)의 발파 전/후 결과

자. 암석 시험편 발파 결과 고찰

각각의 천공홀 형상별 및 장약량에 따른 발파로 인해 파괴되어 등분된 시편을 통해 다음과 같이 노치의 발파메커니즘 효과를 확인할 수 있었다.

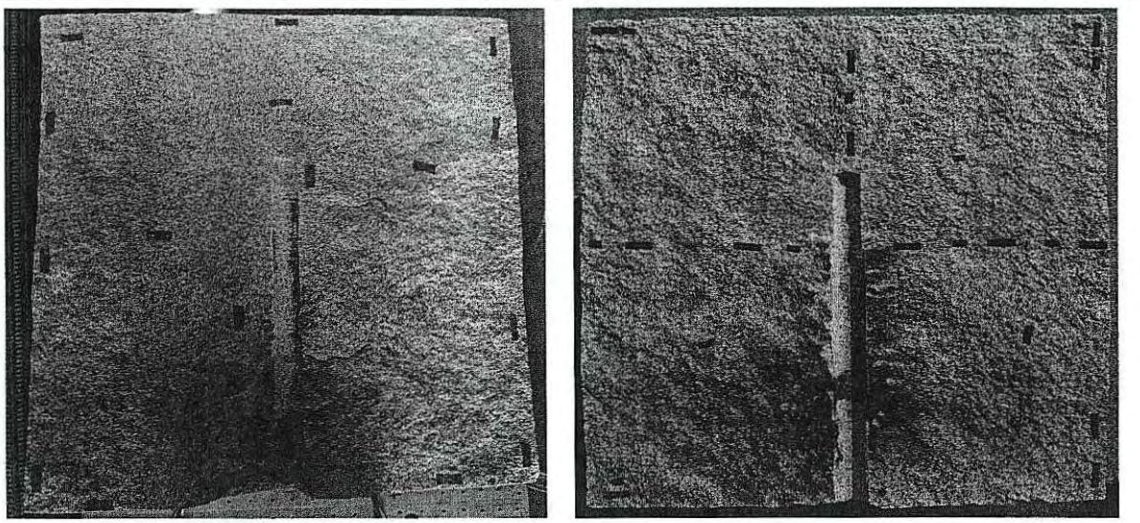
1번, 4번 노치공형상을 가진 시험편 발파시 노치방향으로 등분된 시편을 통해 파괴방향 제어가 가능한 노치효과를 확인할 수 있었다. 하지만 정밀폭약 100g으로 장약된 4번 시험편의 결과를 통해 노치효과의 극대화를 위해 적절한 장약량의 고려가 필요함을 알 수 있다. 노치홈에 응력을 집중시킴으로써 일반발파공보다 적은 장약량으로도 파괴가 가능한 노치효과는 1번, 4번, 5번 시험편발파를 통해 검증되었다. 이는 정밀폭약 80g으로 장약된 일반공 시편은 파괴가 이루어지지 않았고 정밀폭약 100g에서 파단면을 생성하며 이등분되었지만 5번 일반공 시험편과 동일한 장약량으로 수행된 1번 노치공 시험편은 원하는 노치공 방향으로 이등분 된 결과를 통해 알 수 있다.

2. 원형공과 노치공의 파단면 생성 결과 분석

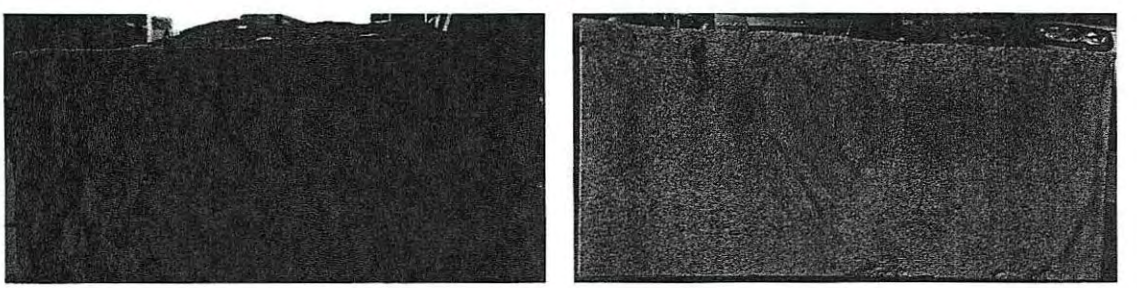
노치공과 일반공 조건으로 이루어진 발파시험에서 동일한 조건에서 파단면을 생성한 시편의 비교를 위해 정밀폭약 100g으로 발파 시험을 수행한 3번(원형공)과 4번(노치공) 시편을 대상으로 하여 파단면을 비교 분석하였다. 그림 3.6.24는 발파 후 파단면을 생성하여 이등분된 3번, 4번 시험편이다. 그림 3.6.24(a)의 정면방향으로 관찰된 두 면의 거칠기는 노치공 발파에 의한 파괴면이 일반원형공에 의한 파괴면의 표면보다 상대적으로 더 매끈하고 파괴면요철의 기복이 더 적음을 확인할 수 있다. 그림 3.6.24(b) 시편의 천공면의 반대면을 보여주고 있다. 발파공 반대방향에서의 파단면 쪼깨짐은 일반공과 노치공 둘 다 비슷한 형상을 보인다. 그림 3.6.24(a)의 정면방향으로 보았을 때와 비교시 천공홀이 아닌 부분에서 노치공과 일반공의 파단면 거칠기 양상이 비슷함을 확인할 수 있다. 이는 본 실험에서 검증하고자 하는 노치효과가 천공 깊이만큼 밖에는 작용되지 않았다는 것을 확인 할 수 있다. 그림 3.6.24(c), (d)의 측면 방향과 발파공 방향으로 관찰된 파단면의 굴곡은 노치공이 일반공 조건으로 발파된 시편보다 굴곡 변화가 더 적음을 확연히 확인할 수 있다.

일반공과 노치공에 의한 발파로 생긴 파단면의 거칠기와 굴곡 양상을 통해 시각적으로도 노치효과에 의한 원하는 방향으로의 발파제어가 가능함을 확인할 수 있었다. 또한 노치에 의한 시편의 파괴제어는 노치공이 형성된 깊이까지임을 확인 할 수 있다.

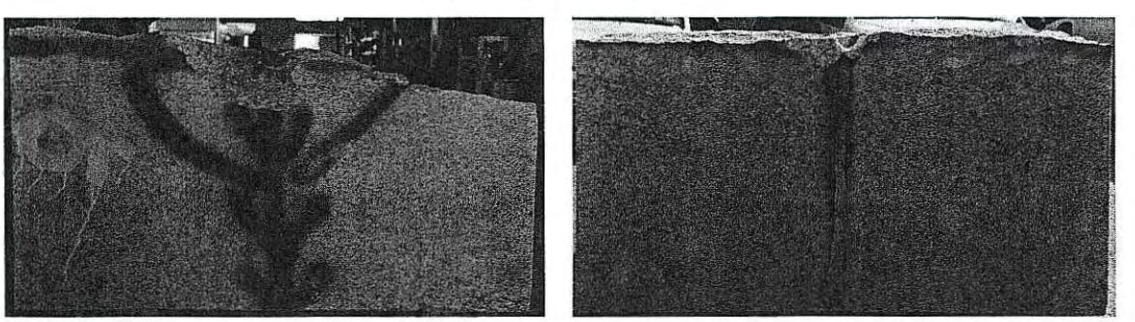
원형공(3번 시험편)	노치공(4번 시험편)



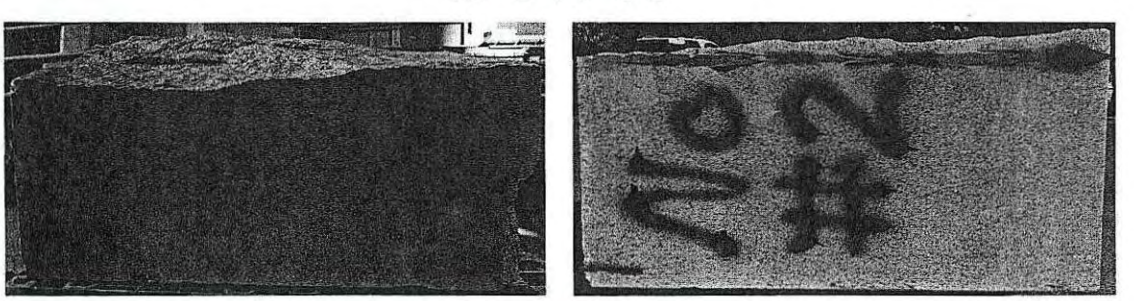
(a) 정면 방향



(b) 발파공 반대방향



(c) 발파공 방향



(d) 측면 방향

그림 3.6.24 원형공 발파와 노치공 발파에 의해 생성된 파단면 형상 비교

(좌-노치공, 우-원형공)

3. 시험편 발파 파단면의 DEM 생성

3번(원형공)과 4번(노치공) 시험편을 선택하여 각 시편 파단면을 DEM 모델로 구성하여 표면 거칠기의 정량적 평가를 위하여 디지털 영상 계측을 수행하였다.

가. DEM 모델 생성 원리

디지털 영상 계측 기법에 의한 대상체의 3차원 모델 생성을 위한 과정은 다음과 같은 단계를 거쳐 이루어진다.

- 영상정합 (image matching): 이미지 처리에 의한 각각의 이미지에서 서로 대응되는 점의 결정
- 카메라 외부표정과 이미지의 공간상 정합점을 이용한 3차원 포인트 생성
- 표면 메쉬를 생성하기 위한 포인트들 사이의 연결 (triangulation)

(1) 영상정합 (image matching)

영상정합(image matching)의 의미는 서로 다른 데이터들 사이에서 정합점(homologous point; 지상의 한점에 해당되는 두 이미지에서의 점의 위치)을 확립하는 것으로 정의 될 수 있다. 구체적으로 같은 대상을 촬영한 서로 다른 디지털 이미지로부터 추출된 원시정보들 사이의 일치점을 정의 하는 것이다(Zhang, 1994). 영상정합 기술 중 대표적인 것은 비모수 통계(nonparametric statistics), 최소제곱법(least square), 상관계수, 두 화소의 단순 차이 값 비교 등의 기법이다.

모든 기법은 영상의 화소값을 일정 크기의 탐색창을 이용하여 추출한 후 두 영상의 화소의 분포값을 비교하는 기법들이다. 두 영상의 비교를 위해서 먼저 한 영상을 기준 영상으로 설정한 후 다른 한 영상의 영역을 탐색하면서 화소값의 분포가 가장 유사한 영역을 찾는 과정으로 수행된다. 그림 3.6.25는 좌측 영상을 기준영상으로 하여 5×3 크기의 탐색창을 이용하여 우측 영상에서 비교될 화소값을 추출하는 과정의 모식도이다.

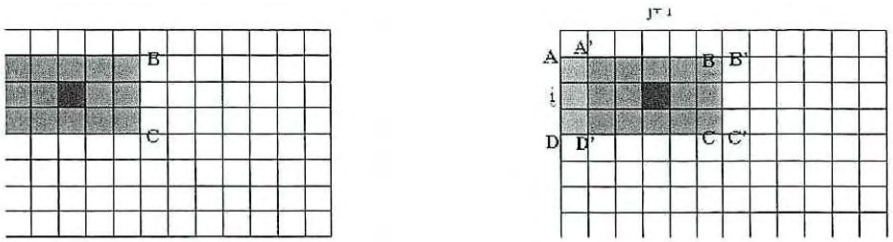


그림 3.6.25 두 개의 영상을 이용한 영상정합 과정

(2) 3차원 입체모델 생성

두 방향에서 획득한 동일 대상체의 이미지를 통해 정합점을 찾고 카메라의 외부표정(external orientation) 인자가 결정되면 3차원 공간 좌표계에 정합점을 위치시킬 수 있다(Kraus, 1992). 그림 3.6.26은 한 쌍의 이미지의 정합점을 3차원 좌표로 변환시키는 원리를 기하학적으로 나타내고 있다. 두 개의 선인 r'과 r''은 정합점 P', P''으로부터 시작하여 카메라의 투영 중심인 O'과 O''을 통과한 선이다. 공간상의 두선 r'과 r''의 교차점이 P로 3차원 공간상에 위치하게 된다. 두 선이 정확히 한 점에서 일치하지 않는 것은 카메라 외부표정과 이미지 측정에서 생기는 오차에 기인하게 된다. 이럴 경우 두 선의 가장 가까운 거리의 중심점을 최종 3차원 공간상의 점으로 재구성 하게 된다.

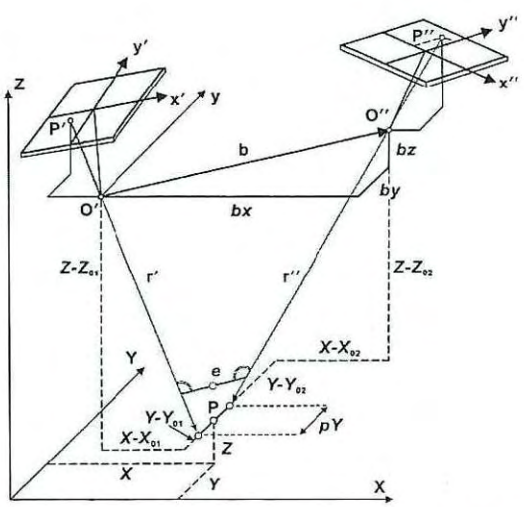


그림 3.6.26 한 쌍의 이미지의 정합점을 3차원 좌표로 변환시키는 원리

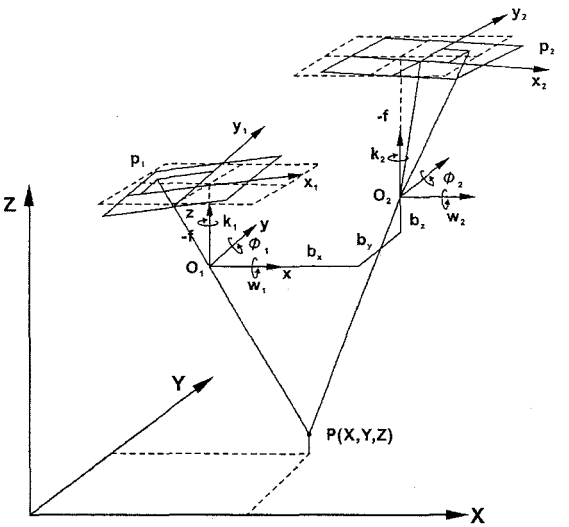


그림 3.6.27 공면조건을 이용한 상호표정

3차원공간에서 한 쌍의 중복된 사진이 동일면상에서 일치(사진상의 점 및 투영중심이 일치)하여야 하는 조건을 공면조건이라 한다. 3차원공간상의 평면의 일반식은 $AX+BY+CZ+D=0$이다. 다음 그림 3.6.27과 같이 2개의 투영중심 $O_1(X_{O_1}, Y_{O_1}, Z_{O_1})$, $O_2(X_{O_2}, Y_{O_2}, Z_{O_2})$와 공간상의 임의의 점 P의 상점 $p_1(X_{p_1}, Y_{p_1}, Z_{p_1})$, $p_2(X_{p_2}, Y_{p_2}, Z_{p_2})$가 동일평면에 있기 위한 관계식은 식 3.6.1과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_{o_1} & Y_{o_2} & Z_{O_1} & 1 \\ X_{o_2} & Y_{o_2} & Z_{O_2} & 1 \\ X_{p_1} & Y_{p_1} & Z_{p_1} & 1 \\ X_{p_2} & Y_{p_2} & Z_{p_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad \text{(식 3.6.1)}$$

따라서 4점(O_1, O_2, p_1, p_2)이 동일한 평면 내에 있기 위한 조건인 공면조건(coplanarity condition)을 만족하기 위해서는 다음의 행렬식이 0이 되어야 한다.

$$\begin{bmatrix} X_{O_1} & Y_{1} & Z_{O_1} & 1 \\ X_{O_2} & Y_{O_2} & Z_{O_2} & 1 \\ X_{p_1} & Y_{p_1} & Z_{p_1} & 1 \\ X_{p_2} & Y_{p_2} & Z_{p_2} & 1 \end{bmatrix} = 0 \qquad \text{(식 3.6.2)}$$

한편, 기선 b의 x, y, z 성분인 bx, by, bz와 O_1, O_2의 좌표 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$bx = X_{O_2} - X_{O_1} \ , \ by = Y_{O_2} - Y_{O_1} \ , \ bz = Z_{O_2} - Z_{O_1} \qquad \text{(식 3.6.3)}$$

따라서, bx, by, bz와 O_1의 좌표를 이용하여 O_2의 좌표를 나타내면 $O_2(X_{O_1} + bx, Y_{O_1} + by, Z_{O_1} + bz)$이다.

여기서, O_1을 기준으로 하면 $O_1 = (0,0,0)$이고, $O_2 = (bx, by, bz)$로 나타낼 수 있으므로, 식 3.6.2는 식 3.6.4와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{vmatrix} bx & by & bz \\ X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \end{vmatrix} = 0 \qquad \text{(식 3.6.4)}$$

(3) 입체모형좌표계산

그림 3.6.28과 같은 입체모형좌표(model coordinate system)에서 그 선에 대한 광속(bundle of ray)의 공간직선은 식 3.6.5와 같이 표현된다.

$$\frac{X_{m1} - X_{01}}{X_1 - X_{01}} = \frac{Y_{m1} - Y_{01}}{Y_1 - Y_{01}} = \frac{Z_{m1} - Z_{01}}{Z_1 - Z_{01}} = S_1$$
$$\frac{X_{m2} - X_{02}}{X_2 - X_{02}} = \frac{Y_{m2} - Y_{02}}{Y_2 - Y_{02}} = \frac{Z_{m2} - Z_{02}}{Z_2 - Z_{02}} = S_2 \qquad \text{(식 3.6.5)}$$

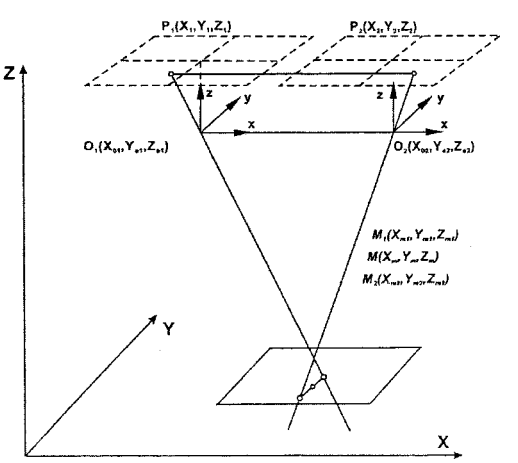


그림 3.6.28 입체모형좌표계

광속은 관측좌표의 차로 인하여 교합하지 않는다. 교합하는 점의 입체모형좌표는 XZ평면에 있어 그 직선의 교점을 구하여 X시차를 소거하고 2개의 Y값의 중점자표를 얻음으로써 식 3.6.6과 같이 구한다.

$$S_1 = \frac{\begin{vmatrix} X_{02}-X_{01} & Z_{02}-Z_{01} \\ X_2-X_1 & Z_2-Z_1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} X_1-X_{01} & Z_1-Z_{01} \\ X_2-X_{02} & Z_2-Z_{02} \end{vmatrix}} \quad S_2 = \frac{\begin{vmatrix} X_{02}-X_{01} & Z_{02}-Z_{01} \\ X_1-X_{02} & Z_1-Z_{01} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} X_1-X_{01} & Z_1-Z_{01} \\ X_2-X_{02} & Z_2-Z_{02} \end{vmatrix}} \qquad \text{(식 3.6.6)}$$

이라 하면,

$$\begin{aligned} X_m &= S_1(X_1 - X_{01}) + X_{01} = S_2(X_2 - X_{02}) + X_{02} \\ Z_m &= S_1(Z_1 - Z_{01}) + Z_{01} = S_2(Z_2 - Z_{02}) + Z_{02} \end{aligned} \qquad \text{(식 3.6.7)}$$

이다. 또한

$$\frac{X_m - X_{01}}{X_1 - X_{01}} = \frac{Z_m - Z_{01}}{Z_1 - Z_{01}} = S_1 \quad \frac{X_m - X_{02}}{X_2 - X_{01}} = \frac{Z_m - Z_{02}}{Z_2 - Z_{02}} = S_2 \qquad \text{(식 3.6.8)}$$

이라 하면,

$$\begin{aligned} Y_{m1} &= S_1(Y_1 - Y_{01}) + Y_{01} \\ Y_{m2} &= S_2(Y_2 - Y_{02}) + Y_{02} \\ Y_m &= \frac{1}{2}(Y_{m1} + Y_{m2}) \end{aligned} \qquad \text{(식 3.6.9)}$$

이 된다.

(4) 접합표정

촬영경로(course)상의 다수의 입체사진에 대해 각각 독립적으로 입체모형을 형성하면 입체모형에서 왼쪽 입체모형의 오른쪽 사진과 오른쪽 입체모형의 왼쪽 사진은 공통이므로 인접한 2개의 입체모형 모두에 이용할 수 있는 종접합점(pass point)이나 접합점(tie point)이 존재한다.

접합표정(successive orientation)은 인접한 2개 사진 및 입체모형에 공통인 요

소를 이용하여 입체모형의 경사와 축척을 통일시켜 1개의 통일된 스트립(strip)의 좌표계로 변환하는 것이다. 접합표정의 방법은 크게 나누어 ① 상호표정에서 얻어진 표정요소를 이용하는 방법과 ② 상호표정에서 얻어진 투영중심과 공통인 접합점의 입체모형좌표계를 이용하는 방법이 있다.

(5) 절대표정

절대표정(absolute orientation)은 가상좌표(사진(photo)좌표, 입체모형(model)좌표, 스트립(strip)좌표 및 블록(block)좌표)로부터 표정기준점좌표를 이용하여 축척 및 경사 등을 조정함으로써 절대좌표를 얻는 과정을 의미한다. 절대표정의 일반식은 식 3.6.10과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} = SR \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \qquad \text{(식 3.6.10)}$$

여기서, X_G, Y_G, Z_G는 절대좌표 X_m, Y_m, Z_m은 입체모형좌표, X_0, Y_0, Z_0는 입체모형좌표계의 원점위치이며, S는 축척인자, R은 회전행렬이다.

식 3.6.10에 포함된 미지의 외부표정요소는 S, X_0, Y_0, Z_0 및 R을 구성하는 3개의 회전각 K, Φ, Ω의 7개이다.

(6) 면 생성

표면에 정합점들이 3차원 입체 좌표계 속으로 재구성이 되었다면 이러한 점들을 연결하여 표면(surface)를 생성시키는 것이 필수적이다. 세 점을 이어서 삼각형을 만들어서 연결시키는 방법은 가장 표현하기 쉬운 표면 생성 기법이다. 각각의 정합점들은 그 자신의 입체 좌표와 그것이 연결되는 지점의 인덱스가 같이 부여되는 방식으로 쉽게 표현될 수 있다. 삼각형 표면 생성과 그 외의 표면 생성 기법 관한 여러 가지 방법들은 Uray(1997)의 논문에 잘 나타나 있다.

각각의 인덱스가 부여된 삼각형 표면화 정보들은 VRML(virtual reality modelling language)와 같은 일반적인 그래프 파일 형식으로 표현할 수 있다. 삼각형 표면화 기법 중 가장 대표적인 방법은 Delaunay(1934)가 제안한 삼각면화 기

법(triangulation)이다. 입체좌표계의 정합점들로부터 삼각면화 된 결과물이 그림 3.6.28에 나타나 있다.



(a) (b)

그림 3.6.28 입체좌표계의 정합점들로부터 생성된 삼각면

나. DEM 모델 정보 획득 장비 구성

본 실험에서 영상 이미지 획득을 위한 주요 장비는 다음과 같이 구성되었다.

(1) 고해상도 디지털 카메라

디지털 영상 계측의 정밀도는 대상물의 크기와 화소수에 따라 결정된다. 화소수가 많을수록 한 대상체가 가지고 있게 되는 픽셀점이 많아지므로 이미지의 분석에 있어 더욱 더 정밀한 분석이 가능하다. 화소수에 다른 디지털 카메라의 정밀도를 고려하여 본 실험에서는 Nikon 사의 D2X를 사용하였다. Nikon D2X의 제원은 다음 표 3.6.5와 같다. D2X와 함께 사용된 렌즈는 Nikkor AF-S DX 17-55mm F2.8G (IF)로 고해상도, 3장의 ED렌즈에 의한 색수차 보정, 3매의 비구면 렌즈에 의한 렌즈의 왜곡현상을 보정한다. Nikon 사에서 생산되는 표준줌렌즈 중 최상급으로 디지털 영상 계측 실험에 있어 정확성을 높일 수 있다. Nikkor AF-S DX 17-55mm F2.8G (IF)의 제원은 다음 표 3.6.6과 같다.

표 3.6.5 고해상도 디지털 카메라 (Nikon D2X)



Image Sensor(CCD)	Size : 23.7 x 15.7mm
Record Format	JPEG(Exif Ver. 2.1), RAW / DCF, DPOF
Max. Image Size	4,288 x 2,848(pixels)
Imgae quality mode	JPEG(fine / normal / basic), TIFF, RAW
Area of Coverage(mm)	38 ~ 155
Color Mode	sRGB, Adobe RGB, sYCC
Shutter Speed	30 ~ 1/8,000 sec, Bulb
Minimum Focal Length	General : 30 cm, Macro : 2 cm
ISO	100 ~ 800
Size/Weight	156x158x80 mm/1.2 kg

표 3.6.6 D2X 렌즈의 제원 (Nikkor AF-S DX ED 17-55mm F2.8G (IF))



Focal Length	17mm - 55mm
Angle of View	28° ~ 79°
Lens Iris	F/2.8
Lens Scale Factor	1/5
Minimum Distance to Object	0.36m
Filter Diameter	77mm
Size(Diameter x Length)/Weight)	85.5×110.5mm/755g

(2) 코디드 타겟과 포인트 클라우드

디지털 이미지로부터 생성되는 3D DEM 모델의 정확도를 높이기 위해 코디드

타겟이 사용되어야 한다(그림 3.6.29). DEM 생성 프로그램 수행 시 코디드 타겟(Coded Target)은 이미지 상에서 특정지점으로 인식되어 각각 다른 방향으로 촬영된 이미지들 상에서 동일한 지점을 자동마킹을 하여 수동마킹보다 더 처리가 빠르고 정확한 정합점을 찾아준다. 또한 코디드 타겟을 프로그램에서 처리 시 수동마킹을 하더라도 각각의 코디드 타겟일 고유한 형상 때문에 서로 다른 위치 상에서 동일한 대상체를 촬영한 이미지들의 동일한 지점을 쉽게 인식할 수 있다. 그러나 본 실험에서는 코디드 타겟을 제작하여 3D DEM 모델 생성을 위한 시편에 설치 시 코디드 타겟의 크기에 의해 시편 표면 거칠기의 정량적 평가에 위한 연구에 어려움이 있게 된다. 실험에 사용되는 피사체의 크기와 평가하고자하는 영역이 코디드 타겟의 크기에 의해 방해가 된다면 코디드 타겟이 아닌 대용적으로 사용할 타겟이 필요하게 된다.

본 연구에서는 코디드 타겟의 대체용으로 시편에 약 20 mm x 50 mm로 작게 잘라낸 마킹테이프를 시편에 부착하여(그림 3.6.30) 각각 다른 각도에서 촬영된 이미지상에서 기준점 및 정합점을 쉽게 찾을 수 있도록 하였다. 그림 3.6.31은 3D DEM 생성 과정시 포인트 클라우더를 이용하여 파단면에 생성한 포인트를 나타낸다. 그림 3.6.31 A는 고해상도 카메라로 촬영시 카메라에 장착된 플래쉬와 포인트 클라우더가 동조되어 촬영된 이미지 정보이며, 그림 3.6.31 B는 이미지 정보상에 있는 파단면의 한 부분을 확대하여 나타낸 것이다. 그림 3.6.31 B에 나타난 파단면상에 부착된 마킹테이프는 서로 다른 위치에서 촬영한 이미지 정보들 간의 정합점을 찾을 때 기준이 되는 역할을 한다. 파단면의 각 구역에 부착된 청테이프는 3D DEM을 이용하여 거칠기 분석시 영향을 주지않도록 매끈한 면 상에 부착하였다.

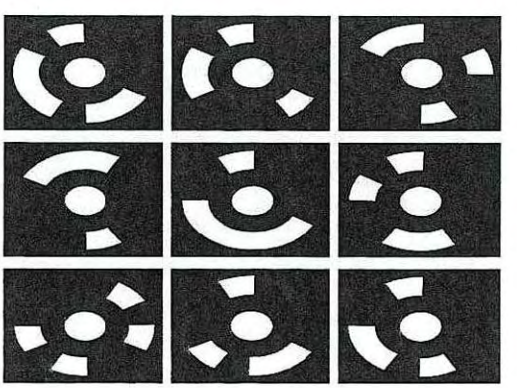


그림 3.6.29 코디드 타겟

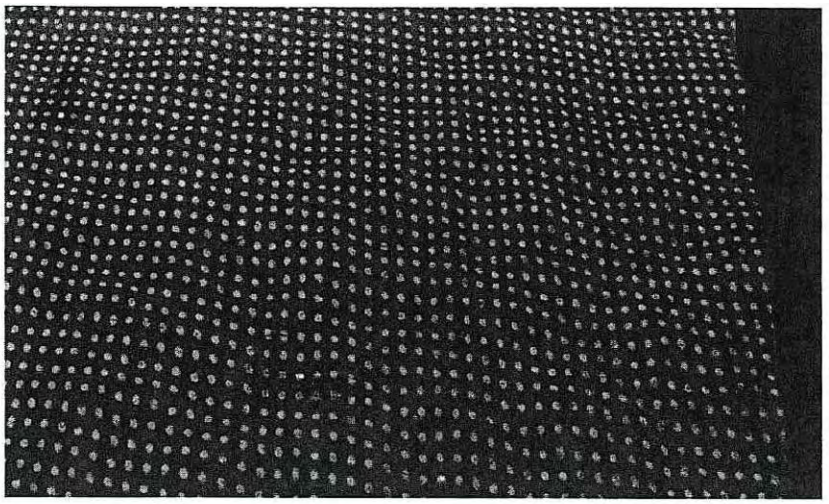


그림 3.6.30 파단면 상에 부착된 마킹테이프

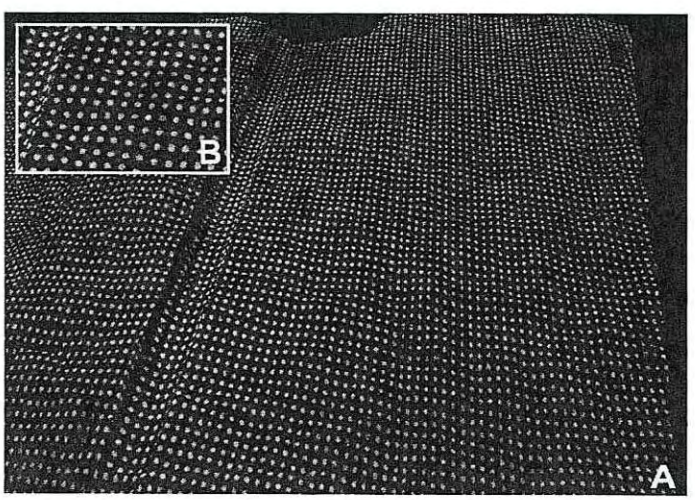


그림 3.6.31 파단면에 생성된 포인트 클라우드

시편의 거칠기의 정량화 분석을 위한 3D DEM 모델을 생성에는 생성과정에서 디지털 이미지 정합을 위한 포인트의 수가 많을수록 생성하는 모델의 정확도 및 정밀도가 높아진다. 이러한 조건을 충족시키기 위해 포인트 클라우더를 이용하여 시편에 포인트 클라우드를 생성하였다. 포인트 클라우더는 카메라의 플래쉬와 동조하여 촬영 시 카메라의 셔터속도와 동일하게 촬영 대상물에 빛 포인트들이 투사되어 영상 정보에 수많은 포인들을 생성하게 해준다. 실험에 사용된 포인트 클라우더의 제원은 다음 표 3.6.7과 같다.

표 3.6.7 포인트 클라우더



Classification	Features
Accuracy	0.001~0.025 mm per 1 m of object
Point number	6,000~23,000
Weight	5.0 kg
Environments of temperature	0~40 °C

(3) 3D DEM 모델 처리 소프트웨어

EOS System Inc.사의 포토모델러 5.0은 Window OS 상에서 사진으로부터 대상물의 치수나 3D 모델을 생성해 내는 프로그램이다. 이 프로그램은 카메라를 센서로 하여, 단 시간 내에 대상물의 세부사항에 대한 매우 정확한 정보를 얻으며, 모니터 상에서 나타난 사진에서 작업을 하여 그에 대한 모델링 및 치수를 얻어내는 소프트웨어이다. 포토모델러는 대상체를 서로 다른 각도에서 촬영한 최소 2장 이상의 이미지들을 이용한다. 촬영 대상체의 3차원 모델의 생성 및 좌표를 추출하기위해서는 최소 2장 이상의 이미지 상에서 서로 다른 위치에 투사되었지만 실제로 동일한 타겟 포인트가 각 이미지별로 최소 6개가 필요하다. 포토모델러는 최소 2장의 이미지와 각 이미지당 최소 6개의 타겟을 이용하여 수행을 한다. 이 프로그램은 스테레오 상의 정합점을 자동적으로 인식한다(Making). 그리고 Making으로 생성된 무차원 포인트들을 다른 위치에서 촬영된 다수의 사진 상에 위치한 동일한 타겟의 이미지를 찾아 그 타겟의 정합점과 이미지 간을 연결시키는 레퍼런싱

(Referencing) 작업을 한다. 6개 이상의 정합점들을 레퍼런싱을 했다면 이를 프로세싱(Processing) 하여 각 측정점들의 3차원 좌표를 계산한다. 이러한 특징을 가진 포토모델러는 사면변위의 모니터링, 터널의 내공변위 측정에 이용된다. 또한 절삭된 면을 가진 시편의 3차원 모델생성에 사용된다. 터널의 내공변위 측정의 경우 광파기를 이용하는 일반측량기법과의 비교에서 정확도 및 처리시간이 토탈스테이션을 사용하는 터널의 첨단침하 변위계측보다 더 우수함을 보여준다.

본 연구에서는 노치공에 의한 발파로 생긴 화강암 시편의 파단면과 일반원형공에 의한 파단면의 거칠기를 정략적 수치들로 비교·분석하기 위해 각 파단면을 디지털 영상 계측을 하였다. 정략적 수치들의 추출을 위한 과정으로 3D DEM을 생성을 위해 포토모델러 5.0을 사용하여 본 연구를 수행하였다.

다. 시험방법

DEM 생성을 위한 대상 파단면의 디지털 영상 사진을 획득시 측정 대상이 커질수록 이미지 상에 표현이 되지 않는 면(hidden surface)이 발생할 수 있다. 본 실험에서는 이러한 면을 최소화하기 위해 대상시험편을 4등분하였다(그림 3.6.32). 또한 사용된 소프트웨어 상에서 생성하는 모델의 포인트 수가 많을수록 거칠기면의 정확도가 높아지지만 처리속도가 떨어지고 계산 상 오차의 범위가 커지게 된다. 따라서, 각각의 4등분한 면의 3차원 DEM을 생성하고, 생성된 4개의 DEM을 합성하는 방법을 사용하였다. 3차원 DEM 생성을 위한 절차는 다음과 같다.

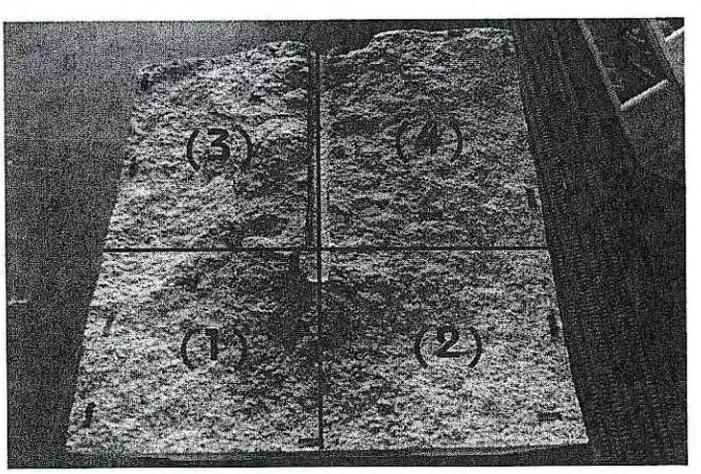


그림 3.6.32 시험편 파단면 DEM 생성을 위한 구역 분할

(1) 장비의 설치

① 파단된 시편의 천공영역면에 빛포인트가 최대한 원형으로 생성될 수 있도록 포인트 클라우더의 렌즈가 천공부분의 모든 면을 바라다볼 수 있는 위치에 포인트 클라우더를 설치한다(그림 3.6.33).

② 파단면 전체에 골고루 빛포인트가 생성될 수 있도록 삼각대에 설치된 포인트 클라우더의 높이 및 위치를 조절한다. 이때 포인트클라우더의 각도는 헤드 부분이 파단면과 거의 수직하게 한다.

③ 높이 및 위치 설정 후 촬영된 이미지 상 빛포인트가 선명하게 촬영될 수 있도록 포인트클라우더의 렌즈조리개를 조작한다.

④ 그림 3.6.34와 같이 포인트클라우더와 카메라의 플래쉬를 싱크선으로 연결하여 카메라 플래쉬가 터질 때 포인트클라우더가 동조되어 빛포인트가 생성되는지 확인한다.

⑤ 시편의 면 상에 마킹테이프를 부착한다. 이때 면의 거칠기 분석시 영향을 주지않는 매끈한 면 상에 마킹테이프를 부착한다.

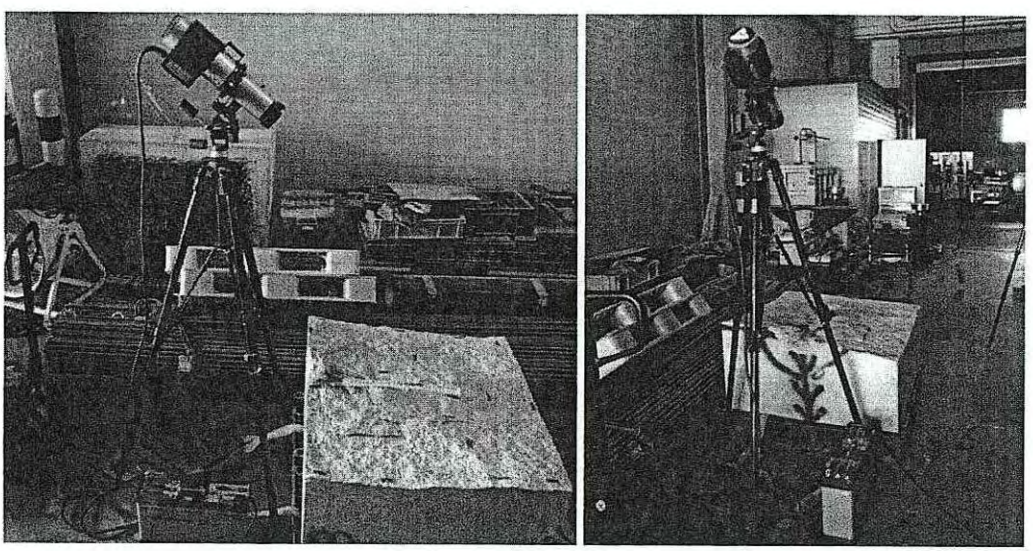


그림 3.6.33 파단면 상에 정합점 생성을 위한 포인트 클라우더의 설치



그림 3.6.34 플래쉬와 포인트클라우더의 동조

(2) 이미지 정보 획득 방법

DEM 생성을 위한 이미지 획득시 대상 파단면 영역에 생성된 빛포인트의 수가 많을수록, 대상 파단면과 카메라 렌즈의 거리가 멀어져 획득된 이미지 상의 포인트의 화소수가 작을수록 정합점을 마킹시 정밀도 및 정확도에 대한 신뢰도가 낮아지게 된다. 또한 측정대상이 커질수록 이미지 상에 표현되지 않는 면(hidden surface)이 발생 할 수 있다. 본 실험에서는 3차원 DEM 생성시 정확도 및 정밀도에 대한 신뢰도를 높이기 위해 촬영할 면을 4등분하여 각각의 영역별로 3차원 DEM을 생성하고 생성된 4개의 면을 합성하는 방법을 사용하였다. 본 이미지 정보 획득 방법은 다음과 같은 절차를 가진다.

- 임의로 4등분한 파단면의 한 영역을 촬영시 어느 한 파단영역이 카메라의 뷰파인더 안에 꽉 차도록 렌즈초점거리를 조절하여 고정시킨다. 본 실험에서 렌즈초점거리를 17mm로 고정시켜 실험하였다.

- 촬영 대상 영역을 중심으로 동서남북 위치에서 총 4장의 빛포인트가 생성된 파단면의 이미지들을 획득한다(그림 3.6.35, 3.6.36).

- 각각의 영역별로 생성한 3차원 DEM들을 하나의 전체 파단면으로 합성하기 위해 촬영대상 영역면과 접하는 다른 영역의 면과 중첩되는 영역까지 이미지를 획득한다.

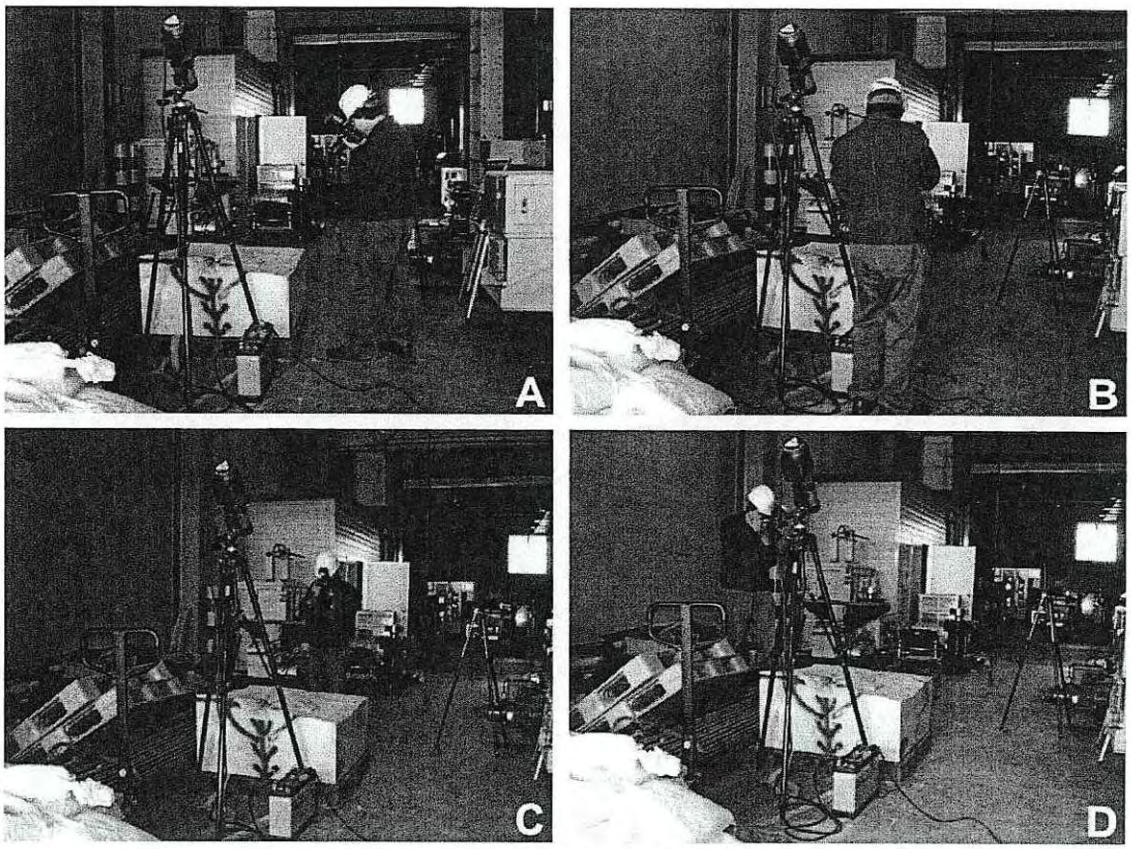


그림 3.6.35 이미지 획득을 위한 대상 파단면의 촬영 위치

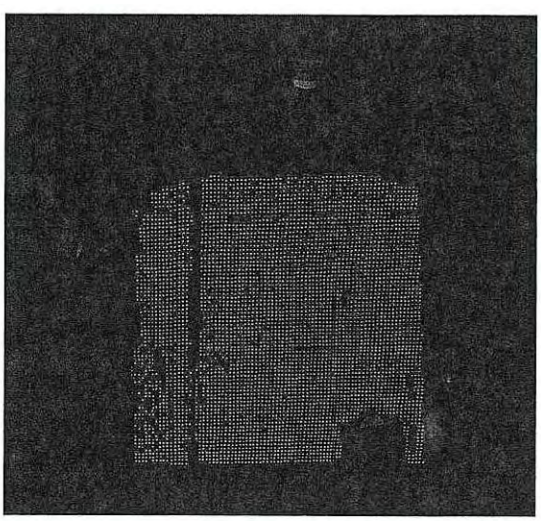


그림 3.6.36 시험편 파단면의 DEM 생성을 위한 구역 분할 및 이미지 획득을 위한 카메라 위치

그림 3.6.37은 포인트클라우더가 설치된 위치에서 각각의 영역별로 촬영된 이미지를 보여준다. 그림 3.6.37 A는 그림 3.6.37 B와 C의 영역이 어느 정도 포함되도록 촬영되었다. 그림 3.6.37 A에 나타난 영역으로 만들어진 3차원 DEM을 그림 3.6.37 B와 C의 영역으로 만들어진 3차원 DEM과 합성하기 위한 것이다. 마찬가지로 그림 3.6.37 B의 영역은 그림 3.6.37 A와 D의 영역이 포함되도록 이미지를 획득하였다.

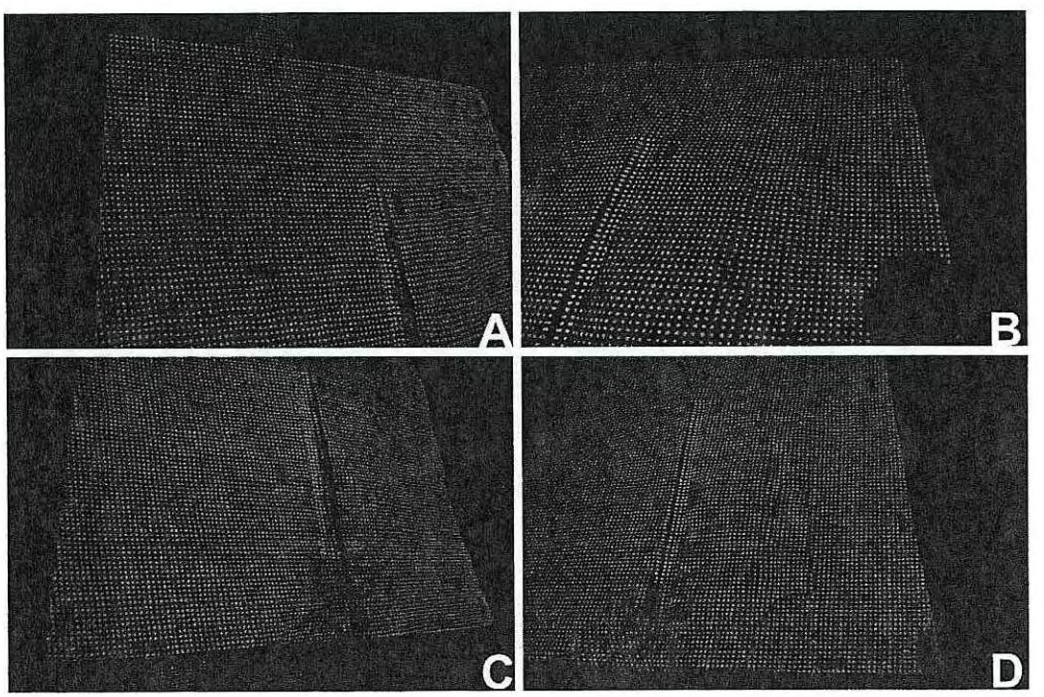


그림 3.6.37 각각의 영역별로 획득된 이미지

라. 3D DEM 모델 생성

노치공을 가진 파단면과 일반원형공을 가진 파단면을 4구역으로 나누어 각각 한 구역씩 동서남북으로 하여 4장의 영상 정보를 획득하였다. 하나의 시편당 총 16장의 영상 정보를 이용하여 하나의 3D DEM을 생성하였다. 획득한 이미지를 이용하여 3D DEM을 만드는 과정은 다음과 같다.

- 한 시편을 4구역으로 나누어 촬영한 이미지들 중 하나의 구역을 동서남북 방향으로 촬영한 이미지 4장을 3D 생성 소프트웨어 상에 업로드한다. 이 때 카메라

의 정보 및 렌즈의 정보를 가진 캘리브레이션 파일을 소프트웨어 상에서 인식을 시켜 업로드한 이미지들의 정보를 소프트웨어 상에 주게 한다.

- 다른 위치에서 촬영한 각 4장의 이미지 상에서 시편의 모서리 상에 부착한 청테이프에 투사된 타겟포인트들을 기준점으로 하여 수동마킹 한다.

- 수동마킹한 포인트들을 서로 비교하여 동일한 정합점을 찾아 수동으로 레퍼런싱 한다. 이 때 각각의 사진들에 레퍼런싱 된 포인트 수가 최소 6개가 되도록 한다.

- 레퍼런싱 된 포인트들을 이용하여 프로세싱을 한다. 프로세싱을 한 포인트들은 3차원 좌표를 가진 3차원 점들로 생성된다. 추출된 6개 이상의 3차원 점들은 자동 레퍼런싱과 프로세싱의 기준점 및 4개의 구역으로 나누어져 처리한 3차원 모델들을 중첩할 때의 기준점이 된다.

- 수동으로 생성한 기준점들은 자동 레퍼런싱의 기준 좌표가 되어 수많은 포인트들의 3차원 포인트 생성에 기준이 된다.

- 소프트웨어 상에서 이미지 상의 모든 포인트들을 한 스텝으로 처리할 경우 컴퓨터 사양에 따라 다르지만 소프트웨어의 해석에 따른 처리속도 및 그에 따른 오차가 생긴다. 따라서 청테이프에 투사되어 기준점으로 정하여 선작업으로 만들어진 기준점들의 주변 영역의 포인트들을 컴퓨터 처리속도에 맞는 포인트들의 수를 잡아가면서 자동 레퍼런싱 및 프로세싱을 하여 3차원 좌표점들을 늘려나간다. 스텝별로 생성된 포인트들은 다음 스텝에서 생성할 3차원 포인트들의 기준점들이 된다. 이 기준점들은 다음 스텝에서 처리되는 포인트의 정밀도를 높이지만 정확도면에서 오차를 발생할 수 있다. 따라서 각 스텝별로 생성된 포인트들의 RMS값을 비교하여 해석시 오차를 발생할 수 있는 포인트들은 제거하였다.

- 이러한 과정을 통해 파단면의 한 영역을 지닌 3차원 모델을 생성한다. 다른 영역에서의 모델 생성 역시 위의 과정들을 반복하여 수행하였다.

- 각 영역별로 만들어진 4개의 3차원 모델들을(그림 3.6.38) 각각의 모델별로 천공면 주위에 부착한 청테이프에 투사된 빛포인트로 만들어진 3차원 포인트를 정합점으로 하여 하나의 모델로 중첩시켜 생성하였다(그림 3.6.39).

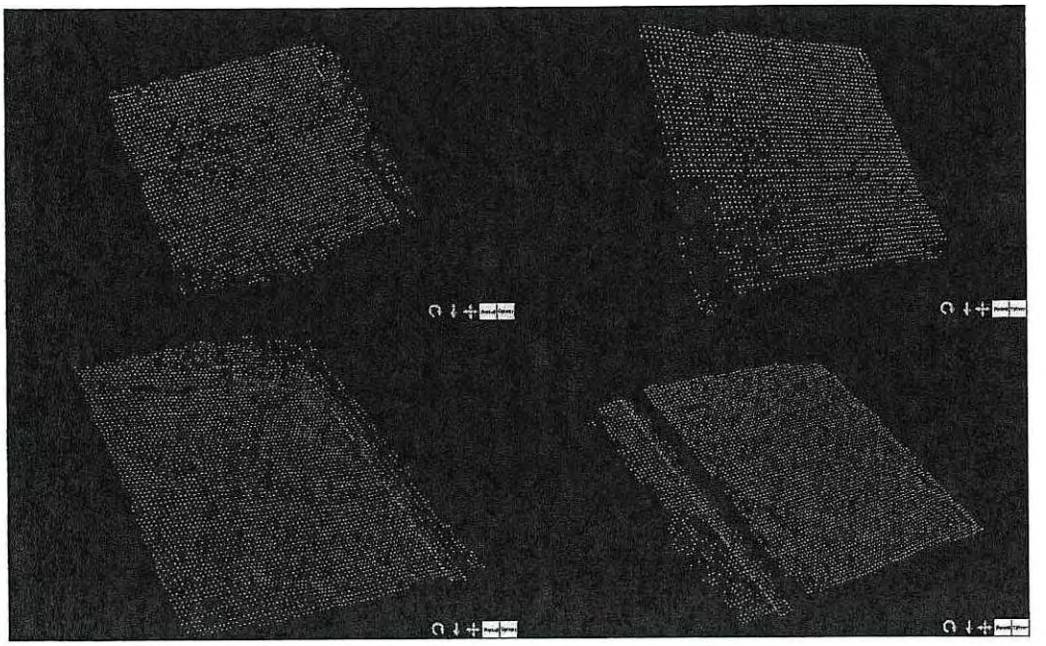


그림 3.6.38 대상체의 구역별 DEM 모델

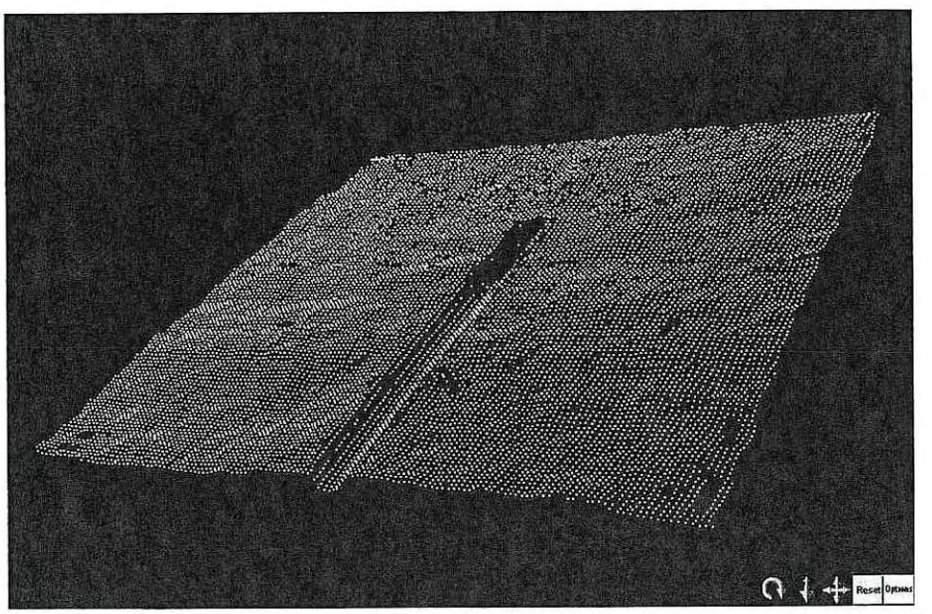


그림 3.6.39 파단면 전체 DEM

마. 생성된 3D DEM 모델 고찰

노치공으로 발파된 시편과 일반원형공으로 발파되어 파단면을 가진 시편은 각각 13111개와 9845개의 포인트들을 가진 3D DEM으로 생성되었다. 그림 3.6.39에서 보면 파단면에 빛포인트 클라우드가 파단면에 투사되어 이미지 상에 포인트들로 이루어진 모든 점들을 전부 3차원 포인트로 생성화하지 못하였다. 이는 3D DEM 모델 생성시 3차원 파단면 모델이 실제 모델과의 정확도에 대해 오차를 발생하는 3차원 포인트들의 탈락과 초기 마킹 및 레퍼런싱 과정에서 기준점이 된 청테이프 면에 투사된 포인트의 탈락으로 인한 것이다. 그런데 천공의 끝부분은 노치공을 가진 파단면 모델과 원형공 파단면 모델 둘 다 촬영 시 빛포인트를 뿌려주었음에도 불구하고 3차원 좌표를 가진 점 생성에서 탈락되었다. 이는 파단면과 포인트 클라우더가 빛을 투과하는 각과의 관계에서 일어난 결과이다. 소프트웨어 상에서 점을 마킹 시 점의 형상이 원형에 가까울수록 마킹의 정확도에 대한 신뢰성이 높다. 따라서 포인트 클라우더의 렌즈 각도와 대상체의 면과의 각도는 수직에 가까울수록 이미지 상에서 획득된 포인트에 대한 마킨 신뢰도가 높아지게 된다. 본 실험에서는 실험장소의 특성 상 포인트 클라우더가 파단면과 수직이 되도록 하지 못하고 최대한 수직에 가깝도록 하기 위하여 포인트 클라우더를 설치한 삼각대의 높이를 최대한 올리고 포인트 클라우더는 헤드 부분을 최대로 숙여 실험을 수행하였다. 그러나 이러한 실험조건에 의해 파단면의 천공 옆부분과 끝부분에 투사된 빛포인트들이 원형을 유지하지 못하고 타원 형상으로 이미지 상에서 획득되었다. 타원 모양의 포인트가 수동마킹이 되어도 3D DEM 모델 생성을 위한 처리 과정에서 모델의 정확도를 떨어뜨리는 오차의 원인으로 작용하여 3차원 파단면 모델로 나타내었다.

4. 파단면 DEM 거칠기 분석

암반의 불연속면에 대한 다양한 특성 중 기하학적 특성 및 거칠기(roughness)와 같은 형상에 초점이 맞추어진 분석 방법이 다양하게 시도되어 왔다. 표면 거칠기는 금속 표면과 같은 나노크기의 측정을 위한 현미경 측정법(김종태 외, 2004)등과 같이 정밀한 측정법도 이용되고 있으나 대상체의 스케일의 제약이 있다. 본 연구에서는 최근에 급속도로 발전이 되고 있는 디지털 영상 계측을 이용한 파단면의 DEM 모델을 생성하고 DEM 모델의 거칠기를 정량화 파라미터에 의해 수치화 하는 방법으로 노치 선균열의 효과를 평가하고자 하였다.

가. 거칠기의 정량화 방법

(1) 통계적 파라미터 방법

거칠기의 정량화를 위해 이용되는 통계적 파라미터로는 평방평균(RMS, Root Mean Square), 프로파일 기울기의 평방평균(Z_2), 평균거칠기각(Ai, micro average angle), 거칠기 형상지수(R_P, Roughness Profile Index), 구조함수(SF, Structure Function), 표면 거칠기 형상지수(SR_P, Surface Roughness Profile Index)등이 있다.

각 통계적 파라미터를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$RMS = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{(식 3.6.11)}$$

$$Z_2 = \left[\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n-1}\left(\frac{y_{i+1}-y_i}{\triangle x}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{(식 3.6.12)}$$

$$A_i = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n-1} I_i = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n-1}\tan^{-1}\left(\frac{y_{i+1}-y_i}{x_{i+1}-x_i}\right) \quad \text{(식 3.6.13)}$$

$$R_p = \frac{1}{\cos(A_i)} = \sum_{i=1}^{n-1}\frac{(\triangle x_i^2 - \triangle y_i^2)^{\frac{1}{2}}}{L} \quad \text{(식 3.6.14)}$$

$$SF = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n-1}(y_{i+1}-y_i)^2 \quad \text{(식 3.6.15)}$$

(2) 프랙탈 차원에 의한 방법

유클리드 기하학에서 직선, 평면, 육면체 및 구 등의 규칙적인 형상을 정수의 차원을 도입하여 설명하였다. 1차원 정수는 직선, 2차원 정수는 평면, 3차원 정수는 육면체 및 구를 설명하게 된다. 그러나 암석 표면의 거칠기 단면은 그 거칠기의 단면에 따라 1(차원)과 2(차원) 사이의 비정수 차원을 가지게 된다. 이 비정수 차원이 프랙탈 차원이며 공간적 변동성의 정량화에 효과적으로 사용될 수 있다. 이러한 프랙탈 차원의 산정에는 박스집계법 (box counting method)이 사용될 수 있다.

한 평면을 분할하는 사각요소의 크기가 r일 때 절리 트레이스를 포함하는 사각요소의 개수가 N(r)이라면 다음과 같은 식을 가진다.

$$N(r) \propto r^{-D_B} = B_r^{-D_B} \qquad \text{(식 3.6.16)}$$

여기서, B_r은 비례상수, DB는 박스집계법에 의한 프랙탈 차원이다.

나. 거칠기 정량화 분석 소프트웨어

서퍼(Surfer)는 2D 그래픽 프로그램이 Grapher와 함께 Golden Software INC에서 제작한 프로그램으로 Microsoft Windows 환경에서 실행할 수 있는 3D 그래픽 프로그램이다. Surfer는 불규칙한 XYZ 데이터 파일을 규칙적인 간격을 갖는 Grid 데이터 파일로 만들어서 이것을 기초로 하여 Contour Map이나 Surface Plot을 그릴 수 있다. 또한 Surfer에 있는 그림들에 Boundary Information을 추가하거나 데이터 포인트를 첨가하여 보다 더 향상 된 그림들을 플로팅 할 수도 있다. 이것뿐만 아니라 여러 개의 그림들을 서로 결합시킬 수도 있다. 텍스트를 추가하여 그림에 주석을 첨가할 수도 있다. 또한 하나의 페이지에 여러 개의 그림들을 위치시켜 플로팅 할 수도 있다.

Surfer는 또한 Grid 파일로부터 표면 아래의 체적이나 두 표면사이의 체적들을 계산할 수 있다; 기준면 위·아래의 체적 계산, 표면적 또는 표면의 투영면적의 계산, 절단면에 대한 데이터 파일 만들기, Grid 파일과 데이터 파일 사이에 있는 차이 계산 등 여러 가지 수학적 계산이 가능하다.

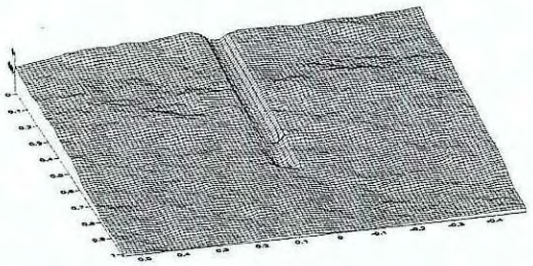
본 연구에서 포토모델러로 수행하여 생성된 DEM 모델을 이루는 3차원 포인트들을 추출하여 이들 포인트들의 정략적 분석을 위해 Surfer를 이용하여 그리드 모델

및 Contour Map을 만들었다.

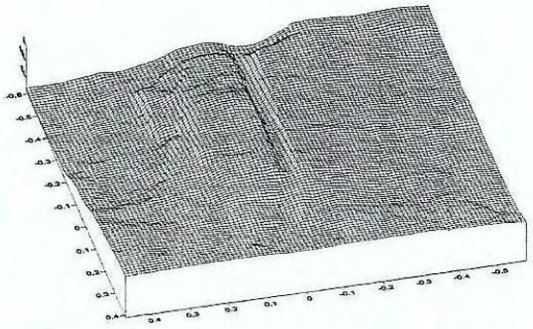
다. 시험편 파단면 DEM 거칠기 파라미터

(1) 거칠기 정량화를 위한 시험편 파단면 DEM

그림 3.6.40은 3차원 디지털 영상 계측 후 포토모델러 상에서 3D DEM으로 생성한 노치공 발파와 일반원형공 발파에 의해 이등분된 파단면의 3차원 좌표를 가진 포인트들을 데이터 값으로 추출하여 서퍼에서 그 데이터들을 그리드 형태로 표현한 것이다. 발파공에 의한 파단면 형성 메커니즘을 고려하여 각 DEM 파단면을 등분하였다. 발파공의 주변에서 파단면의 끝부분까지 등분하여 거칠기 영역을 구분하였다. 각 파단면 DEM 그리드는 그림 3.6.41에 나타난 것와 같이 등분의 방향은 발파공을 기준으로 가로면과 세로면으로 등분하였다. 노치공 파단면과 일반원형 파단면의 구분된 영역들을 직사각형 격자로 나누었다. 각 영역별로 재구성된 발파공 파단면의 DEM이 그림 3.6.42와 3.6.43에 나타나 있다. 이러한 절차를 통해 생성된 각 영역들은 통계적 파라미터와 프랙탈 차원을 이용하여 거칠기 측정하였다.

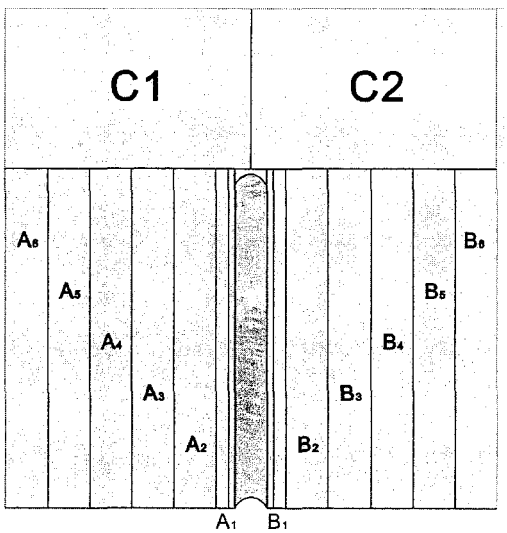


(a) 노치공 발파에 의해 생성된 파단면 DEM

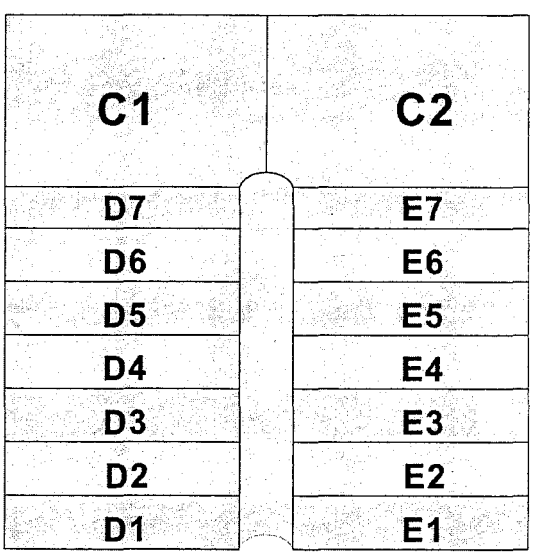


(b) 일반공 발파에 의해 생성된 파단면 DEM

그림 3.6.40 노치공과 일반공 발파에 의해 생성된 파단면의 DEM 비교

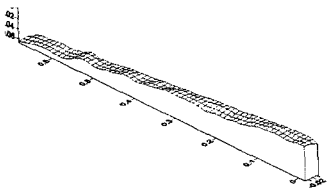


(a) 세로

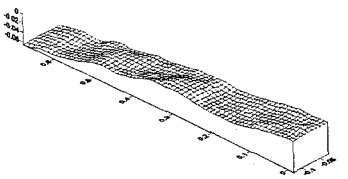


(b) 가로

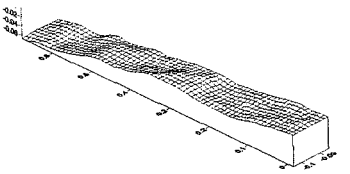
그림 3.6.41 시험편 파단면의 거칠기 측정 영역



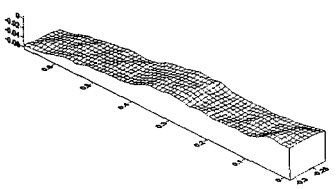
A1



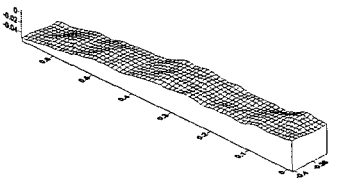
A2



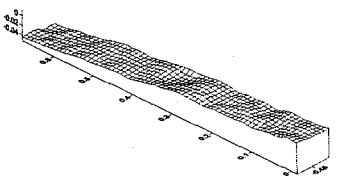
A3



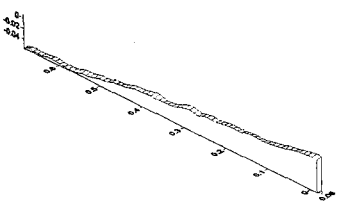
A4



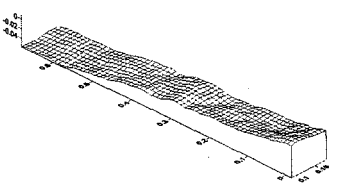
A5



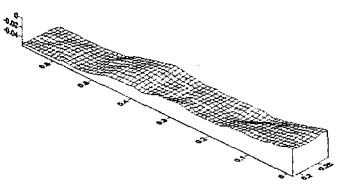
A6



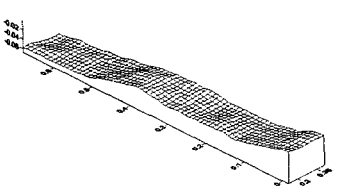
B1



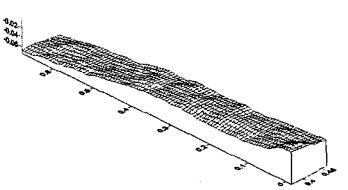
B2



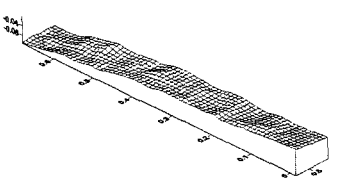
B3



B4

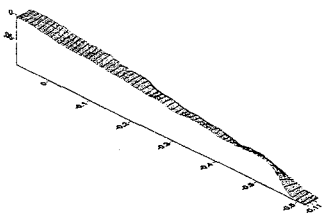


B5

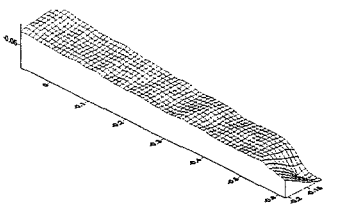


B6

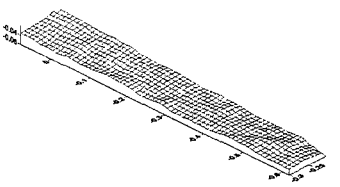
(a) 노치 발파공 파단면



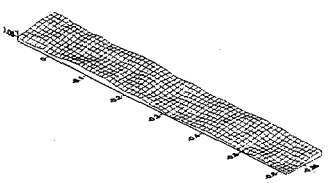
A1



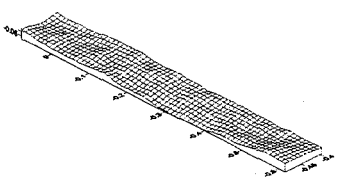
A2



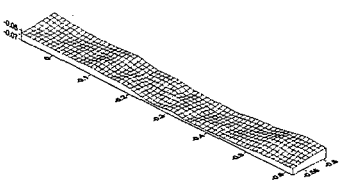
A3



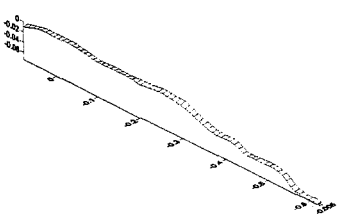
A4



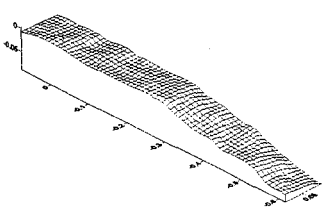
A5



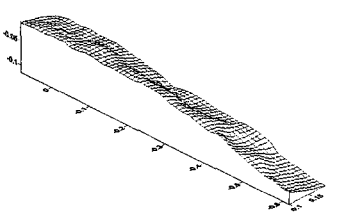
A6



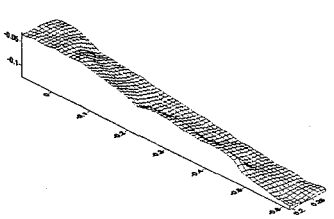
B1



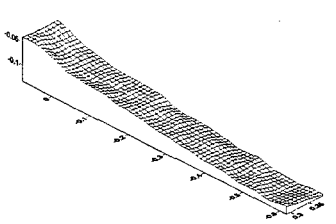
B2



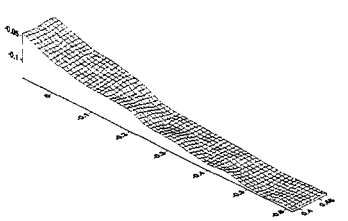
B3



B4



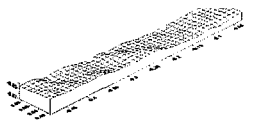
B5



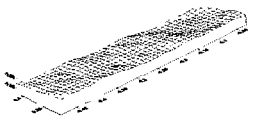
B6

(b) 일반 발파공 파단면

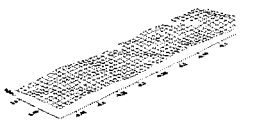
그림 3.6.42 발파공 파단면의 영역별 DEM (세로)



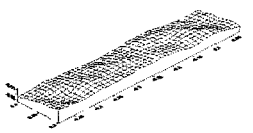
D1



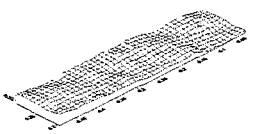
D2



D3



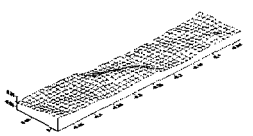
D4



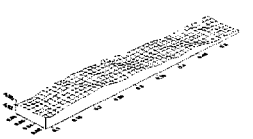
D5



D6



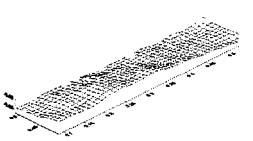
D7



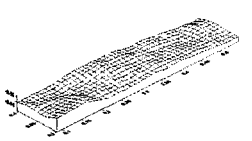
E1



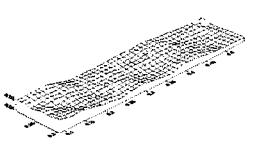
E2



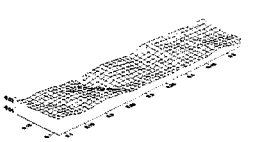
E3



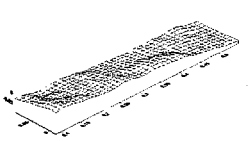
E4



E5

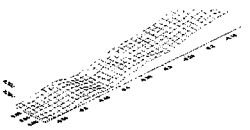


E6



E7

(a) 노치 발파공 파단면



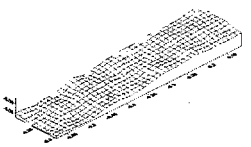
D1



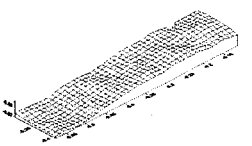
D2



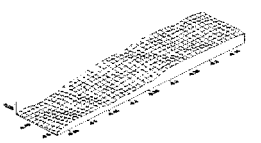
D3



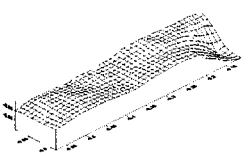
D4



D5



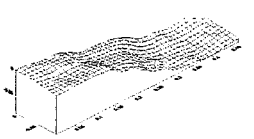
D6



D7



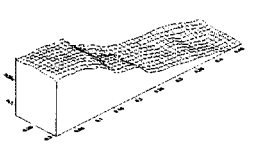
E1



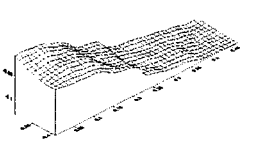
E2



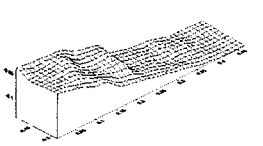
E3



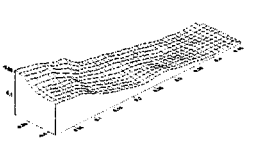
E4



E5



E6



E7

(b) 일반 발파공 파단면

그림 3.6.43 발파공 파단면의 영역별 DEM (가로)

(2) 통계적 파라미터

본 연구에서 사용된 시험편 파단면 DEM 거칠기의 통계적 파라미터로 한국건설기술연구원의 김광염 박사에 의해 제안된 면 거칠기 형상지수(Surface Roughness Profile Index, SRp)를 이용하였다(김광염, 2008). SRp는 DEM 각 절점 높이의 표준편차(SDH, Standard Deviation of Height)와 거칠기 형상 지수(Roughness Profile Index)를 응용한 대상 표면의 총 면적을 투영된 평면 면적으로 나눈 무차원량이다. SRp 값이 클수록 DEM 면의 굴곡이 크다는 것을 의미한다. 일정한 영역으로 구분된 파단면의 표면적을 계산하고 그 영역 내의 격자수를 계산하여 각 영역별로 SRp를 계산하였다.

(3) Box Counting Method를 이용한 거칠기 정량화

본 연구에서는 사진계측을 이용하여 생성한 일반공과 노치공에 의한 파단면의 DEM을 정량적인 평가·분석을 위하여 프랙탈 차원을 산정하였다. 프랙탈 분석 방법 중 하나인 Box Counting 기법을 이용한 프랙탈 차원 상수 D를 산정하여 일반공과 노치공의 파단면 거칠기를 비교·분석하였다. 일반적으로 Box Counting Method에 의한 프랙탈 차원은 하천, 해안 등의 선형의 특징을 가진 지형에 적용된다. 프랙탈 차원이 적용되는 지형의 형상은 평면도가 이용된다. 본 연구에서는 기존의 평면도를 이용한 프랙탈 차원이 아닌 단면도를 이용하였다. 분할된 파단면의 시편을 ZY축을 가진 2차원 단면으로 하여 그 단면이 가진 높이를 Box Counting Method에 적용하였다. 프랙탈 차원은 지형이 복잡할수록 그 값이 커진다. 본 연구에서 사용한 Box Counting Method은 다음과 같다.

발파공의 주변에서 파단면의 끝부분까지 등분하여 거칠기 영역을 구분한 파단면의 영역별 DEM을 그림 3.6.44와 같이 ZY축을 가진 2차원 단면으로 하여 각각을 2bit BMP 이미지 파일로 추출한다.

추출된 2차원 단면은 파단면의 거칠기가 높이로 표현된다. 거칠기가 높이로 표현된 2차원 단면을 한 변의 길이가 S인 정사각형 요소들로 이루어진 조사창에 투영시켜 2차원 단면을 포함하고 있는 정사각형 요소의 개수를 센다(그림 3.6.45). 한 변의 길이 S를 다르게 하여 만들어진 조사창에 2차원 단면을 투영시켜 단면을 포함하고 있는 요소(박스)의 수를 센다(그림 3.6.46). 본 연구에서는 정사각형 요소의 한 변의 길이 S의 변화는 일정한 비율로 증가시켰으며 10개의 서로 다른 길이

를 가진 요소들을 이용하였다. 그리고 각각의 길이가 다른 요소에 따라 측정된 횟수는 가장 작은 S1 길이의 요소일 때는 1회, 다음 일정한 비율로 증가된 S2 길이를 가진 요소는 2회, S3 길이인 요소는 3회로 하여 한 변의 길이가 S10인 요소를 높이가 거칠기로 표현된 2차원 단면을 투영시켰을 때는 10회 측정이 이루어졌다. 박스를 놓는 위치에 따라 박스가 2차원 단면을 포함하고 있는 영역의 위치가 달라지게 된다. 박스의 크기가 커질수록 각 위치에 따른 박스의 수 오차가 커진다. 따라서 한 변의 길이 S가 증가할수록 측정횟수도 증가시켜 측정이 이루어졌다. 이러한 방법을 반복하여 만들어진 정사각 박스의 한 변 길이 S와 2차원 단면을 포함한 박스의 수의 관계를 그림 3.6.47과 같이 log-log 그래프로 나타낸다. 이 때 그래프 상에는 각 단계별 정사각 박스는 평균으로 나타낸다. 이러한 과정을 통해 파단면의 각 영역별 프랙탈 차원 D_B를 계산하였다.

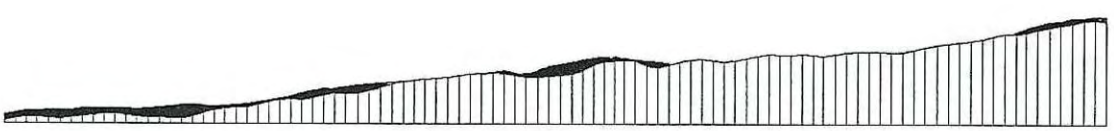


그림 3.6.44 ZY축만을 가진 DEM

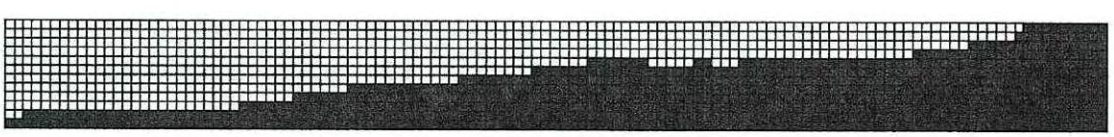


그림 3.6.45 한 변이 S1인 정사각형으로 이루어진 Box Counting Method

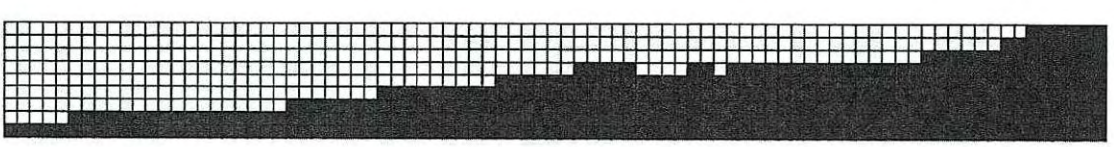


그림 3.6.46 한 변이 S2인 정사각형으로 이루어진 Box Counting Method

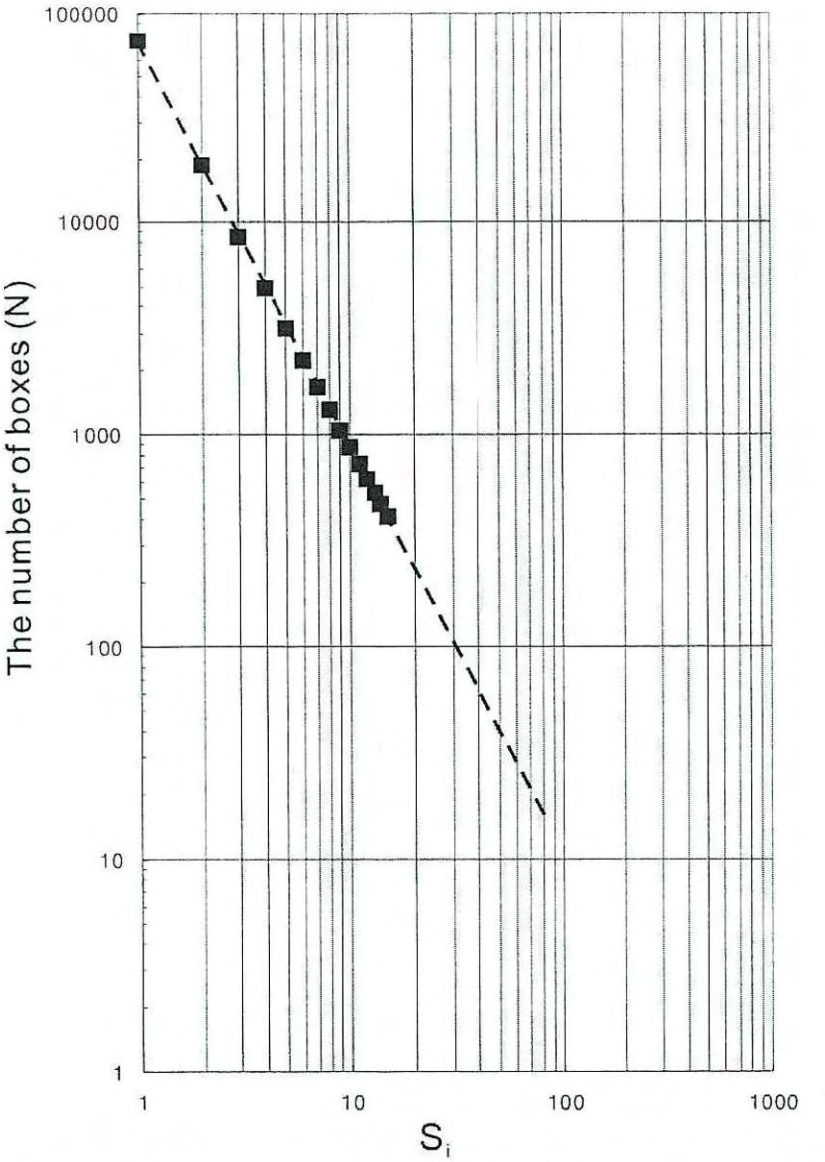


그림 3.6.47 Box Counting Method에 의한 log-log 그래프

라. 정량화된 파단면 DEM 거칠기 파라미터 분석

(1) SRp 값에 의한 비교

표 3.6.8 발파 파단면의 면 거칠기 형상지수 비교 (세로)

거칠기 측정 영역		면 거칠기 형상지수, SR_p					
		노치 발파공			일반 발파공		
		표면적	투영적	SR_p	표면적	투영적	SR_p
A	section 1	22.4557	21.9139	1.0247	25.0539	22.0985	1.1337
	section 2	67.0751	65.7438	1.0203	68.7346	66.2954	1.0368
	section 3	67.0240	65.7445	1.0195	67.2424	66.2940	1.0143
	section 4	67.1154	65.7438	1.0209	67.1835	66.2954	1.0134
	section 5	66.8343	65.7445	1.0166	67.1857	66.2954	1.0134
	section 6	59.3665	58.4391	1.0159	59.7053	58.9293	1.0132
	total	349.871	343.330	1.0191	355.1054	346.208	1.0257
B	section 1	7.5037	7.3046	1.0273	7.6135	7.3655	1.0337
	section 2	67.0177	65.7438	1.0194	68.3681	66.2961	1.0313
	section 3	67.0513	65.7445	1.0199	72.5624	66.2954	1.0945
	section 4	66.8810	65.7438	1.0173	72.0536	66.2954	1.0869
	section 5	66.8250	65.7445	1.0164	68.4321	66.2954	1.0322
	section 6	59.4706	58.4391	1.0177	60.5553	58.9293	1.0276
	total	334.749	328.720	1.0183	349.585	331.477	1.0546
C	section 1	177.533	174.445	1.0177	179.321	175.909	1.0194
	section 2	173.463	170.957	1.0147	175.118	172.391	1.0158
	total	350.996	345.402	1.0162	354.439	348.300	1.0176
전체		1038.616	1017.452	1.0208	1059.123	1025.985	1.0323

표 3.6.8은 발파공을 중심으로 파단면을 세로로 각 영역별로 구분하여 계산된 SRp 거칠기 정량화 지수를 정리한 것이다. 각 영역별 파단면 DEM 모델의 분석을

표 3.6.8을 통해 노치 발파공과 일반 발파공의 파단면의 거칠기를 살펴보면 전체적으로 노치발파공이 일반 발파공의 파단면 SRp 값이 더 작음을 확인할 수 있다. 노치 발파공 파단면은 공 중심에서 가장 가까운 주변영역 A1, B1에서 SRp 값이 각각 1.0247, 1.0273으로 영역별 SRp 중에서 가장 큼을 알 수 있다. 이러한 이유는 노치발파공의 A1과 B1 영역의 경우 노치날개에 의한 파단면과 인접하였거나 중복된 영역으로 노치날개에 의한 굴곡으로 판단되어진다. 하지만 이러한 노치 발파공 영역에서 가장 가까워서 노치날개에 의한 굴곡이 다른 영역에 비해 심한 A1, B1 영역은 다른 노치 발파공의 각 영역별 SRp 값들과 일정함을 알 수 있다. 이에 비해 일반 발파공의 파단면의 각 영역별의 경우 A3 ~ A6의 SRp 값이 일정하지만 다른 영역에서의 SRp 값들이 일정하지 않으며 노치 발파공의 SRp 값들보다 더 큰 값을 가지고 있다. 각 영역에서의 SRp 값들의 경향은 그림 3.6.48에서 보다 쉽게 알 수 있다.

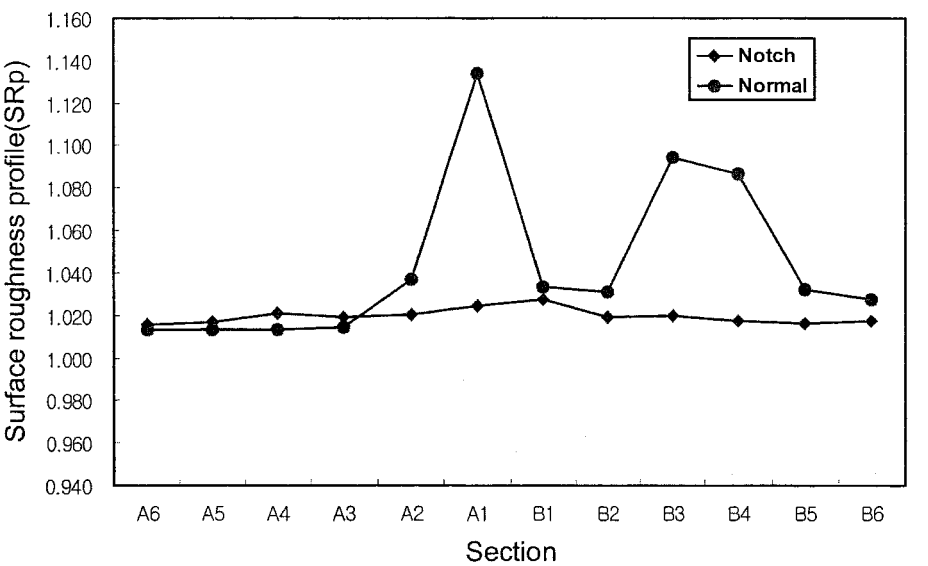


그림 3.6.48 노치 발파공과 일반 발파공의 구간별 거칠기 파라미터 (세로)

표 3.6.9 발파 파단면의 면 거칠기 형상지수 비교 (가로)

거칠기 측정 영역		면 거칠기 형상지수, SR_p					
		노치 발파공			일반 발파공		
		표면적	투영적	SR_p	표면적	투영적	SR_p
D	section 1	34.467	33.782	1.0203	34.424	33.748	1.0200
	section 2	49.532	48.260	1.0264	48.913	48.211	1.0146
	section 3	48.908	48.259	1.0135	48.953	48.211	1.0154
	section 4	49.585	48.259	1.0275	48.949	48.211	1.0153
	section 5	49.131	48.260	1.0181	48.845	48.211	1.0131
	section 6	49.088	48.259	1.0172	48.770	48.211	1.0116
	section 7	49.307	48.259	1.0217	50.510	48.212	1.0477
	total	330.018	323.338	1.1447	329.364	323.015	1.1377
E	section 1	34.272	33.782	1.0145	35.063	33.748	1.0390
	section 2	48.989	48.260	1.0151	50.575	48.211	1.0490
	section 3	49.549	48.259	1.0267	50.637	48.211	1.0503
	section 4	49.128	48.259	1.0180	51.551	48.211	1.0693
	section 5	49.056	48.260	1.0165	51.469	48.211	1.0676
	section 6	49.172	48.259	1.0189	51.307	48.211	1.0642
	section 7	49.647	48.259	1.0287	50.212	48.212	1.0415
	total	329.813	323.338	1.1384	340.814	323.015	1.3809
C	section 1	177.533	174.445	1.0177	179.321	175.909	1.0194
	section 2	173.463	170.957	1.0147	175.118	172.391	1.0158
	total	350.996	345.402	1.0162	354.439	348.300	1.0176
전체		1038.616	1017.452	1.0208	1059.123	1025.985	1.0323

표 3.6.9는 각 시편의 파단면의 영역을 구분을 가로로 나눈 각 영역별 면적 및 SRp 값을 정리한 표이다. 세로영역들로 구분된 파단면의 SRp의 값보다 대체적으로 큰 값들을 가지고 있지만 노치공 발파 파단면의 각 영역들의 SRp 값들은 세로로 구분된 영역들의 SRp 값들과 같이 서로 큰 차이를 보이고 있지 않음을 알 수

있다. 일반 발파공의 경우 Section D 영역들의 DEM 모델의 SRp 값들이 D7 영역을 제외하고 노치 발파공의 값보다 작으며 Section D 전체 영역에 대한 SRp 값이 작음을 확인할 수 있다. 그러나 일반 발파공의 Section D 내 영역들의 SRp 값들은 서로 간 노치 발파공에 비해 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 노치 발파공의 Section E는 Section D와 마찬가지로 그 영역 내 SRp 값들이 큰 차이를 보이고 있지 않다. Section E 영역의 일반 발파공의 경우 각각의 영역들의 SRp 값들이 노치 발파공보다 큰 값을 가지고 있으며 서로 간 큰 차이를 보이고 있다. 그림 3.6.49는 SRp 값들을 그래프로 표현한 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 노치 발파공의 거칠기 파라미터는 일정한 값을 가지고 있고 일반 발파공의 경우 각 구간별 파라미터의 값들이 일정하지 않음을 알 수 있다.

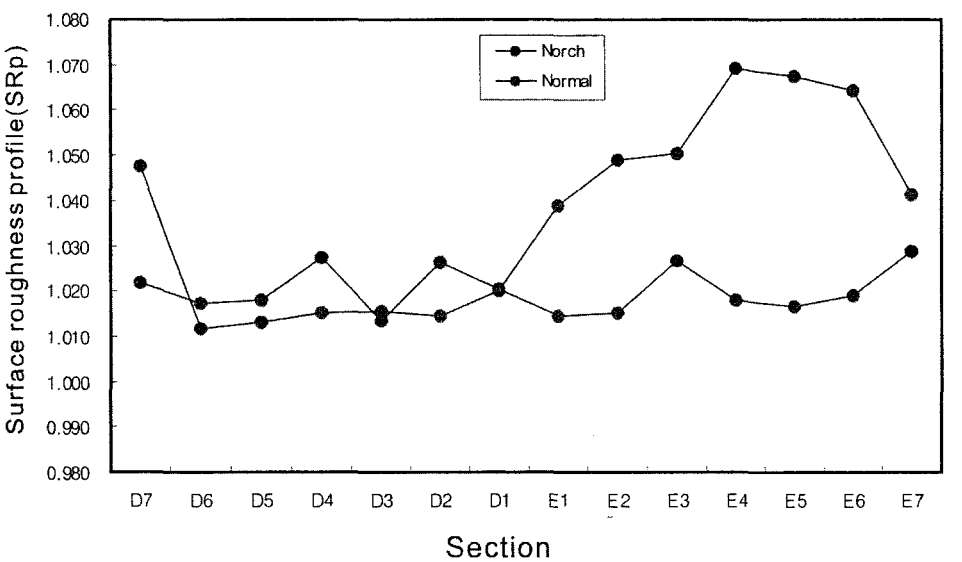


그림 3.6.49 노치 발파공과 일반 발파공의 구간별 거칠기 파라미터 (가로)

(2) 프랙탈 차원에 의한 비교

표 3.6.10과 3.6.11은 파단면을 각각 세로와 가로영역들로 구분하여 각각의 영역에 대해 프랙탈 차원을 계산한 값을 정리한 표이다.

표 3.6.10과 3.6.11의 각 구간별 프랙탈 차원의 경향은 그림 3.6.50과 3.6.51의 그래프를 통해 확인 할 수 있다. 노치 발파공의 구간별 프랙탈 차원의 경향이 비슷함을 확인 할 수 있다. 일반 발파공의 경우 노치 발파공의 프랙탈 차원보다 적은

값을 가지는 영역도 있지만 대체적으로 노치 발파공의 값들보다 높은 값을 보이며 서로 간의 일정한 값을 가지는 경향이 보이지 않는다.

표 3.6.10 발파 파단면의 면 거칠기 프랙탈 차원상수 D 비교 (세로)

거칠기 측정 영역		프랙탈 차원상수 D	
		노치 발파공	일반 발파공
		D	D
A	section 1	1.926	1.955
	section 2	1.927	1.956
	section 3	1.933	1.898
	section 4	1.930	1.844
	section 5	1.929	1.852
	section 6	1.925	1.833
B	section 1	1.906	1.941
	section 2	1.913	1.956
	section 3	1.903	1.964
	section 4	1.916	1.952
	section 5	1.921	1.940
	section 6	1.917	1.919

표 3.6.11 발파 파단면의 면 거칠기 프랙탈 차원상수 D 비교 (가로)

거칠기 측정 영역		프랙탈 차원상수 D	
		노치 발파공	일반 발파공
		D	D
D	section 1	1.866	1.939
	section 2	1.855	1.866
	section 3	1.856	1.877
	section 4	1.889	1.883
	section 5	1.863	1.878
	section 6	1.904	1.870
	section 7	1.874	1.882
E	section 1	1.906	1.918
	section 2	1.861	1.938
	section 3	1.847	1.944
	section 4	1.881	1.947
	section 5	1.887	1.949
	section 6	1.876	1.940
	section 7	1.857	1.929

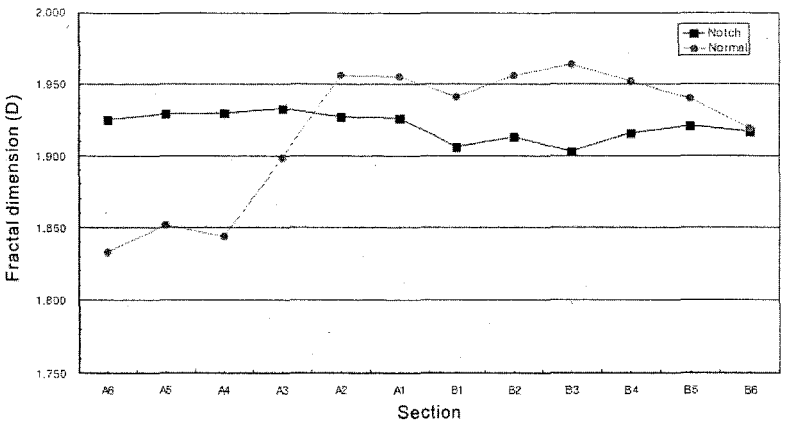


그림 3.6.50 노치 발파공과 일반 발파공의 구간별 거칠기 파라미터 비교(세로)

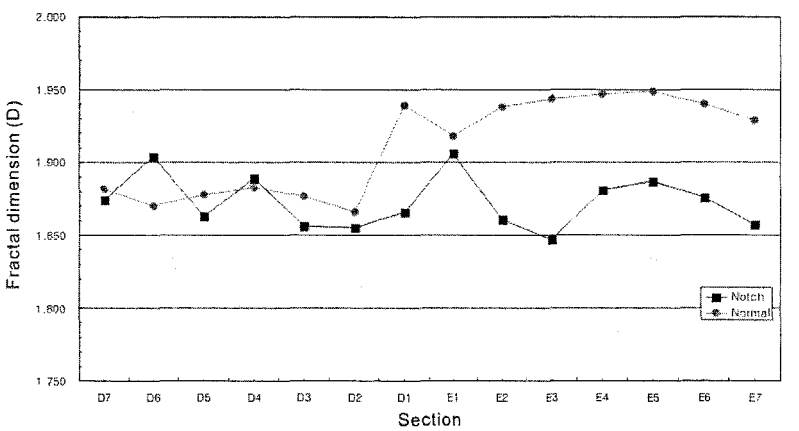


그림 3.6.51 노치 발파공과 일반 발파공의 구간별 거칠기 파라미터 비교(가로)

마. 고찰

각 영역별 DEM 모델의 분석을 통해 얻어진 거칠기 정량지수인 SRp와 DEM 모델을 이용한 프랙탈 차원을 통해 파단면의 거칠기를 나타내었다. 전체적으로 노치 발파공이 일반 발파공보다 형상 및 높이에 있어 각 SRp와 프랙탈 차원 값이 더 작음을 알 수 있었다. 이것은 노치 발파공에 의한 파단면이 일반 발파공에 의한 파단면보다 더 적은 굴곡 및 거칠기를 가지고 있음을 알 수 있게 한다. 그러나 각 구간별 거칠기를 비교하면 몇몇 구간에서 일반 발파공의 파단면 영역이 노치 발파공보다 더 작은 값을 가지고 있다. 세로로 나누어진 영역의 경우 발파공을 중심으로 좌

측면 영역(A3 ~ A6)에서 확인 할 수 있다. A3 ~ A6 영역에서 일반 발파공이 노치 발파공보다 더 적은 굴곡을 나타내고 있는 것은 균열의 방향성과 연관이 있다. 발파 시 초기 폭굉압이 확장할 때 노치날개에 의한 노치효과로 인해 응력이 노치 홈으로 집중할 때 암석의 균열 방향성을 제어하지만 폭굉압의 공 주변에 끼치는 충격파가 자유면에 도달 후 반사파로 균열을 확장키고 이 균열로 가스압이 침투하여 암석의 균열을 일으키는 과정에서 암석 시험편이 가지고 있는 암석 내 미세균열 및 입자의 분포, 크기가 균열전파의 방향성에 영향을 미치기 때문이라 판단된다. 파단면을 가로로 나누어 거칠기를 산정한 결과에서도 노치 발파공이 일반 발파공보다 더 완만한 면을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 노치효과에 의한 균열전파의 방향성 제어는 가로로 나누어진 파단면의 경우 그림 3.6.24에서도 육안으로도 확인되는 노치 발파공과 일반 발파공의 면의 거칠기 및 굴곡의 큰 차이가 정량화된 SRp와 프랙탈 차원을 통해서도 확인이 된다.

실제 암석 시편의 발파를 통해 노치공과 일반공의 균열전파 양상을 비교하였다. 육안으로 확인이 가능한 각 발파공 형상에 따른 균열전파의 방향성을 정량화하기 위해 거칠기 파라미터와 프랙탈 차원을 도입하여 발파에 의한 파단면의 거칠기로 나타내었다. 그림 3.6.48 ~ 3.6.51에 나타난 거칠기 파라미터와 프랙탈 차원 그래프들을 비교할 때 구역별 거칠기의 값들의 경향이 비슷함을 알 수 있다.

암석의 발파시험을 시작하여 파단면의 DEM 생성 그리고 파단면 거칠기의 정량화 과정을 통해 노치공에 의해 발파되어 생성된 파단면이 일반공에 의한 파단면보다 완만한 굴곡 및 거칠기를 가졌음을 확인함으로써 노치공에 의한 균열전파의 제어가 가능함을 확인할 수 있었다.

제 7 절 암반발파에서 노치공 발파의 수치 모델링 연구 I

1. 서 론

본 동적 수치모델링 해석은 암반발파에서 손상제어효과를 해명하여, 노치공 발파 설계에 필요한 기초자료를 얻기 위한 목적으로 암반파괴과정해석을 수치해석적으로 검토하고자 하였다. 구체적으로는 노치공에 대해서 일반폭약과 저비중폭약을 이용한 경우를 해석하고, 각각의 해석결과로부터 암반의 파괴과정과 최종파단면형태를 수치해석으로 해명하였으며, 파단면 형태와 형성에 관하여 고찰하였다. 추가로 기폭초시정도가 파단면형성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 DS뇌관 기폭초기오차를 고려하였다.

2. 암반파괴과정 해석법

본 수치모델링에서는 동적유한요소 해석법과 파괴역학을 기초로 하여 제안된 암석파괴 프로세스 해석법(조상호 외, 2004)을 적용하였다. 해석모델은 그림 3.7.1에 나타낸 것과 같이 자유면에 평행한 3개의 장약공을 가진 일자유면발파를 가정한 것으로 하였다. 또한 발파조건이 균열의 진전프로세스에 미치는 영향을 검토하기 위해서 장약공 공간격과 최소저항선비가 3:4인 모델을 작성하였다. 여기서 모델은 최소저항선(W)과 공간격(S)이 각각 45cm, 60cm가 되게 하였으며, 신선한 경암으로 가정하였으며, 표 3.7.1에 역학적 물성치를 나타내었다. 장약공 내경은 터널 내 제어발파 규격인 직경 45mm로 하였다. 장약공 공벽에 작용하는 폭발생성 가스는 등엔돌피 팽창을 가정한 JWL상태방정식을 적용하였다.

$$P = A\exp(-R_1V(t))+B\exp(-R_2V(t))+CV(t)^{-(w+1)} \quad (1)$$

여기서 V(t)는 장약공과 폭약의 체적의 비이다. 이 체적의 비에 따라 디커플링 및 장약공의 체적변화에 따른 압력변화를 표현하도록 하였다. A, B, C, R_1, R_2, w는 실험적으로 구하는 실험 변수이고, 폭약은 SB용 슬러리폭약 (약경 22mm)의 JWL

변수로서 KHT코드에 의한 계산치를 사용하였다. 본 연구에서는 노치공에 대해서 통상폭약과 저비중폭약을 이용한 경우를 해석하였다.

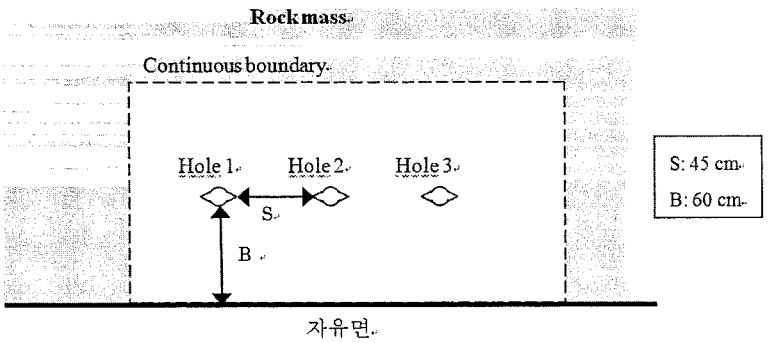


그림 3.7.1 노치공 발파의 해석 모델

표 3.7.1 노치공발파의 동적파괴과정 해석모델에 적용된 물성치

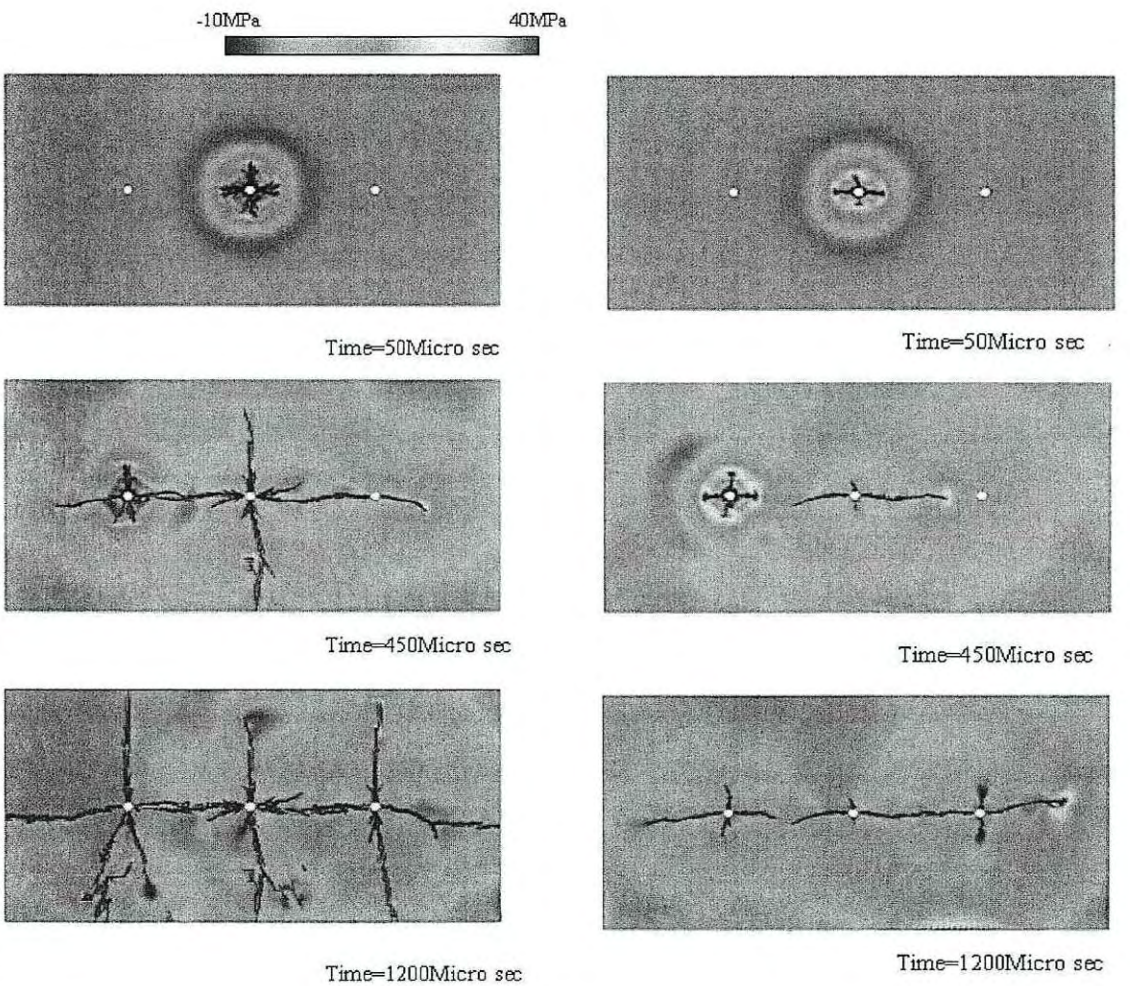
Parameter	Value
Density ρ (kg/m^3)	2700
Elastic modulus E (GPa)	80
Poisson's ratiov	0.25
Average compressive strength Sc (MPa)	250
Average tensile strength St (MPa)	18
Fracture energy Gf (Pa·m)	300
Coefficient of uniformity m	5
P wave velocity C_P (m/s)	6000

3. 해석 결과

가. 일반폭약에 의한 암반파괴과정

제발기폭조건은 현행의 발파에서 실현하기 어려운 이상적인 발파조건이므로 DS 뇌관의 기폭시차에러를 고려하여 파괴과정해석을 하여 파단면형성에 관하여 살펴보았다. 그림 3.7.2(a)는 해석결과로서 최대주응력 분포와 균열을 보여주고 있다. 여기서 압축응력(-)은 파란, 인장응력(+)은 적색으로 나타내고, 균열은 흑색선으로 표시하였다. 시각은 중심공이 기폭된 시간을 기준으로 한 경과시간이다. 시각50s에

서는 중앙의 장약공이 기폭 되어 공으로 부터 압축의 응력파가 반경방향으로 전파하고, 이에 뒤따라 인장의 응력파가 전파하고 있다. 이 인장응력파에 의해 장약공의 공벽으로 부터 방사상의 균열이 발생하고 있다. 중앙 장약공으로 부터 탁월균열의 진전방향은 자유면, 좌·우, 상단면으로서 좌우방향으로 진전된 균열들은400s간격으로 기폭되는 좌측공과 우측공으로부터의 균열과 연결된다. 자유면 방향으로의 진전된 균열들은 모두 자유면과 연결되었다. 결과적으로 일반폭약을 사용한 경우 파단면이 형성되었으나 상단면 발파손상영역을 발생시켰다.



(a) 일반폭약 (b) 저비중 폭약

그림 3.7.2 노치공 발파의 동적파괴 과정 해석 결과

나. 저비중 폭약에 의한 암반파괴과정

노치공에 저비중 폭약을 적용한 경우를 해석한 결과를 그림 3.7.2(b)에 최대주응력 분포와 균열진전과정으로서 보여주고 있다. 위의 경와 동일하게 시각 50s에서는 중앙의 장약공이 기폭되어 공으로 부터 압축의 응력파가 반경방향으로 전파하고, 이에 뒤따라 인장의 응력파가 전파하고 있다. 일반폭약을 사용한 경우와는 달리 자유면 방향으로 탁월균열이 발생하지 않았으며, 상단부 암반손상영역이 제어되었다.

즉, 저비중 폭약을 사용하면 공간을 연결하는 방향의 균열이 탁월하게 신장하고 파단면이 형성시키고, 암반의 주변손상은 제어할 수 있는 가능성을 보여주고 있다. 저비중 폭약을 사용했음에도 불구하고 자유면 으로부터의 반사파의 영향으로 부터 자유면과 직교 또는 평행한 방향으로 탁월균열이 발생하게 되는데, 이는 선행 기폭된 발파공으로 부터 발생된 탁월균열의 방향과 자유면의 존재는 밀접한 관계가 있음을 보여 주고 있다. 또한 후속 기폭하는 장약공으로부터 신장하는 탁월균열은 선행기폭 된 장약공으로부터 발생된 탁월균열의 영향을 크게 받는다. 후속기폭 된 발파공으로 부터 신장하는 균열의 선단이 선행기폭에 의해 발생된 균열에 어느 정도 접근하게 되면 양 균열간에 응력간섭이 발생하여 양 균열이 결합하게 된다. 그러나 이와 같은 조건이 성립하지 않는 경우에는 균열이 결합하지 않는다. 따라서 공간격이 멀어지면 균열이 장약공 사이를 결합하는 가능성이 저하하게 된다.

4. 고 찰

본 연구에서 노치공발파에서 암석파괴과정을 수치해석적으로 검토하여, 그 균열진전 메카니즘에 대해서 고찰하였다. 일반폭약을 사용한 경우 파단면이 형성되었으나 상단면 발파손상영역을 발생시켰다. 노치공에 저비중 폭약을 적용한 경우에는 자유면 방향으로 탁월균열이 발생하지 않았으며, 상단부 암반손상영역이 제어되었다.

제 8 절 암반발파에서 노치공 발파의 수치 모델링 연구 II

1. 모델의 수치해석 조건

가. 일반공과 노치공

본 연구는 암석발파 시 노치공 내 노치첨단에서 선균열을 발생하고 전파방향이 제어되어 발생하는 암석의 손상역역을 정량적으로 평가를 위한 것이다. 정량적인 분석을 위해 노치공(모델 1)과 일반공(모델 2)이 모델링된 암석시편을 모델화하여 폭약폭발에 의해 동일한 시간대에 암석모델이 받는 압력값을 비교하였다.

나. 유한요소망

그림 3.8.1은 해석모델을 나타낸 것이다. 본 수치해석 암석모델과 장약공은 노치공 발파시험에(한국건설기술연구원, 김광염, 2008) 사용된 암석시편을 고려하여 모델링하였다. 노치공 발파시험에 사용된 암석시편과 장약공은 각각 반경 0.025m와 1m×1m×1m(가로×세로×높이) 크기이며 일정량의 폭약을 장약하여 발파시험을 수행하였다. 본 수치해석은 2차원 원형공 해석으로 대칭성(Daryl, 1998)을 고려하여 시험모델의 1/4 영역만을 유한요소망으로 모델을 형상화하였다.

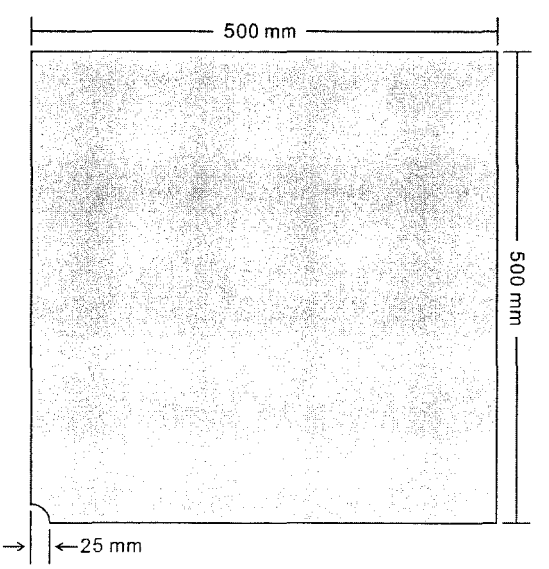
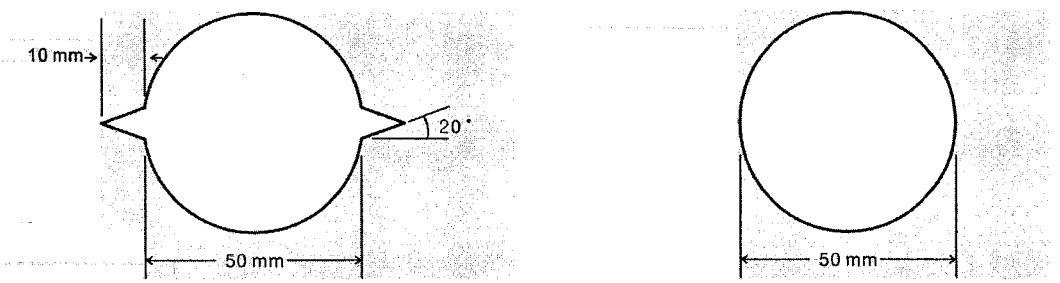


그림 3.8.1 2차원 발파모델

그림 3.8.2는 노치 발파공(a)과 일반 발파공(b) 형상을 보여준다. 장약공의 원형 크기는 반경 0.025m 이며 노치 발파공(b)의 노치의 길이(0.01m)와 각도(20°)는 실제 발파시험과 기존에 수행된 노치장비 개발에 관한 연구 자료를(정동호, 2007) 참고하여 모델링하였다.



(a) 노치 발파공 (b) 일반발파공

그림 3.8.2 장약공 모델의 형상 및 크기

그림 3.8.3은 모델 1의 노치공 주변 유한요소망의 형상을 나타낸다. 자유면과 최단거리 상에 위치한 노치가 가지는 선균열 효과를 극대화하기 위해 그림 3.8.3과 같은 형상의 유한요소망을 형성하였으며 유한요소망의 형상은 다양한 형상으로 해석한 결과 경험적으로 결정된 형상이다. 또한 노치에 의한 선균열전파 방향을 고려하여 다른 영역의 유한요소망에 비해 보다 조밀하게 요소망을 형성함으로써 보다 세분적으로 암석의 파괴를 평가할 수 있다.

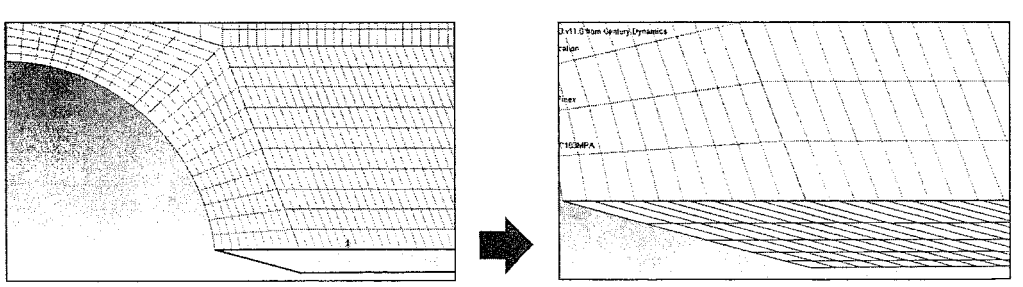


그림 3.8.3 노치공 주변의 유한요소망

모델2의 경우 모델 1의 노치를 형상화하는 요소망을 폐합하여 원형공을 가진 모델로 생성하였다. 모델 1과 2의 유한요소망은 원형공 주변부의 요소망을 제외하고 동일한 형상과 크기를 가지며 두 모델들은 각 63625개의 요소를 가지고 있다.

다. 암석모델 물성치

재료의 강성모델은 Hook's Law에 의한 탄성응력 상태를 가진다. 암반의 취성을 나타내기 위해 재료의 강성모델(Strength Model)로 RHT Concrete Model을 사용하였다. RHT Concrete Model은 암석이나 콘크리트 같은 취성 재료를 위해 개발된 강성모델이다(Autodyn Manual). 발파에 의해 암석 내 Crack의 발생과 진행을 고려하기 위해 Crack Soften Option을 적용하여 파괴모델(Failure Model)을 구성하였다. Crack Soften의 입력값은 대상 요소의 크기가 고려된 파괴 에너지(Fracture Energy, G)로 정의된다. 앞서 언급한 함수식 $K_I = \sqrt{EG_f}$을 이용하여 실내시험을 통해 얻어진 K_I과 E를 대입하여 얻어낸 G_f를 수치해석 상에 적용하게 된다. 본 수치해석에서 사용된 암석의 물성치는 기존에 수행된 연구결과의 실제 암석재료의 값들을 사용하였다(장수호, 2005). G_f의 입력을 위한 K_I의 경우 역시 기존에 수행된 연구결과 값과 본 해석에 사용된 화강암 물성치를 동일하게 적용하여 수치해석 결과를 낸 연구자료를 참고하였다(장수호, 1999, 유상화, 2008). 수치해석 시 적용된 상태방정식, 강도모델, 파괴모델과 사용된 실제 화강암의 물성치들은 표 3.8.1에 정리하였다.

표 3.8.1 화강암 물성치

<table>
<tr><th>Equation of State</th><th colspan="2">Strength Model</th><th colspan="2">Failure Model</th></tr>
<tr><td rowspan="5">P-Alpha</td><td colspan="2">RHT Concrete</td><td colspan="2">RHT Concrete</td></tr>
<tr><td>Poison' ratio</td><td>0.18</td><td rowspan="2">Failure Toughness</td><td rowspan="2">1.0 Mpa/cm$^{1/2}$</td></tr>
<tr><td>Young's Modulus</td><td>42.27 GPa</td></tr>
<tr><td>Shear Modulus</td><td>17.91 GPa</td><td rowspan="2">Fracture Energy</td><td rowspan="2">23.55 J/m^2</td></tr>
<tr><td>Compressive Strength</td><td>183 Mpa</td></tr>
<tr><td>Specific weight</td><td colspan="4">2.72 g/cm^3</td></tr>
</table>

라. 수치해석 프로그램

발파에 의한 암석모델링을 해석하기 위해 비선형 동적 해석이 가능한 유한요소 해석프로그램 ANSYS 사의 AUTODYN을 사용하였다. AUTODYN은 폭약에 의한 발파과정을 수치적으로 해석이 가능하며 시간에 따른 발파 모델의 변화를 시각적으로 관찰이 가능한 프로그램이다. Autodyn에서 위치, 속도, 압력과 같은 상태 변수들이 정의되는 유한요소망을 Lagrange sub-grid라고 하며, 일련의 계산과정은 각각의 time-step(또는 cycle) 증분에 대하여 Lagrange 서브그리드 내에서 수행된다. 먼저 경계 및 반응력이 계산되고 이전 타임스텝 또는 사이클에서 계산된 내력과 결합된다. 모든 비선형 Lagrange 노드에 대하여 가속도, 속도 및 위치가 운동량 방정식과 적분에 의해 계산된다. 이 값으로부터 새로운 서브그리드의 체적과 변형률 속도가 계산된다. 에너지 방정식을 이용하여 압력, 응력 및 에너지, 그리고 다음 사이클에 사용될 힘을 계산한다(Autodyn Manual).

마. 장약 조건

암반의 손상은 2차원 암석시편모델 정중앙에 모델링된 노치공 내의 폭약모델이 발파하면서 발생하는 가스압이 암석모델에 접촉을 하면서 시작된다. 폭약과 같은 폭발적이고 높은 팽창성을 가진 거동을 해석하기 위해 JWL EOS(Jones-Wilkins-Lee Equation Of State)를 적용하였다.

JWL 방정식은 폭약의 폭발에 의한 팽창정도를 예측하기 위해 개발된 폭발압력(P), 팽창된 체적(V), 그리고 에너지(E) 사이의 상대적인 상태 방정식이다. JWL 방정식은 각종 폭약에 대한 실험 데이터를 이용 폭발전이 과정과 그 특성을 그래프상에 표시한 후 이를 Curve fitting 방법을 이용하여 구한 경험적인 방정식이다(배규진, 1995). 다음 식에 나타나는 팽창 가스압 함수식은 JWL 상태방정식에 적용되는 식이다.

$$P = A\left(1-\frac{\omega}{R_1 V}\right)e^{-R_1 V} + B\left(1-\frac{\omega}{R_2 V}\right)e^{-R_2 V} + \frac{\omega(E+\lambda Q)}{V}$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = a(1-\lambda)^m P^n \qquad \text{(식 3.8.1)}$$

여기서,

A, B, R_1, R_2, w : 실내시험에 의해 구해진 실험상수

V : 장약공과 폭약의 체적비

Q : additional specific energy(비에너지)

λ : Q의 reaction rate

a : energy release constant

m : energy release exponent

n : pressure exponent

본 해석에서는 노치공 발파시험을 고려하여 한화발파(주)에서 생산하는 뉴화이넥스(NewFinex) 에멀젼계 폭약의 JWL 식의 변수를 적용하였다. 다음 표 3.8.2는 한화발파(주)에서 실험하여 얻어진 뉴화이넥스의 JWL 물성치이다.

표 3.8.2 뉴화이넥스 JWL 물성치

Reference Density	1.25 g/cm^3
Parameter A	214 GPa
Parameter B	182 Mpa
Parameter R1	4.2
Parameter R2	0.9
Parameter W	0.26
Detonation velocity	5500 m/s
Energy / unit volume	2.84 GJ/m^3
Pressure	10.4 GPa

2. 수치해석 기법

취성재료는 외부로부터의 힘을 받으면 파쇄 혹은 파괴 거동을 한다. 콘크리트나 암석과 같은 취성 재료의 거동의 모사를 위한 해석에서는 적합한 해석기법의 선이 중요하다. 해석에 사용된 Autodyn은 기본적으로 재료 거동 해석에는 라그랑지안(Lagrangian)과 오일러리안(Eulerian) 기법을 사용한다. 오일러리안 기법은 제한된 그리드 영역 내에서 해당 재료의 그리드들을 평균값으로 계산하며 모델링된 요소

의 체적의 변형이 심하게 일어나지 않아 안정적인 해석이 수행되는 장점을 가지고 있다. 하지만 본 해석에서는 큰 질량을 가진 암반에 비해 아주 작은 노치에 의한 선균열발파 파괴양상을 위해 아주 조밀한 요소들로 이루어진 모델해석이 수행되어야 한다. 따라서 해석모델은 서로 다른 체적을 가져 질량과 크기, 형상이 각각 다른 요소들을 모델링 할 수 있는 라그랑지안 기법을 사용하였다. 라그랑지안 기법은 발파 시 폭약재료 및 가스의 팽창에 의해 암석재료를 이루는 그리드의 변형이 심하게 일어날 경우 계산상의 오류가 발생하여 해석이 중단되는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 취성재료의 특성을 가진 암반재료의 그리드가 일정 이상의 응력을 받으면 해석상에서 탈락이 되도록 Erosion을 적용하였다. 일반적으로 암반의 해석 시 2 ~ 5의 값을 가지지만 본 해석에서는 노치공에 의한 암반의 파괴거동을 목적으로 하기 때문에 0.5의 값을 주어 그리드가 내부 압력에 의해 일어나는 체적의 변형보다 요소의 파괴에 중점을 두었다.

본 연구에서는 천공홀이 적용된 암석시편의 경우 발파에 따른 파괴거동의 모사를 고려하여 라그랑지안 기법을 사용하였다. 폭약재료의 경우 폭발에 따른 전파양상을 나타내기 위해 오릴러리안 기법을 이용하였다. 일정한 영역을 void 채우고 라그랑지로 된 발파모델의 공 내에 air와 폭약재료를 모델링하였다.

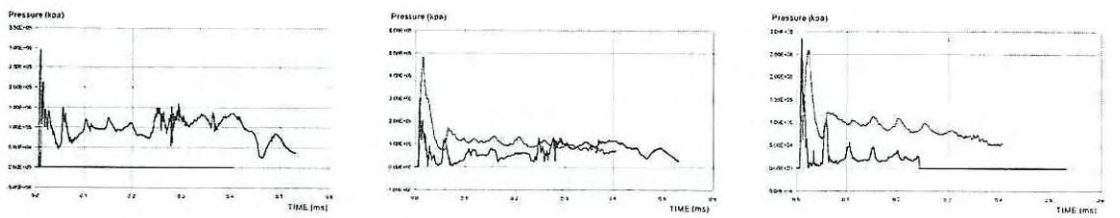
3. 결과 분석

가. 압력치 측정 위치

발파시 발생하는 폭약이 발파공 중심에서 팽창하여 발생하는 폭굉압과 가스압에 영향을 받아 각 요소들이 받는 압력값을 시간대별로 모델 1과 모델 2를 비교하였다. 다음에 나오는 각각의 그래프들의 (a)는 노치공을 기준으로 파괴가 일어나는 요소(노치첨단과 수평방향에 위치)이며 (b)는 (a) 요소의 바로 위에 위치하는 요소, (c)는 (b) 요소의 바로 위에 위치하는 요소이다. (a) 그래프는 폭굉압 및 가스압이 해당 요소에 도달한 시간과 파괴가 일어난 시간 그리고 그 시점에 요소가 받는 파괴압력값을 알 수 있다. (b), (c)는 노치첨단 영역에서 팽창압에 의해 인장응력을 받을 때의 요소가 받는 압력치를 측정하기 위한 것이다. (a), (b), (c) 사이의 수직간격은 약 0.3㎜이다. 빨간색 그래프는 노치이며 검은색 그래프는 원형공 모델 압력 그래프이다.

나. 각 구간별 요소가 받는 압력-시간 그래프

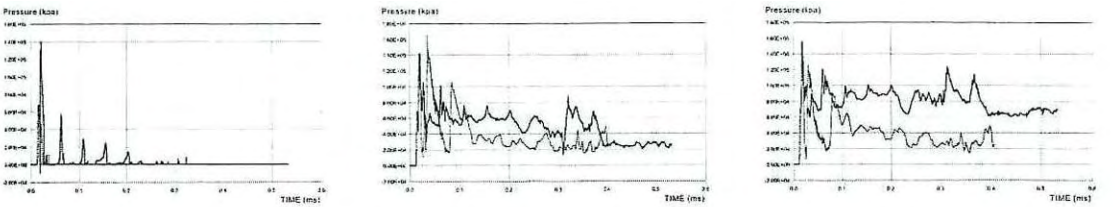
그림 3.8.4는 모델 1의 노치공 내에서 발생한 폭굉압이 노치첨단에 최초로 도달하는 위치의 요소이며 이를 위한 비교를 위해 모델 2에서도 폭굉압이 최초로 도달하는 요소의 압력값을 비교한 그래프이다. 그림 3.8.4 (a)에서 모델 1의 요소(노치첨단)는 0.000156701ms에 폭굉압이 도달하여 0.0112596ms에 파괴가 되는 동안 모델 2보다 적은 압력을 받고 있음을 확인 할 수 있다. 모델 2의 경우 모델 1의 최대 압력이 발생하는 시간과 동일하게 최대 압력이 발생하지만 파괴가 진행되지 않았다. 이는 노치공 첨단에 인장응력이 집중되어 모델 1의 (a) 요소가 압축을 받아 균열파괴가 발생되며 적은 균열압력으로도 파괴가 가능함을 알 수 있다. 모델 2의 (a), (b), (c) 요소는 최대 압력값과 최대 압력을 받는 시간이 동일하며 그래프의 경향이 같음을 알 수 있다. 단 모델 2의 (c) 요소는 약 0.25ms에서 파괴가 진행되었다.



(a) (b) (c)

그림 3.8.4 노치첨단에 위치한 요소의 압력값(노치공 기준)

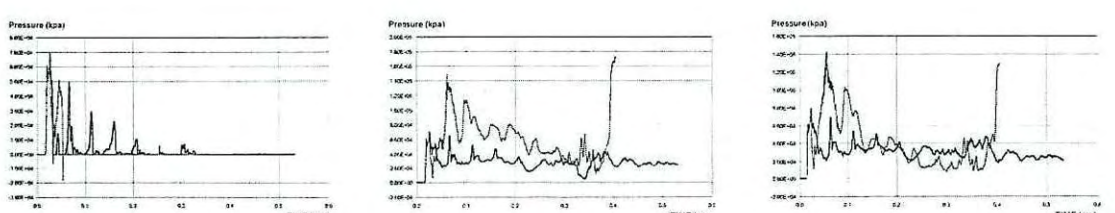
그림 3.8.5는 공 중심에서 반경 61㎜ 거리에 위치한 요소들의 압력그래프이다. 폭굉압이 0.003ms에 도달하여 모델 1 (a)를 파괴하였고 모델 2의 (a)는 모델 1과 동일한 시간에 응력파를 받았으나 파괴가 발생하지 않았다. 모델 1의 경우 약 60㎜까지 파괴가 진행되어 (a) 요소가 직접 폭굉압을 받았으며 모델 2의 (a)는 공벽에 접촉하여 자유면으로 진행되는 응력파에 의한 압력을 받았음을 의미한다. 모델 1, 2의 (b), (c)는 요소들이 받는 압력이 다르지만 각 모델별로 그래프의 경향이 같음을 확인 할 수 있다. 압력치가 다름은 요소매질에 따른 전달응력의 감소를 의미한다.



(a) (b) (c)

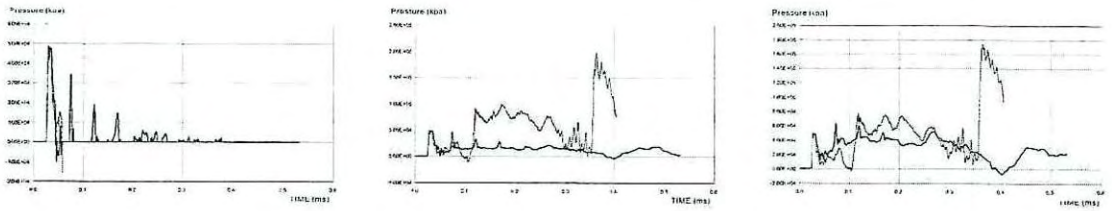
그림 3.8.5 공 중심에서 반경 61㎜ 거리의 압력값

그림 3.8.6은 공 중심에서 약 76㎜에 위치한 요소들의 압력그래프를 나타낸다. 모델 1의 (a) 요소의 파괴는 약 0.008에 외부압력에 영향을 받다가 약 0.05ms에 파괴가 진행되었다. 이는 1차 응력파에 의해 최초 압력에 대한 영향을 받으면서 인접 요소(b, c)에 인장력을 전달하다가 2차 응력파에 의한 파괴가 진행되었음을 의미한다. 모델 1의 (a)는 외부힘에 대한 압력변화가 상승하다 0으로 하강이 반복되는데 완전 파괴가 아닌 수치해석상 failed 된 요소로써 완전파괴가 아닌 암반요소의 균열로 보여진다. 모델 2의 (b), (c)는 76㎜ 거리에 위치한 요소들과 같은 경향성을 보인다. 모델 1의 (b), (c) 또한 76㎜ 거리의 요소들과 비슷하지만 해석이 종료되는 시점(암반모델의 절단)에서 높은 압력값을 받는 것은 가스압에 의한 잔존응력으로 판단된다. 이러한 양상은 공 중심에서 약 154㎜에 위치한 요소들에까지 나타난다(그림 3.8.7, 3.8.8).



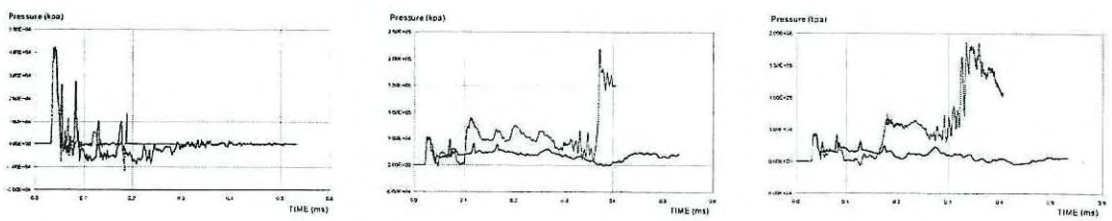
(a) (b) (c)

그림 3.8.6 공 중심에서 반경 76㎜ 거리의 압력값



(a) (b) (c)

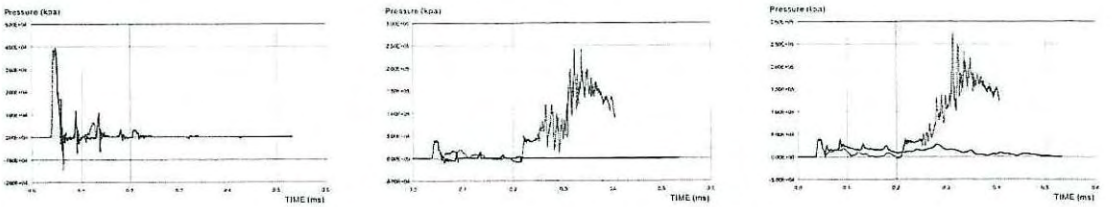
그림 3.8.7 공 중심에서 118㎜ 거리의 압력값



(a) (b) (c)

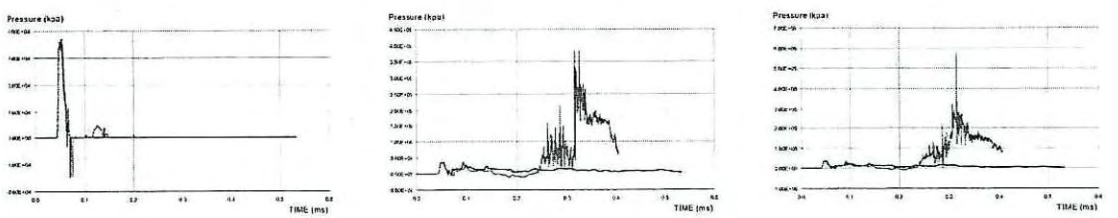
그림 3.8.8 공 중심에서 154㎜ 거리의 압력값

그림 3.8.9 ~ 3.8.11에서는 모델 1의 노치효과에 의한 암반모델 요소들의 균열 및 파괴가 (b), (c) 그래프의 급격한 변화를 통해 가스압과 폭굉압이 동시 또는 순차적으로 해당 요소들을 지나가면서 영향을 주고 있음이 확인된다. 또한 자유면에 반사되어 되돌아오는 반사응력파도 영향을 주고 있어 약 0.2ms ~ 0.35에서는 외부압력에 의한 인장응력과 내부압력에 의한 압축응력이 존재됨을 알 수 있다. 모델 2의 요소들이 발파 후 약 0.2ms 이후부터 0으로 수렴되고 있다. 이는 암반요소의 파괴 또는 균열이 발생한 것으로 판단되며 원형공을 가진 암석모델은 자유면 최단거리 방향으로 공 중심에서 가까운 곳부터 균열 또는 파괴가 일어나지 않는 것을 알 수 있게 해준다.



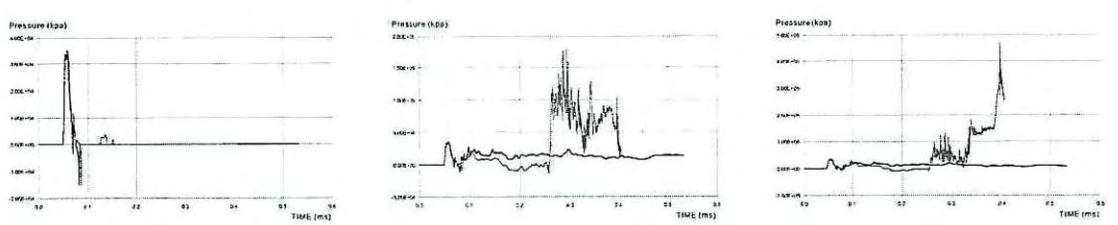
(a) (b) (c)

그림 3.8.9 공 중심에서 178㎜ 거리의 압력값



(a) (b) (c)

그림 3.8.10 공 중심에서 202㎜ 거리의 압력값

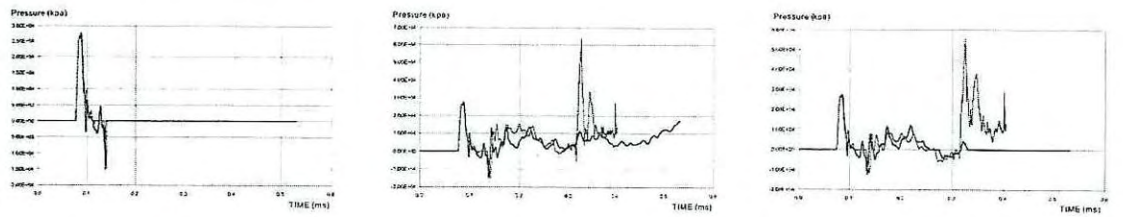


(a) (b) (c)

그림 3.8.11 공 중심에서 227㎜ 거리의 압력값

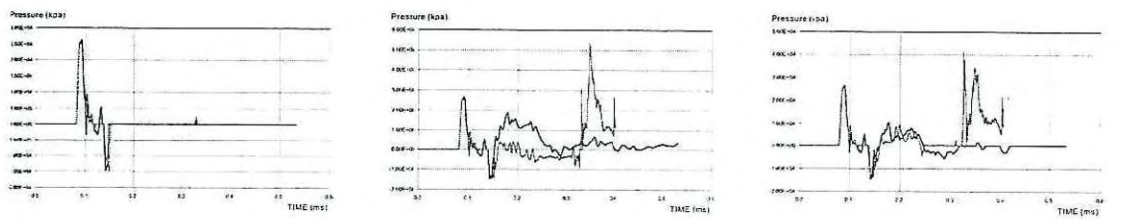
그림 3.8.12, 3.8.13은 발파 후 약 0.07ms에 각 그래프들의 급격한 압력의 증가가 보이며 이 때 요소들이 힘을 받고 있음을 알 수 있다. 동일한 거리에 위치한 (a) ~ (c)가 0.07ms 시간대에서 최대 압력값이 비슷한 것을 확인되며 이는 암석 내부로 전달되는 응력파가 공 중심 반경방향으로 동등한 힘으로 전달되었음을 의미한다. 각 모델들의 요소들은 0.1ms 이후로 소성단계를 지나 수치해석수행 중 failed에 도달하여 응력파에 의한 압축응력과 주변 암석요소들의 반력에 의한 요소의 균열로 판단되어진다. 그런데 모델 1의 (b), (c)에서 0.35ms 이후부터 압력곡

선의 증가를 보이는 것은 가스압 또는 폭굉압이 각 요소에 도달되어 외부힘을 주어 요소의 파괴가 이루어지는 구간이며 이 때 모델 1은 노치효과에 따른 인장응력에 의해 수직으로 체적변화가 이루어지고 있다.



(a) (b) (c)

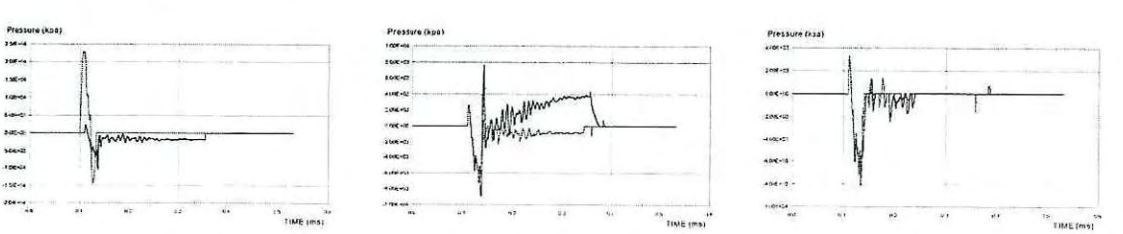
그림 3.8.12 공 중심에서 353㎜ 거리의 압력값



(a) (b) (c)

그림 3.8.13 공 중심에서 375㎜ 거리의 압력값

그림 3.8.14는 자유면 최단거리에 위치한 요소들의 압력 그래프이다. 최초 압력곡선 증가 시점은 응력파가 최단거리 자유면에 도달한 시간(0.106367ms)이다. 응력파가 도달한 시간대를 제외하고 각 요소들간의 그래프에서 비슷한 경향성을 찾을 수 없다. 이는 응력파에 의한 암석의 탄성상태에서 소성상태로의 변화시 각각에 전달된 힘이 서로 다르다는 것을 의미한다.



(a) (b) (c)

그림 3.8.14 공 중심에서 500㎜ 거리의 압력값

다. 동하중 상태에서 인장응력의 전파방향

그림 3.8.15는 노치공이 모델링된 암석모델(모델 1)의 time-st데 0.3ms일 때의 폭굉압에 의한 인장응력의 전파방향을 나타낸다. 화살표의 길이는 압력의 크기를 나타낸다. 노치첨단 수평거리방향으로 폭굉압이 또는 가스압이 도달되는 노치요소에서 최대응력이 집중되고 있음을 보여주며 화살표의 수직방향으로 노치에 의한 암석의 파괴 및 절단 효과를 알 수 있다. 그림 3.8.16은 발파 후 0.3ms일 때의 원형공 모델(모델 2)의 압력 전파방향이다. 균열 및 파괴가 진행되어 공간이 생긴 영역으로 폭약 및 가스가 스며들어 노치와 비슷한 압력 전파방향 양상을 보이지만 모델 1보다 적은 압력이 전파되고 있음을 확인 할 수 있다. 또한 모델 1의 경우 노치에 의한 응력집중이 일어나는 요소 외의 주변 요소에 까지 노치효과를 보이지만 모델 2의 경우 균열이 발생되는 요소 외의 주변부에서는 모델 2에 비해 매우 미약한 인장응력을 나타내고 있다.

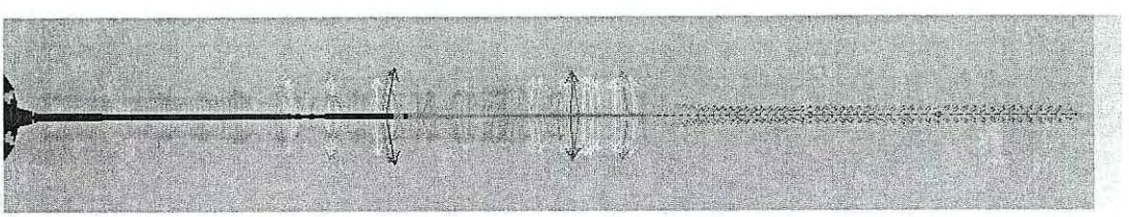


그림 3.8.15 노치공 모델의 폭굉압에 의한 압력전파방향(0.2ms)

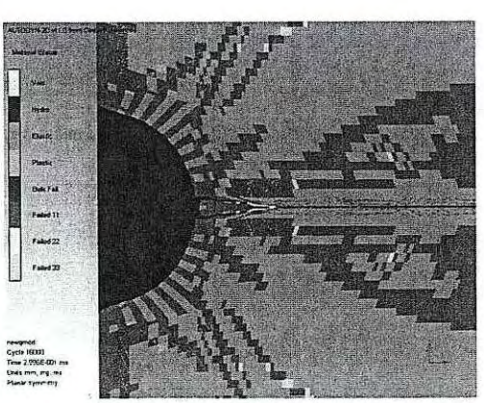
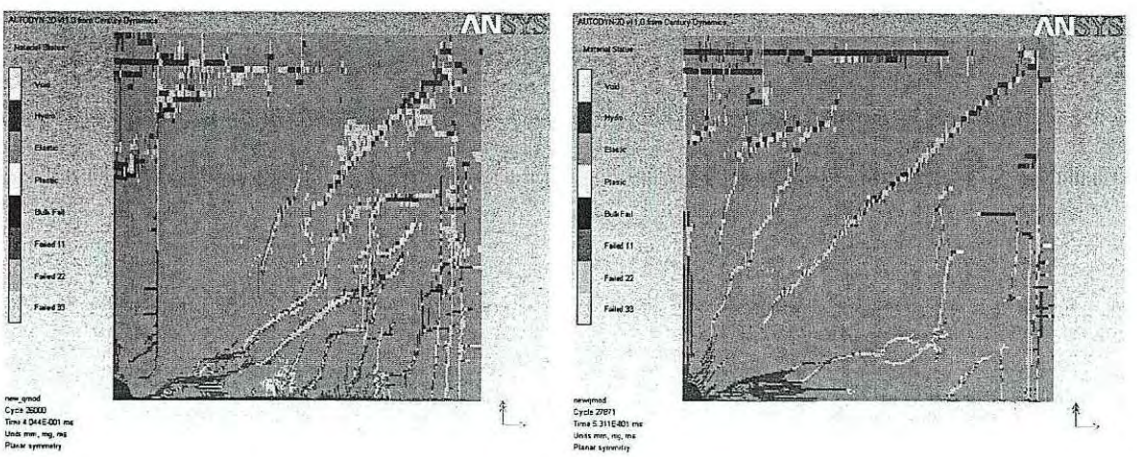


그림 3.8.16 원형공 모델의 폭굉압에 의한 압력전파방향(0.2ms)

그림 3.8.17은 각 모델의 해석 종료 후의 파괴양상도를 나타낸 것이다. 약 0.4ms

에서 모델 1(노치공)은 암석모델의 수평방향으로의 절단 및 파괴가 진행되어 수치해석이 종료되었으며 모델 2의 경우 모델 1의 종료시간 이후에도 약간의 파괴가 진행되었다. (a)의 경우 소성상태를 지나 failed 된 요소들의 방향성은 자유면 최단거리 방향(공 중심에서 수직, 수평방향)으로 파괴 및 균열 전파양상을 알 수 있다. 그리고 노치에 의한 인장응력이 노치첨단 연장선의 수직방향으로 진행되어 자유면 수직방향보다 수평방량 주변에 더 많은 압력이 전파되었음을 알 수 있다. (b)의 경우 자유면 수직과 수평방향으로의 균열전파양상이 비슷함을 알 수 있으며 동일한 장약량으로 발파 시 노치공에 비해 일반공의 파괴전파 압력이 약함을 알 수 있다.



(a) (b)

그림 3.8.17 해석 종료 후 모델의 파괴양상(a: 모델 1, b: 모델 2)

4. 결 론

본 연구에서는 기존에 수행된 노치공과 일반공으로 천공된 암석들의 발파시험을 고려하여 장약공 형상에 따른 암반이 받는 영향을 정량적인 수치들로 분석하기 위해 수치해석을 수행하였다. 각 장약공 형상으로 모델링된 암석모델을 발파해석을 수행 후 각 암석요소망들에 발생하는 압력값들을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 발파 시 폭약이 팽창하여 폭굉압이 공벽에 닿았을 때 일반공 암석모델은 원형공의 반경방향으로 동일한 크기의 힘을 받지만 노치공 모델의 경우 자유면 최단

거리인 노치방향으로 응력이 집중되어 노치날개 방향으로 암석의 파괴가 일어남을 알 수 있었다.

2) 노치방향으로 파괴가 진행되는 노치공 모델은 폭굉압에 의해 암석재료가 받는 내부에서의 힘의 전파방향은 노치날개에 가까울수록 수직으로 작용함을 알 수 있다.

3) 동일한 시간동안 노치공 모델은 일반공 모델에 비해 파괴진행속도가 더 빠름을 확인하였다. 노치공모델이 폭약재료 및 공기에 의해 파괴진행이 완료된 시간에서 일반공 모델의 파괴는 공 중심과 자유면의 최단거리방향으로 암석요소들의 파괴가 일어나고 상대적으로 요소의 파괴진행이 미비하였다.

제 9 절 노치 선균열 공법을 적용한 최적 발파 패턴 설계

1. 동적파괴과정 해석법 및 해석조건

가. 동적파괴과정해석법 개요

동적파괴과정해석법(Dynamic Fracture Process Analysis)은 동적유한요소법(Dynamic Finite Element method)과 비선형 파괴역학을 기초로 하여 개발된 프로그램이다. (조상호 외, 2004) 이 방법은 그림 3.9.1과 같이 균열의 발생, 성장, 결합등은 요소경계변의 파괴로서 취급하며, 요소 경계변의 응력은 그 응력경계 변을 포함하는 요소들의 응력의 평균값을 계산하고 이 평균값과 요소경계변의 인장강도의 비(국소위험율)를 계산하여 인장파괴판정에 적용한다. 압축파괴의 판정에는 Mohr-Coulomb 파괴기준식을 사용하였다.

암석의 파괴는 그 조직과 밀접한 관계가 있으므로 암석의 파괴를 고려하기 위해서는 암석의 미세구조를 모델화할 필요가 있으나 이러한 엄밀한 수치해석은 곤란하므로, 미시적 크기를 가진 요소의 집합체로써 근사시켜 모델링을 한다. 특히 암석의 미시구조는 극히 불 균질하지만 이것은 강도와 탄성률의 불균질성으로써 표현된다.

본 해석에서는 복수균열의 발생 및 성장을 해석하기 위해 균열선단주변에서 파괴프로세스 영역을 유한한 강도를 가진 균열 면으로 가정하여 취급하는 인장연화모델을 적용하였다. 균열은 분리된 두개의 경계 변으로써 취급되므로 균열 면에 수직방향으로 압축응력이 작용한 경우에는 개구변위가 음으로 되는 경우가 발생하게 된다. 이러한 과도폐합이 발생하는 경우에는 균열면상에 대응하는 절점에 대해서 접촉 압에 상응하는 절 점력을 작용시켜 균열의 개구변위가 영으로 되도록 반복계산하도록 하였다. 계산용량 및 계산시간이 증가하게 되는데, 계산용량을 줄이기 위해 전체강성방정식의 매트릭스에서 비영성분만을 일차원배열로 저장시키고, 연립방정식의 계산에는 ICCG법을 채용하여 계산시간을 감소시켰다.

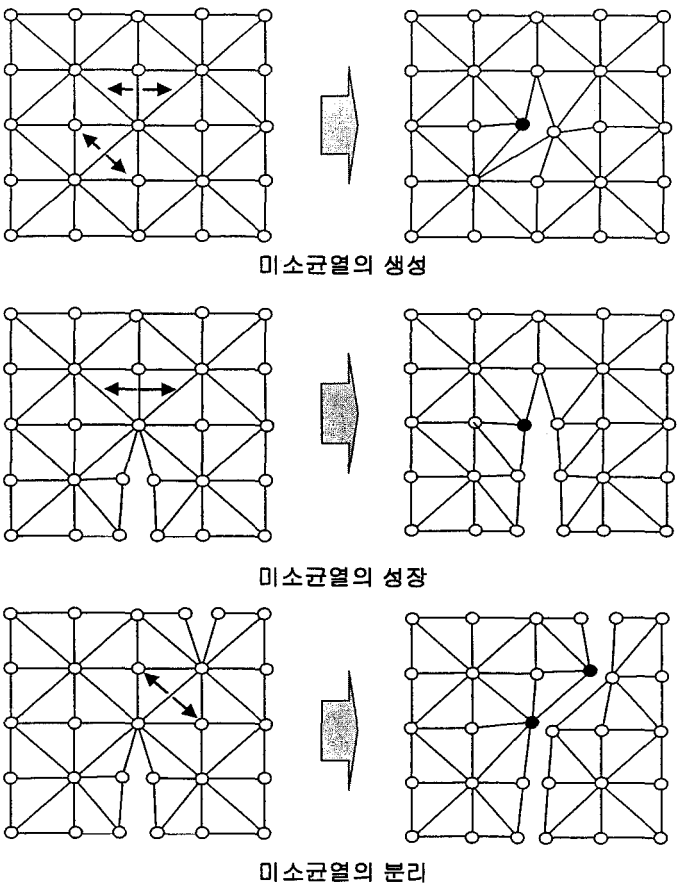


그림 3.9.1 인장파괴의 균열성장과정

나. 해석조건

수치실험모델은 그림 3.9.2에 보여주는 것과 같이 외곽경계를 실험조건과 달리 정사각형이 아닌 원형으로 모델링하였다. 정사각형인 모델의 경우 반사파의 영향으로 균열발생방향이 최단거리로 나가므로 노치에 의한 균열제어효과를 분석하기에 적절하지 않으므로 장약공으로부터 모든 거리가 동일한 원형공을 직경이 1m인 원형을 사용하였다. 노치장약공의 균열제어효과를 분석하기 위하여 그림 3.9.2, 그림 3.9.3과 같이 장약공의 형태만 상이하고 나머지는 동일 조건의 일반원형장약공과 노치장약공을 모델링하였다. 노치장약공의 모델은 기준모델로서 노치장약공에 의한 파단면 제어효과를 분석하기 위한 발파실험의 조건으로 설정하였다. 내부경계는 모델의 중심부를 기준으로 양쪽의 날개모양의 노치를 가진 직경 50mm의 원형공으로 한쪽의 노치길이가 10mm이고, 노치개구 폭이 12mm로 모델링하였다. 요소크기가

파괴과정에 미치는 영향을 최소화하기 위해서 장약공 주변은 1mm이내의 크기로 세분화하고, 전체 요소수를 줄이기 위하여 외곽영역으로 갈수록 요소의 크기가 증가하도록 작성하였다. 해석모델의 절점수는 7254개, 요소수는 14148개이며, 계산 시간증분은 0.1μs로 설정하였다. 균열의 성장 방향이나 크기에 대해 정밀한 제어를 성취하기 위하여 본 연구에서는 노치장약공에서의 노치의 형상 또는 장약조건을 아래 표와 같이 조건을 설정하여 동적파괴해석을 수행하였다.

해석모델에서 사용된 암반조건은 압축강도 101MPa, 인장강도 8.5MPa, 밀도 2140kg/m^3, 탄성계수 77.0GPa, 포아송비 0.349, P파속도 3400m/s 으로 노치장약공에 의한 파단면 제어효과를 분석하기 위한 실험에서의 물성치를 적용하였다.

표 3.9.1 해석모델의 기하조건

해석조건	모델유형	노치길이 (mm)	노치개구폭 (mm)	장약지수
노치 길이	Model 1	1	12	4.5
	Model 2	5	12	4.5
	Model 3(기준)	10	12	4.5
	Model 4	15	12	4.5
노치 개구폭	Model 5	10	9	4.5
	Model 6	10	15	4.5
장약지수	Model 7	10	12	3.5
	Model 8	10	12	5.5
원형 장약공	Model 9	0	0	4.5

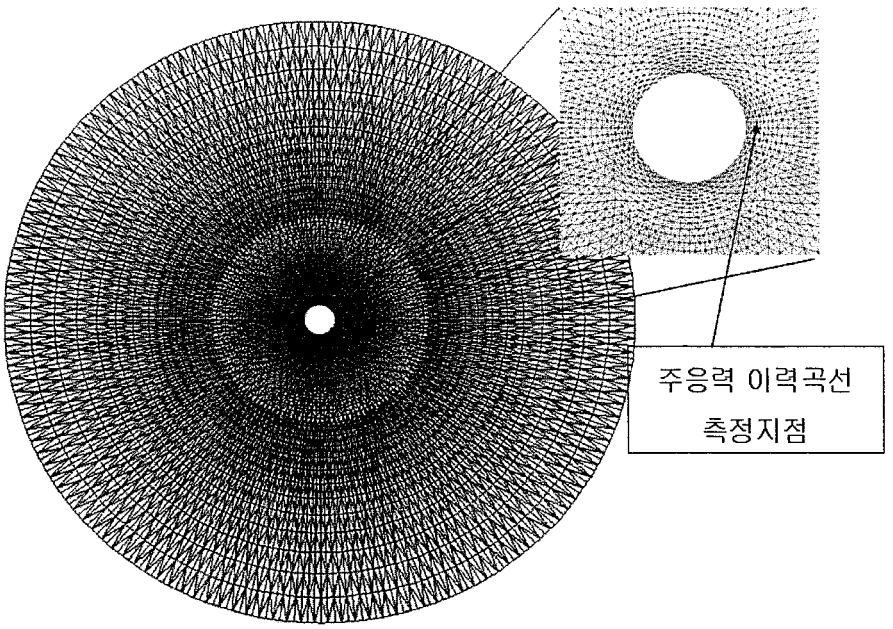


그림 3.9.2 일반장약공의 유한요소모델 및 장약공 노치 주변 주응력 관측점

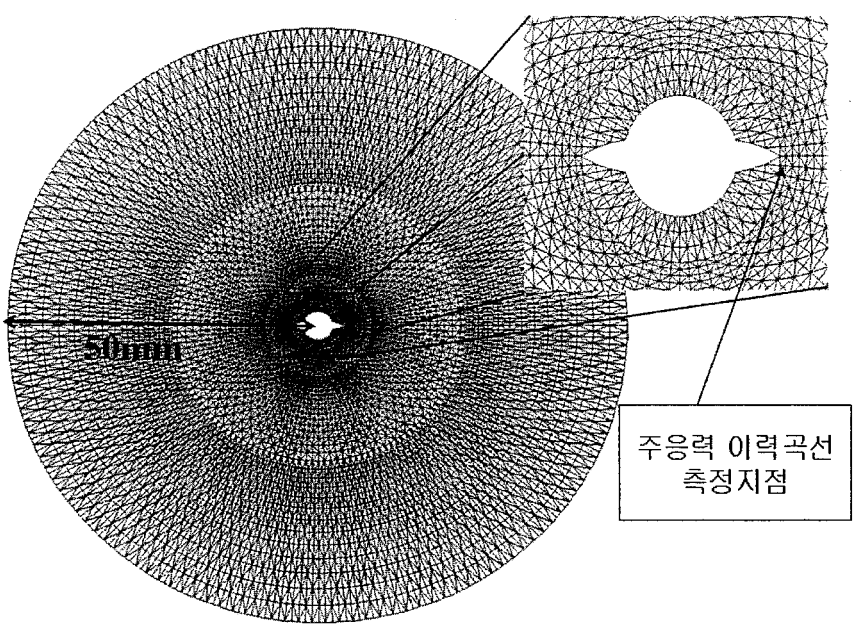


그림 3.9.3 노치장약공의 유한요소모델 및 장약공 노치 주변 주응력 관측점

다. 장약조건

장약실내의 폭발생성가스가 등엔돌피팽창을 가정하여 장약공벽에 작용하는 폭발

하중은 JWL 상태방정식을 적용하였다.

$$P = Aexp(-R_1 V) + Bexp(-R_2 V) + CV^{-(+1)} \qquad \text{(식 3.9.1)}$$

여기서 V는 장약공과 폭약의 체적의 비이다. 이식을 장약공의 체적변화에 따른 압력변화를 표현한다. 본 해석에서는 노치를 이용한 발파시험을 고려하여 에멀젼계 폭약의 JWL변수를 사용하였다(조상호 외, 2004).

표 3.9.2 에멀젼계폭약의 JWL 변수

변 수	값
A (GPa)	351
B (GPa)	5.7
C (GPa)	1.2
R_1	4.0
R_2	0.9
ω	0.35

2. 동적응력 해석결과 및 분석

가. 원형장약공 발파에서의 동적응력해석 결과

원형 장약공을 이용한 제어발파에서 발생되는 응력상태를 살펴보기 위하여 동적응력해석을 수행하였다. 그림 3.9.4는 원형장약공 모델(Model 9)의 시간에 따른 최대주응력분포를 보여주고 있다. 그림 내에 표시된 시각은 장약공벽에 폭발하중이 가해지기 시작한 후 경과시간을 의미하며, 최대주응력의 분포에서 인장응력은 적색(+), 압축응력은 청색(−)으로 보여주고 있다.

경과시간 10μs에서의 원형장약공의 주응력분포를 살펴보면 장약공 주변에 동심원상에 압축응력파가 전파하고 장약공의 둘레를 따라 인장응력이 발생되고 있으며, 그 이후 30μs일때 압축파는 자유면을 향해 진전하였으며 50μs를 보면 압축파를 뒤따라 인장파가 진전하고 있음을 알 수 있다. 이후 130μs와 170μs에서 자유면에

도달하였다. 이것은 암반모델의 탄성파가 34000m/sec이고, 외부경계의 반경이 500mm일 때 이론상 응력파의 자유면 도달시간은 150μs가 되므로 동적탄성해석의 유효성을 보여준다. 원형장약공벽 둘레에 작용한 접선방향 인장응력은 계산이 끝나는 200μs까지 지속적으로 집중되어 발생되고 있는데, 이것은 반경방향 압축응력파을 뒤따르는 접선방향 인장응력이 작용하고 있기 때문이다.

나. 노치장약공 발파의 동적응력해석결과

그림 3.9.5는 노치장약공에서의 동적파괴해석결과로써, 경과시간 10μs에서의 주응력분포를 살펴보면 장약공 주변에 동심원상에 압축응력파가 전파하고 원형 장약공에서의 장약공 둘레에서 인장응력이 고르게 발생하는 것과 다르게 장약공의 상부, 노치의 첨단에 인장응력이 발생되고 있으며, 특히 노치의 첨단에는 높은 인장응력이 집중되어 있음을 보여준다. 그 이후 30μs일때 압축파는 자유면을 향해 진전하였으며 50μs를 보면 압축파를 뒤따라 인장파가 진전하고 있음을 알 수 있다. 이후 130μs와 170μs에서 자유면에 도달하고 있다. 이것은 암반모델의 탄성파가 34000m/sec이고, 외부경계의 반경이 500mm일 때 이론상 응력파의 자유면 도달시간은 150μs가 되므로 동적탄성해석의 유효성을 보여준다. 노치 첨단에서 작용한 접선방향 인장응력은 계산이 끝나는 200μs까지 지속적으로 집중되어 발생되고 있는데, 이것은 반경방향 압축응력파를 뒤따르는 접선방향 인장응력이 작용하고 있기 때문이다.

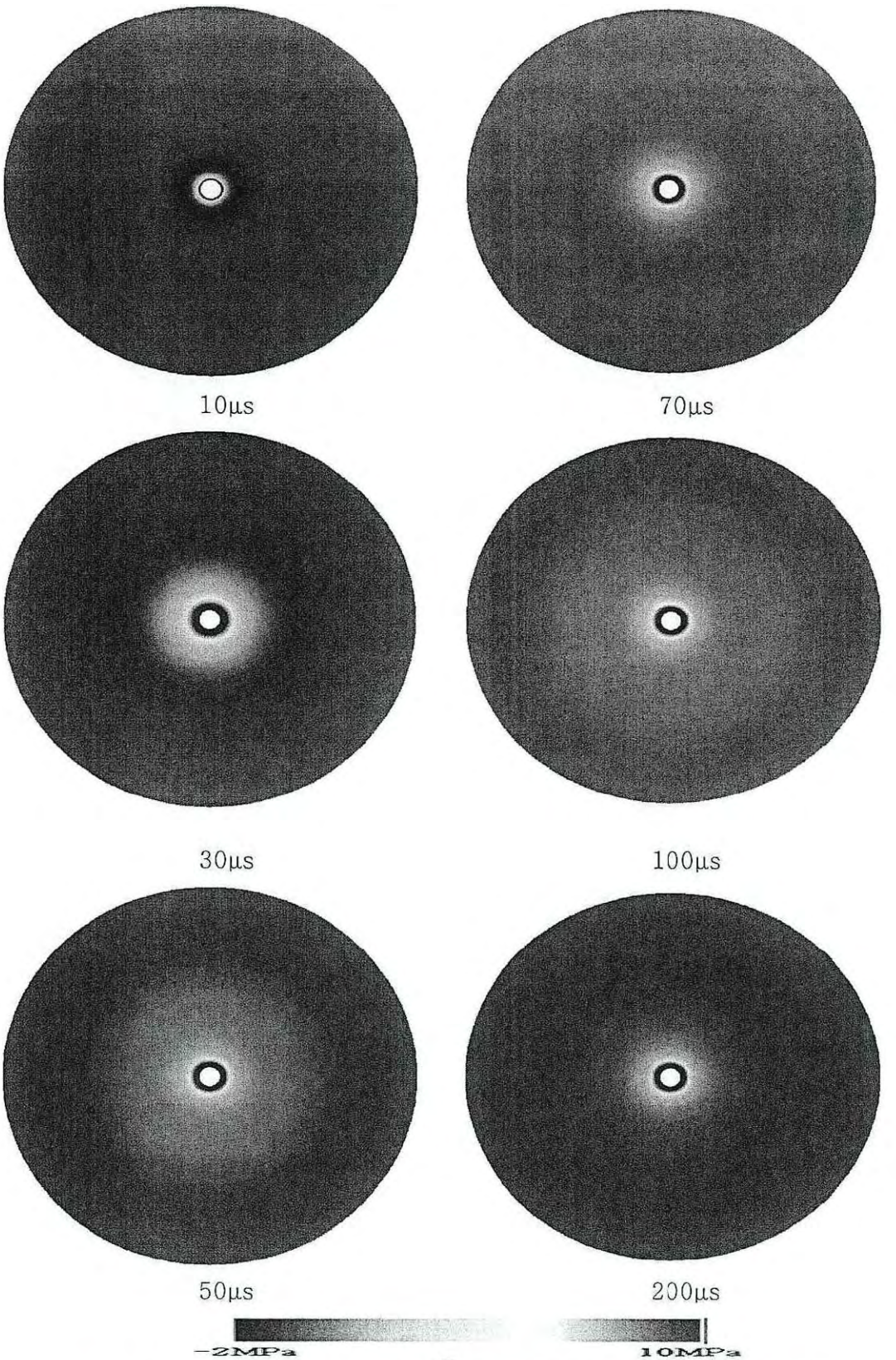


그림 3.9.4 원형장약공의 동탄성해석에 따른 주응력분포 (Model 9)

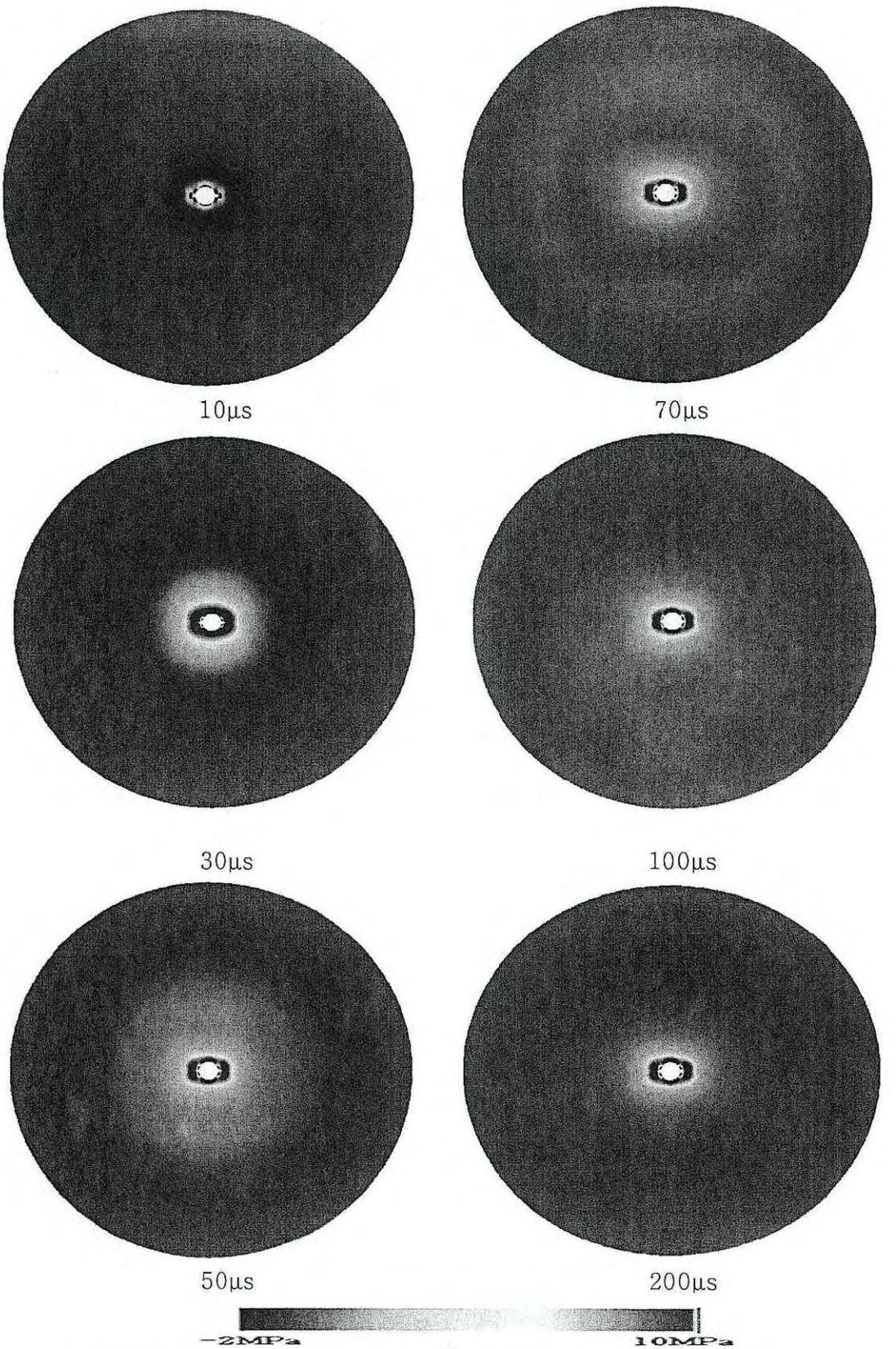


그림 3.9.5 동탄성해석에 따른 시간에 따른 주응력분포 (Model 3)

다. 노치형상의 변화에 따른 응력확대계수

노치장약공은 일반원형장약공과 다르게 노치첨단에 높은 응력이 발생함을 알 수 있었다. 이에 노치형상에 따른 노치 첨단에서의 응력집중도를 알아보기 위하여 Model 3, Model 5, Model 6의 개구폭의 조건으로 분석모델이외에 노치의 길이를 4mm부터 15mm까지 모델링하여 파괴를 고려하지 않은 동적탄성해석을 수행하였다. 노치선단에서 1mm 떨어진 지점에서 최대주응력값(σ_n)을 측정하고 이와 동일한 방법으로 원형공에서의 최대주응력값(σ_c)을 측정하여 식 3.9.2와 같이 응력확대계수(SIF) 나타내었다.

$$SIF = \sigma_n / \sigma_c \qquad \text{(식 3.9.2)}$$

그림 3.9.6은 동적탄성을 수행하여 얻어진 노치형상에 따른 응력확대계수에 대한 그래프이다. 기준모델의 개구폭과 같은 12mm조건에서의 길이에 따른 응력확대계수의 변화를 보면 노치길이 12mm사이까지 증가가 보이지만 이후 증가는 수렴하는 경향을 보였으며. 기준모델보다 작은 개구 폭인 9mm의 경우에는 노치길이가 9mm 사이까지 증가를 보이지만 이후의 노치길이에서 응력확대계수가 약간 감소하였다. 기준모델보다 개구 폭이 큰 경우인 15mm의 경우에서는 15mm의 노치길이 사이까지 응력확대계수의 증가를 보이지만 이후 수렴하는 경향을 나타냈다.

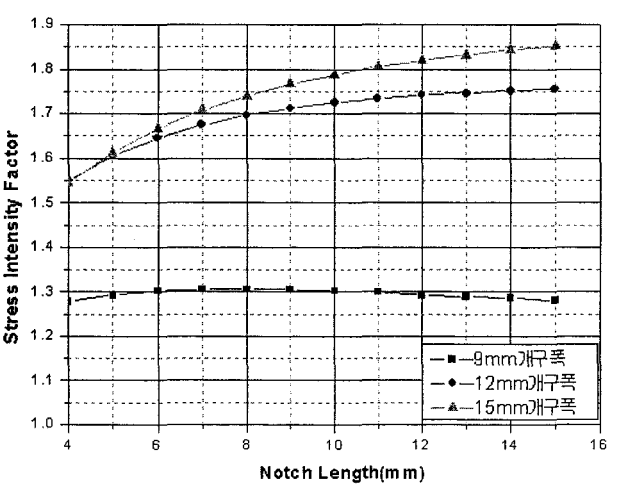


그림 3.9.6 노치형상에 따른 응력확대계수

라. 장약지수에 따른 응력확대계수

노치장약공에서 장약지수에 따른 노치첨단에서의 응력집중도를 알아보기 위하여 Model 3를 기준으로 장약지수를 변경하여 모델을 설정하고 동적탄성해석을 수행하였다. 또한 노치길이가 다른 모델들에 대해서도 장약지수를 다르게 적용시켜 동적탄성해석을 수행하였다. 여기서 장약지수는 장약경의 면적을 폭약의 면적으로 나눈 지수로 설정하였다. 그림 3.9.7은 동적탄성해석을 수행하여 측정된 각 모델들의 (Model 1, Model2, Model 3, Model 4) 결과를 보여준다. 해석결과 장약지수의 변화에 따른 응력확대계수는 거의 일정하게 나타난 반면 노치길이에 따른 응력확대계수 차이는 크게 나타났다.

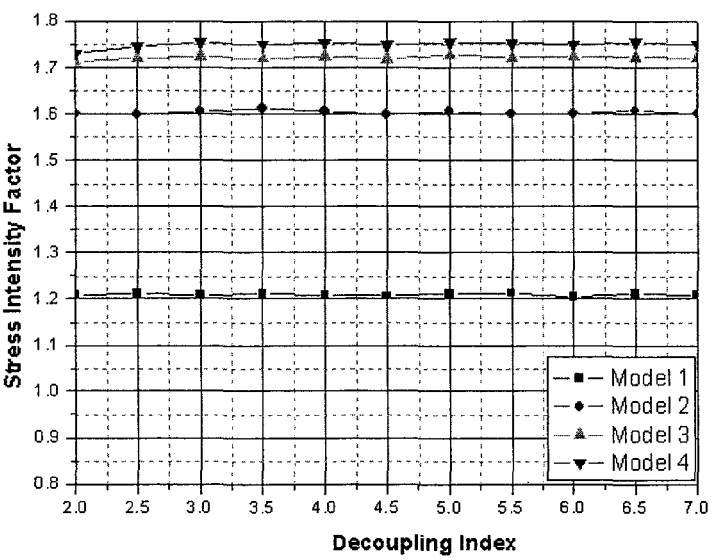


그림 3.9.7 장약지수의 변화에 따른 응력확대계수

3. 노치 장약공 발파에 의한 암반의 파괴과정 해석결과 및 분석

가. 일반장약공과 노치장약공 발파에서의 동적파괴과정해석

동적탄성해석을 통하여 노치형상과 장약지수에 따른 노치첨단의 응력확대계수를 통하여 응력집중도를 분석하였다. 응력집중에 따른 균열제어 효과를 분석하기 위하여 표 3.9.2에서 사용한 동일한 기준모델을 이용하여 파괴를 고려한 동적파괴과정 해석을 수행하였다. 기준모델인 최대 그림 3.9.12(a), (b)는 기준모델인 Model 3

에서의 주응력 분포와 파괴과정을 보여주고 있다. 이때의 평균압축강도는 101MPa 이고, 인장강도는 8.5MPa이다. 여기서 적색(+)은 인장응력을 의미하며 청색(−)는 압축강도를 의미한다.

그림 3.9.9(a),(b)는 원형장약공의 동적파괴과정해석을 수행하여 주응력분포 및 균열전파양상을 나타내었다. 분석결과 10μs에서 보면 장약공 둘레에 응력이 집중하여 장약공 둘레에 균열이 발생하는 것을 볼 수 있다. 30μs에서 응력집중에 의해 발생한 선균열을 따라 인장응력이 집중되어 균열이 진전되는 것을 볼 수 있다. 이후 균열은 지속적으로 선균열들을 따라 진전되었지만, 장약공 주변의 파괴가 심하게 나타나 발파 시 주변암반의 손상을 보여준다. 그러나 기준모델(Model 3)인 그림 3.9.12를 보면 노치 선단에서 인장응력이 발생하여, 균열의 선단을 따라 인장응력이 집중되어 균열이 자유면까지 도달되었다. 10μs에서 보면 일반 원형장약공에서의 장약공주변에 응력이 집중되는 것과는 다르게 노치의 첨단에 응력이 집중되어져 균열이 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 3.9.12(a)를 보면 응력집중이 노치첨단에서 집중되어 균열이 발생되고 성장하는 균열의 첨단을 따라 응력이 집중되어 균열이 외곽경계 쪽으로 진전하는 것을 볼 수 있다. 그림 3.9.12(b)는 균열전파양상을 보여주는데 장약공 주변에서는 비교적 직선성을 보여주고 있으나, 외곽경계에 가까워질수록 굴곡이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 파괴패턴은 실험에서도 자주 발생하는 것으로 주로 반사된 응력파가 성장하는 균열 첨단의 응력상태를 교란하여 균열을 분기시켜 발생되는 현상이다. 이로써 노치장약공 발파 시 원형장약공에 비해 장약공 주변에 손상을 입히지 않고 원하는 방향으로 균열을 제어함으로써 노치장약공에 의한 파단면제어실험의 결과와 일치한 결과를 보여주고 있다(그림 3.9.8).

나. 노치형상 및 장약밀도에 따른 동적파괴과정해석

화약 발파 시 인위적으로 응력을 집중시켜 주변암반의 손상을 최소화 시키면서 매끄러운 파단면을 만듬으로써 일반적으로 야기되는 미굴 또는 여굴에 대한 문제점들을 상당히 개선시킬 수 있는 노치효과를 이용한 균열제어공법에 대한 연구결과가 국내·외에서 많이 발표되어지고 있다. 최근에는 노치비트의 개발로 인하여 노치장약공에 대한 연구가 주목받고 있다. 본 연구에서는 노치장약공의 노치의 형상과 장약지수가 균열성장제어에 미치는 효과를 분석하기 위하여 동적파괴해석을 수

행하였다. 노치형상과 장약지수에 따른 노치첨단의 응력집중도를 알아보기 위하여 응력확대계수를 이용하여 비교하였으며, 노치첨단의 응력집중에 의한 균열진전양상 및 파괴패턴을 분석하였다.

(1) 노치형상에 따른 동적파괴과정해석

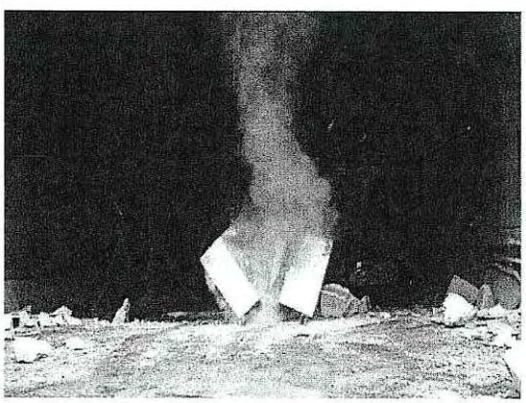
노치길이가 파괴과정에 미치는 영향을 분석하기 위하여 노치길이 1mm, 5mm, 10mm, 15mm에 대하여 동적파괴과정해석을 이용한 수치해석을 수행한 결과를 그림 3.9.10, 그림 3.9.11, 그림 3.9.12, 그림 3.9.13의 (a),(b)에서 보여주고 있다. 각 그림의 (a)는 시간에 따른 주응력 분포를 보여주고 있으며, (b)는 균열전파양상을 보여주고 있다. 비교분석한 결과 노치길이가 1mm, 5mm일 때와 10mm일 때를 비교해 본 결과 응력확대계수가 큰 증가를 보인반면 장약공직경의 20%인 노치길이가 10mm이상에서는 동적탄성해석결과 노치에 대한 응력확대계수는 큰 증가가 보이지 않고 수렴하는 결과를 가져왔다. 동적파괴과정해석을 수행한 결과 500μs일 때의 파괴패턴을 분석결과 10mm이상인 Model 3과 Model 4에서 균열이 자유면에 도달하였다. 더 자세히 알아보기 위하여 시간에 따른 균열진전을 분석하였을 때 Model 3에서 균열이 Model 4 보다 더 빠르게 도달함으로써 12mm의 개구폭의 길이에서는 장약공직경의 20%인 노치길이에서 효과적인 균열제어가 나타났다.

노치개구 폭의 길이가 파괴과정에 미치는 영향을 비교·분석하기 위하여 노치 첨단의 응력집중에 의한 균열진전양상을 살펴보기 위해 장약공직경의 20%의 노치길이를 고정시키고 노치길이에 대한 노치개구 폭의 길이를 다르게 하여 동적파괴과정해석을 수행한 결과를 그림 3.9.14, 그림 3.9.12와 그림 3.9.15에서 보여주고 있다. 균열전파양상이나 주응력분포를 비교해본 결과 세 모델 전부 노치첨단에서 발생한 균열이 자유면에 도달한 결과를 보여주었으며, 시간에 따른 균열진전을 살펴본 결과에서도 Model 5, Model 3, Model 6의 균열진전속도가 유사하게 나타났다.

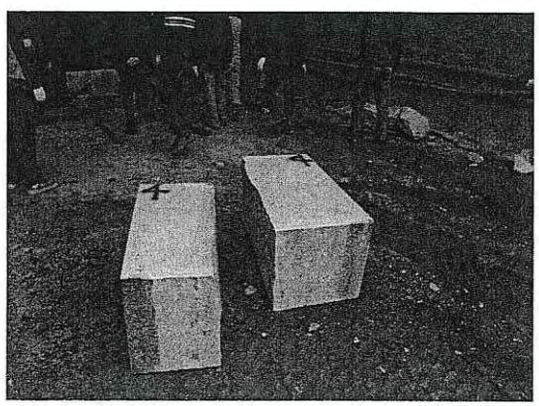
(2) 장약지수에 따른 동적파괴과정해석

장약지수가 파괴과정에 미치는 영향을 비교·분석하기위하여 동적파괴과정 해석프로그램을 이용하여 수치해석 결과를 그림 3.9.16, 그림 3.9.12, 그림 3.9.17에서 보여주고 있다. 먼저 위에 실험한 응력확대계수를 확인한 결과 장약지수 자체에 대한 응력확대계수는 거의 일정하게 나타났다. 이에 대해 알아보기 위하여 이상적인 모

델인 Model 3에 대하여 장약지수만 변경하여 수치해석을 수행한 결과 약장약인 경우 300μs 시간에서 220mm의 균열이 발생하였으나 이후균열은 진전하지 않았으며, 균열진전속도 또한 낮게 나타났다(그림 3.9.16). 반면, 과장약인 경우 180μs에서 노치 첨단에서 발생한 균열이 자유면에 도달하여 매우 빠른 균열진전속도를 보였으나 그림 3.9.4에서의 파괴패턴을 보면 노치첨단 이외에 잉여의 균열이 노치 상·하부에 발생함으로써, 노치에 의한 균열제어효과가 나타나지 않았다(그림 3.9.17). 이는 과장약인경우에는 균열제어효과를 저해함을 의미한다.

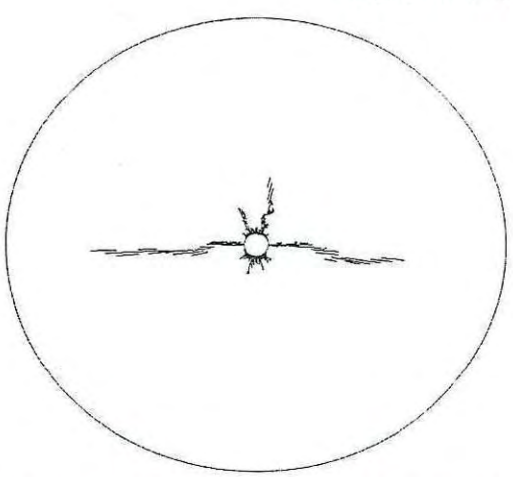


(a) 원형장약공 실험발파 결과

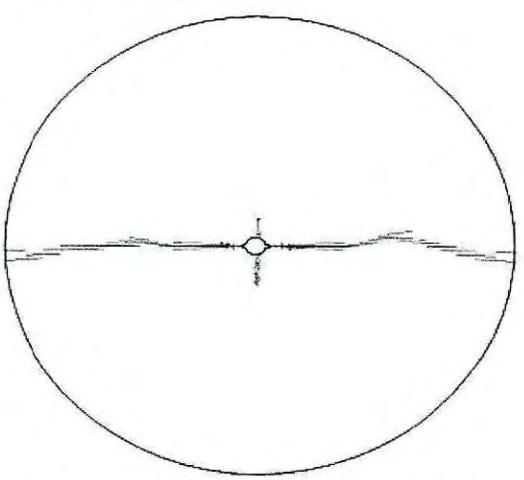


(b) 노치장약공 실험발파 결과

파단면제어에 관한 실 발파실험



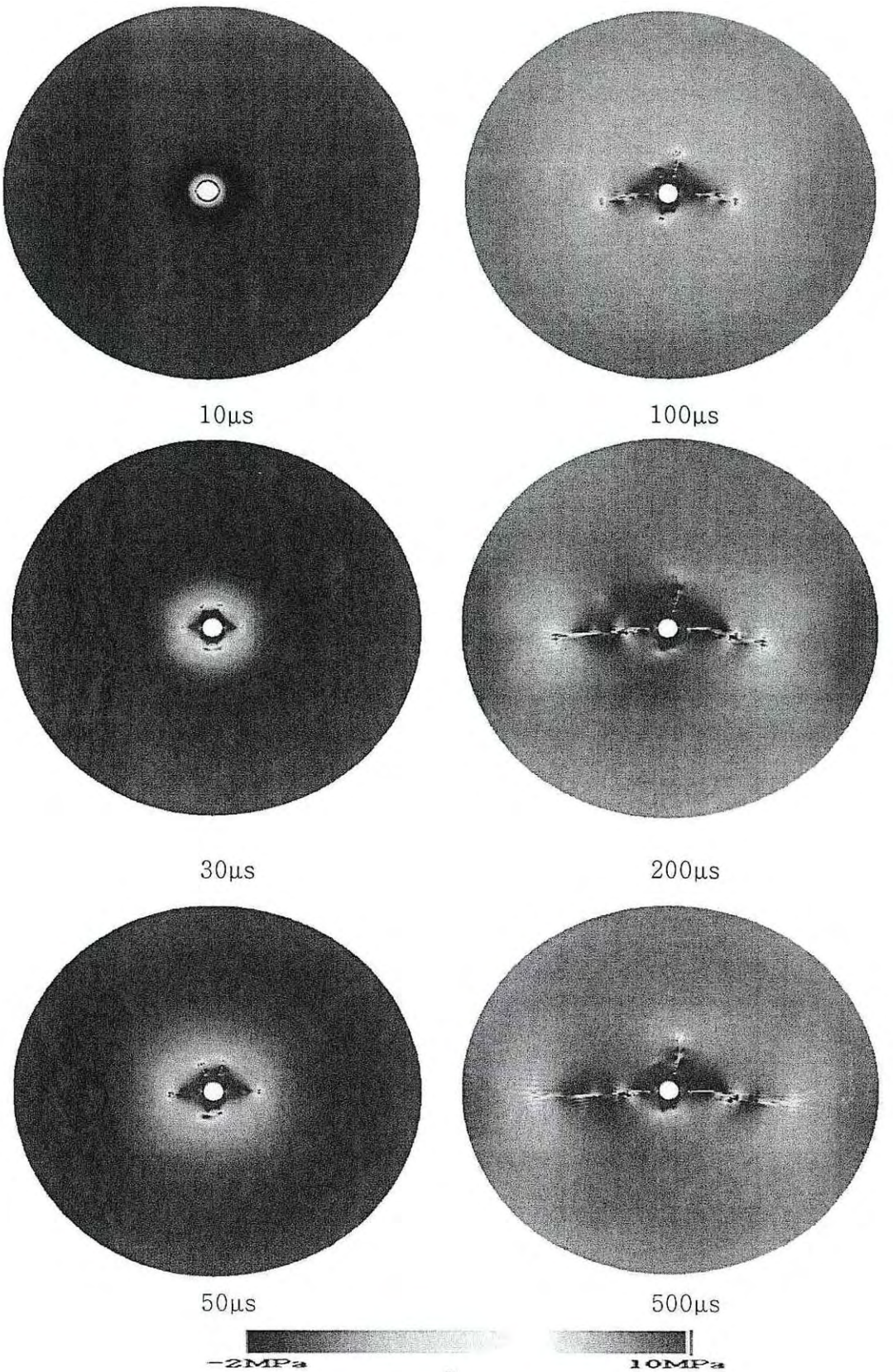
동적파괴해석결과 500μs(일반장약공)



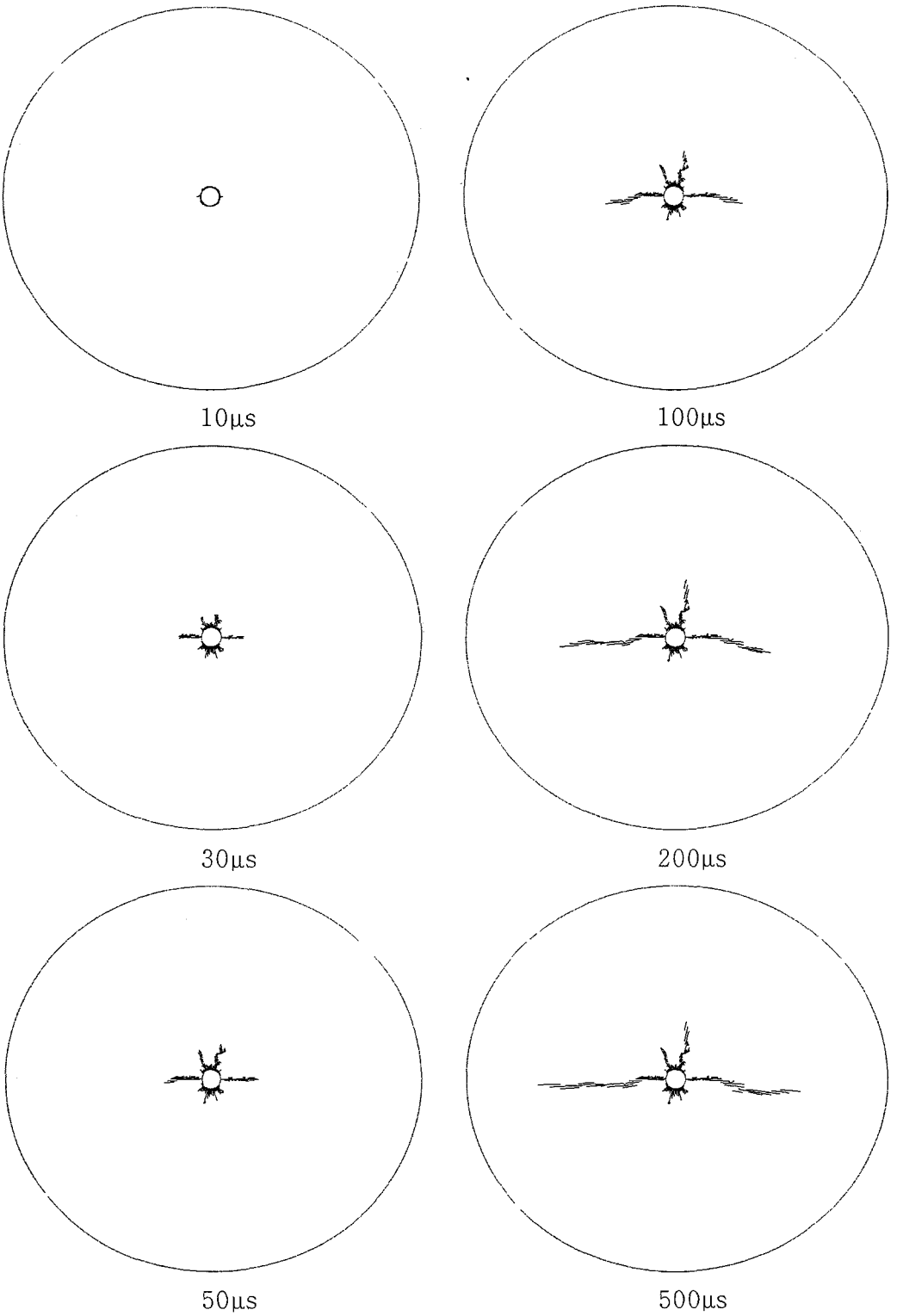
동적파괴해석결과 500μs(노치장약공)

동적파괴과정해석에 따른 균열진전

그림 3.9.8 원형장약공과 노치장약공의 실 발파실험 및 수치해석 결과

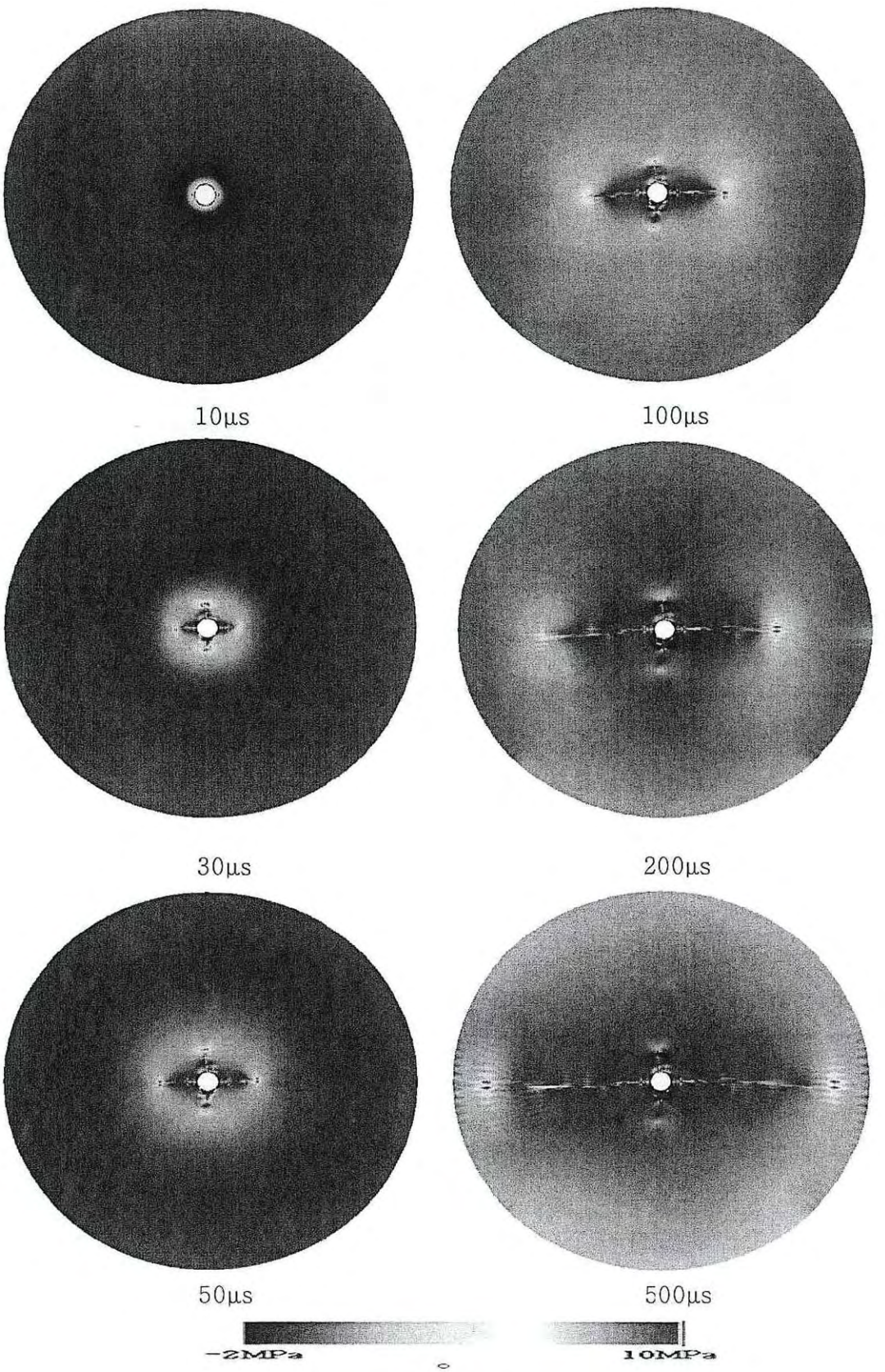


(a) 시간에 따른 주응력 분포

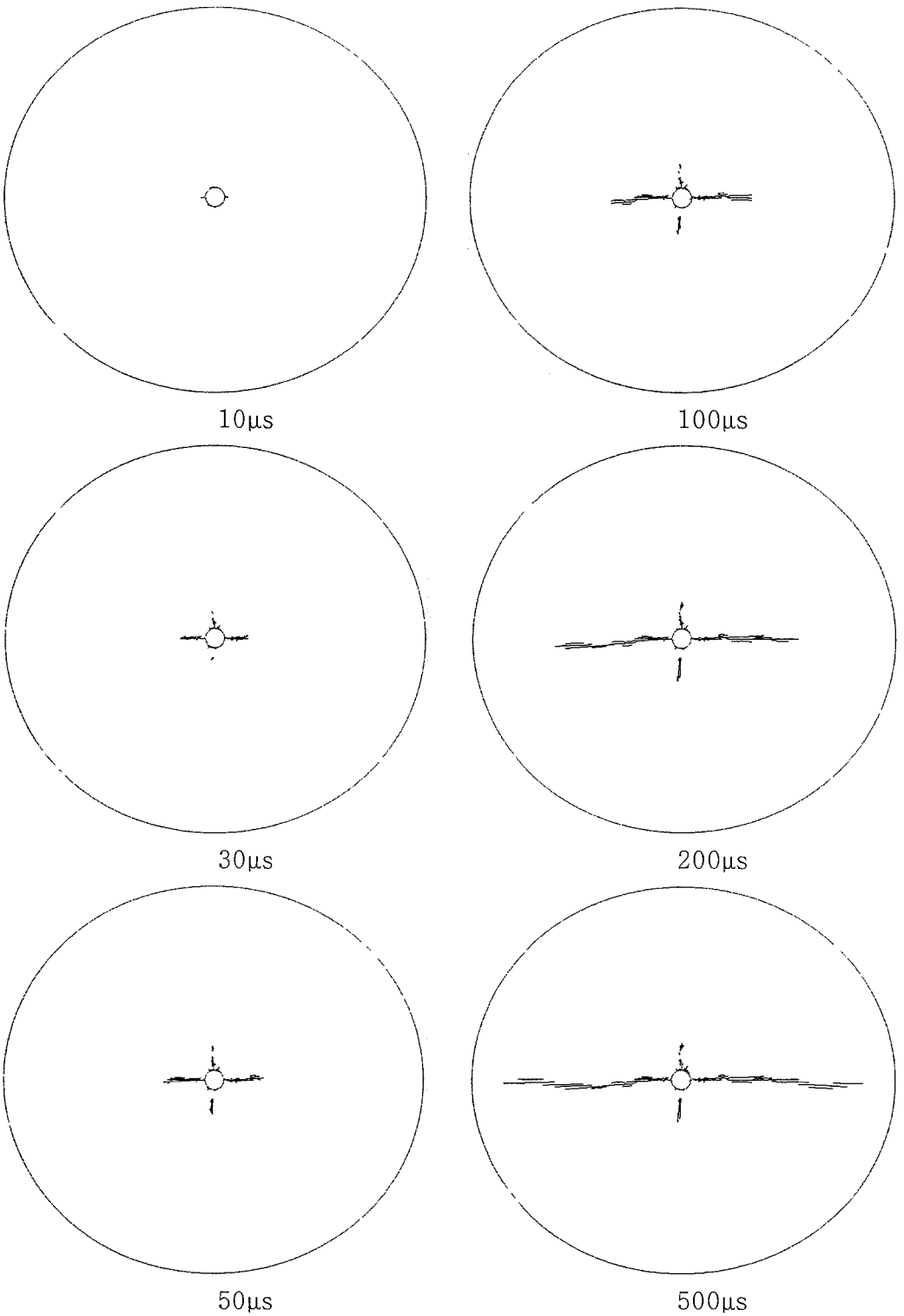


(b) 시간에 따른 균열진전

그림 3.9.9 시간에 따른 동적파괴과정해석결과 (Model 9 적용)

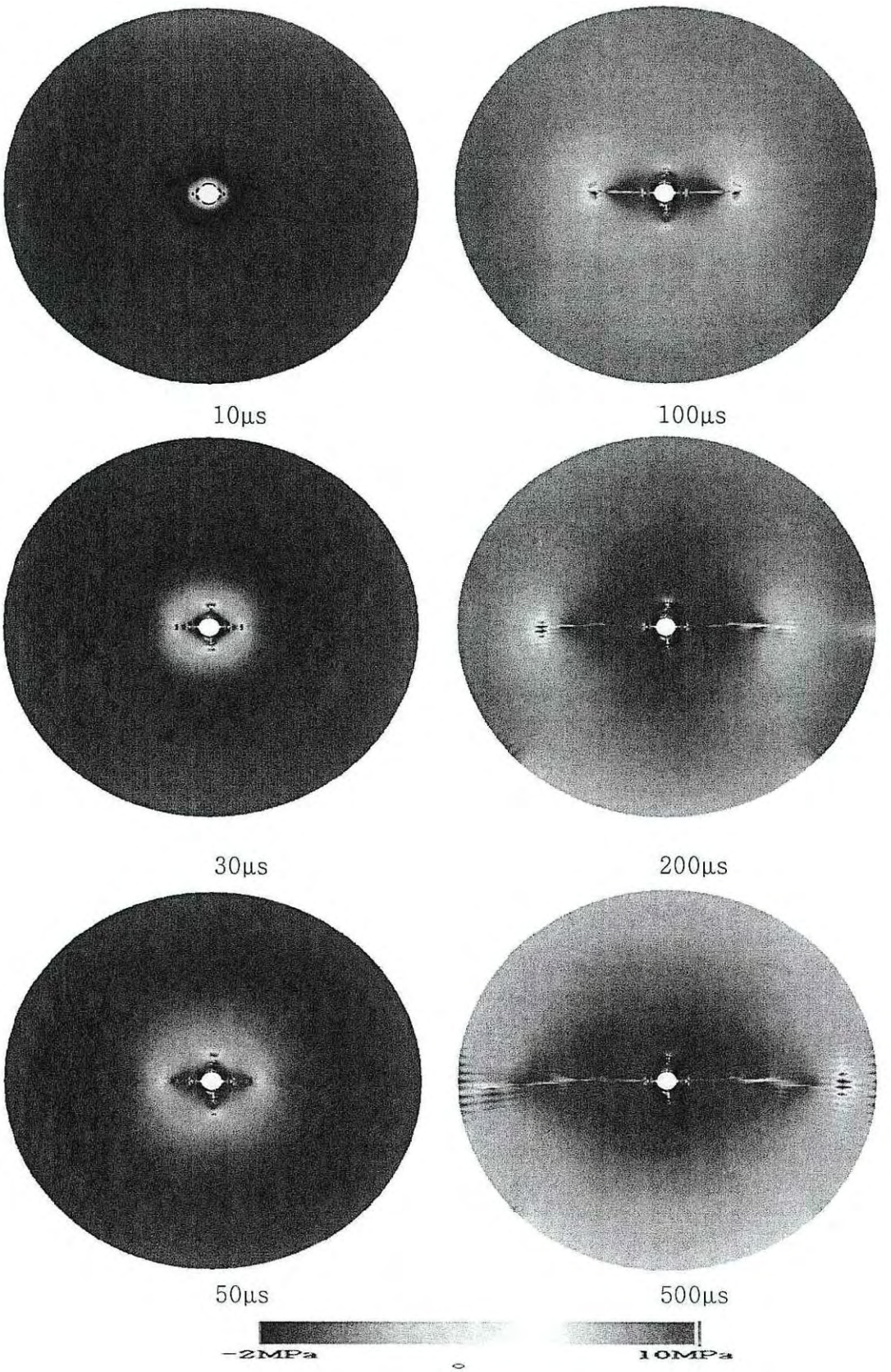


(a) 시간에 따른 주응력 분포

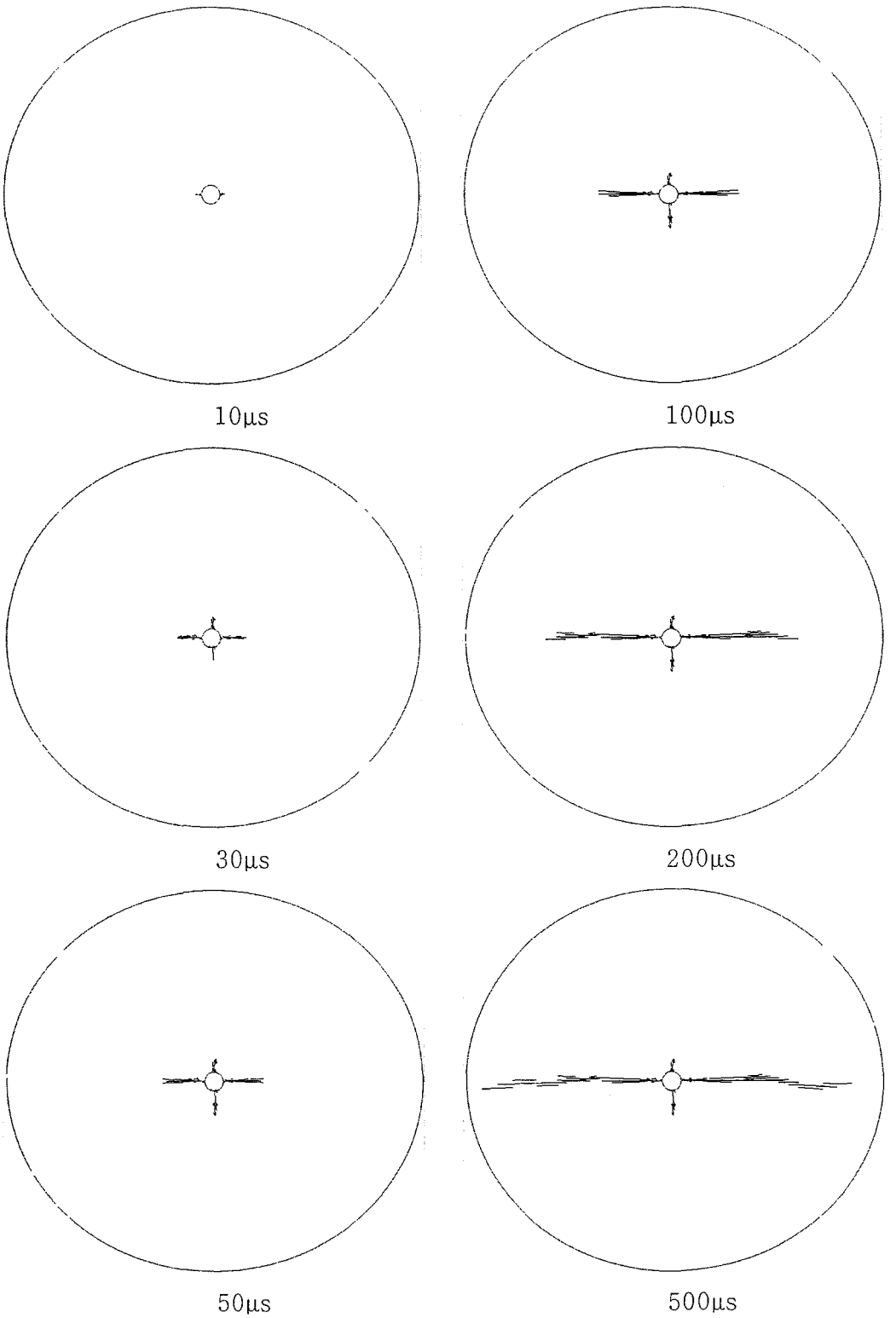


(b) 시간에 따른 균열진전

그림 3.9.10 시간에 따른 동적파괴과정해석결과 (Model 1 적용)

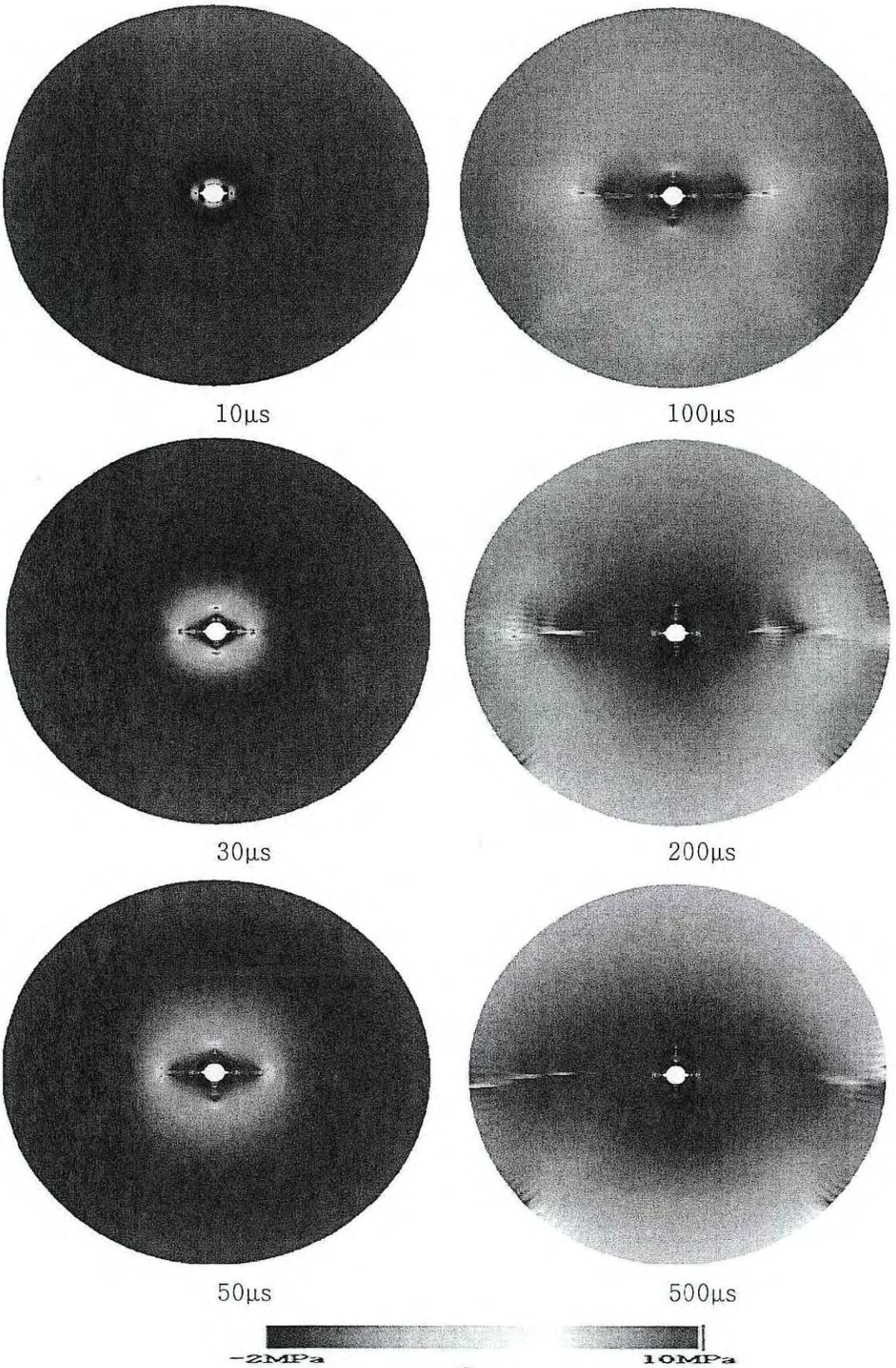


(a) 시간에 따른 주응력 분포

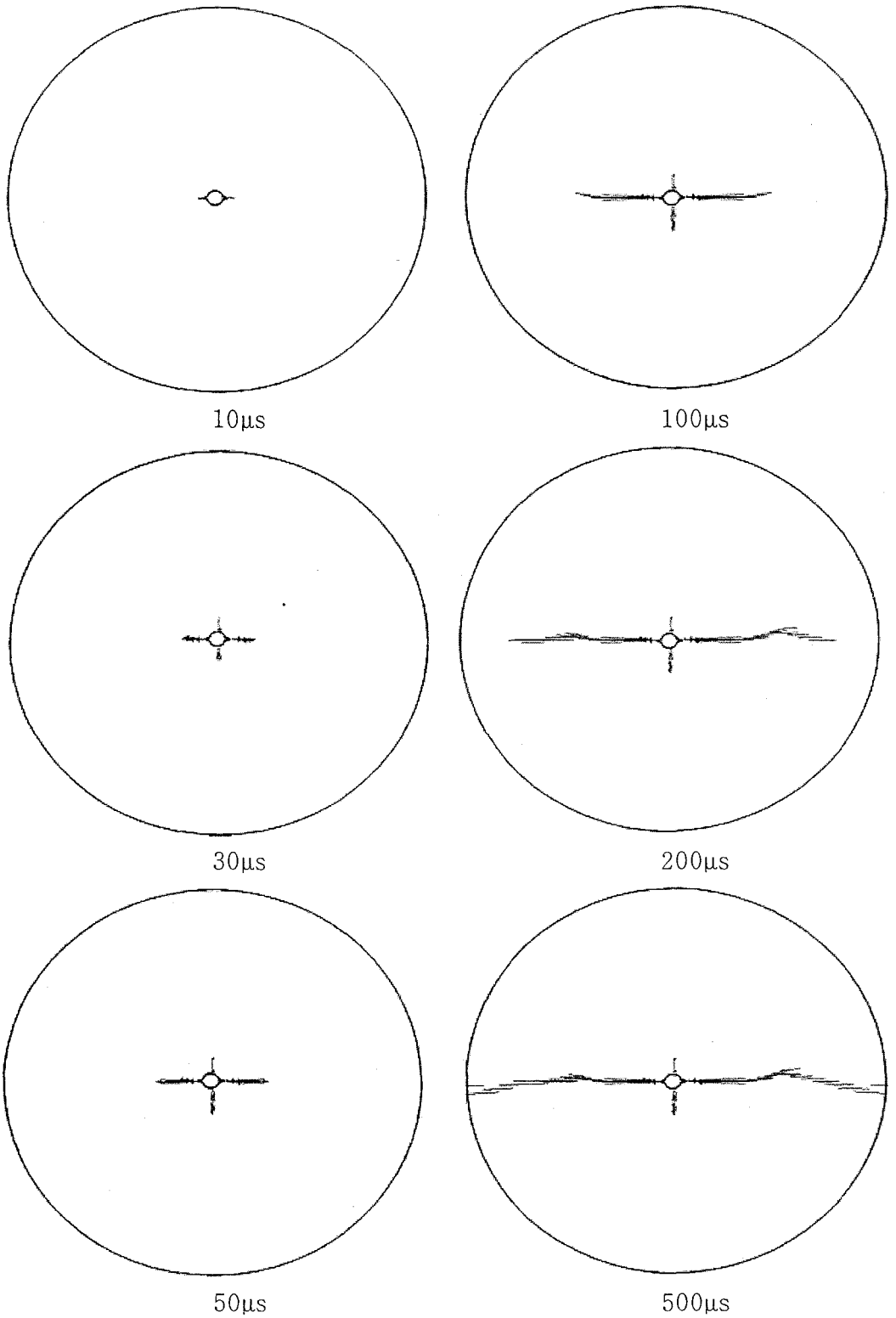


(b) 시간에 따른 균열진전

그림 3.9.11 시간에 따른 동적파괴과정해석결과 (Model 2 적용)

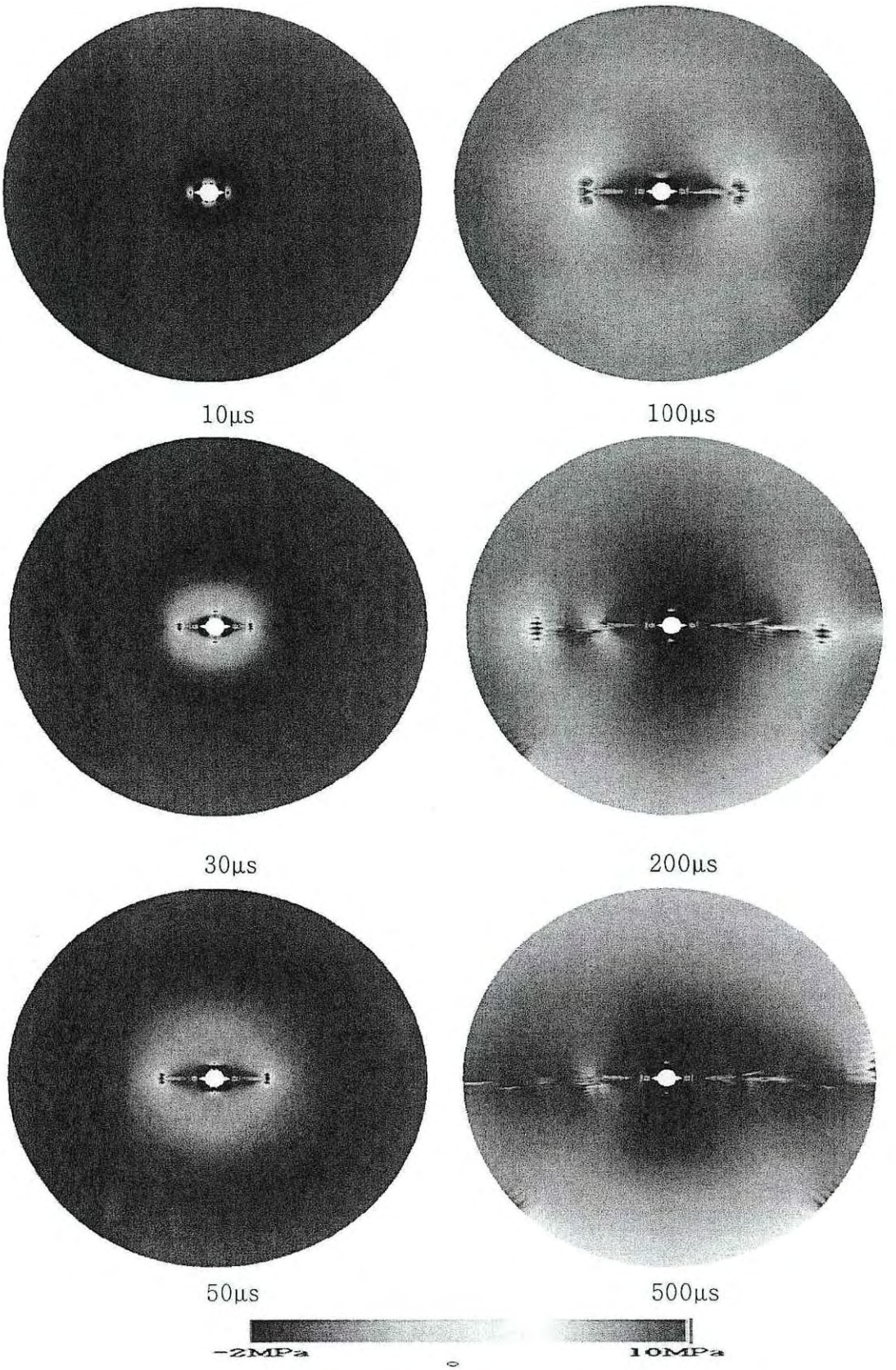


(a) 시간에 따른 최대주응력 분포

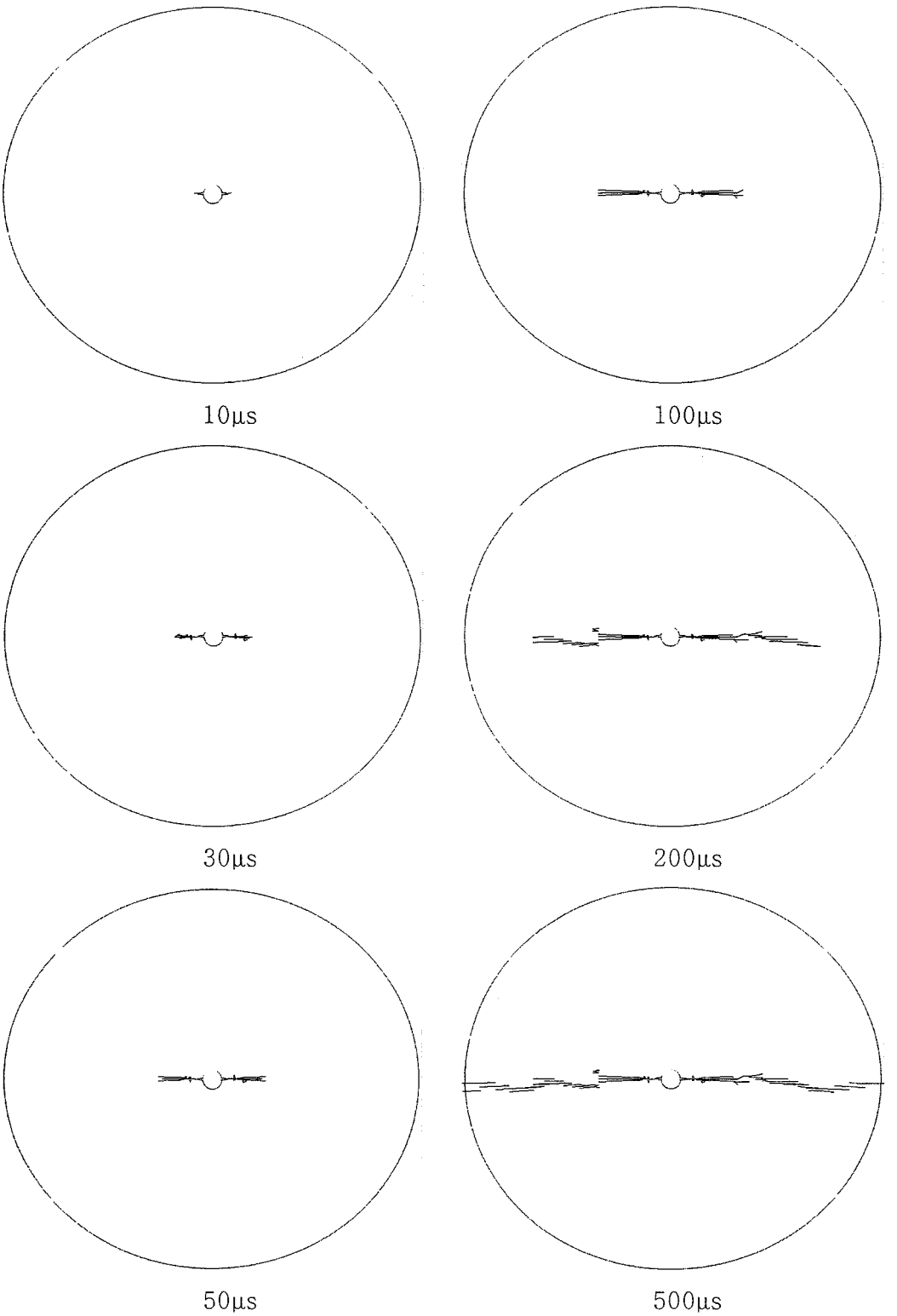


(b) 시간에 따른 균열진전

그림 3.9.12 시간에 따른 동적파괴과정해석결과 (Model 3 적용)

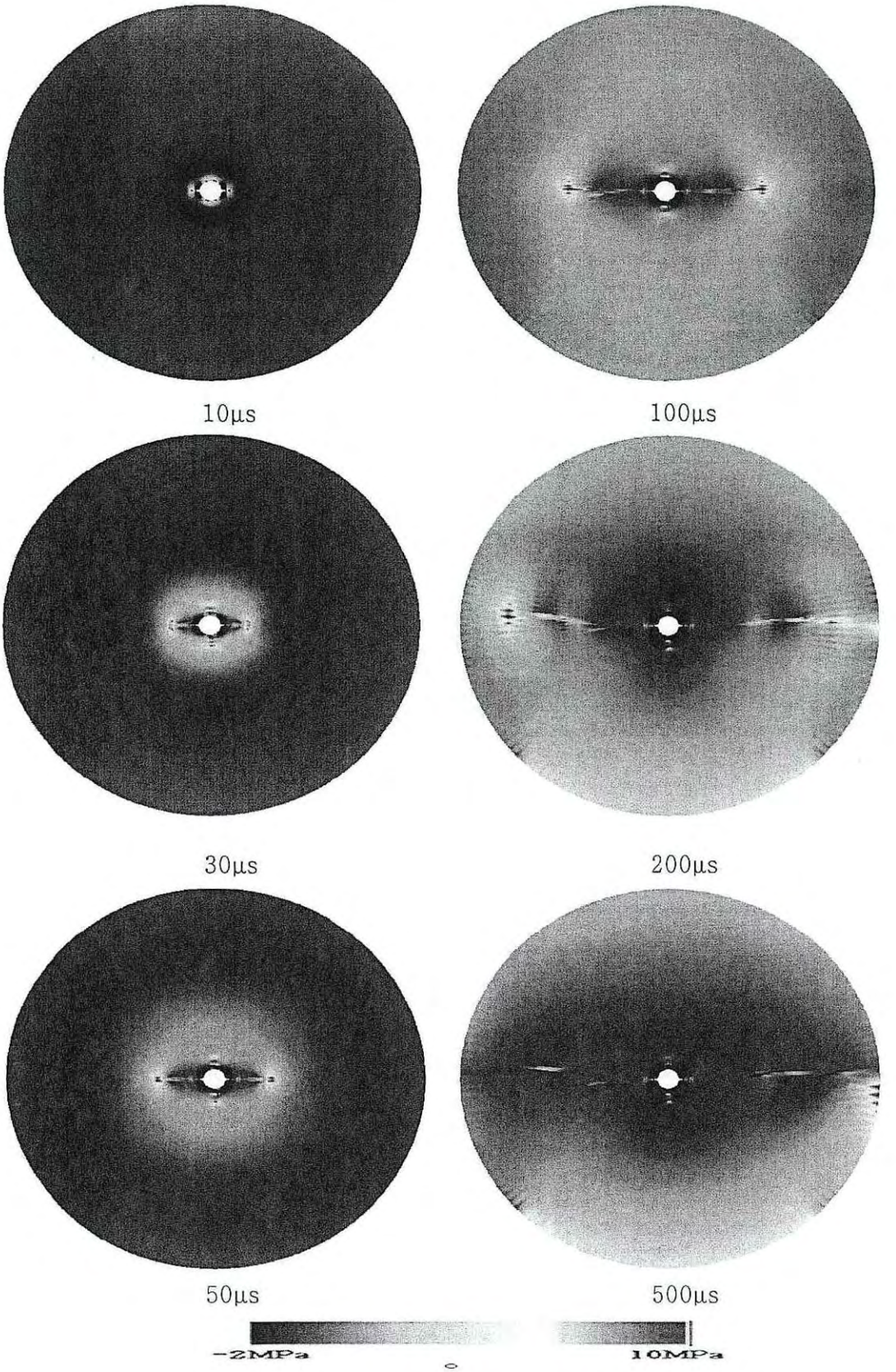


(a) 시간에 따른 최대주응력 분포

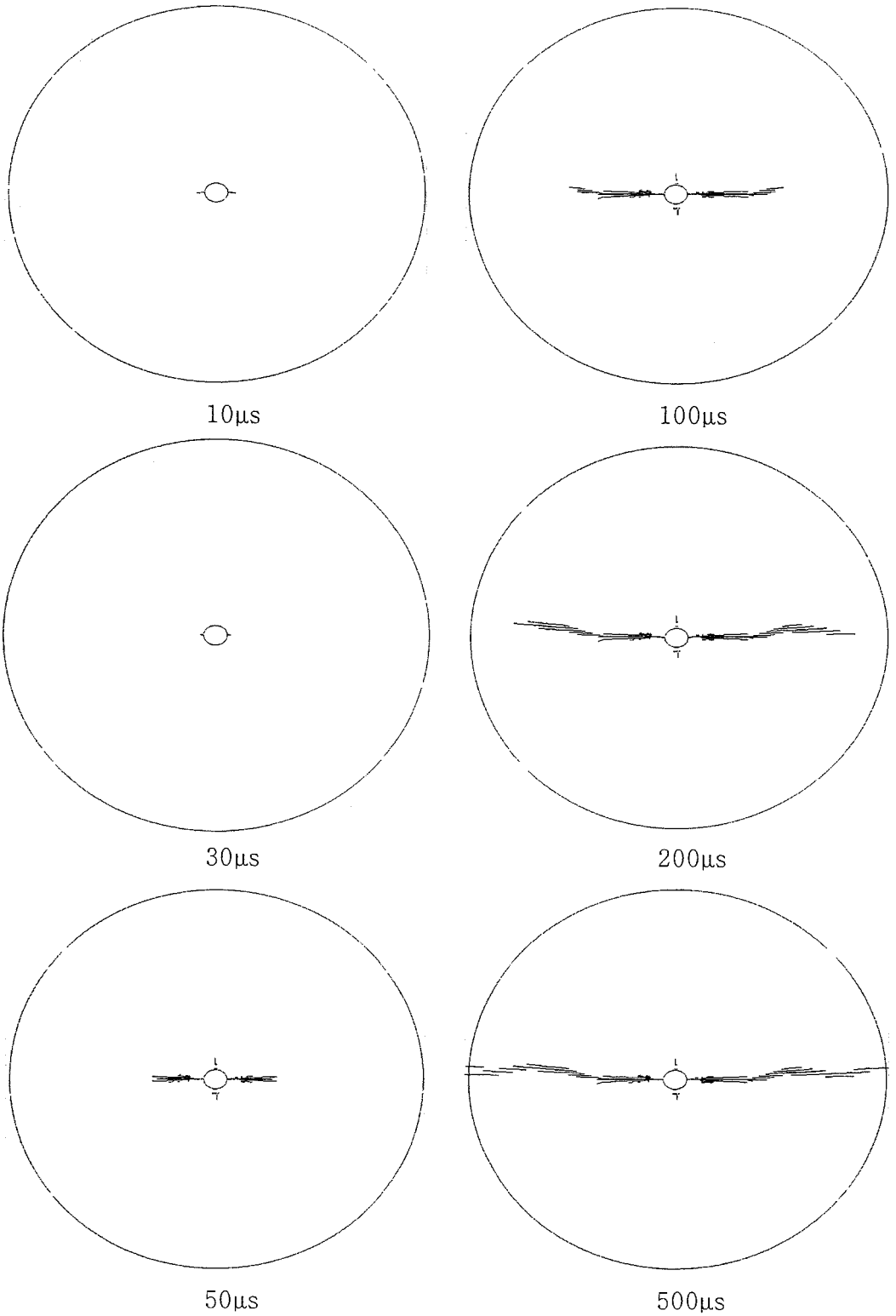


(b) 시간에 따른 균열진전

그림 3.9.13 시간에 따른 동적파괴과정해석결과 (Model 4 적용)

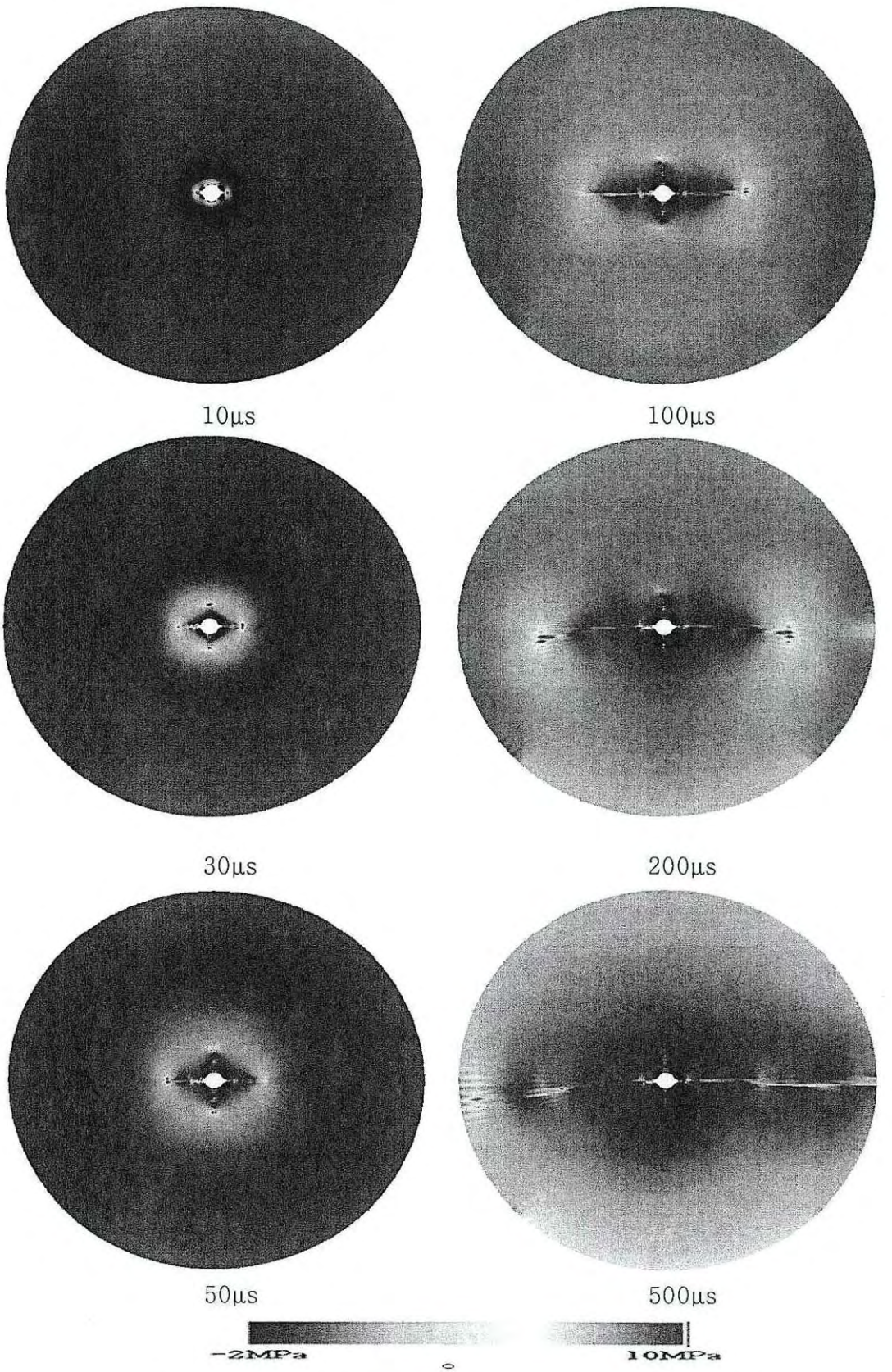


(a) 시간에 따른 최대주응력 분포

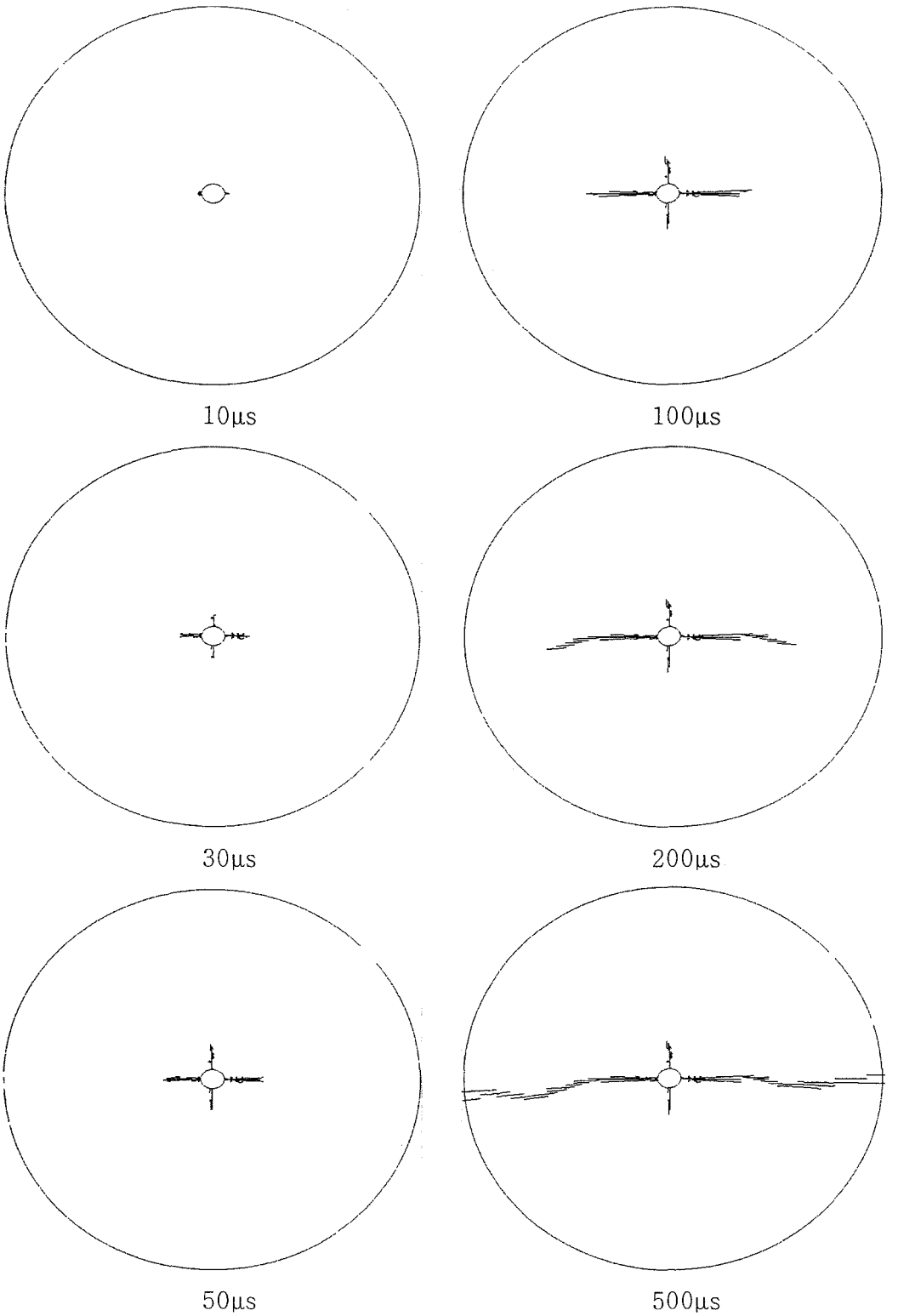


(b) 시간에 따른 균열진전

그림 3.9.14 시간에 따른 동적파괴과정해석결과 (Model 5 적용)

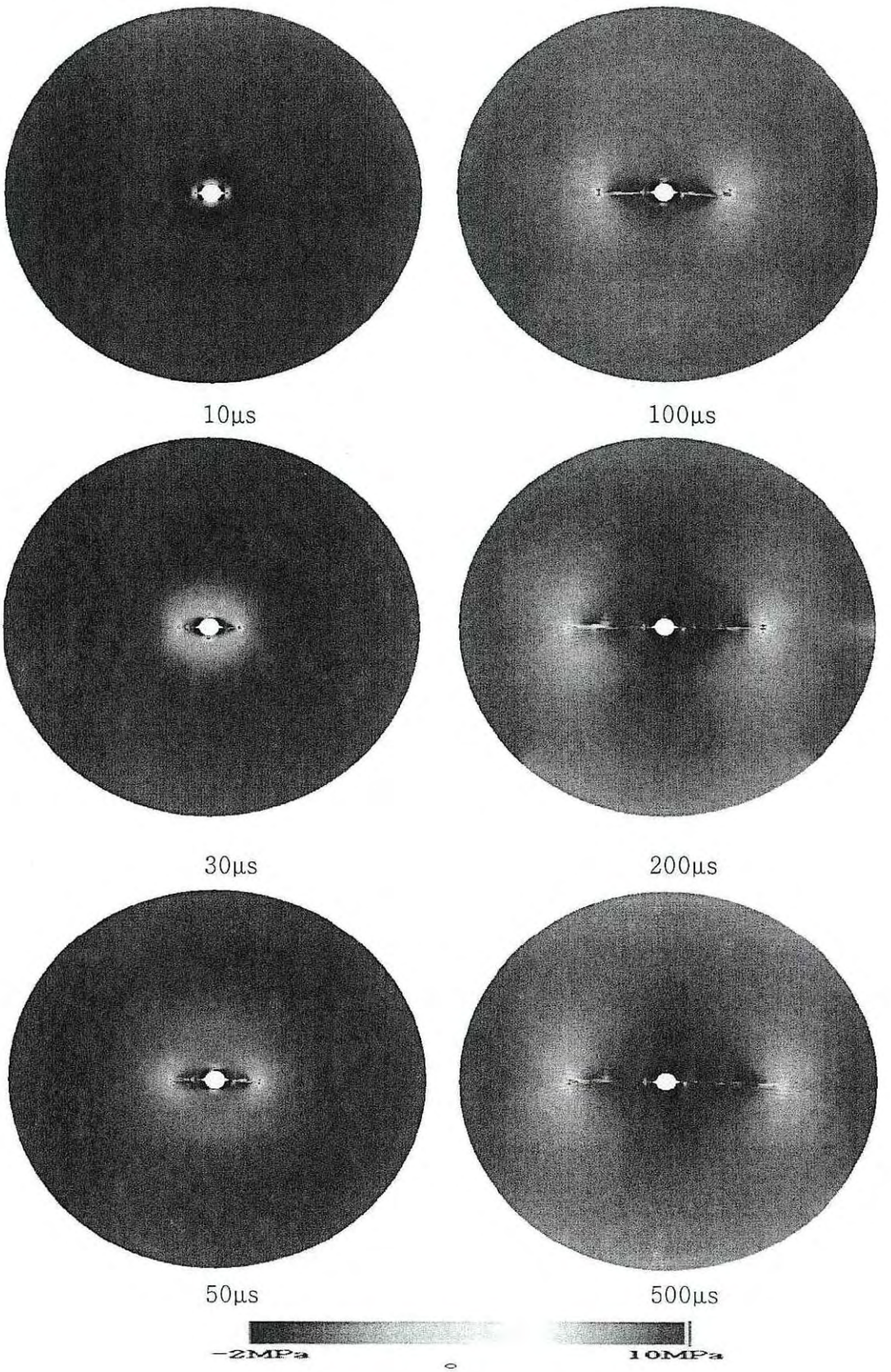


(a) 시간에 따른 최대주응력 분포

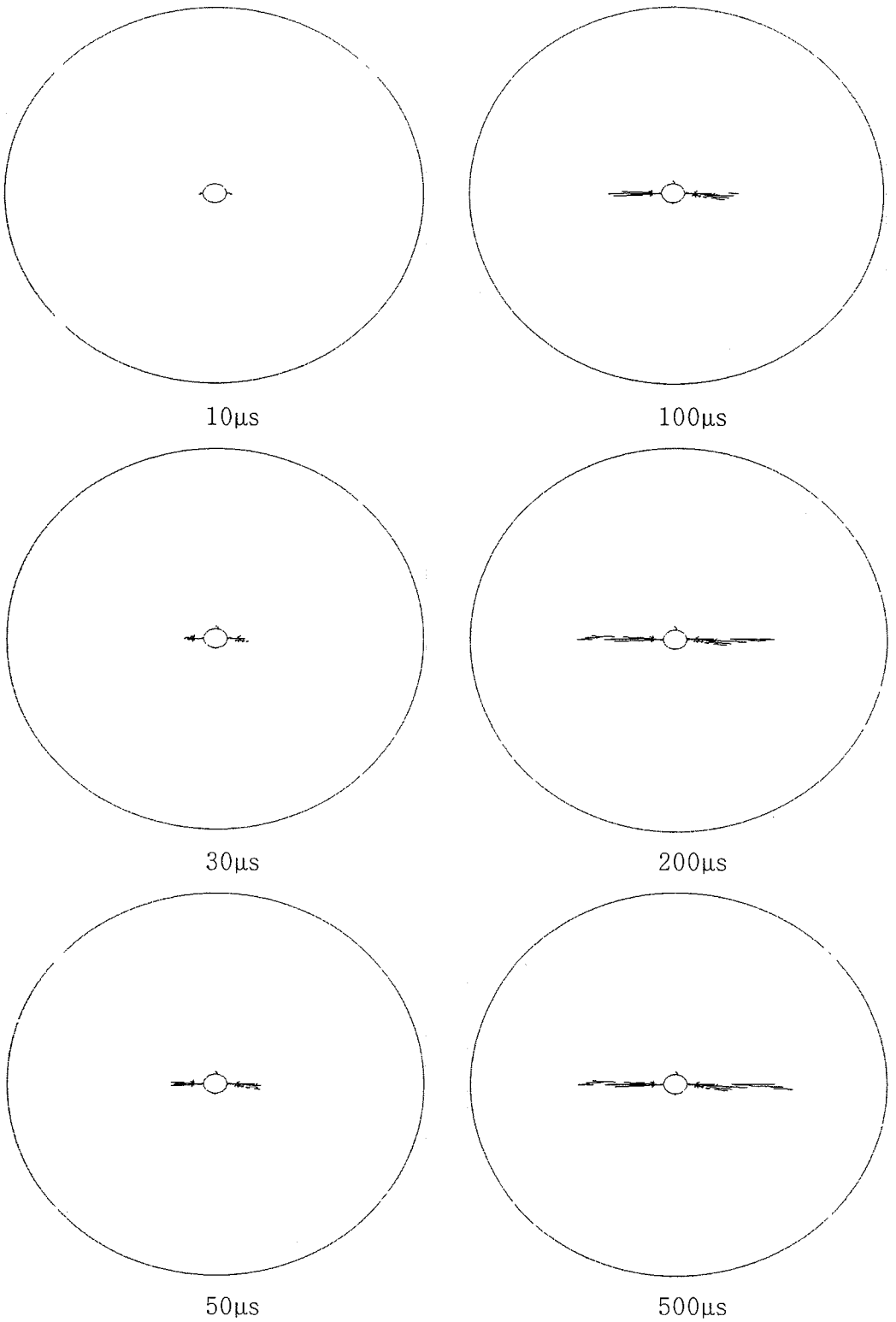


(b) 시간에 따른 균열진전

그림 3.9.15 시간에 따른 동적파괴과정해석결과 (Model 6 적용)

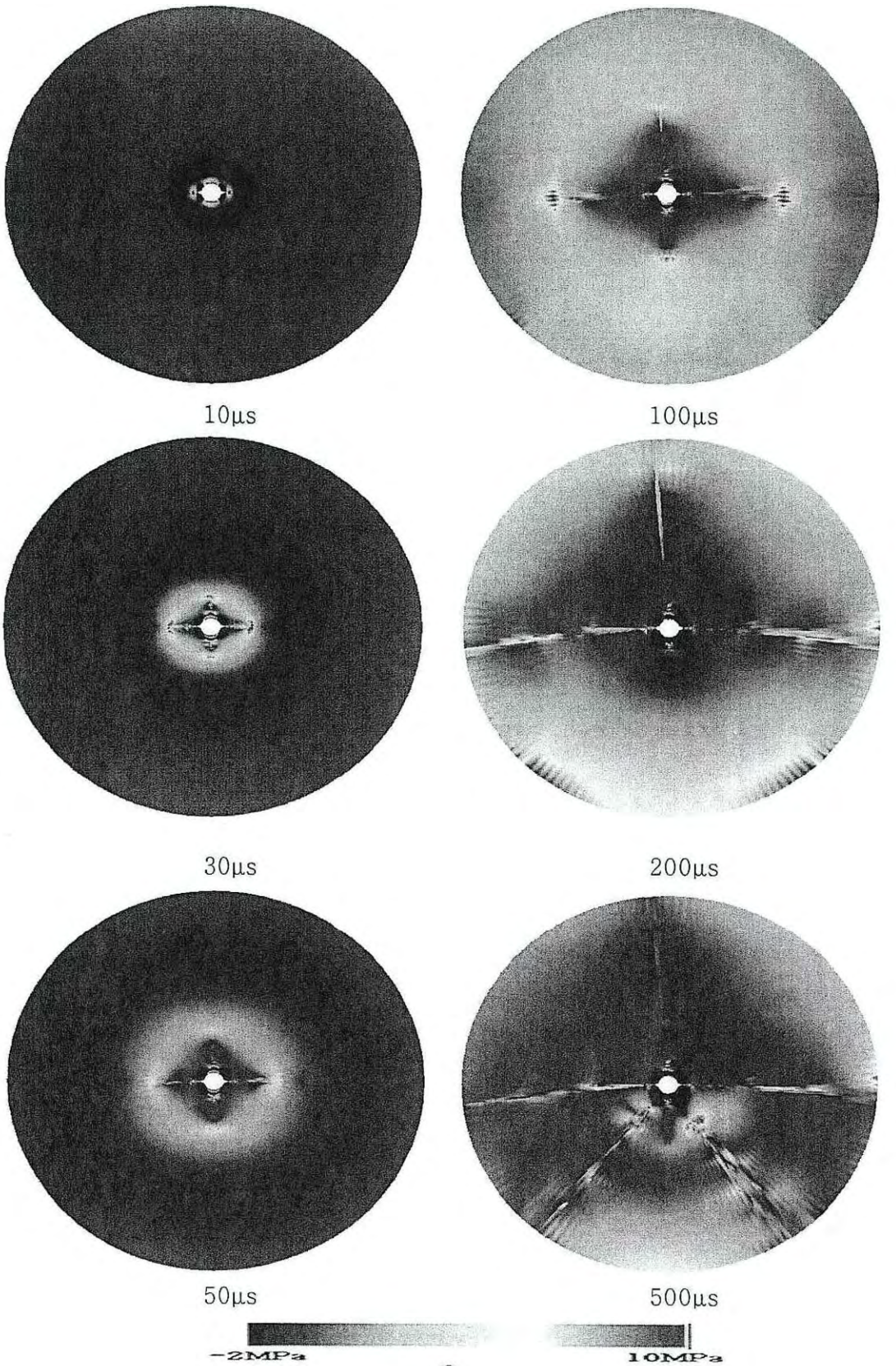


(a) 시간에 따른 최대주응력 분포

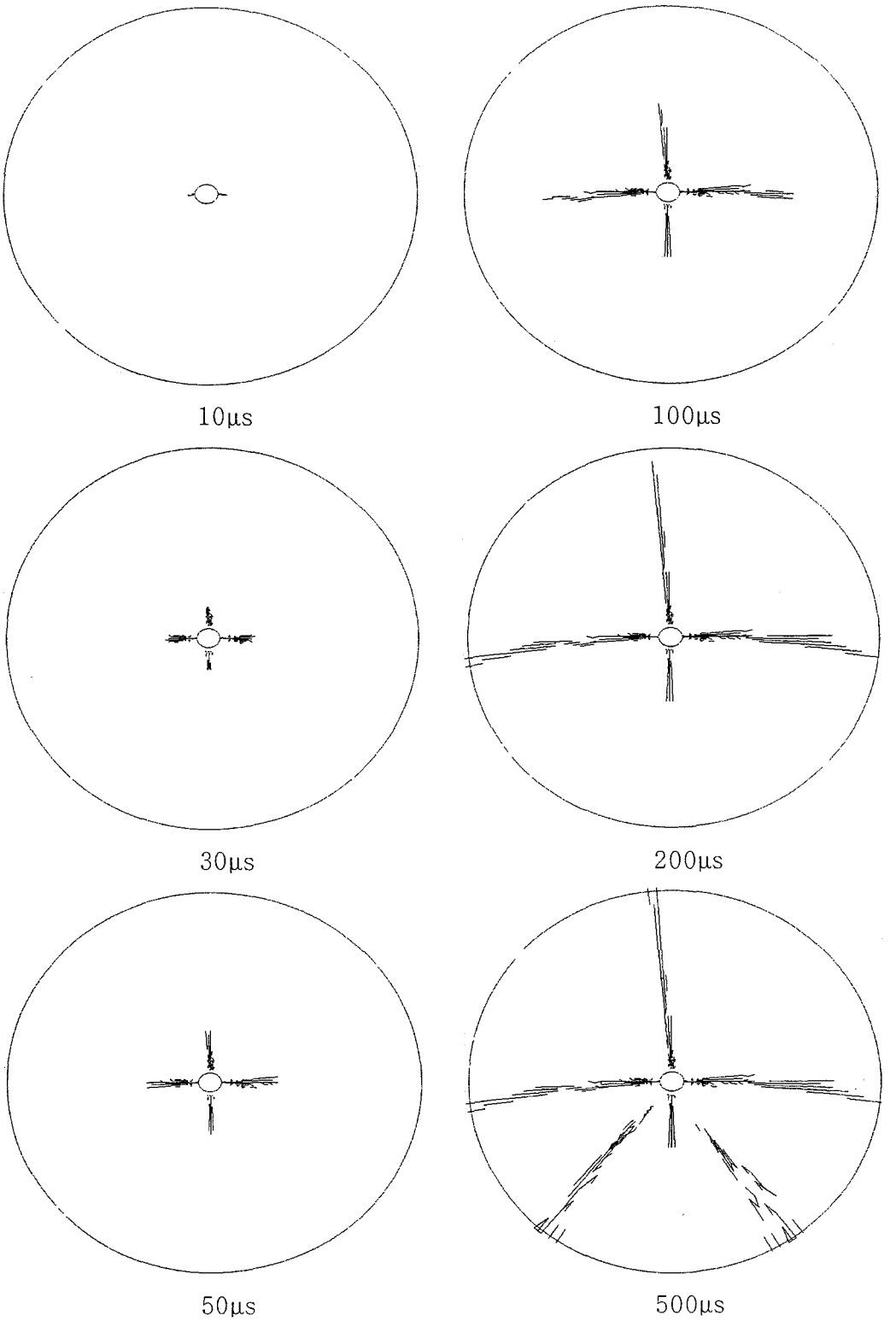


(b) 시간에 따른 균열진전

그림 3.9.16 시간에 따른 동적파괴과정해석결과 (Model 7 적용)



(a) 시간에 따른 최대주응력 분포



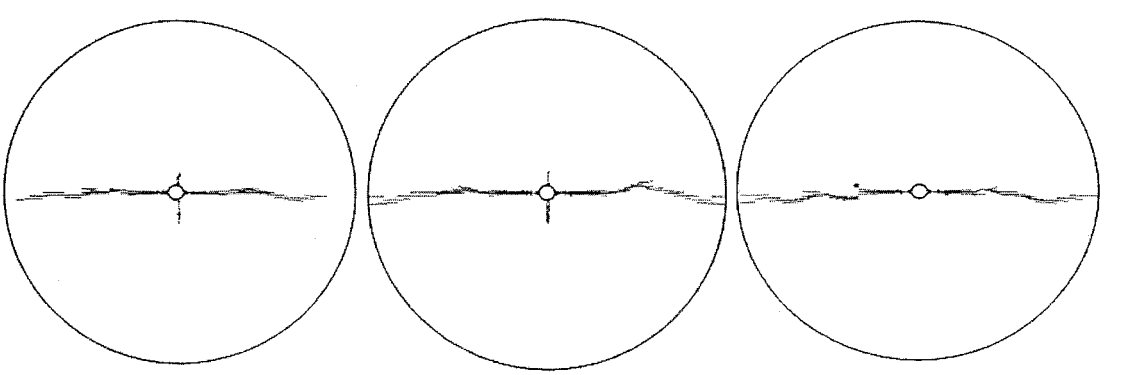
(b) 시간에 따른 균열진전

그림 3.9.17 시간에 따른 동적파괴과정해석결과 (Model 8 적용)

다. 노치형상의 변화에 따른 최종 파괴패턴

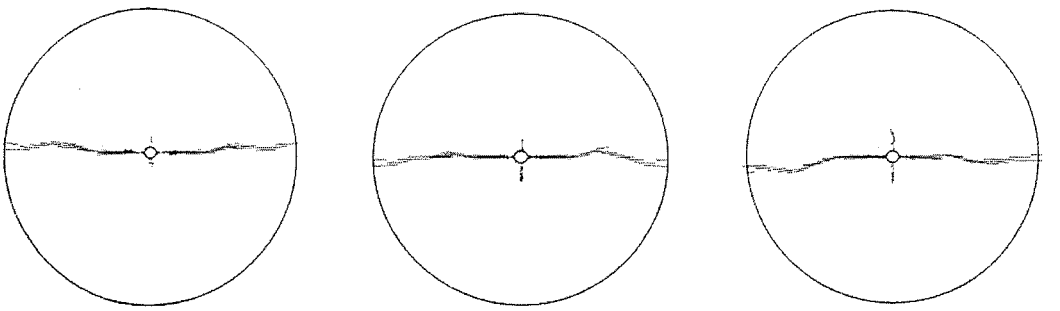
노치형상이 파괴과정에 미치는 영향을 파악하기 위해 노치길이가 미치는 영향과 노치개구 폭이 미치는 영향에 대해 분석하였다. 노치 길이에 따른 응력집중효과가 파괴에 미치는 영향을 분석하기위해 수치해석을 수행하였다. Model 3을 기준모델로 설정하여 노치길이와 노치개구 폭의 길이를 노치 기준모델보다 크고 작게 모델링하여 수치해석을 수행하여 파괴패턴을 비교하였다.

노치길이에 따른 균열제어효과를 분석결과로써 그림 3.9.18에서는 Model 2, Model 3, Model 4와 같은 조건에 대하여 파괴를 고려한 수치실험에서 500μs일 때의 균열패턴을 보여주고 있다. Model 2에서는 500μs일 때 균열전파양상을 보면 균열이 자유면까지 도달되지 못한 결과가 나타났다. Model 4에서는 Model 3과 같이 자유면까지 균열이 도달한 결과가 나타났다. 그림 3.9.19는 노치개구 폭의 따른 균열전파양상에 대한 분석결과로써 노치길이에 대한 수치실험에서 가장 효과적인 결과를 가져온 노치장약공의 20%정도의 길이를 기준으로 노치길이를 고정시키고, 노치개구 폭의 길이를 9mm(Model 5), 12mm(Model 3), 15mm(Model 6)으로 조건을 설정한 노치장약공에 대하여 파괴를 고려한 수치실험을 수행한 결과이다. 500μs일 때의 파괴패턴 해석 결과 Model 3 , Model 5, Model 6 모두 노치 선단에서 인장응력이 발생하여, 균열의 선단을 따라 인장응력이 집중되어 균열이 자유면까지 도달하는 결과를 보여 주었다.



Model 2 (L=5mm)　　Model 3 (L=10mm)　　Model 4 (L=15mm)

그림 3.9.18 노치길이에 따른 파괴패턴 (500μs)



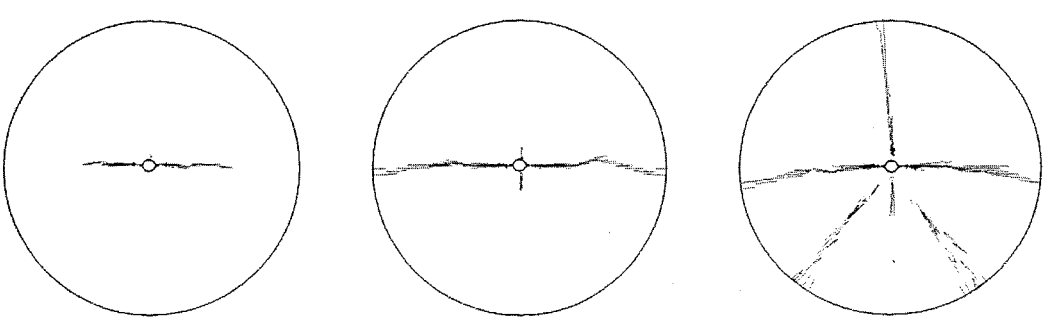
Model 5 (W=9mm)　　Model 3 (W=12mm)　　Model 6 (W=15mm)

그림 3.9.19 노치개구 폭(W)의 길이에 따른 파괴패턴 (500μs)

라. 장약지수가 파괴에 미치는 영향

장약지수가 암반파괴에 미치는 영향을 분석하기 위하여 장약지수에 따른 응력집중에 의한 효과가 파괴에 미치는 영향을 분석하기위하여 수치해석을 수행하였다. 노치의 모델 기준모델인 Model 3를 설정하여 약장약과 과장약인 모델을 설정하여 파괴패턴을 비교하였다.

그림 3.9.20에서 보여주는 것과 같이 기준모델이 Model 3에서는 노치첨단에 응력집중으로 인하여 선균열이 발생하여 선균열을 따라 균열이 진전되어 자유면에 도달하는 결과를 가져왔으나, Model 3을 기준으로 약장약 조건인 Model 7 보면 노치에 의한 선균열 효과를 보이지만 균열은 자유면까지 도달되지 못한 결과를 가져왔다. 반면에 과장약인 Model 8인 경우에는 노치첨단에 의한 균열이외에 장약공 상하부에서도 균열이 발생함으로써 예정된 방향의 균열진전이외에 노치공 상하부의 잉여의 균열이 3개 더 발생하였다. 이로써 과도한 장약량은 발파에서는 노치를 이용한 균열제어효과를 저해하는 결과를 가져왔다.



Model 7 (DE=5.5)　　Model 3 (DE=4.5)　　Model 8 (DE=3.5)

그림 3.9.20 장약지수(DE) 변화에 따른 파괴패턴 (500μs)

4. 노치 장약공 발파 설계법에 관한 고찰

가. 해석변수 및 파괴과정해석 결과

본 연구에서 적용한 동적파괴과정해석법은 균열의 발생, 성장, 결합 등을 요소경계변의 파괴로서 나타내며, 요소 경계변의 응력은 그 응력 경계변을 포함하는 요소들의 응력 평균값으로 한다. 이 평균값과 요소 경계변의 인장강도의 비(국소위험율)를 계산하여 인장파괴판정에 적용한다. 압축파괴의 판정에는 Mohr-Coulomb 파괴기준식을 사용하였다.

해석모델에 사용한 물성치는 동적파괴과정 해석조건과 동일한 값을 사용하여 P파속도는 5500m/s, S파속도는 3179m/s이며 밀도는 2700kg/m^3,탄성계수는 5.97GPa, 포아송비는 0.25고 균질계수는 5이다. 모델 경계는 연속경계로 하여 응력파가 반사되지 않는 자유면으로 가정한다. 설계변수로서 노치의 길이, 암반의 인장강도를 고려하여 노치길이는 각각 5mm, 10m, 15mm, 인장강도는 10MPa, 20MPa, 30MPa으로 동적파괴과정을 수행하였다. 암반의 압축강도는 인장강도의 10로 설정하였다. 그림 3.9.21은 노치의 길이와 인장강도의 변화에 따른 최종적인 파괴패턴을 보여주고 있다. 인장강도가 증가하면서 발생 균열의 길이는 감소하고 노치길이가 증가하면 발생균열의 길이도 증가한다.

나. 노치 장약공을 이용한 균열설계법 제안

그림 3.9.22는 그림 3.9.21에서 보여준 결과를 바탕으로 인장강도(St)와 공내 작용하중(P)의 비를 고려한 무차원압력과 노치방향으로 제어된 발생균열의 길이(Lc)를 노치공 반경(an)로 나눈 무차원 균열길이를 그래프로 나타내었다. 무차원 균열길이는 작용압력이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이며, 인장강도가 증가함에 따라 평균 균열의 길이는 감소하고, 노치길이가 길어짐에 따라서 평균 균열의 길이는 증가하였다. 이러한 결과는 실험실규모의 균열제어 발파실험에서 보여주는 경향과 일치하며, 향후 실험실 및 현장규모의 균열제어발파의 설계에 중요한 정보를 제공할 것으로 판단된다.

그림 3.9.22를 이용하여 노치장약공 발파에서 균열설계에 적용하는 과정을 설명하면 다음과 같다.

1) 암반의 사용폭약 및 디커플링을 고려한 공내 작용하중(P)을 산정한다.

2) 대상 암반의 인장강도를 측정한다.

3) 제어하고자 하는 균열의 길이(Lc)를 선정한다.

4) 최적의 장약공, 노치 비트의 노치길이와 노치 개구폭을 산정한다.

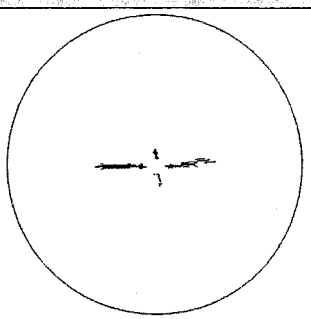
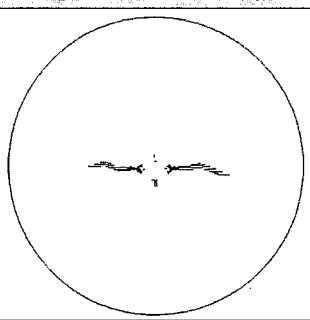
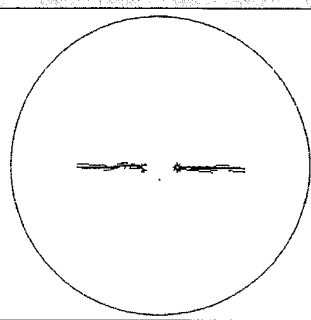
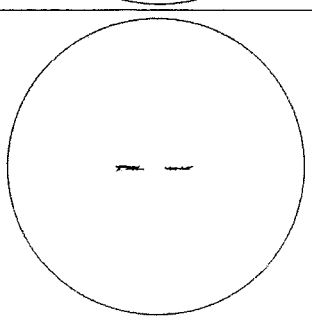
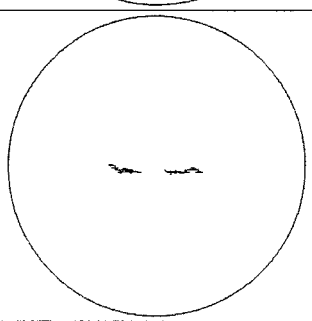
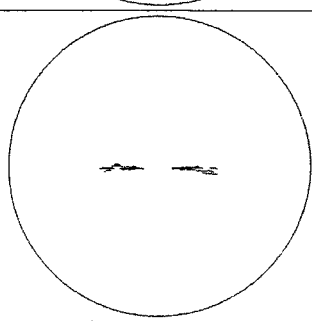
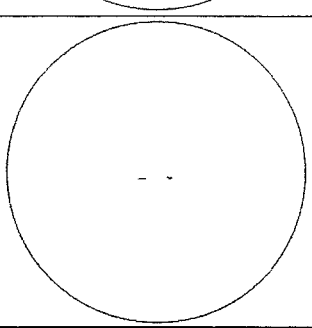
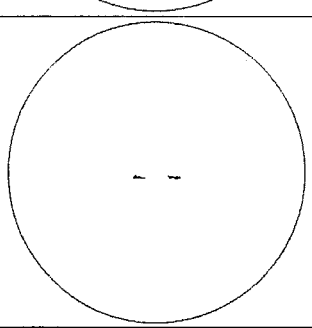
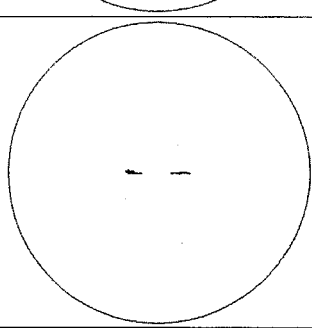
인장강도	노치길이 L=5mm	노치길이 L=10mm	노치길이 L=15mm
10MPa			
20MPa			
30MPa			

그림 3.9.21 노치길이와 인장강도의 변화에 따른 최종파괴패턴

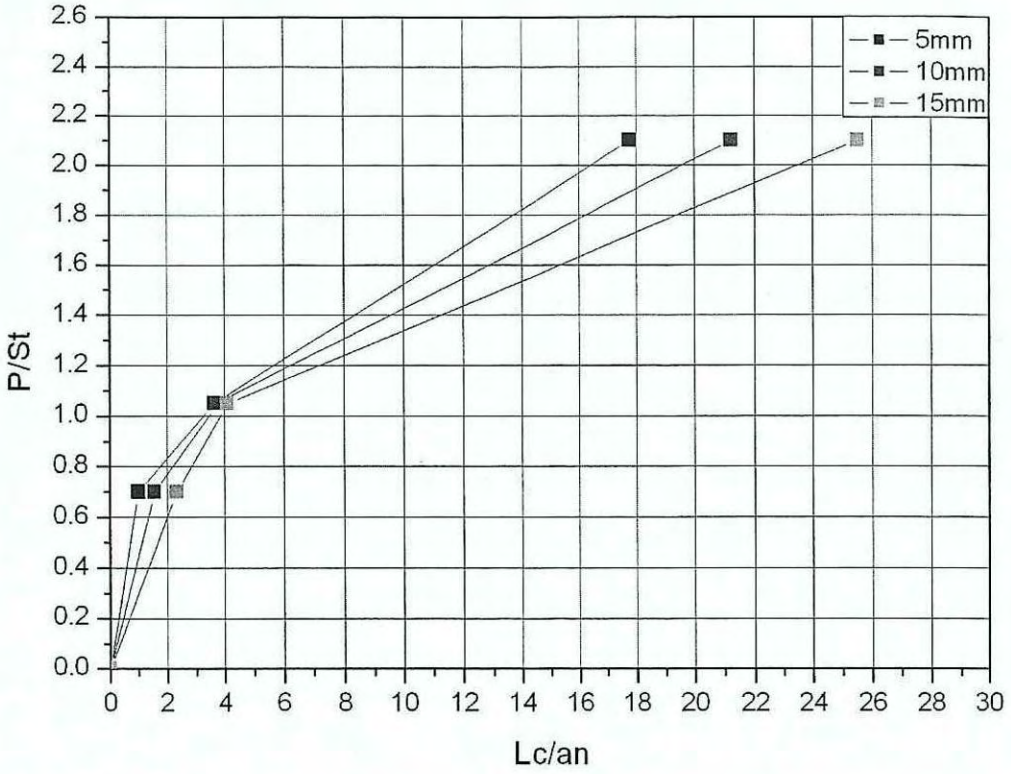


그림 3.9.22 노치길이에 따른 균열발생압력과 균열전파거리의 관계

제 10 절 현장적용 예비시험을 통한 노치발파 적용성 연구 I

1. 현장현황

본 현장은 인천국제공항철도 2단계 토목공사 현장의 본선터널 굴착공사 중 도심지 통과 구간(약 171m)으로 그림 3.10.1과 같이 인접 구조물들의 안정성 문제로 유압절개 굴착공법으로 설계되었던 구간이다. 그런데 본 구간의 현장지질조사 결과 지질조건이 화강암질 편마암류로 일축압축강도가 130~150MPa에 이르는 경암으로 판명되어 시공성 저하에 따른 공기 증가로 유압절개 굴착공법의 적용이 어려운 구간이었다. 이에 그림 3.10.2와 같이 미진동 암굴착공법을 적용하여 진동과 여굴을 제어하였다.

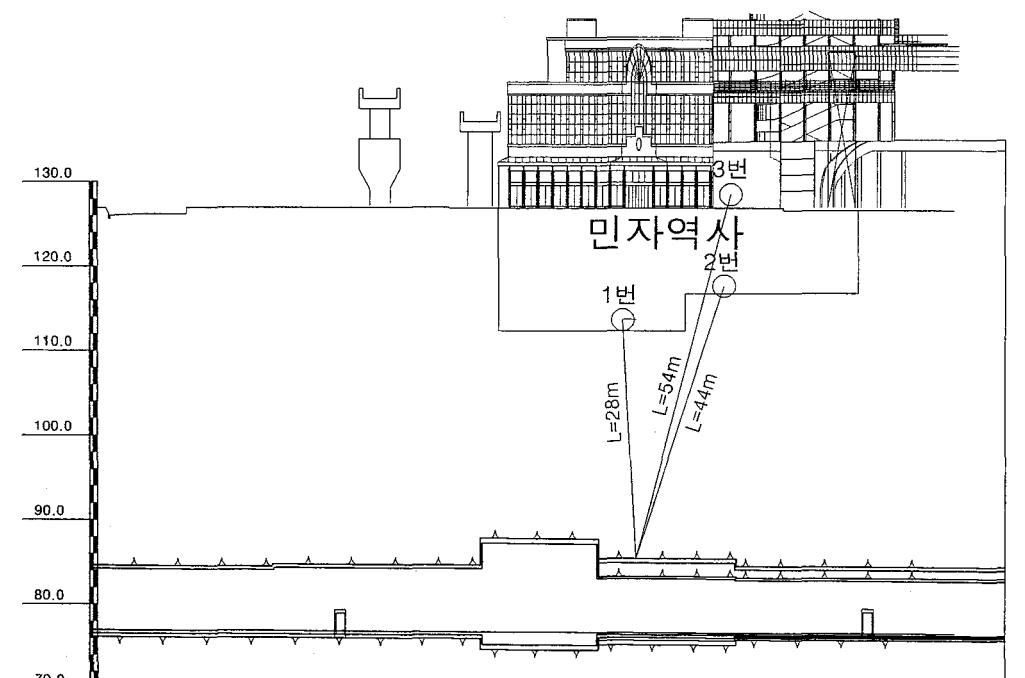


그림 3.10.1 Conditions on the site

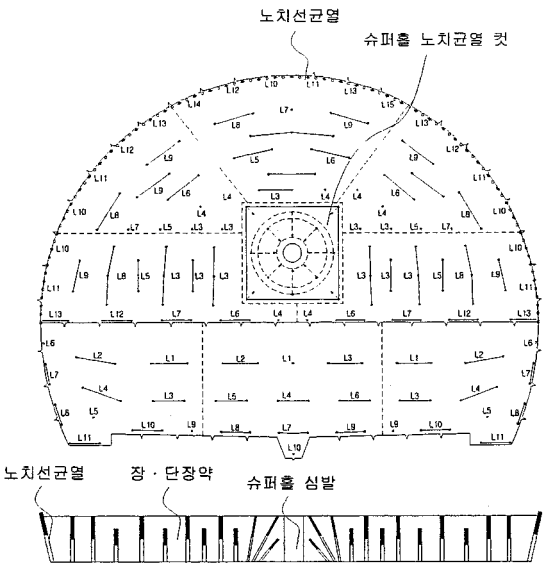


그림 3.10.2 미진동 암굴착 공법

2. 미진동 암굴착공법의 적용

본 연구에서는 일반발파공법, 선균열 노치발파공법, 미진동 암굴착공법 비교를 위해 일반발파공법을 5회, 선균열 노치발파공법 1~15회, 미진동 암굴착공법 1~15회에 총 35회의 굴착 시공을 수행하였다. 매회 2~3지점에서 발생한 진동치와 여굴량을 계측하여 분석을 실시하였다. 여기서 선균열 노치발파공법이란 최외곽굴착선공부에만 노치발파공을 적용한 공법이다.

진동치 계측을 위해 사용된 계측기기는 변위, 속도, 가속도, 주파수, 폭풍압을 모두 측정할 수 있는 것으로 Instantel사 DS-677이다. 계측위치는 터널 진행방향과 직각으로 각각 35개의 데이터를 계측하였으며 회귀분석결과는 그림 3.10.3과 같다.

분석결과 그림 3.10.3에 보듯이 선균열 노치발파공법 적용 시 일반발파공법에서보다 약 30% 이상, 미진동 암굴착공법 적용 시는 약 50%의 진동저감효과가 있음이 확인되었다. 터널 내 여굴은 SET2010 장비를 사용하여 표 3.10.1과 같은 방법으로 측정하였다. 그 결과는 표 3.10.2와 같이 일반발파를 시행하였을 경우는 천단부에서는 약 16cm, 측벽부에서는 약 11cm, 노치공법을 이용하였을 경우는 천단부 11cm, 측벽부 11cm이 발생하였다. 측벽부에 발생하는 여굴은 일반발파나 노치공법 적용시나 큰 차이가 발생하지 않았지만 천단부에서는 약 6cm가 줄어 1/3정도 감소하였다. 노

치 선균열 발파의 적용으로 여굴 감소 뿐 아니라 암반손상대의 축소도 기대할 수 있으며 이는 영구 구조물로서 터널의 안정성에 기여할 것으로 판단된다.

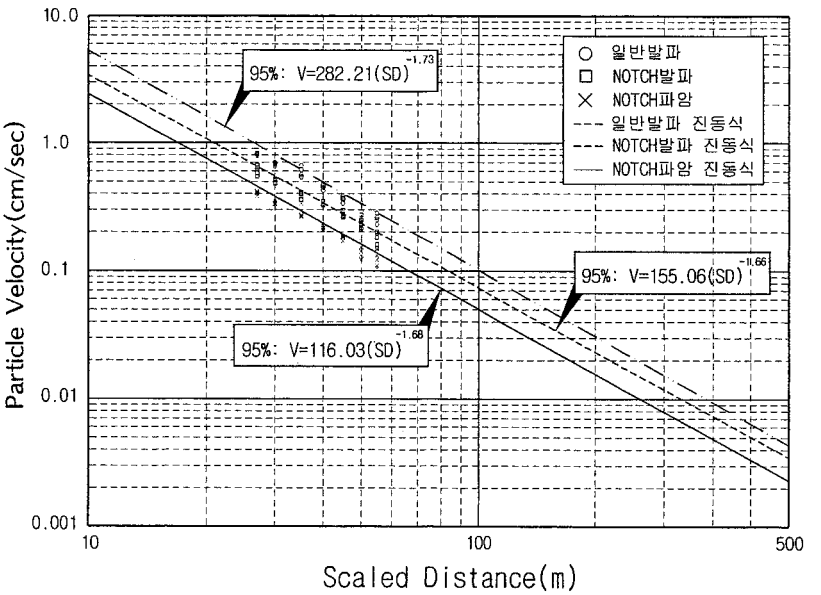


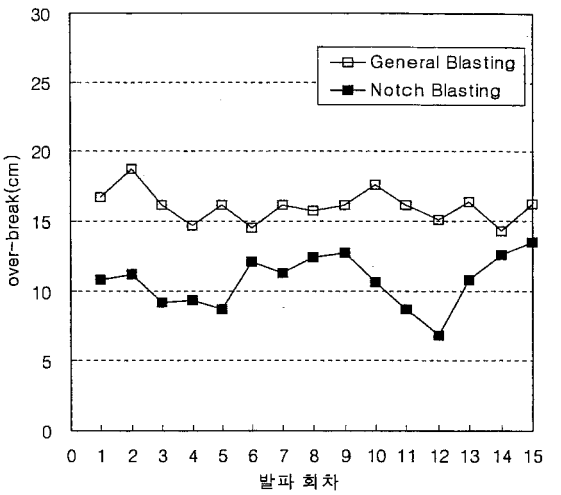
그림 3.10.3 Regression result of vibration

표 3.10.1 Sample of Measuring result of over-break after Notch-blasting

측점	X (m)	Y (m)	여굴(cm)	여굴 측정 개요도
1	-6.020	125.387	10.6	
2	-5.814	126.945	9.7	
3	-5.213	128.397	10.6	
4	-4.256	129.644	11.6	
5	-3.010	130.601	10.6	
6	-1.558	131.202	12.7	
7	0	131.407	11.2	
8	+1.558	131.202	12.1	
9	+3.010	130.609	12.1	
10	+4.256	129.644	10.6	
11	+5.213	128.397	10.5	
12	+5.814	126.945	11.1	
13	+6.020	125.387	8.8	
평균			10.94	

표 3.10.2 Result of measuring over-break (units: cm)

회차	General Blasting		Notch Blasting	
	Roof	Wall	Roof	Wall
1	16.7	11.7	10.8	12.1
2	18.7	12.5	11.2	12.5
3	16.1	12.1	9.2	11.1
4	14.7	13.6	9.3	9.7
5	16.1	11.3	8.7	8.7
6	14.5	10.6	12.1	12.5
7	16.1	9.7	11.3	10.6
8	15.7	12.3	12.4	9.2
9	16.1	12.4	12.7	10.3
10	17.6	8.6	10.6	9.2
11	16.1	9.7	8.7	11.5
12	15.1	10.7	6.8	13.2
13	16.4	13.2	10.8	10.9
14	14.3	11.7	12.6	13.2
15	16.2	13.6	13.5	11.1
평균	16.03	11.58	10.71	11.05



3. 평 가

실제 터널 시공현장에 선균열 노치발파공법, 미진동 암굴착공법을 적용하여 일반 발파공법과 비교한 결과, 선균열 노치발파공법 적용시 약 30%, 미진동 암굴착공법 적용시 약 50%의 진동 감소 효과를 보였다.

터널 굴착선공부에 노치를 적용하였을 시 여굴은 기존공법에 비해 약 1/3 정도 줄일 수 있었으며 여굴 감소에 따라 암반손상영역이 축소되어 영구 구조물로서 터널 안정성에도 기여할 것으로 판단된다.

제 11 절 현장적용 예비시험을 통한 노치발파 적용성 연구 II

1. 개 요

가. 위치

본 시험시공 지역은 행정구역상 경기도 파주시 법원읍 법원리~양주시 남면 상수리에 이르는 약 10.058km 구간으로서 축척 1:50,000 문산 지형도의 우측중앙을 동서로 가로지르는 56번 국지도의 확장 및 일부 신설구간이다.

나. 지형

본 시험시공 노선 중 시점부는 자웅산(△249.5)을 주봉으로 하여 노고산(△249.5)이 능선계 등의 영향을 직접적으로 주고 있으며, 또한 본 시험시공 노선의 좌측을 따라 남북방향으로 발달하는 거대수계인 임진강이 위치하며 전술된 산계들에서 발달되어 온 수지상 수계들의 지류들이 모여서 서류하면서 임진강으로 유입되며 전반적으로 지형 윤회상 장년기의 지형을 보이는 지역이다.

다. 지질

본 시험시공 지역의 지질은 선캠브리아기의 흑운모 편마암이며 중생대 쥬라기의 관입화강암인 대보화강암이 편마암을 관입하여 분포하고 제4기 충적층이 하천인근에 넓게 분포하고 있다.

선캠브리아기의 흑운모 편마암은 편마구조 및 엽리가 발달되어 있으며 후기에 화강암의 관입 영향을 받아 일부 화강암질 편마암이 분포하기도 한다. 주 구성광물은 백운모 석영 장석으로 구성되어 있으며 본 시험시공 지역의 시점부에 주로 분포한다. 또한 쥬라기의 대보화강암은 상기한 편마암을 관입하면서 주변암의 변성작용을 시키며 분포하고 주 구성광물은 장석, 흑운모, 석영으로 구성되어 있다. 그리고 제4기 충적층은 하천을 중심으로 발달하여 자갈, 모래, 점토 등으로 구성되어 상기한 기반암을 부정합으로 피복하고 있다. 시험시공 지역의 지질도는 그림 3.11.1과 같다. 그리고 현장 종평면도와 평면도는 그림 3.11.2와 그림 3.11.3과 같다.

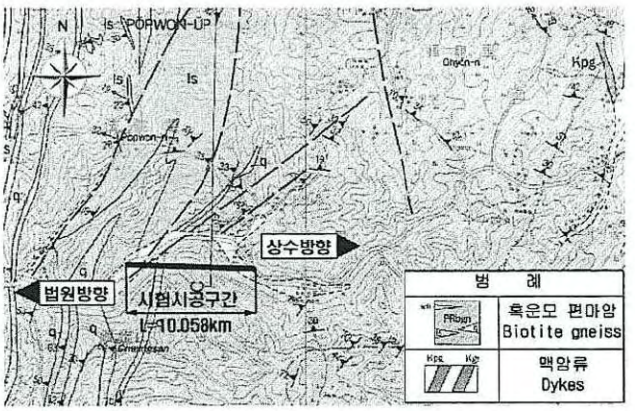


그림 3.11.1 시험시공 지역의 지질도

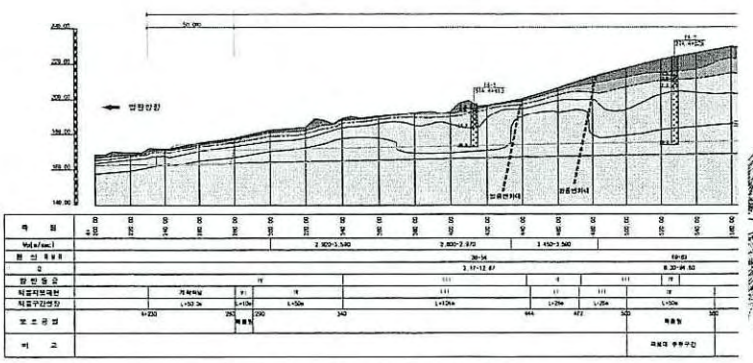


그림 3.11.2 현장 종평면도

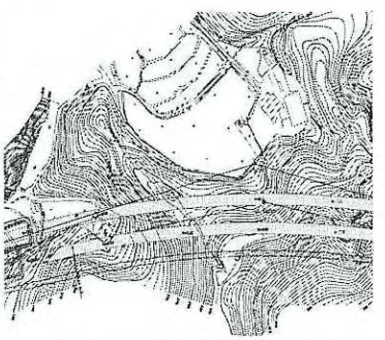


그림 3.11.3 현장 평면도

2. 현장실험 수행 내용 및 결과

가. 현장실험 수행

본 시험시공에서 노치효과인 진동감소 및 여굴 제어에 초점을 맞추어 실험을 진행하였다. 그림 3.11.4와 같이 진동 데이터를 얻기 위해 터널 상부에 진동 계측기를 여러 대 설치하였다. 그리고 그림 3.11.5와 같이 터널 중심을 기준으로 좌·우에 노치천공과 일반천공을 배치하였고 매 막장마다 좌·우 패턴을 계속 바꿔가면서 실험을 실시하였다. 이는 지질의 특성으로 인한 실험 결과의 편협성을 막고 실험 결과의 정확성을 위한 조치였다. 발파 진동 계측기는 미국 PMT사의 eXAD-8 진동소음측정기를 사용하였고 그 제원은 그림 3.11.6과 같다.

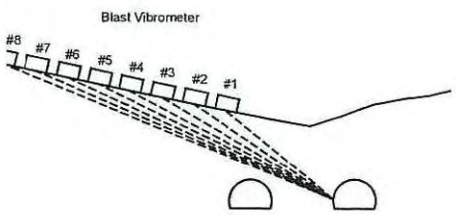


그림 3.11.4. 진동계측기 설치 개요도

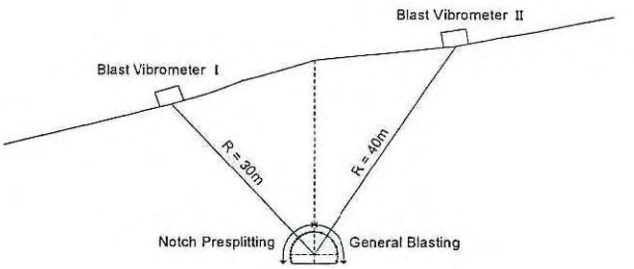


그림 3.11.5. 시험시공 천공 개요도



* Microprocessor: 8XC52 Family
* A/D Converter: 13 Bit Self Calibrating
* Frequency Response: Mic A-Weighted Fast Response 8 KHz RMS Sound Level
* Data Stroage : Over 100 Events
* Sample Stroage Rate: 1024 SPS
* Geopone Range: 80mm/s
* Display: 4 Line by 20 Column
* Frequency Respose: Velocity 3 - 250 Hz
* Resolution: Geophone 0.01 mm/s, Mic 1 dB
* Anti-Aliasing Filter: 250-10000 Hz
* Battery: 6V, Rechargeable, 200 Hrs

그림 3.11.6. 발파 진동 계측기 제원

그리고 노치효과의 효율성 극대화를 위해서는 노치의 방향성 및 천공 깊이의 균일화를 시키는 게 반드시 필요한데 이를 위해 점보드릴에 부착하는 노치천공방향 제어 인식기(그림 3.11.7) 및 천공 깊이를 균일화 시키는 시스템(그림 3.11.8)을 개발하여 실험에 적용하였다. 노치의 방향성을 일정하게 유지시키기 위해 필요한 노치 천공방향 제어 인식기는 점보드릴의 붐대 뒷부분에 설치하여 화살표 방향을 맞춰 천공하는 원리를 적용하였고 천공의 깊이를 일청하게 유지시키기 위해 필요한 천공 깊이 균일화 시스템은 원하는 천공 깊이를 입력하면 그 깊이에 점보드릴의 붐대가 도달했을 때 유압의 자동 조절로 천공을 종료하도록 하는 원리를 이용하였다. 현재속도 및 현재거리, 설정거리를 입력하게 되어있으며 장비시스템 본체에 연결되어 있는 붐대 부착용 컨트롤러에 의해 모니터에 그 결과가 표시되어진다. 이 천공 깊이 균일화 시스템을 사용하면 그림 3.11.9와 같이 발파 효율을 높일 수 있다. 노치 천공부분은 위의 장비들을 이용하여 그 정확성을 높였다. 일반천공 및 노치천공을 통해 발생한 여굴은 SET2010 장비를 사용하여 측정하였다. 노치천공 측과 일반

천공 측 각각 10곳의 여굴을 측정하였다.

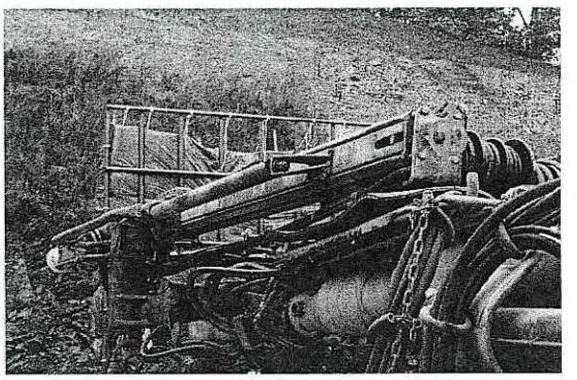
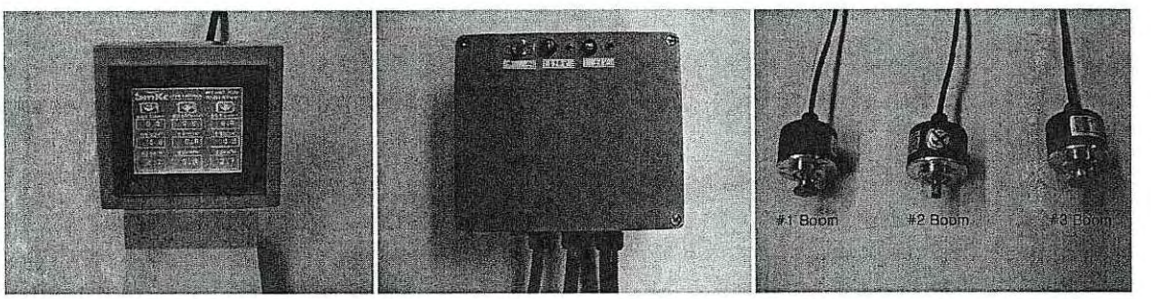
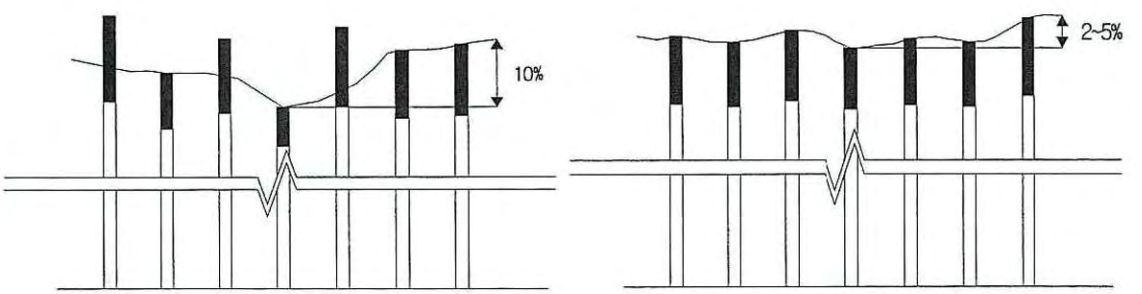


그림 3.11.7. 노치천공방향 제어 인식기



(a)천공 깊이 확인 모니터 (b)장비시스템 본체 (c)붐대 부착용 컨트롤러

그림 3.11.8. 천공 깊이 균일화 시스템



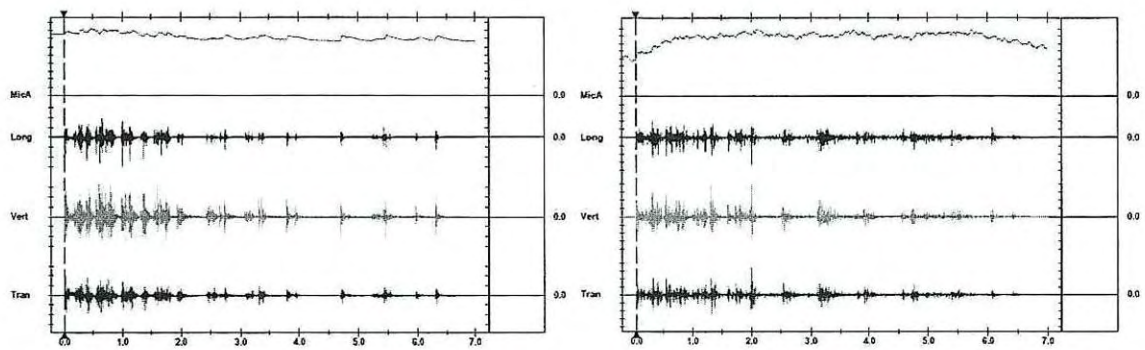
(a) 천공 깊이 균일화 시스템 미사용 (b) 천공 깊이 균일화 시스템 사용

그림 3.11.9. 천공 깊이 균일화 시스템 사용 여부에 따른 발파 효율성 비교

나. 현장실험 결과

실험 결과 그림 3.11.10과 같은 발파에 의한 진동 데이터를 일반천공·노치천공 각각 35개씩 얻었다. 각 그래프의 경향을 살펴보면 일반천공에서의 발파진등 그래프는 초기 부분에서의 진동치가 높은 반면 노치천공에서의 발파진동 그래프는 초

기가 지난 그 다음 부분에서의 진동치가 높음을 알 수 있다. 이는 노치천공으로 인한 발파는 초기 발파진동 제어가 가능하다는 의미로 생각할 수 있다. 각 그래프들을 분석하여 종합한 결과는 그림 3.11.11의 그래프와 같다. 이 그래프를 통해 알 수 있듯이 노치천공에 의한 발파가 일반천공에 의한 발파에 비해 진동이 저감되는 것을 알 수 있었다.



(a) 일반천공에서의 발파 데이터 샘플 (b) 노치천공에서의 발파 데이터 샘플

그림 3.11.10. 진동 측정 데이터 샘플

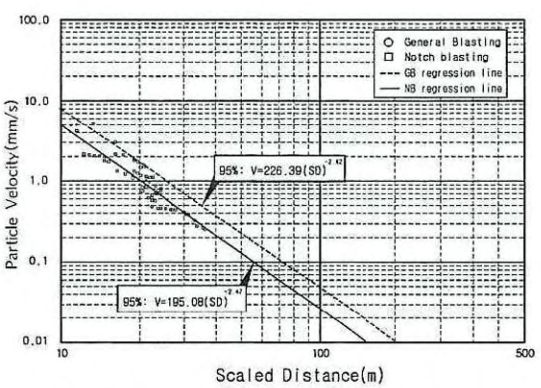


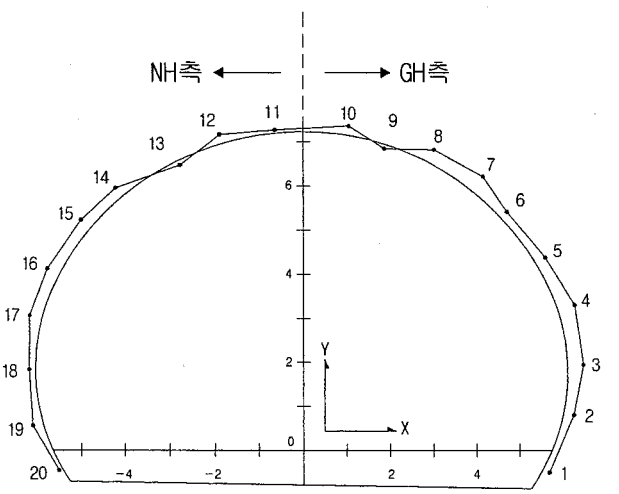
그림 3.11.11. 진동분석 그래프

그리고 그림 3.11.12와 같은 여굴 측정을 통한 결과 데이터를 각각 30개씩 얻었고 이 데이터를 바탕으로 여굴량에 대한 분석을 하였다. 그 결과 일반천공에서의 발파에 의한 여굴량은 평균 23.8cm, 노치천공에서의 발파에 의한 여굴량은 평균 16.5cm로 측정되었고 노치천공이 일반천공에 비해 여굴량이 31% 저감되는 결과를 얻었다.

이 현장시험 결과를 바탕으로 노치 선균열에 의한 발파공법은 일반발파공법에 비해 진동은 30~50%, 여굴은 1/3 정도 줄일 수 있는 것으로 확인되었다. 결론적으로

여굴 감소에 따라 암반손상영역이 축소되어 영구 구조물로서 터널 안정성에도 기여 할 것으로 판단된다.

개요도



구분	측점	좌우거리(m)	지반고(m)	여굴량(cm)	Avg.
GH	1	5.671	169.314	16.2	24.3
	2	6.220	170.620	23.3	
	3	6.429	171.757	34.9	
	4	6.237	173.116	39.5	
	5	5.584	174.190	25.7	
	6	4.707	175.228	19.8	
	7	4.149	176.024	41.4	
	8	3.011	176.629	31.1	
	9	1.869	176.656	-9.9	
	10	1.055	177.169	21.2	
NH	11	-0.649	177.085	7.6	17.7
	12	-1.885	176.974	21.0	
	13	-2.770	176.280	-11.0	
	14	-4.210	175.758	24.5	
	15	-5.002	175.039	29.0	
	16	-5.783	173.938	30.2	
	17	-6.196	172.876	29.2	
	18	-6.207	171.651	14.5	
	19	-6.121	170.380	23.8	
	20	-5.521	169.364	8.4	

그림 3.11.12. 여굴 측정 데이터 샘플

제 12 절 결 론

노치공을 이용한 암반 균열굴착에 관한 현재까지의 연구는 노치효과 입증에 집중되었고, 또한, 이론적으로 입증된 노치효과를 전산시뮬레이션과 모형실험을 통해 증명한 정도이다. 그래서 본 연구에서는 지금까지의 연구에서 입증된 노치효과를 실제 설계에 적용하기 위한 연구를 수행하고자 하였다.

이를 위해 충분한 현장시험을 수행하여 데이터를 축적, 정량적 분석을 통해 한국의 지질특성에 맞는 노치비트를 개발하고, 내구성을 향상시키는 것을 목표로 하였고, 터널 현장 굴착에 적합한 최적의 노치 콘트롤러 등의 장비시스템 개발과 노치홀의 발파설계를 현장설계에 적용할 수 있도록 하는 발파설계 개발을 목표로 하였다. 본 연구개발을 위하여 총 3차년도의 연구계획을 수립하였으며, 최적의 선균열 암굴착 노치장비 및 시공기술 개발을 위하여 문헌조사 및 연구, 요소시험, 현장시험, 데이터분석, 전산시뮬레이션 등을 주요 연구내용으로 계획하였다.

1) 5개의 각기 다른 형상을 가진 노치공 블록시험편을 시험발파하여 형상에 따른 균열방향 양상을 관찰하였다. 발파시 충격탄성파의 전달속도와 발파하중에 의한 충격가속도를 측정을 위해 동적데이터 획득시스템을 이용하였다. 일정한 노치길이에서 노치폭이 작을 경우 노치효과가 발생되지 않으며 노치의 길이비가 1 이상일 때 노치에 의한 균열제어 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

2) 천공작업의 시공성과 노치시스템의 안정성 확보를 위한 노치모델 연구이다. 1차, 2차 노치비트 모델을 거치면서 1차 노치비트 모델의 2공정을 1공정으로 간소화함으로써 노치공 형성시간을 기존 일반비트와 비슷한 수준으로 단축시켰다.

3) 노치효과를 충분히 발휘할 수 있는 노치공 형성 및 노치비트 파손, 마모율을 최소화하는 노치형상 및 내구성 연구이다. 노치길이, 모양, 몸체의 두께를 최적화하여 노치 홈의 직진성과 천공, 인발시 노치 팁의 파괴를 방지할 수 있도록 하였다.

4) 현장 막장면의 굴곡부에 적절히 대응하면서 노치의 방향성을 유지시켜 줄 수

있도록 가이드를 제작하였고, 원활한 슬러지 제거는 물론 가이드 후미부에 부싱을 설치하여 이 부분이 먼저 마모가 일어나도록 유도하여 이 부싱 부를 선 교환함으로써 노치가이드 본체의 교체 횟수를 줄일 수 있도록 개선하였다.

5) 노치비트 내구성 확보를 위한 금속재료 및 제작 연구이다. 금속에 대한 연구를 수행하여 초경합금, 열처리기술 개선으로 노치비트의 파손 및 마모율을 줄일 수 있었고 내구성을 향상시켰다.

6) 모델발파 시험에 의한 노치효과 검증 연구이다. 동일한 장약량 발파조건에서 일반 원형공에 비해 노치공의 균열확장 속도가 더 빠르기 때문에 상대적으로 적은 장약량으로 파단면 형성이 가능하였다. 이러한 노치공 원리를 이용할 경우 터널 발파의 최외곽공과 같은 조절발파 시 적은 장약량을 사용하여 발파로 인한 암반 손상영역을 최소화 하면서 원하는 방향의 파단면 형성이 가능하다. 그리고 노치공과 일반 발파공에 의해 생성된 파단면 DEM의 거칠기를 면 거칠기 형상 지수(SRp)를 이용하여 비교하였다. 일반공 보다 노치공에 의해 생성된 파단면의 거칠기가 상대적으로 완만하게 나타났으며, 특히 노치공에 의해 생성된 파단면의 영역별 거칠기 지수 편차가 일반공에 의한 파단면 보다 훨씬 작게 나타났다.

7) 암반발파에서 노치공 발파의 수치 모델링 연구이다. 노치공에 일반폭약과 저비중 폭약을 이용하여 수치모델링해석으로 파단면 형태와 형성을 고찰하여 암반발파에서 손상제어효과를 해명하였다. 그리고 Autodyn을 이용하여 노치공 모델과 일반공 모델의 발파시 파괴양상을 수치 해석한 결과 발파 시 폭약이 팽창하여 폭굉압이 공벽에 닿았을 때 일반공 모델은 원형공의 반경방향으로 동일한 크기의 힘을 받지만 노치공 모델의 경우 자유면 최단거리인 노치방향으로 응력이 집중되어 노치날개 방향으로 암석의 파괴가 일어남을 알 수 있었다. 동일한 시간동안 노치공 모델은 일반공 모델에 비해 파괴진행속도가 더 빠름을 확인하였다. 노치공모델이 폭약재료 및 공기에 의해 파괴진행이 완료된 시간에서 일반공 모델의 파괴는 공중심과 자유면의 최단거리방향으로 암석요소들의 파괴가 일어나고 상대적으로 요소의 파괴진행이 미비하였다. 이와 같은 수치해석을 통해 노치공 발파설계에 필요한 기초자료를 획득할 수 있었다.

8) 동적탄성해석을 통하여 노치형상과 장약지수에 따른 노치첨단의 응력확대계수를 통하여 응력집중도 분석연구이다. 인장강도(St)와 공내 작용하중(P)의 비를 고려한 무차원압력과 노치방향으로 제어된 발생균열의 길이(Lc)를 노치공 반경(an)로 나눈 무차원 균열길이를 그래프로 나타내었다. 그 결과 무차원 균열길이는 작용압력이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이며, 인장강도가 증가함에 따라 평균 균열의 길이는 감소하고, 노치길이가 길어짐에 따라서 평균 균열의 길이는 증가하였다. 이러한 결과는 실험실규모의 균열제어 발파실험에서 보여주는 경향과 일치하며, 향후 실험실 및 현장규모의 균열제어발파의 설계에 중요한 정보를 제공할 것으로 판단된다.

9) 실규모 터널에서의 시험을 통한 노치시공기술의 현장 적용성 연구이다. 실제 몇몇의 토목공사 현장에서 실시한 시험에서 본 노치시공기술은 일반 발파공법에 비해 발파진동은 약 30~50%, 여굴은 약 1/3이 감소하는 결과를 얻었다. 이를 통해 현장 적용성에도 적합하다고 판단하였다.

제 4 장 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 연구목표의 달성도

1. 연구개발 수행 진도율

<1차년도>

구 분 / 연구내용	추 진 일 정												진도 (%)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
발파공법 연구문헌 조사, 수집	·····	·····	·····										100
	———	———	———										
국내외 암굴착용 비트형상 조사	·····	·····	·····										100
	———	———	———										
현장발파시공에 대한 문헌 조사	·····	·····	·····	·····	·····	·····							100
	———	———	———	———	———	———							
국내 암발파 패턴 문헌조사				·····	·····	·····							100
				———	———	———							
비트형상에 따른 굴착효율분석				·····	·····	·····							100
				———	———	———							
총 진도율	100	100	100	100	100	100							

····· 당초계획
——— 실 적

<2차년도>

구분 / 연구내용	추진일정 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	진도(%)
기존 터널발파시공 문제점 분석	----	----	----										100
	————	————	————										
터널 발파패턴 설계시 문제점 분석 및 개선사항 연구	————	————	————										100
노치비트의 기초 요소 실험	----	----	----	----	----	----							100
	————	————	————	————	————	————							
굴착효율 핵심요소인자 선정				----	----	----							100
				————	————	————							
노치비트에 의한 손상영역 감소 수치모델링	----	----	----	----	----	----	----						100
	————	————	————	————	————	————	————						
노치비트에 의한 발파성능평가 축소모형실험 및 현장실험			----	----	----	----	----	----	----	----			100
			————	————	————	————	————	————	————	————			
노치비트 형상별 요소실험으로 최적의 비트형상 선정						----	----	----	----	----			100
						————	————	————	————	————			
일반 및 노치선균열발파의 비교분석을 위한 현장실험계획 수립					----	----	----						100
					————	————	————						
노치선균열공법 적용시 발생되는 기술적 문제점 연구 및 보완								----	----	----			100
								————	————	————			
내구성 실험에 의한 노치비트 품질향상 연구								----	----	----			100
								————	————	————			
총 진도율	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100			

---------- 당초계획
———— 실 적

<3차년도>

구분 / 연구내용	추진일정 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	진도(%)
노치비트에 의한 발파성능평가 축소모형실험 및 현장실험	----	----	----	----	----	----							100
	————	————	————	————	————	————							
경암 및 연암특성별 발파 실험 및 일반발파와의 비교 검토	----	----	----	----									100
	————	————	————	————									
현장계측결과 분석, 적용성 확인	----	----	----	----									100
	————	————	————	————									
노치비트 실용화 제품 개발	----	----	----	----									100
	————	————	————	————									
동적파괴해석법을 위한 노치발파모델의 제안	----	----	----	----									100
	————	————	————	————									
노치공 및 장약조건에 따른 파단면제어의 동적파괴과정 해석			----	----	----	----							100
			————	————	————	————							
파단면 제어를 위한 노치공 및 장약조건의 최적화 연구			----	----	----	----	----	----					100
			————	————	————	————	————	————					
노치공 및 장약 조건에 따른 표준시험발파 결과 검증			----	----	----	----	----	----					100
			————	————	————	————	————	————					
VE/LCC 기법을 이용한 경제성 노치공 발파의 경제성 분석							----	----	----	----			100
							————	————	————	————			
현장시공 문제점 분석 및 보완					----	----	----	----	----	----			100
					————	————	————	————	————	————			
노치선균열공법을 적용한 최적의 발파패턴설계 개발							----	----	----	----			100
							————	————	————	————			
현장 노치선균열 발파공법 시공기준 확립											----	----	100
											————	————	
총 진도율	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

..... 당초계획
———— 실 적

2. 연구개발 목표의 달성도

<1차년도>

연 구 목 표	달 성 도 (%)	내 용
▪ 노치선균열발파공법 문헌 연구	100	▪ 국내외 발파공법 연구문헌 조사 ▪ 국내 암발파 패턴 문헌조사 ▪ 터널 발파패턴설계 문제점 분석 및 개선사항 연구
▪ 노치비트 시스템의 최적화 구축	100	▪ 암굴착용 비트형상 조사 ▪ 암굴착용 비트 형상에 따른 굴착효율분석 ▪ 노치비트의 기초 요소 실험에 의한 효율적인 노치비트 시스템 구축

<2차년도>

연 구 목 표	달 성 도 (%)	내 용
▪ 터널발파에 관한 문헌 연구	100	▪ 현장발파시공에 대한 문헌조사 ▪ 기존 터널발파시공 문제점 분석 ▪ 굴착효율에 대한 핵심요소인자 선정
▪ 굴착효율 및 내구성이 우수한 노치비트 개발	100	▪ 노치선균열공법 발파패턴 적용 연구 및 수치해석 적용성 검토 ▪ 노치비트에 의한 손상영역 감소 수치모델링 ▪ 노치비트에 의한 발파성능평가 축소모형실험 및 현장실험
▪ 현장발파실험에 의한 효율적인 노치선균열발파 적용연구	100	▪ 노치비트 요소실험에 의한 최적의 비트형상 선정 ▪ 내구성 실험에 의한 노치비트 품질향상 ▪ 노치비트 실용화 제품 개발

<3차년도>

연 구 목 표	달 성 도 (%)	내 용
▪ 터널발파 현장시험 수행 및 적용성 검증	100	▪ 암반등급별 터널현장시험 및 일반발파와의 비교 검토 ▪ 천공간격, 천공수를 고려한 경제성 분석 ▪ 노치공 각도조정의 간편화 연구
▪ 암석의 동적파괴역학을 고려한 노치균열의 제어설계법 제안	100	▪ 동적파괴해석법을 위한 노치발파모델의 제안 ▪ 노치공 및 장약조건에 따른 파단면제어의 동적파괴과정 해석 ▪ 파단면 제어를 위한 노치공 및 장약조건의 최적화 연구
▪ 최적 노치 균열 성능 검증을 위한 시험발파 및 경제성 분석	100	▪ 노치공 및 장약 조건에 따른 표준시험발파 결과 검증 ▪ VE/LCC 기법을 이용한 경제성 노치공 발파의 경제성 분석
▪ 터널 내 노치선균열 발파공법 시공기준확립	100	▪ 현장시험결과 데이터 종합검토 ▪ 현장시공 시 문제점 분석 및 보완 ▪ 현장 노치선균열 발파공법 시공기준 확립

3. 연구 목표치 대비 실적치

<1차년도>

연구목표	성과지표	목표치	실적치	성과물 명칭
노치균열공법 문헌 연구	노치이론 문헌	3건	9건	이론자료 및 관련논문 수집
국내 굴착기종별 노치비트 시스템 최적화 구축	굴착기종별 최적화 구축	3건	3건	노치비트 시스템 3종 제품 개발
응력집중 균열파쇄를 위한 노치비트 최적화 개발	관련학회 학술발표회	1건	1건	노치비트 개발 논문

<2차년도>

연구목표	성과지표	목표치	실적치	성과물 명칭
국내 굴착기종별 노치비트 시스템 최적화 구축 보완	굴착기종별 최적화 구축 보완	3건	3건	노치비트 시스템 3종 보완제품 개발
노치비트 시스템 예비 현장적용 실험	암반등급별 적용성 업그레이드	1건	1건	현장시험보고서
예비 현장적용실험 분석	관련학회 학술발표회	1건	1건	관련학회 현장적용성 실험 최적화 발표보고서
굴착효율 및 내구성이 우수한 노치비트 개발	논문발표	2건	2건	-해외 학술발표회 논문 -국내 학술발표회 논문

<3차년도>

연구목표	성과지표	목표치	실적치	성과물 명칭
노치비트 시스템 선균열 암굴착 현장 실험	여굴축소 및 진동저감	1건	2건	현장시험보고서 및 VTR
암석의 동적파괴역학을 고려한 노치 균열의 제어설계법 제안	관련학회지	1건	3건	학회지 논문
터널내 노치선균열 파쇄공법 시공기준 확립	시방기준	1건	1건	암파쇄 패턴 및 시방기준서
노치비트 시스템 의장등록, 실용신안 및 특허 등록	의장등록, 실용신안 및 특허	1건	1건	특허

제 2 절 연구 성과의 관련분야 기여도

본 연구성과는 굴착효율 및 내구성이 우수한 노치비트 개발과 현장발파실험에 의한 효율적인 노치선균열발파 적용 연구로 금속에 대한 연구를 하고 수차례 거듭 반복 제작하면서 우수한 내구성을 확보하였다. 이를 바탕으로 현장적용성 실험을 반복해서 수행하였고 분석한 실험 결과를 통해 노치효과를 확인할 수 있었다. 실험결과들의 분석을 통해 확인된 노치효과를 실용화 단계로 발전시키는 연구를 수행하였고, 이는 발파 굴착의 문제점으로 발생되는 지나친 여굴, 진동 및 암소음으로 인한 민원 등을 해소하는 데 활용될 수 있을 것이다. 또한 기존의 공법에 비해 경제성, 시공성, 안정성 등 모든 항목에서 탁월한 경쟁력을 확보할 수 있어 도심지 터파기 및 터널 굴착에 독보적인 효과가 기대된다.

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

제 1 절 연구결과의 활용방안

노치비트 시스템 장비를 개발하여 암반균열 노치발파 굴착의 현장 적용성을 많이 개선하였다. 또한, 노치비트 시스템 개발의 성과로 인하여 현장 실규모 터널시험에 의한 실용화 연구와 최적 노치 암반균열 미진동 제어발파 설계기법 개발을 가능하게 하는데 기초를 마련하였다.

제 2 절 기대성과 및 파급효과

1. 기술적 측면

터널 암발파 굴착에 있어서 지발당 장약량이 많은 심발 및 확대발파 단계보다 지발당 장약량이 상대적으로 적은 외곽공을 노치홀을 이용하여 선균열 발파함으로써 진동, 암소음을 30~40% 제어 차단하여 민원발생을 해소할 것이다.

여굴제어 효과가 탁월하여 숏크리트, 콘크리트 등의 후속공정의 비용이 절감되고, 터널 안정성을 위한 빠른 폐합 및 낙석의 위험이 감소되어 시공성, 경제성, 안정성의 상승효과가 크다.

2. 사회 · 경제적 측면

도로 및 철도의 개량사업, 도심지 지하철 공사 시 터널계획은 필연적이며 주로 발파굴착이 이루어지고 있는 바 본 노치 선균열 발파공법의 적용으로 진동저감, 여굴 발생의 최소화로 민원 및 굴착비용 최소화, 주변 인접 구조물의 안정성 확보, 숏크리트, 콘크리트 등의 후속공정 비용 20% 이상 절감 효과를 거둘 수 있고, 공기단축으로 인하여 도심지 교통장애 요소가 감소하여 운송비용 절감 및 타 산업의 경제적 손실 감소효과를 유발할 것이다.

기존 굴착법인 스무스블라스팅, 프리스플릿팅에 비해 경제성, 시공성, 안정성 등 모든 항목에서 탁월한 경쟁력을 확보 할 수 있으며, 특히 터널 내 무자유면의 구속

압력으로 시공성이 현저히 떨어지는 무진동 굴착구간 2/3정도를 노치선균열 암굴착공법으로 가능하며 무진동 암파쇄공법을 적용했을 때 비해 약 6배의 원가절감 효과를 기대할 수 있다. 무진동 공법 대비 50%, 일반발파대비 3~5%의 원가절감이 예상된다.

제 3 절 타 산업에 미치는 효과

본 연구의 성과로 인하여 타 산업에 미치는 효과는 첫째, 효율적인 암굴착 기술의 개발로 지하공간 건설비용이 감소함으로써 더 많은 사회 인프라구축의 기반을 마련하게 될 것이다. 둘째, 시공성 향상으로 인한 공기단축으로 인하여 도심지 교통장애 요소가 감소하여 타산업의 경제적 손실 감소효과를 유발할 것이다. 셋째, 신기술의 개발로 시공현장 주변의 민원 발생요인을 최소화하여 국민의 편익비 증대 효과 및 굴착 시공기술 향상으로 공학 분야의 활성화를 유도할 것이다. 넷째, 지하공간의 고품질, 고성능 설계기술 개발은 핵폐기물 처리장, 상하수도 처리장, 농수산물저장고 등 지하공간 창출이 가능하도록 하며 지하공간 수요를 저렴한 비용으로 건설함으로서 원할한 산업활동이 가능하도록 하여 국가경쟁력 강화에 기여할 것이다.

제 4 절 관련 후속연구개발의 전망

본 연구로 개발된 발파공해 저감 및 여굴 최소화를 위한 선균열 암굴착 노치장비 및 시공기술을 바탕으로 향후 근접시공의 비용을 절감하고, 안정성 최대화 및 민원 최소화를 위한 연구를 추가적으로 수행할 계획이다. 또한 노치공 천공의 효율을 높이고 마모율을 줄이는 연구가 지속되어 보다 완성도 높은 기술을 개발시켜 나가야 할 것이다.

제 6 장 참고문헌

1) 김광염, 김동규, 정동호, 조상호(2008), 노치발파공에 의한 파단면 제어효과에 관한 연구, 대한화약발파공학회지, 제26권 제1호, pp.57~66.

2) 김광염, 김창용, 김광식, 2008, 균질암반에서의 유압식 천공데이터 평가, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 18권, 6호, pp. 480-490.

3) 배규진, 문홍득, 구호본, 홍성완, 유영현, 이봉열, 김창용, 1995, 지하생활공간 개발 요소기술 연구 - 지반굴착기술분야(II), 한국건설기술연구원

4) 백승규, 김재동, 류창하, 1999, 노치성형발파공을 이용한 균열제어 발파방법의 균열발생 특성에 대한 수치해석적 고찰, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol. 9, pp. 64-71.

5) 유상화, 장수호, 조정우, 전석원, 2008, 동적 파괴모델링에 의한 TBM 디스크 커터의 최적 절삭간격 예측, 한국터널공학회 논문집, 제10권, 제1호, pp. 81~90.

6) 이춘오, 홍세선, 이병태, 김경수, 윤현수, 2006, 국내석재산지의 지역별 분포유형과 특성, 암석학회지, 한국암석학회, 15권, 제3호, pp. 154-166.

7) 장수호, 이정인, 1999, 인장, 전단 및 혼합모드에서 디스크 시험편을 이용한 암석의 파괴인성 측정에 관한 연구, 한국암반공학회, Vol. 9, pp. 315~327.

8) 장수호, 최순욱, 박관인, 전석원, 2005, 선형절삭시험에 의한 TBM 디스크 커터의 절삭성능 평가, 대한토목학회논문집, 제25권, 제6C호, pp. 429~436.

9) 정동호, 김선홍, 안대진, 박치웅, 김은관, 배효진, 2007, 터널굴착 진동제어 및 여굴 최소화를 위한 노치 선균열 암반굴착 기술개발, 한화 발파 심포지움.

10) 정동호, 문상조, 안대진, 정원준, 김은관, 김동규(2007),발파공해 해소 및 여굴 최소화를 위한 선균열 암굴착 노치장비개발에 관한 연구, 터널과지하공간, Vol.17, No. pp. 216-224.

11) 정동호, 문상조, 안대진, 정원준, 이승우(2008), 발파균열 제어를 위한 노치 장약공 수치 모델링 및 블록실험에 관한 연구, 한화 발파 심포지움, pp.10~22.

12) 조상호, 박승환, 김승곤, 김광염, 김동규(2009), 노치 형상과 장약밀도 변화에

따른 균열 전파 양상에 관한 수치해석적 연구, 한국암반공학회학술발표회, 83-89.

13) 지포리도폭 지질조사보고서, 2007, 한국지질자원연구원, pp. 21-23.

14) 최용근, 이정인, 2000, 장약공 노치와 장약홀더를 이용한 발파균열의 제어에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 37, No. 5, pp. 315-326.

15) 최용근, 이정인, 2000, 장약공 노치와 장약홀더를 이용한 발파균열의 제어에 관한 연구,한국자원공학회지, Vol. 37, pp.315-326.

16) 한국 도로공사, 도로연구소, 2000, "여굴 최소화를 위한 최적발파패턴 설계방안에 관한 연구"

17) Altas Poweder Company, 1987, *ExplosivesandRockBlasting*, p.662.

18) Autodyn Manual

19) Dally, J.W. And Fourney, W.L., 1997, "Fracture Control in Construction Blasting",Proc. 18th U.S. Symp. on Rock Mechanics, PP 2A6-1~2A6-7

20) Daryl L. Logan 저, 신종계 외 공역, 1998, Logan의 유한요소법 첫걸음, 시그마프레스, p. 141.

21) Fourney, W.L.,mDally, J.W. and Holloway, D.C. (1978), Controlled Blasting with Ligamented Charge Holders, Int. J. Rock Mech. Min.Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 15, pp. 121~129.

22) Giorgio Berta, Italesplosive-Milano 1990, Explosives : An Engineering Tool, PP 79~108

23) ISEE, 1998, Blasters' Handbook, 17th edition, PP 479~493

24) Nakamura Y, Matsunaga H, Yamamoto M, and Sumiyoshi K, 1992, 장약홀더를 사용한 균열 파공법, 日本工業火藥, Vol. 53, pp.31-36.

25) Niklasson, B. and Keisu, M., 1993, "New Technique for Tunnelling and Drilling, "Proc. of the 4th International Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, Vienna, Austria, pp. 167~174.

26) Per-Anders Persson, Roger Holemberg And Jaimin Lee, 1994, Rock Blasting And Explosives engineering, PP 265~285

27) Rooke, D.P. and Cartwright, D.J., 1976, Compendium of Stress Intensity Factors, HMSO, London,pp.160-161.

28) S.H.Cho, Y. Nakamura, B. Mohanty, H.S. Yang, K. Kaneko, 2008, "Numerical study of fracture plane control in laboratory-scale blasting", Engineering Fracture Mechanics 75 3966-3984.

29) Sih, G.C.M., 1973, Handbook of Stress Intensity Factors, Lehigh University, pp.1.2.8-3~1.2.8-4.

30) Stig O.Olofsson, 1990, Applied Explosives Technology For Construction And Minning, PP181~196

31) Tada, H., Paris, P.C. and Irwin, G.R., 1973, The Stress Analysis of Crack Handbook, Del Research, Hellertown, Pa., pp. 1.1~1.6.

32) Tsoutrelis, C.E., Gikas, N., Nomikos, P. and Exadaktylos, G., 1997, "Use of notched bore holes for fracture controlled blasting in the ornamental stone qarries, FRAGBLAST," International Journal of Blasting and Fragmentation, Vol. 1, pp. 445-463.

33) USA. National Highway Institute, 1991, Explosives Engineering, Rock Blasting And OverBreak Control, PP 415

34) Zhicheng, Z., 1991, "Blasting Technology of Directional Fragmentation in Rock," Proc. of the International Conf. on Engineering Blasting Technique, China, pp. 381-387.