

터널용 벌크 폭약(New Emulite 1000)의 국내 경암 터널 시공사례 및 향후 발전 방향에 관한 연구

조 영곤¹⁾, 이 상돈²⁾, 김 희도¹⁾

¹⁾(주)고려노벨화약

²⁾한국도로공사 도로연구소

1. 서 론

벌크 에멀전 폭약(Bulk-Emulsion explosives)이란 포장하지 않은 상태에서 기계화 장전 시스템을 이용하여 직접 공내로 주입되는 에멀전계 폭약을 말한다. Bulk-Emulsion system은 미주나 서구 유럽 등지의 발파분야에 있어 선구적인 역할을 수행하여 왔던 나라에서는 이미 보편화된 시스템으로 ANFO 다음으로 노천이나 터널 굴진에 널리 적용되고 있다. Bulk-Emulsion system은 제조, 저장, 운반 및 사용에 있어서 극히 안전하고 장전밀도를 증가시켜 효과적인 파쇄와 굴진을 향상을 기대할 수 있으며 발파 후가스가 매우 양호한 것을 비롯하여 기계화 장전에 따른 시공 능률 향상과 작업 안전성 강화 등 많은 장점을 가지고 있다. 국내에도 노천에 한하여 Bulk-Emulsion system이 도입된 바 있으나 터널에는 아직 적용한 사례가 없다. 본 연구에서는 현재 시공중인 중부내륙 고속도로(수안보-상주 간) ○공구 ○○터널 현장에 국내 최초로 터널용 Bulk-Emulsion system을 이용하여 2001년 8월 17일 ~ 8월 22일까지 6일간 총 15회에 걸쳐 시험발파를 실시하였으며 이 결과를 토대로 하여 Bulk-Emulsion system 적용에 따른 효과와 문제점을 알아보려고 하였다.

2. 본 론

본 연구의 대상 현장은 충북 괴산군 연풍면에 위치하는 현장으로 대상 지형 및 지질을 알아보면 다음과 같다.

2.1 지형 및 지질

가. 지형

본 발파현장은 총 연장이 5.28km 고속도로 편도 2차선 터널현장으로 도로노선은 북동쪽에서 남서쪽으로 이어져서 소백산맥 줄기를 동서로 가로지르는 위치에 있다.

본 지역은 장년기의 험준한 산악지대로서 계획노선 상하로 북쪽의 조령산(1,025m)과 남쪽의 백화산(1,063m), 회양산(998m), 덕사산(866m)등 크고 험준한 산봉들이 능선을 이루고 있으며, 조령산에서 이 화령고개를 지나 백화산의 정점들이 좌, 우 경계로 서쪽은 충청북도 괴산군, 동쪽은 경상북도 문경군으로 구분된다.

나. 지질

본 현장의 지질은 시대미상의 백화리 각섬암 및 상내리층, 이들과 부정합 관계에 놓여있는 시대미상의 옥천계 지층인 이화령층, 조봉층, 백화산층과 이들을 관입한 중생대 백악기 지층인 화강암류들이 다양하게 분포하고 있다. 본 연구 대상암반의 지질은 녹리석 편암과 견운모 편암, 견운모 녹리석 편암이 주를 이루는 이화령 층으로 시험 기간중 대상암반을 Face mapping한 결과 막장면은 최소 2~3개 이상의 막장면과 거의 직각을 이루는 수직경사 절리군과 Fault zone이 발달하고 있다. 절리면 상태는 대체로 매끄럽고 기복상의 평면절리가 약 40~60cm 간격으로 잘 발달되어 있으며 극부적으로 풍화 파쇄층 사이에 점토 충전물과 소규모의 Seam이 존재하고 있다. 평균 RQD는 59~70% 이었고 지하수 조건은 건조한 상태로 평균 RMR은 61~71 이었으며 주향은 N10° W~ N15° W로서 터널 굴진축에 대해 수직에 가까우므로 굴진에 상당히 불리한 상황이다.

2.2 발파제원

(1) 사용화약류

가. 폭약

본 연구에 사용된 폭약류 및 뇌관류의 성능 및 재원을 대략 정리하면 표 1, 표 2, 표 3과 같다.

표 1. 사용된 폭약의 특성

Product	Velocity (m/sec)	Density (g/cc)	Energy (KCal/kg)	Gas Amount (ℓ/kg)	Cold Resistance	Water Resistance	USE
New Emulite 1000	5,000	1.20	687	976	-20 ℃	Excellent	For Hard Rock
Super Emulsion	5,800	1.28	1,398	675	-20 ℃	Excellent	
Kinex-1	4,200	1.20	870	900	-20 ℃	Excellent	

표 2. 사용된 폭약의 재원

Product	Diameter	Length	Weight	Number per Box	Weight per Box	Packing type
New Emulite 1000	-	-	-	-	250 / 500 kg	Bulk type
Super Emulsion	32 mm	200 mm	160 g	125 EA	20.0 Kg	Wax paper
Kinex-1	17 mm	1,000mm	250 g	80 EA	20.0 Kg	Plastic Pipe

나. 뇌관

표 3. 사용된 뇌관 재원

Applied Detonators	Period No.	Tube Length	Type
Nonel MS	# 3 ~ 19	7.8 m	공저뇌관
Nonel LP	# 6 ~ 60	7.8 m	공저뇌관
Nonel Bunch Connector	SL0, SL17	4.8 m	표면뇌관

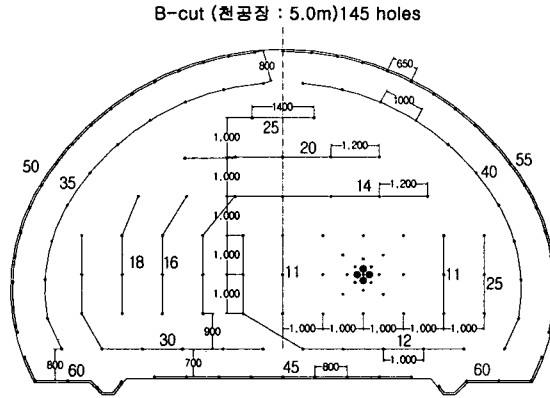


그림 3 시험 천공 패턴도 (Type-II, 145공)

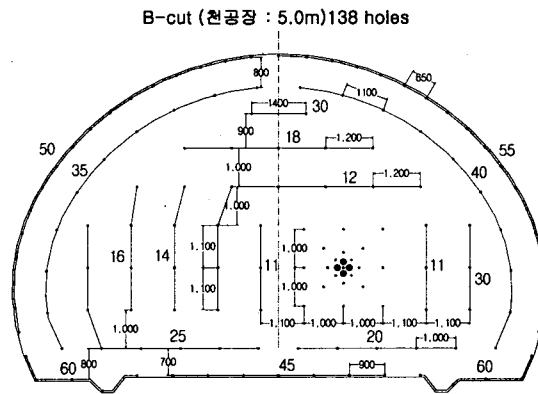


그림 4 시험 천공 패턴도 (Type-III, 138공)

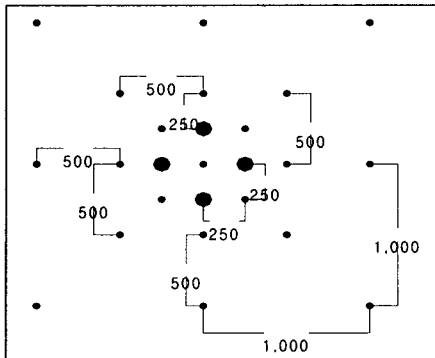


그림 5 심발부 천공 패턴도

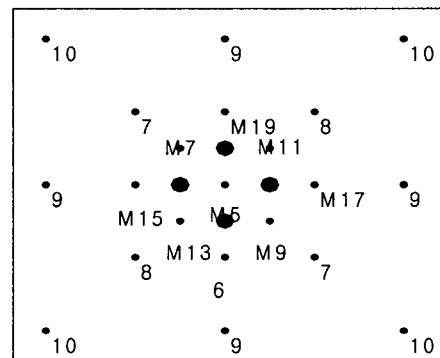


그림 6 심발부 기폭 패턴도

(3) 장 약

Bulk-Emulsion 폭약은 매우 둔감하여 전폭약(Primer)을 사용하지 않으면 기폭 되지 않는다. 본 연구에서는 모든 장전공에 전폭약포로 Super Emulsion ($\phi 32\text{mm} \times 200\text{mm}$, Wax paper) 1개를 사용하였으며 최 외곽공을 제외한 전공에 Bulk Emulsion을 사용하였고 최 외곽공(S·B공열)에는 정밀폭약(Kinex-I, $\phi 17\text{mm} \times 1,000\text{mm}$)을 공 입구까지 장전하였다.

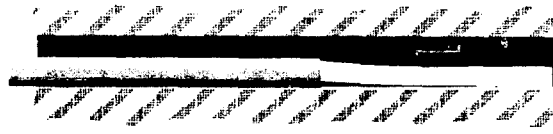


그림 7 Bulk-Emulsion System 장전

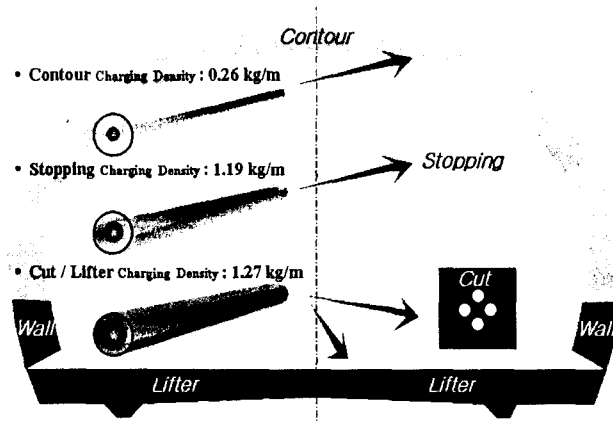


그림 8 막장의 부분별 장전 밀도

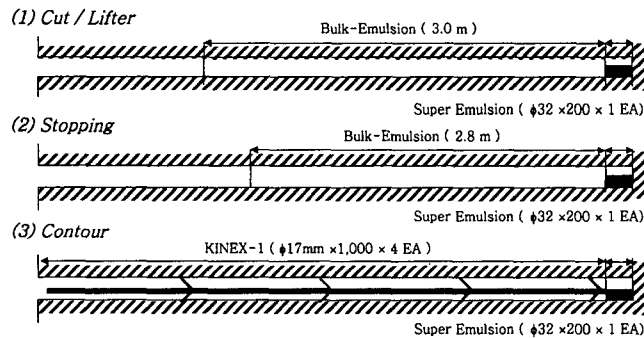


그림 9 공당 부분별 장약패턴

Bulk-Emulsion system에서 폭약의 장전밀도 조절에는 몇 가지 방법이 있는데 장전시 미세한 기체 Bubble(Gas Agent)을 Emulsion Matrix 내로 고루 분사시켜 폭약의 밀도를 조정하거나 기계 호스 수축기가 달린 장전기(Hose Restriction Unit)를 사용하여 장전호스의 속도를 조정함으로써 장전밀도를 조절하는 방법이 있는데 본 연구에서는 미리 장전호스에 장전위치를 표시하는 방법을 사용하여 공당 장전밀도를 조정하였다. Bulk-emulsion의 장약량은 천공장 4.5m를 기준으로 심발공과 바닥공은 3.0m를 장전하여 장전밀도는 약 1.27 kg/m 이었고, 그 외 확대공 부분은 최대 2.8m를 장전하여 장전밀도는 약 1.19 kg/m 이었다. 저 밀도 폭약을 사용하여 폭발 위력을 저감할 필요가 있는 최 외곽 공열(S·B공열)에는 Bulk Emulsion을 사용하지 않고 정밀폭약을 사용하여 장약 밀도를 0.26 kg/m까지 낮추어주었다. 최 외곽공에 Bulk Emulsion을 적용하지 않은 이유는 본 연구에서 적용한 Bulk Emulsion System으로는 S·B공열에서 요구하는 Decoupling 효과를 기대하기 힘들어 과파 현상(Over break)이 발생할 우려가 있기 때문으로 이는 차후 장비 보원으로 해결될 수 있는 사항이다.

3. 결 과

3.1 발파결과

본 연구에서 Bulk-Emulsion System을 적용한 위치는 상행선 STA 4+702.1과 하행선 STA 4+701.3에서 상행선 STA 4+728.1과 하행선 STA 4+725.6까지의 구간이다. 2001년 8월 17일부터 8월 22일까지 6일간 총 15회 발파 결과를 종합한 결과는 표.4와 같으며 천공장은 3.0m에서 최대 5.0m 까지 천공수는 최대 161공에서 최소 130공까지 실시하였다. 그림. 10과 같이 천공장의 증가 및 천공수의 감소에 따른 특별한 굴진률 저하 현상은 없었다.

표. 4 Bulk-Emulsion System 적용결과

	Unit	Maximum	Minimum	Average
Drilling Number	hole	161	130	139
Drilling Depth	m	5.0	3.0	4.30
Advance	m	4.8	2.8	4.07
Advance Efficiency	%	98	91.4	94.7
Specific Charge	kg/m ³	2.04	1.44	1.73
Charging Time	Minute	175	70	120

총 15회의 발파를 수행하는 동안 평균 굴진 효율은 94.7 % 이었으며 천공장 5.0m에서 천공수를 130공까지 줄였음에도 불구하고 최대 98%의 높은 굴진 효율도 기록하였다. 기존 발파에서 천공 수는 보통 172공 정도였으나 Bulk-Emulsion 적용시 최저 130공 이하로 천공수를 최대 25% 절감하여 천공시간을 약 30분 이상 단축할 수 있었다. 그러나 천공수가 줄었음에도 불구하고 카트리지 폭약에 비하여 상대적으로 장전밀도가 높아 비 장약량은 시험 초기 세 번의 발파에서 최대 2.0 kg/m³ 정도로 다소 과장약의 측면이 있었으나 이후 천공수의 감소와 함께 적정 장약 패턴으로 1.5~1.7 kg/m³으로 조정하였다.

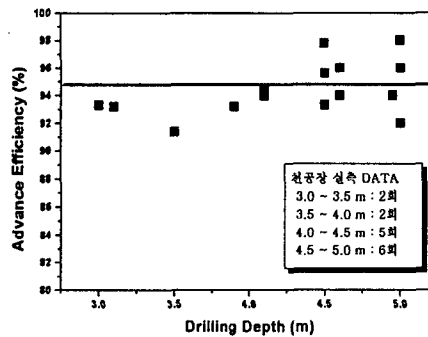


그림 10 천공장과 굴진률(%) 관계

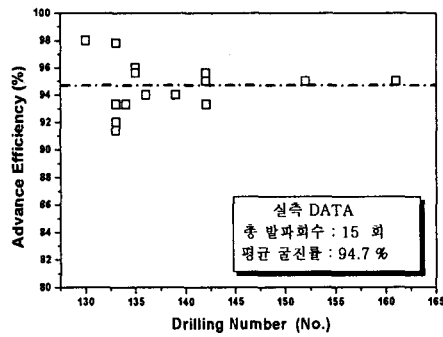


그림 11 천공수와 굴진률(%) 관계

본 연구에서 적용한 Bulk Emulsion의 밀도는 1.2 kg/l로서 고정되어 있으나 차후 가스 Bubble 발생기 등 장비보완을 통하여 폭약밀도를 조정하는 것이 가능하다. 예를 들어 스웨덴의 DYNO Nobel사에서 개발한 SSE (Site-Sensitized Emulsion) System과 같은 터널용 Bulk-Emulsion System의 경우 운송이나 보관 단계에서 Emulsion Matrix의 밀도는 1.4 kg/l이지만 일정한 수준으로 밀도를 낮추어 주는 Emulsion Matrix내 미세한 기체 Bubble의 형성으로 0.85 kg/l ~ 1.4 kg/l 까지 다양하게 폭약 밀도 조정이 가능하다. 따라서 향후 밀도 조정이 가능한 장비 보완에 의해 Bulk-Emulsion System 사용에 따른 비 장약량의 증가를 초래하는 문제는 해소될 것으로 사료된다. 그림 12는 해당 발파당 사용 비 장약량을 나타낸 것으로 총 15회 실시된 시험 발파에서 평균 비 장약량은 1.73 kg/m³ 정도이었으나 발파패턴이 비교적 안정된 시험 후반부에는 약 1.5~1.6 kg/m³의 비 장약량으로 충분한 발파효율을 얻을 수 있었다. 또한 그림 13은 장약 시간을 비교한 것이다. 장약 시간은 단일 호스를 사용하였을 경우 평균 1시간 30분~2시간 정도가 소요되어 기존 카트리지 장전시간과 별 차이가 없으나 2개의 호스로 동시 장약하였을 경우 1시간 이내가 가능하여 공기 절감효과도 기대할 수 있다.

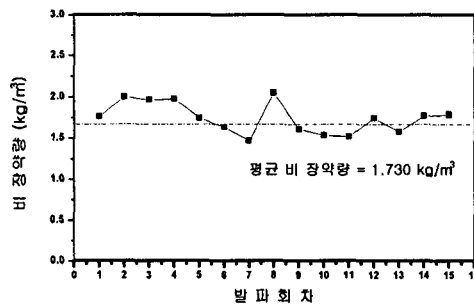


그림 12 발파 회차별 사용 비장약량

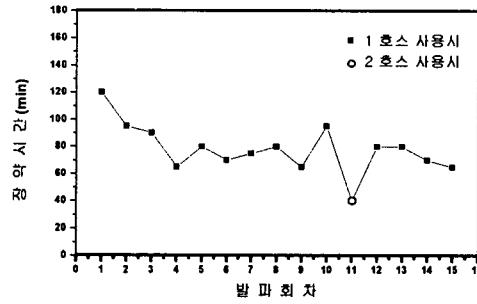


그림 13 발파 회차별 장전 소요시간

3.2 기존발파와 비교분석

기존에 사용되었던 Cartridge 폭약과 본 연구에서 Bulk-Emulsion System(N/E 1000)으로 시공한 실적을 바탕으로 천공장, 천공수와 굴진 효율을 비교하였으며 차후 경제성을 판단하는 기초자료로 삼고자 하였다. 비교 대상구간의 암반은 주로 녹리석 편암 및 견운모를 다량 함유하고 있는 이화령층으로 암반강도는 대체로 1,500kg·f/cm²정도였다. 비교 대상의 발파결과는 표 5와 같다.

표 5 기존 발파와 Bulk-Emulsion 비교

구분	천공장 (m)	천공수 (공)	굴진장 (m)	장약량 (kg)	비장약량 (kg/m ³)	천공시간 (min)	장약시간 (min)	굴진효율 (%)	
Cartridge	8/8	4.46	177	3.8	512.5	1.420	294	90	85.2
	8/9	4.46	172	3.7	462.5	1.316	334	85	89.6
	8/10	4.30	175	3.9	497.3	1.342	303	100	90.7
	평균	4.41	174.7	3.8	490.1	1.360	310.3	91.7	88.5
Bulk-Emulsion (N/E1000)	8/20	4.74	130	4.7	714.0	1.599	269	130	98.4
	8/21	4.90	135	4.5	718.8	1.681	331	125	91.8
	8/22	4.57	133	4.3	740.0	1.811	273	105	94.1
	평균	4.74	132.7	4.5	692.4	1.697	291	120	95.3

각각 3일간의 발파결과를 종합한 결과 굴진효율 측면에서 Bulk-Emulsion System(N/E 1000)을 적용하였을 경우가 기존 일반 Cartridge를 적용하였을 경우에 비하여 천공장이 약 7.5 %가 늘어나고 천공수가 약 24 % 감소되었음에도 불구하고 효율은 약 8 %증가(기존발파 100 기준)하였다. 그러나 공당 장전밀도 증가에 의해 천공수가 약 24 % 줄었음에도 불구하고 평균 비 장약량은 약 25 % 증가하였다.

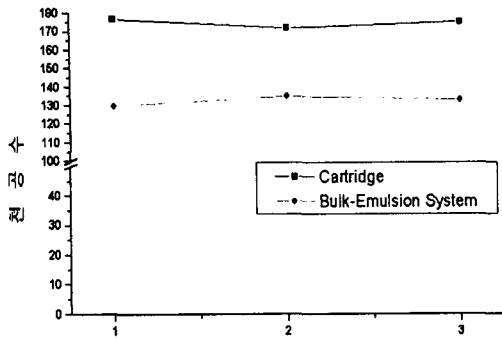


그림 14 천공수 비교

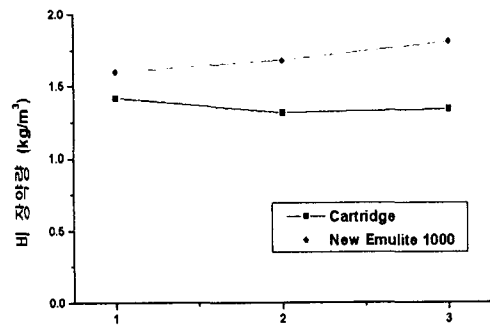


그림 15 비 장약량 비교

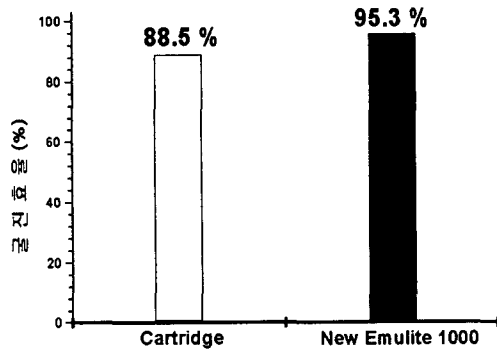


그림 16 굴진 효율 비교

4. 결론 및 향후 발전방향

본 연구에서는 터널용 벌크 에멀전 폭약(New Emulite 1000)을 경암의 장대 터널 현장에서 국내 최초로 총 15회의 시험발파를 실시하고 이를 토대로 굴진율, 천공수의 감소, 장약시간 및 장전시스템 검토, 폭약사용량 및 전체 작업공정에서의 기대효과에 대한 검토를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 각각의 천공패턴에 의해 총 15회 실시한 시험발파 결과 평균 굴진효율은 94.7%의 매우 높은 굴진률을 기록하였다.

2) 전단면 굴착에 대한 천공수에 있어서는 기존 Cartridge 폭약 사용시 172공에서 터널용 Bulk Emulsion 적용시 최소 130공으로 42공의 천공수 감소 효과 (기존 대비 천공수 약 25%저감)로 발파당 천공시간이 30분 이상 감소되어 전체 Cycle time을 절감할 수 있었다.

3) 장전기를 이용한 장전시간의 경우 현재의 1호스체제를 가동할 경우 3회 이후 숙련도의 증가에 따라 기존 Cartridge 장약시간과 비슷한 1시간 30분의 장약시간을 보였으며, 특히 2호스를 운용한 11회의 경우 실제 장약시간이 1시간 이내로 향후 2호스 체제의 운용으로 장약시간의 절감효과도 있을 것으로 판단된다.

4) 폭약사용량의 측면에서는 4회 발파 이후 발파패턴의 정착으로 인해 비 장약량은 1.5~ 1.7 kg/m³으로 균일한 패턴의 안정을 이루었으며, 향후 Gas Agent 등 예감제의 다변화와 HRU System을 통한 일체화된 단일 폭약 장약 시스템과 장약 밀도 조절로 비 장약량은 감소될 전망이다.

- 5) 시험발파와 기존발파를 작업능률이 최적 여건에 이른 최종 3일간의 data로 비교해보면
- 평균 천공장은 4.7m은 기존발파 4.4m에 비해 7.5% 증가하였고
 - 평균 천공수는 132공으로 기존발파 174공에 비해 24% 감소하였음에도 불구하고
 - 굴진율은 85.5%에서 95.3%로 약 8%의 매우 높은 성과를 얻을 수 있었다.

6) 이외에도 장대터널에서 환기시간의 30분 단축 등을 통한 작업공정시간 단축과 발파 후 유해 가스의 저감 등의 간접적인 기대효과도 예상된다.

따라서 상기 몇몇 시스템 보안을 통해 장전밀도 조절과 2호스의 운영체계가 정착화 된다면 Bulk Emulsion 폭약인 New Emulite 1000제품은 기존의 Cartridge 제품에 비해 보관 및 운반, 사용 안전면에서 매우 유리하고 효율적인 시공으로 인한 경제성과 발파후 양호한 후가스의 환경 친화성 등 여러 이점을 가지고 있어 차세대 폭약으로서 국내 경암 및 극경암의 장대 터널 전용 폭약으로 정착될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 3 Country Park Section, Tai Lam Road Tunnels, Hong Kong, New Territories. ElvØ y, Jan ; Storas, Ingvild ; RØnn, Pal-Egil ; " Bruk av Slurry I Haneleivtunneen I Vestford", Fjellprenger'n nr. 2 1996.
2. Fauske, Arve, Dyno Nobel ; "Norwegian Urban Tunnelling", ITA, Washington D.C., April 21-26, 1996.
3. Fauske, Arve, Dyno Nobel ; "Development of Drilling Pattern and Initiation Sequences From Controlled Blasting to Conventional Round", Preliminary Report May 1996, Route.