

우리나라의 터널발파공법 설계와 실적공사비에 의한 표준품셈의 문제점 고찰

두준기¹⁾ · 김정규²⁾

1. 서 론

우리나라는 국토의 70% 정도가 산지인 지형적인 특성을 나타내고 있어서 도로 및 철도를 건설할 때 터널을 설계하여 시공해야한다. 우리나라는 산악지형으로 인하여 장대터널이 설계되고 있는데 암반등급을 분류하여 발파패턴을 설계한다. 일반적으로 암반등급이 I 등급인 경우 4.0m 이상으로 발파당굴진장을 설계하는데 우리나라에서는 터널발파공법의 기술력이 열악하여 발파당굴진장을 3.5m 이상으로 줄여서 설계하고 있다. 터널을 굴착하기 위하여 발파당굴진장을 3.5m 이상으로 설계할 때 새롭게 개발된 신기술공법을 적용하기도 하나 대부분 실린더 컷(Cylinder-cut)으로 설계하여 공사기간과 공사비를 산출한다. 실린더 컷은 중앙에 대구경 무장약공을 천공하여 자유면으로 이용하는 발파방법이나 공법을 개발할 때 무장약공을 천공하는 장비와 발파공을 천공하는 장비가 이원화되어 개발되었기 때문에 작업능률이 저하되었는데 점보드릴이 개발된 이후부터는 점보드릴로 천공이 가능한 4"의 무장약공을 여러 개 천공하여 단일직경의 대구경 무장약공과 동일한 효과를 나타내도록 발파패턴을 개발하여 작업능률을 향상시켰다. 실린더 컷의 설계는 발파당굴진장에 따른 무장약공의 수와 발파공수, 연천공장, 공당장약량, 뇌관배열에 의한 뇌관 수 등을 결정하고 작업에 투입하는 장비와 자재와 인원 및 소요되는 시간과 작업능률에 의하여 공사기간 및 공사비를 산출한다. 우리나라에서는 일반적으로 암반등급 Type-I, II의 발파패턴을 실린더 컷으로 설계하는 경우 3개의 4" 무장약공을 배치하고 Type-III은 2개의 4" 무장약공을 배치하여 설계하고 각각의 공정에 따른 소요시간과 투입자재 및 비용을 산출한다.

2. 이론적인 배경

터널발파공법은 경사천공에 의한 심발발파법과 평행천공에 의한 심발발파법으로 크게 나눌 수 있다. 우리나라에서 시행하는 일반적인 발파공법은 경사천공 심발발파법은 브이 컷(V-cut)이 있고 평행천공 심발발파법은 실린더 컷(Cylinder-cut)을 적용하고 있다. 브이 컷은

1) 휴먼테크발파기술사사무소

2) 전남대학교

공저에 집중장약을 하여 막장면을 자유면으로 이용하여 발파하는 방법이어서 무장약공이 필요하지 않으나 실린더 컷은 무장약공을 자유면으로 이용하여 발파하는 방법이다. 실린더 컷으로 발파할 때 굴진장이 길어질수록 파쇄되는 버력량이 증가하면 버력이 배출되는 통로의 마찰저항이 증가하여 버력이 배출되지 못하고 소결현상이 발생되어 실린더 홀과 발파공에 의해 형성된 공간에 채워진 상태로 남아있어 다음 발파공의 자유면을 제공하지 못하여 발파를 실패하게 된다. 발파당굴진장이 길어져서 버력량이 많아지고 마찰저항이 증가하는 현상을 완화시키기 위하여 발파당굴진장이 길어질수록 무장약공의 크기를 증대시켜야한다.

2.1 천공이론과 천공속도

암반에 구멍을 뚫는 천공작업은 암반의 취성과파괴이론과 착암기의 에너지 전달능력을 제고 시키는 방법으로 기술과 장비가 발전되었다. 암석은 단단하지만 충격에 약하여 타격을 가하면 용이하게 파괴되는 성질을 이용하여 암반에 구멍을 뚫는 착암기를 개발하였으며 착암기는 공압을 이용한 인력지식식 착암기가 먼저 개발되었고, 이어서 웨건드릴을 거쳐 에너지 효율이 양호한 유압식 점보드릴로 발전하였다. 착암기의 천공속도는 기계적인 특성과 에너지 효율에 의해 결정되는데 암반과 기계적인 조건이 동일한 경우에는 천공경에 의해 천공속도가 결정된다. 천공경이 클수록 천공시간이 길어지고 천공경이 작을수록 천공시간이 짧아지는데 천공속도를 산출하는 식은 $V = k \frac{1}{d^2}$, (V : 천공속도, k : 천공상수, d : 천공경)이다.

2.2 무장약공과 환산직경

발파당 굴진장이 길어질수록 무장약공의 직경이 커지는데 실린더 컷의 무장약공이 커지면서 발파공을 천공하는 장비와 무장약공을 천공하는 하는 장비를 별도로 개발하여 사용하였다. 점보드릴이 개발되면서 천공경의 범위가 확대되고 환산직경이론이 개발되어 4" 무장약공을 2~4공 배치하여 대구경의 무장약공과 동일한 효과를 얻을 수 있는 발파방법이 개발

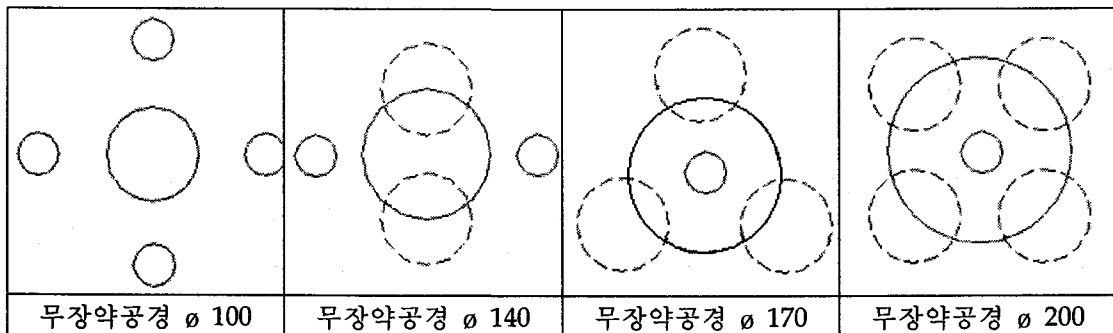


그림 1. 실린더 컷의 환산직경과 무장약공 배치

되었다. 환산직경을 구하는 식은 $D=d\sqrt{n}$ (D : 환산직경, d : 무장약공의 직경, n : 무장약공의 수)이다. 대구경의 무장약공을 대체하기 위하여 환산직경으로 산출된 소구경의 무장약공들은 심발공이 발파될 때 파쇄된 버력의 배출통로로 이용되어야 소결현상을 방지할 수 있다.

3. 터널발파공법의 설계

터널발파공법은 암반의 등급별로 발파패턴의 타입을 결정하여 설계하는데 일반적으로 암반등급이 양호하여 발파당굴진장이 3.5m 이상인 I 타입과 발파당굴진장이 3.0m 이상인 II 타입은 실린더 (Cylinder-cut) 컷을 적용하여 설계하고, 발파당굴진장이 2.5m 이상인 III 타입은 설계자에 따라서 실린더 컷 또는 브이 컷(V-cut)으로 설계하고, 발파당굴진장이 1.5m 이하인 IV 타입과 발파당굴진장이 1.1m 이하인 V 타입은 브이 컷으로 설계한다. 갭문은 암반의 타입 보다는 안전성과 환경성을 고려하여 진동을 제어하는 발파공법을 적용하여 설계한다. 실린더 컷의 무장약공과 발파공을 배치하는 방법은 발파당굴진장에 따라서 발파패턴의 타입별로 차별화된다. 우리나라에서 발파패턴 Type-I 을 실린더 컷으로 설계할 때 그림 3과 같이 무장약공을 배치하는데 무장약공 3개중에서 1개는 이격거리가 멀어서 자유면으로 이용되지 못하고 2개의 무장약공만 심발공의 자유면과 암반의 배출통로 이용되기 때문에 실린더 컷을 설계도와 같이 발파하면 소결현상이 발생되어 정상적으로 발파가 이루어질 수 없게 된다.

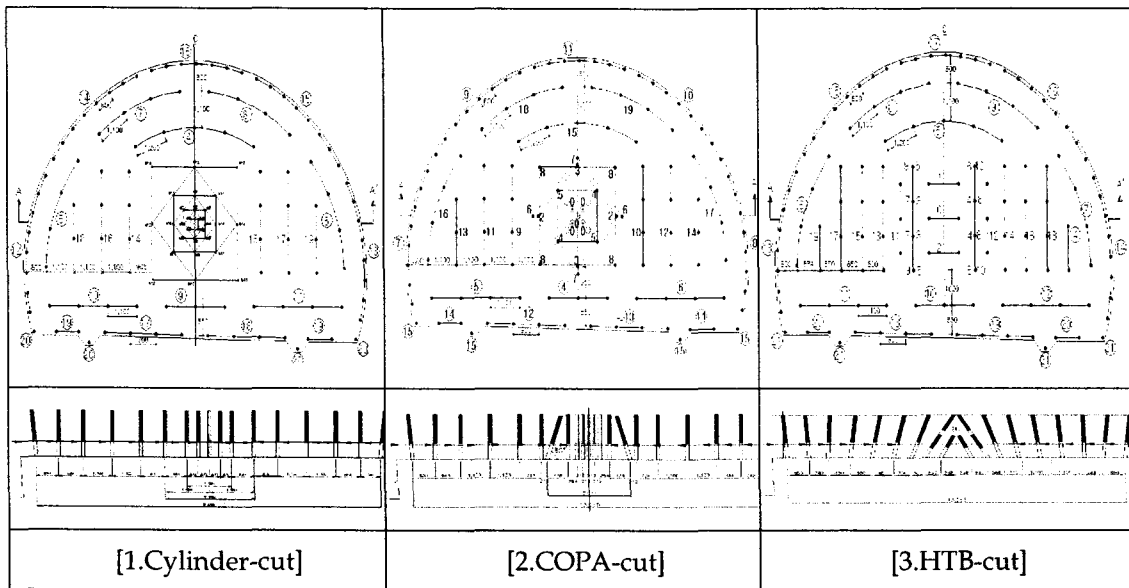


그림 2. 실린더 컷과 코파 컷, 에취티비 컷의 발파패턴도

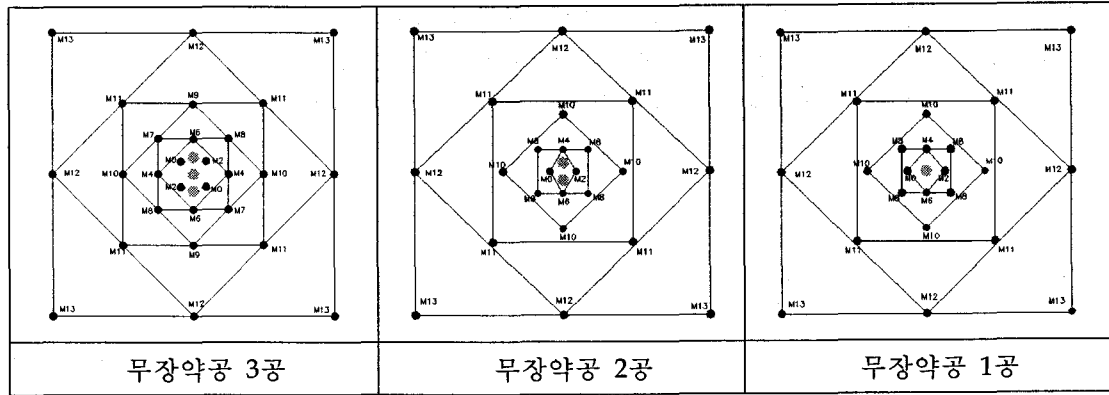


그림 3. 우리나라에서 설계하는 실린더 컷의 무장약공 수와 발파공 배치도

3.1 실린더 컷의 연천공장 산출

[Type- I : 발파당굴진장 3.5m/ 천공장 3.7m, 2차선 도로터널 기준]

구 분	천공수(ea)			연천공장(m)			45mm환산 연천공장(m)			비 고
	4"	45mm	소계	4"	45mm	소계	4"	45mm		
현행 설계 방법	3	137	140	11.1	506.9	518.0	11.1	506.9	518.0	
표준 설계 방법	3	137	140	11.1	506.9	510.6	57.0	506.9	563.9	▲ 45.9m

3.2 실린더 컷의 천공작업시간

[Type- I : 발파당굴진장 3.5m/ 천공장 3.7m, 2차선 도로터널 기준]

구 분	천공수(ea)			45mm환산 연천공장(m)			천공시간			비 고
	4"	Ø45	소계	4"	Ø45	소계	증감	min	증감	
현행 설계 방법	3	137	140	11.1	506.9	518.0		246		
표준 설계 방법	3	137	140	57.0	506.9	563.9	▲ 45.9	268	▲ 22	

도로 2차선 터널을 실린더 컷으로 설계하여 시공할 때의 천공시간은 현행 설계방법이 표준설계방법에 비하여 22분이 적게 산출된다.

3.3 터널발파공법의 직접공사비 산출방법(Cylinder-Cut, 도로 2차선 터널 기준)

표 1. 터널발파공법의 직접공사비를 산출하는 표준품셈

산 출 근 거	재 료 비	노 무 비	경 비	합 계	비 고
#.전단면굴착(2차로,전단면)Cylinder-Cut,표준단면 굴진장=발파당굴진장(M)/1 발파당 굴착량(M ³) 1.기계경비 착암 CM =장비가동시간(MIN) 천공 T1 = 천공시간(MIN) 가. JUMBO (3 BOOM) 터널공 BASIC [XB61500000] 참조 경 비 : 감가상각비*CM/60 재료비 : 시간당천공재료비*CM/60*(T1/CM) 발전기 (150K.W) : [E0075050150C] 경 비 : 감가상각비*CM/60 재료비 : 시간당발전재료비*CM/60*(T1/CM) 소 계 : 단위보정 [1/328.073] 2.발파재료비 가. 화 약 1) 정밀폭약(1호) : 장약량(KG)* 단가 2) 에멀전 폭약(32mm) : 장약량(KG)* 단가 3) 다이ना마이트(32mm) : 장약량(KG)* 단가 나. 비전기보관 1) MS : 수량(EA) * 단가 2) LP : 수량(EA) * 단가 3) 번치커넥터 : 수량(EA) * 단가 4) 스타터 : 수량(EA) * 단가 다. BIT (R=45 M/M) 천공장 : 연천공장(M)/본당천공장(M)/EA*단가*(0.9) 라. SHANK ADAPTER : 연천공장(M)/본당천공장(M)/EA*단가*(0.9) 마. EXTENSION ROD : 연천공장(M)/본당천공장(M)/EA*단가*(0.9) 바. CONPLING SLEEVE : 연천공장(M)/본당천공장(M)/EA*단가*(0.9) 소 계 : 단위보정 [1/ 328.073]					

<p>3. 굴착노무비 소요 작업조 : 1 조 갱 내 작업 : H= 1.292 작업 반장 A1 = 2인 * 인건비/일 중기 운전수 A2 = 1인 * 인건비/일 중기 조수 A3 = 1인 * 인건비/일 보통 인부 A4 = 3인 * 인건비/일 화약공 A5 = 1인 * 인건비/일 화약공 조수 A6 = 2인 * 인건비/일 소 계 AS=A1+A2+A3+ A4+ A5+ A6= 노무비 LAL=AS*직,간접비(1.292)*1= 소 계 : 단위보정 [1/328.073] 단위보정 1.2.3.번/328.073(M3/3.5M당) 전체 합계</p>					
1. JUMBOODILL (3BOOM)					
경비 : 600,000,000 * 10 ⁻⁷ * 2914 = 174,840					
T1(1발과당 천공소요시간)					
천공시간 : 1발과당 천공길이 / (JUMBOO 평균 천공속도 * BOOM수)					
2차로 터널조건: JUMBOO 평균속도 = 0.7 m/min					
BOOM의 수 =: 3 BOOM					
2. 굴착 싸이클 타임					
1) 굴 착					
① 준비 : T _{bpu} = 20 분					
② 천 공 : T _{bdu} = (연천공장 m / 0.7m/min / 3) = 천공시간(분)					
③ 장약및발파 : T _{bpu} = 45 분					
④ 환 기 : T _{bpu} = 45 분					
⑤ 부식 정리 : T _{bpu} = 25 분					
계 : T _b = (분)					
2) 버럭 처리					
① 준비 : T _{rpu} = 10 분					
② 버럭 처리 : (2.87m ³ 로더 + 15Ton 덤프)					
q = 2.87 . L = 1.85 , f = 1 / L = 0.54 , k = 0.55					
E = 0.35 . Cm = 8 * 1.8 + 20 + 14 = 48.40 초					
Q = 3600 * 2.87 * 0.55 * 0.54 * 0.35 / 48.4 = 22.19 m ³ /hr					
버럭 처리 : T _{rtu} = (버럭처리량 / 분당 처리량) = 버럭처리시간(분)					
③ 뒷 정 리 : T _{rcu} = 15분					
④ 측 량 : T _{rsu} = 10 분					
계 : T _{ru} = (분)					
3) 슛크리트타설					
① 준비 : 10 분					
② 바닥청소 및 면정리 : 81분					
③ 뿔어붙임 : 타설시간(분)					
④ 잔재제거 : 20분					
⑤ 장비점검 : 10분					
계 : T _{su} = (분)					
4) 락볼트지보공					
① 준비 : 20 분					
② 천 공 : 3분					
③ 공내청소 : 1 분					
④ 총 진 : 2분					
⑤ 정착 : 2 분					
⑥ 이동기타 : 20 분					
계 : T _{pu} = (분)					
5) 굴 착 Cycle time 계					
계 : C _{mtu} = (분)					

4. 터널발파공법별 직접공사비 비교

[Type- I: 발파당굴진장 3.5m, 천공장 3.7m, 굴착량 328.1m]

구분	발파패턴 Type- I	증감	비고
굴착 m ³ 당 공사비	현행설계	11,473원	
	표준설계	11,841원	▲ 368
굴진 m당 공사비	현행설계	1,075,511원	
	표준설계	1,110,009원	▲ 34,498
1회 발파 공사비	현행설계	3,764,291 원	
	표준설계	3,885,032 원	▲ 120,741

도로 2차선 터널을 실린더 컷으로 설계하여 시공할 때의 표준공사에 비하여 현행설계공사비가 m³당 368원, 터널 1m당 공사비는 34,498원, 1발파당 공사비는 120,741원을 감액하여 설계하고 있다.

5. 터널발파기술의 낙후성

터널발파기술은 암반이 양호할 경우 발파당굴진장을 4.0m 이상으로 발파해야 선진화된 발파기술이라 할 수 있으며 터널발파기술이 선진화되기 위해서는 시공기술이 고도화되고 공사기간을 산출하거나 공사비를 산출하는 품셈기준이 합리적이어야 기술발전이 가능해진다. 우리나라의 터널발파공법에 대한 설계기준과 품셈을 적용하여 설계할 때 불합리한 설계방법과 품셈을 적용하고 있어서 작업시간과 공사기간이 불합리하게 산출되고 현실성이 결여된 공사비가 산출되고 있다. 발파당굴진장을 3.5m로 설계하고 시공할 때 발파당굴진장을 3.0m 이하로 낮추는 변칙적인 시공은 시공하는 공사비가 증가하여 부정한 설계변경 등이 발생될 수 있다. 작업능률이 감소되어 발파횟수를 증가시키면 작업환경이 악화되고 노동 강도가 높아져서 작업능률과 안전성과 경제성이 저하된다. 우리나라에서 실린더 컷으로 설계된 터널을 브이 컷으로 변경하여 발파당굴진장을 3.5m에서 3.0m로 시공하는 근본적인 이유는 터널의 장공발파에 대한 기술력의 낙후되어 발생하는 현상이다.

6. 실적공사비의 산출

터널굴착공사에 대한 실적공사비는 실린더 컷으로 설계하면 실린더 컷으로 시공하는 현장에서 실적공사비를 산출해야하고 브이 컷으로 설계하면 브이 컷을 시공하는 현장을 대상으로 공사비를 산출해야 적절한 공사비가 산출된다. 실린더 컷을 대상으로 실적공사비를 산

출하는 경우에는 무장약공의 천공시간과 발파공의 천공시간을 조사하여 총 천공시간을 산출해야 한다. 실적공사비를 적용하여 실린더 컷을 설계하려면 발파당굴진장에 의해 무장약공의 수가 변하여 연천공장이 달라지므로 천공경이 다를 때 천공속도를 산출할 수 있는 식 ($V=k \times 1/d^2$, V : 천공속도, k : 천공상수, d : 천공경)을 제시해야 올바른 설계를 할 수 있다. 현재 우리나라의 터널설계기준이나 품셈기준은 무장약공을 천공하지 않는 발파공법을 대상으로 실적공사비가 산출되었기 때문에 실린더 컷을 설계할 때에도 무장약공과 발파공의 연천공장을 구하여 단일 천공속도를 곱하여 천공시간을 산출하는데 실제작업시간과 무관한 천공시간이 산출되어 공사기간을 예측할 때 신뢰성이 결여되고 불합리한 공사비가 산출된다.

7. 결 론

터널의 설계 기준과 공사비를 산출하는 품셈은 올바른 기술기준을 제시하여 합리적인 설계와 시공이 이루어질 수 있는 지침이 되어야 한다. 현행 터널발파공법의 실린더 컷에 대한 설계방법과 작업시간 및 공사비를 산출하는 품셈이 원칙에 어긋나는 기준을 적용하여 시공이 곤란하고 불합리한 공사기간과 공사비가 산출되고 있어 보완이 요구된다. 터널발파공법을 실린더 컷으로 설계하고 시공할 때 천공경이 다른 경우 천공속도를 산출하는 식을 적용하여 천공시간을 산출해야 공사기간과 공사비가 합리적으로 산출된다. 합리적인 터널설계기준과 품셈은 기술력을 제고시켜 작업능률이 향상되고 작업자의 보건과 안전을 도모할 수 있으며 경제적인 터널굴착공사가 가능하게 되어 터널기술의 선진화를 이룰 수 있다.

참고문헌

1. 김웅수, 1995, 발파핸드북, 구미서관, pp. 20-21.
2. 김재극, 1999, 산업화약과 발파공학, pp. 163-185.
3. 조상호, 양형식, 금자승비고, 2003, 암석의 정적 인장강도에 미치는 불균질성의 영향, 터널과 지하공간, Vol. 13, No. 2, pp. 117-124.
4. 두준기, 양형식, 2001, 최소저항선과 자유면의 크기가 발파진동에 미치는 영향, 대한화약발파공학회지, Vol. 19, No. 3, pp. 59-66.
5. 雜喉謙, 1994, 발파진동의 주변에의 영향과 대책, pp. 24-29.
6. Cho Sang Ho, Ogata Yuji and Kaneko Katsuhiko, 2003, Strain rate dependency of the dynamic tensile strength of rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science.
7. Kaneko, K., Y. Matsunaga and M. Yamamoto, 1995, Fracture mechanics analysis of fragmentation process in rock blasting, Journal of the Japan Explosive Society, Vol. 58, No. 3, pp. 91-99(1).

8. Kubica, G., 1998, The Modern Technique of Rock Blasting for Tunnels, Doosan Construction & Engineering Co. Ltd.
9. Olofson, S.O., 1988, Applied explosives technology for construction and mining. pp. 131-144.