

터널의 여굴 설계와 시공의 문제점 고찰

두준기¹⁾

1. 서론

터널을 설계할 때 여굴량에 대한 기준은 동일한 암반에서 동일한 유효단면을 확보하기 위하여 터널을 굴착하는 경우에도 굴착방법에 따라서 서로 다르게 규정해야한다. 터널을 기계식 브레이커로 굴착할 때는 여굴량을 설계할 때 확굴(Look out)량을 고려하지 않고 여굴량을 결정해야하고, 발파공법으로 굴착할 때는 확굴량을 고려하여 여굴량을 결정해야 하기 때문이다. 터널을 설계하거나 굴착할 때 적용하는 용어는 여굴(Over break)과 확굴(Look out), 미굴(Under break) 등이 있는데 각각의 용어를 정의하기에 따라서 적용해야하는 방법이 상이하므로 정확한 용어 정의는 합리적인 설계와 시공을 하기 위한 전제 조건이라 할 수 있다. 본고는 터널굴착에 대한 용어에 대하여 합리적으로 정의하고 올바른 적용방법을 제시하여 용어 정의가 불명확하여 빚어지는 혼선을 방지하고 설계와 시공이 원칙에 맞추어 이루어질 수 있게 하여 경제적인 터널굴착을 가능하게 하기 위함이다.

2. 본론

2.1 우리나라 터널설계기준의 여굴기준

터널설계기준은 터널을 굴착할 때 유효굴착단면 보다 크게 굴착된 부분을 총칭하여 여굴이라고 규정하고 있는데 발파기술이 최초로 개발된 서구에서는 여굴이라는 용어를 확굴보다 크게 굴착되었을 때를 정의하는 용어로서 우리말의 한자표기와 동일한 의미로 정의되며 불필요한 굴착이 이루어진 상태를 말한다.

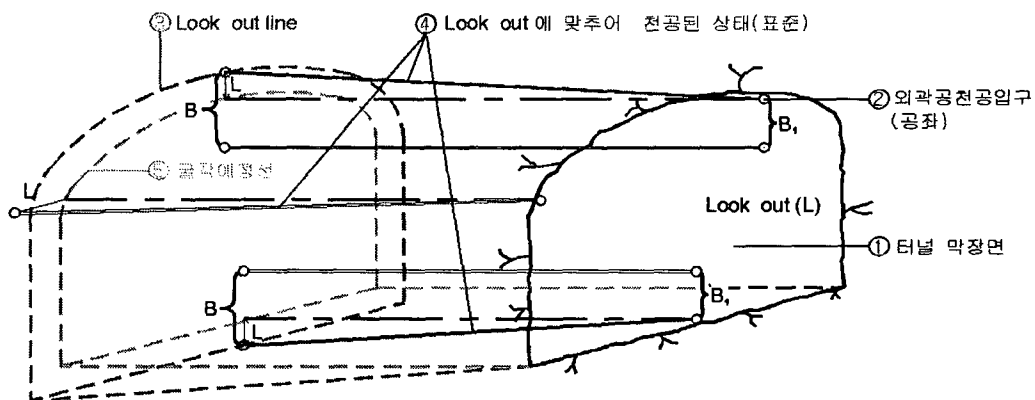


그림 1. Look out

1) 휴먼테크발파기술사사무소

2.2 여굴과 미굴

터널굴착공법에서 여굴과 확굴과 미굴을 구분하는 것은 터널을 굴착하는 방법에 따라서 유효 단면을 확보하기 위한 작업방법과 설계기준이 서로 다르므로 용어를 구분하여 표기해야 합리적인 터널설계와 시공기준을 결정할 수 있기 때문이다. 터널을 브레이커나 TBM 등 기계굴착으로 굴착할 때에는 Look out을 고려하지 않고 터널의 유효굴착단면을 기준하여 설계와 시공이 이루어지고 여굴과 미굴을 결정한다. 터널을 발파방법으로 굴착할 때에는 이어지는 발파를 위하여 절대적으로 필요한 굴착단면을 확보하기 위하여 유효굴착단면에 Look out을 합한 단면을 기준하여 굴착하는데 Look out 보다 크게 굴착되었을 때를 여굴이라 하고 Look out 보다 적게 굴착되었을 때는 미굴이라 한다.

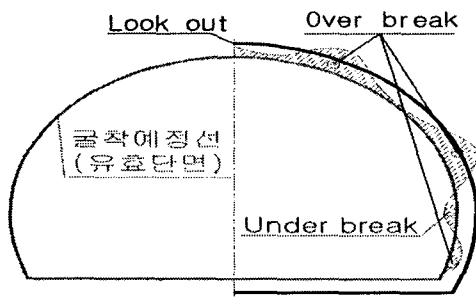


그림 2. 유효굴착단면을 기준한 미굴과 여굴

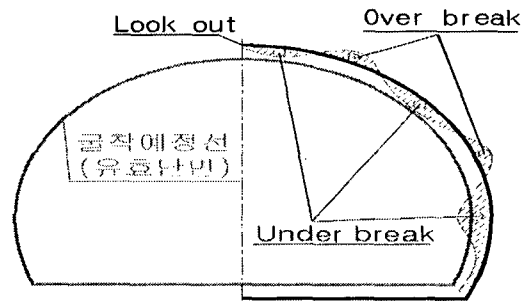


그림 3. Look out을 기준한 미굴과 여굴

2.3 여굴의 판단기준에 대한 문제점

터널을 굴착할 때 여굴과 미굴을 판단하는 기준이 원칙적으로는 Look out을 기준하여 판단해야 하는데 우리나라에서는 Look out을 기준하지 않고 유효굴착단면을 기준하여 여굴과 미굴을 판단하고 있기 때문에 여굴이 더욱 크게 발생되고 있다. 유효굴착단면을 기준하여 여굴과 미굴을 판단하는 경우에는 여굴로 나타난 부분이 Look out 보다 적게 굴착된 경우에는 실제로 미굴이 발생된 것이고 Look out 보다 크게 굴착된 경우에는 여굴이 발생된 것이다. 유효굴착단면을 기준하여 미굴이 발생된 경우에는 이어지는 발파의 외곽공 보다 외측에 추가로 발파공을 천공하여 확장하기 때문에 천공시간이 늘어나고 여굴이 크게 발생된다. 유효굴착단면을 기준하여 여굴과 미굴을 판단하는 경우에는 발파공을 추가하여 미굴된 부분을 확장하는 불필요한 작업이 발생되고, 여굴도 크게 발생시키는 근본적인 원인을 제공하게 된다.

2.4 여굴이 발생하는 원인

발파방법으로 터널을 굴착할 때 여굴이 발생하는 원인은 터널의 시공계획을 수립할 때 투입되는 장비의 특성과 천공 변위량을 고려한 Look out을 설계하지 않고 원설계의 여굴량을 기준하여 시공계획을 수립하는 경우에 여굴이 크게 발생되고, 원지반의 특성에 의하여 외곽공을 발파할 때 원지반의 배면이 붕괴되어 Look out 보다 더 큰 단면으로 굴착되어 여굴이 발생되며, 외곽공의 천공작업에서 공좌가 이동된 상태로 천공하여 공저 부분의 변위량이 커져서 여굴이 크게 발생되고, 천공장비의 결합으로 천공 변위량이 크게 발생되어 여굴이 발생되며, 천공작업자가 외곽공을

천공할 때 천공위치와 천공방향을 부정확하게 설정하여 천공작업이 이루어져서 여굴이 크게 발생된다.

2.5 원지반의 상태에 따른 여굴

터널을 굴착하는 원지반의 상태에 따라서 여굴의 발생 양상이 서로 다르게 나타나는데 암반을 분류하는 기준과 여굴이 발생하는 상태를 개략적으로 분류하면 암반이 양호하여 자립능력이 우수한 I, II등급에서는 외곽공을 Smooth blasting으로 발파하였을 때 천공흔적의 공저부분에서 원지반이 경미하게 손상된 흔적을 발견할 수 있고 나머지 부분에서는 공벽에 균열이 발생되어 있으나 천공흔적이 유지되어 있다는 사실은 Smooth blasting에 의해서 여굴이 발생되지 않는 것으로 판단해야한다. Smooth blasting을 하였는데도 여굴이 발생하는 현상은 Smooth blasting외에 다른 원인에서 이유를 찾아야한다. 외곽공의 천공이 불규칙하여 최소저항선거리가 커질 경우 일반적으로 발파작업자는 공발을 방지하기 위하여 의도적으로 외곽공의 공저에 폭약량을 증대시켜 발파하고 있는 점에 유의해야한다. 외곽공이 불규칙하게 천공되고 공저의 폭약량이 증대되면 발파공의 파괴각이 커지며 근접해있는 외곽공의 영역까지 파괴가 진행되어 천공흔적을 제거하며 여굴을 발생시키는 결과를 초래할 수 있기 때문이다. 암반이 III등급에서는 암질에 따라서 천공작업의 오류는 물론 Smooth blasting의 공저 폭약의 영향에 의하여 여굴이 발생될 수 있다. 암반이 IV, V등급에서는 천공장이 짧기 때문에 천공의 오류에 의한 여굴 보다는 외곽공의 발파에 의하여 여굴이 크게 발생될 수 있는데 발파패턴을 설계할 때 원지반을 고려하지 않은 Look out설계와 Smooth blasting의 전폭약이 암반의 등급을 고려하지 않고 설계하는 점에 유의해야한다.

2.6 표준 천공 변위량(Standard hole deviation)

발파공을 천공할 때 천공 홀의 공저부분의 위치가 계획된 위치에서 이탈하여 변위를 발생시키는 것으로 천공장이 길어질수록 변위량이 커진다. 공저부분의 변위량을 천공오차라 한다. 천공변위량의 단위는 길이로 표시하며 일반적으로 직경 75mm일 때 천공장 1.0m당 약 3cm의 변위량이 발생되고 직경이 45mm일 때는 천공장 1.0m당 약 1cm 이내의 변위량이 발생된다.

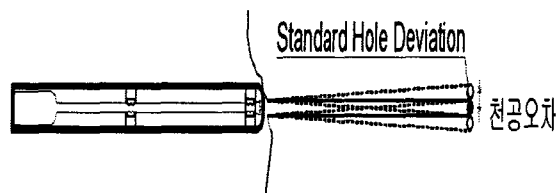


그림 4. 표준 천공 변위량

2.7 불량 천공에 의한 천공 변위량(Hole deviation of drilling error)

발파공을 천공할 때 공좌의 천공작업이 부실하면 동일한 암반 조건에서도 공저부분의 천공 변위량이 크게 나타난다. 부실한 천공작업은 공좌 위치의 이탈 무리한 Feed 등에 의해 발생되며 여굴을 발생시키는 가장 큰 요인으로 작용한다.

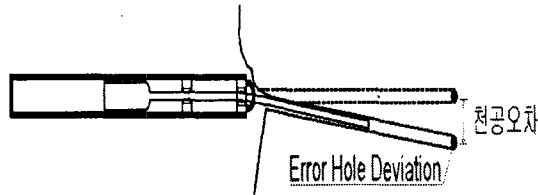


그림 5. 불량천공에 의한 천공변위량

2.8 공좌의 위치 이동에 따른 천공변위량

공좌의 위치가 이동하였을 때 비트의 진행방향이 변하여 천공장이 길어질수록 확천량이 증가하게 된다. 점보드릴의 룯드를 16ft로 사용하는 경우 공좌가 1cm이동하였을 때 전체길이에 비하여 미미한 변위가 발생될 것으로 판단할 수 있는데 공좌의 위치 변위량은 비트와 룯드를 잡아주는 Guide에서부터 비트까지의 거리에 대하여 변위량으로 나타나기 때문에 굴진장이 길어질수록 천공 변위량이 커진다. 계산상으로 비트와 Guide의 거리가 30cm일 때 공좌가 1cm 이동하면 3.0m 에서는 10cm, 4.0m에서 13.3cm이 변위된다.

표 1. 공좌 이동량과 천공장에 따른 공저 변위량

단위: mm

구 분	비트와 Guide거리						
	200mm 일 때			300mm 일 때			
천 공 장	2.0m	3.0m	4.0m	2.0m	3.0m	4.0m	
공좌 이동량	10mm	100	150	200	67	100	133
	20mm	200	300	400	133	200	267
	30mm	300	450	600	200	300	400
	40mm	400	600	800	267	400	533

2.9 Look out의 설계

Look out은 천공장비의 Feeder 사양과 천공작업 중에 발생하는 변위량으로 결정할 수 있는데 우리나라의 설계기준에는 Look out을 설계하는 규정이 없다. 천공장비의 Feeder 사양은 제조회사 마다 다르기 때문에 모든 터널의 Look out을 일률적으로 규정하는 것은 여굴을 증대시키는 원인이 된다. Look out을 산출하는 공식은 L=비트 중심에서 Feeder의 가장자리까지의 최단거리 + 천공 변위량/m이다.

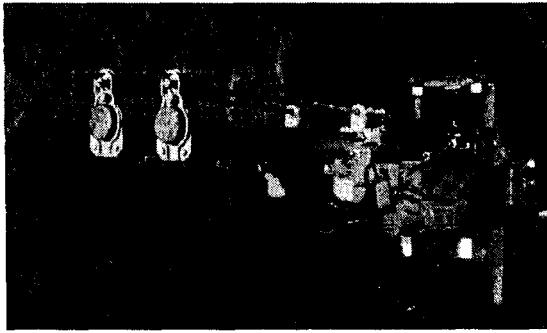


그림 6. 점보 드릴

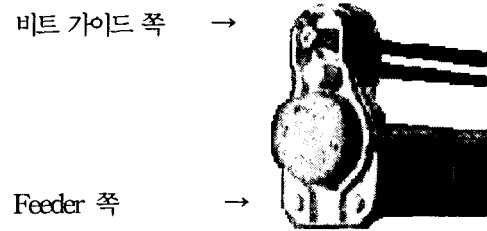


그림 7. 비트와 비트 및 룯드 가이드

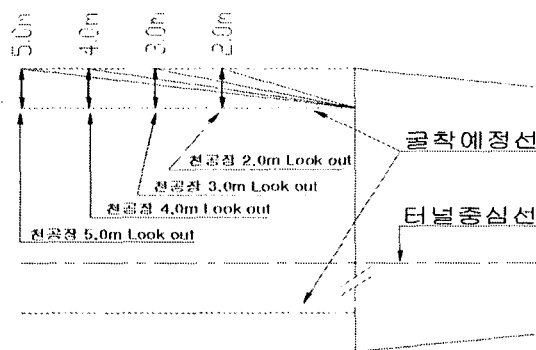


그림 8. 굴진장별 Look out

표 2. 굴진장별 각도

구 분		천 공 장 (굴 진 장)			
		2.0 m	3.0 m	4.0 m	5.0 m
L o o k o u t	150mm	4.29°	2.86°	2.15°	1.72°
	200mm	5.71°	3.81°	2.86°	2.29°
	250mm	7.13°	4.76°	3.58°	2.86°

2.10 점보드릴 모니터에 나타나는 천공 도면의 문제점

최신 점보드릴은 천공작업에 대한 내용을 모니터로 출력이 가능하여 모니터의 자료를 이용하여 천공작업을 관리할 수 있는데 모니터의 데이터를 이용하여 발파작업을 관리하는 경우 심각한 오류를 범하게 된다. 현재 까지 개발된 점보드릴은 최신 기종일지라도 모니터에서 검색이 가능한 Drill Logging은 비트의 선단이 진행되는 방향을 정확하게 읽어내는 능력이 부재하고 착암기가 Feeder 상에서 이동하는 궤적만을 추적하여 모니터에서 천공결과 도면으로 나타므로 공좌가 원

위치에 정확하게 천공되고 변위량이 발생되지 않는 이상적인 경우에 한하여 실제 천공결과와 모니터의 천공결과가 일치한다. 일반적인 천공작업에서는 모니터와 무관한 천공작업이 이루어지기 때문에 현재 까지 개발된 점보드릴의 모니터에 나타나는 천공결과에 대한 Drill logging은 신뢰성이 결여된다.

3. 결론

터널발파에서 여굴이 발생하는 원인은 Look out의 설계 결함과 원지반의 상태와 장비의 결함과 드릴작업자의 기능 미숙과 터널굴착작업의 관리 부실로 인한 천공작업시간의 부족으로 인하여 발생된다. 여굴을 관리할 수 있는 설계기준과 작업관리방법에 대한 제도적인 장치가 마련되어야 효율적이고 경제적인 터널굴착이 이루어질 수 있다.

참고문헌

1. 강대우, 심동수, 1996, 응용발파기술, 구미서관, pp. 140-143.
2. 건설교통부, 2003, 건설교통부의 암 발파공법 설계 및 시험발파 잠정지침, 건설교통부.
3. 건설교통부, 1999, 터널시방서, 건설교통부.
4. 김용수, 1995, 발파핸드북, 구미서관 pp. 20-21.
5. 김재극, 1986, 산업화약과 발파공학, 서울대학교출판부, pp. 182-185.
6. 양형식, 1992, 발파진동학, 구미서관, pp. 236-243.
7. 윤지선, 1992, 최신발파기술, 구미서관, pp. 89-96.
8. 한국도로공사, 2000, 여굴최소화를 위한 최적 발파패턴 설계방안에 관한 연구, 한국도로공사.
9. 한국도로공사, 2000, 터널 발파작업 시공관리, 한국도로공사.
10. 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)
11. Kubica, G., 1998, The Modern Technique of Rock Blasting for Tunnels, Doosan Construction & Engineering Co. Ltd.
12. Olofsson, S. O., 1990, Applied Explosive Technology for Construction and Mining pp. 131-134.