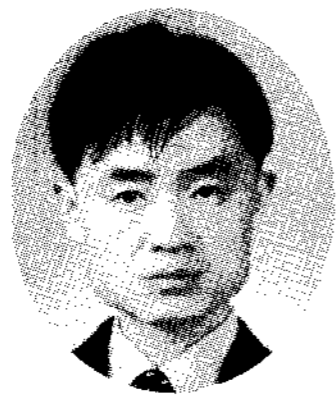


운영중인 터널의 확폭 굴착에 관한 해외 사례 분석(II)



서경원
대우건설 기술연구원
선임연구원



백기현
대우건설 기술연구원
책임연구원



김용구
대우건설 기술연구원
연구원

1. 서론

전호의 「운영중인 터널의 확폭 굴착에 관한 해외 사례 분석(I)」에서는 주로 일본에서 이루어진 터널 확폭의 각종 제원과 현황에 대해서 소개하였다. 일본에서 이루어진 확폭은 기존터널 내부에 프로텍터를 설치하여 공용차로를 보호하고 기존터널 외주를 로드헤더 등의 기계로 조금씩 굴착해 나가는 방법이 주로 적용되었다. 그렇기 때문에 확폭터널의 작업공간이 매우 좁아 슛크리트, 록볼트의 지보공 작업이나 보조공법의 적용시 공간적인 제약이 많다.

이때 기계식 굴착에 의한 확폭시공사 기존터널의 안정성에 관해 시공 경험자들은 굴착공법은 NATM이더라도 굴착방식은 기계에 의한 굴착이 많아 버력이 프로텍터의 안정에 미치는 영향은 작고, 발파를 하지 않으므로 선행 변위나 지반이완이 작아 기존터널에 미치는 영향도 작다고 한다. 위와 같은 이유와 공사의 희귀성으로 인해 확폭

공사시 기존터널의 안정성 분석이나 사전보강에 대한 자료는 극히 드물다. 국내의 경우 도심부에서 확폭이 이루어진다고 할지라도 풍화암 이상의 암반인 경우가 많아 기계식 굴착으로는 시공성 및 경제성이 떨어질 것으로 판단되며, 발파를 이용한 굴착이 이루어질 것으로 예상된다. 이 경우 기존터널 및 지상·인접구조물의 안정성이 중요한 요소가 될 것이다.

본문에서는 확폭공사가 수행된 수 개소의 터널에서 분석된 기존터널의 안정성 분석과 보조·보강공법의 적용을 소개하고자 한다.

2. 터널확폭시의 지보시스템 및 보조공법

표-1에는 수집한 터널확폭 자료중 터널정보, 지반정보, 지보정보가 명확히 기재된 15개소의 지보구조 및 보조공법을 정리하여 나타내었다.

2.1 지보시스템

먼저, 표-1의 확폭터널은 시공연장이 비교적 짧고 토 피고도 50m 이하에서 시공된 경우가 많아 연암이하의 지반으로 추정되며 다양한 암종의 지반에서 수행된 것을 알 수 있다. 각 현장의 지반 물성값은 명시되어 있지 않지만 단편적으로 소개된 문헌과 암종 분포상 상당히 풍화가 진행된 지반인 것으로 추정할 수 있다.

이때 지보시스템은 신설터널과 마찬가지로 숏크리트, 록볼트, 강아치공이 주가 됨을 알 수 있다(표-1). 특히 록볼트는 확폭터널에서도 주지보재로서의 역할이 크며, 시공은 좁은 공간에서 작업이 이루어지므로 경사볼트를 채용하고 있는 곳도 있으며 길이가 짧은 것을 연결하여 시공하는 경우도 있다. 지반이 견고한 경우에는 강아치공을 생략하는 경우도 있으며, 숏크리트는 15~30cm까지 타설한 현장이 많다.

즉 기존터널의 확폭시에도 신설터널의 지보시스템과 유사하며 단지 좁은 공간에서 작업이 이루어지기 때문에 기존공법의 시공성을 향상시키는 노력과 적절한 작업 프로세스를 구축하는 것이 중요함을 알 수 있다.

2.2 보조공법

확폭터널의 보조공법에 관해서는 전호에서도 간략히 언급하였지만 포어폴링과 록볼트가 주로 사용되고 있으며, 극히 연약한 지반에서는 신설터널과 마찬가지로 측벽 혹은 상부에서 선진도갱 공법이 이루어지는 경우가 많다. 이외에는 신설터널과 비슷하나 표-1의 F, H터널은 프로텍터를 설치하기 전에 기존터널의 라이닝에서 배면 지반 쪽으로 록볼트를 타설해서 선행보강을 해 놓은 상태에서 확폭한 것이 특징이다. 또한 G터널의 경우처럼 특별한 보강없이 주변을 확폭하는 경우도 있다. 각 터널의 지반 조건, 보강공법 및 보조공법의 주요 제원은 표-1과 같다.

2.2.1 록볼트를 주 보조공법으로 사용한 예

그림-1에는 록볼트를 주 보조공법으로 사용한 확폭터널의 지보패턴을 나타내었다. 확폭터널의 제원은 다음과 같다.

- 기존터널 시공년도 : 1950~1953년
- 확폭터널 시공년도 : 1989~1989년
- 지보공 : CII, DIII
- 숏크리트 : t=10cm(CII), 20cm(DIII)
- 록볼트 : L 3.0m×8본/단면
- 보조공법 : 기존터널의 배면에 주입한 모르타르, 사전 보강 볼트 L 3.0m×@0.6m, ctc 1.5m

2.2.2 포어폴링을 주 보조공법으로 사용한 예

그림-2에는 포어폴링을 주 보조공법으로 사용한 확폭터널의 지보패턴을 나타내었다. 확폭터널의 제원은 다음과 같다.

- 기존터널 시공년도 : 1939년
- 확폭터널 시공년도 : 1998.03월~1999.08월
- 지보공 : H-200@1.0m
- 숏크리트 : t=25cm
- 록볼트 : L 4.0m×4본/단면, ctc 1.0m
- 보조공법 : 포어폴링 L 3.0m×@0.6m, 17본/단면, ctc 1.0m

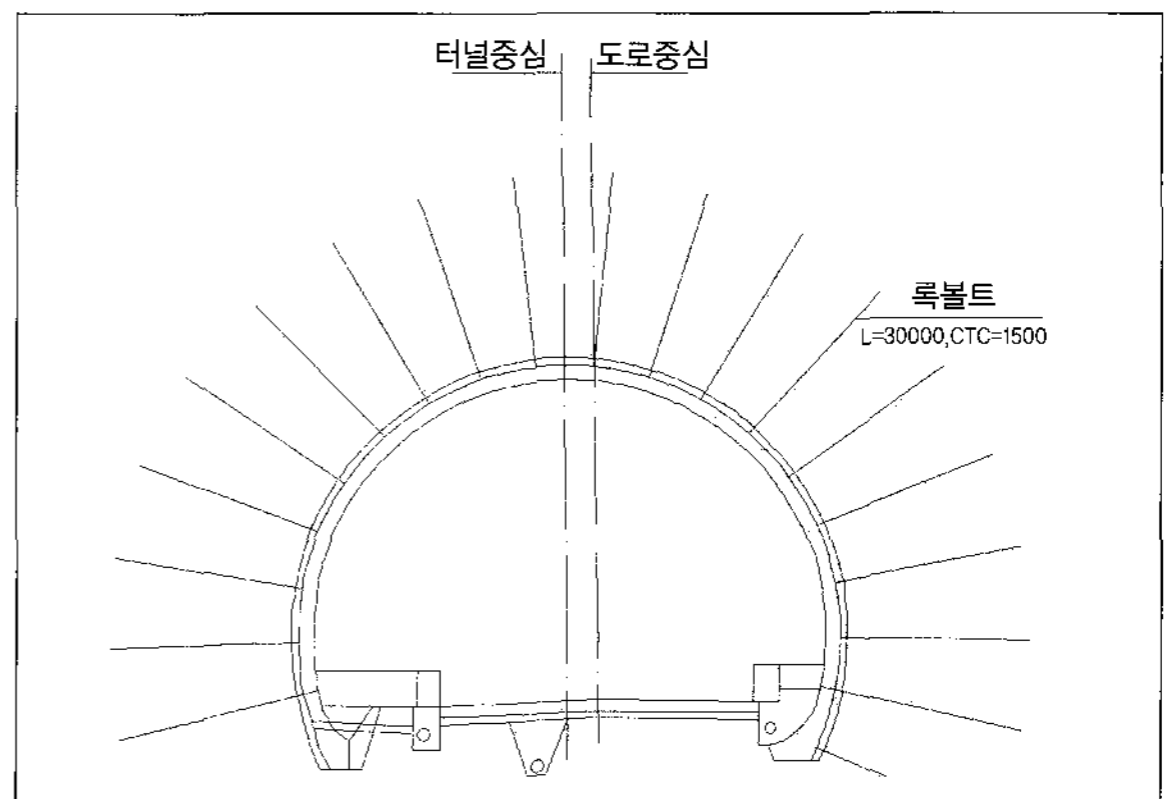


그림 1. 록볼트를 주 보조공법으로 한 신설터널 표준패턴도

표 1. 지보구조 및 보조공법

터널명	연장(m)	최대 토포고(m)	신설 단면적(m ²)	암종	시공	지보상태	보조공법
A 터널	34.5	-	75.0	화산각력암, 화산쇄설암	NATM(상부선진)	표준지보(C I 해당)	지반개량공(천단부)
B 터널	40.0	9	56.8	중생대 변성대의 강풍화 화강암(마사토화 됨)	재래공법 (중단도강, 상반선진)	숫크리트 t=20cm, 강지보 H150	
C 터널	55.0	20	54.9~58.8	녹색편암	NATM(상부선진)	표준지보(C II, D III), 축벽부만 록볼트 시공	포아폴링(부분적으로 우레탄 주입)
D 터널	56.0	23	75.3	제3기 퇴적암인 이암	NATM(상부선진)	표준지보(D III), 단 록볼트는 수평으로 한쪽에 2본 설치	포아폴링
E 터널	80.0	15	56.0	응회질사암, 역암의 호층	NATM(3분할시공)	표준지보, D I ~ D III의 패턴볼트(인력시공+연결볼트)	갱구부 포아폴링
F 터널	97.0	40	66.0	애추퇴적암, 응회암	NATM(-)	표준지보, 록볼트는 천단부 L=3.0m, 40°의 경사타설	신행볼트(천단부)
G 터널	97.5	50	74.9	제3기 퇴적암, 사암(qu=10MPa)	재래공법 (상반선진, 링컷)	표준지보(재래지보 때문에 볼트 없음), 강지보(H150@0.75~1.0m)	특별히 없음
H 터널	107.5	30	60.8	안산암질응회각력암(qu=13.5MPa) 안산암력(qu=60~80MPa)	NATM(상반선진)	표준지보(C II, D I, E), 강지보(H125@1.0m), 숫크리트 t=15~20cm, 록볼트(패턴볼트)L=4.0m(인력시공+연결볼트)	신행볼트(천단부)
I 터널	124.0	30	105.0	제3기 사암, 이암의 호층(qu=40MPa)	NATM(축벽도강선진)	표준지보(D I), 강지보(H200@0.75m)	축벽도강선진, 전구간 포아폴링
J 터널	142.0	20	66.33	제3기 신선세 세류사암	NATM(축벽도강선진)	강지보(H200), 숫크리트 t=25cm	축벽도강선진 전구간 포아폴링
K 터널	181.0	-	56.0	제3기 신선세의 응회암(qu=0.3~0.8MPa)	NATM(상반선진)	강지보 없음, 숫크리트와 록볼트만으로 지보	
L 터널	225.0	-	38.3	사암	NATM(-)	지보불명확(C, D), 인력시공+레그에 의한 연결볼트	
M 터널	265.0	-	65.2	점판암을 기반암으로 하며 상부에 화산역층, 응결응회암, 단구퇴적물	NATM(상반선진)	강지보(H200), 숫크리트 t=30cm 보강볼트 L=6.0m@1.0m	분기부에 록볼트 보강
N 터널	283.8	-	88.1~187.6	화강섬록암	NATM(상반선진)	숫크리트 t=15~20cm, 록볼트 L=4.0m(@1.2~1.5m)	
O 터널	1,440	-	-	사암·이암호층, 혈암	NATM(상반선진)	강지보(H200@1.0), 숫크리트 t=25cm, 록볼트 L=4.0m, 서쪽은 지반개량으로 록볼트 샌라	주입식포아폴링

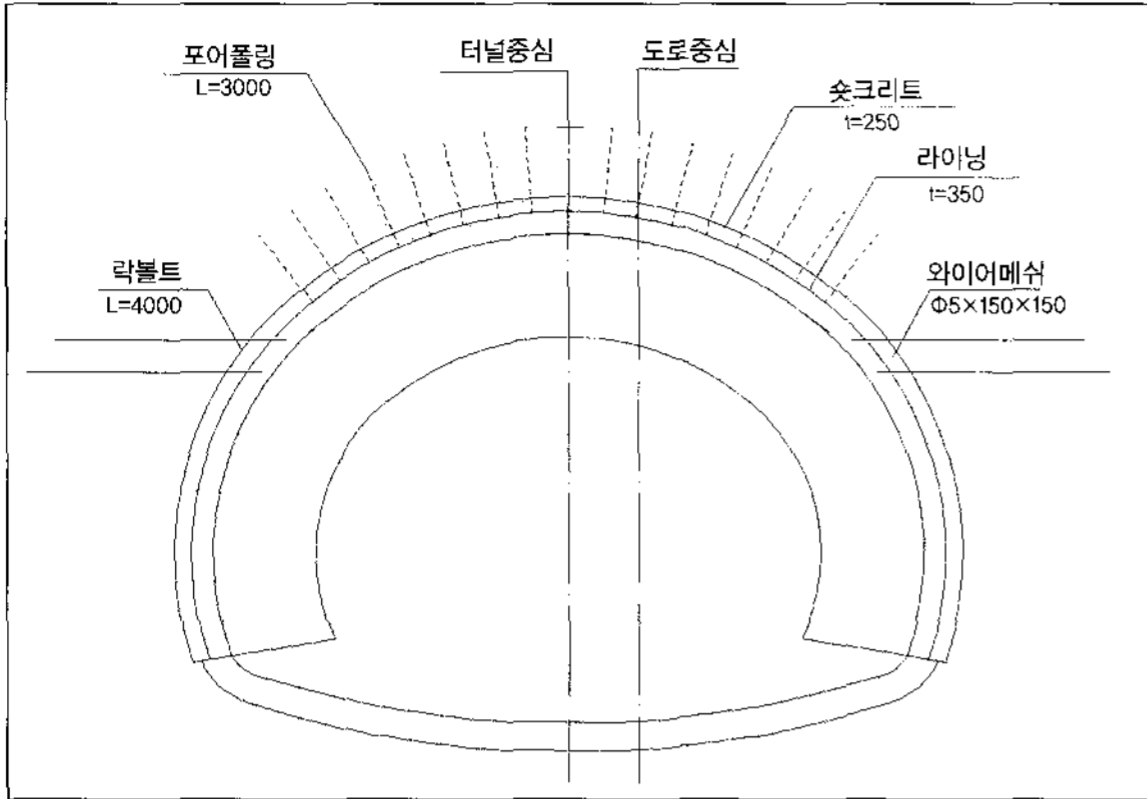


그림 2. 포어폴링을 주 보조공법으로 한 터널

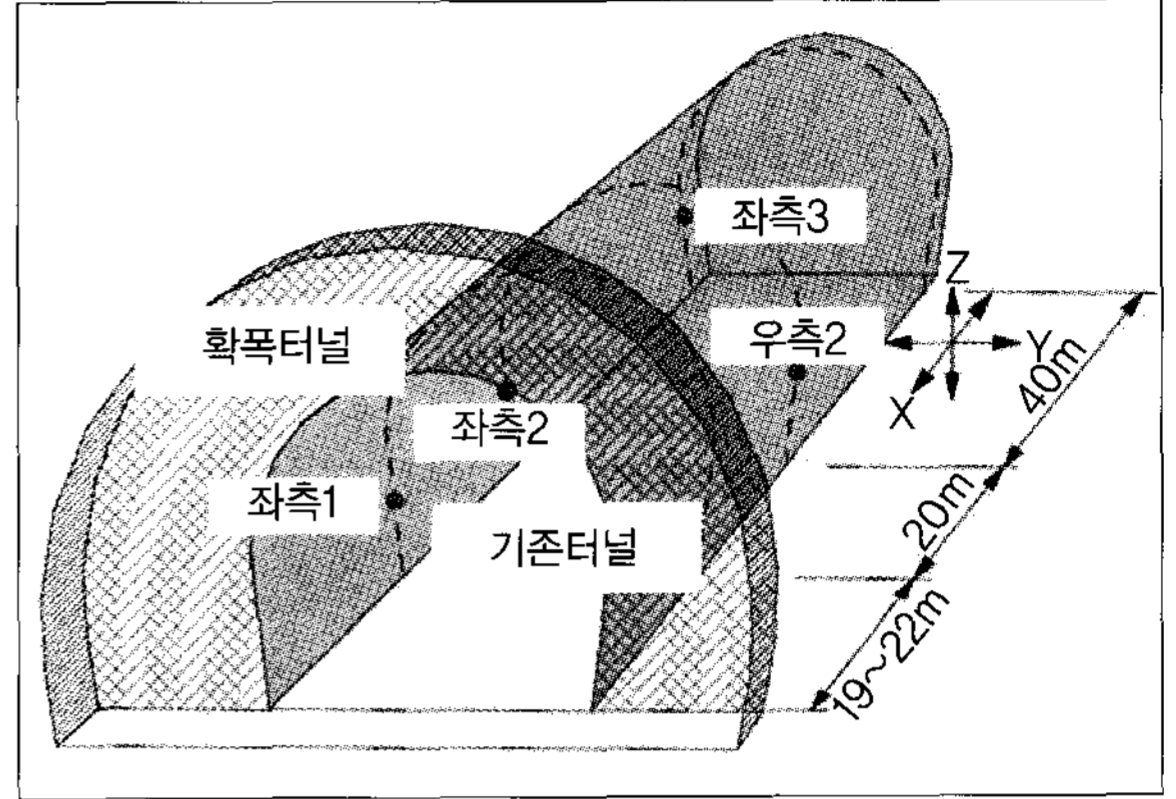


그림 3. 발파진동 계측 위치도

3. 발파에 의한 터널 확폭시 기존터널의 안정성 분석

지금까지 대부분의 확폭은 전호에서 소개한바와 같이 기존터널내로 프로텍터를 삽입하고 주변을 전용기계 혹은 일반 굴착장비로 조금씩 긁어내는 형식의 확폭이 진행되었다. 그러나 국내의 경우는 도심지라도 지반이 연암이상인 경우가 많아 기계식 굴착으로는 경제성 및 시공성이 불리할 것으로 예상되며 불가피하게 발파를 이용한 확폭이 필요할 것으로 예상된다. 본 고에서는 발파를 이용한 확폭시 기존터널의 안전성 분석을 계측한 예를 소개하고자 한다.

3.1 터널 기본 정보

Isai터널은 연장 416m, 폭 4.1m로서 터널 내에서 교차통행이 불가능하여 연장 401m, 폭 8.0m로 확장한 사례이다. 확폭시공은 주변에 광역임도가 있어 기존 교통을 우회시키고 발파에 의해 확폭하여 2004년 공사를 완료하였다. 터널 지반은 중생대 및 그 이전의 화강섬록암이 주체이며 풍화 및 균열이 발달하였고 일축압축강도는 50~100N/mm² 정도이다. 터널 확폭은 그림-3의 개념도

와 같이 기존터널을 중앙부에 두고 양측을 확폭하는 방식을 취하였다.

3.2 발파진동의 측정

발파진동은 확폭터널 막장에서 약 20m, 40m, 80m 떨어진 3개소에 측정하였다. 이때 측정위치를 고정하고 있기 때문에 측정지점까지의 거리는 굴착이 이루어짐에 따라 점점 짧아지게 된다. 측정은 터널 축방향(X), 수평종단방향(Y), 연직방향(Z)의 3 방향 변위속도이다. 최소 측정거리를 비석 및 풍속으로 인한 케이블 등의 손상을 막기 위해 막장에서 20m 이격된 지점으로 설정하였지만 실제 발파시에는 5m 정도의 위치에서도 측정 가능하였다. 발파진동의 측정위치와 측정방향을 그림-3에 나타내었다. 계측은 3회 발파에 대하여 실시하였다.

3.3 발파진동의 검토

발파진동의 계측결과 일례를 표-2에 나타내었다. 보통의 신설터널에서는 막장이 1자유면이기 때문에 심폐기에 많은 폭약을 사용하고 저항도 크기 때문에 발파진동이 커지지만, 확폭을 위한 발파에서는 장약량이 적고 막장에

표 2. 확폭터널 발파시 진동 계측 결과 사례

노관 단수	거리(m) 화약사용량 (kg)	측선좌측									측선우측		
		측점1			측점2			측점3			측점2		
		진동속도 V(kine=cm/s)			진동속도 V(kine=cm/s)			진동속도 V(kine=cm/s)			진동속도 V(kine=cm/s)		
		20.0			40.0			80.0			40.0		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
순발	1.8	0.391	0.296	0.110	0.164	0.358	0.073	0.042	0.031	0.015	0.066	0.110	0.124
DS2	2.4	0.240	0.283	0.278	0.116	0.257	0.057	0.024	0.028	0.012	0.107	0.128	0.064
DS3	2.2	0.169	0.110	0.101	0.098	0.248	0.059	0.028	0.042	0.010	0.069	0.098	0.072
DS4	1.8	0.140	0.193	0.087	0.069	0.248	0.046	0.015	0.041	0.008	0.077	0.110	0.050
DS5	0.8	0.251	0.316	0.223	0.124	0.146	0.042	0.020	0.041	0.009	0.097	0.059	0.058
DS6	1.8	0.109	0.195	0.094	0.117	0.196	0.037	0.024	0.022	0.009	0.048	0.042	0.059
DS9	0.6	0.213	0.243	0.196	0.119	0.101	0.055	0.031	0.021	0.007	0.094	0.047	0.062

이미 자유면(기존 터널)이 있어 발파진동은 표와 같이 크지 않은 것으로 나타났다.

발파진동의 예측식은 일반적으로 식(1)과 같이 표현되는 경우가 많다.

$$V = K \cdot W^\alpha \cdot D^\beta \text{ 혹은 } \log V = \log K + \alpha \cdot \log W + \beta \cdot \log D \quad (1)$$

여기서, V : 발파진동속도(cm/sec=kine), K : 발파나 지반의 조건 등에 의한 계수(40~1,000), W : 제발약량(kg), D : 폭발점부터의 거리(m), α : 폭약량에 대한 지수(0.5~1), β : 거리감쇄지수(-1~-2)이다.

발파진동속도의 계측과 회귀분석에 의해 구해진 계수 K, α , β 를 표 3에 나타내었고 회귀 그래프를 그림 4에 나

표 3. 회귀분석 결과

	X	Y	Z	전체
K	25	28	37	30
α	0.157	0.316	0.225	0.233
β	-1.598	-1.540	-1.884	-1.674

타내었다.

회귀분석결과로부터 발파나 지반의 조건 등에 의한 계수 K는 일반적인 값보다도 작고 발생하는 진동도 작은 것을 알 수 있다. 또한 거리감쇄 지수 β 는 지금까지 사용되어온 -1.5~-2.0의 범위에 있지만 연직방향(Z방향)의 감쇄가 다른 2방향보다 크고 발생하는 진동도 작다. 한편, 화약량에 대한 지수 α 는 일반적인 값보다도 작고 진동속도에의 영향은 거의 없다. 이것은 화약량이 적고 지반이나 발파에 의한 편차에 비하여 영향이 작고 명료한 차이가 없기 때문으로 생각된다. 또한 터널 축방향(X방향)의 K와 α 가 다른 2방향에 비하여 작다. 이것은 진동의 방향이 장약공의 방향과 일치하기 때문에 발생하는 진동이 작고 장약량의 영향도 작아지는 것으로 생각된다.

회귀분석 그래프로부터 보통의 범위(수 m이상)에서는 수평횡단방향(Y방향)의 진동이 큰 것을 알 수 있다. 이것은 발파가 터널 중심을 향하여 이루어지기 때문에 기존 터널의 벽면에 직각방향의 진동이 커지기 때문으로 생각된다.

새롭게 관측된 값의 95%를 포함하는(이의 진동속도를

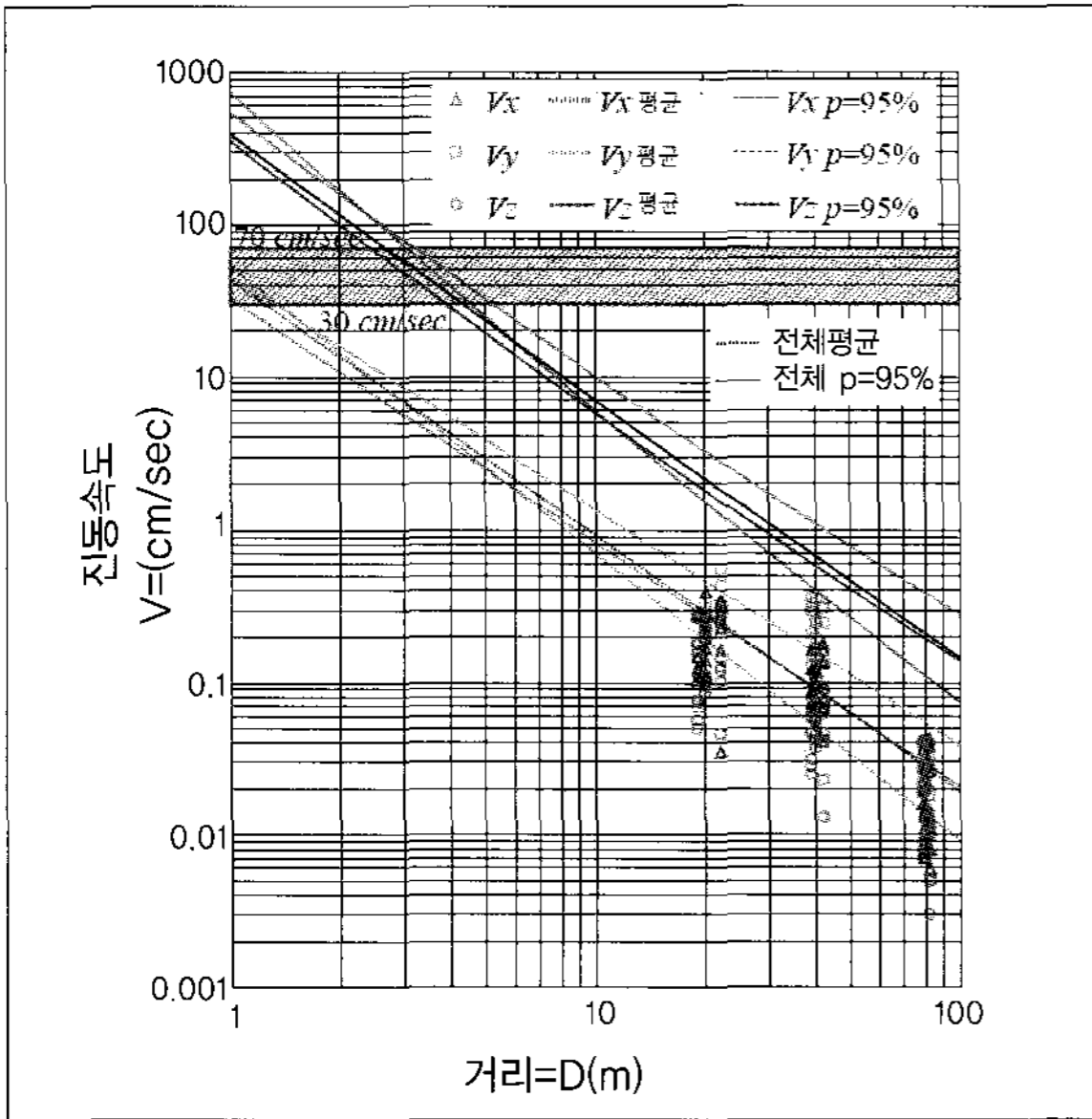


그림 4. 발파진동의 예측

범을 확률이 5%) 범위의 상한값을 그림 4에 나타내었다. 한편, 콘크리트에 크랙을 발생시키는 발파진동속도는 지금까지의 실험으로 보아 30~70cm/sec로 평가되고 있다. 이 한계값보다 막장후방 3~5m의 범위에서는 콘크리트에 크랙이 발생할 가능성이 있다. 그러나 크랙이 발생하여도 경미하고 기설터널의 안정을 해치지 않는다면 이후에 굴착되므로 아무런 문제도 되지 않을 것으로 생각된다.

3.4 발파진동이 기존터널에 미치는 영향

이번 발파진동의 계측 및 검토결과

- ① 발파 및 지반조건 등에 의한 계수(K값)가 작고 발생하는 발파진동도 작다
- ② 확폭터널에서는 기존 터널이 자유면이 되어 순발파 단발의 차이가 거의 없다.
- ③ 장약량이 작기 때문에 지반이나 발파조건 등에 의한 편차가 작아지고 장약량이 발파진동에 미치는 영향

은 명확하지 않다.

- ④ 거리감쇄 지수는 $-1.5 \sim -1.9$ 이며 특히 연직방향의 감쇄가 크다
- ⑤ 발파에 의한 진동이 기존 라이닝 콘크리트에 미치는 영향은 작고 크랙이 발행하여도 막장에서 3~5m의 좁은 범위이며 기존 터널이 불안정하게 되는 큰 손상을 받는 범위는 더욱 작다고 생각한다.

이상 발파에 의해 발생하는 진동은 작고 기존 라이닝이 순차적으로 제거되는 확폭 터널에서는 거의 문제가 되지 않는다고 생각한다. 단 라이닝 콘크리트의 노후화 등에 의해 이미 어떤 손상이 있는 경우에는 보다 넓은 범위에 영향을 미칠 수도 있다고 생각한다.

4. 터널확폭에 따른 계측 : 토노미네 터널(일)

4.1 지형 및 지질

가나가와현(일) 하코네에 위치하고 있으며 화산활동으로 생성된 1,000m내외의 산들과 중앙화구들로 이루어졌다. 지층은 화산의 일차퇴적물로 이루어졌으며 상부는 화산력응회암층이며 하부는 응회각력암층으로 이루어졌고 대상터널인 토노미네 터널(철도터널)은 상부의 화산력응회암층을 관통하고 있다.

4.2 확폭계획

- 확폭구간 : 25m
- 내공단면 : $20\text{m}^2 \rightarrow 50\text{m}^2$
- 굴착공법 : 상부반단면 선진공법
- 공법 : NATM
- 공사기간 : 1990.03~1994.07

표 4. 확폭터널의 시공순서

① 방호공 설비	② 상반굴착공	③ 상반 라이닝 콘크리트	④ 하반굴착 및 측벽콘크리트	⑤ 방호공 철거

4.3 시공순서

확폭터널의 시공순서는 아래 표 4와 같이 ① 기존터널의 방호공 설치, ② 상반굴착+지보공, ③ 상반라이닝 콘크리트, ④ 상반굴착+지보공+하반 라이닝 콘크리트, ⑤ 방호공 철거 및 해체의 순으로 이루어졌다.

4.4 방호공의 설계

시공중 열차의 안전운행을 확보하기 위해서는 단선터널내의 건축한계를 확보할 필요가 있으며 터널내에 방호공을 설치하였다. 방호공의 설계조건을 아래에 나타내었다.

- 토피고 하중 : 2.0m
- 토사 단위체적중량 : 20tf/m³
- 내부마찰각(ϕ) : 20°(추정)
- 방호공의 설치간격 : 1.0m(H125×125×6.5m×9)
- 록볼트 : ϕ 25mm, L=2.0m

여기서 록볼트에는 다음의 두 가지 효과를 기대하였다. 우선, 확폭터널의 상반굴착시에 하부지반의 보강이며, 다른 하나는 방호공과 지반의 일체화를 기대하였다.

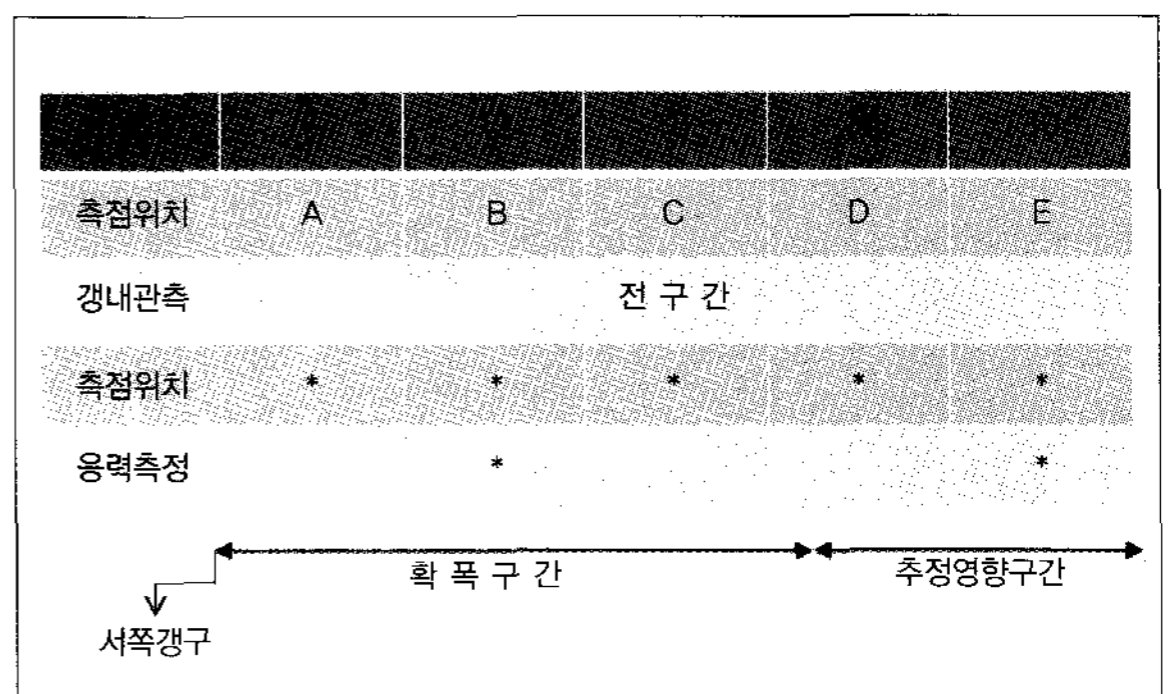


그림 5. 계측공 배치도(응력 및 내공변위)

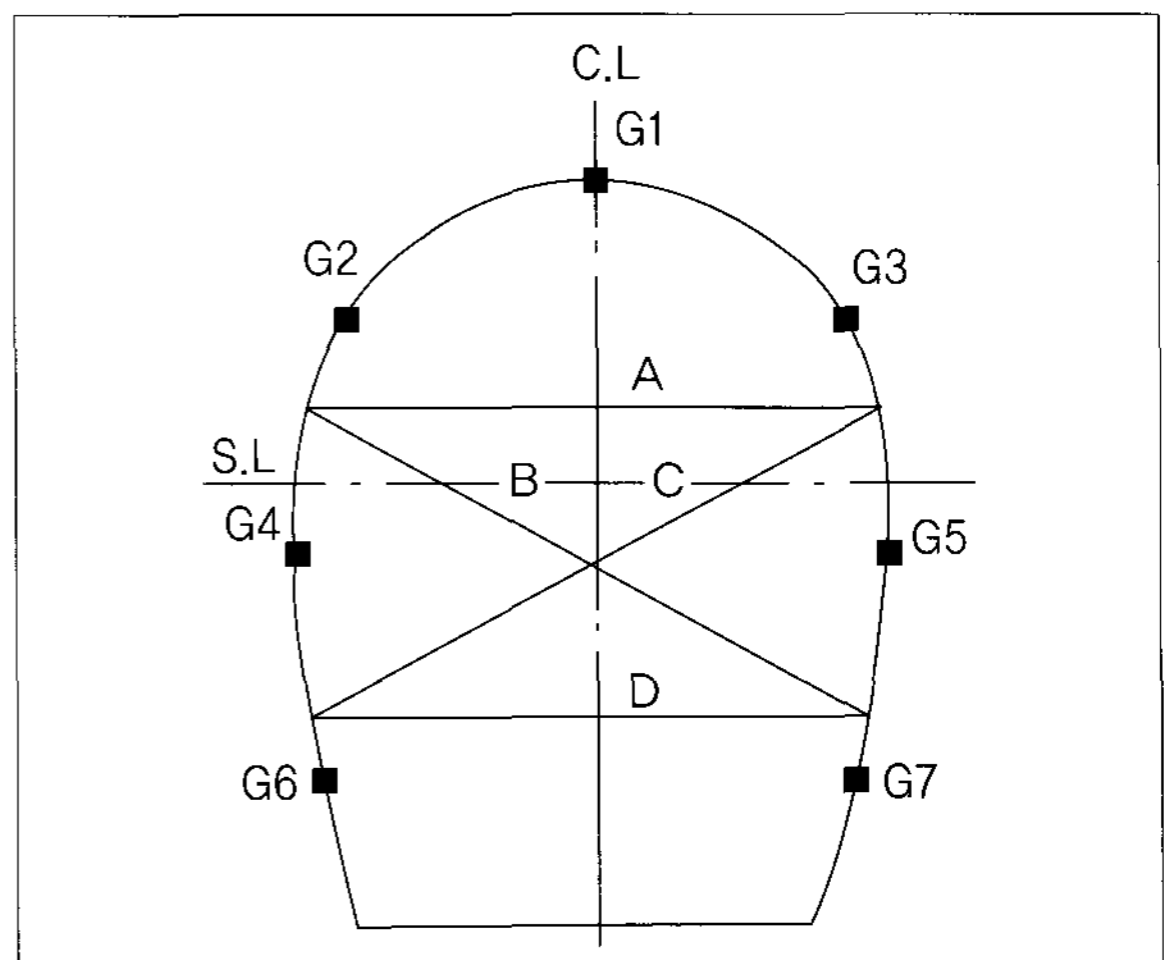


그림 6. 계측배치 단면도

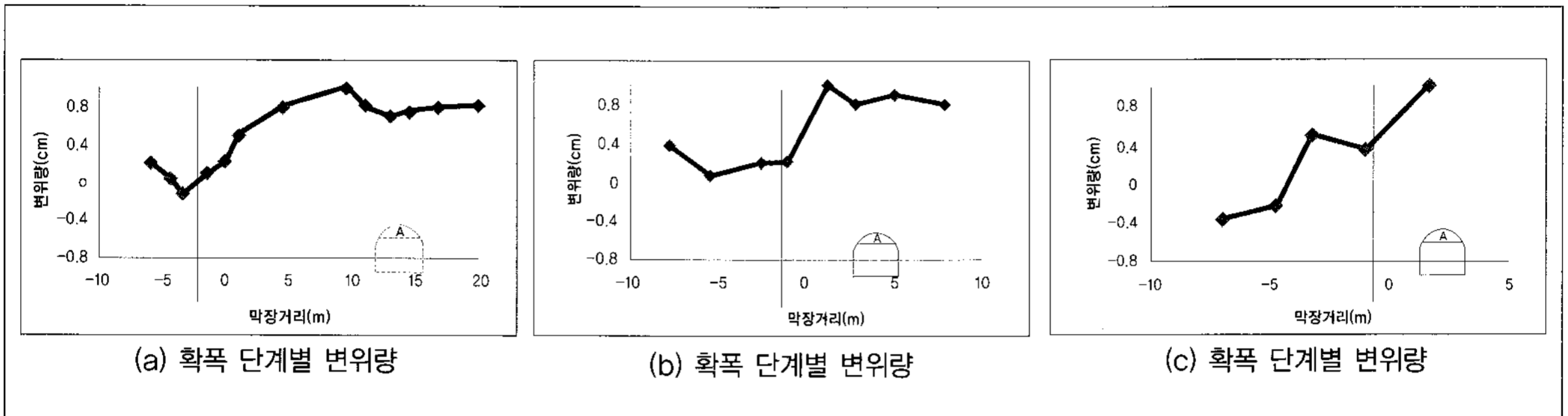


그림 7. 확폭단계별 변위량(+ : 인장, - : 압축)

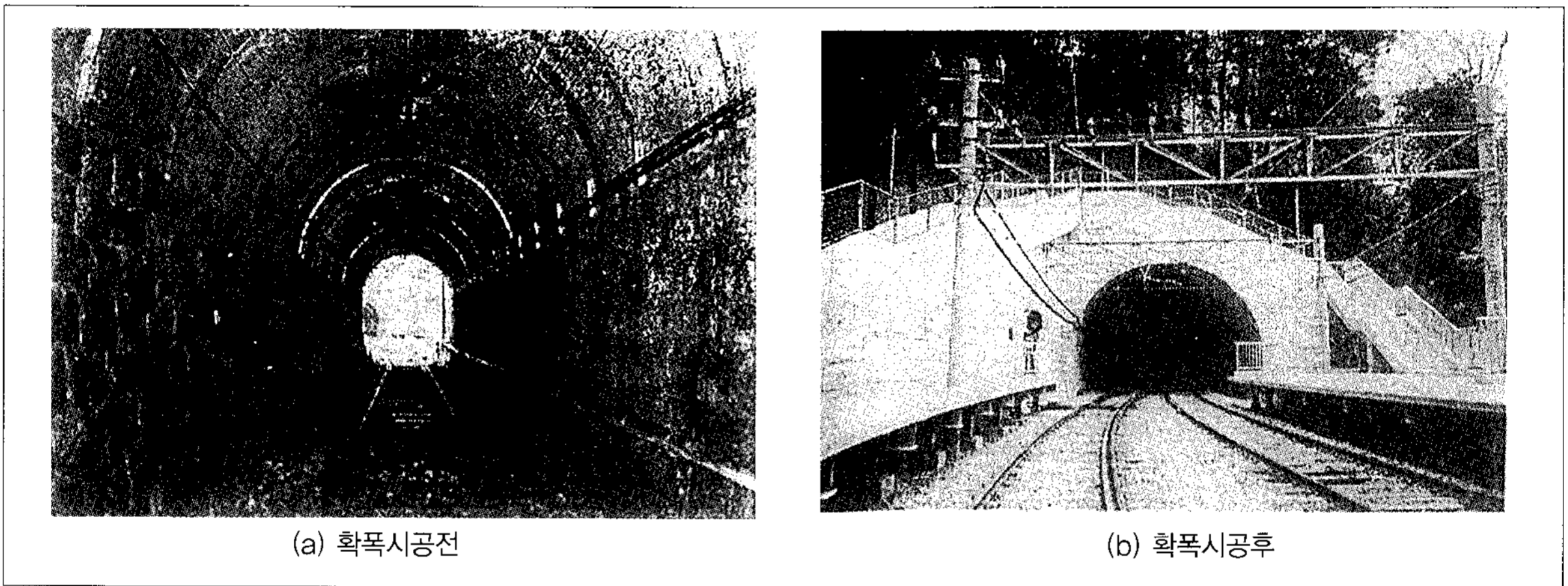


그림 8. 토노미네 터널의 확폭시공 전·후

4.5 계측계획

그림 5와 6에는 확폭구간의 계측공 배치도와 변위계측을 위한 배치도를 나타내었다. 계측 구간 30m에서 막장 관찰은 매 막장 실시하며, 내공변위는 5개소, 응력은 2개소에서 측정하였다.

4.6 계측결과

그림 7은 터널확폭과 동시에 계측된 기존터널 천단부의 수평변위를 나타내었다. 막장전방에서는 인장의 변위가 발생하고 있으며 후방에서는 압축의 변위를 나타내고

전체적으로 10mm 이내의 범위에서 발생하고 있다.

위의 과정에 따라 확폭시공된 터널의 모습을 그림 8에 나타내었다.

5. 맺음말

본 고에서는 전호에 이어 확폭터널시 기존터널의 안정성에 관한 시공사례를 소개하였다. 국내의 경우 도심지의 옛 터널에서 확폭이 이루어진다 해도 풍화암 이상의 지반과 조우할 가능성이 클 것으로 예상되어 기계식 굴착으로는 시공성, 경제성을 확보하기 어려울 것이며 발파에 의

한 굴착이 이루어질 것으로 예상된다. 이 경우 발파에 의한 기존터널의 안정성과, 인접터널에의 영향, 보조공법에 대한 사전연구가 필요할 것으로 생각한다.

확폭터널의 대부분이 기계식 굴착으로 이루어져 왔지만 본 고에서 소개된 터널의 경우 발파로 인한 시공에 있어 기존터널의 라이닝 및 변위계측 결과 안전한 시공을 하고 있어 차량운행을 유지하면서 확폭하는 기술이 적용 가능함을 알 수 있다.

참고문헌

1. 김동규, 정호섭, 공용중인 터널 확폭에 의한 기능향상, 한국지반공학회지, Vol.23, No.3, pp.14-20, 2007
2. 백기현, 노종륜, 공영중인 터널의 확폭 시공사례(오쿠라터널), 대한토목학회정기학대회, 2007
3. 토목연구소(일), 기존 터널의 단면확대 공법 개발에 관한 공동연구보고서, 2003.
4. 桜沢 雅志, 확폭터널의 발파진동에 관한 연구, 토목학회 제57회 연차강연회, 2002
5. Masayuki SUZUKI, 활선개축에 의한 도로터널의 시공, 터널공학보고집 제15권, pp.153-160, 2005.12