

도심지 NATM 터널 굴착시 적용된 미진동발파 공법 개선사례

A Case of the Alternative Method to Improve the Ambient Vibration Blasting Method Applied NATM Tunnel Construction in Urban Areas

이종윤¹⁾, Jong-Yoon Lee, 황연수²⁾, Yeon-Soo Hwang, 최학용³⁾, Hack-Yong Choi, 배효진⁴⁾, Hyo-Jin Bae

¹⁾ 한국토지주택공사 과장, Assistant Manager, Korea National Land Housing Corporation

²⁾ (주)이산 이사, Director, ISan Corporation

³⁾ (주)태영건설 부장, Manager, TaeYoung E&C

⁴⁾ 예탄ENG기술사사무소 대표이사, CEO, YeTan Engineering Corporation

SYNOPSIS : Various difficulties have been increased in the construction of public structure; like the road in the overcrowding urban area, because of civil complaint, cost and period of construction. In order to overcome these social problems, the tunnel has been planned the road design. Despite the resolution, there are many technical problems when constructed near facilities. The design of new tunnel below the existing service reservoir is applied to the ambient vibration blasting using Plasma. The result of test blasting was exceeded the standard ("2kine"). So it was considered a countermeasure for the vibration reduction applied to change the controlled blasting method, reduce the charge, add the pre middle horizontal hole in the cut blasting site, and so on. The result was satisfied the standard. Accordingly, if the quality of blasting process can be managed well, the application of this alternative method is highly effective one. Also, based on cost analysis between two methods, the alternative method is very competitive.

Keywords : NATM, Plasma, Controlled Blasting, Cut Blasting, Ambient Vibration Blasting

1. 서론

최근 도심지내 도로계획 수립시 환경에 미치는 영향의 최소화와 토지보상에 따른 사업비 관련 경제성을 중점 고려한 터널이 다수 계획되고 있다. 이러한 터널의 경우 도시형성이후 설치되어 중요구조물과 인접하여 시공되는 사례가 빈번하다. 본 사례와 관련된 서부우회도로 개설공사의 화산터널(표1)도 배수지 하부를 통과하는 등 인접구조물을 근접 통과토록 노선이 계획(그림1, 2)되어 실시설계에 플라즈마를 이용한 미진동발파가 반영되었다.

본 사례에서는 화산터널의 배수지 하부 통과를 위해 설계에 적용된 플라즈마 전기충격 파암 공법을 시험발파를 통한 진동저감 방안 및 현장여건을 고려한 시공상의 문제, 안정성, 경제성을 종합적으로 검토하여 적정하고 경제적인 대안발파공법으로 변경하여 터널 굴진함으로써 안전하고 경제적으로 터널을 굴진 완료한 미진동발파 공법 개선사항을 소개하고자 한다.

표 1. 화산터널설계 개요

구분		상행선	하행선
연장(m)		330(280)	370(320)
갱문 형식	시점	벨마우스	
	종점		
터널굴착공법		NATM	
종단경사(%)		+1.6726	-1.6852
환기방식		자연환기	



그림 1. 화산터널 및 인접 구조물 현황도

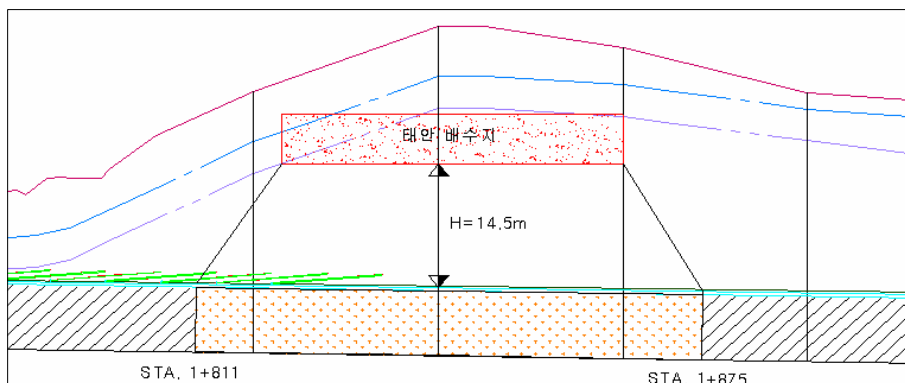


그림 2. 배수지 하부 미진동발파구간(L=64m) 현황

2. 인접구조물(배수지)를 고려한 터널 실시설계

2.1 인접구조물(배수지) 현황

태안배수지는 태안지역 주민들의 상수공급을 위해 설치한 지하체 중요시설이며, 당 현장 STA.1+823~1+860에 위치하여 하부에 위치한 터널과의 이격거리가 최단거리 14.5m로 터널발파굴착에 따른 영향이 우려되어 별도의 검토와 시공시 보안건물로써 각별한 현장관리가 요구되었다.

2.2 실시설계

배수지라는 구조물의 용도를 고려한 피해영향을 최소화하기 위해 배수지를 관리하고 있는 지자체와 실시계획 인가 협의시, 비록 배수지가 내진설계가 되어있으나 기능수행수준이 아닌 붕괴방지수준 개념의 내진설계이며, 콘크리트 구조물의 수밀한 상태가 유지되어야 한다는 관리부서의 요구조건과 콘크리트 구조물에 대한 진동기준 적용사례 등을 종합적으로 고려하여 설계시 진동허용기준치 2kine 이하로 계획하였다. 특히 태안배수지 직하부 수원방향 STA.1+811.00 ~ STA.1+875.00(64m) 구간을 GNR, SUPER WEDGE, 겔과쇄 공법 및 미진동 굴착공법 등을 비교 검토하여 공비 등에서 우수한 미진동 굴착공법을 그림3 및 표2와 같이 적용하였으며, 시공시에는 사전균열조사 및 특별관리계측 계획을 수립하여 배수지의 안정과 터널의 안정, 시공시의 문제점을 사전에 방지코자 하였다.

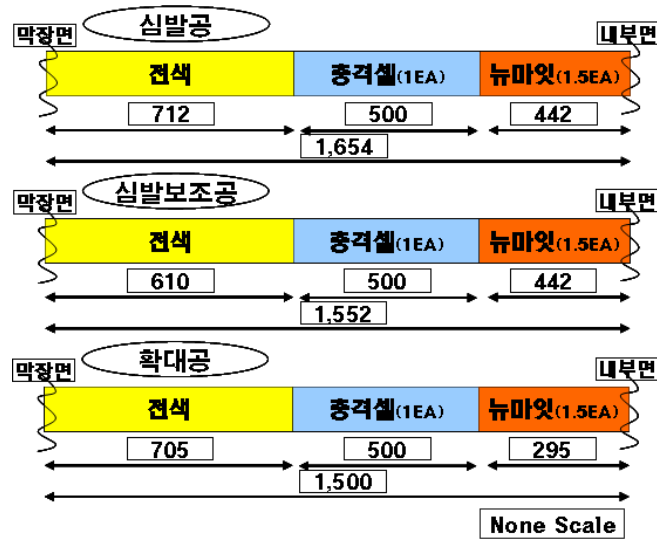


그림 3. 플라즈마 발파 설계 장약 단면도(단위:mm)

표 2. 플라즈마 발파 설계현황

Type 구분	연장(m)	굴진장
Type 4-1	46	1.2m
Type 5-1	18	1.0m
소 계	64	

2.3 시험발파 결과 및 원인분석

2.3.1 시험발파 과정 및 결과

실시설계에서 제시한 바와 같이 시험발파를 실시하였다. 표3의 시험발파 과정 및 결과를 참고하여 플라즈마(충격셀)와 에멀전(폭약)의 수량을 감소시켜 시험 시행하였으나 배수지와 거리감소에 따른 합성 성분 계측치가 상승추세로 소요의 기준치인 2kine을 초과하여 플라즈마와 에멀전의 혼합사용에 대한 문제점이 제기되었으며, 플라즈마와 에멀전의 사용량 축소에 따른 발생 버력 크기 증가로 인한 소할비용 상승 등 시공 및 경제성 문제가 있어 대안발파의 필요성이 제기되었다.

표 3. 플라즈마와 폭약을 혼합 적용한 시험발파 과정 및 결과 (배효진, 2009)

회차	충격셀(kg)		에멀전(kg)		단일성분 계측값 (kine)	계측기와 이격거리	합성성분 계측값 (kine)	진동 기준값 (kine)	평가
	설계	시험	설계	시험					
1	81.75	49.35	50.45	50.45	1.972	26	2.038	2.0	N.G.
2	81.75	43.85	50.45	50.45	2.162	30	2.385		N.G.
3	81.75	42.05	50.45	31.70	2.169	29	2.416		N.G.
4	81.75	28.75	50.45	20.50	2.447	27	2.638		N.G.

2.3.2 시험발파 결과에 대한 원인분석

기준치를 초과한 원인은 지반 및 구조물의 주파수 특성(윤여원; 김상훈, 2002) 등 여러 가지가 있을 수 있으며, 수치해석을 통한 시뮬레이션이나 다양한 조건하에서 시행된 추가적인 연구가 필요하나, 동 시험발파에 한정하여 원인을 분석한다면 설계시 적용된 바와 같이 발파개념의 화약인 에멀전과 파쇄개념의 플라즈마인 충격셀의 혼합(그림 3)에 따른 플라즈마의 기능저하가 그 원인으로 판단된다. 일반적으로 플라즈마는 노천발파 시 소음진동 저감을 위해 단일하게 사용되나, 터널에 적용된 화약과 혼합된 플라즈마(그림3)는 전기충격 후 고온 팽창(그림4)해야 하지만 같은 공내 폭약 발파의 간섭으로 제 기능을 발휘하지 못한 것으로 추정되며(그림5), 플라즈마와 화약량 일부감소에도 불구하고 배수지와 이격거리가 근접됨에 따라 합성성분 계측값이 증가됨에 주목하여 화약의 단일사용과 사용량 감소 등을 대안발파의 기본개념으로 판단하였다.



그림 4. 플라즈마 파쇄 메카니즘

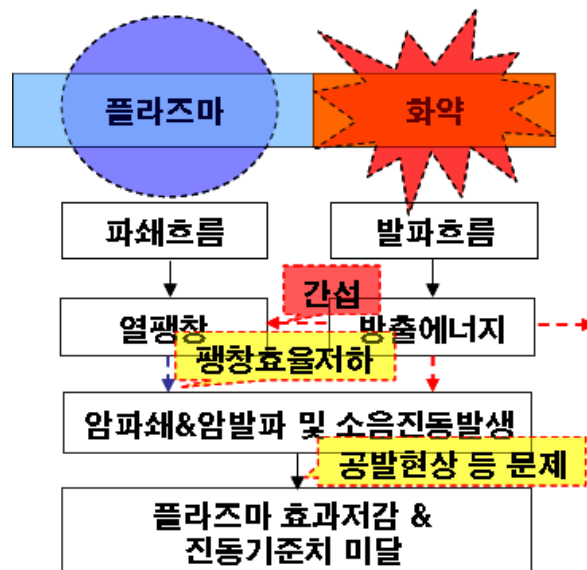


그림 5. 터널발파시 플라즈마와 화약 병행 사용에 따른 문제점

3. 인접구조물(배수지)를 고려한 대안발파

3.1 대안발파의 일반적용 및 기대효과

시험발파 결과에 따른 실시설계의 미진동발파공법 개선을 위해 표4 및 그림6, 그림7과 같이 일반원칙을 정하여 기준치를 준수코자 하였다. 대안발파는 현장경험에서 얻어진 소음진동 유발요인을 분석하여 대표적인 두가지를 적용하였다. 첫째, 심발발파의 목적이 자유면 증가에 따른 화약량 감소효과를 얻기 위함임에 따라, 최근 PLHBM 공법 (선대구경수평보링 발파공법) 등이 소개(우준명, 2002)되고 있음에 주목하여(표5), 화산터널의 연장에 따른 경제성 등을 고려하여 별도의 장비 도입없이 현장에서 가용한 장비인 3-Boom의 강관다단그라우팅용 착암기를 이용해 직경 105mm의 무장약 천공을 심발발파에 적용함으로써 발파효율을 증대코자 하였다.

둘째, 소음진동의 주요원인은 화약에 있으며, 화약량에 의해 소음진동의 크기가 결정되어(표3), 공당 및 지발당 화약량을 감소코자 하였고, 대표적인 제어발파 공법을 표6에서와 같이 SmoothBlasting에서 LineDrilling으로 변경하여 소음진동을 감소코자 하였다.

표 4. 대안발파의 일반 적용사항

적용사항	기대사항
1) 심발부 무장약공 천공	심발부 자유면 용적을 크게하여 심발부 진동 감쇄효과
2) 외곽부 라인드릴링 천공	라인드릴링 천공에 따른 진동의 차단효과 및 스무스브라스팅에 비해 화약량 감소
3) 천공장 축소	공당 화약량 감소 효과
4) 동시 제발 공수 축소	지발당 화약량 감소 효과

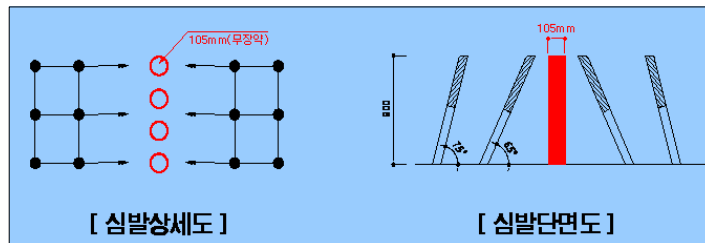


그림 6. 플라즈마 발파 설계 장약 단면도

표 5. 심발발파 적용을 위한 공법비교

구 분	현장대안발파	PLHBM
장비	3Boom 강관다단용 착암기	선대구경수평 보링장비
천공경	D105mm	D362mm or 445mm
시공비	상대적 저가	상대적 고가

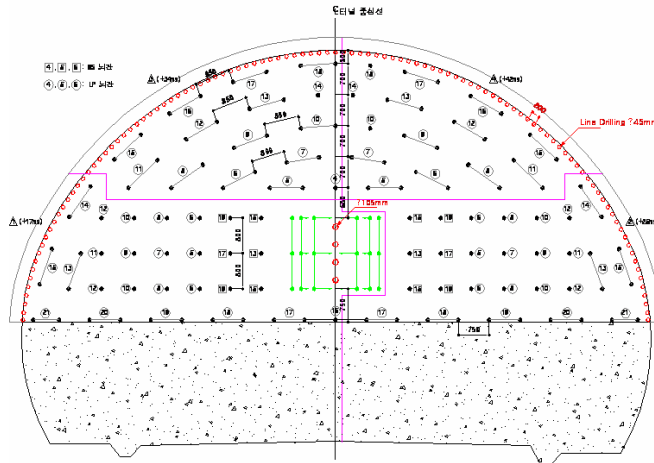


그림 7. 대안발과 단면도

표 6. 제어발과 비교 및 적용

구 분	SmoothBlasting	LineDrilling
	실시설계	대안발과
외곽공 장약	정밀폭약	무장약
외곽공 천공수	小	多
단점	정밀폭약 사용에 따른 소음진동유발	천공비용 과다
장점	장약 용이	소음진동 小
적용		◎

3.2 대안발과 적용결과

앞에서 검토한 바를 대안발과에 적용하여 현장에 적용한 결과 표7과 그림8과 같이 기준치를 만족하였다. 이는 화약량 감소와 심발발과 효율증대에 따른 결과이며 별도의 장비도입 없이 현장장비를 그대로 이용한 의미있는 결과이기도 하다.

표 7. 대안발과 적용 결과

회차	발과지점	계측이격 거리(m)	기준치 (kine)	계측값 (kine)	평가	분석값 (kine)
1	STA.1+865	20.5	2.0	0.849	OK	1.564
2		22.8		0.519	OK	
3		28.6		0.229	OK	
4		36.3		0.184	OK	

표 8. 실제 대안발파 결과

회차	발파지점	계측이격 거리(m)	기준치 (kine)	계측값 (kine)	평가	분석값 (kine)
1	1+853	30	2.0	0.531	OK	1.564
2	1+849	26		0.565		
3	1+840	20		1.069		
4	1+832	20		0.884		
5	1+827	20		1.071		
6	1+820	24		0.855		

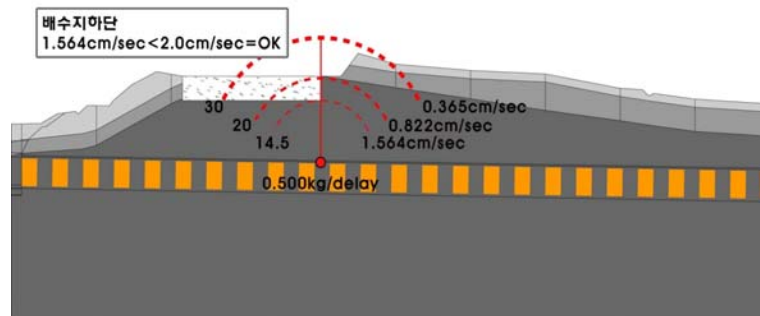


그림 8. 대안발파 단면도

3.3 대안발파 경제성 분석

설계에 반영된 플라즈마를 이용한 미진동발파공법을 현장여건을 고려한 대안발파로 변경한 결과 기준치인 2kine을 만족했을 뿐만 아니라, 표9과 같이 경제성분석 결과 m당 당초 설계대비 약 70%의 원가절감이 가능하여 약 1.2억원의 공사비 절감이 가능하였다. 그러나 미진동발파 구간이 길 경우 라인드릴링과 심빼기부 무장약 공에 의한 천공 시간, 천공대가 증가에 따른 경비 증가가 예상되므로 연장에 따른 경제성 분석을 통한 대안발파의 적정성 검토가 필요하다.

표 9. 미진동발파 (설계 VS 대안) 비교 및 적용 (단위:천원)

구분	적용 연장(m)	m당 환산단가	개략 공사비	증감
표준단면 (플라즈마)	64	5,770 [73.06%]	379,335	감122,470
대안단면 (대안발파)		4,013 [86.53%]		

4. 맺음말

본 사례의 터널이 도시의 중요시설인 배수지 하부를 통과하여 발파굴착으로 인한 배수지 구조물 변형 발생시 단수 등의 2차적인 피해가 발생하므로 미진동발파공법의 선택과 적용이 공사 성패를 가늠하는 척도로써 기준치 준수를 위한 대안발파 적용이 불가피하였으며 대안발파 적용에 따른 결론은 다음과 같다.

첫째, 기준치를 준수하고 원가를 절감할 수 있었다.

둘째, 터널굴착시 플라즈마와 화약의 혼합적용은 발파효율이 저감될 수 있으므로 적용에 신중해야 하며, 저감의 정도 및 특성에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

셋째, 별도의 장비투입없이 현장에 있는 장비인 3Boom을 이용하여 시공성 및 막장면 안정성을 도모하였으며, 선중구경수평보링공법으로 심발발파의 효율 증대 (화약량 및 진동 감소)가 기대되며 천공, 장약 및 발파진동 저감효율 등에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

넷째, 제어발파의 라인드릴링으로의 변경적용도 화약량 축소 및 발생 버력 크기 감소 등에 따라 발파진동저감과 시공효율 증진에 효과적이거나, 천공에 따른 시간소요의 문제점을 고려하여야 한다.

다섯째, 본 사례의 대안발파는 진동저감을 필요로 하는 현장에 설계 및 시공적용이 가능한 공법이다.

참고문헌

1. 배효진(2009), “화산터널 발파시 태안배수지에 대한 시험발파 결과보고서”, 예탄ENG기술사사무소, pp.1~82.
2. 윤지선, 김상훈(2002), “플라즈마 공법에 의한 암석파괴의 실험적 연구”, 한국터널공학회 논문집 (터널기술), Vol.4, No.1, pp.27~35.
3. 우준명(2002), “터널 심발발파시 대구경 무장약공의 효과에 관한 연구”, 서울산업대학교 산업대학원 공학석사 학위논문, pp.1~65.