

터널 갱구부 페터널 교차구간 시공사례

A Case Study on Construction of Tunnel Crossed by Abandoned Tunnel

나승훈¹⁾, Ra, Seung-Hoon, 김동현²⁾, Kim, Dong-Hyun, 이상필³⁾, Lee, Sang-Pil,
이훈연³⁾, Lee, Hun-Yeon, 정세현⁴⁾, Jeong, Se-Heon

¹⁾ GS건설 지하공간팀 차장 (Manager, GS Engineering & Construction, Geosystem Engineering Team, shra1@gsconst.co.kr, 교신저자)

²⁾ GS건설 지하공간팀 과장 (Manager, GS Engineering & Construction, Geosystem Engineering Team)

³⁾ GS건설 지하공간팀 팀장 (Team Manager, GS Engineering & Construction, Geosystem Engineering Team)

⁴⁾ GS건설 토목 2 담당 (Vice President, GS Engineering & Construction)

⁵⁾ GS건설 남천-청도 현장소장 (Construction Manager, GS Engineering & Construction)

SYNOPSIS : As portions(28m) of the designed tunnel was crossing the abandoned tunnel, methods for safe construction were demanded. The level of the abandoned tunnel and the designed tunnel was almost same and each tunnel was crossing at an angle of about 40 degrees. Therefore the abandoned tunnel would adversely affect the stability of the designed tunnel. Some sections of the abandoned tunnel passes through the designed tunnel wall were fully filled with tunneling spoil and cement milk grouting to increase tunnelling stability. By checking physical properties of grouting cores drilled at the cross section of the designed tunnel and the abandoned tunnel, the quality of material filled in the abandoned tunnel was confirmed. Also the stability of the designed tunnel was checked by the monitoring during excavation of the tunnel.

요 지 : 계획된 터널 갱구부에서 일부 구간(28m)이 용도폐기된 터널과 교차하여 안전한 시공을 위한 대책방안이 요구되었다. 페터널은 계획터널과 계획고가 거의 같은 상태에서 경사교차하여 계획터널의 시공 중 안정성과 영구 안정성에 큰 위해요소가 되었다. 본터널 벽면을 관통하여 지반에 위치한 페터널의 일정 구간을 버력과 시멘트밀크그라우팅으로 밀실하게 채워 안정성을 확보하였다. 되메움 후 페터널 교차 구간 시공 시 그라우팅 core를 획득하여 물성시험을 통해 시공 품질을 확인하였고, 시공 중 계측을 통해 안정성을 확인하였다.

Keywords : Abandoned tunnel, Cement milk grouting, Monitoring

1. 서 론

당 현장의 터널 노선 계획 시 폐사용 철도터널(대천성공터널)과 중복하게 되어 터널의 시공 및 공용에 있어 안정성을 확보할 수 있는 방법이 요구되었다. 터널노선과 폐터널이 중복되는 구간은 굴착을 통해 제거할 수 있으나, 본터널 벽면을 관통하는 폐터널 구간은 굴착 시 암반의 일체성 확보가 힘들어 부분적인 응력집중 현상의 발생으로 안정성 문제가 있으며, 지보재 보강이 곤란하여 적절한 사전보강이 필요하다. 따라서 기존의 사례 및 연구결과를 참조하여 버력과 시멘트밀크그라우팅을 충전하도록 설계했으며, 시공 당시 시공성을 위해 폐터널의 조적식 라이닝 철거 후 충진을 실시하였다. 공사 중 그라우팅 구간에 대해 코어를 채취하여 물성시험을 한 결과 암반과 비슷한 범위의 변형계수값으로 터널의 암반과 일체거동을 통하여 아치효과를 형성하는데 문제가 없었던 것으로 사료된다. 본 고에서는 폐터널 구간에 대한 사전설계와 실제 시공 및 결과에 대해 소개한다.

2. 지반 및 현장 현황

2.1 지반

현장의 기반암은 화산력 응회암, 응회각력암 및 안산암으로 구성되어 있으며, 폐터널이 위치해 있는 구간은 주로 화산력 응회암과 응회각력암이다. 터널 갱구부 지역의 노출된 암반에 대한 지표 지질조사를 실시한 결과 절리면의 간격은 30~60cm 정도의 괴상이며, 0.01~1mm 두께로 점토 충전, 절리면의 표면은 약간 풍화되어 있고, 습한 상태, 암반의 강도는 740~1800kgf/cm²으로 연경암 정도의 강도를 보였다. 표 1은 현장 지반조사를 통해 파악된 암질별, 암종별 물성치이다.

표 1. 현장 암질별, 암종별 물성치

구분		암질별		암종별	
		연암	경암	화산력 응회암	응회각력암
일축압축강도(kgf/cm ²)		1,060	1,661	1,611	1,486
탄성계수($\times 10^5$ kgf/cm ²)		1.4	1.88	1.84	1.75
탄성과 속도(m/sec)	P wave	2,936	2,911	3,006	2,997
	S wave	1,438	1,569	1,503	1,498
포와송비		0.24	0.23	0.23	0.23

2.2 현장현황

그림 1과 같이 남성현터널 종점 갱구부 부근에는 1930년대에 건설된 것으로 추정되는 페터널 (대천성공터널)이 본터널과 교차하고 있다. 28m 구간(Sta.10+350~10+323m)은 중복되며, 이후 구간은 터널 벽면을 관통하여 연장되어 있으며, 보강은 이 구간을 중심으로 이루어졌다.

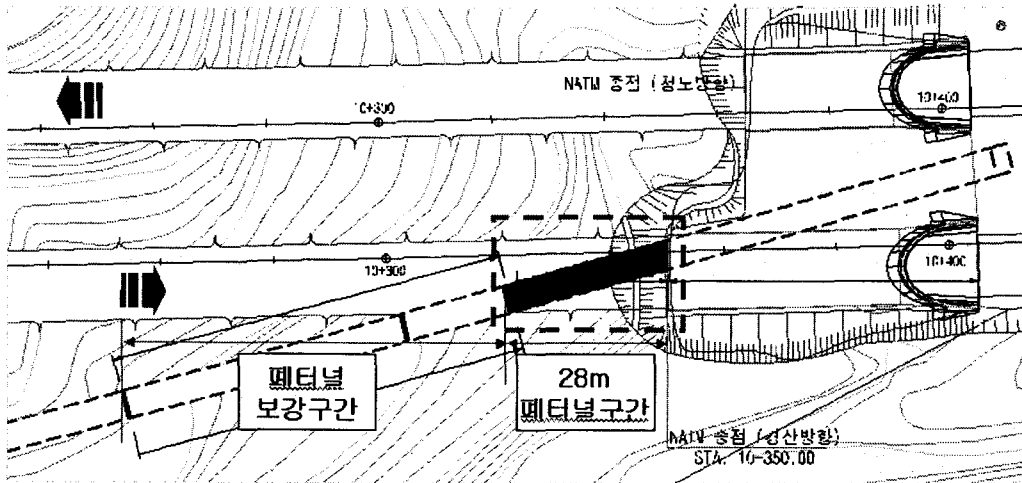


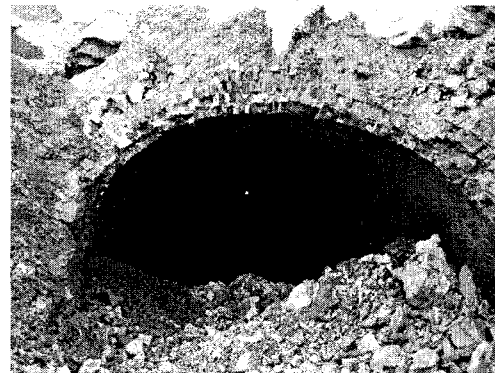
그림 1. 페터널 교차구간

3. 페터널 제원

그림 2와 같이 페터널은 조적식 라이닝의 마제형 터널로서 총 연장은 약 900m 이다. 페터널 (대천성공터널)의 제원을 요약하면 표 2와 같다.



(a) 대천성공 터널 입구



(b) 본터널과 교차된 페터널

그림 2. 대천성공 터널

표 2. 대천성공 터널 제원

구 분	내 용
터 널 명	대천성공터널
위 치	경상북도 청도군 남천면
연 장	900m
폭 원	4.8m (바닥폭 3.8m)
구 조 형 식	마제형 단선터널
적 용 공 법	재래식 공법(조적식 라이닝)
준 공 년 도	1930년(추정년도)
터널 내부	측벽 내부 : 석벽(찰쌓기, 30cm×30cm) 상부아치부 : 적벽돌 2열, 일단 천단부 파손 석축 및 적벽돌 표면으로 습기 일부구간에서 암반수 누수 상태 장기방치에 따른 콘크리트 라이닝 강도 저하
터널 이력	건설 이후 약 70여년 정도 경과된 터널로서 장기간 동안 유지관 리 및 보수·보강이 거의 이루어지지 않은 상태임.

4. 페터널 보강방안 수립 및 시공

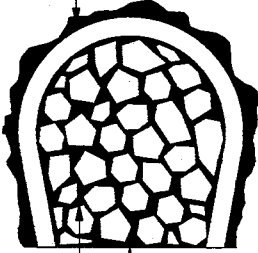
4.1 사전 조사 결과

사전 설계를 위한 지반조사 시 터널 내부의 총 14개소에서 라이닝 표면으로부터 120~150cm 두께로 코어를 채취하여 라이닝 배면공동 상태를 직접 확인한 결과, 조적식 라이닝의 두께는 30~70cm로 평균 48cm, 배면공동의 두께는 3~43cm로 평균 11.7cm로 조사되었다. 그러나, 마감벽 설치를 위하여 페터널 조적식 라이닝 구조물의 일부를 제거하였더니, 배면 공동의 깊이가 당초 조사결과(3~43cm)와 다르게 약 1.5m 정도로 상당히 크게 나타나, 배면 그라우팅 시 콘크리트의 하중으로 인한 조적식 구조물의 안정성 문제가 부각되었다. 특히 조적식 구조물은 벽돌과 벽돌을 시멘트를 이용하여 부착한 구조물로서 블록 사이의 부착강도 및 아칭 effect로서 하중을 지지하나, 일부 구간의 붕괴 시 연속적으로 붕괴가 일어날 수 있기 때문이다. 따라서 이에 대한 대책이 요구되었다.

4.2 원설계 및 문제점

원설계에서는 조적식 구조물의 배면 공동을 경량기포 시멘트로 그라우팅을 실시하고, 라이닝 내부는 버력 및 시멘트 밀크 주입으로 채우는 방안이 제시되었다. 원설계 페터널 보강안을 요약하면 표 3과 같다.

표 3. 현 설계 페터널 시공방안

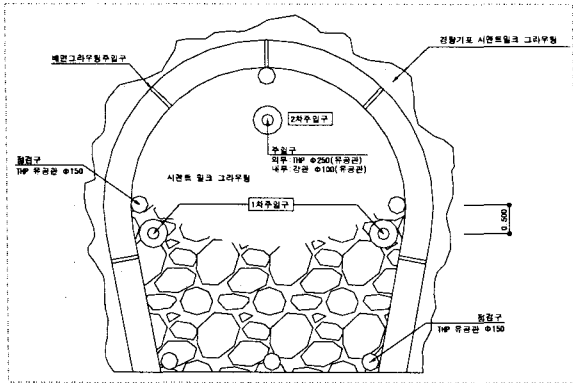
보강 방안	보강 순서
<p>폐철도터널 공동 시멘트밀크그라우팅채움</p>  <p>시멘트밀크그라우팅+ 버력암채움 폐철도터널(대전성공)</p>	<p>개착구간 절토 및 폐철도터널 철거</p> <p>NATM구간(STA. 10+350~STA. 10+323) 굴착 + 폐철도터널 철거</p> <p>폐철도터널 배면공동 경량기포 시멘트밀크 채움</p> <p>폐철도터널 버력채움 및 시멘트밀크 그라우팅</p>

현 설계대로 페터널 보강방법을 시공하는 데 있어서 다음과 같은 문제점들이 있을 것으로 파악되어 공법의 변경이 필요할 것으로 판단되었다.

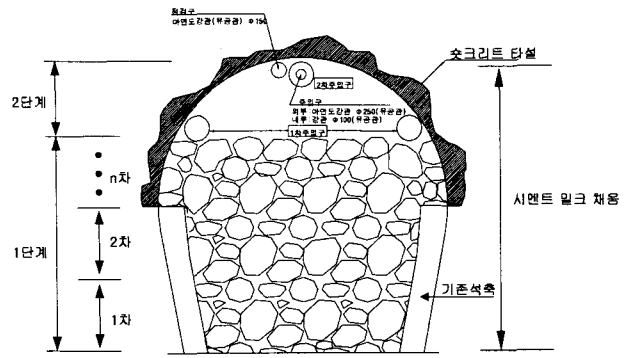
- 주입구와 점검구가 버력에 손상되기 쉬운 THP유공관으로 설계되어 관(주입구와 점검구) 파괴의 가능성
- 상부 일부구간은 버력을 채우기 곤란하며, 배면공동의 그라우팅 효과를 확인하기 어려움
- 사전 예측보다 배면공동의 크기가 큰 것으로 확인되어 조적식 구조물의 안정성 우려

4.3 대안공법 제시

상기 원설계의 문제점 해결을 위해 대안공법이 제시되었다. 대안공법은 상부 조적식 라이닝을 제거한 후 전체 터널 내공을 버력과 시멘트 밀크로 채우는 공법으로 안전충진을 위해 콘크리트 충전 전에 슛크리트로 내공의 굴곡을 없애므로써 사공극 발생을 방지하는 공법이다. 원설계와 비교한 공법의 모식도는 그림 3과 같고, 표 4에 대안공법에 의한 개선사항을 정리하였다.



〈현설계 공법 요약도〉



〈대안공법 요약도〉

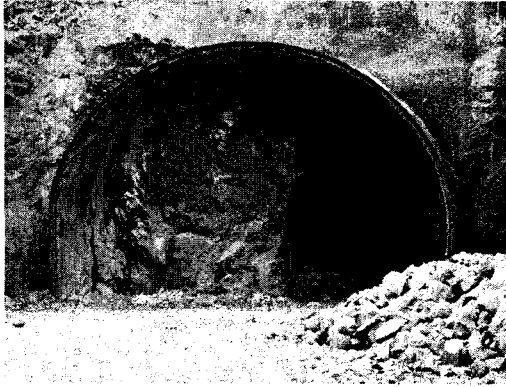
그림 3. 페터널 보강방안 요약도

표 4. 대안공법 요약

현설계 문제점	대안 공법	개선 사항
관(주입구와 점검구) 파괴의 가능성	버력 채움 후 관설치	버력 채움 상부에 주입구를 설치하므로, 버력에 의한 주입구의 손상 가능성 제거
버력채움 불가능 구간 존재	버력채움이 가능한 구간까지만 버력을 채우고, 상부는 밀크그라우팅으로 채움	상부 버력채움이 곤란한 구간은 밀크그라우팅으로 밀실하게 채움으로서 안정성 확보
배면공동 그라우트재 채움효과 확인 곤란	조적식 구조물을 철거하고 여굴부위(배면공동)는 숏크리트를 타설하여 마감함	라이닝을 철거하지 않고 배면주입을 할 경우 공동의 위치 및 크기의 파악이 불가능하여 주입량 및 주입압을 산정하기 어렵고, 주입효과의 확인이 불가능함. 라이닝을 철거하고 숏크리트로 공동을 채움으로서 밀실한 채움이 가능함

4.4 시공

그림 4 (a)와 같이 종점부 갱구부로부터 28m의 보강하지 않은 페터널 교차구간을 시공하였으며, Sta. 10+323m 지점에서 터널의 좌하단부에 페터널 보강구간이 시작되는 것을 그림 4 (b)에서 볼 수 있다.



(a) NATM 시점 (페터널 비충진 구간)



(b) 페터널 충전 구간

그림 4. 페터널 구간 시공

공동을 밀실하게 채운다고 가정할 경우, 페터널 공동 인접부 굴착시 변형거동을 지배하는 주요 인자는 공동채움재료의 변형계수 및 강도정수라 할 수 있다(구용회 외, 2002).

실제 물성시험 결과, 표 5와 같이 압축강도는 170 kgf/cm², 변형계수는 각각 102,000 kgf/cm²와 110,000 kgf/cm²로 평가되었다. 일반적인 라이닝 배면공동 채움재료로서의 성질이 표 6과 같이 압축강도 10 kgf/cm² 정도인 데, 본 시공에 의한 파벽돌+암버력+시멘트 밀크 구성체의 일축압축강도는 이의 10배 이상이며, 변형계수는 당 현장의 2등급~3등급 암반의 물성에 해당하는 값으로 충분한 강도를 확보하여 터널 지반과의 일체성을 확보하고 안정성을 확보하는데 충분하다고 판단된다.

표 5. 파벽돌+암버력+시멘트 밀크 구성체 코어 물성치

No.	Size D x L (mm)	Compressive Strength(kgf/cm ²)	Young's Modulus 10 ⁵ (kgf/cm ²)	Wave Velocity (m/sec)		Poisson's Ratio
				P wave	S wave	
1	99.5 x 105.8	170	1.02	1950	1020	0.28
2	99.5 x 86.4	170	1.11	2040	1100	0.27

표 6. 국내 터널 관련 시방서의 뒤채움재의 물성규정 (마상준, 2004)

터널구분	기관명	보고서 명	배합비의 강도 (kgf/cm ²)	주입압 (kgf/cm ²)
변상터널	시설안전기술공단(1996)	터널의 배면공동 충전을 위한 현장 적용성 연구	20	2
	한국도로공사(1992)	도로설계 요령	10	-
	일본철도종합기술연구소	변상터널 대책공 설계 매뉴얼	1N/mm ² (붕괴성 지반 : 2~3N/mm ²)	1~2

신설터널	한국수자원공사(1997)	수로터널 설계 및 시공지침(안)	-	-
	철도청(1999)	철도공사 전문시방서	-	2~4
	한국건설기술 연구원(1998)	국내터널설계 기술력 향상을 위한 신기술 연구(I)	10	-
	건설교통부(1996)	터널표준시방서(NATM편)	-	-
	대한터널협회(1999)	터널표준시방서	-	1~2
	고속전철사업 기획단(1991)	고속철도 터널 표준시방서(안)	10	-

4.5 계측결과

폐터널 중복 구간에 해당하는 Sta.10+340m 지점에서 일상계측(내공변위계와 천단변위계)을 실시하였고, 폐터널이 터널 벽면에 교차하여 통과한 직후인 10+320m 지점에 일상계측과 쏫크리트 응력계를 설치하여 계측하였다. 결과는 표 7과 같이 초기계측 이후 특이한 변위 진행 및 쏫크리트 응력 변화 없이 관리기준치 이내로 수렴된 양상을 보이고 있어 폐터널 구간에 대한 안전한 시공이 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

표 7. 계측결과

Date	Sta.10+340m(상반)					Sta.10+320(상반)	
	천단침하 (mm)	수평내공변위 (mm)	쏫크리트 응력(kgf/cm ²)			천단침하 (mm)	수평내공변위 (mm)
			Radial	Tangential 1	Tangential 2		
2006/7/4	0	0	0.00	0.00	0.00	-	-
2006/7/10	-3	-2	-1.60	8.70	9.55	-	-
2006/7/15	-2	-2	-1.52	11.88	13.36	0	0
2006/7/20	-2	-2	-1.36	6.79	8.49	-2	-1
2006/7/31	-1	-3	-1.60	0.64	3.82	-2	-3
2006/8/14	-1	-2	-1.66	3.39	6.15	-2	-3
2006/8/28	-2	-2	-1.52	4.67	7.00	-2	-5

5. 폐터널을 이용한 발파패턴 수립 및 시공

5.1 폐터널을 이용한 발파패턴

일반적으로 터널굴착을 위한 발파작업에는 심발발파공법이 적용되는데, 심발발파공법은 최초의 자유면 확보를 통해 확대공의 발파를 용이하게 한다는 점에서 굴진효율과 발파에 의해 발생되는 진동 및 소음과 밀접한 관련이 있다. 당 현장의 심발발파공법으로 단계별 V-Cut(SAV-Cut) 발파공법이 설계되었으나, 4.8 × 5.3m 규모의 폐터널이 터널 구간과 중복되어 있어 폐터널 자체가 심발 효과를 할 수 있을 것으로 판단되었다. 따라서 폐터널을 이용한 발파패턴을 그림 5와 같

이 설계하여 시공하였다.

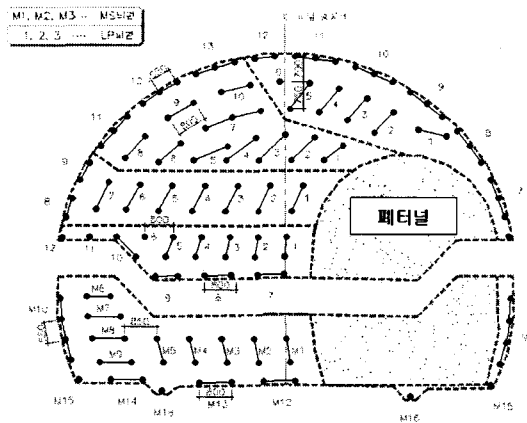


그림 5. 페터널을 활용한 발파패턴

5.2 시공 결과

당 현장의 터널은 병렬터널로 일반 발파 구간과 페터널을 이용한 발파 구간과 구별하여 발파 진동 및 소음을 측정하였다. 표 8에서와 같이 페터널이 자유면 역할을 수행하여 1 자유면 발파에 의한 저항에 따른 발파진동 및 소음이 감소하였고, 페터널을 이용한 발파로 천공수와 화약량을 절감할 수 있어 저비용, 단시간으로 굴착을 수행할 수 있었다.

표 8. 현장 발파 진동 및 소음 측정 결과

No.	일반 발파		페터널 이용 발파		측정점에서 터널입구까지 거리
	진동(cm/sec)	소음(dB(A))	진동(cm/sec)	소음(dB(A))	
1	0.0526	77.2	0.0404	55.1	170m
2	0.0518	77.5	0.0451	70.8	
3	0.0646	75.3	0.0413	73.8	
4	0.0887	84.2	0.0415	78.5	
5	0.0713	84.5	0.0670	78.9	
6	0.0610	84.9	0.0616	77.0	
7	0.0746	73.5	-	-	

6. 결 론

이상과 같은 시공사례를 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- 1) 터널노선과 페터널이 중복되는 구간은 굴착을 통해 제거할 수 있으나, 본터널 벽면을 관통

하는 페터널 구간은 터널의 안정성 확보를 위한 대책이 필요하다.

2) 원 설계 시 제시된 페터널 채움 보강안(배면공동 채움 경량기포그라우팅+ 라이닝 내부 버력 및 시멘트 밀크 채움)의 경우, ①조적식 라이닝 배면의 공동이 예상보다 큰 점, ②버력에 의한 관(주입구와 점검구) 손상 가능성, ③상부 일부구간에 대한 버력채움의 한계, ④배면공동 그라우트 재 채움효과 확인 곤란 등의 문제점이 있는 것으로 판단되었다.

3) 각각의 문제점을 해결하기 위한 대안으로, 조적식 라이닝 철거+ 여굴면 슛크리트 타설+ 내부공동 버력 및 시멘트 밀크 채움(상부 버력채움 곤란 구간은 경량기포 콘크리트 채움) 방안을 제시하였고, 이를 통해 원설계 제안안보다 공동의 밀실한 채움이 가능하여 보다 안전한 시공방안이 될 것으로 판단되었다.

4) 페터널 보강 구간에 대한 코어를 채취하여 물성시험을 한 결과 뒤 일축압축강도는 뒤채움재 물성기준의 10배 이상이고 변형계수는 2등급~3등급에 해당하는 물성치로 충분한 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단되었다.

5) 계측 결과 특이한 변화 없이 관리기준치 이내로 수렴하여 안전한 시공이 이루어졌음을 확인되었다.

6) 페터널을 심발부로 활용한 발파패턴을 새로 설계하여 시공한 결과, 페터널이 자유면 역할을 수행하여 1 자유면 발파에 의한 저항에 따른 발파진동 및 소음이 감소하였고, 페터널을 이용한 발파로 천공수와 화약량을 절감할 수 있어 저비용, 단시간으로 굴착을 수행할 수 있었다.

참고문헌

1. 구용회, 구기욱, 황정순(2002), 경량콘크리트로 되메운 폐선터널에 인접한 철도터널의 안정성 검토, *대한토목학회 학술발표회*, pp. 19~22.
2. 변근주, 송하원, 박상순, 안상기(1996), 경량기포콘크리트의 개발에 관한 연구, *대한토목학회 학술발표회*, pp. 251~254.
3. 마상준(2004), 석분을 이용한 터널 배면공동 뒤채움재 개발과 노후터널에서의 현장 적용성에 관한 연구, *대한토목학회 논문집*, No. 24, pp. 71~80.