

터널보조공법으로서 TAS공법의 적용효과

The Effect of TAS Method by an Auxiliary Method to Tunnel

천병식¹⁾, Byung-Sik Chun, 여유현²⁾, Yoo-Hyeon Yeoh, 백정식³⁾, Jung-Shik Baik 최춘식⁴⁾, Chun-Sik Choi, 윤계한⁵⁾, Gye-Han Youn, 황송연⁶⁾, Song-Youn Hwang

¹⁾ 한양대학교 공과대학 교수, Professor, College of Engineering, Hanyang University

²⁾ (주)에이펙엔지니어링 대표이사/한국해양대 겸임교수, President, APEC Eng. Co./Concurrent Professor, K.M.N.Univ.

³⁾ (주)대솔 지오텍 대표이사, President, DAESOL Geotech Co.

⁴⁾ 서울그라우팅 연구소 사장, President, Seoul Grouting Institute Research

⁵⁾ (주)가야이엔지 대표이사, President, Gaya Engineering Co.

⁶⁾ (주)우지스 상무이사, Executive Director, WGS Co.

SYNOPSIS : Generally it is informed that urethane materials are superior to the others in physical characteristics, durability, ground improvement and the influence to environment . But, the existing urethane methods are too expensive to apply. So this study has analyzed the applicability of TAS method which has developed the existing urethane injection mechanism. From the results, Extending the max-injection distance over 10m from 6m which the existing methods could inject to, TAS method has proved to be economical. Also, the TAS method is obtained quickly to ground improvement effect in various tunnel constructions because rise-time was relatively shorter than that of cement-grouting. Therefore, it is expected that TAS method would be applied a lot for water proof and ground improvement etc. owing to its many advantages mentioned the above.

Key words : urethane, TAS method, auxiliary method, ground improvement, rise-time

1. 서 론

현재 국내의 여러 건설현장에서는 연약지반을 보강하거나 차수를 목적으로 다양한 지반개량공법이 개발 또는 도입되어 사용되고 있으나 환경영향, 내구성, 주입효과 등 아직도 해결해야할 문제가 산재해 있는 실정이다. 특히, 최근에는 지반환경 문제가 심각히 대두되어 개량효과, 시공성 및 경제성에 추가하여 환경영향이 고려된 공법의 현장적용이 절실히 요구되고 있다. 국내에서 일반적인 우레탄공법은 시멘트 그라우팅 공법과 비교하여 개량효과와 환경영향이 거의 없는 공법(천, 2001)이지만 주입약액이 고가로 경제적이지 못하며, 고결시간이 짧아 주입길이가 제한적인 단점이 있는 것으로 알려졌다. 따라서 본 연구에서는 주입 메커니즘에 의해 개량범위를 확대할 수 있는 TAS주입볼트와 고분자계 우레탄의 TAS약액에 의한 TAS공법(Tunneling method on Advanced reinforcing System)의 터널보조공법으로서의 적용효과 파악을 위하여 각종 시험 및 현장시험을 실시하였다.

2. 우레탄 약액의 특성

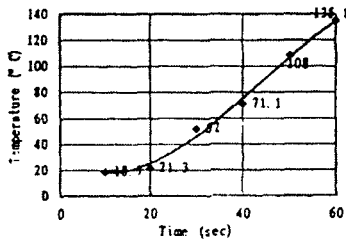
2.1 우레탄 약액의 물리적 특성

일반적인 우레탄 약액으로 A액과 B액을 1:3의 비율로 혼합하여 사용하였다. 약액의 반응시간은 매우

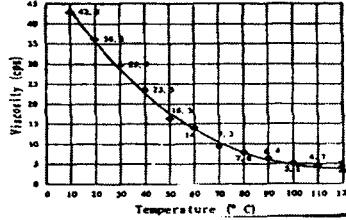
빠를 뿐만 아니라 혼합과정 중 높은 발열과 함께 약액의 점도가 변화한다. 혼합액의 반응개시부터 겔화 시작 전까지의 온도 및 점도의 변화는 그림 1과 같다. 약액의 점도가 침투성을 좌우하는 용액형 약액의 경우 반응후 높은 열을 방출함과 아울러 겔화전까지 지속적으로 점도가 저하하는 특징이 있다(천, 1997). 실제 지반에서의 주입성은 당초 우레탄 약액의 점도(표 1)를 약 50cps로 고려했을 경우보다 현저히 우수하다.

표 1. 일반적인 우레탄 약액의 비중 및 점도

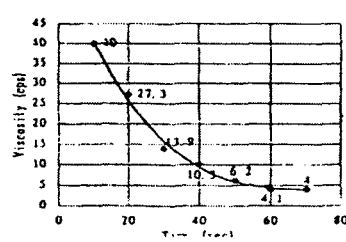
약액	기준치		측정치	
	주입재	코킹재	주입재	코킹재
점도	주재료(A액) 50±10	400±50	44	340
	경화제(B액) 50±10	200±20	42	230
(cps)	배합비율 1:2.7~3.0	1:1	1:3	1:1
비중	주재료(A액) 1.1±0.05	1.1±0.05	1.05	1.05
	경화제(B액) 1.25±0.05	1.25±0.05	1.23	1.23



(a) 반응시간 & 온도



(b) 온도 & 점도



(c) 반응시간 & 점도

그림 1. 반응시간에 따른 발열 온도, 점도의 변화

2.2 우레탄 약액의 역학적 특성

2.2.1 강도 특성

가) 호모겔(Homo-Gel)강도

우레탄 A액과 B액을 1:3(10g, 30g)의 비율로 혼합하여 5×5×5cm의 시험 용기에 넣고 뚜껑을 닫은 후 용액이 4배 발포되어 완전히 응고된 호모겔 상태에서 실시한 강도시험 성과는 표 2와 같다.

표 2. 일반적인 우레탄약액의 호모겔 강도

약액	기준치		측정치	
	주입재 (kgf/cm ²)	코킹재 (kgf/cm ²)	주입재 (kgf/cm ²)	코킹재 (kgf/cm ²)
강도	급 휨 40이상	40이상	92	72
	일축압축 50이상	50이상	73	88
	전단접착 18이상	18이상	52	-

나) 샌드겔 강도

지반 개량특성의 실질적인 영향 요소는 샌드겔 강도로서 기존에 연구된 샌드겔 강도는 표 3과 같다. 표에서와 같이 주입후 강도개량 및 차수효과는 매우 크게 나타났음을 알 수 있다.

표 3. 우레탄계 약액주입 고결토 시험성과

구분	r _i (t/m ³)	G _s	q _u (kg/cm ²)	k cm/sec	V km/sec	C (kg/cm ²)	φ (°)	비고
서울지하철현장	주입전	-	-	7×10 ⁻³ (추정)	-	0.0	35.79	(천,1991)
	주입후	1.93	2.55	41.92	6.75×10 ⁻⁵	1.043	측정불가	
부산지하철현장	주입전	1.77	2.60	1.442	1.841×10 ⁻⁵	-	0.092	(정,1993)
	주입후	2.18	-	54.29	2.599×10 ⁻⁷	-	-	

2.2.2 내구성

고결된 약액의 지반 중 간극수에 의한 용출율을 알아보기 위하여 직경 5cm × 길이 10cm의 고결물을 수조 중에 28일간 침적한 결과 우레탄을 이용한 호모겔 시편(사진 1) 및 샌드겔 시편(사진 2)은 제작 후 24개월이 지난 후에도 사진에서 보는 바와 같이 풍화가 거의 일어나지 않아 지반 내 내구성이 매우 우수함을 알 수 있다.

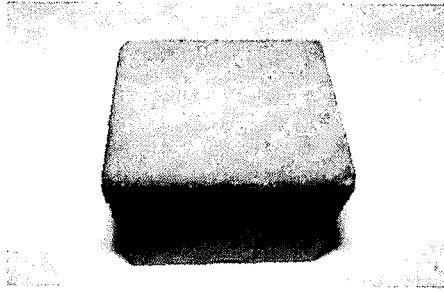


사진 1. 호모겔 시편(4배 발포)

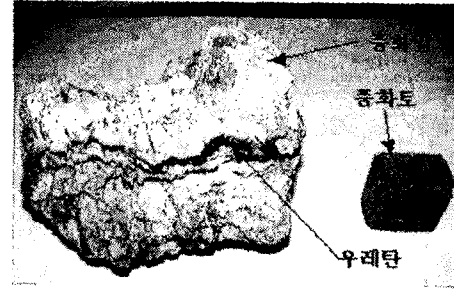


사진 2. 샌드겔 시편(암, 풍화토지반)

특히, 우레탄 약액에 의한 주입효과는 그림 2에서와 같이 강도특성이 우수하며 그림 3에서와 같이 물유리계의 경우 실리카분의 10 ~ 50%가 용출되는데 반해, 우레탄 고결체는 0.1%이하로 용출이 거의 일어나지 않아 장기적인 내구성이 우수한 것으로 알려져 있다.

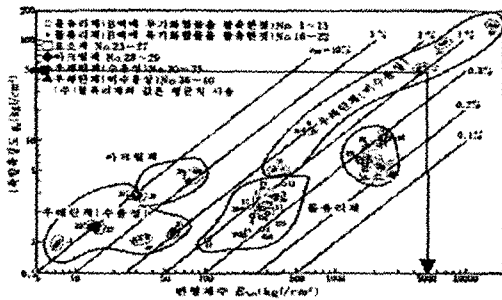


그림 2. 표준사 고결토의 일축압축강도와 변형계수

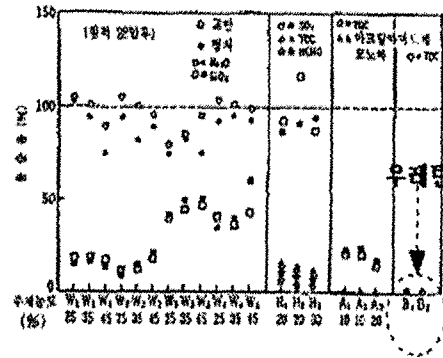


그림 3. 각 고결토의 용출성분 비교

2.2.3 침투특성

발포압에 의한 2차 침투 특성파악을 위하여 지름 6cm×높이 7cm의 원통형 몰드의 중앙에 지름 15mm의 강봉을 놓고 표준사를 채우고 강봉을 뺀 후 빈 구멍에 약액을 주입하였다. 몰드 뚜껑을 덮은 상태로 3분 경과후의 고결체 형상은 매우 견고하였다(사진 3 참조). 시험결과로부터 우레탄 약액은 단순히 주입압만을 고려해 산정된 보강영역보다 실질적으로 더 넓은 보강영역을 확보할 것임을 알 수 있었다. Jiagai(1982)등에 의해서도 사암지반의 점토단층내에 세워진 댐기초를 안정화하기 위하여 우레탄의 발포특성을 이용하였는데 0.01~0.03mm의 균열에 대하여 발포압에 의한 2차 충전이 이루어졌음을 보고하였다.

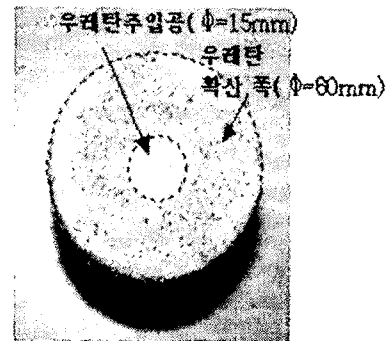


사진 3. 모래시료속에 주입된 우레탄 약액 2차 발포

2.3 환경 영향 특성

2.3.1 용출시험 결과

일반적인 지반주입용 우레탄의 경우 우레탄을 발포하여 시편을 그램당 20ml의 증류수에 60°C로 30분 용출하여 ICP 분석 및 KSM0111에 따른 시험결과 표 4와 같이 6가 크롬 외에도 인체에 치명

표 4. 우레탄 약액 용출시험 결과 및 토양 환경 기준치

시험 항목	단위	시험결과	시험방법	기준치	
용출시험	Pb	mg/l	검출안됨	ICP	0.01mg/l 이하
	Cd	mg/l	검출안됨	ICP	0.01mg/l 이하
	Cr	mg/l	검출안됨	ICP	0.05mg/l 이하
	As	mg/l	검출안됨	ICP	0.01mg/l 이하
	Hg	mg/l	검출안됨	ICP	0.0005mg/l 이하
	페놀류	mg/l	검출안됨	ICP	0.005mg/l 이하
CN	mg/l	검출안됨	UV/VIS분석	검출되지 않음	

※ 시험결과 : 한국화학시험연구원 시험결과(2000.1.17)

※ 기준치: 토양환경기준(木暮敬二, 2000)

적인 해를 입힐 수 있는 납, 카드뮴, 비소, 수은, 시안, 페놀류 등이 검출되지 않아 환경친화적인 주입재임을 확인할 수 있었다.

2.3.2 어독성 시험 결과

지반보강용 우레탄 약액은 주재와 경화제로 각각 폴리올과 MDI(매틸렌디페닐 이소시아네이트)를 사용하며 주재와 경화제의 혼합반응시 이는 100% 서로 반응하여 무독성의 플라스틱인 폴리우레탄으로 변화되므로 공해유발 가능성이 없다.

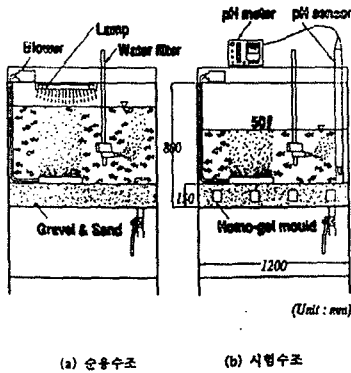


그림 4. 어독성 시험장치

표 5. 각 주입재의 24, 48, 96시간 후의 치사율

주입액		24시간		48시간		96시간	
A액	B액	pH	치사율	pH	치사율	pH	치사율
규산소다3호	보통포틀랜드시멘트	10.9	85%	10.9	100%	10.9	100%
규산소다3호	마이크로시멘트	10.68	5%	10.58	15%	10.38	65%
실리카졸	보통포틀랜드시멘트	8.37	0%	8.37	0%	8.35	0%
실리카졸	마이크로시멘트	8.1	0%	8.3	0%	8.3	0%
우레탄A액	우레탄 B액	-	0%	-	0%	-	0%

어독성 시험(그림 4) 결과(표 5)에 따르면 96시간 후 LC50(96시간에 물고기 100마리 중 50마리가 죽게 되는 농도)으로서 물 1 liter당 약품량(mg)은 주재(A액) 65,300mg/liter(6.5%), 경화제(B액) 5000mg/liter로서 타 일반 약품(예 : 세제 22mg/liter, 시멘트 그라우팅 수백mg/liter)에 비해 환경영향은 거의 없는 것으로 나타났다(천, 2000).

3. 기존 우레탄 그라우팅 공법

국내 현장에 적용되고 있는 3m단관 또는 6m이중관에 대하여 적용성, 경제성, 시공성을 검토하였다.

3.1 적용성

- (가) 3m주입볼트(단관) : 주입볼트의 길이가 짧아 전력구, 통신구 등의 소단면 터널에서만 적용하고, 주입 볼트의 강성이 작아 토사터널과 같이 붕락대의 상재하중이 크게 작용할 경우 볼트가 꺾여 약액 주입이 불가하며 보 요소로서의 역할을 기대하기 어렵다.
- (나) 6m주입볼트(이중관) : 연약지반을 통과하는 대단면 터널의 경우 폭(D)이 커지면 주입볼트의 시공각도 θ (그림 5 참조)가 커져야 하므로 충분한 보 요소로서의 역할기대가 곤란하다. 터널 막장 내에 코어를 형성시키는 경우에도 shoulder부는 보 요소로서의 역할이 불충분하다. 또한, 우레탄의 겔타임은 약 1분 정도로 주입볼트 길이를 연장할 경우 rise-time의 초과로 볼트가 막혀 개량효과를 얻기가 곤란하다.

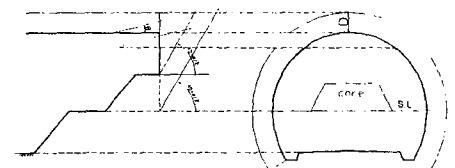


그림 5. 시공 각도

3.2 경제성

- (가) 3m주입볼트(단관) : 보강대의 두께가 커질 경우 주입볼트를 매 막장마다 시공해야 하므로 시공성

저하 뿐 아니라 경제적으로도 고가이다.

(나) 6m주입볼트(이중관) : 보강대의 두께가 커질 경우 우레탄 주입의 시공간격이 좁아져 시공성 및 경제성이 저하되고, 주입볼트의 길이가 길어질수록 불필요한 약액의 손실이 많아진다.

3.3 시공성

(가) 3m주입볼트(단관) : 주입볼트의 주면적이 작아 고압 우레탄주입시 충분한 마찰저항을 기대하기 어려워 주입볼트가 바깥으로 돌출(사진 4 참조)되는 경우가 발생하여 시공상의 위험요소 및 볼트의 기능상 문제점을 초래하게 된다.

(나) 6m주입볼트(이중관) : 주입볼트에 압력이 크게 작용하게 될 경우 주입볼트가 공외부로 돌출되는 경우가 발생하여 볼트의 기능상의 문제점이 발생한다.

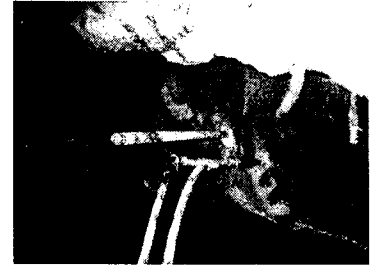


사진 4. 주입볼트 돌출모습

4. TAS공법의 적용성 검토

4.1 주입 메커니즘

우레탄은 순결형 약액이다. 따라서 우레탄 약액이 지중에서 rise-time보다 긴 시간 동안 주입되면 약액은 처음에는 구형으로 침투하여 외측부에서 켈화되고 차례로 주입되는 약액에 의해서는 그의 일부를 뚫고 들어가 약액은 취약부로 침투되어 컬리플라워(Cauliflower) 형태로 고결된다(Christian Kutzner, 1996). 시험결과에 의하면 풍화토층의 경우 rise-time의 45배 시간동안 지속적 주입이 가능하였으나 관내부에서는 rise-time의 초과로 관이 막히게 된다. 따라서 관내에서는 토출구까지의 약액도달시간을 rise-time 이내로 유지하는 것이 무엇보다도 중요하다. 또한 균등, 균질한 형태의 주입 구근을 형성시키기 위해서는 주입볼트의 중앙부를 경계로 하여 양측의 일정시간 동안의 토출유량이 거의 동일하게 하는 것이 중요하다.

4.2 기존 주입볼트의 주입시험 결과

기존 주입볼트는 그림 6에서와 같이 길이(L)가 6m, 볼트 직경 $\phi 50.8\text{mm}$ (외관), $\phi 27\text{mm}$ (내관)인 이중강관 형식이다. 현장시험 결과 최대토출량 조건에서 동시에 주입볼트의 전 구간에 약액이 분출되지 않고 전반부 3.5m 범위에서만 약액이 분출되었다(사진 5 참조). 기존 주입볼트는 외부(공내)와 내부에서 동시에 충전되므로 관내에서 소정의 토출구까지의 도달시간이 주입볼트 외부의 약액충진속도에 의존하게 된다. 따라서, 대상지반의 큰 공극이 많거나, 파쇄가 심할 경우 약액의 누출량이 많아 필요 지역까지의 약액도달시간이 risetime을 초과하게 되어 주입볼트가 막히게 되어 선단부의 주입상태가 매우 불량하게 될 것이다. 그림 7로부터 기존 볼트의 충전 가능거리(χ)를 계산해 보면, 주입볼트 외

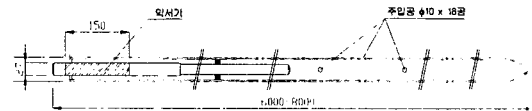


그림 6. 기존 주입 볼트

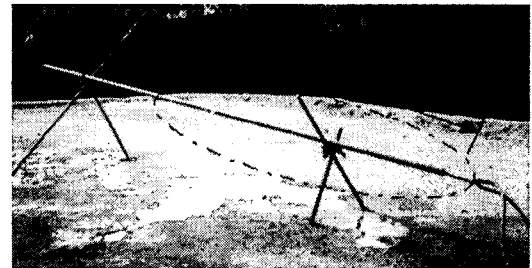


사진 5. 기존 볼트 약액 분출 장면

부체적(V_1) 29.98 χ , 주입볼트 내부체적(V_2) 15.48 ($\chi-140$), 주입기의 최대토출량(V) 22.7 l/min의 관계로부터 547cm로 계산된다. 이로부터 기존 주입볼트의 경우 risetime동안의 약액주입거리(최대토출량 기준)는 약 5.5m로서, 그 이상의 범위에서는 주입상태가 불량하게 된다. 기존 볼트를 10m길이를 3개 제작하여 실트질 모래지반에서 현장주입시험을 실시한 결과에서도 사진 6에서와 같이 전반부 5.0~5.7m 부분까지

만 약액이 주입된 것으로 확인할 수 있었다.

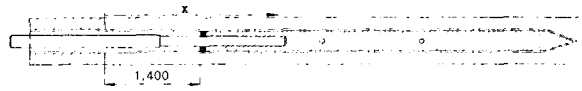


그림 7. 충전 가능 거리

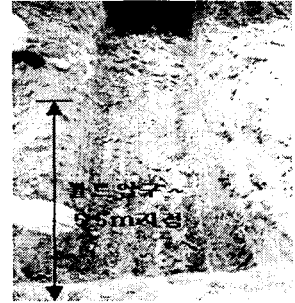


사진 6. 주입효과 확인

4.3 TAS 주입볼트

TAS 주입볼트는 그림 8과 같이 길이(L)가 6~12m, 볼트지름(ϕ)이 외관 50.8mm, 내관34mm인 중공 이중강관으로 제작하여 넓은 영역까지 효과적으로 보강이 가능하도록 제작하였다. 주요 특징은 다음과 같다.

①입구부에서의 수두손실을 최소화하기 위한 단면 점진확대형 입구부 제작, ②고압주입시 주입볼트가 공외부로 돌출되는 현상을 억제하기 위하여 마찰력이 증대된 모눈형 코킹부 설치, ③공벽과 주입볼트를 이격시켜 시공시 삽입 성능이 우수하도록 간격재 설치, ④최적의 주입상태를 확보하기 위한 주입공의 크기 및 간격 결정, ⑤약액의 효율적 주입과 기능향상을 고려한 중공 이중관 강관구조 제작, ⑥약액사용의 최소화과 rise-time이내에 원활한 약액주입이 가능하게 하는 간격재(수직, 수평)가 설치된 양단 원추형 중공 내관 등이다.



그림 8. TAS 주입볼트 구조도

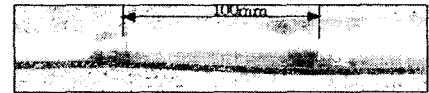
4.3.1 TAS 주입볼트의 구성

가) 외 관

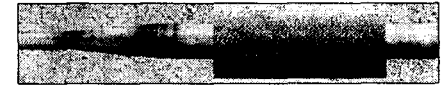
- ① 주입구 : 약액주입시 입구부를 단면 급확대형으로 할 경우, 와류의 발생 및 에너지 손실을 최소화하기 위하여 입구부를 사진 7(a)와 같이 단면 점진확대형으로 설치.
- ② 코킹부 : 지중에 우레탄 주입시 주입볼트에는 최대 40kg/cm^2 이상의 압력이 작용한다. 이와 같은 압력발생시 주입볼트가 주입공 외부로의 돌출 방지를 위하여 마찰력 증대를 목적으로 사진 7(b)와 같이 모눈형 격자 설치.
- ③ 약액 분출 구멍 : 약액의 균등한 분출을 사진 7(c)와 같이 구멍크기 및 간격을 변화.
- ④ 주입 볼트 끝부분(팽이) : 천공홀 사이로 볼트 주입이 용이하도록 제작(사진 7(d) 참조).

나) 내 관

- ① 내부 간격재(수평, 수직) : 공벽과 주입볼트를 이격시켜 주면서 시공시 삽입 성능이 우수하도록 간격재 설치(사진 7(e) 참조)
- 다) 외관 속에 내관 삽입 : 볼트를 두 부분($L=5\text{m} \times 2$)으로 나누어 볼트식으로 체결하도록 제작(사진 7(f) 참조).



(a) 점진 확대형 주입구



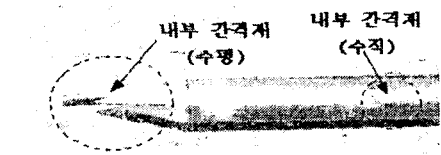
(b) 코킹부 모눈



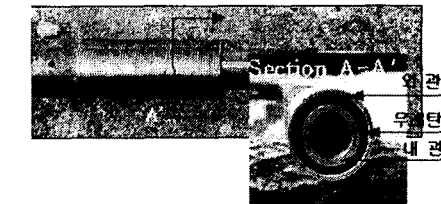
(c) 분출 구멍



(d) 팽이 부분



(e) 수평, 수직 간격재




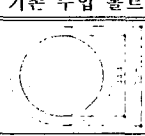
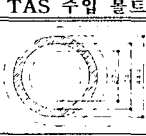
(f) 내관 속에 외관 삽입

사진 7. TAS주입볼트의 구성.

4.3.2 TAS 주입볼트의 강성

기존의 주입볼트와 TAS 주입볼트의 단면계수를 비교하면 표 6과 같다. 산정결과로부터 TAS 주입볼트는 기존 볼트에 비해 약 40%의 강성증대 효과를 기대할 수 있다.

표 6. 주입 볼트의 단면계수 비교

	기존 주입 볼트	TAS 주입 볼트
		
$Z = \frac{\pi(d^4 - d_i^4)}{32d}$	$Z = \frac{\pi(5.08^4 - 4.44^4)}{32 \times 5.08} = 5.34 \text{ cm}^3$	$Z = \frac{\pi(5.08^4 - 4.44^4)}{32 \times 5.08} + \frac{\pi(3.4^4 - 2.76^4)}{32 \times 3.4} = 7.54 \text{ cm}^3$

4.3.3 TAS 주입볼트의 성능 시험 결과

TAS주입볼트의 매 5cm마다 교호하여 4mm 및 5.5mm구멍을 뚫은 시험 주입볼트 제작하여 약 15°의 시공 각도로 하여 주입볼트를 거치하고 각 구멍에는 테이핑 처리하였다. 각 시험경우별로 구멍의 크기, 수량 및 위치를 변경하면서 주입시작 후 rise-time동안의 각 토출구별 약액도달시간 및 토출유량을 결정하여 관 양측의 토출유량이 같아질 때까지 반복하여 시험을 실시하였다. 시험결과는 표 8과 같이 주입공의 위치와 크기에서 사진 8과 같은 최적의 토출형태를 갖는다.

표 7. 주입볼트의 성능 시험 결과

구멍 번호	주입공 위치(m)	도달 시간(sec)	토출 유량(ℓ)	전반부 유량(ℓ)	후반부 유량(ℓ)
①	2.5	5.16	5.43	7.6	7.87
②	3.8	9.43	2.17		
③	5.8	12.07	1.90		
④	7.55	18.61	2.71		
⑤	8.75	26.31	2.17		
⑥	9.35	30.17	1.09		

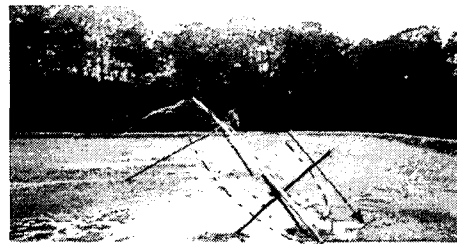


사진 8. TAS주입볼트의 약액 분출

4.4 TAS공법의 적용효과

4.4.1 현장시험

TAS공법의 적용성 파악을 위하여 몰드시험과 풍화암 지반에 대한 현장시험 시공을 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

가) 몰드시험 결과

사진 9와 같은 지름 100cm×150cm의 몰드 속에 현장에서 채취한 풍화토를 채워 넣고 몰드에서 시료와 약액의 혼합정도 및 침투성에 대하여 파악하였다. 몰드시험에서 평균주입압은 5kg/cm²으로 10kg의 약액을 저압으로 주입하였으며 주입완료 후 사진 10과 같이 고결체를 얻을 수 있었다.

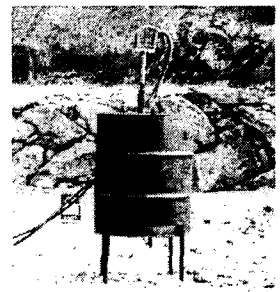


사진 9. 몰드 주입



사진 10. 우레탄 고결체

나) 현장 시험시공

시험시공 대상지반은 사진 11에서와 같이 절리가 발달한 풍화대의 사면이다. 시험시공은 천공(φ=75mm, L=10m)을 실시한 후 TAS 주입볼트(φ=50.8mm, L=10m)를 삽입하고 코킹(Caulking)후 압입볼트에 주입호스를 연결하여 TAS약액(A액:B액=1:3비율)을 주입하였다. 주입공수는 사진 12에서와 같이 60cm간격으로 3공을 실시하였다. 주입과정 중 우레탄 약액이 사면의 절리면을 통하여 흘러 나왔는데, 이것은 지반속의 대 절리와 공극으로 침투되어 공극을 완전히 채운 후 잉여되어 약액이 지표면으로 흘러나온 것으로 지반중에서의 침투주입효과가 매우 크게 나타났음을 알 수 있다. 사진 12의 주입 중심점에서 채취한 코어로부터 풍화토지반에서의 고결효과를 확인할 수 있었다(사진 13 참조).



사진 11. 시험시공 대상지반

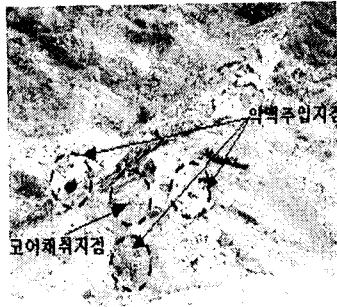


사진 12. TAS공법 적용후 사면형태

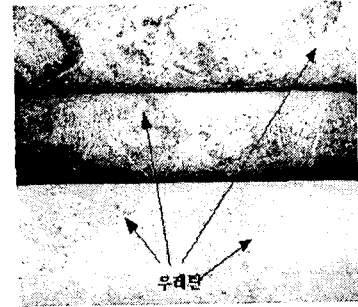


사진 13. 코어 샘플 상태

상기의 TAS공법에 대한 시험시공 결과로부터 주입된 우레탄 약액은 주입볼트 주변의 미세한 공극까지 침투되어 주변지반을 일정 범위 내에서 균질하고 강도 높은 원형 고결체를 형성시키게 된다. 따라서 TAS공법은 rise-time이 시멘트 그라우팅과 비교하여 상대적으로 짧기 때문에 토사층과 같이 연약한 터널굴착시의 터널보조공법으로서 효과가 매우 양호한 것으로 판단된다.

5. 결론

TAS공법의 현장 적용성을 파악하기 위하여 실시한 연구 결과를 요약정리하면 다음과 같다.

- (1) 일반적으로 우레탄 약액은 물리 및 역학적 특성이 우수하며 장기적인 내구성과 공해유발 가능성이 없는 재료로 지반주입시 그 효과는 매우 우수하다. 그러나 공사비용이 고가로 일반적인 적용이 어려운 실정으로 경제성을 고려한 개발이 이루어질 경우 그 적용성은 매우 우수할 것으로 판단된다.
- (2) 주입메카니즘을 개발한 TAS공법은 주입거리를 10m이상까지 확대시킬 수 있는 공법으로 터널 보조공법으로 현장적용시 시공성과 더불어 경제성 있는 공법임을 확인할 수 있었다.
- (3) TAS공법은 Rise-time이 시멘트 그라우팅에 비해 상대적으로 매우 짧기 때문에 지반주입 즉시 개량 효과를 얻을 수 있어 터널 시공시 안정성 확보에 유리하고, 환경 친화적인 차수 및 지반보강 목적의 폭넓은 적용이 기대된다.

참고문헌

1. 원경식(1996), "약액주입공법", 창우출판, pp.21~36
2. 정성교(1993), "부산 지하철 1호선 4-8공구 PU-IF공법의 시공에 따른 토질시험결과 보고서", pp.1~2
3. 천병식(1993), "우레탄계 약액(TRI)에 의해 형성된 고결토의 토질역학 시험성과 보고서", 한양대학교 부설 산업과학 연구소, pp.1~8.
4. 천병식(1997), "지반주입용 폴리우레탄의 공학적특성 및 보강효과", 대한토목학회논문집 제17권 제III-4호, pp.476~478
5. 천병식(2001), "약액주입과 지반환경문제", 한국지반환경공학회 학술발표회 논문집, pp.12~23
6. 현장 기술자를 위한 흙과 기초 시리즈 1(1999), "약액주입공법 조사설계", 도서출판 과학기술, pp.95~96
7. 日本土質工學會(1985), "現場技術者のための土と基礎シリーズ -薬液注入工法の調査設計からまで-", pp.56~63
8. Christian Kutzner (1996), "Grouting of Rock and Soil", A.A. Balkema, pp.203~204