

고분자계 우레탄 注入工法에 의한 地盤補強 效果

(The Effect of the Ground Reinforcement

by the High Polymer Urethane Grouting Method)

채영수¹⁾ 이강일²⁾

1. 서론

고분자계 우레탄 주입공법은 1990년대 초에 국내에 보급되었으며, 국내에 보급된 우레탄 자재는 실제 일본 D회사에서 생산된 TBU, CBU, FCU 등의 자재에 기준을 두고 공법을 도입하게 되었으며, 보급될 당시만 해도 전량 수입에 의존하였고, 현재 국내에서 사용되고 있는 자재가 일본에서 개발된 자재에 기준을 두고 있으므로, 지형적인 상이함으로 인한 차이점 및 약액이 지반에 주입된 후 지반내에서 반응하는 차이 등 국내 토질 특성에 대한 검토가 이루어지지 않는 상태에서 시공하는 등 국내의 지반조건에 알맞게 국산화 시켜야 하는 문제에 봉착하게 되었다.

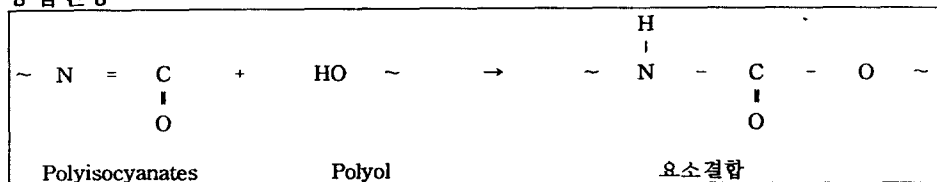
본 실험에서는 일본에서 개발되어 국내에 보급된지 얼마 되지 않은 공법으로 그 차수성 및 지반강도에 효과적인 시공성을 보이고 있는 반면, 여러 가지 면에서 체계를 이루지 못하고 있는 우레탄 주입공법에 따른 지반보강의 효과를 검토하고자 하였으며, 국내에서 사용되고 있는 약액자체가 가지고 있는 재료적 특성을 파악하고자 한다.

2. 주입공법

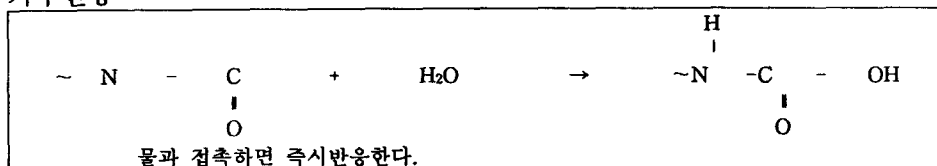
2.1. 고분자계 우레탄의 고결화 메카니즘

Polyurethane의 반응 mechanism은 Polyol 수산기와 MDI계 isocyanate로 구성된 용액이 혼합교반의 과정에 의해 요소 결합하는 것으로서, 3차원의 망상 구조를 형성하며, 이런 가교반응의 주 mechanism은 중합반응 →가수반응→발포반응→가교반응 의 순서로 이루어지며 결합 반응식은 <그림 1>과 같다.

i) 중합반응



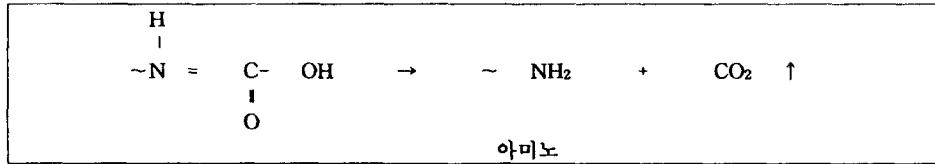
ii) 가수반응



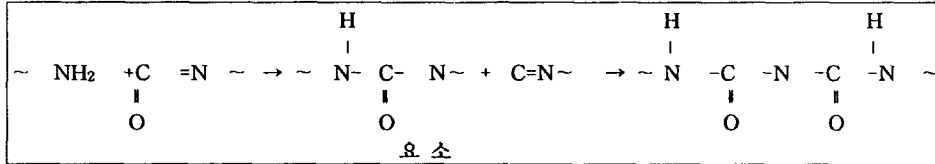
1) 수원대학교 토목공학과 부교수

2) 수원대학교 토목공학과 대학원

iii) 발포반응



iv) 가교반응



<그림 1.> 고분자 Polyurethane의 결합 반응식.

2.2 주입량 및 주입압

2.2.1 주입량

주입량은 보통 지반이 불확정요소로 크게 변함을 감안하여 적용식에 대해서는 특히 각 변수들에 대한 적절한 값의 대입에 주의하여야 하며 크게 토사층과 암반균열면의 주입으로 나누어 식을 대개 적용하고 있다.

<토사층>

점성토일 경우에는 (2.1.a)식으로, 사질토일 경우는 (2.1.b,c)식으로 나타낼 수 있다.

$$\bullet Q = V \cdot \frac{G_s}{1+e} \cdot (w - w_p) \text{ ----- (2.1.a)}$$

$$\bullet Q = V \cdot n \cdot \alpha (1 + \beta) \text{ ----- (2.1.b)}$$

$$\bullet Q = R^2 \cdot \pi \cdot n \cdot \alpha \cdot (1 + \beta) \text{ ----- (2.1.c)}$$

여기서, Q : 주입량(cm³/sec)
 V : 주입대상 토량 ((cm³)
 n : 흙의 공극률(소수)
 R : 주입유효반경(cm)
 α : 토질, 주입제 점성 등에 따라 변하는 주입제의 공극 충전율 또는 주입충전율(0.3 ~ 1.0)
 β : 주입손실계수 = 0.05 - 1.0 ≒ 0.1
 (현장 시험 주입으로 정의하는 것이 좋다.)
 e : 토립자 공극비.
 w : 자연함수비(소수)
 w_p : 소성한계(소수)

<암반균열면>

W.J.Baker(1955)에 의하면 일정한 개구를 가진 균열에 있어 개구폭에 있어서 현탁액의 주입량은 식 (2.8.d)과 같이 나타내었다.

$$\bullet Q = \frac{P\pi\delta^3}{6\nu \ln \frac{R}{r_0}} \text{ ----- (2.1.d)}$$

여기서, P : 주입압력
 ν : Newtonian 유체의 점성계수
 δ : 개구폭
 R : 침투거리
 r₀ : 주입공반경

2.5.2 주입압

약액의 주입시에 중요한 부분 중의 하나로서 약액이 토중 취약부 경계를 따라 지반을 할렬 하면서 들어가게 되며 이런 작용에 의해 수압파쇄현상이 일어나게 된다. 이러한 현상은 주입의 향타, sand drain의 casing타설 또는 현장투수시험 등에서 높은 주입압에 의해 발생하는 것으로서 1976년 미국 Teton dam의 파괴 이후 많은 관심을 모으고 있다.

< 토사층 >

사질토층에서의 주입압력은 Maag에 의하면 식(2.2)과 같고 Thiem은 (2.3)식으로 나타내었다.

$$\bullet \text{ Maag} : P_1 - P_0 = \frac{Q \cdot r_w}{4000 \pi \cdot k_g \cdot a} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R} \right) \text{-----}(2.2)$$

$$\bullet \text{ Thiem} : P_2 - P_0 = \frac{2.3 Q \cdot r_w}{2000 \pi \cdot k_g \cdot a} \log \frac{R}{r_0} \text{-----} (2.3)$$

여기서, P_0 : 지반내의 수압 또는 주입압 (kg/cm^2)
 P_1 : 선단주입방법에 의한 주입압 (kg/cm^2)
 P_2 : strainer주입방법에 의한 주입압 (kg/cm^2)
 Q : 주입량 (cm^3/sec)
 r_w : 물의 단위체적중량 (g/cm^3)
 k_g : 약액의 투수계수 (cm/sec)
 r_0 : 주입공의 반경 (cm)
 R : 영향반경 (cm)
 a : strainer 부의 길이 (cm)

식(2.2)와 (2.3)은 선단주입방법과 strainer 주입방법에 의해 개발된 것이다.

3. 실험 및 결과 고찰

3.1 우레탄 시료의 재료적 특성

압축강도 및 인장, 굴곡강도 실험 등을 위한 실험용 표본으로는 폴리우레탄 약액 A액, B액을 각각 1 : 3의 성분 비율로 혼합하여 교반 후 일정 용기에 발포하여 일정 시간 경과 후 폴리우레탄의 재료 역학적인 성질을 파악하고자 하였다.

3.1.1 점도 및 비중 실험

국내 터널현장 및 여러 구조물에서 차수 및 지반보강의 효과를 목적으로 사용되고 있는 우레탄 약액의 점도 및 비중이 어느 정도의 값을 가지고 있는가를 알아 보았다. 우레탄계 약액은 지반내에 주입되기 전과 후의 상태의 온도에 따라 점도의 변화는 다양하며, 온도에 따라서도 다양한 변화를 보이고 있으며 온도가 증가시 점도는 감소되고 있는 추세다. 점도의 변화에 따라서 실제 주입 시료가 지반내에 주입될 때 많은 영향을 보이고 있으며, 본 실험에서 사용된 주입약액의 일반적인 결과치는 <표 1>에서 보는 바와 같이 비중이 각각 1.09, 1.23 정도로 나타났으며, 점도는 A액 B액 각각 44.16, 45.69 cps와 같이 나타났다.

3.1.2 압축강도, 굴곡, 굽힘, 인장전단접착강도 실험

압축강도의 시험용기는 $5 \times 5 \times 5 \text{cm}$ 의 정사각형의 용기에 약액 A, B를 각각 약 10g, 30g씩 일정한 속도로 교반하여 성형하였다.

인장전단접착강도, 굴곡, 굽힘강도는 $25 \times 5 \times 2.5 \text{cm}$ 가 되는 시료를 압축강도와 같은 비율로 투입 발포 고결시켰으며, 실험 결과에 대하여 <표 2>에 나타냈으며, 약액 자체가 가지는 순수한 재료적인 성질로서는 상당히 강한 모습을 띄고 있음을 알 수가 있었다.

<표 1> 고분자 우레탄 약액의 점도 및 비중

날 짜	점 도(cps)		비 중	
	A액	B액	A액	B액
94. 9.10	41.1	44.8	1.110	1.230
94.11. 8	36.2	38.4	1.120	1.250
95. 2. 2	30.2	34.3	1.120	1.270
95. 3. 9	47.0	64.0	1.069	1.123
95. 3.15	36.9	38.7	1.120	1.270
95. 4.28	46.0	36.0	1.058	1.241
95. 4.24	61.0	58.0	1.052	1.233
95. 3.16	62.0	67.0	1.106	1.238
95. 5.15	37.0	30.0	1.120	1.248
평 균	44.16	45.69	1.09	1.23

<표 2> 굽힘강도, 압축강도, 굴곡강도, 인장전단접착강도

날 짜	단위 : kg/cm ²			
	굽힘강도	압축강도	굴곡강도	인장전단접착강도
94.04.14	67.0	-	-	-
94.04.24	85.8	69.4	-	-
94.09.07	85.0	40.9	-	-
94.09.07	90.02	51.09	-	-
94.09.10	87.7	38.1	-	-
94.09.10	101.5	35.4	-	-
94.11.08	78	59	-	9.1
94.11.26	-	46.5	48.2	18.3
94.11.30	-	-	-	18.3
95.02.02	44.4	46.2	-	-
95.02.02	42.4	55.1	-	-
95.03.10	-	52	66	-
95.03.15	70	56.8	-	-
평 균	75.18	50.04	57.10	15.23

3.1.3 용출시험

우레탄 약액이 지반내에 주입될 때, 또는 주입되고 난 후에 약액이 지하수와 함께, 또는 약액 자체에서 용출되는 물질이 지반내에 어떠한 영향을 미치게 되는가에 대하여 알아 보았다.

이러한 사항들이 고분자계약액에서 상당히 중요한 요소로 작용된다는 점을 감안하여, 즉 약액이 지반내에 주입고결 됐을 때 지하수에 용해되어 용출됨으로서 지하수를 오염시키는 요인임을 판별하고자 하였다.

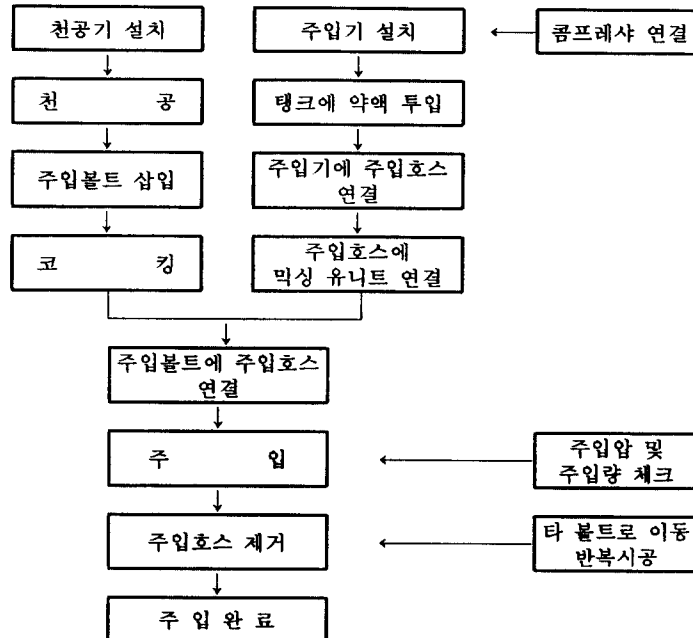
그 결과값은 <표 3>이며, 대부분의 인체에 해로운 화학약액이 용출되지 않았으며, Cl-와 증발잔류물 및 KMnO₄이 각각 0.13, 9.0, 0.6~1.25가 검출되었다.

<표 3> 화학약액 용출시험.

시험항목	단위	결 과 치			시험방법			
		1)	2)	3)	1)	2)	3)	
용출시험	Pb	mg/ℓ	검출안됨	검출안됨	-	I.C.P	I.C.P	KSM 0100-88
	Cd	"	"	검출안됨	-			
	Hg	"	"	검출안됨	-			
	As	"	"	검출안됨	-			
	Cr ³⁺	"	"	검출안됨	-			
	Cr	"	"	검출안됨	-			
	Cl-	mg/ℓ	-	-	0.13			
	Cu	"	"	검출안됨	-			
	페놀	mg/ℓ	-	검출안됨	검출안됨			
	pH(19℃)	-	-	-	5.83			
	증발잔류물	mg/ℓ	-	-	9.0			
	CN	"	"	검출안됨	-			
CN-	"	"	검출안됨	검출안됨	"	"		
KMnO ₄ 소비량			0.6	-	1.25	보사부 고시 94-28		KSM 0100-88
※ 1, 3) 용출조건 : 증류수 500ml/15g × 상온 × 72hrs 2) 용출조건 : 증류수 × 500ml/EA × 상온 × 72hrs								

3.2 현장 시험

아래 <그림 2>와 같이 지반에 $\phi 27.2\text{mm}$ 길이 2m~6m의 주입볼트를 천공주입한 후 주입볼트에 A, B의 2가지 약액을 우레탄 주입기(1.5 shot)를 통한 호스로 연결·주입함으로써 실제 터널 막장전면에 주입하는 방법과 같은 메카니즘을 통하여 실험하였으며, 평면구조물에 수직 및 경사 주입하는 방법 등을 통하여 주입상황 및 주입고결 결과 등을 파악하고자 하였다.



<그림 2> 시공 흐름도

3.2.1 부산 00-00구간 전력구 터널내 실험

1) 지질조건

풍화가 심한 풍화암에 속하며, 암이 망치로 때릴 경우 쉽게 조각나며 부서질 정도로 연약하였고 상당량의 지하수가 흐르고 있다.

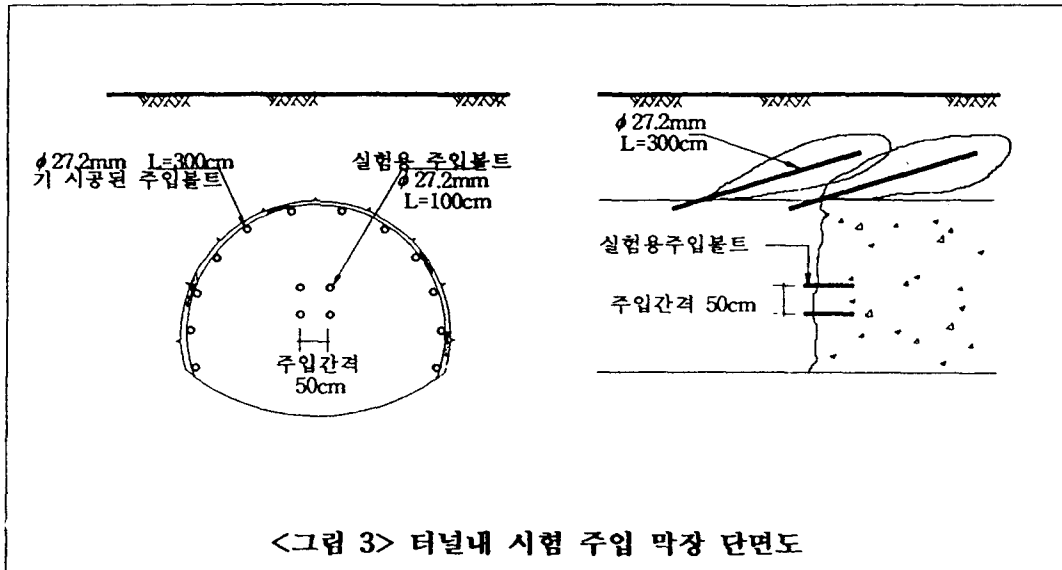
2) 실험방법

<그림 2>와 같은 시공순서로 약액주입을 하였으며, 다만 시험시공을 위하여 중앙에 $\phi 27\text{mm}$, $L=100\text{cm}$ 의 주입볼트 50cm간격으로 사각형으로 천공·주입 <그림 3 참조>하여 약 2시간후에 지반이 고결된 후에 주입된 후의 고결된 구근을 채취하고자 테두리 부분의 바깥부분부터 굴착하여 구근을 형성 시킨후 시료를 채취하였다.

3) 실험결과

우레탄이 주입된 막장에서 Core 채취기를 통해서 채취하려 하였으나, 막장 전면에서 어느정도 거리를 두고 약액이 침투 고결됐으므로, 어느정도의 깊이 및 거리에 있는 시료 채취시 일반적인 Coring기를 이용하는 것이 쉽지 않음을 알 수 있었다.

우레탄이 주입되어 고결된 지반의 Sample을 채취하기가 어려우므로 본 실험에서는 막장 전면에서 사각형의 모양으로 직경 27.2mm 길이 100cm 의 압입볼트를 천공 주입하여 성형된 시료를 채취하는 방법을 이용하려 하였다. 그러나 시료 채취시 포크레인을 이용하여 구근으로 성형된 시료를 채취하려 하였으나, 약액이 침투하여 고결된 연약한 지반이 포크레인의 강한 굴착힘으로 인해서 잘게 부서지므로 고결 성형된 시료 덩어리를 얻을 수가 없었다.



3.2.2 시화지구 실험.

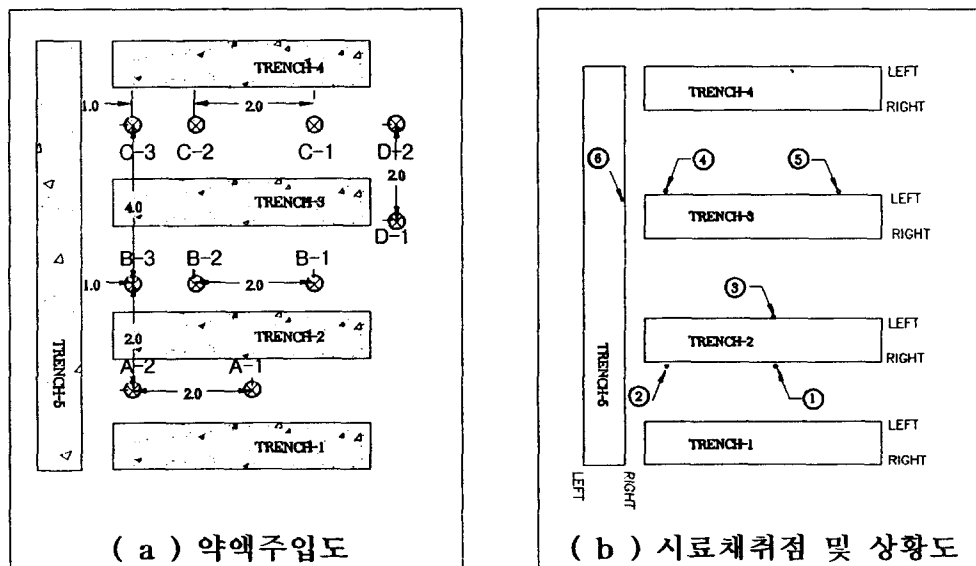
1) 지질조건

서해안 매립지로서 실험이 진행된 곳의 수직적인 지층분포는 지표로부터 매립층, 실트층, 풍화토, 풍화암의 순서로 분포되고 있으며, 지하수위는 지하 380cm~410cm에서 형성.

2) 실험방법

<그림 4-a>와 같이 총 4가지 type(A,B,C,D) 으로 주입 적용, 각 type의 실험방법으로서는 천공기를 통하여 평면지반을 2~3m 하향 천공후 φ27.2mm L=3m의 주입볼트를 투입한 후 주입볼트 주위를 코킹작업을 통해 천공홀 주위와 주입볼트 사이를 밀폐시킨후 약액 및 시멘트를 주입시킨다.

(UNIT : M)



<그림 4> 약액주입도(a) 및 시료 채취점 및 상황도(b)

※ 약액 주입 순서 : A-1 → A-2 → B-3 → B-2 → B-1 → C-1 → C-2 → C-3 → D-1 → D-2

① Cement Milk + S.T.U 주입. (Type-A)

- A-1 : 시멘트를 주입한 후 그 양의 20%에 해당하는 약액 S.T.U를 1:1의 비율로 주입하여 시멘트와 S.T.U와의 혼합관계 및 그 침투 및 고결 형상을 파악하고자 하였다.
- A-2 : 실험방법에 있어서 A-1과 똑같은 방법으로 주입한 양에 있어서 차이를 두고 주입한 경우이며, 이 두가지 경우가 상대방에게 어떠한 침투효과를 미치게 하는가에 중점을 둔 경우이다.

② Cement milk 주입. (Type-B)

- B-1 : 시멘트를 실험대상 지반에 주입할 경우 어떠한 형상을 띄게 되는가를 파악하고자 하였으나 먼저 시공한 A-type의 영향으로 인하여 주입이 되지 않았다.
- B-2 : A-type의 실험횟수가 적은 관계로 시멘트주입 후 S.T.U를 1:1 비율로 주입.
- B-3 : 시멘트만 주입한 경우

③ R.T.U 주입.(TYPE-C)

- C-1 : 우레탄 약액인 R.T.U를 A:B를 1:3의 비율로 혼합하여 주입한 경우로서 C-2, C-3는 약액의 비율은 같으나 주입한 양과 주입간격에 차이를 두고 주입한 경우.

④ Cement Milk + R.T.U 주입. (TYPE-D)

본 실험은 시멘트와 기존의 우레탄 자재인 R.T.U가 기존 현장에서 병행하여 사용하는 점을 감안하여 시멘트와 우레탄계 약액인 R.T.U와의 상호 혼합정도 및 침투성을 파악하고자 하였다.

5) 실험결과

본 실험에서는 <그림 4-b>에서 나타내고 있는 바와 같이 trench굴착하여 시료가 어디에서 (관찰점 위치 : ①~⑥ 및 각 type별 주입위치) 어떠한 형상으로 약액 및 시멘트가 주입 고결되어 있는지를 알아보았으며, 시료의 고결되어 있는 상황은 다음과 같다.

<관찰점 ①> : 160cm 깊이 부터 약액이 고결 형성된 시료가 채취되기 시작하였으며, 주입된 시료의 형상은 시멘트밀크가 하단에 깔리고 그 위에 S.T.U가 얹히는 형상으로 주입되었으며, 시멘트와 약액이 혼합되는 형상은 보이지 않고 시멘트가 충전되지 못한 곳을 S.T.U의 우레탄계약액이 충전된 것으로 보아 시멘트와 약액의 충전시에는 입자의 크기가 큰 시멘트가 주입되지 못한 부분은 입자의 크기가 작은 S.T.U가 상호 보완적인 입장에서 충전 고결된다는 것을 확인할 수가 있었다.

<관찰점 ②> : 시험주입한 곳에 trench를 수직으로 230cm를 굴착하자 구근모양의 시료가 형성됨을 알 수가 있었고, 이는 주입pipe가 3m의 길이를 가지고 있으며 주입볼트 하단부에 구멍이 존재하는 것으로 말미암아 많은 양이 주입되지 않은 상태에서는 주입볼트 하단부에 약액이 몰려 구근을 형성시키며, 적은 범위안에서 맥상으로 주입된 것 같다. 따라서 지반의 상황에 따른 약액의 주입량 산출 및 충전률등의 산출이 지반의 고결형성에 상당히 중요함을 알 수가 있었다. 또한, A-2주입공에서 주입된 시료인 것으로 사료되는 시료가 150cm 깊이에서 폭40cm 정도의 크기의 원판형으로 채취되었으며, trench굴착한 지반내에 있어서 우레탄 및 시멘트밀크가 주입된 곳에서는 지하수가 나오지 않고 주입되지 않은 곳으로 지하수가 흘러 나옴으로 해서 약액의 보강에 대한 차수성은 입증할 수가 있었다. 230cm이하의 지하수가 흘러나와서 그 이하의 지반 상황은 판단하기가 어려웠다.

<관찰점 ③> : 150cm깊이에서 시료가 채취됨.

<관찰점 ④> : 원추형 모양으로 170cm부터 소량의 작은시료들이 지반의 입자사이에 형성되어있다.

<관찰점 ⑤> : 관찰점 부분에서는 170cm부터 소량의 작은시료가 추출되기 시작하였다.

<관찰점 ⑥> : C-3 Type의 주입 영향인 것 같이, 140cm의 깊이에서 열린 판상형의 시료가 30cm 정도의 크기로 존재하며, 잠시 후에 다시 굴착한 결과 넓이 1m정도의 두께 20cm정도의 높낮이로 C-3에서 주입된 것이 퍼진 것으로 추정되는 약액(R.T.U)가 존재하며 약액의 고결상태는 부서부서한 시료상태로 존재.

C-3밀 140cm깊이에서 평행하게 trench-5의 ⑥번 위치까지 약액이 분포하고 있다. 이는 C-3에 약액을 주입한 결과가 지반내에서 trench-5번 쪽 즉 ⑥번 위치점으로 간극이 형성됨으로서 약액이 간극을 타고 충전된 것으로 추정된다.

따라서 위에서 서술한 바와 같이 약액의 주입량이 적절하지 못하게 주입될 경우에는 간극이 보다 큰 방향으로 즉 한쪽 방향으로 충전됨으로서 지반의 충분한 고결화에 많은 영향을 미치게 됨을 알 수가 있었다.

4. 결 론

1. 충분한 지반조사를 수행하므로써 약액의 주입량 및 우레탄약액의 적절한 선택 가능하다.
2. 주입량의 산출이 적절하지 않을 경우 지반내의 공동 및 절리에 따라 약액이 커다란 공극을 따라 편중되듯 충전되는 현상이 발생함으로서 약액의 편중으로 시공자가 예상하는 지반의 절리 및 간극의 충전이 적절치 못한 경우가 발생한다.
3. 온도에 따른 점도의 변화는 다양하고, 또한 민감하므로 시공성에 있어서 주의를 요하며 온도의 증가는 점도를 낮게 함으로서 투수성을 증가 시킴을 알 수가 있었다. 또한 현장의 지반조건에 알맞은 우레탄 약액의 선택, 즉 알맞은 점도와 Gel-Time을 보유한 약액을 가지고 시공하는 것이 중요하다.
4. 시멘트주입 후 우레탄의 혼합주입에서 시멘트와 우레탄의 혼합이 잘 이루어지지 않았다.
5. 우레탄 지반보강 효과에 대한 확인 및 충분한 계측관리 및 정보화시공을 통하여 정확한 물성치를 얻음으로서 높은 품질의 시공을 가능하게 된다.
6. 가급적 불교란 상태인 현장에서의 현장 실험을 수행해야만 신뢰성있는 물성치를 얻을 수 있다.
7. 암석 및 흙의 종류, 다량의 지하수등 다양한 지반조건에 따른 약액 점도, 고결시간등의 선별등, 장·단점을 data base화하여 시공시 지반조건이 변화할 경우 신속하고 적절한 약액을 선택하여 안전하고 빠른 시공으로 작업을 유도하여야 한다.

5. 참고문헌

- 1) 건설연구사(1987) “기초지반개량공법”
- 2) 류동성 외 4인 “암반주입용 우레탄계 약액의 특성 및 시공사례 연구” 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), 1995.
- 3) 박문수 외 3인 “지반보강용 폴리우레탄의 적정배합을 통한 기계적 열적, 물성 향상” 한국지반공학회 학술발표회논문집 1994. 5.
- 4) 원기술(1995) “지반주입공법”
- 5) 진병익, 천병식 “약액주입에 의한 고결토의 공학적 특성” 대한토목학회지 제 28권, 제6호, 1980. 12.

- 6) 천병식 “화학약액에 의한 토질성상변화에 관한 연구” 한양대학교 대학원 박사학위논문 1980. 12.
- 7) 문홍득 “주입공법 적용시 지반개량 효과의 확인.” 건설기술정보(1994)
- 8) 동아대학교 한국자원개발연구소 “창원-진해간(안민터널)도로 개설공사 터널보강공법(SPUG 공법)의 시공에 대한 검토 보고서” 1995. 4.
- 9) 동아대학교 “부산 지하철 1호선 4-8공구 PU-IF공법의 시공에 따른 토질실험 결과 보고서”1993. 2.
- 10) Ted S. Vinson and James K. Mitchell., “Polyurethane Foamed Plastics In Soil Grouting” A. M. ASCE , F. ASCE, Vol. 98, No. SM6, pp 579~602, June, 1972
- 11) Andrew Bodocsi and Mark T. Bowers., “Permeability of Acrylate, Urethane, And Silicate Grouted Sands with Chemicals” Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, No.8, pp. 1227~1244, August, 1991