

고성능 다기능 특수 그라우트 신재료 개발 및 기초지반보강재료의 사례 연구 Research & Development of High Performance & Multi-Functional New Grouting Materials for Ground Improvement & Reinforcement

박봉근¹⁾, Bong-Geun Park, 조국환²⁾, Kook-Hwan Cho, 나 경³⁾, Kyung Na, 윤태국⁴⁾, Tae-Gook Yoon,
이용준⁵⁾, Yong-Jun Lee

¹⁾ 공학박사, (주)백경지앤씨 대표이사, Ph.D., President of BKGNC

²⁾ 공학박사, 국립서울산업대학교 철도건설공학과 교수, Ph.D., Professor, Seoul National Univ. of Technology

³⁾ 한국철도시설공단 영남본부 시설운영사업단 단장, Executive Director, YG Facilities Operation, Korea Rail Network Authority

⁴⁾ 공학박사, 한국시설안전공단 대외협력 팀장, Ph.D., Team Manager, International Cooperation & Public Relation Team, Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation

⁵⁾ 공학박사, (주)포스코건설기술연구소 부장, Ph.D., General Manager of Research & Engineering Division, POSCO Engineering & Construction Co., Ltd.

SYNOPSIS : As existing materials for ground reinforcement, chemical grout material using cementitious materials and waterglass was used. But many problems in terms of ground reinforcement effects were implicated. In this study, for development and applicability verification of new materials, viscosity, fluidity, permeability, Self-Leveling, keeping of drilled hole, antiwashout underwater, resistance of water (groundwater dilution and minimize material eluting) and the early strength and long-term strength characteristics of developed materials was confirmed, and material standards, and establishing construction standards for the various model tests were conducted. As a result, high viscosity, flowability, permeability and keeping of drilled hole characteristics are excellent, in addition to the early strength properties, dilution does not occur to groundwater, including groundwater is available for dealing with environmental issues. Application of basic and reinforcement method by Filler function in addition to structure can also or development of a new concept can be expected. In addition, middle and large-diameter drilled shaft, micropile, ground anchors, soil-nailing, steel pipes multi-grouting reinforcement for cement injection process could be used enough to even be considered.

Keywords : Viscosity, Fluidity, Permeability, Self-Leveling, Antiwashout

1. 서론

하천과 해안 등의 근처에서 행해지고 있는 공사에는 환경, 특히 수질오염을 줄일 수 있는 대책이 필요하며, 교량기초 공사에서는 지반보강 또는 말뚝 시공을 위해 깊은 수심에서도 분산되지 않는 점성을 갖는 그라우트재가 사용되어야 한다. 또한 지하 수맥 부근에서 이루어지는 공사는 지하수의 수질오염을 방지할 수 있는 그라우트재가 사용되어야 할 것이다.

그러나, 다양한 환경에서 이루어지는 공사에서 현재 사용되는 시멘트계 그라우트재에 사용하고 있는 각종 첨가제들은 점성이 강한 특성을 만족시키지만 유동성, 자기 충전성 및 수중불분리성이 저하된 특성을 갖게 되며, 또한 유동성 및 조기 경화성을 만족시키는 경우에는 점성, 분리저항성(수중불분리성)이 낮은 특성을 갖는 등 요구되는 다양한 특성 중 몇 가지 특성만을 만족시킬 뿐 요구 특성을 동시에 모두 만족시키지 못하는 문제가 있었다. 종래의 레미콘 분야에서 사용되는 수중불분리제는 콘크리트의 점성을 증가시켜 콘크리트 중의 골재가 페이스트로부터 침전이나 분리되는 현상을 줄여 주는 화학 혼화제이다. 대부분의 기존 시판 수중불분리제는 분말 형태로 시판되기 때문에 콘크리트 제조시에 수중불분리재

의 투입을 위해 별도의 저장 설비가 필요하거나 백타입의 제품을 사람이 직접 손으로 투입해야 되는 등의 불편함이 있다. 또한 수중불분리재 만으로는 유동성, 자기충진성 등의 레올러지 특성을 부여할 수 없기 때문에 나프탈렌 설펜이테계, 멜라민계, 폴리카보네이트계의 액상 유동화제와 병행하여 사용되고 있다. 특히 일반 건축토목건설공사에서 시멘트와 물로 구성되는 그라우트재의 경우 양생기간 단축을 위해 분말 형태의 알루미늄이테계 혼화제가 사용되지만 분말형 수중불분리재는 용해성이 낮기 때문에 레미콘 형태로 먼저 콘크리트를 장시간 동안 배합할 경우에만 사용할 수 있는 단점이 있다.

따라서 지반, 하천, 해안, 지하 등 다양한 지반 공사 환경에서 사용이 가능하고, 고점성, 유동성, 자기충진성, 조기경화성, 분리저항성 등의 레올러지 특성을 자유롭게 제어하도록 형성되어 용도에 따른 요구 특성을 모두 만족시킬 수 있으며, 또한 여러 가지 제품을 섞는 방법보다는 한 가지 종류만으로 여러 가지 레올러지 특성을 부여하고 사용이 간편하고 빠른 용해성을 갖는 액상형 그라우트재용 개질재를 연구 개발하는 것이 일차 연구 목적이며, 지하수 오염 등 환경문제에의 대처가 가능하고 충전재 기능 이외에 구조체 역할도 함께 분담할 수 있는 기초공법 및 보강공법으로의 적용이나 지지 미케니즘이 전혀 다른 형태의 신개념 말뚝공법의 개발하며, 또한, 중구경 및 대구경 현장타설말뚝, 마이크로파일, 그라운드 앵커, 쏘일네일링, 강관다단그라우팅 등 시멘트 주입이 필요한 보강공법에도 충분히 활용 가능하도록 미래형 기초 공법으로의 실용성을 검증하고자 하였다.

2. 재료적 특성

2.1 재료의 품질 규격(20 ± 2℃하에서)

본 연구에 사용된 Hi-FA 제품은 고성능 다기능성의 신 그라우트재로 개발된 것으로 Hi-FA 제품의 특징은 표 2.1과 같이 실내온도 20 ± 2℃ 하에서 무색 혹은 옅은 미황색을 띄고 있으며, pH 는 2.9 밀도는 1.0 정도의 특성을 나타내고 있다.

표 1. Hi-FA 특징

Item	Unit	Specification	Result
Appearance		무색 또는 미황색 액체	옅은 미황색 액체
p H		3.0 ±1.0	2.9
Density	g/cm ³	1.05 ± 0.1	1.01

2.2 물리적 특성

2.2.1 점도 특성

2.2.1.1 물 / Hi-FA 220MVW 수용액의 점도 거동 특성

본 제품의 온도와 농도의 정도에 따른 점도 특성을 파악하기 위해 물온도 변화를 20~35℃ 로 설정하고 Hi-FA 수용액의 농도를 물 대비 1~5% 변화를 주면서 점도측정기를 사용하여 점도를 측정하였다.

표 2. Hi-FA 220MVW 수용액의 농도 및 온도 변화에 따른 점도 거동

온도(℃)	Hi-FA 220MVW 수용액 농도					비 고
	1%	2%	3%	4%	5%	
20	21	22	39	489	1,327	
25	17	18	36	189	272	
30	6	14	34	51	98	
35	4	8	16	44	42	

註) Brook Field DV-E VISCOMETER로, 61sp, 1.5~100rpm 조건으로 측정함

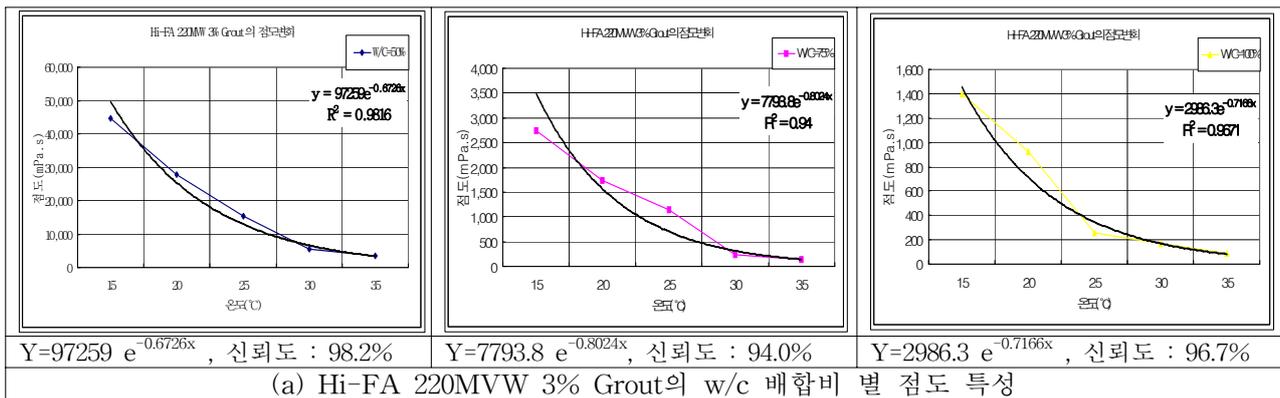
본 연구에 사용된 Hi-FA 재료의 온도 및 농도에 따른 점도시험 결과 표 2.에서 나타나듯이 수용액의 농도가 4% 이상에서 점도의 변화가 급격히 증가되는 현상이 나타난 것을 볼 수 있으며, 이러한 점도의 특성을 얻기 위한 적절한 사용량이 3% 이상으로 판단되어 3~5%의 배합비로 경향성을 실험했다. 또한 25℃ 이상의 온도에서는 점도의 변화가 크지 않는 특성이 관찰되었다.

2.2.1.2 물 / Hi-FA 220MVW / 시멘트 배합의 점도 거동 특성

표 3. 온도 변화에 따른 Hi-FA 220MVW 배합비(%)별 점도 결과

온도(℃)	약제/물 중량(%)									비고
	3%			4%			5%			
	W/C 50%	W/C 75%	W/C 100%	W/C 50%	W/C 75%	W/C 100%	W/C 50%	W/C 75%	W/C 100%	
15	44,690	2,739	1,400	100,800	3,503	2,360	174,000	3,557	2,711	
20	27,860	1,732	928	30,500	2,659	1,532	49,800	2,711	1,672	
25	15,230	1,148	257	19,510	1,968	893	33,230	2,049	916	
30	5,450	230	166	8,358	1,480	426	12,565	1,556	475	
35	3,500	136	92	6,289	822	340	8,636	1,088	380	

註) Brook Field DV-E VISCOMETER, 63sp, 0.6 ~100rpm



$Y=155356 e^{-0.6343x}$	신뢰도 :95.7%
$Y=5293.5 e^{-0.3495x}$	신뢰도 : 97.1%
$Y=4032.7 e^{-0.5155x}$	신뢰도 : 98.1%
(b) Hi-FA 220MVW 4% Grout의 w/c 배합비 별 점도 특성	
표 3.의 결과를 상기(a)와 같이 지수함수 그래프로 분석한 결과	

$Y=289014 e^{-0.7353x}$	신뢰도 : 96.4%
$Y=4851.6 e^{-0.2924x}$	신뢰도 : 99.7%
$Y=4476.3 e^{-0.5188x}$	신뢰도 : 98.2%
(c) Hi-FA 220MVW 5% Grout의 w/c 배합비 별 점도 특성	
표 3.의 결과를 상기(a)와 같이 지수함수 그래프로 분석한 결과	

그림 1. Hi-FA Grout의 배합비와 온도변화에 따른 점도 특성

표 3.과 그림 1.에서 나타나듯이 Hi-FA 220MVW Grout의 점도 특성은 사용량과 온도에 따라 그 점도가 다르게 발현되고 있으며 물-시멘트 비와 Hi-FA의 사용 용량에 따라 점도특성의 조절을 쉽게 할 수 있다. 그 결과 Hi-FA 사용량은 3% 이상, 사용온도 범위는 15℃ 이상에서는 점도특성이 잘 일어나고 있

음을 알 수 있다. 또한 각 시료의 시험 결과를 도시하여 분석한 결과 그림 2.에서 나타난 지수함수에 의한 관계식으로 각 배합비 별 온도 변화에 따른 점도 특성을 예측 계산을 할 수 있는 것으로 판단된다.

2.2.2 Self leveling 특성

본 연구에서 사용된 Hi-FA 의 물리적 특성은 크게 수중불분리성의 특징과 고 점성, 고 유동성의 특징을 가지고 있다. 고 점도의 특징은 점도 측정기를 사용하여 측정하였고 또 다른 특성인 고 유동성의 특징을 확인하기 위하여 Self Leveling 시험을 수행하였다. Self Leveling 측정방법은 Hi-FA 220MVW 약제를 사용한 Grout를 만들어 850ml의 용량을 갖는 원기둥모형에 넣고 물속에 충분히 잠겨 있는 아크릴판 위에서 Grout의 퍼지는 정도를 센티미터 단위로 측정하였다. 그 결과를 종합하면 다음과 같다.

표 4. 배합비 및 온도 변화별 Self Leveling 측정 결과 (cm/1 minutes)

온도(°C)	약제/물 중량(%)									비고
	3%			4%			5%			
	W/C 50%	W/C 75%	W/C 100%	W/C 50%	W/C 75%	W/C 100%	W/C 50%	W/C 75%	W/C 100%	
15	38	43	43	37	41	41	36	40	40	
20	42	47	47	39	43	43	38	42	42	
25	43	48	48	42	46	46	40	45	45	
30	45	49	49	43	48	48	43	47	47	
35	51	55	55	49	53	53	46	51	51	

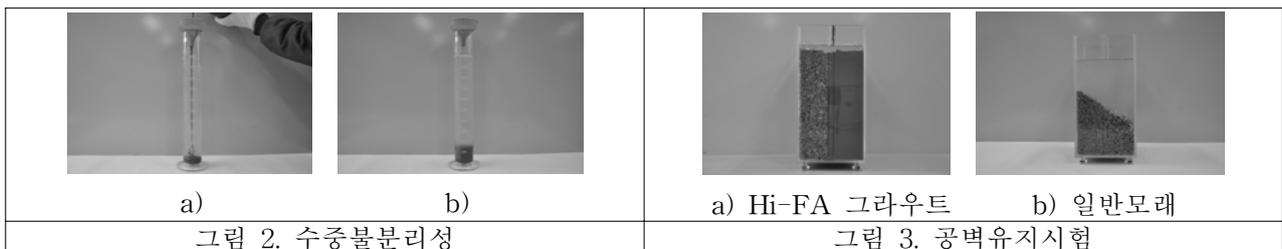
본 연구에서 사용된 Hi-FA220MVW Grout의 유동성은 표 4.에서 보이듯이 사용량과 온도에 따라 비례적으로 변화함을 알 수 있다. 또한 온도에 따른 유동성은 표 4.에서 보이듯이 약 15 ~ 20°C에서 가장 적합한 상태를 보이고 있으며, 물 온도 20°C 이상에서는 점도의 감소에 따른 유동성이 증가하고 있음을 알 수 있었다.

2.3 역학적 특징

Hi-FA를 첨가한 Grout의 현장적용성을 사전 검토하기 위하여 점성, 유동성, 침투성, 공벽유지성능 등을 모형시험을 실시하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

2.3.1 수중불분리성

그림 2.와 같이 물이 채워진 메스실린더에 Hi-FA를 첨가한 Grout는 수중에 투입하였을 때 그림 2(a).와 같이 재료가 분리되지 않고 바닥에 Grout만이 가라앉는 결과를 보여 Hi-FA Grout는 수중불분리성을 가지는 것을 알 수 있다. 점성을 높이거나 낮추어도 수중불분리성은 유지되는 것으로 측정되었다.



2.3.2 공벽유지

공벽유지시험을 위해 높이 50 cm, 가운데 칸막이가 된 사각 아크릴 통에 한쪽에는 모래를 채우고 다른 쪽에는 Hi-FA를 첨가한 Grout를 채운 상태에서 가운데 칸막이를 제거한 결과 그림 3(a)에 보이는 대로 모래층이 무너지지 않고 유지되는 결과를 알 수 있어 일반모래층에서도 공벽유지에 탁월한 성능을 보이는 것으로 판단된다.

2.3.3 유동성/침투성

2.3.2절 공벽유지시험에서 사용한 사각통을 사용해 한쪽에는 자갈을 채우고 다른 쪽에는 Hi-FA Grout를 채운 상태에서 가운데 칸막이를 뽑아 올렸을 때 그림 4와 같이 Hi-FA를 첨가한 Grout는 별도의 첨가제를 사용하지 않아도 유동성이 좋아 탁월한 침투성을 보인다. 유동성은 점성을 조절하면 침투범위를 조절할 수 있다. 점성이 낮을수록 침투범위는 넓어지는 것으로 측정되었다.

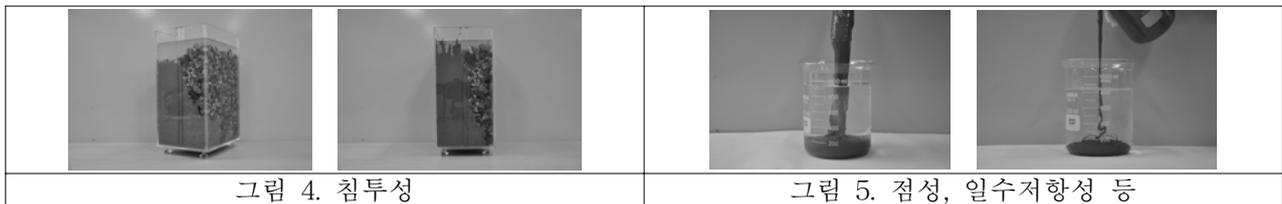


그림 4. 침투성

그림 5. 점성, 일수저항성 등

2.3.4 점성/일수저항성

Hi-FA를 첨가한 Grout는 그림 5와 같이 블리딩이 일어나지 않는 일수저항성을 보인다.

2.3.5 조기강도

표 5. Hi-FA Grout 압축강도 시험결과

W/C	Hi-FA 첨가량	최종블리딩률	압축강도 (N/mm ²)	
			3일	7일
50 %	물 × 3 %	0.0 %	21.3	26.5

표 5.에서 나타난 바 W/C 50%, Hi-FA 첨가량 3%(물 대비)로 제작한 Grout를 시험한 결과 블리딩률 0%로 나타났으며 3일, 7일 강도는 각각 21.3, 26.5N/mm²로 조기강도가 양호한 것으로 측정되었다.

2.3.6 고찰

시험결과를 종합해보면 Hi-FA를 첨가한 Gout의 경우 일반 Grout에 비해 점성이 높고 유동성이 좋아 침투성이 뛰어나며 공벽유지에 탁월한 성능을 보이며 장기강도와 조기강도도 매우 우수하게 측정된다.

2.4 환경적 특성(친환경성)

2.4.1 환경적 특성 개요

지반개량을 위해 주입하는 Normal 그라우트제는 시멘트로부터 염기성 물질의 용출과 수중의 현탁화

및 중금속으로 인한 주변 토양 및 지하수의 오염을 야기하고 있다. 본 신재료인 Hi-FA Grout는 고점성으로 인해 시멘트의 염기성 물질의 용출이 적어 수질오염을 줄여주고, 시멘트의 거동으로 인한 탁도 문제가 현저히 감소되는 특징을 가지고 있다. 환경적 영향을 살펴보기 위해 pH, 탁도, 어독성을 측정함으로써 수질오염 및 환경적으로 미치는 영향을 간접적으로 평가하고자 한다.

2.4.1 시험기구 및 장치

KS M 0111 규정을 참고하여 다음과 같이 구성하였다. 시험 수조는 깨끗한 유리제로서 용량은 3ℓ 비이커로 하였고, 물의 온도는 20°C±2°C를 유지하도록 한다. 공시어는 수온, 먹이 취급 등 실험실 내의 생존조건에 적합한 것으로 크기가 고르며 건강하고 한번에 다수 채집이 가능한 송사리목 구피과로 한다. pH meter는 경과시간에 따라 pH를 측정하기 위해 비이커내에 설치한다. 탁도는 경과 시간별로 시료를 채취하여 측정했다.

- 3ℓ 비이커 5개
- 구피 50마리 (Guppy, Poecilia reticalata)
 - (㉠) 경골어장, 진구아강, 송사리목, 구피과
 - (㉡) 사용 : 환경오염물질, 발암물질, 최기형성물질, 중금속, 농약 등의 독성 연구에 가장 많이 이용
- 시멘트 그라우트재 50g, 100g
- Hi-FA 그라우트재 50g, 100g

2.4.2 시험조건의 결정

시험조건은 현장과 유사하게 세팅하는 것이 타당하나 본 시험의 경우 시멘트 그라우트재와 Hi-FA 220 MVW 4%를 첨가한 Hi-FA Grout재를 비이커에 각 50g, 100g을 투입하여 그라우트재의 수질오염 정도를 pH, 탁도, 어독성 시험을 통해 간접적으로 비교, 평가해 보고자 한다.

2.4.3 pH 결과

표 6. 물/ 시멘트 수용액의 pH 거동 (50~100g/3ℓ)

시간(분)	Grout					비고
	Blank	Normal		Hi-FA 220MVW 4%		
		50g/3ℓ	100g/3ℓ	50g/3ℓ	100g/3ℓ	
0	7.67	7.67	7.67	7.67	7.67	
60	8.05	12.11	12.14	10.33	10.34	
120	8.10	11.89	11.90	10.43	10.45	
180	8.11	11.93	11.98	10.82	10.86	
240	8.09	12.08	12.18	10.88	10.85	
300	8.10	11.98	12.09	10.90	10.88	
360	8.08	12.07	12.07	10.95	10.90	
420	8.06	12.14	12.14	10.93	10.98	

측정기기 : pH 검사 기기 : ISTEK사 P15 pH Meter(KOREA)

표 6.에 나타나듯이 물 시멘트 50% 의 일반 그라우트와 물 시멘트 50%에 Hi-FA 220MVW Grout(4%)의 큰 차이는 시멘트가 함유한 염기성 물질의 배출 속도가 현저히 다르다는 것을 알 수 있으며, 이 차이로 인한 환경오염 및 수저생물에 대한 영향에 크게 다를 것으로 예측된다.

또한 Grout의 농도보다는 종류에 의한 차이가 훨씬 중요한 요소임을 알 수 있었다.

2.4.4 탁도 결과

표 7. 물/ 시멘트 수용액의 탁도 거동 (50~100g/3ℓ)

시간(분)	Grout					비고
	Blank	Normal		Hi-FA 220MVW 4%		
		50g/3ℓ	100g/3ℓ	50g/3ℓ	100g/3ℓ	
0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
10	0.5	206.0	213.0	6.2	10.5	
30	2.1	58.0	61.0	9.8	10.3	
60	3.2	30.0	32.0	13.0	10.3	
90	3.4	23.6	25.8	10.3	10.5	
120	3.5	19.6	18.9	7.7	10.9	
180	3.5	15.5	16.7	5.1	10.9	
240	3.5	14.9	15.3	5.0	10.9	
300	3.3	15.3	16.9	5.3	10.9	
360	3.6	15.4	15.4	5.1	10.9	
420	3.4	14.1	14.6	4.9	11.0	

측정기기 : 탁도 검사 기기 : EUTECH INSTRUMENTS사 TN-100(SINGAPORE)

표 7.에서와 같이 물 시멘트 50%의 일반 Grout는 Cement가 투입 직후 급격한 시멘트의 용출이 일어나 탁도 측정이 불가능하여 10분 경과 후부터 측정했다. 측정된 결과를 살펴보면 Hi-FA 220MVW을 사용한 Grout는 아주 서서히 용출되어 순간적인 충격을 주지 않는다는 점을 예측할 수 있다.

2.4.5 어독성 시험 결과 고찰

어독성 시험은 3ℓ 비이커 5개에 각각 구피 10마리를 넣고 두 번째, 세 번째 비이커에는 일반 시멘트 그라우트재 50g, 100g을 투입하였고, 네 번째, 다섯 번째 비이커에는 Hi-FA Grout를 50g, 100g을 투입하여 비교시험을 진행한 결과 일반 시멘트 그라우트 50g을 넣은 비이커에는 100분에 10마리 전체 치사되었고, 100g을 넣은 비이커는 70분에 10마리 전체 치사되었다. Hi-FA 그라우트재를 넣은 비이커에는 420분 후에 10마리 중 9마리가 치사 되었다.



그림 6. 어독성 시험 사진

Hi-FA 그라우트는 일반 시멘트 그라우트재와 비교해서 수중불분리성과 점성의 특성을 가지고 있어 일반 시멘트 그라우트재에서 발생하는 일수현상이 없는 특징이 있으며, 일반 시멘트 그라우트재의 경우 시멘트의 알칼리 성분이 지하수에 용출되지만 Hi-FA 그라우트재는 지하수에 용출되는 것을 완화시키며, 토양 및 지하수의 오염을 줄이거나 방지하여 환경적으로 유리한 신 재료이다.

표 8. 시멘트 그라우트제와 Hi-FA 그라우트제를 첨가할 때 어독성 시험 결과

	시멘트 그라우트				Hi-FA 그라우트			
	50g/3리터		100g/3리터		50g/3리터		100g/3리터	
	COD	결과	COD	결과	COD	결과	COD	결과
투입 전		자유롭게 활동		자유롭게 활동		자유롭게 활동		자유롭게 활동
투입 10분		상층부로 이동			20이하		20이하	
투입 30분								
투입 40분				6마리 치사		상층 이동		
투입 50분		2마리 치사		8마리 치사				
투입 60분		6마리 치사		9마리 치사	20이하	움직임 둔함	20이하	움직임 둔함
투입 70분		8마리 치사		10마리 치사				
투입 80분		9마리 치사						
투입 90분								
투입 100분		10마리 치사						
투입 120분					20이하			
투입 180분					20이하	1마리 치사		
투입 240분					22.4		22.5	1마리 치사
투입 300분					34.9	5마리 치사	55.9	4마리 치사
투입 360분					68.1	9마리 치사	71.3	5마리 치사
투입 420분					88.6	9마리 치사	100이상	9마리 치사

참고1. 시멘트 그라우트 COD는 시멘트가 무기질이므로 COD 변화 없음.

참고2. COD 검사 기기 : HUMAS사 HS-1000NP Water analyzer(KOREA)로 측정범위가 20~100ppm

위 시험 결과(표 8.)로 볼 때 시멘트에서 용출된 알칼리성 물질이 물고기에 가장 큰 위협으로 작용한 것으로 보이며, 시멘트 그라우트의 경우 투입 후 곧 바로 수소이온 농도가 12부근까지 상승하나, Hi-FA 그라우트의 경우 서서히 상승함을 알 수 있고 이 차이가 결국 물고기의 생존 시간을 결정하는 요인으로 판단된다.

3. 현장 적용 사례

3.1 지반모형시험

본 논문에서 소개한 Hi-FA Grout제를 이용하여 오창 OO현장 내에서 모형 시험을 실시하여 정수압 상태의 모래자갈층에서의 각 사용 주입압력에 따른 그라우트제의 확산 범위와 투입량, 투입시간을 확인하였다. 사용되었던 모형체의 모식도와 모사한 지반조건은 다음과 같다.

표 9. 모형체 재원

구분	흡관	지반조건	수위	투입 Casing
규격	ID. 1200mm Hihgt 2400mm	모래섞인 자갈 (D 20~30mm)	정수위 상태	OD. 146 mm ID. 135 mm

본 모형 시험에 사용된 모형체의 모식도와 지반 조건은 다음과 같다.

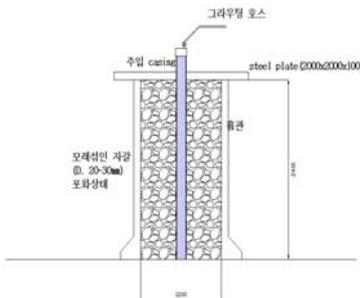


그림 7. 모형체 모식도

구분	자갈 size (mm)	함수비 (%)	건조 단위중량 (t/m ³)
모래섞인 자갈	20~30	20	1.6
	포화 단위중량 (t/m ³)	간극비	간극률
	1.92	0.47	0.32

표 10. 모형체 지반조건

표 10.과 그림 7.에서 명시된 조건과 같이 내경 1200mm의 흠관을 이용하여 내부에 모래섞인 자갈을 각 층별로 속채움을 하고 층별 물다짐을 실시하여 자연 상태 정수위 조건을 모사하였다. 또한 그라우팅 주입에 의한 지층의 용기를 막기 위하여 흠관 내부를 속채움 한 후 상부에 3ton 중량의 steel plate를 거치하여 주입에 따른 용기를 방지하고 자연상태에서의 상부 토괴압이 작용하도록 설치하였다.

모형체의 지반 조건은 표 10.과 같다.

3.1.1 시험 수행 조건

모형 시험의 수행은 표 11.과 같이 주입압을 주지 않은 상태에서의 자연 침투 조건과 저압의 주입압을 사용하여 침투시킨 조건 두가지로 구분하여 수행하였다.

표 11. 시험 수행 조건

조건	주입압	W/C	Hi-FA	사용 케이싱	비고
Type-1	무압	50 %	3%(물)	O.D 146mm	
Type-2	10~20kg/cm ²	50 %	3%(물)	I.D 135mm	



그림 8. 모형체 시험 과정

본 시험은 그림 8.과 같이 흠관에 모래섞인 자갈을 속채움한 후 50cm 간격으로 물을 주입하여 충분히 포화시키는 과정을 반복하여 정수위를 유지하여 최대한 자연 상태의 지중 조건을 확보하였다.

또한 기 설치된 케이싱을 이용하여 Hi-FA grout 전용 펌프를 사용하여 각 주입조건에 맞게 주입을 실시하였다.

3.1.2 시험 수행 결과

본 모형 시험은 모사된 자연상태(지중, 포화)의 지반 조건에서 주입압을 사용하지 않은 조건과 10~20kg/cm²의 저압 주입을 사용하여 확산된 직경을 확인하였다. 본 모형체 시험 결과는 다음과 같다.

표 12. 모형체 시험 결과

구분	주입압 (kg/cm ²)	케이싱 직경 (mm)	주면 확산직경 (mm)	선단 확산직경 (mm)	확산률(%)	
					주면부	선단부
Type-1	무압	146	200~300	300~350	137~205	205~240
Type-2	10~20	146	400~500	600~850	274~342	411~479

	 <p>(a) 무압조건</p> <p>(b) 무압조건</p>	 <p>(c) 저압조건</p> <p>(d) 저압조건</p>
<p>Grout체 형상</p>	<p>(a) 확산직경 : 200 ~ 300mm (b) 확산직경 : 300 ~ 350mm</p>	<p>(c) 확산직경 : 400 ~ 500mm (d) 확산직경 : 600 ~ 850mm</p>

그림 9. 시험 결과 확인

본 모형체 시험 결과 주입압을 사용하지 않았을 경우와 저압의 주입압을 사용하였을 때의 확산 범위는 표 12.와 같이 나타났으며 무압 주입시 casing 직경 대비 주변부는 약 137~205% 정도의 확산률을 보이고 있고 선단부의 경우 약 205~240% 정도의 확산률을 보이고 있다. 또한 저압 주입시는 확산 범위가 커 주변부의 경우 약 274~342%, 선단부의 경우 약 411~479% 정도의 확산률을 보이고 있다.

따라서 본 Grout제의 경우 수중불분리의 특성(고 점성)과 함께 수중 침투성이 뛰어나 저압의 주입조건하에서도 확산 범위를 유동적으로 조절이 가능한 것으로 나타났다.

3.2 양양 OO현장 적용시험

양양 OO현장은 현장타설말뚝의 정재하 시험용 반력 Anchor 시공 중에 Hi-FA 재료를 사용하였다. 그 결과 Anchor 설계시 심도결정에 영향을 주었으며 일반 그라우팅과 Hi-FA 재료를 사용한 Anchor 인발시험의 사례를 소개하고자 한다.

3.2.1 시공특성

본 현장의 지반 상태는 호박돌층, 풍화암층, 연암층으로 구성되어 있고 호박돌(N:50/19, 실트질 모래)층의 심도(26.0m)가 깊고 지하수위가 높아 일반 그라우팅 재료를 사용할 경우 지하수에 의한 희석과 인근 하천수의 흐름에 의한 일수현상에 의해 정착부로서의 역할을 수행하기 어렵다. 또한 그라우팅의 희석과 인근 하천수로의 유입은 하천의 오염등 환경문제로의 위험성이 내재되어 있다. 따라서 본 현장에서 Hi-FA Grout제를 사용하여 수중불분리의 특성과 고 점성, 고침투성의 특성을 활용하여 호박돌층에서의 정착구간의 확보 및 Grout제의 희석을 방지하여 경제성과 친환경성을 확보하고자 하였다. 일반 시멘트 그라우트를 사용하여 앵커를 시공할 경우 약 33.0m의 시공 심도가 필요하였으나 본 Hi-FA 재료를 이용하여 앵커 시공시 호박돌층 약 10.5m 정도로 시공심도를 설계 계획하였다.

본 현장에서는 설계된 10.5m로 일반 그라우팅과 Hi-FA를 이용한 그라우팅으로 시공을 수행하였으며 3일 양생 후 인발시험을 수행하여 그 성능을 확인하였다.

Anchor 강선 12.7mm 10가닥, 일반시멘트, Hi-FA+일반시멘트, Hi-FA+조강시멘트 세가지 조건으로 나누어 시공하였다.

3.2.2 인발재하시험 결과

본 시험은 시공 후 3일후에 실시하였으며 본 시공 조건이 자유장 없이 올 그라우팅을 실시하여 시공 하였으므로 앵커체와 그라우트재로 이루어진 복합말뚝 개념으로 해석을 수행하였다.

표 13. 인발재하시험 결과 하중 변위 곡선

일반시멘트	Hi-FA+일반시멘트	Hi-FA+조강시멘트	해석조건
			① 일반시멘트 con'c 강도: 120kg/cm ² 탄성계수 : 2264.3ton/cm ² ② Hi-FA 이용 con'c 강도 : 150kg/cm ² 탄성계수 : 2283.7ton/cm ²

재하시험 결과 일반시멘트 그라우팅을 사용했을 경우 최종하중 115ton 일때 최종변위량 104.91mm, Hi-FA+일반시멘트 그라우팅을 사용했을 경우 최종하중 156ton 일때 최종변위량 89.35mm, Hi-FA+조강시멘트 그라우팅을 사용했을 경우 최종하중 170ton 일때 최종변위량 81.19mm로 나타났다.

이와 같은 시험결과로 보면 일반시멘트 그라우팅보다는 Hi-FA를 이용하여 그라우팅시 최종하중 및 인발량에서도 현격한 차이를 볼 수 있었다.

3.2.4 시험 결과 종합

본 현장의 시험 결과 조강 시멘트를 사용한 일반 그라우팅(w/c 50%)에 의한 복합체와 Hi-FA 그라우팅을 이용한 복합체의 인발저항 성능은 최종 확인하중 115ton(일반 그라우팅)과 155~170ton(Hi-FA 그라우팅)으로 나타났으며 그 결과를 비교하면 약 34.5~47.8% 정도의 증가된 성능을 보이고 있는 것으로 판단된다. 또한 시공 시 일반 그라우팅의 경우는 희석과 일수 현상에 의한 재 주입이 요구되었지만 Hi-FA 그라우팅의 경우 희석과 일수 현상에 의한 재 주입이 필요치 않아 친 환경적인 성능도 발휘되고 있음을 알 수 있었다.

4. 신 재료의 활용성

4.1 지반 보강재 및 개량재로 활용

신재료를 활용한 지반보강공법인 HIS(Hi-FA Grouted Ground Improvement System)공법은 고점성, 고유동성, 친환경성 신 재료인 Hi-FA Grout를 이용한 무압 또는 저압의 Grouting System으로서 지반 교란을 최소화하고, 지반 보강 범위를 현장 조건에 맞추어 자유로이 조절이 가능한 맞춤형 공법으로, 연약지반 및 지반 보강이 필요할 때 Hi-FA 신재료를 이용한 지반보강공법에 활용한다면 기존 지반 보강 법인 약액주입, 고압분사, CGS 공법 등보다 다음과 같은 장점을 가지고 있을 것으로 사료된다.

Hi-FA 그라우트는 높은 점성을 유지하면서도 유동성이 좋아, Hi-FA 그라우트를 이용한 무압 또는 저압의 Grouting System으로서 지반교란을 최소화하고, 지반 보강 범위를 현장 조건에 맞추어 자유롭게 조절이 가능하여 현장 맞춤형 공법에 활용할 수 있을 것이다.

또한 Hi-FA 재료의 조기 강도 특성이 우수하여 양생기간 동안 공사 기간을 단축할 수 있을 것이며, 그라우트의 높은 점성 유지 능력으로 말뚝의 공벽 유지가 가능하며, 높은 재료분리저항성과 지반 이완 방지 효과가 있을 것으로 사료되며, 이러한 특징을 기반으로 시공성이 우수하고, 친환경적인 특징을 가

진 공법으로 활용 가능할 것이다.

4.2 충전재로의 활용

투수계수가 높은 지반이나, 하천이나 해안가 또는 계곡 등 지하수의 흐름이 있는 지반에 매입형 현장 타설말뚝을 시공하는 경우에 종래 매입형 현장타설말뚝 시공 방법은, 시멘트 슬러리, 시멘트 페이스트, 콘크리트 등과 같은 일반적인 그라우트재가 유출되거나 지하수에 의하여 그라우트재가 희석되어 주변 마찰력이 감소되고 내구성 및 하중분담효과가 저하된다. 또한 점토나 깃벌 등에서 말뚝을 시공할 경우에 종래 매입형 현장타설말뚝 시공 방법으로는, 천공구에 그라우트재가 완전히 채워지지 않기 때문에 주변 마찰력이 감소되는 문제가 있다. 또한, 모래받이나 충적층 등의 연약 지반에 매입형 현장타설말뚝을 시공하는 경우에 종래 매입형 현장타설말뚝 시공 방법은, 말뚝과 천공구 사이의 공간만을 채우도록 투입 완료된 일반적인 그라우트재가 천공구 주변의 지반으로 서서히 침투해버려서 그라우트재 미충진으로 인하여 말뚝 수평저항력이 감소되고, 내구성 및 하중분담효과가 저하되어 말뚝이 침하되는 문제가 있다.

특히 400km/h 이상 달리는 초고속열차의 철도교는 열차진동, 지진, 반복(수평)하중 및 충격수평하중에 대한 지표부 수평저항성능이 강하고, 기초 선단부 슬라임이 제거된 장기안정성이 확보된 고내구형 기초가 요구되고 있다. 현재 고속열차의 기초로 가장 많이 사용되고 있는 매입말뚝의 기존 시멘트 페이스트 충전재는 강도가 낮고 시멘트 용출 등 일수현상으로 인해 지표부 지반의 이완, 미충진으로 인한 수평저항성 감소, 내구성 및 하중분담효과를 기대할 수 없으며, 시멘트계 충전재의 중금속 등 발암물질 용출로 인한 환경오염문제를 내포하고 있다. 현장타설말뚝의 경우는 선단부 슬라임에 의한 장기 변형문제를 안고 있다. 따라서, 고성능 다기능의 신재료를 이용한 충전재로 개발 및 충전 방법 및 슬라임제거 방법 개발 등을 통해 미래형 초고속철도교의 내진, 내수평력, 장기안정 성능이 향상된 신개념의 친환경 기초 매입형 현장타설말뚝 시공법으로 활용이 가능할 것이다.

4.3 속채움재로의 활용

현재 속채움 구조체를 콘크리트로 속채움하는 공법에는 여러 가지가 있다.

일반적인 현장타설말뚝과 기성 말뚝 공법의 경우에는 천공한 후 케이싱 또는 강관을 삽입하고 레미콘 형태로 먼저 콘크리트를 배합하여 펌프카를 통해 상기 삽입된 케이싱 또는 강관 내부에 콘크리트를 타설하여 속채움을 시공하게 되는데, 즉 속채움되는 콘크리트는 사전에 시멘트, 물 및 골재 등을 미리 혼합하여 사용되는 것이다. 따라서 콘크리트 재료들을 충분히 혼합하더라도 좁고 깊은 공간에 속채움 타설시 재료별 분리 현상이 발생되거나 구조체 내부 충전 상태 불량으로 결함부(공간 또는 공극)가 생성될 가능성이 크다. 특히, 구조체로서 길이가 긴 강관이 이용될 경우 속채움 깊이 역시 좁고 매우 깊게 되므로 재료 분리 현상이 더욱 현저히 발생되며, 재료간 공극을 제거하고 밀도를 확보하기 위하여 봉으로 찌르기 등을 추가적으로 수행할 수도 있으나, 골재와 골재 사이의 공극을 제거하는 것이 곤란한 문제점이 있고, 공극으로 인하여 재료들이 서로 분리되어 내구성이 현저히 저하되는 문제점도 있었다.

더구나, 말뚝을 시공할 현장이 수중이나 해수 중일 경우에는 콘크리트의 수중 분리로 인하여 시멘트 유실 및 희석 등이 발생되어 강도 안정성 및 내구성이 현저히 저하되고 유실된 시멘트로 인하여 환경이 오염되는 문제점이 있었다.

액상 초고점성 및 유동성 그라우트재인 Hi-FA 그라우트를 활용한 속채움 구조체 시공 방법으로 위에 명기된 문제점을 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

신재료인 Hi-FA를 활용한 속채움재 공법의 특징은 속채움 구조체를 형성하기 위한 구조체를 설치하고 내부를 굴착한 후 물을 주입한 다음 액상 초고점성 및 유동성 그라우트재를 타설하고 골재를 투하함으로써 시공성을 향상시키므로 공사 기간을 단축시키고, 재료 분리성이 낮기 때문에 골재 사이의 공극 발생을 제거하여 내구성 및 강도 안정성이 보장되는 효과가 있다.

또한 Hi-FA 그라우트재가 경화 지연이 작아 강도 발현성이 뛰어나기 때문에 조기 강도 실현이 가능

한 효과가 있으며, 재료 유실이 없으므로 환경 오염을 최소화하는 효과가 있을 것으로 사료된다.

5. 결론 및 제언

연약 점성토 지반, 지하수 흐름이 있는 사력 지반, 느슨한 모래 지반 등 기초 지반으로서의 활용을 위해서는 별도의 보강 및 개량 등이 필요한 지반의 경우 보강재료로서 시멘트계 재료와 물유리 등을 이용한 화학 약액계 재료가 많이 사용되어져 왔다. 지반 조건과 보강 목적에 따라 배합비 조절, 주입 방법 조절, 장비의 개발, 배합재료의 조절 등을 통해 지반보강 공법 또한 매우 다양하게 개발되어져 왔다.

그러나, 기존 재료, 특히, 시멘트계의 경우 지하수위가 높고 지반의 투수계수가 높거나 하천이나 해안가 또는 계곡 등에 위치하여 지하수의 흐름이 있는 경우에 시멘트 유출로 인해 보강효과를 기대할 수 없으며, 점성토 지반에서는 재료의 밀실한 시공이 어려운 경우가 많았다. 또한, 화학약액계의 경우 강도나 차수측면에서 불확실성을 내포하고 있다. 특히, 고압분사 및 고압교반공법의 경우 지반교란이 심하여 근접 시공시 주변구조물에 악영향을 초래할 수 있고 부배합재료를 이용한 압밀주입의 경우 침투범위 조절이 어렵고 상대밀도가 큰 지반이나 피압을 받는 지반의 경우 시공성이 떨어지는 문제점이 있다. 따라서, 다양한 지반조건에도 적용가능하고 침투효과나 보강효과 등을 확실히 기대할 수 있는 보강재료 및 공법 개발은 매우 중요한 과제중의 하나이다.

본 연구에서는 고유동성, 고점성, 조기강도 특성 등을 동시에 갖고 있어 재료분리 저항성, 일수 저항성, 수중 불분리성, 탁월한 침투 특성, 양생기간 감소 등 다양한 측면에서 매우 유리한 특성을 가진 고성능 다기능의 신재료를 개발하여 기존 기초 보강 공법이 갖고 있었던 많은 문제점들을 해결할 수 있는 방법을 모색하고자 하였다. 이를 위해 개발된 재료의 점성, 유동성, 침투성, Self-Leveling, 공벽유지, 수중불분리성, 일수저항성(지하수 회석 및 재료 용출 최소화) 및 조기 강도, 장기 강도 특성 등을 확인하였으며, 신재료의 다양한 활용을 위해 재료표준, 시공표준 등을 수립하기위한 다양한 시험을 실시하였다.

그 결과 고점성, 고유동성, 침투성 및 공벽유지 특성이 우수하고, 조기 강도 특성 이외에 지하수에 의한 회석이 발생하지 않아 지하수 오염 등 환경문제에의 대처가 가능하고 장기 강도가 크게는 $300\text{kg}/\text{cm}^2$ 내외로 확보 가능해짐에 따라 충전재 기능 이외에 구조체 역할도 함께 분담할 수 있는 기초 공법 및 보강공법으로의 적용이나 기존 매입말뚝 보강시 지지 메커니즘이 전혀 다른 형태의 신개념 말뚝공법의 개발도 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 중구경 및 대구경 현장타설말뚝, 마이크로파일, 그라운드 앵커, 쏘일네일링, 강관다단그라우팅 등 시멘트 주입이 필요한 보강공법에도 충분히 활용 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 천병식(1998), “최신지반주입-이론과실제-”, 원기술, pp. 17-37
2. 천병식(2001), “지반개량재료로서의시멘트사용에의한지반오염문제및대책”, 한국지반공회지, pp.19~22
3. 한국지반공학회(1997), “지반공학시리즈6 - 연약지반”, 구미서관. pp.17-183.
4. 한국지반공학회(1997), 진동 및 내진설계, 도서출판 구미서관
5. 한국지반공학회(2003), “구조물기초기준설계해설”, 구미서관
6. 한국표준협회, “KS M 0111-1993”, 공장 폐수 시험방법”(1990), pp.296~300.
7. Michell, J. K.(1992) "*Reinforcement of earth slopes and embankments*", NCHRP-290, Transportation Research Board
8. T.S Nagaraj(2000), "*Composite Soft Ground - Its Formation and Characterization*", Special Invitation Lecture, pp.1-25