

Hi-FA(유동성 및 점성 개질제)를 이용한 지하공동 보강사례 Reinforcement of underground cavities by Hi-FA(High performance and Multi functional Agent)

임해식¹⁾, Hai-Sik Lim, 박영호²⁾, Yeung-Ho Park, 백규호³⁾, Kyu-Ho Paik, 이용준⁴⁾, Yong-Jun Lee, 박수용⁵⁾, Su-Yong Park

- 1) 한국토지주택공사 주택설계총괄처 차장 , Dupty General Manager Korea Land & Housing Corporation.
- 2) 한국도로공사 도로교통연구원 건설기반실장, Director Reseacher Engineer, Infrastructure Research Division, Expressway & Transportation Research Institute, KEC
- 3) 관동대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kwandong University
- 4) (주)포스코건설 기술연구소 부장, General Manager of Research & Engineering Division, POSCO Engineering & Construction Co., Ltd.
- 5) (주)백경지앤씨 TPC사업부 부장, General Manager of Total Pile Care Division, BKGNC

SYNOPSIS : Damage Cases of variously type are reported that the ground subsidence is caused by the underground cavities at structure and construction works in lime stone or abandoned zone. A underground cavities by direct for zone having an effect on structure have been filled with cement agents. But this measure is urgently needed in materials and work methods, because ground water pollution at water down fillings and flow out, ground disturb at high participle , damage of farms and fishery. The research confirm application of filling method and filling materials of environmentally friendly and economical by Hi-FA new materials have both liquidity and viscosity from case reinforcement in APT site, Gunsan

Key words : Hi-FA, HGF

1. 서 론

석회암 지대나 폐광지역은 구조물 및 시설공사 과정에서 지하 공동으로 인해 지반함몰 및 침하 등 다양한 형태의 피해사례가 보고되고 있다. 지하 공동의 지반보강공법에는 직접 충전하는 공동충전 공법과 구조물에 영향을 미치는 부분에만 국부적으로 보강하는 국부보강 공법이 있다. 공동충전 공법에는 수압식과 공압식이 있으며, 충전재로 시멘트 고화제가 주로 이용되었다. 그러나 충전재료의 지하수 희석 및 용출, 유실 등으로 인한 지하수 오염문제, 가축이나 어장의 피해, 고압에 의한 그라우팅으로 오히려 지반을 교란시켜 악영향을 미치는 등 재료나 공법 측면에서 보다 향상된 방안 마련이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 군산 OO아파트 현장 기초 하부에 형성된 공동의 보강사례를 통해 유동성과 점성을 동시에 발휘시키는 Hi-FA 신재료를 이용하여 시멘트 유실로 인한 지하수 오염을 최소화할 수 있는 친환경적이고 경제적인 지하공동 충전재료 및 충전방법의 적용성을 확인하였다.

2. Hi-FA(유동성 및 점성 개질재)의 재료 특성

2.1 재료의 역학적 특성

여기서 사용한 Hi-FA 그라우트재의 특성은 수중불분리성, 유동성, 고점성, Self leveling, 조기경화성 등이 있다. 수중불분리성은 지하수나 하천수에 의한 일수(주입재가 지하수로 스며드는 현상) 및 회석이 되지 않고, 조기경화성의 특성은 이동하는 문제점이 없다. 이 특성으로 인해 환경피해를 최소화 할 수 있다. 또한 유동성, 고점성, Self leveling 특성에 의해 지하의 피압수에 의한 보강효과를 저해하는 요소를 최소화 할 수 있다. 또한 침투성이 커서 간극이 큰 모래자갈층의 침투에 탁월한 효과를 나타내고 있으며 침투범위 조정시에는 Hi-FA 수용액의 점성을 조절하여 보강범위를 조절 할 수 있다.(박봉근, 2010)

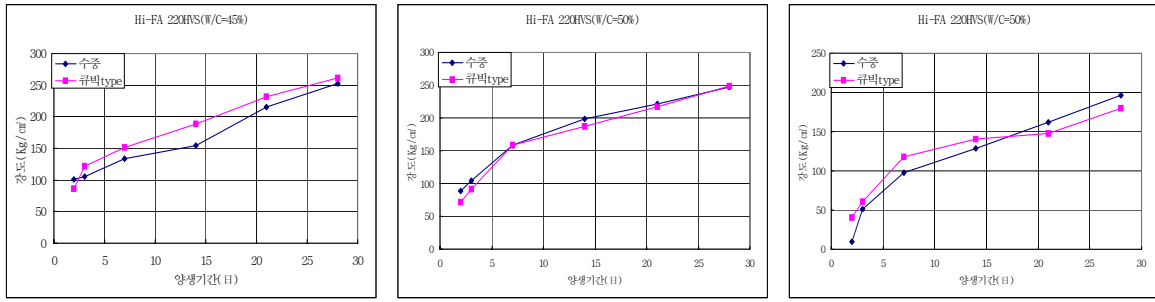


2.2 강도 특성

본 논문에 사용한 Hi-FA 그라우트 재료의 강도특성을 재령에 따라 측정하였다. Hi-FA 그라우트의 강도를 측정한 결과, Cement를 이용한 Hi-FA 그라우트재의 경우 재령 3일 이후에 100 kgf/cm² 이상의 강도 특성을 발휘하였다. 반면 Hi-Crete의 경우 재령 7일 이후에 100 kgf/cm² 이상의 강도가 발휘하였으므로, Hi-FA 그라우트재에 비해 강도가 다소 낮게 나타났다(박영호, 2004).

표 1. 물/시멘트비(W/C)의 변화에 따른 재령의 강도 변화

재령 (일)	Hi-FA 220HVS Grout(Cement 이용)			Hi-FA 220HVS Grout(Hi-Crete 이용)			비고
	W/C = 50%			W/C = 50%			
	실린더 타입		큐빅타입	실린더 타입		큐빅타입	
	기중	수중		기중	수중		
2	106	88	71	22	10	41	
3	117	105	92	68	51	61	
7	189	159	158	151	98	118	
14	214	198	187	189	129	140	
21	232	222	217	221	162	148	
28	280	247	249	230	197	180	



(a) 100% Cement (Hi-FA220HVS)

(b) Cement 70%+Hi-Crete30%

그림 5. 물-시멘트비(W/C) 변화에 따른 재령의 강도 변화

註) 큐빅 타입 : 5cm×5cm×5cm의 정육면체, 실린더 타입 : 반지름 5.7cm, 높이 11.4cm인 원기둥

3. HGF(Hi-FA Green Fill) 공법

3.1 공법 개요

Hi-FA 그라우트재를 이용한 Hi-FA Green Fill 공법(이하 HGF공법)은 저압의 그라우팅 시스템으로서 지반교란을 최소화하고, 지하공동 보강범위를 현장조건에 맞추어 자유로이 조절이 가능한 맞춤형 공법이다. 또한 이 공법은 공동보강시 조기경화성의 특징으로 공기단축을 도모할 수 있다.

3.2 공법 비교

주입특성, 환경성, 시공품질, 시공성, 경제성, 고객편의성, 그리고 안정성 관점에서 HGF 공법과 기존의 (초)고압분사공법을 표 2와 표 3에 나타내었다.

표 2. (초)고압분사공법 VS. HGF공법

구 분	기존 (초)고압분사 공법	HGF 공법
주입 특성	고압분사 절삭	침투, 맥상 주입
주입 방식	2 ~ 3 중관	Casing 후 Rod관 주입
슬라임	주입체적의 약 50%	없음
주입 범위 형성 (mm)	Ø800 - Ø1,400 ^(박영호, 2004)	보강 범위 조절 가능
주입 재료	시멘트+물+약액	Hi-Crete (시멘트계 친환경 주입재료)
적용 토질	N치 30이하 토질	모든 토질 (특히 포화된 모래 자갈층에 가장 유리)
환경영향	고압분사 유실	없음
기존구조물 영향	하부지반 연약화	없음
내구성	보통	우수

표 3. 일반 시멘트계 공법 VS. HGF공법

구분	비교 기준	일반 시멘트계 공동 보강 공법	HGF공법
친환경성	수질오염 (수중불분리성, 일수방지, 회석 및 용출)	지하수 회석, 용출, 일수현상 등으로 인해 지하수오염 발생 가능	완벽한 수중불분리성으로 지하수 오염 최소화
시공 품질	조기강도 특성	조강성 없음 (별도 혼화재 필요)	조강성이 좋아 공기단축에 유리
	강도 안전성 (수중불분리성에 따른 재료손실)	강도 저하(지하수 회석, 용출), 재료 손실(일수현상)	강도, 내구성, 침투성 등으로 보강 효과 최대
	지반 교란 (그라우트 주입압력 및 침투성)	주입압(중-고압)에 따른 지반 교란	무압 및 저압 주입으로 지반 교란 최소화
	일관성 (구조체 형성 범위 조절)	일관된 구조체 및 지반보강을 할 수 없음	공동 보강 범위 조절 가능 (공동보강범위 균질성 확보 가능)
시공성	주입시공성 (유동성, 침투성)	일수현상으로 추가 충전재 주입 필요	수중불분리성으로 일수현상 없어 추가주입 불필요
	압력 (무압 및 저압 주입)	초저압 주입 불가능	무압 및 초저압 주입 가능
경제성	천공비, 재료비용 비교	공사비가 비교적 고가(천공수가 많음)	천공수 적음. 재료손실 최소화
고객 편의성	시공 시간 비교	천공시간 및 양생시간 필요	천공시간, 양생시간 단축
안정성	장기시공품질 안정성	일수현상 및 재료 분리현상으로 장기 안정성 확보 미흡	수중불분리로 장기안정성 유리

4. 현장 적용 사례

4.1 군산 OO 현장 적용 사례

군산 OO 아파트 현장은 말뚝 시공시 나타난 지하공동으로 인해 하부 기초의 지내력 저하를 유발하였다. 본 공법을 사용하여 이를 보강한 사례를 소개하고자 한다.

4.1.1 현장 지반조사

본 현장의 지반조건은 상부로부터 매립층, 퇴적층, 풍화잔류토, 풍화토, 풍화암, 연암층이 순차적인 층서를 이루며 분포하고 있다. 주상도에 의하면, 공동위치는 현 지반고에서 하부에 23 m 지점에 공동이 존재하며, 그 두께는 3.5 m 깊이였고, 29.8 m 지점에 1.9 m 깊이로 공동 존재, 32.3 m 지점에 0.8 m 깊이로 공동 존재 등 대형공동 및 소규모 공동 등이 교호하는 형태를 보이고 있다

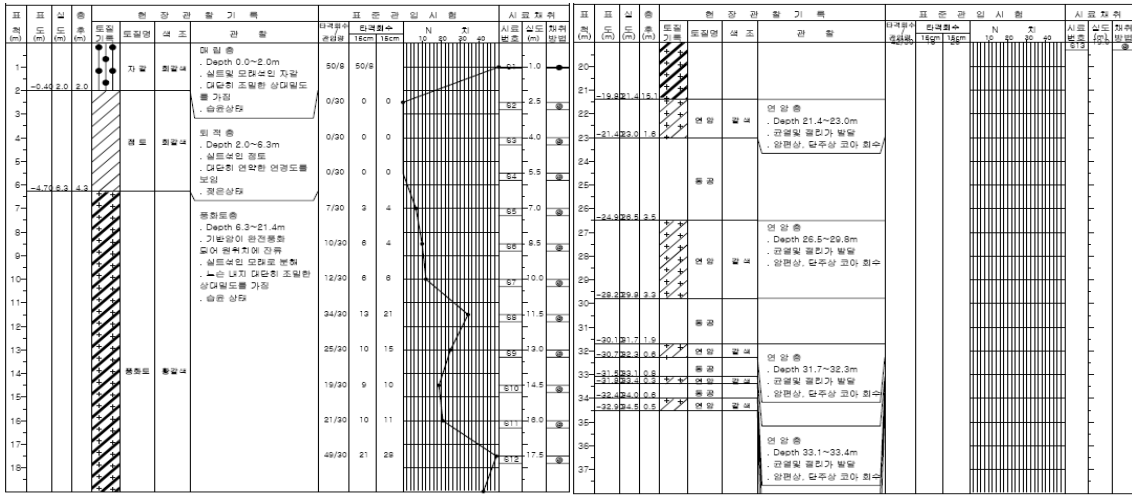


그림 5. 지반 시추조사 결과

4.1.2 수치해석

본 현장의 석회암 공동 규모는 시추조사를 통하여 이루어진 상태이다. 제일 깊은 공동의 심도는 3.5m로 매우 불규칙하게 분포하는 것으로 나타났다. 이와 같은 석회암 공동인 내재된 지반층에 구조물 기초가 시공될 경우에 지지력 부족 또는 과도한 침하 등의 지반공학적 문제가 유발될 수 있으며, 말뚝기초가 적용된 본 현장과 같은 경우 지지층인 연암 하부에 존재하는 공동의 붕괴에 의한 말뚝기초의 안정성에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 이와 같은 지반공학적인 문제점을 사전에 인식 및 예방하기 위하여 석회암 공동이 하부기초에 미치는 영향을 검토하고, 교량구조물의 허용지지력 및 허용침하량 기준을 초과할 경우 보강방안을 검토할 필요가 있다.

본 현장의 풍화토층 하부 연암층에서 다량의 석회암 공동이 확인되었다. 또한 하부로 갈수록 소규모 공동은 매우 매우 불규칙하게 분포하고 있으며, 지반보강을 실시한 후 말뚝을 시공하는 것으로 검토를 수행하였다. 보강대책에 대한 안정성 검토 방법은 그림 6과 같다.

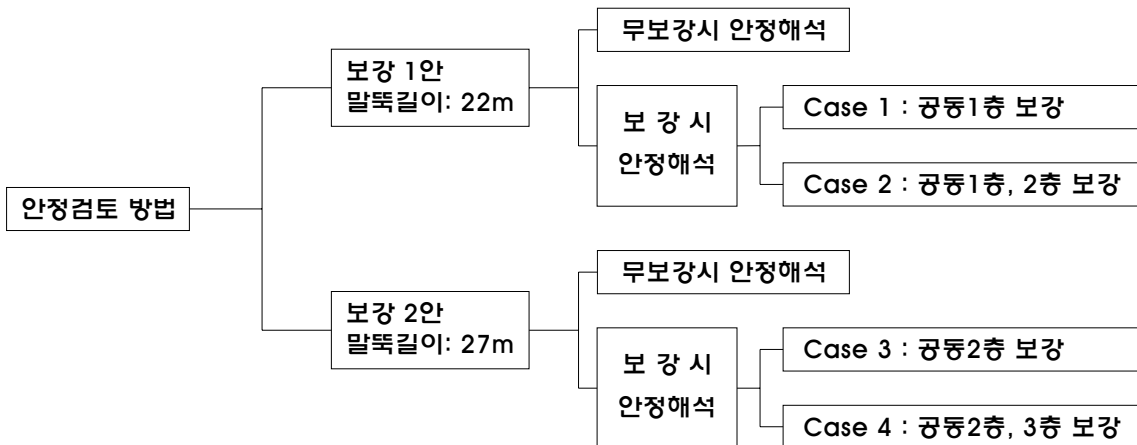


그림 6. 수치해석 방법

해석프로그램은 Midas-GTS를 이용하여 해석을 하였으며, 보강1안의 해석조건은 최초 출현하는 연암층에 0.5 m 관입시켰을 경우에 대해 해석을 Case별로 수행을 하였다. Case-1은 하부에 최초 출현하는 공동에 대한 보강을 수행했을 경우이고, Case-2는 1번째 출현 공동과 2번째 출현 공동에 대해 보강을 수행하였을 경우에 대한 안정성 검토내용이다.

보강2안의 해석조건은 2번째 출현하는 연암층에 0.5 m 관입시켰을 경우에 대해 해석을 Case별로 수행을 하였다. Case-3은 하부에 2번째 출현하는 공동에 대한 보강을 수행했을 경우이고, Case-4는 2번째 출현 공동과 3번째 출현 공동에 대해 보강을 수행하였을 경우에 대한 안정성 검토내용이다.

1) 해석 Case별 연직변위 결과

보강효과 확인을 위한 수치해석 결과 연직응력은 다음과 같다. 그러나 이 해석에 필요한 지반정수 산정을 위한 실내외시험이 실시하지 않아서, 물성치는 문헌값을 사용하였다.

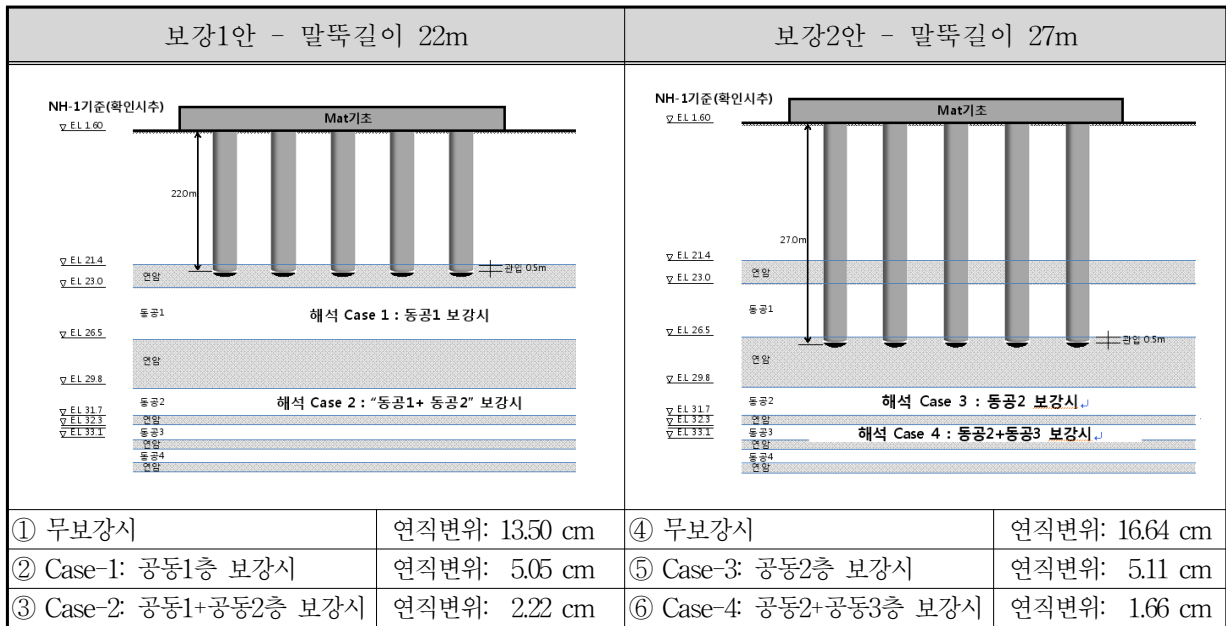


그림 7. 보강안 및 해석 결과

2) 해석 결과

해석 결과, 보강효과가 우수한 순서는 ⑥ Case-4: 공동2+공동3층 보강시 > ③ Case-2: 공동1+공동2층 보강시 > ② Case-1: 공동1층 보강시 > ⑤ Case-3: 공동2층 보강시 > ① 무보강시 > ④ 무보강시 과 같으며, '⑥ Case-4'가 가장 안전하였다. 이 결과는 추정된 물성값을 사용하였기에 경향과약에 도움될 것이다.

4.1.3 말뚝의 지중영향범위 분석

허용연직변위기준을 만족하는 Case-2와 Case-4의 지중영향범위를 분석하기 위하여 변위와 응력 영향 범위를 분석하였으며 그 내용은 다음과 같다.

1) Case-2의 지중영향범위 분석

말뚝선단부에서의 변위영향 범위는 1번째 출현 공동 상부에서 약 3 m 지점까지이며, 선단부 발생응력은 1번째 출현공동에서 1.26 m (말뚝선단부터 2.21 m)까지 영향범위로 분포한다.

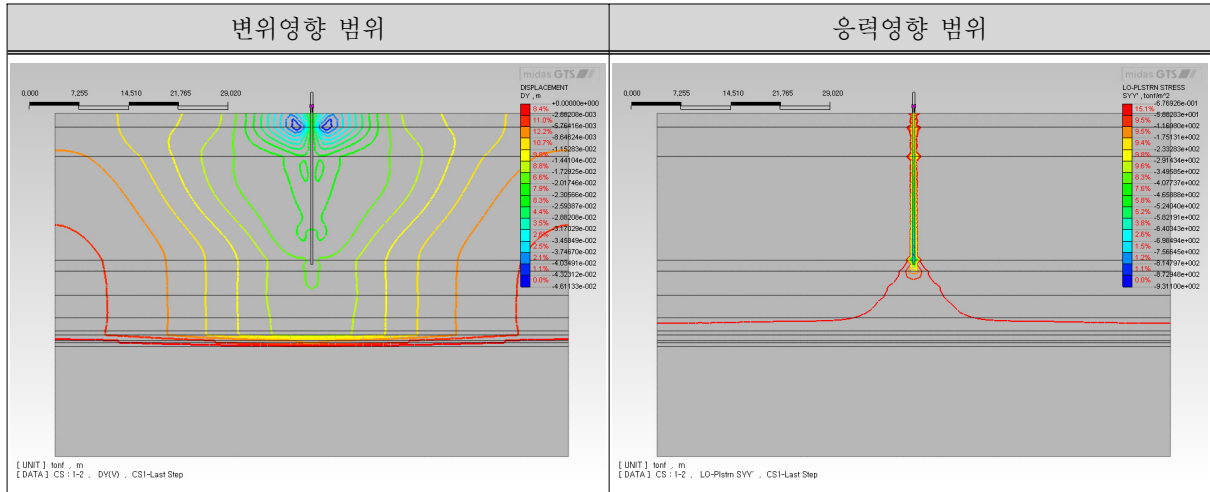


그림 8. Case-2의 지중영향범위 분석

2) Case-4의 지중영향범위 분석

말뚝선단부에서의 변위 영향 범위는 5번째 연암상단까지 넓게 분포하며, 응력영향범위는 말뚝선단에서 약 2.49 m 까지로 지지 연암층에서 거의 수렴되는 경향을 나타낸다.

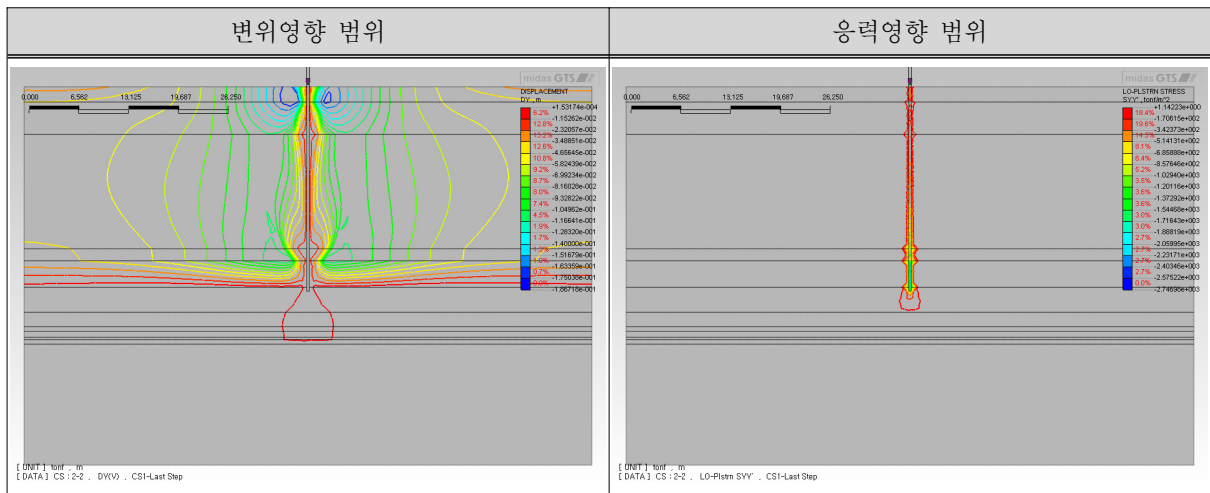


그림 9. Case-4의 지중영향범위 분석

해석 Case별 연직변위에 대한 안정성 검토결과, 말뚝길이 27 m가 적용되어 2번째 출현하는 연암층을 지지층으로 하고 그 하부에 존재하는 2번째 및 3번째 공동부를 그라우팅 공법을 적용하여 충전하는 것이 가장 안전한 것으로 평가되었다.

4.1.4 공동 보강 및 지반보강의 수행

현장에서 수행한 시공내용은 크게 3가지 방법으로 하였다. 1번째로 말뚝선단부 아래 위치한 암반층을 말뚝내부를 통해 78 mm Rod를 관입하여 암반층을 최소 6 m 이상 천공하였다. 이때 공동유무를 확인하고 그라우트 주입을 실시하였다. 2번째는 124 mm Casing을 사용하여 말뚝 주변을 말뚝 관입심도까지 천공하여 Casing을 통해 그라우트를 주입하는 지반보강 작업을 실시하였다. 최종적으로 본 말뚝을 시공할 때 1회 타격당 최종관입량이 시공기준에 미치지 못한 말뚝(NG말뚝)에 대하여 말뚝내부 속채움작업

으로 보강작업을 마무리 하였다.

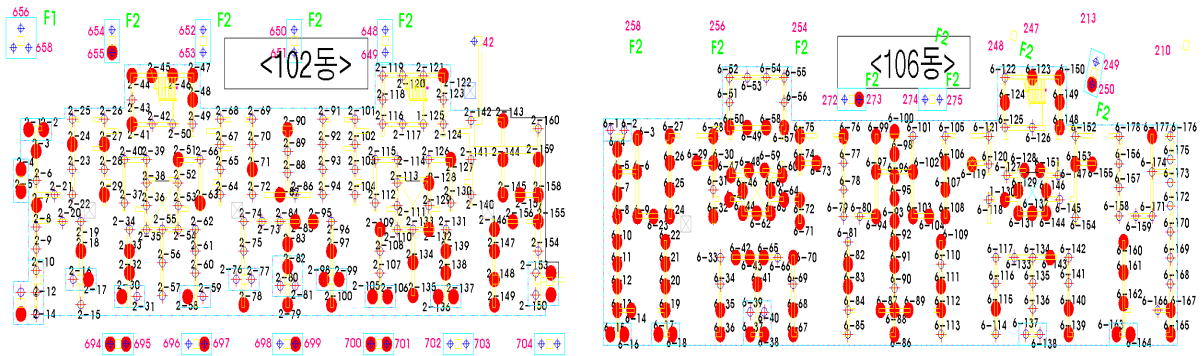


그림 10. NG 말뚝의 위치도(빨간점으로 표시된 것)

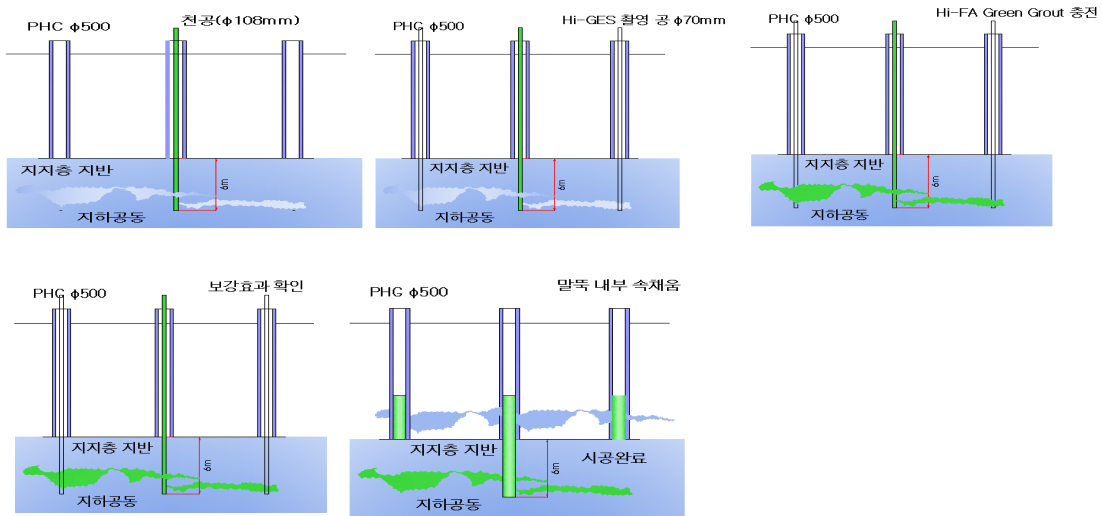


그림 11. HGF 공법의 시공순서

4.1.5 보강효과의 확인

천공 및 주입 작업을 할 때 인근 말뚝에서 관찰한 주입 확산범위는 그림 12와 같다. 4일 경과후, 말뚝 동재하시험 및 정재하시험으로 보강 전, 후의 지지력 및 하중-변위 관계를 나타내었다.

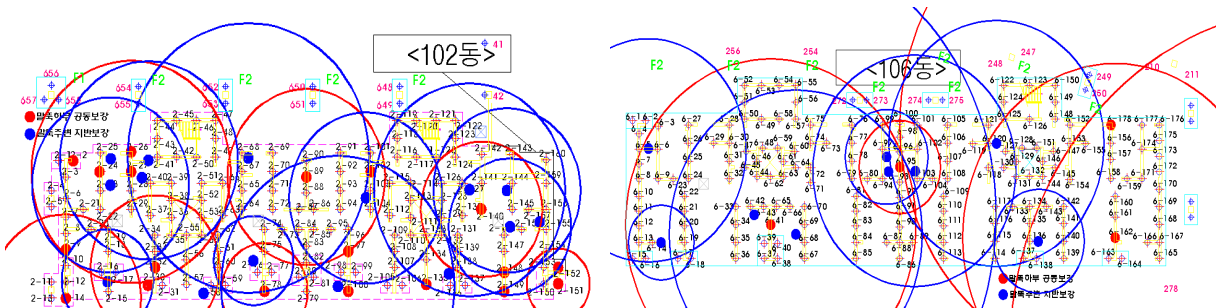


그림 12. 보강효과 범위

그림 12는 군산 OO 현장의 석회암 공동 충전보강효과범위를 도면상에 표시한 것으로 공동부의 Type

에 따라 보강 범위가 다양하게 나타났다. 여러 개의 공동부가 연결되어 있는 경우는 그 보강 범위가 약 10 m 이상의 효과로 나타났다. 독립적인 공동의 경우는 말뚝내부를 통해 공동내부의 침전물을 배출시키면서 공동부를 Hi-FA 그라우트로 충전하였다. Hi-FA Green Fill은 자기 침투압에 의해 공동내부의 침전물을 밀어내고 공동부를 충전하는 특성을 가지고 있어 그 보강 범위는 상당히 큰 범위를 가지고 있는 것으로 나타났다.



그림 13. 그라우트 충전확인 및 확인용 코어채취

그림 13은 그라우트 충전시 공동내부의 침전물을 배출시키는 광경 및 보강후 확인용 코어채취를 한 광경이다. 이는 충전재 자체가 자기 침투압을 가지고 있으며, 점성과 수중 불분리 특성에 의해 침전물과 혼합되지 않아 침전물을 배출시킬 수 있었던 것으로 판단된다.

표 4. 공동보강 코어 압축강도 시험 결과

시험(검사)종목	시험(검사)방법	구분	단위	시험(검사)결과
압축강도	KS F 2422	코어시료	Mpa	2.8

표 4는 공동보강 코어채취후 압축강도 시험한 결과를 나타낸 것이다.

1) 동재하시험

OO동 26번의 지반보강 전, 후의 동재하시험을 통하여 주변마찰력의 증대효과를 볼 수 있었다.

표 5. 보강 전

낙하고 (m)	최종 관입량 (mm)	CAPWAP METHOD			안전율	허용지지력 (KN)	설계하중 (KN)	판정
		주면마찰력 (KN)	선단지지력 (KN)	전체지지력 (KN)				
2.0	2.3	169.4	2516.2	2685.6	2.5	1,074.2	1,500	NG

표 6. 보강 후

낙하고 (m)	최종 관입량 (mm)	CAPWAP METHOD			안전율	허용지지력 (KN)	설계하중 (KN)	판정
		주면마찰력 (KN)	선단지지력 (KN)	전체지지력 (KN)				
2.0	1.0	3296.5	1651.9	4948.4	2.5	1,979.3	1,500	OK

2) 정재하시험 사례

지반보강 하기 전 정재하시험을 실시한 OO동 29번 말뚝과 가장 인근한 말뚝인 같은 동 41번 말뚝을 보강한 이후 정재하시험을 실시하였다. 그 결과는 다음과 같다.

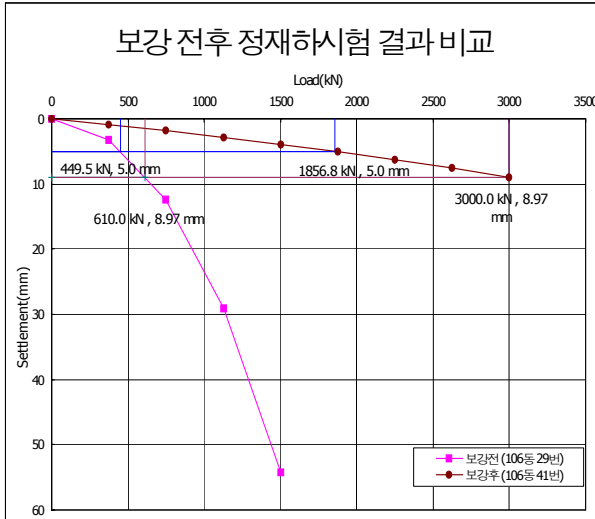


그림 14. 지반보강 전과 후의 하중-침하 곡선

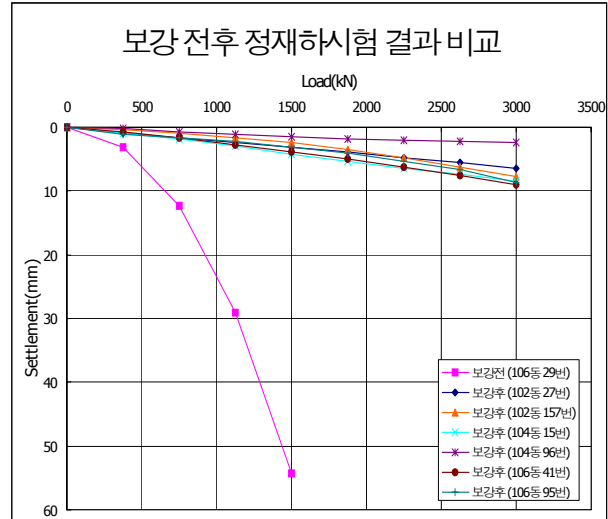


그림 15. 지반보강 전과 후 정재하비교 그래프

표 7. 하중별 변위 감소 비율

하중 (kN)	말뚝별 변위 (mm)		감소율 (%)	비고
	OO동 29번 (보강전)	OO동 41번 (보강후)		
375	3.17	0.83	73.9	
750	12.41	1.73	86.1	
1125	29.14	2.79	90.4	
1500	54.23	3.92	92.8	

그림 14에 의하면, 두 말뚝의 변위량이 5.0 mm 및 보강후 최대침하량이 8.97 mm일 때의 하중을 각각 구해보면 OO동 29번의 말뚝은 449.5 KN 및 610.0 KN 으로 측정되었으며 OO동 41번 말뚝은 1,856.8 KN 및 3000.0 KN으로 측정되었다. 보강 이후 변위량 5.0 mm 에서의 하중증가비율은 약 413.1 % 증가하는 것으로 측정되었으며 변위량 8.97 mm 일때의 하중증가비율은 약 491.8 % 증가하는 것으로 나타났다.

그림 15 및 표 7에서 보면 보강작업 이후 그 효과를 확인하기 위해 아파트 동당 각 2회씩 정재하시험을 실시하였다. 보강하기 전 실시한 정재하시험 결과와 보강 후 실시한 정재하시험의 하중-변위 곡선으로 나타내었으며 그 결과 보강후의 침하량이 현저히 감소하는 결과로 나타났다.

5. 결론

본 논문은 Hi-FA를 이용한 지하공동 보강사례에 관한 것으로 군산현장에서 HGF 공법으로 보강을 수행하였다. Hi-FA는 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 것으로 나타났으며 공동부 위에 구조물이나 기초가 형성되어 있는 경우에 가장 효과적인 재료로 확인되었다.

기존의 공동부 충전 방법은 고압의 air를 사용하여 공동부 내의 침전물을 배출시키고 공동부를 빈 상태에서 충전재를 충전하는 방식이므로 공동부 위에 구조물이 존재하거나 기초가 존재하는 경우 손상의 위험성이 있다. 그러나 본 연구에서 활용된 HGF(Hi-FA Green Fill)공법의 경우 저압의 주입압을 사용하여 충전하므로 상부 구조물의 영향성을 최소화 하였으며, Hi-FA 재료의 특징인 고유동성과 수중 불분리성에 의해 공동부 침전물을 배출시킬 수 있었다.

또한 수중불분리 특성은 물에 의한 희석을 최소화하여 일반 포트랜드 시멘트계가 가지는 지하수 및 지반의 오염을 방지할 수 있는 친환경적인 요소인 것으로 확인되었다.

향 후 친환경성을 지닌 HGF 공법을 추가 연구, 현장에 적극 활용하여 보다 합리적이고 안정적인 공법의 방안을 제시하고자 한다.

참고문헌

1. 박영호(2004), “석회암 공동부에 근입된 말뚝기초의 설계 및 시공법 개발”, 한국도로공사 도로교통연구 연구보고서, 경기도, pp.372~386
2. 박봉근, 조국환, 나경, 윤태국, 이용준(2010. 04), “고성능 다기능 특수 그라우트 신재료 개발 및 기초지반보강재료의 실용화 연구” 한국지반공학회.
3. 사공명, 백규호, 임해식, 조국환, 나경(2010. 05), “고속철도교 기초에 대한 내진 및 수평저항성능 보강형 신개념 친환경말뚝공법의 실용화 기초연구” 한국철도학회.
4. 천병식(1998), “최신지반주입-이론과실제-”, 원기술, pp. 17-37.
5. 천병식(2001), “지반개량재료로서의시멘트사용에의한지반오염문제및대책”, 한국지반공학회, pp.19-22
6. 한국지반공학회(1997), “지반공학시리즈6 - 연약지반”, 구미서관. pp.17-183.
7. 한국지반공학회(2009), “구조물기초기준설계해설”, 구미서관
8. Michell, J. K.(1992) "*Reinforcement of earth slopes and embankments*", NCHRP-290, Transportation Research Board.
9. T.S. Nagaraj(2000), "*Composite Soft Ground - Its Formation and Characterization*", Special Invitation Lecture, pp.1-25.
10. Goodman, R. E., 1993, *Engineering Geology*, John Wiley and Sons, New York, pp.143-193.
11. Waltham, A. C., 1989, "*Ground Subsidence*", Chapman & Hall, New York, pp.202
12. Waltham, A. C. and Smart, P., 1988. Photo-graphic feature:Civil engineering difficultiesin the karst of China. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, London, 21, pp.1~4.