



# 고로슬래그미분말을 사용한 탄소저감형 초고강도 Green PHC 파일 제조 기술 및 이를 활용한 현장 적용

## Field Application and Manufacturing Technology of Low Carbon Ultra High Strength Green PHC Pile using High Volume Ground Granulated Blast Furnace Slag

이희건 Hee-Gun Lee  
(주)삼표산업  
연구소 전임연구원

공민호 Min-Ho Gong  
현대엔지니어링  
차장

정연수 Youn-Su, Jung  
현대건설(주)  
연구개발본부, 차장

### 1. 머리말

국내 파일 산업은 1970년대 초반까지 RC(Ready-mixed Concrete) 말뚝을 주로 사용하였고 1970년대 후반부터 1990년대까지는 PC(Precasted-Concrete) 말뚝이 주를 이루었다. 최근에는 콘크리트 구조물의 설계가 고층화 및 대형화됨에 따라 깊은 관입량과 지지력 보강에 유리한 말뚝기초공법인 PHC 파일(Pretensioned Spun High Strength Concrete Pile)의 사용이 필요하게 되었다.

특히, 해안가와 같은 연약지반의 구조물 공사가 활발해지고 내진설계법이 도입 되는 등 구조물의 안정성에 대한 인식이 변화함에 따라 구조물 기초 보강을 위한 PHC 파일의 사용은 이미 대중화 되고 있으며, <그림 1>과 같이 PHC 파일의 수요는 매년 증가하고 있는 추세이다.

PHC 파일 시장은 최근 3년간 500만 톤이 넘는 출하량으로 수요 대비 공급에 난항을 겪고 있으며, 이에 따른 재료 부족으로 대체 재료에 대한 필요성이 대두됨에 따라 그동안 관심이 없었던 PHC 파일 시장에서도 산업부산물과 같은 순환 자원의 활용 기술과 CO<sub>2</sub> 저감 기술의 적용에 대한 관심이 고조되고 있다.

본 기사에서는 고로슬래그미분말을 사용한 탄소저감형 초고강도 Green PHC 파일 제조 기술과 이를 활용하여 현장에 적용한 사례를 소개하고자 한다.

### 2. 탄소저감형 초고강도 Green PHC 파일

#### 2.1 기술 개요

일반적으로 고강도를 요구하는 PHC 파일은 콘크리트 배합 시 많은 양의 시멘트와 낮은 물-시멘트비로 <사진 1>과 같이 원심성형 및 양생과정을 거쳐 제조하게 된다. PHC 파일은 업체별 온도이력이 다양하지만 일반적으로 시멘트와 특수 규사 미분말을 결합재로 하는 오토클레이브양생 방식과 시멘트와 고강도용 결합재를 사용하는 증기양생 방식으로 생산되고 있으며, 강도기준에 따라서는 「KS F 4306 프리텐션방식 원심력 고강도 콘크리트 말뚝」의 기준인 압축강도 78.5 MPa에 맞춰진 일반 PHC 파일과 압축강도 110 MPa의 초고강도 PHC 파일로 생산되고 있다. 이 중 본 기술은 증기양생 방식으로 제조되는 PHC 파일 중 110 MPa 이상의 초고강도 PHC 파일 제조방법에 관한 기술로 고로슬래그미분말을 다량 사용할 뿐 아니라 시멘트와 고강도 결합재의 사용량을 최소화한 기술이다.

특히, 110 MPa 이상의 초고강도 PHC 파일에서 고로슬래그미분말은 사용량이 증가 할수록 콘크리트 작업성 저하, 원심 성형 불량에 따른 제품 불량률 증가 및 압축강도 감소 등의 이유로 사용이 전무한 실정이며, 일반 PHC 파일을 생산하는 대부분의 업체에서도 사일로(silo) 부족, 배합 변경에 따른 품질변동에 대한 우려, 연구부족 등의 이유로 사용하지 않거나, 매우 소량(5~10%)만을 사용하고 있는 실정이다.

따라서 본 기술은 증기양생 방법에 의해 생산되는 PHC 파일에 대표적인 순환자원인 고로슬래그미분말을 다량으로 사용하는 기술로써 <그림 2>와 같이 고로슬래그미분말 40% 및 3종 조강 시멘트를 대체한 개량된 1종 시멘트를 사용하여 기존 초고강도 PHC 파일과 동등한 수준의 압축강도를 발휘하는 것을 특징으로 한다. 이에 따라 일반 PHC 파일 대비 높은 지지력으로 시공파일 본수가 저감되는 경제적 효과 뿐 아니라 제조 및 시공 시 CO<sub>2</sub> 배출량이 저감되는 친환경 기술이다.

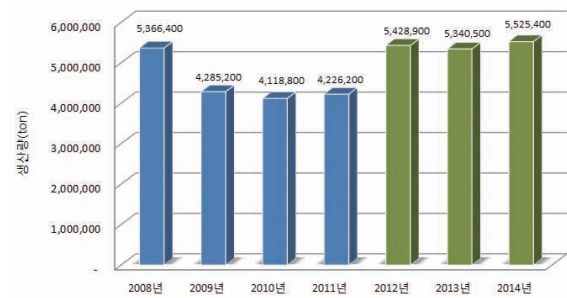


그림 1. PHC 파일 생산량(한국원심력콘크리트공업협동조합)

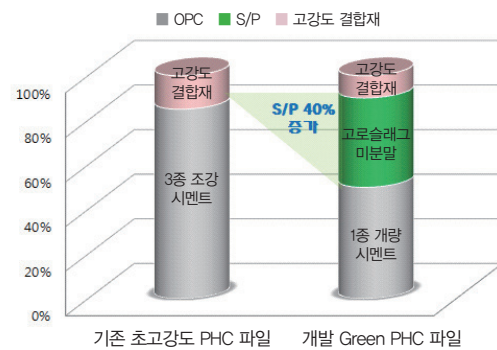


그림 2. 기술의 개요



사진 1. PHC 파일 제조 공정

## 2.2 기술 개발 사항

초고강도 PHC 파일은 110 MPa 이상의 초고강도를 발현해야 하는 배합적 특성으로 결합재량이 450~600 kg/m<sup>3</sup>로 매우 높으며, 제품 성형을 위한 최소한의 단위수량으로 제조되므로 매우 높은 점성을 가진다. 이러한 특성으로 고로슬래그미분말을 사용하게 되면 작업성 및 성형성이 크게 저하되어 제품 불량률이 높아지고 초고강도가 낮아져 초고강도 PHC 파일의 압축강도 성능기준을 만족하기 어렵게 된다. 이와 같은 기술적 한계를 해결하기 위해 폴리카르보산계 분산제를 기본으로 하는 Green PHC 파일 전용 혼화제 제조 기술을 개발하여 작업성 저하 및 성형 불량에 대한 문제를 해결하고, 3종 조강 시멘트 및 고강도 결합재의 재료적 특성을 분석하여 다량의 고로슬래그미분말 사용하는 배합과 공정 조건을 최적화하였다.

## 2.3 국내 최고 기술 대비 본 기술의 수준 및 우수성

〈표 1〉은 본 기술과 유사한 기술 조사 결과를 정리한 것으로 유사기술을 통하여 신청기술의 수준을 비교 및 분석하였다. 본 신청기술과 유사한 초고강도 PHC 파일은 삼표피앤씨(주)에서 최초로 개발된 기술로써 현재 국내에서 생산 가능한 업체 수가 적고 아직 보급화 되지 않은 기술이다. 또한, 기존 초고강도 PHC 파일 기술은 고가의 3종 조강 시멘트를 주요 결합재로 사용하는 기술로

표 1. Green PHC 파일 기술과 유사 기술 조사 결과

특허 등록번호	발명의 명칭
10-1247400	조기 초고강도 확보를 위한 PHC 파일용 콘크리트 조성물 및 이의 제조방법
10-1247440	저탄소 친환경 고내구성 PHC 파일용 콘크리트 조성물 및 그 제조방법
10-1172635	원심성형 PHC 파일용 초고강도 콘크리트 조성물
10-0474968	증기양생용 고강도 콘크리트 혼합재 조성물의 제조방법
10-0212971	고강도 및 고내구성의 시멘트 조성물
10-0233778	산업부산물을 이용한 고강도 콘크리트용 분말혼화제
10-1085044	증기양생 콘크리트 2차 제품 제조용 무기결합재

※ 특허정보검색서비스(www.kipris.or.kr) 활용.  
 검색어 : PHC 파일, 고강도, 결합재, 증기양생



(a) 초고강도 PHC 파일 (b) Green PHC 파일

사진 2. 내부 성형성 비교

써 파일 제조단가가 일반 PHC 파일에 비하여 크게 상승하지만, 본 기술은 개량형 1종 보통 시멘트를 사용할 뿐 아니라 고로슬래그미분말 40%를 사용하여 기존의 초고강도 PHC 파일과 동등한 성능을 발휘하므로 경제적, 환경적 측면에서 국내 최고 수준으로 2015년 4월 국토교통부로부터 녹색기술(제GT-15-00091호)로 인증되었다(〈그림 2〉).

### 2.3.1 성능적 측면의 우수성

#### ① 제품 성형성

작업성 저하를 해결하기 위해 폴리카르보산계 분산제를 개량한 기술을 적용하였다. 이로 인해 점성이 저하되고 성형성이 향상되었으며 파일 내관에서 골재 돌출 없이 내부 조직이 치밀해졌고 매끄러운 표면 형상을 보였다(〈사진 2〉).

#### ② 압축강도

일반 PHC 파일과 비교하여 재령 7일 압축강도가 30.4% 증가하였고, 기존 초고강도 PHC 파일과 비교하

표 2. 균열 및 파괴 휨모멘트(KS F 4306)

구분	KS 기준	측정값
균열(kN.m)	103.0	103.72
파괴(kN.m)	155.0	187.62

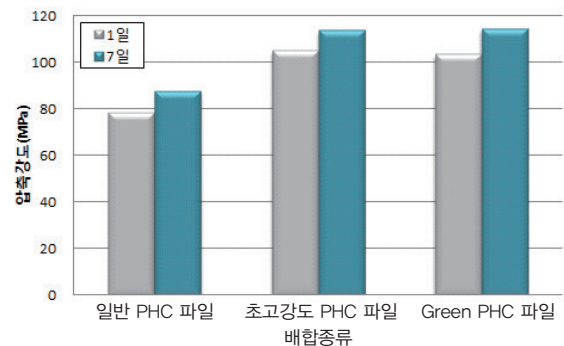


그림 3. PHC 파일 종류별 압축강도

여도 동등한 수준으로 나타났다. 고로슬래그미분말을 최고 40%를 사용하면서도 압축강도 110 MPa의 초고강도 성능이 발휘되었다<그림 3>.

③ 실부재 휨강도 시험

KS F 4306에 의거 균열 및 파괴 휨모멘트 측정결과 KS를 모두 만족하였다<표 2><사진 3>.



▲ (a) 시험 전경  
 ▼ (b) 균열 확인

사진 3. 균열 및 파괴 휨모멘트(KS F 4306) 시험

표 3. 일반 PHC 파일과 Green PHC 파일의 CO<sub>2</sub> 배출량 비교

기술	재료 구분	생산과정			운송과정			전체CO <sub>2</sub> 배출량 (CO <sub>2</sub> -kg)
		A.재료량 (kg)	B.원단위 (CO <sub>2</sub> -kg/kg)	C.배출량 (A×B)	D.거리 (km)	E.원단위 (CO <sub>2</sub> -kg/kg)	F.배출량 (A×D×E)	
일반 PHC 파일	조강	0	9.44×10 <sup>-1</sup>	0	100	3.37×10 <sup>-6</sup>	0	426.91
	OPC	312	9.44×10 <sup>-1</sup>	294.528	50	3.37×10 <sup>-6</sup>	0.053	
	S/P	104	2.65×10 <sup>-2</sup>	2.756	50	3.37×10 <sup>-6</sup>	0.018	
	H/B	104	2.65×10 <sup>-2</sup>	2.756	100	3.37×10 <sup>-6</sup>	0.035	
	S	559	2.60×10 <sup>-3</sup>	1.453	50	1.03×10 <sup>-3</sup>	28.789	
	G	1275	7.50×10 <sup>-3</sup>	9.563	50	1.03×10 <sup>-3</sup>	65.663	
	W	130	1.96×10 <sup>-4</sup>	0.025	0	-	0	
	AD	5.2	2.50×10 <sup>-1</sup>	1.300	50	2.21×10 <sup>-4</sup>	0.057	
	Con'c	2489.2	8.00×10 <sup>-3</sup>	19.914	0	6.74×10 <sup>-4</sup>	0	
	합계			332.295			94.614	
초고강도 PHC 파일	조강	200	9.44×10 <sup>-1</sup>	188.800	100	3.37×10 <sup>-6</sup>	0.067	473.75
	OPC	164	9.44×10 <sup>-1</sup>	154.816	50	3.37×10 <sup>-6</sup>	0.028	
	S/P	84	2.65×10 <sup>-2</sup>	2.226	50	3.37×10 <sup>-6</sup>	0.014	
	H/B	112	2.65×10 <sup>-2</sup>	2.968	100	3.37×10 <sup>-6</sup>	0.038	
	S	483	2.60×10 <sup>-3</sup>	1.256	50	1.03×10 <sup>-3</sup>	24.875	
	G	1315	7.50×10 <sup>-3</sup>	9.863	50	1.03×10 <sup>-3</sup>	67.723	
	W	123	1.96×10 <sup>-4</sup>	0.024	0	-	0.000	
	AD	4.48	2.50×10 <sup>-1</sup>	1.120	50	2.21×10 <sup>-4</sup>	0.050	
	Con'c	2485.48	8.00×10 <sup>-3</sup>	19.884	0	6.74×10 <sup>-4</sup>	0.000	
	합계			380.956			92.793	
Green PHC 파일	조강	0	9.44×10 <sup>-1</sup>	0	100	3.37×10 <sup>-6</sup>	0	396.52
	개량C	280	9.44×10 <sup>-1</sup>	264.320	50	3.37×10 <sup>-6</sup>	0.047	
	S/P	224	2.65×10 <sup>-2</sup>	5.936	50	3.37×10 <sup>-6</sup>	0.038	
	H/B	56	2.65×10 <sup>-2</sup>	1.484	100	3.37×10 <sup>-6</sup>	0.019	
	S	482	2.60×10 <sup>-3</sup>	1.253	50	1.03×10 <sup>-3</sup>	24.823	
	G	1,312	7.50×10 <sup>-3</sup>	9,840	50	1.03×10 <sup>-3</sup>	67.568	
	W	123	1.96×10 <sup>-4</sup>	0.024	0	-	0.000	
	AD	5.04	2.50×10 <sup>-1</sup>	1.260	50	2.21×10 <sup>-4</sup>	0.056	
	Con'c	2491.5	8.00×10 <sup>-3</sup>	19.856	0	6.74×10 <sup>-4</sup>	0.000	
	합계			303.974			92.550	

※ 조강(3중 시멘트), OPC(1중 보통 시멘트), 개량 C(1중 개량 시멘트), S/P(고로슬래그미분말), H/B(고강도 결합재), S(잔골재), G(굵은 골재), W(배합수), AD(혼화제), Con'c(콘크리트)

### 2.3.2 경제적 측면의 우수성

Green PHC 파일은 기존 110 MPa 초고강도 PHC 파일 제조원가 보다 약 26%의 제조원가 절감이 가능하며, 일반 PHC 파일 지지력은 1,200 kN인데 비해 1,600 kN으로 33%의 지지력 향상되므로 이에 따른 파일 공사비를 약 20% 감소시킬 수 있다.

### 2.3.3 에너지와 자원 절약 및 녹색성장 기여도

국가 LCI D/B 및 지식경제부 시멘트 업종 MRV 자료를 기반으로 하여 기존 초고강도 PHC 파일과 본 기술의 CO<sub>2</sub> 배출량을 분석·평가한 결과, 삼표피앤씨(주) 제천공장에서 초고강도 PHC 파일 제조 시 CO<sub>2</sub> 배출량에 비해 본 기술 적용 시 콘크리트 제조 및 운송의 전 과정의 CO<sub>2</sub> 배출량이 m<sup>3</sup>당 77.23 kg 저감하는 것으로 분석되었다. 이는 삼표피앤씨(주)의 2015년 판매목표량 26만 3,900 톤(105,560 m<sup>3</sup>)을 기준으로 8,152 톤의 CO<sub>2</sub> 배출 저감이 가능한 수치이다. 또한, 일반 PHC 파일에 비해 본 기술은 허용지지력이 높아 약 33%의 파일 분수 저감이 예상되며 이에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량도 추가로 저감 가능할 것으로 예상된다.

### 2.3.4 파급효과

본 기술은 3종 조강 시멘트가 주재료로 사용되고 있는 초고강도 PHC 파일 시장에서 시멘트 대체재료로 산업 부산물인 고로슬래그미분말을 40% 이상 사용하는 PHC 파일 제조 기술로써 기존 업체의 고로슬래그미분말 사용에 대한 소극적인 자세를 개선하여 혼화재료의 사용이 확대될 것으로 기대되며, 이에 따른 시멘트 사용량 감소 및 전체 건설산업의 탄소배출량 저감에 기여할 것으로 판단된다.

## 3. 현장적용 사례 및 결과

### 3.1 현장 개요

- (1) 대지 위치 : 충청남도 천안시 동남구 신부동 295번지 일원

- (2) 현장명 : 천안 신부동 힐스테이트 신축공사
- (3) 공동기술개발사 : 현대건설(주), 현대엔지니어링(주), (주)삼표피앤씨, (주)삼표산업
- (4) 시험일 : 2015년 10월 13일
- (5) 시험항목 : ① 말뚝 동재하 시험, ② 정재하 시험

### 3.2 말뚝 동재하 시험

아파트 신축공사에서 기초 구조용으로 시공된 직경 500 mm Green PHC 파일에 대한 침하량 측정 및 허용 지지력을 산정하기 위해 말뚝 동재하 시험을 실시하였다 <사진 4>. 말뚝 동재하 시험은 말뚝의 지지력은 물론이고 선단과 마찰지지력 분포와 크기 파악 및 건전도를 확인하고 항타 및 경타 장비의 적합성을 판단할 수 있는 시험법이다. 본 현장 초기 동재하 시험결과 허용지지력은 1385.00 ~ 1644.20 kN/pile이었으며, 재항타 동재하 시험을 실시한 결과 2297.64 ~ 2432.04 kN/pile로 해석되어 시험된 말뚝은 각각 설계지지력을 만족하는 것으로 최종 확인되었다. 또한, 시험된 말뚝의 압축응력 및 건전도지수(BTA) 등 말뚝의 제반 결과도 모두 허용범위 이내로 분석되어 양호한 것으로 나타났다.



(a) 파일 반입

(b) 내공 확인



(c) 파일 삽입

(d) 파일 항타



(e) 측정 게이지 설치

(f) 지내력 측정

사진 4. 동재하 시험

### 3.3 정재하 시험

정재하 시험은 타설된 말뚝 머리에 정하중을 단계별로 증가 또는 감소시키고, 하중 지속시간에 따른 침하량을 측정하여 말뚝의 극한 및 항복 지지력을 설계하중과 비교 검토하여, 추후 설치되는 구조물의 기초로서 안정성 확보를 위한 품질을 확인 및 검증하는 시험법이다(사진 5). 시험결과, 최대 재하하중인 3,922.66 kN/pile에서 9,340 mm와 11,435 mm의 침하량을 나타냈으며, 최종 하중을 제거한 상태에서 측정된 잔류침하량은 2,875 ~ 5,590 mm로 나타났다. 재하시험 도중 어떠한 변곡점도 발생하지 않았으므로 최대 재하하중을 항복하중으로 간주하여도 무방할 것으로 판단된다. 말뚝의 허용 지지력은 1,961.33 kN/pile로 현대엔지니어링 설계하중 1,600 kN/pile을 충분히 만족하는 것으로 나타났다.

### 4. 맺음말

최근 구조물의 고층화, 대형화 등이 증가하면서 더 큰 지지력을 얻기 위해 높은 압축강도와 깊은 관입량을 견딜 수 있는 초고강도 파일의 수요가 증가하고 있다. 또한 내진설계법 도입 등 안정성에 대한 인식이 변화되기 시작하면서 파일의 역할은 점점 중요해지고 있다. 이러



사진 5. 정재하 시험

한 인식을 반영하는 듯 2009년 약 400만 톤에서 2014년 550만 톤으로 생산량 증가를 보이며 급격히 성장하고 있는 PHC 파일 산업에도 지속가능한 발전, 환경 친화적 기술 확보, 산업부산물의 자원화 등 미래지향적 꾸준한 연구와 도전이 활성화되기를 기대해 본다. [4]

담당 편집위원 : 서태석(현대건설(주)) tsseo@hdec.co.kr



**이희건 전임연구원**은 군산대학교 신소재공학과에서 SO<sub>3</sub>함량에 따른 저분말도 슬래그 시멘트 자기수축 및 단열온도 특성에 관한 연구로 학위를 취득한 후 2010년 12월부터 삼표산업 연구소에 재직하고 있다. 주요 관심분야는 시멘트 및 혼화 재료를 활용한 그라우트 및 몰탈 개발, 산업부산물을 활용한 건설소재 개발이다.

happytree@sampyo.co.kr



**공민호 박사**는 2007년 2월 단국대학교에서 고강도 매스콘크리트 강도발현에 미치는 고온이력 영향에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후 2007년 4월부터 현대엔지니어링 기술연구소에 재직하고 있다. 주요 관심분야는 산업용 바닥 콘크리트, 고강도 내화 및 초고층 압송기술 개발로 우리 학회 레미콘품질관리위원회 위원으로 활동 중이다.

gong92@naver.com



**정연수 차장**은 미국 Texas A&M 대학교 토목공학과에서 콘크리트 포장분야에서 박사학위를 취득하였으며, 2년 간 텍사스 교통연구소에서 박사후 연구원을 거쳐 2012년부터 현대건설 연구개발본부에서 재직하고 있다. 주 관심 연구분야는 혼화재 다량 치환의 고성능 콘크리트로 현재 다수의 국내외 건설 프로젝트의 기술 지원을 수행하고 있으며, 사내 강사로도 활동하고 있다.

younsujung@hdec.co.kr