

# 특 집

|| 콘크리트의 공장제품 ||

## PHC 말뚝의 콘크리트 고품질화를 위한 제언

- A Suggestion of High Quality Concrete for PHC Pile -



최승선\*

### 1. 서 론

2001년도 연간 302만 4,000 ton의 사용실적을 보이고 전체 콘크리트 말뚝 사용량의 99.5%를 점유하고 있는 PHC 말뚝은 국내에 도입된 1992년이래 약 10년 동안 양적, 질적으로 많은 발전을 거듭하여 왔으며 현재 우리나라의 건축, 토목공사용 기초 자재로서 없어서는 안될 중요한 위치를 확보하고 있는 것이 사실이다. 1970년대까지 주로 사용되었던 RC 말뚝은 1970년대 후반부터 PC 말뚝으로 대체되었고, 1990년도 초반 생산되기 시작한 PHC 말뚝이 우리나라 콘크리트 말뚝의 주류를 이루어 현재 콘크리트 말뚝의 대명사로 자리 매김하며 발전을 거듭하고 있는 것이다. 또한 PHC 말뚝에 사용되는 콘크리트의 압축강도는 800 kgf/cm<sup>2</sup> 이상이 확보되어야 함으로 콘크리트 공장제품 중에서 보기 드물게 고강도를 요구하고 있으며 고강도화를 위한 제조공정의 품질관리도 높은 수준이 요구되어 우리나라 콘크리트 공장제품의 고강도화와 품질향상에 기여한 정도가 이루 말할 수 없을 정도로 크다고 볼 수 있다.

기초공사 현장에서도 PHC 말뚝의 출현으로 기존 RC 및 PC 말뚝으로는 극복하기 어려웠던 깊은 심도의 말뚝시공, 본당 장기허용지지력의 증가, 시공성, 경제성 등을 극복하여 강관 파일만으로 시공이 가능했던 공사에도 거의 동등하게 적용할 수 있게 될 정도로 그 품질의 우수성을 입증하며 발전해 왔다고 볼 수 있다.

본 특집에서는 PHC 말뚝을 제조하는데 있어서 간과하기가 쉽지만 품질향상을 위하여 반드시 고려하여야 할 사항들을 위주로 생산자와 사용자 모두가 관심을 가질 수 있는 문제들에 중점을 두어 서술하고자 한다.

### 2. 콘크리트 말뚝의 역사와 발전

#### 2.1 콘크리트 말뚝의 사용 유래

철근 콘크리트 말뚝의 기원은 헨네비크(Hennebique)가 고안하고 1897년에 유럽에서, 1904년에 미국에서 처음으로 사용되었다고 알려지고 있다. 또, Cast-in-Place 말뚝(현장타설 콘크리트 말뚝)이 주로 미국에서 널리 사용된 것에 비하여 기성 콘크리트 파일은 유럽에서 발전하였다.

콘크리트 말뚝이 최초로 사용된 중요한 이유는 부식에 대하여 강하기 때문이며 방식처리한 나무말뚝보다 3~4배, 무처리한 나무말뚝보다 5~6배 경제적인 이점이 있었다. 그러나 나무말뚝의 지지력이 본당 10~25 ton이었던 것에 비하여 콘크리트 파일은 20~75 ton이 채용되어 기초와 상부구조의 결합을 고려한 공사비와 공기의 저감이 가능하였던 것도 중요한 이유가 되었다고 볼 수 있다. 반면에 콘크리트 파일은 시공속도가 느리고 중량이 무겁고 취급도가 약하여 취급이 어렵다는 결점을 가지고 있었으나 나무말뚝의 품질저하와 사용에 충분히 큰 나무말뚝을 구하는 것이 곤란해 졌으며, 15 m 이상의 긴 말뚝의 필요성이 증가하게

\* 영풍산업주식회사 음성공장 공장장 부장

되어 콘크리트 말뚝의 보급이 급속히 증가하게 되었다.

한편 원심력 말뚝의 개발은 말뚝의 강도를 증가시키기 위하여 센트루이스시의 Mikinley 다리에는 원심력을 이용한 RC 파일이 제작되어 사용된 것이 그 기원으로 알려져 있으며 그 파일의 강도는 당시의 보통 콘크리트 강도가 210 ~ 250 kgf/cm<sup>2</sup>인 것에 비하여 약 350 kgf/cm<sup>2</sup>이나 되었다. 또한 원심력을 이용하여 제조한 RC 파일의 최초의 것은 철제의 말뚝이 입수곤란에 의하여 고안된 직경 40 cm, 길이 4.5 ~ 15 m의 Macco Spunpiles로 알려지고 있다.

RC 말뚝의 단점이 보완된 PC 말뚝은 1939년에 스웨덴에서 고안되었으며 영국은 1949년에 프리스트레스량 56 kgf/cm<sup>2</sup>의 중공 PC 말뚝을 제조하였다. 이 시대의 PC 말뚝은 직경 50 cm 까지는 중공부가 없었으며 직경 60 cm에서 30 cm의 중공부가 있었다. PC 말뚝은 장척의 경우에도 그 취급이 용이한 것이 개발의 중요한 이유로 알려져 있으며 당시 최대 약 43.5 m 길이의 것도 제작되었다.

일본에서는 1950년대까지 나무말뚝이 널리 사용되었으나 1936년 원심력 콘크리트 파일의 제조기술이 도입된 이래 RC, PC, PHC 말뚝 등으로 발전을 거듭하였으며 현재는 SC, PRC, ST, SL 말뚝 등이 개발되어 사용되어 지는 등 그 발전을 거듭하고 있다.

우리나라의 콘크리트 말뚝 발전역사는 정확한 기록이 없는 상태이나 1960년대부터 1970년대 초반까지는 주로 RC 파일을 사용하였고 1970년대 후반부터 1990년대 초반까지는 PC 파일이 주류를 이루었다.

## 2.2 우리나라의 PHC 말뚝 도입 배경

현재 우리나라에서 콘크리트 말뚝 중 가장 많이 사용되고 있는 PHC 말뚝은 1983년 KS 규격이 제정된 후 건축물의 고층화, 대형화, 연약지반의 사용용도 증가 등으로 기존의 PC 말뚝을 대체할 고품질 말뚝의 필요성이 대두되며 기존의 PC 말뚝 제조업체들이 1992년에 일본에서 제조기술을 도입하여 국내에서는 처음으로 생산되기 시작하였으며 PHC 말뚝을 국내에 도입한 회사는 (주)영풍콘크리트(현재는 영풍산업(주) 음성공장), 새한콘크리트공업(주)(현재는 새한마텍(주)), 대림콘크리트공업(주) 등이다. 참고로 우리나라 콘크리트 말뚝과 관련된 KS 규격의 제정연도를 살펴보면 다음 <표 1>과 같다.

표 1. 콘크리트 파일의 KS 기준 제정 연도

구 분	KS 규격 번호	제정연도
RC 파일	KS F 4301	1965.4.10
PC 파일	KS F 4303	1972.8.10
PHC 파일	KS F 4306	1983.12.17

## 3. PHC 말뚝의 품질규정

KS F 4306(프리텐션방식 원심력 고강도 콘크리트 말뚝)에 규정된 PHC 말뚝의 주요 품질 규정은 다음과 같다.

- (1) 콘크리트의 압축강도 : 78.5 N/mm<sup>2</sup>(800 kgf/cm<sup>2</sup>) 이상
- (2) 겉모양 : 사용상 해로운 흠, 균열 등의 결점이 없어야 한다.
- (3) 몸체의 휨강도 : 균열휨강도와 파괴휨강도로 규정되어 있으며 기준 값 이상이어야 한다.
- (4) 몸체의 축력휨강도 : 말뚝에 소정의 축력을 가한 상태로 휨강도 시험을 행하여 균열휨강도와 파괴휨강도가 규정된 기준 값 이상이어야 한다.
- (5) 몸체의 전단강도 : 규정된 전단강도 기준 값 이상이어야 한다.
- (6) 이음부의 휨강도 : 용접 이음부의 휨강도는 규정된 몸체의 휨강도 중 파괴휨강도와 같거나 그 이상이어야 한다.

## 4. PHC 말뚝의 콘크리트 고품질화를 위한 주요 공정 관리포인트

본절에서는 일반적으로 콘크리트 관련 기술서적에 기술되어 있는 콘크리트의 품질관리와 관련된 내용은 가급적 언급을 회피하고 PHC 말뚝을 제조시 유의하여 관리하여야 할 사항을 위주로 기술하고자 한다.

### 4.1 원재료의 관리

#### 4.1.1 시멘트의 온도관리

시멘트의 온도는 시멘트의 품질과 직접적인 관계는 없으나 시멘트 공장에서 출하 및 공장에서 사용시점의 시멘트 온도는 콘크리트 말뚝의 품질에 많은 영향을 미친다. 즉 시멘트의 온도가 높을수록 수화속도가 빨라지며, 급격한 수화의 진행은 시멘트 입자의 수화율을 떨어뜨리고 높은 w/c를 요구하기 때문에 적당한 온도의 시멘트 사용이 중요하다.

시멘트의 온도가 콘크리트에 미치는 영향은 시멘트 페이스트의 플로우 시험으로 간단히 측정 할 수 있으며 20℃와 70℃인 경우의 플로우 값은 70℃의 시멘트인 경우 20℃의 시멘트를 사용한 경우보다 54%의 플로우값 감소를 나타낸 시험결과도 있다. 이는 동일한 워커빌리티를 얻기 위하여 단위수량의 증가를 요구하며 페이스트 제조시 덩어리 발생량이 많아져 압축강도의 증진 폭 둔화의 원인으로 작용한다.

자동차 벌크 운반시 시멘트의 온도별 플로우치 및 물성시험의 예를 보면 <표 2>에 예시한 바와 같이 온도가 높은 상태의 시멘트는 실온상태의 시멘트보다 1일, 3일, 7일, 28일 재령에서의 압축강도가 공히 낮게 나타났으며 페이스트 제조시 덩어리 형성

량이 적을수록 압축강도 발현이 좋게 나타남을 알 수 있다. 특히 하절기에는 시멘트 온도가 매우 높게 나타나므로 콘크리트 말뚝 제조공장에서는 시멘트의 온도를 낮추기 위한 방법을 강구할 필요가 있으며 이를 통하여 말뚝의 품질을 향상시키고 제조비용 절감도 꾀할 수 있을 것이다.

표 2 시멘트의 온도에 따른 물리성능 비교시험 예

시멘트 온도(°C)	모르타르 플로우치(mm)					
	믹싱직후	15분후	25분후			
79.0	67.6	55.5	44.1			
24.5	72.3	54.8	55.3			
분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	응결시간(분)		재령별 압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )			
	초결	종결	1일	3일	7일	28일
3,112	195	280	100	213	260	314
	210	315	114	221	285	346

4.1.2 PHC 말뚝 제조에 적합한 골재의 선택

콘크리트 중에 골재가 차지하는 용적비율은 대단히 높기 때문에 골재 자체의 강도가 콘크리트 강도에 미치는 영향은 충분히 예상할 수가 있으며 특히 PHC 말뚝과 같은 고강도 콘크리트를 요하는 제품에서는 골재의 강도가 특히 중요하다. 골재의 강도는 암석의 종류 및 풍화도, 절리, 함유량 등에 따라 상당한 차이를 보이지만 일반적으로는 시멘트 페이스트 혹은 모르타르의 강도보다 큰 강도를 필요로 한다. 양질의 천연골재인 경우 1,000 kgf/cm<sup>2</sup> 정도의 압축강도를 가지고 있으므로 레미콘이나 PC 말뚝 등에서는 사용에 문제가 없는 것으로 볼 수 있지만 PHC 말뚝인 경우는 1,200 kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 강도를 가진 골재의 사용이 권장된다.

일반적으로 골재로서 적합한 암석의 종류로는 석영반암, 반암, 현무암, 역암, 사암, 석회암, 편마암, 화강암 등이며 골재로서 부적합한 암석의 종류는 편암, 응회암, 이암, 안산암 등이다.

PHC 말뚝의 제조에 적합한 골재로 요구되는 품질은 다음과 같다.

- (1) 비교적 높은 압축강도를 가질 것 : PHC 말뚝의 콘크리트 배합강도는 880 kgf/cm<sup>2</sup> 이상이며 실제 관리되고 있는 강도는 대부분의 회사에서 900 kgf/cm<sup>2</sup> 이상이므로 고강도화에 충분한 골재의 강도를 필요로 한다.
- (2) 시멘트 페이스트와 골재의 부착강도가 높을 것 : 콘크리트의 강도는 골재와 시멘트 페이스트 접합면의 미세구조와 밀접한 관계가 있다. 골재와 시멘트 페이스트 접합면에서 부착력을 떨어뜨리는 요인은 a) 골재와 모르타르 경계면의 부착균열, b) 모르타르 자체의 균열, c) 골재의 균열 등 3종류가 있으며 이것을 최소화함으로써 부착강도를 높일 수 있다. 특히 부착균열을 억제하기 위하여서는 불리당수에 의한 골재 하부면의 균열발생을 억제하고 직경이

표 3. 시멘트 페이스트와 골재의 부착강도 측정 예

골재의 종류와 페이스트의 표면의 w/c 상태	사암			화강암		석회암			
	w/c (%)			w/c(%)		w/c(%)			
	26.5	30	36	30	36	26.5	30	36	
연마면	부착강도	16.4	16.8	15.6	24.1	21.5	30.3	23.7	19.0
	강도비	0.44	0.42	0.43	0.61	0.59	0.81	0.60	0.52
절단면	부착강도	21.6	19.2	16.4	27.7	25.4	36.4	35.4	26.3
	강도비	0.57	0.48	0.45	0.70	0.69	0.97	0.89	0.72
자연 파쇄면	부착강도	25.3	25.7	22.3	28.1	24.8	34.0	30.7	24.8
	강도비	0.67	0.65	0.61	0.71	0.68	0.90	0.77	0.68

비고, 1) 강도비는 시멘트 페이스트의 압축강도에 대한 비율

- 2) 시멘트 페이스트의 인장강도 : w/c = 26.5 → 37.6 kgf/cm<sup>2</sup>  
w/c = 30.0 → 39.7 kgf/cm<sup>2</sup>  
w/c = 36.0 → 36.6 kgf/cm<sup>2</sup>

작고 골재의 주면장이 짧은 골재를 사용하여 골재와 시멘트 페이스트 간의 부착강도가 높은 암석으로 제조한 골재를 사용할 필요가 있다. <표 3>는 암석의 종류에 따라 골재와 시멘트 페이스트의 부착강도를 골재면의 상태에 따라 비교한 자료이다.

- (3) 알칼리 골재반응이 없을 것 : 알칼리 골재반응은 알칼리 실리카 반응, 알칼리 탄산염 반응, 알칼리 실리케이트 반응 등이 있으며 이것은 골재 중의 실리카 등이 시멘트 중의 알칼리와 반응하여 팽창을 일으켜 콘크리트를 열화시키는 것을 말하므로 사용하는 골재를 선정하기 전에 시험을 통하여 무해한 것으로 판정된 골재를 사용하여야 한다.

4.2 콘크리트의 혼합관리

콘크리트 제조 플랜트에서의 혼합은 보통 시멘트, 골재, 물과 혼화재료를 약간의 시간차를 두고 투입한 다음 소정의 시간동안 혼합하는 방법이 일반적이며 대부분의 2차 제품 제조공장에서 이 방법을 사용하는 경우가 많다.

그러나 PHC 말뚝과 같이 고성능 감수제를 사용하여 w/c를 낮추어 고강도화 하는 경우에는 고성능 감수제의 투입시기에 의하여 동일 배합에 있어도 슬럼프의 변화가 크게 나타난다. 이것은 바꾸어 말하면 동일한 배합에서도 고성능 감수제의 투입시기에 따라 w/c가 변화되고 이에 따라 강도변화도 발생하며 이는 원재료 투입 시 고성능 감수제의 투입순서 및 시간을 조정하여 경제적인 콘크리트 제조가 가능함을 말하는 것이다. 또한 고성능 감수제 외에도 골재와 시멘트, 물(혼화제)의 투입순서 및 혼합방법에 따라서 강도차이가 크게 발생되고 있으나 대부분의 공장에서는 플랜트 설비의 한계 등의 이유로 활용정도가 극히 낮은 것이 현실이나 활용방법을 찾을 수도 있을 것이므로 기술하고자 한다.

- 4.2.1 고성능 감수제의 투입순서가 콘크리트의 강도에 미치는 영향  
고성능 감수제를 사용하는 경우는 그 투입시기에 따라서 동일

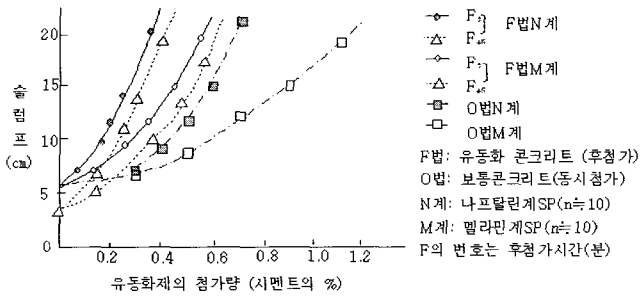


그림 1. 고성능 감수제의 종류 및 첨가량별 투입시기가 슬럼프에 미치는 영향

배합에 있어서도 슬럼프의 변화가 크게 발생한다. 그 대표적인 예가 미리 혼합된 콘크리트에 고성능 감수제를 투입하여 재혼합하는 지연첨가법이다. 고성능 감수제가 시멘트 페이스트(콘크리트)의 유동성을 증가시키는 메커니즘을 간단히 기술하면 시멘트에 물과 혼합된 고성능 감수제(이하 감수제라 칭한다)를 가하여 혼합시 시멘트 페이스트 수용액 중에 존재하는 감수제 분자는 직접 시멘트 입자에 흡착되고 각 시멘트 입자표면에 (-)전위를 주게된다. 이때 감수제의 첨가량이 증가할수록 흡착량도 증가하며 표면의 (-)전위를 증가시키게 된다. (-)전위의 증대에 따라 입자간의 상호작용에 의한 반발에너지도 크게되어 시멘트 입자의 분산성을 크게하여 시멘트 페이스트의 점도를 낮추어 유동성(슬럼프)을 증가시키는 것이다.

고성능 감수제를 나중에 첨가하여 혼합할 때 동시첨가에 비하여 슬럼프가 높아지는 이유는 시멘트 특유의 현상으로 감수제를 미리 용해한 물에 시멘트를 첨가하는 방법(이하 동시첨가법이라 칭함)과 감수제를 용해하지 않은 물에 시멘트를 넣어 혼합 후 감수제를 첨가하는 방법(이하 후첨가법이라 칭함)에서는 <그림 1>과 같이 슬럼프의 큰 차이를 보인다. 이 감수제 후첨가 메커니즘은 시멘트 광물 중 C<sub>4</sub>AF와 C<sub>3</sub>A에 대한 감수제의 흡착량이 동시첨가법을 사용할 때 후첨가법을 사용할 때보다 현저히 많기 때문이다. 즉 석고를 주성분으로 하는 포틀랜드 시멘트에 있어서 감수제의 후첨가 효과는 C<sub>4</sub>AF, C<sub>3</sub>A에 감수제가 다량 흡착됨에 따라 시멘트의 주성분인 C<sub>3</sub>S 및 C<sub>2</sub>S의 분산에 사용 될 액상 중의 감수제가 상대적으로 적게되기 때문이다.

그러므로 PHC 말뚝의 제조시 상기 감수제의 후첨가 방법을 잘 활용하면 동일한 조건에서 보다 경제적이고 고품질의 제품을 생산하는 방법을 찾을 수 있을 것이다.

4.2.2 콘크리트 재료의 혼합순서가 콘크리트의 품질에 미치는 영향

고성능 감수제의 나중 투입으로 콘크리트의 성능을 개선하는 것은 설비개선을 필요로 하는 사항이고 현재 대부분의 공장에서 물과 고성능 감수제를 희석하여 동시 투입하는 방법을 사용하고 있기 때문에 이때 콘크리트의 품질을 향상시키는 방법에 대하여 기술하고자 한다. <그림 2>는 원재료의 혼합순서에 따라 동일배합

방법	투입 순서
A-1 전비빔1	(C) (S) (G) (W+A)
A-2 전비빔2	(C) (S) (G) (W+A)
B 지연첨가	(C) (S) (G) (W) (A)
C 전 재료 동시투입	(C) (S) (G) (W+A)

주) C:시멘트, S:모래, G: 자갈, W: 물, A: 혼화제

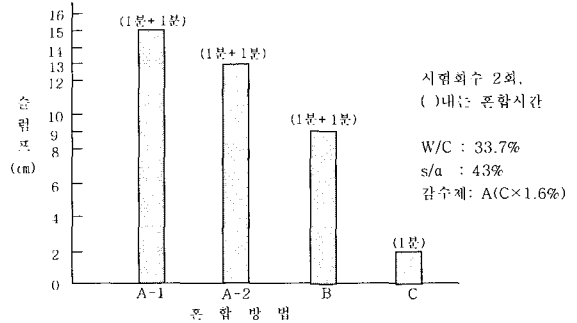


그림 2. 각종 혼합방법과 슬럼프의 관계

인 콘크리트의 슬럼프를 비교한 결과이다. 모든 재료를 동시에 투입한 경우(C) 슬럼프는 2cm이지만 고성능 감수제를 지연투입한 경우(B)는 슬럼프가 9cm가 되었다. 시멘트와 골재를 예비 혼합한 다음 물과 고성능 감수제를 혼합하는 경우는 골재의 투입 시기에 따라 약간의 슬럼프 차이는 보이고 있으나 13~15cm로 되었으며 혼합시간의 합계가 전 재료 동시투입법이 전 비빔을 실시한 경우보다 짧지만 동시투입법은 혼합시간을 증가하여도 슬럼프가 증가하지 않고 역으로 떨어지는 것이 확인되었다.

<그림 3>은 전 비빔시간 및 고성능 감수제의 첨가량을 변화시켜 시험을 행한 경우 슬럼프 측정 결과를 보여주고 있다. 이 시험결과에 따르면 전 비빔에 의한 슬럼프 증대량은 감수제의 첨가

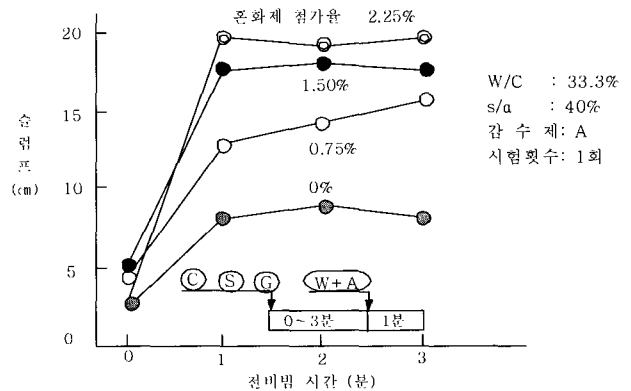


그림 3. 감수제 첨가율과 전 비빔 시간의 변화가 슬럼프에 미치는 영향

율이 클수록 증가하는 것을 알 수 있다.

이처럼 고강도 콘크리트에서는 혼합 방법을 변화시킴에 따라 슬럼프의 현저한 증대가 가능하고 전 비빔 혹은 지연첨가법에 의하여 동일한 슬럼프를 얻기 위한 단위수량의 감소가 가능하며 그 결과로서 단위시멘트량의 감소도 가능하여 경제적인 콘크리트의 제조가 가능하게 된다. <표 4>은 국내 Y사에서 원심공시체를 이용하여 전 비빔 시간에 따라 공시체의 잉여수 배출에 의하여 발생하는 슬러지량 및 압축강도의 변화를 시험한 것으로 이 결과를 통하여 전 비빔에 의하여 w/c의 감소 및 압축강도의 증진이 가능함을 알 수 있다.

표 4. 전 비빔에 의한 슬러지량 및 압축강도의 변화

전비빔시간(초)	슬러지 발생량(g)			평균압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )
	1회차 시험	2회차 시험	3회차 시험	
0	236	39	0	826
60	270	193	148	905

### 4.3 제품의 원심성형 관리

현재 PHC 말뚝을 생산하기 위하여 행하여지고 있는 원심성형 공정은 보통 3~4 공정으로 이루어지며 3공정인 경우 저속회전, 중속회전, 고속회전으로 나누어지며 4공정인 경우 저속회전을 초속회전과 저속회전으로 구분하여 사용한다.

각 단계별 적용되는 평균 원심력 및 효과는 <표 5>와 같다.

표 5. 원심 단계별 평균 원심력 및 콘크리트에 가해지는 효과

원심 단계	저 속	중 속	고 속
평균원심력(g)	1~5	10~15	25~35
공정효과	형틀 내의 콘크리트를 균등하게 재혼합하여 콘크리트를 소프트하게 하는 효과	재료분리를 최소화하면서 형틀 내측에 콘크리트를 다져서 정착시키는 효과	콘크리트 내부에 존재하는 잉여수를 최대한 배출시키며 콘크리트를 치밀하게 다지는 효과

#### 4.3.1 적절한 저속회전 조건

##### (1) 저속 회전시 콘크리트의 슬럼프별 적정 원심력

원심성형에서 저속회전은 콘크리트를 재혼합 및 고르게 분포시켜 콘크리트의 두께를 일정하게 하고 편심을 방지하여 고속회전 시 형틀의 점프를 방지하는 등 대단히 중요한 역할을 한다. <표 6>는 저속회전시 원심력의 크기와 슬럼프를 변화시키며 공시체의 성형가능성을 시험한 결과로 낮은 슬럼프로 관리되는 PHC 말뚝 성형시에는 저속회전시 3g 이하의 원심력으로 성형하여야 함을 알 수 있다. 따라서 저속회전 원심성형 단계에서는 콘크리트의 슬럼프에 대하여 적절한 원심력은 어느 수준인가를 찾아서 관리할 필요가 있는 것이다.

표 6. 저속회전시 콘크리트의 슬럼프와 원심력에 대한 성형성 시험결과

저속회전수 (RPM)	100	125	150	175	200	225	250	275	300
원심력(g)	0.83	1.31	1.89	2.57	3.36	4.25	5.25	6.35	7.55
슬럼프 (cm)	0	성형불능	不	不	不	不	不	不	不
	2	성형가능	可	可	不	不	不	不	不
	4	可	可	可	可	不	不	不	不
	6	可	可	可	可	可	不	不	不
	8	可	可	可	可	可	可	不	不
	10	可	可	可	可	可	可	可	不
	12	可	可	可	可	可	可	可	可
	14	可	可	可	可	可	可	可	可
16	可	可	可	可	可	可	可	可	

#### (2) 저속회전의 적정 회전시간

적정 저속 회전시간을 알아보기 위하여 원심력 1.31g의 조건에서 슬럼프와 회전시간을 변경시키며 성형가능 여부를 시험한 결과 <표 7>과 같이 슬럼프가 낮은 콘크리트일수록 저속회전 시간을 길게 하지 않으면 성형되지 않으며 높은 슬럼프의 콘크리트는 시간을 짧게 하여도 충분히 성형됨을 알 수 있다. 따라서 저속회전 시간도 원심력과 같이 시험을 통하여 어느 한도 이상으로 관리하여야만 원심성형 효과를 높이고 양질의 제품을 생산하는데 도움이 될 것이다.

표 7. 콘크리트의 슬럼프별 저속회전 시간별 성형성 시험결과

저속회전 시간(초)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
슬럼프 (cm)	0	不	不	不	不	不	不	不	不	不	不	不	不
	2	不	不	不	不	不	不	不	不	可	可	可	可
	4	不	不	不	不	不	不	不	不	可	可	可	可
	6	不	不	不	不	不	可	可	可	可	可	可	可
	8	不	不	不	不	不	可	可	可	可	可	可	可
	10	不	不	不	可	可	可	可	可	可	可	可	可
	12	不	不	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可
	14	不	不	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可
16	不	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	

#### 4.3.2 원심성형 조건과 콘크리트 강도와의 관계

##### (1) 저속회전과 콘크리트 강도와의 관계

저속회전이 콘크리트의 강도에 미치는 영향은 고속회전에 비하여 성형시간이 짧기 때문에 그 차이가 크지는 않다. 저속시간을 3분으로 일정하게 하고 각 저속회전에 대하여 각각의 슬럼프를 변화시킨 다음 고속회전을 500 RPM(21g)으로 7분 실시한 공시체를 4주간 표준양생하여 압축강도 시험을 실시한 경우의 원심회전수, 슬럼프, 콘크리트 강도와의 관계를 나타낸 것이 <표 8>과 <그림 4>이다.

이 결과를 보면 저속회전수의 경우는 일반적으로 슬럼프가 증대할수록 처음에는 강도가 증가하지만 일정한 극대치에 달하면 역으로 감소하는 현상을 보인다. 이러한 현상은 각 수준의 회전

표 8. 콘크리트의 슬럼프별 저속회전수 변화에 대한 압축강도시험결과

저속회전수(RPM)	100	125	150	200	
원심력(g)	0.83	1.31	1.89	2.57	
슬럼프 (cm)	2	442	420	-	-
		435	425	-	-
		451	430	-	-
	4	462	440	-	-
		455	443	-	-
		465	438	-	-
	6	435	440	430	-
		440	448	432	-
		443	441	435	-
	8	430	435	443	420
		432	438	440	418
		428	430	438	415
10	425	430	430	430	
	430	432	435	433	
	428	425	432	428	
12	410	420	425	435	
	415	422	428	438	
	408	418	420	440	
14	400	410	418	420	
	403	415	420	423	
	402	411	415	430	

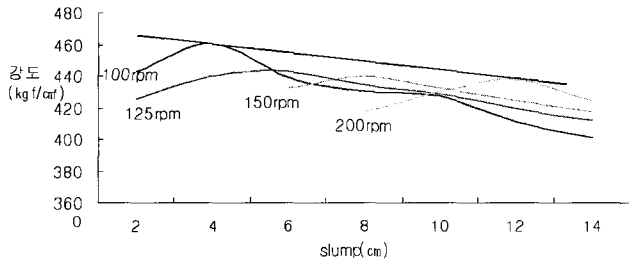


그림 4. 콘크리트의 슬럼프별 저속회전수 변화에 대한 압축강도 변화

수에서 동일하며 각 수준이 극대치를 가지고 있음을 알 수 있으며 각 수준의 극대치를 연결하면 직선에 가깝게 되고 이 직선은 슬럼프가 적은 경련 콘크리트일수록 강도가 커짐을 나타내며 이것은 강도를 크게 하려면 시공할 수 있는 범위 내에서 슬럼프가 최소가 되게 하여 적당한 저속회전수를 찾아 관리하는 것이 중요함을 나타내 준다. 이러한 결과를 나타내 주는 가장 중요한 이유는 원심성형을 마친 공시체 자체의 w/c비에 관련이 있다. 즉, 굳지않은 콘크리트의 w/c는 동일하여도 회전수의 차이에 의하여 원심성형한 콘크리트의 w/c가 달라지게 되고 이는 원심성형 한 후 배출되는 슬러지의 건조무게와 건조전 무게에 의하여 배출된 물량의 계산이 가능하며 이렇게 계산한 원심력 콘크리트의 w/c는 <표 9>와 같이 변화하기 때문이다.

저속회전의 역할은 콘크리트를 형틀 내에서 균등하게 두께를 형성시키는 것 외에 회전을 적당히 가감하는 것에 의하여 성형한 원심력 콘크리트의 w/c비를 최소로 하고 강도를 증가시키기 위

표 9. 굳지않은 콘크리트와 원심 성형한 콘크리트의 슬럼프 변화

굳지않은 콘크리트의 w/c(%)	40	42	44	46	
저속회전수 및 원심력	원심력 콘크리트의 w/c(%)				
	100 RPM (0.83 g)	32.3	34.0	37.0	
	125 RPM (1.31 g)	33.6	33.8	35.2	39.0
	150 RPM (1.89 g)		35.0	35.0	37.2
	175 RPM (2.57 g)			36.2	37.2
	200 RPM (3.36 g)				37.3
	250 RPM (5.25 g)				39.0

한 준비회전의 역할도 있는 것이다.

(2) 저속회전 시간과 원심력 콘크리트 강도와의 관계

저속회전과 원심력 콘크리트 강도와의 관계를 알아보기 위하여 저속회전수를 150 RPM(1.89 g)로 고정하고 회전시간을 변화시킨 경우 회전시간과 원심력 콘크리트 강도와의 관계를 <표 10>과 <그림 5>에 나타내었다. 이 때 고속회전은 전과 동일하게 500 RPM(21 g)로 하였다.

표 10. 저속회전수(150 rpm)에서 회전시간별 원심력 콘크리트의 압축강도 시험 예

저속회전 시간(분)	원심력 콘크리트 압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )		
	슬럼프 4 cm	8 cm	12 cm
1	430	425	415
2	443	440	425
3	450	430	420
4	443	410	410
5	435	-	380

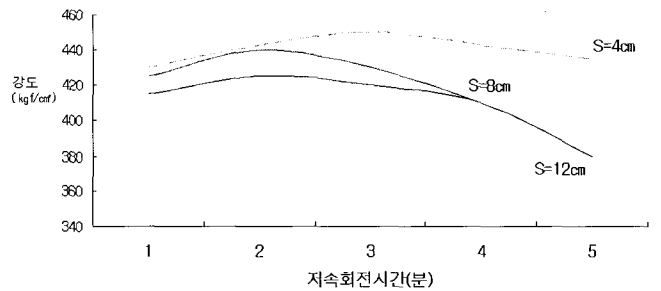


그림 5. 저속회전수 150 rpm에서 각 슬럼프별 회전시간과 압축강도와의 관계

시험결과를 살펴보면 저속회전수 시험결과와 동일하게 시간의 증가에 따라 강도가 증진하다가 어느 시간에서 극대치를 보이고 이후 시간을 연장하면 역으로 강도가 저하하는 경향을 보인다. 최적의 저속회전 시간은 콘크리트의 슬럼프가 낮을수록 길게, 슬럼프가 높을수록 짧게 관리하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

표 11. 고속회전수별 중속회전속도와 회전시간에 의한 강도변화 시험결과

회전시간 (분)	고속회전 = 500 RPM - 21 g - 10분					고속회전 = 600 RPM - 30.2 g - 5분					고속회전 = 700 RPM - 41.1 g - 3분			
	중속회전(RPM)(g)					중속회전(RPM)(g)					중속회전(RPM)(g)			
	250 (5.25)	300 (7.55)	350 (10.3)	400 (13.4)	450 (17.0)	350 (10.3)	400 (13.4)	450 (17.0)	500 (21.0)	550 (25.4)	400 (13.4)	450 (17.0)	500 (21.0)	550 (25.4)
1	440	441	443	444	444	420	421	422	422	422	400	401	402	403
2	441	442	445	447	440	422	424	425	427	420	401	403	404	406
3	441	444	447	450	437	422	425	429	426	415	401	404	408	408
4	443	446	451	448	435	424	428	434	422	-	402	405	411	407
5	445	452	455	442	433	426	431	435	417	-	403	407	413	404
6	445	451	453	437	-	428	434	420	-	-	405	410	411	400
7	448	447	450	-	-	430	434	425	-	-	406	411	408	-
8	450	442	445	-	-	431	431	422	-	-	408	409	404	-
9	445	441	440	-	-	430	425	-	-	-	406	403	-	-
10	442	435	-	-	-	427	421	-	-	-	401	-	-	-

(3) 중속회전이 원심력 콘크리트에 미치는 영향

중속회전은 저속회전과 고속회전의 중간에서 연속하여 중속의 회전을 주는 것이며 중속회전을 주는 이유는 회전속도를 저속에서 고속으로 짧은 시간에 변화를 주지 않음으로써 원심력에 의한 콘크리트의 재료분리를 적게 하고 원심성형 효과도 충분히 발휘시키기 위하여 실시한다. 재료의 분리를 보다 적게 하기 위하여서는 2단계보다는 3단계, 나아가 4단계 또는 원심성형 속

도의 단계를 설정하지 않고 서서히 중속시키는 방법 등이 있으나 3단계 이상에서는 그 차이가 미미하므로 보통 3단계 또는 4단계로 실시한다.

중속회전의 유무가 콘크리트의 강도에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험으로 저속은 125 RPM(1.31 g)으로 3분간 성형하고 고속회전은 500 RPM(21 g)으로 10분, 600 RPM(30.2 g)으로 5분, 700 RPM(41.1 g)으로 3분간 성형한 경우에 대하여 중속회전이 콘크리트의 강도에 미치는 영향을 시험한 결과를 <표 11>

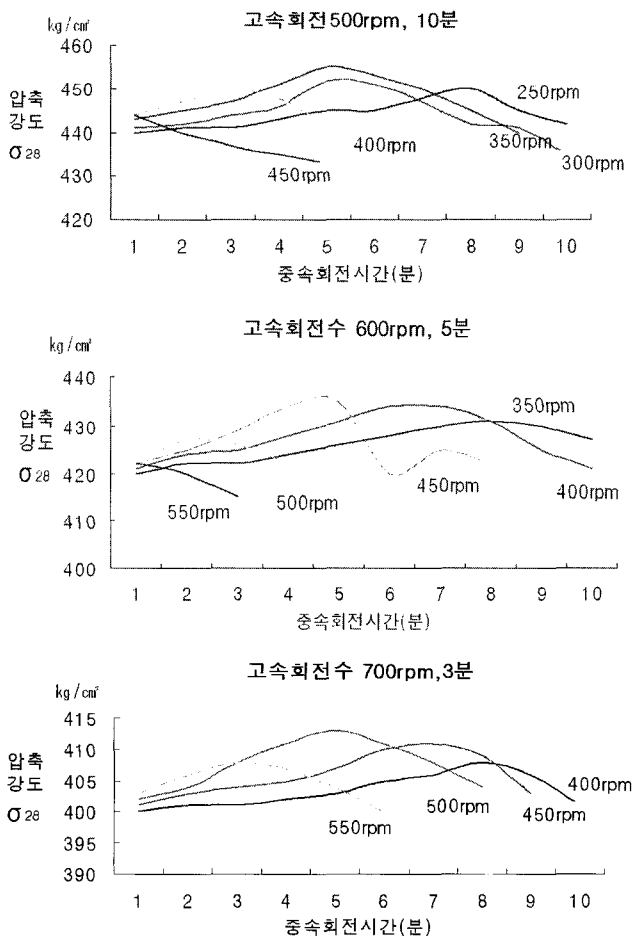


그림 6. 중속회전시간 및 회전수가 원심력 콘크리트의 강도에 미치는 영향

표 12. 고속회전수, 회전시간과 원심력 콘크리트 강도와의 관계

원심시간 (분)	고속회전수 (RPM) (g)					
	400 (13.4)	450 (17.0)	500 (21.0)	600 (30.2)	700 (41.1)	800 (53.7)
1	-	-	-	-	372	385
2	-	-	-	370	391	395
3	-	-	-	372	404	392
4	-	-	378	385	402	390
5	-	366	392	418	400	388
6	354	380	404	416	396	386
7	-	-	-	413	394	385
8	380	400	428	412	390	-
9	-	-	-	410	-	-
10	400	425	442	400	-	-
11	410	-	-	-	-	-
12	408	446	438	398	-	-
13	-	-	-	-	-	-
14	432	450	434	-	-	-
15	-	454	-	-	-	-
16	440	-	430	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-
18	448	452	430	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-
20	456	448	428	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-
22	460	444	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-
24	-	440	-	-	-	-
25	466	-	-	-	-	-

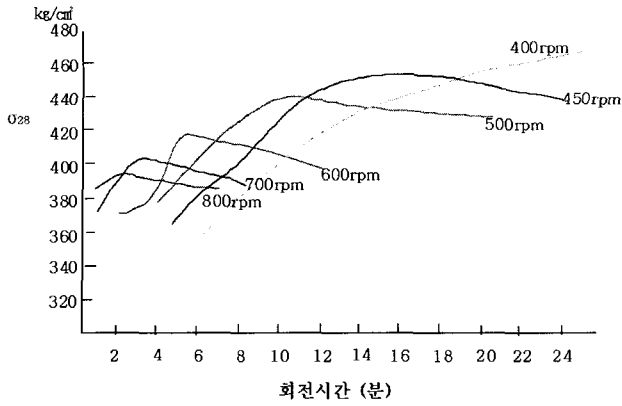


그림 7. 고속회전수, 회전시간이 원심력 콘크리트의 강도에 미치는 영향

및 <그림 6>에 나타내었다.

이 경우 나타나는 경향은 일반적으로 중속회전은 시간이 증가할수록 어느 범위까지는 강도가 증가하지만 일정범위를 넘어서면 역으로 강도가 증가하는 것을 알 수 있으며 회전수가 커질수록 회전시간은 짧아지고 회전수가 작아질수록 회전시간을 길게 요함을 알 수 있으므로 이에 대한 관리도 중요함을 알 수 있다.

(4) 고속회전과 콘크리트 강도와의 관계

원심성형에서 고속회전과 콘크리트 강도와의 관계에 대하여 알아보기 위하여 저속회전은 125 RPM(1.31 g)으로 3분간 성형하고 고속회전의 원심력과 회전시간 및 압축강도와의 관계를 시험한 결과를 정리한 것이 <표 12>과 <그림 7>이다.

이 결과로부터 원심력은 회전수의 제곱에 비례하지만 압축강도는 회전수의 제곱에 비례하여 증가하지 않는 것을 알 수 있다. 또한 회전시간에도 비례하지 않음을 알 수 있다. 그러나 어느 범위까지는 회전수 및 시간의 증가에 따라 강도도 증가하지만 최대치를 경과하면 역으로 감소하는 경향을 보인다. 이것은 콘크리트의 재료분리 현상이 가장 큰 이유로 생각된다. 즉, 원심력 콘크리트에서 회전수 및 시간의 증대에 따라 다짐의 효과도 커지지만 역으로 재료분리 현상도 이것에 비례하여 커지기 때문에 강도증

가 효과가 상쇄되기 때문에 판단된다.

5. 결 언

이상에서 기술한 내용 이외에도 원심력 콘크리트에서 품질에 영향을 미치는 요소는 시멘트의 품질, 시멘트의 분말도, 굵은골재의 최대치수, 혼화제 및 혼화재료의 품질, 콘크리트 반죽의 보관시간, 원심기의 구조, 콘크리트의 재료분리 상태, 상압증기양생, 오토클레이브 양생 등 무수하게 많이 있지만 지면 관계상 일반적인 콘크리트 기술서적에서 논하고 있지 않은 부분에 한정하여 기술하였다.

PHC 말뚝 제조회사에서 콘크리트 품질관리 및 품질향상을 위하여 노력하고 있는 많은 분들에게 자신 있게 제안하기에는 다소 미진한 부분이 없지는 않았으나 수년간의 관리활동을 통하여 수집한 자료와 시험, 그리고 경험의 결과를 정리하여 기술하게 되었음을 말씀드리며 이러한 계기를 통하여 PHC 말뚝뿐만 아니라 원심력을 이용하여 제품을 제조하는 홉관, PC관, 수로관, 전주 등에도 이와 같은 이론이 접목되어 보다 양질의 제품을 생산하는데 조금이라도 참고가 되었으면 하는 마음이다. ▣

참고문헌

1. 國府勝郎, 福澤公夫, "最新 콘크리트 技術選書 8, 膨脹콘크리트. 高強度콘크리트", 山海堂, 1982.
2. 笠井芳夫, 小林正凡, "セメント 콘크리트用 混和材料", 技術書院, 1993.
3. 山田順治, 有泉昌, わかりやすい セメントと 콘크리트の 知識, 鹿島出版會, 1993.
4. 윤재환, "포틀랜드 시멘트 및 콘크리트", 세진사, 1990.
5. Kiichi Aya, "on Compacting Concrete of Reinforced Concrete Piles by Centrifugal Method", 日本土木學會 第71号 別冊4-2, 1960.