

프리스트레스트 콘크리트 파일의 제조와 물성에 관한 연구(I)
- 콘크리트 파일의 원심 성형에 미치는 각 요인의 영향 -

A Study on Production and Physical Properties of Prestressed Concrete Piles(I)
- Effect of Factors on the Centrifugal Compaction of Concrete Piles -

정재동*, 김원기**, 오정용**, 김진철***, 유택준****
Jaung, Jae Dong Kim, Won Ki Jeong, Yong Kim, Jin Chul Yoo, Taec Jun

ABSTRACT

The objective of this report is to investigate the effect of factors on the centrifugal compaction of concrete piles with design of experiments. The analysis of sludge and measurement of compressive strength of specimens compacted by centrifugal or vibration were performed.

As a result, there were some effective factors like unit content of cement, high and middle centrifugal force and time. It was considered that the process of centrifugal compaction of concrete piles could be optimized with these results.

1. 서론

콘크리트 제품의 성형 방법중의 하나로 원심력 다짐 방법이 쓰이고 있다. 이것은 콘크리트를 고속으로 회전시켜 얻는 강한 원심력으로 콘크리트중의 기포와 잉여수분을 추출하여 고강도의 치밀한 조직을 얻을 수 있는 방법으로 내구성과 수밀성이 특히 요구되는 콘크리트 파일, 전신주, 흙관등의 중공원통형 제품의 성형에 널리 쓰이고 있다.

많은 연구 결과[1]에 의하면 원심 성형 효과는 원심력을 가하는 방법(회전속도, 회전시간)과 콘크리트의 배합에 의해 좌우되며 원심기와 몰드의 차륜간의 접촉에 의해 생기는 미세한 고속 진동이나 회전 조건, 제품의 형상, 크기에 의해서도 영향을 받는다고 한다. 현재 국내에서 생산되고 있는 대부분의 원심 성형

콘크리트 제품의 경우 이러한 고찰없이 기존의 다짐 방법을 답습하고 있으며 회전 조건이 원심력 다짐 효과나 원심력 다짐시 발생하는 슬러지에 미치는 영향에 관한 연구는 매우 드문 실정이다.

본 연구는 프리스트레스트 콘크리트 파일의 원심력 다짐 효과에 미치는 각 요인의 영향에 관한 실험적 연구이며, 콘크리트의 배합조건 및 저속, 중속, 고속 원심력과 회전시간 등의 각 요인들이 압축강도와 슬러지 배출 성향에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 실험 개요

2.1 실험 재료

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 골재로 세골재는 비중 2.54, FM 3.05의 하천사, 조골재는 비중 2.58, 최대크기 19mm의 쇄석을 사용하였다. 혼화제는 리그닌계 표준 감수제를 사용하였다. 사용한 시멘트의 화학 분석과 물리 시험 결과를 표 1, 2에 나타내었다.

* 정회원, 동양중앙연구소 연구실장, 공박
** 정회원, 동, 주임연구원
*** 정회원, 동, 연구원
**** 동양시멘트(주)이리파일공장 품질관리실장

표 1. 시멘트의 화학 분석 결과(wt %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	F.L	Ig. loss
21.51	6.20	3.07	62.98	2.58	1.92	0.85	-	0.89

표 2. 시멘트의 물리 시험 결과

비표면적 (브라인 장치) (cm ² /g)	응 결 시 간 (시간:분)		오토클레이브 안정도 (%)	압 축 강 도 (Kgf/cm ²)		
	초 결	종 결		3 일	7 일	28 일
3,451	3:20	5:55	0.18	184	250	463

표 3. 콘크리트의 배합

No.	단위시멘트량 (Kg/m ³)	물-시멘트비 (x)	잔골재율 (%)	단위수량 (kg/m ³)	감수제 첨가율 (%)
1	430.0	42.4	38.0	182.4	0.3
2	480.0	38.0	37.0	182.4	0.3
3	530.0	34.4	36.0	182.4	0.3

2.2 실험 계획

2.2.1 콘크리트 배합

KS F 4303 「프리텐슨 방식 원심력 PC 말뚝」에 규정된 28일 압축강도 500kg/cm² 이상을 만족할 수 있도록 예비실험을 통하여 단위 시멘트량 430, 480, 530kg/m³의 세가지 배합을 결정하였으며 목표 슬럼프는 5±1cm로 하였다. 실험에 사용한 콘크리트의 배합을 표 3에 나타내었다.

2.2.2 원심 성형 실험 계획

예비실험과 KS F 2454 「원심력으로 다져진 콘크리트의 압축강도 시험 방법」의 원심력 다짐 조건을 통하여 원심 성형 실험의 요인과 수준을 정하였다. 실험은 실험계획법에 따라서 콘크리트의 배합(A), 저속, 중속, 고속 원심력(B, C, D), 고속회전시간(F), 총회전시간(G)의 각 3수준의 6가지 요인을 선정, L₂₇(3¹³) 직교 배열표상에 배치하여 총 27회의 실험을 실시하였다. 교호작용으로는 콘크리트 배합과 고속 원심력(Ax_D), 콘크리트 배합과 고속회전시간

(Ax_F), 고속원심력과 고속회전시간(Dx_F)을 선정하였다. 각 실험에서 측정 항목은 원심 성형 후 슬러지의 배출량, 슬러지중 고형분의 농도, 재령 7, 28일에서 압축강도이며, 원심력 다짐 효과를 알아보기 위하여 봉진동기(진동수 8,000rpm)로 진동 다짐한 φ10x20원주형 공시체를 제작하여 3, 7, 28일 압축강도를 측정하였다. 본 연구에서 선정한 원심 성형 실험 요인과 수준을 표 4에 나타내었다.

2.2.3 원심력 다짐기와 공시체

원심력 다짐은 별도 제작한 원심력 다짐기로 하였다. 원심력 다짐기의 회전수는 광반사식 회전속도측정계를 사용하여 측정, 제어하였으며 제작한 공시체는 두께 4cm, φ20x30의 중공 원통형 공시체였다. 중공형 공시체와 원주형 공시체는 실험실내에서 24 시간후에 탈형, 정해진 재령까지 수중 양생하였다. 강도측정시마다 공시체의 지름, 길이, 두께, 무게를 측정하였다.

표 4. 실험 요인 및 수준

요 인	수 준		
	0	1	2
A: 콘크리트 배합	C=430kg/m ³	C=480kg/m ³	C=530kg/m ³
B: 저속 원심력(g)	4.0	5.2	7.0
C: 중속 원심력(g)	12.0	15.3	16.0
D: 고속 원심력(g)	22.0	29.0	37.0
F: 고속 회전시간(분)	3.0	5.5	7.0
G: 총 회전시간(분)	10.5	12.5	14.5

* g : 중력가속도

표 5. 원심 성형과 진동 성형 콘크리트의 실험 결과

No.	SLUMP (cm)	슬러지 배출량 (cc)	슬러지 고형분 (%)	압축강도 (kgf/cm ²)					원심다짐율(x)	
				진동성형			원심성형(강도비)		ds/dv x 100	
				3일	7일	28일	7 일	28 일	7 일	28일
1	6.3	125	20.1	257	472	520	377(80)	512(98)	100	100
2	6.3	210	30.6	237	379	518	415(109)	511(99)	98	100
3	4.5	185	19.2	264	400	454	405(101)	531(117)	100	102
4	6.8	275	18.9	214	302	460	395(131)	553(120)	102	100
5	5.8	205	15.9	248	370	495	391(106)	517(104)	100	101
6	5.0	175	18.0	260	413	583	402(97)	512(88)	100	100
7	7.0	240	18.0	246	360	514	423(118)	532(104)	100	101
8	6.5	200	5.5	257	446	527	428(96)	519(98)	100	100
9	6.0	110	5.1	272	410	522	393(96)	514(98)	99	100
10	5.3	200	17.8	322	437	585	464(106)	607(104)	100	102
11	6.3	170	45.6	333	484	614	466(96)	596(97)	103	101
12	4.8	200	20.2	300	446	569	434(97)	570(100)	99	101
13	4.5	165	38.5	313	482	619	439(91)	544(88)	99	101
14	5.0	175	18.1	298	448	567	479(107)	550(97)	101	100
15	4.8	165	11.8	317	460	574	386(84)	576(100)	100	100
16	5.3	220	21.0	308	446	577	473(106)	558(97)	102	101
17	5.5	165	9.3	299	420	560	450(107)	523(93)	100	100
18	4.0	165	11.6	331	462	575	440(95)	553(96)	100	99
19	2.5	110	25.9	362	529	567	500(95)	550(97)	99	100
20	6.3	200	38.2	352	487	654	473(97)	575(88)	102	100
21	5.5	175	26.2	415	418	596	457(109)	537(90)	99	100
22	3.5	140	18.7	358	521	658	511(98)	569(86)	99	100
23	3.3	125	17.1	370	527	636	322(61)	592(93)	94	98
24	5.4	150	9.1	334	510	602	469(92)	565(94)	99	101
25	3.8	100	27.3	361	551	641	481(87)	550(86)	100	100
26	3.5	75	13.9	353	502	589	411(82)	507(86)	99	98
27	4.5	190	9.2	364	489	600	508(104)	602(100)	101	101

* ds : 원심성형 공시체의 겉보기 비중
 dv : 진동성형 공시체의 겉보기 비중

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 실험 결과

실험계획에 따라 제작한 콘크리트의 슬럼프, 원심 성형시에 발생하는 슬러지의 배출량과 이것을 원심분리기로 분리한 고형분의 함량, 진동 및 원심 성형 공시체의 압축강도, 원심다짐율을 측정하여 결과를 표 5에 나타내었다. 진동 성형 공시체에 대한 원심 성형 공시체의 압축강도비를 강도비로 나타냈으며, 원심다짐율은 재령 7일과 28일에서 측정하여 원심 성형 공시체와 진동 성형 공시체의 겉보기 비중의 비로 하였다.

3.2 슬러지 배출 및 고형분량에 미치는 원심성형 조건의 요인 분석

콘크리트에 원심력이 가해짐에 따라 재료중에 있는 미립자와 잉여수가 물드내측으로 이동하여 슬러지를 배출하게 된다. 이러한 슬러지는 콘크리트 파일의 중공내면의 형상과 물성에 영향을 미친다고 알려져 있다[2]. 본 실험에서는 원심성형조건에 따른 슬러지의 배출성향을 검토하였다. 그 결과 슬러지의 배출량에 미치는 특이한 요인은 발견할 수 없었다. 그러나 슬러지중의 고형분의 함량을 요인 분석한 결과 원심 성형시 고속원심력, 고속회전시간, 그리고 이 두 요인의 교호 작용이 95%의 신뢰도에서 유효함을 알 수 있었다.

그림 1은 고형분과 고속원심력, 고속회전시간과의 관계를 나타낸 것이다. 고속원심력을 클수록, 고속회전시간이 길수록 슬러지중의 고형분량은 감소하였다. 따라서 고형분량의 감소를 위해서는 고속원심력과 고속회전시간을 크게 할 필요가 있다고 생각된다. 그림 2는 고속원심력과 고속회전시간의 교호작용을 그림으로 나타낸 것으로 슬러지중의 고형분량을 감소시키기 위해서는 고속원심력과 고속회전시간이 둘 다 커야한다는 것을 나타내고 있다.

3.3 압축강도에 미치는 원심 성형 조건의 요인 분석

원심성형한 콘크리트 공시체의 28일 압축강도에 미치는 원심성형조건의 각 요인을 분석한 결과, 가장 중요한 것은 콘크리트의 배합(신뢰도 95%)이었으며, 원심성형조건에 있어서는 총

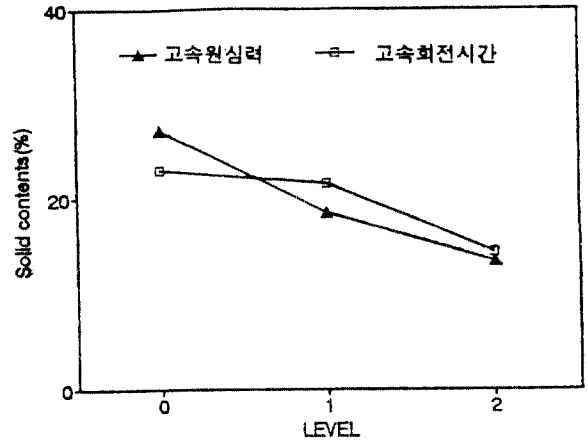


그림 1. 슬러지 고형분과 고속원심력, 고속회전시간의 관계

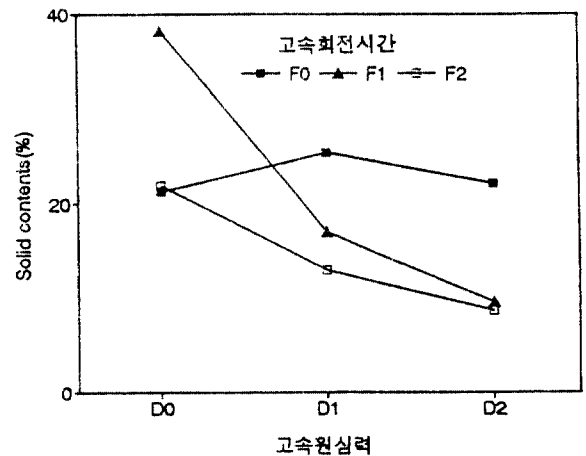


그림 2. 각 고속원심력에서 고속회전시간 변화에 따른 슬러지 고형분의 관계

회전시간(신뢰도 90%)이 중요한 인자이다. 그리고 콘크리트 배합과 고속원심력사이에는 교호작용(신뢰도 90%)이 존재함을 알 수 있었다.

그림 3은 원심성형 콘크리트의 재령 28일에서 압축강도에 미치는 각 요인의 효과중 중요한 것으로 나타난 단위시멘트량과 총회전시간의 영향을 나타낸 것이다. 단위시멘트량 480kg/m³에서 가장 높은 강도를 나타내고 있는데, 이것은 단위시멘트량 530kg/m³에서 원심성형시 성형이 불량한데 기인한 것으로 생각된다.

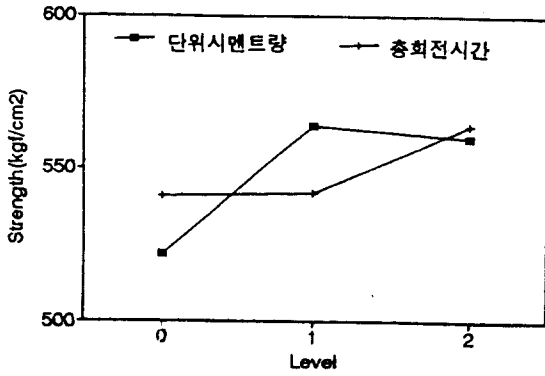


그림 3. 원심성형 공시체의 28일 압축강도에 미치는 단위시멘트량, 총회전시간의 영향

다. 또한 각 단계별 원심력과 고속회전시간의 효과는 본 실험에서는 나타나지 않았으나, 총회전시간이 길수록 강도가 높은 경향을 나타내고 있었다. 이것은 원심성형 콘크리트의 압축강도에 미치는 각 요인들중에 압축강도 발전에 큰 영향을 미치는 것은 콘크리트 배합과 총회전시간임을 의미하고 있다.

그림 4는 단위시멘트량과 고속원심력의 교호작용으로서 단위시멘트량 변화에 대하여 고속원심력의 변화가 압축강도에 미치는 효과를 나타낸 것이다. 단위시멘트량 430kg/m³에서는 고속원심력의 변화가 큰 영향을 미치지 않으나, 단위시멘트량 480kg/m³에서는 고속원심력이 작을수록 압축강도가 높게 발전되었으며, 단위시멘트량 530kg/m³에서는 본 실험의 고속원심력 요인중 중간 수준의 원심력에서 가장 높은 압축강도가 발전되었다. 따라서 본 실험의 고속원심력요인중 압축강도 발전에는 중간 수준이하에서도 충분한 원심력 다짐 효과를 얻을 수 있다고 생각된다.

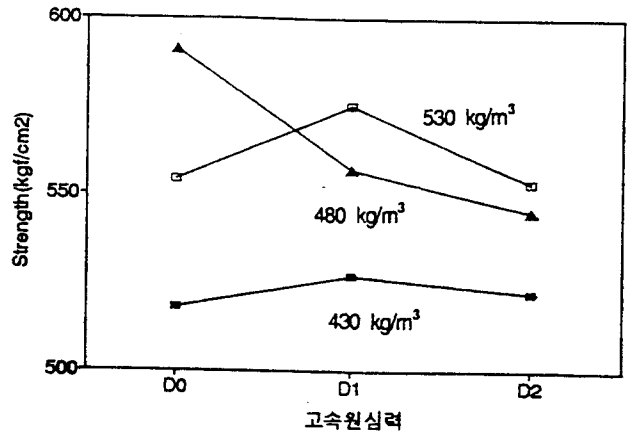


그림 4. 각 고속원심력에서 단위시멘트량 변화에 따른 원심성형 공시체의 28일 압축강도

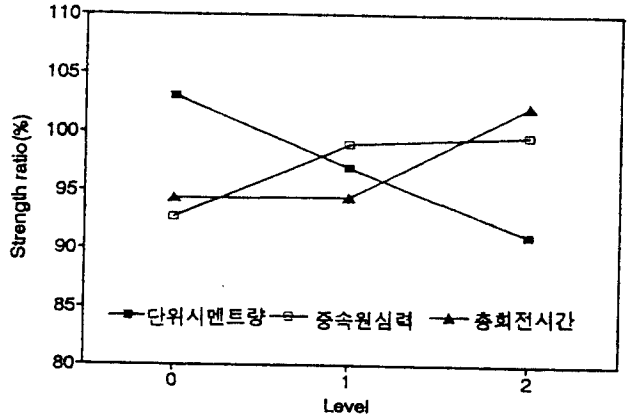


그림 5. 진동성형에 대한 원심성형 공시체의 강도비에 미치는 중요 요인의 영향

표 6. 각 물성에 미치는 중요 원심 성형 요인

요 인 물 성	콘크리트 배 합(A)	원 심 력			고속회전시간 (F)	총회전시간 (G)	교 호 작 용
		저속 (B)	중속 (C)	고속 (D)			
슬러지 고형분	--	--	--	D2<D1<D0	F2<F1<F0	--	D x F
28일 압축강도	A1>A2>A0	--	--	--	--	G2>G1>G0	A x D
28일 강도비	A0>A1>A2	--	C2>C1>C0	--	--	G2>G1=G0	--

3.4 최적 원심 성형 조건의 고찰

원심 성형의 효과를 알아보기 위하여 재령 7일과 28일에서 공시체의 겉보기 비중을 측정하여 진동 다짐한 공시체에 대하여 원심력 다짐으로 성형한 공시체의 겉보기 비중의 비를 원심 성형 다짐율로 하여 분석한 결과 원심 성형에 의한 다짐 효과는 찾을 수 없었다.

따라서 재령 28일에서 원심 성형한 공시체와 진동 성형한 공시체의 강도비를 데이터로 하여 요인 분석을 실시한 결과 강도비에 영향을 주는 중요한 인자는 콘크리트 배합(신뢰도 95%), 중속 원심력(신뢰도 90%), 그리고 총회전시간(신뢰도 95%)이었다. 이 결과를 그림 5에 나타내었는데 단위시멘트량이 작을수록, 중속 원심력과 총회전시간은 클수록 원심 성형 효과를 충분히 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

표 6은 슬러지 고형분량, 원심 성형 공시체의 28일 강도, 28일에서 원심 성형 공시체와 진동 성형 공시체의 28일 강도비의 결과를 바탕으로 중요한 요인들을 정리한 것이다.

6. 결론

콘크리트 파일의 원심 성형에 미치는 콘크리트의 배합, 원심력과 회전 시간의 영향을 알기 위하여 실험계획법을 사용·실험한 결과, 본 실험의 범위에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 원심성형시 발생하는 슬러지중의 고형분 함량에 영향을 미치는 요인은 고속원심력, 고속회전시간이었다.
- 2) 원심성형 콘크리트의 28일 압축강도 발현에 큰 영향을 미치는 요인은 콘크리트 배합과 총 회전시간이었으며, 콘크리트 배합과 고속 원심력 사이에는 교호작용이 존재하여 배합에 따라 고속 원심력의 영향이 차이가 있었다.
- 3) 재령 28일에서 원심 성형한 공시체와 진동 성형한 공시체의 강도비에 영향을 주는 중요한 요인은 콘크리트 배합, 중속 원심력, 총회전시간이었다.
- 4) 이상의 실험결과를 바탕으로 원심성형에 의한 콘크리트 파일제조시 원심성형조건의 최적화가 수립될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 西林外, 遠心力締め固め効果に関する研究, セメント技術年報 21, pp.415-419(1967)
2. 福澤譯, 遠心力締め固めコンクリートの分離, コンクリートジャーナル, Vol.8, No.9, pp. 11-16(1970)