

급냉 제강 슬래그 대체율과 폴리머 수지에 따른 폴리머 콘크리트의 유동특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the fluidity properties of Polymer Concrete According to Replacement Ratio of Rapidly-Chilled Steel Slag and polymer resin

최 덕 진* 김 재 원* 선 정 수* 김 하 석** 황 의 환*** 김 진 만****
Choi, Duck-Jin Kim, Jae-Won Sun, Joung-Soo Kim, Ha-Suk Hwang, Eui-Hwan Kim, Jin-Man

Abstract

The steel slag, a by-product which is produced by refining pig iron during the manufacture of steel, is mainly used as road materials after aging. It is necessary to age steel slag for long time in air because the reaction with water and free-CaO in steel slag could make the expansion of volume. This problem prevents steel slag from being used as aggregate for concrete. However, steel slag used in this study was controled by a air-jet method which rapidly cools substance melted at a high temperature. The rapidly-chilled method would prevent from generation of free-CaO in steel slag. Also, Molten steel slag rapidly-chilled by air in high speed becomes a fine aggregate of nearly spherical shape

This study dealt with the influence of the using rate of rapidly-chilled steel slag and polymer resin on fluidity of polymer concrete, as a results Since RCSS has spherical shape and high density, up to replacement ratio of 100%, increases concrete fluidity under same polymer content and decrease polymer content in order to secure the same fluidity

키워드 : 급냉 제강 슬래그, 불포화폴리에스테르수지, 폴리머, 유동성

Keywords : Rapidly-Chilled Steel Slag, Unsaturated Polyester resin, Polymer, Fluidity

1. 서 론

폴리머 콘크리트는 복합재료의 하나로서 시멘트를 사용하지 않고 열경화성 또는 열가소성수지와 같은 액상 수지를 사용하여 골재를 결합시킨 것을 말한다. 1990년대 초에 국내에 처음 상용화 되어 현재는 5개 업체에서 폴리머 콘크리트 제품을 생산하고 있다. 시멘트 콘크리트에 비해 강도는 물론 기타 물리·화학적인 성질이 우수한 장점을 지니고 있는 폴리머 콘크리트는 현재 보수보강공사와 프리캐스트 제품에 그 사용이 폭넓게 증가하고 있는 추세이다. 그러나 폴리머 콘크리트는 프리캐스트 제품 제조 및 개발 시 몇 가지 문제점을 안고 있다.

우선 결합재로 사용되어지는 폴리머 수지의 가격이 높아 단위체적당 생산 단가가 시멘트 콘크리트의 7-8배나 된다. 시공의 편이성과 제품의 단면을 줄이는 방법으로 어느 정도의 가격 경쟁력을 가지고 있으나 아직도 시멘트 콘크리트에 비해 단가가 높으므로 생산 공정의 개선을 통한 생산성을 높이는 방법, 사용 골재의 변화를 통하여 수지량을 저감시키는 방법 등의 다양한 연구가 필요한 실정이다.¹⁾²⁾³⁾

둘째로 워커빌리티의 개선이 필요성이다. 폴리머 콘크리트의 워커빌리티는 수지의 점도 및 함량에 큰 영향을 받는데 이 수지의 점도가 높고 온도에 따라 변화폭이 커 소정의 흐름값을 얻는데 많은 시간이 소요된다는 점이 제품 제조 시 불리하게 작용하고 있다.⁴⁾ 또한 상기의 수지의 특성으로 인해 기존의 시멘트 콘크리트의 워커빌리티 측정 방법을 따르는 것은 워커빌리티를 정량적으로 평가하기가 지난(至難)함에도 불구하고, 이에 대한 기준이 적립되지 않아 현장에서는 표준화 되지 않은 간이 방법을 이용하고 있는 실정이다. 그러므로 폴리머 콘크리트의 재료 특성에 맞는 워커빌리티 측정 방법의 개발이 필요한 시점이다.

한편 우리나라는 중국, 일본, 미국, 러시아에 이은 세계 5위의 조강 생산국으로 막대한 양의 철강 생산량과 더불어 그 부산물인 철강 슬래그 또한 다량 발생 하고 있다. 국내의 철강 슬래그의 발생량은 2006년 기준으로 약 1434만 톤 발생하였고, 이 중 고로 슬래그가 약 815만 톤, 제강 슬래그가 약 619만 톤이 발생하였다.

한편 철강 슬래그는 고로 슬래그 외에는 뚜렷한 재활용 용도가 마련되지 않은 대표적인 공정 부산물로 재활용 용도의 개발이 시급한 실정이다. 특히 제강 슬래그는 Free CaO에 의한 팽창 붕괴성과 높은 밀도에 의한 재료분리 때문에 건설재료로 재활용하는데 많은 제약을 받고 있었다.

그러나 최근에는 고속의 공기를 이용하여 용융상태의 제강

* 정회원, 공주대학교 건축공학과 석사과정
** 정회원, 공주대학교 건축공학과 박사과정
*** 정회원, 공주대학교 화학공학과 교수공학박사
**** 정회원, 공주대학교 건축공학과 교수공학박사

슬래그를 급냉시키는 방법으로 Free CaO의 생성량을 제어하는 방법이 개발되어 Free CaO에 의한 팽창 붕괴의 위험이 적으며, 또한 급냉된 제강 슬래그는 입형이 구형에 가까운 잔골재 형태를 갖기 때문에 콘크리트용 건설재료로의 재활용할 경우 유동성이 증가하는 장점이 있다.⁵⁾⁶⁾

이에 본 연구에서는 급냉 제강 슬래그(이하 RCSS)를 폴리머 콘크리트용 골재로 활용하고 다양한 질기를 갖는 폴리머 콘크리트의 유동특성을 파악하기 위한 일련의 연구로서 먼저 RCSS의 잔골재 대체율 및 폴리머 수지량의 변화에 따른 폴리머 콘크리트의 유동 특성을 검토하였다. 본 연구의 결과를 폴리머 콘크리트 유동성 측정에 적합한 정량적인 측정방법의 개발과 RCSS의 건축재료의 활용 활성화 방안에 기초 자료로 제시하고자 한다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험 계획

본 연구에서는 폴리머 콘크리트의 골재 대체와 수지 변화에 따른 실험 계획으로 표 1과 같다. 실험 인자는 골재 대체로 급냉 제강 슬래그를 용적대체율별 25%씩 증가하여 실시하였으며, 골재에 대한 폴리머 수지는 중량별 1%씩 변화를 주어 실시하였다.

표 1. 실험계획

Factors	Levels (%)	Mix ID	Test Items
Replacement ratio of RCSS (Vol%)	0	R*00	Modified Slump Test Modified L-box Test Modified Vebe Test
	25	R25	
	50	R50	
	75	R75	
	100	R100	
Polymer resin content (Wt%)	9	P*9	
	10	P10	
	11	P11	
	12	P12	
	13	P13	

R* : Replacement ratio, P* : Polymer resin amount

표 2. 실험배합

Mix ID	Unit Volume (ℓ / m ³)					
	UP*	PS*	CaCO ₃	Coarse Agg.	RCSS	Sand No.6
PO11RS0	187	48	169	405	0	192
PO11RS50	187	48	169	405	96	96
PO11RS100	187	48	169	405	192	0

UP* : Unsaturated Polyester resin, PS* : Polystyrene

2.2 사용 재료

2.2.1 폴리머 수지

본 실험에서 사용한 폴리머 수지는 국내 S사에서 생산되고 있는 제품인 불포화폴리에스테르수지(Unsaturated Polyester

resin)로 물리적 특성은 표 3과 같다. 불포화폴리에스테르의 비중은 약 1.1정도로 물과 거의 유사한 것으로 나타났다.

표 3. 폴리머 수지의 물리적 특성

Type of polymer	Specific gravity	viscosity (poise)	Acid value	Non volatile materials(%)
UP*	1.1	4.1	28	62

Note : UP* =Unsaturated Polyester resin

2.2.2 수축저감제

폴리머 콘크리트는 폴리머가 경화되는 과정에서 발생하는 중합반응에 의한 체적 수축이 발생하므로 본 실험에서는 체적 안정성을 부여하기 위하여 수축 저감제를 사용하였으며 수축 저감제를 물리적 특성은 표 2와 같다. 수축저감제의 비중은 0.95이며, 점도는 약 33 poise로 나타나는 제품을 사용하였다.

표 4. 수축저감제의 물리적 특성

Specific gravity	viscosity (poise)	Non volatile materials(%)
0.95	33	35

2.2.3 골재 및 충전제

실험에 사용한 골재와 충전제에 대한 물리적 특성은 표 6과 같다. 골재는 수분에 대한 안정을 부여하기 위하여 건조 후 약 수분 함량이 0.05% 이하 되는 것을 사용하였으며 굵은 골재는 5~10mm를, 잔골재는 규사 6호사로 0.3~0.6mm인 골재를 사용하였다. 충전제는 밀도 2.7(g/cm³)인 중질탄산칼슘(CaCO₃)을 사용하였다.

표 5. 골재 및 충전제의 물리적 특성

Types	Density (g/cm ³)	Particle size(mm)	Water content(%)
Filer(CaCO ₃)	2.7	0.032	< 0.05
Fine aggregate	2.62	< 0.6	< 0.05
Coarse aggregate	2.65	5~10	< 0.05

2.2.4 급냉 제강 슬래그

급냉 제강 슬래그는 용융된 슬래그를 고속의 공기로 급속 냉각시키는 아토마이징 기술을 적용하는 것으로 화학적 성분 표6와 같다. 표6과 같이 Free CaO의 함유량이 약 0.16%로 나타나 Free CaO에 대한 안정성을 가지는 것으로 나타났다.

표 6. RCSS의 화학적 성분

Chemical composition (wt.%)							F-CaO (%)
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	
13.0	9.6	30.2	39.9	8.0	0.03	0.1	0.15

급냉 제강 슬래그와 규사 6호사와의 비교하면 그림 2와 같으며 물리적 특성은 표 7과 같다. 그림 2와 같이 급냉 제강 슬래그는 입형이 구형에 가까우며 규사 6호사는 입형이 거칠은 것으로 나타나 비표면적에 차이가 나는 것으로 나타났다. 표와 같이 급냉 제강슬래그는 밀도(g/cm³)는 3.54로 6호사가 2.62인 것에 비해 약 1.4배 높게 나타났고, 실적률은 62.7%로 6호사가 55.9%인 것에 비해 약 7% 높게 나타났다.

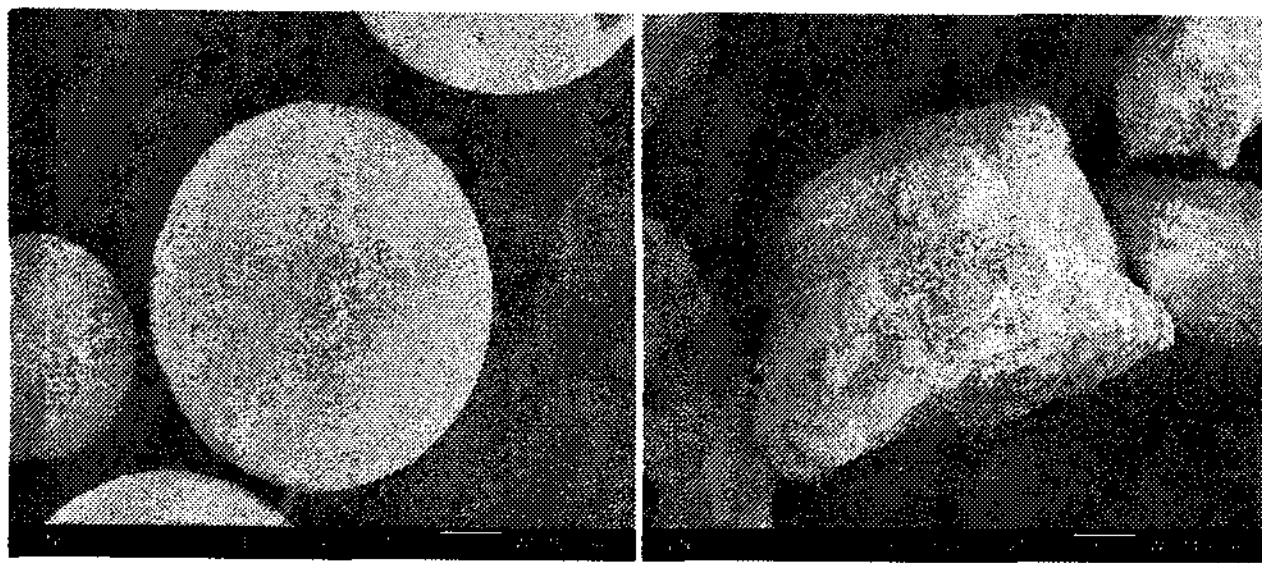


그림 2. RCSS 및 6호사의 입형

표 7. RCSS 및 사용 잔골재의 물리적 특성

Type	Density (g/cm ³)	Unit Weight (kg/ℓ)	Solid Volume(%)
Sand No.6	2.62	1.46	55.9
RCSS	3.54	2.22	62.7

RCSS* = Rapidly-Chilled Steel Slag

3.3 실험 방법

3.3.1 Modified Slump Test

KS F 2402(콘크리트의 슬럼프 시험 방법)에 준하여 아랫면 안지름 200mm, 윗면 안지름 100mm, 높이 150mm의 슬럼프 콘 안에 시료를 1/2씩 25회 붓 다짐을 하여 채워 넣고 슬럼프 콘을 수직으로 들어 올린 다음 5분 후에 슬럼프를 측정하였다.

3.3.2 Modified L- box Test

L-box 장치의 수직 박스에 시료를(3ℓ) 가득 채워 넣고 하단 부의 Gate를 개방하여 진동 상태에서 시료가 로트부를 유하하여 끝 지점까지(30cm) 도달하는데 걸리는 시간을 측정하였다.

3.3.3 Modified Vebe Test

KS F 2427(굳지 않은 콘크리트의 반죽질기 시험방법)에 준하여 실시하였으며 안지름 240mm, 높이 200mm의 용기에 윗면 안지름 100mm, 아랫면 안지름 150mm, 높이 200mm인 슬럼프콘을 넣고 슬럼프콘에 시료를 채운 다음 다짐봉으로 다진 후 수직으로 들어올린다. 그 후 지름 230mm, 질량 2750g의 원판을 시료에 얹은 다음 10초의 진동시간 동안 시료의 침하깊이를 측정하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 Modified Slump Test

그림 5는 Modified slump test에 의한 워커빌리티 측정 실험으로 RCSS 대체율의 증가와 폴리머 수지량이 증가할수록 슬럼프 값이 증가하는 것으로 나타나고 있다. 수지량이 적을때(된비빔)일때 RCSS의 잔골재 대체에 따른 유동성의 증가 효과가 더욱 크게 나타나고 있으며 100%대체했을경우 0%대체한 것에 비해 수지의 양을 약 2%정도 저감 시킬 수 있는 것으로 나타났다. 이는 RCSS의 둥근 입형으로 인한 것으로, 비표면적이 감소하여 소요의 흐름성을 갖기 위한 수지의 양이 저감하고, 또한

RCSS의 둥근 입형에 의해 골재간의 마찰계수가 감소한 것에 기인하는 것으로 사료된다.

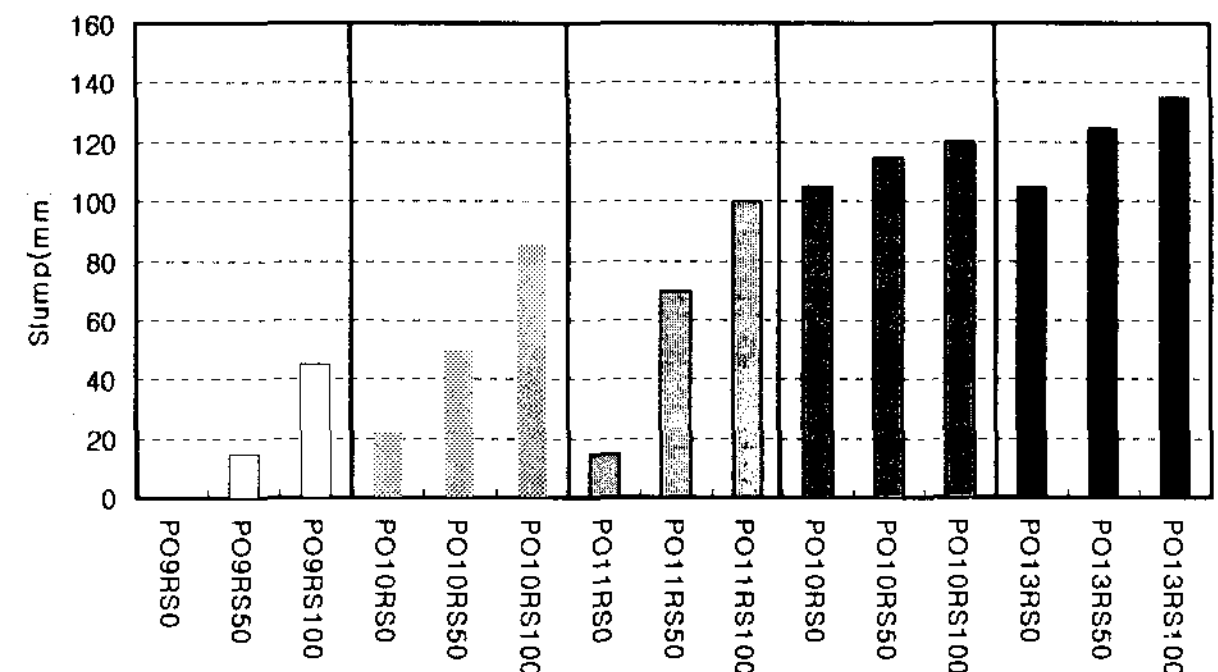


그림 5. 폴리머 수지량과 RCSS의 잔골재 대체율에 따른 폴리머콘크리트의 유동성 변화

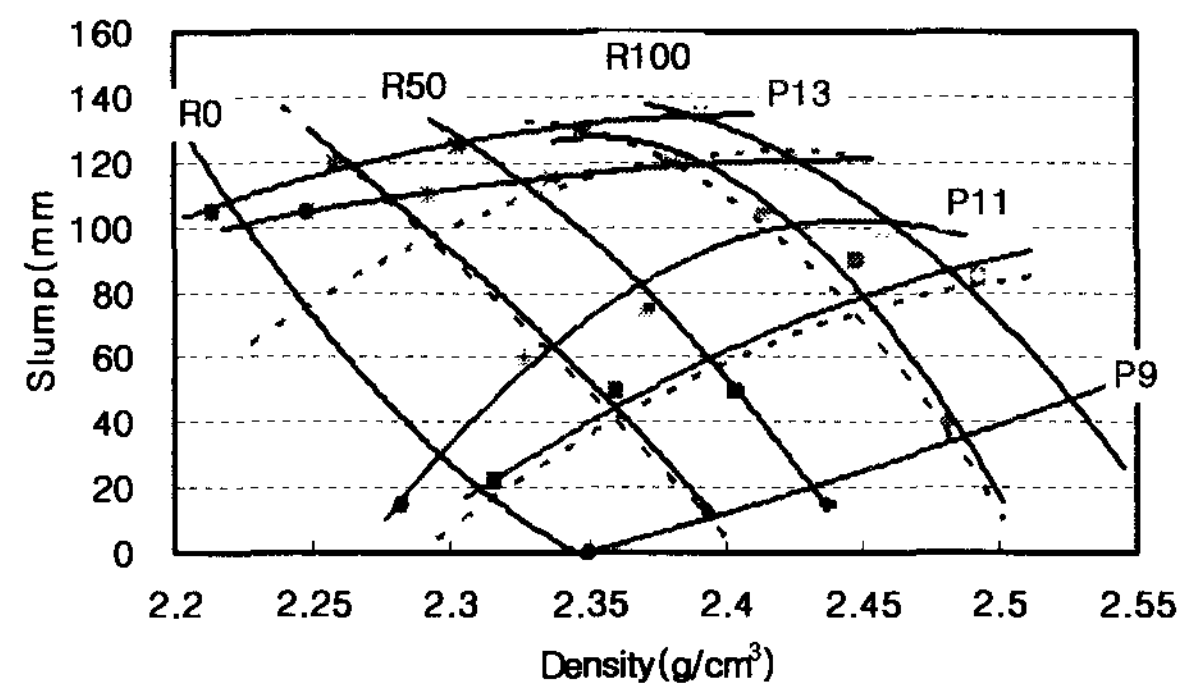


그림 6. Slump test에 의한 밀도에 따른 폴리머콘크리트의 유동성

4.2 Modified L-box Test

그림 7은 Modified L-box test에 의한 워커빌리티 측정 실험으로 폴리머 콘크리트의 생산 플랜트와 유사한 형태로서 몰드에 충전되는 시간을 평가할 수 있는 방법이다. RCSS 대체율의 증가와 폴리머 수지량이 증가할수록 유동성이 증가하는 것으로 나타나고 있으며 수지량이 적을(된비빔)때 RCSS의 잔골재 대체에 따른 유동성의 증가 효과가 더욱 크게 나타나고 있으며 100%대체한 경우 0%대체한 것에 비해 수지의 양을 약 1.5%정도 저감 시킬 수 있는 것으로 나타났다.

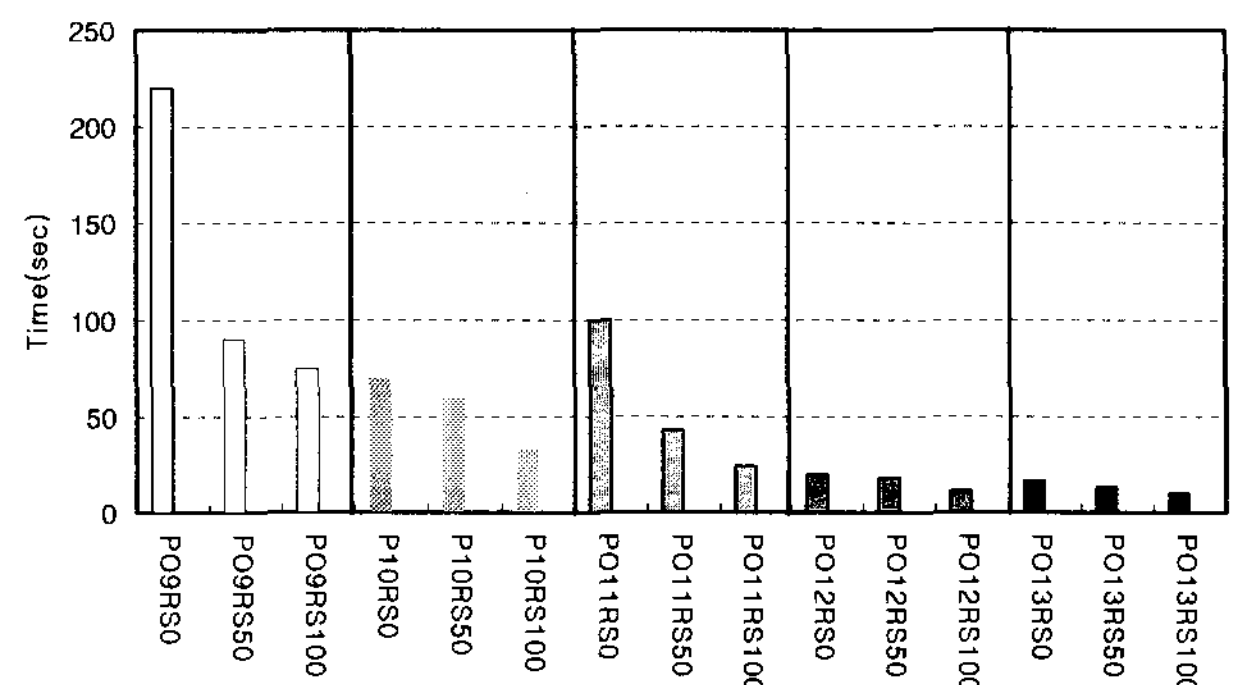


그림 7. Modified L-box test에 의한 폴리머 수지량과 RCSS의 잔골재 대체율에 따른 폴리머콘크리트의 유동성 변화

이는 상기에 언급한 RCSS의 둥근 입형의 특성에 의해 기인된 것으로 판단되며, 또한 RCSS의 사용량 증가에 의한 자중의 증가 또한 유동성의 개선에 효과가 있는 것으로 판단된다.

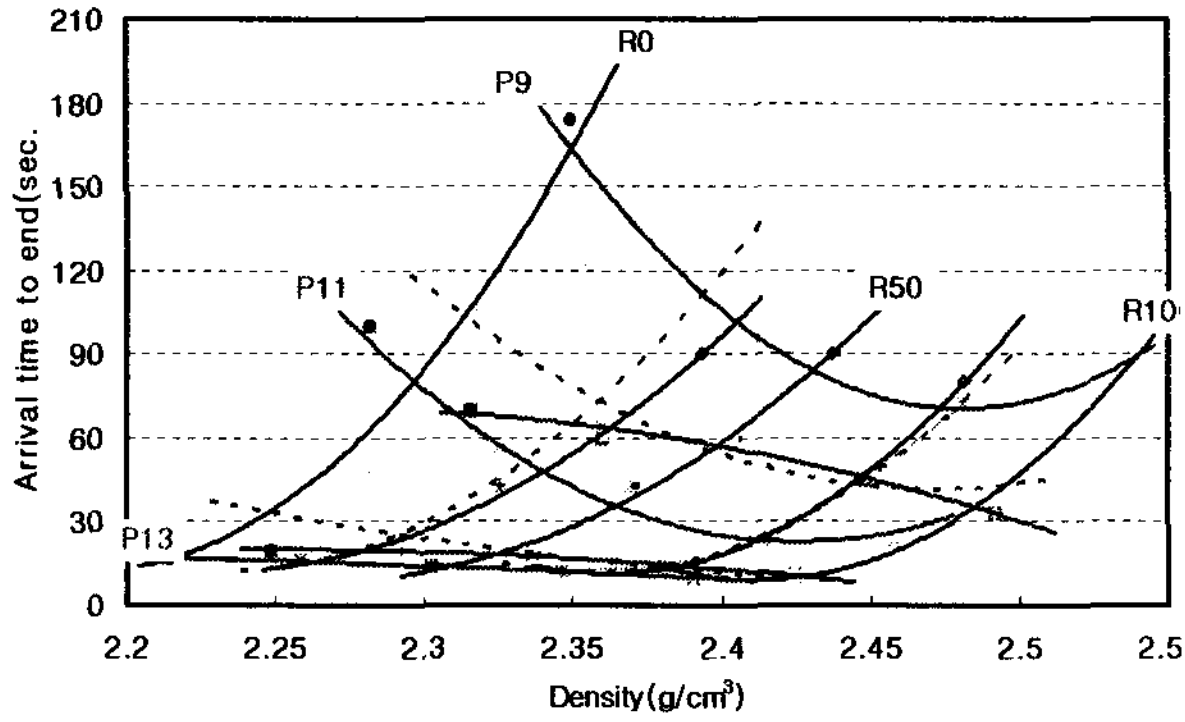


그림 8. L-box test에 의한 밀도에 따른 폴리머콘크리트의 유동성

4.3 Modified Vebe Test

그림 9는 Modified Vebe test에 의한 워커빌리티 측정 실험으로 된비빔 시멘트 콘크리트의 충전성을 평가하는데 활용되는 실험 방법으로서 슬럼프콘의 용적을 변화시켜 본 실험에 적용하였다. RCSS 대체율의 증가와 폴리머 수지량이 증가할수록 유동성이 증가하는 것으로 나타나고 있으며 수지량이 적을때 (된비빔)일때 RCSS의 잔골재 대체에 따른 유동성의 증가 효과가 더욱 크게 나타나고 있다.

이는 Modified Slump Test와 Modified L-Box Test에 언급되어진 것과 마찬가지로 둥근입형인 RCSS 특성의 영향으로 사료된다.

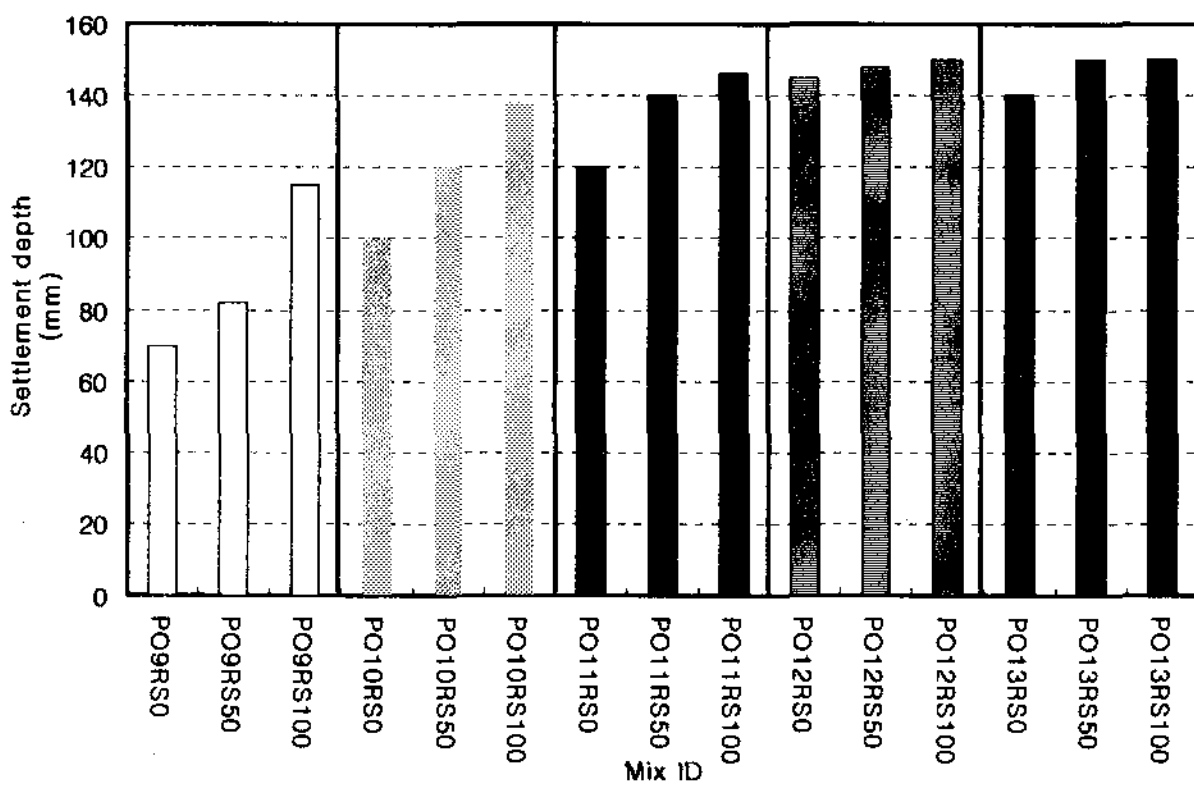


그림 9 Modified Vebe test에 의한 폴리머 수지량과 RCSS의 잔골재 대체율에 따른 폴리머콘크리트의 유동성 변화

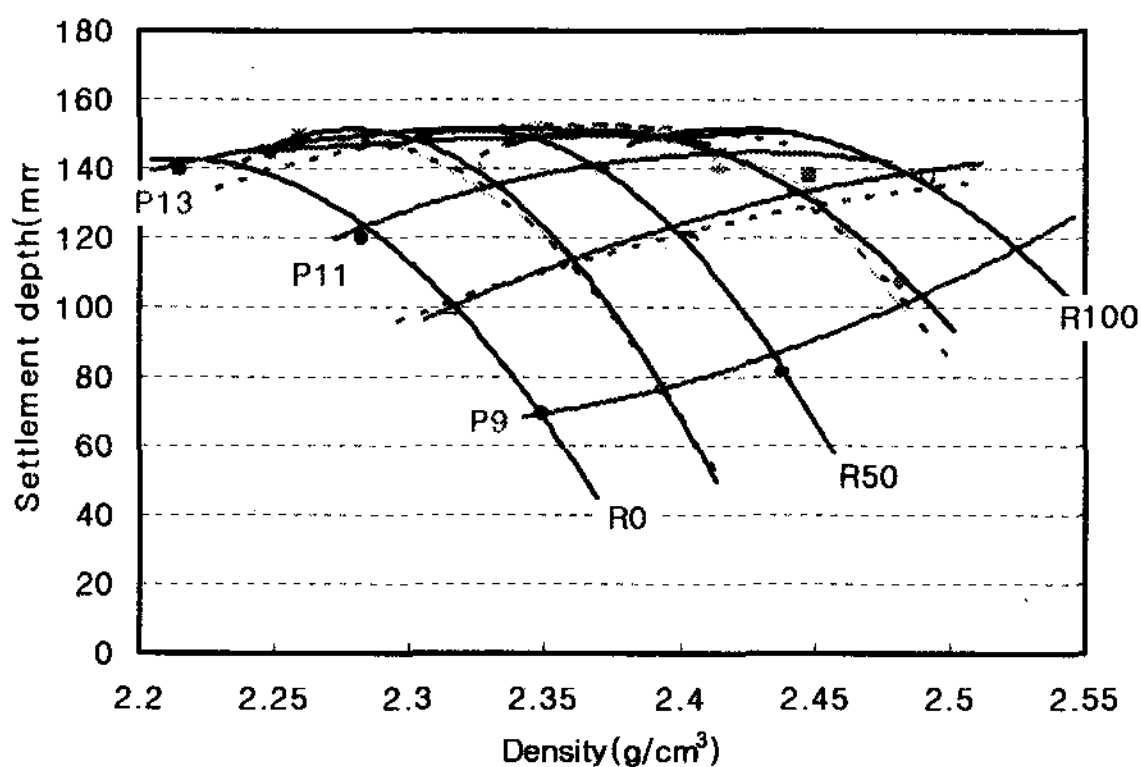


그림 10. 에 의한 밀도에 따른 폴리머콘크리트의 유동성

5. 결론

- 1) RCSS의 잔골재 대체율에 따라 폴리머 콘크리트의 유동성 증진효과가 확인한 것으로 나타났으며 동일한 유동성을 확보하기 위한 수지량을 약 2%정도 저감 시킬 수 있는 것으로 나타났다. 이는 RCSS의 둥근 입형에 기인한 것으로, 비표면적이 감소하여 소요의 흐름성을 갖기 위한 수지의 양이 저감하고, RCSS의 둥근 입형에 의해 골재간의 마찰계수가 감소한 것으로 사료되며, RCSS의 사용량 증가에 따른 자중의 증가로 인해 유동성 개선에 효과가 있는 것으로 판단된다.
- 2) 워커빌리티 평가에 있어서 Modified slump test는 유동성 변화가 확실하였지만 Test하는데 5분이상의 소요시간으로 인해서 현장적용성이 떨어지는 것으로 판단되고 Modified Vebe Test는 수지량 11% 이하의 된비빔에서 적용이 가능하지만 그이상의 수지량에서는 유동성 변화가 미비하였다. 이러한 이유로 Modified L-Box Test가 폴리머 콘크리트의 재료 특성에 맞는 워커빌리티 평가 방법으로 가장 적합한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 공주대학교 자원재활용소재 연구센터(RIC/NMR)가 공동으로 수행한 연구의 일부이며 이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 「2단계 BK21 사업」의 지원비를 받는 것으로 관계 기관에 감사의 말씀을 올립니다.

참고 문헌

1. 문한영 외 1인, 한국 콘크리트학회 논문집 Vol.14, No.4, pp.597~607, 2002.08
2. 오옥수 외 2인, "제강 슬래그 내의 지금 회수방법", 특허청, 특허 등록 번호,10-0098062-0000.1996
3. 조성현 외 3인, 한국 콘크리트학회 논문집 Vol.17, No.1, pp77~84, 2005.02.
4. 폴리머 콘크리트 소위원회, "콘크리트-폴리머 복합체", 한국 콘크리트학회
5. 한국 철강 협회, www.kosa.or.kr
6. 황의환 외 2인, 한국공업화학, Vol.10, No.7, pp1066~1072, 1999