아토마이징 제강 환원슬래그를 사용한 폴리머 콘크리트 복합재료의 특성 (I) (PMMA 수축저감재를 사용)

황의환[†] · 김진만*

공주대학교 화학공학부, *공주대학교 건축학부
(2014년 1월 4일 접수, 2014년 1월 24일 심사, 2014년 1월 28일 채택)

Characteristics of Concrete Polymer Composite Using Atomizing Reduction Steel Slag (I) (Use of PMMA as a Shrinkage Reducing Agent)

Eui Hwan Hwang[†] and Jin Man Kim*

Department of Chemical Engineering, Kongju National University, 275 Budae-dong, Cheonan, Chungnam, 331-717, Korea

*Department of Architecture, Kongju National University, 275 Budae-dong, Cheonan, Chungnam, 331-717, Korea

(Received January 4, 2014; Revised January 24, 2014; Accepted January 28, 2014)

구형의 아토마이징 제강 환원슬래그(래들로 슬래그)를 폴리머 콘크리트 복합재료의 잔골재 대신 사용하기 위하여 아토마이징 제강 환원슬래그의 대체율과 폴리머 결합재의 첨가율을 다양하게 변화시켜 공시체를 제작하였다. 공시체의 제 물성을 조사하기 위하여 흡수시험, 압축 및 휨강도, 내열수성시험, 세공분포측정 및 SEM에 의한 미세조직 관찰을 실시하였다. 그 결과 폴리머 결합재 7.5% 첨가한 공시체는 제강 환원슬래그의 대체율이 증가됨에 따라 압축 및 휨강도가 증가되었으나 폴리머 결합재 8.0% 이상에서는 유동성의 증가로 인한 재료분리 현상으로 특정한 대체율에서 최대값을 나타내었다. 내열수성시험에 의하여 압축강도, 휨강도, 세공의 평균직경 및 밀도는 감소되었으나 총세공량과 공극률은 증가되었다. 아토마이징 제강 환원슬래그를 잔골재 대신 사용함으로써 유동성이 현저히 증가되어 폴리머 결합재의 사용량을 최대 23.5%까지 절감할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 아토마이징 제강 환원슬래그를 사용함으로써 내열수성이 감소되기 때문에 더 많은 연구가 요구된다.

In order to use the spherical atomizing reduction steel slag (ladle furnace slag, LFS) instead of the fine aggregate of polymer concrete composites, various specimens were prepared with various replacement ratios of atomizing reduction steel slag and the addition ratios of polymer binder. Physical properties of these specimens were investigated through the absorption test, the compressive strength test, the flexural strength test, the hot water resistance test, the pore analysis and the micro-structure using scanning electron microscope. Results showed that the compressive strength and flexural strength of specimens with 7.5% of polymer binders increased with the increase of replacement ratios of atomizing reduction steel slag, but those of the specimens with 8.0% or more of polymer binders showed a maximum strength at a certain replacement ratio due to the material segregation causing the increase of fluidity. By hot water resistance tests, the compressive strength, flexural strength, average pore diameter, and bulk density decreased but the total pore volume and pore diameter increased. It was concluded that the amount of polymer binders could be reduced by maximum 23.8%, because the workability of the polymer concrete was remarkably improved by using the atomizing reduction steel slag instead of fine aggregate. However, since the use of atomizing reduction steel slag decreased the resistance of the polymer concrete to hot water, further studies are required.

Keywords: polymer concrete composite, polymer binder, reduction steel slag, spherical aggregate, recycling

1. 서 론

철강 제조공정에서 발생하는 부산물로서 고로슬래그와 제강슬래그가 있다. 전기로에서 발생하는 제강슬래그는 고철을 용해한 후 생성되

를 투입하고, 산소를 불어넣으면서 고철 중에 존재하는 불순물을 제거하는 산화공정에서 발생하는 산화슬래그와 용융된 용강을 다시 래들로(ladle furnace)에서 코크스와 생성회를 투입하여 산소와 황 등을 제거하는 환원공정에서 발생하는 환원슬래그로 분류된다. 대체적으로 전기로에서 발생하는 제강슬래그는 산화슬래그가 80%, 환원슬래그가 20%를 차지하고 있다. 이러한 제강슬래그 속에는 미반응의 산화칼슘(CaO)과 산화마그네슘(MgO)이 존재하는데 산화슬래그보다 환원슬래그에 훨씬 많은 양이 존재한다. 이러한 미반응의 산화금속(CaO, MgO)은 물과 반응하면 체적이 팽창되면서 붕괴되기 때문에 시멘트 콘크리

[†] Corresponding Author: Kongju National University, Department of Chemical Engineering, 275 Budae-dong, Cheonan, Chungnam, 331-717, Korea
Tel: +82-41-521-9356 e-mail: ehwhang@kongju.ac.kr

Table 1. The Physical Properties of the Filler and the Aggregates

Type	Source	Blain (cm ² /g)	Density (g/cm ³)	Water content (%)	Unit weight (kg/m ³)	Solid volume (%)	Size (mm)
Filler	CaCO ₃	3,632	2.67	< 0.05	-	-	0.03
Aggregate	Coarse Silica	-	2.65	< 0.05	1,510	52	5-8
	Fine Silica	-	2.62	< 0.05	1,422	55	0.3-1.2
	Atomizing steel slag	-	2.94	< 0.05	1,879	63.2	0.3-1.2

Table 2. The Physical Properties of UP Resin and PMMA Shrinkage Reducing Agent

Type	Specific Gravity	None Volatile Materials	Acid Value	Viscosity (Poise)
Unsaturated poly Ester Resin	1.1	62	20	4.1
PMMA SRA	1.19	-	-	25

트의 유용한 골재자원으로 활용할 수 없는 것으로 알려져 있다[1-4]. 최근 이러한 문제점을 해결하기 위하여 제강슬래그 용탕을 소량으로 흘려보내면서 고압의 압축공기를 분사하여 용탕을 비산 급냉시키는 아토마이징 공법이 개발되었다[5,6]. 아토마이징 공법으로 생산된 제강슬래그는 구형의 형상으로 산화칼슘(CaO)과 산화마그네슘(MgO)이 유리화되기 때문에 화학반응성이 상당히 감소되게 된다. 그러나 현재의 기술로는 미반응의 산화칼슘(CaO, MgO)을 완전히 제거할 수 없을 뿐만 아니라 일반 골재보다 비중이 훨씬 크기 때문에 재료분리가 일어나 시멘트 콘크리트용 골재로 사용하는데 문제점이 있는 것으로 알려져 있다[3,5].

최근 이러한 문제점을 해결하기 위하여 물과 시멘트를 전혀 사용하지 않는 폴리머 콘크리트 복합재료 제조에 골재로 재활용하는 기술이 보고되고 있다[4,7]. 폴리머 콘크리트 복합재료의 골재로 아토마이징 제강 산화슬래그를 사용한 연구사례는 종종 보고되고 있으나[3,5,7] 아직까지 아토마이징 제강 환원슬래그의 제조기술이나 골재로 사용한 연구사례는 전혀 없다. 이러한 이유는 환원슬래그의 발생량이 산화슬래그의 발생량보다 훨씬 적고 환원슬래그의 아토마이징 기술도 최근에 개발되고 있기 때문이다. 폴리머 콘크리트 복합재료는 시멘트 콘크리트에 사용되는 물과 시멘트를 전혀 사용하지 않고, 결합재로서 불포화폴리에스테르수지, 에폭시수지, 페놀수지, 메틸메타크릴레이트수지 등이 사용되고[8-10] 있기 때문에 아토마이징 제강 환원슬래그를 사용하여도 시멘트 콘크리트에서 발생할 수 있는 유리 산화칼슘(CaO, MgO)의 팽창붕괴가 일어나지 않고 또 폴리머 결합재의 점도가 매우 높기 때문에 재료분리도 거의 일어나지 않는다. 폴리머 콘크리트 복합재료는 시멘트 콘크리트에 비하여 기계적 강도가 훨씬 우수할 뿐만 아니라 시멘트 콘크리트가 갖고 있지 못한 수밀성, 내구성, 내약품성, 내마모성 및 내충격성 등이 매우 우수하여[9,10] 바닥재, 포장재, 방수재, 보수재, 방식재 및 프리캐스트 제품에 이르기까지 다양한 산업분야에 널리 활용되고 있다[8,11-14]. 그러나 시멘트 콘크리트에 비하여 내열성 및 내화성이 매우 약한 폴리머를 결합재로 사용하기 때문에 건축물의 사용에는 상당히 제약을 받고 있다[8,15]. 또한 시멘트 콘크리트에 비하여 동일한 부피당 생산가격이 훨씬 비싸기 때문에 보급에 한계성이 있다[9,10]. 최근에는 폴리머 콘크리트의 생산가격의 대부분을 차지하고 있는 폴리머 결합재의 사용량을 줄이고 또 저가의 폴리머 결합재를 개발하여 사용하는 연구가 보고되고 있다[16,17,18].

본 연구에서는 폴리머 결합재의 첨가율 및 구형의 아토마이징 제강 환원슬래그의 용적 대체율에 따라 다양한 공시체를 제조하고 물성시험을 통하여 최적의 배합설계를 도출하고자 하였다. 폴리머 결합재는 성능과 경제성 면에서 우수한 불포화폴리에스테르수지[10,14]에 폴리 메틸메타크릴레이트 수축저감재를 혼합하여 사용하였다. 폴리머 콘크리트 복합재료의 물성을 조사하기 위하여 공시체의 압축 및 휨강도를 측정하였고, 내열성을 조사하기 위하여 내열수성시험 전과 후의 강도 감소율을 측정하였다. 내열수성시험 전과 후의 세공량, 세공경, 세공률 및 밀도변화와 SEM을 이용한 미세조직과 균열상태 등에 대하여 조사하였으며, 그 결과를 보고하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 실험재료

폴리머 콘크리트 복합재료 제조에 사용한 불포화폴리에스테르 수지는 국내 K사에서 생산되는 폴리머 콘크리트 제조용을 사용하였다. 그리고 Polymethyl methacrylate (PMMA) 수축저감재는 Methyl methacrylate (MMA) 80%, PMMA 15% 및 Trimethylolpropane trimethacrylate (TMP-TMA) 5%를 용해 및 혼합시켜서 사용하였다. 경화제(촉매)로 Methyl ethyl ketone peroxide (MEKPO), 촉진제로 Cobalt octoate (CoOc)를 사용하였다. 충전재로는 중질탄산칼슘(평균입경 30 mm), 잔골재는 강모래(0.3-1.2 mm), 굵은 골재는 쇄석(5-8 mm)을 건조하여 사용하였으며, 잔골재 대용으로 사용한 제강 슬래그는 전기로(래들로)에서 생산되는 제강 환원슬래그를 아토마이징시켜 구형의 재료로 만들어 사용하였다. Table 1, 2에 사용한 재료의 물성을 나타내었고, 제강 환원슬래그의 화학적 조성을 Table 3에 나타내었다.

2.2. 시험방법

2.2.1. 압축 및 휨강도시험

KS F 2481 및 2482에 의하여 압축 및 휨강도시험을 수행하였다.

2.2.2. 흡수시험

14일 양생한 공시체를 80 ± 2 °C에서 48 h 건조한 후 중량을 측정하였고, 20 ± 2 °C에서 48 h 침수시킨 다음 다시 중량을 측정하여 흡수율을 다음 식에 따라 구하였다.

Table 3. Chemical Composition of Atomizing Ladle Furnace Slag

Chemical composition (wt%)								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	Free-CaO	Ig. loss
7.1	24.6	1.0	59.3	4.8	0.8	1.9	0.2	0.3

Table 4. Mix Proportions of UP/PMMA Polymer Concrete Using LFS

PB ¹⁾ (UP/PMMA) (w%)	CaCO ₃ (w%)	Fine Aggregate		Coarse Aggregate (w%)	Remarks
		River Sand (w%)	LFS ²⁾ (v%)		
7.5	20	20	0	52.5	Catalyst : MEKPO ³⁾ Accelerator : CoOc ⁴⁾ Shrinkage-reducing agent : PMMA ⁵⁾
		15	5		
		10	10		
		5	15		
		0	20		
8.0	20	20	0	52	
		15	5		
		10	10		
		5	15		
		0	20		
8.5	20	20	0	51.5	
		15	5		
		10	10		
		5	15		
		0	20		
9.0	20	20	0	51.0	
		15	5		
		10	10		
		5	15		
		0	20		

¹⁾ PB: Polymer binder (UP 80% + PMMA 20%)

²⁾ LFS: Ladle furnace slag

³⁾ MEKPO: Methyl ethyl ketone peroxide

⁴⁾ CoOc: Cobalt octoate

⁵⁾ PMMA: Polymethylmethacrylate

$$\text{흡수율}(\%) = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100$$

여기서, W₀ = 시험 전 공시체 중량

W₁ = 시험 후 공시체 중량

2.2.3. 내열수성시험

90 ℃의 열수에 28일간 내열수시험을 행한 후 압축 및 휨강도를 측정하여 시험 전의 강도와 비교·검토하였다.

2.2.4. 세공측정

입경 2.5-5 mm 범위의 시료를 채취하여 아세톤으로 세정하고 48 h 건조시켜 수은 압입법으로 세공을 측정하였다.

2.2.5. SEM 분석시험

시편을 아세톤으로 세정하고, 건조시킨 다음 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM)을 이용하여 시편의 미세조직을 관찰하였다.

2.3. 배합설계

폴리머 콘크리트 복합재료 공시체를 제조하기 위한 배합설계표를 Table 4에 나타내었다. 배합설계표에서 보는 바와 같이 폴리머 결합재의 첨가량은 4단계(7.5, 8.0, 8.5, 9.0%), 탄산칼슘 충전재의 첨가량은 20%, 잔골재에 대한 아토마이징 제강 환원슬래그의 대체율은 5단계(0, 25, 50, 75, 100%), 굵은 골재의 첨가량은 4단계(51, 51.5, 52.0, 52.5%)로 변화시켜 총 20종의 배합에 대하여 공시체를 제조하였다. 잔골재를 대체하는 제강 환원슬래그(ladle furnace slag, LFS)의 양은 대체되는 잔골재와 동일한 부피가 되도록 조정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 흡수특성

Figure 1에 폴리머 콘크리트 공시체의 흡수율에 대한 측정결과를 나타내었다. 그림에서 아토마이징 제강 환원슬래그(LFS)의 대체율이 증가될수록 흡수율은 점차 감소되는 것으로 나타나고 있다. 이것은 아토마이징 제강 환원슬래그가 실리카와 산화금속이 용융되어 만들

Figure 1. Water absorption of polymer concrete versus replacement ratios of LFS.

어진 치밀한 조직의 골재로 흡수율이 잔골재(강모래)에 비하여 현저하게 낮기 때문에 나타나는 결과로 생각된다[7]. 또한 폴리머 결합재의 첨가율이 증가될수록 흡수율은 현저하게 감소되는 것을 알 수 있다. 폴리머 콘크리트의 흡수율은 보통 시멘트 콘크리트의 흡수율(5-10% 정도)에 비하여 대략 1/100 정도 밖에 되지 않는 것을 알 수 있다[3]. 이렇게 흡수율이 낮은 이유는 폴리머 결합재가 골재의 주변을 둘러싸고 있어 수분의 침투를 방지하고 있기 때문으로 생각된다. 폴리머 콘크리트의 흡수율이 현저히 낮게 나타남으로써 동결기에 동결융해작용에 의한 내구성 저하를 원천적으로 차단할 수 있기 때문에 재료의 내구성 면에서 긍정적인 효과가 매우 큰 것으로 판단된다.

3.2. PMMA 수축저감재를 사용한 폴리머 콘크리트의 압축 및 휨강도 특성

PMMA 수축저감재와 아톰마이징 제강 환원슬래그(LFS)를 사용하여 제작한 공시체의 압축 및 휨강도 측정결과를 Figure 2에 나타내었다. Figure 2(a) 압축강도에서 폴리머 결합재 7.5% 공시체는 아톰마이징 제강슬래그의 대체율 증가에 따라 압축강도가 점차 증가되었으나 폴리머 결합재 8.0% 이상에서는 특정한 배합에서 최대강도를 나타내었다. 즉 폴리머 결합재 8.0%에서 아톰마이징 제강슬래그 대체율 75%에서 최대강도가 나타났고, 폴리머 결합재 8.5% 및 9.0%에서는 제강슬래그 대체율 50%에서 최대강도를 나타내었다. 폴리머 결합재의 첨가율이 증가될수록 아톰마이징 제강슬래그의 최적 대체율은 감소되고 있다. 이러한 결과는 아톰마이징 제강슬래그가 구형으로 표면이 매끄러워 적은 양의 폴리머 결합재를 사용하여도 불베어링 효과로 유동성이 양호하여 치밀한 공시체가 만들어지기 때문으로 생각된다. 폴리머 결합재 9.0%에서 압축강도가 오히려 감소되는 현상이 나타나고 있는데 이러한 현상은 아톰마이징 제강슬래그가 강모래보다 밀도가 크기 때문에 폴리머 결합재를 과량으로 사용할 경우 재료분리가 쉽게 일어나기 때문으로 판단된다.

Figure 2(b) 휨강도에서 폴리머 결합재 7.5%와 8.0% 공시체의 강도는 아톰마이징 제강슬래그의 대체율 증가에 따라 점차 증가되었으나 폴리머 결합재 8.5%와 9.0%에서는 제강슬래그의 대체율 증가에 따라 점차 감소되는 것으로 나타나고 있다. 폴리스티렌 수축저감재를 사용

(a) Compressive strengths

(b) Flexural strengths

Figure 2. Compressive strengths and flexural strengths of Up/PMMA polymer concrete versus replacement ratios of LFS.

한 경우, 제강슬래그 대체율 증가에 따라 폴리머 결합재의 첨가율에 관계없이 증가되는 것으로 보고되고[7] 있으나 PMMA 수축저감재를 사용한 경우는 폴리머 결합재 8.5% 이상에서 제강슬래그의 대체율 증가에 따라 점차 감소되는 것으로 나타나고 있다. 이러한 결과는 PMMA 수축저감재가 폴리스티렌 수축저감재보다 점도가 낮아 더 쉽게 재료분리 현상이 일어나기 때문으로 판단된다.

3.3. 내열수성시험 후의 압축 및 휨강도 감소율

Figure 3에 내열수시험 전에 측정한 압축 및 휨강도에 대한 내열수시험 후에 측정한 강도의 감소율을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 내열수시험 후에 측정한 압축강도, 휨강도가 내열수성시험 전에 측정한 강도에 비하여 현저하게 감소되는 것을 볼 수 있으며, Figure 3(a) 압축강도 감소율보다 Figure 3(b) 휨강도 감소율이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

Figure 3(a)에서 내열수성시험 후에 측정한 압축강도 감소율은 아톰마이징 제강슬래그의 대체율이 증가될수록 현저히 증가되는 것을 볼 수 있으며, 폴리머 결합재의 첨가율이 증가될수록 대체적으로 압축강

Figure 3. Reduction ratios of compressive strength and flexural strength measured before and after hot water resistance test versus replacement ratios of LFS.

Figure 4. Total pore volume, average pore diameter, porosity and bulk density versus replacement ratios of LFS. (Polymer binder: 8.0%)

도 감소율은 증가되는 것으로 나타나고 있다. 그러나 폴리머 결합재 첨가율 9.0%의 경우는 제강슬래그의 대체율에 따른 영향이 비교적 적은 것으로 나타나고 있다. 이러한 결과는 내열수성시험 전에 측정된 강도가 재료분리 현상으로 상대적으로 압축강도가 낮게 나타났기 때문에 얻어지는 결과로 생각된다. 대체적으로 낮은 압축강도를 나타내는 폴리머 결합재 첨가율 7.5% 및 9.0% 공시체의 강도감소율에 비하여 고강도가 발현되는 폴리머 결합재 첨가율 8.0% 및 8.5% 공시체의 강도감소율은 제강슬래그의 대체율 증가에 따라 감소율이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 제강슬래그의 대체율이 증가됨에 따라 강도 감소율이 크게 나타나는 것은 제강슬래그가 여러 가지 금속성분을 함유하고 있기 때문에 매트릭스와 열팽창계수 차가 커서 제강슬래그 골재 주위에 미세한 균열이 발생되어 나타나는 결과로 생각된다.

Figure 3(b)의 휨강도 감소율은 압축강도의 감소율과는 다른 양상을 보여주고 있다. 제강슬래그의 대체율이 증가됨에 따라 강도감소율이 크게 나타나는 것은 압축강도의 감소율과 유사하다. 그러나 제강슬래그의 대체율 25-75% 범위에서는 서서히 강도감소율이 증가되나 100% 대체율에서는 강도감소율이 급격하게 증가되고 있다. 이러한 현상은 제강슬래그가 강모래에 비하여 금속성분이 많이 포함되어 있어 내열수성시험에 의하여 크게 영향을 받기 때문으로 판단된다. 압축강도 감소율과 휨강도 감소율은 대체적으로 42-49%와 69-77%로 각각 나타나고 있어 내열수성시험에 의한 강도감소 현상은 압축강도보다 휨강도

에서 훨씬 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

3.4. 내열수성시험 전과 후의 세공특성

Figure 4에 폴리머 결합재를 8.0% 사용하고, 잔골재(강모래)를 아토마이징 제강슬래그로 대체하여 제조한 공시체에 대하여 내열수성시험 전과 후에 측정된 총세공량, 세공의 평균직경, 공극율 및 밀도의 변화를 각각 비교하여 나타내었다.

Figure 4(a)에서 시편 속에 존재하는 총세공량은 아토마이징 제강슬래그의 대체율이 증가됨에 따라 점차 감소되는 경향을 보여주고 있으며, 내열수성시험 후에 측정된 총세공량은 시험 전에 측정된 총세공량에 비하여 현저하게 증가되는 경향을 나타내고 있다. 아토마이징 제강슬래그의 대체율 증가에 따라 총세공량이 감소되는 이유는 아토마이징 제강슬래그가 강모래 잔골재에 비하여 치밀한 조직을 갖고 있기 때문으로 생각되며, 내열수성시험에 의하여 총세공량이 증가되는 이유는 폴리머 결합재가 분해 또는 열화 되면서 미세한 공극이나 균열이 발생되기 때문에 나타나는 결과로 생각된다.

Figure 4(b)에서 내열수성시험 전에 측정된 세공의 평균직경은 아토마이징 제강슬래그의 대체율이 증가됨에 따라 점차 커지는 경향을 보여주고 있으나, 내열수성시험 후에 측정된 세공의 평균직경은 대체율이 증가됨에 따라 점차 작아지는 결과를 보여주고 있다. 이러한 현상은 제강슬래그 속에 금속성분을 많이 포함하고 있기 때문에 열전달이

Figure 5. SEM micrographs of ladle furnace slag and river sand.

Figure 6. SEM micrographs of specimen surface and fracture surface before and after hot water resistance test (polymer binder: 8.5%).

쉽게 이루어져 폴리머 결합재가 분해 또는 열화 되면서 폴리머 결합재 속에 존재하던 비교적 큰 기포들이 열려지기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다.

Figure 4(c)에서 내열수성시험에 의하여 공극률이 현저히 증가되는 것을 볼 수 있다. 내열수성시험에 의하여 공극률이 증가되는 것은 폴리머 결합재의 열화 또는 분해에 기인되어 나타나는 결과로 생각된다. 아토마이징 제강슬래그의 대체율이 증가됨에 따라 공극률은 점차 감소되는 것을 알 수 있다.

Figure 4(d)에서 아토마이징 제강슬래그의 대체율이 증가됨에 따라 밀도가 증가되는 것을 볼 수 있다. 이것은 아토마이징 제강슬래그가 잔골재(강모래)에 비하여 밀도가 크기 때문에 나타나는 결과로 생각되고, 내열수성시험 전에 측정된 밀도에 비하여 시험 후에 측정된 밀도가 적게 나타나는 것은 공시체를 열수 속에 오랫동안 침적시킴으로서 폴리머 결합재가 분해되거나 열화 되기 때문에 나타나는 결과로 판단된다.

3.5. 미세조직 관찰

Figure 5에 본 실험에 사용한 아토마이징 제강슬래그 및 강모래의 전자현미경 사진을 Figure 5(a) 및 Figure 5(b)에 각각 나타내었다. 사진에서 보는 바와 같이 제강슬래그는 표면이 매끄럽고 구형을 이루고

있어 혼합과정에서 볼베어링 효과를 나타내어 적은 양의 폴리머 결합재를 사용하여도 우수한 작업성을 나타내게 된다.

Figure 6에 아토마이징 제강슬래그 대체율 50% 및 UP/PMMA 폴리머 결합재 첨가율 8.5%를 사용한 배합의 시편에 대하여 내열수성시험 전과 후를 비교하여 표면사진과 파단면 사진을 각각 나타내었다. 보통 폴리머 콘크리트에서는 폴리머 결합재를 11% 전후 사용하여 제작해야 유동성이 확보되어 표면이 매끄럽게 제작되지만 Figure 6(a)에서 보는 바와 같이 구형의 아토마이징 제강슬래그를 대체하여 사용함으로써 폴리머 결합재 8.0%의 적은 양을 사용하여도 폴리머 결합재, 충전재 및 골재가 잘 융착되어 co-matrix상[13,14,17]을 형성하여 공시체 표면이 매끄럽게 제작된 것을 볼 수 있다. 그러나 Figure 6(a') 내열수성시험 후의 공시체 표면사진에서는 폴리머 결합재가 열화 또는 분해되어 폴리머 결합재가 많이 빠져나간 모양을 관찰할 수 있다. Figure 6(b) 내열수성시험 전 공시체 파단면 사진에서 아토마이징 제강슬래그의 계면을 따라 폴리머 결합재가 연속적으로 잘 결합되어 있음을 관찰할 수 있다. 그러나 Figure 6(b') 내열수성시험 후 아토마이징 제강슬래그 주위에서 재료들 간의 열팽창계수차로 인하여 아토마이징 제강슬래그와 폴리머 결합재가 단리 되어 있는 모양을 관찰할 수 있다. 아토마이징 제강슬래그는 금속성분을 다량 함유하고 있기 때문에 열전달이 쉽고 또 열팽창계수가 높아 아토마이징 제강슬래그 주위에서 폴리머 결합재의 열화현상이 두드러지게 나타나는 것으로 판단된다.

4. 결 론

폴리머 콘크리트 복합재료에 사용되는 잔골재(강모래) 대신 아토마이징 공법으로 제조한 구형의 제강 환원슬래그를 대체 사용하여 제조한 공시체의 물성에 대하여 조사한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 폴리머 콘크리트 복합재료의 흡수율은 폴리머 결합재의 첨가율이 증가됨에 따라 또 아토마이징 제강 환원슬래그의 대체율이 증가됨에 따라 현저히 감소되었다.
- 2) 내열수성시험 전에 측정된 압축 및 휨강도 측정 결과에서 폴리머 결합재 7.5% 첨가한 공시체는 제강 환원슬래그의 대체율이 증가됨에 따라 강도가 증가되었으나 폴리머 결합재 8.0% 이상에서는 유동성의 증가로 인한 재료분리 현상으로 특정한 대체율에서 최대값을 나타내었다.
- 3) 내열수성시험에 의한 강도 감소율은 폴리머 결합재의 첨가율과 제강슬래그의 대체율에 따라 압축강도의 경우 42-49%, 휨강도의 경우 69-77%가 감소되어 압축강도보다 휨강도가 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.
- 4) 내열수성시험 전에 측정된 총세공량과 공극률은 제강 환원슬래그의 대체율이 증가됨에 따라 감소되었으나 세공의 평균직경과 밀도는 증가되었다. 내열수성시험 후에 측정된 총세공량과 공극률은 내열수성시험 전에 측정된 값에 비하여 현저히 증가되었으나 세공의 평균직경과 밀도는 감소되었다.
- 5) 전자현미경을 통한 미세조직 관찰에서 내열수성시험 전에는 폴리머 결합재, 충전재 및 제강슬래그가 견고하게 융착되어 있었으나 내열수성시험 후에는 폴리머 결합재가 열화되거나 분해되어 있는 모양을 관찰할 수 있었다. 특히 제강슬래그 주위에서 폴리머 결합재와 제강슬래그 간의 열팽창계수 차이로 인하여 단리 되어 있는 것을 관찰할 수 있었다.
- 6) 폴리머 콘크리트 복합재료 제조에 아토마이징 제강 환원슬래그

를 사용함으로써 유동성이 현저히 증가되어 폴리머 결합재 8.0%에서도 공시체 제조가 가능하였다. 따라서 기존의 폴리머 콘크리트 제조에 사용되는 폴리머 결합재의 첨가량 10.5%에 비하여 최대 23.8%의 폴리머 결합재를 절감할 수 있게 되었다.

감 사

본 논문은 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업 중 폐금속유용자원 재활용기술개발사업의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다(과제번호: 11-C21-ID).

참 고 문 헌

1. D. G. Montgomery and G. Wang, Instant-chilled steel slag aggregate in concrete(strength related properties), *Cem. Conc. Res.*, **21**, 1083-1091 (1991).
2. D. G. Montgomery and G. Wang, Instant-chilled steel slag aggregate in concrete (fracture related properties), *Cem. Conc. Res.*, **22**, 755-760 (1992).
3. E. H. Hwang, C. H. Lee, and J. M. Kim, Physical properties of polymer concrete composite using rapid-cooled steel slag(I), *Appl. Chem. Eng.*, **23**, 210-216 (2012).
4. E. H. Hwang, C. H. Lee, and J. M. Kim, Physical properties of polymer concrete composite using rapid-cooled steel slag(II), *Appl. Chem. Eng.*, **23**, 409-415 (2012).
5. J. M. Kim, S. H. Cho, S. Y. Oh, and E. G. Kwak, The properties of underwater-hardening epoxy mortar used the rapidly cooled steel slag, *J. Korea Conc., Instit.*, **19**, 39-45 (2007).
6. O. S. Oh et al., Patent No. 10-0098062-0000 (1996).
7. E. H. Hwang, J. M. Kim, and J. H. Yeon, Characteristics of polyester polymer concrete using spherical aggregates from industrial by-products, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2905-2912 (2013).
8. D. W. Fowler, Polymers in concrete: a vision for the 21st century, *Cem. Conc. Com.*, **21**, 449-452 (1999).
9. M. Haidar, E. Ghorbel, and H. Toutanji, Optimization of the formulation of micro-polymer concretes, *Const. Build. Mater.*, **25**, 1632-1644 (2011).
10. J. P. Gorninski, D. C. Dal Molin, and C. S. Kazmierczak, Strength degradation of polymer concrete in acidic environments, *Cem. Conc. Compos.*, **29**, 637-645 (2007).
11. L. Czarnecki, A. Garbacz, and J. Kurach, On the characterization of polymer concrete fracture surface, *Cem. Conc. Compos.*, **23**, 399-409 (2001).
12. Y. Ohama, Recent research and development trends of concrete polymer composites in Japan, Proc. 12th Inter. Cong. on polym. in Conc., September 27-28, Chuncheon, Korea (2007).
13. D. V. Gemert et al, Cement concrete and concrete - polymer composites: Two merging worlds, *Cem. Conc. Compos.*, **27**, 926-933 (2005).
14. J. T. San-Jose, I. J. Vegas, and M. Frias, Mechanical expectations of a high performance concrete based on a polymer binder and reinforced with non-metallic rebars, *Const. Build. Mater.*, **22**, 2031-2041 (2008).
15. B. W. Jo, S. K. Park, and D. K. Kim, Mechanical properties of nano-MMT reinforced polymer composite and polymer concrete, *Const. Build. Mater.*, **22**, 14-20 (2008).
16. J. P. Gorninski, D. C. Dal Molin, and C. S. Kazmierczak, Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and portland cement concrete, *Cem. Conc. Res.*, **34**, 2091-2095 (2004).
17. H. Abdel-Fattah and M. M. El-Hawary, Flexural behavior of polymer concrete, construction and building materials, *Const. Build. Mater.*, **13**, 253-262 (1999).
18. J. P. Gorninski, D. C. Dal Molin, and C. S. Kazmierczak, Comparative assessment of isophthalic and orthophthalic polyester polymer concrete: Different costs, similar mechanical properties and durability, *Const. Build. Mater.*, **21**, 546-555 (2007).
19. G. D. Soraru and P. Tassone, Mechanical durability of a polymer concrete: a Vickers indentation study of the strength degradation process, *Const. Build. Mater.*, **18**, 561-566 (2004).