

레미콘의 슬러지 고품분과 회수골재를 사용한 무시멘트 경화체의 강도특성

Strength Properties of Non-cement Matrix by Using Recycled Aggregates and Sludge from Ready-Mixed Concrete

류동우^{1*}Dong-Woo Ryu^{1*}

(Received December 5, 2016 / Revised December 13, 2016 / Accepted December 13, 2016)

This study investigates the expressions characteristics of compression strength depending on the condition of fresh concrete and cured concrete by producing Non-cement mortar and concrete only with solidified sludge in the dehydrated cake form, recycled concrete and premixed materials(BS, FA) in order to actively use remicon recycling water as resources, rather than as construction waste material. After treating wastewater of pH 12.5 or more with alkali activator and after promoting BS hydration reaction, the amount of BS inflow was found to be increased and compression strength was increased accordingly: these results coincide with the analysis results of TG-DTA and SEM.

키워드 : 레미콘, 회수수, 회수골재, 모르타르, 콘크리트

Keywords : Ready-mixed concrete, Recycling water, Recycling aggregate, Mortar, Concrete

1. 서론

레디믹스트 콘크리트(이하 레미콘)의 회수수는 레미콘 생산공장에서 트럭에지데이터, 배차플랜트의 믹서 등에 부착한 콘크리트 및 잉여·반송 콘크리트의 세척에 의해 발생하는 물로서 강알칼리성의 건설폐기물이기 때문에 중화처리하거나 회수수 재활용 설비를 구비하여 사용하여야 한다.

레미콘 회수수는 크게 상징수와 슬러지수로 구분되며, 현행 KS F 4009(레디믹스트 콘크리트)에서는 상징수를 일반 비빔용수와 동일하게 사용할 수 있다. 그러나 슬러지수의 슬러지 고품분은 시멘트 중량의 3% 이하로 그 사용을 제한하고 있으며 고강도 콘크리트의 제조시에는 회수수의 사용을 금지하고 있다.

현재 국내 레미콘 생산량은 연간 약 1억 5,000만³(2015년 기준)으로 회수수 재사용량을 전체 단위수량(170kg/m³)의 약 30%로 단순 가정한다면 연간 675만 톤으로 추정되며, 재이용되지 않는 회수수를 포함하면 발생량은 그 이상이 될 것으로 예상된다. 특히,

슬러지 고품분의 경우 국내 건설폐기물의 종류별 분류체계에는 별도 분류되어 있지 않으나 페벤토나이트와 같은 무기성 ‘건설오니’로 분류할 경우 수분함량이 95%미만이거나 고형물함량이 5%이상인 것으로서, 폐기물 관리법에서는 수분함량이 85% 이내로 탈수·건조한 후 관리형 매립시설에 매립하도록 규정하고 있다.

이와 같이 각 레미콘 제조회사에서는 도심지 최종 매립용지의 부족 및 중화/폐기처리에 따른 비용증가 등으로 인하여 상기의 관련 규정을 따르는 것이 현실적으로 매우 곤란한 상황으로 대부분의 회수수를 재활용하고 있어 건설폐기물인 레미콘 회수수의 친환경적 처리방안이 절실한 실정이다.

일본의 경우는 기본적으로 회수수의 슬러지 고품분은 탈수기(필터프레스)에 의해 탈수케이크상으로 배출하여 관리형 산업폐기물로서 매립처분하고 있다. 또한 2014년 JIS A 5308(레디믹스트 콘크리트)의 재개정을 추진하여 회수수 사용 콘크리트에 대한 환경라벨의 도입과 기준에 사용이 불가능하였던 잉여·반송 콘크리트로부터 회수한 잔골재 및 굵은 골재를 질량비로 5% 또는 20%(정

* Corresponding author E-mail: dwryu@daejin.ac.kr

¹대전대학교 건축공학과 (Department of Architectural Engineering, Daejin University, Gyeonggi-do, 11159, Korea)

해진 조건에 만족하는 것)까지 사용 가능토록 규정하여 정책적으로 환경부하저감과 순환형사회의 형성을 추진하기 위한 회수수의 재자원화에 주력하고 있다.

한편, 레미콘 회수수에는 시멘트 수화반응에 의한 다량의 수산화칼슘을 포함하고 있기 때문에 pH 12 이상의 강알칼리성을 나타내며 이는 산업부산물인 고로슬래그 미분말이나 플라이애쉬의 경화에 필요한 알칼리 자극제로써의 역할이 가능하다(Lee 2011). 또한 슬러지고형분의 경우 시멘트 미수화 반응물질 및 미립자를 다량 함유하고 있어 콘크리트 혼화재료로의 활용가능성이 매우 높은 특성을 가지고 있다(Sandrolini et al. 2000; Chatveera et al. 2006).

콘크리트용 순환골재는 생산시 에너지 소비량이 크고 높은 흡수율과 다량의 미분말이 발생하는 등 문제점이 있는 반면 잉여·반송 콘크리트로부터 회수한 회수골재는 순환골재에 비해 생산과 정성 에너지 사용량이 적고 물리화학적 특성이 우수한 장점이 있으나, 시멘트 및 혼화제 성분을 완전히 제거하는 것이 어려워 ISO 22965-2에서도 그 사용량을 5%까지로 제한을 두고 있다. 국내 KS F 4009 기준에서는 회수골재에 대한 사용규정이 없어 전량 재사용하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구는 레미콘 회수수를 건설폐기물이 아닌 자원으로 적극 활용하여 환경문제 해결과 함께 자원순환형 건설재료의 CO₂ Zero Emission 구축을 위한 재자원화 기술을 개발하고자 탈수케이싱상의 슬러지 고형분과 회수골재, 혼화재료만을 사용한 무시멘트 모르타르 및 콘크리트를 제작하여 재령 및 양생조건에 따른 강도발현 특성을 검토하였다.

2. 이론적 고찰

Fig. 1은 레미콘 공장에서의 회수수 재활용 설비를 설명한 것으로 레미콘 믹서트럭, 배치플랜트, 레미콘 믹서드럼 및 반송레미콘 등의 세척을 통해 발생한 회수수는 유입구를 통해 세척드럼(washing drum)으로 유입되어 트롬멜(trommel)에서 굵은 골재와 잔골재가 분리된다. 그 다음 사이클론(cyclone)에 의해 잔골재 미립분과 슬러지가 최종적으로 분리되어 회수수 저장탱크에 저장된다. 주저장 탱크내에는 농도조절기가 설치되어 있어 슬러지 고형분의 농도를 측정하여 고형분율이 3%를 넘지 않게 조절하는 것이 원칙이다. 그러나 국내 대부분의 레미콘 공장에서는 레미콘 회수수의 발생량 변동에 따라 자동측정 농도조절기가 설치되어 있는 곳이 거의 없고 1일 2회 정도 수작업을 통하여 농도를 체크하기 때문에 회수수의 농도에 따른 품질편차가 매우 심하다(Kang 2004).

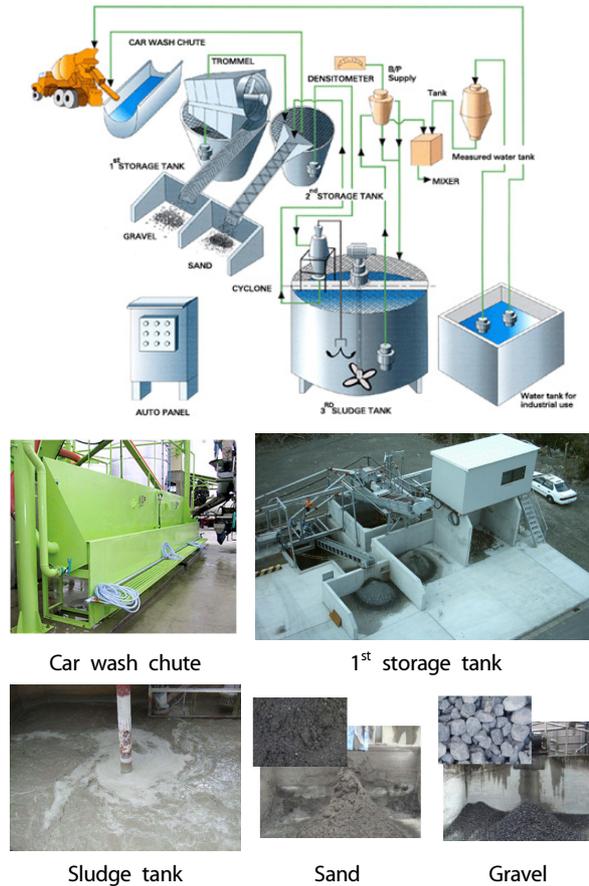


Fig. 1. Slurry water and recycle aggregate at ready-mixed concrete plant

2.1 회수수 성분

2.1.1 세척배수의 구성

세척배수의 구성성분은 사용재료, 레미콘 규격, 씻기에 사용된 물의 양 및 다양한 요인에 의해 달라질 수 있으며, 구성배율은 물이 대략 95%로 대부분을 차지하고 잔골재가 4.5%, 굵은 골재와 시멘트는 대략 1% 전후이다. 또한 세척배수의 pH는 세척배수 발생량과 반비례 관계를 나타내는데, 대략 pH 11~13의 범위를 보인다(Kim 2011).

2.1.2 상징수의 성분

레미콘 회수수 중 상징수내의 화학성분 중 용해성분들은 주로 미수화 시멘트 주변에 형성된 시멘트 겔의 피복으로 수화작용이 30분~2시간 이상 지체되는 유도기 과정에서 상징수내에 용해되는 Ca²⁺, Na⁺, K⁺, SO₄²⁻ 성분이 주를 이루는데 이중 Ca²⁺의 농도는

시간의 경과에 따라 증가한다(Kim 2011).

2.1.3 슬러지수의 성분

회수수를 110±5°C에서 건조시켜 얻은 슬러지 고품분의 성분은 Table 10에 나타난 바와 같이 시멘트성분과 미세한 잔골재의 성분에 기인하여 CaO량이 가장 많고 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, SO₃ 순이며 불용 잔분은 25.5%, 분말도는 9940cm²/g이다(Chatveera et al. 2006).

Table 1. Chemical composition of dry sludge powder(%)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O
SP	32	26.87	6.91	3.17	3.92	1.51	0.98
OPC	66.28	20.84	5.22	3.2	2.41	1.24	0.22

3. 실험개요

3.1 사용재료

본 연구에서는 모르타르 및 콘크리트 경화체 제작시 결합재 대체재로 국내 레미콘기업 Y사의 회수수를 채취하여 일정시간 침강시킨 후 슬러지수를 탈수시킨 슬러지 고품분(함수율 약 40~50%, 이하 SS)을 주원료로 사용하였다. 혼화재료로는 KS F 2563에 적합한 고로슬래그 미분말 3종(밀도 2,89g/cm³, 비표면적 4231cm²/g, 이하 BS)과 KS L 5405 기준을 만족한 플라이애쉬 2종(밀도 2.22g/cm³, 비표면적 3519cm²/g, 이하 FA)을 사용하였다. 배합수 및 양생수는 pH 12.5 이상을 나타내는 상징수를 사용하여 혼화재의 알칼리자극제 역할을 기대하였다. 또한 사용골재로는 Fig. 10에 나타난 바와 같이 트롬멜(trommel)에서 채취된 회수골재(잔골재, 굵은 골재)를 사용하여 회수수 배출원에서의 원천적인 감량화 노력과 함께 친환경적 처리방안을 모색하고자 하였다.

SS와 회수골재는 채취시기 및 방법에 따라 밀도가 일정하지 않기 때문에 용적비가 아닌 중량비로 계산하였으며, SS를 기준으로 한 모르타르 및 콘크리트 배합별 각 재료의 중량비는 Table 2 및 Table 3와 같다.

Table 2. Mix proportions of mortar

Series	Weight ratio				Slump flow(mm)
	SS	Sand	BS	FA	
SS(Control)	1	1	-	-	180±10
BS2	1	1	0.2	-	
BS4			0.4	-	
BS6			0.6	-	
FA2BS8	1	1	0.2	0.8	
FA4BS6			0.4	0.6	

Table 3. Mix proportions of concrete

Series	Weight ratio				
	SS	Gravel	Sand	BS	FA
SS(Control)	1	1.39	1.29	-	-
BS2				0.2	-
BS4				0.4	-
BS6				0.6	-
FA2BS6				0.6	0.2

3.2 실험방법

KS L ISO 6790에 따라 모르타르 시험체는 목표 슬럼프플로우를 180±10mm으로 설정하여 40×40×160mm의 크기로 제작하였으며, 항온항습실(20±0.5°C, 60±1%RH)에서 72시간 동안 기건양생 후 탈형하여 상징수에서 수중양생을 실시하였다. 압축강도 시험은 재령 7, 28, 56, 91일에 실시하였으며, 모르타르 시험체의 매트릭스 조직구조 및 수화특성을 분석하기 위해 주사전자현미경분석(SEM) 및 열분석(TG-DTA)을 실시하였다.

콘크리트 시험체는 KS F 2403에 따라 ϕ100×200mm의 시험체를 재령별로 3개씩 제작하였다. 양생방법은 수중양생, 기중양생, 증기양생으로 나누어 실시하였으며, 재령 7, 28, 56일에서 KS F 2505에 따라 압축강도 시험을 실시하였다. 단 증기양생은 1일간 실시하였다.

4. 실험결과

4.1 무시멘트 경화체의 압축강도 발현특성

Fig. 2는 각 시리즈별 모르타르의 재령별 압축강도를 나타낸 것이다. BS의 혼입량이 증가함에 따라 압축강도가 증가하였으며, 재령 28일 이후의 장기강도 발현율이 우수한 것으로 나타났다. 결합재로 BS와 FA를 함께 사용한 3성분계 모르타르의 경우 결합재량 증가로 인해 압축강도가 향상된 것으로 판단된다.

한편, 일본의 경우 SS의 압축강도가 8MPa 이상이면 관리형폐기물에서 안정형 산업폐기물로의 처리도 가능하다. 슬러지 고품분만을 결합재로 사용한 SS의 재령별 압축강도는 7일에서 약 4.7MPa, 28일 약 10.1MPa, 91일 장기재령에서도 약 15.5MPa으로 나타나 SS 단독으로 사용하는 것은 도심지에 집중되어 있는 레미콘 공장부지를 고려해 볼 때 부적합한 것으로 나타났다.

Fig. 3은 모르타르 배합과 동일한 재료를 사용하여 양생조건별 콘크리트의 압축강도 특성을 평가한 것이다. 친환경 시멘트·콘크리트 2차 제품(인터록킹 블록, 콘크리트벽돌·블록 등) 개발을 고

려하여 증기양생에 대한 압축강도 발현특성도 함께 검토하였다.

그 결과 양생조건과 관계없이 재령별 압축강도 발현특성은 모르타르와 유사하게 BS의 혼입량이 증가함에 따라 압축강도는 증가하였다. 그러나 SS 및 BS2, FA4BS6의 경우, 상징수를 알칼리자극제로 사용한 수중양생과는 달리 기중양생은 장기재령으로 갈수록 강도편차가 급격히 벌어져 재령 91일 경우 최대 47~70%까지 나타났다.

또한 24시간 증기양생의 경우 SS는 압축강도 측정 자체가 불가능하였으며, BS의 치환율이 증가하여도 6MPa 이하의 압축강도를 보여 별도의 알칼리자극제나 C/S 몰비 조정 등 별도의 대책이 필요한 것으로 판단된다.

4.2 모르타르 배합 및 재령별 열분석(TG-DTA)

Fig. 4는 Thermogravimetry Differential Thermal Analysis(TG-DTA)를 이용하여 모르타르 배합의 재령별 열분석을 실시한 결과이다. 배합에 따른 미세한 차이는 있으나 전 배합에서 110℃, 480℃, 720℃ 부근에서 흡열피크가 발생하고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 100~200℃ 영역에서는 페이스트에 포함되어 있는 자유수, 에트리징사이트와 C-S-H상 등의 분해, 450~550℃ 영역에서는 수산화칼슘의 분해($\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$), 700~750℃ 영역에선 탄산칼슘이 분해($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$)됨으로써 흡열피크가 발생하고 있는 것으로 알려져 있다(Schneider 1982; Park 2012).

SS_28일의 경우 시멘트 미수화 물질의 수화에 기인한 수산화칼슘과 탄산칼슘의 생성 및 분해에 의해 뚜렷한 흡열피크를 나타낸 것으로 판단된다. 이에 반해 BS2와 BS4 배합의 경우 고로슬래그 미분말의 잠재수경성에 의해 수산화칼슘을 소모한 결과 완만한 흡열피크를 나타낸 것으로 판단된다. 모르타르의 재령별 수산화칼슘의 질량감소율은 BS4_7일(51%) > BS2_91일(46%) > SS_28일(43%) 순으로 높게 나타났다.

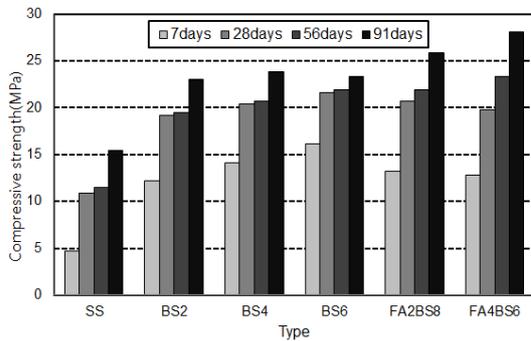
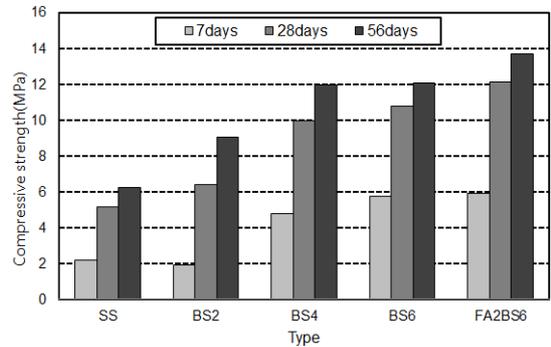
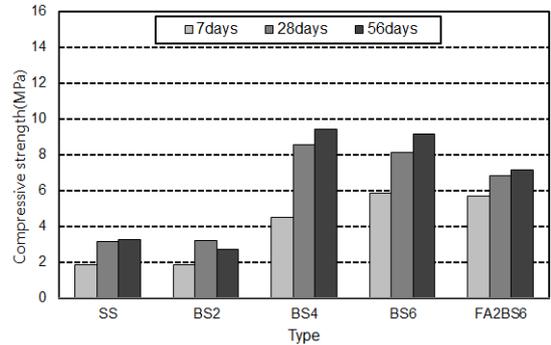


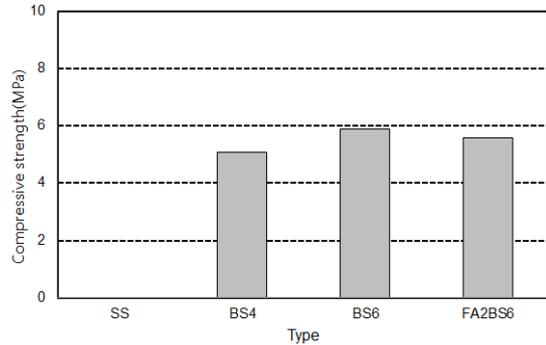
Fig. 2. Strength of non-cement mortar



(a) water curing



(b) dry curing



(c) steam curing

Fig. 3. Strength of non-cement concrete

4.3 모르타르의 배합 및 재령별 SEM분석

Fig. 5는 모르타르의 배합별, 재령별 Scanning Electron Microscope (SEM) 분석을 실시한 결과를 나타낸 것이다. 전 배합에서 재령 7일에 비해 재령 91일에서 치밀한 조구조를 형성하고 있는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 pH 12.5 이상의 상징수를 알칼리자극제로 사용함으로써 BS의 수화를 촉진하여 Fig. 2와 같은 압축강도 증가를 나타낸 것으로 판단된다. 이론적으로 BS의 수화반응은 수산화칼슘량이 5% 이상으로 되면 그 첨가량에 크게 의존하지 않지만 BS의 수화생성물은 상대적으로 Ca^{2+} 이온이 부족하여 그 부족

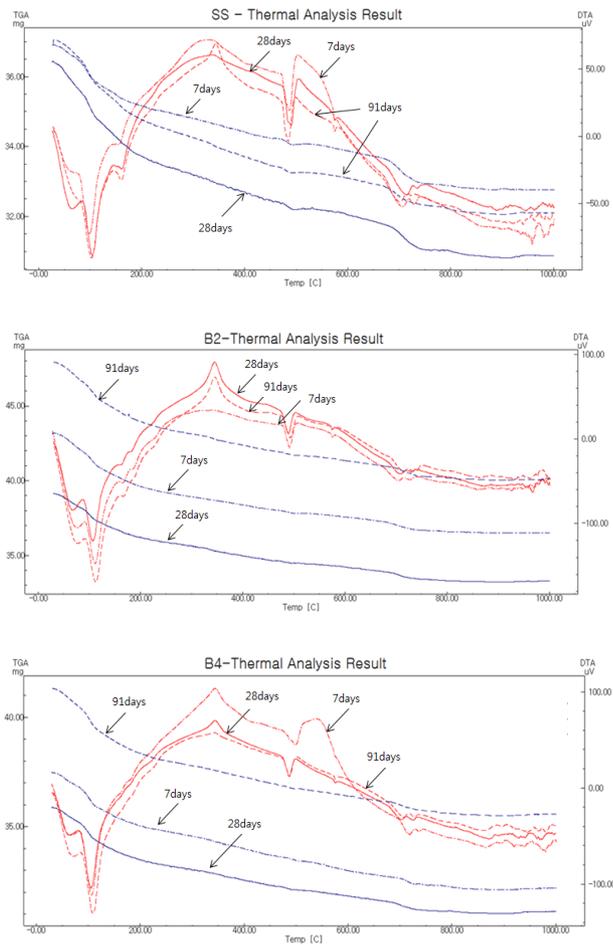


Fig. 4. TG-DTA analysis result

분을 수산화칼슘으로부터 공급받는다. 따라서 BS와 수산화칼슘과의 포졸란 반응으로 결정상호간의 결합력이 작은 수산화칼슘이 소비되고 이 상태에서의 C-S-H 조성은 C/S 몰비가 작은 C-S-H 결정체를 생성하여 비표면적이 크고 결정상호간의 결합력이 큰 조직구조를 형성한다(Daimon 1980).

5. 결론

본 연구에서는 레미콘 회수수를 건설폐기물이 아닌 자원으로 적극 활용하고자 탈수케이싱상의 슬러지 고형분과 회수골재, 혼합재료만을 사용한 무시멘트 모르타르 및 콘크리트를 제작하여 재령 및 양생조건에 따른 강도발현 특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 양생조건과 관계없이 무시멘트 경화체의 재령별 압축강도 발현 특성은 BS의 혼입량이 증가함에 따라 증가하였으며, 재령 28일

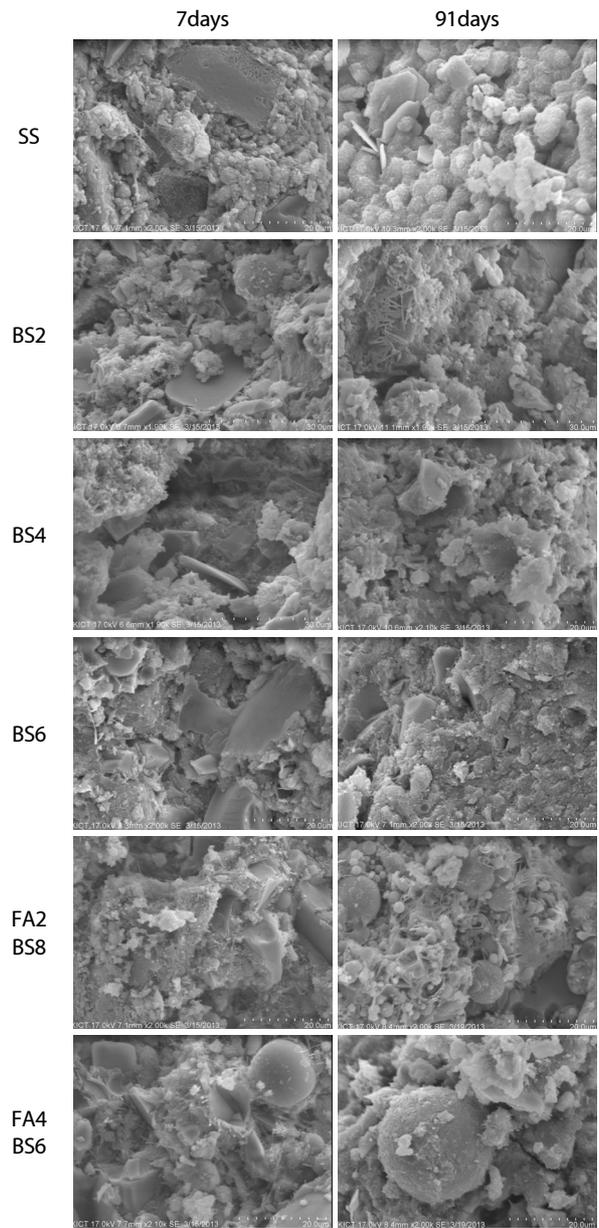


Fig. 5. SEM images of non-cement mortar(x2.00k)

- 이후의 장기강도 발현율이 우수한 것으로 나타났다. 그러나 SS 및 BS2, FA4BS6의 경우, 상징수를 알칼리자극제로 사용한 수중양생과는 달리 기중양생은 장기재령으로 갈수록 강도편차가 급격히 벌어져 재령 91일 경우 최대 47~70%까지 나타났다.
2. TG-DTA를 이용하여 모르타르 배합의 재령별 열분석을 실시한 결과, SS_28일의 경우 시멘트 미수화 물질의 수화에 기인한 수산화칼슘과 탄산칼슘의 생성 및 분해에 의해 뚜렷한 흡열피크를 나타낸 반면, BS2와 BS4 배합의 경우 고로슬래그 미분말의

잠재수경성에 의해 수산화칼슘을 소모한 결과 완만한 흡열피크를 나타냈다.

- 3. 모르타르의 배합별, 재령별 SEM 분석을 실시한 결과, pH 12.5 이상의 상징수가 알칼리자극제로 작용하여 BS의 수화를 촉진하여 치밀한 조직구조를 형성하였다.

감사의 글

본 연구는 2016학년도 대전대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Charveera, B., Lertwattanaruk, P., Makul, N. (2006). Effect of sludge water from ready-mixed concrete plant on properties and durability of concrete, *Cement and Concrete Composite*, **28**, 441-450.

Daimon, M. (1980). "Mechanism and kinetics of slag cement hydration," *Proceeding of 7th International Congress on the Chemistry of Cement*, **1(III-2)**, 15-23.

Kang, J.S. (2004). Recovering Hydrated Performance of Ready-mixed Concrete Sludge According to Various Heating Condition, Master's Thesis, Dong-a University [in Korean].

Kim, J.S. (2011). An Experimental Study on the Properties of Concrete Considered to Sewage Sludge Ratio of Sludge Water, Korea Ready Mixed Concrete Industry Association, 7-8 [in Korean].

Lee, H.J. (2011). An Experimental Study on the Alkali-activated Slag Cement Using Recycling Water of Ready Mixed Concrete, Master's Thesis, Hanyang University [in Korean].

Park, C.B. (2016). Properties of High Volume Mineral Admixtures Concrete with Kind of Inorganic Activators, Ph.D Thesis, Konkuk University [in Korean].

Sandrolini, F., Franzoni, E. (2001). Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants, *Cement and Concrete Research*, **31**, 485-489.

Schneider, U. (1982). Behavior of Concrete at High Temperatures, Berlin.

레미콘의 슬러지 고형분과 회수골재를 사용한 무시멘트 경화체의 강도특성

본 연구에서는 레미콘 회수수를 건설폐기물이 아닌 자원으로 적극 활용하고자 탈수케이이크상의 슬러지 고형분과 회수골재, 혼화재료(BS, FA)만을 사용한 무시멘트 모르타르 및 콘크리트를 제작하여 재령 및 양생조건에 따른 압축강도 발현특성을 검토하였다. pH 12.5 이상의 상징수가 알칼리자극제로 작용하여 BS의 수화를 촉진한 결과 BS의 혼입량이 증가함에 따라 압축강도는 증가하였으며, TG-DTA, SEM 등의 분석결과와도 일치하였다.