



하수슬러지를 활용한 저강도 콘크리트의 합리적 배합방법

김동훈¹⁾ · 호리구치 다카시²⁾ · 임남기^{1)*}

¹⁾동명대학교 건축공학과 ²⁾일본국립 북해도대학대학원 공학연구과

Rational Method of CLSM Mixture with Sewage Sludge Cinder

Dong-Hun Kim,¹⁾ Horiguchi Takashi,²⁾ and Nam-Gi Lim^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Tongmyong University, Busan 608-711, Korea

²⁾Division of Built Environmental, Graduate School of Engineering Hokkaido University, Sapporo 060-8628, Japan

ABSTRACT This research aims to find an effective mixing method for controlled low strength material (CLSM) using diverse recycled industrial byproducts. This study is a fundamental research to develop and commercialize a resource-recycling CLMS that can greatly contribute to cost reduction and environmental stress relief. In the past, few studies have been performed on CLSM in Korea. This research is expected to provide fundamental data not only for development and commercialization of the resource-recycling CLSM satisfying required material performances but also serve as a ground breaking study on utilization of recycled material in construction industry and ultimately leading to advanced resource-recycling practices at national level. From the comprehensive analysis of minimum unit quantity for maximum strength and material segregation prevention, it was found that the optimal mixing condition for mixing FSD, RSID and SD material to filler-aggregate ratio (f/a) was approximately 50.

Keywords : CLSM, fly ash, crushed stone, self-packing ability, recycling resources

1. 서 론

CLSM(controlled low strength materials: 이하, 저강도 콘크리트)은 시멘트계 슬러리 재료로서 ACI Committe 229(1994)에서는 “재령 28일의 압축강도가 8.3 N/mm² 이하로 될 수 있게 제어된 슬러리계의 되메움 재료”로 정의하고 있다.¹⁾ 또한, 일본에서는 “제어형저강도 재료” 또는 “저강도제어 재료”로 정의되고 있는 유동화 처리토의 일종이며,^{2,3)} 국내의 경우 저강도 콘크리트의 개념을 확대하여 토목 및 지반개량공학 분야에서 적용하고 있는 유동성 충전재이다. 저강도 콘크리트는 북미의 경우 일반적으로 레미콘공장에서 출하되고 있으나, 사용재료는 보통포틀랜드시멘트, 물, 잔골재 및 플라이애쉬(이하, FA)가 일반적이며, 잔골재를 사용하지 않는 경우도 있다. 일본의 경우 유동화처리토는 전용 플랜트 설비를 필요로 하고 있으나, 저강도 콘크리트는 전용의 플랜트 설비를 요구하지 않기 때문에 안전한 품질의 슬러리계 재료를 어디에서든 제조할 수 있는 범용성이 높은 재료이다.³⁻⁶⁾ 저강도 콘크리트의 주사용 재료는 현 시점에서 FA가 주

로 이용되고 있으나,^{7,8)} FRP폐재, 유리폐자재 등의 각종 산업폐기물 및 고로슬래그미분말 등의 산업부산물은 물론 쓰레기·하수오니 소각재 등의 리사이클링 재료 또한 FA의 대체 재료로 충분히 검토해 볼 수 있다. 국내의 경우 다량의 산업부산물 및 폐기물 등의 재생자원을 재활용하여 적용한 사례가 선진외국에 비해 상당히 저조한 실정이나, 저강도 콘크리트의 가장 큰 특징은 다량의 산업부산물 및 폐기물을 안전하면서도 유효하게 경제적으로 이용할 수 있다. 또한, 저강도 콘크리트는 고유동성, 자기충전성 등의 성능을 가지고 있기 때문에 협소한 공간으로 다짐 작업이 어려운 현장 등의 되메우기 및 뒤채움 재료로 이용하면 대단히 효과적이므로 건축 및 토목분야에서의 광범위한 적용이 가능한 슬러리계의 재료이다.⁸⁻¹¹⁾ 이에 이 연구에서는 다량의 도시형 리사이클링 재료 및 산업부산물 등의 재생자원을 안전하게 유효 이용하는 방법이지만 국내에서는 지금까지 그 사례가 적었던 새로운 용도를 개척하고 대규모의 코스트와 환경부하를 저감할 수 있는 저강도 콘크리트의 개발 및 실용화를 위한 기초적인 연구의 하나로 각종 산업부산물을 재활용한 저강도 콘크리트의 합리적 배합방법에 관한 기초적인 연구를 진행하였다. 지금까지 토목분야를 중심으로 하중을 지지하지 않는 구조물에서의 되메움 재료 및 공동 충전재로서 적용되고 있는 저강도 콘크리트를 Fig. 1

*Corresponding author E-mail : ing@tu.ac.kr

Received April 4, 2012, Revised June 3, 2012,

Accepted June 4, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

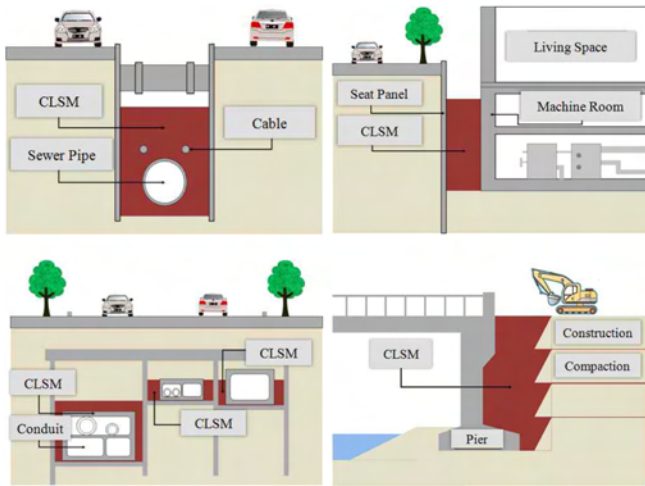


Fig. 1 Application uses of CLSM

과 같이, 건축구조물에서의 뒷채움재 및 되메움 재료로서의 새로운 적용가능성을 검토하고자 공학적 특성을 중심으로 실험을 실시하였다. 이를 통해 각종 산업부산물을 재활용한 저장도 콘크리트의 합리적인 배합방법을 제안함으로써 다양한 용도와 사용재료별 요구성능에 대응할 수 있는 새로운 형태의 저장도 콘크리트의 개발 및 실용화를 위한 기초적인 자료로 제시하고자 하였다. Fig. 1은 하중을 지지하지 않는 범위에서의 저장도 콘크리트의 적용가능한 용도를 나타낸다.

2. 실험 계획

2.1 실험 재료

이 연구에서는 각종 산업부산물을 재활용한 저장도 콘크리트의 합리적 배합에 있어 그 기초적인 자료를 제시하고자 다음과 같은 재료를 이용하여 실험을 진행하였다.

시멘트는 보통포틀랜드시멘트(밀도 3.16 g/cm^3), FA는 KS L 5405에 규정된 품질(2종)을 사용하였다. Table 1은 이 실험에서 사용한 재료의 물성을 나타낸다. 이 실험에서 사용한 쇄석분말은 분급장치를 이용하여 제조한 것으로 바람에 흩날리는 가벼운 것을 쇄석미분말로 하고, 남은 것을 쇄석분말로 하였다. 쇄석미분말은 분체부분에 사

Table 1 Physical properties of use materials

	Density (g/cm^3)	Specific surface area (cm^2/g)	Absorbing ratio (%)
Cement	3.16	3,150	-
Fly ash	2.18	3,370	-
Sand	2.70	-	1.40
FSD ⁽¹⁾	2.72	-	1.12
Admixture	AE agent for concrete and fly ash		
Water	Waterworks		

⁽¹⁾FSD: crushed stone powder

Table 2 Physical properties of sewage sludge cinder

	Soil particle density (g/cm^3)	3.044
	Self-water content (%)	60.9
Density (%)	Aggregate powder (2-75 mm)	18
	Sand powder (0.075-2 mm)	60
	Silt powder (0.005-0.075 mm)	18
	Soil powder (0.005 under)	4
Aggregate	Specific gravity	2.071
	Absorbing ratio (%)	26.7
	Decantation test (%)	15.2
	PH	10.8

Table 3 Base value of toxic substance

Item	Base value ⁽¹⁾	Item	Base value ⁽¹⁾	Unit
Lead	0.1	Cyan	0.2	mg/L
Selenium	0.01	PCB	0	mg/L
Hexavalent chromium	0.1	Copper	1.0	mg/L
Arsenic	0.1	Zinc	1.0	mg/L
Mercury	0.001	Manganese	2.0	mg/L
Cadmium	0.02	-	-	mg/L

⁽¹⁾Effluent quality standard of water pollutants (Environment 2007)

용하고, 쇄석분말은 잔골재로 사용하였다.

그리고, 이 실험에서 사용한 하수슬러지는 환경부 폐기물 공정시험방법(폐기물 관련법 제2조)에 의거하여 탈수 및 소각처리를 실시한 것을 유해물질 함유량 분석시험을 거쳐 기준치 이하의 안전한 것을 사용하였다. Table 2는 하수슬러지의 기본물성시험 결과, Table 3은 환경부 수질오염 물질의 배출허용 기준을 나타낸다.

2.2 배합

이 연구에서는 각종 산업부산물의 혼입이 저장도 콘크리트의 유동성 및 일축 압축강도에 미치는 영향을 파악하기 위해 단위시멘트량을 20 kg/m^3 로 고정하고 시멘트, 물, 분체, 잔골재로 구성된 각 재료의 배합에 있어 목표 플로우 값 200 mm를 얻는데 필요한 단위수량을 설정하는 방법으로 플라이애쉬 및 보통 콘크리트용 AE제를 사용하여 각 재료의 배합을 결정하였다. 또한, 배합에 있어서 분체부분은 유동성 및 재료분리저항성을 개선시킬 수 있도록 하였으며, 분체부분에는 FA, 쇄석미분말(이하, FSD)을 잔골재부분에는 모래(이하, S), 하수슬러지(이하, RSIA), 쇄석분말(이하, SD), 하수슬러지+쇄석분말(RSIA + SD)을 각각 혼입하여 이들 재료의 배합과 골재 중에 차지하는 분체의 용적비(이하, f/a)를 변화시키는 방법으로 실험을 실시하였다. Table 4는 사용재료의 배합 및 f/a 값의 범위를 나타내고, Table 5는 배합표를 나타낸다.

공시체의 제작은 모르타르 믹서(80리터)를 이용하여 각 배합별로 비빔을 완료하였다. 각 배합별 비빔은 먼저 시

Table 4 Mix ratio by volume of use materials

Unit quantity of cement (kg/m ³)			
Test item	f/a	Pulverulent body	Fine aggregate
P0	15-30	FA	S
P1	40-90	FA	RSIA
P2	20-60	FSD	S
P3	30-90	FSD	RSIA
P4	20-40	FSD	SD
P5	40-90	FSD	RSIA+SD

Table 5 Mixture proportion of FA and FSD

	f/a	Unit weight (kg/m ³)						
		C	W	FA	FSD	S	SD	RSIA
P0	15	20	280	233	-	1638	-	-
P0	20	20	276	313	-	1551	-	-
P0	25	20	278	390	-	1450	-	-
P0	30	20	287	462	-	1335	-	-
P1	40	20	520	413	-	-	-	589
P1	50	20	513	524	-	-	-	498
P1	60	20	504	640	-	-	-	406
P1	70	20	496	759	-	-	-	309
P1	80	20	485	887	-	-	-	211
P1	90	20	479	1010	-	-	-	107
P2	20	20	309	-	392	1376	-	-
P2	30	20	305	-	583	1195	-	-
P2	40	20	311	-	760	1001	-	-
P2	50	20	348	-	889	780	-	-
P3	40	20	612	-	312	-	-	533
P3	50	20	576	-	454	-	-	519
P3	60	20	547	-	607	-	-	462
P3	70	20	514	-	893	-	-	314
P3	80	20	507	-	1044	-	-	214
P3	90	20	507	-	1181	-	-	108
P4	20	20	407	-	319	-	1278	-
P4	30	20	385	-	497	-	1159	-
P4	40	20	393	-	653	-	980	-
P5	40	20	496	-	541	-	406	309
P5	50	20	475	-	706	-	353	269
P5	60	20	482	-	834	-	278	212
P5	70	20	526	-	861	-	199	161
P5	80	20	530	-	986	-	133	107
P5	90	20	537	-	1106	-	66	54

멘트, 분체, 잔골재를 혼합하여 1분간 건비빔을 실시한 후, 마지막으로 물을 믹서에 첨가하여 약 2분간 비빔을 실시하였다. 비빔을 완료한 시료는 KS F 2401의 굳지 않은 콘크리트의 시료 채취방법에 따라 시료를 채취하였으며, PVC몰드(Ø 50 × 100 mm)를 이용하여 일축 압축강도용 공시체를 제작하였다.

2.3 시험 항목

일반적으로 석탄회 등의 각종 산업부산물을 재활용한 저장도 콘크리트는 플로우값, 블리딩율, 일축 압축강도값을 기준으로 공학적 특성 및 성능, 현장에서의 적용가능성을 평가하고 있다.¹⁻³⁾ 국내의 경우 현재까지 정확한 평가기준은 없으나, 북미의 경우는 ACI Committe 229(1994) 및 TRB(2008), ASTM(2002), 일본의 경우는 유동화처리토 이용매뉴얼(2009)에서 그 평가기준과 시험방법 등을 규정하고 있다.

각종 산업부산물을 재활용한 저장도 콘크리트를 구조물용 되메움재로 개발하기 위해서는 ASTM에서 규정하고 있는 사용재료의 정확한 플로우 및 강도 특성을 파악할 필요가 있다. 기존의 저장도 콘크리트는 모래를 주성분으로 사용하여 시멘트의 첨가량을 조절하는 방법으로 필요한 일축 압축강도를 얻고 있다. 하지만, 저장도 콘크리트의 경우 추후 보수공사 등을 고려해 인력 또는 기계 등을 이용해 재굴착이 가능한 정도의 강도를 가져야 하는데 이에 대해서는 각국의 기관마다 다른 기준을 제시하고 있다. 예를 들면, ACI Committe 229에서는 2,068 kPa(300 psi)이하, ASTM에서는 인력굴착시 345 kPa(50 psi), 기계굴착시 13,480 kPa(200 psi), TRB에서는 350~1,000 kPa(51~145 psi)으로 저장도 콘크리트의 일축 압축강도 범위를 규정하고 있다.

또한, 저장도 콘크리트의 자기수평성 및 원활한 유동성을 확보하기 위해 플로우 값을 ACI Committe 229 및 TRB에서는 200 mm 이상, 일본의 유동화처리토 이용매뉴얼에서는 160 mm 이상으로 규정하고 있는데, 이 경우 되메우기 또는 충전하는 개소의 구조 등에 따라 설정하고 있으나, 현장적용의 경우에는 200±20 mm 정도를 제안하고 있다.

이 연구에서는 각종 산업부산물을 재활용한 저장도 콘크리트의 평가방법에 있어 플로우 및 블리딩 시험을 통해 유동성 평가를 실시하고, 강도 특성을 파악하기 위하여 일축 압축강도 시험을 실시하였다. 또한, 이 연구에서는 중요 평가 항목으로 각종 건설재료의 사용이 주변환경에 미치는 영향을 고려하여 하수슬러지를 대상으로 탈수 및 소각처리를 실시한 것을 환경부 폐기물 공정시험방법에 기준하여 용출시험을 실시하였다. 이를 통해 하수슬러지에 함유된 유해물질 특히, 최근의 시멘트 개량토에서 용출되는 것으로 알려진 육가크롬(이하, Cr)의 금속이온 농도를 중심으로 시험을 실시하여 각종 유해물질의 분석은 물론 주변 환경에 미치는 영향에 대해 평가를 실시하였다.

2.3.1 플로우 시험

일반적으로 저장도 콘크리트의 유동성은 현장에서의 충전성 및 시공성 등에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 보통의 경우 이러한 유동성 평가는 플로우 시험을 통해 얻어진 값을 기준으로 평가하고 있다.^{12,3)} 일본에서는 유동화처리토의 경우 유동구배와 플로우치의

상관성을 평가하여 나타내는 방법이 이용되고 있는데, 여기서 유동구배는 수평거리에 대한 타설 높이의 구배를 나타내는 것으로 이를 통해 CLSM의 충전성을 평가하는 것으로 알려져 있다. 이 연구에서는 ACI Committe 229 및 TRB에서 규정하고 있는 최소 플로우 값의 만족 여부와 일본의 유동화처리도 이용매뉴얼에서 규정하는 현장 적용성을 고려하여 플로우 값을 200 mm로 설정하였으며, KS F 2594에 규정된 굳지 않은 콘크리트의 플로우 시험방법에 기준하여 실험을 실시하였다.

2.3.2 블리딩 시험

최근의 연구보고에 의하면 FA를 혼입한 저강도 콘크리트의 경우 대략적으로 1-3% 정도의 블리딩이 나타나는 것으로 알려져 있다.^{3,12,13} 지금까지의 연구사례에서는 FA를 주 사용재료로 사용한 저강도 콘크리트의 경우 FA를 적당히 혼입함으로써 블리딩율의 감소와 함께 유동성 개선은 물론 단위수량의 저감에 있어서도 대단히 유효한 것으로 알려져 있다.¹²⁻¹⁴ 또한, AE제 등의 혼입에 의해 적당한 양의 공기를 연행시키는 방법도 블리딩의 억제 효과에 유효한 것으로 보고되고 있다. 최근 일본에서는 저강도 콘크리트를 사용한 하수도맨홀 되메움 공사에서의 표면침하량이 블리딩율과 거의 같은 1.8% 정도 나타난 것으로 보고된 바 있다.

또한, 저강도 콘크리트는 자기수평성 및 유동성이 우수한 재료로 계절의 영향에 대단히 민감하다고 할 수 있다. 특히, 이 연구에서 사용한 RSIA는 재료 자체가 가지고 있는 높은흡수율과 자기함수비로 인하여 온도와 습도의 영향을 크게 받는 것으로 나타나, 일축 압축강도에 상당한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이 연구에서는 각 재료의 배합에 있어 먼저, P3(FSD + RSIA)의 f/a 30, 40 과 P5(FSD + RSIA + SD)의 f/a 30, 40, 50에 해당되는 공시체의 제작은 겨울에 또한, P3의 f/a 50, 60, 70, 80, 90과 P5의 f/a 60, 70, 80, 90에 해당되는 공시체의 제작은 여름에 실시하여 KS F 2433에 규정된 주입 모르타르의 블리딩 시험방법에 의거 20시간 이후의 블리딩을 측정하는 방법으로 온도 및 습도가 강도에 미치는 영향에 대해 평가를 실시하였다.

2.3.3 일축 압축강도 시험

저강도 콘크리트의 일축 압축강도는 적용용도에 따라 시멘트의 첨가량을 변화시키는 방법으로 강도를 설정하는 것이 일반적이다. 현재까지 저강도 콘크리트의 적용용도 중에서도 가장 많이 이용되고 있는 것은 되메움 및 뒷채움재의 강도설정 방법으로 이 경우 자중 및 상재하중에 의한 저강도 콘크리트의 파괴 및 압축침하가 생기지 않을 것 등의 조건을 요구^{3,14}하고 있다. 또한, 강도 평가는 일축 압축강도의 크기로 평가되고 있으나, 용도 및 적용 개소에 따라 특별한 강도정수로 평가되는 경우도 있다. 일본의 유동화 처리도 이용매뉴얼에서는 보통 7일 강도가 이용되고 있으나, 시간의 경과에 따른 강도



Fig. 2 Flow, bleeding and strength test method

증가를 고려하여 28일의 일축 압축강도를 요구하기도 한다.

이 연구에서는 PVC몰드(Ø 50 × 100)를 이용하여 공시체를 제작하고, 실온에서 봉합하여 양생시키는 방법으로 KS F 2426에 규정된 일축 압축강도 시험방법에 따라 재령 28일의 일축 압축강도를 측정하였다. Fig. 2에 플로우, 블리딩, 일축 압축강도의 시험방법을 나타낸다.

2.3.4 용출시험

이 연구에서는 각종 산업부산물의 사용이 주변에 미치는 환경을 고려하여 탈수 및 소각처리를 실시한 하수슬러지를 대상으로 환경부 폐기물 공정시험방법에 기준하여 용출시험을 실시하였다. 일반적으로 시멘트의 개량토에서 용출되는 알려진 육가크롬(이하, Cr)의 경우 최근의 보고에 의하면 대량의 침투수가 유입되는 곳을 제외하고는 주변의 환경에 미치는 영향은 적은 것으로 보고^{2,4}되고 있다.

이 연구에서는 육가크롬이외에도 비소(As), 카드뮴(Cd), 납(Pb), 셀렌(Se)에 대해서도 용출시험을 실시하여 금속이온의 농도를 측정하는 방법으로 하수슬러지에 함유된 각종 유해물질의 분석은 물론 주변에 미치는 환경에 대하여 평가를 실시하였다. 각 금속이온의 표준허용기준은 환경부수질오염물질 배출허용기준(제34조, 청정지역)에 의거하여 시험을 실시하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 단위수량

목표 플로우치 200 mm를 얻는데 필요한 단위수량의 도출 결과를 Fig. 3에 나타낸다. 전체적으로 잔골재 부분에 RSIA를 사용한 P1, P3, P5의 경우가 잔골재로 RSIA이외 재료를 사용한 P0, P2, P4에 비해 많은 양의 단위수량이 필요한 것으로 나타났다. 또한, 분체 부분에 FA

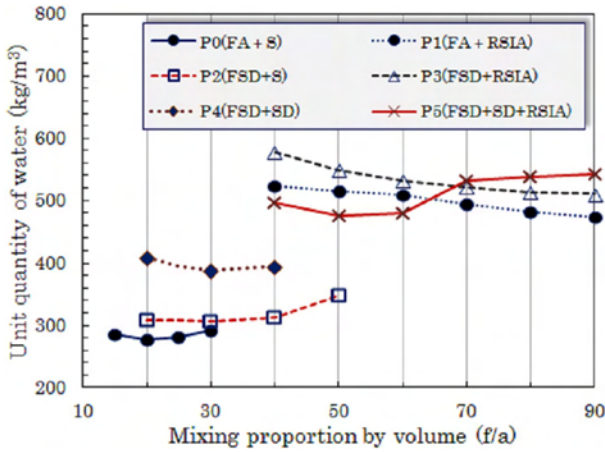


Fig. 3 Flow test result of CLSM

를 사용하고 잔골재로 각각 S와 RSIA를 혼입한 P0, P1에 비해 분체부분에 FSD를 사용하고, 잔골재로 각각 같은 재료를 혼입한 P2, P3의 단위수량이 많이 필요한 것으로 파악되었다. 이는 FSD의 입자 형태가 구형에 가깝지 않아 유동성 확보를 위해 단위수량을 추가한 때문으로 판단된다.

그리고, RSIA를 잔골재로 혼입한 P1, P3, P5의 경우 다른 재료를 잔골재로 혼입한 것에 비해 높은 단위수량이 나타났으나, f/a 50에서 최소단위수량이 확인되어 RSIA를 사용하는 CLSM의 경우 잔골재로 SD를 함께 적절히 사용하면 목표 플로우치를 얻기 위한 최소 단위수량의 확보가 가능할 것으로 파악되었다. 이 경우 골재 중에서 차지하는 분체의 용적비 즉, f/a의 비율은 50 정도가 가장 타당한 것으로 나타났다.

Fig. 4에 단위수량과 단위체적중량과의 관계를 나타낸다. 그림에 따르면, 전체적으로 단위체적중량이 증가함에 따라 단위수량이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한, RSIA를 잔골재로 사용한 P1, P3, P5의 경우 다른 재료를 잔골재로 사용한 P0, P2, P4에 비해 단위수량이 높게 분포되어 있었다. 이는 RSIA가 가지고 있는 높은 흡수율과 자기함수비가 단위수량의 결과에 크게 영향을 미친

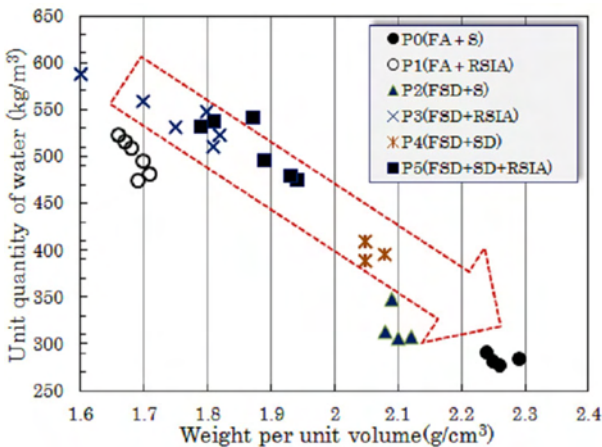


Fig. 4 Relation of unit quantity of water and weight per unit volume

때문으로 판단된다.

3.2 블리딩율

Fig. 5에 분체 부분에 FA를 사용하고, 잔골재로 S와 RSIA를 각각 혼입한 블리딩 시험 결과를 나타낸다. 먼저, P0의 경우 전체적으로 FA의 양이 증가할수록 블리딩율은 감소하는 것으로 나타났다. 특히, f/a 15~25의 범위 내에서 블리딩율이 급격히 감소하는 것으로 나타나 FA의 혼입량 증가에 따른 유동성 개선효과가 확인되었다. 하지만, f/a 25 이상에서는 블리딩율이 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 따라서, FA+S로 조합된 P0 경우 f/a 값을 20~25로 설정하면 유동성 개선상 가장 합리적인 것으로 사료된다.

한편, P1의 경우는 f/a 60 이상부터 블리딩율이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 하지만, f/a 40~60까지의 블리딩율의 평균값이 약 1.28 정도로 P0의 최소 블리딩율과 거의 동등한 것으로 나타났다. 따라서, FA+RSIA 조합된 P1의 경우 f/a 값을 40~60 정도에서 설정하는 것이 유동성 개선상 가장 합리적인 것으로 사료된다. Fig. 6에 분체부분에 FSD를 사용하고, 잔골재로 각각 S, RSIA, SD, RSIA+SD를 혼입한 블리딩 시험 결과를 나타낸다. 그림에 따르면, FSD+SD로 조합된 P4의 경우 f/a가 증가함에 따라 블리딩율이 급격히 증가하는 것으로 나타나, P4의 경우 유동성 개선을 위한 조건으로 f/a 값의 비율을 가장 최소범위에서 설정하는 방법이 유효한 것으로 확인되었다. 한편, P2, P5의 경우는 f/a가 증가함에 따라 블리딩율이 서서히 증가하는 것으로 파악되었으나, P3의 경우는 블리딩율이 증가와 감소를 반복하는 것으로 확인되었다.

그리고, P2는 f/a 50, P3는 f/a 80, P4는 f/a 30, P5는 f/a 70을 기준으로 블리딩율이 급격히 증가하는 것으로 나타나, FSD를 분체로 사용할 경우에는 배합설정에 있어 f/a의 적합한 비율이 필요한 것으로 나타났다. 이 실험의 결과에서는 블리딩율의 감소를 통한 유동성 개선을 위해서는 P2의 경우 f/a 30, P3는 f/a 40, P4는 f/a 20, P5는 f/a 60 정도로 설정하면 가장 적절한 것으로 나타

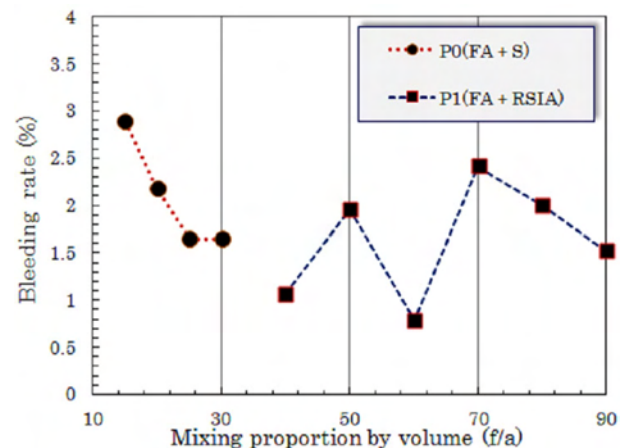


Fig. 5 Bleeding test result (FA + S, FA + RSIA)

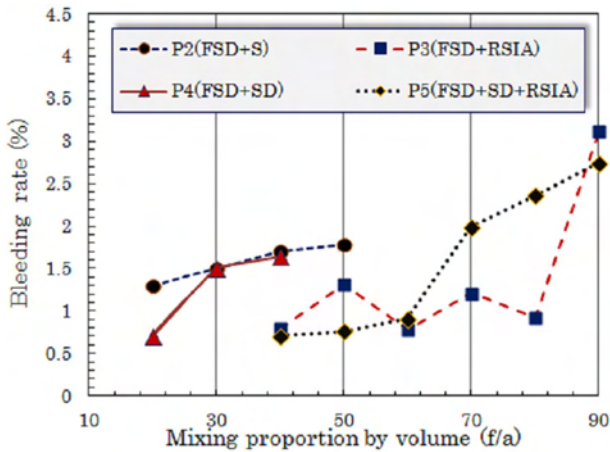


Fig. 6 Bleeding test result (FSD + S, FSD + RSIA, FSD + SD, FSD + SD + RSIA)

났다. 여기에 잔골재로 RSIA와 SD를 적절히 혼합하여 사용하면 CLSM의 유동성 개선에 크게 유효한 것으로 나타났다.

3.3 일축 압축강도

Fig. 7에 FA를 분체로 사용하고, 잔골재로 S와 RSIA를 각각 혼합한 일축 압축강도 시험 결과를 나타낸다. 먼저, FA + S로 조합된 P0 경우 f/a가 증가할수록 강도가 전체적으로 증가하는 경향이 나타났다. 특히, f/a 20 이상부터 강도가 급격히 증가하였으나, f/a 30부터는 크게 변화가 없는 것으로 나타났다. 따라서, FA + S로 조합된 P0의 경우 최대강도의 확보를 위해서는 f/a값을 30 정도로 설정하여 배합하는 방법이 가장 유효한 것으로 사료된다.

그리고, FA + RSIA로 조합된 P1의 경우는 f/a 50 정도에서 강도가 급격히 감소하였으나, 이후부터는 f/a의 증가에 따라 강도가 서서히 증가하는 경향이 파악되었다. f/a 50에서의 급격한 강도 감소는 하수슬러지의 높은 흡수율과 자기함수비가 강도의 거동에 크게 영향을 미친 것으로 판단된다.

Fig. 8에 FSD를 분체로 사용하고, 잔골재로 각각 S,

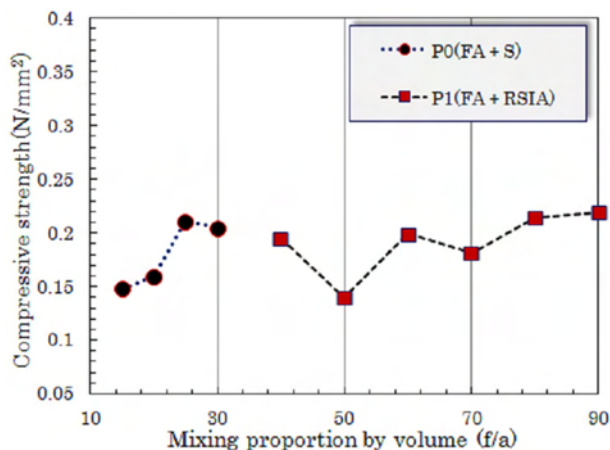


Fig. 7 Compressive strength result (FA + S, FA + RSIA)

RSIA, SD, SD + RSIA을 혼합한 강도시험 결과를 나타낸다. FSD + S로 조합된 P2의 경우 f/a 값이 증가할수록 강도는 감소하는 경향이 나타났으나, 이후부터는 거의 변화가 없는 것으로 파악되었다. 한편, 잔골재를 각각 RSIA, SD, SD + RSIA로 조합된 P3, P4, P5의 경우는 f/a 값이 증가함에 따라 강도 또한 증가하는 것으로 나타났다. 특히, RSIA를 잔골재 사용한 P3, P5의 경우 f/a 50을 기준으로 급격히 강도가 증가하는 것으로 파악되었다. 이는 RSIA가 가지고 있는 높은 흡수율과 자기함수비와 함께 온도와 습도의 영향을 타의 재료에 비해 크게 받는 것으로 평가할 수 있다.

이 실험에 있어 P3(FSD + RSIA)의 f/a 30, 40과 P5(FSD + RSIA + SD)의 f/a 30, 40, 50에 해당되는 공시체의 제작 시기는 겨울이었고, P3의 f/a 50, 60, 70, 80, 90과 P5의 f/a 60, 70, 80, 90은 공시체를 제작하여 실험을 진행한 시기가 여름이었다.

따라서, RSIA를 사용하는 CLSM의 배합에 있어 최대강도를 확보하기 위해서는 RSIA가 가지고 있는 재료의 성능을 정확히 분석하여 온도와 습도 등 여러 환경을 고려한 적절한 품질관리를 통하여 타설할 경우 높은 강도를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 특히, 골재 중에서 차지하는 f/a 값을 50 정도로 설정하여 배합하면 가장 우수한 성능의 저강도 콘크리트의 확보가 가능한 합리적인 배합방법으로 판단된다.

3.4 용출시험

Table 5에 환경부 폐기물 공정시험방법을 기준으로 실시한 RSIA의 용출시험 결과를 나타내고, Fig. 9에 용출시험의 과정을 나타낸다. 이 연구에서 사용한 RSIA는 탈수 및 소각처리를 실시한 것을 Table 2에서 나타난 유해물질 함유량 분석시험의 기준치 이하로써 안전한 것으로 나타났다.

이 연구에서는 육가크롬이외에도 비소(As), 카드뮴(Cd), 납(Pb), 셀렌(Se)에 대해서도 시험을 측정하였으나, Cr이

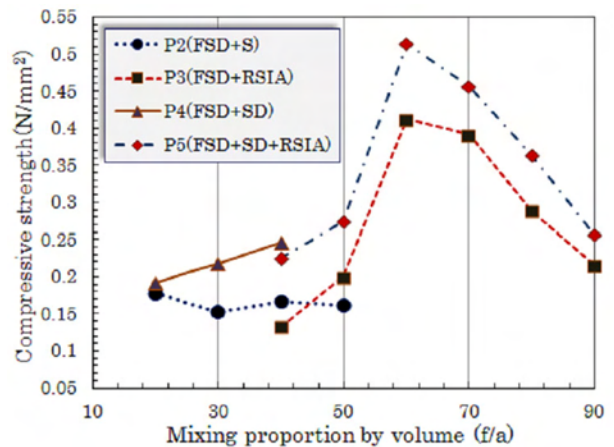


Fig. 8 Compressive strength result (FSD + S, FSD + RSIA, FSD + SD, FSD + SD + RSIA)



Fig. 9 Test method of gush test

Table 6 Result of gush test

	f/a	Metal concentration (mg/L)				
		As	Cd	Cr ⁽¹⁾	Pb	Se
P3	40	0.001	0.001	0.062	0.004	0.001
P3	50	0.003	0.002	0.091	0.001	0.024
P3	60	0.001	0.001	0.060	0.001	0.001
P3	70	0.001	0.001	0.068	0.001	0.001
P3	80	0.001	0.001	0.083	0.001	0.001
P3	90	0.001	0.00	0.100	0.004	0.001
Environmental standard ⁽²⁾		0.1	0.02	0.1	0.1	0.01
P5	30	0.001	0.003	0.21	0.001	0.019
P5	40	0.001	0.001	0.12	0.001	0.021
P5	50	0.001	0.001	0.087	0.001	0.001
P5	60	0.001	0.001	0.12	0.001	0.005
P5	70	0.002	0.001	0.12	0.001	0.001
P5	80	0.001	0.001	0.075	0.001	0.001
P5	90	0.001	0.001	0.068	0.001	0.005
Environmental standard ⁽²⁾		0.1	0.02	0.1	0.1	0.01

⁽¹⁾Concentration of total Cr value (hexavalent chromium measurement)

⁽²⁾Effluent quality standard of water pollutants (Environment, 2007)

외에는 금속농도가 거의 존재하지 않는 것으로 나타나, 금속이온의 용출은 거의 없는 것으로 확인되었다. Cr 또한, 환경기준에서 설정하고 있는 육가크롬에 대한 농도가 아니라, 이 용출시험에서는 전체 Cr 값의 농도를 측정하는 것으로 모두 환경기준치 이하에 해당되는 것으로 나타나, 주변 환경에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

4. 결 론

CLSM은 저강도 콘크리트 개념을 토목 및 지반개량분

야에 적용한 것으로 일반적으로 잔골재(모래, FA), 물, 시멘트, 혼화제 등을 혼합하여 만든 슬러리게 재료이다.

하지만, 강모래 등의 천연자원이 부족한 우리나라의 실정에는 다소 맞지 않는 경향이 있어 모래를 대체할 수 있는 재료로 매립 석탄회를 재활용하여 이를 일부분 적용하여 현장에 시범으로 시공한 사례가 있으나, 저강도 콘크리트에 관한 이용매뉴얼이 전무한 상태에서 특별한 대안 없이 기존재료의 공학적 특성과약에만 머물러 있는 실정이다.

이에 이 연구에서는 각종 산업부산물을 재활용한 합리적인 배합방법에 관한 기초적인 연구의 일환으로 모래 및 FA의 대체 재료로서 각종 산업부산물의 재활용 가능성을 제시함은 물론 다양한 용도와 사용재료별 요구성능에 대응할 수 있는 새로운 형태의 저강도 콘크리트의 개발 및 실용화를 위한 기초적인 자료로 제시하고자 연구를 진행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) FA를 분체로 사용하고 잔골재로 각각 S와 RSIA를 혼합한 CLSM의 경우 재료분리방지는 물론 최소단위수량, 유동성 및 최대강도를 확보하기 위한 배합조건으로 FA + S의 배합은 f/a 20, FA + RSIA의 배합은 f/a 60이 합리적인 최적의 배합방법으로 확인되었다.
- 2) FSD를 분체로 사용하고 잔골재로 각각 S, RSIA, SD, RSIA + SD를 혼합한 CLSM의 경우는 FSD + S f/a 20, FSD+RSIA f/a 50, FSD+SD f/a 30, FSD + RSIA + SD의 f/a 50이 합리적인 최적의 배합방법으로 확인되었다.

이상의 연구 결과 각종 산업부산물을 재활용한 저강도 콘크리트의 가장 이상적인 배합조건으로 FSD + RSIA + SD를 사용재료로 한 골재 중 f/a 값 50을 합리적인 최적의 배합조건으로 제안한다.

참고문헌

1. ACI Committee 229., "Controlled Low-Strength Materials (CLSM)," ACI Manual of Concrete Practice, ACI 229 R-94, 1999, 229 pp.
2. 建設省土木研究所, 流動化処理土利用技術マニュアル, 技報堂出版, 東京, 2008, pp. 1~10.
3. CLSM普及検討小委員会, CLSM利用マニュアル, 北海道土木技術会コンクリート研究委員会, 北海道, 2006, pp. 1~13.
4. Horiguchi, T., Okumura, H., and Saeki, N., "Durability of CLSM with Used Foundry Sand, Bottom Ash in Cold Regions," *ACI Special Publication SP*, Vol. 200, No. 2, 2001, pp. 325~340.
5. Horiguchi, T. and Saeki, N., "Compressive Strength and Leachate Characteristics of New Green CLSM with Eco-cement and Melted Slag from Municipal Solid Waste," *ACI Special Publication SP*, Vol. 221, No. 6, 2004, pp. 539~558.
6. Horiguchi, T., Okumura, H., and Saeki, N., "Optimization of CLSM Mixture Proportion with Combination of Clinker Ash and Fly Ash," *ACI Special Publication SP*, Vol. 199, No. 1, 2001, pp. 307~318.

7. 현호규, 김현기, 천병식, “매립회를 활용한 저강도 고유동화재의 동결융해 특성,” 한국지반공학회 논문집, 11권, 7호, 2010, pp. 51~56.
8. 김영일, 지성현, 천병식, “석탄회를 활용한 CLSM의 pH 저감에 관한 연구,” 한국지반공학회 논문집, 11권, 9호, 2010, pp. 39~45.
9. 박재현, 이관호, 조재윤, 김석남, “현장발생토 CLSM을 이용한 지하매설관의 변형 특성,” 한국지반공학회 논문집, 20권, 3호, 2004, pp. 129~139.
10. 오기대, 김대홍, “굴착잔토를 재활용한 지중 전력케이블 유동성 뒤채움재의 열저항 특성,” 한국지반환경공학회 논문집, 11권, 10호, 2010, pp. 15~24.
11. Adaska, W. S., “Controlled Low Strength Materials,” *ACI Concrete International*, Vol. 19, No. 4, 1997, pp. 41~43.
12. Sweeney, J. and Fisher, H., “Evaluating the Use of a Product Derived from Aluminum Dross in Controlled Low Materials,” *Air and Waste Management Association of America Publications VIP*, Vol. 144, No. 1, 2003, pp. 737~746.
13. Okumura, H., Taerwe, Horiguchi, T., Saeki, “Basic Properties of Controlled Low Strength Materials with Various Mix of Coal Ashes,” *Report No. 3, V-41, Japan Society of Civil Engineers*, Hokkaido, 2002, pp. 888~891.
14. Imai, K., Onodera, O., Mizuguchi H., and Horiguchi, T., “Development of New CLSM Flow Able Fill Construction Method Part 1,” *Report No. 3, V-25, Japan Society of Civil Engineers*, Hokkaido, 2004, pp. 758~759.

요 약 이 연구에서는 국내의 경우 지금까지 그 사례를 찾아보기 힘들었던 새로운 용도에서의 대규모적인 비용 절감은 물론 환경부하의 저감까지도 고려한 저강도 콘크리트의 개발 및 실용화를 위한 기초적인 연구의 일환으로 각종 산업부산물을 재활용한 저강도 콘크리트의 합리적인 배합방법에 관한 연구를 진행하였다. 이를 통해 모래 및 FA의 대체 재료로서 각종 산업부산물의 적용가능성을 제시함은 물론 다양한 용도와 사용재료별 요구성능에 대응할 수 있는 저강도 콘크리트의 개발 및 실용화를 위한 연구에 있어 기초적인 자료로 제시하고자 하였다. 각종 산업부산물을 재활용한 저강도 콘크리트의 합리적인 배합조건으로 재료분리방지는 물론 최소단위수량, 유동성 및 최대강도를 고려하여 종합적으로 분석 평가한 결과, 사용재료는 FSD + RSIA + SD의 배합에서 골재 중 f/a 값을 50을 합리적인 최적의 배합조건으로 제안한다.

핵심용어 : 저강도 콘크리트, 플라이애쉬, 쇄석미분말, 자기충전성, 재생자원