

에틸벤젠에 의한 굴폐각 혼합공시체의 압축강도 변화 특성

Strength Change of Concrete with Crushed Oyster Shell by the Addition of Ethylbenzene

윤 현 석*¹ Yoon, Hyun-Suk

이 기 호*² Lee, Ki-Ho

박 준 범*³ Park, Jun-Boum

Abstract

The development of contaminated sites often requires foundation concrete to be placed in contact with soils contaminated with organic compounds. There is a common perception that organic compounds affect the setting and hardening of concrete, giving a reduced long-term strength. In this study, unconfined compressive strength tests for concrete cured in Ethylbenzene were performed. The possibility of byproduct to be used for aggregate of concretes as materials of construction was also evaluated by carrying out the investigation of the characteristics of the mixture of concrete and crushed oyster shell which is treated as waste material and often illegally disposed at coastal oyster production site. The transformation of strength characteristics was investigated by varying the blending ratio of fly ash.

요 지

오염된 부지를 개발하는 경우 유기 화합물로 오염된 부지에 콘크리트 기초가 놓이게 된다. 이러한 경우, 콘크리트 경화는 유기화합물에 영향을 받게 되는데, 본 논문에서는 유기화합물(에틸벤젠)을 혼합한 콘크리트 공시체를 제작하고 일축압축실험을 실시하였다. 콘크리트 공시체 제작 시 골재 대용재료로써 굴폐각을 사용하였다. 그 이유는 산업부 산물을 건설재료로 활용하기 위한 가능성을 검토하기 위해서 이다. 또한 굴폐각 공시체에 플라이애쉬를 첨가하여 유기화합물의 유무에 따른 강도변화 특성을 고찰하였다.

Keywords : Compressive strength, Ethylbenzene, Fly ash, Oyster shell

1. 서 론

건설부지의 부족으로 공업단지, 폐기물 매립장 등의 오염된 지반의 재활용에 대한 지반 공학적 중요성이 높아지고 있다. 더불어 산업부산물로 발생하는 굴폐각(Oyster Shell)과 플라이애쉬(Fly Ash) 등을 콘크리트에

혼합하여 건설재료로 재활용하기 위한 공학적 특성연구가 진행되고 있다. 이러한 연구에 있어 주목해야 할 점은 혼합콘크리트가 지반 내에 잔존하는 유기오염물질과 혼재되는 경우 일반적인 혼합콘크리트와는 강도 특성에 있어 다른 양상을 나타내리라는 것이다. 도심지 주변의 공장, 주유소, 쓰레기매립지 등을 건설부지

*1 정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engr., Seoul National Univ., yoonhs1@snu.ac.kr)

*2 정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사후과정 (Member, Post-Doctoral Researcher, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engr., Seoul National Univ.)

*3 정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engr., Seoul National Univ.)

재활용하는 경우 여러 유해물질로 오염된 지반 특성을 고려해야 한다. 특히 유류와 같은 석유탄화수소 물질로 오염된 경우 유기오염물질이 콘크리트 고형화 특성에 어느 정도 영향을 주는지에 대한 연구가 필수적이다. 이와 관련된 기존의 연구를 개략적으로 살펴보면 다음과 같다.

Paul(1994)은 오염 부지 내에 타설된 기초콘크리트 손상의 주요 원인으로 황산염을 주목하였다. Lea(1970)와 Biczok(1964)는 기초 콘크리트 수화와 경화에 광물성 기름의 화학성분이 영향을 미쳐 장기강도를 감소시킨다는 것을 확인하였다. 반면 석유 및 석탄타르가 경화된 기초콘크리트의 강도와 내구성에 영향을 미치나, 이에 대한 영향은 미소하다는 결과도 보고되고 있다(Dobrowolski, 1998; Murdock & Blackledge, 1969).

Smith(1985)는 페놀이 콘크리트의 강도에 미치는 영향을 평가하였다. 페놀은 콘크리트 강도를 감소시키며, 페놀의 농도가 높을수록 강도의 감소율이 더욱 크고 감소율은 2년 후에 약 6~9%가 되는 것으로 보고하였다.

Wilson(2001)등은 석유탄화수소계열 물질로 오염된 부지 내에 설치되는 콘크리트 기초의 강도 특성에 대해 고찰하였다. 물-시멘트비를 0.6으로 조성한 시편에 대하여 3종의 유기 화합물인 디젤(Diesel), 윤활유(Lubricating oil), 크레오소트(Creosote)에 의한 강도 변화의 특성을 연구하였다. 연구자들은 100mm 정육면체로 제작된 콘크리트 공시체를 같은 부피의 오염용액이 들어있는 폴리에틸렌백에 넣어 오염물질과의 반응을 모사하였다. 오염되지 않은 공시체의 일축압축강도와 비교하였을 때, 디젤에 의한 강도 변화가 가장 작은 영향을 나타내었고, 크레오소트가 가장 큰 영향을 나타내었으며 3종의 오염물질은 28일 콘크리트 강도를 약 15%정도 감소시키는 것으로 확인되었다.

본 논문에서는 대표적인 산업부산물인 굴폐각과 플라이애쉬를 콘크리트의 혼합재로 활용하기 위한 방안을 모색하였다. 유기오염물질로는 에틸벤젠(Ethylbenzene; EB)을 사용하여 오염물에 의한 혼합콘크리트의 강도 변화 특성을 파악하였다. 대표적인 산업부산물인 굴폐각을 파쇄하여 모래 대체재로써의 특성을 분석하였고, 첨가제로써 산업 폐기물인 플라이애쉬를 첨가하여 강도 변화 특성을 고찰하였다.

굴폐각은 굴생산을 통해 발생하는 폐기물로 남해 청정해역에서 대량으로 발생하고 있지만 대부분은 처리하지 못하고, 야적되고 있어 악취 뿐 만 아니라 인근 해역을

오염시키는 등 많은 문제점을 야기하고 있다. 굴폐각은 자연계에서 생성된 탄산칼슘(CaCO_3)이 주성분으로 구성되어 있으며, 얇은 막으로 여러 겹 둘러싸인 다공질체로서 비표면적이 큰 것으로 알려져 있다(박흥재, 2001).

화력발전소에서 대량 발생하는 플라이애쉬(Fly Ash)는 석탄을 연소시킨 후 발생하는 회 중 집진기에서 포집되는 미세한 입자들을 의미한다. 석탄회는 매년 443만 톤(2000년도 기준)이 발생하였으며, 이 중 54.6%인 242만톤이 건설재료 등으로 재활용되고 나머지는 슬러리화하여 회사장(ash pond)등에 매립되고 있다. 플라이애쉬는 분말도가 크고 부피밀도가 800kg/m^3 정도로 매우 가벼운 특성을 지니며 비표면적이 $3,000\text{cm}^2/\text{g}$ 전후의 미세 입자이다. 또한 입경은 $0.5\sim 100\mu\text{m}$ 의 범위에 속하며 분말도, 구형도 등의 특성을 가진다. 주요 구성 성분은 규소, 알루미늄, 철의 산화물로서 이들 세 가지 성분이 전체의 80~90%이상을 차지하며 고온 연소 생성물의 특성상 석회와 물이 플라이애쉬의 주성분인 SiO_2 와 반응하여 시멘트성 물질을 생성하는 포졸란 성질을 지닌다(오병환, 1991; 남영우, 2000). 석탄회는 pH 10~13의 강알칼리성 물질로서, 약산성 이상의 환경에서 입자의 표면은 음전하로 대전된다. 따라서 수용액상에 존재하는 금속 이온들에 대해서는 침전과 표면 전하에 의한 정전기적 흡착을 발생할 수 있다(조희찬, 2001; 장암, 1998). 플라이애쉬를 콘크리트에 첨가하는 경우 수화에 요구되는 단위 수량을 감소시키게 된다. 또한 플라이애쉬 단독으로는 경화성을 갖지 않지만, 포졸란이나 백토처럼 가용성 SiO_2 를 다량함유하기 때문에, C_3S , C_2S 에서 유리된 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 포졸란 반응을 일으켜, 불용성 C-S-H gel을 생성한다. 따라서 재령 28일까지의 단기 강도는 낮지만, 6개월 이상의 장기강도는 보통 포트랜드 시멘트 보다 우수하다고 알려져 있다. 그리고 포졸란 반응에 의해 생성된 수화물이 조직을 치밀하게 하게 된다(Arai, 1998).

본 논문의 목적은 다음과 같다. 먼저, 산업 부산물인 굴폐각 입자와 플라이애쉬의 건설골재로서의 활용 가능성을 평가하고자 하였다. 표준사를 혼입한 동일 혼합비의 공시체에 대해서 강도특성을 파악하여 굴폐각의 활용성을 정량적으로 평가하였다. 그리고 콘크리트 혼합체가 유기화합물인 에틸벤젠과 접촉되는 경우 콘크리트 혼합체의 강도의 변화 특성을 고찰하였다.

굴폐각과 같은 대체 재료의 개발과 더불어 산업부산물(굴폐각, 플라이애쉬)을 첨가한 혼합공시체의 유기오염물

질에 의한 강도 변화를 평가할 수 있는 기본 연구인 것이다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험재료

2.1.1 시료

본 연구에서 사용한 굴패각과 플라아에쉬는 각각 남해안 굴 양식장과 충남의 화력발전소에서 구입하였다. 굴패각은 염분에 영향을 받지 않도록 중탕 세척 후 105°C 건조로에서 건조시킨 후 파쇄하였고, 분쇄된 굴패각 입자를 체분리하여 굴패각 큰입자(4.75mm-2mm)와 굴패각 작은입자(2mm-0.074mm)로 구분하여 시료준비를 하였다. 본 논문에서는 굴패각 큰입자를 LOS(Large Oyster Shell)로 굴패각 작은입자를 SOS(Small Oyster Shell)로 표기하였다. 사진 1에 굴패각 큰입자(LOS)를, 사진 2에 굴패각 작은입자(SOS)를 나타냈다. 일반적으로 파쇄된 굴패각의 입자 형태는 타원형의 입자형태를 나타내고

박편화 되는 경향을 보이며, 비중은 2.38로 비중 2.63인 주문진 표준사보다 작다.

플라이애쉬는 유연탄을 원료로 하는 화력발전소에서 발생한 상태 그대로를 사용하였으며 비중은 2.04이다. 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 혼합 콘크리트 내의 잔골재로 사용할 모래는 주문진 표준사를 사용하였다. 표 1은 본 연구에서 사용한 굴패각과 플라이애쉬 그리고 시멘트의 성분을 XRF(X-Ray Fluorescence Spectrometry)를 이용하여 분석한 결과를 나타낸 것이다. 굴패각의 경우 주성분이 CaCO₃이기 때문에 CaO성분이 50% 이상으로 가장 많은 조성비를 나타냈고, 플라이애쉬는 SiO₂와 Al₂O₃가 주요 구성 성분으로 분석되었다.

2.1.2 유기화합물(오염용액)

본 연구에서 사용된 소수성 유기화합물은 침출수 및 주유소 등지에서 많이 접할 수 있는 유해 오염물질로서 토양환경보전법상에서 규제하고 있으며, 또한 미국 환경청(USEPA)에서 주요 토양 오염물질로 지정한 방향

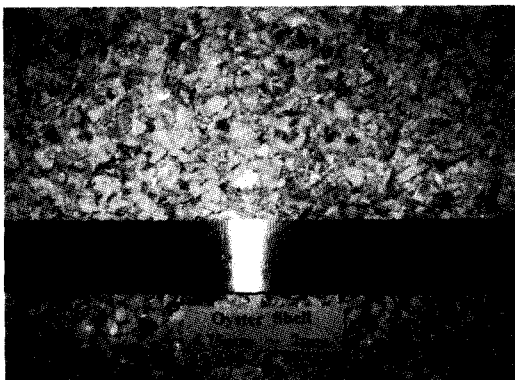


사진 1. 굴패각 큰입자(LOS)

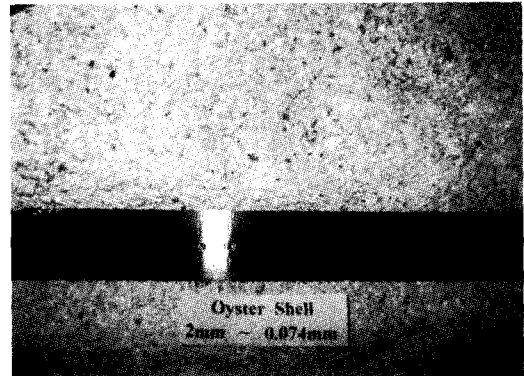



사진 2. 굴패각 작은입자(SOS)

Table 1. Results of XRF Analysis (Unit : %)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	L.I.*	Total
Oyster Shell	0.62	-	0.01	0.32	0.78	52.94	0.93	0.03	-	0.17	44.02	99.81
Fly Ash	51.88	23.27	0.89	8.68	1.55	4.46	0.59	1.13	0.06	0.80	5.74	99.15
Potland Cement	21.24	5.97	-	3.34	2.36	62.72	0.31	0.81	2.36	-	1.46	100

L.I.* : loss of ignition

Table 2. The Physico-Chemical Properties of Ethylbenzene

Compound Name	Structure Formula	Molecular Formula	Mol. wt	melt/Boil pt.(°C)	Specific Gravity	a) log K _{ow}	b) Solubility (mg/L)	a) Henry's Constant logK _H
Ethylbenzene		C ₈ H ₁₀	106.2	-95.0 / 136.2	0.867	3.15	150	0.90

a) Source : Schwarzenbach, R.P., et al (1993) *Environmental Organic Chemistry* (at 25°C)

b) Source : *Bedient* (1994)

족 화합물(Aromatic Compounds)인 에틸벤젠(EB)을 사용하였다. EB는 가솔린 등의 주요 구성 요소 중 하나로 발암성 물질로 광범위한 토양오염원으로 알려져 있다. EB의 물리·화학적 특성치를 표 2에 정리하였다. 실험에서 사용된 시약은 Junsei Chemicals Co., Ltd.의 제품(순도 98.5% 이상)을 사용하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 흡착실험

혼합 공시체의 골재로 사용될 골패각 입자와 플라이애쉬에 대한 유기화합물인 EB과의 반응성을 평가하기 위하여 흡착실험을 실시하였다. 본 연구에서는 먼저 흡착평형시험(Sorption Equilibrium Test)을 실시하여 등온흡착평형시간을 산출하고 이를 근거로 등온흡착실험(Sorption Isotherm Test)을 실시하였다.

EB의 농도는 Gas Chromatography (6890 Series, Hewlett Packard Co. USA)로 분석하였다. GC의 검출기는 FID (flame ionization detector), 컬럼은 Model No. HP 19091J-413(HP-5, 5% Phenyl Methyl Siloxane, Capillary 30m, 320nm, 0.25mm nominal), 운반가스는 질소가스를 사용하였다. GC 분석 조건은 Inlets 온도 = 250℃, Split ratio = 20:1, Split flow = 24mL/min. Detector 온도 = 280℃로 하였다.

2.2.1.1 흡착 평형 실험(Sorption Equilibrium Test)

흡착평형실험을 통해서 EB이 골패각, 플라이애쉬 각각의 시료에 대하여 어느 정도의 시간이 경과한 후에 흡착평형에 도달하는가를 조사하였다. 이 실험을 통해 얻어진 흡착평형 도달시간은 유기화합물이 시료에 대해 흡착평형에 충분히 도달하는 시간을 의미한다.

실험 방법은 다음과 같다 : 일정량의 대상 시료와 EB (농도 20mg/L) 용액을 시험관에 빈 공간(headspace)이 없게 넣는다. 시험관은 $\phi 16\text{mm} \times 150\text{mm}$ Culture c-tube (Wheaton Co., with Teflon-faced cap)을 사용하였다. 이때, 용액에 Sodium Azide(NaN_3)를 극미량(중량비로 0.01%) 첨가하여 시료 속 미생물의 활동에 의한 생분해 오차를 억제하였다. 그리고 시험관을 항온실에서 교반기로 교반시킨 다음 2시간, 4시간, 8시간, 16시간, 24시간, 48시간, 72시간, 96시간 간격으로 시험관에서 오염 용액을 추출하였다. 추출방법으로 시험관을 원심분리기(Maraton 8K, Fisher Scientific)에서 20분간 3000rpm

이상의 속도로 회전시켜 고액 분리시킨 후 상징액(super-natant)을 8ml vial에 4ml을 채우고 헥산(Hexane)을 4ml를 첨가하여 용매 추출한 후 이를 다시 2ml vial에 담아 GC를 이용하여 농도를 측정하였다.

2.2.1.2 등온 흡착 실험(Sorption Isotherm Test)

등온흡착실험 방법은 먼저 대상 시료 2.5g, 5g을 각각 시험관에 넣고 농도 20mg/L, 35mg/L, 50mg/L, 75mg/L, 100mg/L 등의 여러 농도의 용액으로 빈 공간 없이 채운다. 즉, 다양한 시료/용액의 비(dilution ratio, DR비)에 대하여 실험을 실시한다. 그리고, 항온실에서 흡착평형 시간에 도달할 때까지 교반시킨 후 흡착평형실험에서와 같은 방법으로 각 시험관을 원심분리기로 고액 분리한 후 상징액을 헥산(Hexane)을 이용하여 용매 추출하고 GC로 농도를 측정하였다.

2.2.2 혼합 공시체 제작 및 강도 실험

본 연구에서 사용한 혼합 공시체 제작에 쓰인 재료를 분류하면 다음과 같다. 먼저 주 재료로써 물과 오염용액으로 EB(농도 20ppm용액), 시멘트 그리고 혼합재로 모래, 골패각 큰입자(LOS), 골패각 작은입자(SOS), 플라이애쉬를 사용하였다. 공시체의 기본 혼합비인 물-시멘트 비(W/C)는 1로 고정하였다. 먼저 시멘트 페이스트(Cement paste)에 잔골재로써 골패각 또는 모래를 각각 시멘트 중량을 기준으로 1배 또는 2배 혼합 비율로 혼합 공시체를 제작하였다. 그리고 플라이애쉬를 시멘트 중량을 기준으로 0, 5, 10, 15%의 비율로 혼합하여 공시체를 제작하였다. 유기 오염물에 의한 강도 변화 특성 평가를 위하여 물 대신 20ppm 농도의 EB 용액으로 혼합하여 오염 공시체를 제작하였다.

혼합공시체의 기본이 되는 물-시멘트 비와 일축압축 강도와와의 관계는 기존 연구(Neville, 1997)에 의하면 조강 포틀랜드 시멘트를 이용한 물-시멘트 비와 일축압축 강도 사이에는 반비례 관계인 포물선 형태의 관계식으로 유도할 수 있음을 밝혔다. 이러한 관계를 일축압축 강도와 시멘트-물 비(C/W)와의 관계로 정리하면 시멘트-물 비의 범위가 1.2에서 2.5 사이에서 선형 관계식으로 표현할 수 있으며, 이러한 관계는 Alexander(1982)에 의해 재확인되었다. 강도와 배합비의 선형관계를 통해 강도의 예측이 가능하리라 판단된다.

일축압축실험 공시체는 순수 물로 성형한 공시체의 개수와 같이하여 오염용액으로 형성된 공시체를 제작

표 3. 공시체 제작에 대한 혼합비(중량비)

물-시멘트비 = 1			EB용액-시멘트비 = 1				
잔 골재	플라이애쉬	기호(Label)	잔 골재	플라이애쉬	기호(Label)		
0	0	W-C	0	0	C-C		
모래 (SD)	1	0	W-SD1-F00	모래 (SD)	1	0	C-SD1-F00
	1	0.05	W-SD1-F05		1	0.05	C-SD1-F05
	1	0.10	W-SD1-F10		1	0.10	C-SD1-F10
	1	0.15	W-SD1-F15		1	0.15	C-SD1-F15
굴패각 큰입자 (LOS)	1	0	W-LO1-F00	굴패각 큰입자 (LOS)	1	0	C-LO1-F00
	1	0.05	W-LO1-F05		1	0.05	C-LO1-F05
	1	0.10	W-LO1-F10		1	0.10	C-LO1-F10
	1	0.15	W-LO1-F15		1	0.15	C-LO1-F15
굴패각 작은입자 (SOS)	1	0	W-SO1-F00	굴패각 작은입자 (SOS)	1	0	C-SO1-F00
	1	0.05	W-SO1-F05		1	0.05	C-SO1-F05
	1	0.10	W-SO1-F10		1	0.10	C-SO1-F10
	1	0.15	W-SO1-F15		1	0.15	C-SO1-F15
모래 (SD)	2	0	W-SD2-F00	모래 (SD)	2	0	C-SD2-F00
	2	0.05	W-SD2-F05		2	0.05	C-SD2-F05
	2	0.10	W-SD2-F10		2	0.10	C-SD2-F10
	2	0.15	W-SD2-F15		2	0.15	C-SD2-F15
굴패각 큰입자 (LOS)	2	0	W-LO2-F00	굴패각 큰입자 (LOS)	2	0	C-LO2-F00
	2	0.05	W-LO2-F05		2	0.05	C-LO2-F05
	2	0.10	W-LO2-F10		2	0.10	C-LO2-F10
	2	0.15	W-LO2-F15		2	0.15	C-LO2-F15
굴패각 작은입자 (SOS)	2	0	W-SO2-F00	굴패각 작은입자 (SOS)	2	0	C-SO2-F00
	2	0.05	W-SO2-F05		2	0.05	C-SO2-F05
	2	0.10	W-SO2-F10		2	0.10	C-SO2-F10
	2	0.15	W-SO2-F15		2	0.15	C-SO2-F15

하였으며, 각각의 공시체에 대해서 7일(초기강도), 28일(설계기준강도), 60일(장기강도) 양생 일수에 따른 일축압축강도 실험을 실시하였다. 일축압축강도 실험 방법은 공시체의 크기가 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 인 몰드를 이용하여 KSF 2314의 방법에 의거 수행하였다. 제작한 공시체는 1일 기건(氣乾) 양생한 다음 몰드에서 탈형하여 수중양생을 하였다. 일축압축강도시험 장비(UTM; KSU200C)를 이용하여 변형률 제어 방식으로 1mm/min의 속도로 실험을 실시하였다. 본 연구에서 실험을 수행한 공시체 혼합비를 표 3에 정리하였다. 각각 재료의 혼합비에 따라서 혼합공시체를 표현하는 기호(label)로 W는 물, C는 EB용액, SD는 표준사, LO는 큰입자굴패각, SO는 작은입자굴패각 그리고 F는 플라이애쉬를 의미한다. 그리고 표 3에서 사용된 숫자는 혼합된 각 재료의 혼합비가 시멘트 중량 대비 혼합된 양을 나타내는 것이다.

3. 결과 및 고찰

2.1 재료의 입자 형태의 특성

굴패각 입자의 형태 특성을 분석하기 위하여 입자를 디지털 사진으로 촬영하였다. 파쇄된 굴패각 입자가 타

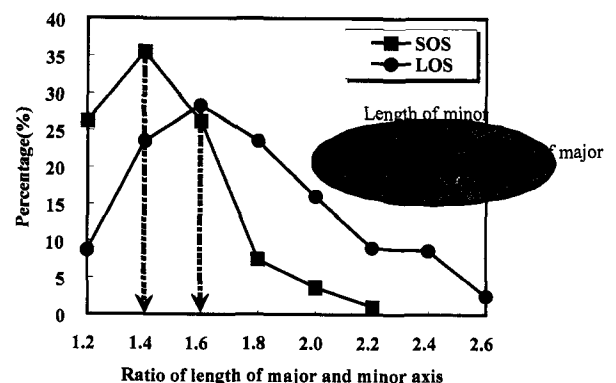


그림 1. 굴패각 입자의 형태 특성

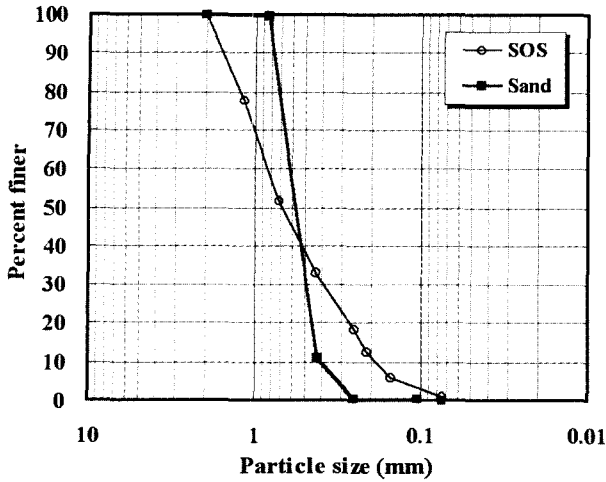


그림 2. 주문진 표준사와 굴폐각 작은입자(SOS)의 입도 분포 곡선

원의 박편 형태이므로, 타원형 입자로서 굴폐각의 장축/단축비를 구하였다. 굴폐각 입자 크기의 종류별로 각각 입자의 형태로부터 장축과 단축의 비를 그림 1에 정리하였다. 굴폐각 LOS의 경우 장축/단축의 비가 1.6인 경우가 가장 많았으며, 굴폐각 SOS의 경우에는 대표적 장축/단축비는 1.4인 입자의 비율이 높은 것으로 나타났다.

그림 2는 주문진 표준사와 굴폐각 작은입자(SOS)의 입도분포곡선을 나타낸 것이다.

입도분포곡선에서 주문진 표준사의 균등계수(Cu)는 1.53, 곡률계수(Cg)는 0.94, 굴폐각 작은입자(SOS)의 균등계수는 4.67, 곡률계수는 1.01로 나타났다. 그리고 유효 입경(D₁₀)은 주문진 표준사는 0.4mm, SOS는 0.18mm였다.

3.2 흡착 평형 실험 결과

흡착 실험 결과 실험 골재 재료에 대한 EB 흡착평형은 약 48시간 이후에 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 흡착을 위한 교반 시간을 3일로 하였다.

흡착 평형에 도달한 시료에 흡착된 EB의 양은 다음의 식에 의해서 계산했다.

$$C_s = \frac{(C_o - C_e) \times V}{M} \quad (1)$$

여기서,

C_s = 매질의 건조단위중량당 흡착된 용질의 질량 (amounts of the solute sorbed in the solid material), (mg/kg)

C_o = 공시험에서 용액의 농도(concentration of the

solution in the blank test), (mg/L)

C_e = 평형상태에서의 용액의 농도(concentration of the solution in equilibrium with solid material), (mg/L)

V = 용액의 부피(volume of the solution), (mL)

M = 매질의 질량(weight of the solid material), (g)

식 (1)에서 구한 값을 가지고 선형 등온 흡착(Linear Sorption Isotherm)모델을 이용하여 EB에 대한 흡착 특성을 파악하였다. 식 (2)는 선형 흡착 분배 계수의 관계를 나타내는 식이다.

$$K_d = \frac{C_s}{C_e} \quad (2)$$

여기서, K_d = 선형 분배 계수(linear equilibrium partition coefficient), (L³/M)

선형 분배 계수 K_d는 대상 오염물질이 두개의 상(phase)으로 구성된 시스템 내에서 어느 상으로 이동할지 평가하는 지표로 이용된다.

그림 3은 공시체 혼합 재료인 굴폐각과 플라이애쉬에 대해서 EB의 흡착특성을 도시한 것이다. 그림에서 직선의 기울기가 각 시료의 분배계수 K_d 값을 나타낸다. 두개의 상(phase)인 물과 시료가 혼합되어 있는 시스템에 오염물질이 누출된 경우, K_d값이 커짐에 따라 오염물질이 시료로 이동하려는 경향성이 크다는 것을 의미하고, 또한 시료가 오염물질에 대한 흡착성이 크다고 평가할 수 있다. 분배 계수 K_d값을 이용하여 실험 결과를 분석

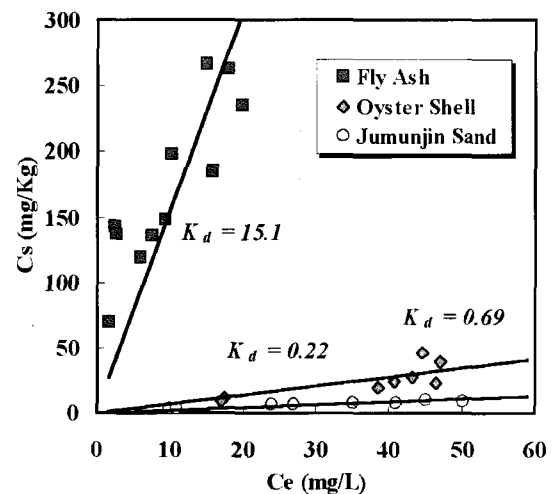


그림 3. Linear sorption isotherm

해 보면 플라이애쉬의 EB의 선형분배계수 K_d 값은 15.1 이고, 굴폐각의 K_d 값은 0.69, 그리고 주문진 표준사의 K_d 값은 0.22로 플라이애쉬에 대한 EB의 흡착능이 상당히 컸고, 굴폐각의 경우 표준사의 EB에 대한 흡착능보다 약 3배 정도 크게 나타났다.

3.3 혼합 공시체의 파괴 형태

본 연구에서 일축압축강도를 평가한 혼합공시체(재령 60일)에 골재의 종류에 따른 파괴 양상을 사진 3~5에

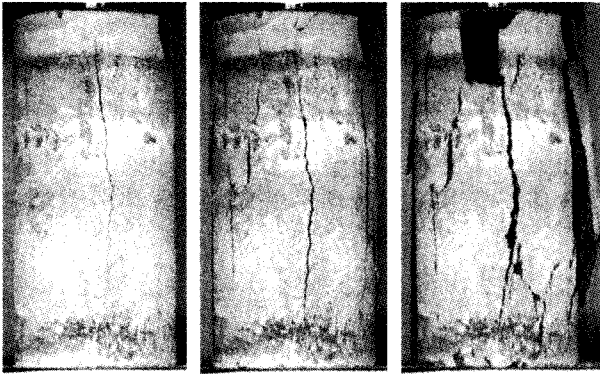


사진 3. 모래 혼합공시체

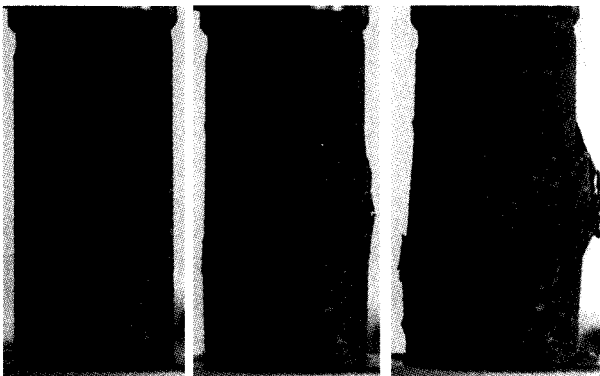


사진 4. 큰입자 굴폐각(LOS) 혼합공시체

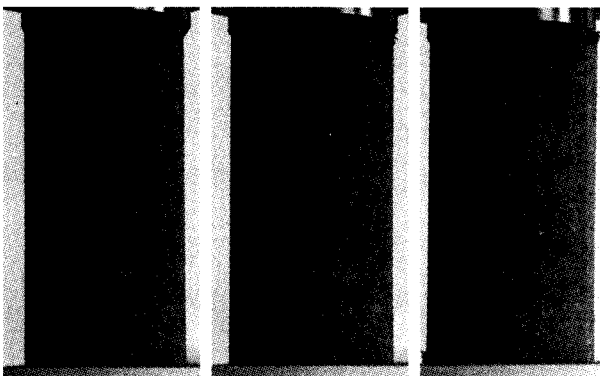


사진 5. 작은입자 굴폐각(SOS) 혼합공시체

나타내었다. 사진 3은 모래가 시멘트 중량의 2배가 혼합된 경우(W-SD2-F00), 사진 4는 굴폐각 큰입자(LOS)가 시멘트 중량의 1배가 혼합된 경우(W-LO1-F00), 사진 5는 굴폐각 작은입자(SOS)가 시멘트 중량의 2배가 혼합된 경우(W-SO2-F00)를 나타낸다. 혼합공시체의 혼합 잔 골재에 따라 공시체의 파괴양상에 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 모래를 혼합한 혼합공시체의 경우 공시체의 상하방향으로 미세한 균열이 발생하고 이것이 전체 스케일로 전이되어 파괴되는 양상을 나타낸다. 이러한 형태의 파괴를 일반적으로 할렬 파괴라고 하며, 공시체가 기둥모양으로 파괴되는데 이는 일반적으로 공시체의 강도가 클 경우 발생한다. 굴폐각 큰입자(LOS) 혼합 공시체의 경우, 공시체의 중앙부에서 균열이 시작되고 혼합되어 있는 굴폐각 입자의 둘레를 따라 전이되며 파괴되는 것으로 판단된다. 굴폐각 작은입자(SOS)를 혼합한 경우, 굴폐각 입자가 전단면에 위치함에 따라, 깨끗한 전단면이 발생하지 않고 지그재그형 전단면이 발생하였다. 이러한 특성은 전단면의 깊이방향으로 더욱 뚜렷하게 나타난 것을 확인할 수 있었다. LOS 혼합 공시체의 경우 전단면이 SOS 혼합공시체의 경우에 비해 굴폐각 입자의 형태에 더 크게 영향을 받으며, 따라서 LOS에 비하여 SOS가 혼합 공시체 형성 시 모래 혼합공시체에 보다 유사한 형태의 공시체를 구성한다고 판단할 수 있다.

3.4 모래 혼합 공시체의 EB용액에 의한 강도 특성 변화

일반적인 건설재료에서 사용하는 모르타르 배합 재료인 시멘트, 물, 잔골재의 혼합 공시체에 유기오염물질인 EB이 혼합되는 경우 강도에 어떤 영향을 주는지 고

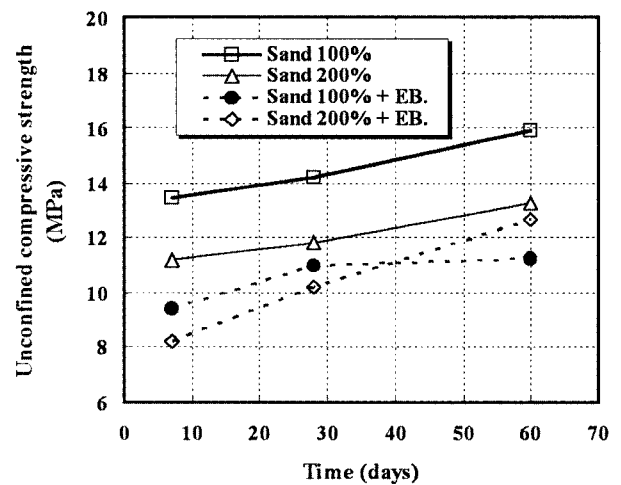


그림 4. EB 혼입에 따른 모래 공시체의 강도 변화

찰하였다. 실험 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림의 범례에서 “100%”의 의미는 물-시멘트비가 1인 시멘트풀에 시멘트 중량의 100% 모래의 혼합한 공시체를 의미(W-SD1)하고, “+ EB”는 순수 물 대신 EB용액으로 구성된 공시체(C-SD1)를 의미한다. 일축압축강도에 있어서 모래의 혼합비율이 100%인 공시체가 200%인 경우보다 강도 발현이 큰 것으로 나타났다. 이는 200% 모래 혼합이 적정 혼합비를 넘어서는 함유량으로 판단된다. 또한 EB용액으로 혼합된 경우 일반적인 물로 혼합된 공시체에 비하여 일축압축 강도가 작게 나타났다. 이는 EB용액이 시멘트 화합물의 수화 반응에 영향을 미쳐 모래혼합공시체의 강도 저하가 발생했음을 나타내는 것이다. 그러나 모래 200%의 경우 순수물과 EB용액으로 각각 혼합된 공시체에 대한 강도 변화를 살펴보면 양생 일수가 증가함에 따라 일축압축강도의 차가 점차 작아지는 것으로 평가되었다. 이는 모래 혼합공시체의 양생 기간이 짧은 초기 강도일수록 EB용액에 의한 수화반응의 저해가 상대적으로 큰 것으로 평가되며 양생기간이 길어짐에 따라 EB용액에 의한 강도 발현 간섭 효과가 감소되는 것으로 사료된다.

3.5 굴패각 혼합 공시체의 강도 변화 특성

공시체에서 모래 대신 굴패각 입자를 골재로 사용한 혼합공시체의 재령에 따른 일축압축강도를 그림 5와 6에 나타내었다. 시멘트 중량을 기준으로 굴패각 100%를 혼합한 경우 일축압축강도가 양생 7일 경우에 굴패각 SOS가 혼합된 공시체(W-SO1)의 강도는 약 2.3MPa, 굴패각 LOM을 혼합한 공시체(W-LO1)는 약 5.6MPa 정

도로 모래 혼합 공시체에 비하여 작게 나타났다. 여기서, 모래와 유사한 입경의 SOS 굴패각 입자의 경우 LOS에 비하여 모래의 혼합공시체의 강도와 비슷한 강도가 발현하는 것으로 나타났다. 이는 모래와 유사한 입도분포의 굴패각은 모래와 같은 골재 역할을 기대할 수 있는 것으로 평가할 수 있다.

물과 EB용액으로 형성된 모래 혼합공시체의 경우 일축압축강도에 있어 차이를 나타내었으나, 굴패각이 혼합된 경우에는 물과 EB용액으로 각각 형성된 공시체 사이에 일축압축강도의 차이가 상대적으로 크지 않음을 확인하였다. 특히, LOS 100%과 SOS 100% 공시체 경우에는 오염 유무에 따라 강도의 차가 미세함을 알 수 있다. 이는 모래 대신 굴패각 입자를 골재로 사용하는 경우 유기오염물에 의한 강도 저하가 상대적으로 작다는 것으로 판단할 수 있다.

그림 7과 8은 모래 혼합공시체 일축압축강도로 굴패각 혼합공시체의 일축압축강도를 정규화 한 값을 나타낸 것이다. 여기서 정규화 값 1의 의미는 모래 혼합공시체의 강도와 굴패각 혼합공시체 강도가 동일하다는 것을 의미하며, 1보다 크다는 것은 모래 혼합공시체 강도보다 굴패각 혼합공시체의 강도가 더 크다는 것을 의미한다. 정규화 값에서 LOS 혼합공시체의 경우에는 모래 혼합공시체의 강도에 비해 오염 여부와 관계없이 강도비가 1보다 작았다. 특히, 강도의 차는 오염되지 않은 경우가 오염된 모래 혼합공시체와 오염된 LOS 혼합공시체의 강도비에 비하여 더 크게 나타났다. 그러나 SOS 100% 혼합공시체의 경우 오염된 시료의 강도비는 양생 기간에 관계없이 1보다 큰 결과를 나타내었다. 이는 굴패각 작은입자를 모래 대응으로 사용한 경우 EB용액에

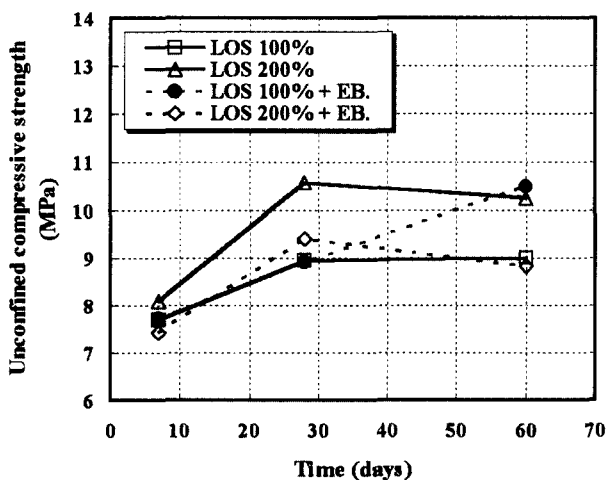


그림 5. EB 혼입에 따른 LOS 공시체 강도 변화

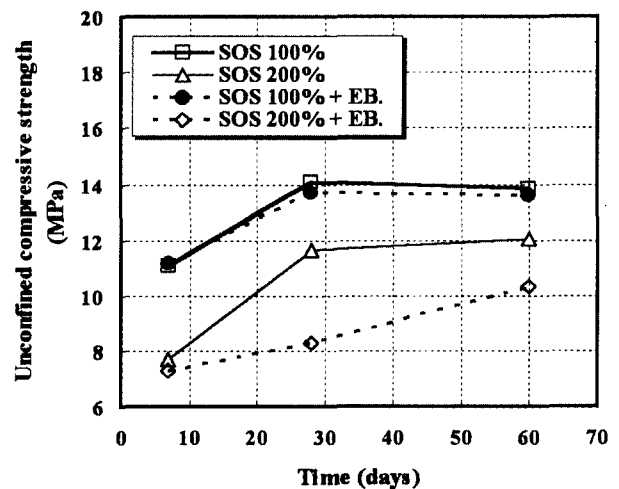


그림 6. EB 혼입에 따른 SOS 공시체 강도 변화

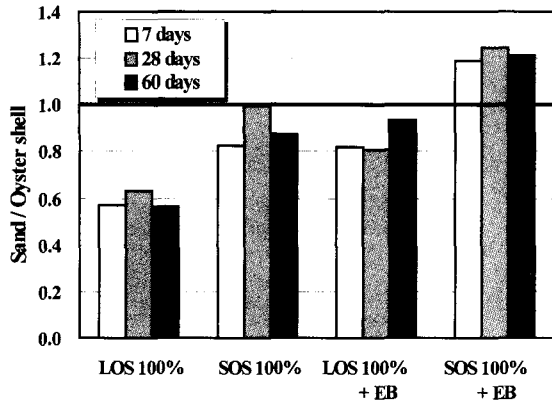


그림 7. 정규화된 일축압축강도(혼합비 100%)

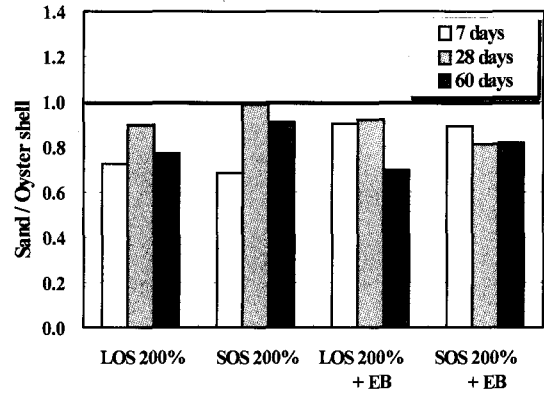


그림 8. 정규화된 일축압축강도(혼합비 200%)

의한 강도 저하가 상대적으로 작은 것으로 판단할 수 있다. 혼합공시체 내에서 골재로 사용된 모래의 경우 EB과 같은 소수성 유기 화합물이 모래에 흡착되기보다는 상대적으로 간극수에 많이 남아 공시체의 경화 반응을 간섭하는데 비해 골재각 작은 입자의 경우 골재각 입자 내에 존재하는 미세 틈새로 EB의 흡착이 일어나 간극수 내의 EB의 농도를 감소시키고 이로 인해 간섭효과가 줄어들기 때문인 것으로 판단된다.

3.6 모래 혼합공시체의 플라이애쉬의 첨가에 따른 강도 변화 특성

플라이애쉬를 혼합공시체에 첨가하여 일축압축강도에 미치는 영향을 고찰하였다. 전술한 바와 같이, 플라이애쉬의 첨가비는 혼합공시체의 시멘트 중량비의 5%, 10%, 15%를 첨가하였다. 양생일수와 플라이애쉬의 혼합비율에 따라서 100% 모래 혼합공시체(W-SD1)의 일축압축강도는 그림 9, EB용액을 혼합한 100% 모래 혼

합공시체(C-SD1)의 강도는 그림 10, 200% 모래 혼합공시체(W-SD2)의 강도는 그림 11, 그리고 EB용액에 모래 200%를 첨가한 혼합공시체(C-SD2)의 경우를 그림 12에 각각 정리하였다. 오염되지 않은 경우, 초기 강도는 플라이애쉬가 첨가되지 않은 혼합공시체의 강도가 크게 나타났다. 그러나 W-SD2 공시체의 경우에는 15%의 플라이애쉬가 첨가된 공시체의 강도가 양생기간 전반에 걸쳐 첨가되지 않은 경우에 비하여 다소 큰 강도를 나타내었다. 반면 콘크리트의 경화반응에 충분한 시간을 갖는 경우, 플라이애쉬를 첨가한 공시체의 강도가 크게 나타났다. 이는 W-SD2의 경우 발생하는 강도 저하를 플라이애쉬가 첨가됨으로써 포졸란 반응에 의하여 장기 강도저하를 보완할 수 있음을 나타내는 것이다. 특히 플라이애쉬를 첨가한 공시체의 경우 양생기간이 28일 이후에 현저한 강도 증가를 확인할 수 있다. 또한 W-SD1의 경우 플라이애쉬를 첨가함으로써 양생일수가 28일에서 60일 사이에서 상당한 강도 증진 효과가 있는

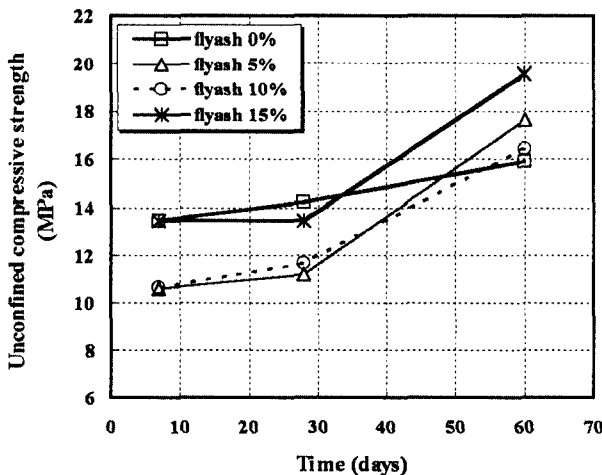


그림 9. 플라이애쉬 첨가에 따른 W-SD1의 일축압축강도

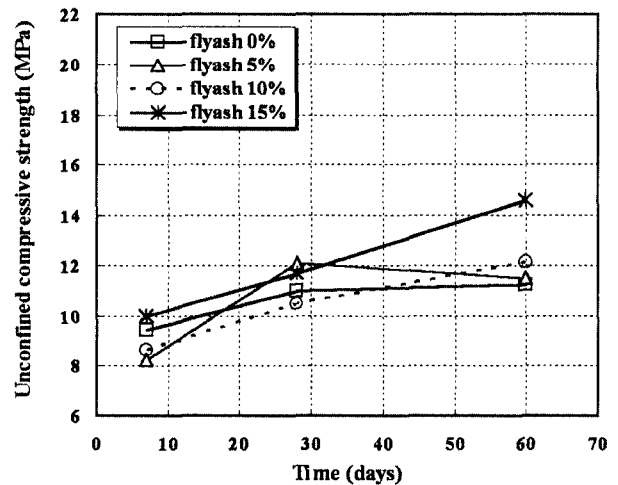


그림 10. 플라이애쉬 첨가에 따른 C-SD1의 일축압축강도

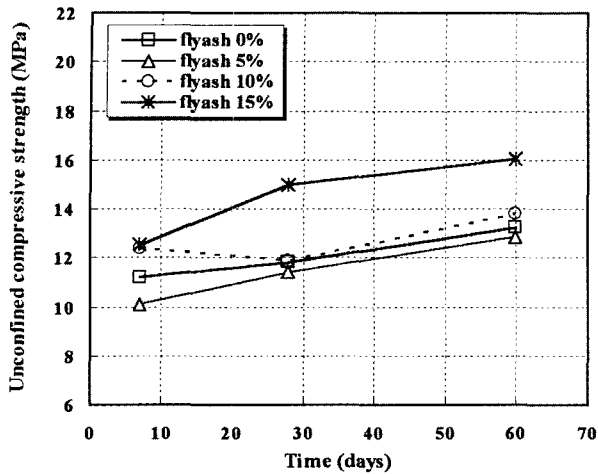


그림 11. 플라이애쉬 첨가에 따른 W-SD2의 일축압축강도

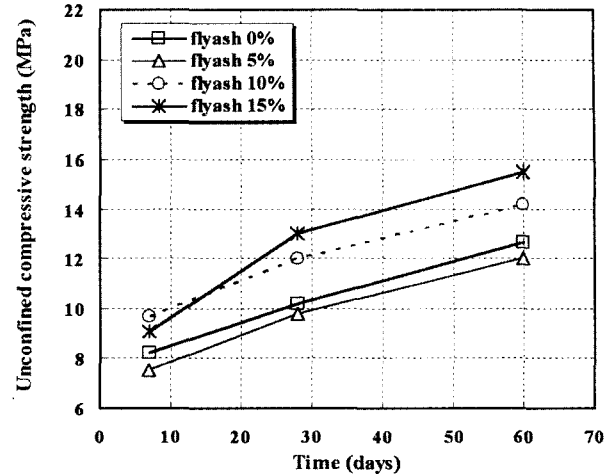


그림 12. 플라이애쉬 첨가에 따른 C-SD2의 일축압축강도

것으로 나타났다.

EB용액을 첨가하는 경우(그림 10, 12), 일축압축강도의 변화 특성을 살펴보면 플라이애쉬가 첨가되지 않은 모래만의 혼합공시체에서의 유기화합물에 의한 강도저하에 비해 플라이애쉬 첨가 혼합공시체에서의 강도 감소의 차이가 줄어드는 것으로 나타났다.

3.7 플라이애쉬가 첨가된 굴패각 혼합공시체 강도에 대한 유기화합물의 영향

굴패각 혼합 공시체에 플라이애쉬를 첨가함에 따른 일축압축강도의 변화와 EB의 용액으로 공시체를 성형했을 경우에 대한 강도 변화를 비교·고찰하였다. 이에 관한 실험의 결과를 그림 13~16에 나타내었다. 굴패각 큰입자 공시체(W-LO2)에 플라이애쉬 첨가에 따른 일축압축강도를 그림 13에, C-LO2 공시체의 일축압축강도

를 그림 14에 정리하였다. 오염 여부에 관계없이 플라이애쉬의 첨가에 따라 일축압축강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 15%의 플라이애쉬가 첨가된 경우 강도가 증가하는 것으로 보아 플라이애쉬량이 증가하면 강도도 같이 증가하는 경향을 확인할 수 있다. EB용액에 의한 영향을 살펴보면 초기강도(재령 7일) 및 설계기준강도(재령 28일)에서는 오염되지 않은 공시체와 큰 차이를 나타내지 않았다.

굴패각 작은입자 혼합공시체인 W-SO2와 C-SO2의 경우 플라이애쉬의 첨가에 따른 일축압축강도의 변화 양상을 그림 15와 16에 나타내었다. 이 경우 EB용액으로 혼합된 경우와 물로 혼합된 경우 모두 재령 60일의 강도에서는 플라이애쉬가 첨가된 공시체의 강도가 다소 크게 나타났다. 또한 오염 용액으로 성형한 혼합공시체의 경우 전반적으로 오염되지 않은 공시체에 비해 강도가 조금 작게 나타났다. 특히 오염 용액으로 성형한

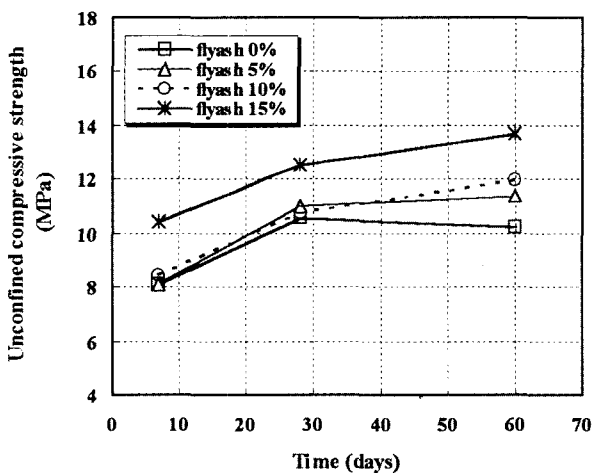


그림 13. 플라이애쉬 첨가에 따른 W-LO2의 일축압축강도

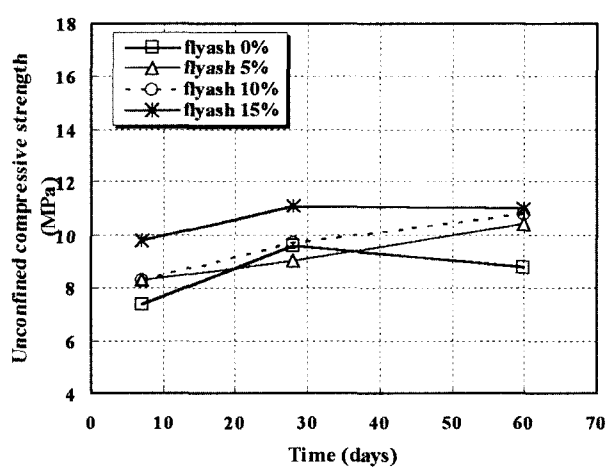


그림 14. 플라이애쉬 첨가에 따른 C-LO2의 일축압축강도

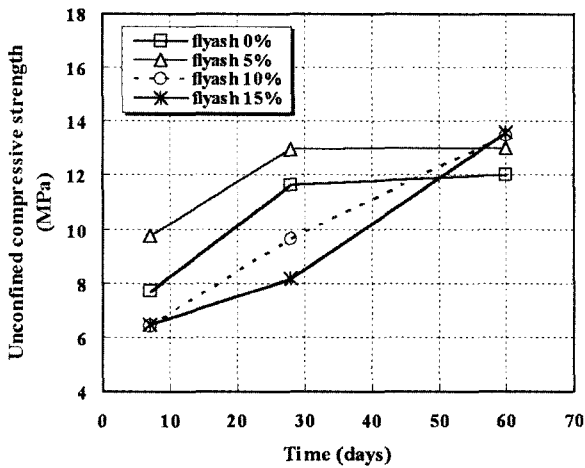


그림 15. 플라이애쉬 첨가에 따른 W-SO2의 일축압축강도

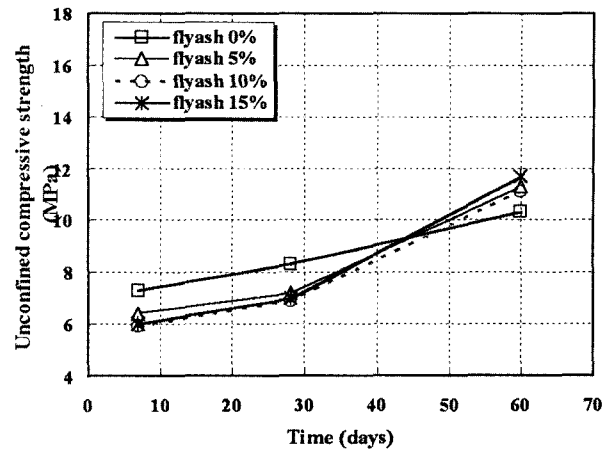


그림 16. 플라이애쉬 첨가에 따른 C-SO2의 일축압축강도

공시체의 경우 플라이애쉬가 첨가된 경우에 재령 7일에서 28일까지의 강도 증가보다 재령 28일에서 60일로의 강도의 증가가 더 크게 나타났다.

3.8 체적비에 따른 일축압축강도의 변화 특성

혼합공시체의 강도특성은 골패각의 혼합, 시멘트 페이스트의 자경성(自硬性), 골패각과 시멘트 페이스트(매트릭스 부분), 그리고 골패각과 골패각의 접촉 효과(Interface) 등에 의해 발생된다고 판단된다. 골패각 혼합체의 단면은 시멘트 페이스트(매트릭스 부분)와 혼합재(골패각)의 부분으로 구별할 수 있다(그림 17). 공시체에서 비반응성 물질인 골패각 입자의 부피를 제외하면 그림에서와 같이 다공성의 공시체로 이상화 할 수 있다. 이러한 형태를 이상화한 혼합공시체에서 같은 중량의 골패각 입자를 포함하더라도 입자의 입도 분포 즉, LOS

혼합공시체와 SOS 혼합공시체는 서로 다른 간극구조를 보인다. 그리고 이러한 간극구조는 재하 하중에 대하여 공시체의 저항특성에 영향을 미친다고 판단된다.

골패각의 혼합율이 증가하면 공시체내의 시멘트 페이스트의 체적이 감소하게 되고, 이로 인해 시멘트의 고형화에 의한 강도증가 효과가 감소하게 된다. 따라서, 어느 비율 이상의 골패각을 혼합하는 경우 혼합체 내에 형성된 골패각의 골격구조(또는 간극구조)가 공시체 강도 발현에 주된 역할을 할 것으로 사료된다.

이러한 효과를 정량적으로 평가하기 위하여 체적의 개념으로 강도에 대한 영향을 고찰하였다. 혼합공시체의 체적을 각 재료의 부피의 합으로 나타내면 식 (3)과 같다.

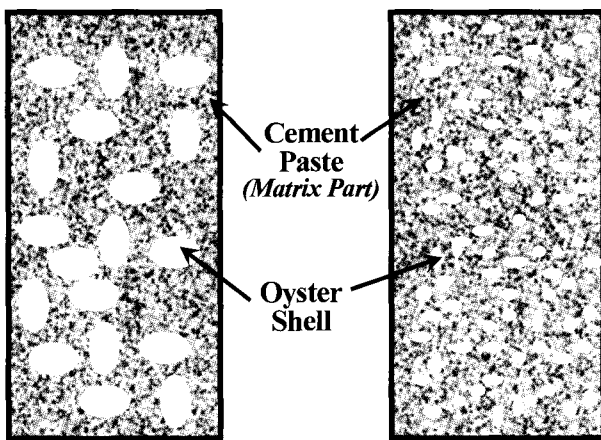
$$V_t = V_w + V_c + V_o + V_f \quad (3)$$

여기서,

- V_t = 혼합공시체 전체 체적
- V_w = 물(또는 EB용액)의 체적
- V_c = 시멘트의 체적
- V_o = 골패각의 체적
- V_f = 플라이애쉬의 체적

따라서, 매트릭스 부분을 중심으로 접근할 경우, 골패각이 점유하는 체적을 간극이라고 볼 수 있다.

식 (3)을 이용하여 플라이애쉬가 첨가된 혼합공시체에서 플라이애쉬 체적 변화에 대하여 강도 변화를 재령별로 그림 18~21에 나타내었다. 골패각이 100% 첨가된 경우 그 양의 변화는 거의 없으므로 가로축을 $V_f/(V_c+V_w)$ 즉, 시멘트 페이스트에 대한 플라이애쉬 체



(a) 큰입자 혼합구조 (b) 작은입자 혼합구조

그림 17. 골패각 혼합 공시체의 단순화한 단면구조

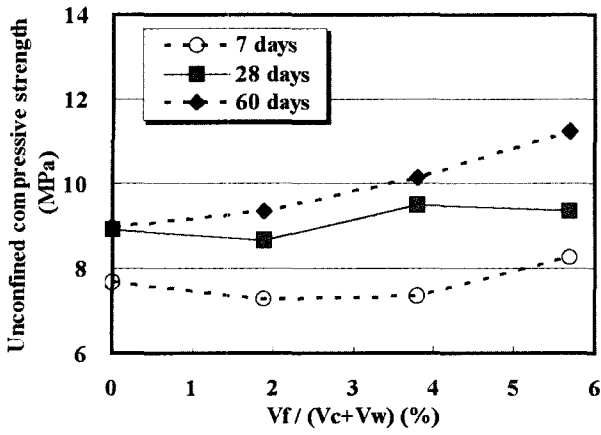


그림 18. W-LO1 혼합공시체

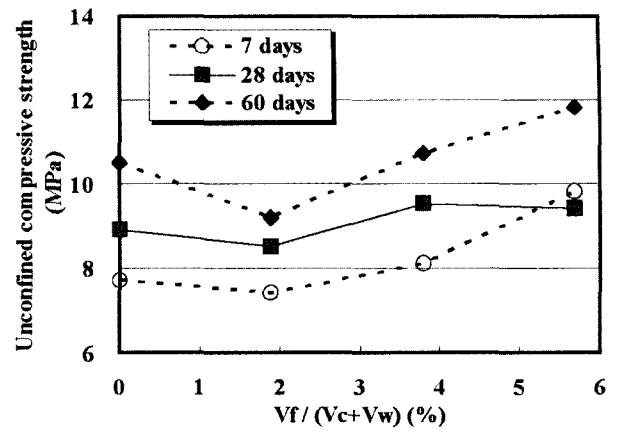


그림 19. C-LO1 혼합공시체

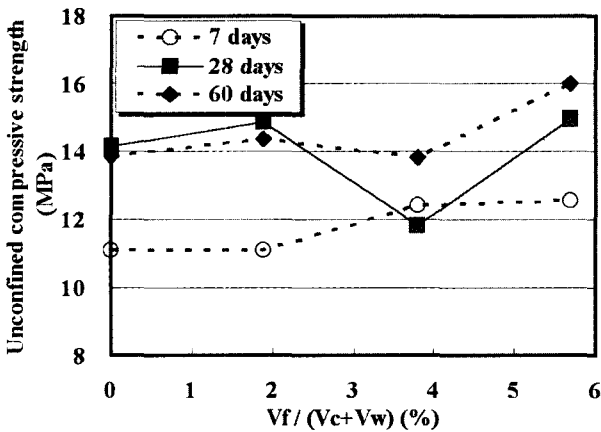


그림 20. W-SO1 혼합공시체

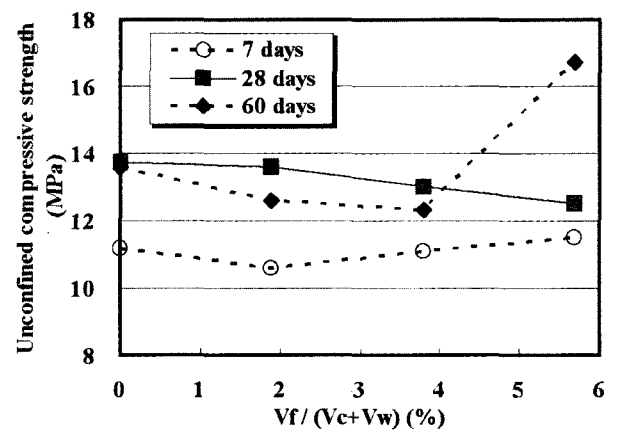


그림 21. C-SO1 혼합공시체

적의 변화로 표시하고 강도의 변화를 살펴보았다. LOS 혼합공시체에 플라이애쉬가 첨가되는 경우 플라이애쉬에 의한 강도 발현이 재령에 따라 전체적으로 균일하게 나타나고 있다. 그러나 SOS 혼합공시체의 경우 플라이애쉬의 첨가에 의한 강도 발현이 재령에 따라 일정하게 나타나고 있지 않음을 알 수 있다. 즉, 플라이애쉬 첨가량이 10% 미만인 경우 재령 28일 강도가 60일 강도에 비해 다소 크게 나타나는 부분도 있다. 이러한 경향은 EB용액이 첨가된 경우에도 유사하게 나타나고 있으며, 이는 혼합공시체 내 입자 형태에 있어 LOS 혼합공시체에서는 플라이애쉬가 재령에 따라 강도의 증진에 일정한 역할을 하는 반면, SOS 혼합공시체의 경우, 플라이애쉬의 역할이 상대적으로 줄어든다고 판단된다.

플라이애쉬 체적비의 변화에 따라 물과 EB용액으로 혼합된 굴폐각 공시체의 강도변화에서 선형화 관계식을 유도하였다. 이 관계를 그림 22에 나타내었다. 그림에서 k는 선형관계식의 직선의 기울기를 나타낸다. 혼합공시체에 첨가된 플라이애쉬의 시멘트 페이스트에 대한 체적비가

증가함에 따른 강도의 증가에 있어 물로 혼합된 공시체에 있어서는 직선의 기울기는 LOS 공시체(W-LO1)의 경우 k=0.28, SOS 공시체(W-SO1)의 경우 k=0.31로 나타났다. 반면 EB용액으로 혼합된 경우 LOS 공시체(C-LO1) 경우에는 k=0.40, SOS 공시체(C-SO1) 경우에는 기울기 k=0.48이었다. 즉, EB용액 혼합공시체의 경우 플라이애쉬 체적비 증가에 의한 강도 증진 효과가 큰 것으로 판단된다.

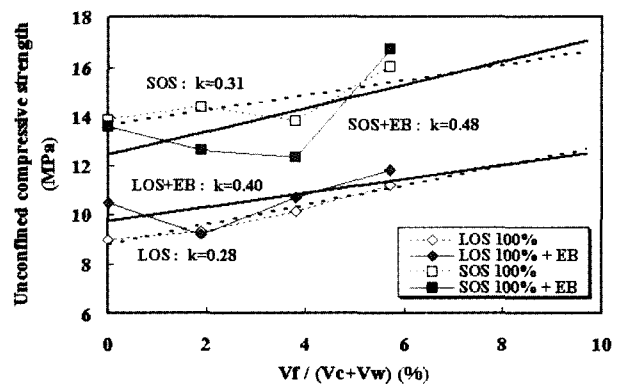


그림 22. 플라이애쉬 체적비에 따른 재령 60일 공시체 일축압축강도

이러한 선형관계식으로부터 EB와 같은 유기화합물이 혼합되는 경우 플라이애쉬 첨가에 의해 유기화합물에 의한 강도 저하를 감소할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

굴패각 혼합공시체 및 플라이애쉬 첨가에 따른 일축 압축강도변화, 그리고 유기화합물인 에틸벤젠(EB)용액이 공시체 강도에 어떤 영향을 주는지를 평가하기 위하여 재료의 기본물성실험과 혼합공시체에 대한 일축압축 실험을 실시하였다. 그리고 강도 변화 특성을 일반적인 모래 혼합공시체의 일축압축강도와 비교 고찰하였다. 이상의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 파쇄된 굴패각 입자의 형태는 박편의 타원 형태로 구성되며, 입자의 크기에 따라 형태에 있어 다소 차이를 나타내었다.
- (2) 유기화합물인 에틸벤젠과의 흡착 특성으로 본 연구에서 사용한 플라이애쉬의 에틸벤젠에 대한 선형분배계수 K_d 값은 15.1, 굴패각의 K_d 값은 0.69, 그리고 주문진 표준사의 K_d 값은 0.22였다.
- (3) 혼합공시체의 파괴 균열 전이 형상으로 모래혼합공시체는 기둥모양의 할렬파괴, 굴패각 큰입자 혼합공시체의 경우에는 굴패각 입자의 둘레를 따라 발생한 균열에 의한 공시체 중앙부의 파괴, 그리고 굴패각 작은입자 혼합공시체의 경우에는 단일 균열에 의해 공시체가 파괴되었다.
- (4) 모래 혼합공시체에 있어 에틸벤젠용액에 의한 일축 압축강도 저하는 시멘트 중량비 대비 100% 모래 혼합비율이 200% 혼합공시체에 비해 다소 큰 차이를 나타냈으며, 재령 초기인 7일에서 강도 저하가 장기 시보다 차이가 컸다.
- (5) 굴패각 작은입자 혼합공시체의 경우 모래 혼합공시체와 유사하게 혼합비 100%인 경우가 200%인 경우보다 일축압축강도가 크게 발현되었다. 반면 굴패각 큰입자인 경우 혼합비가 커짐에 따라 강도도 증가하였다. 에틸벤젠용액에 의한 강도 저하는 굴패각 큰입자와 작은입자 경우 모두 100% 혼합 시 강도저하가 적었으며, 200% 혼합공시체의 경우 에틸벤젠용액에 의한 강도 저하 현상이 보다 크게 나타났다.
- (6) 모래 혼합공시체에 시멘트 중량비의 5%, 10%, 15%의 플라이애쉬를 첨가한 혼합공시체에 대한 일축압축강도

의 변화에서 재령 초기인 7일 일축압축강도는 플라이애쉬가 첨가되지 않은 혼합공시체의 강도가 크게 나타났다. 에틸벤젠용액이 첨가되는 경우 플라이애쉬의 첨가량에 의한 일축압축강도의 변화 특성은 순수 모래만의 혼합공시체에서의 유기화합물에 의한 강도저하에 비해 강도 감소의 차이가 줄어드는 것으로 나타났다.

- (7) 굴패각 혼합공시체에 대하여 플라이애쉬의 첨가에 따른 강도 변화에 있어 재령 28일 이후 강도 증가가 발현되는 것으로 나타났으며 에틸벤젠용액을 혼합한 경우 굴패각 큰입자에 비해 굴패각 작은입자 혼합공시체에서 플라이애쉬의 의한 재령 60일의 강도 증가가 뚜렷이 나타났다.
- (8) 굴패각 혼합공시체에 첨가된 플라이애쉬의 시멘트 페이스트에 대한 체적비가 증가함에 따른 일축압축 강도의 변화에서 선형화 관계를 유도할 수 있었다. 선형 관계식에서 모래 혼합된 공시체에 비해 에틸벤젠용액으로 혼합된 공시체에 있어 선형관계식의 기울기 값이 상대적으로 컸으며, 이러한 관계에서 에틸벤젠과 같은 유기화합물이 혼합되는 경우 플라이애쉬 첨가에 의해 유기화합물에 의한 강도 저하를 감소할 수 있을 것으로 판단된다.

기 호

- EB : 에틸벤젠 (Ethylbenzene)
 LOS : 굴패각 큰입자(Large Oyster Shell)
 SOS : 굴패각 작은입자(Small Oyster Shell)
 C_s : 매질의 건조단위중량당 흡착된 용질의 질량
 (amounts of the solute sorbed in the solid material)
 C_o : 공시험에서 용액의 농도(concentration of the solution in the blank test)
 C_e : 평형상태에서의 용액의 농도(concentration of the solution in equilibrium with solid material)
 V : 용액의 부피(volume of the solution)
 M : 매질의 질량(weight of the solid material)
 K_d : 선형 분배 계수(linear equilibrium partition coefficient)
 V_f : 혼합공시체 전체 체적
 V_w : 물(또는 EB용액)의 체적
 V_c : 시멘트의 체적
 V_o : 굴패각의 체적
 V_f : 플라이애쉬의 체적

참 고 문 헌

1. Alexander, K. M. and Ivanusec, I.(1982), "Long Term Effects of Cement SO₃ Content on the Properties of Normal and High-Strength Concrete, Part 1. The Effect on Strength." *Cement and Concrete Research*, Vol.12, No.1, pp.51-60.
2. Arai, Yasuo(1998), 시멘트 재료역학, 전남대학교 출판부, pp.265-266.
3. Bedient, P. B., Rifai, H. S. and Newell, C. J.(1994), *Ground Water Contamination*, Prentice-Hall, New Jersey.
4. Biczok, I.(1964), *Concrete Corrosion and Concrete Protection*. Publishing House of the Hungarian Academy of Sciences, Budapest.
5. Dobrowolski, J. A.(1998), *Concrete Construction Handbook*, 4th ed. McGraw-Hill Handbooks, New York.
6. Lea, F. M.(1970), *The Chemistry of Cement and Concrete*, 3rd ed. Edward Arnold(Publishers) Limited, London.
7. Murdock, L. J. and Blackledge, G. F.(1968), *Concrete Materials and Practice*, 4th Edition. Edward Arnold Publishers Limited, London.
8. Neville, A. M.(1997), *Properties of Concrete*, 4th and Final Edition, John Willy & Sons, Inc.
9. Paul, V.(1994), *Performance of Building Materials in Contaminated Land*. Building Research Establishment, BRE Report BR255, HMSO, London.
10. Schwarzenbach, R. P., Gschwend, P. M. and Imboden, D. M.(1993), *Environmental Organic Chemistry*. John Wiley & Sons, Inc. NY.
11. Smith, M. A.(1985), "The effect of phenol upon concrete." *Magazine of Concrete Research*, Vol.37, No.133, pp.234-237.
12. Wilson, S. A., Langdon, N. J. and Walden, P. J.(2001), "The effects of hydrocarbon contamination on concrete strength." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering*, Vol.149, No.3, pp.189-193.
13. 남영우, 김내영, 김한상(2000) "비산재의 시멘트 첨가제로서 재활용에 관한 연구", *한국폐기물학회지*, Vol.17, No.8, pp.907-913.
14. 박홍재, 이봉현(2001) "폐 재칩과 골폐각의 재활용에 관한 기초 연구", *한국폐기물학회지*, Vol.18, No.4, pp.319-325.
15. 오병환, 정범석(1991) "플라이애쉬 및 플라이애쉬 콘크리트의 제반 특성 및 이용", *한국콘크리트학회지*, Vol.3, No.3, pp.5-22.
16. 윤현석, 박준범, 이기호, 홍승철(2002) "산업부산물에 대한 BTE (Benzene, Toluene, Etyl-benzene)의 흡착 특성", *한국폐기물학회지*, Vol.19, No.3, pp.356-364.
17. 장암, 김원태, 김인수(1998) "Fly ash를 이용한 폐광산 광미의 중금속 고정화", *한국폐기물학회지*, Vol.15, No.3, pp.169-177.
18. 조희찬, 오달영(2001) "석탄회의 중금속 흡착 특성 연구", *자원리사이클링학회지*, Vol.10, No.4, pp.10-17.

(접수일자 2002. 9. 4, 심사완료일 2002. 12. 8)