

폐기물을 이용한 투수블록의 투수성 및 동결융해저항 특성

신대용[†] · 한상목* · 김경남** · 이현종

강원대학교 석재복합연구소

*강원대학교 신소재공학과

**삼척대학교 신소재공학과

(2003년 12월 3일 접수; 2004년 1월 17일 승인)

The Properties of Permeability and Freeze-Thaw Resistance of Water-Permeable Paving Brick Using Wastes

Dae Yong Shin,[†] Sang Mok Han,* Kyeong Nam Kim,** and Hyun Jong Lee

Research Center for Advanced Mineral Aggregate Composite Products, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

*Department of Advanced Materials Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

**Department of Advanced Materials Engineering, Samcheok National University, Samcheok 245-711, Korea

(Received December 3, 2003; Accepted January 17, 2004)

초 록

하수슬러지 소각재, 폐도자기 파편, 폐유약 및 저급점토를 이용하여 1,000°C에서 2시간 소성하여 투수블록용 다공질 세라믹스를 제조하여 제조인자에 따른 물리·역학적 특성, 투수특성 및 동결융해특성을 조사하였다. 폐도자기 파편의 크기가 동일한 시편은 소성온도와 소각재의 첨가량이 증가함에 따라 부피비중과 압축강도는 증가하였으나, 기공률과 투수성은 감소하였다. 소성온도와 소각재의 첨가량이 동일한 시편은 폐도자기 파편의 크기가 증가하면 부피비중과 압축강도는 감소하고 기공률과 투수성은 증가하였다. 폐도자기 파편의 크기가 1~2 mm이고 1,000°C에서 2시간 소성한 30A60F 시편은 부피비중 2.17, 기공률 46.2%, 압축강도 221 kgf/cm² 및 통과전하량이 3,150 coulombs이었으며, 동결융해 저항성이 우수하여 투수블록으로 사용이 가능하였다. 투수블록 시편에 함유된 중금속은 허용기준치보다 낮아 무해하였다.

ABSTRACT

Porous ceramics for water-permeable paving brick was prepared by the sintering of mixed materials comprising of sewage sludge ash, waste porcelain fragment, waste glaze and low-grade clay at 1,000°C for 2 h, and the physical·mechanical properties, the permeability and the freeze-thaw resistance of specimens with preparation parameters were investigated. The physical mechanical properties were increased in specimens while porosity and permeability were decreased with increasing sewage sludge ash content and sintering temperature at the same waste porcelain fragment size. On the contrary, the effect of waste porcelain fragment size at the same sewage sludge ash content and sintering temperature on the properties of specimens showed the opposite results. The bulk density, porosity, compressive strength and permeability (passed charge) of 30A60F specimens with 30 wt% of sewage sludge ash content, waste porcelain fragment size with 1~2 mm and sintered at 1,000°C for 2 h were 2.17, 46.2%, 221 kgf/cm² and 3,150 coulombs, respectively. The permeability was increased with increasing waste porcelain fragment size, however compressive strength was decreased. The freeze-thaw resistance of 30A60F specimen with 1~2 mm of fragment size was superior to that of the other specimens. The 30A60F specimens can be used for the water-permeable paving brick with the high permeability and adequate strength. The heavy metals included in the all specimens showed lower than the standard level.

Key words : Water-permeable paving brick, Sewage sludge ash, Waste porcelain fragment, Physical·mechanical property, Permeability, Freeze-thaw resistance

1. 서 론

산업과 문명의 발달에 따른 자원부족과 폐기물에 의한 환경오염이 사회적 문제가 되어 폐기물의 안정화 처리를

위한 소각, 고형화 및 재활용기술이 요구되고 있다.^{1,2)} 생활폐기물인 하수슬러지는 육상매립 및 해양투기에 의하여 처리되고 있으나, 매립지 확보의 어려움과 각종 환경 규제 등으로 점차 처리가 곤란하여 최근에는 하수슬러지를 소각하여 열에너지를 회수한 후, 소각재를 이용하여 건축·건설자재를 제조하는 연구가 시도되고 있다.³⁻⁶⁾ 국내에서도 앞으로 하수슬러지의 소각처리가 적용될 예정으로 소각재의 처리 및 재활용에 관한 체계적인 연구가

[†]Corresponding author : Dae Yong Shin

E-mail : shinmater@hanmail.net

Tel : +82-33-250-6261 Fax : +82-33-250-6260

필요하나, 토양개량재나 인공경량골재로의 활용 외에는 건축·건설자재의 연구는 미진한 실정이다.

시멘트와 점토를 이용한 보도블록은 제조공정이 간단하고 저렴하며 대량소비가 가능해 오래 전부터 도로 및 토목·건축시공에 널리 이용되고 있으나, 우천시 빗물의 흡수나 투수가 곤란하여 토양의 사막화가 가속되고 이로 인한 도시의 온난화에 의해 도시지역의 평균기온이 높아지는 heat-island 현상으로 시멘트 및 점토벽돌의 사용량은 점차 감소하고 있다.⁶⁾ 또한, 최근의 UN 발표자료에 의하면 우리 나라는 연강수량은 높지만 연중 강수량이 일정치 않고 강수량이 우기에 집중되어 수자원의 저장에 미흡하여 2005년부터 물부족 국가로 분류되고 있다.¹⁾ 이러한 문제를 해결하기 위하여 일본에서는 하수슬러지 소각재와 각종 폐기물을 이용한 투수블록을 제조하여 실용화 단계에 도달하였으며, 국내에서도 자원부족 현상과 수자원 확보 차원에서 투수블록 제조에 관심을 갖게 되었다.

따라서, 본 연구에서는 하수슬러지 소각재와 폐도자기 파편 및 폐유약과 저급점토를 이용하여 투수블록을 제조하고 소각재 첨가량, 폐도자기 파편의 크기 및 소성온도에 따른 투수블록 시편의 물리·기계적, 투수성 및 동결융해 특성을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1. 시편제조

투수블록을 제조하기 위한 출발원료로 폐도자기 파편과 폐유약, 저급점토 및 C시 하수종말처리장에서 발생하는 하수슬러지를 900°C로 소각한 소각재를 이용하였다. 투수블록 시편의 하층부를 제조하기 위하여 Table 1과 같

Table 1. Composition of Starting Materials for Preparation of Water-Permeable Paving Bricks

Upper Part		Lower Part	
Raw materials	Contents (wt%)	Raw materials	Contents (wt%)
Waste porcelain fragment	70	Waste porcelain fragment	50~70
Waste glaze	20	Sewage sludge ash	20~40
Clay	10	Clay	10

Table 2. Chemical Compositions of Waste Porcelain Fragment, Waste Glaze, Sewage Sludge Ash, and Clay (wt%)

Component	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	L.O.I
Raw materials											
Waste porcelain fragment	73.00	19.62	2.05	0.40	0.48	0.12	0.03	2.71	0.98	0.41	0.20
Waste glaze	59.30	15.20	3.54	10.89	1.32	0.22	0.01	3.94	1.36	1.31	2.91
Clay	57.65	15.05	7.93	2.17	2.41	0.97	0.31	3.39	2.81	0.19	7.12
Sewage sludge ash	53.27	17.35	7.98	3.96	2.98	0.93	0.39	3.13	2.88	0.53	6.60

이 1 mm이하, 1~2 mm 및 2 mm 이상의 폐도자기 파편, 소각재와 점토에 20 vol% 물을 첨가한 혼합시료를 성형 몰드에 투입하였다. 투수블록 시편의 상층부는 1~2 mm의 폐도자기 파편, 폐유약과 점토에 물을 20 vol% 첨가한 혼합시료를 성형몰드의 하층부 시료 위에 투입하고 일축 유압프레스를 이용하여 50 kgf/cm²의 압력으로 시편을 성형하였다. 성형시편을 상온에서 72시간 건조한 후 5°C/min의 승온속도로 950~1,050°C에서 2시간 소성하여 투수블록 시편을 제조하였다.

2.2. 특성분석

출발원료의 화학성분 및 입도 분석은 XRF (Philips, PW 140, Holland) 및 입도분석기(Shimazu, SA-CP3, Japan)를 이용하였다. 시편의 부피비중과 기공률은 KS L 3,114, 압축강도는 KS L 4,201을 이용하여 측정하였으며, 미세구조는 SEM(JEOL, JSM-5,800, Japan)을 이용하여 관찰하였다. 시편의 투수성 측정은 ASTM C1,202-91과 AASHTO T259⁷⁾의 염소이온투과시험법을 이용하여 통과전하량을 측정하였다.⁷⁾ 동결융해저항성 평가를 위한 상대동탄성계수는 KS F 2,456의 급속동결융해에 의한 콘크리트의 저항시험방법의 B방법(공기 중에서 급속동결하여 수중에서 융해시키는 방법)에 의하여 측정하였다. 소각재 및 폐유약의 첨가에 따른 시편의 중금속용출은 환경처고시 폐기물공정시험법에 따라 ICP/MS (HP-4,500 series, U.S.A.)를 이용하여 중금속성분을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

출발원료의 화학조성을 Table 2에 표시하였다. 폐도자기 파편은 SiO₂, Al₂O₃ 및 소량의 알칼리산화물로 구성되어 있으며, 폐유약은 SiO₂, Al₂O₃, CaO 및 K₂O를 함유한 백자유로서 평균입경이 25.7 μm, 입도분포는 0.5~100 μm이었다. 점토와 소각재는 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO와 알칼리산화물로 구성되어 있으며, 평균입경 14.3 및 22.6 μm, 입도분포 0.5~50 및 0.5~150 μm이었다.

일반적으로 투수블록에 요구되는 특성은 ① 우수한 투수성과 보수성, ② 포장재로서 필요한 내하중성, ③ 미끄럼을 방지하고 보행이 용이한 표면 및 ④ 소각재 특유색상인 갈색을 은폐하기 위한 착색이 가능하여야 한다.⁶⁾

Table 3. Physical · Mechanical Properties of Upper and Lower Part Specimen with Composition and Sintering Temperature at 1 – 2 mm of Waste Porcelain Fragment Size

Specimens	Properties	Compositions	Bulk density	Porosity (%)	Compressive strength (kgf/cm ²)	Sintering temperature (°C)
Upper Part		20A70F	2.18	48.2	178	950
			2.25	45.6	214	1000
			2.33	39.7	246	1050
Lower Part	20A70F		1.93	63.5	149	950
			2.02	55.4	168	1000
			2.08	51.3	183	1050
	30A60F		2.03	57.4	156	950
			2.09	48.3	183	1000
			2.15	44.2	198	1050
	40A50F		2.06	53.2	161	950
			2.20	46.5	189	1000
			2.27	42.4	218	1050

A : Sewage sludge ash, F : Waste porcelain fragment

1~2 mm 폐도자기 파편을 이용한 투수블록 상층부와 하층부 시편의 조성 및 소성온도에 따른 물리·기계적 특성을 Table 3에 표시하였다. 상·하층부 시편 모두 소성온도가 증가함에 따라 부피비중과 압축강도는 증가하였으나 기공률은 감소하였으며, 하층부 시편은 소각재의 첨가량이 증가함에 따라 소성온도와 동등한 결과를 나타내었다. 결합재로서 20 wt%의 점토를 첨가하여 1,000°C로 소성한 상층부 시편 (20A70F)은 부피비중 2.25, 기공률 45.6% 및 압축강도가 214 kgf/cm²이었으나, 결합재로서 20 wt%의 소각재를 첨가한 하층부 시편 (20A70F)은 부피비중 2.02, 기공률 55.4% 및 압축강도가 168 kgf/cm²로서, 결합재로 소각재를 이용한 하층부 시편이 상층부 시편에 비해 기공률은 증가하였으나, 낮은 부피비중과 압축강도를 나타내었다. 따라서, 투수블록의 실용화를 위하여 내하중성, 마찰저항 및 압축강도의 향상을 위하여 투수블록 상층부에 결합재로서 점토를 이용하였으며, 투수성을 향상

시키기 위하여 투수블록 하층부에는 소각재를 이용하였다.

1,000°C에서 2시간 소성한 투수블록 시편의 상층부, 하층부 (30A60F) 및 30A60F 투수블록 시편의 외관을 Fig. 1에 나타내었다. 상층부에 백자유인 폐유약의 사용에 의해 소각재 특유색상인 갈색의 은폐가 가능하며, 다양한 색상의 유약이나 안료의 사용에 의해 투수블록의 색상조절이 가능하였다.

폐도자기 파편의 크기, 소각재 첨가량 및 소성온도에 따른 투수블록 시편의 물리·기계적 특성을 Table 4에 표시하였다. 폐도자기 파편의 크기가 동일한 시편은 소각재 첨가량과 소성온도가 증가함에 따라 부피비중과 압축강도는 증가하였으나, 기공률은 감소하였다. 이는 소성온도와 소각재의 첨가량이 증가하면 소각재의 CaO와 Na₂O 등의 알칼리성분과 SiO₂ 및 Al₂O₃이 반응하여 형성된 용액이 시편의 기공을 메워 기공의 크기와 분포가 감소하고 폐도자기 파편간의 결합력이 증가되었기 때문이다.^{8,9)}

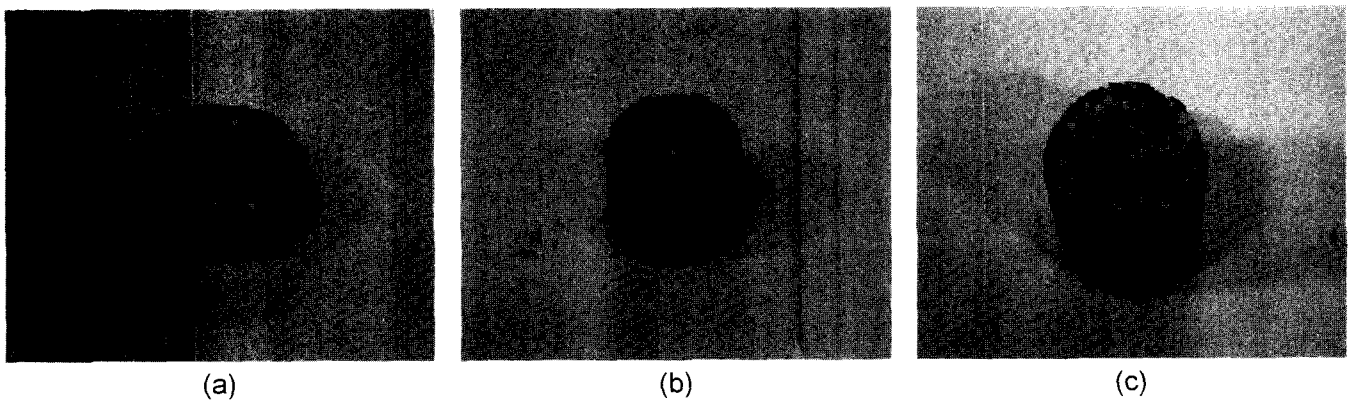


Fig. 1. Appearance of 30A60F specimen sintered at 1,000°C for 2 h : (a) upper part, (b) lower part, and (c) water-permeable paving brick specimen.

Table 4. Physical · Mechanical Properties of Water-Permeable Paving Bricks Specimens with Waste Porcelain Fragment Size, Composition, and Sintering Temperature

Specimens	Properties	Waste porcelain fragment size (mm)	Bulk density	Porosity (%)	Compressive strength (kgf/cm ²)	Sintering temperature (°C)
20A70F			2.08	51.8	151	950
			2.15	46.6	178	1000
			2.22	42.3	216	1050
30A60F		<1 mm	2.15	49.9	175	950
			2.23	41.6	218	1000
			2.29	38.4	245	1050
40A50F			2.19	40.8	189	950
			2.35	36.9	234	1000
			2.48	32.7	268	1050
20A70F			2.03	53.5	155	950
			2.14	48.6	191	1000
			2.19	45.6	212	1050
30A60F		1~2 mm	2.13	49.5	179	950
			2.17	46.2	221	1000
			2.28	39.6	238	1050
40A50F			2.14	44.5	182	950
			2.31	38.8	225	1000
			2.36	34.2	244	1050
20A70F			1.96	56.2	122	950
			2.01	53.8	148	1000
			2.05	48.2	163	1050
30A60F		>2 mm	1.99	52.9	134	950
			2.06	49.6	176	1000
			2.12	43.2	187	1050
40A50F			2.07	46.8	167	950
			2.13	42.3	183	1000
			2.15	35.6	198	1050

소각재 첨가량과 소성온도가 동일한 시편은 폐도자기 파편의 크기가 증가함에 따라 시편 내에 형성된 기공에 의해 부피비중과 압축강도는 감소하고 기공률은 증가하였다. KS L 4,201에 의하면 1종 점토벽돌은 압축강도가 210 kgf/cm² 이상으로 본 연구에서 제조한 폐도자기 파편의 크기가 1~2 mm, 1,000°C 에서 2시간 소성한 30A60F 투수블록 시편은 부피비중 2.17, 기공률 46.2% 및 압축강도가 221 kgf/cm²로서 기계적 강도와 투수성이 양호하여 투수블록으로 사용이 가능하였다.

투수블록의 실용화를 위하여는 압축강도 이외에 투수성이 중요하다. 폐도자기 파편의 크기, 소각재 첨가량 및 소성온도에 따른 시편의 투수특성을 Fig. 2에 나타내었다. 시편의 투수특성은 압축강도 및 부피비중이 증가함에 따라 감소하였으나, 기공률이 증가함에 따라 향상되었다. 1~2 mm의 폐도자기 파편을 이용하고 1,000°C에서 2시간 소성한 시편은 소각재의 첨가량이 증가함에 따라 통과전

하량이 3,250에서 2,350 coulombs으로 감소하여 동일온도에서는 소각재의 첨가량이 증가함에 따라 투수성은 감소하였다. 1 mm 이하 및 2 mm 이상의 폐도자기 파편을 이용한 시편도 동등한 결과를 나타내었다. 폐도자기 파편의 크기 및 소성온도에 따른 투수성은 1,000°C로 소성한 30A60F 시편의 경우, 폐도자기 파편의 크기가 증가함에 따라 통과전하량이 2,190에서 3,150 coulombs으로 증가하여 투수성이 향상되었으나, 소성온도가 950°C에서 1,050°C로 증가함에 따라 3,750에서 2,065 coulombs으로 투수성은 감소하였다. 따라서, 시편에 형성된 연속기공이 투수성 향상의 주요인으로 작용함을 알 수 있었다.¹⁰⁾ 그러나, 2 mm 이상의 폐도자기 파편을 이용 시편은 투수성이 우수하였으나, 압축강도가 낮아 투수블록으로의 적용은 불가능하였다.

투수블록은 일반 보도블록에 비해 투수성과 흡음성이 양호하나 동결융해가 심한 지역에서는 내구성이 감소하

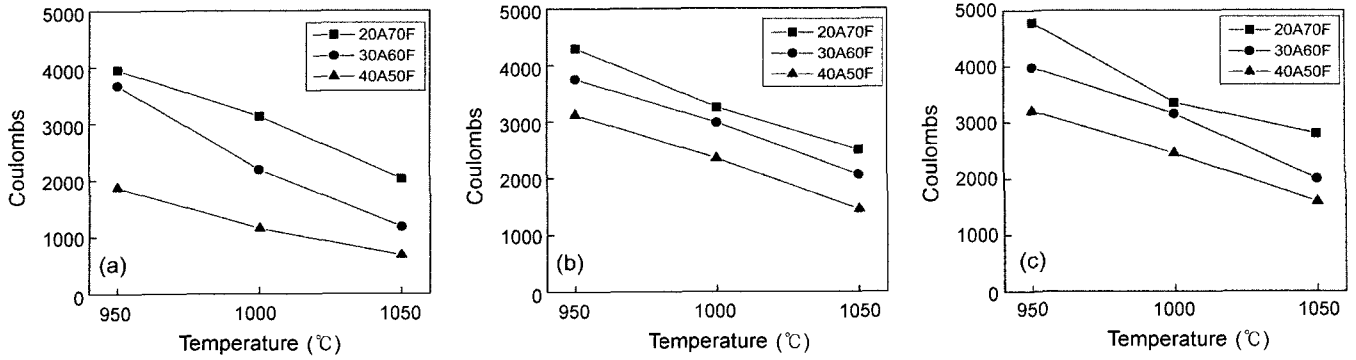


Fig. 2. Variation of charge passed of specimens with waste porcelain fragment sizes, compositions and sintering temperature : (a) <math>< 1\text{ mm}</math>, (b) $1 \sim 2\text{ mm}$, and (c) $> 2\text{ mm}$ of waste porcelain fragment size.

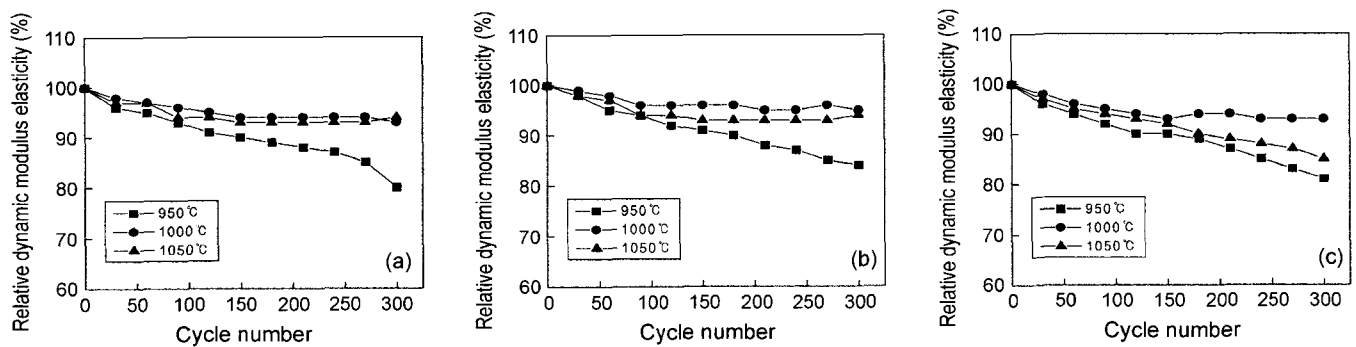


Fig. 3. Variation of relative dynamic modulus of elasticity of 30A60F specimens with waste porcelain fragment sizes and sintering temperature : (a) <math>< 1\text{ mm}</math>, (b) $1 \sim 2\text{ mm}$, and (c) $> 2\text{ mm}$ of waste porcelain fragment size.

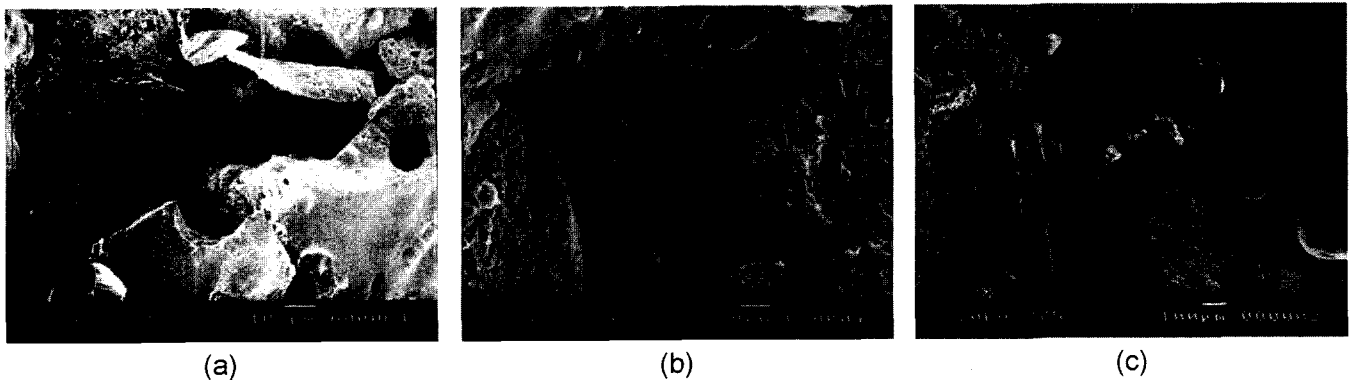


Fig. 4. SEM photographs of 30A60F specimens with sintering temperature at 1 ~ 2 mm of waste porcelain fragment size : (a) 950, (b) 1,000, and (c) 1,050°C for 2 h.

므로 동결융해 저항성이 요구된다. 30A60F 시편의 폐도자기 파편 크기와 소성온도에 따른 동결융해 cycle에 대한 상대동탄성계수를 Fig. 3에 나타내었다. 1~2 mm의 폐도자기 파편을 이용하여 1,000°C로 소성한 30A60F 시편은 동결융해 반복주기 300 cycle까지 상대동탄성계수가 90% 이상 유지되어 우수한 동결융해 저항성을 나타내었다. 이는 소각재와 점토에 의해 골격구조를 이루는 폐도자기 파편의 결합력이 증가하고 자유수의 동결로 인한 체

적증가에 따른 압력발생을 기공이 완하시켜 자유수의 이동이 용이하여 동결융해 저항성이 증가되었기 때문이다.¹¹⁾

1~2 mm의 폐도자기 파편을 이용한 30A60F 투수블록 시편의 소성온도에 따른 미세조직을 Fig. 3에 나타내었다.

1,000°C에서 2시간 소성한 투수블록 시편의 소각재 첨가량에 따른 중금속용출 결과를 Table 5에 표시하였다. 소각재 첨가량이 증가함에 따라 시편의 중금속 용출량이 증가하였으나, 청정지역 침출수 허용기준치⁵⁾보다 낮은 값으

Table 5. Leached amount of Heavy Metals from Water-Permeable Paving Bricks Specimens Sintered at 1,000°C for 2 h with Sewage Sludge Ash Contents (ppb)

Element	Specimens	Ash	40A50F	30A60F	20A70F	Standard of extraction
Cr		0.38	0.58	0.27	0.30	500
Mn		10.18	16.86	5.78	3.67	2,000
Fe		73.81	231.04	36.55	33.57	2,000
Cu		5.65	1.75	1.51	0.90	500
Zn		5.48	8.62	3.74	0.60	1,000
As		21.22	21.83	13.71	10.16	100
Cd		0.02	-	0.01	-	20
Pb		0.64	0.93	0.12	0.03	200
Mg		500.68	91.17	110.63	398.86	-
Ni		0.55	0.22	0.25	0.05	-

로서 하수슬러지 소각재를 이용한 세라믹스 투수블록은 주위 환경에 해가 없음을 알 수 있다.

4. 결 론

폐도자기 파편과 하수슬러지 소각재, 집토 및 폐유약을 이용하여 투수블록을 제조하였다. 소성온도와 소각재의 첨가량이 증가함에 따라 시편 중의 알칼리성분과 SiO₂와 Al₂O₃의 반응에 의해 생성된 용액에 의해 부피비중과 압축강도는 증가하였으나, 기공률과 투수성은 감소하였다. 폐도자기 파편의 크기가 증가하면 투수블록 시편에 형성된 연속기공에 의해 부피비중과 압축강도는 감소하고 기공률과 투수성은 증가하였다. 폐도자기 파편의 크기가 1~2 mm이고 1,000°C에서 2시간 소성한 30A60F 투수블록 시편은 부피비중 2.17, 기공률 46.2%, 압축강도 221 kgf/cm² 및 통과전하량이 3,150 coulombs으로 우수한 압축강도와 투수특성을 나타내어 투수블록으로 사용이 가능하였으며, 동결융해 반복주기 300 cycle까지 상대동탄성계수가 90% 이상 유지되어 우수한 동결융해 저항성을 나타내었다. 하수슬러지 소각재의 첨가량이 증가함에 따라 투수블록 시편의 중금속용출은 증가하였으나, 매립지 허용기준치보다 낮아 주위 환경에 무해하였다.

REFERENCES

1. K. S. Kim, "A Plan of Reduction and Recycling of Sewage Sludge," *J. Environ. Hi-Tech.*, **7** 10-7 (1998).

2. S. M. Han and D. Y. Shin, "Disposal Techniques of Sewage Sludge(in Kor)," pp. 64-8 in Kangwon Regional Environ. Tech. Development Center Report, Kangwon National University, Chuncheon, 2001.

3. N. Takeuchi, H. Takahashi, and M. Wakamatsu, "Effect of Firing Atmosphere on Extraordinary Expansion of Sintered Brick from Incinerated Ash of Sewage Sludge," *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **107** [6] 551-54 (1999).

4. I. M. Park and J. S. Oh, "Lightweight Aggregate Made from Dewatered Sludge of Sewage Treatment Plant," *J. Kor. Solid Waste Eng. Soc.*, **17** [1] 102-10 (2000).

5. D. Y. Shin and S. M. Han, "Preparation of Porous Ceramics Sound Absorbent Materials Using Sewage Sludge Slag," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **40** [3] 273-78 (2003).

6. M. Iwase and Y. Kurokawa, "Water-Permeable Paving Brick by Utilizing Sewage Sludge Ash(in Jpn.)," *Ceram. of Jpn.*, **33** [7] 521-23 (1998).

7. AASHTO T 259, "Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration," p. 1-5, CRT, U.S.A (2,000).

8. S. M. Han, D. Y. Shin, and S. K. Kang, "Preparation for Porous Ceramics Using Low Grade Clay," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **35** [6] 575-82 (1998).

9. D. Y. Shin, S. M. Han, and S. G. Choi, "Synthesis of Ceramic Support for Immobilization of Microorganisms Using Fly Ash," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **39** [9] 857-62 (2002).

10. K. M. Parker and D. M. Roy, "Porosity, Permeability and Microstructure of Potrland-Blast Furnace Slag Cement Pastes," *J. Am. Ceram. Soc. Bull.*, **61** [3] 345-52 (1982).

11. Daniel, "Comparative Study of Latex-Modified Concretes and Normal Concretes Subjected to Freezing and Thawing in the Presence of a Direct Salt Solution," *ACI. Mater. J.*, **89** [6] 547-53 (1992).