

# Vitrified Glass 콘크리트의 특성

## Utilization of Vitrified Glass as an Aggregate Source in Concrete

민            정            기  
Min,        Jeong        Ki

### Abstract

Over 4.1 billion metric tons of non-hazardous solid wastes are generated in the United States annually. Therefore, there is a need to reuse or reprocess as many products or by-products as possible.

In this report, the aggregates produced from Naval Shipyard and Charleston area dredge spoils are designated as GP 21-23 and GP 4-5, respectively.

The major objective of this study is to determine the feasibility of the use of these aggregates in concrete.

The followings are some of the conclusions, observations and recommendations regarding this portion of the research project

In most cases, the unit weight of concrete containing GP 21-23 and GP 4-5 (vitrified glass) lower than the control concrete, and the concrete containing vitrified glass produced lower compressive and bending strength compared to the control. However the concrete containing vitrified glass could be used in the field based on the minimum criteria set for the mix design.

The use of vitrified glass in concrete concrete is recommended in several applications except parking lots, side walks and main roads, because abrasion resistance is not high.

### I. 서      론

골재란 하천, 산림, 공유수면, 기타 지상, 지하 등에 부존되어 있는 암석, 모래 또는 자갈로서 건설공사의 기초재료로 쓰이는 것(골재 채취법), 또는 콘크리트를 만들기 위하여 시멘트와 물에 혼합하는 모래, 자갈 기타 이와 비슷한 재료(표준시방

서)라고 정의 할 수 있다.

근래에 계속된 하천골재의 채취로 인하여 그 부존량이 감소됨에 따라 약 10년 이후 그리고 골재 부존상태의 편중이나 유통체계가 상대적으로 낙후된 지역에서는 약 5년 이후부터는 건설골재의 부족난이 심화될 것으로 예상된다. 이에 현재 정부에서는 이들 천연자원의 고갈에 대비하고 자원의

\*충남대학교 농과대학

키워드 : 산업폐기물, 재활용, 공기량, 단위중량, 압축강도, 휨강도, vitrified glass

재활용을 촉진하기 위하여 재생 골재와 인공골재를 골재의 정의에 새로 포함시키려고 법개정을 추진하고 있다.

한편, 국내에서는 산업의 발달로 인한 산업폐기물 및 부산물의 발생량이 매년 증가하는 추세에 있으며, 이를 처리하기 위한 노력도 다양하게 진행되고 있다.

미국에서는 매년 41억 톤의 고형폐기물이 발생되는데, 이는 매년 1인당 16톤의 쓰레기를 배출하는 것과 같은 것으로, 이들 대부분의 폐기물은 재활용이나 재처리의 노력이 부족하여 대부분이 일반 매립장에 매립되어 지고 있으며, 이는 국가적인 차원에서 환경문제와 경비 등의 많은 문제점을 야기시키고 있다.

Environmental Protection Agency(EPA)는 향후 20년 내로 현존하는 매립지의 약 20% 가량이 폐쇄될 것이며, 다른 매립지를 개발하거나 준비하는 데는 상당한 예산이 소요될 것으로 추정됨에 따라, 폐기물의 재사용 및 재처리의 필요성을 강조하고 있으며, 건설분야가 이들 폐기물을 재활용하는데 가장 가능성이 크고 이용량도 많을 것으로 추정되는 분야이다.

미국 South Carolina는 다른 주와 마찬가지로 많은 군사기지를 가지고 있었으나, 현재는 예산삭감 등의 이유로 여러 곳이 폐쇄되었다. 이들 시설 중 Naval Complex라고 불리는 곳이 있는데, 이는 Charleston에 위치해 있고 1996년 폐쇄된 곳으로 조선소 시설을 가지고 있으며, 여러 해 동안 오염이 되어졌던 곳이다.

본 연구는 이 지역에 위치한 회사와 Clemson University가 공동으로 이들 지역의 오염된 토양을

재활용하기 위한 연구의 일환으로, Charleston Naval Complex와 Charleston Harbor Dredge Spoils로부터 나온 폐기물을 수거하여, 이들 오염된 지역의 토양을 유리질화(Vitrification Process)하여 건설재료(아스팔트 및 콘크리트 등)로의 활용 가능성을 연구하기 위하여 실시하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 사용재료

#### 가. 시멘트

본 실험에 사용된 시멘트는 보통 포트랜드 시멘트이며, 이의 물리적 성질은 Table 1과 같다.

#### 나. 골재

본 실험에 사용된 굵은골재와 잔골재는 화강암 쇄석과 쇄사를 사용하였으며, 이의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

그리고 Vitrified glass는 Charleston Naval Complex(GP21-23)와 Charleston Harbor Dredge Spoils(GP4-5)에서 채취된 두 종류의 폐기물을 대상으로 실험을 실시하였다.

Vitrification process는 오염된 물질로부터 유해성분을 제거하기 위한 새로운 개념으로써, 대상물질을 원형 로(爐)속에서 약 1,550°C의 고온으로 가열하면 액상의 유리질로 변하고, 이를 정제된 액체상태의 유리질을 두드려 냉각시켜 원통형의 고체상태로 만든 다음, 이를 분쇄하여 일정크기의 골재로 만든다. 이 유리질화된 골재는 환경에 대한 안전성을 평가하기 위하여 독성시험을 실시하게 된다.

Table 1. Physical properties of the cement used

Specific gravity	Fineness (㎎/g)	Water requirement at standard consistency(%)	Soundness (%)	Setting time (h:min)		Compressive strength (MPa)		
				Initial	Final	3 days	7 days	28 days
3.1	3,155	28	0.02	3:20	5:55	24.52	31.98	41.36

Table 2. Physical properties of the aggregate used

Classification	Size (mm)	Specific gravity (25°C)	Absorption ratio (%)	Fineness modulus	Unit weight (kgf/m <sup>3</sup> )
Coarse aggregate	4.75~25	2.66	1.05	6.70	1,511
Fine aggregate	<4.75	2.64	0.97	2.55	1,510

Vitrification process는 미국 환경보호국(Environmental Protection Agency, EPA)에서 독성 금속으로 규정하고 있는 납과 아연도 생물질로부터 성공적으로 제거된다.

Vitrification process를 거쳐 골재화 된 각각의 재료에 대한 TCLP 실험결과는 Table 3과 같고,

Table 3. TCLP results for the product glasses

Constituent	Analyse concentration (mg/l)		
	TCLP limits	GP 21-23	GP 4-5
Arsenic (As)	5.0	< 0.2	< 0.2
Barium (Ba)	100.0	< 0.2	< 0.2
Cadmium (Cd)	1.0	< 0.1	< 0.1
Chromium (Cr)	5.0	< 0.1	< 0.1
Lead (Pb)	5.0	< 0.1	< 0.1
Mercury (Hg)	0.2	< 0.1	< 0.1
Selenium (Se)	0.5	< 0.2	< 0.2
Silver (Ag)	5.0	< 0.1	< 0.1

※ TCLP : Toxic characteristic leading procedure

Table 4. Physical properties of GP 21-23 and GP 4-5

Property	GP 21-23	GP 4-5
Bulk specific gravity (SSD)	2.669	2.707
Percent absorption (%)	1.23	1.79
Fineness modulus	5.41	4.93
Los angeles abrasion (%)	40.4	45.3
Size (mm)	4.75~25	4.75~25

사용된 vitrified glass 골재에 대한 물리적 성질은 Table 4와 같다.

## 2. 공시체 제작

### 가. 콘크리트 배합

본 실험에서 control의 압축강도가 재령 28일에서 280kgf/cm<sup>2</sup> 이상이 되고, 슬럼프는 10±1cm가 되도록 ACI-211에 의하여 배합설계를 하였고, 이 배합비를 기준으로 재 처리된 골재의 사용량을 사용 굵은골재의 5, 10, 15%로 첨가량을 달리하였으며, 이의 배합설계결과를 나타내면 Table 5와 같다.

### 나. 제작 및 양생

압축강도 측정용 공시체는 각 배합비별로  $\phi 6'' \times 12''$ 의 원주형 공시체를, 휨강도 측정용은 3''×3''×14''의 공시체를 각각 3개씩 제작하여, 24시간 정지 후 탈형하여 23±1°C, 상대습도가 100%로 유지되는 습윤양생실에서 재령 28일까지 양생하였으며, 실험 개략도는 Fig. 1과 같다

Table 5. Mix design of vitrified glass concrete

(Unit : kgf/m<sup>3</sup>)

Mix	Cement	Aggregate		Water	GP 21-23	GP 4-5	Slump (cm)
		Fine	Coarse				
Control	423	668	978	202	-	-	10±1
GP 21-23	5%	423	668	210	49	-	
	10%	423	668	224	98	-	
	15%	423	668	230	147	-	
GP 4-5	5%	423	668	218	-	49	
	10%	423	668	231	-	98	
	15%	423	668	239	-	147	

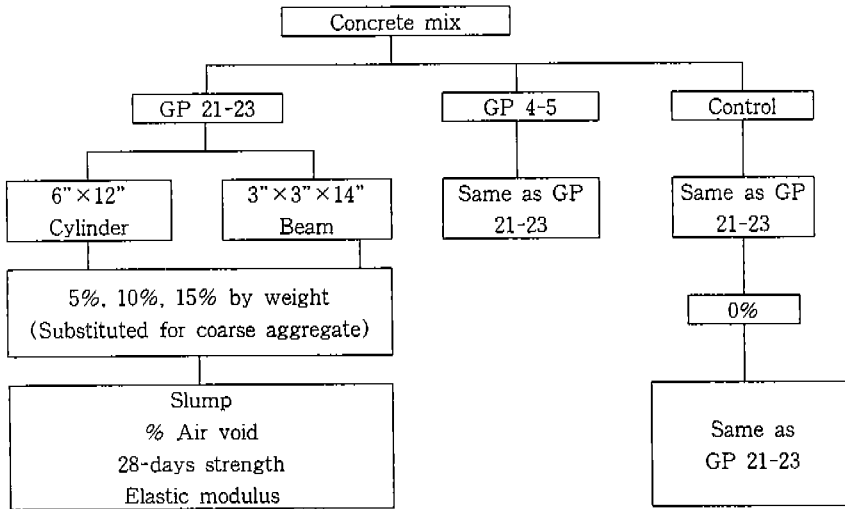


Fig. 1. Experimental design for vitrified glass concrete (n=5)

### 3. 시험방법

콘크리트 혼합물의 공기량 시험은 ASTM C 173-78 (Air content of fresh mixed concrete by the volumetric method)에 의하여 콘크리트 혼합 후 바로 측정하였으며, 단위중량은 ASTM C 138 (Unit weight, yield, and air content of concrete), 압축강도는 ASTM C 39 (Compressive strength of cylindrical concrete specimens), 휨강도는 ASTM C 293 (Flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading)), 응력-변형률 특성은 ASTM C 469 (Static

modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression)의 시험규정에 준하여 소정의 재령에서 실시하였다.

### III. 결과 및 고찰

Vitrified glass concrete에 대한 실험결과를 나타내면 Table 6과 같다.

여기서 알 수 있듯이, 공기량은 control보다 vitrified glass를 함유한 콘크리트에서 증가하는 것으로 나타났고, 각 배합비별 vitrified glass의 함유

Table 6. Test results of vitrified glass concrete

Mix	Air void contents (%)	Unit weight (kgf/m <sup>3</sup> )	Compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Relative value of compressive strength	Bending strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Relative value of bending strength	
Control	1.7	2,521	310.55	1.00	62.53	1.00	
GP 21-23	5%	1.9	2,446	301.78	0.97	62.34	1.00
	10%	2.3	2,436	301.69	0.97	61.60	0.99
	15%	2.4	2,428	289.88	0.93	61.05	0.98
GP 4-5	5%	1.8	2,457	280.31	0.90	62.10	0.99
	10%	1.9	2,449	279.97	0.90	61.83	0.99
	15%	2.2	2,444	274.54	0.88	60.21	0.96

량이 증가 할수록 비례하여 증가하는 경향을 보였으며, 동일 첨가량에서는 GP 21-23이 GP 4-5보다 더 많은 공기량을 함유하는 것으로 나타났다. 특히 GP 21-23을 10%, 15%를 함유한 경우와 GP 4-5를 15% 함유한 콘크리트의 공기량은 2% 이상으로 크게 나타났다.

따라서, 이러한 vitrified glass를 사용하면 기존의 보통 콘크리트보다 콘크리트 내의 공기량이 증가하는 경향을 보였으며, 이러한 경향은 vitrified glass의 사용량이 증가함에 따라 비례해서 증가한다는 것을 알 수 있었다.

단위중량은 control보다 vitrified glass를 사용함에 따라 감소하였고, 그 사용량이 증가할 수록 단위중량이 감소하는 것으로 나타났으며, GP 4-5보다는 GP 21-23의 사용에 의한 단위중량의 감소가 크게 나타났다.

이는 Table 4에 나타난 것과 같이, GP 21-23의 단위중량이 GP 4-5보다 작고, 또 동일량 첨가시 GP 4-5보다 더 많은 공기량이 발생되기 때문에 나타난 결과라고 생각된다.

압축강도는 control과 비교하여 vitrified glass를 사용한 콘크리트에서 작게 나타났으며 강도 감소율은 GP 21-23은 5% GP 4-5는 10% 내외를 보였는데, 이는 동일 배합비 내에서 측정강도 값의 오차 크기가 10%인 점을 감안한다면 상당히 양호한 압축강도를 발휘한다는 것을 알 수 있다. 이는 vitrified glass를 콘크리트용 골재로 대체 사용하더라도 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향은 거의 없는 것을 의미하는 것이며, 또 각 배합비별 vitrified glass의 혼입량 차이에 의한 압축강도의 변화도 거의 없는 것으로 나타남에 따라, 콘크리트 대체 골재로서의 사용 가능성이 상당히 높을 것으로 생각된다.

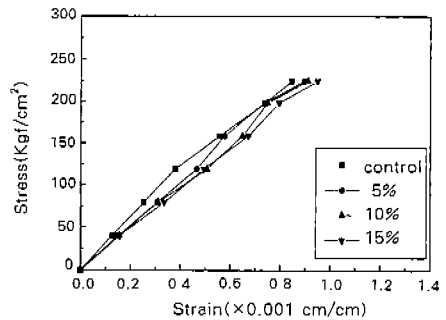
휨강도는 control과 비교하여 vitrified glass 골재의 종류 및 각 배합비별 혼입량 차이에 의한 변화가 거의 없는 것으로 나타남에 따라, vitrified glass 골재 사용에 의한 콘크리트의 휨강도는 거의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있었다.

도로교 표준시방서에서 제안하고 있는 도로포장

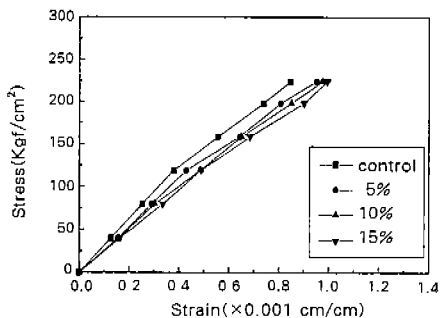
에 적합한 휨강도와 압축강도의 비는, 압축강도 250~300kgf/cm<sup>2</sup>인 경우는 14~16, 300~350kgf/cm<sup>2</sup>인 경우는 13~14 정도를 권장하고 있는데, 본 실험에서 얻어진 결과는 모두 20을 상회하는 상당히 양호한 강도비를 보임에 따라 강도비로만 보면 포장용 골재로서의 이용 가능성 또한 상당히 높을 것으로 생각되나, 사용된 골재의 마모율이 40%를 초과하므로 도로포장재로 사용하기에는 내구성에 문제가 있을 것으로 판단된다.

응력-변형률 곡선은 Fig. 2와 같고 탄성계수 측정 결과는 Table 7과 같다.

여기서 보는 바와 같이, GP 21-23을 혼입한 콘크리트의 탄성계수는  $2.28 \times 10^5 \sim 2.54 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ , GP 4-5를 혼입한 콘크리트는  $2.34 \times 10^5 \sim 2.43 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ 의 값을 보임으로써, control과 비교하여 압축 및 휨강도의 저하를 만큼 저하하는 경향을 보였으나, GP 21-23을 15% 혼입한 경우를 제



(a) GP 21-23



(b) GP 4-5

Fig. 2. Stress-strain curve of vitrified glass concrete

Table 7. Test results of elastic modulus of vitrified glass concrete

Mix		Elasticity modulus ( $\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ )	Relative value of elasticity modulus
Control		259	1.00
GP 21-23	5%	254	0.98
	10%	239	0.92
	15%	228	0.88
GP 4-5	5%	243	0.94
	10%	238	0.92
	15%	234	0.90

외하고는 모두 control의 90% 이상의 값을 보임에 따라, vitrified glass 혼입에 의한 콘크리트의 탄성계수는 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 또한, 보통 시멘트 콘크리트의 탄성계수는 압축강도가  $270 \text{kgf/cm}^2$ 인 경우는  $2.5 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$  정도이고  $300 \text{kgf/cm}^2$ 인 경우는  $2.6 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$  정도인데, 본 시험에서 얻어진 결과는 모두 이들 값과 유사함을 보였다.

이상의 결과를 종합해 보면, vitrified glass를 콘크리트의 재료로 사용할 경우, 콘크리트의 내부 공기량은 증가되고 단위중량은 감소되는 경향을 보였고, 각 강도에 미치는 영향은 압축강도의 경우는 5~10% 내외, 휨강도는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며 탄성계수 역시 양호하게 나타남에 따라, 콘크리트의 대체 골재로서의 성능에 문제가 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

따라서, vitrified glass를 콘크리트 골재로서 재 활용하는 것은 상당히 유의성이 있는 것으로 판단되며, 이에 대한 연구가 좀 더 세밀하고 체계적으로 이루어져 실제 구조물에서의 활용성에 대한 적합성 및 상업화 방안과 가능성 등을 구명해야 할 것으로 생각된다.

#### IV. 결 론

본 실험은 조선소나 해군기지 등에서 배출되는

폐기물의 재활용 가능성을 알아보기 위한 연구로서, 이들 폐기물을 가공하여 자체에 가지고 있는 독성물질을 제거하여 골재화시킨 재료를 굵은골재의 일부로 사용하였으며, 이의 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 공기량은 vitrified glass의 첨가량이 증가할수록 증가하는 경향을 보였으며, GP 4-5보다는 GP 21-23에서 더 많은 공기량을 함유하는 것으로 나타났다.

2. 단위중량은 vitrified glass를 첨가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, GP 4-5보다는 GP 21-23에서의 감소경향이 더 크게 나타났다.

3. 압축강도는 vitrified glass를 사용함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, control과 비교하여 GP 21-23은 5%, GP 4-5는 10% 정도 감소하였다.

4. 휨강도는 vitrified glass 사용 및 혼입량의 차이에 따라 큰 변화는 보이지 않았으며, control과 비교하여 거의 동등수준으로 나타났다.

5. 탄성계수는 control과 비교하여 vitrified glass를 사용한 콘크리트에서 감소하는 경향을 보였으며, 그 감소율은 10% 이내로 작게 나타났다.

6. Vitrified glass를 사용함으로써 공기량이 증가하고 단위중량이 감소하였으며, 압축강도와 휨강도 및 탄성계수에 미치는 영향이 작은 것으로 나타남에 따라, 콘크리트 대체 골재로서 vitrified glass의 활용이 기대되나, 이들 재료의 마모율이 크므로 주차장, 보도 및 간선도로 등의 도로포장 등을 제외한 일반 구조물에 이용이 가능할 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

1. 건설교통부, 1996, 도로교 표준시방서, 기문당.
2. Min, Jeong-Ki, 1997, Utilization of vitrified glass as an aggregate source in asphalt concrete mixtures, Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers, 39, pp.51-56.
3. Amirkhanian, S. and Manugian, D., 1994, A feasibility study of the use of waste mater-

- ials in highway construction, Report FHWA-SC-94-01, Clemson University, Civil Engineering Department, Clemson, SC 29534-0911.
4. Amirkhanian, S., 1997, Utilization of waste materials in highway industry, *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, 24(2), pp.94-103.
  5. ASTM C 39, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, American Society for Testing and Materials, Vol. 04. 02, 1990.
  6. ASTM C 138, Standard test method for unit weight, yield, and air content of concrete, American Society for Testing and Materials, Vol. 04. 02, 1990.
  7. ASTM C 293, Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading), American Society for Testing and Materials, Vol. 04. 02, 1990.
  8. ASTM C 469, Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression, American Society for Testing and Materials, Vol. 04. 02, 1990.