

폐도자기를 골재로 이용한 콘크리트의 특성

강성구 · 이완조 · 황인동* · 박 성 · 정윤중[†]

명지대학교 세라믹공학과

*세일콘(주) 부설연구소

(2004년 9월 23일 접수; 2004년 12월 13일 승인)

Properties of Concrete Using Waste Pottery and Porcelain as Aggregates

Sung-Gu Kang, Wan-Jo Lee, In-Dong Hwang,* Sung Park, and Yun-Joong Chung[†]

Department of Ceramic Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea

*R&D Center, Seil Con Co. Ltd., Anseong 456-933, Korea

(Received September 23, 2004; Accepted December 13, 2004)

초 록

현재 국내에서 많은 양의 도자기 폐기물이 발생하고 있으며, 이들 폐기물은 경제적 이득과 환경 보전의 차원에서 재활용 하는 방안이 모색되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 도자기 폐기물을 콘크리트용 골재로 이용하여 폐도자기의 재활용성을 검증하고자 하였다. 폐도자기 재활용 골재(recycled aggregate)의 품질을 부순 골재(crushed aggregate)와 비교 분석하였으며, 부순 골재 단독 콘크리트와 재활용 골재가 비례대로 치환된 콘크리트의 물리적 특성을 비교 분석하였다. 실험 결과 재활용 폐도자기의 비율이 10%, 20%, 그리고 30%까지는 압축강도에 작은 영향을 미쳤지만, 재활용 폐도자기의 비율이 30% 이상 증가할수록 압축강도는 급격히 감소하였으며, 흡수율은 증가하였다. 실험 결과에 따르면, 일정한 압축 강도를 지니는 폐도자기 재활용 콘크리트의 제조를 위해서 대체 가능한 재활용 골재의 최대 함량은 30%임을 확인 할 수 있었다.

ABSTRACT

Nowadays, large amount of waste pottery and porcelain annually are produced. It is needed that they are used as recycled materials in order to prevent environmental pollution and gain economic profits. Therefore, the purpose of this study is to present the method of utilizing the recycled aggregates that are obtained from waste pottery and porcelain as the concrete aggregate. The qualities of the recycled aggregate were compared with those of the crushed aggregate through measuring their physical properties. The test results showed that the replacement of crushed aggregate by recycled aggregate at the levels 10%, 20%, and 30% had little effect on the compressive strength of the concretes, but higher levels of replacement reduced the compressive strength. Increment of the replacement of recycled aggregate caused increase in absorption ratio. As a conclusion, normal strength recycled aggregate concretes can be produced using less than 30% of recycled aggregate.

Key words : Waste pottery and porcelain, Recycled aggregate, Compressive strength

1. 서 론

우리나라에 부존되어 있는 천연골재의 고갈현상은 이미 심각한 수준에 도달하고 있으며 이를 해결하기 위해 산업폐기물 및 부산물의 재활용 방안이 도입되어 어느 경우에는 이미 콘크리트에 다량 사용되고 있는 실정이다. 산업 폐기물로 만든 골재 또는 고로슬래그, 플라야시 및 콘크리트 폐기물 등이 재활용 골재로서 사용되어 지고 있으며, 폐 콘크리트를 자원의 유효이용 및 환경보전

의 차원에서 콘크리트용 골재로서 재활용하기 위한 연구는 이미 오래전부터 진행되고 있다.^{1,2)}

현재 국내의 기업형 도자기 제조업체와 경기도 내의 여주, 이천 및 광주를 비롯한 기타 지역의 소규모 공방 형태에서 발생하는 도자기 폐기물의 양은 매우 크며, 이들 대부분이 산업 폐기물로 분류되어 처리되고 있는 실정이다. 이들 폐기물은 경제적 이득과 환경 보전의 차원에서 재활용 하는 방안이 모색되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 도자기 생산업체에서 배출되는 폐 도자기를 이용하여 자원의 재활용을 기하고 환경을 보호하기 위한 일환으로 이를 골재화 하는 방안을 모색하고자 하였다.

[†]Corresponding author : Yun-Joong Chung

E-mail : cyj@mju.ac.kr

Tel : +82-31-330-6460 Fax : +82-31-330-6457

2. 실험 방법

본 연구에 사용한 시멘트는 비중 3.15, 분말도 3,200 cm²/g 인 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 굵은 골재는 부순 돌(Crushed Coarse Aggregate, 이하 CCA)을 사용하였으며, 잔골재는 부순돌(Crushed Fine Aggregate, 이하 CFA)과 도자기 폐기물을 조 크러셔로 파쇄한 재활용 골재(Recycled Fine Aggregate, 이하 RFA)을 사용하였다. 도자기 폐기물을 이용한 재활용 골재와 부순돌의 물리적 성질은 Table 1과 같다.

골재의 물성시험은 비중 및 흡수율 시험(잔골재의 경우는 KS F 2504, 굵은골재의 경우 KS F 2503), 입도시험(KS F 2502), 단위용적중량 시험(KS F 2505)을 실시하였다.

예비 실험 결과를 기초로 물-시멘트비를 30%로 하였으며, RFA의 배합비율은 50%까지 CFA와 비례대로 치환하였으며(specimen B, C, D, E, F), 시험시 조건을 동일하게 하기 위해 RFA가 전혀 치환되어 들어가지 않은 경우(specimen A)와 동시에 시행하였다. 본 연구의 배합계획은 Table 2와 같다.

콘크리트 혼합은 강제식 팬믹서를 이용하여 시멘트와 골재를 30초간 건비빔 한 후 감수제(WRA)를 희석한 물을 넣고 150초간 혼합하였다. 비빔을 완료한 콘크리트는 몰드(φ10×20 cm)에 1/2 채운 후 봉다짐을 25회 실시하였으며, 이를 2회 반복하여 공시체를 제작하였다. 또한 공시체는 제작 24시간 후 탈형하여 측정 재령까지 표준수준양생(20±3°C)을 실시하였다.

경화 콘크리트의 흡수율은 공시체의 표건 및 절건 중량을 측정하여 계산하였고, 압축강도는 KS F 2405의 방법으로 측정하였다.

Table 1. Properties of Aggregate

Type of aggregate	Unit weight (kg/m ³)	Specific gravity	Absorption rate (%)	Fineness modulus
CCA	1,490	2.60	0.87	6.45
CFA	1,805	2.58	1.60	3.16
RFA	1,678	2.47	5.21	2.65

Table 2. Mixing Design

Specimen	Slump (cm)	Air (%)	Unit weight (kg/m ³)					WRA (kg/m ³)	Percentage of RFA
			C	W	CCA	RFA	CFA		
A						0	1,825	0%	
B						175	1,643	10%	
C	0	1	330	99	212	349	1,460	20%	
D						524	1,278	30%	
E						698	1,095	40%	
F						872	913	50%	

3. 결과 및 고찰

3.1. 재활용 골재의 품질

골재의 입도는 필요한 콘크리트를 경제적으로 만드는데 있어서, 가장 중요한 요소중의 하나이고, 크고 작은 입자가 적당하게 혼합하고 있는 것이어야 한다. 폐도자기를 파쇄한 RFA의 입도를 KS F 2502에 의해 측정된 결과를 나타낸 것이 Fig. 1이다.

RFA와 CFA의 비중 및 흡수율을 측정된 결과를 나타낸 것이 Fig. 2이다. 이 그림에서 CFA의 비중이 2.58인데 비하여 RFA의 비중은 2.47의 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 한편, RFA의 흡수율은 CFA에 비하여 약 3배정도의 큰 값을 나타내고 있으며, 이는 폐도자기 내부에 존재하는 공극에 의한 영향이라고 생각되어진다. 비록 흡수율이 KS규격에서 제시하고 있는 잔골재의 흡수율 범위를 훨씬 넘어서는 값으로서 그 사용에 있어서 고려해야 할 내용으로 보여 지지만 배합 설계상에서 보정을 해준다면 충분히 사용 가능하다고 보여진다.

한편, RFA의 단위용적중량, 공극률 그리고 실적률을 CFA와 비교한 결과는 Table 3과 같다.

RFA의 단위용적중량은 1,678 kg/m³으로 부순 잔골재의

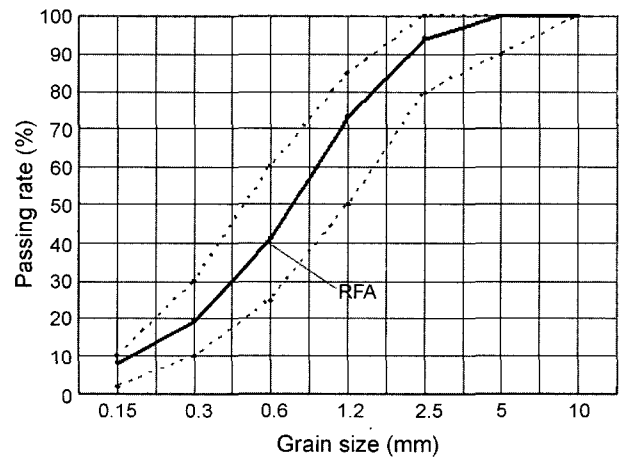


Fig. 1. Grain size distribution of RFA.

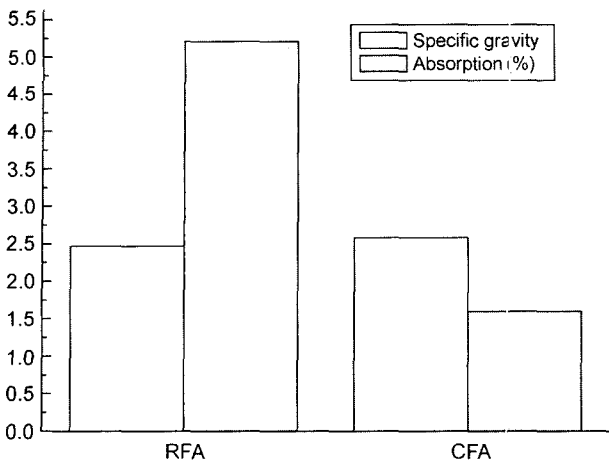


Fig. 2. Specific gravity and absorption of RFA and CFA.

Table 3. Unit Weight, Void Ratio, Solid Content of RFA and CFA

	RFA	CFA
Unit weight (kg/m ³)	1,678	1,805
Void ratio (%)	31.97	29.9
Solid content (%)	68.03	70.1

1,805 kg/m³보다 다소 작은 값을 나타내고 있지만 일반적으로 사용되어지고 있는 잔골재의 단위용적질량 1,450~1,700 kg/m³의 범위를 가지고 있는 것을 확인할 수 있으며, 이는 RFA의 입도 분포가 양호하다는 것을 알 수 있다. 또한 골재의 실적률은 입도, 입형의 양부를 알 수 있는 지표가 되며 동일 입도의 경우에는 일반적으로 각형일수록 실적률이 작아지는 경향이 있다. RFA의 실적률은 68.03%로 CFA의 70.1%보다 약간 작으며, 일반적 경우 55~70% 범위안에 포함되는 것을 알 수 있으며, 공극률은 RFA가 31.97%, CFA가 29.9%로 나타나고 있다. 콘크리트는 가압적 공극이 적은 것을 선택할 필요가 있는데 그 이점은 공극률이 적을 수록 또는 실적률이 클수록 시멘트 사용량이 적게 들어 경제적이 되며, 동일 양의 시멘트를 사용할 때는 콘크리트의 강도를 증진시키는데 기여한다. 즉, 실적률이 큰 골재를 사용하면 시멘트 페이스트량이 적게 들기 때문에 콘크리트의 밀도, 마모저항, 내구성의 증대를 기대할 수 있다.

Fig. 3은 RFA의 XRD(X-Ray Diffraction, X-선 회절)분석 결과이다. 주 구성광물은 저온형 크리스토팔라이트(α -Cristobalite, SiO₂)와 Mullite(3Al₂O₃ · 2SiO₂) 그리고 일부 유리질로 되어 있는 것을 확인할 수 있으며, 일반적으로 사용되어지고 있는 CFA의 구성광물(α -Quartz)과는 차이가 있으나 이는 물성면에서 보다 우수하다는 것을 추측할 수 있다. 또한 XRD 분석 결과에서도 알 수 있는 바와 같이 2 θ 15~30°의 broad한 peak로 보아 폐도자기들은

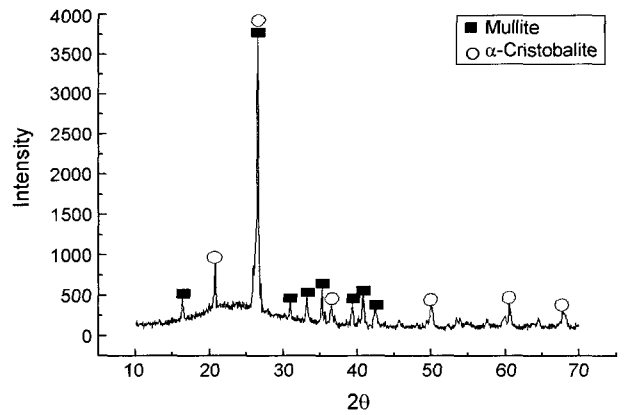


Fig. 3. XRD of RFA.

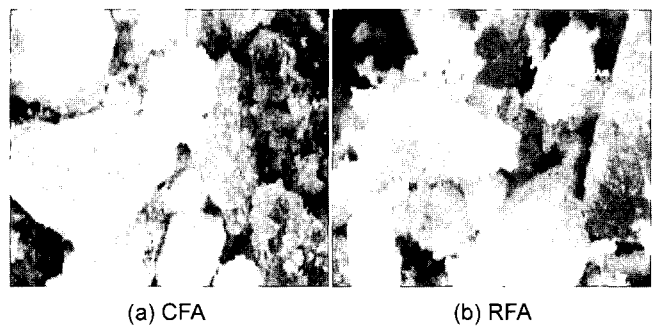


Fig. 4. Photographs of shapes of CFA and RFA.

소지 위에 입혀진 유성분(glaze)으로 인하여 다량의 비정질 성분들을 함유하고 있는 것으로 판단되어 진다.

Fig. 4는 CFA 및 RFA 입자의 형상과 표면조직을 광학현미경을 이용하여 관찰한 결과로 잔골재로 사용할 수 있는 형상과 표면조직을 갖추고 있는지의 여부를 비교 확인할 수 있다. 골재의 입형과 표면 거칠기는 페이스트와 골재의 부착력에 영향을 주어 콘크리트 물성에 영향을 주는 것으로 알려져 있다.^{3,5)}

그림에서 알 수 있는 바와 같이 CFA의 경우는 입자의 형상이 둥글지 못하고 길며 입자의 크기도 아주 작은 것부터 큰 것 까지 존재하고 있는 것을 알 수 있다. 한편 RFA도 CFA와 같은 형상을 하고 있으며 입자의 크기도 미세한 것 까지 발견된다. 또한 CFA와 마찬가지로 입내의 응력(stress)이 관찰되어 골재화했을 때 강도발현에 영향을 미칠 것으로 생각된다.

3.2. 압축강도 및 흡수율

Fig. 5는 CFA만을 이용한 콘크리트 A와 RFA가 10~50%까지 비례대로 치환되어 들어간 콘크리트 B, C, D, E, F의 압축강도와 흡수율을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 압축강도는 동일 단위시멘트 양에서 RFA 함량이 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있으며, 재령 28일을 기준으로 CFA만을 이용한 콘크리트 A의 압축강도

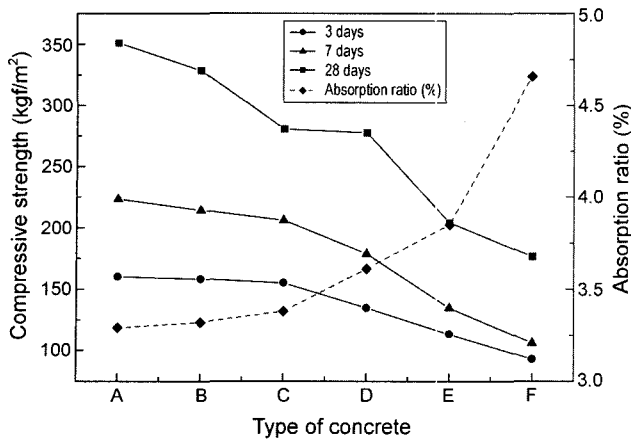


Fig. 5. Changes in compressive strength and absorption rate of concrete.

는 351 kgf/cm² 정도이며, RFA 비율이 10~50% 비례 치환된 콘크리트 B~F의 압축강도는 각각 329 kgf/cm², 281 kgf/cm², 278 kgf/cm², 204 kgf/cm², 176 kgf/cm²로 나타났다.

즉, RFA의 비율이 30%까지는 배합강도 이상 발휘되고 있지만 그 이상에서는 압축강도가 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. RFA의 함량이 증가할수록 압축강도가 감소하는 이유는 CFA의 비중이 크고 RFA의 비중이 작기 때문에 CFA와 RFA를 혼합하여 사용할 때, RFA 함량 증가에 따라 CFA의 함량이 상대적으로 감소함에 따라 동일 체적 안에 함유되는 전체 골재의 양이 줄어들어 압축강도가 감소하는 것으로 보여진다.⁶⁻⁸⁾

또 다른 이유는 RFA의 성분 중에는 비정질의 SiO₂와 유성분의 골재 입자(glaze aggregate)가 상당량 포함되어 있기 때문에 콘크리트에 응력을 가해 주었을 때 시멘트 경화 부분 즉, 골재 사이에서의 파괴(inter aggregate fracture) 보다는 골재내 파괴 즉, 시유된 도자기 표면에서 만들어진 유리인 유(glaze)가 이루는 입자 내부에서 파괴가 일어난 것(intra aggregate fracture)으로 생각할 수 있다고 보여진다. 다시 말해 압축강도는 골재 자체가 구성하고 있는 성분 및 구성 입자의 강도에 의해 많은 영향을 받고 있을 것으로 판단되어진다.⁹⁻¹³⁾

흡수율을 보면, Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 RFA의 함량이 증가할수록 흡수율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 RFA의 함량이 증가할수록 콘크리트의 압축강도가 감소하는 것과 연관이 있으며, 흡수율이 증가한다는 것은 콘크리트 공시체 내부에 공극의 양이 증가한다는 것을 의미하며, 이는 앞에서 설명한 바와 같이 RFA의 함량이 증가할수록 전체 골재의 양이 감소하고, 공극률이 증가하기 때문에 콘크리트 공시체의 충전율이 감소하게 된다. 콘크리트 공시체의 공극률이 높아질수록 외부응력에 대한 저항력이 감소하기 때문에 압축강도 역시 감소한다고 볼 수 있다.

4. 결 론

폐도자기를 분쇄하여 조립율을 맞추고 기존의 CFA와 치환하여 적용하므로서 폐도자기의 골재화를 기하여 골재로서의 가능성을 규명하려고 한 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 폐도자기를 잔골재로 재활용 하는 가능성을 검토한 결과 비중이 2.47로 일반 골재에 비하여 조금 작게 나타났다. 흡수율은 5.21로 허용기준 보다 높게 나타났다. 단위용적질량 1.678 kg/m³, 공극률 31.97%, 실적률 68.03%, 조립률 2.65로 비교적 입도 분포가 양호한 것으로 판정되었다.

2. RFA의 형상과 표면조직을 광학현미경을 통해 관찰한 결과 일반적으로 사용되어지고 있는 CFA의 형상이나 표면조직과 별 차이가 없는 것으로 확인되었으며, 이는 시멘트페이스트-골재 간 접촉을 양호하게 만들 수 있다고 보여진다.

3. XRD(X-Ray Diffraction, X-선 회절)를 통한 RFA의 화학분석 결과 광물 조성은 저온 형 크리스토팔라이트(α -Cristobalite, SiO₂)와 Mullite(3Al₂O₃·2SiO₂)가 주성분을 이루고 있는 것을 확인할 수 있었으며 일부 유리화된 부분으로 구성된 골재와 이 밖에도 소지 표면에 입혀진 유리 성분인 유(glaze)가 골재 입자를 이루고 있음을 알 수 있다.

4. RFA를 CFA와 치환하여 사용할 경우 폐도자기의 잔골재로서의 가능성과 그 함량을 충분히 생각할 수 있다고 본다. 즉 이 실험 결과 RFA의 잔골재로서의 사용량은 앞에서 언급한 바와 같이 CFA와 치환하여 30%가 대체 가능한 최대 함량임을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 명지대학교 도자기연구센터 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. A. Henrichsen, "Use of Recycled Aggregates in Europe," International Workshop on Recycled Concrete, JSPS 76 Committee on Construction Materials, 1-8 (2000).
2. E. Vazquez, "Recycling of Aggregates in Spain," International Workshop on Recycled Concrete JSPS 76 Committee on Construction Materials, 27-41 (2000).
3. A. M. Neville, "Properties of Concrete," Pitman, London, 251 (1973).
4. M. F. Kaplan, "Flexural and Compressive Strength of Concrete as Affected by the Properties of Coarse Aggregate," *J. Am. Concr. Inst.*, **55** [11] 1193-208 (1959).
5. R. Jones and M. F. Kaplan, "The Effects of Coarse Aggre-

- gate on the Mode of Failure of Concrete in Compression and Flexure," *Mag. Concr. Res.*, **9** [26] August, 89-94 (1957).
6. B. G. Singh, "Specific Surface of Aggregates Related to Compressive and Flexural Strength of Concrete," *Proc. Am. Concr. Inst.*, **54** [10] 897-907 (1958).
 7. H. C. Emtroy and B. W. Shacklock, "Design of High-Strength Concrete Mixes," Proc. Symp. Mix Design and Quality Control of Concrete, London, 55-73 (1954).
 8. J. D. McIntosh, "Basic Principles of Concrete Mix Design," Proc. Symp. Mix Design and Quality Control of Concrete, London, 3-18 (1954).
 9. M. F. Kaplan, "Crack Propagation and the Fracture of Concrete," *Proc. Am. Concr. Inst.*, **58** [5] 591-610 (1961).
 10. J. Glücklich, "Fracture of Plain Concrete," *Am. Soc. Civ. Engrs. J. Engng. Mech. Div.*, **89** 127-38 (1963).
 11. M. F. Kaplan, "The Application of Fracture Mechanics to Concrete," Proc. Conf. Structure of Concrete and Its Behaviour Under Load, London, 1965, 169-175, Cement Concrete Association, London (1968).
 12. T. T. C. Hsu, F. O. Slate, G. M. Sturman, and G. Winter, "Microcracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress Strain Curve," *Proc. Am. Concr. Inst.*, **60** [2] 209-24 (1963).
 13. H. H. Bache and P. Nepper-Christensen, "Observation on Strength and Fracture in Lightweight and Ordinary Concrete," Proc. Conf. Structure of Concrete and Its Behaviour Under Load, London, 1965, 93-108, Cement Concrete Association, London (1968).