

재생 골재의 고부가가치화에 대한 연구

A Study on The Great Supplementary Value of Recycled Aggregates

심종성* 문도영** 박성재** 김용재***

Sim, Jong sung Moon, Do young Park, Sung jae Kim, Yong jae

ABSTRACT

Until now, the quantity to recycle wasted concrete as the great supplementary value was very little. But considering a insufficiency of the present state of aggregates, the recycling of wasted aggregates is indispensable. This study will offer the basic application data of the recycled aggregates to make by the new attempt and offer the basic data of the great supplementary value of recycled aggregate to make good use of precast process.

The result of compressive strength, tensile strength, flexural strength and drying shrinkage test of concrete by recycled aggregates were similar to the property of normal aggregate concrete, and the contrary effect of recycled aggregate by high temperature steam curing do not have been found out. Therefore the great supplementary value of recycled aggregate to make good use of precast process is possible way to be helpful to a insufficiency of the present state of aggregates.

1. 서론

1.1. 현황

현재 국내 건설시장은 60~70년대 경제성장과정 중 건설되었던 노후구조물들의 재건축 및 재개발의 활성화로 인해 건설폐기물의 발생량은 계속하여 증가하는 추세에 있으며 이러한 건설폐기물 중 콘크리트폐기물 발생량은 표 1과 같이 전체의 약 67%를 차지하고 있다. 이렇게 발생된 막대한 양의 건설폐기물은 매립, 소각, 재활용 등의 방법으로 처리되고 있으며 이 중 매립에 의한 방법은 심각한 주변 환경오염 및 매립지 부족의 문제를 야기해 점차 그 처리량이 줄어들고 있다. 또한 표 2와 같이 총 건설폐기물 처리현황 중 약 86%를 차지하는 재활용에 의한 방법은 성토나 도로포설, 구조물 뒷채움재 등의 낮은 부가가치로 재처리되고 있는 실정이다¹⁾.

그러나 건설현장에서는 아파트건설 등 수많은 콘크리트 구조물의 신설로 인해 연간 약 2억m³의 골재수요량을 나타내고 있으며 앞으로 장기적인 수급대책을 수립하지 않는다면 천연 골재 부존량의 고갈과 천연 골재 채취에 대한 환경규제의 강화로 인해 머지않아 골재를 수입해야하는 상황에 이를 것이다²⁾.

또한 올해 서울시가 추진중인 청계천 복원사업으로 인해 막대한 양의 폐콘크리트가 발생될 것이며, 이에 따라 폐콘크리트의 재활용에 대한 관심이 더욱 집중되고 있다. 따라서 현재 성토나 매립으로 사용되는 건설폐기물내의 골재를 고부가가치의 구조재 즉, 1종 골재로 재활용하여 골재의 부족난을 해결하며 천연 골재 채취로 인한 환경파괴도 줄여야 할 것이다.

*정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수

**정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 박사과정

***정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 석사과정

본 논문에서는 최근 국내에서 최초로 생산되는 레미콘용 1종 골재의 구조재로써의 사용성을 검토하며 나아가 프리캐스트 공정에서의 재생 골재 사용성을 검토하여 골재의 효과적인 재활용에 대한 기초자료를 제시하고자 한다.

표 1 2001년 불연성 건설폐기물 발생현황⁴⁾

구분	계	토사	콘크리트	아스팔트	기타
발생량 (톤/일)	98,660	8,210	66,051	13,700	10,699
점유비 (%)	100	8.3	67.0	13.9	10.8

표 2 2001년 총 건설폐기물 처리현황⁴⁾

구분	계	매립	소각	재활용
처리량 (톤/일)	108,520	12,943	2,424	93,153
점유비 (%)	100	12.0	2.2	85.8

1.2. 최근 재생 골재의 특성

1.2.1. 생산방식의 차이

지금까지 생산되었던 재생 골재는 대부분 2종 골재로서 골재표면에 부착되어있는 모르타르의 높은 흡수율로 인해 구조재로써의 사용이 불가능하였다. 구조재로 사용하기 위해서는 일반 골재를 일정비율로 혼합하여 사용하거나 혼화재를 첨가하여야하며 이는 일반콘크리트의 품질, 경제성에 미치지 못하리라는 것이 일반적인 연구 결과였다. 그러나 최근 생산되는 재생 골재는 지금까지의 공정과는 다른 방법을 이용하여 골재표면의 모르타르의 제거율을 높였으며 일반 골재와 거의 흡사한 특성을 가질 수 있도록 하였다. 기존의 생산 방식과 최근 생산되는 재생 골재 생산 방식의 차이점을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 평면스크린 낙하지점에서 쓰레기 분리를 위한 송풍방식사용

이물질 분리용 평면진동스크린을 기존보다 넓게 설치하여 재생 골재와 이물질이 중첩되지 않도록 하였으며 평면스크린의 낙하지점에 양방향의 송풍기를 설치하여 풍력의 세기를 일정하게 유지하면서 이물질을 분리하는 새로운 방식을 사용하였다.

(2) 수조탱크를 이용한 불순물 자동 분리 및 세척 방식사용

1차 분리된 재생 골재를 수조탱크에 투입하여 부력으로 쓰레기와 골재, 기타 부유물을 먼저 제거하고 수조탱크 안에 설치된 수중폭기조, 물분사 고압노즐, 회전틀 등으로 미세 불순물, 토분 등을 분리·선별함과 동시에 골재를 세척하는 방식을 사용하였다.

(3) 콘크라셔를 이용한 재생 골재 입형 개선 공법사용

편심회전운동을 하는 콘크라셔에 재생 골재를 투입하여 골재가 마찰작용, 굽힘작용, 전단작용, 압축작용을 동시에 받도록 하여 고밀도 상태에서 골재 입자간 회전 마찰 파쇄현상을 유발시켜 골재가 둥근입방체를 이루게 하는 신기술 공정을 사용하였다⁴⁾.

1.2.2. 일반 골재와 재생 골재의 품질비교

한국건설기술연구원의 재생 골재 품질검토서에 따르면 최근까지 국내에서 생산되는 재생 골재는 한 국산업규격 KS F 2573(콘크리트용 재생 골재)에서 규정하는 1종 재생 골재 기준인 흡수율 3%이하의

수준에 도달하지 못하였으나 최근 생산된 재생 골재는 흡수율을 비롯하여 비중, 마모율, 실적률, 입도 규정을 모두 만족하는 것으로 나타나 천연 골재와 동등한 수준의 양질의 골재로 검증되었다.

표 3 KS F 2573(콘크리트용 재생 골재)와 최근 생산된 재생 골재의 특성비교^{*)}

구분	콘크리트용 재생 굵은 골재(KS F 2573)			최근 생산된 재생 골재	일반천연 골재 (쇄석)
	1종	2종	3종		
흡수율(%)	3 이하	5 이하	7 이하	1.12	1.23
비중	2.2 이상			2.62	2.64
마모율(%)	40 이하			21.5	24.1
입자모양 판정실적률(%)	55이상			60	60.8
채 가름 통과량 (%)	25mm	100		100	100
	20mm	90~100		95	94
	10mm	20~55		27	28
	5mm	0~10		1	2
	2.5mm	0~5		0	0

2. 재생 골재의 프리캐스트화를 위한 기초물성 실험

2.1. 실험계획 및 방법

본 실험은 폐콘크리트의 고부가가치 자원화를 위한 기초연구의 일환으로써 100% 재생 골재를 사용한 콘크리트를 프리캐스트화하여 구조재로서의 사용가능여부를 검토하기 위해 재생 골재사용 및 양생 방법에 따른 기초물성실험을 수행하였다. 실험에 사용한 굵은 골재는 일반 쇄석(재생 골재의 입도, 물성 고려)과 재생 굵은 골재를 사용하였으며 잔 골재는 일반 잔 골재(재생 잔 골재의 입도 고려)와 재생 잔 골재를 사용하였다. 양생방법은 일반 수중 양생과 프리캐스트 공정과 동일한 고온 증기 양생의 두 가지 방법으로 실시하여 비교하였다.

2.2. 사용재료 및 배합설계

배합설계를 위하여 잔 골재 및 굵은 골재의 입도 및 기초물성 실험을 하였으며 결과는 표 4와 같다. 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 굵은 골재는 100% 재생 굵은 골재, 재생 골재의 입형을 고려한 일반 굵은 골재를 사용하였다. 잔 골재는 재생 잔 골재가 일반 잔 골재에 비해 #30체의 통과량이 많다는 점을 고려하여 미장용 모르타르에 사용되는 잔 골재와 콘크리트용 잔 골재를 혼합하여 입도와 조립율을 조절한 일반 잔 골재와 100%재생 잔 골재를 사용하여 공시체를 제작하였다.

배합설계에 있어서 슬럼프는 15±3cm를 목표로 설정하였으며 설계기준강도는 프리캐스트바닥판 설계시 재령 28일 압축강도인 350kgf/cm²로 설정·배합하였고 100%재생 잔 골재 및 재생 굵은 골재를 사용한 공시체와 100% 일반 굵은 골재 및 100% 일반 잔 골재를 사용한 공시체, 두 종류를 제작하였다(표 5).

표 4 골재의 물리적 성질 비교

구분		비중	마모율(%)	실적률(%)	흡수율(%)	#200체 통과량(%)
굵은 골재	일반 골재	2.59	20.1	60	1.20	-
	재생 골재	2.62	21.5	55	1.12	-
잔 골재	일반 골재	2.62	-	-	1.62	2.6
	재생 골재	2.60	-	-	2.61	3.1

표 5 배합설계표

골재	굵은 골재 최대치수(mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	물-시멘트비 (%)	잔 골재율 (%)	단위량(kgf/m ³)				
						물	시멘트	잔 골재	굵은 골재	AE제
일반 골재	25	15	5	38	38	172	465	627	1011	0.2325
재생 골재						172	465	622	1023	0.2325

2.3. 양생

본 실험에서는 양생방법에 따른 강도변화의 특성, 즉 프리캐스트 바닥판 제작에 재생 골재의 적용성에 대하여 고찰하기 위하여 일반 골재 수중 양생, 재생 골재 수중 양생, 일반 골재 고온 증기 양생 후 수중 양생, 재생 골재 고온 증기 양생 후 수중 양생의 2가지 방법으로 양생을 실시하였다. 양생온도 및 양생 지속시간은 현장과 유사한 조건의 실험을 위해 일반 시공현장 및 프리캐스트 공장에서 사용하는 방법인 80℃, 6시간 양생방식을 택하였고 온도상승률 20℃/hr, 온도하강률 40℃/hr, 최대양생온도 80℃/hr, 90%이상의 상대습도, 전양생 2시간 등 기타 실험조건은 그림 1과 같이 ACI⁽⁴⁾를 참고하여 실험하였다.

2.4. 실험결과 및 고찰

(1) 슬럼프 및 공기량

실험결과 재생 골재를 사용한 콘크리트 공시체 제작시 슬럼프값이 일반 골재에 비해 현저히 저하되는 것을 발견 할 수 있었으며 이는 재생 골재 생산시 완전히 제거되지 못한 모르타르의 미세한 조각들이 재생 잔 골재에 섞여 타설시 배합수를 흡수하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 공기량 측정결과에서도 재생 골재를 사용한 콘크리트에 배합설계시보다 약 1.1%의 미세한 공기량이 더 포함된 것을 발견할 수 있었으며 이 또한 재생 잔 골재표면에 붙어있는 모르타르와 재생 잔 골재에 섞여있는 미세한 모르타르조각에 의해 소량의 공기가 연행되었기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 재생 잔 골재를 100% 사용시에는 콘크리트의 내구성 등 다양한 부분에 대한 연구를 시행한 후 사용해야 할 것이다.

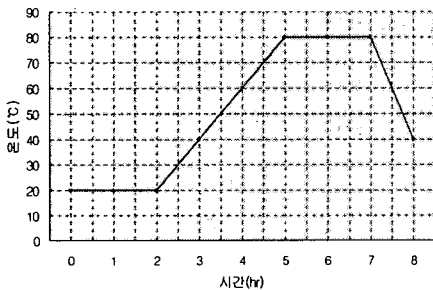


그림 1 스팀양생주기

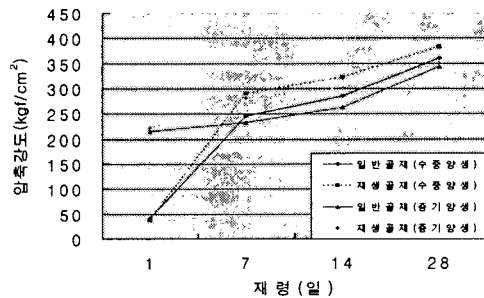


그림 2 골재·양생별 압축강도

(2) 탈형강도

고온 증기 양생을 실시한 시험체는 일반 골재, 재생 골재 두 종류 모두 재령 1일 탈형강도가 건설교통부 표준시방서의 탈형강도 기준인 100kgf/cm²을 초과하는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트의 주위의 온도가 상승하며 수화반응 속도가 가속되고 이에 따라 시멘트 페이스트의 강도발현속도 역시 증가되

있기 때문인 것으로 판단되며 따라서 시공현장 또는 프리캐스트 제작 공정시 굳지 않은 콘크리트 내부 물, 시멘트, 골재의 열팽창계수를 고려하여 전양생을 실시하고, 20℃/hr이하의 온도상승률, 최대온도 80℃, 40℃이하의 온도하강률 등의 양생조건을 적절히 조절한다면 재생 골재도 초기 탈형강도에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

(3) 압축강도

압축강도는 14일 재령시 일반적 연구결과와 마찬가지로 고온 증기 양생의 압축강도가 일반양생보다 작게 나타났으며 이는 고온 증기 양생시 각 재료간의 열팽창률의 차이에 의해 초기에 발생하는 공극의 증가나 내부균열이 장기압축강도에 악영향을 미친 것으로 판단된다. 재생 골재 역시 일반 골재와

사진 1 일반 골재와 재생 골재의 파괴단면



마찬가지로 고온 증기 양생의 공시체가 일반양생보다 낮은 강도를 나타냈으나, 재생 골재사용에 따른 고온 증기 양생 콘크리트의 품질변화는 거의 없는 것으로 판단된다(표 6, 그림2). 그러나 재령 7일 압축강도 측정 후 파괴단면(사진 1)을 살펴보면 일반 골재를 사용한 콘크리트(左)는 압축강도 측정시 굵은 골재가 파괴되었으나 재생 골재를 사용한 콘크리트(右)는 굵은 골재가 파괴되지 않고 굵은 골재와 모르타르의 경계면이 파괴되는 현상을 보였다. 또한 재령 14일 강도 측정시에도 이와 같은 양상을 보였다. 이것은 사용 골재자체의 압축강도, 부착력 등 골재품질에 의한 영향 또는 모르타르와 골재의 부착강도에 의한 영향인 것으로 판단되나 기타 다른 성질에 의한 영향인 것으로 사료되며 확실한 실험적 원인 규명이 필요하다.

(4) 인장, 휨 강도

재생 골재의 인장강도, 휨강도 역시 압축강도와 비례하여 증가, 감소하는 일반적인 취도계수와 강도비를 가지고 있으며, 인장강도는 압축강도의 1/11 정도, 휨강도는 압축강도의 1/5정도로써 재생 골재사용이나 재생 골재 고온 증기 양생에 따른 특이한 강도저하는 발견할 수 없었다.

(5) 건조수축

과거 재생 골재의 가장 큰 문제점이었던 건조수축에 의한 길이변화율을 알아보기 위해 건조수축이 가장 크게 나타나는 재령 14일 시점에서 그 값을 측정한 결과 재생 골재 사용 콘크리트는 일반 골재

표 6 실험결과

골재	양생방식	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도(kgf/cm ²)				인장강도 (kgf/cm ²)	휨강도 (kgf/cm ²)	건조수축 변화율(%)
				1일	7일	14일	28일(추정)	14일	14일	14일
일반 골재	수중 양생	17	5.4	40.5	244.7	285.1	360.2	25.2	57.0	0.120
	고온 증기 양생후 수중 양생			215.0	232.3	262.0	343.5	24.2	51.9	0.098
재생 골재	수중 양생	12	6.5	37.8	290.7	322.6	382.8	29.3	65.1	0.193
	고온 증기 양생후 수중 양생			220.9	280.7	301.4	350.6	26.8	61.0	0.169

사용 콘크리트보다 건조수축률이 약 0.04%정도 크게 나타나는 미세한 차이를 보였으며 이는 재생 잔 골재에 부착된 미세한 모르타르에 의한 흡수율 증가에 의한 영향인 것으로 판단된다. 양생법에 따른 건조수축의 차이는 고온 증기 양생이 일반수중 양생보다 0.03%정도 높은 결과를 나타냈으며 이는 고온 증기 양생 초기의 재료간의 다른 열팽창계수, 재생 잔 골재의 기부착 모르타르에 의한 흡수율 증가에 따른 미세공극 발생에 의한 결과로 판단된다.

3. 결론

(1) 현재 발생하는 건설폐기물의 대부분이 매립이나 성토 등의 부가가치가 낮은 용도로 재활용되고 있으며 건설시장에서 골재수급 사정이 매우 악화된 현 시점을 고려해 볼 때 구조재로의 활용이 가능한 1종 골재수준의 재생 골재가 생산 가능하다는 점은 매우 괄목할 만한 점이며 재생 골재의 효과적인 재활용으로 골재수급난을 해결해 나가야 할 것이다.

(3) 재생 골재 콘크리트의 프리캐스트화에 대한 기초적 연구실험 결과 100% 재생 굵은 골재 및 재생 잔 골재를 사용하여 제작한 콘크리트의 수중 양생 후 압축강도, 인장강도, 휨강도, 건조수축 모두 일반 골재와 비슷한 양호한 성능을 나타냈으며, 고온 증기 양생 후 압축강도, 인장강도, 휨강도, 건조수축 또한 모두 일반 골재와 거의 흡사한 품질을 나타내었다. 이는 기존의 일반 재생 골재에서 문제시되었던 재생 굵은 골재 표면의 잔여 모르타르를 모두 분리시킴으로써 흡수율을 저하시켜 양생 후 공극을 줄이고 콘크리트내부를 밀실하게 할 수 있었기 때문으로 판단된다. 또한 재생 잔 골재에 의한 약간의 슬럼프 감소, 공기량 증가 등 위커빌리티 개선문제는 적량의 감수제사용 또는 재생 잔 골재의 체 가름을 통한 기존 모르타르제거 등의 방법을 통해 해결할 수 있으리라 사료된다. 다만 재생 골재가 콘크리트의 장기 구조적 성능에 미치는 영향에 관한 연구는 아직 미흡하며 구조재로의 사용을 위해서는 추후의 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

(2) 재생 골재를 이용하여 일반콘크리트와 동등한 수준의 재생 골재 콘크리트를 제작하기 위한 방법으로 콘크리트의 품질관리가 용이한 장점을 지닌 프리캐스트 공정의 도입이 가능하며 이를 활용하면 더욱 양질의 재생 골재 콘크리트를 생산할 수 있으리라 판단된다.

4. 참고문헌

1. “2002년 전국 폐기물발생현황”, 환경부.
2. “2002년 전국 골재소비량”, 한국골재협회.
3. 오종택, “건설폐기물 친환경처리 및 고순도 재생 골재 생산 신기술”, 인선이엔티 주식회사.
4. ACI Committee 308, “Standard Practice for Curing Concrete 308, ACI 308-92”, ACI Standard 92 .
5. 김석원, 나도식, 이동우, 김병균, “양생조건에 따른 재생 골재 콘크리트의 강도 특성에 관한 실험적 연구”, 1996년도 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집.
6. 이진용, “재생콘크리트의 강도발현 및 건조수축 특성 연구”, 한국콘크리트학회지 Vol.9 No.6
7. 문한영, 김성수, “土木材料學”, 구미서관.