

폐콘크리트를 이용한 재활용 골재의 특성 고찰

申 恒 植

(한국과학기술원 토목공학과 교수)

1. 서 론

재활용 시스템은 폐기물로 부터 유용한 물질을 회수하고 폐기물 이전의 원래의 상품과 같거나 그와 유사한 상품을 제조, 생산, 조립하기 위하여 회수된 물질을 재이용하는 일련의 공정을 말한다. 근래에 국내에서는 활발한 도시의 재개발과 노후된 건물의 철거 등 여러가지 개발 및 건설과정에서 막대한 양의 폐콘크리트가 발생되고 있다. 그러나 이에 비하여 이를 처분할 수 있는 매립지 및 최종처분장의 확보는 더욱더 어려워 지고 있는 것이 우리의 실정이며 이로 인하여 재개발 및 건설사업으로 발생하는 폐콘크리트를 농경지 및 자연녹지 등에 불법처분하는 사례가 빈번하여 지고 있다. 국내의 경우 지난 '92년 하루평균 발생된 사업장 일반폐기물 총량 48,058톤/일 중에서 서울을 제외한 전국 각지에서 발생된 건축물 폐재류는 이의 약 2.53%인 1,216톤/일이며 전체 일반폐기물량의 약 1%를 차지하고 있다(1). 특히 발생된 건축물 폐재류중 폐콘크리트가 차지하는 양은 약 30% 이상이며 이들의 감량화가 불가능하고 재활용하지 않을 경우 전량 매립지에 최종처분되어야 한다는 사실을 상기할 때 이들의 재활용방안에 관한 연구나 정책적 배려가 매우 시급하다는 것을 알 수 있다.

Frondistou - Yannas는 적어도 연간 204,000톤의 콘크리트 파쇄물이 발생되면 콘크리트의 재활용은 충분한 경제적 타당성을 갖는다고 평가하였다(2). 콘크리트를 생산하기 위해 사용되는 굵은골재로서 폐콘크리트를 활용하는 기술은 김 등(3, 4), Frondistou-Yannas(2), Nixon(5), Hansen(6) 및 Sri Ravindrarajah (7) 등에 의해 연구되었다. 비록 콘크리트 구조물 요소로부터 철근등의 보강재를 분리하는 기술적인 문제들이 완전히 해결된 것은 아니지만 콘크리트 파쇄물들의 처분이 환경적인 문제를 야기시키는 도시 중심지에서 폐콘크리트의 재활용은 고려할 만한 대안이 될 수 있다.

최근 폐콘크리트를 포함한 건설폐기물의 급증과 매립지 등 최종 처분장의 부족에 대처하고 환경오염의 방지를 위하여 건설폐기물의 재활용에 대한 필요성이 점점증하고 있으며, 이를 위하여는 건설폐기물의 처리기술 및 재활용기술에 대한 깊이 있는 연구와 함께 국가적 차원에서 건설폐기물의 재활용체계가 확립되어야 할 것이다. 본고에서는 이와 관련하여 재개발 및 건설과정에서 필연적으로 발생하는 폐콘크리트를 골재로 재활용할 경우 폐콘크리트 재활용골재의 특성과 그것으로 만들어진 콘크리트의 특성에 관한 상기 연구자들의 연구결과들을 요약정리하였다.

2. 폐콘크리트의 발생 및 재활용 방안

2. 1 폐콘크리트 발생현황

국내의 경우 건설폐기물의 발생량 및 재활용에 관한 구체적인 통계자료가 없어 정확한 실태를 파악하기가 곤란하지만 '91년 연간 발생된 건축물을 포함한 건설폐기물 배출량의 추정치는 총 3,036만톤이며 일본의 건설폐기물 배출량에 대한 통계자료를 토대로하여 국내의 건설 폐기물 종류별로 배출량을 추정하면 그림 1에서 보여주는 바와 같고 그 중에서 폐콘크리트의 발생량은 33.5%로서 연간 1,016만톤에 달할 것으로 추정되고 있다(3).

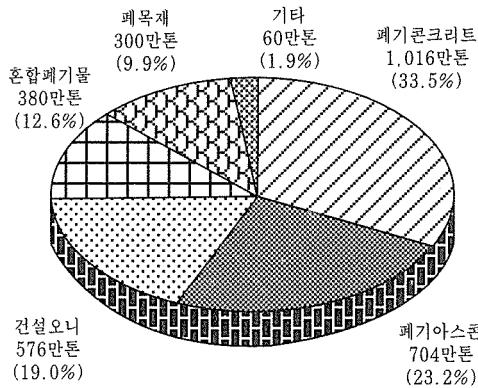


그림 1. 국내 연간 건설폐기물 배출량의 추정(1991년)(3)

2. 2 폐콘크리트의 재활용방안

건설폐기물 가운데 재활용 재료로서 가장 이용도가 높은 것 중의 하나가 폐콘크리트이다. 따라서 폐콘크리트는 중간처리에 의해 재생재료로서 적극적인 이용이 요구된다. 건설현장에서 발생한 폐콘크리트를 콘크리트용 골재로서 재이용함에 있어 일반적인 공정 및 공급시스템은 그림 2와 같다. 또한 폐콘크리트는 파쇄 및 제조 상태에 따라 표 1과 같이 다양한 용도로 이용될

수 있다(3).

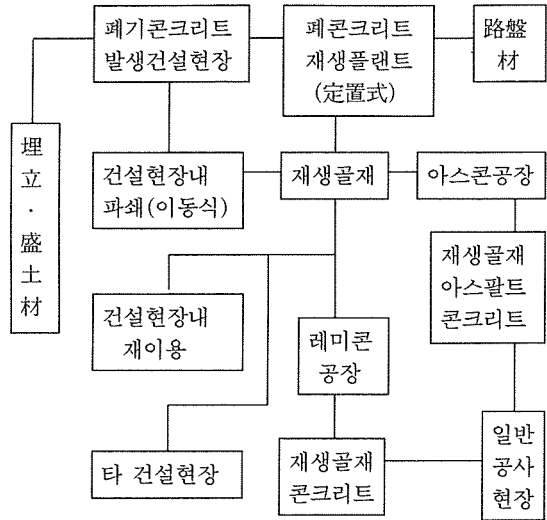


그림 2. 폐콘크리트 재활용 골재의 제조 및 공급시스템(3)

한편, 최근 정부가 입법한 '자원절약과 재활용 촉진에 관한 법률' 제12조와 시행령 제11조에서는 건설폐기물을 배출하는 지정부산물 배출업자에 대하여 토사, 폐콘크리트덩이 등의 건설폐기물을 재활용하도록 규정하고 있다. 또한 건설폐기물 배출사업자의 재활용지침 제4조(재활용방법) 및 제5조 1항(재활용계획의 수립)을 살펴보면 중점관리대상 건설업자는 체적합계 500m³ 이상 또는 총 중량이 1,000톤 이상인 콘크리트덩이 등 건설폐기물의 재활용계획을 수립·시행하고 그 실적을 기록·보존하도록 하고 있다. 정부에서는 표 2와 같이 연도별 건설폐기물 재활용 목표율을 설정하여 건설폐기물의 재활용을 강력히 추진해 나갈 계획으로 하고 있다.

3. 재활용 골재 및 재생콘크리트의 제조

골재로 재활용하기 위한 원콘크리트는 자연사와 화강암을 최대 20mm의 크기로 파쇄한 굵은골

표 1. 폐콘크리트의 재활용 응도

형 상	용 도	활 용 방 안
부재·덩어리	어 초 바닥갈기돌	建設의 보, 기둥부분을 切斷하여 어초로 재이용하고 얇은부분은 가공하여 바닥갈기돌로 이용
1차 파쇄상태	滑石 바닥다짐재 道路用材料	建設現場에서 1차 破碎된 콘크리트를 30-50mm 정도 로 2차 破碎하여 바닥다짐材料, 埋設材, 路盤材로 이 용하거나 不良土와 혼합교반하여 이용
조골재	아스콘용·骨材 콘크리트용·骨材	廢棄콘크리트를 破碎하여 생산된 조골재를 아스팔트 콘크리트용 粗骨材로 이용하거나 콘크리트 제조용 5 mm이상의 粗骨材로 재이용
세골재	콘크리트용·骨材	廢棄콘크리트를 破碎한 세골재를 콘크리트용 혹은 시 멘트 2次製品用 細骨材로 재이용
미분말	지반개량	地盤 深層 混合處理에 이용

표 2. 정부의 건설폐기물 재활용 목표율

연 도 별	목 표 율(%)		
	토 사	콘크리트덩이	아스팔트 콘크리트덩이
1995년 12월 31일까지	30	25	10
1996년 1월 1일까지 1997년 12월 31일까지	45	35	25
1998년 1월 1일부터	60	50	35

자료) 건설부

재가 사용되었으며 연구자 모두 보통포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였다. 재활용될 폐콘크리트 골재는 원콘크리트로부터 준비된 150mm의 정육면체 공시체를 파쇄하여 37.5-20mm, 20-14mm, 14-10mm, 10-5mm 그리고 5mm 이하 등 크기 별로 다양하게 선별되었다. 재활용 콘크리트 굵은골재의 입도분포는 화강암 골재의 분포에 준하여 이와 유사하게 파쇄된 다양한 크기의 콘크리트 골재를 혼합하여 구성하였다.

Sri Ravindraraiah(7) 등은 재활용 골재를 제조하기 위한 원콘크리트의 배합비를 다양한 등급으로 구성하였으며 각 배합비에 따른 원콘크리트를 H(상급), M(중급), L(하급) 등의 등급으로 표시하였고, 각각의 원콘크리트에서 얻

어진 굵은골재를 사용한 재생콘크리트를 Hr, Mr, Lr로 표기하였다. 또한 재생콘크리트의 배합비 역시 다양한 등급으로 구성하여 HrH, HrM, HrL, MrH, MrM, MrL, LrH, LrM9, LrL 등으로 표기하였다. 다음 표 3은 원콘크리트의 배합구성과 이로부터 얻어진 재활용 굵은골재를 사용한 재생콘크리트의 배합구성을 보여주고 있다.

한편, 재활용 잔골재의 사용은 표 4에 제시된 바와 같은 배합비로 연구되었다(8). 또한 재활용 굵은골재와 재활용 잔골재 모두를 사용하는 방안에 대한 배합비는 표 5에서 보여주는 바와 같으며, 자연골재와 재생골재간의 비중차이로 인해 골재의 동등체적을 기초로 배합설계를 실시

표 3. 원콘크리트 및 재활용 굵은골재를 이용한 재생콘크리트의 배합구성

배합구분	시멘트	잔골재	굵은골재	배합수	물/시멘트
H	375	815	995	190	0.51
M	315	885	980	190	0.60
L	260	1000	925	190	0.73
Hr	410	835	870	205	0.50
Mr	340	960	820	205	0.60
Lr	275	1065	785	205	0.75

* 배합구성은(kg/m³)

표 4. 자연사 또는 재활용 잔골재를 이용한 콘크리트 배합구성

잔골재의 종류	시멘트	잔골재	굵은골재	배합수	물/시멘트
자연사	386	875	875	212	0.55
재활용 잔골재	382	860	860	210	0.55

* 배합구성은(kg/m³)

표 5. 자연골재 혹은 재활용 굵은 골재 및 잔골재를 이용한 콘크리트의 배합구성

배합구분	시멘트	총 골재량	배합수	물/시멘트
GS	344	1818	196	0.57
RS	334	1692	190	0.57
RR	344	1668	196	0.57

* 배합구성은(kg/m³), GS : 화강암 굵은골재 및 자연사, RS : 재활용 굵은골재 및 자연사
RR : 재활용 굵은골재 및 재활용 잔골재

하였다.

4. 재활용 골재 및 재생콘크리트의 특성

4. 1 재활용 골재의 특성

4. 1. 1 입도분포

그림 3에서 화강암 파쇄골재와 원콘크리트를 파쇄한 후 분석된 파쇄생성물 및 이로부터 얻어진 재활용 굵은골재(Recycled Concrete Coarse Aggregate)의 입도곡선을 보여주고

있다. Sri Ravindrarah 등(7)은 파쇄생성물의 입도분포는 원콘크리트의 등급에 크게 영향을 받지 않는다고 보고하였다. 5mm이하 잔골재의 실제적인 발생량은 상급, 중급, 하급의 원콘크리트로부터 각각 23.1%, 25.7%, 26.5%의 중량비로 발생되었다. 일반적으로 하급의 콘크리트가 사용될수록 잔골재의 생성분율이 높았고 이는 아마도 하급의 콘크리트에 잔골재의 배합분율이 높기 때문이고 상급의 콘크리트에 비하여 하급의 콘크리트가 비교적 쉽게 분쇄되는 경향 때문인것으로 판단하였다.

한편, 그림 4에서는 재활용 잔골재(RCFA :

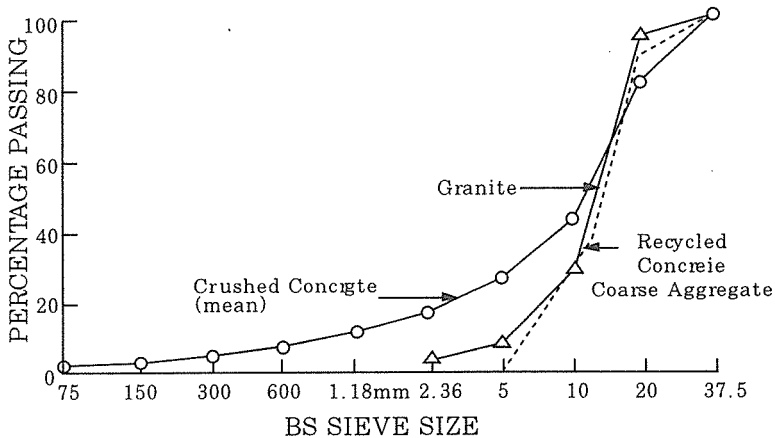


그림 3. 파쇄 생성물, 화강암 및 재생 굵은골재의 입자분포

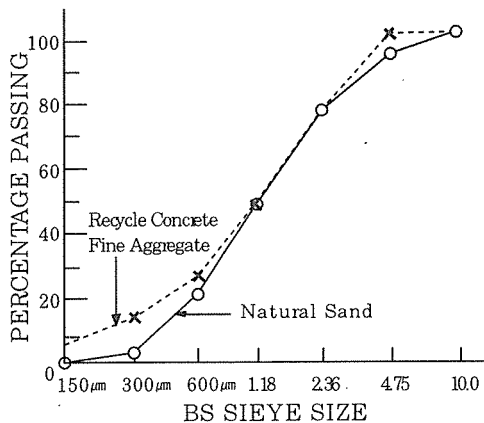


그림 4. 자연사 및 재생 잔골재의 입자분포

Recycled Concrete Fine Aggregate)와 원콘크리트에서 사용된 자연사(natural sand)의 입도곡선을 보여주고 있다. 그림 4에서 보는 바와 같이 재활용 잔골재는 자연사보다 훨씬 더 세립의 입도를 가지고 0.15mm 이하의 입경을 갖는 분율이 10% 정도이다. 재활용 잔골재의 조립율(fineness modulus)는 3.30이고 이에 비하여 자연사는 3.59의 값을 갖는다.

4. 1. 2 입자의 형태와 표면구조

재활용 굵은골재와 화강암 골재는 모두 모가 나있는 쇄석형태이다. 또한 재활용 굵은골재의 표면구조는 원래의 자연골재에 오래된 모르타르가 붙어있는 부착면으로 인하여 일반적으로 거칠고 다공성이며 재활용 굵은골재의 모르타르 함량은 체적비 약 50% 정도까지 심하게 변한다(7). 어떤 경우에는 재활용 굵은골재의 입자가 완전히 모르타르로 구성되는 경우도 있다. Hansen과 Narud (9)는 재활용 골재의 입도분포가 16-30mm, 8-16mm 그리고 4-8mm에 대하여 모르타르의 성분이 각각 30%, 39% 그리고 60% 이었다고 보고하였다. 또한 분쇄된 원콘크리트의 등급은 골재내 모르타르의 함량에 큰 영향을 미치지 않는다고 보고한 바 있다.

리트의 등급은 골재내 모르타르의 함량에 큰 영향을 미치지 않는다고 보고한 바 있다.

재활용 잔골재는 주로 분쇄된 원래의 골재와 오래된 모르타르로 구성된다. 모르타르는 부분적으로 수화된 시멘트풀로 구성되며 재활용 잔골재에서 미세한 입자를 형성한다(8). 재활용 잔골재중 큰 입자들은 그 모양이 불규칙하고 각이진 파쇄체 형태이며 재활용 굵은골재처럼 표면구조 역시 일반적으로 거칠며 다공성이다.

4. 1. 3 비중

표면건조 포화상태(SSD)에 대한 비중은 화강암의 경우가 가장 크고 표 6에서 보여주는 바와 같이 자연사의 비중이 그 다음으로 크다. 재활용 굵은골재의 비중은 다양한 등급의 원콘크리트에도 불구하고 크게 차이가 나지 않았으며 재활용 잔골재의 비중이 가장 작은 값을 보여주었다. 재활용 골재의 비중이 작은 이유는 재활용 골재 입자의 높은 다공성에 기인한다. 이는 재활용 굵은골재와 잔골재의 겉보기 비중과 표면건조 포화비중의 차이가 자연골재의 차이에 비하여 매우 크다는 것으로 부터 알 수 있다.

표 6. 자연산 골재와 재활용 골재의 물리적 특성

골재의 종류	표면건조 포화비중	겉보기 비중	수분 흡수량 (%)
화강암	2.67	2.68	0.3
자연사	2.61	2.64	0.6
재활용 굵은골재(H)	2.44	2.64	5.4
재활용 굵은골재(M)	2.46	2.63	4.5
재활용 굵은골재(L)	2.44	2.63	4.7
재활용 잔골재	2.32	2.54	6.2

4. 1. 4 물의 흡수성

골재의 물에 대한 흡수성은 비중값의 비교에서 보여준 바와 같이 투수성 공극의 양과 직접적인 관련이 있다. 표 6에서 보여주는 바와 같이 재활용 굵은골재와 잔골재의 높은 흡수능은 재생 콘크리트 제조시 어느정도 동등한 작업성을 얻기 위해서는 더 많은 첨가수를 필요케 하는 중요한 인자이다. 그림 5은 재활용 골재 입자의 크기가 작을수록 오래된 모르타르 성분의 증가로 인해 흡수성이 증가함을 보여주고 있다.

4. 1. 5 재활용 골재의 기계적 물성특성

표 7은 화강암 골재와 재활용 굵은골재에 대한 압밀시험, 분쇄시험 및 마모시험의 결과를

보여주고 있다. 표 7에서 보여주는 바와 같이 등급이 낮을수록 재활용 굵은골재의 기계적 물성특성이 저조한 것은 화강암의 강도에 비하여 재활용 굵은골재내의 약한 모르타르 성분이 증가하고 화강암과 그에 부착된 모르타르 간의 결합강도가 저조하기 때문이다. 상기와 같은 기계적 작용에 대하여 그나마 양호한 저항력은 상급의 원콘크리트로 부터 얻어진 재활용 골재에서 나타난다.

4. 2 재활용 굵은골재 재생콘크리트의 특성

표 8은 표 1에서 언급된 일련의 배합에 대한

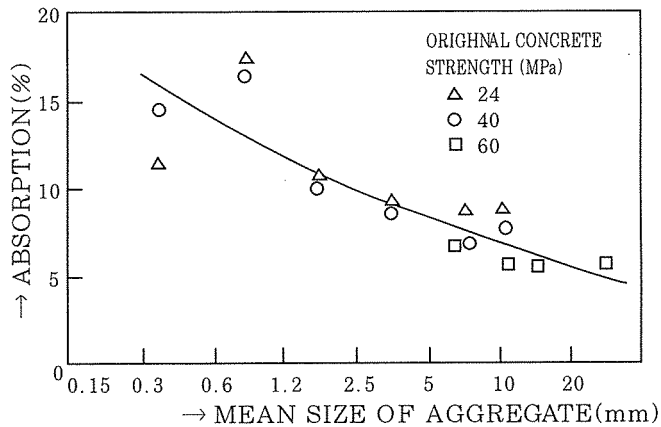


그림 5. 재활용골재 입자의 크기가 흡수성에 미치는 영향

표 7. 화강암 골재와 재활용 굵은골재의 기계적 물성특성 비교

골재의 종류	압밀시험치 (%)	분쇄시험치 (%)	마모시험치 (%)
화강암	14.6	16.9	18.1
재활용 굵은골재(H)	26.0	28.7	37.2
재활용 굵은골재(M)	27.6	29.9	40.8
재활용 굵은골재(L)	31.0	33.5	40.8

표 8. 화강암골재 또는 재활용 굵은골재 콘크리트 배합의 특성

배합구분	슬럼프 (mm)	Vebe 시간 (sec)	압밀계수	습윤밀도 (kg/m ³)
H	55	4.4	0.93	2370
HrH	65	4.0	0.96	2250
HrM	75	4.0	0.94	2280
HrL	65	5.0	0.94	2320
M	25	11.0	0.92	2360
MrH	85	5.0	0.94	2250
MrM	60	4.0	0.98	2260
MrL	65	1.6	0.98	2260
L	30	12.0	0.92	2340
LrH	50	5.0	0.93	2240
LrM	80	5.0	0.94	2240
LrL	45	5.4	0.94	2250

작업성(워커빌리티)과 습윤밀도의 결과를 보여 준다. 원콘크리트 및 재생 굵은골재를 사용한 재생콘크리트의 압축강도, 간접 인장강도 및 휨 강도(flexural strength)와 탄성계수가 표 9에 제시되어 있다.

4. 2. 1 콘크리트 배합의 특성

재생콘크리트 배합에서는 자연사와 재활용 굵은골재를 사용하는 것이 가장 일반적이다. 재활용 굵은골재를 사용하는 재생콘크리트 배합이 소정의 작업성을 얻기 위해서는 일반 콘크리트보

다 약 8% 정도의 자유수 함량이 증가되어야 함을 명심해야 한다. 재생콘크리트는 증가된 수분 함량과 재활용 굵은골재의 낮은 비중으로 인해 더욱 낮은 습윤 밀도를 갖는다.

4. 2. 2 압축강도

일반적으로 재활용 굵은골재를 사용하는 재생 콘크리트는 유사한 조성의 원콘크리트 보다 저조한 압축강도를 나타낸다. 하급의 원콘크리트로 부터 얻어진 중급의 재활용 굵은골재 재생콘크리트의 압축강도는 최대 24%의 강도감소를

표 9. 자연골재 또는 재활용 굵은골재를 이용한 콘크리트의 특성

배합구분	압축강도 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)	휨강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (10 ³ kg/cm ²)	70일 건조수축 (μ strain)	비변형 (μ strain/ kg/cm ²)
H	433.7	24.0	42.9	321.4	255	1.38
HrH	413.3	25.5	46.9	275.5	495	-
HrM	398.0	23.5	36.2	270.4	490	-
HrL	382.7	25.5	41.8	255.1	340	2.16
M	382.7	23.5	40.8	372.4	305	1.76
MrH	301.0	21.9	37.8	250.0	470	-
MrM	306.1	24.5	34.7	255.1	420	2.86
MrL	290.8	22.4	37.8	229.6	405	-
L	290.8	18.9	32.7	290.8	330	3.44
LrH	250.0	17.3	36.7	234.7	440	4.60
LrM	275.5	18.4	32.7	224.5	380	-
LrL	244.9	21.4	29.6	214.3	385	-

보였다. 압축강도의 일반적인 감소는 다음 몇가지 요인에 기인한다고 보고하였다(10). 우선, 재활용 굵은골재는 화강암 굵은골재보다 더 많은 공극을 가지고 있기 때문에 결과적인 총공극의 증가가 발생된다. 둘째로는 재활용 골재 자체의 강도가 화강암 골재보다 저조하다. 마지막으로 재활용 굵은골재 입자에는 원 화강암에 부착되어 있는 오래된 모르타르로 인해 재생콘크리트에 연약결합 부분이 훨씬 더 많기 때문이다. 또한 재활용 굵은골재 콘크리트에는 오래된 모르타르와 새로운 시멘트풀 간에 약하게 결합

된 부분을 많이 포함하고 있다.

4. 2. 3 간접인장과 휨강도

표 9로부터 압축강도와는 다르게 인장 및 휨강도는 재활용 굵은골재를 사용한 효과가 명확하게 나타나지 않는다. 이와같이 나타나는 한가지 가능한 이유는 재생콘크리트내에 자연의 굵은골재 함량이 낮아졌기 때문이라 볼 수 있다. Johnston(11)은 골재의 함량이 감소할 경우 압축강도는 감소하는 반면 인장강도는 증가한다고 보고한 바 있다.

4. 2. 4 탄성계수

표 9에서 보는 바와 같이 재활용 굵은골재를 사용한 재생콘크리트의 탄성계수는 동일한 압축 강도를 가지는 자연골재 콘크리트의 탄성계수보다 저조한 값을 갖는다. 이는 재활용 굵은골재 입자에 낮은 탄성계수를 갖는 오래된 모르타르가 상당량 포함되기 때문인 것으로 판단된다. 재활용 굵은골재를 사용한 정육면체의 재생콘크리트 강도와 탄성계수간에는 식 1과 같은 관계가 주어진다. 한편, Teychenne 등(12)은 자연골재 콘크리트에 대하여 아래와 같은 관계식 2를 제안하였다.

$$E=7.77f_{cu}^{0.33} \dots \dots \dots \text{식1}$$

$$E=9.10f_{cu}^{0.33} \dots \dots \dots \text{식2}$$

4. 2. 5 건조수축과 변형

자연골재 콘크리트와 재생 굵은골재를 사용한 콘크리트에 대한 건조수축과 변형의 결과는 표 9에 제시되어 있다. 화강암 대신 재활용 굵은골재를 사용하면 콘크리트의 건조수축과 변형 모두를 증가시킨다. 이것은 첨가수의 증가와 재활용 굵은골재의 저조한 탄성계수에 기인한다. 더구나 재활용 골재의 모르타르가 수축되고 변형

될 수 있다.

4. 3 재활용 잔골재를 사용한 재생콘크리트의 특성

재활용 굵은골재를 생산하는 과정에서 5mm체를 통과하는 잔재료가 중량비 약 25% 정도 생산된다. 이들을 재생콘크리트의 잔골재로 사용할 때 콘크리트의 특성에 미치는 영향이 보고된 바 있다(8). 이 연구결과가 표 10에 제시되어 있다. 보고된 강도 및 탄성계수는 28일간 수중양생된 콘크리트의 시험결과이다. 표 10에서 보는 바와 같이 압축강도와 인장강도에 대한 인장강도 혹은 휨강도의 비가 자연사 대신 재활용 골재를 사용한 영향을 크게 받지 않았음을 알 수 있다. 재활용 잔골재를 사용한 경우 탄성계수는 약 15% 감소되었고 건조수축은 약 30% 증가되었다. 그러나 총 변형은 크게 영향받지 않았다.

4. 4 재활용 굵은골재와 잔골재를 사용한 재생콘크리트의 특성

표 11에는 각각 28일간 양생된 일반콘크리트

표 10. 자연사 또는 재활용 잔골재를 이용한 콘크리트의 특성

잔골재	압축강도 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)	휨강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (10 ³ kg/cm ²)	90일 건조수축 (μ strain)	비변형 (μ strain/ kg/cm ²)
자연사	332.7	27.0	45.6	299.0	230	3.28
재활용골재	341.8	30.8	49.7	263.3	295	3.31

와 재생콘크리트의 강도와 탄성계수 그리고 90일 후 콘크리트의 건조수축 결과를 제시하였다. 또한 자연골재 콘크리트에 대한 재생콘크리트의 상대적인 비교치가 표 12에 제시되어 있다.

4. 4. 1 콘크리트 배합의 특성

표 5의 배합비를 갖는 콘크리트 배합의 초기 특성은 골재의 재활용 여부에 큰 영향을 받지 않고 작업성(위커빌리티)이 유사하나 시간이 경

표 11. 자연골재 및 재활용 골재를 이용한 콘크리트의 특성

배합구분	압축강도 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)	휨강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (10 ³ kg/cm ²)	90일 건조수축 (μ strain)
GS	344.9	24.6	49.8	295.9	205
RS	300.0	21.7	44.8	252.0	325
RR	285.7	19.7	42.3	219.4	430

표 12. 일반콘크리트에 대한 재생콘크리트의 상대적인 특성비교(%)

배합구분	압축강도	인장강도	휨강도	탄성계수	90일 건조수축
GS	100	100	100	100	100
RS	87	88	90	85	159
RR	83	80	85	87	211

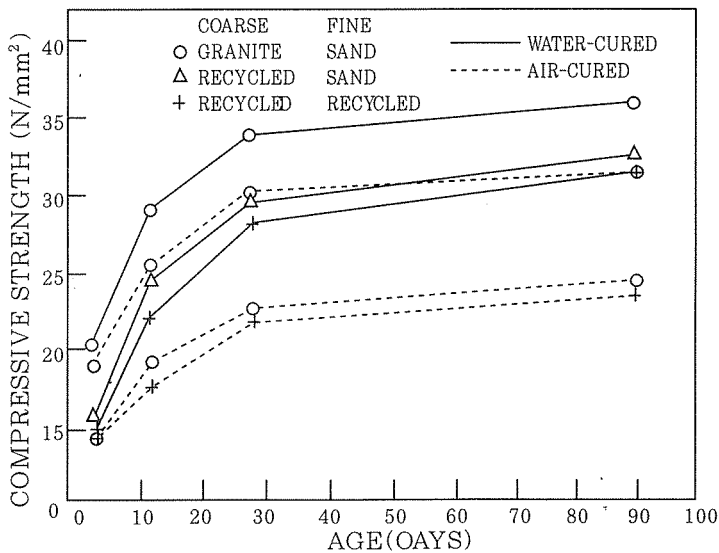


그림 6. 자연골재 및 재활용 골재를 사용한 콘크리트의 재령에 따른 압축강도의 발현

과됨에 따라서 재생콘크리트 배합이 자연골재 콘크리트보다 현저한 작업성 감소를 보인다고 보고하였다(13). 더구나 재활용 굵은골재와 잔골재를 동시에 사용한 콘크리트 배합의 초기 응결은 자연골재 콘크리트보다 훨씬 빨랐고 이러한 결과는 재활용 골재의 높은 물흡수능이 콘크리트 배합의 “working time”을 감소시킬 수 있음을 보여준다.

4. 4. 2 압축강도

양생방법과 사용골재 및 재령에 따른 압축강도의 발현은 그림 6에서 보여주는 바와 같다. 또한 표 11 및 12에서 보는 바와 같이 재활용 굵은골재가 압축강도에 미치는 영향은 재활용 잔골재 보다 크다. 한편, 재활용 골재를 사용한 콘크리트는 유사한 배합구성을 갖는 자연골재 콘크리트보다 비교적 일정하게 10% 정도가 감소하는 결과를 보였다고 보고하였다(13).

4. 4. 3 인장 및 휨강도

그림 7은 재활용 골재의 사용이 28일 양생된 콘크리트의 인장 및 휨강도에 미치는 영향을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 재활용 굵은 골재와 재활용 잔골재를 동시에 사용한 콘

크리트의 인장 및 휨강도가 자연골재를 사용한 콘크리트보다 저조함을 알 수 있다. 표 11과 표 12에 제시된 결과로부터 재활용 굵은골재가 재활용 잔골재보다 인장 및 휨강도에 더 큰 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다.

4. 4. 4 탄성계수

표 12에서 보여주는 바와 같이 재활용 굵은골재 및 잔골재를 사용한 콘크리트의 탄성계수는 자연골재를 사용한 콘크리트보다 약 13% 작게 나타났다. 이러한 탄성계수의 차이는 재령이 길어질수록 심화되며 90일 재령에서는 26%에 달하는 것으로 밝혀졌다(13).

또한 양생정도의 불충분은 탄성계수 감소의 정도를 증가시키는 것으로 밝혀졌다. 90일간 습윤양생이 아닌 공기양생이 실시된 재생콘크리트의 탄성계수는 자연골재 콘크리트보다 37% 이상이 감소하였다고 보고되었다. 한편, 재활용 굵은골재를 사용한 콘크리트의 탄성계수는 자연골재 콘크리트보다 15-40% 정도 감소되는 것으로 보고된바 있으며(7, 10, 14, 15), 자연골재(GS), 재활용 굵은골재와 자연사(RS) 그리고 재활용 굵은골재와 잔골재(RR)를 사용한 콘크리트의 강도와 동적 탄성계수간의 관계는 다

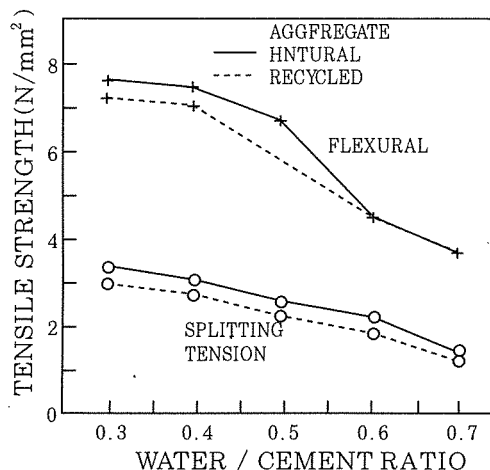


그림 7. 자연골재 및 재활용 골재를 사용한 콘크리트 물/시멘트 비가 인장 및 휨강도에 미치는 영향

음 식 3, 4, 5와 같이 제안되었다.

$$E=5.31f_{cu}^{0.5}+5.8\cdots\text{식3(자연골재)}$$

$$E=3.48f_{cu}^{0.5}+13.1\cdots\text{식4(재활용 굵은골재 및 자연사)}$$

$$E=3.02f_{cu}^{0.5}+10.7\cdots\text{식5(재활용 굵은골재 및 잔골재)}$$

4. 4. 5 건조수축

자연골재가 재활용 굵은골재와 잔골재로 동시에 대체될 경우 건조수축이 두배 이상으로 증가된다는 것을 표 11 및 12에서 보여주고 있다. 강도나 탄성계수와는 다르게 콘크리트의 건조수축은 재활용 굵은골재와 잔골재 모두에 의해 크게 영향을 받는다. 재활용 굵은골재와 잔골재를 사용한 콘크리트의 건조수축 증가는 원골재에 부착된 오래된 모르타르의 수축과 저조한 골재 탄성계수의 복합효과에 기인한다.

4. 4. 6 산성조건에 대한 내화학적

일련의 실험결과에 의하면 자연골재 콘크리트와 재생콘크리트는 염산, 황산 및 유산에 침식당한다고 보고되었다(16). 재생콘크리트의 배합설계는 자연골재 콘크리트의 압축강도와 동등한 강도를 발현하도록 설계되지만 유산에 20일간

침적된 재생콘크리트의 중량손실은 자연골재 콘크리트가 25.5%의 손실을 나타내는데 비하여 29.6%에 이른다. 한편, 염산과 황산에서는 재생콘크리트의 중량감소는 각각 15.0%와 16.3%로 나타났다.

4. 5 재생콘크리트의 개선방안

재생콘크리트의 강도 및 탄성계수의 저하, 내산성의 감소 및 건조수축과 변형의 증가는 배합조정을 하거나 실리카흙 또는 플라이애쉬를 첨가함으로써 부분적으로 혹은 완전히 보완될 수 있다. 이같은 방법을 연구한 내용은 다음과 같다. 우선 두가지 그룹의 콘크리트 배합을 준비하였다. 첫번째 그룹은 다음 4가지 배합으로 구성되었다. 자연골재 만을 사용한 control 배합(Mix GS), 재활용 굵은골재와 잔골재를 사용한 배합(Mix RR), 재활용 굵은골재와 잔골재를 사용하는 한편 시멘트 중량비 10%의 플라이애쉬를 사용한 배합(Mix RRF) 및 시멘트 중량비 5%의 실리카흙을 사용한 배합(Mix RRS) 등이다. 두번째 그룹의 배합은 실리카흙을 첨가하고 배합조정을 실시하였다. 두번째 그

표 13. 재령 28일의 control 콘크리트와 재생콘크리트의 상대적인 특성비교(%)

특 성	Mix GS	Mix RR	Mix RRF	Mix RRS	Mix GS1	Mix RR1	Mix RRM
압 축 강 도	100	83	96	103	100	109	112
인 장 강 도	100	80	106	103	100	121	128
휨 강 도	100	85	127	129	100	122	131
정적 탄성계수	100	74	73	76	100	87	87
90일 건조수축	100	211	176	151	100	148	141

룹의 배합은 자연골재를 사용하고 물/시멘트 비를 0.5로 한 control배합(Mix GS1), 굵은골재는 재활용 골재를 사용하고 잔골재는 50%의 재활용 골재와 50%의 자연사를 사용하는 한편 물/시멘트 비를 0.48%로 조정한 배합(Mix RR1) 그리고 Mix RR1과 같은 배합비를 사용하였으나 시멘트 중량비 5%의 실리카흙을 첨가한 배합 등이 연구되었다(17).

연구결과 표 13에 제시되어 있는 바와 같이 실리카흙 혹은 플라이애쉬를 사용함으로써 강도의 감소가 완전히 혹은 부분적으로 보완될 수 있음을 보여주었다. 한편, 재생콘크리트의 건조수축은 이같은 방법으로 어느정도 보완될 수는 있으나 자연골재를 이용한 콘크리트보다 항상 크게 발생하는 것으로 보고되었다(17).

가장 심각한 것은 위와같은 방법에도 불구하고 탄성계수가 control 배합의 탄성계수 만큼 복구되지 않았다는 사실이다. 콘크리트의 구성 중 가장 큰 부피를 차지하는 재활용 골재의 저조한 탄성계수의 영향은 실리카흙이나 플라이애쉬 등의 첨가에 의한 강도증가로는 쉽게 보완되지 않았다. 자연골재 또는 재활용골재 콘크리트에 실리카흙을 첨가하는 방안은 이들 콘크리트의 내산성을 향상시키는 것으로 밝혀졌다(16).

5. 결 론

본고에서는 새로운 콘크리트를 생산하기 위한 골재로서 오염되지 않은 폐콘크리트를 사용하는 방안에 대한 다양한 연구결과들을 소개하였다. 지금까지의 연구결과에 의하면 재활용골재의 특성은 원래의 자연골재에 부착되어 있는 상당량의 오래된 모르타르에 의해 영향을 받고 있음을 보여주었다. 재활용골재의 높은 다공성은 다량의 물을 흡수하는 흡수성과 비중의 저하 및 강도의 약화를 야기시키는 중요한 요인이다. 어떤 면에서는 재활용 골재는 인공경량 골재와 유사한 특성을 갖는다. 하지만 재활용 골재는 보통의 무게를 갖는 자연골재와 가벼운 모르타르의

복합물이다. 자연골재를 대체하기 위하여 재활용골재를 사용하는 것은 무시할 수 없는 압축, 인장 및 휨강도의 저하를 발생시킨다. 특히 문제가 되는 것은 탄성계수, 수축 및 변형 등과 같은 콘크리트의 변형특성이다. 지금까지의 연구결과에 의하면 강도의 저하는 다음과 같은 몇 가지 방법에 의하여 쉽게 보완될 수 있음을 보여주었다. 첫째, 물/시멘트 비의 감소, 둘째, 잔골재로서 자연사의 부분적인 이용, 셋째, 플라이애쉬 및 실리카흙의 첨가 등이 보완방법이 될 수 있다. 재생콘크리트의 물/시멘트 비를 감소시킬때 야기되는 작업성 감소를 개선하기 위하여 감수혼화제를 사용할 수 있을 것이다.

폐콘크리트의 분쇄과정에서 생성되는 잔골재의 양이 25% 정도로 제한적이기 때문에 잔골재를 부분적으로 재활용골재로 사용하는 것은 훌륭한 방법이 될 것이다. 그러나 이같은 방법들은 콘크리트의 변형특성, 특히 탄성계수의 개선에는 그다지 큰 효과를 미치지 못하는 것으로 밝혀졌다. 그러나 향후 채취 가능한 양질의 자연골재가 지속적으로 감소하기 때문에 재활용골재의 이용은 골재확보의 대안이 될 뿐만 아니라 콘크리트 구조물 해체로부터 발생하는 폐콘크리트 처분을 위한 훌륭한 해결책 까지도 제공한다.

참고문헌

1. 환경처, 한국환경연감, 1993
2. S.A. Frondistou-Yannas, "Recycled concrete as new aggregate", Progress in Concrete Technology, Edited by V.M. Malhotra, CANMET, Canada, pp. 639-684, 1980.
3. 김무한, 건설폐기물의 리사이클시스템 및 재활용방안에 관한 연구, 한국폐기물학회지, 제11권 3호, pp. 444-455, 1994
4. 김무한 외, 재생골재의 혼합조건에 따른 재생골재콘크리트의 시공성 및 공학적 특

-
- 성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 논문집, 제9권 11호, pp. 109-120, 1993
5. P.J. Nixon, "Recycled concrete as an aggregate for concrete-a review : , Materials and Structures : Research and Testing, Vol. 11, No. 65, pp. 371-378, 1978.
 6. T.C. Hansen, "Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, Second state-of-the-art report, Developments 1978-1984 : , Materials and Structures, Vol. 19, No. 111, pp. 201-246, 1986.
 7. R. Sri Ravindrarajah and C.T. Tam, "Properties of concrete with crushed concrete as coarse aggregate : , Magazine of Concrete Research, Vol. 37, No. 130, pp. 29-38, 1985.
 8. R. Sri Ravindrarajah and C.T. Tam, "Recycling concrete as fine aggregate in concrete", The Int. J. of Cement Composites and Lightweight Concrete", Vol. 9, No. 4, pp. 235-241, 1987.
 9. T.C. Hansen and H. Narud, "Strength of recycled concrete made from crushed coarse aggregate", Concrete International: Design and Construction, Vol. 5, No. 1, pp. 79-83, 1983.
 10. K.C.G. Ong and R. Sri Ravindrarajah, "Fracture energy of concrete with natural and recycled aggregate concrete", Proc., Int. Conf. on Fracture of Concrete and Rocks, Houston, USA, 1987.
 11. C.D. Johnston, "Strength and deformation of concrete in uniaxial tension and compression", Magazine of Concrete Research, Vol. 22, No. 70, pp. 5-16, 1970.
 12. D.C Teychenne, L.J. Parrot and C.D. Pomeroy, "The estimation of the elastic modulus of concrete for the design of structure", CP 23/78, Building Research Establishment, Garston 1978.
 13. R. Sri Ravindrarajah, Y.H. Loo and C.T. Tam, "Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 39, No. 141, pp. 214-220, 1987.
 14. T.C. Hansen and E. Boegh, "Elasticity and drying shrinkage of recycled-aggregate concrete", J. of the American Concrete Institute, Proc., Vol. 82, No. 5, pp. 648-652, 1985.
 15. S.A. Frondistou-Yannas, "Waste concrete as aggregate for new concrete", J. of the American Concrete Institute, Proc., Vol. 74, No. 8, pp. 373-376, 1977.
 16. R. Sri Ravindrarajah, "Effect of cement paste quality and aggregate type on the acid resistance of concrete", Supplementary paper, FIP 92 Congress, Budapest, Hungary, May 1992.