폐콘크리트로부터 골재 재생에 관한 연구

강승규* · 서형남 · 민경소
<라파즈한라시멘트 기술연구소>

1. 서 론

1960~1970년대의 도시 집중화 및 경제 개발이 활발하던 시기의 콘크리트 구조물의 노후화에 따른 재개발 사업이1990년 이후 활발해 지면서 건설 폐기물의 발생이 기하 급수적으로 증가하고 있다. <표 1>에 의하면 1997년 건설 폐기물의 발생량은 약 1,740만 톤으로 그 중 콘크리트가 약 53%인 930만톤을 차지하고 있으며 2003년에는 폐콘크리트의 발생량이 1,800만 톤 이상에 달할 것으로 추정하고 있다.

골재자원 수급의 경우 국내 골재의 부존량은 약 131억m3이며 경제성, 법규상의 제약으로 실제 이용 가능량은 약 30.5%인 약 40억m3로 추정되나 환경규제의 강화, 각종 민원의 발생 등으로 실제 이용 가능량은 더욱 감소될 것으로 예상된다

<표 1> 건설폐기물의 발생현황 (톤/일)

년도	총계	가연성	불연성		
		폐합성수지	콘크리트	아스팔트	기타
1996	28,425	833	14,981	3,398	1,244
1997	47,777	811	25,469	7,489	2,372
1998	47,693	655	28,165	7,867	1,532
1999	62,221	968	39,819	9,317	2,849
2000	78,777	1,311	49,352	11,388	4,744

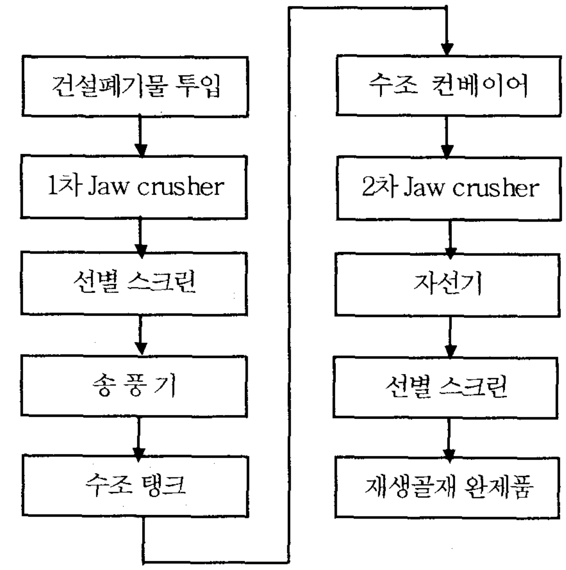
2003년 골재 수급 전망은 약 2억 4천만m3이며 이중 레미콘과 기타 콘크리트용의 수요는 약 9,600백만m3 정도로 예상되며 골재 매장량의 확보 규모는 97년 말 기준 14억m3로 향후 5년간 예상 수용량 11억m3을 충족할 것으로 보이지만 지역간 불균형 및 공급부족 현상이 예상되며, 5년 이후인 2003년부터는 골재 부족 현상이 심화될 것으로 판단된다.

그러나 발생하는 폐콘크리트를 재생하여 콘크리트용 골재로 재활용 할 경우, 신규 골재의 반입량과 위탁 처리에 따른 비용을 줄일 수 있어 자원 재활용 및 원가 절감 효과를 동시에 얻을 수 있을 것으로 판단되지만, 아직까지 골재 부족 현상은 인지하면서도 발생되는 폐콘크리트의 재활용은 단순히 대지 조성재, 기초 매립재, 노반재, 아스팔트 혼합재로 이용하는 것이 대부분으로 <표 2>에서 보는 바와 같이 재활용율은 높지만 대부분이콘크리트용 골재와는 거리가 멀다.

국내에서도 이미 폐콘크리트로부터 골재를 재생재생·판매하고 있으나 처리 방법과 입수되는 건축폐기물의 종류에 따라 다른 특성을 보인다.

<표 2> 건설폐기물의 처리방법별 현황

연 도	계(톤/일)	매 립	소 각	재활용
1996	28,425	10,988	848	16,589
1997	47,777	9,747	1,457	36,573
1998	47,693	7,112	1,007	39,574
1999	62,221	10,600	1,278	50,343
2000	78,777	10,021	2,071	66,685



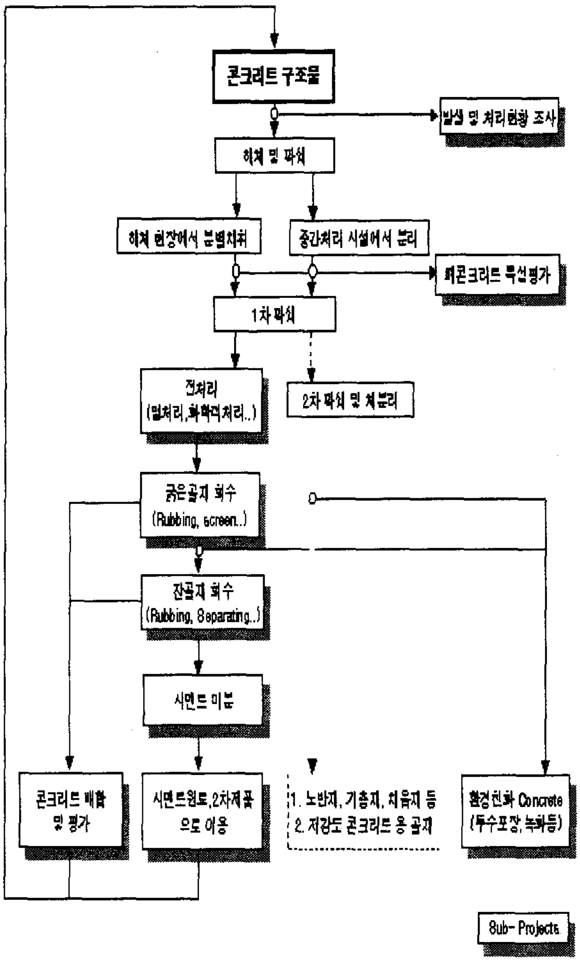
<그림 1> 건설폐기물 처리 과정

대부분의 재생 골재 처리 방법은 <그림 1>과 같이 Jaw crusher를 이용하여 500mm의 크기로 파쇄한 후, 수조탱크에서 수중 폭기조를 이용해 세척을 하고 2차 Jaw crusher를 통하여 약 200~300mm의 크기로 파쇄한다. 파쇄된 골재는 자선기를 통하여 철분을 제거하고 40~25mm, 25~9mm, 9mm 이하의 재생 골재 완제품으로 분류하여 생산된다. <표 3>은 제조, 판매되는 재생 골재의 특성이다.

본 연구의 전체적인 목표는 폐콘크리트를 이용하여 KS규격을 만족하는 보통 콘크리트용 골재 제조와, 골재 재생시 부산되는 시멘트 미분말의 재활용 및 재생된 골재를 골재의 품질에 따라 녹화식생 및 투수 포장용 콘크리트로의 이용에 대한 기술을 개발하여 콘크리트 분야에서

<표 3> 생산된 재생골재 및 그 특성

업체	생산골재	특성
S사	40mm 이하 25mm이하, 석분	비 중 : 2.6, 흡수율 : 2.4
I사	25mm 이하 9mm 이하	비중 : 2.22 (25mm) 2.20 (9mm) 흡수율: 5.37 (25mm) 5.91 (9mm)



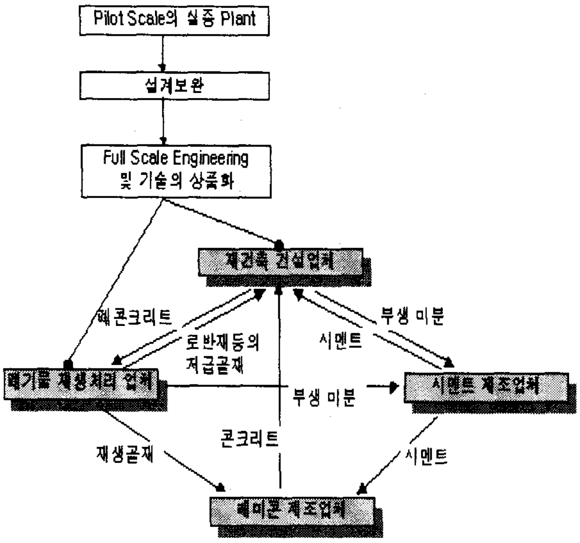
<그림 2> 재생골재의 생산 및 재활용 개념도

완전 리싸이클링 시스템을 구축하는 것이다. <그림 2>와 <그림 3>에 고품질 골재 회수와 활용에 대한 기본 개념을 나타내었다.재건축 현장에서의 골재의 수급 및 재생골재의 특성에 따라 KS 규격의 골재는 일반 콘크리트용으로, 저급 굵은 골재는 포러스 콘크리트용으로, 골재 재생시 부산되는 시멘트 분말은 시멘트 원료 또는 2차 제품으로 재활용이 가능할 것으로 판단된다.

금번 실험에서는 상기의 목표 중 하나로서 폐콘크리트로부터 재생 굵은 골재에 관한 제조 기술을 다룬 관한 것이다.

2. 실험 방법

2.1 출발원료



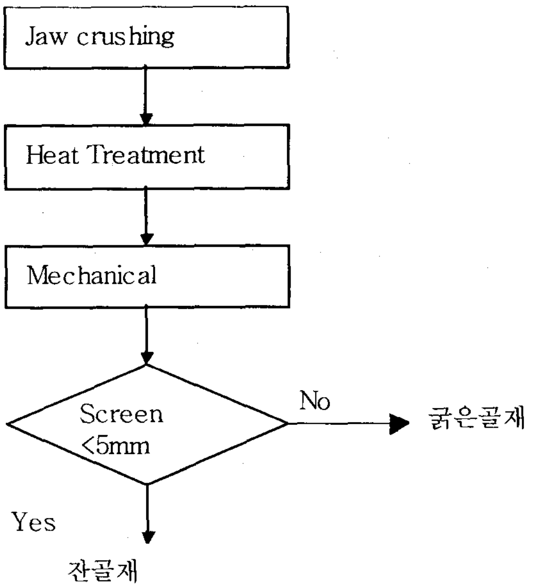
<그림 3> 골재 재생처리 기술의 실용화

수집된 폐콘크리트는 S폐기물(강릉), S산업(동해), W환경(청주) 등의 건설 폐기물 수거업체로부터 샘플링하였으며 이들에는 적벽돌, 스폰지, 플라스틱, 고철 등을 포함하고 있어 손으로 선별하였다. Reference로 사용된 콘크리트는 실험실에서 제조한 일반 콘크리트이다.

2.1 재생처리 과정

본 실험의 재생 처리 과정을 간략하게 나타내면 <그림 4>와 같다. 대개의 폐콘크리트는 크기가 대체로 40~50mm 전후이고 이는 골재와 모르타르가 결합된 상태이므로 먼저 1차 기계적 처리로 Jaw crusher를 이용하여 골재와 모르타르를 분리하였다. 열처리는 당 연구소가 시험 제작한 터널식 전기로로 시행 하였으며, 2차 기계적 처리는 당 연구소에서 보유하던 기존 ball mill과 새롭게 디자인하여 크기 및 내부 구조를 개선한 ball mill 의하여 파쇄 및 마찰법의 원리로 처리하였다.

제조되는 재생 골재의 품질은 열처리의 온도 및 2차 기계적 처리에서mill의 회전 속도와 회전 시간, ball의 크기 및 개수에 의해 결정될 것으로 판단되며, 초기의 폐콘크리트에 비해 분쇄된 40~5 mm사이의 재생 굵은 골재의 무게비(회수율)은 40% 이상을 목표로 하였다. <표. 4>는 재생 처리실험에 있어서 실험 조건들을 나열하였다



<그림 4> 재생 골재 처리도

2.3 재생골재 물리시험

본 실험에서 제조된 재생골재의 물리적 성질을 알아보기 위하여 재생골재의 흡수율, 비중 시

<표 4> 골재 재생 시험 조건 변수

구분	실험조건	
폐콘크리트	S산업(동해), W환경(청주), 실험실 제작 콘크리트	
열처리온도	200 / 250 / 300 / 350 ℃	
Ball mill	종류	2종
	Ball charge 종류	A/B/C*
	회전수	200~600
	회전속도	20~50 RPM

*** Ball charge 종류**

크기	60mm	50mm	40mm	30mm
A	10	20	30	60
B	5	29	30	60
C	0	19	48	108

<표 5> 사용 결합재의 화학 및 물리적 특성

화학특성	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	LOI
OPC	21.91	6.29	3.02	61.73	2.86	2.26	1.37

물리특성	비중	분말도 (cm^2/g)	안정도 (%)	응결시간 (h:m) 초결	응결시간 (h:m) 종결
OPC	3.14	3,421	0.03	4:15	7:25

험을 KS F 2503 굵은 골재의 비중 및 흡수율 시험 방법에 따라 행하였다.

2.4 재생골재를 사용한 콘크리트 실험

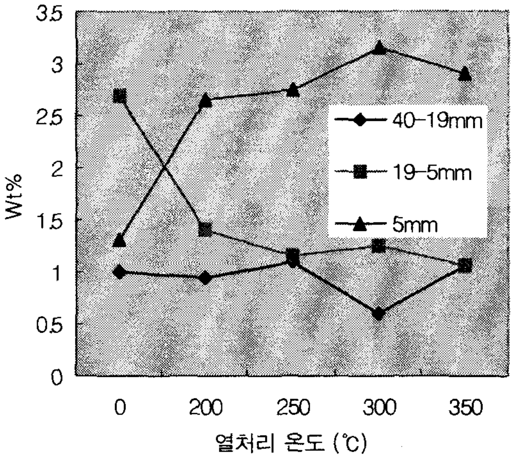
현재 재생처리 되어 생산되는 재생골재가 콘크리트의 품질에 미치는 영향을 알아보기 위해 굳지 않은 콘크리트 및 경화 콘크리트의 물성 변화에 대해 조사 하였다. 재생골재는 제조 업체에서 생산되는 재생골재를 공급 받아 사용하였다. 콘크리트 제조를 위한 결합재로서 시멘트는 당사의 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC라함)를 사용하였으며 <표 5>에 기초물성 및 화학성분을 나타내었다.

콘크리트 혼합은 잔골재와 결합재를 투입하여 90초간 건비빔을 하고 굵은 골재를 투입하여 60초 동안 2차 건비빔을 실시한 뒤 혼합수를 투입하여 120초간 혼합하였다. 굳지 않은 콘크리트의 물성측정은 KS F 2402의 슬럼프시험, KS F 2421의 공기량 시험 방법에 준하여 측정하였다.

한편, 경화콘크리트의 특성분석을 위한 콘크리트 시험체는 Φ10×20cm의 압축강도 측정용 원주시험체와 10×10×40cm의 휨 강도 측정용 각주시험체로 제작하였으며, 콘크리트의 압축강도 및 휨 강도용 시험체는 소요재령까지 20±3℃의 수중에서 양생하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열처리 시험 결과

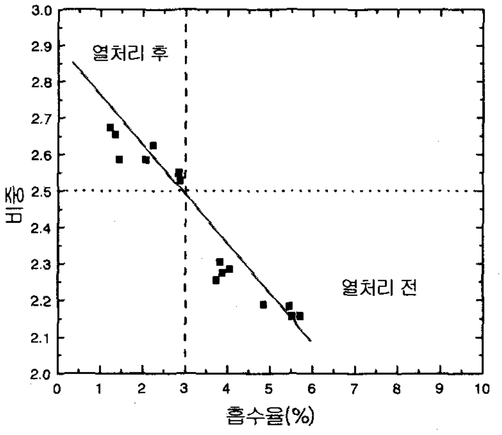


<그림 5> 열처리 온도에 따른 기계적 처리 효과

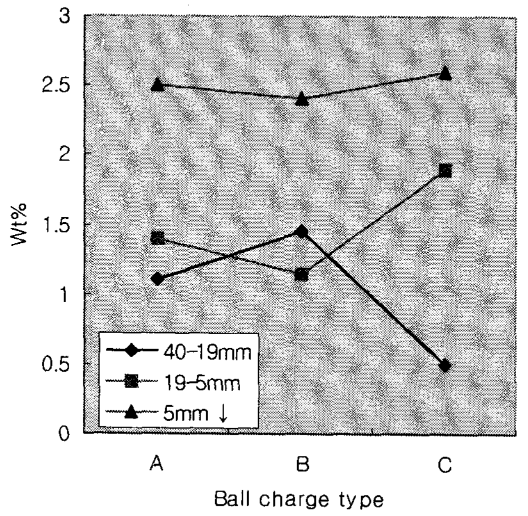
Ball mill 조건을 동일하게 하고, 열처리를 변화시켰을 때의 효과는, <그림 5>와 같이 열처리 온도가 높아질수록 5mm 이하의 부분의 비율이 증가하였다. 이는 열처리에 따라 모르타르의 열화에 의해 계면의 부착력이 약화되어 기계적 마찰에 의한 효과가 상승한 것으로 판단된다. <그림 6>은 열처리 전과 후의 재생 골재의 비중 및 흡수율을 나타내는 것으로 열처리 한 후, 기계적 마모를 행할 경우가 더 많은 양의 모르타르 부분의 감소로 비중은 상승하고 흡수율은 감소하는 패턴을 보여주는 것이라 판단된다.

3.2 기계적 마찰 시험

Ball의 종류를 변화시켰을 때는 <그림 7>과



<그림 6> 열처리와 골재의 물리특성과의 관계



<그림 7> Ball 종류에 따른 기계적 처리효과

같이 40~19mm, 19~5mm 범위내에서 입도는 변화지만5mm 이하 분에 대해서는 그리 큰 변화는 없었다. 이는 밀 내부의 볼 종류의 변화는 볼의 역할 중 열화된 계면을 분리하는 파쇄력과 남아있는 모르타르 부분을 마모시켜 제거하는 마찰력 중 마찰력의 변화 보다는 파쇄력의 변화를 일으키는 것으로 판단된다. 그러나 골재의 회수율에 있어서는 큰 변화가 없었다.

3.3 열처리 및 기계적 마찰 시험

<표 6>은 ball charge와 RPM을 일정하게 유지하고, 온도와 볼밀의 회전수를 변화시키면서 얻은 재생 굵은 골재에 대한 회수율이다. 온도가 증가하면 회수율은 대체로 감소하는 경향을 가지며또한 회전수가 증가할수록 같은 온도에서라도 회수율에 있어서 큰 차이를 보인다. 이것은앞서서 실험한 결과와 마찬가지로 열처리 온도가 증가함에 따라 골재와 모르타르 간의 계면의 결합력이 약해졌기 때문이라 판단되며, 사용된 ball mill내의볼들이 밀의 회전 운동 동안 골재표면의 모르타르를 마모시키거나, 분리하는데 역할을 한 것으로 판단된다. 그러나 300℃ 에서는 350℃와 역전되는 현상을 가진다. 위 실험의 결과로 폐콘크리트로부터 골재를 보다 유효하게 분리하기 위해서는 온도와 밀의 회전수, 밀 내부의 볼 종류 등이 적정한 조건을 가져야 하며, 초기에 굵은골재의 회수율 목표를 40%로 하였기 때문에, 온도는 200, 250, 350℃가 적정하며, 밀의 회전수는 200 이 바람직함을 알 수 있다.

<표 6> 온도와 회전수에 따른 골재 회수율

온도	Ball type	회전수	RPM	회수율 (%)
200℃	A	200	30	47
		300	30	37
		400	30	30
250℃	A	200	30	45
		300	30	31
		400	30	28
300℃	A	200	30	37
350℃	A	200	30	42

3.4 회수율과 재생 골재의 특성

회수율이 40%를 초과(70%~50%)하는 재생골재에 대해서는 비중 및 흡수율이 모두 콘크리트용 굵은 골재의 물리 특성 값에서 크게 벗어남을 <표 7>에 나타내었다.

골재의 회수율이 높으면 골재는 그 표면에 다량의 모르타르가 부착되어 있으며, 재생골재의 흡수율과 비중의 특성을 해치게 되는데, 콘크리트의 해체재중에 포함되어 있는 골재는 본래 양질의 골재였기 때문에, 재생골재의 품질은 골재 주위에 부착되어 있는 모르타르의 물리적 성질과 그 부착량에 의존한다. 특히 강도에 대해서는 부착 모르타르의 강도가 높다고 해서 재생골재의 품질이 좋아진다고 할 수는 없다.

즉 부착 모르타르의 강도가 낮을수록 파쇄 단계에서 모르타르 분이 분쇄되어 양질의 골재를 얻을 수가 있다. 따라서 재생골재의 품질은 모르타르 등의 부착량으로 평가를 해도 적당하다고 생각되어 <그림 8>에 재생골재에 부착된 모르타르양과 재생골재의 흡수율과의 관계를 나타내었다.

회수율이 40 % 전후인 재생 굵은 골재의 물리

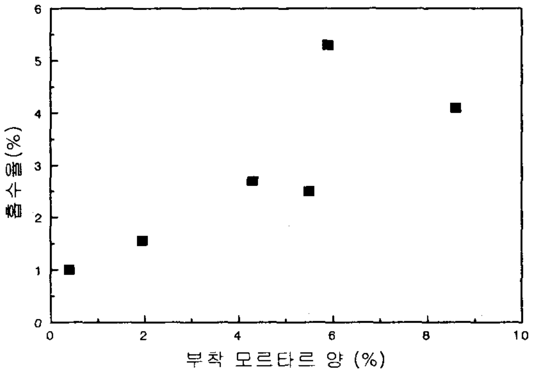
<표 7> 굵은 골재 회수율 대비 물리특성

재생 굵은골재	굵은 골재 특성		
	회수율(%)	비중	흡수율(%)
D-1	74	2.3	4.94
L-4	67	2.4	3.86
L-5	62	2.4	3.28
L6	67	2.38	3.82
L-7	74	2.3	4.94
C-F	80	2.33	4.28

* L : Lab 제조 콘크리트 사용
C, D : C 및 D 사 폐콘크리트 사용

특성을 <표 8>에 나타내었고, <표 9> 에는 비교를 위하여 콘크리트용 굵은 골재와 재생 굵은 골재의 품질 기준을 나타내었다.

C환경에서 샘플링된 폐콘크리트를 가지고 재생 처리한 굵은 골재(C-1~C-7)는 Ref와 유사한 비중을 가지지만, 흡수율에 있어서는 높은 값을 가지게 되는데 이것은 실험실에서 제조된 콘크리트의 경우는 사용된 원골재의 크기 분포가 우수하고 골재에 부착된 모르타르가 양호하며 골재 외에는 첨가된 것이 없으나 외부 폐기물 처리장에서 수집된 콘크리트로 처리된 재생 굵은



<그림 8> 부착 모르타르 강도와 흡수율의 관계

골재에는 벽돌 등이 잔존하고, 골재에 부착된 모르타르의 품질이 다소 떨어지기 때문으로 판단된다. 하지만, Ref.와 C2~C7 모두 <표 9>에 나타난 재생 굵은 골재의 품질기준 뿐만 아니라 콘크리트용 굵은 골재 물리 특성을 모두 만족시킨다.

또한 기존에 시판되고 있는 재생 굵은 골재의 물성보다도 우수한 특성을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 기존의 골재 처리 과정처럼 단순히 Jaw crusher를 이용한 파쇄와 세척, 스크린에 의한 크기 선별 등의 방법을 이용하지 않고, 1차 파쇄를 한 후 열처리를 하여 폐콘크리

<표 8> 열처리 및 기계적 처리 후의 재생 굵은 골재의 실험조건 및 물리적 특성

샘플	열처리온도	Ball mill			회수율(%)	굵은 골재 특성	
		Ball charge	회전수	RPM		비중	흡수율
Ref.1	300	A	200	30	40	2.58	1.12
Ref. 3	350	A	200	30	40	2.59	0.81
C-1	200	A	200	30	44	2.47	2.49
C-2	200	A	300	30	37	2.52	1.81
C-3	250	A	200	30	44	2.54	2.11
C-4	250	A	400	30	28	2.61	1.25
C-5	300	A	200	30	37	2.54	2.17
C-6	300	A	200	30	55	2.50	2.52
C-7	350	A	200	30	42	2.58	1.85

<표 9> 천연 및 재생 굵은 골재 품질

물리 특성	콘크리트용 굵은 골재	재생 굵은골재 품질기준		
		1종	2종	3종
흡수율 (%)	3.0 이하	3이하	5이하	7이하
비중	2.5 이상	2.2 이상		

트 중의 골재와 모르타르 계면을 약화시킨 후 다시 ball mill에 의하여 마찰 및 충격력을 이용하여 골재와 모르타르를 분리하였기 때문이라 판단된다.

본 실험에서 재생 처리되어 제조된 굵은 골재가 현재보다 더 낮은 흡수율을 가지기 위해서는 부착되어 있는 모르타르를 더 제거하여야 하지만, 그러한 경우에는 회수율이 너무 낮고, 무리한 2차 기계적 처리가 오히려 골재에 충격을 주어 균열을 유발할 수 있는 위험이 있고 또한 동시에 발생하는 5mm 이하의 분쇄물에 대해서는 과량의 미분을 초래하여, 향후 목적으로 하는 잔골재 제조에도 바람직하지 못할 것으로 판단된다.

3.5 재생 굵은 골재를 사용한 콘크리트

재생골재는 생산과정에서 폐콘크리트에 압박 또는 충격을 가하여 제조되므로 균열이 분포되어 있고 표면의 몰탈 등이 완전히 제거되지 못하여 흡수율이 높고 품질이 불안정하다. 이러한 재생 골재를 사용한 재생 콘크리트가 보통 콘크리트에 비하여 강도 등이 취약한 것은 재생 골재 콘크리트의 품질이 골재 특성에 기인하기 때문이다.

<표 10>는 시판되고 있는 재생 골재를 사용하여 재생 콘크리트 제조하기 위한 콘크리트 배합비이다.

3.5.1 굳지 않은 콘크리트의 물성 변화

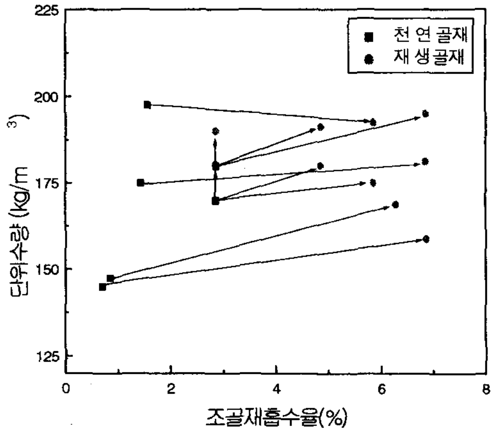
경화 콘크리트의 건조수축이나 중성화, 염분 침투성에 대해서는 콘크리트 조직의 치밀성을 확보하는 것이 중요하기 때문에 굳지 않은 콘크리트의 단위 수량을 낮게 제어할 필요가 있다.

굵은골재를 천연골재에서 재생골재로 치환할 경우, 동등한 슬럼프를 얻기 위해 필요한 콘크리트의 단위수량의 변화를 <그림 9>에 나타내었다.

그 결과, 천연골재를 재생골재로 치환하면 단위수량이 증가하는 경향을 알 수 있었다. 증가의 경향은 일정하지는 않지만, 흡수율이 5% 커지면 단위수량의 증가는 약 5~15kg/cm3정도 증가하는 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 천연골재를 재생골재로 치환했을 경우, 단위수량이 증가하는 이유는 입자형상의 차이, 즉 재생골재는 원래 콘크리트를 파쇄하여 제조하기 때문에 입자형상이 각이 져 있기 때문이라고 생각된다. 따라서 적당한 입도 분포의 재생골재를 사용한 경우의 콘크리트의 단위 수량은 천연골재를 사용했을 경우와 같은 정도로 할 수 있다고 생각된다.

<표 10> 재생 골재 사용 배합

구분	굵은 골재 최대 치수 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	물시멘트비 (%)	잔골재율 (S/a)	단위량 (kg/m^3)				시방 배합량 (kg)				비고 (혼화재)
						W	C	S	G	W	C	S	G	
천연골재	25mm	12	1	55	37	174	316	689	1173	6.26	11.3	24.8	42.2	시멘트 중량의 0.1~0.3%
재생골재	25mm	12	1	55	37	174	316	689	1082	6.26	11.3	24.8	38.9	



<그림 9> 천연골재를 재생골재로 치환했을 경우의 단위수량 변화

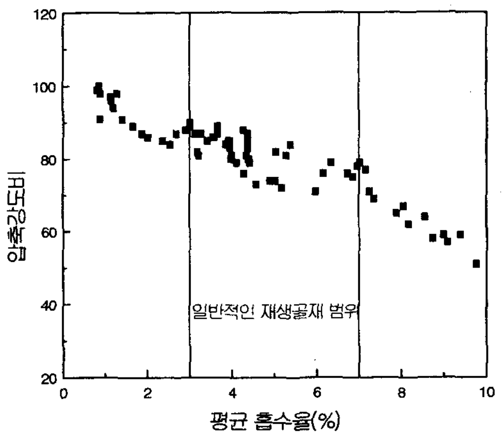
<표 11>에 같은 배합 비에서 천연골재를 재생 골재로 치환했을 때의 슬럼프 경시변화를 나타내었다. 그 결과, 슬럼프의 경우 역시 재생 콘크리트 골재는 일반 골재와 많은 차이를 나타내고 있는 것을 알 수가 있었다. 이 결과 역시 폐콘크리트 재생골재의 입형이 불량한 결과로 생각되어지며, 콘크리트 단위수량 변화의 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수가 있었다.

3.5.2 경화콘크리트의 물성 변화

압축강도는 천연골재를 사용한 경우의 압축강도를 100으로 하고, 이에 대한 비율(압축강도비)로 표시하였다. 그 결과, 평균 흡수율이 커질수록 압축강도 비는 감소하는 경향을 알 수가 있었다. 평균 흡수율이 1% 증가함에 따라 압축강도 비의 감소율은 차이는 있지만 약 4%정도를 나타내었다. 일반적인 재생골재의 흡수율의 범위는 3~7%정도이고, 평균으로 5%정도라고 생각할 때, 재생골재를 사용했을 경우의 압축강도

<표 11> 천연골재를 재생골재로 치환했을 경우의 슬럼프 경시변화 (단위 : cm)

	천연골재	재생골재
배합후	11	6.2
10분후	7	4.8
20분후	4	2.5



<그림 10> 평균 흡수율과 압축강도의 비

비는 천연골재를 사용했을 경우의 약 80% 정도임을 알 수가 있었다.평균 흡수율과 압축강도의 관계를 <그림 10>에 나타내었다

4. 결 론

기존의 폐콘크리트를 재생하기 위하여 사용된 기계적 파쇄 방법만을 사용하지 않고, 고품질의 일반 콘크리트용 골재를 재생하기 위해서 당 소에서 디자인한 터널식 연속 전기로로 열처리하고 ball mill을 사용하여 기계적 처리를 행한 실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 1차 파쇄된 폐콘크리트를 200, 250, 300, 350℃에서 각각 가열한 결과, 열처리한 온도가 높을수록 동일한 조건의 2차 기계적 처리의 효과가 우수하였고, 재생된 골재의 품질도 우수하였다.

2) 열처리 후의 2차 기계적 처리방법, 즉 ball milling에 의한 마찰 및 충격 방법에 따라 재생 골재의 품질이 차이가 있었다.

3) Ball milling 방법 중, ball milling의 시간이 가장 큰 영향을 주었고, RPM과 사용된 ball 종류에 따라서도 영향을 받았다.

4) 열처리와 기계적 마찰과 충격을 동시에 가한

폐콘크리트로부터 KS 규격 (비중 2.5 이상, 흡수율 3.0 이하)에 만족하는 비중 2.5~2.59, 흡수율 2.52~0.81 의 특성을 콘크리트용 굵은 골재를 제조 할 수 있었다.

5) 시판되고 있는 재생 굵은 골재를 사용하여 재생 콘크리트를 제조하여 실험한 결과, 동등한 슬럼프를 얻기 위한 단위수량이 증가하였다. 증가의 경향은 일정치 않지만 대략 흡수율이 5% 증가하면 5~15kg/cm3 만큼 증가하였다. 압축강도의 경우 흡수율이 1% 증가할 때 압축강도의 비는 4% 감소하였다.

< 참 고 문 헌 >

1) 김무한, 재생골재의현황 및 재활용방안, 콘크리트학회지, Vol.9, No.6, p11~17, 1997

2) 정재동 외 1, 폐기물의 유효 이용과 콘크리트, 콘크리트 학회지, Vol.12, No. 5, p23~28, 2000

3) 김기형, 콘크리트용 재료로서 각종 산업 폐기물의 재활용, 콘크리트 학회지, Vol.13, No.4, p118~125, 2001

4) T. Ishikura 외, Development of production techniques on high quality recycled aggregate, 콘크리트공학, Vol.37, No.7, 1999

5) M. Tamura 외, Development of Recyclable concrete based on material conservation, Vol.38, No.11, 2000.

6) 월간 폐기물 편집부, 건설폐기물의 발생 및 재활용, 월간폐기물, Vol.3, No.3, 2002