

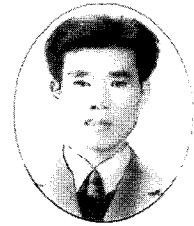
폐콘크리트의 재활용을 위한 기술

- Technology for Reuse of Waste Concrete -



김무한*

Kim, Moo Han



강석표**

Kang, Suk Pyo

1. 서 론

근대 산업화 흐름에 따라 국가의 사회간접시설 및 대량 건설사업이 급속하게 진행된 이후 현재 이러한 시설물들은 수명의 한계로 폐기 및 재건축 되어지고 있으며, 이에 따른 막대한 양의 건설폐기물이 발생되어지고 있다. 2000년 환경부 보도 자료에 따르면 건설폐기물 발생량은 전체 산업폐기물 발생량의 34%를 차지하고 있으며, 향후 급격히 증가할 것으로 예상되기 때문에 건설폐기물 처리 문제는 더욱 큰 국가·사회적 문제로 제기될 것으로 전망된다. 그러나 국내의 경우 아직까지 건설산업에서 발생하는 건설폐기물을 주로 매립에 의존하여 왔으며 이러한 매립의 경우에도 막대한 수송비와 처분비용으로 인해 최근까지 국내 건설 현장에서 발생한 건설폐기물 상당부분이 불법매립, 투기 및 소각과 같이 적절치 못하게 처리되고 있으며, 특히 IMF 이후 폐기물 업체들의 잇따른 도산으로 간척지 또는 도로변 입야 등에 불법적인 처분이 증가하여 환경파괴 및 오염을 가중시키고 지역주민과의 민원을 유발시키고 있다.

특히, 발생량이 급증하고 있는 건설폐기물 중에서도 폐콘크리트는 약 90%로 대부분을 차지하고 있으며 2000년 현재 약 1,500만 톤이었던 폐콘크리트 발생량이 2020년에는 약 1억 톤 이상으로 급격히 증가할 것으로 예상되기 때문에 날로 심각해지

는 주거환경, 지역환경 및 지구환경파괴에 대한 대책으로서 부가가치가 높고 수요가 많은 폐콘크리트의 재자원화 기술 개발 및 실용화 방안이 절실히 요구되고 있다.

이에 본고에서는 환경의 시대인 21세기에 있어서 천연골재원의 고갈 및 부족이나 에너지의 유한성, 지구환경보전, 환경부하의 저감 등을 고려하여 지구온난화, 자연환경파괴 등의 지구환경문제를 해결하기 위한 환경제어기술측면에서 건설폐기물의 대부분을 차지하고 있는 폐콘크리트를 재자원화하기 위한 재생골재와 재생미분말의 제조기술 및 건설분야에서의 이용기술에 관하여 기술하였다.

2. 폐콘크리트의 재자원화를 위한 기술 개발현황

2.1 파분쇄 기술

2.1.1 파분쇄의 원리

암석이나 폐콘크리트를 파분쇄하는 힘에는 압력, 충격, 전단, 만곡, 마찰 등이 있다. 파쇄기는 일반적으로 최대의 크기에는 상당히 강력한 규제를 가하면서도 최소의 크기에는 제한된 능력을 가지기 때문에 필요 이상으로 작은 입자들이 파분쇄되어 선별 작업에 지장을 일으키는 원인이 될 수 있다. 이런 일들을 가급적 억제하기 위해서는 폐콘크리트를 단번에 필요한 크기까지 잘게 파쇄하기 보다는 여러 단계의 기계들을 설치하고 그 사이에 분립장치를 삽입함으로써 소정의 크기를 갖는 폐콘크리트를 그 아래

* 정회원, 충남대학교 건축공학과 교수

** 정회원, 한일시멘트(주) 중앙연구소 주임연구원

의 단계로 내보내고 아직 굵은 덩어리는 반복해서 파쇄하는 다단 파쇄를 이용하는 것이 바람직하다.

조, 중, 분쇄를 말할 때는 급광과 그 파분쇄물 산물의 크기로 표현하며 보통은 급광의 최대입자와 파쇄산물의 최대 입자의 크기비를 축소비, 혹은 파분쇄비라 하여 기계 및 작업을 비교 평가 시 척도로 한다.

2.1.2 파분쇄기의 종류 및 특성

광석 및 폐콘크리트에 사용되는 대표적인 파쇄기의 종류별 특성을 <표 1>에 나타내었다. 콘크리트 1차 파쇄에는 조 크러셔, 2차 파쇄에는 임팩트 크러셔 또는 콘 크러셔 등이 자주 사용되어져 왔고, 최근에 들어서는 롤 크러셔도 자주 사용되고 있다.

일반적으로 폐콘크리트의 경우는 골재와 시멘트 페이스트 사이의 부착력이 다소 작지만 광석의 경우는 맥석과 치밀하게 결합되어 있기 때문에 이것을 물리적으로 분리하기 위해서는 광석을 미리 분쇄해야한다.

(1) 조 크러셔(jaw crusher)

폐콘크리트 파쇄에 가장 일반적으로 사용하고 있는 것으로 고정조와 가동조 두 개의 판 가운데 폐콘크리트를 집어넣어 턱과 같이 움직여서 파쇄하는 기계로서 100 cm 이상의 큰 덩어리를 파쇄하는 것이 가능하다. 축소비는 4 ~ 6 정도이다.

(2) 자이레토리 크러셔(gyratory crusher)

조 크러셔와 같은 용도로 쓰여지며 직축형의 크러셔로서 절구 형태의 고정 셀 중에 맨틀이라고 하는 원추형의 배트가 밑으로 매달려 있어서 이 맨틀이 편심운동을 해서 처리물을 압축하여 파쇄한다.

(3) 콘 크러셔(cone crusher)

자이레토리 크러셔와 형태 및 파쇄 기구가 유사하나 콘케이브가 하부에서 맨틀과 평행으로 대면하는 구조로 되어 있고, 자이레토리 크러셔보다 잘게 파쇄된다.

(4) 롤 크러셔(roll crusher)

평행으로 놓여진 두 개의 원통로를 서로 반대방향으로 회전시켜 그 가운데 처리물을 집어넣어 파쇄시키는 것이다.

(5) 임팩트 크러셔(impact crusher)

고속으로 회전하는 로터의 주변에 붙인 특수 강제의 햄머로 처리물을 두들기거나, 반발판에 부딪히게 해서 처리물끼리 충돌시켜 파쇄하는 것이다.

(6) 볼 밀(ball mill)

원통형 또는 원통원추형의 셀내에 볼과 함께 처리물을 집어넣어 처리물을 회전시킴으로써 마찰, 또는 충격을 처리물에 주어 파쇄시킨다. 볼로는 강구 또는 세라믹 볼 등이 사용된다.

(7) 로드 밀(rod mill)

볼 밀과 형태 및 파쇄 기구가 같지만 원통형 셀 내에 볼 대신에 로드를 사용하는 분쇄기이다.

(8) 진동 볼 밀과 진동 로드 밀

밀 용기 내에 각각 볼과 로드를 용적률로 80 %까지 충전하여 용기를 진동시키면서 처리물을 그 가운데로 통과시켜 파쇄하는 것이다. 원로의 입경은 1 mm 이하의 것이 많고 미세분쇄에 적합하다. 처리능력은 볼 밀이 로드 밀보다 크다.

(9) 제트 밀(jet mill)

유체에너지 밀이라고 말하기도 하는데 고압기류의 에너지를 이용하여 입자를 유속전후의 속도로 기류 중에 가속시켜 입자상호간 및 입자와 벽 또는 충격판과의 충격에 의하여 분쇄하는 것이다.

2.2 분급기술

2.2.1 분급의 원리

공업적인 분급에는 체질과 분급의 두 가지가 있다. 체질은 분급보다 간단하고 정확해서 편리하게 쓰이고 있으나 입자가 작아지면 공업적인 체질이 불가능하게 된다.

2.2.2 분급기의 종류 및 특성

체질로 처리되지 않은 미분쇄광은 유체를 쓰는 분급기에서 처리한다. 분쇄된 광석을 굵은 부분과 미세한 부분으로 분리하는 조작을 분급이라 한다. 주로 유체 중의 침강속도의 차이를 이용하여 분급기에는 유체로서 물을 이용한 습식분급기와 공기를 이용한 공기분급기가 있다.

2.3 선별기술

2.3.1 선별법의 종류 및 원리

(1) 수선(手選)

광물을 인력에 의하여 선광하는 것을 수선이라 한다. 최근 인건비를 절약할 목적으로 수선을 하지 않고 중액선별과 같은 기계적 방법으로 전환하고자 하나 아직도 수선을 유용하게 이용하고 있다.

(2) 비중선광법(比重選鑛法)

유색광물과 맥석(혹은 폐콘크리트와 폐건자재), 또는 유용광물

표 1. 파쇄기의 종류별 특성

파쇄기의 종류	파쇄압축	용 도	입도(mm)
조 크러셔	압 축	조 쇄	500 ~ 15
자이레토리 크러셔			200 ~ 50
콘 크러셔		중 쇄	100 ~ 10
롤 크러셔	20 ~ 10		
임팩트 크러셔	30 이하		
햄머 크러	20 이하		
볼 밀	충격과 마찰	미분쇄	1 이하
로드 밀			1 이하
로라 밀	마 찰		1 이하
빵 밀		10 이하	
제트 밀	충격과 마찰	초미분쇄	0.01 이하

사이에 충분한 비중차가 있으며 광립의 크기가 거의 비슷한 경우에는 비중차에 의한 광립의 낙하속도의 차를 이용하여 선별이 되며, 비중선광에서는 광립에 작용하는 외력으로서 수력을 이용하거나 풍력을 이용하는 건식법도 있다.

(3) 자력선광법(磁力選鑛法)

자성광물과 비자성 광물은 그 자성의 차이를 이용하여 자장을 적용하여 분리된다. 강자성인 자철광은 비자성인 맥석으로부터 자선분리가 용이하며 자철광이나 사철 등에 응용되는 선광법이며, 건설폐기물속에 함유된 철편류, 특히 폐콘크리트에 함유된 철근을 제거하는데 효과적인 방법일 것으로 생각된다.

(4) 중액선광법(重液選鑛法)

비중선광법의 일종으로 광석중의 유용광물과 맥석과의 중간의 비중을 갖는 액체(중액)를 만들어 여기에 광석을 넣어 비중이 작은 맥석을 띄우고 비중이 큰 유용광물은 가라앉게 하여 분리하는 방법이다.

(5) 정전선광법(靜電選鑛法)

정전선별기는 정전유도형과 코로나방전형으로 나뉘어진다. 코로나 방전형의 경우는 접지된 롤의 가까이에 고압으로 대전된 가는 금속선이나 빗 모양으로 된 침극들을 직선으로 놓으면 여기서 롤의 방향으로 전기가 분사된다. 그러면 이 전기에 의하여 도체인 광물은 감응되나 받은 전기를 바로 롤로 유출시켜 약간의 영향을 받거나 혹은 무감응 상태로 떨어져 내려가고 부도체광물은 금속선과는 반대부호로 대전된 롤면에 붙은 채로 돌다가 솔에 씻겨져 떨어진다.

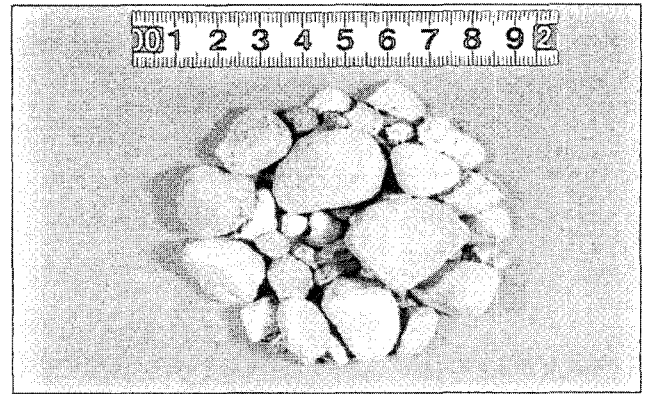
(6) 부유선광법(浮游選鑛法)

부유선별기 조작으로는 미분광석의 혼합수용액, 즉 광액에 포수제를 넣어 유용광물을 선택적으로 소수성으로 만들고, 이어서 파인유와 같은 기포제를 넣은 광액에 공기를 불어넣어서 기포를 발생시키면 충분히 소수성으로 된 광물은 기포에 부착하여 액면에 떠오르므로 표면의 거품을 긁어모으면 부선된 광물만을 채취할 수 있다.

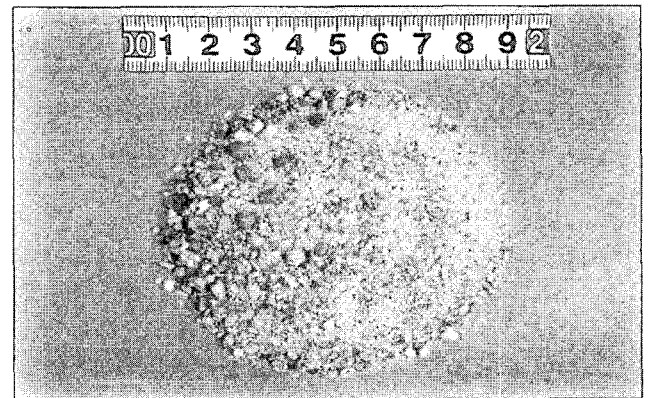
2.4 고도화처리기술

2.4.1 가열분쇄에 의한 재생골재 회수기술

(사진 1)에 나타난 바와 같이 가열분쇄에 의한 재생골재 회수 기술은 폐콘크리트 덩어리를 가열하여 시멘트 페이스트를 탈수시켜 열화 시킨 후 골재가 파쇄되지 않는 정도로 마쇄하여 골재의 주변에 부착된 모르타르와 시멘트 페이스트를 선택적으로 제거하여 KS에 규정된 골재와 동등한 품질의 굵은골재와 잔골재를 회수하는 것이다. 재생골재의 품질에 가장 큰 영향을 주는 것은 폐콘크리트를 파분쇄하더라도 골재에 부착된 시멘트 페이스트이다. 따라서 골재에 부착된 시멘트 페이스트를 모두 제거하면 당연히 골재의 품질은 천연골재의 품질과 거의 같기 때문에 이들을 구조용 골재로 사용 가능하다.



(a) 고품질 재생굵은골재



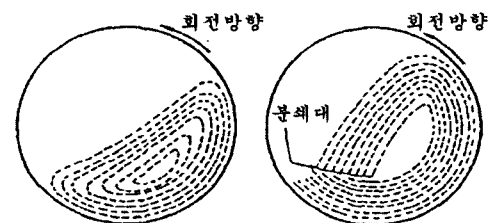
(b) 고품질 재생잔골재

사진 1. 가열처리공법에 의해 제조된 고품질 재생골재의 일례(일본)

2.4.2 마쇄에 의한 재생골재 회수기술

굵은 골재에 부착된 시멘트 모르타르나 잔골재에 부착된 시멘트 페이스트를 제거하기 위해서는 골재간의 마찰뿐만 아니라 중량이 큰 금속질 매체를 접촉시켜 이들간의 마찰력으로 제거하는 것이 가장 바람직하다고 생각된다. 이러한 골재와 매개물의 마찰로 시멘트 모르타르나 시멘트 페이스트를 제거하는 분쇄기로는 볼 밀이 가장 적합할 것으로 판단된다.

(그림 1)은 원통 내의 볼 운동을 묘사한 것으로 두 가지 형태가 있다. (a)는 처리물과 볼과의 마찰에 의한 파쇄이며 처리물 표면의 마모가 목적인 때 사용된다. (b)에서는 충격파쇄가 주는 파쇄능력이다. 골재에 부착된 시멘트 모르타르나 페이스트를 제거하기 위해서는 골재를 손상시키지 말아야 하므로 (a)형태의 파쇄방법이 가장 적합한 형태로 생각된다.



(a) 소연상 (b) 대연상

그림 1. 회전밀내의 볼의 운동형태

표 2 폐콘크리트의 재활용 용도

형상	용도	활용 방안
부재 덩어리	어초 바닥포장	건물의 보, 기둥부분을 절단하여 어초로 재활용하고 얇은 부분은 가공하여 포장용으로 사용
1차 파쇄 상태	어초 바닥다짐재 도로용재	건설현장에서 1차 파쇄된 콘크리트를 30 ~ 50 mm 정도로 2차 파쇄하여 바닥다짐재, 매립재, 혼합재, 노반재로 활용하거나 불량도와 혼합교반 활용
굵은골재	아스콘용 골재 콘크리트용 골재	폐콘크리트를 파쇄하여 생산된 굵은골재를 아스팔트콘크리트용 굵은골재로 활용하거나 콘크리트 제조용 5mm 이상의 굵은골재로 활용
잔골재	콘크리트용 골재	폐콘크리트를 파쇄한 잔골재를 콘크리트용 또는 시멘트 2차 제품용 잔골재로 활용
미분말	지반개량	지반심층 혼합처리에 활용

3. 폐콘크리트의 이용기술 개발 현황

3.1 일반사항

건설폐기물 중 폐콘크리트는 발생량이 많고 매립지의 용적을 많이 차지하고 있지만, 재활용은 이제서야 시작단계에 있다. 발생량이 많은 만큼 향후 재활용 재료로서 가장 활용도가 높을 것으로 예상된다.

3.1.1 폐콘크리트의 용도 및 품질기준

폐콘크리트는 중간처리 후 여러 가지 용도로 사용할 수 있는데 그 내용은 <표 2>에, 재생골재의 품질기준과 적용분야를 <표 3 ~ 5>에 나타내었다.

3.2 비구조체용 재생골재의 이용기술

3.2.1 도로용 재생골재

도로용으로 이용하는 재생골재의 품질기준은 도로포장설계·시

표 3. 재생골재의 유해물 함유량의 허용값

구 분	항 목	재생굵은골재	재생잔골재
		1, 2, 3 종	1, 2 종
0.8 mm체 통과량 시험에서 손실된 양(%)	콘크리트의 표면이 마모작용을 받는 경우	1.5 이하	5 이하
	그 밖의 경우	1.5 이하	7 이하

표 4. 재생골재의 입도

골재 종류	체의 호칭치수(mm)	체를 통과하는 중량 백분율(%)													
		50	40	30	25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
재생 굵은 골재	40	100	95~100			35~70		10~30	0~5						
	25			100	95~100		30~70		0~10	0.5					
	20				100	90~100		20~55	0~10	0~5					
재생 잔골재								100	90~100	80~100	50~90	25~65	10~35	2~15	

표 5. 재생골재로 만든 콘크리트의 적용 분야

재생 콘크리트 종류	설계 기준강도 (kgf/cm ²)	골재의 종류		이 용 용 도
		재생 굵은 골재	재생 잔 골재	
1급	210 이하 180 초과	1종	천연골재	교량 하부공, 옹벽, 터널 라이닝공
2급	180 이하	2종	천연골재 또는 1종	콘크리트 블록, 도로구조물 기초, 측구, 집수받이 기초, 중력식 옹벽, 중력식 교대
3급	150 초과	3종	2종	막 콘크리트, 강도가 요구되지 않는 체움재 콘크리트, 건축물의 비구조체 콘크리트

공지침에서 규정하는 품질항목 및 품질기준에 준용하며 <표 6>을 표준으로 한다.

(1) 도로기층용

재생골재가 연결일 경우 다짐으로 입도변화 및 입도조정기층 재료의 시방범위를 벗어나서는 안되며 입도조정층은 입상재료로만 구성되므로 KS F 2375 편장석을 사용해서는 안 된다. 입도조정층은골재의 맞물림에 의하여 지지력을 유지하고 있으므로 강우나 지하수에 의한 영향이 있을 때에는 지지력이 약해지므로 지하수가 상존하지 않아도 지하수에 의한 영향을 받을 가능성이 있고, 지금까지 입도며 입도조정층은 입상재료로만 구성되므로 KS F 2375 편장석을 사용해서는 안 된다. 입도조정층은골재의 맞물림에 의하여 지지력을 유지하고 있으므로 강우나 지하수에 의한 영향이 있을 때에는 지지력이 약해지므로 지하수가 상존하지 않아도 지하수에 의한 영향을 받을 가능성이 있고, 지금까지 입도조정기층을 사용하여 지지력에 대한 한계성을 알고 있으므로 주요 간선도로나 고속도로가 아닌 교통량이 적은 지방도나 시가지 도로에 사용하는 것을 원칙으로 한다. <사진 2>에 나타낸 바와 같이 도로기층용으로서 재생골재를 사용하고 있다.

입도조정기층에 사용되는 재생골재의 입도는 다짐두께와 최대입경과의 관계, 다짐시험기기, 다짐장비 등을 고려하여 최대입경의 범위는 50 ~ 19 mm가 적당하다. 그 외의 입도를 사용할 경우에는 감독관의 승인을 받아야 한다.

표 6. 도로용 재생골재의 품질기준

대구분	소구분	기준항목	품질기준
노 체	상부노체	최대치수 수정CBR값	300 mm 이하 2.5 % 이상
	하부노체	최대치수	300 mm 이하
노 상	상부노상	최대치수 소성지수(PI) 수정CBR값	100 mm이하 10 % 이하 10 % 이상
	하부노상	최대치수 소성지수(PI) 수정CBR값	150 mm 이하 30 % 이하 5 % 이상
동상방지층		최대치수 0.02 mm 이하 세립토 함량 모래당량	100 mm 이하 3 % 이하 20 % 이상
보조기층		마모감량 소성지수(PI) 액성한계 실내CBR값 모래당량	50 % 이하 6 % 이하 25 % 이하 30 % 이상 25 % 이상
기 층	입도조정 기층	마모감량 소성지수(PI) 수정CBR값 안정성	40 % 이하 4 % 이하 80 % 이상 20 % 이하
	시멘트 안정 처리기층	마모감량 소성지수(PI) 안정성 점토함유량	40 % 이하 9 % 이하 25 % 이하 1 % 이하

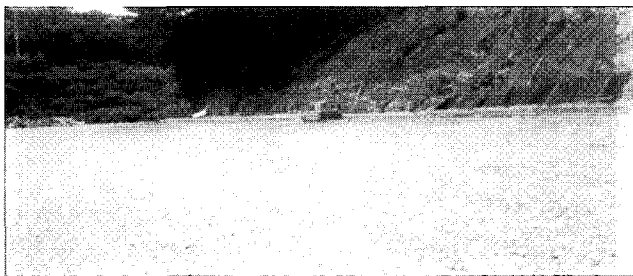


사진 2. 도로기층용 재생골재

(2) 도로보조기층용

도로보조기층용 재생골재는 일반적으로 미립분이 많아 함수변화에 예민하여 그 변화에 따라 지지력 저하, 배수성 불량 또는 동해의 우려가 있어 교통하중에 의한 포장파손의 직접적인 원인이 되므로 PI규정을 엄수하여야 한다.

마모감량시험은 KS F 2508의 A입도에 규정한 방법에 의한다. 단 시료의 입경은 40 ~ 19 mm, 19 ~ 10 mm로 하고 중량은 각 입경 2500 g으로 전중량 500 ± 40 g으로 한다.

도로보조기층용 골재의 최대입경이 표준크기 이상인 경우에는 연속입도로서 보조기층의 품질과 시공상에 문제가 없을 경우 1층 시공두께를 1/2 이하로 사용할 수가 있다. 이 경우 다짐관리에 대해서는 별도의 규정을 정하여 발주자의 승인을 얻어야 한다.

(3) 아스팔트용

아스팔트는 공공사업에서 가장 배출량이 많은 건설폐기물이기

때문에 폐기물처리장 용량이 부족하여 고심하는 지역에서는 관심을 가질만한 분야이다. 일본에서도 재활용촉진법의 시행 이후 아스팔트폐재로부터 아스팔트혼합물을 재이용하고 파쇄된 노반재 등을 입상재료로 재이용하는 곳이 많아졌다.

일본의 경우 재생아스팔트 혼합물의 생산량은 1981년 이후부터 서서히 증가하여 1991년에 약 851만 톤으로 전체 아스팔트 혼합물 생산량 7,612만 톤의 11.1 %를 차지하고 있다. 또한, 재활용촉진법의 전국적 적용으로 재생이용률은 점점 상승할 것이라 예상된다.

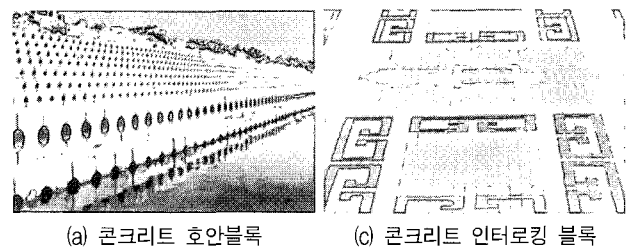
3.2.2 프리캐스트 콘크리트 제품용

재생골재를 사용한 콘크리트는 구조재료로서 천연골재를 사용한 경우와 비교하여 강도가 많이 떨어진다. 그러나 구조체와 같이 높은 강도를 요구하지 않는 콘크리트 2차 제품으로서 재생골재를 사용하면 높은 사용실적과 효과를 얻을 수 있다. (사진 3)에 나타난 바와 같이 제방 또는 해안에 우수에 의한 파괴와 침식을 방지할 목적으로 시공되는 호안블록과 도로의 경계부에 사용되는 경계블록, 보도 및 주차장 등의 포장에 사용되는 인터로킹 블록과 재생골재를 사용한 벽돌 등 많은 용도로서 사용되고 있다.

3.3 구조체용 재생골재의 이용기술

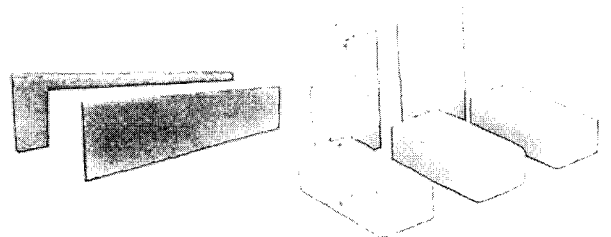
폐콘크리트를 사용한 재생골재는 천연골재와 비교하여 기초물성이 상대적으로 열악하여 이를 이용한 재생골재 콘크리트의 경우 천연골재인 강모래·강자갈 콘크리트에 비하여 시공성 뿐만 아니라 경화콘크리트에서의 압축강도 성상을 비롯한 공학적 특성 및 내구성 저하에 대한 우려로 건축구조재료로서의 사회적인 신뢰도가 낮은 실정이다.

따라서 재생골재를 구조물에 사용하기 위해서는 품질기준이 필요하다. 유럽 각국과 미국은 재생골재를 도로 포장용으로 이용하



(a) 콘크리트 호안블록

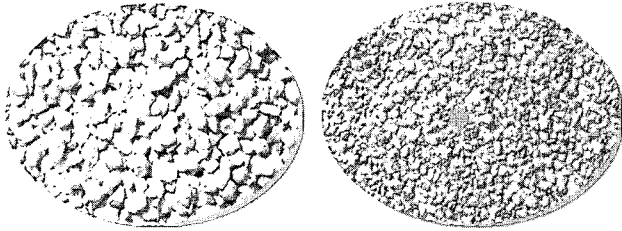
(c) 콘크리트 인터로킹 블록



(b) 콘크리트 경계블록

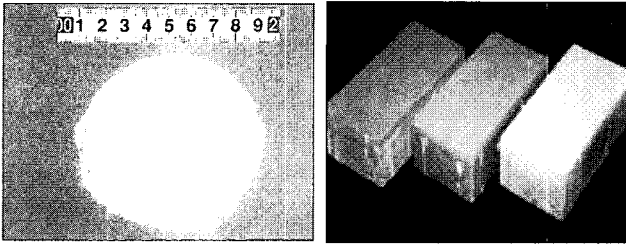
(d) 콘크리트 벽돌

사진 3. 프리캐스트 콘크리트 제품



(a) 고품질 재생굵은골재 (b) 고품질 재생잔골재

사진 4. 국내에서 제조된 고품질 재생골재의 일례



(a) 재생미분말 (b) 재생미분말을 이용한 제품

사진 5. 재생미분말과 이를 이용한 제품의 일례

는 것을 인정하고 있으나, 구조물에서의 적용에 대해서는 기준이 없거나 기준 값이 너무 높아 적용이 어려운 경우가 많다. 따라서, 현재 폐콘크리트는 주로 노반재와 채움재로 재이용되며 구조재로는 거의 이용되지 못하고 있다.

그러나, 재생골재 콘크리트의 재활용 방안에 있어서 재생골재 콘크리트의 컨시스턴스, 워커빌리티, 펌프빌리티 등의 작업성 및 시공성의 향상 방안과 경화 콘크리트의 공학적 특성에 대한 실험·실증적인 연구에 의하여 재생골재 콘크리트의 제조기술 및 품질관리에 대한 기술이 향상된다면 구조체 적용 가능성 및 활용 범위는 커질 것이다. <사진 4>와 같이 최근에는 폐기물 콘크리트에서 고품질의 재생골재를 생산할 수 있는 기술이 개발되고 있고 구조용 골재로도 사용되고 있는 실정이다.

3.4 재생미분말의 이용기술

3.4.1 개요

재생미분말은 폐콘크리트로부터 재생골재 제조시 발생하는 것으로 폐콘크리트로부터 생산되는 재생골재에 대하여 약 10% 정도 발생되며, 향후 고품질 재생골재의 제조에 의해 그 발생량은 증가할 것으로 예상된다. 또한 재생미분말은 폐콘크리트의 경화 페이스트로 이루어져 있으며 가열 등의 처리에 의해 시멘트 본래의 물성을 가질 수 있을 것으로 예상되어 콘크리트용 혼화재료, 토양안정제 및 토질 개량제 등으로 활용 가능할 것으로 기대되며 <사진 5>에 그 일례는 나타내었다.

한편, 일본의 경우 폐콘크리트로부터 재생골재 제조시 발생하는 재생미분말에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이용기술에 있어서도 콘크리트용 잔골재, 콘크리트용 혼화재료, 고유동콘크리트의 충전재, 지반개량제 등에 대한 활용성이 검토되고 있는

실정이다. 그러나, 현재 국내의 경우 폐콘크리트로부터 생산되는 재생골재에 대해서는 많은 연구가 이루어지고 있으며 그 이용용도도 점차 확대되고 있지만, 재생미분말에 대한 연구는 아직 기초적인 단계이며 이용기술이 개발되어 있지 않아 전량 매립·처분되고 있는 실정이다.

3.4.2 콘크리트용 혼화재료로서 재생미분말 적용

(a) 실험개요

폐콘크리트로부터 재생골재 생산시 발생하는 재생미분말에 대한 품질관리가 제대로 되고 있지 않기 때문에 <그림 2>와 같이 보통포틀랜드 시멘트로 3수준(시멘트에 대한 잔골재 비 = 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3)의 모르타르를 제작하여 91일 수중양생을 실시한 후, 조 크러셔로 1차 분쇄를 하였으며 진동밀로 3분씩 2차 분쇄하였다. 또한, 체가름(No.100)하여 통과한 미분말을 비가열, 300, 600, 1,000°C로 전기로에서 가열하여 2시간 유지시킨 후 공기중에서 급냉시켜 재생미분말을 제조하였다.

(b) 실험결과

① 재생미분말의 기초물성 평가

<표 7>은 재생미분말의 물리적 성질을 나타낸 것으로 시멘트에 대한 잔골재비가 작을수록 비중이 높은 시멘트 페이스트의 미분이 많이 발생하기 때문에 비중은 시멘트에 대한 잔골재의 비가 작을

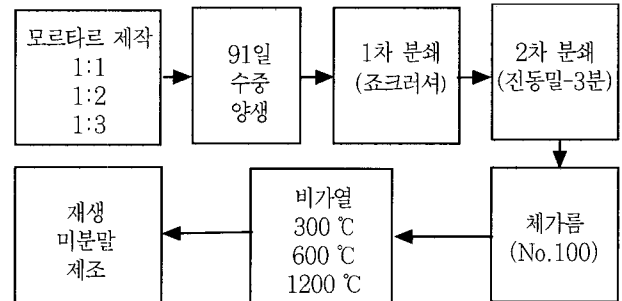


그림 2. 재생미분말 제조 방법

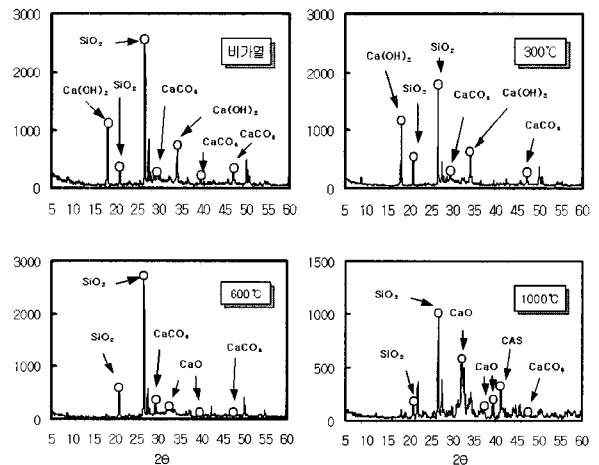


그림 3. 재생미분말의 XRD 분석 (1:1)

표 7. 재생미분말의 물리적 성질

C:S	비중				분말도 (cm ² /g)	용해분 (%)	불용잔분 (%)
	비가열	300 °C	600 °C	1,000 °C			
1:1	2.44	2.70	2.86	3.57	1330	76.2	23.8
1:2	2.13	2.50	2.78	3.33	1250	65.5	34.5
1:3	2.08	2.38	2.70	3.13	1187	61.0	39.0

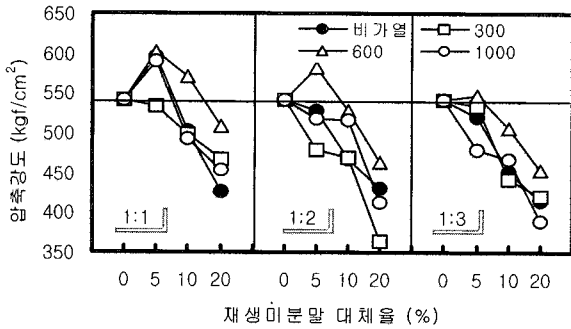


그림 4. 가열온도에 따른 재령 28일 압축강도의 변화

수록, 가열온도가 높을수록 크게 나타나고 있으며, 분말도는 시멘트에 대한 잔골재의 비가 작을수록 크게 나타나고 있다. 특히 가열온도 1,000 °C의 경우 시멘트 비중과 동등 내지는 그 이상의 높은 비중을 보이고 있는데, 이는 재생미분말이 1,000 °C의 고열에 입자들끼리의 용융에 의한 고상반응의 결과로 판단된다. 또한 각각의 재생미분말을 10%의 염산 수용액에 2시간 용해시킬 때의 용해분과 불용잔분은 시멘트에 대한 잔골재비가 작을수록 용해분은 높게, 불용잔분은 낮게 나타나 시멘트 수화물 인자가 많은 것으로 나타났다.

② XRD 분석

〈그림 3〉은 시멘트에 대한 잔골재의 비가 1:1인 재생미분말의 가열온도별 XRD 분석을 나타낸 것으로 비가열의 시료는 잔골재의 SiO₂ 및 시멘트 수화반응 및 탄산화에 의한 Ca(OH)₂, CaCO₃가 다량 존재하고 있으며, 가열온도 300 °C 시료에서도 비가열의 시료와 동일한 XRD 분포를 나타내고 있다. 그러나, 가열온도 600 °C의 시료는 Ca(OH)₂의 탈수에 의한 CaO의 생성이 약간 나타나고 있으며, CaCO₃의 결정은 그대로 존재하고 있다.

또한, 가열온도 1,000 °C의 시료는 Ca(OH)₂의 탈수뿐만 아니라 CaCO₃의 탈탄산화에 의한 CaO의 생성이 다량 나타나고 있으며, 고온의 용융으로 고상반응에 의한 CAS상(Gehelite)의 생성도 보이는 것으로 나타났다.

③ 압축강도

〈그림 4〉는 가열온도에 따른 재령 28일 압축강도를 나타낸 것으로 시멘트에 대한 잔골재비가 작을수록 압축강도는 높게 나타나고 있다. 또한, 시멘트에 대한 잔골재비에 관계없이 가열온도 600 °C, 재생미분말 대체율 5%에서 가장 높은 압축강도를 발현하고 있으나, 재생미분말 대체율 10%에서도 강도저하가 비교적

작게 나타나고 있다. 이는 기존의 연구보고와 유사한 결과로 재생미분말을 시멘트 혼화재료로 유효하게 사용하기 위해서는 600 °C에서 열처리하고 대체율 10% 이하에서 사용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

3.4.3 콘크리트용 잔골재로서 재생미분말 이용

(a) 실험개요

〈표 8〉에서 보는 바와 같이 재생미분말의 분말도를 2수준, 물-시멘트비를 3수준, 잔골재로의 재생미분말 치환율을 3수준으로 설정하여 재생미분말을 잔골재로 치환한 콘크리트의 공학적 특성에 대해서 검토하였다.

(b) 실험결과

① 슬럼프의 변화

〈그림 5〉는 경과시간에 따른 슬럼프의 변화를 나타낸 것으로 재생미분말의 분말도 및 치환율에 관계없이 경과시간 60분에 있어서 슬럼프는 약 7 cm 정도 저하하는 것으로 나타났다.

표 8. 실험개요

분말도 (cm ² /g)	물-시멘트비 (%)	치환율 (%)	목표슬럼프 (cm)	측정항목
3,440	45	0	18 ± 2.5	· 공기량 · 슬럼프 · 불리당량 · 응결시험 · 압축강도
	55	4		
5,700	65	8		

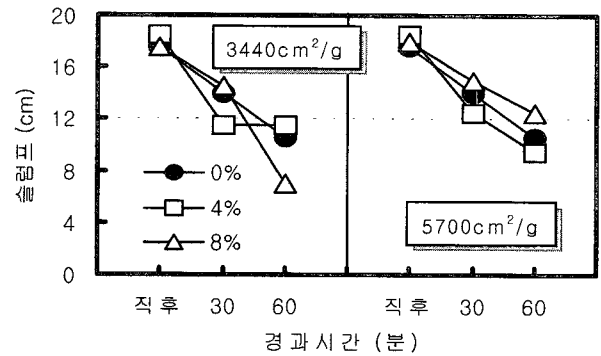


그림 5. 슬럼프의 변화

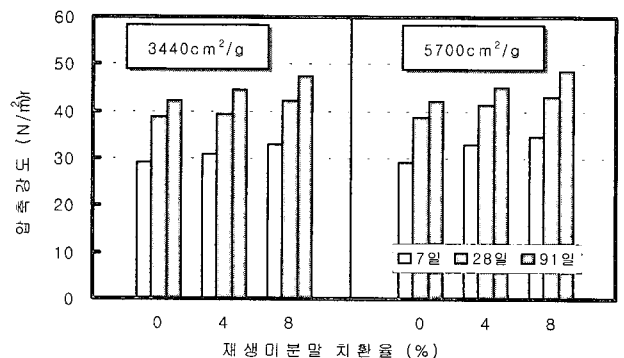


그림 6. 재령별 압축강도의 변화 (W/C = 55%)

② 압축강도

〈그림 6〉은 재령별 재생미분말의 치환율 및 분말도에 따른 압축강도의 변화를 나타낸 것으로 재생미분말의 치환율이 증가할수록, 분말도가 높을수록 압축강도가 높게 나타나 콘크리트용 잔골재로 재생미분말을 이용하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

3.4.4 시멘트클링커 원료로서 재생미분말 이용

(a) 실험개요

폐콘크리트로부터 재생골재 생산시 발생하는 재생미분말의 화학성분은 콘크리트에 사용되는 골재성분과 그 양, 구조물이 관계하는 환경 등에 의해 영향을 받는다.

1994년도 「건설부산물의 발생억제·재생이용기술의 개발」에서는 ① 미분말은 다량의 알칼리나 염화물이온을 함유하고 있으며, 미분말에 따라 크게 변동한다. ② 클링커 원료에 사용가능한 미분말량은 다량의 알칼리를 함유하고 있는 상태에서는 20 kg/t 클링커를 기준으로 공장의 상황에 맞도록 유효이용을 도모하는 것이 바람직하다. ③ 클링커 소성의 용이성은 미분말 사용량이 증가할수록 저하하는 경향이 있고, 시멘트 제조 비용은 증가한다고 기술하고 있다.

본 시험에서는 전국 14개 골재재생처리공장의 미분말을 시멘트원료에 사용한 경우의 클링커 화학성분에 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

(b) 실험결과

① 시멘트클링커의 화학성분은 알칼리량과 염화물이온의 영향을 크게 받는다. 미분말은 주로 클링커 원료의 점토대체로서 일반적으로 40 kg/t 클링커 정도까지 사용할 수 있다. 그러나, 미분말은 다량의 알칼리와 염화물이온을 함유하고 있고, 1994년도 「건설부산물의 발생억제·재생이용기술의 개발」에서는 해수의 영향으로 다량의 염화물이온을 함유한 경우 사용가능성은 6 kg/t 클링커 이하로 하고 있다.

② 미분말을 다량으로 사용할 경우에는 알칼리량, 염화물이온량이 증가하는 경향이 있다. 따라서, 현재 사용하고 있는 원료의 선별사용 등에 의한 알칼리량 저감대책과 염화물이온량이 포틀랜드시멘트의 JIS규격(200 ppm 이하)을 만족해도 100 ppm 정도에서 클링커 소성시의 사이클론 수축 등의 문제가 발생하므로 탈염소 설비 등의 대책이 필요하다.

3.4.5 고유동 콘크리트로의 재생미분말 이용

(a) 실험개요

재생미분말을 이용한 고유동 콘크리트의 배합검토를 실시하고, 실제의 폐콘크리트로부터 노반재를 제조할 때 발생하는 콘크리트 미분말에 대해서 실기 테이블 회전식 분쇄기에 의한 조정실험, 조정된 재생미분말을 이용한 고유동 콘크리트의 실기플랜트에 있어서 제조실험 및 고유동 콘크리트를 이용한 실대 기동벽부재에

있어서 시공실험을 실시하였다. 이와 같은 일련의 실험결과로부터 재생미분말을 이용한 고유동 콘크리트의 현장설비에 의한 제조에서 시공까지 검토 플로우를 서술하였다.

(b) 실험결과

① 재생미분말을 이용한 고유동 콘크리트의 배합

재생미분말의 입도조정은 콘크리트 미립분에 대해서 실기테이블 회전식 분쇄기의 테이블 회전수를 450, 550 및 610 rpm으로 변경하여 조정하였으며, 재생미분말의 품질을 〈표 9〉에 나타내었다.

〈표 10〉은 재생미분말을 이용한 고유동 콘크리트의 배합을 나타낸 것으로 재생미분말의 혼입비율은 단위시멘트량에 대해서 외할 15%로 할 경우 물-시멘트비는 60%로 하고 있다. 증점계고유동 콘크리트에 이용되는 혼화제는 감수제와 분리저감제를 주성분으로 하는 것이 있고 재생미분말용(B)은 증점계용(A)에 비해 분리저감제의 비율이 작게 된다. 재생미분말용 혼화제의 첨가량은 재생미분말량의 3.2%로 하고 있다.

〈그림 7〉은 재생미분말을 이용한 고유동 콘크리트의 슬럼프-플로우의 변화를 나타낸 것으로 미조정 재생미분말을 이용한 고유동 콘크리트의 슬럼프-플로우는 실기테이블 회전식 분쇄기에 의해 입도조정된 콘크리트에 비해 현저하게 작게 나타나 재생미분말의 입도조정에 의해 고유동 콘크리트의 유동성이 증가하는 것으로 나타났다.

표 9. 재생미분말의 품질관리 결과

재생미분말 종류	비중	분말도 (cm ² /g)	흡수율 (%)	물통과 잔분(%)	
				45 μm	90 μm
A	2.56	4,527	4.44	17.0	0.11
B	2.58	5,376	2.75	5.7	0.01
C	2.53	7,275	4.56	1.3	0.01
미조정	2.30	-	5.58	-	-

표 10. 재생미분말을 이용한 고유동 콘크리트의 배합

고유동 콘크리트의 종류	W/C (%)	s/a (%)	단위중량(kg/m ³)					특수혼화제 ^{*5} ((C+P)×%)
			W	C ^{*1}	P ^{*2}	S ^{*3}	G ^{*4}	
증점계	60.0	54.4	180	300	-	962	825	A3.5 (1A)
A		180	300	45	884	857	B3.2 (12A)	
B		180	300	45	887	857		
C		180	300	45	884	857		
미조정		51.2	180	300	45	879	857	

* 1 : 보통포틀랜드 시멘트(비중 3.16),
 * 2 : 재생미분말
 * 3 : 혼합모래(부순모래 : 강모래 = 8 : 2, 비중 2.66, 흡수율 2.00%, 조립률 2.70)
 * 4 : 부순자갈(비중 2.69, 흡수율 2.00%, 조립률 : 6.76)
 * 5 : A 증점계 혼화제 (감수제 : 분리저감제 = 100 : 20)
 B 재생미분말 혼화제 (감수제 : 분리저감제 = 100 : 10)

〈그림 8〉은 재생미분말을 이용한 고유동 콘크리트의 재령 28일에 있어서 압축강도를 나타낸 것으로 미조정 재생미분말을 이용한 고유동 콘크리트에 비해 입도 조정한 재생미분말을 이용한 콘크리트의 압축강도가 높게 나타났으며, 재생미분말 C의 경우 증점제계 고유동 콘크리트에 비해 압축강도가 저하되지 않는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 물-시멘트비 60%에 있어서도 JASS 5의 고유동 콘크리트의 질에 나타난 최소한의 품질을 재생미분말을 이용한 고유동 콘크리트의 품질이 만족하고 있는 것으로 나타났다.

4. 결 언

최근 경제성장과 더불어 도시개발의 가속화, 재개발건축의 활성화, 지하공간 이용증대 등으로 해마다 건설폐기물이 증가하고 있으며, 특히, 이중에서도 건설폐기물의 대부분을 차지하고 있는 폐콘크리트의 완전리사이클시스템 개발이 중요한 과제로 대두되고 있는 상황에서 폐콘크리트의 재자원화를 위한 기술 개발은 중요하다 할 수 있다.

국내의 경우, 현재 재생골재는 주로 도로보조기층용, 성토용, 복토용, 보도블록용, 콘크리트제품 제조용 등 비구조체에 주로 사용되고 있어 자원의 유효이용 측면에서 매우 불합리하다. 한편, 앞으로는 천연골재자원의 부족과 환경보전 등의 이유로 천연골재의 공급이 매우 곤란해질 것이며, 또한, 향후 지속적인 골재수요로 인해 천연골재 대체재료의 개발이 국가·사회적으로 시급한 실정이다. 이러한 배경에서 고품질의 재생골재를 제조하는 기술을 개발하여 현재 비구조체에만 사용되는 재생골재를 구조용 콘크리트 골재로 재활용함으로써 국가건설경제적인 측면에서 골재 공급문제의 안정화 및 건설생산성을 극대화시킬 필요가 있다.

또한, 현재 국내의 경우 재생골재 제조시 발생하는 재생미분말에 대한 연구가 거의 이루어지지 않아 전량이 폐기·매립되고 있는 실정이며, 이러한 재생미분말은 경화페이스트로 구성되어 있어 가열처리 등에 의해 시멘트 본래의 물성을 가질 것으로 예상되기 때문에 재생미분말을 콘크리트용 혼화재료, 재생시멘트로의 활용 및 토질안정제나 토양개량제, 폐수처리용 여과재 등으로 활용할 수 있는 기술을 개발하여야 할 것이다.

따라서, 환경의 시대인 21세기에 있어서 자원순환, 천연골재 자원의 고갈 및 부족이나 에너지의 유한성, 지구환경보전, 환경부하의 저감 등을 고려하여 지구온난화, 자연환경파괴 등의 지구환경문제를 해결하기 위한 환경제어기술(environmental technology) 측면에서 폐콘크리트를 100% 이용할 수 있는 폐콘크리트의 완전자원순환시스템을 개발이 국가·사회적으로 필요하다고 사료된다. ■

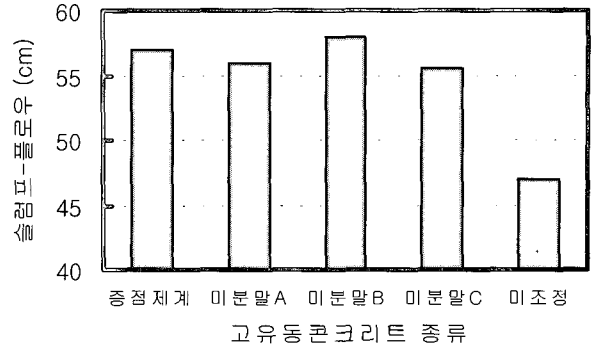


그림 7. 슬럼프-플로우의 변화

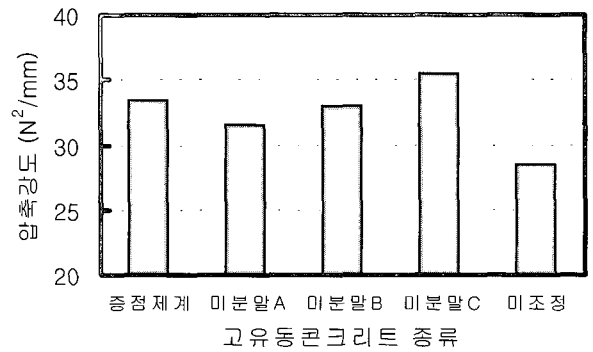


그림 8. 압축강도의 변화

참고문헌

1. 建設省土木研究所 콘크리트研究室, 再生骨材を用いたコンクリートの設計施工指針(案), 土木研究資料, No.2418, 1986.
2. 建設業協會建設廢棄物處理再利用委員會, 再生骨材および再生コンクリートの使用基準(案), 콘크리트工學, 16(7), 1997. 8 pp.42~46.
3. 吉兼亨, 道路用再生骨材の性質, 콘크리트工學, Vol.35 No.7, 1997. 7, pp.36~41.
4. 大和竹史, 콘크리트의 리사이클에 關する海外の動向, 콘크리트工學, Vol.35 No.7, 1997. 7, pp.19~22.
5. 東京部, 東京部建設リサイクルガイドライン, 平成 11年 12月
6. 公開特許公報(A), 콘크리트廢在らの骨材をらの再生させる方法, 2000.
7. 충남대학교, 건설산업폐기물의 리사이클링 시스템 및 재활용 기술개발에 관한 연구, 1997. 8.
8. 한국지질자원연구원, 건설폐기물 리사이클의 품질기준 및 촉진방안, 2002. 9.
9. 김무한, 건설폐기물 및 재생골재 콘크리트, 콘크리트학회지, 제10권 제6호, 1998. 12, pp.52~60.
10. 김무한 외, 재생미분말의 가열온도에 따른 기초물성 및 시멘트혼화제 적용성에 관한 연구, 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제13권 제1호, 2001. 5, pp.635~640.