

# 도로용 순환골재 현장재활용 시공평가

## 1. 서론

건설산업에서는 근본적으로 다른 산업에 비해 많은 양의 폐기물이 발생된다. 건설폐기물은 다른 산업폐기물에 비하여 유해성은 상대적으로 적으나 발생시기가 특정기간에 집중되는 특성이 있어 처리와 재활용 과정의 어려움에서 발생하는 환경유해성은 크다고 볼 수 있다. 또한 재활용할 때 건설폐기물의 발생장소, 순환골재의 생산 및 사용장소가 지리적으로 다르다면 운반 및 사용에 대한 비용상승도 재활용 저해에 중요한 요인으로 작용하게 된다. 따라서 재활용은 환경적인 안전성을 확보한 상태에서 가급적 간단한 공정을 거쳐 경제적으로 이루어질 수 있도록 관련 시방서 및 품질기준이 정해져야겠다.

정부에서는 건설폐기물의 재활용 촉진 및 환경오염 저감을 위하여 폐기물관리법, 자원의절약및재활용촉진에관한법률 등을 제정하여 시행하여 왔다. 폐기물관리법에 의한 건설폐기물의 최대치수 및 이물질 함유량 제한과 2001년부터 시행된 분리발주와 같은 법적 제한이 환경보전에 미친 영향은 지대하였다. 그러나 개별 건설폐기물의 특수성을 고려하지 않음으로서 교량, 콘크리트 포장 등과 같은 토목구조물에서 발생하는 양질의 폐콘크리트가 폐타일, 적벽돌, 벽돌 등과 같은 저급 건설폐기물이 많이 포함된 건축폐기물과 동일한 재활용 과정을 거쳐야 한다는 것은 자원의 유효이용, 경제성 측면에서 심각히 재고되어야 할 것으로 생각된다.

2003년 12월 제정된 건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률은 그동안 많은 논란을 일으켰던 분리발주, 순환골재 의무사용대상공사 지정, 용도별 품질기준 및 설계시공 지침 등에 대한 제정과 품질인증제도 도입 등에 대한 제도적 장치를 마련하고 있다. 그러나 폐기물관리법에서 규정하고 있는 재활용 골재의 최대치수 규정에 대한 건설과 환경분야의 논란, 적정 장치를 통하여 현장 생산된 순환골재의 이동규제, 순환골재 의무사용 대상공사의 사용률 지정 등의 문제에 있어 아직 명확한 결론을 내리지 못하고 있어 향후 법률 적용에 관심이 주목되고 있다.

본 고찰에서는 국내 건설현장에서 발생되고 있는 폐콘크리트를 포함한 건설폐기물의 현황을 살펴보고, 도로용 재료로 재활용하기 위한 물성평가 결과를 검토하였다. 또한 건설폐기물의 유효이용과 경제성에 입각하여 비교적 유해물질이 적게 함유되어 있는 고속도로 발생 폐콘크리트를 현장 파쇄 및 재활용 시험시공 결과를 정리하여 환경오염을 경감하고 분리발주에 의한 공사비 증액요인을 억제하기 위한 방안을 고찰하였다.

## 2. 폐콘크리트 발생 및 처리현황

환경부에서는 매년 건설폐기물 발생량 및 처리현황을 정리하여 폐기물의 재활용률 향상을 위한 정책 반영에 힘쓰고 있다. 표 1은 건설폐기물의 연도별 발생현황을 정리한 것으로 실제 현장에서 발

생하는 배출량과는 차이가 있지만 아파트 재건축, 서울 및 광역도시의 지하철공사 등 건설물량 증가에 따라 발생량이 크게 증가하고 있다.

2002년도 국내 건설폐기물 발생량은 101,992톤/일이며, 이 가운데 폐콘크리트 71.1%, 폐아스팔트 콘크리트 14.5%로서 85.6%를 차지하고 있으며, 수도권에서 발생하는 건설폐기물이 전체의 약 45%를 차지하고 있다.<sup>1)</sup>

표 1 건설폐기물의 발생량(톤/일)

연도	계	토사	콘크리트	아스콘	기타
1996	23,577	3,954	14,981	3,398	1,244
1997	42,985	6,990	25,469	7,489	2,372
1998	42,445	4,881	28,165	7,867	1,532
1999	56,212	4,727	39,819	9,317	2,849
2000	71,063	5,579	49,352	11,388	4,744
2001	98,660	8,210	66,051	13,700	10,699
2002	101,992	7,428	72,526	14,738	7,309
2003	130,615	9,399	92,639	18,352	10,225

건설폐기물의 처리형태는 매립지 반출, 중간처리업체 위탁처리, 공사현장 자체 재활용으로 구분할 수 있으며, 처리실태는 매립 14.5%, 소각 2.1%, 재활용 83.4%로서 재활용률이 매우 높게 나타나고 있다. 그러나 사업주체별 건설폐기물 처리현황을 보면 전체 건설폐기물중 약 96%가 수집운반법, 중간처리업과 같은 대형처리업소에서 처리되고 있다. 대형처리업소는 건설폐기물을 재활용제품으로 생산하지만 최종적으로 적용하는 기관이 아닌 점을 감안하면 실제 재활용에 사용된 재생골재양은 추정할 수 없다.

한국건설기술연구원에서 건설현장 및 중간처리업체를 대상으로 조사한 결과에 따르면<sup>2)</sup> 재활용 실적과 건설현장의 상황이 큰 차이가 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 환경부에서는 건설폐기물 재활용 통계기준을 생산기준에서 사용기준으로 전환하겠다고 공언한바 있으며<sup>3)</sup>, 향후 건설폐기물 발생, 처리 및 재활용단계에서 정부의 적극적 의지를 알 수 있다.

고속도로 건설 및 유지보수와 관련하여 발생하는 건설폐기물은 주로 폐아스콘과 폐콘크리트로 구분할 수 있으며, 표 2는 한국도로공사에서 발생하는 폐콘크리트 발생 및 처리현황을 정리한 것이다.

고속도로 건설물량 증가에 따라 폐콘크리트 발생량이 꾸준히 증가하고 있으며, 현장내 재활용 및 위탁처리량도 증가추세를 보이고 있다.<sup>4)</sup> 위탁 처리 평균 단가는 2003년도 10,451원/톤이었으나 지역별로는 5,485원/톤에서 36,565원/톤까지 큰 차이를 나타내었다. 이는 위탁처리업체의 난립 및 과당 경쟁에 의한 것으로 생각된다.

표 2 연도별 폐콘크리트 발생 및 처리현황(단위 : 톤)

년도	발생량	처리내역			잔여량
		재활용처리량	위탁처리량	위탁처리비용(천원)	
1997	109,878	101,290	8,588	124,853	-
1998	225,513	179,846	45,667	591,541	3,468
1999	381,973	320,275	61,698	775,533	13,920
2000	487,317	263,086	224,232	2,455,699	73,924
2001	978,473	617,010	361,463	4,735,083	120,200
2002	751,391	468,573	282,817	2,802,872	12
2003	636,065	456,773	179,292	1,873,767	7,502

2001년 고속도로 건설 및 유지관리 과정에서 발생된 폐콘크리트는 약 63%가 재활용되었으며, 주요 용도로서는 그림 1과 같이 성토용 약 90%, 도로기층재 또는 보조기층재와 같은 포장용 재료 약 9.3%에 지나지 않음을 알 수 있다.<sup>5)</sup>

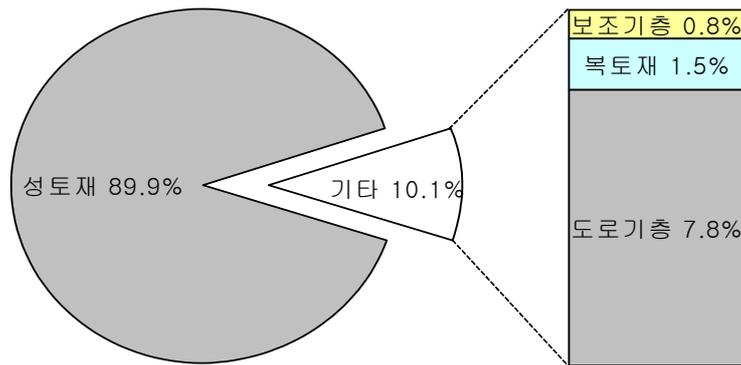


그림 1 폐콘크리트의 재활용율(2001년, 한국도로공사)

고속도로 건설 및 유지관리과정에서 발생하는 폐콘크리트는 일반 건설폐기물과 달리 아스팔트 혼합물을 제외하면 환경 이물질은 거의 없기 때문에 양질의 포장용 재료로서 활용이 가능하지만 고부가가치 용도의 재활용 실적은 매우 낮아 이에 대한 기술 및 용도개발이 시급한 실정이다.

국외에서 건설폐기물이 도로에 적용된 사례를 고찰해 보면 스웨덴, 덴마크 등은 아스팔트 콘크리트 폐기물중 약 90% 이상 재활용하고 있으나 폐콘크리트 재활용 실적은 미미하다. 미국은 재활용에 대한 연구 및 시공실적이 활발하여 폐콘크리트를 콘크리트 포장, 빈배합 콘크리트, 기층, 노반재 등 다양한 도로용 재료로 재활용한 실적이 있으며, 기존 도로의 재활용을 위한 파쇄, 재포장 기술 등을 보유하고 있다. Iowa 주에서는 49년 경과된 약 26km 노후 콘크리트 포장의 재활용에 파일박는 해머를 이용한 콘크리트 포장파쇄기 개발 및 실용화를 통하여 철거 및 재활용 비용을 절감한 사례는<sup>6)</sup> 재생골재의 최대치수에 대한 논란이 많은 우리에게 시사하는 바가 매우 크다. 또한 FHWA에서는

콘크리트 포장 재활용 시범사업을 1980년대 초·중반에 시행하여 성공적인 결과를 도출함으로써 폐기물 처리에 따른 환경문제 발생억제 및 골재구입비의 저감 등 괄목할만한 성과를 거두고 있다.<sup>7)</sup>

### 3. 도로용 순환골재 물성평가

그림 2는 골재 종류별 다짐곡선을 나타낸 것이다. 골재 입도의 영향요인을 최소화하기 위하여 고속도로공사 전문시방서에서 규정하고 있는 SB-2 입도의 중간점에 해당하는 값으로 하였으며, 잔골재는 일반 강사를 사용하였다. 이 그림에서 천연골재에 비하여 순환골재의 함수비 및 건조밀도관계가 완만한 특성을 나타내었다.

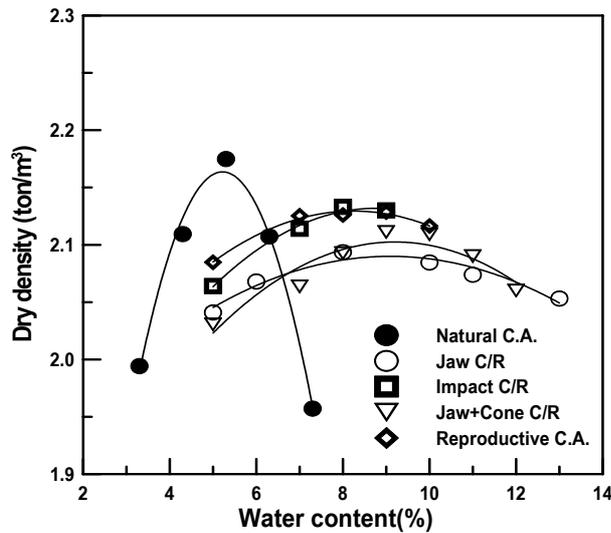


그림 2. 순환골재 사용 동상방지층 다짐곡선

표 3은 골재 종류별 다짐시험결과를 정리한 것으로 최대 건조밀도는 순환골재종류별 차이가 크지 않은 반면 순환골재의 최적함수비는 천연골재의 1.6~1.8배 정도 큰 값을 나타내고 있다. 이러한 결과는 순환골재에 부착된 모르타르에 의하여 함수비가 증가되었기 때문으로 생각된다.

이진용<sup>8)</sup>, 황충렬<sup>9)</sup>, 구봉근<sup>10)</sup> 등의 연구에서는 재생골재 사용에 따라 최대건조밀도는 천연골재의 약 85%, 최적함수비는 약 2배 정도 증가하는 결과를 나타내어 본 연구와 큰 차이를 나타내고 있다. 이러한 결과는 기존 연구가 흡수율이 높은 재생잔골재를 포함하였기 때문이다.

표 3. 동상방지층용 순환골재의 다짐시험결과

시험항목	골재종류				
	쪼크러셔	쪼, 콘크러셔 조합형	임팩트 크러셔	중간처리 업체	천연쇄석
$\gamma d \max$ (g/cm³)	2.092	2.115	2.130	2.130	2.163
OMC (%)	8.6	9.6	8.7	8.3	5.2

빈배합콘크리트 기층은 콘크리트 포장체와 직접 접하면서 평탄성에 큰 영향을 미치며, 시공중에는 콘크리트 포설장비를 지지할 수 있는 소요강도를 필요로 한다. 국외의 경우 공사기간의 여유가 있는 경우 물-시멘트비 100%로서 일반콘크리트와 동일하게 제조하여 시공하지만 국내에서는 공기단축을 위하여 건식 빈배합콘크리트를 사용하고 있다.

건식 빈배합콘크리트공법은 포설된 콘크리트를 진동, 탠덤, 타이어 로울러를 사용하여 전압하므로써 공기단축을 시도하는 방법으로 배합설계는 다짐시험으로부터 계산된 최대습윤밀도 및 최적함수비 시험결과를 이용하여 건조상태 재료 중량을 구하고 골재의 흡수율 시험결과로부터 표면건조 포화상태의 재료중량을 계산한다.

그림 3은 단위시멘트량 158kg/m<sup>3</sup>일 때 골재종류별 다짐시험결과를 나타낸 것이다. 골재입도에 따른 영향을 배제하기 위하여 고속도로 공사 전문시방서에서 정하고 있는 소요입도범위의 중앙점을 선정하였으며, 골재 종류에 관계없이 유사한 다짐곡선을 나타내고 있다.

표 4는 다짐시험결과로부터 계산된 골재종류별 최적함수비, 최대습윤밀도 및 최대건조밀도를 정리한 것이다. 골재종류에 관계없이 최적함수비 및 최대건조밀도 측정값이 거의 유사하게 나타났다. 이러한 결과는 빈배합콘크리트 기층의 경우 단위시멘트량이 150 kg/m<sup>3</sup> 이상이므로 미분량 증가에 의해 골재의 흡수율 영향이 감소한 것으로 생각된다. 표 5는 다짐시험결과로부터 골재종류별 빈배합콘크리트 배합설계결과 및 재령 7일 압축강도 측정결과를 정리한 것이다.

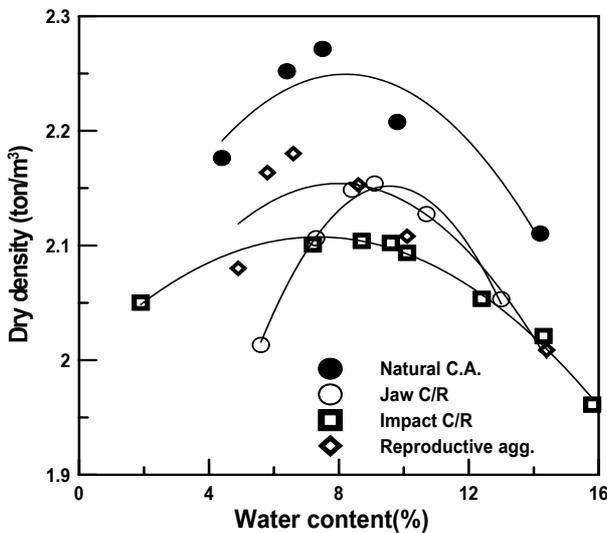


그림 3. 빈배합콘크리트 다짐곡선

표 4. 빈배합콘크리트의 다짐시험결과

골재의 종류	OMC (%)	최대습윤밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	최대건조밀도 (g/cm <sup>3</sup> )
조크러셔	9.5	2.35	2.15
임팩트 크러셔	8.0	2.29	2.10
중간처리업체	7.0	2.32	2.19
천연쇄석	8.0	2.42	2.25

표 5. 빈배합콘크리트 배합 및 압축강도

골재종류	W/C (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )					압축강도 (MPa)
		C	W	G	No. 4	모래	
조크러셔	79	158	125	791	393	882	12.9
임팩트 크러셔	67	158	105	783	389	873	12.0
중간처리업체	46	158	73	820	407	914	-
천연쇄석	100	158	159	798	396	889	14.5

빈배합콘크리트의 재령 7일 압축강도 측정결과는 천연쇄석을 사용한 경우 14.5MPa로서 순환골재를 사용한 빈배합콘크리트보다 약 10% 정도 높은 값을 나타내었다. 그러나 현장파쇄 순환골재를 사용한 경우에도 재령 7일 압축강도가 모두 10MPa를 상회하므로 현장적용에는 큰 문제가 없음을 알 수 있었다.

#### 4. 시험시공

순환골재의 도로용 재료로서 적용성 및 시공성을 평가하기 위하여 고속도로 본선포장을 모사한 시험시공을 실시하였다. 동상방지층 시공장비는 진동로울러만으로 다짐작업을 실시하였으며, 현장에서 실시된 평판재하시험 및 현장 CBR 시험결과를 정리한 것이 표 6이다.

고속도로공사 전문시방서에서는 동상방지층 및 보조기층에 대하여 평판재하시험에 의한 지지력을 평가하고 있으며 아스팔트 포장공인 경우 침하량 0.25cm에서 지지력계수(K<sub>30</sub>) 30kg/cm<sup>2</sup>/cm 이상, 시멘트 포장공인 경우 침하량 0.125cm에서 지지력계수(K<sub>30</sub>) 20kg/cm<sup>2</sup>/cm 이상으로 규정하고 있다. 순환골재를 사용한 경우 노상의 지지력에 따라 차이가 있으나 모두 시방기준을 만족하고 있음을 알 수 있다.

표 6. 동상방지층 시험시공결과

종 류		평판재하시험 (kgf/cm <sup>2</sup> /cm)		현장CBR(%)		비 고
		노상	동상방지층	노상	동상방지층	
SB-1	Ø75 mm	56.0	53.0	56.7	45.1	살수 전·후 8회
	Ø75 mm	35.0	35.0	64.4	48.29	살수 전·후 4회
SB-2	Ø40 mm	22.6	48.0	23.2	55.6	살수 전·후 12회
	Ø40 mm	14.0	31.0	9.7	32.9	살수 전·후 8회
	Ø40 mm	-	25.0	-	21.9	살수 전·후 4회

표 7은 시험시공에 사용한 빈배합콘크리트 기층의 시방배합을 정리한 것이다. 시공장비로는 덤프트럭, 포설을 위한 아스팔트 피니셔, 다짐에는 진동 로울러, 타이어 로울러 및 텐덤 로울러 등이 사용되었다. 다짐은 진동 및 타이어 로울러를 교대로 사용하였으며, 다짐횟수는 천연골재 사용 단면의 경우 진동로울러 2회, 타이어 로울러 14회, 텐덤 로울러 8회를 다짐하였고, 순환골재 사용 단면은 진동 2회, 타이어 10회, 텐덤 로울러를 6회 다짐하였다

표 7. 빈배합 콘크리트 기층 시험시공에 사용된 시방배합

종 류	Gmax (mm)	단위재료 중량 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S	G	
					32mm	25mm
천연골재	32	70	154	895	659	659
순환골재	32	60	158	753	1353	

다짐특성은 천연골재를 사용한 경우보다 순환골재를 사용한 구간이 양호하였으며, 최종 다짐작업이 끝난 후에 빈배합 콘크리트의 층 두께를 각 단면별로 3회씩 측정하였는데, 평균 15.5cm의 두께를 나타내어 고속도로공사 전문시방서에서 규정하고 있는 다짐후 두께 규정 15±1.5cm를 만족하였다. 또한 동 시방서에서는 빈배합콘크리트 기층의 시공시 다짐도 기준을 100% 이상으로 규정하고 있으나 이 규정은 현장에서 즉시 측정이 곤란하므로 코어 공시체의 압축강도 측정으로 다짐의 양·부를 판정하였다.

그림 4는 빈배합콘크리트 기층의 압축강도 측정결과이다. 시험시공에 사용된 빈배합콘크리트 기층을 실내시험에서는 KS F 2312에 규정된 E다짐방법으로 E 다짐방법으로 제작한 공시체 강도를 천연골재(NCA) 및 순환골재(RCA)로 나타내었으며, 현장코어는 시공구간에서 채취한 코어시편(-Core)의 압축강도도 비교하였다. 순환골재 사용 빈배합 콘크리트의 압축강도는 천연쇄석 콘크리

트에 비하여 평균 약 15% 감소하였다. 실험실 제작 및 현장코어시편의 압축강도는 재령 8일까지 코어 시편이 낮은 값을 나타내지만 재령 28일에서는 코어시편이 높은 값을 나타내었다.

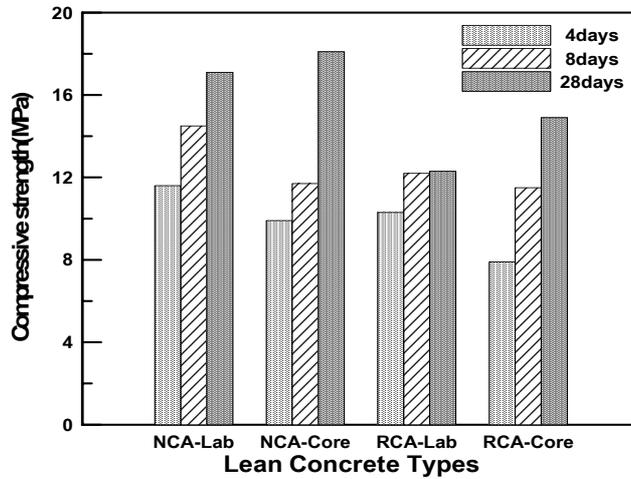


그림 4 골재종류, 제작방법에 따른 압축강도

그러나 순환골재를 사용한 빈배합콘크리트의 경우에도 고속도로공사 전문시방서에서 정하고 있는 배합강도 5MPa를 크게 상회하는 결과를 나타내므로써 큰 문제없이 현장에 적용할 수 있음을 알 수 있다.

그림 5는 콘크리트 포장층 포설전까지 균열발생 및 진전상황 조사결과를 정리한 것이다. 골재 종류에 관계없이 총 5개의 횡단균열이 약 25m 간격으로 발생하였으며, 마지막 E 균열은 건조수축이 원인이라기 보다는 시험시공 완료후 차량의 운행으로 발생한 것으로 추정된다.

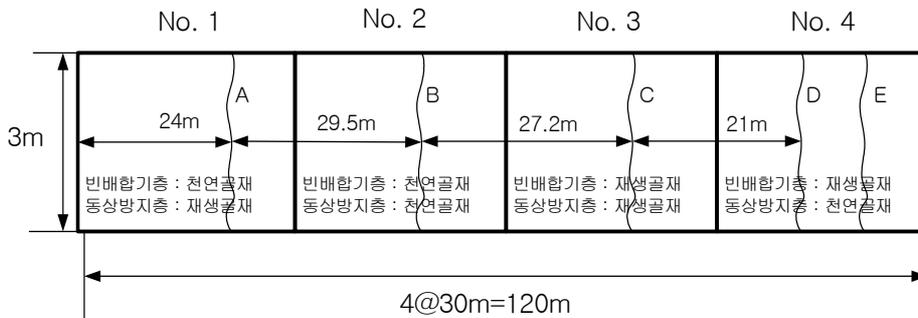


그림 5. 시험시공 구간 균열전개도

고속도로 건설공사로 인하여 기존의 작업로, 농로 등이 소통제한을 받는 경우 간이포장을 실시하며, 이를 부체도로라 하며, 동상방지층 위에 콘크리트 포장을 인력으로 시공하고 있다. 대부분의 부체도로는 중차량 통행이 거의 없으므로 순환골재의 적정용도로 판단되어 부체도로 콘크리트 포장에 시험시공을 실시하였다.

순환골재 생산에 사용된 폐콘크리트의 코어압축강도는 35.3MPa를 나타내었으며, 콘크리트 표층에 시공되기 때문에 천연골재와 혼합하여 사용하였다. 순환골재의 혼합율은 0, 30, 50 및 70%의 4단

계로 하였으며, 배치플랜트 혼합효과, 시공성 및 경화콘크리트의 강도를 평가하였다.

콘크리트의 시공성 평가결과 순환골재 혼합률 30 및 50%의 경우 거의 같은 슬럼프 값과 공기량 값을 보였으나 70%는 공기량이 상당히 감소하고 슬럼프는 오히려 증가하는 양상을 보였다. 또한 콘크리트 제조 공정에서 혼합률 30%의 경우 계량되는 중량이 적은 관계로 정확한 혼합률을 유지하기 어려웠으며, 이는 기존 제조시스템에서 낙차보정 등과 같은 부가적인 조치가 취해져야 할 것으로 판단된다.

현장제작된 콘크리트의 강도 측정결과를 순환골재 혼합율별로 정리한 것이 그림 6~8이다.

재령 7일에서는 순환골재를 혼합한 콘크리트의 압축강도가 천연골재만 사용한 경우보다 높은 값을 나타내었으며, 쪼갬인장 및 휨강도는 비슷한 수준을 나타내었다. 재령이 증가함에 따라 압축 및 쪼갬인장강도는 순환골재를 사용한 경우 약간 높은 값을 나타내었으며, 휨강도는 유사한 수준을 나타내었다.

그러나 콘크리트 포장체는 교통개방 이후 중차량 등에 의한 과도한 교통하중과 비표면적이 넓기 때문에 발생하는 건조수축, 기온변화에 따른 동결융해, 강설시 살포되는 융빙제 살포 등으로 인한 빙점강하 등과 같은 내구성에 매우 취약하며, 이러한 원인이 내구성 및 공용성에 악영향을 미칠 수 있다. 또한 차륜의 마모작용을 직접받으므로 고속도로공사 전문시방서에서는 콘크리트 포장용 골재의 마모율을 35% 이하, 적설한랭지의 경우 25% 이하로 제한하고 있으므로 본선 콘크리트 포장에 적용하는 것은 곤란하였다.

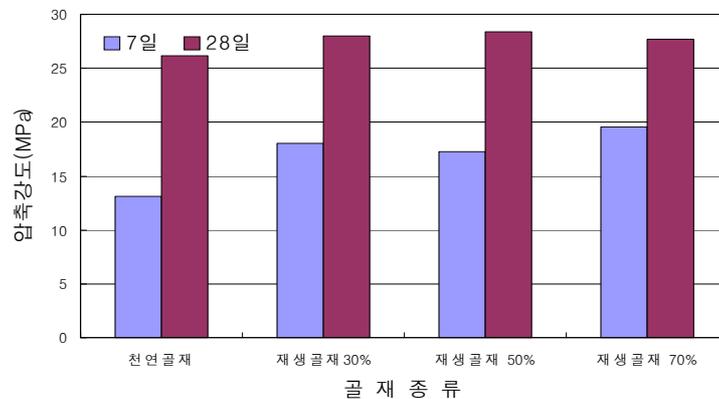


그림 6 순환골재 혼합률에 따른 압축강도

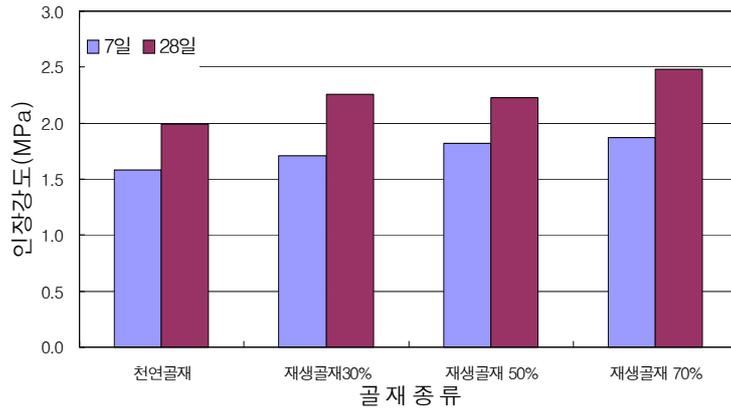


그림 7 순환골재 혼합물에 따른 쪼갬인장강도

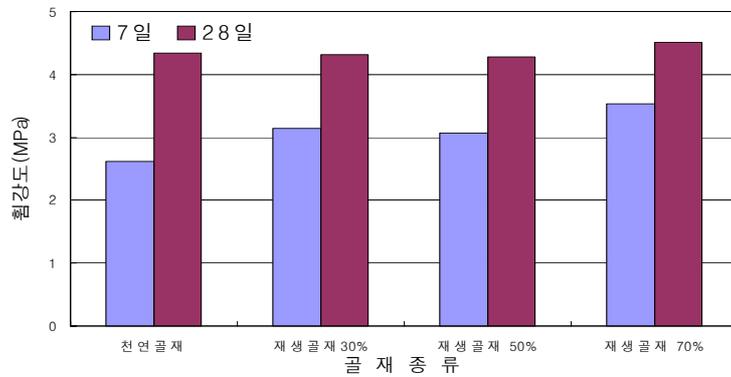


그림 8 순환골재 혼합물에 따른 휨강도

## 5. 맺음말

건설폐기물은 높지 않은 기술수준으로 쉽게 재활용할 수 있으나 대부분 성토, 복토용 저급재료로 활용되고 있으며, 이러한 현실은 정책의 혼선, 건설폐기물에 대한 인식부족, 관련 시방서 미비 및 재활용과정상의 여러가지 문제점에 기인하며, 재활용을 위한 정책과 기술개발의 전환점이 절실히 필요한 시점이라고 생각된다.

폐콘크리트를 적절한 파쇄시스템을 통하여 생산된 순환골재는 시방서에서 양질의 천연골재에 대하여 규정하고 있는 비중, 흡수율, 마모율 등 몇가지 품질 항목을 제외하고 포장용 재료로서 사용하는데 손색이 없음을 시험시공을 통하여 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 지속적인 기술개발과 적용처를 넓혀 가면서 건설폐기물의 발생과 처리를 위한 네트워크 시스템을 통하여 물류 처리비용을 감소시킨다면 순환골재의 적용과 비용절감으로 건설경쟁력향상에 크게 일조할 수 있을 것으로 생각된다.

끝으로 순환골재의 생산과 적용을 위한 지속적인 기술개발, 지속적인 지원과 실험결과 및 현장적용 결과의 관리를 통하여 폐콘크리트의 재활용 확산을 기대한다.

## 참고문헌

1. 환경부, 전국폐기물 발생 및 처리현황, 1997~2004
2. 한국건설기술연구원, 건설폐기물 재활용 촉진을 위한 정책 및 기술개발, 2001
3. 환경부, 건설폐기물 재활용 촉진을 위한 종합대책, 2002. 11
3. 한국도로공사, 건설폐기물 현황조사(자체 집계자료), 2002
4. 한국도로공사, 건설폐기물 재활용 현황조사(자체 집계자료), 2002
5. 김광우 등, 콘크리트 재활용 실태 및 연구동향, 한국콘크리트 학회지, Vol. 6, No. 6, 1994.12
6. 김주원, 산업부산물물의 도로포장에의 재활용, 한국도로포장공학회지, 제 2권 4호, pp. 30~36, 2000
7. 이진용, 이인대, 재활용골재의 성토재료로서의 적합성연구, 대한토목학회지, 제 16권 III-2호, pp.131~138, 1996
8. 황충렬 등, 폐콘크리트 재활용 기술개발방안에 관한 연구, 한국자원재생공사, 1996
9. 구봉근 등, 건설폐기물의 재활용 및 처리기술개발, 건설교통부 연구보고서

---

도로교통기술원 재료환경연구그룹 김진철