

파쇄횡수가 순환골재의 품질특성에 미치는 영향



1. 서론

박상준 선임연구원 (주)대우건설 기술연구소 concrete@dwconst.co.kr

콘크리트는 구조재료로서 가장 널리 사용되고 있는 우수한 재료이지만, 높은 흡수율과 골재 자체 강도 등의 열악함으로 인하여 재이용 및 재활용이 쉽지 않다는 큰 결점을 가지고 있다. 그러나 천연 골재의 부족현상과 더불어 도심지의 재개발 및 재건축 사업 등이 진행됨에 따라 발생하는 막대한량의 폐콘크리트는 현재 당면하고 있는 커다란 문제점으로 대두되고 있다.

이러한 사회현상에 기인하여 폐콘크리트를 활용한 순환 굵은 골재의 사용성에 대한 검토는 이전부터 국내외에서 활발히 진행되어 왔으나, 대부분이 도로기층 보조재나 노반재 등과 같은 비구조체를 대상으로 실용화 되고 있는 실정에 있다. 즉, 건설폐기물 중에서 폐콘크리트가 차지하는 비율이 가장 높지만, 이를 활용한 순환골재는 사용성 및 강도특성상 많은 문제점을 가지고 있기 때문에 다각적인 품질개선 방안이 절실한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 원콘크리트의 배합조건 및 골재특성이 콘크리트의 유동특성에 미치는 영향을 평가할 목적으로 동일 배합조건의 공시체를 제작하여 6개월간 자연 상태에 폭로시킨 후, 파쇄하여 순환 골재로 사용함으로써 원콘크리트에 적용된 콘크리트의 특성이 순환 골재의 기초특성에 미치는 영향을 평가하고, 아울러 천연골재와의 혼합비율에 따른 품질개선 효과 등에 대해서도 검토하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험개요

순환골재의 품질을 평가하는 단계에 있어 원콘크리트에 적용된 배합조건이나 골재특성 등에 대한 기초자료를 확보할 수 있다면 매우 유용하다. 그러나 대부분의 경우 이와 관련된 기초자료는 거의 확보할 수 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 원콘크리트의 배합조건 및 골재특성이 콘크리트의 유동특성에 미치는 영향을 평가할 목적으로 동일 배합조건 of 공시체를 제작하여 6개월간 자연 상태에서 폭로시킨 후, 파쇄하여 순환골재로 제조하였는데, 본 단계에서는 콘크리트 단계에 앞서 모르타르 단계에서의 유동특성을 중심으로 검토하였다.

2.2 사용재료

순환골재를 제조하는데 사용된 원콘크리트의 배합조건 및 압축강도 범위는 [표 1]과 같으며, 원콘크리트에 사용된 골재의 물리적 특성은 [표 2]와 같다.

[표 1] 원콘크리트의 배합조건 및 강도범위

W/B	재령	시험체	대상	압축강도
0.37	6월	실린더	초유동 콘크리트	37.8

[표 2] 원 콘크리트에 사용된 골재의 물리적 특성

항목 종류	비중	흡수율 (%)	단위용 적질량 (kg/m ³)	조립율	마모율 (%)	염화물 (%)	실적율 (%)
잔골재	2.61	1.00	1,665	2.78	-	0.004	64
굵은골재	2.63	0.96	1,546	7.01	7.04	-	59

원콘크리트는 분체계 초유동 콘크리트의 배합조건으로 제조되었기 때문에, 굵은골재 용적비(GV)가 50%로 일반 콘크리트에 비해 시멘트 페이스트량이 많은 반면, 상대적으로 굵은 골재량이 다소 적은 특징을 가지고 있다. 또한, 원콘크리트 제조에 사용된 시멘트는 S사의 보통 포틀랜드 시멘트이며, 분체로 F급 플라이애쉬를 30% 사용하였다. 잔골재는 바닷모래, 굵은 골재는 25mm 쇄석을 사용하였다.

[표 3] 실험항목 및 변수범위

실험항목	변수범위	
사용골재 종류	순환골재, 천연골재	
순환골재 파쇄횟수	1, 2, 3차 파쇄	
파쇄횟수별 순환골재의 재료특성	- 입도(조립율) - 비중 - 마모감량 - 흡수율 - 씻기손실량 - 중량감소율	
모르타르 특성	순환 잔골재 혼합비율	0, 30, 50, 70, 100%
	사용분체	F급 플라이애쉬 30%
	평가방법	플로우 및 구속수비
	배합조건	- 물/결합재비(30.2, 53.5) - 잔골재 용적비(40%) - 고성능 감수제(0 ~ 1.8%)

2.3 실험방법

원콘크리트의 파쇄횟수별 순환골재의 품질특성을 비교하기 위해 Jaw crusher를 이용하여 25mm 순환골재를 제조하였다. 본 연구에서는 파쇄 된 순환골재를 크게 굵은골재와 잔골재로 분류하였으며, 미립분의 경우에 대해서는 차기에 검토하는 것으로 하였다. 실험항목 및 변수범위는 [표 3]과 같다. 여기서, 순환골재의 중량감소를 시험은 파쇄횟수별로 각각 7kg의 시료를 5%의 염산용액에 10일간 침지시킨 후, #4체에 잔류하는 골재의 중량을 측정하는 것으로 하였다. 또한, 파쇄횟수별 제조된 순환골재의 품질시험결과는 KS규준(콘크리트용 골재)과 일본건설성 순환골재 품질규준(안)으로 구분하여 분석하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 파쇄횟수에 따른 골재종류별 발생비율

원콘크리트의 파쇄횟수에 따른 순환 굵은골재 및 잔골재, 그리고 미립분의 발생비율은 [표 4]와 같다.

즉, [표 4]에서와 같이, 파쇄횟수가 증가될수록 굵은골재에 부착되어 있던 모르타르 부분이 제거되어, 순환 굵은골재의 생산량은 감

소하였지만, 상대적으로 순환 잔골재량은 증가되는 것으로 나타났다. 또한, 미립분도 파쇄횟수에 따라 발생비율이 증가하여 3차 파쇄시 전체의 2% 정도가 발생하기 때문에, 이에 대한 성분분석 및 활용방안을 검토할 필요가 있다.

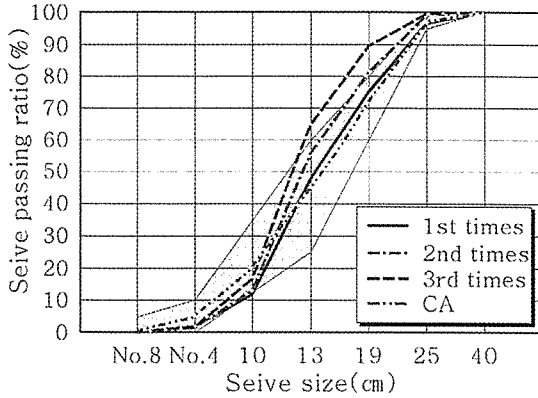
[표 4] 파쇄횟수에 따른 골재종류별 발생비율

구분	파쇄횟수별 골재별 발생 비율(%)		
	1차 파쇄	2차 파쇄	3차 파쇄
굵은골재	76	69.2	66
잔골재	22.9	26.8	31.9
미립분	1.1	1.6	2.1

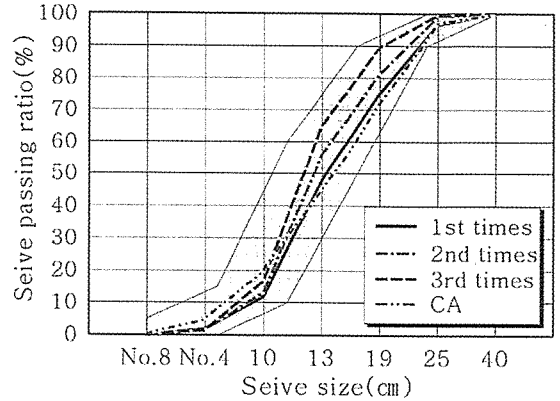
3.2 파쇄횟수에 따른 입도

파쇄횟수에 따른 순환 굵은골재 및 원콘크리트에 사용된 굵은골재의 입도곡선은 [그림 1]과 같다.

[그림 1]에 나타난 바와 같이, 원콘크리트에 사용된 굵은골재(CA)에 비해 순환 굵은골재의 입도는 파쇄횟수가 증가할수록 13mm와 19mm 골재의 체통과율이 증대되는 것으로 나타났는데, 이는 Jaw crusher가 25mm로 조정되어 있기 때문에 굵은 입도의 골재가 파쇄되는 비율이 높아져, 상대적으로 13mm이하 골재의 발생비율이 높아졌기 때문으로 사료된다.



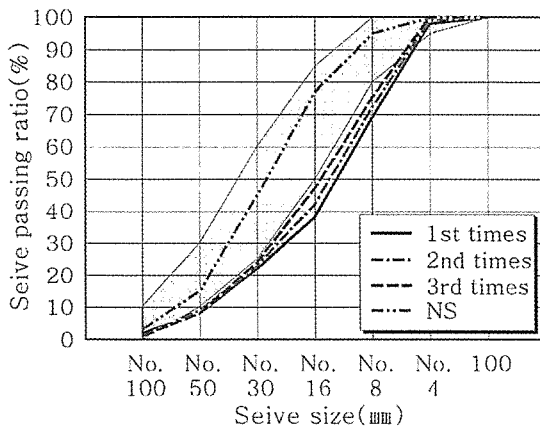
[그림 1(a)] 파쇄횟수별 굵은골재의 입도곡선 (KS기준)



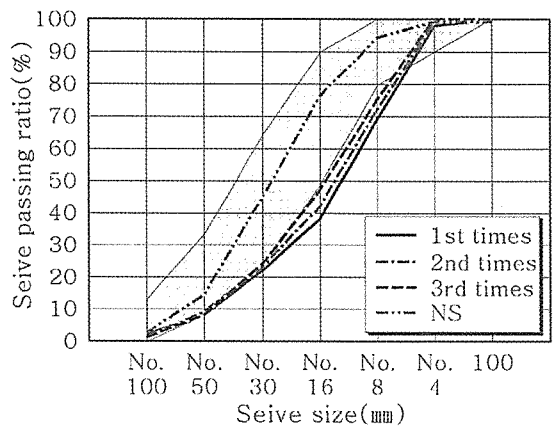
[그림 1(b)] 파쇄횟수별 굵은골재의 입도곡선 (일본 건설성)

세부적으로, KS 표준입도범위([그림 1(a)])을 적용한 경우, 2차 파쇄까지만 규준을 만족하는 것으로 나타났으며, 일본 건설성에서 제안하고 있는 순환 굵은골재의 표준입도범위([그림 1(b)])을 적용한 경우는 대부분이 만족하는 것으로 나타났다.

[그림 2]는 순환 잔골재의 입도곡선을 나타낸 것이다. 즉, 잔골재의 경우, 굵은골재에 비해 상대적으로 파쇄횟수에 따른 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 일부는 KS나 일본 건설성의 표준 입도범위를 다소 벗어나는 경우도 있는 것으로 나타났다. 한편, 원 콘크리트의 잔골재(NS)에 비해 체통과율이 낮게 평가되는 것으로 나타났는데, 이는 Jaw Crusher의 파쇄입경이 25mm용이기 때문인 것에 기인한 결과로 판단된다. 그러나 파쇄횟수가 증대될수록 입형을 개선하는 효과가 크기 때문에, 천연 잔골재와 혼합하여 사용한다면 사용성 및 품질을 개선시킬 수 있을 것으로 사료된다.



[그림 2(a)] 파쇄횟수별 잔골재의 입도곡선 (KS기준)



[그림 2(b)] 파쇄횟수별 잔골재의 입도곡선 (일본 건설성)

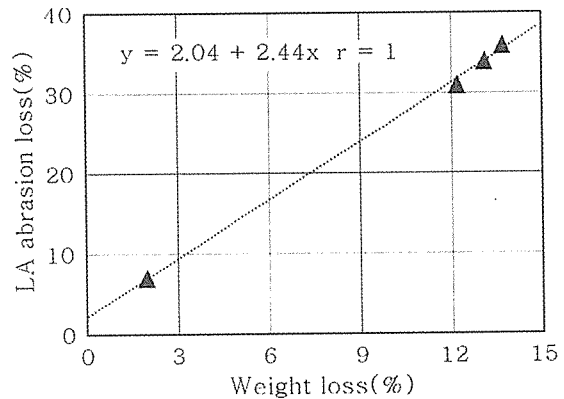
3.3 순환골재의 중량 감소율 및 마모감량

본 연구에서는 압축강도가 37.8MPa인 원콘크리트를 대상으로 순환 굵은골재의 파쇄횟수별 중량 감소율 및 마모감량을 측정하였으며, 시험결과는 [그림 3]과 같다.

마모감량의 관계측, 파쇄횟수에 따른 중량 감소율은 각각 13.7, 13.1, 12.2%인 것으로 나타났으며, 마모감량도 파쇄횟수에 따라 각각 36, 34, 31%씩 감소하는 것으로 나타났다. 이는 파쇄횟수가 증가할수록 순환골재 감싸고 있는 모르타르나 페이스트 부분이 감소되었기 때문인 것으로 분석된다. 식 (1)과 [그림 3]은 중량 감소율과 마모감량간의 상호관계를 나타낸 것이다.

$$LosA = 2.44 \times L.W + 2.04 \text{ ————— 식(1)}$$

여기서, $LosA$: 마모감량, $L.W$: 중량 감소율



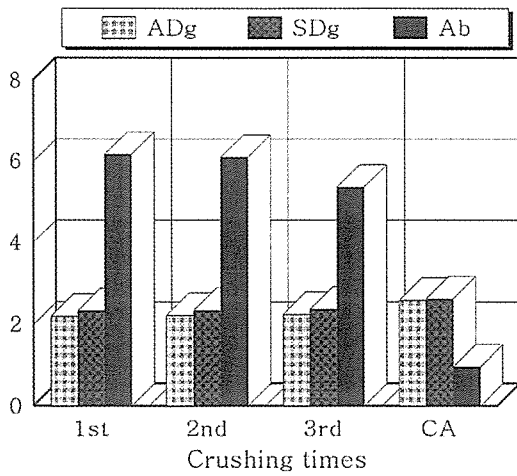
[그림 3] 파쇄횟수별 중량 감소율과 마모감량의 관계

3.4 파쇄횟수에 따른 비중 및 흡수율

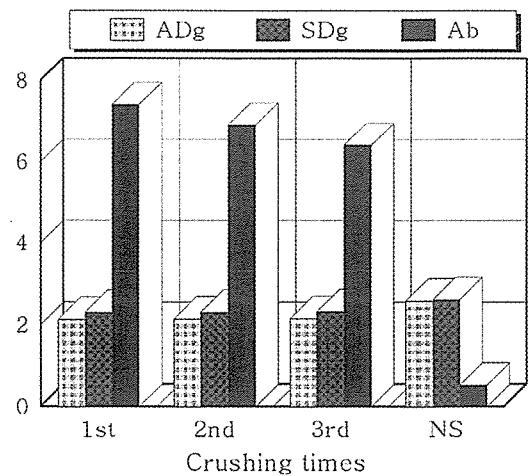
[그림 4]는 원콘크리트의 파쇄횟수에 따른 순환골재의 절건비중(ADg), 표건비중(SDg) 및 흡수율(Ab) 시험결과를 나타낸 것이다.

분석결과, 순환 굵은골재의 경우, 파쇄횟수가 증가할수록 흡수율이 감소되는 반면, 비중은 다소 증가되는 것으로 나타났는데, 세부적으로 비중의 경우에는 원콘크리트에 사용된 굵은골재(CA)와 거의 유사한 값을 나타내고 있었으며, 흡수율의 경우는 천연골재에 비해 매우 높은 값을 나타냈다. 즉, 순환 굵은골재의 흡수율 시험 결과는 일본 건설성의 관리규준인 7% 이하를 만족하고 있기 때문에, 순환골재의 사용성은 충분히 확보될 수 있는 것으로 사료되나, 원콘크리트에 적용된 굵은골재의 흡수율이 1% 이하인 점을 감안하여 볼 때 콘크리트에서의 시공성, 강도 및 내구성 측면을 보완할 수 있는 품질관리 방안이 정립되어야 할 것으로 판단된다.

한편, 순환 잔골재의 경우도 굵은골재와 유사한 경향으로, 일본 건설성의 흡수율 규준(13%이하)을 만족하는 것으로 나타났다.



[그림 4(a)] 파쇄횟수별 굵은골재의 비중 및 흡수율



[그림 4(b)] 파쇄횟수별 잔골재의 비중 및 흡수율

3.5 입형판정 실적을 및 씻기 손실량

[표 5]는 파쇄횟수에 따른 순환 굵은골재의 입형판정 실적율 및 씻기시험 손실량 시험결과를 나타낸 것이다.

먼저, 순환 굵은골재의 입형판정 실적율은 일본 건설성의 관리규준인 53% 이상을 만족하였으며, 파쇄횟수가 증가할수록 입형이 개선되는 효과에 기인하여 다소

증가하는 경향을 나타내고 있었다. 그러나 씻기 손실량의 경우는 잔·굵은골재에 따른 구분 없이 1차 파쇄의 경우, 관리규준을 만족하지 못하고, 3차 파쇄 과정을 거쳐야만 규준을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 파쇄횟수를 증대하는 방안과 혼합사를 사용하는 방안에 대한 정량적인 평가가 필요한 것으로 분석되었다.

3.6 마모감량과 비중·흡수율 관계

[그림 5]는 순환 굵은골재의 마모감량과 비중 그리고, 흡수율간의 상호관계를 선형회귀 분석한 결과이다. 분석결과, 마모감량이 증가할수록 흡수율은 비례하여 증가하는 반면, 비중은 감소하는 것으로 나타났다. 식(2)와 식(3)은 상호관계를 나타낸 것이다.

[표 5] 파쇄횟수에 따른 순환골재의 실적율 및 손실율

파쇄횟수		건설성 규준(日本)	1차	2차	3차	원골재
굵은골재	입형판정실적율	53% 이상	58.0%	59.0%	59.0%	58.2%
	씻기시험손실량	1.0% 이하	1.70%	1.50%	0.90%	0.5%
잔골재	씻기시험손실량	8.0% 이하	8.20%	7.90%	7.30%	2.0%

$$Gr = -0.01 \times LosA + 2.69 \quad \text{식(2)}$$

$$Ab = 0.18 \times LosA - 0.32 \quad \text{식(3)}$$

여기서, Gr: 비중, LosA: 마모감량, Ab: 흡수율

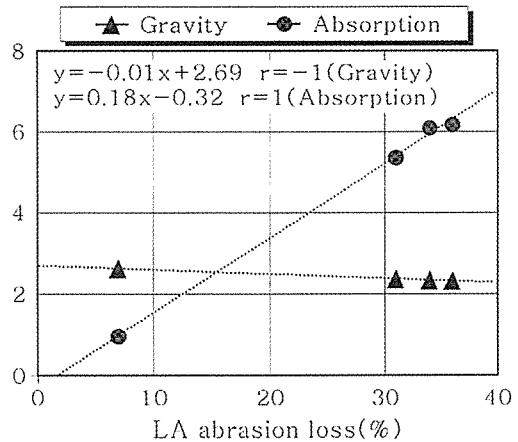
3.7 순환골재의 치환율에 따른 품질특성

파쇄횟수가 증가할수록 순환골재의 품질이 크게 개선된다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 순환골재를 범용화 하기 위해서는 경제성이나 설비 상황 등을 고려하여 평가할 필요가 있다. 따라서 천연골재의 치환율에 따른 특성을 평가하였다.

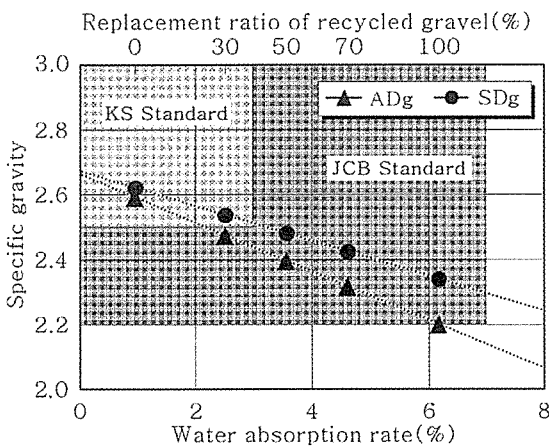
즉, 잔·굵은골재에 대한 순환골재의 치환율을 중량비로 각각 0, 30, 50, 70, 100%로 변화시켜 품질 특성을 검토하였다.

[그림 6]은 순환골재의 치환율에 따른 비중 및 흡수율간의 상호관계를 나타낸 것이다. 분석결과, 순환 잔·굵은골재의 치환율 30%까지는 KS의 비중(2.5이상) 및 흡수율(3.0이하) 규준을 만족하고 있었으며, 일본건설성 순환골재 규준의 경우 순환골재의 치환율이 100%인 범위까지 비중 및 흡수율 규정을 만족하고 있다.

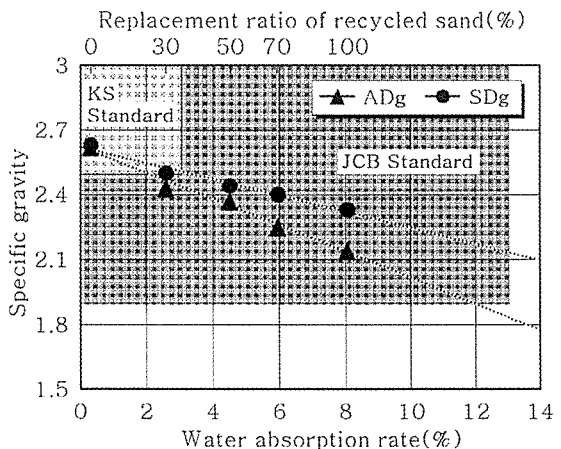
따라서 향후 순환골재와 관련한 KS 규준이 정립될 것으로 예상되기 때문에, 모르타르나 콘크리트 단계에서의 요구성능을 만족하는 범위에서 크게 활용할 수 있을 것으로 예상된다.



[그림 5] 순환골재의 마모감량과 비중·흡수율간의 상호관계



[그림 6(a)] 순환 굵은골재 치환율에 따른 품질특성



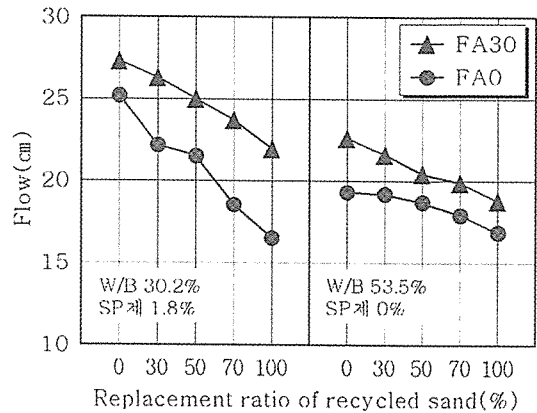
[그림 6(b)] 순환 잔골재의 치환율에 따른 품질특성

3.8 모르타르의 유동 특성

순환 잔골재를 사용한 모르타르의 유동특성을 평가할 목적으로, 천연 잔골재에 대한 순환 잔골재의 치환율은 각각 0, 30, 50, 70, 100%의 5개 수준 그리고, F급 플라이애시 치환율은 0%와 30% 2개 수준으로 하여 유동특성을 검토하였다.

시험결과, 물/결합재비 변화에 따른 구분 없이 순환 잔골재의 치환율이 증가할수록 유동성은 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 순환 잔골재의 경우 부순모래와 유사한 입형 및 입도를 갖는다는 것과 높은 흡수율에 기인한 고성능 감수제의 흡착효과 등이 복합되어 나타난 결과로 분석된다.

그러나 물/결합재비가 높아질수록 순환 잔골재의 치환율에 따른 유동성 저하특성이 다소 완만해지는 경향으로 나타나고 있어, 일반 콘크리트를 대상으로 적용하는데는 커다란 어려움이 없을 것으로 판단된다.



[그림 7] 순환 잔골재의 치환율에 따른 유동특성

4. 결론

원콘크리트의 파쇄횟수 및 천연 잔골재의 혼합비율이 순환골재의 품질특성에 미치는 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 파쇄횟수에 따른 순환골재의 발생비율은 파쇄횟수가 증가할수록 굵은골재의 생산량은 감소하고, 잔골재량은 증가되는 것으로 나타났다.
- (2) 순환 굵은골재의 입도는 2차 파쇄까지만 KS의 표준입도범위를 만족하고 있었으며, 일본 건설성의 표준입도범위를 적용한 경우는 대부분이 만족하는 것으로 나타났다.
- (3) 순환 잔골재의 입도는 굵은골재에 비해 상대적으로 파쇄횟수에 따른 영향이 크지 않은 것으로 나타났으며, 일부는 KS나 일본 건설성의 표준입도범위를 다소 만족하지 못하는 경우도 있었다.
- (4) 비중 · 흡수율 · 마모감량 및 중량 감소율 등은 파쇄횟수가 증가할수록 개선되어, 천연골재를 대상으로 하고 있는 KS의 품질관리규준을 만족하기는 어려우나, 일본 건설성에서 제안하고 있는 순환골재의 품질관리규준은 만족하는 것으로 나타났다.

- (3) 순환 잔 · 굵은골재의 치환율에 따른 특성으로 치환율 30%까지는 KS의 품질관리항목인 비중 및 흡수율 기준을 만족하고 있었으며, 치환율 100%의 경우는 일본건설성의 품질관리기준을 만족하고 있었다.
- (4) 모르타르 실험결과, 순환 잔골재의 치환율이 증가할수록 유동성이 크게 저하하는 것으로 나타났다. 그러나 일반강도범위의 콘크리트를 대상으로 한다면 매우 유용하게 활용할 수 있는 것으로 평가되었다.

참고문헌

- (1) Mostafa Tavakoli and Parviz Soroushian, "Strengths of Recycled Aggregate Concrete Made Using Field-Demolished Concrete as Aggregate", ACI Material Journal, 3-4 1996
- (2) 南波篤志, 阿部道彦, 棚野博之, 前田弘美, "再生コンクリートの品質改善に関する実験", 콘크리트工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 2, 1995. pp. 65~70.
- (3) 阿部道彦, "再生骨材を用いたコンクリート", 콘크리트工学, Vol. 33, No. 12, 1995. 12, pp. 110~116.
- (4) 김무한외 5인, "건식제조법에 의해 생산된 고품질 재생잔골재의 품질 및 재생콘크리트의 성상에 관한 연구", 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제16권 1호, 2004, pp. 364~367.
- (5) 심재원외 3인, "현장파쇄 재생골재를 사용한 부체도로 콘크리트 포장", 콘크리트학회 학술발표 논문집, 제16권 1호, 2004, pp. 348~351.