

## 도로포장 재료로서 폐콘크리트 재생골재의 활용성 연구

### Assesment of Applicability of Recycled Aggregates for Highway Pavement Materials

김 광 우\* · 류 능 환\*\* · 도 영 수\*\*\* · 이 상 범\*\*\*\*

Kim, Kwang Woo · Ryu, Neung Hwan · Doh, Young Soo · Li, Xiang Fan

#### Abstract

This study was performed to evaluate applicability of recycled aggregates as subbase and surface concrete materials for cement concrete pavement. Laboratory compaction test, CBR test and plate load bearing test were conducted to evaluate applicability for pavement subbase materials. Recycled concrete for surface course was manufactured with a design strength of 280kgf/cm<sup>2</sup>. Normal coarse aggregate was substituted with recycled aggregates with five different ratios, 0%, 20%, 40%, 60% and 80% for recycled concrete mixes. Fresh concrete properties, concrete strength properties for the five substitution percentages of recycled aggregates after 28-day curing and freezing-and-thawing resistance were evaluated experimentally. Based on the experimental results, it was concluded that the recycled aggregate was the material good enough to use for subbase material, and 40% or lower substitution ratio was an appropriate percentage of recycled aggregates replacement for surface concrete.

**Keywords** : *Recycle, Recycled aggregate, Recycled concrete, Concrete pavement, Subbase, Freezing-and-thawing*

#### 요 지

본 연구는 재생골재를 도로의 보조기층재료 및 포장용 콘크리트 골재로 사용하기 위하여 수행되었다. 우선 보조기층재료로서의 활용성 여부를 파악하기 위하여 실내다짐시험, CBR 시험, 평판재하시험을 수행하였으며, 콘크리트용 골재로의 활용성을 보기 위하여 재생골재 첨가비율을 0, 20, 40, 60, 80%로 하여 설계기준강도 280kgf/cm<sup>2</sup>인 표층용 콘크리트를 제조하였다. 제조된 콘크리트로 굳지 않은 콘크리트 성질과 28일 양생 후 강도시험과 동결 용해에 따른 내구성 시험을 통해 폐콘크리트 재생골재의 활용성을 도로포장재료 측면에서 검토하였다. 실험결과 재생골재는 보조기층재료로서의 사용이 충분히 가능하며 표층용 콘크리트 골재로서 재생골재 첨가비율 40%까지 활용이 가능함을 알 수 있었다.

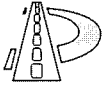
**핵심용어** : 재활용, 재생골재, 재생 콘크리트, 콘크리트포장, 보조기층, 동결-용해

\* 정희원 · 강원대학교 농공학부 교수

\*\* 강원대학교 농공학부 교수

\*\*\* 정희원 · 강원대학교 석재복합신소재제품연구센터 박사후 연구원

\*\*\*\* 정희원 · 강원대학교 대학원 박사수료



## 1. 서 론

최근 도시개발의 가속화로 인하여 20~40년 전에 건설된 콘크리트 구조물들이 재개발 및 철거 대상이 되어 매년 전국적으로 막대한 양의 폐콘크리트가 발생되고 있다. 이의 처리를 위해 중간 처리업이 새로이 등장하였으나 처리비용이 매우 비싸 불법 매립이나 불법 투기의 원인이 되고 있다. 이와 같은 불법 투기는 각종 환경오염의 원인이 되고 있으나 아직 폐콘크리트의 재활용처가 확실하게 제시되지 못하고 있어 정책적인 차원에서의 재활용이 절실한 실정이다. 하지만 건설폐기물의 재활용은 체계적인 실험 연구를 통한 실용성 평가가 필요하다.

순수한 폐콘크리트 덩이를 파쇄하면 골재와 모르터 부분이 같이 부서지고 이를 용도에 따라 일정 크기 이하의 입자로 체가름하면 세칭 “재생골재”가 얻어진다(1). 이 입자들은 본래의 굵은골재와 모르터가 붙어있으며 이중 골재부분에 비해 모르터 부분은 비중이 낮고 상대적으로 약하며 흡수율도 높다(2,3). 이로 인하여 일부에서는 골재들만을 추려내기 위해 모르터 부분을 2차, 3차 작업과정을 통해 떨어내고 얻어진 입자들을 재생골재로 활용한다. 하지만 이렇게 하는 것은 작업과정이 복잡하여 비용이 많이 들며 부산물로 분진과 세립의 폐콘크리트 입자들이 많이 발생되어 이의 처리가 또한 새로운 문제로 대두될 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 폐콘크리트를 보다 손쉽게 재활용하기 위하여 재생처리장에서 일정 크기 이하로 파쇄하여 골재와 모르터가 함께 붙어있는 입자들을 체가름한 재생골재를 도로의 보조기층재료 및 포장용 콘크리트 골재로 사용하기 위한 연구가 수행되었다. 우선 보조기층재료로서의 활용성 여부를 파악하기 위하여 실내다짐시험, CBR 시험, 평판재하시험을 수행하였으며, 콘크리트용 골재로의 활용성을 보기 위하여 재생골재

첨가비율을 0, 20, 40, 60, 80%로 하여 설계기준강도 280kg/cm<sup>2</sup>인 표층용 콘크리트를 제조하였다. 제조된 콘크리트로 굳지 않은 콘크리트 성질과 28일 양생 후 강도시험과 동결 융해에 따른 내구성 시험을 통해 폐콘크리트 재생골재의 활용성을 도로포장재료 측면에서 검토하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 사용재료

재생콘크리트란 폐콘크리트 재생골재를 일반골재에 일정비율 첨가하여 제조한 콘크리트를 말하며, 이의 제조를 위하여 시멘트는 국내 H사의 일반 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 혼화제는 고성능 감수제(마이티 150, 비중 1.2)를 시멘트량에 0.5% 사용하였고, 재생골재와 함께 쇄석골재(일반골재)를 사용하였다. 재생골재는 강원도 춘천시에 위치한 재생처리장에서 생산한 25mm, 40mm 골재를 사용하였다. 그림 1, 2는 25mm와 40mm의 재생골재 형상을 보여주고 있다. 사용된 재생골재는 생산라인에서 수작업과 기계선별을 거치기 때문에 유기물 함량이 비교적 적었고, 입도 구분이 좋았다. 재생골재는 일본 건설성에서 제시한 재생골재 입도범위(5, 6)를 만족하는 것으로 나타났다.

일반골재는 강원도 춘천 지역에서 생산되는 쇄석골재를 사용하였고, 재생콘크리트 제조시 잔골재는 강원도 춘천 지역의 하상에서 채취한 자연산 모래를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 굵은골재 및 잔골재에 대한 물리적 성질은 표 1과 같다. 그림 3은 재생골재와 일반골재를 혼합한 입도분포를 나타낸다.

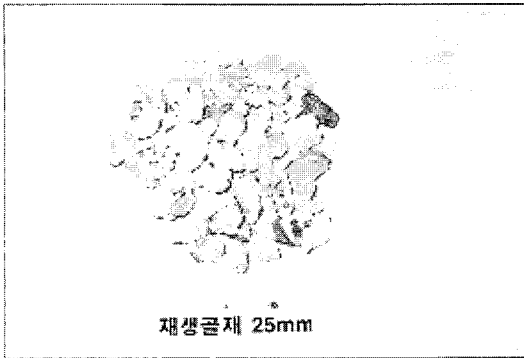
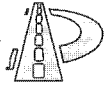


그림 1. Recycled aggregate (25mm)

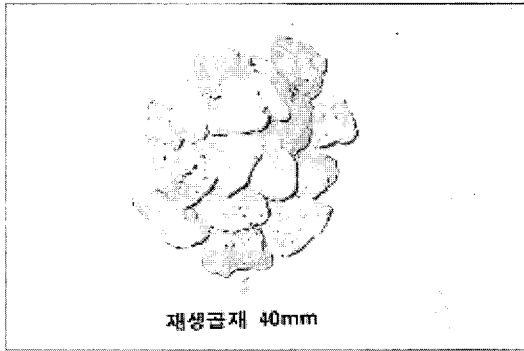


그림 2. Recycled aggregate (40mm)

표 1. Physical properties of aggregates

Physical property / Aggregate	S.G.	Absorption (%)	Soundness (%)	Abrasion (%)	F.M.
<b>Fine Aggregate</b>					
Spec.	above 2.5	below 3.0	-	-	2.3~3.1
Measured	2.65	1.09	-	-	2.8
<b>Normal coarse agg.</b>					
Spec.	above 2.5	below 3.0	below 12	below 20	-
Measured	2.69	1.14	7.4	18.1	-
<b>Recycled coarse agg.</b>					
Spec.	above 2.2	below 7.0	-	below 50	-
Measured	2.53	5.92	13.7	39.4	-

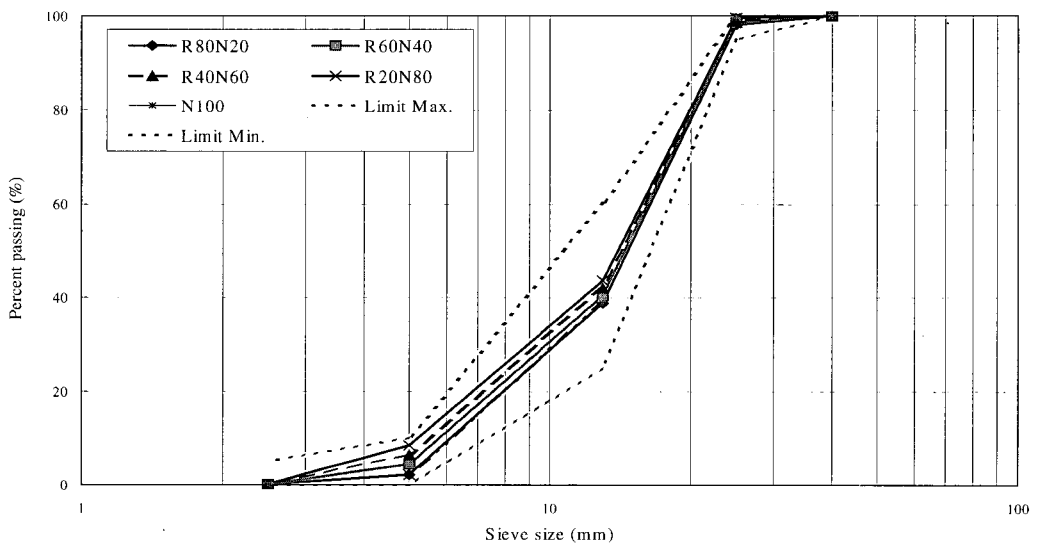


그림 3. Gradation curve of recycled aggregate plus normal aggregate

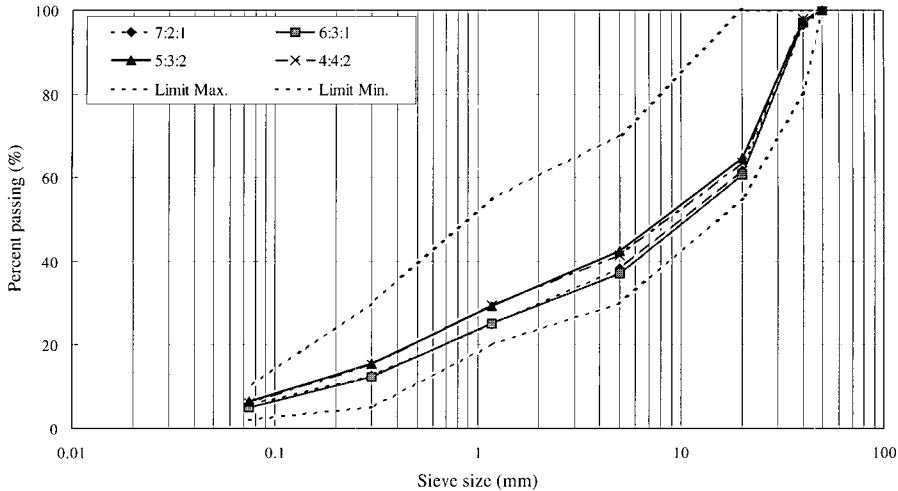
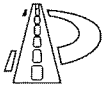


그림 4. 보조기층용 재생골재 합성입도

## 2.2. 시험방법

판재하시험을 수행하는 상태를 보여주고 있다.

### 2.2.1. 재생골재의 다짐특성, CBR 시험, 평판재하시험

재생골재를 이용하여 실내에서 4가지 비율 4:4:2, 5:3:2, 6:3:1, 7:2:1(40mm 골재 : 19mm 골재 : 4.75mm(No.4) 골재)로 조합하여 KS F 2312에 따라 다짐시험을 수행하였으며, 재생골재를 이용한 지반 특히 도로의 노상, 노반의 지지력을 평가하기 위하여 KS F 2320에 따라 상기의 배합비율로 CBR 시험을 수행하였다. 배합비율에 따른 골재입도분포는 그림 4와 같다. 또한 보조기층재료로서의 재활용을 위하여 액성한계 시험을 KS F 2303, 소성지수시험을 KS F 2304, 마모감량은 KS F 2508에 따라 수행하였으며, 시험피트(Pit)를 설치하여 다짐을 최대전조밀도의 95% 정도로 다지고 ELE-29형 평판재하시험기를 이용하여 평판재하시험을 수행하였다. 이때 재하판은 지름이 30cm인 원형판을 사용하였고 유압재키를 20톤 대형트럭 밑에 설치하여 하중을 재하하였다. 그림 5는 재생골재를 다짐하는 작업을 보여주며, 그림 6은 평



그림 5. Compaction with a vibrating roller in a test pit

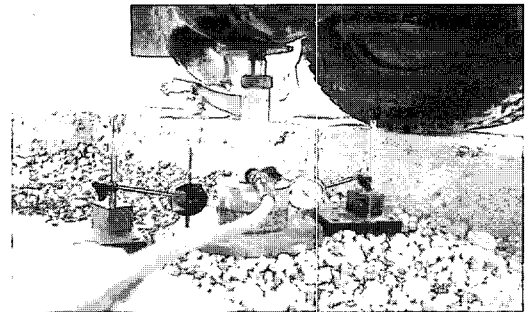
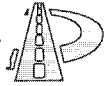


그림 6. Plate loading test



### 2.2.2. 배합설계

콘크리트 표준시방서에서 도로포장의 표층용 배합은 일반 도로용 콘크리트의 28일 설계 휨강도를 45kgf/cm<sup>2</sup>로 제시하고 있으며 이때의 압축강도는 280kgf/cm<sup>2</sup> 정도이다. 재생골재의 품질은 일반골재에 비하여 다소 불량하고 불순물이 다소 함유되어 있어 이것으로 제조되는 재생콘크리트의 강도는 불확실성이 크므로 변동계수(Coefficient of variation)를 비교적 높은 15%로 추정하고 이로부터 증가계수  $\alpha = 1.15$ 를 곱해 배합강도를 설정하였다. 그리고 배합설계 목표 슬럼프는 6cm로 설정하였으며 현장에서 작업성을 좋게 하기 위하여 고성능 감수제를 첨가하여 슬럼프를 15±2cm가 얻어지는지를 확인하였다. 물-시멘트 비를 41%로 하고 주어진 천연골재와 재생골재를 일정 비율로 배합하여 배합설계를 수행한 결과를 표 2에 나타내었다.

표 2. Specified mix proportion of surface course concrete

Recycle ratio (%)	Designation	W/C	Unit weight (kgf/m <sup>3</sup> )					Coarse agg.	
			W	C	Add.	Fine agg.	Na.	Rec.	
0	N100	0.41	168	410	2.10	706	1032	0	
20	R80N20						826	206	
40	R60N40						619	413	
60	R40N60						413	619	
80	R20N80						206	826	

Add. : additive  
 N : Normal aggregate  
 R : Recycled aggregate

### 2.2.3. 콘크리트의 특성 시험

콘크리트 물성의 변화를 파악하기 위하여 굳지 않은 콘크리트의 단위용적중량, 공기량, 슬럼프 및 28일 수중양생 후 재생콘크리트의 응력과 변형률 관계, 압축강도, 휨강도, 압축 탄성계수, 인

장강도 및 동결 융해에 따른 동탄성계수 등을 측정하였다. 휨강도를 제외한 모든 공시체는 원통형 공시체로, 25mm의 재생콘크리트는  $\phi 10 \times 20$ cm의 원주형 몰드를 사용하였고 휨강도용 공시체는 15×15×52cm(지간 48cm)의 보로 제조하였다.

공시체의 배합은 소정량의 재료를 모두 계량하여 실험실용 믹서를 이용하여 콘크리트를 혼합하였으며, 압축강도시험용 공시체는 사전에 커터기를 사용하여 표면을 연마하여 편심하중이 가해지지 않도록 하였다.

동결-융해 저항성 시험은 한 사이클을 4시간으로 하여, 공시체 중심에서의 온도를 4°C에서 -18°C로 떨어뜨리고 다시 4°C로 상승시키는 것을 반복하였다. 각 공시체의 동탄성계수 측정은 C.N.S Electronics LTD사의 Erudite Resonant frequency tester 시험기를 이용하여 초기 값의 40%가 손실될 때까지 또는 300사이클까지 진행하도록 규정되어 있는 KS F 2456-1993에 의하여 수행하였다. 그림 7은 동탄성계수를 측정하는 모습을 나타내고 있다.

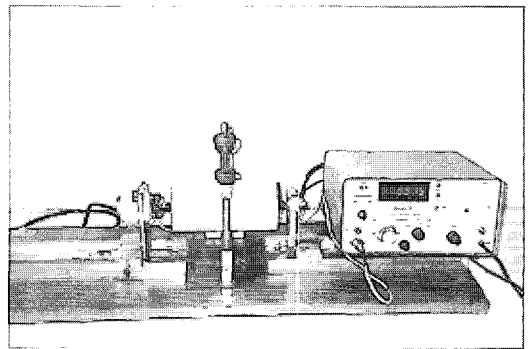
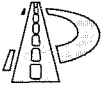


그림 7. Dynamic elastic modulus testing system

각각의 공시체 재령 14일에 최초로(동결-융해 처리 전) 동탄성계수를 측정하고 바로 동결-융해 처리에 들어갔다. 이후 매 24사이클(4일) 처리 후 한 번씩 공시체를 꺼내어 동탄성계수를 측정하고 다시 동결-융해 처리하고 공시체 별로 동결-융해



처리 횟수의 증가에 따른 동탄성계수의 변화를 기록하였다. 또한 매 24사이클이 끝날 때마다 동탄성계수 측정을 위해 공시체를 꺼낼 때 공시체 표면상태(외관)를 관찰하고 이상 징후가 존재하거나 변형이 생긴 것은 사진을 찍고 기록해 두었다. 그래서 일단 이상 징후(미세균열 등)가 보인 공시체는 그 표면상태를 자세히 관찰하며 손상의 진전상태를 파악하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 다짐시험

보조기층재료로서의 재활용을 위한 품질시험결과를 표 3과 같으며, 그림 8은 4가지 비율로 배합한 시료에 대한 다짐밀도 실험결과를 보여주고 있다. 조립분의 함량이 높을수록 건조밀도는 증가하는 추세를 보였으며, 7:2:1의 배합에서는 조립분의 비율이 많아서 다짐작업이 원활하지 못하였으나 6:3:1의 배합에서는 다짐작업도 편리하고 최대건조밀도와 함수비에서 다른 배합들보다 유리하고 다짐효과도 크게 나타나 6:3:1의 배합이 가장 이상적인 배합으로 판단되었다.

표 3. 보조기층재료로서의 재생골재 품질

Property	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Plasticity limit	Abrasion (%)
Aggregate				
Measured	30.75	22.22	8.53	39.4

재생골재는 다짐 작업중에 주변에 부착되어 있는 모래, 시멘트 모르타르 부스러기, 소형자갈이 분쇄되어 보다 양호한 입도로 재구성되어 다짐효과가 극대화된다. 또한 동결-융해에 따른 손상방지 효과는 물론 포장층 내부 또는 하부층에 자유수의 유입을 방지할 수 있다고 사료되므로 다짐시험결과에서 보면 노상 성토재료로 충분히 사용

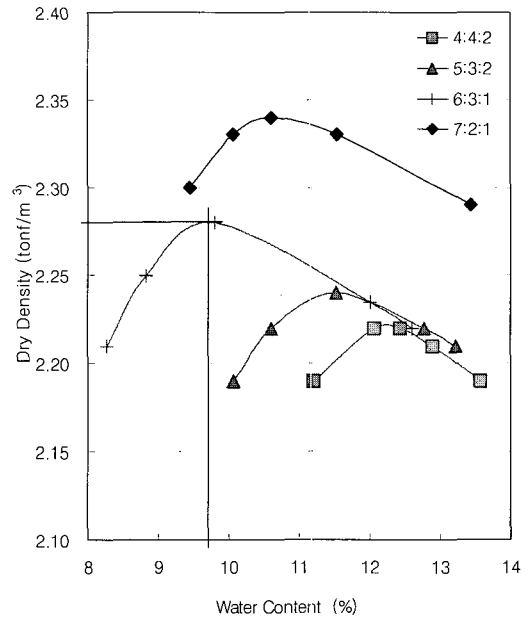


그림 8. Compaction test result

가능하다고 판단되었다.

#### 3.2. CBR 시험

최적 배합비율로 결정된 6:3:1의 재생골재를 17, 42, 92회씩 다짐하여 각 다짐횟수에서의 CBR 값을 구하였다. 그림 9는 다짐횟수가 92회일 때 CBR 값을 보여주고 있다. 그리고 실내 최대건조밀도의 95%값을 취하여 상기의 3개 다짐횟수에 대한 CBR 결과를 외삽법에 의하여 수정 CBR 값을 91.5%로 결정하였다. 이 값은 노상 골재로서의 역학적 특성을 충분히 발휘할 수 있고, 다짐 작업 중 자생적으로 재료의 이탈 및 분쇄현상이 발생하여 입도분포가 양호하게 조절됨으로 부순 막자갈보다도 더욱 유용한 골재로 판단되었다. 따라서 CBR의 관점에서 본 재생골재는 적절한 배합과 다짐 및 함수비를 유지해준다면 노반재료로 사용이 충분히 가능할 것으로 판단되었다.

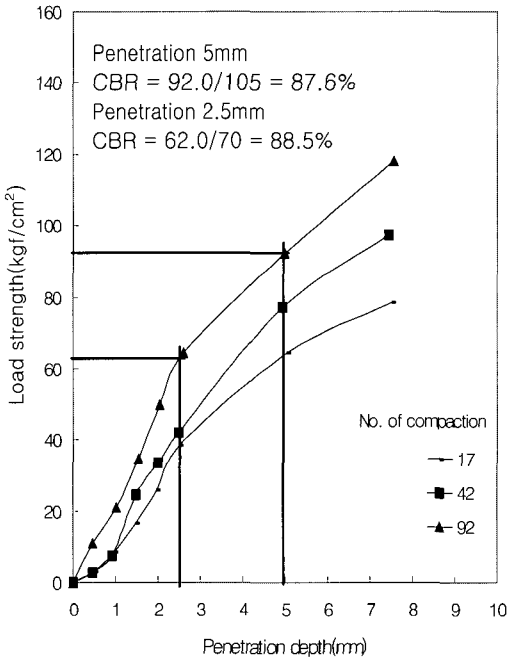
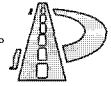


그림 9. CBR test result(6:3:1)

### 3.3. 평판재하시험

평판재하시험 결과는  $K = 29.76 \text{ kgf/cm}^3$ 의 값을 얻었는데 이 값은 3회 반복시험의 평균값으로 그림 10과 같다. 일반적으로 콘크리트 포장의 경우 지름이 30cm인 원형 재하판을 사용하였을 때 K 값을  $15 \text{ kgf/cm}^3$  이상으로 규정하고 있다. 따라서 K의 규정 값보다 2배 정도 크게 나타났다. 이로부터 노상 성토재료로 재생골재를 사용했을 때 적절한 다짐만 보장된다면 충분히 사용 가능하다고 판단된다.

### 3.4. 굳지 않은 콘크리트의 성질

표층용으로 재생골재 함유량별 콘크리트를 배합비에 따라 혼합하고 각각에 대하여 단위용적 중량 및 공기량과 슬럼프를 측정하여 결과를 그림 11~13에 나타내었다. 그림 11~13에서 알 수 있듯이 재생골재의 함유량이 증가함에 따라 단위용

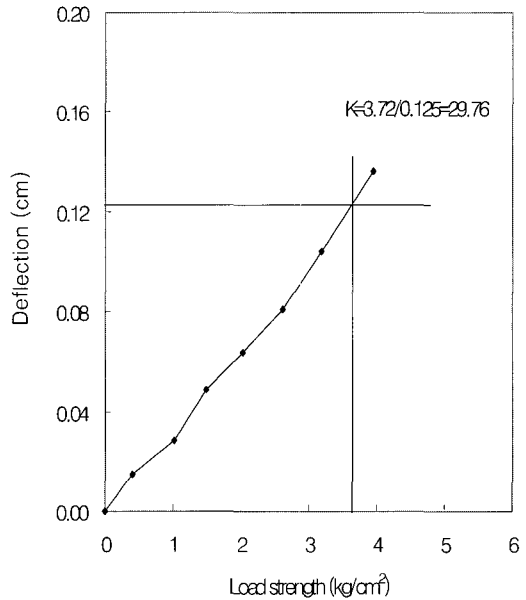


그림 10. Plate bearing test result

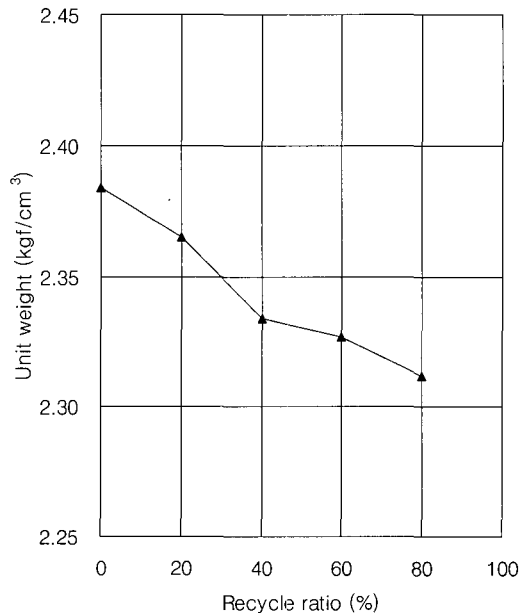


그림 11. Relationship between unit weight and replacement ratio of recycled aggregate in fresh recycled aggregate

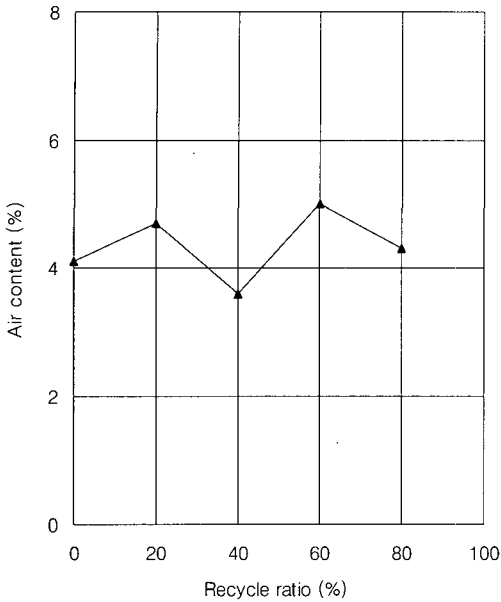
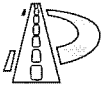


그림 12. Relationship between air content and replacement ratio of recycled aggregate in fresh recycled aggregate

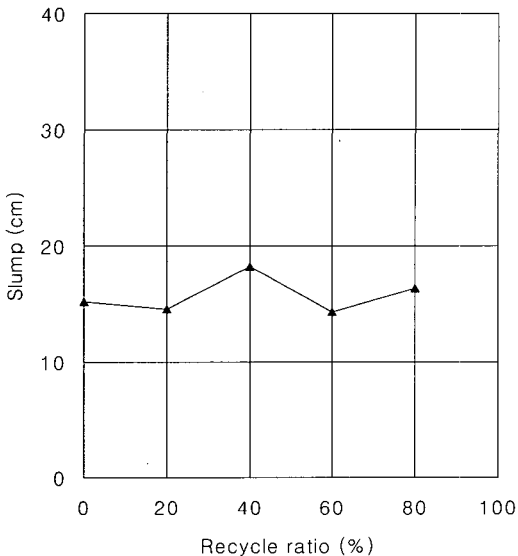


그림 13. Relationship between slump and replacement ratio of recycled aggregate in fresh recycled aggregate

적중량은 점차 감소하는 경향으로 나타났는데 이는 재생골재의 비중과 실적률이 작기 때문이라고 판단된다. 공기량은 재생골재의 첨가량에 관계없이 모두 비슷하게 나타났고, 슬럼프 값도 재생골재의 첨가량에 관계없이 모두 약 16cm로 우수한 작업성을 나타내었다. 이는 적정량의 혼화제를 사용하면 작업성을 향상시킬 수 있음을 보여주는 것으로 판단된다.

### 3.5. 강도

표 3은 표층용으로 재생골재 함유량별 콘크리트를 제조하여 28일 강도를 측정된 결과를 나타낸다.

표층용 재생콘크리트는 재생골재의 함유량이 증가함에 따라 강도가 저하하는 경향을 나타냈다. 또한 표층용 콘크리트는 재생골재 함유량이 40%에서 설계기준강도(280kgf/cm<sup>2</sup>)와 휨강도에 거의 만족하였지만 그 이상의 함유량에서는 만족하지 못했다. 따라서 표층용 재생콘크리트로의 활용률을 높이기 위해서는 재생골재 함유량을 40% 이하로 제한하고 적절한 혼화제의 첨가가 필요할 것으로 사료된다.

### 3.6. 동결-융해 저항특성

#### 3.6.1. 내구성 및 외형의 변화

각 재생골재 첨가별 콘크리트에 대하여 재령 14일에 동결-융해 처리를 시작하여 공시체의 상

표 3. Strength of recycled concrete for surface course slab

Recycle ratio (%)	Various strengths at 28days			
	Compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Elastic modulus (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Flexural strength (kgf/cm <sup>2</sup> )
0	376.3	280,256	37.26	54.12
20	309.2	253,731	32.80	50.86
40	281.6	232,280	26.74	44.93
60	241.2	218,352	26.00	42.58
80	218.4	204,812	23.45	38.98



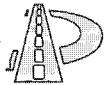


그림 14. Specimen showing microcracking    그림 15. Specimens showing severe surface damage (scaling)    그림 16. Completely separated specimens

태를 관찰한 결과 재생골재가 60% 이상 포함된 공시체에서 비교적 큰 외형의 손상이 나타나 내구성이 나쁜 것으로 나타났고, 40% 이하 공시체는 재생골재를 첨가하지 않은 공시체와 유사하게 손상이 비교적 적었다. 공시체의 상태 변화는 다음과 같이 분류할 수 있었다. 첫째, 공시체 표면에 미세균열이 생기고 그것이 굵은 균열로 발전하는 상태; 둘째, 표면의 껍질이 벗겨지고 거칠어지는 상태; 셋째, 부분적으로 깊이 패이든가 떨어져 나가는 상태; 마지막으로 완전히 공시체가 절단되는 상태이다. 특히 72사이클 후 공시체가 완전히 절단된 상태는 재생골재가 80% 포함된 공시체에서 일어났다. 공시체의 파괴상태를 단계별로 그림 14~16에 보여주고 있다.

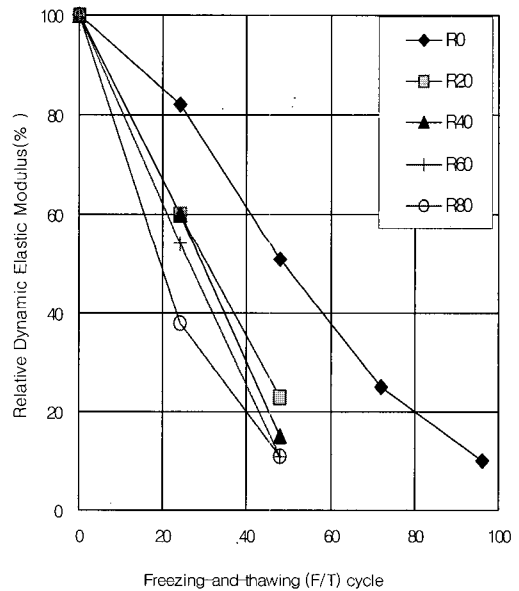


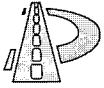
그림 17. Change of dynamic elastic modulus by F/T cycle

### 3.6.2. 동탄성계수의 변화

그림 16은 재생콘크리트를 동결-융해시키면서 일정 사이클마다 동탄성계수를 측정하여 그 변화를 보여주고 있다. 그림 17에서 알 수 있듯이 재생골재 함유량이 증가할 수록 동탄성계수는 감소하는 추세를 나타내었다. 또한 일반 콘크리트에 비하여 내구성이 낮게 나타났다. 이는 기존 연구 (1~4, 7)의 플라리아쉬를 첨가하였을 때와 비교하여 급격한 저하추세를 보여, 앞으로 이에 대한 연구가 있어야 할 것이다.

## 4. 결론

본 연구에 사용된 재생골재는 일반골재에 비교하여 비중과 단위용적중량이 작고 흡수율이 크게 나타났지만 일본 건설성 규정의 재생골재의 품질 기준에 적합한 것으로 나타났으며 이를 도로포장용 재료로 폐콘크리트 재생골재의 활용성을 평가하기 위하여 다양한 시험을 수행하여 분석한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.



1. 재생골재는 노상 성토재료는 물론 액성한계 값을 보정할 수 있다면 보조기층 재료로도 사용 가능하다고 판단되었다.
2. 재생골재 함유량이 증가함에도 굳지 않은 콘크리트의 성질은 양호하였다. 또한 혼화제의 첨가에 따라 작업성 등이 조절되므로 현장에 따라 적절한 사용이 가능할 것으로 판단된다.
3. 표층용 콘크리트의 동결융해 저항성 및 내구성 판정결과 재생골재 함유량이 40% 이하에서 적절하였고, 동탄성계수 시험결과를 기존 연구와 비교한 결과 플라이에쉬의 사용을 통한 내구성 향상 연구가 있어야 할 것으로 사료된다.
4. 내구성 및 강도시험결과를 종합하여 볼 때 표층용 콘크리트의 재생골재 함유량별 강도를 볼 때 내구성이 비교적 양호하고 휨강도가 약  $45\text{kgf/cm}^2$ (압축강도  $280\text{kgf/cm}^2$  이상)이 얻어진 40% 이내에서의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구결과는 사용된 한 종류의 재생골재에 의하여 얻어진 결과이므로 보다 일반화된 결과를

얻기 위하여서는 더 많은 종류의 재생골재를 이용한 실험연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. 김광우, 도영수, 김진영, 박용철, (1995), "콘크리트 폐기물을 재활용한 콘크리트의 제조 및 품질 특성 연구," 동아건설 논문상 수상 논문집, 동아건설 산업 주식회사.
2. 김광우, 류능환, 최영규, (1996) "폐 콘크리트를 재활용한 소도로 포장에 관한 연구," 한국농공학회 논문집, 제38권 4호.
3. 김광우, 류능환, 최영규, (1996) "소도로 포장재료로서 재생 콘크리트의 역학적 특성," 한국콘크리트학회 논문집, 제8권 5호.
4. 김광우, 이상범, 최영규, 조희원, 정규동, (1996) "재생골재의 함유량차이에 따른 재생콘크리트의 강도특성," 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집.
5. 吉乘 亨, (1996) "폐콘크리트 덩이로부터 재생골재 생산," 건설폐기물 재활용 심포지엄 논문집.
6. 本多淳裕, 山田 優, (1990) "건설계 폐기물의 처리와 재활용," pp83-129.
7. 이진용, 이인대, 김광우, 배성용 (1998) "재생콘크리트 강도 발현 및 동결 융해 저항성 특성," 한국콘크리트학회 논문집, 제10권 4호.

(접수: 2001. 2. 14)