

碩士學位論文

순환잔골재 치환율에 따른  
콘크리트 압축강도 특성

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

土木工學 專攻

金希峻

2010.2

碩士學位論文

순환잔골재 치환율에 따른  
콘크리트 압축강도 특성

指導教授 朴 相 烈

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

土木工學 專攻

金 希 峻

2 0 1 0 . 2

# 순환잔골재 치환율에 따른 콘크리트 압축강도 특성

指導教授 朴 相 烈

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2010年 2月 日

濟州大學校 産業大學院  
建設環境工學科 土木工學專攻  
金 希 峻

金希峻의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

2010年 2月 日

審査委員長 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

Compressive Strength of Concrete with Different  
Substitution Ratio of Recycled Fine Aggregates

Hee-Joon Kim

(Supervised by Professor Sang-Yeol Park)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for  
the degree of Master of Engineering

2010. 2.

This thesis has been examined and approved

Master committee : Sang-Jin Kim, Prof. of Civil Engineering

Master committee : Dong-Wook Lee, Prof. of Civil Engineering

Master committee : Sang-Yeol Park, Prof. of Civil Engineering

Department of Construction and Environmental Engineering  
Graduate School of Industry  
Jeju National University

- 목 차 -

표 목차

그림 목차

요약문

<b>I. 서론</b> .....	<b>1</b>
1. 연구배경 및 목적 .....	1
2. 연구내용 및 방법 .....	2
<b>II. 기존 연구 및 이론 고찰</b> .....	<b>4</b>
1. 개요 .....	4
2. 건설폐기물 현황 .....	4
3. 순환골재의 특징과 용도 .....	7
1) 순환골재의 특징 .....	7
2) 순환골재의 용도 .....	12
3) 순환골재의 물리적 특성과 콘크리트 특성과의 관계 .....	13
4. 순환골재 콘크리트의 특성 .....	14
1) 단위수량과 슬럼프 .....	14
2) 공기량과 밀도 .....	15
3) 압축강도 .....	15
4) 인장강도 .....	16
5) 건조수축 .....	17
5. 순환골재의 제조 및 활용현황 .....	17
1) 국내 순환골재 품질기준 및 재활용현황 .....	17
2) 국외 순환골재 품질기준 .....	20
3) 고품질 순환골재 제조기술 .....	24
4) 순환골재 콘크리트의 제조 및 활용기술 .....	27

<b>III. 실험</b> .....	<b>28</b>
1. 실험개요 .....	28
2. 사용재료 .....	31
1) 시멘트 .....	31
2) 골재 .....	32
3) 혼화제 .....	34
3.3 실험방법 .....	35
1) 슬럼프 .....	35
2) 공기량 .....	35
3) 압축강도 .....	37
<b>IV. 실험결과 및 분석</b> .....	<b>39</b>
1. 실험결과 .....	39
2. 결과분석 .....	40
1) 슬럼프시험 결과분석 .....	40
2) 공기량시험 결과분석 .....	41
3) 압축강도시험 결과분석 .....	42
<b>V. 결 론</b> .....	<b>44</b>
<b>VI. 참고문헌</b> .....	<b>46</b>

## 표 목차

<표 1> 건설폐기물 성장현황 .....	6
<표 2> 기준 콘크리트의 압축강도 대비 15% 감소시 이물질의 체적률 .....	8
<표 3> 순환골재의 용도별 생산 현황(2002년) .....	13
<표 4> 골재의 특성과 콘크리트 특성과의 관계 .....	13
<표 5> 순환굵은골재와 잔골재의 혼합비율에 따른 압축강도의 변화 .....	16
<표 6> 순환골재의 품질기준 .....	18
<표 7> 순환골재의 입도 .....	18
<표 8> 건축구조용 순환골재의 입도 .....	20
<표 9> 건축구조용 순환골재의 품질기준((재)일본건축센터 인정기준 일례) ..	21
<표 10> 순환골재의 품질(JASS 5) .....	22
<표 11> 순환굵은골재 및 잔골재의 입도기준(JASS 5) .....	22
<표 12> 실험 변수 .....	28
<표 13> 기본실험 배합표1(천연굵은골재 + 순환잔골재<0,50,100%>)-미분 미제거 ..	30
<표 14> 기본실험 배합표2(천연굵은골재 + 순환잔골재<0,50,100%>)-미분 제거 ..	30
<표 15> 순환골재 배합표3(순환굵은골재100%+순환잔골재100%) .....	30
<표 16> 시멘트의 화학적 특성 .....	31
<표 17> 시멘트의 물리적 특성 .....	31
<표 18> 골재의 물리적 성질 .....	32
<표 19> 시험결과표 .....	39
<표 20> 미분 제거 여부에 따른 압축강도 비교 .....	43

## 그림 목차

<그림 1> 폐기물 발생량 변화추이 .....	5
<그림 2> 건설폐기물 발생량 및 점유율 .....	5
<그림 3> 연도별 건설폐기물 처리방법별 처리량 .....	7
<그림 4> 연도별 건설폐기물 처리방법별 비율 .....	7
<그림 5> 순환골재에 포함된 이물질 성상 .....	9
<그림 6> 순환골재의 절건밀도와 흡수율 .....	10
<그림 7> 부착시멘트량과 흡수율의 관계 .....	11
<그림 8> 입도별 시멘트부착량 (한국레미콘공업협회) .....	12
<그림 9> 굵은 콘크리트의 밀도가 압축강도에 미치는 영향 .....	15
<그림 10> 순환잔골재 건식생산시설 전경 및 계통도 .....	26
<그림 11> 밀도 및 흡수율 시험 .....	32
<그림 12> 골재의 성상 .....	33
<그림 13> 체가름시험 및 0.08mm체 통과량 측정 .....	33
<그림 14> 입도분포곡선 .....	34
<그림 15> 과정별 시험장면 .....	38
<그림 16> 변수별 시험결과 .....	39
<그림 17> 치환율에 따른 슬럼프값 비교 .....	40
<그림 18> 미분 제거여부에 따른 슬럼프값 비교 .....	40
<그림 19> 치환율에 따른 공기량 비교 .....	41
<그림 20> 미분 제거여부에 따른 공기량 비교 .....	41
<그림 21> 치환율에 따른 압축강도 비교 .....	42
<그림 22> 미분 제거여부에 따른 압축강도 비교 .....	42



## 요 약 문

본 연구는 순환골재를 사용한 콘크리트에서 순환잔골재의 치환율과 잔골재의 미분 제거 여부에 따른 콘크리트의 압축강도 특성의 변화를 파악하였다.

본 연구에 사용된 순환골재는 도내 J사에서 생산한 40mm 이하 순환골재를 이용하여 25mm이하 굵은골재와 5mm이하의 잔골재를 추출하여 사용하였으며, 순환잔골재의 치환율(0, 50, 100%) 및 미분제거(제거, 미제거) 여부와 순환 굵은 골재 사용 여부를 주요 변수로 설정하였다.

실험 결과 순환잔골재를 사용한 슬럼프의 변화는 순환골재 치환율 증가에 따라 슬럼프가 감소하고, 공기량은 순환굵은골재 사용시 그 증가폭이 크게 나타났다.

압축강도는 50% 치환시 10% 감소, 100% 치환시 18% 감소되었고, 순환골재만을 사용한 경우에는 21% 감소되어 감소폭이 큰 것으로 나타났으며, 미분 제거시에는 미분을 제거하지 않고 같은 비율로 치환한 경우에 비하여 5~6%까지 강도가 증진되었다.

순환골재 콘크리트는 골재의 품질에 따라 영향을 많이 받게 되므로 순환골재 사용시에는 배합수 관리에 주의를 기하여야 하고, 시험배합을 통하여 적정 강도가 발휘되어질 수 있도록 배합설계시 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.

# 1. 서론

## 1. 연구배경 및 목적

최근 재개발, 재건축 등으로 천연골재의 수요가 급증하고 있다. 골재는 민간부분의 주택 건설과 공공부분의 도로, 지하철, 항만, 공항 등의 사회 간접자본시설 확충으로 인하여 향후에도 지속적으로 골재 수요가 증가할 것으로 예상되고 있다. 그러나 골재자원은 유한한 자원으로서 부존량의 지속적인 감소와 더불어 사전환경성 검토, 바다모래의 채취 총량제 등과 같이 환경보호와 연관된 채취 규제가 더욱 강화됨으로 인해 골재의 안정적 수급 및 품질 확보의 어려움이 점차 증가할 것으로 전망되고 있다.

또한, 도시 재개발을 통한 건물의 경제적, 기능적 수명 단축으로 인한 철거되는 건축물의 급증은 건설폐기물의 증가로 이어지고 있어 환경적인 측면에서도 문제를 야기하고 있다. 이와 같은 건설폐기물의 대량 발생은 귀중한 자원낭비를 가져옴은 물론, 매립 또는 소각과정에서 토양, 지하수, 대기 등에 심각한 환경오염을 초래하게 된다. 더욱이 건설폐기물 매립지 부족으로 인해 야기되는 환경적인 문제는 자원의 효율적 활용 측면뿐만 아니라 환경보호 차원에서도 국가적으로 해결해야 할 중요한 과제의 하나로 등장하고 있다.

이러한 건설폐기물의 처리와 골재자원의 부족문제를 해결하고자 2003년 12월 「건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률」을 제정하여 제도적 기틀을 마련하였고, 2006년 12월 같은법 제35조 규정에 근거한 순환골재의 용도별 「순환골재 품질기준」을 마련하였으며, 한국산업규격과의 통일성 유지를 위하여 콘크리트용, 아스팔트 콘크리트용 및 도로 보조기층용과 같은 용도별 순환골재 KS 규격을 개정하여 다양한 용도로 순환골재의 활용도를 높이기 위한 정책을 시행하고 있다.

환경부에 따르면 우리나라의 2007년도 총 폐기물 중 건설폐기물의 점유율은 51%이고 건설폐기물 중 폐콘크리트가 68.5%로서 가장 큰 비중을 차지하

고 있으며, 현재 폐콘크리트의 처리방법 중 90% 이상이 도로건설의 노반재나 성토용 및 복토용 등 부가가치가 낮은 용도로 사용되고 있다.

그 이유로는 폐콘크리트를 이용한 순환골재는 여러 가지 품질상의 제약으로 인하여 비구조체에 주로 사용되고 있어서, 이를 개선하지 않고 콘크리트의 제조에 재활용할 경우 콘크리트의 품질이 저하될 수 있기 때문에 품질관리가 쉽고 생산비용이 저렴한 도로건설의 노반재 용도나 성토 및 복토용으로 그 이용이 제한되고 있기 때문이다.

전술한 바와 같이 자원부족과 환경적 측면에서 폐콘크리트를 활용한 순환골재 콘크리트의 제조기술을 개선하여 현재 비구조체 위주로 사용되는 순환골재를 건축물의 구조체 콘크리트용 골재로 활용함으로써 자원문제와 환경문제를 동시에 해결해야 할 필요성이 있다.

최근 순환골재를 중심으로 구조용으로 활용하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있으나, 순환골재에 대하여는 좀더 다양한 방법으로 연구가 진행되어야 할 것으로 판단되며, 본 연구에서는 순환골재의 치환율과 미분제거에 따른 콘크리트의 압축강도 특성을 분석하여, 순환골재의 이용활성화를 위한 기초자료로 제시하는 것을 주된 목적으로 한다.

## 2. 연구내용 및 방법

본 연구는 건설폐기물의 대부분을 차지하고 있는 폐콘크리트를 활용하여 만들어진 순환골재의 용도를 확대하기 위하여 순환골재의 치환율에 따른 콘크리트의 압축강도특성을 분석하고, 순환골재에 포함된 미분 제거여부가 콘크리트의 압축 강도에 미치는 영향을 분석하기 위한 내용으로, 아래와 같은 방법으로 연구를 진행하였다.

제1장 서론에서는 본 연구의 배경 및 목적과 연구내용 및 방법을 기술하였다.

제2장 기존연구 및 이론고찰에서는 콘크리트용 순환골재의 특성 및 순환골재 콘크리트의 특성에 관한 각종 참고문헌을 종합하여 순환골재의 특성이 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 인자와 연구방향을 고찰하였다.

제3장 실험에서는 도내 J사에서 생산된 순환골재를 이용하여 치환율과 잔골재에 포함된 0.08mm 이하의 미립분 제거 여부를 주요 변수로 하여 콘크리트를 배합하였으며, 배합에 따라 슬럼프와 공기량 및 재령28일 압축강도의 변화를 측정하였다.

제4장 실험결과 및 분석에서는 순환잔골재 치환율과 미분제거에 따른 슬럼프의 변화, 공기량의 변화 및 압축강도의 변화를 분석하였다.

제5장 결론에서는 이와 같은 순환잔골재를 사용한 순환골재콘크리트의 특성에 관한 연구 결과를 종합적으로 기술하였다.

## 2. 기존 연구 및 이론 고찰

### 1. 개요

인류의 삶의 질 향상과 생활환경 개선에 대한 욕구의 증대에 따라 경제와 산업의 비약적인 발전을 이루어 왔다. 그러나 이러한 도약의 과정에서는 가용 자원의 발굴과 대량소비 등에 따른 자원고갈의 문제와 각종 산업 분야에서 배출되는 각종 폐기물 및 오염물질로 인하여 대기환경 악화와 생활환경 훼손이라는 오류를 범하여 왔다.

특히 건설구조물은 일정기간 사용한 후에는 해체되기 마련이며, 이것이 재활용되지 않고 폐기하게 되면 머지않은 미래에 전 국토가 건설 폐기물로 뒤덮이는 상황이 도래할 것이다.

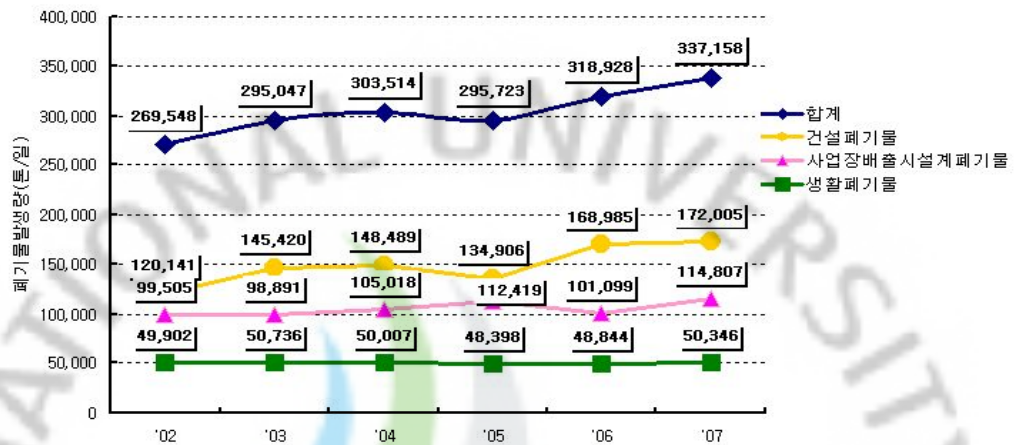
이러한 건설구조물의 주재료는 콘크리트이며, 골재는 콘크리트 용적의 약 70%정도를 차지하고 있으나, 최근 골재 자원의 감소와 골재채취 여건 악화로 골재 부족 현상은 더 가중될 전망이다. 이에 대한 대안으로 폐콘크리트를 재활용한 순환골재를 자원 순환형으로 활용할 수 있는 방안을 도출하는 것이 매우 시급하다..

따라서 본장에서는 순환골재를 콘크리트용 골재로 활용하기 위해서 기존의 연구자료 및 각종 현황자료를 토대로 순환골재의 기본적인 물성과 그 특성에 대하여 검토하고자 한다.

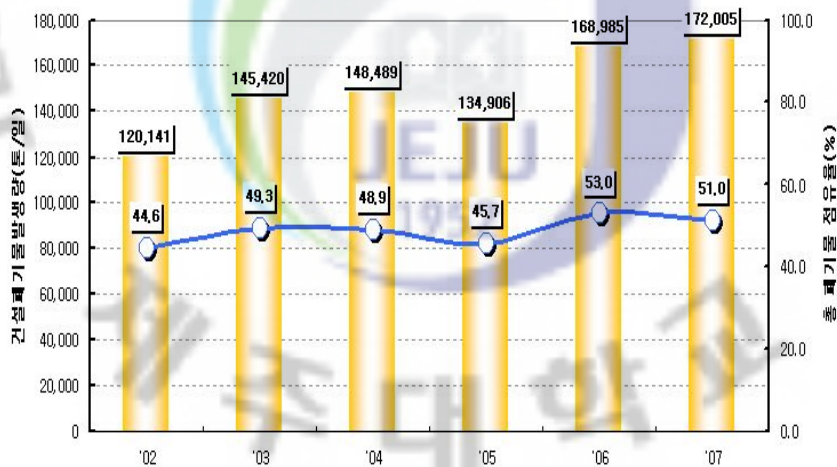
### 2. 건설폐기물 현황

“2007 전국 폐기물 발생 및 처리현황”(환경부 국립환경과학원, 2008)에 따르면 <그림 1>과 <그림 2>에서와 같이 2007년도의 총 폐기물 발생량(지정 폐기물 제외)은 337,158톤/일로, 전년도 318,928톤/일에 비하여 약 5.7% 증가

하였고, 폐기물 구성비는 생활폐기물 14.9%, 사업장배출시설계폐기물 34.1%, 건설폐기물 51.0%, 172,005톤/일로서 건설폐기물이 가장 큰 구성비율을 차지하고 있다.



<그림 1> 폐기물 발생량 변화추이



<그림 2> 건설폐기물 발생량 및 점유율

다음 <표 1>은 「건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률」에 의거 변경된 건설폐기물 성상 분류 기준에 따른 2007년도의 건설폐기물의 성상현황으로 건설

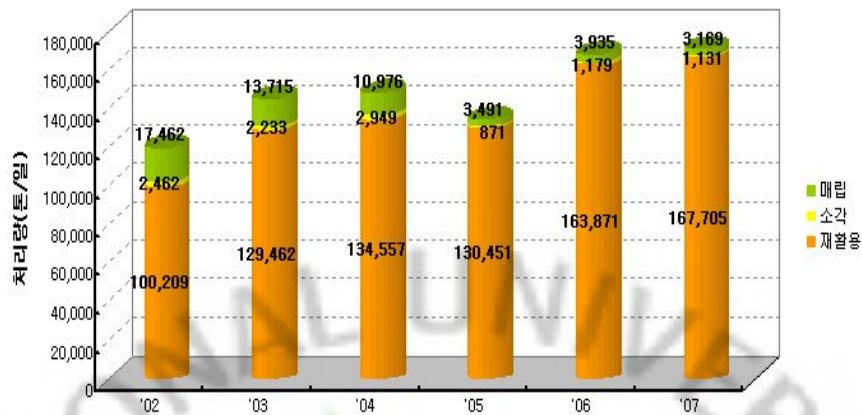
폐재류 82.1%, 가연성 1.0%, 비가연성 0.2%, 건설폐토석 4.1%, 혼합건설폐기물 12.6%로 나타났다. 건설폐재류 중 폐콘크리트가 전체 건설폐기물 중에서 68.5%로서 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 다음으로 폐아스팔트가 12.9%를 차지하고 있다.

<표 1> 건설폐기물 성장현황

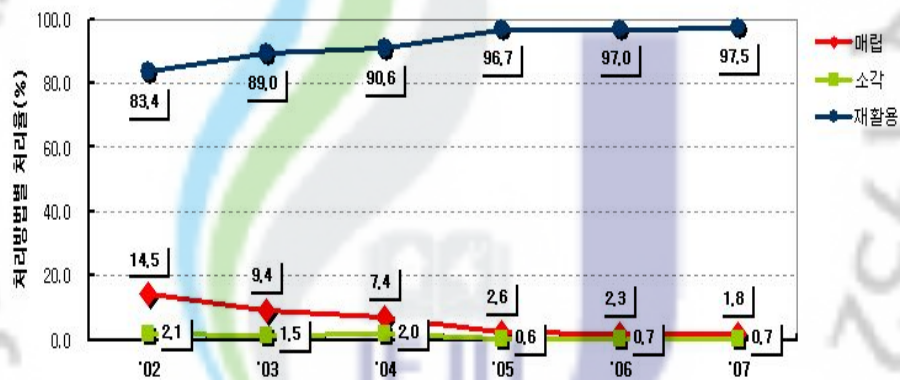
구 분	'02	'03	'04	구 분	'05	'06	'07		
총계 (톤/일)	120,141	145,420	148,489	총계 (톤/일)	134,906	168,985	172,005		
가연성	소 계	6,053	5,807	7,021	건설폐재류	소 계	94,303	132,954	141,158
	나무류	2,632	2,534	3,248		폐콘크리트	78,506	110,296	117,866
	합성수지류	1,800	1,445	1,687		폐아스팔트 콘크리트	15,384	21,674	22,176
	종이류	507	452	478		기타	413	984	1,116
	기타	1,113	1,376	1,608	가연성 건설폐기물	소 계	4,729	2,737	1,688
	불연성	소 계	114,088	139,613		141,468	폐목재	3,697	1,772
금속류		1,323	922	1,025		폐합성수지	1,009	947	948
유리류		430	354	313	기타	23	18	13	
기타		10,343	7,722	7,842	비가연성 건설폐기물	소 계	497	487	317
건설폐재류		101,992	130,615	132,288		건설오니	399	473	300
				기타	98	14	17		
				건설폐토석	6,806	8,817	7,102		
				혼합건설폐기물	28,571	23,990	21,740		

- '05년 건설폐재류 기타 : 폐벽돌, 폐블럭, 폐기와
- 가연성건설폐기물 기타 : 폐섬유, 폐벽지
- 비가연성건설폐기물 기타 : 폐금속류, 폐유리

다음 <그림 3>, <그림 4>는 건설폐기물의 처리방법 변화 추이를 나타낸 것으로서 재활용율은 년도에 따라서 계속 증가하고 있는 반면, 매립율은 감소하고 있다. 재활용율은 '07년 97.5%로 전년대비 0.5%포인트 증가하였고, 소각율은 0.7%로 변동 폭이 적으며, 매립율은 1.8%로서 전년도 2.3%에 비해서 0.5%포인트 감소하였다.



<그림 3> 연도별 건설폐기물 처리방법별 처리량



<그림 4> 연도별 건설폐기물 처리방법별 비율

### 3. 순환골재의 특징과 용도

#### 1) 순환골재의 특징

순환골재는 폐 콘크리트를 파쇄·가공하여 제조된 것으로 기존의 천연골재와 다른 물리적 특성상의 차이점은 각종 이물질이 포함될 가능성이 크고, 골재



표면이 거칠고 모르타르가 부착되어 있으며, 품질편차가 크다는 점을 대표적으로 들 수 있다.

이는 콘크리트용으로 사용하기 위한 순환골재의 물리적 특성을 대부분 저하시키며, 특히 흡수율, 밀도, 마모감량의 특성이 저하된다. 순환골재의 일반적 특성은 다음과 같다.

- 가. 이물질
- 나. 입도와 입형
- 다. 밀도
- 라. 흡수율
- 마. 시멘트 페이스트 부착량

위와 같은 순환골재의 세부적인 특성은 다음과 같다.

① 이물질

순환골재는 건설구조물의 해체로 인하여 발생하는 폐콘크리트를 주 원료로 하기 때문에 순환골재에는 각종 이물질이 포함되게 되며 유리, 타일, 목재, 점토, 아스팔트, 금속, 비닐 등 그 형태는 매우 다양하다. 이러한 이물질은 그 종류에 따라 콘크리트에 영향을 미치는 정도가 달라지는데, 금속은 대부분 철로서 순환골재 생산 공정에서 대다수 제거되고, 석재·타일·벽돌·유리와 같은 무기이물질은 보통골재와 밀도가 비교적 유사하여 분리제거하기가 어려우나, 화학적으로 안정적이기 때문에 콘크리트에 대한 영향은 크지 않지만, <표 2>와 같은 각종 이물질이 콘크리트의 압축강도를 낮추기 때문에 반드시 그 함유량을 확인할 필요가 있다.

<표 2> 기준 콘크리트의 압축강도 대비 15% 감소시 이물질의 체적률

혼합물	회반죽	점토	나무	탈수석고	아스팔트	비닐아세테이트 페인트
골재에 대한 부피비(%)	7	5	4	3	2	0.2



<그림 5> 순환골재에 포함된 이물질 정상

#### (1) 입도와 입형

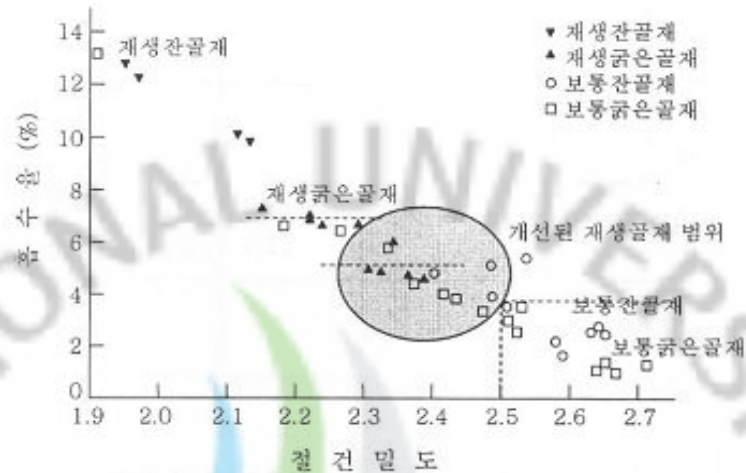
순환골재의 입도분포는 원콘크리트의 품질, 파쇄기의 종류 및 파쇄방법 등 다양한 요소에 의해 영향을 받는다. 일반적으로 천연골재에 비하여 약간 굵고 거친 것으로 판정되고 있으나, 이는 생산과정에서 파쇄방법의 조정 등을 통하여 충분히 조정이 가능하다. 또한 순환골재는 대부분 각진 형태를 갖는 경우가 많으므로 콘크리트 배합이 거칠어지고 유동성이 저하되지만 천연모래를 첨가함으로써 시공연도를 개선할 수 있다.

#### (2) 밀도

한국산업규격 KS F 2573(콘크리트용 재생골재-2002)에서는 순환 굵은골재 및 잔골재의 밀도를  $2.2\text{g}/\text{cm}^3$  이상으로 규정하고 있으나, 2009년 개정된 “콘크리트용 순환골재 품질기준”에서는 순환 굵은골재의 밀도를 KS F 2526(콘크리트용 골재)과 동일한 수준인 밀도  $2.5\text{g}/\text{cm}^3$  이상으로 강화하였다. 하지만, 순환 잔골재는 적용강도 및 부위를 감안하여 현행 KS F 2573(콘크리트용 재생골재-2002)을 준용하였다. 아울러 KS F 2573에서는 1종 순환 굵은골재의 흡수율은 3% 이하로, 1종 순환 잔골재의 흡수율은 5% 이하로 규정한 기준을 준용하고 있다.

국내에서 생산되는 순환골재의 경우 순환 굵은골재의 밀도는  $2.15\sim 2.24\text{g}/\text{cm}^3$ 의 범위를 보이고, 순환잔골재의 밀도는  $1.90\sim 2.33\text{g}/\text{cm}^3$  범위를 나타내어 보통

골재에 비하여 약 15~20%정도 낮은 밀도를 보인다는 조사결과가 있지만, 최근 생산되는 품질이 개선된 순환골재의 경우에는 <그림 6>과 같이 흡수율, 밀도의 관계에 있어서 보통골재와 유사한 범위를 보이고 있다.

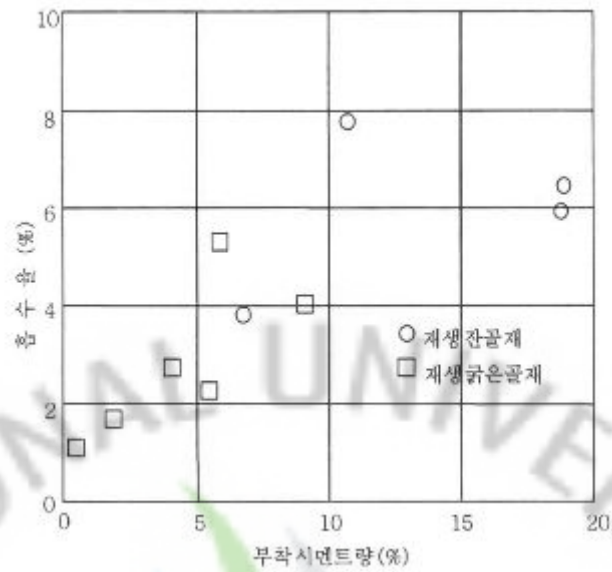


<그림 6> 순환골재의 절건밀도와 흡수율

### (3) 흡수율

순환골재의 품질은 원콘크리트의 종류와 성상, 부착된 모르타의 양에 따라 현저한 영향을 받기 때문에 콘크리트용 순환골재의 품질을 정하는 기준 항목으로서 흡수율을 주요 품질 지표로 삼고 있다.

흡수율은 <그림 7>과 같이 표면에 부착된 시멘트 페이스트와 상관관계를 가지며, 흡수율을 감소시킴에 따라 밀도, 단위용적질량, 실적율 등은 증가하고 골재에 부착된 페이스트의 양은 감소하게 되며, 입도분포가 좋아져서 순환골재의 품질이 전반적으로 우수해진다. 반면 흡수율이 증가할 경우 단위용적질량의 감소와 더불어 콘크리트 강도의 저하, 프리웨팅(pre wetting)으로 인한 배합수의 관리가 어려워지고 건조수축의 증대, 동결융해 저항성 감소로 인한 내구성 저하, 골재의 밀도, 입형, 입도분포 등에 악영향을 미치게 된다.



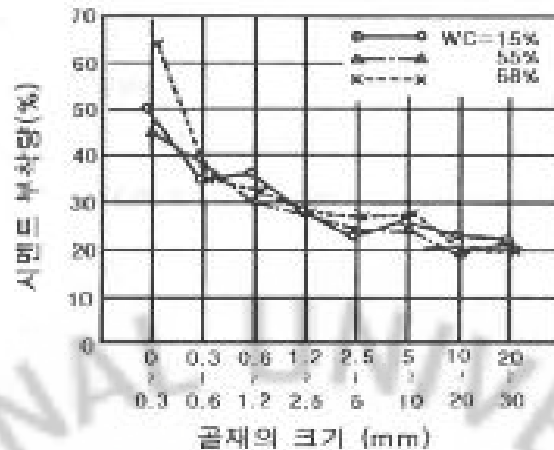
<그림 7> 부착시멘트량과 흡수율의 관계

일본 국토개발 기술연구재단(1993)의 연구결과에 의하면, 1차 파쇄한 순환잔골재의 흡수율은 11.2%로 보통잔골재의 약 9배이며, 고강도 콘크리트에서 가공한 순환잔골재의 순환잔골재의 흡수율은 7.8%로 보통잔골재의 4.4배에 달하는 것으로 보고되고 있으며, 국내에서는 5mm이하의 순환잔골재의 흡수율은 11% 내외로, 이전까지 국내에 생산된 순환골재는 2,3종이 대부분을 차지하는 것으로 나타났으나, 최근들어 국내 순환골재의 생산기술의 발달로 순환골재 표면의 모르터 및 미분의 제거효과를 높혀, 흡수율이 현저히 감소하여 순환골재의 품질이 전반적으로 향상되고 있다.

#### (4) 시멘트 페이스트 부착량

순환골재에 부착된 시멘트 페이스트의 양에 따라 현저한 흡수율 증가와 미립분의 증가 및 비중의 감소에 상당한 영향을 미치게 된다.

시멘트페이스트 부착량은 <그림 8>에 나타난 것처럼 입자가 조립인 것보다 세립에서 보다 많은 것으로 알려지고 있는데, 순환골재 20~30mm인 경우는 약 20%이고, 0.3mm이하는 45~65% 범위이다.



<그림 8> 입도별 시멘트부착량 (한국레미콘공업협회)

결국 전술한 입도별 절건비중과 흡수율의 차이는 시멘트페이스트 부착량에 의해 좌우된다고 할 수 있으며, 이는 입도를 구성하는 원재료와 시멘트페이스트와의 비율이 입도에 의해 변화되고, 입도가 작은 만큼 시멘트페이스트분이 많아지고 골재로서의 품질이 저하된다.

## 2) 순환골재의 용도

순환골재는 매우 다양한 용도로 재활용될 수 있으며, 부가가치 낮은 성토용에서부터 부가가치가 높은 레미콘용에 이르기까지 용도가 다양하다. 순환골재를 단순 매립하거나 저부가가치의 성토재로 활용하기 보다는 이를 파쇄 가공하여 다시 건설용 골재로 재활용하는 것은 자원절약 및 환경보존을 통한 자원 순환형 사회시스템 구축을 위한 중요한 키워드가 되고 있다. 그러나 국내에서 고부가가치의 용도로 사용될 수 있을 만큼 적절한 품질의 순환골재가 적절한 용도로 사용되고 있는지는 의문의 여지가 있다.

국내 순환골재 생산업계의 재활용 현황을 보면 표와 같다. 일반적으로 부가가치가 높은 용도로는 도로용(노반제 및 보조기층제 등), 콘크리트 2차제품용, 레미콘용 등을 들 수 있으나, 표에서의 도로용이란 거의 성토용에 불과한 것으로 보인다.

일본의 폐콘크리트 발생량과 도로용(노반제) 수요에 대한 연도별 추이에 대한

연구 결과를 보면, 2005년도 이후에는 폐콘크리트를 노반재만으로는 완전한 처리가 불가능해져 콘크리트용으로 사용할 필요성이 대두되었다고 한다. 우리나라의 경우에도 이러한 현상은 곧 닥칠 것으로 생각되므로, 순환골재를 콘크리트용으로 사용하기 위한 각종 기술 개발이 요구된다.

<표 3> 순환골재의 용도별 생산 현황(2002년)

용도	생산량(톤)	점유율(%)
합 계	10,393,900	100
성토매립용	6,477,400	62.3
바닥용	551,000	5.3
도로용	1,749,000	16.8
2차제품용	278,500	2.7
레미콘용	837,500	8.1
기타	500,500	4.8

### 3) 순환골재의 물리적 특성과 콘크리트 특성과의 관계

순환골재 콘크리트의 품질은 사용된 순환골재의 품질에 의해 좌우되며, 순환골재가 콘크리트의 특성에 영향을 주는 것은 많은 연구를 통해 정리되어 왔으며 <표 4>에서 나타낸 바와 같이 골재의 특성에 따라 콘크리트에 미치는 영향 정도가 다름을 알 수 있다.

<표 4> 골재의 특성과 콘크리트 특성과의 관계

골재의 특성	콘크리트의 특성과의 관계
안정성	강도, 내구성
화학적 안정성	알칼리 골재반응, 팽아웃, 풍화작용
마모감량	마모저항성
입도	유동성, 밀도, 경제성, 수축, 강도
골재의 최대 크기	유동성, 경제성, 수축, 밀도, 강도
입형	유동성, 경제성, 수축, 강도
표면 상태	유동성, 접착강도, 내구성
밀도	골재 분리, 내구성, 용적 계산, 경제성
흡수율 및 표면수율	강도, 유동성, 내구성
실적률	강도, 강성, 투수율, 내구성

\* Concrete Manual(1989), Aggregate in Concrete(2005)

#### 4. 순환골재 콘크리트의 특성

순환골재 콘크리트의 품질은 사용된 순환골재의 품질에 의해 좌우된다. 따라서 고품질의 순환골재 콘크리트를 제조하기 위해서는 먼저 고품질의 순환골재를 사용하여 제조하는 것이 가장 중요하다. 순환골재 콘크리트의 품질은 압축강도 뿐만 아니라 슬럼프, 공기량, 인장강도, 건조수축 등에 영향을 미치므로 순환골재 콘크리트의 제조, 시공, 설계, 응용 전반에 관한 다각적인 검토가 필요하다.

##### 1) 단위수량과 슬럼프

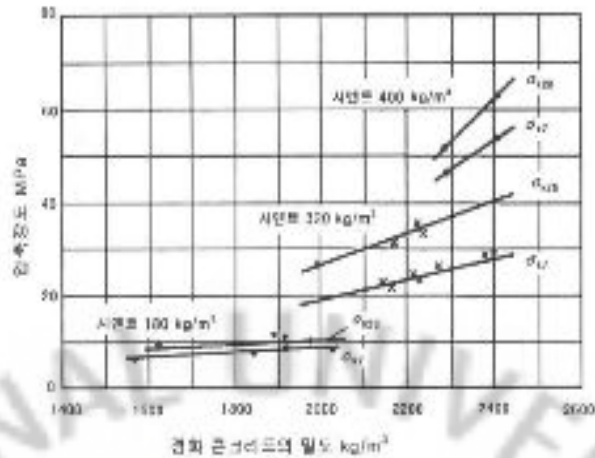
순환골재는 흡수율이 매우 크기 때문에 사용하기에 앞서 프리웨팅(pre-wetting)하는 것을 원칙으로 하고 있다. 그러나 이와 같은 조작을 하는 경우에도 골재의 입형이 불량하기 때문에 일반적으로 순환골재 콘크리트는 워커빌리티가 좋지 못하며, 보통콘크리트에 비하여 동일 슬럼프를 얻기 위해서는 단위수량을 많이 필요로 하는 경향을 나타낸다.

##### 2) 공기량과 밀도

순환골재 콘크리트는 전체적으로 공기량이 크고 분포의 상황도 넓은 범위에 걸쳐 분포하고 있으며, 그 이유로는 골재의 입형이 불량하기 때문에 잠재 공기량이 많은 점과 골재 자체의 공극이 큰 것 등에 의한 것으로 판단된다.

순환골재 콘크리트는 보통콘크리트의 공기량보다 약간 더 높고 순환골재 콘크리트의 밀도는 보통 콘크리트보다 전반적으로 낮으며, 밀도의 범위는 5%에서 15%까지의 변동범위를 보여주고 있다.

또한 <그림 9>와 같이 압축강도와 순환골재 콘크리트의 밀도는 선형관계에 있다는 연구결과도 있다(Kreijger, 1983).



<그림 9> 굵은 콘크리트의 밀도가 압축강도에 미치는 영향

### 3) 압축강도

순환골재 콘크리트의 압축강도는 골재의 조합과 배합에 따라 많은 차이를 보이는 데 순환굵은골재와 천연모래를 사용한 경우, 보통콘크리트의 압축강도에 비하여 약 20% 이하의 수준으로 저하된다고 보고된 바 있으며, 일본에서도 순환골재 콘크리트가 일반콘크리트의 압축강도에 비해 14%~32% 낮은 수준임을 확인하였다. 또한 네덜란드에서도 순환골재 콘크리트의 압축강도가 일반적인 콘크리트 강도의 95% 수준이라고 보고된 바 있다.

<표 5>에서와 같이 순환굵은골재에 순환잔골재와 천연모래를 각각 50%씩 배합한 순환골재 콘크리트의 압축강도는 순환굵은골재와 천연모래를 사용한 순환골재 콘크리트에 비하여 10~20% 낮은 압축강도를 보이며, 굵은골재와 잔골재 모두 순환골재로 대체하였을 경우는 순환굵은골재만을 사용한 경우보다 20~40% 정도 낮은 압축강도를 보인다.



<표 5> 순환굵은골재와 잔골재의 혼합비율에 따른 압축강도의 변화

물시멘트비	콘크리트의 28일 압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )			
	천연굵은골재 + 천연잔골재	순환굵은골재 + 100%천연모래	순환굵은골재 + 천연모래 및 순환 잔골재 50%혼합	순환굵은골재 + 순환잔골재
45	382	377	346	305
55	294	290	254	219
68	224	214	176	132

한편, 이처럼 잔골재의 대체비율에 따른 순환골재콘크리트의 압축강도 저하는 적절한 배합과 관리가 이루어질 경우, 동일한 물시멘트비에서 천연골재콘크리트에 비하여 약 8.5%정도 높은 강도발현이 가능하다는 연구결과가 발표되기도 하였다.

#### 4) 인장강도

순환골재콘크리트의 인장강도는 순환굵은골재와 천연모래를 사용할 경우, 보통콘크리트를 기준으로 약 10%정도의 감소되고 순환잔골재를 사용할 경우에는 20% 가량 낮은 수준을 보이는 것으로 보고된 바 있다.

그러나 카라는 순환굵은골재와 순환잔골재를 사용한 순환골재콘크리트의 할열인장강도가 일반콘크리트에 비하여 35%정도 감소되고 휨강도는 25% 저하되며 압축강도와 휨강도의 비가 일반콘크리트에 비하여 낮다는 연구결과를 발표한 바 있다. 연구자들 간에 결과가 이처럼 차이가 있는 것은 사용된 순환골재의 품질에 기인한 것으로 판단된다.

#### 5) 건조수축

순환골재콘크리트는 보통콘크리트에 비하여 건조수축이 일반적으로 약간 큰 값을 나타내며, 재령이 증가함에 따라 그 차이는 더욱 증대된다.

Hasaba(1981) 등은 순환굵은골재와 천연모래로 이루어진 순환골재콘크리트가 보통콘크리트의 건조수축에 비하여 50%이상 더 크며, 순환굵은골재와 순

환잔골재를 사용한 순환골재콘크리트의 건조수축은 보통콘크리트에 비해 70~80%정도 더 크게 나타난다고 실험을 통해 밝힌 바 있다.

한편 보통콘크리트와 순환골재 콘크리트의 수축율과 팽창률을 비교했을 때, 순환골재 콘크리트의 수축율이 천천히 작아지는 것을 발견할 수 있는데, 이는 물이 골재입자에 흡착되기 때문이라고 판단된다.

## 5. 순환잔골재의 제조 및 활용현황

### 1) 국내 순환골재 품질기준 및 재활용현황

“건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률”은 건설공사 등으로 인하여 발생한 건설폐기물을 친환경적으로 적정처리하고 재활용을 촉진하여 국가자원의 효율적 이용을 목적으로 하고 있으며, 이 법률 제35조에 근거하여 “순환골재 품질기준”을 2006년 12월에 규정하였다. 또한 이 기준과 상호간에 일치를 위하여 같은 시기에 한국산업규격 KS F 2573 (콘크리트용 순환골재)을 개정하였다.

- (1) 순환골재 생산을 위하여 투입되는 폐콘크리트는 환경에 유해한 화학물질, 약취, 콘크리트 특성에 악영향을 미치지 않는 것을 사용해야 하며, 생산된 순환골재는 <표 6>에서 나타낸 품질기준과 <표 7>의 입도를 만족하여야 한다.
- (2) 순환골재의 유기이물질 함유량은 KS F 2576(순환골재의 이물질 함유량 시험방법)에 의하여 골재속에 포함된 비닐, 플라스틱, 목재, 종이 등의 함유량을 확인하고 그 결과치가 총 골재 용적의 1.0% 이하를 만족하여야 한다.
- (3) 순환골재에 혼입된 페아스콘, 유리, 슬레이트, 자기류, 적벽돌 등의 무기이물질 함유량은 KS F 2576(순환골재의 이물질 함유량 시험방법)에 따라 이물질을 분리·선별한 후 질량을 측정하여 그 결과치가 총 골재질량의 1.0% 이하를 만족하여야 한다.

<표 6> 순환골재의 품질기준

구 분		순환 굵은골재	순환 잔골재
절대 건조 밀도(g/cm <sup>3</sup> )		2.5 이상	2.2 이상
흡수율(%)		3.0 이하	5.0 이하
마모감량(%)		40 이하	-
입자모양판정실적률(%)		55 이상	53 이상
0.08mm체 통과량 시험에서 손실된 양(%)		1.0 이하	7.0 이하
알칼리 골재 반응		무해할 것	
점토덩어리량(%)		0.2 이하	1.0 이하
안정성(%)		12 이하	10
이물질 함유량 (%)	유기이물질	1.0 이하 (용적)	
	무기이물질	1.0 이하 (질량)	

<표 7> 순환골재의 입도

체의 호칭			체를 통과하는 것의 질량 백분율 (%)										
			40mm	25mm	20mm	15mm	10mm	5mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm
순환 굵은골재	최대 치수 (mm)	25	100	95~100		25~60		0~10	0~5				
		20		100	90~100		20~55	0~10	0~5				
순환 잔골재							100	90~100	80~100	50~90	25~65	10~35	2~15

① 종전 KS F 2573(콘크리트용 재생골재-2002)에서는 순환 굵은골재 및 잔골재의 밀도를 2.2g/cm<sup>3</sup> 이상으로 규정하고 있으나, 본 품질기준에서는 순환 굵은골재의 밀도를 KS F 2526(콘크리트용 골재)과 동일한 수준인 밀도 2.5g/cm<sup>3</sup> 이상으로 강화하였다. 하지만, 순환 잔골재는 적용강도 및 부위를 감안하여 현행 KS F 2573(콘크리트용 재생골재-2002)을 준용하였다. 아울러 KS F 2573에서는 1종 순환 굵은골재의 흡수율은 3% 이하로,

1종 순환 잔골재의 흡수율은 5% 이하로 규정하고 있는데, 본 품질기준에서는 각각의 흡수율 기준을 준용하였다.

- ② 과거에 축적된 데이터에 의하면 순환골재 0.08mm체 통과량의 평균값은 순환 굵은골재 1.67%, 순환 잔골재 8.15%로서 KS F 2573(콘크리트용 재생골재-2002)의 기준 순환 굵은골재 1.5% 이하, 순환 잔골재 7% 이하를 만족하지 못하는 비율이 높다. 하지만, 최근 생산되는 순환골재는 생산공정 중에 세척이나 집진, 비중 선별, 스크린 등의 설치 및 적용을 통하여 발생된 미분이 상당 부분 제거될 수 있으므로 본 품질기준에서는 순환 굵은골재의 0.08mm체 통과량 규정을 1.5%에서 1%로 다소 강화한 반면, 순환 잔골재는 7% 이하로서 용도나 적용부위를 감안하여 KS F 2573(콘크리트용 재생골재-2002) 규정을 그대로 따르도록 하였다.
- ③ 콘크리트의 파쇄과정 등을 통해 생산되는 순환 굵은골재는 대체로 골재 표면에 모르타르가 붙어 있는 형태로서, 순환 잔골재는 잔골재와 비슷한 크기의 입자형태로서 존재하게 되며 이 모르타르는 수화반응이 끝난 상태가 아닌 미수화된 형태로도 존재하게 된다. 이때, 미수화된 모르타르는 알칼리 성질을 띄고 있으며 이를 사용하여 콘크리트를 제조할 경우 알칼리 량의 과다로 인한 알칼리 골재반응의 발생가능성이 있으므로 KS F 2545(골재의 알칼리 잠재 반응 시험 방법 (화학적 방법))에서 규정하는 알칼리 골재반응 시험을 실시하도록 하였다.
- ④ 점토덩어리가 다량으로 함유된 골재가 콘크리트에 함유되었을 경우, 시멘트 페이스트와 골재 또는 철근과의 부착력을 감소시킨다. 지하구조물을 해체한 건설폐기물로부터 생산되는 순환골재는 세척, 파쇄 등의 공정을 통과하여도 점토덩어리가 상당량 포함될 수 있기 때문에 본 품질기준에서는 순환골재의 점토덩어리량을 0.2% 이하, 순환 잔골재는 1.0% 이하로 각각 규정하였다.
- ⑤ 순환골재를 콘크리트용 골재로 활용하기 위해서는 골재의 내구성 확인이 필요하며 순환 굵은골재는 설계기준강도 27MPa까지의 콘크리트에 적용되므로 본 기준에서는 KS F 2507(골재의 안정성 시험)을 이용하여 사용되는 순환골재의 내구성을 사전에 검토한 후에 사용하도록 하였다.

⑥ 순환골재의 입도분포는 1차 파쇄만 실시하였을 경우, 표준 입도에서 벗어날 수 있으나 2차, 3차 파쇄 등 적절한 처리 공정을 거치면 표준 입도분포에 적합한 골재생산이 가능하다. 따라서 KS F 2573(콘크리트용 재생골재-2002)과 같이 순환골재의 입도분포를 천연골재와 별도로 규정하던 것을 본 품질기준에서는 본문의 <표 7> 혹은 KS F 2526(콘크리트용 골재)의 콘크리트용 골재의 입도분포 범위와 동일하게 규정하였다.

## 2) 국외 순환골재 품질기준

### (1) 일본

일본은 우리나라와 건설환경이 비슷할 뿐만 아니라 콘크리트의 사용도 앞서 있어 폐콘크리트의 처리 및 재활용에 관한 연구 또한 앞서 진행되어 1977년 일본콘크리트공학협회에서 재생골재 및 콘크리트의 사용기준(안)이 제시되었다.

여기에서는 재생골재의 품질기준 항목으로 입도, 절건비중, 흡수율, 씻기시험 손실량, 입자모양관정실적률 등을 제시하고 재생콘크리트나 강재에 악영향을 미치는 양의 불순물을 포함하지 않도록 하고 있으나, 수치화된 규정은 없다.

이후 지속적인 연구를 통하여 수정 보완된 기준(안)들이 제안되었으며, 1999년 12월에 (재)일본건축센터는 건축물에 사용하는 일반적인 콘크리트용 골재와 동등한 품질을 가진 순환골재를 “건축구조용 재생골재”로서 인정하였으며, 인정된 순환골재의 품질항목과 기준치는 <표 8> 및 <표 9>와 같다.

<표 8> 건축구조용 순환골재의 입도

체의 호칭			체를 통과하는 것의 질량 백분율 (%)										
			40mm	25mm	20mm	15mm	10mm	5mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm
순환골재	최대 치수 (mm)	25	100	95~100		30~70		0~10	0~5				
		20		100	90~100		20~55	0~10	0~5				
순환 잔골재							100	90~100	80~100	50~90	25~65	10~35	2~15

<표 9> 건축구조용 순환골재의 품질기준((재)일본건축센터 인정기준 일례)

항 목	기 준 치		시험방법
	순환 굵은골재	순환 잔골재	
절대 건조 밀도(g/cm <sup>3</sup> )	2.5 이상	2.5 이상	JIS A 1109
흡수율(%)	3.0 이하	3.5 이하	JIS A 1110
입자모양판정실적률(%)	55 이상	53 이상	JIS A 1104
미분함량(%)	1.0 이하	7.0 이하	JIS A 1103
염화물량(%)	-	0.04 이하	JIS A 5002
알칼리 골재 반응	무해, 무해로 판정된 것		JIS A 5308 JIS A 1804
1.95 부유불순물량(%)	1.0 이하	1.0 이하	JIS A 5308

건축구조용 순환골재의 품질기준은 천연골재와 부순골재의 성능기준과 동일한 값을 적용하고 있으나, 천연골재의 성능항목에서는 점토 덩어리량과 유기 불순물량, 연석량이 제외되어 있으며, 부순골재의 성능항목에서는 안정성과 마모감량이 제외되어 있다.

또한 굵은골재나 잔골재의 품질기준에서 비중 1.95의 액체에 뜨는 석탄이나 갈탄의 함유량은 0.5% 이하를 기준으로 하고, 콘크리트의 외관이 중요하지 않은 경우에 한하여 1.0%로 완화되고 있으나, 순환골재에 있어서는 부유불순물량에 대한 기준을 1.0%로 규정하고 있다.

한편, 2003년 일본 “건축공사 표준사양서, JASS 5:철근콘크리트공사”에서는 순환골재의 품질은 “건축구조용 순환골재”의 기준치를 참고로 하여 <표 10>과 <표 11>과 같이 천연 굵은골재나 잔골재와 동일하게 규정하였다.

<표 10> 순환골재의 품질(JASS 5)

종 류	기 준 치	
	굵은골재	잔골재
절대 건조 밀도(g/cm <sup>3</sup> )	2.5 이상	2.5 이상
흡수율(%)	3.0 이하	3.5 이하
점토덩어리(%)	0.2 이하	1.0 이하
미립분량 시험에 의한 손실량(%)	1.0 이하	3.0 이하
유기물순물	-	표준색액 또는 건본체의 색보다 묽음
염화물(NaCl로서)(%)	1.0 이하	1.0 이하

<표 11> 순환굵은골재 및 잔골재의 입도기준(JASS 5)

체의 호칭			체를 통과하는 골재의 질량 백분율 (%)												
			50mm	40mm	30mm	25mm	20mm	15mm	10mm	5mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm
순환 굵은 골재	최대 치수 (mm)	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				
순환 잔골재									100	90~100	80~100	50~90	25~65	10~35	2~15

(2) 미국

미국은 각주마다 경제성장이나 개발의 정도에 따라 건설경기가 다르고, 도시재개발 등과 같은 계획이 주기적이지 않으며, 각 지방정부와 연방정부의 건설폐기물 처리나 재활용에 관한 정책이 다르기 때문에 국가 전체적으로 발생하는 건설폐기물의 양에 대한 집계가 어렵지만 폐콘크리트의 양은 6,000만

톤 정도로 보고되고 있다.

최근에 들어 몇몇 주에서 건설폐기물에 대한 관심을 갖기 시작하여 폐기물 발생량을 집계하고 있으나, 아직까지 발생량은 매우 작은 것으로 나타났으며, 전체 폐기물의 약 25% 정도가 건설폐기물이며, 이 가운데 약 50% 정도가 폐콘크리트나 폐아스팔트 등의 건설폐재류로 보고되고 있다.

### (3) 영국

영국에서는 연간 약 1,100만톤의 폐콘크리트가 매립되고 있는 상황으로 최근에는 최소의 강도가 요구되는 부위에 폐콘크리트나 벽돌을 재활용한 골재를 사용하고 있으며 BS 8500(Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1)에서는 순환골재를 「RA(Recycled Aggregates)」와 「RCA(Recycled Concrete Aggregates)」로 구분하여 규정하고 있다.

## 3) 고품질 순환골재 제조기술

### (1) 가열마쇄방식

가열마쇄에 의한 순환골재 회수기술은 일본에서 폐기콘크리트를 가열하여 시멘트페이스트를 탈수시켜 열화시킨 후 골재가 파쇄되지 않는 정도로 마쇄하여 골재 주변에 부착된 모르타르와 시멘트페이스트를 선택적으로 제거하여 JASS 5에 규정된 천연골재와 동등한 품질의 고품질 순환골재를 생산하기 위한 기술로서, 순환골재의 품질에 가장 큰 영향을 주는 시멘트페이스트를 모두 제거하여 골재품질을 천연골재의 품질과 유사한 수준으로 제조하여 구조체 콘크리트용 골재로 사용 가능하게 하는 기술이다.

가열마쇄방식의 제조는 콘크리트덩어리를 약 50mm 이하로 조쇄하여 호퍼에 투입한 다음, 열풍(최대온도 450도)을 불어 투입된 콘크리트덩어리를 300도시까지 가열시키며, 가열된 시멘트페이스트 부분을 취약화하여 최대 60mm의 강제 원형구를 투입한 튜브밀에 연속적으로 투입하여 강제구의 마찰 및 골재간의 마찰을 통하여 500이하의 순환골재를 생산하는 공정을 거친다.

이러한 가열마쇄방식은 미립분 제거효율이 우수하여 고품질의 순환골재를



생산 할 수 있고 품질향상을 가능하게 할 수 있는 장점이 있는 반면, 가열장비 설치에 의해 제조원가가 상승하고, 가열소요시간에 의해 대량생산이 곤란하며 가열된 골재 냉각을 위한 별도의 냉각시설이 필요할 뿐만 아니라 미립분 제거를 위한 추가과정이 필요하다는 단점이 있다.

## (2) 물세척방식

물세척방식은 폐콘크리트로부터 순환잔골재 생산시 발생하는 미립분을 제거하기 위하여 파쇄 및 체가름 등의 선행작업을 거친 골재를 우수분리장치의 세정수 저장수조(공기 또는 고압수가 공급되어 와류 및 기포 발생)에 투입하여 잔골재는 가라앉고, 부유물질과 미분 및 미세립분이 함유된 세척수를 외부로 배출함으로써 미립분을 제거하고 고품질의 순환잔골재를 생산하는 방식이다.

이 기술은 기존에 가장 실용화된 공법으로 현재 국내에서도 다수위 업체에서 활용하고 있는 공법으로, 물세척에 의한 미분제거 효과가 우수하여 우기에도 작업이 가능하고, 생산량을 조절할 수 있는 장점이 있는 반면, 세척수에 의한 환경오염발생, 고가의 필터프레스 장비구입, 작업장 환경불량 및 물세척시설의 시설비 과다로 인한 초기 투자시설비와 유지관리비가 과다하게 되며, 수중설치에 의한 처리시설의 내구성이 부족하여 동절기 동파로 인한 작업이 불가능하고, 슬러지 활용이 어렵다는 단점이 있다.

## (3) 풍력선별방식

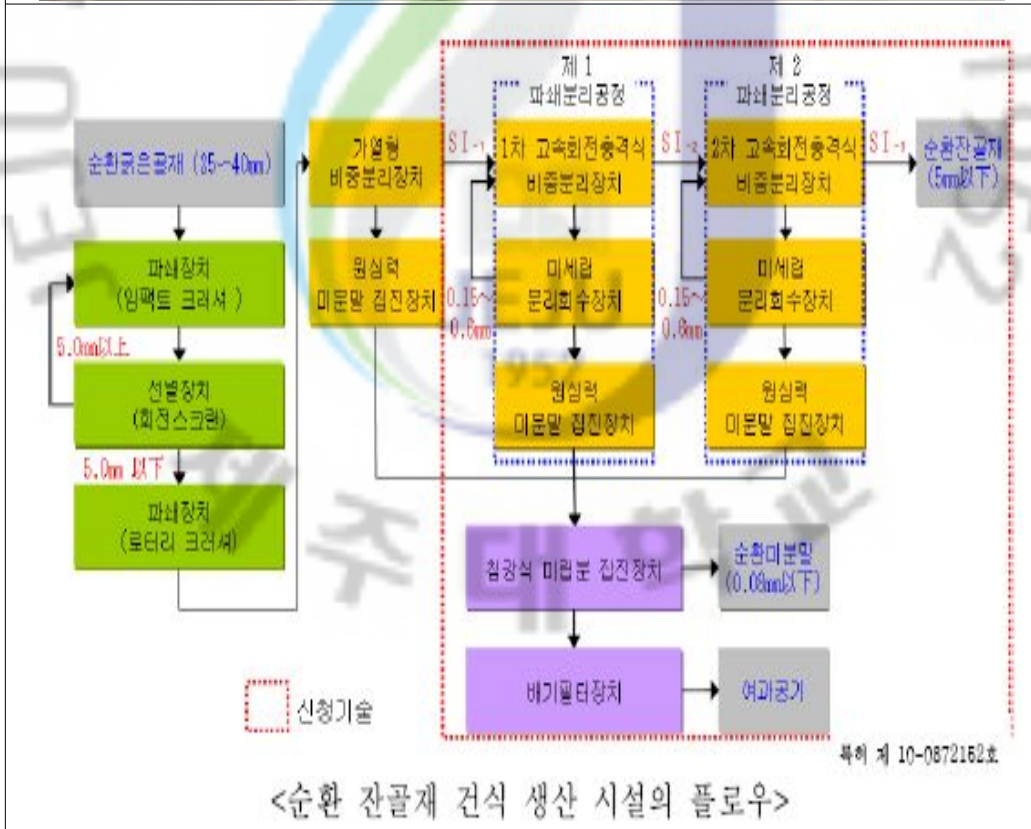
풍력선별방식은 순환잔골재를 생산하는 데 있어 미분말 및 이물질이 섞여 있는 파쇄된 폐기콘크리트를 풍력을 공급하여 비중차에 의해 미분을 제거하는 방식이다.

풍력선별방식은 40mm이하로 파쇄된 파쇄쇄물로부터 폐석분을 처리하는 저장공정, 이물질 입도가 큰 골재를 선별·제거하는 선별공정, 비교적 정선된 폐석분을 비산시켜 비중이 큰 골재와 비중이 작은 토사, 먼지, 미세분말 등의 이물질을 풍력에 의해 비중차로 분리시키는 비중분리공정을 거쳐, 5mm이하의 순환잔골재를 제조·생산하는 방식이다.

풍력선별 방식은 생산공정이 단순하고 생산단가가 저렴하다는 장점이 있는 반면, 비산먼지의 발생을 막기 위한 추가공정이 필요하고, 송풍압이 일정하지 못하여 입도선별이 명확하지 않으며, 폐기물이 증척된 상태로 낙하하므로 불순물 분리효율이 낮아 전체적으로 미분말 분리효율이 낮게 되어 고품질 순환잔골재를 생산하기가 어렵다는 단점이 있다.

따라서, 폐콘크리트로부터 생산되는 순환잔골재를 고품질화하기 위해서는 순환잔골재에 다량 함유된 미립분을 효과적으로 분리·제거 할 수 있는 기술 개발이 필수적이며, 더불어 건설산업을 환경친화적 산업구조로 전환시켜 환경보존과 건설생산성 향상을 동시에 실현하여 국가경쟁력을 제고시킬 수 있는 순환잔골재 제조시스템과 활용기술이 시급히 개발되어야 할 것이다.

다행히 최근 산학 합동연구를 통해 5mm이하로 파쇄된 순환골재로 고속회전 충격에 의한 파쇄와 미세립 분리회수 장치를 통하여 입도가 개선되고 집진기에서 미세분진을 포집하는 순환잔골재 건식생산 기술이 개발된 점은 다행스런 일이다.



<그림 10> 순환잔골재 건식생산시설 전경 및 계통도

#### 4) 순환골재 콘크리트의 제조 및 활용기술

순환골재 콘크리트를 제조하는 레미콘공장에서는 순환골재의 특성에 대한 기술적 지식과 품질편차를 줄이기 위한 기술력 확보에 대한 노력이 요망된다. 순환골재 콘크리트의 요구품질을 확보하려면 우선 반입검사에 의하여 품질이 좋은 순환골재를 선정, 관리하는 것이 중요하다. 순환골재 콘크리트의 물리적 특성 중에서 콘크리트의 품질관리에 가장 유념을 해야 하는 것은 흡수율 관리 일 것이다. 이것은 순환골재의 표면에 부착되어 있는 모르타르의 흡수성이 높기 때문에 골재의 표면수율 관리가 어렵고 따라서 콘크리트의 슬럼프를 비롯한 각종 물리적, 역학적 특성에 대한 품질편차가 크게 발생할 소지가 많기 때문이다. 이를 위해서는 순환골재의 적절한 함수율 관리를 위하여 지붕이 있고 살수설비가 구비되어 있는 별도의 저장 시설을 가추는 것이 바람직하다.

건설 현장에서 순환골재 콘크리트를 적용할 경우에는 우선 균열발생에 대비해야 되므로, 레미콘공장 선정시에 생산시설의 적정성과 사용재료의 종류 및 품질관리 실태의 적절성 등을 사전에 검토 할 필요가 있다.

한편 순환골재는 기존의 골재보다 품질확보가 어려우므로 천연골재와 혼합하여 사용하는 것이 바람직하며, 이러한 혼합 사용방법이 순환골재의 재활용을 위해서도 좋을 것으로 판단되며, 혼합비율을 적절하게 확인할 수 있는 기술개발이 필요하다.

### 3. 실험계획

#### 1. 실험개요

이번 실험에서는 <표 12>와 같이 순환잔골재의 치환율과 잔골재의 미분 제거 여부를 주요 변수로 설정하였으며, <표 13>, <표 14>, <표 15>와 같이 순환골재 치환율에 따른 유동성을 검토하기 위하여 기본배합에 대한 슬럼프값은  $15 \pm 2.5\text{cm}$ , 공기량은  $4.5 \pm 1.5\%$ 로 계획하였으며, 물시멘트비는 55%, 잔골재 치환율은 0%, 50%, 100%, 미분제거에 따른 영향을 분석하기 위하여 0.08mm 이하 미분 제거, 미제거시로 나누어 실험을 실시하였다.

<표 12> 실험 변수

배합	굵은골재종류	잔골재 미분제거여부	순환잔골재 치환율(%)	비고
1	천연굵은골재(G1)	미제거(X)	0	G1S1X
2			50	G1(S1S2)X
3			100	G1S2X
4		제거(O)	0	G1S1O
5			50	G1(S1+S2)O
6			100	G1S2O
7	순환굵은골재(G2)	미제거(X)	100	G2S2X
8		제거(O)	100	G2S2O

※ G1 : 천연골재 G2 : 순환굵은골재 S1 : 천연골재 S2 : 순환잔골재

<표 13> 기본실험 배합표1(천연굵은골재 + 순환잔골재<0,50,100%>)-미분 미제거

구분	G <sub>max</sub>	W/C (%)	S/a (%)	slump flow (cm)	Air (%)	치환 비율 (%)	수량(kg/m <sup>3</sup> )						혼화제 (kg/m <sup>3</sup> )
							W	C	G1	G2	S1	S2	AE 감수제
배합1	25	55	49	15±2.5	4.5±1.5	0	180	325	884	0	843	0	1.625 (0.5%)
배합2	25	55	49	15±2.5	4.5±1.5	50	180	325	884	0	407	407	1.625 (0.5%)
배합3	25	55	49	15±2.5	4.5±1.5	100	180	325	884	0	0	784	1.625 (0.5%)

<표 14> 기본실험 배합표2(천연굵은골재 + 순환잔골재<0,50,100%>)-미분 제거

구분	G <sub>max</sub>	W/C (%)	S/a (%)	slump flow (cm)	Air (%)	치환 비율 (%)	수량(kg/m <sup>3</sup> )						혼화제 (kg/m <sup>3</sup> )
							W	C	G1	G2	S1	S2	AE 감수제
배합4	25	55	49	15±2.5	4.5±1.5	0	180	325	884	0	843	0	1.625 (0.5%)
배합5	25	55	49	15±2.5	4.5±1.5	50	180	325	884	0	409	409	1.625 (0.5%)
배합6	25	55	49	15±2.5	4.5±1.5	100	180	325	884	0	0	791	1.625 (0.5%)

<표 15> 순환골재 배합표3(순환굵은골재100%+순환잔골재100%)

구분	G <sub>max</sub>	W/C (%)	S/a (%)	slump flow (cm)	Air (%)	미분 제거	수량(kg/m <sup>3</sup> )						혼화제 (kg/m <sup>3</sup> )
							W	C	G1	G2	S1	S2	AE 감수제
배합7	25	55	49	15±2.5	4.5±1.5	X	180	325	0	823	0	784	1.625 (0.5%)
배합8	25	55	49	15±2.5	4.5±1.5	O	180	325	0	823	0	791	1.625 (0.5%)

## 2. 사용재료

### 1) 시멘트

시험에 사용한 시멘트는 국내에서 생산되는 D사 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며 화학적·물리적 특성은 <표 16>와 <표 17>에 나타내었다.

<표 16> 시멘트의 화학적 특성

constituent	chemical composition (%)
$SiO_2$	30~36
$Al_2O_3$	12~18
$Fe_2O_3$	0.25~0.35
$CaO$	38~45
$MgO$	10.0이하
$SO_3$	2.74
( $S$ 황분)	1.0

<표 17> 시멘트의 물리적 특성

Contents	Physical composition
강열감량 (%)	0.99
밀도( $kg/m^3$ )	2.9~2.95
잔분( $>45\mu m$ )	2.0 이하
평균입경( $\mu m$ )	10~13
비표면적( $cm^2/g$ )	4,210
모르터의 공기함유량(%)	3.46
비 중	3.04

## 2) 골재

본 연구에 사용된 굵은골재는 25mm 이하 채석과 잔골재로는 천연모래의 입도 개선을 위하여 5mm 이하 부순잔골재와 해사를 4 : 6으로 혼합하여 사용하였으며 순환골재는 도내 J사에서 생산한 40mm 이하 순환골재를 이용하여 25mm이하 굵은골재와 5mm이하의 잔골재를 추출하였다. 그 물리적 성질은 <표 18>과 같고, 성상 및 입도분포는 <그림 12>,<그림 14>와 같다.

<표 18> 골재의 물리적 성질

구 분	천연골재		순환골재	
	굵은골재	잔골재	굵은골재	잔골재
밀 도(g/cm <sup>3</sup> )	2.51	2.40	2.43	2.29
흡 수 율(%)	1.09	1.42	2.85	4.68
0.08mm채 통과량(%)	0.5	2.59	0.72	3.9



<그림 11> 밀도 및 흡수율 시험

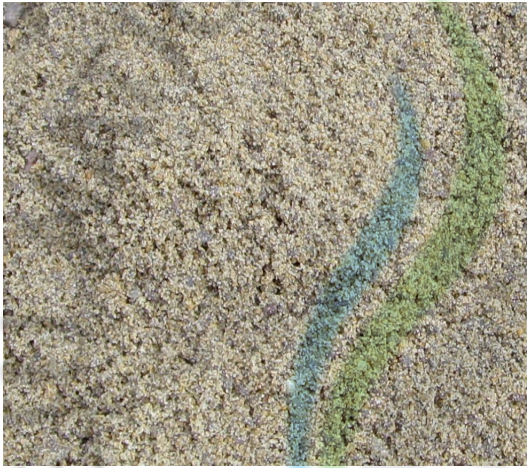




(a) 천연굵은골재



(b) 순환굵은골재



(c) 천연잔골재

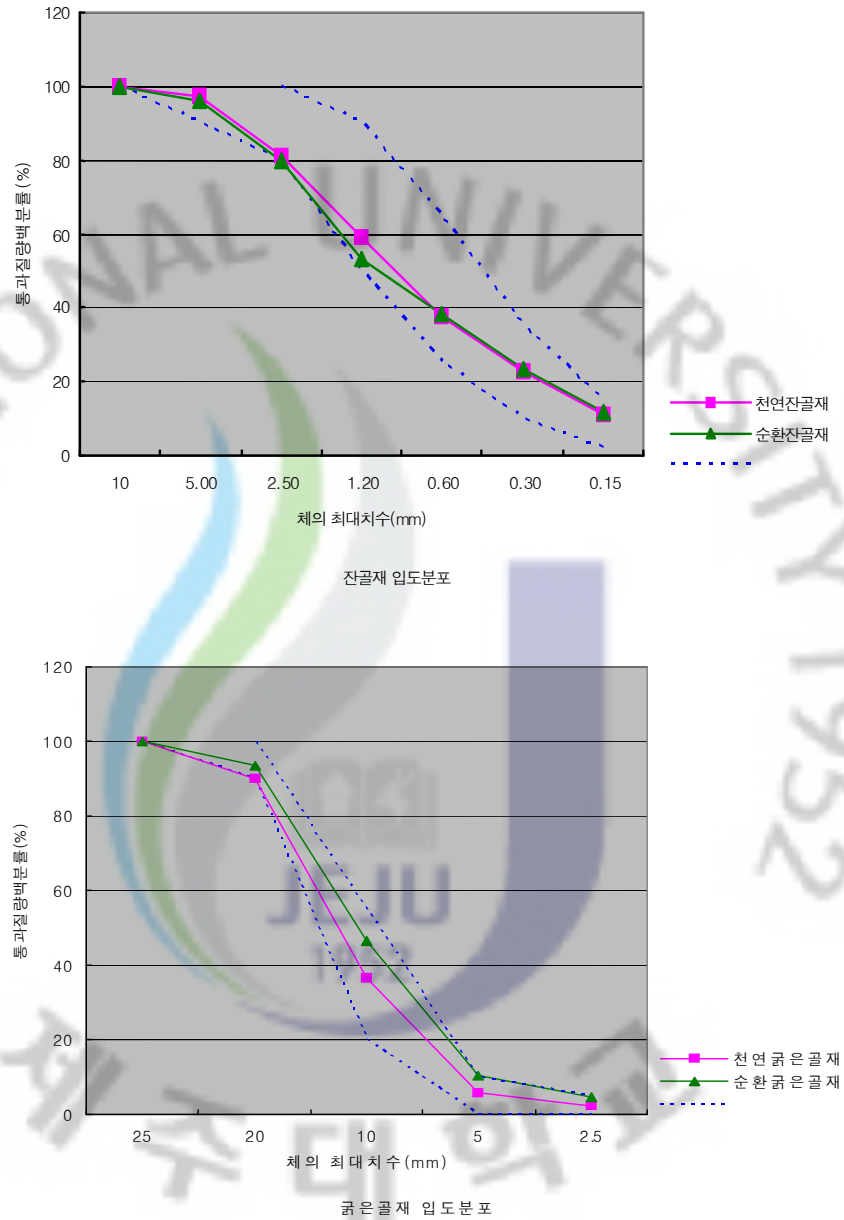


(d) 순환잔골재

<그림 12> 골재의 성상



<그림 13> 체가름시험 및 0.08mm체 통과량 측정



<그림 14> 입도분포곡선

### 3) 혼화제

본 시험에 사용한 혼화제는 E사의 고성능 감수제를 사용하였다.

### 3. 실험방법

본 시험에서는 각 변수별로 콘크리트를 배합기로 비빈 후 슬럼프와 공기량 시험을 변수별 1회씩 시행하고, 압축강도 시험에 필요한 공시체는 지름 10cm 인 원통형 몰드에 각 변수별로 10개씩을 제작하였으며, 24시간 경과 후  $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 에서 수중 양생 하였다. 세부적인 시험방법은 다음과 같다.

#### 1) 슬럼프

본 실험에서는 KS F 2402(콘크리트 슬럼프 시험방법)을 따라서 실시하였으며 방법은 아래와 같다.

(시험방법)

① 슬럼프 콘의 내면과 평판의 윗면은 미리 젖은 수건 등으로 닦아 둔다. 슬럼프 콘은 수평으로 설치한 강으로 습한 비 흡수성의 단단한 수밀성이 있는 평판 위에 놓고 시료를 채워 넣을 동안, 수밀성 평판을 디디고서 콘에 붙어 있는 손잡이로 콘이 움직이지 않도록 꼭 잡고 누른다.

② 시료는 거의 같은 양의 3층으로 나눠서 채운다. 그 각 층은 다짐봉으로 고르게 한 후 25회 똑같이 다진다. 각 층을 다질 때 다짐봉의 다짐 깊이는 그 앞 층에 거의 도달할 정도로 한다.

③ 먼저 시료를 콘 용적의 약 1/3(콘의 바닥에서부터 6~7cm)까지 채우고, 다짐봉으로 고른 후 25회 단면 전체에 균등하게 다진다.

④ 최상층을 다진 후 조심성 있게 수직방향으로 들어올린다.

⑤ 콘크리트가 충분히 주저앉은 다음 슬럼프 콘의 높이와 공시체 밑면의 원 중심부터 공시체 높이와의 차를 cm단위(0.5cm의 정밀도)로 구하여 슬럼프를 정한다.

#### 2) 공기량

본 실험에서는 KS F 2421(콘크리트 공기실 압력 방법)을 따라서 실시하였으며 방법은 아래와 같다.

(시험방법)

- ① 용기를 수평한 면에 놓고 대표적인 콘크리트 시료를 3층으로 나누어 채운다. 이때, 각 층의 부피를 비슷하게 한다.
- ② 각 층을 다짐봉으로 균일하게 다진다. 단, 제1층을 다질 때는 다짐봉이 용기 바닥을 다지지 않도록 하며, 용기의 측면을 고무망치로 두들겨서 다짐에 의한 흔적을 없앤다.
- ③ 용기 플랜지 윗면과 뚜껑 플랜지의 밑면을 깨끗이 닦고, 공기실의 주 밸브는 잠그고 주 수구 밸브와 배기구 밸브를 열어 놓은 채 용기 뚜껑을 밀착시켜 잠근다.
- ④ 용기 속의 콘크리트와 뚜껑 사이의 공간에 물을 채우는 구조에서는, 배기구에 물이 나올 때까지 주수구를 통해 물을 넣고, 배기구의 밸브를 잠근다.
- ⑤ 모든 밸브를 잠그고, 공기 펌프로 공기실의 압력을 초압력에 일치시킨다. 약 5초가 지난 후 주 밸브를 충분히 연다. 콘크리트의 각부에 압력이 잘 전달되도록 용기의 측면을 망치로 두들긴다.
- ⑥ 다시 주 밸브를 더 열어 압력이 충분히 전달되어 압력계의 눈금을 손가락으로 두들겨도 움직이지 않고 안정되었을 때, 압력계의 눈금을 읽고, 이 측정값을 콘크리트의 겉보기 공기량으로 한다.
- ⑦ 공기량 눈금판의 검정관계 곡선이 있을 때에는 이를 보정한다.
- ⑧ 용기내의 시료를 모두 제거하고, 용기를 깨끗이 닦은 후, 골재 수정계수의 측정시험을 시작한다.

3) 압축강도

본 실험에서는 KS F 2405(콘크리트 압축강도 시험방법)을 따라서 실시하였으며 방법은 아래와 같다.

(시험방법)

- ① 공시체의 상하 끝면 및 상하의 가압판의 압축면을 청소한다.
- ② 공시체를 지름의 1% 이내의 오차에서 그 중심축이 가압판의 중심과 일치하도록 놓는다.
- ③ 시험기의 가압판과 공시체의 끝면은 직접 밀착시키고 그 사이에 쿠션재를 넣어서는 안 된다. 다만 언본드 캐핑에 의한 경우는 제외한다.
- ④ 공시체에 충격을 주지 않도록 똑같은 속도로 하중을 가한다. 하중을 가하는 속도는 압축응력의 증가율이 매초(0.6±0.4)Mpa이 되도록 한다.
- ⑤ 공시체가 급격한 변형을 시작한 후에는 하중을 가하는 속도의 조정을 중지하고 하중을 계속 가한다.
- ⑥ 공시체가 파괴될 때까지 시험기가 나타내는 최대 하중을 유효 숫자 3자리까지 읽는다.

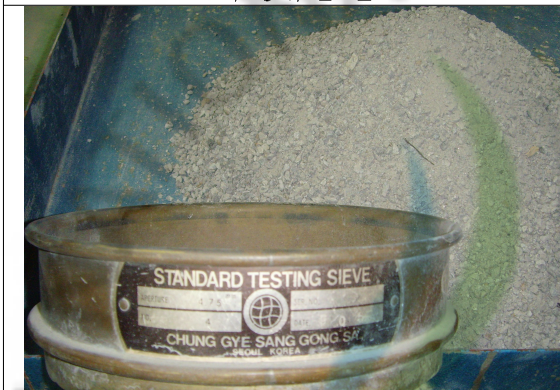
압축강도시 공시체는 수조에서 꺼낸 즉시 시행하며, 재령28일 압축강도를 시험 변수별로 10개씩 측정하였고, 공시체 평균값을 시험결과로 채택하였으며, <그림 15>는 과정별 시험장면이다..



골재 종류별 건조



잔골재 체가름시험



0.08mm 이하 분리 작업



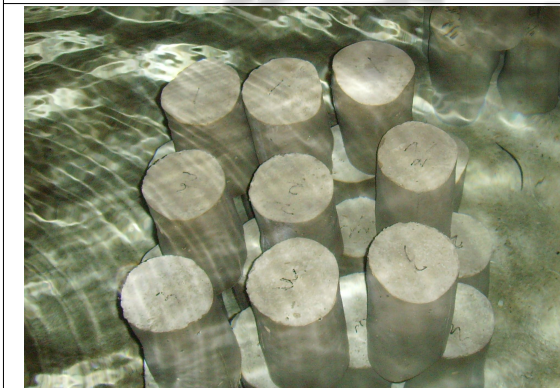
분리된 0.08mm 이하 미분말



슬럼프, 공기량 시험



공시체 제작



수중양생



압축강도 시험

<그림 15> 과정별 시험장면

## 4. 실험결과 및 분석

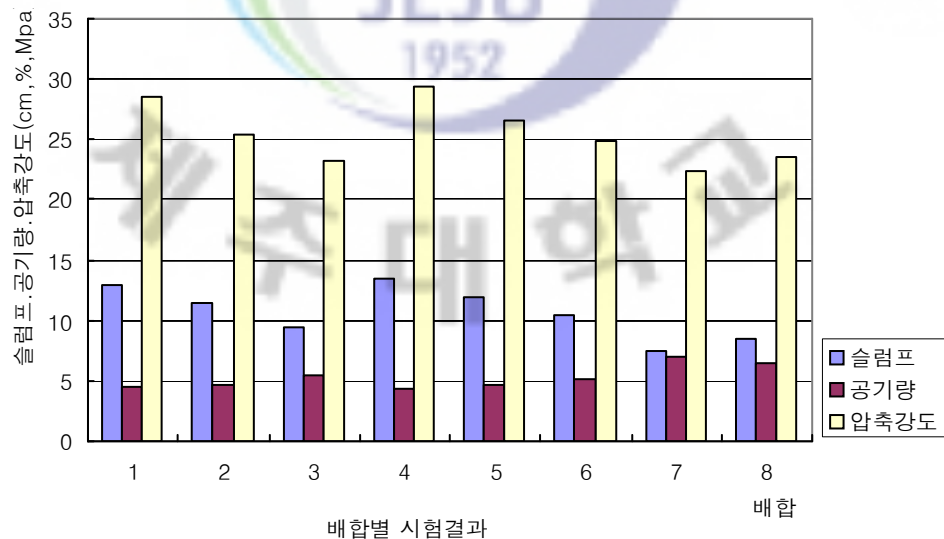
### 1. 실험결과

실험변수에 따른 각 배합별 시험결과는 <표 19> 및 <그림 16>과 같다.

<표 19> 시험결과표

배합	굵은골재 종류	잔골재 미분제거여부	순환잔골재 치환율(%)	슬럼프	공기량	압축강도	비고
1	천연굵은 골재(G1)	미제거(X)	0	13.0	4.5	28.5	G1S1-X
2			50	11.5	4.7	25.4	G1(S1S2)-X
3			100	9.5	5.4	23.3	G1S2-X
4		제거(O)	0	13.5	4.3	29.3	G1S1-O
5			50	12.0	4.7	26.6	G1(S1+S2)-O
6			100	10.5	5.1	24.8	G1S2-O
7	순환굵은 골재(G2)	미제거(X)	100	7.5	6.9	22.4	G2S2-X
8	골재(G2)	제거(O)	100	8.5	6.4	23.6	G2S2-O

※ G1 : 천연골재 G2 : 순환굵은골재 S1 : 천연골재 S2 : 순환잔골재



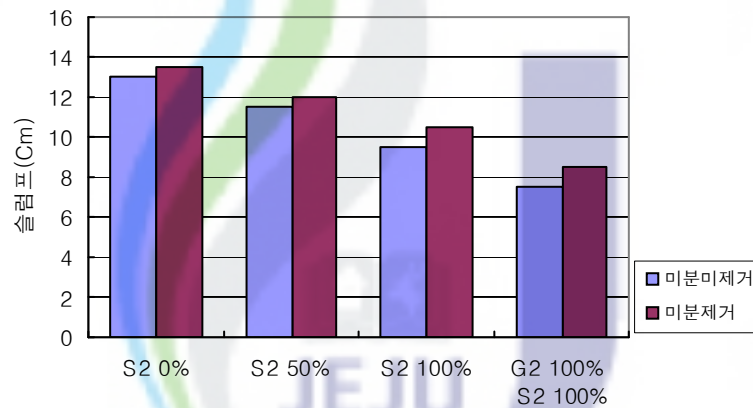
<그림 16> 변수별 시험결과

## 2. 실험결과분석

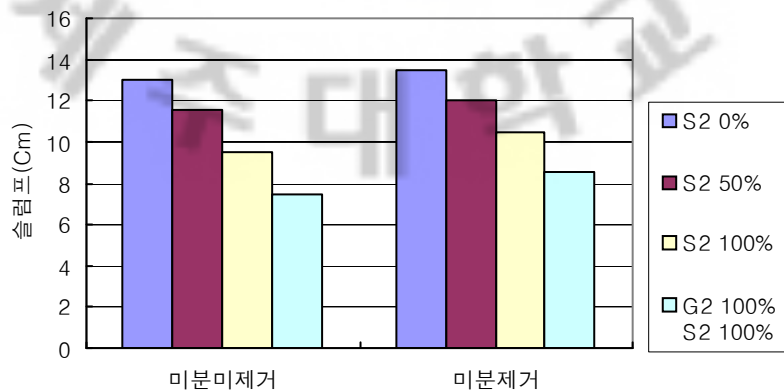
### 1) 슬럼프시험 결과분석

<그림17>, <그림18>은 순환잔골재의 치환율과 미분제거 정도에 따른 슬럼프의 변화를 나타내고 있다. 천연굵은골재를 사용한 콘크리트 배합에서 순환잔골재 치환율에 따른 슬럼프의 변화는 미분 미제거시 최초 13.0cm에서 9.5cm까지 27% 감소하였으며, 미분 제거시에는 최초 13.5cm에서 10.5cm까지 22% 감소하였다. 또한 순환골재만을 사용한 배합(G2S2)에서는 7.5cm에서 미분제거시 8.5cm로 증가하였다.

본 실험에 사용한 순환골재는 보통골재에 비하여 흡수율이 2-4배 높은 특성으로 순환골재 치환율 증가에 따라 슬럼프가 감소하는 것으로 판단된다.



<그림 17> 치환율에 따른 슬럼프값 비교

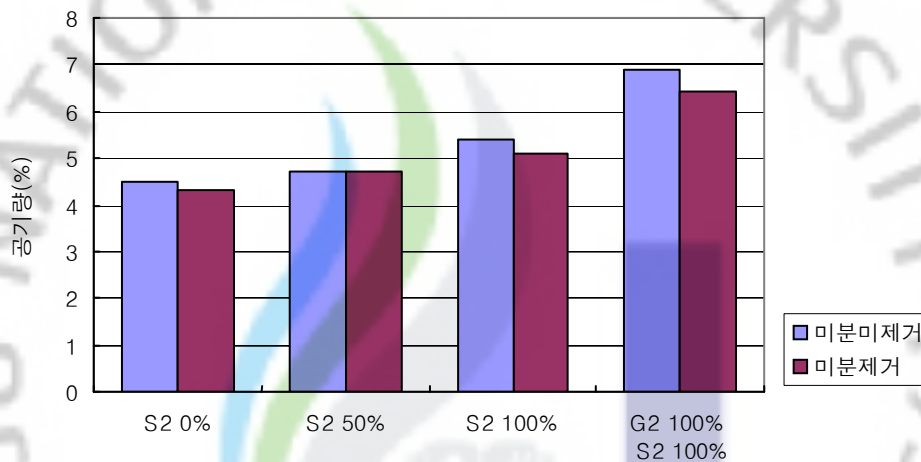


<그림 18> 미분 제거여부에 따른 슬럼프값 비교

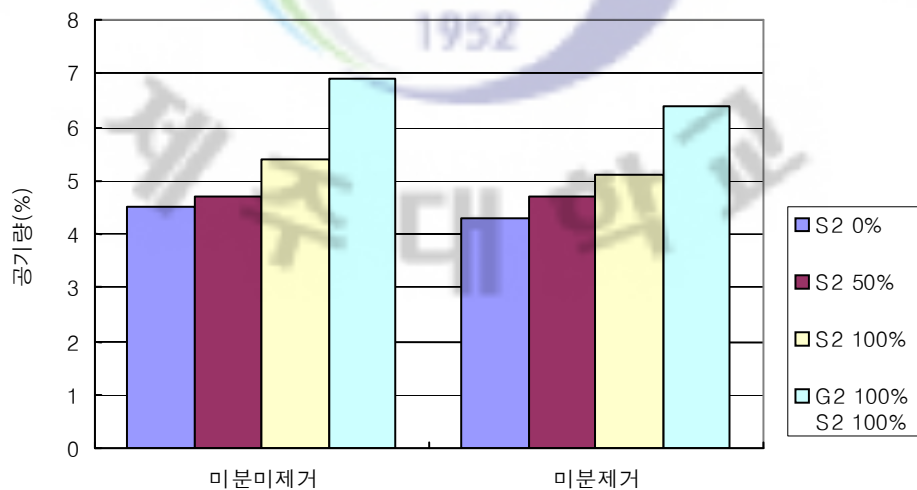


## 2) 공기량시험 결과분석

<그림 19>, <그림 20>은 순환잔골재의 치환율과 미분제거 정도에 따른 공기량의 변화를 나타내고 있다. 공기량의 변화는 4.5 에서 5.4 범위로 순환잔골재 치환율이 증가 할수록 전반적으로 증가하였고, 순환골재 사용시에는 6.9%로 증가폭이 더 크게 나타났다. 같은 치환비율에서는 순환잔골재의 미분 제거시 조금 감소하는 것으로 나타났다.



<그림 19> 치환율에 따른 공기량 비교

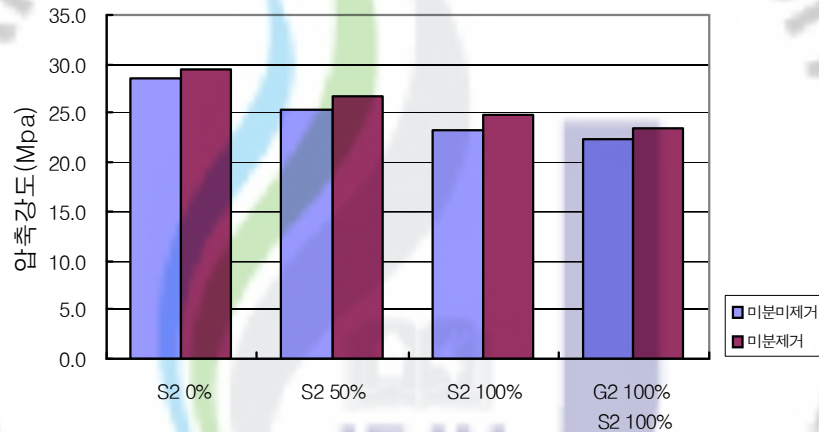


<그림 20> 미분 제거여부에 따른 공기량 비교

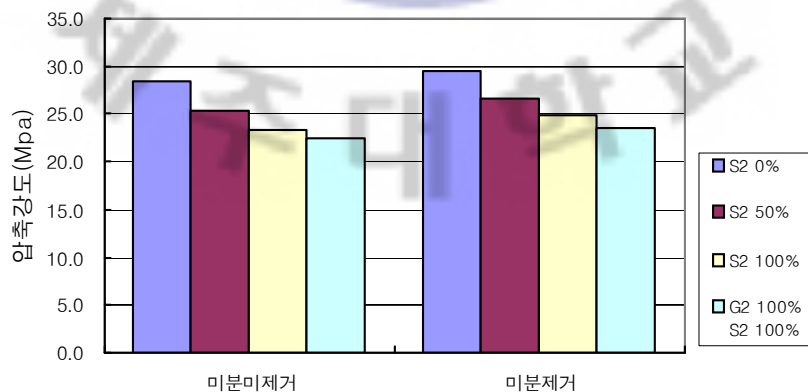
### 3) 압축강도시험 결과분석

<그림 21>, <그림 22>는 순환잔골재의 치환율과 미분제거 정도에 따른 재령 28일 압축강도 실험 결과이다. 순환잔골재 치환율에 따른 압축강도의 변화는 미분 미제거시 28.5에서 23.3까지, 미분제거시에는 29.3에서 24.8까지 뚜렷한 감소 추세가 나타났고, 순환굵은골재와 순환잔골재만을 사용한 경우는 미분 미제거시 22.4, 미분제거시 23.6으로 나타나 강도가 가장 취약한 것으로 나타났다.

천연굵은골재를 순환굵은골재로 대체했을 경우에는 강도가 0.9MPa(3.9%)이 감소한 반면 천연잔골재를 순환잔골재로 대체했을 경우에는 5.2MPa(18.2%) 감소하여, 순환잔골재가 강도에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.



<그림 21> 치환율에 따른 압축강도 비교



<그림 22> 미분 제거여부에 따른 압축강도 비교

<표 20>은 0.08mm이하의 미분 제거가 강도에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 표에서 보면, 천연굵은골재+천연잔골재(G1S1)의 경우에 천연잔골재의 미분제거 시 0.8MPa(2.8%) 강도 증진을 보였지만, 천연굵은골재+순환잔골재(G1S2)의 미분 제거시에는 1.5MPa(6.4%)까지 강도가 증대된다.

이처럼 미분 제거에 따른 강도 개선효과가 천연골재보다 순환골재에서 크게 나타나는 이유는 순환잔골재에 포함된 미분함량이 3.9%로 천연잔골재내 미분함량 2.59%보다 크고, 순환골재에서 발생된 미분이 밀도가 낮고 영화물 등 유해분을 많이 포함하고 있기 때문에 미분 제거영향이 더 크게 나타난 것으로 판단된다.

<표 20> 미분 제거 여부에 따른 압축강도 비교

구분	압축강도(MPa)				비고
	미분 미제거	미분 제거	증감	비율(%)	
G1S1	28.5	29.3	0.8	2.8	
G1(S1+S2)	25.4	26.6	1.2	4.7	
G1S2	23.3	24.8	1.5	6.4	
G2S2	22.4	23.6	1.2	5.4	

## 5. 결론

본 실험을 통한 순환잔골재의 치환율과 잔골재에 포함된 0.08mm이하 미립 분 제거에 따른 콘크리트의 역학적 특성에 대한 실험 결과 다음과 같다.

- 1) 순환잔골재 치환율에 따른 압축강도의 변화는 50% 치환시 10% 강도 감소, 100% 치환시 강도가 18% 저하되었다. 순환골재만을 사용한 경우에는 21% 감소되어 감소폭이 큰 것으로 나타나 순환잔골재를 이용한 콘크리트를 배합 설계 할 시에는 순환잔골재의 사용량을 적절히 조정할 필요가 있다고 판단된다.
- 2) 미분 제거에 따른 압축강도의 변화는 50% 치환시 9% 강도 감소, 100% 치환시 15% 감소되었지만, 미분을 제거하지 않고 같은 비율로 치환한 경우에 비하여 5 ~ 6%까지 강도가 증진되었다. 이것은 순환잔골재에 포함된 미분함량이 3.9%로 천연잔골재내 미분함량 2.59%보다 크고, 순환골재에서 발생된 미분이 밀도가 낮고 염화물 등 유해성분을 많이 포함하고 있기 때문에 미분 제거영향이 더 크게 나타난 것으로 판단된다.
- 3) 순환잔골재 치환율이 높아질수록 슬럼프가 감소하였고, 미분을 제거했을 경우에는 0.5에서 1.0까지 슬럼프가 증가되었다. 이것은 본 실험에 사용한 순환골재가 보통골재에 비하여 흡수율이 2~4배 높은 특성으로 인해 순환골재 치환율 증가에 따라 슬럼프가 감소하는 것으로 판단된다.
- 4) 순환잔골재 치환율 증가에 따라 공기량은 소폭 증가하였지만, 순환굵은골재 사용시에는 그 증가폭이 더 증대된다. 이것은 골재의 거친 입형에 의한 간헐 공기량의 증가와 골재 표면에 부착되어 있는 모르타 및 파쇄 과정에서 골재 자체의 미세 균열 등에 의해 공극을 많이 내포하고 있기 때문으로 판단된다.
- 5) 순환골재 콘크리트는 골재의 품질에 따라 영향을 많이 받게 된다. 따라서 순환골재 콘크리트 사용시에는 배합수 관리에 철저히 하여야 하며, 동일한 조건(야적,보관,살수 등)으로 골재를 관리하여 골재의 품질편차가 생기지 않도록

주의를 기하여야 할 것으로 사료된다.

- 6) 슬럼프는 투입골재의 함수상태에 따라서 크게 영향을 받으므로 시험배합을 통하여 적정 강도가 발현되어질 수 있도록 배합설계시 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.



## 6. 참고문헌

- 건설교통부,(2009) “콘크리트 표준시방서”
- 서광찬,(2008) “자원순환형 고품질 순환잔골재 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구”, 석사학위논문, 충남대학교 대학원, pp51~60
- 서치호,(2004) “재생골재콘크리트의 특성”
- 심종성,(2006) “순환골재 치환율에 따른 순환골재콘크리트의 압축강도 및 탄성계수 특성” 「2006 대한토목학회논문집」 A:구조공학,원자력공학,콘크리트공학 제26권 제1호, 대한토목학회 pp213~218
- 이도현,(2007) “콘크리트용 순환골재의 기술개발 현황” 「2007 콘크리트 학회지」 제19권 제2호, 한국콘크리트학회, pp34~41
- 이상수,(2008) “습식비중분리시스템을 활용한 순환잔골재의 품질특성에 관한 연구” 「대한건축학회논문집」 제24권 제5호 통권 제235호, 대한건축학회, pp117~124
- 이세현,(2005) “콘크리트용 순환골재 품질기준“
- 이승환,(2008) “순환골재 생산과정에서 발생하는 미분말의 재활용 방안” 석사학위논문, 목포해양대학교 대학원
- 이종열,(2006) “순환 잔골재 콘크리트 이용 인증 취득 사례 조사(일본)” 「2006 한국건설순환자원학회지」 제2권 제2호, 한국건설순환자원학회, pp38~42
- 전에스더,(2008) “순환잔골재 품질에 따른 콘크리트의 강도특성”
- 정재동,(1996) “콘크리트재료공학”, 동양시멘트(주)
- 최기선,(2009) “순환굵은/잔골재를 사용한 굳지않은 콘크리트의 특성” 「2009 자원리사이클링」 제18권 제3호 통권 제89호, 한국자원리사이클링학회, pp20~26
- 환경부 국립환경과학원,(2008) “2007 전국 폐기물 발생 및 처리현황”

## 감사의 글

이번 논문이 완성되기까지 여러 차례 검토하고 시행착오를 줄일수 있도록 많은 지도와 격려를 아끼지 않으신 박상렬 교수님께 진심으로 감사드립니다.

그리고 바쁘신 중에도 논문 심사과정에서 세심하게 검토해 주신 김상진교수님과 이동욱교수님을 비롯하여 대학원 과정에서 항상 많은 가르침과 격려를 해 주신 김남형교수님, 양성기교수님, 남정만교수님, 이병걸교수님 등 여러 교수님들께도 깊이 감사드립니다.

본 논문이 완성되기까지 여러 시행착오를 거칠때마다 함께 고민하고 조언을 아끼지 않은 연구실 김창훈님과, 좌용현님, 그리고 동기이면서 연구과정에서 물심양면으로 도움을 준 심재용님과 고은효님에게도 지면을 빌어서 고맙다는 말을 전합니다.

또한, 배움의 길을 걸을 수 있도록 배려해 주신 직장동료와 선·후배님, 그리고 대학원과정을 보람차고 활기차게 보낼 수 있도록 함께 해준 우리 동기들과 선·후배님들께도 진심으로 감사드리며, 앞으로 험난한 세상을 사는 동안 세상살이의 벗이 되기를 소망합니다.

끝으로 늦게나마 학문의 길을 갈 수 있도록 용기를 주신 아버지와 어머니, 힘든 과정에서도 묵묵히 참고 견뎌준 사랑하는 아내 유미와 아이들을 비롯한 사랑하는 가족들과 함께 이 조그만 결실의 기쁨을 나누고자 합니다.

2009. 12월

김희준 올림