

## 콘크리트 재활용 실태 및 연구동향

### Research and Practical Application of the Reuse of Demolished Concretes



김광우\*



박제선\*\*



이봉학\*\*\*



연규석\*

#### 1. 서 론

근래에 와서 콘크리트의 폐기처분은 여러가지 문제 때문에 점차 어려워지고 있다. 환경문제에 따른 폐기장소의 제한은 폐콘크리트 처분거리를 증가시키며, 골재자원의 고갈에 따른 천연골재 구입거리의 증가와 함께 건설업체에 2중고를 유발한다. 또한 폐기 처분장소를 구해도 처분 물량과 입자의 크기를 제한하므로 파쇄 후 폐기해야 하는 경우가 대부분이며 게다가 폐기처분 비용까지 내야 한다. 일본의 경우 1985년에 매립장에 톤당 처분 비용은 미국달러로 \$3~10 하는 경우가 대부분이었다. 이와 같은 문제는 우리나라에서도 1992년 건설중이던 신해주대교 붕괴 시 그 폐콘크리트의 처분을 통하여 어려움을 경험한 바 있다.

하지만 콘크리트를 재활용 해야 하는 가장 근본적인 이유는 천연골재 자원의 고갈에 따른 골재의 공급 부족에 있다고 볼 수 있다. 국내에서도 이미 경험하고 있듯이 河床에서의 골재는 한계에 다다랐고 굵은골재는 파쇄석이 그리고 잔골재는 海沙가 사용되는 경우가 많다. 천연골재의 주를 이루

는 하천골재의 비중은 전체 골재수급량의 54.2% (88년)에서 28.4%(97년, 추정)으로 저하되어가고 있으며, 반면 산림 등에서 생산하는 인공(쇄석)골재는 동기간동안 26.5%에서 41.8%로 개발이 활발해지고 있고 이러한 현상은 점차 심화될 것으로 예측된다. 또한 수요량에 있어서도 1988년 9,800만<sup>3</sup>m에서 1993년에는 2배인 18,500만<sup>3</sup>m으로까지 급속히 증가하고 있다. 이와 같은 증가추세에 의하면 현재 확보된 약 40억<sup>3</sup>m의 확보된 가채매장량은 약 10년분 정도에 불과하며, 운송거리의 제약 등으로 인한 지역적 수급불균형은 5년을 전후하여 나타날 것으로 전망된다.

국내의 한 통계('92 한국건축폐기물협회)에 의하면 우리나라에서는 매년 약 500만톤의 콘크리트 폐기물이 발생되는 것으로 보고되고 있다. 한편 유럽 공동체(EEC)에서 매년 철거되는 폐콘크리트의 양은 약 5,000만 톤으로 추산되고 있으며 그 중 영국에서만 매년 1,100만톤, 불란서에서 매년 1,300만톤, 벨지움에서 약 300만톤 등의 콘크리트가 철거되고 있다. 한편 미국에서의 그 물량은 약 6,000만 톤으로 추산되며 일본<sup>(36)</sup>에서도 약 2,540만톤의 폐콘크리트가 1990년 철거된 것으로 알려졌다. 하지만, 전세계적으로 볼 때 그중 일부만이 재활용 되고 있으며 그것도 구조용 콘크리트 골재

\* 정희원, 강원대학교 농공학과 교수  
 \*\* 정희원, 강원대학교 토목공학과 교수  
 \*\*\* 강원대학교 토목공학과 교수

로 재활용 되기 보다는 대부분 매립용 막석 대용이나 도로의 기층 또는 보조기층 등 저급 재료로 사용될 뿐 나머지는 그냥 사토장에 버려진다.<sup>[23]</sup>

덴마크의 Hansen에 의하면 서기 2000년의 세계적인 콘크리트 철거 물량은 1980년대 후반의 약 3배가 될 것이라고 추산하고 있다. 따라서 이 물량의 처리는 심각한 문제로 대두될 것이고 결국 재활용만이 가장 중요한 해결책이라는 것이다. 하지만 다행인 것은 대부분의 철거되는 콘크리트들은 재활용이 가능하는 사실이다. 이는 지금까지의 외국에서의 많은 연구<sup>[1, 2, 3]</sup>와 실제 사업의 시행에서 밝혀지고 있으며 따라서 국내에서도 이에 대해 보다 체계적인 연구가 시행되어야 할 것이라고 보여진다.

외국의 여러 연구자들의 경험에 의하면 PCC의 재활용 과정은 비교적 간단하다. 그것은 일정 기준을 만족하는 콘크리트 구조물을 파괴, 제거하여 규정된 크기로 폐쇄하고 그것을 새로운 포틀랜드 시멘트 콘크리트나 또는 도로 기층재료, 역청콘크리트 등과 같은 어떤 다른 분야에 골재로서 재사용하는 것을 포함한다. 이는 폐기처분 할 콘크리트를 새로 타설할 콘크리트의 골재의 재원으로 사용하므로써 폐기물 처리에 대한 문제를 줄일 수 있다. 선진국의 이러한 추세에 비추어 볼 때 우리나라와 같이 자원이 부족한 나라에서는 폐콘크리트를 유효하게 재이용하는 방안이나 연구에 보다 많은 관심을 가질 필요가 있다. 따라서 본 원고는 국내에서의 폐콘크리트 재활용에 대한 실용화를 위하여 보다 상세한 외국의 재활용 실태와 연구동향을 조사·분석하여 보고하고자 한다.

## 2. 용어 정의

여기서 구체적인 본문의 내용으로 들어 가기 전 반복되어 사용될 용어들을 간단히 정의하고 넘어가기로 한다.

**폐콘크리트(waste concrete)** : 기존 콘크리트 구조물의 철거로부터 얻어지는 콘크리트 또는 파괴된 콘크리트에 철근 및 기타 재료가 붙어있는 덩어리

**재생골재(recycled aggregate)** : 폐콘크리트의

큰덩어리를 일정크기 이하로 파쇄하여 얻어진 조각들. 기존의 골재와 몰탈이 붙어있는 입자들로서 재생 잔골재와 재생 굵은골재로 구분,

**재생잔골재(recycled fine aggregate : RFA)** : 재생골재 중 #4 체로 체가름 하여 통과된 작은 입자,

**재생굵은골재(recycled coarse aggregate : RCA)** : 재생골재 중 #4 체로 체가름 하여 남은 굵은 입자,

**천연골재(virgine aggregate)** : 콘크리트에 사용된 적이 없는 골재, 강자갈, 강모래 및 쇄석골재,

**재생콘크리트(recycled concrete)** : 재생골재를 일정비율 사용하여 제조한 콘크리트,

**일반콘크리트(normal concrete)** : 기 사용된 적이 없는 천연골재만을 사용하여 제조한 일반적인 콘크리트.

## 3. 재활용 실태

### 3.1 1970년 이전의 재활용 실태

최초로 건물의 파쇄 재료를 새로운 콘크리트의 골재로 재활용한 근거는 2차 대전직후부터 찾아볼 수 있다. 그 당시 특히 영국과 독일에서는 도시 폭격으로 파괴된 콘크리트 덩어리들을 구조물의 재건 시 콘크리트에 재 사용하였다. 그리고 유럽 전체적으로 戰後 각종 요새들을 해체하면서 그 파쇄 콘크리트를 콘크리트용 골재로 사용하는 붐이 일어났으나 전후 복구사업이 일단락 되면서 재활용사업도 사라졌다.

파쇄 폐콘크리트가 제일 쉽게 이용된 곳은 도로의 지반(Subbase) 등에 배수 및 보강 재료로 사용되는 막석 대용품으로 또는 도로 기층용 lean concrete 등이란가 soil-cement 재료로써 이다. 2차 대전 전 기간 중 미국 일리노이주는 US-66도로의 재건설시 일부 기존 포장을 파쇄하여 골재 기층용 재료로 사용하였다. 당시는 戰時라 4차선 도로의 건설이 미국에서는 금지되어 있었다. 따라서 그들은 기존 노화된 2차선 도로 옆에 새로이 2차선 도로를 건설하면서 기존 도로를 철거, 파쇄하여 야적하여 두었다가 전후의 2차선 추가 재건시에 기

층 재료로 사용하였다.<sup>(61)</sup> 1964년 미국 텍사스주 달라스의 Love Field 비행장 활주로 및 택시로의 보조 기층은 파쇄 콘크리트를 사용하여 건설되었다.<sup>(62)</sup> 그들은 보조 기층 재료의 배합 시에 72%의 파쇄 콘크리트와 28%의 천연골재를 사용하였다.

### 3.2 1970년대 이후의 재활용 실태

1970년대 초 미국에서 폐콘크리트 재활용에 관한 기사가 처음 소개된 것은 Roads and Streets 지 5월 호이다.<sup>(10)</sup> 이 기사는 캘리포니아의 한 도로 건설 현장에서 기존 도로의 콘크리트 구조물을 철거하고 이를 부수어서 도로의 노반 재료로 성공적으로 사용한 기사를 실고 있다. 이어 같은 해 9월 호에 Marek 등이 폐콘크리트 덩어리가 깊어지 있는 골재 자원임을 소개하고 있다. 1973년 미국의 Pits & Quarry 지<sup>(66)</sup>와 Roads and Streets 지<sup>(63)</sup> 그리고 Public Works 지<sup>(67)</sup>들은 각기 폐콘크리트 덩어리를 플랜트에서 파쇄하여 골재로 재활용한 현장기사를 소개하고 있다.

1975년 Concrete Construction 10월 호는 로스 앤젤레스 지역의 한 도로 건설 현장에서 노화된 콘크리트 및 아스팔트 도로포장을 파쇄하여 이것을 새로 건설되는 도로의 lean concrete (Econo-crete)에 사용한 내용을 소개하는 기사를 실고 있다.<sup>(54)</sup> 이는 lean concrete 재료로 폐콘크리트가 사용된 첫번째 기록으로 알려져 있다. 그들은 이 콘크리트에 과도한 공기가 함유되는 것을 막기 위하여 detraining 혼화제를 첨가하였다. 이 lean concrete의 28일 평균강도는 52kg/cm<sup>2</sup>였다. 이 사업 후 캘리포니아는 lean concrete에 관한 추가 연구를 수행하고 이에 관한 시방서를 개발·제정하였다.<sup>(61)</sup>

1976년 Iowa 교통국은 아스팔트로 7.5cm 덧씌우기 된 US-75(41년 된) 콘크리트 도로를 재활용하였다. 그들은 아스팔트 층을 먼저 걷어내고 콘크리트 층을 철거하였으며 이를 두 재료는 모두 재활용되었다. 이 사업의 결과로 그들은 노화된 콘크리트의 재활용이 가능하다고 결론지었다.<sup>(5)</sup> 1977 Iowa주는 Pottawattamie County의 I-68도

로 4.8Km를 재활용하였다. 그들은 철거한 콘크리트를 10cm lean concrete 기층과 15cm로건에 사용하였다. 또 1978-1979년에는 Iowa주의 남서쪽 지방에 1929년 건설된 약 26km의 도로를 재활용하였다. 이 사업에서 그들은 특수 제작한 디젤엔진 파일박는 햄머를 적재한 포장 파쇄기를 사용하였는데 이것이 그 뒤 널리 사용된 이 장비의 최초 기원으로 알려지고 있다.<sup>(65)</sup>

플로리다주의 Jacksonville 공항은 활주로를 재건설하면서 기존의 노화된 콘크리트 활주로(약 28cm 두께)를 철거하여 일부는 지반의 배수용 막석으로, 그리고 일부는 새로운 콘크리트 포장의 기층 콘크리트용 골재로 사용하였다.<sup>(64)</sup> 그들은 천연골재를 마이애미로부터 구입하는 비용이 톤당 \$7에 가까운데 비하여 폐콘크리트로부터 재생골재를 생산하는 비용은 \$4 미만이어서 경제적인임을 보여주고 있다.

1976-1977년 하절기에 불란서 파리 북쪽의 매우 교통량이 많은 두 고속도로가 보수되었다. 이 사업은 외측 2차선의 콘크리트 포장과 시멘트 안정처리 기층의 제거와 하부 지반의 토질을 안정처리하는 것이었다. 재 건설은 이 철거된 폐콘크리트를 새로운 lean-concrete 기층과 로건의 투수 콘크리트에 사용하는 것이었다. 이 도로의 남쪽행 53km의 재건설은 7주만에 완성되었다. lean-concrete는 재생골재에 162Kg/m<sup>3</sup>의 시멘트와 71Kg/m<sup>3</sup> 플라이애쉬를 사용하여 만들어졌고, 로건의 투수 콘크리트는 입도 5mm 이상의 재생골재를 사용하여 건설되었다.

최초로 Dow-Mash 포장 콘크리트가 재활용된 사업이 일리노이 교통국에 의해 시카고 북쪽외곽 I-94 고속도로 24Km에 대하여 시행되었다. 이 도로는 일일 교통량이 130,000 대인 매우 복잡한 도로여서 낮 시간에 29km 거리에서 골재를 운반하는데 왕복 1시간 이상이 걸렸다. 따라서 철거된 콘크리트의 운반 및 골재의 반입은 매우 어려웠으며 그들은 현장에 파쇄기를 설치하고 철거된 35만 톤의 콘크리트를 파쇄하여 약 85%는 배수용 성토골재로, 나머지는 안정처리 기층 하의 콘크리트용 골재로 사용하였다. 이 사업은 1980년 10월 끝났

**Table 1 Concrete pavement recycling projects performed in Michigan**

Year	Route	Location	Length Configuration	Concrete Shoulders
1981	Street	City of Wyoming, suburb of Grand Rapids	1 mi, 4-lane arterial	no
1982	Garfield Road	Macomb County	1.2 mi, 55 ft. wide	no
1983	1-94	Kalamazoo County, near Battle Creek	5.7 mi, dual 24 ft.	yes
1984	1-94	Van Buren Co., E. of Hartford Interchange	8.96 mi. dual 24 ft.	yes
	1-75	Wayne and Monroe counties, S. of Detroit	6.7 mi, dual 36 ft.	yes
	1-75	Monroe County, S. of Detroit, NB only	6 mi, single 36 ft.	yes
1985	1-94	Calhoun County to Jackson Conty line	6.3 mi, dual 24 ft.	yes
	1-94	Kalamazoo County, near Galesburg	8.7 mi, dual 24 ft.	yes
1986	1-94	Calhoun County, E. of 11 Mile Road	5.7 mi, dual 24 ft.	yes
	1-96	Ionia County, W. of Lansing	7.7 mi, dual 24 ft.	no
	1-96	Ionia County, near Portland	10.49 mi EB, 24 ft. 5.46 mi WB, 24 ft.	no
	1-94	Van Buren County near Paw Paw	5 mi, dual 24 ft.	yes
	1-94	Washtenaw County, Harris Rd, vicinity	2.31 mi, dual 24 ft. into dual 36 ft.	yes
1987	1-94	Calhoun County E. of old U.S. 27	4.4 mi, dual 24 ft.	yes
	1-75	Monroe County E. of old U.S. 27	6.3 mi, single 36 ft.	yes
	1-94	Van Buren County W. of Paw Paw	5.8 mi, dual 24 ft	yes
	US-10	Wayne Co., Lodge Freeway to 1-75, Detroit	8.7 mi, dual 36 ft.	yes
	1-96	Ionia and Kent counties	8.2 mi, dual 24 ft.	no.

**Table 2 Portland cement concrete recycling in Wisconsin**

Year	No. of Projects	12-ft Lane Miles Pavt. Placement Using Recycled Concrete	Concrete Removed (S.Y.)	Aggregate Conserved (tons)
1983	1	27	192,000	67,900
1984	10	139	992,000	351,000
1985	2	52	363,000	128,000
Totals	13	218	1,547,000	547,300

**Table 3 Concrete recycling projects in Iowa**

Year	Route	County	Length
1976	U. S. 75	Lyon	
1977	I-680	Pottawattamie	3 miles
1978-79	Iowa Route 2	Taylor & Page	16 miles
1983	I-35	Story	
1985	I-80	Powershick	
1986	I-80	Pottawattamie	
1985	County Road E	Greene	2.37 miles
1986	County routes	Greene	4.3 miles
1987	I-80	Iowa	
1987	County routes	Greene	

**Table 4 North Dakota's first three PCC recycling projects**

Project	Location	Length (Miles)	Original Pavement Type	Original Pavement Thickness (in.)	Age When Recycled (Years)
1	194 N.D. 30 to Cleveland	12.2	Jointed	10	25
2	129 Hillsboro N. & S.	10.7	CRCP	8	13
3	194 Eckelson to N.D. 1 So.				

• 각 사업별로 응찰한 골재의 최저 응찰가격은 표 5와 같으며, 천연골재가 \$12~14/ton일 경우 1마일 포장당 \$35,000 ~ \$50,000의 비용을 절약한 것으로 분석되었음.

**Table 5 Cost comparisons of recycled and virgin aggregate**

Project	Item	Recycled Aggregate		Virgin Aggregate	
		Bid Price		Fine Aggregate Bid Price	Coarse Aggregate <sup>a</sup> Bid Price
1	Removal, hauling, and crushing 10" PCC pavement	\$2.10 /yd <sup>2</sup>		\$11.00 /ton	\$14.00 /ton
2	Breaking, removal, hauling, and crushing 8" CRCP pavement	\$4.37 /yd <sup>2</sup>		\$ 6.75 /ton	\$12.00 /ton
3	Breaking, removal, hauling, and crushing 10" PCC pavement	\$4.00 /yd <sup>2</sup>		\$11.00 /ton	\$13.00 /ton

<sup>a</sup> Virgin coarse aggregate was used as there was not enough recycled coarse aggregate to pave the entire length of the projects because concrete shoulders were added to the typical section.

으며 이로부터 약 20만 갤론의 디젤이 절약된 것으로 추산되었다.

1980년대에 들어오면서 콘크리트 재활용 사업은 아스팔트 콘크리트의 재활용 사업과 마찬가지로 미국등 많은 국가에서 대대적으로 시행되었다.

**Table 6 Concrete recycling projects in Minnesota**

Route	Year	Location	Project Length	Square Yards	Use
U.S. 59	1980	Worthington North	16 mi	228,170	Aggregate for new PCC pvmt.
U.S. 212	1982	West-Central	6.2 mi		Backfill and shoulder agg.
T.H. 15	1982	Martin Co.	11.5 mi	134,780	Agg. for new PCC pavement
T.H. 15	1983		8 mi	95,490	Agg. for bituminous base course for flexible pvmt.
I-90	1983	Austin area	5.5 mi		Severely D-cracked pvmt. mat'l wasted or used in fill
I-90	1984	Minnesota state line to Beaver Creek			Agg. for new PCC pavement
I-94 W / B	1986	Evansville	11 mi		Agg. for new PCC pavement
I-94 E / B	1987	Fergus Falls	9 mi		Agg. for new PCC pavement
I-94 W / B	1988	Fergus Falls	6.5 mi		Agg. for new PCC pavement
I-94 E / B	1988	Brandon	12 mi		Agg. for new PCC pavement
T.H. 60	1988	Mountain Lake	10 mi		Agg. for new PCC pavement
U.S. 52		Olmstead County			Agg. for new PCC pavement

**Table 7 Airport recycling projects**

Location	Job Size	Year	Use
Love Field, Dallas	8,800 R / W, T / W & Apron	1964	Cement treated base for new PCC pavement
Jacksonville Intern'l Airport, Florida	R / W Keel 50 ft	1977	6" lean concrete base & 6" open graded drainage layer
FAA ANG, Atlantic City	75,000 yd <sup>3</sup>		Cement treated base for new 14" R / W PCC pavement and as agg. for outside lane of new R / W pavement
Oklahoma City, Will Rogers Airport	150,000 yd <sup>3</sup> terminal apron replacement-Removed 12" PCC		8" cement treated base for Pavement
Denver Stapleton Field	Remove 8,000 ft R / W Asphalt & Concrete 47,000 yd <sup>3</sup> concrete		14" cement-treated base run way pavement
Atlanta Hartsfield Airport, Georgia	4th E / W Runway 187,000 yd <sup>3</sup> Removed from old terminal area up to 16' thick reinforced with mesh	1979	Cement treated base for new PCC
Richmond, Virginia International airport	Removed 75 ft of pavement on each side of 300 ft R / W		10" cement-treated base for new pavement
O'Hare Airport	157,000 120,000 yd <sup>3</sup> 6" floor slabs on base		Used as cement treated base for reconstructing parking apron & T / W

특히 이 사업은 콘크리트 포장을 재건설하면서 많이 시행되었으며 미국에서의 그 중요한 예를 표 1 부터 6을 통하여 나타내었다.

한편 공항의 콘크리트 포장도(활주로, 택시로드 및 보조포장) 미국의 여러 비행장의 개, 보수 사업 시에 이루어졌으며 그중 중요한 사업을 표 7에 요약하여 정리하였다.

#### 4. 외국의 연구사

2차대전 직후 당시의 문헌에 의하면 각종 벽돌이 건축물 재료로 가장 널리 사용되었음을 Nixon<sup>(53)</sup>은 기술하고 있다. 하지만 당시에는 이 분야에 대한 깊이 있는 연구가 별로 없었다. 1970년대에 접어들면서 戰後 또는 그 이전에 지은 노화된 콘크리트 구조물의 철기와 새로운 건설물량의 증가와, 일부에서의 미래 천연물재의 고갈에 대한 우려가 시작되면서 폐콘크리트를 골재로 사용하기 위한 관심이 증가되었다.

근래의(1970년 이후) 폐콘크리트 재활용에 관한 연구 동향을 살펴보면 크게 서너가지로 분류할 수 있다. 이들은 우선 폐콘크리트의 재활용 가능성에 관한 연구, 재생콘크리트의 각종 성질 및 특성에 관한 연구, 그리고 재생콘크리트의 활용에 관한 연구이다. 폐콘크리트의 재활용은 유럽을 중심으로 많은 연구가 이루어지고 있으며 미국도 1970년대 초반부터 많은 관심을 보이고 있다. 아세아에서는 일본에서 연구 및 활용이 활발하며, 싱가포르, 사우디아라비아에서도 많은 연구실적을 찾아볼 수 있다.

한편 유럽의 RILEM(the International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures)은 1976년에 기술위원회 37-DRC를 구성하고 1977년 영국에서 첫번째 회의를 개최하였으며 "콘크리트용 골재로서의 재생골재"에 관한 보고서<sup>(53)</sup>를 1978년 발표하였다. 이 위원회는 1981-1988년 사이 "Demolition and Reuse of Concrete"에 대한 연구를 수행을 하였으며 콘크리트 재활용(및 콘크리트 구조물 파괴)에 관한 제 1차 EDA-RILEM 심포지움을 유럽철기협회(EDA)와 공동으로 1985년 Rotterdam에서 개최

하였고, 같은 주제하에 1988년 11월 제 2차 학술회의를 동경의 일본대학에서 개최하였다. 이들 학회에서는 콘크리트 재활용에 관해서만 40편 이상의 논문이 발표되었다. 한편 이 위원회의는 1992년 폐콘크리트의 재활용에 관한 보고서<sup>(23)</sup>도 출간하였다.

RILEM은 37-DRC 기술위원회의 연구결과를 토대로 국제적인 재활용 지침 및 규정의 필요성을 인식하고 1989년 새로이 기술위원회 121-DRG를 구성하여 "Guidelines for Demolition and Reuse of Concrete and Masonry"에 관한 연구를 1989-1993년 사이에 수행하였다. 또한 이들은 RILEM 제3차 학술회의를 1993년 10월 덴마크에서 개최하였으며 여기서는 콘크리트 폐기물 재활용에 관해서만 총 34편의 논문이 발표되었다. 그들은 또한 지진등 재해로부터 구조물의 폐기물이 크게 발생하는 점을 유의하여 이에 관한 연구보고서<sup>(24)</sup>를 출간하였다. 따라서 본 절에서는 상기의 3차 RILEM 국제학술회의와 그외 각종 국제저널과 학술발표회의의 논문집에 발표된 논문을 중심으로 그 연구 동향 및 활용과정을 지역별 연대별로 고찰하였다.

#### 4.1 북미의 재활용 연구

미 육군 공병단 미시시피 연구소의 Buck<sup>(6)</sup>는 콘크리트 재활용 가능성에 관한 실험논문을 1973년 Highway Research Record에 발표하였다. 그는 불순물이 섞이지 않은 폐콘크리트를 골재 크기로 파쇄하여 콘크리트용 골재로 사용하였으며, 이 재활용된 콘크리트의 성질을 일반콘크리트와 비교하였다. Buck는 계속된 그의 연구<sup>(7)</sup>에서 재생 콘크리트가 일반콘크리트보다 같은 물-시멘트 비와 슬럼프에서 낮은 항복 강도와 높은 흡수율을 가지며, 반면에 더 높은 동결 저항성을 보인다는 것을 발표하였다. 그는 이 연구에서 러시아의 Gluzhge의 보고서의 내용을 소개하였는데 그중 중요한 일부를 보면: (1) 재생 잔골재의 사용은 시멘트 사용 비율을 크게 증가시키며 (2) 재생콘크리트의 압축강도는 일반콘크리트보다 낮고 (3) 파쇄 콘크리트를 포화되지 않을 정도로 적셔서 사용하면 시멘

트 비율을 줄일 수 있으며 (4) 같은 압축강도에서 재생콘크리트의 휘 강도가 더 높다는 것이었다.

같은 해 MIT의 Frondistou-Yannas는 폐콘크리트 재활용의 경제성에 관한 연구를 Itoh와 함께 발표하였다.<sup>(17)</sup> 여기서 그들은 대부분 대도시 지역에서 24km 이내의 천연 골재자원은 고갈되어 가고 있으며, 따라서 폐콘크리트의 재활용에 의한 재생골재 생산비는 \$2/ton 임에 비하여 천연골재의 구입 비는 \$3.3/ton으로 더 높다고 하였다. 또한 그는 같은 골재를 콘크리트 파쇄 석으로 대치한 재생콘크리트의 역학적 성질을 규명한 연구에서 몰탈과 재생골재의 부착력이 일반콘크리트보다 55-88% 감소되며, 압축강도는 일반콘크리트 강도의 76%내지 그 이상 그리고 탄성계수는 일반콘크리트의 60-100% 정도임을 보여주었다.<sup>(16)</sup>

Ray<sup>(61)</sup>는 국제 공군 페이브먼트학회에서 포틀랜드 시멘트 콘크리트 포장의 재활용에 관한 리뷰논문에서 당시까지 미국에서 수행된 콘크리트 재활용에 관한 각종 사례들을 기술하고 있다. 그중 한 가지는 Washington DC에서는 2개소의 재활용 플랜트가 설립되었으며 지하철 공사에서 나오는 폐콘크리트를 장거리 운송하여 폐기하는 것보다 이곳에서 재활용 할 수 있도록 덤프하는 것이 경제적이었다는 사례 등을 기술하고 있다. 미국의 Highway & Heavy Construction 1978년 1월 호는 이 Ray의 논문을 토대로 한 기사<sup>(62)</sup>를 실고 있다.

D-균열이 많이 나타난 콘크리트 포장을 재활용한 사업이 1980년 미네소타주 교통국에 의해서 최초로 시행되었다. 대상은 이 주 남부에 1955년 건설된 US-25 도로 16마일이었으며 이 도로는 D-균열에 취약한 석회석 골재를 주로 사용하여 건설되어 많은 D-균열이 나타나 있었다. 그들은 이 포장 콘크리트를 파쇄하여 재생 골재는 새로 건설되는 포장의 골재로, 그리고 #4채 통과 분은 기존 기층의 안정 처리 재료로 사용하였다. 그들은 플라이애쉬를 유동화제로 사용하여 수분의 소량을 줄였다. 이 사업으로 부터 그들은 \$725,000를 절약한 것으로 추정하였다.<sup>(31)</sup>

미국 연방도로국(FHWA)의 Forster<sup>(14, 15)</sup>는 Concrete International Journal에 발표한 그의 논문을 통하여 비록 재생콘크리트가 일반콘크리

트보다 성질상 다소 다르기는 하지만 충분한 실험을 통하여 내구성 있고 강한 콘크리트를 제조할 수 있음을 시사하였다. 미국콘크리트포장협회(ACPA)의 Yrajanson<sup>(86)</sup>은 그의 NCHRP 보고서에서 콘크리트 포장에 재건설될 때는 언제나 기존 콘크리트의 재활용을 고려해야 하며 이것이 폐기물 처리에 따른 환경적 문제와 골재 구입비를 줄이는 경제적 문제의 해답이 될 수 있다고 하였다. 그는 또한 파쇄 콘크리트를 재생 굵은 골재로 사용할 때는 배합이나 워커빌리티에 큰 문제가 없으나 재생잔골재를 사용할 때는 이것의 비율이 사용될 잔골재의 30%가 넘지 않도록 제한할 것을 제시했다. 따라서 잔골재를 모두 천연잔골재로 사용하거나 제한된 양의 잔골재를 사용할 경우 재생콘크리트의 강도는 일반콘크리트의 강도와 유사하다고 하였다.

한편 플로리다 대학의 Kibert<sup>(40)</sup>은 미국에서의 콘크리트벽/벽돌 재활용 과정을 소개하는 논문에서 미국의 재활용사업은 아직 어떤 국가적인 규정이 정해져있지 않은 상태이며 주로 환경영향적으로 타당할 때 행하여 진다고 하였다. 캐나다의 Emery는 교통학회에서 캐나다 내의 도로건설폐기물 재활용의 관한 논문<sup>(13)</sup>을 통해 캐나다의 콘크리트 폐기물 재활용 실태를 보고하였다.

#### 4.2 미국의 FHWA 시범 프로젝트(DP #47)

미국의 연방도로국은 1980년대 초 중반 미국의 여러 주를 통하여 포틀랜드시멘트 콘크리트 포장의 재활용 시범사업<sup>(65)</sup> (Demonstration Project Program : DP #47)을 시행하였다. 이 프로젝트는 미국의 Wyoming주 등 10여개 주가 참여하여 1980년대 중반 성공적으로 끝났다. 이에 대한 자세한 내용은 김광우 등<sup>(87)</sup>에 의해 1992년 국내에 소개되었다.

#### 4.3 유럽의 재활용 연구

영국의 Nixon<sup>(53)</sup>은 RILEM 기술위원회 37-DRC의 1차회의 위임으로 콘크리트재활용에 관한 논문을 Materials and Structure에 게재하

였다. 여기에서 그는 그간의 여러 연구를 몇 가지 분야로 구분하여 항목별로 분류하였다. 그는 2차대전 직후 1946년 구소련의 Glushge의 연구와 1948년 독일의 Graf의 연구를 최초의 콘크리트 재활용 사례로 소개하고 있다.

유럽에서 1980년대부터 이 분야에서 가장 많은 연구를 수행 한 사람은 단연 덴마크의 Hansen이라 할 수 있다. 그는 Narud와 1983년에 이 분야에 3편의 연구 논문을 발표하였다. 그중 하나는 파쇄 콘크리트의 굵은 골재로 만든 재생콘크리트의 강도에 관한 연구<sup>(23)</sup>이며 나머지 둘은 재생콘크리트와 실리카흙, 그리고 플라이애쉬를 이용하여 Calcium Silicate 벽돌을 개발한 연구<sup>(29, 30)</sup>이다. 그는 실리카흙을 첨가하여 상당한 압축강도의 증진을 얻었으며 오토클레이브 양생 방법을 사용하였다.

Hansen은 다른 연구자들과도 많은 연구를 수행하였다. 그 중에는 재생골재의 성질이 본래 콘크리트의 혼화제에 따르는 영향<sup>(26)</sup>, 재생콘크리트의 탄성과 건조 수축에 관한 연구<sup>(25)</sup>, 토질의 개질 재료로서 파쇄 잔골재의 재활용에 관한 연구<sup>(24)</sup> 등이 있다. 그리고 그는 1985년 콘크리트 재활용에 관한 State-of-the-Art 보고 논문을 Materials and Structure지에 게재하였으며<sup>(21)</sup>, 1990년 플라이애쉬와 재생골재를 이용하여 시멘트 없이 콘크리트를 생산하는 연구<sup>(22)</sup>를 Cement and Concrete Research誌에 게재하였다. 그는 1992년 RILEM 위원으로서 1945-1989년 사이의 콘크리트 재활용에 관한 세번째 State-of-the-Art 보고서<sup>(23)</sup>를 내었다.

그외에도 덴마크에는 많은 연구자들이 있다. 재활용 재료를 효율적으로 확보할 수 있는 구조물 해체(demolition)방법에 관한 경험적 연구가 Lauritzen과 Jannerup<sup>(47)</sup>에 의하여 수행되었으며 Lauritzen은 이 논문이 발표된 3차 RILEM 심포지움의 에디터를 맡았다. 동명(성)의 Hansen<sup>(20)</sup>은 벽돌 파쇄물을 전체 다 재활용하는 기술을 제시하였다. 그는 진흙벽돌과 몰탈을 한꺼번에 900℃ 이상의 고온으로 가열하여 이를 칼슘 실리카질로 변화시켜 재활용에 사용하는 방법을 발표하였다. 이와 유사하게 진흙벽돌을 다시 구워서 100% 재활

용하는 연구를 Kristensen<sup>(46)</sup>이 발표하였다. Gottfredsen과 Thogersen<sup>(19)</sup>는 악조건하에서의 콘크리트 재활용에 관한 연구에서 플라이에쉬가 알칼리 반응 등을 저지시켜 준다고 보고하였다.

독일의 Schulz는 1988년 독일의 폐콘크리트 재활용에 관한 논문<sup>(69)</sup>을 발표하였으며 그는 또한 네덜란드의 Hendricks와 벽돌 파쇄 재료를 재활용하는 연구<sup>(71)</sup>를 수행하였다. 콘크리트와 달리 파쇄 벽돌로 부터 얻어진 골재는 그 특성이 다르며 따라서 그것의 재활용에 따른 연구도 별도로 취급되었다. 여기서 말하는 벽돌이란 건물의 벽체 재료로 사용된 시멘트 벽돌, 시멘트 블록, 경량 벽돌, 붉은 벽돌 등을 모두 포함하며 경우에 따라서 타일 부스러기도 포함된다. 그들은 결론에서 독일이나 네덜란드에서 벽돌 파쇄재료를 콘크리트용 재료로 사용할 수 있도록 규정하고 있으나 사용되는 재료의 다양성 때문에 철저한 시험을 거쳐야 한다고 언급하였다. 또한 그는 독일에서 건물 파쇄물을 콘크리트용 골재로 사용하는 과정을 소개하였다.<sup>(70)</sup> 독일의 DIN 4226 Part 2는 벽돌 재활용 재료에 불순물의 한계치를 규정하고 있다. 벽돌 재활용 콘크리트는 크리프가 큰 것으로 나타났다. 한편 Klöpper<sup>(44)</sup>는 철도침목 받침용 콘크리트를 재활용하는 특수기술을 그리고 Rahlwes<sup>(39)</sup>는 철근 콘크리트의 재활용을 환경과 경제적 측면에서 분석하였다.

벨지움에서는 Simons와 Henderieckx<sup>(72)</sup>가 재활용 재료를 보다 양질로 그리고 많이 확보할 수 있는 구조물 해체방법을 제시하는 연구를 수행하였다. Vyncke와 Rousseau<sup>(79)</sup>는 벨지움의 현재의 철거물 재활용실태와 미래의 발전에 대한 연구를 수행하였다. 또한 De Pauw<sup>(11)</sup>는 재해후 파괴된 구조물의 효율적인 철거 방법과 재활용에 대한 연구를 수행하였다.

영국에서는 Collins<sup>(9)</sup>가 영국에서 해체 폐기물의 약 40%가 재활용되고 있으나 그중 대부분은 채움재 등과 같은 저급의 재료로 쓰이며 콘크리트 등과 같은 고급재료로의 사용은 미약하다고 하였다. 그는 그 이유를 적절한 규정의 부족에 기인한다고 지적하였다. Wainwright 등<sup>(80)</sup>은 재생 굵은골재와 잔골재를 사용한 재생콘크리트의 성능을 고유동

화재, Pulverised Fuel Ash(PFA) 및 천연모래를 사용하여 개선하는 연구를 수행하였다. 에이레의 O'Mahony는 영국의 Millgan<sup>(55)</sup>과 함께 파쇄 폐콘크리트의 재활용을 위한 연구를 수행하였다.

네덜란드의 Barth<sup>(3)</sup>는 건설폐기물의 재활용에 따른 경제적, 사회적, 정치적면에서의 문제점들을 기술하고 있다. 한편 네덜란드의 재활용 규정 초안에는 종이, 플라스틱, 유리 등 불순물이 중량과 용적으로 1% 미만이어야 한다고 규정하고 있다.

프랑스에서는 Merlet와 Pimienta<sup>(48)</sup>가 재생콘크리트의 역학적 특성과 물리-화학적 특성을 연구하였는데 그들은 특히 재생콘크리트는 건조수축이 크며, 물의 이동과 탄산화(carbonation)의 비율도 크다고 지적하였다. 또한 Morel 등은 스페인의 Mana, 벨지움의 Rousseau와 함께 두 나라의 재생골재 사용지침을 제시하는 연구를 수행하였다. 그들은 재생골재를 얻을 수 있는 폐기물의 선별방법, 재생골재의 품질을 측정하기 위한 시험방법 등 실용적인 기준을 제시하였다.

그외 오스트리아의 Sommer<sup>(73)</sup>는 콘크리트를 도로포장용 콘크리트로 재활용하는 연구를, 유고의 Pakvor 등<sup>(57)</sup>도 콘크리트 폐기물의 재활용 연구를 수행하였다.

1988년 RILEM 2차 심포지움에 유럽에서는 앞서 언급한 논문외에도 덴마크의 Busch 등<sup>(8)</sup>, Hansen 등<sup>(27)</sup>, Puckman 등<sup>(58)</sup>, 영국의 Mulheron 등<sup>(50, 51)</sup>, Trevorrow 등<sup>(78)</sup>, 벨지움의 Gorle<sup>(18)</sup>, 불란서의 Bauchard 등<sup>(4)</sup> 여러 학자들이 참가하였다.

#### 4.4 아세아에서의 재활용 연구

사우디 아라비아의 Akhtaruzzaman과 Hasnat<sup>(1)</sup>는 파쇄 벽돌을 재활용한 콘크리트에 관한 연구에서 구운벽돌(국내의 붉은벽돌과 유사)을 파쇄하여 얻은 최대치수 19mm의 굵은골재를 콘크리트 제조에 사용하였다. 이 콘크리트는 탄성계수가 30% 정도 일반콘크리트보다 낮은 반면 인장강도는 11% 높았고 중량이 보통 콘크리트와 경량 콘크리트의 중간 정도였다. 또한 사우디 아라비아의 Rasheeduzzafar와 Khan<sup>(60)</sup>는 새로운 골재의 자원으로써의 콘크리트 재활용에 관한 연구에서



W/C 비율의 변화에 따른 재생콘크리트의 압축 강도를 일반콘크리트와 비교하였다.

싱가포르의 Sri Ravindrarajah는 몇몇 연구자들과 이 분야에서 여러편의 연구논문을 발표하였다.<sup>(56, 74, 77)</sup> 그는 파쇄 콘크리트를 곱은골재로 사용한 재생콘크리트의 성질에 관한 연구<sup>(75)</sup>에서 강도와 탄성계수 외에 충격저항, 마모시험 등을 수행하였다. Ong과의 재생콘크리트의 역학적 성질과 파괴 에너지에 관한 연구<sup>(56)</sup>에서 재생콘크리트의 낮은 강도와 강성은 재생골재의 부착에 기인한 파괴 에너지의 감소 때문으로 추정하였다. Tam과의 폐콘크리트를 재생골재로 이용하는 연구<sup>(77)</sup>에서 재생골재의 사용은 콘크리트의 여러가지 성질 저하를 유발하나 PFA를 사용하여 완화시킬 수 있음을 시사하였다. 그리고 현장에서 재생콘크리트의 강도를 평가하는 연구<sup>(74)</sup>에서 재생골재의 강도 측정을 위하여 초음파 박동속도와 반향수를 이용한 결과를 발표하였다.

한편 인도의 Bairagi 등<sup>(2)</sup>은 재생콘크리트의 배합설계에 관한 연구에서 재생골재를 사용함에 따른 영향 요인들을 찾아 그 실험적 관계를 분석하고 그에 따른 배합 설계법을 개발하였다. 이 방법에 의하면 기존의 방법보다 약 10%정도 시멘트가 더 요구되는 것으로 나타났다.

1988년 11월 7-11일 사이에 동경의 일본 대학교에서는 철거 폐기물 재활용에 관한 국제 심포지움이 일본 건설성과 RILEM 주체 하에 구조물의 철거 방법과 철거물 재료의 재활용에 관한 두 부분으로 나뉘어 개최되었다. 이 심포지움에서는 일본 대학의 Kasai 교수를 비롯한 일본의 여러 연구자들에 의해 다수의 논문<sup>(32, 35, 37, 39, 41, 45, 49, 52, 81, 82, 85)</sup>을 비롯해 총 30편의 논문이 발표되었다. 유럽에서는 앞서 언급한 독일 Schulz 등 많은 연구자들이 참여하여 각기 논문을 발표하였으며 아세아에서는 싱가포르의 Sri Ravindrarajah가 참가하였다. 이 학회의 발표논문을 분석 하여보면 크게, 1) Methodology and Practice for Recycling Cement, Concrete and Demolition Wastes, 2) Evaluation of Properties and Strength of Recycled Concretes, 3) Use of Demolished Materials for

Road Base Materials, 4) Use of Recycled Concrete for Concrete Pavement Materials, 5) Recycling for Reinforced Concrete 등으로 분류할 수 있다.

일본은 덴마아크에서 열린 제3차 RILEM 심포지움에도 여러편의 논문을 발표하였다. 이중 Kasai<sup>(36)</sup>는 일본에서의 철거된 콘크리트의 재활용에 관한 현재 실태와 재활용 지침안을 제시하였다. 그리고 일본에서는 Kikuchi 등<sup>(42)</sup>, Yagishita 등<sup>(84)</sup>, Sano 등<sup>(68)</sup>, Yanagi 등<sup>(83)</sup>이 콘크리트의 재활용에 관한 논문을 발표하여 그들 나라의 높은 관심도를 보였다. 그외에도 일본 국내에서는 이에 관한 많은 연구와 실용화가 이루어지고 있는 것으로 보고되고 있다.

## 5. 국내의 연구사

지금까지 외국에서의 연구사에 의하면 선진국에서는 일찍이 환경과 자원으로갈에 대한 우려속에 콘크리트 재활용에 대한 기초연구는 물론 실용화를 위한 연구가 이미 진행되고 있다. 그를 위해서 그들은 규정의 제정 및 법제화, 강도증진을 위한 연구, 철근콘크리트에의 사용, 콘크리트 뿐 아니라 벽돌의 재활용과 함께 이미 시범사업으로의 현장타설 및 그 성능판정의 단계에 들어가 있다. 하지만 국내에서는 1986년 충남대 김무한 교수 등의 논문<sup>(91)</sup>이 대한건축학회에서 발표되었으나, 그 이후 1990년대 초반까지 대외적인 연구발표는 매우 제한되었었다. 그러나 최근 2-3년 사이에 급격한 관심의 증가와 함께 1994년 1월 환경처와 건설부 통합고시에 의해 대형 공사에서 콘크리트 등 건설 폐기물의 재활용이 20%까지 의무화되면서 이에 대한 연구가 증가하고 있다.

국내 연구자들의 1990년대 연구를 정리하여 보면, 강원대의 김광우 등<sup>(43)</sup>은 재생콘크리트 내에서 폐콘크리트 재생골재의 성능에 관한 연구를 1992년 9월 미국토목학회(ASCE) 건설폐기물 재활용 분과에서 발표하였다. 여기서는 재생골재와 새로운 몰탈과의 부착상태 관측을 위하여 재생골재를 염색하여 파괴후 그 파쇄현을 조사하였고, 재생콘크리트의 파괴특성을 고찰하였다. 또한 그는 재생

콘크리트의 강도특성에 관한 연구<sup>(88)</sup>에서 재생콘크리트는 압축강도와 탄성계수가 낮고 변형률이 커서 구조재료로 사용시 문제가 되는 점을 지적하였다. 그리고 재생콘크리트의 변형특성과 동결융해 저항특성에 대한 연구<sup>(89)</sup>도 같은 해 발표하였다. 1994년 콘크리트학회 학술발표에서는 플라이애쉬를 사용한 재생콘크리트의 특성에 관한 연구<sup>(93)</sup>를 발표하였다.

1993년 봄 콘크리트학회 학술발표에는 충남대의 김무한 교수 및 청주대의 한천구 교수 연구진에 의한 6편의 콘크리트 재활용 연구가 발표되어 관심을 끌었다. 여기서는 재생콘크리트를 구조용 콘크리트로 적용함에 있어 타당성 연구<sup>(92, 97)</sup>, 재생골재 혼합조건이 재생콘크리트의 공학적 특성에 미치는 연구<sup>(94, 98)</sup> 및 재생콘크리트의 강도 조기추정 및 비파괴 실험의 적용성에 관한 연구<sup>(90, 95)</sup>가 수행되었다. 이 일련의 연구에서 재생골재를 구조용 콘크리트 재료로서의 사용가능성, 유동화제 등의 사용으로 워커빌리티의 향상, 물-시멘트비를 낮추어서 압축강도의 향상, 동탄성계수의 측정 등에 대한 결과가 발표되었다. 같은해 가을 콘크리트학회 학술발표회를 통해 상기 연구진의 연구논문이 2편<sup>(96, 99)</sup> 더 발표되었으며 이는 재생 콘크리트의 강도조기추정 및 품질관리를 위한 비파괴 검사법의 적용성에 관한 것이었다.

이상 국내·외 학회지 및 학술발표회지에 게재된 국내 연구자들의 논문을 중심으로 조사한 바에 의하면 내용상으로 대부분 재활용을 위한 기초연구이므로 외국에 비해 아직 실용화 연구가 미흡한 실정이다. 따라서 국내에서는 이 분야에 보다 많은 관심과 연구노력이 필요한 것으로 사료되며, 저자들은 본 기사의 내용 및 인용분헌이 국내의 타연구자 및 관계자들에게 도움이 될 수 있기를 바라는 마음이다.

## 참 고 문 헌

1. Akhtaruzzaman, A. A. and Hasnat, A. (1983), "Properties of Concrete Using Crushed Brick as Aggregate," Concrete Int'l, Feb., pp.58-63.
2. Bairagi, N. K., Vidyadhara, H. S. and Rav-

- ende, K. (1990), "Mix Design Procedure for Recycled Aggregate Concrete," Construction & Building Materials, Vol. 4, No.4, December, pp.188-193.
3. Barth, H. P. (1994), "Financial, Economical and Political Aspects of the Reuse of Construction and Demolition Waste," Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London.
4. Bauchard, M. (1988), "The Use in Roads of Aggregates made from Demolition Materials," Proc., 2nd Int'l RILEM Symp., Ed. by Kasai, Chapman and Hall, pp.719-725.
5. Bergren, J. V. and Britson, R. A. (1977), "Portland Cement Concrete Utilizing Recycled Pavement," Iowa Department of Transportation, Division of Highways, Office of Materials, January.
6. Buck, A. D. (1973), "Recycled Concrete," Highway Research Record 430, HRB, pp.1-8.
7. Buck, A. D. (1977), "Recycled Concrete as a Source of Aggregate," ACI J., Title No.74-22, May, pp.212-219.
8. Busch, C. (1988), "Crushed Concrete used as Basecourse Material on Runway 04R-22L at Copenhagen Airport," Proc., 2nd Int'l RILEM Symp., Ed. by Kasai, Chapman and Hall, pp. 766-774.
9. Collins, R. J. (1994), "Reuse of Demolition Materials in Relation to Specifications in the U. K.," Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London.
10. "Crushing converts rubble into subbase aggregate," (1971), Roads and Streets, May.
11. De Pauw, C. (1994), "Demolition and Reuse Following Disaster," Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London.
12. "Disaster Planning, Structural Assessment, Demolition and Recycling," (1994), Report of RILEM Technical Committee121-DRG, Ed. by C. D. Pauw and E. K. Lauritzen, E & FN Spon, London.
13. Emery, J. (1993), "Use of Waste, Surplus Materials and By-Products in Transportation Construction," Paper Presented at Annual Conf.

- of Transportation Association of Canada, Ottawa, Canada, Sept.
14. Forster, S. W. (1985), "The use of recycled PCC as aggregates in PCC pavements," FHWA, Office of Eng. and Highway Operation Research Development, Washington, D.C.
  15. Forster, S. W. (1986), "Recycled Concrete as Aggregate," *Concrete Int'l*, Oct. pp.34-40.
  16. Frondistou-Yannas, S. (1977), "Waste Concretes as Aggregate for New Concrete," *ACI J.*, August, pp.373-376.
  17. Frondistou-Yannas, S. and Itoh, T. (1977), "Economic Feasibility of Concrete Recycling," *J. of Structural Eng. Div., ASCE*, April, pp. 885-899.
  18. Gorle, D. and Saeys, L. (1988), "Reuse of Crushed Concrete as a Road Base Material," *Proc., 2nd Int'l RILEM Symp., Ed. by Kasai, Chapman and Hall*, pp.736-745.
  19. Gottfredsen, F. R. and Thogersen, F. (1994), "Recycling of Concrete in Aggressive Environment," *Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London*.
  20. Hansen, H. (1994), "A Method for Total Reutilization of Masonry by Crushing, Burning, Shaping and Autoclaving," *Proc., 3rd Int'l RILEM Symp., Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London*, pp.407-410.
  21. Hansen, T. C. (1986), "Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete: Second State-of-the-Art Report Developments 1945-1985," *Materials and Structures*, 19(111), June, pp.201-246.
  22. Hansen, T. C. (1990), "Recycled Concrete Aggregate and Fly Ash Produce Concrete without Portland Cement," *Cement and Concrete Research*, Vol.20, pp.355-356.
  23. Hansen, T. C. (1992), "Recycling of Demolished Concrete and Masonry," Part 1, Report of Technical Committee 37 - DRC, RILEM, E & FN Spon, London, pp.1-160.
  24. Hansen, T. C. and Angelo, J. W. (1986), "Crushed Concrete Fines Recycled for Soil Modification," *ACI J.*, Title No.83-87, pp. 983-987.
  25. Hansen, T. C. and Boegh, E. (1985), "Elasticity and Drying Shrinkage of Recycled-Aggregate Concrete," *ACI J.*, Title No.82-56, 648-652.
  26. Hansen, T. C. and Hedegard, S. E. (1984), "Properties of Recycled Aggregate Concrete as Affected by Admixtures in Original Concretes," *ACI J.*, Title No.81-3, pp.21-26.
  27. Hansen, T. C. and Marga, M. (1988), "Strength of Recycled Concrete Made from Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregate," *Proc., 2nd Int'l RILEM Symp., Ed. by Kasai, Chapman and Hall*, pp.605-612.
  28. Hansen, T. C. and Narud, H. (1983), "Strength of Recycled Concrete made from Crushed Concrete Coarse Aggregate," *Concrete Int'l*, Jan., pp.79-83.
  29. Hansen, T. C. and Narud, H. (1983), "Recycled Concrete and Fly Ash make Calcium Silicate Bricks," *Cement and Concrete Research*, Vol. 13, No. 4, pp.505-510.
  30. Hansen, T. C. and Narud H. (1983), "Recycled Concrete and Silica Fume make Calcium Silicate Bricks," *Cement and Concrete Research*, Vol. 13, No. 5, pp.626-630.
  31. Halverson, A. D. (1985), "Recycling Portland Cement Concrete Pavement," Minnesota Department of Transportation, Office of Research and Development.
  32. Ikeda, T., Yamane, S. and Sakamoto, A. (1988), "Strength of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate," *Proc., 2nd Int'l RILEM Symp., Ed. by Kasai, Chapman and Hall*, pp.585-594.
  33. Kaga, H., Kasai, Y., Takeda, K. and Kemi, T. (1988), "Properties of Recycled Aggregate from Concrete," *Proc., 2nd Int'l RILEM Symp., Ed. by Kasai, Chapman and Hall*, pp. 690-698.
  34. Kakizaki, M., Harada, M. and Motoyasu, H. (1988), "Manufacturing of Recovered Aggregate Through Disposal and Recovery of Demolished Concrete Structures," *Proc., 2nd Int'l RILEM Symp., Ed. by Kasai, Chapman and Hall*, pp.699-708
  35. Kakizaki, M., Harada, M., Soshiroda, T., Kubota, S., Ikeda, T. and Kasai, Y. (1988),

- "Strength and Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete," Proc., 2nd Int'l RILEM Symp., Ed. by Kasai, Chapman and Hall, pp. 565-574.
36. Kasai, Y. (1994), "Guidelines and The Present State of the Reuse of Demolished Concrete in Japan," Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London.
  37. Kasai, Y., Hisaka, M. and Yanagi, K. (1988), "Durability of Concrete Using Recycled Coarse Aggregate," Proc., 2nd Int'l RILEM Symp., Ed. by Kasai, Chapman and Hall, pp. 623-632.
  38. Kawai, T., Wastanabe, M. and Nagataki, S. (1988), "Preplaced Aggregate Concrete made from Demolished Concrete Aggregate," Proc., 2nd Int'l RILEM Symp., Ed. by Kasai, Chapman and Hall, pp.680-689.
  39. Kawamura, M. and Torii, K. (1988), "Reuse of Recycled Concrete Aggregate for Pavement," Proc., 2nd Int'l RILEM Symp., Ed. by Kasai, Chapman and Hall, pp.726-735.
  40. Kibert, C. J. (1994), "Concrete /Masonry Recycling Progress in the USA," Proc. of 3rd Intern'l RILEM Symp., Ed. by Lauritzen, Odense, Denmark, pp.83-92.
  41. Kikuchi, M., Mukai, T. and Koizumi, H. (1988), "Properties of Concrete Products Containing Recycled Aggregate," Proc., 2nd Int'l RILEM Symp., Ed. by Kasai, Chapman and Hall.
  42. Kikuchi, M., Yasunaga, A. and Ehara, K. (1994), "The Total Evaluation of Recycled Aggregate and Recycled Concrete," Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London.
  43. Kim, K. W., Lee, B. H., Park, J. S. and Doh, Y. S. (1992). "Performance of Crushed Waste Concrete as Aggregate in Structural Concrete," Utilization of Waste Materials in Civil Eng. Construction, ASCE, New York.
  44. Klöpffer, R. (1994), "Special Techniques for the Recycling of Concrete Base Plate (Railway Slippers)," Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London.
  45. Kobayashi, S. and Kawano, H. (1988), "Properties and Usage of Recycled Aggregate Concrete," Proc., 2nd Int'l RILEM Symp., Ed. by Kasai, Chapman and Hall, pp.547-556.
  46. Kristensen, P. (1994), "Recycling of Clay Bricks," Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London.
  47. Lauritzen, E. K. and Jannerup, M. (1994), "Guidelines and Experience from the Demolition of House in Connection with Oresund Link between Denmark and Sweden," Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London.
  48. Merlet, J. D. and Pimienta, P. (1994), "Mechanical and Physico-Chemical Properties of Concrete Produced with Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregates," Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London.
  49. Mukai, T. and Kikuchi, M. (1988), "Properties of Reinforced Concrete Beams Containing Recycled Aggregate," Proc., 2nd Int'l RILEM Symp., Ed. by Kasai, Chapman and Hall, pp. 670-679.
  50. Mulheron M. (1988), "The Recycling of Demolition Debris: Current Practice, Products and Standards in the United Kingdom," Proc., 2nd Int'l RILEM, Symp. Ed., by Kasai Chapman and Hall, pp.510-519.
  51. Mulheron, M. and O'Mahony, M. (1988), "The Durability of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete," Proc., 2nd Int'l RILEM Symp., Ed. by Kasai, Chapman and Hall, pp.633-642.
  52. Nishibayashi, S. and Yamura, K. (1988), "Mechanical Properties and Durability of Concrete from Recycled Coarse Aggregate Prepared by Crushed Concrete," Proc., 2nd Int'l RILEM Symp., Ed. by Kasai, Chapman and Hall, pp.652-659.
  53. Nixon, P. J. (1978), "Recycled Concrete as an Aggregate for Concrete - a Review, Materials and Structures, Vol. 11, No. 65, pp.371-378.
  54. "Old pavement recycled into new subbase


- (1975), "Concrete Construction, Oct., pp. 441-442.
55. O'Mahony, M. M. and Milligan, G. W. E. (1991), "Recycling of Construction Waste," Waste Materials in Construction, Proc., Int'l Conf. on environmental implication of construction with waste materials, Elsevier Amsterdam, pp.225-231.
  56. Ong, K. C. G. and Sri Ravindrarajah, R. (1987), "Mechanical Properties and Fracture Energy of Recycled-Aggregate Concrete," SEM /RILEM Int'l Conf. on Fracture of Concrete and Rock, Houston, TX, June, pp. 150-158.
  57. Pakvor, A. Muravljov, M. and Kovacevic, T. (1994), "Exploration of Concrete and Structural Concrete Elements Made of Reused Masonry," Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London.
  58. Puckman, K. and Henrichsen, A. (1988), "Reuse of Concrete Pavements," Proc., 2nd Int'l RILEM Symp., Ed. by Kasai, Chapman and Hall, pp.746-755.
  59. Rahlwes, K. (1994), "Recycling of Reinforced Structures and Buildings Using Composite Construction: Approach to an Environmental-Economic Assessment," Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London.
  60. Rasheeduzzafar, and Khan, A. (1984), "Recycled Concrete - A Source for New Aggregate," Cement, Concrete, and Aggregates, Vol. 6, No. 1, pp.17-27.
  61. Ray, G. K. (1978), "Recycling Portland Cement Concrete Pavement," Paper for Worldwide Air Force Pavement Conf., Panama City Beach, Oct.
  62. "Recycle Old Concrete? It can save you money," (1978), Highway & Heavy Construction, January pp.30-31.
  63. "Recycled rubble saves contractors money," (1973), Roads & Streets, April, pp.80 and 83.
  64. "Recycled Slab is New Runway Base," (1977), Highway & Heavy Construction, July, pp. 30-33.
  65. "Recycling Portland Cement Concrete," (1985), Demonstration Project Program: DP #47, FHWA, US Department of Transportation.
  66. "Recycling Roads and Buildings with Portable Plants," (1973), Pits & Quarry, Feb., pp. 90-91, 106.
  67. Sadler, T. B. (1973), "A Crushing Success: Aggregate from Concrete," Public Works, Apr., pp.72-73.
  68. Sano, M., Yagishita, F. and Yamada, M. (1994), "Recycling Powdered Concrete Waste," Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London.
  69. Schulz, R. R. (1988), "Concrete with Recycled Rubble - Developments in West Germany," Proc., 2nd Int'l RILEM Symp., Ed. by Kasai, Chapman and Hall, pp.500-509.
  70. Schulz, R. R. (1994), "The Processing of Building Rubble as Concrete Aggregate in Germany," Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London.
  71. Schulz, R. R. and Hendricks, C. F. (1992), "Recycling of Masonry Rubble," Part 2, Report of Technical Committee 37 - DRC, RILEM, E & FN Spon, London, pp.161-255.
  72. Simon, B. P. and Henderickx, F. (1994), "Guidelines for Demolition with Respect to the Reuse of Building Masterials," Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London.
  73. Sommer, H. (1994), "Recycling of Concrete for the Reconstruction of the Concrete Pavement on the Vienna-Salzburg Mortorway," Proc., 3rd Int'l RILEM Symp, Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London.
  74. Sri Ravindrajah, R., Loo, T. H. and Tam, C. T. (1988), "Strength Evaluation of Recycled - Aggregate Concrete by in-situ Tests," Materials and Structures, 21 (124), July, pp. 289-295.
  75. Sri Ravindrajah, and Tam, C. T. (1985), "Properties of Concrete Made with Crushed Concrete as Coarse Aggreggate," Magazine of Concrete Research, Vol. 37, No. 130, March, pp.29-38.
  76. Sri Ravindrajah, and Tam, C. T. (1988a),

- "Recycling Concrete as Fine Aggregate in Concrete," *The Int'l J. of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 9, No. 4, November, pp.235-241.
77. Sri Ravindrajah, and Tam, C. T. (1988b), "Method Improving the Quality of Recycled Aggregate Concrete," *Proc., 2nd Int'l RILEM Symp.*, Ed. by Kasai, Chapman and Hall, pp. 575-584.
  78. Trevorrow, A. Joynes, H. and Wainwright, P. J. (1988), "Recycling of Concrete and Demolition Waste in the U. K.," *Proc., 2nd Int'l RILEM Symp.*, Ed. by Kasai, Chapman and Hall, pp.520-526.
  79. Vyncke, J. and Rousseau, E. (1994), "Recycling of Construction and Demolition Waste in Belgium: Actual Situation and Futrue Evolution," *Proc., 3rd Int'l RILEM Symp*, Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London.
  80. Wainwright, P. J., Trevorrow, A., Yu, Y. and Wang, Y. (1994), "Modifying the Performance of Concrete Made with Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregate," *Proc., 3rd Int'l RILEM Symp*, Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London.
  81. Yamato, T., Emoto, Y., Soeda, M. and Sakamoto, Y. (1988), "Some Properties of Recycled Aggregate Concrete," *Proc., 2nd Int'l RILEM Symp.*, Ed. by Kasai, Chapman and Hall, pp.634-651.
  82. Yanagi, K. and Hisaka, M. (1988), "Effect of Impurities in Recycled Coarse Aggregate Upon a Few Properties of the Concrete Produced with it," *Proc., 2nd Int'l RILEM Symp.*, Ed. by Kasai, Chapman and Hall, pp.613-622.
  83. Yanagi, K., Hisaka, M. and Kasai, Y. (1994), "Physical Properties of Recycled Concrete Using Recycled Coarse Aggregate Made of Concrete with Finishing Materials," *Proc., 3rd Int'l RILEM Symp*, Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London.
  84. Yagishita, F., Sano, M. and Yamada, M. (1994), "Behavior of Reinforced Concrete Beams Containing Recycled Aggregate," *Proc., 3rd Int'l RILEM Symp*, Ed. by Lauritzen, E & FN Spon, London.
  85. Yoshikane, T. (1988), "The Instances of Concrete Recycled for Base Course Materials in Japan," *Proc., 2nd Int'l RILEM Symp.*, Ed. by Kasai, Chapman and Hall, pp.756-765.
  86. Yrjanson, W. A. (1989), "Recycling of Portland Cement Concrete Pavements," *NCHRP Syn. 154, TRB*, December.
  87. 김광우, 박제선. (1992). "폐콘크리트의 재활용-미국 FHWA 시범 프로젝트 (DP #47)의 소개," *대한토목학회지* 10월호.
  88. 김광우, 연규석, 이병덕. (1992) "재생콘크리트의 강도특성상의 문제점," *콘크리트학회 학술발표회 논문집 제 7집*, 충남대학교.
  89. 김광우, 이봉학, 도영수. (1992). "재생콘크리트의 동결융해 저항성과 변형특성," *콘크리트학회 논문집*, 제 4권 4호.
  90. 김기철, 윤기원, 한천구, 김무한. (1993), "재생골재 콘크리트의 강도조기추정 및 비파괴시험 적용성에 관한 연구 (1) - 제1보 역학적 성질 및 강도조기추정," *콘크리트학회 학술발표회 논문집 제 8집*, 건국대학교.
  91. 김무한 외. (1986), "잔·굵은골재로서 폐기콘크리트를 사용한 콘크리트에 관한 실험적 연구(제1보 - 제4보)," *대한건축학회 학술발표회 논문집 제6권 제1호*.
  92. 김진만, 유광우, 남상일, 김무한. (1993), "재생골재 콘크리트의 구조체 적용성에 관한 실험적 연구(제2보)," *콘크리트학회 학술발표회 논문집 제 8집*, 건국대학교.
  93. 김진형, 김광우, 이봉학, 박제선. (1994), "플라이애쉬를 사용한 구조용 재생 콘크리트의 역학적 특성," *콘크리트학회 학술발표회 논문집 제 11집*, 동국대학교.
  94. 남상진, 이상수, 유광우, 박정일, 김진만, 김무한. (1993), "재생골재 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 재생골재 혼합조건의 영향에 관한 실험적 연구 (제 2보)," *콘크리트학회 학술발표회 논문집 제 8집*, 건국대학교.
  95. 윤기원, 김기철, 한천구, 김무한. (1993), "재생골재 콘크리트의 강도조기추정 및 비파괴시험 적용성에 관한 연구 (I) - 제2보 비파괴시험," *콘크리트학회 학술발표회 논문집 제8집*, 건국대학교.
  96. 윤기원, 최청각, 한천구, 김무한. (1993), "재생골재 콘크리트의 강도조기추정 및 비파괴시험 적용성에 관한 연구 (II) - 제2보 비파괴 시험", *콘크리트학회 학술발표회 논문집 제9집*, 전남대학교.

97. 이상수, 최민수, 김진만, 남상일, 김무한. (1993), “재생골재 콘크리트의 구조체 적용성에 관한 실험적 연구(제 1보).” 콘크리트학회 학술발표회 논문집 제 8집, 건국대학교.

98. 최진성, 윤병수, 임정수, 김진만, 남상일, 김무한. (1993), “재생골재 콘크리트의 광학적 특성에 미치는 재생골재 혼합조건의 영향에 관한 실험적

연구(제 1보).” 콘크리트학회 학술발표회 논문집 제8집, 건국대학교.

99. 최청각, 윤기원, 한천구, 김무한. (1993), “재생골재 콘크리트의 강도조기추정 및 비파괴실험 적용성에 관한 연구(Ⅱ) - 제1보 역학적 성질 및 강도조기추정.” 콘크리트학회 학술발표회 논문집 제9집, 전남대학교. 

### 전문서적 보급 안내

## “콘크리트 구조물의 비파괴 검사 및 안전진단”

— 본 학회 제 2 회 기술강좌 교재 —

- 주요내용 :
  - 비파괴검사의 종류, 특징 및 적용방법(이리형)
  - 반발경도, 초음파 및 탄성파법에 의한 비파괴 검사방법(최계식)
  - 전자파, 방사선, 적외선 등을 이용한 비파괴 시험(임창덕)
  - 콘크리트 구조물에 대한 비파괴검사의 응용 및 평가(권영웅)
  - 콘크리트 건축구조물의 안전진단 및 평가(김상식)
  - 콘크리트 토목구조물의 안전진단 및 평가(오병환)
  - 콘크리트 구조물의 유지관리 및 보수, 보강공법(박승범)
  - 콘크리트 내구성 향상방법 및 관련 시험방법(정재동)
- 보급가격 : 20,000원
- 문의처 : 546-5384, 543-1916