특 집

‖ 콘크리트의 리사이클링 ‖

재생콘크리트의 특성

- Properties of Recycled Aggregate Concrete -

김무한* *Kim, Moo Han*

김진만** *Kim, Jin Man*

1. 개 요

일본 건설성의 잠정 안에서는 재생골재의 품질기준에 부가하여 재생골재 콘크리트의 종류를 〈표 1〉과 같이 콘크리트의 사용용도에 따라 분류하였다. 이들 용도에 대응하여 합리적으로 사용할 수 있는 강도 목표는 다음과 같다.

- 재생골재 콘크리트 Ⅰ : 180 ~ 210 kgf/cm^2
- 재생골재 콘크리트 Ⅱ : 160 ~ 180 kgf/cm^2
- 재생골재 콘크리트 Ⅲ : 160 kgf/cm^2 미만

표 1 재생콘크리트의 종류

종류	재생골재 콘크리트의 용도	재생굵은골재	재생잔골재
Ⅰ	철 근콘크리트 무근 콘크리트 등	재생굵은골재 1종	보통골재
Ⅱ	무근 콘크리트 등	재생굵은골재 2종	보통 또는 재생 잔골재 1종
Ⅲ	버림 콘크리트 등	재생굵은골재 3종	재생골재 2종

〈표 2〉에 재생골재 콘크리트 이용용도의 예를 나타내었다. 물론 재생골재 콘크리트 Ⅰ을 Ⅱ 또는 Ⅲ의 용도로, Ⅱ를 Ⅲ의 용도로 사용하는 것은 전혀 문제가 없다. 이 표에 나타낸 골재의 구분이나 규격치, 이용방법은 연구가 진행되면 변경될 가능성 있지만 현재로서는 일반적으로 수용되고 있는 것이므로 이러한 분류방법을 중심으로 재생콘크리트의 물성에 대하여 고찰하고자 한다.

표 2 재생콘크리트의 적용구조물 예

종류	구 조 물
Ⅰ	교량하부, 옹벽, 터널 라이닝 등
Ⅱ	콘크리트 블록, 도로부속물 기초, 집수정 기초, 중력식 옹벽, 중력식 교대, 중매립 콘크리트, 상방댐 및 그 부속공 등
Ⅲ	버림 콘크리트, 고름 콘크리트, 강도가 필요 없는 채움 콘크리트, 기타 건축물의 비구조체

2. 굳지않은 상태의 재생콘크리트 특성

2.1 단위수량

재생골재는 흡수율이 크기 때문에 사용 전에 프리웨팅하는 것이 원칙이나 이와 같은 조치를 한 경우에도 골재 입형이 나쁘기 때문에 일반적으로 워커빌리티가 나쁘게 되는 경향이 많아 보통 콘크리트에 비해 동일한 슬럼프를 얻기 위해서는 단위수량이 많아지는 경향이 있다. 따라서, 일반적으로 재생골재는 쇄석상으로 입도 및 입형이 불량하고 실적률이 낮기 때문에 보통골재를 사용하는 경우에 비하여 동일수준의 워커빌리티를 확보하기 위한 단위수량이 25 kg 정도 증가하게 된다.

12개의 연구기관에서 실시한 각종 콘크리트의 슬럼프와 단위수량과의 관계를 나타낸 〈그림 1〉에 의하면 12 cm 이하의 저슬럼프의 콘크리트에서는 콘크리트 종류에 의한 단위수량의 차는

* 정회원, 충남대학교 건축공학과 교수
** 정회원, 공주대학교 건축공학과 교수

작지만 18 cm 이상의 고슬럼프의 콘크리트에서는 명확한 차가 보여지고 있다. 재생골재의 사용량이 많은 콘크리트일수록 단위수량이 커지는데 이를 슬럼프 20 cm의 콘크리트에서 비교해보면 보통콘크리트에서 약 190 ℓ/m^3인 것에 비하여 재생콘크리트 I종 및 II종에서는 8 및 12 ℓ/m^3 증가하고, 재생 III종 콘크리트에서는 22 ℓ/m^3 증가하고 있다.

이와 같이 콘크리트의 단위수량이 많아지는 것은 콘크리트의 건조수축을 증가시켜 균열을 발생시키는 원인이 되기 때문에 된 비빔 콘크리트의 사용, 유효한 고성능 감수제 사용 등에 의해 가능한 한 단위수량을 저감시키는 것이 바람직하다.

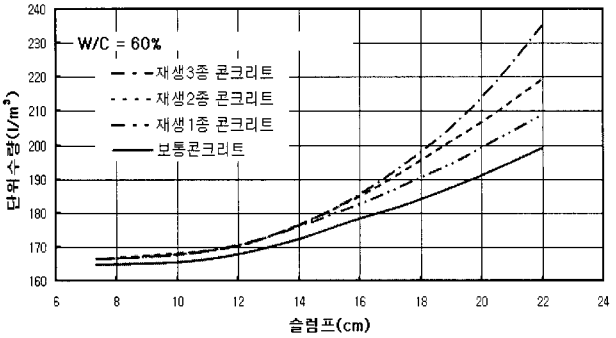

그림 1. 재생콘크리트의 단위수량과 슬럼프의 관계

2.2 잔골재율

재생골재는 쇄석상이므로 이를 이용한 콘크리트는 강모래·강자갈 콘크리트에 비하여 워커빌리티가 나쁘기 때문에 재생골재 콘크리트에서는 고성능 감수제를 사용하는 것을 원칙으로 하고 또 필요에 따라 잔골재율을 높이는 조치가 요구된다.

〈그림 2〉는 일본건축학회 콘크리트 배합 지침 안에 표시한 강모래·강자갈 AE 콘크리트의 물-시멘트비, 슬럼프와 잔골재율의 관계를 점선으로 나타낸 것으로 앞에서 제시한 재생 I종 콘크리트에 적정하다고 생각되는 잔골재율을 표시한 것이다. 각 연구기관의 실험치를 모아서 기록했기 때문에 상당한 편차를 보이고 있지만 전체적으로 볼 경우, 점선으로 표시되어 있는 잔골재율과 비교적 유사한 경향이라고 할 수 있어 재생 I종 콘크리트에 있어서 잔골재율은 일본건축학회 콘크리트 배합지침에 표시하는 강모래·강자갈 AE 콘크리트와 거의 동일한 값을 사용해도 좋다.

이에 대하여 재생골재의 사용비율이 큰 재생콘크리트 II종 및 III종에서는 적정 잔골재율이 크게 된다. 이들 실험에 사용한 약 200 종류의 총평균으로 보면 I종 콘크리트에 비하여 II종 콘크리트에서는 1 % 크고, III종 콘크리트에서는 2.8 % 증가하고 있다.

2.3 공기량

〈그림 3〉은 AE제를 사용한 보통 및 재생콘크리트의 보정하지

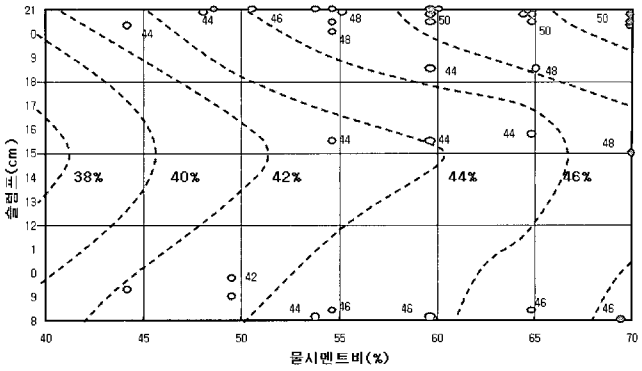

그림 2. 물-시멘트비, 슬럼프와 잔골재율의 관계

않은 실측 공기량의 분포상태를 나타낸 것이다. 보통콘크리트는 약 3.5 %를 중심으로 분포하고 있으나, 재생콘크리트는 전체적으로 공기량이 크고, 분포의 상황도 상당히 넓은 범위에 걸쳐 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 재생콘크리트의 공기량이 크게 나타나는 것은 골재 입형이 나쁘기 때문에 잠재 공기량이 많고, 골재 자체의 공극이 크기 때문으로 사료된다.

재생골재의 골재수정계수는 1 ~ 2 % 정도이기 때문에 이를 이용하여 보정을 하면, 즉 실측공기량은 보통콘크리트에 비하여 약간 큰 정도로 되어 그리 큰 차이는 아니라고 할 수 있다.

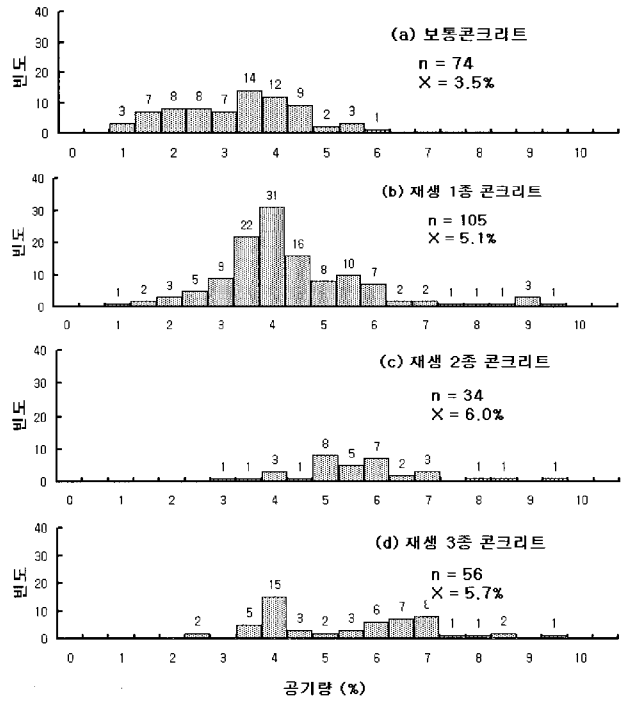

그림 3. 재생콘크리트의 실측 공기량

2.4 단위용적중량

재생골재의 단위용적중량은 〈표 3〉과 같이 보통골재에 비해 작으며, 특히 잔골재에서 명확한 차이가 나타난다. 그 때문에 재생콘크리트는 일반적으로 단위용적중량이 작아지는 경향을 보인

표 3. 재생콘크리트의 단위용적중량(t/m³)

비 고	재생콘크리트		
	Ⅰ종	Ⅱ종	Ⅲ종
평 균	2.21	2.09	2.02
범 위	2.24 ~ 2.17	1.99 ~ 2.18	1.98 ~ 2.07
연구기관수	6	2	5

다. 이를 동일 조합의 강모래·강자갈 콘크리트(단위용적중량 : 약 2.33 t/m³)와 비교하면 재생Ⅰ종 콘크리트에서는 5 %, Ⅱ종에서는 10 %, Ⅲ종에서는 13.5 % 줄어들고 있다.

재생골재 콘크리트는 재생골재 중의 수분 및 단위수량이 보통콘크리트에 비하여 크기 때문에 기건상태에 있어서의 단위용적중량은 다시 작아진다고 할 수 있다.

2.5 블리딩

재생콘크리트는 보통콘크리트에 비하여 단위수량이 크기 때문에 당초 블리딩이 커질 것으로 예상했지만 〈그림 4〉에 의하면 보통콘크리트와의 비교에서 오히려 작은 값을 나타내고 있다.

이와 같은 원인으로서 재생골재는 비중이 작고 입형이 나빠서 골재상호간의 가교작용에 의한 침강이 적어 블리딩 되기 어려운 점과 블리딩수가 골재하부에 잔류하는 비율이 강자갈에 비해 많은 점이 거론될 수 있다. 그 때문에 재생골재를 시공하는 경우에는 콜드조인트가 생기지 않도록 이어치기 허용시간과 흙손 누름까지의 시간을 충분히 배려할 필요가 있다.

3. 재생콘크리트의 역학적 특성

3.1 압축강도

3.1.1 재생굵은골재와 천연잔골재로 만든 재생콘크리트

보통콘크리트와 재생콘크리트의 압축강도는 밀접한 관계가 있으며, 보통 재생굵은골재를 사용하여 생산된 콘크리트는 보통콘크리트에 비하여 8 ~ 32 % 정도 낮은 값을 보인다.

Hansen과 Boegh는 수중 40 °C에서 양생한 고강도(W/C = 0.4), 중간강도(W/C = 0.7), 저강도(W/C = 1.2) 콘크리트 공시체를 준비하여 28일 후 압축시험을 실시하였다. 각 콘크리트는 실험실에서 조크러셔를 사용하여 파괴하였고, 재생콘크리트는 40 °C에서 수중양생하고 28일 후에 압축강도를 측정하였는데 그 실험결과를 〈표 4〉에 도시하였다. 3회에 걸친 독립적인 일련의 실험을 통하여 재생골재를 사용한 경우에서 천연골재만을 사용한 콘크리트와 거의 같은 강도를 얻었다. 그러나, 고강도 콘크리트가 저강도의 재생굵은골재를 사용하면 기준배합에 해당하는 고강도의 재생굵은골재를 사용하여 생산된 기준 배합보다 압축강도가 약 39 % 정도 낮았다.

재생 굵은골재나 잔골재가 사용되었다면 강도차이가 더 커졌을 것이다. 이들은 재생콘크리트의 압축강도는 원콘크리트의 압축강도와 원콘크리트의 물-시멘트의 배합비에 많은 영향을 받으며 특히, 재생콘크리트의 물-시멘트에 영향을 받는다고 결론을 내렸다. 원콘크리트의 물-시멘트비가 재생콘크리트의 것과 같거나 낮다면 새롭게 발현되는 강도는 원콘크리트의 강도보다 더 높다고 주장하였다. 〈그림 5〉는 잔골재의 대체에 따른 결과로서 굵은골재를 대체했을 때와 비슷한 결과를 보여주고 있다.

표 4. 28일 양생 후 재생콘크리트의 압축강도

항목	원골재와 재생골재의 압축강도(MPa)											
	H				M				L			
		H/H	H/M	H/L		M/H	M/M	M/L		L/H	L/M	L/L
1	56	61	49	34	34	35	33	27	14	15	15	13
2	61	60			36		36		15			14
3	58	60			33		36		15			13

* H, M, L은 원콘크리트가 고강도, 중간강도, 저강도 콘크리트임을 의미함.

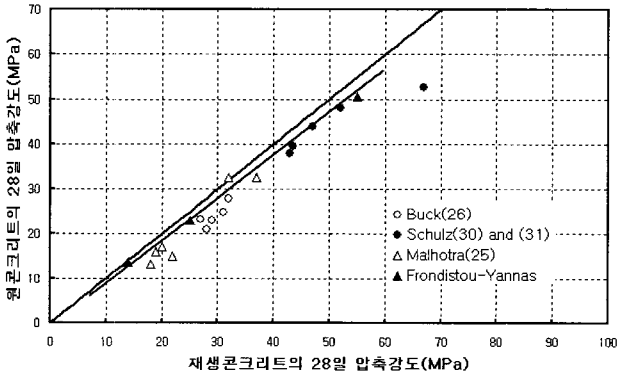

그림 5. 원콘크리트의 압축강도에 대한 재생콘크리트의 압축강도

3.1.2 재생 조·잔골재로 만든 재생콘크리트

일부의 연구에 의하면 재생굵은골재로 만들어진 재생콘크리트와 재생굵은골재와 재생잔골재로 만들어진 재생콘크리트간의 압축강도 사이에는 차이는 없다고 하였으나, 반대 의견도 많은 편이다.

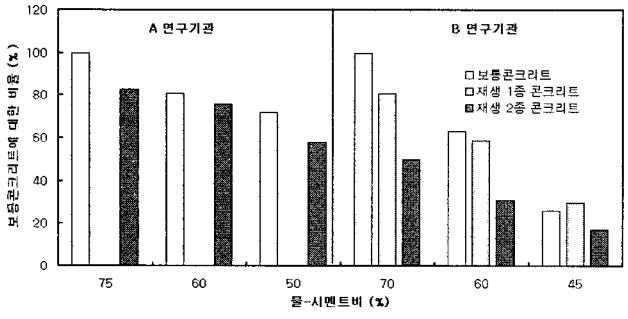

그림 4. 재생콘크리트의 블리딩

Gerardu와 Hendriks는 재생굵은골재와 자연잔골재로 만들어진 재생콘크리트가 일반적인 콘크리트 압축강도의 95 %를 발현할 때 동일한 조건에서 재생굵은골재와 재생잔골재로 만들어진 재생콘크리트는 일반적인 콘크리트에 비해 약 85 %나 그 이상의 압축강도를 발현하였다. 다른 연구결과에 의하면 혼합시 모든 자연잔골재가 재생잔골재로 대체된 경우 재생콘크리트의 압축강도는 반 정도 감소한다. 또한 강도의 감소는 대체가 굵은골재 부분에서만 일어난 경우에 비하여 천연잔골재가 재생잔골재로 대체된 경우 더욱 심하다는 것을 보고한 바 있다.

3.2 재생골재 콘크리트의 압축강도 변동률

시험실에서 실험한 재생콘크리트의 압축강도 편차계수는 한 종류 또는 동종의 재생골재가 사용되었을 때 기존의 일반 콘크리트와 비교해서 큰 차이점을 보이지 않는 것으로 나타났다. 그러나, 서로 다른 종류의 15년 경화한 12개의 콘크리트로부터 분쇄한 재생골재를 사용하여 동일 배합조건으로 콘크리트를 생산하였을 때, 28일 압축강도는 32.0 ~ 49.1 MPa로 나타났다. 〈표 5〉에 나타난 바와 같이 재생콘크리트의 압축강도 평균치는 41 MPa이었고, 변동률은 12 %를 나타내었다. 또한, 원재료에서 무작위로 혼용시킨 콘크리트, 즉 오래된 빌딩 건축물, 도로포장, 보도, 주행로 등을 분쇄하여 제조한 재생골재를 사용한 레디믹스트 플랜트에서 생산된 콘크리트에서 높은 강도 변동률을 보인다.

그 예로서 근원지를 알 수 없는 재생골재를 사용하여 레디믹스트 플랜트로부터 중간강도의 12배치 콘크리트를 생산하고, 시험을 수행하였다고 했을 때, 만약 총 배치 중 6배치는 〈표 7〉의 M/H 타입(즉 보통강도의 재생골재를 사용한 고강도 재생콘크리트)으로 하고 나머지 6배치는 M/L 타입(즉 보통강도 재생골재를 사용한 저강도 재생콘크리트)으로 하였을 때 변동률은 〈표 5〉의 결과에 의하면 약 14 % 정도였다. 그러나 만약 H/H(고강도 재생골재를 사용한 고강도 콘크리트)와 H/L(고강도 재생골재를 사용한 저강도 콘크리트)를 사용하였을 때에는 변동률이 25 %로 증가하였다.

Hendriks의 연구결과에 따르면 동일한 배합조건이지만 여러 독일의 생산업체에서 생산하고 있는 재생골재를 사용하여 생산한 콘크리트의 압축강도는 41.0 ~ 50.6 MPa의 범주에 속하였다. 보통콘크리트와 관련된 규정 및 시방서 상의 특성강도 요구조건을 맞추기 위해서는 높은 표준편차와 이에 따른 높은 강도 변동률은 시멘트의 사용량을 증가시키므로 경제성이 악화되게 된다.

3.3 탄성계수

재생골재에 있어서는 비교적 낮은 탄성계수를 갖는 구모르타르가 원골재 주위에 다량 부착 존재하므로 인해 재생골재 콘크리트의 탄성계수는 원골재를 사용한 동종 콘크리트보다 낮다.

표 5. 폐콘크리트를 파쇄 후 생산한 재생콘크리트의 압축강도

원콘크리트의 물-시멘트비	15년 경과후 분쇄시 원콘크리트의 압축강도(MPa)	재생골재 콘크리트의 물-시멘트비	28일 경과후 재생골재 콘크리트의 압축강도(MPa)
0.53	75.0	0.57	49.1
0.67	51.5	0.57	40.3
0.65	59.3	0.57	43.1
0.80	38.9	0.57	38.0
0.50	73.1	0.57	47.4
0.59	62.4	0.57	43.3
0.65	67.9	0.57	41.8
0.81	42.1	0.57	32.0
0.50	61.9	0.57	39.8
0.50	84.8	0.57	36.8
0.53	73.4	0.57	44.0
0.50	64.1	0.57	35.2

Frondistou-Yannas에 따르면 재생굵은골재와 천연 잔골재로 제조한 재생콘크리트는 보통콘크리트의 탄성계수보다 33 % 정도까지 낮은 것으로 보고하고 있다. 또한 굵은골재와 잔골재를 재생된 것으로 사용한 재생콘크리트는 보통콘크리트에 비해 28 %의 낮은 동탄성계수를 갖는다.

다른 연구결과에 의하면 보통콘크리트에 비해 재생골재와 천연잔골재로 생산한 재생 콘크리트는 최대 15 % 낮은 탄성계수치를 나타냈으며, 자연사를 분쇄시킨 잔골재로 대체하였을 때 탄성계수는 최대 40 % 감소하였다. 그리고 동일한 물-시멘트로서 두 가지의 천연굵은골재와 재생굵은골재를 혼합하여 제조한 재생굵은골재는 보통콘크리트에 비해 19 % 낮은 탄성계수를 나타내었다.〈그림 6〉

Khan과 Rasheeduzzafar는 재생굵은골재와 자연사로 배합시킨 재생콘크리트의 경우 보통골재를 이용한 원콘크리트에 비해 18 % 낮은 정탄성계수치를 나타낸 것으로 보고하였다. 또한 재생굵은골재와 자연사로 생산한 재생 콘크리트의 탄성계수는 기존 콘크리트에 비해 10 ~ 30 % 정도 낮은 값을 나타냈다. 보통콘크리트를 재생굵은골재와 100 % 재생잔골재로 생산하였을 때 기존 콘크리트의 탄성계수에 비해 25 ~ 40 % 낮은 탄성계수를 나타냈다.

Hansen과 Boegh는 40 °C에서 양생한 고강도용 콘크리트(H : w/c = 0.40), 중간강도(M : w/c = 0.70) 및 저강도(L : w/c

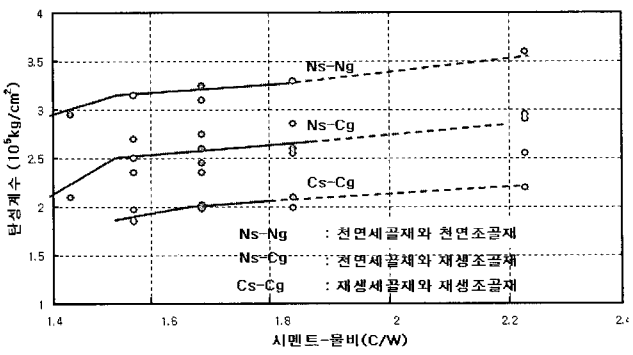

그림 6. 보통콘크리트와 재생콘크리트의 물-시멘트비에 따른 탄성계수

= 1.20)용 콘크리트를 준비하고 47일 경과후 탄성계수를 구하였다. 그 후 3종류의 콘크리트를 시험실용 죠 크러셔에서 파쇄시킨 후 스크린과정을 거쳐 원골재의 입도분포와 같도록 하면서 3종류의 재생 굵은골재, 즉 H, M, L 타입을 재생콘크리트 생산을 위해 재결합하였다. 배합은 고강도, 중간강도, 저강도 콘크리트로 처음 원콘크리트와 일치하도록 실시하였으며, 이 때 9가지의 재생골재의 배합 경우의 수가 고려되었다. 이 9가지의 콘크리트는 40 ℃ 수중양생 하였고, 수중양생 47일 후에 탄성계수치를 측정하였다. 〈표 6〉은 이에 대한 결과를 나타낸 것으로 동일 조건하에서의 원콘크리트보다 재생콘크리트는 14 ~ 28 %의 정·동탄성계수의 저하를 나타내었다.

그러나, 시험실에서 사용한 천연골재보다 단단한 강성의 골재(석영과 같은 종류)를 사용하여 고강도 콘크리트를 생산하였을 경우와 저강도 콘크리트를 천연골재 보다 연성의 골재(연성 석회암류)를 사용하여 생산하였을 때 그 탄성계수의 차는 더욱 심하게 나타났다. 특히 분쇄된 모르타르 성분으로 된 재생골재로 생산한 재생콘크리트의 탄성계수는 동일 조건하에서 기존의 골재로 생산한 콘크리트보다 45 % 낮은 탄성계수를 나타냈다. 그리고 굵은골재와 잔골재를 재생하여 생산한 재생콘크리트의 경우 압축파괴시의 극한 변위는 2.67×10^{-3}이고, 천연골재로 생산한 보통콘크리트나 재생골재 및 자연사로 생산한 재생콘크리트는 모두 1.75×10^{-3}인 것으로 나타났다.

국내에서는 충남대 김무한 교수가 재생골재 콘크리트의 물-시멘트비와 재생세·굵은골재의 대체율별 조합조건에 관계없이 각각 재령에 따라 강모래·강자갈을 사용한 보통콘크리트의 정탄성계수에 비해 약 10 % 낮은 경향을 나타내고 있음을 보고하였다. 물-시멘트비 60 %에서도 40 %와 유사한 경향으로 재생골재의 대체율이 증가함에 따라 감소하며 재생굵은골재의 조합조건이 재생굵은골재의 조합조건에 의해서 보다 큰 영향을 받으며 또한 물-시멘트비에 의해서도 현격한 차이를 나타내고 있음을 보고하고 있다.

3.4 크리프

재생굵은골재와 천연잔골재로 두 번 재생시킨 콘크리트의 크리프는 기존의 자연굵은골재와 부순굵은골재를 사용하여 제작한 보통콘크리트보다 50 % 높은 것을 발견하였다〈MPa〉. 콘크리트의 크리프는 콘크리트 속에 함유된 시멘트나 모르타르의 함유량에 비례하여 증가하기 때문으로 분석된다.

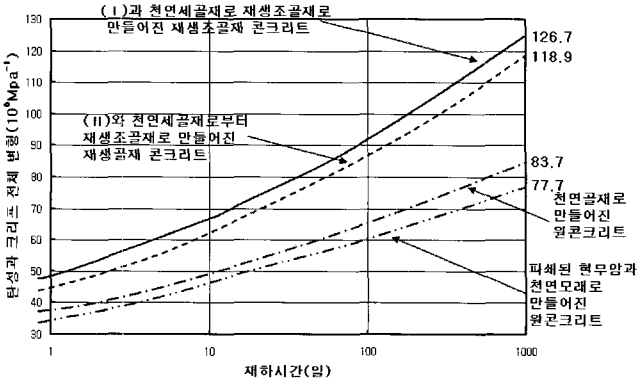

그림 7. 보통콘크리트와 재생콘크리트의 변형

Tam과 Ravindrarajah는 재생굵은골재와 잔골재로 생산한 재생콘크리트에 있어서의 크리프는 기존형식의 콘크리트보다 30 ~ 60 % 높게 나타났으며, 재생굵은골재와 천연잔골재로 배합한 재생콘크리트의 경우 기존형식의 콘크리트보다 20 ~ 30% 높은 크리프가 발생한 것을 측정하였다.

일부 연구결과에서는 재생콘크리트는 원골재로 배합한 보통콘크리트보다 40 % 높은 크리프가 발생하는 것으로 나타났다.

3.5 건조수축

Hasaba는 시멘트량 300 kg/m^3, 재생골재 및 잔골재를 사용하여 생산한 재생콘크리트의 건조수축은 재생잔골재 및 자연굵은골재를 사용한 원콘크리트 보다 50 % 크고, 재생굵은골재 및 재생잔골재를 사용하였을 때 재생콘크리트의 건조수축이 자연굵은골재와 쇄사를 사용한 원콘크리트보다 70 ~ 80 % 상승하였다.

Coquillat의 경우에는 기존의 보통콘크리트보다 재생잔골재 및 굵은골재를 사용한 재생콘크리트에서 건조수축이 73 % 크게 나타났으며 재생굵은골재와 자연사로 제작한 2개의 재생골재 콘크리트는 원 자연골재로 제작한 보통콘크리트보다 건조수축이 40 % 상승하고 기존의 자연골재를 사용하여 생산한 콘크리트에 비

표 6. 45일 양생 후 재생콘크리트의 정·동탄성계수

항목	원골재와 재생골재의 탄성계수(GPa)											
	H				M				L			
		H/L	H/M	H/L		M/H	M/M	M/L		L/H	L/M	L/L
동탄성계수	46.7	40.3	37.6	39.1	42.3	36.4	35.8	35.0	36.6	31.0	28.8	28.0
% 감소율	0.0	13.7	19.5	16.3	0.0	13.5	15.4	17.2	0.0	15.3	21.3	23.4
정탄성계수	43.4	37.0	36.3	34.8	38.5	33.0	32.0	30.0	30.8	27.5	22.3	22.6
% 감소율	0.0	14.7	16.4	19.8	0.0	14.3	16.9	22.1	0.0	10.7	27.6	26.6

* 표에서 기호 H, M, L은 각각 자연석으로 배합한 원콘크리트의 고강도, 중간강도, 그리고 저강도 콘크리트를 칭하며, 기호 H/M은 당초 고강도 콘크리트에서 생산한 재생굵은골재를 이용한 보통강도 콘크리트를 말함

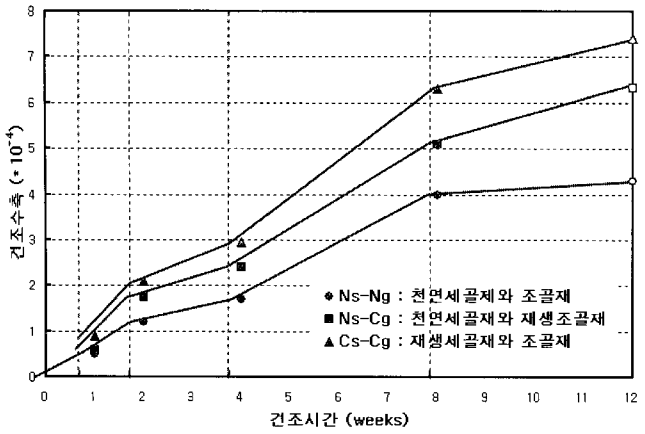

그림 8. 보통콘크리트와 재생콘크리트의 건조수축

해 재생굵은골재와 천연잔골재를 사용한 콘크리트의 건조수축은 20 ~ 30 % 증가하는 것을 발견하였다.〈그림 8〉

전술한 Hansen과 Boegh는 9가지의 재생골재의 배합을 고려하여 40 ℃에서 수중양생하였다. 각 9종류의 재생콘크리트로부터 10 × 10 × 80 cm 크기의 보를 제작하여 6개월간 40 % RH, 25℃에서 건조시켜 건조수축량을 측정하였다.〈표 7〉

일반적으로 모든 재생콘크리트의 건조수축량은 동일한 자연골재로 생산한 원콘크리트보다 배합비나 재생골재의 종류에 관계없이 약 50 % 상승하였다. 그리고, 분쇄한 골재 중 저급의 모르타르 성분이 있는 재생골재를 사용하여 생산한 재생골재 콘크리트의 경우는 기존의 원 자연골재로 생산한 콘크리트 보다 3배정도 건조수축이 증가하였다.

다른 시험결과에 의하면 재생굵은골재와 재생잔골재를 사용할 때, 재생콘크리트의 건조수축은 천연골재를 전부 사용한 콘크리트의 건조수축보다 14 ~ 95 % 정도 많은 건조수축이 발생한다는 결과를 얻었다.

3.6 인장강도와 휨강도

재생굵은골재와 천연잔골재로 만든 재생골재 콘크리트의 인장강도는 일반콘크리트의 인장강도와 큰 차이점은 없다. 그러나, 재생굵은골재와 재생잔골재를 사용하였을 때, 재생콘크리트의 인장강도는 보통콘크리트의 인장강도보다 20 % 정도 낮다. Gerardu와 Hendriks는 천연골재를 사용한 보통콘크리트와 비교할 때 재생굵은골재와 천연잔골재로 만든 재생골재 콘크리트의 간접 인장강도가 10 % 정도 적고, 모래를 부순 콘크리트로 만든 잔골재로 대체할 경우, 인장강도 감소율은 20 % 정도 늘어났다.

3.7 재생골재 콘크리트의 내구성

3.7.1 투수성과 흡수성

콘크리트 열화를 발생시키는데 많은 비중을 차지하는 것은 콘크리트의 투수성이다. 수분흡수성은 경화된 콘크리트의 투수성과 간접적인 관련이 있고, 콘크리트 속으로의 수분침투는 콘크리트 열화의 원인이 된다. Kasai는 물-시멘트비 0.5 ~ 0.7과 슬럼프 21 cm를 갖는 콘크리트에 대하여 투수시험을 행한 결과 재생골재 콘크리트의 투수성은 보통콘크리트의 투수성보다 2.5배 높은 것으로 보고하였다.

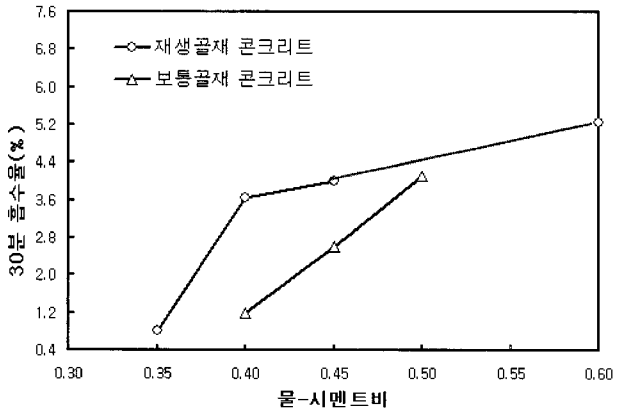

그림 9. 물-시멘트비에 따른 재생콘크리트와 보통콘크리트 30분간의 흡수성

재생콘크리트의 물-시멘트비보다 더 높은 비율의 물-시멘트비로 만든 보통콘크리트(강도 저하 발생)의 경우 〈그림 9〉에서와 같이 일반골재로 만든 콘크리트와 재생콘크리트 사이에서 흡수성에 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나, 재생골재를 만드는데 사용된 콘크리트의 물-시멘트비보다 더 낮은 물-시멘트비로 만든 일반 콘크리트와 비교할 경우에는 재생콘크리트의 흡수율은 보통콘크리트의 흡수율의 약 3배가 된다. 이것은 보통콘크리트는 굵은골재와 비교적 밀실한 천연 잔골재와 매트릭스를 포함하는 반면에 재생골재 콘크리트는 매트릭스는 밀실하지만 재생골재가 상대적으로 많은 공극을 가지기 때문인 것으로 사료된다.

표 7. 40 % RH와 25 ℃에서의 보통콘크리트와 재생콘크리트의 13주 동안의 건조수축

항 목	원콘크리트와 재생콘크리트의 40 % RH, 25 ℃에서의 13주 동안의 건조수축											
	H				M				L			
		H/H	H/M	H/L		M/H	M/M	M/L		L/H	L/M	L/L
총건조수축(× 104)	3.4	5.1	4.9	5.3	3.5	4.9	5.3	5.2	4.5	6.8	5.7	6.8
건조수축증가율(%)	0	50	44	56	0	40	51	49	0	51	27	51

3.7.2 내동해성

Malhotra와 Buck은 다양한 물-시멘트비를 갖는 보통콘크리트와 재생콘크리트와의 내동해성을 비교하였다. 보통콘크리트의 내동해성보다 재생콘크리트의 동결융해 저항성을 낮다는 것을 발견하였다. McCarty와 MacCreery은 ASTM C-666규정에 따라 재생골재콘크리트에 대해 동결 융해시험을 실시한 결과 천연골재로 만든 콘크리트보다 내구성이 우수한 것으로 상반된 결과를 얻었다. 또한 Hasaba 등은 재생콘크리트의 동결융해 저항성은 보통콘크리트보다 항상 적다고 보고하였다.

〈그림 10〉에 의하면 재생굵은골재와 천연잔골재를 사용한 경우나 둘 다 재생골재를 사용한 경우 모두 보통콘크리트보다 동결융해 저항성이 작고 재생굵은골재와 재생잔골재를 사용한 경우가 재생굵은골재와 천연잔골재를 사용한 경우보다 더 빠르게 내구성이 저하하고 있다.

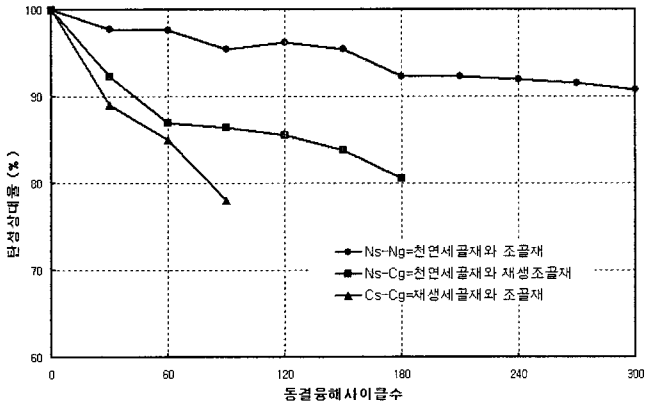

그림 10. 물-시멘트비에 따른 보통콘크리트와 재생콘크리트의 내동해성

3.7.3 중성화, 염분 침투와 철근 부식

B.C.S.J는 대기 온도 20 ℃와 상대 습도 60 %에서 재생콘크리트의 탄산화 비율을 연구한 결과 중성화가 되어 있는 콘크리트로부터 생산된 재생골재로 만든 재생콘크리트의 중성화 비율은 일반골재로 만든 보통콘크리트보다 65%정도 더 높았으며, 철근의 녹은 피복두께 2 ~ 3 cm 속에 있는 철근에서 두 달 후부터 관찰되었다.

그리고, 재생콘크리트 속에 있는 철근이 보통콘크리트 속에 있는 철근보다 더 빨리 부식된다고 보고하고 있으나, 증가되는 부식 위험도는 보통콘크리트보다 더 낮은 물-시멘트비를 갖는 재생콘크리트를 생산함으로써 감소시킬 수 있다고 결론지었다. 〈그림 11〉에서 보여주는 것처럼 같은 물-시멘트비인 경우, 재생콘크리트보다 약간 더 부식이 되었다. 그러나, 보통콘크리트보다 적은 물-시멘트비로 만든 재생콘크리트는 약간의 증진이 있었다.

또한, 일반 골재로써 고로슬래그를 사용한 콘크리트로부터 생산된 재생골재를 사용해 만든 재생콘크리트일 때 혹은 재생 골재가 석회나 나무조각에 의해 더럽혀진 경우가 보통콘크리트의 탄

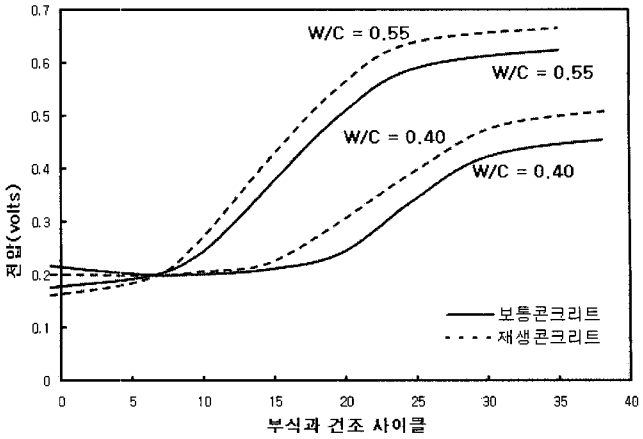

그림 11. 보통콘크리트와 재생콘크리트의 부식

산화보다 1.2 ~ 2배 증가하는 것을 발견하였다.

3.7.4 폭로에 의한 품질변화

일본 건설성 총합기술개발 프로젝트인 「건설부산물의 발생억제·재생이용기술의 개발」에서 10년 동안에 걸쳐 품질조사를 실시하였다. 품질조사 결과에 따르면 중성화도 일반콘크리트와 유사한 정도이며 벽면이 균열도 거의 발생되지 않았다. 또한, 코어의 압축강도는 재령 3개월부터 증가하고 있지만 탄성계수는 약간 저하하는 경우도 있기 때문에 품질변화에 주목해야 한다고 보고하였다.

4. 맺음말

국내의 경우, 재생골재에 관한 KS가 제정되고 각종 법규에서 재생골재의 이용을 촉진하기 위하여 노력하고 있지만 아직까지 재생골재를 적극적으로 이용하기 위해서는 개선되어야 할 몇 가지 문제점이 있으며, 이를 정리하면 다음과 같다.

재생골재는 그 처리 횟수를 증가시키면 그 품질이 개선되지만 에너지 비용의 증가와 미립분의 발생이 많아지게 되므로 재생골재를 모두 양질의 골재화하여 사용하는 것은 한계가 있게 된다. 더불어 미립분의 사용 용도의 개발이 중요하다.

골재를 대상으로 한 현재의 시험방법은 기본적으로 강자갈·강모래를 사용하던 시기에 만들어진 것이다. 그 후 나온 쇄석 및 쇄사, 각종 슬래그골재 등에 적용하기에는 적절하지 않은 점이 있으며, 재생골재의 경우도 또한 마찬가지이다. 특히, 표건상태의 판정에는 문제점이 있다. 또한, 골재의 흡수율시험은 정확하게 하면 3일이 소요되는데 이는 재생골재의 빈번한 품질 변동을 고려할 때 적절치 않으며, 좀 더 신속히 품질을 판단할 수 있는 방법이 개발되어야 한다.

일반골재에서는 발생하지 않지만 재생골재에는 타일, 기와, 플라스틱, 종이, 금속편 등 각종 혼합물이 섞이게 된다. 이러한 혼합

물은 콘크리트의 강도를 저하시키는 원인이므로 그 양을 신속히 측정하는 방법의 개발과 혼입률의 상한치를 설정할 필요가 있다.

재생골재를 사용한 재생콘크리트는 보통콘크리트에 비하여 강도 및 내구성의 저하가 발생하므로 동일한 조건의 보통콘크리트에 비하여 단위시멘트량이 증가하게 되는데, 이는 건조수축률을 증가시키는 원인이 되므로 적절한 혼화제의 사용으로 조정하여야 할 것이며, 그 사용방법에 대한 규정을 만들 필요가 있다.

이상과 같은 문제점이 해결된다 하더라도 재생골재의 사용을 활성화하기 위해서는 경제성 및 원활한 공급체제의 확보가 선행되어야 한다. 재생골재는 아무래도 그 용도가 제한적일 수밖에 없기 때문에 수요도 적을 것이며, 따라서, 유통을 위한 운반거리가 증대됨으로써 물류비의 증가에 따라 경제성이 악화될 것이며, 전술한 단위시멘트량의 증가에 의해서도 경제성은 저하하게 되는데 이러한 문제를 해결할 수 있는 방안의 개발도 또한 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 大和竹史, "コクリートのリサイクリルに關する海外の動向", コクリート工學, Vol.35, No.7, 1997. 7, pp.19~22.
2. 山崎庸行, "建設業の立場から —建築—", コクリート工學, Vol.35, No.7, 1997. 7, pp.35~41.
3. 阿部道彦, "コクリート用再生骨材, コクリート工學", Vol.35, No.7, 1997. 7, pp.42~48.
4. 横山 滋, "セメント原料への利用, コクリート工學", Vol.35, No.7, 1997. 7, pp.49~52.
5. 嘉門雅史, "地盤改良材への利用, コクリート工學", Vol.35, No.7, 1997. 7, pp.53~56.
6. 友澤 史紀, 野口 貴文, "完全リサイクリルコクリート", コクリート工學, Vol.35, No.7, 1997. 7, pp.57~60.
7. 河野 廣隆, "再生骨材, セメント・コンクリート", No.618, 1998. 8, pp.64~69.
8. 笠井芳夫, "解体コンクリートの처리의現況", コクリート工學, Vol. 35, No.7, 1997. 7, pp.13~24.
9. F. Tomosawa and T. Noguchi, "Towards Completely Recyclable Concrete", Integrated Design and Environmental Issues in Concrete Technology, E&FN SPON, 1996, pp.263~272.
10. 崔 敏壽, 阿部道彦, 南波篤志, "再生骨材の粒子構成の特性", セメント・コンクリート論文集, No.49, 1995. 5, pp.336~341.
11. 飛坂基夫, 笠井芳夫, 加賀秀治, 阿部道彦, 福部 聰, "實機プラントにおける再生コンクリートの製造・工程管理(その 1) 再生骨材の品質", 일본建築學會大會學術講演梗概集, 1996. 9, pp.389~390.
12. "(財)國土開發技術研究センター ; 再生コンくリートの利用技術の開發", 平成6年度報告集(その 2), 共通試驗による再生骨材の品質試驗方法の檢討, 1995. 3, pp.351~369.
13. Edited by Y. Kasai : Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol.1 : Demolition Methods and Reuse, CHAPMAN AND HALL, 1988.
14. Edited by Y. Kasai : Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol.2 : Reuse of Demolition Waste, CHAPMAN AND HALL, 1988.
15. Edited by Y. Erik K. Laulitzen : Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, F&FN SPON, 1994.
16. Edited by T. C. Hansen : RILEM REPORT 6, Recycling of Demolished Concrete and Masonry, E&FN SPON, 1989, pp.109~110.
17. J. Vyncke and E. Rousseau : Recycling of Construction and Demolition Waste in Belgium, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, F&FN SPON, 1984, pp.57~69.
18. R. J. Collins : Reuse of Demolition Materials in Relation to Specifications in The UK, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, F&FN SPON, 1994, pp.49~56.
19. C. J. Kibert : Concrete/Masonry Recycling Progress in the USA, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, F&FN SPON, 1994, pp.83~91.
20. Edited by T. C. Hansen : RILEM REPORT 6, Recycling of Demolished Concrete and Masonry, E&FN SPON, 1989, pp.116~120.
21. Edited by T. C. Hansen : RILEM REPORT 6, Recycling of Demolished Concrete and Masonry, E&FN SPON, 1989, p.121.
22. R.-R. Schulz : The Processing of Building Rubble as Concrete Aggregate in Germany, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, F&FN SPON, 1994, pp.105~116.
23. Edited by T. C. Hansen : RILEM REPORT 6, Recycling of Demolished Concrete and Masonry, E&FN SPON, 1989, p.122.
24. A. Morel and J. L. Gallias : Practical Guidelines for. The Use of Recycled Aggregates in Concrete in France and Spain, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, F&FN SPON, 1994, pp.105~116.
25. A. Henrichsen : Report on Unified Specifications for Recycled Coarse Aggregates for concrete, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, F&FN SPON, 1994, pp.119~120.
26. Edited by J. W. Llewellyn and H.Davies : Sustainable Use of Materials, Proceedings of an International Seminar held on 23 & 24 September 1996 at the Building Research Establishment, Garston Watford, UK.