

동슬래그와 재생골재의 콘크리트 활용기술 현황

- Technology of Copper Slag and Recycled Aggregates
in Application of Concrete Material -



이세현*

1. 서 언

지구촌 시대에 환경과 자원 절약의 문제가 주요 관심사로 대두되고 있는 가운데 국내에서도 각종 부산물의 재활용 기술개발이 활발히 이루어지고 있다. 그리고 이러한 기술개발의 상당 부분은 발생된 부산물의 처리와 활용을 위한 재생재료로서 가공을 거쳐 콘크리트용 재료로 활용하기 위한 기술개발이 주류를 이루고 있다.

주요 재생재료로는 이미 콘크리트용 재료로서 광범위하게 활용되고 있는 제철, 제련 등 다양한 금속의 생산공정에서 발생되는 슬래그(slag)류, 플라이애쉬와 같이 화력 발전 또는 화학 공정 등에서 얻어지는 석탄회류, 최근 그 발생량이 급증함에 따라 점진적으로 콘크리트용 골재로 활용이 추진되고 있는 재생골재 그리고 폐타이어, 광산 폐석, 제지 슬러지 연소재 등 그 종류가 상당히 다양하다.

이에 본고에서는 많은 종류의 재생재료 가운데 최근, 본격적인 콘크리트용 골재로서 활용기술 개발이 이루어지고 있는 “동제련 슬래그(이하 동슬래그)”와 “재생골재”

를 중심으로 그 특성과 현황에 대하여 소개하고자 한다.

2. 동슬래그를 사용한 콘크리트

2.1 동슬래그의 개요

동의 제련 공정은 자용로 공법(outokumpu flash smelting process)과 연속 동제련 공법(mitsubishi continuous copper smelting process)이 있다. 자용로 공법은 <그림 1>에서와 같이 건조한 정광을 산소 부화 공기와 함께 반사로형의 자용로에 분사시켜 황화정광이 산화성 분위기와 급격한 반응을 일으켜 슬래그를 분리하는 공정이다. 그리고 연속 동제련 공법은 건조한 정광과 산소부화 공기를 Top Blow Lance로 투입하는 방식으로 Launder를 통한 용탕의 연속 이동과 함께 전로를 제거하여 생산된다.

모든 동슬래그는 <그림 2>에서와 같이 검은색 유리질의 광택이 있는 형상을 지니며 자용로 슬래그의 경우, 1~3mm의 불규칙한 미립 또는 괴상 형태를 가지고 연속로 슬래그는 날카로운 형태의 괴상 조직과 미립의 침상 조직이 혼재되어 있는

형상을 지닌다.

이미 일본 및 독일 등 선진 각국에서는 <그림 3>에서와 같이 콘크리트용 잔골재뿐만 아니라 노반재, 지반 개량재 등 건설용 골재로서 다양하게 활용하고 있으며 국내에서는 시멘트 가철재와 Sand Blasting 재 그리고 시멘트 벽돌, 인터로킹 블럭 등 콘크리트 제품용 지반 개량재 등으로 사용되고 있다.

일반적으로 동슬래그는 안정된 유리질 상태로서, 환경오염이 없으며 입자가 균일하고 취급이 용이하다. 또한 염분을 함유하고 있지 않아 시멘트 원료와 콘크리트용 골재에 적합하고 철분(43~47%), 규산질(25~30%)을 함유하고 있다. 현재, 국내에서는 연간 약 70만 톤 정도의 동슬래그 골재가 생산되고 있으며 연속 공정 라인의 증설에 따라 발생량은 더욱 증가될 것으로 예상되고 있다.

2.2 동슬래그의 물리적 특성

(1) 입형 및 입도

수쇄 방식에 의해 생산되는 동슬래그는 작은 입자의 형태로 제조되며 완전한 구형이 아닌 각진 형태의 입형을 갖게 된다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 건축연구부 선임연구원

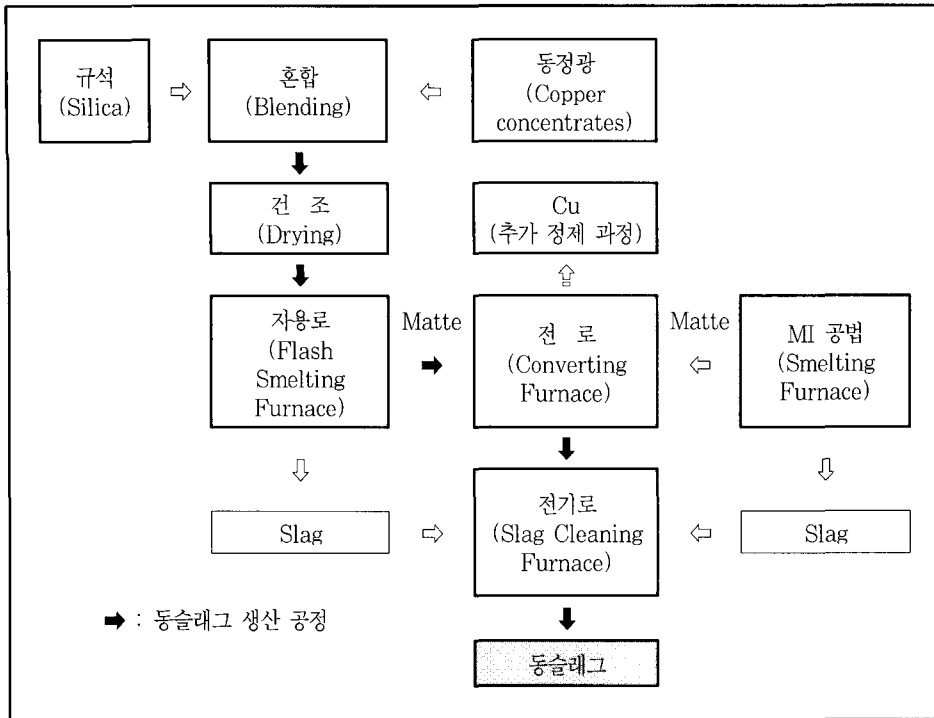


그림 1. 동슬래그 생산 공정

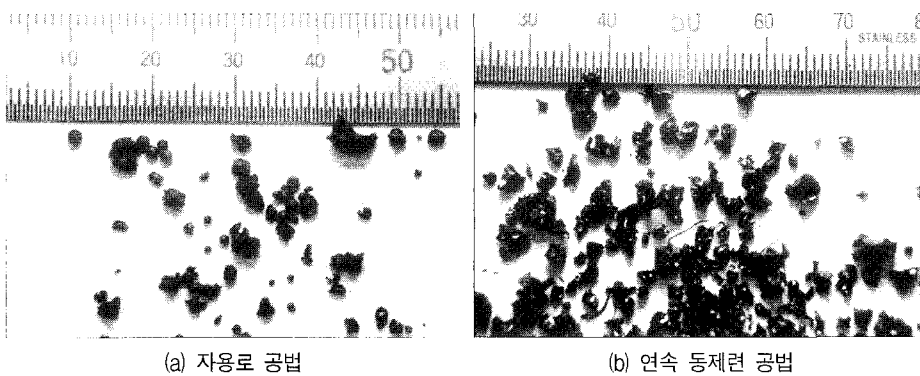


그림 2. 동제련 공법에 따른 동슬래그의 형상

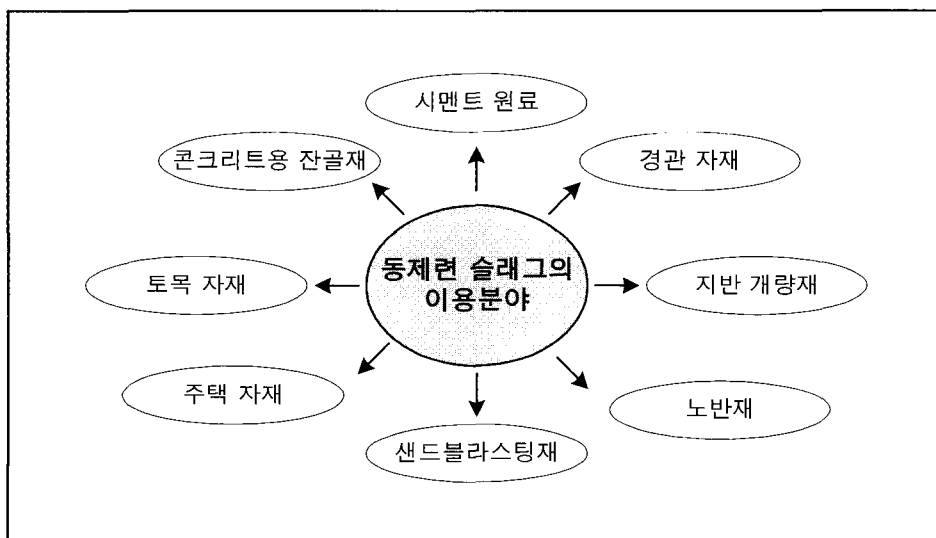


그림 3. 동슬래그의 사용 현황

전체적인 입도 분포는 자용로 슬래그가 연속로 슬래그보다 다소 작으며 <표 1>과 <그림 4>에서와 같이 일반적인 콘크리트용 잔골재인 모래에 비하여 다소 큰 입도 분포를 보인다.

(2) 물리적 특성

동슬래그의 비중은 <표 2>에서와 같이 일반 모래보다 높으며 흡수율은 매우 낮아 물에 대한 안정성이 우수하다. 그리고 단위용적중량은 2,000 ~ 2,500 kg/m³, 실적률은 일반 모래와 유사한 50 ~ 70% 수준이며 점토 덩어리량은 1%, 안정성은 3% 이내를 보인다.

동슬래그의 가장 큰 특성은 높은 비중의 골재라는 것이다. 일본 토목학회에서 발간한 「동슬래그 세골재를 이용한 콘크리트의 시공지침」에는 이러한 동슬래그의 높은 비중 특성을 활용한 소파 블럭, 케이블 앵커, 중력식 옹벽 등 중량 콘크리트에 적용이 매우 유리한 것으로 기술하고 있다.

2.3 동슬래그 콘크리트의 특성

천연 모래를 일부 동슬래그로 대체하여 제조된 콘크리트는 전반적으로 고유동영역에서 동슬래그의 혼입에 따른 슬럼프 저하 폭이 비교적 크지 않아 유동성 확보가 가능하다. 또한 콘크리트 배합시 혼입률에 따라 차이가 있으나 일반적으로 단위용적중량은 3.2 ~ 2.6 kg/m³으로 보통 콘크리트보다 다소 무거운 단위중량으로 보인다.

압축강도는 동슬래그의 혼입률에 따라 50%까지는 대부분의 배합에서 다소 증진되며 강도를 고려한 최적 배합비는 약 50% 내외인 것으로 밝혀지고 있다. 또한 중성화의 경우는 동슬래그를 혼입할 경우, 혼입하지 않은 경우와 비교하여 중성화가 약간 증가되나 물-시멘트비가 작을 경우에는 큰 차이가 없다.

내동해성은 동슬래그 혼입률 75%에서 내동해 성능이 가장 낮고 혼입률 100%의 배합이 내동해 성능이 가장 양호하며 공기량과 내구성수소와의 관계는 대략 정비례하는 것으로 나타나고 있다.

3. 재생골재를 사용한 콘크리트

3.1 재생골재의 발생과 재활용

국내의 경우, 1960년대 중반부터 시작된 산업화 이후 약 30~40년이 경과된 철근 콘크리트 구조물들은 경제적, 기능적 수명 단축으로 재개발, 재건축이 활발히 이루어지고 있다. 따라서 건설 폐기물의 발생이 급증하고 있으며 이 가운데 폐콘크리트는 건설 폐기물 전체 발생량의 약 66%에 이르고 있다. 그러나 이처럼 막대한 량의 폐콘크리트는 대부분 단순 파쇄를 통하여 재생골재로서 생산되고 대부분이 매립 등의 초보적 단계의 활용이 이루어지거나 폐기되고 있는 실정이다. 또한 <그림 5>에서와 같이 장기적으로 연간 10억 톤의 폐콘크리트가 발생될 것으로 예측되고 있으며 그에 따른 매립지 부족 문제와 골재채취에 따른 환경 문제 등 자원과 환경 측면의 사회적 문제가 대두되고 있다.

미국, 일본 등 선진 각국에서는 재생골재를 매립 등의 단순한 처리로부터 콘크리트 용 골재, 혼화재료 및 시멘트 원료 등 고부가가치 재료로 활용하기 위한 고도 활용 기술개발에 주력하고 있다. 그리고 그 노력의 결과로서 1990년대 후반부터 재생골재 콘크리트의 현장 적용이 조심스럽게 시도되고 있다. 그러나 국내에서는 최근까지도 재생골재 콘크리트가 제조·활용되지 못하고 있으며, 이는 보통 콘크리트에 비하여 특히 취약한 강도 및 제반 역학적 성능 저하와 그에 따른 부정적 인식에 기인한다. 그러나 자원과 환경을 고려할 때 재생골재의 활용 기술개발이 시급히 요구되고 있다.

3.2 재생골재의 특성

재생골재의 품질은 재생골재 생산플랜

표 1. 동슬래그의 일반적인 입도 분포

구 분	체 통과 중량 백분율(wt/%)						
	10 mm	5 mm	2.5 mm	1.2 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm
자용로 슬래그	100	99.4	91.1	39.8	22.4	1.3	0.5
연속로 슬래그	100	97.1	65.1	22.4	7.5	4.0	1.5

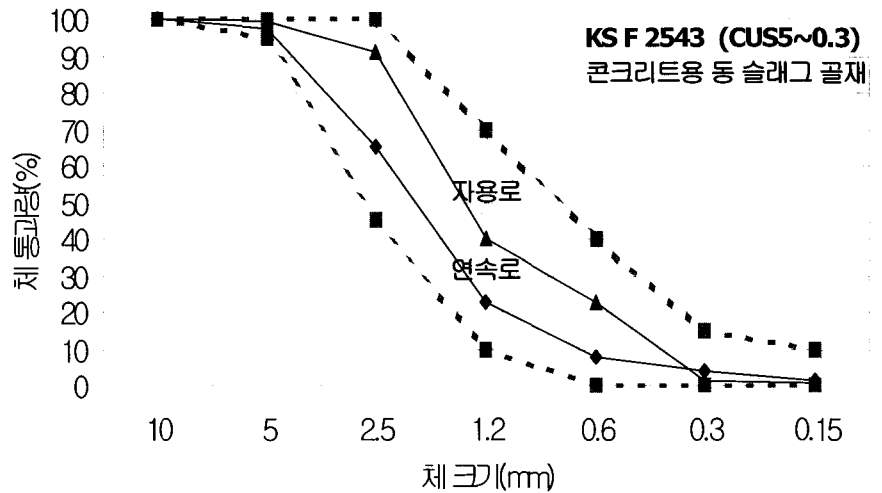


그림 4. 동슬래그의 입도 분포

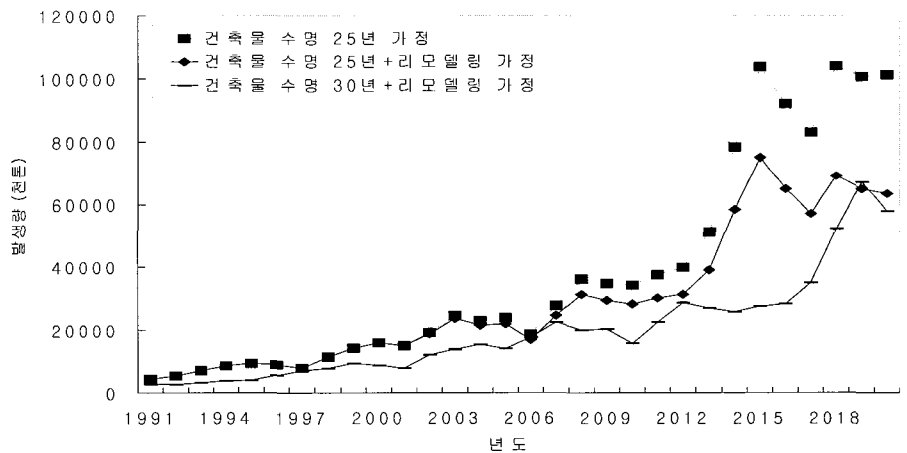


그림 5. 폐콘크리트 발생량 예측

트에 반입된 폐콘크리트의 처리, 즉 재생골재의 생산 방법과 시스템에 따라 골재의 흡수율, 강도 등 제반 품질이 변화한다. 재생골재의 생산 과정에서 원골재에 부착되어 있는 시멘트 페이스트를 완전히 제거할 수 있다면 원콘크리트에서 사용한 잔골재·굵은골재를 그대로 이용할 수 있으나, 생산시간과 비용의 증가로 콘크리트의 1~2차 파쇄에 의한 재생골재를 주로 사

용하고 있으며, 최근에는 골재의 품질을 고려하여 3차 파쇄 및 세척에 의한 재생골재가 생산되기도 한다.

재생골재 콘크리트가 보통 콘크리트에 비하여 낮은 강도 및 취약한 역학적 특성을 보이는 근본적인 이유는 골재 특성에 그 원인이 있다. 즉 재생골재는 폐콘크리트의 파쇄, 선별을 통하여 얻어지며 파쇄 과정에서 골재에 가해지는 충격으로 인한

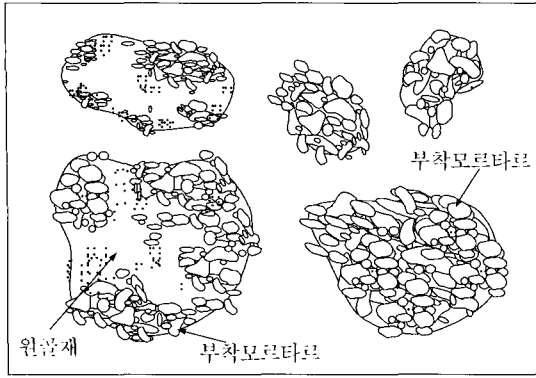


그림 6. 일반적인 재생골재의 형태

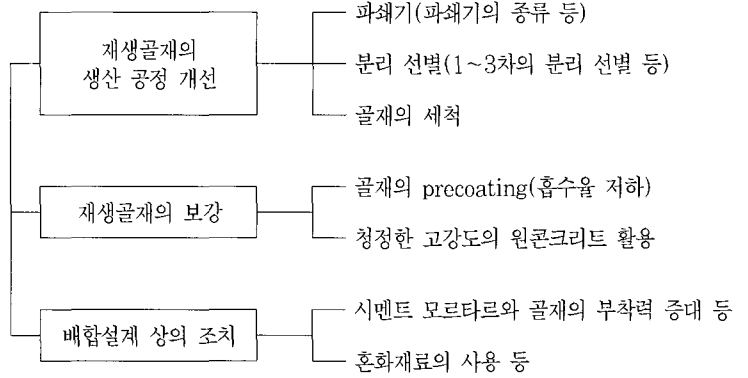


그림 7. 재생골재 콘크리트의 성능개선 방안

낮은 강성과 <그림 6>에서와 같이 표면에 부착된 구(舊)모르타르의 영향으로 높은 흡수율을 지니는 등 천연골재와 같이 콘크리트 내부에서 구조적 역할을 다하지 못하기 때문이다.

3.3 재생골재의 콘크리트용 골재로서 활용의 전제

보통 콘크리트에 비하여 취약한 재생골재 콘크리트의 강도 및 제반 특성을 고려할 때, 그 성능을 개선시키기 위해서는 근본적으로 재생골재의 흡수율 통제와 더불어 새로운 모르타르와 부착을 증대시키는 방안이 필요하다. 이는 재생골재 및 재생골재 콘크리트가 천연 골재를 사용한 보통 콘크리트와 달리 다음과 같은 품질 저하의 원인을 지니기 때문이다.

- 재생골재의 생산 과정에서 골재에 가해진 충격, 압박 등으로 골재 자체에 발달된 균열과 낮은 강성
- 재생골재 표면에 부착되어 있는 시멘트 모르타르로 인한 공극과 그에 따른 높은 흡수율로 인한 배합 설계 및 관리상의 어려움과 강도 저하
- 재생골재 표면에 이미 부착된 모르타르 및 골재와 새로운 모르타르 계면의 부착력 저하

이와 같은 재생골재 및 재생골재 콘크리트의 단점을 보완하기 위해서는 근본적으로 재생골재의 흡수율을 저하시키는 것

이 가장 효율적인 대안이다. 재생골재는 표면에 부착된 모르타르로 인하여 천연골재와 비교할 때 3~7배의 높은 흡수율을 지닌다. 따라서 콘크리트 제조에 활용하기 위해서는 프리웨팅 등의 조치가 필요하지만 압축강도를 비롯한 역학적 특성뿐만 아니라 동결 용해 저항성 등 내구성에도 악영향을 미친다.

따라서 <표 3>에서와 같이 재생골재의 흡수율은 골재 표면에 부착된 모르타르량을 판단할 수 있는 지표로서 흡수율이 높을 경우, 역학적 성능뿐만 아니라 내구성과 시공성까지 전반적인 악영향을 미친다.

따라서 재생골재 콘크리트 성능개선의 전제는 낮은 흡수율을 지닌 재생골재의 활용이 전제되어야 하며 그 방안은 <그림 7>에서와 같이 여러 가지가 있으나 ① 청정한 고강도의 원콘크리트를 획득하여 재생골재로 가공하는 방법 ② 재생골재의 생산 과정에서 가급적 원골재에 충격을 주지 않

고 효율적으로 표면 모르타르를 제거하는 시스템의 활용 ③ 재생골재 내외부에 발달된 공극 및 균열을 충전하여 흡수율을 저하는 피복 처리 ④ 배합설계상의 조치 등으로 요약된다.

4. 콘크리트용 골재로서 동슬래그 및 재생골재의 기술개발 현황

동슬래그의 경우, 일본에서는 1990년대 초반부터 산업부산물의 재활용 차원에서 콘크리트용 잔골재로 활용을 위한 5년간의 연구를 수행하였으며 그 결과를 바탕으로 1997년, JIS A 5011-3(콘크리트용 동슬래그 골재)를 제정하였다. 또한 같은년에는 일본 토목학회에서 "동슬래그 콘크리트 제조 및 시공지침"을 제정하고 1998년 JIS A 5308(레디 믹스트 콘크리트)에 레미콘용 골재로서 삽입, 개정하였다. 그리고 최근에는 동슬래그 골재 콘크

표 3. 재생골재 흡수율이 골재 품질과 콘크리트에 미치는 영향

구 분	골재 및 콘크리트에 미치는 영향	비 고
높은 흡수율의 재생골재	1) 재생골재 비중 및 단위용적중량의 감소 2) 재생골재 콘크리트의 강도 감소 3) 재생골재 콘크리트의 내구성 저하 및 건조 수축 증대 4) 배합수의 관리	• 골재 표면의 부착 모르타르량 증대로 인한 비중, 단위용적중량 감소 • 골재-모르타르의 부착력 감소 • 프리웨팅, 배합수 증가 투입 등에 의한 동결 용해 저항성 감소와 건조 수축 증대 • 프리웨팅 등의 조치 필요
낮은 흡수율의 재생골재	1) 재생골재 콘크리트의 역학적 특성 및 내구성 등의 개선 2) 재생골재 콘크리트의 제조, 시공, 관리의 개선	• 천연 골재와 유사한 품질 확보

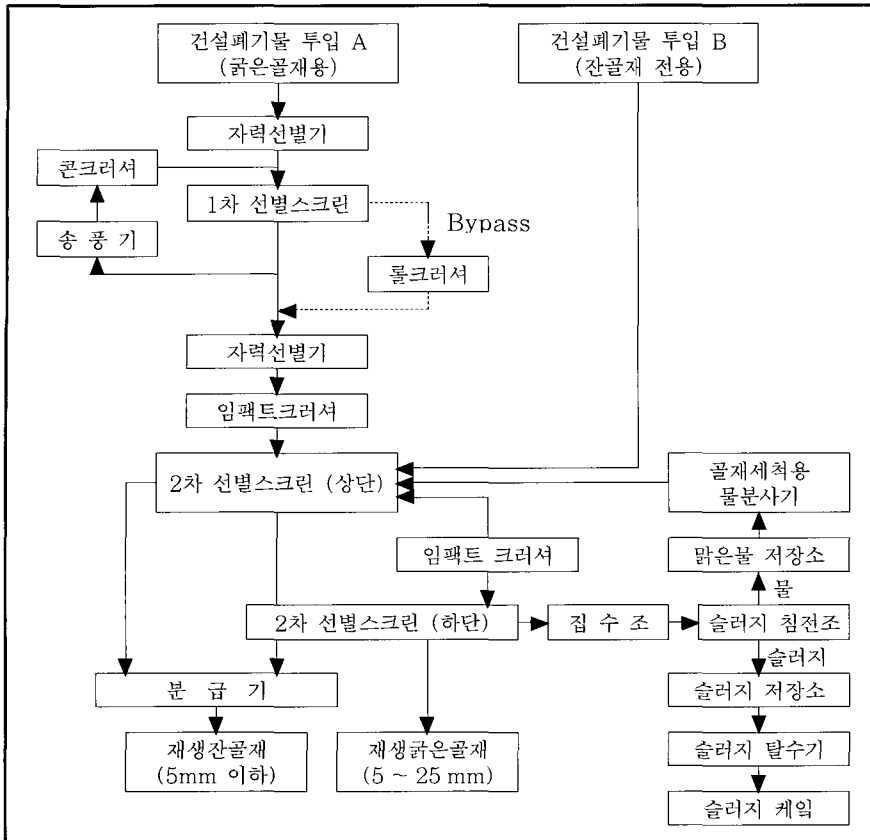


그림 8. 1종 재생골재 생산시스템

적극적인 활용을 위한 기술개발이 필요하고 이를 현장에서 적극적으로 수용할 수 있는 긍정적인 마음가짐이 요구된다. □

참고문헌

1. 이태용, "산업부산물 자원재활용 정책방향 (석탄재 및 슬래그를 중심으로)", 한국콘크리트학회 Posco Forum 발표집, 1999.
2. 이형우 외, "폐 Copper Slag의 시멘트 모르타르 잔골재 재활용", 한국폐기물학회 지 제15권 제6호, 1998.
3. 한국건자재시험연구원, 「Blasting 연소재 Slag의 잔골재로서 활용화 방안 연구」, 한국건자재시험연구원, 1998.
4. LG-Nikko 동제련 기술연구소, 동제련 슬래그의 물성과약 및 개선을 통한 용도개발, 2000.
5. LG-Nikko동제련(주) 제련기술연구소, 동제련 슬래그의 물성 파악 및 개선을 통한 용도개발 - 청정생산기술개발사업 진행결과 -, LG-Nikko동제련(주), 1999.
6. 김광우, 콘크리트 재활용 실태 및 연구동향, 콘크리트학회지, 1994.
7. 김무한, 「건설산업폐기물의 리사이클링 시스템 및 재활용 기술개발에 관한 연구」, 충남대, 건설교통부, 1997.
8. 財團法人建築業協會廢棄物處理再利用委員會, "再生骨材콘크리트에關する研究", 콘크리트工學, 1978. 7.
9. 再生콘크리트의利用技術의開發, 日本國土開發技術研究センター, 1995.
10. 阿部道彦, 콘크리트副産物の再生利用技術, 平成 6年 建築研究所春季研究發表會聽講資料, 1994. 5.
11. Yannas, S. F. "Waste Concrete as Aggregate for New Concrete", ACI Journal, August 1977.
12. Hansen, T. C. "Recycling of Demolished Concrete and Masonry", E FN SPON.
13. Hansen, T.C. and Narud, H., "Strength of recycled concrete made from crushed coarse aggregate", Concrete International-Design and Construction, Vol.5, No.1, pp.79 ~ 83, 1983.

리트의 높은 단위중량의 장점을 이용하여 주로 항만 공사용 테트라포트, 방파제 구축용 콘크리트 등에 활발한 적용이 이루어지고 있다.

국내에서는 1997년 동슬래그의 건설용 골재 활용을 위한 본격적인 연구를 시작한 이후, 2000년에 "KS F 2543(콘크리트용 동슬래그 골재)"으로 한국산업규격이 제정되었으며 최근에는 건축물, 항만용 방파제, 테트라포트 등에 점진적인 활용이 이루어지고 있다. 또한 최근에는 콘크리트용 잔골재로서 최적 입도의 공급 및 적정 혼입률을 중심으로 동슬래그를 사용한 콘크리트의 특성에 관한 규명이 이루어지고 있으며 "동슬래그 콘크리트 시방서" 제정을 위한 노력이 추진되고 있다.

재생골재의 경우는 국내에 흡수율이 낮은 양질의 재생골재 생산기술이 없어 실질적인 콘크리트용 골재로서 사용이 이루어지지 않았으나, 1999년 KS F 2573(콘크리트용 재생골재)이 제정되고 <그림 8>에서의

시스템을 이용하여 2000년에는 흡수율 3% 이내의 천연 골재와 유사한 재생골재 생산 기술이 개발되었다. 따라서 건축물을 비롯한 레미콘용 골재로서 본격적인 활용 노력이 추진되고 있다. 특히 건설교통부를 중심으로 건설 폐기물 재활용 촉진을 위한 용적률 완화 등 다각적인 정책 지원이 강구되고 있어 점진적으로 재생골재의 활용이 이루어질 것으로 예상되고 있다.

5. 결 언

콘크리트 제조에 사용되는 모든 골재는 육상, 수중 골재를 불문하고 모두 환경 훼손을 전제로 얻어지는 것이며 환경과 자원이 중시되는 21세기에는 골재의 채취와 사용에 많은 어려움을 겪을 것으로 예상된다. 또한 다양한 산업 부문에서 많은 부산물이 발생되고 있으며 그 처리에 어려움을 겪고 있다. 따라서 다양한 재생 재료를 사용한 콘크리트의 제조와 품질 확보를 위한