충북지역 광산폐석의 콘크리트용 골재화에 관한 연구

유 현 기 〈충주산업대학교 부교수〉

1. 서 론

최근 들어 건설산업의 대규모화, 다량화 등으로 말미암아 막대한 양의 콘크리트를 이용하게 됨으로써, 종전에 손쉽게 구할 수 있던 양질의 천연 골재는 고갈의 위기에 놓여 있고, 또한 자연환경의 보존 차원에서도 더 이상 취급할 수 없는 고갈현상은 날로 심화되고 있는 실정이다.

이러한 천연골재의 대책으로는 천연자원인 암석을 물리, 화학 등 인공적인 가공에 의한 활용방안과 저품질 천연골재의 활용방안 및 건설 또는 산업 폐기물, 부산물 등을 가공하여 재활용하는 (Recycling) 방안 등의 다각적인 측면에서 대체골재의 개발이 시도되어 왔는데, 이 중 비교적 바람직한 방안으로는 산업폐기물의 일종인 광산폐석을 콘크리트용 골재로 재활용하는 방안을 들 수 있다.

즉, 산업폐기물인 광산폐석은 양이 막대하고, 환경오염방지와 자원의 재활용 측면에서 일거양득의 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단되어지며, 또한 가장 경제적일 수 있는 가능성이 있음에도 불구하고, 구체적인 활용방안에 대한 연구는 미흡한 실정에 있다.

그러므로, 본 연구에서는 충북도내 전체 광산에 대하여 폐석의 발생량과 사용량을 설문 및 현지조사를 통하여 분석하고, 그 중 가장 대표적이라고 판단되는 광물을 임의로 선정하여 그 폐석을 죠크랏셔(Jaw crusher)에 의하여 골재화할 경우, 입도 및 입형 특성과 콘크리트용 골재로서의 제반 물리적 성질을 구명하므로써 콘크리트용 골재로서의 활용 가능성 및 가능량에 대한 검토에 참고자료를 제시하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 광산의 실태조사

1) 조사방법 및 기간

본 조사의 조사시기는 1991년 4월에 각 사업체로 실태조사서를 발송한 다음 5월말까지 회수하여, 회수된 실태조사서와 통계자료를 비교 분석한 다음, 동년 7~8월의 2개월간에 걸친 전체 광산의 현지 조사를 통하여 실태조사서에 대한 회신 확인과 회수되지 않은 사업체에 대하여는 현지에서 실태조사를 실시하였으며, 이때 각 광산의 대표적인 폐석을 시료로 채취하여 실험실로 운반하였다.

2) 광종분포 및 광산 운영

실태조사에서 밝혀진 충북도내 광산의 일반적인 운영 상황으로는 생산 광물 20여종, 광산수 100개이고, 광종별로 구분하면 금속 광산 16개 (16%), 비금속 광산 84개 (84%)이며, 금속 광산은 금 은, 동 아연 광산과 기타이고, 비금속 광산은 석회석, 규석, 무연탄, 기타로써, 이상의 광산별 구성 및 운영현황은 〈그

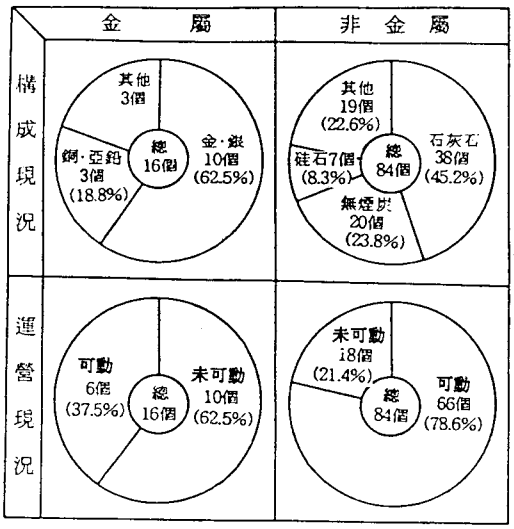
림-1〉과 같다.

3) 광산폐석의 발생량

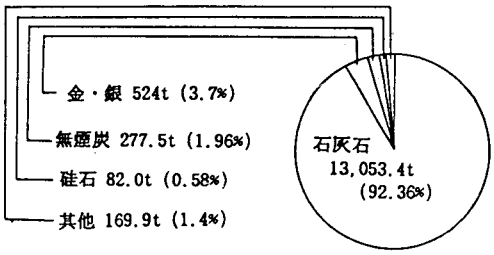
충북도내 조사대상 광산 100개중 광산의 폐석을 콘크리트용 골재로 이용할 수 없다고 보여지는 산과 이미 골재화되고 있는 광산 및 화강암 광산, 가동되고 있지 않는 광산을 제외하면 68개 광산으로, 전체 광산의 1일 폐석 발생량을 집계하면 14,134t이나 되는 막대한 양임을 알 수 있었다.

이를 광종별로 세분하여 보면 〈그림-2〉와 같이 석회석이 전체 발생량의 92.36%로 거의 대부분을 차지하고, 금 · 은 광산이 3.7%로 그 다음이며 무연탄, 규석, 골석, 대리석, 납석의 순으로 나타났다.

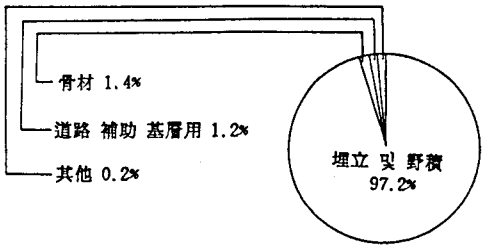
또한 폐석 발생량이 가장 많은 석회석 광산에 대하여 폐석의 용도를 분석하면 〈그림-3〉과 같이 매립 및 야적이 97.2%로 제일 많고, 그 다음이 골재용 1.4%, 도로의 보조 기층용 1.2 %, 기타 0.2%의 순으로 나타났는데, 이 중 매립 및 야적은 적당한 용도가 없는 것으로 콘크리트용 골재화할 수 있는 대상이 된다. 결국 1일 평균 폐석 발생량을 14천t으로 보면 연간 4,200천t의 폐석이 발생함을 알 수 있다.



〈그림-1〉



〈그림-2〉 광종별 폐석 발생량의 구성



〈그림-3〉 석회석 폐석의 사용 용도

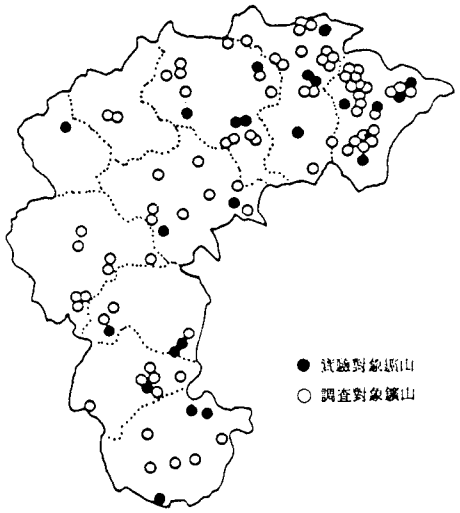
3. 광산폐석의 콘크리트용 골재화에 관한 실험

1) 실험대상

본 실험의 대상은 광산폐석의 발생량 조사에서 밝혀진 활용 가능한 68개 광산 중 광종별로는 13개 전부를 선정하였고, 산지는 동일 광물일지라도 폐석의 산출량이 많거나 광맥이 다른 경우는 광종별 산지를 추가하여 총 23개 산지의 광산폐석을 대상으로 선정하였는데, 이때 충북도내 전체광산중 대상광산은 〈그림-4〉와 같다.

2) 실험계획

본 연구의 실험계획은 〈표-1〉과 같다. 즉, 죠크랏셔



〈그림-4〉 실험대상 광산

로 분쇄된 광산폐석에 대하여 입도특성으로 입도분포, 조립율, 입형특성으로 입형판정 실적율, 형상계수, 형상분류 및 물리적 특성으로 비중, 흡수율과 굵은골재의 마모율 및 잔골재의 No.200체 통과량 등을 시험하여 콘크리트용 골재로서 활용 가능한 광산폐석의 색출과 아울러 사용 가능량을 추산하도록 실험 계획하였다.

3) 실험방법

본 연구의 실험방법은 실험대상 광산폐석에 대하여 먼저, 현지로부터 채취해 온 40~80mm의 광산폐석을 실험실용 죠크랏셔를 이용, 분쇄하므로써 골재화

〈표-1〉 실험계획

골재종류	실 험 항 목	
	잔 골 재	굵 은 골 재
13광종23개 산지	입도분포,조립율 입형판정 실적율, 비중, 흡수율	
	No. 200체 통과량	마모율, 형상계수 및 형상분류

하였다. 분쇄가 끝난 광산폐석을 No.4체로 체가름하여 잔 · 굵은골재로 분류한 다음 각 골재의 입도 및 입형과 물리적 특성을 각각 KS의 해당 규정에 의거 표준적인 방법으로 실시하였고, 굵은골재의 형상계수는 Wenthworth의 방법으로 구하였으며, 형상계수는 Zingg의 방법으로 실시하였다.

4) 입도분포 및 입형 특성

가.입도분포 특성

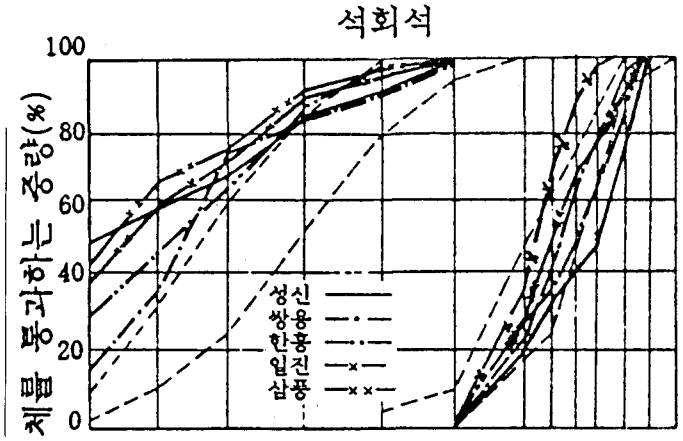
〈그림-5〉는 실험대상 광산폐석을 죠크랏셔로 분쇄하였을 경우 제조된 잔 · 굵은골재의 입도분포를 광종별로 나타낸 그래프이다.

잔골재의 경우 입도분포 형태는 균일입도성 분포를 나타내는 쌍용광산의 석회석을 제외하고는 산지별 또는 광종별로 거의 유사한 경향인데 즉, 1.2mm 이상과 0.15m 이하의 입도가 많은 불연속성 입도의 경향을 나타내고, 대부분의 광종에서 0.15mm 이하의 미립분이 20% 내외로서 KS F2558의 콘크리트용 부순 모래의 기준치 2~15%보다 다소 많은 것으로 나타났다.

또한, 굵은골재의 입도분포는 광종별, 산지별로 거의 유사한 경향으로 나타났는데, 특히 대덕 및 지원의 무연탄, 용화의 금, 금풍의 동, 기린의 몰리브덴 폐석의 경우 10mm이상의 입자가 표준입도 범위보다 적은 것을 제외하고는 거의 모든 폐석이 표준입도 범위에 들어가거나 접근하고 있어 약간의 입도조정을 실시하면 입도분포상으로는 거의 문제시되지 않는 것으로 나타났다.

나. 입형특성

〈그림-6〉은 광종별 및 산지별 광산폐석을 죠크랏셔로 분쇄한 경우 입형 특성을 분석하기 위하여 잔 · 굵은골재의 입형판정실적율과 굵은골재의 경우 마모시험후의 입형판정실적율을 막대 그래프로 나타낸 것이다. 먼저, 잔골재의 경우 입형판정 실적율은 평균



〈그림-5〉 죠크랏셔에 의한 분쇄후 제조된 잔.굵은골재의 입도곡선

56.5%로 KS의 "53% 이상" 규정을 상회하는 양호한 것으로 나타났는데, 유일하게 불합격된 한국유리산 백운석의 경우는 52.8%로 약간 저하하는 것으로 나타났다.

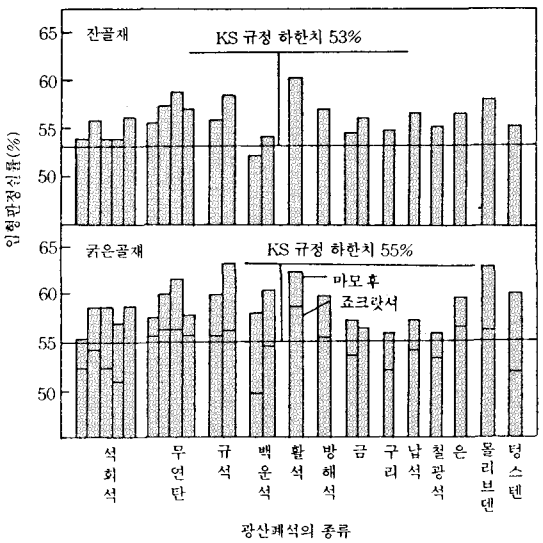
굵은골재의 입형판정실적율은 평균 54.6%로서 KS의 "55%이상"규정에 대부분 미달되는 불리한 경향을 나타내었는데, 이는 죠크랏셔의 구조상 골재분쇄시 골재간 접촉면에 큰 응력이 집중되어 파쇄되므로 편평하거나 길쭉함 등 입형이 매우 나쁜 것에 기인된 결과로 분석되어진다. 단, 굵은골재의 입형 개량을 목적으로 로스안젤스 마모시험기에서 마모회전수 500회로 마모시킨 결과 입형판정실적율은 평균 59.3% 정도로 모두 KS 규격을 상회하는 양호한 결과로 나타나 적절한 방법을 도입하면 입형개량이 가능할 수 있음을 시사하고 있다.

참고로 〈표2〉는 죠크랏셔로 분쇄시 및 마모 시험후 골재의 형상계수 및 형상분류를 나타낸 것으로서 먼저, 죠크랏셔에 의한 분쇄후 형상계수는 1.84~4.58의 범위로 광종 및 산지별로 차이가 크게 나타났으며, Zingg의 형상분류법에 의한 형상으로는 용화산의 금광폐석과 기린산 몰리브덴의 경우 구상의 양호한 골재 형상을 나타내었으나, 그 외의 모든 광산폐석에서는 원판상이나 엽판상의 불리한 형상으로 나타났다. 단, 입형개량을 위한 마모시험후의 결과는 성신과 일진산의 석회석, 명암산의 규석, 일신산의 활석을 제외하고는 모두 구상으로 개량되는 것을 알 수 있었다.

5) 물리적 특성

가. 비중

〈그림-7〉은 잔 · 굵은골재의 표건비중을 광종 및 산지별로 나타낸 막대그래프이다. 먼저, 전반적인 경향으로 잔.굵은골재 공히 몰리브덴, 텅스텐, 철광석, 백운석, 동 및 일부 석회석에서 비중 2.7 이상으로 나타났다. 이를 건축공사 표준시방서 및 KSF 의 규정치인 비중 2.5이상과 비교할 때 잔골재의 경우 단양 대흥의 백운석, 제천



〈그림-6〉 잔 · 굵은골재의 입형판정실적율

명암의 규석, 보은 한보의 무연탄 및 단양 드렁골의 납석에서 2.47~2.48로 약간 미달되고 있으나, 굵은 골재의 경우에는 규정치를 상회하여 양호한 비중임을 알 수 있었다.

나. 흡수율

〈그림-8〉은 잔 · 굵은골재의 흡수율을 비교한 그래프이다. 골재종류별 흡수율은 전반적으로 비중과는 반대의 경향으로 비중이 작은 광종은 흡수율이 크고, 비중이 큰 텅스텐, 몰리브덴 및 철광석에서 작은데, 대부분의 광종은 건축공사 표준시방서 및 KS 규정인 "3.0 이하"에 합격하는 양호한 경향이나, 잔골재의 은과 납석의 광종에서 3.23%와 3.05%로 규정을 상회하고, 굵은골재는 괴산 한흥산 석회석만이 3.68%로 규정을 상회하는 경향으로 나타났다.

〈표-2〉 광산폐석의 골재화 방법에 따른 입형

구 분		Jaw crusher		마모 시험기	
		형상계수 F=a+b/2c*	형 상	형상계수 F=a+b/2c*	형 상
석회석	성신	2.87	원판상	2.04	원판상
	일진	2.45	원판상	2.31	원판상
	한흥	2.90	원판상	1.71	구상
	삼풍	3.10	원판상	1.59	구상
	쌍용	2.28	원판상	1.82	구상
무연탄	대덕	2.63	원판상	1.93	구상
	한보	2.65	엽판상	1.82	구상
	마로	2.63	엽판상	1.74	구상
	지원	2.74	엽판상	2.00	구상
규 석	명암	2.30	엽판상	1.91	원판상
	금평	2.30	엽판상	1.58	구상
백운석	한국유리	4.58	엽판상	1.54	구상
	대흥	2.34	엽판상	1.73	구상
골 석	일신	2.53	엽판상	1.97	원판상
방해석	월림	2.13	원판상	1.55	구상
금	영풍	2.42	원판상	1.64	구상
	용화	1.84	구상	1.78	구상
동	금풍	3.13	원판상	1.81	구상
납 석	드렁골	2.96	엽판상	2.38	구상
철광석	만정	2.34	원판상	1.78	구상
	은월유	2.22	원판상	1.76	구상
몰리브덴	기린	2.20	구상	1.74	구상
텅스텐	동광	2.92	엽판상	1.65	구상

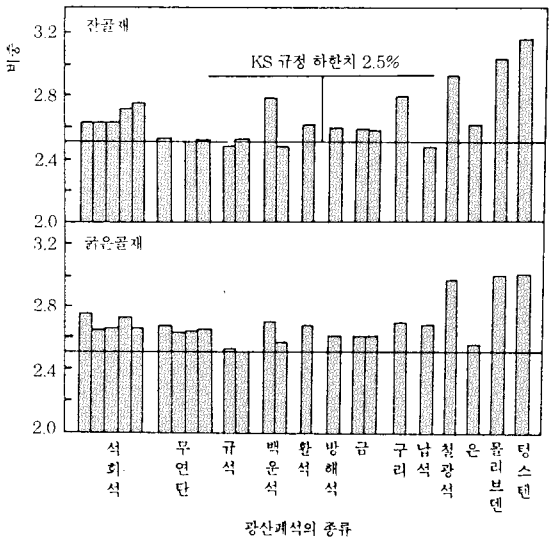
* a는 골재의 최대경, b는 골재의 중간경, c는 골재의 최소경임.

다. No.200체 통과량

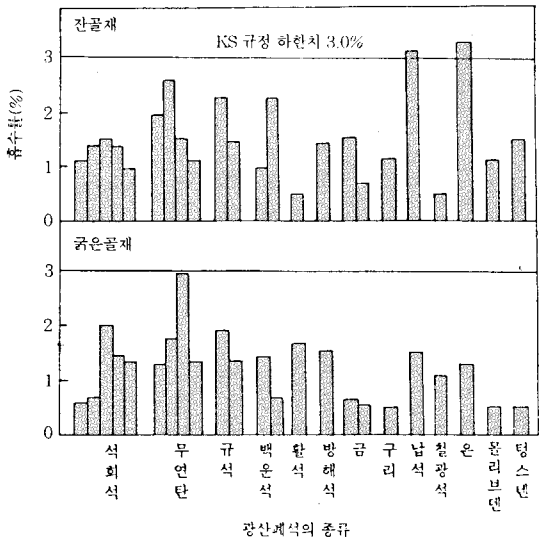
〈그림 9〉는 광종 및 산지별 잔골재의 No.200체 통과량을 비교한 것으로, 보은 일진산의 석회석 폐석이 20.4%로 제일 크고, 괴산 금평산의 규석, 몰리브덴, 골석의 순으로 나타났으며, 단양 드렁골산의 납석과 옥천 지원산의 무연탄만이 약 7% 정도로 제일 작게 나타났는데, 광종 및 산지별 편차가 매우 큰 경향으로, 대부분의 잔골재에서 규정치를 상회하고 있어, 죠크랏셔로 분쇄한 쇄석골재를 콘크리트용 잔골재로 이용할 경우 잔입자의 함유량을 줄이는 방안을 강구할 필요가 있는 것으로 판단된다.

라. 마모율

〈그림-10〉은 굵은골재의 마모시험에 의한 마모율을 광종 및 산지별로 비교한 것으로 광종별 편차가 다소 크게 나타났는데, 석회석(괴산, 보은),규석(제천, 괴산), 백운석(단양), 골석(충주),방해석(제천), 몰리브덴(제천)의 6개 광종 9개의 산지의 광산 폐석이 KS규격 40%이하의 규정에 불합격되는 것으로 나타났다.



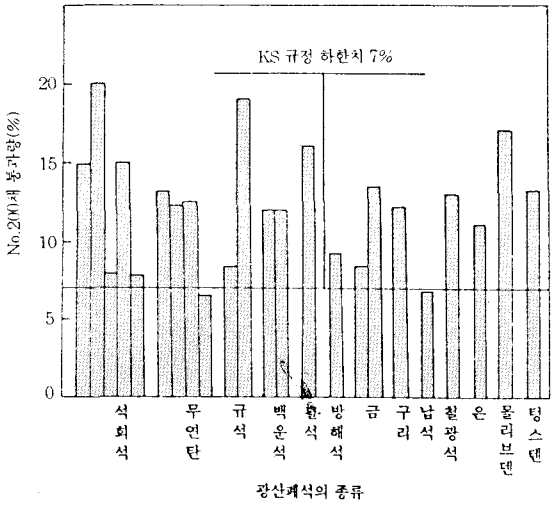
〈그림-7〉 잔 · 굵은골재의 표건비중



〈그림-8〉 잔 · 굵은골재의 흡수율

6) 광산폐석골재의 사용가능량 분석

〈표-3〉은 잔 · 굵은골재의 입도, 입형 및 물리적 성질의 실험결과를 기초로 콘크리트용 골재로서 활용가능여부를 판단한 다음 사용 가능한 광산폐석에 대하여 사용 가능량을 분석한 것이다. 먼저, 광산폐석의 사용 가능여부 판단은 인위적인 개량이 불가능한 비중, 흡수율, 마모율 등이 KS규정에 불합격할 경우는 사용불가로 판단하였으며, 기타 개량이 가능한 요소가 불합격된 경우는 모두 사용가능한 것으로 판단하였는데, 이때, 잔골재의 경우는 보은 한보의 무연탄, 제천 명암의 규석, 단양 대흥의 백운석, 단양 드렁골의 납석, 영동 월유의 은 등 5개 산지의 광종을 제외한 18개 산지의 광종이 가능한 것으로 분석되어졌으며, 굵은골재의 경우 괴산, 영동 및 충주의 석회석과 제천, 괴산의 규석, 단양의 백운석, 충주의 활석, 제천의 방해석 과 몰리브덴 등 9개 산지의 광산폐석이 사용 불가로 판단되고, 그 외의 14개 광산 폐석은 사용



〈그림-9〉 잔골재의 No.200체 통과량

가능한 것으로 분석되었다.

따라서 콘크리트용 골재로서 광산폐석의 사용가능량 환산은 죠크랏셔에 의한 분쇄시 각 발생비율을 먼저, 잔골재는 발생된 잔골재 40% 중에서 미립분(No.200체 통과량 약 15%)제거와 입형개량을 위하여 20%는 폐기하는 것으로 환산하여 32%(발생량 40% × 0.8)를 사용 가능한 양으로 적용하였으며, 굵은골재도 발생량 60%에서 입도 조정 및 입형개량을 위하여 20%는 폐기하여 48%를 사용가능한 양으로 산출하였다.

상기와 같은 산출 방법으로 산출한 결과, 잔 · 굵은골재의 사용 가능량은 〈표-3〉과 같이 1일 폐석발생량 14천t에 대하여 잔골재는 4.7천t(33%) 정도, 굵은골재는 6.4천t(45%) 정도를 재사용할 수 있는 것으로 분석되어졌다.

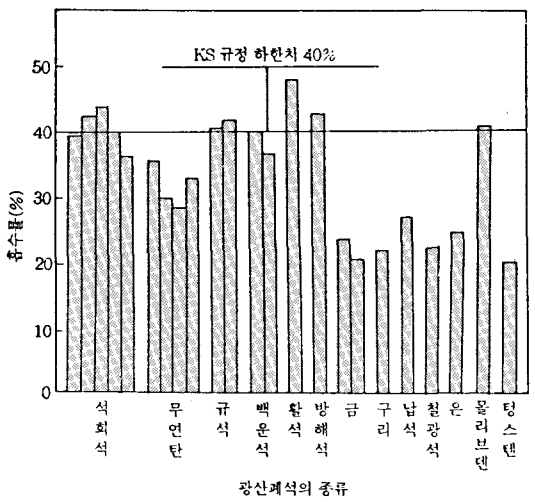
4. 결 론

충북 지역에서 발생되는 산업 폐기물인 광산 폐석을 콘크리트용 골재로 재활용하기 위한 기초 조사연구로서 도내 전체 광산에 대하여 폐석의 발생량 및 사용량을 설문 및 현지답사를 통하여 분석하고, 그 중 대표적인 광산폐석을 대상으로 콘크리트용 골재로서의 활용가능성 여부 및 가능량을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 충북도내 조사대상 광산 100개 중 골재로 이용할 수 없거나 이미 골재화되어 있는 광물의 광산을 제외하면 68개소로서 1일 평균 폐석량은 총14,000t인데 석회석이 제일 많고 금, 무연탄, 규석 등의 순서로 나타나, 비금속 광산이 96.3%, 금속광산이 3.7%를 차지하고 있었다.

2) 광산폐석의 입도분포 특성은 잔골재의 경우 전반적으로 1.2mm이상과 0.15mm이하의 입자가 많고 그 사이가 적은 불연속 입도분포성 경향으로 대부분 표준입도 범위를 벗어났고, 굵은골재는 동과 몰리브덴 폐석을 제외하고 거의 대부분 표준입도범위에 들거나 접근하고 있었다.

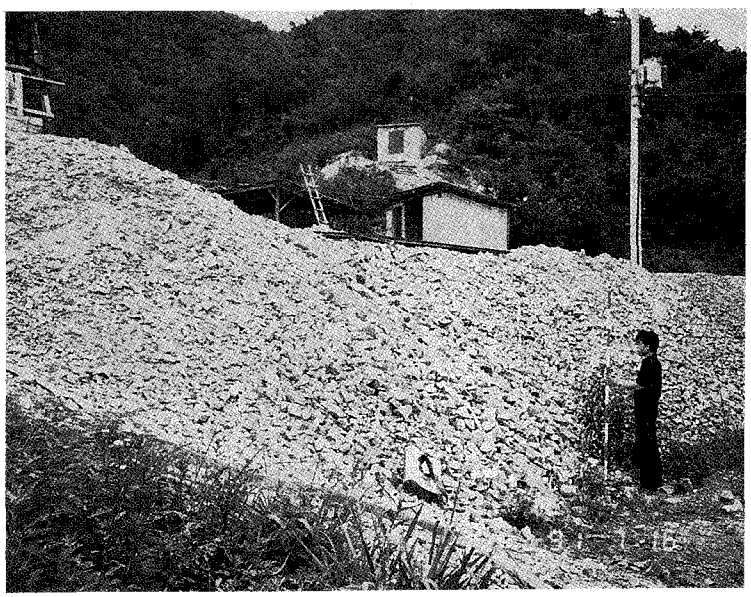
3) 입형특성으로 입형판정실적율은 잔골재의 경우 거의 모든 폐석이 KS규정 "53%이상"에 합격하고, 굵은골재는 대부분 "55%이상"에 미달되는데, 형상은



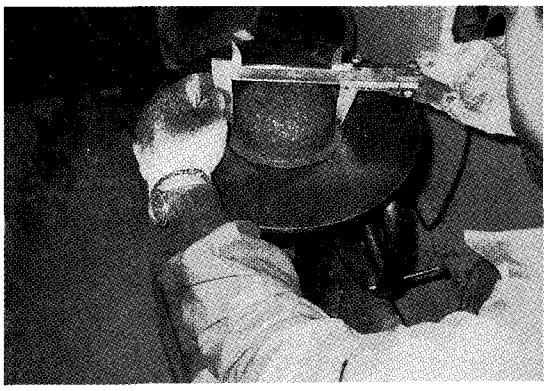
〈그림-10〉 굵은골재의 마모율

원판상이나 엽판상으로 나타났다. 단, 굵은골재의 입형개량을 위하여 로스 안젤스 마모시험기로 마모시킨 결과 모든 광종에서 입형판정시험율 이 KS규정에 합격하고, 거의 모두가 구상으로 개량되었다.

4) 물리적 특성으로 표건비중은 잔골재의 경우 4개 광산폐석이 KS규정 "2.5이상"에 미달되었으나, 굵은골재는 모두 KS규정에 합격하였고, 흡수율로서 잔골재는 2개, 굵은골재는 1개 광산에서 "3.0% 이하"를 초과하는 것으로 나타났으며, 잔골재의 No.200체 통과량은 거의 모두 KS규정을 상회하여 미립분 제거가 요구되고, 굵은골재의 마모율은 석회석(6개 광산), 규석(2개 광산) 등 9개 산지의 폐석이 40% 이하의 규정에 불합격되었다.



〈표-3〉 잔,굵은골재의 사용 가능량

구분	종류	1일 평균 폐석 발생량 (t/日)	사용 가능량	
			잔골재	굵은골재
금속	금	484	154.9	233.3
	은	40	0	19.2
	기타	0	0	0
	소계	524	154.9	252.5
비금속	석회석	13,053.4	4362.4	6006.2
	무연탄	277.5	79.2	133.2
	규석	82	52.5	0
	활석	80	54.4	0
	납석	4	0	1.9
	백운석	24.5	15.7	0
	기타	88.4	0	0
	소계	13,609.8	4,564.2	6,141.3
계		14,133.8	4,719.1	6,393.8
			11,112.9	
백분율(%)		100	33.39	45.24
			78.63	

5) 광산폐석의 입도 및 입형특성과 각종 물리적 특성으로 활용 여부를 분석한 결과 잔골재는 5개 산지, 굵은골재는 14개 산지의 광산폐석이 사용불가능으로 판단되어, 1일 폐석 발생량에 대하여 사용 가능한 폐석의 발생량은 잔골재 4.7천t, 굵은골재 6.4천t으로 충북지역 광산폐석 발생량의 약 79% 정도를 재활용할 수 있는 것으로 밝혀졌다.