

부순모래를 사용한 레디믹스트 콘크리트의 배합설계 및 강도추정방법 Strength Estimation of Ready-Mixed Concrete Using Crushed Sand

서진국*
Jin-Kook Suh

<Abstract>

It is difficult to keep the balance of supply and demand for natural aggregates in recent years, because natural resources have become to be almost exhausted. Crushed stone is already used for coarse aggregate instead of river gravel at present. Now, crushed sand or sea sand should be used for fine aggregate, because natural sand also has been exhausted with a few exceptions around Nakdong River. The sea sand has a lot of problems which are the corrosion of reinforcement bars, the investment of facility for cleansing salt and the cost increase due to the insufficiency of industrial water. Therefore, it is necessary to produce and to utilize the crushed sand very actively, but some material properties which are related to water absorption, strength and chemical durability, prevent from determining the generalized criteria because its rocks make much differences in its physical and chemical characteristics. In this paper, fundamental physical properties of crushed sand, which comes from Daegu Subway construction fields, have been investigated for the usability on basic material of concrete. The optimum replacement ratio and the strength estimation method of crushed sand replacing natural sand also have been presented here through the compressive strength test of ready-mixed concrete cylinders.

Key Words : *crushed sand, physical properties of ready-mixed concrete, strength characteristics*

1. 서론

최근 들어 국내에서는 사회간접자본에 대한 국가적인 투자가 급증함에 따라 거대한 해양구조물, 장대교량, 다목적 댐, 초고층 건축물 등

부재 크기가 큰 대형구조물이 많이 건설되고 있다. 이러한 사회간접자본을 확충하기 위한 건설부분의 투자는 급증하는 반면 건설에 사용되어지는 원자재인 여러 가지 천연자원은 그 고갈시대를 맞아 지금까지 수급이 원활하던 콘크

* 정회원, 경동정보대학 토목과 조교수, 工博
영남대학교 대학원 졸업
Tel: (053) 850-8231
E-mail: jksuh@serve.kyungdong-c.ac.kr
(본 연구는 1997년도 경산시 산학협동연구개발사업에 의하여 수행된 것임)

Assistance Professor, Dept. of Civil Engineering,
Kyungdong College, 224-1, Buho, Hayang, Kyungsan,
Rep. of Korea, 712-900
Ph.D., Graduate School of Yeungnam University

리트용 천연골재도 급기야 고갈되기에 이르렀다. 이에 따라 콘크리트 구성의 가장 큰 부분을 차지하는 재료인 골재 중 굵은골재인 강자갈을 대신한 쇄석(碎石)의 사용은 현재 보편화되어 있다. 또한 이제는 낙동강 인근 몇몇 지역을 제외하고는 강모래 대신 부순모래 또는 해사(海沙)를 사용하여야 할만큼 강모래 자원도 거의 고갈되었다. 콘크리트용 잔골재 수급대안의 하나로 해사도 그 부족분을 상당량 감당하고 있지만, 해사는 다량의 염분을 포함하고 있기 때문에 철근 부식에 대한 우려가 크며, 이를 방지하기 위하여 염분세척에 필요한 시설투자 및 공업용수의 부족으로 인한 원가상승 등과 같은 문제점을 가지고 있다. 따라서 이러한 문제를 근본적으로 해결하기 위한 또 다른 대안으로 근래에 대두되고 있는 부순모래의 적극적인 생산 및 활용이 시급하다고 하겠다. 그러나 부순모래의 물리적, 화학적 특성은 그 원석의 출처에 따라 상당한 차이를 보이므로, 흡수량, 강도 특성, 화학적 내구성 등 재료의 여러 가지 특성 상 일반화된 규정을 마련하기가 쉽지 않다.

따라서 본 연구에서는 먼저, 인근 지역에서 생산될 수 있는 부순모래가 콘크리트용 기초재료로 사용 가능한지를 검증하기 위하여 대구 지하철 공사현장에서 흔히 발생되는 암석을 원석으로 한 부순모래의 기초물성을 조사하였다. 또한, 자연사(自然沙)와의 혼입량에 따른 콘크리트의 강도시험을 통하여 적절한 부순모래의 치환율을 결정하였으며, 이를 통한 배합설계의 기준모델과 강도추정식을 제시하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

실험에 사용된 재료는 일반적으로 상용되는 제품을 사용했으며, 단지 잔골재만 부순모래를 사용하였다.

(1) 시멘트

국내에서 생산되는 포틀랜드 시멘트(ASTM Type I, KSL 5201 1종)를 사용하였다.

(2) 골재

시편 제작에 사용한 잔골재는 대구 지하철 공사현장에서 채취한 퇴적암 원석을 분쇄기(roll mill)에 넣어 분쇄하였다. 비교를 위한 천연 잔골재로는 낙동강에서 채취한 하상골재이

며, 그 비중은 2.58이고, 조립율은 3.10이다. 굵은골재로는 안동시 남부지역에서 생산되는 쇄석을 사용하였으며, 굵은골재의 최대치수는 19mm이다. 골재의 품질시험 결과는 다음 [표 1]과 같다.

[표 1] 골재의 품질시험 결과표

골재	비중	조립율	흡수율 (%)	실적율 (%)	단위용적중량 (kg/m ³)
쇄석	2.71	6.15	1.57	59.3	1,600
천연 잔골재	2.58	3.10	1.18	59.1	1,630

(3) 재료의 혼합 및 양생

시편은 $\varnothing 100mm$, $h=200mm$ 의 주철 공시체 몰드를 사용하여 제작하였고, 이 때 혼합장치는 100 l 용량의 강제식 믹서를 사용하였으며, 다짐 시에는 봉상의 진동다짐기를 3단계로 나누어 사용하였다. 시편의 표면 마무리에는 여러 가지 방법이 있으나, 실제 현장여건에 맞추기 위하여 현재 현장에서 가장 널리 쓰이는 몰탈 캡핑방법을 이용하였으며, 양생은 13℃ 수중양생을 실시하였다.

2.2 실험변수

부순모래의 작업성을 알아보기 위하여 부순모래의 혼입량을 본 실험의 주변수로 정하였고, 부순모래를 함유한 콘크리트의 강도 검증을 위하여 천연모래를 사용하여 제작한 시편에 대한 실험결과와 비교하였다. 다음 사항은 본 연구의 실험변수에 관련된 기본적인 요소들이다.

(1) 물/시멘트 비

콘크리트 강도의 결정에는 물/시멘트 비, 굵은골재의 강도, 시멘트풀과 골재의 부착강도 등이 중요한 인자가 된다. 따라서 본 실험에서는 레미콘 업체에서 일반적으로 사용하는 배합비로 물/시멘트 비를 결정하였다.

(2) 슬럼프

천연모래를 사용했을 때의 슬럼프를 기준으로 부순모래의 혼입량에 따른 슬럼프의 경시변화를 측정하였다. 여기서, 부순모래를 사용하면 골재의 흡수량이 천연모래에 비해 커져 슬럼프의 손실이 커질 것으로 예상되므로, 이로 인한 작업성의 저하 및 강도감소 현상에 대한 실험도 병행하였다.

(3) 배합비

부순모래만을 사용할 경우에는 흡수율 등을 고려한 특별한 배합비가 필요하게 되나, 강모래와 혼합하여 사용할 경우에는 일반적인 배합비에서 잔골재율은 변화시키지 않고 부순모래의 양만을 치환하여 사용할 수 있다. 따라서 강모래를 부순모래와 혼합하여 사용할 경우의 부순모래의 최적 혼입율을 구하고, 그 치환율에 따른 적정배합비를 도출하기 위하여 부순모래의 5가지 치환율(0%, 30%, 50%, 70%, 100%)에 대하여 설계강도가 보통강도(210kg/cm²)인 것과 비교적 고강도(400kg/cm²)인 두 가지 배합비를 사용하였다. 여기서, 배합설계의 기준이 되는 상기 두 배합비는 현장조건에 맞는 배합설계표를 제시하기 위하여 레미콘 업체의 일반적인 배합비를 사용하였다. 배합비는 다음 [표 2]와 같다. 표 및 그림의 시편기호 중 'nscs'는 보통강도를, 'hscs'는 고강도 콘크리트 공시체를 나타내며, 뒷부분의 숫자는 부순모래의 치환율을 의미한다.

[표 2] 부순모래의 치환율에 따른 배합비(kg/m³)

시 편	설계 강도	치 환 율	w/c	시 멘 트	굵은 골재	잔 골재	수 량	혼 화 제
nscs-0	210	0	0.547	307	971	880	168	1.54
nscs-30		30						
nscs-50		50						
nscs-70		70						
nscs-100		100						
hscs-0	400	0	0.345	498	881	798	172	2.49
hscs-30		30						
hscs-50		50						
hscs-70		70						
hscs-100		100						

2.3 실험방법 및 내용

부순모래의 물성실험에서는 표준시험방법(KS 및 ASTM규정¹⁾)에 준하여 체가름시험, 단위용적중량시험, 흡수량시험, 표면수시험, 유기불순물시험, 씻기시험 등을 수행하였다. 부순모래를 혼입한 콘크리트의 압축강도시험은 KS F 2405규정과 ASTM규정에 준하여 실시하였으며, 이 때 재하장치는 100ton 용량의 유압식 만능시험기(SHIMADZU제)를 사용하였고, 재하속도는 ASTM C39-86규정에 맞게 1.3mm/min의 속도로 재하하였다. 콘크리트 슬럼프 시험은 KS F 2402에 준하여 슬럼프 값을 측정하였다.

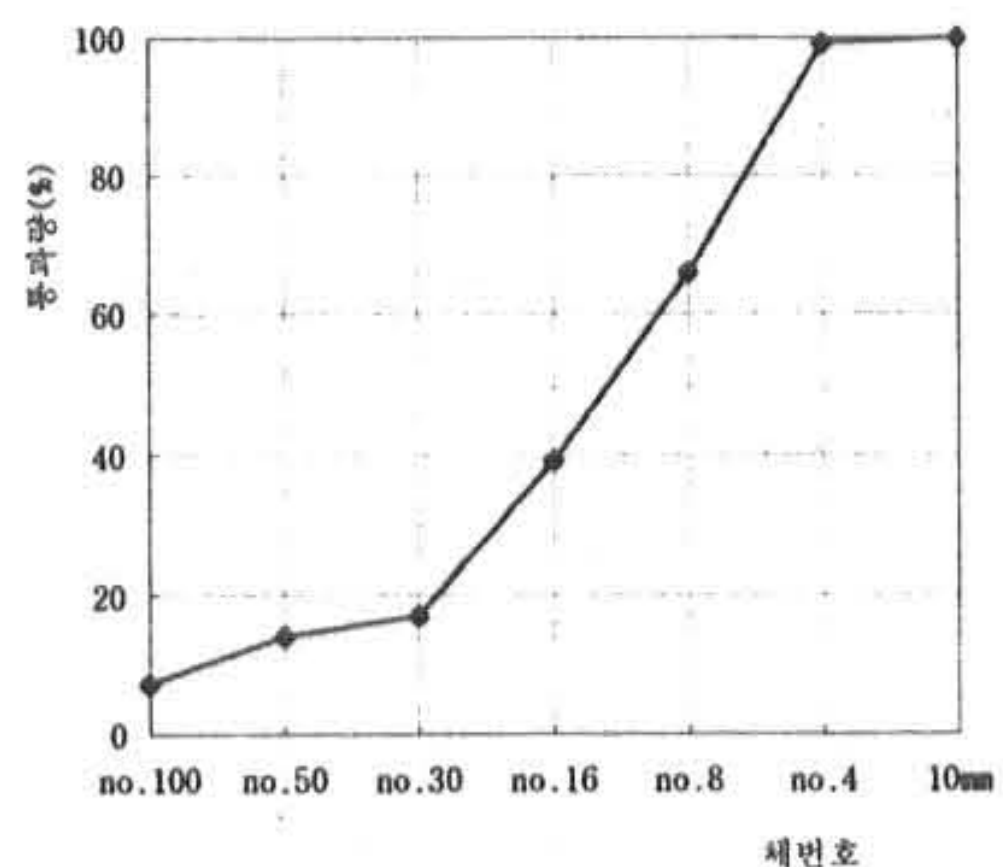
3. 기초물성실험 및 결과

3.1 부순모래의 물성실험

부순모래는 공장에서 생산되는 제품이므로, 천연적으로 산출되는 골재와는 달리 생산설비 관리와 개선을 통하여 균일한 품질을 유지할 수 있다면 천연산 골재에 버금가는 제품을 생산할 수 있다. 부순모래의 품질은 KS규정에서와 같이, 비중이 2.5 이상, 흡수율 3% 이하, 조립율 2.3~3.1, 입형판정실적을 53% 이상, 씻기손실을 7% 이하이며, 입도는 KS F 2558의 입도 범위에 들어가면 콘크리트용 골재로서의 조건을 충족한다. 특히, 양질의 콘크리트를 제조하기 위한 부순모래의 품질은 비중 2.55~2.65, 흡수율 1.5% 이하, 정입도에 가까우면서 5mm체를 100% 통과하고, 2.5mm체 통과량이 90~95%이며, 조립율이 2.6~2.8인 입도분포를 가지고, 입형판정실적을 55% 이상, 씻기손실율이 3~5%인 여건을 구비하여야 한다.²⁾⁻⁸⁾ 그러나 본 실험에 사용된 부순모래는 1997~1998년 현재의 공장여건상 초기가동상태에 머물고 있어 완벽한 품질관리가 이루어지지 않으므로 아래와 같이 이러한 조건을 전부 만족하지는 못하며, 이로 인해 부순모래만을 잔골재로 사용할 수는 없다.

(1) 잔골재의 체가름 시험

KS F 2502 규정에 따라 실시한 부순모래의 체가름시험 결과 잔골재의 조립율은 평균 3.57로서 일반적인 강모래의 경우(2.3~3.1)보다 입자가 큰 것으로 판단되며, 미립분의 함유량도 약간 큰 것으로 나타났다.



[그림 1] 잔골재의 체가름 시험 결과

(2) 잔골재의 단위무게 측정

본 시험은 KS F 2505규정에 의거하여 실시하였으며, 그 결과 일반적인 잔골재의 단위무게는 $1450 \sim 1700 \text{kg/m}^3$ 인데 반해, 시험에 사용된 재료는 일반 천연골재보다 단위무게가 다소 큰 1778kg/m^3 으로 나타났다.

(3) 골재에 포함된 잔 입자 시험

골재의 표면에 잔 입자가 붙어 있으면 골재와 시멘트의 부착력이 감소하고, 사용수량이 증가되어 건조수축이 커지며, 내구성과 강도가 약해진다. 시험에 사용된 부순모래는 7.5%로 그 한도를 훨씬 초과하는 값을 나타내므로 현장에서 이를 사용할 때는 반드시 세척을 한 후 사용해야 할 것으로 판단된다.

(4) 잔골재의 비중 및 흡수량 시험

KS F 2504규정에 따른 시험 결과, 부순모래의 비중은 천연모래의 일반적인 비중과 별 차이가 없으나, 흡수율평균(2.5%)이 천연골재에 비해 큰 것으로 나타나므로 건조수축과 슬럼프 손실로 인한 작업성의 손실이 우려된다.

(5) 잔골재의 표면수 측정

부순모래의 표면수량을 KS F 2509에 의하여 측정한 결과, 평균 3.4로 나타났다.

(6) 유기 불순물 시험

부순모래에 포함된 유기 불순물의 함유량을 색도에 의하여 판정(KS F 2510)한 결과는 대체적으로 표준 용액과 비슷한 색을 나타내므로, 보통강도 콘크리트에는 무해한 것으로 판단되나 강도가 아주 큰 고강도 콘크리트 제작에는 사용하지 않는 것이 합당하다고 판단된다.

3.2 굳지 않은 콘크리트의 물성 변화

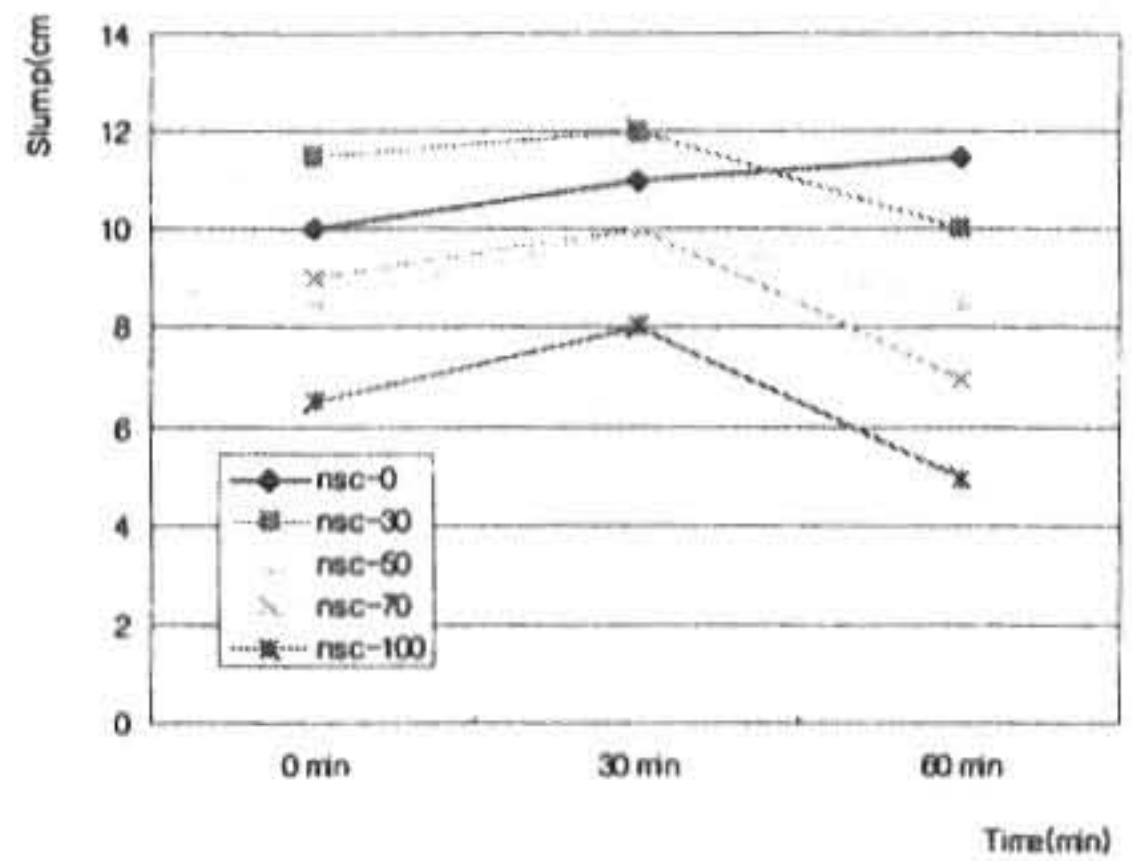
부순모래의 혼입율에 따른 콘크리트의 슬럼프 변화를 [그림 2]와 [그림 3]에 나타내었다.

4. 부순모래를 사용한 콘크리트의 성능

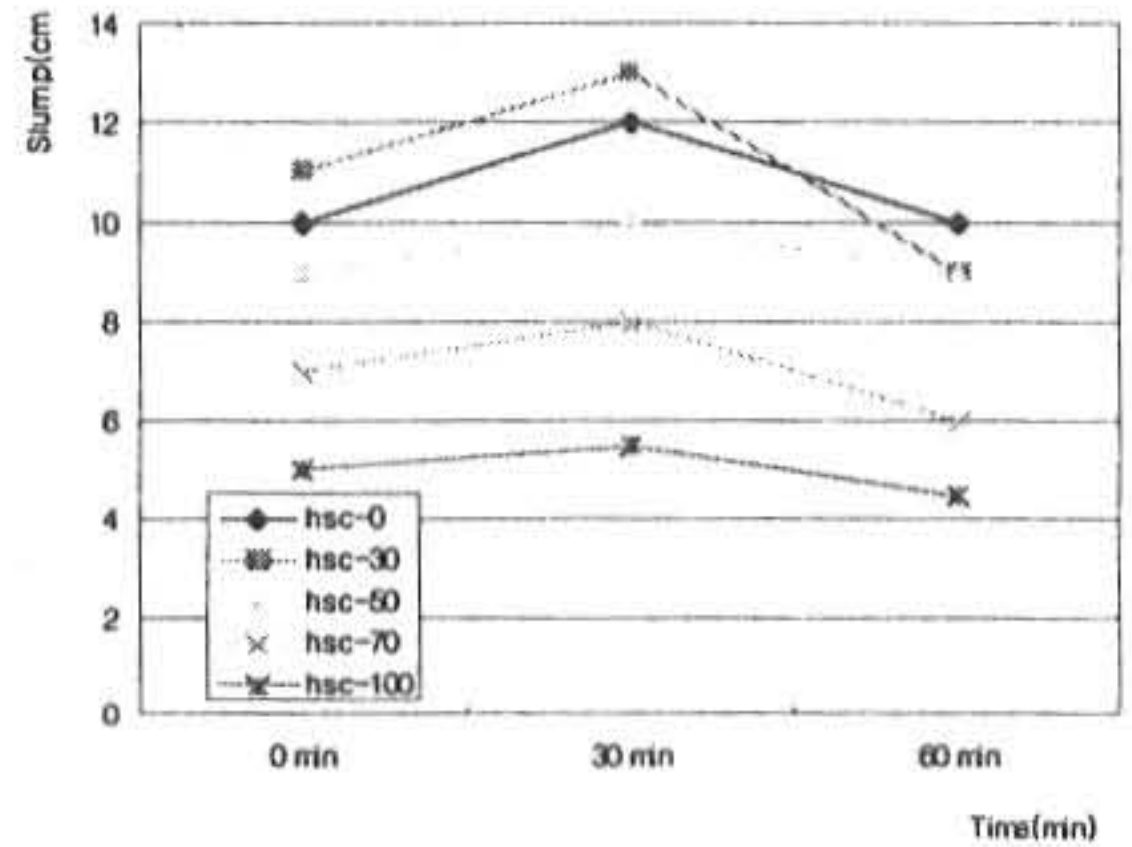
4.1 강도발현범위

콘크리트 공시체의 압축강도는 각 시편별 20개를 일축 압축시험을 한 후 그 파괴모양을 보고 그 중 정상적인 압축파괴형태로 파괴된 것만을 산술 평균하여 결정한 것이다.

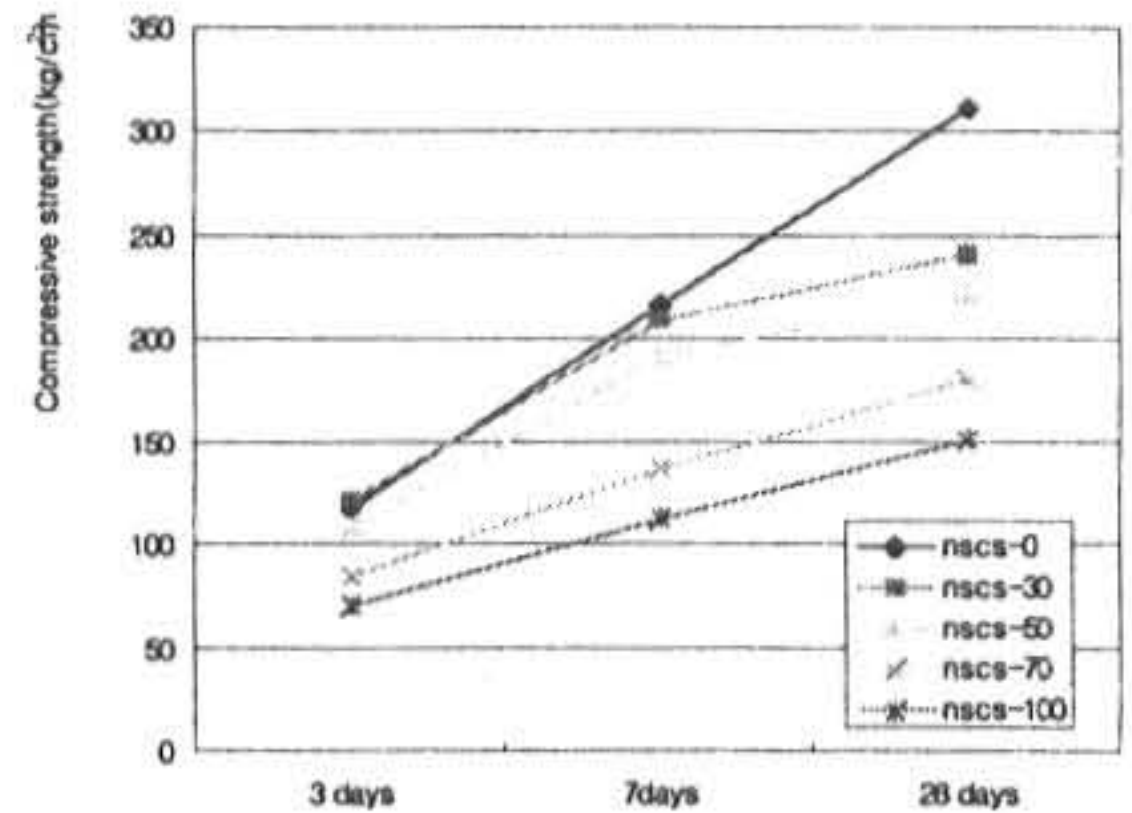
각 경우별 압축강도의 변화는 [그림 4] 및 [그림 5]에 나타난 바와 같이, 28일 강도 기준으로 부순모래의 혼입량이 증가할수록 압축강



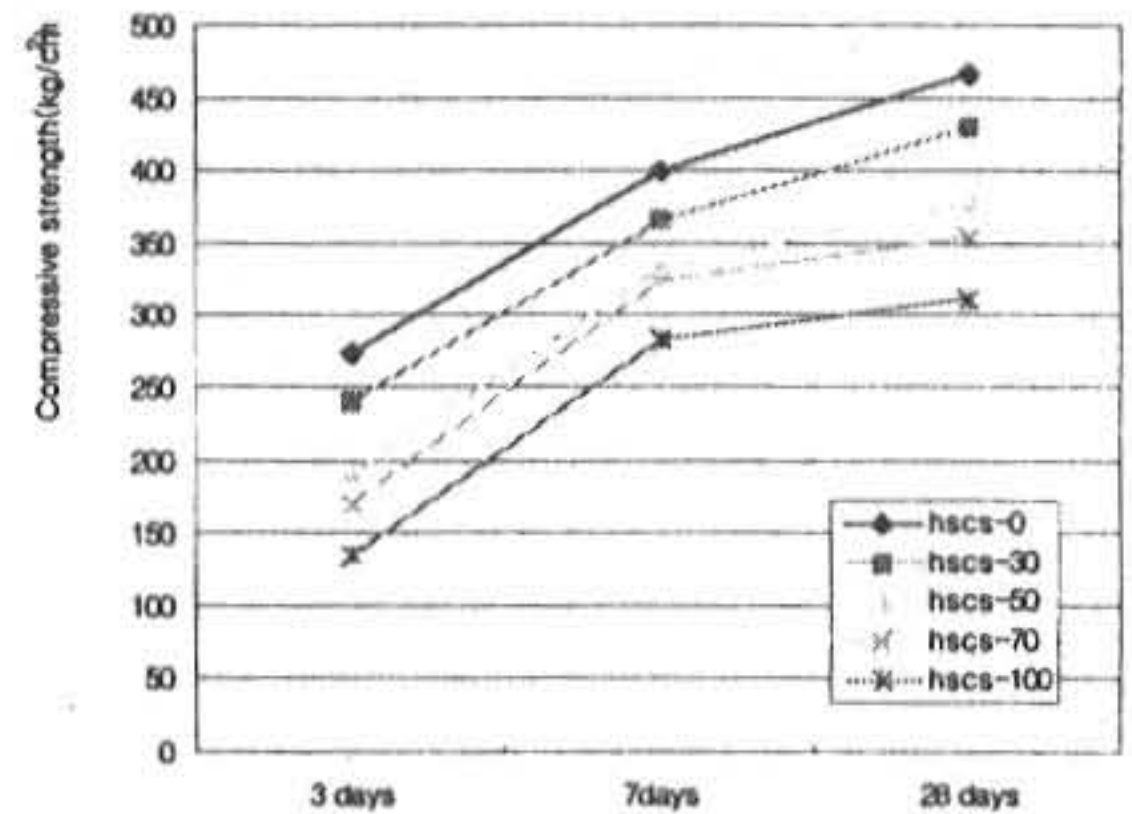
[그림 2] nscs의 슬럼프 경시변화



[그림 3] hscs의 슬럼프 경시변화



[그림 4] nscs의 압축강도 변화



[그림 8] hscs의 압축강도 변화

도가 상대적으로 낮아지는 경향을 보이고 있다. 그러나 한편으로는, 부순모래를 사용한 콘크리트도 특별한 혼화제의 첨가없이 $300\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상의 압축강도를 발현할 수 있다는 것을 보여준다.

4.2 부순모래를 혼입한 콘크리트 강도의 추정

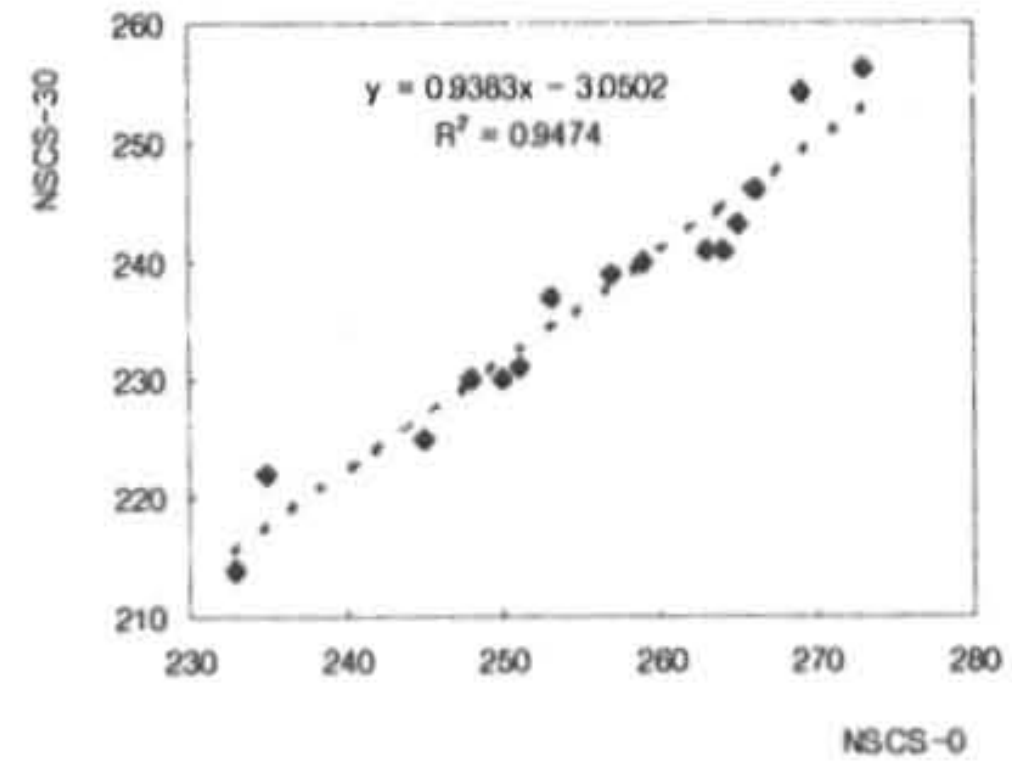
부순모래를 혼입한 콘크리트의 강도를 천연모래를 100% 사용한 콘크리트의 강도로 부터 추정하기 위하여 각 경우별로 15개의 공시체, 즉 150개의 공시체의 압축강도시험을 수행한 후, [그림 6]~[그림 13]과 같이 그 결과를 회귀 분석하여 다음 [표 3]과 같은 강도추정식을 제안하였다. 여기서, y 는 부순모래 콘크리트의 압축강도, x 는 천연모래 콘크리트의 압축강도를 각각 나타낸다.

[표 3] 부순모래 콘크리트의 강도추정식

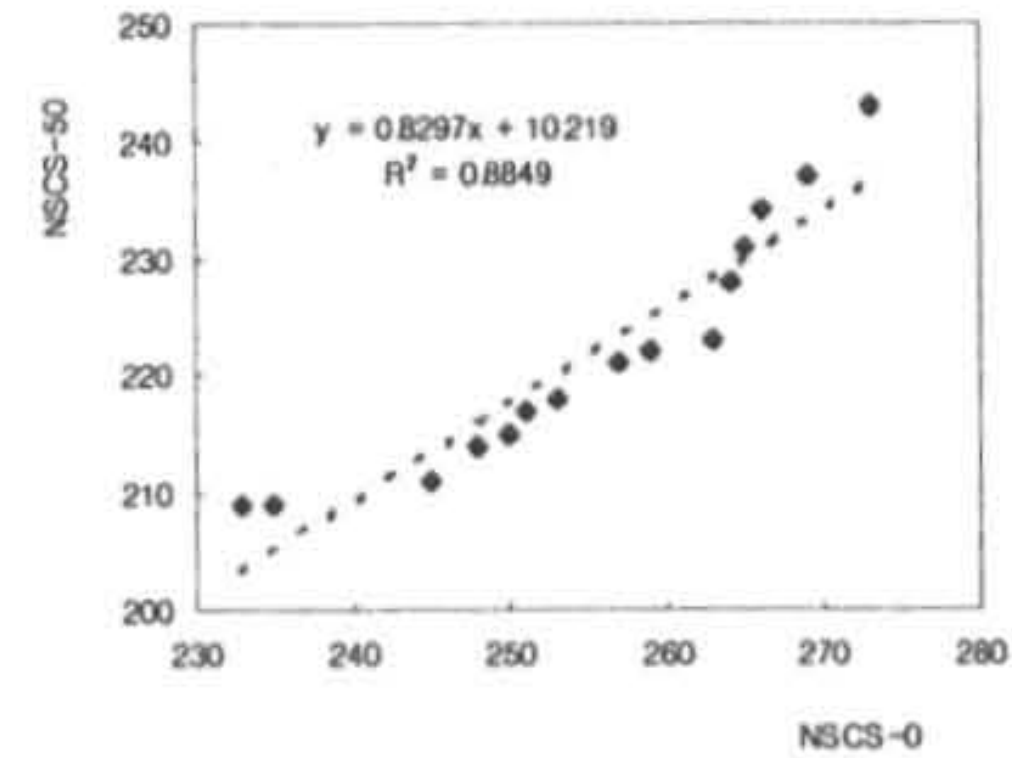
시 편	W/C	강도추정식	신뢰도 (R^2)
hscs-0	0.345	-	-
hscs-30		$y = 0.8211x + 48.656$	0.8514
hscs-50		$y = 0.9133x - 50.265$	0.9392
hscs-70		$y = 0.8260x - 30.594$	0.9582
hscs-100		$y = 1.2224x - 253.18$	0.9574
nscs-0	0.547	-	-
nscs-30		$y = 0.9383x - 3.0502$	0.9474
nscs-50		$y = 0.8297x + 10.219$	0.8849
nscs-70		$y = 0.9991x - 64.968$	0.7923
nscs-100		$y = 0.8437x - 66.938$	0.9160

4.3 배합설계제안

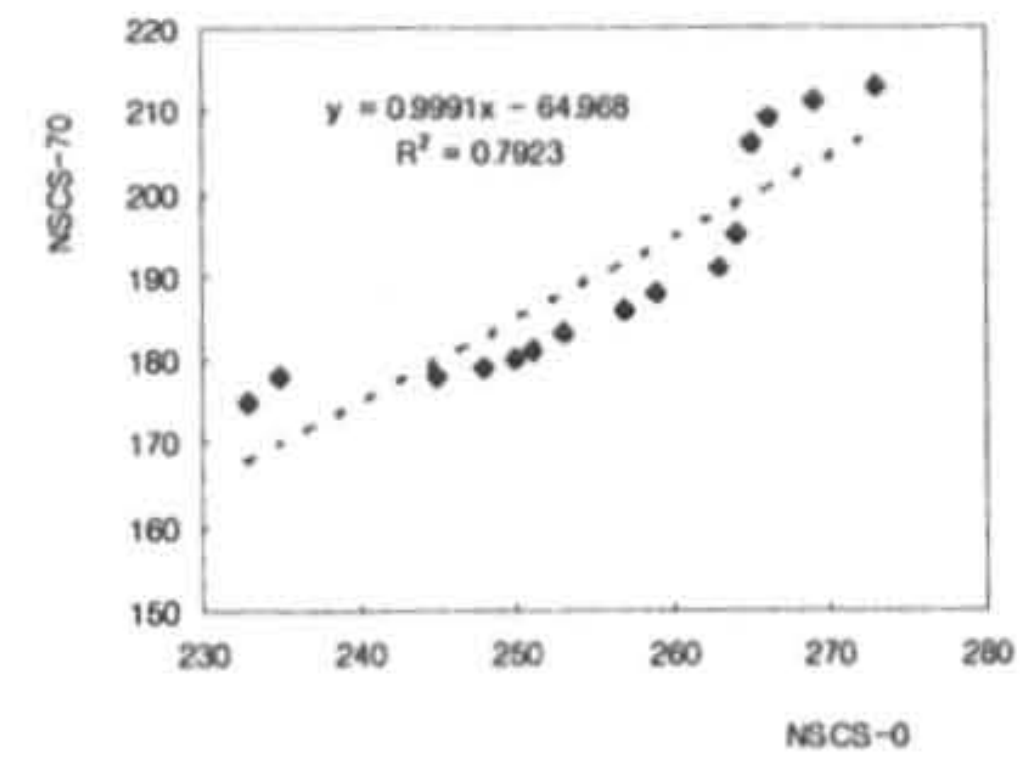
레미콘 제조에 있어 부순모래를 사용할 때 실제 현장에서 사용할 수 있는 배합설계를 부순모래의 적정 혼입을 30%~50%의 경우에 대하여 앞서 기술한 연구결과에 의거하여 제시하였다. 다음 [표 4]~[표 6]은 굵은골재의 크기 (여기서는 최대치수가 25mm인 것만 제시하였음), 슬럼프의 정도, 콘크리트 압축강도 등의 변수를 조합하여 제안한 여러 가지 배합비를 보여준다.



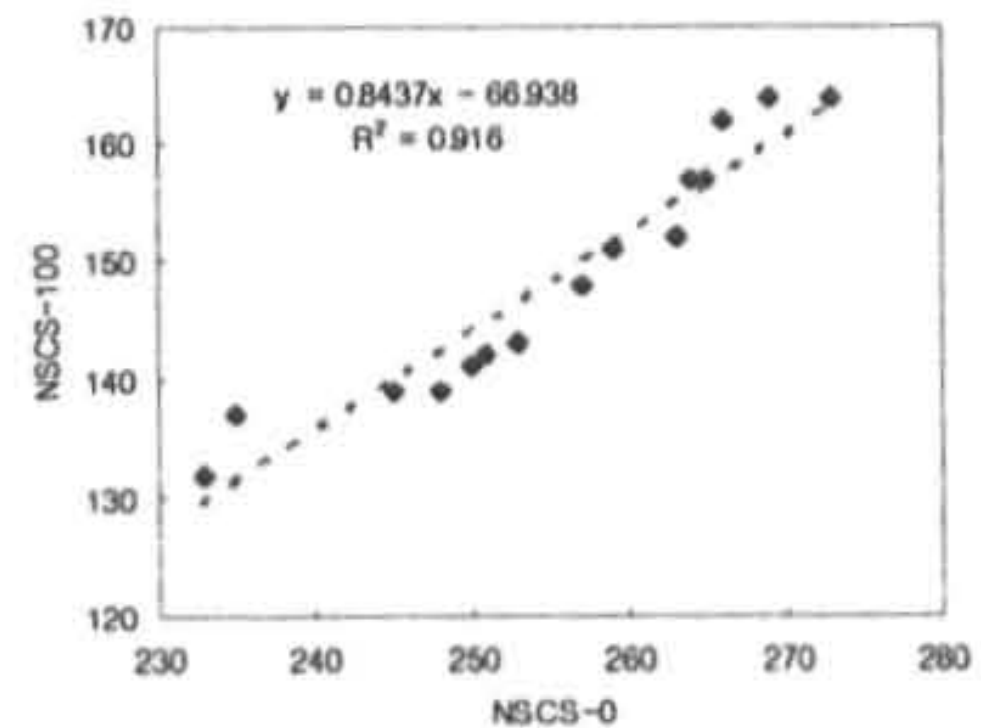
[그림 10] nscs-30의 압축강도 추정



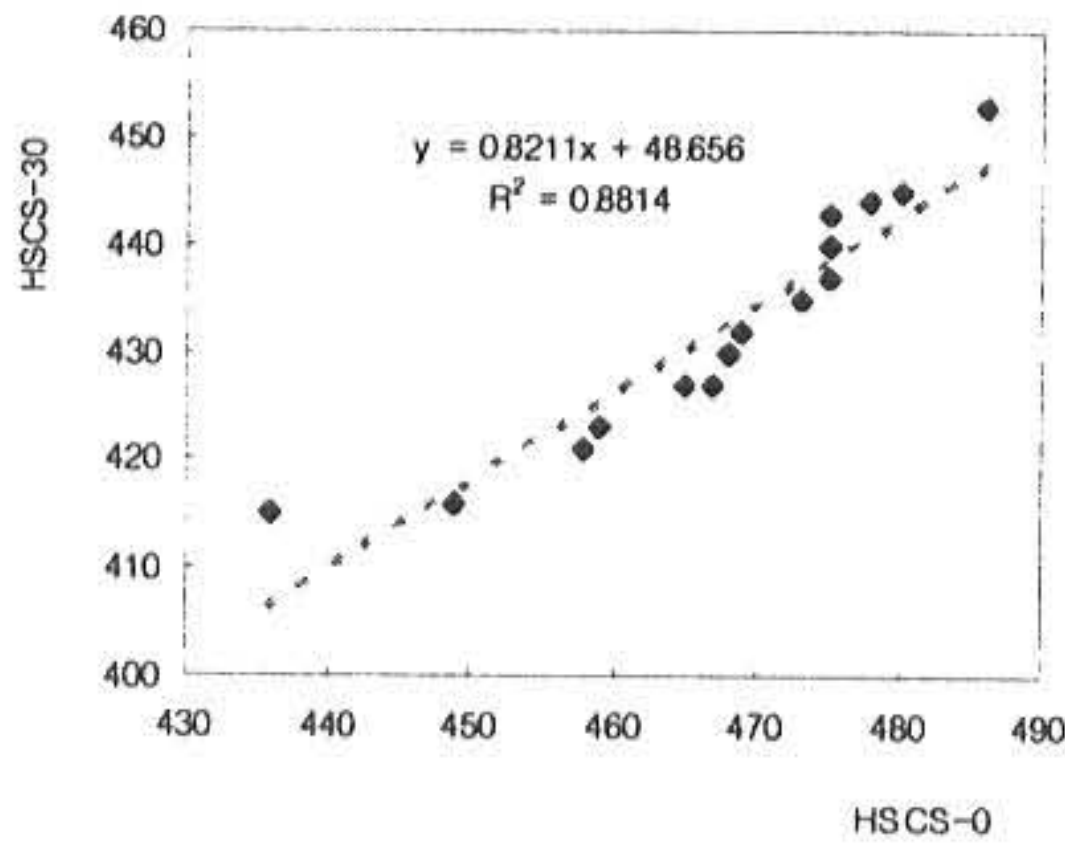
[그림 7] nscs-50의 압축강도 추정



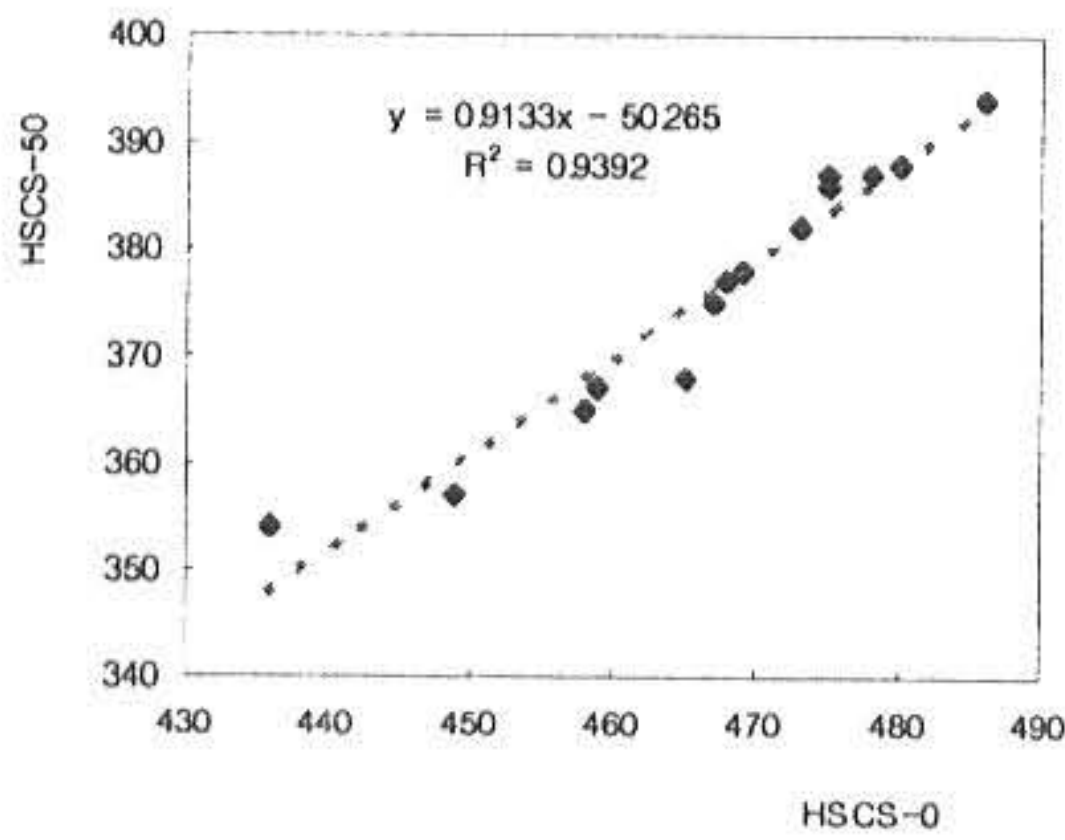
[그림 12] nscs-70의 압축강도 추정



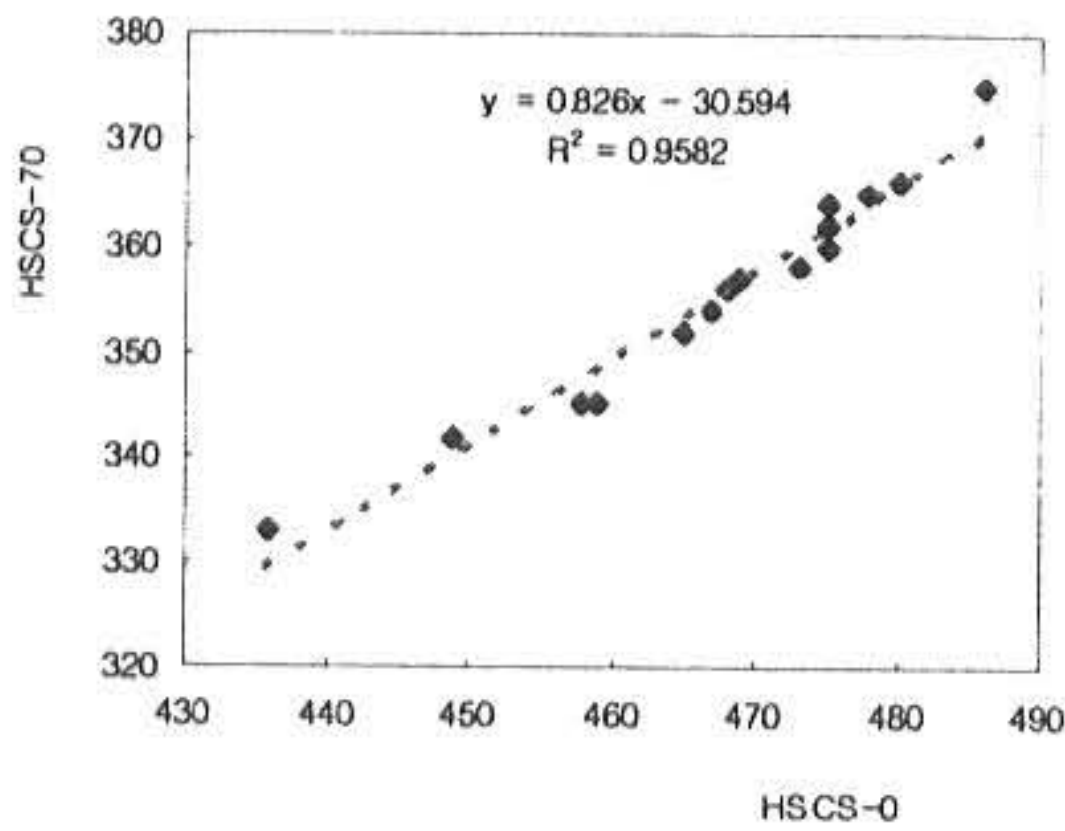
[그림 13] nscs-100의 압축강도 추정



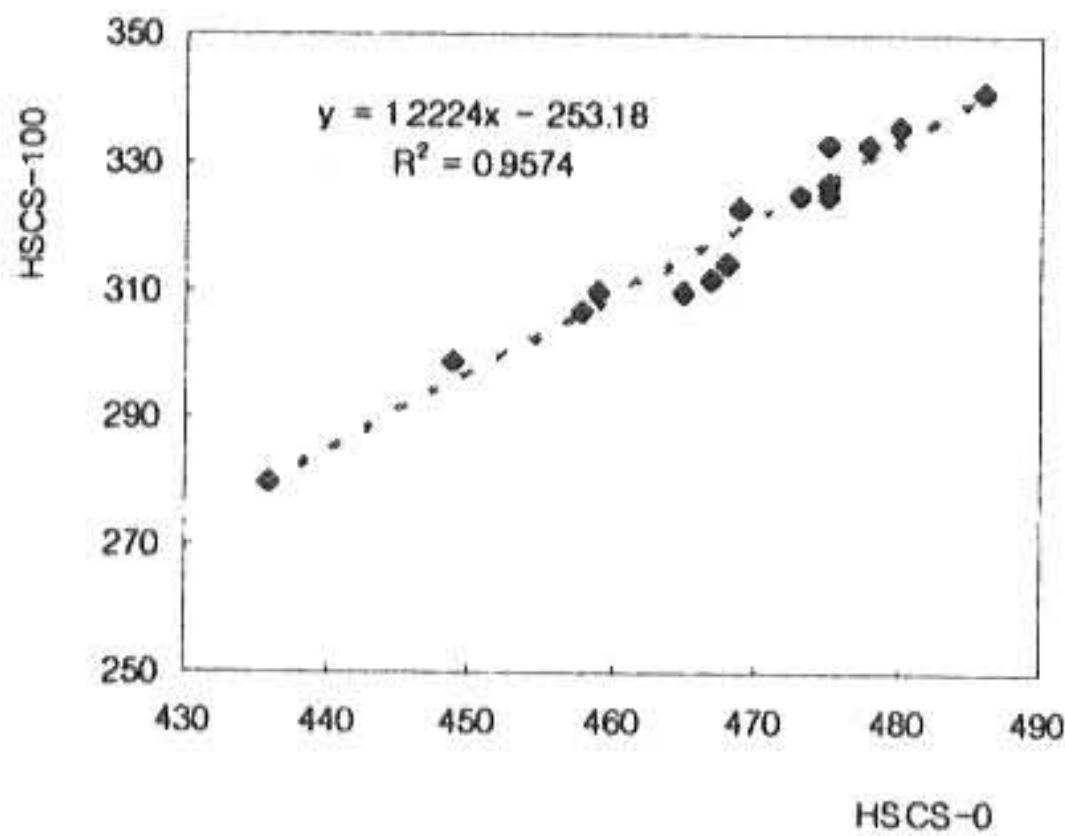
[그림 10] hscs-30의 압축강도 추정



[그림 11] hscs-50의 압축강도 추정



[그림 12] hscs-70의 압축강도 추정



[그림 13] hscs-100의 압축강도 추정

5. 결론

본 연구를 통하여 레디믹스트 콘크리트 생산에 잔골재로서 부순모래를 혼입하여 사용하기 위한 기초물성실험 및 강도특성실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었으며, 이에 따라 적절하게 현장에서 이용할 수 있는 배합설계표의 기준을 제시하였다.

- (1) 일반적으로 대구지하철 공사현장에서 흔히 채취되어 생산되는 부순모래는 그 치환율이 30%~50%일 때 가장 큰 강도를 나타냈으며, 50% 이상이 될 때는 강도가 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 최적 치환율이 30%~50%가 적당하다는 것을 의미한다.
- (2) 낮은 강도의 콘크리트의 경우, 치환율 50%까지는 강도감소가 작게 나타나는데 비해 높은 강도의 콘크리트에서는 치환율 30%부터 강도감소가 나타난다. 즉, 고강도 콘크리트는 특별한 재료의 혼합이 되어야 만 그 제조가 가능하다고 판단된다.
- (3) 슬럼프의 경시 변화에서, 부순모래의 치환율이 30%일 때 가장 큰 슬럼프 값을 보였고, 부순모래의 치환율이 증가함에 따라 슬럼프 값도 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 혼합시간이 길어질수록 슬럼프의 감소경향도 커지게 되므로 부순모래를 포함한 콘크리트를 사용할 때에는 혼합시간이 30분을 넘지 않게 하여야 한다.
- (4) 좋은 워커빌리티를 가지기 위해서는 부순모래의 치환율이 50%를 넘지 않게 배합설계를 하여야 하며, 이보다 많은 양의 부순모래를 사용할 때는 감수제 혹은 고성능 유동화제의 사용이 필수적이다.
- (5) 부순모래의 입도와 입형에 따라 콘크리트의 작업성 및 경화 콘크리트의 물성이 크게 영향을 받는 것으로 나타났으며, 그 품질특성은 입형판정 실적율이 56% 이상, 조립율이 2.65~2.75로, 정입도 곡선에 가까운 부순모래를 사용하여 콘크리트를 제작하였을 때 개선되었다.
- (6) 부순모래의 모르타르 유동성 시험 결과, 부순모래의 조립율이 2.2~2.9면, 모르타르의 유동성과 동일 유동성을 얻을 수 있다. 따라서 정입도곡선을 기준(조립율 2.7)으로 2.6~2.8 정도의 조립율을 갖는 부순모래를 생산하는 것이 좋다.

[표 4] 부순모래 치환율 30%

배합강도	W/C (%)	슬럼프 (cm)	S/A (%)	단위재료중량(kg/m ³)						
				물	시멘트량	천연모래	부순모래	굵은골재	혼화제	총중량
270	57.6	5	52.4	170	295	677	290	888	1.48	2321.48
270	57.6	8	52.4	179	311	664	284	870	1.56	2309.56
270	57.6	15	52.4	188	326	652	277	853	1.63	2297.63
270	57.6	21	52.4	198	344	635	272	833	1.72	2283.72
317	54.7	8	51.8	175	320	657	281	883	1.60	2317.6
317	54.7	12	51.8	182	332	646	277	869	1.66	2307.66
317	54.7	18	51.8	192	351	631	271	848	1.76	2294.76
353	49.7	10	50.8	177	355	626	277	884	1.78	2320.78
353	49.7	15	50.8	185	372	619	265	866	1.86	2308.86
353	49.7	21	50.8	196	394	602	258	842	1.97	2293.97
398	42.7	5	49.4	166	388	615	263	909	1.94	2342.94
398	42.7	10	49.4	175	409	601	258	889	2.05	2334.05
398	42.7	15	49.4	183	428	589	252	870	2.14	2324.14
398	42.7	21	49.4	194	454	570	245	844	2.27	2309.27
516	34.5	5	47.8	163	472	575	246	906	2.30	2364.30
516	34.5	10	47.8	172	498	559	239	881	2.49	2351.49
516	34.5	15	47.8	181	524	544	233	858	2.62	2342.62
516	34.5	21	47.8	191	553	528	226	832	2.77	2332.77

[표 5] 부순모래 치환율 40%

배합강도	W/C (%)	슬럼프 (cm)	S/A (%)	단위재료중량(kg/m ³)						
				물	시멘트량	천연모래	부순모래	굵은골재	혼화제	총중량
285	57.6	4	52.4	170	295	580	387	888	1.48	2321.48
285	57.6	6	52.4	179	311	551	379	870	1.56	2309.56
285	57.6	13	52.4	188	326	557	372	853	1.63	2297.63
258	57.6	20	52.4	198	344	544	363	833	1.72	2283.72
310	54.7	6	51.8	175	320	563	375	883	1.60	2317.6
310	54.7	11	51.8	182	332	554	369	869	1.66	2307.66
310	54.7	16	51.8	192	351	541	361	848	1.76	2294.76
310	49.7	9	50.8	177	355	554	369	884	1.78	2320.78
353	49.7	15	50.8	185	372	542	361	866	1.86	2308.86
353	49.7	20	50.8	196	394	516	344	842	1.97	2293.97
400	42.7	4	49.4	166	388	527	351	909	1.94	2342.94
400	42.7	8	49.4	175	409	515	344	889	2.05	2334.05
400	42.7	13	49.4	183	428	505	336	870	2.14	2324.14
400	42.7	20	49.4	194	454	489	326	844	2.27	2309.27
510	34.5	5	47.8	163	472	493	328	906	2.30	2364.30
510	34.5	8	47.8	172	498	479	319	881	2.49	2351.49
510	34.5	14	47.8	181	524	466	311	858	2.62	2342.62
510	34.5	19	47.8	191	553	452	302	832	2.77	2332.77

[표 6] 부순모래 치환율 50%

배합강도	W/C (%)	슬럼프 (cm)	S/A (%)	단 위 재 료 중 량						
				물	시멘트량	천연모래	부순모래	굵은골재	혼화제	총중량
265	57.6	5	52.4	170	295	483	484	888	1.50	2321.50
265	57.6	8	52.4	179	311	474	474	870	1.58	2309.58
265	57.6	15	52.4	188	326	464	465	853	1.66	2297.66
265	57.6	21	52.4	198	344	453	454	833	1.76	2283.76
290	54.7	8	51.8	175	320	469	469	883	1.65	2317.65
290	54.7	12	51.8	182	332	461	462	869	1.68	2307.68
290	54.7	18	51.8	192	351	451	451	848	1.78	2294.78
335	49.7	10	50.8	177	355	461	462	884	1.80	2320.80
335	49.7	15	50.8	185	372	451	452	866	1.88	2308.88
335	49.7	21	50.8	196	394	430	430	842	1.99	2293.99
380	42.7	5	49.4	166	388	439	439	909	1.97	2342.97
380	42.7	10	49.4	175	409	429	430	889	2.09	2334.09
380	42.7	15	49.4	183	428	420	421	870	2.18	2324.18
380	42.7	21	49.4	194	454	407	408	844	2.29	2309.29
500	34.5	5	47.8	163	472	410	411	906	2.34	2364.34
500	34.5	10	47.8	172	498	399	399	881	2.49	2351.49
500	34.5	15	47.8	181	524	388	389	858	2.66	2342.66
500	34.5	21	47.8	191	553	377	377	832	2.79	2332.79

참고문헌

- 1) 1990 Annual Book of ASTM Standards: Section 4. Construction, Vol.04.02 Concrete and Aggregates (1990)
- 2) 김생빈, 콘크리트에서의 골재의 역할과 기본 메카니즘, 한국콘크리트학회지, 3(2), 5-10 (1991)
- 3) Neville, A. M., *Properties of Concrete*, 3rd Ed., Pitman (1981)
- 4) 김형전, 불량골재가 콘크리트의 강도 및 경제성에 미치는 영향, 대한건축학회지, 7(14), (1968)
- 5) Mantuani, L. D., *Handbook of Concrete Aggregate*, Noyes Pub. (1983)
- 6) 한국콘크리트학회, 최신콘크리트공학 (1992)
- 7) Mindess, S. and Young, J. F., *Concrete*, Prentice Hall Inc. (1981)
- 8) Murdock, L. J. and Brook, K. M., *Concrete Materials and Practice*, Edward Arnold (1979)

(1999년2월3일 접수, 1999년 4월15일 채택)