

---

## 폐주물사를 혼입한 콘크리트의 적정배합설계

Optimum Mix Design of Concrete Incorporating Waste Foundry Sand



박 제 선\*

Park, Jae-Sun



윤 경 구\*\*

Yun, Kyong-Ku



김 태 경\*\*\*

Kim, Tae-Kyong



백 민 경\*\*\*\*

Paek, Min-Kyong

---

### ABSTRACT

The waste foundry sand might be recycled in concrete, saving energy and protecting environment .

An half- factorial experiments were performed with the primary variable such as water-cement ratio, waste foundry sand substitution ratio, fine aggregate ratio and slump as a preliminary study for optimum mix design of concrete.

The preliminary study show that the water-cement ratio is the most important factor to the concrete strength, followed by slump. The substitute of waste foundry sand up to 70% has little influence, indicating that it can substitute the fine aggregate without damaging the Concrete strength.

The interaction between waste foundry sand substitution ratio and fine aggregate ratio was most significant to the concrete strength among the 2-way interaction variable.

Only compressive strength affect the formation of optimum mix design area more as

---

\* 정회원, 강원대학교 토목공학과 교수

\*\* 정회원, 한국도로공사 책임연구원

\*\*\* 정회원, 성덕전문대학교 토목환경과 전임강사

\*\*\*\* 정회원, 통일기술공사 철도부

• 본 논문에 대한 토의를 1998년 2월 30일까지 학회로 보내주  
시면 1998년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

target compressive strength increases. Optimum mix designs of concrete incorporating waste foundry sand, satisfying the target

responses, were proposed in terms of waste foundry sand substitution ratio, water cement ratio and fine aggregate ratio.

keyword :

## 1. 서론

주물공장의 부산물인 폐주물사(Waste Foundry Sand)는 매년 막대한 물량이 발생하고 여러해 동안 누적되어 이제는 방치 할 수 없는 단계에 이르렀다. 주물단지의 주물공장들은 매년 이 부산물의 처리에 많은 비용을 지출하고 있다. 특히, 인천 지역의 경우 연 6만톤 가량의 발생폐기물에 대한 폐기장소 부족 등에 있어서 매우 큰 어려움을 겪고 있다. 따라서, 이러한 폐주물사를 재활용 할 수 있는 기술개발에 대한 연구가 시급히 요청되고 있다.

산업폐기물인 폐주물사를 잔골재로 치환한 콘크리트가 건설 재료로 활용 될 경우, 그동안 매립에만 의존하여 지출하던 막대한 폐기물 처리비용도 절감할 수 있고, 자원재활용 측면에서 심각한 대두되고 있는 환경문제해결에도 일익을 할 수 있으리라 기대된다.

따라서, 본 연구의 목적은 폐주물사를 콘크리트 재료중 잔골재로 치환하여 그 활용 가능성을 고찰하고, 폐주물사를 혼입한 콘크리트의 사용목적에 따라 적정의 배합설계를 제시하는데 있다.

## 2. 예비 실험

### 2.1 실험 재료

#### 2.1.1 폐주물사 (Waste Foundry Sand)

본 실험에 사용된 주물사는 화학적 조성중 대부분을 차지하는 SiO<sub>2</sub> 가 87.3%로 일반적으로 시멘트 매트릭스내에서 칼슘옥사이드와 결합하여 규산삼석회를 생성하는데 이 규산삼석회는 시멘트 강도발현에 중요한 성분으로 나타난다. 폐주물사는 고온의 열처리 과정을 거친 후 생성되므로 화학적으로 매우 안정되어 있으며 압갈색의 색상을 띠고 있다.

Table 1 Chemical Properties of Foundry Sand

Unit (%)										
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	L.O.I
87.3	5.03	1.29	0.15	0.01	0.37	0.42	1.56	0.47	0.03	2.91

정되어 있으며 압갈색의 색상을 띠고 있다.

폐주물사의 일반적 화학성질은 Table 1에 나타나 있다.

#### 2.1.2 골재

본실험에서 사용된 굵은골재는 강원도 춘천 지역에서 생산되는 최대치수 25mm 인 레미콘용 쇄석으로 하였고, 잔골재는 강원도 홍천강 유역에서 채취된 천연 강모래를 이용하였다. 폐주물사를 일정비율로 잔골재에 대처하였다. 골재의 물리적 성질은 Table 2와 같으며, 체가름 시험결과는 Fig 1과 같다. 분석결과 쇄석과 강모래는 시방서 규정의 표준입도곡선에 포함되지만, 폐주물사는 미분말의 균질한 구조로 되어있어 콘크리트에 혼입되었을 때에 공극(Porosity) 충전

Table 2 Physical Properties of Aggregates & Foundry Sand

Classification	Coarse Aggregate	Fine Aggregate	Fine Aggregate
	Crushed Stone	River Sand	Foundry Sand
Size (mm)	< 25	< 5	< 1.18
Specific Gravity	2.64	2.60	2.43
Absorption (%)	0.91	1.23	1.63
Fineness Modulus	6.63	2.99	1.15

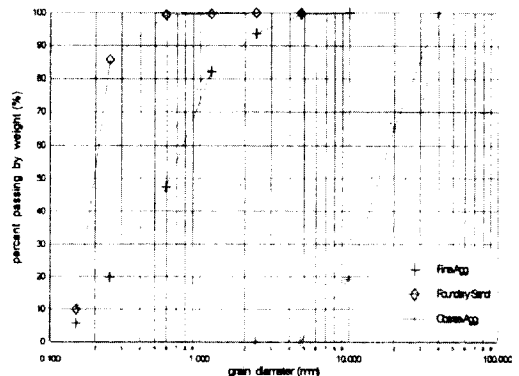


Fig. 1 Graduation of Aggregate Used

의 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대되나, 일반 강도 레보다 흡수율이 높은 것으로 나타났다.

### 2.1.3 시멘트 및 혼화제

본실험에서는 국내 H사 제품인 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 고성능 유동화제로는 국내 K사 제품인 나프탈렌 셀포네이트 나트륨염계 Ezcon을 사용하였으며, 화학적 성질은 Table 3과 같다. AE 감수제로 국내 K사 제품을 사용하였으며, 비중은  $1.18 \pm 0.02$  이고, 암갈색의 색상을 갖는 재료를 사용하였다.

Table 3 Chemical Properties of Ezcon

Solid Intensity	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> Intensity	PH	Specific Gravity	Cl <sup>-</sup> Intensity	Ion	Solubility
>41%	<1.2%	8.0	1.21g/ml	<500ppm	negative ion	dissolved in water

## 2. 2 배합 설계 및 실험

### 2.2.1 요인 실험법(factorial experimental design)

요인실험법이란 두개 이상의 요인을 한 실험에서 동시에 취급하는 실험방법으로서 본연구의 폐주물사를 혼입한 콘크리트의 혼입비율에 따른 역학적 특성을 실험적으로 해석하고 적정배합설계를 구성하기 위한 실험 목적의 달성에 가장 효율적인 실험법이다. 본 연구에서는 폐주물사를 잔골재로 치환한 콘크리트의 강도특성에 영향을 미치는 요인 및 주요인자들의 2차 상호작용을 파악하기 위한 목적으로 요인실험법을 사용하였으며, 요인실험법중에서 이와 같은 결과분석이 가능하고 배지수를 줄 일수 있는 half factorial design을 선택하였다. half-factorial experimental design 에 의한 실험조건을 Table 4

Table 4 Half Factorial Experimental Design

	S/E	90 : 10		30 : 70	
		35	50	35	50
30	5	①			④
	15		③	②	
40	5		⑦	⑥	
	15	⑤			⑧

에 나타났다. 이에 따른 결과치는 콘크리트의 압축강도로 하였다.

요인실험법의 주요 변수로는 폐주물사 대체율, 물-시멘트비, 슬럼프값, 잔골재율로 선택하였다. 폐주물사의 혼입비율에 따른 콘크리트의 성능을 파악하기 위하여 잔골재와 폐주물사의 비율을 90:10 과 30:70 으로 달리하였으며, 일반콘크리트 에서 강도에 큰 영향을 미치는 요인으로 알려진 물-시멘트비를 35%, 50% 로 수준의 변화를 주었고, 슬럼프는 유동화제와 감수제를 사용하여 조절 하였으며, 폐주물사를 혼입한 콘크리트의 적정 잔 골재율을 파악하기 위해 30%, 40% 로 잔골재율 의 변화를 주었다. 콘크리트의 배합설계는 Table 5 와 같고 실험 순서는 불규칙하게 배치되었다.

Table 5 Mixing Design of Concrete

Run order	Water	Cement	Sand	Unit (kg/m <sup>3</sup> )	
				Waste Foundry Sand	Gravel
①	169	483	414.96	49.44	1153.6
②	169	483	148.32	346.08	1153.6
③	169	338	484.11	59.79	1255.1
④	169	338	161.37	376.53	1255.1
⑤	169	483	593.38	65.92	988.8
⑥	169	483	197.76	461.44	988.8
⑦	169	338	645.48	71.72	1075.8
⑧	169	338	215.16	502.04	1075.8

### 2.2.2 콘크리트 배합

콘크리트 비빔은 굵은골재와 잔골재를 투입하고 30초간 건비빔을 한 후 시멘트, 폐주물사, 혼합수(물+AE감수제) 2/3 를 투입 후 1분간 비빔을 실시하고, 나머지 혼합수(물+AE감수제)를 넣고 2분간 비빔을 실시하였으며, 이때에 소정의 워어커빌리티를 확보하기 위하여 고성능유동화제를 사용하였다.

콘크리트 믹싱 후 굳지 않은 콘크리트의 워어커빌리티를 측정하기 위하여 슬럼프를 측정하였고, 탁상식 바이브레이터로 RPM 2000의 진동으로 30초간 2층 다짐을 실시하였다. 타설시 실험실 온도는 15℃ 전후에서 이루어졌다.

### 2.2.3 시험체 제작 및 실험방법

요인실험법에서는 압축강도가 콘크리트의 가장 대표적인 성질임을 감안하여 실험의 결과치를 콘크리트의 압축강도로 선택하였다. 콘크리트 압축강도실험을

실시하기 위해  $\phi$  100×200mm 원주형공시체를 각 Order 별로 4개를 제작하였다. 제작된 시험체는 실온에서 24시간동안 양생한 후에 탈형하여 20±1℃ 온도를 유지하면서 28일 동안 수중양생을 실시하였다.

### 2.2.4 실험방법

경화 콘크리트의 압축강도실험은 재령 28일을 기준으로 하였으며, KS F 2405 의 규정된 실험방법에 의하여 실시하였다. 사용된 기기는 200ton 용량의 UTM(모델 UEH-200A)으로 하였으며, 공시체는 가압판의 중심에 일치시킨 후, 재하속도를 1초 당 1.3~2.4kg/sec 씩 일정한 속도를 유지하면서 시험체가 파괴점 도달시까지 하중제어를 실시하였다.

### 2.3 실험결과 및 고찰

산업폐기물인 폐주물사를 혼입한 콘크리트를 대상으로 half-factorial experimental design에 따른 압축강도 실험을 실시한 결과를 Table 6 에 나타내었다.

Table 6의 실험 결과를 바탕으로 각 실험 변수들의 주요인에 의한 결과치를 Fig. 2~Fig. 5에 나타냈고, 상호작용에 대한 결과치를 Fig. 6~Fig. 8에 나타내었다.

Table 7은 각 변수들과 그들의 상호관계가 ANOVA Test 를 통하여 어느 정도 강도에 영향을

Table 6 Strength Test Result of Specimen

Run order	A	B	C	D	Compressive Strength (kg/cm <sup>2</sup> )			
					Mean (Std.Dev)			
1	-	-	-	-	412.34	458.44	351.43	385.31
					402.63(38.84)			
2	+	-	-	+	258.44	345.97	297.92	316.23
					304.61(31.71)			
3	-	+	-	+	149.48	140.78	140.64	133.90
					141.2(5.53)			
4	+	+	-	-	205.06	165.45	161.30	201.04
					183.21(19.97)			
5	-	-	+	-	350.52	354.81	284.29	238.83
					307.11(48.34)			
6	+	-	+	-	290.74	358.44	364.29	351.69
					343.54(25.68)			
7	-	+	+	-	193.50	184.02	189.87	202.08
					192.37(6.47)			
8	+	+	+	+	226.49	240.26	213.77	237.53
					229.51(10.51)			

\* A : Sand / Foundry Sand, B : W/C, C : S/A, D : Slump

\* - : LOW, + : HIGH

미치는가를 보여주고 있다. 표에 나타나 있듯이 신뢰도 95%의 수준에서 F-Ratio가 가장 높은 물-시멘트비가 강도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고, 슬럼프, 잔골재율, 주물사의 잔골재 치환율 순으로 강도에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 2는 폐주물사의 잔골재 치환율이 10%에서 70%로 증가함에 따라 압축강도가 다소 증가하는 경향을 나타내고 있는데 이러한 결과의 원인을 분석하여 보면 첫째, 폐주물사의 잔골재 대체가 골재조립도에 큰 변화를 가져오지않고, 둘째로 폐주물사의 화학적 안정성이 강도에 좋은 영향을 미치는 것으로 판단되며, 셋째로 폐주물사의 미세분말이 콘크리트내부에서 충전제역할을 하여서 골재조립도에 의한 강도 감소요인을 상쇄하여 압축강도의 미세한 증진을 가져온다. 이는 폐주물사가 잔골재로서의 치환이 가능하다는 것을 보여주는 것이다.

Fig. 3는 물-시멘트비가 35%에서 50%로 증가함에 따라 강도가 크게 감소하는 현상이 나타났는데, 이는 물-시멘트비가 일반콘크리트에서 강도에 크게 영향을 미치는 것과 동일하게 물-시멘트비가 본 연구에서도 다른 변수에 비해 콘크리트 압축강도에 큰 영향을 미친다는 것을 알려주는 것이다. Fig. 4, Fig. 5에서는 잔골재율이 30%에서 40%로 증가하는 경우와 슬럼프값이 5cm에서 15cm로 증가할 때 압축강도의 변화를 영향을 나타내는 것으로, 이러한 변수들이 일정범위내에서는 일반콘크리트의 압축강도에 큰 영향을 미치지 않는 것과 마찬가지로 본 연구에서도 이러한 실험변수들이 콘크리트의 압축강도에 크

Table 7. Analysis of Variance of the Strength Test Result

	Source	Sum-of-squares	DF	Mean-Square	F Ratio	P
Compressive Strength kg/cm <sup>2</sup>	A	38,676	1	38,676	0.004	0.9512
	B	4671,407	1	4671,407	27.471	0.0019
	C	208,590	1	208,590	0.022	0.8868
	D	2125,213	1	2125,213	0.267	0.6210
	A×B	2474,913	1	2474,913	0.272	0.6204
	A×C	2097,900	1	2097,900	0.229	0.6489
	A×D	2967,966	1	2967,966	0.330	0.5867
	B×C	3967,966	1	3967,966	0.330	0.5867
	B×D	2097,900	1	2097,900	0.229	0.6489
	C×D	4082,464	1	4082,464	0.230	0.6488
	Error	147301,75	48	3068,78		

\* statistically significant at the 95% level of confidence

(F0.05,1,6 = 5.99 < F0)

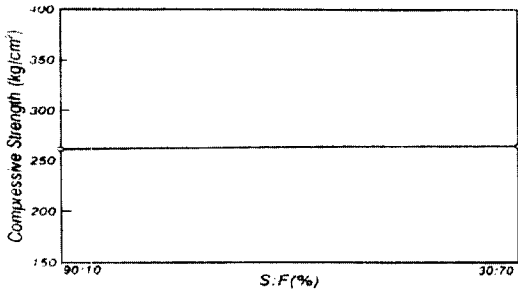


Fig. 2 Effect of S:F to Compressive Strength

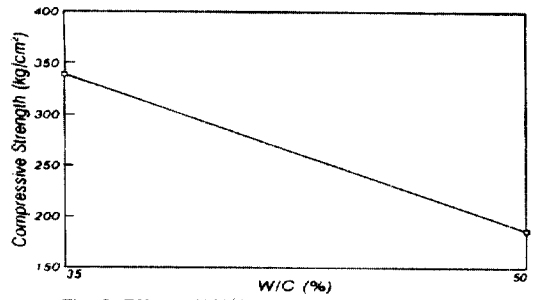


Fig. 3 Effect of W/C to Compressive Strength

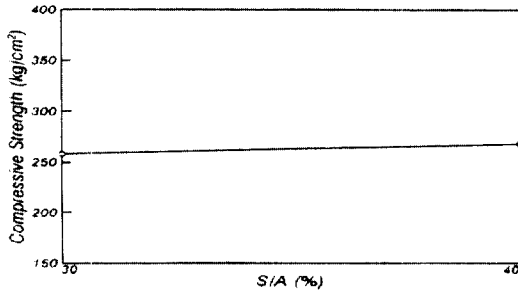


Fig. 4 Effect of S/A to Compressive Strength

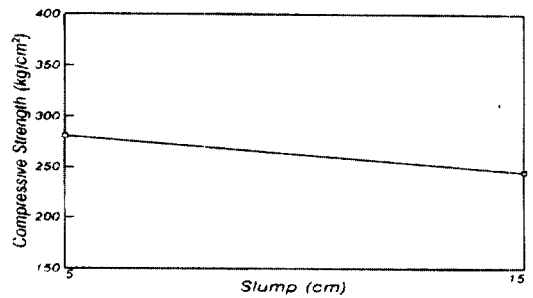


Fig. 5 Effect of Slump to Compressive Strength

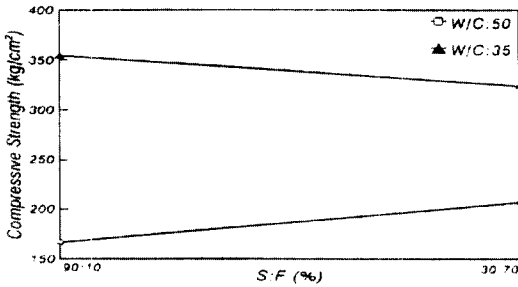


Fig. 6 AB Interaction Plot

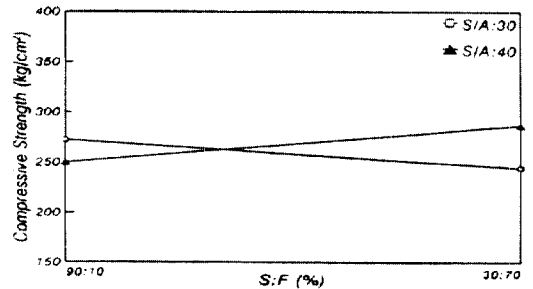


Fig. 7 AC Interaction Plot

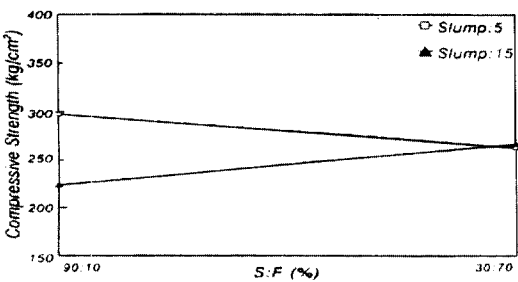


Fig. 8 AD Interaction Plot

개 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Fig. 6 은 폐주물사의 잔골재 치환율이 증가에 따른 물-시멘트비가 35%인 경우와 50%인 경우의 상관관계를 나타내고 있다. Table. 7 의 ANOVA Test 결과에서 상호관계가 작게 나타났지만, Fig. 6

을 보면, 폐주물사의 잔골재 치환율이 증가함에 따라 물-시멘트비가 35%일 때 강도가 약간 감소하는 경향을 보이고 50%일 때 강도가 약간 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 폐주물사 대체율과 물-시멘트비가 상호관계가 있는 것은 폐주물사의 미세분과 흡수율에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 35%의 낮은 물-시멘트비에서는 폐주물사 대체율이 증가함에 따라 미세분의 증가와 표면적의 증가로 콘크리트 수화작용에 필요한 절대 수분의 양이 부족하여 시멘트의 일부가 수화되지 않은 것으로 판단된다. 한편, 50%의 높은 물-시멘트비에서는 폐주물사의 혼입율이 증가함에도 불구하고 수화작용에 필요한 충분한 수분의 공급으로 시멘트가 충분히 수화반응하고, 폐주물사의 혼입이 과잉수분이 줄어드는 효과를 가져와 강

도를 증진시키는 것으로 판단된다.

Fig. 7 은 폐주물사의 잔골재 치환율이 10%에서 70%로 증가함에 따라 잔골재율이 30%일 때에는 강도가 감소하고 있으며, 40%일 때에는 강도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 잔골재율이 30%일 때 보다는 40%일 때 폐주물사가 충전제의 역할을 더 잘하는 것으로 40%일 때 조립율이 더 좋아질 것으로 사료된다. 따라서 두 변수가 상호관계가 서로 교차하며 폐주물사의 잔골재 치환율의 증가에 따라 서로 상반된 양상을 보이고 있으므로, 폐주물사의 대체율과 잔골재율의 상호관계가 존재하는 것이다.

Fig. 8 은 Fig. 7 과 마찬가지로 폐주물사의 잔골재 치환율이 증가함에 따라 Slump의 변화가 상반된 경향을 보이고 있으므로 강도에 미치는 두변수 간의 상호작용은 영향이 다소 크다는 것을 보여주고 있다. 이러한 폐주물사 대체율과 슬럼프값의 상호관계는 폐주물사 대체율과 물-시멘트비의 상호관계와 동일한 이유이다. 즉, 폐주물사의 미세분과 이에따른 표면적의 증가가 이러한 상호관계를 가져온 것이다.

이와 같은 결과로부터 폐주물사의 잔골재 치환율에 따른 각 변수들 간의 상호관계는 슬럼프, 잔골재율 순으로 크게 나타났다.

### 3. 적정 배합 설계 실험

#### 3.1 배합 설계

##### 3.1.1 적정배합실험법

예비실험에서 반요인 실험(Half factorial experimental design)에 의한 분석결과를 바탕으로, 예비실험에서 폐주물사를 혼입한 콘크리트의 강도발현에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 판명된 물/시멘트비, 폐주물사의 혼입율의 변화와 상호작용이 큰 것으로 분석된 잔골재율의 변화를 변수로하여 적정배합실험을 실시하였다. 적정배합 제시를 위한 적정배합실험의 각변수와 수준의 변화를 Table. 8에 나타

Table. 8 Optimum Experimental Design

S/F W/C S/A	90 : 10			70 : 30			50 : 50		
	40	45	50	40	45	50	40	45	50
35	(5)		(1)				(3)		(9)
40				(2)	(4)				
45	(6)		(12)				(7)		(10)

내었다. 적정배합실험에서 결과치는 콘크리트의 압축강도, 휨강도와 탄성계수로 하였다.

Table 9 Experimental Concrete Mix Design for Optimization

Run order	A	B	C	Fine Aggregate		Coarse Aggregate	Cement	Water
				sand	foundry sand			
①	90 : 10	50	35	581	64	1198	388	169
②	70 : 30	45	40	505	217	1082	377	169
③	50 : 50	40	35	308	308	1142	424	169
④	70 : 30	45	40	505	217	1082	377	169
⑤	90 : 10	40	35	581	64	1142	424	169
⑥	90 : 10	40	45	712	79	966	424	169
⑦	50 : 50	40	45	306	306	966	424	169
⑧	70 : 30	45	40	505	217	1082	377	169
⑨	50 : 50	50	35	323	323	1198	338	169
⑩	50 : 50	50	45	415	415	1014	388	169
⑪	70 : 30	45	40	505	217	1082	377	169
⑫	90 : 10	50	45	746	83	1014	338	169

※ A : Sand/Foundry sand, B : W/C, C : S/A

Table 10 Test Results of optimum experimental design

Run order	A	B	C	Compressive Strength kg/cm <sup>2</sup>		Flexural Strength(kg/cm <sup>2</sup> )		Elastic Modulus( $\times 10^4$ kg/cm <sup>2</sup> )					
				Mean/Std. Dev <sup>1</sup>		Mean/Std. Dev <sup>1</sup>		Mean/Std. Dev <sup>1</sup>					
				Mean	Std. Dev	Mean	Std. Dev	Mean	Std. Dev				
1	-	+	-	173.16	182.07	176.97	178.25	3650	37.26	3680	1.52	2.27	2.38
				177.61	19.3190			3636	5.342		1.900	0.334	
2	0	0	0	190.98	168.06	180.79	175.07	32.20	39.10	31.96	2.79	3.51	3.43
				178.73	68.2830			35.42	2.8360		3.239	0.354	
3	-	-	-	216.45	215.18	217.72	229.18	39.10	46.46	38.64	2.02	2.67	2.51
				219.63	5.6829			41.39	3.5890		2.400	0.2510	
4	0	0	0	184.62	179.52	198.62	204.99	31.74	40.02	36.50	3.37	3.01	2.62
				191.94	16.2340			36.18	3.7890		3.030	0.3600	
5	-	-	-	217.72	207.53	229.90	210.08	35.88	41.16	43.70	2.83	2.54	2.86
				218.30	68.8820			41.53	3.7690		2.740	0.1880	
6	-	-	+	184.62	179.53	192.28	190.98	36.80	39.10	40.02	2.70	3.09	3.19
				186.85	5.0230			36.64	1.3540		2.980	0.2510	
7	+	+	+	184.62	225.36	203.72	184.62	34.04	39.56	37.26	2.33	2.97	2.85
				190.58	16.8000			36.05	2.3380		2.720	0.2790	
8	0	0	0	182.07	193.33	173.16	175.70	36.34	41.40	36.34	3.58	3.10	3.08
				181.12	7.7529			35.02	2.1890		3.270	0.2710	
9	+	+	-	147.70	171.89	151.52	159.15	39.10	36.80	36.34	1.97	1.77	1.88
				157.57	19.1150			37.41	1.3070		1.860	0.0000	
10	+	+	+	175.88	160.43	165.52	166.80	25.50	31.04	28.02	2.27	2.31	2.18
				162.66	3.5329			29.35	1.8900		2.290	0.1420	
11	0	0	0	198.62	180.16	179.52	203.72	41.40	32.66	37.03	2.88	3.24	3.32
				190.51	10.7300			37.03	3.7880		3.240	0.2800	
12	-	+	+	134.96	146.60	143.58	143.06	36.34	29.90	29.90	2.95	2.92	2.32
				141.38	4.2070			32.63	3.0000		2.520	0.3720	

※ A : Sand / Foundry Sand, B : W/C, C : S/A

### 3.1.2 시험체 제작 및 실험방법

콘크리트의 배합설계는 Table 9 와 같다. 콘크리트 배합에 사용된 골재와 시멘트 그리고 잔골재에 일정비율로 혼합된 폐주물사의 종류와 특성은 예비실험과 동일하며, 콘크리트 배합도 동일한 순서와 같은 방법으로 하였다. 적정배합조건을 제시하기 위한 적정배합실험에서는 콘크리트의 압축강도, 휨강도, 탄성계수등 역학적 특성을 구명하기 위하여  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  원통형 공시체를 각 조건별로 7개, 휨강도용  $100 \times 100 \times 460\text{mm}$  3개를 제작하였다. 제작된 시험체는 실온에서 24시간 양성한 후 탈형하여  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  온도를 유지하면서 28일 동안 수중양생을 실시하였다. 경화 콘크리트의 각종 시험은 제령 28일을 기준으로 하였으며, 압축강도는 KS F 2405, 휨강도는 KS F 2408 의 규정된 시험방법에 의하여 실시하였다. 탄성계수는 60mm 스트레인 게이지를 이용하여 KS F 2438의 규정된 방법에 의해 측정하였다.

### 3.2 실험결과 및 고찰

예비실험에 의한 연구결과를 바탕으로 적정배합설계에 따른 역학적 특성을 측정된 결과를 Table 10에 나타내었다.

3.2.1 폐주물사의 잔골재 치환율에 따른 압축강도, 휨강도, 탄성계수 폐주물사의 잔골재 치환율을 10%, 30%, 50%의 비율로 하였을때 압축강도와 휨강도, 탄성계수의 변화를 Fig. 9~Fig.19에 각각 나타내었다.

Fig. 9~Fig. 11에서 보여주듯이 폐주물사의 잔골재 치환율에 따른 압축강도 변화를 물-시멘트비, 잔골재율의 관계로 살펴보면, 잔골재율과 물-시멘트비가 모두 낮은 경우에 강도발현이 상대적으로 높게 나타났다. 동일한 강도발현을 위해서 물-시멘트비와 잔골재율은 반비례적으로 조합되어야 함을 알 수 있다. 폐주물사의 잔골재 치환율이 10%에서 50%로 증가

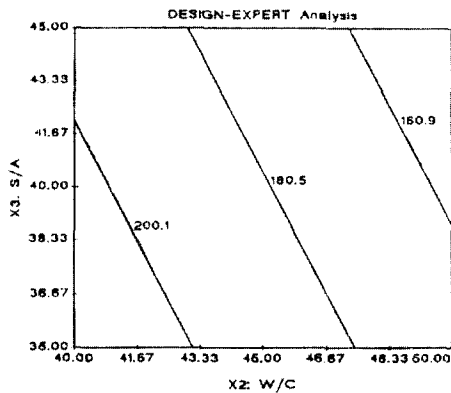


Fig. 9 Response Surface Plot of Compressive Strength (Waste Foundry = 10%)

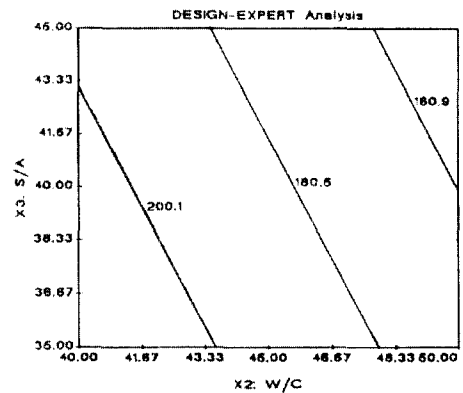


Fig. 10 Response Surface Plot of Compressive Strength (Waste Foundry = 30%)

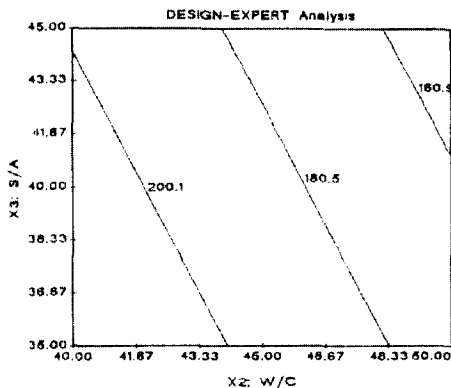


Fig. 11 Response Surface Plot of Compressive Strength (Waste Foundry = 50%)

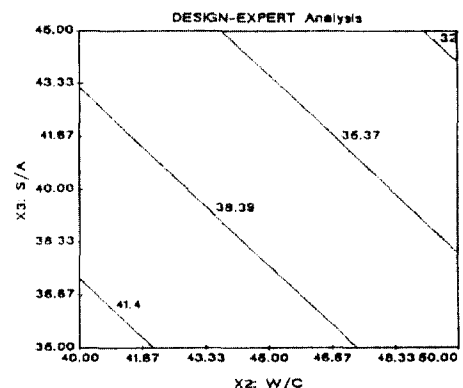


Fig. 12 Response Surface Plot of flexural Strength (Waste Foundry = 10%)

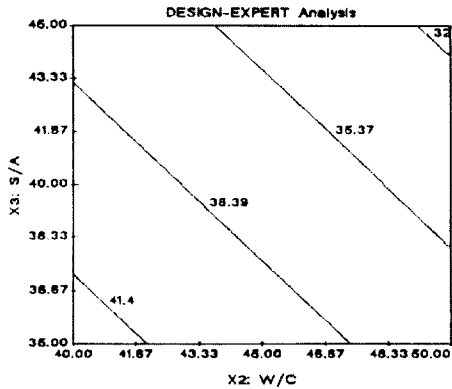


Fig. 13 Response Surface Plot of flexural Strength (Waste Foundry = 30%)

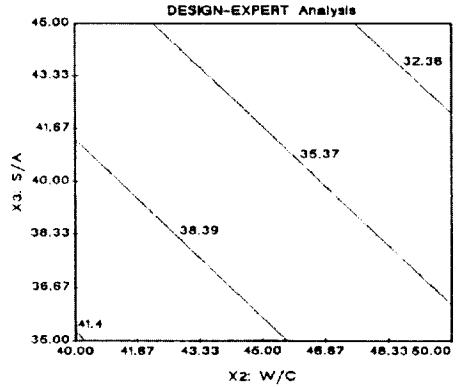


Fig. 14 Response Surface Plot of flexural Strength (Waste Foundry = 50%)

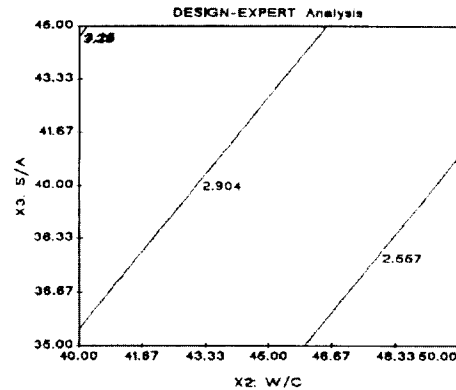


Fig. 15 Response Surface Plot of Elastic Modulus (Waste Foundry = 10%)

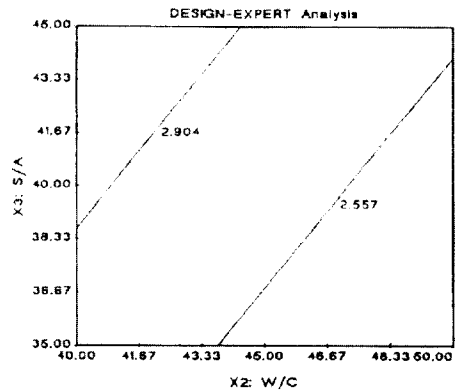


Fig. 16 Response Surface Plot of Elastic Modulus (Waste Foundry = 30%)

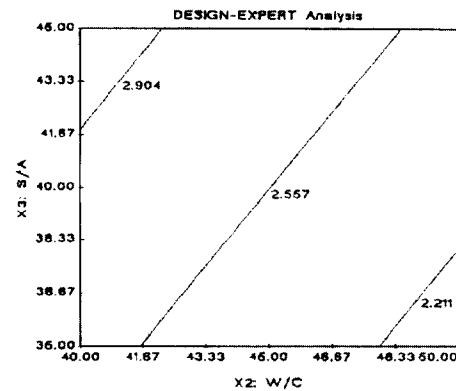


Fig. 17 Response Surface Plot of Elastic Modulus (Waste Foundry = 50%)

함에 따라 압축강도의 경우 동일한 강도를 발현하기 위해서는 물-시멘트비와 잔골재율의 범위가 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 동일한 압축강도를 얻기 위해서 높은 폐주물사 치환율을 사용할 때 더 넓은 범위에서 배합비를 선택할 수 있음을 의미한다. 이러

한 결과는 폐주물사가 미분말의 균질한 구조로 되어 있기 때문에 혼입량이 증가할수록 공극충진의 효과를 얻는 것으로 판단되며, 또한 폐주물사의 흡수율이 일반잔골재와 비교하여 다소 큰 것이 원인인 것으로 생각된다.

Fig. 12~Fig. 14에서 알 수 있듯이 폐주물사의 잔골재 치환율에 따른 휨강도의 관계를 살펴보면, 낮은 잔골재율과 물-시멘트의 조건에서 강도발현이 크게 나타났다. 폐주물사의 잔골재 치환율이 10%에서 30%, 50%로 증가될 때, 압축강도의 경우와는 다르게 물-시멘트비와 잔골재의 비가 동일한 휨강도의 발현에 있어 선택할 수 있는 배합범위가 축소되는 것을 알 수 있다.

일반적으로 콘크리트의 휨강도는 압축강도의 1/4에서 1/8 정도로 알려져있는데 본 실험의 경우에는 1/4에서 1/6의 범위로 나타났다.

반면, Fig. 15~Fig. 17에서 보듯이 탄성계수의



결과에서는 동일한 탄성계수를 얻기위해서 물-시멘트비와 잔골재율이 서로 비례적으로 증가됨을 알 수 있다. 그리고 폐주물사의 잔골재 치환율이 증가될수록 동일한 탄성계수를 얻기 위해서는 낮은 물-시멘트비와 높은 잔골재율이 필요함을 알 수 있다.

### 3.2.2 목표압축강도에 대한 적정배합설계

폐주물사를 혼입한 콘크리트의 압축강도와 휨강도관계는 일반콘크리트와 유사하게 나타났으므로 휨강도의 범위는 일반콘크리트와 유사하게 목표압축강도에서 1/4~1/8의 범위를 취했다. 탄성계수도 일반콘크리트와 유사하게 나타났으므로 경험식  $E_c = 15,000 \sqrt{\sigma_{ck}}$ 의 공식에 적용하여 범위를 산출하였다.

Table 11는 목표압축강도와 휨강도, 탄성계수의 적정배합범위를 나타낸다.

Table 11. Optimum Range of Target Responses

Compressive Strength ( Kg/cm <sup>2</sup> )	Flexural Strength ( Kg/cm <sup>2</sup> )	Modulus of Elasticity ( × 10 <sup>4</sup> Kg/cm <sup>2</sup> )
200 <	25 ~ 50	2.1 <
210 <	26.25 ~ 52.5	2.15 <
220 <	27.5 ~ 55	2.2 <

#### 1) 폐주물사의 잔골재 대체율이 10% 인 경우

폐주물사의 잔골재 치환율이 10%인 경우 각 강도별 적정배합설계조건을 Fig. 18~Fig. 19에 각각 나타내었다. 그래프에서, R1은 압축강도의 결과값을, R2는 휨강도, R3는 탄성계수의 결과값을 나타내고있다.

Fig. 18의 경우에는 목표압축강도 200kg/cm<sup>2</sup> 이상이며, 휨강도의 범위는 25kg/cm<sup>2</sup>~50Kg/cm<sup>2</sup>, 탄성수의 최저치는 2.1 × 10<sup>5</sup> kg/cm<sup>2</sup>의 범위이며

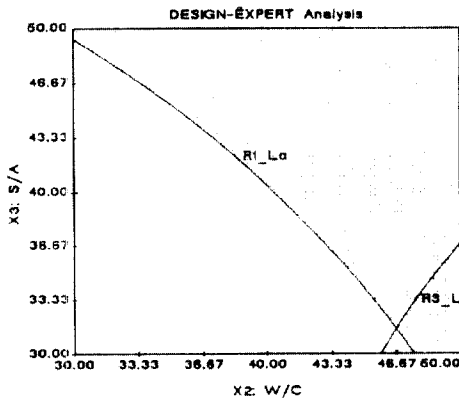


Fig. 18 Optimization Plot of Target Compressive Strength(200Kg/cm<sup>2</sup>, Waste Foundry = 10%)

압축강도 결과치의 하한값과 탄성계수 결과치의 하한값으로 적정구간이 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 19의 경우에는 목표압축강도의 최저치가 210kg/cm<sup>2</sup> 이상이고, 휨강도는 26.25kg/cm<sup>2</sup>~52.5kg/cm<sup>2</sup>, 탄성계수는 2.15 × 10<sup>5</sup> kg/cm<sup>2</sup> 이상인 조건의 적정배합상태이고 Fig. 21, Fig. 22과 유사하지만 적정배합구간이 점차 낮은 물-시멘트비와 낮은 잔골재율로 변화되는 것을 알 수 있다.

Fig. 20에서는 목표압축강도가 220kg/cm<sup>2</sup> 이상이고, 휨강도는 27.5kg/cm<sup>2</sup>~55Kg/cm<sup>2</sup>의 범위에 있으며, 탄성계수는 2.2 × 10<sup>5</sup> kg/cm<sup>2</sup> 이상인 적정배합상태이고 Fig. 18의 경우와는 반대로 적정구간이 낮은 물-시멘트비와 잔골재율에 치중해 있음을 알 수 있다.

폐주물사의 대체율이 10%인 경우에는 목표압축강도가 높아질수록 적정구간이 광범위하게 커지고 있

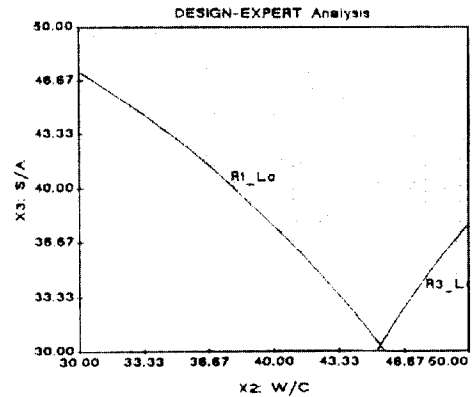


Fig. 19 Optimization Plot of Target Compressive Strength (210Kg/cm<sup>2</sup>, Waste Foundry = 10%)

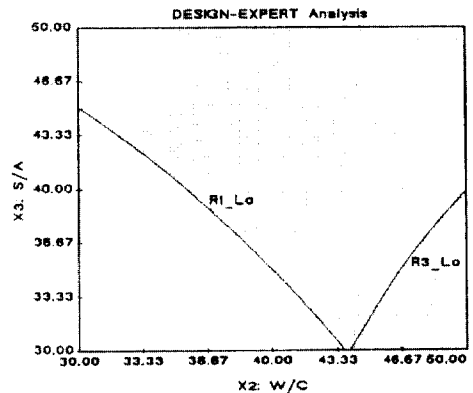


Fig. 20 Optimization Plot of Target Compressive Strength (220Kg/cm<sup>2</sup>, Waste Foundry = 10%)

음을 알 수 있다.

Fig.18 부터 Fig.19 까지를 비교분석해 보면, 목표압축강도가 커짐에 따라서 이를 만족시키는 물-시멘트비와 잔골재율도 점차 작아짐을 알 수 있다. 목표압축강도가 커질수록 압축강도가 낮은 물-시멘트비와 낮은 잔골재율로 변하며 적정구간을 형성하고, 휨강도는 낮은 물-시멘트비로 적정구간이 형성되어 지고 있으며, 또한, 목표압축강도 값이 커짐에 따라서 적정구간이 점점 커지는데, 이는 콘크리트의 압축강도가 커질수록 상대적으로 큰 휨강도와 탄성계수를 쉽게 얻을 수 있음을 의미한다.

2) 폐주물사의 잔골재 대체율이 30% 인 경우

폐주물사의 잔골재 치환율이 30%인 경우 각 강도별 적정배합설계조건을 Fig. 21~Fig. 23에 각각 나타내었다.

Fig.21의 목표압축강도가 200kg/cm<sup>2</sup> 이상이고 휨강도는 25.0kg/cm<sup>2</sup>~50.0kg/cm<sup>2</sup>, 탄성계수가 2.1 × 10<sup>5</sup> kg/cm<sup>2</sup> 인 경우, 그리고 Fig. 22의 목표압축강도 210kg/cm<sup>2</sup> 이상이고 휨강도는 26.25kg/cm<sup>2</sup>~52.5kg/cm<sup>2</sup>, 탄성계수가 2.15 × 10<sup>5</sup> kg/cm<sup>2</sup> 이상 인 경우, Fig. 23의 목표압축강도가 220kg/cm<sup>2</sup> 이상이고 휨강도는 27.5kg/cm<sup>2</sup>~55kg/cm<sup>2</sup>, 탄성계수가 2.2 × 10<sup>5</sup> kg/cm<sup>2</sup> 인 세 경우에는 모두 낮은 비율의 물-시멘트비에서 적정배합구간이 분포되어 있고, 목표압축강도가 200kg/cm<sup>2</sup>에서 220kg/cm<sup>2</sup>로 증가될 때 최적구간은 물-시멘트비와 잔골재율이 동일하게 낮은 비율로 이동하고 있다.

전체적으로 30%정도 잔골재에 폐주물사를 혼합하

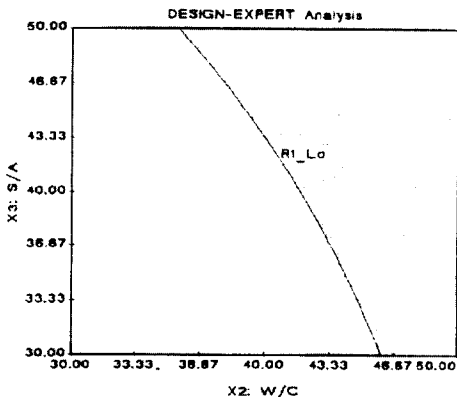


Fig. 21 Optimization Plot of Target Compressive Strength (200Kg/cm<sup>2</sup>, Waste Foundry = 30%)

였을 경우에도 적정구간이 목표압축강도값이 커짐에 따라서 넓게 분포되어지고 낮은 물-시멘트비와 잔골재율로 수렴해 감을 알 수 있으며 콘크리트의 압축강도만 만족시키면 휨강도와 탄성계수는 자연스럽게 만족됨을 알 수 있다.

3) 폐주물사의 잔골재 대체율이 50% 인 경우

폐주물사의 잔골재치환율이 가장 높은 50%의 경우 목표압축강도에 따른 적정배합조건을 Fig. 24~Fig. 26에 나타내었다.

Fig.24의 목표압축강도가 200kg/cm<sup>2</sup>이상, 휨강도가 25kg/cm<sup>2</sup> ~ 50kg/cm<sup>2</sup>의 범위, 탄성계수가 2.1 × 10<sup>5</sup> kg/cm<sup>2</sup> 이상인 경우, Fig. 25과 비슷한 구간을 형성하고 있다.

Fig. 25의 목표압축강도 210kg/cm<sup>2</sup> 이상이고, 휨강도가 26.25kg/cm<sup>2</sup>~52.5kg/cm<sup>2</sup>, 탄성계수는 2.15 × 10<sup>5</sup> kg/cm<sup>2</sup>, Fig. 26의 목표압축강도가

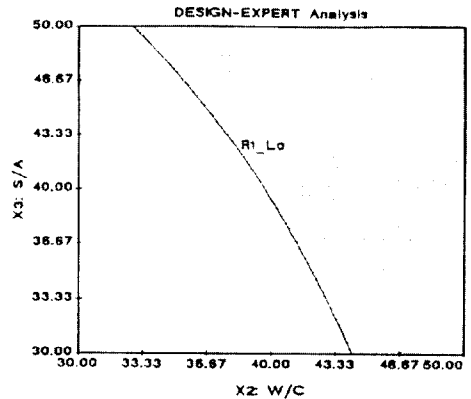


Fig. 22 Optimization Plot of Target Compressive Strength (210Kg/cm<sup>2</sup>, Waste Foundry = 30%)

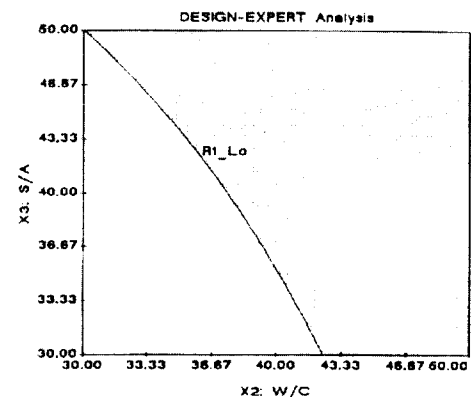


Fig. 23 Optimization Plot of Target Compressive Strength (220Kg/cm<sup>2</sup>, Waste Foundry = 30%)

220kg/cm<sup>2</sup> 이상, 휨강도 27.5kg/cm<sup>2</sup>~55kg/cm<sup>2</sup>, 탄성계수는 2.2 × 10<sup>5</sup> kg/cm<sup>2</sup> 이상인 두 경우에 40%이하의 물-시멘트비에서 적정구간을 형성하고 있으며 휨강도는 적정구간설정에 영향을 미치지 못

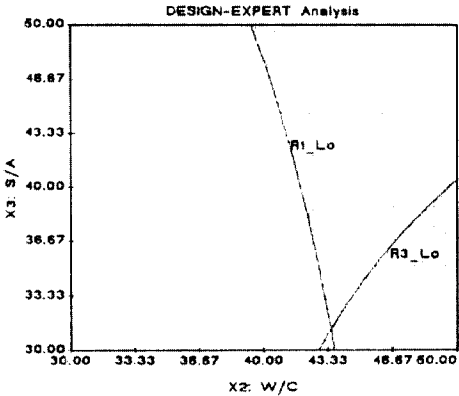


Fig. 24 Optimization Plot of Target Compressive Strength (200Kg/cm<sup>2</sup>, Waste Foundry = 50%)

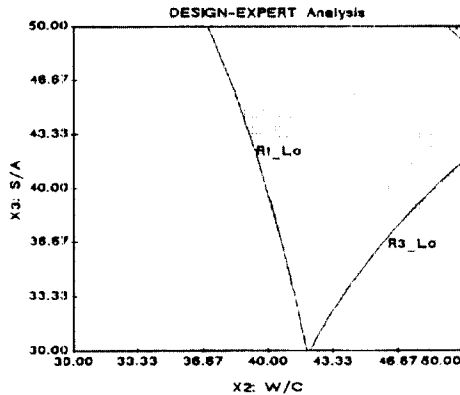


Fig. 25 Optimization Plot of Target Compressive Strength (210Kg/cm<sup>2</sup>, Waste Foundry = 50%)

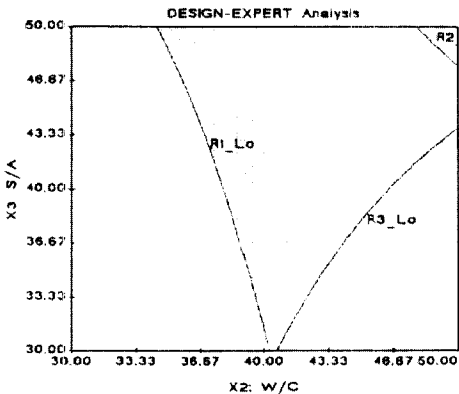


Fig. 26 Optimization Plot of Target Compressive Strength (220Kg/cm<sup>2</sup>, Waste Foundry = 50%)

하고 있다. 목표압축강도가 낮은 경우 50%대체의 경우에는 높은 물-시멘트비와 잔골재율 구간에 적정구간이 형성되지만 목표압축강도가 높아질수록, 낮은 비율의 물-시멘트비와 잔골재율로 수렴해 가고 있다. 또 대체율이 10%인 경우와 30%인 경우를 50%인 경우와 비교해보면 동일한 목표압축강도의 적정구간 형성에서 대체율이 높아질수록 잔골재율의 범위가 늘어나고 있으며 물-시멘트비의 범위는 낮은 범위로 이동해가고 있다.

결과적으로 목표압축강도가 커질수록 이를 만족시키기 위한 물-시멘트비와 잔골재율은 작아져야 함을 알 수 있다. 그러나 목표 결과치를 만족시키는 적정구간의 형성에는 압축강도만 영향을 미치고 탄성계수와 인장강도는 영향을 미치지 못한다.

#### 4. 결론

본 연구는 산업폐기물인 폐주물사를 콘크리트에서 잔골재로 치환할 때 콘크리트에 역학적 거동을 미치는 인자를 실험통계로서 확인하고 콘크리트 적정배합설계를 위한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 압축강도에 영향을 미치는 인자로, 물-시멘트비의 경우가 가장 크게 나타났고, 폐주물사의 잔골재 잔골재 치환율의 변화가 강도발현에 영향을 미치지 못하는 것으로 판명되어 폐주물사의 잔골재 치환이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

2. 폐주물사의 잔골재 치환율의 변화에 따른 상호작용을 검토한 결과 잔골재 치환율과 잔골재율이 가장 큰 상호영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

3. 목표로하는 콘크리트압축강도를 얻기위한 폐주물사의 잔골재 치환율, 물-시멘트비, 잔골재율의 적정배합설계를 제시하였다.

4. 콘크리트 목표압축강도가 커질수록 목표결과값을 만족시키는 적정구간의 형성에는 압축강도만 영향을 미치고 인장강도와 탄성계수는 영향을 미치지 못하는 것으로 판명되었다.

5. 향후과제로 내구성에 대한 검토로서, 동결융해 저항성, 길이변화특성, 화학저항성등이 규명되어야 하고, 철근의 부식강도시험등 구조물에 사용될때에 필요로 하는 제반 연구들이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

“본 연구는 강원대학교 석재복합신소재 제품연구 센터의 연구비 지원에 의하여 수행되었음”

## 참고 문헌

1. Abasi, A. F., Munir, A., and Mohamad, W., "Optimization of Concrete Mix Propotion ing Using Reduced Factorial Experimental Technique", *ACI Material Journal*, January-February 1987, pp.55-63.
2. Abrams, D. A., "Design of Concrete Mixtures", Chicago, Structural Materials Research Laboratory, 1918 (Lewis Institute, Bulletin #1).
3. Ahmed, E. A., and Ahmed, A. E., "Properties of Cconcrete Incorporating Natural and Crushed Stone Very Fine Sand", *ACI Material Journal*, July-August 1989, pp. 417- 424.
4. Alasail, M. M., and Malhotra, V. M., "Role of Concrete In corporating High Volumes of Fly Ash in Controlling Expansion due to Alkali-Aggregate Reaction", *ACI Materials Journal* , Title No. 88-M20, March-April 1991, pp. 159-164.
5. Andrzej, K., and Marek, M., "Waste Cement Dusts as Actvating Agents", *Cement and Concrete Research*, Vol. 14, 1984, pp. 615-621.
6. Andrej, K., and Marek, M., "Waste Cement Dusts as Fillers for Rubber Componds", *CEMENT and CONCRETERESERCH*, Vol.14, 1984, pp. 776-784.
7. Akhtaruzzaman, A. A., and Hasnat, A., "Properties of Concrete Using Crushed Brick as Aggregate", *Concrete International*, February 1983, pp.58-63.
8. 배수호, 윤상대, 박광수, 신의근., "실리카흙을 혼입한 고품질 콘크리트의 특성에 관한 연구", *한국콘크리트학회 학술발표회논문집*, 제7권 1호, 1995.5, pp. 88-93.
9. 배수호, 윤상대, 박상대, 신의근., "왕겨세를 혼입한 콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구", *한국콘크리트학회 학술발표회논문집*, 제8권 2호, 1996, pp. 71-76.
10. Bairagi, N. K., Vidyadhara, H. S., and Ravande, K., "Mix Design Procedure for Recycled Aggregate oncrete", *Construction & Building Materials*, Vol. 4 No.4, December 1990, pp. 188-193.
11. 부치량, 김경옥, 설광옥, 장호철, 김제원., "구사 혼입 콘크리트의 역학적 특성에 관한 연구", *콘크리트학회 학술발표회 논문집*, 1995, 제7권 2호, 서울 산업대학교, pp. 63-68.
12. Buck, A. D., "Recycled Concrete", *Highway Research Record* 430, HRB, 1973, pp. 1-8.
13. Tarun R. Naik, Shiw S. Singh, Mathew P. Tharaniyil, and Robert B. Wendorf., "Application of Foundry By-Product Materials in Manufacture of Concrete and Masonry Products", *ACI Materials Journal*, January-February 1996, pp. 41- 50.

## 요 약

산업폐기물인 폐주물사를 재활용하여 에너지 절감과 환경오염방지효과를 얻을 수 있다. 반요인실험법을 사용하여 폐주물사를 잔골재에 일정비율 치환한 콘크리트의 적정배합설계제시를 위한 예비실험에서 물-시멘트비, 폐주물사의 잔골재치환율, 잔골재율, 슬럼프와 같은 주요변수와 변수사이의 2차상호작용을 파악하였다.

예비실험결과 폐주물사의 잔골재치환율을 70%까지 실시하였을 때 폐주물사를 혼입한 콘크리트의 강도발현에 가장 중요한 변수는 물-시멘트비로 분석되었고 폐주물사의 잔골재치환율은 거의 영향이 없는 것으로 분석되어 폐주물사를 콘크리트의 잔골재로 대체할수 있음을 알 수 있었다. 각 변수의 2차상호작용에서는 폐주물사의 잔골재치환율과 잔골재율의 상관관계가 콘크리트의 강도발현에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

목표압축강도에 대한 적정배합조건을 폐주물사의 잔골재 치환율에 따라 물-시멘트비, 잔골재율에 대해 제시하였다.

(접수일자 : 1997. 3. 10)