

# 폐석분 함유율에 따른 최적의 콘크리트 탄성계수 추정

## Presumption of Optimum Concrete Elastic Modulus according to Content of Crushed Stone Powder

박도경\*

Park, Do-kyong

양극영\*\*

Yang, Keek-Young

### Abstract

While a Study with regard to the measurement on Concrete Strength and the Change of Drying Shrinkage in accordance with Content Ratio of Crushed Stone Powder, it is being analyzed as the result that the strength according to Content Ratio of crushed Stone Powder is somewhat lowering. Accordingly, it is the real situation that the Concrete mixed with Crushed Stone Powder is utilized for non-structural material, not for the structural material. Therefore, this Research willing to furnish the suitable utilizing scheme for construction site as well as practical life by means of conduct the experiment on both Concrete Pressure Strength according to mixture with Crushed Stone Powder and Elastic Modulus, it also presumes the optimum Elastic Modulus Equation after analysis of comparison with common concrete strength. As the result of the experiment, in case of the Content Ratio of Crushed Stone Powder is less than 5%, it did not display a big difference in its both strength and matter-property compare with common concrete. In case of Elastic Modulus, when the Pressure Strength is 50% and 40% respectively, the Elastic Modulus Equation accords very well with the provided condition of Quadratic function, and as the result of the Presumption on Elastic Modulus according to Content of Crushed Stone Powder, in case the Pressure Strength is 50%, Elastic Modulus Equation showed that Error Ratio of Cubic function is at degree of 0.0005%, in case the Pressure Strength is 40%, Elastic Modulus Equation was accorded well with the value of the experimental data likely as the Error Ratio of Cubic function is at the degree around 0.0034%, respectively.

키워드 : 폐석분, 콘크리트 탄성계수, 최적화

Keywords : Crushed Stone-powder, Concrete Elastic Modulus, Optimization

## 1. 서론

현재 우리나라의 경우 인체에 해로운 각종 폐분진(제강분진, 석분, 석탄회, 쓰레기 조각재 등)을 인공경량골재로 제조하는 기술 등이 개발되었고 국내에서 발생하는 산업 폐분진의 10%를 재활용 할 경우 연간 3500억원의 경제적 효과를 얻을 수 있다는 연구 결과가 나왔을 뿐만 아니라 골재 불법채취 감소 및 폐분진의 중금속에 의한 토양 및 지하수 오염 개선 등 환경 보전효과 역시 기대된다.<sup>1)</sup> 이러한 관점에서 선진국의 경우에는 환경오염의 원인이 되는 폐석분 및 석분슬러지를 사용하여 건축용 인조석 판재 및 타일의 제조 등에 재활용할 수 있는 방법을 다각도로 검토해 왔다. 석재 가공업에서 배출되는 석분을 콘크리트 재료로 현재 다방면에 연구되고 있다. 석분은 콘크리트 결점인 건조수축과 미세균열을 방지하는 원료로 사용될 수 있는데 시멘트계의 각종 건축자재에 석분을 이용하게 되면 미세 균열을 줄일 수 있게 된다. 또한 건물등의 바닥재에 사용되는 셀프 레벨링재에도 석분이 사용된다.<sup>2)</sup> 우리나라의 경우에도 폐석분의 함유율에 따른 콘크리트강도의 측정 및 건조수축

의 변화 등에 관한 연구가 진행되고 있으나 폐석분의 함유율에 따른 강도는 다소 떨어지는 것으로 결과가 분석되고 있다. 따라서 이러한 폐석분이 함유된 콘크리트를 구조용 재료가 아닌 비구조적 재료에 이용하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 폐석분의 혼입에 따른 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수시험을 실시하여 일반콘크리트 강도와 비교, 분석한 후 SPSS 13.0의 Curve Estimation을 이용하여 추정식을 만들고 각 추정식에 대한 오차율을 비교 분석한 후 최적의 탄성계수식을 추정 건설현장 및 실생활에 적절한 활용방안을 제시하고자 한다.

## 2. 실험 개요

### 2.1 개요

본 시험에 있어서 공시체는 지름 길이는 (15×30cm)인 원주형을 사용하였으며, 공시체에 2개의 Strain Gauge를 부착하여 시험에 필요한 데이터를 수집하였다. 시험에 사용된 재료의 배합설계는 표1과 같다.

\* 원광대 건축학부 강사, 공학박사

\*\* 원광대 건축학부 교수, 공학박사

표 1. 배합 계획

호칭 강도 (MPa)	배합 강도 (MPa)	w/c	Slump	S/A (%)	물 (kg)	시멘트 (kg)	잔골재 (kg)	굵은골재 (kg)
21	24	49.7	21	46	203.3	408	757	909

위의 실험에 이용된 parameter는 시멘트량을 5%, 10%, 20%씩 줄이고 폐석분을 5%, 10%, 20%씩 첨가하여 각 석분함유량에 따른 공시체를 5개씩 제작하여 총 60개의 공시체를 가지고 실험을 실시하였다. 압축강도시험은 재령일에 따른 압축강도 측정을 위하여 재령 7일, 28일, 80일로 구분하여 실험을 실시하였다.

표 2. 폐석분 함유율에 따른 배합설계

폐석분 함유율	물 (kg)	시멘트 (kg)	잔골재 (kg)	굵은골재 (kg)	폐석분 (kg)
0%	1.626	3.264	1.514	7.272	0
5%	1.626	3.100	1.514	7.272	0.1640
10%	1.626	2.940	1.514	7.272	0.3260
20%	1.626	2.600	1.514	7.272	0.6528

## 2.2 사용재료

### 2.2.1 시멘트

본 실험에 사용된 시멘트는 KS L 5201에 규정된 S사의 보통 포틀랜드 시멘트로서 화학적 성분 및 물리적 성질은 다음 표 3 및 표 4와 같다.

표 3. 시멘트의 화학적 성분

성분	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ig.loss
조성비(%)	21.1	2.9	62.5	3.3	2.2	6.5	1.0

표 4. 시멘트의 물리적 성질

비중	분말도 (cm <sup>3</sup> /g)	안정도	응결		압축강도(kg/cm <sup>2</sup> )		
			초결	종결	3日	7日	28日
3.15	3,314	양호	4h-10m	7h-10m	154	230	356

### 2.2.2 골재

굵은 골재는 전북 익산시 낭산면 소재 (유) 경동산업의 쇄석으로 25mm 이하를 사용하였다. 물리적 성질은 표 5와 같고, 잔골재는 혼합모래를 사용하였고 물리적 성질 및 입도 곡선은 표 6, 그림 1과 같다.

표 5. 굵은 골재의 물리적 성질

구분	비중	흡수율(%)	조립율(%)	마모율(%)
쇄석	2.65	0.8	6.44	22.5

표 6. 잔골재의 물리적 성질

	비중	흡수율(%)	단위용적중량 (kg/m <sup>3</sup> )	조립율 (F.M)
혼합 모래	2.55	1.30	1,583	2.67

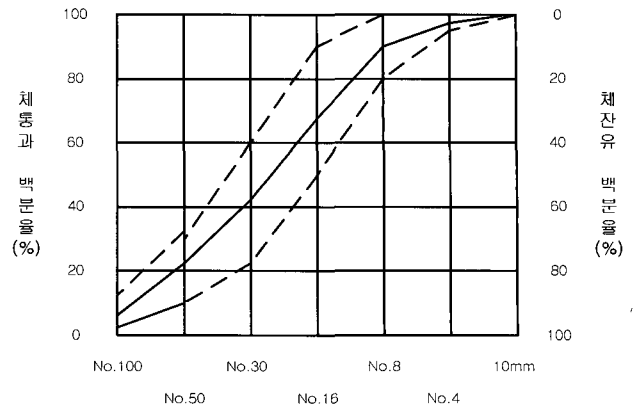


그림 1. 골재의 입도 분포곡선

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 압축강도 시험

각 공시체에 대한 하중 재하속도를 KS F2405에서 규정하고 있는 가압속도를 매초 2~3kgf/cm<sup>2</sup>로 시험하도록 정하여져 있고 ASTM C 39에는 0.14~0.34 MPa/sec 속도로 재하 하도록 규정되어 있어 본 실험에서는 2가지의 조건이 만족되도록 가압하고, 공시체가 1~2분 정도에 파괴되도록 하중을 균등하게 가력 하였다.

### 2.2.2 탄성계수 시험

콘크리트 구조물의 설계나 해석에 있어서 중요한 재료 특성인 콘크리트 탄성계수는 공시체에 대한 압축시험으로 얻은 응력-변형률 관계에서 최대 압축강도( $f_{ck}$ )의 45%에 대응하는 강도에 대한 할선계수(Scant Modulus)를 사용하도록 ASTM C469의 규정을 따르고 있으며, 본 연구에서 좀 더 정확한 해석을 위하여 압축강도의 50%, 40%에 해당하는 탄성계수를 추정하였다.

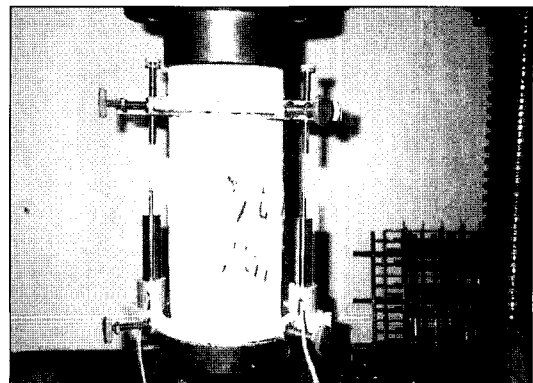


사진 1. 압축강도 시험 및 탄성계수 측정

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 압축강도 시험결과 및 분석

압축강도 측정결과를 그림 2에 나타냈다. 석분함유율에 따라 강도는 다소 감소하는 경향을 보이고 있지만, 석분함유율 5% 이내일 경우 강도는 일반콘크리트와 큰 차이는 보이지 않는 것으로 나타났다.

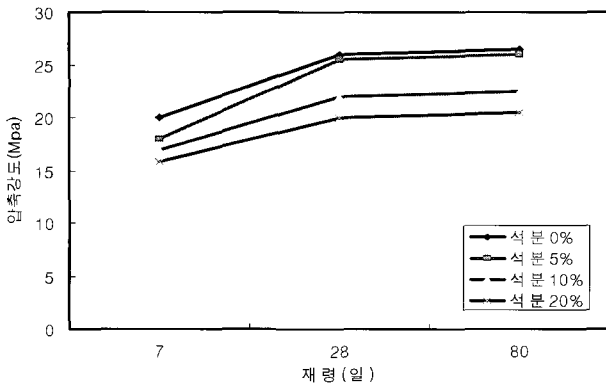


그림 2. 석분함유율과 재령에 따른 압축강도 시험결과

### 3.2 탄성계수 시험 결과 및 분석

탄성계수 측정을 위하여 최대시험 하중은  $P_{max} = 2/3 \cdot f_{ck} \cdot A$ 로서 추정하고, 각 하중 단계에 대응하는 변형률등을 이용하여 응력-변형률 곡선을 그린 후 할선탄성계수를 얻기 위해  $\sigma_a (=1/3 f_{ck})$  및 대응하는 변형률  $\epsilon_a$ 의 위치를 결정한 후 탄성계수를 구하는 방법을 채택하였다. 다음 그림3은 응력과 변형률 곡선을 나타낸 것이다.

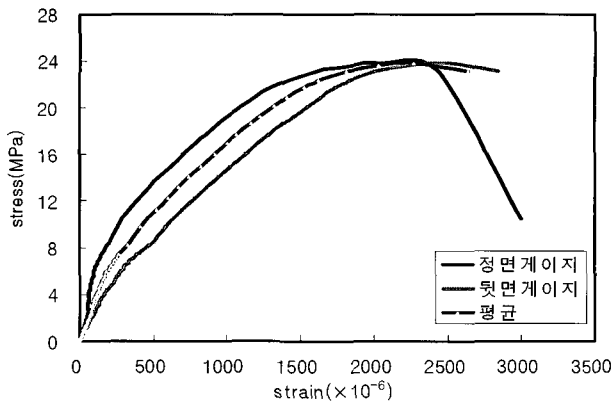


그림 3. 공시체 응력과 변형률 곡선

#### 3.2.1 압축강도 50%의 탄성계수

압축강도의 50%일 경우 석분 함유율에 따른 탄성계수 실험한 결과 다음 표 7, 그림 4와 같이 나타났다.

표 7. 압축강도 50% 일때 탄성계수(단위:MPa)

No	석분 0%		석분 5%		석분 10%		석분 20%	
	압축강도	탄성계수	압축강도	탄성계수	압축강도	탄성계수	압축강도	탄성계수
1	24.6	23118	25.6	22486	21.8	22312	19.8	21678
2	24.6	23214	25.0	22478	23.9	22368	21.2	21785
3	24.7	23195	24.6	22563	24.7	22354	19.7	21486
4	24.1	23186	22.2	22398	25.3	22745	20.6	21555
5	23.1	23368	24.0	22448	23.9	22678	21.4	21671

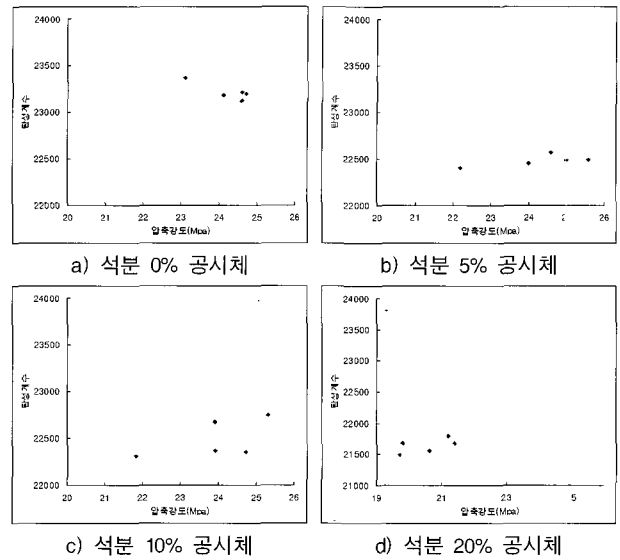


그림 4. 압축강도 50%일때 폐석분 혼입율별 탄성계수

본 실험에서 압축강도와 탄성계수와의 관계를 알수 있었으며 그리하여 실험 데이터를 이용 최적의 탄성계수 곡선식 추정을 위해 SPSS 13.0의 Curve Estimation 프로그램을 이용하여 분석을 실시하여 다음 그림 5와 같은 결과가 나왔고, 표8과 같은 각각 추정곡선의 추정계수를 얻을 수 있었다.

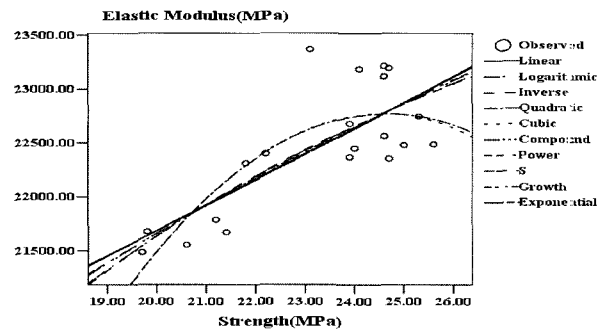


그림 5. 회귀분석 결과 (압축강도 50%)

표 8. 압축강도 50% 일때 추정곡선의 추정계수

방정식	R <sup>2</sup>	F 값	추정계수			
			상수항	b1	b2	b3
선형	0.575	24.349	16949.077	236.886		
대수	0.587	25.594	5492.226	5397.383		
역	0.598	26.723	27745.996	-122172.00		
2차	0.649	15.714	-12933.1	2895.127	-58.691	
3차	0.652	15.945	-3476.441	1601.887	0.000	-0.884
혼합	0.584	25.238	17523.227	1.011		
파워	0.596	26.555	10466.761	0.243		
S	0.607	27.751	10.257	-5.495		
성장	0.584	25.238	9.771	0.011		
지수	0.584	25.238	17523.227	0.011		

그림5의 회귀분석 결과 주어진 데이터와 가장 일치하는 함수식은 Quadratic function 과 Cubic function이 가장 근접한 결과치를 나타냈다. 그리하여 주어진 함수식과 측정된 데이터 값과의 오차율을 분석하여 최적의 탄성계수 곡선식을 만들어 분

석하고, 그림6과 같이 측정값과 추정값을 2차, 3차 방정식을 적용시켜본 결과 다음과 같은 결과가 나타났다.

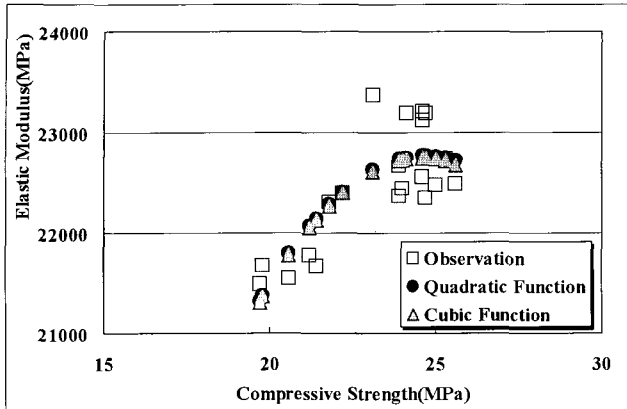


그림 6. 탄성계수 추정곡선식과 추정값 비교(압축강도 50%)

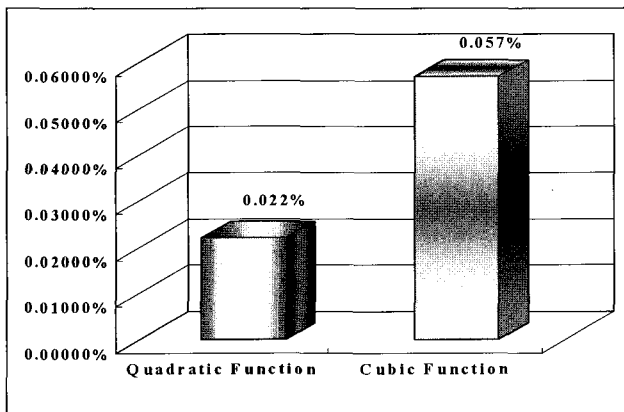


그림 7. 추정곡선식 오차율(50%)

위의 그림 7에서 보는 바와 같이 탄성계수 추정 함수 중 Quadratic function 이 오차율 0.022% 정도로 낮게 추정되어 압축강도의 50%일때의 탄성계수 함수의 추정식은  $E = -12933.1 + 2895.127 f_{ck} - 58.691 f_{ck}^2$  (MPa)으로 산정할 수 있었다.

### 3.2.2 압축강도 40%의 탄성계수

압축강도의 40%일 경우의 석분 함유율에 따른 탄성계수 측정 실험 결과 표9, 그림8과 같이 측정되었다.

표 9. 압축강도 40%일때의 탄성계수(단위:MPa)

No	석분 0%		석분 5%		석분 10%		석분 20%	
	압축 강도	탄성 계수	압축 강도	탄성 계수	압축 강도	탄성 계수	압축 강도	탄성 계수
1	24.6	23468	25.6	23542	21.8	22797	19.8	21998
2	24.6	23464	25.0	23538	23.9	22868	21.2	22018
3	24.7	23472	24.6	23466	24.7	22878	19.7	21994
4	24.1	23454	22.2	23448	25.3	22885	20.6	22007
5	23.1	23450	24.0	23468	23.9	22778	21.4	22048

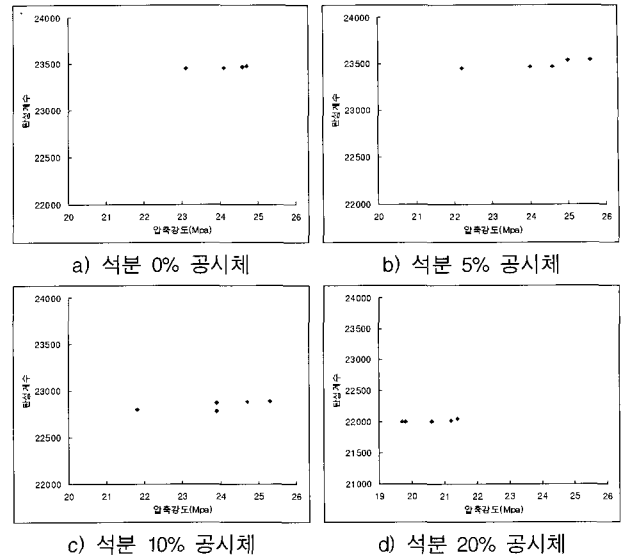


그림 8. 압축강도 40%일때 폐석분 혼입율별 탄성계수

위의 데이터도 압축강도 50% 일때의 경우와 같은 방법으로 SPSS 프로그램을 이용하여 최적의 탄성곡선식을 유도하여 분석한 결과는 다음 그림 9와 같은 결과가 나왔고 표 10과 같은 추정곡선의 추정계수를 얻을 수 있었다.

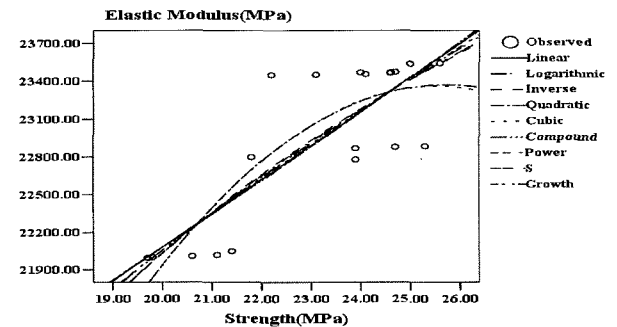


그림 9. 회귀분석 결과(압축강도 40%)

표 10. 압축강도 40%일 때의 추정곡선식의 추정계수

방정식	R <sup>2</sup>	F 값	추정계수			
			상수항	b1	b2	b3
선형	0.675	37.345	16691.985	269.424		
대수	0.684	38.951	3736.209	6114.998		
역	0.691	40.318	28927.697	-137927.00		
2차	0.712	21.007	-5657.560	2257.972	-43.912	
3차	0.713	21.124	1526.579	1283.123	0.000	-0.657
혼합	0.679	37.993	17413.195	1.012		
파워	0.688	39.655	9838.559	0.269		
S	0.695	41.085	10.304	-6.078		
성장	0.679	37.993	9.765	0.012		
지수	0.679	37.993	17413.195	0.012		

회귀분석 결과 주어진 데이터와 가장 일치하는 함수식은 앞의 실험 결과와 같은 Quadratic function과 Cubic function이 가장 근접한 결과치를 나타냈다. 그리하여 주어진 함수식과 측정된 데이터 값과의 오차율을 분석하여 최적의 탄성계수 곡선식

을 분석할 수 있었으며, 그림 10, 11에 나타냈다.

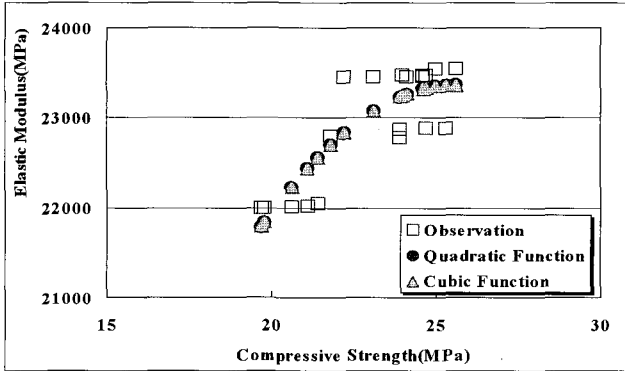


그림 10. 탄성계수 추정곡선식과 관측값(압축강도40%)

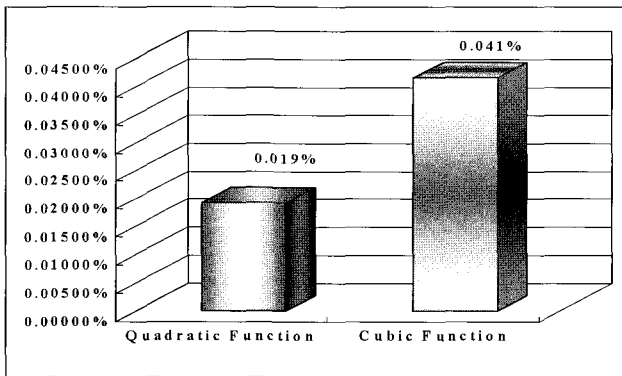


그림 11. 추정곡선식 오차율(압축강도40%)

위의 그림11에서 보는 바와 같이 압축강도 40%의 탄성계수 추정 함수 중 Quadratic function이 오차율 0.019% 정도로 낮게 추정되어 압축강도의 40%일 때의 탄성계수 값은 약간의 R<sup>2</sup>값의 차이가 있음에도 오차율이 적으므로  $E = -5657.56 + 2257.972 f_{ck} - 43.912 f_{ck}^2$  (MPa)으로 산정할 수 있었다.

### 3.2.3 폐석분 함유율별 탄성계수 추정

폐석분의 함유율에 따른 탄성계수 추정 또한 위의 같은 방법으로 SPSS 프로그램으로 분석한 후 가장 근접한 함수식을 도출 각 함수에 따른 오차율을 비교, 분석한 후 폐석분 함유율에 따른 최적의 탄성계수식을 추정하였다.

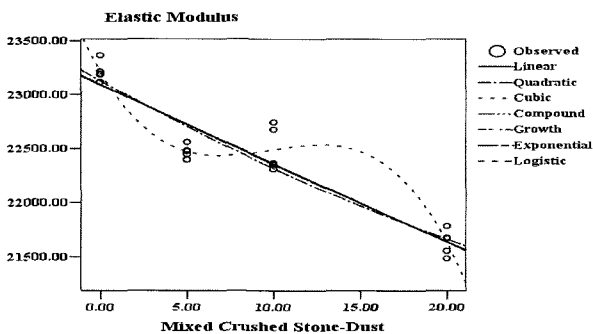


그림 12. 회귀분석 결과(압축강도50%)

그림 12의 회귀분석 결과 폐석분 함유율에 따른 탄성계수 추정결과는 Cubic function이 가장 근접한 결과치를 나타내고

있다. 따라서 표 11의 폐석분 함유율에 따른 압축강도 50%일때의 탄성추정식은  $E = 23216.2 - 276.913 Sm + 30.994 Sm^2 - 1.0551 Sm^3$  으로 나타낼 수 있었다. 여기서, Sm은 폐석분 함유량이다.

표 11. 폐석분 함유율 따른 추정계수(압축강도 50%)

방정식	R <sup>2</sup>	F 값	추정계수			
			상수항	b1	b2	b3
선형	0.886	139.369	23090.840	-72.747		
2차	0.889	68.272	23129.876	-88.920	0.781	
3차	0.959	124.612	23216.200	-276.913	30.994	-1.055
혼합	0.888	143.376	23095.077	0.997		
성장	0.888	143.376	10.047	-0.003		
지수	0.888	143.376	23095.077	-0.003		

따라서 각 함수에 따른 오차율을 분석하여 최적의 함수식을 추정한 결과 그림 13과 같이 나타냈다.

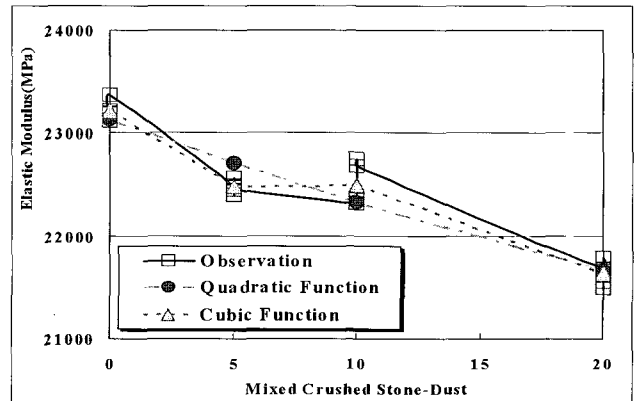


그림 13. 폐석분 함유율에 따른 탄성계수 추정식(압축강도50%)

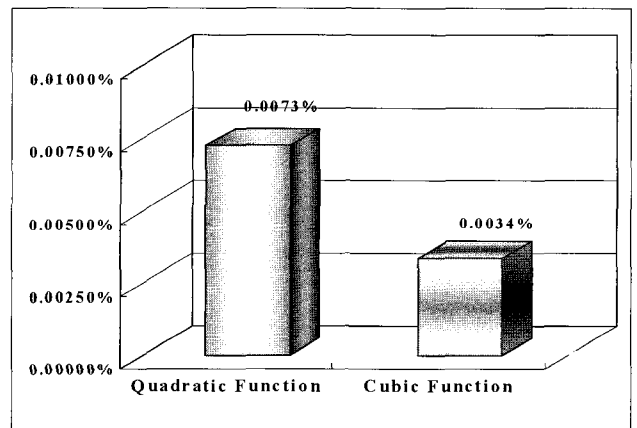


그림 14. 추정곡선식 오차율(압축강도50%)

그림 14에서 보는 바와 같이 폐석분 함유율에 따른 압축강도 50%일때의 탄성계수식은 Cubic function의 오차율이 0.0034% 정도로 Quadratic function보다 낮게 분석되었다. 압축강도의 40%일때의 탄성계수 추정식 역시 그림 15에서 보는 바와 같이 Quadratic function과 Cubic function 함수식이 주어진 조건과 가장 잘 일치하고 있었다. 그리하여 각 함수에 따른 오차율 분석을 통하여 최적의 함수식을 추정하였다.

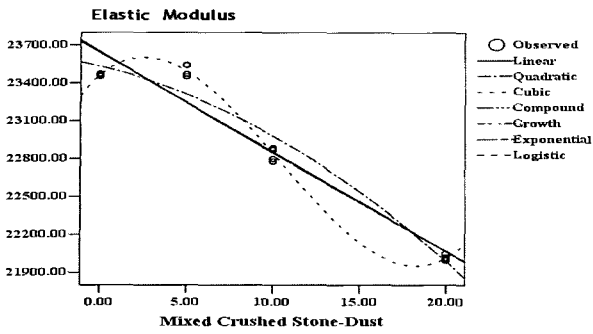


그림 15. 회귀분석 결과(압축강도40%)

표 12를 분석한 결과 압축강도 40%일 때의 탄성계수식을  $E = 23461.6 + 116.363Sm - 26.241Sm^2 + 0.8401Sm^3$  으로 수식화할 수 있었다.

표 12. 폐석분 함유율에 따른 추정계수(압축강도 40%)

방정식	R <sup>2</sup>	F 값	추정계수			
			상수항	b1	b2	b3
선형	0.932	244.977	23639.560	-78.573		
2차	0.957	191.113	23530.333	-33.321	-2.185	
3차	0.997	191.376	23461.600	116.363	-26.241	0.840
혼합	0.932	246.405	23647.927	0.997		
성장	0.932	246.405	10.071	-0.003		
지수	0.932	246.405	23647.927	-0.003		

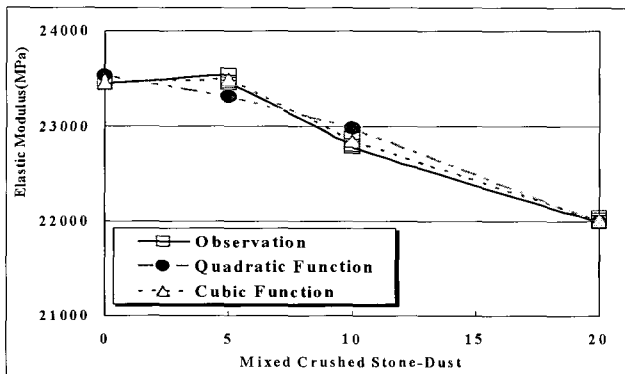


그림 16. 폐석분 함유율에 따른 탄성계수 추정식(40%)

그림 16의 폐석분 함유율에 따른 탄성계수의 추정식을 회귀 분석한 결과를 바탕으로 그림 17의 오차율을 분석한 결과 Cubic function의 오차율이 0.0005%정도로 낮게 분석되었다.

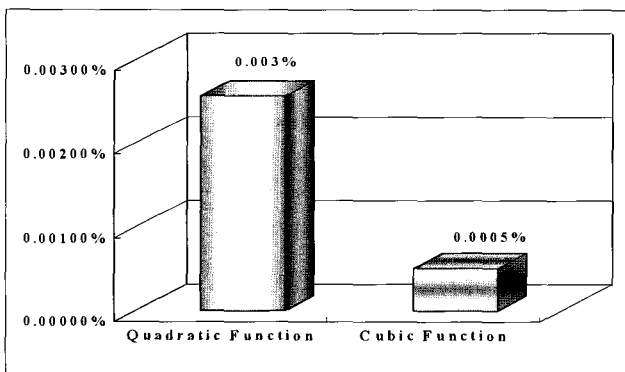


그림 17. 추정곡선식 오차율(40%)

본 연구에서 추정된 2차방정식을 이용하여 예측된 추정치와 실측치에 대한 신뢰수준을 검증하기 위하여 실측치와 추정치 간의 쌍체비교(Paired Sample Test)를 실시하였다. 압축강도가 40%일 때 95% 신뢰수준에서 t-Test 값이 0.002로 추정치와 실측치간의 차이가 없는 것으로 나타났습니다. 또한 압축강도가 50%일 때도 t-Test 값이 0.000으로 차이가 없는 것으로 나타났습니다.

#### 4. 결론

본 실험은 폐석분 함유율에 따른 압축강도와 탄성계수와의 관계를 추정하기 위해 SPSS 13.0의 Curve Estimation 추정을 통하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 폐석분 함유율이 5%일 경우는 일반콘크리트와의 강도에서 큰 차이를 보이고 있지 않으므로, 실생활 구조용 재료로 사용될 수 있도록 좀 더 많은 연구가 필요하다.
- 2) 폐석분 함유율이 10%, 20%일 경우는 일반콘크리트 강도보다 낮게 측정되므로 구조용 재료로 사용은 다소 불가능할 것으로 판단된다.
- 3) 압축강도의 50%일 때의 탄성계수식은 Quadratic function의 오차율이 0.022%로 주어진 조건과 가장 잘 일치하였으며, 탄성계수식을  $E = -12933.1 + 2895.127 f_{ck} - 58.691 f_{ck}^2$  (MPa) 산정할 수 있었다.
- 4) 압축강도의 40%일 때의 탄성계수식은 Quadratic function이 오차율 0.019%도로 주어진 조건과 가장 잘 일치하였으며,  $E = -5657.56 + 2257.972 f_{ck} - 43.912 f_{ck}^2$  (MPa) 으로 산정할 수 있었다.
- 5) 폐석분 함유율에 따른 탄성계수 추정결과 압축강도의 50%일 경우 탄성계수식은 Cubic function이 오차율 0.0034%정도로 실험 데이터값과 가장 잘 일치하여, 탄성계수식을  $E = 23216.2 - 276.913Sm + 30.994Sm^2 - 1.0551Sm^3$ 으로 산정할 수 있었다.
- 6) 폐석분 함유율에 따른 탄성계수 추정결과 압축강도의 40%일 경우 탄성계수식은 Cubic function이 오차율 0.0005%정도로 실험데이터값과 가장 잘 일치하여, 탄성계수식을  $E = 23461.6 + 116.363Sm - 26.241Sm^2 + 0.8401Sm^3$  산정할 수 있었다.

차후 폐석분을 함유한 공시체의 압축강도 및 탄성계수 데이터를 Bayesian Updating 기법을 통하여 보다 신뢰성 있는 식으로 표현되어야 할 것으로 판단된다.

#### 참고 문헌

1. 이상욱, 김성원, 오상균, 김정길, 마상준, 2003, 혼화재료로서 석분토의 재활용 가능성 평가, 대한건축학회 학술발표회 논문집 제23권 제2호, pp351-354

2. 황성태, 장경환, 정경락(1998), 석분과 폐석을 이용한 인조석 제조에 관한 연구, 전북대학교 공업기술개발연구소 제29권, pp73-81
3. 성찬용, 정현정(1996), 석분과 플라이 애쉬를 혼입한 투수용 폴리머 콘크리트의 공학적 성질, 한국농공학회지 제28권 제4호, pp147-154
4. 김창은, 이승규, 1994, "시멘트를 이용한 폐기물의 고형화 처리기술, 요업재료의 과학과 기술", Vol.9, No.5, p517~528
5. 신항식, 김종모, 정연구, 1992, "중금속 슬러지의 고형화 및 최종 처분 방안 연구", 한국 폐기물 학회지, Vol.9, No.1, p103
6. Tahir Celik and Khaled Marar(1996), EFFECTS OF CRUSHED STONE DUST ON SOME PROPERTIES OF CONCRETE, Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 7, pp1121-1130
7. ASTM, Concrete and Mineral Aggregates, Part 5, 1970, BSI, 33pp, London, 1970