

# 고강도 콘크리트의 탄성계수에 미치는 배합재료의 영향 평가

## Effect of Mix Ingredients on Modulus of Elasticity of High-Strength Concrete

손유신\*      이승훈\*\*      김규동\*\*\*      장일영\*\*\*\*      박훈규\*\*\*\*\*  
 Sohn, Yu Shin    Lee, Sung Hoon    Kim, Gyu Dong    Jang, Il Young    Park, Hoon Gyu

### ABSTRACT

This paper report the effects of mix ingredients on the modulus of elasticity of high-strength concrete. The test of 284 cylinder specimens are conducted for type I with 10% replacement of fly-ash cement concretes. Different water-binder ratio, amounts of water and coarse aggregate as variables were investigated. And also analyzed it statistically by using SAS.

### 1. 서론

콘크리트 구조물의 설계 및 해석에 있어서나 구조물 처짐 제어에 있어서 가장 중요한 재료적 변수는 탄성계수이다. 일반적으로 탄성계수는 실용적 측면에서 측정이 용이한 단위중량과 압축강도만의 함수로써 간략하게 정의되고 있다. 그러나 이러한 회귀식들은 대부분 실험자료에 대한 평균적인 의미이므로 매우 많은 불확실성이 포함되어 있어 지금까지 제시된 많은 표준식 및 실험식들이 다소의 차이가 있다.

Fig.1에서와 같이 이러한 식들은 압축강도와 탄성계수 사이의 큰 상관성이 있음을 잘 표현하고 있으나, 동일한 압축강도에서 탄성계수는 크게 분산된 값으로 측정됨을 알 수 있다. 이것은 콘크리트 탄성계수가 각 구성재료의 탄성특성과 체적비, 굵은골재와 시멘트 페이스트 사이의 부착강도, 혼화재료의 사용량, 양생방법 및 습윤상태, 재하속도, 시험방법, 공시체 가압면의 처리방법 등의 수많은 변수들에 의해 영향을 받으며, 이러한 변수들을 고려한 실험을 통하여 콘크리트의 탄성적 특성을 명확하게 규명하여 정량화하는 것은 매우 어렵다는 것을 의미한다<sup>(1)</sup>.

보통강도 콘크리트에서 굵은골재량과 최대치수의 증가는 역학적, 기하학적 비균질성을 증대 시켜 응력-변형을 곡선의 비선형성을 증가시킨다. 따라서 골재의 체적비가 증가할수록 탄성계수는 증가한다는 것이 일반적인 견해이다<sup>(2)</sup>. 그러나 보통강도 콘크리트와 파괴양상이나 시멘트풀 또는 모르타르 강성이 다른 고강도 콘크리트의 경우에는 탄성계수에 미치는 골재 등의 배합재료에 따른 영향이 다를 것이 예상된다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 고강도 콘크리트 영역에서 탄성계수에 미치는 배합변수들의 영향을 통

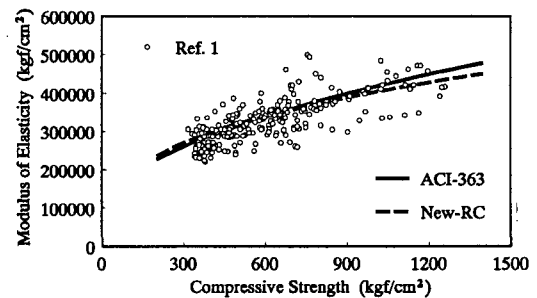


Fig.1 Elastic modulus vs. compressive strength

- \* 정회원, 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 연구원
- \*\* 정회원, 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 선임연구원
- \*\*\* 정회원, 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 전임연구원
- \*\*\*\* 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 교수
- \*\*\*\*\* 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 강사

계적 기법을 이용하여 분석하고, 이를 통하여 동일한 압축강도에서 최대의 탄성계수를 얻기 위한 방안을 모색해 보고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험변수 및 실험재료

콘크리트는 페이스트 매트릭스(paste matrix)와 골재의 합성재료로 볼 수 있으므로 본 연구에서는 일정한 골재량(굵은골재 체석비)에서의 물-결합재와 단위수량을 변수로 하여 모르타르에 의한 영향을 분석하였으며, 동일한 단위수량에 따른 굵은골재량과 최대치수를 변수로 하여 골재의 영향을 분석하였다. 실험변수는 Table 1에 나타난 것과 같다. 실험에 사용된 시멘트, 잔골재, 굵은골재의 물리적 특성은 Table 2와 같다.

### 2.3 콘크리트 배합 및 실험방법

콘크리트 배합은 Table 3 및 4와 같다.

Table 3은 동일 단위수량( $W=171\text{kg/m}^3$ )에서 물-결합재비와 굵은골재량( $V_G=0.31, 0.37$ ) 변화를 변수로 한 것이며, Table 4는 굵은골재량( $V_G=0.34$ )이 일정한 경우에 대해 물-결합재비( $W/(C+F)=0.24\sim 0.38$ ), 단위수량( $W=161, 171, 181\text{kg/m}^3$ )에 따른 탄성계수 변화양상을 분석하기 위한 것이다. 굵은골재 최대치수( $D_G$ )는 13, 19, 25mm를 사용하여 그 영향을 평가하였다. 압축강도와 탄성계수 시험은 공시체 양면을 연마하여 각각 KS F 2405, KS F 2438에 따라 실시하였다.

## 3. 통계적 분석

본 연구에서는 고강도 콘크리트 탄성계수 향상을 위한 배합재료의 영향을 분석하기 위하여 상관분석과 주성분분석을 수행하였다. 재령 28일, 56일에서의 전체자료에 대한 분석을 통하여 전체적인 변수들의 영향정도를 파악하고, 각 재령에서 동일 압축강도의 자료에 대한 분석을 수행하여 동일 압축강도에서 탄성계수에 미치는 배합변수들의 영향정도를 평가하였다.

### 3.1 상관분석

상관분석은 하나의 변수와 다른 변수의 관련성을 판단하기 위한 분석방법이다. 본 연구에서는 일반적인 상관분석방법인 Pearson방법을 이용하였다<sup>(3)</sup>.

#### 3.1.1 재령 28일 및 56일 전체자료 분석

Table 5와 6은 재령 28, 56일에 측정된 전체 실험결과에 대한 통계적특성 및 상관분석 결과이다.

Table 6에서 탄성계수( $E_c$ )와 각 변수간의 유의성을 검증해 보면,  $E_c$ 와  $W$ 와의 상관계수는  $-0.18$ 로 비교

Table 1 Test variables

| Variable                                 |             |                  |
|--|-------------|------------------|
| Water-Binder ratio(%)                    | $[W/(C+F)]$ | 24,26,30,34,38   |
| Unit weight of water ( $\text{kg/m}^3$ ) | $[W]$       | 161, 171, 181    |
| Volume fraction of coarse aggregate      | $[V_G]$     | 0.31, 0.34, 0.37 |
| Max. size of coarse aggregate(mm)        | $[D_G]$     | 13, 19, 25       |

Table 2 Material properties

| Type                                       | Type I Cement | Fly ash | Fine agg. River sand | Coarse agg. Crushed stone |
|--|---------------|---------|----------------------|---------------------------|
| Specific surface( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) | 3.315         | 4300    | -                    | -                         |
| Specific gravity                           | 3.15          | 2.1     | 2.62                 | 2.64                      |
| Fineness modulus                           | -             | -       | 2.74                 | 6.82                      |
| Compressive strength( $\text{kgf/cm}^2$ )  | 400           | -       | -                    | 1172                      |
| Elastic modulus( $\text{kgf/cm}^2$ )       | -             | -       | -                    | 649848                    |

Table 3 Mixture proportions

| W/(C+F) | Notation             |      | S/A | Unit weight( $\text{kg/m}^3$ ) |    |     |     |  |
|---------|----------------------|------|-----|--------------------------------|----|-----|-----|--|
|         | W                    | C    |     | F.A                            | G  | S   |     |  |
| 0.24    | 24-171-0.31-13,19,25 | 46.5 | 171 | 642                            | 71 | 794 | 685 |  |
|         | 24-171-0.37-13,19,25 | 36.2 | 171 | 642                            | 71 | 947 | 533 |  |
|         | 26-171-0.31-13,19,25 | 48.2 | 171 | 592                            | 66 | 794 | 733 |  |
| 0.26    | 26-171-0.37-13,19,25 | 38.2 | 171 | 592                            | 66 | 947 | 581 |  |
|         | 30-171-0.31-13,19,25 | 50.7 | 171 | 513                            | 57 | 793 | 810 |  |
|         | 30-171-0.37-13,19,25 | 41.1 | 171 | 513                            | 57 | 948 | 656 |  |
| 0.30    | 34-171-0.31-13,19,25 | 52.4 | 171 | 453                            | 50 | 793 | 868 |  |
|         | 34-171-0.37-13,19,25 | 43.2 | 171 | 453                            | 50 | 948 | 715 |  |
|         | 38-171-0.31-13,19,25 | 53.7 | 171 | 405                            | 45 | 794 | 914 |  |
| 0.38    | 38-171-0.37-13,19,25 | 44.7 | 171 | 405                            | 45 | 948 | 761 |  |

Table 4 Mixture proportions

| W/(C+F) | Notation             |      | S/A | Unit weight( $\text{kg/m}^3$ ) |    |     |     |  |
|---------|----------------------|------|-----|--------------------------------|----|-----|-----|--|
|         | W                    | C    |     | F.A                            | G  | S   |     |  |
| 0.24    | 24-161-0.34-13,19,25 | 42.8 | 161 | 604                            | 67 | 871 | 646 |  |
|         | 24-171-0.34-13,19,25 | 41.3 | 171 | 642                            | 71 | 871 | 608 |  |
|         | 24-181-0.34-13,19,25 | 38.8 | 181 | 679                            | 75 | 871 | 547 |  |
| 0.26    | 26-161-0.34-13,19,25 | 45.3 | 161 | 557                            | 62 | 871 | 716 |  |
|         | 26-171-0.34-13,19,25 | 43.2 | 171 | 592                            | 66 | 871 | 598 |  |
|         | 26-181-0.34-13,19,25 | 40.9 | 181 | 626                            | 70 | 871 | 598 |  |
| 0.30    | 30-161-0.34-13,19,25 | 47.7 | 161 | 483                            | 54 | 871 | 788 |  |
|         | 30-171-0.34-13,19,25 | 45.9 | 171 | 513                            | 57 | 871 | 733 |  |
|         | 30-181-0.34-13,19,25 | 44.0 | 181 | 543                            | 60 | 871 | 679 |  |
| 0.34    | 34-161-0.34-13,19,25 | 49.4 | 161 | 427                            | 47 | 871 | 843 |  |
|         | 34-171-0.34-13,19,25 | 47.8 | 171 | 453                            | 50 | 871 | 791 |  |
|         | 34-181-0.34-13,19,25 | 46.1 | 181 | 479                            | 53 | 871 | 740 |  |
| 0.38    | 38-161-0.34-13,19,25 | 50.6 | 161 | 382                            | 42 | 871 | 886 |  |
|         | 38-171-0.34-13,19,25 | 45.9 | 171 | 405                            | 45 | 871 | 837 |  |
|         | 38-181-0.34-13,19,25 | 47.7 | 181 | 428                            | 48 | 871 | 788 |  |

적 낮은 편이나, 그 때 상관계수보다 클 확률값이 0.03(97%)이다. 따라서 검정실시 전 설정해둔(SAS 프로그램 기본값) 0.05(95%)보다 작으므로 어느 정도의 역상관이 있다고 볼 수 있다.

분석을 통하여  $E_c$ 와 유의성이 있는 변수는 W, W/(C+F), C, Flyash(F.A), S의 배합변수와 단위중량( $\gamma_c$ ), 압축강도( $f_c$ )임을 알 수 있다. 또한  $E_c$ 는  $\gamma_c$ ,  $f_c$ 와 가장 큰 상관성을 보임을 알 수 있다. 이러한 이유에서 기존의 실험적으로 제시된 다양한 탄성계수식들이 단위중량, 압축강도의 함수로써 표현되는 것이다.

Table 6의 분석결과에서 주목할 점은  $E_c$ 와 유의성이 있는 변수들 중 W/(C+F), C, F.A, S는  $f_c$ 와 더 큰 상관이 있으므로 탄성계수에 대한 독립변수라 하기 어려운 반면, W는  $\gamma_c$ 나  $f_c$ 에 비해 탄성계수에 더욱 독립적인 역의 상관이 있음을 알 수 있다. 즉 단위수량 증가는 탄성계수 감소 효과가 있음을 의미한다. 최근 New-RC의 연구에서 제시된 물-결합재비에 대한 단위수량의 표준적인 범위와 본 연구에서 수집된 자료의 평균값을 비교해 보면, New-RC에서 제시한 단위수량의 표준적인 범위에 비해 국내 실험자료를 토대로 한 물-결합재비에 따른 단위수량이 많아짐을 알 수 있다<sup>(3)</sup>. 이러한 배합특성으로 인하여 Fig.1에 볼 수 있듯이 New-RC 탄성계수식의 추정값에 비해 국내 실험값이 더 낮게 측정된다는 것을 알 수 있다

단위수량의 영향을 명확히 분석하기 위하여 Table 4에 나타낸 것과 같이 일정한 골재량( $V_G=0.34$ )에 대해 단위수량을 161, 171, 181kg/m<sup>3</sup>로 변화시킨 실험자료에 대한 분석을 수행하였으며, Fig.2에 나타내었다. Fig.2의 비교에서 단위수량 증가는 탄성계수 감소 효과를 명확히 알 수 있다.

고강도 콘크리트의 탄성계수에 미치는 굵은골재의 영향은 Fig.3의 비교에서와 같이 동일한 단위수량과 골재량인 경우 골재치수에 따른 뚜렷한 차이는 보이지 않으나 골재치수 13mm에 비해 19mm나 25mm를 사용한 경우의 탄성계수가 대략 평균적으로 5%정도 높게 나타남을 알 수 있다. 보통강도 콘크리트에서와 같이 골재량 증가에 따른 탄성계수 증가는 기대하기 어려운 것으로 보이며, 오히려 Fig.3(a)와 (b)에서와 같이 콘크리트 압축강도가 고강도화 될수록 골재량이 많을수록 탄성계수값이 작게 나타났으며, 최대 5%정도 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 골재치수 19mm나 25mm에 비해 13mm인 경우 좀 더 큰 차이를 보인다. 이것은 콘크리트가 고강도화 될수록 골재 강성에 비해 모르타르 강성의 영향이 증가하기 때문인 것으로 보인다. 따라서 골재치수가 25mm인 경우에는 골재량의 영향이 없는 것으로 보이나, 19mm이하인 경우에는 골재량을 작게 하는 것이 탄성계수 향상에 좀 더 효과적인 것이다.

### 3.1.2 동일 압축강도자료 분석

본 연구의 주요목적이 배합재료의 영향을 분석하여 동일한 압축강도에서 가장 높은 탄성계수를 얻을 수 있는 방법을 모색하고자 하는 것이므로, 목표강도 500, 600, 700, 800kgf/cm<sup>2</sup>를 기준으로 적절한 편차범위내

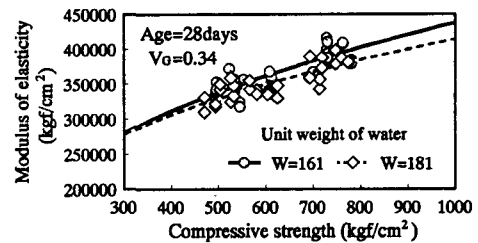
Table 5 Simple statistics for test data

| Age | Variable | N   | Mean     | Std.D.  | Min.     | Max.     |
|-----|----------|-----|----------|---------|----------|----------|
| 28  | $f_c$    | 150 | 641.7    | 90.5    | 470.0    | 781.0    |
|     | $E_c$    | 150 | 369743.0 | 21099.0 | 309743.0 | 416343.0 |
| 56  | $f_c$    | 134 | 701.2    | 105.9   | 173.0    | 856.0    |
|     | $E_c$    | 134 | 383978.0 | 19375.0 | 331708.0 | 425934.0 |

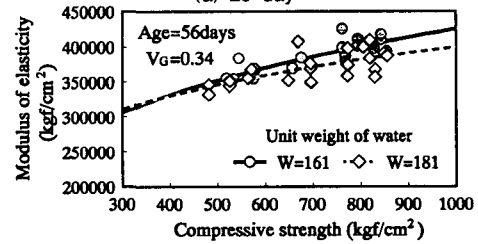
Table 6 Correlations between each variables for all data

| Age        | 28         |       |       | 56         |       |       |
|------------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|
|            | $\gamma_c$ | $f_c$ | $E_c$ | $\gamma_c$ | $f_c$ | $E_c$ |
| W          | -0.13      | -0.06 | -0.18 | -0.11      | -0.04 | -0.19 |
|            | 0.11       | 0.48  | 0.03  | 0.19       | 0.61  | 0.03  |
| W/(C+F)    | -0.41      | -0.91 | -0.38 | -0.33      | -0.90 | -0.39 |
|            | 0.00       | 0.00  | 0.00  | 0.00       | 0.00  | 0.00  |
| C          | 0.38       | 0.88  | 0.34  | 0.31       | 0.89  | 0.35  |
|            | 0.00       | 0.00  | 0.00  | 0.00       | 0.00  | 0.00  |
| F.A        | 0.38       | 0.88  | 0.34  | 0.31       | 0.89  | 0.35  |
|            | 0.00       | 0.00  | 0.00  | 0.00       | 0.00  | 0.00  |
| S/A        | -0.48      | -0.61 | -0.14 | -0.39      | -0.56 | -0.08 |
|            | 0.00       | 0.00  | 0.09  | 0.00       | 0.00  | 0.35  |
| S          | -0.44      | -0.77 | -0.22 | -0.37      | -0.75 | -0.22 |
|            | 0.00       | 0.00  | 0.01  | 0.00       | 0.00  | 0.01  |
| G          | 0.32       | 0.01  | -0.18 | 0.29       | -0.03 | -0.17 |
|            | 0.00       | 0.93  | 0.06  | 0.00       | 0.72  | 0.05  |
| $D_G$      | 0.28       | -0.05 | 0.15  | 0.33       | -0.05 | 0.00  |
|            | 0.00       | 0.53  | 0.06  | 0.00       | 0.59  | 1.00  |
| $V_G$      | 0.34       | 0.06  | 0.15  | 0.31       | 0.00  | -0.14 |
|            | 0.00       | 0.53  | 0.06  | 0.00       | 0.99  | 0.11  |
| $\gamma_c$ | 1          | 0.54  | 0.56  | 1          | 0.45  | 0.41  |
|            | 0          | 0.00  | 0.00  | 0          | 0.00  | 0.00  |
| $f_c$      |            | 1     | 0.54  |            | 1     | 0.46  |
|            |            | 0     | 0.00  |            | 0     | 0.00  |

Correlation coefficient  
Confidence limit

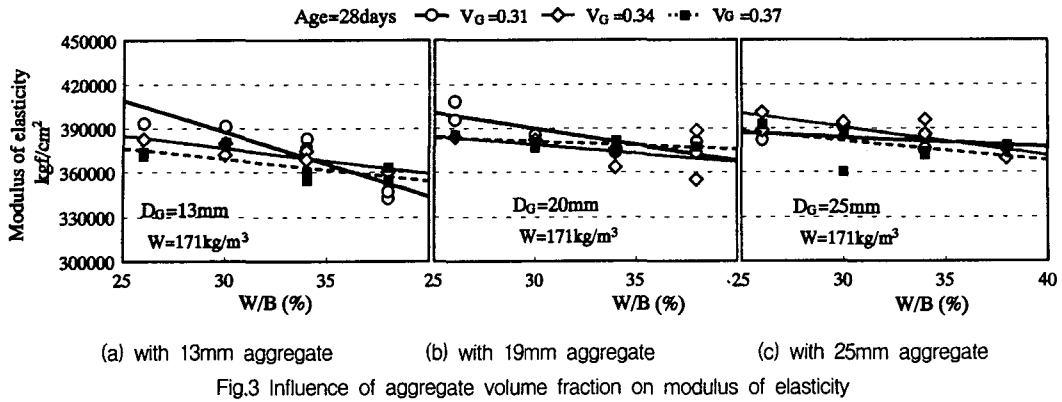


(a) 28 day



(b) 56 day

Fig.2 Influence of unit weight of water on modulus of elasticity



의 압축강도를 동일 압축강도로 취하여 분석하였다.

Table 7과 8은 재령 28일, 56일에서 측정된 실험결과 중 목표강도 500, 600, 700, 800kgf/cm<sup>2</sup>의 자료에 대한 분석결과를 나타낸 것이다. 각 목표강도별 압축강도의 표준편차는 ACI-363의 35~49kgf/cm<sup>2</sup> 권장 범위와 JASS-5 제시값인 35kgf/cm<sup>2</sup>보다 작다<sup>(3)</sup>. 변동계수 또한 Walker<sup>(2)</sup>의 품질관리 등급에 따라 판단하여 우수함(<5%) 품질의 콘크리트라 할 수 있으며, 동일한 압축강도로 취급할 수 있다.

Table 8의 분석결과를 살펴보면, 공통적으로 단위수량의 감소와 탄성계수 증가 사이에 유의성이 있는 것이 확인된다. 굵은골재 최대치수나 량과의 상관은 없는 것으로 나타났으며, 단위시멘트량과는 역상관을 보이고 있다. 또한 잔골재량의 증가도 어느 정도 탄성계수 향상에 기여하는 것으로 분석된다.

이러한 분석결과를 Fig.4와 5에 나타내었다. Fig.4에서 각 목표강도별, 시멘트량에 따른 탄성계수값 차이를 볼 수 있다.

전체자료 분석결과에서 나타난 것과 같이 전체적으로는 시멘트량 100kg/m<sup>3</sup>증가에 따라 압축강도 증가와 더

Table 7 Simple statistics for each target strength

| Age (day) | Variable | N     | Mean                | S.Dev.   | Min.    | Max.     |          |
|-----------|----------|-------|---------------------|----------|---------|----------|----------|
|           |          |       | kgf/cm <sup>2</sup> |          |         |          |          |
| 28        | F500     | $f_c$ | 38                  | 519.6    | 22.1    | 470.0    | 545.0    |
|           |          | $E_c$ | 38                  | 351794.0 | 20600.0 | 309743.0 | 388327.0 |
|           | F600     | $f_c$ | 40                  | 609.2    | 29.2    | 553.0    | 649.0    |
|           |          | $E_c$ | 40                  | 365511.0 | 16986.0 | 329769.0 | 395716.0 |
|           | F700     | $f_c$ | 52                  | 710.4    | 25.8    | 657.0    | 748.0    |
|           |          | $E_c$ | 52                  | 383568.0 | 14324.0 | 342985.0 | 416343.0 |
| 56        | F600     | $f_c$ | 23                  | 576.9    | 22.0    | 557.0    | 649.0    |
|           |          | $E_c$ | 23                  | 366956.0 | 11038.0 | 345265.0 | 392797.0 |
|           | F700     | $f_c$ | 51                  | 700.0    | 30.3    | 651.0    | 745.0    |
|           |          | $E_c$ | 51                  | 391543.0 | 18210.0 | 348743.0 | 425934.0 |
|           | F800     | $f_c$ | 51                  | 797.4    | 33.8    | 751.0    | 856.0    |
|           |          | $E_c$ | 51                  | 388962.0 | 14528.0 | 353338.0 | 425483.0 |

Table 8 Correlation between each variables

| Age            | 28 dys     |       |       |            |       |       |            |       |       | 56 days    |       |       |            |       |       |            |       |       |
|----------------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|
|                | F500       |       |       | F600       |       |       | F700       |       |       | F600       |       |       | F700       |       |       | F800       |       |       |
|                | $\gamma_c$ | $f_c$ | $E_c$ | $\gamma_c$ | $f_c$ | $E_c$ | $\gamma_c$ | $f_c$ | $E_c$ | $\gamma_c$ | $f_c$ | $E_c$ | $\gamma_c$ | $f_c$ | $E_c$ | $\gamma_c$ | $f_c$ | $E_c$ |
| W              | -0.26      | -0.28 | -0.15 | -0.29      | -0.02 | -0.34 | -0.24      | -0.06 | -0.39 | -0.09      | -0.14 | -0.01 | -0.11      | 0.08  | -0.01 | -0.20      | 0.09  | -0.36 |
| W/(C+F)        | 0.12       | 0.09  | 0.38  | 0.07       | 0.91  | 0.03  | 0.09       | 0.69  | 0.00  | 0.68       | 0.51  | 0.95  | 0.43       | 0.56  | 0.96  | 0.16       | 0.54  | 0.01  |
| C              | 0.48       | -0.23 | 0.40  | 0.28       | -0.23 | 0.46  | 0.18       | -0.68 | 0.12  | 0.42       | -0.46 | 0.33  | -0.07      | -0.67 | -0.29 | 0.08       | -0.65 | 0.31  |
| S/A            | 0.00       | 0.16  | 0.01  | 0.08       | 0.15  | 0.00  | 0.21       | 0.00  | 0.39  | 0.04       | 0.03  | 0.12  | 0.61       | 0.00  | 0.04  | 0.59       | 0.00  | 0.03  |
| S              | -0.53      | -0.04 | -0.54 | -0.38      | 0.17  | -0.54 | -0.26      | 0.59  | -0.27 | -0.44      | 0.44  | -0.33 | 0.04       | 0.66  | 0.27  | -0.15      | 0.64  | -0.48 |
| G              | 0.00       | 0.82  | 0.00  | 0.02       | 0.29  | 0.00  | 0.06       | 0.00  | 0.05  | 0.03       | 0.04  | 0.12  | 0.80       | 0.00  | 0.05  | 0.29       | 0.00  | 0.00  |
| D <sub>G</sub> | -0.56      | -0.33 | 0.26  | -0.02      | -0.03 | 0.36  | -0.30      | -0.31 | 0.38  | -0.82      | -0.16 | -0.53 | -0.19      | -0.28 | -0.07 | -0.06      | 0.26  | 0.39  |
| V <sub>G</sub> | 0.00       | 0.04  | 0.11  | 0.92       | 0.83  | 0.02  | 0.03       | 0.03  | 0.01  | 0.00       | 0.46  | 0.01  | 0.19       | 0.05  | 0.63  | 0.65       | 0.07  | 0.00  |
| $\gamma_c$     | 0.06       | -0.02 | 0.30  | 0.12       | -0.08 | 0.46  | -0.13      | -0.42 | 0.40  | -0.36      | -0.29 | -0.22 | -0.13      | -0.31 | -0.01 | 0.02       | -0.38 | 0.46  |
| $f_c$          | 0.71       | 0.88  | 0.07  | 0.46       | 0.62  | 0.00  | 0.35       | 0.00  | 0.00  | 0.10       | 0.18  | 0.32  | 0.35       | 0.03  | 0.95  | 0.91       | 0.01  | 0.00  |
| $E_c$          | 0.40       | 0.06  | -0.06 | 0.28       | -0.04 | -0.05 | 0.58       | 0.04  | -0.21 | 0.68       | 0.41  | 0.39  | 0.37       | -0.07 | -0.18 | 0.25       | 0.03  | -0.17 |
| $\gamma_c$     | 0.01       | 0.74  | 0.74  | 0.08       | 0.83  | 0.75  | 0.00       | 0.77  | 0.13  | 0.00       | 0.05  | 0.07  | 0.01       | 0.61  | 0.20  | 0.07       | 0.85  | 0.24  |
| $f_c$          | 0.41       | -0.01 | 0.26  | 0.03       | -0.71 | 0.12  | 0.52       | 0.13  | -0.19 | 0.30       | 0.68  | 0.50  | 0.57       | -0.14 | -0.17 | 0.01       | -0.30 | -0.02 |
| $E_c$          | 0.01       | 0.97  | 0.12  | 0.87       | 0.00  | 0.46  | 0.00       | 0.37  | 0.18  | 0.17       | 0.00  | 0.02  | 0.00       | 0.34  | 0.22  | 0.95       | 0.03  | 0.90  |
| $\gamma_c$     | 0.40       | 0.06  | -0.06 | 0.28       | -0.04 | -0.05 | 0.58       | 0.04  | -0.21 | 0.68       | 0.41  | 0.39  | 0.33       | 0.01  | -0.18 | 0.23       | -0.05 | -0.18 |
| $f_c$          | 0.01       | 0.74  | 0.74  | 0.08       | 0.83  | 0.76  | 0.00       | 0.79  | 0.13  | 0.00       | 0.05  | 0.07  | 0.02       | 0.96  | 0.19  | 0.10       | 0.75  | 0.22  |
| $E_c$          | 1          | 0.30  | 0.47  | 1          | 0.05  | 0.77  | 1          | 0.04  | -0.00 | 1          | 0.33  | 0.67  | 1          | 0.24  | 0.25  | 1          | 0.14  | 0.11  |
| $\gamma_c$     | 0          | 0.07  | 0.00  | 0          | 0.77  | 0.00  | 0          | 0.78  | 0.98  | 0          | 0.13  | 0.00  | 0          | 0.09  | 0.08  | 0          | 0.33  | 0.43  |
| $f_c$          |            | 1     | 0.26  |            | 1     | 0.12  |            | 1     | 0.09  |            | 1     | 0.35  |            | 1     | 0.43  |            | 1     | -0.24 |
| $E_c$          |            | 0     | 0.12  |            | 0     | 0.45  |            | 0     | 0.54  |            | 0     | 0.10  |            | 0     | 0.00  |            | 0     | 0.09  |

불어 탄성계수가 약 22.3%정도 증가하는 양상을 확인할 수 있다. 그러나 각 목표강도 별로 검토해 보면, 동일 압축강도에서는 시멘트량이 물-결합재비나 압축강도에 종속되지 않고 탄성계수를 종속변수로 할 경우, 시멘트량이 감소할수록 탄성계수 향상에 기여하는 것으로 나타났다.

Fig.5는 각 목표강도별 잔골재량과 탄성계수의 관계를 나타낸 것이다. 전체적으로 볼 때 잔골재량 100kg/m<sup>3</sup> 증가에 따라 약 1.2%의 탄성계수 감소가 있는 것으로 나타났으나, 각 목표강도별 양상과 전체적인 양상은 차이가 있다. 압축강도 700kgf/cm<sup>2</sup>의 경우에는 큰 차이가 없으나 500kgf/cm<sup>2</sup>의 경우에는 잔골재량 100kg/m<sup>3</sup> 증가에 따라 탄성계수가 21%정도 증가하는 것으로 나타났다.

따라서 동일 압축강도를 목표로 배합을 할 경우 가능한 범위 내에서 적은 수량 및 시멘트량 사용과 잔골재량을 늘임으로서 탄성계수 향상을 기대 할 수 있을 것이다.

### 3.2 주성분분석

주성분 분석은 많은 변동인자에 대해 공통변량으로 요약하여 설명하는 기법이다. 주성분분석을 통하여 공통변량으로 형성된 변수에 대해 회귀분석을 수행할 경우 배합변수와 탄성계수와의 관계를 적절히 모델화할 수 있다.

#### 3.2.1 재령 28일 및 56일 전체자료 분석

각 주성분과 콘크리트를 구성하는 재료변수 사이의 상관을 설명하는 인자부하량은 고유치와 고유벡터로 구하며, 고강도 콘크리트의 특정변수가 가지는 총정보를 각 주성분에 적재되는 량으로 계산한 값을 기여도라 할 때, 인자부하량을 이용하여 구한 재령 28일 및 56일 전체 자료는 제 1~3주성분까지 기여도가 나타났다. 기여도를 구한 결과는 Table 9와 같다. 인자부하량이 0.4이상이면 매우 높은 적재량이라 할 수 있으므로, 배합변수들의 인자부하량과 기여도를 살펴보면 제1주성분(PC-1)의 경우에는 압축강도에 영향을 주는 인자들로서 W/(C+F), C, F.A, S/A, S의 배합재료와 단위중량, 압축강도, 탄성계수로 공통변량을 형성하고 있음을 알 수 있다. 한편 제3주성분(PC-3)에서 단위수량과 굵은골재치수, 단위중량, 탄성계수가 공통변량으로 형성되어 있으며, 상관분석 결과에서와 같이 탄성계수 증가와 단위수량 감소가 상관성이 있음을 확인 할 수 있다.

또한 제3주성분에서 굵은골재 최대치수와 탄성계수가 공통변량으로 형성됨을 알 수 있음을 알 수 있는데, 굵은골재의 영향에 대한 상관분석에서와 같이 골재치수증가와 탄성계수증가가 상관성이 있음을 확인할 수 있다. 그러나 굵은골재 최대치수는 Table 6의 상관분석에서 알 수 있듯이 단위중량에 더 크게 종속되므로 탄성계수의 독립변수라 할 수 없다. 주성분분석에서도 굵은골재량과 탄성계수는 공통변량으로 형성되지 않는 것으로 나타났다.

#### 3.2.2 동일 압축강도자료 분석

Table 10의 재령 28일 압축강도 500, 600 및 700kgf/cm<sup>2</sup>에 대한 분석결과를 살펴보면, 제1주성분에서 압축강도가 거의 일정한 변수이므로 공통변량에서 제외됨을 알 수 있으며, W/(C+F), C, F.A, S의 배합변수

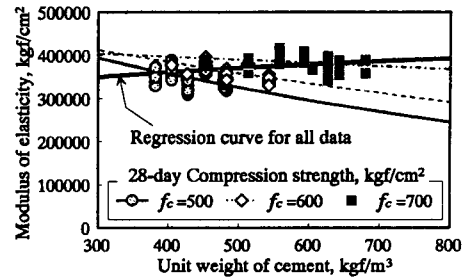


Fig.4 Modulus of elasticity vs. cement contents

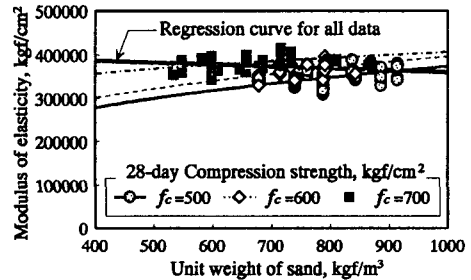


Fig.5 Modulus of elasticity vs. fine agg. contents

Table 9 Factor loadings for all test data

| Variable       | 28 day |        |        | 56 day |        |        |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                | PC-1   | PC-2   | PC-3   | PC-1   | PC-2   | PC-3   |
| W              | 0.131  | 0.097  | -0.664 | 0.084  | 0.107  | -0.641 |
| W/(C+F)        | -0.914 | 0.315  | 0.058  | -0.906 | 0.357  | 0.027  |
| C              | 0.929  | -0.286 | -0.202 | 0.921  | -0.313 | -0.184 |
| S/A            | -0.867 | -0.437 | 0.130  | -0.848 | -0.489 | 0.163  |
| S              | -0.959 | -0.156 | 0.223  | -0.958 | -0.178 | 0.204  |
| G              | 0.348  | 0.924  | 0.106  | 0.340  | 0.911  | 0.073  |
| D <sub>G</sub> | 0.090  | 0.019  | 0.406  | 0.068  | 0.081  | 0.405  |
| V <sub>G</sub> | 0.344  | 0.927  | 0.100  | 0.348  | 0.912  | 0.073  |
| r <sub>c</sub> | 0.572  | 0.141  | 0.644  | 0.484  | 0.221  | 0.672  |
| f <sub>c</sub> | 0.892  | -0.311 | 0.109  | 0.809  | -0.350 | 0.142  |
| E <sub>c</sub> | 0.433  | -0.375 | 0.625  | 0.400  | -0.378 | 0.561  |

Table 10 Factor loadings

| Age            | 28 day         |        |        |        |        |        |        |        |        |
|----------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                | F500           |        |        | F600   |        |        | F700   |        |        |
|                | Factor loading |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Variable       | PC-1           | PC-2   | PC-3   | PC-1   | PC-2   | PC-3   | PC-1   | PC-2   | PC-3   |
| W              | 0.355          | 0.094  | -0.498 | -0.612 | -0.093 | -0.145 | 0.358  | -0.191 | -0.749 |
| W/(C+F)        | -0.826         | -0.044 | -0.219 | 0.704  | 0.420  | -0.388 | -0.770 | 0.504  | -0.325 |
| C              | 0.984          | 0.096  | -0.023 | -0.883 | -0.389 | 0.252  | 0.826  | -0.548 | 0.019  |
| F.A            | 0.974          | 0.101  | -0.045 | -0.889 | -0.398 | 0.263  | 0.830  | -0.543 | 0.028  |
| S/A            | -0.210         | -0.872 | -0.154 | 0.774  | -0.622 | -0.041 | -0.913 | -0.344 | 0.110  |
| S              | -0.623         | -0.712 | 0.169  | 0.910  | -0.364 | -0.085 | -0.982 | -0.074 | 0.117  |
| G              | -0.035         | 0.985  | -0.016 | -0.297 | 0.933  | -0.045 | 0.540  | 0.796  | -0.001 |
| D <sub>c</sub> | -0.228         | 0.000  | 0.158  | 0.398  | -0.155 | 0.399  | 0.506  | 0.296  | 0.218  |
| V <sub>G</sub> | -0.035         | 0.985  | -0.016 | -0.295 | 0.934  | -0.046 | 0.538  | 0.798  | -0.002 |
| $\gamma_c$     | -0.600         | 0.456  | 0.403  | 0.386  | 0.521  | 0.606  | 0.150  | 0.767  | 0.340  |
| $f_c$          | 0.186          | 0.062  | 0.870  | -0.188 | -0.037 | -0.186 | 0.538  | -0.344 | 0.546  |
| E <sub>c</sub> | -0.503         | -0.050 | 0.609  | 0.660  | 0.253  | 0.444  | -0.408 | -0.078 | 0.625  |

Table 11 Factor loadings

| Age            | 56 day         |        |        |        |        |        |        |        |        |
|----------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                | F600           |        |        | F700   |        |        | F800   |        |        |
|                | Factor loading |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Variable       | PC-1           | PC-2   | PC-3   | PC-1   | PC-2   | PC-3   | PC-1   | PC-2   | PC-3   |
| W              | 0.292          | -0.362 | -0.601 | -0.102 | -0.440 | 0.508  | 0.523  | -0.579 | 0.394  |
| W/(C+F)        | -0.334         | 0.751  | 0.347  | 0.469  | -0.062 | -0.051 | -0.631 | -0.413 | 0.147  |
| C              | 0.461          | -0.879 | 0.029  | -0.452 | -0.047 | 0.149  | 0.843  | 0.056  | 0.061  |
| F.A            | 0.462          | -0.873 | 0.064  | -0.463 | -0.036 | 0.139  | 0.843  | 0.048  | 0.086  |
| S/A            | -0.834         | -0.268 | 0.049  | -0.354 | 0.150  | 0.072  | -0.805 | 0.010  | -0.039 |
| S              | 0.860          | 0.376  | -0.299 | -0.137 | 0.159  | -0.001 | -0.939 | 0.036  | -0.073 |
| G              | 0.860          | 0.376  | -0.297 | 0.720  | -0.119 | -0.239 | 0.333  | 0.031  | -0.040 |
| D <sub>c</sub> | 0.424          | -0.014 | 0.236  | 0.449  | 0.559  | 0.637  | -0.016 | 0.395  | 0.853  |
| V <sub>G</sub> | 0.860          | 0.376  | -0.297 | 0.719  | -0.118 | -0.239 | 0.334  | 0.030  | -0.039 |
| $\gamma_c$     | 0.496          | 0.736  | 0.100  | 0.367  | 0.775  | 0.052  | 0.124  | 0.641  | 0.147  |
| $f_c$          | 0.626          | -0.221 | 0.299  | -0.540 | 0.215  | -0.101 | 0.600  | 0.239  | -0.559 |
| E <sub>c</sub> | 0.401          | 0.614  | 0.426  | -0.476 | 0.468  | -0.455 | -0.536 | 0.456  | -0.030 |

와  $\gamma_c$ , E<sub>c</sub>가 공통변량으로 형성됨을 알 수 있다.

주성분분석에도 상관분석과 일치하는 양상을 확인할 수 있는데, Table 9의 재령 28일 전체자료에 대한 분석결과에서 시멘트량 증가와 잔골재량 감소가 압축강도 증가와 상관성이 있으며, 압축강도 증가를 독립 변수로 하여 탄성계수가 증가하는 일반적인 양상을 보인 반면에, Table 10에서와 같이 압축강도가 공통변량에서 제외될 경우 시멘트량 증가와 잔골재량 감소는 오히려 탄성계수 감소의 효과를 가져올 수 있음을 알 수 있다.

재령 28일 각 목표강도별 분석에서 굵은골재량이나 최대치수와 탄성계수는 공통변량으로 형성되지 않는 것으로 나타났다. 분석결과에서 공통적으로는 제2 또는 제3주성분에서 단위수량과 탄성계수가 공통변량을 형성하고 있다. 이러한 각 목표강도에 대한 분석결과를 종합해 볼 때, 동일한 압축강도의 배합인 경우 상관분석에서와 같이 단위수량, 시멘트량, 잔골재량 또는 잔골재율의 배합변수를 독립변수로 하여 회귀분석을 수행할 경우 탄성계수를 추정할 수 있는 적절한 모델식을 도출할 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 고강도 콘크리트영역에서, 동일한 압축강도에서 최대의 탄성계수를 얻기 위한 방안을 모색하기 위한 실험 및 상관분석, 주성분분석의 통계적 연구를 수행하였으며 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 단위수량 감소는 탄성계수 증가 효과가 있다.
- (2) 굵은골재 최대치수가 19mm이하인 경우, 굵은골재 최대치수가 작을수록 굵은골재량을 적게 하는 것이 고강도 콘크리트의 탄성계수 향상에 효과적이다.
- (3) 동일 압축강도를 목표로 배합을 할 경우, 가능한 범위내에서 적은 수량 및 적은 시멘트량 사용과 굵은골재량에 비해 잔골재량을 늘임으로서 탄성계수 향상을 기대 할 수 있다.
- (4) 단위수량, 시멘트량, 잔골재량 또는 잔골재율의 배합변수를 독립변수로 하여 회귀분석을 수행할 경우 배합재료로부터 탄성계수를 추정할 수 있는 적절한 모델식을 도출할 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

1. 장일영, 윤영수, 박훈규, "국내의 실험자료를 이용한 고강도 및 초고강도 콘크리트의 탄성계수식", 한국 콘크리트학회지, 제8권6호, 1996년 12월
2. Neville, N. E., "Properties of Concrete", 3rd ed., Pitman Books, London, 1982, pp.662
3. 장일영, 박훈규, 장판기, "고강도 콘크리트의 배합설계 시스템 개발에 관한 연구", 대한토목학회 논문집 제19권 I-5호, 1999년 9월