

초유동 콘크리트의 최적 배합설계를 위한 정식화 기법의 도입

이 상 수

<<주>대우 건설기술연구소 주임연구원

원 철

<<주>대우 건설기술연구소 주임연구원

김 동 석

<<주>대우 건설기술연구소 주임연구원

- | | |
|----------------------|--------------------------|
| 1. 서론 | 4.3 물/결합재 용적비의 평가방법 |
| 2. 초유동 콘크리트의 배합설계 단계 | 4.4 고성능 감수제 첨가량의 평가 방법 |
| 2.1 기본개념 | 4.5 배합평가에 따른 최적배합의 추정 |
| 2.2 페이스트 시험 | 5. 실험결과 및 분석 |
| 2.3 모르타르 시험 | 5.1 구속수비 실험결과 |
| 3. 실험개요 | 5.2 석회석분의 유동성 및 점성평가 |
| 3.1 사용재료 | 5.3 석회석분 치환율의 영향 |
| 3.2 모르타르의 배합설계 순서 | 5.4 플라이애쉬의 유동성 및 점성평가 |
| 3.3 배합조건 및 범위 | 5.5 물/결합재비와 고성능감수제 첨가율 |
| 4. 수식화 개념 모델 | 5.6 플라이애쉬 치환율의 영향 |
| 4.1 배합조건과 모르타르 특성 | 5.7 최적의 W/B 및 SP제 첨가량 산정 |
| 4.2 정식화 범위 | 6. 결론 |

1. 서론

초유동 콘크리트의 기본개념은 다짐이 필요 없는 자기충전성을 콘크리트 자체에 부여하여 높은 유동성과 재료분리 저항성을 동시에 가지는 것이다.⁽¹⁾ 다짐이 필요없는 초유동 콘크리트가 소개된 이래, 지금까지 국내에서도 이에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으나, 재료선정

과 배합설계의 접근방법은 아직도 일반 콘크리트와 유사한 방법을 사용하고 있는 실정이다.

따라서, 초유동 콘크리트의 요구성능에 직접적으로 대응할 수 있는 단계별 합리적인 배합설계법이 필요한 실정이다.

특히, 굳지 않은 콘크리트 상태에서 슬럼프 플로우, 간극통과성 및 깔대기 유하시간 등으로 초유동 콘크리트의 성능을 평가하는 연구

사례²⁾는 많았지만, 모르타르 상태에서 사용재료의 특성평가 및 배합조건의 조정으로 초유동 콘크리트의 최적 배합조건에 접근하는 연구는 거의 없었다.

본 연구에서는 기존에 발표된 초유동 콘크리트의 모르타르 상태에서 플로우 및 깔대기 시험을 통해 목표로 하는 상대면적비-속도비를 만족하는 최적 배합조건의 도출방안의 하나로 제시된 수식화 모델³⁾을 기본으로 최적의 물/결합재 용적비와 SP제 첨가량을 산정하는 방법을 제시하여 초유동 콘크리트 배합설계의 최적화에 기여하고자 한다.

2. 초유동 콘크리트의 배합설계 단계

2.1 기본개념

일반 콘크리트의 배합설계는 각국의 규정에 따라 약간의 차이가 있지만, 주로 물/시멘트비(W/C), 슬럼프, 잔골재율(S/a), 굵은골재 최대크기(G_{max})와 같은 배합요인에 따라 단계별로 요구되는 성능을 만족하는 범위에서 배합재료량을 산정한다.

그러나, 초유동 콘크리트의 기본개념은 流動性 · 充塡性 · 材料分離 抵抗性 등을 콘크리트의 기본 요구성능으로 하기 때문에, 이에 적합한 배합설계 개념을 도입하여 배합재료량을 합리적으로 산정하는 방안이 필요하다.

이러한 기본개념을 만족하기 위해서는 콘크리트를 페이스트, 모르타르 및 콘크리트 상태로 구분하여 상호관계를 정량적으로 규명하는 연구가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 기존의 연구에서 제시된 페이스트 및 모르타르 상태의 단계적 연구를 통한 초유동성의 기본개념 수식화 모델을 바탕으로 최적의 물/결합재 용적비와 SP제 첨가량을 보다 쉽게 예측할 수 있는 배합설계 방안을 도출하고자 한다.

2.2 페이스트 시험

일반적으로, 초유동 콘크리트는 결합재를 사용하는 분체계와 증점제를 사용하는 증점계, 그리고 이를 함께 사용하는 병용계로 구분된다. 따라서, 사전에 사용할 재료의 특성을 정확히 파악함으로써 콘크리트 상태에서의 배합오차를 가능한 줄이도록 해야한다.

특히, 분체계를 사용할 경우에는 분체의 특성에 따라 流動에 기여하지 못하는 單位水量(拘束水量)을 먼저 산정하고 이에 따른 粉體系의 拘束水比(β_p)와 변형계수(E_v)를 결정 한 후, 이를 배합설계에 반영시킬 수 있는 방안이 필요하다.

분체계의 구속수비 산정방법은 [표 1]과 같고, 상대플로우 면적비는 (식1)로 산정한다.

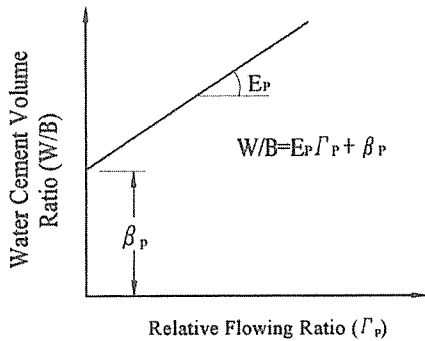
$$\Gamma_p = \frac{\pi(F_p / 2)^2 - \pi(F_0 / 2)^2}{\pi(F_0 / 2)^2} = (F_p / F_0)^2 - 1 \dots\dots\dots (식1)$$

여기서, F_p는 페이스트의 플로우값(mm), F₀는 플로우-콘의 단면직경(100mm)을 나타낸 것이다.

플로우 시험에서 물/시멘트 용적비를 변화시키면, 상대플로우 면적비와 물/시멘트 용적비는 매우 밀접한 상관성을 갖게 되는데 이를 線形關係로 直線回歸하여 상대플로우 면적비

[표 1] 시멘트 또는 결합재의 구속수비(β_p)

Flow test of paste (Cement or binder)	Water cement (or binder) volume ratio ⇒ 1.1~1.4 (4 Cases)
↓	
Relative flowing ratio -Water cement volume ratio	Test results (Linear regression analysis)
↓	
Confined water ratio (β_p) of cement	Estimation of β_p in that relative flowing ratio is zero



[그림 1] 구속수비(β_p)의 선형 회귀분석

가 0이 되는 물/시멘트 용적비가 사용할 시멘트의 구속수비이다.

즉, [그림 1]에서 나타난 직선의 切片값이 시멘트 또는 결합재의 拘束水比(β_p)를 의미한다. 구속수비가 커지면 페이스트를 유동시키기 위한 단위수량이 커지게 되고, 반대로, 구속수비가 작아지면 페이스트를 유동시키기 위한 단위수량이 작아진다.

따라서, 보다 경제적이고 고품질의 초유동 콘크리트를 제조하기 위해서는 구속수비를 저감시킬 수 있는 시멘트계 재료개발이 시급한 것으로 사료된다.

여기서, E_p 는 변형계수를 의미하며, 콘크리트의 변형저항성에 관계되는 계수이다. 이성분계 초유동 콘크리트의 경우에는 분체의 치환율에 따른 결합재(시멘트+분체)를 대상으로 물/결합재 용적비를 1.1, 1.2, 1.3 및 1.4로 정하고, 동일한 시험방법으로 구속수비를 결정한다.

그렇지만, 결합재의 종류에 따라서는 물/결합재 용적비의 범위를 상향 또는 하향 조정하여 선정할 필요가 있다. 예를 들면, 구속수비가 큰 결합재의 경우에는 물/결합재 용적비의 범위를 1.2나 1.3에서 시작점으로 선정하고, 반대로, 구속수비가 작은 경우에는 1.1이하에서 시작점을 선정하여 실험을 실시해야 한다.

2.3 모르타르 시험

모르타르의 물/시멘트 용적비 또는 물/결합재 용적비는 시멘트의 拘束水比에 일정상수인 수비계수(K_p)를 곱한 (식2)로부터 산정하며, 잔골재 용적비(S_r) 산정식은 (식3)과 같다.

일반적으로, 초유동 콘크리트를 제조하기 위한 수비계수(K_p)의 범위가 일본의 경우에는 0.85~0.90 사이에 존재하지만, 국내의 경우에는 0.9~1.0 사이에 존재하는 것으로 나타났다. 이것은 일본과 국내의 골재 여건의 다른 영향도 있겠지만, 주로 시멘트의 품질에 좌우되는 것으로 사료된다.

$$W/C(W/B) = K_p \times \beta_p \dots \dots \dots (식2)$$

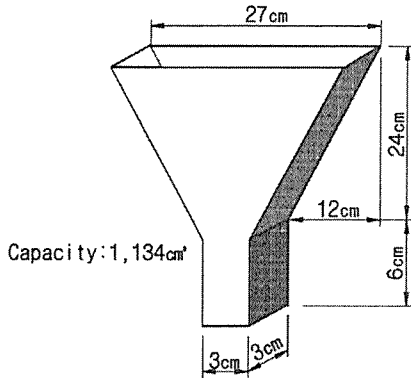
$$S_r = \frac{S/M}{1 - S_m} \dots \dots \dots (식3)$$

여기서, S는 잔골재 용적, M은 모르타르 용적, 그리고 S_m 은 입경이 0.06mm이하인 잔골재의 비율을 의미한다. 잔골재에서 0.06mm이하의 입자는 골재의 역할외에도 결합재의 특성을 함께 갖는다. 따라서, 잔골재의 입도시험을 실시하여 0.06mm이하의 입자를 제거하거나 2%이상일 경우에는 배합설계에 반영하는 것이 바람직하다.

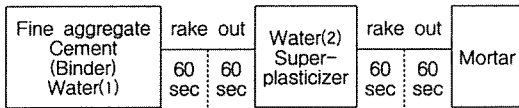
모르타르 시험은 먼저 잔골재 용적비(S_r)를 정한 후, 물/결합재비와 高性能 減水劑 첨가율을 변화시키면서 플로우 및 깔대기 시험을 실시하는 것으로, 시험을 통해 나타난 결과로부터 최적 배합조건을 도출한다.

모르타르의 상대 플로우 면적비(이하, Γ_m)는 (식1)과 동일한 방법으로 산정하며, 상대 깔대기 속도비(이하, R_m)는 [그림 2]와 같은 모르타르용 유하 시험장치를 사용하여 유하시간(T_r)을 측정 후 (식4)로부터 산정한다.

$$R_m = \frac{10}{T_r} \dots \dots \dots (식4)$$



(그림 2) 모르타르의 유하시험 장치(SFC용)



(그림 3) 모르타르의 배합방법

본 실험의 잔골재 용적비는 기존의 연구⁽⁴⁾에서 제시한 40%를 대상으로 하였으며, Γ_m 와 R_m 의 관계에서 점성 및 변형성 평가를 통해 최적상태를 도출하고자 한다. 이때, 주변수는 물/결합재 용적비와 고성능 감수제 첨가율이며, 모르타르의 배합방법은 [그림 3]과 같다.

3. 실험개요

3.1 사용재료

초유동 콘크리트용 모르타르의 점성과 변형

(표 2) 분체의 품질시험결과

Properties	Gravity	CaO (%)	Moisture contents (%)	Loss Ig. (%)	Specific surface (cm ² /g)
Limestone	3.02	52.0	0.04	16.2	3,430
Class F fly ash	2.21	2.50	0.19	3.57	3,158

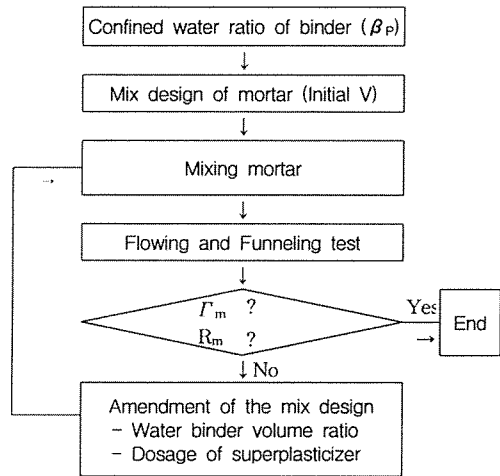
성을 평가하기 위한 실험에는 T사의 보통 포틀랜드 시멘트(1종)와 남양만의 세척사(바닷모래)가 사용되었다.

또한, 플라이애쉬는 보령 화력발전소(F급)에서 생산된 것이며, 석회석분은 G사에서 생산된 것으로 품질시험 결과는 [표 2]와 같다.

3.2 모르타르의 배합설계 순서

최적 Γ_m - R_m 을 산정하기 위한 초유동 콘크리트용 모르타르의 배합설계 순서는 [그림 4]와 같으며, 수정배합을 반복한다.

여기서, 결합재의 구속수비 시험은 치환율에 따라 각각 실시하며, 이를 모르타르 배합설계에 반영하도록 하였다.



(그림 4) 모르타르의 배합설계 순서

3.3 배합조건 및 범위

초유동 콘크리트용 모르타르의 배합조건 및 범위는 [표 3]과 같다.

여기서, 水比係數(K_p)는 분체의 치환율별로 산정된 구속수비에 대해 5단계로 구분하여 물/결합재 용적비를 산정하도록 하였다.

[표 3] 모르타르의 배합조건 및 범위

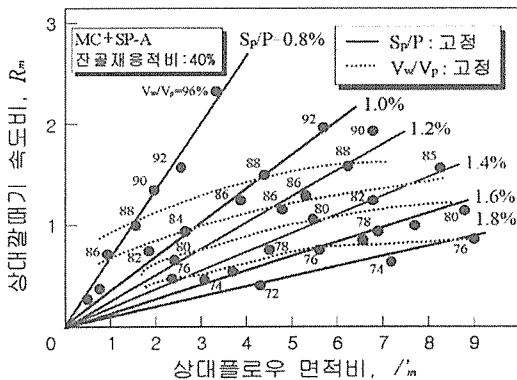
K_p (%)	W/B (%:Vol)	Sr (%)	Replacement ratio of Binders (%)	Dosage of Super- plasticizer (B×%)
0.80~1.00 (5 Cases)	76~102	40	30	0.9~2.1

4. 수식화 개념 모델

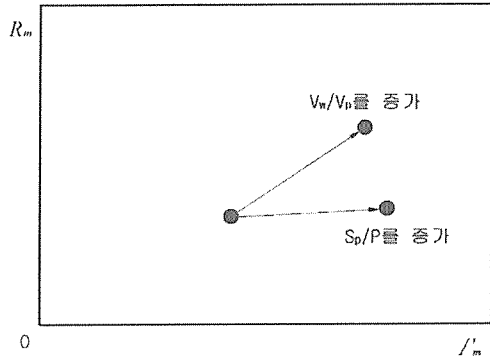
4.1 배합조건과 모르타르 특성

배합설계법을 구축하기 위해서는 먼저 모르타르 상태에서 고성능 감수제 첨가량 및 물/결합재비가 모르타르 성상에 미치는 영향을 정량적으로 파악해 둘 필요가 있다. 그림 5.는 중용열 시멘트를 사용한 모르타르 배합에서 고성능 감수제의 첨가율(S_p/P -결합재의 중량비) 및 물/결합재비(V_w/V_p -체적)의 변화에 따른 Γ_m 및 R_m 의 관계(이하, Γ_m - R_m 선으로 칭함)를 나타낸 것이다. 이때, 잔골재 용적비(S_r)는 일정하다.

[그림 5] 모르타르의 배합조건과 성상실선은 고성능 감수제의 첨가율(S_p/P)이 일정할 때 물/결합재비(V_w/V_p)가 변화되는 것을 나타낸 것이며, 점선은 물/결합재비가 일정할 때



[그림 5] 모르타르의 배합조건과 성상



[그림 6] 물과 고성능 감수제의 역할

고성능 감수제의 첨가율이 변화되는 것을 나타낸 것이다.

고성능 감수제의 첨가율(S_p/P)이 일정할 경우, 물/결합재비의 변화에 따른 Γ_m - R_m 선은 직선으로 나타나고 있으며, 또한 S_p/P 가 증가할수록 직선의 기울기가 작아지는 것을 알 수 있다.

즉, 고성능 감수제의 첨가는 모르타르의 변형성과 점성의 균형을 변화시키는 것을 의미한다. 또한, S_p/P 가 증가할수록 V_w/V_p 값이 작아지는데, 이는 고성능 감수제의 첨가로 입자의 분산성을 향상시켜 변형에 필요한 수량을 감소시키기 때문으로 사료된다.

[그림 6]에서 보듯이 물을 첨가하여 플로우 면적을 증가시키면 깔대기 속도가 증가되지만, 고성능 감수제를 첨가하여 플로우 면적을 증가시킬 경우에는 그다지 깔대기 속도가 증가되지는 않는다.

즉, 물과 고성능 감수제의 역할이 다르기 때문에, 모르타르에 적당한 변형성과 점성을 양립시킬 수 있으며, 이에 따라 초유동 콘크리트의 실현이 가능하게 된다. 바꾸어 말하면, 최적의 변형성과 점성을 조합시키기 위해서는 S_p/P 및 V_w/V_p 를 변화시켜야 하며, 한 변수를 고정시킨 상태에서 모르타르에 최적의 변형성과 점성을 부여하기는 어렵다.

4.2 정식화 범위(전제조건)

[그림 7]은 중용열 시멘트의 페이스트 상태에서 고성능 감수제의 첨가율(S_p/P)과 Γ_m - R_m 선의 관계를 나타낸 것이다.

초유동 콘크리트를 제조할 수 있는 ($S_p/P \cdot V_w/V_p$) 및 ($\Gamma_m \cdot R_m$)의 관계를 정량적으로 기술할 수 있는 값은 대략 $(\Gamma_m \cdot R_m) = (5 \cdot 1)$ 을 중심으로 $R_m < 2$ 과 $R_m < 0.4\Gamma_m$ 의 범위에 있다.

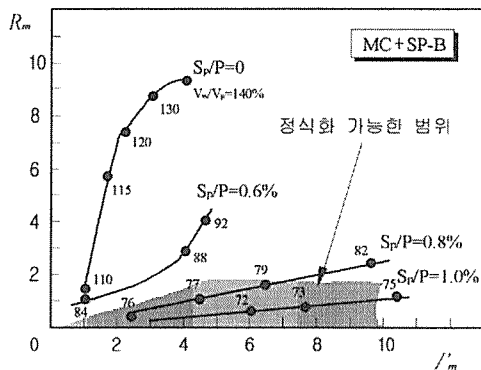
이러한 경향은 다른 분체를 사용한 모르타르 및 페이스트에서도 마찬가지이다.

따라서, 모르타르의 배합설계 및 수정법을 고안할 때는 모르타르의 성상이 [그림 7]의 정식화 가능 범위를 만족한다는 것을 전제로 한다.

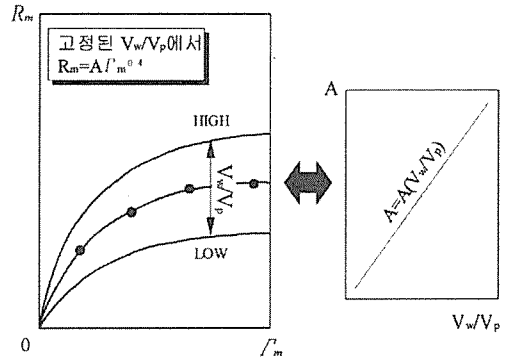
4.3 물/결합재 용적비의 평가방법

[그림 7]에 나타낸 바와 같이 정식화가 가능한 범위 내에서 물/결합재비(V_w/V_p)가 일정할 경우, Γ_m 와 R_m 의 관계는 곡선에 가까운 것으로 보고되었으며, 이를 고려한 제안식은 다음식(식5)과 같다.⁽⁵⁾

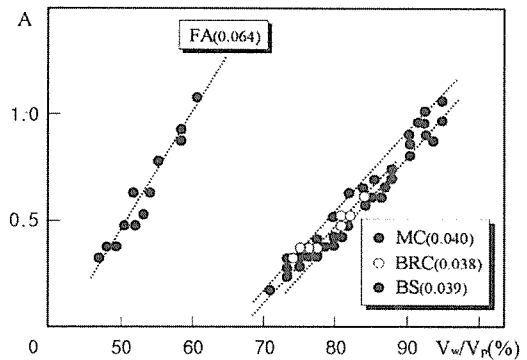
$$R_m = A \cdot \Gamma_m^{0.4} \dots \dots \dots (식5)$$



[그림 7] S_p/P 에 따른 페이스트의 성상



[그림 8] V_w/V_p 에 따른 페이스트의 정식화

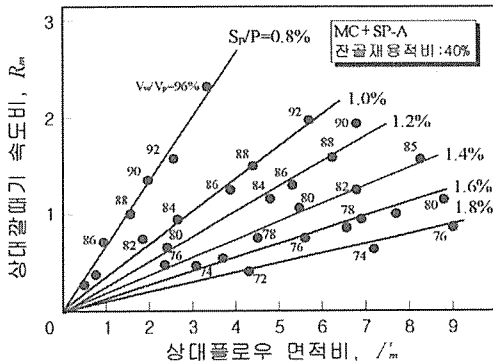


[그림 9] 분체별 V_w/V_p -A 직선의 기울기

[그림 8]은 동일한 곡선 상에서 S_p/P 가 변화하는 것을 나타낸 것이다. 다만, 계수 A는 V_w/V_p 의 關數이며, 선형관계(이하, V_w/V_p -A 직선으로 칭함)인 것으로 보고되었다.⁽⁵⁾

실험결과, 최적 물/결합재비(V_w/V_p)를 추정할 때에는 V_w/V_p -A 직선의 기울기를 알고 있는 것이 바람직하다.

[그림 9]에서 보듯이 V_w/V_p -A 직선의 기울기(단위당 V_w/V_p (%)의 변화에 대한 계수 A의 변화량)는 중용열 시멘트, 高Belite 시멘트 및 고로슬래그 미분말(블레인 4,000)을 사용한 모르타르의 경우 약 0.04, 플라이애쉬를 사용한 모르타르의 경우 약 0.06이며, 형상이 양호한 플라이애쉬를 사용한 경우에는 기울기가 큰 것으로 확인되었다.



(그림 10) Sp/P에 따른 직선(원점에 수렴)

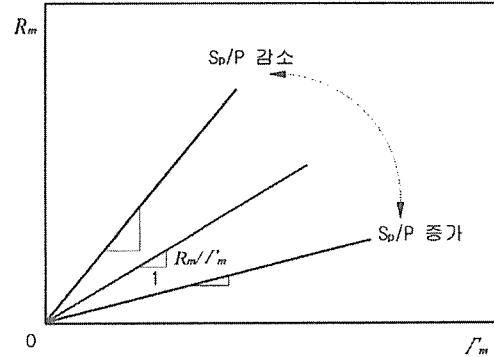
또한, 실험결과에서 이러한 V_w/V_p -A 직선의 기울기는 사용하는 고성능 감수제의 종류에 관계없이 모르타르내의 고체입자 성질만으로 거의 결정되는 것으로 사료된다. 일반적인 입도의 시멘트를 사용한 모르타르의 경우, 분리저감제를 사용하지 않는다면, 본 실험에서 얻은 중용열 시멘트 및 고Belite 시멘트 모르타르의 V_w/V_p -A 직선 기울기 0.04를 사용해도 무방할 것으로 사료된다.

4.4 고성능 감수제 첨가량의 평가방법

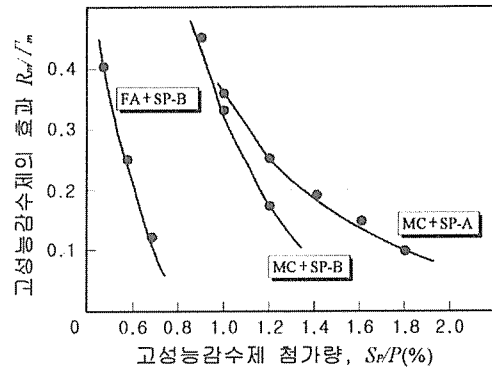
[그림 7]에 나타난 정식화 가능 범위에서 Γ_m - R_m 선은 점 $(\Gamma_m \cdot R_m) = (0 \cdot 0)$ 을 통과하는 직선에 가깝다는 것은 [그림 10]과 같은 실험 결과에서 명확해 졌다.⁽⁶⁾

즉, 고성능 감수제의 첨가에 의한 모르타르 성상의 변화는 원점 $(\Gamma_m \cdot R_m) = (0 \cdot 0)$ 을 통과하는 Γ_m - R_m 직선의 기울기 변화에 따라 표현된다. 이보다 [그림 11]에 나타난 바와 같은 실험자료 (Γ_m, R_m) 로부터 S_p/P 에 대응하는 Γ_m - R_m 선을 쉽게 구할 수 있다.

따라서, 앞으로는 S_p/P 에 대응하는 Γ_m - R_m 선의 기울기를 고성능 감수제가 모르타르 성상에 미치는 효과로 정의한다. [그림 12]는



(그림 11) 고성능 감수제의 효과(정의)



(그림 12) Sp/P와 효과지표(Γ_m/R_m)의 관계

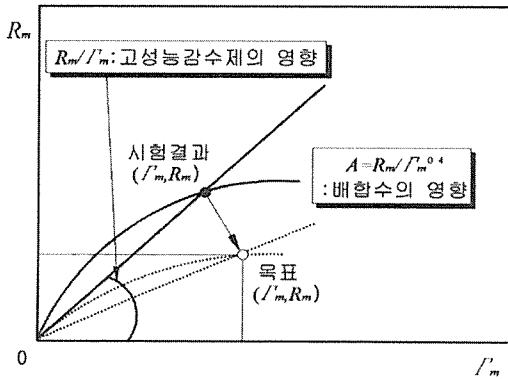
고성능 감수제의 종류 또는 사용한 분체의 차이에 따른 S_p/P 와 효과지표(Γ_m/R_m)의 관계를 나타낸 것이다.

현재, S_p/P 및 정의된 효과지표(Γ_m/R_m)의 관계는 고성능 감수제 및 분체의 종류에 따라 각각 다른 것으로 나타났다.

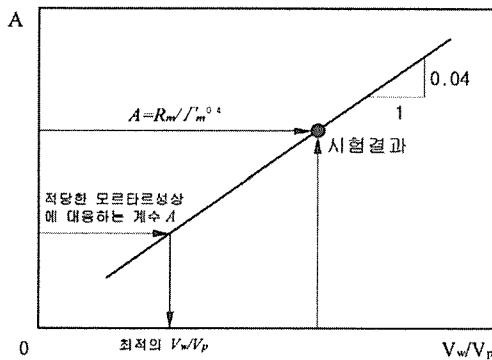
4.5 배합평가에 따른 최적배합의 추정

[그림 13]은 초기에 설정된 배합으로 모르타르의 플로우 및 깔대기 시험을 통해 고성능 감수제 및 배합수가 모르타르의 성상에 미치는 영향을 평가한 것이다.

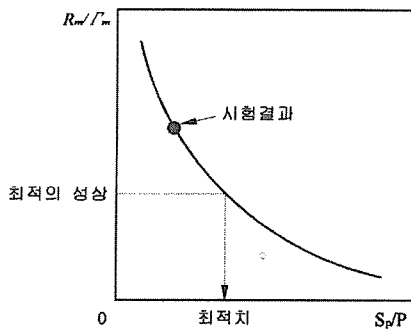
물/결합재비(V_w/V_p)에 대해 V_w/V_p -A 직



(그림 13) 모르타르 배합결과의 평가방법



(그림 14) 최적 Vw/Vp의 추정법



(그림 15) 최적 Sp/P의 추정법

선의 기울기를 0.04정도로 설정해 놓고, [그림 14]와 같이 목표로 선정한 $(\Gamma_m \cdot R_m)$ 에 대응하는 계수 A의 V_w/V_p 를 산정한다.

한편, 목표로 선정한 $(\Gamma_m \cdot R_m)$ 에 대응하는 Γ_m/R_m 의 S_p/P 는 [그림 15]와 같이 산정한다.

또한, 여기서 추정된 배합조건(V_w/V_p , S_p/P)을 사용하여 모르타르의 플로우 및 깔대기 시험을 실시하고 $(\Gamma_m \cdot R_m)$ 이 목표하는 범위 내에 있으면 종료한다. 그렇지 않을 경우에는 시험결과로부터 배합추정을 실시하도록 한다.

현재, 고성능 감수제의 첨가율(S_p/P)과 효과지표(Γ_m/R_m)의 관계를 정식화하지는 못하였지만, 모르타르의 성상과 물/결합재비(V_w/V_p)의 관계는 정식화되어 있기 때문에, 적당한 변형성과 점성을 부여하는 물/결합재비(V_w/V_p)는 합리적으로 구할 수 있게 되었다.

물/결합재비(V_w/V_p)와 고성능 감수제의 첨가율(S_p/P)을 미지수로 두고, 이를 산정할 경우에는 본 연구에서 제안한 방법을 사용하면 배합결정을 간소화시킬 수 있을 것이다.

5. 실험결과 및 분석

5.1 구속수비 실험결과

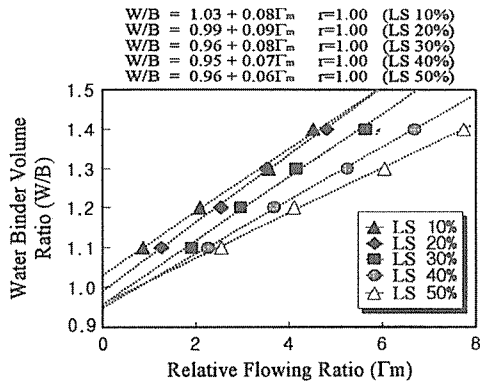
[그림 16]은 석회석분(LS)의 치환율에 따른 결합재의 구속수비 실험결과를 나타낸 것이다.

석회석분의 치환율이 증가할수록 구속수비는 감소하나 치환율이 30%이상인 경우에는 일정한 값(0.96)에 수렴하며, 직선의 기울기인 변형계수(EP)도 치환율에 따라 감소하는 경향을 보였다.

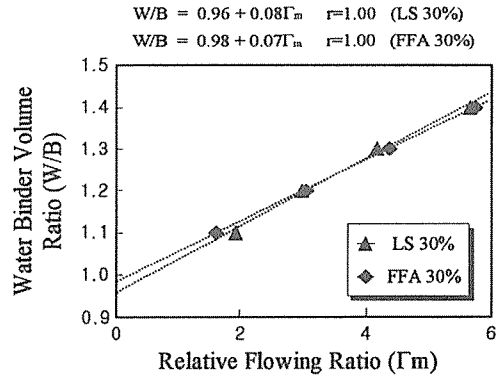
또한, 결합재 종류에 따른 유동성 개선효과를 비교하기 위해, F급(FFA) 플라이애쉬 및 석회석분(LS)을 각각 30%씩 치환한 결합재의 구속수비 결정실험을 실시하였으며, 결과는 [그림 17]과 같다.

결합재별 구속수비는 F급 플라이애쉬가 0.98, 석회석분이 0.96으로 나타났다.

실험결과로부터, F급 플라이애쉬 및 석회석



(그림 16) 구속수비 실험결과(LS-석회석분)



(그림 17) 분체의 종류에 따른 구속수비

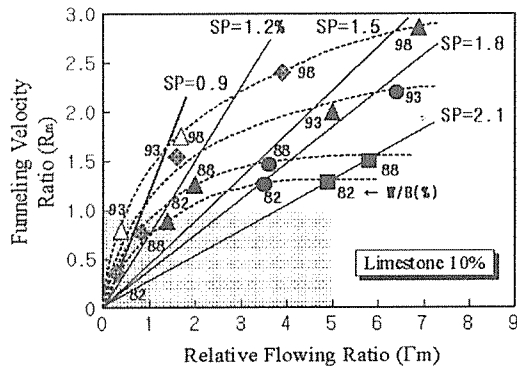
분은 입자표면에 흡수되는 구속수량이 적기 때문에, 초유동 콘크리트에 사용할 경우에 유동성개선에 효과가 클 것으로 기대된다.

5.2 석회석분의 유동성 및 점성평가

초유동 콘크리트용 모르타르의 유동성은 상대 플로우 면적비(Γ_m)로, 점성은 깔대기 유하 속도비(R_m)로 평가한다.⁽⁶⁾

[그림 18]은 석회석분 치환율이 10%일 때, 물/결합재비(W/B)와 고성능 감수제 첨가율(SP)에 따른 Γ_m - R_m 의 관계를 나타낸 것이다.

여기서, 점선은 물/결합재비가 동일할 때 고성능 감수제 첨가율의 변화에 따른 Γ_m - R_m 의



(그림 18) 석회석분 모르타르의 R_m - Γ_m (10%)

상관관계이며, 실선은 고성능 감수제 첨가율이 동일할 때 물/결합재비의 변화에 따른 Γ_m - R_m 의 상관관계를 나타낸 것이다.

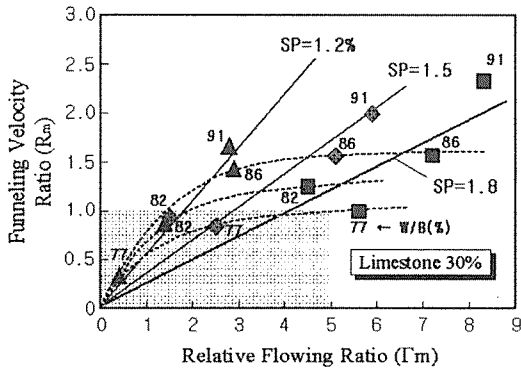
실험결과, 고성능 감수제 첨가율이 일정할 때 물/결합재비가 증가할수록 Γ_m - R_m 은 원점을 통과하는 직선관계로 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 이는 물/결합재비의 증가가 유동성뿐만 아니라 점성에도 영향을 미치기 때문이다.

그러나, 물/결합재비가 일정할 때, 고성능 감수제 첨가율을 증대시키면 Γ_m - R_m 은 곡선을 띄며 기울기도 감소한다. 이러한 경향은 물/결합재비가 낮은 범위일수록 뚜렷하게 나타났다는데, 이는 고성능 감수제에 의한 분산성 증대와 함께 단위수량의 감소로 인하여 유동성 및 점성증대에도 기여하기 때문으로 사료된다.

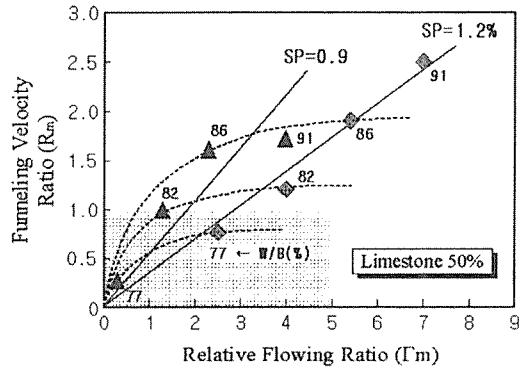
[그림 19] 및 [그림 20]은 석회석분 치환율이 30% 및 50%인 모르타르의 Γ_m - R_m 관계이다.

기존의 연구는 유동성 측면에서 Γ_m 가 5.0 ± 0.5 , 점성 측면에서 R_m 가 1.0 ± 0.1 범위일 때 가장 우수한 성능을 갖는 것으로 제안하였다.

따라서, 석회석분을 사용한 모르타르는 석회석분 치환율 30%, 물/결합재 용적비 77~82%, 고성능 감수제 첨가율 1.8%범위에서 유



(그림 19) 석회석분 모르타르의 $R_m-\Gamma_m$ (30%)



(그림 20) 석회석분 모르타르의 $R_m-\Gamma_m$ (50%)

동성 및 점성이 가장 우수한 것으로 평가된다.

도 어느정도 기여하는 것으로 평가된다.

5.3 석회석분 치환율의 영향

5.4 플라이애쉬의 유동성 및 점성평가

[그림 21]은 고성능 감수제의 첨가율이 일정할 때, 석회석분 치환율에 따른 Γ_m-R_m 의 상관관계를 나타낸 것이다.

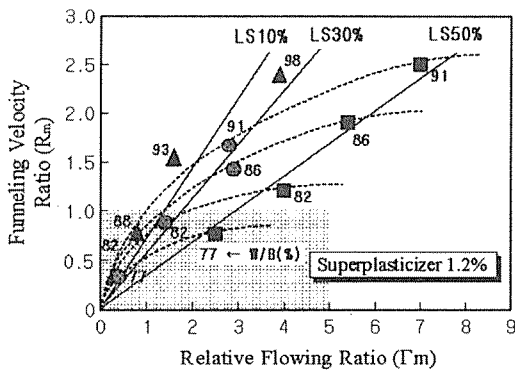
플라이애쉬를 분체로 사용한 초유동 콘크리트용 모르타르의 물/결합재 용적비와 고성능 감수제의 첨가율에 따른 Γ_m-R_m 의 상관성 및 플라이애쉬의 치환율에 따른 유동성과 점성을 평가하면 다음과 같다.

실험결과, 동일한 물/결합재비(점선)에서 석회석분 치환율이 증가할수록 유동성 개선효과가 증대되는 것으로 나타났다. 이는 석회석분 치환율이 증대할수록 구속수비가 감소되어 유동에 기여하는 잉여수가 증대되기 때문이다.

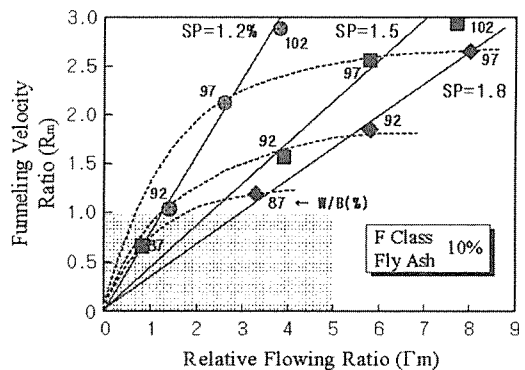
5.5 물/결합재비와 고성능 감수제 첨가율

또한, 석회석분 치환율이 증대할수록 Γ_m-R_m 의 기울기가 감소하기 때문에 점성유지에

[그림 22]는 F급 플라이애쉬(FFA)의 치환율이 10%일 때, 물/결합재 용적비와 고성능



(그림 21) 석회석분 치환율에 따른 Γ_m-R_m



(그림 22) 플라이애쉬 모르타르의 $R_m-\Gamma_m$ (10%)

감수제의 첨가율에 따른 Γ_m - R_m 관계를 나타낸 것이다.

실험결과, 일반적인 경향은 석회석분과 마찬가지로 고성능 감수제의 첨가율이 일정할 때 물/결합재비가 증가할수록 Γ_m - R_m 은 직선관계로 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, Γ_m - R_m 직선의 기울기를 고려하면, 플라이애쉬를 사용하는 것이 석회석분보다 초유동 콘크리트의 점성개선에 효과적인 것으로 나타났다.

[그림 23] 및 [그림 24]는 플라이애쉬 치환율이 각각 30%, 50%일 때의 모르타르에 대한 Γ_m - R_m 관계를 나타낸 것이다.

플라이애쉬의 치환율이 30%일 때, 고성능 수제의 첨가율 1.8%, 물/결합재 용적비 83~88%범위에서 모르타르의 유동성 및 점성이

가장 우수한 것으로 나타났다.

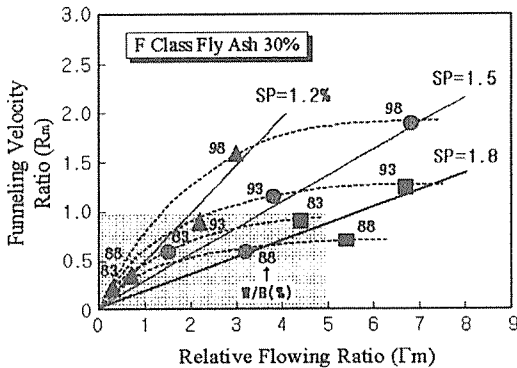
플라이애쉬의 치환율이 50%일 때는 고성능 감수제의 치환율 1.5%, 물/결합재 용적비 87%에서 가장 성능이 양호한 경향을 나타내었다.

5.6 플라이애쉬 치환율의 영향

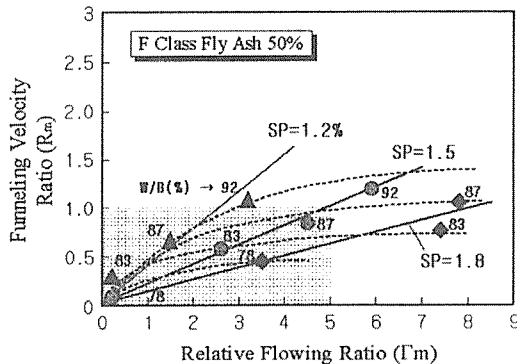
[그림 25]는 고성능 감수제의 첨가율이 일정할 때, 플라이애쉬의 치환율에 따른 Γ_m - R_m 의 상관관계를 나타낸 것이다.

실험결과, 동일한 물/결합재 용적비에서 플라이애쉬의 치환율이 증가할수록 유동성 및 점성이 증대되는 경향을 보였으며, 초유동 콘크리트용 모르타르의 성능을 확보하기 위해서는 플라이애쉬의 치환율 30%정도가 가장 적합한 것으로 나타났다.

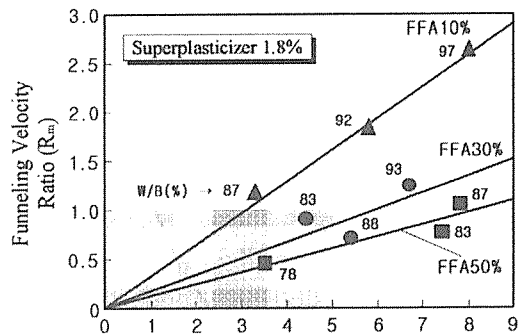
이러한 배합조건은 플라이애쉬를 30% 치환한 초유동 콘크리트의 현장적용 사례^{(7),(8)}에서도 확인할 수 있었다. 따라서, 향후 현장적용에 있어서 사전에 현장재료에 대한 최적배합을 수식화 모델로 예측·평가하여 오차를 저감시키는 방안이 필요하다.



(그림 23) 플라이애쉬 모르타르의 R_m - Γ_m (30%)



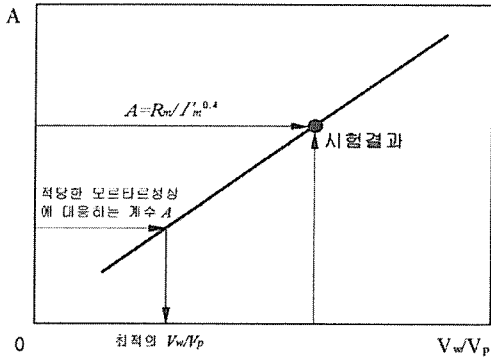
(그림 24) 플라이애쉬 모르타르의 R_m - Γ_m (50%)



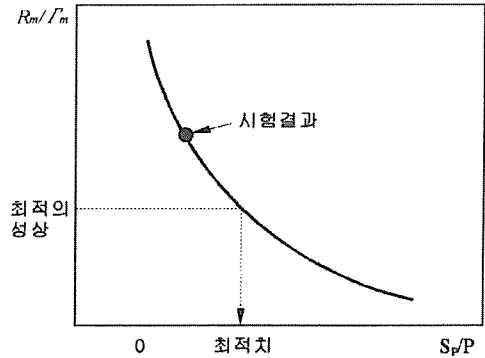
(그림 25) 플라이애쉬의 치환율에 따른 Γ_m - R_m

5.7 최적의 W/B 및 SP제 첨가량 산정

최적의 물/결합재 용적비를 산정하기 위해



(그림 26) 최적 물/결합재비 추정법



(그림 28) 최적 SP제 첨가량 추정법

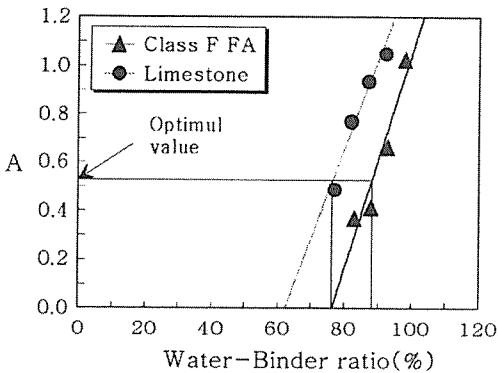
서는 물/결합재 용적비와 A의 관계를 직선으로 나타내어 기울기를 사전에 알고 있어야 한다.

직선의 기울기는 사용하는 고성능 감수제의 종류에 관계없이 모르타르내의 고체입자 성질만으로 거의 결정되는 것으로 보고 되고 있다.

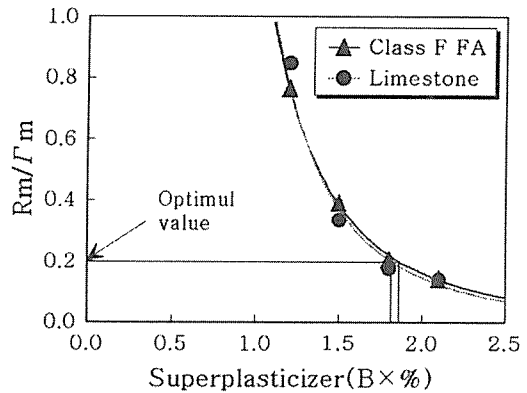
[그림 26]은 최적 물/결합재 용적비 추정법을 나타내고 있다.

직선의 기울기는 석회석분 및 F급 플라이애쉬 모두 0.04로 나타났다. 수식화 가능범위에서 석회석분 및 F급 플라이애쉬의 최적 물/결합재 용적비는 [그림 27]로부터 추정할 수 있다.

[그림 27]에서 최적의 A(0.53)값에 대응하는 석회석분 및 F급 플라이애쉬의 물/결합재 용적비는 각각 77, 88로 나타났다.



(그림 27) 최적 물/결합재비 산정



(그림 29) 최적 SP제 첨가량 산정

또한, 목표로 선정한 ($\Gamma_m \cdot R_m = 5 \cdot 1$)에 대응하는 최적의 SP제 첨가량은 [그림 28]과 같은 방법으로 산정한다.

따라서, 각 결합재에 대한 최적 SP제 첨가량은 [그림 29]로부터 추정할 수 있다.

[그림 29]에서 R_m/Γ_m 은 [그림 13]에서 설명한 바와 같이 고성능 감수제의 영향을 나타내는 값으로 이로부터 최적의 R_m/Γ_m (0.2)에 대응하는 고성능 감수제 첨가량을 구할 수 있다. 각 결합재별 최적의 고성능 감수제 첨가량은 석회석분의 경우 1.81, F급 플라이애쉬의 경우는 1.87로 나타났다.

상기와 같은 방법으로 산정된 값으로 모르타르 배합을 실시한 결과, [표 4]와 같은 결과

를 얻었다.

실험결과, 면적비의 경우에는 결합재별로 목표값과 10%정도의 오차를 나타내었고, 속도비의 경우에는 석회석분은 오차가 거의 없는 반면, F급 플라이애쉬는 9%정도의 오차를 나타냈지만 목표값의 허용범위에 근접하는 것을 알 수 있다.

[표 4] 최적 W/B 및 SP제 첨가량 산정결과

결합재 종류	면적비(Γ_m)			속도비(R_m)		
	계산값	실험값	오차	계산값	실험값	오차
FA	5.0	5.5	+10%	1.0	0.91	-9%
LS	5.0	5.6	+11%	1.0	1.00	0

6. 결론

초유동 콘크리트용 모르타르의 최적배합설계의 수식화 개념을 도입한 실험결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 결합재별 구속수비는 F급 플라이애쉬(0.98)와 석회석분(0.96)이 서로 유사한 것으로 나타났다.

2) 정식화가 가능한 범위에서 물/결합재비를 고정하였을 때, $R_m = A \cdot (\Gamma_m)^{0.4}$ 의 관계가 성립하며, 점성과 유동성을 만족하는 범위 ($(\Gamma_m \cdot R_m) = (5 \cdot 1)$)는 $A=0.53$ 이다.

3) 물/결합재 용적비 산정을 위한 물/결합재 용적비-A 직선의 기울기는 석회석분과 플라이애쉬 모두 0.04를 나타냈다.

4) 최적 물/결합재 용적비와 SP제 첨가량 산정결과, 계산값과 실험값은 면적비의 경우 +10%정도의 오차를 나타냈고, 속도비는 F급 FA의 경우 -9%정도의 오차를 나타내 계산치에 근접하는 것으로 나타났다.

향후, 수식화 모델을 사용한 초유동 콘크리트의 최적화 기법에 관한 활발한 연구가 진행되어 적용이 모르타르 상태에서 그치지 않고, 콘크리트 상태로 확대 될 것으로 기대한다.

참고문헌

1. 岡村甫, 前川宏一, 小澤一雅., “ハイパフォーマンスコンクリート”, 技報堂出版, 1993.
2. 金和中外., “超流動 콘크리트의 開發에 관한 基礎的 研究”, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제7권1호, 1995.5, pp.42~53
3. 박철림, 김무한, 권영호, 이상수, 원 철., “二成分系 SFC용 모르타르의 레올로지 評價方案”, 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 제18권1호, 1998. 5, pp. 993~1,000
4. 박철림, 안재현, 권영호, 이상수., “超流動 콘크리트의 配合設計에 關한 研究”, 한국콘크리트학회 가을학술발표논문집 제8권 2호, 1996.11, pp.283~289
5. 大内雅博, 小澤一雅., “フレツェモルタル 變形性に及ぼす粉體特性の影響”, 土木學會 第46回年次學術講演會 第5部, 1991
6. 山口昇三, 枝松良展, 岡村甫., “モルタルフロー値に及ぼす細骨材特性の影響”, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.16, No.1, 1994
7. 박철림, 권영호, 이상수, 원 철., “초유동 콘크리트의 2차계품 적용에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 봄학술발표 논문집 제9권1호, 1997.5, pp.285~291
8. 박철림, 권영호, 이상수, 원 철., “Top Down 工法에 超流動 콘크리트의 現場適用”, 대한건축학회 논문집, 제13권10호, 1997.10, pp.355~362.