



SP제 및 물시멘트비 영향을 고려한 초유동 콘크리트의 흐름 실험 및 해석

조창근^{1)*} · 김화중²⁾ · 최 열²⁾

¹⁾조선대학교 건축학부 교수 ²⁾경북대학교 건축학부 교수

Flow Experiments and Analysis of Highly Flowable Concrete Considering the Effect of Dosages of SP Admixture and W/C Ratios

Chang-Geun Cho,^{1)*} Wha-Jung Kim,²⁾ and Yeol Choi²⁾

¹⁾School of Architecture, Chosun University, Philmundaero, Gwangju, South Korea

²⁾School of Architecture, Kyungpook National University, Sankyuk-dong 569, Daegu, South Korea

ABSTRACT In this research, flow experiments and simulation of highly flowable concrete has been attempted using a viscoplastic particle method varying with dosages of SP admixture and water-cement (W/C) ratios. Rheological and flow characteristics of flowable concrete manufactured in domestic products of cement, aggregates, and SP admixtures were investigated by experimental programs varying with mix proportions. From experiment, the predictive model of rheological characteristics of flowable concrete has been newly proposed considering with the effects of the W/C ratio and the dosage of SP admixture, and the effect of mixing proportion has also been incorporated into shear stress and strain rate curve of flowable concrete in the current method. A series of L-box flow test of highly flowable concrete varying with dosages of SP admixture and W/C ratios was compared with the proposed model.

Keywords : highly flowable concrete, particle method, water-cement ratio, SP admixture, L-box flow test

1. 서 론

초유동 콘크리트의 제조에 있어서 물시멘트비, 혼화제, 골재의 치수 및 성질에 따른 배합조건은 굳지 않은 콘크리트의 유동성 및 자기충진성 확보에 중요한 변수가 된다.^{4-8,12-14)} 각각의 배합조건들은 유동 콘크리트의 레올로지 및 유동거동 특성에 일정 경향에 따른 영향을 끼치는 것으로 파악되고 있다.^{2,9)} 하지만 국내에서 생산되는 모르타르 및 콘크리트를 대상으로 하여, 굳지 않은 콘크리트의 레올로지 및 유동거동 특성에 관한 실험 및 연구 자료는 현재 충분히 확보되어 있지 않은 상태이다. 그 근본 원인으로서는 각 배합조건에 따른 레올로지 특성값들에 대한 소성점도 및 항복응력 등의 변화 패턴에 대한 정확히 추정을 하기에는 실험 결과에 미치는 외적 영향이 너무 많아 실험 자료 획득이 용이한 편이 아니기 때문이다. 국내 생산 제품을 대상으로 하여 굳지 않은 콘크리트, 모르타르 및 초유동 콘크리트에 관한 여러 배합조건에 따른 레

올로지 및 유동거동 특성을 규명하고 정식화 하는 것은 향후 초유동 콘크리트 활용 및 적용 기술에 있어서 중요한 자료가 될 것이다.

본 연구에서는 국내에서 생산되는 골재 및 시멘트를 대상으로 하여 물시멘트비 및 SP제의 배합변수를 고려한 레올로지 특성 시험 및 슬럼프, L형 박스 등의 유동거동 시험을 수행하였으며, 실험 결과를 통해, 각 배합조건에 따른 레올로지 정수 추정 모델 및 점소성 입자법에 의한 유동거동 예측 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 개발된 모델을 이용하여 각 배합조건에 따른 모르타르 및 초유동 콘크리트에 대한 레올로지 특성 및 유동 거동에 관해서 비교 평가하였다.

2. 배합변수를 고려한 레올로지 특성 및 유동거동 시험

2.1 레올로지 특성 실험

본 장에서는 물시멘트비 및 SP제 혼합율에 따른 초유동 콘크리트의 레올로지 특성 및 유동거동 실험을 수행하였다. 본 실험에 적용된 배합조건은 Table 1과 같으며,

*Corresponding author E-mail : chocg@chosun.ac.kr
 Received October 4, 2013, Revised August 15, 2014,
 Accepted August 26, 2014
 ©2014 by Korea Concrete Institute

배합변수는 잔골재비(C:S) 1:2로서, 물시멘트비(W/C) 45%, 50% 및 55%, 시멘트량에 대한 SP제 혼합율은 0.5~1.0%로 고려하였다. Table 1에서 SP제 혼합율인 괄호 내 백분율은 시멘트량에 대한 SP제 혼합율이다. 배합 재료로는 국내산 1종 보통 포틀랜드 시멘트, 굵은골재 최대치수 0.15 mm의 잔골재, SP 혼화제는 폴리카르본산계 AE제를 사용하였다. 각 배합조건에 따른 레올로지 특성 시험은 회전점도계(Brookfield HADA II+) 장치를 이용하여 측정하였다.

레올로지 정수의 실험 결과, 각 배합에 따른 항복응력 및 소성점도 측정값을 Table 2에 나타내었다. 이는 Fig. 1과 같이 각 배합의 회전점도계로부터 측정된 전단응력과 변형률속도 관계 그래프에서 획득된 값으로서, 변형률속도가 시작되는 점을 항복응력으로 하여, 그 이후의 기울기를 선형화하여 획득한 기울기 값이 소성점도가 된다.

각각의 배합조건에 따른 측정된 레올로지 특성값의 경

향을 분석하기 위하여 SP제 및 물시멘트비의 변화에 따른 항복응력 및 소성점도의 변화 양상을 분석하였다. 시험 결과에서처럼, SP제 양의 증가에 따라서 소성점도 및 항복응력은 지수 함수적으로 감소하였다. 물시멘트비 증가에 따라서도 소성점도 및 항복응력이 완만하게 지수 함수적으로 감소하는 경향을 나타내었다. SP제 및 물시멘트비의 배합변수에 대해서 레올로지 특성값이 대체적으로 일정 경향의 함수로서 정식화가 가능한 변화 양상을 나타내는 것으로 평가되었다.

2.2 유동거동 실험

앞 절에서 각각 배합된 동일 조건의 초유동 콘크리트에 대하여 유동거동 특성을 평가하기 위하여 슬럼프 및 L형 박스의 흐름시험을 수행하였다. L형 박스의 규격은 폭 200 mm, 높이 400 mm, 길이 820 mm이다.¹¹⁾ 흐름시험 결과 측정된 각 배합조건의 슬럼프 및 L형 박스 흐름량은 Table 3과 같다. 흐름시험에서 측정된 각 흐름량의 양상은 물시멘트비 및 SP제 첨가량에 따라서 물시멘트비의 증가 및 소성점도의 감소에 따라서 슬럼프값 및 흐름값의 길이가 증가하는 양상을 나타내었다.

3. 배합변수에 따른 레올로지 특성 모델링

본 장에서는 앞 장에서 소개된 레올로지 특성시험 결과를 근거로 하여, 배합변수에 따른 레올로지 정수 추정을 위한 모델을 제시하였다. 시험 결과에서처럼, SP제 양의 증가에 따른 항복응력 τ_y^{SP} 및 소성점도 μ^{SP} 를 지수 함

Table 1 Mix proportions

Mix No.	W/C (%)	C:S	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	SP (g)
45-II	45	1:2	15	30	6.75	75 (0.50%)
45-III	45	1:2	15	30	6.75	112.5 (0.75%)
45-IV	45	1:2	15	30	6.75	150 (1.00%)
50-I	50	1:2	15	30	7.50	75 (0.50%)
55-I	55	1:2	15	30	8.25	75 (0.50%)

Table 2 Rheological constants from test

Mix No.	W/C (%)	Yield stress (Pa)	Viscosity (Pa·s)
45-II	45	8.5	1.02
45-III	45	5.0	0.92
45-IV	45	2.0	0.84
50-I	50	5.8	0.87
55-I	55	3.7	0.75

Table 3 Flow results by test

Mix No.	W/C (%)	Slump (cm)	L-box (cm)
45-II	45	36	31
45-III	45	45	46.5
45-IV	45	64	74 (full)
50-I	50	53	61
55-I	55	66	74 (full)

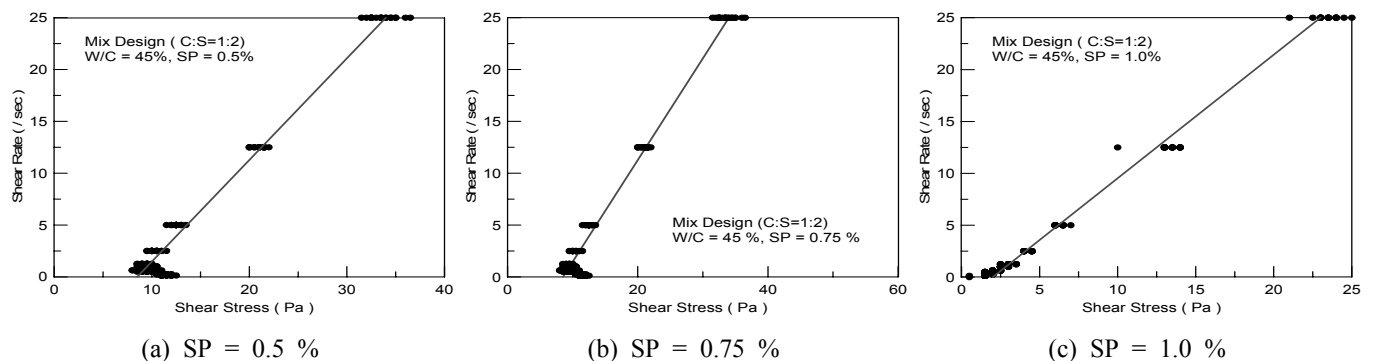


Fig. 1 Shear stress vs. strain rate by test

수적으로 감소하는 경향을 고려하여 SP제 첨가량 X_{SP} 에 대해 각각 다음 식과 같이 제시하였다.

$$\tau_Y^{SP} = A + B \cdot \exp(-X_{SP}) \quad (1)$$

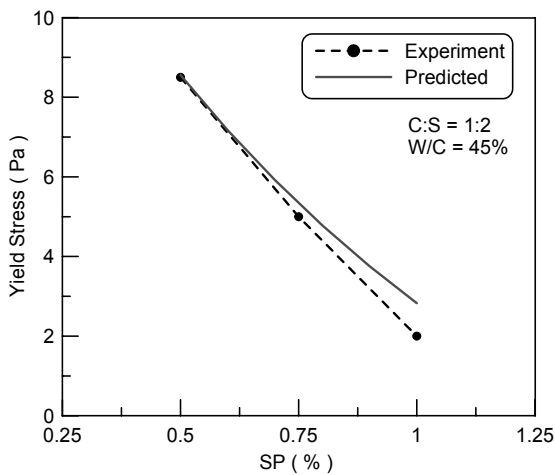
$$\mu^{SP} = C + D \cdot \exp(-X_{SP}) \quad (2)$$

물시멘트비의 증가에 따른 항복응력 τ_Y^{WC} 및 소성점도 μ^{WC} 의 변화 역시 완만하게 지수 함수적으로 감소하는 경향을 고려하여 물시멘트비 45%를 기준으로 하여 물시멘트비 X_{WC} 의 변화에 따라서 각각 다음 식과 같이 제시하였다.

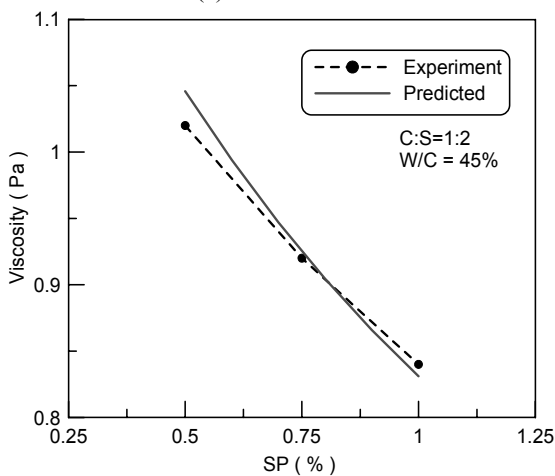
$$\tau_Y^{WC} = E \cdot \tau_Y^{45} + F \cdot \tau_Y^{45} \cdot \exp\left[1.0 - \frac{X_{WC}}{45.0}\right] \quad (3)$$

Table 4 Experimental constants for modeling rheological characteristics

Exp. const.	A	B	C	D	E	F	G	H
-	-6.0	24.0	0.5	0.9	-0.5	1.5	-2.0	3.0



(a) Yield stress



(b) Viscosity

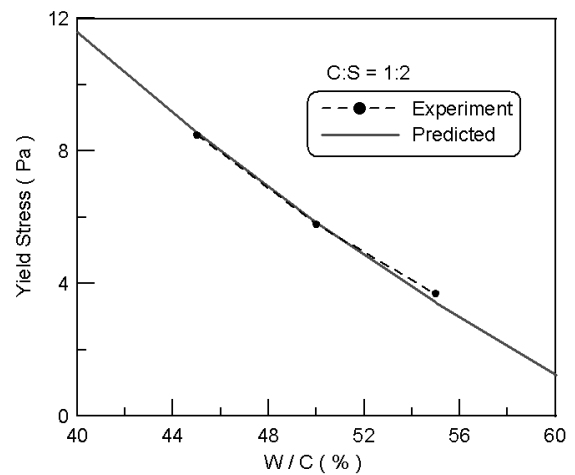
Fig. 2 Predicted rheological constants vs. SP

$$\mu^{WC} = G \cdot \mu^{45} + H \cdot \mu^{45} \cdot \exp\left[1.0 - \frac{X_{WC}}{45.0}\right] \quad (4)$$

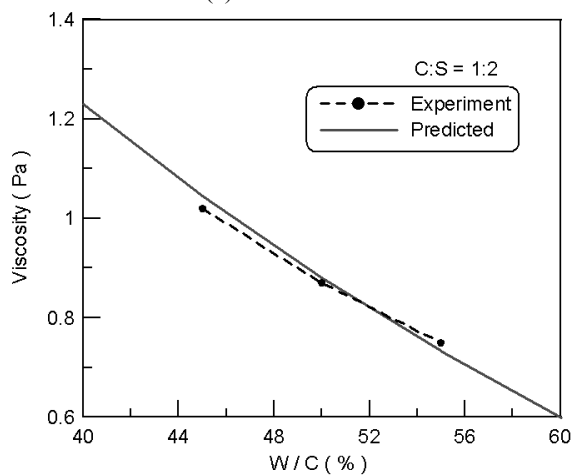
위 식들에서 고려된 실험상수들은 Table 4와 같으며, τ_Y^{45} 및 μ^{45} 는 각각 물시멘트비 45% 일때 항복응력 및 소성점도이다.

이상에서 제시한 모델을 이용, SP제 및 물시멘트비에 따른 레올로지 특성값을 예측하여 실험 결과와 비교한 결과를 각각 Fig. 2 및 3에 비교 제시하였다. 그림에서처럼, 실험에서의 배합조건에 따른 항복응력과 소성점도의 변화 양상이 제시된 방법과 비교하여 비교적 잘 일치하였다. 본 모델을 이용, 물시멘트비 45~60% 범위와 SP제 0.25~1.0% 범위에서 배합변수에 따른 레올로지 값들에 항복응력 및 소성점도에 대한 변화 예측이 각각 Fig. 4 및 5 같이 추정되었다.

본 연구에서 수행한 각 배합변수에 따른 레올로지 특성값의 실험 및 해석 결과를 종합·비교하여 Table 5에 나타내었다. 레올로지 특성 실험으로부터 물시멘트비 및 SP제 혼입율에 따른 초유동 콘크리트의 항복응력 및 소성점도 변화에 관한 예측 방법을 제시하였다.

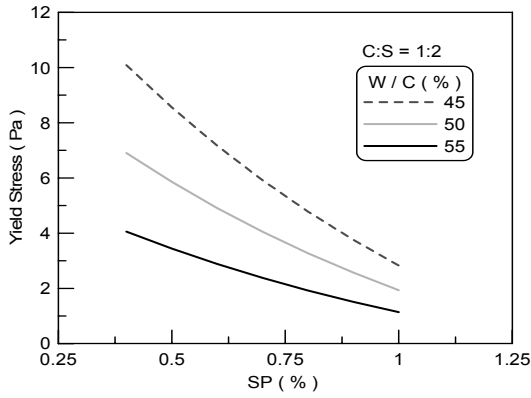


(a) Yield stress

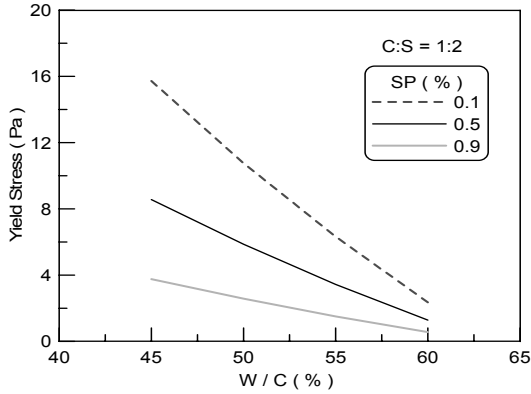


(b) Viscosity

Fig. 3 Predicted rheological constants vs. W/C ratio (SP=0.5%)

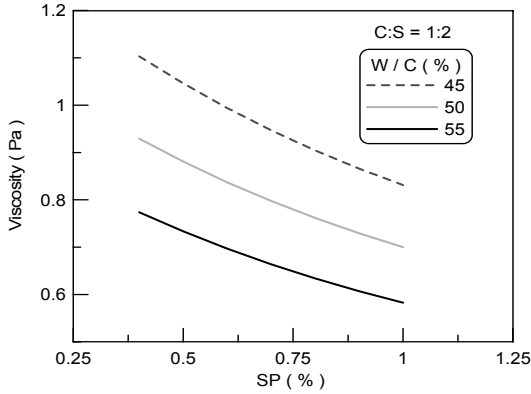


(a) Varying with SP

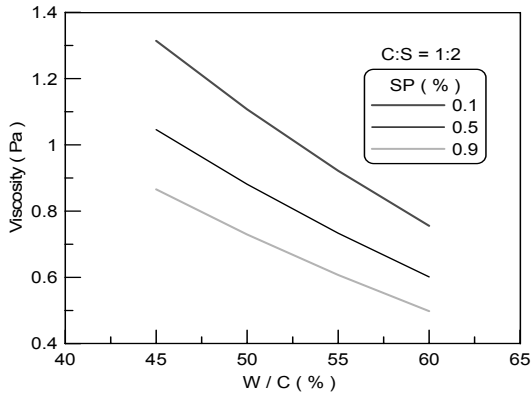


(b) Varying with W/C

Fig. 4 Predicted yield stresses



(a) Varying with W/C



(b) Varying with SP

Fig. 5 Predicted viscosities

Table 5 Comparison of rheological constants

Mix No.	W/C (%)	Experiment		Analysis	
		Yield stress (Pa)	Viscosity (Pa.s)	Yield stress (Pa)	Viscosity (Pa.s)
45-II	45	8.5	1.02	8.6	1.05
45-III	45	5.0	0.92	5.3	0.92
45-IV	45	2.0	0.84	2.8	0.83
50-I	50	5.8	0.87	5.8	0.88
55-I	55	3.7	0.75	3.4	0.73

4. 점소성 입자법에 의한 유동해석모델

앞 장에서 제시된 배합변수를 고려한 레올로지 특성 모델을 점소성 입자법 해석 알고리즘에 적용함으로써, 배합조건을 반영한 모르타르 및 유동콘크리트의 입자법에 의한 예측모델을 제시하였다.

Fig. 6과 같이 굳지 않은 콘크리트가 부동 상태일 경우 고점성 유체로, 항복 이후 유동 상태가 되면 점소성 유체로 가정할 경우, 점소성 모델에 의한 2차원 하에서 항복 조건 및 소성 포텐셜 함수를 고려한 소성이론을 적용, 유동상태에서의 점소성 구성관계가 유도된다. 이때 Navier-Stokes 운동방정식에 의해 표현된 굳지않은 콘크리트의 지배방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \tilde{X} + \left(\mu + \frac{\tau_y}{\sqrt{2\varepsilon_y \cdot \varepsilon_y}} \right) \nabla^2 \tilde{u} + 2\varepsilon_y \cdot \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\tau_y}{\sqrt{2\varepsilon_y \cdot \varepsilon_y}} \right) \quad (5)$$

여기서, ρ 는 입자의 밀도, p 는 압력, \tilde{u} 는 속도벡터, \tilde{X} 벡터는 외력항의 힘의 벡터, 그리고 τ_y 는 유동 콘크리트의 항복응력, μ 는 유동상태의 점도계수, ε_y 는 전단변형률속도이다.

식 (5)에 표현된 유동 콘크리트에 대한 점소성 유체의 Navier-Stokes 운동방정식의 미분방정식을 입자법인 MPS 법(moving-particle semi-implicit method)의 구배 방정식에 의해 대수방정식으로 정식화함으로써,^{1,3,10} 입자법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 유동 해석 시뮬레이션의 알고리즘을 유도할 수 있다. 해의 산정을 위해 운동방정식을 점소성 및 외력에 의한 입자 속도 \tilde{u}_i^* 와 압력에 의한 입자 속도 \tilde{u}_i' 로 변환하여 매 시간단계 $k+1$ 시간에서의 입자의 속도 \tilde{u}_i^{k+1} 및 입자의 위치 \tilde{r}_i^{k+1} 를 각각 다음 식과 같이 갱신토록 하고 있다.

$$\tilde{u}_i^{k+1} = \tilde{u}_i^* + \tilde{u}_i' \quad (6)$$

$$\tilde{r}_i^{k+1} = \tilde{r}_i^* + \Delta t \tilde{u}_i' \quad (7)$$

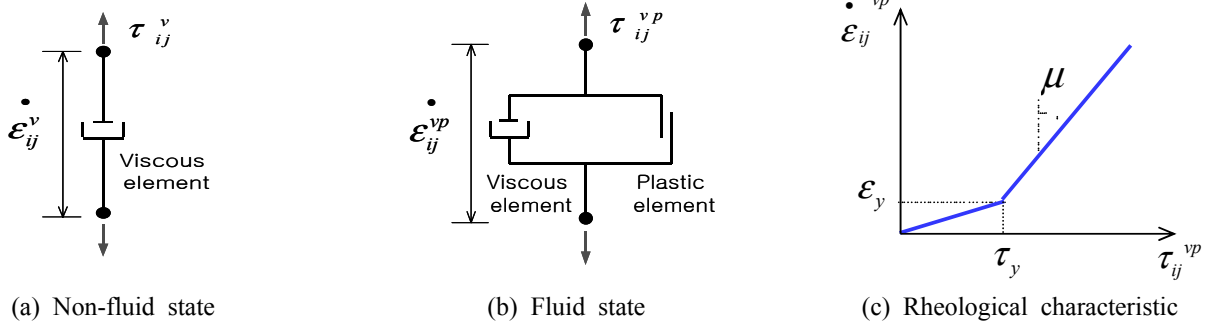


Fig. 6 Rheological flow states

이때 점소성력 및 외력에 의한 입자속도 및 점소성력은 각각 다음과 같이 유도된다.

$$\tilde{u}_i^* = \tilde{F} dt + \tilde{X} dt \quad (8)$$

$$\tilde{F} = \left(\mu + \frac{\tau_y}{\sqrt{2\epsilon_{ij}\epsilon_{ij}}} \right) \nabla^2 \tilde{u} + 2\epsilon_{ij} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\tau_y}{\sqrt{2\epsilon_{ij}\epsilon_{ij}}} \right) \quad (9)$$

입자법에 의해 유도된 구배 및 Laplacian 모델을 적용하면, 위 식의 구배 및 Laplacian 값은 각각 다음 식과 같이 미분방정식을 선형방정식화하여 산정할 수 있다.

$$\langle \nabla \Gamma \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{(\Gamma_j - \Gamma_i)(\tilde{r}_j - \tilde{r}_i)}{|\tilde{r}_j - \tilde{r}_i|^2} w(|\tilde{r}_j - \tilde{r}_i|) \right] \quad (10)$$

$$\langle \nabla^2 \tilde{u} \rangle_i = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{j \neq i} [(\tilde{u}_j - \tilde{u}_i) w(|\tilde{r}_j - \tilde{r}_i|)] \quad (11)$$

여기서

$$\Gamma = \tau_y / \sqrt{2\epsilon_{ij}\epsilon_{ij}} \quad (12)$$

위 식들로부터 입자법 알고리즘에 의한 유동 예측 및 실시간 시뮬레이션이 가능하다. 제시된 알고리즘에서 물시멘트비 및 SP제의 배합조건 변화에 따른 레올로지 특성의 고려한 모델이 되기 위하여, 전단응력과 변형률속도 관계 곡선의 항복응력 및 소성점도 값에 앞 장에서 제시된 식 (1)~(4)의 레올로지 특성 모델의 정식화를 추가함으로써, 물시멘트비 및 SP제의 영향을 반영한 유동해석 시뮬레이션 기법을 제시하였다.

5. 물시멘트비 및 SP제 변화량을 고려한 유동해석 시뮬레이션

앞 장과 같이 개발된 입자법 모델을 이용, Fig. 7과 같이 2장에서 소개된 각 배합조건이 따른 L형 박스 흐름시험에 대한 유동 예측시뮬레이션을 수행하였다. 2차원 해

Table 6 Predicted L-box flow by MPS

Mix No.	W/C (%)	L-box flow (cm)		Error (%)
		Tested	Predicted by MPS	
45-II	45	31	32.2	+3.9
45-III	45	46.5	42.7	-8.2
45-IV	45	74 (full)	74 (full)	0.0
50-I	50	61	63.5	+4.1
55-I	55	74 (full)	74 (full)	0.0

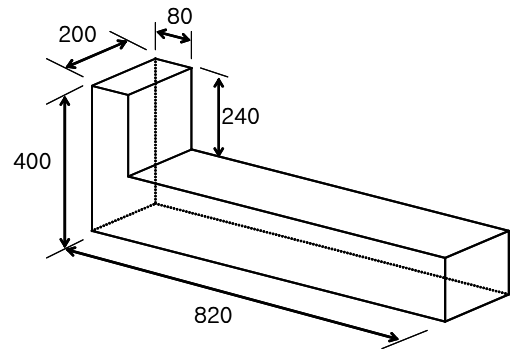


Fig. 7 L-box flow test

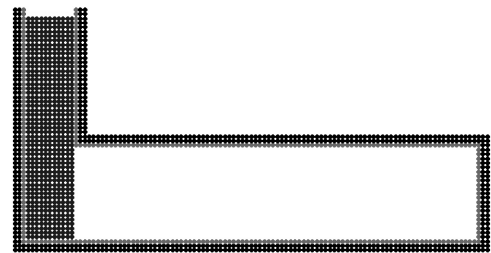


Fig. 8 Initial state in L-box test

석모델의 초기상태는 Fig. 8과 같다. 해석을 수행하여 각 배합조건에 따른 흐름량의 실험 및 해석 값을 비교하여 Table 6에 나타내었다. Fig. 9는 물시멘트비 45%인 배합조건인 최종시간 유동시뮬레이션을 나타낸 것으로서, 그림에서 배합조건 45-II의 예측 결과는 실험과 잘 일치하고 있다. 실험과의 비교에서, SP제 및 물시멘트비에 따라서 예측 값이 실험치 보다 최대 8.2% 미만의 오차였다.

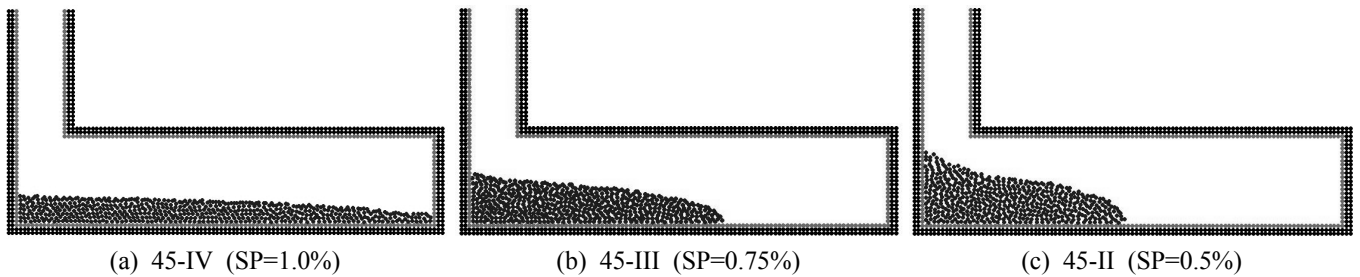


Fig. 9 Simulation of L-box flow

개발된 모델은 물시멘트비 및 SP제 변화에 따른 L형 박스 흐름 현상을 비교적 잘 예측해 주었다.

6. 결 론

본 연구를 통한 실험 및 해석모델의 개발을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 국내 생산의 시멘트, 골재, 및 SP제 등의 배합조건을 고려한 초유동 콘크리트에 대한 소성점도 및 항복응력의 레올로지 정수 추정모델을 제시하여 레올로지 특성 및 변화 양상을 파악하였다.
- 2) 제안된 레올로지 정수 추정모델을 적용하여 배합조건 변화에 고려한 점소성 입자법에 의한 2차원의 균지 않은 콘크리트에 대한 흐름해석 시뮬레이션 기법을 개발, 2차원 입자법의 모델은 물시멘트비 및 SP제 변화에 따른 L형 박스의 흐름 현상을 비교적 잘 예측해 주었다.
- 3) 제시된 예측모델이 보다 실용적으로 개선되기 위해서는 향후 골재의 조건에 따른 보다 방대한 실험 자료의 획득과 이를 통한 모델링이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2014년도 교과부 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2014044260), 그리고 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비 지원(13건설연구A02)에 의해 수행되었습니다.

References

- 1) Cho, C.G., Kim, W.J., and Choi, Y., "Model for Flow Analysis of Fresh Concrete using Particle Method with Visco-Plastic Flow Formulation", *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 20, Issue 3, 2008, pp. 317-323.
- 2) Choi, Y.J., Kim, J.H., Jee, N.Y., and Kim, W.J., "A Study on The Rheological Properties of Cement Paste using Fly Ash and Slag Powder", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Structure and Construction, Vol. 14, Issue 6, 1998, pp. 105-115.
- 3) Koshitsuka, Numerical Fluid Mechanics, Baifukan, 1997.
- 4) Yamada, Rheological Study of Fresh Concrete, *Cement and Concrete*, Issue 707, 2006, pp. 18-27.
- 5) ACI Committee 309, "Behavior of Fresh Concrete During Vibration", *Journal of ACI*, Vol. 78, Issue 1-2, 1981, pp. 36-53.
- 6) Banfill, P.F.G., Rheology of Fresh Cement and Concrete, E & FN Spon, London, 1991.
- 7) Bartos, P., Fresh Concrete: Properties and Tests, Elsevier, 1992.
- 8) Ferraris, C.F., "Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report", *J. of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 104, Issue 5, 1999, pp. 461-478.
- 9) Lu, G., Wang, K., and Rudolph, T.J., "Modeling Rheological Behavior of Highly Flowable Mortar using Concepts of Particle and Fluid Mechanics", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, 2008, pp. 1-12.
- 10) Koshizuka, S. and Oka, Y., "Moving-Particle Semi-Implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid", *Nucl. Sci. Eng.*, Vol. 123, 1996, pp. 421-434.
- 11) Miyamoto, Y. and Yamamoto, Y., "Study on the Fluidity and the Mix Proportion of High-Fluidity Concrete by Using the J Shaped Flow Test", *J. Struct. Constr. Eng.*, Architectural Institute of Japan, Issue 547, 2001, pp. 9-15.
- 12) Saak, A.W., Jennings, H.M., and Shah, S.P., "A Generalized Approach for the Determination of Yield Stress by Slump and Slump Flow", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, pp. 363-371.
- 13) Tanigawa, Y. and Mori, H., "Analytical Study on Deformation of Fresh Concrete", *Journal of Engineering Mechanics*, Proc. of American Society of Civil Engineers, Vol. 115, Issue 3, 1989, pp.493-508.
- 14) Tattersall, G.H. and Banfill, P.F.G., "The Rheology of Fresh Concrete", *Pitman Advanced Publishing Program*, 1983, p. 359.

요약 본 연구는 SP제 및 물시멘트비 영향에 따른 변화를 고려한 초유동 콘크리트의 유동 실험 및 해석 시뮬레이션 기법에 관해 소개한 것이다. 국내에서 생산되는 시멘트, 골재 및 SP 혼화제를 대상으로 하여 배합조건에 따른 유동 콘크리트의 레올로지 특성 및 유동현상 실험을 수행하였으며, 이로부터 물시멘트비와 SP제의 영향을 고려한 유동 콘크리트의 레올로지 정수 추정에 관한 예측모델을 제시하였다. 제시된 두 배합조건에 의한 영향을 유동 콘크리트의 전단응력과 변형률속도 관계 정식화에 적용하여 본 해석 모델을 제시하였다. SP제 및 물시멘트비의 변화를 고려한 초유동 콘크리트의 L형 박스 흐름 실험을 수행하여 해석 시뮬레이션 모델과 비교하여 개발 모델에 대해 평가토록 하였다.

핵심용어 : 초유동 콘크리트, 입자법, 물시멘트비, SP 혼화제, L형 박스 흐름시험