

# SPH 기법을 이용한 주조공정 용탕 주입 유동 해석

박병래\* · 이상욱†

## Molten Metal Flow Analysis of Casting Process Using SPH Method

Byung Lae Park\* and Sang Wook Lee†

**Abstract** It is important to develop more efficient and productive casting processes for an automated high precision molten-metal casting system. Detailed analysis of molten-metal flow in the casting process by the numerical approach will help to optimize the control of a ladle. In this study, the smoothed particle hydrodynamics method was applied to analyze casting flow characteristics with different tilting angular speed and initial molten-metal level. The smoothed particle hydrodynamics technique has advantages to easily handle non-linear free surface behavior with the absence of a computational mesh. We found that tilting angular speed has relatively greater effect on the casting flowrate and that the effect of the initial molten-metal level is only minor. Further extensive study will be necessary to find an optimal condition for high efficient casting system.

**Key Words** : Smoothed particle hydrodynamics (입자완화 유체동역학), Molten metal flow(주조유동), Free surface(자유표면), Tilting angular speed(경사 각속도)

### 1. 서론

주조공정은 금속을 이용한 여러 제조 공법 중에 가장 오래된 방법이면서 대형 제품, 대량 생산에 있어 아직까지도 상대적으로 저렴하고 효과적인 생산 방법으로 자리 잡고 있다. 현재 다양한 주조 공법이 개발되어 생산하고자 하는 제품의 기계적 또는 형상적 특성 등의 요구 조건에 따라 고압주조, 저압주조, 중력주조, 금형주조, 소실모형주조 등 여러 가지로 세분화 되었다<sup>1)</sup>.

주조공정에서 우수한 주물을 얻기 위해서는 제조 환경, 소재 차원의 특성, 작업자의 기능적 요소 등 여러 가지 요인들이 영향을 미치지만 그 중에서 주조성에 가장 직접적으로 영향을 미치는 것은 소재와 공정이라 할 수 있다. 좋은 주조성의 확보는 경제적인 이점과 함께 제품의 품질 향상에도 중요한 영향을 미친다.

주조공정은 보통 섭씨 1,500도 내외의 고온에서 레이들(ladle) 내의 용탕이 수 톤에서 수백 톤 주입되는 공정이다. 작업 생산성 향상을 위해 많은 노력이 기울여 지고 있지만 안전사고의 위험성 때문에 생산성 향상이 쉽게 이루어지기 어려운 실정이다. 기존에 사용하고 있는 수동 핸들 조작에 의한 용탕주입 방법은 작업자의 숙련도에 따라 품질의 편차가 크게 나타나기 때문에 미숙련도를 가진 신

† School of Mechanical Engineering, University of Ulsan  
E-mail: leesw@ulsan.ac.kr

\* Department of Mechanical and Automotive Engineering, Graduate School, University of Ulsan

규 작업자가 투입되는 경우 제품의 생산성 저하 및 균일한 품질을 유지하는 데 문제가 발생될 수 있다. 이러한 주조공정의 낮은 생산성을 개선하고 생산 효율을 향상시키기 위해 용탕 주입 시 수동 작업이 아닌 자동 고정밀 정량 주입 장치 개발이 절실히 요구된다<sup>2)</sup>. 경사식 주입레이들 방식의 고정밀 정량 주입장치 개발을 위해 용탕 주입 공정에 대한 전산유동해석을 통한 최적 공정 설계가 필요하다.

주조공정에서 대형 주물일수록 주조 공정방식의 설정이 매우 중요한데 이는 금형의 설계 단계부터 고려가 되어야 한다. 설계된 주조 공정방식이 효율적인지 여부를 검토하기 위해서는 실제로 양산을 해보고 나타나는 결함이 있다면 그것을 해결하기 위해 다시 설계를 변경해야만 한다. 또한 이러한 결함은 한 번에 나타나는 것이 아닐 수도 있고 주조 횟수가 반복되어 증가함에 따라 나타날 수도 있기 때문에 다시 설계를 변경한다는 것은 경제적으로 큰 낭비가 되는 일이다. 이러한 문제를 효과적으로 처리하기 위해서는 전산시뮬레이션을 이용하는 것이 효과적이다.

주조공정 유동을 해석하기 위해서는 고온에서 용해된 액체금속과 공기와의 접촉면인 자유표면 해석이 필요하다. 자유표면을 추적하기 위한 방법으로는 격자를 사용하는 오일러(Eulerian) 방법과 비격자법인 라그랑지(Lagrangian) 방법이 있다. 오일러(Eulerian) 방법에서는 대표적으로 VOF(Volume of fluid) 기법과 Level-Set 기법 등이 있지만 강한 비선형성을 갖는 자유표면 유동 해석에 있어서 자유표면의 추적과 물리량의 보존성 등의 문제점이 있고 격자 의존성이 높아 정확성의 편차가 크다. 라그랑지(Lagrangian) 방법으로는 입자완화 유체동역학 기법(smoothed particle hydrodynamics, SPH)과 이동입자 반음해법 (moving particle semi-implicit method, MPS) 기법 등이 있다<sup>3,4)</sup>.

격자법은 형상에 맞도록 격자를 생성해야만 좋은 정확도의 해를 구할 수 있는 반면 격자 생성에 상당한 노력을 요구한다. 주조공정은 제품의 개발에서 완료까지 신속히 이루어지기 때문에 해석의 정확도도 중요하지만 계산 시간도 매우 중요한 요소이다. 한편 입자를 사용하는 SPH 기법은 격자생성의 복잡한 작업이 불필요하며, 경계면이 크게 변

형되는 문제에도 적용될 수 있는 기법이다. SPH 기법을 사용하면 격자를 사용하는 해석 방법보다 복잡한 비선형성의 자유표면 액체 거동을 갖는 물리현상을 상대적으로 수월하게 해석할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 SPH 기법을 이용하여 주조공정의 비선형성 자유표면의 유동을 해석하고, 레이들의 경사(tilting) 초기각도 및 경사 각속도와 초기 수위에 따른 용탕 주입 유동 특성을 상세 해석한 뒤, 결과를 비교, 분석하였다.

## 2 수치해석 방법 및 해석결과

### 2.1 연구방법

#### 2.1.1 해석 모델

본 연구에서 적용된 레이들 모델 (Versa #8C Model, Northern Iron & Machine, MN) 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 약  $1.5 \times 10^3 \text{ m}^3$  정도의 용용 금속을 담을 수 있는 용량의 크기를 가진다. 용탕 유동의 수치 해석을 위한 주조용 금속으로는 제조 및 경제성이 뛰어난 AZ31B 마그네슘 합금을 적용하였다. AZ31B 마그네슘 합금은 매우 가벼운 구조용 합금으로 우수한 비강도, 진동감쇠능 및 기계 가공성과 방열성 등을 가지고 있어 전자부품, 산업용 공구 및 구조용 재료 등에 사용되고 있다<sup>5)</sup>.

#### 2.1.2 SPH 입자 생성

본 연구에서는 비격자법(mesh-free method)인 SPH 수치 기법을 적용하였기 때문에 수치 격자 생성 없이 레이들 및 용탕 유동장 영역에 SPH 입자를 분포시켰다. Fig. 2는 고체 레이들과 용탕 유동 영역에 생성한 SPH 입자 분포를 보여주고 있다.

#### 2.1.3 수치해석 기법 및 경계조건

오픈소스 코드인 DualSPHysics<sup>6)</sup>를 이용하여 약  $1400^\circ\text{C}$ 의 마그네슘 합금 용탕에 대한 주입 유동을 수치 시뮬레이션 하였다.

SPH 기법은 함수 근사를 적용하여 각 입자들의

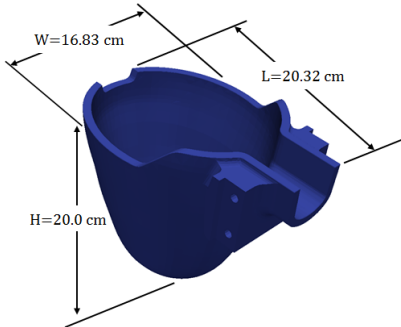


Fig. 1. A ladle model

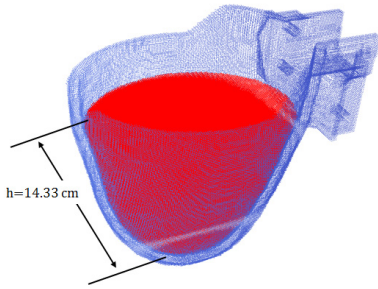


Fig. 2. Distribution of initial particles

물리량을 계산한다. 일반 함수  $A(r)$ 에 대한 연속적인 SPH의 적분 표현은 다음과 같이 이산화 될 수 있다.

$$A(r) \cong \int_{\Omega} A(r') W(r-r', h) dr' \quad (1)$$

여기서,  $W$ 는 가중함수(weighted function)이며,  $h$ 는 근사완화 길이(smoothing length)이다. 입자의 입자  $a$ 에서 함수에 대한 입자 근사는 최종적으로 식 (2)와 같이 주변 영역에서의 모든 입자들의 영향에 대한 합으로 표현할 수 있다.

$$\langle A(r) \rangle = \sum_b \frac{m_b}{\rho_b} A_b W_{ab} \quad (2)$$

함수  $A(r)$ 의 미분  $A'(r)$ 는 가중함수  $W$ 의 미분에 의하여 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$A'(r) \cong \int_{\Omega} A(r) W'(r-r', h) dr' \quad (3)$$

따라서 이에 대한 이산화는 다음과 같이 표현된다.

$$\langle A'(r) \rangle \cong \sum_b \frac{m_b}{\rho_b} A_b W'_{ab} \quad (4)$$

본 연구에서는 가중함수  $W$ 로 4차 근사의 Wendland kernel 함수<sup>(7)</sup>를 사용하였다.

$$W(r-r', h) = \alpha_D \left(1 - \frac{q}{2}\right)^4 (2q+1); \quad 0 \leq q \leq 2 \quad (5)$$

여기서,  $\alpha_D$ 는  $21/16\pi h^3$ 이며,  $q = (r-r')/h$ 이다.

Lagrangian 형태로 연속방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla v \quad (6)$$

$\nabla v$ 를 SPH 형태로 근사시키면 다음과 같은 이산화식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{D\rho_a}{Dt} = \sum_b m_b (v_a - v_b) \nabla_a W_{ab} \quad (7)$$

$\nabla_a W_{ab}$ 는 가중함수의 기울기이다.

운동량 방정식에서 점성력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(\nu_o \nabla^2 v)_a = \sum_b m_b \left( \frac{4\nu_o r_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b)(r_{ab}^2 + \eta^2)} \right) v_{ab} \quad (8)$$

연속적인 장에서 운동량 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g + \nu_o \nabla^2 v + \frac{1}{\rho} \nabla \vec{\tau} \quad (9)$$

위 식에서  $\vec{\tau}$ 는 Sub-Particle Scale (SPS) 텐서<sup>(8)</sup>로서

$$\frac{\vec{\tau}_{ij}}{\rho} = \nu_t \left( 2S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} C_T \Delta^2 \delta_{ij} |S_{ij}|^2 \quad (10)$$

이다. 여기서  $\nu_t = [(C_s \Delta l)]^2 |S|$  는 점성계수이고,  $k$  는 SPS 난류 운동에너지 값이다.  $C_s$  는 Smagorinsky 상수값으로 0.12를 가진다.  $\Delta l$  은 입자간의 간격이고  $|S| = (2S_{ij}S_{ij})^{0.5}$  으로  $S_{ij}$  의 SPS 변형을 값이다.

그러므로, Dalrymple and Rogers<sup>(6)</sup>이 제시한 방법에 의해 방정식 (9)는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{dv_a}{dt} = & - \sum_b m_b \left( \frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} \right) \nabla_a W_{ab} + g \\ & + \sum_b m_b \left( \frac{4v_o r_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b)(r_{ab}^2 + \eta^2)} \right) v_{ab} \\ & + \sum_b m_b \left( \frac{\vec{r}_{ij}^b}{\rho_b^2} + \frac{\vec{r}_{ij}^a}{\rho_a^2} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

압력과 밀도 관계식로부터 압력 계산을 위해 다음과 같은 상태방정식을 적용한다.

$$p = B \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (12)$$

여기서,  $\gamma = 7$ 로 일정한 상수를 가지며  $\rho_0$ 는 기준이 되는 밀도값으로 본 논문에서는  $1,770 \text{ kg/m}^3$ 의 일정한 값을 가진다.  $B = (c_0)^2 \rho_0 / \gamma$  이며,  $c_0$ 는 기준 밀도에서 음속으로  $c_0 = \sqrt{(\partial P / \partial \rho)}|_{\rho_0}$ 로 표현된다.

## 2.2 수치해석 결과

Fig. 3에서는 레이들의 경사 각속도에 따른 유량의 변화를 나타내었다. 경사 각속도가 낮을수록 전반부, 후반부 모두 유량의 기울기가 감소하는 것을 확인하였다.

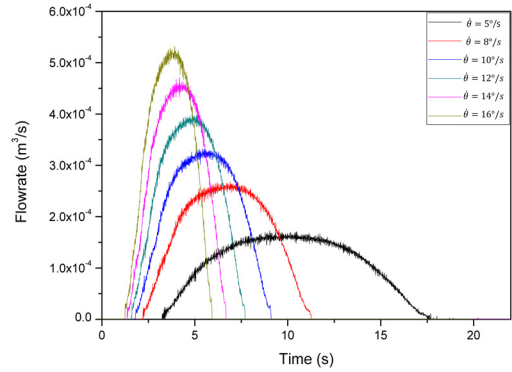


Fig. 3. Comparison of flowrates at different tilting angular velocity

Fig. 4과 Fig. 5에서 각각  $\theta = 5^\circ/\text{s}$  와  $\theta = 14^\circ/\text{s}$ 의 경사 각속도를 적용한 경우, 용탕 주입 유동장 시뮬레이션 결과를 가시화하였다.

Fig. 6에서 경사 각속도  $\theta = 5^\circ/\text{s}$  일 때, 레이들 내부 초기 수위에 따른 유량의 변화를 나타내었다. 유량의 최대값은 초기 수위와 관계없이 거의 동일한 값을 가지는 것을 알 수 있으며, 단지 용탕이 최초 주물에 도달하는 시간이 다른 것을 알 수 있다.

실제 용탕 주입 과정에서 시간에 따라 일정한 유량을 유지하는 것이 중요한 조건으로서 이를 위해 레이들 각속도를 최적 제어하는 것이 필요하다. 이러한 제어시스템 설계를 위한 데이터를 얻기 위하여 Fig. 7과 같이 레이들의 회전각이 선형 및 사인(sine) 곡선의 패턴이 되도록 레이들 각속도의 변화를 주었다.

Fig. 8에서는 Fig. 7에 보인 것처럼 시간에 따른 각도가 유지되도록 레이들 각속도 및 각가속도를 제어할 때 발생하는 유량 변화를 나타내었다. 초기에 상대적으로 높은 각속도를 가지는 사인(sine) 형태의 레이들 각도 조건보다는 일정한 각속도를 가지는 레이들 회전 운동 조건이 전체적으로 일정한 유량을 유지하는 데 유리한 것을 알 수 있었다.

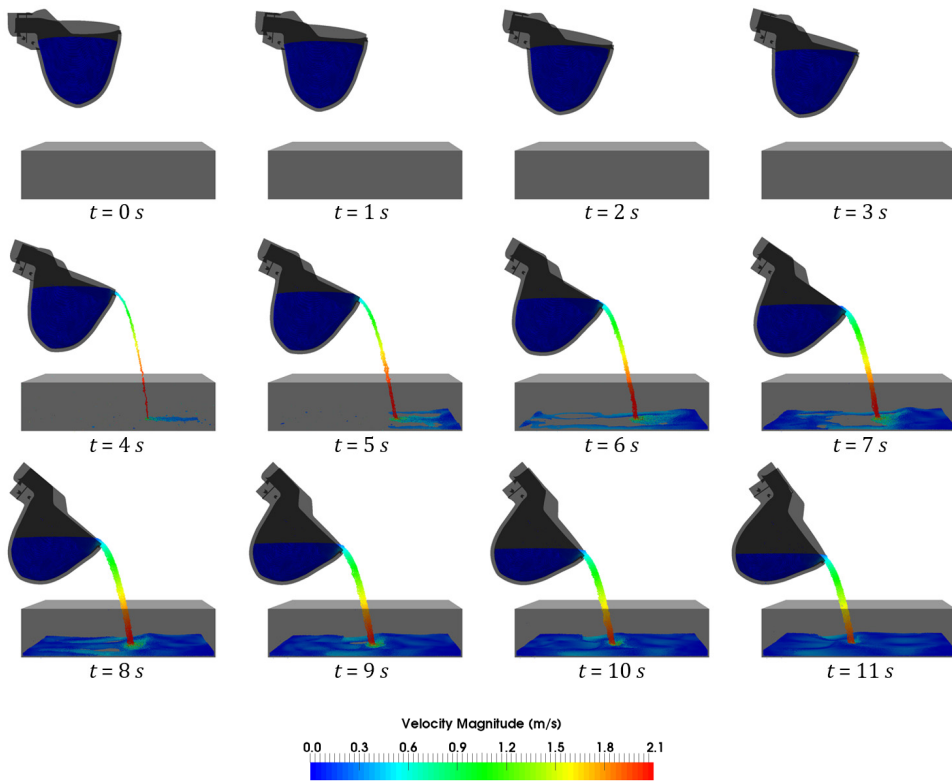


Fig. 4. Visualization of molten-metal casting flow field ( $\dot{\theta} = 5^\circ/\text{s}$ )

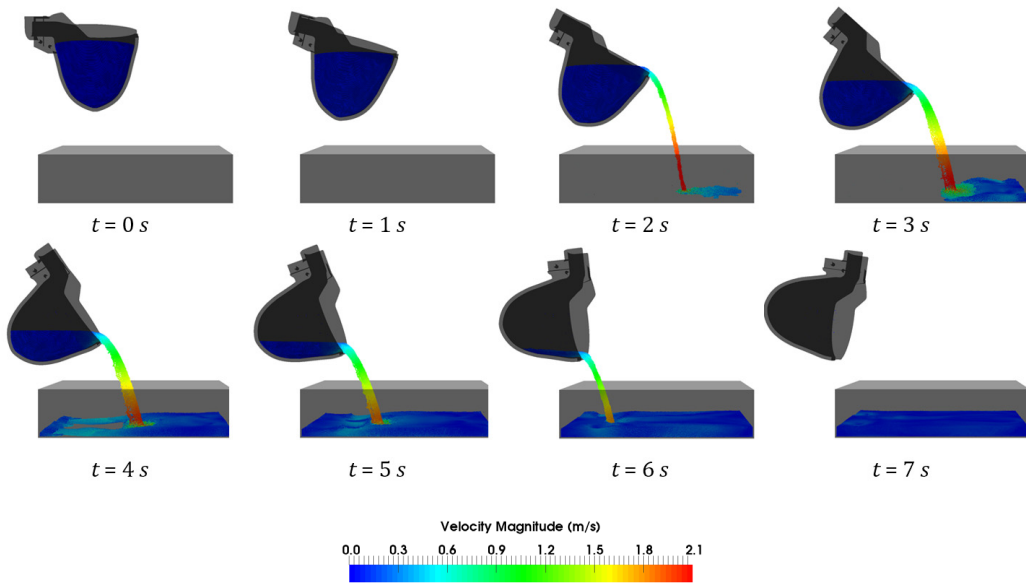


Fig. 5. Visualization of molten-metal casting flow field ( $\dot{\theta} = 14^\circ/\text{s}$ )

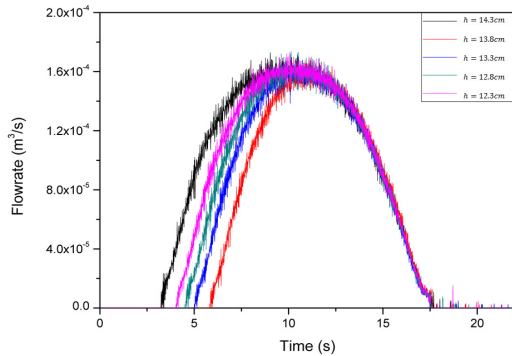


Fig. 6. Flowrates with different initial height of molten metal flow in a ladle ( $\dot{\theta}=5^\circ/\text{s}$ )

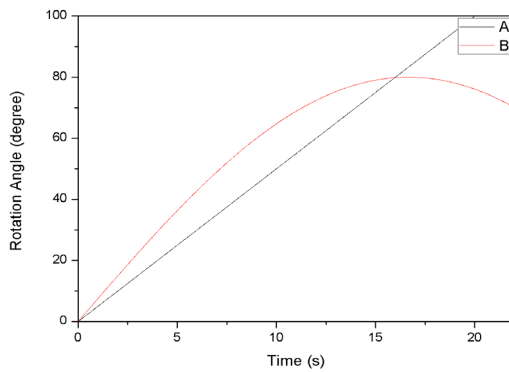


Fig. 7. Different rotation angles of a ladle in time to control flowrate

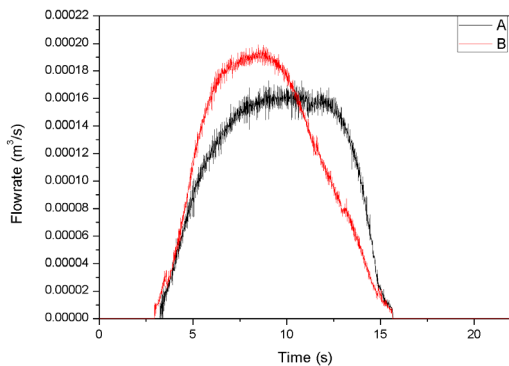


Fig. 8. Comparison of flowrates with different time-varying tilting angular velocities

### 3. 결론

SPH 기법을 적용하여 레이들의 용탕 주입 유동을 해석하였다. 이로부터 경사 각속도가 시간에 따른 유량 변화에 중요한 영향을 미치고, 초기 수위의 차이는 최대 유량값 등의 유량 변화에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다. 추후 일정한 유량을 유지할 수 있는 최적 제어 조건을 찾기 위한 보다 폭넓은 연구가 요구된다.

### 참고문헌

- 1) Y. M. Hur, 2007, "A study of the pre-estimate of castability of ADC10 and scrap by FEM simulation and experiment", M.S Thesis, Hanyang University.
- 2) J. S. Lee, Y. C. Lee, B. K. Bae and H. S. Jang, 2011, "Mold Filling Analysis for Development of Vertical Die Casting Machine," Korean Society of Precision Engineering 2018 Fall Conference, pp. 1161-1162.
- 3) B.-H. Lee, J.-C. Park, M.-C. Ryu, Y.-S. Kim and Y.-H. Kim, 2007, "Numerical Simulation of Non-linear Free-surface Motions Using Moving Particle Semi-implicit(MPS) Method", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 21, No. 6, pp. 53-58.
- 4) J. C. Park, B. H. Lee and S. J. Jung, 2007, "Numerical simulation of dam-broken problems using a particle method", Korean Society for Computational Fluids Engineering, pp. 258-263
- 5) G. H. Lee, T. W. Yoon and C. Y. Kang, 2014, "A Study on the Mechanical Properties and Formability of Mg AZ31B Sheet", Transactions of Materials Processing, Vol. 23, No. 8, pp. 495-500.
- 6) R. A. Dalrymple and B. D. Rogers, 2006, "Numerical modeling of water waves with the SPH method", Coastal engineering, Vol. 53, pp. 141-147.
- 7) H. Wendland, 1995, "Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial

functions of minimal degree", *Advances in Computational Mathematics*, Vol. 4, No. 1, pp. 389-396.

- 8) H. Gotoh, S. Shao, and T. Memita, 2004, "SPH-LES model for numerical investigation of wave interaction with partially immersed breakwater", *Coastal Engineering Journal*, Vol. 46, pp. 39-63.