

수중방전에 의한 압력분포의 2차원 해석

김 양 술*

Two-Dimensional Analysis of Pressure Distribute by Underwater Electric Discharge

Yang-Sul Kim*

ABSTRACT

The two-dimensional pressure distribution, which is the most important parameter in the casting cleaning installations(CCI), was analyzed using the K-FIX computer program for two-phase flow. Modelling was done using R-Z coordinates for the initial and boundary conditions which don't have periodic influx and efflux, and also there was the electric discharge due to high pressure and temperature. The marked particles were introduced to predict the structure and the size of main and local moving surfaces. The initial and boundary conditions were modified due to the internal structure of CCI. From the results of numerical analysis, it was shown that the maximum pressure on casting was increased with the increase of a water level. The pressure on casting in the radial direction was higher than that in axial direction. Also, it was proved that by introducing the marked particles it was possible to predict the surface structure in case of two-phase flow.

Key Words : Casting Cleaning Installations (주물청정장치), Under-Water Electric Discharge (수중방전), Two-Phase Flow (2상유동)

1. 서 론

방전현상^{1,2)}은 공업분야에 널리 이용되고 있으며 특히 기계공업분야에 있어서, 방전가공은 방전현상을 통한 재료 가공에 이용한 것이고, 방전성형은 방전시 발생하는 충격적 압력파를 재료의 소성가공에 적용하여 생산가공에 이용되고 있다.

수중방전현상은 우리 나라에서는 아직 개발되고 있지 않은 주물사 청정 시스템에 적용하는 경우 수중 고전압 방전시 발생하는 충격압력파로부터 강력한 압력파가 형성될 때 발생하는 수중스파크 방전현상의 일종인 프라즈마³⁾를 이용하여 주물품의 불순물을 제거하는데 이용할 수가 있을 것이다. 수중에서 전기방전을 행하고, 그때의 에너지에 의해 발생하는 폭발적인 압축압력을 이

* 홍익대학교 기계설계학과(중신회원)

용하려는 시도^(4,5)는 오래 전부터 연구되어 외국에서는 고에너지와 고속변형의 분야에 대한 실용화 연구가 진행되고 있으며, 국내에서는 최근에 수중 고전압 방전시 발생하는 충격 압력파를 주물사 청정에 이용하려는 연구⁽⁶⁾가 수행되고 있다.

전기수압방식을 이용한 주물사 청정과 코어 청정 시스템은 주조공장에서 생산성을 획기적으로 향상시키고 공해산업으로 지적되고 있는 주조공장의 작업환경을 크게 개선할 수 있는 주조물 청정의 최첨단기술(6)로 평가되고 있다.

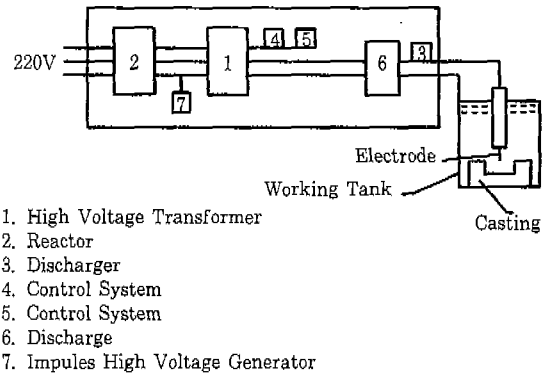
따라서 본 연구에서는 전기수압식 수중 방전에 의한 수력에너지 형성과정에 있어서의 이론적 연구를 수치적 방법으로 해석하였다.

수중방전에 의한 거시적인 압력의 전파 및 계면에서의 유동해석과 주물청정의 최적 조건을 선정하기 위하여 2유체 모델 및 분산유동에서 분리유동까지 모든 유동양식에 적용할 수 있도록 음함수 다영역 방법⁽⁷⁾ (Implicit Multifield Technique)을 사용하여 개발된 2차원 2상유동의 과도적 해석 프로그램인 K-FIX⁽⁸⁾ 코드를 채택하였으며 액상과 기상의 계면에서의 상호작용을 보다 정확히 묘사하기 위하여 단상 유동에서 자유표면 형상화에 이용되는 표시입자(Marker particle)⁽⁹⁾를 첨가함으로써 주물사 청정시스템 내의 상을 분리하는 계면의 구조와 크기를 정확히 예측하려 시도하였다.

2. 주물청정시스템의 Modelling

2-1. 주물청정시스템의 구조

전기적인 에너지를 발생시키기 위한 장치로써 Fig. 1과 같이 기본적인 요소들로 구성되어 있으며, 작동원리는 고전압 정류전류는 콘덴서에 충전되고, 음극은 작업탱크와 연결되고 충전된 양극은 방전기와 연결되어 있으며, 방전기 전극의 하나는 콘덴서에 연결되고 나머지 하나는 작업전극에 연결되어 공기공극으로 분리된 두개의 전극으로 구성되어 있다. 전극은 물로 가득찬 탱크안에 담겨져 있고 물 저항에 따라 전극 표면으로부터 최적의 위치에서 주물을 위치시킨다. 콘덴서 터미널의 전압이 임계값에 도달하면, 방전기 중의 하나는 공기에서, 또 하나는 물의 공간(작업전극-주물)에서 방전한다. 이 때에는 물 내부에 고속의 충격파가 발생하며, 이때 충격파가 주물에 가해지면서 주물을 청정시키는 작업이 수행된다.



1. High Voltage Transformer
2. Reactor
3. Discharger
4. Control System
5. Control System
6. Discharge
7. Impules High Voltage Generator

Fig. 1 Casting Cleaning System

2-2. Modelling

고전압에 의한 수중방전시 주물사에 미치는 가장 중요한 변수인 압력의 분포를 살펴보기 위하여 Fig. 1과 같이 주물청정시스템의 내부구조를 단순화시켰다. 주물청정시스템의 실제구조는 직사각형의 수조형태이다. 그러나 국부적인 압력이나 속도에는 영향을 주지만 전체적인 유동축면에서는 그 영향을 무시할 수 있는 어느 점에서도 유입부가 없는 수직 원통의 모양으로 Modelling 하였다. 이와 같이 Modelling하면 유동의 형성조건이 중심축에 대해 대칭이 되므로 2차원 R-Z원통 좌표계를 사용하였다.

계산에 사용된 주물청정시스템의 크기는 아래와 같다.

내부 반지름 $2.0 \times 10^2 \text{m}$
 내부 높이 $4.0 \times 10^2 \text{m}$

2-3. 격자 형성

본 수치해석에서 채택한 주물청정시스템의 유동영역에 대한 격자망 분포 및 전극봉과 주물품, 경계격자를 포함하여 22×42 의 격자망으로 구성하여 모든 축방향으로 동일한 R-Z 평면 격자를 가지며, 모든 축 방향으로 동일한 R-Z 평면 격자를 가지며 경계조건이 부가될 수 있도록 계산격자(Computing cell) 주위에 가상격자(Boundary cell)를 두었다.

한편, cell 하나의 반경방향(R)과 축방향(Z)의 크기는 플라즈마 발광선의 직경이 0.1 mm - 2.0 mm 임을 고려하여 그 중간값인 1 mm로 택하였다.

2-4. 계면전달조건

계면에서의 질량전달은 기체분자 운동론으로부터 계산될 수 있으며 평형상태에서 증기분자가 액상 표면에 충돌하는 충돌율(W_D)은 다음과 같다.

$$W_D = \frac{PA}{\sqrt{2\pi RT}} \quad (1)$$

충돌율당 액상속으로 흡수되는 확률을 α 로 표현하면 응축율(J_c)은 다음과 같다.

$$J_c = \alpha W_D(P) \quad (2)$$

액상온도 T_1 에서 계의 평형상태를 가정하면 증발율(J_e)은 다음과 같다.

$$J_e = \alpha W_D(P^*) \quad (3)$$

여기서 P^* 는 액상온도 T_1 에서의 포화압력이다. 따라서 계면을 포함하는 격자내에서 단위 부피당의 응축 및 증발율은

$$J_c = \alpha \alpha \frac{Pv}{\sqrt{2\pi RT}} \quad (4)$$

$$J_e = \alpha \alpha \frac{P^*}{\sqrt{2\pi RT_1}} \quad (5)$$

로 표시된다. 응축계수 α 의 값으로는 0.04를 적용하였다.

2-5. 초기 및 경계조건

수증방전시 기포가 발생하는 초기조건⁽²⁾과 초기방전시의 기포의 형태를 프라즈마의 발광선^(6,12)의 형태로 가정하여 주물의 형상과 수위의 높이에 따라 아래와 같은 경우에 대해 수행하였다.

초기방전시의 기포의 형태를 프라즈마의 발광선의 형태로 본 경우

(1) 주물이 반경방향으로 놓인 경우

유체의 온도는 298K

단, 방전이 일어나는 영역 $R = 5.0 \times 10^{-4}$ m, $Z = 5.5 \times 10^{-3} \sim 8.55 \times 10^{-3}$ m(Node I = 2, J = 7-10)에서의 유체의 온도는 3273K

유체의 압력은 대기압

단, 방전이 일어나는 영역 $R = 5.0 \times 10^{-4}$ m, $Z = 5.5 \times 10^{-3} \sim 8.55 \times 10^{-3}$ m(Node I = 2, J = 7-10)에서의 유

체의 압력은 5000MPa

한편, 방전이 일어나는 영역에서는 고온, 고압의 상태이므로 $R = 5.0 \times 10^{-4}$ m, $Z = 5.5 \times 10^{-3} \sim 8.55 \times 10^{-3}$ m(Node I = 2, J = 7-10)에서의 Void fraction = 1.0

(2) 주물이 축방향으로 놓인 경우

유체의 온도는 298K

단, 방전이 일어나는 영역 $R = 5.0 \times 10^{-4}$ m, $Z = 8.5 \times 10^{-3} \sim 11.5 \times 10^{-3}$ m(Node I=2, J=10-13)에서의 유체의 온도는 3273K

유체의 압력은 대기압

단, 방전이 일어나는 영역 $R = 5.0 \times 10^{-4}$ m, $Z = 8.5 \times 10^{-3} \sim 11.5 \times 10^{-3}$ m(Node I = 2, J = 10-13)에서의 유체의 압력은 5000MPa

한편, 방전이 일어나는 영역에서는 고온, 고압의 상태이므로 $R = 5.0 \times 10^{-4}$ m, $Z = 8.5 \times 10^{-3} \sim 11.5 \times 10^{-3}$ m(Node I = 2, J = 10-13)에서의 Void fraction = 1.0

(3) 수위의 높이

1. $Z = 2.4 \times 10^{-2}$ m(Node J=24)

2. $Z = 2.9 \times 10^{-2}$ m(Node J=29)

3. $Z = 3.4 \times 10^{-2}$ m(Node J=34)

한편, 프라즈마로 가정한 영역에서의 내부에너지는 Pr (Reduced pressure)과 Tr (Reduced temperature)로써, 일반화된 엔탈피 이탈선도⁽¹³⁾로부터 $Pr = 25$ 인 지점에서부터 선형적이라는 가정하에 1차 직선으로 Curve fitting 하여 구한 엔탈피로부터 얻었다. 그 외의 초기값으로 주어지는 물성치는 Steam의 물성표⁽¹⁴⁾로부터 온도에 따라 선형적으로 증가한다는 가정하에 보간 하였다.

2-6. 표시 입자 개념

주물청정시스템 내부는 거시적으로 액상과 기상이 분리된 분리유동이라 볼 수 있다. 액상에 의해 점유된 격자망에 질량이 없는 표시입자⁽¹⁵⁾를 도입함으로써 액상의 유동을 가시화할 수 있다. 그러나 표시입자가 갖는 근본 목적은 액상과 기상의 경계면을 형상화 하는데 있다. 각상에 대한 평형표시 입자는 방정식들을 풀어 모든 격자점에서 속도가 결정된후에 격자안에 위치한 표시입자는 입자와 가장 가까운 반경 방향속도 및 축방향 속도쌍의 가중 평균값에 따라 입자 자체가 갖는 속도가

계산된다. K번째 표시 입자의 반경 방향 속도(u_k) 및 축 방향 속도 (v_k)에 관한 식은 다음과 같다.

$$u_k = A_2 \times u(ID-1, JR+1) + A_1 \times u(ID, JR+1) + A_3 \times u(ID-1, JR) + A_4 \times u(ID, JR) \quad (6)$$

$$v_k = A_2 \times v(IR, JD) + A_1 \times v(IR, 1, JD) + A_3 \times v(IR, JD-1) + A_4 \times v(IR+1, JD-1) \quad (7)$$

Fig. 2에서 보는 바와 같이 속도 u_k 를 결정하는데 있어 기준격자(Reference cell)는 하부 반경방향 속도 쌍사이에 놓인 빗금친 부분이 되고 2개의 반경방향 속도쌍을 선택하는 기준이 된다. 이와 유사하게 속도 v_k 를 결정하는 경우에는 좌측 축방향 속도쌍사이에 놓인 부분이 기준 격자가 되고 2개의 축방향 속도쌍을 선택하는 기준이 된다. 도너격자(Donor Cell)는 입자를 포함하는 격자이다. 입자와 선택된 4개의 속도사이의 거리 및 입자의 격자점유 위치에 따라 도너격자는 4개로 양분되며 이에 따라 각 속도가 입자의 속도에 미치는 영향은 달라지게 된다. 여기서 기준격자의 위치는 (IR, JR)로 표시되며 도너격자는 (ID, JD)로 표시된다. 식에서 A_1, A_2, A_3, A_4 는 도너격자를 4개로 분할한 면적이다. 이와 같이 계산된 입자의 속도는 입자가 유동에 따라 이동한 위치를 계산하는데 이용되며 관련된 식은 다음과 같다.

$$\frac{r_k n + 1}{\delta r} = \frac{r_k n}{\delta r} + u_k \frac{\delta t}{\delta r} \quad (8)$$

$$\frac{z_k n + 1}{\delta r} = \frac{z_k n}{\delta r} + v_k \frac{\delta t}{\delta r} \quad (9)$$

3. 결과 및 고찰

3-1. 표시입자 분포

Fig. 3은 주물이 반경방향(Fig. 3(a)), 축방향(Fig. 3(b))으로 놓인 경우에 있어서 수위의 변화에 따른 고전압방전에 의한 유동의 형상과 계면의 구조 변화가 표시입자에 의해 도시된 것이다. 유동계는 22×42 의 계산격자(Cell)로 구성되어 있고, 한 격자의 크기는 $0.1 \times 10^{-2} \text{m} \times 0.1 \times 10^{-2} \text{m}$ 이다. 한편, 주계면과 극부 계면의 형상을 살펴보기 위하여 보이드율이 1.0인 격자 주위에는 4×4 의 표시입자를 도입하였으며, 나머지 전극봉의 위치와 주물의 위치를 제외한 모든 격자에는 1

$\times 1$ 의 표시 입자를 도입하였다.

100 μs 에서의 극부 계면에서의 표시입자의 분포를 살펴보면 반경방향으로 보다는 상대적으로 축방향으로 널리 분포되어 있음을 볼 수 있다. 그 이유로는 비압축적 유체인 물로 가득 차 있는 반경방향(Radial direction)으로의 유체의 유동 보다는 상대적으로 아무런 장애물이 없다고 볼수있는 압축성 유체의 자유표면을 포함하고 있는 축방향(Axial direction)으로의 유동이 더욱 활발하기 때문이다. 따라서, 주계면에서의 표시입자 분포는 축 방향으로의 유동으로 인한 수위의 변화를 나타내고 있다.

3.2 압력 분포

Fig. 4는 100 μs 까지의 수위의 변화에 따른 반경방향으로 놓여진 주물에서의 압력의 분포를 도시한 것이다. 유입 및 유출이 없는 주물청정시스템 내에서의 고전압으로 방전이 일어나는 영역에서 가장 높은 압력을 갖는다. 초기 방전이 일어나는 시점에서의 압력분포는 수위의 변화에 따른 압력의 크기가 차이는 있지만 전반적인 현상은 고전압 방전이 일어남과 동시에 주물에 압력이 전달되면서 이에 따른 압력반사가 발생함을 알 수 있다. 이는 압축성 유체로부터 비압축성유체로 압력이 전파되는 과정에서 아무런 장애물이 없는 반경 방향으로의 압력의 전파는 자유롭지만 축아래 방향으로는 주물이라는 고체의 장애물로 인해 압력의 전파가 용이하지 못하기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 축아래 방향으로는 압력의 전파과정중 전파된 압력의 일부는 주물의 청정에 이용되고, 일부의 압력파는 반사가 되어 주위의 유체의 압력보다는 낮은 또 다른 압력파를 형성함을 알 수 있다. 100 μs 에서의 압력분포를 보면 이러한 현상으로 인해 주물이 위치한 지점에서의 뒷방향으로 주물에 의해 반사된 새로운 압력파가 형성되었음을 알 수 있으며, 반경방향으로는 압력이 감소되면서 최대 압력파가 벽면까지 계속 전파됨을 알수있다.

한편, Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이 고전압의 방전으로 인한 주물의 청정에 이용되어지는 압력은 약 50 μs 까지 인 것으로 추측되어지며 Fig. 5(b)의 F-t선도로부터 이때에 주물표면 전체에 가해지는 충격량을 구할 수 있다.

또한 수위의 변화에 의한 압력의 분포는 수위가 높아질수록 주물에 가해지는 압력이 증가함을 알수있다. 이는 초기 고전압 방전시의 압력을 감쇄시키는 역할을 한

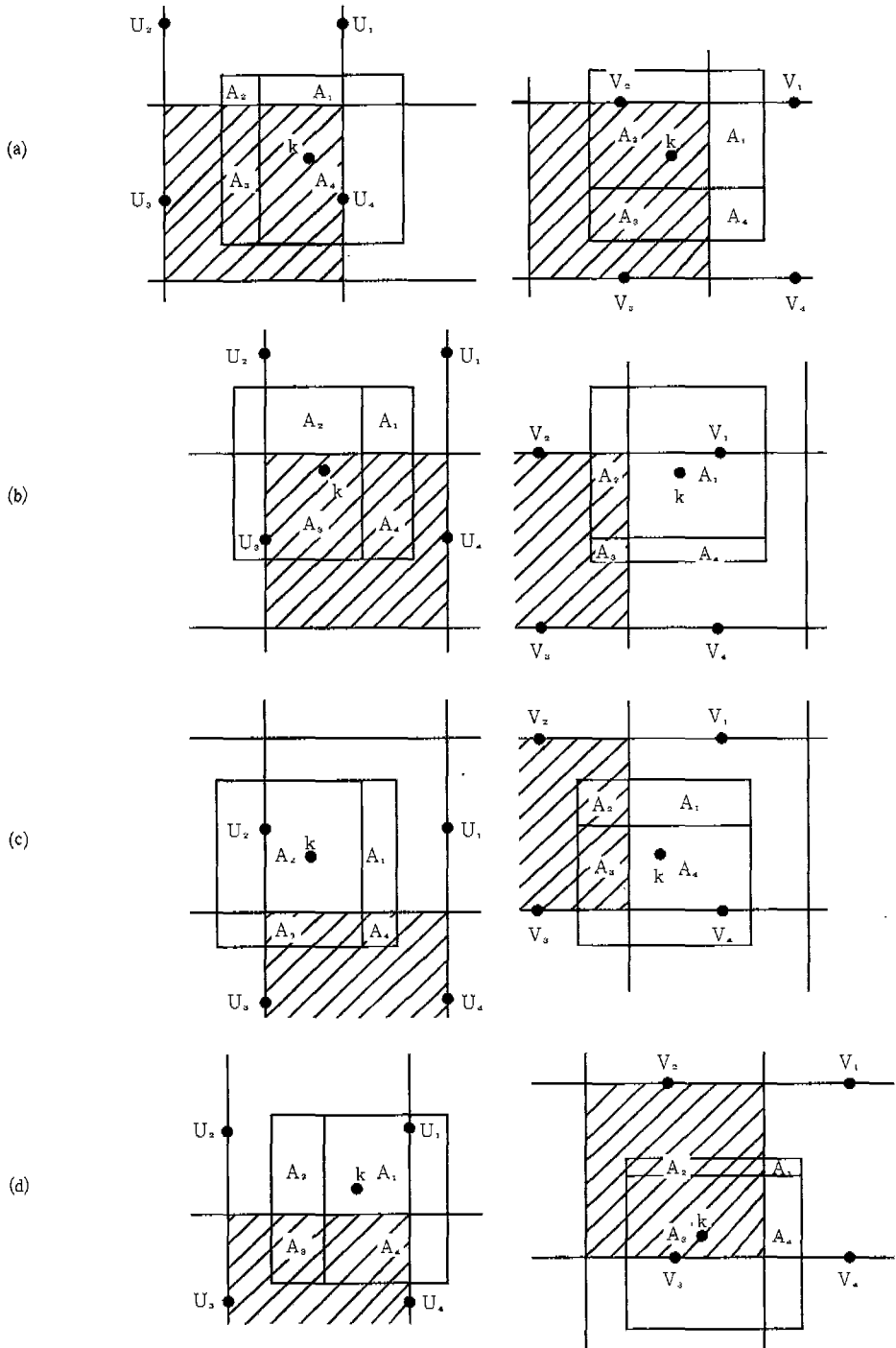
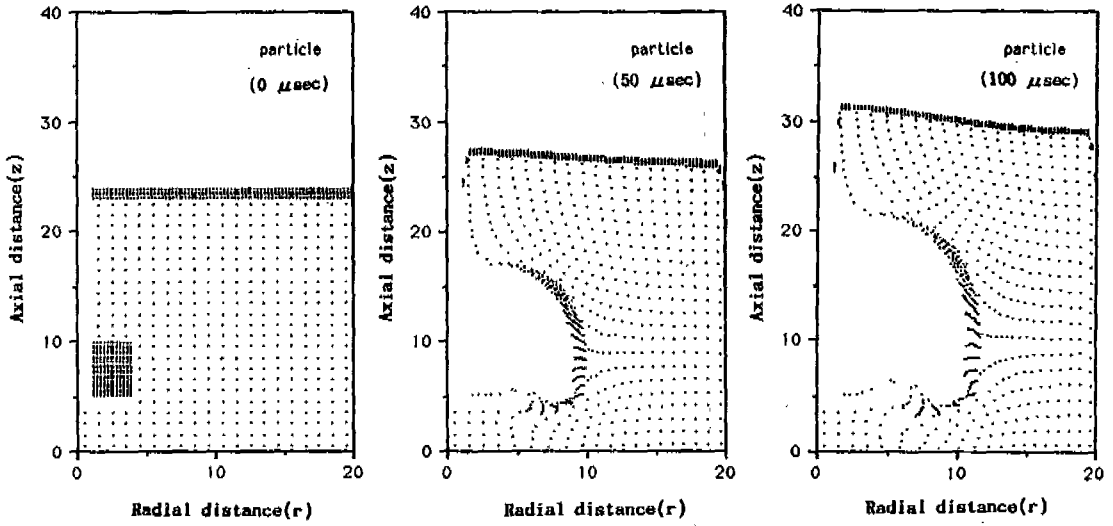
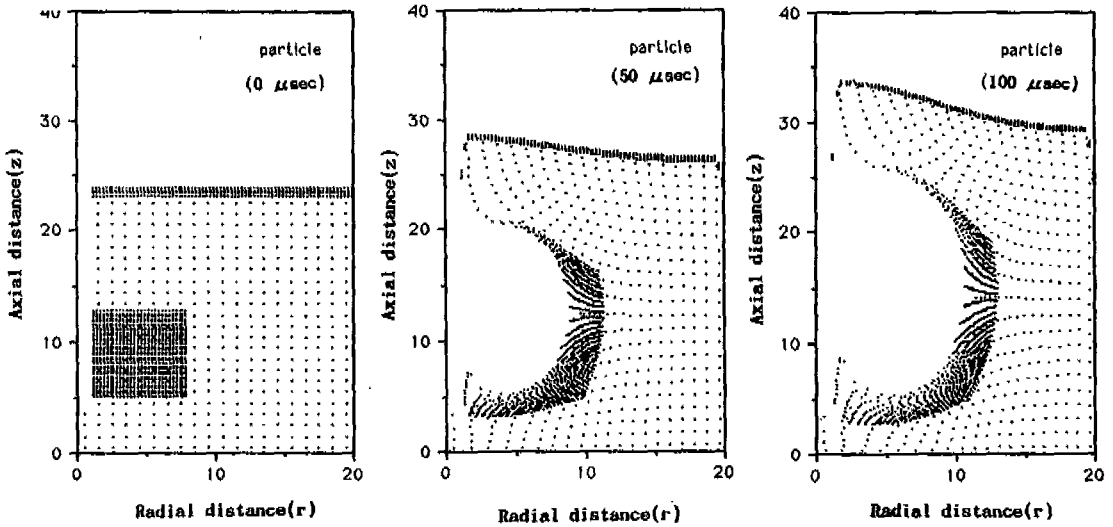


Fig. 2 Area-Velocity Weighting Scheme for U_k and V_k



(a) Casting located in the radial direction



(b) Casting located in the axial direction

Fig. 3 Distribution of marker particle ($Z = 2.4 \times 10^{-2}$ m)

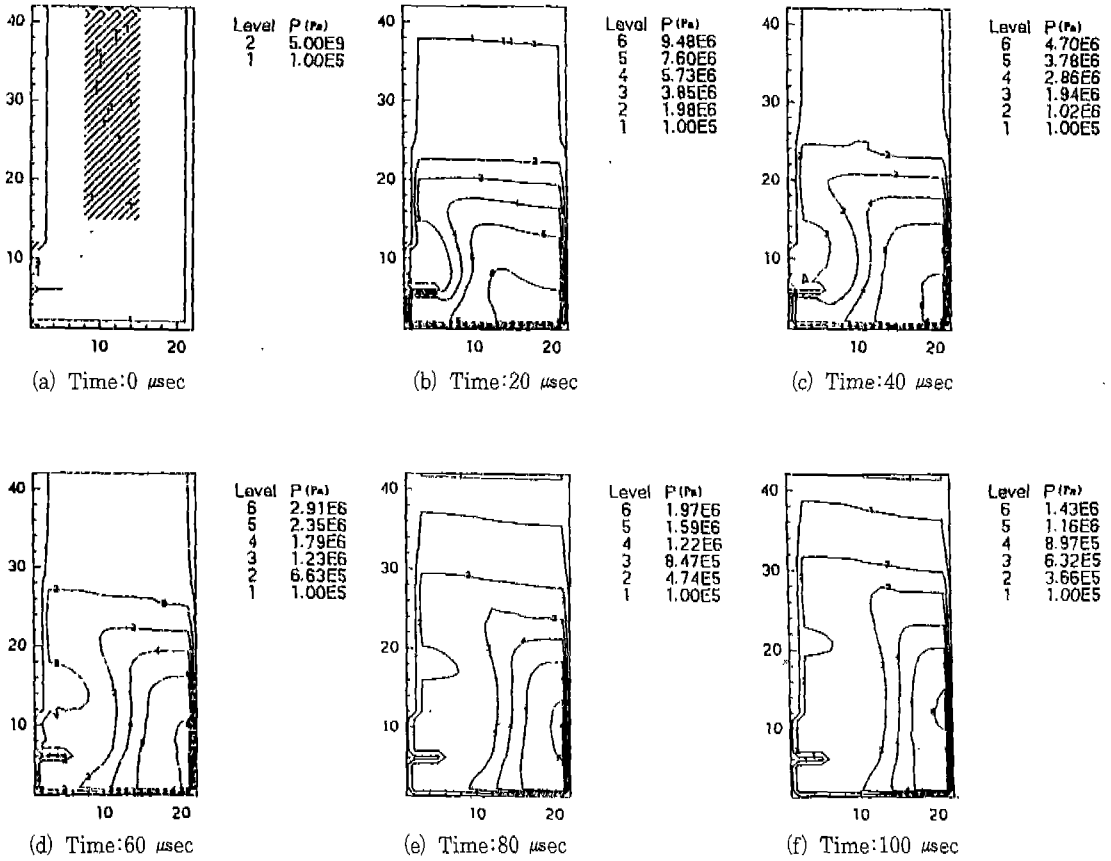


Fig. 4 Pressure-distribution of casting located in the radial direction ($Z = 2.4 \times 10^{-2}$ m)

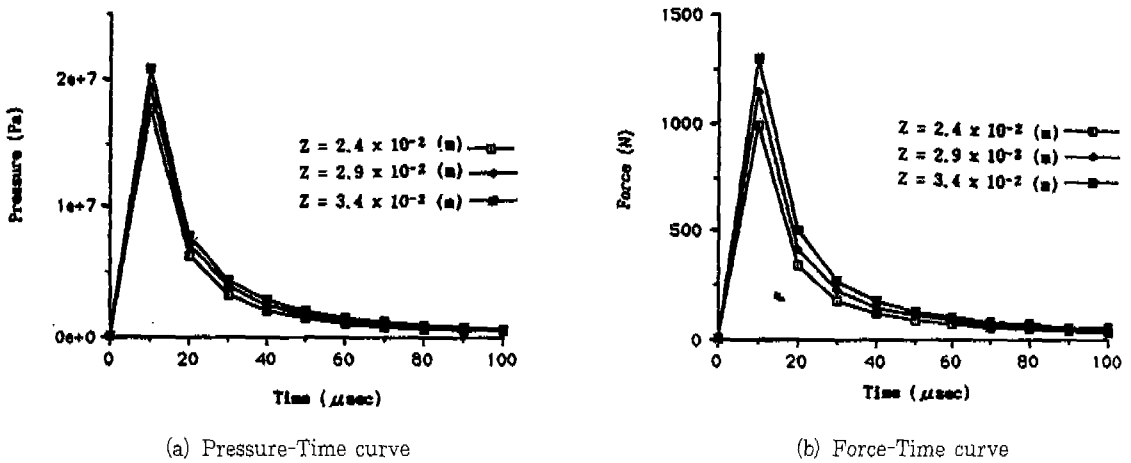


Fig. 5 Casting located in the radial direction

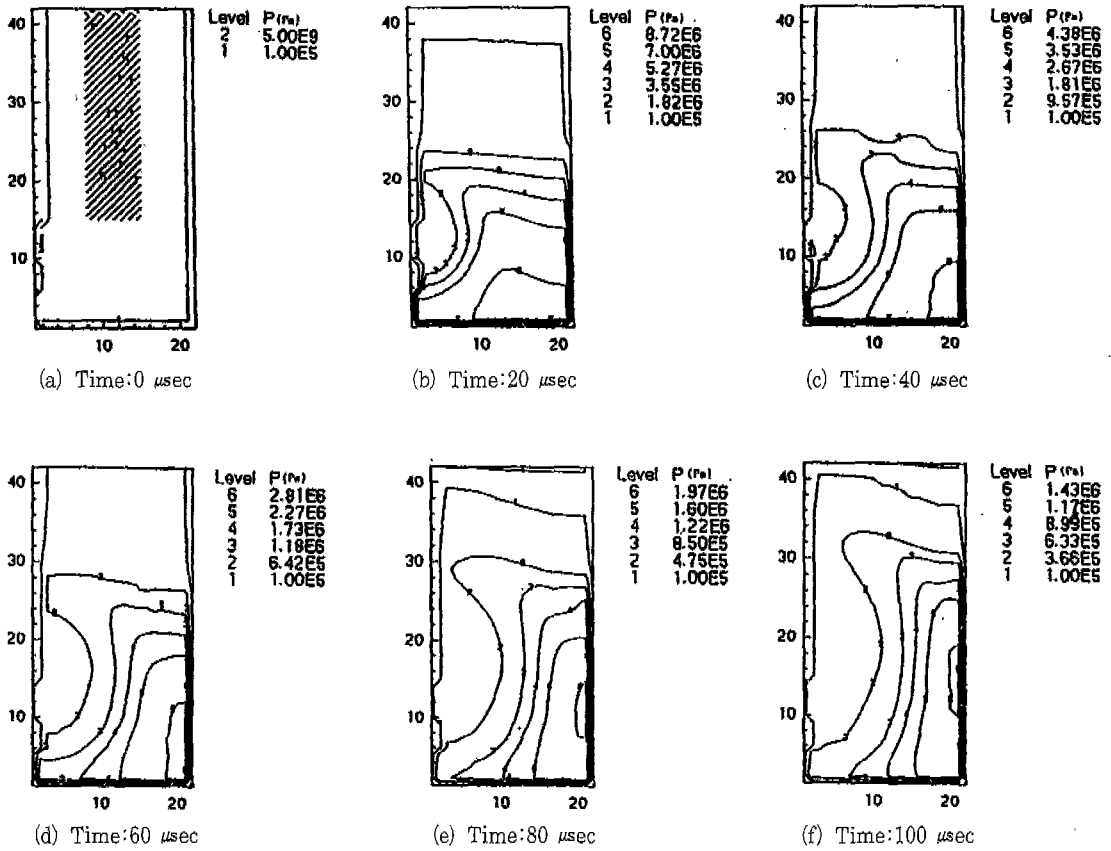


Fig. 6 Marker particle-distribution of casting located in the axial direction ($Z = 2.4 \times 10^{-2}$ m)

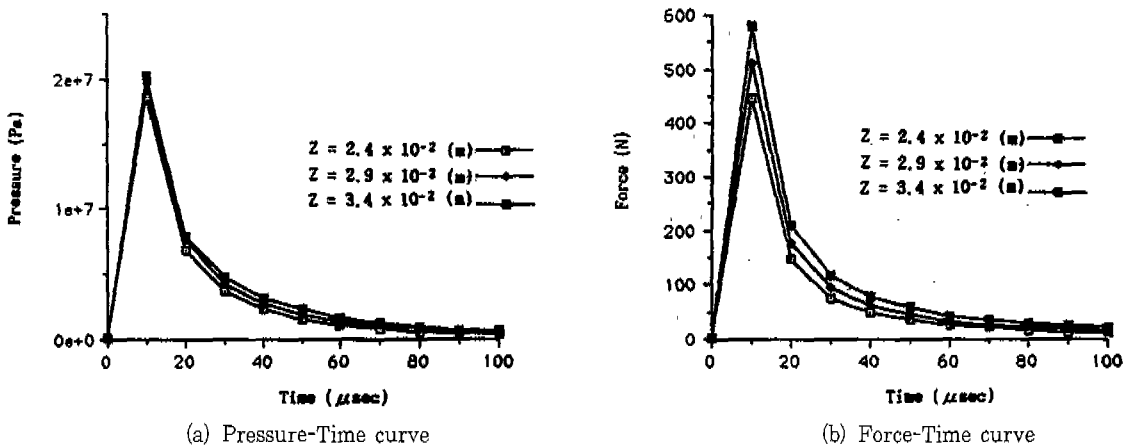


Fig. 7 Casting located in the axial direction

다고 볼 수 있는 자유 표면이 초기의 최대압력 발생지 점으로부터 멀리 떨어져 있기 때문이다.

주물이 축방향으로 놓여진 경우의 수위의 변화에 따른 압력의 분포는 Fig. 6에 나타나 있다. 주물이 축방향으로 놓여진 경우의 압력분포도 주물이 반경방향으로 놓여진 경우의 압력분포와 거의 비슷하나 압력이 반사를 일으킬 수 있는 주물의 표면적이 반경방향으로 놓여진 경우보다 적은 이유로 인해 압력파의 형성이 대칭축을 중심으로 거의 반원인 압력등고선을 형성함을 알 수 있다. 시간이 80 μ s, 100 μ s에 와서는 벽면을 포함하고 있는 반경방향으로 보다는 자유표면을 포함하고 있는 축방향으로의 장축인 반타원의 형태를 취함을 알 수 있다. 주물이 축방향으로 놓여진 경우에도 수위가 높아짐에 따라 압력이 증가함을 나타내고 있다.

Fig. 7(a)는 시간의 변화에 따른 주물에 가해지는 최대압력을 나타내며 Fig. 7(b)는 주물표면 전체에 가해지는 충격량을 나타내고 있다. 주물이 반경방향으로 놓인 경우와 축방향으로 놓인 경우의 각 시간에서의 최대압력을 비교해보면 거의 비슷하나, 주물의 청정에 이용되어지는 시간으로 예측되어지는 50 μ s까지는 반경방향으로 놓여진 경우보다 축방향으로 놓여진 경우에 약간 더 높게 나타났으며, 그 이후의 시간부터는 반경방향으로 놓여진 경우에 가해지는 압력이 더 크게 나타나고 있다.

4. 결 론

수증방전에 의하여 발생하는 압력분포를 2유체모델을 사용하여 2차원적으로 해석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 매 시간 step마다 계산된 속도장을 따라 표시입자가 이동함으로써 계의 계면구조 예측이 가능하였다.
2. 수위가 높아짐에 따라 주물에 가해지는 최대압력은 증가하였다. 계산영역, 내부 반지름 2.0×10^{-2} m, 내부 높이 4.0×10^{-2} m에서 축방향으로 수위의 높이가 0.5×10^{-2} m 증가하였을 때 주물에 가해지는 최대압력은 수위증가전의 최대압력에 비해 약 1.12배가 증가하였다.
3. 주물이 반경 방향으로 놓인 경우와 축 방향으로 놓인 경우에 있어서 주물에 가해지는 최대압력은 주물의 청정에 이용되어지는 시간으로 예측 되어지는 50 μ s까지는 축방향으로 놓인 경우에 있어서 더 크게 산출되

었으며, 그 이후의 시간부터는 최대 압력이 반경방향으로 놓인 경우에 있어서 더 높게 산출 되었다.

참고문헌

1. 강도열, 서국철, 신편고전압 공학, 동명사, pp.31,68,74,119, 1990
2. 방전 및 고전압공학연구회, "워크 샵 교재", pp.149-152, 1983
3. Gerdeman, D. A., "Arc Plasma Technology in Materials Science", Springer-Verlag, Press, New York, pp.4-6, 80, 93, 1972
4. Robert, H. Cole, "Underwater Explosion", Princeton Univ, Press, pp.3-4, 1948
5. 根岸秀明, 日本의 고에너지 속도가공기술과 연구동향, 대한기계학회지, Vol.31, No.4, pp.360-387, 1991
6. 김종역 등 "전기수압식 주물청정장치의 설계 및 제작기술", 상공부보고서, pp.10-16, 1991
7. F.H. Harlow, and A. A. Amsden, "Numerical Calculation of Multiphase Fluid Flow" J. Cowp. Phys. 17, 19, 1975
8. W. C. Rivard, and M. D. Torrey, "K-FIX: A Computer program for Transient Two-Dimensional, Two-Fluid Flow, "LANUREG 633, 1979
9. A. A. Amsden, and F. H. Harlow, "The SMAC Method: A Numerical Technique for Calculating Incompressible Fluid Flows", LA-4370, TID-4500, 1970
10. J. R. T. ravis, F. H. Harlow, and A. A. Amsden, "Numerical Calculation of Two-Phase Flows", Los Alamos Scientific Laboratory report LA-5492-MS, 1975
11. M. Ishii, "Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow", Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricite de France, Eyrolles, Paris, 1975
12. 김양술, 수증방전에 의한 주물청정장치의 개발에 관한 연구, 박사논문, 홍익대학교, pp.15-20, 1992
13. Gorden J. Van Wylen, Richard E. Sontag,

Advanced Industrial Thermodynamics,
Wiley, pp.731-732, 1984

14. Jamss R. Welty, "Engineering Heat Trans-

fer", Department of Mechanical Engineer-
ing, Oregon State University, Corvallis,
pp.423, 1978