

몰드형 건식 계기용 변압기 제작을 위한 수치 충전 해석 연구

김무선^{1*}, 장동욱², 김승모³

¹한국철도기술연구원 광역도시철도융합연구실, ²한국철도기술연구원 무선급전연구팀, ³한국기술교육대학교 기계공학부

Numerical Analysis of Resin Filling Process for a Molded Dry-type Potential Transformer

Moosun Kim^{1*}, Dong Uk Jang², Seung Mo Kim³

¹Metropolitan Transit Convergence Research Division, Korea Railroad Research Institute

²Wireless Power Transfer System Research Team, Korea Railroad Research Institute

³Korea University of Technology and Education, School of Mechanical Engineering

요약 철도 차량에 쓰이는 기존 유입식 형태의 계기용 변압기는 장치 내부에 절연유가 충전된 형태이므로, 차량 운행 중에 내부 압력이 상승할 수 있는 가능성이 있으며, 그에 따른 폭발위험성이 존재한다. 따라서 폭발 방지를 위해 몰드형 건식 계기용 변압기를 개발 중에 있다. 몰드형 건식 계기용 변압기 개발시 주의 하여야 할 점은 몰드를 구성하는 절연용 에폭시 수지를 주입할 때 권선 코일이 감겨진 코어 주변에 기공이 없어야 한다는 것이다. 이는 몰드 내부의 기공에서 스파크 등의 발생 위험이 있기 때문이다. 몰드 내의 기공 발생 요인으로서는, 수치 내에 미세 기공(micro void)이 잔재되어 있는 경우와, 성형 중 합침 구조물의 형태에 따라서 대형 기공(macro void)이 발생할 수 있는 점 등이다. 현재 개발 중인 코어는 변압기 성능 향상을 위해 중공(cavity)이 존재하는 형태이며 점도가 높은 에폭시 주입시 중공 내부에 대형 기공이 갇힐 위험이 있다. 따라서 이번 연구에서는, 몰드 내부에 발생할 수 있는 대형 기공의 형성 과정을 이해하고, 기공 형성 요인을 제거할 수 있는 방안으로, 개선된 성형 조건 적용시 기공 형성 결과를 확인하기 위해, 몰드 충전 과정을 VOF기법을 적용한 자유 표면 유동의 수치해석을 통하여 확인하였다.

Abstract Current oil-type potential transformers for trains are filled with insulating oil, which could have problems like explosions due to rising inner pressure during train operation. Therefore, mold and dry-type potential transformers are being developed to prevent explosions. One problem in manufacturing mold-type transformers is preventing void formation around the coiled core inside the mold during epoxy filling, which could cause an electrical spark. Micro voids can remain in the resin after filling, and macro voids can occur due to the structure shape. A transformer that is being developed has a cavity at the junction of the core and the coil for better performance, and when highly viscous epoxy flows inside the cavity channel, macro voids can form inside it. Therefore, in this study, the free-surface flow of the mold filling procedure was analyzed numerically by applying the VOF method. The results were used to understand the phenomena of void formation inside the cavity and to modify the process conditions to reduce voids.

Keywords : Dry-type transformer, Epoxy, Mold filling, VOF, Void

1. 서론

철도 차량 계기용 변압기 중 교류 급전 시스템의 전동

차에서 사용되고 있는 유입식 계기용 변압기는 현재 20년이 넘게 사용되고 있으며 내구연한 도래로 인하여 변압기 사고가 빈번히 발생하고 있다. 이로 인하여 차량 운

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었음

*Corresponding Author : Moosun Kim(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5546 email: mskim@krrri.re.kr

Received October 25, 2016

Revised November 22, 2016

Accepted December 8, 2016

Published December 31, 2016

행 지연 등의 문제가 발생하여, 승객의 열차 이용 불편과 함께, 운영사의 유지보수 비용 등도 증가하는 문제점이 있다. 기존에 사용되고 있는 유입식 계기용 변압기의 하우징은 자기계 재질로 구성되어 있고, 그 내부에 절연유로 채워져 있는 형태를 가지는데, 내부에서 절연열화 및 절연파괴 등으로 과전류가 흐르는 경우, 내부 압력 상승으로 인해 폭발할 가능성이 있으며, 이 경우 주변으로 외부 절연물이 비산되어 전차선로 주변의 건물 또는 사람들에 2차 피해를 줄 수 있는 가능성이 있다. 따라서 주기적인 절연유 유지보수가 필요한 실정이다. 절연유를 이용한 기존 계기용 변압기의 문제점을 해결하기 위해, 유입식 계기용 변압기를 절연유가 없는 몰드형 건식 계기용 변압기로 교체하면 방압 기능이 탁월하여 폭발의 위험성이 적어지게 된다.

몰드형 계기용 변압기는 1946년에 유럽에서 처음 개발되었고 일본에서는 1952년에 11[kV]/110[V] 단상 200[VA] 급 계기용 변압기가 개발되어 실용화된 이래 에폭시 성형 또는 배합기술의 발달에 의해서 전기절연재료로서 우수한 전기적 특성 및 기계적 강도가 뛰어나 기존의 유입식 계기용 변압기를 대신하여 사용이 급격하게 증가하였다.[1] 특히 에폭시 수지는 적당한 경화제 및 경화조건, 첨가제에 의해 다양한 물리적, 화학적 성질을 지닌 재료로 만들 수 있어 전기적으로 회전기, 변압기 및 변성 기류의 절연과 부식 및 절연판 등의 전기 절연재료로 널리 쓰이고 있다.[2,3]

몰드형 계기용 변압기는 에폭시 수지를 진공 주형함으로써 우수한 기계적 강도와 절연성을 유지하게 된다. 진공 주형의 이유는 변압기 작동 중 아크 발생 등의 요인이 될 수 있는 에폭시 수지내의 기포를 충분히 제거하기 위함이다. 절연용 에폭시 수지는 상대적으로 점도가 높아 제품 제작을 위해 예비과정으로 점도를 낮추기 위한 예열과 재료 내 기포 제거를 위한 탈포 과정을 거치게 된다. 이 과정을 거쳐 주형을 하더라도 함침되는 구조물의 형상 특성에 의해 대형기공(macro void)이 형성될 수 있다. 현재 철도기술연구원에서 개발이 진행 중인 몰드형 건식 계기용 변압기는 철심 코일과 클램프가 상호 결합되어 있는 형태인데, 안정적인 권선 제작을 위해 단면형태가 원형인 철심 코일과 사각형인 U자형 클램프가 결합되어 있으며, 이로 인해 몰드 내부에 장착되는 코어 중앙부에 중공(cavity)이 존재하게 된다. 제품 제작을 위해 수지 충진을 위한 몰드 내에 코어를 장착하게 되고,

일정 압력으로 절연용 에폭시 수지를 주입하고 토출구를 진공압으로 구성하는 방법으로 제작을 진행하는데, 중공이 존재하는 코어의 형태상 대형 기공이 제품 내에 갈릴 수 있는 가능성이 있다. 충전 중 발생하는 대형 기공의 발생 위치와 특성 등을 예측할 수 있는 방법으로는 충전 과정을 모사할 수 있는 유동 해석 방법을 들 수 있다. 수지 충전 과정은 수지의 자유 표면 유동 현상으로 고려할 수 있는데, 자유 표면 유동 해석을 위한 방법으로 대표적인 VOF 방법을 활용할 수 있다. 관련된 주요 연구로, Hirt[4]은 체적분율에 대한 전달 방정식을 제안하였으며, Shin[5]은 격자계 특성에 상관없이 적용될 수 있는 선택적 VOF 방법을 제안하였고 Kim[6, 7]은 Baby cell을 활용한 VOF 방법을 제안하였다. VOF 방법을 활용한 응용연구로는 An[8]은 고질수형 양변기 모델 개발을 위한 방법으로, 그리고 Kim[9]은 V-groove 패턴의 마이크로 사출성형의 충전 현상 해석을 위해 VOF 방법을 적용하였다. 이상과 같이 VOF 방법은 자유표면 유동을 포함한 다양한 유동현상에 효과적으로 적용할 수 있는 방법이다.

따라서 이번 연구에서는, 제품 제작시 발생할 수 있는 대형기공 형성을 최대한 방지하기 위해, VOF 방법 적용 자유 표면 유동 해석을 수행하여, 그로부터 에폭시 수지 주입시 변압기 코어 형태에 의해 발생할 수 있는 기공 형성 과정을 이해하고, 수정된 공정 조건 적용시 기공 형성 여부를 확인하고자 한다.

2. 본론

2.1 몰드형 건식 변압기 구성

서론에서 언급한 바와 같이 몰드형 건식 계기용 변압기는 유입식 형태의 변압기에 대비하여 사고시 폭발 위험성이 적으며, 몰드를 구성하는 에폭시 수지는 난연성과 자기소화성을 가지고 있어, 안정적인 작동이 가능하다. 현재 개발 중인 몰드형 건식 변압기 중 수지가 충전되는 절연용 에폭시 몰드와 내부 코어의 구성은 Fig.1과 같은 형태를 가진다.

Fig.1 에서 (a)는 외부 하우징으로서 에폭시로 충전되는 몰드이며, (b)는 하우징 내부에 들어가는 권선 코일과 U자형 클램프가 결합되어 있는 내부 코어 형상이다. Fig.1 (b)의 횡단면에서 알 수 있듯이, 내부 코어에서 권

선 코일의 원형 단면 중앙에 사각 단면을 가진 U 자형 클램프가 삽입되고 삽입된 연결 부위의 위아래로 중공 부분이 형성되어 이 부분을 에폭시 충전시 채우게 된다.

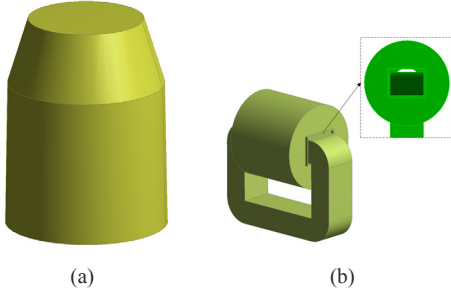


Fig. 1. (a) an epoxy mold and (b) a core of the molded dry-type transformer

2.2 자유 표면 유동 해석 기법

비압축성 유체의 자유 표면 유동은 고분자 수치 충전 해석 등의 응용 분야에 적용할 수 있는 현상이다. 이번 몰드형 건식 계기용 변압기 제작에 있어서도, 변압기 몰드 형태를 고분자 수지가 충전하는 과정으로 고려한다. 충전 과정은 시간이 흐르면서 유체의 자유 표면 위치가 변하는 현상으로 볼 수 있다. 이렇게 이동하는 자유 표면을 추적하는 방법으로는 계산 영역의 변화에 따라 매 계산시간마다 새롭게 격자를 변형시키는 이동 격자(moving grid)를 사용하는 방법과 금형 내부와 같이 채워지는 영역에 미리 격자를 형성하여 자유 표면 경계의 이동을 처리하게 되는 고정격자(fixed grid) 방법이 있다. 본 연구에서는 몰드 내부의 자유 표면 유동 해석을 위해 고정격자 방법을 적용하였다. 고정격자 방법에는 대표적으로 Hirt 와 Nichols가 제안한 VOF(Volume of Fluid) 방법[4]이 있는데, 이는 임의의 셀, 혹은 검사 체적에서 관심 유체가 차지하는 비율(체적 비율 F)을 정의하고, 식(1)과 같이 그 체적 비율에 대한 전달 방정식을 풀어서 시간에 따른 영역 변화를 표현하는 방법이다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (uF) = 0 \quad (1)$$

이 때 u 는 유체 속도를 나타낸다.

본 연구에서는 고정 격자 방법 중에서 VOF 방법을 적용하였다. 해석 대상이 되는 유체가 물성이 일정하면서 층류유동의 특성을 가진다고 가정할 때, 비압축성 유체의 지배방정식인 연속방정식과 운동량 방정식은 다음

과 같다.

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau + f \quad (3)$$

$$\tau = \mu(\nabla u + \nabla^T u) \quad (4)$$

위 식에서 ρ 와 τ 는 유체 밀도와 점성 응력을, μ 는 점도, P 와 f 는 각각 압력과 체적력을 나타낸다.

위와 같은 VOF 방법을 활용한 계산과정을 간단하게 정리하면, 먼저 고정 격자계를 구성한 후, 유한 요소법을 활용하여 식 (2),(3),(4)을 풀어 속도 값을 계산한다. 다음으로 식 (1)로부터 체적 플럭스를 계산한 후 새로운 충전 비율을 구하고 그 값을 바탕으로 위 계산 과정을 반복하게 된다.

2.3 수치 해석 조건

VOF 방법을 적용한 몰드 내 수치 충전 과정의 자유 표면 유동 현상 해석을 위해, 해석하고자 하는 영역을 Fig.2와 같이 모델링하였다.

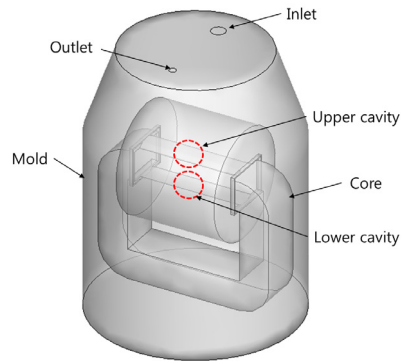


Fig. 2. Mold modeling for numerical analysis

먼저 해석의 효율성을 높이고자 모델링을 단순화하기 위하여 몰드 내에서 코어를 지지하는 하부 영역의 지지대를 생략하였다. 이는 지지대가 계산영역에 대한 복잡성을 증가시키지만, 수치충전 현상에 미치는 영향은 크지 않기 때문이다. 다음으로 원형 철심 코어를 표면이 매끈한 실린더 형태로 모델링하였다. 실제 원형 코어에는 철심과 절연지 등이 반복되어 적층되어 있는 형태이기 때문에 대형기공보다는 수치에서 미처 탈포 되지 않았거나 또는 철심과 절연지의 미세 간극에 의해 미세기공이

발생할 수 있다. 이는 본 연구의 관심 사항인 대형기공과는 다른 요인에 기인하기 때문에, 이번 연구에서는 이에 대한 영향을 무시하였다. 마지막으로 몰드 체적에서 내부 고체 코어의 체적을 제거하여 순수 유동 해석 영역만 추출하여 모델링을 구성하였다.

충진을 위해 정의한 성형조건과 수지 특성은 Table.1에 정리하였다.

Table 1. Filling conditions and resin properties

Inlet diameter (m)	0.02
Outlet diameter (m)	0.01
Inlet velocity (m/s)	0.2
Outlet pressure (gauge, MPa)	-0.1
Mold filling volume (m ³)	1.68e-2
Resin density (kg/m ³)	1,080
Resin viscosity (kg/m·s)	0.5

수지가 주입되는 주입구 및 토출구의 크기를 각각 정의하였고, 주입구는 수지 주입속도 조건을, 토출구는 압력 조건으로 진공압을 고려하였다. 하지만 완전 진공상태를 조성하는 것은 실질적으로 불가능하기 때문에 그 값을 -0.1MPa로 설정하였다. 또한 수지는 온도와 관계없이 점도가 일정하게 유지된다고 가정하여 일정 값을 설정하였다. 중공 영역인 채널 내부의 유동 특성 고려를 위해, 해석 조건으로 비압축성 점성유체의 특성인 non-slip 벽면 조건을 가지는 층류유동으로 가정하였다.

격자 형태는 사면체 격자를 사용하였고, 관심영역인 코어 내 중공 부분에 상대적으로 조밀한 격자를 적용하였다. 수치해석을 위해 유동 특성 전용 해석틀인 Fluent를 사용하였다.

2.4 수치 해석 결과

동일 형상의 몰드에 대해 다음과 같이 두 가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

- 1) 몰드 위아래 평면이 수평면과 평행하게 놓여 있는 일반 성형 조건
- 2) 몰드 위아래 평면이 수평면에 10° 기울어져 있는 수정 성형 조건

몰드 기울기 부여는 성형조건에서 가장 수월하게 조절할 수 있는 조건인 동시에, 수평 몰드 유지시 예상되는 채널 중간 기공을 제거하기 위한 비대칭 유동을 이끌어 낼 수 있는 가장 효과적인 방법이기 때문이다. 몰드

기울기에 따른 충진의 정성적인 특성 분석을 위해 기울기 대푯값을 10°로 임의 선정하였다.

먼저 몰드 위아래 평면이 수평면과 평행하게 놓여 있는 경우, 시간에 따른 수지의 자유표면 형상(붉은 영역)을 Fig. 3에 도시하였다.

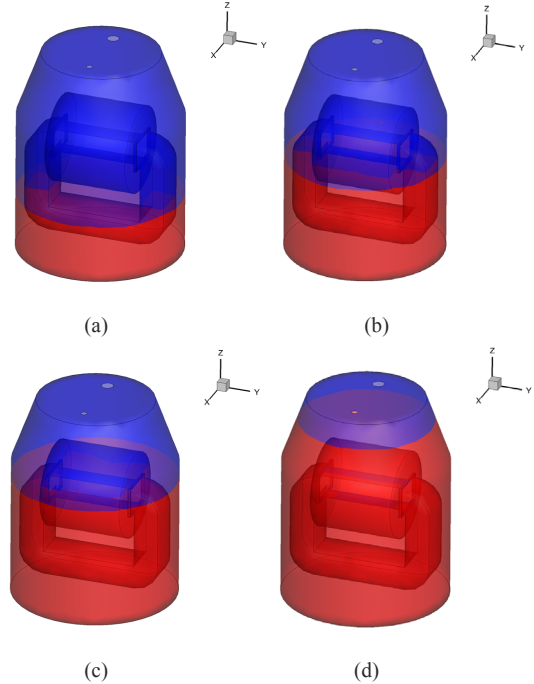


Fig. 3. Free surface of flow at (a) t=93sec (b) t=145sec (c) t=173sec and (d) t=255sec in case 1

주입구에서 주입되는 수지는 중력에 의해 원형 철심 코어에 먼저 떨어진 후, 클램프 아래 부분을 지나, 몰드 바닥에 흐트러진다. 이 과정을 통해 몰드 내 수지 층은 점진적으로 상승하게 되며 약 145 초에 원형 실린더 하부 중공 채널의 입구에 다다르게 된다. 이후로 코어 외곽의 수지 층은 계속 상승하지만 하부 중공 채널에서의 수지는 외곽의 상승 속도를 따라가지 못하고, 중공 영역을 채우기 위해 유동 선단은 전진하게 된다. 중공 채널의 양쪽에서 전진한 수지는 대칭조건에 의해 중공 채널의 중심으로 흐르게 되며 수지가 아직 채워지지 않은 대형기공이 형성된다. 이후, 계속 상승한 수지는 약 173 초에 상부 중공 채널까지 다다르게 되며, 하부 중공에서의 유동 형태와 유사한 패턴을 보이며 상부 중공을 채워나가게 된다.

시간에 따른 상하부 중공 채널의 유동을 자세히 살펴보기 위하여 몰드 단면을 Fig.4에 도시하였다.

상부 중공 채널은 하부 중공 채널보다 상대적으로 유동 속도가 빠르며 상부 중공 채널 양쪽의 유동 선단이 하부 중공 채널보다 먼저 만나게 됨을 알 수 있다. 상부 중공 채널에서 양쪽 수지의 유동 선단이 먼저 만나지만, 채널의 단면을 모두 채우면서 전진하지는 않는다.

하부 중공 채널에서도 초기 흐름에서는 채널의 아래 부분부터 채우기 시작하지만, 어느 정도 시간이 지남에 따라 채널 위쪽에서도 수지가 채워지기 시작한다. 따라서 하부 중공에서는 중공 채널 중심에 기공이 형성될 것이며, 상부 중공에서는 채널 상부에 상대적으로 넓게 분포될 것으로 예상된다. 또한 하부 중공 채널 길이 방향의 가장자리에서는 점도가 높은 수지의 침투가 어려워 가장 자리를 따라 기다란 기공이 형성됨을 알 수 있다. 자유표면 유동 해석을 통한 몰드 충전 해석 결과의 정확도를 나타낼 수 있는 충전 시간을 비교하면, 수지가 몰드를 완전히 채우는데 필요한 충전 시간은 해석적 결과로 270 초가 소요되었으며, 이는 이론적 충전 완료 시간인 267 초에서 약 1.1%의 오차를 보이므로 정확도가 높다고 볼 수 있다.

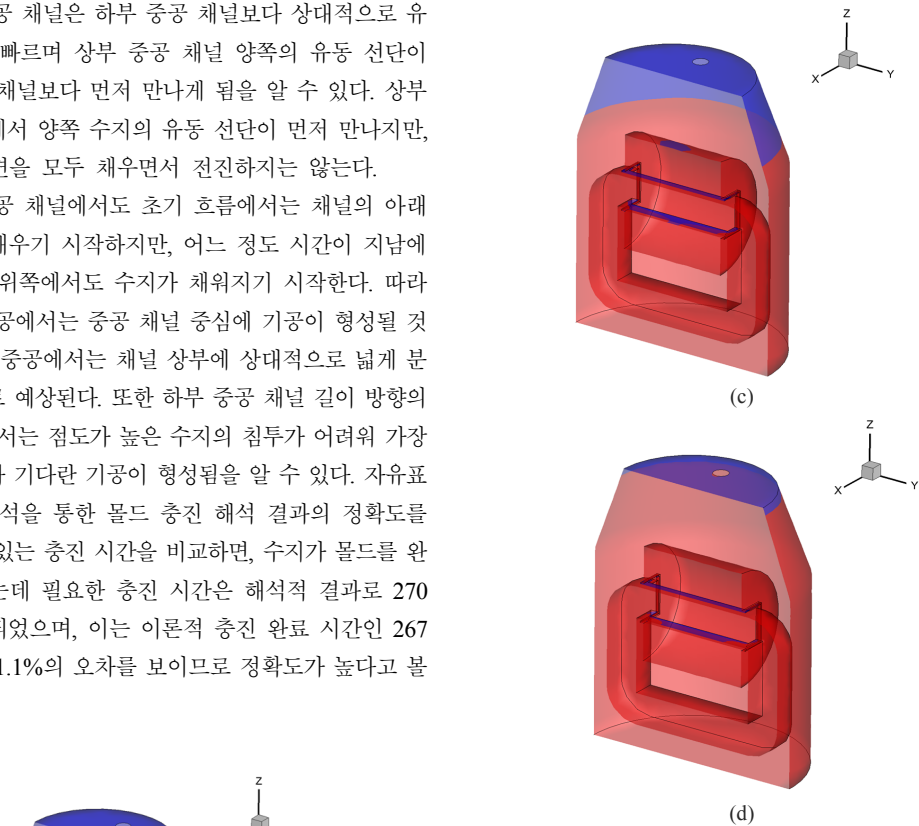


Fig. 4. Flow front in cavities at (a) $t=150\text{sec}$ (b) $t=175\text{sec}$ (c) $t=220\text{sec}$ and (d) $t=255\text{sec}$ in case 1

다음으로 몰드 위아래 평면이 수평면에 일정 각도로 기울어져 있는 경우, 수지의 자유 표면 형상을 Fig.5에 도시하였다. 마찬가지로, 시간에 따른 몰드 단면을 통한 상하부 중공 채널의 수지 유동을 Fig.6에 도시하였다.

이 경우는 앞선 수평평면의 경우에서 알 수 있는 바와 같이, 유동의 대칭조건에 의해 중공 중심에서 기공 발생을 억제하기 위한 목적으로, 수평면 대비하여 일정 각도로 몰드를 기울임으로써 중공 내부 채널에서 기공 형성을 최대한 방지하고자 함이다.

수지는 아래 평면의 모서리부터 몰드를 채우기 시작하여, 약 136 초에 하부 중공 채널의 한쪽 입구에 다다르게 된다. 이후, 수지 층은 중공 영역 외곽과 중공 내부에서 모두 상승하게 되지만, 고점도 유체의 채널 유동에 의해 내부 상승 속도는 상대적으로 작다. 결국, 외곽 수지 층이 중공 채널의 나머지 입구를 지나치고 난 후에, 중공 채널 내부의 수지 유동은 반대 쪽 입구에 다다르게 된다. 따라서 수지는 하부 중공 내부의 가장자리에서 기

공이 형성될 수 있다. 또한 하부 중공 채널에서는 앞선 경우와 마찬가지로 수지 침투가 어려운 채널 길이방향의 가장자리에 기공이 길게 형성됨을 확인 할 수 있다.

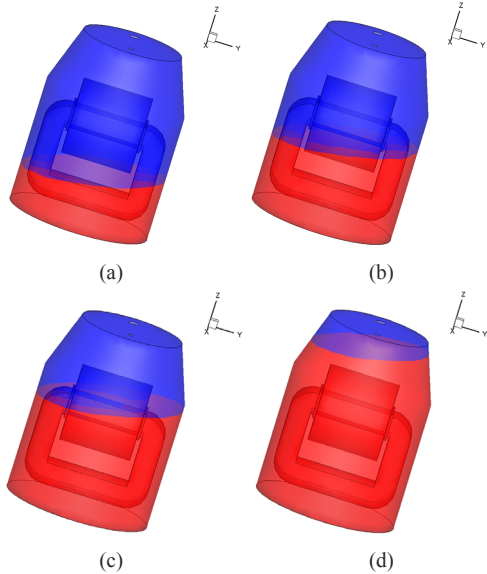


Fig. 5. Free surface of flow at (a) $t=90\text{sec}$ (b) $t=136\text{sec}$ (c) $t=173\text{sec}$ and (d) $t=255\text{sec}$ in case 2

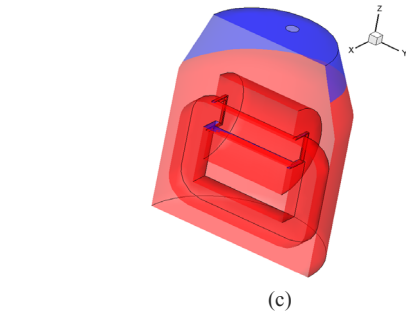
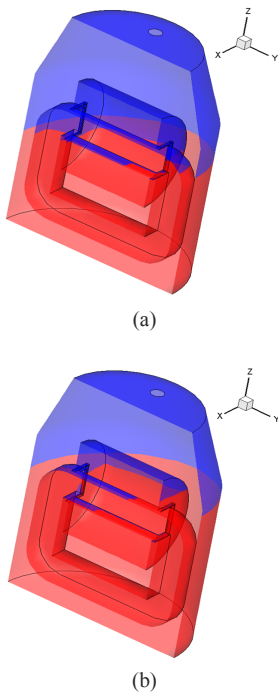


Fig. 6. Flow front in cavities at (a) $t=147\text{sec}$ (b) $t=174\text{sec}$ and (c) $t=240\text{sec}$ in case 2

다음으로 약 170 초에 수지는 상부 중공 입구에 다다르게 된다. 상부 중공 채널의 유동은 하부 중공 채널 대비 늦게 시작됐음에도 불구하고, 넓은 단면적에 의해, 수지의 운동이 상대적으로 자유롭기 때문에, 외곽 수지 상승 속도와 비슷하게 채워진다. 따라서 상부 중공 채널에서는 기공 형성이 억제될 수 있다.

계속하여 상승하는 수지는 주입구와 토출구의 위치 특성에 의해 토출구보다 높은 몰드 상부는 채우기 어려우므로, 주입구에 수지가 닿기 시작하는 충전시간 약 260 초 이전에는 수평면에 평행하게 몰드를 위치시켜야 한다.

결과적으로, 몰드 충전시 기울기를 가지는 경우 중공 내부의 기공을 억제하는 것은 가능하지만, 두께가 얇은 채널에서는 유동 특성상 채널 입구 쪽의 기공 형성을 피할 수 없었다. 이 경우는 수지해석을 통한 충전 시간과 수지 자유 표면 예측을 바탕으로, 이미 주어진 기울기의 직교 방향으로 다시 한번 몰드를 기울임으로써 입구 쪽 기공의 상승을 유발하여 제거할 수 있을 것이다. 하지만 하부 채널 길이 방향의 가장자리 기공은 몰드의 단순 기울임을 통해서서는 제거가 어려울 것으로 예측된다.

3. 결론

본 연구에서는 몰드형 건식 계기용 변압기 제작시 몰드 내에 절연용 수지를 주입할 때 발생할 수 있는 기공 형성에 관하여 연구를 진행하였다. 수지 충전시 자유 표면 유동 현상을 VOF 방법을 적용하여 해석적으로 접근하였으며, 그로부터 기공 형성의 특성을 분석하였다.

몰드를 수평면에 평행하게 위치하는 경우, 대칭형 유동선단의 움직임 때문에 중공 채널 내부에서 모두 대형 기공이 발생하였으며, 단면 형상이 다른 상하부 영역에

따라 유동 특성이 달라져, 기공의 발생 형상도 달라짐을 알 수 있었다.

몰드를 일정 각도로 기울였을 때는 중공 영역의 비대칭 유동 선단의 특성 때문에 기공이 하부 중공 채널의 가장자리에서 형성됨을 알 수 있었다.

따라서, 해석 결과를 참조하여 몰드에 적절한 기울기를 순차적으로 가함으로써 그 요인을 제거할 수 있으며, 또한 적정 시간에 수평상태로 회전시킴으로써, 일반적인 조건으로 성형을 하는 경우의 기공 발생 가능성을 낮출 수 있음을 확인하였다.

향후 연구에서는 채널 내부 가장자리에 발생하는 기공을 대상으로, 이번 연구에서 가정된 일정 점도값 대신, 온도에 따른 점도 변화를 고려하여, 코어의 온도를 조절함으로써 기공 제거 가능성을 확인 할 예정이다.

References

- [1] I. Mihosha, Instrument transformers, Electric Book in Japan, p.126~128, 1950.
- [2] K.H. Cho, C.H. Jang, "The Design and Test Technology of Metering Out Fit", KIEE Summer Conference 2003, p.1803-1805, 2003.
- [3] T. Hasegawa, "Application Technology of Molded products in the Field", Takaoka Review, vol. 43., no. 4, p.66-72, 1996.
- [4] C.W.Hirt, B.D. Nichols, "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", Journal of Computational Physics, vol. 39, pp.201~225, 1981. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
- [5] S.H.Shin, W.I.Lee, "Finite Element Analysis of Flow with Moving Free Surface by Volume of Fluid Method", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B, vol. 21, no. 9, pp.1230~1243, 1997.
- [6] M.S.Kim, S.H.Shin, W.I.Lee, "A New VOF-based Numerical Scheme for the Simulation of Fluid Flow with Free Surface (I) - New Free Surface Tracking Algorithm and Its Verification-", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B, vol. 24, no. 12, pp.1555~1569, 2000.
- [7] M.S.Kim, J.Park, W.I.Lee, "A New VOF-based Numerical Scheme for the Simulation of Fluid Flow with Free Surface (II) - Application to the Cavity Filling and Sloshing Problems -", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B, vol. 24, no. 12, pp.1570~1579, 2000.
- [8] I.Y.An, Y.L.Lee, "A Numerical Analysis Study on Two-phase Flow for the Development of High-efficiency Toilet", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 13, no. 12, pp.5661~5668, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.12.5661>

- [9] M.S.Kim, S.M.Kim, "Filling Behavior of Polymer Melt in Micro Injection Molding for V-Grooves Pattern", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, vol. 23, no. 3, pp.291~298, 2014. DOI: <https://doi.org/10.7735/ksmte.2014.23.3.291>

김 무 선(Moosun Kim)

[정회원]



- 2002년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부(공학석사)
- 2008년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부(공학박사)
- 2008년 7월 ~ 2012년 8월 : 현대자동차 남양연구소 책임연구원
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

최적화, 열유동 및 구조 해석

장 동 욱(Dong Uk Jang)

[정회원]



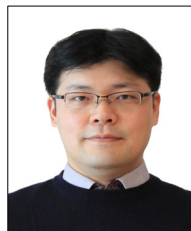
- 1998년 2월 : 충북대학교 공과대학 전기공학과 (학사)
- 2000년 2월 : 충북대학교 공과대학 전기공학과 (석사)
- 2000년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

전기철도, 절연재료, 고전압

김 승 모(Seung Mo Kim)

[정회원]



- 2001년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 (학사)
- 2007년 8월 : 서울대학교 공과대학 기계공학과 (박사)
- 2007년 9월 ~ 2012년 2월 : 삼성전자 반도체연구소 책임연구원
- 2012년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 교수

<관심분야>

최적화, 열유동 및 구조해석