

논문

Projection Method 에 의한 주조 해석용 접촉 요소망 생성 기법

남정호 * · 광시영 **†

*한국생산기술연구원 공정지능연구부

**과학기술연합대학원대학교 한국생산기술연구원 캠퍼스 생산기술과(산업소재 및 스마트제조전공)

Contact Element Generation Method for Casting Analysis by using Projection Method

Jeong-Ho Nam* and Si-Young Kwak**†

*Intelligent Manufacturing Process Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH),
Siheung 11358, Republic of Korea

**Department of Industrial Technology, University of Science and Technology (UST), Daejeon 34113, Republic of Korea

Abstract

In general, hot metal castings contract and molds expand during the cooling step of a casting process. Therefore, it is important to consider both the casting and mold at the same time in a casting process analysis. For a more accurate analysis that includes the contact characteristics, matching each node of the casting and mold in the contact area is recommended. However, it is very difficult to match the nodes of the casting and the mold when generating elements due to the geometric problem of CAD model data. The present study proposes a mesh generation technique that considers mechanical contact between the casting and the mold in a casting analysis (finite element analysis). The technique focuses on the fact that the mold surrounds the casting. After generating the 3D elements for the casting, the surface elements of the casting in contact with the mold are projected inside the mold to create contact elements that coincide with the contact surface of the casting. It was confirmed that high-quality contact element information and a 3D element net can be automatically generated by the method proposed in this study.

Key word: Ductile cast iron, Mechanical properties, Shell stack mold, Alloying element, Cast iron

1. 서 론

주조 공정은 여러 공정 중 가장 복잡한 형상을 제조할 수 있는 공법이다. 주조 과정에서 제품은 주형 안에서 냉각되기 때문에 제품의 열변형 상태를 관찰하기 어렵다. 따라서 주조 공정 시 결합과 응력을 분석하고 예측하기 위해서 열응력 해석을 요구하고 있다.

컴퓨터 하드웨어의 비약적인 발전으로 컴퓨터 시뮬레이션이 활발하게 이루어지고 있으나, 주조공정의 제품은 형상이 매우 복잡하여 요소 생성이 매우 까다롭고 어렵다. 또한 주조공정

에서 효율적인 열응력 해석을 수행하기 위해 복잡한 형상의 주물과 주물을 감싸고 있는 주형의 접촉면에서 요소의 절점을 서로 일치하게 요소망을 생성하는 것은 매우 까다로운 작업이다. CAD를 사용하여 두 물체 사이 접촉면을 일치하게 모델링 하기도 어렵고 또한 일치하더라도 접촉면에서 요소의 절점이 일치하게 요소를 생성하는 것은 더 어렵다.

요소망에 따른 주조 열응력 해석은 다양한 시도가 있어왔다. Grill[1] 등은 2차원 평면에 대해 유한차분법(Finite Difference Method, FDM)과 유한요소법(Finite Element Method, FEM)을 같이 사용하였고 Hou[2] 등은 유한요소법과 경계요

-남정호: 연구원, 광시영: 수석연구원, 교수

Received: Apr. 13, 2020 ; Revised: Jul. 16, 2020 ; Accepted: Dec. 12, 2020
†Corresponding author: Si-Young Kwak (KITECH)
Tel: +82-31-8084-8801, Fax: +82-31-8084-8603
E-mail: vlvwlv@kitech.re.kr

Journal of Korea Foundry Society
2020. Vol. 40 No. 6, pp. 146~150
http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2020.40.6.146
pISSN 1598-706X / eISSN 2288-8381

© Korea Foundry Society, All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

소법(Boundary Element Method, BEM)을 사용하여 주조 공정에 대한 전산모사를 시도하였다. 3차원 해석에서는 MAGMASOFT[®][3]와 같은 주조공정 해석 SW가 유한차분법에 의해 열응력 해석을 수행하였다. 국내에서는 3차원 상에서 유한차분법과 유한요소법 사이에 데이터 교환을 체계적으로 행하여 주조공정에서의 응고, 온도, 열응력 해석을 수행하였다[4]. 상기 연구에서 유한차분법의 경우는 요소생성이 용이하므로 주조해석 전용으로 개발되어 사용되지만 유한요소법의 적용에서는 기존의 기계공학에서 사용하는 상용 요소생성 프로그램을 활용하고 있으며 주조 전용 유한요소망 생성에 관한 본격적인 연구는 사실 거의 전무하다시피 하다.

본 연구에서는 주조 공정에서 주형이 주물을 둘러싸고 있는 점에 착안하여 주물과 주형에서 일치하는 접촉 요소망을 생성하는 기법을 제안하였다. 주물에 대해 먼저 요소망을 생성한 후 주형과 접촉하는 주물의 표면 요소를 주형 안쪽에 투영(projection)하여 주물과 주형의 접촉면에서 서로 절점이 일치하는 접촉 요소망을 생성하는 기법을 개발하였다.

2. 열응력 해석

주조 공정은 높은 온도의 액체 상태 금속을 주형에 붓고 이를 냉각시켜 제품을 만든다. 주물과 주형이 동시에 냉각되면서 열응력과 열변형이 발생한다. 이 현상을 해석하기 위해 이종 재료(주형, 주물) 열응력 유한요소법(Finite Element Method)를 적용하였다. 이종 재료 열응력 유한 요소해석을 실행하기 위해선 이종 재료에 대한 각각의 요소망이 필요하다. 열응력 해석은 접촉면의 요소의 절점이 일치하지 않아도 해석은 가능하지만 접촉면의 절점에서 이종재료의 요소망의 절점 간의 보간(interpolation)이 필요하여 오차가 발생하고 해석 시간 또한 오래 걸린다. 따라서 접촉면에서 절점이 일치하는 접촉 요소를 생성하면 이종 재료 열응력 해석의 정확성을 높이고 해석시간을 줄일 수 있다.

2.1 주물과 주형의 냉각

주형 안에서 주물은 높은 온도에서 냉각되기 때문에 수축을 하고, 주형은 이와 반대로 주물에서 얻은 열로 인해 팽창을 한다. 이러한 변형으로 인해 주물은 인장응력이 발생하고 주형은 압축응력이 발생한다. Fig. 1에 간단한 형상의 제품에 대해 주조공정 중 발생하는 변형과 응력거동을 나타내었다.

Fig. 1의 형상에 대해 1/4 대칭 모델로 x, y축 대칭점을 기준으로 경계 조건을 주어 실제 주조열응력 해석을 실시하면 주물과 주형의 접촉을 고려할 때 Fig. 2와 같이 횡축 방향으로 큰 인장 응력이 발생하였다. 반면 주물과 주형이 접촉 발생하지 않는다고 가정하면 구속조건이 없기 때문에 열응력은 발생하지 않을 것이다.

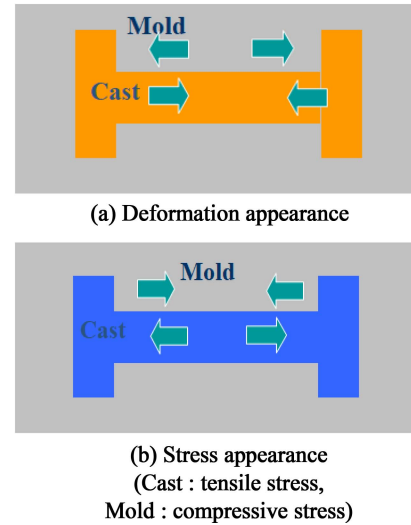


Fig. 1. Mechanical contact between mold and casting during casting process.

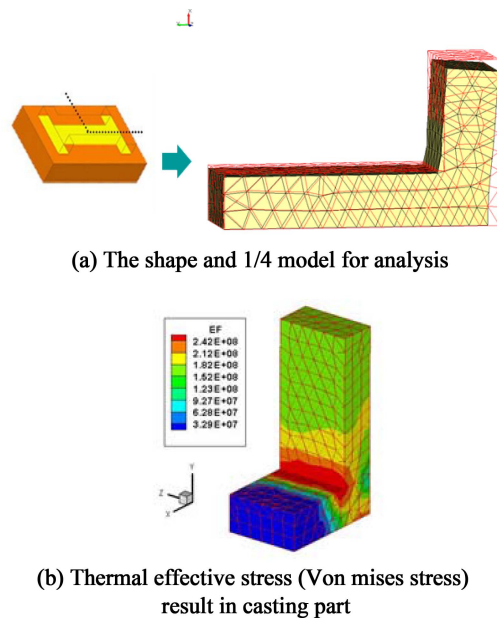


Fig. 2. Thermal stress analysis result of I shape part considering between mold and casting.

2.2 접촉 요소

Fig. 3은 2차원 비선형 접촉 요소를 나타낸 것이다. 두 물체가 접촉한다면 상호 접촉을 고려하여 서로 가상의 스프링이 연결되어 있는 것으로 가정하여 해석한다. 즉, 수직방향의 압축력과 수평방향의 전단력이 발생하는 응력 해석을 계산한다.

접촉 요소의 각 절점의 3차원 자유도를 u, v, w 라 하면 절점의 접촉 요소 수식은 Eq. (1)과 같다. 본 연구에서는 주물

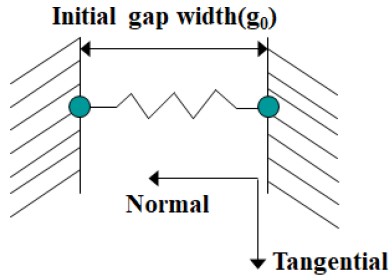


Fig. 3. Configuration of 2D contact element.

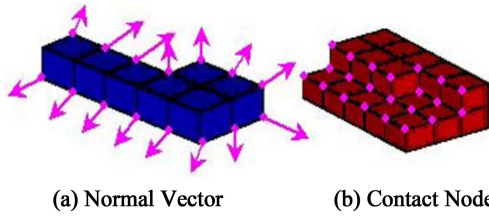


Fig. 4. Example for normal vector and contact node between cast and mold.

과 주형의 마찰은 무시하였다. 그리고 접촉 요소는 open mode와 close&slide mode의 두 가지 상태를 가진다.

$$g = (u_2 - u_1) + g_0 \tag{1}$$

$$g > 0 \text{ (open status)}$$

$$g \leq 0 \text{ (closestatus)}$$

where, $u_2 - u_1$: relative displacement
 g_0 : initial gap width

Fig. 4는 Fig. 2의 I 자 형상 제품의 1/8 모델에 대한 요소망이다. Fig. 4(a)는 주물 제품의 표면 접촉 요소의 각 절점에서 수직방향의 벡터를 표시한 것이며 주형 또한 주물과 일치하는 절점위치에서 반대방향의 벡터를 갖는다. Fig 4(b)는 주형에서 접촉 요소의 절점을 표시하였다.

3. 접촉 요소 생성 알고리즘

3.1 CAD 모델 특성

접촉 요소를 생성하는 기법을 설명하기 위해 Fig. 5와 같이 실린더형상의 주물과 중공실린더 형상의 주형을 가정하고 CAD 모델링 하였다. 주물과 주형을 결합하면 접촉 표면의 형상이 일치하더라도 Fig. 6(b)와 같이 접촉 영역에서 CAD 모델 정보가 일치하지 않는다. 따라서 각각의 CAD 모델에 대해 요소를 생성하면 Fig. 6(c)의 요소망과 같이 절점이 일치하지 않는 요소망이 생성된다. 왜냐하면 각각의 CAD 모델은 표면의 방향, 호의 길이정보 등 고유의 형상 정보가 일치

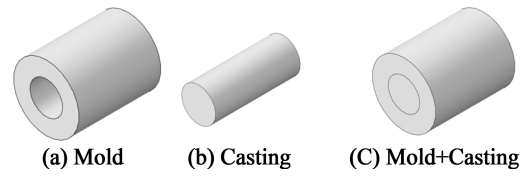


Fig. 5. CAD modeling for simple shape.

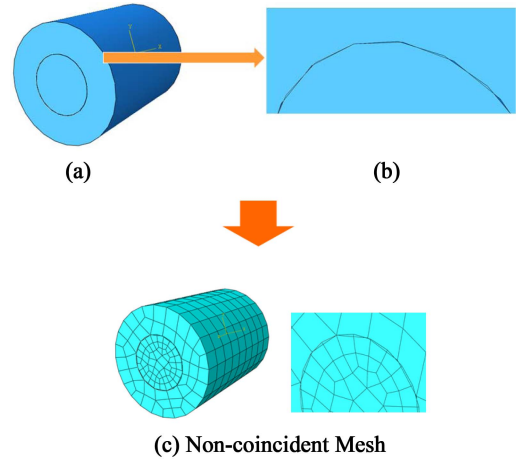


Fig. 6. Non-coincident mesh generation due to geometry discrepancy in CAD; (a) CAD Model (Mold+Cast), (b) Geometry discrepancy in CAD.

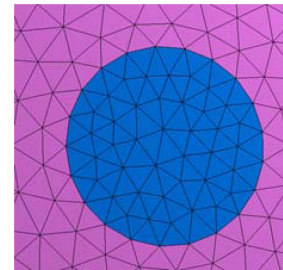


Fig. 7. Coincident mesh for casting and mold.

하지 않기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서 제안한 Projective Method 기법을 적용하여 Fig. 7과 같이 접촉 영역에서 절점이 일치하는 접촉 요소망을 생성할 수 있었다.

3.2 Projective Method 접촉 요소 생성

본 연구에서는 앞 절에서 설명한 문제를 해결하기 위해 주형의 요소 생성을 2가지로 나누어 진행하였다. 주형을 Fig. 8과 같이 내부에서 주물과 접촉하는 내부영역(빨간색)과 주형의 외부영역(파란색)으로 나누었다. 그리고 주물과 접하는 내부 접촉영역은 주물과 주형이 접하는 주물의 외부 요소망을 정보를 수집하여 사용하였다. 내부 접촉영역에서 얻은 표면요소망과 주형 외부 표면에서 생성한 요소망(파란선)정보를 결

합하여 주형의 완전한 표면 요소망을 얻을 수 있다.

이를 3차원 형상으로 표현하면 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다. 주물의 접촉표면 요소망 정보를 외부 주형에 투영시켜 주형의 내부 접촉 요소망을 생성하고 주형의 외곽 표면 요소망과 결합하면 주형의 전체 요소망을 생성 할 수 있다. 내부 주물의 표면 요소를 이용하여 외부 주형의 요소망을 생성하였기 때문에 접촉 영역에서 주물과 주형에서 각각 절점이 일치하는 접촉 요소를 얻을 수 있다.

요소망 생성 엔진으로 CM2-MeshTools를 사용하였다 [5]. CM2 MeshTools의 요소 생성은 “Advancing-Front and Delaunay” 알고리즘을 사용하여 고품질의 삼각요소 및 사면체 요소를 생성한다.

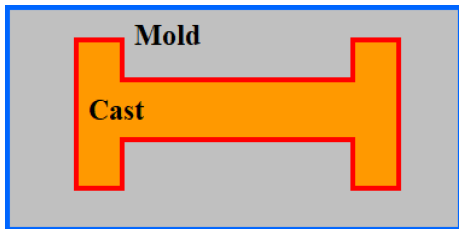


Fig. 8. Inner contact area and outer area for mold part.

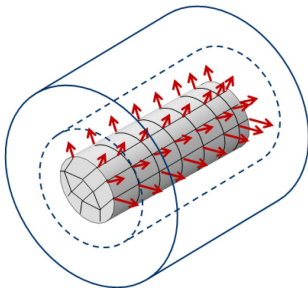


Fig. 9. The conception of projective mesh generation for inner contact surface of mold part.

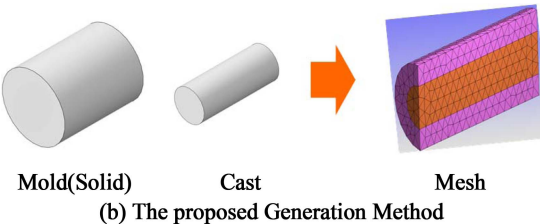
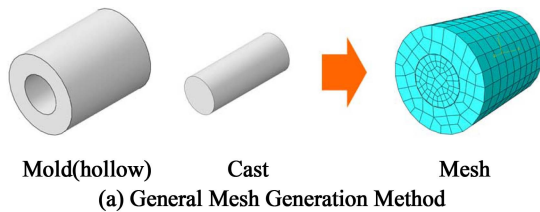


Fig. 10. CAD modeling technique for Projective Method.

3.3 접촉 요소 생성 절차

본 기법을 적용할 때는 CAD 모델링에서부터 달라지게 된다. 주물의 외부 형상의 정보를 사용해 주형의 내부 접촉면 요소를 생성하기 때문에 주형 형상에서 일반적인 CAD 모델링과 차이가 있다. 일반적인 주형의 CAD 모델링은 Fig. 10(a)와 같이 주형 모델링에서 주물의 형상의 빈 형상을 모델링해야 한다. 반면에 Projective Method를 적용하려면 주형의 CAD 모델링 작업에서 기존과 달리 내부 접촉 영역은 Fig. 10(b)와 같이 모델링을 할 필요 없이 채워진 형상으로 모델링 하면 된다.

Fig. 11은 전체적인 투영 접촉 요소 생성절차를 그림으로 나타내었다. 먼저 주물을 입체(Solid) 요소망을 생성하고 주

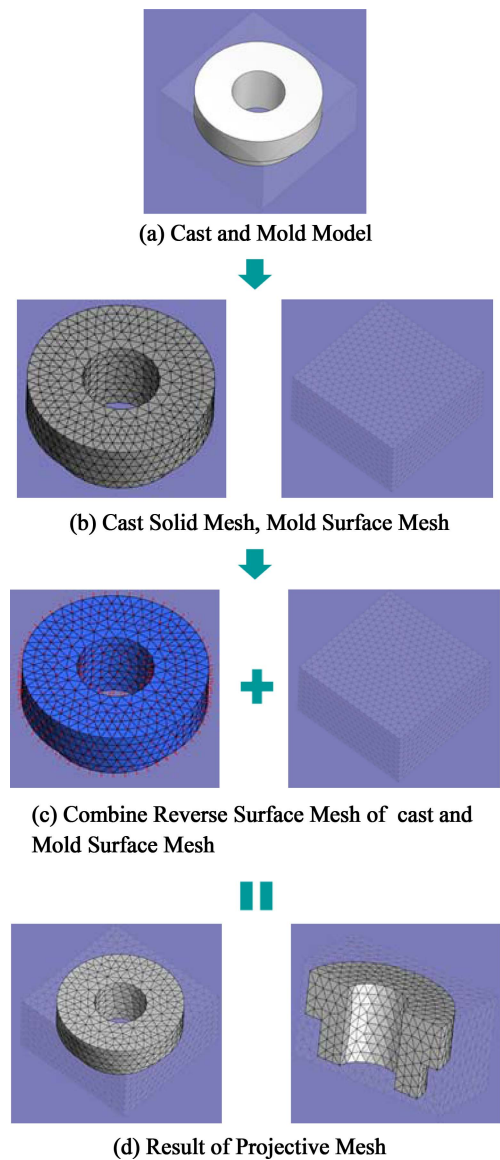
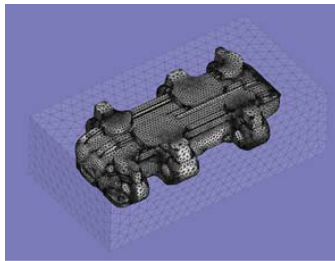


Fig. 11. Procedure of project contact mesh generation.

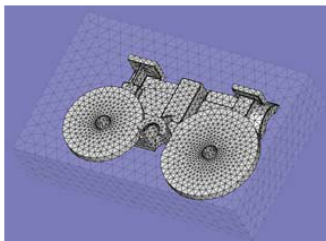
형은 표면(Surface) 요소망을 생성한다. 다음으로 Fig. 11(c)와 같이 주물의 접촉 요소망을 반대방향으로 뒤집은 정보와 주형의 외곽 표면 요소망정보를 결합하면 주형의 입체 요소망을 생성할 수 있다. 즉, 주물의 접촉 형상을 주형에 투영시켜 Fig. 11(d)의 접촉 요소망 결과를 얻을 수 있었다.

4. 요소망 생성 예

본 연구에서 개발한 기법인 접촉 요소 생성기를 사용하여 여러 형상에 적용하여 FEM 열응력 해석에 필요한 고품질의 접촉 요소망을 얻을 수 있었다. Fig. 12는 여러 실제 제품에 적용한 요소망 결과물이다.



(a) Mesh of Full Model



(b) Mesh of 1/2 Model

Fig. 12. The application examples for Projective mesh.

5. 결 론

본 연구에서는 주조 공정과정에서 열응력 해석 위한 주물과 주형의 접촉 영역에서 각각의 절점이 일치하는 접촉 요소망 생성을 위한 연구를 하였다. 그 방법으로 주물의 접촉 표면 형상을 주형에 투영시켜 주형의 요소망을 생성하여 접촉 요소망을 생성하는 방법을 개발하였다.

HyperMesh 등의 상용 요소 생성 프로그램을 사용하더라도 가격이 비싸고 주물과 주형이 형상이 복잡해 주물과 주형의 접촉 요소망을 생성하는 작업은 어렵다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서 제안된 기법으로 고품질의 접촉 요소 정보 및 3차원 요소망을 자동으로 생성 할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부가 지원하는 '주조공장의 분진발생 저감을 위한 주형재료 및 주물사 재생처리 원천기술개발'의 사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Grill, A., Brimacombe, J. K. and Weinberg, F., Ironmaking and Steelmaking, "Mathematical analysis of stresses in continuous casting of steel", **3** (1976) 38-47.
- [2] T. X. Hou, R. D. Pehike and J. O. Wilkes, International Conference on Modeling of Casting & Solidification Process – V, "Computer simulation of casting solidification using a combination of the finite element and boundary element methods", (1990) 15-22.
- [3] <https://www.magmaflow.com/en/solutions/magmaflow/>
- [4] Si HM, Cho C, and Kwak SY, J. Materials Processing Technology, "A hybrid method for casting process simulation by combining FDM and FEM with an efficient data conversion algorithm", **133** (2003) 311-321.
- [5] <https://www.computing-objects.com/cm2-meshtools-suite/#triamesh-iso>