



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2010년도 8 월  
공학석사학위논문

고압펌프 크랭크 케이싱 최적  
주조방안에 관한 연구

조선대학교 대학원

기계공학과

정 승 원

# 고압펌프 크랭크 케이싱 최적 주조방안에 관한 연구

A Study on the Optimum Cast Plan of  
High-pressure Pump Crank Casing

2010 년 8 월 일

조선대학교 대학원

기계공학과

정 승 원

# 고압펌프 크랭크 케이싱 최적 구조방안에 관한 연구

지도교수 차 용 훈

이 논문을 공학석사학위 신청논문으로 제출함.

2010 년 8월

조선대학교 대학원

기계공학과

정 승 원

# 정승원의 공학석사학위논문을 인준함

위원장      조선대학교 교수      홍 명 석      인

위    원      조선대학교 교수      박 창 선      인

위    원      조선대학교 교수      차 용 훈      인

2010 년    8 월

조선대학교 대학원

# 목 차

List of tables .....	I
List of photographs .....	III
List of figures .....	III
Abstract .....	IV

## 제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적 .....	1
1.2 연구방법 .....	3

## 제 2 장 관련이론

2.1 주조 방안 .....	4
2.2 탕구계의 설계 .....	8
2.3 기본 미분 방정식 .....	11
2.4 유동해석 .....	18
2.5 지배방정식 .....	20

## 제 3 장 실험재료 및 방법

3.1 재료 및 설계 .....	22
3.2 초고압펌프 메인바디 모델링 .....	28

3.3 구조방안 및 해석 ..... 29

**제 4 장 결과 및 고찰**

4.1 유동해석 ..... 35

4.2 유동속도벡터 해석 ..... 41

4.3 응고온도 및 수축현상 ..... 46

**제 5 장 경도시험** ..... 51

**제 6 장 결론** ..... 54

**REFERENCES** ..... 55

## List of tables

Table 3.1 Mechanical properties of FCD500 alloys .....	24
Table 3.2 Chemical compositions of FCD500 alloy .....	24
Table 4.1 Hardness test results ( $H_B$ ) .....	52

## List of photographs

Photo. 3.1 Brinell hardness test machine .....	25
Photo. 3.2 Wooden patten for the casting .....	34
Photo. 3.3 Pour molten metal into a casting .....	34

## List of figures

Fig. 2.1 1 Dimension heat flow model .....	14
Fig. 2.2 Using element shape in the FDM .....	15
Fig. 2.3 3 Dimension mesh structure .....	18
Fig. 3.1 2D design for the high pressure pump .....	26
Fig. 3.2 Side plan for the high pressure pump .....	27
Fig. 3.3 Detail design of ultra-pressure pump main body .....	29
Fig. 3.4 Modeling shape design of device in foundry for cast system .....	32
Fig. 3.5 Inlet for the casting .....	33
Fig. 3.6 The casting gate .....	33
Fig. 4.1 Flow analysis results in Filling processing 10 % .....	36
Fig. 4.2 Flow analysis results in Filling processing 20 % .....	36
Fig. 4.3 Flow analysis results in Filling processing 30 % .....	37
Fig. 4.4 Flow analysis results in Filling processing 40 % .....	37



Fig. 4.5	Flow analysis results in Filling processing 50 %	38
Fig. 4.6	Flow analysis results in Filling processing 60 %	38
Fig. 4.7	Flow analysis results in Filling processing 70 %	39
Fig. 4.8	Flow analysis results in Filling processing 80 %	39
Fig. 4.9	Flow analysis results in Filling processing 90 %	40
Fig. 4.10	Flow analysis results in Filling processing 100 %	40
Fig. 4.11	Velocity vector analysis results in Filling processing 10 %	42
Fig. 4.12	Velocity vector analysis results in Filling processing 20 %	42
Fig. 4.13	Velocity vector analysis results in Filling processing 30 %	42
Fig. 4.14	Velocity vector analysis results in Filling processing 40 %	43
Fig. 4.15	Velocity vector analysis results in Filling processing 50 %	43
Fig. 4.16	Velocity vector analysis results in Filling processing 60 %	43
Fig. 4.17	Velocity vector analysis results in Filling processing 70 %	44
Fig. 4.18	Velocity vector analysis results in Filling processing 80 %	44
Fig. 4.19	Velocity vector analysis results in Filling processing 90 %	44
Fig. 4.20	Velocity vector analysis results in Filling processing 100 %	45
Fig. 4.21	The solidification temperature results 10%	47
Fig. 4.22	The solidification temperature results 20%	47
Fig. 4.23	The solidification temperature results 30%	48
Fig. 4.24	The solidification temperature results 40%	48
Fig. 4.25	The solidification temperature results 50%	48
Fig. 4.26	The solidification temperature results 60%	49
Fig. 4.27	The solidification temperature results 70%	49
Fig. 4.28	The solidification temperature results 80%	50
Fig. 4.29	The solidification temperature results 90%	50
Fig. 4.30	The solidification temperature results 100%	50
Fig. 4.31	H <sub>B</sub> hardness test zone	51
Fig. 4.32	Measurement results to the H <sub>B</sub> hardness test	52
Fig. 4.33	Brinell hardness test	53



# ABSTRACT

## A Study on the Optimum Cast Plan of High-pressure Pump Crank Casing

By Jung, Seong-Won

Advisor : Prof. Cha, Yong-Hun, Ph.D.

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

### Abstract

To produce high-quality cast in developing high-pressure water jets, the causes of defects and physical phenomenon occurring in casting have to be theoretically analysed. Defects can be predicted through analyses on causes of defects and casting plans can be changed or other processing variables can be controlled to produce high-quality cast. For effective control of casting defects, exact flow analysis, thermal analysis, and stress analysis should be conducted to predict locations and causes of defects. However, existing analyses on casting processes did not consider packing process of cast and analyse flow and thermal behaviors at full cast. There have been a number of analyses on inside the cast, but few studies which analyse gate and spruce runner.

This study presents cast plan of high-pressure pump using ductile cast iron according to types and simulates die design and the principles of design

for processing analyses. Fluid speed of gate and overflow must be controlled to improve quality of cast. Therefore, this study analysed cast speed and solidification in thermal and flow perspectives and based on the results, conducted a confidence test on main body of high-pressure pump.

This study investigated factors of casting targeting the main body of high-pressure pumps and confirmed that locations of gates affect pores, flow and solidification of molten metal. As a result of analysing packing, defects due to mis-run were predicted through computer analyses and it was found that pores occur in thick section of the main body by gases in casting as a result of flow speed vector analysis, which can be solved through changes in size of gates. Optimal cast conditions were applied for configurations of real products and optimal flow was found at temperatures ranging from 1250°C to 1300°C. After 40% of solidification processed after packing, rapid solidification began when temperatures were 900°C ~1100°C measured. Below 900°C, temperatures were maintained at the center of parts for certain periods for thermal stability of cast and structural stability of cast iron. Overflow recharges shrunken cast. Brinell Hardness Test was conducted on specimen from the parts where defects are predicted and hardness of the model with gates at sides was above HB210, which indicates that part of the models used in fields may have defects. Therefore, this study discovered that defects on main bodies can be minimized according to changes in locations of gates.

**Key Words : Water-Jet, Cleaning system, Moulding analysis, Ultra-pressure pump, Foundry device, Gate, Overflow, Solidification, Flow temperature**

# 제 1장 서론

## 1.1 연구배경 및 목적

주조법에 의한 금속제품의 생산은 액체상태의 용융금속을 특정 한 형상을 한 주형내부로 유입시켜 냉각을 통해 원하는 제품을 만들어 내는 공정이다. 주조법은 복잡한 형상의 제품을 비교적 낮은 생산비로 용이하게 생산할 수 있기 때문에 많은 제품의 생산에 적용되고 있다. 산업기술의 발달로 단가가 낮은 고품질의 주조 제품에 대한 요구가 크게 증가하고 있으며 이에 따라 주조제품 생산업체에서는 품질향상과 생산비의 절감이 중요한 문제로 대두되고 있다.

하지만 주조 공정에서 용융금속이 주입구를 통하여 주형 공간에 주입되어 응고 되는 과정은 열적, 물리적으로 매우 복잡한 현상으로서 그 과정을 정확히 규명하고 제어하는 일은 매우 어려운 문제이다.

이 과정은 용융금속이 탕구계를 통하여 주입되어 주형 공간내에 충전되는 과정과 충전 된 금속이 냉각 되면서 응고되는 과정의 두 가지로 나눌 수 있다. 종래에는 이를 제어하기 위하여 경험에 의존하였다. 충전 과정은 베르누이의 원리에 의하여 주입구에서의 유속을 구하여 탕구계의 치수를 계산하는 정도였으므로, 충전 과정에서의 와류 발생, 공기의 혼입 여부 등을 제어하는 것이 어려웠고 또한 응고 과정은 주물의 복잡한 형상에 따른 주물의 응고 양상을 정확히 제어하는 것은 불가능하였다. 따라서 주조시험을 통하여 정확한 결과가 입증되고 고품질의 주물을 얻을 수 있을 때까지 반복 주조시험을 하였다. 하지만 고품질의 주조제품을 얻기 위해서는 주조 공정에 대한 정밀한 제어가 필요하고, 결함이 발생하는 원인에 대한 깊은 이해가 필요하며, 이를 위해서는 주조 공정에서 발생하는 물리적 현상을 공학적 접근을 통한 이론적 해석이 필요하다.

결함의 발생원인에 대한 이해를 통해 주조 공정에서 발생하는 결함을 예측하

고 주형설계를 변경하거나 기타 공정변수를 제어함으로써 고품질의 제품을 생산할 수 있기 때문이다.

중소 조선업체 및 기계 가공업체는 선진국과의 기술 격차와 국내 인건비상승에 따른 원가부담 압박의 이중고에 시달리고 있으며, 이를 해결하기 위한 가장 효율적인 전략이 기술개발임을 인식하고 있다. 국내 선박제조업체가 경쟁력을 강화시키기 위해서는 기술수준을 크게 향상해야 하며, 조선관련 업체 대상으로 실시한 실태조사에 따르면 우리업체들의 기술수준이 신제품 개발, 신기술 응용 등에서 선진국에 비하여 크게 미치지 못하고 있다.<sup>66~77)</sup>

따라서, 최근에 전문 인력의 부족 및 생산단가를 낮추기 위한 방안으로 여러 방안이 모색되고 있다. 물을 초고압(Ultra-High Pressure)으로 압축하고, 물의 위치 에너지를 운동에너지로 변환하기 위해 회전형 노즐을 통해 음속에 가까운 속도로 분사시켜서, 선체 표면처리 작업시 인체 유해한 중금속 및 분진 등을 원천적으로 제거할 수 있는 작업환경 개선용 초고압 고속 워터제트 장치개발을 수행함에 있어 고품질의 주조제품을 생산하기 위해서는 결함이 발생하는 원인에 대한 분석이 필요하며 이를 위해서는 주조공정에서 발생하는 물리적 현상에 대해 이론적 해석이 필요하다. 결함의 발생 원인에 대한 해석을 통해 주조공정에서 발생하는 결함을 예측하고 주형설계를 변경하거나 기타 공정 변수를 제어하여 고품질의 제품을 생산할 수 있을 것으로 생각되며, 선박기자재 부품의 고품질화 및 정밀한 제품을 생산하는데 그 이용이 기대된다.

본 논문에서는 초고압 펌프 메인 바디를 구상후연주철을 이용한 유형별 주조 방안을 제시하고, 금형설계 및 공정해석을 위한 설계원리를 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 방법을 택하였다. 주조해석에서 탕구 및 오버플로우의 유체 속도제어는 주물의 품질을 향상시키기 위해 반드시 필요하며, 이러한 주조 속도 및 응고과정에 대하여 열 및 유동해석의 관점에서 해석하고, 그 결과를 토대로 초고압펌프의 메인바디 제작된 부품에 대한 신뢰성 검증을 실시하였다.

## 1.2 연구방법

1. 초고압펌프 메인바디 대한 주조방안을 제시하고 2가지 모델 조건이 설정되면 시뮬레이션을 통하여 주조방안에서 일어날 수 있는 결함을 분석 예측하고, 실제 시험 주조를 통하여 신뢰성을 확보하여 결함 제거를 위한 방안을 정립하고자 하였다.

2. 주조방안에 대하여 주조 전용 상용 프로그램인 Z-CAST를 이용하여 충전 및 응고해석을 수행하고, 수축결함에 따른 주조결함을 최소화하는 방안을 제시한다.

3. 주조방안 조건에 따라 제작된 초고압펌프 메인바디의 시험편을 두 가지로 분류하고 채취한 다음 브리넬 경도시험을 통하여 최적의 주조방안에 따른 성능평가를 실시하여 부품에 대한 신뢰성 검증을 실시하였으며, 경도시험 후 재질 내부에 존재하는 기공 및 조직의 균일 상태를 조사 한다.

## 제 2 장 관련 이론

### 2.1 주조방안

주형을 만드는 데에는 주물이 되는 부분으로 용탕을 주입하는 탕구가 필요하고 경우에 따라서 응고, 수축할 때에 용탕을 보급하는 압탕이 필요한데, 이 탕구, 압탕 등은 주물의 크기, 두께 또는 재질 등에 따라서 변하는 것이므로 결정하기가 매우 어렵다. 또, 건전한 주물을 만들 때는 용탕을 탕구에 주입할 때의 온도, 속도 등 주입 조건에 좌우되는 경우가 많으므로 이들의 결정에는 충분한 주의가 필요하다.

따라서, 주물을 만들기 위해서는 주어진 제작 도면에 따라 그 주물을 어떠한 방법으로 제작할 것인지를 검토하는 것이 매우 중요하며, 이를 주조 방안이라고 한다.

#### 1. 탕구 계

##### (1) 탕구계의 명칭과 역할

탕구계는 주형 내에 주입하는 용탕의 통로로, 레이들 내의 용탕을 주입하는 주입 컵으로부터 주물로 되는 부분의 입구까지를 말한다. 탕구계는 주입컵, 탕도, 게이트, 탕구 바닥 등이 있다. 주입 컵은 레이들로부터 용탕을 받는 곳이며, 탕구는 주입 컵에 받은 용탕을 탕도로 보내는 통로이고, 게이트는 탕도의 용탕을 주형공간으로 유입시키는 입구이다.

##### (가) 주형 각부의 기능

주입컵(pouring cup) 주입 시에 레이들(ladle)로부터 용융 금속을 받아들이는 곳이다. 용융 금속을 탕구에 직접 주입하려면 실제적으로 주입 속도를 조절하기 어렵고, 모래나 슬래그 등이 섞여 들어갈 염려가 많을 뿐만 아니라 용융 금속이 탕구 밖으로 흘러 안전하게 작업할 수 없게 된다.

##### (나) 탕구(sprue)와 탕구 바닥(sprue base)

탕구는 주입 컵 을 통해 들어 온 용융 금속이 지나가는 첫 번째 통로로서, 단면은 원형



이고, 공기의 흡입을 방지하기 위하여 아랫부분보다 윗부분이 조금 넓게 되어 있다. 탕구의 높이와 지름은 용융 금속의 비중과 유동성 및 주물의 모양에 따라 결정된다.

탕구 바닥은 탕구와 탕도가 연결되는 부분으로, 탕구의 밑면을 흐름이 원활하고 금속의 소용돌이를 막고 조용히 용융 금속이 흐르도록 하기 위한 것이다. 탕구 높이에 따라 큰 충격을 받게 되는 경우에는 내화 벽돌 등을 사용한다.

#### (다) 탕도(runner)와 게이트(gate)

탕도는 용융 금속을 주형 내부의 각 부분으로 유도 및 분배해 주는 수평 통로이며, 게이트는 용융 금속이 주형으로 들어가는 입구이다. 소형의 간단한 주물을 만들 때에는 이들을 구분하지 않고 게이트만을 사용하는 경우도 있다.

탕도와 게이트는 주입되는 용융 금속에서 슬래그나 게재 물을 제거하고, 용융 금속이 소용돌이나 공기의 흡입 없이 조용하고 신속하게 주형 내부에 주입될 수 있도록 만들어야 한다. 주물의 모양, 크기 및 용융 금속의 성질을 고려하여 탕도와 게이트의 위치, 개수, 모양 및 크기 등을 알맞게 설계하여야 한다.

보통 사용되는 게이트의 단면 모양은 비가압 탕구계에서는 하형에 탕도를, 상형에 게이트를 설치하여 주형 내에 불순물의 혼입을 방지하고 있으며, 가압 탕구계에서는 탕도는 상형에, 게이트는 하형에 설치하는 것이 일반적이다. 주입시 주형에 처음 유입된 용융 금속은 온도가 낮고 불순물이 많이 함유되어 있어 이러한 불순물을 포집하기 위해 탕도 연장부(runner extension)를 설치한다.

#### (라) 압탕(riser)

주입된 용융 금속은 주형 속에서 냉각 및 응고될 때, 수축되어 부피의 감소가 일어나게 되므로 주물이 응고, 수축할 때 용융 금속을 공급해 줄 수 있는 압탕의 설치가 필요하다. 압탕의 크기는 이론적인 기준 값과 경험 값을 고려하여 설계한다. 일반적으로 회주철은 작아도 되나 주강, 백주철 및 비철 합금 등의 주물에서는 큰 압탕이 필요하다. 압탕은 여러 가지가 있으나, 일반적인 것은 위쪽을 개방한 원주형 압탕으로서, 높이는 압탕 지름의 1~2배 정도가 보통이다.

긴 가스빼기와 플로오프(flow off) 용융 금속을 주입할 때에 발생하는 가스나 주형 속의

공기는 주물사의 통기도만으로는 주형 밖으로 배출되기 어려우며, 이에 의한 압력 때문에 용융 금속의 주입이 방해되거나, 또는 주물 내부에 기포 등이 생겨 불건전한 주물이 되기 쉽다. 따라서, 복잡한 주형이나 탕구에서 먼 부분, 또는 가스의 배출이 잘 안 되는 곳에는 알맞은 크기의 가스 배출 구멍을 만들어 주어야 하는데, 이것을 가스빼기라 한다.

플로오프는 가스빼기보다 구멍이 큰 것으로, 가스빼기의 역할과 동시에 용융 금속 표면에 떠있는 슬래그나 모래알 같은 혼입 물을 주물 밖으로 배출시키거나 처음 주입되어 온도가 낮아진 용융 금속을 흘러나오도록 하기 위해 설치하는 것으로, 주형에서 가장 높은 곳에 설치하는 것이 일반적이다.

## (2) 탕구계의 종류

### (가) 탕구계의 구조

탕구, 탕도 및 게이트 등을 포함한다. 탕구계의 설계가 잘못되면 주물에 불순물, 가스 등이 혼입되고, 수축공이 생기며, 용탕 경계 및 금속의 산화 등의 결함이 생긴다.

(ㄱ) 주형 공간부에 용융 금속을 채울 수 있어야 한다.

(ㄴ) 주형의 침식이나 가스의 혼입을 방지하기 위하여 가능한 한 조용하고 빨리, 그리고 난류의 발생이 심하지 않도록 용융 금속이 주형 내부로 흘러 들어가야 한다.

(ㄷ) 주입된 용융 금속이 응고할 때 방향성 응고가 되도록 설치하여야 한다.

(ㄹ) 용융 금속이 탕구를 흐르는 동안 슬래그나 혼합물을 제거 할 수 있어야 한다.

(ㄴ) 용융 금속이 주형 내부로 흘러들어가는 속도를 조절할 수 있어야 한다.

(ㅇ) 주물 회수율이 최대가 되도록 설계하며, 가공비를 줄일 수 있어야 한다.

탕구계는 게이트가 설치되는 위치와 모양에 따라 상부 게이트, 하부 게이트, 단 게이트로 분류한다.

(ㄱ) 상부 게이트 : 탕도와 게이트가 주물의 상부에 설치되어 있다. 주입시 용탕의 소용돌이가 생기기 쉬우나 조형 작업이 간편하고 경제적이므로 많이 사용되고 있다.

(ㄴ) 하부 게이트 : 게이트를 주물의 밑면에 설치한 것으로, 주형 내에서의 소용돌이와 침식을 최소화할 수 있다. 그러나 먼저 주입된 용융 금속이 압탕 쪽으로 공급되어 먼

저 응고하므로 압탕의 역할을 제대로 발휘하지 못하는 경우가 있다.

(ㄷ) 단 게이트 : 여러 층의 게이트를 사용한 것으로, 상부, 하부게이트의 단점을 보완한 것이다.

단 게이트에서는 아래쪽에서 주입 된 용융 금속 위에 위쪽의 게이트를 통하여 용융 금속이 단계적으로 주입되므로 압탕부의 온도가 가장 높아 압탕의 역할을 충분히 할 수 있게 된다.

#### (나) 탕구비

탕구 비란, 탕구계를 이루는 각 부분의 최소 단면적 비율을 말하며, 탕구의 단면적 : 탕도의 단면적 : 게이트의 총 단면적의 비로 표시한다. 가압 탕구계 와 비가압 탕구계로 나눈다.

#### (다) 가압 탕구계

탕구비가 1 : 0.75 : 0.5 인 경우이다.

이러한 탕구계는 각 게이트에서 주형 공간으로의 유입 속도가 균일하고, 주물의 회수율이 높으나, 탕도가 게이트보다 위에 있어 슬래그나 산화물 등이 주형 내로 들어갈 가능성이 적다.

그러나 용융금속의 유입 속도가 빠르므로 주형으로 유입 될 때 소용돌이가 생겨 공기의 혼입, 산화물의 생성 및 주형의 침식 등 각종 주물 결함의 우려가 있다. 따라서, 가압 탕구계는 산화물 생성에 따른 결함이 적은 주철이나 구리 합금계의 주조에 주로 이용된다.

#### (라) 비가압 탕구계

탕구비가 1 : 3 : 3 또는 1 : 4 : 4 이 탕구계는 용융 금속의 유입 속도가 느리므로 용융 금속의 산화나 공기의 흡입이 없어 산화성이 큰 알루미늄 합금의 주조에 적당하다. 그러나 비가압 탕구계는 주입 중 탕구계가 완전히 차도록 설계해야 하는데, 그 방법 중의 하나로 게이트를 탕도 위에 설치한다. 또, 각 게이트마다주입 속도가 균일하도록 각각의 단면적을 조절해야 한다. 게이트의 부피가 크므로 가압 탕구계에 비해서 주물의 회수율이

낮다.

## 2.2 탕구계의 설계

탕구계의 설계는 당연히 주형 내의 용탕의 흐름, 주입온도와 주입시간 즉 주입 속도는 주조방안을 세우는 데 매우 중요한 사항이며, 탕구, 탕도, 주입구의 크기와 모양에 따라 달라진다. 그러므로 주입속도, 즉 주입시간을 미리 결정한 다음 이것을 기준으로 하여 탕구 비를 정하는 것이 보통이다. 그리고 주물의 재질, 형상 그 외의 것도 고려하여야 하며, 경제성도 고려하여 탕구계를 설계해야 한다.

### (1) 주입온도가 높을 경우

주입할 때 가장주의 해야 할 것이 주입온도와 주입시간이므로 주입온도는 주형에 주입하기 직전의 용탕온도를 말하며, 같은 화학성분을 가진 쇳물이라도 그 주입온도가 쇳물의 유동성에 미치는 영향은 크며, 주물의 a양 및 필릿 두께에 따라 주입온도를 조절할 필요가 있다.

#### (a) 주입온도가 높을 경우

용탕의 가스 흡입구가 심하기 때문에 수축공의 원인이 되고, 수축이 크면 균열이 생기기 쉽다.

#### (b) 주입온도가 낮을 경우

압탕, 플로오프 등에 의한 충분한 용탕이 보급되지 않은 상태에서 응고되므로 수축이 생기기 쉽고, 유동성도 나쁘므로 주탕불량, 쇳물경계 등이 생기기 쉽다.

주입온도와 주물의 재질은 밀접한 관계를 가지고 있으므로 그 재질에 알맞은 온도로 주입하지 않으면 안 된다.

### (2) 주입시간

주입시간을 길게 하여 낮은 온도에서 주입하면 주형을 다 채우지 못한 채 응고하든지 cold shut 등을 야기 시키며, 너무 빠르면 주형의 침식, 거친 주물의 표면, 많은 수축 및 다른 결함 등이 나타날 수 있다.

주입은 고요하고 빠르게 하는 것이 요구되는데, 오직 쇳물이 난류를 일으키지 않도록 탕구 방안을 세우도록 주의하여야 한다. 주철과 같은 금속은 주입 속도에 그리 민감하지 않으나 주강과 같은 금속은 다른 주물용 합금에 비해 응고구간이 높은 온도에 위치하고 있음으로 미리 응고하는 것을 막기 위해 빠르게 주입하여야 한다. 그러나 주강과 같은 주입온도가 높은 것은 너무 속도가 빠르면 주형을 파손시킬 염려가 있고 두꺼운 살 부분에 수축이 많이 생기므로 일반적으로는 모양이 복잡하고 얇은 두께인 주물의 경우는 압탕을 크게 하여 속도를 빠르게 하고, 모양이 간단하고 두꺼운 주물의 경우는 주입시간이 길게 한다. 주입시간의 계산식은 Dietert가 중량과 두께의 관계의 식을 보면

$$T = S\sqrt{W} \quad (2.1)$$

여기서 T : 주입시간

W: 주물의 무게 [Kg]

S: 주물의 살 두께에 따른 상수

주철의 경우 주물의 살 두께에 따른 상수(S)가 주철주물 살 두께가 2.8~3.6 mm 경우 1.63이고, 살 두께 4.0~8.0일 경우 상수가 1.86이며, 살 두께 8.3~15.8 mm 일때는 2.23을 사용한다.

### (3) 주입구의 총탄면적

주입 경로에서 최소의 면적이 도는 부분이 주형공간에 들어가는 유속을 조절

하며 주입시간을 결정시킨다. 대개 이러한 초크부는 탕구의 하부 또는 주입구를 칭하며, 초크부가 탕구의 밑에 있는 경우 Bernoulli의 정리에 의해 적절한 단면적을 계산할 수 있는데 그 식은 다음과 같다.

$$A = \frac{W}{\alpha T \rho \sqrt{2gH}} \quad (2.2)$$

A : 주입구의 총단면적 또는 초크단면적( $cm^2$ )

W : 주물중량(Kg)

T : 주입시간(sec)

$\rho$  : 용탕의 밀도( $kg/cm^3$ )

H : 용탕의 유효높이(cm)

a : 유량계수 또는 노즐계수(0.8-0.5)

g : 중력가속도( $980/sec^2$ )

#### (4) 유효탕구높이

탕구의 높이는 주물에 미치는 용탕의 정압과 관계가 있으며, 실제 상주입, 하주입 등의 주입방법에 따라 그 유효높이를 다르게 설정한다. 유효 높이 식은 다음과 같다.

$$H = \frac{2hc - a^2}{2c} \quad (2.3)$$

상주입법(top gate) :

$$H = \frac{2hc - a^2}{2c} = \frac{2hc - 0}{2c} = h \quad (2.4)$$

하주입법(down gate)

$$H = \frac{2hc - a^2}{2c} = \frac{2hc - c^2}{2c} = \frac{h + hc - 0}{2} = \frac{h + h_1}{2} \quad (2.5)$$

## 2.3 기본 미분 방정식

열은 고온부에서 저온부로 흐르므로 열전도에 의한 열 이동은 Fourier 법칙에 따르게 된다.

1 차원의 경우,

$$\dot{q} = -K \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2-6)$$

이 된다. 여기서  $\dot{q}$ 는 열유속(cal/cm),  $T$ 는 온도(℃),  $x$ 는 좌표(cm),  $\partial T/\partial x$ 는 온도 구배(℃/cm)이고, 비례상수  $K$ 는 열전도도(cal/℃cm)이다.

Fourier 법칙에 의해 (2-7)의 열에너지 보존법칙을 수식으로 나타낼 수 있다. 시간  $t$ 에서  $(t+\Delta t)$ 사이의 임의 영역에 축적된 열량

$$Q = Q_{in} - Q_{out} \quad (2-7)$$

(where :  $Q_{in}$  :  $t$ 시간에 유입된 열량 ,  $Q_{out}$  :  $t$ 시간에 유출된 열량)

이다. 이제  $x$  방향에만 온도분포가 있는 임의 미소영역 (체적  $V$ )에 대한 열에너지 보존법칙을 생각하여 보자. 미소영역에서는 밀도  $\rho$ (g/cm<sup>3</sup>), 비열  $C_p$ (cal/

g°C), 온도  $T(^{\circ}\text{C})$ 가 일정하다고 가정하면, 축적된 열량  $Q$ 는

$$\begin{aligned} Q &= (\text{시간 } t+\Delta t \text{에서의 열량}) - (\text{시간 } t \text{에서의 열량}) \\ &= \rho C_p V T^{t+\Delta t} - \rho C_p V T^t \end{aligned} \quad (2-8)$$

또, 물체사이의 거리를  $x$ , 각각의 면적에서의 열유속이 직선적으로 변한다면 다음 관계가 성립한다.

$$Q_{in} - Q_{out} = 1 \cdot \dot{q}_a + \Delta t - 1 \cdot \dot{q}_b \Delta t = -\Delta x \frac{\Delta \dot{q}}{\Delta x} \Delta t \quad (2-9)$$

이때, 식(2-7)에 식(2-8), (2-9)을 대입하면

$$\rho C_p V \frac{T^{t+\Delta t} - T^t}{\Delta t} = -\left(\frac{\Delta \dot{q}}{\Delta x}\right) \Delta x \quad (2-10)$$

이 된다. 여기서  $V = 1 \cdot \Delta x$ 로서 무한소요소( $\Delta x \rightarrow 0$ ), 무한소시간 증분( $\Delta t \rightarrow 0$ )을 고려하면 식(2-10)은

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial \dot{q}}{\partial x} \quad (2-11)$$



이 식에 식(2-11)을 대입하면 다음 열전도 기초 미분방정식이 얻어진다.

여기서, 만약 열전도도  $K$ 가 위치와 온도에 의해 변한다면 ( $\partial K/\partial x \neq 0$ )

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad a = \frac{K}{\rho C_p}$$

(2-12)

이다.  $a$ 는 열확산율 또는 온도전도율이라 부른다.

요소내의 응고구간 즉 고액공존역이 존재하면 발열항으로 반응열, 응고잠열의 방출을 고려한 항이 추가되어 2차원 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t}$$

(2-13)

여기서  $L$ 은 응고잠열(cal/g)을,  $f_s$ 는 고상율을 각각 나타낸다. (2-13)식은 상변화를 수반하는 열전도의 기본미분방정식이라 한다.

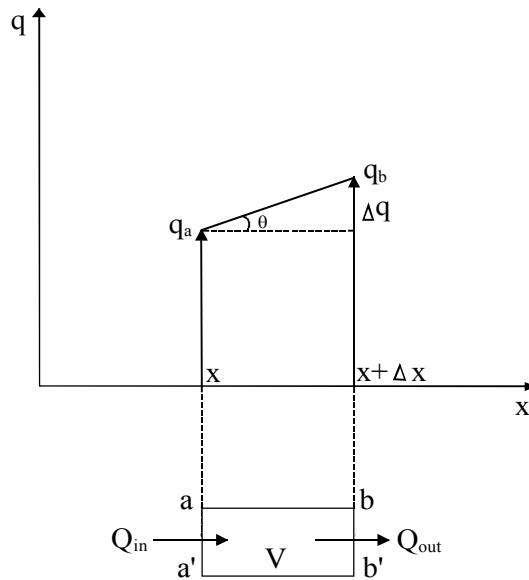


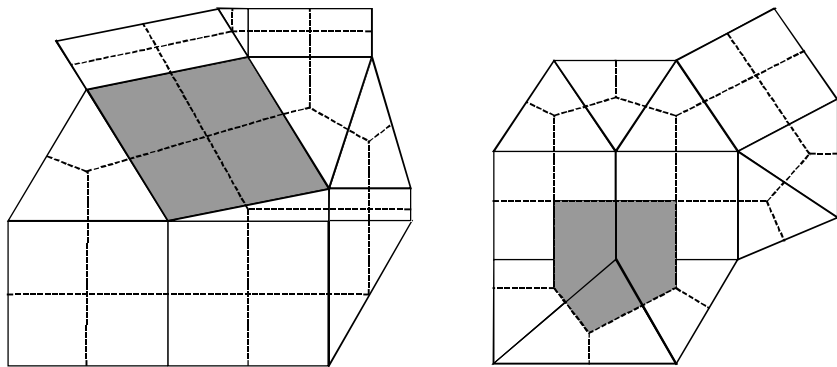
Fig. 2.1 1 Dimension heat flow model

컴퓨터에 의한 열전도 기초미분방정식을 주어진 초기조건과 경계조건하에서 직접 해석하는 것은 불가능하다. 왜냐하면 미분방정식은 연속식인데 비하여 컴퓨터는 이산화된 값만 취급할 수 있기 때문이다. 따라서 시간에 대해서는 미소시간  $\Delta t$ (time step)마다, 장소에 대해서는 어떤 절점에 대해서 계산하고 임의의 시간과 장소에 대해서는 내삽(interpolation) 또는 외삽(extrapolation)에 의해서 구할 수 있다. 그러므로 기초미분방정식이나 경계조건식은 적당한 간격의 시간, 장소에 관한 값을 나타내는 식 즉, 이산화식 또는 차분식으로 변환할 필요가 있다.

앞에서 설명한 열전도 미분방정식을 Taylor전개에 의해 차분방정식으로 변환하여 해를 구하는 방법은 실제 복잡한 형상의 물체에서는 어려운 점이 많다. 복잡형상에 대한 실용적 해석으로서는 유한요소법과 경계요소법이 있다. 후자의 방법은 물성치 일정의 정상문제에는 적합하나, 열처리 등의 비정상문제에는 반드시 좋지는 않다. 유한요소법은 범용성은 있으나, 열이동 문제에 대해서는 직접차분

법보다 이해하기 곤란하고, 프로그램 크기(program size)도 커서 하드웨어 (hardware)적인 어려움이 많아 실용적이지 못하다.

종래의 수치해석법의 모두가 미분방정식을 기초로 하고 있는 것에 대하여 본 프로그램에서 사용한 직접차분법에서는 풀어야 할 계(system)를 미소요소로 분할하고, 각 요소에 대하여 물리현상을 미분방정식을 경유하여 직접 컴퓨터 계산을 위한 차분방정식으로 표현하여 수치해를 구한다. 이 경우 절점과 절점 영역의 개념이 중요하다. 왜냐하면 온도와 고상율 등을 절점에 있어서의 값으로 이산화하고, 절점 영역에 있어서 보존 법칙을 수식으로 표현하기 때문이다. 절점과 절점 영역의 정의 방법에는 내절점법과 외절점법이 있다. 내절점법은 Fig. 2.2 (a)와 같이 분할요소의 외심을 절점으로 하여 요소자체를 절점영역으로 한다. 그러나 외절점법은 Fig. 2.2 (b)와 같이 요소 꼭짓점에 절점을 정의하고 절점 영역은 요소의 각 변을 2등분선으로 구성된 새로운 영역으로 한다. 외절점법은 유한요소법에 가깝고 응력해석과 유동해석에 편리하며, 내절점법은 계산시간이 짧고 컴퓨터 기억용량을 작게 차지하는 장점이 있다.



(a) inner node method

(b) out of node method

Fig. 2.2 Using element shape in the FDM

Fig. 2.3은 X-Y-Z축의 임의의 6면체 요소(i,j,k)에 대한 요소 형상 및 좌표축을

나타낸 것이다. 시간  $\Delta t$  사이에 요소(i,j,k)내의 열량 변화량  $Q_a$ 는

$$Q_a = \frac{\rho C}{\Delta t} V_{ijk} (T_{ijk}^{t+\Delta t} - T_{ijk}^t) \quad (2-14)$$

으로 표시된다. 또한 면  $A_{i-1}, A_{i+1}, A_{j-1}, A_{j+1}, A_{k-1}, A_{k+1}$ 을 통해 유입되는 열량  $Q_b$ 는

$$\begin{aligned} Q_b = & B_{i-1} \cdot A_{i-1} (T_{i-1}^t - T_i^t) + B_{i+1} \cdot A_{i+1} (T_{i+1}^t - T_i^t) \\ & + B_{j-1} \cdot A_{j-1} (T_{j-1}^t - T_j^t) + B_{j+1} \cdot A_{j+1} (T_{j+1}^t - T_j^t) \\ & + B_{k-1} \cdot A_{k-1} (T_{k-1}^t - T_k^t) + B_{k+1} \cdot A_{k+1} (T_{k+1}^t - T_k^t) \end{aligned} \quad (2-15)$$

로 된다.

Fourier 에너지 보존법칙으로부터

$$Q_a = Q_b$$

이므로 미지수  $T_{ijk}$ 에 대해 정리하면 최종적으로 (2-16)식과 같이 표시할 수

있다.

$$\begin{aligned}
 T_{ijk}^{t+\Delta t} = & \left[ 1 - \frac{\Delta t}{\rho c} \frac{1}{V_{ijk}} (B_{i-1} \cdot A_{i-1} + B_{i+1} \cdot A_{i+1} \right. & (2-16) \\
 & + B_{j+1} \cdot A_{j-1} + B_{j+1} \cdot A_{j+1} \\
 & \left. + B_{k+1} \cdot A_{k-1} + B_{k+1} \cdot A_{k+1}) \right] T_{ijk}^t \\
 & + \frac{\Delta t}{\rho c} \frac{1}{V_{ijk}} (B_{i-1} \cdot A_{i-1} \cdot T_{i-1}^t + B_{i+1} \cdot A_{i+1} \cdot T_{i+1}^t \\
 & + B_{j-1} \cdot A_{j-1} \cdot T_{j-1}^t + B_{j+1} \cdot A_{j+1} \cdot T_{j+1}^t \\
 & + B_{k-1} \cdot A_{k-1} \cdot T_{k-1}^t + B_{k+1} \cdot A_{k+1} \cdot T_{k+1}^t)
 \end{aligned}$$

식 (2-16)를 이용하여 실제 열전도 및 응고문제를 해석하기 위해서는 적당한 경계조건의 설정이 필요하다. 예를 들어 면  $A_{i-1}$ 에 대한 경계조건  $B_{i-1}$ 는 다음과 같은 경우로 설명할 수 있다.

물질 1과 물질 2(또는 동일한 물질)가 면  $A_{i-1}$ 에서 열저항 없이 접촉하고 있는 경우는

$$B_{i-1} = \frac{1}{\frac{\Delta x_1}{K_1} + \frac{\Delta x_2}{K_2}} \tag{2-17}$$

이며 물질 1과 물질 2가 면  $A_{i-1}$ 에서 열저항  $1/h$ 를 갖고 접촉하고 있는 경우는

$$B_{i-1} = \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{\Delta x_1}{K_1} + \frac{\Delta x_2}{K_2}} \quad (2-18)$$

이다. 또, 공기 혹은 물과 같은 환경과 열저항(1/ha)을 가지고 있는 경우

$$B_{i-1} = \frac{1}{\frac{1}{ha} + \frac{\Delta x_1}{K_1}} \quad (2-19)$$

이다.

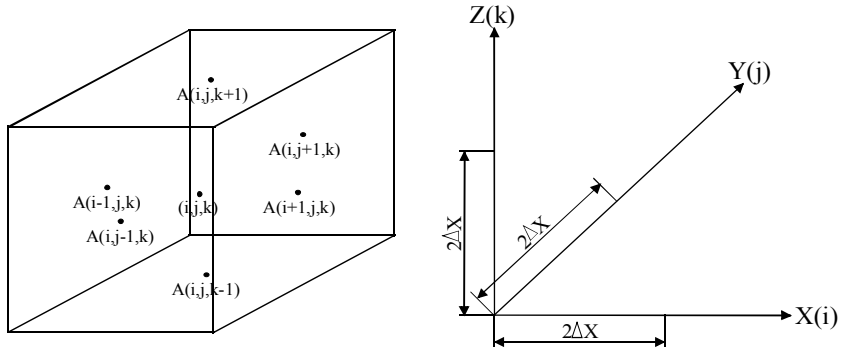


Fig. 2.3 3 Dimension mesh structure

## 2.4 유동해석

주형내 용탕의 흐름을 컴퓨터로 수치해석하기 위해서는 용탕내부의 속도뿐만 아니라, 용탕이 지니고 있는 자유표면 영역의 속도들도 정확히 계산할 수 있어야 한다. 용탕의 유동해석은 비선형 방정식인 Navier-Stokes식에 의해 기술되는데 주형내로 충전되는 과정에서 변화하는 용탕 자유표면의 위치와 형상을 인식하고

그 표면에 대한 속도 및 열전달현상을 해석적으로 풀다는 것은 불가능하다.

자유표면의 위치와 형상을 추적하기 위해서는 두 가지 좌표계, 즉 이동좌표계(Lagrangian mesh system)와 고정좌표계(Eulerian mesh system)를 사용하여야 한다. 유체에 대한 이산화된 이동좌표 표현방법은 개념적으로 이해하기 쉬운데 이는 유체를 미소 요소로 세분화된 격자 각각의 영역은 모든시간동안 같은 유체 요소로 판단되어 존재하기 때문이다. 그러므로 이러한 방법으로 각 요소의 동적 반응을 직접 계산할 수 있다. 반면 고정좌표계에서는 격자가 고정되어 유체의 요소를 구별하는 것이 어렵다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 이동좌표계(Lagrangian mesh system)와 고정좌표계(Eulerian mesh system)를 효과적으로 결합시켜 사용해야 한다. 즉, 계산영역을 고정좌표계(Eulerian mesh system)로서 분할하여 유체 이동에 관계없이 mesh 구조를 유지하고, 각 계산셀에서의 유체속도들을 계산하고, 이동좌표계(Lagrangian mesh system)를 사용한 자유표면 추적법을 이용하여 자유표면의 위치 및 형상을 계산하여야 한다.

주조분야의 자유표면을 지닌 2차원 비압축성 유동을 해석하기 위해 이동좌표계(Lagrangian mesh system)와 고정좌표계(Eulerian mesh system)를 효과적으로 결합시킨 MAC, SMAC 및 SOLA-VOF와 같은 수치해석 방법들이 개발되어 사용되고 있으나, 이러한 방법들은 주조시 용탕의 충전문제에 직접 적용하기에는 많은 한계가 있으며 임의 형태의 주형과 다중 주입구를 고려한 문제에 대해서는 많은 수정이 필요하다. 또한 3차원으로 확장할 경우 이론적인 전개 및 방대한 계산 메모리 요구 등의 문제가 있다. 따라서 이러한 수치해석법을 주조문제에 적용하기 위해서는 주조시 용탕 유동의 특성을 고려함과 동시에 다양한 주조방안의 해석이 가능하도록 여러 가지 교정 및 수정을 하여야 한다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 높이함수법(Height Function Method), 선형구획법(Line Segment Method), Marker법(Marker Particles Method), VOF법(Volume of Fluid Flow Method)등이 개발되어 사용되어 왔다. 이러한 방법들 중 높이함수법

이나 선형구획법등은 복잡한 자유표면을 해석하는데 있어서 한계를 지니고 있을 뿐만 아니라 구조문제를 고려하는 경우에는 응용하기 어려운 난점이 있다. 또한 Marker법은 자유표면을 수치적으로 직접 정의하는 대신에 전체 유체영역에 Marker입자를 골고루 분산시킨 후 유체속도의 변화에 따라 Marker입자들을 이동시키는 방법으로 Marker입자의 유무에 따라 계산영역을 자유표면영역, 유체영역 및 빈 영역으로 구분할 수 있다. 이러한 Marker법은 자유표면의 형상과 유체의 흐름을 관찰할 수 있으나 Marker 입자들의 위치를 계산하기 위하여 많은 기억용량을 필요로 하며 표면장력을 설정하기 위해서는 자유표면의 곡률 반경을 설정하여야 하는데 Marker법의 특성상 곡률 반경의 계산은 어려운 실정이다. 더 나아가 복잡한 구조물의 해석을 위해서는 비등간격 요소분할이 요구되나 현재 개발되어 있는 Marker법은 등간격만이 계산 가능하여 현장에서 사용하는데 많은 제약이 있는 실정이다.

이하의 이론에서는 자유표면을 지닌 3차원 비압축성 유체의 흐름을 해석하기 위하여 SOLA법과 자유표면을 고려할 수 있는 VOF법을 결합시킨 3차원 SOLA-VOF법에 대한 설명을 하기로 하겠다.

## 2.5 지배방정식

SOLA-VOF에서는 주형내 용탕의 유동을 3차원 비압축성, 비정상상태의 점성을 지닌 흐름으로 가정하고 직교좌표계에서 모든 비선형항을 포함시킨 Navier-Stokes방정식과 연속방정식, 열전달방정식을 원시변수(Primitive value)의 형태로 유도하여 사용하였다. 3차원 비압축성 유체의 열유동해석에 사용된 열 및 유동해석과 연속된 응고해석에 사용된 지배방정식들은 다음과 같다.



연속방정식(Continuity equation) :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.20)$$

Navier-stokes 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u + g_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vw}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 v + g_y \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial ww}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 w + g_z$$

에너지 방정식

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (2.22)$$

Volume of Fluid

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\partial uF}{\partial x} + \frac{\partial vF}{\partial y} + \frac{\partial wF}{\partial z} \quad (2.23)$$

여기서  $\nu$  는 동점성계수(kinematic viscosity),  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $g_x, g_y, g_z$ 는 x,y,z방향의 중력가속도, P는 압력, F는 유체부피분율을 나타낸다.

## 제 3 장 실험재료 및 방법

### 3.1 재료 및 설계

본 연구에 사용한 FCD500 구상흑연주철은 주방 상태에서 구상흑연을 정출하는 주철이며, 보통은 과공정조성의 주철용탕에 Mg, Ce, Ca 등의 순금속, 합금 또는 이들의 화합물을 첨가하여 Mg의 잔류량을 약 0.04% 이상, Ca, Ce 은 약 0.02% 이상 함유하도록 하여 주방에서 흑연을 구상화시킨 것이므로 보통주철에서는 흑연이 편상으로 정출하므로 연신도 작고 취약하여 충격에 약한 결점이 있지만 어느 정도 이러한 결점을 제거한 구상 흑연주철이다.

FCD500 구상흑연주철 공정은 용해 → 탈황 → 구상화처리 → 접종 → 주입 → 후처리 → 열처리로 공정은 끝난다. 보통 S함유량이 0.02% 이하, 그 외에 흑연구상화를 저해하는 원소 Ti, Sb, As, Sn, Pb, Zn 등의 함유량의 총합이 0.1% 이하인 과공정조성의 주철을 고온용해하고 후에 구상화처리를 하였다. 주물 두께 12.5mm이하에서는 Sc<1.1, 12.5~17.5mm에서는 Sc<1.0으로 Sc의 상한 값을 부여하고 있다. 또 탄소량이 약간 적어도 흑연의 구상화가 다소 어려워지므로 하한 값으로서 3.3%로 고려된다. 따라서 탄소량을 3.4~4.1% 정도에서 행하였다.

용해는 용선로, 저주파유도로, 아아크 전기로 등이 사용되며 구상흑연 주철용 선철, 회주철, 강스크랩 등의 지금을 사용하며, S량까지 탈황을 한다. 그 후에 래들에서 흑연구상화제를 첨가하여 흑연구상화처리를 한다. 흑연구상화처리는 처리 중량, 흑연구상화제의 종류 등에 따라 처리방법이 다르며 표면첨가법, 플러저첨가법, 압력첨가법, 샌드위치법, 인몰드법, 전로법 등이 있다. 구상화처리 후에는 적당한 성분의 Fe-Si 등으로 접종한다. 또 반드시 적당한 성분의 Fe-Si 등에 의해 접종한다.

또한, 구상흑연주철은 구조성이 좋지 않아 압탕의 설계에 완벽을 기하지 않으

면 수축공동이 발생하는 수가 있고 용해방법이나 주형, 래들 등의 조건에 따라 기포가 생기기 쉬운 것이 결점이다. 또한, 질량효과가 크기 때문에 얇은 부분의 철이 생기기 쉽고 그것이 완전히 백선회면으로 되는 경우가 많으므로 열처리를 하여야 하는 경우가 많다.

구상흑연주철의 현미경조직은 일반적으로 흑연을 구상으로 간주하고 그 기지 조직에 따라서 구분되며, 흑연의 주이에 소량의 페라이트가 석출한 볼스 아이조직에서 전체가 페라이트조직으로 되어 있는 페라이트 형과 기지가 전 퍼얼라이트로 되어 있는 퍼얼라이트형 그리고 기지가 시멘타이트 형으로 되어 있는 백선회면으로 나누는 것이 보통이다.

기계적 성질은 편상흑연주철에서 흑연의 양과 분포로 결정되므로 이것에 직접 영향을 주는 Sc의 값으로 재질을 판정하는 것이 가능하지만 구상흑연주철에서는 그렇지 않다. 우선 흑연량이 증가하면 강도는 당연히 떨어지지만, 흑연의 크기에 의한 응력집중의 비율은 구상에서는 변화하지 않으므로 그 영향은 강도를 지배할 정도로 크지는 않다.

Si는 페라이트 중에 고용하여 강도, 경도를 증가시키나 연신율을 감소 시켜 재질을 취약하게 하므로 2.8% 이하가 사용된다.

Mn은 기지가 페라이트의 경우 보통 0.4~0.7% 함유한다. P는 점성을 현저하게 악화시키므로 0.05%이하, S는 구상화를 저해하므로 0.02% 이하로 한정한다.

구상흑연 주철의 인장강도는 40~60kg/mm<sup>2</sup> 정도로 이 값은 기지조직에 관계된다. 연신율은 페라이트기지의 경우 25%이고 퍼얼라이트 기지의 경우 5~6%정도다. 경도는 페라이트 기지인 경우 HB 160~210, 퍼얼라이트 기지에서는 200~270 정도이다.

선박용 압축하중 지지대에 사용하는 곡블록용 핀지그는 FGCD500의 구상흑연주철 합금으로 기계적 성질 및 화학적 성분을 Table 3.1과 Table 3.2에 나타내었다. 또한, 구조방안에 의해서 제작된 시험편의 경도를 측정하기 위하여 Photo.

3.1 와 같이 브리넬 경도계를 사용하였다.

Table 3.1 Mechanical properties of FCD500 alloys

Yield Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Hardness Test (H <sub>B</sub> )
Min 320	Min 500	Min 7	170 ~ 241
388.9	520	9	194

Table 3.2 Chemical compositions of FCD500 alloy

(wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Cu	Mo
3.94	2.72	0.28	0.031	0.001	0.030	-	0.308	-



Photo. 3.1 Brinell hardness test machine

Fig. 3.1은 초고압 펌프 메인바디 설계도면이며, 그림에서와 같이 부품이 크고 내부 형상이 복잡 형태를 띄고 있으므로 각각의 부품이 작동에 함에 따라 마멸 및 강도를 요함으로 이에 대한 설계 및 구조방안에서 해결해야할 사항이다. 그림에서와 같이 밑면이 536×350 mm, 높이 595 mm이고, Fig. 3.2는 밑면에서 245mm 정도에서 복잡형상이 이루어지며, 하단부에서 210~425mm에서는 유동체가 가장 많이 필요로 하며, 응고에 따른 수축률 높기 때문에 결함이 발생할 수 있는 요인이 많이 발생할 수 있다.



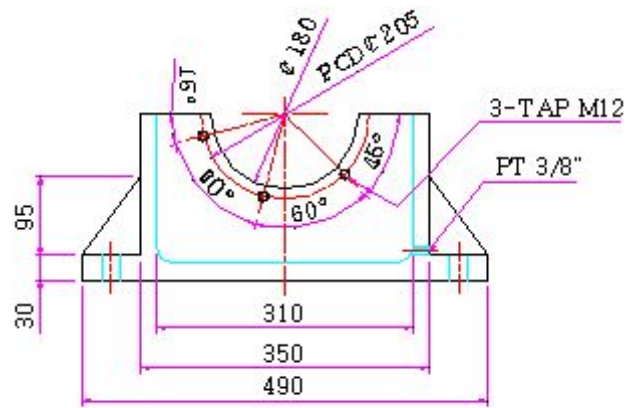
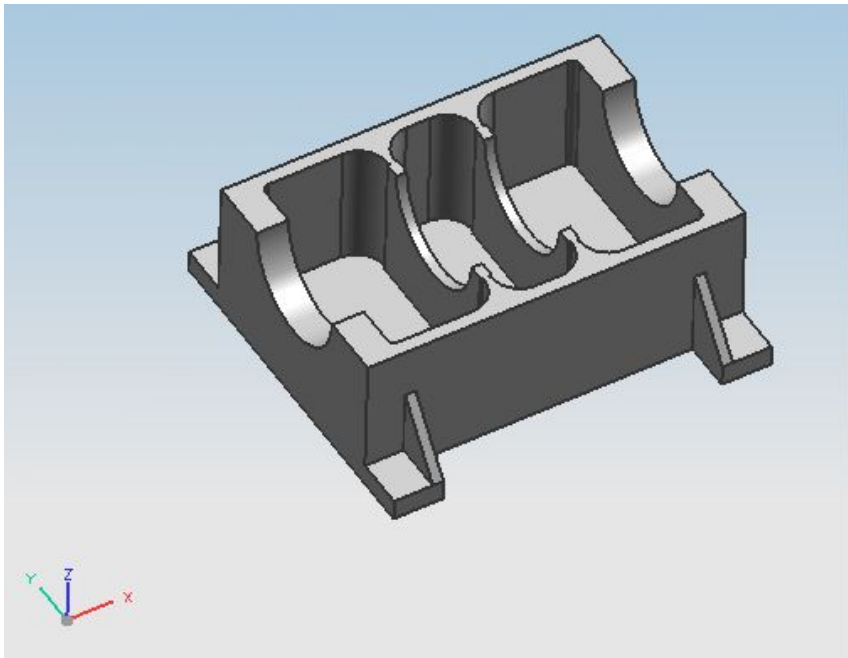


Fig. 3.2 Side plan for the high pressure pump

## 3.2 초고압펌프 메인바디 모델링

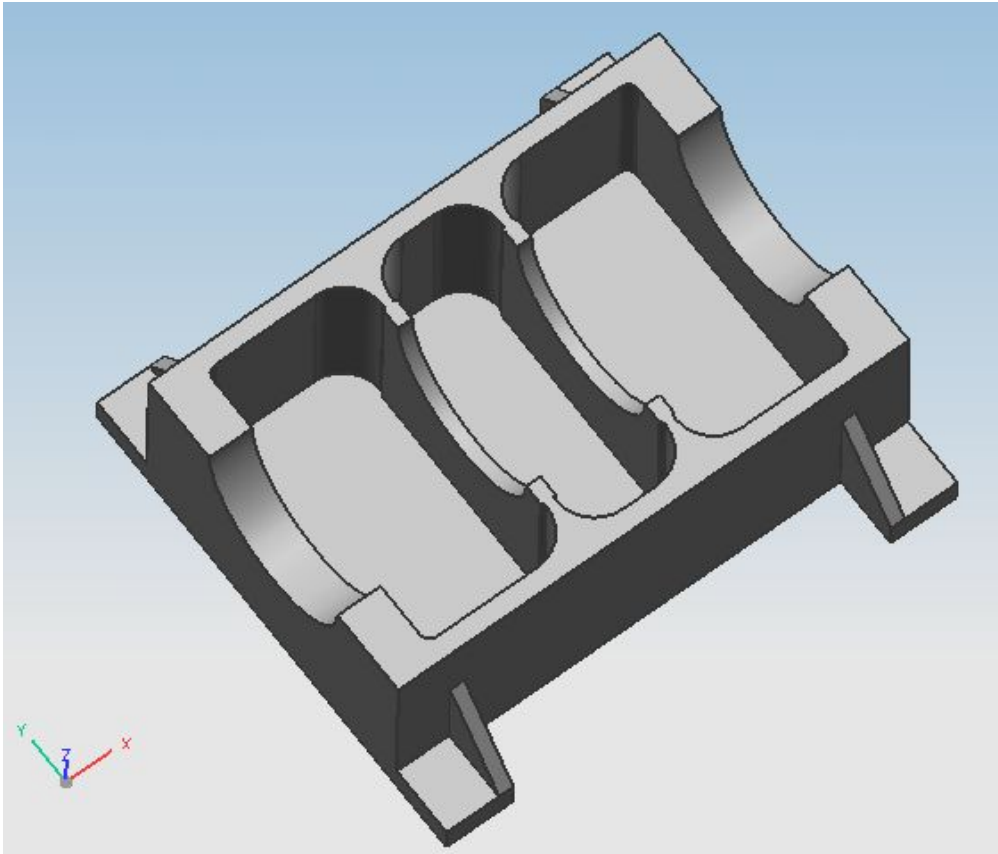
Fig. 3.3은 메인바디의 설계 상태 및 간섭부분을 체크하기 위하여 모델링한 상태를 보여주는 그림이다. 초고압펌프 메인바디는 초고압 상태에서 작동 되어야 하기 때문에 내압에 대한 보완을 하였으므로 더욱 안전감 얻을 수 있으리라 판단된다.

위에서와 같이 검증된 데이터를 바탕으로 제작된 초고압펌프 메인바디는 상단과 하단에 결합되는 부품이 장착되어야 함으로 우수한 강도와 수밀성을 필요로 한다.



(a) ultra-pressure pump main body





(a) Inner design of ultra-pressure pump main body

Fig. 3.3 Detail design of ultra-pressure pump main body

### 3.3 주조방안 및 해석

본 해석에서는 전산해석을 위한 소재물성 데이터로서 Z-CAST의 데이터베이스에 내장되어 있는 FCD500계열 합금의 열적 물성치를 사용하였다. 대체소재를 공정합금으로 선택한 이유는 공정조성 합금의 경우 주조재로서 유동성이 좋으며, 응고 중 등온변태에서 나타나는 급랭으로 인해 조직이 미세화 되는 등의 특성을 가지고 있어 정량적인 해석이 아닌 전형적인 유동 및 응고패턴을 보여주는 정성

적인 해석에 적절한 소재라고 판단하였다.

전산해석의 충진 및 응고 해석에 이용되는 지배방정식은 유체의 흐름과 열전달에 대하여 질량, 운동량, 에너지보존법칙으로 나타낼 수 있으며, 유동해석은 Navier -Stokes방정식에 의해 하였으며, 열 유동해석은 Fourier's 방정식에 의해 수행되었다.

주조전용 상용 소프트웨어인 Z-CAST의 전반적인 해석 과정은 전처리 과정, 요소분할 과정, 시뮬레이션 과정, 후처리과정으로 크게 4단계로 구분된다. 전산해석을 위해 현재 양산중인 주조방안을 기준으로 UG NX 6 CAD SYSTEM을 이용하여 Fig 3.4에서와 같이 3차원 솔리드 모델링을 하였으며, Z-CAST에서 인식 가능한 STL(stereo lithography) 파일로 변환하여 각 재질군을 생성한 결과를 나타내었다. 전처리 과정을 통해 각각 변환된 STL file로부터 주조품, 탕도 및 게이트에 대하여 가상 열전대 등은 Z-CAST의 전처리기의 CAD툴을 사용하여 형성하였다.

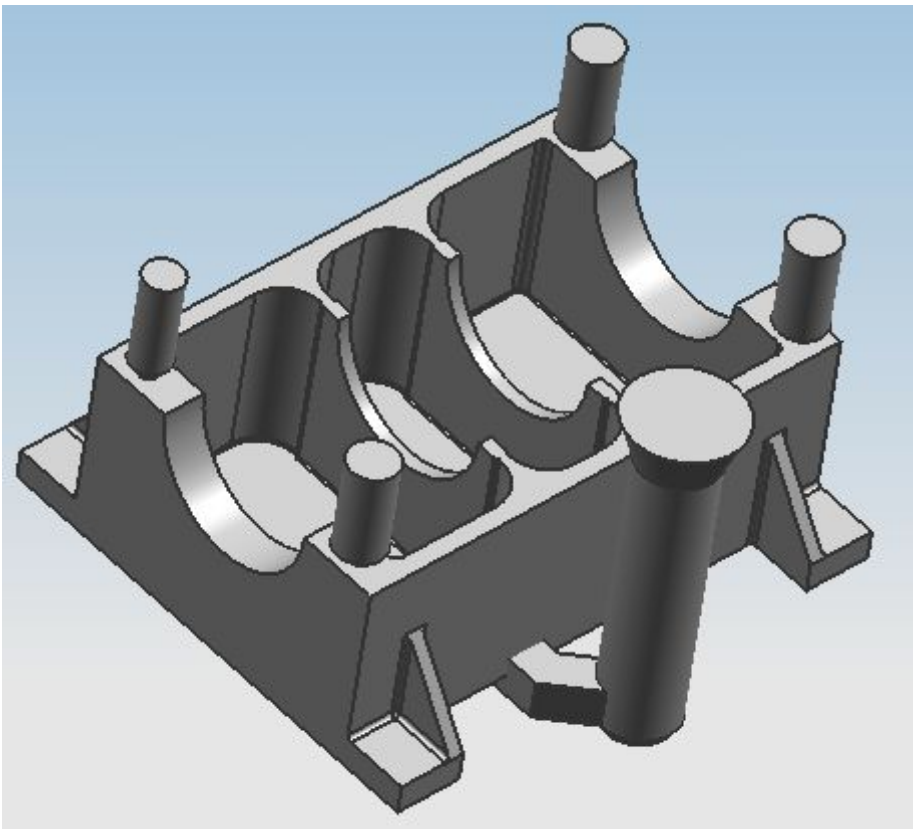
Z-CAST는 FVM계열로서 요소분할은 직교좌표 분할에 의하여 자동 요소분할을 수행하며, 용탕의 요소크기에 해당하는 메탈 셀을 정의하여 사용한다.

해석을 수행하기 위해서는 각 형상들에 대해서 요소분할을 해야 되는데, 요소는 STL에 포함된 삼각형 절점의 개수를 나타내고, 길이는 STL을 포함하는 직육면체의 각 축 방향의 길이인데, Max는 다각형의 각 축 방향의 최대길이, Min는 다각형의 각 축 방향의 최소길이, Uniform : 축 방향으로 메쉬 길이가 균등하도록 분할, Nonuniform : 축 방향으로 메쉬 길이가 불균등 하도록 분할. 축 방향 별로 메쉬의 최대 및 최소길이를 지정하게 된다.

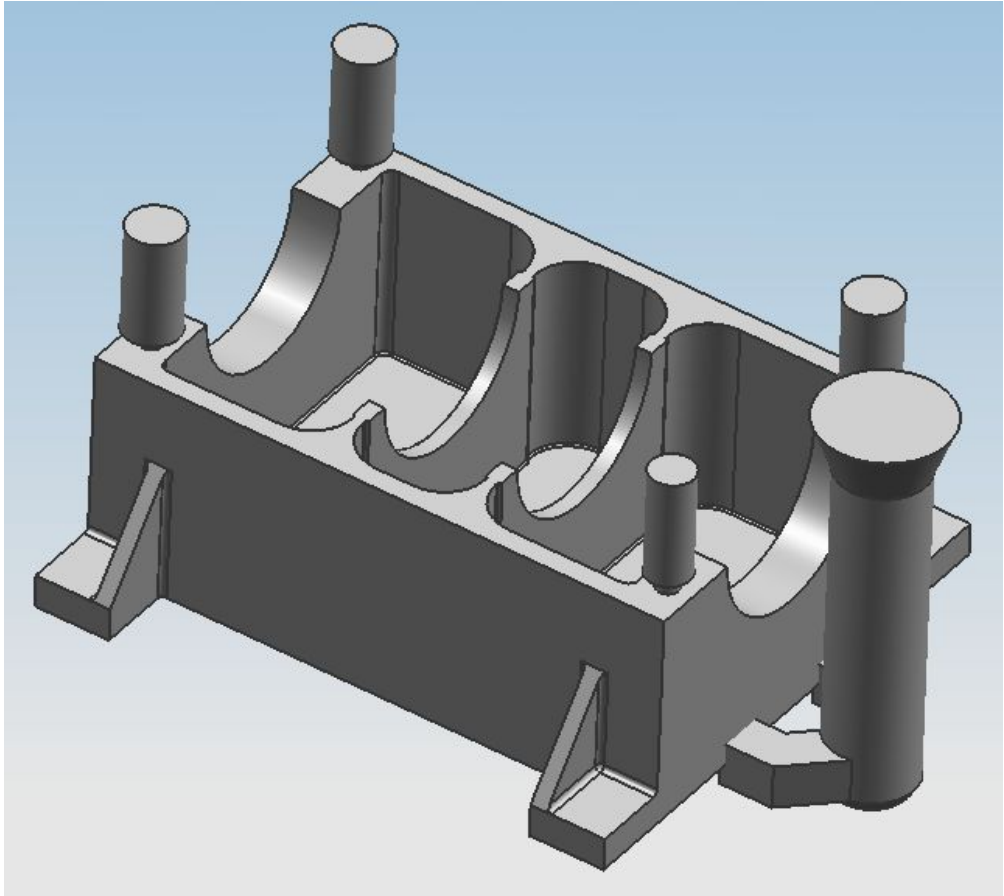
Fig. 3.4에서와 같이 최적의 주조방안을 제시하기 위하여 모델링 하였으며, A-type와 B-type은 현장에서 실시하고 있는 주조방안을 이용하였으며, 게이트부 위치를 변화를 주어 내부의 결함을 최소화하기 위한 주조방안을 제시하였다. 초고압펌프 메인바디와 같이 크기가 큰 주조품을 해석을 하기 위하여 더욱 세분화

하여 차등적으로 요소 분할하였으며, 초고압펌프 메인바디 부품의 요소가 생성된 결과와 각 부품별의 요소 생성크기는 제품은 3,935,700개의 삼각형 요소분할을 하였다.

Photo. 3.2와 Photo. 3.3은 주형 제작을 위한 목형 및 주조장면의 사진이다.



(a) Ultra-pressure pump main body A-type



(b) Ultra-pressure pump main body B-type

Fig. 3.4 Modeling shape design of device in foundry for cast system

Fig. 3.5와 Fig. 3.6은 게이트부 입구 및 형상이며, 용탕이 금형내에 100% 충전이 이루어 질 때까지 공급되는 가상의 용탕 주입구를 말하며, 충전 과정 중에는 초기 용탕의 설정온도를 유지한다. 주입구는 유동해석시 솔버 입력창에서 자동 찾기를 통해 입력이 가능하다. 또한, 작업 환경에 따라 여러 형태의 주입구를 설정할 수 있다.

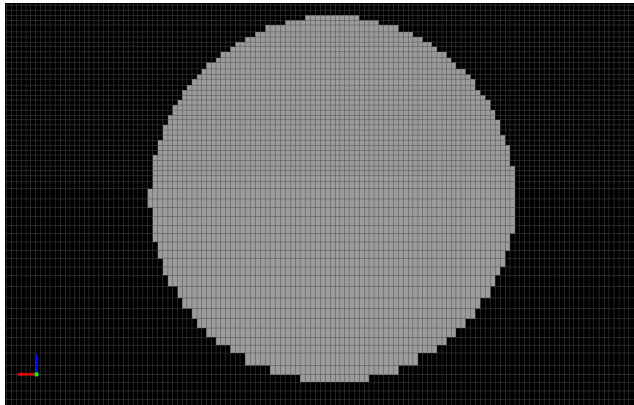


Fig. 3.5 Inlet for the casting

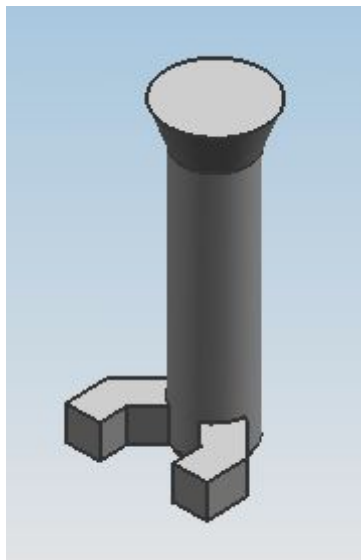


Fig. 3.6 The casting gate



Photo. 3.2 Wooden patten for the casting



Photo. 3.3 Pour molten metal into a casting

## 제 4 장 결과 및 고찰

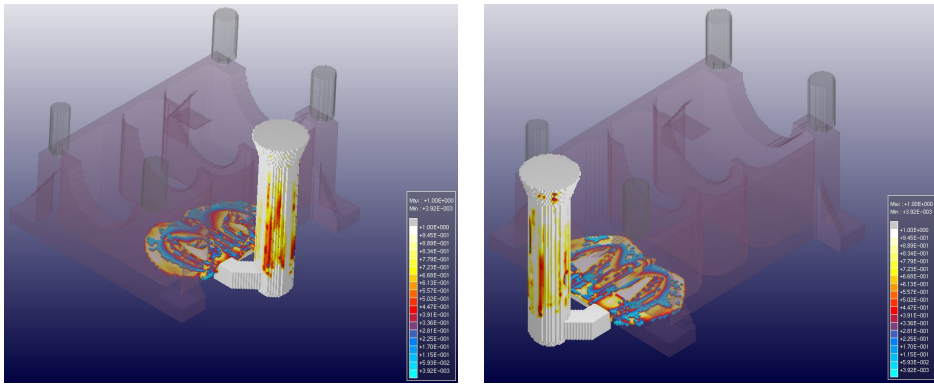
### 4.1 유동해석

Fig. 4.1~Fig. 4.10은 초고압펌프 메인바디의 유동해석 진행과정을 보여주고 있다. 유동해석이 진행되는 중이거나, 해석이 완료된 뒤에도 충전 상태, 충전 온도분포, 충전 방향을 확인하여 제품의 결함을 찾아낼 수 있다. 유동은 하부에서 상부로 충전 되면서 온도와 속도 그리고 압력 등에서 큰 편차를 보이지 않음으로써 전반적으로 양호한 충전 거동으로 나타났다. 유동해석과정에서 용탕온도는 상부와 하부에서 차이가 다소 나타났으며, 결함 예상부라고 볼 수 있는 유동상의 결함 요인은 아니지만, 이러한 제품내 온도차를 줄이기 위해서는 게이트부의 크기를 일정하게 유지하는 방안이 필요할 것으로 판단되며, 전체적으로 양호한 충전 양상이라 할 수 있다.

해석결과에서 알 수 있듯이 초고압펌프 메인바디 상단부 및 하부 쪽에서 단면적 변화가 급격하여 소용돌이 형태의 흐름이 나타났으나, 탕도 및 게이트 입구의 개선으로 이러한 현상이 발생되지 않았으며, 이로 인해 제품 중에 기포가 혼입될 가능성을 상당히 줄일 수 있었다.

그림에서 보여주듯이 안정적으로 용융물이 충전 되어 가는 것을 확인할 수 있었으며, 충전율이 70~80%에서 메인바디의 형체가 완료가 되며 충전율 90%에서 메인바디가 형성 되었다. 90%~100%의 진행범위에서 오버플로우가 채워졌으며, 오버플로우는 응고 후에 수축에 따른 보충역할 및 용체 내에 포함된 기포들을 배출하여 메인바디의 결함을 줄일 수 있었다. 구조방안 A-Type과 B-Type에 유동에는 큰 변화는 없었으나, 용체가 많이 필요로 하는 부분을 보강한 B-Type에서 뎀들이 현상을 줄일 수 있었다. 충전율 100%에 도달하면, 탕구에 충분한 용융물이 존재함으로 응고과정에서 수축이 발생해도 보충되도록 하였

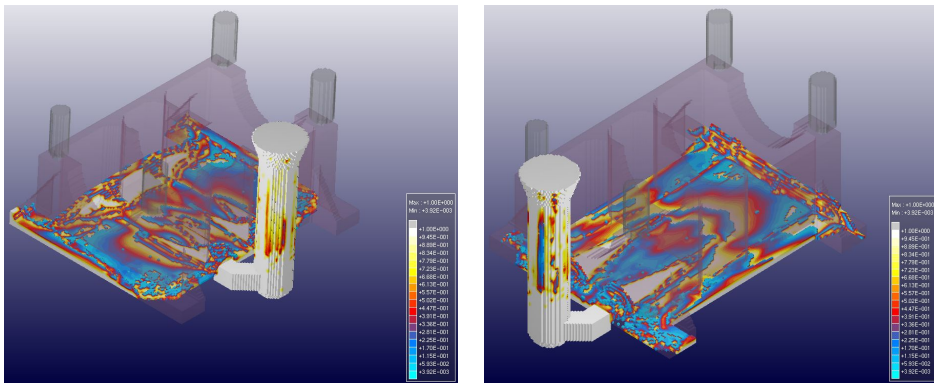
다.



(a) A-type

(b) B-type

Fig. 4.1 Flow analysis results in Filling processing 10 %

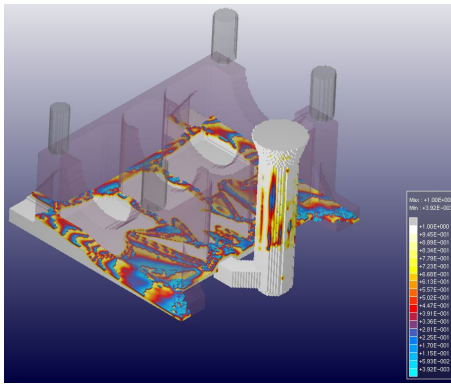


(a) A-type

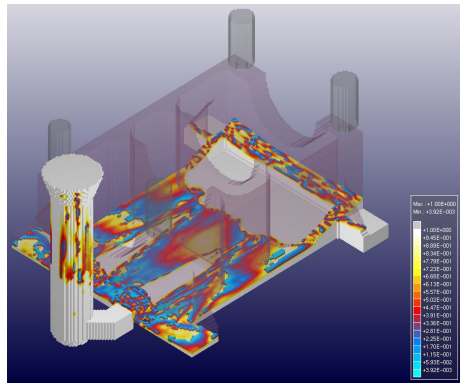
(b) B-type

Fig. 4.2 Flow analysis results in Filling processing 20 %



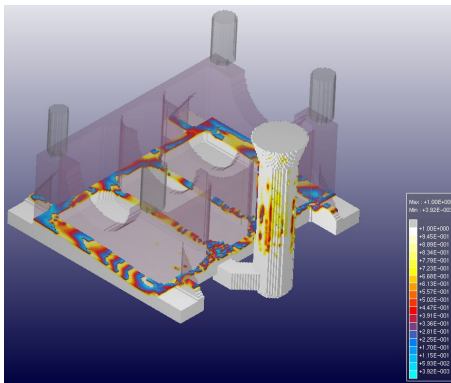


(a) A-type

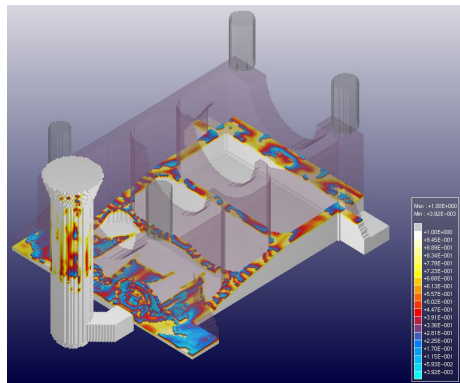


(b) B-type

Fig. 4.3 Flow analysis results in Filling processing 30 %

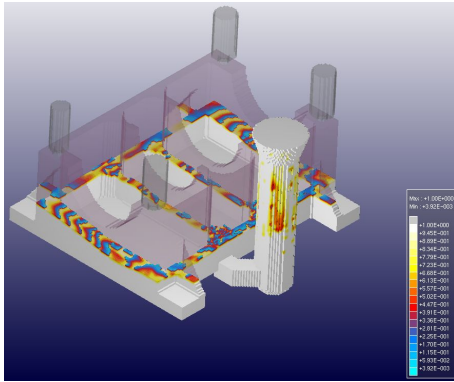


(a) A-type

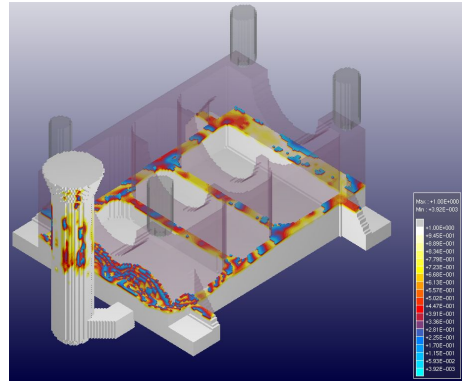


(b) B-type

Fig. 4.4 Flow analysis results in Filling processing 40 %

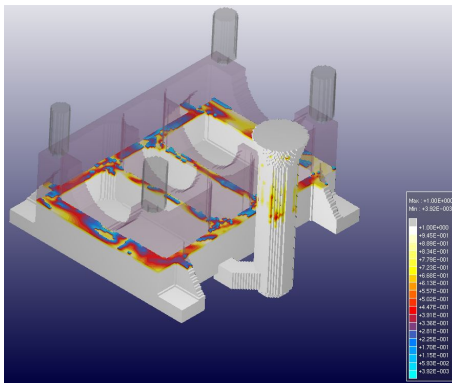


(a) A-type

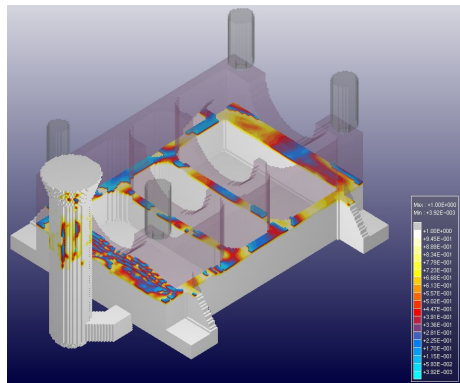


(b) B-type

Fig. 4.5 Flow analysis results in Filling processing 50 %

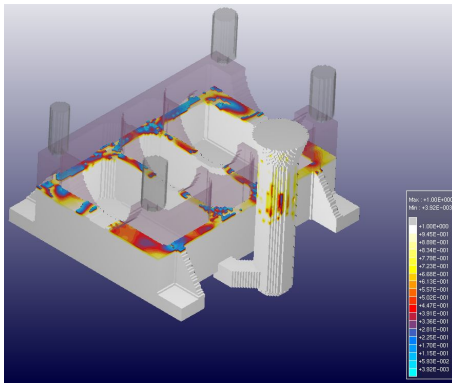


(a) A-type

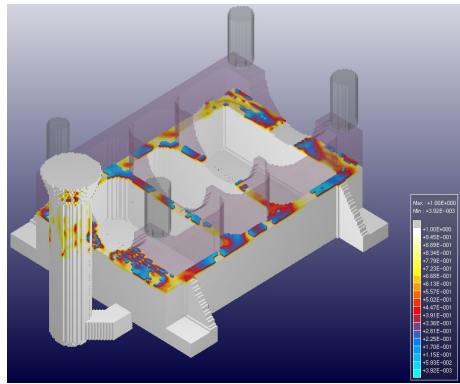


(b) B-type

Fig. 4.6 Flow analysis results in Filling processing 60 %

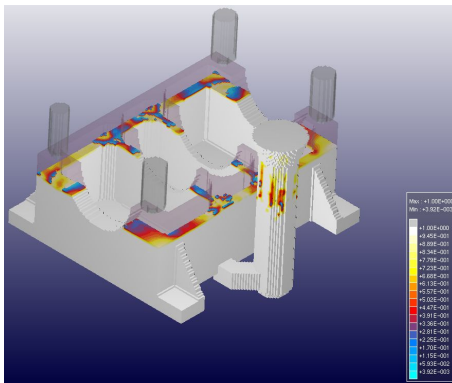


(a) A-type

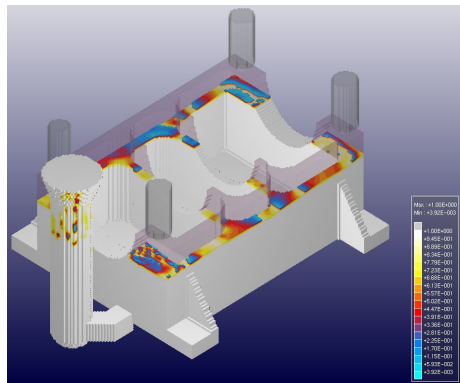


(b) B-type

Fig. 4.7 Flow analysis results in Filling processing 70 %

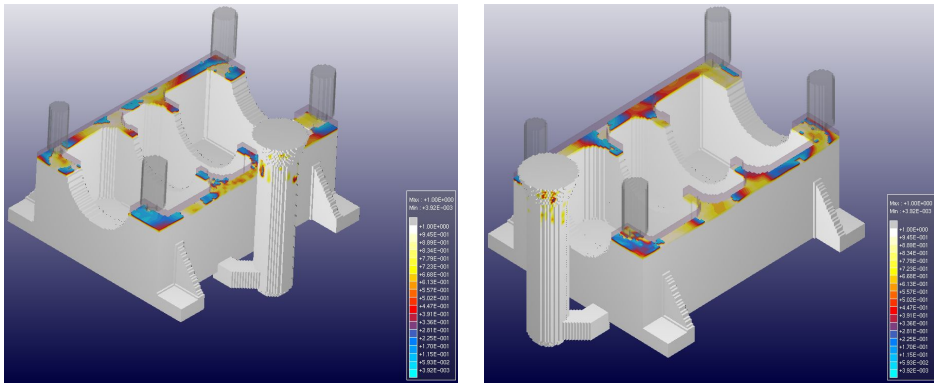


(a) A-type



(b) B-type

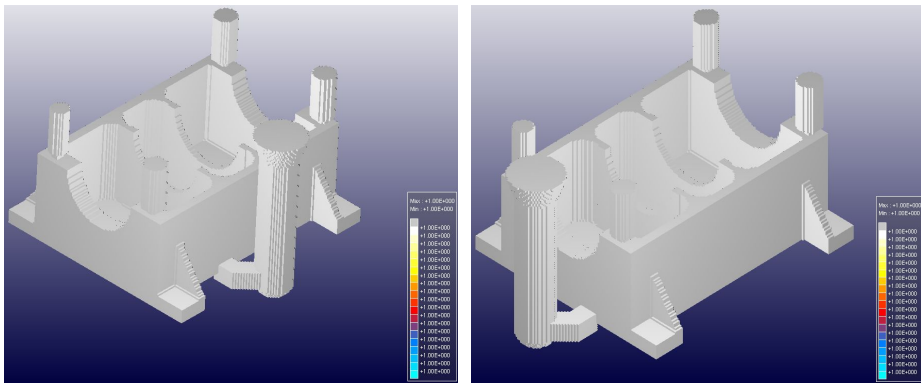
Fig. 4.8 Flow analysis results in Filling processing 80 %



(a) A-type

(b) B-type

Fig. 4.9 Flow analysis results in Filling processing 90 %



(a) A-type

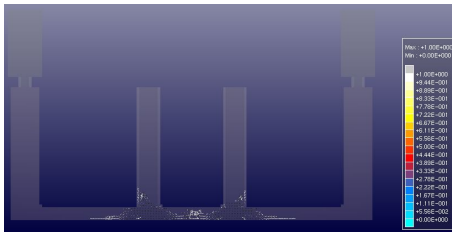
(b) B-type

Fig. 4.10 Flow analysis results in Filling processing 100 %

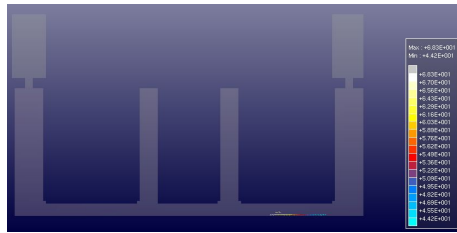
## 4.2 유동속도 벡터 해석

Fig. 4.11~Fig. 4.20은 충전중에 유동속도에 대하여 해석한 그림이다. 그림에서와 같이 속도벡터 결과 전반적으로 안정된 충전 양상을 확인할 수 있었으며, 이러한 해석 결과를 바탕으로 게이트 형상의 변경 및 탕도의 크기가 결정된다. 따라서 유동속도벡터 해석결과 적정한 탕도 및 게이트의 설정으로 건전한 제품의 양산이 가능하였다.

그림에서와 같이 부품의 유동속도 벡터에서 분석한 결과 표면으로부터 2 mm 깊이의 부위에 가상 열전대를 설치한 후 10%의 공정을 실행하는 동안 열전대의 변화를 측정된 결과 10%와 70% 비교해 보면 온도변화에 뚜렷한 차이가 나타났으며, 70% 이후 일정한 온도를 유지하였다. 최고온도와 최저온도와의 차이를 나타내는  $\Delta T$ 도 유사한 양상을 보이는 것으로 볼 수 있었다. 특히, A-type보다 B-type에서 일정온도의 용체가 하부까지 잘 유동 되고 있으며, A-type에서는 유동의 흐름이 다소 원활하지 못하여 충전 70~90%에서는 하부에 온도가 다소 낮아져 냉각이 진행 되었다. 또한 상부 측의 유동을 비교한 결과 A-type보다, B-type에서 용체가 다소 안전적으로 메인바디에 충전 되도록 하여 해석 결과에서도 같은 결론을 얻을 수 있었으며, 상부 측에서 유동속도가 안정적으로 이동하는 현상을 관찰 할 수 있었다.

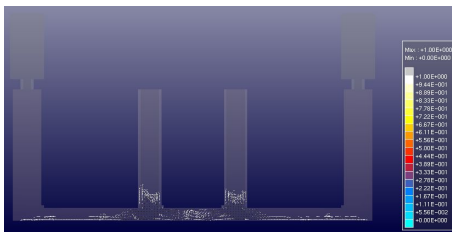


(a) A type

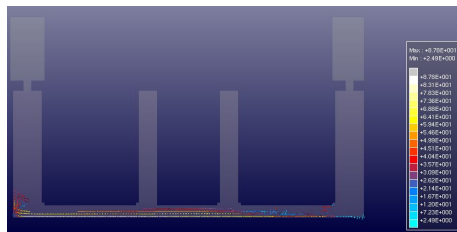


(b) B type

Fig. 4.11 Velocity vector analysis results in Filling processing 10 %

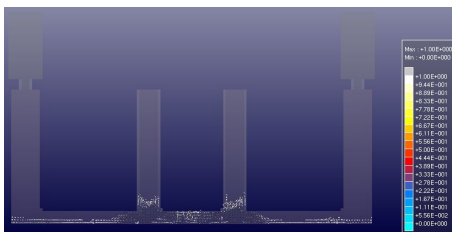


(a) A type

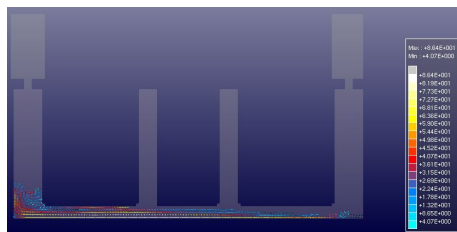


(b) B type

Fig. 4.12 Velocity vector analysis results in Filling processing 20 %

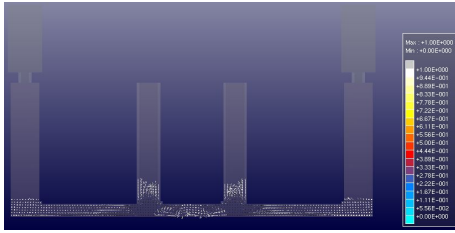


(a) A type

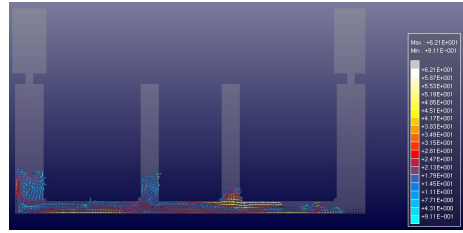


(b) B type

Fig. 4.13 Velocity vector analysis results in Filling processing 30 %

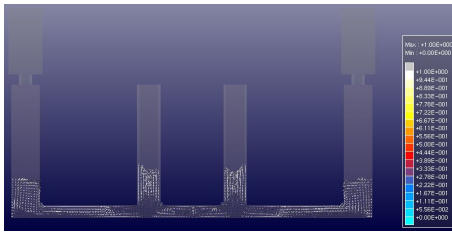


(a) A type

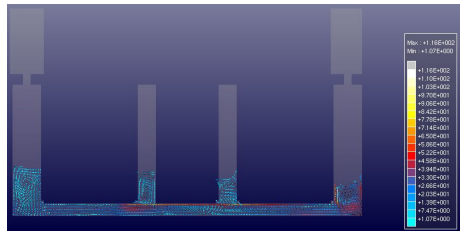


(b) B type

Fig. 4.14 Velocity vector analysis results in Filling processing 40%

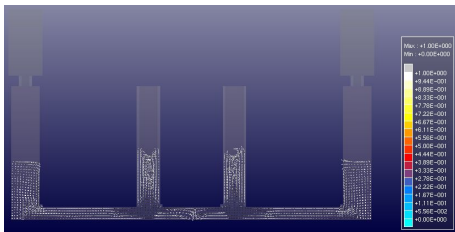


(a) A type

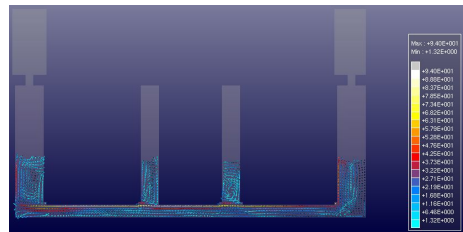


(b) B type

Fig. 4.15 Velocity vector analysis results in Filling processing 50%

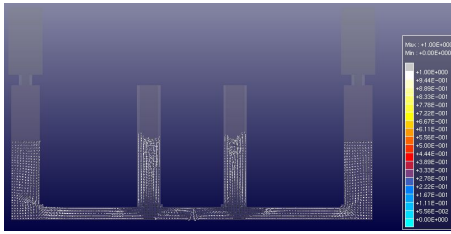


(a) A type

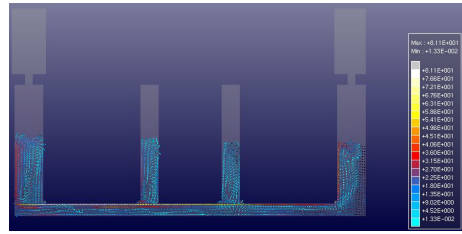


(b) B type

Fig. 4.16 Velocity vector analysis results in Filling processing 60%

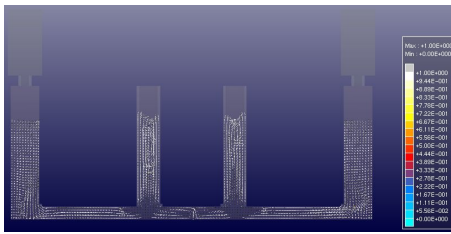


(a) A type

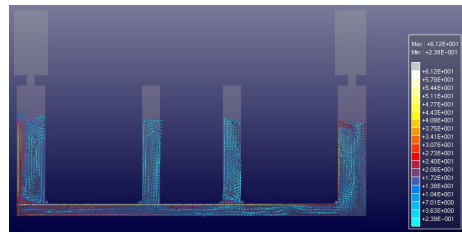


(b) B type

Fig. 4.17 Velocity vector analysis results in Filling processing 70%

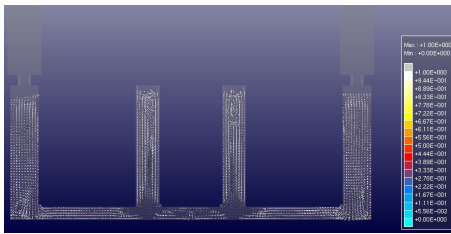


(a) A type

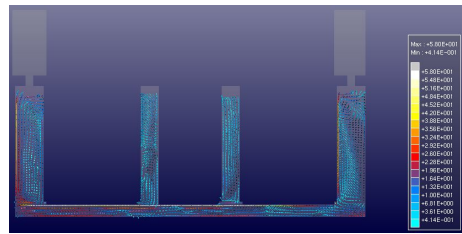


(b) B type

Fig. 4.18 Velocity vector analysis results in Filling processing 80%



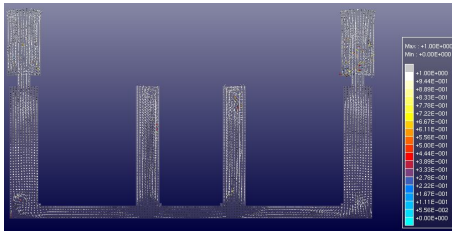
(a) A type



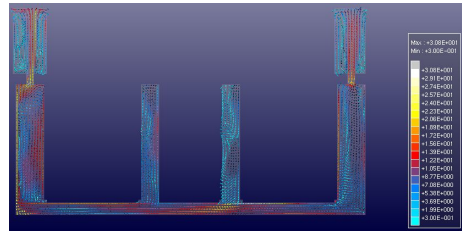
(b) B type

Fig. 4.19 Velocity vector analysis results in Filling processing 90%





(a) A type



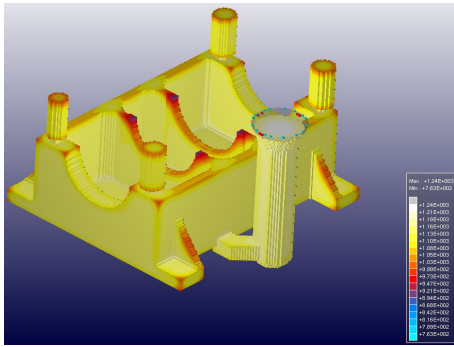
(b) B type

Fig. 4.20 Velocity vector analysis results in Filling processing 100%

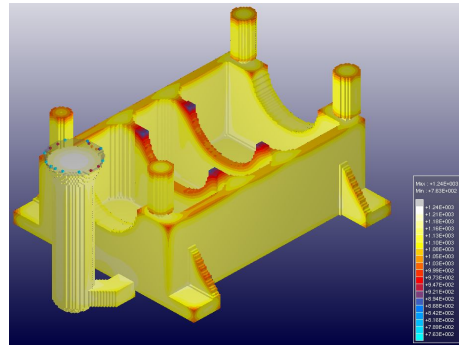
### 4.3 응고온도 및 수축현상

Fig. 4.21~Fig. 4.30에 나타난 것과 같이 지정된 위치는 충전과 동시에 1,310°C ~1,280°C를 유지하고 있어 최종 충전시 까지 유동에 지장을 주지 않음을 알 수 있었다. 그림에서와 같이 충전 과정에서 열의 안정 상태로 유지됨을 알 수 있으며, 1100°C 정도에서 응고되기 시작하여 950°C에서 급속도로 냉각되기 시작하였다.

그림에서와 같이 40%에서부터 표면의 온도가 하강하기 시작하여 70% 사이에서 급격히 온도가 떨어졌으며 90%, 100%에서는 일부 온도가 중심부에 내재 되어 있는 것을 볼 수 있다. 또한, 응고가 진행되는 중에 주조 품에서 열이 급형으로 빠져 나오지 못하고 내재 되어 있으나, 주조품의 조직변화에는 큰 영향을 미치지 못했다. 주조품의 중심부를 절단하여 내부에 존재하는 열을 체크하여 본 결과에서 알 수 있듯이 부품 가운데 부분에서 열이 빠져 나오지 못하는 현상을 볼 수 있으나 최종 주조방안에서 이러한 문제점을 최소화 하였다. A-type의 후육부에서 모두 수축과정에서 결함이 나타남을 관찰할 수 있었다. 수축에 따른 용체가 부족하여 게이트부 및 오버플로우의 용체가 메인바디에 흡수 되어도 그 양이 부족하여 후육부가 침하하듯이 공간이 형성되어 결함이 발생하였다. 그림에서 알 수 있듯이 초고압펌프의 메인바디 부품의 중심에서 등온선이 페루프를 이루며 응고가 진행되는 것을 볼 수 있다. 이로부터 최종 응고 시 제품중심의 후육부에서 수축결함이 발생할 가능성이 높은 것을 가지적으로 예측할 수 있다. 이를 토대로 현장에서 사용되고 있는 게이트부의 위치가 잘못 되었으며, B-type과 같이 최적의 주조방안을 제 설정할 필요가 있음을 확인하였다.

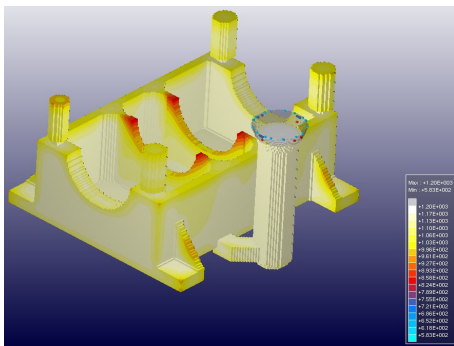


(a) A type

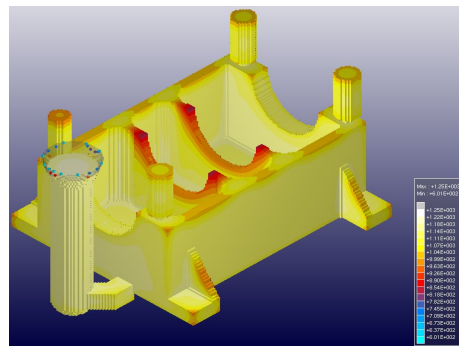


(b) B type

Fig. 4.21 The solidification temperature results 10%

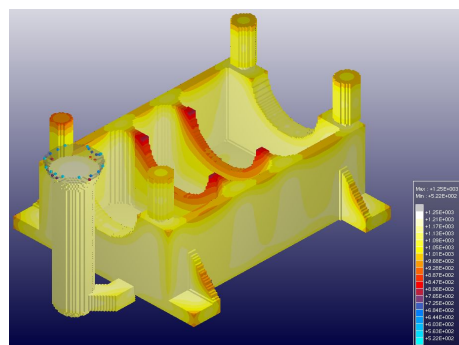
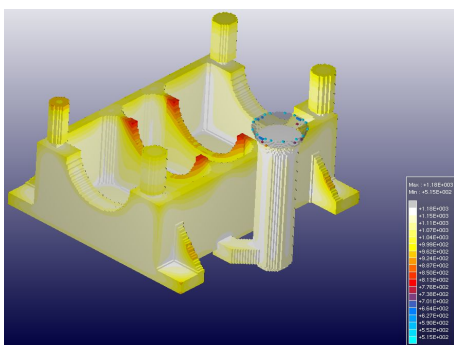


(a) A type



(b) B type

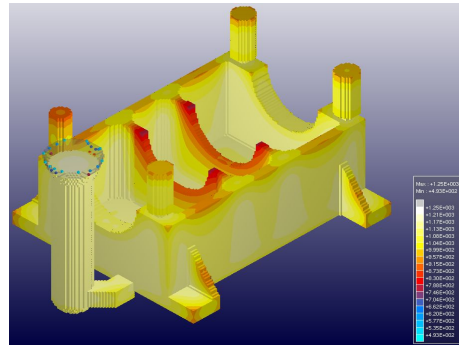
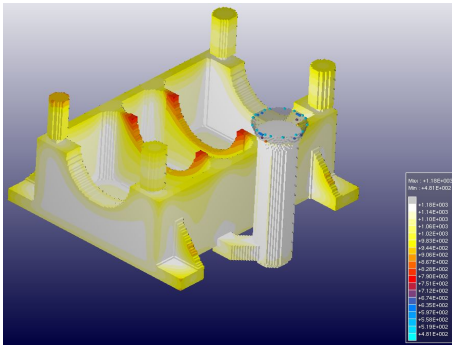
Fig. 4.22 The solidification temperature results 20%



(a) A type

(b) B type

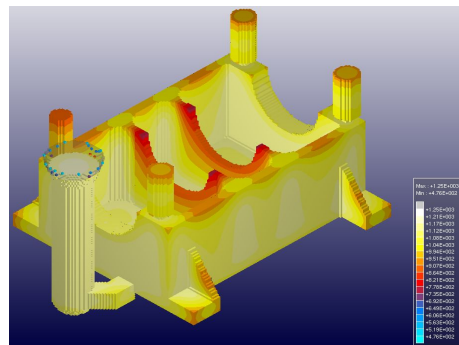
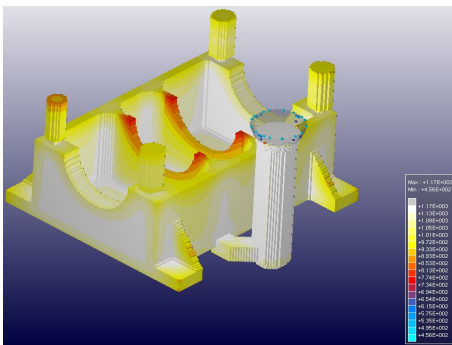
Fig. 4.23 The solidification temperature results 30%



(a) A type

(b) B type

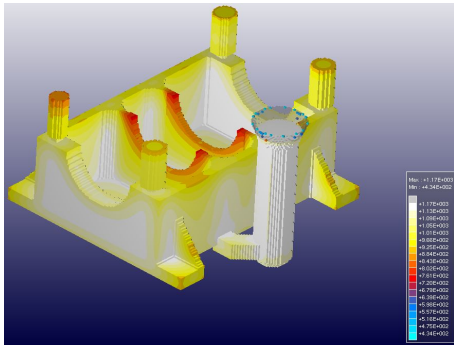
Fig. 4.24 The solidification temperature results 40%



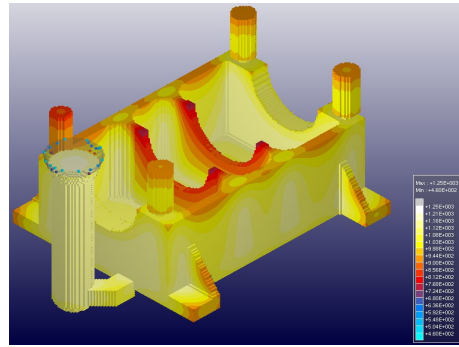
(a) A type

(b) B type

Fig. 4.25 The solidification temperature results 50%

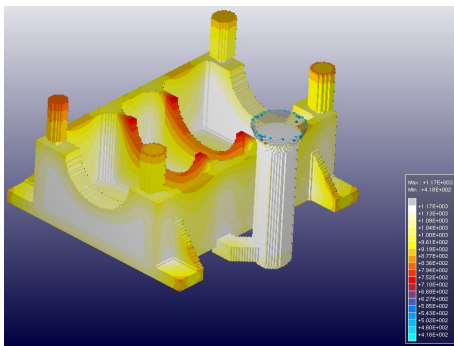


(a) A type

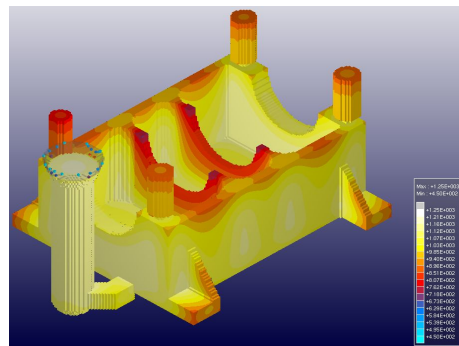


(b) B type

Fig. 4.26 The solidification temperature results 60%

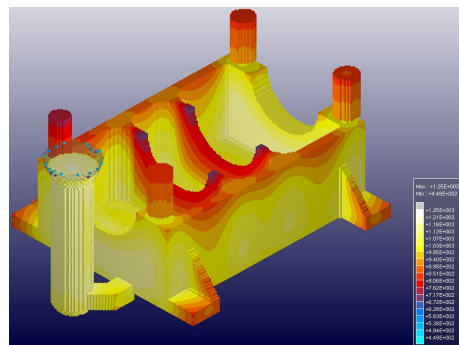
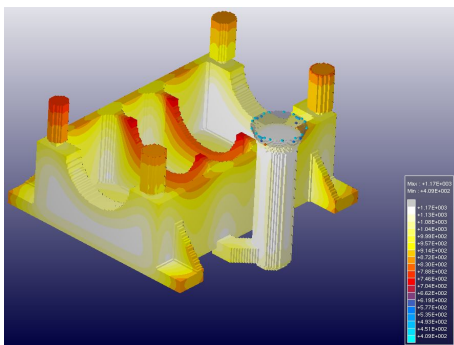


(a) A type



(b) B type

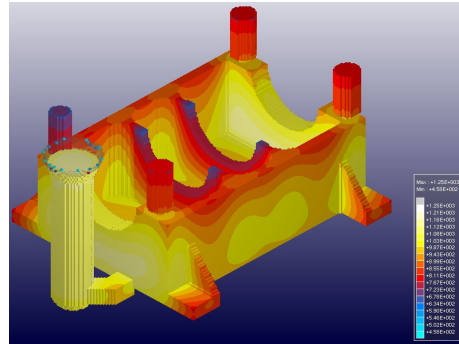
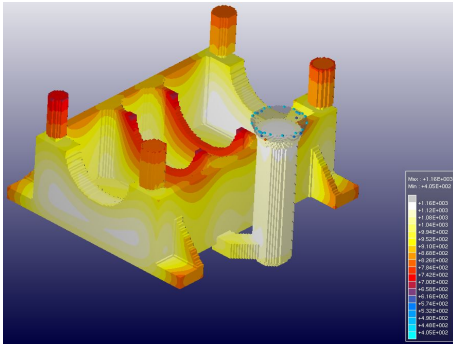
Fig. 4.27 The solidification temperature results 70%



(a) A type

(b) B type

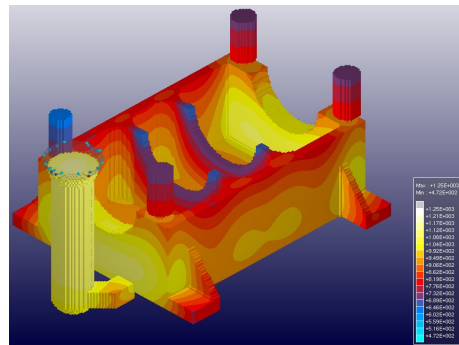
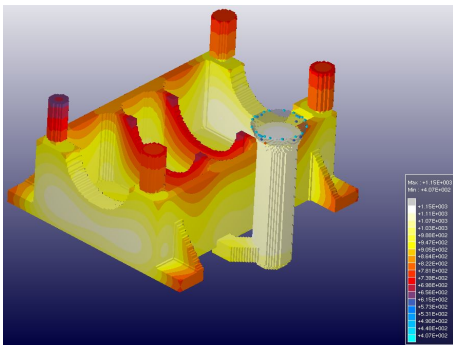
Fig. 4.28 The solidification temperature results 80%



(a) A type

(b) B type

Fig. 4.29 The solidification temperature results 90%



(a) A type

(b) B type

Fig. 4.30 The solidification temperature results 100%

## 제 5 장 경도시험

Fig. 4.31에서 표시된 1, 2, 3, 4, 5 및 6부위의 시험편을 채취하여 브리넬 경도시험을 행하였으며, 그 결과를 Table 4.1에 나타내었다. A-type과 B-type 경도시험 결과 B-type 시험모델에서 경도 값이  $H_B210$ 이상으로 측정되었다. Fig. 4.32~Fig. 4.33의 그림에서와 같이 각각의 위치에 따른 데이터 값의 평균값이 거의 같게 나타났으며, 최적상태의 주조모델에서 높게 측정되었으며, 약간의 미소한 차이가 있는 것은 측정 오차에 의한 것으로 사료된다.

컴퓨터 시뮬레이션에 의한 해석의 수정과 반복 해석에 의한 최적의 주조 조건을 구하였으며, 최종 주조조건에 의해 제품의 경도 값이 높게 측정되었음을 정확히 알 수 있었다. 이것은 주조과정에서 발생하는 시행착오에 의해 발생되는 비용, 시간 및 운영상 측면에서 현저하게 줄일 수 있으며, 선택부품의 해석결과로 제품의 신뢰성을 확보 할 수 있었다.

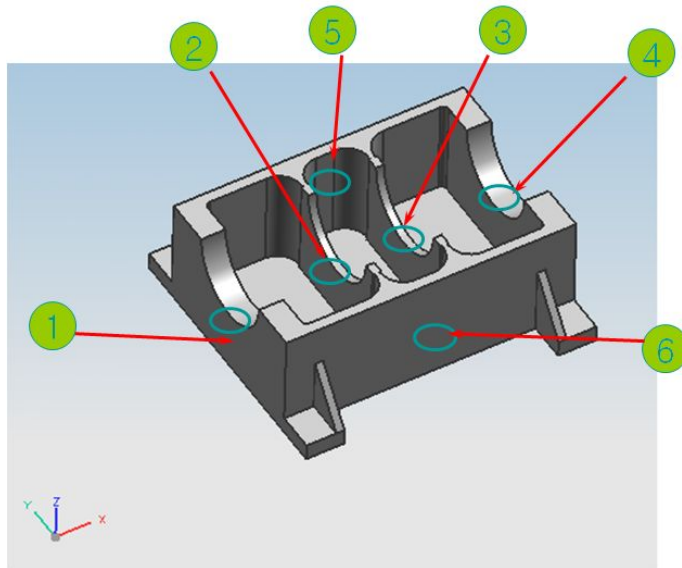


Fig. 4.31  $H_B$  hardness test zone

Table 4.1 Hardness test results (H<sub>B</sub>)

	A type	B type
A	203	214
B	201	212
C	199	213
D	202	216
E	198	215
F	204	217
Average	201.17	214.50

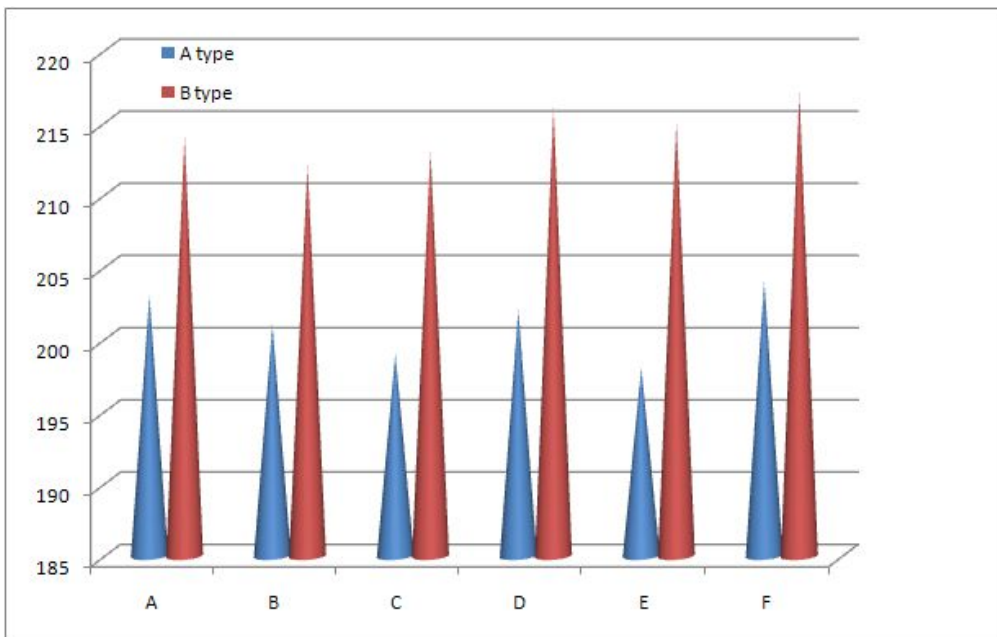


Fig. 4.32 Measurement results to the H<sub>B</sub> hardness test



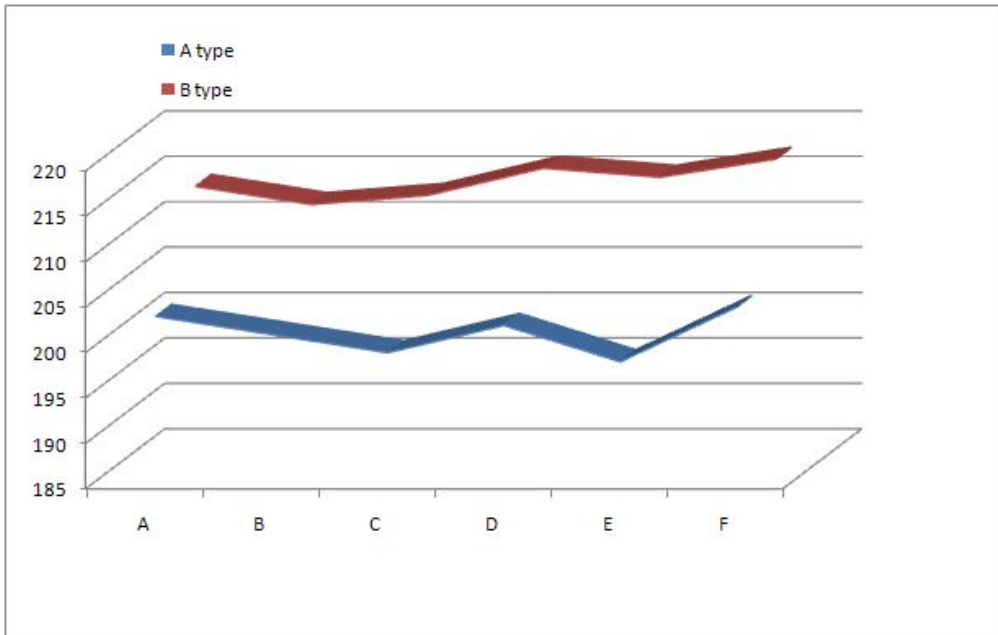


Fig. 4.33 Brinell hardness test

## 제 6 장 결론

본 연구는 초고압펌프 메인바디를 구상흑연주철 FCD500을 이용하여 개발하였으며, 주조방안 개선을 위한 주조과정에서의 유동 및 응고 과정에 따르는 제현상들을 정량적으로 예측하고, 주조에서 얻은 시험편을 채취한 후 경도시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초고압펌프 메인바디 시험모델을 대상으로 주조과정에서 영향을 줄 수 있는 인자들에 대하여 조사를 하였으며, 게이트부 위치변화에 따라 유동 및 응고과정에서 기공, 용탕 유동 및 응고에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

2. 최적의 주조조건을 선정하여 실제 제품 형상의 주조에 적용하였으며, 용탕의 온도가 1250℃ ~ 1300℃에서 최적의 유동 흐름을 알 수 있었다. 또한, 충전 완료 후 응고 진행률이 40%~50% 진행 후 급속히 응고시작 되었으며, 이때의 온도가 900℃ ~ 1100℃로 측정 되었다. 또한, 900℃ 이하에서는 부품의 중심부에 일정 시간동안 온도를 유지하여 부품내의 열적 안정성 및 구상흑연 주철의 조직의 안정화를 가져왔다.

3. 주조방안 A-type과 B-type 비교 분석 결과 게이트부의 위치가 제품의 결함에 많은 영향을 주었으며, 오버플로우는 응고 시 수축에 따른 주물폼에 역으로 충전해주는 역할을 하였다. 또한, 시험 모델을 대상으로 결함이 예상 되는 부위의 시험편을 채취하여 브리넬 경도시험을 행하였으며, 그 결과 측면에서 게이트부를 설치한 모델에서 경도 값이 H<sub>B</sub>210이상으로 측정 되어 현장에서 일부 사용하는 모델이 결함이 발생할 수 있음을 확인 하였다.

## 참고문헌

1. MAGMA Gi ereitechnologie Gmbh, "MAGMASOFT User ' s Tutorial Manual". 1997.
2. N. S. Kim, C. G. Kang, " An investigation of flow characteristics onsidering the effect of viscosity variation in the thixoforming process", Journal of material processing technology Vol. 103, pp. 237, 2000.
3. 福永秀春, 粉離型劑の初期潤滑性について, Japan Die Casting Association, JD92- 04, pp. 28, 1992.
4. C. Mitterer , F. Holler , F. Ü stel, D. Heim, "Application of hard coatings in aluminium die casting - soldering, erosion and thermal fatigue behaviour ", surface and Coatings T echnology Vol.125, pp. 233, 2000.
5. G. Bar-Meir, E. R. G. Eckert, R. J. Goldstein, "Pressure Die Casting: A Model of Vacuum Pumping", Journal of Manufacturing Science & Engineering - Transactions of the ASME , Vol.118, pp. 259, 1996.
6. A. Jackson, T. Sheppard, "Extrusion Limit Diagrams: Effect of Homogenising Conditions and Extension to Productivity Analysis", Materials science and technology, Vol. 13, pp. 61~68, January 1997.
7. O. Reiso, "The Effect of Billet Preheating Practice on Extrudability of AlMaSi Alloys", Preceeding of the fourth Int'l aluminum extrusion technology seminar, Vol. 1, pp. 287~295, 1988.
8. R. J. Dashwood, H. B. McShane, A. Jackson, "Computer Prediction of

- Extrusion Limit Diagrams”, Preceding of the fourth Int’l aluminum extrusion technology seminar, Vol. 1, pp. 287~295, 1988.
9. N. K. Nanda, K. A. Smith, V. R. Voller and K. F. Haberle, “ Feature-Based Design of Gates and Risers in a Casting”, Applications in Materials Science and Engineering, The Minerals, Metals & Materials Society, pp.75-84, 1994.
  10. S. Okaniwa, “アルミニウム押し”, 軽金属, Vol. 40, No. 1, pp.64~73, 1990.
  11. S. Okaniwa, “アルミニウム押し”, 軽金属, Vol. 45, No. 8, pp. 471~489, 1995.
  12. E. Niyama and K. Anzai ; Material process vol. 34, No. 3, 1993.
  13. P.N.Hansen, E. Flender and J. C. Sturm : int. Conf. On Best practice in foundries 11, 1993.
  14. B.H.Hu, K.K. Tong, X.P. Niu, I. Pinwill, i Journal of Materials Processing Technology 2000 Vol. 105, pp. 128~133, 2000.
  15. Song, R., Dhatt, G. and Cheikh, A. Ben, “Thermo-Mechanical Finite Element Model of Casting Systems,” International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 30, pp. 579~599, 1990.
  16. Aboutalebi, M. Reza, Hasan, M. and Guthrie, R. I. L., “Coupled Turbulent Flow, Heat, and Solute Transport in Continuous Casting Processes,” Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 28B, pp. 731~744, 1995.
  17. B.H.Hu, K.K. Tong, X.P. Niu, I. Pinwill, i Journal of Materials Processing Technology 2000 Vol. 105 pp. 128~133, 2000.

18. D.G.R. Sharma, M. Krishnan, AFS Transactions, pp. 429~438, 1991.
19. S. C. Lu, A. B. Rebello, R. A. Miller, G. L. Kinzel, R.Y. Yagel, "A simple visualization tool to support concurrent engineering design", Computer Aided Design, Vol.29, No.10, pp. 727, 1997.
20. Zhang Weishan, Xiong Shoumei and Liu Baicheng, "Study on a CAD/CAE System of Die Casting", J. of Mat . Science and T ech. Vol. 63, pp. 707, 1997.
21. Shamsuddin Sulaiman and Tham Chee Keen, "Flow Analysis along the Runner and Gating System of a Casting Process", J . of Mat . Science and Tech. Vol.63, pp. 690, 1997.
22. 鑄鐵製造技術；韓國生產技術研究院, pp.51~111, pp.263~308, 1997.
23. K. G. Davis and J. G. Magny, "Computer-Aided Riser Calculations for Steel Castings" , AFS Transactions vol 84-174, pp. 73-82, 1991.
24. J. D. Kim, "A Study on the Moulding Analysis of Compressive Load Support in the Ship Construction Curve Block", Graduate School of Industry, 2007.
25. J. Runyoro, S. M. A. Boubrabi, and J. Campbell, "Critical Gate Velocities for Film-Forming Casting Alloys", A Basis for a Process Specification , pp.1-31. 1992.
26. A. Jackson, T. Sheppard, "Observations on Production and Limit Diagrams for the Extrusion Process", Preceeding of the fourth Int'l aluminum extrusion technology seminar, Vol. 2, pp. 209~216, 1988.