

'98 추계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## CONV-2&3D 전산코드를 이용한 피막층 형성이 있는 금속용융물의 자연대류 열전달 해석

### Analysis of Natural Convection Heat Transfer with Crust Formation in the Molten Metal Pool using CONV-2&3D Computer Codes

박래준, 강경호, 김상백, 김희동

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

최상민

한국과학기술원  
대전광역시 유성구 구성동 373-1

#### 요약

원전의 중대사고 발생시 형성될수 있는 금속용융물에서 피막층을 동반하는 용융물의 자연대류 열전달 특성에 대한 실험결과를 검증하고 정밀 분석하기 위한 해석적 연구를 CONV-2&3D 전산코드를 이용하여 수행하였다. 본 연구대상 실험은 종횡비가 작은 경우와 큰 경우에 대하여 경계조건에 따라 용융물의 피막층 두께를 측정하고, 피막층 주변의 열전달량을 측정, 분석한 것이다[1, 2]. OECD/NEA 주관의 RASPLAV 프로젝트를 통하여 개발된 CONV-2&3D 전산코드를 이용하여 피막층 형성이 있는 용융물의 자연대류 열전달을 해석한 결과, 용융 금속의 Rayleigh-Benard 자연대류 흐름은 용융 금속의 불균일한 피막층 형성에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 피막층 두께에 대한 해석결과는 실험결과보다 실험중의 열손실 때문에 다소 높게 나타났다. 3차원 해석을 수행한 CONV-3D의 피막층 두께에 대한 계산결과는 2차원 해석을 수행한 CONV-2D 계산결과보다 다소 크게 나타나 실험 수행중의 3차원 유동 및 벽면효과를 확인할 수 있었다.

#### Abstract

Analytical studies have been performed on natural convection heat transfer with crust formation in a molten metal pool to validate and evaluate experimental data using the CONV-2&3D computer codes. Two types of steady state tests, a low and high geometric aspect ratio case in the molten metal pool, were performed to investigate crust thickness as a function of boundary conditions. The CONV-2&3D computer codes were developed under the OECD/NEA RASPLAV project to simulate two- and three-dimensional natural convection heat transfer with crust formation, respectively. The Rayleigh-Benard flow patterns in the molten metal pool contribute to the temperature distribution, which affects non-uniform crust formation. The CONV-2D results on crust thickness are a little higher than the experimental data because of heat loss during the test. In comparison of the CONV-3D results with the CONV-2D results on crust thickness, the three-dimensional results are higher than the two-dimensional results, because of three dimensional natural convection flow and wall effect.

#### 1. 개요

원전에서 핵연료가 용융되는 중대사고 발생시 노심용융물은 사고 전개과정에 따라 원자로용기 내부의 노심과 하부 plenum, 원자로용기 외부의 원자로공동(cavity) 등에 존재하여 용융 pool이 형성될 수 있으며, 형성된 노심용융 pool은 구성성분의 밀도차이 때문에 하부의 산화용융물층과 상부의

금속용융물층으로 분리될 수 있다. 하부의 산화용융물층은 핵연료 성분 때문에 붕괴열의 내부발열 자연대류 열전달이 발생하고 상부의 금속용융물층은 내부발열이 없는 대신 하부의 산화용융물층으로부터 열전달이 되는 하부가열 상부냉각의 Rayleigh-Benard 자연대류 열전달이 발생하게 된다. 이때 노심용융물 pool을 냉각하기 위하여 냉각수를 주입할 때 용융물과 냉각수 사이의 폭발적 반응이 발생하지 않는다면 노심용융물은 냉각수와 주변의 구조물과의 열전달로 고화되어 pool 외곽에 피막층(crust)이 형성될 수 있다. 이와 같은 용융 pool 경계에서의 피막층은 노심용융물과 냉각수 사이의 전도 열저항(conducting thermal barrier) 역할을 하여 용융물의 냉각을 방해할 수 있으며[3, 4], 노심용융물의 자연대류 열전달에도 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 노심용융물의 냉각특성을 정확하게 평가하기 위해서는 용융물과 냉각수의 초기 및 경계조건에 따른 용융물의 피막층 성장 과정과 피막층 형성에 따른 용융물 내부의 자연대류 열전달 특성을 정확하게 규명할 필요가 있다.

금속용융물 내에서 고화현상과 자연대류가 동시에 발생하는 복합 열전달 문제에 대한 연구는 적용범위는 많지만 해석의 복잡성으로 Viskanta[5] 외에는 거의 연구가 수행되지 않아 많은 연구가 필요하다. 상변화인 고화과정이 없는 순수 물질의 자연대류 열전달은 Pr수가 1보다 큰 물질에 대하여 많은 연구가 수행되었다[6, 7]. 이들 연구 결과에 의하면 밀폐된 공간에서 순수 물질의 자연대류 열전달량인 Nu수는 Ra수, Pr수, 종횡비 등의 변화에 따라 변화하며, 특히 Ra수 변화와 밀접한 관계가 있다. 따라서 자연대류 열전달이 발달될 때 Nu수는 Ra수, Pr수, 종횡비의 함수로 나타나며, 일반적으로 Ra수가 증가하고, Pr수가 증가하고, 종횡비가 감소할수록 Nu수는 증가한다고 알려져 있다. Pr수가 1보다 작은 금속용융물의 상변화인 고화과정과 자연대류가 동시에 발생하는 경우에는 고화가 자연대류 열전달량에 많은 영향을 미치며, 자연대류 열전달 형태가 용융물의 고화층 형성에 많은 영향을 미친다고 알려져 있다.

원전에서 중대사고 발생시 형성될 수 있는 금속용융물층의 냉각수에 의한 냉각특성을 규명하기 위하여 합금용융물 pool을 형성시키고 이를 냉각수의 자연대류와 강제대류를 통하여 냉각·고화되어 피막층을 형성할 때 피막층 형성과정, 피막층 두께, 피막층 주변의 열전달 특성 등을 규명하기 위한 정상상태 실험을 수행하여 그 결과를 발표하였다[1, 2]. 이 실험에서는 용융물층의 깊이를 달리하여 초기 종횡비가 각각 1/6과 4/5인 두 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 이와 같은 실험결과를 검증하고 평가하기 위하여 CONV-2&3D 전산코드를 이용하여 피막층 형성이 있는 용융물층에서 자연대류 열전달이 발생할 때 용융물 내부의 온도분포와 피막층 두께를 계산하는 해석적 연구를 수행하였다.

## 2. CONV 2&3D 관련 모델 및 입력

본 연구대상 실험에 대해서는 이미 발표를 하였기 때문에 본 논문에서는 이에 대한 기술을 생략하였다. 본 연구에서 사용한 CONV-2&3D 전산코드[8]는 OECD/NEA 주관의 RASPLAV 프로젝트[9]에서 용융물의 피막층 형성이 있는 자연대류 열전달에 대한 실험의 예비해석과 실험후 분석을 위하여 러시아의 Kurchatov 연구소에서 개발하였다. 이 전산코드는 Boussinesq 가설을 사용한 비정상(unsteady) 2차원(CONV-2D)과 3차원(CONV-3D) Navier-Stokes 방정식과 열생성이 있고 고화/액화의 상변화 과정을 모의하는 에너지 방정식을 사용한다. 상변화 모델에서는 무차원 Stefan 수를 도입하여 모의한다. 이들 방정식들은 직교좌표와 극좌표에 대하여 orthogonal curvilinear

격자점(grid)을 생성하여 유한차분법을 이용하여 풀이한다. 이 전산코드의 상세한 내용은 사용자 manual에 기술되어 있다[9].

CONV-2&3D 전산코드를 이용하여 실험을 해석하기 위하여 종횡비가 작고 큰 경우에 대하여 각각 실험용기내 용융물 만의 직교좌표로 2차원 3차원 입력모델을 설정하였다. 2차원 입력모델에서는 양측면은 단열이고 상부는 실험에서 측정된 온도를 사용하고 하부는 실험의 설정온도를 사용하였다. 3차원 입력모델에서는 2차원 입력모델과 같이 네 측면은 단열이고 상부면은 실험에서 측정된 온도가 일정하게 유지한다고 가정하였으며, 하부면은 실험의 설정온도를 사용하였다. CONV-2&3D 해석에 사용된 모든 물성값은 일정하다고 가정하였으며, 다음과 같은 격자점을 사용하여 SUN-Sparc Workstation 에서 계산하였다.

- 종횡비가 작은 경우의 CONV-2D : 45 x 15의 일정 격자점
- 종횡비가 큰 경우의 CONV-2D : 50 x 40의 일정 격자점
- 종횡비가 작은 경우의 CONV-3D : 45 x 15 x 15의 일정 격자점
- 종횡비가 큰 경우의 CONV-3D : 50 x 15 x 40의 일정 격자점

### 3. 해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 종횡비가 작은 경우와 큰 경우에 대하여 하부 설정온도에 따라 CONV-2&3D 계산을 수행하여 실험에서 측정할 수 없었던 용융물의 유동형태를 분석하였으며, 피막층 두께에 대한 실험결과를 검증하였다. 그림 1과 2는 하부 설정온도가 80 °C일때 종횡비가 작은 경우와 큰 경우의 용융물 온도분포에 대한 CONV-2D 계산결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 종횡비가 작은 경우는 3개의 Benard Cell이 발생하는 자연대류 흐름이 발달하였으며, 종횡비가 큰 경우는 1개의 큰 Benard Cell이 발생하여 이들 흐름이 용융물의 온도분포에 영향을 미쳤다. 또한 이와 같은 온도분포들은 용융물의 피막층 형성에 직접적인 영향을 미친다. 표 1과 표 2는 종횡비가 작은 경우와 큰 경우에 대하여 용융물의 피막층 두께 변화에 대한 CONV-2D 계산결과를 실험결과와 비교하여 보여주고 있다. 표에서 보는 바와 같이 피막층 두께에 대한 CONV-2D 계산결과는 실험결과에 비하여 다소 높게 나타나고 있다. 이와 같이 계산결과가 실험결과에 비하여 높게 나타난 것은 실험수행 중의 열손실 때문에 실험용기 중앙부분의 온도가 외곽부분의 온도보다 높았기 때문이다. 이와 같은 실험수행 중의 열손실 효과는 종횡비가 큰 경우가 Ra수가 크기 때문에 더 크게 나타났다.

그림 3과 4는 종횡비가 작은 경우의 용융물내 온도분포와 피막층 두께에 대한 CONV-3D 계산결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 Rayleigh-Benard 자연대류 열전달 흐름이 온도변화에 많은 영향을 미쳤으며 이에 따라 고화층 두께가 불균일하게 형성되었다. 그림 5와 6은 종횡비가 큰 경우의 용융물내 온도분포와 피막층 두께에 대한 CONV-3D 계산결과를 보여주고 있다. 종횡비가 큰 경우는 종횡비가 작은 경우와는 다르게 Rayleigh-Benard 자연대류 흐름이 다르게 나타나 이들 흐름이 피막층 두께를 불균일한 다른 모양으로 나타나게 했다. 이와 같은 불균일한 피막층 두께 형성은 실험 수행중에 확인한 바 있다. 표 3과 4는 종횡비가 작은 경우와 큰 경우에 대하여 용융물의 피막층 두께 변화에 대한 CONV-3D 계산결과를 실험결과와 비교하여 보여주고 있다. 표에서 보는 바와 같이 피막층 두께에 대한 CONV-3D 계산결과는 표 1과 표 2의 CONV-2D 계산결과보다 실험결과에 비하여 높게 나타나고 있다.

이와 같이 CONV-3D 계산결과가 CONV-2D 계산 결과와 다르게 나타난 것은 실험수행동안의 3차원 효과인 자연대류와 벽면효과 때문이다. 따라서 피막층 형성이 있는 용융물의 자연대류를 모의할 때는 이와 같은 3차원 효과를 고려하여야 할 것이다.

#### 4. 결론

CONV-2&3D 전산코드를 이용하여 피막층 형성이 있는 용융물의 자연대류에 대한 해석적 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 용융 금속의 Rayleigh-Benard 자연대류 흐름은 용융 금속의 피막층 형성에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 종횡비에 따라 이와 같은 자연대류 흐름은 다르게 나타났다.
- 피막층 두께에 대한 해석결과는 실험결과에 비하여 실험중의 열손실 때문에 다소 높게 나타났으며, 이와 같은 차이는 종횡비가 큰 경우에 더 크게 나타났다.
- 3차원 해석을 수행한 CONV-3D 결과는 2차원 해석을 수행한 CONV-2D 결과와 다소 다르게 나타나 실험 수행중의 3차원 효과인 자연대류와 벽면효과를 확인할 수 있었으며, 피막층 형성이 있는 용융물의 자연대류를 모의할 때는 이와 같은 3차원 효과를 고려하여야 할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발과제 일환으로 수행하였습니다.

#### 참고문헌

1. R. J. Park, S. J. Lee, S. K. Sim, and K. J. Yoo, "Crust Formation and Its Effect on the Molten Pool Coolability," Proc. of the 7<sup>th</sup> Int. Mtg. NURETH7, NUREG/CP-0142, Vol. 3, pp. 1863-1880, Saratoga Springs, New York, Sept. 10-15, 1995
2. R. J. Park, S. B. Kim, H. D. Kim, and S. M. Choi, "Crust Formation and Its Effect on Heat Transfer in the Molten Metal Pool," ARS 1997 Int. Meeting, Orlando, Florida, June 1-4, 1997
3. M. Epstein, "The MACE Internally-Heated Corium Pool: Was It a Thermal Oscillator ?," ANS Proceedings : '92 National Heat Transfer Conference, San Diego, August 12, 1992
4. J. M. Bonnet et al., "Coolability of Corium Spread on to Concrete Under Water, the PERCOLA Model," ANS Proceedings : '92 National Heat Transfer Conference, San Diego, August 12, 1992
5. C. Beckermann, R. Viskanta, "Effect of Solid Subcooling on Natural Convection Melting of a Pure Metal," J. of Heat Transfer, Vol. 111, pp. 416-424, 1989
6. A. Bejan et al., "The Prandtl Number Effect on the Transition in Natural Convection Along a Vertical Surface," J. of Heat Transfer, Vol. 112, pp. 787 - 790, 1990
7. M. Keyhani et al., "The Aspect Ratio Effect on Natural Convection in an Enclosure with Protruding Heat Sources," J. of Heat Transfer, Vol. 113, pp. 883 - 891, 1991
8. OECD/NEA, "Agreement on the OECD RASPLAV Project to investigate Molten Reactor Fuel Lower Pressure Vessel Head Interaction," 1994
9. IBRAE, "CONV-3D: An Integrated Computer Code for Numerical Modeling of Convection/Diffusion Processes with Regard for Melting," Russian Academy of Science, May 1997

표 1. 종횡비가 작은 경우의 피막층 두께에 대한 실험결과와 CONV-2D 계산결과의 비교

Bottom Surface Temp. (°C)	Top Surface Temp. (°C)	Liquid Area (m <sup>2</sup> )	Crust Thickness (cm)	
			Exp. Data	CONV-2D Results
100	69.4	3.2545e-2	0.02	0.27
100	68.5	3.2545e-2	0.11	0.27
90	69.9	3.2545e-2	0.01	0.27
90	67.9	3.2517e-2	0.18	0.27
90	64.6	2.9830e-2	0.52	0.87
90	62.1	2.5696e-2	0.86	1.79
80	68.9	3.2380e-2	0.25	0.30
80	62.3	1.6710e-2	2.38	3.79
80	56.9	1.4053e-2	3.61	4.38
80	50.5	9.8900e-3	4.30	5.30
80	48.0	9.5880e-3	4.68	5.37

표 2. 종횡비가 큰 경우의 피막층 두께에 대한 실험결과와 CONV-2D 계산결과의 비교

Bottom Surface Temp.(°C)	Top Surface Temp. (°C)	Liquid Area (m <sup>2</sup> )	Crust Thickness (cm)	
			Exp. Data	CONV-2D Results
90	68.4	4.9390e-2	0.12	0.24
85	66.0	4.8587e-2	0.43	0.57
85	63.6	4.7500e-2	0.57	1.00
80	66.6	4.7737e-2	0.55	0.91
80	61.1	4.2033e-2	0.92	3.20
80	57.6	3.4517e-2	1.59	6.20
75	67.3	3.2380e-2	1.66	1.65
75	61.7	2.8870e-2	4.74	8.45
75	58.1	1.7874e-2	7.16	12.85
75	43.8	9.5353e-3	10.78	16.19

표 3. 종횡비가 작은 경우의 피막층 두께에 대한 실험결과와 CONV-3D 계산결과의 비교

Bottom Surface Temp.(°C)	Top Surface Temp.(°C)	Liquid Volume (m <sup>3</sup> )	Crust Thickness (cm)	
			Exp. Data	CONV-3D Results
100	68.5	4.8657e-3	0.11	0.29
90	67.9	4.5800e-3	0.18	0.72
80	68.9	4.2841e-3	0.25	1.15

표 4. 종횡비가 큰 경우의 피막층 두께에 대한 실험결과와 CONV-3D 계산결과의 비교

Bottom Surface Temp. (°C)	Top Surface Temp. (°C)	Liquid Volume (m <sup>3</sup> )	Crust Thickness (cm)	
			Exp. Data	CONV-3D Results
90	68.4	7.2370e-3	0.12	0.69
85	66.0	6.4402e-3	0.43	2.93
80	66.6	5.6800e-2	0.55	4.85
75	67.3	4.5370e-2	1.66	7.90

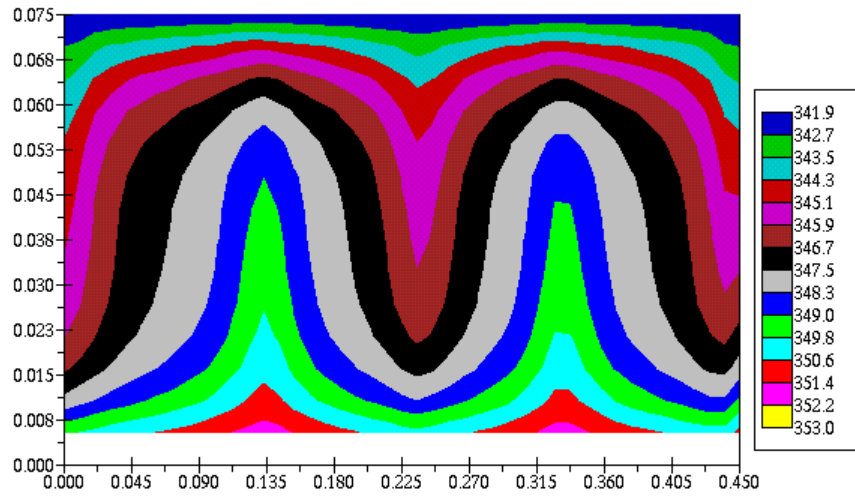


그림 1. 종횡비가 작은 경우의 하부온도가 80 °C일때 용융금속물에서의 온도 분포에 대한 CONV-2D 계산결과

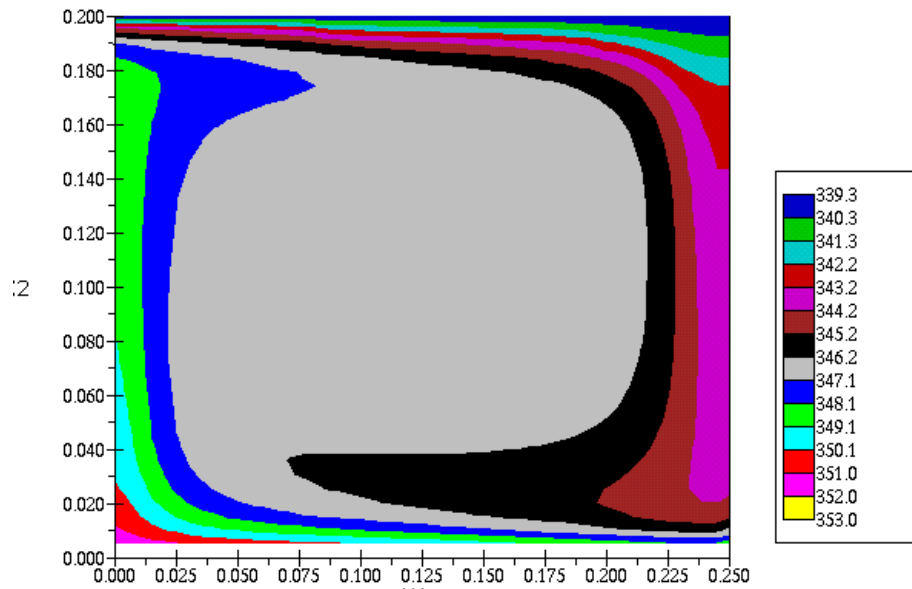


그림 2. 종횡비가 큰 경우의 하부온도가 80 °C일때 용융금속물에서의 온도 분포에 대한 CONV-2D 계산결과

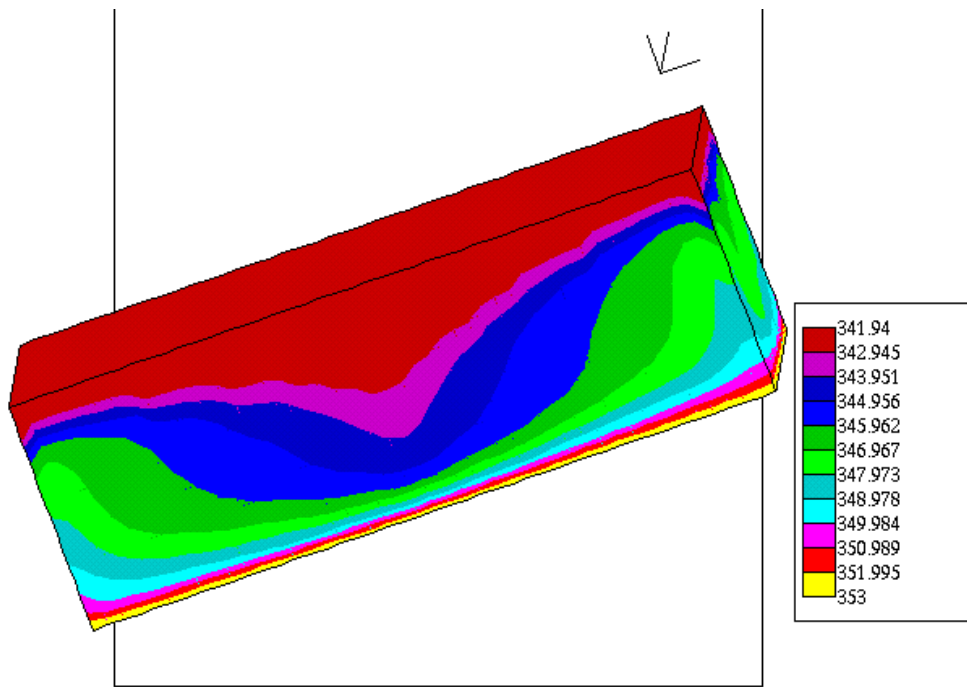


그림 3. 종횡비가 작은 경우의 하부온도가 80 °C일때 용융금속물에서의 온도 분포에 대한 CONV-3D 계산결과

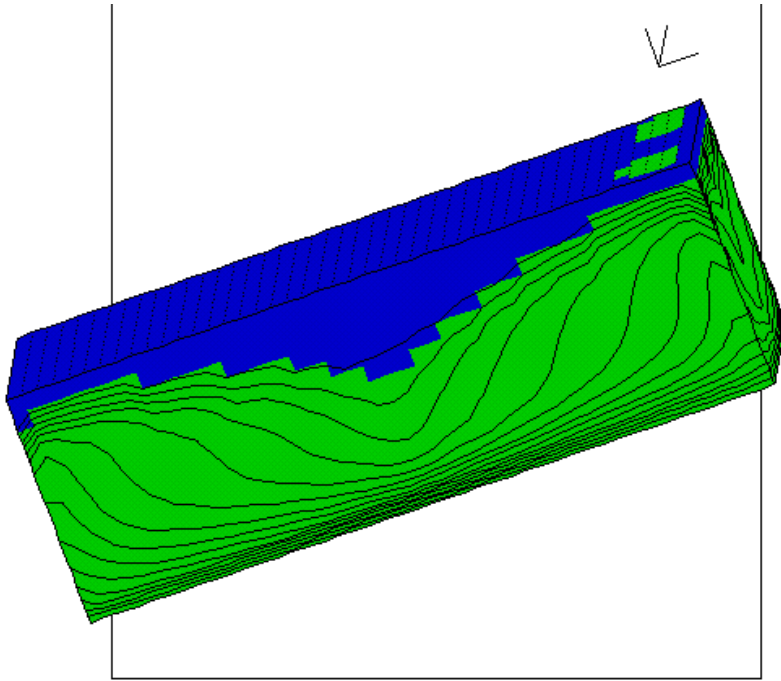


그림 4. 중횡비가 작은 경우의 하부온도가 80 °C일때 피막층 두께에 대한 CONV-3D 계산결과



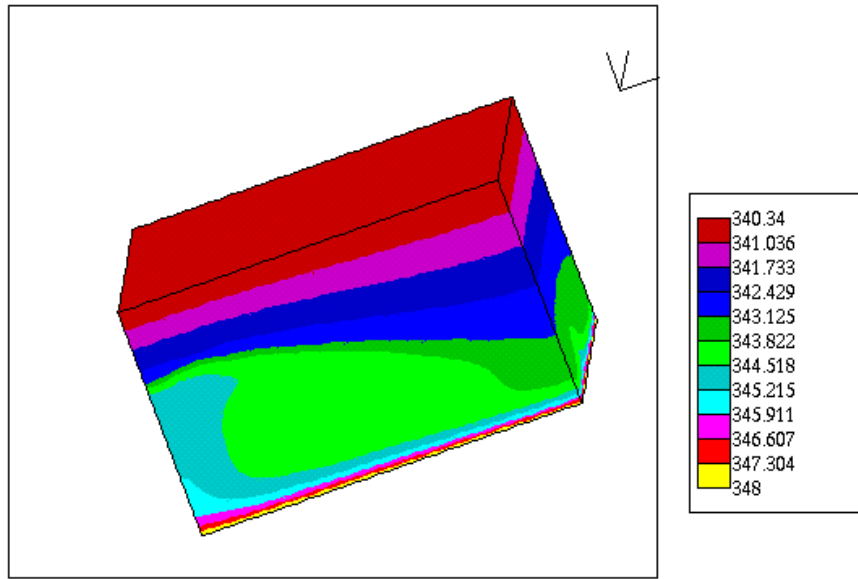


그림 5. 중횡비가 작은 경우의 하부온도가 75 °C일때 용융금속물에서의 온도 분포에 대한 CONV-3D 계산결과

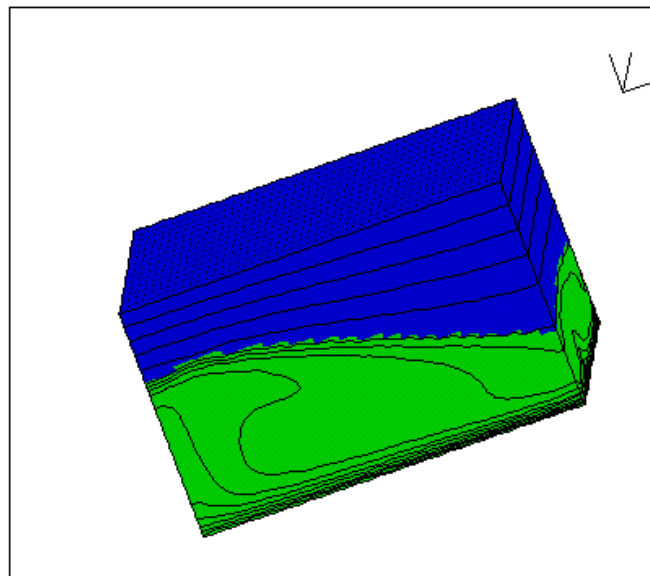


그림 6. 중횡비가 큰 경우의 하부온도가 75 °C일때 피막층 두께에 대한 CONV-3D 계산결과