

의료용 동위원소 운반용기 차폐체 주조해석 및 주조 방안

Solidification Analysis and Casting Design of the Casting Process for a Medical Radioisotope Transport Cask

이운상, 김희승, 장세정, 김기환, 이돈배, 서기석, 김창규

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

의료용 동위원소 운반용기의 차폐체는 차폐 성능이 우수한 감손우라늄을 사용하고 있다. 차폐체의 주조 방안을 수립하기 위해 응고해석 코드를 사용하여 압탕 지름에 따른 결함 발생 여부를 계산하여 보고, 결함이 없이 주조할 수 있는 주조 방안을 검토하였다. 주조해석 결과 압탕의 지름이 40 mm인 경우 수축공이 발생하는 것을 확인하였다.

Abstract

The shielding material of a shipping container for a medical radioisotope transport cask is usually made use of depleted uranium having a good shielding efficiency. In order to design optimum casting mold which will be used to cast the medical shielding cask without defects, the casting design factors were considered with the calculation results of solidification analysis of casting. The results of solidification analysis shows that there might be casting cavity on products with the riser diameter of 40 mm.

1. 서론

방사성 동위원소를 운반하기 위해서는 인체에 해롭지 않도록 차폐재로 차폐를 하도록 법에 규정되어 있다.[1-3] 운반하기 위한 방사성물질과 그 포장의 종류는 방사

성물질의 종류와 한계량에 따라, L형, IP형, A형, B형, C형, 핵분열성물질 운반물로 구분되어 있으며, 일반적으로 납, 텅스텐, 우라늄 등의 재료로 차폐 용기를 만들어 방사성 동위원소로부터 나오는 방사선을 차폐하고 있다. 높은 준위의 방사성 동위원소를 차폐시키기 위해서는 차폐효율이 좋은 우라늄을 사용한다. 감손우라늄을 사용하면 우라늄의 밀도가 높기 때문에 납 등에 비해 적은 체적으로 운반용기를 만들 수 있다. 감손우라늄은 텅스텐 등에 비해 주조성이 좋기 때문에 고효율의 운반용기는 감손우라늄을 사용하여 제작하고 있다.

한국원자력연구소에서는 현재 우리나라에서 전량 수입되고 있는 감손우라늄 차폐용기를 국산화하기 위해, 방사성 동위원소 운반용기에 대한 설계 및 제작에 관한 연구가 진행 중이다. 운반용기를 제작하기 위해서는 우라늄을 용해하고 주조할 수 있는 주조장치를 사용하여 감손우라늄 차폐체를 주조하게 된다.

차폐체를 주조하기 위해서는 감손우라늄을 용해 한 후 주형에 용탕을 충전시켜 응고시키게 된다. 이 때 주형의 크기, 온도구배, 압탕의 크기 등에 따라 주물에 결함이 발생할 수 있다. 따라서 결함이 없는 차폐체를 주조하기 위해서는 경험에 의해 주조 방안을 설계할 수도 있으나, 요즘에는 컴퓨터를 사용하여 응고해석을 수행하여 실제 주조 방안을 분석하고 결함 발생 여부를 확인한 후 주조 방안을 수립하는 추세이다. 따라서 이 연구에서는 주조해석 프로그램인 Z-CAST를 사용하여 주조해석을 수행하고, 결함이 없이 주조할 수 있는 주조방안을 제시하고자 한다.

2. 운반용기 차폐체 형상

2호 의료용 방사성 동위원소 운반용기의 조립도는 그림 1과 같은 형상으로, ^{192}Ir 13.5 Ci의 밀봉선원 2개를 지름 9.5 mm의 티타늄 튜브를 곡률 55 mm를 갖도록 벤딩하여 U자 형태로 만든 안내관 안에 밀봉캡슐에 동위원소를 넣도록 설계하였다. 선원을 중심으로 일정한 두께의 감손우라늄을 감싸서 방사선량이 요구되는 허용치 이하가 되도록 계산하여 형상을 결정하였다. 감손우라늄 차폐체의 형상은 그림 2와 같으며, 폭 118 mm, 두께 90 mm 높이 157 mm로 되어 있다.

3. 차폐체 주조 방안

완전한 주물을 경제적으로 만들기 위해서는 주조에 영향을 미치는 여러 가지 요소를 분석한 뒤 가장 적절한 주조방법을 계획하게 된다. 주조방안의 내용으로는 원료의 품질, 용해에 관한 사항, 주형재료에 관한 사항, 조형에 관한 사항(주형제작), 주입에 관한 사항(주입온도, 주입속도, 주형의 상태), 다듬질에 관한 사항 등을 고려해야 하는데 현실적으로 주조방안을 설정함에 있어서 반드시 그 주물에 가장 적합한 각 요소를 자유로이 설정할 수가 없을 때가 많다. 일반적으로 주조방안이라는 것은 주입 용탕의 중량, 주입속도, 주입온도 등을 고려하여 탕구계를 설계하는 주형 설계를 의미하기도 한다. [4]

3.1 주형 설계

3.1.1 응고 수축율

주형을 설계하기 위해서는 수축율을 고려해서 만들고자 하는 최종 제품보다 크게 제작되어야 한다. 그 동안의 경험에 의해 우라늄의 응고수축율은 약 2.2%로 적용하였다.

3.1.2 주입 용탕 중량 및 주입 시간의 결정

그림 1의 체적은 약 612 cm³로서 우라늄 약 10.7 kg(U-0.2%Mo 밀도 17.6으로 계산)에 해당된다. 압탕 부의 크기를 고려하여 대략 15 kg을 주입량으로 하였다. 적절한 주입시간이 정해지면 용탕의 유속을 고려하여 탕구 계통 각부의 크기가 결정된다. H.W.Dietert를 비롯해서 주입시간을 계산하는 여러 식이 발표되어 있으나 완벽하게 주입시간을 계산할 수 있는 계산식은 없다. 그러나 다음과 같은 H.W.Dieter 식을 사용하여 주입시간을 계산하였다.

$$T = S\sqrt{W}$$

T: 주입시간[s]

S: 살두께에 따라서 정해지는 계수

W: 주입용탕 중량[kg]

살두께 4.0 ~ 8.0 mm 일 때 S=1.84, 여기서 살두께란 주물의 가장 얇은 부분을 선택한다.

위 식에 의해 계산하면 주입시간은 약 7초 이내에 이루어져야 한다.

3.1.3 노즐의 크기

위에서 계산한 주입시간 내에 용탕을 주입하기 위해, 노즐의 지름을 약 25 mm로 할 경우 주입 시간은 6초 정도 걸리며, 35 mm로 할 경우는 3초 정도 걸린다.

3.1.4 압탕의 설계

압탕은 주입된 주형 내의 용탕에 정압을 부여하여 이것에 의해 정체하고 있는 가스나 용탕에서 발생하는 가스를 제거하는 동시에 용탕의 냉각 및 응고에 따라서 생기는 용탕의 수축에 대하여 용탕을 보급하는 것을 목적으로 한다. 압탕의 설계 조건으로는 압탕이 주물보다 나중에 응고가 되어 하며, 압탕이 가지는 액상금속의 압력이 주물의 모든 부분에 골고루 미치는 위치에 설계되도록 해야 한다. 따라서 이 경우에는 압탕은 탕구와 겸용으로 직하 압탕(top riser)으로 하였고, 압탕의 용탕이

보온되어 지향성 응고가 일어나도록 하기 위해 Graphite를 가공하여 슬리브를 설치하였다.

4. 주조 해석 조건

위에서 설계한 압탕과 주형에 대해 주물에 발생할 수 있는 수축공 등의 결함 발생 여부를 확인하기 위해, 유한차분법(FDM)을 적용한 3차원 컴퓨터 Simulation software인 Z-CAST를 사용하여 유동 해석 및 응고해석을 수행하여, 결함이 발생할 수 있는 부위를 확인하여 보았다.

주조해석의 변수로는 압탕의 크기, 주형의 예열 온도 및 온도 구배, 주형의 크기, 도가니의 노즐 크기 등의 변수가 있다. 표 1 및 2는 각 구성품의 재료 상수 값 및 경계조건으로 사용되는 온도 값에 대한 내용이다. Graphite 몰드와 공기의 열전달 계수 h_a 값은 1.4×10^{-3} cal/cm, 용탕과 몰드와의 접촉 열전달계수는 2.4×10^{-2} cal/cm²·s·℃로 설정하였다.

표 1. 재료 상수값

	Specific Heat (cal/g · K)		Thermal Conductivity (cal/cm · K · sec)		Heat of Fusion (kJ/mol)	density (g/cm ³)		viscosity (m/Nsm ⁻²)
Uranium	0.02771	20 ℃	0.05378	20 ℃	12.5	19.05	α	6.5 (m.p)
	0.04443	600℃	0.08498	600℃		18.89	β	
	0.04204	700℃	0.09036	700℃		17.9	γ	
	0.03822	800℃	0.09574	800℃				
	0.3702	solid	$0.0527+5.38 \times 10^{-5} T$	solid				
	0.04299	liquid	0.8440	liquid				
	액상선 온도: 1132℃, 고상선온도: 1131℃							
	Specific Heat (cal/g · K)		Thermal Conductivity (cal/cm · K · sec)		Heat of Fusion (kJ/mol)	density (g/cm ³)		viscosity (m/Nsm ⁻²)
Graphite	0.4		0.25614	20℃		1.62		
			0.17236	600℃				
			0.15897	700℃				
			0.14468	800℃				
			$0.259-1.429 \times 10^{-4} \times T$					
	Specific Heat (cal/g · K)		Thermal Conductivity (cal/cm · K · sec)		Heat of Fusion (kJ/mol)	density (g/cm ³)		viscosity (m/Nsm ⁻²)
Ti	0.12611	50℃	0.03822	20 ~ 100℃		4.51		

표 2. 입력 변수값 (온도)

Model	Material	Initial Temp	Environment Temp
metal	Depleted Uranuim	1350	25
riser	Depleted Uranuim	1350	25
Mold 상	Graphite	600	25
Mold 중	Graphite	450	25
Mold 하	Graphite	300	25

해석 조건의 입력은 해석 대상인 차폐체의 주형을 구성하고 있는 티타늄 튜브, 감손우라늄 주물, 슬리브, 탕도, 분배기, 압탕 등을 3차원 CAD 도면을 생성하여 입력시켰다. 압탕을 변수로 하여 압탕(riser)의 지름을 변경해가며 계산하였고, 다음 표와 같이 압탕 및 주형의 크기를 변화시켜가면서 결함 발생 여부를 확인하였다.

표 3. 계산 시 압탕 및 주형 크기 조건

경우	압탕크기		주형크기	
	지름	높이	지름	높이
방안 1	100	135	290	360
방안 2	40	70	290	300
방안 3	50	70	290	300
방안 4	60	70	290	300
방안 5	70	70	290	300

각 구성품에 대한 재료 상수값을 입력하고, 수축공 솔버를 선택하여 수축률 2.2%, 한계고상율을 70%로 주어 응고해석을 수행하였다.

메쉬는 등간격으로 100만개로 나누었으며 그림 3은 메쉬의 일부로서 감손우라늄 주물 부분만 나타낸 것이다.

5. 주조 해석 결과

주조방안 1은 주형 및 압탕을 충분히 주어 계산을 해보았다. 주형의 예열 온도는 온도구배를 주지 않았고, 25 ℃하여 계산하였다. 메쉬는 450만개로 나누었다. 주형의 크기를 지름 300mm, 높이 360, 압탕의 크기를 지름 100 mm(압탕 목의 지름은

80 mm), 높이 135 mm로 한 결과는 그림 4와 같다. 해석 결과 약 185 초 후에 완전히 응고가 이루어졌으며, 제품에서 압탕 방향으로 지향성 응고가 형성되어 수축 결함이 발생하지 않을 것으로 예상되었다.

압탕을 줄이기 위해 압탕의 높이를 70 mm로 하였으며, 압탕의 지름을 70, 60, 50, 40 mm에 대해 순차적으로 계산하여 보았다. 계산 결과 그림 5는 압탕 지름을 50 mm로 했을 때의 결과이고, 그림 6은 압탕 지름을 40 mm로 했을 때의 결과이다. 이 때 응고가 완료되는 시간은 약 83초 걸렸다.

6. 결론

의료용 동위원소 운반용기의 감손우라늄 차폐체를 결함없이 주조하기 위한 주조 방안을 수립하기 위하여 주형의 크기, 온도 구배, 주입 속도, 압탕 크기 등을 정하고, 주조해석 프로그램인 Z-CAST를 사용하여 주조해석을 해 본 결과 압탕의 지름이 40 mm 인 경우 수축공이 발생하는 것을 확인할 수 있었으므로, 차폐체 주형 제작 시 압탕의 크기는 지름이 적어도 40 mm 이상이 되도록 제작되어야 하겠다.

이 연구를 통하여, 현재 전량 수입되고 있는 의료용 동위원소 운반용기를 국산화할 수 있다.

감사의 글: 본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기사업의 일환으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] 과기부고시 제 96-38호, “방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정,” 1996.
- [2] IAEA, “IAEA Safety Standards Series No. ST-1 : Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material,” 1996.
- [3] US NRC, 10 CFR Part 71, “Packaging and Transportation of Radioactive Material,” 1989.
- [4] 김덕윤 편저, “주철주물의 주조방안”, 대광서림, 1997.

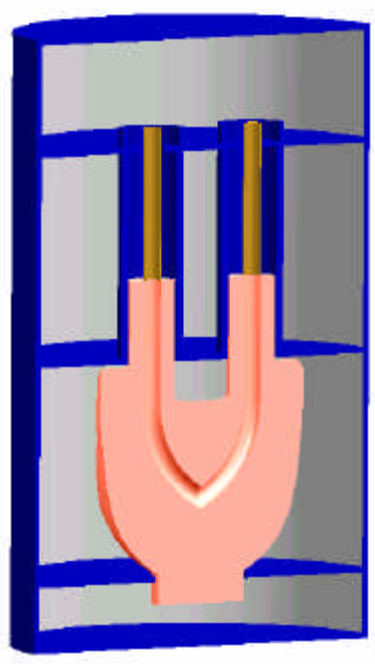


그림 1. 의료용 운반용기
차폐체 조립도

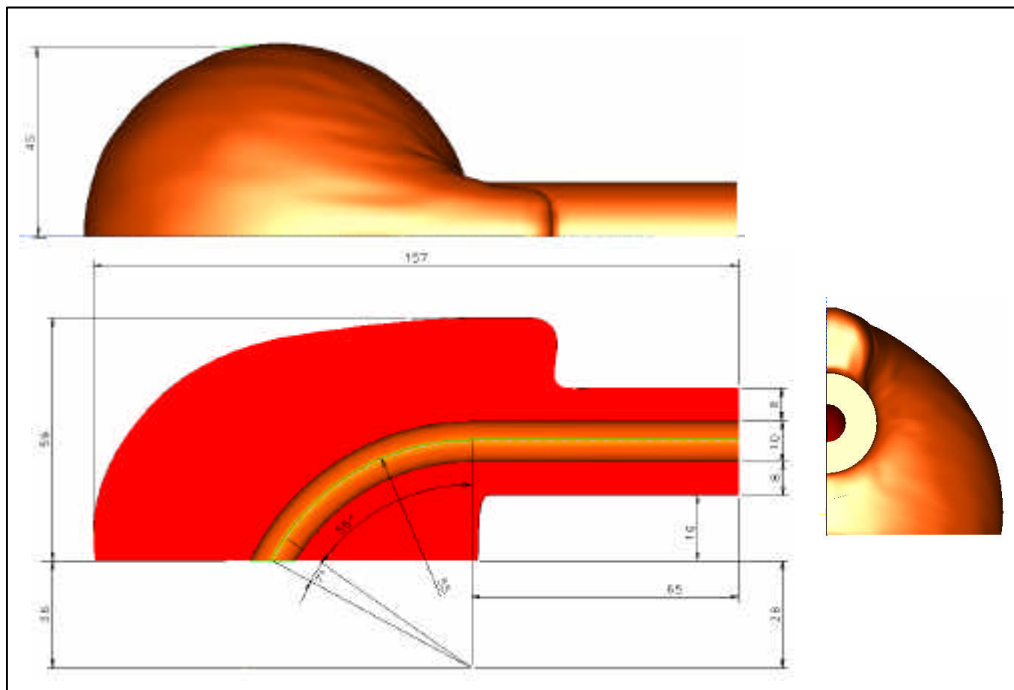


그림 2. 차폐체 형상

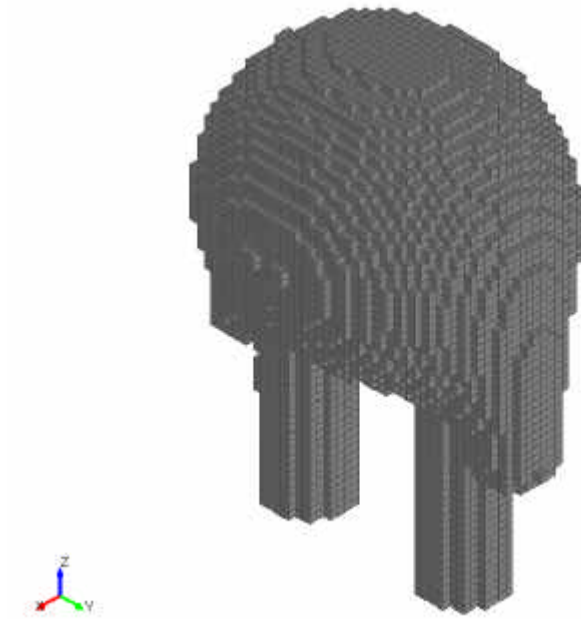


그림 3. 메쉬의 일부(감손우라늄 주물 부분)

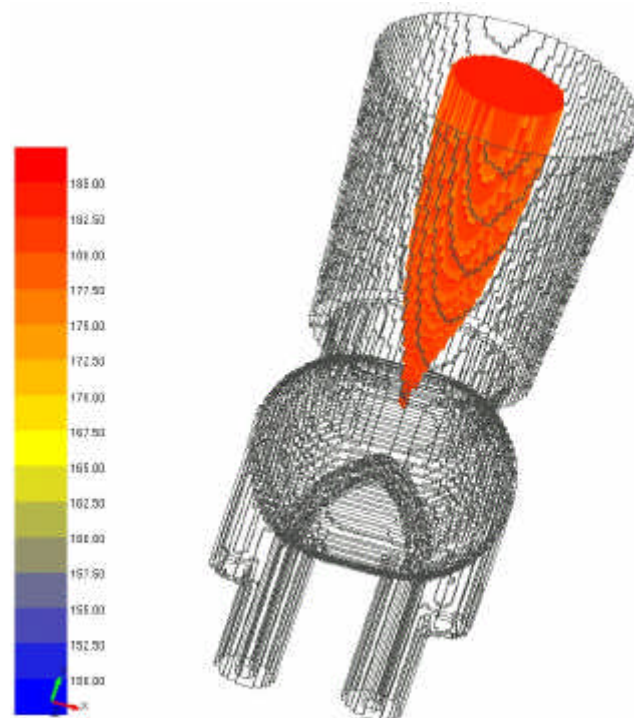


그림 4. 압탕 크기 D100 x H130의 계산 결과

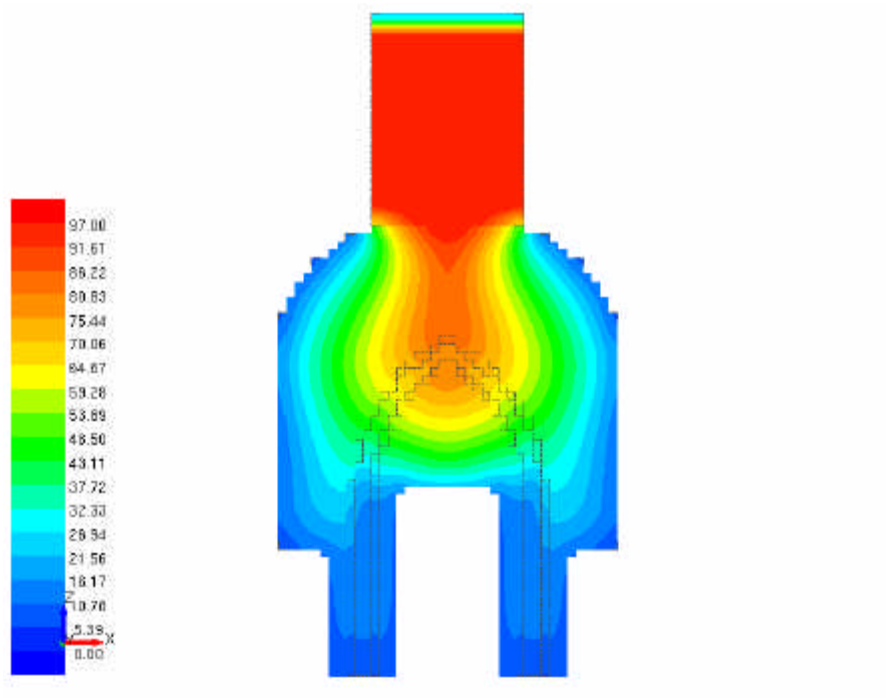


그림 5-a. 압탕 지름 50 mm 일때의 계산 결과(응고시간)

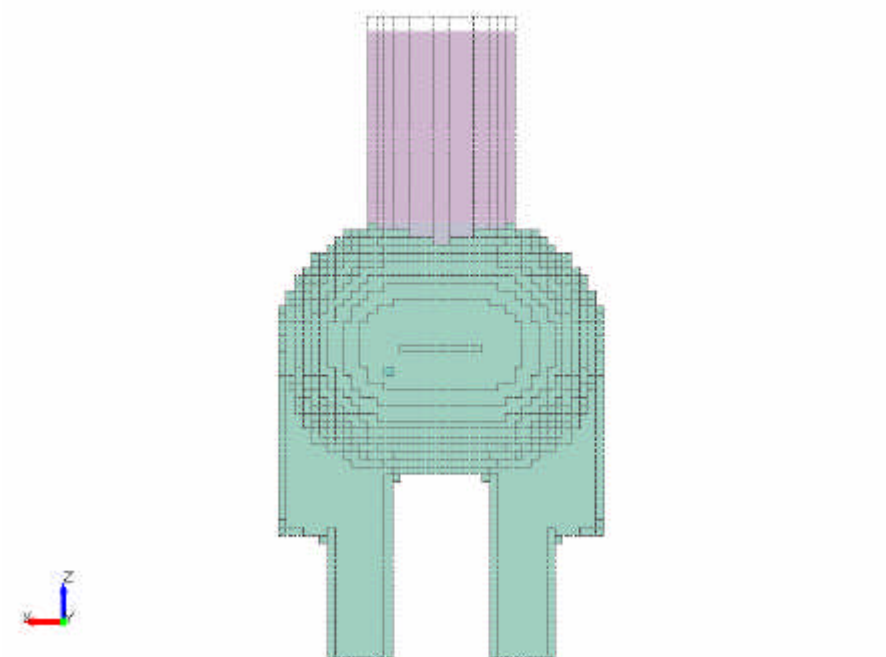


그림 5-b. 압탕 지름 50 mm 일때의 계산 결과(반투명수축)

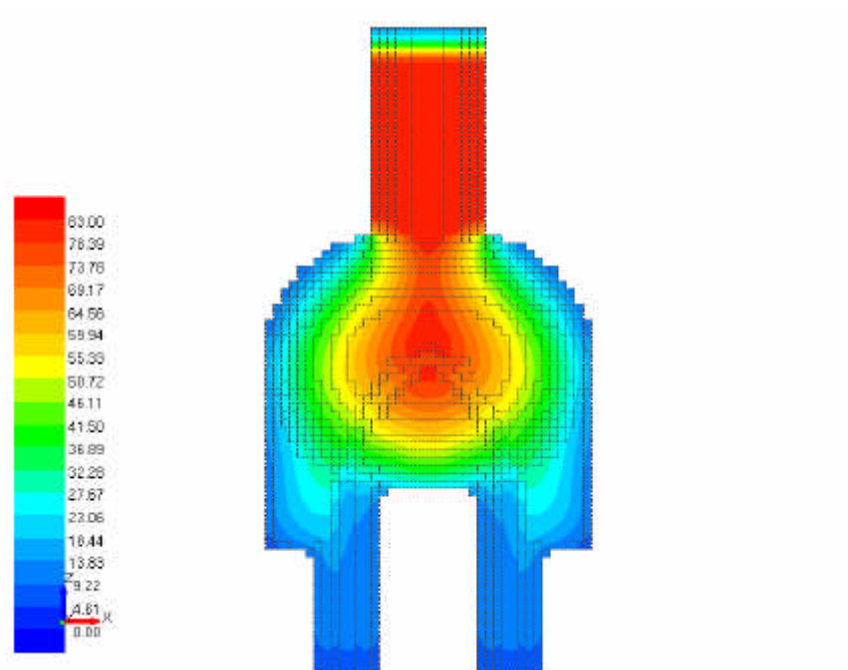


그림 6-a. 압탕 지름 40 mm 일때의 계산 결과(응고시간)

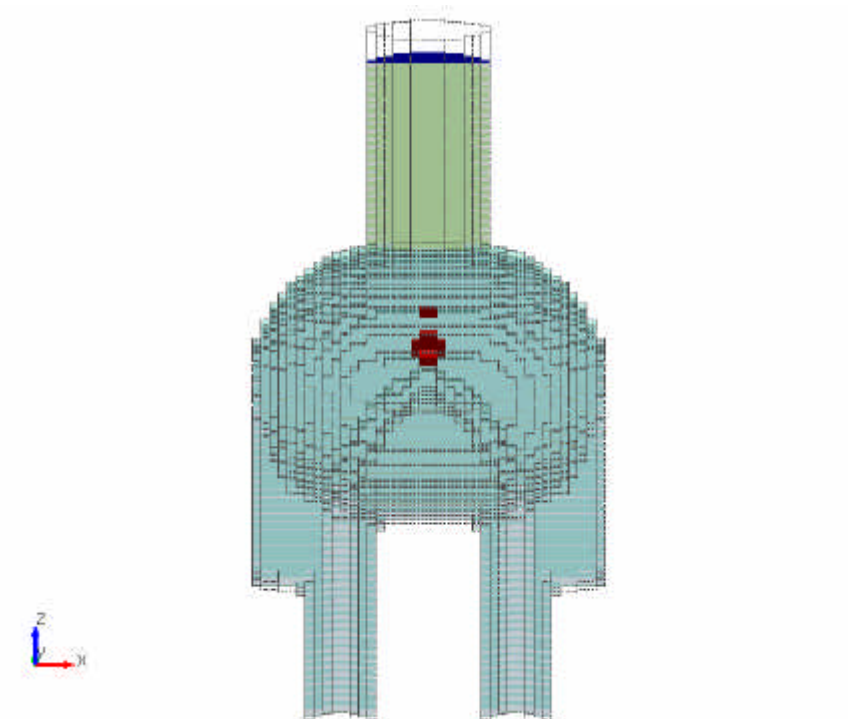


그림 6-b. 압탕 지름 60 mm 일때의 계산 결과(반투명수축)