

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.11.1175>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

원전용 금속단열재의 내부 형상결정을 위한 설계인자 별 열전달 특성 분석

송기오** · 유정호* · 이태호* · 전현익* · 하승우* · 조선영*

* 케이엘이에스 주식회사

Analysis of Heat Transfer Characteristics Based on Design Factors for Determining the Internal Geometry of Metal Insulation in Nuclear Power Plant

Ki O Song** , Jeong Ho Yu* , Tae Ho Lee* , Hyun Ik Jeon* , Seung Woo Ha* and Sun Young Cho*

* KLES Inc.

(Received March 23, 2015 ; Revised August 7, 2015 ; Accepted September 4, 2015)

Key Words: Metal Insulation(금속단열재), Heat Transfer Rate(열전달률), Conduction(열전도), Radiation(복사), Convective Heat Transfer(대류열전달), Concept Design(개념설계)

초록: 일반적으로 산업현장에서 많이 사용되고 있는 단열재는 유리섬유와 같은 열전도도가 낮은 재료를 사용함으로써 단열성능을 확보하고 있다. 이와 달리 원전용 금속단열재의 경우 높은 열전도도를 가진 TP 304 스테인리스 박판을 재료로 한정하고 있어 단열성능을 확보하기 위해서는 구조적 측면에서의 접근이 필요하다. 본 연구에서는 금속단열재 내부구조에 대한 설계인자를 전도, 대류, 복사로 구성된 3가지 열전달 모드를 고려해 추출하고 각 인자들이 열전달에 미치는 영향과 각각의 열전달이 전체 열전달에 차지하는 비율을 열 유동해석을 이용하여 파악하고자 하였다. 본 연구를 통해 단열재 내부에서 발생하는 대류현상을 최소화하기 위해 다수의 박판을 삽입함과 동시에 증가하는 전도 비율을 비교하여 내부형상결정을 위한 세 가지 열전달 모드 하에서의 단열성능을 분석하였다.

Abstract: A heat insulating material used in the industrial site normally derives its heat insulating performance by using a low thermal conductivity material such as glass fiber. In case of the metal insulation for nuclear power plant, in contrast, only TP 304 stainless steel foil having high thermal conductivity is the only acceptable material. So, it is required to approach in structural aspect to ensure the insulation performance. In this study, the design factors related to the metal insulation internal structure were determined considering the three modes of heat transfer, i.e., conduction, convection, and radiation. The analysis of heat flow was used to understand the ratio of the heat transfer from each factor to the overall heat transfer from all the factors. Based on this study, in order to minimize the convection phenomenon caused by the internal insulation, a multiple foil was inserted in the insulation. The increase in the conduction heat transfer rate was compared, and the insulation performance under the three modes of heat transfer was analyzed in order to determine the internal geometry.

1. 서론

원전냉각재상실 사고 시 발생하는 이물질로 인해 재순환 집수조 여과기가 막히거나 여과기를

통과한 이물질이 노심의 안정성을 저해하는 GSI-191 현안의 해결을 위해 여과기 설비개선이 이루어지고 있으며, 이와 같은 맥락으로 미국 원자력규제위원회는 SECY-12-93에서 제시한 바와 같이 기존 섬유질 단열재보다 수두손실 발생요인이 적은 내, 외피가 모두 TP304 스테인리스 재질인 금속단열재 사용을

† Corresponding Author, kiosong@kles.co.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

권고하고 있다.^(1,2) 하지만 TP304 스테인리스 재질의 금속단열재는 높은 열전도도로 인해 내열성이 우수하며, 열전도도가 작아 극한 환경에 노출되는 기기에 사용되는 섬유질로 된 단열재에 비해 단열성능이 떨어질 수밖에 없다.⁽³⁾ 따라서 금속단열재의 단열성능을 일정수준이상으로 향상시키기 위해서는 내외부간 열전달을 최소화할 수 있는 단열재 내부에 대한 열 차폐 설계가 필요하다.

본 연구에서는 3차원 해석모델에서 발생할 수 있는 수렴성 문제를 감안해 2차원 해석모델을 사용하여 세 가지 열전달 모드별 비율분석 및 내부 박판에 대한 기본 설계변수에 따른 열전달 해석을 선행한 후 설계인자 중 단열성능에 가장 지배적인 영향을 나타내는 박판 적층 수를 변수로 한 3차원 해석을 수행하였다. 설계변수에 따른 단열성능차이는 정상상태에서 외부 공기층과 접촉하는 외함 상부 평균온도 및 열전달 모드별 총 열전달률을 통해 비교하였다.

2. 2D 열전달 특성

2.1 해석조건 및 방법

설계인자 별 열전달 특성은 상용유체해석 솔버인 Fluent ver. 14를 이용해 2차원 열유동해석으로 확인하였다.⁽⁴⁾ 최초 기준모델을 이용하여 전도, 대류, 복사 세 가지 열전달 모드의 비율 분석을 수행한 후 박판 두께, 박판 적층 수, 박판형상과 같이 기본적인 설계 변수들의 영향을 분석하였다. 열전달 모드의 비율을 분석하기 위해 사용된 2차원 기준모델의 외함 크기는 폭 1,000mm, 높이 105mm이며 외함과 박판의 두께는 0.7mm, 박판 적층 수는 16개로 하였고 박판과 외함은 완전하게 접촉된 구조이다. 박판의 경우 외함의 폭과 크기에 비해 상대적으로 작고 두께 방향의 열전달 특성 변화는 크지 않을 것으로 예상되므로 단일 요소를 사용하여 해석 모델을 구성하였다.

Table 1 Material properties of TP 304SS and air

	TP 304SS	Air
Density(kg/m ³)	8030	Ideal Gas (Incompressible)
Specific Heat(J/kg·K)	502.48	1006.43
Thermal Conductivity(W/m·K)	16.27	0.0242
Absorption Coefficient(cm ⁻¹)	0.68	1.7894×10 ⁻⁵

설계 변수들의 영향을 분석하기 위해 사용된 2차원 모델은 외함 크기, 박판 두께를 기준모델과 동일하게 고정시키고 각 설계 변수에 따른 외함 표면온도와 총 열전달률 변화를 확인하였다. 경계조건으로 외함의 옆면은 단열처리를 하여 옆면을 통한 외부로의 열전달이 발생되지 않게 하였다. 열원온도는 613.15K, 외기온도는 300K, 자연대류로 열전달 계수는 5W/m²K로 가정하였으며, 복사 열전달에 주요한 인자인 TP304 스테인리스강의 방사율은 0.15로 하였다.^(5,6) 이 밖에 해석에 사용된 재료상수는 Table 1에 나타내었다.

2.2 열전달 모드별 비율 분석

열전달 모드별 온도분포는 Fig. 1과 같이 폭 방향으로 대칭임을 감안해 전체 모델의 절반만 나타내었다.

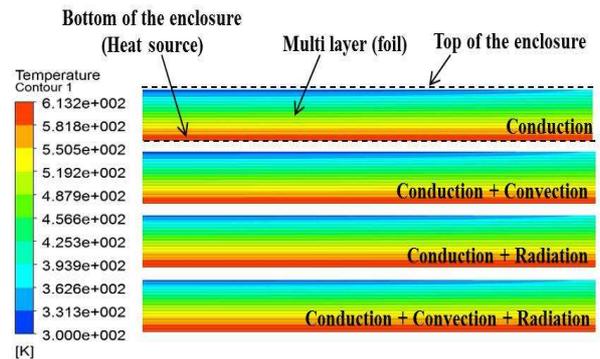


Fig. 1 Temp. contour according to combined heat transfer for 2D reference model

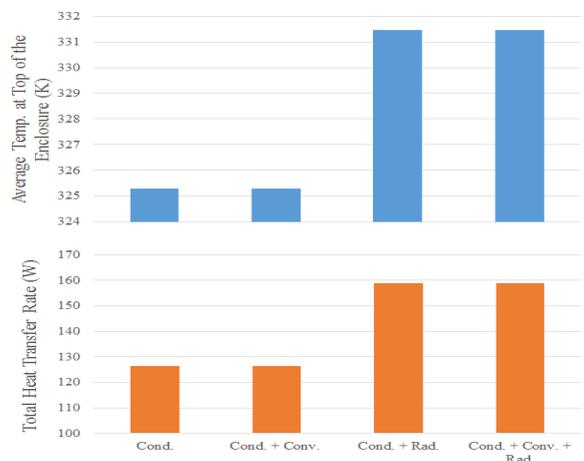


Fig. 2 Average temp. at top of the enclosure and total heat transfer rate of 2D reference model

공기층과 접촉하는 외함 상부 평균온도와 열원을 통해 전달되는 총 조합별 열전달률은 Fig. 2와 같다. 분석결과 전도+대류+복사 계산에서 총 열전달률(158.82W) 중 전도 79.5%(126W), 대류 1% 미만(0W), 복사 약 20%(32W)의 비율로 열전달이 발생하였다. 대류에 의한 열전달은 외함과 삽입된 16장 박판의 완전접촉으로 인해 무시할 수준으로 판단되며, 외함과 박판 간 접촉유무에 따른 영향은 박판 부착방법에서 재검토하였다.

2.3 설계인자 별 열전달 특성

내부 형상결정 시 주요한 설계인자를 박판두께, 박판적층 수, 박판형상, 박판과 외함 간 부착방법으로 구분하여 각 인자에 대한 열전달 특성을 분석하였다.

박판두께 변화에 따른 열전달 특성은 두께를 0.7, 0.35, 0.06mm로 구분하고 적층 수는 3개로 동일하게 구성한 후 전도, 전도+대류, 전도+복사 계산을 수행하였다. 박판 두께에 따른 외함 상부 평균온도와 총 열전달률의 변화량은 1% 미만으로 단열재 박판의 경우 설계 시 주요인자는 아닌 것으로 확인된다. 박판 두께 별 외함 상부 평균온도 및 열전달 모드 별 열전달률을 Fig. 3에 나타내었다. 평균온도가 비슷함에도 불구하고 열전달률이 두 배가량 차이를 보이는 이유는 실제 열전달량과 비교하면 약간의 정량적 차이가 존재할 수 있지만, 박판두께가 0.7일 때 전도와 전도+대류의 경우 온도차가 약 30K, 전도+대류와 전도+복사는 온도차는 대략 2K이다.

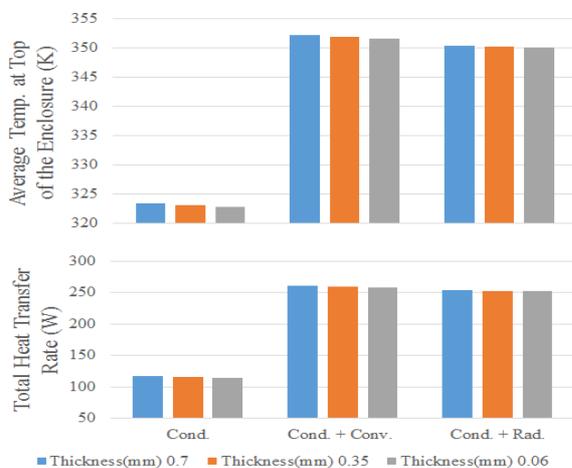


Fig. 3 Average temp. at top of the enclosure and total heat transfer rate for changes in thickness of TP 304SS foil

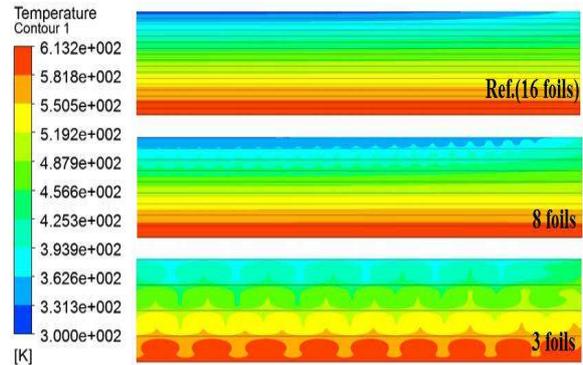


Fig. 4 Temp. contour for changes in No. of foils

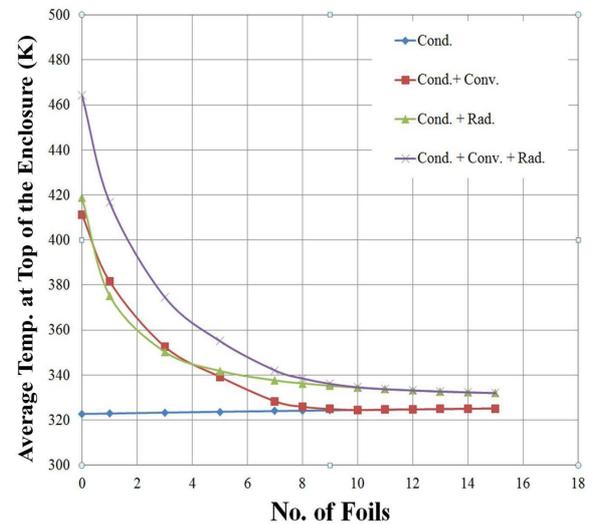


Fig. 5 Profiles for average temp. according to No. of foils at top of the enclosure

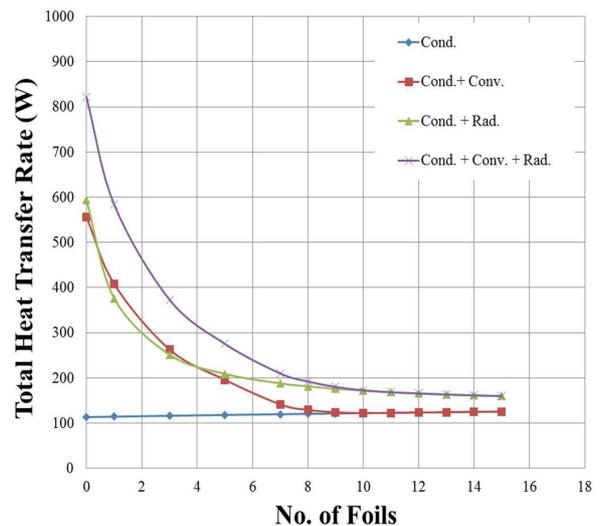


Fig. 6 Profiles for total heat transfer rate according to No. of foils

전도+복사 경우의 온도차가 약 2K임에도 불구하고 열전달이 약 8W가량(전도+대류 경우의 열전달의 3%) 차이 나는 것을 볼 때, 온도차가 약 30K이 될 때 열전달량 차이가 150W 가량(전도+대류 열전달량의 55%)으로 일관적이지 않게 결과가 나타난 것으로 판단된다.

박판 적층 수에 따른 열전달 특성을 확인하기 위해 적층 수를 0~15개로 변화시키면서 전도, 전도+대류, 전도+복사, 전도+대류+복사 열 해석 결과를 비교하였다.

Fig. 4에는 3, 8, 15장의 박판이 적층된 2D 모델의 온도분포를 나타내었으며, 외함 상부 평균 온도와 총 열전달률의 변화량은 Fig. 5, 6과 같다. 적층 수가 증가함에 따라 전도에 의한 평균온도와 열전달률은 미미하게 증가하지만 대류와 복사 측면에서의 열전달률은 큰 폭으로 감소하였다. 전도+대류+복사 결과로 볼 때 박판 적층 수가 감소할수록 총 열전달률이 증가할 뿐 아니라 대류 및 복사에 따른 열전달도 크게 나타났다. 박판 적층 수에 따른 열전달률은 대략 10장을 적층하는 경우 포화상태에 도달하였다.

복사효과를 이용한 차단설계를 위해 박판형상에 따른 복사 열전달의 차이를 비교 분석하였다. 2차원 모델은 앞서 확인된 열전달률이 포화상태에 도달하는 박판 적층 수가 10장인 모델과 15장 모델로 폭 180mm, 높이 105mm로 하였다.

해석에 사용된 박판형상은 Fig. 7과 같이 각각의 굴곡내부에서 형상계수(view factor) 관점에서의 오목한 표면을 통해 복사 열전달에 따른 단열효과가 예상되는 3가지 형상을 선정하였다.^(7, 8) Fig. 8에는 이들 형상에 따른 외함 상부 평균온도와 총 열전달률을 나타내었다.

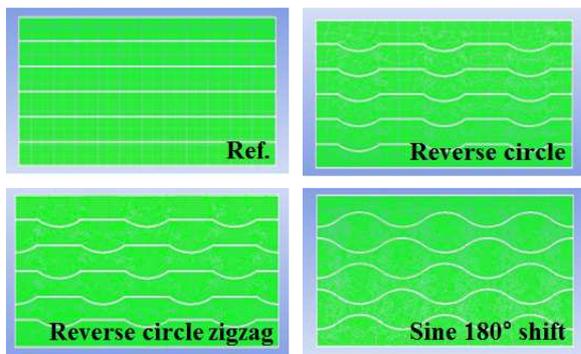


Fig. 7 2D model of various foil shapes for analysis of heat flow

전도+대류+복사 열전달 결과로 볼 때 외함 상부 표면온도가 347K인 기준모델(Ref.)과 비교하여 뒤집힌 원형을 지그재그(Reverse circle zigzag)로 배열한 형상이 346K로 낮게 나타났다. 형상 별 박판 적층 수가 10장, 15장인 모델에 대한 열전달 특성을 분석한 결과 Fig. 9와 같은 결과를 얻었다.

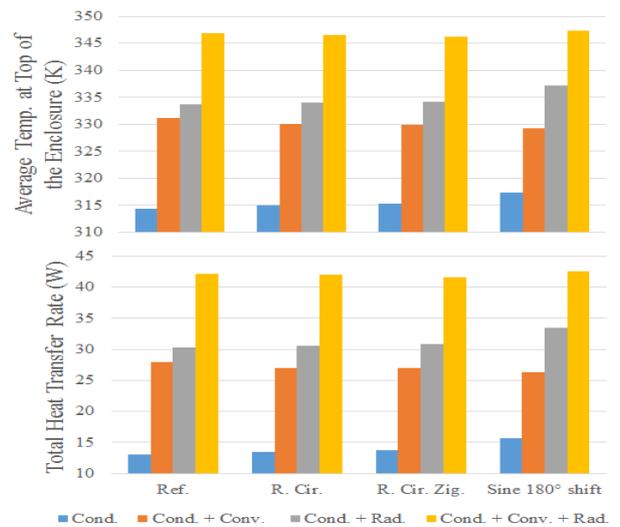


Fig. 8 Average Temp. at Top of the Enclosure and total heat transfer rate for changes in shape of TP 304SS foil

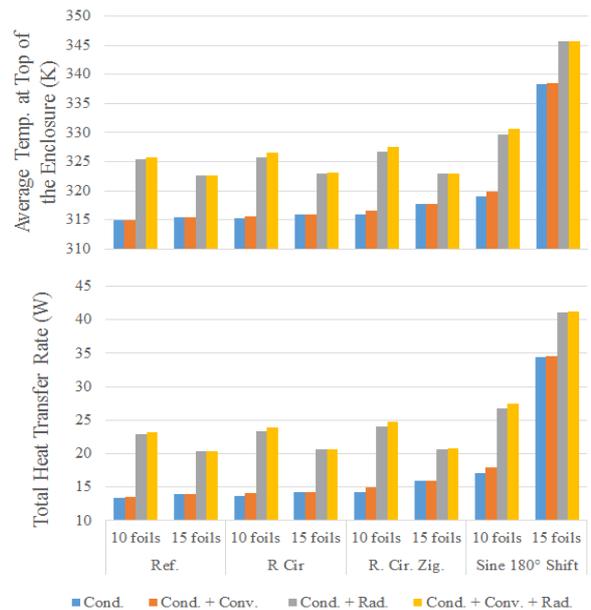


Fig. 9 Average Temp. at Top of the Enclosure and total heat transfer rate for changes in shape and No. of foil

모든 형상에서 박판 적층 수를 증가시킴에 따라 전도와 전도+대류 계산결과, 전도+복사와 전도+대류+복사의 결과가 차이가 거의 없는 것으로 보아 앞서 설명한 바와 같이 적층 수가 많아질 경우 대류효과는 미미한 것을 확인할 수 있다. 박판 적층이 15장인 모델에서 전도와 전도+복사 열전달률의 차이는 뒤집힌 원형(R. Cir., 6.37W), 뒤집힌 원형 지그재그(R.Cir.Zig., 6.45W), 평판(Ref., 6.47W), 사인파 180° shift 순으로 커진다. 이를 통해 복사에 따른 단열효과는 이 역순으로 커짐을 알 수 있다. 하지만 외함 상부 평균온도는 평판일 때 모든 열전달 모드에서 가장 낮게 나타났다. 이와 같은 결과들로 미루어 볼 때 복사를 이용한 단열 효과보다는 박판굴곡에 따른 열전달 면적의 증가 효과가 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 10은 박판 15장이 적용된 사인파 180° shift 모델에 대한 온도해석 결과이다. 이 형상의 경우 주기적으로 접촉이 일어나는 피크부에서 전도에 의한 열전달이 증가하므로 접촉이 일어나지 않는 다른 모델과의 결과와 비교하여 외함 상부 평균 온도와 열전달률이 급격하게 증가함을 알 수 있다. 박판형상 측면에서의 내부형상 결정은 평판형상의 박판으로 박판 간 접촉이 이루어지지 않게 이격시켜 적층하는 것이 열차폐에 가장 유리한 것으로 나타났다.

금속단열재의 박판은 용접을 통해 외함과 접촉 시키거나, 절곡 등의 기계가공으로 박판에 굴곡을 만들어 박판 간 접촉을 통해 적층할 수 있다.

Fig. 11에는 용접이 아닌 박판에 굴곡을 만들어 적층할 때 필연적으로 생성되는 외함과 박판 간 간극의 영향을 분석하기 위한 모델과 기준모델(양 끝단 완전접촉)의 온도분포를 나타내었다.

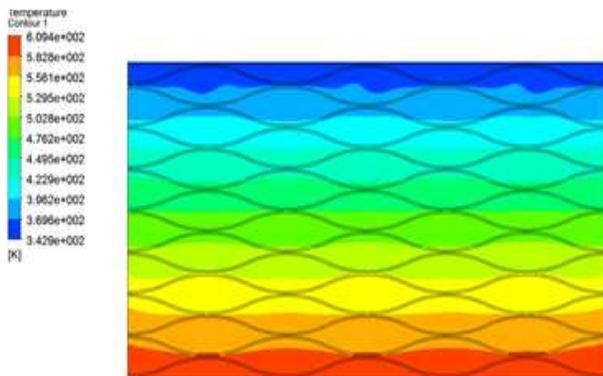


Fig. 10 Temp. contour for sine 180° shift model

간극영향을 분석하기 위한 모델은 보수적 평가를 위해 양 끝단에 극단적인 경우인 10mm 간극을 생성하였고, Fig. 12에 나타난 전도, 전도+대류, 전도+복사, 전도+대류+복사 결과를 이용해 기준모델과 비교하였다. 전도측면에서는 10mm 간극을 가진 모델이 기준모델에 비해 열 전달경로가 줄어들어 외함 상부 평균온도와 총 열 전도률이 감소하였다. 10mm 간극이 형성됨에 따른 대류효과로 인해 기준모델에 비해 1%가량 하였으며, 복사 역시 열원에서 외함 상부로 직접 전해지는 경로가 발생하여 열전달률이 증가하는 것으로 나타났다.

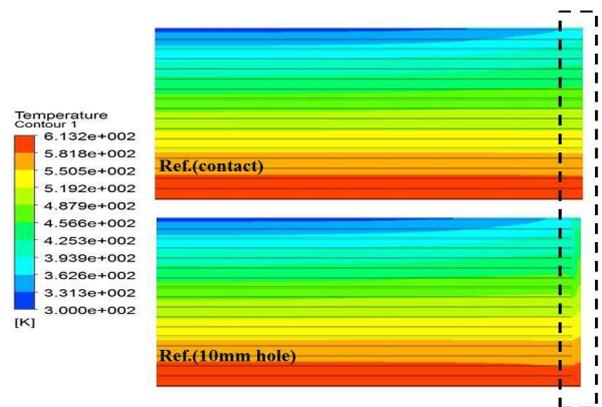


Fig. 11 Temp. contour for changes in attaching method between TP 304SS foil and TP 304SS enclosure

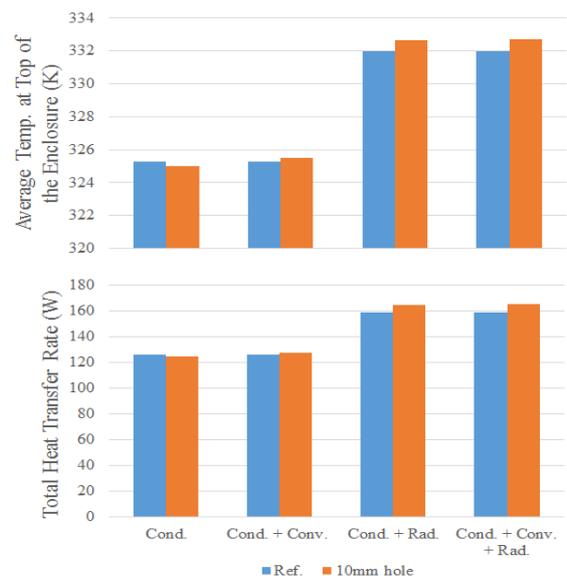


Fig. 12 Average temp. at top of the enclosure and total heat transfer rate for changes in attaching method between TP 304SS foil and TP 304SS enclosure

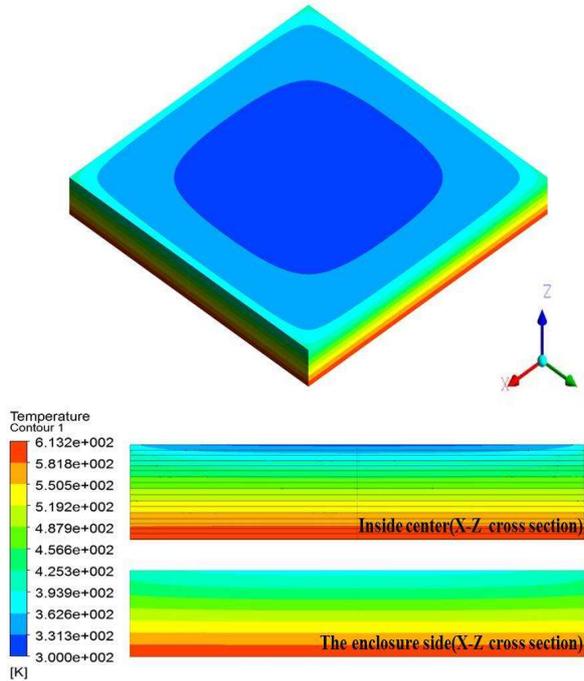


Fig. 13 Temp. contour of 16 stacked foils 3D model

전도, 대류, 복사 세 가지 열전달 모드를 모두 고려했을 때의 박판부착은 외함 측면에 지그재그 형태로 부착방향을 엇갈리게 부착하고 이 때 간극크기는 작으면 작을수록 단열성능 확보에 유리하게 작용할 것으로 예상된다.

3. 3D 열전달 특성

3.1 해석조건 및 방법

3차원 모델을 이용하여 박판 적층 수에 따른 세 가지 열전달 모드별 비율을 분석하기 위해 열유동 해석을 수행하였다. 3차원 해석모델은 2차원 해석결과를 바탕으로 열전달이 높이방향으로만 일어난다고 가정하였고, 2차원 모델의 1/4 크기인 500×500×105mm(가로×세로×높이)로 선정하였으며 박판과 외함의 두께는 0.7mm, 박판은 16장을 기준모델로 하였다. 이외 재료상수를 포함한 해석조건은 2.1절에 나타난 2차원 해석과 동일하게 수행하였다.

3.2 해석결과

Fig. 13은 박판 적층 수가 16장일 때의 외함 상부 및 측면 온도분포이며, 박판 적층 수가 5, 8, 16장인 3차원 모델에 대한 외함 상부 최대 및 평균 온도 그리고 총 열전달률을 Fig. 14에 나타내었다.

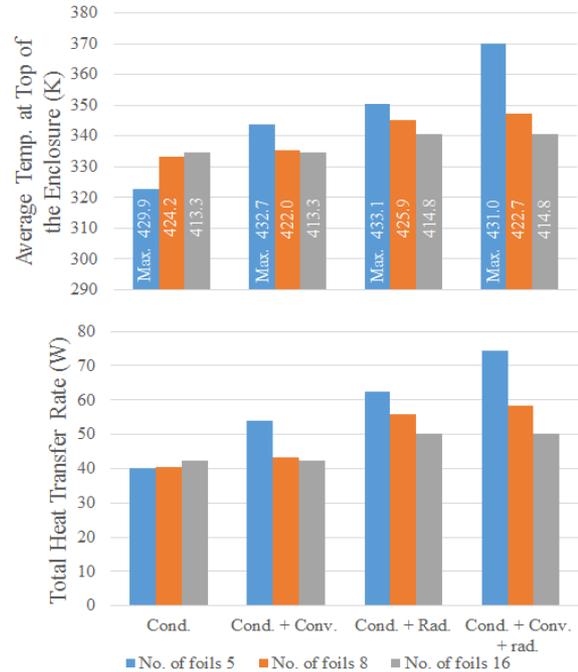


Fig. 14 Average temp. at top of the enclosure and total heat transfer rate for changes in No. of foils using 3D model

각 모델에 대한 세 가지 열전달 모드 별 비율은 박판이 5장일 때, 총 열전달률 중 전도가 54%(40W), 대류 18%(14W), 복사 22.3%(22.3W)이며, 8장은 전도 70%(40.6W), 대류 5%(2.8W), 복사 15%(15.2W) 그리고 16장은 전도 85%(42.4W), 대류 1%미만(0W), 복사 15%(7.8W) 비율로 나타났다. 16장과 8장 모델의 전도+대류 결과를 보았을 때, 대류에 의한 영향은 5%미만임을 알 수 있었다.

16장에 대한 3차원 해석모델의 경우 전도에 의한 열전달률이 85%로 2차원 모델에 비해 5%가량 증가하였다.

4. 결론

본 논문에서는 원전용 금속단열재의 내부 형상 결정을 위한 설계인자 별 열전달 특성을 2, 3차원 해석을 통해 확인하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 박판두께 변화에 따른 외함 상부 평균온도와 총 열전달률 차이는 1%로 미만으로 두께는 금속단열재의 단열성능에 지배적인 영향을 주는 설계인자가 아닌 것으로 나타났다.

(2) 박판 적층 수가 많아질수록 대류와 복사를 차단하는 효과를 나타내지만 전체 열전달 면적을

증가시켜 전도에 따른 열전달은 증가하였다. 대류와 복사를 효과적으로 차단하고 전도 측면에서도 유리한 박판 적층 수는 10장 가량으로 확인된다.

(3) 복사 열전달 측면에서 박판에 굴곡이 있는 모델과 기준모델인 평판의 차이는 거의 없으며, 총 열전달률과 외함 상부 평균온도로 볼 때 평판 모델의 열 차폐 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다. 이를 통해 복사 차폐효과보다 열전달 면적의 증가에 따른 전도 열전달이 금속단열재의 주된 열전달 모드임을 알 수 있었다.

(4) 다층박판은 서로 완전하게 이격되게 배열하여 전체 열전달 모드 중 높은 비율을 차지하고 있는 전도 열전달을 최소화하는 것이 열 차폐에 가장 효과적인 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 2013년 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었습니다.(2013T100200005).

참고문헌 (References)

- (1) USNRC, 2003, "Water Sources for Long-Term Recirculation Cooling Following a Loss-of-Collant Accident," *Regulatory Guide* 1.82, Rev. 3.
- (2) USNRC, 2005, "GSI-191: Experimental Studies of Loss of Coolant Accident Generated Debris Accumulation and Head Loss with Emphasis on the Effects of Calcium Silicate Insulation," NUREG/CR-6874.
- (3) Kang, H. and Baek, Y. K., 2009, "An Analysis of Thermal Conductivity of Ceramic Fibrous Insulator by Modeling & Simulation Method I," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 5, No. 1, pp. 83~95.
- (4) ANSYS, Inc., 2011, "ANSYS FLUENT User's Guide," Ver. 14.0.
- (5) McAdams, W. H., 1954, *Heat Transmission*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, NY, pp. 165~171.
- (6) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 1985, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley and Sons, New York, NY, pp. 795~797.
- (7) Mahesh, M. R. and Raul, R. K., 2011, *Engineering Heat Transfer*, Jones & Bartlett Learning, Burlington, pp. 883~884.
- (8) Greg, F. N., 2002, *Heat Transfer in Single and Multiphase Systems*, CRC PRESS, London, pp. 186~190.
- (9) USNRC, 2003, "Water Sources for Long-Term Recirculation Cooling Following a Loss-of-Collant Accident," *Regulatory Guide* 1.82, Rev. 3.

(1) USNRC, 2003, "Water Sources for Long-Term Recirculation Cooling Following a Loss-of-Collant