

단열 다심관의 열전달 특성에 관한 연구

박상균¹ · 이태호² · 김명준[†]

(Received February 11, 2015 ; Revised April 26, 2015 ; Accepted May 30, 2015)

A Study on the Heat Transfer Characteristic of Insulated Multi Core Tube

Sang-Kyun Park¹, Tae-Ho Lee², Myoung-Jun Kim[†]

요약: 본 연구에서는 다심관(Multi Core Tube)에 단열재로 글라스울(Glass wool)을 사용한 단열 다심관(Insulated Multi Core Tube)의 열전달 특성에 관하여 검토하였다. 제작된 단열 다심관에 대하여 외기온도, 유압 오일 공급온도, 유압 오일 공급유량에 따른 단열 다심관 내부의 유압 오일의 온도특성에 관하여 실험 및 모델링을 통하여 검토하였다. 그 결과 본 연구의 범위 내에서 최소 유압 오일 공급유량인 0.29(l/min)인 경우 실험결과와 수치해석 결과의 온도차이가 최대 약 3°C정도 발생하였다. 외기온도가 일정한 경우 유압 오일 공급온도가 높을수록 유압 오일의 공급유량에 관계없이 유압 오일 출구온도가 높아지고, 유압 오일 공급유량이 1.01(l/min)이상일 경우에는 유압 오일의 온도강하에 외기온도의 영향이 적음을 알 수 있었다.

주제어: 단열 다심관, 글라스울, 열전달, 단열

Abstract: In this paper, we study the characteristics of heat transfer for an insulated multi-core tube using glass wool as an insulator for the multi-core tube. By performing experiments and modeling, we examine the variations in the temperature characteristics of hydraulic oil inside the multi-core tube with atmosphere temperature, inlet temperature, and the flow rate of hydraulic oil for the insulated multi-core tube that we developed. When the minimum inlet flow rate of hydraulic oil employed within the scope of the research is 0.29 l/min, the temperature difference obtained in the experiments and numerical analysis was a maximum of 3°C. For a constant atmospheric temperature, as the inlet temperature of the hydraulic oil increases, the outlet temperature of the hydraulic oil will also increase, regardless of its inlet flow rate. Further, when the inlet flow rate of the hydraulic oil is more than 1.01 l/min, the effect of the atmospheric temperature on the temperature drop of the hydraulic oil is low.

Keywords: Insulated multi-core tube, Glass wool, Heat transfer, Insulation

1. 서론

극지를 운항하는 선박 및 해양 플랜트는 -45°C에 달하는 저온의 환경조건에 노출되어 있어, 외기에 접하거나 외기가 순환되어야 하는 곳에 노출되어 있는 기자재들은 저온에 대한 방한 기능을 갖추고 있어야 한다. 이를 위해 일반적인 환경에서 적용되는 기자재 보다 단열성 및 저온 특성이 우수하거나 별도의 열원 등에 의하여 보온되어야 한다. 선박 및 해양플랜트 분야에서 협소한 공간의 효율적 활용 및 고압용 유·공압 제어라인에서 필수 부품으로 다심관(Multi Core Tube, MCT) 사용되어지고 있으며, 최근의 극지 개발 수요와 맞물려 단열 다심관(Insulated Multi Core Tube)의 수요가 증가되고 있다. 현재 유압라인에 사용되어지고 있는 유압 작동유는 석유계 작동유, 합성 작동유 및 수성형

작동유 등으로 다양하게 분류되어 사용되어지고 있다. 이러한 유압 작동유의 저온 사용 한계는 작동유의 특성에 따라서 -30°C~0°C이다[1]. 다심관 내부를 흐르는 작동유가 극지 환경에서 저온 사용 한계보다 낮은 온도에서 사용되어지는 경우 유압계통 및 전체 시스템에 문제가 발생할 수 있을 것이다. 이를 방지하기 위해서 다심관에 단열재를 사용하여 보온하거나, 스팀라인 및 전기 히터 등의 부가적인 장비를 설치 할 수 있다.

국내에서도 선박 및 해양플랜트용 다심관을 생산하여 판매하고 있지만[2]-[5], 선박 및 해양 플랜트용으로 특화된 단열 Tube, Steam-traced bundles 및 Electrical heat-traced 제품의 생산 및 판매는 거의 이루지고 있지 않으며, 여기에 대한 연구도 찾아보기 힘들다. 선박에 설치되는 다심관에 관한 연구

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9056-4904>): Department of Power System Engineering, Kunsan National University, 588 Daehak-ro, Gunsan, Jeonbuk 573-701, Korea, E-mail: mjkim@kunsan.ac.kr, Tel: 063-469-1849

1 Division of Marine Information Technology, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: skpark@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4579

2 Department of Power System Engineering, Kunsan National University, E-mail: leeth4798@kunsan.ac.kr, Tel: 063-469-1849

로서 화재안전측면에서는 다심관이 연소확대 경로를 제공하기 때문에 연소확대 저지를 위한 연구가 일부 진행되었다[6].

본 연구에서는 단열재로 글라스울(Glass wool)을 사용한 단열 다심관(Insulated Multi Core Tube)의 제작에 필요한 수치해석 모델의 개발을 목적으로 단열 다심관의 성능을 파악하기 위한 실험 설비를 구축하고, 제작된 단열 다심관에 대하여 외기온도, 유압 오일 공급온도, 유압 오일 공급유량에 따른 단열 다심관 내부의 유압 오일의 온도 특성에 관하여 실험을 수행하였다. 또한 개발된 수치해석 모델을 실험 결과와 비교 검토 및 단열 다심관에 대한 수치해석을 통한 열전달 특성에 관하여 검토하였다.

2. 실험 및 수치해석 방법

2.1 실험장치 및 방법

Figure 1은 단열 MCT의 주위온도, 유압 오일의 공급온도 및 유량에 따른 단열 MCT내부를 흐르는 유압유의 온도 특성을 파악하기 위한 실험장비의 개략도를 보여주고 있다. 실험장비는 유압 오일을 단열 MCT로 공급하는 공급온도를 조절하기 위한 Oil Tank, 유압유를 공급하기 위한 Pump, 4Core 단열 MCT, 단열 MCT의 주위온도를 조절하기 위한 냉동챔버, 단열 MCT 각 부위의 온도를 측정하기 위한 열전대, 측정된 온도를 기록하기 위한 Data Logger과 컴퓨터로 구성되어 있다[7].

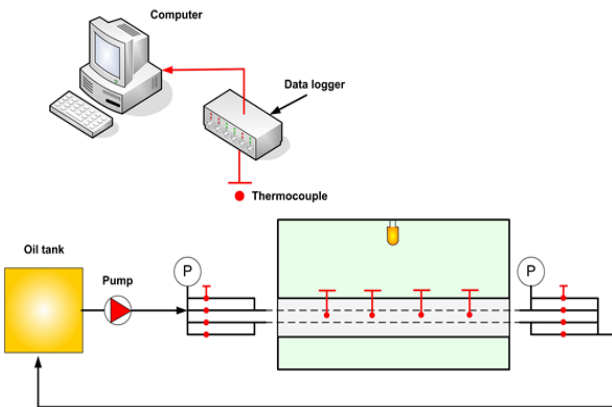


Figure 1: A schematic diagram of apparatus

실험은 단열 MCT를 냉동챔버 내부에 설치하고, 냉동기 구동하여 실험온도까지 냉동챔버의 온도를 낮추었다. 냉동챔버의 온도가 설정치까지 낮아지면 유압 오일을 유압펌프로 순환하여 약 10분간 구동하여 시스템이 안정된 후의 각 부위의 온도를 측정하였다. 단열 MCT가 4Core로 구성되어져 있기 때문에 각 Core의 온도를 측정하여 평균 온도를 계산하였다.

2.2 수치해석 방법

Figure 2는 수치해석용 단열 MCT의 단면도를 보여주고 있다. 수치해석용 단열 MCT는 실제로 제작한 단열 MCT와 동일한 치수와 재료로 구성하였다. 수치해석은 CFD분석에

널리 활용되어지고 있는 상용프로그램인 ANSYS FLUENT 프로그램을 사용하여 3D로 모델링을 수행하였다[8]. 수치해석의 ①Outer Sheath의 경계조건으로 대류열전달이 없다고 가정하여 외기온도(냉동챔버의 내부온도)를 설정하였고, Oil 입구의 경계조건으로 유압 오일 공급온도, 공급유량, 압력을 설정하였으며, Oil 영역은 770,700의 혼합격자로 구성하여 진단가열효과를 무시하고 수치해석을 수행하였다. 유압 오일의 공급 압력은 1bar이며, 단열 MCT의 길이는 750mm 이다. Figure 3은 단열 MCT 내부의 코일의 배치상태를 보여주고 있다. 내부 코일은 제조 특성상 직관이 아닌 750mm 간격으로 360° 회전하는 형태로 제작 되어있다.

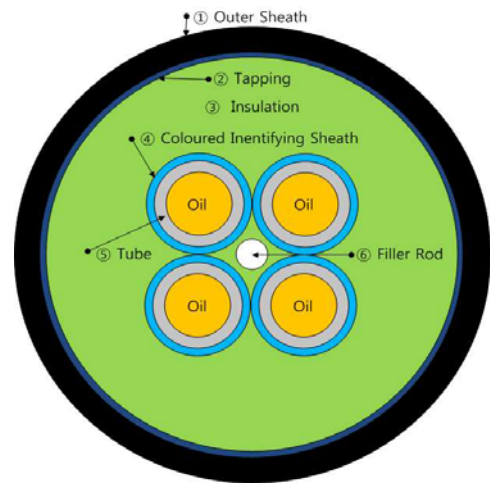


Figure 2: Insulated multi core tube section

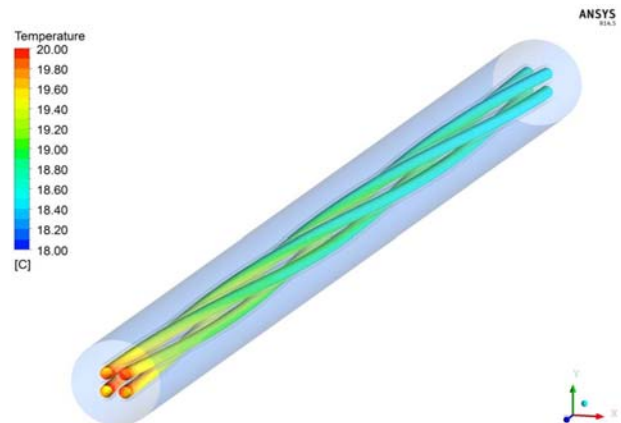


Figure 3: Inside of insulated multi core tube

2.3 실험 및 수치해석 조건

Table 1: Experimental and simulation conditions

Conditions		1	2	3
a	Atmosphere temperature(°C)	-50	-30	-10
b	Oil inlet temperature(°C)	10	20	30
c	Oil Flow rate(l/min)	0.29	1.01	3.28

Table 2: Properties of solid material

	Section	Material	Thickness (mm)	Outside Diameter (mm)	Density (kg/m ³)	Specific Heat (J/kg·K)	Thermal Conductivity (W/m·K)
①	Outer Sheath	PVC	3	45.5	1470	840	0.1
②	Tapping	Nonwoven	0.75	39.5	80	1300	0.06
③	Insulation	Glass wool	10	38	24	700	0.038
④	Coloured Identifying Sheath	PVC	0.5	9	1470	840	0.1
⑤	Tube	SUS 316	1	8	8238	468	13.4
⑥	Filler Rod	PVC	-	3	1470	840	0.1

Table 3: Properties of oil

Shell Tellus Oil 46	Density (kg/m ³)	Specific Heat (J/kg·K)	Thermal Conductivity (W/m·K)	Viscosity (kg/m·s)
	879	1880pro	0.145	0.8

Table 1은 본 연구에서 수행한 실험조건 및 수치해석 조건을 보여주고 있다. 외기온도는 냉동챔버 내부의 온도를 의미하며 -50℃, -30℃, -10℃의 3가지 경우, 단열 MCT로 공급되는 유압 오일의 공급온도는 10℃, 20℃, 30℃의 3가지 경우, 유압 오일의 공급 유량은 0.29 l/min, 1.01 l/min, 3.28 l/min의 3가지 경우로 한정하여 실험 및 계산을 수행하였다. Table 2는 단열 MCT의 사양과 단열 MCT의 고체 (Solid) 부분의 물성치를 나타내고 있으며, Table 3은 유압 오일의 물성치를 나타내고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험 및 수치해석 비교

Figure 4는 다양한 운전 조건에서의 단열 MCT 오일 출구 온도의 평균값에 대한 실험 및 수치해석 결과를 보여 주고 있다. 수치해석 값은 유압 오일 출구부에서의 질량유량 평균 온도값을 나타내고 있다.

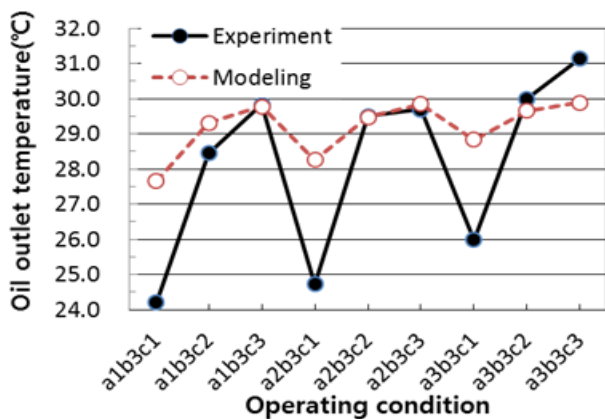


Figure 4: Comparison between the simulated and the measured data

운전 조건의 기호는 a1(외기온도=-50℃)b3(유압 오일 공급온도=30℃)c1(유압 오일 공급유량=0.29 l/min)를 의미한다. 실험 범위 내에서 최소 유압 오일 공급유량인 c1(0.29 l/min)인 경우 실험결과와 수치해석 결과의 온도차이가 최대 약 3℃정도 온도차가 발생함을 알 수 있다. 이는 실험 설비의 단열 등의 문제로 발생하는 차이로 생각되어진다. 다른 조건에서는 실험결과와 수치해석 결과의 차이가 1℃ 이내로 일치함을 알 수 있다.

3.2 외기 온도 일정의 경우

Figure 5의 (a), (b), (c)는 외기온도 a(-50℃, -30℃, -10℃)가 일정한 경우 유압 오일 공급온도 b(10℃, 20℃, 30℃)와 유압 오일 공급유량 c(0.29 l/min, 1.01 l/min, 3.28 l/min)의 변화에 따른 단열 MCT 유압 오일 출구부에서의 질량유량 평균 온도값(°C)에 대한 수치해석 결과를 보여주고 있다. 각각의 외기온도에서 유압 오일 공급온도가 높을수록 유압 오일의 공급유량에 관계없이 유압 오일 출구온도가 높아짐을 알 수 있다. 이는 유압 오일의 온도가 높아질수록 외기온도의 열유속은 증가하지만 단열효과로 인하여 외부로의 열이동이 유압 오일의 온도강하에 미치는 영향이 적기 때문이다.

외기온도가 -50℃이고 유압 오일 공급유량이 0.29(l/min), 유압 오일 공급온도가 10℃인 경우의 유압 오일 출구온도가 2.85℃로 가장 낮음을 알 수 있다. 유압 오일 공급유량이 1.01 l/min이상인 경우에는 유압 오일 공급온도와 유압 오일 출구온도와 차이가 외기온도에 따라 약 0.11℃~1.76℃임을 알 수 있다. 본 연구의 수치계산 범위에서는 유압 오일 공급유량이 1.01 l/min이상일 경우에는 유압 오일의 온도강하에 외기온도의 영향이 적음을 알 수 있다. 이는 외기온도가 아주 낮은 경우 선박이나 해양플랜트에 설치된 단열 MCT의 변경이 불가능한 경우 유압 오일의 유량을 임의로 조절함으로써 단열효과를 얻을 수 있음을 의미한다.

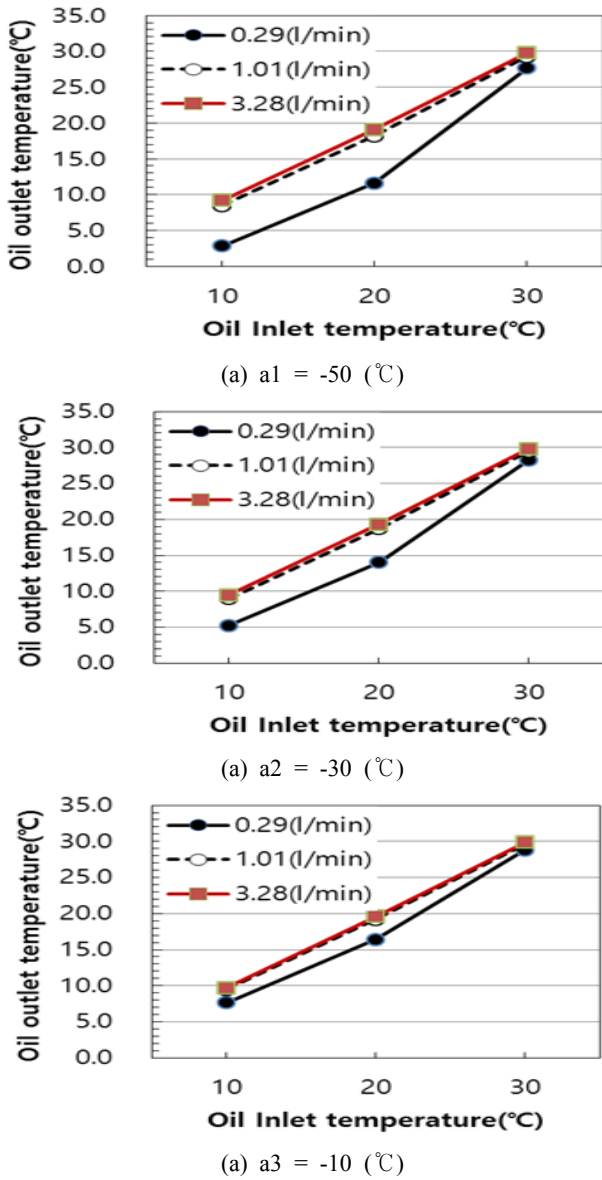


Figure 5: Results of simulation

3.3 유압 오일 공급온도 일정한 경우

Figure 6의 (a), (b), (c)는 유압 오일 공급온도 $b(10^{\circ}\text{C}, 20^{\circ}\text{C}, 30^{\circ}\text{C})$ 가 일정한 경우 외기온도 $a(-50^{\circ}\text{C}, -30^{\circ}\text{C}, -10^{\circ}\text{C})$ 와 유압 오일 공급유량 $c(0.29\text{ l/min}, 1.01\text{ l/min}, 3.28\text{ l/min})$ 의 변화에 따른 단열 MCT 유압 오일 출구부에서의 질량유량 평균 온도값($^{\circ}\text{C}$)에 대한 수치해석 결과를 보여주고 있다. 각각의 유압 오일 공급온도에서 외기온도가 높을수록 유압 오일의 공급유량에 관계없이 유압 오일 출구온도가 높아짐을 알 수 있다. 이는 외기 온도가 높을수록 유압 오일에서 외기로의 열유속이 감소하기 때문이다. 유압 오일 공급온도가 30°C 이고 외기온도가 -10°C , 유압 오일 공급유량이 3.28 l/min 인 경우의 유압 오일 출구온도가 29.89°C 로 가장 높음을 알 수 있다. 또한, 유압 오일 공급온도가 30°C 의 경우 유압 오일 출구온도는 유압 오일 공급유량과 외기온도에 따라 약 $27.66\sim 29.89^{\circ}\text{C}$ 임을 알 수 있다. 이는 유압

오일 공급온도와 유압 오일 출구온도와의 차이가 약 $0.11\sim 2.34^{\circ}\text{C}$ 임을 의미한다. 동일한 유압 오일 공급온도에서 유압 오일 공급유량이 증가할수록 유압 오일 출구온도가 높아짐을 알 수 있다. 이는 유압 오일에서 외기로 동일한 양의 열이 이동하더라도 유압 오일의 유량이 증가하였기 때문에 온도강하는 낮아지기 때문이다.

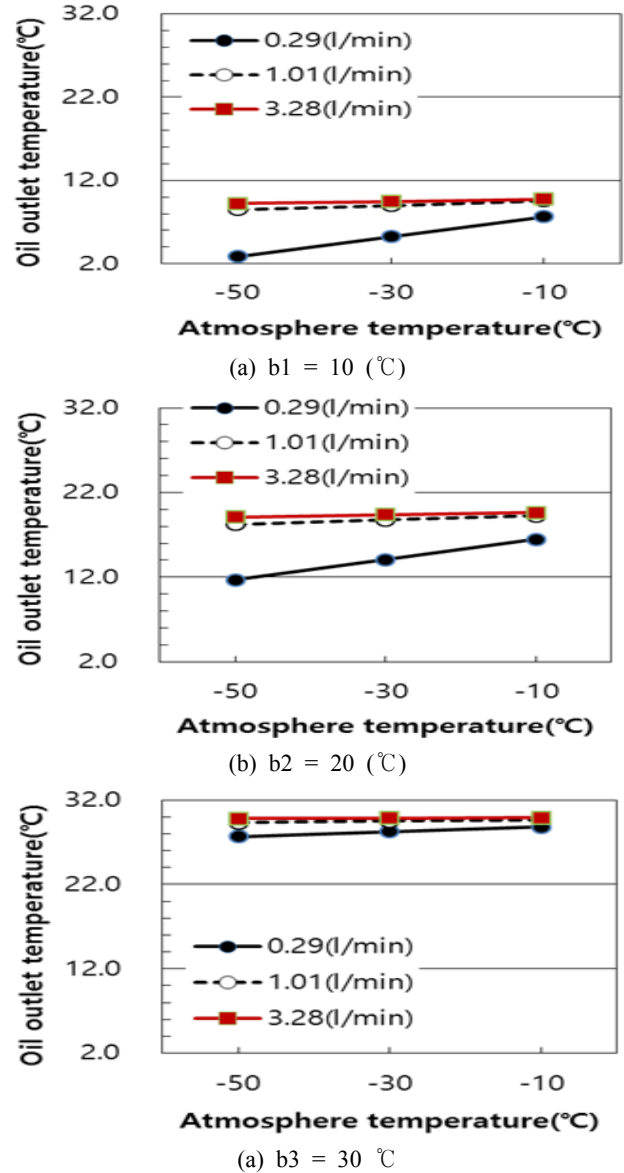


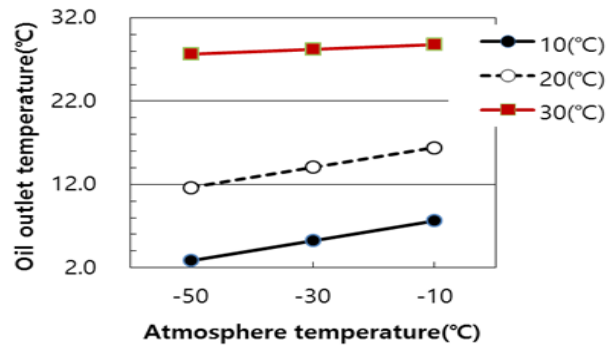
Figure 6: Results of simulation

3.4 유압 오일 공급유량 일정한 경우

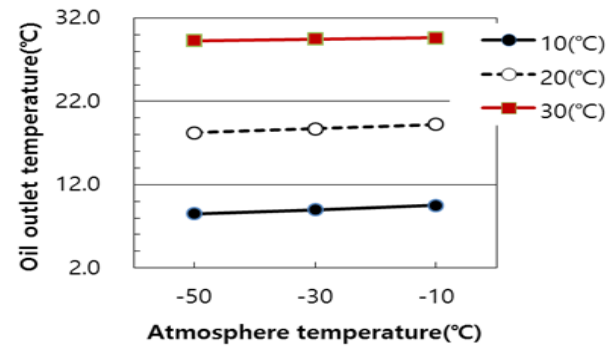
Figure 7의 (a), (b), (c)는 유압 오일 공급유량 $c(0.29\text{ l/min}, 1.01\text{ l/min}, 3.28\text{ l/min})$ 이 일정한 경우 외기온도 $a(-50^{\circ}\text{C}, -30^{\circ}\text{C}, -10^{\circ}\text{C})$ 와 유압 오일 공급온도 $b(10^{\circ}\text{C}, 20^{\circ}\text{C}, 30^{\circ}\text{C})$ 의 변화에 따른 단열 MCT 유압 오일 출구부에서의 질량유량 평균 온도값($^{\circ}\text{C}$)에 대한 수치해석 결과를 보여주고 있다. 각각의 유압 오일 공급유량에서 외기온도가 높을수록 유압 오일의 공급온도에 관계없이 유압 오일 출구온도가 높아짐

을 알 수 있다. 또한, 유압 오일 공급유량이 증가 할수록 유압 오일 출구온도가 외기온도의 영향을 적게 받음을 알 수 있고, 특히 유압 오일 공급온도가 높을수록 그 경향이 더욱 뚜렷해짐을 알 수 있다.

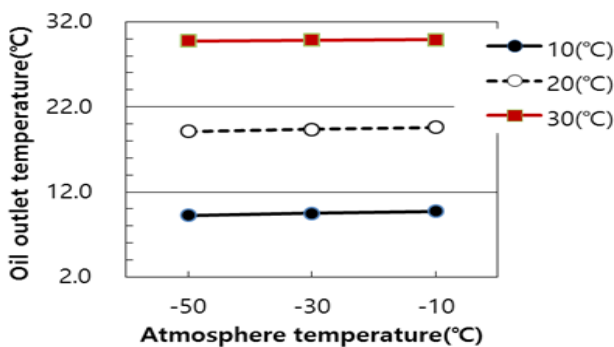
유압 오일 공급유량이 0.29 l/min이고, 유압 오일 공급온도가 20℃이고, 외기온도가 -50℃인 경우의 유압 오일 출구온도가 11.65℃로 유압 오일 입구온도와 유압 오일 출구온도와의 차이가 8.35℃ 본 연구의 수치해석 범위에서 가장 높음을 알 수 있다.



(a) c1 = 0.29 (l/min)



(a) c2 = 1.01 (l/min)



(a) c3 = 3.28 (l/min)

Figure 7: Results of simulation

4. 결론

본 연구에서는 단일 다심관에 대한 실험 및 수치해석을 통하여 외기온도, 유압 오일 공급온도, 유압 오일 공급유량에 따른 단일 다심관 내부의 유압 오일의 열전달 특성에 관하여 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 실험 범위 내에서 최소 유압 오일 공급유량인 c1(0.29 l/min)인 경우 실험결과와 수치해석 결과의 온도차이가 최대 약 3℃정도 발생하였고, 다른 조건에서는 실험결과와 수치해석 결과의 차이가 1℃ 이내로 일치함을 알 수 있다.

(2) 외기온도가 일정한 경우 유압 오일 공급온도가 높을수록 유압 오일의 공급유량에 관계없이 유압 오일 출구온도가 높아지고, 본 연구의 수치계산 범위에서는 유압 오일 공급유량이 1.01 l/min 이상일 경우에는 유압 오일의 온도강하에 외기온도의 영향이 적음을 알 수 있다.

(3) 유압 오일 공급유량이 0.29 l/min이고, 유압 오일 공급온도가 20℃이고, 외기온도가 -50℃인 경우의 유압 오일 출구온도가 11.65℃로 유압 오일 입구온도와 유압 오일 출구온도와의 차이가 8.35℃ 본 연구의 수치해석 범위에서 가장 높음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 중소기업청 산학연협력 기술개발사업 첫걸음 과제 및 군산대학교 해양생물연구교육센터 해양바이오에너지연구실에서 수행된 연구결과이며, 이에 감사드립니다.

Reference

- [1] J. S. Chun, "Selection procedure and classification of hydraulic oils," Journal of the Korea Fluid Power Systems Society, vol. 1, no. 2, pp. 1-8, 2004 (in Korean).
- [2] Daechun Industrial Co., LTD., [http://www.daechun.co.kr/2013_kor/images/contents2/4_1/E-brochure\(English\).pdf](http://www.daechun.co.kr/2013_kor/images/contents2/4_1/E-brochure(English).pdf), Accessed February 04, 2015.
- [3] GS-Hydro, <http://www.gshydro.com/gshydro-products/multicore-tubes>, Accessed February 04, 2015.
- [4] Desen Co., LTD., [http://www.desen.co.kr/DESEN%20VER2\(LOW\).pdf](http://www.desen.co.kr/DESEN%20VER2(LOW).pdf), Accessed February 04, 2015.
- [5] Desen Co., LTD., <http://www.accutech.net/wp-content/uploads/2010/03/4200-M-2-multitube.pdf>, Accessed February 04, 2015.
- [6] M. S. Choi, B. Y. Lee, J. S. Ahn, and C. S. Shin, "Development of multi core tube having flame retardant performance," Proceedings of Korean Institute of Fire Science & Engineering Spring Conference, pp. 46-52, 2002 (in Korean).
- [7] M. J. Kim, S. K. Park, and T. H. Lee, "A study on the temperature characteristic of insulated multi-core tube," Proceedings of Korean society for Power System Engineering Fall Conference, pp. 27-28, 2014 (in Korean).
- [8] DNDE, http://www.dnde.co.kr/menu_e2/menu_e_4.asp, Accessed February 04, 2015.