

대형배관 내부식 코팅공정의 온도 균일성 향상을 위한 와류날개 형상 연구

박재현*, 박희성**, 김수태**,#, 강경무***

*창원대학교 대학원, **창원대학교 기계공학부, *** (주)삼건세기

A Study on the Temperature Uniformity for the Anti-Corrosion Coating Process of Large-Sized Water Pipes

Jaehyun Park*, Heesung Park**, Sootae Kim**,#, Gyuongmoo Kang***

*Graduate School of Mechanical Engineering, Changwon National Univ.,

School of Mechanical Engineering, Changwon National Univ., *Samkun Century

(Received 21 July 2016; received in received 31 August 2016; received in received 22 September 2016)

ABSTRACT

In this study, the thermal and fluid dynamic characteristics for the coating process of large-sized water pipes was studied by heating the inside of a pipe directly with a gas burner. Heat and flow analyses were performed on large pipes with various inlet shapes. Using large pipes for coating was shown to be the proper shape for heating large pipes uniformly. This type has a screw with a diameter of 200 mm installed at the inlet to provide a rotational motion to the heating air. The rotational motion resulted in a uniform temperature distribution that ranged from 289.1 °C to 352.1 °C The optimized geometric configuration of the inlet of the pipe successfully and uniformly enhanced the thermal characteristics of the devised temperature limit.

Key Words : Heating Pipe(가열배관), Coating(코팅), Internal Flow(내부유동), Heat Transfer(열전달)

1. 서 론

현재 플랜트 사업은 자동차, 반도체 및 기계 등 주력 수출산업보다 더 많은 외화를 벌어들이는 우리나라의 경제 핵심동력으로 자리 잡고 있다. 이러한 플랜트 사업은 오일과 가스, 발전담수 분야의 육상 플랜트 산업과 조선 해양 플랜트 산업분야로

구분되고 세계의 경기침체에도 불구하고 큰 폭의 상승세를 나타내고 있다. 전 세계는 현재 물 부족을 해결하고자 다양한 노력을 하고 있으며, 대체수자원 확보를 위해 해수담수화 기술개발에 투자를 기울이고 있다. 또한, 국내에서는 상수도, 하/폐수처리 및 해수담수화 등 물 관련 산업의 범정부적 지원을 통해 미래전략 산업으로 집중 육성하는 로드맵을 확정하고, 국내 물 산업 규모를 20조원 이상으로 확대하여, 세계 10위권 물 전문 기업으로 육성하여 국내외 시장을 주도한다는 계획을 추진 중에 있다.

Corresponding Author : stkim@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-3602, Fax: +82-55-275-0101

대규모 플랜트 시장의 성장 및 확대에 적용되는 배관의 크기는 대형화되고 있다. 내식성이 우수하여 해수를 취수하거나 공급하는 조선해양플랜트 및 육상플랜트뿐만 아니라, 위생적이므로 상수도 배관용으로 맑은 물을 공급하는 역할을 하는 코팅배관은 전처리후 가열하여 분말코팅제로 용착시켜 코팅한다.^[1-2] 이때, 배관 가열은 가열로에서 진행되며, 가열로 크기에 맞게 배관을 가열하는데 공간적 제한 및 작업 효율성이 떨어지는 문제점이 있다. 가열시스템의 현황은 연소 불꽃이 직접 닿는 직화식과 내화물을 사이에 두고 간접적으로 가열하는 머플러식이 있다. 열처리는 피가열물을 균일하게 가열해야 하는데 직화식은 일정하게 가열하지는 못하나 열의 손실이 적으며, 머플러식은 열효율은 좋지 않으나 균일하게 가열할 수 있고 불꽃이 재료에 닿지 않아 재료손상이 적다. 현재 사용하는 가열로는 박스 형태의 구조에 가스버너의 열풍으로, 배관 전체를 가열한 후 코팅작업을 위해 가열로 도어를 열 어둔다. 이때, 가열로는 열 손실로 인해 온도가 떨어지게 된다. 가열로의 온도를 맞추기 위해서는 많은 연료가스가 투입되고, 이에 따른 가스비용이 많이 들어가는 단점이 있다. 우수한 코팅배관을 얻기 위해서는 배관을 적정온도까지 가열해야 하며 배관의 균일한 온도분포가 필수적이다. 대형배관을 균일하게 코팅하기 위해서는 배관의 최저 온도가 250℃ 이상이고, 배관내의 온도 차가 70℃ 이내인 균일한 온도분포를 가져야 한다. 따라서 본 연구는 입구 와류날개 형상변화를 통하여 대형 배관을 균일하게 가열하고, 열 손실을 줄여 코팅을 위한 대형 배관용 가열시스템의 최적화를 이루고자 한다.^[3-6]

2. 유한요소법

2.1 이론식

유체역학 및 열전달 문제를 해석하는데 있어서 연속 방정식, 운동량 방정식 및 에너지 방정식을 도입하여 얻어지는 3종의 미분 방정식을 적당한 경계조건과 초기조건 하에서 계산한다.

또한, 유체역학과 열전도가 동시에 포함되는 문제를 강제대류와 자연대류로 구분된다. 강제대류

는 먼저 Navier-Stokes 방정식^[7] 등의 운동량 방정식으로부터 유속을 구하고, 이어서 얻어진 유속분포를 열전도 방정식에 이용하여 온도를 구한다. 자연대류는 흐름의 운동량 방정식과 열전도 방정식의 양자에 속도와 온도가 포함되기 때문에 연성문제가 되므로 양 방정식을 동시에 풀 필요가 있다. 이와 같이 자연대류에서는 에너지 방정식과 Navier-Stokes 방정식은 연성해석을 수행한다.^[8]

본 논문에서는 대형배관을 해석모델로 선정하여 배관의 온도 분포를 CFD사용 프로그램인 Ansys Workbench^[9]를 이용하여 3차원 열 유동 해석을 수행하였다.

열 유동은 온도의 차이, 즉 온도구배의 결과라는 것은 이미 열역학에서 잘 정립된 것이다. 열 유동과 온도구배와의 관계에서의 비례상수가 바로 열전도율이며, Fourier법칙^[10]으로 불리어지고 있다. Founier 법칙은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\vec{q} = -k \nabla T \quad (1)$$

여기서 \vec{q} 는 열 유동으로서 열전도에 의하여 단위시간에 \vec{q} 에 수직한 단위면적을 통하여 \vec{q} 방향으로 전달되는 열의 양이다. 열전도에 의한 양의 열의 방향(+ \vec{q} 방향)을 온도가 높은 데서 낮은 데로 전달되는 방향으로 정의하면 식(1)에 의하여 k는 양의 값으로 정의된다. k의 물리적 차원은 식(1)로부터 쉽게 결정된다.

해석에 사용된 지배방정식은 다음과 같다. 연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

운동량 방정식

x- 성분:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} - \rho_{\infty} \beta (T - T_{\infty}) g_x + \mu \nabla^2 u \quad (3)$$

y- 성분:

$$\begin{aligned} & \rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial y} - \rho_{\infty} \beta (T - T_{\infty}) g_y + \mu \nabla^2 v \end{aligned} \quad (4)$$

z- 성분:

$$\begin{aligned} & \rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho_{\infty} \beta (T - T_{\infty}) g_z + \mu \nabla^2 w \end{aligned} \quad (5)$$

에너지 방정식

$$\begin{aligned} & \rho C_p (u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) \\ &= k \nabla^2 T + \Phi \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 Φ 는 소산항이며 다음과 같이 표시된다.

$$\Phi = \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (7)$$

식 (7)에서 유의할 점은 밀도는 온도만의 함수로서 변화하는 변수이지만 오직 체적력 항에만 밀도의 변화를 고려하였으며, 그 외의 항에는 밀도를 일정하게 놓았다. 이와 같은 가정을 Boussineq 가정이라 한다. 그러므로 위 식은 자연대류 문제와 비압축성 강체대류 문제를 다룰 때에만 유효한 운동방정식이다.^[11]

2.2 모델링 및 경계조건

본 연구에서 사용되는 배관의 크기는 길이 3,000mm, 직경 1,800mm, 두께 13mm이다. 가열되어지는 배관과 연결된 배관의 직경은 750mm이며, 두 배관을 연결시켜주는 후드타입의 배관 각도는



(a) plate twister (b) blade (c) screw

Fig. 1 Model of heating pipe at inlet

30°이다. Fig. 1에 배관을 균일하게 가열하기 위해 적합한 형상을 구하기 위하여 해석에 사용한 3가지 형상의 와류날개를 제시하였고, 이는 다양한 유동현상을 구현하는데 사용된다. Fig. 1(a)는 입구에 판 2개를 각각 90°비틀어 유동이 흐름을 회전시켜 선회유동이 발생하게 하였다. Fig. 1(b)는 입구에 깃을 설치하여 유동을 회전시켜 선회유동을 발생하게 하였다. Fig. 1(c)는 입구에 스크류를 설치하여 유동을 회전시켰으며, 스크류의 직경은 200mm이다.

열 유동해석을 위한 경계조건은 다음과 같다.^[12-15]

- (1) 배관이 가열되는 환경을 고려하여 초기온도는 5°C로 설정하였다.
- (2) 배관의 입구로 유입되는 공기는 30m/s, 400°C의 조건을 부여하였다.
- (3) 출구 측의 조건은 대기압 opening조건으로 설정하였다.
- (4) 배관 바깥표면의 공기는 배관이 가열되는 환경을 고려하여 대류열전달계수 $12 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ 를 적용하였다.
- (5) 열 유동해석의 수렴성 향상을 위하여 입구의 유동장은 입구직경의 3배, 출구의 유동장은 출구직경의 8배를 설정하였다.

2.3 열 유동해석 결과

Fig. 2는 입구에 판 2개를 비틀어 설치한 경우이다. 이때 유동방향이 크게 2방향으로 선회유동이 발생하여 배관의 온도분포가 대칭적으로 일어나는 것을 확인하였다. 발생된 선회유동으로 인하여 배관의 온도는 상승하였고, 온도분포는 249.4°C ~ 312.3°C이며, 최저온도와 최고온도의 차는 62.9°C

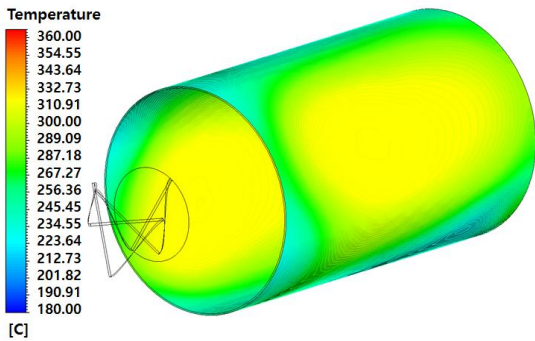


Fig. 2 Temperature distribution with twister inlet

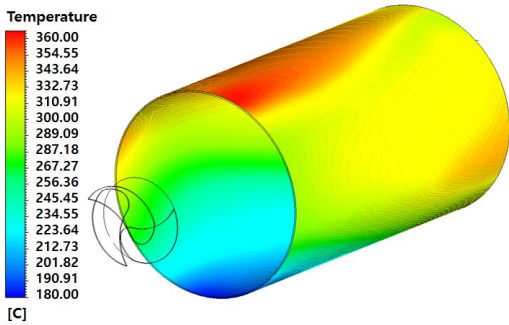


Fig. 3 Temperature distribution with blade inlet

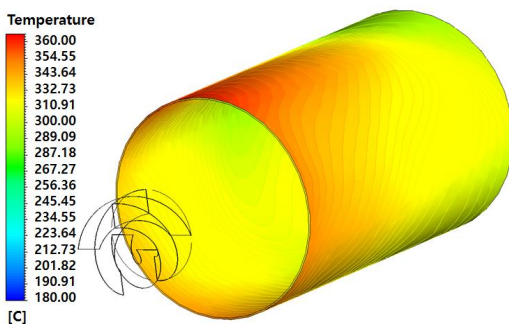


Fig. 4 Temperature distribution with screw inlet

이다. Fig. 3은 입구에 깃을 설치한 경우이다. 이 형상의 경우 충분한 선회유동을 발생시키지 못하고, 유동의 흐름이 일정하지 못하여 온도분포 편차가 크게 발생하였다. 온도분포는 182.4°C~ 350.

7°C이며, 최저온도와 최고온도의 편차가 168°C로 나타났다.

Fig. 4는 입구에 직경 200mm의 스크류를 설치하고, 입구 와류날개 형상으로 인한 선회유동이 잘 일어난 것을 볼 수 있으며, 선회유동으로 인한 온도분포는 289.1°C~352.1°C이다. 입구의 온도가 가장 높았으며, 출구로 갈수록 온도가 감소하였다.

3. 가열시스템

수치해석 결과를 바탕으로 입구측에 스크류타입 배관의 가열특성을 실험적으로 검증하고자 한다.

3.1 가열 및 코팅시스템 구성

가열시스템은 Fig. 5와 같이 구성하였다. 가스버너에 의해 발생된 열풍은 덕트를 거쳐 배관 내부로 직접 전달되며, 송풍기에 의해 덕트를 거쳐 배관 내부로 직접 전달되어 순환되는 방식으로 구성하였다. 배관 길이에 따라 가열이 가능하도록 슬리브 길이 조절장치를 제작하였으며, 빠른 시간내에 배관 연결/해체가 되도록 후드 타입의 배관 연결 장치를 제작하였다.^[16]

가열된 배관은 코팅을 위해 빠른 시간내 코팅 작업대로 이동해야한다. 이를 위해 대차를 이용하여 작업대로 이동시키며, 이동된 배관은 내/외부 코팅을 위해, 배관 내부는 파우더 공급장치, 배관 외부는 코팅 파우더를 낙하시키는 방식으로 코팅장치를 제작하였다.

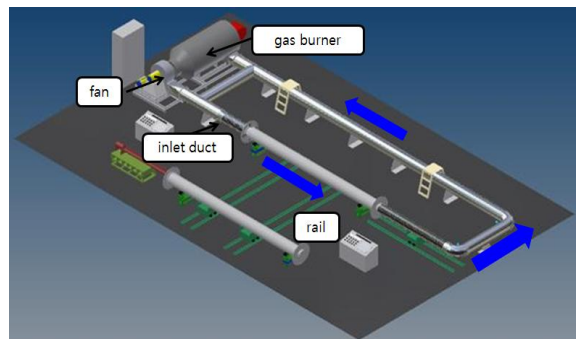


Fig. 5 Pipe heating system conception



Fig. 6 Prototype of screw mixer

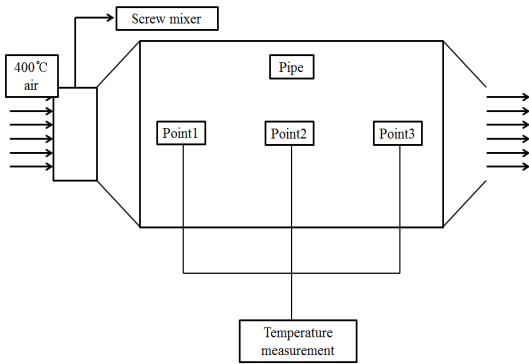


Fig. 7 Schematic of the temperature measurement point

가열시스템의 가열효율을 위해 열 유동해석으로 얻은 최적의 믹스장치를 고안하여 그 결과를 토대로, 스크류 타입 믹스장치를 설계/제작하여 Fig. 6에 나타내었다.

3.2 실험결과

배관의 온도 측정은 Fig. 7에서와 같이 전단에 스크류 타입의 믹스장치가 배관과 연결되어 가열시스템을 구성하였다. 온도 측정 위치는 Fig. 7에서 나타낸 바와 같이 입구, 중간, 출구부를 열전대를 이용하여 온도를 측정하였다. 입구에서는 400°C의 가열된 공기가 공급되어 출구로 배출된다. Fig. 8에는 실험조건에 대해 측정된 온도를 그래프로 나타내었다. 그래프에서 나타낸 바와 같이 초기 20분 동안 급격히 온도가 증가하고 이후에는

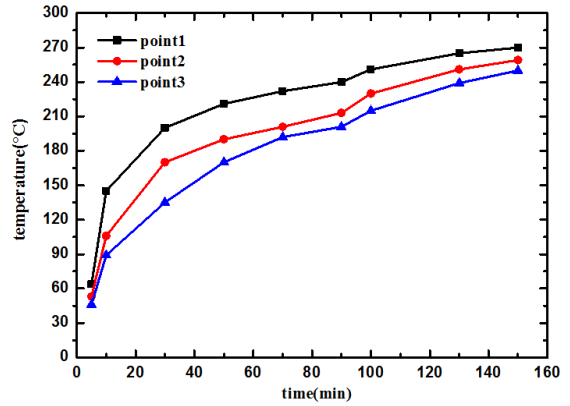


Fig. 8 Temperature increase with respect to heating time

완전히 상승하는 것을 볼 수 있다. 150분에서 최고 온도는 270°C로 나타났으며, 최저온도는 250°C로 나타났다.

4. 결론

본 연구는 기존 대형배관의 가열시스템에서 벗어나 가스버너를 이용하여 배관내부를 직접 가열하고, 배관입구 와류날개 형상에 따른 온도분포 및 유동해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 대형배관을 균일하게 코팅하기 위해서는 대형 배관에 최저온도가 250°C 이상이고 온도차가 70°C 이내인 고른 온도분포를 만족시키는 형상은 스크류 타입이다. 배관입구에 200mm 직경의 스크류를 설치하여 선회속도를 부여하고, 최고온도는 352.1°C 온도차는 63°C로 다른 형상의 입구 와류형상 중에서 가장 균일한 배관 온도를 얻었다.
- (2) 배관입구의 단순 확대된 경우보다 스크류를 설치하여 유동의 선회속도를 부여함으로써 좀 더 균일온도 배관온도를 얻을 수 있었다. 단순히 관을 휘어놓은 것을 사용한 형상은 충분한 선회속도를 부여하지 못하므로 배관 입구 쪽의 온도상승을 유발하나, 균일한 온도분포를 얻지

못하였다.

- (3) 배관의 균일한 가열을 위해 가스버너, 송풍기를 통해 배관 내부로 열풍을 주입하여 기존 가열로의 공간적 제한에서 벗어나 배관을 효율적으로 가열할 수 있는 것을 확인할 수 있었다.
- (4) 본 연구는 대형 배관 코팅을 위해 가스버너, 송풍기를 통해 배관 내부로 열풍을 주입하여 배관을 가열하는 시스템으로, 기존 가열로의 공간적 제한에서 벗어나 배관을 효율적으로 가열할 수 있도록 제작하였다. 특히, 열유동을 위해 다양한 유동 패턴을 분석하고, 적절한 믹스 장치를 선정하여, 믹스장치를 설계/제작하였다.

후 기

“이 논문은 2015~2016년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.”

REFERENCES

1. Dang, H. W., Yang, S. W., Doh, Y. H., Choi, K. H., "Improvement of Spray Coating Uniformity using ESD Electrodes," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 2, pp. 118~124, 2016.
2. Yun, S. U., Kim, J. Y., Choi, S. H., Kim, H. W., "Inspection System of Coating Layers by Thermal Behavior Effect," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 6, pp. 1~7, 2014.
3. Miyazaki, Y., Arikawa, M., "Visualization of Oscillating Heat Pipe, 36th National Heat Pipe", 36th National Heat Transfer Symposium of Japan, pp. 659~660, 1999.
4. Webb, R. L., "Principles of Enhanced Heat Transfer", Wiley Inter Science, pp. 56-86, 1994.
5. Jeon, E. C., Youn, G. H., Kang, C. H., " A Study on Effect of Flow Characteristics for Turbine Impeller Shape," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 4, pp. 36~43, 2014.
6. Cho, S. M., Kim, K. S., Kim, C. J., Lyu, G. J., Lee, Y. J., "Temperature Variations of Air Pocket in Type-3 Composite Vessel during Ambient Hydraulic Cycling Test," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 5, pp. 120~125, 2015.
7. Frank Kreith, Mark S. Bohn, "Heat Transfer Fifth Edition", West Info Access.
8. Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L. and Lavine, A. S., "Introduction to Heat Transfer, 5th ed," John Wiley & Sons, Inc, Notre Dame, pp. 504~551, 2007.
9. Ansys, "Theory Reference Release 5.6", ANSYS Manual, 1992.
10. Yunus A. Cengel, "Heat Transfer International Edition", McGrawHill.
11. Zienkiewicz, "The Finite Element Method", New York Mc Graw-Hill, 1977.
12. David M. Preatt, Won Soon Chang, Kevin P. Hallinan, "Heat Pipe Transient Simulation Model", 6th International Symposium on Transport Phenomena in Thermal Engineering, 1993.
13. Park, J. H., Kim, S. T., Kang, J. I., "Flow Analysis on the Uniform Temperature Distribution of Pipe for Coating through inner Heating," Proceeding of the KSMPE Autumn Conference, pp. 92, 2014.
14. Park, J. H., Kang, K. M., Kang, J. I., Kim, S. T., "Development of Heating and Coating system for Pipe Coating," Proceeding of the KSMPE Autumn Conference, pp. 117, 2015.
15. S. C. Jang, T. S. Park, N. S. Hur, I. W. Kim, "CAE/CFD Analysis and Design of High-Pressure Drop Control Valve for Offshore Project," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 5, pp. 42~49, 2015.
16. Byeon, W. J., Kim, S. T., Kang, K. M., "Development of Heating system for the Coating of Large Pipe," Proceeding of the KSMPE Autumn Conference, pp. 96, 2015.