

연소로의 화염분포가 보일러 관로에 미치는 영향에 관한 연구

조 동 현*
(대진대학교)

A Study on the Influence of the Pipe Line of Boiler for Flame Distribution of Combustion Furnace

Dong-Hyun CHO†
(Daejin University)

Abstract

The fire took place in the synthetic heat transfer fluid boiler used in production process of medium density fiberboard. This study investigated pressure distribution of the first, second and third passes and the temperature in the fire burner. The boiler's internal fluid is unsteady due to the out of order inverter. As the operation continues, the flame's flow and speed are unsteady. The synthetic heat transfer fluid leak spouted about 120kg/min in the form of vapor in the early period of the fire. The flame extended to the second and third passes. The highest temperature of the second and third pass is 1059°C and 1007°C, respectively. The synthetic heat transfer fluid spouted through the cracked part of the fire box in the first pass and accumulated on the turn table. Therefore, it is expected that the temperature of the interior of the fire box is above 1200°C. The temperature of the burner rises to a maximum level several times in a short period. On account of that, several explosions occur in the fire burner. Pressure distribution at steady state in combustion furnace is 2~5mAq and pressure distribution at inverter under fault condition in combustion furnace is 10~53mAq. The decrement of coil thickness measurement for synthetic heat transfer fluid boiler is 0~5mm.

Key words : Synthetic heat transfer fluid boiler, Flame distribution, Pressure distribution, Inverter, Coil

I. 서론

MDF(Medium Density Fiberboard)를 제조하는 공정에 열에너지를 공급하는 열매체보일러(Synthetic heat transfer fluid boiler)에서 화재가 발생하였다. 화재가 발생한 1차 패스 연소대 위쪽 열매체보일러의 14단 부근에서 열매유가 방출되었다. Lee(2012)는 화재가 발생한 열매체보일러의 화재 원인을 규명하기 위하여 화재 전 정상상태

와 화재 후의 변화를 해석하였다. 해석에는 3차원 자동설계 프로그램인 CATIA(CATIA V5, 2002)를 활용하여 설계하고 이를 바탕으로 유한요소해석 프로그램인 ANSYS(ANSYS Manual, 2010)를 활용하여 해석한 결과에 의하면 화재 후 1차 패스의 최대온도는 1240°C 증가하고 최대응력은 100배 증가하며 최대변형율은 82배 증가함으로써 1차 패스의 손상이 매우 크며 안전범위를 벗어나 있다고 하였다. 그리고 Kim(2013)은 열매

† Corresponding author : 031-539-1973, chodh@daejin.ac.kr.ac.kr

* 이 논문은 2014학년도 대진대학교 학술연구비 지원에 의한 것임

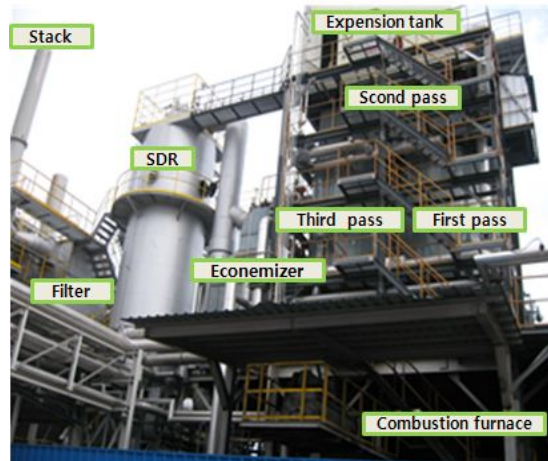
체보일러 내부화재를 해석한 결과에서 열매체유 누유로 인한 화재에서 연도 내 화재 초기에 약 120kg/min으로 열매체유가 기화로 인해 분출되면서 화재 발생 후 2차 패스 연도온도는 935℃ 범위까지 상승하였으며, 화염이 2차 패스와 3차 패스까지 열이 전달되며, 화염이 확대되고 2차 패스 최고온도는 1,059℃, 3차 패스는 1,007℃이며, 바깥흐름으로 형성되면서 아래쪽에서는 온도가 767℃로 해석되었다고 보고하였다.

본 연구에서는 보일러의 정상상태와 화재 후의 비정상상태에 대한 화염분포와 압력분포를 구하고, 열매체보일러의 1차 패스 14단 코일의 균열 부위로 누출된 열매체유의 누유량과 누유량에 대한 연소열량을 분석하며, 또한 연소열량이 코일의 부식과 균열에 미치는 영향에 대하여 규명하고자 한다.

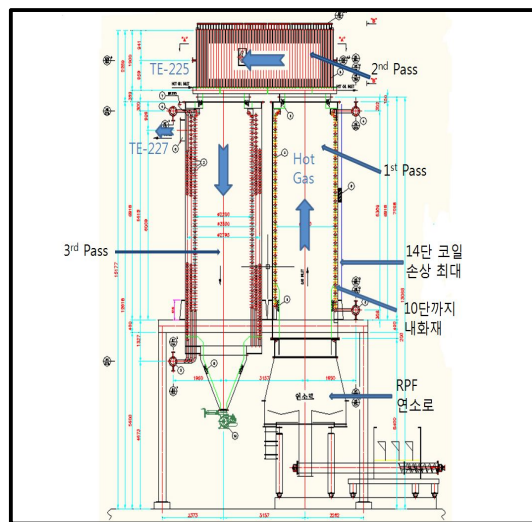
II. 열매체유 보일러 구조 분석

[Fig. 1]은 열매체보일러와 스팀보일러의 배치도를 나타낸다. [Fig. 2]는 열매체유 보일러의 정면도이며 [Fig. 3]은 열매체보일러의 설계도이다. 열매체보일러의 연료는 RPF를 사용하며, 동일한 형식의 연소기에 의하여 가동되고 있다. 분쇄되어 투입된 RPF연료는 RPF 이송장치인 컨베이어를 통해 연소기로 이송된다. 우측으로 수송된 RPF연료는 스팀보일러로 공급되고 좌측으로 수송된 RPF연료는 열매체유 보일러로 공급된다. 연소기 내부에서는 하부로부터 연속적으로 컨베이어 벨트를 통하여 수직 공급되는 RPF를 회전하는 연소대 위에서 태우면서 가장자리로 이동시켜서 타고 남은 재는 외부로 방출된다. 두 보일러는 동일한 연소기를 사용하여 RPF를 연소하도록 구성되어 있다. 스팀보일러와 열매체보일러의 1차 패스 구조는 동일하며, 2차 패스와 3차 패스의 구조는 다소 다른 구조로 설치되어 있다. 두 보일러는 모두 동일한 기간 동안 운전되었는데

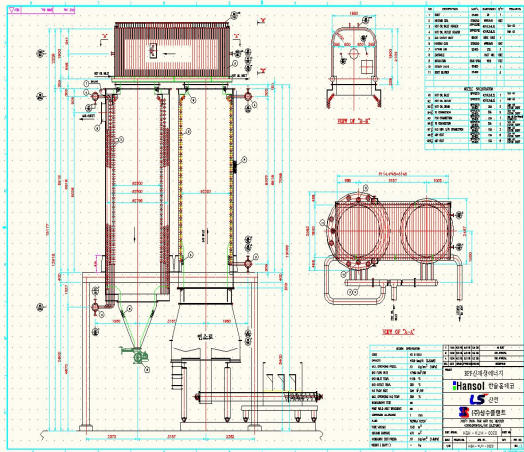
스팀보일러는 사고 시점까지 별다른 문제점이 발견되지 않았다. 화재 진압 후에 열매체보일러 내부를 조사한 결과 1차 패스의 최하단 코일로부터 14단 코일이 길이방향으로 약 90cm와 틈새 약 1mm 간격으로 균열이 발생되어 있는 것을 확인하였다.



[Fig. 1] Geometry of synthetic heat transfer fluid boiler and steam boiler



[Fig. 2] Geometry of synthetic heat transfer fluid boiler



[Fig. 3] Geometry of synthetic heat transfer fluid boiler.

<Table 2> Charging quantity of synthetic heat transfer fluid

Item	Charging quantity of synthetic heat transfer fluid(m ³)
Charging quantity of the early stage	26.0
Charging quantity of first pass	2.4
Charging quantity of second pass	1.6
Charging quantity of first pass, second pas, expansion tank and third pass	7.5
Charging quantity of expansion tank	3.5
Charging quantity of pipe line	1.0

Ⅲ. 화재 시 연소된 열매체유 유량 및 연소열량

1. 열매체유 충전량 및 누유량

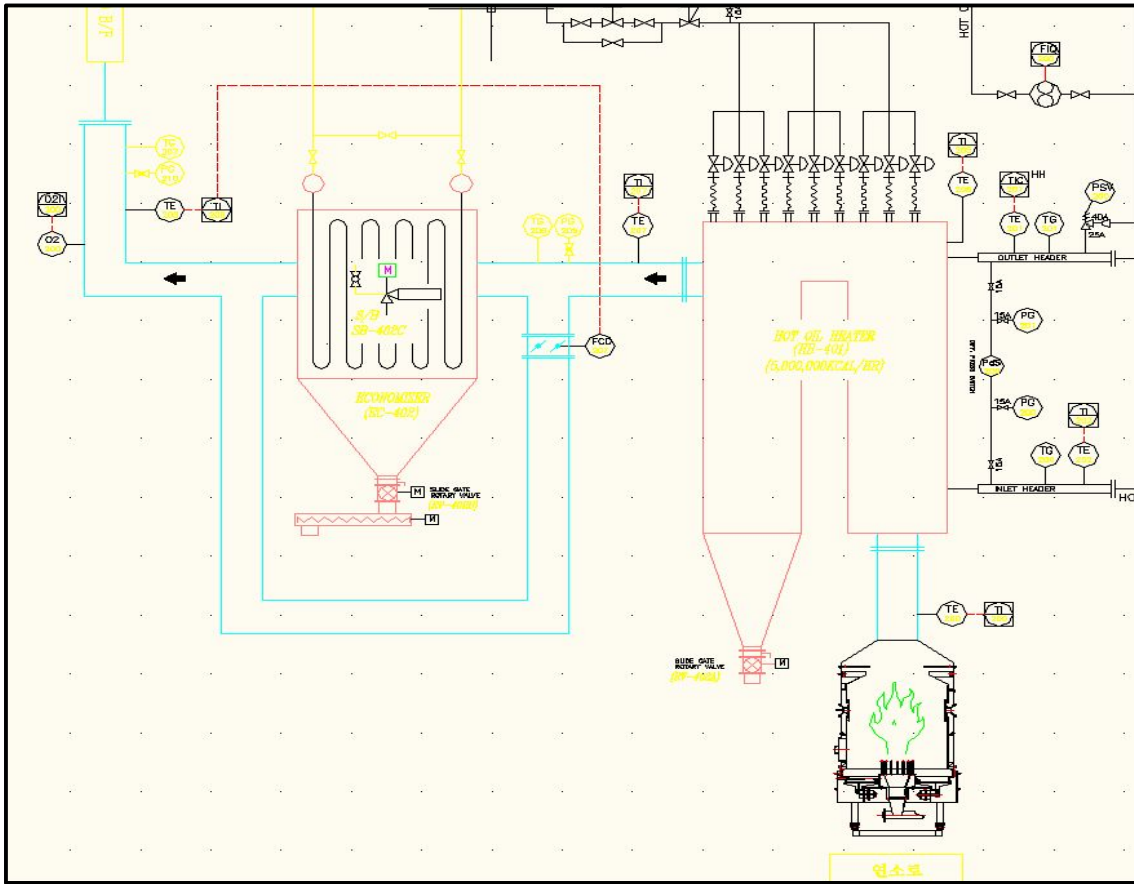
<Table 1>은 화재시에 누유된 열매체유의 누유량을 나타낸다. 그리고 열매체보일러에 주입된 열매체유 충전량은 <Table 2>와 같다. 열매체유는 TOTAL SERIOLA KS 2120를 사용하였다. <Table 2>에 나타난바와 같이 열매체유의 총 충전량은 26m³이며, 화재 시 누유량은 15,000L가 누유되었다. 화재시 누유된 누유량에 의해 연소된 연소열량은 386GJ이다.

<Table 1> Outflow of synthetic heat transfer fluid

Outflow time	Outflow(L)
2~3minutes after initial fire	1,600~2,000
10minutes after initial fire	5,000
7hour after initial fire	10,000
Charging quantity of first pass, second pas, expansion tank and third pass	7,500
Total outflow time : 7hour and 20minutes	15,000

2. 화재에 의한 열매체의 완전누출 및 연소

열매체보일러의 1차 패스 14단 코일이 균열되어 대기에 노출되었다. 표준대기압 하에서의 열매체의 비등점은 340~390℃이므로 열매체유에 열을 공급하여 열매체유의 온도가 340℃가 되면 액체 열매체유가 기체열매체유로 상변화하게 된다 (Park, 2004). 즉 열매체유가 기화하게 된다. 1차 패스 내부온도가 1,125℃이므로 코일 균열부위로부터 누설되는 액체 열매체유는 기체 가스로 기화하게 된다(Lim, 2002). 그리고 열매체유의 연소점은 218℃이므로 기화된 가스는 바로 연소하게 된다(Lim, 2008). 또한 코일 내부의 열매체유의 압력은 7bar로 대기압보다 높으므로 액체 열매체유는 코일 균열부위가 노출처럼 작용하면서 코일 외부로 분사되게 된다. 분사된 열매체유는 기화되면서 연소실과 1차 패스의 연소가스 통로에서 연소하게 된다. 코일 균열부위로부터 누유된 열매체유의 질량은 1시간당 1,195.2kg이 누유되었으며 분사된 열매체유가 연소되면서 발생한 열량은 386GJ이다. 열매체유가 연소되면서 발생한 열량은 시간당 36GJ이다. [Fig. 4]의 열매체보일러 계통도에 나타난바와 같이 1차 패스와 2차 패스의



[Fig. 4] Block diagram of synthetic heat transfer fluid boiler.

코일 내부에 있는 열매체유 모두가 균열부위에서 누유 되어 연소되면 1차 패스와 2차 패스의 코일 내부는 빈 공간이 된다. 균열부위가 대기에 노출 되어 있으므로 1차 패스와 2차 패스의 코일 내부는 열매체유 기화가스가 존재하게 된다. [Fig. 4]의 열매체보일러와 같이 3차 패스 코일 내부에 있는 열매체유는 중력에 의해 1차 패스 코일 하부로 유동하여 균열부위에 누유 되면서 기화되어 연소한다. 또한 팽창탱크에 남아있던 열매체유도 중력에 의해 열매체펌프로 내려간 후 누출부위의 고온에 의해 기화되고 분출되어 완전히 소실되었다.

3. 열매체보일러 설계 용량과 열매체유 누

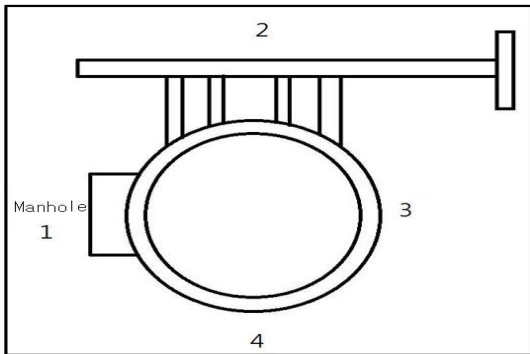
설에 의한 연소열량

열매체보일러가 정상가동 시 RPF 연료의 연소에 의해 공급한 열량은 시간당 18.8GJ이다. 그런데 열매체유 누설에 의한 연소열량은 시간당 36GJ이다. 열매체유의 연소에 의한 화재로 발생한 열량이 RPF 연료의 연소에 의한 정상가동 시 열량보다 1.9배 더 많이 발생하였다. RPF 연료의 연소에 의해 공급한 열량은 코일 내부에서 유동하는 열매체유가 열을 모두 흡수하여 공장으로 수송하며 연소가스의 입구온도 1,125℃, 2차 패스 입구온도 650℃, 3차 패스 온도 420℃로 일정하게 유지된다. 그런데 1차 패스 균열부위에서 열매체유가 분사된 후 3분후에 모든 펌프, 송풍기

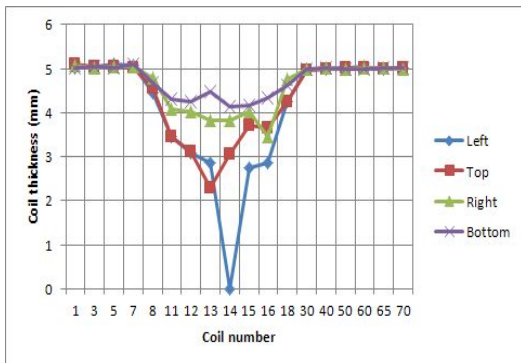
등 유체 수송장치가 정지한 상태이므로 열매체유의 연소에 의한 열은 공장으로 수송되지 못하고 보일러 코일에 열전달 영향을 미치게 된다.

4. 코일두께 감소량

[Fig. 5]은 열매체보일러와 스팀보일러의 1차 패스 코일 두께 측정 위치를 나타낸다. 그리고 [Fig. 6]은 열매체보일러 코일 두께를 그래프로 나타내었다.



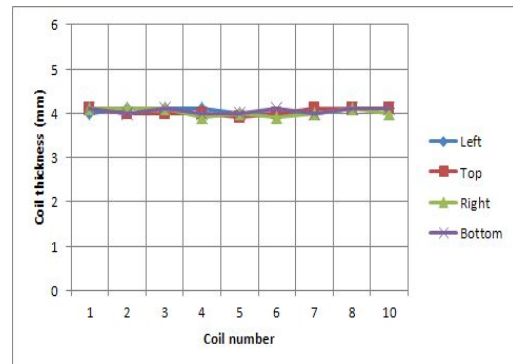
[Fig. 5] Position of coil thickness measurement.



[Fig. 6] The decrement of coil thickness measurement for synthetic heat transfer fluid boiler.

[Fig. 7]은 스팀보일러 코일 두께를 그래프로 나타내었다. [Fig. 6]에서 8단부터 18단까지 코일 두께 감소를 보였고, 13단에서 16단이 가장 심하였으므로, 맨홀에서부터 왼쪽 방향이 앞쪽이나 오

른쪽보다 비교적 심각하였다. 그리고 열매체보일러 코일의 1차 패스 14번 코일의 두께 감소는 5mm이다. 이와 비교하여 스팀보일러 코일의 두께 감소는 [Fig. 7]에 나타낸바와 같이 0.1mm이다. 그러므로 열매체보일러 코일의 두께 감소는 스팀보일러 코일의 두께 감소보다 50배 더 크게 나타났다. 그러므로 스팀보일러 코일의 정상부식 속도 및 균열 위험성이 열매체보일러보다 크게 나타났음에도 불구하고 실제로는 열매체보일러 코일의 두께 감소가 더 큰 결과를 보이고 있다. 이와 같은 결과로부터 열매체보일러 코일의 두께 감소는 정상부식(normal corrosion)에 의해 감소된 것이 아님이 명백하며, 비정상부식(abnormal corrosion)에 의한 것으로 판단된다. 코일의 정상 부식에 대한 설계 값은 10년에 코일 두께가 1mm 감소되는 것으로 설계되었으며, 10개월 동안 스팀보일러 코일의 두께는 0.1mm정도 감소



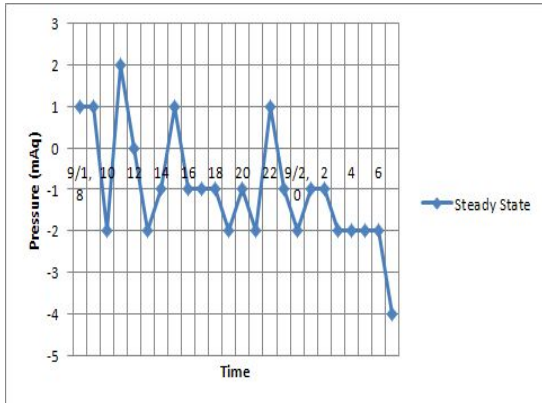
[Fig. 7] The decrement of coil thickness measurement for steam boiler.

되었으므로 거의 설계 값과 일치하나 열매체보일러는 5mm 전부가 마멸되었으므로 비정상 마멸로 판단된다.

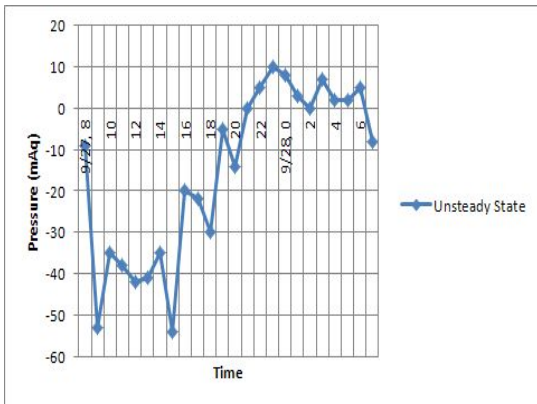
IV. 연소로 내부 화염 및 압력분포

1. 연소기 상부에서 측정된 로내 압력 및 화염분포도에 의한 코일의 손상

[Fig. 9]는 정상 상태에서 연소로내 압력분포도를 나타내며, [Fig. 10]은 인버터 고장상태에서의 연소로내 압력분포를 나타낸다. [Fig. 9]에 나타낸 바와 같이 정상상태에서 압력분포는 2 ~ -5mAq이며, 그리고 [Fig. 10]에 나타낸바와 같이 인버터가 고장으로 인한 비정상 가동상태에서의 로내 압력은 10 ~ -53mAq이다.



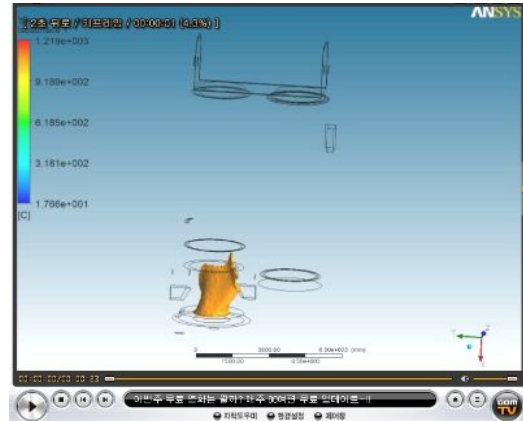
[Fig. 9] Pressure distribution at steady state in combustion furnace.



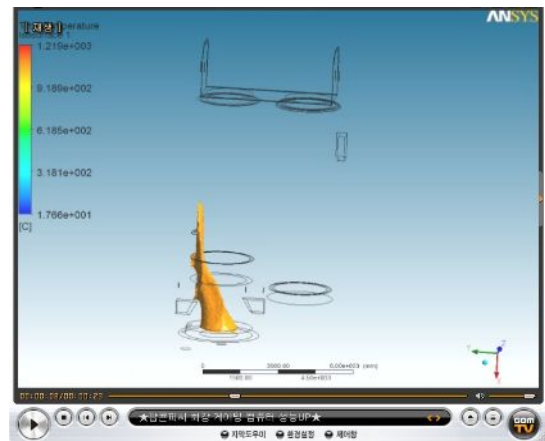
[Fig. 10] Pressure distribution at inverter under fault condition in combustion furnace.

그러므로 인버터 고장 시의 연소로내 압력은 정상 가동 상태에서의 연소로내 압력보다 부압이 4~6배 이상 크게 작용되었다. ID Fan을 제어하는 인버터가 고장이 나서 연소로내 압력에 의한 주

과수 제어가 불가능하게 되어 전원에 직접 연결 해서 팬을 가동함으로써 로내 압력이 과다하게 내려가는 문제가 발생하였다. 노내 압력이 저하 되면 연소기 내부에서 유동하던 연소화염이 1차 패스 하부로 상승하게 되고 연소 잔해물인 회분도 보다 많은 양이 상승기류에 포함되어 보일러 연도로 이동하게 된다.



[Fig. 11] Flame distribution at steady state in combustion furnace.



[Fig. 12] Flame distribution at Inverter under fault condition in combustion furnace.

[Fig. 11]은 정상상태에서의 로내 화염분포를 나타내며 1차 패스 하부 연소실에서 화염이 타고 있으나 [Fig. 12]는 인버터 고장상태의 노내 화염

분포로써 음압이 4~6배 크게 작용한 결과 불꽃의 유동이 1차 패스 8~18단 코일부위까지 상승됨으로써 고온의 RPF 연소화염에 노출되어 가열되는 양상을 보이고 있다.

이와 같은 결과로 인버터가 고장 난 상태에서는 코일의 용융온도보다 높은 2,100℃~2,350℃의 연소화염에 의한 고온 열 손상으로 코일에 심각한 금속손실(metal loss)가 진행되었고 계속된 수동운전 중 코일 내부압력 7bar를 견딜 수 없는 극한 상황에서 1차 패스 14단 코일에 균열이 발생한 것으로 판단된다.

V. 결 론

MDF를 제조하는 공정에 필요한 열매체보일러에서 화재 발생에 의한 연소로내의 압력분포와 온도분포에 대하여 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 열매체보일러의 1차 패스 14단 코일이 균열 부위로 누출된 열매유의 총량은 15,000L이며, 연소열량으로 환산하면 총 연소열량은 386GJ이다.
- (2) 정상상태에서의 로내 화염분포도는 1차 패스 하부 연소실에서 연소화염이 타고 있으나 인버터 고장 시 비정상 상태에서 의 로내 화염 분포도는 음압이 4~6배 크게 작용한 결과로 인하여 연소화염이 1차 패스 코일의 18단까지 상승하게 되고, 화염의 유동이 8~18단 코일의 1번 부위에 집중됨으로서 고온가열에 의한 과도한 metal loss가 발생되었고 결국 코일내부 압력을 견디지 못하는 시점에서 균열되었다.
- (3) 열매체보일러 코일의 두께 감소가 스팀보일러 코일의 두께 감소보다 50배 더 높게 나타났다.

References

- ANSYS User's Manual(2010). Ver.12.1, ANSYS Inc.
- Che heechang(2002). "Introduction to CATIA V5", Pearson Education Korea Ltd.
- James Shakelford & William Alexander(1994). "Material Science and Engineering Hand Book", CRC Press.
- Kim Y. R. & Son B. S.(2013). "Temperature and Flow Velocity Analysis for Fire in Synthetic Heat Transfer Fluid Boiler", Fire Sci. Eng., Vol. 27, No. 5, 19~25.
- Kim Y. R. · Lee D. M & Kim Y. Z.(2012). "Temperature and Flow Velocity Simulation for Fire in Synthetic Heat Transfer Fluid Boiler", Proceedings of 2012 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, 472~475.
- Lee J. S.(2012). "Structural Analysis of Synthetic Heat Transfer Fluid Boiler", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society Vol. 13, No. 8, 3352~3357.
- Lim, T. W. & You, S. S.(2008), A Study on the microcooling Fin Fabrication Process for Enhancing Boiling Heat Transfer, Jour. Fish. Mar. Sci. Edu., 19(3), 366~372.
- Lim, T. W. · Park, J. U. & Kim. J. H.(2002). A Study on Heat Transfer and Pressure Drop in Flow Boiling of Binary Mixtures in a Uniformly Heated Horizontal Tube, Jour. Fish. Mar. Sci. Edu., 14(2), 177~190.
- Park C, H.(2008). "User Guide of ANSYS Workbench", Interscience.
- Park, J. U. & Cho, D. H.(2004). A Study on Heat Transfer Characteristics of Helical Coiled Tube, Jour. Fish. Mar. Sci. Edu., 16(2), 257~270.

-
- 논문접수일 : 2014년 10월 05일
 - 심사완료일 : 1차 - 2014년 11월 01일
2차 - 2014년 12월 17일
 - 게재확정일 : 2014년 12월 18일