

# CFD 해석을 이용한 Al6061 튜브의 극저온 열처리 시 소재의 온도 예측 및 실험적 검증

## Temperature Prediction of Al6061 Tube in Cryogenic Heat Treatment by CFD Analysis and Experimental Verification

황성준<sup>1</sup>, 고대훈<sup>1</sup>, 김동환<sup>2</sup>, 김병민<sup>3,✉</sup>

Seong Jun Hwang<sup>1</sup>, Dae Hoon Ko<sup>1</sup>, Dong Hwan Kim<sup>2</sup> and Byung Min Kim<sup>3,✉</sup>

<sup>1</sup> 부산대학교 정밀가공시스템 (Department of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

<sup>2</sup> 한국국제대학교 기계자동차공학과 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, International Univ. of Korea)

<sup>3</sup> 부산대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

✉ Corresponding author: bmkim@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-3074

Manuscript received: 2011.5.13 / Accepted: 2011.9.5

*The purpose of this study is to establish the analysis method for prediction of temperature during cryogenic heat treatment. Experimental cryogenic heat treatment is conducted to observe the phenomena such as boiling of fluid, ice layer on the material surface and to measure the temperature distribution of Al6061 tube. The CFD analysis considering the observed phenomena in the experiment is performed to predict the temperature distribution and convection heat transfer coefficient at each stage of cryogenic heat treatment, in which the boiling of fluid is considered as the multi-phase condition of vapour and liquid. The formation of ice layer on the tube surface is also modeled between material and fluid. The predicted results are in good agreement with the experimental ones. From the results, it is shown that the analysis method can predict the temperature distribution and convection heat transfer coefficient during cryogenic heat treatment.*

Key Words: Solid Solution (용체화처리), Up-hill Quenching (업힐퀸칭), Cryogenic Heat Treatment (극저온 열처리), Computational Fluid Dynamics (CFD; 유체유동해석), Single-phase (단상), Multi-phase (다상)

### 1. 서론

금속의 열처리는 가열 및 냉각하여 재료의 기계적, 물리적 성능을 향상시키거나 가공성을 개선시키는 기술이다. 특히 온도, 시간, 가열 및 냉각 속도 등의 열처리 조건에 따라 재료의 기계적 성질을 결정하는 데에 중요한 영향을 미친다.<sup>1-3</sup>

일반적으로 알루미늄 열처리는 재료를 과포화 고용체(supersaturated solid solution)로 형성하기 위해

500 °C 전후로 가열한 뒤 급냉하는 용체화 열처리(solid solution)와 최적의 기계적 성질을 얻기 위해 용체화처리 후 상온에서 유지하는 자연시효(natural ageing), 약 150 °C에서 유지하는 인공시효처리(artificial ageing)가 있다. 그 밖에 알루미늄 열처리로는 균질화 열처리, 극저온 열처리(cryogenic heat treatment) 등의 여러 방법들이 있다. 특히, 잔류응력 제거를 위한 극저온 열처리는 잔류응력에 직접적인 영향을 미치는 각 단계별 열처리 온도와 이

에 대한 가열 및 냉각 속도의 파악이 매우 중요하므로 열처리 온도 예측이 필수적으로 요구된다.

또한 정확한 열처리 온도 예측을 위해서는 비등현상 등의 실제 열처리 과정에서 발생하는 요인들을 고려할 필요가 있으며, 이러한 현상들을 고려하기 위하여 CFD(Computational fluid dynamics)를 적용한 열처리 해석이 많이 수행되었다.<sup>4,6</sup> CFD 해석의 장점은 열처리 시 유체 유동에 의한 소재 온도와 유체 온도 변화를 동시에 고려할 수 있다. 또한 유체의 유동 방향, 속도, 그리고 대류열전달계수(heat transfer coefficient) 등 다양한 데이터를 얻을 수 있으며, 유체의 상 변화도 고려하여 해석할 수 있는 방법이다.

Lind<sup>4</sup> 등은 가스보일러 냉각에서 강관의 퀴칭 시 표면열전달계수의 분포를 파악하기 위해 CFD 해석을 수행하였으며, Berglund<sup>5</sup> 등은 열처리로에서 우주항공부품의 가열 시, 표면열전달계수의 분포를 파악하기 위해 CFD 해석을 수행하였다. 그리고 Lior<sup>7</sup>는 단일 및 다중 기관의 가스 퀴칭 시 가스의 유동과 대류열전달계수를 CFD 해석을 통해 확인하였다. 하지만 대부분의 연구들은 가스, 물 등의 유체에 의해 단순히 소재가 가열 및 냉각되는 해석을 수행하였으며, 정확한 열처리 온도 및 대류열전달계수를 예측하기 위해서는 실제 열처리과정에서 발생하는 유체의 비등 등 실제현상을 고려한 해석이 필요하다.

따라서 본 연구의 목적은 Al6061 대형튜브의 극저온열처리 시, 발생하는 실제현상을 CFD 해석에서 고려하여 각 단계 별 열처리 시 소재온도 분포 및 대류열전달계수를 예측하는데 있다. 이를 위해 잔류응력 제거에 적용되는 극저온 열처리에 대해 실험을 수행하여 열처리 시, 유체의 비등현상과 소재의 표면에 얼음층이 형성되는 현상들을 파악하였다. 파악된 현상들을 CFD 해석에 고려하여 극저온 열처리의 각 단계별 온도 및 대류열전달계수를 예측하였다. 예측된 결과를 실험 결과와 비교하여 해석 결과의 타당성을 확인하고 정확한 열처리 온도예측을 위한 해석기법을 확립하였다.

**2. 극저온 열처리 예비 실험**

본 연구에서는 Al6061의 극저온 열처리 시 발생하는 현상을 규명하고, 열처리 온도를 측정할 목적으로 열처리 실험을 수행하였다. 일반적으로

극저온 열처리는 크게 용체화열처리, 업힐퀴칭(up-hill quenching), 인공시효로 구성된다. 특히, 업힐퀴칭에서 소재를 극저온까지 냉각한 후 급속 가열하여 가열속도를 최대화하는 것이 잔류응력 제거 효율을 결정하는 핵심기술이다.<sup>1</sup>

극저온 열처리 실험은 Fig. 1에 나타난 바와 같이, 먼저 530 °C에서 2시간 유지한 후 상온의 물로 수냉하여 용체화처리 하였으며, 업힐퀴칭은 액체질소(LN<sub>2</sub>)로 -196 °C의 극저온까지 냉각한 후 끓는 물을 사용하여 급속 가열하였다. 그리고 인공시효는 Al6061의 일반적인 조건으로 175 °C에서 9시간 유지한 후 공냉하였다.

극저온 열처리 실험에 사용된 소재 크기와 온도 측정지점을 Fig. 2에 나타내었다. 소재의 온도는 각각의 측정위치에 드릴 가공하여 K-type의 열전대를 삽입하여 온도를 측정하였다. 온도측정장비는 Tokyo sokki kenkyujo 사의 TDS-530를 사용하여 실시간으로 측정하였다.

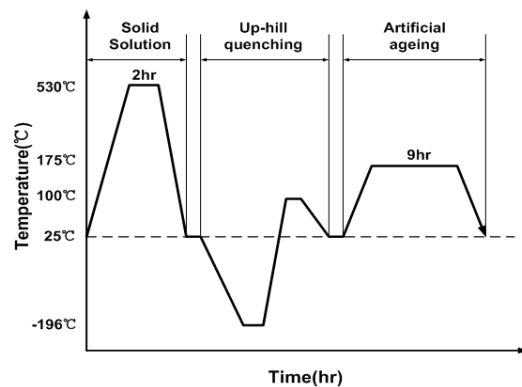


Fig. 1 Cryogenic heat treatment curve of Al6061 tube

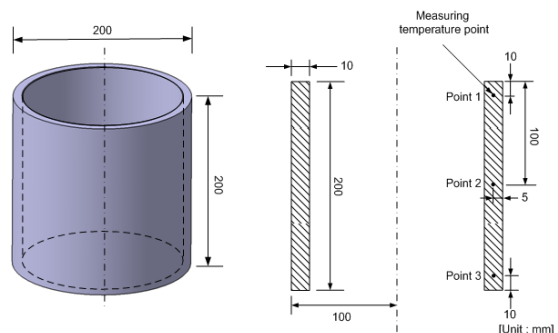
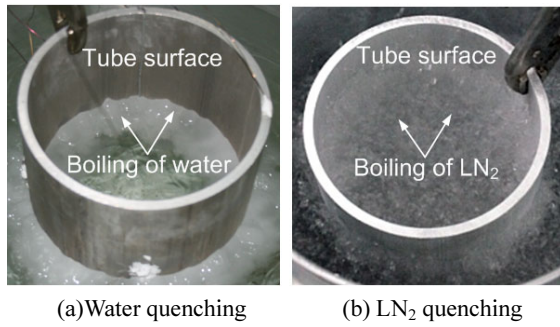


Fig. 2 Shape of specimen and measuring point for temperature in cryogenic heat treatment



(a) Water quenching (b) LN<sub>2</sub> quenching  
 Fig. 3 Boiling phenomenon during water and LN<sub>2</sub> quenching

**2.1 비등(Boiling)현상**

530 ℃의 튜브를 수냉하는 과정에서 Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 유체의 비등 현상을 확인할 수 있었다. 비등은 기포생성을 동반하는 상 변태 과정으로 매우 효과적인 열전달 형태이다. 소재와 유체의 경계면에서 유체 온도가 물의 경우 100 ℃ 이상되면 비등 현상이 발생한다. 냉각 초기에는 고온의 소재표면에 증기막이 생성되고, 그 후 심한 비등 현상으로 인해 증기막이 파괴되면서 기포가 발생한다. 이 때 소재표면은 물과 접촉되면서 활발한 유체 유동에 의해 소재의 냉각속도를 급속도로 향상시킨다.<sup>8,9</sup>

또한, 업힐퀀칭에서 LN<sub>2</sub>를 이용한 냉각 시에도, Fig. 3(b)와 같은 비등 현상을 확인할 수 있었다. 이는 LN<sub>2</sub>의 비등점이 -196 ℃ 이기 때문에 상온에서는 비등현상이 자연적으로 발생한다. 이러한 유체의 비등현상은 소재와의 열전달에 직접적인 영향을 미치기 때문에 이를 고려한 CFD 해석이 필요할 것으로 판단된다.

**2.2 얼음층(Ice) 생성**

LN<sub>2</sub>에 의해 냉각된 튜브를 순간적으로 100 ℃의 끓는 물로 가열하는 업힐퀀칭 시 Fig. 4와 같이 튜브의 표면에 얼음층이 형성됨을 확인할 수 있었다. 이는 업힐퀀칭 시, 소재와 끓는 물의 열전달로 인해 소재 표면에 존재하는 물의 온도가 어는 점, 즉 0 ℃이하로 냉각되었음을 의미한다. 얼음층은 업힐퀀칭 초기에 활발하게 생성되었다가, 시간이 경과함에 따라 점차 소멸되면서 10 초 후에는 완전히 소멸되었다. 업힐퀀칭 5 초 후의 얼음층 두께를 측정된 결과, Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 얼음층은 약 0.6mm의 두께를 가졌다.

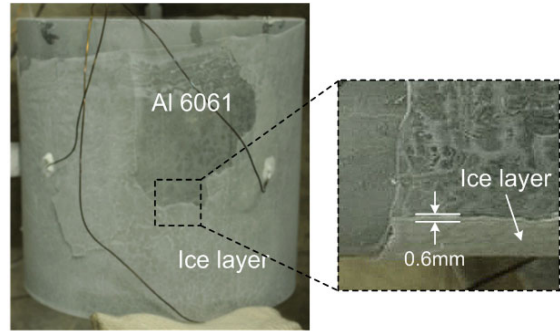


Fig. 4 Formation of ice layer at tube surface during up-hill quenching and thickness of ice layer after 5 s

**3. 극저온 열처리의 CFD 해석**

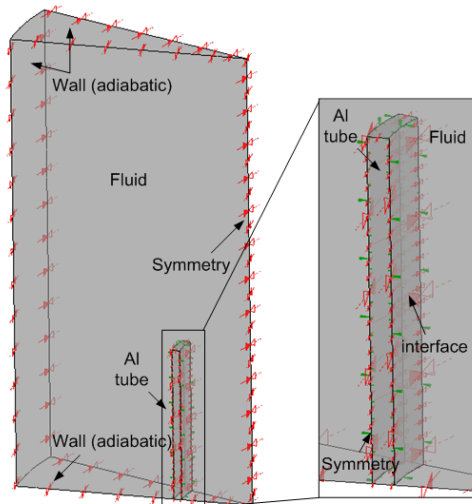
**3.1 해석 모델 및 조건**

본 연구에서는 극저온 열처리 시 소재의 온도 및 대류열전달계수는 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX-V.12를 사용하여 예측되었다. CFD 해석에서 대류열전달계수는 식 (1)과 (2)를 통해 도출된다. 열전달량( $Q_C$ )은 시간에 따른 소재의 온도변화에 의해 식 (1)과 같이 결정할 수 있으며 여기서,  $m$ ,  $C$ ,  $T_{wall}$ 은 각각 소재의 질량과 비열, 온도변화를 나타낸다. 또한, 결정된 열전달량은 식(2)의 뉴턴의 냉각법칙(Newton's law)에 의해 대류열전달계수를 구할 수 있다. 여기서,  $h$ ,  $S$ ,  $T_{fluid}$ 는 각각 대류열전달계수, 소재와 유체사이의 접촉면적이다. 또한, 해석에서 소재 및 크기, 가열로, 유체온도 및 유체종류 등은 실험과 동일한 조건을 적용하였고, 극저온 열처리 실험으로 확인된 비등과 얼음층이 생성된 현상들을 고려하여 해석을 수행하였다. 해석모델은 1/72 모델로 고려하였으며 경계조건은 Fig. 5와 같이 설정하였다. 튜브의 표면과 유체의 접촉면에 대해 열전달 경계조건을 부여하고, 밀도 차에 의한 유체의 유동을 고려하기 위해 중력을 입력하였다.

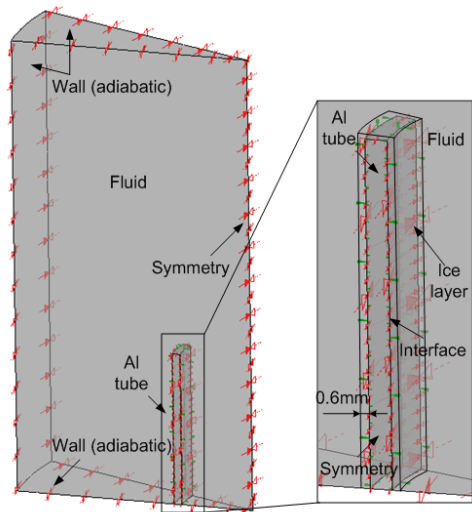
$$\frac{dQ_C}{dt} = m \cdot C \cdot \frac{dT_{wall}}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{dQ_C}{dt} = h(t) \cdot S \cdot (T_{fluid}(t) - T_{wall}(t)) \quad (2)$$

비등과 얼음층을 고려한 해석방법은 먼저 비등 현상의 경우는 수냉과 업힐켄칭 조건은 Multi-phase 로 해석하였으며, 그 밖에 공냉 및 가열로 가열조건은 Single-phase 로 해석하였다. Single-phase 는 단상유동만을 고려하는 반면에, Multi-phase 는 액체와 기체의 2 상이 유동하는 조건을 고려한 해석이 필요하므로 유체의 포화온도를 설정하였다.



(a) FE-model without ice layer



(b) FE-model with ice layer

Fig. 5 FE-model and boundary condition for CFD analysis

Table 1 Thermal properties of material and fluid

Value Type	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Thermal cond. (W/m·K)	Spec. heat capacity (J/kg·K)
Al6061	2,713	180	963
Water	0°C (Ice)	917	2,093
	25°C (Liquid)	997	0.607
	100°C (Liquid)	958.4	0.679
	100°C (Vapour)	0.59	0.025
Nitrogen	LN <sub>2</sub> (Liquid)	806.08	0.145
	N <sub>2</sub> (gas)	1.25	0.026

또한, 업힐켄칭 시 튜브의 표면에 발생하는 얼음층은 Fig. 5(b)에 나타낸 바와 같이 튜브와 유체의 경계면 사이에 얼음층을 모델링하고 물성치를 입력하였으며, 그 얼음층의 두께는 실험에서 확인된 0.6mm 로 설정하였다. 그 밖에 해석에 필요한 소재, 얼음층 및 유체의 열적 물성치를 Table 1 에 나타내었다.

이 때의 포화온도는 유체의 상 변태를 구분하는 기준온도이며, 수냉과 업힐켄칭 시 물과 LN<sub>2</sub>의 비등점을 고려하여 100 °C와 -196°C로 각각 설정하였다.

Multi-phase 를 고려한 수냉 해석 시, 유체의 물성은 상온(25°C)과 100°C의 물에 대한 물성 그리고 100°C 의 수증기 물성이 각각 입력되었다. 또한 업힐켄칭에서 LN<sub>2</sub> 로 냉각하는 경우는 -196°C의 LN<sub>2</sub> 와 질소가스(N<sub>2</sub>)의 물성이 적용되었으며, 끓는 물로 가열하는 경우는 100°C의 물과 수증기의 물성을 입력하여 해석하였다.

### 3.2 Multi-phase 해석의 영향

본 연구에서는 극저온 열처리의 각 단계별에 대한 온도 및 대류열전달계수를 파악하기 전에 먼저 Single-phase 와 Multi-phase 조건으로 각각 해석을 수행하여 수냉 시, 온도 및 냉각속도를 비교해 보았다.

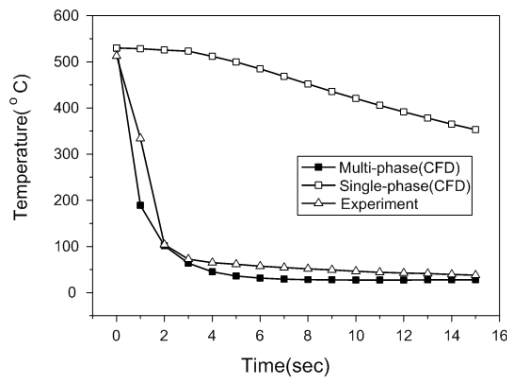


Fig. 6 Effect of temperature between single and multiphase analysis for water quenching

각각의 해석조건에 대한 예측된 온도결과를 실험결과와 비교하여 Fig. 6 에 나타내었다.

온도비교지점은 튜브의 중심부(Point 2)로 동일한 위치에서 해석과 실험이 비교되었다. 해석결과, 각각의 냉각속도가 Multi-phase 는 83.1°C/s, Single-phase 는 11.3°C/s 로 나타났으며 해석조건에 따라 튜브의 냉각속도에 현저한 차이를 보였다.

이는 수냉 해석 시, Multi-phase 는 비등점 이상으로 가열된 물이 기체로 상 변화하여 활발한 유동으로 인해 효과적인 열전달이 가능한 반면, 상 변화가 고려되지 않는 Single-phase 는 100 °C까지 가열된 물이 유동하지 못하고 정체되어 정상적인 열전달이 이루어지지 못해 발생한 현상이라 판단된다. 또한 Multi-phase 결과가 실험결과와 매우 유사한 경향을 나타냄을 확인할 수 있었으며 이에 따라 수냉 해석 시, 상 변화를 고려한 Multi-phase 해석방법이 타당함을 확인할 수 있었다.

### 3.3 CFD 해석 결과

Fig. 7, 8 에 수냉과 업힐 퀘칭 열처리 시 유체 유동과 소재의 온도분포를 열처리 시간에 따라 각각 나타내었다. Fig. 7 은 물에서 상 변화한 수증기가 밀도 차로 인해 상승하여 시간이 경과함에 따라 활발한 유동이 일어남을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 8 은 극저온 소재 주위의 물 온도가 낮아짐에 따라 물의 유동이 하강하는 경향을 나타내므로 튜브의 하부가 상부보다 느리게 가열됨을 확인할 수 있다.

극저온 열처리에 대한 실험의 온도측정결과와 CFD 의 온도예측결과를 각각 비교하고, CFD 를 통

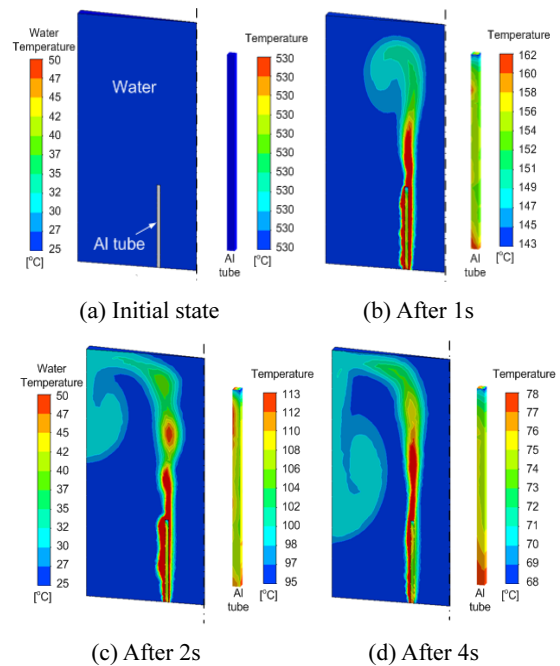


Fig. 7 Results of fluid flow and temperature distribution for water quenching

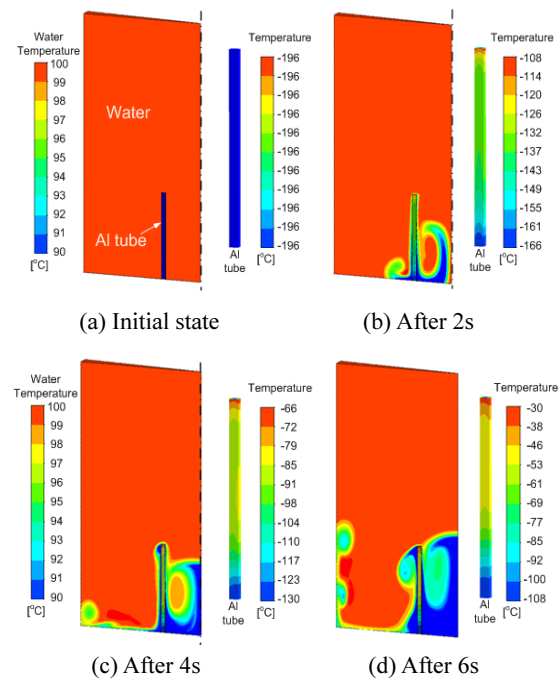


Fig. 8 Results of fluid flow and temperature distribution for uphill quenching

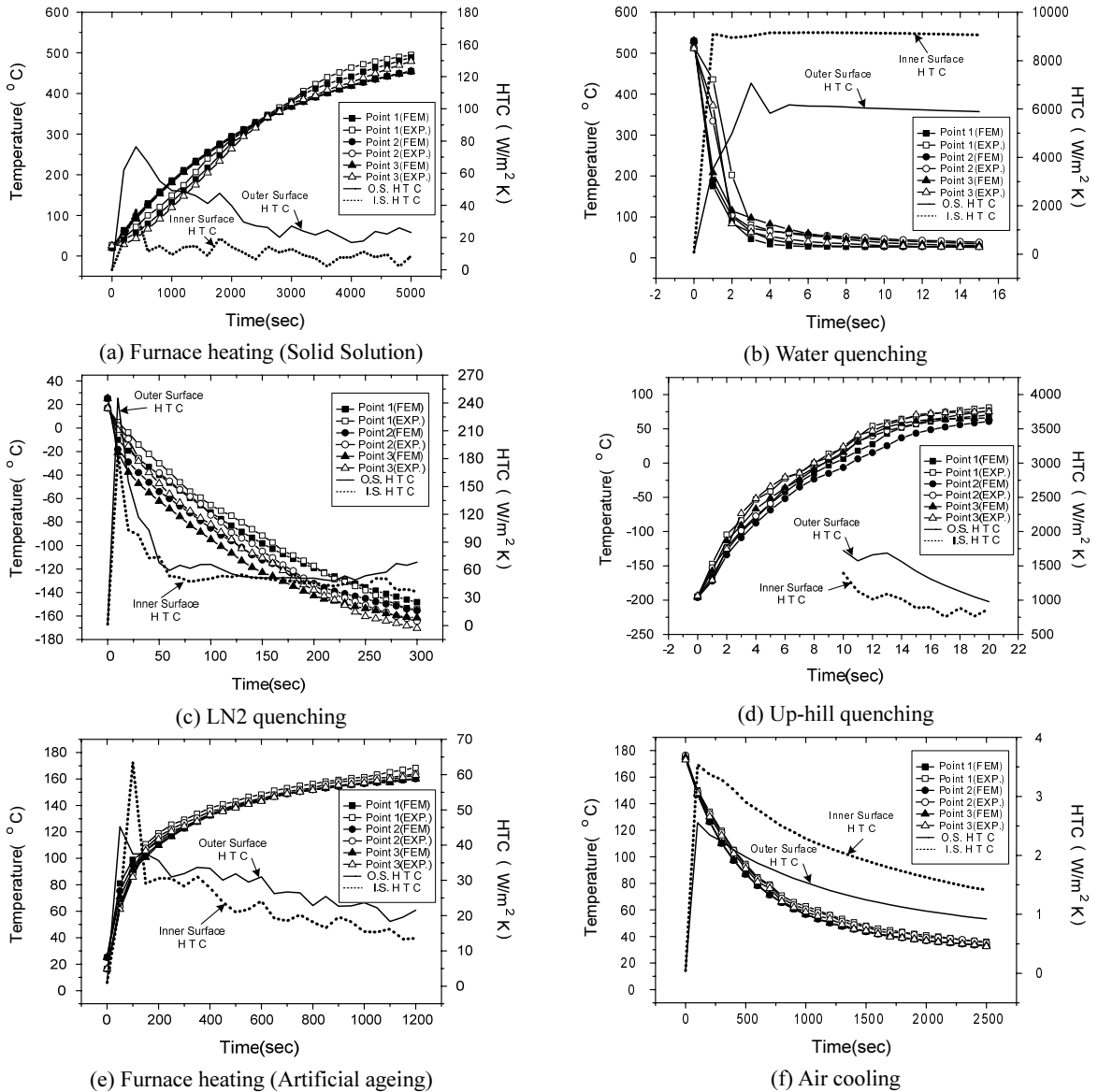


Fig. 9 Comparison between results of experiment and FE-simulation for temperature and heat transfer coefficient

한 대류열전달계수를 예측하여 Fig. 9 에 나타내었다. 온도비교는 극저온 열처리 의 각 단계별 총 6 조건에 대해 평가하였으며, 실험과 해석에서 동일한 온도측정지점에 대하여 각각 비교하였다. 온도비교결과, 업힐퀠칭 시 LN<sub>2</sub> 로 냉각하는 Fig. 9(c)에서 실험과 해석이 상대적으로 온도차가 높게 발생하였으며, 동일한 지점에서 최대 온도차가 15℃로 나타났다. 이는 비등점이 -196 ℃인 액체질소가 실험이 수행된 상온에서는 비등현상이 지속

적으로 발생하기 때문에 이러한 현상을 해석에서는 고려하지 못하여 발생한 오차라 판단된다. 그러나 극저온 열처리 의 각 단계별 모든 조건에서 실험과 해석의 온도가 매우 유사한 경향을 가졌으며 이에 따라 비등과 얼음층을 고려한 온도예측결과의 타당성을 확인할 수 있었다.

CFD 해석 결과, 수냉(Fig. 9(b))에서 소재 중심부(Point 2)의 냉각속도가 83.1℃/s 로 가장 높게 나타났으며 업힐퀠칭 시 끓는 물을 이용하여 가열하는

경우(Fig. 9(d))도 19.2℃/s 의 비교적 높은 가열속도를 가짐을 확인할 수 있었다. 이에 따라 수냉과 끓는 물 가열조건에서 각각 9200 W/m<sup>2</sup>·K, 1600 W/m<sup>2</sup>·K 이상의 높은 평균 대류열전달계수가 예측되었다. 하지만 그 밖의 다른 조건에서는 모두 1 ℃/s 이하의 매우 낮은 냉각 및 가열속도를 가졌으며, 평균 대류열전달계수도 100 W/m<sup>2</sup>·K 이하로 낮게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 잔류응력 제거를 위한 극저온 열처리의 수냉과 업힐 퀘칭을 제외한 조건들은 잔류응력에 큰 영향이 없음을 의미한다. 이에 따라 효과적인 잔류응력 제거를 위해서는 수냉 시, 적절하게 냉각속도를 조절하여 잔류응력의 발생을 최대한 저감하고, 업힐퀘칭 시는 급속 가열을 통한 잔류응력 제거효율의 극대화가 필요할 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

본 연구는 잔류응력 제거를 위한 극저온 열처리 시, 잔류응력에 직접적인 영향을 미치는 열처리 온도를 예측하는 해석기법을 확립하기 위해 CFD 해석 및 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 유체의 비등현상과 소재 표면에 얼음층이 생성되는 것을 극저온 열처리 실험을 통해 파악하였으며, 얼음층은 약 0.6 mm 의 두께를 가졌다.

(2) 비등현상이 발생하는 수냉조건에 대해 Single 과 Multi-phase 해석을 각각 수행하고 실험결과와 비교함으로써 상 변화를 고려한 Multi-phase 해석기법의 타당성을 확인하였다.

(3) CFD 해석 결과로부터 수냉 및 업힐퀘칭 시 상 변화 및 유체의 밀도차에 의한 유동특성을 확인하였으며, 대류열전달계수는 수냉의 경우가 9200W/m<sup>2</sup>·K 로 가장 높게 나타났다.

(4) 비등현상과 얼음층을 고려한 CFD 해석을 극저온 열처리의 각각의 모든 단계별에 대해 수행하여 소재의 온도 및 대류열전달계수를 예측하고 실험과 비교하여 그 신뢰성을 확인하였다.

(5) 극저온 열처리를 이용하여 잔류응력을 효과적으로 제거하기 위해서는 수냉과 업힐 퀘칭의 냉각 및 가열속도가 가장 중요한 인자임을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 방위사업청의 민군겸용기술개발사업 과제(09-DU-MP-02)의 연구비 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

1. Kim, H. S. and Lee, D. N., "Relief of Residual Quenching Stresses in 2024 Aluminum Alloy," J. Kor. Inst. Met. & Mater, Vol. 16, No. 4, pp. 233-243, 1978.
2. Lee, Y. B., Sim, H. J. and Nam, W. J., "Formation of ultrafine grains 5083 Al Alloy by cryogenic rolling process," Transactions of Materials Processing, Vol. 13, No. 2, pp. 137-141, 2004.
3. Mackerle, J., "Finite element analysis and simulation of quenching and other heat treatment processes," Computational Materials Science, Vol. 27, No. 3, pp. 313-332, 2003.
4. Lind, M., Lior, N., Alavyoon, F. and Bark, F., "Flow effects and modeling in gas-cooled quenching," Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Heat Transfer Conference, Vol. 3, pp. 171-176, 1998.
5. Berglund, D., Alberg, H. and Runnemalm, H., "Simulation of welding and stress relief heat treatment of an aero engine component," Finite Elements Engrg. Des., Vol. 39, No. 9, pp. 865-881, 2003.
6. Alberg, H., "Material modeling for simulation of heat treatment," Licentiate Thesis, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, LULEÅ University of Technology, 2003.
7. Lior, N., "The cooling process in gas quenching," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 155-156, pp. 1881-1888, 2004.
8. Lee, M. H., Kim, D. K., Lee, S. Y. and Rhim, D. R., "Coupled CFD-FE Analysis Method for IC Engine Cooling Water Jacket under Subcooled Nucleate Boiling Conditions," Transactions of the Korea Society of Mechanical Engineers, Vol. 14, No. 5, pp. 9-16, 2006.
9. In, W. K., Shin, C. H. and Chun, T. H., "Near-wall grid dependency of CFD simulation for a subcooled boiling flow using wall boiling model," J. of Computational Fluids Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 24-31, 2010.