

TC-NCF 접합 공정의 다상유동에 대한 수치적 연구

최원준, 손기현*

서강대학교 기계공학과

NUMERICAL STUDY OF MULTIPHASE FLOW IN TC-NCF BONDING

W. Choi and G. Son*

Department of Mechanical Engineering, Sogang University

*Corresponding author, E-mail: gihun@sogang.ac.kr

Keywords:

열압착 접합(TCB),
비전도성 필름(NCF),
경화 거동(Curing kinetics),
솔더(Solder),
용융 및 응고(Solidification and melting)

ABSTRACT

Thermo-compression (TC) bonding using non-conductive films (NCF) and micro solder bumps has become a key technology for interconnecting upper and lower chips in high-bandwidth memory (HBM) packaging. In this study, a comprehensive numerical model is proposed to analyze the TC-NCF process by simultaneously considering solder phase change, wetting-driven flow, NCF curing kinetics, and interfacial evolution driven by the displacement of the upper chip. A Volume-of-Fluid (VOF) method is employed to capture the multiphase flow behavior among air, NCF, and solder, including wall wetting dynamics. The melting and solidification of solder are modeled using an enthalpy-based phase change approach, while the compression induced by the upper chip is represented through a dynamic mesh technique. The proposed model provides a quantitative framework for analyzing the coupled effects of process parameters and material properties, thereby offering a theoretical foundation for the design and optimization of thermo-compression bonding processes.

1. 서론

TCB(Thermo-compression bonding) 공정은 상하부 칩 간의 전기적 연결을 구현하기 위한 핵심 패키징 기술로 널리 활용되고 있다[1]. 이 공정은 전극 사이에 위치한 솔더 범프(solder bump)를 매개로 접합이 이루어지며, 열과 압력을 동시에 인가하여 솔더를 용융시킴으로써 상하부 전극을 물리적·전기적으로 연결하는 원리이다. 그 중에서도 TC-NCF 공정은 비전도성 필름(Non-Conductive Film, NCF)를 활용하여 칩과 솔더 범프 사이의 빈 공간을 채우는 동시에 접합을 수행하는 기술이다[2]. 이 방식은

Received | 20 April, 2026

Revised | 29 May, 2026

Accepted | 1 June, 2026



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

고대역폭 메모리(High Bandwidth Memory, HBM) 적층구조의 전기적 연결과 패키징을 동시에 달성하는 방법 중 하나이다. TC-NCF 공정을 통해 결정되는 HBM의 전기적 특성은 솔더 범프의 접합 형상에 의해 결정된다. 특히, 미접합에 따른 개방(open circuit)이나 솔더 쓸림에 의한 단락(short circuit) 현상은 HBM의 하드웨어 성능에 치명적인 결함을 초래하므로[3], 최적의 접합 형상을 구현하기 위한 공정 조건을 도출하는 것이 매우 중요하다. 그러나 이러한 중요성에도 불구하고, TC-NCF 공정은 열과 기계적 하중이 복합적으로 작용하는 환경 내에서 솔더의 상변화(phase change), NCF의 경화반응(curing reaction)에 의한 유변학적 거동, 그리고 솔더의 젖음성(wetting) 등이 얹힌 복잡한 다상 열전달 현상을 동반한다 [4]. 이러한 복합적 물리 현상의 개략도를 Fig. 1에 나타내었으며, 공정 내부의 실시간 실험적 관찰에 한계가 있다.

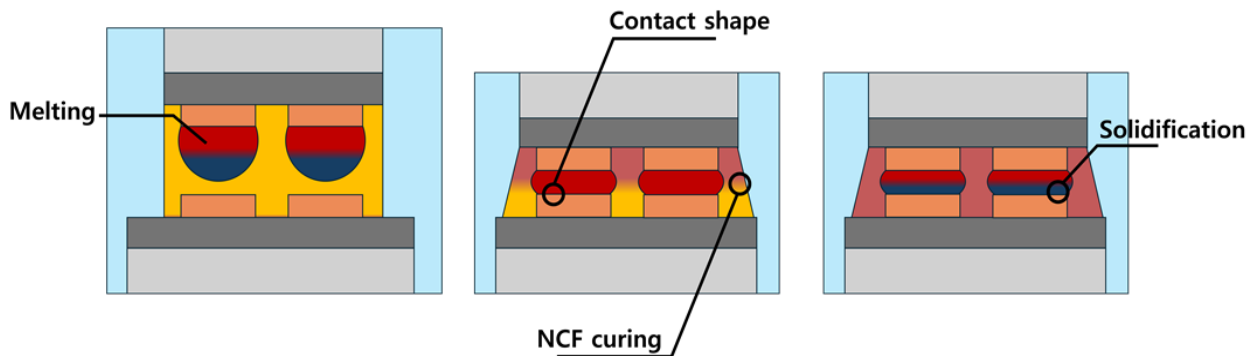


Fig. 1. Multi-physical phenomena in the TC-NCF process

기존의 연구는 TC-NCF 공정의 특정 요소를 대상으로 한 수치해석 방법들을 제안하였다[5-10]. Chang과 Young[5]은 비뉴턴 유체가 포함된 열압착 공정에서 고체 솔더 범프의 변형과 비뉴턴 유체의 유동 및 경화 거동을 고려한 해석을 수행하였다. Che 등[6]은 TCB 공정에서 발생하는 응력 분포를 분석하였다. Oliver와 Elabassi[7]는 상부 칩이 하강하는 압착 공정 상황을 모사하여 NCF의 경화 거동 및 유동을 수치적으로 연구하였다. Athia 등[8]과 Autret[9]은 TCB 공정에서 접합 간 온도 편차 및 열전달 거동을 분석하기 위한 수치해석을 수행하였다. Xiong과 Cheng[10]은 단일 액체상 솔더 액적이 하부 구조와 접촉한 이후 발생하는 젖음 및 응고 거동을 수치적으로 연구하였다. 그러나 이러한 연구들은 각각 공정의 일부 물리 현상에 초점을 두고 있으며, 솔더의 용융 및 젖음, NCF 충전재의 유동과 경화, 그리고 상부 칩의 압착에 따른 동적 거동이 수반된 TC-NCF 공정을 통합적으로 고려하지는 못하였다.

본 연구에서는 솔더 용융, NCF 경화 거동, 솔더 젖음 특성 및 칩의 하강 유동을 결합한 TC-NCF 공정의 복합 물리 해석 모델을 제시한다. Ansys Fluent를 기반으로 공정 모델링에 필요한 기법을 추가함으로써 공정에서 발생하는 복잡한 메커니즘을 규명한다. 이를 통해 공정 변수 및 재료 물성이 접합 거동에 미치는 영향을 체계적으로 분석할 수 있도록 하며, TC-NCF 공정의 설계 및 최적화를 위한 정량적이고 실질적인 지침을 제공한다.

2. 수치해석 기법

본 연구의 해석 대상인 TC-NCF 공정의 개략도는 Fig. 2에 제시되어 있다. 해석 범위는 가열 단계와 접합 단계 및 냉각 단계로 한정하였다. 먼저, 가열 단계에서는 상부에 인가되는 온도가 점차 상승함에 따라 고체 상태의 솔더가 용융되어 완전히 액체 상태로 전이된다. 접합 단계에서는 온도가 더 이상 증가하지 않으며, 액체 상태의 솔더가 하부 패드와 접촉하며 접합 모양을 형성한다. 이후 냉각 단계에서는 온도가 감소함에 따라 액체 상태의 솔더가 다시 응고된다. 한편, NCF는 전

공정에 걸쳐 경화 반응이 진행됨에 따라 점도가 급격히 상승하며, 공정 종료 시점에는 고체에 가까운 물성을 갖는 상태로 변화한다.

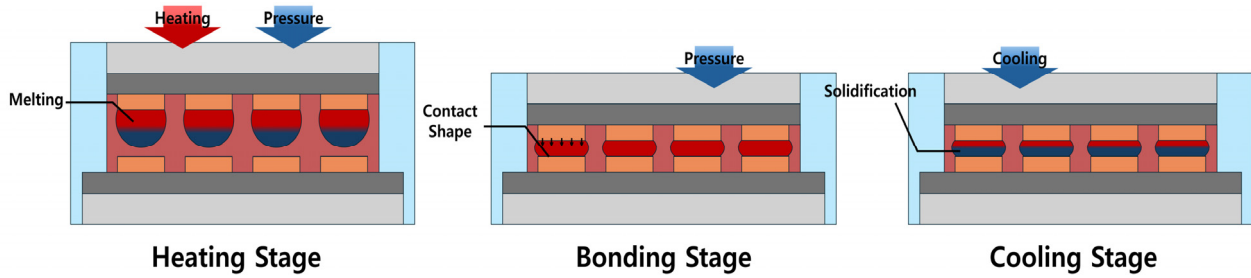


Fig. 2. Schematic illustration of the stages in the TC-NCF process

2.1 지배방정식

다음의 지배방정식을 고려하여 공기, 솔더 및 NCF로 이루어진 다상 유체 영역의 유동과 열전달을 모사하였다.

2.1.1 연속방정식

다상유동을 모사하는 질량 및 운동량 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial(C_i \rho_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (C_i \rho_i \mathbf{u}) = 0, \quad \sum_i C_i = 1 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{S} + \mathbf{F}_d \quad (2)$$

$$\rho = \sum_i C_i \rho_i, \quad \mu = \left(\sum_i \frac{C_i}{\mu_i} \right)^{-1} \quad (3)$$

C_1, C_2 및 C_3 는 각각 공기, 솔더 및 NCF의 체적분율을 나타내며 $0 \leq C_i \leq 1$ 사이의 값으로 정의된다. 계면의 추적 방식으로는 압축성 VOF(Compressive Volume-of-Fluid) 방법을 채택하였고, 밀도와 점도는 각각 산술 평균과 조화평균을 사용하여 나타내었다. 또한, $\mathbf{S}$ 는 계면에 작용하는 표면장력 항이며, $\mathbf{F}_d$ 는 고체 상태의 거동을 모사하는 감쇠항으로 참고 문헌 [11]의 Darcy형 모델을 따라 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{F}_d = \frac{(1-\beta)^2}{\beta^3 + \epsilon} A_{mush} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_s) \quad (4)$$

$$\mathbf{S} = \sigma_{ij} \beta^* x_{ij} \left(\frac{\rho \nabla C}{\rho_i + \rho_j} \right), \quad x_{ij} = -\nabla \cdot \mathbf{n}_{ij}, \quad \beta^* = \begin{cases} 0 & (\beta \leq \beta_1) \\ \frac{\beta - \beta_1}{\beta_2 - \beta_1} & (\beta_1 < \beta \leq \beta_2) \\ 1 & (\beta > \beta_2) \end{cases} \quad (5)$$

여기서, β 는 액상분율(liquid-fraction)을 의미하며, $\beta = 1$ 인 경우 완전한 액체 상태, $\beta = 0$ 인 경우 완전한 고체 상태를 나타낸다. 본 연구에서는 상변화가 슬터에만 국한되므로, 공기와 NCF는 항상 액체 상태로 가정하여 $\beta = 1$ 로 설정하였다. 식(4)의 A_{mush} 는 감쇠 효과의 스케일을 나타내는 계수로 매우 큰 값인 10^{14} 을 부여하고, $\mathbf{u}_s$ 는 상부 칩의 하강 속도와 동일하게 설정하였다. 또한, ϵ 은 수치적 발산을 방지하기 위한 양의 상수로서 0.001을 사용하였다. 식 (5)는 Thirumalaisamy와 Bhalla[12]가 제시한 액상분율이 곱해진 표면장력 항을 변형하여 구성하였다. 특성값 β^* 는 고체와 액체가 공존하는 영역에서 표면장력의 영향을 선택적으로 반영하기 위해 컷오프(cutoff) 형태로 변형되었고, 본 연구의 A_{mush} 가 큰 경우에는 해석 결과가 β_1, β_2 에 민감하지 않았다. $\beta_1 = 0.85, \beta_2 = 0.90$ 는 감쇠항의 스케일이 작은 경우, 표면장력 항과의 수치적 불안정성을 완화하기 위해 선택된 값이다. 해당 모델은 사용자 정의 함수(User Defined Function, UDF)를 통해 구현하였다.

2.1.2 에너지 방정식

다상 영역 간의 열전달을 모사하기 위한 에너지 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (6)$$

$$H = h + \beta L \quad \left(h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dt \right) \quad (7)$$

$$\beta = \begin{cases} 0 & (T \leq T_s) \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & (T_s < T \leq T_l) \\ 1 & (T > T_l) \end{cases} \quad (8)$$

여기서, L 은 상변화 과정에서 발생하는 잠열(latent heat)을 의미하며, T_s, T_l 는 각각 고상선 온도(solidus temperature)와 액상선 온도(liquidus temperature)를 의미한다. 따라서, $T \leq T_s$ 인 경우는 완전한 고체 상태, $T > T_l$ 인 경우는 완전한 액체 상태가 된다. 한편, 슬터를 제외한 고체 및 액체 영역에서는 상변화 효과를 고려하지 않았다.

2.1.3 NCF 경화 모델

NCF의 유변학적 특성은 경화 반응에 의한 점도 모델로 표현되며, 그 관계식은 다음과 같다[13,14].

$$\mu_{NCF} = A_\eta e^{\frac{E_\eta}{RT}} \left(\frac{1}{1 - \alpha} \right)^B \quad (9)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = (A_1 e^{-E_1/RT} + A_2 e^{-E_2/RT} \alpha^m) (1 - \alpha)^n \quad (10)$$

NCF의 점도는 경화 정도를 나타내는 값(degree of cure) α 와 온도에 의해 결정되며, R 은 기체 상수(universal gas constant), A_1, A_2, E_1, E_2, m, n 은 실험적으로 결정된 재료 고유의 반응 속도 상수이다. 또한, α 는 UDM(User Defined Memory)에 저장하였으며, 식 (9)와 (10)은 UDF를 통해 구현하였다.

2.2 해석 도메인 및 계산

TC-NCF 공정의 해석 대상 도메인은 2차원 축대칭 구조로 구성되며, 기판(substrate), 칩(chip) 구리기둥(cu pillar)으로 이루어진 고체 영역과 공기, NCF, 솔더로 이루어진 유체 영역을 포함한다. 이러한 복합 도메인의 전체 형상 및 경계 조건은 Fig. 3에 제시되어 있다.

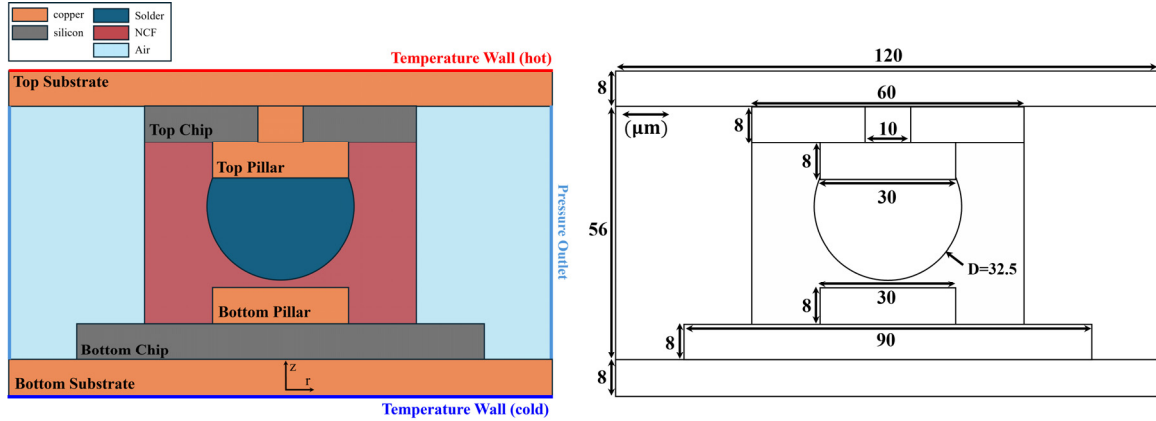


Fig. 3. Computational domain and boundary conditions

상·하부 기판에는 각각 온도 경계조건을 부여하였으며, 고체 영역 내 전도에 의해 유체 영역으로 열이 자연스럽게 전달 되도록 복합 열전달 기법을 적용하였다. 또한, 출구에는 대기압 조건을 모사하기 위해 pressure outlet 경계조건을 설정하였다.

상부 칩의 압착 거동을 구현하기 위해 Ansys Fluent의 동적 격자(dynamic mesh) 기법을 적용하였다. 계산 영역은 정적 영역(stationary region), 셀이 변형되는 형상 변형 영역(deforming region), 운동이 부여되는 강체 영역(rigid region)으로 구분하여, 고체의 운동이 유체 영역에 물리적으로 일관되게 반영되도록 구성하였다. 형상 변형 영역 변형은 공간적으로 균일하게 이루어지도록 선형 탄성체(linearly elastic solid) 기법을 사용하였으며, 칩의 하강 속도는 UDF를 통해 부여하였다. Fig. 4에는 초기 상태와 해석 종료 시점의 격자 형상이 제시되어 있다.

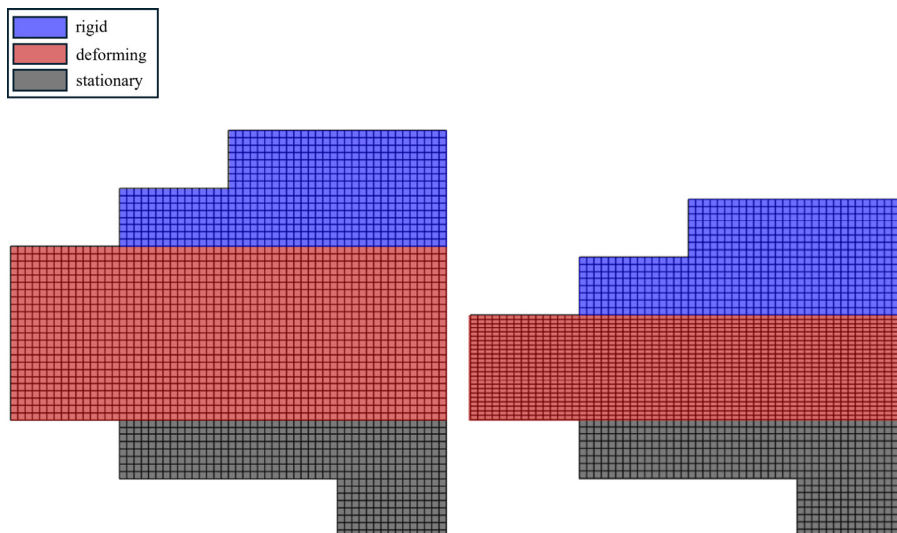


Fig. 4. Dynamic mesh regions in $t=0$ s (left) and $t=3.0$ s (right)

3. 결과 및 고찰

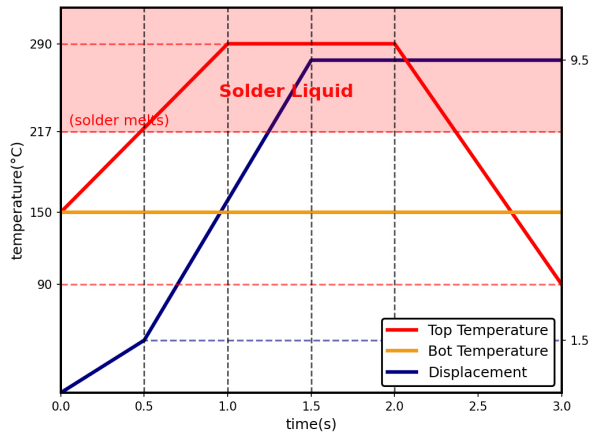
TC-NCF 공정에 사용된 열유동 물성치는 Table 1에 정리하였으며, 이때 사용된 솔더의 물성치는 [15]의 값을 채택하였다. NCF 경화 모델에 사용된 계수는 Table 2에 제시하였다. NCF의 물성치와 모델 계수는 [7]을 참고하였으며, NCF-공기 계면의 접촉각은 20° , 표면장력계수는 0.04 N/m 로 설정하였다. Base case의 경우, NCF-솔더 계면의 접촉각은 120° 로 설정하였으며, 표면장력계수는 NCF-공기 계면과 동일한 값을 적용하였다. 공정의 온도 및 상부 칩의 하강 변위는 Fig. 5(a)에 나타내었으며, 이에 따른 NCF의 경화도 및 점도 변화는 Fig. 5(b)에 제시하였다.

Table 1. Thermo-physical properties used in the simulation

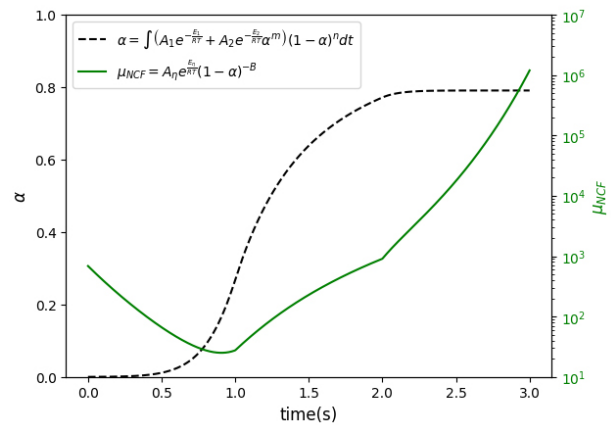
Material	Conductivity (W/mK)	Specific heat (J/KgK)	Density (kg/m ³)	Viscosity (Pa·s)	Latent heat (J/kg)	Liquidus/Solidus temperature(K)
Silicon	130	700	2329	(solid)	-	-
Copper	388	381	8978	(solid)	-	-
NCF	0.3	1200	1700	(model)	-	-
SAC305(solder)	50	250	7400	0.002	55100	490 / 493

Table 2. Parameters used in the NCF viscosity model

$A_1(\text{s}^{-1})$	$A_2(\text{s}^{-1})$	$E_1(\text{J/mol})$	$E_2(\text{J/mol})$	m	n	$A_\eta(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$E_\eta(\text{J/mol})$	B
4×10^9	4×10^9	10^5	10^5	1	2	4.2×10^{-5}	5.8×10^4	5



(a)



(b)

Fig. 5. (a) Temperature and displacement profiles; (b) degree of cure and viscosity of the NCF

3.1 격자 의존도 시험

격자 해상도에 따른 계면 형상의 민감도를 평가하기 위해 격자 크기에 따른 의존도를 분석하였다. 본 연구는 미세 길이 스케일에서 고점도 NCF와 용융 솔더 사이의 계면 거동을 해석하므로, 관성 효과보다 점성 및 계면장력 효과가 지배적인 Stokes 유동 조건에 해당한다. 따라서 Galusinski와 Vigneaux [16]가 미세유체 계면 유동에 대해 제시한 점성 지배 표면장력 안정 조건 $\Delta t_{STK} \sim (\mu \Delta x) / \sigma$ 를 만족하도록 설정하였다. 격자 의존도 시험에 사용된 격자 정보 및 시간 간격에 대한 정보를 Table 3에 정리하였다.

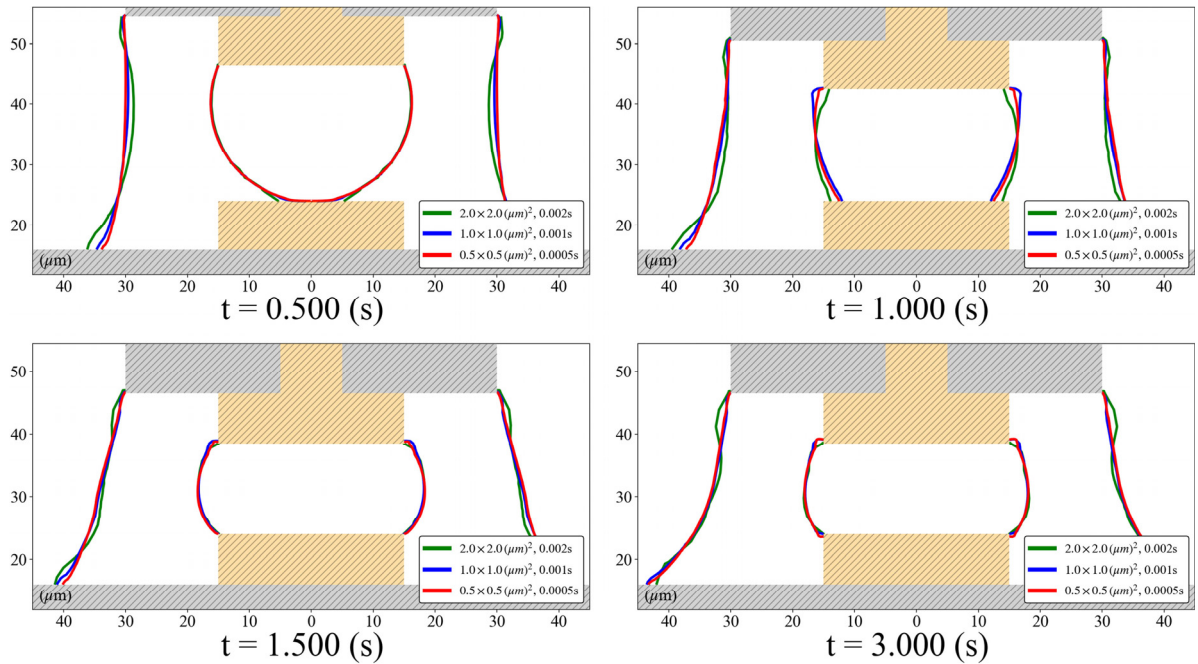
Table 3. Computational grid and time-step settings

Grid level	Grid size(μm) ²	Number of cells	Time step(s), Δt	$(U_{\max} \Delta t) / \Delta x$	$(\sigma \Delta t) / (\mu \Delta x)$
Coarse	2.0×2.0	1,116	2.0×10 ⁻³	16.0×10 ⁻³	0.5
Base	1.0×1.0	4,320	1.0×10 ⁻³	8.0×10 ⁻³	0.5
Fine	0.5×0.5	17,280	5.0×10 ⁻⁴	4.0×10 ⁻³	0.5

각 격자 조건에서의 솔더 계면 형상을 Fig. 6에 나타내었다. 해석 결과, 격자 해상도가 감소함에 따라 솔더가 하부 패드 방향으로 더 넓게 퍼지는 경향이 나타났다. 이는 성긴 격자 조건에서 계면 근처의 수치적 확산이 증가하고, 계면 곡률 및 표면장력 계산의 정확도가 저하되기 때문으로 해석된다. 그 결과, 실제보다 과도한 젖음 거동에 예측될 수 있다. 이러한 차이는 계면 곡률 변화가 큰 압착 단계에서 두드러지며, 이후의 형상 차이는 감소한다. 계면 거동의 차이를 정량적으로 비교하기 위해, 솔더-패드 접촉면의 수평 젖음 길이(L)을 Fig. 7에 나타내었다. 초기 젖음 길이가 작은 구간에서 상대오차가 과대평가되는 것을 방지하기 위해, $t=0.4\text{--}1.4\text{ s}$ 구간에서 base case의 최종 젖음 길이 $L_{\text{base,final}}$ 로 정규화한 평균 절대오차를 다음과 같이 계산하였다.

$$\text{Normalized mean absolute error (\%)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|L(t_i) - L_{\text{base}}(t_i)|}{L_{\text{base,final}}} \times 100 \quad (11)$$

그 결과 coarse case의 평균 절대 오차는 11.5%로 나타난 반면, fine case의 평균 절대오차는 3.1%로 비교적 작게 나타났다. 이는 coarse mesh 조건에서는 계면 거동이 base case와 뚜렷한 차이를 보이는 반면, fine mesh 조건에서는 base case와 유사한 젖음 거동을 예측함을 의미한다. 이에 따라, 계면 형상을 크게 왜곡시키지 않으면서도 계산 효율을 고려하여 $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ 크기를 기본 해상도로 선정하였다.


Fig. 6. Temporal evolution of the solder and NCF interfaces for different mesh sizes

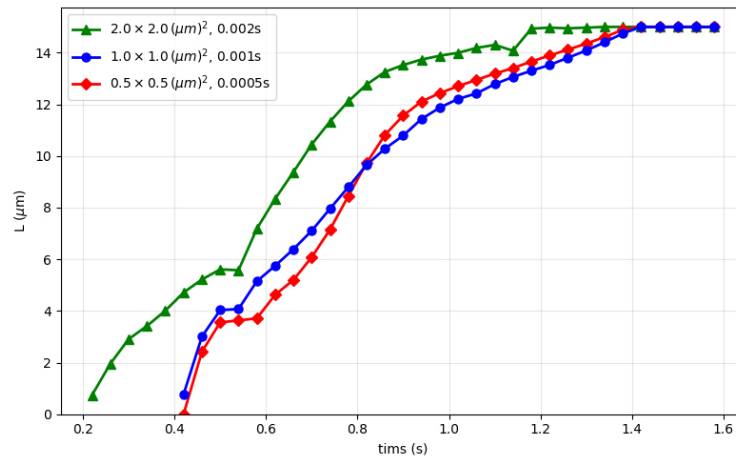


Fig. 7. Temporal evolution of the solder-pad wetting length(L) for different mesh sizes

3.2 공정 시간에 따른 솔더 형상

TC-NCF의 전체 공정 사이클을 고려하여, 가열·접합·냉각 단계별 솔더의 변형 거동과 NCF와의 계면 특성을 해석한 결과를 Fig. 8에 제시하였다. 초기 가열 단계인 0~0.5초 구간에서는 고체 상태의 솔더가 하강하면서 주변 NCF 유체를 밀어 내지만, 상변화가 발생하지 않아 형상 변화는 나타나지 않는다. 0.5~0.6초 구간에서는 솔더가 용융점에 도달함에 따라 상단부부터 상변화가 진행되어 형상이 점차 변형되며, 하단부는 여전히 고체 상태를 유지하여 초기 형상이 일부 보존된다. 이후 솔더가 완전히 용융되는 0.7~1.5초 구간에서는 하부 패드 접촉면을 중심으로 변형이 본격적으로 발생하고, 솔더가 퍼지면서 접촉이 완료된다. 마지막으로 2.31~2.33초 구간에서는 솔더가 응고되어 완전한 고체 상태에 도달하며, 3.0초 시점에서 전체 공정이 마무리됨을 확인할 수 있다.

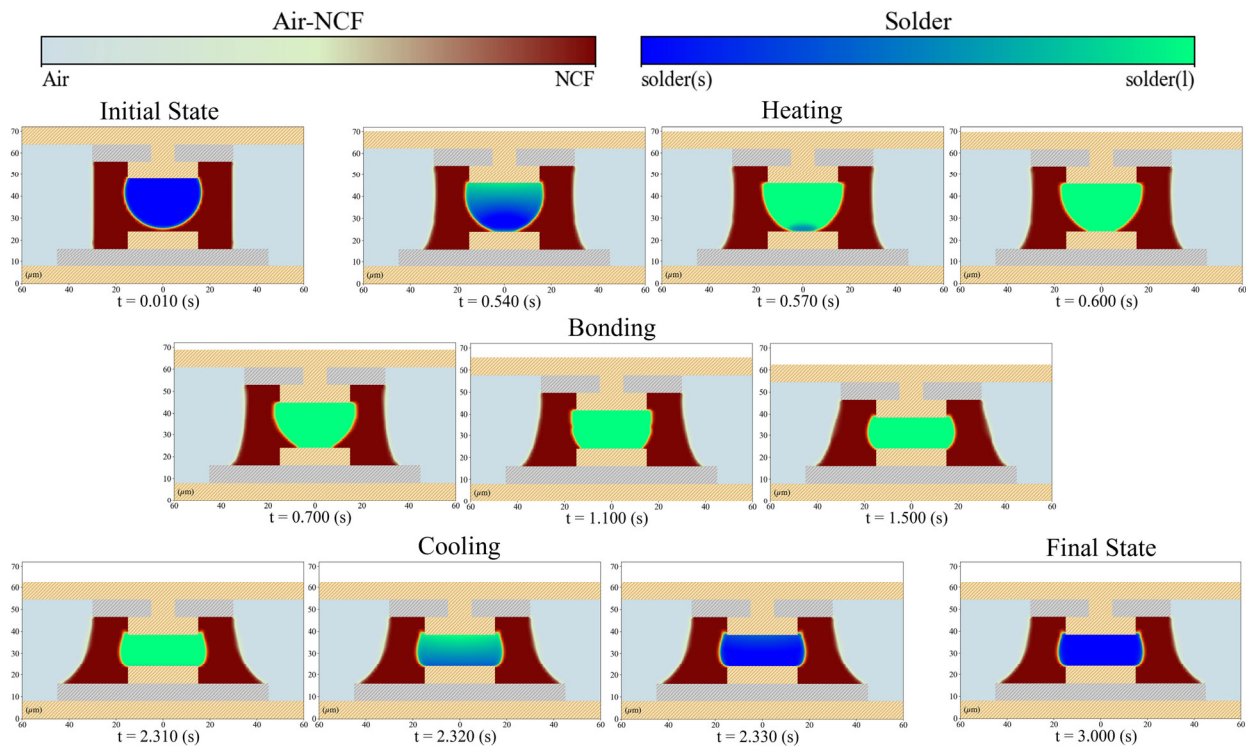


Fig. 8. Temporal evolution of the solder and NCF interfaces for the base case

3.3 표면장력계수 및 접촉각에 따른 계면 형상

표면장력계수와 접촉각에 따른 솔더 계면의 형상 차이를 확인하기 위해 Table 4의 계산 설정값에 따라 계산을 수행하였다. 이에 따른 결과를 각각 Fig. 9에 나타내었다.

Table 4. Surface tension coefficients and contact angles for each case

Case	$\sigma_{NCF-solder}(\text{N/m})$	$\sigma_{NCF-air}(\text{N/m})$	$\theta_{NCF-air}(\text{deg})$	$\theta_{NCF-solder}(\text{deg})$
Base	0.04	0.04	20	120
1	0.36	0.04	20	120
2	0.04	0.04	20	90
3	0.04	0.04	20	150

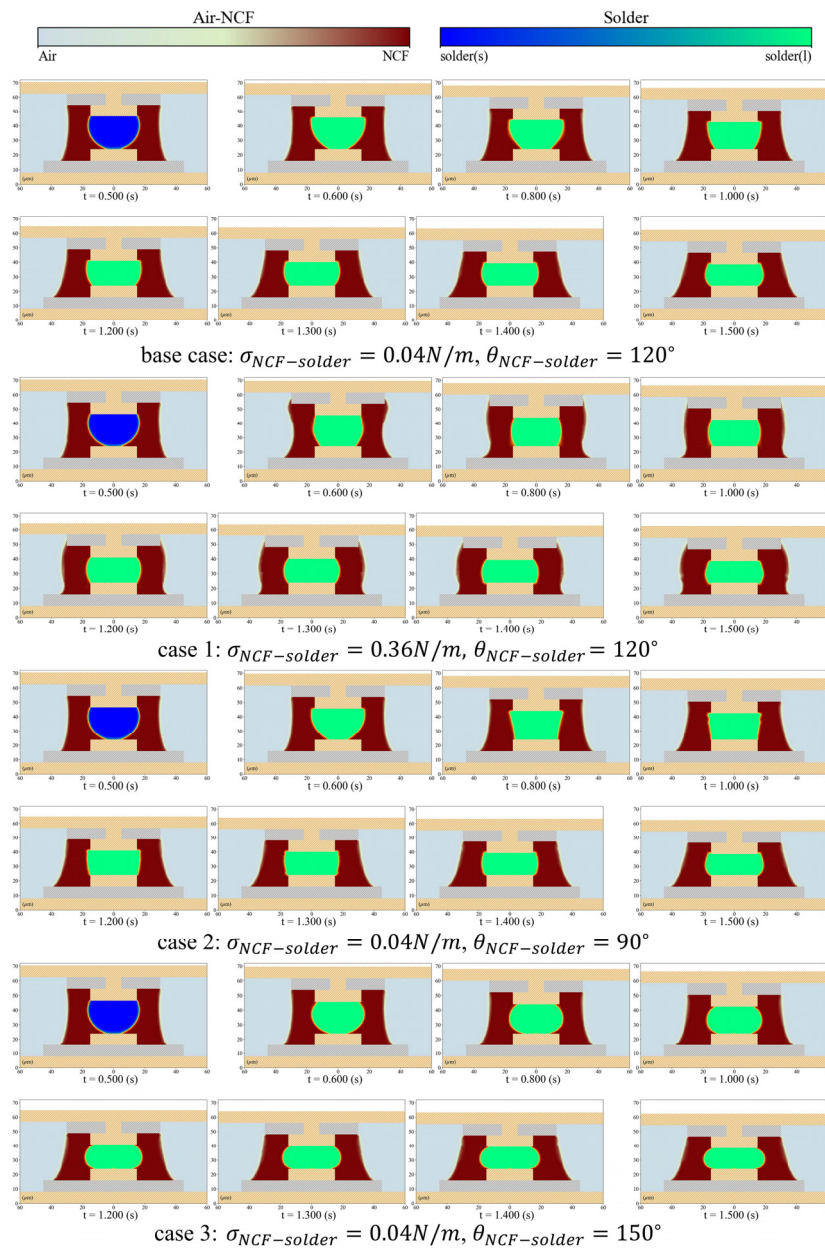


Fig. 9. Temporal evolution of the solder interface for different cases

Base case와 case 1을 비교한 결과, NCF-솔더의 표면장력계수가 증가할수록 솔더가 하부 패드 방향으로 더 빠르게 퍼지는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 솔더의 퍼짐 거동 변화는 NCF-공기 계면 형상에도 뚜렷한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면, 접촉각 조건만 변화시킨 case 2와 case 3의 경우, base case와 비교하여 접촉각이 작은 조건에서는 솔더 계면이 안쪽으로 볼록한 형상을 보였고, 접촉각이 큰 조건에서는 바깥쪽으로 볼록한 형상을 보였다. 그러나 해당 조건에서는 NCF-솔더의 표면장력계수가 상대적으로 작기 때문에, 접촉각 변화가 NCF-공기 계면 형상에 미치는 영향은 제한적인 것으로 해석된다.

3.4 솔더의 열전도 효과

솔더의 열전도 특성이 형상 변형 및 NCF의 유변학적 거동에 미치는 영향을 분석하기 위해, 열전도도를 각각 50, 10, 0.3 W/m·K로 설정하여 비교 해석을 수행하였다. 이는 각각 SAC305의 실제 물성, 이를 1/5 수준으로 감소시킨 가상 물성, 그리고 NCF와 동일한 수준의 열전도도를 부여한 경우를 의미한다.

각 조건에서 솔더가 완전히 용융된 시점의 형상과 온도 분포를 Fig. 10에 나타내었다. 기본 물성을 적용한 경우에는 약 0.59초에 솔더가 완전히 용융되었으며, 중간 열전도도 조건에서는 약 0.72초에 완전 액상 상태에 도달하여 용융이 지연되는 경향을 보였다. 반면, 열전도도를 NCF와 동일하게 설정한 경우에는 공정 전반에 걸쳐 부분적으로만 용융되어, 하부 영역이 고체 상태로 남게 되고 접촉면에서의 형상 변형이 거의 발생하지 않았다.

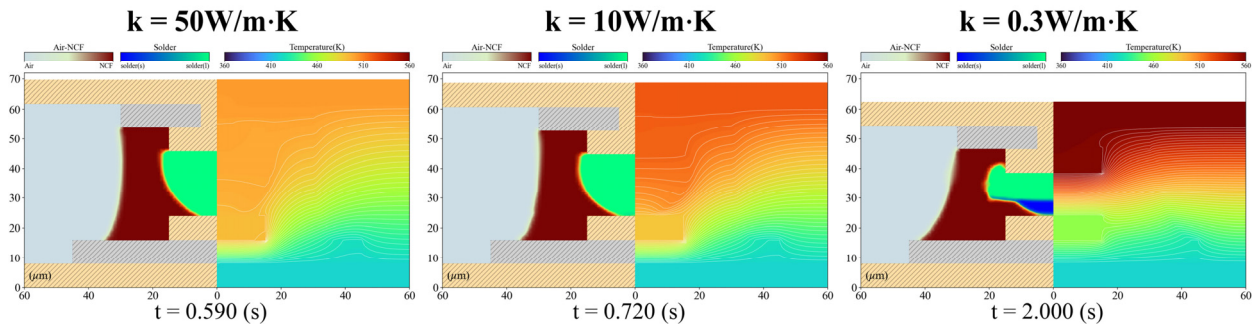


Fig. 10. Solder shape and temperature distribution at fully molten state for different thermal conductivities

한편, Fig. 11에 제시된 NCF의 경화도(좌) 및 점도(우) 분포를 통해, 솔더가 NCF 내 열전달 경로 작용하는 열적 통로 역할을 수행함을 확인할 수 있었다. 수치해석 결과, SAC305의 기본 물성 및 중간 물성 조건에서는 경화 거동에 큰 차이가 나타나지 않았다. 그러나 솔더의 열전도도를 NCF와 동일하게 설정한 등가 물성 조건(0.3 W/m·K)에서는 상부 패드 인접 영역에

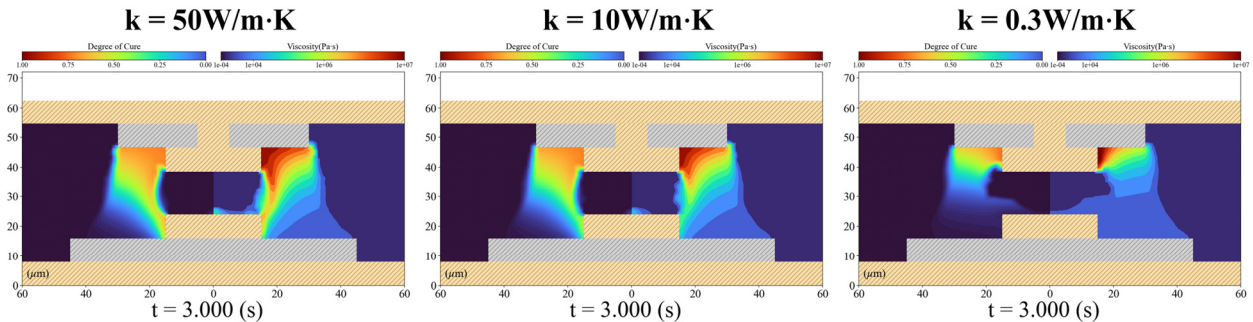


Fig. 11. Distributions of degree of cure and viscosity at $t=3.00$ s for different thermal conductivities

서만 국부적인 경화가 진행되었으며, 전체적인 경화 수준 또한 현저히 낮게 나타났다. 이는 TC-NCF 공정에서 솔더가 전기적 연결 매개체를 넘어, 효과적인 열전달 경로로서 작용하여 NCF의 균일한 경화를 유도하는 데 중요한 역할을 함을 시사한다.

3.5 NCF 점도 모델 효과

본 절에서는 NCF의 유변학적 점도가 솔더 접합 형상에 미치는 영향을 분석하기 위해, 세 가지 점도 모델을 적용하여 TC-NCF 공정 해석을 수행하였다. 고려된 모델은 경화 반응을 반영한 기본 점도 모델, 경화도를 배제하고 온도 의존성만을 고려한 모델, 그리고 공정 전반에 걸쳐 초기 점도를 일정하게 유지하는 정점도 모델이다. 각 모델에 따른 공정 시간별 점도 변화는 Fig. 12에 나타내었으며, 공정 종료 시점의 해석 결과는 Fig. 13에 비교하여 제시하였다.

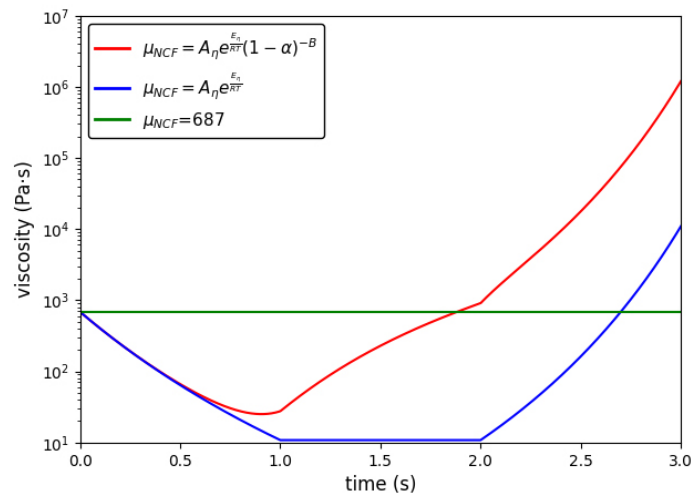


Fig. 12. Temporal variation of viscosity for different viscosity models

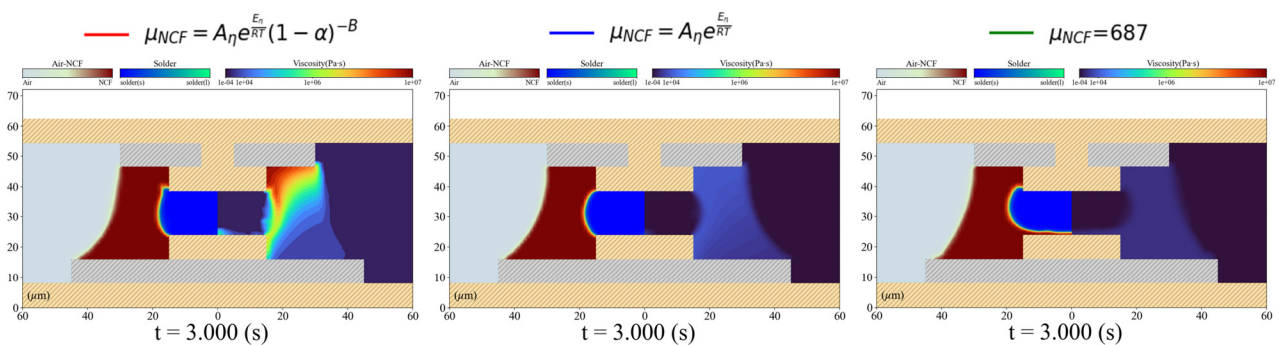


Fig. 13. Solder shape and viscosity distribution at $t=3.00$ s for different viscosity models

해석 결과, 경화도를 고려한 모델과 온도 의존성 모델의 경우, 접합 및 형상 변형이 집중되는 $0.5 \sim 1.0$ s 구간에서 NCF의 점도가 급격히 감소함에 따라 솔더가 하부 패드에 원활하게 접촉하는 것으로 나타났다. 반면, 점도가 일정하게 유지되는 모델에서는 NCF가 솔더와 하부 패드 사이에서 강한 물리적 장벽으로 작용하여 솔더의 젖음 및 접촉을 저해하였다.

즉, 솔더 접합 시점에 NCF 점도가 충분히 낮아야 우수한 접합 형상을 얻을 수 있으며 이는 [3]의 실험적 경향성과 일치한다. 반면 NCF의 점도가 높게 유지될 경우, 솔더와 패드 간의 접촉을 방해하여 open circuit 불량률 유발할 수 있으며, 이

는 최종적으로 HBM의 신뢰성과 전기적 성능에 치명적인 저하를 초래할 수 있다. 따라서 수치해석에서 적절한 유변학적 모델을 도입하는 것은, 접합 시점에서 NCF의 점도를 낮추어 접합성을 확보하고자 하는 실제 공정의 메커니즘을 정확히 반영하는 데 그 의의가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 TC-NCF 공정을 해석하기 위해 압착 유동을 모사하는 동적 격자 기법, 솔더의 상변화, NCF의 유변학적 거동, 그리고 다상 유동 계면 추적을 결합한 통합 수치 해석 모델을 제시하였다. Ansys Fluent 기반으로 UDF 개발을 통해 구축된 본 모델을 통해 공정 내 복합 물리 현상을 규명하고, 주요 인자를 분석 및 도출하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

먼저, 격자 해상도에 따른 해석 결과 비교를 통해 모델의 최적 격자 체계를 확립하였다. 또한 공정 사이클에 따른 솔더 형상 변화를 추적함으로써, 용융 거동과 상부 칩의 압착에 따른 계면 진화를 수치적으로 재현하였다.

다음으로, 솔더의 열전도 특성이 공정 내 열-유변학적 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 열전도도가 높은 솔더는 상부로의 열 전달 경로로 작용하여 용융을 촉진하고 NCF의 경화를 유도하는 반면, 열전도도가 낮은 경우에는 국부 경화와 용융 지연이 발생함을 확인하였다. 이는 솔더가 단순한 전기적 접합 매개체를 넘어 열전달 매개체로서 중요한 역할을 수행함을 의미한다.

마지막으로, NCF 유변 모델 비교를 통해 접합 시점의 점도 제어가 공정 성패를 좌우하는 핵심 인자임을 규명하였다. 고점성 NCF는 물리적 장벽으로 작용하여 솔더 접합을 저해하고 open circuit 불량을 유발하는 것으로 나타났으며, 이에 따라 공정 설계 시 적절한 유동성을 확보하기 위한 NCF 물성 최적화의 필요성을 제시하였다.

본 연구에서 제안한 통합 수치 해석 모델은 HBM을 포함한 반도체 패키징 공정에서 발생하는 복합 물리 현상을 정량적으로 분석할 수 있는 물리 기반 도구로서, 실험적 한계를 보완하고 결함 예측 및 공정 조건 최적화를 위한 설계 도구로 활용될 수 있다.

Note

This paper is a revised version of a paper presented at the KSCFE 2026 Spring's Annual meeting, Jecheon, April 9-10, 2026.

후기

본 연구는 2026년도 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행되었습니다. (RS-2024-00423446)

References

- [1] 2017, Lee, S., "Fundamentals of thermal compression bonding technology and process materials for 2.5/3D

- packages,” *3D Microelectronic Packaging: From Fundamentals to Applications*, Springer, pp. 157-203.
- [2] 2015, Yang, L., Tian, D., Cheung, Y.M. and Li, M., “Investigation of key factors in thermal compression (TCB) NCF bonding process,” *IEEE 17th Electronics Packaging and Technology Conference*, pp. 1-5.
 - [3] 2021, Moon, J.Y., Shin, Y., Kim, S., Hahn, S.H., Lim, K., Jung, W.J., Lim, C., Kim, Y., Hwang, J. and Rhee, M.D., “Non Conductive Film Analysis Using Cure Kinetics and Rheokinetics for Gang Bonding Process for 3DIC TSV Packaging,” *IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference*, pp. 706-710.
 - [4] 2018, Lee, H., Lee, S., Park, J., Chung, C.K., Jang, K.W., Kim, I., Choi, S. and Paik, K.Y., “A Study on the Curing Properties and Viscosities of Non-Conductive Films (NCFs) for Sn-Ag Solder Bump Flip Chip Assembly,” *IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference*, pp. 2464-2469.
 - [5] 2014, Chang, C.H. and Young, W-B., “Modeling and numerical study of thermal-compression bonding in the packaging process using NCA,” *Appl. Math. Model.*, Vol. 38, No. 11, pp. 3016-3030.
 - [6] 2015, Che, F.X., Lin, J.K., Au, K.Y., Hsiao, H.Y. and Zhang, X., “Stress Analysis and Design Optimization for Low-k Chip With Cu Pillar Interconnection,” *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, Vol. 5, No. 9, pp. 1273-1283.
 - [7] 2015, Oliver, M. and Elabbasi, N., “Multiphysics modeling of underfill flow and cure during thermocompression bonding,” *International Symposium on Microelectronics*, Vol. 2015, No. 1, pp. 526-529.
 - [8] 2017, Athia, D., Rezvani, A., Clauberg, H., Qin, I. and Mayer, M., “Numerical Simulations of Joint-to-Joint Temperature Variation During Thermo-Compression Bonding,” *IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference*, pp. 1906-1915.
 - [9] 2020, Autret, M., “Calcul du coefficient de constriction du flux thermique dans une matrice d'interconnexions en micro-électronique,” Université de Sherbrooke, Master Thesis.
 - [10] 2020, Xiong, W. and Cheng, P., “A 3D numerical study of a molten solder droplet's wetting and solidifying on a pillar with application to electronic packaging,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 153, p. 119585.
 - [11] 2009, ANSYS, Inc., “ANSYS Fluent Theory Guide,” ANSYS, Inc., Canonsburg, PA.
 - [12] 2025, Thirumalaisamy, R. and Bhalla, A.P.S., “A consistent, volume preserving, and adaptive mesh refinement-based framework for modeling non-isothermal gas-liquid-solid flows with phase change,” *Int. J. Multiph. Flow.*, Vol. 183, p. 105060.
 - [13] 1982, Castro, J.M. and Macosko, C.W., “Studies of mold filling and curing in the reaction injection molding process,” *AIChE J.*, Vol. 28, No. 2, pp. 250-260.
 - [14] 1973, Kamal, M.R. and Sourour, S., “Kinetics and thermal characterization of thermoset cure,” *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 13, No. 1, pp. 59-64.
 - [15] 2021, Varanasi, D. and Pal, M.K., “Density and dynamic viscosity of Sn, Sn-Ag, and Sn-Ag-Cu liquid lead-free solder alloys,” *Powder Metall. Met. Ceram.*, Vol. 60, No. 7-8, pp. 504-512.
 - [16] 2008, Galusinski, C. and Vigneaux, P., “On stability condition for bifluid flows with surface tension: Application to microfluidics,” *J. Comput. Phys.*, Vol. 227, pp. 6140-6164.