



FOWLP 공정용 챔버 내 유동 균일성 확보를 위한 입구 형상 및 내부 구조의 수치 해석

이준영^a, 전도윤^a, 김승모^{a,*}

Numerical Analysis of Flow Uniformity in Fan-Out Wafer-Level Packaging Chambers Considering Inlet Shape and Baffle Configuration

Jun-Young Lee^a, Do-Yoon Jeon^a, Seung-Mo Kim^{a,*}^a Department of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18 July 2025
Revised 1 September 2025
Accepted 30 September 2025

Keywords:

Wafer chamber
Uniformity
Soft bake
FOWLP
CFD

ABSTRACT

Fan-out wafer-level packaging (FOWLP) is an advanced packaging technology that supports high integration and miniaturization of semiconductor devices. In thermal processes, such as soft bake, chamber-internal flow behavior strongly influences wafer temperature uniformity and process reliability. While most previous studies have focused on material properties and thermal stress, quantitative evaluations of flow characteristics inside chambers are limited. This study conducted steady-state computational fluid dynamics (CFD) simulations using ANSYS Fluent[®] to investigate the effects of inlet geometry (hole or slit) and the presence or absence of a baffle structure on the internal flow. Velocity and pressure distributions across the wafer surface were analyzed to assess flow uniformity. The results demonstrate that baffle placement and chamber geometry significantly affect flow stability and distribution. Thus, this work provides fundamental insights into optimizing chamber designs, by identifying key flow variables essential for achieving uniform thermal processing in wafer-level manufacturing systems.

1. 서론

반도체 산업에서 패키징 기술은 반도체 칩을 외부 환경으로부터 보호하고, 전기적 연결성을 확보하는 핵심 역할을 수행한다. 최근에는 고성능, 소형화, 고집적화 수요 증가로 인해 패키징 기술 또한 고도화되고 있으며, 그 중 fan-out wafer level packaging (FOWLP)은 우수한 전기적 특성과 열 관리 능력, 저형상 구현 등의 장점으로 각광받고 있다^[1-4]. FOWLP 공정에서 wafer의 형상 안정성, 특히 휨(warping) 제어는 수율 및 신뢰성 확보의 관점에

서 매우 중요한 요소로 간주된다. 이러한 휨 현상은 재료 특성뿐 아니라 열·유동 환경의 비균일성에 의해서도 유발될 수 있다. 특히, soft bake와 같은 열처리 공정 중에는 chamber 내부 유동의 속력과 압력 분포가 웨이퍼 표면에 직접적인 영향을 미치며, 이는 온도 균일성, 경화 반응, 기계적 응력 분포에까지 영향을 줄 수 있다. 그러나 이런 연구의 공통된 결과로 FOWLP 공정에서 발생하는 warpage는 몰딩 재료의 점탄성 특성^[5], EMC 재료의 열역학적 물성^[6], 그리고 공정 조건의 차이에 따라 크게 영향을 받는 것으로 보고되었다^[7,8]. 이와 더해 CVD chamber 내부의 온도 분포 및

* Corresponding author. Tel.: +82-41-560-1159

E-mail address: smkim@koreatech.ac.kr (Seung-Mo Kim).

기체 확산을 수치 해석을 통해 공정 영향을 보고한 사례도 있다^[9,10]. 그러나 기존 연구들은 대부분 열응력 및 재료 특성, chamber 설계에 집중되어 있으며, chamber 내 유동장(속도 및 압력 분포)에 대한 정량적·정성적 분석은 극히 제한적이다. 따라서 본 연구는 soft bake 공정에서 입구 형상(hole, slit) 및 baffle 구조의 유무에 따른 chamber 내부 유동 특성을 CFD 수치해석을 통해 평가하고자 한다. 이를 통해 bake 공정에서 유동 균일성을 확보할 수 있는 chamber 설계의 기초 데이터를 마련하며, 향후 실제 제조된 웨이퍼의 막 두께 분석 결과와 비교를 통해 핵심 공정 변수를 도출하기 위한 기반 연구로 활용하고자 한다. 이를 위해, 본 연구에서는 상용 유동 해석 소프트웨어인 ANSYS FLUENT 23R2를 활용하여 각 chamber 모델에 대한 정상상태 유동 해석을 수행하였다. 이를 통해 chamber 내부에 형성되는 속력 및 압력 분포의 특성을 정량적으로 분석하고, 유동 균일성 측면에서 구조적 영향을 평가하였다.

2. 수치 해석 방법

2.1 난류 모델

이번 연구는 chamber에서 입구, 출구에서 큰 압력 차이로 인해 내부 유동이 난류로 형성될 것으로 예상된다. 내부 난류 유동에 특화된 k-ε 난류 모델을 선택하였고 해당 난류 모델에는 Standard, RNG 그리고 Realizable k-ε 난류 모델이 존재하며 chamber 내 유동에 적절한 난류 모델을 선정할 필요가 있다. 정상상태 수치 해석 난류 모델에서 가장 신뢰성이 높고 정확한 Realizable k-ε 모델을 선정하였다^[11-14]. 이번 논문에서 적용된 Realizable k-ε 모델 상수는 수치 해석 프로그램의 기본값(C2-ε:1.9, TKE Prandtl Number : 1, TDR Prandtl Number 1.2, Production Limiter Clop Factor : 10)을 이용하여 해석을 진행했다.

2.2 경계조건

2.2.1 Chamber 모델

Fig. 1은 이번 연구에서 적용된 chamber 모델을 정리한 그림이다. 이번 연구에 적용된 구조는 chamber 벽면에 hole, slit 형상의 입구가 있고 상부에 출구가 존재하는 chamber이다. (A)의 경우 입구 형태가 hole의 형태로 구성된 모델이며 (B)는 가로 길이가 긴 형태의 slit 형태의 모델이다. (1)의 경우 chamber 내부에 baffle 구조가 없고 (2)의 경우 chamber 내부에 baffle 구조가 있는 모델이다.

2.2.2 Periodic 경계조건

Fig. 2는 이번 해석에 적용된 periodic 경계조건을 정리한 그림이

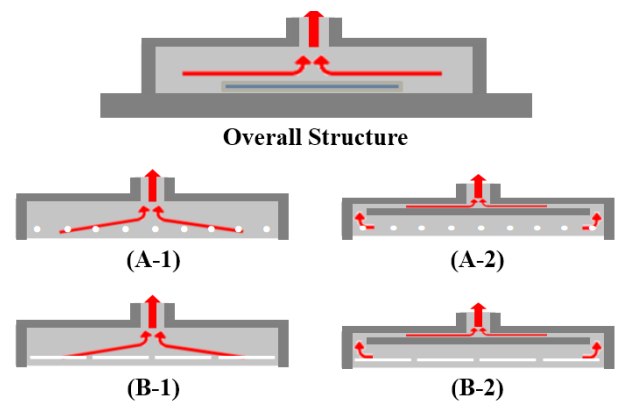


Fig. 1 Chamber model

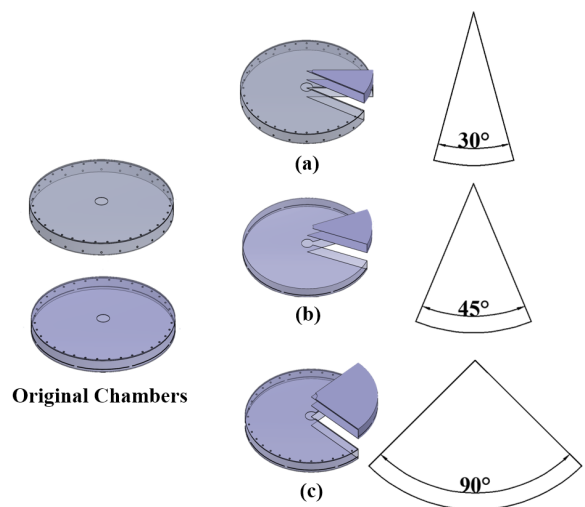


Fig. 2 Periodic boundary condition

다. 각 chamber 모델은 일정한 각도로 동일한 형상을 가지는 모델이므로 해석의 시간과 비용을 줄이기 위해 periodic 경계조건을 활용하였다. Chamber 원형을 기준으로 (a), 30도 각도로 chamber 모델을 잘랐다. 해당하는 모델은 hole non-baffle, with baffle이고 (b)는 45도 각도로 chamber 모델을 자른 경우며 slit non-baffle이 이에 해당한다. (c)의 경우 90도 각도로 slit with baffle 구조에 적용하여 해석했다. 이와 더해 chamber 바닥에 300 mm(12 inch), 775 μm 두께의 평평한 웨이퍼를 구현하여 현실적인 환경을 도모하였다.

2.2.3 환경 평가

웨이퍼에 형성된 환경을 정량적으로 평가하기 위해 웨이퍼를 반지름 방향으로 5개의 구간을 나누어 조성된 속력, 압력 평균을 이용하여 유동의 환경을 정량적으로 평가하고자 한다. Table 1은 각 range의 범위를 구체적으로 정리한 표이다.

2.2.4 입구, 출구 부 경계조건

Table 2는 이번 연구에 적용된 입구 조건을 정리한 표이다.

해당 개발 장비는 입구에서 100 kPa의 압력으로 가스가 주입되어 출구에서 최저 0.05 kPa에서 최고 0.15 kPa의 압력으로 배출된다.

Table 1 The wafer data range

Name	Range
Range 1	0 mm ~ 30 mm
Range 2	30 mm ~ 60 mm
Range 3	60 mm ~ 90 mm
Range 4	90 mm ~ 120 mm
Range 5	120 mm ~ 150 mm

Table 2 Inlet and outlet boundary condition

Inlet pressure [kPa]	
100 kPa	
Outlet pressure [kPa]	
Case 1	Case 2
0.05 kPa	0.15 kPa

3. 수치 해석 결과

3.1 Chamber 수치 해석 결과

Fig. 3 및 Fig. 4는 hole chamber 웨이퍼 표면 위에서 형성된 속력 분포(contour)와 해당 속력 및 압력의 변화 추세를 시각적으로 나타낸 결과를 제시한다. 구체적으로, Fig. 3의 (a-1)과 (a-2)는 baffle 유무에 따라 속력 분포와 구간별 추세를 나타내고, Fig. 4의 (b-1)과 (b-2)는 압력 분포와의 변화 추세를 도시한 것이다.

또한, Table 3과 Table 4는 hole chamber 내 속력 및 압력에 대한 수치해석 결과의 대표 지표인 표준편차(standard deviation, STD), 평균값(average, Ave), 최대값(max), 최소값(min)을 정리한 표이다. 수치해석 결과에 따르면 출구 압력 조건과 관계없이 전반적인 유동 환경은 유사하게 형성되었으나, baffle이 없는 구조에서는 wafer 표면에 상대적으로 높은 속력과 낮은 압력의 유동장이 형성되는 것으로 분석되었다. 보다 구체적으로, baffle이 없는 경우 최대 속력은 약 13 m/s로 나타났으며, baffle이 있는 경우 그 절반 수준인 7 m/s로 감소하였다. 반면, 최소 속력은 양 구조 모두에서 0 m/s에 가까운 정체 영역이 확인되었다. 압력 분포에 있어서

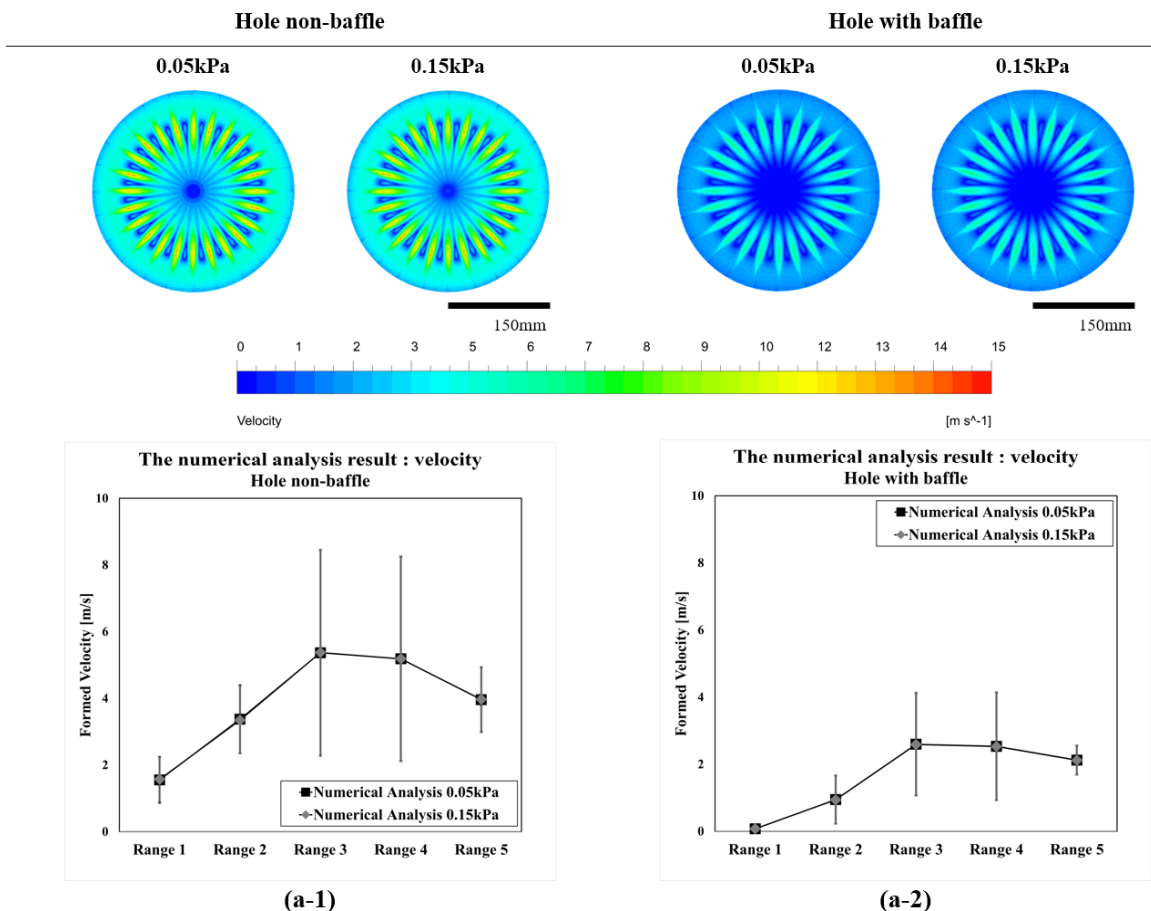


Fig. 3 Result of velocity according to range in the hole chamber

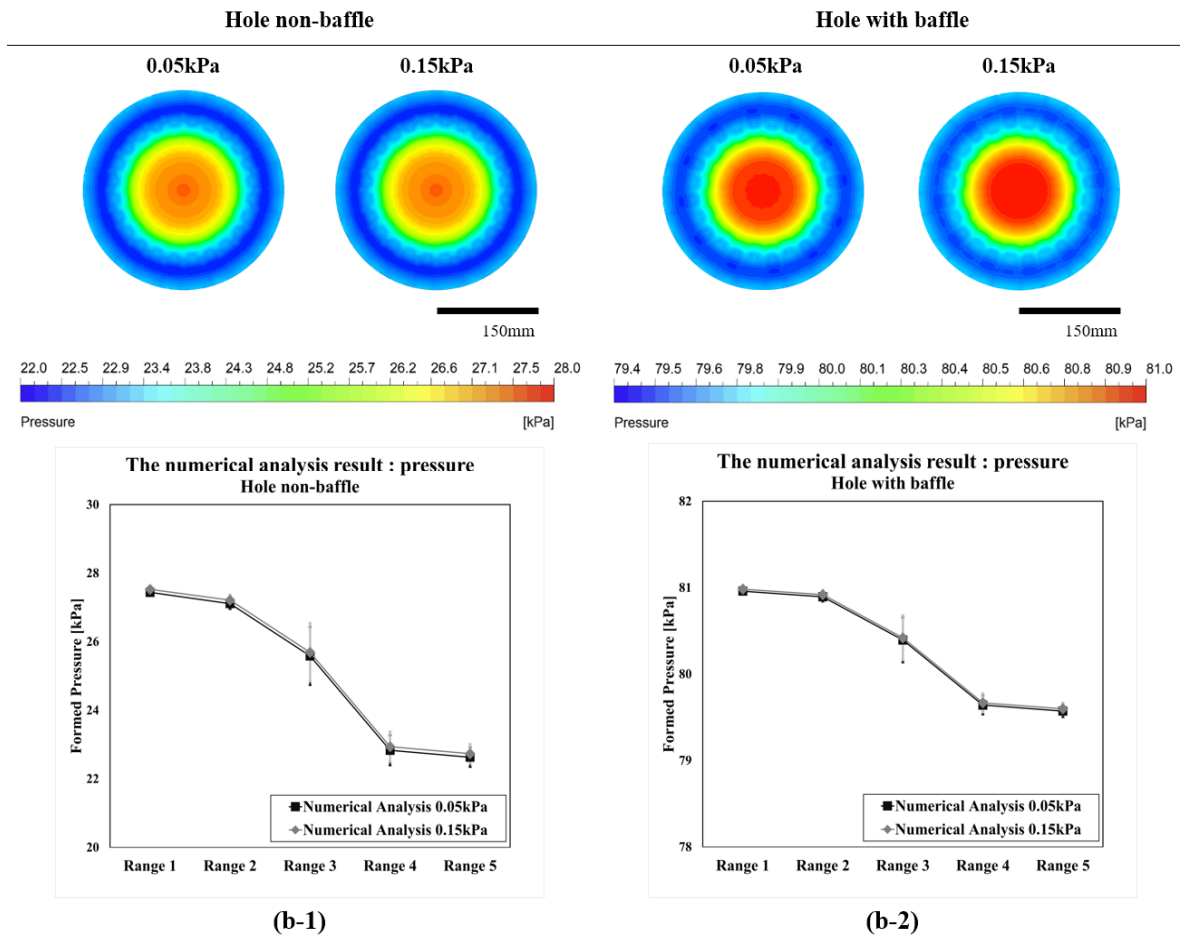


Fig. 4 Result of pressure according to range in the hole chamber

Table 3 Hole chamber velocity results

Value	Non-baffle		With baffle	
	0.05 kPa	0.15 kPa	0.05 kPa	0.15 kPa
STD [-]	2.43	2.43	1.32	1.32
Ave [m/s]	4.42	4.42	2.11	2.10
Max [m/s]	13.2	12.8	6.84	6.84
Min [m/s]	0.1	0.2	0	0

Table 4 Hole chamber pressure results

Value	Non-baffle		With baffle	
	0.05 kPa	0.15 kPa	0.05 kPa	0.15 kPa
STD [-]	1.86	1.85	0.53	0.53
Ave [kPa]	24.0	24.1	80.0	80.0
Max [kPa]	27.6	27.6	81.0	81.0
Min [kPa]	22.2	22.3	79.5	79.5

는, baffle이 없는 구조에서는 평균 약 24 kPa의 저압 환경이 형성된 반면, baffle이 포함된 구조에서는 평균 80 kPa 수준의 상대적으로 고압 환경이 유지되는 것으로 나타났다. 한편, Fig. 3의 속도 변화의 추세를 비교해보면 baffle 구조의 유무와 관계없이 전반적

으로 유사한 유동 환경이 형성되었음을 시사한다. 특히 baffle 구조의 도입은 유동의 전반적인 세기와 안정성을 향상시키는 데 기여한 것으로 분석된다. 또한 속도 contour 결과를 통해, baffle이 있는 구조에서는 웨이퍼 표면 위에 줄기 형태의 정형화된 유동 패턴이 명확히 형성된 것이 관찰되었다. 이러한 정형화된 흐름은 입구 형상이 hole 구조로 설계된 데 기인한 것으로 판단된다. 유동은 웨이퍼 중심부에서 상대적으로 느린 속도로 시작하여 점차 속력이 형성되면서, range 3과 4구간에서 비교적 높은 속력을 보인 후, 유속 손실이 발생하며 웨이퍼 외곽으로 갈수록 감소하는 경향을 나타냈다. 특히 range 3과 4구간에서 형성된 유동은 속력은 높았으나 유동의 방향성과 안정성 측면에서는 다소 불안정한 특성이 관찰되었으며, 이는 정형화된 유동 경로의 영향으로 해석된다.

Table 5와 Table 6은 각 구간에서 형성된 속력을 정량적으로 정리한 표이다.

구체적으로 baffle 구조가 없는 경우 최저 0.1 m/s의 흐름을 조성하였고 range 3과 4에서 대략 5 m/s의 흐름을 형성하였으나 비교적 불안정한 흐름이 조성된 것에 유의해야 하며 속력이 소폭 감소하여 range 5에서 대략 4 m/s의 흐름이 조성되었다. 이와 더해

Table 5 Range velocity for hole non-baffle chamber

Value [m/s]	0.05 kPa		0.15 kPa	
	Average	STD	Average	STD
Range 1	1.55	0.69	1.57	0.64
Range 2	3.37	1.02	3.34	1.00
Range 3	5.37	3.08	5.37	3.07
Range 4	5.18	3.06	5.18	3.10
Range 5	3.96	0.97	3.97	0.97

Table 6 Range velocity for hole with baffle chamber

Value [m/s]	0.05 kPa		0.15 kPa	
	Average	STD	Average	STD
Range 1	0.075	0.031	0.079	0.030
Range 2	0.95	0.72	0.94	0.71
Range 3	2.59	1.53	2.59	1.52
Range 4	2.54	1.61	2.53	1.60
Range 5	2.12	0.43	2.1	0.43

Table 7 Range pressure for hole non-baffle chamber

Value [kPa]	0.05 kPa		0.15 kPa	
	Average	STD	Average	STD
Range 1	27.44	0.072	27.53	0.066
Range 2	27.11	0.16	27.21	0.16
Range 3	25.58	0.85	25.69	0.85
Range 4	22.83	0.44	22.94	0.44
Range 5	22.63	0.28	22.73	0.28

baffle 구조가 있는 경우 최저 0 m/s의 완전히 정체된 흐름을 웨이퍼 중앙에 조성하였고 range 3과 4에서 2.5 m/s에 가까운 흐름을 형성하고 마지막 웨이퍼 끝단에서 2 m/s에 가까운 흐름을 형성하였다. 이 역시 range 3과 4에서 형성된 흐름은 상당히 불안정한 흐름을 형성했다는 것에 유의해야 한다.

Fig. 4의 압력 분포의 추세 또한 baffle 구조의 유무와 관계없이 웨이퍼 표면에서 전반적으로 유사한 압력 환경이 형성되었음을 보여준다. Table 7과 Table 8은 hole chamber에서 형성된 압력의 결과를 정략적으로 정리하여 보여주는 표이다. baffle 구조에 따라 압력 손실의 크기에는 뚜렷한 차이가 나타났다. Baffle이 없는 chamber에서는 최고 압력이 약 28 kPa, 최저 압력이 약 22 kPa로, 웨이퍼 표면 상에서 약 6 kPa의 압력 손실이 발생하였다.

반면 baffle이 포함된 구조에서는 최대 압력이 약 81 kPa, 최저 압력이 약 79.5kPa로, 압력 손실이 약 1.5kPa에 불과하여 보다 안정된 압력 환경이 조성되었다. 형성된 압력 추세를 분석한 결과, range 1, 즉 웨이퍼 중심부에서 가장 높은 압력이 형성되었으며, 외곽부로 갈수록 점차 감소하여 range 5, 즉 웨이퍼 가장자리에서 최저 압력이 형성되는 경향이 명확히 나타났다. 이러한 분포는 중

Table 8 Range pressure for hole with baffle chamber

Value [kPa]	0.05 kPa		0.15 kPa	
	Average	STD	Average	STD
Range 1	80.96	0	80.98	0
Range 2	80.89	0.055	80.92	0.055
Range 3	80.39	0.26	80.42	0.26
Range 4	79.64	0.11	79.67	0.11
Range 5	79.57	0.069	79.60	0.069

Table 9 Slit chamber velocity results

Value	Non-baffle		With baffle	
	0.05 kPa	0.15 kPa	0.05 kPa	0.15 kPa
STD [-]	3.45	3.46	1.47	1.46
Ave [m/s]	9.15	9.15	2.44	2.44
Max [m/s]	17.5	17.5	7.02	8.28
Min [m/s]	0.05	0.04	0.02	0

Table 10 Slit chamber pressure results

Value	Non-baffle		With baffle	
	0.05 kPa	0.15 kPa	0.05 kPa	0.15 kPa
STD [-]	1.11	1.12	0.15	0.15
Ave [kPa]	78.1	78.1	97.5	97.5
Max [kPa]	82.6	82.8	97.9	97.9
Min [kPa]	76.5	76.5	97.1	97.1

심에서 외곽으로 향하는 압력 구배를 기반으로 한 유동의 방사형 확산 경향을 반영하는 것으로 판단된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 slit chamber 내에서 형성된 속력 및 압력 분포(Contour)를 정리한 도식이다. 구체적으로, Fig. 5의 (c-1)과 (c-2)는 slit non-baffle 구조에서의 속력 분포와 그 변화 추세를 나타내며 Fig. 6의 (d-1)과 (d-2)는 동일한 구조에서의 압력 분포 및 추세 변화 결과를 시각적으로 제시한 것이다.

Table 9와 Table 10은 slit chamber에서의 속력 및 압력에 대한 수치해석 결과를 대표 지표들로 요약한 표이다. 수치적으로는 baffle 유무에 따라 차이가 존재하지만, 절대적인 수치만으로는 전혀 다른 유동 환경이 형성되었다고 판단하기에는 제한적이다. 그러나 baffle 구조의 유무에 따라 웨이퍼 표면에서 형성되는 유동특성에는 뚜렷한 차이가 관찰되었다. Baffle이 없는 구조에서는 평균 속력이 약 9 m/s로 형성되었지만, baffle 구조에서는 평균 속력이 약 2 m/s로 크게 감소하였다. 특히 최저 속력이 0 m/s에 근접한 결과를 고려할 때, 유동이 정체되는 영역이 존재함을 시사한다. 이러한 결과는 baffle 구조가 유동 저항을 증가시키고, 그로 인해 속력 분포 및 유동 안정성에 유의미한 영향을 미친 것으로 해석된다.

조성된 압력 분포를 살펴보면, Baffle 구조가 포함된 경우 최고 압력은 약 98 kPa로, 이는 hole chamber에 비해 현저히 높은 압력

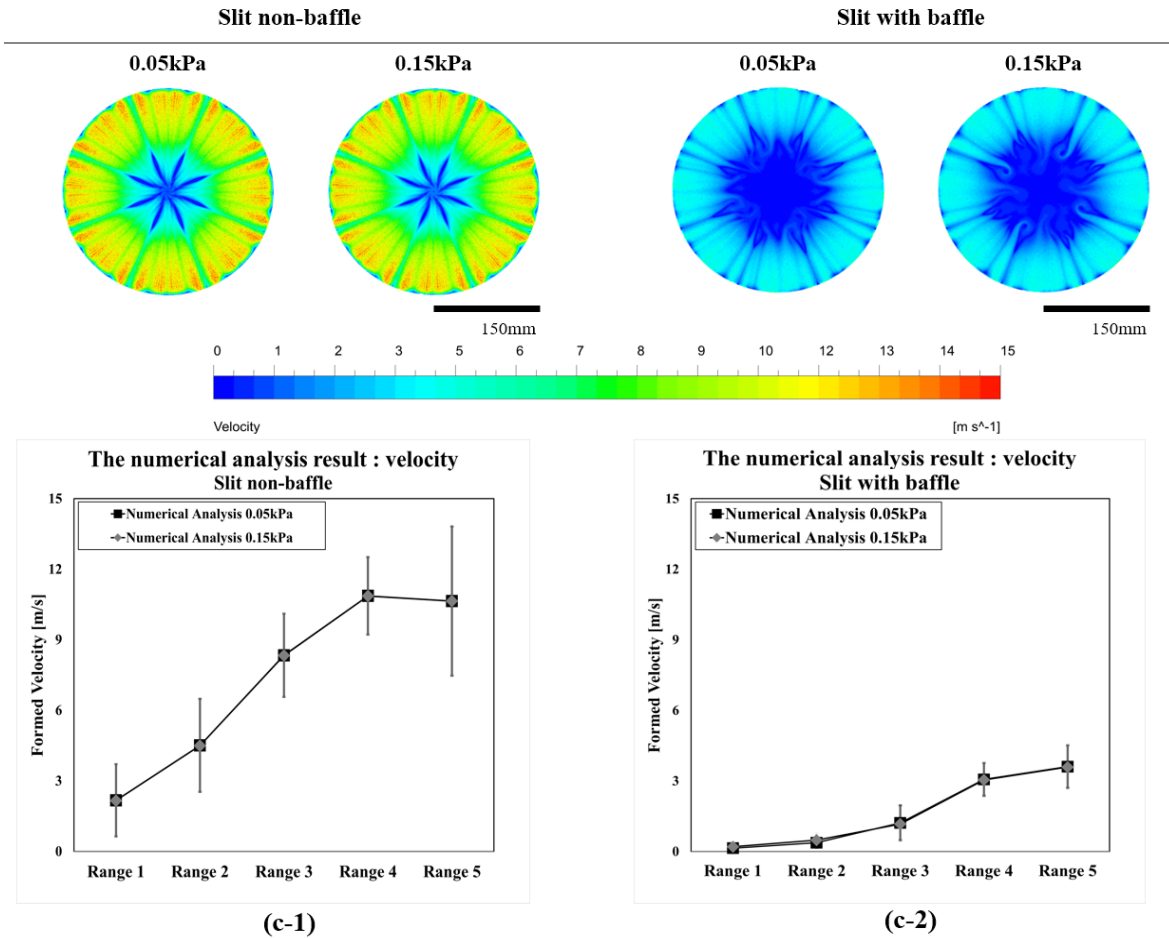


Fig. 5 Result of velocity according to range in the slit chamber

환경이 형성된 결과로 분석된다. Baffle이 없는 경우에도 평균 압력이 약 78 kPa 수준으로 나타나, slit 형태의 입구 구조가 상대적으로 고압 환경 조성에 유리한 특성을 갖는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 slit 구조의 입구 형상이 유입 유량을 집중시켜 전반적인 chamber 내 압력을 상승시키는 데 기여했을 가능성을 시사한다.

이와 더하여, Fig. 5의 속력 분포 결과를 통해 웨이퍼 표면 전반에 걸쳐 비교적 폭넓은 유동이 형성되었음을 확인할 수 있다. 이는 입구 형상이 가로로 길게 설계된 slit 구조 특성에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 baffle 구조가 포함된 경우, 형성된 유동이 웨이퍼 중심부까지 충분히 공급되지 못하는 경향이 관찰되었다. 이는 baffle에 의해 유동이 분산되거나 저항을 받아 중심부로의 유입이 제한되는 결과로 해석되며, 유속의 감소 및 정체 영역 형성에 영향을 미칠 가능성이 있다.

Table 11과 Table 12는 slit chamber 내 각 구간에서 형성된 속력을 정량적으로 정리한 표이다. 속력 변화 그래프를 분석한 결과, 웨이퍼 표면에서의 속력 분포 추세는 hole chamber에서 관찰된 양상과는 상이한 형태로 형성되었음을 시사한다.

이는 입구 형상 및 내부 유동 구조의 차이에 기인한 것으로 해석

Table 11 Range velocity for slit non-baffle chamber

Value [m/s]	0.05 kPa		0.15 kPa	
	Average	STD	Average	STD
Range 1	2.17	1.53	2.16	1.54
Range 2	4.51	1.97	4.50	1.97
Range 3	8.34	1.77	8.33	1.77
Range 4	10.87	1.64	10.86	1.64
Range 5	10.64	3.17	10.65	3.18

Table 12 Range velocity for slit with baffle chamber

Value [m/s]	0.05 kPa		0.15 kPa	
	Average	STD	Average	STD
Range 1	0.14	0.051	0.20	0.16
Range 2	0.38	0.21	0.49	0.28
Range 3	1.22	0.74	1.17	0.74
Range 4	3.07	0.70	3.04	0.71
Range 5	3.61	0.90	3.59	0.92

되며, slit 구조 특유의 유동 확산 특성이 유속 분포에 영향을 미칠 가능성이 높다.

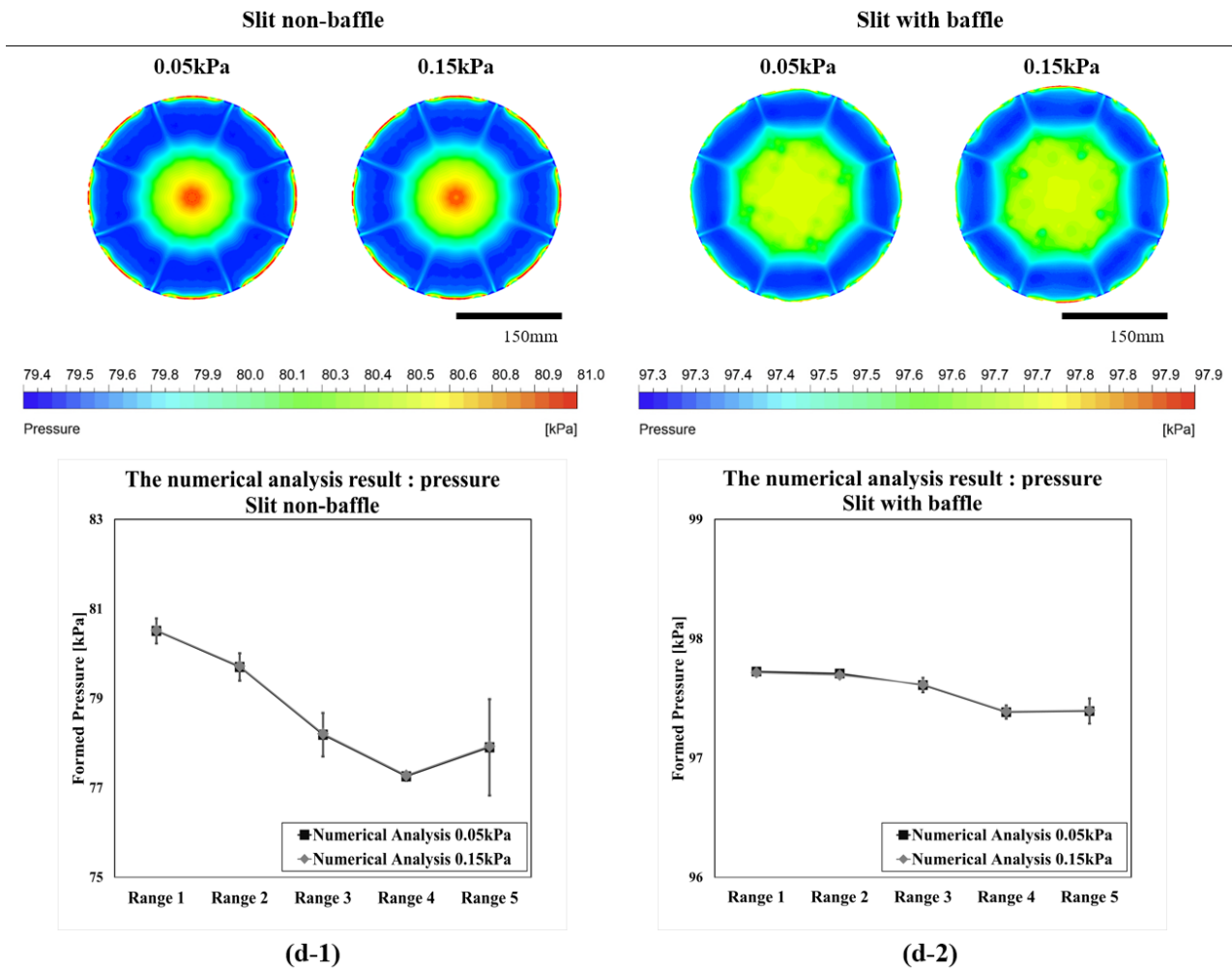


Fig. 6 Result of pressure according to range in the slit chamber

속력 분포의 세부 추세를 비교해보면, baffle 구조의 유무와 관계 Table 12 range velocity for slit with baffle chamber 없이 range 1, 즉 웨이퍼 중심부에서 가장 낮은 속력이 형성되며, range 4까지 점진적으로 속력이 증가하는 경향을 보였다. 그러나 range 5구간, 즉 웨이퍼 외곽부에서의 유동 형성 양상은 baffle 구조의 유무에 따라 뚜렷한 차이를 나타냈다. Baffle이 없는 경우 range 4에서 약 10.9 m/s, range 5에서 약 10.6 m/s의 속력을 보여, 외곽으로 갈수록 소폭 감소하는 경향이 관찰되었다. 반면, baffle이 포함된 경우 range 4에서는 약 3.0 m/s, range 5에서는 3.6 m/s로 오히려 속력이 증가하는 양상을 나타내, 구조에 따라 상이한 유동 거동을 보이는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 baffle이 유동을 재분배하거나 방향을 변경시킴으로써 외곽부 유속을 증가시키는 역할을 했을 가능성을 시사한다.

Table 13과 Table 14는 동일한 구조에서 형성된 압력 분포의 추세를 정량적으로 정리한 표이다. 분석 결과, baffle 구조의 유무에 따라 압력 형성 양상에는 뚜렷한 차이가 나타났으며, 이는 구조

적 특성이 국부적인 압력 분포에 영향을 미친 것으로 해석된다. 그럼에도 불구하고, slit chamber는 다른 chamber 구조와 비교했을 때 상대적으로 고압의 유동 환경을 조성하기 용이한 특성을 보이는 것으로 분석된다. 이러한 결과는 slit 형태의 입구 형상이 유입 유량의 집중 및 압력 상승에 기여했을 가능성을 시사한다.

Baffle 구조가 없는 경우, 웨이퍼 중심부인 range 1에서 최고 압력이 형성되었으며, 이후 외곽으로 갈수록 점진적인 압력 손실이 발생하여 range 4에서는 약 77.3 kPa 수준의 압력이 형성되었다. 그러나 range 5, 즉 웨이퍼 가장자리에서는 압력이 소폭 상승하여 약 77.9 kPa에 도달하는 양상을 보였으며, 이는 전형적인 압력 감소 추세와는 다소 상이한 결과로, 해당 영역에서의 유동 환경이 상대적으로 불안정하게 형성되었음을 유의할 필요가 있다. 이러한 압력 분포는 유동 재순환 또는 미세한 와류 형성 등 국소적인 유동 현상에 기인했을 가능성이 있다.

Baffle 구조가 포함된 경우에도 압력 분포의 전반적인 추세는 baffle이 없는 경우와 유사하게 형성된 것으로 분석된다. 그러나

Table 13 Slit non-baffle chamber pressure results

Value [kPa]	0.05 kPa		0.15 kPa	
	Average	STD	Average	STD
Range 1	80.51	0.28	80.52	0.28
Range 2	79.70	0.30	79.72	0.30
Range 3	78.19	0.49	78.21	0.49
Range 4	77.26	0.099	77.28	0.099
Range 5	77.90	1.07	77.93	1.08

Table 14 Slit with baffle chamber pressure results

Value [kPa]	0.05 kPa		0.15 kPa	
	Average	STD	Average	STD
Range 1	97.72	0	97.72	0
Range 2	97.71	0.012	97.70	0.023
Range 3	97.61	0.061	97.62	0.056
Range 4	97.38	0.056	97.39	0.058
Range 5	97.39	0.10	97.40	0.11

동일한 입구 형상 조건에서 baffle 구조의 영향으로 인해, 전체 압력 수준은 baffle이 없는 경우에 비해 약 20 kPa 정도 높은 값으로 형성된 것으로 나타났다. 또한, 각 구간에서 형성된 압력 값의 차이가 약 0.3~0.4 kPa 수준에 불과하여, 웨이퍼 표면 전반에 걸쳐 상대적으로 균일한 압력 분포가 형성되었음을 시사한다. 이러한 결과는 baffle 구조가 유동을 보다 고르게 분산시켜, 안정적인 고압 환경을 조성하는 데 기여했을 가능성을 뒷받침한다.

구체적으로 압력 분포의 추세를 살펴보면, 웨이퍼 중심부인 range 1에서 약 97.7 kPa의 최대 압력이 형성되었으며, 이후 range 4까지는 점진적으로 감소하여 약 97.38 kPa의 압력을 나타냈다. 웨이퍼 가장자리인 range 5에서는 약 97.39 kPa의 압력이 형성되어 전 구간 대비 압력 변화는 미미한 수준에 불과하였으나, 해당 구간에서의 압력은 상대적으로 불안정한 유동 환경과 연관되어 있을 가능성이 있는 것으로 평가된다. 그럼에도 불구하고, 전반적인 압력 차가 0.3 kPa 이내로 유지된다는 점을 고려할 때, 본 구조는 다른 chamber 모델에 비해 보다 균일하고 안정적인 압력 분포를 웨이퍼 표면 위에 형성한 것으로 판단된다.

4. Conclusion

본 연구에서는 fan-out wafer-level packaging 공정 중 soft bake 단계에서의 유동 특성을 입구 형상(hole/slit) 및 baffle 유무에 따라 수치적으로 분석하였다. CFD 해석 결과, chamber 내부 구조는 유동 균일성과 안정성에 지배적인 영향을 주는 것으로 나타났다. 특히 baffle 구조는 속력 및 압력 분포를 안정화시키며, 웨이퍼 표면 위의 흐름을 정형화하여 공정 균일성 향상에 기여할

수 있음을 확인하였다.

Hole chamber의 경우, baffle 구조의 유무와 관계없이 전반적인 압력 및 속력 분포는 유사한 환경으로 조성된 것으로 분석되었다. 특히, 압력 강하 추세와 속력 분포 추세 간의 유사성이 높았으며, 이는 입구 형상에 기인한 정형화된 유동 구조가 웨이퍼 표면에 형성되었음을 시사한다. Baffle 구조의 도입은 고압 환경을 유지하는 데 기여하였으며, 유속 분포를 보다 균일하게 조성함으로써 wafer 표면 전반의 유동 안정성을 향상시키는 데에 지배적인 영향을 미친 것으로 평가된다.

Slit chamber 역시 baffle 유무 관계없이 거시적인 유동 환경은 유사하게 형성되었으나, 세부적인 유동 거동에서는 baffle 구조가 더욱 지배적인 영향을 미친 것으로 나타났다. 특히 압력 및 속력의 변화 추세가 baffle에 의해 뚜렷하게 완화되어, 보다 완만한 분포 곡선을 형성하였으며, 이는 유동 안정성 향상 측면에서 유의미한 결과로 판단된다. 특히 slit with baffle 구조에서 형성된 유동 환경이 가장 안정적인 환경을 조성한 것으로 드러났다. 아울러, 가로로 긴 slit 형상의 입구 특성상 웨이퍼 표면에 형성된 추세는 hole chamber와 다른 양상을 형성하였다. 또한 외곽(edge) 영역에 상대적으로 강한 유동이 집중되었고, 이로 인해 웨이퍼 끝단에서는 비교적 불안정한 유동 영역이 일부 형성된 것으로 분석되었다.

이와 같은 결과는 입구 형상 및 내부 구조(예: baffle) 설계가 웨이퍼 표면의 유동 균일성 확보에 중요한 설계 변수임을 시사하며, 추후 반도체 열처리 공정에서의 chamber 최적화 설계 시 유동 균일성 확보를 위한 기반 데이터로 활용될 수 있을 것이다. 또한 soft bake뿐 아니라 후속 열처리 공정의 장비 설계에 참고가 될 수 있는 설계 기준을 제공할 수 있으며, 다만 본 연구는 정상상태의 유동 해석에 국한되어 있으며, 향후 시간 의존성 유동 해석 및 열 연계 분석이 병행될 필요가 있다.

후 기

본 연구는 한국산업기술기획평가원의 연구비 지원(20021828)과 한국기술교육대학교 2025년도 교육연구진흥과제의 연구비 지원으로 연구되었음.

References

[1] Keser, B., Amrine, C., Duong, T., Fay, O., Hayes, S., Leal, G., Lytle W., Mitchell D., Wenzel, R., 2007, The Redistributed Chip Package: A Breakthrough for Advanced Packaging, 2007 Proceedings 57th Electronic Components and Technology Conference, 286-291, <https://doi.org/10.1109/ECTC.2007>.

- 373811.
- [2] Lau, J. H., 2018, Fan-Out Wafer-Level Packaging, Springer, Singapore, <https://doi.org/10.1007/978-981-10-8884-1>.
- [3] Keser, B., Kröhnert, S., 2019, Advances in Embedded and Fan-Out Wafer-Level Packaging Technologies, Wiley, USA.
- [4] Braun, T., Becker, K.-F., Hölck, O., S. Voges, S. Kahle, R., Dreissigacker, M., Schneider-Ramelow, M., 2019, Fan-Out Wafer and Panel Level Packaging as Packaging Platform for Heterogeneous Integration, *Micromachines*, 10:5 342, <https://doi.org/10.3390/mi10050342>.
- [5] Praful, P., Bailey, C., 2025, Warpage in Wafer-Level Packaging: A Review of Causes, Modelling, and Mitigation Strategies, *Front. Electron.*, 5 1515860, <https://doi.org/10.3389/felec.2024.1515860>.
- [6] Cheng, H.-C., Wu, Z.-D., Liu, Y.-C., 2020, Viscoelastic Warpage Modeling of Fan-Out Wafer-Level Packaging During Wafer-Level Mold Cure Process, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 10:7 1240-1250, <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2020.2992041>.
- [7] Chuang, W.-C., Huang, Y., Chen, P.-E., 2023, Exploring the Influence of Material Properties of Epoxy Molding Compound on Wafer Warpage in Fan-Out Wafer-Level Packaging, *Materials*, 16:9 3482, <https://doi.org/10.3390/ma16093482>.
- [8] Gadhiya, G., Brämer, B., Rzepka, S., Otto, T., 2019, Assessment of FOWLP Process Dependent Wafer Warpage Using Parametric FE Study, *Proceedings of the 2019 European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC 2019)*, 1-8, <https://doi.org/10.23919/EMPC44848.2019.8951805>.
- [9] You, S. K., Kim, S. M., 2024, Numerical Analysis of Wafer Temperature with Respect to Radiation Variation in CVD Chamber, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 33:4 172-177, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2024.33.4.172>.
- [10] You, S. K., Kim, S. M., 2024, Numerical Analysis of Gas Diffusion in CVD Chambers, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 33:4 178-183, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2024.33.4.178>.
- [11] Khalaji, M. N., Koca, A., Kotcioğlu, İ., 2019, Investigation of Numerical Analysis Velocity Contours k-ε Model of RNG, *Standard And Realizable Turbulence for Different Geometries, International Journal of Innovative Research and Reviews*, 3:2 29-34, <<https://www.injirr.com/index.php/injirr/article/view/42>>.
- [12] Shaheed, R., Mohammadian, A., Gildeh, H. K., 2019, A Comparison of Standard k-ε and Realizable k-ε Turbulence Models in Curved and Confluent Channels, *Environ. Fluid Mech.*, 19 543-568, <https://doi.org/10.1007/s10652-018-9637-1>.
- [13] ANSYS Inc., 2009, Realizable k-ε Model Theory Guide, <<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/t/h/node60.htm>>.
- [14] COMSOL Ltd., n.d., Realizable k-ε Model, 2022, Comsol Documentation, Version 6.1, <https://doc.comsol.com/6.1/doc/com.comsol.help.cfd/cfd_ug_fluidflow_single.06.092.html>.



Jun-Young Lee

M. S. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education. His research interests are CAE & Process Optimization.
E-mail: 2017120095@koreatech.ac.kr



Do-Yoon Jeon

M. S. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education. His research interests are CAE & Process Optimization.
E-mail: jeondoyun@koreatech.ac.kr



Seung-Mo Kim

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education. His research interests are CAE & Process Optimization.
E-mail: smkim@koreatech.ac.kr