



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2023 년 2 월
석사학위 논문

유한요소해석에 기반한
다상 및 다중 물리
사례에 대한 연구

조선대학교 대학원

기계시스템 · 미래자동차공학과

강 유 림

유한요소해석에 기반한
다상 및 다중 물리
사례에 대한 연구

Case Study of Multiphase and Multiphysics
based on Finite Element Analysis

2023 년 2 월 24 일

조선대학교 대학원

기계시스템 · 미래자동차공학과

강 유 림

유한요소해석에 기반한
다상 및 다중 물리
사례에 관한 연구

지도교수 곽 재 복

이 논문을 공학석사학위 신청논문으로 제출함

2022년 10월

조선대학교 대학원

기계시스템·미래자동차공학과

강 유 림

강유림의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 박정우 (인)

위원 조선대학교 교수 김창래 (인)

위원 조선대학교 교수 곽재복 (인)

2022년 12월

조선대학교 대학원

목차

ABSTRACT	vii
제 1 장 서 론	1
1. 연구배경	1
2. 연구목표	7
제 2 장 액체-고체 사이클론의 성능 특성화 (다상)	8
1. 사이클론 원리	8
2. 해석진행	9
가) 지배방정식	9
나) 모델 및 경계조건	11
다) 실험적 검증 및 결과	16
3. 성능 특성 비교 및 분석	20
제 3 장 BGA의 열-기계적 피로 수명 예측 (다중)	25
1. BGA의 열-기계적 피로 원리	25
2. 해석진행	26
가) 해석 모델 및 경계조건	26
나) 물성 및 재료 모델 선정	29
다) 해석 결과 분석 및 검증	33
라) 피로 수명 예측 및 고찰	36
제 4 장 결론	38
REFERENCE	40

표목차

Table 1 -1 Cases of prior analysis approaches	2
Table 2 -1 Dimensions of the cyclone models	11
Table 2 -2 Mesh quality of cyclone models	14
Table 2 -3 Boundary conditions	14
Table 2 -4 Averaged values obtained by measuring and calculating	19
Table 2 -5 Comparison of upper outlet flow rate for cyclone models 1, 2 and 3	24
Table 3 -1 Dimensional details for package	27
Table 3 -2 Material property for package	29
Table 3 -3 Temperature dependent mechanical properties	29
Table 3 -4 Anand Model Parameters	32
Table 3 -5 Correlation of Finite Element Predictions and Experimental Data for SAC 305 ...	35
Table 3 -6 Material constants for the Darveaux model	37
Table 3 -7 Life predictions for 63Sn37Pb, SAC305 and 42Sn58Bi solder joints	37

도목차

Fig 1 -1 Problem-solving approach method.....	3
Fig 1 -2 Evolution of semiconductor package technology	5
Fig 1 -3 Solder reflow temperature profile	6
Fig 2 -1 Schematic representation of the cyclone principle.....	8
Fig 2 -2 Schematic diagram of cyclone models; (a) Model 1 (basic), (b) Model 2 (added socket 1) and (c) Model 3 (added socket 2).	12
Fig 2 -3 Meshing of the cyclone models; (a) Model 1 (basic), (b) Model 2 (added socket 1) and (c) Model 3 (added socket 2)	13
Fig 2 -4 Experimental set up.....	16
Fig 2 -5 Contour of Model 1 injected with 5 percent particles; (a) Total pressure and (b) Velocity magnitude.....	17
Fig 2 -6 Distribution profile of Model 1 injected with 5 percent particles;	17
Fig 2 -7 Comparison of calculated and measured results; (a) inlet static pressure and (b) upper outlet flow rate.....	19
Fig 2 -8 Contour of tangential velocity for each cyclone model.....	20
Fig 2 -9 Tangential velocity profile y1 (cylindrical center) and y2 (conical center);	21
Fig 2 -10 Contour and profile of Axial velocity for cyclone models.....	22
Fig 2 -11 Comparison of cyclone filter performance; (a) Separation efficiency and (b) Number of particles contained in discharge fluid (100 mL)	24
Fig 3 -1 Solder thermal-mechanical fatigue principle	25
Fig 3 -2 Modeling of BGA and details of the solder joint	27
Fig 3 -3 Temperature profile of thermal cycle.....	28
Fig 3 -4 Contours of Accumulated plastic work for solders (MPa); (a) 64Sn37Pb[41], (b) SAC305 [36,42] and (c) 42Sn58Bi [43]	35

기호 설명

FEA	Finite Element Analysis
CFD	Computational Fluid Dynamics
BGA	Ball Grid Array
CTE	Coefficient of Thermal Expansion
FEM	Finite Element Method
RoHs	Restrictions on the use of hazardous substances
RSM	Reynolds Stress Model
DPM	Discrete Phase Model
PCB	Printed Circuit Board

아래 첨자

u	Instantaneous velocity of fluid
\bar{u}_i	Average velocity of fluid
u'_i	Fluctuating component of velocity
x_i	Spatial direction.
\bar{p}	Average pressure of fluid.
ρ	Fluid density.
μ	Fluid absolute dynamic viscosity.
$-\rho \overline{u'_i u'_j}$	Reynolds stress tensor.
$D_{T,ij}$	Turbulence diffusion.
P_{ij}	Stress production.
ϕ_{ij}	Pressure strain.
ε_{ij}	Dissipation term
F_{ij}	Rotation production
u_p	Velocity of particles
F_D	Drag force
ρ_p	Density of particles

g_i	Gravitational acceleration
F_s	Corresponds to the additional forces
s	Deformation resistance
c	Function of strain rate and temperature
$\dot{\epsilon}_p$	Plastic strain rate
T	Absolute temperature (K)
ξ	Multiplier of stress
A	Pre-exponential factor (1/sec)
Q	Activation energy (J/mol)
R	Universal gas constant (J/mol·K)
m	Strain rate sensitivity
$\dot{\epsilon}_p$	Plastic strain rate
h_0	Hardening constant (MPa)
a	Strain rate sensitivity of hardening
\hat{s}	Coefficient for deformation resistance saturation value (MPa)
n	Deformation resistance value
ΔW_{avg}	Accumulated plastic work per cycle (MPa)
K_1, K_2, K_3, K_4	Darveaux Constants

N_0	Number of cycles to crack initiation
N_f	Characteristic life of the joint
da/dN	Crack growth rate (μm)
a	Solder joint diameter (μm)

ABSTRACT

Case Study of Multiphase and Multiphysics based on Finite Element Analysis

Yu Rim Kang
Advisor: Prof. Jae B. Kwak.
Dept. of Mechanical System & Automotive
Engineering.
Graduate School of Chosun University

Finite element analysis (FEA) is an effective problem-solving tool that enables predictive analysis of problems and simulates even complex physical deformation. In this study, two case studies will be conducted according to the strategy using the finite element analysis method, which can visualize flow and express thermal-mechanical characteristics.

The first is the performance characterization of a liquid-solid cyclone using high viscosity oil. Cyclone separator are active filtering devices that recycles wastewater, oil and cleans air pollution. Because internal flow of cyclone by the vortex is highly complicated, the performance and flow patterns of these filters should be thoroughly researched. Generally, studies on gas-solid cyclones are conducted, numerical studies on cyclones that utilize higher-viscosity oil are limited. In this study, a liquid-solid cyclone injected with high-viscosity cutting-oil containing various sized-particles was comprehensively investigated. The reliability of the CFD (Computational Fluid Dynamics) method was verified through comparison with the experimental results. Three models with different geometries were considered for the analysis. One model was used for CFD verification; the remaining two models were added sockets of length extension and shape change to the bottom of the hopper to improve performance. The models that changed the shape of the hopper, thus directly affecting the cyclone performance, were investigated, and each model was qualitatively compared using a validated method. In addition, the particle separation efficiency was evaluated by focusing on the velocity distribution to quantitatively confirm the influence of changing the shape of the hopper. Consequently, the tangential velocity was determined to be

similar, but the axial velocity was different, and the change in the velocity of transport for particles affected the filter function.

The second is the prediction of thermal-mechanical fatigue life of BGA. The BGA is a package type that mechanically and electrically connects chips and substrates using solder balls. Since high density mounting is possible in a small area, it is used as a high-performance automotive semiconductor package. However, the semiconductor package consists of various materials with differences in coefficients of thermal expansion, it is exposed to fatigue under the condition of cyclic thermal load. In particular, it is important to ensure the reliability for solder joint of a fine pitch that is easily fractured when warpage occurs due to thermal deformation. If the material properties of the solder with viscoplasticity are not suitable, the simulation results may be different from the actual one. Therefore, an appropriate analysis method is required. In this study, thermal-mechanical fatigue analysis of solder was conducted using the Anand model, which representing the behavior of viscoplasticity. In addition, the fatigue life prediction of three materials was carried out, and each material is 63Sn37Pb, SAC 305 and 48Sn52Bi. The SAC305 is a material that is replacing by lead solder by environmental regulations, and 48Sn58Bi is low temperature solder used to compensate for the disadvantages of SAC305. As a result, it confirmed that the fatigue life was the best in 63Sn37Pb and that it was lower in 48Snn58Bi than other materials.

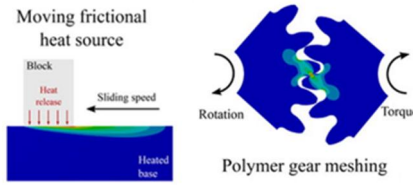
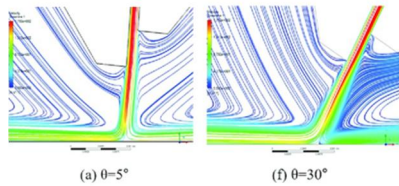
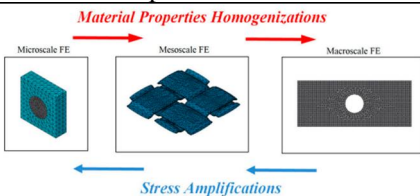
제 1 장 서 론

1. 연구배경

유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)은 유한요소법 (Finite Element Method, FEM)이라고 불리는 수치적 기법을 사용하여 공학적인 문제를 해결하는 시뮬레이션 기법이다. 문제에 대한 예측 분석이 가능할 뿐만 아니라, 복잡한 물리적 변형까지도 묘사할 수 있다는 이점을 가지고 있기 때문에 가장 보편적이고 효과적인 계산 도구로 널리 사용되고 있다. 실험에 비해 시간과 비용의 절감이 가능하며, 오늘날 유한요소해석의 적용은 신뢰할 수 있는 결과를 보여주고 있음이 많은 연구에서 입증되었다[1]. 특히, 예측하기 어려운 유동의 시각화가 가능할 뿐만 아니라 열-기계적 특성의 표현이 가능하기 때문에 유동해석과, 반도체 패키지의 분석에도 사용된다. 실제 물리적 문제를 해결하기 위한 기본적인 유한요소해석의 과정은 크게 전처리(Pre-processing), Solving, 후처리(Post-processing)의 3단계로 나뉜다. 전처리의 과정은 해석 모듈 선정, 모델링, 격자 생성, 경계조건 설정 등 물리적 현상을 표현하고, 근사해를 구하기 위한 계산 요소의 특성을 정의하는 준비과정이다. Solving은 수치적 방법을 이용해 계산하고, 성공적으로 수행된 경우 후처리의 과정을 통해 시각화하고 분석한다. 이때, 해석결과의 신뢰성 확보를 위해서는 실험이나 이론을 통한 검증이 이루어져야 한다. 대부분의 해석 과정은 공통적으로 3가지 단계와 검증으로 나뉘지지만, 연구하고자 하는 목적 및 계산하고자 하는 변수에 따라 해석 전략은 다르게 나타날 수 있다. Table 1-1은 기존의 유한요소해석을 사용한 접근법 사례를 나타내며, 해석을 진행할 때 중점을 둔 조건을 보여준다. 열-기계적 연동해석인 spur gear에서는 Contact 시 발생하는 마찰열이, Air-Knife는 기류를 표현하기 위한 난류모델이, 복합재의 재료물성을 구하기 위해서는 대표영역을 구성하는 방식으로 고려되었다. 연구하는 목적에 따라 물리적 현상을 파악하고 해석의 전략을 세우는 것은 중요한 부분이라고 할 수 있다.

본 논문에서는 Fig 1-1에 나타난 것과 같이 유한요소해석 전략적 접근을 통해 다상 유동인 1) 액체-고체 사이클론의 성능 특성화와 2) 다중 물리 시스템인 BGA(Ball Grid Array)의 열-기계적 피로 수명 예측의 두 가지의 사례 연구를 진행하고자 한다.

Table 1 -1 Cases of prior analysis approaches

Finite Element Analysis	Applications	Variable
	Spur gear	
Thermal – mechanical [2]		Frictions effects at the contact interface
	Air – Knife (air flow)	
Computational Fluid Dynamics [3]		Turbulence model
	Composite materials	
Structural Analysis [4]		Representative volume element, RVE

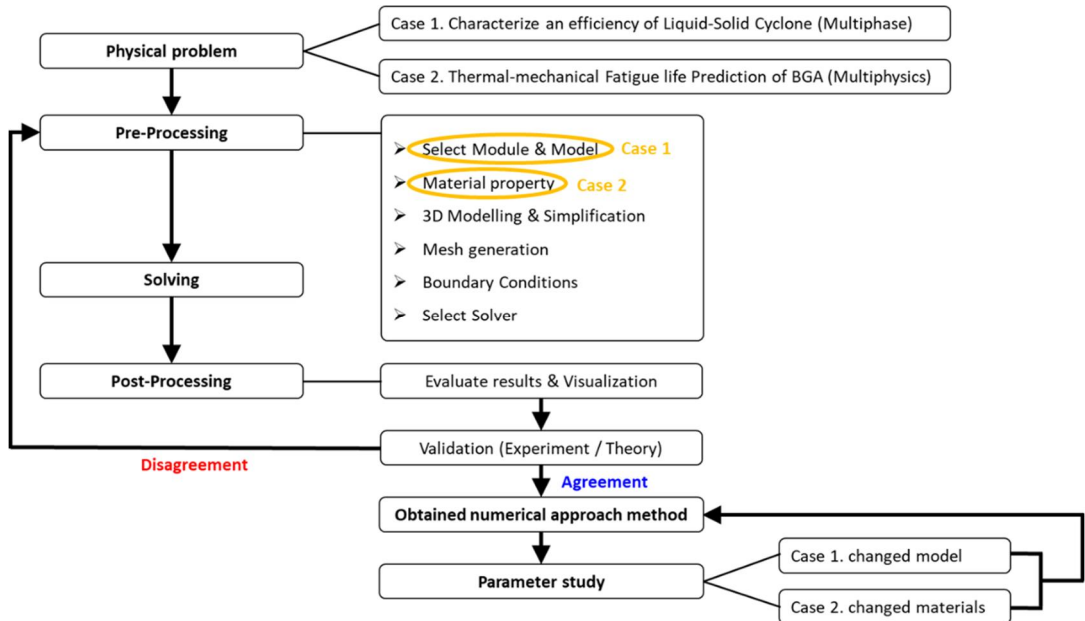


Fig 1 -1 Problem-solving approach method

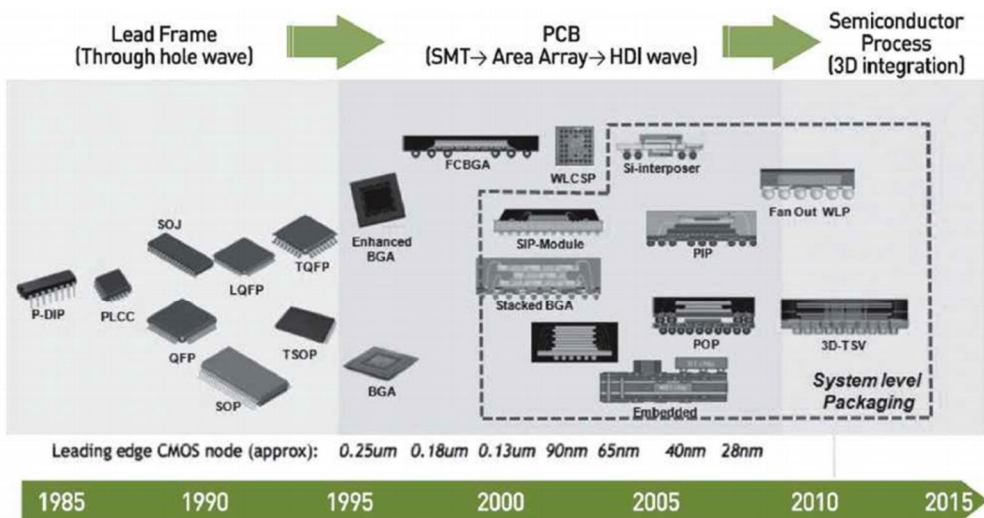
첫째, 액체-고체 사이클론의 성능 특성화이다. 사이클론은 원심력을 사용하여 유체와 입자의 상을 분리하는 능동적인 여과장치로 기하학적 단순성, 저비용, 쉬운 작동 방법, 높은 분리 성능 등의 이점으로 인해 다양한 산업에서 널리 사용되는 분리 장치 중 하나이다 [5,6]. 단순한 형상과 다르게 내부 유동은 매우 복잡하기 때문에, 성능 및 흐름 패턴 예측을 위한 연구가 많이 진행되고 있다[7]. 일반적으로 사이클론의 성능 예측을 위해 전산 유체 역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)이 사용된다 [8-10]. 저점도를 갖는 기체가 주입되는 연구가 주로 진행되고 있으며, 요즘은 더 점도가 높은 액체가 주입되는 사이클론의 성능 특성 연구 또한 활발해지는 추세이다. 대부분의 액체로는 물이 사용되며, 고점도 Oil을 사용하는 연구는 많이 찾아볼 수 없다 [11]. 따라서, 입자와 분리가 더 어려울 것이라고 판단되는 고점도 Oil과 입자를 주입하는 사이클론의 해석 방법이 확보되어야 한다. 추가적으로, 모델의 변경은 내부 유동장을 변화시켜 성능에 직접적인 영향을 미치기 때문에 형상 변화에 따른 사이클론의 성능을 특성화 하는 것은 중요하다

[12]. 성능 향상을 위한 입구와 출구 형상, 콘의 길이, vortex finder의 직경 같은 형상 매개변수의 연구가 활발하게 이루어지고 있지만, hopper에 관한 연구는 거의 진행되고 있지 않다 [13-16]. 이것은 hopper가 포함되지 않고 수행된 많은 연구들이 실험과의 일치를 보여주었기 때문이다 [17-18]. 하지만, 실제로 사이클론 작동 시 hopper에 수집되는 입자는 상향흐름의 영향을 받아 본체로의 재유입이 발생하기 때문에, hopper가 없을 경우에 재유입 되는 입자가 고려되지 않아 입자 분리 효율이 실제보다 과대평가가 될 수 있다. 따라서, 결과의 신뢰성 향상을 위해서는 hopper를 포함하는 연구가 진행되어야 한다.

둘째, BGA의 열-기계적 피로수명 예측이다. 최근 전자제품이 소형화됨에 따라 반도체 패키지의 고성능, 고집적화가 이루어지고 있다. Fig 1-2는 반도체 패키지 기술 발전의 동향을 나타낸다 [19]. 과거에는 와이어 본딩을 사용했지만 패키지의 크기가 작아지면서 와이어가 점유하는 공간을 줄일 수 있는 표면실장 가능한 볼 형식의 패키지가 사용되는 추세이다. BGA패키지는 solder ball을 이용해 칩과 기판을 기계적, 전기적으로 연결하는 패키지 형식이다. Solder로 바로 연결하기 때문에 신호전달 경로가 짧고, 표면실장으로 I/O 단자수를 증가시켜 성능향상이 가능하다는 이점을 가지고 고성능 차량용 반도체 패키지로 사용되고 있다 [20]. 반도체 패키지는 열팽창계수(Coefficient of Thermal Expansion, CTE)의 차이가 있는 여러 재료로 구성되기 때문에 반복적인 열 하중의 조건에서 각 재료마다 다른 열변형이 발생한다. 서로 다른 기판을 연결하는 solder 접합부는 열응력이 집중됨에 따라 열-기계적 피로 파괴에 가장 취약하게 나타난다. 특히, 고성능화에 따른 solder joint의 미세화에 따라 열변형에 의한 휨(warping)이 발생할 경우 쉽게 파단이 일어나기 때문에, solder joint의 신뢰성을 확보하는 것은 중요하다고 할 수 있다.

Solder는 점소성의 특성을 가지고 있으며, 온도에 큰 영향을 받기 때문에 재료의 물성이나 경계조건이 적절하지 않은 경우 실제와 다른 해석결과가 도출될 수 있으므로 적절한 해석방법이 필요시 된다. 또한, 환경규제 및 집적화 되는

전자기기의 성능향상을 위해 소재의 변화가 요구되고 있으며, 각 소재의 활용을 위해 재료별 열-기계적 피로 수명을 예측하는 것은 중요하다. 기존의 접합 소재인 Sn-Pb계의 solder가 우수한 기계적 특성, 저비용, 젖음성, 낮은 용점 등 다양한 측면의 이점으로 인해 일반적인 접합 소재로 사용되었다. 그러나, 유해물질 제한(Restrictions on the use of hazardous substances, RoHs)에 따라 Pb 가 함유된 소재가 제한되면서 이를 대체하기 위한 lead free solder에 관한 연구가 많이 진행되고 있다 [21]. 특히, 기계적 특성이 우수한 SAC305(Sn-0.3Ag-0.5Cu)가 주로 이용되고 있지만, 217°C의 높은 용점으로 인해 reflow 과정 중 전자기기의 신뢰성을 저하시킨다는 문제를 가진다. 이를 해결하기 위해 저온계 솔더가 필요시 되고 있으며, Sn-Bi계는 138°C의 용융점을 갖는 저온계 솔더 중 하나로 알려져 있다. Fig 1-3는 각 솔더 재료의 reflow 온도 프로파일을 나타낸다 [22,23].



자료: 중소벤처기업부, 중소기업 기술로드맵 2018-2020

Fig 1 -2 Evolution of semiconductor package technology

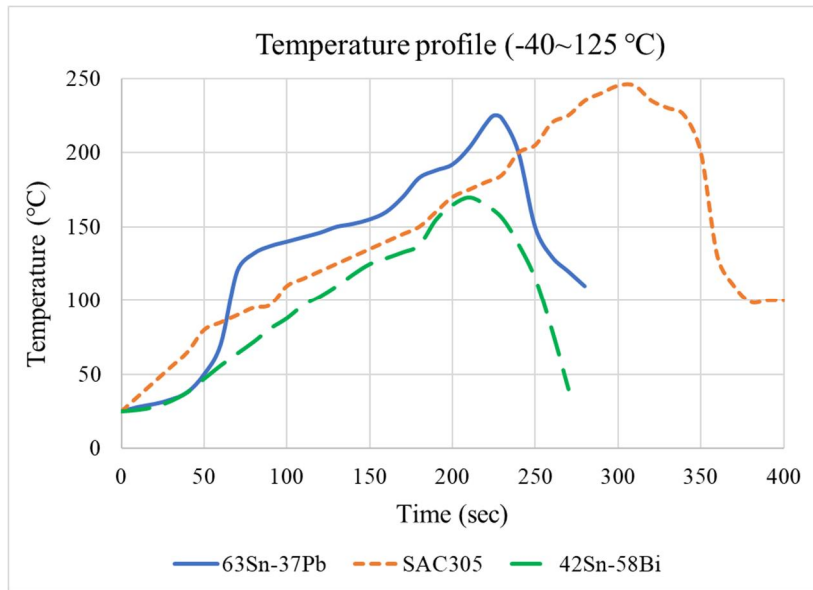


Fig 1 -3 Solder reflow temperature profile

2. 연구목표

본 논문은 Fig 1-1과 같이 유한요소해석의 전략에 따라(1) 고점도 oil을 주입한 액체-고체 사이클론의 성능 특성화, (2) BGA의 열-기계적 피로수명 예측의 두 가지 사례의 해석 방법을 확보하고자 한다. 추가적으로, 확보된 해석 방법을 적용하여 각 변수(사이클론 형상, BGA solder의 재료)가 미치는 영향을 분석하는 것을 목적으로 한다.

첫째, CFD를 이용해 해석을 진행하고, 실험과 해석의 토출 유량 및 입자 분리 성능 비교를 통해 고점도 oil을 사용한 액체-고체 사이클론의 해석법을 검증한다. 또한, 사이클론 성능에 직접적으로 영향을 미치는 hopper의 형상을 변화시킨 모델을 제시한다. 제시된 모델은 CFD 검증 모델, 길이 연장, 모래시계 모양의 형상 변화의 socket을 각각 추가한 세 가지이다. 형상 변화가 입자 분리 효율 및 토출 유량에 미치는 영향을 속도 분포를 중점으로 분석하고, 각 입자 크기에 따라 필터링에 적합한 모델을 선정하고자 한다.

둘째, 패키지에서 열-기계적 피로에 가장 취약하게 나타나는 solder joint의 신뢰성을 확보하기 위한 피로 수명 예측의 해석적 방법을 확보하고자 한다. 반복적인 열하중이 가해졌을 때, 패키지에 발생하는 전반적인 열변형을 확인하고 기존 연구와의 결과 비교를 통해 해석 방법을 검증한다. 검증된 방법을 사용하여, 변화가 요구되는 solder 소재에 대한 열-기계적 피로 수명을 예측하고자 한다. 사용되는 소재는 lead solder 인 Sn-Pb계, lead-free solder인 중온계의 SAC305, 저온계의 Sn-Bi계의 세 가지이다. 특히, 저온계 lead-free solder로 각광받는 Sn-Bi계를 기존에 사용되던 Sn-Pb계, SAC305 소재와 비교하여 특성을 파악하고, 고성능 자동차 패키지에 적용 가능성을 판단하고자 한다.

제 2 장 액체-고체 사이클론의 성능 특성화 (다상)

1. 사이클론 원리

Fig 2-1은 사이클론의 작동 원리를 나타낸다. 불순물이 섞인 더러운 유체가 입구(Inlet)에 접선방향으로 유입되면 원심력이 생성된다. 발생된 원심력과 중력으로 인해 나선형으로 회전하며 하강한다. 이때, 더 크고 밀도가 높은 입자는 관성에 의해 벽면으로 운반되며, hopper에 도달했을 때, 내벽에 충돌한 후 유체의 흐름에서 벗어나 수집된다. 이렇게 불순물이 분리된 깨끗한 유체는 다시 상향 회전하며 상단의 출구(upper outlet)로 빠져나오게 된다 [24].

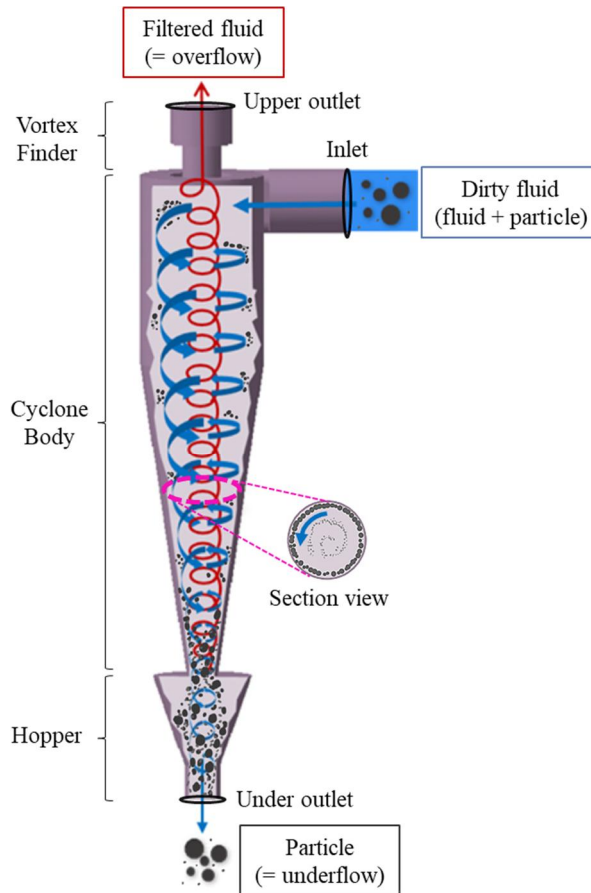


Fig 2 -1 Schematic representation of the cyclone principle

2. 해석진행

가) 지배방정식

Navier-Stokes 방정식은 연속체의 거동을 나타내는 지배방정식이다 [25]. 압력이 인가될 때, Oil의 체적 변화 정도는 매우 미미하기 때문에 밀도가 일정한 비압축성 유체로 가정된다.

유체의 속도장은 Reynolds decomposition을 사용하여 식 (2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = \bar{u}_i + u'_i \quad (2.1)$$

여기서 u 는 유체의 순간 속도, \bar{u}_i 는 유체의 평균 속도, u'_i 는 속도의 변동 성분이다.

비압축성 유체의 경우, 연속방정식은 식 (2.2)와 같이 운동량 방정식은 식 (2.3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial(-\rho \overline{u'_i u'_j})}{\partial t} + \rho g_i \quad (2.3)$$

x_i 는 위치, \bar{p} 유체의 평균 압력, ρ 유체의 밀도, μ 는 점성계수 그리고 $(-\rho \overline{u'_i u'_j})$ 는 Reynolds stress tensor이다.

CFD 결과의 정밀도는 난류 모델의 선택에 따라 달라지기 때문에, 적합한 난류 모델을 결정해야한다 [26]. 사이클론에서는 극심한 난류와 이방성의 특징을 가진 복잡한 내부 유동이 나타난다. RSM(Reynolds stress model)은 이방성의 특징이

나타나는 사이클론에 적합한 난류 모델로 간주되며, 많은 연구에서 그 정확도가 입증되었다 [27,28]. 이 모델에서 Reynolds stress tensor인 $(-\rho\overline{u_i' u_j'})$ 은 수송 방정식에 의해 계산된다. RSM에 대한 수송방정식은 식 (2.4) 로 설명할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\overline{u_i' u_j'}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_k \overline{u_i' u_j'}) = D_{T,ij} + P_{ij} + \phi_{ij} + \varepsilon_{ij} + F_{ij} \quad (2.4)$$

$D_{T,ij}$ 는 난류 확산, P_{ij} 는 응력 생성, ϕ_{ij} 는 압력 변형률, ε_{ij} 는 소산항 그리고 F_{ij} 회전 생성이다.

분산상(입자)의 움직임을 개별적으로 계산하기 위해 DPM(Discrete Phase Model)이 사용된다. DPM은 분산상이 낮은 체적분율(약 10 ~ 12%)을 가질 때 적용할 수 있다. 이때 분산상은 낮은 체적분율을 가지기 때문에, 동적 상호작용은 유체가 입자에 영향을 미치는 단방향 결합으로 가정되며, 입자는 유체의 물리적 특성에 큰 영향을 미치지 않는다. 또한 입자-입자 충돌 및 벽과의 충돌이 혼합물의 운동량 전달에 미치는 영향을 무시할 수 있다. 입자의 운동방정식은 식 (2.5) 로 설명되었다 [29].

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u_i - u_p) + \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} g_i + \frac{\nabla p}{\rho} + F_s \quad (2.5)$$

u_p 는 입자의 속도, $F_D(u_i - u_p)$ 는 단일 질량의 항력, ρ_p 는 입자의 밀도, g_i 는 중력가속도, F_s 는 입자에 작용하는 추가적인 힘이다.

나) 모델 및 경계조건

Fig 2-2는 해석에 사용된 유동영역 모델이며, Table 2-1은 각 모델의 구체적인 수치를 나타낸다. Model 1은 기본적인 고효율 집진기의 이론적 치수비에 따라 원통직경: 원통길이: 원추길이가 1: 1.5: 2.5의 비율로 설계된 모델이다. 이때, Model 1으로 실험과의 비교를 통해 CFD를 이용한 액체-고체 사이클론의 해석법을 검증했다. 또한, hopper 형상의 길이와 직경이 사이클론의 성능에 미치는 영향을 확인하기 위해, 길이연장과 현상변경의 순서로 단계적으로 형상의 변경을 진행했다. Model 2는 hopper 하단의 길이를 연장시킨 모델이고, Model 3는 Model 2와 길이는 동일하지만 직경의 영향을 확인하기 위해 단면적을 갑작스럽게 감소시킨 모델이다. 이때, Model 2의 증가된 길이는 이전 연구에서 사용된 치수비를 기반으로 설계되었다[30]. 총 3가지의 모델의 해석을 진행하여 형상에 따른 사이클론 성능(토출 유량 및 입자분리효율)을 확인하고, 변수의 영향(길이, 직경)을 확인했다.

Table 2 -1 Dimensions of the cyclone models

Geometry	Symbol	Dimensions (mm)		
		Model 1	Model 2	Model 3
Cylindrical length	h		112	
Conical length	H		187	
Inlet diameter	D_i		ϕ 38.5	
Cylindrical diameter	D		ϕ 74	
Vortex finder diameter	D_e		ϕ 36.75	
Conical under diameter	B		ϕ 18.5	
Socket 1 diameter	a	-	ϕ 21.5	-
Socket 1 length	b	-	70	-
Socket 2 diameter	c	-	-	ϕ 30.26
Socket 2 middle diameter	d	-	-	ϕ 6
Socket 2 diameter	e	-	-	70

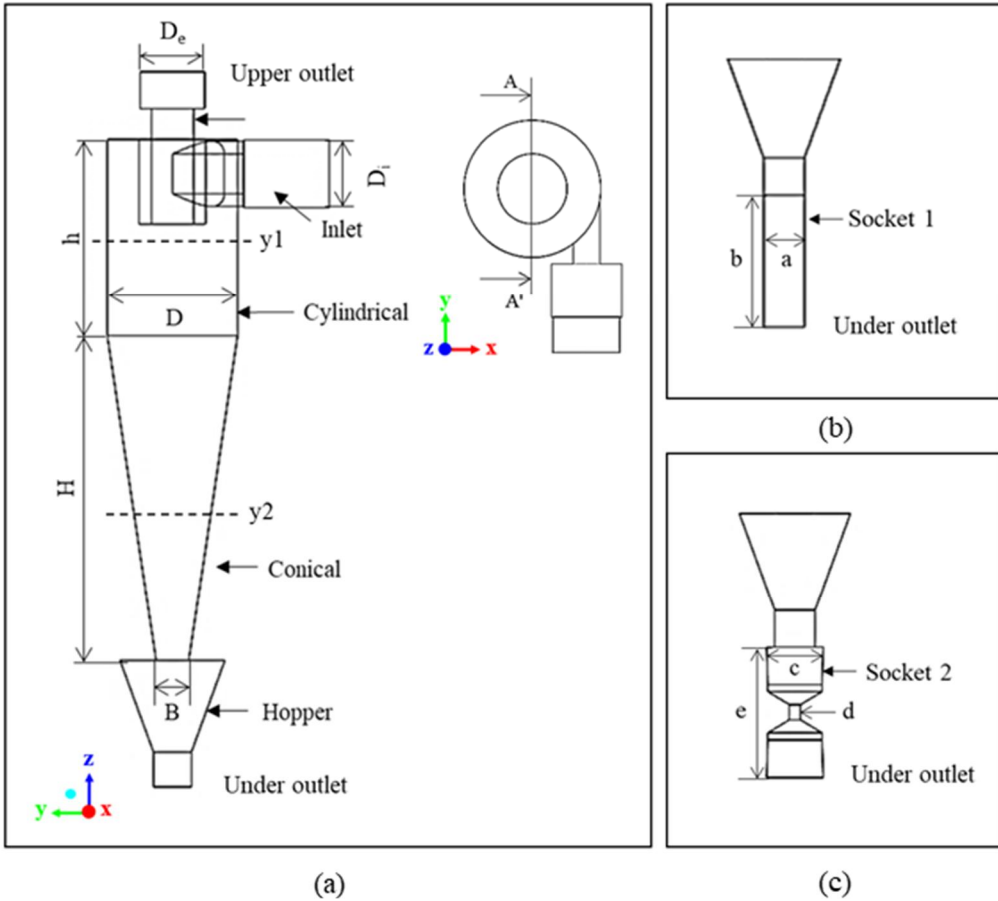


Fig 2 -2 Schematic diagram of cyclone models; (a) Model 1 (basic), (b) Model 2 (added socket 1) and (c) Model 3 (added socket 2).

Fig 2-3는 유동 영역의 형성된 격자구조를 보여준다. 해석 격자는 tetrahedral cells으로 구성되었다. 유한요소해석에 Pre-processing, Solving, Post-processing 기능이 포함된 상용 프로그램인 Ansys 19.2를 사용했다. 형성된 격자의 품질은 해석 결과의 정확성과 수렴성에 영향을 미치는 중요한 요소 중 하나이다. 여기서, Mesh quality는 Aspect Ratio(AR), Orthogonal Quality(OQ), Skewness (S)를 기준으로 평가되었다. Aspect Ratio는 요소 사이의 가로와 세로의 비율을 나타내며, 값이 증가할수록 품질이 저하된다. Skewness는 이상적인 Element (=정삼각형)에 대비한 기울기를 통해 mesh quality를 결정한다. 0에서 1까지의 범위로 평가되며, 0에 가까울수록 좋은 품질의

mesh를 나타낸다. 또한 Orthogonal quality는 인접한 element surface 사이의 각도가 최적의 각도에 얼마나 가까운지를 나타낸다. 0에서 1까지의 범위로 평가되며, 1에 가까울수록 적절한 격자를 나타낸다 [31]. Table 2-2는 각 사이클론 모델에 사용된 Element의 수와 격자 품질을 보여준다. 해석에서 사용되는 Mesh quality는 중요하기 때문에, 세 모델에서 거의 동일하게 적용하여 해석을 진행한 것을 확인할 수 있다.

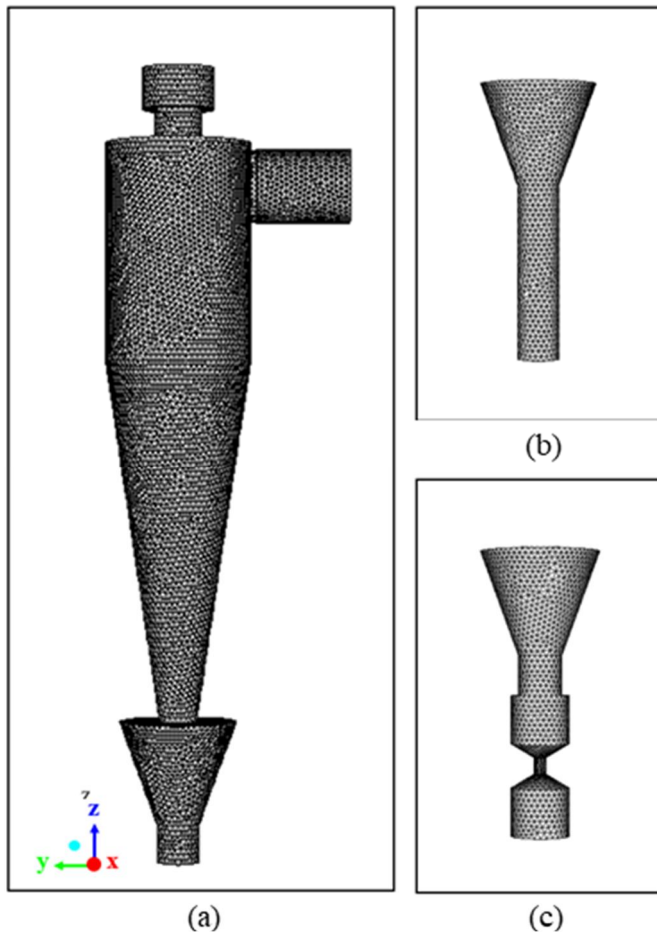


Fig 2 -3 Meshing of the cyclone models; (a) Model 1 (basic), (b) Model 2 (added socket 1) and (c) Model 3 (added socket 2)

Table 2 -2 Mesh quality of cyclone models.

	Model 1			Model 2			Model 3		
Number of Elements	178,578			189,306			205,476		
Mesh quality	AR	OQ	S	AR	OQ	S	AR	OQ	S
	9.75	0.99	0.81	14.88	0.99	0.85	12.49	0.99	0.82

본 연구에서 사이클론은 액체와 고체, 총 두 개의 상이 주입되기 때문에 다상 모델을 사용했다. 분산상의 움직임을 개별적으로 계산하기 위하여 DPM을 사용하고, RSM으로 사이클론 내부에서 발생하는 유체의 난류 영향을 고려했다. 이때 입자의 거동은 유체 흐름을 기반으로 수행된다. 주입되는 유체는 Oil (Density: 998.2 kg/m³, Viscosity: 2.7 cSt)이고, 입자는 알루미늄(Density: 2719 kg/m³)이다. 경계조건은 유체의 inlet velocity를 2.15 m/s, 대기압 조건의 outlet pressure을 1 atm으로, 각 모델에 동일하게 적용했다. 입자 크기에 따라 사이클론 필터 성능을 확인하기 위해, 서로 다른 크기의 입자 (10, 15, 20, 25 μm)를 혼합하여 주입했으며, 이때 입자는 구의 형태로 가정하였다. 분산상의 체적분율은 전체 체적이 차지하는 비율 중 5%와 0.5%로 각각 고려되었다. 5%의 체적분율은 액체 - 고체 사이클론의 해석적 방법 검증을 위해, 0.5% 체적분율은 형상 변화에 따른 사이클론 성능 비교를 위해 사용된다. 표면조도는 벽면에 부딪힐 때의 입자 거동과 연관이 있기 때문에 필터링 성능에 직접적인 영향을 미칠 것으로 예상되며, 실험과 동일한 3.2 μm의 값을 적용했다. Table 2-3는 해석의 경계조건을 보여준다.

Table 2 -3 Boundary conditions

Section	Boundary Conditions	
	Category	DPM
Inlet	Velocity inlet	Reflect
Upper outlet	Pressure outlet	Escape
Under outlet	Pressure outlet	Trapped
Wall	-	Reflect

사이클론의 전반적인 성능을 확인 하기위해 정상 상태의 CFD 모델을 사용했다. 해석을 계산하는 이산화 방식으로는 Pressure-velocity coupling을 사용하였으며, 알고리즘으로는 semi-implicit method for pressure-linked equations (SIMPLE)을 적용했다. 압력을 계산하기위한 보간법으로 PRESTO! (Pressure staggered option)의 방법을 선택하고, Reynolds stress는 first-order upwind로 계산되었다. 마지막으로, 다른 변수는 second-order upwind의 방법을 적용했다. 해석의 수렴은 residual의 값이 10^{-3} 보다 작아지고, 주요 변수(inlet pressure과 outlet flow rate)의 값이 일정하게 나타날 때 수렴되었다고 가정하였다.

다) 실험적 검증 및 결과

고점도 oil을 주입한 액체-고체 사이클론의 해석 방법 검증을 위해 실험을 진행했다. 실험장치는 pump(ACP-1100MF), pressure gauge, flow meter, cyclone 본체, collector tank로 구성된다. 펌프로 1.8 ~ 1.9 bar의 압력을 유지하며 더러운 유체(입자가 섞인 Oil)를 공급하고, 일정 시간동안 상단의 출구(=upper outlet)로 토출되는 유량을 flow meter로 측정했다. 이때, 일정한 압력이 형성되었을 때의 토출 유량으로 해석의 정확성을 검증했다. 또한 토출되는 유체의 일정 체적당 포함된 입자수를 측정하여 Model 1의 입자 분리 효율을 평가하고, 형상을 변화시킨 다른 모델들의 필터 기능을 예측했다. Fig2-4는 실험 장비의 구성도를 나타낸다.

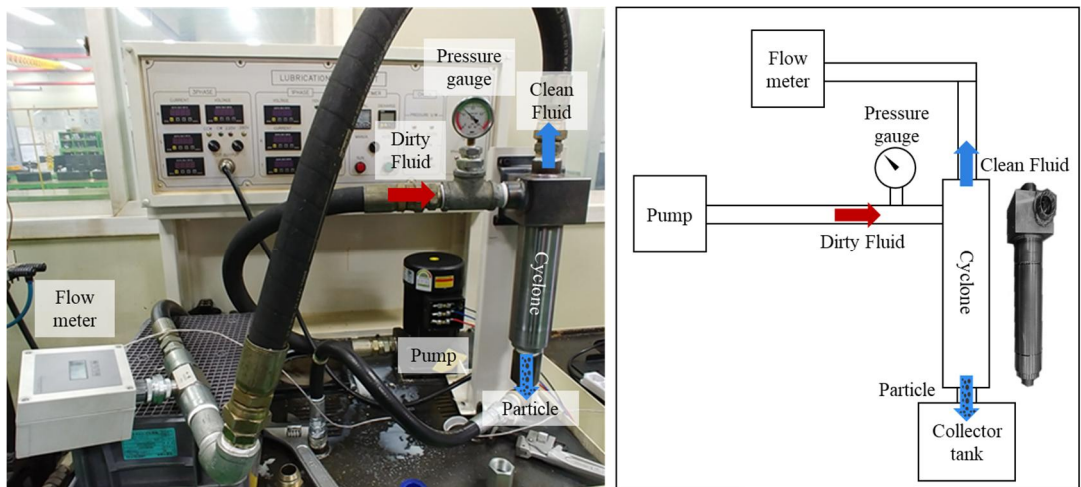


Fig 2 -4 Experimental set up.

해석결과, Fig 2-5 와 Fig 2-6는 5% 입자를 주입했을 때, 전압과 속도의 분포를 각각 보여준다. Fig 2-6의 profile은 사이클론 원통의 중심(=y1)과 원추의 중심의 단면(=y2)을 나타낸 값이다. 압력분포는 중심에서 최소가 되며 반경 방향으로 갈수록 증가한다. 또한 속도분포는 외부 와류와 내부 와류를 나타내며, 속도가 최대가 되는 지점에서 경계가 구별된다. 속도의 최대값은 외부 와류와 내부 와류의

동일 방향 회전으로 인해 발생한다. 이것은 일반적인 사이클론의 압력 및 속도 분포와 유사하게 나타나는 것으로 확인되었다 [32].

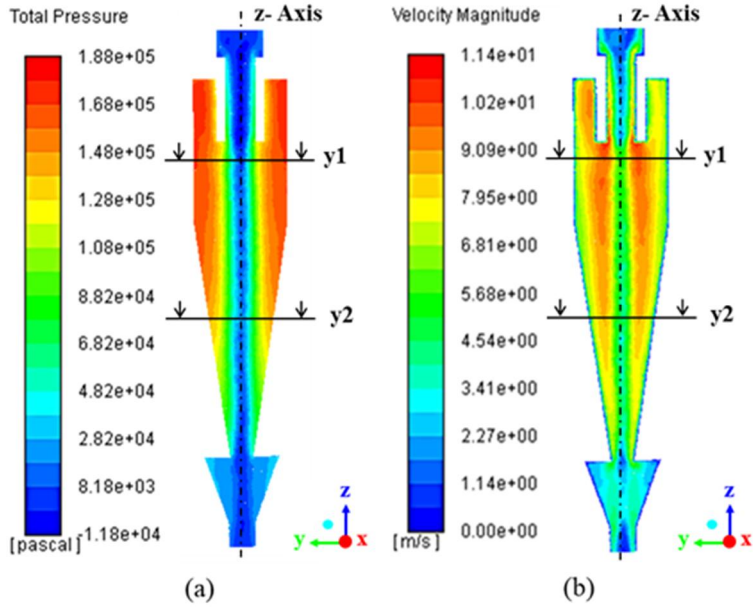


Fig 2 -5 Contour of Model 1 injected with 5 percent particles; (a) Total pressure and (b) Velocity magnitude.

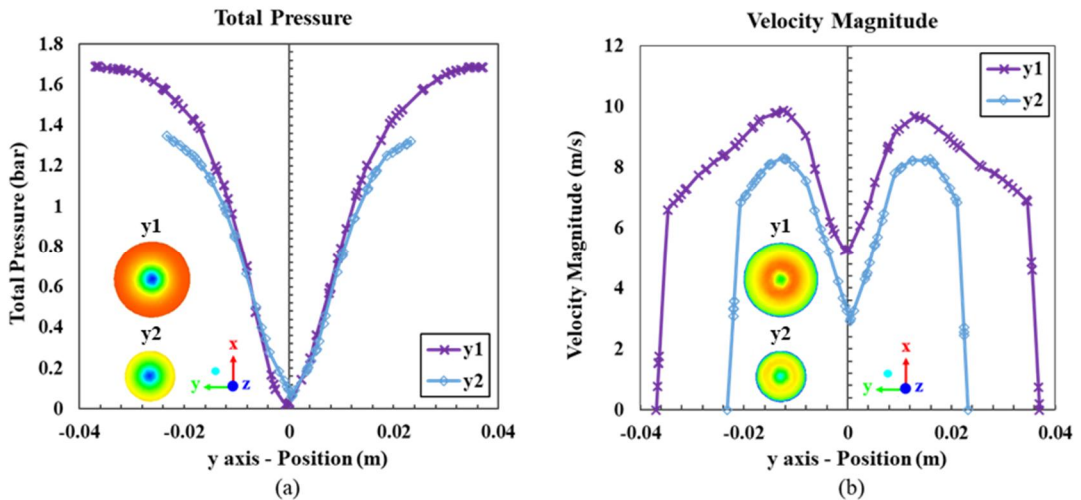
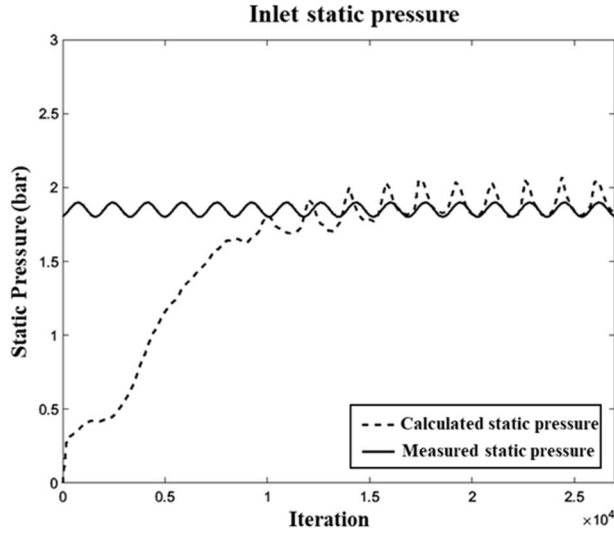
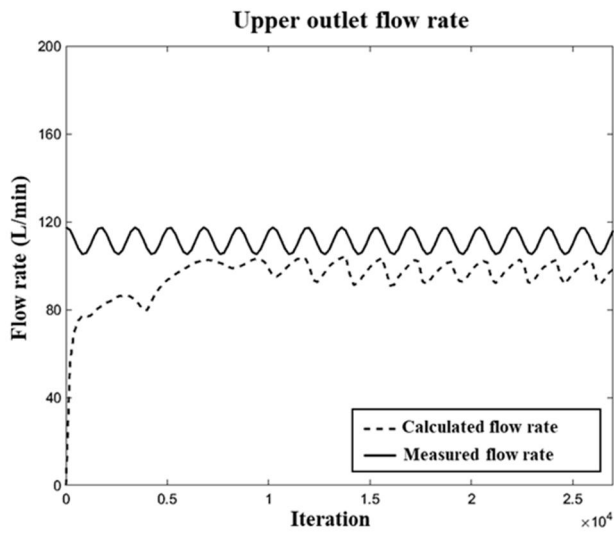


Fig 2 -6 Distribution profile of Model 1 injected with 5 percent particles; (a) Total pressure and (b) Velocity magnitude.

Fig 2-7은 실험과 해석으로 계산된 결과값의 비교를 보여준다. (a)는 inlet에서 형성된 압력이며, (b)는 유사한 압력이 형성되었을 때의 상단의 출구로 빠져나오는 토출 유량의 결과를 나타낸다. Inlet의 압력은 평균 1.89 bar 가 형성되며 실험값과 유사한 유입 압력이 나타나는 것이 확인된다. 1.89 bar의 압력이 형성되었을 때, upper outlet에서 98.27 L/min의 토출 유량이 발생하며 실험과의 오차율은 약 13% 가 나타난다. 실제 실험에서 사용되는 입자의 비율, 형태, 입자-입자 간의 충돌 등 해석에서 고려되지 않은 변수로 인해 오차가 발생하는 것으로 예상된다. 이 비교에서 해석 결과와 실험 결과는 비교적 일치하는 결과를 나타내며, 고점도 oil을 사용한 액체-고체 사이클론의 해석법이 확보되었음을 확인할 수 있다. Table 2-4는 실험과 해석에서 얻어진 평균값을 수치적으로 보여준다.



(a)



(b)

Fig 2 -7 Comparison of calculated and measured results; (a) inlet static pressure and (b) upper outlet flow rate

Table 2 -4 Averaged values obtained by measuring and calculating.

	Inlet Static Pressure (bar)	Upper outlet flow rate (L/min)
Measured	1.85 (± 0.5)	111.27 (± 6.18)
Calculated	1.89 (± 0.08)	98.27 (± 3.74)

3. 성능 특성 비교 및 분석

사이클론 필터 성능은 원심력을 발생시키는 속도 성분인 tangential velocity 와 입자를 운반하는 속도 성분인 axial velocity의 영향을 받아 결정된다. 해석결과, tangential velocity의 분포는 세 모델에서 유사하게 나타난다. 이는 hopper 하단의 형상이 tangential velocity에 거의 영향을 미치지 않음을 나타내며, 작용하는 원심력 또한 비슷할 것으로 예측할 수 있다. 결론적으로 hopper의 형상이 변경될 경우, 사이클론의 지배적인 속도였던 tangential velocity는 입자의 필터 성능에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있다. Fig 2-8 와 Fig 2-9는 tangential velocity의 Contour 와 profile을 보여준다.

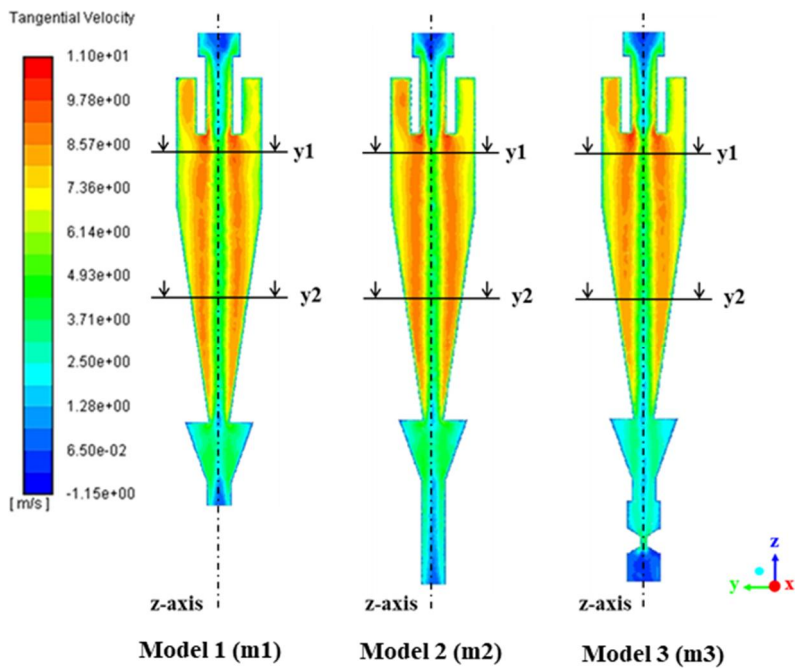
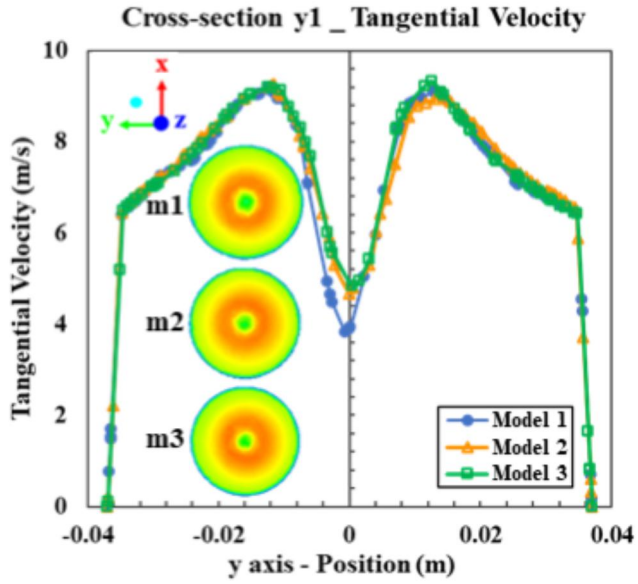
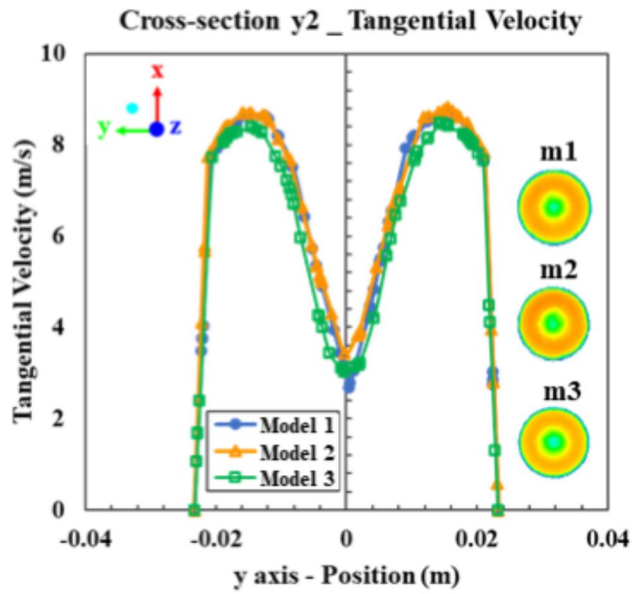


Fig 2 -8 Contour of tangential velocity for each cyclone model



(a)



(b)

Fig 2-9 Tangential velocity profile y1 (cylindrical center) and y2 (conical center);
 (a) Tangential velocity at y1 and (b) Tangential velocity at y2.

또한 입자가 수집 장치로 이동하는 데에는 axial velocity가 중요하다. Hopper 하단으로 빠져나가는 axial velocity의 증가 시, 내부 와류로 인한 입자의 재유입을 막아 필터 성능이 향상된다 [33]. Fig 2-10 과 Fig 2-11은 Axial velocity의 Contour 와 profile을 보여준다. Fig 2-10의 profile은 axial velocity의 차이가 나타나는 중심영역의 평균값을 나타낸 것이다. Model 1 과 Model 2를 비교했을 때, 하단의 길이를 연장한 Model 2에서는 큰 차이가 나타나지 않는다. 그러나 Model 3에서 모래시계 형상의 socket을 추가했을 때는 axial velocity가 크게 증가하는 것이 확인된다. 이것은 단면적의 감소로 상향흐름의 갑작스러운 집중이 발생하기 때문이다. Axial velocity는 hopper 하단의 기하학적 영향을 받으며, 길이보다는 직경의 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

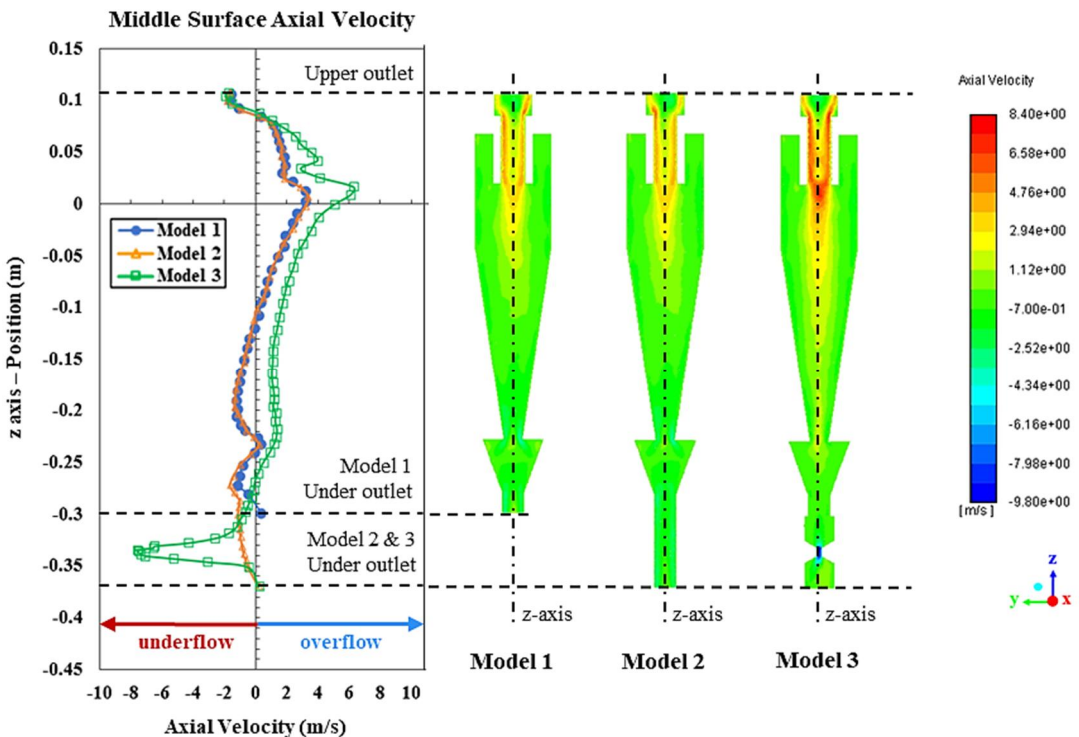


Fig 2-10 Contour and profile of Axial velocity for cyclone models

사이클론의 성능은 토출 유량과 입자 분리 성능 두 가지를 기준으로 평가되었다. Table 2-5은 각 모델의 토출 유량의 비교를, Fig 2-11는 입자 크기에 따른 사이클론 필터 성능 비교를 나타낸다. 토출 유량은 Model 1 과 Model 2에서 비슷하지만, Model 3에서는 증가한다. 토출 유량은 속도의 영향을 받으며, 기존 사이클론의 지배적인 속도값인 *tangential velocity*는 각 모델에서 유사하게 나타나므로, *axial velocity*의 영향을 많이 받았다는 것을 알 수 있다. 분리 효율은 입자 추적 방법에 따라, trapped 된 입자 (the particle trapped upper outlet)와 released 된 입자 (from inlet)의 비율의 계산으로 얻을 수 있었다 [34]. Fig 2-11 (a)에서 사이클론 입자 분리 효율은 Model 1에 비해 Model 2에서 전체적으로 증가하고, Model 3에서 감소된다. 입자 크기가 작아질수록 필터의 기능은 저하되며, 모델마다 차이가 증가하는 것이 확인되었다. 길이 연장 모델인 Model 2는 Model 1에 비해 hopper 하단에서 빠져나가는 속도를 증가시켜 입자의 재유입을 막아 필터 기능이 향상되었다. 또한, Model 3에서도 Model 2와 동일하게 길이를 연장시켰지만, 갑작스러운 단면적의 감소로 내부 와류의 *axial velocity*가 증가하여 관성이 작은 입자는 hopper 하단에 도달하기 전 상향 흐름에 의해 유체와 함께 토출되어 필터 기능의 저하가 나타난다. Fig 2-11 (b)는 토출 된 100mL 유체에 포함된 입자의 수를 실험모델인 Model 1에 기반하여 예측한 것이다. 입자오염도는 NAS (National Aerospace Standard) 1638에 따라 세 모델이 동일하게 class 9의 범위에 들어가는 것이 확인되었다 (class #: particle size (μm): number of particles; class 8: 5-15: 67000, 15-25: 11400, 25-50: 2025; class 9:5-15: 28000, 15-25: 22800, 25-50: 4050;) [35]. 결론적으로 Model 1과 비교했을 때, Model 2의 토출량은 비슷하지만 필터 기능은 전체적으로 향상되었기 때문에 미세 입자를 필터링 할 경우, Model 2 가 더 적합하다. 반면에 Model 3에서는 토출량이 기존 모델 대비 1.37배 증가했지만, 입자 크기가 작아질수록 필터 성능이 저하되므로, 20 μm 이하의 미세 입자를 필터링 할 경우 적합하지 않다는 것을 확인할 수 있다.

Table 2 -5 Comparison of upper outlet flow rate for cyclone models 1, 2 and 3.

	Upper outlet flow rate (L/min)	(Inlet/ Upper outlet)*100 (%)
Model 1	100.93	67.29
Model 2	101.30	67.53
Model 3	137.93	91.95

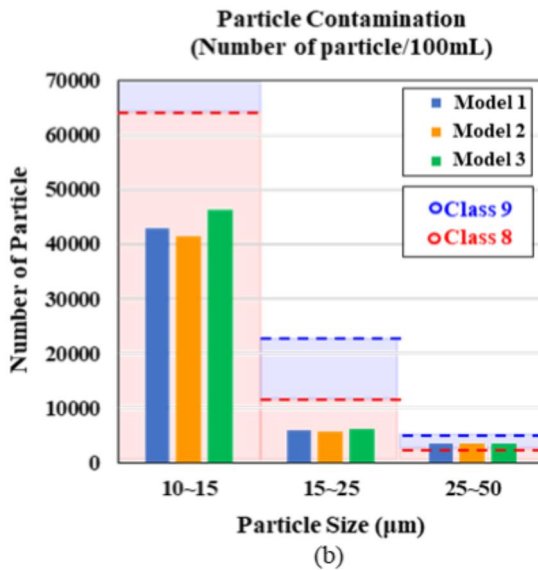
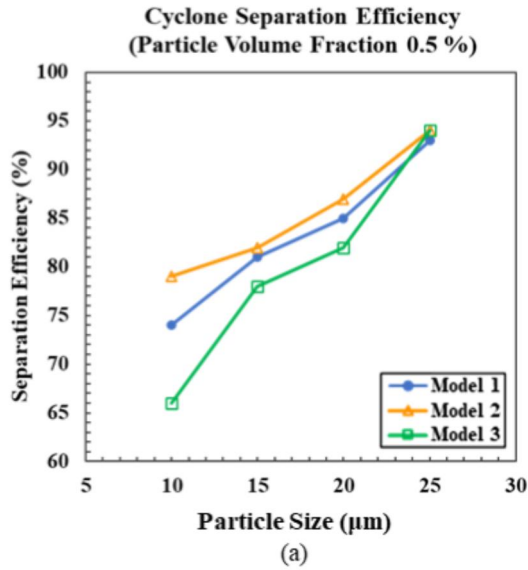


Fig 2 -11 Comparison of cyclone filter performance; (a) Separation efficiency and (b) Number of particles contained in discharge fluid (100 mL)

제 3 장 BGA의 열-기계적 피로 수명 예측 (다중)

1. BGA의 열-기계적 피로 원리

BGA패키지란 solder ball을 이용해 표면 실장을 진행하여 칩과 기판을 기계적, 전기적으로 연결하는 패키지의 형태이다. 이때, 패키지는 서로 다른 열팽창계수(CTE)를 가지고 있는 재료로 구성된다. 고온과 저온의 열하중이 반복적으로 인가되면, 각 재료의 열팽창계수 차이에 의해 열변형이 발생한다. 반복되는 사이클에 의해 열응력이 누적됨에 따라 피로에 노출되게 되며, 이를 열-기계적 피로라고 한다. 결과적으로 시간이 지남에 따라 solder에서 균열이 형성되며, 최종적으로 파단이 발생하여 전자기기의 전체 불량률의 원인이 된다. Fig 3-1은 solder joint의 열-기계적 피로 원리의 개략도를 나타낸다.

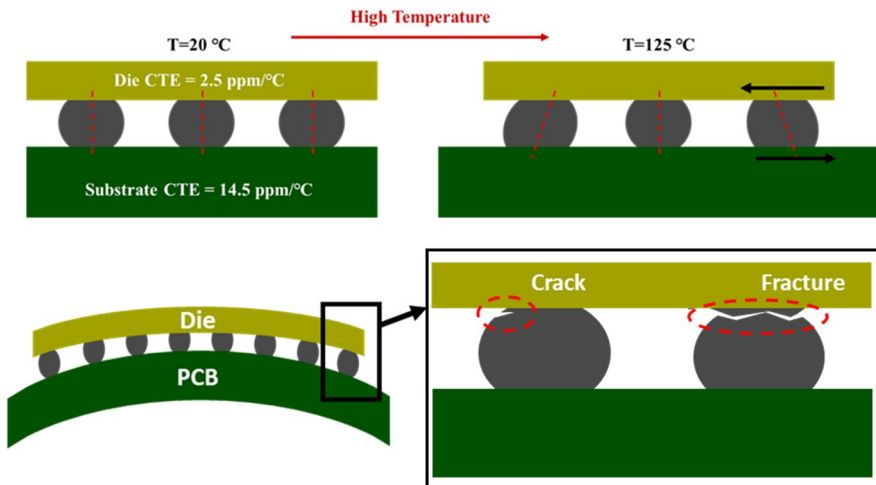


Fig 3 -1 Solder thermal-mechanical fatigue principle

2. 해석진행

가) 해석 모델 및 경계조건

패키지는 대칭구조 이므로 해석 시간을 줄이기 위해 전체의 1/4 만을 모델링했다. 각 부분은 Mold compound, Silicon die, Die attachment, Solder mask, BT substrate, Copper pad, Solder joint, PCB(Printed Circuit Board)로 구성된다. 패키지의 서로 다른 구성 요소의 접합면에서 bonded 접촉 조건을 적용했다. 대칭면의 축에 따라 대칭 경계조건을 적용했으며, 강체의 움직임에 의한 영향을 무시하기 위해 PCB 하단 표면의 중심 Node에 대해 Fixed support ($\Delta x, y, z = 0, \text{rotation} = 0$)의 구속 조건을 적용했다. 해석의 격자는 Hexa 격자로 구성하였으며, 열응력이 집중될 것으로 예상되는 접합부와 최외각 solder에는 더욱 세밀하게 격자를 생성했다. 해석에 사용된 총 Nodes 수는 743,662 개, Elements 수는 174, 691개로 구성된다. 해석은 상용프로그램인 Ansys workbench 19.2 mechanical을 사용했다. Fig 3-2는 해석에 사용된 모델과 격자를 나타내며, Table 3-1은 패키지의 구체적인 치수를 나타낸다 [36].

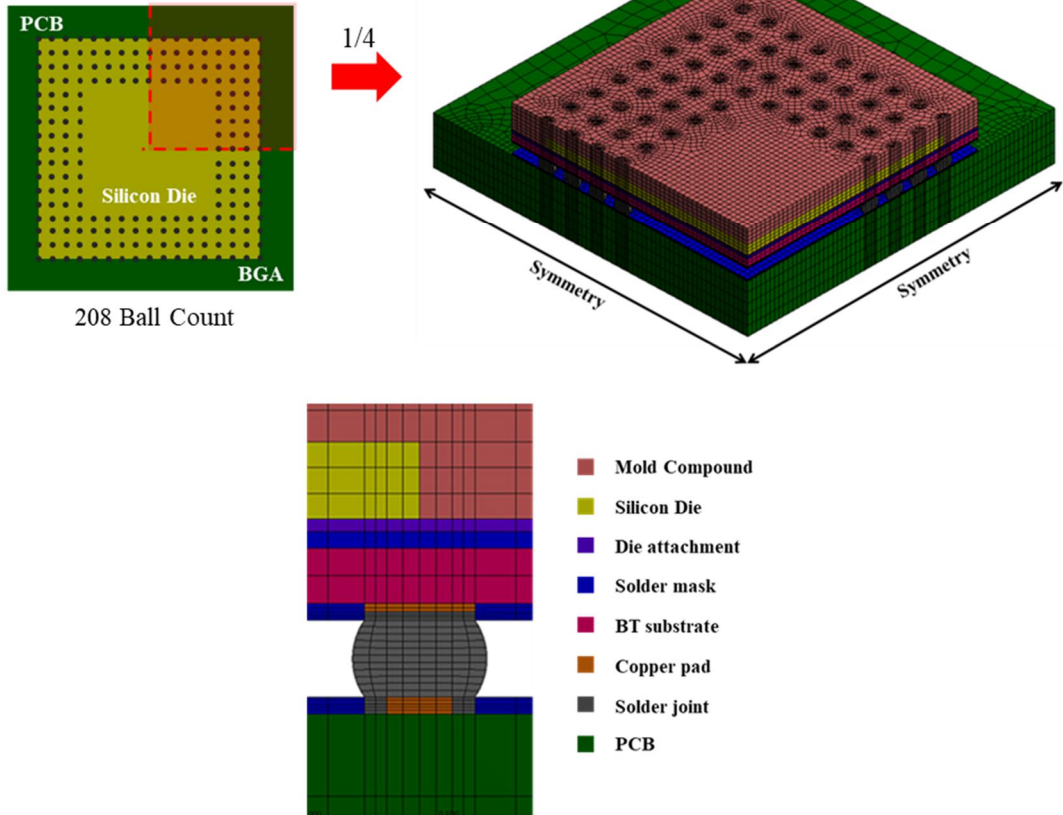


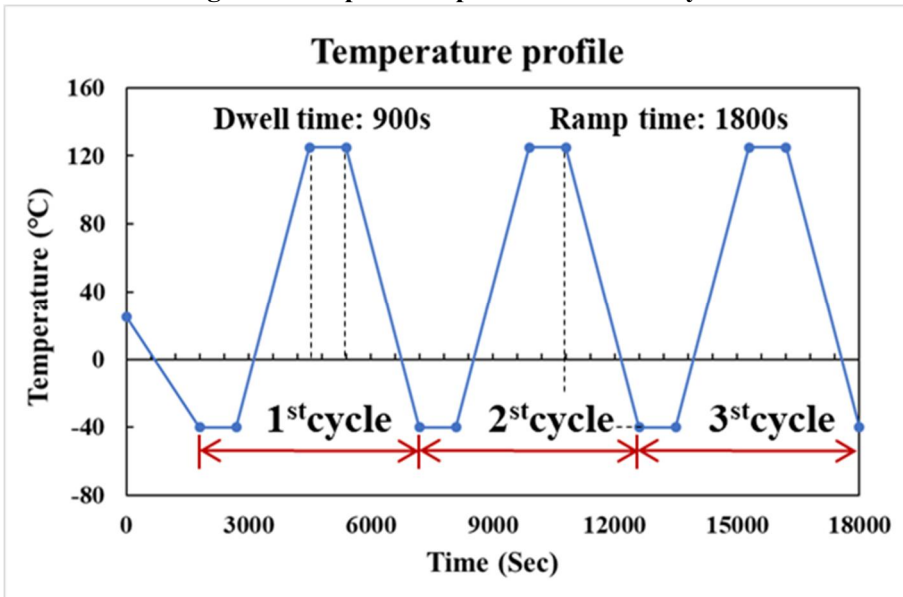
Fig 3 -2 Modeling of BGA and details of the solder joint.

Table 3 -1 Dimensional details for package

Parameter	Dimension (mm)	Parameter	Dimension (mm)
PCB body size	15 x 15	Mold thickness	0.73
Die size	12.7 x 12.7	Die attach thickness	0.05
Die thickness	0.28	Solder mask thickness	0.06
Ball pitch	0.8	BT substrate thickness	0.2
Ball interface	0.4	Copper pad thickness	0.025

자동차에 사용되는 반도체 패키지를 기준으로 가속수명시험을 하기 위해 -40 ~ 125℃의 열하중을 전체 모델에 적용하였다. 해석이 시작되는 시점의 온도는 상온인 25℃로 가정했다. 1800s의 시간동안 25℃에서 -40℃까지 온도를 낮춘 후, 안정화된 plastic work를 도출하기 위해 한 사이클당 5400s씩 총 세 사이클의 열 하중이 반복되었다. 이때, Dwell time 은 900s이며 Ramp time은 1800s의 시간이 각각 적용되었다. Fig 3-3은 해석에 적용된 온도 사이클을 나타낸다.

Fig 3-3 Temperature profile of thermal cycle



나) 물성 및 재료 모델 선정

Solder joint와 직접 접하는 부분인 BT substrate와 PCB는 방향성에 따른 재료의 변형을 고려하고, 온도에 의존하는 이방성 재료 모델을 사용하였으며, 그 외 다른 구성 요소는 등방성 재료 모델을 사용했다. Table 3-2는 열-기계적 피로해석에 사용된 재료 물성을, Table 3-3은 온도에 의존하는 solder의 탄성계수를 나타낸다.

Table 3-2 Material property for package

Material	Elastic Modulus (GPa)	Shear Modulus (GPa)	Poission Ratio	CTE (ppm/°C)
Copper pad	129.0	-	0.34	16.3
Silicon die	163.0	-	0.28	2.5
Die attachment	6.77	-	0.35	83.6
Solder mask	3.10	-	0.30	30
Mold compound	23.52	-	0.25	10
PCB	19.30 (xy, -40°C)	8.71 (xy, -40°C)	0.11 (xy)	14.5 (xy)
	13.20 (xy, 125°C)	5.95 (xy, 125°C)		
	8.48 (z, -40°C)	3.80 (xz,yz; -40°C)	0.39 (xz, yz)	67.2 (z)
	5.84 (z, 125°C)	2.60 (xz,yz 125°C)		
BT substrate	17.89 (xy)	8.06 (xy)	0.11 (xy)	12.4 (xy)
	7.85 (z)	2.82 (xz, yz)	0.39 (xz, yz)	57 (z)

Table 3-3 Temperature dependent mechanical properties

Temperature (°C)	63Sn37Pb	SAC305	42Sn58Bi
	Elastic Modulus (GPa)		
25	4.34	38.00	18.30
50	14.55	35.00	16.10
75	22.72	32.00	12.30
100	13.44	29.00	10.65

Solder는 점소성의 특징을 가지고 있으며, 온도에 큰 영향을 받는다. 주기적인 열 사이클이 주어질 때, solder joint의 점소성 거동을 표현하기 위해 많은 열-피로 해석에서 Anand 모델이 사용된다. 독립적인 항복 조건과 loading/unloading의 기준을 정하지 않아도 계산할 수 있다는 이점을 가지며, 소성(Plastic)과 크리프(Creep) 변형률의 조합으로 비탄성 변형률(inelastic strain rate)을 정의하는 통합 구성 모델이다. 이 모델은 응력 방정식, 흐름 방정식, 진화 방정식을 사용하여 계산된다 [37]. 단축 하중이 주어질 때, 응력 방정식은 (3.1) 과 같이 주어진다.

$$\sigma = cs; c < 1 \tag{3.1}$$

s 는 내부 변수이고 c 는 온도에 대한 변형률의 함수이다. c 는 (3.2) 와 같이 표현할 수 있다.

$$c = c(\dot{\epsilon}_p, T) = \frac{1}{\xi} \sinh^{-1} \left\{ \left[\frac{\dot{\epsilon}_p}{A} e^{\left(\frac{Q}{RT}\right)} \right]^m \right\} \tag{3.2}$$

여기서, $\dot{\epsilon}_p$ 는 plastic strain rate, T 는 absolute temperature, ξ 는 multiplier of stress, A 는 pre-exponential factor, Q 는 activation energy, R 은 universal gas constant 그리고 m 은 strain rate sensitivity를 나타낸다.

(3.2)의 방정식을 (3.1)에 대입하여 전개했을 때, 응력의 방정식은 (3.3)과 같이 표현된다.

$$\sigma = \frac{s}{\xi} \sinh^{-1} \left\{ \left[\frac{\dot{\epsilon}_p}{A} e^{\left(\frac{Q}{RT}\right)} \right]^m \right\} \tag{3.3}$$

재배열하여 plastic strain rate ($\dot{\epsilon}_p$)를 계산하는 흐름 방정식은 (3.4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_p = \frac{d\epsilon_p}{dt} = A e^{-\left(\frac{Q}{RT}\right)} \left[\sinh \left(\xi \frac{\sigma}{s} \right) \right]^{\frac{1}{m}} \quad (3.4)$$

또한, 내부 변수 s 에 대한 진화 방정식의 미분 형식은 (3.5)의 형식으로 가정된다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= h(\sigma, s, T) \dot{\epsilon}_p \\ \dot{s} &= \left[h_0 \left(1 - \frac{s}{s^*} \right)^a \text{sign} \left(1 - \frac{s}{s^*} \right) \dot{\epsilon}_p \right]; a > 1 \end{aligned} \quad (3.5)$$

여기서, $h(\sigma, s, T)$ 는 dynamic hardening 과 recovery 과정과 연관이 있다. 변수 h_0 는 hardening constant를, a 는 Strain rate sensitivity of hardening를 의미한다. s^* 은 (3.6)과 같이 표현된다.

$$s^* = \hat{s} \left[\frac{\dot{\epsilon}_p}{A} e^{(Q/RT)} \right]^n \quad (3.6)$$

\hat{s} 는 coefficient for deformation resistance saturation value이고, n 은 deformation resistance value이다. 내부 변수 s 를 계산하기 위해 방정식을 통합하면 (3.7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s = \hat{s} \left[\frac{\dot{\epsilon}_p}{A} e^{(Q/RT)} \right]^n - \left[\frac{\left(\hat{s} \left[\frac{\dot{\epsilon}_p}{A} e^{(Q/RT)} \right]^n - s_0 \right)^{(1-a)}}{+(a-1) \left\{ h_0 \left(\hat{s} \left[\frac{\dot{\epsilon}_p}{A} e^{(Q/RT)} \right]^n \right)^{-a} \right\} \dot{\epsilon}_p} \right]^{\frac{a}{1-a}} \quad (3.7)$$

결론적으로 비탄성 변형률을 구하기 위해서는 총 9개의 재료상수 ($s_0, Q/R, A, \xi, m, h_0, \hat{s}, n, a$)가 필요하다 [38]. 여기서, 재료상수는 온도 및 변형률 속도에 대한 stress-strain test로 얻어진다. 재료의 특성은 히스테리시스 곡선에 의해 표현할 수 있다. Table 3-4는 해석에 사용된 각 solder의 Anand parameter 값이다.

Table 3-4 Anand Model Parameters

Constant Number	Anand Constant	Unit	63Sn37Pb [39]	SAC305	42Sn58Bi [40]
1	s_0	MPa	12.4	21.0	Parameter
2	Q/R	1/K	9400	9320	6618
3	A	1/sec	4.0E+06	3501	199.4
4	ξ	-	1.5	4	5
5	m	-	0.303	0.25	0.37
6	h_0	Mpa	1379	1.8E+05	19294
7	\hat{s}	Mpa	13.8	30.2	29.6
8	n	-	0.07	0.01	0.089
9	a	-	1.3	1.78	1.12

42Sn58Bi	Temperature (°C)	s_0 (MPa)
	25	36.3
50	33.8	
75	28.8	
100	26.4	

다) 해석 결과 분석 및 검증

사이클의 반복에 따라 solder는 과단이 될 때까지 일정한 누적 damage를 받는다. 이때, 누적되는 damage를 plastic work라고 한다. 따라서, 해석의 결과는 누적된 plastic work를 기준으로 분석되었다. Fig 3-4는 각 solder 소재 별 누적된 plastic work를 나타내며, (a)는 63Sn37Pb, (b)는 SAC305, (c)는 42Sn58B의 소재이다. 이때, SAC305는 solder의 열-기계적 피로해석의 방법을 확보하기 위해 기존 연구의 실험값과 비교를 진행한 검증 모델이다.

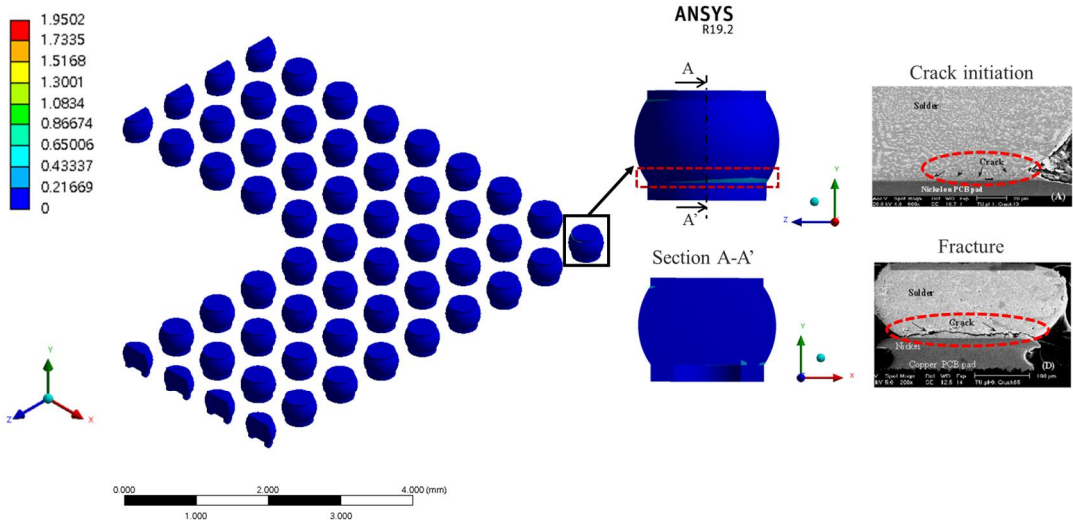
해석에서 주기당 누적된 평균 plastic work는 (3.8)의 공식으로 계산되었다.

$$\Delta W_{avg} = \frac{\sum \Delta W_e \cdot V_e}{V_e} \quad (3.8)$$

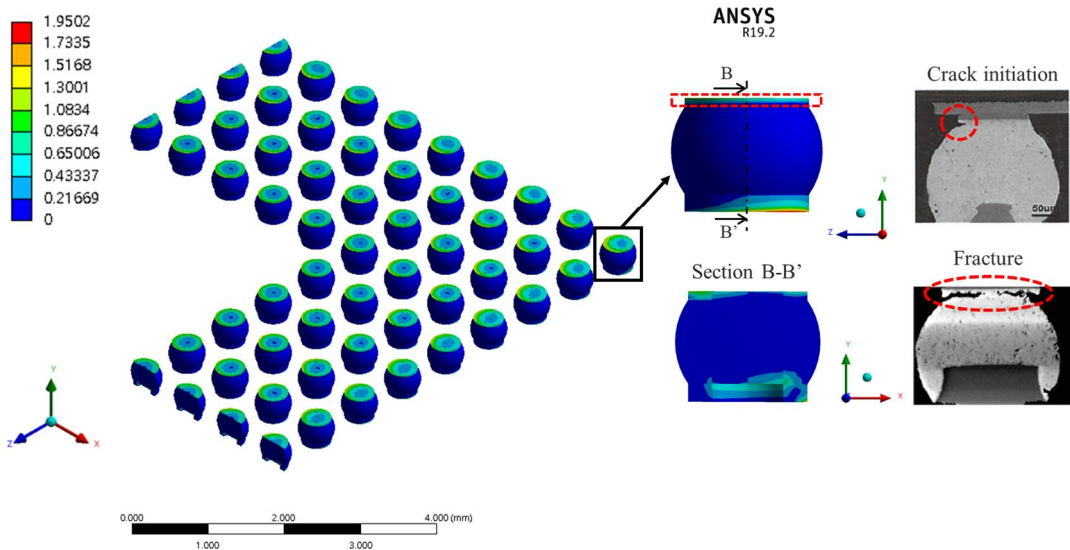
여기서, ΔW_{avg} 은 주기당 누적된 plastic work의 평균값이며, ΔW_e element에서 누적된 plastic work 그리고 V_e 는 각 element의 체적을 나타낸다.

누적된 plastic work의 양상은 전체적으로 접합부인 상단과 하단에서 집중되게 나타나며, 가장 바깥쪽 위치의 solder (=critical solder)에서 최대값이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 검증을 위한 모델인 Fig 3-4 (b)에서 critical solder의 plastic work의 분포는 PCB와 접하는 solder 하단에서 최대값이 나타났지만, BT substrate와 접하는 상단에서 더 고르게 분포하고 집중된 양상이 보이므로 상단의 일정 부분을 취하여 누적된 plastic work의 평균을 계산했다. 이전 연구에서의 실험값과 해석 결과를 비교했을 때 실험에서 0.233 MPa, 해석에서 0.221MPa의 plastic work가 발생했다. 오차율은 약 0.9 %로 거의 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 해석이 올바르게 진행되었음을 검증할 수 있다. Table 3-5는 해석법 검증을 위한 SAC305 solder의 실험과 해석의 결과값의 비교를 수치적으로 나타낸다. Fig 3-4의 (a), (c)는 검증된 방법으로 해석을 진행한 모델이다. 동일한 위치인 solder의 하단에서 plastic work가 집중되는 것이 확인되며, 각 소재의 피로 수명 예측을 위해 일정한 하단의 영역을

취하여 누적된 plastic work의 평균을 계산했다. 각 Solder 소재에 따른 누적된 plastic work의 양상은 SAC305에서 가장 크게 나타나며 58Sn42Bi, 63Sn37Pb 순으로 감소하는 것을 시각적으로 확인할 수 있다.



(a)



(b)

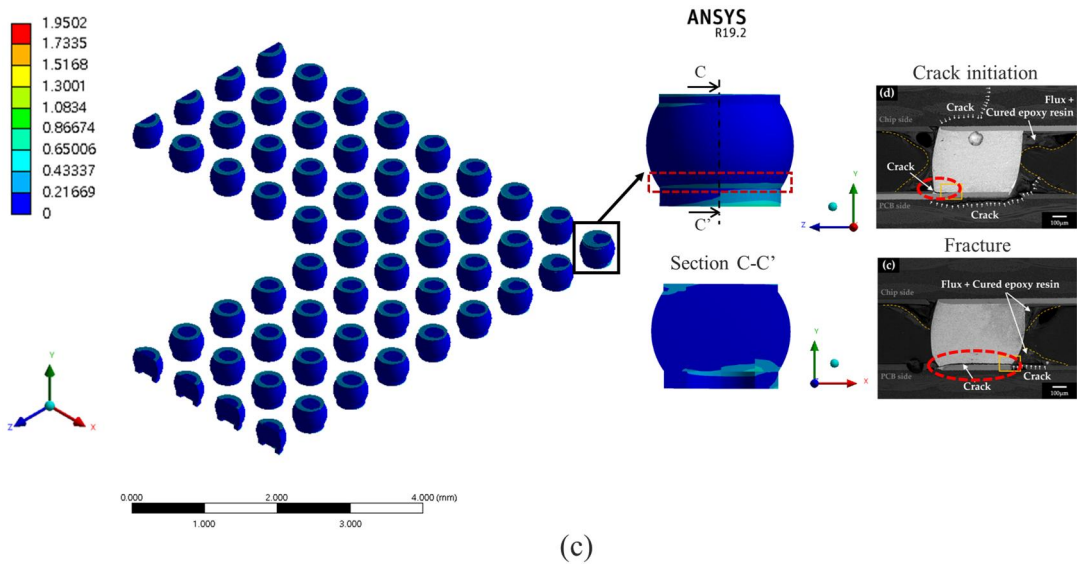


Fig 3 -4 Contours of Accumulated plastic work for solders (MPa); (a) 64Sn37Pb[41], (b) SAC305 [36,42] and (c) 42Sn58Bi [43]

Table 3 -5 Correlation of Finite Element Predictions and Experimental Data for SAC 305

	Experimental [36]	Numerical	Difference (%)
ΔW_{avg} (MPa)	0.223	0.221	0.9

라) 피로 수명 예측 및 고찰

Darveaux 모델은 주기적인 열하중이 인가되는 동안의 변형률 에너지 밀도 또는 plastic work를 기반으로 피로 수명을 예측하는 모델이다 [43]. 이 모델의 피로 수명은 초기 균열이 생기는 사이클 수와 파단이 일어날 때의 사이클 수의 합으로 계산된다.

피로 수명은 다음과 같은 수식으로 계산할 수 있다.

$$N_0 = K_1(\Delta W_{avg})^{K_2} \quad (3.9)$$

$$\frac{da}{dN} = K_3(\Delta W_{avg})^{K_4} \quad (3.10)$$

$$N_f = N_0 + \frac{a}{da/dN} \quad (3.11)$$

여기서, N_0 는 균열이 발생하게 되는 사이클 수이며, da/dN 은 균열의 성장률, a 는 solder joint 지름 그리고 N_f 는 solder 접합부가 파단 될 때의 사이클 수를 나타낸다. K_1, K_2, K_3, K_4 는 Darveaux의 실험으로 얻은 재료상수로, solder joint의 형태, 두께, 그리고 해석 방법 등에 의해 결정된다 [44]. Plastic work 가 계산된 solder joint 범위의 형태와 두께가 일치하는 63Sn37Pb와 42Sn58Bi의 피로 상수는 Darveaux model 기준에 의해 동일하게 사용되었으며 [45], 다른 형태와 두께를 가지는 SAC305는 기존 연구에서 실험적으로 구해진 피로 상수 값을 적용했다 [36]. Table 3-6은 피로 수명 예측을 위해 해석에 사용된 Darveaux의 재료 상수를 나타낸다.

Table 3 -6 Material constants for the Darveaux model.

	Layer Thickness (μm)	K_1 (Cycles/MPa ^{K₂})	K_2	K_3 (mm/Cycle- MPa ^{K₄})	K_4
63Sn37Pb	25.4	11.61	-1.52	0.020	0.98
SAC305	20	37.97	-2.8	0.038	3.41
42Sn58Bi	25.4	11.61	-1.52	0.020	0.98

반도체 패키지의 피로수명 예측의 기준은 활용 분야에 따라 다르게 적용되어야 한다. 기존의 전자기기에서는 초기 균열이 시작되는 사이클 수와 파단이 일어날 때의 사이클 수의 합으로 피로 수명을 계산했다. 그러나, 자동차에서 사용되는 패키지의 경우 생명과 직결되기 때문에 더욱 엄격한 제한이 필요하며, 초기 균열이 발생하게 되는 사이클 수인 N_0 에 의해 평가되어야 한다. Table 3-7은 소재에 따른 solder의 피로 수명 예측의 결과를 보여준다. 피로수명은 63Sn37Pb 소재의 solder에서 가장 우수하게 나타난다. 초기 균열까지의 사이클 수가 높을 뿐만 아니라, 다른 소재의 solder 대비 매우 낮은 균열 성장률으로 인해 파단되기까지의 사이클 수 또한 높게 나타나는 것이 확인되었다. SAC305 소재는 초기 균열이 시작되는 사이클의 수는 63Sn37Pb와 비슷하지만, 높은 균열 성장률로 인해 파단되기까지의 사이클 수는 42Sn58Bi보다 낮게 나타난다. 전체적인 피로 수명의 경향은 42Sn58Bi, SAC305, 63Sn37Pb의 순으로 증가하며, 저온계 lead-free 솔더인 42Sn58Bi은 세 가지의 소재 중 가장 열에 취약함을 확인할 수 있다. 따라서, 해석결과에서 나타난 것과 같이 저온계 솔더인 42Sn58Bi은 고성능 자동차 패키지에 적용하기 어렵다는 것을 예측할 수 있다.

Table 3 -7 Life predictions for 63Sn37Pb, SAC305 and 42Sn58Bi solder joints

	63Sn37Pb	SAC305	42Sn58Bi
ΔW_{avg} (MPa)	0.026	0.221	0.07
N_0	2996	2605	663
N_f	7345	1815	2780
da/dN (μm)	0.054	0.220	0.144
Total	10341	4420	3443

제 4 장 결론

유한요소해석은 문제에 대한 예측 분석이 가능하고, 복잡한 물리적 변형까지도 모사할 수 있는 이점을 가진 공학적 문제를 해결하기 위해 사용되는 효과적인 도구 중 하나이다. 실제 물리적인 문제를 해결하기 위한 해석의 과정은 크게 전처리, Solving, 후처리의 과정으로 나누어진다. 이 중 전처리 단계는 해를 구하기 위한 유한요소를 모델링하고 특성을 정의하는 준비과정으로, 모델의 선정이나 재료의 물성 입력 및 경계조건 설정이 이루어지므로 정확성 향상을 위한 해석법을 확보하는 것에 중요한 단계라고 할 수 있다. 본 연구에서는 유동의 가시화가 가능하고, 열-기계적 특성을 표현 가능한 유한요소해석의 방법을 사용하여 전처리 단계에 중점을 둔 해석 전략에 따라 두 가지의 사례연구를 진행하고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 고점도 oil을 사용한 액체-고체 사이클론의 성능 특성화이다.

(1) 사이클론의 필터링 성능 및 토출 유량의 해석결과는 다상 과 난류모델의 영향을 많이 받는다. 따라서, 입자의 거동을 더욱 사실적으로 표현할 수 있는 DPM 모델을 사용하고, 이방성 vortex의 흐름을 나타낼 수 있는 RSM 난류 모델을 사용하여 해석을 진행했다.

(2) 본 연구에서는 실험과 해석의 토출 유량을 비교해, 고점도 oil을 사용했을 때 액체-고체 사이클론의 해석법을 검증했다.

(3) 형상변화는 내부 유동에 직접적인 영향을 주기 때문에 형상에 따른 성능 특성화는 중요하다. 따라서, hopper 하단의 형상을 변화시키고 형상에 따른 사이클론 성능을 속도 분포를 중점으로 분석을 진행했다. 이를 통해 hopper의 형상변화는 원심력을 결정짓는 속도인 tangential velocity에는 거의 영향을 주지 않으며, 입자를 운반하는 속도인 axial velocity에 큰 영향을 주는 것이 확인되었다.

(4) Model 1 과 Model 2는 토출 유량은 비슷하게 나타나지만 Model 2에서 필터 성능이 향상되었기 때문에, 미세 입자를 필터링하는 경우 Model 2가 더 적합함을

알 수 있다. 반면, Model 3의 토출 유량은 기존 모델인 Model 1대비 1.37 배 증가하지만 입자 크기가 작아짐에 따라 필터 성능이 저하되어 미세 입자의 필터링에는 적합하지 않다.

(5) 향후, 필터링 하기위한 입자 크기의 기준에 따라 사이클론의 기하학적 형상의 최적화를 고려해야한다.

둘째, BGA의 열-기계적 피로수명 예측이다.

(1) Solder joint는 점소성을 특성을 가지기 때문에, 해석에서 적절한 재료 물성을 정의하는 것이 중요하다. 따라서, 소성 변형률과 크리프 변형률까지 고려한 Anand model이 재료 물성에 사용되었다.

(2) SAC305 소재의 해석으로 계산되어진 누적된 plastic work의 평균과 이전 연구에서의 결과값과의 비교를 통해 해석법의 검증이 이루어졌다.

(3) 추가적으로, Darveaux 모델을 사용해 세 가지 소재(63Sn37Pb, SAC305, 42Sn58Bi)의 피로수명을 예측했다. 그 결과, Pb 가 함유된 63Sn37Pb의 소재가 가장 높은 피로수명이 나타나며 신뢰성이 우수하다는 것을 알 수 있다. 반면 저온계 소재인 42Sn58Bi는 다른 소재 대비 피로수명이 낮게 나타나는 것이 확인되었다.

(4) 자동차에 사용되는 고성능 패키지의 경우, 피로수명이 낮게 예측된 저온계 solder인 42Sn58Bi는 적용할 수 없다.

REFERENCE

- [1] I. A. Magomedov., M. S-U. Khaliev., A. A. Elmurzaev. (2020). Application of Finite Element Analysis in medicine. *Journal of Physics: Conference Series*, 1679, 022057
- [2] Černe. B., Duhovnik.J., Tavčar. J. (2019). Semi-analytical flash temperature model for thermoplastic polymer spur gears with consideration of linear thermo-mechanical material characteristics, *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(4), 617–628.
- [3] Park. S., Park. K. (2022). Air-knife design for improved drying efficiency in manufacturing flat-panel displays, *Journal of Computational Design and Engineering*, 9(4), 1388–1396.
- [4] S. D. Müzel., E. P. Bonhin., N. M. Guimarães., E. S. Guidi. (2020). Application of the Finite Element Method in the Analysis of Composite Materials: A Review. *Polymers (Basel)*, 12(4), 818.
- [5] Park. D., Go. J. S. (2020). Design of Cyclone Separator Critical Diameter Model Based on Machine Learning and CFD. *Processes*, 8(11), 1521.
- [6] S. K. Shukla., P. Shukla., P. Ghosh, (2013). The effect of modeling of velocity fluctuations on prediction of collection efficiency of cyclone separators. *Applied Mathematical Modelling*, 37(8), 5774-5789.
- [7] I. Karagoz., A. Avci., (2005). Modelling of the Pressure Drop in Tangential Inlet Cyclone Separators. *Aerosol Science and Technology*, 39, 857-865.
- [8] M. Azadi., M. Azadi., A. Mohebbi, (2010). A CFD study of the effect of cyclone size on its performance parameters, *Journal of Hazardous Materials*, 182(1-3), 835-841.
- [9] P. Singh., I. Couckuyt., K. Elsayed., D. Deschrijver, (2016). Shape optimization of a cyclone separator using multi-objective surrogate-based optimization. *Applied Mathematical Modelling*, 40(5-6), 4248-4259.
- [10] H. Safikhani., F. Esmaeili., S. Salehfard, (2020). Numerical Study of Flow Field in New

- Design Dynamic Cyclone Separators, IJE TRANSACTIONS B: Applications, 33(2), 357-365.
- [11] M. Izadi., A. M. Makvand., E. Assareh., F. Parvaz, (2020). Optimizing the design and performance of solid-liquid separators. International Journal of Thermofluids, 5-6, 100 033.
- [12] H. Ci., G. Sun, (2015). Effects of wall roughness on the flow field and vortex length of cyclone. Procedia Engineering, 102, 1316-1325.
- [13] K. Elasyed., C. Lacor, (2011). The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance. Applied Mathematical Modelling, 35(4), 1952-1968.
- [14] P. Zhang., J. Duan., G. Chen., Wang, W, (2019). Numerical Investigation on Gas-solid Flow in a Circumfluent Cyclone Separator. Aerosol and Air Quality Research, 19(5), 971-980.
- [15] S. Pandey., I. Saha., O. Prakash., T. Mukherjee., J. Iqbal., A. K. Roy., M. Wasilewski., L. S. Brar, (2022). CFD Investigations of Cyclone Separators with Different Cone Heights and Shapes. Appl. Sci, 12(10), 4904.
- [16] K. Elasyed., C. Lacor, (2012). The effect of cyclone vortex finder dimensions on the flow pattern and performance using LES. Computers & Fluids, 71, 224-239.
- [17] M. D. Slack., R. O. Prasad., A. Bakker., F. Boysan, (2000) Advances in cyclone modeling using unstructured grids. TransIChemE, 78, 1098-1104.
- [18] L. S. Brar., R. P. Sharma, (2015). Effect of varying diameter on the performance of industrial scale gas cyclone dust separators. Materials Today: Proceedings, 2(4-5), 3230-3237.
- [19] 지식산업정보원, (2019). 반도체/디스플레이장비 부품·소재 및 기능성 화학소재 산업 R&D전략, ISBN 979-11-5862-119-3
- [20] B. Qiu., J. Xiong., H. Wang., S. Zhou., X. Yang., Z. Lin., M. Liu., N. Cai, (2022). Survey on Fatigue Life Prediction of BGA Solder Joints. Electronics, 11, 542.
- [21] H. Kang., S. H. Rajendran., J. P. Jung, (2021) Low Melting Temperature Sn-Bi Solder: Effect

- of Alloying and Nanoparticle Addition on the Microstructural, Thermal, Interfacial Bonding, and Mechanical Characteristics. *Metals*, 11, 364.
- [22] , (2006). Effects of aging on the stress-strain and creep behaviors of lead free solders. *IEEE*,
- [23] C. Chen., C. Wang., H. Sun., H. Yin., X. Gao., H. Xue., D. Ni., K. Bian., Q. Gu, (2022). Interfacial Microstructure and Mechanical Reliability of Sn-58Bi/ENEPIG Solder Joints. *Processes*, 10, 295.
- [24] S. I. Pishbin., M. Moghiman, (2010). Optimization of Cyclone Separators Genetic Algorithm. *International Review of Chemical Engineering (I.RE.CH.E.)*, 2(6).
- [25] M. Durango-Cogollo., J. Garcia-Bravo., B. Newell., A. Gonzalez-Mancera, (2020). CFD Modeling of Hydrocyclones-A Study of Efficiency of Hydrodynamic Reservoirs. *Fluids*, 5(3), 118.
- [26] M.A.M. Nor., S. Kamaruddin., T. A. Lemma, (2022). Numerical investigation of API 31 cyclone separator for mechanical seal piping plan for rotating machineries. *Alexandria Engineering Journal*, 61(2), 1597-1606
- [27] H. M. El-Batch, (2013). Improving cyclone performance by proper selection of the exit pipe. *Applied Mathematical Modelling*, 37(7), 5286-5303.
- [28] K. W. Chu., B. Wang., D. L. Xu., Y. K. Chen., A. B. Yu, (2011). CFD–DEM simulation of the gas–solid flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science*, 66(5), 834-847.
- [29] K. Elasyed., C. Lacor, (2011). Numerical modeling of the flow field and performance in cyclones of different cone-tip diameters. *Computers & Fluids*, 51(1), 48-59.
- [30] K. Elasyed., C. Lacor, (2012). The effect of the dust outlet geometry on the performance and hydrodynamics of gas cyclones. *Computers & Fluids*, 68, 134-147.
- [31] C. Zabala-Quintero., J. Ramirez-Pastran., M. J. Torres, (2021). Performance Characterization of a New Model for a Cyclone Separator of Particles Using

- Computational Fluid Dynamics. Appl. Sci, 11, 5342.
- [32] B. Wang., D. L. Xu., K. W. Chu., A. B. Yu,(2006). Numerical study of gas-solid flow in a cyclone separator. Applied Mathematical Modeling, 30(11), 1326-1342.
- [33] O. Hamdy., M. A. Bassily., H. M. El-batsh., T. A. Mekhail, (2017). Numerical study of the effect of changing the cyclone cone length on the gas flow field. Applied Mathematical Modelling, 46, 81-97.
- [34] G. Gong., A. Yang., S. Zhu, (2012). Numerical investigation of the effect of helix angle and leaf margin on the flow pattern and the performance of the axial flow cyclone separator. Applied Mathematical Modeling, 36(8), 3916-3930.
- [35] N. Baroiu., G. A. Morosanu, (2021). Constructive-Functional Analysis and Sizing of Hydraulic Filters. THE ANNALS OF “DUNĂREA DE JOS” UNIVERSITY OF GALAȚI, 39(1).
- [36] M. M. Basit., M. Motalab., J. C. Suhling., Z. Hai., J. Evans., M. J. Bozack., P. Lall, (2015). Thermal cycling Reliability of Aged PBGA Assemblies - Comparison of Weibull Failure Data and Finite Element Model Predictions, 2015 IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), pp. 106-117.
- [37] M. Motalab., M. Mustafa., J. C. Suhling., J. Zhang., J. Evans., M. J. Bozack., P. Lall, (2013). Correlation of reliability models including aging effects with thermal cycling reliability data, 2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference, pp. 986-1004.
- [38] Q. Wang., Y. Zhang., L. Liang., Y. Liu., S. Irving, (2007). Anand Parameter Test for Pb-Free Material SnAgCu and Life Prediction for a CSP, 2007 8th International Conference on Electronic Packaging Technology, pp. 1-9.
- [39]. J. Gao and J. B. Kwak, (2021). Reliability and thermal fatigue life prediction of solder joints for advanced automotive microelectronics, Journal of Mechanical Science and

- Technology, 35(8) pp. 3633–3641.
- [40] M. A. Haq., M. A. Hoque., J. C. Suhling., P. Lall, (2021). Anand Parameters for Eutectic Tin-Bismuth Solder, 2021 20th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (iTherm), pp. 926-932.
- [41] P. L. Tu., Y. C. Chan., K. C. Hung., J. K. L. Lai, (2001). Study of micro-BGA solder joint reliability. *Microelectronics Reliability*, 41, 287-293
- [42] C. Cai., J. Xu., H. Wang., S. B. Park, (2021). A comparative study of thermal fatigue life of Eutectic Sn-Bi, Hybrid Sn-bi/SAC and SAC solder alloy BGAs, 119, 114065
- [43] L. Liu., S. Xue., R. Ni., P. Zhang, (2022), Board Level Drop Test for Evaluating the Reliability of High-Strength Sn–Bi Composite Solder Pastes with Thermosetting Epoxy. *Crystals*, 12, 924.
- [44] M.S. Kang., D. S. Kim., Y. E. Shin, (2019) The Effect of Epoxy Polymer Addition in Sn-Ag-Cu and Sn-Bi Solder Joints. *Materials (Basel)*. 12(6), 960.
- [45] R. Darveaux, (2000). Effect of Simulation Methodology on Solder Joint Crack Growth Correlation, 2000 Proceedings. 50th Electronic Components and Technology Conference (Cat. No.00CH37070), pp. 1048-1058.

감사의 글

석사과정을 하는 동안 논문이 완성되기까지 많은 분들의 도움과 응원이 있었습니다. 짧은 글로 감사한 마음을 전하기에는 부족하겠지만, 마지막을 기록하면서 이제까지 도움을 주신 많은 분들에게 감사의 인사를 드립니다.

먼저, 졸업 논문이 나오기까지 지도와 심사를 해주신 박정우 교수님, 김창래 교수님,곽재복 교수님께 감사드립니다. 바쁘신 와중에도 시간을 할애하여 지도해주시고, 부족한 점이 많았던 저를 위해 많은 가르침을 주셨던 덕분에 무사히 논문을 작성하고 석사과정을 마칠 수 있었습니다.

대학교 2학년 때부터 석사과정을 마칠 때까지 큰 도움을 주시고, 앞으로 나아갈 수 있게 해 주셨던 저의 지도교수님이신 곽재복 교수님께 다시 한번 감사의 말씀을 전합니다. 교수님의 지도 덕분에 대학원에 진학하고 난 후 단 한번도 제 선택을 후회해본 적이 없을만큼 소중하고 뜻 깊은 날들을 보냈습니다. 지나온 시간동안 배웠던 가르침을 기억하며 한 명의 연구자로 성장하기 위해 남은 시간도 노력하겠습니다.

또한, 실험실에 소속되어 있으면서 많은 도움을 주었던 선배, 동기들에게 감사의 인사를 포함합니다.

논문을 쓰는동안 양해해주신 한국광기술원 센터원 분들과 항상 격려해주신 사수님, 박창주 박사님께도 감사의 마음을 전합니다.

마지막으로 변함없이 믿어주신 부모님에게는 감사보다는 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다.

제게 주셨던 도움을 바탕으로 앞으로도 최선을 다하겠습니다. 감사합니다.