

외부 에어백 폴딩 방식에 따른 자유 낙하 충돌 시 멀티콥터형 개인용 항공기에 가해지는 충격력 비교

장운호¹ · 김정^{1,†}

¹부산대학교 공과대학 항공우주공학과

Comparison of the Free-Fall Impact Force Applied to a Multicopter PAV According to External Airbag Folding Method

Yoon Ho Jang¹ , Jeong Kim^{1,†}

¹Department of Aerospace Engineering, Pusan National University

Abstract

With the development of small multicopter PAV (Personal Air Vehicle), it is necessary to develop safety-related devices for manned rotorcraft. In this study, we assumed that an external airbag can be installed in a small multicopter PAV, and using LS-DYNA's Airbag Folding Application, we performed a free-fall collision analysis by modeling the airbag shapes consisting or Roll, Zigzag, and Sigma. There was no significant difference in the final airbag deployment time of the three models. However, when it collides with the ground during deployment, the Sigma fold type external airbag had the fastest deployment speed, applying the most impact force to the PAV, while the Roll fold type external airbag applied the smallest impact force to the PAV.

초 록

회전익 항공기의 발달에 따라 사람이 탑승하는 유인 회전익 항공기의 안전과 관련된 장치들이 개발 될 필요가 있다. 본 연구에서는 소형 멀티콥터 PAV에 외부 에어백이 장착될 수 있다는 점을 가정하였다. LS-DYNA의 Airbag Folding Application을 사용하여 Roll, Sigma, Zigzag 총 세 가지 폴딩이 이루어진 에어백 형상들을 모델링하고 자유낙하 충돌 해석을 수행하였다. 세 가지 모델의 최종 에어백 전개 시간에는 큰 차이가 없었다. 그러나 전개가 시작되는 중 지면과 충돌 할 경우 Sigma Fold 방식의 외부 에어백이 전개 속도는 가장 빠르지만, PAV에 더 많은 충격력을 전달한다는 것을 확인하였으며, 최종적으로 Roll Fold 방식의 외부 에어백이 가장 작은 충격력을 전달한다는 결론을 도출하였다.

Key Words : PAV(개인용 항공기), Multicopter(멀티콥터), Free-Fall Collision(자유낙하충돌), Impact Force(충격력), External Airbag(외부 에어백), Airbag Folding Method(에어백 폴딩 방식)

1. 서 론

최근 도로 구축의 속도보다 자가용 자동차 수의 증가율이 더 높아짐과 동시에 다양한 산업의 발전으로

물류 이동률과 인적 이동률이 높아지면서 교통체증이 증가하고 시간지체율이 커지고 있다[1]. 이러한 수송 수요의 증가로 인하여 발생하는 문제들을 타개하기 위해 PAV(Personal Air Vehicle)가 개발되고 있으며 PAV는 이륙방법에 따라 CTOL(Conventional Take-off And Landing), VTOL(Vertical Take-off and Landing), STOL(Short Take-off and Landing) 등으로 나뉜다[2]. 그 중 최근 급부상하고 있는 전기

Received: Aug. 17, 2021 Revised: Oct. 05, 2021 Accepted: Oct. 25, 2021

† Corresponding Author

Tel: +82-51-510-2477, E-mail: greatkj@pusan.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

동력 수직 이착륙기(eVTOL), 혹은 전기 개인용 비행기(ePAV)[3]는 활주로와 같이 운용을 위한 큰 부지가 필요없다. 그리고 모터의 추력이 이륙을 위한 양력과 일치하므로 고정익 항공기가 할 수 없는 제자리 비행이 가능하며 저고도에서 안정적으로 운용할 수 있으므로 고정익 항공기에 비하여 운전자들이 쉽게 수동으로 조종할 수 있다. 그러므로 전기 동력 수직 이착륙기는 도심 내(Intra-City), 도시 간(Inter-City)을 이동할 수 있는 자가용으로서의 역할을 할 수 있다. 그러나 온전히 모터 추력만으로 양력을 만들어 내기 때문에 비행 중 추락을 야기할 수 있는 비상 상황이 발생 할 시, 자유낙하에 대응할 수 있는 수단이 없을 뿐만 아니라 대응할 수 있는 시간이 매우 짧다. 이로 인한 항공기의 자유낙하는 고가의 항공기의 손상 및 탑승자에게 치명적인 상해를 입히게 된다. 본 논문에서는 전기 동력 수직 이착륙기에 세 가지 방식으로 폴딩된 외부 에어백을 장착하고 항공기의 자유낙하 상황에서 에어백 전개 시뮬레이션을 수행하였으며 에어백이 장착되지 않았을 때, 각 외부 에어백의 폴딩 방식에 따라 PAV가 받는 충격력을 비교하는 연구를 수행하였다.

2. 시뮬레이션 모델링

2.1 외부 에어백 형상

외부 에어백은 1인용 ePAV의 대표적인 실제 기체 중 하나인 EHang-184 모델의 제원을 참고하여 모델링하였다. 실제 에어백은 사고 충격을 감지하는 충격 센서(Crash Sensor), 폭발을 위해 필요한 아지드화나트륨(NaN_3)과 산화철(FeO)이 내포되어 있고 폭발을 통해 질소(N_2)가스를 방출 시키는 인플레이터(Inflator) 및 캐니스터(Canister), 공기주머니의 역할을 하는 에어백(Airbag)과 에어백의 형상을 잡아주는 테더(Tether) 등으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 화학 반응을 배제하고 캐니스터와 에어백, 테더로 간단히 에어백 모듈을 모델링하였으며, 직접적으로 질소가스를 에어백에 주입시키는 방식의 해석을 수행할 수 있도록 모델을 단순화 시켰다. 이에 대한 1/4 영역을 Fig. 2과 같이 나타내었다.

EHang-184 모델의 경우 항공기 하부에 에어백을

설치 시 외부 에어백이 기체 하부와 접촉해야 하는 면적이 5.76 m^2 정도이다. 따라서 해당 면적을 포함할 수 있도록 에어백의 크기를 아래처럼 결정하였다.

Figure 1과 같이 LS-Prepost 유한요소해석 프로그램으로 모델링 되어 상부 공기주머니(Upper Bag)과 하부 공기주머니(Lower Bag)이 합쳐진 에어백의 가로 길이와 세로 길이는 펼쳐져 있는 상태에서 각각 2,400 mm이며, 캐니스터의 세로 길이와 가로 길이는 200 mm, 높이는 100 mm 이다.

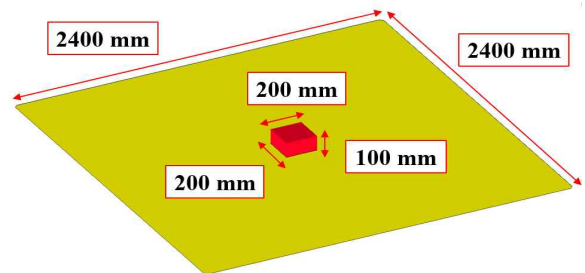


Fig. 1 Size of Airbag Module

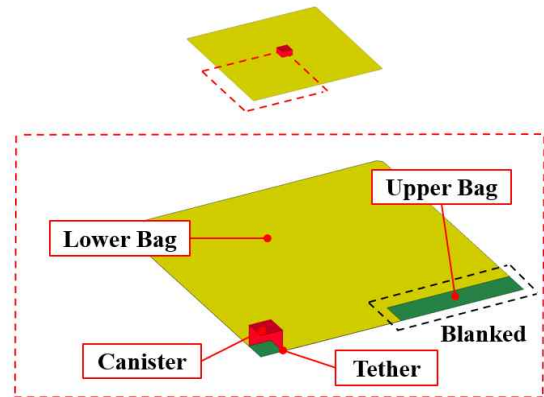


Fig. 2 Airbag Module in Parts

2.2 외부 에어백 폴딩

LS-Prepost의 Airbag Folding Application을 사용하여 외부 에어백 폴딩을 수행했다. 외부 에어백은 인플레이터의 크기에 비해 팽창 후의 에어백의 크기가 상대적으로 크기 때문에 팽창 전, 팽창 후의 에어백 크기의 차이가 많이 나므로, 에어백을 보관하기 위해서는 에어백을 폴딩하는 횟수가 상대적으로 많이 늘어난다는 점에서 기존의 에어백들과 차별화 된다.

Airbag Folding Application은 Fig. 3과 같이 두 개의 절점을 선택하여 에어백이 접히기 위한 기준선 벡터 \vec{n} 을 형성하고, 기준선 벡터로 인해 두 부분으로 나누어진 에어백의 FEM 모델에서 임의의 절점을 선택하면 기준선 벡터를 기준으로 선택된 절점과 같은 면으로 나누어진 모든 절점들이 이루는 요소들이 폴딩이 이루어지게 되는데, 기준선 벡터를 법선 벡터로 갖는 모든 평면 \vec{S} 와 법선 벡터와 평면이 만나는 점을 기준으로 원점 대칭이동을 하게 되는 원리로 에어백을 폴딩하게 된다.

이러한 원리로 인해 두께가 있는 에어백을 폴딩하거나, 같은 방향으로 폴딩을 여러 번 반복하면, 두께를 고려하기 위해 기준선 벡터에 인접한 요소들은 기준선 벡터 방향을 제외한 나머지 방향으로 요소들의 길이가 늘어나게 된다. 이를 해결하기 위해 추가적인 해석 방식 AIRBAG_REFERENCE_GEOMETRY 키워드가 사용된다. 해당 해석방식은 에어백이 폴딩 되기 전 상태의 절점들의 인접 절점끼리의 상대적인 위치를 지정하여 폴딩 과정에서 길이가 늘어났던 요소들이 Fig. 4와 같이 에어백이 전개되면서 늘어나기 전의 원래의 길이로 돌아오도록 함으로서 해석과정에서 발생하는 부피 및 압력 데이터의 오차를 줄이게 된다.

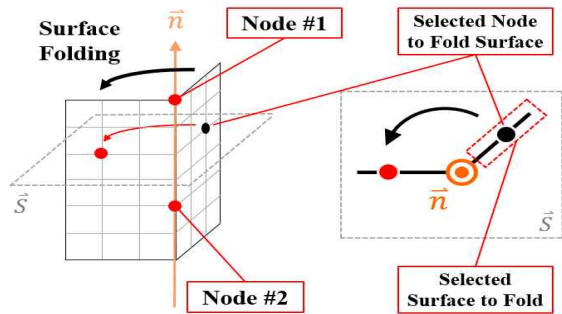


Fig. 3 Principle of Airbag Folding Method

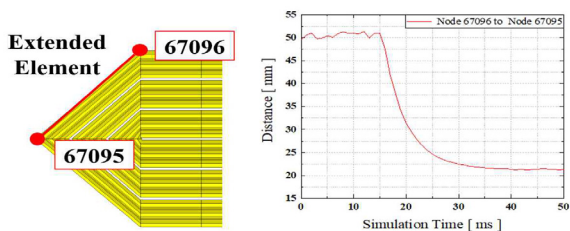


Fig. 4 Node to Node Distance During Simulation

폴딩이 좌우 대칭으로 이루어져 있기 때문에 본 논문에서의 Fig. 6-8은 대칭면을 기준으로 한 쪽만을 보여주고 있다. 먼저 Fig. 1의 완전히 펼쳐져 있는 상태의 에어백을 X 방향으로 Fig. 5와 같이 폴딩하였으며 모든 에어백 폴딩 모델들은 X 방향으로 동일하게 폴딩하였기 때문에 ‘Base Fold’라 칭하였다. 그리고 Y 방향으로 총 3가지 형상으로 폴딩 형상을 모델링하였으며 각각 폴딩 방식에 따라 ‘Roll Fold’, ‘Zigzag Fold’, ‘Sigma Fold’로 칭하였다. Fig. 1의 에어백 모델을 기준으로 각각 X 방향으로 10회, Y방향으로 10회, 총 20회씩 폴딩하였다.

Roll Fold는 Fig. 6처럼 접는 방향을 동일하게 폴딩하는 것으로, 쉽게 설명하면 에어백을 돌돌 말아가며 만들어진 폴딩 모델이다. Sigma Fold는 Fig. 7처럼 매번 접는 방향을 바꿔가며 에어백을 접어 만들어진 폴딩 모델이다. Zigzag Fold는 Fig. 8처럼 Sigma Fold의 마지막 폴딩 과정을 Roll Fold로 처리한 폴딩 모델이며, 각각 폴딩 모델의 최종 형상은 Fig. 9와 같다.

총 세 가지 외부 에어백 폴딩 모델의 전체 부피는 초기 부피가 동일하도록 결정하였으나 폴딩으로 인해 늘어난 요소들로 인하여 Fig. 9의 초기 에어백 모듈의 부피에는 차이가 있으며 이에 따라 각 에어백 모델의 폴딩 상태에서 모듈의 전체 부피는 Table 1과 같다.

Table 1 Initial Volume of Three Folded External Airbag Modules

Type	Roll Fold	Zigzag Fold	Sigma Fold
Volume (m ³)	0.133	0.132	0.120

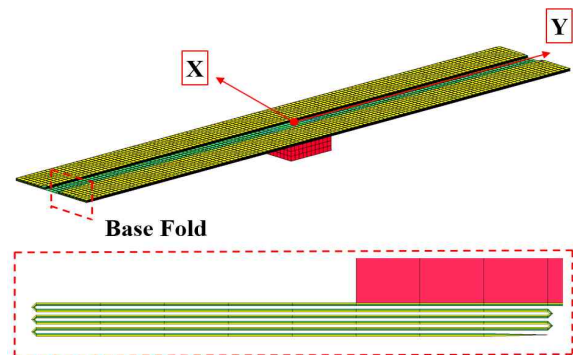


Fig. 5 Airbag Base Fold

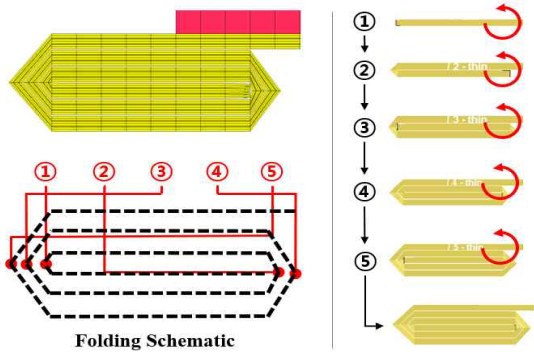


Fig. 6 Sequence and Schematic of Roll Fold

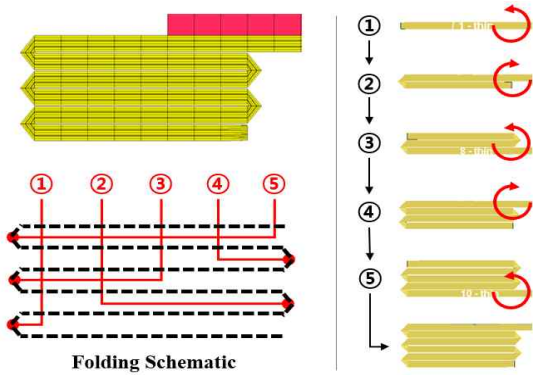


Fig. 7 Sequence and Schematic of Sigma Fold

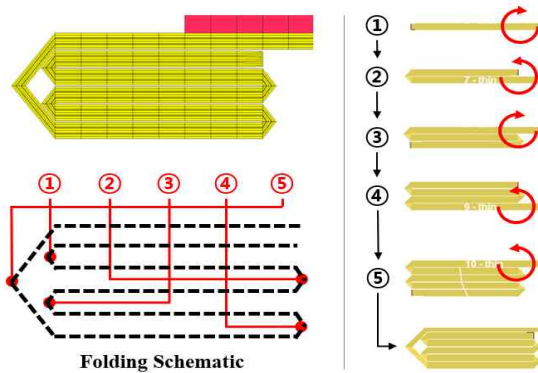


Fig. 8 Sequence and Schematic of Zigzag Fold

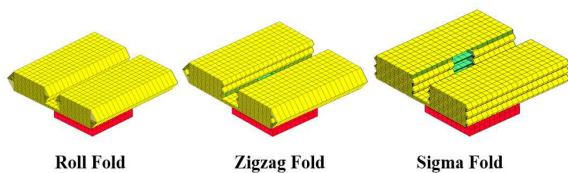


Fig. 9 Three Types of Folded External Airbags

2.3 시뮬레이션 조건

에어백 충돌 시뮬레이션 구현을 위해 LS-Prepost에 내포되어 있는 분자운동방정식 기반의 Corpuscular Particle Method가 적용된 AIRBAG_PARTICLE 해석 방식을 사용하였다[4].

해당 해석방식은 이상기체방정식에 기반하여 분자들이 에어백 내부 및 분자들끼리 충돌 시 완전탄성운동을 한다고 가정한다. Fig. 10과 같이 모든 기체 분자들의 운동을 일부의 분자 집합으로 묶어 분자 집합의 운동으로 가정한다. 해당 가정에 의해 모든 입자의 운동에너지의 합과 모든 분자 집합의 운동에너지의 합은 동일하므로 이를 통해 에어백에 주입되는 모든 기체 분자의 거동을 입자 수를 대폭적으로 줄여 만든 소수의 분자 집합을 통해 에어백의 거동을 빠르고 실제와 흡사하게 예측하게 된다.

에어백 내부에 들어있는 기체 분자의 수를 N_m , 각 기체 분자의 질량을 m_i , 각 기체 분자의 병진 속도를 v_i 라고 가정하면, 에어백 내부의 총 기체 분자들의 운동에너지 E_k 는 Eq. 1과 같이 나타 낼 수 있다. 그리고 에어백 내부에 들어있는 기체 분자를 분자 집합으로 묶어 분자 집합의 수를 N_p , 분자 집합의 질량을 m_j , 분자 집합의 병진 속도를 v_j 라고 가정하면, 에어백 내부의 총 분자 집합들의 운동에너지 \overline{E}_k 는 Eq. 2와 같이 표현 가능하다.

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_m} m_i v_i^2 \quad (1)$$

$$\overline{E}_k = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N_p} m_j v_j^2 \quad (2)$$

여기서 에어백 표면에 작용하는 압력을 구하기 위해서 분자 입자들이 x 방향으로 병진운동을 한다고 가정하였을 때, 에어백의 x 방향 길이를 l_x , 속도를 v_x 라고 하면, 하나의 분자가 에어백 표면을 치고 돌아오는데 걸리는 시간은 Eq. 3처럼 나타낼 수 있다. 그리고 에어백 내 분자들의 x, y, z 방향으로의 운동이 x 방향의 운동과 같다고 가정하면, 피타고라스 정리에 의해 분자 하나의 속도를 Eq. 4처럼 나타낼 수 있다.

$$t = \frac{l_x}{2v_x} \quad (3)$$

$$v_x^2 = \frac{1}{3}v^2 \quad (4)$$

총 분자의 개수를 N , 분자 하나의 질량을 m 이라 하면, Eq. 3과 Eq. 4에 따라 총 분자들이 에어백에 가하게 되는 힘은 Eq. 5로 나타낼 수 있다. 이를 통해 모든 기체 분자가 가하게 되는 압력은 압력의 정의식에 따라, 단면적 A 로 힘을 나누어준 값으로, 에어백의 부피 V 를 포함한 기체 분자 전체의 운동에너지로 표현 가능하며 Eq. 6과 같다. 이는 분자의 개수가 아주 많다고 가정하면 에어백의 부피와 분자의 운동에너지가 압력으로 표현 될 수 있음을 의미한다.

$$F = N(ma) = 4N\left(m\frac{l_x}{t^2}\right) = \frac{4}{3}N\frac{mv^2}{l_x} \quad (5)$$

$$P = \frac{F}{A} = \frac{4}{3}\frac{N(mv^2)}{Al_x} = \frac{2}{3}\frac{N}{V}(E_k) \quad (6)$$

분자 집합과 각 분자들의 관계에서 보았을 때, 특정 시점에서 에어백의 부피는 동일하다. 또한 분자 집합들의 총 운동에너지 $\overline{E_k}$ 와 분자 각각의 운동에너지의 합 E_k 는 동일해야하므로 압력은 Eq. 7처럼 표현할 수 있다. 최종적으로 Eq. 8과 같이 이상기체방정식에서 유도한 압력이 기체분자의 병진 에너지에 대한 함수라는 조건으로 각 분자들의 압력 P 는 기체 분자 집합들의 압력 \overline{P} 와 동일하게 된다.

$$P \approx \frac{2}{3}E_k = \frac{2}{3}\overline{E_k} \quad (7)$$

$$\overline{P} = P \quad (8)$$

본 해석에서는 에어백을 팽창시키는 가스를 질소(N_2)로 가정하고 Table 2와 같이 분자 집합 개수를 200,000개로 가정하였으며, 운동에너지에 영향을 주는 열용량계수에 질소의 물성치를 대입하였다[5]. 에어백에 주입되는 질소 가스는 Fig. 11과 같이 자동차 운전석 에어백의 가스의 질량유량(Mass Flow Rate) 및 온도(Temperature) 그래프의 개형을 유지하되, 외부 에어백을 충분히 팽창시키도록 스케일 업 하였다[6].

외부 에어백은 기존 자동차 에어백에 사용되는 소재인 PA66(나일론)을 두께 0.7 mm의 등방성(Isotropic) 셸(Shell) 형상으로 가정하였으며, 물성(Material Properties)을 Table 3과 같이 적용하였다[7].

Table 2 N_2 Gas Properties for Airbag

The Number of Group	Molar Mass (kg/mol)	a^*	b^{**}	c^{***}
200,000	0.028	28.90	-0.002	10^{-9}

*Constant of Heat Capacity,

**Linear Coefficient of Heat Capacity,

***Quadratic Coefficient of Heat Capacity

Table 3 Material Properties of PA66

Properties	ρ^* (kg/m ³)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	ν^{**}_1	ν_2
PA66	910	2.5	2.5	0.345	0.345

*Density, **Poisson's ratio

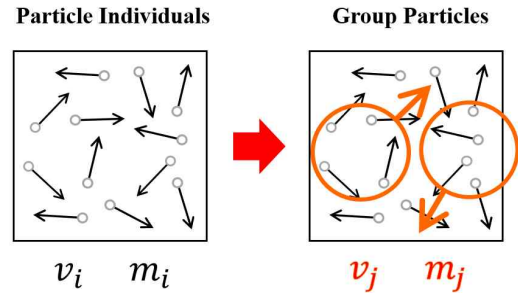


Fig. 10 Principle of Corpuscular Particle Method

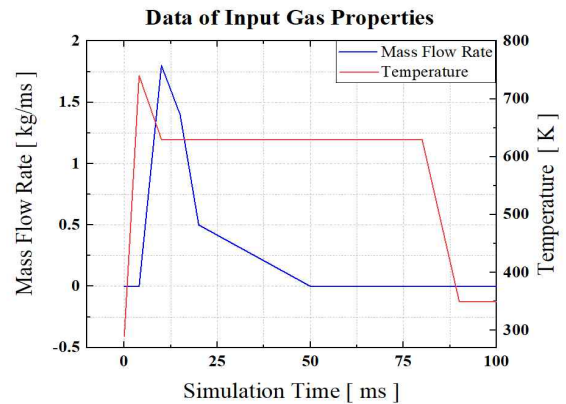


Fig. 11 Mass Flow Rate and Temperature of Nitrogen Gas

2.4 자유 낙하 시뮬레이션 모델

앞에서 모델링한 총 세 가지 외부 에어백 폴딩 모델들을 각각 동일한 PAV의 무게 중심이 위치하는 하단부에 부착하여 Fig. 12와 같이 자유 낙하 시뮬레이션 모델을 완성하였다. 전형적으로 멀티콥터의 무게중심은 각 마주보는 모터들을 이은 중심에 위치하므로[8], 해당 모델에서의 에어백의 위치는 Fig. 13과 같이 무게중심 축이 위치하는 기체 하부에 장착하였다. PAV의 샘플 모델은 Fig. 14의 EHang-184 모델의 크기 제원을 확인하여 최대한 유사하게 모델링하였으며, PAV의 관성모멘트와 같은 부수적인 데이터는 획득할 수 없었기 때문에 관성모멘트의 영향을 무시할 수 있는 수직 추락 조건만을 가정하고, 추락 방향을 제외한 방향의 병진운동과 회전운동을 구속시켰다. 에어백 폴딩 방식에 따라 기체가 받는 가속도의 변화를 보는 것이 목적이므로, 시뮬레이션을 위한 PAV의 샘플 형상은 Shell 타입의 변형이 없는 강체(Rigid)로 가정하였으며 이에 따라 PAV 모델에 속한 모든 절점은 동일한 가속도 데이터를 갖는다. Table 4와 같이 PAV 모델의 질량은 탑승자 1인을 포함하여 Fig. 14의 제원과 동일하며, 밀도를 맞추어 무게를 제원과 일치시켰다. 하단의 지면(Ground)은 변형이 없는 강체로 가정하고 6 자유도를 완전 구속시켰다.

Table 4 Specifications of Sample PAV

Width (m)	Height (m)	Volume (m ³)	ρ^* (kg/m ³)	Mass (kg)
2.074	1.018	0.150	2,000	300

*Density

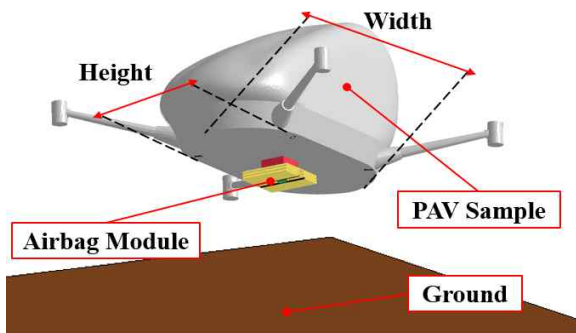


Fig. 12 Final Crash Model for Simulations

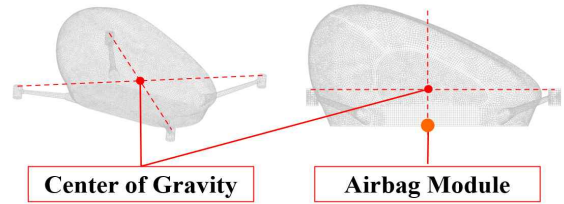


Fig. 13 Mounting Location of Airbag Module

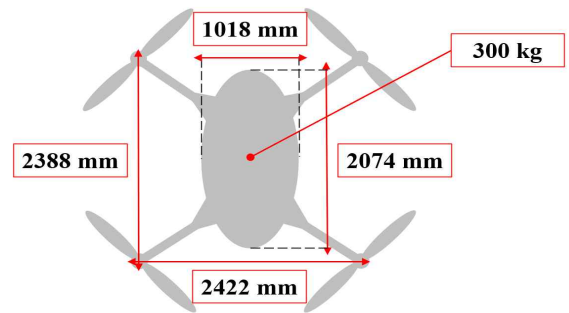


Fig. 14 Specification of EHang-184 PAV

3. 외부 에어백 전개 시뮬레이션

3.1 자유 전개 시뮬레이션 결과

먼저 폴딩 방식에 따른 세 가지 외부 에어백 모델의 자유 팽창 시뮬레이션을 수행하였다. 동일한 시간에 따른 질량유량 데이터를 Fig. 11과 같이 입력해 주었기 때문에, 폴딩 방식에 상관없이 외부 에어백이 완전히 전개되는 시간은 팽창 시작 후 약 24 ms 로, Table 5에서 보여 지듯이 유의미한 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 그러나 전개가 진행되는 시점인 5 ms 에서 17.5 ms 사이에 외부 에어백의 부피와 내부 압력은 에어백의 폴딩 방식에 따라 달라지는 것을 Fig. 15와 Fig. 16을 통해 확인할 수 있다.

Table 5 Final Deployment Time of Airbags

Type	Roll Fold	Zigzag Fold	Sigma Fold
Time (ms)	23.7	23.7	23.5

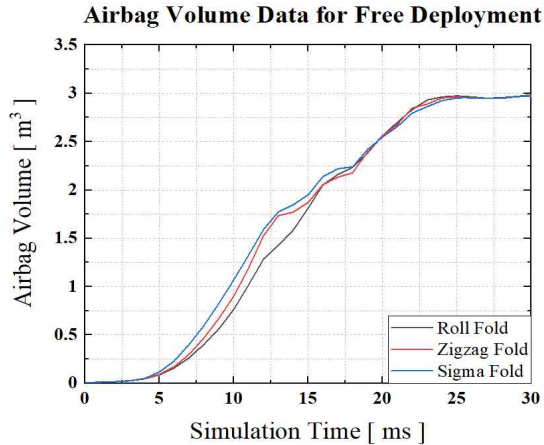


Fig. 15 Volume Comparison in Free Deployment

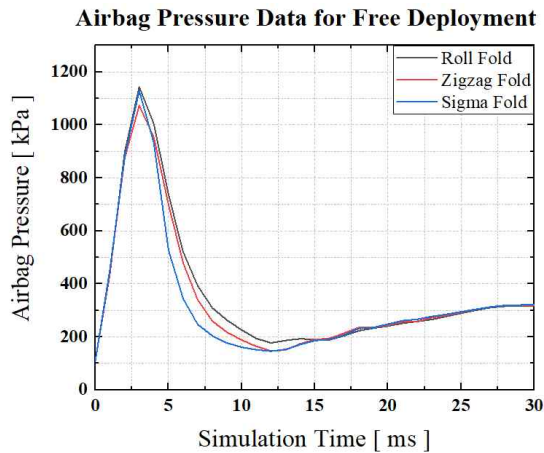


Fig. 16 Pressure Comparison in Free Deployment

3.2 자유 전개 시뮬레이션 분석

해당 결과를 분석 해 보기 위해 각각 전개 시간에서 폴딩 방식에 따른 외부 에어백의 전개 양상을 Fig. 17을 통해 확인하였다.

Roll Fold와 같이 말리는 방식으로 폴딩 되어 있는 에어백의 경우 가장 안쪽으로 말려있는 에어백에 가스가 주입되기 위해서 말린 부분이 펴져야 한다. 이는 에어백의 특정 접힌 부분이 펴지는 과정에서 다른 접힌 부분의 영향을 받는다는 것을 의미한다. 하지만 Sigma Fold 방식의 경우 말아서 접는 방식이 아니기 때문에 특정 접힌 부분이 펴지는 과정에서 다른 접힌 부분의 영향을 받지 않는다. 따라서 Table 6을 통해 초기 전개가 이루어지고 있는 9 ms 전까지 Sigma Fold 방식이 초기 전개 속도가 가장 빠르며 부피 증가

가 가장 크다는 것을 알 수 있다. Roll Fold 방식은 접힌 부분이 펴지는 속도가 상대적으로 Sigma Fold 보다 늦지만, 시간에 따라 같은 질량유량을 입력받으므로 초기 전개 과정에서 상대적으로 에어백 내부에 더 높은 압력을 갖는 것을 Table 7을 통해 확인 할 수 있다. Zigzag Fold 방식은 Roll Fold와 Sigma Fold 방식이 혼합된 형태로서 위의 두 가지 폴딩 방식의 중간 정도의 경향성을 보이는 것을 알 수 있다.

20 ms 후에는 세 가지 폴딩 방식 모두 폴딩된 외부 에어백이 대부분 전개가 완료 된 상태이기 때문에 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있으며 최종적으로 각 폴딩 방식에 따른 외부 에어백의 부피는 약 3.01 m^3 임을 Fig. 15와 Table 6에서 확인 할 수 있다.

해당 시뮬레이션 결과를 각 시뮬레이션 시간에 따라 외부 에어백이 전개되는 형상을 보면, Fig. 17을 통해 외부 에어백의 전개 과정에서 전개 양상이 다른 것을 확인 할 수 있다. 5 ms 에서 Roll Fold와 Zigzag Fold 방식은 접힌 부분이 펴지는 과정에 좌우 방향으로의 전개 영향을 받고 머무르지만, Sigma Fold 방식은 팽창 과정에서 주변부의 영향을 받지 않기 때문에 빠른 속도로 가스가 주입되는 방향으로 전개가 이루어지는 것을 확인 할 수 있다.

이와 마찬가지로 11 ms 에 도달했을 때, Sigma Fold 방식은 가스 노즐 방향으로의 전개가 모두 이루어져서 테더가 노즐 방향으로의 추가적인 팽창을 막기 때문에 남은 압력들이 Fig. 17의 Right 방향을 전개해 나가는 것을 확인 할 수 있다. Roll Fold 방식과 Zigzag Fold 방식은 15 ms 를 지나서야 폴딩 된 부분이 펴져가는 것을 확인 할 수 있고, Zigzag Fold 방식은 Sigma Fold와 Roll Fold 방식이 섞여 있는 형태로 다른 부분들의 영향을 받기 때문에 약 13 ms 에서 접힌 부분들이 대부분 펴진 것을 확인 할 수 있다.

이를 통해 폴딩 횟수가 늘어날수록 폴딩 타입에 따른 외부 에어백의 전개 속도는 더 큰 차이를 보일 것으로 예상 할 수 있다.

Table 6 Volume Data in Deployment Time

Time (ms)	Roll Fold	Zigzag Fold	Sigma Fold
	V* (m ³)	V (m ³)	V (m ³)
5	0.08725	0.09186	0.11656
7	0.26376	0.29942	0.40279
9	0.56472	0.67061	0.82697
11	1.01848	1.19369	1.32570
13	1.42698	1.73530	1.77353
15	1.81367	1.87063	1.95005
24	3.01295	3.00984	3.00269

*Volume of N₂ in Airbag

Table 7 Pressure Data in Deployment Time

Time (ms)	Roll Fold	Zigzag Fold	Sigma Fold
	P* (kPa)	P (kPa)	P (kPa)
5	737.585	699.837	527.423
7	392.293	339.200	246.854
9	263.110	217.068	177.046
11	194.398	164.002	151.534
13	186.545	150.499	152.533
15	190.483	189.564	185.713
24	316.406	318.691	320.111

*Pressure of N₂ in Airbag

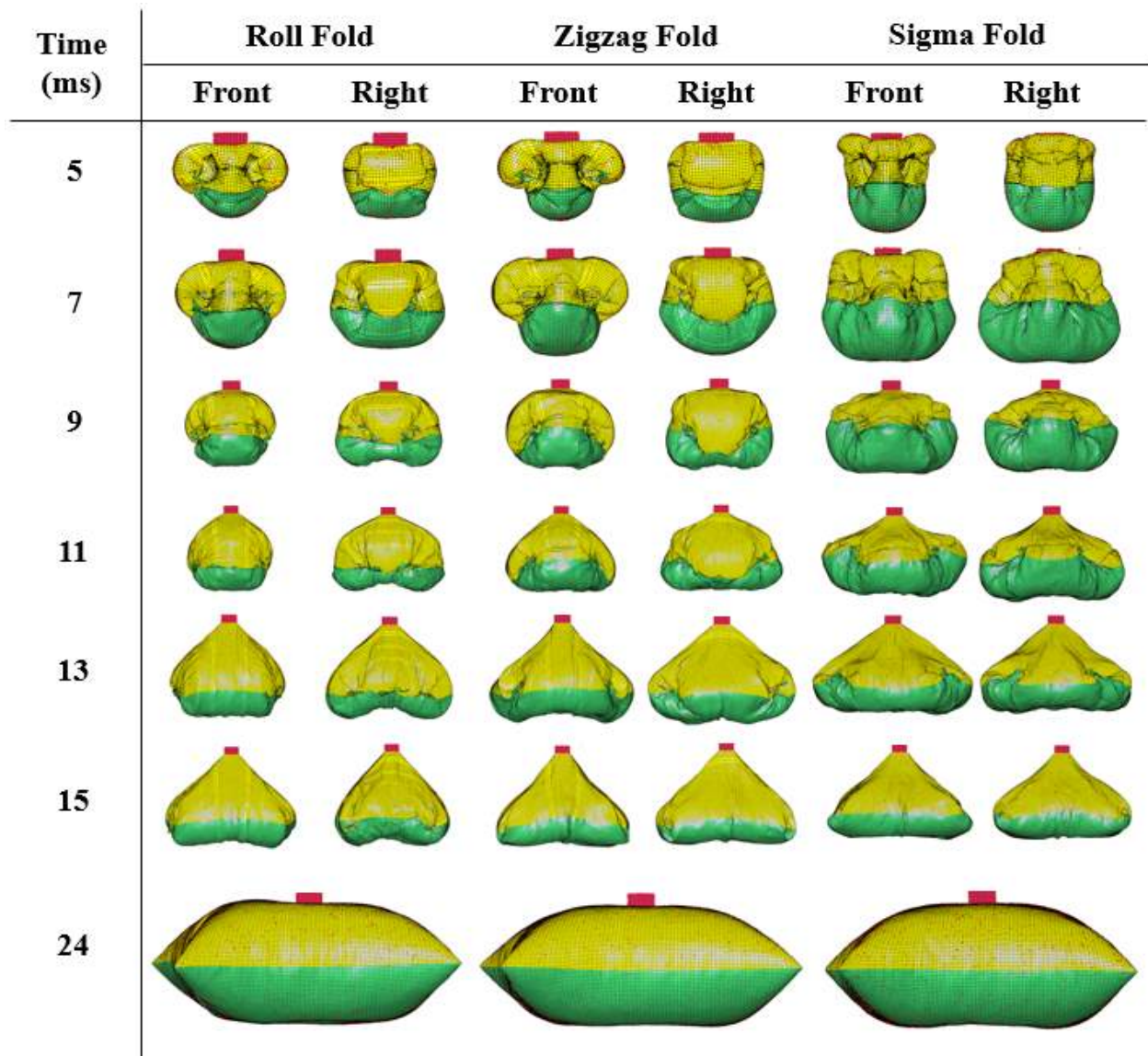


Fig. 17 The Shape of External Airbags in Free Deployment Over Time

3.3 PAV의 자유 낙하 충돌 시뮬레이션 결과

3.2절의 자유 전개 시뮬레이션 결과를 가지고 세 가지 폴딩된 외부 에어백들을 장착한 PAV의 추락 시뮬레이션을 수행했다. 개인용으로 운용 할 수 있는 소형 PAV의 운용 고도에 대한 공식적인 기준이나 범용이 지정되어 있지 않기 때문에, 미국 UBER의 Elevate에서 기준으로 한 150 m 를 자유낙하 고도로 선정하여 35 m/s 를 최종 낙하 속도로 설정하였다[9].

시뮬레이션 조건은 에어백이 전개되는 높이에 따라 Table 8과 같이 3가지로 나누었다. 각각 에어백이 전개된 정도를 기준으로 PAV와 지면과의 거리를 지정하였으며, 외부 에어백이 대부분 전개 된 상태(Fig. 17에서의 24 ms 시점)에서 충돌이 일어나는 Case 1, 외부 에어백이 어느정도 전개되는 상태(Fig. 17에서의 11 ms 시점)에서 충돌이 일어나는 Case 2, 외부 에어백이 막 전개를 시작하는 상태(Fig. 17에서의 5 ms 시점)에서 충돌이 일어나는 Case 3, 총 3가지로 나누어 시뮬레이션을 수행했다. Fig. 18-20을 통해서 각각의 해석조건 마다 Roll Fold 방식, Sigma Fold 방식, Zigzag Fold 방식에서 시간에 따라 PAV가 받게 되는 가속도에 차이가 있음을 확인 하였다.

PAV가 받는 가속도가 최대치에 달하는 25 ms 후에는 외부 에어백 폴딩 방식에 상관없이 유사한 가속도 경향성을 보였다. 각 폴딩 방식에 따른 전개 속도의 차이가 거의 없기 때문에 외부 에어백이 전개가 거의 이루어진 상태에서는 유의미한 차이를 확인 할 수 없었다. 그러나 Fig. 20에서 보이듯이 에어백이 전개를 시작하는 도중에 지면과 충돌하는 경우에는 Sigma Fold 방식이 상대적으로 더 큰 가속도를 PAV에 전달하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 10 ms 에서 25 ms 사이 시점에서 Case 3에 대한 에어백 전개 양상을 Fig. 23과 같이 분석 해 보았다.

Table 8 Parameters of Case Study

Case No.	Time* (ms)	Velocity (m/s)	Distance** (m)
Case 1	5	-35	0.75
Case 2	11		0.60
Case 3	20		0.40

*Airbag Deployment Sequence in Fig. 20 at Contact

**Distance From Ground at Initiating Deployment

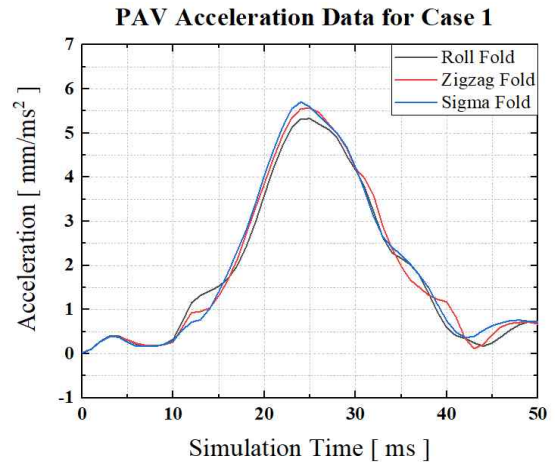


Fig. 18 Case 1 PAV's Acceleration Comparison

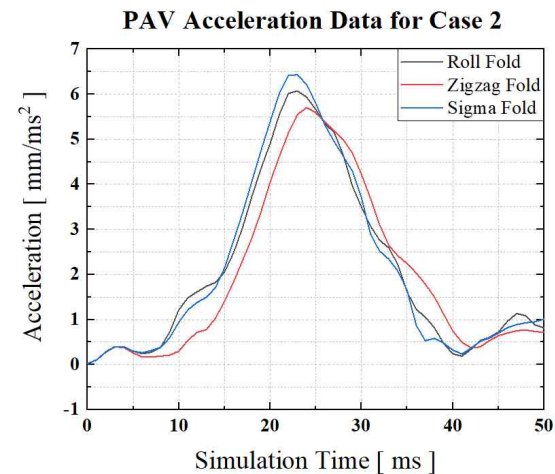


Fig. 19 Case 2 PAV's Acceleration Comparison

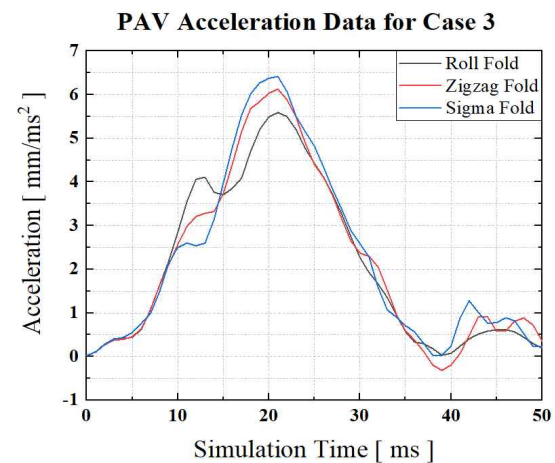


Fig. 20 Case 3 PAV's Acceleration Comparison

3.4 PAV의 자유 낙하 충돌 시뮬레이션 분석

외부 에어백이 대부분 전개된 상태(Case 1)이거나 에어백이 어느정도 전개된 상태(Case 2)에서의 PAV에 작용하는 가속도에서는 Fig. 18-19의 약 10 ms 지점의 첫 충돌이 일어나는 부분에서 Roll Fold 방식의 외부 에어백이 다른 폴딩 방식 대비 상대적으로 높은 압력으로 충격을 흡수 한다는 것 및 20 ms 지점에서 전개 속도가 가장 빠른 Sigma Fold 방식의 외부 에어백이 기체의 속도를 가장 먼저 감속시키는 것을 공통적으로 알 수 있지만, 에어백의 폴딩 타입에 따른 PAV의 가속도에서는 유의미한 차이를 확인할 수 없다.

에어백의 폴딩 방식에 따라 PAV가 받게되는 가속도에 있어 유의미한 차이는 외부 에어백이 막 전개되기 시작하는 상황인 지면과 충돌하는 상태(Case 3)에서 확인할 수 있다. 이에 대한 분석을 위해 먼저 Case 3에 대한 폴딩 타입에 따른 외부 에어백의 부피와 압력 데이터를 각각 Fig. 21과 Fig. 22에 나타내었다.

Figure 23은 외부 에어백이 지면과의 거리가 400 mm 일 때 전개가 시작되며 Fig. 17의 5 ms 시점에서 지면과 충돌하는 시뮬레이션의 해석 결과인 Case 3의 해석 시간 별 전개 양상을 나타낸 것이다. Right 시점의 경우 대칭 형상이기에 형상의 1/2만을 나타내었다.

Figure 20을 보면, 10 ms 지점에서 Sigma Fold 방식의 외부 에어백이 초기 단계에서 전개가 빠르게 이루어지므로 충돌 후 더 많은 가스를 밀어내는 것을 확인할 수 있다. 하지만 Fig. 21과 Fig. 22에서 나타나듯이 Zigzag Fold 방식과 Roll Fold 방식의 외부 에어백은 초기 전개단계에서 Sigma Fold 방식 대비 전개가 느리게 이루어진다. 따라서 폴딩된 에어백들이 전개되지 않은 상태의 작은 부피로 높은 압력을 유지할 수 있으므로 PAV의 속도를 급격하게 감속시키는 것을 확인할 수 있다. 16 ms 이후인 충돌 후에는 거의 유사한 거동을 보이는 것을 확인할 수 있다.

이에 따라 Case 3에 PAV에 가해지는 가속도를 Table 9에 나타내었다. 21 ms 에서 모두 최대가속도를 보이며, Sigma Fold 방식의 에어백이 전달하는 충격력은 Roll Fold 대비 12.90%, Zigzag Fold 대비 4.56% 크다는 것을 확인하였다.

Table 9 PAV Acceleration Data for Case 3

Time (ms)	Roll Fold	Zigzag Fold	Sigma Fold
	A* (mm/msec ²)	A (mm/msec ²)	A (mm/msec ²)
6	0.612	0.632	0.757
9	2.171	2.096	2.121
12	4.060	3.205	2.538
15	3.705	3.727	3.972
18	4.696	5.683	6.018
21	5.591	6.126	6.419
24	4.769	4.900	5.153
ER**	12.899%	4.560%	0%

*Acceleration,

**Difference of Maximum Acceleration of Sigma Fold

External Airbag Volume Data for Case 3

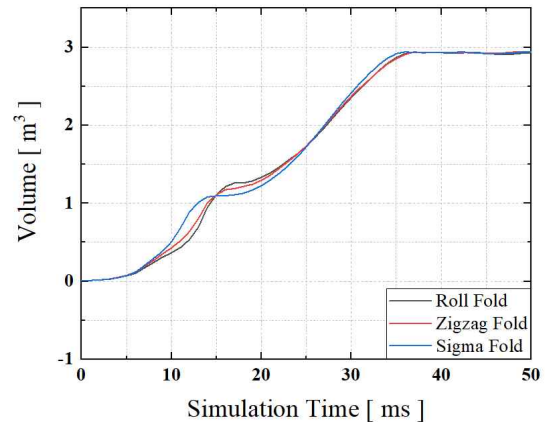


Fig. 21 Case 3 External Airbag Volume Data

External Airbag Pressure Data for Case 3

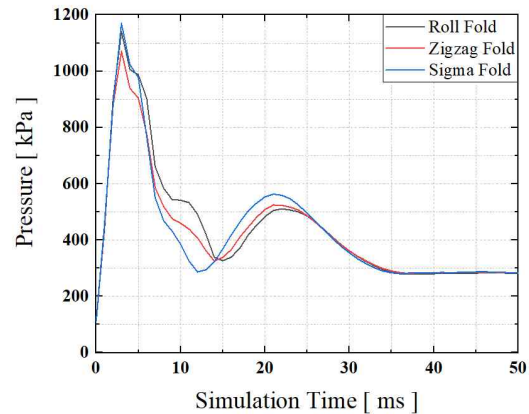


Fig. 22 Case 3 External Airbag Pressure Data

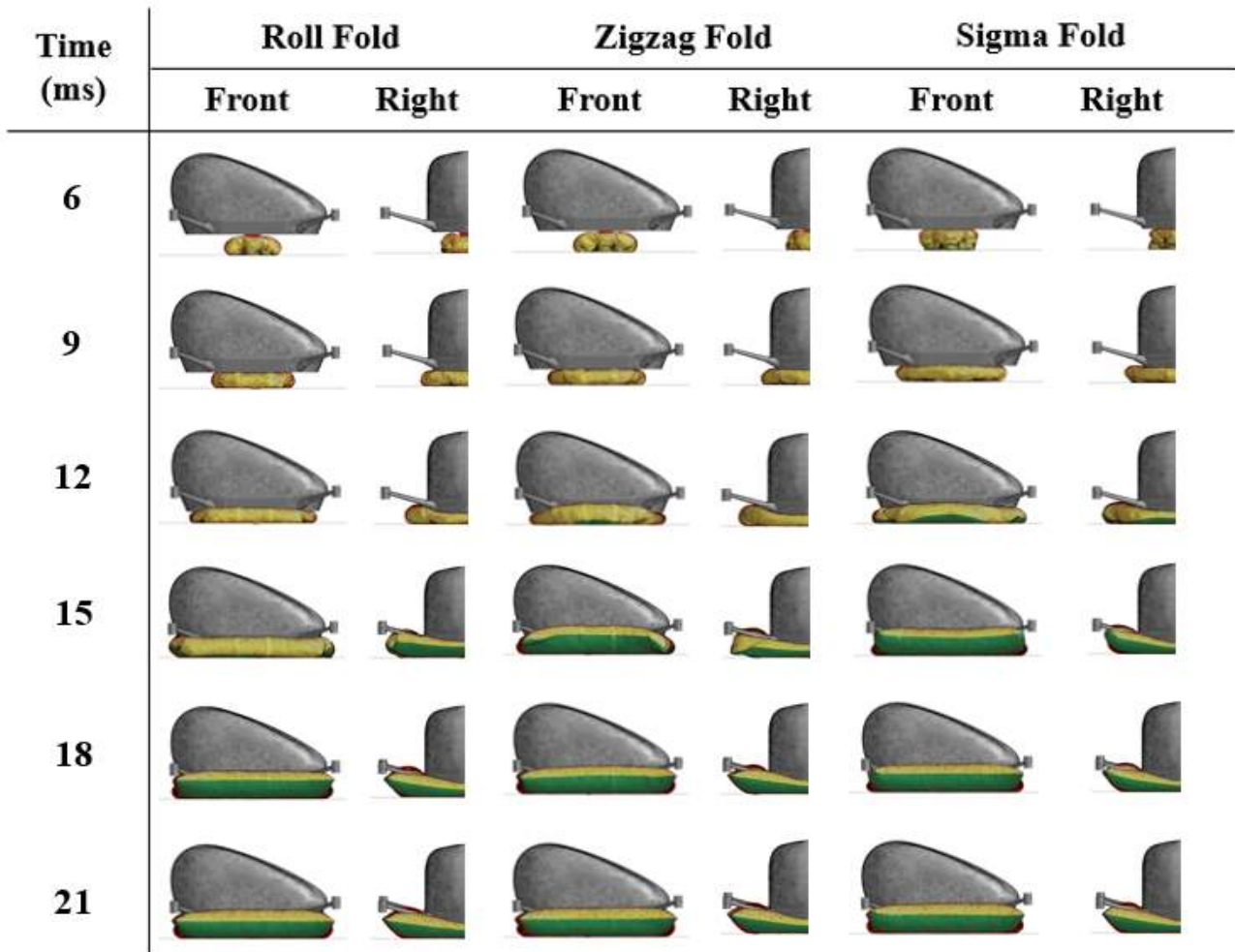


Fig. 23 The Shape of External Airbags in Free Fall Crash Over Time

4. 결 론

외부 에어백은 기체를 감싸기 위한 큰 부피를 상대적으로 작은 부피로 수납해야하므로 폴딩 횟수가 많아 지기에 팽창에 걸리는 시간이 상대적으로 일반적인 자동차 운전석 에어백 보다 길어질 수 있다. 따라서 외부 에어백의 폴딩 방법은 에어백의 팽창 시간을 줄이는 과정에 있어 중요한 역할을 한다.

먼저 외부 에어백을 모델링 하고 자유 전개 시뮬레이션을 통해 폴딩 방식에 따라 외부 에어백의 전개 경향을 확인하였다. 폴딩 방식에 따라 외부 에어백이 완전히 전개 되는 시간에 있어서는 큰 차이가 없었지만,

에어백이 전개되는 과정에서의 팽창 속도의 차이가 존재했으며 Sigma Fold 방식의 에어백이 다른 방식보다 상대적으로 빠르게 전개가 되는 것을 확인 할 수 있었다.

하지만 에어백은 지면과 충돌하기 직전 빠르게 전개가 되어야 하므로, 에어백이 완전하게 팽창되지 않은 상태에서의 충돌을 무시 할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 PAV를 가정한 모델에 외부 에어백을 장착하고 외부 에어백이 완전히 전개가 된 시점, 전개가 어느정도 진행되고 있는 시점, 막 전개를 시작하는 시점의 총 3가지 상황에서 자유낙하충돌 시뮬레이션을 수행하였다.

외부 에어백이 완전히 전개된 시점에서의 PAV에 전달 되는 충격력은 외부 에어백의 폴딩 방식에 따라 유의미한 차이가 없었다. 에어백의 전개가 어느정도 진행된 시점에서 충돌이 일어나는 경우 예상했던 것과는 달리 Sigma Fold 방식이 전개 속도가 가장 빠르지만 PAV에 가장 큰 충격력을 전달하는 것을 확인 할 수 있었으며, 전개 속도가 느린 대신 에어백 내부의 높은 압력을 유지시키는 Roll Fold 방식이 항공기에 가장 적은 충격력을 전달하는 것을 확인 할 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 멀티콥터형 PAV에 추락을 방지하기 위한 외부 에어백을 장착 할 경우, 상대적으로 적은 충격량을 PAV에 전달하는 Roll Fold 방식으로 폴딩 된 외부 에어백을 사용 하는 것이 더 항공기와 인명 피해 정도를 감소시킨다는 결론을 도출하였다.

후 기

이 논문은 2019년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 선도연구센터지원사업(No.2019R1A5A6099595)과 2020년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 이공학개인지초연구지원사업(No. NRF-2020R1I1A3A04036865) 및 교육부 및 한국연구재단의 4단계 두뇌한국21 사업(4단계 BK21 사업) 및 2017년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원-산업용 무인비행장치 전문인력양성사업(No. G02N05660000601)의 지원을 받아 수행된 연구임. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- [1] Jae-Young Cha, Ho-Yon Hwang, Han-Gyu Jeong, Seok-Beom Kim and Jon Ahn, "Certification Criteria, Patent Analysis and Aerodynamic Analysis for a Roadable PAV Design," *Journal of Advanced Navigation Technology*, vol. 21, no. 1, pp. 1-12, Feb, 2017.
- [2] Chang-Hwan Han, "A Study on the Domestic Development Strategy and the Foreign Research Trends for the Personal Air Vehicle(PAV)," *The Journal of Aerospace Industry*, vol. 82, no. 1, pp. 1-23, Feb, 2017.
- [3] Deog-Kwan Kim, "Technology Trend on the Status of the Electric Motor Rotorcraft," *Current Industrial and Technological Trend in Aerospace*, vol. 19, no. 1, pp. 32-41, Jul, 2019.
- [4] Steffen Mattern, DYNAmore GmbH, "DYNAmore Express: Overview on Airbag-Modeling Possibilities in LS-DYNA," *DYNAmore Express Webinar*, Oct, 2020.
- [5] Özgün Yücel, Mehmet Alaittin Hastaoglu, "Kinetic modeling and simulation of throated downdraft gasifier," *Fuel Processing Technology*, vol. 144, pp. 145-154, Apr, 2016.
- [6] Huajian Zhou, Zhihua Zhong and Manjiang Hu, "Design and Occupant-Protection Performance Analysis of a New Tubular Driver Airbag," *Engineering*, vol. 4, no 2, pp. 291-297, Apr, 2018.
- [7] D. Bendjaballah, A. Bouchoucha, M. L. Sahli and J-C. Gelin, "Numerical Analysis of side airbags deployment in out-of position situations," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 1-9, Mar, 2017.
- [8] Dong Woo Lee, Kwang Woo Jang, Lam Su Kim and Hyo Choong Bang, "Adaptive Control of PAV Considering changes in the Center of Gravity," *Proc. of The Korean Society for Aeronautical and Space Science Conference 2020, Korea*, pp. 229-230, Nov, 2020.
- [9] C.Hwang, M.Lee, K.Chung, S.Kim and E.Kim, "Worldwide Development Status of Urban eVTOL Air Taxi," *Proc. of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences Conference 2017, Korea*, pp. 507-508, Nov, 2017.