

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(12), 1027-1034(2016)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.12.1027>

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

충돌 입자의 크기에 따른 알루미늄 합금과 적외선창의 입자침식 저항성 연구

홍윤기*, 문관호

Research about Size Effect of Solid Particles on Erosion Resistance of Aluminum Alloy and Infrared Windows

Yun Ky Hong* and Kwan Ho Moon

Agency of Defence Development

ABSTRACT

In this research, experimental study about size effect of solid particles on erosion resistance is presented. A high-density polyethylene particle with a mm-sized diameter is accelerated using a two-stage light gas gun up to Mach number of approximately 3.0. An accelerated particle impacts aluminum alloy such as Al1050 and Al6061 T6, and infrared windows such as ZnS and sapphire specimens. For the aluminum alloy, craters that form on the surface of the specimens are measured to characterize the erosion resistance of the material. For the infrared windows, repetitive tests are conducted until a linear or circumferential crack is found to create damage threshold curves that define a material's erosive resistance. From the comparison of test data for various sizes of high-density polyethylene particles, it is found that erosion resistance of material is linearly dependent on the size of particles.

초 록

본 논문에서는 실험적 연구를 통해 고체 입자의 크기가 입자 침식에 미치는 영향에 대해 논하였다. 고밀도 폴리에틸렌 입자를 최고 속도 마하 3으로 이단 가스건을 이용해 발사하였다. 발사된 입자를 Al1050, Al6061 T6 알루미늄 합금과 ZnS, 사파이어 적외선창 시편과 충돌시켜 입자침식을 일으켰다. 알루미늄 합금의 표면에는 크레이터가 생성되었다. 크레이터의 크기를 통해, 알루미늄 합금의 입자침식 저항성을 살펴보았다. 적외선창은 시편 표면에 크랙이 생성될 때까지 반복해서 시험하였다. 이를 통해 적외선창의 입자침식 저항 특성을 나타내는 충돌 임계 곡선을 정의할 수 있었다. 다양한 크기의 고체 입자를 이용한 입자침식 시험을 통해, 고체 입자의 크기가 재료의 입자침식 저항성에 선형적으로 영향을 끼친다는 것을 확인할 수 있었다.

Key Words : Particle erosion(입자침식), Impact(충돌), High-density Polyethylene(고밀도 폴리에틸렌), Aluminum alloy(알루미늄 합금), Infrared window(적외선창)

† Received : August 30, 2016 Accepted : November 25, 2016

* Corresponding author, E-mail : shinehyk@gmail.com

I. 서 론

고체나 액체 입자의 충돌로 인해 재료가 손상되는 현상을 입자침식이라 한다. 입자침식은 다양한 환경에서 발생한다. 우주 환경에서는 먼지 입자나 우주 쓰레기와 위성 등의 충돌로 인해 발생하고, 대기 중을 비행하는 고속 비행체의 경우에는 공기 중에 존재하는 얼음, 물방울, 모래 등과의 충돌로 인해 발생할 수 있다[1-6].

침식 환경은 다양한 크기의 입자들로 구성된다. 각각의 입자가 미치는 영향을 시스템적으로 해석하기 위해서는 입자의 크기가 재료의 입자침식 저항 특성에 미치는 영향에 대한 규명이 필요하다. 물방울과 같은 액체 입자의 크기가 입자침식에 미치는 영향은 적외선창과 같은 소재에 대한 실험적 연구를 통해 규명된 바 있다[6]. 하지만 고체 입자의 크기가 재료의 입자침식에 미치는 영향에 대해서는 아직 정확하게 규명된 바 없다[7].

본 연구에서는 고속 비행체의 구조물에 많이 사용되는 금속 재료인 알루미늄 합금 시편과 적외선 탐색기창 시편에 대한 입자침식 시험을 통해, 고체 입자의 크기가 재료의 입자침식 저항 특성에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 고체 입자로는 수 mm 크기의 구형의 고밀도 폴리에틸렌 (High-density Polyethylene, HDPE) 입자를 이용하였고, 이단 가스건을 통해 최대 마하 3의 속도로 발사하였다.

II. 시험 장치

Figure 1에 본 연구에 사용된 이단 가스건을 도시하였다. 공기로 채워진 고압 챔버를 통해 피스톤이 가속되고, 가속된 피스톤에 의해 입자가 발사된다. 발사된 입자의 속도는 다이오드 레이저와 디텍터 및 오실로스코프를 통해 측정된다[1].

발사된 입자는 고속카메라 (FASTCAM SA-X2)

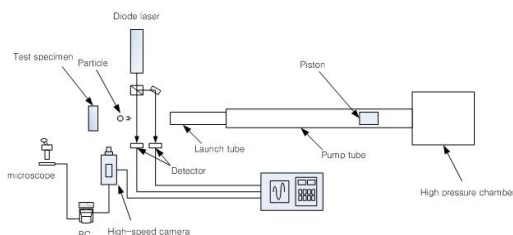


Fig. 1. Schematic of experimental facility

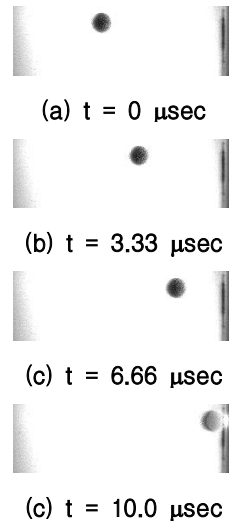


Fig. 2. Successive images taken by the high-speed camera for a HDPE particle with a diameter of 2 mm at impact velocity of 1045 m/s

를 통해 256 x 80의 해상도로 매 3.33 μsec당 촬영되었으며, 노출 시간은 300 nsec이다. 본 시험에서는 1, 2, 3 mm의 지름을 가진 구형의 HDPE 입자를 발사하였다. Fig. 2에 1045 m/s의 속도로 발사된 지름 2 mm의 입자가 Al1050 시편과 충돌하는 영상을 도시하였다. Fig. 2(c)에서 충돌 지점에 강한 섬광이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 충돌 순간에 발생하는 높은 충돌 압력으로 인해 생성된 충격파에 의해 발생한 것이다.

III. 알루미늄 합금 시험

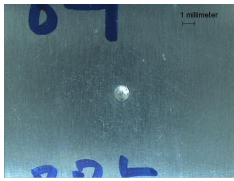
Al1050과 Al6061 T6 합금을 입자침식 시험에 이용하였다.

3.1 Al1050 시편 시험

크기 50 mm X 50 mm와 두께 5 mm를 가진 Al1050 시편에 대한 입자침식 시험을 수행하였다.

지름 1, 2, 3 mm의 입자가 각각 885, 877, 811 m/s의 속도로 시편과 충돌했을 때 생성된 크레이터들을 Fig. 3에 나타냈다. 충돌 입자의 크기가 클수록 시편 표면에 동그랗게 생성된 크레이터의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다.

충돌 입자의 크기와 크레이터 크기(너비, 깊이)를 다양한 속도 영역에서 비교하기 위해, 마하 3



(a) Particle diameter: 1 mm, Impact velocity: 885 m/s



(b) Particle diameter: 2 mm, Impact velocity: 877 m/s



(c) Particle diameter: 3 mm, Impact velocity: 811 m/s

Fig. 3. Al1050 specimens impacted by HDPE particles

이하의 속도에서 입자침식 시험을 수행하였고, 그 결과가 Fig. 4, 5와 같다. Fig. 4에는 시편 표면에 생성된 크레이터의 너비를, Fig. 5에는 크레이터의 깊이를 도시하였다.

Figure 4와 5에서 점선은 지름 2 mm의 입자 충돌로 인해 생성된 크레이터의 크기를 선형적으로 피팅한 추세선이다. 이 추세선과 시험 결과의

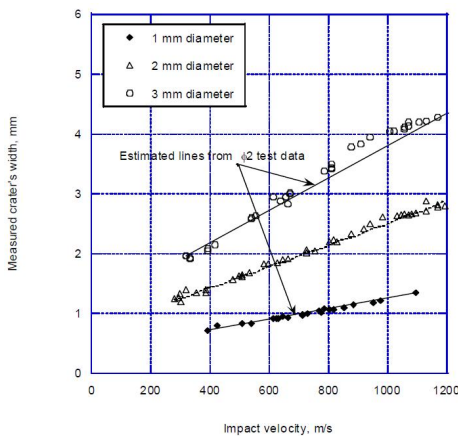


Fig. 4. Crater's width for Al1050 specimens impacted by HDPE particles

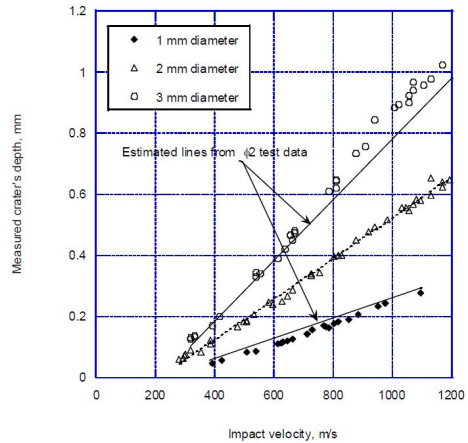


Fig. 5. Crater's depth for Al1050 specimens impacted by HDPE particles

Table 1. Correlation coefficient between measured and estimated crater's sizes for Al1050 specimens

Particle size	Crater's width	Crater's depth
	Correlation coefficient, R	Correlation coefficient, R
1 mm	0.982	0.943
2 mm	0.996	0.998
3 mm	0.987	0.983

상관 계수를 Table 1의 입자 지름 2 mm에 해당하는 항목에 나타냈다. 시험 결과와 추세선은 크레이터의 너비와 깊이의 경우, 각각 0.996, 0.998의 높은 상관 관계를 보인다.

충돌 입자의 크기가 크레이터의 크기에 미치는 영향을 파악하기 위해, 아래와 같이, 이들이 서로 선형적으로 비례한다고 가정하였다.

$$\frac{L_{D_2}}{L_{D_1}}, \frac{H_{D_2}}{H_{D_1}} = \frac{D_2}{D_1} \quad (1)$$

위 식에서 L, H, D는 각각 크레이터의 너비, 깊이, 충돌 입자의 크기를 나타낸다. 위 식과 앞에서 구한 추세선을 이용해, 지름 1, 3 mm의 입자가 충돌했을 경우 생성되는 크레이터의 너비와 깊이를 예측할 수 있다. 예측된 결과를 Fig. 4와 5에 실선으로 표시하였다. 예측한 크레이터의 크기와 실제 시험 결과가 가지는 상관계수를 표 1에 함께 나타냈다. Table 1에서 입자 지름 1 mm와 3 mm에 해당하는 수치가 이 값들을 의미한다. 지름 1 mm 입자의 경우, 크레이터 너비는 0.982, 깊이는 0.943, 지름 3 mm 입자의 경우, 너비는 0.987, 깊이는 0.983의 높은 상관관계를 보

이는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해, 앞서 제시한 크레이터의 크기가 입자의 크기에 선형적으로 비례한다는 가정이 성립한다는 것을 확인할 수 있다.

3.2 Al6061 시편 시험

크기 50 mm X 50 mm와 두께 5 mm를 가진 Al6061 T6 시편에 대해서도 앞의 Al1050과 마찬가지로 입자침식 시험을 수행하였다.

Figure 6에 지름 1, 2, 3 mm의 HDPE 입자와 각각 1032 m/s, 1008 m/s, 1032 m/s의 속도로 충돌한 시편들을 나타냈다. Al1050의 경우와 마찬가지로, 충돌 입자의 크기가 커질수록 크레이터의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다.

마하 3이하의 속도에서 시험한 시편에 생성된 크레이터의 너비와 깊이를 Fig. 7과 8에 정리하였다. 앞의 Al1050 시험에서와 마찬가지로 크레이터의 크기가 입자의 크기에 비례한다는 가정을 적용해 시험 결과를 분석했다. Fig. 7과 8에서 점선은 지름 2 mm의 입자가 충돌했을 때 생성되는 크레이터의 크기를, 실선은 이를 바탕으로 지름 1, 3 mm가 충돌했을 때 생성될 것으로 예측되는 크레이터의 크기를 나타낸다. 예측된 크레



(a) Particle diameter: 1mm, Impact velocity: 1032m/s



(b) Particle diameter: 2mm, Impact velocity: 1008m/s



(c) Particle diameter: 3mm, Impact velocity: 1032m/s

Fig. 6. Al6061 specimens impacted by HDPE particles

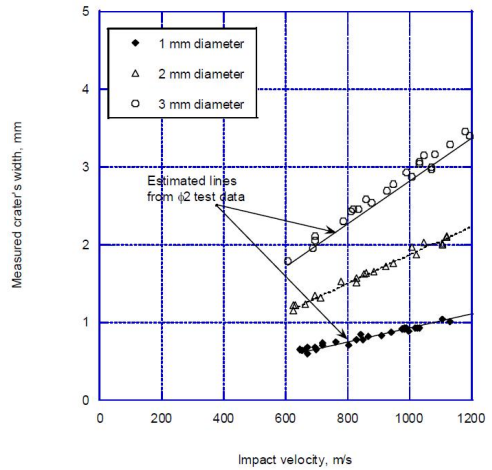


Fig. 7. Crater's width for Al6061 specimens impacted by HDPE particles

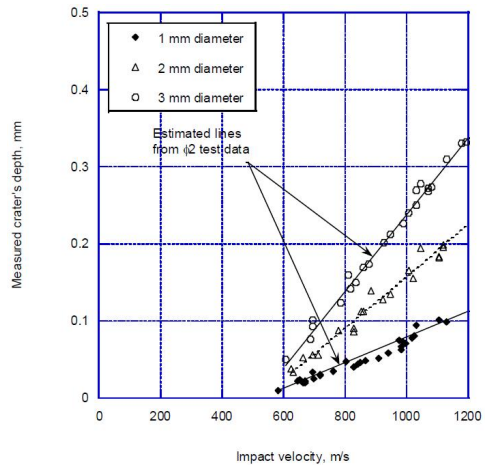


Fig. 8. Crater's depth for Al6061 specimens impacted by HDPE particles

Table 2. Correlation coefficient between measured and estimated crater's sizes for Al1050 specimens

Particle size	Crater's width	Crater's depth
	Correlation coefficient, R	Correlation coefficient, R
1 mm	0.987	0.975
2 mm	0.994	0.991
3 mm	0.974	0.974

이터의 크기와 실제 시험 결과와의 상관 계수가 Table 2와 같다. Al1050의 경우와 마찬가지로 표를 통해, 직경 1 mm와 3 mm에 대한 예측 결과와 시험 결과의 상관 계수가 높다는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해, 앞서 제시한 크레이터의 크

기가 입자의 크기에 선형적으로 비례한다는 가정이 성립한다는 것을 다시 한 번 확인할 수 있다.

IV. 적외선창 시험

ZnS와 사파이어 적외선창에 대한 입자침식 시험을 수행하였다.

4.1 ZnS 적외선창 시험

화학증착법(Cheical vapor deposite, CVD)으로 생산된 ZnS 적외선창에 시험에 이용하였다. 시편의 지름은 20 mm, 두께는 4 mm이다. 코팅되지 않은 시편과 양면에 1.34 mm 두께의 무반사(Anti-reflection, AR) 코팅된 시편 두 가지를 시험에 이용하였다. 적외선창은 앞에서 시험한 알루미늄 합금과 달리, 피로 파괴와 같이, 반복적인 입자 충돌로 인해 손상을 받는다. 따라서, 입자침식 시험을 시편에 선형 혹은 원형상의 크랙이 생성될 때까지 반복해서 수행하였다.

Figure 9에 시험한 시편을 도시하였다. 왼쪽 시편은 평균 263 m/s의 속도에서 2회 충돌 후 손상된 시편이고, 오른쪽 시편은 339 m/s의 속

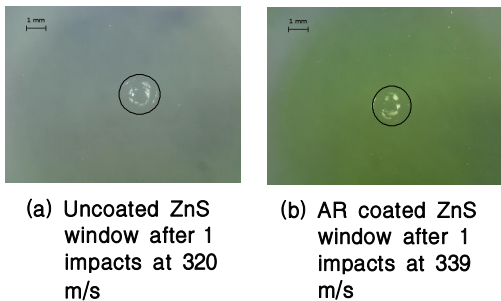


Fig. 9. ZnS window impacted by HDPE particles with a diameter of 2 mm

Table 3. Uncoated ZnS window impacted by HDPE particles with a diameter of 2 mm

Specimen	Average Impact velocity, m/s	Standard deviation, m/s	Number of impacts	Remarks
Z-6.1-9	320	0	1	
Z-6.1-10	315	0	1	
Z-6.1-11	305	0	1	
Z-6.1-12	285	2.3	2	
Z-6.1-13	285	4.6	2	
Z-6.1-14	263	19.5	2	
Z-6.1-15	210	6.0	15	
Z-6.1-18	195.2	6.6	33	
Z-6.1-17	177.0	5.5	100	No damage

Table 4. AR coated ZnS window impacted by HDPE particles with a diameter of 2 mm

Specimen	Average Impact velocity, m/s	Standard deviation, m/s	Number of impacts	Remarks
Z-6.2-11	339	0	1	
Z-6.2-9	313	12.3	3	
Z-6.2-14	267	14.4	4	
Z-5.2-8	207	16.2	18	
Z-6.2-15	201	7.6	19	
Z-6.2-16	177.5	6.0	40	
Z-6.2-17	161.9	11.3	100	No damage

도에서 1회 충돌 후 손상된 시편이다. 그림에서 원으로 표시된 부분이 충돌 지점을 가리킨다. 두 시편 모두 표면에 원형상의 크랙이 생성된 것을 확인할 수 있다.

다양한 속도 영역에서 지름 2 mm의 HDPE 입자를 충돌시켜 획득한 시험 결과가 Table 3과 4와 같다. 이 표를 통해, 시편이 손상을 입기 시작할 때의 충돌 횟수를 확인할 수 있다. Table 3과 4의 시험 결과를 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있다. 그림을 통해, 충돌 속도가 빠를수록 더 적은 충돌 횟수에서 손상이 시작된다는 것을 확인할 수 있다.

또한, Fig. 10에서 AR 코팅된 재료와 코팅되지 않은 재료는 서로 유사한 입자 충돌 저항 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 AR 코팅된 적외선창에 재료의 강도를 높일 수 있는 Diamond-like-carbon(DLC) 코팅과 같은 것들이 적용되지 않았기 때문으로, 당연한 결과라 할 수 있다.

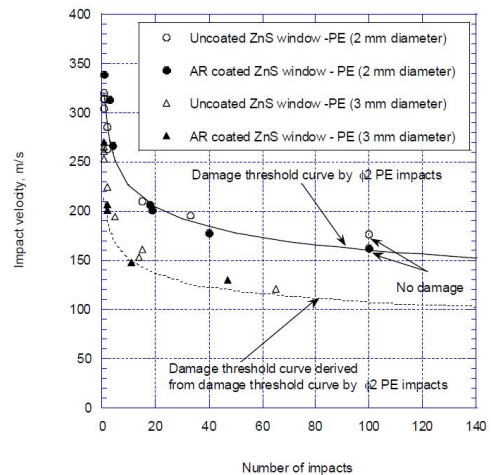


Fig. 10. Damage Threshold Curve for ZnS window for impact by HDPE particles

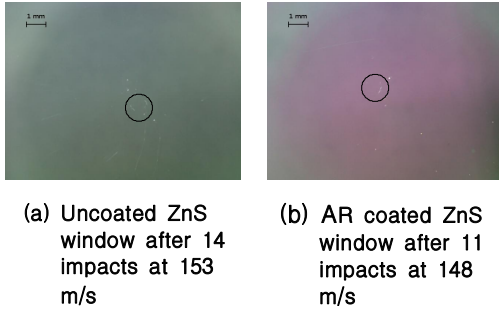


Fig. 11. ZnS window impacted by HDPE particles with a diameter of 3 mm

그림에 보이는 실선은 직경 2 mm의 입자를 이용한 충돌 시험 결과로부터 도출된 손상 임계 곡선(Damage Threshold Curve, DTC)이다. [2] 이 곡선은 적외선창과 같이 반복적인 충돌로 인해 손상을 입는 재료들의 입자침식 저항 특성을 나타내기 위해 주로 사용된다.

직경 3 mm의 HDPE입자를 이용해서도 입자 침식 시험을 수행하였다. Fig. 11에 시험한 시편들을 도시하였다. 왼쪽에는 평균 153 m/s의 속도로 14번 충돌해 손상된 시편을, 오른쪽에는 평균 148 m/s의 속도에서 11번 충돌해 손상된 시편을 도시하였다.

Table 5과 6에 지름 3 mm의 입자와 충돌한 시편에 대한 시험 결과를 정리하였다. 이 시험 결과들을 앞에 제시된 Fig. 10에 함께 정리하였다. 앞에서와 마찬가지로, AR 코팅된 시편과 코팅되지 않은 시편이 유사한 침식 저항 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

Figure 10에 보이는 점선은 2 mm의 입자 충돌 시험결과로부터 충돌 임계 속도가 직경에 반비례한다는 아래와 같은 가정하에 유추한 결과이다.

$$\frac{DTV_{D_2}}{DTV_{D_1}} = \frac{D_1}{D_2} \quad (2)$$

실선과 직경 2 mm에 해당하는 시험 결과의 상관계수는 0.967이고, 점선과 직경 3mm에 해당하는 시험 결과의 상관계수는 0.912로, 이들 모두 높은 상관관계를 보여주는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 앞의 식 (2)와 같은 가정이 타당하다는 것을 증명할 수 있다.

참고로, 고체 입자가 아닌, 물방울과 같은 액체 입자가 적외선창과 같은 재료와 충돌할 경우에는 앞의 식 (2)와는 다른 아래와 같이 관계식이 성립한다고 알려져 있다[6].

Table 5. Uncoated ZnS window impacted by HDPE particles with a diameter of 3 mm

Specimen	Average Impact velocity, m/s	Standard deviation, m/s	Number of impacts	Remarks
Z-14.1-3	266	0	1	
Z-14.1-2	261	0	1	
Z-14.1-4	253	0	1	
Z-14.1-5	225	2.3	2	
Z-14.1-6	195.0	4.6	5	
Z-14.1-8	161.3	19.5	15	
Z-14.1-16	153.0	6.0	14	
Z-14.1-15	121.4	7.1	65	

Table 6. AR coated ZnS window impacted by HDPE particles with a diameter of 3 mm

Specimen	Average Impact velocity, m/s	Standard deviation, m/s	Number of impacts	Remarks
Z-14.2-17	270	0	1	
Z-6.2-8	207	9.8	2	
Z-6.2-7	202	4.9	2	
Z-24.2-1	148	12.1	11	
Z-24.2-4	129.5	6.31	47	

$$\frac{DTV_{D_2}}{DTV_{D_1}} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

본 실험을 통해, 고체 입자와 액체 입자의 크기가 입자 침식 저항 특성에 미치는 영향이 서로 다르다는 것을 확인할 수 있다.

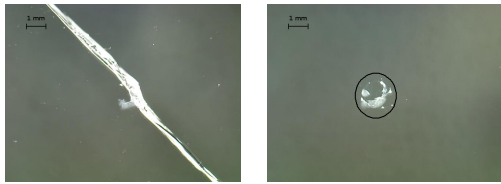
4.2 Sapphire 적외선창 시험

C-plane(0001) 사파이어 적외선창을 이용해 입자침식 시험을 수행하였다. 30 mm X 30 mm의 크기와 두께 3 mm를 가진 코팅되지 않은 시편과 지름 20 mm와 두께 3 mm를 가진 양면에 0.36 μm 두께의 무반사(Anti-reflection, AR)코팅된 시편 두 가지를 시험에 이용하였다.

입자침식 시험은 앞의 ZnS와 마찬가지로 시편에 선형 혹은 원형의 크랙이 생성될 때까지 반복 수행하였다.

Figure 12에 시험한 시편을 도시하였다. 왼쪽 그림에서 평균 1119 m/s의 속도에서 1회 충돌 후 손상된 시편을 확인할 수 있다. 오른쪽 그림에서는 521 m/s의 속도에서 26회 충돌 후 손상된 시편을 확인할 수 있다. 왼쪽 시편에는 선형 크랙이, 오른쪽 시편에는 원형상의 크랙이 생성된 것을 확인할 수 있다.

지름 2 mm의 HDPE입자를 이용한 시험 결과를 Table 7과 8, Fig. 13에 정리하였다. 앞의 ZnS의 경우와 마찬가지로, 충돌 횟수가 많을수록 더



(a) Uncoated Sapphire window after 1 impacts at 1119 m/s (b) AR coated Sapphire window after 26 impacts at 521 m/s

Fig. 12. Sapphire window impacted by HDPE particles with a diameter of 2 mm

Table 7. Uncoated Sapphire window impacted by HDPE particles with a diameter of 2 mm

Specimen	Average Impact velocity, m/s	Standard deviation, m/s	Number of impacts	Remarks
S-2.1-16	1119	0	1	
S-2.1-15	980	11.6	3	
S-2.1-14	916	6.1	2	
S-2.1-13	836	17.4	4	
S-2.1-10	722	22	5	
S-2.1-11	665	26	12	
S-2.1-12	626	21	16	
S-2.1-9	532	23	47	
S-2.1-17	468	18.8	77	

Table 8. AR coated Sapphire window impacted by HDPE particles with a diameter of 2 mm

Specimen	Average Impact velocity, m/s	Standard deviation, m/s	Number of impacts	Remarks
S-2.2-13	1020	0	1	
S-2.2-12	934	0	2	
S-2.2-11	882	13.4	4	
S-2.2-9	730	25	5	
S-2.2-10	626	33	15	
S-2.2-15	559	22	22	
S-2.2-17	521	16.3	26	
S-2.2-18	489	20.7	93	
S-2.2-14	477	20.9	100	No damage

낮은 속도에서 손상되기 시작한다는 것과 AR 코팅된 재료와 코팅되지 않은 재료는 입자 충돌 저항 특성에서 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있다.

그림에 보이는 실선은 직경 2 mm의 충돌 시험 결과로부터 도출된 손상 임계 곡선(Damage Threshold Curve, DTC)이다[2].

직경 3 mm의 HDPE 입자를 이용해 시험한 사파이어 시편을 Fig. 14에 나타냈다. 왼쪽에는 평균 598 m/s의 속도로 1번 충돌해 선형 크랙이

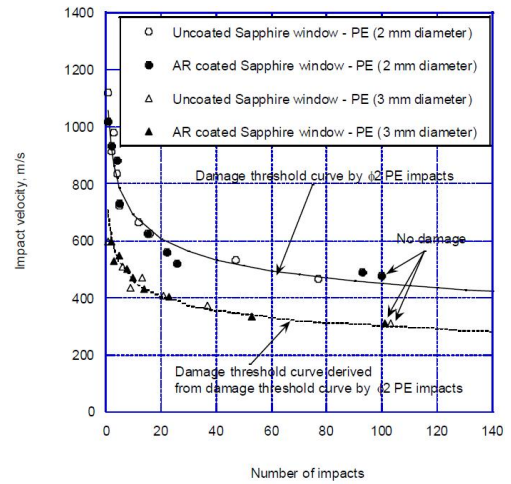
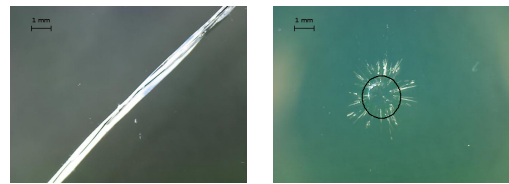


Fig. 13. Damage Threshold Curve for Sapphire window for impact by HDPE particles



(a) Uncoated Sapphire window after 1 impacts at 598 m/s (b) AR coated Sapphire window after 10 impacts at 470 m/s

Fig. 14. Sapphire window impacted by HDPE particles with a diameter of 3 mm

생성된 시편을, 오른쪽에는 평균 470 m/s의 속도에서 10번 충돌해 원형상의 크랙이 생성된 시편을 도시하였다.

Table 9와 10에는 지름 3 mm의 입자와 충돌한 시편에 대한 시험 결과를 정리하였다. 시험 결과는 앞의 Fig. 13에 함께 표시하였다. 앞에서와 마찬가지로, AR 코팅된 시편과 코팅되지 않은 시편이 동일한 침식 저항 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다.

Figure 13에 보이는 점선은 앞의 ZnS 창과의 경우와 같이 2 mm의 입자 충돌 시험 결과로부터 충돌 임계 속도가 직경에 반비례한다는 앞에서 제시된 식 (2)와 같은 가정하에 유추한 결과이다. 실선과 직경 2 mm 시험 결과는 0.976의 상관 계수를 보이고, 점선과 직경 3 mm 시험 결과는 0.921의 상관 계수를 보인다. 이를 통해, 액체에 의한 입자 침식과 달리 고체 입자의 크기가 손상 임계 속도에 선형적으로 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다.

Table 9. Uncoated Sapphire window impacted by HDPE particles with a diameter of 3 mm

Specimen	Average Impact velocity, m/s	Standard deviation, m/s	Number of impacts	Remarks
S-2.1-5	598	0	1	
S-11.1-1	510	21	6	
S-2.1-7	472	18.6	13	
S-2.1-8	437	30	9	
S-2.1-6	408	16.3	21	
S-11.1-3	375	19.0	37	
S-2.1-18	310	18.9	103	

Table 10. AR coated Sapphire window impacted by HDPE particles with a diameter of 3 mm

Specimen	Average Impact velocity, m/s	Standard deviation, m/s	Number of impacts	Remarks
S-2.2-3	601	3.7	2	
S-2.2-2	548	16.2	5	
S-2.2-1	530	6.1	3	
S-2.2-4	500	10.6	8	
S-2.2-5	470	11.5	10	
S-2.2-6	432	16.6	14	
S-2.2-7	406	17.9	23	
S-12.2-2	336	16.8	53	
S-12.2-6	311	18.0	101	No damage

V. 결 론

본 연구에서는 수 mm 크기의 직경을 가진 HDPE 입자를 이용해 입자 침식 시험을 수행하였다. 시편으로는 고속 비행체에 많이 이용되는 알루미늄 합금과 적외선 관측을 위한 창으로 많이 이용되는 ZnS와 사파이어를 이용하였다. 시험을 통해, 알루미늄 시편에 생성되는 크레이터의 크기와 적외선창의 손상 임계 속도가 입자 크기에 선형적으로 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 이전에 제시된 물방울에 의한 적외선창의 손상이 입자 크기의 1/3승에 영향을 받는다는 결과와 차이를 보이는 연구 결과로, 본

연구를 통해, 고체 입자의 크기가 재료의 입자 침식 저항성에 미치는 영향을 파악할 수 있었다.

References

- 1) Hong, Y. K., Park, C., and Baek, S. W., "High Velocity Impact of Ice Particles on a Composite Material," *Journal of Composite Materials*, Vol. 43, No. 17, 2009, pp.1819~1834.
- 2) Seward, C. R., Pickles, C. S. J., Coad, E. J., Watt, M., and Field, J. E., "Studies of Rain Erosion Mechanisms in a Range of IR Transmitting Ceramics - Including Coated Samples," Cavendish Lab., SPC-92-4032, 1994.
- 3) Adler, W. F., Flavin, J. W., and Richards, J. P., "Multiple Simulated Waterdrop Impact Damage in Zinc Sulfide at Supersonic Velocities," *SPIE Window and Dome Technologies and Materials II*, Vol. 1760, 1992, pp. 303~315.
- 4) Adler, W. F., "Rain Impact Retrospective and Vision for the Future," *Wear*, Vol. 233-235, 1999, pp.25~38.
- 5) Hand, R. J., Field, J. E., and Townsend, D., "The Use of Liquid Jets to Simulate Angled Drop Impact," *Journal of Applied Physics*, Vol. 70, 1991, pp.7111~7118.
- 6) Kennedy, C. F., and Field, J. E., "Damage Threshold Velocities for Liquid Impact," *Journal of Materials Science*, Vol. 35, 2000, pp.5331~5339.
- 7) Yildiran, Y., Avcu, E., SaHin, A. E., Fidan, S., Yetistiren, H., and Sinmazcelik, T., "Effect of Particle Impact angle, Eroderent Particle Size and Acceleration Pressure on the Solid Particle Erosion Behavior of 3003 Aluminum Alloy," *Proceedings of the 3rd International Congress APMAS2013*, April, 2013, Antalya, Turkey.