비활성 요소의 방호 메커니즘 분석

An Analysis on the Protection Mechanism of Some Inert Reactive Cassettes

주 재 현*
Jae-Hyun Joo

최 준 홍*
Joon-Hong Choi

이 헌 주*
Heon-Joo Lee

이 창 현*
Chang-Hyun Lee

Abstract

In this study, a series of ballistic experiments have been performed to investigate the protection mechanism of some inert reactive cassettes against shaped charge jet. Three kinds of material were tested as a core material of the inert cassettes, i.e. one of rubber materials, a high modulus and high strength composite material used for ballistic protection and a mixture of energetic materials. Parameters such as deformation of the cassettes, occurrence time of jet distortion, leading jet length and residual penetration depth were investigated from the experiments and they were compared to each other quantitatively according to the jet incidence angles. The results show that the increment of cassette deformation caused jet distortion to occur early and jet distortion brought decrease of the length of leading jet. Then the decrease of the length of leading jet accompanied the decrease of residual penetration depth.

Keywords : Shaped Charge Jet(성형작약탄 제트), Flash X-ray(섬광 X선), Inert Reactive Cassette(비활성 요소), Residual Penetration Depth(잔류관통깊이)

1. 서론

일반적으로 장갑차량의 측면은 정면에 비해 방호력이 떨어지므로 RPG7과 같은 성형작약탄의 공격에 매우 취약하다. 따라서 이를 방호하기 위한 부가장갑으로 폭발형 반응장갑(Explosive Reactive Armor)^[1]이 개발되었지만 폭발형 반응장갑은 고폭화약 사용으로 인해 차량 구조의 손상 가능성, 폭압과 파편에 의한 아군 피해, 주변 반응장갑의 동반 상실로 인한 취약부위

증가 등의 문제점이 있으므로 이를 극복하기 위해 고폭화약 대신 비활성 물질을 사용한 비활성 반응장갑이 개발되고 있다^[2~4]. 비활성 반응장갑은 고무, 복합재료 등의 물질을 이용한 NERA(Non-Energetic Reactive Armor)와 추진제 등의 에너지 물질을 이용한 NxRA(Non-explosive Reactive Armor) 등으로 구분되는데 NERA 보다는 NxRA가 성능이 더 좋은 것으로 나타난다^[5]. 비활성 반응장갑 개발에 필요한 주요 기술적인 활동 중의 하나는 여러 가지 비활성 물질에 대한 제트 방호성능을 관찰하여 최적의 비활성 물질을 선택하고 설계에 적용하는 것으로 이를 위해서는 물질에 따른 요소의 성능 분석 실험과 함께 장갑의 방호기구(Protection Mechanism)에 대한 연구가 필요하다. 따라

† 2012년 4월 24일 접수~2012년 8월 24일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 주재현(jhjoo@add.re.kr)

서 본 연구에서는 비활성 반응장갑 설계에 필요한 지배적인 설계인자를 식별하고 비활성 반응장갑의 방호기구를 규명하기 위한 실험 연구를 수행하였다^[6].

비활성 반응장갑의 방호기구 연구를 위해서는 수십 μ s의 매우 짧은 시간내에 이루어지는 성형작약탄의 제트에 의한 비활성 요소(금속판/비활성 물질/금속판의 샌드위치 구조로서 비활성 반응장갑의 핵심구조임)의 관통 현상을 순간적으로 포착하여 가시화 하는 기술이 필요하다. 이러한 비활성 요소의 방호 기구 분석에 섬광 X선이 효과적으로 사용되고 있다^[7,8].

본 연구에서는 비활성 요소의 방호기구 분석과 비활성 물질간의 성능비교를 위해 화약 충전 직경(Charge Diameter)이 40mm급인 성형작약탄을 이용하여 3종류의 비활성 요소에 대한 관통시험을 수행하였으며 비활성 요소 관통시 요소와 제트의 상호거동을 가시화 하기 위해 Scandiflash Model 300^[9] 장비를 이용하여 섬광 X선 사진을 획득하였다. 본 연구에서 사용한 비활성 요소 시편은 길이와 폭이 각각 150mm와 70mm이며 한 장의 두께가 2mm인 연강판 두 장 사이에 두께 10mm의 비활성 물질을 배열한 샌드위치 구조로서 비활성 물질은 고무 계열 물질, 방탄소재로 사용되는 경량 고강도의 복합재료 및 산화제, 결합제, 촉매제 등의 혼합물인 비폭발성 에너지 물질 등 3종류의 물질을 적용하였다. 한편 제트 입사각에 따른 성능비교를 위해 45°와 60°의 두 종류의 제트의 입사각으로 실험하였으며 본 연구에서 사용한 성형작약탄의 제트의 속도가 대략 7km/s 임을 고려하여 제트가 요소 시편을 관통한 뒤인 탄 기폭후 51 μ s와 91 μ s에서 각각 제트와 요소 시편의 거동을 분석하기 위한 섬광 X선 사진을 획득하였다. 또한 51 μ s에서의 섬광 X선 실험시 비활성 요소간의 성능을 정량적으로 비교하기 위해 RHA(Rolled Homogeneous Armor) 입증판에 대한 잔류관통깊이를 측정하였다.

2. 실험 과정

본 연구에서는 제트에 대한 비활성 요소의 방호기구 분석을 위해 Scandiflash Model 300 섬광 X선 장비(최대 300kV 출력, 2개의 X-ray tube 헤드 사용)를 사용하였다. 실험 장치 및 치구 배열은 Fig. 1에서 보는 것과 같으며 X-ray tube 헤드를 시편의 정면에 위치시키기 위해 2개의 X-ray tube 헤드를 수직으로 적층하여 배열

하였으며 제트의 잔류관통깊이를 측정하기 위해 RHA 입증판을 설치하였다. 또한 제트의 속도를 측정하기 위해 한 쌍의 make-screen을 제작하여 제트가 통과하는 경로인 지지대 치구 상판의 아래면과 첫 번째 RHA 입증판의 윗면에 각각 설치하였으며(Fig. 2) 제트가 make-screen을 관통할 때의 신호를 탐지하고 분석하기 위해 오실로스코프를 사용하였다. Fig. 1의 실험 배열에서 X-ray tube 헤드와 시편 중심까지의 거리(STOD : Source To Object Distance)는 약 2250mm, X-ray film에서 시편 중심까지의 거리(FTOD : Film To Object Distance)는 160mm 이다.

Fig. 1. Experimental setup

요소 시편은 Fig. 2에서 보는 것처럼 “ㄱ”자 모양의 앵글 두 개를 일정한 간격을 두고 지지대 치구 상판 밑에 클램프로 고정하여 설치한 뒤 앵글에 시편을 매다는 방식으로 제트 입사각이 45° 또는 60°가 되도록 경사지게 고정하였다. Fig. 2의 실험배열에서 탄과 시편사이의 이격거리(Standoff)는 탄 파편 보호치구와 지지대 치구의 두께 50mm를 포함하여 시편의 중앙까지 약 160mm(제트 입사각이 45°인 경우)로 약 4.5CD에 해당되며 제트의 입사각이 60°인 경우는 시편이 아래로 더 기울어지므로 이격거리가 170mm로 증가한다. 탄과 RHA 입증판 사이의 이격거리는 470mm로 약 13.2CD에 해당된다. Fig. 3은 실험에 사용한 요소 시편의 실제 형상으로 샌드위치 구조의 바깥판인 연강판의 크기는 150mm×70mm이며 비활성 물질은 요소의 조립(M6볼트 사용)을 고려하여 120mm×70mm의 크기로 정하였다.

Fig. 2. Installation of test specimen and make-screens

Fig. 3. Shape of an inert cassette used in the test

3. 실험 결과 및 분석

가. 섬광 X선 사진 비교

Fig. 4 ~ Fig. 6은 본 연구에서 획득한 섬광 X선 사진중 일부로서 같은 제트 입사각에서의 각 물질 요소의 시간대별 제트와 요소의 거동을 보여준다. Fig. 4(a)는 제트 입사각이 45°인 조건에서 고무계열 요소에 대한 제트 관통 거동을 비교한 것으로 탄 기폭후 51 μ s에서는 요소의 변형이 시작되는 단계이고 제트도 요소와의 간섭에 의한 별다른 손상을 받지 않은 반면 40 μ s가 더 경과한 후인 91 μ s에서는 요소의 변형이 크게 증가하였으며 제트의 선단 부위는 큰 이격거리를 진행하는 동안에 제트의 인장으로 인해 파단(Breakup)이 발생하였으며 제트 중반부위에서는 요소와의 간섭에 의한 결과인 일그러짐(Distortion)이 발생한 것을 볼 수 있다.

Fig. 4. Flash X-ray photographs for a rubber material cassette (a) and a high modulus composite material cassette (b)

Fig. 4(b)는 제트 입사각이 60° 인 조건에서 방탄소재용 복합재료 물질을 사용한 요소에 대한 제트 관통 거동을 비교한 것으로 $51\mu\text{s}$ 에서는 요소의 변형이 크지 않고 제트도 요소에 의해 손상되지 않은 반면 $91\mu\text{s}$ 에서는 요소의 변형이 크게 증가하였고 요소와의 간섭에 의한 제트의 일그러짐이 많이 발생한 것을 볼 수 있다.

Fig. 5. Flash X-ray photographs of the interaction between an inert mixture material cassette and a jet at two consecutive times(incident angle : 45°)

제트입사각이 45° 인 조건에서의 비폭발성 물질 요소에 대한 제트 관통후의 거동은 Fig. 5에서 보는바와 같이 $51\mu\text{s}$ 에서 다른 물질 요소와 비교하여 요소의 변

형이 증가하였으나 제트의 손상은 발생하지 않았으며 $91\mu\text{s}$ 에서는 다른 물질 요소에 비해 요소의 변형이 크게 증가하였으며 제트의 일그러짐이 Fig. 4(b)의 경우와 같이 요소를 관통한 제트에서 광범위하게 발생함을 볼 수 있다.

Fig. 6. Flash X-ray photographs of the interaction between an inert mixture material cassette and a jet at two consecutive times(incident angle : 60°)

Fig. 6은 제트입사각을 45°에서 60°로 증가시킨 조건에서의 비폭발성 물질 요소에 대한 제트 관통후의 거동을 나타낸 것으로 제트 입사각이 45°인 경우(Fig. 5)와 비교하여 51 μ s에서 제트의 일그러짐이 이미 발생하였으며 91 μ s에서는 제트 입사각 45° 경우와 비슷하게 제트의 일그러짐이 다수 발생한 것을 볼 수 있다.

나. 설계변수와 실험결과간의 상관관계 분석

본 연구에서 획득한 X선 사진에 있는 강철자의 구멍 간격(50mm 또는 100mm)을 알고 있으므로 축적비율을 이용하면 Fig. 4 ~ Fig. 6과 같은 X선 사진에서 임의의 두 점 사이의 거리를 구할 수 있다. 이러한 분석 기법을 이용하여 요소의 변형량과 제트의 침투 부분에서부터 제트의 일그러짐이 발생하기 전까지의 제트의 손상되지 않은 부분인 제트 선단 부위의 길이를 측정하였으며 제트의 침투에서부터 요소 시편의 전/후면까지의 제트 길이를 본 연구에서 make-screen 기법으로 측정한 제트의 평균속도인 7.05km/s로 나누어 그 거리만큼 제트가 이동하는데 걸리는 시간을 구한 뒤 제트 침투의 도달시간인 51 μ s 또는 91 μ s로부터 빼면 제트가 요소에 도달한 시간과 제트가 요소로부터 빠져나오기 시작한 시간 등을 추정할 수 있다. 제트의 일그러짐이 발생한 경우에 제트의 일그러짐이 발생한 시간은 제트의 침투가 요소를 관통하면서 빠져나오기 시작하는 시간에 제트 선단부가 요소로부터 완전히 빠져나오는데 걸리는 시간을 더하여 추정하였다.

본 연구에서는 물질에 따른 요소의 성능비교와 제트에 대한 비활성 요소의 방호기구 분석을 위해 Fig. 7과 같이 물질의 종류와 제트 입사각(또는 요소의 경사각)과 같은 설계 변수와 실험 결과에서 얻은 변수들을 구분한 뒤 설계변수에 따른 실험결과 변수의 변화 경향을 살펴보았으며 실험 결과 변수들 간의 상관관계를 분석하여 상호간에 어떤 연관성이 있는지를 조사하였다.

물질에 따른 요소의 변형량을 탄 기폭후의 시간 경과에 따라 Fig. 8과 같이 표시하였다. Fig. 8에서 고무 계통의 물질 요소를 cassette A, 방탄소재용 고강성 복합재료 물질 요소를 cassette B, 비폭발성 에너지 물질 요소를 cassette C라고 표시하였으며 제트의 입사각 조건을 함께 표시하였다. Fig. 8에서 시간이 경과함에 따라 세 종류의 요소들이 모두 변형량이 증가하는 결과를 보여 주었으며 비폭발성 물질 요소인 cassette C의 변형량이 가장 큰 것으로 나타났다.

Fig. 7. A plan to investigate the interrelation of design variables and experimental results

Fig. 8. Deformation of cassettes according to time passage after ignition of the shaped charge warhead

제트의 일그러짐은 제트가 비활성 요소를 관통한 후에 발생하는 중요한 특징이다. 이는 제트가 물질을 관통함에 따라 제트의 운동에너지가 비활성 물질의 내부에너지로 변환되어 물질의 내부에너지가 증가하여 물질이 팽창함으로써 요소의 대변형을 일으켜 후속제트와 간섭이 발생하여 생기는 현상이다. 제트 입사각에 따른 제트 일그러짐 발생 시간을 Fig. 9에 표시하였다. 그림에서 보듯이 제트의 일그러짐이 가장 빨리 발생하는 경우는 제트 입사각이 60°일 때의 비폭발성 물질 적용 요소(Cassette C)이다. 그림에서 고무 계열 물질 요소의 경우 45°와 60°의 제트 입사각에서 제트 일그러짐 시작 시간에 거의 차이가 없었으나 복합재료 물질요소와 비폭발성 물질 요소에서 제트 입사각이 증가함에 따라 제트 일그러짐 발생시간이 감소(즉 제트 입사각이 증가하면 제트 일그러짐이 더 빨리 발생)함을 알 수 있다.

Fig. 9. Comparison of jet distortion initiation time according to jet incidence angles

본 연구에서는 세 종류의 물질요소의 제트에 대한 방호성능을 정량적으로 비교하기 위해 RHA 입증판에 대한 잔류관통깊이를 측정하였으며 제트 입사각에 따른 잔류관통깊이를 Fig. 10과 같이 비교하였다.

Fig. 10. Comparison of depth of penetration into RHA witness plate according to jet incidence angles

세 종류의 요소 모두 45°에서 60°로 제트 입사각이 증가함에 따라 RHA 입증판에 대한 잔류관통깊이는 감소하였으며 45°와 60°의 제트 입사각에서 모두 비폭발성 에너지 물질 요소의 잔류관통깊이가 가장 작은 것으로 나타났다.

세 종류의 물질 요소에 대하여 제트 입사각에 따른 요소의 변형량, 제트 일그러짐 발생 시간, 제트 일그러짐이 발생하지 않은 제트 선단부 길이, RHA 입증판에 대한 잔류관통깊이를 비교한 결과 본 연구에서 사용한 세 종류의 물질 요소 중에서 비폭발성 에너지 물질 요소가 가장 우수한 것으로 나타났다.

이번에는 본 연구에서 실험결과를 분석하기 위해 식별한 매개변수인 요소 변형량, 제트 일그러짐 발생 시간, 제트 선단부 길이, 잔류관통깊이 간의 상관관계를 분석하였다. 요소와의 간섭에 의한 제트의 일그러짐이 발생하는 시간과 제트 선단부 길이를 Fig. 11과 같이 비교하였다. 그림에서 보듯이 제트의 일그러짐 발생 시간과 제트 선단부의 길이는 비례의 관계가 있으므로 제트의 일그러짐이 빨리 발생할수록 제트 선단부의 길이가 짧아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 11. Relation between jet distortion initiation time and leading jet length

제트 선단부의 길이와 잔류관통깊이의 관계를 Fig. 12에 비교하였다. 그림에서 보듯이 제트 선단부의 길이와 잔류관통깊이는 비례의 관계가 있으므로 제트 선단부의 길이가 길수록 잔류관통깊이가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 12. Relation between leading jet length and depth of penetration into RHA witness plate

이상과 같이 분석한 결과를 종합하면 본 연구에서 고려한 세 종류의 비활성 물질 요소는 모두 제트 관통에 따른 요소의 변형량이 발생하였으며 요소의 변형량은 요소의 종류에 따라 차이가 발생하였다. 또한 요소의 종류에 따라 제트 일그러짐 발생 시간, 제트 선단부 길이 및 잔류관통 깊이에 차이가 발생하였다. 본 연구에서 분석한 바에 의하면 제트에 대한 비활성 요소의 방호기구 단계간의 상관관계는 제트 관통후 요소의 변형량이 증가함에 따라 후속제트의 일그러짐이 빨리 발생하였으며 이에따라 요소를 관통하였음에도 불구하고 장갑에 대한 관통성능을 상실하지 않은 제트 선단부의 길이가 짧아져서 결국 RHA 입증판에 대한 잔류관통깊이가 감소하는 상관관계가 있음을 알 수 있다. 요소의 변형량 증가와 제트 일그러짐의 발생 시간 단축은 모두 잔류관통깊이 감소의 결과를 가져왔으며 제트 입사각의 증가는 제트 일그러짐 발생 시간 단축, 제트 선단부 길이 감소 및 잔류관통깊이 감소의 결과를 가져왔다.

4. 결 론

본 연구에서는 비활성 반응요소의 방호기구 분석과 성능 비교를 위해 고무 계열 물질 요소, 방탄소재용 경량 고강성 복합재료 물질 요소 및 비폭발성 에너지 물질 요소 등 세 종류의 비활성 요소에 대한 성형작약탄 제트 관통 실험을 수행하였으며 실험에서 획득한 설파X선 사진을 분석하여 요소 변형량, 제트 일그러짐(Distortion) 발생 시간, 제트 선단부 길이, 잔류관통깊이와 같은 결과변수들을 식별하였고 물질의 종류와 제트 입사각과 같은 설계변수와 이들 결과변수와의 상관관계 및 결과 변수들 상호간의 상관관계를 정량적으로 분석하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

요소 종류에 따라 제트 관통시 요소 변형량에 차이가 발생하였으며 본 연구에서 사용한 세 종류의 물질 요소 중에서 비폭발성 에너지 물질 요소가 요소의 변형량이 가장 큰 것으로 나타났다. 요소 변형량의 증가는 제트 일그러짐이 빨리 발생하도록 하여 요소 관통

후에도 성능이 약화되지 않은 제트 선단부의 길이를 감소시켜 결국 잔류관통깊이를 감소시키는 연쇄적인 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 또한 요소를 제트에 대해 경사지게 설치하여 제트의 입사각을 증가시키는 것이 제트 일그러짐을 빨리 발생시켜 잔류관통깊이를 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

References

- [1] Valery Grigoryan, Nikolay Dorokhov, "Evolution of ERA for Light-armoured Fighting Vehicles", http://www.be-and-co.com/oaf_pdf/oaf01103338.pdf
- [2] S. Friling, M. Benyami, D. Yaziv, "The Interaction of Shaped Charge Jets with Combined Reactive - Inert Cassettes", 14th International Symposium on Ballistics, pp. 227~235, 1993.
- [3] K. Thoma, D. Vinckier, J. Kiermeir, "Shaped Charge Jet Interaction with Highly Effective Passive Sandwich Systems - Experiments and Analysis", Propellants, Explosives, Pyrotechnics 18, pp. 275~281, 1993.
- [4] Manfred Held, "Disturbance of Shaped Charge Jets by Bulging Armour", Propellants, Explosives, Pyrotechnics 26, pp. 191~195, 2001.
- [5] 미국 특허 US20090078346A1(Extremely Insensitive Detonating Substance and Method for its Manufacture).
- [6] 주재현, 최준홍, 구만희, 이현주, 설파 X선 장비를 이용한 비활성 요소의 작동기구 실험 및 분석(II), 국방과학연구소, ADDR-519-111245, 2011.
- [7] A. Holzwarth, K. Weimann, "Combination of Inert and Energetic Materials in Reactive Armor Against Shaped Charge Jets", 19th International Symposium on Ballistics, pp. 1523~1530, 2001.
- [8] ZU Xu-dong et al., "Dip Angle Effect on the Impact of Polybutylene Rubber Composite Target Resistance to Jet Penetration", 25th International Symposium on Ballistics, pp. 1239~1246, 2010.
- [9] Instruction Manual SCANDIFLASH MODEL 300, Mirror Electronics Co.