Research Paper DOI: http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2016.20.2.067

폭발볼트의 구속환경에 따른 분리메커니즘 연구

정동희[a,*] · 이영우[b]

Study of Separation Mechanism According to the Constraint Condition of Explosive Bolts

Donghee Jeong[a,*] · Youngwoo Lee[b]
[a] *Energetic Material & Pyrotechnics Department, Hanwha Corporation R&D Institute, Daejeon, Korea*
[b] *Daejeon Center, Defense Agency for Technology and Quality, Korea*
[*] *Corresponding author. E-mail: hanwhacell@hanwha.com*

ABSTRACT

Explosive bolt is one of separation device that uses high explosive charge, and is separated by pressure formed by an explosion and the resulting shock waves. Explosive bolt having such a mechanism would have to be designed to minimize shock and debris formation generated during separation. In this study, separation tests were carried out with distance as variable for restraining the explosive bolt (Air Gap). Bolt release and its separating shape with variation of air gap is observed, and we used accelerometer to measure the shock wave transmitted through a bound object. In addition, separation behavior of explosive bolt is analyzed using ANSYS AUOTODYN program. By comparing the results of previously performed experiments and analysis, we could confirm the effects of air gap to the release behavior of explosive bolt, and decide optimum constraining environment for specific separation bolts.

초 록

폭발볼트는 고폭약를 사용하는 분리장치의 하나로서 폭발볼트의 내부에서 형성되는 폭압 및 충격파에 의해 분리된다. 이러한 메커니즘을 갖는 폭발볼트는 분리시 생성되는 충격파 및 파편형성 최소화되도록 설계되어야 할 것이다. 본 연구에서는 폭발볼트 및 볼트를 구속하는 구속물과의 거리(Air gap)을 변수로 두어 분리시험을 수행하였다. 이때 Air gap 따른 분리유무 및 분리 형상을 확인 하였고, 가속도 센서를 이용하여 구속물의 전달되는 Pyro-shock를 측정하였다. 또한 ANSYS Autodyn 프로그램을 이용하여 폭발볼트의 분리거동을 해석하였다. 실험 및 해석으로부터 폭발볼트와 구속물 사이의 Air gap 크기에 따른 폭발볼트의 분리거동에 미치는 영향을 확인하였고 특정 볼트에 한해서 최적의 폭발볼트의 구속환경을 설정하였다.

Key Words: Explosive Bolt(폭발볼트), Pyro Device(분리장치), AUTODYN Program(오토딘프로그램)

Received 2 December 2015 / Revised 2 March 2016 / Accepted 9 March 2016
Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548
[이 논문은 한국추진공학회 2015년도 추계학술대회(2015. 11. 25-27, 경주 현대호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

폭발볼트는 고폭화약의 폭발력 및 충격파의

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(a) (b)

Fig. 1 (a) Rupture type and (b) Ridge cut type.

힘으로 체결된 두 구조물을 분리시키는 파이로 디바이스 장치이고 같은 결합력을 가지는 분리 장치들에 비해 크기가 작고 작동원리가 단순하여 분리 신뢰도가 높은 장점을 가지고 있어 우주발사체 및 유도탄의 고정부 분리, 단분리, 연료탱크 분리, 낙화산 분리 등 다양하게 사용되고 있다[1]. 폭발볼트는 Fig. 1에서와 같이 형상에 따라 파열형과 Ridge-cut형으로 구분된다. Ridge-cut형은 특정 부의의 노치(notch)나 리지(ridge)을 만들어 화약폭발에 의해 생성된 충격파가 이 부위에서 상호작용을 이르켜 절단이 되도록 설계되어 파열형보다 적은 화약으로 깨끗하고 재현성 있는 분리면을 얻으면서 분리시 파편형성이 적어 기술적으로 발전된 폭발볼트이다[2]. 폭발볼트는 기능적으로 신뢰도가 높은 분리장치이지만 분리시 미세한 파편 및 충격파가 발생된다. 이러한 충격파는 수백 g에서 수만 g의 가속도 값을 가지고 있기 때문에 우주 발사체 및 유도탄의 전자 장치 및 기계장치의 손상과 오작동을 유발하여 발사 시스템 실폐의 원인이 되기도 한다. 따라서 분리시 미세파편 및 충격파가 최소화 되도록 폭발볼트의 최적의 구속환경을 설계해야 할 것이다.

본 연구는 Ridge-cut형 폭발볼트 분리시 발생되는 충격파를 차단을 위한 폭발볼트 및 구속치구 사이의 Air Gap의 거리를 변수로 정하여 충격량 측정시험을 수행하였다. 이때 거리에 따른 충격량의 크기 및 파단면 형상의 상호 작용을 관찰하였다. 또한 AUTODYN 프로그램을 이용하여 폭발볼트의 분리거동을 해석을 수행하여 이를 검증하였다.

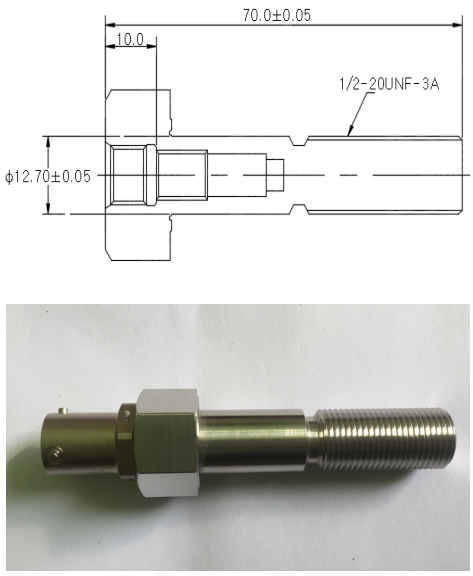


Fig. 2 The shape of Explosive Bolt.

Table 1. Specification of Specimen.

Type	Rigde-cut
Bolt Size	1/2 inch
Material	17-4 PH
Operating Current	5.0 A(Min)

2. 충격량 측정시험

21 시험시료 및 구속치구 형상

시험에 사용된 폭발볼트의 형상은 Fig. 2와 같고 Ridge-cut 형태로 볼트 사이즈는 1/2 inch 이다 폭발볼트의 재료물성 및 특징은 Table 1과 같다. Fig. 3, 4는 폭발볼트의 Pyro-shock 측정을 위한 치구로 상부, 하부로 구성되어 있고 하부 치구에 센서를 구멍을 삽입하여 Pyro-shock를 측정하였다. 상부 베이스 및 하부 베이스는 나사결합 방식으로 연결 되었으며 폭발볼트 몸체는 작동 후에도 상부 구속치구에서 분리가 되지 않도록 하였다.

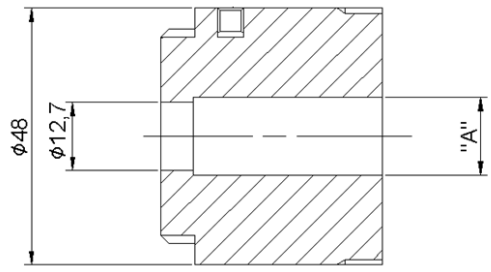


Fig. 3 Upper confinement.

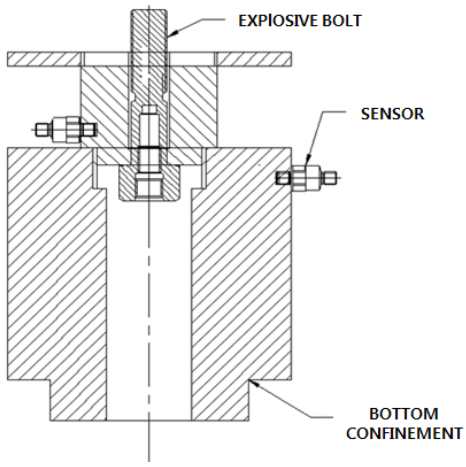


Fig. 4 Test Equipment of Pyro-shock.

Table 2. Specification of sensor.

Maker	KISTLER
Type	8743A100
S/N	2005302
Measuring range	±100 kg
Sensitivity	0.0568 mv/g
Resonant frequency	100 kHz

Table 3. Confinement condition of “A”.

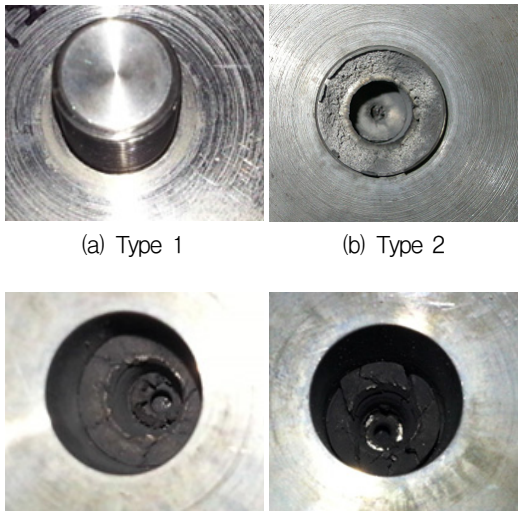
Condition	A(mm)	Condition	A(mm)
Type Ⅰ	Φ12.8	Type Ⅲ	Φ14.8
Type Ⅱ	Φ13.8	Type Ⅳ	Φ15.8

2.2 시험장비 및 시험방법

폭발볼트 Pyro-shock 측정에 사용된 계측프로그램은 B&K 社의 Pulse Labshop 14.1이고 계측장비로는 Pulse analyzer Type 3050-A-060을 사용하였다. 폭발볼트의 Pyro-shock은 상부 베이스의 내경인(Air gap) "A"의 크기를 변화시키면서 측정하였다. Air gap의 크기는 Table 3과 같고 각각 Type별 2개씩 시험을 수행하였다.

2.3 Air gap 길이에 따른 시험 결과

Fig. 5는 조건별 폭발볼트의 분리면을 확인 할 수 있다. 폭발볼트와 상부베이스의 길이(Air gap)이 따라 분리면 다르게 나타나는 것을 알 수 있으며 Air gap의 크기가 큰 조건일수록 절단면이 고르지 않고 요철 및 크렉이 크게 발생되었다. Type 1인 경우는 대부분의 폭발볼트가 분리되었지만 Fig. 5(a)와 같이 볼트 주변에 크렉만 발생되고 분리되지 않는 경우도 있었다. 이와는 다르게 Table 4에 나타난 Pyro-shock 측정결과 Air gap의 크기가 클수록 Pyro-shock 즉 가속도 값이 작아지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6은 Pyro-shock의 최대값과 Air gap에 대하여 관계식으로 나타내었다. Fig. 7은 Pyro-shock의 시간별 가속도 값을 그래프로 나타내었다.



(a) Type 1 (b) Type 2

(C) Type 3 (D) Type 4

Fig. 5 The shape of Separation plane.

Table 4. Measured values at sensor.

No.	A(mm)	g(m/s^2)		
		+Max.	-Max	Mean
1	Φ12.8	978	157	567
2	Φ12.8	1200	100	650
3	Φ13.8	360	40	200
4	Φ13.8	249	122	185
5	Φ14.8	334	130	232
6	Φ14.8	158	96	127
7	Φ15.8	159	85	122
8	Φ15.8	249	103	176

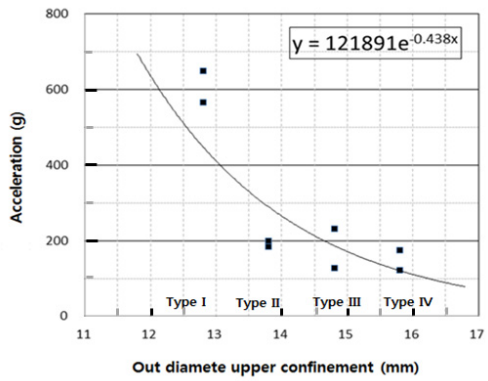
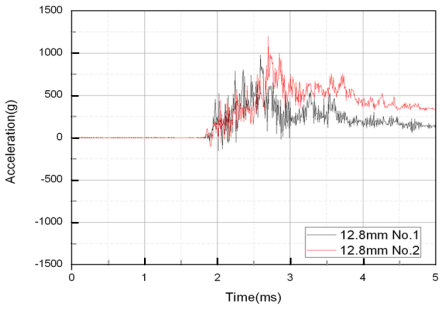


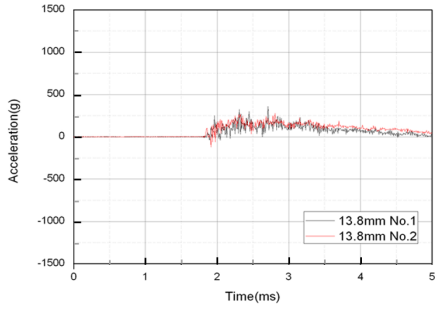
Fig. 6 The relationship at sensor.

2.4 구속 조건의 최적화

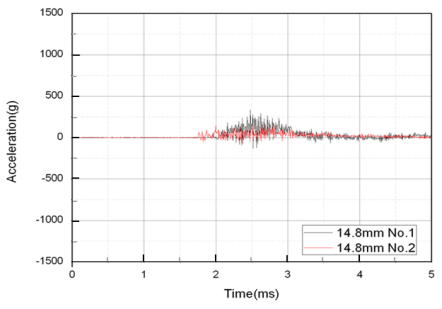
Ridge-cut형 폭발볼트의 경우 분리시 충격파가 볼트의 Ridge부위에 도달 후 자유면에 반사되어 나오는 충격파의 중첩에 의해 분리되는 원리이다. 폭발볼트의 구속환경을 설계할 때 Pyro-shock의 크기가 작고 이와 동시에 파편 발생도 최소화 되는 방향으로 설계해야 할 것이다. 시험결과 Type II에서 파단면이 제일 깨끗하고 크렉 및 파편형성이 없었다. 또한 Pyro-shock 측정 결과 Air Gap이 커질수록 작아지는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 Type II와 나머지 Type III, IV에서의 Pyro-shock의 차이가 크지 않기 때문에 파편형성이 없는 Type II가 1/2 inch 폭발볼트 구속환경에 있어 가장 적절하다고 판단된다.



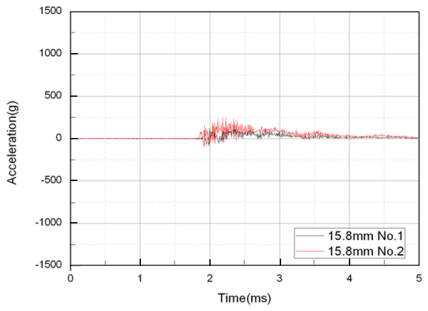
(a) Pyro-shock graph of Type I



(b) Pyro-shock graph of Type II



(c) Pyro-shock graph of TypeIII



(d) Pyro-shock graph of TypeIV

Fig. 7 Graph of pyro-shock depend on Type.

3. 유한요소 해석

3.1 해석모델 및 Material 구성

폭발볼트의 해석모델은 Solidworks 프로그램을 이용하여 구성하였다. 3D모델링을 2D화 시킨 후 step파일로 저장하여 AUTODYN 프로그램에 적용하였다. 폭발볼트는 축대칭 형태이므로 2D 및 3D 해석 결과가 큰 차이가 나타나지 않기 때문에 해석시간을 단축시키기 위하여 2D화 시켰다. Fig. 8은 1/2 inch 폭발볼트의 모델이다. 폭발볼트의 기폭 트레인은 LA, PETN, RDX가 사용된다. 착화기가 1차적으로 LA을 기폭 시키고 그다음 PETN을 기폭 시킨다. 최종적으로 RDX가 폭발하여 폭발볼트가 분리된다. LA는 폭발볼트 몸체에 미치는 영향은 작기 때문에 해석모델에서 포함시키지 않다.

폭발볼트, 슬리브 및 분리치구에 적용되는 재료는. 17-4PH의 거동 해석을 위한 상태방적으로는 Mie-Gruneisen 기반의 Shock 상태 방정식을 적용하였다[3]. Shock 상태방정식을 통해 고체 내부의 충격파면(Shock front)이 D 속도로 진행하며, 충격파면 뒤의 입자(particle)가 속도 u로 진행하는 경우를 둘의 관계를 얻을 수 있으며, 충격파 통과 후 재료의 거동을 해석하기 위해 필요한 상태방정식은 Eq. 1-3으로 정의할 수 있다.

$$P = P_H + \Gamma\rho\left[e - e_H\right] \tag{1}$$

$$P_H = c_o^2(v_o - v)/\left[v_o - s(v_o - v)\right]^2 \tag{2}$$

$$e_H = \frac{1}{2}P_H(v_o - v) \tag{3}$$

D : Shock wave velocity
u : particle velocity u($D = c_o + su$)
c_o, S : Hugoniot parameters (c_o: bulk speed of sound, s: Hugoniot slope coefficient)
P : Denote the pressure
e : Internal energy / v: volume
r : Gruneisen Parameter

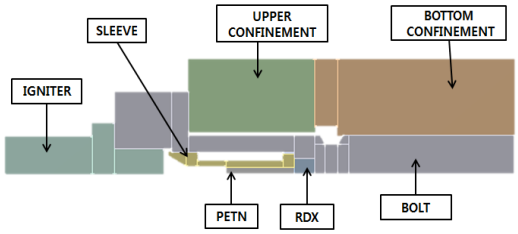


Fig. 8 Analysis Model(1/2 inch).

17-4PH 재료의 거동은 유동응력을 유효변형율과 유효변형 속도항으로 표현된 Jhonnson and Cook(JC) 모델을 적용하였다[4]. 이 소재 모델은 변형률 속도를 고려한 비선형 소성거동 모델에서 광범위 하게 사용되고 있으며 Eq. 4로 표현된다. JC 모델은 크게 3가지 항으로 구성되어져 있는데 첫째항은 변형률에 의한 응력의 변화정도를 지수형식으로 기술한 변형률 경화 항이고, 둘째 항은 변형률 속도의 영향성을 로그형식으로 기술한 변형률 속도 경화 항이며, 마지막 항은 소성일과 재료온도상승에 기인한 재료 연화를 표현한 항이다. 또한 폭발볼트는 빠른 시간 안에 분리되기 때문에 17-4PH 재료는 취성 가까운 성질의 파괴거동 나타난다. 따라서 취성재료의 파괴현상과 가장 접합한 Principal stress 조건을 적용하여 볼트의 파손 모델조건으로 사용하였다. Table 5는 재료 물성치를 표시하였다.

$$Y = \left[A + B\varepsilon_p^n\right]\left[1 + C\log\varepsilon_p^*\right]\left[1 - T_H^m\right] \tag{4}$$

A, B, n, C, m : material Constants
ε_p : effective plastic strain
ε_p^* : normalized effective plastic strain
T_H : $(T - T_r)/(T_m - T_r)$
Tr : Room Temperature
T_m : Melting Temperature

PETN, RDX의 거동 해석은 고체화약과 기체 반응생성물의 혼합 상태인 화약의 폭발상태를 설명하는 JWL(Jones-Wilkins-Lee) 상태방정식으로 모사하였다. JWL 상태방정식을 통해 화약의 폭발 반응이 끝나고 난 지점인 C-J 점(Chapman-

Jouguet Point)과 폭굉 부산물의 단열 팽창을 정의할 수 있다[5]. JWL 상태 방정식은 경험적인 방정식으로 폭굉 부산물 팽창 초기 상태의 실험적 형상을 정확하게 예측가능하며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$P = Ae^{-R_1 v} + Be^{-R_2 v} + \frac{C}{v^{1+\omega}} \quad (5)$$

위의 식을 v(specific volume)에 대해 적분하고 C에 대해 유도하면 Eq. 5로 나타나고 최종적으로 Eq. 6을 Eq. 5에 대입하면 Eq. 7과 같은 형태의 JWL 방정식을 구할 수 있다.

$$C = \omega v^{\omega}[E_s - \frac{A}{R_1}e^{-R_1 v} + \frac{B}{R_2}e^{-R_2 v}] \quad (6)$$

$$P = A[1 - \frac{\omega}{R_1 v}]e^{-R_1 v} + B[1 - \frac{\omega}{R_2 v}]e^{-R_2 v} + \frac{\omega E_s}{v} \quad (7)$$

PETN 및 RDX의 물성은 각각 PETN 1.5와 COMP-3의 물성으로 적용하였다.

Table 5. Material Data of 17-4 PH.

Parameter	S-7 STeel (17-4 PH)
Reference Density	7.86(g/cm^3)
A	1.47e6 [KPa]
B	4.47 [KPa]
n	0.18
c	0.012
m	1
T_H	1763 [K]
Γ	**2.17**
G	2.0 [KPa]
v	0.272
Principal Tensile Failure Stress	2.8×10^6
Erosion strain	3

3.2 경계조건 및 해석조건 설정

폭발볼트의 경계조건은 볼트몸체가 아닌 구속치구 상하부에 Fixed support로 설정하였으며 볼트와 접촉되는 외부 공기는 해석상 일정 크기의 도메인으로 정의하고 유동의 경계면에 Flow Out 조건을 설정하였다. 본 해석에서는 2D-축대칭 해석이므로, 회전축은 flow out 경계조건 적용에서 제외하였다. 폭발볼트 몸체, 상하부치구 및 SLEEVE는 Lagrange 요소를 사용하였고 크기는 0.2-0.5 mm 이다. 볼트 주변은 Air 영역을 정의 하고 Euler 2D Multi-material로 요소로 구성하였고 크기는 0.1 mm 이다. Euler-Lagrange Interactions를 고려하여 정확한 해석을 수행하기 위해서는 Euler 요소 크기가 Lagrange 요소 크기보다 2배 이상 작아야 한다. 해석모델은 Fig. 10와 같이 이를 만족한다. 폭발 위치는 해석에서 제외시킨 LA와 맞닿는 PETN에 Point exploding을 설정하였다. Fig. 9는 위의 해석 조건을 나타내었다.

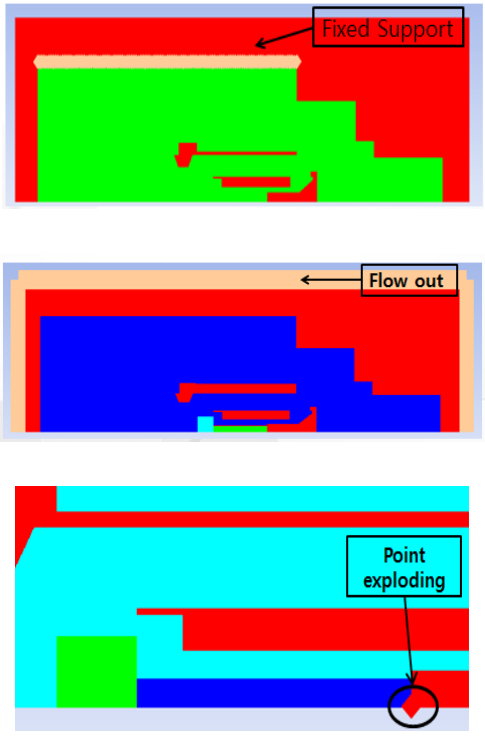


Fig. 9 Boundary conditions for the analysis.

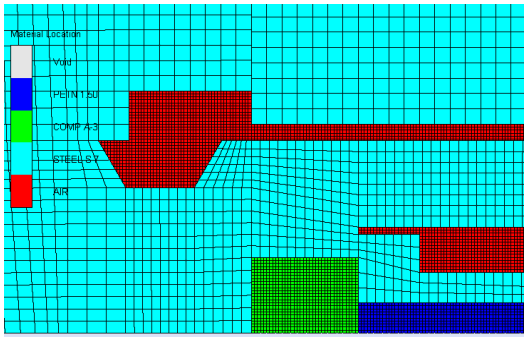
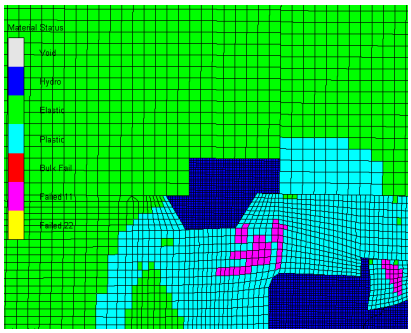


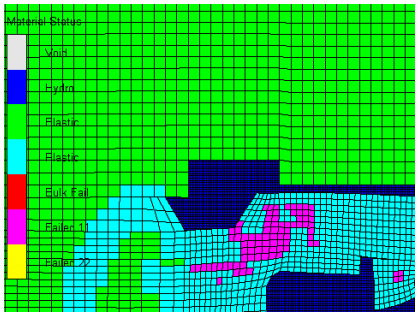
Fig. 10 Defined Steel-S7 (Lagrange) and Air, PETN, RDX (Euler).

3.3 해석결과

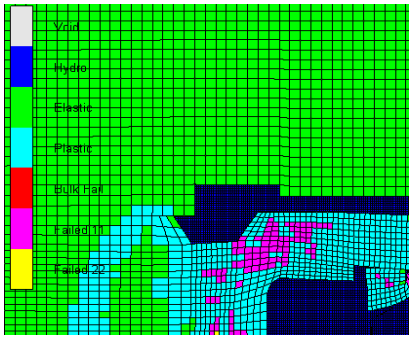
Air gap 길에 따른 폭발볼트 분리거동에 대하여 해석을 진행하였다. Air gap 길이에 변화에 대한 Material Status의 결과는 Fig. 11에 나타나 있다. 폭발볼트의 분리 성공률은 Ride-cut 주변에 파괴된 요소의 수 및 집중도에 따라 판단하였다. 해석 결과 Air gap의 길이가 가장 작은 0.05 mm에서 파괴된 요수가 가장 작다 또한 Ride-cut 주변에서 파괴된 요소수의 집중도 역시 가장 작기 때문에 다른 조건보다 분리성공률이 가장 낮을 것으로 예상된다. 이는 폭발볼트와 구속치구 사이의 Air gap이 작을 경우 충격파가 일부 치구에 전달되어 자유경계면에 반사되는 충격파의 크기에 영향을 주어 분리가 잘 이루어지지 않을 것으로 판단 할 수 있다. 또 다른 변수 조건인 0.55 mm, 1.05 mm, 1.55 mm 에서의 파괴된 요소 수 및 집중도가 거의 비슷한 결과를 나타난 것으로 보아 특정 Air gap 이상에서는 분리 성공률이 크게 달라지지 않는 것으로 해석할 수 있다.



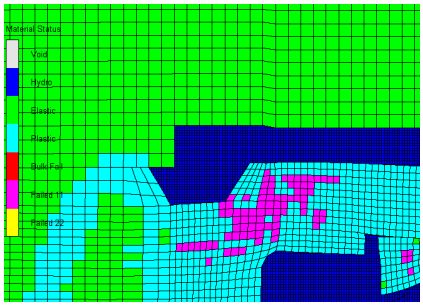
(a) Air gap : 0.05 mm



(b) Air gap : 0.55 mm



(c) Air gap : 1.05 mm



(d) Air gap : 1.55 mm

Fig. 11 Analysis Results.

4. 결 론

본 연구에서는 Ridge-cut형 폭발볼트의 분리거동에 영향을 미치는 Air gap 조건을 변화시키면 해석을 수행하였다. Air gap이 작은 경우는 분리 성공률이 떨어지지만 경험상 분리 면이 깨끗하고 파편형성이 적었다. 그러나 분리가 일어나지

않은 경우가 발생되고 충격파가 구속물에 전이되는 확률이 크기 때문에 유도탄 및 발사체에 악영향을 미칠 것이다. 따라서 해석결과 및 시험결과를 바탕으로 폭발볼트와 구속치구의 Air gap의 크기를 최적화여 분리 성공률을 높이면서 Pyro-shock의 전이가 최소화 되도록 설계에 되어야 할 것이다.

본 연구를 바탕으로 1/2 inch 폭발볼트의 최적의 구속환경을 확인하였다. 1/2 inch 폭발볼트의 분리 성공률 및 신뢰성을 정확하게 판단할 수는 없지만, Air gap 변화에 따른 분리 성공률의 증감 여부를 확인할 수 있었다.

References

1. Karl O.B., *Handbook of Pyrotechnics*, Chemical Publishing Co., Inc., New York, N.Y., U.S.A., pp. 119-128. 1974.
2. Lee, Y.J., "The Interpretation of Separation Mechanism of Ridge-Cut Exploisve Bolt Using Simulation Programs," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers,* Vol. 8, No. 2, pp. 102-114. 2001.
3. Marc A.M., *Dynamic Behavior of Materials*, John Wiley & Sons Inc., New York, C.O., U.S.A., 1994.
4. Johnson, G.R. and Cook, W.H., "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures," *Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics*, The Hague, Netherlands, pp. 541-547, 1983.
5. Lee, E.L., Hornig, H.C. and Kury, J.W., "Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products," Rept. UCRL-50422, Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, 1968.