

탄두 충돌 시 기폭관 컵의 변형 해석

Deformation of STS Cup for EFI Detonator in High Velocity Impact

김 석 봉* 유 요 한*
Seok-Bong Kim Yo-Han Yoo

ABSTRACT

In this paper, we have investigated deformation of cup for EFI detonator in high velocity impact test. The experimental result shows that STS cup deformed 0.170 mm with the bulged shape. The numerical simulation result with static/dynamic material properties of SUS304 shows 0.166 mm of deformation. The main parameters to decrease the deformation of cup are strength, thickness and density of cup. The initial condition of SUS304 cup was strength of 215 MPa and thickness of 0.12 mm. As strength increases to 500 MPa, deformation of cup converges to 0 mm, and as thickness increases to 0.18 mm, deformation of cup converges to 0 mm. If the density of cup decreases from 8 to 2.7 g/cc, the deformation of cup decreases to 0.141 mm.

Keywords : Exploding Foil Initiator, EFI,(포일 기폭관), HNS Explosive(Hexanitrostilbene 화약), Impact(충돌), Penetration (관통)

1. 서 론

탄두가 표적에 충돌할 때 탄체 및 신관에 순간적으로 큰 감가속도가 가해지게 된다^[1~3]. 이러한 감가속도가 설정한 조건이상으로 가해질 경우 신관 내부에 위치한 기폭관에 고전압이 발생하게 된다. 고전압은 기폭 콘덴서에 충전되며 일정 크기 이상의 기폭신호가 입력될 때 충전된 에너지가 기폭관에 인가되어 탄두를 폭발시키게 된다. 본 연구에서 다루는 금속박막 폭발형 포일 기폭관(EFI : Exploding Foil Initiator)의 개략도는 Fig. 1과 같다^[4~6]. 전체외경은 7~15 mm이며 외부

에서 핀을 통하여 강한 전류가 박막으로 집중되어 플라즈마 상태가 되며 이때 박막이 폭발하면서 형성된 충격파압력으로 인하여 운동에너지를 가진 비행 파편이 HNS 화약^[7,8]을 기폭하게 되는 원리이다. 이때 비행 파편의 속도는 수 km/sec에 이른다^[6]. HNS 화약의 기폭과 동시에 외부의 기폭관 컵(cup)의 파괴도 발생해야 하며 이때 신관 주변의 주장약이 반응하여 최종적으로 탄두가 폭발하게 된다. 따라서 기폭관 컵의 두께가 너무 두껍거나 강도가 강하면 컵이 파괴되지 않으며 주장약이 반응하지 않아 탄두가 불발 될 수 있다. 반대로 컵의 두께가 너무 얇거나 강도가 약하면 탄두가 표적에 충돌하는 순간, 감가속도로 인한 관성에 의하여 HNS 화약이 컵에 순간하중을 준다. 이 때문에 컵이 불록하게 변형하며 변형된 공간만큼 화약이 파손되어 부스러기가 되면서 기폭이 되지 않을 수 있다.

† 2013년 3월 29일 접수~2013년 7월 5일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 김석봉(kimseokbong79@gmail.com)

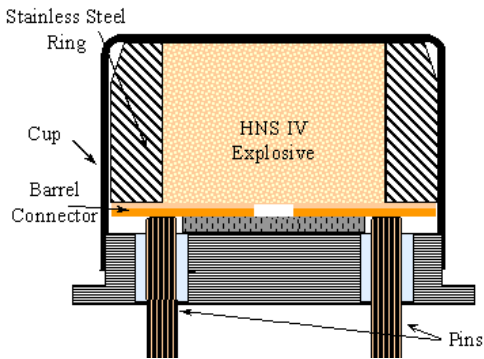


Fig. 1. Standard detonator^[5]

본 연구에서는 탄두 충돌 시 발생하는 순간가속도에 의하여 기폭관에 사용되는 컵이 변형하는 정도를 해석을 통해서 평가하며 시험결과와 비교한다. 이후 컵의 두께, 강도 및 밀도를 변수로 설정하여 기폭관 컵의 변형량을 분석한다.

2. 유한 요소 모델

해석에 사용하기 위한 기폭관의 형상은 Fig. 2와 같으며 축대칭으로 2D로 모델링 하였다. 컵의 재질은 스테인리스(STS304, YS:215 MPa, UTS:560 MPa)로 두께는 0.12 mm이다. STS304는 0.5 mm 두께의 박판 소재를 이용하여 인장시험을 수행하였으며 정적 및 100/sec에서 공칭응력-변형률선도는 Fig. 3과 같다. 변형률속도가 100/sec으로 증가하면 항복응력이 약 1.6배 증가하며 최대인장응력은 유사해지는 특징을 보인다. 전체 기폭관의 반경은 5.87 mm이며 강체(rigid body) 가화약 기폭을 위한 반경 3 mm 공간을 남겨두고 기폭관을 둘러싸고 있다. 탄두가 진행하여 표적에 충돌할 경우 강체로 둘러쌓여 있는 부분은 거의 변형을 하지 않으나 강체가 없는 부분에서 화약의 관성에 의해서 컵 부분이 국부적으로 볼록하게 변형한다.

해석 프로그램은 LS-DYNA v.971을 사용하였으며 물성은 Table 1과 같다^[9]. 기폭관 컵은 탄두의 충돌과 동시에 고속으로 변형하므로 STS304의 정적 선도 및 100/sec의 고변형률속도 선도를 해석에 piece-wise linear 모델로 적용하였으며 Fig. 3의 응력-변형률선도를 그대로 적용하였다. glass, copper는 elasto-linear plastic 모델을 사용하였으며 HNS 화약은 elastic 모델을 사용하였다.

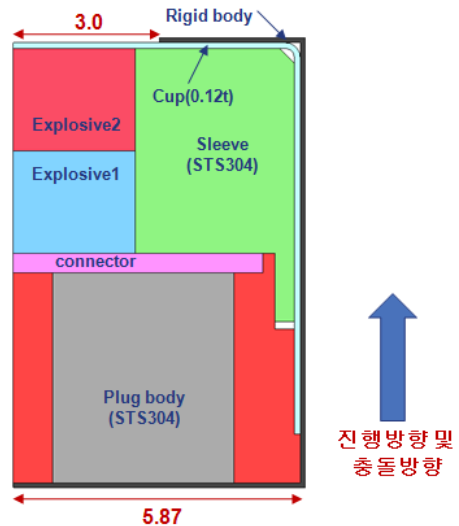


Fig. 2. F. E. modeling of detonator

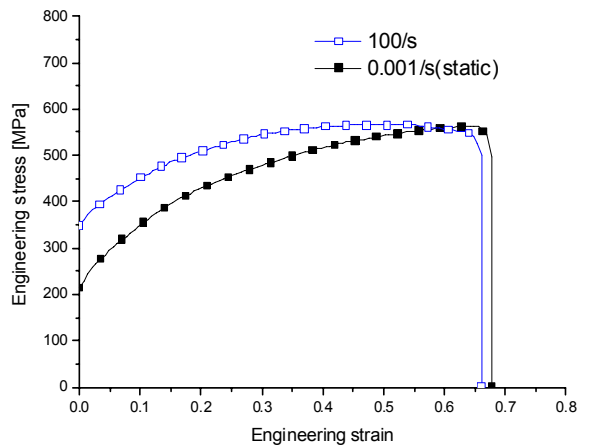


Fig. 3. Engineering stress-strain curves of STS304

Table 1. Mechanical properties

Part.	Mat.	Density [g/cc]	Yield stress [MPa]
cup	STS304	8	215
sleeve	STS304	8	215
plug body	glass	2.64	50
connector	copper	7.94	334
explosive1	HNS	1.58	-
explosive2	HNS	1.88	-

3. 해석 결과

가. 시험결과와 비교

본 연구에서는 실제 탄두의 충돌 시험 시 신관에 장착한 가속도 이력장치에서 얻은 감가속도 결과를 사용하였다. 약 250 kg의 탄두가 마하 2.0의 속도로 비행하여 35 MPa의 콘크리트를 관통한 시험으로 기폭관은 신관내부에 장착되어 있다. 탄두의 고속 진행 후 표적과 충돌 후 얻은 이력장치의 감가속도이력은 Fig. 4와 같다. 22,000G 이상의 순간적인 감가속도로 인하여 기

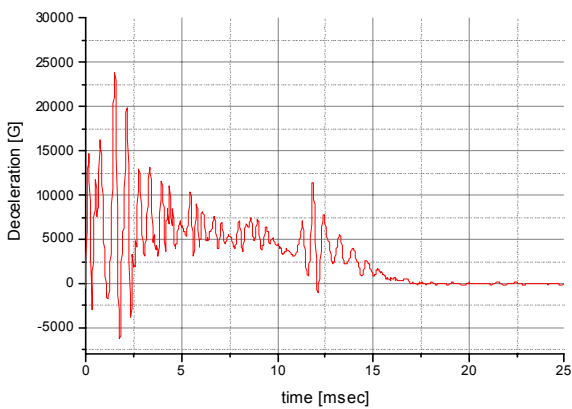


Fig. 4. Deceleration profile of fuze

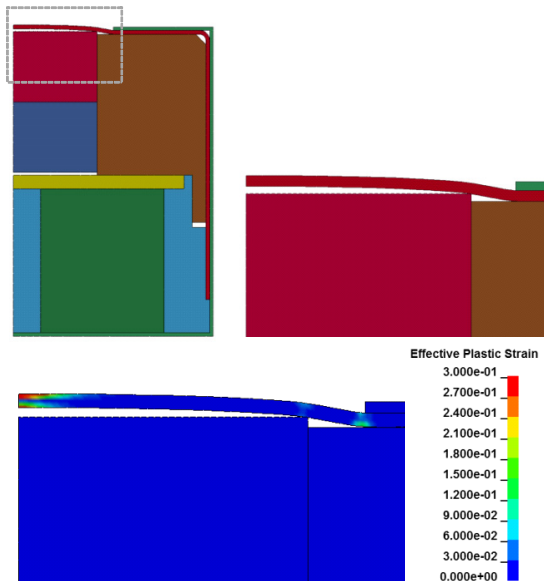


Fig. 5. Deformed shape of cup and effective plastic strain distribution of deformed region

폭관 내부의 화약이 관성에 의하여 이동하여 컵이 변형하였다. 시험에서 측정된 감가속도 이력을 해석 모델의 강제 부분의 이력으로 적용하였으며 이때의 변형 형상은 Fig. 5와 같다. 화약이 관성에 의해서 충돌방향으로 이동하며 컵을 변형시켰다. 컵의 충돌방향으로의 변형 이력은 Fig. 6이며 감가속도에 의하여 변형이 점차 진행되어 최종적으로 변형이 0.166 mm에 수렴하였다. 충돌 시험 후 측정된 기폭관 컵 변형은 Fig. 7과 같이 직경 약 5.4 mm, 높이 0.170 mm의 볼록한 형상이며 해석결과와 유사함을 알 수 있다. 이는 신관 내부에 장착된 가속도 이력장치 결과를 동일 신관 내부이지만 상대적으로 다른 곳에 위치한 기폭관에 적용해도 유사한 결과를 얻을 수 있음을 보여준다.

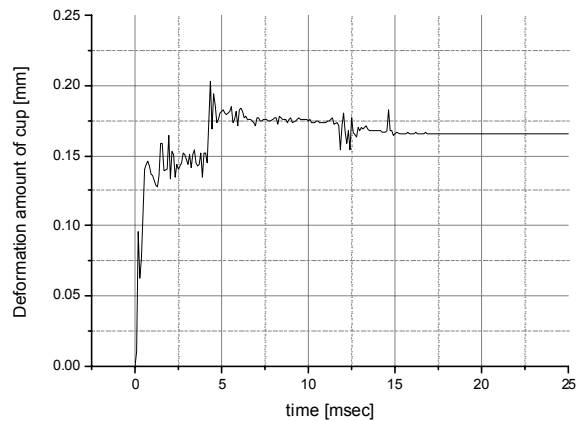


Fig. 6. Deformation amount of cup with increase of time

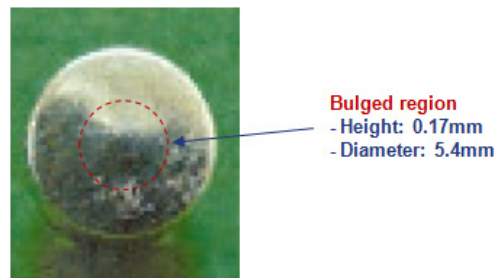


Fig. 7. Deformed shape of cup after concrete penetration test

나. 컵의 강도, 두께 및 밀도 변화

앞서 해석결과와 시험결과를 비교를 통해서 해석 모델의 정확성을 평가하였다. 동일한 모델에서 컵의 두

계 및 재료(밀도, 강도)를 변화하여 컵의 변형량을 정량적으로 평가하였다. 이는 동일한 감가속도 이력 또는 충돌조건에서 컵의 변형이 최소가 되는 두께 및 재료를 결정하기 위해서이다.

컵의 변형량을 최소화 할 수 있는 강도 및 두께를 결정하기 위하여 해석에서 사용된 초기 값(YS:215 MPa, 두께 : 0.12 mm)에서 강도, 두께를 점차 증가시켰다. 먼저 초기 재료인 SUS304에서 두께를 0.12 mm로 고정하고 강도를 증가하였다. 적용한 응력-변형률 선도는 Fig. 3의 정적 및 100/sec 선도에서 항복응력 기준으로 비례해서 증가 시켰다. Fig. 8과 같이 항복강도가 500 MPa 이상에서 변형량이 0에 수렴하는 결과를 얻을 수 있다. 항복응력을 초기조건인 215 MPa로 고정하고 두께를 증가시킨 경우에 Fig. 9와 같이 약 0.18 mm에서 변형량이 0에 수렴한다. 초기조건에서 항복강도는 약 2.33배, 두께는 1.5배 이상에서 컵의 변형량이 최소가 될 수 있으며 이는 컵의 변형량이 두께 변화에 더 민감함을 보여준다.

다음으로 재료를 SUS304에서 Al 합금으로 대체할 경우를 고려하였다. 동일한 초기 항복강도 및 두께 조건을 사용하였으며 밀도를 8 g/cc에서 2.7 g/cc로 감소하여 밀도의 영향을 살펴보았다. 기폭관 컵의 높이 변형량은 Fig. 10과 같이 0.166 mm에서 0.141 mm로 약 15% 감소한다. 이는 컵 재료의 밀도가 작아지면서 컵 개방부의 질량이 상대적으로 작아 관성이 작게 작용하므로 나타나는 결과이다. 결국 밀도가 작으며 강도 및 두께가 큰 재료를 사용할 경우 컵의 변형량을 최소화 할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 기폭관 컵 형태로 성형(forming) 하는데 큰 문제만 없다면 컵의 재질을 기존의 SUS304 보다 강도가 높은 Al 합금으로 대체하고, 동시에 컵의 두께를 두껍게 조절한다면 충돌 시 변형을 최소화하는 기폭관 컵을 제작할 수 있을 것이다.

기폭관 컵의 성능을 완벽하게 최적화하기 위해서는 이상에서 제시한 컵의 재질(밀도가 작은 Al 합금으로 대체), 강도(500 MPa 이상) 또는 두께(0.18 mm 이상)변경과 함께 기폭 가능한 최소 HNS 화약량을 결정하는 것이 중요하다. 충돌 감가속도로 인한 컵의 변형량을 최소화하는 재질 및 형상과 함께 컵의 파괴를 유도할 수 있는 최적의 HNS 화약량을 결정하기 위한 폭발해석도 필요하다. 그러나 이는 본 연구에서 다루지 않으며 여기서는 가속도에 따른 물리적인 컵의 변형을 주로 다루었다.

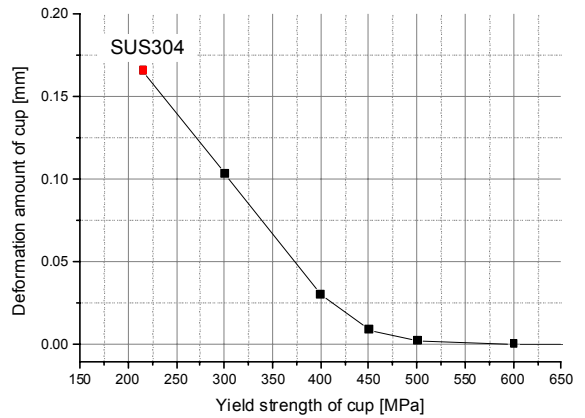


Fig. 8. Deformation of cup according to yield strength change

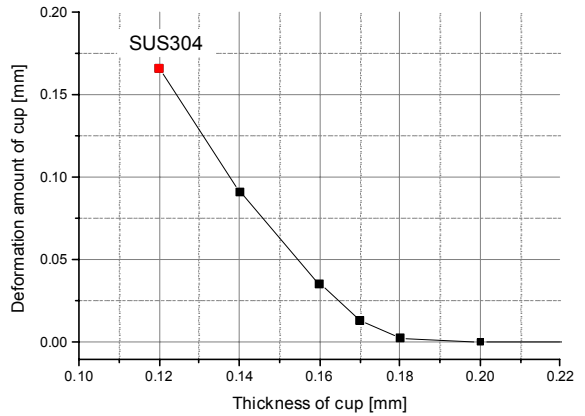


Fig. 9. Deformation of cup according to thickness change

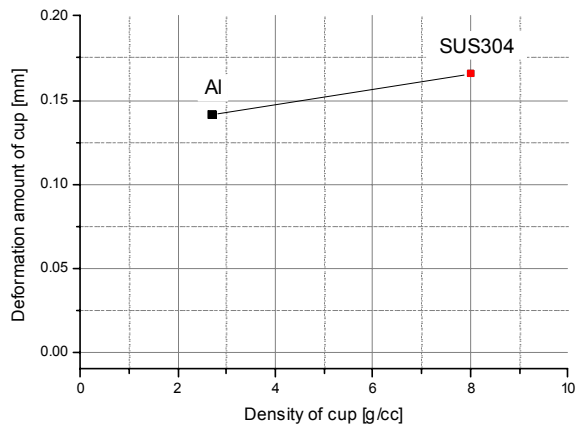


Fig. 10. Deformation of cup according to density change

4. 결론

본 연구에서는 탄두가 콘크리트 표적 충돌 시의 순간가속도에 의하여 기폭관 컵이 변형하는 정도를 시험 및 해석결과를 통하여 분석하였다. 또한 기폭관 컵의 강도, 두께, 밀도를 변수로 하여 컵의 변형량을 정량적으로 분석하였다. 결과를 정리하면 아래와 같다.

- 1) 충돌시험에서 얻은 신관의 가속도 이력결과 및 SUS304의 정/동적 물성을 해석에 적용하였으며 기폭관 컵은 높이 0.166 mm 변형하였다. 이는 시험에서 얻은 변형량 0.170 mm와 유사하며 이를 통하여 해석모델의 신뢰도를 확보하였다.
- 2) SUS304 기폭관 컵의 경우 초기 강도(215 MPa) 및 두께(0.12 mm) 조건에서 변형이 발생하지 않는 최대강도, 최대두께는 각각 500 MPa, 0.18 mm 이다. 또한 동일 강도, 두께에서 컵 재료 밀도가 감소할 경우 변형부위의 질량이 감소하게 되어 변형량이 감소한다.
- 3) 감가속도에 의한 기폭관 컵의 변형량 해석과 함께 HNS 화약의 폭발해석을 수행한다면 최적화된 기폭관 컵의 형상 및 재료를 얻을 수 있을 것이다.

References

- [1] Frew, D. J., Hanchak, S. J., Green, M. L. and Forrestal, M. J., "Penetration of Concrete Targets with Ogive-nose Steel Rods", *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 21, pp. 489~497, 1998.
- [2] Forrestal, M. J., Frew, D. J., Hickerson H. P. and Rohwer, T. A., "Penetration of Concrete Targets with Deceleration-time Measurements", *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 28, pp. 479~497, 2003.
- [3] 김용석, 여환곤, "소형 관통자의 콘크리트 표적 수직충돌 침투특성 연구", *한국군사과학기술학회지*, 제14권, 제2호, pp. 321~325, 2011.
- [4] Furnberg, C. M., "Computer Modeling of Detonators", SAND-94-8725C, 1994.
- [5] Neyer, B. T., "HNS-IV Explosive Properties and Characterization Tests", 39th AIAA/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA-2003-5138, 2003.
- [6] Davies, H. R., Chapman, D. J., Vine, T. A. and Proud, W. G., "Characterisation of an Exploding Foil Initiator(EFI) System", CP1195, *Shock Compression of Condensed Matter*, pp. 283~286, 2009.
- [7] 강정부, 외 3인, "HNS(Hexanitrostilbene)의 결정 전환 연구", *한국군사과학기술학회지*, 제4권, 제1호, pp. 216~224, 2001.
- [8] Setchell, R. E., "Grain-size Effects on the Shock Sensitivity of Hexanitrostilbene(HNS) Explosive", *Combust. Flame* Vol. 56, pp. 343~345, 1984.
- [9] LS-DYNA Keyword User's Manual ver. 971, Livermore Software Technology Corporation, 2007.