

폭발성형 관통자 생성 모사 해석

수리동역학 코드를 사용하여 폭발성형 관통자의 생성과정을 해석하고 다양한 해석기법을 개발하였다. 수치해석 결과를 섬광 X선 장비를 사용한 정치시험 결과와 비교하여 해석 결과의 신뢰성을 확인하였다. 폭발성형 관통자의 관통성능 증대를 위하여 다양한 라이너 모델에 대한 수치해석을 수행하고, 그 결과를 비교하였다.

정수경 국방과학연구소 4본부 3부, 책임연구원

e-mail : csk4936@unitel.co.kr

머리말

일반적 폭발성형 관통자(EFP: Explosively Formed Penetrator) 탄두는 장갑을 파괴시키는 기본 구조요소로서 성형작약탄두의 일종에 포함될 수 있다. 특히 다양한 무기체계에 파괴기구로 적용되는 폭발성형관통자는 비교적 원거리에서 전차의 상부표적을 관통할 수 있어 최근에 활발히 연구되고 있는 핵심부품의 하나이다. 주요 설계인자로는 화약, 라이너 소재, 라이너 형상 및 탄체형상 등이 있으며 제한된 용적 내에서 최대의 효과를 가질 수 있는 최적 설계가 요구된다. 이 글에서는 EFP의 형성과정을 고찰하고 설계인자 중 탄체와 화약에 대한 변수는 일정하게 하여 라이너의 형상 변수만에 따른 결과를 전산유체 코드로 해석할 수 있는 기법을 개발하였으며 그 해석결과를 실제 섬광 X선 결과와 비교하여 신뢰성을 확인하였다.

폭발성형 관통자 형성 원리

폭발성형 관통자 탄두의 기본 구조는 그림 1과 같다. 고폭 화약의 기폭에 의한 충격파가 라이너에 작용하면 라이너 소재의 소성항복변형률(plastic yield strain)을 초과하지 않는 상태에서 연신되어 관통자를

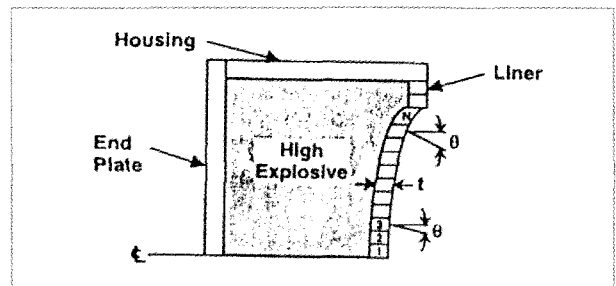


그림 1 EFP 라이너의 관통자 형성과정

형성한다. 이러한 관통자의 형성 과정은 라이너의 두께, 곡률각도(convex angle) θ 에 의해 결정된다.(그림 1 참조)

라이너의 두께와 곡률각도는 각 요소에서 다르며 이 경우 각 개별 요소로 붕괴될 수 있다. 화약의 폭발압력파가 라이너에 도달했을 때, 그 압력파는 라이너를 수직과 반경방향으로 가속하기 시작한다. 이러한 과정에서 라이너는 붕괴되기 시작하여 파단이 없는 한 길게 연신된다. 이 때 가공경화(work hardening)와 유동응력(flow stress)의 양은 EFP가 붕괴되어 형성하는 한계 값으로 영향을 미친다.

EFP 생성 전산 모사

모델링

폭발성형 관통자 생성 해석에 적용된 프로그램

표 1 재료 모델링

	재료명	연산자	상태방정식	구성방정식
탄체	4340 steel	Euler	Linear	Johnson-Cook
고폭약	LX-14	Euler	JWL	Hydro
라이너	OFHC copper	Lagrange	Linear	Johnson-Cook

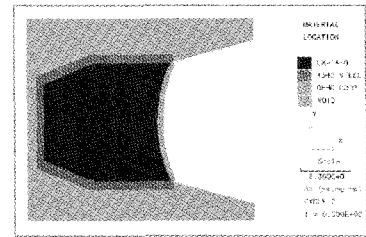


그림 2 EFP 모델링

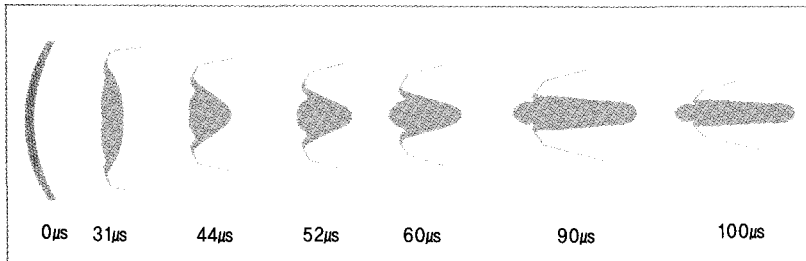


그림 3 관통자 형성 과정

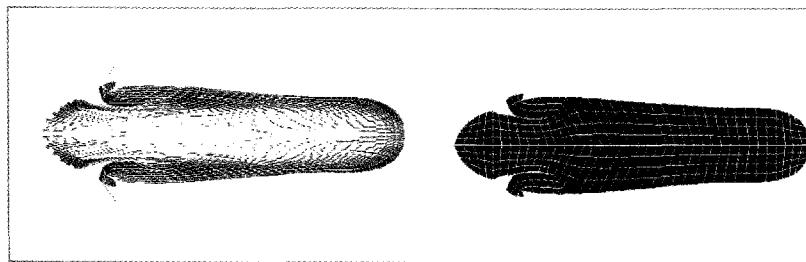


그림 4 격자 재구성 전후 관통자형상 비교

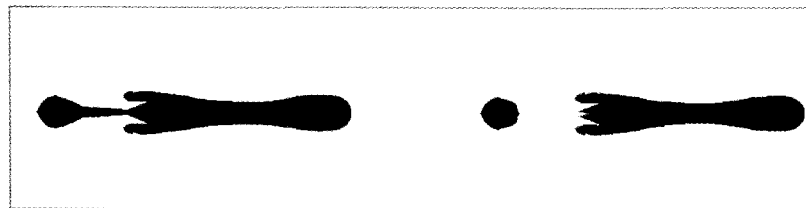


그림 5 관통자 파단 전후 현상

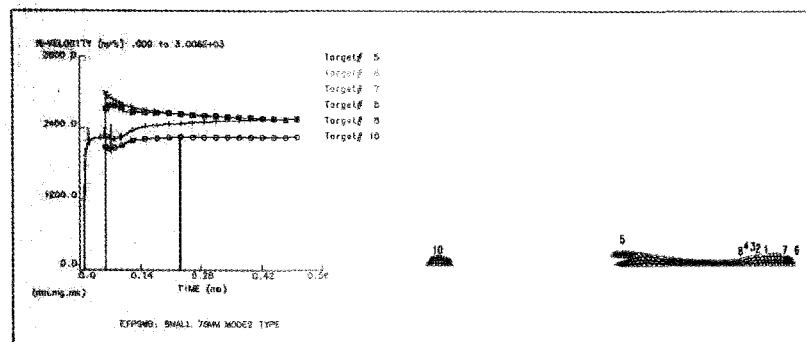


그림 6 관통자 위치별 속도분포

리동역학코드(Hydrodynamic node)이다. EFP라이너는 라그랑지 연산자(Lagrange processor)를 사용하고 고폭화약 및 탄체는 오일러 연산자(Euler processor)를 이용하였으며 연산자간의 작용(interaction)은 프로그램에서 제공하는 다각형 알고리즘(Polygon Algorithm)을 이용하였다.

2차원 축대칭으로 모델링하였으며 탄체, 고폭화약, 금속라이너를 4340 합금강, LX-14, 무산소동(OFHC Copper)으로 각각 정의하였으며 기타 부품은 해석에서 제외하였다. 부품별 모델링 입력자료 및 EFP 모델링(modeling) 형상을 표 1 과 그림 2에 나타내었다.

강성효과에 대한 모델링은 하이드로 다이나믹 상태방정식을 사용해 계산할 수 있으나 재료의 강도가 무시될 수 없는 경우, 강도 영향이 중요한 부품인 라이너와 표적에 대해서는 표 1과 같은 모델식을 적용하여 보다 정확한 해를 얻고자 하였다. 또한 열역학적 평형을 고려하여, 국부 정수압 응력과 비체적 및 비내부 에너지의 관계가 $p = f(v, e)$ 형태의 상태방정식으로 나타난다. 이 글에서는 표 1과 같이 각 부품마다 재료특성에 맞는 상태방정식을 적용하

은 미국의 CDI사에서 개발한 비선형 동적 구조해석 프로그램 AUTODYNE으로 유한 차분법을 사용하는 수

해석 과정

고폭 화약의 기폭에 의한 충격파가 라이너에 도달하면 고압에 의하여 라이너에 대변형이 발생한다. 라이너 격자의 변형이 심화되면 수치적 오류에 의하여 해석이 중지된다. 격자 왜곡(mesh distortion) 문제를 자동 재격자(auto-remeshing)를 사용하지 않고 매뉴얼로 격자 재구성(remeshing/remap) 처리하여 해석하였으며 시간별 해석결과는 그림 3과 같다.

100 μ s 경과 후 관통자의 격자가 심하게 왜곡되어 더 이상 계산이 불가능하다. 이를 해결하기 위하여 왜곡된 격자의 좌표점을 읽어 그림 4와 같이 규칙적인 격자로 재구성하고 각종 상태 변수를 재배치(remap)한다.

격자 재구성(remesh) 이후 관통자 연신 결과는 그림 5와 같으며, 230 μ s에서 분리되는 현상을 나타내었다. 관통자의 파단의 주요 원인은 EFP 라이너 형상에 의한 관통자 전·후부의 속도차에 의해 주로 발생하며 앞 항에서 언급한 소재의 항복강도와 관련이 있는 것으로 사료된다. 관통자 길이방향의 속도분포는 그림 6과 같으며, #10과 #6-#9지점의 속도차로 분리됨을 알 수 있다.

섬광 X선 시험

라이너의 형상에 따른 관통자 거동 변화를 예측하기 위하여 상기 해석 결과의 신뢰성이 입증되어야 하므로, 그림 7과 같이 폭발섬광을 투과할 수 있는 섬광 X선(flash X-ray) 장비를 이용한 정치관통시험을 수행하였다. 그림 8은 시험에 사용된 EFP 탄두이며, 그림 9는 시간대별 X선 필름에 촬영된 EFP이다.

관통자 속도에 대하여 해석결과와 시험결과를 분석하면 분리현상은 첨두부와 후부의 속도차로 인하여 발생하며, 그 결과는 표 2와 같다. 해석 결과와 시험결과가 10% 이내로 일치함을 알 수

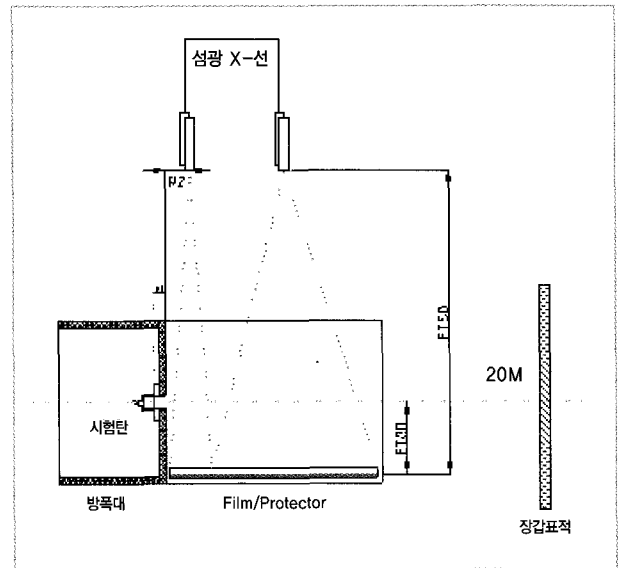


그림 7 섬광 X선 장비 설치도

표 2 관통자 속도 결과 비교

속도(km/sec)	시험결과	해석결과
첨두부	2.86	2.60
후부	2.38	2.20

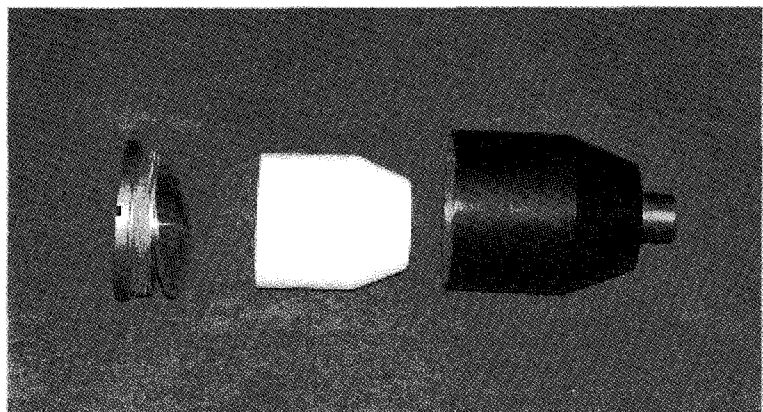


그림 8 EFP 탄두 형상

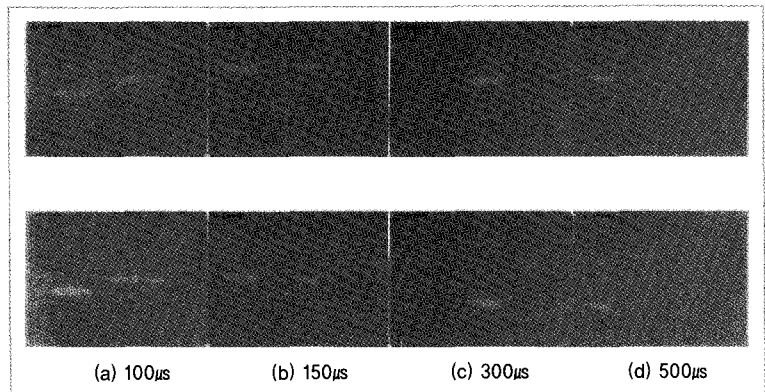


그림 9 시간별 EFP 섬광 X선 촬영결과

표 3 EFP 탄탈늄라이너 설계 제원 비교

Model	외부 R	내부 R	중심두께	외부두께	상수A	상수B
Mod7	147.0	137.5	4.50	4.98	1.069	0.0327
Mod21	160.0	158.0	4.00	4.23	1.013	0.0253
Mod23	160.0	160.0	4.50	4.50	1.000	0.0281
Mod26	160.0	162.0	4.50	4.28	0.988	0.0278

으며 그 중 Mod 7, 21, 23, 26의 설계제원 비교는 표 3과 같다. 화약은 Mod7만 CompB를 적용하고 나머지는 Octol을 적용하였다. 해석 결과는 표 4와 같다.

표 4 EFP 탄탈늄라이너 해석결과 비교

Model	속도 m/s	질량 (g)	길이 (mm)	직경 (mm)	L/D	KE (ujoule)
Mod7 (compB)	1402	1175	127	33.8	3.76	1.1557E+12
Mod21	1744	961	178	27.9	6.36	1.5341E+12
Mod23	1633	1056	135	31.0	4.34	1.4849E+12
Mod26	1655	1123	116	31.4	3.70	1.4821E+12

있다.

설계 적용

해석기법의 신뢰성이 확인된 바 탄탈늄 소재를 적용한 설계를 수행하였다. 탄두결합체에 라이너 소재와 충전화약을 탄탈늄과 Octol로 변경 적용하여 총 26종을 설계, EFP 설계 제원별 관통자 거동을 분석하였

맺음말

폭발성형 관통자의 생성과정을 AUTODYN 코드를 이용하여 해석하였다. 축대칭 해석 기법의 표준화를 확립하였으며, 이 글에는 제시하지 않았지만 오일러, 라그랑지, 자동연산기법을 적용

한 ALE 연산자(Arbitrary Euler-lagrangian processor)적용 기법과 ALE 모델링에서 3차원 썩기 모델로 치환하는 mapping 기법 등 다양한 해석기법을 개발하였으며, 각 해석 결과를 설파 X선 장비를 이용한 정치시험과 비교·분석하여 신뢰성 있는 EFP 라이너 해석기법을 제시하였다. 라이너 형상 변수에 대한 관통자 거동 변화를 고찰하여 라이너 최적설계 제원을 도출하였고 실험을 통한 오차를 확인하였다.

기계용어해설

샘플지 제어(Sampled Data Control)

자동제어에서 오차 또는 제어량의 검출을 일정한 시간간격으로 하여 조작출력을 결정하는 방식의 제어방법의 일종.

염욕(鹽浴), 솔트 베스(Salt Bath)

염화바륨, 염화 나트륨 등의 염류를 용해하고 그 속에서 강 등의 금속재료를 고르게 가열하여 열처리 효과를 거둘 수 있는 가열법의 일종.

염수속도법(鹽水速度法; Salt Velocity Method)

식염수의 전기전도도가 보통의 물에 비해서 매우 높다는 것을 이용하여 물의 유량을 측정하는 방법.

포화온도(飽和溫度; Saturation Temperature)

액체를 가열하여 액체의 종류와 액체에 가해지는 압력에 따라 증기를 발생하고 끓음이 시작되는 온도.