

# 드로잉 가공 성형폭약용기를 이용한 강재구조 발파공법에서 사용폭약의 종류가 절단성능에 미치는 영향

김경규<sup>1)</sup> · 박 훈<sup>2)</sup> · 민경조<sup>1)</sup> · 신찬휘<sup>1)</sup> · 조상호<sup>1)\*</sup>

## Influence of the Charged Explosives on the Steel Plate Cutting Performance in Bent-Shaped Charge Holder Blasting

Gyeong-Gyu Kim, Hoon Park, Gyeong-Jo Min, Chan-Hwi Shin, Sang-Ho Cho

**Abstract** As the national economic growth and the rapid increase in industrial structures are aging, the demand for removing steel structures is increasing, and research on improving the penetration performance of the linear shape charge explosives. In the study, numerical analyses were performed on the effect of the type of explosive used in the self-made shape charging container and the initiation method on the cutting performance of the steel plate and the effect on the shaped explosive installed close to it. ANSYS LS-DYNA, which can analyze the large deformation problem of materials due to explosion, was used, and an ALE(Arbitrary-Lagrange-Eulerian) model was applied that enables interlocking analysis of gases, liquids, and solid.

**Key words** Linear shaped charge, Metal-jet, LS-DYNA, ALE

**초 록** 경제성장과 함께 급증한 산업구조물이 노후화됨에 따라 철 구조물 해체 수요가 증가하고 있으며, 선형 성형폭약의 관통 성능개선에 관한 연구가 관심을 받고 있다. 본 연구에서는 자체 제작한 성형폭약 장약 용기 내 사용하는 폭약의 종류와 기폭방식이 강재 절단 성능에 미치는 영향과 근접한 성형폭약에 미치는 영향에 대한 수치 해석적인 분석을 수행하였다. 수치해석에는 폭발에 의한 재료의 대변형 해석이 가능한 ANSYS LS-DYNA를 사용하였으며 기체, 액체, 고체의 유동해석에 특화된 ALE(Arbitrary-Lagrange-Eulerian) 모델이 적용된다.

**핵심어** 선형성형장약, 금속제트, LS-DYNA, ALE

### 1. 서 론

최근 노후화된 산업용 철 구조물에 대한 해체 수요가 증가하고 있으며, 공사 기간의 단축 및 경제성을 고려하여 폭약을 이용한 철 구조물 발파해체에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 태풍이나 지진과 같

은 비정상 하중에 의하여 국부 손상된 철재 구조물의 경우 추가적인 붕괴 위험이 있어 전체 구조물에 대한 해체가 이루어지는 사례가 있다(Baciu and Lupoe, 2012). 2017년에 국외의 경우 Arch Bridge 발파해체 사례(Baofu Duan 외, 2017)가 있으며, 국내의 경우 필리핀에서 국내기업에 의해서 수행된 Sabang River Bridge 발파해체는 국부 손상된 철 구조물에 대한 대표적인 발파해체사례로 기록되어 있다(석철기 외, 2018). 당시에 시판되는 성형폭약이 부재하여 직접 제작한 장약 용기에 에멀전 계열 폭약을 충전하여 철골 트러스 교량의 해체에 사용하였다. Molinari(2002)는

1) 전북대학교 공과대학 토목/환경/자원에너지공학부

2) ㈜ 코리아카코

\* 교신저자 chosh@jbnu.ac.kr

접수일 : 2021년 3월 23일

심사 완료일 : 2021년 3월 26일

계재 승인일 : 2021년 3월 29일

성형폭약의 제트형성, 제트균열, 관통을 유한요소 시뮬레이션을 통해 수행된 바가 있다. Kato 외(2007)는 선형 성형폭약(Linear Shaped Charge)을 이용한 강재 절단에 있어서 강재의 재료 특성, 폭약의 종류, 라이너 재료 및 물성, 이격거리는 강재절단성능과 밀접한 관계를 실험적으로 밝혔으며, 특히 강재의 재료에 따른 장약량 식을 제안한 바가 있다. Feng 외(2013)는 관통 실험 방사선 사진과 시뮬레이션을 통해 성형폭약의 제트 형성과 관통 효과를 비교한 바 있다. 선행 연구(박훈 외, 2018; 박훈 외, 2020)로 선형 성형장약용기 개발 및 절단성능 평가를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 성형장약용기 내 충전하는 폭약의 종류에 따른 철재 강판의 관통성능을 수치해석적으로 모사하기 위하여 ALE(Arbitrary-Lagrangian-Eulerian) 해석기법이 적용되었으며, 폭약의 폭발반응 특성을 고려하기 위하여 폭약의 경험적인 방정식인 JWL(Jones-Wilkins-Lee) 상태방정식이 도입되었다. 해석 결과를 분석하여 폭약의 종류에 따른 금속제트 전파거리와 시간 곡선을 획득하고, 도폭선 및 전자뇌관의 기폭초시오차에 의하여 근접한 장약 용기에 미칠 수 있는 영향 범위에 대하여 고찰하였다.

## 2. 강재절단 성형폭약의 금속제트 시뮬레이션

### 2.1 해석 모델

민경조 외(2018)는 에멀전 폭약을 이용한 성형장약용기의 철판 관통을 수치해석적으로 모사하였다. 본 연구에서는 고성능 폭약과 다른 기폭방식을 적용한 경우를 가정하여 선형 성형장약의 철판 관통성능을 해석하였다. 먼저, 고성능 폭약은 RDX와 HMX 폭약이 적용되었으며 기폭방식은 도폭선과 전자뇌관을 고려하였다. 관통해석은 폭발과 같은 빠른 거동의 대변형 및 유체와 고체 연성 등 해석이 가능한 ANSYS사 LS-DYNA를 사용하였으며 기체, 액체, 고체의 유동해석에 특화된 ALE(Arbitrary-Lagrangian-Eulerian) 모델이 적용된다.

그림 1은 선형 장약 용기와 철재 판재의 3차원 모델을 보여주고 있다. 장약 용기는 구리재료이며 두께는 3mm, 철재 판재의 두께는 35mm이다. 사용된 폭약은 Emulsion, RDX, HMX 3종으로 하였다.

### 2.2 재료 구성모델

재료 구성모델은 외부에서 작용하는 조건에 대하여 재료의 고유한 특성을 역학적으로 표현한 구성방정식이며, 이러한 구성방정식은 물체 거동 유형에 따라 다양하게 존재하지만 공통적으로 상태변수와 이

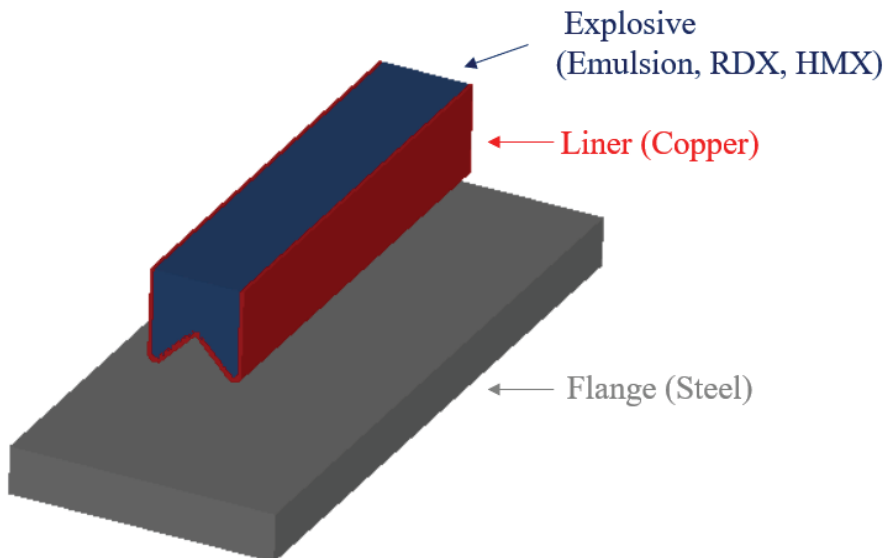


그림 1. 선형 성형장약용기 및 철재 판재 해석모델

변수로 계산되는 거동 값과의 관계를 나타낸다. 본 연구에서는 강재절단 성형폭약의 기폭에 의한 구리라이너의 동적 거동과 탄소성 해석을 위하여, 대표적인 Johnson-Cook (JC) 재료 모델을 적용하였다. JC 구성 방정식은 다음 식 (1) 과 같다.

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}_p^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

여기서,  $T^* = \frac{T - T_{Room}}{T_{Melt} - T_{Room}}$

식 (1) 에서 A, B, C, m, n은 재료의 고유한 상수이며,  $\bar{\epsilon}_p$ 는 유효소성변형률을 나타낸다. 변형률 속도 비  $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ 로  $\dot{\epsilon}_0$ 는 기준 변형률 속도,  $\dot{\epsilon}$ 는 유효 변형률 속도를 의미하며,  $\dot{\epsilon}_0$ 는  $1s^{-1}$ 로 간주한다. T는 재료의 현재온도,  $T_{Room}$ 와  $T_{Melt}$ 는 실험 온도와 재료의 녹는 온도를 의미한다. 식 (1)의  $(A + B\bar{\epsilon}_p^n)$ 항은 유효 소성변형률에 대한 경화 효과를 나타내며,  $(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)$ 항과  $(1 - T^{*m})$ 항은 동적 경화 계수로 유효 변형률 속도에 대한 경화 효과와 열적연화현상을 나타낸다. 본 수치 모사 수행에서는 열적연화현상을 무시하였고, 유효소성변형률에 대한 경화 효과와 유효 변형률 속도에 대한 경화 효과는 고려하였다. 시뮬레이션 수행 시 적용한 재료 모델의 물성은 다음 표 1과 같다.

**2.3 상태방정식**

폭약의 폭굉반응에 의한 압력, 부피 변화를 나타내

**표 1.** 강재와 장약용기 라이너의 JC 재료 구성모델 물성 (Johnson과 Cook, 1985)

Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	A (MPa)	B (MPa)	C	n	m
Steel	7890	207	0.29	175	380	0.06	0.32	0.55
Copper	8960	115	0.33	92	292	0.02	0.31	1.09

**표 2.** 해석모델의 폭약 종류별 JWL 재료상수

Material	Detonation velocity (m/s)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	C-J pressure (GPa)	E <sub>0</sub> (GPa)	A (GPa)	B (GPa)	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	w
Emulsion	5573	1451	8.401	3.268	385.8	5.04	5.48	1.17	0.25
RDX	8280	1656	29.99	8.894	611.3	10.65	4.4	1.2	0.32
HMX	9110	1891	42	10.50	778.9	7.010	4.2	1	0.3

기 위하여 가장 보편적으로 적용되는 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 상태방정식을 적용하였다(Lee 외, 1968).

$$P = A(1 - \frac{\omega\eta}{R_1})e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B(1 - \frac{\omega\eta}{R_2}) + \omega\rho E_0 \quad (2)$$

여기서,  $\eta = \rho/\rho_0$

식 (2) 에서 A, B, R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, w는 재료 상수를 나타내며, E<sub>0</sub>는 초기 단위 부피당 내부에너지, ρ 및 ρ<sub>0</sub>는 폭약의 밀도와 폭약의 초기 밀도를 의미한다. 표 2는 그림 1의 해석모델에 적용된 폭약별 JWL 재료 상수를 나타내고 있다. 이러한 상수는 각 폭약에 대한 폭굉실험을 통하여 경험적으로 결정된다(Sanchidroam 외, 2015; Hinrichsen 외, 2014; Grant 외, 2014).

**3. 강재절단 성형폭약의 금속제트 시뮬레이션 결과**

그림 2는 성형장약용기와 철재 강판의 이격거리는 73mm이며, 성형장약용기 내 Emulsion 폭약을 충전한 성형장약용기에 한쪽 끝단을 기폭점을 두고 해석한 결과를 보여주고 있다. 기폭 후 40 us 시점에 폭약의 폭굉반응면은 폭약의 중간지점에 도달하고 있으며 폭굉파에 의한 장약용기의 변형과 금속제트의 형성을 확인 할 수 있다. 기폭 후 70 us 이후에 금속제트가 철재 강재 판에 도달하였으며 순차적으로 폭약의 길이 방향으로 금속제트가 강재 판을 관통하면서 절단하는 양상을 살펴볼 수 있다.

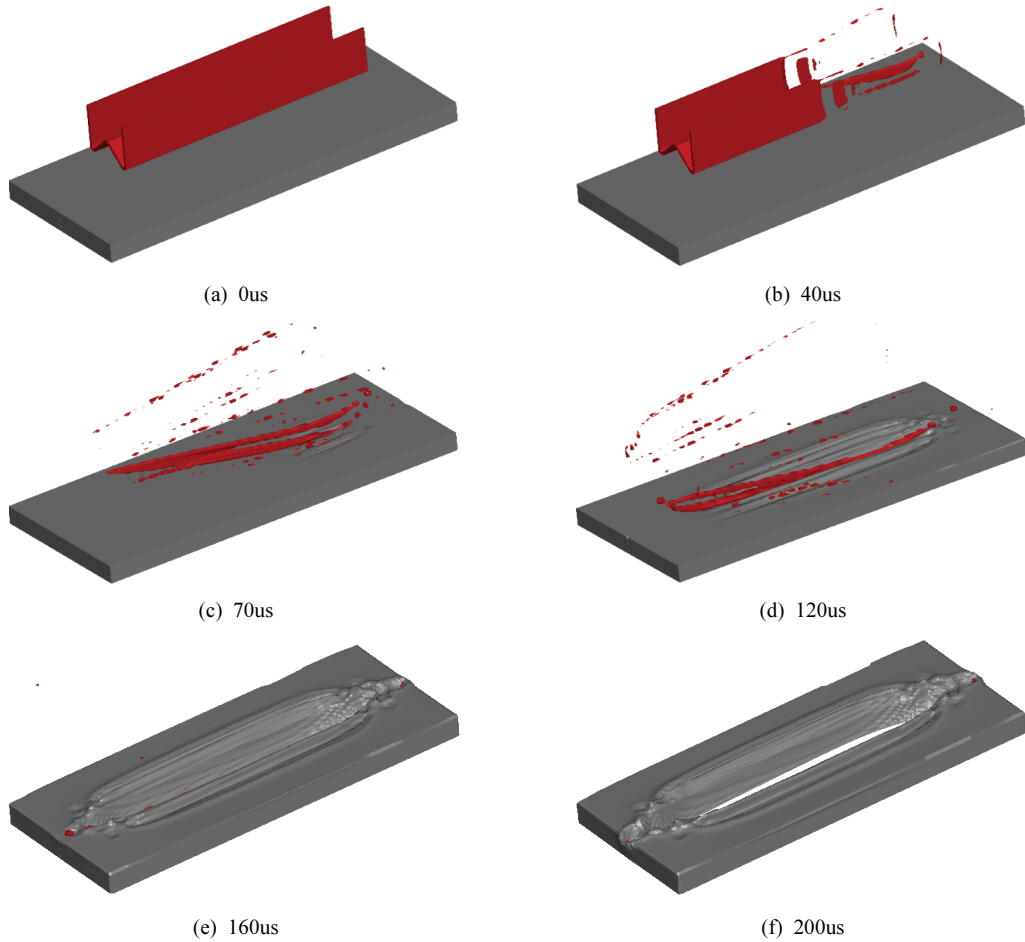


그림 2. Emulsion 폭약 적용 시 장약용기 및 강재의 변형거동 해석결과

그림 3부터 그림 5는 각 Emulsion, RDX, HMX 폭약의 기폭으로 발생한 금속제트의 형상을 보여주고 있다. 먼저 화살표 모양의 금속제트 형성시간을 보면 각각 40 us, 30 us, 20 us로 폭굉속도가 빠를수록 금속제트가 먼저 완성되는 것을 볼 수 있다. 금속제트가 강재 판에 도달 시각을 살펴보면 70 us, 50 us, 40 us로 전파에 속도에 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

그림 6은 폭약 종류별 금속제트 선단의 이동 거리와 속도를 시간에 따라 나타낸 것으로 금속제트가 10mm 지점에서 이동속도는 각각 1,303m/s, 1,998m/s, 2,344m/s, 60mm 지점에서 이동속도는 각각 1,799m/s, 3,314m/s, 2,368m/s로 Emulsion의 경우 약 500m/s, RDX는 약 1,300m/s, HMX는 약 1,350m/s 증가하여 강재 판에 도달 직전 이동속도는 각각 1,828m/s,

3,372m/s, 3,724m/s까지 이르렀으며, 그 이후 강재를 관통하면서 속도가 급격하게 감소하였음을 볼 수 있다. 강재를 관통한 이후 제트는 각각 약 250m/s, 550m/s, 600m/s로 비산하였음을 보여주고 있다. 또한 금속제트가 강재를 관통한 시각은 각각 Emulsion의 경우 200 us, RDX는 110 us, HMX는 100 us에서 완전히 관통되는 것으로 보이고 있다. 해석 결과에서 보여주는 금속제트의 최고속도는 통상적으로 알려진 노이만 효과에 의한 제트의 속도에 미치지 않는 수준으로, 이것은 stand-off가 짧고 두꺼운 금속 재질 라이닝을 사용한 결과로 사료된다.

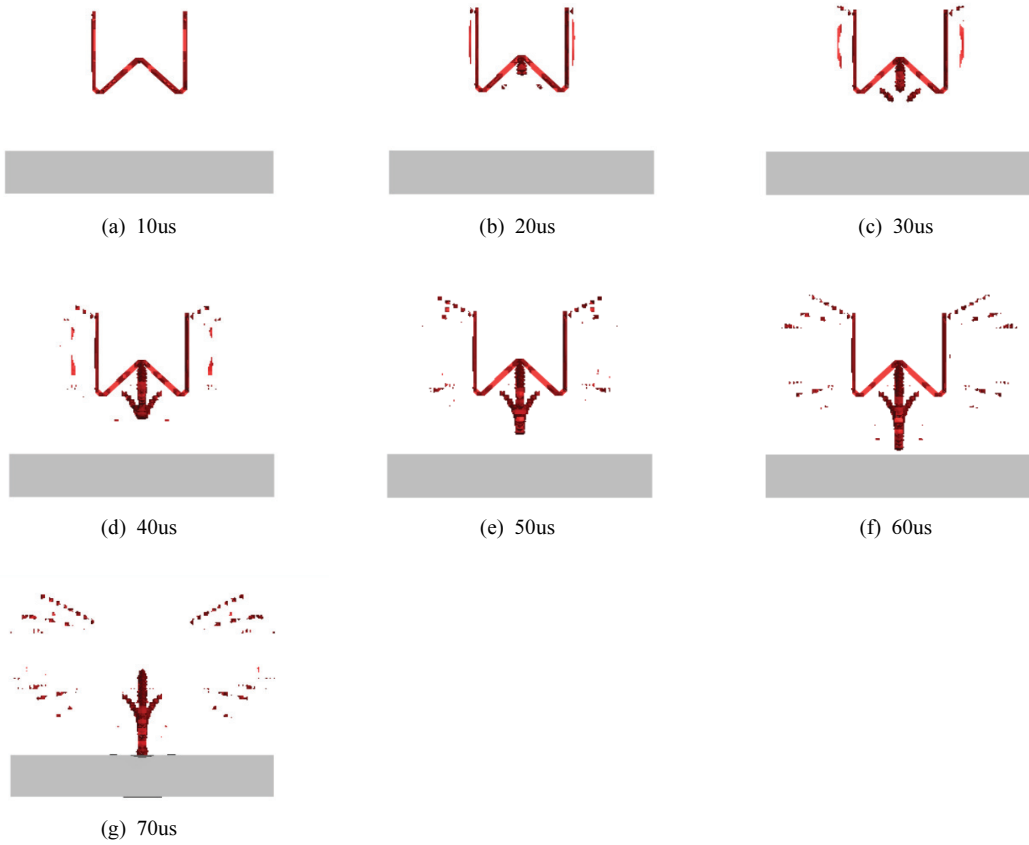


그림 3. 시간 경과에 대한 Emulsion 폭약 금속 제트 거동

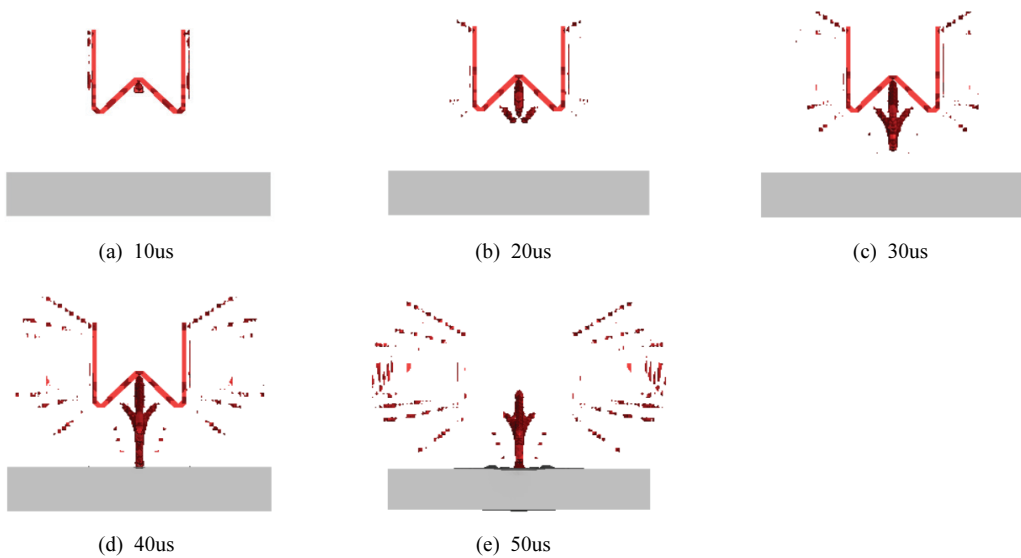


그림 4. 시간 경과에 대한 RDX 폭약 금속 제트 거동

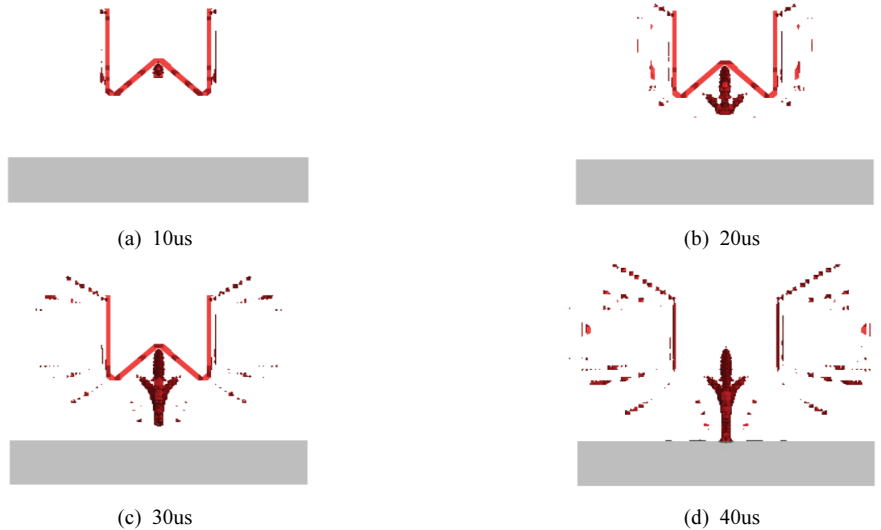
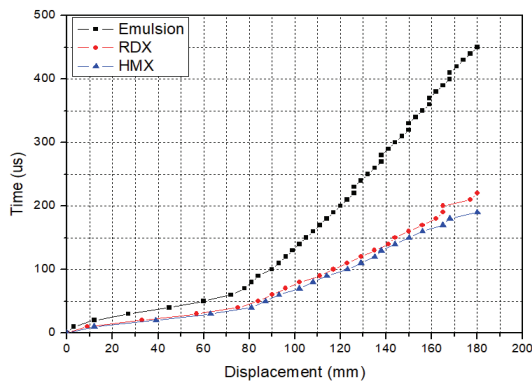
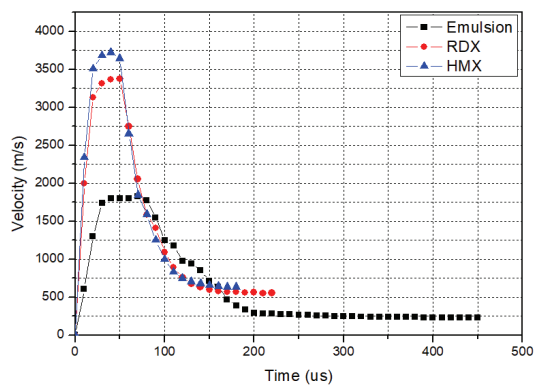


그림 5. 시간 경과에 대한 HMX 폭약 금속 제트 거동



(a) 금속제트 선단 이동위치-시간 곡선



(b) 금속제트 속도-시간변화 곡선

그림 6. 폭약 종류별 금속제트 관통과 속도의 변화

#### 4. 강재절단 성형폭약의 금속제트 시뮬레이션 고찰

그림 7은 성형장약용기를 이용한 H-beam 절단시험 공시체로서 바깥쪽 면에 부착된 제 1 성형폭약의 금속제트 전파방향 선상에 안쪽 면에 제 2 성형폭약이 위치해 있는 것을 볼 수 있다(박훈 외, 2020). 그림 내 시험공시체와 같은 상태에서 성형폭약의 기폭에 도폭선과 전자뇌관이 적용되었다는 것을 가정하고, 폭약별 금속제트의 발생은 그림 6을 적용하여 선행하여 발생한 금속제트가 다른 장약용기에 도달하여 발

파실패를 야기할 수 있는 조건을 검토하였다. 그림 8은 폭약별 금속제트의 이동 거리-시간 주시곡선을 나타내고 있으며, 도폭선과 전자뇌관의 기폭초시오차를 점선으로 각각 표시하였다. 여기서 적용된 도폭선과 전자뇌관의 기폭초시오차는 각각 100 us, 120 us를 가정하였다(조상호 외, 2009; 조상호 외, 2011). 그림 7의 제 1 성형폭약과 제 2 성형폭약과의 이격거리는 162mm이므로, 그림 8 내에 162mm 지점을 표기하면 폭약별 Emulsion은 약 350 us, RDX는 약 175 us, HMX는 약 160 us 시각에 제 1 성형폭약의 금속제트가 제 2 성형폭약에 도달하는 것을 알 수가 있다. 다

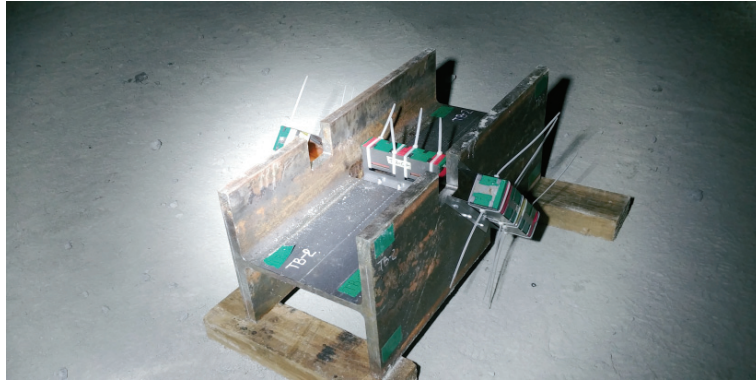


그림 7. 성형장약용기를 이용한 H-beam 절단시험

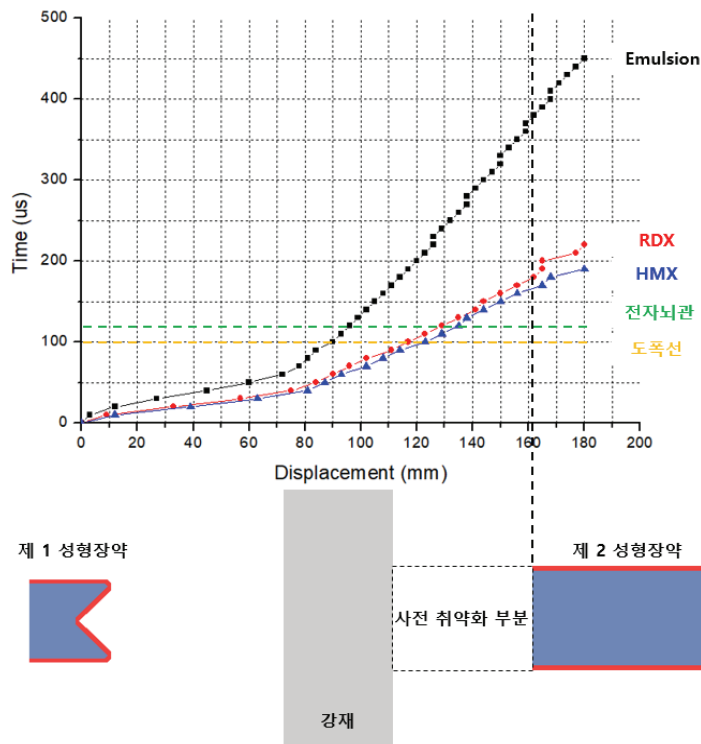


그림 8. 금속제트의 근접 성형폭약에 도달시간과 기폭방식별 기폭초시오차의 비교

시 말하면, 제 2 성형폭약은 접근하는 금속제트의 영향을 받지 않기 위해서는 Emulsion을 사용하는 경우는 약 350 us, RDX는 약 175 us, HMX는 약 160 us 이내 기폭이 시작되어 금속제트가 전파되어야 한다. 전자뇌관과 도폭선을 사용하는 경우 기폭초시오차가 충분히 작아 금속제트의 간섭을 받지 않는 한편 수ms 이상의 지발뇌관을 사용하는 경우에는 성형폭약 상호

간에 금속 제트의 간섭이 발생하여 발파실패로 이어질 수 있다. 본 고찰에서 사용된 그림 8과 같은 금속제트 이동변위주시곡선은 성형장약을 이용한 강제절단 발파해체의 안전설계에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 성형장약용기 내 충전하는 폭약의 종류에 따른 철재 강판의 관통성을 LS-DYNA 소프트웨어를 사용하여 ALE(Arbitrary-Lagrange-Eulerian) 해석 기법을 적용하였으며, 폭약의 폭발반응특성을 고려하기 위하여 폭약의 경험적인 방정식인 JWL (Jones-Wilkins-Lee) 상태방정식을 적용하였다.

강재절단 성형폭약 금속제트 시뮬레이션을 통한 Emulsion의 경우 기폭 후 40us 시점에 폭약의 폭발반응면은 폭약의 중간지점에 도달하였으며 70 us 이후 금속제트가 철재 강판에 도달하였으며 순차적으로 폭약의 길이방향으로 금속제트가 강재 판을 관통하면서 절단하는 양상을 확인하였다. Emulsion, RDX, HMX의 화살표 모양 금속제트 형성시각은 각각 40 us, 30 us, 20 us로 확인하였으며, 금속제트가 강재 판에 도달시각을 살펴보면 70us, 50us, 40us로 확인하였다. 금속제트가 10mm 지점에서 이동속도는 각각 1,303m/s, 1,998m/s, 2,344m/s, 60mm 지점에서 이동속도는 각각 1,799m/s, 3,314m/s, 2,368m/s로 Emulsion의 경우 약 500m/s, RDX는 약 1,300m/s, HMX는 약 1,350m/s 증가하여 강재 판에 도달 직전 이동속도는 1,828m/s, 3,372m/s, 3,724m/s까지 이르렀으며, 그 이후 강재를 관통하면서 속도가 급격하게 감소하였고, 강재를 관통한 이후 금속제트는 약 250m/s, 550m/s, 600m/s로 비산하였음을 확인하였다. 또한 금속제트가 강재를 완전히 관통한 시각은 Emulsion의 경우 200 us, RDX는 110 us, HMX는 100 us에서 관통되는 것을 확인하였다.

## 참고문헌

- 김현수, 김승곤, 송영수, 김광엽, 조상호, 2011, SB 발파에서 무장약 균열 유도공의 파단면 제어 유효성에 관한 수치해석적 연구, 터널과 지하공간, Vol. 21, No. 3, pp. 235-243.
- 민경조, 박훈, 오세욱, 박세웅, 석철기, 조상호, 2018, 드로잉 가공 성형폭약용기의 강판절단성능에 관한 수치해석적 연구, 화약·발파(대한화약발파공학회지), Vol. 36, No. 3, pp. 19-28.
- 박훈, 석철기, 노유송, 2018, 강재절단용 장약용기를 이용한 철골 교량 발파해체 시공사례, 화약·발파(대한화약발파공학회지), Vol. 36, No. 1, pp. 20-32.
- 박훈, 민경조, 조상호, 석철기, 2018, 강재 절단을 위한 장약용기의 개발과 절단 성능 평가, 화약·발파(대한화약발파공학회지), Vol. 36, No. 2, pp. 10-18.
- 박훈, 노유송, 석철기, 2020, 장약용기를 이용한 강재 절단 성능 평가, 화약·발파(대한화약발파공학회지), Vol. 38, No. 2, pp. 13-21.
- 조상호, 정윤영, 김광엽, 가네코, 2009, SB 발파에서 파단면 제어의 고도화에 관한 연구, 터널과 지하공간, Vol. 19, No. 4, pp. 366-372.
- Baciu, C., Lupoae, M., 2012, Nonlinear analysis for a reinforced concrete frame structure under extreme loads, Constructii, Vol. 13, No. 1, pp. 51-61.
- Dai, K., M., Katsuyama, K., Suk, C., Yang, J., Chen, P., 2007, Numerical simulation of cutting capacity of shaped charge in blasting demolition of steel construction, science and technology of energetic materials, Vol. 68, No. 6, pp. 160-166.
- Duan, B., Zhou, Y., Zheng, S., Bao, M., Wang, L., Dong, J., 2017, Blasting demolition of steel structure using linear cumulative cutting technology, Advances in Mechanical Engineering, Vol. 9, No. 11, pp. 1-11.
- Feng, D.L., Liu, M. B., Li, H. Q., Liu, G. R., 2013, Smoothed particle hydrodynamics modeling of linear shaped charge with jet formation and penetration effects, Computer and Fluids, Vol. 86, pp. 77-85.
- Grant W.J. McIntosh, 2014, Explosive modelling using LS-DYNA-a user's guide, pp. 5-6.
- Hinrichsen, R., Moshier, M., Kurtz, A., 2014, High velocity impacts of man portable air defense systems (MANPADS) on selected targets, In 45<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics Materials Conference, p. 1947.
- Johnson, G.R. and W.H. Cook, 1985, Fracture characteristics of three metals subjected to various, strains rate, temperatures and pressures, Engineering fracture mechanics, Vol. 21, No.1, pp. 31-48.
- Lee, E.L., H.C. Horning and J.W. Kury, 1968, Adiabatic expansion of high explosives detonation products(TID 4500-UCRL 50422), Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, Livermore.
- Molinari, J. F., 2002, Finite element simulation of shaped charges, Finite elements in analysis and design, Vol. 38, No. 10, pp. 921-936.
- Sanchidrian, J.A., Castedo, R., Lopez, L.M., Segarra, P., Santos, A.P., 2015, Determination of the for ANFO and emulsion explosives from cylinder test data, Central European journal of energetic materials, Vol. 12, No. 2, pp. 177-194.





**김 경 규**

전북대학교 공과대학 토목/환경/자원에너지공학부 석사과정

Tel: 063-270-4636  
E-mail: akrn823@jbnu.ac.kr



**박 훈**

전북대학교 공과대학 토목/환경/자원에너지공학부 겸임교수  
(주)코리아카코 수석연구원

Tel: 02-834-4590  
E-mail: hujin@jbnu.ac.kr



**민 경 조**

전북대학교 공과대학 토목/환경/자원에너지공학부 박사과정

Tel: 063-270-4636  
E-mail: felsmechanik@gmail.com



**신 찬 휘**

전북대학교 공과대학 토목/환경/자원에너지공학부 4학년

Tel: 063-270-4636  
E-mail: jg030120@jbnu.ac.kr



**조 상 호**

전북대학교 공과대학 토목/환경/자원에너지공학부 교수

Tel: 063-270-4636  
E-mail: chosh@jbnu.ac.kr