

## 발파공 내 전색물의 커플링 효과에 대한 AUTODYN 수치해석

Khaqan Baluch<sup>1)</sup>, 고영훈<sup>1)</sup>, 양형식<sup>1)\*</sup>

### Coupling Effects of Stemming Materials in Blasting Hole by AUTODYN Analysis

Khaqan Baluch, Young Hun Ko, Hyung-Sik Yang

**Abstract** Coupling effects of the stemming materials for single borehole were studied by AUTODYN analysis and compared to understand the role of different stemming materials on transmitting the pressure from blasthole to the surrounding rocks. Five different material properties, air, sand, water, 10% and 20% gelatin were selected. Authors assumed that high pressure detected in borehole means better fragmentation. Simulations show that these coupling materials lead to different level of pressure in the blasting hole and 20% gelatin turns out to be highest among them. Results show that gelatin can be used as better coupling material than sand or water.

**Key words** Stemming material, Coupling effect, AUTODYN, Gelatin, Borehole

**초 록** 전색물 충전이 발파공에서 주변 암반으로 압력파를 전달하는 데 미치는 영향을 AUTODYN으로 해석하고 비교하였다. 공기, 모래, 물, 10%와 20% 젤라틴의 다섯 전색물을 선정하였다. 수치해석 결과 발파공 주변의 관측점은 전색물에 따라 각각 다른 압력을 보였으며 고압일수록 파쇄도가 높은 것으로 간주하였을 때 20% 젤라틴이 가장 나은 것을 알 수 있었다. 따라서 젤라틴은 충전재로서 모래나 물 이상의 효과를 나타내는 것으로 확인되었다.

**핵심어** 전색물, 커플링 효과, AUTODYN, 젤라틴, 발파공

## 1. 서론

전색물은 발파공 내에서 높은 충격압을 유지할 수 있도록 하여 파쇄도가 좋도록 만든다. 발파공은 밀장 전하는 것이 효과적이지만, 폭약의 포장상태에 따라 또는 장약비중의 유지를 위하여 다짐을 하지 못하는 경우도 많다. 이때 적절한 전색물을 충전제로 사용하게 되면 더욱 좁아진 발파공 내 체적 때문에 더 높은 압력이 발생하고 이 압력이 주변암반으로 잘 전파될 수 있어서 파쇄도가 더 좋아질 것으로 기대된다. 따라

서 더 적은 화약으로도 효율적인 발파가 될 수 있고 결과적으로 발파경비를 줄일 수 있을 것이다.

본 연구에서는 전색물을 충전재로 사용하는 경우에 충전물이 발파공 내 압력에 미치는 영향을 조사하였다. 발파공 내에서의 폭굉은 대단히 복잡한 열역학적인 현상이고 수 ms만 지속되는 현상이기 때문에 실험적 관찰은 대단히 어려워서 수치해석에 의존하게 된다. AUTODYN은 ANSYS사의 비선형 동역학분해 해석전문 프로그램으로서 고체-유체간의 연성문제, 접촉, 관통, 폭발, 충돌 등에 대해 강력한 해석 프로그램이며 본 연구에서도 이를 이용하였다.

<sup>1)</sup> 전남대학교 에너지자원공학과

\* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr

접수일 : 2017년 9월 7일

심사 완료일 : 2017년 9월 12일

게재 승인일 : 2017년 9월 18일

## 2. 전색물

다양한 종류의 전색물이 사용되었고 새로운 전색물

**Table 1.** Properties of stemming materials

Materials	Density $D$ ( $g/cm^3$ )	Sound velocity $c$ (m/s)	Coefficient $s$	Grüneisen parameter $\Gamma_0$	EoS
Air	0.001225	-	-	-	ideal gas
Water	0.998	1647	1.92	-	shock
Sand	1.5	1694	1.75	0.6	shock
Soft Gel (10%)	1.03	1520	1.87	0.17	shock
Hard Gel (20%)	1.10	1553	1.97	0.17	shock

도 소개되고 있다. 보통 사용되는 전색물로는 모래, 물, 천공분 등이 있다. 본 연구에서는 특별한 목적의 충전을 위하여 젤라틴을 전색물로 사용하는 방안에 대해서 검토하였다. 또 충전이 되지 않은 경우와 비교하기 위하여 공기를 전색물로 간주하였다. 이를 위하여 수치해석 대상인 전색물로 공기, 모래, 물, 10% 및 20% 젤라틴을 선택하였다. 여기서 %는 물에 혼합한 젤라틴 파우더(청천화학)의 함량을 의미한다.

물리적, 역학적 성질이 상이한 여러 종류의 전색물이 사용되고 있다. 이 논문에서는 전색물을 충전재로 사용할 경우 충전재가 압력의 형성이나 압력이 압반으로 전이되는데 미치는 효과를 알아보기 위하여 다섯 가지 전색물의 충전효과를 서로 비교하였다.

AUTODYN 해석에서 공기와 물의 물성은 소프트웨어 내장 자료를 사용하였고 모래, 젤라틴의 물성은 참고문헌들(Antoun 등, 1912; Hamilton, 1969; Yoon 등, 2015; Awoukeng 등, 2014; Cook 등, 2011; Winter 등, 1975)을 조사하여 적용하였다. 공기는 이상기체의 상태방정식 (EoS, equation of state)를 적용하였으며 나머지 물질은 충격 EoS를 적용하였다. 상태방정식은 외부하중에 대한 재료의 파괴 및 형상변화를 좌우하는 방정식으로서 상태에 따라 다른 구성방정식이 적용된다. Table 1은 모래, 연성 젤라틴(10%)과 경성 젤라틴(20%)의 물성으로서 충격 EoS 적용에 필요한 물성들이다.

Table 1에서  $D$ 는 밀도,  $c$ 는 탄성과 전파속도이고  $s$ 는 충격을 받은 물질의 이동속도와 관련된 계수이며  $U_s-u_p$  Hugoniot 폭굉식으로부터 구할 수 있다 (Awoukeng 등, 2014, Huang, 2015).  $\Gamma_0$ 는 폭굉식에서 사용되는 Grüneisen 변수이다.

높은 수준의 충격 상태 방정식에서는 Grüneisen 변

수나 탄성과 속도가 최대압력에 미치는 영향은 미미하며 밀도가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

$U_s-u_p$  관계식은 다음과 같다.

$$U_s = c + su_p \quad (1)$$

이며 여기서

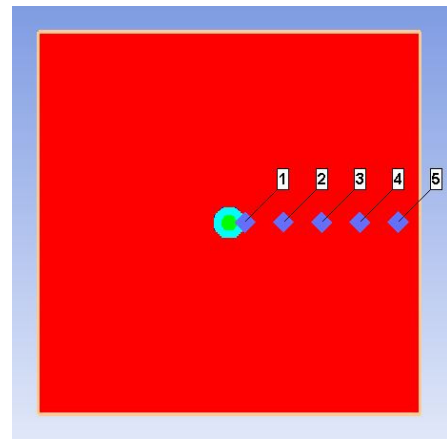
$U_s$ : 폭굉파 속도

$u_p$ : 진동속도이다.

### 3. AUTODYN 수치해석

#### 3.1 모델

단일발파공에 대하여 평면변형률 조건으로 해석하였다. 모델의 크기는 가로 세로 각각 600 mm로 하였으며 압반 부분은 Lagrange part로 처리하였다. 발파공은 직경 50 mm로 모델링하였으며 약정은 25 mm



**Fig. 1.** Blasthole model with 5 gauges.

로 하였다. 따라서 공기 전색의 경우 decoupling 지수는 2이다. 공기, 충전물 그리고 폭약은 Euler part로 처리하였다. 폭약은 에멀전 폭약으로 하였으며 충격 EoS를 적용하였다. 블록모델 외곽은 압력파가 투과하는 조건(transmit boundary) 연속체 조건으로 적용하고, 오일러 영역 외부는 전달된 기체의 유동을 위해 flow out 조건을 적용하였다.

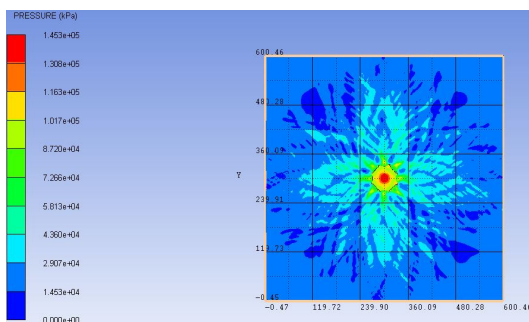
Euler part의 절점 수는 10,201개, 요소 수는 10,000개였으며 Lagrange part의 절점 수는 40,401개, 요소

수는 40,000개였다.

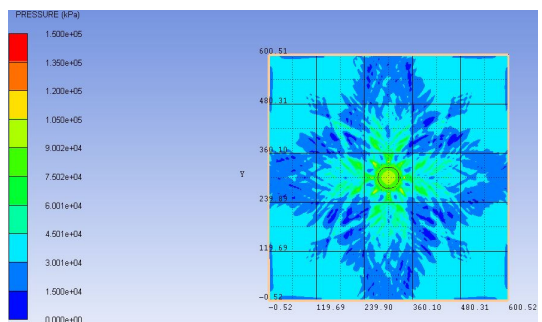
최고 압력을 구하기 위하여 5개의 게이지를 지정하였다.

### 3.2 해석결과

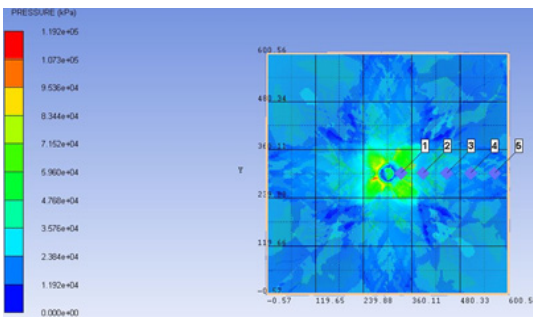
Fig. 2는 다섯 가지 전색물을 충전재로 사용한 경우에 대한 수치해석 결과이다. 충격파 압력의 등고선이 나타나있다. 충격파의 전파 양상은 유사하지만 전색물에 따라 압력의 크기가 서로 다르게 나타난다.



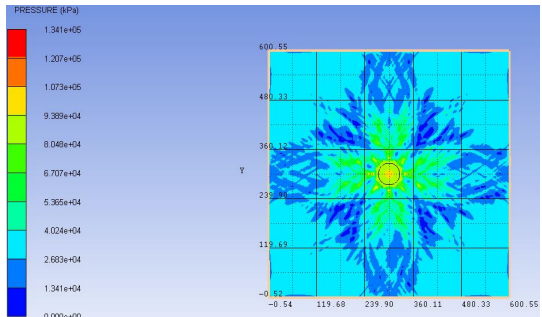
(a) Air model



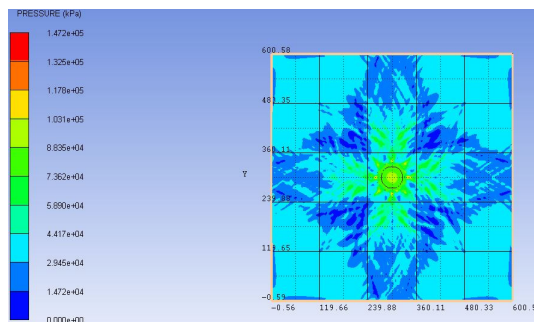
(b) water model



(c) Sand model



(d) 10% gelatin model



(e) 20% gelatin model

Fig. 2. Contour views of different coupling media.

#### 4. 결과 비교

Fig. 3에 충전하지 않은 경우와 네 가지 전색물로 충전하였을 때의 최대압력분포를 나타내었다. AUTO-

DYN 해석결과에 의하면 10% gelatin은 최대 압력이 대략  $1.8 \times 10^6$  kPa 로서 물을 사용한 경우와 거의 유사하였다. 공기의 경우 즉 충전하지 않은 경우에는 압

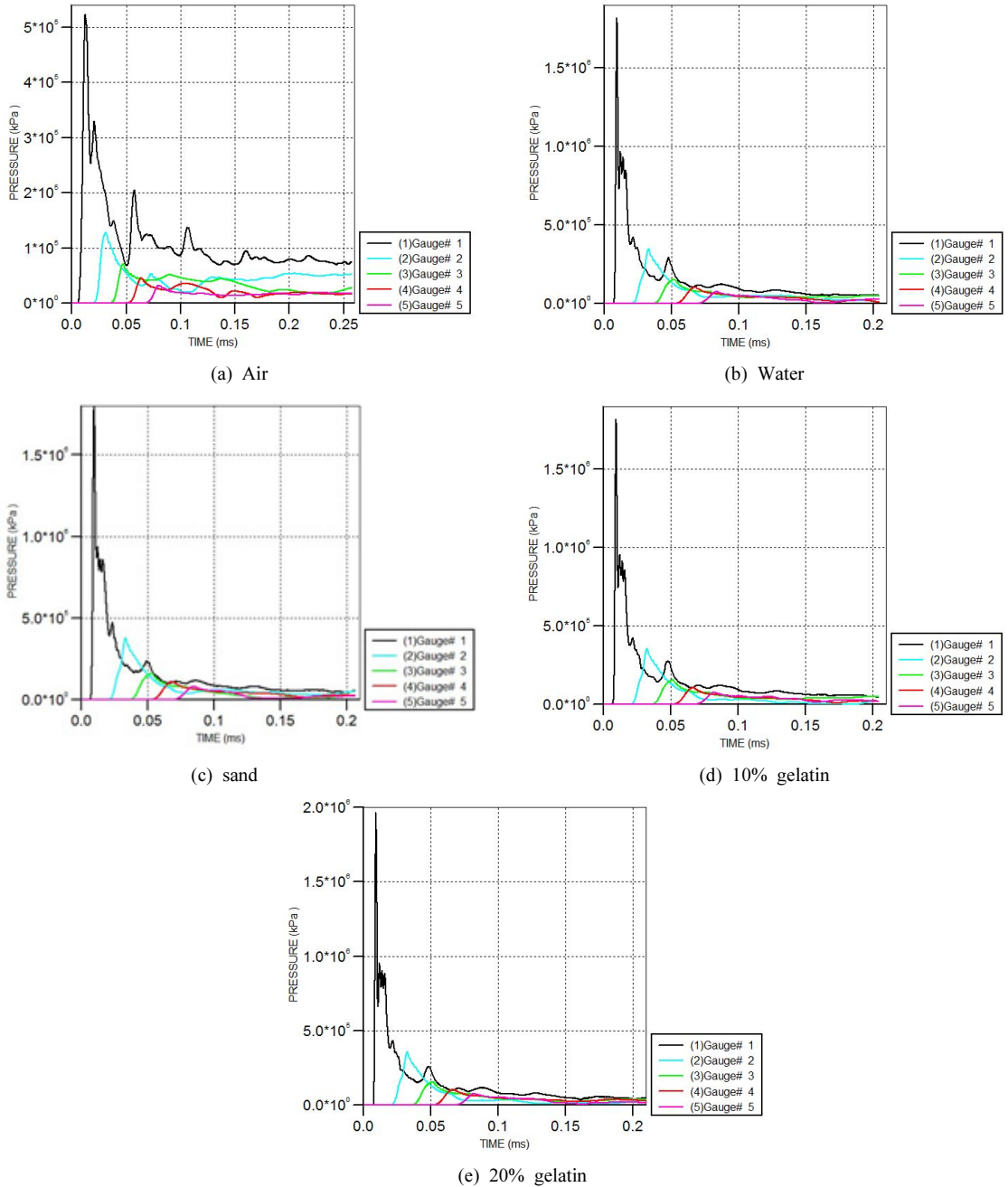


Fig. 3. Pressure history for different coupling media.

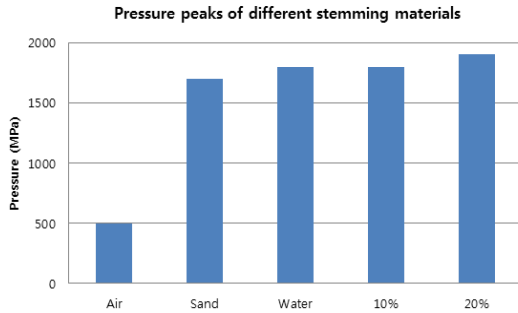


Fig. 4. Pressure peaks of different coupling media.

력이 가장 낮아서  $5 \times 10^5$  kPa에 불과하였다. 네 가지 경우 중에서는 20% gelatin 충전 때가 가장 높아서  $1.9 \times 10^6$  kPa이었다.

물이나 젤라틴으로 충전할 경우에는 충전하지 않은 경우에 비하여 3.5배 이상 더 높은 압력이 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 전색을 한 경우에는 전색하지 않은 경우보다 3~3.5 배 이상의 압력을 보이며 10%, 20% 젤라틴의 경우에는 모래나 물의 경우보다 높은 압력을 보인다.

## 5. 결론

AUTODYN 수치해석 결과에 따르면 밀도가 높은 물질로 발파공을 충전하면 더 높은 압력이 형성되고 파쇄도도 증가할 것으로 예상된다. 디커플링 지수 2의 조건에서 젤라틴으로 충전하였을 때  $1.8 \sim 1.9 \times 10^6$  kPa의 압력을 보여 충전하지 않을 때보다 3.5 배 이상 높은 압력을 형성하였고 모래나 물을 충전할 때보다 높은 압력을 보였다. 따라서 젤라틴은 충전재

로 사용할 수 있고 모래나 물 이상의 효과를 나타내는 것으로 확인되었다.

## 감사의 말

이 연구는 국토교통부의 국토교통기술 촉진연구사업(전문기관: 국토교통과학기술진흥원, 과제번호 17 CTAP-C129770-01)의 지원으로 이루어진 연구 결과의 일부이다.

## 참고문헌

1. Antoun, T., E. Herbold, and S. Johnson, 2012, Dynamic behavior of sand: Annual Report FY 11, Lawrence Livermore National Laboratory.
2. Awoukeng, G.A., L. Taddei, F. Tostain and S. Roth, 2014, Investigations of impact biomechanics for penetrating ballistic cases, Bio-med Mater Eng. 24.6 pp2331-9.
3. Cook, J.R., R.R. Bouchard, and S.Y. Emelianov, 2011, Tissue-mimicking phantoms for photo acoustic and ultrasonic imaging, Biomedical Optics Express 2.11 3193-3206.
4. Hamilton, E.L., 1969, Sound velocity and related properties of marine sediments, North Pacific, J. Geophy. Res. 75.23 pp4423-45.
5. Huang, Y., 2015, Determining the equation of state (EOS) for ballistic gelatin, US Army Research Laboratory (ARL-TR-7467) 22p.
6. Winter, J. et al, 1975, The material properties for gelatin gels, Ballistic Research laboratories (AD-A008 396) 167p.
7. Yoon, G.H., J.S. Mo, K.H. Kim, C.H. Yoon and N.H. Lim 2015, Investigation of bullet penetration in ballistic gelatin via finite element simulation and experiment, J. Mech. Sci. Tech. 29.9 pp3747-59.



**BALUCH KHAQAN**

전남대학교 에너지자원공학과 석사과정

Tel: 062-530-0824

E-mail: khaqan\_baluch@hotmail.co.uk



**고 영 훈**

전남대학교 에너지자원공학과 박사후연구원

Tel: 062-530-0824

E-mail: dddd8401@chonnam.ac.kr



**양 형 식**

전남대학교 에너지자원공학과 교수

Tel: 062-530-1724

E-mail: hsyang@jnu.ac.kr