화약·발파(대한화약발파공학회지)
제35권 제1호, 2017년 3월, pp. 27~33

EXPLOSIVES & BLASTING, Vol. 35, No. 1, 2017, pp. 27-33
Journal of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering

LS-DYNA를 이용한 금속 및 암석 재료의 파괴인성시험 모델링

최병희[1)*], 류창하[1)]

Modeling of Fracture Toughness Test Procedures for Metal and Rock Materials using LS-DYNA

Byung-Hee Choi, Chang-Ha Ryu

Abstract In this study, two fracture toughness test procedures are modelled for selected metal and rock on LS-DYNA, which is a commercial finite element code. The tests are conducted by using the 3-point bend test procedure for rectangular bar specimen. Because it takes a relatively long time to conduct the test, the implicit solver based on the Newmark method is adopted for the analyses. The values of stress intensity factor obtained from the analyses are 73 and 0.3 MPa.m$^{0.5}$ for the metal and rock material, respectively. It can be thought that the resulting small value of the fracture toughness of the rock material model well represents the brittleness of rock material.

Key words Fracture toughness, LS-DYNA, Implicit solver, Stress intensity factor, Brittleness

초 록 본 연구에서는 상용 해석코드인 LS-DYNA 상에서 선택된 금속과 암석을 대상으로 파괴인성시험 과정을 모델링하였다. 이 시험은 각봉의 3점 휨 시험을 토대로 한 것이다. 이 시험을 수행하는 데에는 비교적 긴 시간이 소요되므로 해석과정에서는 Newmark 법을 사용하는 묵시적 해석법을 채택하였다. 본 해석을 통해 얻은 응력확대계수의 값은 금속과 암석의 경우에 각기 73 MPa.m$^{0.5}$ 과 0.3 MPa.m$^{0.5}$ 이었다. 암석 재료모델의 파괴인성 값이 이렇게 작게 나타난 것은 작성된 재료모델이 암석의 특징적인 성질인 취성을 잘 표현하고 있다는 의미이다.

핵심어 파괴인성, LS-DYNA, 묵시적 해석기, 응력확대계수, 취성

1. 서 론

수치해석으로 암석을 모델링할 때에는 사용하는 코드의 종류와 관계없이 작성된 재료모델이 암석의 특성을 제대로 반영하고 있는지를 미리 확인해 보아야 한다. 이를 위해서는 여러 가지 정적 및 동적 파괴모델링(정적/동적 인장/압축시험 모델링, 파괴인성 시험 모델링, 스폴링(spalling) 모델링, 충돌 모델링 등)을 통해 만들어진 재료모델이 취성적인 파괴특성을 보이는지를 검증하는 것이 가장 좋을 것이다. 본 연구에서는 이와 같은 검증작업의 하나로서, 상용코드인 LS-DYNA 상에서 암석을 모델링할 때 적용할 수 있는 정적시험 모델링 기법의 하나인 각봉의 3점 시험 모델링을 통해 암석의 파괴인성을 구하는 과정을 금속의 경우와 비교하여 시뮬레이션 하였다.

취성재료는 파괴과정 중에 에너지 흡수량이 적은 재료로 정의할 수 있으며(Hertzberg et al., 2013), 이러한 재료의 성질을 인성(toughness)이라 한다. 파괴인성 값이 작은 재료에는 두 종류가 있다. 하나는 강도는 크고 연성이 작은 재료이며, 다른 하나는 강도는 작고 연성이 매우 큰 재료이다. 전자는 취성재료이며, 후자는 저강도 연성재료이다. 이 둘을 구분하는 기준은 파괴 도달시간이다. 비교적 빠른 시간 내에 재료가 파괴를 일으키면 취성재료라고 볼 수 있다.

LS-DYNA는 일종의 하이드로코드(hydrocode; hydro-

[1)] 한국지질자원연구원 책임연구원
* 교신저자 : bhchoi@kigam.re.kr
접수일 : 2017년 3월 20일
심사 완료일 : 2017년 3월 23일
게재 승인일 : 2017년 3월 27일

dynamic computer code)이다. 하이드로코드란 충격파의 전파를 취급하며, 속도/변형률/응력 등을 시간과 위치의 함수로 계산하는 컴퓨터 프로그램이다. 통상 하이드로코드는 보존방정식, 구성방정식(EOS(상태방정식) 포함), 그리고 파괴모델로 이루어진다. 하이드로코드에서는 질량, 운동량 및 에너지 보존원리로부터 물질좌표계 및/또는 공간좌표계에 대한 지배 미분방정식이 유도된다. 하이드로코드는 채택하고 있는 좌표계의 정의 방식으로도 구분할 수 있다. 예를 들어, LS-DYNA는 물질좌표계를 채택한 라그랑지안 코드(Lagrangian code)이며, CTH는 공간좌표계를 채택한 율러리안 코드(Eulerian code)이다.

하이드로코드에서의 시간적분 방식에는 명시적 방식과 묵시적 방식이 있다. LS-DYNA는 기본적으로 명시적 방법(중앙차분법)을 채택하고 있으나 묵시적 해석(Newmark 법 등)도 지원하고 있다. 공간분할 방식으로는 점(point)을 기본으로 하는 유한차분법(FDM)과 요소(element)를 기본으로 하는 유한요소법(FEM)이 있다. CTH는 유한차분법, LS-DYNA는 유한요소법 프로그램이다.

파괴인성 시험은 정적 시험이며, 이런 느린 과정을 모델링하기 위해서는 긴 해석시간(10분 이상)이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 LS-DYNA가 별도로 제공하는 묵시적 해석법(Newmark 법)을 적용하여 모델링 작업을 수행하였다.

2. 금속시편의 파괴인성시험 모델링

2.1 재료모델

본 해석에서 파괴인성을 시험하는 대상 시료는 산업에서 많이 쓰이고 있는 구조용 강(STEEL 4340 STKM12B)이다. 재료의 평면변형률 파괴인성을 실험적으로 결정하는 시험법은 미국재료시험학회(ASTM)에서 정하였는데, 여기서는 그 표준시험법을 적용하였다(김엄기 외, 2007).

LS-DYNA 상에서 구조용 강(연강)을 모델링할 수 있는 재료모델에는 여러 가지가 있으나 본 해석에서는 탄소성 해석과 변형률속도 효과를 모사할 수 있는 단순화된 Johnson-Cook 재료모델을 사용하였다. 이 단순화된 재료모델에서는 열적효과나 손상효과는 무시된다.

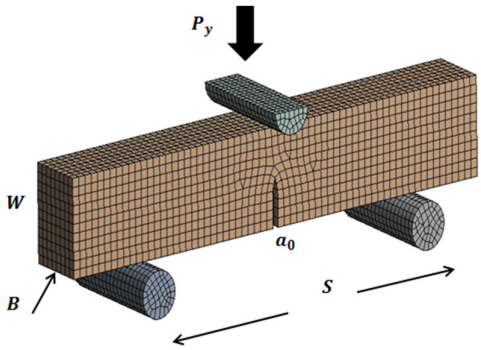
단순화된 Johnson-Cook 재료모델에서의 흐름응력(flow stress) σ_y은 다음 식으로 정의된다.

$$\sigma_y = \left(A + B\bar{\epsilon}_p^{\,n}\right)(1 + C\ln\epsilon^*) \qquad (1)$$

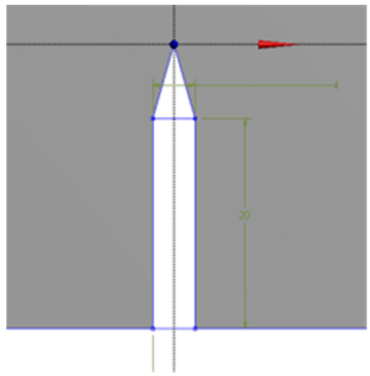
식 (1)에서 A, B, C 및 n은 상수이며, $\bar{\epsilon}_p$는 유효소성응력이다. $\epsilon^* = \dot{\bar{\epsilon}}/\dot{\epsilon}_0$로 정의되며, 기준 변형률속도 $\dot{\epsilon}_0 = 1\ \mathrm{s}^{-1}$에 대한 유효 변형률속도 $\dot{\bar{\epsilon}}$의 비이다.

2.2 해석모델

그림 1은 위에서 언급한 시험대상 시료인 구조용 강에 대한 파괴인성시험(fracture toughness test) 모델이다. 가중방법은 상부 가압봉에 일정한 속도를 부여하여 변위를 제어하며, 가중속도는 0.1 mm/s이다. 시편(각봉)의 규격은 높이 W = 54 mm, 두께 B = 40 mm,



(a) 해석모델



(b) 균열(노치) 모양

그림 1. 금속(연강)의 파괴인성시험 모델.

경간 S = 216 mm이다. 균열의 규격은 길이 a_0 = 27 mm(뾰족한 노치(notch)의 길이 7 mm), 균열폭 4 mm 이다(그림 1b). 시편의 재질은 구조용 강(structural steel; 연강)으로서 밀도 7830 kg/m^3, 체적탄성계수 159 GPa, 강성률 43 GPa(영률 118 GPa, 포아송비 0.37), 항복강도 340 MPa, 연신율 18%, 파괴인성 60 MPa.m$^{0.5}$ 이다.

LS-DYNA 재료모델은 앞에서 기술한 단순화된 Johnson-Cook 모델(LSTC, 2015)로서 표 1에 정리하였으며, 파괴기준은 등가소성변형률 0.18(연신률)로 설정하였다. 해석방법은 해석시간을 고려하여 묵시적 해석법(Newmark 법)을 적용하였다. 금속재료에 대한 파괴인성 표준시험법에서 파괴인성 K_{IC}는 다음 식 (2)로 구할 수 있다. 식 (2)에서 P_y는 파괴 시의 수직 하중이며, 여타의 기호들은 위의 설명과 같다. 형상에 따른 함수 $F(\xi) = F(\frac{a_0}{W})$는 식 (3)과 같이 별도로 정의한다(김엄기 외, 2007).

$$K_{IC} = \frac{SP_y}{W^{3/2}B} F(\xi) \tag{2}$$

단,

$$F(\xi) = 3\xi^{1/2}\left[1.99 - \xi(1-\xi)\{2.15 - 3.93\xi + 2.7\xi^2\}\right] \tag{3}$$

2.3 해석결과

그림 2는 가중하중의 시간이력이며, 그림 3은 해석결과를 시간대별로 보인 것이다. 해석결과로부터 이 재료는 연성재료(금속)의 거동특성을 보이는 것을 알 수 있으며, 식 (2)에 따라 계산된 파괴인성은 K_{IC} =

표 1. LS-DYNA의 단순화된 Johnson-Cook 재료모델과 입력물성

MODEL	RO	E	PR	VP			
JC	7830 kg/m^3	118.3 GPa	(0.376)	(0.0)			
A	B	N	C	PSFAIL	SIGMAX	SIGSAT	EPS0
(3.4e8)	(1e8)	(0.26)	(0.014)	0.18	0.0	0.0	1.020

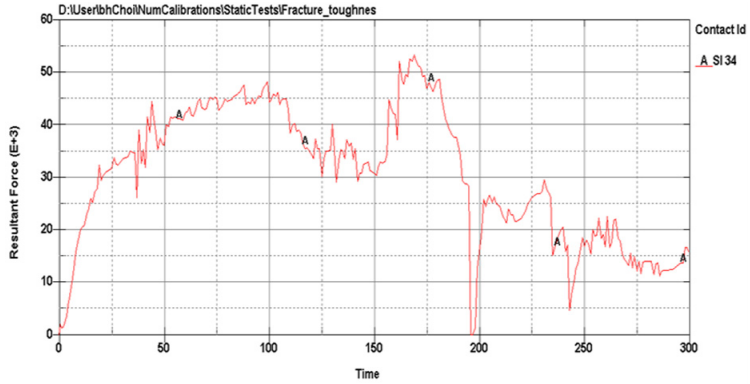
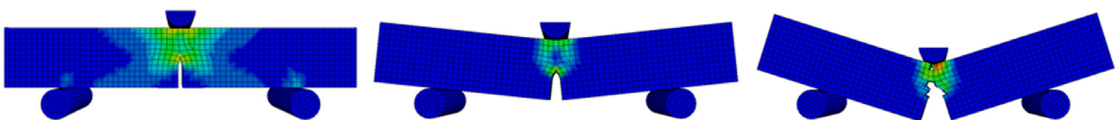


그림 2. 금속(연강)의 파괴인성시험에서의 가중하중의 시간이력.



(a) 3 s (b) 108 s (c) 300 s

그림 3. 금속(연강)의 파괴인성시험 모델링 결과.

73 MPa.m$^{0.5}$로 나타났다. 이 값은 입력값(60 MPa.m$^{0.5}$)에 비해서는 다소 큰 값이지만 입력물성과 해석모델의 정밀도를 고려하면 수용할 수 있는 값이라 여겨진다. 본 모델에서는 주어진 재료에 대한 정확한 파괴인성 값을 구하는 것이 아니라 이와 같은 해석법을 적용할 수 있음을 일례로 보여주고 있다. 따라서 보다 정확한 계산을 원한다면 재료모델의 입력물성을 직접 구하여 새로이 정의하고, 균열선단 부근에서의 수치해석 요소의 크기를 줄인다면 보다 정확한 해석결과를 얻을 수 있을 것이다.

3. 암석시편의 파괴인성시험 모델링

3.1 재료모델

HJC Concrete 재료모델(Holmquist et al., 1993)은 LS-DYNA에서는 JH Concrete 모델 (재료모델 #111)로 지칭되고 있는 것으로, 대변형, 고변형률속도, 고압을 받는 취성 콘크리트에 적합하도록 개발된 모델이다(LSTC, 2015). 그림 4는 HJC 재료모델의 강도모델, 손상모델 및 상태방정식(equation of state; EOS)을 보여주고 있다. HJC 재료모델의 강도모델은 외부 구속압에 대한 강도의 의존성을 표현하며(비손상 & 완전손상 재료모델), 손상모델은 비손상에서 완전손상까지 변화를 나타낸다. 상태방정식은 외부 구속압에 대한 압력-체적 관계를 정의한다. 원래, 대변형, 고변형률속도, 고압 하의 콘크리트 거동을 모델링하기 위해 개발된 것으로서 파괴변형률은 소성변형률과 소성체적변형률(공극효과 고려)의 합으로 표시된다. 1축 압축강도를 기준강도로 사용하므로 입력 재료상수 획득이 비교적 용이한 편이다. 공극효과를 반영할 수 있기 때문에 암석, 특히 풍화암의 모사에 유효할 것으로 판단된다.

3.2 해석모델

그림 5는 어떤 암석에 대한 파괴인성시험 모델인데, 원래 암석재료의 경우에는 각봉(rectangular bar)에 비

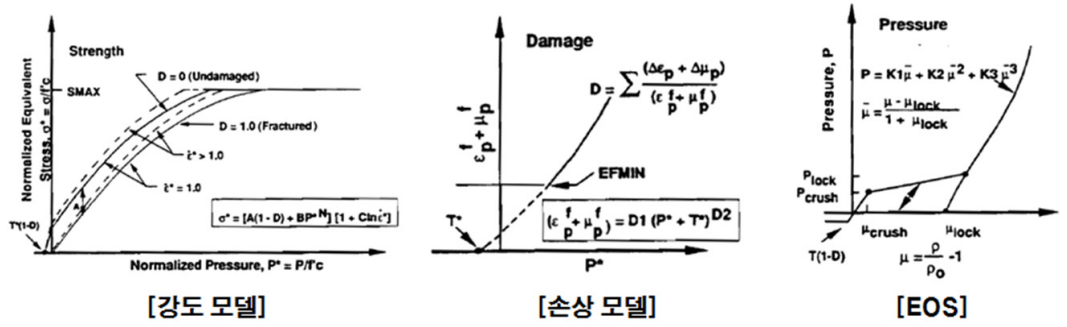


그림 4. HJC 콘크리트 재료모델 (Holmquist et al., 1993).

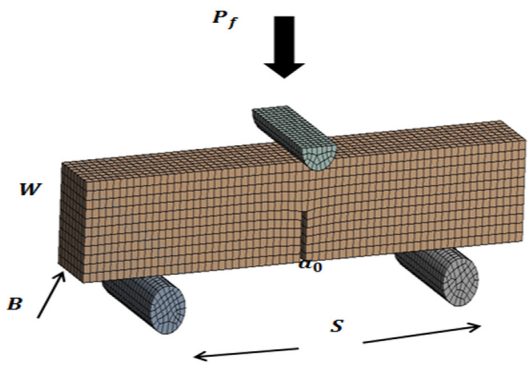


그림 5. 암석시편의 파괴인성시험 해석모델.

표 2. LS-DYNA의 HJC Concrete 재료모델과 입력물성

MODEL	RO	G	A	B	C	N	FC
JH Concrete	2600 kg/m^3	6.357 GPa	(1.0)	(2.01)	(0.0097)	(0.7)	113 MPa
T	EPS0	EFMIN	SFMAX	PC	UC	PL	UL
11.3 MPa	1.0 s^{-1}	0.01	(7.0)	0.038 GPa	0.004	0.800 GPa	0.1
D1	D2	K1	K2	K3	FS		
(0.04)	(1.0)	85 GPa	-171 GPa	208 GPa	1		

해 오히려 환봉(cylindrical bar), 즉 암석코어(rock core)의 형태가 시편으로 성형하기가 훨씬 더 쉽기 때문에 국제암반역학회 등에서는 암석코어를 대상으로 각종 강도시험을 실시하는 것을 표준으로 하고 있다. 하지만 본 논문에서는 실제적인 암석시험이 아니라 수치적인 시험에 대한 예를 앞의 금속 시편과 비교하는 관계로 동일한 형태인 각봉을 사용하였다. 아울러 파괴인성 시험결과치인 응력확대계수(stress intensity factor)를 평가하는 경험식들도 시편의 형상과 종류에 따라 다양하게 제안되어 있지만 본 예에서는 윤지선(1991)의 시험 예를 적용하였다. 실제 시험이 아닌 수치시험의 경우에는 학술적으로 인정받는 시험법이면 어떠한 방법이든 적용이 가능할 것이다. 다만, 실제 시험을 통하여 특정한 암석시편의 물성을 구하고자 할 때는 국제암반역학회에서 정하고 있는 표준시험법을 적용하는 것이 좋으며, 실제 시험에 대한 수치적인 모사를 할 때에도 가급적 실제 시험과 동일한 조건에서 수치모델을 작성하여야 할 것이다.

본 해석모델에서 가정하고 있는 암석의 물성은 Li와 Shi(2016)로부터 발췌하였다. 가중방법은 앞의 금속(연강) 모델에서와 마찬가지로 상부 가압봉에 일정한 속도를 부여하여 변위를 제어하였으며, 가중속도는 0.05 mm/s이다. 시편(각봉)의 규격은 높이 W = 54 mm, 두께 B = 40 mm, 경간 S = 216 mm이다. 균열의 규격은 길이 a_0 = 27 mm, 균열폭 4 mm이다. 암석시편의 재질은 밀도 2600 kg/m^3, 체적탄성계수 85 GPa, 강성률 6.36 GPa(영률 17.8 GPa, 포아송비 0.2), 압축강도 113 MPa, 인장강도 11.3 MPa, 파괴인성 1~2 MPa.m$^{0.5}$(예상치)이다. LS-DYNA 재료모델은 HJC Concrete 모델(표 2)이며, 콘크리트와 암석 등의 취성재료의 모델링에 많이 쓰이는 재료모델이다. 재료의 파괴기준은 최대주응력 11.3 MPa로 설정함으로써 모델링 과정에서 재료가 파괴되도록 하여 좀 더 사실적인 묘사가 되도록 설정하였다. 해석방법은 해석시간을 고려하여 묵시적 해석법(Newmark 법)을 사용하였다. 암석재료에 대한 파괴인성 시험법에서 파괴인성 K_{IC}는 다음 식으로 구할 수 있으며, 형상에 따른 함수 $F(\xi) = F(\frac{a_0}{W})$는 별도로 정의되어 있다(윤지선, 1991).

$$K_{IC} = \frac{3SP_f}{2W^2B} F(\xi) \sqrt{\pi a_0} \quad (4)$$

단,

$$F(\xi) = 1.090 - 1.735\xi + 8.20\xi^2 - 14.18\xi^3 + 14.57\xi^4 \quad (5)$$

3.3 해석결과

그림 6은 가중하중의 시간이력이며, 그림 7은 해석결과를 시간대별로 보인 것이다. 해석결과로부터 이 재료는 취성재료(암석)의 거동특성을 보이는 것을 알 수 있으며, 식 (4)에 따라 계산된 파괴인성은 K_{IC} = 0.3 MPa.m$^{0.5}$이다. 이 값은 입력값 예측치(1~2 MPa.m$^{0.5}$)에 비해서는 다소 작은 값이지만 오차를 고려하면 수용할 수 있는 값이다. 보다 정확한 계산을 원할 때는 요소의 크기를 작게 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 상용 해석코드인 LS-DYNA 상에서 암석을 모델링할 때 적용할 수 있는 정적시험 모델링 기법의 하나인 각봉의 3점 휨 시험 모델링을 통해 암석의 파괴인성을 구하는 과정을 금속의 경우와 비교

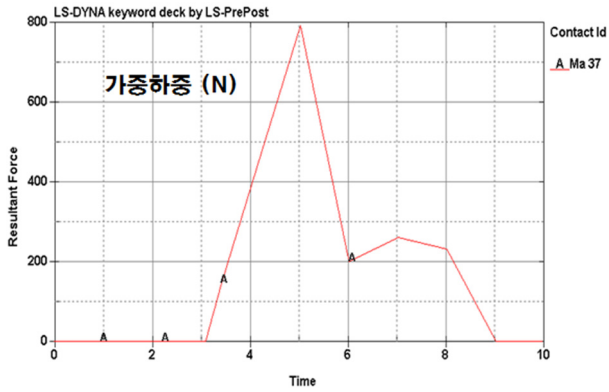
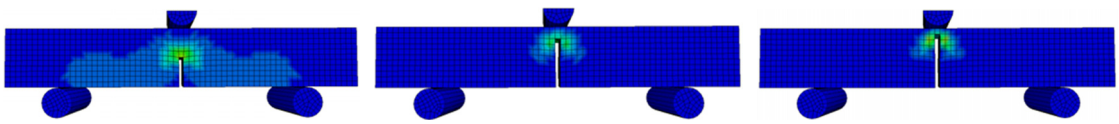


그림 6. 암석의 파괴인성시험에서의 가중하중 (단위: N)의 시간(단위: s) 이력.



(a) 5 s (b) 6 s (c) 8 s

그림 7. 암석시편의 파괴인성시험 수치모델링 과정.

하여 모사해 보았다. 모사 결과, 계산된 파괴인성은 금속(연강)의 경우에는 K_{IC} = 73 MPa.m$^{0.5}$로 나타난 반면, 암석의 경우에는 K_{IC} = 0.3 MPa.m$^{0.5}$이다. 파괴인성의 크기는 파괴과정에서 재료가 에너지를 흡수할 수 있는 능력을 보여주는 중요한 지표로서 파괴속도가 빠르고, 파괴인성이 작으면 이는 취성재료의 특성을 반영한다고 할 수 있다. 따라서 암석재료를 대상으로 수치해석을 수행할 때에는 작성된 재료모델이 암석의 특성인 취성을 잘 반영하고 있는지를 파괴인성시험 모델링 등을 통해 사전에 확인해 보는 것이 바람직하다고 생각된다. 다만, 실제 암석을 대상으로 시험을 실시하고, 이를 수치해석으로 모사할 때에는 국제암반역학회가 권고하는 표준시험법에 따라 암석코어로 만든 환봉시편을 사용하여야 할 것이다.

감사의 말

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요연구사업(과제코드 GP2017-016)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김엄기, 오범석, 남승훈, 전성식, 2007, 재료강도시험법, 두양사, pp.139-154.
2. 윤지선 역, 1991, 암석. 암반의 조사와 시험, 구미서관, pp.579-587.
3. Hertzberg, R.W., R.P. Vinci, and J.L. Hertzberg, 2013, Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, 5th ed., John Wiley & Sons, Inc.
4. Holmquist, T.J., G.R. Johnson, and W.H. Cook, 1993, “A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures”, Proceedings 14th Int. Symp. on Ballistics, Quebec, Canada, pp.591-600.
5. Li, H. and G. Shi, 2016, A dynamic material model for rock materials under conditions of high confining pressures and high strain rates, Int J Impact Eng 89, pp.38-48.
6. LSTC (Livermore Software Technology Corporation), 2015, LS-DYNA Keyword User’s Manual, Livermore, CA.

최 병 희
한국지질자원연구원

Tel: 042-868-3237
E-mail: bhchoi@kigam.re.kr

류 창 하
한국지질자원연구원

Tel: 042-868-3236
E-mail: cryu@kigam.re.kr