

LS-DYNA 발파 모델링에서 현장암반의 특성을 반영하기 위한 Hoek-Brown 파괴기준과 Holmquist-Johnson-Cook 콘크리트 재료모델의 접목

최병희^{1)*} · 선우춘¹⁾ · 정용복¹⁾

Integrating the Hoek-Brown Failure Criterion into the Holmquist-Johnson-Cook Concrete Material Model to Reflect the Characteristics of Field Rock Mass in LS-DYNA Blast Modeling

Byung-Hee Choi, Choon Sunwoo, Yong-Bok Jung

Abstract In this paper the Hoek-Brown (HB) failure criterion is integrated into the Holmquist-Johnson-Cook (HJC) concrete material model to reflect the inherent characteristics of field rock masses in LS-DYNA blast modeling. This is intended to emphasize the distinctive characteristics of field rock masses that usually have many geological discontinuities. The replacement is made only for the static strength part of the HJC material model by using a statistical curve fitting technique, and its procedure is described in detail. An example is also given to illustrate the use of the obtained HJC material model. Computation is performed for a plane strain model of a single-hole blasting on a field limestone by using the combination of the fluid-structure interaction (FSI) technique and the multi-material arbitrary Lagrangian Eulerian (MMALE) method in LS-DYNA.

Key words Hoek-Brown failure criterion, Holmquist-Johnson-Cook concrete material model, rock mass blasting, LS-DYNA, fluid-structure interaction, multi-material arbitrary Lagrangian Eulerian method

초 록 본 논문에서는 Hoek-Brown (HB) 파괴기준을 Holmquist-Johnson-Cook (HJC) 콘크리트 재료모델에 접목시킴으로써 LS-DYNA 상에서 암반발파를 모델링할 때 현장암반의 고유한 특성이 잘 반영될 수 있도록 도모하였다. 이것은 많은 지질학적 불연속면을 포함하고 있는 현장암반이 지니고 있는 독특한 특징을 강조하기 위함이다. 두 모델의 접목은 HB 파괴기준으로 HJC 재료모델의 정적 강도 부분을 교체함으로써 이루어지며, 교체과정은 통계학적 곡선적합 기법에 의해 수행된다. 본 논문에서는 접목의 과정이 상세하게 소개되며, 획득된 HJC 재료모델의 사용에 대한 실례도 제시된다. 제시된 수치계산은 현장의 석회암 암반의 단일공 발파에 대한 평면변형률 모델링으로서 LS-DYNA가 제공하는 유체-구조물 상호작용(FSI) 기법과 다중재료 라그랑주-오일러(MMALE) 정식화 기법을 조합하여 수행된다.

핵심어 Hoek-Brown 파괴기준, Holmquist-Johnson-Cook 콘크리트 재료모델, 암반발파, LS-DYNA, 유체-구조물 상호작용, 다중재료 라그랑주-오일러 정식화 기법

1) 한국지질자원연구원

* 교신저자 bhchoi@kigam.re.kr

접수일 : 2020년 9월 22일

심사 완료일 : 2020년 9월 24일

게재 승인일 : 2020년 9월 25일

1. 서론

LS-DYNA에서 암석용으로 쓸 수 있는 재료모델에는 여러 가지가 있으나 본 논문에서는 취성재료 모델링용으로 제안된 Holmquist-Johnson-Cook (HJC) 콘크리트 모델(LS-DYNA에서는 “JH Concrete” 모델로도 명명됨)을 채택하였다(Holmquist et al., 1993). 그런데 HJC 재료모델을 비롯하여 LS-DYNA에서 쓸 수 있는 다양한 구성모델들의 매개변수 값들은 연속체 역학(continuum mechanics)의 토대 위에서 매우 복잡한 실험들을 통해 결정된다. 그러나 이렇게 복잡한 실험을 통해 구한 재료의 물성이라 하더라도 그것이 인공재료(금속, 세라믹, 콘크리트 등)나 무결암(intact rock)에 대해서는 잘 맞을 수 있지만 구조적 불연속면(structural discontinuities)을 많이 내포하고 있는 현장암반(field rock mass)의 특성을 잘 반영하기는 매우 어렵다고 판단된다.

예를 들어, 암반발파(rock mass blasting)를 잘 묘사하려면 암반의 특성과 발파의 특성을 잘 반영할 필요가 있다. 그런데 암반의 특성은 무결암의 역학적 특성보다는 절리와 같은 불연속면의 특성에 의해 좌우되는 경향이 강하므로 LS-DYNA에서 쓸 수 있는 연속체 역학 기반의 재료모델로는 암반이라는 불연속체(discontinuum)의 특징을 잘 반영하기가 매우 어렵다.

이러한 견지에서 Ma and An(2008)은 암반의 실제적인 강도특성을 LS-DYNA의 재료모델에 반영하기 위하여 암반평가(rock mass rating) 분야에서 파괴기준으로 널리 사용되고 있는 Hoek-Brown (HB) 파괴기준을 JH2 세라믹 재료모델에 적용시키는 방법을 사용한 바 있다. 본 논문에서는 JH2 세라믹 재료모델보다 입력상수의 도출이 용이한 HJC 콘크리트 재료모델에 HB 파괴기준을 접목하여 사용하는 방법을 제시하였다.

이하에서는 과거 국내의 한 석회암 광산에 대한 암반등급 조사결과로부터 몇 개의 자료를 추출하여 HB 파괴기준식을 결정하는 과정을 기술하고, 이렇게 결정된 HB 파괴기준식으로부터 회귀분석(regression analysis)을 통하여 HJC 재료모델에서 정적 강도를 결정하는 매개변수들의 값을 산출하는 과정을 자세히 소개한다. 그런 다음, 이 계산결과와 현장조사 자료,

그리고 기존의 경험치들을 이용하여 HJC 재료모델을 작성하고, LS-DYNA에서 제공하는 폭원모델링 기법을 활용하여 단일공 벤치발파에 대한 평면변형률(plane strain) 모델링을 수행하는 과정까지 예시한다.

2. HB 파괴조건 결정

2.1 파괴조건식

Hoek and Brown(1980)은 RMR 시스템을 이용하여 암반의 파괴기준을 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 암반에 대한 가장 일반적인 형태의 파괴조건식은 다음과 같다.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (1)$$

식 (1)에서,

σ_1' = 최대 유효주응력

σ_3' = 최소 유효주응력

σ_c = 무결암의 일축압축강도

m_b = 암반에 대한 무차원 물질상수 m 의 값

s, a = 암반의 특성에 따른 상수

1992년 기준식은 본래의 기준식에서 예측되었던 인장강도를 제거하기 위하여 다음과 같이 수정되었다(Hoek et al. 1992).

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} \right)^a \quad (2)$$





식 (2)에서, m_b 와 a 는 암반에 대한 상수이다. 절리를 포함하는 암반의 상태가 교란되어 있지 않고 오직 고유의 성질만 나타낸다고 가정하면 상수 m_b 값은 m_b/m_i 에 관한 식에서 m_i 값(표 1)을 대입함으로써 계산된다. 상수 a 값은 표 2로부터 직접 계산할 수 있다.

표 1. 무결암의 암종에 따른 m_i 의 상수값(Hoek et al., 1992)

입자크기	퇴적암			변성암		화성암		
	탄산염	쇄설암	화학적	탄산염	규산염	산성	중성	염기성
조립	백운암 10.1	역암 (20)		대리암 9.3	편마암 29.2	화강암 32.7	반려암 25.8	노라이트 21.7
중립	백악 7.2	사암 18.8	치트 19.3		각섬암 31.2		조립현무암	
세립	석회암 8.4	실트암 9.6	석고 15.5		규암 23.7	유문암 (20)	안산암 18.9	현무암 (17)
초세립		점토암 3.4			점판암 11.4			

주) 값들은 삼축시험의 통계분석에서 유도된 값. 괄호안의 값은 추정치.

표 2. 암석구조와 표면조건에 따른 m_b/m_i 의 상수값(Hoek et al., 1992)

MODIFIED HOEK-BROWN CRITERION		STRUCTURE	SURFACE CONDITION	VERY GOOD Very rough, unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered or altered surfaces	POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings containing angular rock fragments	VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} \right)^a$ σ_1' = major principal effective stress at failure σ_3' = minor principal effective stress at failure σ_c = uniaxial compressive strength of intact pieces of rock m_b and a are constants which depend on the composition, structure and surface conditions of the rock mass								
 BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	m_b/m_i	0.7	0.5	0.3	0.1			
	a	0.3	0.35	0.4	0.45			
	E	50,000	40,000	25,000	5,000			
	v	0.2	0.2	0.2	0.25			
 VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed rock mass with angular blocks formed by four or more discontinuity sets	m_b/m_i	0.3	0.2	0.1	0.04			
	a	0.4	0.45	0.5	0.5			
	E	25,000	15,000	5,000	1,000			
	v	0.2	0.25	0.25	0.25			
 BLOCKY/SEAMY - folded and faulted with many intersecting discontinuities forming angular blocks	m_b/m_i		0.08	0.04	0.01	0.004		
	a		0.5	0.5	0.55	0.6		
	E		3,000	1,000	700	500		
	v		0.25	0.25	0.3	0.3		
 CRUSHED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded blocks	m_b/m_i		0.03	0.015	0.003	0.001		
	a		0.5	0.55	0.6	0.65		
	E		1,000	800	500	300		
	v		0.25	0.3	0.3	0.3		

1995년에 기준식이 다시 수정되어(Hoek et al. 1995) 가장 일반적인 HB 기준식인 식 (1)에 GSI(geological strength index; 지질학적 강도지수)가 도입되었고, ‘교란’ 및 ‘비교란’ 암석의 개념을 나타내고 있다. 상수 s , a 와 m_b/m_i 의 값은 다음 식들과 같이 설정되었다.

GSI > 25의 비교란 암반에 대해:

$$m_b/m_i = e^{\frac{(GSI-100)}{28}} \quad (3)$$

$$s = e^{\frac{(GSI-100)}{9}} \quad (4)$$

$$a = 0.5 \quad (5)$$

GSI < 25의 교란 암반에 대해:

$$s = 0 \quad (6)$$

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad (7)$$

마지막 수정이 2002년에 이루어졌고(Hoek et al. 2002), m_b , s 와 a 의 값이 새롭게 제시되었다.

$$m_b = m_i e^{\frac{(GSI-100)}{28-14D}} \quad (8)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (9)$$

$$s = e^{\frac{(GSI-100)}{9-3D}} \quad (10)$$

매개변수 D 의 도입으로 1995년 기준식에서 GSI 값을 적절하게 보정함으로써 사용자들이 결정하던 교란의 문제를 재평가하였다. 암반이 발파나 응력이완에 의해 영향을 받은 교란의 정도를 나타내는 교란지수 D 는 교란이 되지 않은 암반의 경우 $D = 0$ 에서부터 매우 교란을 받은 암반의 경우 $D = 1$ 까지의 범위를 갖는다(표 3). 교란지수 D 의 영향은 커질 수 있고 이것의 적용은 경험과 판단을 요구한다. 궁극적으로 D 에 대한 선택 값은 관찰과 계측수행을 통하여 실증될 수 있어야 한다.

적절한 σ_{ci} , m_i 와 GSI 값을 사용하는 공개 소프트웨어인 Rocscience사의 RocLab 프로그램을 사용하여

작업과정을 간단히 할 수 있더라도, 어떤 특정한 수직 응력에 대한 순간적인 유효마찰각과 점착력 값을 계산하기 위한 작업과정은 본질적으로 일반화된 1995년 기준과 같다. 오히려 m_i 는 무결암 암석시료에 대한 실험실 UCS(σ_{ci})와 삼축압축실험으로부터 구해아만 한다.

100MPa보다 크거나 작은 σ_{ci} 값에 대해 GSI 시스템을 이용한 암반의 영률(E_m)을 결정하기 위한 제안으로서 Hoek et al.(2002)의 방정식이 Hoek and Diederichs(2006)에 의해 GSI와 D 를 포함하는 하나의 식으로 수정되어 다음과 같이 제시되었다.

$$E = 10^5 \times \left(\frac{1 - D/2}{1 + e^{(75+25D-GSI)/11}} \right) \quad [\text{MPa}] \quad (11)$$

2.2 석회암에 대한 암반물성 산정

본 절은 국내에 소재하는 한 석회석 광산의 운반갱도를 중심으로 RMR, Q 및 GSI에 의한 암반평가를 실시한 예이다.

RMR 값

00광업소의 조사 운반갱도는 암반의 상태가 크게 2가지로 분류되며, 전체적으로 암반이 보통에서 양호한 상태와 이 지역에 분포하는 대단층들의 영향으로 갱도내의 단층에 의한 연약대와 용식동굴들이 존재하는 지역의 연약한 암반으로 대별된다.

갱도의 조사구역별 RMR 암반분류를 수행한 결과는 표 4 및 5와 같다. 요소 값 중 RQD의 경우는 시간적으로나 공간적으로도 시추할 수 있는 상황이 아니기 때문에 암반의 관측상태에서 추정된 값들을 사용했다. 이 경우 RQD 요소값은 하나의 고정된 값이 아니라 범위로 주어지는 값이기 때문에 현장 관찰값을 사용해도 평점값에서는 큰 차이가 생기지 않는다.

다소 양호한 암반의 경우는 전체적으로 RMR 값이 49에서 72까지 평균 59의 값을 갖는다. 갱도의 굴착방향을 고려한 total RMR 값은 약 57의 값으로 III 등급인 보통의 암반이다. 연약암반의 경우는 35 전후의 값으로 IV 등급인 불량 암반이 되며, 이 연약암반 구역들이 전체 갱도의 안정성에 영향을 미치고 있다.

표 3. 교란지수 D 를 추정하기 위한 지침(Hoek et al., 2002)




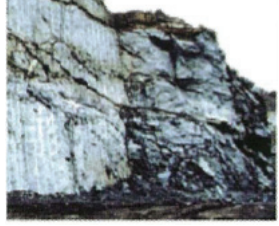

암반의 상태	암반에 대한 개요	D 의 제안값
	<p>TBM에 의한 굴착이나 제어발파에 의한 굴착으로 터널주변 구속암반의 교란을 최소화</p>	<p>$D = 0$</p>
	<p>불량암반에서의 수작업 또는 기계식 굴착(발파 안함)에 의한 주변암석의 교란을 최소화</p> <p>바닥용기로 압착문제가 있는 곳에서 임시 인버트(invert) 타설이 없는 경우 사진과 같이 교란이 심각할 수 있음</p>	<p>$D = 0$</p> <p>$D = 0.5$ 인버트 없음</p>
	<p>경암터널에서 매우 불량한 발파로 암반주변 2m 또는 3m까지 국부적으로 심각하게 손상</p>	<p>$D = 0.8$</p>
	<p>왼쪽 사진처럼 조절발파를 한 경우 도로사면에서 작은 규모의 발파로 암반의 손상이 크지 않음. 따라서 응력이완이 다소의 교란을 일으킴</p>	<p>$D = 0.7$ 양호한 발파</p> <p>$D = 1.0$ 불량 발파</p>
	<p>대규모 노천사면은 큰 규모의 채광발파와 상부 피복층 제거로 응력이완에 의해 심각하게 교란</p> <p>일부 연암에서 증장비에 리핑(ripping) 굴착으로 사면의 손상도가 더 적음</p>	<p>$D = 1.0$ 채광발파</p> <p>$D = 0.7$ 기계굴착</p>

표 4. 2016년 조사구역별 RMR 평점 및 등급

구역	압축강도		RQD		간격		지하수		불연속면 조건						BRMR
		평점	%	평점	cm	평점		평점	길이	틈새	거칠기	충전물	풍화	평점	
x01	경 압	12.0	75-90	17	20-60	10	습 함	10	1	5	5	2	5	18	67
x02	경 압	12.0	75-90	17	20-60	10	습 함	10	1	5	1	6	5	18	67
x03	경 압	12.0	75-90	17	20-60	10	습 함	10	1	5	1	6	5	18	67
x04	경 압	12.0	75-90	17	60-200	15	습 함	10	1	5	1	6	5	18	72
x05	보통압	7.0	50-75	13	6-20	8	습 함	10	4	4	3	2	3	16	54
x07	보통압	7.0	75-90	17	20-60	10	물떨어짐	4	1	5	1	6	5	18	56
x08	보통압	7.0	50-75	13	20-60	10	습 함	10	2	4	3	0	3	12	52
x08-연	연암	4.0	25-50	8	6-20	8	습함	10	2	1	0	0	1	4	34
x09	보통압	7.0	50-75	13	20-60	10	습 함	10	1	4	3	2	5	15	55
x09-연	연암	4.0	25-50	8	6-20	8	습함	10	2	1	3	0	1	7	37
x10-강	보통압	7.0	50-75	13	20-60	10	습 함	10	4	5	5	0	3	17	57
x10-약	풍화암	2.0	25-50	8	6-20	8	습 함	10	4	0	0	0	0	4	32
y11	보통압	7.0	50-75	13	20-60	10	젖 음	7	2	4	1	0	5	12	49
y01R	경 압	12.0	75-90	17	20-60	10	젖 음	7	1	5	5	4	5	20	66
y01L_2	보통압	7.0	50-75	13	6-20	8	습 함	10	2	1	3	2	3	11	49
y01L_1	경 압	12.0	75-90	17	20-60	10	습 함	10	1	4	3	2	3	13	62
y02	보통압	7.0	50- 5	13	20-60	10	습 함	10	1	5	5	2	5	18	58

표 5. 2003년 조사구역별 RMR 평점 및 등급

구역	압축강도		RQD		간격		지하수		불연속면 조건						BRMR
	MPa	평점	%	평점	cm	평점		평점	길이	틈새	거칠기	충전물	풍화	평점	
x0-1	58.1	5	85	17	20-60	10	건조	15	2	6	3	6	5	22	69
x0-2	76.5	7	90	18	20-60	10	습함	10	1	1	3	6	6	17	62
x0-3	69.5	6	65	13	20-60	10	젖음	7	2	4	3	2	5	16	52
x0-4	62.2	6	50	10	6-20	8	젖음	7	2	0	3	2	3	10	41
x0-5	67.6	6	85	17	20-60	10	습함	10	1	1	3	2	5	12	55
x0-6	58.0	5	85	17	60-200	15	습함	10	1	5	5	2	5	18	65
x0-7	75.0	7	60	12	20-60	8	젖음	7	1	1	3	0	3	8	42
x0-8	50.6	5	45	9	6-20	8	젖음	7	2	4	3	2	5	16	45
x0-9	52.3	5	85	17	20-60	8	습함	10	1	4	3	2	5	15	55
x0-10	48.5	5	85	17	20-60	10	젖음	7	2	5	3	6	6	22	61
z0-2	66.1	6	85	17	20-60	10	젖음	7	2	1	5	2	5	15	55
z0-3	87.2	7	80	16	20-60	10	젖음	7	2	4	3	2	5	16	56
z0-4	33.8	4	55	11	20-60	10	습함	10	2	4	3	2	3	14	49
z0-5	96.3	8	80	16	20-60	10	습함	10	2	4	3	2	5	16	60
z0-6	69.9	6	70	13	20-60	10	습함	10	2	1	3	2	3	11	50
z0-7	68.2	6	65	13	20-60	10	습함	10	1	1	3	2	6	13	52
z0-8	80.9	7	80	16	20-60	10	젖음	7	1	1	3	0	5	10	50

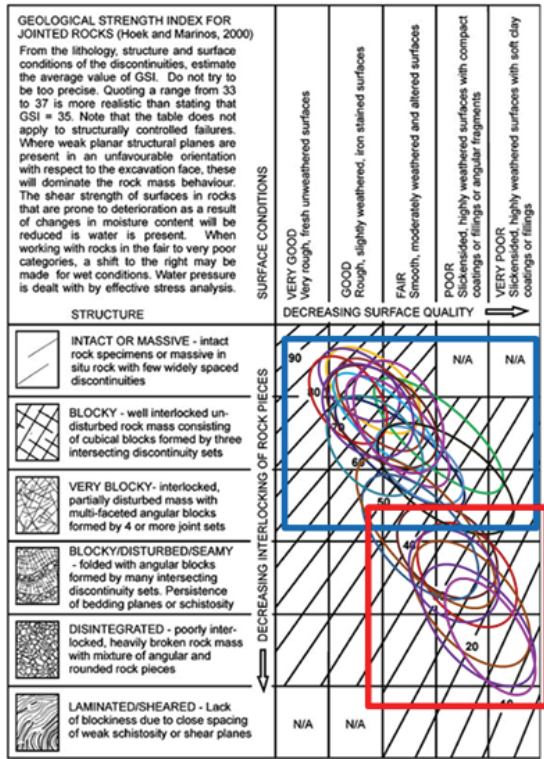


그림 1. x0갱 운반갱도에서 측정된 GSI 값의 분포.

GSI 값

갱도의 조사구역별로 GSI 암반분류를 수행하여 구한 GSI 값은 그림 1 및 표 6과 같다. x0갱 전체적으로 GSI 값은 10에서 90까지 다양한 암반상태를 나타내고 있으며, 전체적인 GSI 평균값은 52를 나타내고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 운반갱도는 암반의 상태가 크게 2가지로 분류되기 때문에 GSI 값은 다소 양호한 암반의 경우는 20~80 범위의 값을 가지며 평균 59 정도의 값을 갖지만(그림 1의 청색 사각형), 연약한 암반의 경우는 10~50 범위의 값을 가지며 평균 32 정도의 값을 갖는다(그림 1의 적색 사각형).

Q 값

00광업소 x0갱 갱도의 암반을 대상으로 Q 시스템을 이용한 암반분류를 수행하였으며, 측정된 Q 값은 표 7과 같다. 이번 조사에서 조사된 Q 값은 다소 양호한 암반의 경우는 1.0~13.3 범위의 값을 가지며 연약한 암반의 경우 Q 값은 0.1이며, 전체적으로 평균 6.1 정도의 값으로 보통의 암반상태를 나타낸다.

표 6. 2016년 측정 GSI 값

구역	GSI			
	최소값	최대값	범위	평균값
x01	45	80	45-80	62.5
x02	60	85	60-85	72.5
x03	55	85	55-85	70
x04	52	75	52-75	63.5
x07	50	80	50-80	65
x08	20	60	20-60	40
x08-연약	10	40	10-40	25
x09	45	75	45-75	60
x09-연약	25	55	25-55	40
x10-강	55	80	55-80	67.5
x10-약	20	40	20-40	30
x10-낙석	10	35	10-35	22.5
x11	40	75	40-75	57.5
y01R	40	75	40-75	57.5
y01L_2	35	60	35-60	47.5
y01L_1	35	75	35-75	55
y02	40	75	40-75	57.5
x05	25	60	25-60	42.5

표 7. 2016년 조사경도에서 측정된 Q값

조사구역	RQD	Jr	평점	SRF	평점	Jn	평점	Ja	평점	Jw	평점	Q
x01	80	F	1.0	J	1.0	F	9.0	B	1.00	B	0.66	5.9
x02	80	F	1.0	J	1.0	F	9.0	B	1.00	A	1.00	8.9
x03	80	F	1.0	J	1.0	E	6.0	B	1.00	A	1.00	13.3
x04	80	F	1.0	J	1.0	E	6.0	B	1.00	A	1.00	13.3
x07	75	F	1.0	J	1.0	F	9.0	B	1.00	A	1.00	8.3
x08	60	F	1.0	J	1.0	F	9.0	B	1.00	A	1.00	6.7
x08-연	35	H	1.0	A	10.0	F	9.0	K	6.00	A	1.00	0.1
x09	60	F	1.0	J	1.0	E	6.0	B	1.00	A	1.00	10.0
x09-연	35	H	1.0	B	5.0	H	15.0	K	6.00	A	1.00	0.1
x10-강	80	F	1.0	J	1.0	E	6.0	B	1.00	A	1.00	13.3
x10-약	35	E	1.5	A	10.0	E	6.0	G	6.00	A	1.00	0.1
x11	60	F	1.0	J	1.0	F	9.0	F	4.00	A	1.00	1.7
y01R	80	F	1.0	J	1.0	D	4.0	G	6.00	A	1.00	3.3
y01L_2	60	F	1.0	J	1.0	H	15.0	C	2.00	A	1.00	2.0
y01L_1	80	F	1.0	J	1.0	G	12.0	A	0.75	A	1.00	8.9
y02	60	G	0.5	J	1.0	H	15.0	C	2.00	A	1.00	1.0

입력자료 산정

수치해석에 사용되는 입력자료는 암석이 아니라 암반의 값이어야 하며, 대부분 실내시험결과와 암반 분류 결과를 조합하여 사용하게 된다. 파괴기준식으로 식 (1)로 표현되는 HB의 일반식을 사용하였기 때문에 암석의 일축압축강도(σ_c), GSI 그리고 m_i (암석의 종류에 따른 분류표를 사용하거나 실내시험 결과를 적합하여 결정)를 구하면 해석에 사용할 암반의 물성을 비교적 객관적으로 구할 수 있다.

최종적으로 암반분류 값 중에 GSI 값을 해석에 사용한다. GSI 값을 알 수 없고 RMR이나 Q 값을 아는 경우는 각 암반분류값들 간의 관계식을 이용하여 GSI 값의 추정치를 사용한다. Q 값은 암반의 물성 값을 구하는 경우보다는 암반에서 공동을 굴착할 경우 공동의 지보를 결정하는 데 주로 사용된다.

앞의 2.1절에서 언급된 암반물성을 구하기 위해서 제시된 식과 표를 사용하지만 Rocscience사에서 개발한 RocLab이란 소프트웨어를 사용하면 편리하다 (그림 2 및 3 참조). RocLab은 일반화 된 HB 파괴기준을 기반으로 하는 암반강도의 매개변수 결정을 위한 보급형 소프트웨어이다. 이 RocLab은 HB 파괴기준을 간단하고 직관적으로 구현하여 사용자가 쉽게 암반 물성에 대한 신뢰할 수 있는 추정치를 구할 수 있고, 파괴포락선에서 변하는 암반 매개변수의 효과

를 시각화할 수 있다.

여기서 교란지수는 굴착에 의한 교란영역(excavation damaged zone; EDZ)을 고려하여 적용할 수 있으나 해석에서는 전체 암반의 거동을 파악하기 위해 해당 광산에서의 EDZ에 대한 정보가 없기 때문에 $D = 0$ 을 적용하였다.

입력자료 결정을 위해서 현장에서 채취한 시료들에 대한 실내시험 결과들을 이용하여 먼저 그림 2와 같이 HB 식에 적합시켜서 각 시험편에 대해 동일 계산 반복 후 $m_i = 14.8\text{MPa}$ 과 $\sigma_c = 71.85\text{MPa}$ 를 대표 값으로 구하였다. 이 값과 2.2절에서와 같이 현장에서 측정된 GSI 평균값 52를 적용하여 그림 3과 같이 입력자료들을 입력하면 해석에 필요한 결과들이 출력된다. 즉, 일반화 된 HB 파괴기준식인 식 (1)의 상수값들로서 $m_b = 2.669$, $a = 0.505$, $s = 0.0048$ 의 결과값들이 각기 식 (8)~(10)에 의해 계산되어 출력된다. 이들 출력된 결과값들은 현장암반을 대상으로 구조물과 암반의 관계에 대한 수치해석을 위한 암반의 특성값으로 사용된다. 최종적으로 구해진 HB 파괴기준식은 다음과 같다.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + 71.85 \left(2.669 \times \frac{\sigma_3'}{71.85} + 0.0048 \right)^{0.505} \text{ (MPa)} \quad (12)$$

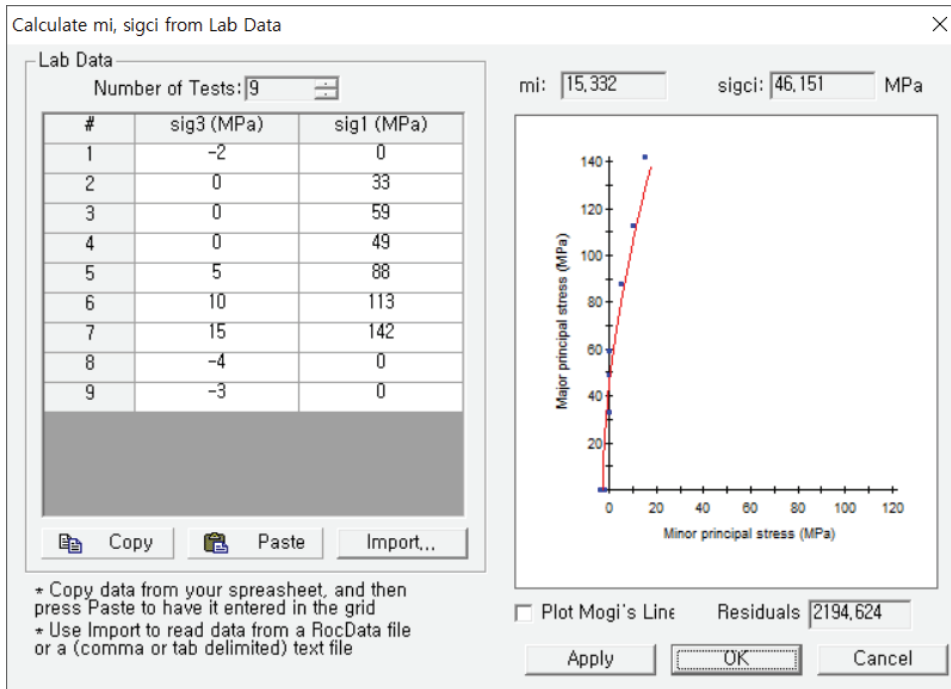


그림 2. 실내시험 자료를 이용한 m_i 및 σ_c 결정

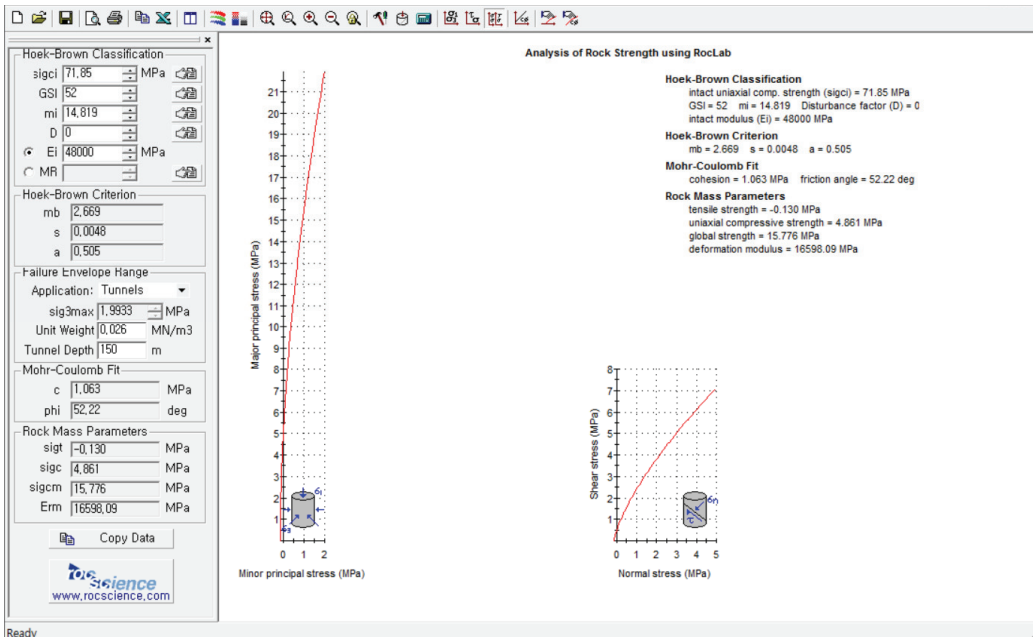


그림 3. 도출된 HB 파괴기준.

3. HJC 재료모델 결정

3.1 HJC 재료모델

HJC 콘크리트 재료모델(Holmquist et al., 1993)은 LS-DYNA에서는 JH Concrete 모델 (재료모델 #111) 로도 지칭되고 있는 것으로, 대변형, 고변형률속도, 고압을 받는 취성 콘크리트에 적합하도록 개발된 모델이다. 그림 4는 HJC 재료모델의 강도모델, 손상모델 및 상태방정식(equation of state; EOS)을 보여주고 있다. 그림 4의 강도모델은 압력에 대한 강도의 의존성을 표현하며(비손상($D = 0$) 및 완전손상($D = 1$) 재료모델), 손상모델은 비손상에서 완전손상까지의 변화를 나타낸다. 단, 여기서의 손상도 D 와 앞의 HB 파괴기준에서의 교란지수 D 는 서로 별개의 기호이다. 그림 4의 EOS는 요소의 압력-체적 관계를 정의한다.

HJC 콘크리트 재료모델에서 파괴변형률은 소성변형률(ϵ_p)과 소성체적변형률(μ_p ; 공극효과 고려)의 합으로 표시된다. 이 재료모델은 일축압축강도를 기준 강도로 사용하므로 JH2 세라믹 재료모델 등에 비해 입력 재료상수의 획득이 비교적 용이한 편이다. 또, 공극효과를 반영할 수 있기 때문에 암석, 특히 풍화암의 모사에 효과적일 것으로 판단된다.

3.2 입력상수 결정

본 절에서는 암반이 석회암으로 이루어져 있다고 가정한다. 석회암은 국내에서 나타나는 여러 암반들 중에서 강도가 매우 낮은 편에 속한다. 이는 국내 석회석에 대한 일축압축강도 및 인장강도 분포를 보아도 알 수 있는 사실이다(김교원 및 김수정, 2006). 국내에서 산출되는 석회암의 무결암 강도는 대체로 100MPa

이하로 나타나며, 이는 앞 절의 국내 석회암 광산에 대한 암반조사 결과($\sigma_c = 71.85\text{MPa}$)와도 잘 일치한다.

앞에서 간략히 언급한 HJC 콘크리트 재료모델(Holmquist et al., 1993)의 강도모델(strength model)은 다음과 같이 정의된다(그림 4 참조).

$$\sigma^* = [A(1 - D) + BP^*]^N [1 + C \ln \dot{\epsilon}^*] \quad (13)$$

식 (13)에서 σ^* 은 정규화 된 응력(normalized stress), P^* 은 정규화 된 압력(normalized pressure), 그리고 $\dot{\epsilon}^*$ 는 정규화 된 변형률속도(normalized strain rate)이다. 응력과 압력은 재료의 일축압축강도(σ_c)를 기준으로 정규화하며, 변형률속도는 1.0 s^{-1} 를 기준으로 정규화한다. 앞에서와 같이 D 는 손상도 변수이며, A , B , C 및 N 은 상수이다.

식 (13)의 강도모델은 두 부분으로 이루어져 있다. 앞부분은 압력(P)과 유효응력(σ)의 관계(이 관계식은 주어진 압력에서 재료가 전달할 수 있는 유효응력을 표시하므로 재료의 파괴조건을 정의하고 있음)를 정규화하여 표시한 부분으로서 재료의 정적 강도를 표현하며, 뒷부분은 변형률속도($\dot{\epsilon}$)의 효과를 정규화하여 표시한 부분으로서 재료의 동적 효과를 표현한다. 따라서 서론에서 언급한 바와 같이 우리가 어떤 암반의 강도를 HJC 강도모델로 표현하려면 암반에서 많이 적용되는 HB 파괴조건을 HJC 강도모델의 정적 파괴조건으로 변환하는 것이 이상적일 것이다. 즉, 다음의 두 식을 곡선적합(curve fitting) 기법을 사용하여 서로 접목시킨다.

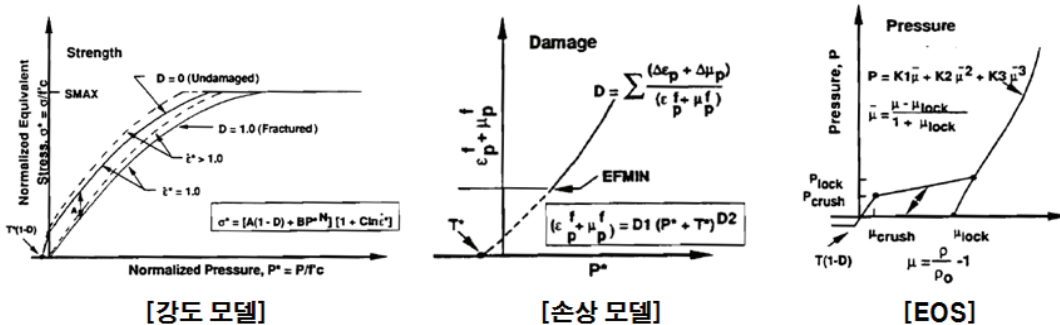


그림 4. HJC 콘크리트 재료모델(Holmquist et al., 1993).

$$(HB \text{ 파괴조건}) \sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (14)$$

$$(HJC \text{ 파괴조건}) \sigma^* = [A(1-D) + BP^{*N}] \quad (15)$$

두 식을 접목시키는 과정은 다음과 같다. 먼저, HB 파괴조건은 이미 앞에서 유도되었으며, 편의상 이를 다시 쓰면 다음 식과 같다.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + 71.85 \left(2.669 \times \frac{\sigma_3'}{71.85} + 0.0048 \right)^{0.505} \quad (\text{MPa}) \quad (12)$$

식 (12)에서 σ_1' 과 σ_3' 는 각각 최대주응력과 최소주응력으로서 압축이 (+)이다. 이 식으로부터 (σ_3' , σ_1')의 점들의 좌표들을 얻는다. 한편, HB와 HJC 파괴기준을 접목시키는 과정에서는 재료모델의 정적 효과에만 관심이 있으므로 식 (13)의 HJC 강도모델에서 동적 효과를 표현하는 변형률속도를 무시하면 $C = 0$ 이 된다. 또한, HJC 재료모델에서 손상도 $D = 1$ 인 경우에도 상수 B 와 N 는 $D = 0$ 인 경우와 똑같은 값을 가지므로(그림 4 참조) HJC 파괴조건식 (15)가 다음 식과 같다고 간주하고 두 식을 접목시킨다.

$$(HJC \text{ 파괴조건} : D = 1 \text{ 일 때}) \sigma^* = BP^{*N} \quad (16)$$

HJC 파괴조건은 응력 σ 는 유효응력(effective stress) 또는 폰 미제스(von Mises) 응력이다. 따라서 만일 중간주응력과 최소주응력이 서로 같다고 ($\sigma_2' = \sigma_3'$) 가정하면 응력 σ 와 압력 P 는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1' - \sigma_2')^2 + (\sigma_2' - \sigma_3')^2 + (\sigma_3' - \sigma_1')^2]^{1/2} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1' - \sigma_3')^2 + 0 + (\sigma_3' - \sigma_1')^2]^{1/2} = \sigma_1' - \sigma_3' \end{aligned} \quad (17)$$

표 8. 석회암 암반에 대한 HJC 콘크리트 재료모델과 입력물성

MODEL	RO	G	A	B	C	N	FC
JH Concrete	2630kg/m ³	7.0GPa	(0.79)	(2.5094)	(0.0097)	(0.8163)	4.8MPa
T	EPS0	EFMIN	SFMAX	PC	UC	PL	UL
0.13MPa	1.0 s ⁻¹	0.01	(7.0)	0.038GPa	(0.004)	0.8GPa	(0.02)
D1	D2	K1	K2	K3	FS		
(0.04)	(1.0)	85GPa	-171GPa	208GPa	0		

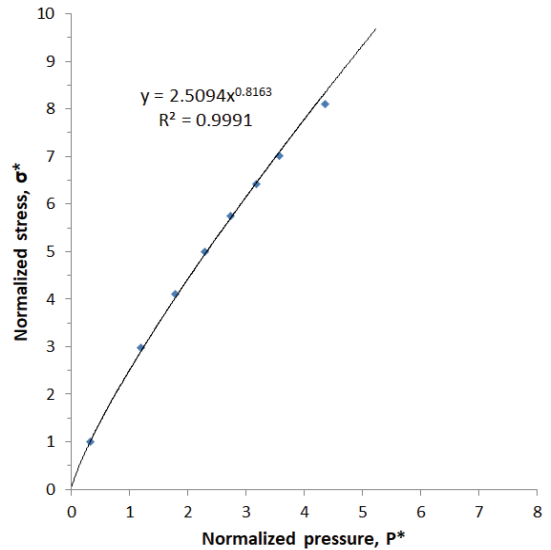


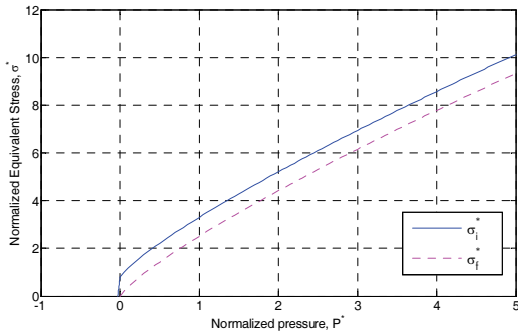
그림 5. HB 파괴조건으로부터 HJC 파괴조건을 구하는 회귀분석 결과.

$$P = \frac{\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3'}{3} = \frac{\sigma_1' + 2\sigma_3'}{3} \quad (18)$$

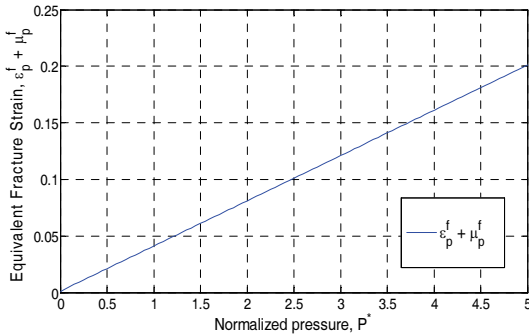
이제 HB 파괴조건식 (12)를 이용하여 다수의 (σ_3' , σ_1') 좌표들을 생성한 후, 각각의 좌표에 상응하는 (P , σ) 좌표들을 식 (17) 및 (18)을 이용하여 계산한다. 구해진 (P , σ) 좌표들을 기준응력 σ_c (일축압축강도)로 정규화하면 (P^* , σ^*) 좌표들을 얻을 수 있다. 이렇게 얻은 (P^* , σ^*) 좌표들을 σ^*-P^* 좌표계에 도시한 후, 회귀모형(regression model)을 식 (16)의 거듭제곱 함수로 설정하고 회귀분석을 실시하면 상수 $B = 2.5094$ 및 $N = 0.8163$ 을 얻을 수 있다. 그림 5는 이와 같은 회귀분석 결과를 보여준다.

앞에서 구한 석회암에 대한 HB 파괴조건에서 암반의 일축압축강도는 약 4.8MPa, 인장강도는 0.13MPa, 암반의 변형계수는 16.6GPa, 포아송비는 0.19 정도로

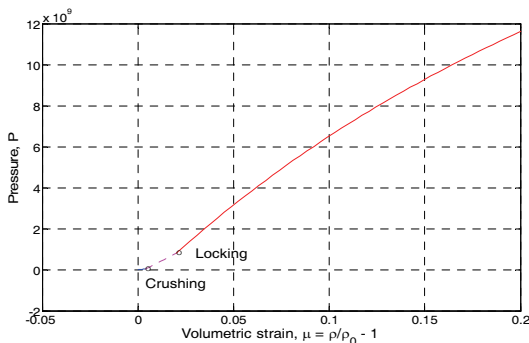
나타났다. 이들 값들과 위의 회귀분석 결과, 그리고 경험치(Holmquist et al., 1993)로부터 HJC 재료모델의 입력물성들을 구하여 표 8에 표시하였다. 표 8의 입력물성 값들을 사용하여 HJC 재료모델의 강도모델, 손상모델 및 상태방정식을 도시하면 그림 6과 같다. 단, 그림 6(a)의 강도모델에서 σ_i^* 는 손상도 $D = 0$ 인 무결암에 대한 응력곡선이고, σ_f^* 는 손상도 $D = 1$ 인 완파된 암석에 대한 응력곡선이다.



(a) 강도모델



(b) 손상모델



(c) 상태방정식

그림 6. 석회암에 대한 HJC 콘크리트 재료모델.

4. 단일공 발파 계산 예

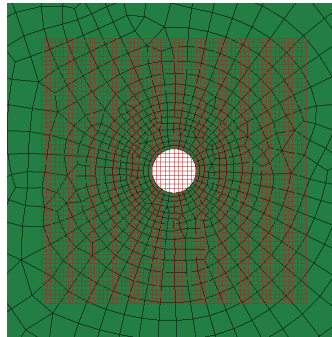
4.1 해석모델

그림 7은 가상의 벤치발파 모델링에서 암반용 재료모델을 앞 절에서 유도한 HJC 콘크리트 재료모델로 설정하고, 계산시간의 단축을 위해 3차원 벤치발파를 단일공 발파에 대한 평면변형률(plane strain) 모델로 단순화시킨 LS-DYNA 수치해석 모델이다. 이 해석모델은 비교목적이 아니고 단순히 앞에서 유도한 재료모델의 활용 예를 보여주기 위한 것이다.

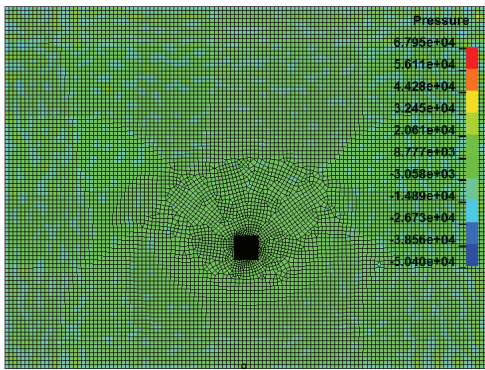
LS-DYNA에서 폭발을 모델링하기 위해서는 유체(폭발가스의 흐름)와 고체(암반)의 상호작용(fluid-structure interaction; FSI)이 잘 이루어지도록 하는 것이 중요하다. LS-DYNA에서 FSI는 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 키워드를 사용하여 구현한다. 이 키워드를 사용하기 위해서는 유체와 고체의 체논들이 서로 겹쳐져야 하는데, 이를 위하여 MMALE (multi-material arbitrary Lagrangian Eulerian) 기법을 사용하였다. 이렇게 함으로써 폭발으로부터 큰 충격을 받은 암석이 대변형을 일으킬 때 체논이 과도하게 변형해도 해석이 중단되는 것을 방지한다.

그림 7(a)에서 중앙의 원형 발파공을 둘러싸고 있는 정사각형 영역의 체논은 내부에서 폭발물질이 대류(advection)를 일으킬 수 있는 MMALE 체논이다. 이 MMALE 체논은 공간에 고정되어 있는 오일러 정식화(Euler formulation)를 사용할 수도 있지만 본 모델에서는 폭발물질이 대류를 일으켜 이동함에 따라 공간상에서 체논도 움직일 수 있는 ALE 정식화(ALE formulation)를 선택하였다. 처음에 그림 7(b)에서와 같이 작은 크기의 MMALE 체논(중앙의 사각형 영역)이 기폭후 1 μ s가 흐르면 그림 7(c)에서와 같이 큰 크기의 체논으로 확대된다. 이렇게 물질이 이동함에 따라 체논도 이동 및 확대됨으로써 FSI가 원활히 이루어지도록 돕는다.

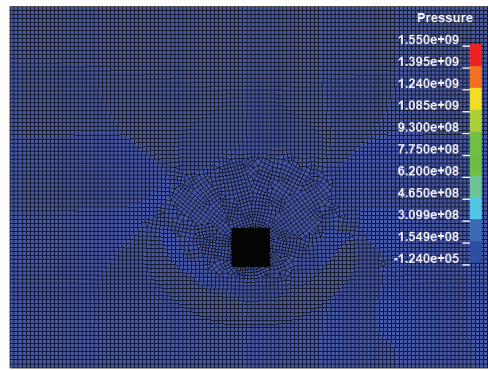
전체 해석모델의 규격은 가로 12m \times 세로 9m \times 두께 50mm의 평판이며, 판의 두께방향에서는 한 개의 요소를 사용함으로써 평면변형률 모델을 표현하였다. 발파공의 직경은 100mm이며, 가로방향에서 모델의 중앙에 위치하고 있다. 발파공에서 하단까지의 저항선은 3m이다. 폭발은 발파공의 중앙에서 시작된다. 모델의 왼쪽, 오른쪽, 위쪽 경계는 무한경계를 구현하기 위하여 비반사 경계(nonreflecting boundary)로 설정하였고,



(a) 발파공과 ALE 체는



(b) 전체 해석모델



(c) 기폭후 1 μ s

그림 7. 해석모델과 확대된 ALE 체는.

아래쪽은 벤치법면이므로 구속이 없는 자유경계(free boundary)이다. 평면변형률 조건을 충족시키기 위해 평판의 전면과 후면은 절점변위를 구속하였다.

4.2 재료모델

암반

암반은 석회석으로 가정하였으며, 이 암반의 물성으로는 앞에서 유도한 HJC 콘크리트 재료모델(표 8)을 사용하였다.

폭약

폭약은 에멀션 폭약(emulsion explosive)을 사용하는 것으로 가정하였다. 이 폭약을 표현하기 위해 LS-DYNA에서 제공되는 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 재료모델과 이 재료모델을 지원하는 *EOS_JWL 상태방정식을 사용하였다(Yi, 2013). 이 두 모델의 입력물성 값은 다음

표 9와 10에 요약되어 있다.

표 9. 에멀션 폭약의 재료모델: *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN(Yi, 2013)

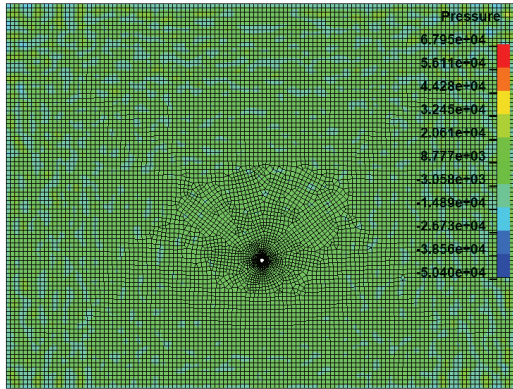
RO	D	Pcj
1180kg/m ³	5122m/s	9.531GPa

표 10. 에멀션 폭약의 EOS: *EOS_JWL(Yi, 2013)

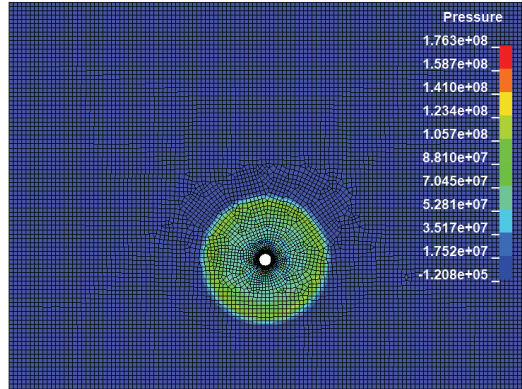
A	B	R1	R2
276GPa	8.44GPa	(5.215)	(2.112)
OMEG	E0	V0	
(0.501)	3.868GPa/m ³ /m ³	1.0m ³ /m ³	

4.3 해석결과

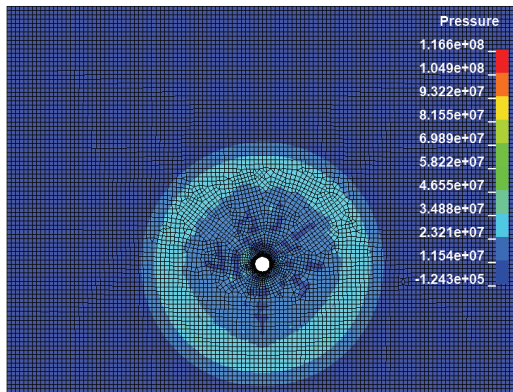
그림 8은 해석결과 나타난 압력파의 전파양상이다. 그림 8(c)에서와 같이 기폭후 약 1000 μ s가 지나면 압



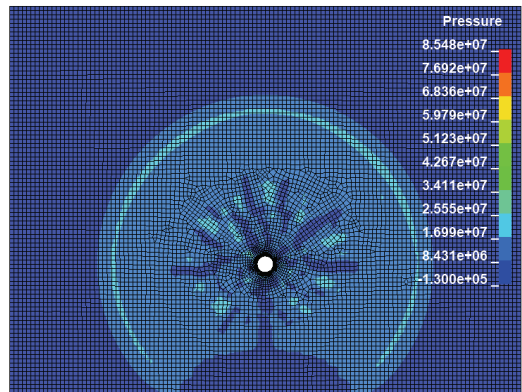
(a) 해석모델(암반)



(b) 500 μ s



(c) 1000 μ s



(d) 1400 μ s

그림 8. 압축파와 반사인장파의 전파양상.

축파의 전파면(wavefront)이 폭원거리 3m인 하단의 자유면에 거의 도달한다(파속 = 3000m/s). 압축파가 자유면에 도달하면 반사되어 인장파로서 발파공 쪽으로 되돌아간다. 그림 8(d)에서는 모델의 하단에서 반사되어 암반 내부로 되돌아가는 반사인장파의 전파면을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 LD-DYNA에서 암반발파를 모델링할 때 “암반”이라는 독특한 재료의 특성을 잘 묘사할 수 있도록 HJC 콘크리트 재료모델에 기존에 암반평가 분야에서 많이 쓰이고 있는 HB 파괴기준을 접목시키는 과정을 소개하였다. 또한, 이를 통해 결정된 HJC 재료모델을 이용하여 LS-DYNA 상에서 단일공

벤치발파를 묘사하는 모델링의 예도 제시하였다. 다만, 본 논문에서는 HB 파괴기준과 HJC 재료모델의 접목방법에 초점을 맞추고 있으므로 예시된 해석모델의 입력치와 결과치는 비실제적인 값일 수도 있다.

비록 본 논문에서는 HB 파괴조건과 HJC 재료모델의 접목만을 소개하였지만 다루고자 하는 암반의 특성에 따라 다양한 파괴조건들과 재료모델들 중에서 적합한 모델들을 각기 선택하여 서로 접목시키는 것도 가능할 것이다. 암반이라는 재료는 일반적인 공학 재료(금속, 세라믹 등)와는 완전히 다른 특성을 지니고 있으며, 심지어 무결암과도 서로 구분되는 독특한 역학적 특성을 지니고 있으므로 이와 같은 다양한 접목의 시도는 암반발파 모델링의 정확성을 향상시키는 데 유용한 수단이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업(과제코드 GP2020-010)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김교원, 김수정, 2006, 한반도의 암종별 공학적 특성의 상관성 분석, J. Eng. Geology, Vol.16, No.1, pp.59-68.
2. Hoek, E. and E.T. Brown, 1980, Underground Excavation in Rock.
3. Hoek E., D. Wood and S. Sha, 1992, A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses. Rock Characterization. Proceedings of ISRM Symposium EUROCK'92 (ed. J. Hudson), Chester, UK, pp. 209-213. British Geotechnical Society, London.
4. Hoek, E., P. K. Kaiser and W. F. Bawden, 1995, Support of Underground Excavations in Hard Rock. Rotterdam: Balkema, p.215.
5. Hoek, E., C. Torres and B. Corkum, 2002, Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition, Rocscience Inc., Canada.
6. Hoek E. and M. S. Diederichs, 2006, Empirical estimation of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, vol. 43(2), pp.203-215.
7. 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.
8. Ma, G. W. and X. M. An, 2008, Numerical simulation of blasting-induced rock fractures, Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 45, pp.966-975.
9. Yi, Changpin, 2013, Improved blasting results with precise initiation - Numerical simulation of sublevel caving blasting, Swebrec Report 2013:3, Swedish Blasting Research Centre, Stockholm, p.8.



최병희

한국지질자원연구원 책임연구원

Tel : 042-868-3237

E-mail : bhchoi@kigam.re.kr



선우춘

한국지질자원연구원 책임연구원

Tel : 042-868-3235

E-mail : sunwoo@kigam.re.kr



정용복

한국지질자원연구원 책임연구원

Tel : 042-868-3097

E-mail : ybjung@kigam.re.kr