

절리조사결과에 의한 현장 낙석무게분포추정 및 추정결과의 낙석시물레이션 적용성 검토

Estimation of Weight Distribution of Rockfall Block by Joint Measurement And Study on Its Application to Rockfall Simulation

김 동 휘¹ Kim, Dong-Hee

류 동 우² Ryu, Dong-Woo

김 수 철³ Kim, Su-Chul

윤 상 길⁴ Yoon, Sang-Kil

이 우 진⁵ Lee, Woojin

Abstract

The characteristics of rockfall are determined by virtually all factors and conditions e.g. the physical figure of the slope such as inclination, height, roughness, the elemental figure of the slope such as vegetation and material deposited, and the shape and weight of the rockfall itself. Although it is one of the major factors to be considered in rockfall simulation, little attention has been given to the weight of the rockfall. And, since the size of the rockfall is dominated by joint spacing, the distribution of the rockfall block weight can be predicted as a function of the joint spacing. In this study, the weight distribution of rockfall was estimated by using the method of volumetric joint count, J_v , based on joint spacing, and RQD- J_v . The results indicate that the weight distributions were analogous in two methods, and the distribution was to be 75.3~76.7% for 200 kilograms or lesser, 15.0~16.6% for 200~400 kilograms, and 6.7~9.7% for 400 kilograms or more, which show good matches with the actual on-site weight distribution. Therefore, the weight distribution of rockfall suggested in this paper is able to be considered as appropriate data for rockfall simulation.

요 지

낙석에 영향을 주는 요소로는 기울기, 높이, 표면 거칠기 등의 비탈면 형태, 식생, 퇴적물질 등의 사면 구성재료 및 낙석 형상, 무게 등이 있다. 이들 영향요소 중 낙석의 크기 즉, 무게는 낙석시물레이션 결과에 큰 영향을 미침에도 불구하고 낙석무게에 대한 연구는 많이 이루어지고 있지 않다. 또한, 낙석의 크기는 현장의 절리간격에 의해서 영향을 많이 받으며, 현장의 발생 가능한 낙석무게분포는 절리간격을 이용하여 산정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 절리간격을 이용하는 체적절리개수(volumetric joint count, J_v) 및 RQD- J_v 관계를 이용하여 낙석무게분포를 산정하였으며, 이는 연구부지에 대한 직접적인 현장낙석 조사결과 및 기존 문헌자료를 이용하여 비교·검증을 수행하였다. 낙석무게 추정결과 분석방법에 따라서 유사한 결과를 보이는 것으로 분석되었으며, 200kg 이하는 75.3~76.7%, 200~400kg은 15.0~16.6%, 400kg 이상은 6.7~9.7%의 분포를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 현장의 낙석무게분포와 비교한 결과 유사한 분포를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제시한 방법으로 산정한 낙석무게분포는 낙석시물레이션의 입력 자료로 사용할 수 있을 것으로 판단되며, 그 추정 결과를 본 현장사면의 낙석 검토시 사용할 경우 경제적인 검토결과를 보이는 것으로 나타났다.

Keywords : Joint spacing, Rockfall, Rockfall simulation, Scanline survey, Volumetric joint count

1 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil, Environ. and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정희원, 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, KIGAM)

3 정희원, 서영엔지니어링 지반터널설계실 과장 (Member, Section Chief, Geotechnical Div., Seoyeong Engrg.)

4 정희원, 바우컨설턴트 지반터널부 전무 (Member, Managing Director, Geotechnical & Tunnel Div., BAU Consultant)

5 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil, Environ. and Architectural Engrg., Korea Univ., wjlee@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

낙석은 암반내 불연속면의 이완현상에 의해 암편이 모암으로부터 분리하여 낙하하는 현상으로 정의한다. 대규모 산사태와 구분하기 위해, 규모면에서는 Rochet (1987)이 제시한 “single block falls($10^2\sim 10^2m^3$)”로 암편을 셀 수 있을 정도의 소량을 의미하고, 물리적 특성면에서는 Evans & Hungr(1993)가 발표한 “fragmental rock falls”로 낙하 블록간 상호작용을 고려하지 않는 것으로 한정한다. 또한, 토사사면에서 발생하는 토사류와도 구분된다.

낙석운동을 분석하기 위해서는 비탈면과 낙석의 특성, 형상정보가 필요하다. 낙석은 낙석의 크기(무게) 및 형상과 같은 물리적 성질, 비탈면의 형태, 비탈면을 구성하고 있는 구성재료의 특성에 따라 영향을 받는다. 비탈면의 형태에서는 기울기, 높이, 표면 거칠기 등이 낙석에 영향을 미치며, 비탈면 구성재료에서는 외부 퇴적 물질이나 식생과 같은 피복여부 등이 낙석에 영향을 미친다. 그리고 낙석이 일어나기 쉬운 암괴의 크기와 형상은 비탈면을 구성하고 있는 지반의 성질과 불연속면 특성에 의해 지배되며, 그 외 암석자체의 밀도와 내구성 그리고 역학적 성질 등도 낙석에 영향을 미치는 요소이다(이중윤 등, 2003).

본 논문에서는 낙석 영향인자 중 낙석크기, 즉 낙석무게를 현장절리자료를 이용하여 분석하고자한다. 현재 낙석에 대한 설계는 대부분 비탈면을 절개하기 전 수행되기 때문에 낙석크기에 대한 정보가 없어 한국도로공사 설계요령(2001)에서 제시하고 있는 400kg을 일률적으로 적용하고 있는 실정이다. 일률적인 낙석무게 적용은 현장의 낙석크기를 충분히 고려하지 못하므로 과소

또는 과다설계로 귀결될 가능성이 있다. 따라서 낙석크기 문제에 대해서도 현장의 절리자료를 이용하여 추정하는 방법이 연구되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 본 논문의 연구대상 사면은 최대높이 약 180m로 기존의 방법과 같이 일률적으로 낙석무게를 적용할 경우 과소 또는 과다 설계가 이루어질 가능성이 높으므로 연구대상 사면과 같이 대규모 사면에서는 현장의 절리조사를 통한 낙석무게분포를 추정한 후 이를 이용하여 낙석시물레이션을 수행하는 것이 합리적인 낙석설계라고 판단된다. 따라서 본 논문에서는 현장의 절리특성을 이용하여 낙석무게분포를 추정하고, 이 결과를 현장낙석 조사자료 및 기존 문헌자료와 비교 검토하여 검증하고자 하며, 추정된 낙석무게분포결과를 이용하여 낙석 시물레이션을 수행한 결과를 제시하고자 한다.

2. 연구대상 사면 특성

2.1 연구대상 사면 위치 및 지질특성

연구대상 사면은 그림 1에서 볼 수 있듯이 경상북도 진해시 안골동에 위치하고 있는 옥망산(해발 188.9m)으로 현재 부산신항만 북컨테이너부두 공사를 위한 사면 절취, 골재 및 매립사석 확보를 위한 석산 개발 중에 있으며, 공사완료 후 최대사면높이는 약 180m로 계획되어 있다. 사면절취 및 석산개발 이전의 산계는 옥망산을 주봉으로 북동-남서 또는 남-북방향의 산계가 발달되었으며, 옥망산을 기준으로 동부와 남부 사면은 급경사를 이루고 있다. 석산 개발 이후에는 신항만 건설공사와 더불어 해안의 매립으로 인하여 지형의 변화가 매우 심한 지역으로, 사면구간은 기반암이 노출되어 절리 및 암중



그림 1. 연구대상 사면위치

등의 지질특성 관찰이 용이하다.

현장 지표지질조사결과 연구지역의 기반암인 중생대 백악기 경상누층군의 최상부 지층인 다대포층(유천층군 중의 하나)은 조사지역에 노출되지 않았으며, 다대포층의 퇴적 후 격렬한 화산활동으로 인하여 그림 2에서 볼 수 있듯이 안산암질 화산 각력암이 조사지역의 북부에 동-서 방향으로 분포하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 안산암이 화산각력암을 관입 또는 분출하여 조사지역의 중앙부에 동-서 방향으로 분포하고 있으며, 그 후 불국사 화강암인 화강섬록암이 상기한 암석을 관입하여 열변질 작용을 일으킨 것으로 추정된다. 그리고 앞의 모든 지반활동 이후에 산성, 중성 또는 염기성 암맥이 모든 암석을 관입하고 있는 것으로 조사되었다.

2.2 사면구간 절리특성

연구대상 부지의 절리정보 파악을 위하여 그림 3에

보인 바와 같이 현장노출암반의 접근이 가능한 위치에서 총 6회의 조사선 조사(scanline survey)를 수행하였으며, 이중 영구절취사면이 형성되는 구간에는 총 3회(SS-1, 4, 5)의 조사선 조사를 수행하였다. 이러한 조사선 조사 결과, 암중 분포 및 사면 등의 구조물계획에 따라서 그림 3과 같이 연구대상 부지를 총 5개의 구조구로 구분하였으며, 북컨테이너부두 공사완료 후 사면이 형성되는 구간은 구조구-1, 2, 3에 해당된다. 이 중 100m 이상의 대규모 사면(최대 높이 약 180m)이 형성되는 구간은 구조구-2, 3이며, 이 구간의 절리특성 파악을 위하여 SS-4, 5 위치에서 수행한 절리특성 조사결과를 요약하면 표 1과 같다.

본 논문에서 낙석무게분포 추정 및 낙석검토결과를 제시한 구조구-2(SS-4) 구간에서의 절리는 표 1과 같이 세 개의 주절리로 구분할 수 있으며, 주절리 경사는 42~83°의 범위를 보이고 있다. 불연속면 거칠기(JRC)는 8.44 이하로 “smooth planar”로 구분되며, 틈새는 매우

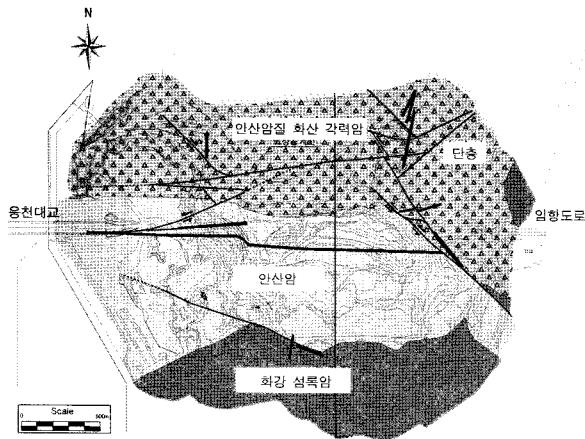


그림 2. 연구대상 사면 지형 및 지질분포 현황

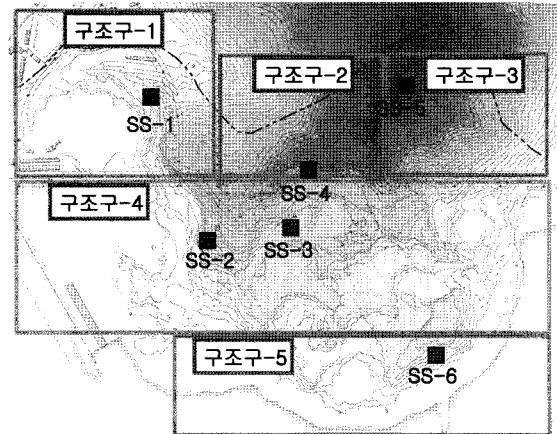


그림 3. 선조사위치 및 구조구 분류 결과

표 1. 조사선 조사(Scanline Survey) 결과

구 분	주향/경사	평균간격 (표준편차),cm	평균연장 (표준편차),cm	선밀도, 개/m	거칠기 (JRC)	Rose Diagram
구조구-2 (SS-4)	SET-1	N06W /83SE	39.67(40.71)	141.29(9.25)	2.53	
	SET-2	N29W /42SW	34.74(40.37)	206.52(12.22)	2.88	
	SET-3	N39E /82SE	33.48(36.61)	69.03(9.40)	2.99	
구조구-3 (SS-5)	SET-1	N54W /84NE	24.63(19.01)	142.47(9.80)	4.87	
	SET-2	NS /83E	18.36(24.42)	125.35(9.60)	5.45	
	SET-3	N49E /79NW	19.63(24.80)	128.28(9.18)	5.59	

좁아 충전물은 없는 것으로 조사되었다. 낙석무게분포 추정에 사용될 구조구-2(SS-4)의 주절리군 절리간격분포는 아래 그림 4와 같다. 또한, 본 연구에서는 사면구간 암반 및 절리특성 파악을 위하여 시추조사를 수행하였으며, 시추조사 결과는 “3.2 시추조사자료를 이용한 낙석무게 분포 추정”에서 제시하였다.

3. 낙석무게분포 추정방법 및 결과

본 연구에서는 낙석무게분포 추정을 위하여 조사선 조사 결과를 이용한 방법, 시추조사자료를 이용한 방법을 사용하였으며, 앞의 두 가지 방법으로 추정한 낙석무게 분포를 연구부지에 대한 직접적인 현장낙석 조사결과 및 기존문헌 자료를 이용하여 비교·검증을 수행하였다.

3.1 조사선 조사 결과를 이용한 낙석무게 분포 추정

3.1.1 낙석크기분포 추정을 위한 절리간격 분석

낙석크기분포를 추정하기 위해서는 절리의 방향성 및 간격은 매우 중요한 인자로 작용한다. 절리 간격(joint spacing)은 절리 기하학적 속성들 중 중요한 인자이며, 이는 절리의 발생 강도에 대한 정보를 지니고 있다. 또한, 절리간격은 조사선 조사(scanline survey)를 통

해 쉽게 얻을 수 있는 자료이다. 절리 간격은 일반적으로 절리군별로 절리와 절리 사이의 간격을 측정하며, 절리 발생에 대한 독립성 가정, 즉 Poisson process에 의해 절리가 발생한다면, 절리 간격을 변량으로 하는 분포는 식 (1)과 같은 음지수분포(negative exponential distribution)를 따른다.

$$f(x) = \lambda \cdot \exp(-\lambda x) \quad (1)$$

여기서, λ 는 발생 강도를 나타내는 모수이다. 이와 같이 Poisson process에 의해 절리가 발생한다는 모델은 일반적으로 Enhanced Beacher model에서 채택한 가정이다. 절리군별 절리 간격에 대한 음지수 분포 가설이 통계학적 검증에서 기각된다면, 절리 발생의 독립성 가정, 즉 Poisson process에 의해 절리가 발생한다는 가정은 재고되어야 한다. 따라서, 다른 모델로 절리 발생에 대한 가정을 세워야 한다. 대표적인 대안 모델들로는 Box-Cox process, geostatistical model, fractal model, nearest neighbor model 등을 들 수 있다.

본 논문에서는 앞에서 언급하였듯이 구조구-2(SS-4) 구간에 대하여 낙석무게분포 추정 및 낙석검토를 수행하였으므로 이 구간의 절리에 대한 음지수 분포 적합성을 검증하였으며, 그 결과는 표 2와 같다. 검토결과 절리군 모두 음지수분포를 따르는 것으로 나타났으므로, 연

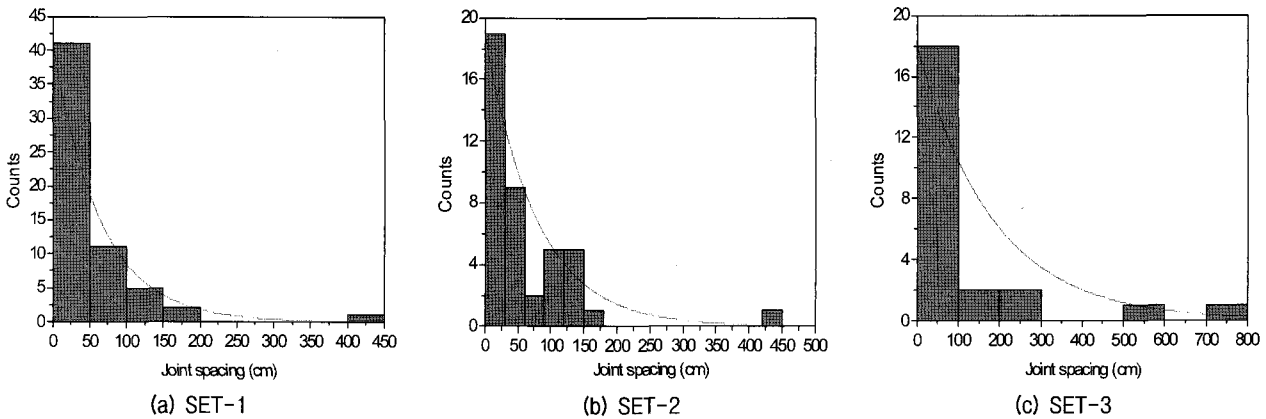


그림 4. 주절리군의 절리간격

표 2. 절리간격의 통계량 및 음지수분포의 통계학적 타당성 검토

SET-1		SET-2		SET-3	
평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
49.0	63.8	44.6	61.5	105.9	182.9
K-S value	P-value	K-S value	P-value	K-S value	P-value
0.1495	0.137	0.1933	0.0155	0.2392	0.1082
채택		채택		채택	

구대상지역의 절리간격에 대한 모델은 음지수분포를 채택하였다. 또한, 본 연구에서는 표 2의 절리간격 통계량을 이용하여 절리난수를 발생시켰으며, 이를 이용하여 낙석무계분포를 추정하였다.

3.1.2 낙석크기분포 추정방법

본 절에서는 조사선 조사 결과를 이용하여 산정할 수 있는 체적절리개수(volumetric joint count, J_v)를 이용하여 낙석크기분포를 추정하였으며, 체적절리개수의 정의 및 이를 이용한 낙석크기분포 추정방법은 다음과 같다.

(1) 체적절리개수(volumetric joint count, J_v)

체적절리개수란 암반(rock mass)의 단위체적(unit volume, $1m^3$)당 교차하는 절리의 개수를 나타내는 척도로서, Palmström(1974, 1982)에 의해서 소개되었으며, Sen & Eissa(1991, 1992) 등의 연구자들에 의해서 활용되고 있다. 체적절리개수(volumetric joint count, J_v)는 식 (2)와 같이 주절리군들의 간격으로 표현된다.

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots + \frac{1}{S_n} \quad (2)$$

여기서, $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$ 은 주절리군들의 평균간격(average spacing)이다. 암반블록 내에 주절리군이 아닌 불규칙한 절리들(random joints)이 많이 분포할 경우에는 이를 고려해야 하며, 불규칙한 절리들을 고려한 체적절리개수는 다음 식 (3)과 같이 표현된다(Palmström, 2005).

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots + \frac{1}{S_n} + \frac{N_r}{5\sqrt{A}} \quad (3)$$

여기서, N_r 은 실제 현장에서의 불규칙한 절리들(random joint)의 개수, A 는 조사구간의 면적(area, m^2)을 의미하며, J_v 값에 따른 절리분포정도는 아래 표 3과 같다(Palmström, 2005).

(2) 체적절리개수를 이용한 블록체적 산정방법

Palmström(2005)은 블록체적(block volume, V_b)과 체적절리개수(volumetric joint count, J_v)의 상관관계를 다

표 3. 체적절리개수 J_v 의 분류(Palmström, 2005)

구분	Degree of jointing					
	very low	low	moderate	high	very high	crushed
J_v	< 1	1 - 3	3 - 10	10 - 30	30 - 60	> 60

음 식 (4)와 같이 표현하였다.

$$V_b = \beta \cdot J_v^{-3} \cdot \frac{1}{\sin\gamma_1 \times \sin\gamma_2 \times \sin\gamma_3} = \beta \cdot J_v^{-3} \quad (4)$$

여기서, $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 는 세 절리군의 교차각(intersecting angle), β 는 블록형상계수(block shape factor)이며, 일반적으로 블록을 형성하는 절리의 교차각이 90° 에 가까울 경우에는 $V_b = \beta \cdot J_v^{-3}$ 로 표현될 수 있다. 위의 식에서 블록형상계수(block shape factor, β)는 블록의 형상을 나타내 주는 계수이며, 다음과 같이 절리간격으로 표현된다.

$$\beta = \frac{(\alpha_2 + \alpha_2 \times \alpha_3 + \alpha_3)^3}{(\alpha_2 \times \alpha_3)^2} \quad (5)$$

여기서, $\alpha_2 = S_2/S_1$, $\alpha_3 = S_3/S_1$ 이며, S_1, S_2, S_3 는 각각 주절리군의 최소간격, 중간간격, 최대간격을 의미한다. 블록의 형상계수 β 는 그림 5와 같이 주절리군의 간격비에 따라서 결정되며, 일반적인 형상계수 β 값으로 36을 제시하고 있다. 또한, Palmström(2005)은 절리에 의해서 형성되는 블록의 치수를 이용하여 다음과 같이 형상계수를 간략하게 추정하는 방법을 제시하였다.

$$\beta = 20 + 7a_3/a_1 \quad (6)$$

여기서, a_1 은 블록의 가장 짧은 길이, a_3 는 블록의 가장 긴 길이를 의미하며, 본 논문에서는 식 (5)와 그림 5를 이용하여 형상계수 β 를 산정한 후 블록체적을 추정하였다.

3.1.3 낙석크기분포 추정결과

앞에서 설명한 바와 같이 절리간격 분석결과 연구대상 지역의 절리간격은 음지수분포(negative exponential distribution)를 따르는 것으로 나타났으며, 낙석가능블

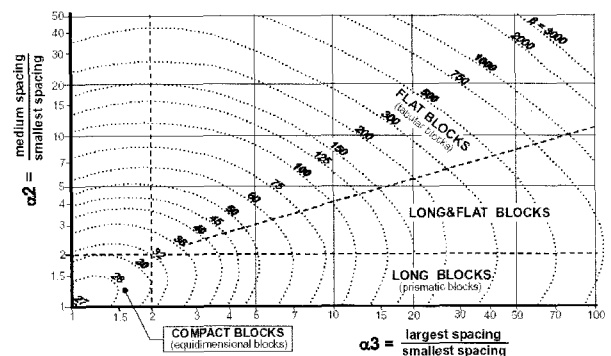


그림 5. 블록형상에 따른 형상계수 β 의 변화(Palmström, 1995)

록의 무게 분포 결정을 위해서는 충분한 자료가 필요하기 때문에 연구대상 지역의 음지수분포 모델을 따르는 절리군별(SET-1, 2, 3) 300개의 절리 난수를 발생시켰다. 절리군별 절리 난수 발생 개수는 전술한 바와 같이 300개로 결정하였으며, 이는 낙석무게분포를 추정함에 있어 충분한 통계자료로 판단된다.

음지수분포 모델을 따르는 절리군별 절리간격 및 앞에서 설명한 체적절리개수(volumetric joint count, J_v) 산정 식(4)를 이용하여 낙석체적분포를 산정하였다. 낙석무게분포는 체적절리개수 J_v 를 이용하여 낙석의 체적을 산정한 후 체적에 일반적인 암반의 단위중량 2.6tf/m^3 을 곱하여 산정하였다. 또한, 낙석무게분포 범위는 낙석무게의 충분한 분포경향을 파악하기 위하여 최대로 산정할 수 있는 블록 무게(약 $1,000\text{kg}$)까지 산정하였으며, 이는 국내 낙석시물레이션에 사용되고 있는 낙석무게 400kg (한국도로공사, 2001) 보다 큰 것으로 나타났다. 낙석무게분포 분석결과는 그림 6과 같으며, 일반적으로 설계에 적용하고 있는 낙석무게인 400kg 이하의 비율이 90.3% 로 나타났으며, 400kg 이상의 낙석은 9.7% 에 불

과하였다. 또한, 400kg 이하의 낙석 중에서도 75.3% 가 200kg 이하의 소규모 낙석으로 분석되었으며, 600kg 이상은 4.5% 로 매우 적은 것으로 나타났다.

3.2 시추조사자료를 이용한 낙석무게 분포 추정

3.2.1 추정방법 - RQD와 J_v 상관관계 이용

RQD(rock quality designation)는 시추공에서 샘플링한 시추공의 총길이와 샘플링된 암석코아 중 길이가 10cm 이상인 코아 합계의 비로 표현되는 일차원적인 지수로 암반 및 절리를 나타내는 다른 지수와 상관성 분석이 많이 이루어져 왔다. 이러한 노력의 일환으로 Palmström(1974)은 RQD와 체적절리개수, J_v 와의 관계를 식(7)과 같이 제시하였다.

$$RQD = 115 - 3.3J_v \quad (7)$$

여기서, $J_v > 35$ 이면 $RQD=0$, $J_v < 4.5$ 이면 $RQD=100$ 이다. 시추코아에서 얻어진 RQD에 의해 추정된 J_v 값은 그림 7에 보이는 바와 같이 상·하한값을 가지기 때문에 RQD에 의해 얻어진 J_v 값으로는 약 $0.001\sim 0.2\text{m}^3$ 범위내의 블록크기만 합리적인 추정이 가능하다는 문제점을 내포하고 있음에 유의해야 한다. 따라서 RQD- J_v 상관관계를 이용한 방법에서는 0.2m^3 (약 520kg) 이하의 낙석만을 산정하여 낙석무게분포를 추정하였다.

3.2.2 낙석무게분포 산정결과

시추조사에서 얻어진 RQD값을 활용하여 식(7)에 의해 J_v 값을 얻고 이를 식(4)에 대입하여 암반 비탈면에 분포하는 암반블록 체적을 산정하였으며, 그 결과는 그림 8과 같다.

그림 8의 체적을 이용하여 암반블록 무게분포를 산정한 결과는 그림 9와 같으며, 일반적으로 설계에 적용하고 있는 낙석무게 400kg 이하의 비율이 93.3% , 200kg 이하의 낙석무게는 76.7% 의 범위를 보이고 있는 것으로 분석되었다. 이는 앞의 체적절리개수(volumetric joint

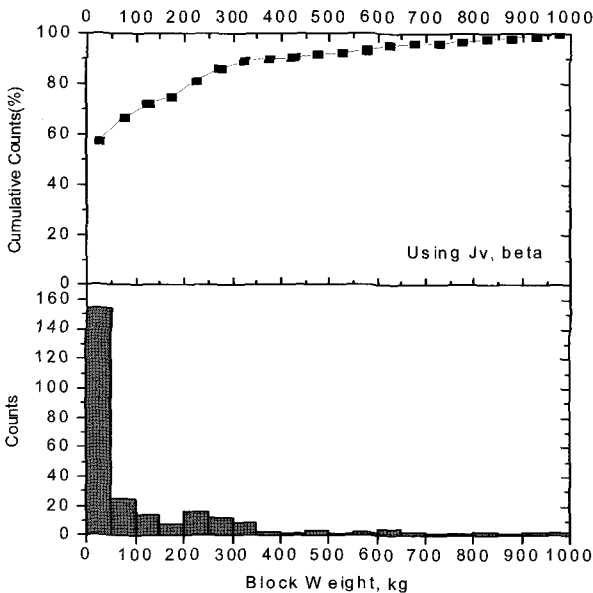


그림 6. 체적절리개수, J_v 를 이용한 낙석무게분포 산정

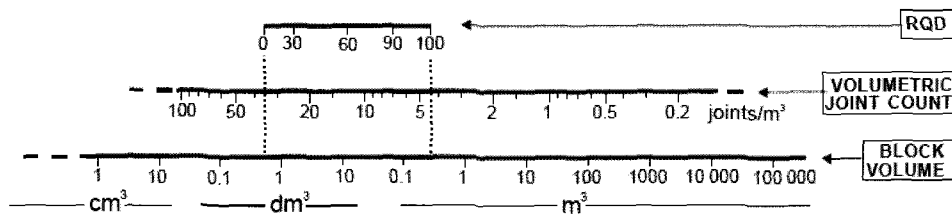


그림 7. RQD값의 분포와 블록체적, J_v 와의 관계 Palmström(1974)

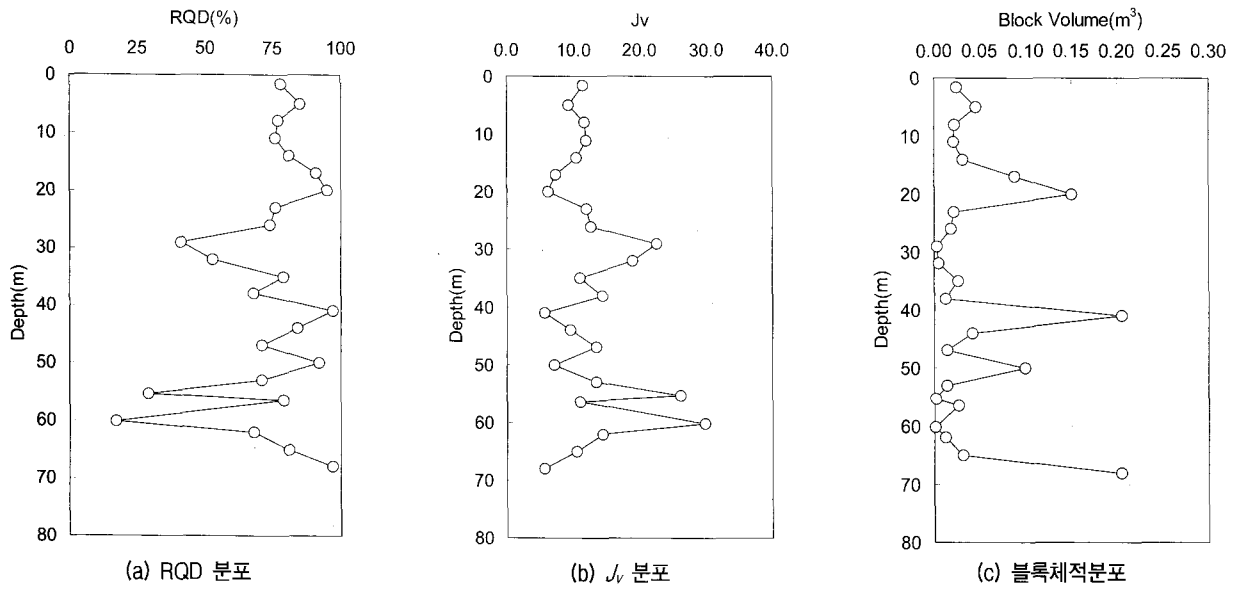


그림 8. 심도에 따른 RQD, J_v , 블록체적 산정 결과

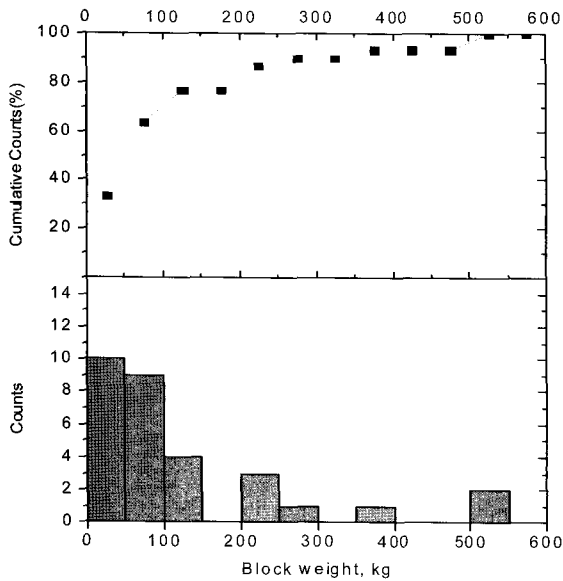


그림 9. RQD- J_v 관계에 의한 낙석무게분포

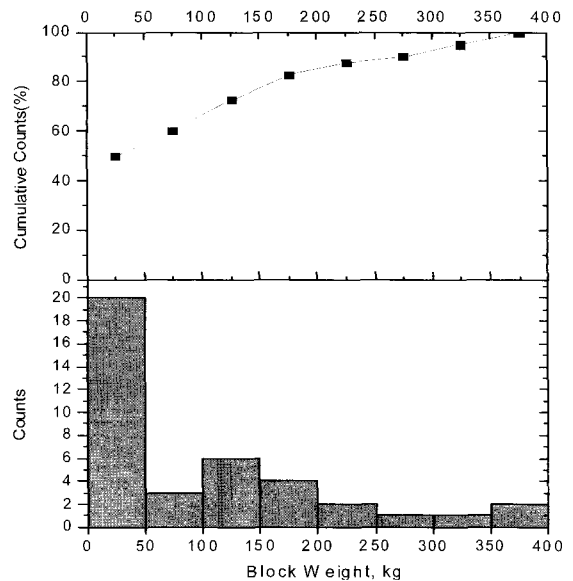


그림 10. 현장조사에 의한 무게분포

count, J_v)를 이용한 방법과 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 체적절리개수를 이용한 방법에서는 절리의 통계값을 이용하여 통계적으로 의미가 있을 것으로 판단되는 개수(300개)만큼 절리를 재생성하여 낙석무게분포를 산정하였으나, 시추조사에 의한 RQD를 이용한 방법은 자료수가 24개뿐이므로 다른 자료들과 비교·분석하여 낙석무게분포비율을 검증한 후 사용해야 할 것으로 판단된다.

3.3 현장 낙석무게분포조사 결과

본 연구대상 지역은 절리 및 낙석 조사 시 발파계획

에 따라 순차적으로 발파가 진행되고 있었으며, 1차적으로 발파를 수행한 구간은 발파에 의하여 발생한 사석을 모두 제거한 후 6개월 이상 방치하고 있었다. 또한, 연구대상 사면에서 낙석이 진행되고 있었으므로 낙석의 크기 조사가 용이 하였으며, 발파시 파쇄암반과 분리하여 현장에서 발생한 낙석 40개를 관찰할 수 있었다. 낙석무게 분포분석결과 그 무게는 그림 10에서 볼 수 있듯이 대부분 400kg 이하로 조사되었으며, 200kg 이하는 82.5%로 분석되었다.

현장에서 조사한 낙석무게 분포결과를 앞에서 제시한 방법들로 산정한 결과와 비교해본 결과 현장에서 직접 측정된 낙석무게분포가 앞에서 산정한 낙석무게분

포보다 작은 것으로 나타났으며, 이것은 절리간격 및 RQD로 산정한 낙석무게분포에는 실제로 발생하지 않을 낙석무게까지 포함되어 있어 나타난 결과라고 판단된다. 또한, 실제 현장에서는 비탈면에서 이탈이 가능한 규모의 블록들에 의한 낙석이 관찰될 것으로 판단되며, 본 연구대상 지역에서도 이탈이 가능한 작은 블록들이 대부분 관찰된 결과라고 판단된다.

4. 낙석무게분포 검증 및 추정 결과

본 연구에서는 낙석무게분포 추정을 위하여 체적절리개수(volumetric joint count, J_v)를 사용한 방법, RQD- J_v 상관관계를 이용한 방법 및 현장낙석조사 방법을 적용하였으며, 그 결과는 다음 표 4와 같다.

추정 결과 표 4에서 볼 수 있듯이 현장낙석조사에 의한 낙석무게가 가장 작은 값을 보이고 있으며, 조사선 조사결과를 이용한 방법과 시추조사자료를 이용한 방법은 유사한 결과를 보이고 있다. 이것은 앞에서 언급하였듯이 절리간격 및 RQD로 산정한 낙석무게분포에는 실제로 발생하지 않을 낙석무게까지 포함되어 있어 나타난 결과라고 판단된다. 또한, 대부분의 낙석무게는 400kg 이하이며, 이것은 69개 발파법면 낙석조사결과 대부분의 낙석은 0~0.12m³(0~300kg) 사이에 분포한다는 김수로 등(2004)의 연구결과와 일치하는 것으로 나타났다.

국내 낙석설계에서는 설계지역의 낙석무게분포 자료가 없을 경우에 한국도로공사 도로설계요령(2001)에서 제시하고 있는 경험적인 값인 400kg을 적용하고 있다. 본 연구지역 낙석설계 시 한국도로공사에서 제시하고 있는 설계적용 낙석무게 400kg을 현장의 낙석무게분포를 고려하지 않고 사용한다면 낙석무게 분포 중 10% 이하로 분포하고 있는 낙석무게를 대표값으로 사용하는 것임을 알 수 있다. 이는 경우에 따라서 과도한 안전측 설계가 될 가능성이 있을 것으로 판단되며, 본 연구에서 처럼 낙석무게분포를 추정할 수 있는 지역에서는 추정된 낙석무게분포 결과를 직접적으로 이용하는 방법이 합리적일 것으로 판단된다.

표 4. 낙석무게 분포 추정결과 요약

낙석무게범위	추정방법	조사선 조사결과 이용	시추조사자료 이용	현장낙석조사
	체적절리개수, J_v 이용	RQD- J_v 관계 이용		
200kg 이하	75.3%	76.7%	82.5%	
400kg 이하	90.3%	93.3%	100%	
400kg 이상	9.7%	6.7%	-	

5. 낙석무게분포 분석결과를 이용한 낙석검토

5.1 검토방법

낙석무게분포의 낙석시물레이션 활용성을 검토하기 위하여 Rocscience사에서 개발한 낙석시물레이션 전용 프로그램인 RocFall을 사용하였다. RocFall 프로그램에서는 낙석을 발생시키는 방법으로 Point Seeder 방식과 Line Seeder 방식이 있으며, 각각의 특징은 다음과 같다. Point Seeder 방식은 그림 11(a)에서 볼 수 있듯이 여러 개의 낙석지점을 점(point)으로 설정 가능하며, 낙석발생지점(point seeder)에 평균낙석무게와 표준편차를 이용하여 낙석을 발생시킬 수 있다. Line Seeder 방식은 그림 11(b)에서처럼 여러 개의 낙석발생지점을 낙석발생 선(line seeder)의 길이로 설정하며, 낙석발생개수는 선의 길이비율에 따라 발생된다. Line Seeder 방식에도 낙석무게 평균 및 표준편차를 입력하여 해석 가능하다. 본 연구에서는 절리간격을 이용하여 산정한 낙석무게분포를 적용하기 위하여 Line Seeder 방식을 적용하여 낙석시물레이션을 수행하였다. 또한, 위의 방식으로 수행한 결과와 비교하기 위하여 국내 낙석설계에 적용하고 있는 낙석무게 400kg을 Point Seeder 방식의 입력자료로 활용하여 낙석시물레이션을 수행하였다.

해석에 적용한 비탈면은 구조구-2의 비탈면으로 높이 약 180m, 경사 1:1.0로 설정하였으며, 낙석무게분포 비율은 앞에서 산정한 세 가지 방법의 모든 자료를 합한 후 현장낙석 무게분포 및 문헌의 자료를 비교·검토한 결과 낙석발생 가능성이 낮을 것으로 판단되는 600kg 이상의 낙석은 제외하여 산정하였다. 즉, 종합한 자료 중 600kg 이상의 낙석을 제외시킨 후 0~200kg(구간평균 100kg, 79%), 200~400kg(구간평균 300kg, 14%), 400~600kg(구간평균 500kg, 7%) 범위의 낙석무게 분포비율을 그림

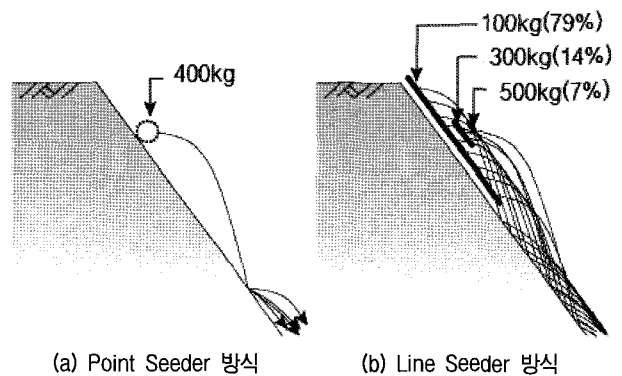


그림 11. RocFall 프로그램에서의 낙석발생 방법

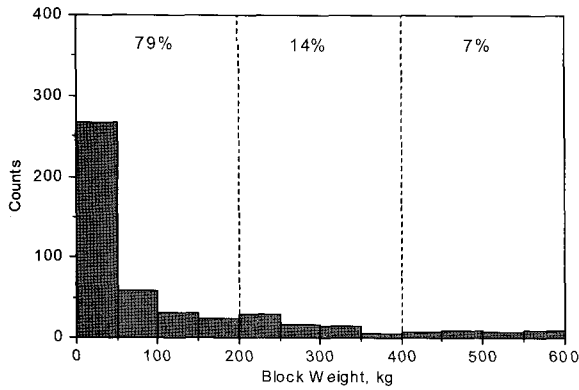
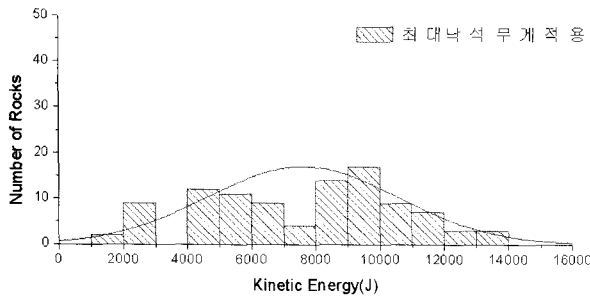


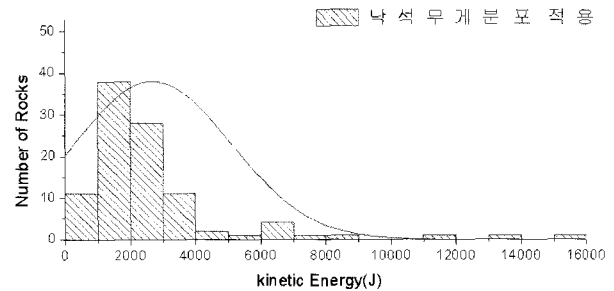
그림 12. 낙석시물레이션에 적용한 낙석무게분포 비율

표 5. 낙석검토 결과 요약

구 분	낙석무게 적용조건	최대도달거리 (m)	최대반발높이 (m)
CASE-1	단일 최대낙석무게 (400kg) 적용 시	16.2	6.4
CASE-2	낙석무게분포 적용 시	13.2	5.7



(a) 최대낙석무게를 적용한 경우(CASE-1)



(b) 낙석무게분포를 적용한 경우(CASE-2)

그림 13. 낙석방지책에 작용하는 에너지

12와 같이 재분석하였으며, 낙석검토 시에는 각각의 낙석무게범위의 구간평균값과 비율을 사용하였다.

5.2 검토결과

낙석시물레이션 수행 결과 낙석무게 400kg을 단일값으로 적용한 경우(CASE-1)가 낙석무게분포 비율을 적용한 경우(CASE-2) 보다 표 5에서 볼 수 있듯이 최대도달거리 및 최대반발높이가 큰 것으로 나타났다. 또한, 낙석방지책을 적용한 후 낙석방지책에 작용하는 충돌 에너지를 분석한 결과, CASE-1 경우에는 그림 13(a)에서 볼 수 있듯이 2,000~14,000J 범위에 거의 일정하게 분포하는 것으로 나타나며, CASE-2의 경우에는 200kg 이하의 낙석무게가 대부분을 차지하므로 그림 13(b)에서 볼 수 있듯이 4,000J 이하의 충돌에너지가 대부분인 것으로 분석되었다.

본 연구대상 사면에서 두 가지 경우(CASE-1, 2)에 대한 낙석시물레이션 수행 결과 최대의 낙석무게를 대표값으로 낙석검토에 적용하는 것보다 현장의 낙석무게분포를 산정하여 이를 낙석설계에 이용할 경우에는 보다 경제적인 낙석설계를 수행할 수 있는 것으로 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 낙석무게분포를 추정하기 위하여 조사선 조사결과를 이용한 방법, 시추조사 결과(RQD- J_v 관계)를 이용한 방법을 사용하였으며, 앞의 두 가지 방법으로 추정된 낙석무게분포를 현장의 낙석조사결과 및 기존 문헌자료를 이용하여 비교·검증 하였다. 또한, 앞에서 추정된 낙석무게분포를 이용하여 높이 약 180m의 현장사면에 대한 낙석시물레이션을 수행하여 기존 낙석검토방법과 비교하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 조사선 조사결과 및 시추조사 결과(RQD- J_v 관계)를 이용한 방법으로 현장낙석무게분포를 추정된 결과 낙석무게 200kg 이하는 75.3~76.7%, 400kg 이하는 90.3~93.3%, 400kg 이상은 6.7~9.7%로 나타났으며, 이는 69개의 발파법면 낙석조사결과 대부분의 낙석은 0~300kg 사이에 분포한다는 김수로 등(2004)의 연구결과와 일치하는 것으로 나타났다. 또한, 한국도로공사(2001)에서 제시하고 있는 값인 400kg보다는 작거나 유사한 값을 보이고 있는 것으로 나타났다.
- 2) 본 논문에서 제시한 두 가지 방법으로 산정한 낙석무

계분포 결과는 현장에서 직접적으로 측정된 낙석무계분포 보다는 약간 큰 것으로 나타났다. 이는 조사선 조사 및 시추조사결과를 이용하여 추정된 낙석무계분포에는 실제로 발생하지 않는 낙석무계까지 포함되어 나타난 결과라고 판단되며, 본 논문에서 제시한 방법으로 낙석무계를 추정할 경우에는 이를 유의해야 할 것으로 판단된다.

- 3) 국내 낙석설계에서 적용하고 있는 낙석무계 400kg과 본 연구에서 추정된 현장의 낙석무계분포 비율을 적용하여 연구대상 사면을 대상으로 낙석시뮬레이션을 수행한 결과 연구대상 사면의 낙석무계가 대부분 400kg 이하이므로 낙석무계분포 비율을 적용한 경우가 낙석 최대도달거리, 최대반발높이 및 낙석방지책 충돌에너지가 상대적으로 작은 것으로 나타났다.
- 4) 본 연구에서는 공사중인 절개면에서 측정된 신뢰성 높은 절리자료를 이용하여 낙석무계분포를 추정하였으므로 본 연구에서 제시한 방법을 다른 현장에 적용할 경우에는 신뢰성 높은 절리자료를 이용하는 것이 매우 중요할 것으로 판단된다. 즉, 현장특성을 정확하게 반영하지 못하는 절리자료를 이용하여 낙석무계분포를 추정할 경우에는 실제와는 다른 결과를 얻을 수 있으므로 신뢰성 높은 절리자료의 사용은 매우 중요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김수로, 이학규, 장범수, 신창진, 안상로 (2004), "사면안정성 요인에 대한 발파패턴의 영향", *한국지반공학회 2004 봄학술발표회논문집*, pp.618.
2. 이종윤, 박형동 (2003), "낙석 시뮬레이션 상용 프로그램의 비교 및 낙석의 분석과 예측", *2003 대한토목학회 정기학술대회*, pp. 3,800-3,805.
3. 한국도로공사(2001), 제2권 한국도로공사 설계요령 토공 및 배수, pp.247-248.
4. Evans S. G. and Hungr O. (1993), "The assessment of rock fall hazard at the base of talus slopes", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.30, pp.620-636.
5. Palmström, A. (1974), "Characterization of jointing density and the quality of rock masses (in Norwegian)", *Internal report, A. B. Berdal, Norway*, pp.26.
6. Palmström, A. (1982), "The volumetric joint count - A useful and simple measure of the degree of jointing", *Proc. int. congr. IAEG, NEW Delhi, 1982*, pp.V.221-V.228.
7. Palmström, A. (1995), "RMi - a rock mass characterization system for rock engineering purposes", *Ph.D thesis, University of Oslo, Norway*, pp.409.
8. Palmström, A. (2005), "Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD)", *Tunnels and Underground Space Technology*, 20 (2005), pp.362-377.
9. Rochet, L. (1987), "Application des modeles numeriques de propagation a l'etude des eboulements rocheux(in French)", *Bulletin Liaison Pont Chaussee 150/151*, pp.84-95.
10. Sen, Z and Eissa, E. A. (1991), "Volumetric rock quality designation", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 9, pp.1331-1346.
11. Sen, Z and Eissa, E. A. (1992), "Rock Quality Charts for Log-normally Distributed Block Size", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. Vol. 29, No. 1, pp.1-12.

(접수일자 2007. 4. 16, 심사완료일 2007. 11. 12)