

# 한반도 인근 지진의 Brune 응력강하량(파라미터) 추정에 대한 고찰 Estimation of Brune's Stress Drops around the Korean Peninsula

연관희\*                      박동희\*                      장천중\*  
Yun, Kwan-Hee              Park, Dong-Hee              Chang, Chun-Jung

## ABSTRACT

Stress drops of Brune's single-corner  $\omega^2$  source model were estimated for the earthquakes ( $2.0 < M < 5.2$ ) occurring around the Korean Peninsula by performing simultaneous nonlinear inversion for the parameters of the stochastic ground-motion model (Boore, 2003) based on the large accumulated spectral data. Various cases of models regarding the path and site effect were considered for the inversion and their relevance to the result of stress drops was reviewed. The stress drop was found to be constant below  $M3.5 \sim 4.0$  and increase up to  $M4.5 \sim 5.0$  above which the level of the stress drop could be assumed to be flat or decrease according to whether the rupture process accompanies buried fault or surface rupturing. The converted data of corner frequency and seismic moment were nicely fitted to the relation of  $M_0 \propto f^3$  but show systematically higher corner frequencies for  $M_0 > 10^{15}$  Nm. This relationship enables systematic evaluation of a scaling relation between magnitude and stress drop. The inverted level of the stress drop is comparable to the recent studies conducted domestic and abroad. A result of lower stress drop estimated by Jun(1991) is supposed to be due to the use of low frequency spectra and existence of two-corner source model around the Korean Peninsula.

## 1. 서론

강지진동 모사시 고려하는 지진원 특성으로는 지진규모, 응력강하량, 규모에 따른 파열면적, 단층면 상의 asperity 위치 등이 있으며, 이중 응력강하량은 고주파 강지진동의 수준을 결정하는 중요한 물리량이다. 응력강하량( $\Delta\sigma$ )은 지진모멘트( $M_0$ )와 더불어 단층운동에 수반되는 지진에너지( $E$ )를 식 (1)과 같이 결정하며, 따라서 에너지 크기와 비례하는 척도로 고안된 모멘트규모( $M_w$ )와도 관련된다. Hanks and Kanamori 등은 규모와 무관한 일정한 응력강하량 값(30bars)을 가정하여 식 (2)를 제안한 바 있다.

$$E = (\Delta\sigma/2\mu) \cdot M_0 \quad (\mu = \text{shear modulus}) \quad (1)$$

$$M_w = 2/3 \cdot \log M_0 - 10.7 \quad (2)$$

응력강하량은 단층의 지질학적인 관찰로부터 Hooke의 법칙에 따라 식 (3)을 통해 계산되는 정적응력강하량과 지진관측자료로부터 다양한 방법을 이용하여 추정되는 여러 종류의 (동적)응력강하량(Brune 응력강하, 외견응력, RMS 응력강하)이 있다. 식 (3)에서  $C$ 는 단층의 기하학적 형상과 관련된 무차원 상수이며,  $\bar{D}$ 는 단층면 상의 평균 변위,  $L$ 은 단층파열길이이다.

$$\Delta\sigma = C \cdot \mu \cdot (\bar{D}/L) \quad (3)$$

\* 한국전력공사 전력연구원, 정희원

관측자료로부터 추정되는 응력강하량은 특정 모델(스펙트럼의 형상, 파열속도, slip 관련)을 가정한 후 이론적으로 도출된 지진원모델에 대한 코너주파수를 추정하여 환산된다. 따라서 관측자료로부터 추정된 응력강하량은 이론적인 지진원모델에 수반된 가정이 실제 현상과 동일할 경우에만 실제적인 물리량의 의미를 가질 수 있으며, 동일하지 않을 경우에는 관측자료에 적합되는 하나의 (응력강하량)파라미터로서 취급되어져야 한다. Bersnev([1])는 관측 자료의 스펙트럼으로부터 추정할 수 있는 유일한 물리량은 slip 속도이며, 응력강하량은 이와 관련된 간접적인 파라미터로 취급하였다.

이상에서 기술된 바와 같이 응력강하량에 대한 물리적 개념의 모호함에도 불구하고 Brune (1970, 1971)의 응력강하량은 강지진동 모사와 관련하여 접지진원의 특성을 평가하는 단순한 모델로서 전세계적으로 선호되고 있으며, 최근 논문에서도 자주 인용되고 있다. Brune은 코너주파수( $f_0$ )로부터 원형단층의 반경( $r$ )을 추정하고, 응력강하량과 코너주파수, 지진모멘트간의 관계식을 식 (4)와 같이 도출한 바 있다. 식 (4)의 응력강하량은 지진원스펙트럼이 단일코너주파수  $\omega^2$  모델을 따를 경우에만, 단층면 상의 상대적인 변위를 가속시키는 힘의 물리량으로서 해석될 수 있다.

$$r = (2.34\beta_0)/(2\pi f_0), \quad f_0 = \beta_0(\Delta\sigma/8.44M_0)^{1/3} \quad (4)$$

응력강하는 종종 고주파 응력강하로도 불리우는데 이 이유는 지진원 코너주파수 이상의 고주파에서 식 (5)처럼 푸리에스펙트럼( $a_{hf}$ )이 응력강하에 비례하여 스케일링 되기 때문이다([2]).

$$a_{hf} \propto \Delta\sigma^{2/3} \cdot M_0^{1/3} \quad (5)$$

또한 응력강하량은 지진의 규모와 파열길이(L)와도 이론적인 관련이 있으며(식(6)), 최대지진규모 평가를 위한 단층의 규모-파열길이 관계식 선정시 고려되어야 할 중요한 요소임이 강조되기도 하였다([3]).

$$M_s = 2 \log L + 1.33 \log \Delta\sigma + 1.66 \quad (6)$$

국내의 경우 응력강하량을 추정하기 위한 다양한 시도가 있었으며, S파의 지진원스펙트럼에 대한 코너주파수를 분석자의 시각적인 주관에 의존하여 결정하거나(기하학적 방법), 이론적인 지진원스펙트럼을 가정한 보다 객관적인 분석방법을 이용하여 결정되기도 하였다([4]). 한편 코너주파수의 이론적인 값 자체도 가정된 지진원 모델 및 에너지방사 패턴에 따라 변동적이며, 특히 국내에서 주로 발생하는 작은 규모의 지진에 대한 코너주파수 평가시, 코너주파수가 부지특성에 의해 왜곡될 가능성이 많은 고주파 대역에 속하기 때문에 추정시 많은 주의가 요망된다. 또한 고주파수 스펙트럼의 경우 근거리라 할지라도 지진파감쇠를 무시할 없기 때문에 지진원스펙트럼 추정시 정확한 지진파감쇠 평가가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 국내 지진관측자료를 기반으로 Brune의 지진원모델에 대한 응력강하량을 추정하고 추정된 응력강하량의 특성에 대한 고찰 및 기존에 수행된 국내·외 연구결과 등과의 비교검토를 수행하였다. 아울러 추정된 응력강하량의 특성을 반영하여 지진규모별로 최적의 응력강하량 모델을 제시하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 다양한 모델함수를 가정한 지진특성 파라미터 역산

지진원의 응력강하량은 지진원 스펙트럼으로 추정할 수 있으며, 지진원스펙트럼 추정시 지진파 감쇠와 부지특성 보정이 필수적으로 수반되어야 한다. 한편 지진파감쇠, 부지특성 등은 사용되는 자료, 모델함수, 추정방법 등에 따라 다양한 특성 값이 존재할 수 있다. 본 연구에서는 추계학적 지진동 모델([5])에서 고려되는 지진파감쇠, 부지특성 모델에 대해 다양한 모델함수를 가정한 후, 국내 지진관측자료를 기반으로 관련 모델파라미터 및 응력강하량에 대한 역산을 수행하였다.

표 1은 역산시 고려된 모델함수에 대한 설명이며, 표 2는 선행연구의 역산방법([6])을 이용하여

여러 가지 경우에 대해 추정된 모델파라미터의 역산결과이다. 지진원 스펙트럼으로는 Brune의 단 일코너파수  $\omega^2$  모델이 동일하게 사용되었으며, 표 1,2의  $Geo(R,f)_{emp}$ ,  $A(f)_i$  등은 기존 연구 결과를 이용하였다([7,8]). 또한 역산에 사용된 지진관측자료로는 1995년 이후 한반도 인근에서 발생한 289 개 지진에 대해 국내 지진관측망에서 기록된 7,914개의 수평성분 푸리에스펙트럼이 사용되었다.

표 1. 추계학적 지진동 모델파라미터 추정시 가정된 여러 가지 모델함수의 종류  
( $R$  = distance,  $f$  = frequency,  $A(f=\infty)_{avg}=1.67$ ,  $X$  = geographical coordinates)

모델	모델수	모델 종류	표 2의 case
Quality factor	3	frequency dependent model ( $=Q_0 f^n$ )	1, 2, 3, 4
		frequency independent model ( $=Q_0$ )	5
		spatially varying model ( $=Q_0(X)^{n(X)}$ )	6
Geometrical spreading	2	bilinear hinged model( $R^{-1} < R_0, R^{-0.5} > R_0$ )	1, 3
		empirical geometrical spreading model from nonparametric method ( $=Geo(R, f)_{emp}$ )	2, 4, 5, 6
Elastic amplification	2	average crustal amplification ( $=A(f)_{avg}$ )	1, 2
		site-specific site response ( $=A(f)_i$ )	3, 4, 5, 6

표 2. 다양한 모델함수를 이용한 한반도 남부 지진의 추계학적 지진모델 파라미터 계산 결과 (빗금친 부분은 역산시 고정되었음).

case	Median $\Delta\sigma$ ( $M>3.0$ )	STD of $\ln(\Delta\sigma)$	$Q(f)=Q_0 f^n$		Geometrical spreading	$\kappa$ relative to $A(f)_{avg}$	$\sigma_\kappa$	$A(f)$	$\gamma$	mean /median	비교
			$Q_0$	$n$							
1	73.19	0.75	308	0.56	$R_0=50km$	0.0270	0.0140	$A(f)_{avg}$	2	1.29	
2	169.42	0.77	272	0.58	$Geo(R, f)_{emp}$	0.0243	0.0143	$A(f)_{avg}$	2	1.28	
3	29.58	0.71	397	0.46	$R_0=49km$	0.0138	0.0144	$A(f)_i$	2	1.13	
4	68.32	0.75	350	0.48	$Geo(R, f)_{emp}$	0.0161	0.0141	$A(f)_i$	2	1.13	
5	14.58	0.73	1326	0	$Geo(R, f)_{emp}$	-0.0028	0.0172	$A(f)_i$	2	1.15	
6	81.86	0.69	$Q_0(X)$	$n(X)$	$Geo(R, f)_{emp}$	0.0161	0.0140	$A(f)_i$	2	1.12	

표 2에는 응력강하량의 통계값이 6가지 case 별로 정리되어 있으며, 통계값으로는 지진관측 자료의 수가 20개 이상인 규모 3.0 이상의 65개 지진에 대한 응력강하량의 중앙값과 자연로그 표준편차가 추정되었다. 표 2로부터  $A(f)$ 를 사용할 경우  $A(f)_{avg}$ 를 사용할 경우 보다 응력강하량이 감소하며,  $Geo(R, f)_{emp}$ ,  $Q_0(X)^{n(X)}$ 를 사용할 경우 응력강하량이 증가하는 경향을 나타내었다. 표 2에서 case 6은 고려할 수 있는 가장 복잡한 모델함수를 가정한 경우이며, case 1은 가장 단순한 모델함수를 가정한 경우이다. 표 2의 결과 중 지진의 다양한 현상을 최대한 반영한 모델함수를 이용한 case 6에 대한 역산결과가 가장 정확할 것으로 판단되며, 실제로 case 6의 경우 응력강하량의 표준편차가 가장 낮은 것으로 확인

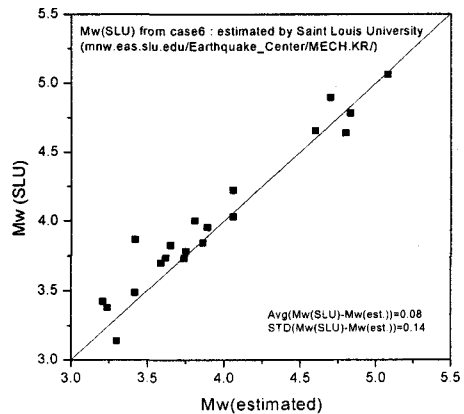


그림 1. 타 연구결과의 모멘트 규모([9])와 표 2의 case 6의 모멘트 규모 비교

된다. 또한 표 2에서 관측소별 부지특성을 고려할 경우(case 3,4,5,6) 오차(mean/median)가 현저히 저감됨을 확인할 수 있으며, 표 2의 case 3는 유사 선행연구([6])와 가장 비슷한 조건으로서 응력강하량 추정결과도 기존 연구결과의 평균 응력강하량 수준인 30bar와 유사하게 평가되었다. 주파수와 무관한 Q 모델을 사용한 경우(case 5)도 응력강하량이 매우 낮게 추정되었으며, 이 경우 규모 3.0 이상 지진에 대한 응력강하량의 표준편차가 상대적으로 크게 평가되었다. 본 연구에서 case 별로 추정된 규모는 타 연구에서 파형역산을 통해 추정된 모멘트규모([9])와도 비교되었는데 모든 case에 대해 유사한 정도로 파형역산에 의한 모멘트규모와 근접되게 추정되었다. 이러한 결과는 모멘트 규모에 영향을 주는 주파수는 주로 저주파로서 표 1에 가정된 모델 선정이 모멘트규모 추정에 큰 영향을 주지 않았기 때문으로 판단된다. 그림 1은 표 2의 case 6에 대해 추정된 모멘트규모와의 비교결과 예제로서 추정된 규모와의 오차 평균, 표준편차는 0.08, 0.14이다.

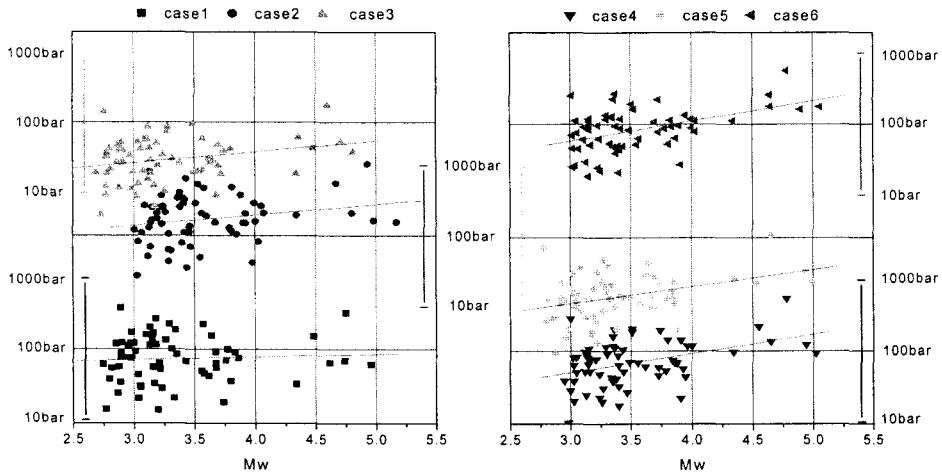


그림 2. 표 2의 case 별 역산결과에 대한 규모-Brune 응력강하량 관계

그림 2는 표 2의 여러 case에 대해 추정된 모멘트규모와 응력강하량의 관계를 상호 비교한 그림으로 각 case 별로 선형 적합된 함수가 함께 도시되어 있다. 그림 2에서 bilinear hinged 기하학적 감쇠 및  $A(f)_{avg}$ 을 사용하는 case1의 경우를 제외하고는 모두 규모가 증가함에 따라 응력강하량이 증가하는 경향을 일관되게 나타내고 있음을 알 수 있다.

## 2.2 국내 응력강하량의 특성 (표 2의 case 6의 결과를 중심으로)

본 절에서는 표 2 중 case 6의 응력강하량 추정결과가 가장 신뢰성 있을 것으로 판단하고, case 6에 대해 추정된 응력강하량의 특징을 살펴보았다. 먼저 내륙지역( $E126^{\circ} \sim 130^{\circ}$ ,  $N34^{\circ} \sim 38^{\circ}$ )에서 발생하고 지진관측자료의 수가 20개 이상인 규모 2.0 이상 지진을 따로 분류 한후, 전체적인 지진에 대한 특성과 비교한 결과(그림 3(a)) 규모별 응력강하량 변화 양상에 큰 차이가 발생하지 않았다. 그림 3(b)는 역산시 사용된 관측소 주파수응답특성과 추정된 응력강하량의 상관성을 평가하기 위한 그림으로, 규모 2.0~3.0의 지진에 대해 관측기록을 갖는 지진관측소의 평균 주파수응답특성을 9Hz, 25Hz에 대해 계산한 후 응력강하량과 비교하였다. 관측소의 주파수응답특성으로는 주파수별 탄성증폭특성과 kappa의 조합이 사용되었다. 비교 결과 그림 3(a)에서 추정된 응력강하량은 관측소의 주파수응답특성과 무관한 것으로 확인되었다.

표 3은 국내에서 발생한 중규모 이상의 지진에 대한 응력강하량 추정 결과로서 내륙과 비교적 멀리 떨어진 황해 해상에서 발생한 중규모 이상의 지진에 대한 응력강하량은 대체로 큰 경향을 나타내나, 내륙 인근 지역 지진은 100~180bar의 범위 이내에 속한다. 그림 4는 응력강하량의 공간적인 분포로 지역별로 뚜렷한 차이를 나타내지 않으며, 동일 지역내의 유사 규모(2.0~3.0) 지진에

대한 응력강하량 검토 결과 추정된 응력강하량 값의 무작위 특성이 확인된다.

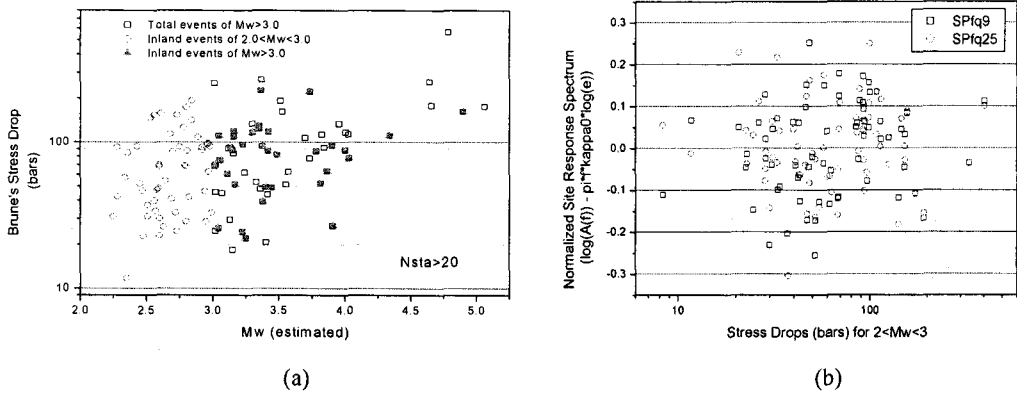


그림 3. 내륙지진에 대한 규모-응력강하량 관계 (a) 및 응력강하량과 관측소 부지특성과의 상관 관계 평가 (b)

표 3. 중요 지진에 대한 Brune 응력강하량 추정 결과

Year	Month	Day	hour	min.	sec.	Longitude (degree)	Latitude (degree)	M <sub>w</sub> (est)	Brune's SD(bar)	비고
1996	12	13	13	10	17.00	128.7113	37.2518	4.9	162.5	영월지진
1997	6	26	3	50	23.00	129.2367	35.8015	4.3*	111.0	경주지진
2002	7	23	21	48	8.00	122.4000	35.7000	4.6	259.8	중국청도 앞바다지진
2003	3	23	5	38	40.00	124.4410	34.9700	4.8	567.8	홍도지진
2003	3	30	20	10	57.00	123.8270	37.7070	4.7	178.5	백령도지진
2004	5	29	19	14	24.65	130.1047	36.6572	5.1	175.6	울진앞바다 지진

\* 역산시 M<sub>w</sub>는 타 연구결과(9)의 값으로 고정시키고, 응력강하량만을 추정하였음.

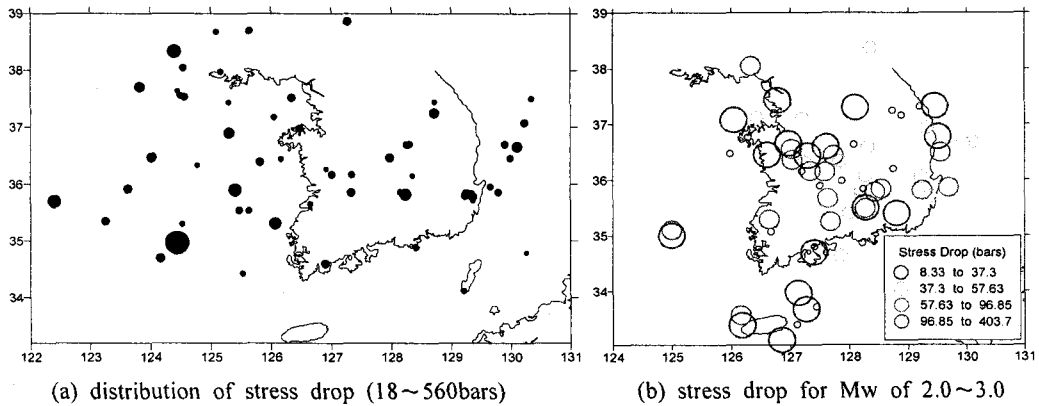


그림 4. 응력강하량의 공간적 분포

### 2.3 기존 응력강하량 추정결과와의 비교

본 연구에서 추정된 규모별 응력강하량을 국내·외의 유사 연구결과와 비교하여 보았다. 국외 연구 대상지역은 북미동부지역, 이탈리아 북동부 지역 등이며([10,11]), 규모별 응력강하량 비교 결과 국내·외 모두 규모에 따라 응력강하량의 평균값은 증가하며, 규모와는 무관하게 응력강하량 상한 값은 대체로 일정한 수준을 갖는 형태를 갖는 것으로 확인되었다(그림 5). 한편 본 연구에서 추정된 응력강하량의 절대적인 수준은 대체적으로 북미동부 지역과 유사한 것으로 나타났다.

국내의 경우는 전명순(1991), 김성균(2002), 조남대(2003)의 유사 연구결과([12,4,13])와 비교하여

보았다. 조남대(2003)의 경우 경주지역에서 발생한 일련의 세 개의 지진에 대한 모멘트규모와 응력강하량을 수정된 Andrew 방법을 이용하여 추정하였으며, 이 결과와 본 연구의 연구결과를 비교한 결과 서로 유사한 수준으로 확인되었다(그림 6(b)). 김성균(2002)은 1996~2001.8 기간에 발생한 49개 지진에 대해 여러 가지 방법(기하학적 방법, Brune의 스펙트럼 적합방법, Snoko 방법)으로 응력강하량을 추정한 후 평균값을 최종적으로 취하였으며, 그림 6(a)와 같이 규모 3.5 미만에서는 응력강하량이 감소하고 규모 3.5 이상에서는 100bar 정도로 일정하다고 보고한 바 있다. 본 연구결과 역시 김성균(2002)의 결과와 유사한 양상이 나타나(그림 6(a)), 규모 3.5 이상에서는 응력강하량이 일정치 않고 서서히 증가하다가 규모 4.5 이상에서는 일정한 수준을 갖는 것으로 추정된다. 한편 선행 연구결과들이 서로 다른 지진파스펙트럼 감쇠 및 부지특성 보정을 수행 하였음에도 불구하고 본 연구의 응력강하량과 유사하게 평가되는 비교결과는 주목할 만하다.

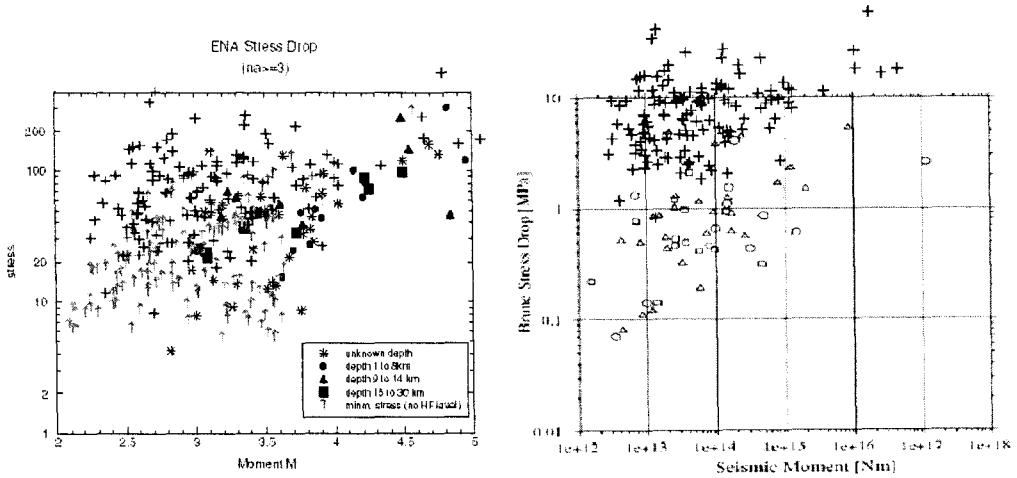


그림 5. 본 연구에서 추정된 규모-응력강하량(+)과 국외 지역에 대한 연구결과와의 비교. 좌측, 우측 그림은 각각 북미동부지역([10]), Friuli-Venezia Giulia(이탈리아 북동부)([11])에 대한 응력강하량 추정결과.

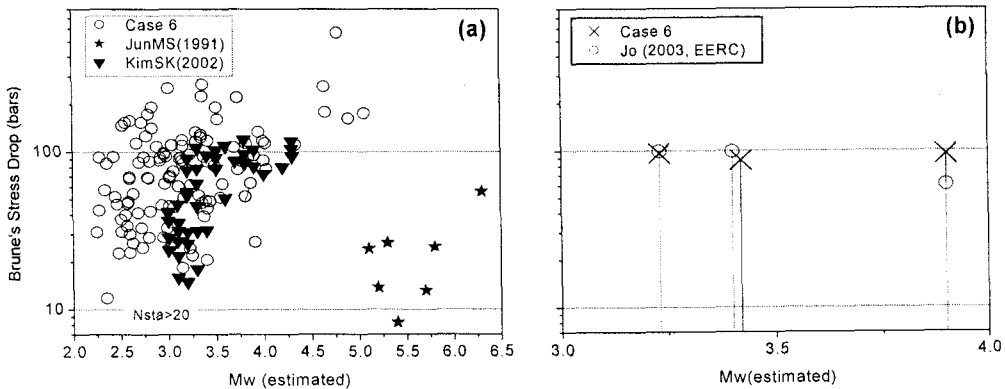


그림 6. 국내 응력강하량 추정에 대한 선행 연구결과와의 비교

반면 한반도 인근에서 발생한 규모 5.0 이상의 지진에 대한 응력강하량 추정결과(전명순, 1991)는 그림 6(a)에서와 같이 본 연구 및 선행연구에서 추정되는 응력강하량 보다 매우 낮게 평가되어 연구결과 간에 큰 차이점이 발생한다. 관련 연구([12])에서는 장거리 아나로그 지진파형 기록을 디지털화하여 지진파(P, S파) 스펙트럼의 저주파(<2Hz) 성분을 이용하였고, S파 스펙트럼 이외에 P파의 스펙트럼에 대해서도 기하학적인 방법으로 코너 주파수를 이용한 후 평균값을 취하였다. 일반적으로 중규모 이상의 지진에 대해서는 단일 코너주파수가 아닌 두개의 코너주파수를 갖는 지

진원스펙트럼이 관찰되며, 전명순(1991)의 연구결과에서 응력강하량이 매우 낮게 평가된 이유로는 관련 연구에서 두개의 지진원스펙트럼 코너주파수 중 활용가능한 저주파 대역에서만 확인되는 작은 코너주파수 만을 추정했기 때문으로 판단된다. 일례로, 그림 7은 Brune의 응력강하량 170bar에 적합된 바 있는 울진해상지진('04.5.29, Mw=5.1)의 관측 지진원스펙트럼으로, 저주파 스펙트럼 만을 보면 20bar 정도의 낮은 Brune 응력강하량 스펙트럼에도 잘 적합되고 있음을 알 수 있다.

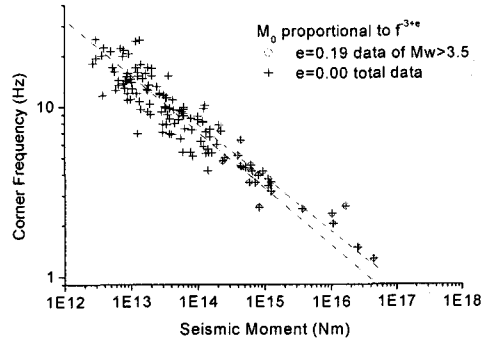
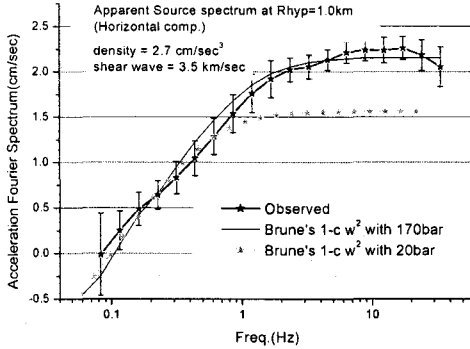
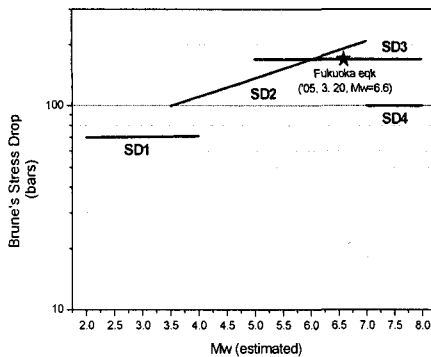


그림 7. 울진앞바다 지진에 대해 추정된 지진원 스펙트럼에 대한 Brune 스펙트럼 비교

그림 8. 지진모멘트와 코너주파수의 관계

#### 2.4 지진규모별 평균 응력강하량 모델 제시

그림 8은 식(4)를 이용하여 코너주파수를 계산하고 식(2)를 이용하여 지진모멘트로 환산한 후 상호관계를 살펴본 그림이다. 그림 8에서 전 자료에 대한 선형회귀분석 결과  $M_0 \propto f^3$ 의 동일 응력강하량 관계식을 따르고 있으나, 특정 모멘트(대략  $10^{15}$ Nm) 이상에서는 코너주파수가 적합식보다 확연히 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 특히 규모 3.5이상에 대한 자료는  $M_0 \propto f^{3.19}$ 에 적합되었다. 이상의 결과는 국내 지진원의 비례법칙(scaling law)은 규모 4.0~5.0을 경계로 성립되지 않음을 시사한다. 본 연구에서는 그림 8에서 얻어진 코너주파수와 지진모멘트 자료에 대한 적합식을 이용하여 그림 9와 같이 지진규모별 평균 응력강하량 모델을 제시하였다. 규모 6.5 이상의 지진에 대해서는 SD3와 SD4의 두 가지 모델이 제시되었으며, SD3의 모델 제안시 후쿠오카 앞바다 지진('05.3.20, Mw=6.6)의 응력강하량([14])이 고려되었다. SD3 모델은 buried fault의 지진원에 대해, SD4는 지표파열(surface rupture)을 갖는 지진원에 대한 적용을 고려하여 별도로 제시되었다.



Mw	응력강하량 (bars)			
	SD1	SD2	SD3	SD4
2.0	70	-	-	-
3.0	70	-	-	-
3.5	70	100	-	-
4.0	70	111	-	-
4.5	-	123	170	-
5.0	-	137	170	-
6.0	-	169	170	-
6.5	-	187	170	-
7.0	-	208	170	100
8.0	-	-	170	100

SD1 :  $\log(M_0) = 16.56 - 3.01 \times \log(fc)$  for  $M_w > 2.0$  ( $M_0$  = seismic moment (Nm),  $fc$  = corner frequency (Hz))  
 SD2 :  $\log(M_0) = 16.86 - 3.19 \times \log(fc)$  for  $M_w > 3.5$   
 SD3 : constant stress drop for  $M_w > 4.5$ , SD4 : lower stress drop due to surface rupture for  $M_w > 6.5$

그림 9. 지진규모별 평균 응력강하량 모델

### 3. 결 론

본 연구에서는 지금까지 축적된 지진관측자료의 S파 수평성분 푸리에스펙트럼 D/B를 기반으로 Brune의 지진원모델에 대한 응력강하량을 다양한 경우의 지진파감쇠, 부지특성모델에 대해 추정하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 가. 응력강하량 추정 결과가 추정에 사용된 지진파감쇠 및 부지특성에 대해 상대적으로 평가됨.
- 나. 여러 경우에 대해 추정된 응력강하량의 대부분은 규모증가에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며, 이러한 경향은 국내·외 유사연구 결과와도 일치함. 전명순(1991)이 추정한 응력강하량과의 차이는 국내에 관측되는 지진원이 두개의 코너주파수를 갖는 스펙트럼 형상의 특징을 갖기 때문으로 사료됨.
- 다. 추정된 응력강하량은 전반적으로는 지진규모와 무관하게 일정하나(즉,  $M_0 \propto f^{3.0}$ ), 특정 모멘트(대략  $10^{15}$ Nm) 이상에서는 작은 지진모멘트에 비해 응력강하량이 크게 평가됨.
- 라. 규모-응력강하량 자료에 대한  $M_0 \propto f^{3.0}$ 의 적합식으로부터, 국내 강지진동 모사에 적합한 지진규모별 평균 응력강하량 모델을 그림 9와 같이 제시함.

### 참고문헌

- [1] Igor A. Beresnev (2001), What We Can and Cannot Learn about Earthquake Sources from the Spectra of Seismic Waves, BSSA, Vol. 91, 397-400.
- [2] Atkinson, Gail M. and Hanks, Thomas C. (1995), A High-Frequency Magnitude Scale, BSSA 85, 825-833.
- [3] Bagher Mohammadioun and Leonello Serva (2001), Stress Drop, Slip Type, Earthquake Magnitude, and Seismic Hazard, BSSA 91. 4, pp. 694-707
- [4] 김성균, 김병철 (2002), 한반도 발생 지진의 지진원 상수, 한국지진공학회 춘계학술대회, 3-11.
- [5] David M. Boore (2003), Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method, Pure appl. geophys. 160, 635-676.
- [6] 연관희, Walter Silva, 박동희, 장천중 (2002), "수정된 Levenberg-Marquardt 역산방법에 의한 한반도 남부의 추계학적 지진 요소 평가", 한국지진공학회 춘계학술대회 Vol. 6. No. 1, 20-27.
- [7] Kwan-Hee Yun, Dong-Hee Park, Jeong-Moon Seo (2004), "BROADBAND NONPARAMETRIC GROUND -MOTION EVALUATION OF HORIZONTAL SHEAR-WAVE FOURIER SPECTRA", OECD/NEA Workshop on Seismic input motions, NIED (Tsukuba, Japan), Nov. 15-17.
- [8] 장천중, 최원학, 연관희, 박동희 (2005), 원전부지 지진관측망 2004년도 지진관측연보, 한전전력연구원.
- [9] Robert B. Herrmann (2006), [http://mnw.eas.slu.edu/Earthquake\\_Center/MECH.KR/](http://mnw.eas.slu.edu/Earthquake_Center/MECH.KR/) (last updated on 2006/01/19), Saint Louis University in U.S.A.
- [10] Gail M. Atkinson (2004), Empirical Attenuation of Ground-Motion Spectral Amplitudes in Southeastern Canada and the Northeastern United States, BSSA 94, pp. 1079 - 1095.
- [11] Gianlorenzo Franceschini, Stefano Kravanja, Gianni Bressanb (2006), Source parameters and scaling relationships in the Friuli-Venezia Giulia (Northeastern Italy) region, Physics of the Earth and Planetary Interiors 154, 148-167.
- [12] M.S. Jun and O. Kulhanek (1991), "Source parameters of earthquakes in and around the Korean Peninsula deduced from spectral analysis", Physics of the Earth and Planetary Interiors, 65, 255-266.
- [13] 조남대, 박창업 (2003), 한반도 남동부에서 부지효과를 고려한 스펙트럼 감쇠상수 추정 및 강지진동의 추계학적 모사, 한국지진공학회 논문집 Vol. 7 No. 6, 59-70.
- [14] 연관희, 박동희, 장천중, 최원학, 이대수 (2005), 후쿠오카 지진('05. 3. 20,  $M_{JMA}=7.0$ )에 대한 일본 인근 지진관측소와 국내 지진관측소의 주파수응답특성 비교, 한국지구물리학회지, Vol. 8, No. 1. 15-21.