

한반도 지진의 지속규모식에 관한 연구

Duration Magnitude and Local-Duration Magnitude Relations for Earthquakes of 1979-1998 Recorded at KMA Network

박삼근*

Park, Sam Keun

정상부**

Chung, Sang-Boo

김상조***

Kim, Sang-Jo

ABSTRACT

An empirical formula for estimating duration magnitude (M_D) is determined by analyzing 619 epicentral distance-duration data set, obtained from earthquakes of 1989 – 1998 recorded at the KMA network. Based on two assumptions: 1) observed signal duration decreases with increasing epicentral distance, and 2) seismographs of KMA are set at low-gain and therefore inclusion of sensitivity correction term in the equation is not necessary, scaling predicted duration at epicenter to Tsuboi's local magnitude yielded the duration magnitude equation: $M_D = 2.0292 \times \log \tau + 0.00124\Delta - 1.4017$ for $1.0 \leq M_L \leq 5.0$, where τ is total signal duration(sec) and Δ is epicentral distance(km). Event by event comparison of M_L values against M_D estimates for 152 events shows that for events having a same M_L the difference in M_D estimates reaches as high as 1.1 magnitude units. So, to test the usefulness of the duration magnitude equation, we have calculated M_L - M_D relations by which duration magnitude estimates are converted to local magnitudes ("predicted" M_L , say) which are then compared with the directly determined local magnitude values. Except for events with stations where duration is anomalously recorded long or short, the duration magnitude equation combined with M_L - M_D relations usually gives magnitude estimates (predicted M_L) which are in an agreement within a 0.2 magnitude units with the corresponding M_L values.

Although this study could gain some insights into magnitudes of the past events, we still need to re-examine all the observables in order to obtain more reliable and precise information about magnitude and hypocenter location. So we will pursue a new local-magnitude scaling, as well as refinement of the duration magnitude equation, starting soon with re-reading the amplitudes-arrival time records of (and hence relocating) 250+ earthquakes of 1979 – present recorded at the KMA network. Thus, with more reliable and precise earthquake parameters determined we would better understand the recent seismicity and related tectonic process within and adjacent region to the Korean peninsula.

1. 서론

기상청은 1978년부터 지진관측 업무를 시작한 이래 한반도와 주변해역에 걸쳐 발생하는 지진의 규모(local magnitude, M_L)를 결정하기 위하여 Tsuboi 공식(김상조, 1983)을 사용해왔다.

$$M_L = \log A_{\max} + 1.73 \times \log \Delta - 0.83$$

여기서 A_{\max} 는 지진동의 속도(μ)를 그리고 Δ 는 진앙거리(km)를 나타낸다. 실제로 A_{\max} 는 수평 또는 수직성분 단주기 지진계에 기록된 S 파의 최대진폭(0-to-peak)을 mm 단위로 읽어 μ 으로 나타낸 후 이를 배율로 나눈 값이다. i.e. $A_{\max} = (A_N^2 + A_E^2)^{1/2} \times 1000 / \text{배율}$ (1990년 이전) 또는 $(2 \times A_z^2)^{1/2} \times 1000 / \text{배율}$ (1990년 이후). 원래 Tsuboi 규모식은 수평성분 중주기 변위(displacement) 지진계에 기록된 f

* 기상청 지진담당관실, 위촉연구원
 ** 기상청 지진담당관실, 기상주사보
 *** 기상청 지진담당관실, 과장

0.2Hz 의 지진파의 최대진폭을 측정하여 규모를 산정하고 진원깊이 60km 이내 지진의 규모를 결정하기 위하여 고안되었다.

현재까지 기상청이 지진망을 운영해온 경험에 의하면 규모가 약 3.5 이상인 지진으로부터 진앙거리 약 200 – 300km 에 위치한 관측소에서는 기록의 한계를 넘거나(off-scale or clipped out) 기록이 희미하여 이 보다 거리가 먼 관측소의 기록으로 규모를 결정해야 했다. Tsuboi 규모식에 의하면, 지진계 시스템의 배율 $\times 12,000$ 을 가정할 때 Teledyne 사의 Helicorder 기록계의 기록한계 진폭인 45mm(0-to-peak)에 미칠 수 있는 이론상의 규모와 거리는, 규모 3.35 의 지진이 관측소로부터 진앙거리 100km 지점에 발생하였을 때 또는 규모 4.18 의 지진이 고 진앙거리 300km 지점에 발생하였을 때 능이다. 따라서 보다 많은 관측소의 기록을 이용하여 규모를 산정할 수 있는 작은 규모의 지진에 비하여 규모 3.5 이상인 지진의 규모를 결정하기 위해서는, 지진파의 지속시간(duration)을 관측하여 이를 진폭규모 (M_L)의 척도에 맞추어(scaling) 지진의 규모를 산출할 수 있는 지속규모식(duration magnitude equation)을 필요로 한다.

리히터 규모식과 마찬가지로 지속규모(M_D)식의 결정에 있어서도, 일정 기간동안 축적된 자료를 경험적 측정(empirical measure)으로 각 관측소의 특성(instrumental characteristics)과 지진파 주변 지각의 특성(propagation characteristics)을 규모식으로 하여급 정량적으로 반영될 수 있도록 규모식을 개발하여 이로부터 결정한 지속규모가 진원에서의 순수한 지진운동 에너지의 양을 나타내는 값이 될 수 있도록 해야 한다. 다음에, 관측 환경을 달리하는 지진망의 특성에 맞도록 개발된 지속규모식의 실례를 들어본다.

Tsumura (1967)는 수직성분 단주기 지진계에 기록된 지진기록의 지속시간을 이용하여 규모를 결정할 수 있는 지속규모식을 개발하여 현재까지 일본 기상청의 지진망에 적용되고있다.

$$M_D = 2.85 \times \log \tau + 0.0014 \Delta - 2.53 \quad (3 < M_L < 5)$$

여기서 τ 는 수직성분 단주기 지진계에 기록된 시그널의 지속시간(sec)을, Δ 는 진앙거리(km)를 나타낸다.

한편, Lee et al. (1972)은 USGS 의 Northern California Seismic Network (NCSN)의 수직성분 단주기 관측망에 기록된 351 지진의 지속시간 자료를 Wood-Anderson 또는 이와 동등한 지진계에 의하여 결정한 리히터 규모에 scaling 하여 Tsumura 의 식과 유사한 지속규모식을 결정하였다.

$$M_D = 2.00 \times \log \tau + 0.0035 \Delta - 0.87 \quad \text{for } 0.5 < M_D < 5$$

여기서 τ 는 지속시간(sec), 그리고 Δ 는 진앙거리(km)이다. Lee et al.은 P 파의 초동시간부터 지진파의 최대진폭(i.e. peak-to-peak amplitude)이 Develocorder film viewer(배율 X20)하에서 1 cm 로 감소하는 시점까지를 지속시간으로 정의하였다. 이는 지진파의 최대진폭이 1cm 로 감소하는 시점이 background noise 의 최대진폭 수준인 0.5cm 의 약 두 배가 되는 시점과 일치하기 때문에 reading 에 따르는 오차를 배제할 수 있기 때문이다.

그러나 Lee et al.은 지속규모식을 결정하기 위하여 high-gain(i.e. attenuator setting = 12 – 18dB) 지진계의 기록만을 사용했기 때문에 규모가 3.5 보다 큰 지진에 대해서 지속규모가 현저히 낮게 결

정된 것으로 확인되었다(Eaton, 1992). 많은 양(예, NCSN 의 74,000 지속시간 자료)의 지속자료에 대한 경험적 측정(empirical measure)에 의하면 attenuator 를 12 - 18dB 로 하였을 때 지진 시그널의 지속시간이 가장 길게, 그리고 attenuator 를 이보다 낮게 또는 높게 setting 할 때 지속시간이 현저히 짧게 기록되기 때문이다(Eaton, 1992). 따라서 Eaton 은 각 관측소의 감응도(sensitivity, e.g. attenuator setting level) 요소도 관측소 오차(station correction) 등과 함께 model parameter 에 포함시켜 Lee et al.의 자료에 NCSN 의 low-gain 관측소의 지속시간 자료를 추가한 지속시간-진앙거리 데이터를 역산함으로써 다음의 지속규모를 결정하였다.

$$M_D = 2.22 \times \log \tau + 0.0011 \Delta + \log(c/c_r) + d + f(h)$$

여기서 $d = 0.006(\Delta - 40)$ if $\Delta < 40.0 \text{ km}$

$d = 0.006(\Delta - 350)$ if $\Delta > 350.0 \text{ km}$

$h =$ 진원깊이 (km)

$f = 0.014(h - 10.0)$ if $h > 10.0 \text{ km}$

$c, c_r =$ 지속시간을 측정 한 관측소의 감응도 요인과 attenuator 를 15dB 로 setting 한 지진계의 감응도 요인

한편, 지진계의 감응도의 차이에 따라 별도의 공식을 적용하기 위하여 Hirshhorn et al.(1987)은 NCSN 을 구성하는 low-gain(attenuator setting = 42dB) 수직성분 관측소의 지속시간 기록만을 사용하여 다음의 지속규모식을 결정하였다.

$$M_D = 2.95 \times \log \tau + 0.001 \Delta - 0.72, \quad 3 < M_L < 6$$

위의 규모식들은 기본적으로 지진파의 지속시간이 거리가 증가함에 따라 감소하는 함수관계에 바탕을 두고 있다. 그러나 지속시간 기록이 진앙거리의 변화에 따른 변화보다 지진계의 감응도의 차이에 대한 변화가 더 큰 요인임을 감안하여 Michaelson(1990)은 진앙거리 항 대신 감응도와 관련된 항을 포함하는 지속규모식을 결정하였다. 따라서 지속시간 대신 NCSN 의 high-gain 수직성분 단주기 지진계에 기록된 총 경과시간(total lapse time = coda threshold time - origin time) 자료를 이용하여 결정한 규모식은,

$$M_D = 2.10 \times \log \tau_1 + 0.00269 \tau_1 - 1.03 + C_s$$

여기서 τ_1 는 총경과시간을 그리고 C_s 는 감응도 수정 상수를 나타낸다.

한편, 김소구, 이승규(1994)는 기상청 지진망과 한양대 지진연구소의 관측소에 기록된 1991 - 1992 기간 동안 한반도에 발생한 지진자료를 사용하여 Lee et al(1972)의 방법으로 한반도의 지역적 특성에 맞는 지속규모식의 개발을 시도하였다.

$$M_D = 2.091 \times \log \tau + 0.0019 \Delta - 0.836, \quad 2.0 \leq M_D \leq 5.0$$

그러나 김소구, 이승규는 분석과정에 제한된 양의 자료를 사용하였고 1992 년 이후에 발생한 지진에 대하여 규모식의 적용 가능성을 확인하지 못하였다.

따라서 본 연구의 목적은 기상청 지진망에 기록된 1990 - 1998 기간동안 한반도 및 주변해역

에 발생한 지진의 자료를 사용하여 지속규모식을 결정하고 결정한 규모식의 기상청의 자료에 적용 가능성 여부를 결정하는데 있다. 기상청의 지진망을 구성하는 지진계의 감응도가 low-gain setting(i.e. 강릉 과 철원 관측소(18dB)를 제외한 나머지 관측소는 30 - 36dB) 인 점을 감안할 때 관측소의 감응도 수정(sensitivity correction)을 분석 과정에 포함하지 않고(예, Lee et al., 1972; Hirshhorn, 1987) 지속규모식을 결정하는 방법을 선택하였다. 본 연구에서 결정한 지속규모식을 적용하여 기상청 지진망에 관측된 1979 - 1998 기간에 발생한 약 250+ 지진의 지속규모를 결정하고 또한 규모와 지속규모의 상관관계식을 구하여 진폭을 측정할 수 없는 과거의 지진과 향후 발생할 지진의 진폭규모를 산출함은 물론 규모에 대한 보다 정확하고 추가적인 정보를 확보함을 목적으로 한다.

II. 자료

본 연구에서 지속규모식을 결정하기 위하여 1990 년 말부터 기상청이 동일한 감진기 (S-13) 와 원격 기록장치(Helicorder)로 네트워킹하여 실시간(near real-time)으로 관측,분석하기 시작한 이후의 기록을 사용하였다. 지진망을 동일한 모델의 지진계 시스템으로 구성하여 중앙에서 분석,처리함으로써 기록의 동시성(synchronization)을 유지할 수 있고 각 관측소에서 개별적으로 관측할 때에 발생할 수 있는 관측자/분석자 주관의 차이에 의한 편차와 오차를 최대한 배제할 수 있기 때문이다.

1991. 5 - 1998. 7 기간동안 발생한 지진 가운데 152 지진에 대한 기상청의 자료(진앙 과 규모) 중 지속시간의 측정이 가능한 관측소에 대한 진앙거리를 계산하여 총 619 지속시간-진앙거리 자료를 확보하였다. 각 관측소 기록의 지속시간 측정은 P 파 초동의 도착시간으로부터 Lg_{coda} 의 진폭이 초동 이전의 noise level 까지 완전히 감소하는 시점까지의 “총 지속시간 (total duration)” 개념을 적용하여 수행하였다. 이는 Lee et al.(1972)과 김소구와 이성규(1994)가 지속규모식을 결정하기위해 사용한 P 파의 초동시간으로부터 coda 파의 진폭이 0.5mm 로 감소하는 시점까지를 지속시간으로 정의한 방법과는 다르다. 다시 말하면 본 연구에서 적용한 총 지속시간의 개념으로 측정한 시간이 일정 시간 더 깊을 뜻한다. 그러나 지속시간에 대한 어떠한 정의의 개념을 선택하느냐의 문제보다 더욱 필수적인 요소는 관측/분석자가 지진 시그널의 진폭이 noise level 로 낮아지는 시점을 판단하는데 있어서 전자료에 대하여 일관성을 유지하는 것이다.

총 152 개 지진 자료 중, 지진별로 각 관측소의 지속시간이 진앙거리가 증가함에 따라 감소하는 추세를 보임과 동시에 되도록이면 광범한 규모값을 갖는 9 개의 지진을 선택하여 규모식을 결정하는데 사용하였다. 표 1 에 나타나 있듯이 분석에 사용한 9 개 지진의 규모는 2.60 - 4.50 이며 지진별로 최소 4 개에서 최대 10 개의 관측소 기록을 포함한다. 관측된 지속시간은 규모 4.50 지진의 경우 480 - 500 초 이며 규모가 가장 작은 지진의 경우 60 - 100 초 이었다.

III. 지속규모식

앞 절에서 언급했듯이, 본 연구에서 지속규모식을 결정하는데 두 가정은, 첫째, 지속시간이 진앙거리의 증가에 따라 감소한다는 요인과, 둘째, 기상청 지진계의 감응도가 low-gain 으로 setting 되어있기 때문에 감응도 수정은 규모식에 포함시키지 않아도 된다는 점이다. 따라서, 한 관측지점

에서의 지속규모 M_D 를 결정하기위한 일반식은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Lee and Stewart, 1981).

$$M_D = a_1 + a_2 \log \tau + a_3 \Delta + a_4(h) \dots\dots\dots(1)$$

여기서 τ = 시그널 지속시간 (초)
 Δ = 진앙거리 (km)
 h = 진원깊이 (km)
 a_1, \dots, a_4 = 데이터로부터 얻어지는 상수 (empirical constant)

위의 식에서 상수는 일정 기간동안 지진을 관측하여 축적된 자료로부터 지속시간, 진앙거리, 진원 깊이를 리히터 규모와의 상관관계를 나타내는 경험식을 구함으로써 얻어진다. 본 자료에 포함된 지진의 진원깊이가 명확하지않기 때문에 상수 중 a_4 의 결정은 본 분석에서 제외키로 한다. 따라서 본 자료의 특성에 가장 적합한 Lee et al.(1972)의 방법을 사용하여 다음과 같이 각 상수를 결정하도록 한다.

첫째, 진앙거리 항의 상수 a_1 은 아래와 같이 각 지진의 지속시간과 진앙거리의 함수관계를 구하여 결정할 수 있다.

$$\log \tau = a' \Delta + b' \dots\dots\dots(2)$$

여기서 τ = 시그널의 총 지속시간(sec)
 Δ = 진앙거리(km)
 a', b' = 상수

그림 1에서와 같이 지진 별로 각 관측소의 지속시간에 로그를 취한 값을 해당 진앙거리 별로 도시하여 데이터를 fitting 하는 회귀선을 구하여 상수 a' 과 b' 을 결정하였다. 표 1에 나열되어 있듯이 상수 a' (= $d\tau/d\Delta$)의 값은 최소 -0.0010에서 최대 -0.0003이었으며 상수 b' 은 최소 2.0654에서 최대 2.9030이었다. 상수 a' 의 값은 지진에 따라 차이가 있기 때문에 9개 지진의 평균값(arithmetic mean)인 -0.00061을 본 자료 전체를 대표하는 진앙거리의 증가에 따른 지속시간의 변화율로 정한다. 따라서 각 지진별로 진앙지에서의 추정 지속시간, τ_0 는

$$\log \tau_0 = \log \tau + 0.00061 \Delta \dots\dots\dots(3)$$

다음, 식 (1)의 상수 a_1 과 a_2 는 각 지진의 규모(M_L)과 식 (2)에서 얻어진 진앙에서의 추정 지속시간 τ_0 와의 상관관계를 구하여 결정한다.

$$M_L(\tau_0) = a_2 \log \tau_0 + a_1 \dots\dots\dots(4)$$

그림 2에서와 같이 데이터를 fitting 하는 회귀선식의 상수 a_2 와 a_1 의 값은 각각 2.0292 및 1.4017로, 두 상수를 결정하는 회귀선이 M_L - τ_0 데이터를 높은 수준으로 만족시키는 것으로 나타났다(i.e. $R^2 = 0.9614$).

위의 과정은, 진앙거리 Δ km에 위치한 지점에서 관측한 지속시간 τ 로부터 진앙지에서의 지속시간 τ_0 을 구하고 다시 τ_0 에 해당하는 규모를 결정하기 위한 일련의 관계식을 지속시간-진앙거리

자료로부터 구하는 것이다. 이를 위하여 마지막으로, 식 (3)의 $\log \tau_0$ 에 대한 표현식을 식 (4)에 대입하여 지속시간과 진앙거리를 변수로 하는 지속규모식을 얻었다.

$$M_D = 2.0292 \times \log \tau + 0.00124 \Delta - 1.4017 \dots \dots \dots (5)$$

지속규모식을 표현하는 지속시간항과 진앙거리항의 계수는 김소구와 이승규 (1994)가 동일한 방법으로 결정한 값 2.091 및 0.0019와 유사하나 마지막 상수는 김소구, 이승규의 값보다 0.567 작다. 이는 본 연구에서 reading 한 지속시간이 김소구, 이승규의 reading 값보다 일정량 더 크기 때문에(예, 규모 3.1인 92/07/19 지진의 지속시간에 대한 김소구, 이승규의 reading 이 56-69 초인 반면 본 연구의 reading 은 120-135 초이었음) M_L vs. τ_0 plot에서 본 연구에서 구한 추세선의 전체 level이 위로 이동되었음을 알 수 있다. 반면, 진앙거리의 변화에 따른 지속시간의 감소율($dt/d\Delta$)을 비교해보면 본 연구에서 구한 0.00124와 김소구, 이승규의 0.0019는 Northern California Seismic Network의 low-gain 지진계(42dB)의 기록에 나타난 값 0.001(Hirshhorn, 1987)과 유사하나 high-gain 지진계(12-18dB)의 기록으로부터 구한 값 0.0035(Lee et al., 1972)에 비해 1/3-1/2 수준에 해당한다.

본 연구에 결정한 지속규모식을 사용하여 분석에 사용한 9개 지진의 각 관측소와 평균 지속규모를 표 1에 나열하였다. 각 지진의 규모와 지속규모의 차이가 최저 0.02에서 0.23 규모단위를 보인다. 그러나 152 지진의 619 기록에 대한 지속규모와 각 지진의 평균 지속규모를 계산하여 각 지진의 규모와 지속규모 값을 비교한 결과 지진마다 두 규모간의 차이의 변화가 심하였다. 152 지진의 두 규모 값의 상관계수는 0.8979였으며 같은 규모 값을 갖는 지진간의 지속규모의 차이가 최대 1.1 규모단위까지 차이를 보였다.

IV. 규모-지속규모 관계식

본 절에서는 새로 결정한 지속규모식을 사용하여 619 관측소의 지속규모와 152 지진의 평균 지속규모를 계산하고, 또한 이들 평균 지속규모가 진폭규모와 상호 일치하는지의 여부를 확인하기 위해 두 규모간의 관계식을 구하였다. 그리고 지속규모식을 기상청 지진망에 적용 가능할지의 여부를 테스트하기 위해 두 규모간의 관계식을 사용하여 지속규모를 진폭규모(“추정규모”)로 환산하여 그 결과를 비교하였다.

먼저, 본 분석에 사용한 9개 지진의 평균 규모와 지속규모간의 관계식을 구하기 위하여 회귀분석을 시도한 결과 다음의 식을 얻었다(그림 3).

$$M_L = 0.9403M_D + 0.2053 \quad (R^2 = 0.9543) \dots \dots \dots (6)$$

그림 3은 회귀선에 의한 관계식이 두 규모 값 전반에 걸쳐 높은 수준으로 fitting 함을 보여준다. 반면, 본 연구에서 결정한 지속규모식을 이용하여 152 지진의 지속규모를 산정하고 그림 4에 규모대 지속규모를 도시하였다. 각 규모에 해당하는 지속규모의 값이 최대 1.1 magnitude unit의 변화를 보이며(예, 규모 2.8에 해당하는 지속규모가 2.0-3.1) 비교적 데이터의 산포가 큼을 알 수 있다. 또한 부분적으로는 규모식의 부적확성과 지진요소의 산출 과정에 포함되는 오차가 두 규모간의 불일치를 초래한다. 152 지진의 두 규모값을 fitting 하는 회귀선은(그림 4)

$$M_L = 0.8344M_D + 0.5514 \quad (R^2 = 0.8019) \dots \dots \dots (7)$$

한편, 규모 3.5 이상의 M_L - M_D 값을 fitting 하는 회귀선은(그림 5),

$$M_L = 1.1202M_D - 0.4411 \quad (R^2 = 0.7089) \dots\dots\dots (8)$$

마지막으로 본 연구에서 결정한 지속규모식(식 (5))과 규모-지속규모 관계식(식 (6)과 식 (8))을 사용하여 152 지진의 지속규모를 규모("추정규모", M_L^p)로 환산하여 진폭기록으로부터 직접 결정한 규모와 비교하였다. 마지막으로 본 연구의 분석에 사용한 9 지진(표 1) 외에도 규모가 큰 지진의 각 규모 값을 표 2 에서 비교하였다. 이들 지진의 규모와 지속규모로부터 환산한 추정규모를 비교할 때, 95-07-24 지진이 0.3 magnitude unit 의 차이를 보이는 것을 제외하고 나머지 지진은 0.2 magnitude unit 또는 이내의 차이를 보인다.

Table 2. Comparison of magnitude estimates for selected events.

Event	Epicenter	M_L	M_D	M_L^p
98-06-08	38.5N 124.3E	3.7	3.7	3.7
96-01-24	37.9N 129.6E	4.2	4.1	4.2
95-07-24	38.2N 124.4E	4.2	3.8	3.9
94-04-22	34.9N 131.0E	4.6	4.3	4.4
94-04-23	35.7N 130.9E	4.1	3.8	3.9
93-03-01	35.6N 126.8E	3.9	3.7	3.7
92-12-13	35.3N 130.1E	4.0	3.8	3.8

여기에서 비교하지 아니한 나머지의 지진과 최근 발생한 지진에 대해서도 규모와 추정규모 값을 비교한 결과, 지속시간이 이례적으로(anomalously) 길거나 짧게 기록된 관측소를 포함하는 지진을 제외하고 두 규모의 차이가 대체로 0.2 magnitude unit 또는 이내에서 일치함을 보여 주었다.

V. 결론 및 토의

기상청의 지진망에 관측된 1990-1998 기간동안 한반도 및 주변해역에 발생한 지진의 기록으로부터 얻어진 총 619 지속시간-진앙거리 자료를 Tsuboi 의 규모공식에 scaling 하여 지속규모식(식 5)을 결정하였다. 또한 지속규모식을 사용하여 619 기록의 지속규모와 152 지진의 평균 지속규모도 결정하였다. 지속규모식의 적용 가능성을 검토하기위해 규모-지속규모의 관계식을 구하고 이 관계식으로 지속규모를 규모로 환산하여 결과를 비교하였다. 152 지진에 대한 규모, 지속규모 및 추정규모 값을 각 지진별로 비교해볼 때 차이의 폭이 0.0 규모단위에서 최대 0.8 규모단위로 나타났으며, 동일한 규모를 갖는 지진의 지속규모 또는 추정규모 값 사이의 차이는 최대 1.1 규모단위까지를 보였다. 그러나 지속시간의 기록이 이례적으로 (anomalously) 지속시간이 길거나 짧게 기록된 관측소를 포함하는 지진을 제외하고, 그리고 최근에 발생한 지진에 지속규모식과 규모-지속규모 관계식을 적용하였을 때, 규모와 지속규모 및 추정규모 값이 대체로 0.2 규모 단위(magnitude unit) 이내에서 일치하는 것으로 나타났다. 이와 같이 지진파 기록으로부터 독립적으로 관측한 진폭과 지속시간으로부터 결정한 규모의 값이 일치하지 않는 이유는 진폭과 시그널의 지속시간의 변화에 영향을 주는 두 메커니즘—instrumental and propagation response—이 이들 요소에 각각 다르게 작용하기 때문이다. 또한 부분적으로는 규모식의 부적확 함과 진폭과 지속시간의 reading 에

다른 오차와 지진요소에 포함된 오차 등이 불일치를 초래한다.

본 연구에 사용된 자료와 지속규모식의 결정 방법에 있어서 몇 가지 제한 사항과 이에 대한 보완책은 다음과 같다. 첫째, 관측 자료에 의하면, 진폭과는 달리 동일한 규모-진앙거리의 조건하에서도 지속시간은 변화의 폭이 심하여 규모에 해당하는 지속규모의 값이 1 규모 단위 이상의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 지속시간의 **reading error**, 지진계의 감응도 차이 및 관측소 지반의 물성 차이 등에 의한 현상으로 경험식(지속규모식)에 감응도 및 관측소 수정 항을 추가하여 각 관측소에 맞는 상수를 결정하여 적용함으로써 해결할 수 있다(예, Eaton et. al., 1992).

둘째, 본 연구에서 지속규모식을 결정하기 위해 지속시간-진앙거리 기록을 리히터 규모가 아닌 Tsuboi 규모에 **scaling** 하였다. Tsuboi 규모식이 지진동의 변위 기록(수평성분)을 사용하여 규모를 결정하도록 고안되었고 또한 기상청 지진망의 특성에 맞는 규모식이 아니라는 점이다. 따라서 이 문제의 해결을 위해서는 기상청의 지진기록을 **standard Wood-Anderson** 기록으로 변환하여 이 W-A 진폭과 진앙거리 자료를 사용하여 규모식을 구해야 한다. 다시 말해서 디지털 기록의 경우 관측에 사용한 지진계의 **response function(magnification curve)**을 **deconvolve** 하고 대신 W-A 지진계의 **response function** 을 **convolve** 하여 얻어진 **seismogram** 의 진폭과 진앙거리 데이터를 사용하여 감쇠함수(-A₀), **station correction**, **component correction**(수평→수직 성분) 등의 항을 경험식에 포함시켜 각 항의 상수를 역산으로 구해야 한다. 그러나 기상청과 같이 아날로그 기록인 경우, **entire seismogram** 을 **deconvolution-convolution** 하지않고 최대 진폭을 갖는 **window** 의 **predominant frequency**(typically 2-5Hz)에 대한 배율만을 적용하여 W-A 진폭으로 환산한 자료를 위의 과정과 같이 역산방법으로 리히터 규모식을 구할 수 있다.

마지막으로, 본 연구의 수행하는데 있어서 자료(진폭, 진앙거리, 지속시간)의 제한성을 들 수 있다. 지속시간-진앙거리 자료를 진폭규모에 **scaling** 하는데 있어서 각 관측소의 진폭과 지속시간이 동시에 필요하나 이는 현재의 지진망 실정(12 관측소)으로는 해결할 수 없는 과제이다(특히 규모 3.5 이상의 지진인 경우). 그러나 더 정확한 진앙거리-진폭-지속시간 자료의 확보를 위해서 250+ 지진을 **relocation** 하고 진폭과 지속시간을 다시 읽어서 보다 정확하고 신뢰도 높은 자료를 확보함으로써 부분적인 해결이 가능하다.

이와 같이 본 연구에서 수행하지 못한 제한사항을 극복하고 기상청의 관측 환경에 적합한 규모식의 개발로 1979 - 현재까지 기상청의 지진망으로 관측한 지진(250+)은 물론 1963 - 1978 기간 동안 WWSSN 으로 관측한 한반도의 지진을 포함하여 정확한 지진요소를 산출함으로써 한반도와 주변지역의 최근 **seismicity** 와 **tectonic process** 를 이해하는데 기여하도록 한다.

감사의 글

본 논문의 저자 중 S.K.P.는 한양대학교 지진연구소의 김소구 교수와 이송규 박사에게 감사를 표하고자 한다. 특히 김소구 교수의 **Lgcoda** 의 **origin** 및 **theoretical and observational phenomena** 에 관한 토의, 조언, 비판은 많은 도움이 되었다.

참고문헌

김상조 (1983). 지진업무 지침서, 중앙기상대.

김소구, 이승규 (1994). 한국 지진의 지속규모 (Duration Magnitude) 결정에 관한 연구, 한국지진공학 회지, Vol. 31, p109 – 117.

Eaton, J.P. (1992). Determination of amplitude and duration magnitudes and site residuals from short-period seismographs in norther California, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 82, 533 – 579.

Hirshhorn, B., A. Lindh, and R. Allen (1987). Real time signal duration magnitudes from low-gain short period seismometers, U.S. Geol. Surv., Open-File Rep. 87-630.

Lee, W.H.K., R. Bennet, and K. Meagher (1972). A method of estimating magnitude of local earthquakes from signal duration, U.S. Geol. Surv., Open-File Rep. 28pp.

Lee, W.H.K. and S. W. Stewart (1981). Principles and Application of Microearthquake Networks, Academic Press.

Michaelson, C.A. (1990). Coda duration magnitudes in central California: an empirical approach, Bull. Seism. Soc. Am., 80, 1190 – 1204.

Tsumura, K. (1967). Determination of Earthquake magnitude from duration of oscillation, Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ. 15, 7 – 18.

Table 1. List of selected events and observed parameters used in the determination of duration magnitude equation. See text for explanation of entries in the columns.

Event	Lat	Lon	Sta	Δ (km)	τ (sec)	A_z	M_D	M_L	M_D^a	M_L^a	$d\tau/\delta\Delta$	$\log\tau_o$
98-01-18	35.6	129.9	SEO	340.31	270	7.75	3.95	3.66	3.83	3.81	-0.0004	2.5382
			PUS	96.29	310		3.77					
			KAL	255.13	270		3.85					
			WUL	159.74	280	19.90	3.76	3.59				
			DAJ	243.05	320	22.75	3.98	3.85				
			CHU	345.29		14.25		3.96				
			SUS	389.49	240	7.50	3.91	3.97				
			CHL	364.87	220		3.80					
			ULL	227.61	210		3.59					
93-03-28	33.1	123.8	SEO	574.19	360	18.40	4.50	4.36	4.41	4.34	-0.0007	2.9030
			PUS	530.52	330	13.65	4.37	4.17				
			KWA	366.22	420	27.50	4.37	4.20				
			DAJ	488.34	420	30.60	4.53	4.46				
			SUS	572.31	250	18.40	4.17	4.36				
			DAE	538.95	380	28.60	4.50	4.50				
96-12-13	37.2	128.8	SEO	165.97	480		4.24		4.35	4.50	-0.0005	2.8046
			PUS	234.42	500		4.37					
			KWA	283.03	500		4.43					
			JEJ	496.76	340	35.00	4.35	4.50				
97-01-15	38.3	128.7	SEO	171.51	160	15.50	3.28	3.38	3.32	3.20	-0.0003	2.2458
			PUS	357.02	150	6.15	3.46	3.53				
			KWA	383.24	135	4.60	3.40	3.45				
			KAL	63.61	180	21.00	3.25	2.76				
			SUS	204.33	130	4.90	3.14	3.01				
			DAE	268.83	160	4.25	3.40	3.07				
96-11-17	39.0	127.6	SEO	168.29		14.15		3.32	3.88	3.65	-0.0004	2.5503
			PUS	451.85		10.85		3.95				
			KWA	430.28	230	6.05	3.92	3.66				
			KAL	179.31	275		3.77					
			WUL	275.01	255	23.10	3.82	3.90				
			DAJ	293.21	290	12.10	3.96	3.67				
			CHU	122.85	360		3.94					
			SUS	168.94	280	14.15	3.77	3.33				
			DAE	357.99	275	10.20	3.99	3.75				
97-05-22	36.0	126.8	KAL	269.69	140	11.00	3.29	3.57	3.46	3.52	-0.0007	2.4193
			CHU	226.93	260	21.20	3.78	3.72				
			SUS	198.68	180	14.00	3.42	3.44				
			CHP	110.46	200		3.40					
			JEJ	307.58	150	3.45	3.39	3.16				
			CHL	243.40	180	18.20	3.48	3.71				
97-08-05	37.2	128.7	SEO	157.42	65	2.65	2.47	2.54	2.72	2.69	-0.0009	2.0695
			PUS	235.39	90	2.15	2.86	2.76				
			KWA	277.70	60	1.20	2.55	2.63				
			KAL	63.65	90	9.60	2.64	2.42				
			WUL	68.01	120	12.90	2.90	2.60				
			DAJ	150.13	100	8.00	2.84	2.99				
			CHU	115.42	100	6.15	2.80	2.68				
			SUS	206.84	85	0.85	2.77	2.26				
			CHP	125.85	90	10.35	2.72	2.97				
96-04-14	35.9	127.9	SEO	202.69	125	6.5	3.10	3.12	3.33	3.36	-0.0006	2.3282
			PUS	135.75	190	26.70	3.39	3.44				
			KWA	121.81	180	27.00	3.33	3.36				
			SUS	243.61	160	7.90	3.37	3.35				
			CHU	222.86	180	13.90	3.45	3.53				
95-06-24	36.8	129.5	SEO	239.03	80	4.60	2.76	3.10	2.62	2.85	-0.0010	2.0654
			PUS	193.63	65	3.20	2.52	2.78				
			DAJ	196.01	60	2.85	2.45	2.74				
			SUS	289.03	60	0.90	2.56	2.53				
			DAE	129.03	100	14.25	2.82	3.13				
			CHL	244.18	70	2.50	2.64	2.85				

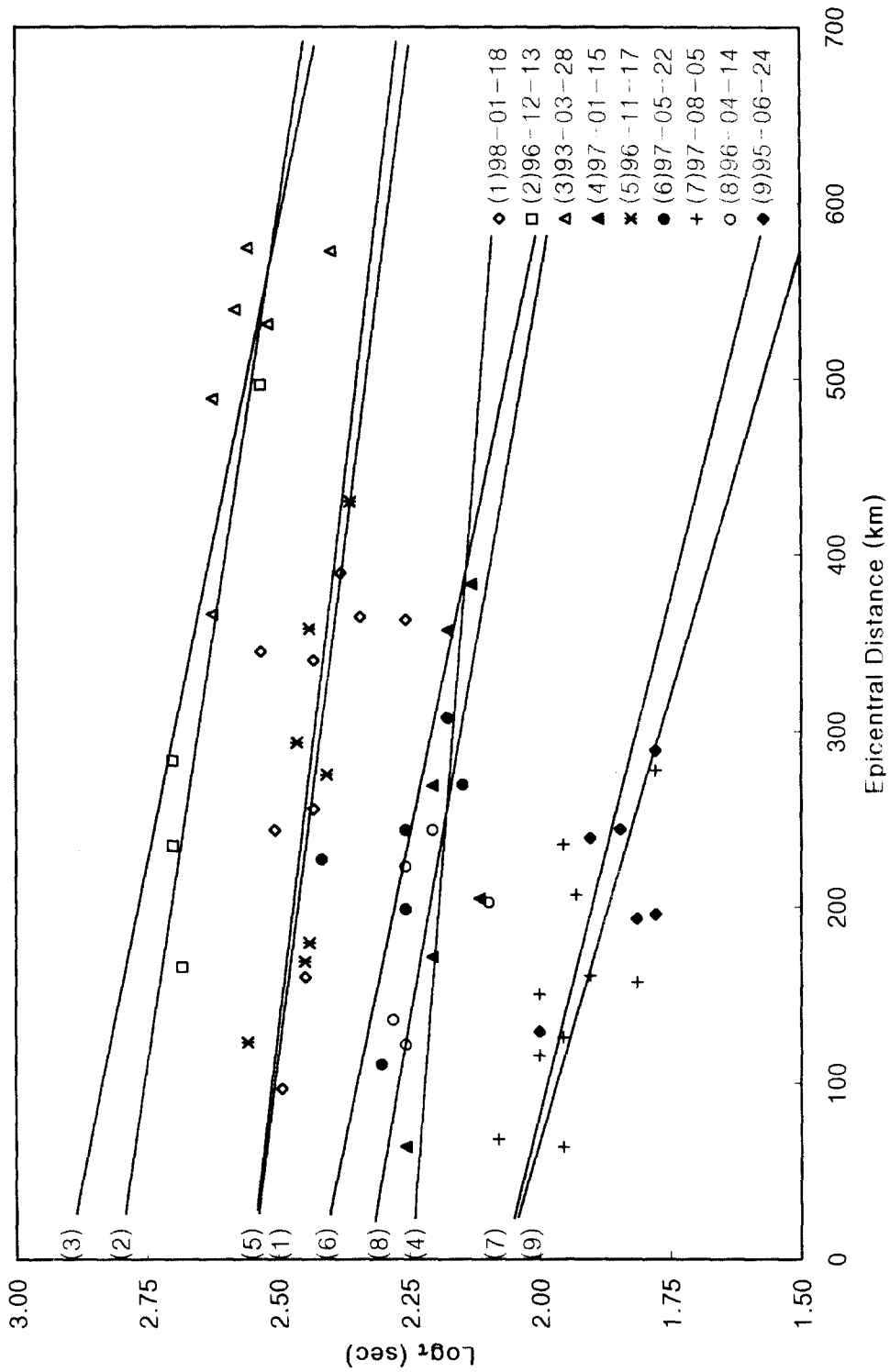


Fig. 1. Variation of total signal duration (τ) as a function of epicentral distance (Δ). A set of least squares fit lines represent the trends of duration for selected events. Shaded region is to show a mean fall-off rate (-0.00061) of total duration over all events.

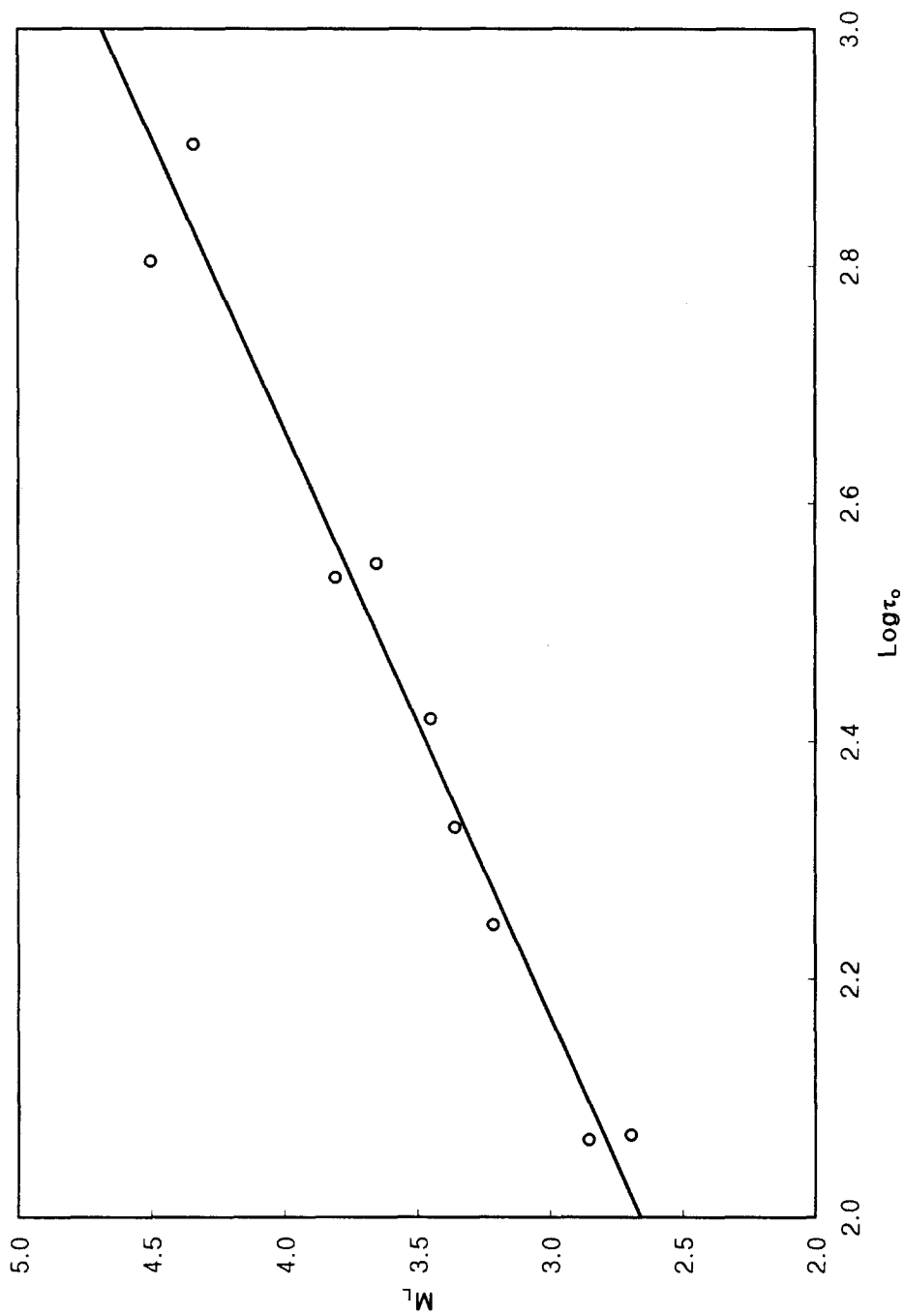


Fig. 2. Local magnitude as a function of total signal duration observed at epicenter. The solid line is the regressed fit to the data of nine events.

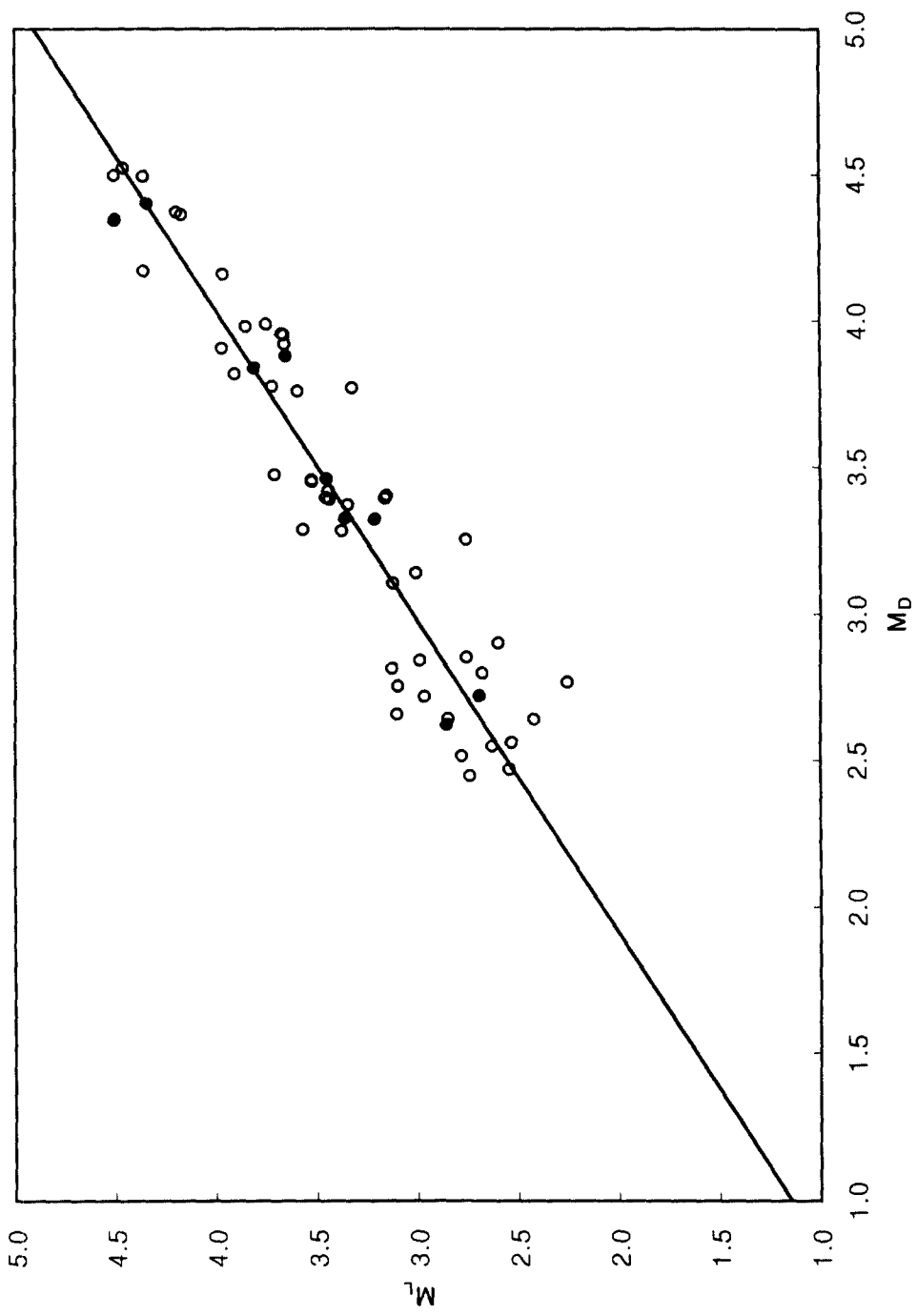


Fig. 3. Local magnitude—Duration magnitude relation represented by the regressed line fit to average values for 9 events (solid circles).

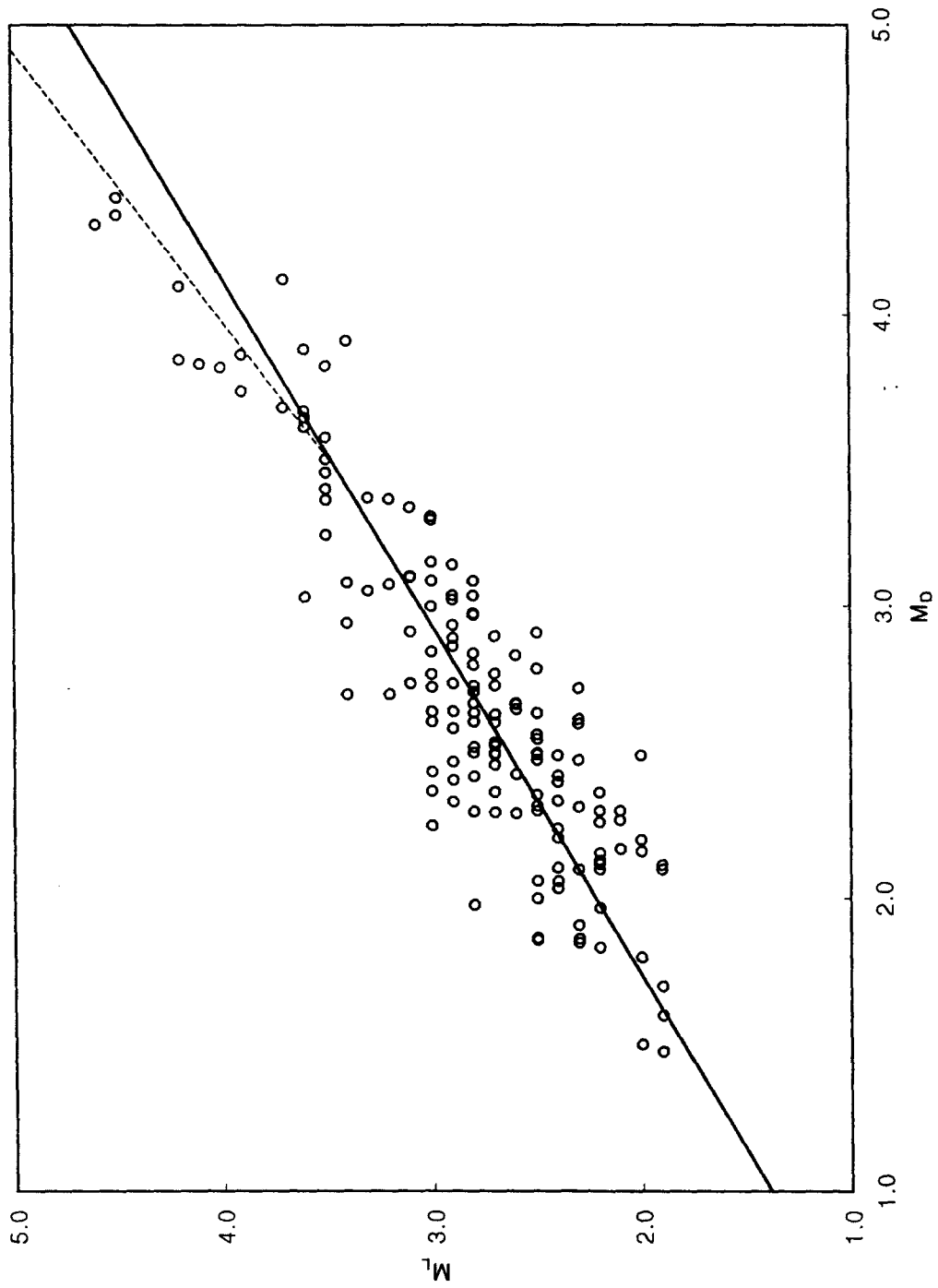


Fig. 4. Local magnitude—Duration magnitude relation. It is apparent that a straight line is not sufficient to represent the relation over entire magnitude ranges but rather a broken line, its one end having a steeper slope (dashed line) for M_D values greater than about 3.5, better accounts the relation.

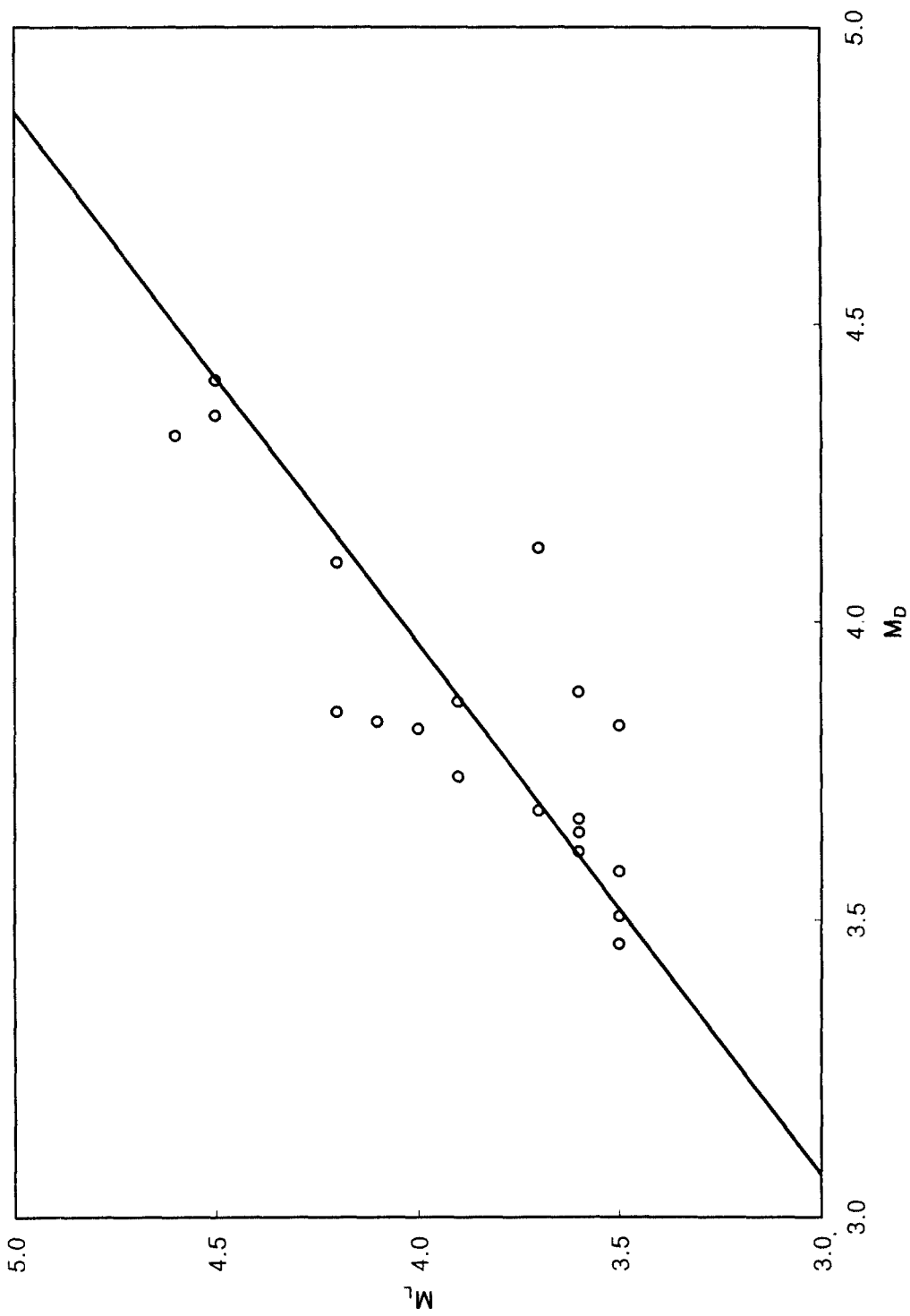


Fig. 5. Local magnitude–Duration magnitude relation for the events with M_L greater than or equal to 3.5.