

한반도 전체를 단일 좌표구역으로 하는 통합된 직각좌표체제

이 규 성

임업연구원

(1992년 11월 5일 받음 ; 1992년 11월 15일 수리)

A Cartesian Coordinate System to Cover the Korean Peninsula as a Single Coordinate Zone

Kyu-Sung Lee

Forestry Research Institute

(Received November 5, 1992 ; Accepted November 15, 1992)

Abstract

Although the Transverse Mercator(TM) coordinate is used on standard topographic maps of Korea as a supplement to regular latitude-longitude coordinate, the use of this TM coordinate system is rather limited to a single coordinate zone that spans only two degrees of longitude. With growing applications of a variety of digital geographic data, such as satellite remote sensor data, a Cartesian or rectangular coordinate system is more effective to deal with such data type than angular coordinate system. An unified rectangular coordinate system based on the Transverse Mercator projection is designed to cover the whole area of the Korean Peninsula as a single coordinate zone. Considering the width of the peninsula and the distribution of scale error, the origin of the coordinate is determined to $127^{\circ}30'$ east and 38° north. Coordinate conversion procedure is discussed along with the corresponding scale error term.

요 약

현재 한국표준지형도에서 사용되고 있는 횡단메카토르좌표(TM) 체제는 한반도 전체

를 단일의 직각좌표 체제로 표시하는데 제한이 있다. 인공위성 원격탐사 및 지리정보 시스템의 광범위한 응용과 함께, 직각좌표체제가 종래의 경위도좌표체제보다 이용에 있어서 보다 편리하고 효과적이라 할 수 있다. 본 논문에서는 한반도 전체를 하나의 좌표구역으로 포함하는 통합된 직각좌표체제를 제안함으로써 표준직각좌표체제 설정의 기반을 도모하고자 하였다. 표준지형도 제작에 사용된 횡단메카토르 투영법을 그대로 유지하고, 기존의 TM좌표 및 UTM좌표를 약간 변형하여 기준원점이 동경 127° 30'와 북위 38°가 되는 직각좌표체제를 시도하였다. 경위도좌표에서 통합된 직각좌표로의 변환과정을 축척오차의 분포 문제와 함께 기술하였다.

1. 지구투영법과 좌표체제

지구는 球의 형상이므로, 그 球面을 2차원적 평면 지도로서 표시하는 데는 여러 가지 한계가 있다. 지구표면을 지도라는 매체로 나타내기 위하여 과거 100~200년 동안 여러 종류의 지구투영법이 개발되었다. 각각의 투영법은 지도상에 표시된 지표물이 실제와 같은 형상을 유지하는 共形性(conformality), 그리고 지도상의 모든 부분이 일관된 축적(equiscale), 면적(equidistance), 방향(equidirection) 등을 유지하고자 하는 특성을 가지고 있으며 그 특성에 따라 이용이 분화되어있다. 그러나 모든 투영법은 어느 정도의 오차와 歪曲(error and distortion)이 있기 마련이고, 위의 모든 조건을 전부 만족시켜 줄 수는 없다.

지구상의 위치 표시는 經緯度를 사용한 角좌표체제가 가장 일반적인 방법이었다. 즉, 지구 중심으로부터 적도면을 0度로 하여 남북방향으로 각각 90度씩 나눈 緯度와 영국 왕립천문대를 통과하는 子午線을 기준으로 하여 동서방향으로 각각 180度씩 나눈 經度로 지구표면상 일정지점의 위치를 나타내 왔다. 그러나 근래에 들어 종이를 매체로 한 지도형태에서 벗어나, 일반 지도에 나타나는 지리적 요소들과 원격탐사 영상자료 등 모든 형태의 지리정보를 컴퓨터에서 처리 가능한 디지털자료로 이용이 증가하는 경향과 함께, 종래의 경위도좌표체제보다는 표시가 용이하고 거리와 면적의 산정 등에 있어서 일관적으로 사용될 수 있는 직각좌표(Cartesian or rectangular coordinate)가 기본좌표체제로서 많이 이용되고 있는 실정이다.

원격탐사 및 지리정보시스템의 응용에 관심이 높아지고 있는 한국의 현 상황을 고려할 때, 한반도 전체를 하나의 좌표구역으로 하는 기본적 직각좌표의 설정이 시급하고 이에 대한 올바른 이해가 요구된다. 본 논문의 목적은 이러한 요구에 부합하여, 현재 사용되는 직각좌표의 문제점을 살펴보고 이에 代案을 제시함으로써 표준설정 기반을 마련해 보고자 하였다. 또한, 기존의 경위도좌표에서 직각좌표로 변환하는 절차를 표준지형도 제작에 사용된 횡단메카토르 투영법에 기준하여 검토해 봄으로써, 실무자의 입장에서 직각좌표의 이용에 따른 이론적 이해를 도모하고자 하였다.

2. 횡단메카토르(Transverse Mercator) 투영법

圓筒투영법의 일종인 횡단메카토르 투영법은 비교적 폭이 좁고 남북으로 길게 뻗은 지역에 적합한 투영법으로써, 한국을 비롯하여 세계 여러 지역에서 널리 이용되어 왔다. 그림 1에서 보는 바와 같이 횡단메카토르 투영법은 지구 중심에서 지구표면으로 빛을 투사한다고 가정했을 때 지구를 횡으로 감싸고 있는 원통에 투영되는 지구표면을 그린 원리이다. 횡으로 둘러 있는 원통은 지구 표면상 단 한줄의 경도선에 닿아 있고, 이 선이 축척에 오차가 없는 基準經度(central meridian)가 된다. 기준경도에서 좌우로 멀어질수록 축척의 오차는 상대적으로 높아지기 때문에 일반적으로 기준경도에서 $\pm 3 \sim 4^\circ$ 범위 내에서 사용되고 있다. 또한, 기준경도로부터 좌우로 멀어질수록 축척이 實值보다 계속 줄어드는 한쪽 방향으로만 오차가 증가한다. 이러한 문제를 보정하기 위하여 기준경도상의 축척계수(scale factor)를 1보다 약간 적은 값으로 준다면 오차가 전체 지역 내에 \pm 양 방향으로 비교적 고르게 분포하게 되므로 전체적인 평균오차가 낮아지게 된다.

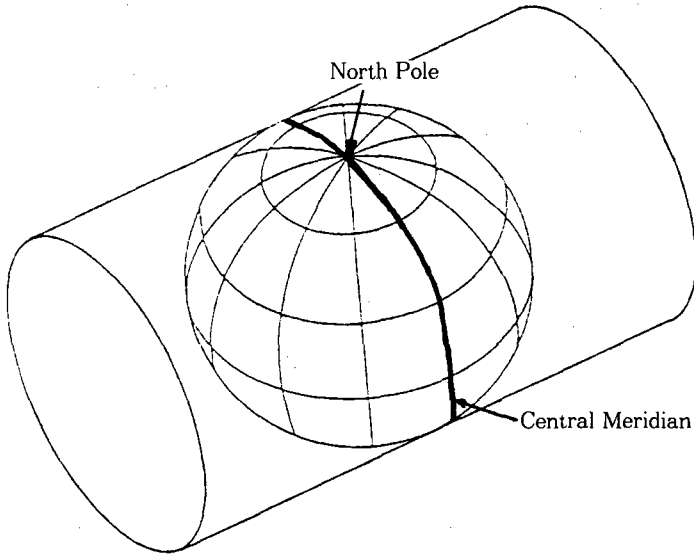


Fig. 1. Transverse cylindrical(Mercator) projection used for the standard topographic maps of Korea.

2-1. 경위도좌표에서 직각좌표로의 변환

角좌표로 표시된 지구표면상 위치를 직각좌표로 변환하기 위해서는 먼저 지구의 형상에 대한 이해가 필요하다. 그간 많은 측정에 의하여 지구는 완전한 球形이 아니라, 동서방향의 지름이 남북방향의 지름보다 약간 긴 회전타원체임이 밝혀졌다. 지구회전타원체의 형상과 크기를 수식으로 표현하는 데에는 난점이 있고, 따라서 그 종류 또한 다양하다. 여러 가지 지구회전타원체 모형 중 한국에서는 Bessel 지구회전타원형을 공식적으로 채택하고 있다(姜과 金, 1979). 표 1은 Bessel 지구회전타원체의 특성을 보여준다.

Table 1. Bessel's Earth Ellipsoid

Equatorial radius(a)	a = 6,377,397.2m
Polar radius(b)	b = 6,356,079.0m
편평도(flattening)	f = 1 - (b/a) = 0.003342774
偏心率(eccentricity)	e ² = 2f - f ² = 0.006674375

직각좌표로의 변환 절차는 결국 지구회전타원체를 얼마만큼 정확하게 수식화할 수 있는가로 시작되지만, 그에 관한 상세한 내용은 본문의 주목적이 아니기에 생략하기로 한다. 횡단메카토르 투영법에서 경위도좌표를 직각좌표로 변환하는 공식은 미국지리원(United States Geological Survey)에서 발행된 지도투영법에 관한 책자를 참고하였다(Snyder, 1984). 직각좌표 $x \cdot y$ 를 경도(λ)와 위도(ϕ)로부터 환산하는 공식은 다음과 같다.

$$x = k_0 N [A + (1 - T + C)A^3/6 + (5 - 18T + T^2 + 72C - 58e'^2)A^5/120] \dots\dots(1)$$

$$y = k_0 \{M - M_0 + N \tan \phi [A^2/2 + (5 - T + 9C + 4C^2)A^4/24] + (61 - 58T + T^2 + 600C - 330e'^2)A^6/720\} \dots\dots(2)$$

여기서 k_0 는 기준경도상의 축척계수를 나타내고,

$$e'^2 = e^2 / (1 - e^2) \dots\dots(3)$$

$$N = a / (1 - e^2 \sin^2 \phi)^{0.5} \dots\dots(4)$$

$$T = \tan^2 \phi \dots\dots(5)$$

$$C = e'^2 \cos^2 \phi \dots\dots\dots(6)$$

$$A = \cos \phi (\lambda - \lambda_0), \quad \lambda_0 = \text{기준경도} \dots\dots\dots(7)$$

그리고 M과 M₀는 적도에서부터 위도 φ까지와 기준위도 φ₀까지의 기준경도상 거리를 말하며, 표 1의 Bessel 지구회전타원체 규격을 대입하면 다음과 같이 간략화된 식으로 얻을 수 있다.

$$M = 111120.6203\phi - 15988.645 \sin 2\phi + 16.73 \sin 4\phi - 0.02 \sin 6\phi \dots\dots\dots(8)$$

지구 반지름이 미터단위로 표시되었기에 직각좌표 x·y의 단위 역시 미터가 된다. 기준경도 좌측의 x값이 음수로 표현되는 것을 피하기 위하여 일정치(일반적으로 500000)를 더해 준다. 또한, 직각좌표 x·y뿐만 아니라 도면상 그 위치에서의 축척오차를 알기 위하여 축척계수(k_{xy})를 다음 식으로 구할 수 있다.

$$k_{xy} = k_0 [1 + (1 + e'^2 \cos^2 \phi)x^2 / (2k_0^2 N^2)] \dots\dots\dots(9)$$

2-2. 공통횡단메카토르(Universal Transverse Mercator) 좌표

미국 육군에서 개발되어 널리 사용되고 있는 공통횡단메카토르(UTM) 좌표는 남위 -84°에서 북위 84° 사이의 세계 전 지역을 경도 6° 간격으로 60개의 좌표구역으로 분할하여 각 좌표구역의 중심선을 기준경도로 하여 횡단메카토르 투영법을 적용한 직각좌표체계이다. 한반도의 경우 UTM Zone 52에 해당하는데, 동경 129°를 기준경도로 하여 좌우로 3°씩 126°에서 132°까지의 지역을 포함한다. 한반도의 남반부는 서해의 일부 도서지방을 제외하고는 이 UTM 좌표구역에 거의 포함되나, 북반부의 평안도 및 황해도 서쪽 지역은 이 구역에서 벗어나게 된다.

한반도 전체를 UTM Zone 52에 포함시켜 하나의 UTM 좌표체계로 사용할 경우 원래 UTM Zone 51에 포함되는 평안도 및 황해도 서쪽지역은 축척상 오차가 커지게 된다. 그림 2는 동경 129°를 기준으로 하여 UTM좌표체계로 만들었을 경우 축척오차의 분포를 보여주고 있다. 즉, 일반적으로 通用되는 기준경도상의 축척계수 k₀를 0.9996으로 하였을 때 한반도의 가장 서쪽에 해당하는 신의주 지역은 축척계수는 1.0017이 된다(축척오차 = 0.17%). 일반적인 UTM 좌표에서 오차의 범위가 ±0.03~0.05%인 점을 감안하면 0.17%의 오차는 허용범위를 초과한다 할 수 있으므로, UTM좌표체계를 한반도 전체에 그대로 적용하는 것에는 무리가 있다.

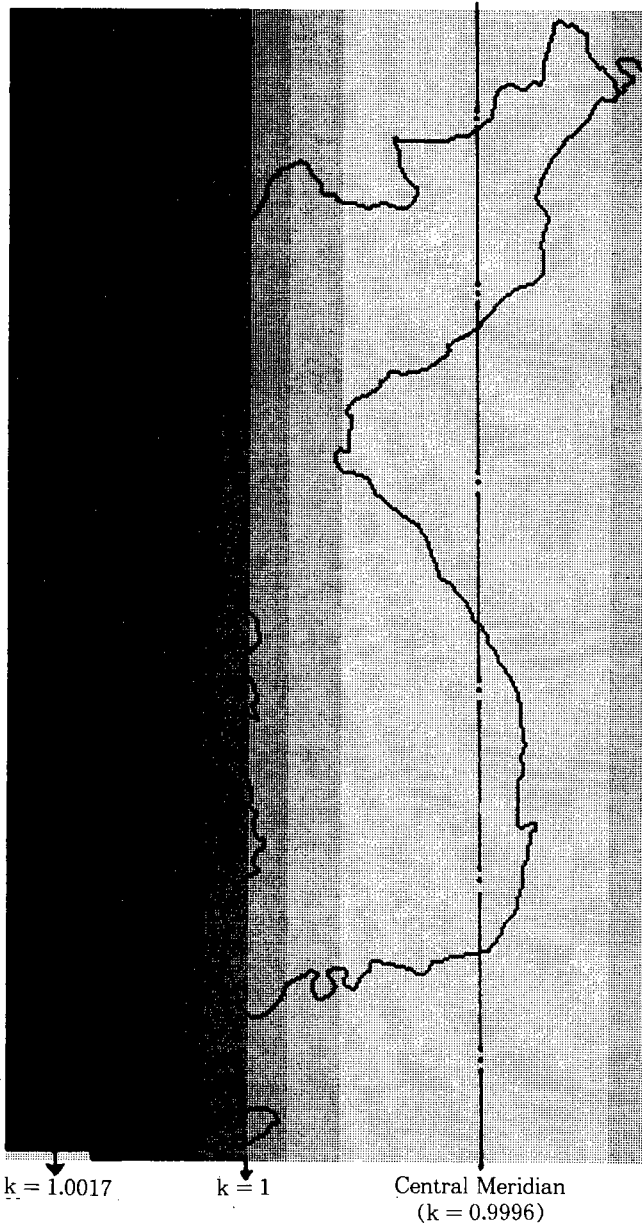


Fig. 2. Scale error distribution for the UTM projection with a central meridian at the 129° east. The grey level is inversely proportional to the scale error. At Shineuju, the scale error is about +0.17% that is much higher than a normal range of scale error $\pm 0.3\sim 0.5\%$.

3. 표준지형도상의 횡단메카토르(TM)좌표

국립지리원 발행 표준지형도(1:50000, 1:25000, 1:5000 축척)상에는 경위도좌표와 함께 직각좌표인 횡단메카토르(TM) 좌표가 표시되어 있다. 이 좌표체제는 한반도를 세 좌표구역으로 나누어 동경 125°, 127°, 129°를 각 좌표구역의 기준경도로 하고 북위 38°를 기준위도로 하여 횡단메카토르 투영법을 적용하여 만들어졌다. UTM 좌표구역은 경도 6°의 폭으로 나눈데 비하여 표준지형도상의 TM 좌표구역은 기준경도를 중심으로 좌우 1°씩 2°의 폭으로 구획되었기 때문에 축척오차가 상대적으로 낮은 장점이 있다. 그러나 좌표구역을 경도 2°씩 나누어 상대적 축척오차를 낮게 유지한 반면, 한반도 전체를 단일 좌표구역으로 포함하지 않기 때문에 대상지역이 한반도 전체이거나 둘 이상의 TM 좌표구역을 포함할 경우에는 단일의 좌표체계로서 표시가 어려운 실정이다.

4. 통합된 TM 좌표체제

위에서 언급된 UTM 좌표체제의 한반도 적용에 있어서 문제점과 현재 한국표준지형도에서 사용되고 있는 TM 좌표체제의 한계성을 감안하여, 한반도 전체를 하나의 직각좌표체제로 나타낼 수 있는 변형된 TM 좌표체제를 다음과 같이 제한하고자 한다.

4-1. 기준경도 및 기준위도의 설정

우선 경도상 한반도의 폭이 대략 6°인 점을 감안하여 그 중심을 가르는 동경 127°30'를 기준경도로 설정하였고, UTM 좌표체제에서 적도를 기준위도로 하는 방식과는 달리 한국의 TM 좌표체제와 같이 북위 38°를 기준위도로 정하였다. 동경 127°30'를 기준경도로 설정함으로써 $\pm 3^\circ$ 범위 내에서 한반도 전지역을 거의 포함시킬 수 있고, 따라서 UTM 좌표체제에서 얻어지는 축척상 오차범위를 유지할 수 있다. 기준위도의 설정에 있어서는, UTM 좌표체제와 같이 적도를 기준위도로 하였을 경우 적도에서 한반도까지의 거리를 나타내는 y좌표가 x좌표보다 한 자리수 높게 표시되기 때문에 이를 피하고, 표준지형도상의 기존 TM좌표체제의 y좌표와 근사한 값을 유지하도록 북위 38°를 사용하였다. 기준원점(127°30', 38°)의 좌측과 아래 지역의 좌표가 음수로 표시되는 것을 피하기 위하여 구해진 x·y 좌표에 각각 500000, 600000을 더하였다. 즉, 기준점의 좌표가 (0, 0)이 아닌 (500000, 600000)이 된다. 표준지형도상의 TM좌표가 기준원점의 y좌표를 500000에서 시작한 반면, 제주도 지역을 함께 양수의

좌표로 나타내기 위하여 본 좌표체계는 기준원점의 y좌표를 600000로 설정하였다.

4-2. 축척오차의 분포

구형인 지구표면을 평면으로 펼쳐 지도를 만들었을 경우 어떠한 투영법을 적용했어도 어느 정도 왜곡과 오차는 있기 마련이다. 지도 제작시 평균오차를 감소시키는 원칙과 함께 오차를 지도 전체에 고르게 분포시키는 문제 또한 중요하다. 횡단메카토르 투영법에서는 기준경도상의 축척계수(k_0)를 實值인 1보다 약간 적게 줌으로써 전체적인 오차를 줄이고 오차를 고르게 분포시킬 수 있다. 즉 k_0 를 0.9996으로 주었을 경우 기준경도에 평행하여 좌우로 약 180 km 떨어진 지점에 축척오차가 없는 $k = 1$ 인 실축척선(true scale line)이 생기는데, 이 두 선의 바깥쪽에 있는 지역은 축척계수가 1보다 커지게 되고 두 선의 안쪽지역은 축척계수가 1보다 작게 된다.

그림 3은 동경 $127^{\circ}30'$ 의 기준경도상 축척계수를 0.9997로 하여 경위도간격을 15분 단위의 격자로 구분하여 통합된 TM좌표로 환산했을 경우, 식 (9)에 의하여 계산된 각 지점의 축척오차의 분포를 보여준다. 여기에서 실축척선의 위치와 축척오차의 분포를 볼 수 있는데, 축척오차를 $(k-1) * 100$ 으로 나타낼 때 두 개의 실축척선 안쪽인 A구역은 (-) 오차지역이고 실축척선 바깥쪽인 B구역은 (+) 오차지역이 된다. k_0 가 0.9997인 경우 기준경도에서 실축척선까지의 거리는 약 160 km가 되고, 축척계수를 0.9997보다 크게 하여 1에 근접시킬수록 (-) 방향의 오차를 갖는 두 실축척선까지의 거리는 좁아지지만, 실축척선 바깥방향으로 벗어날수록 오차는 급속히 높아진다. 표 2는 기준경도상의 축척계수를 달리했을 경우 통합된 TM좌표에 나타나는 한반도 좌우 양 지점의 축척오차를 보여준다. 한반도 內의 전반적인 축척오차의 분포와 좌우 양 지점에서의 오차를 참조하여 기준경도상 축척계수는 0.9997로 설정하였다.

Table 2. Scale error at the extreme left-right points of the Korean Peninsula under the different scale factors at the central meridian of $127^{\circ}30'$ east

Extreme Points	Scale Factor(k_0) at the Central Meridian							
	Long.	Lat.	0.9995	0.9996	0.9997	0.9998	0.9999	1.0000
신의주	$124^{\circ}13'$	$39^{\circ}51'$	0.047	0.057	0.067	0.077	0.087	0.097
울릉도	$130^{\circ}54'$	$37^{\circ}31'$	0.062	0.072	0.082	0.092	0.102	0.112

unit : (+)%

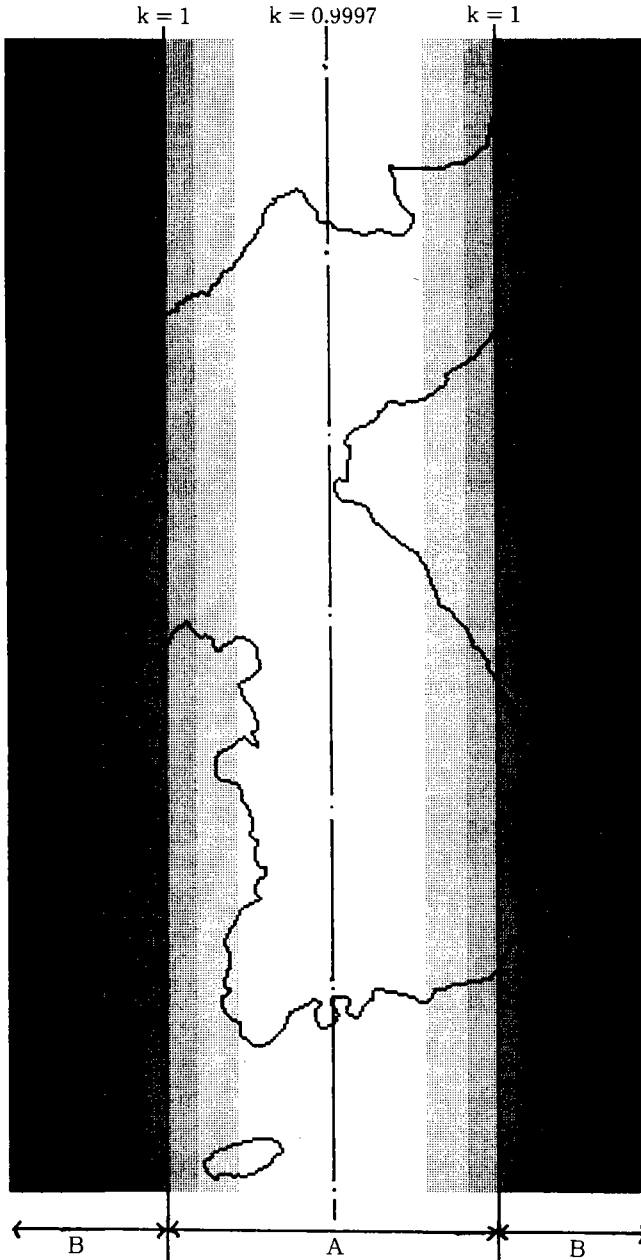


Fig. 3. Scale error distribution for the modified TM coordinate system to cover the Korean Peninsula as a single coordinate zone. The central meridian is $127^{\circ} 30'$ east with a scale factor of 0.9997 (A : - scale error zone, B : + scale error zone).

위와 같이 설정된 기준경위도 및 축척계수를 이용하여 남한지역 내의 경위도를 30분 간격으로 나누어 통합된 TM좌표로 환산하여 보았고, 각 지점마다 축척계수 또한 계산하였다(표 3). 남한 지역은 동경 127° 30'의 기준경도로부터 약 160 km 떨어진 두 실축척선 안에 대부분 포함되므로 축척계수가 1보다 작은 값을 보여준다. 이 좌표환산 및 축척오차의 계산은 마이크로 컴퓨터에서 C-언어로 작성된 간단한 프로그램을 이용하여 실행되었다.

Table 3. The modified Transverse Mercator Coordinates(TM-x & TM-y) and scale factor(k_{xy}) for the Southern Part of Korea(every 30 minute interval)

Long. \ Lat.	39°			38° 30'		
	TM-x	TM-y	k_{xy}	TM-x	TM-y	k_{xy}
126°	370111.8	712030.9	0.9999078	369202.4	656544.0	0.9999107
126° 30'	413409.0	711436.3	0.9997923	412802.9	655951.7	0.9997936
127°	456704.9	711079.6	0.9997231	456401.8	655596.4	0.9997234
127° 30'	500000.0	710960.7	0.9997000	500000.0	655478.0	0.9997000
128°	543295.1	711079.6	0.9997231	543598.2	655596.4	0.9997234
128° 30'	586591.0	711436.3	0.9997923	587197.1	655951.7	0.9997936
129°	629888.2	712030.9	0.9999078	630797.6	656544.0	0.9999107
129° 30'	673187.4	712863.4	1.0000694	674400.3	657373.3	1.0000746
		38°			37° 30'	
126°	368302.9	601061.5	0.9999136	367413.5	545583.4	0.9999166
126° 30'	412203.3	600471.7	0.9997949	411610.5	544996.3	0.9997962
127°	456102.1	600117.9	0.9997237	455805.7	544644.1	0.9997241
127° 30'	500000.0	600000.0	0.9997000	500000.0	544526.7	0.9997000
128°	543897.9	600117.9	0.9997237	544194.3	544644.1	0.9997241
128° 30'	587796.7	600471.7	0.9997949	588389.5	544996.3	0.9997962
129°	631697.1	601061.5	0.9999136	632586.5	545583.4	0.9999166
129° 30'	675599.9	601887.3	1.0000798	676786.1	546405.5	1.0000850
		37°			36° 30'	
126°	366534.3	490109.7	0.9999195	365665.2	434640.3	0.9999224
126° 30'	411024.4	489525.4	0.9997975	410445.1	434059.1	0.9997988
127°	455512.7	489174.9	0.9997244	455223.1	433710.4	0.0007247
127° 30'	500000.0	489058.1	0.9997000	500000.0	433594.2	0.9997000
128°	544487.3	489174.9	0.9997244	544776.9	433710.4	0.9997247
128° 30'	588975.6	489525.4	0.9997975	589554.9	434059.1	0.9997988
129°	633465.7	490109.7	0.9999195	634334.8	434640.3	0.9999224
129° 30'	677958.7	490927.8	1.0000902	679117.8	435454.2	1.0000953

→

→ Table 3. Continued

Long. \ Lat.	36°			35° 30'		
	TM-x	TM-y	k _{xy}	TM-x	TM-y	k _{xy}
126°	364806.4	379175.3	0.9999252	363957.9	323714.5	0.999281
126° 30'	409872.7	378597.2	0.9998001	409307.1	323139.9	0.9998014
127°	454936.9	378250.5	0.9997250	454654.1	322795.2	0.9997253
127° 30'	500000.0	378134.9	0.0007000	500000.0	322680.3	0.9997000
128°	545063.1	378250.5	0.9997250	545345.9	322795.2	0.0007253
128° 30'	590127.3	378597.2	0.9998001	590692.9	323139.9	0.9998014
129°	635193.6	379175.3	0.9999252	636042.1	323714.5	0.0000281
129° 30'	680263.2	379984.6	1.0001004	681394.8	324519.2	1.0001055
	35°			34° 30'		
126°	363119.8	268258.0	0.9999309	362292.1	212805.0	0.9999338
126° 30'	408748.5	267687.0	0.9998026	408196.8	212238.5	0.9998039
127°	454374.9	267344.4	0.9997257	454099.0	211898.1	0.9997260
127° 30'	500000.0	267230.2	0.9997000	500000.0	211784.7	0.9997000
128°	545625.1	267344.4	0.9997257	545901.0	211898.1	0.9997260
128° 30'	591251.5	267687.0	0.9998026	591803.2	212238.5	0.9998039
129°	636880.2	268258.0	0.9999309	637707.9	212805.8	0.9999338
129° 30'	682512.6	269057.7	1.0001106	683616.4	213600.3	1.0001156
	34°			33° 30'		
126°	361474.9	157357.8	0.9999366	360668.3	101914.0	0.9999394
126° 30'	407652.2	156794.4	0.9998051	407114.5	101354.7	0.0008064
127°	453826.7	156456.4	0.9997263	453558.0	101019.1	0.9997266
127° 30'	500000.0	156343.7	0.9997000	500000.0	100907.2	0.9997000
128°	546173.3	156456.4	0.9997263	546442.0	101019.1	0.0007266
128° 30'	592347.8	156794.4	0.9998051	592885.5	101354.7	0.9998064
129°	638525.1	157357.8	0.9999366	639331.7	101914.0	0.9999394
129° 30'	684706.3	158146.8	1.0001206	685782.1	102697.3	1.0001256

5. 결론

보다 광범위한 지역을 대상으로 하는 인공위성 원격탐사의 응용이 확산되고 GIS를 바탕으로 한 디지털지리정보의 취급이 증대됨에 따라 종래의 경위도좌표체계보다는 직각좌표의 이용이 보다 효과적이라 할 수 있다. 이러한 요구에 부응하여 한반도 전체를 단일좌표구역으로 하는 직각좌표체제로 표시하고자, 표준지형도 작성에 이용된 횡단메카토르 투영법을 바탕으로 한 통합된 횡단메카토르(TM) 좌표체제를 다음과 같이 제안한다.

* 한반도의 폭을 감안하여 그 중심이 되는 동경 127° 30'를 기준경도(central meridian)로

북위 38°를 기준위도로 설정한다.

* 통합된 TM 좌표체제에서 축척오차의 분포를 고르게 하고 좌우 양 극점의 오차한계를 고려하여, 기준경도선의 축척계수를 0.9997로 하였다.

참고문헌

Snyder, J. P., 1984, Map Projections Used by the U. S. Geological Survey, *Geological Survey Bulletin 1532*, 2nd Ed., 313 pgs.

강신업·김진호, 1979, 增補 測量學, 향문사, 443 pgs.