

수치지도 좌표계 전환에 관한 연구

Development of Coordinate Transformation Tool for Existing Digital Map

윤홍식¹⁾ · 조재명²⁾ · 송동섭³⁾ · 김명호⁴⁾ · 조홍목⁵⁾

Yun, Hong Sic · Cho, Jae Myung · Song, Dong Soup · Kim, Myung Ho · Cho, Heyng Moug

¹⁾ 성균관대학교 토목환경공학과 교수(E-mail:yhs@geo.skku.ac.kr)

²⁾ 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정(E-mail:jmcho@geo.skku.ac.kr)

³⁾ 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정(E-mail:yddsong@geo.skku.ac.kr)

⁴⁾ 건설교통부 국토지리정보원 지리정보과 서기관

⁵⁾ 건설교통부 국토지리정보원 측지과 사무관

Abstract

This study deals with development of transformation tool for transformation of digital map coordinates systems using by the best fit transformation parameters which are determined between the local geodetic datum and geocentric datum (ITRF2000) in Korea and distortion modelling derived from collocation method. We used 107 control points as a common points. For analyzing the derived parameters, another 83 common points are tested. Finally, the best fit parameters are determined from Molodensky-Badekas model after considering the RMSE, maximum value, minimum values, and 95% confidence interval of residuals. after transformation of best fit parameters and distortion modelling, we could develop transformation tools with advanced accuracy. so it is possible to perform on transformation of digital map with scale 1:5,000. and we tested accuracy evaluation through analysis between transformation results and field results of GPS observation.

1. 서론

본 연구에서는 세계 측지기준계 채택에 따른 공간데이터의 획득, 유지, 관리 및 원활한 공급을 수행할 수 있도록 기존의 수치지도 등과 같은 지리정보를 효율적이고, 정확하게 변환하기 위한 통일되고, 표준적인 변환전략과 변환도구를 개발하기 위하여 측량성과의 계산, 최적 변환파라미터의 산정, 변환도구 제작, 변환성과의 정확도 평가 및 변환도구 사용지침을 작성, 다양한 지리정보 이용자들에게 변환성과를 제공함으로써 사회·경제적인 이익을 도모하고자 한다. 이를 수행하기 위하여 다양한 좌표변환 모델들을 검토하여 최적합한 변환 파라미터의 산출과 변환 파라미터에 의한 좌표변환 후에 발생하는 좌표의 차이(왜곡)를 왜곡모델링 (Distorsion modelling)을 수행하여 보정함으로써 변환좌표의 정확도를 향상시켜 1/5,000 수치지도의 변환할 수 있도록 변환도구를 개발하는 것이다.

2. 변환계수 모델의 비교와 분석

본 연구에서는 두 측지기준간의 좌표변환 파라미터를 계산하기 위하여 1996년부터 국립지리원에서 관측한 정밀1차측지망의 기준점 107점을 사용하였다. 107점을 공통점(Common Points)이라고 하며, Bessel 타원체에 기준한 신성과와 GRS80에 기준한 ITRF2000 성과를 가지고 있는 점들이다.

이들 107점의 공통점들을 이용하여 Bursa-Wolf모델, Molodensky-Badekas모델, Veis모델, Affine

(Wolfum)모델 및 Krakiwsky-Thomson모델에 의하여 두 측지기준간의 변환 파라미터를 계산하였다. 최적 변환 파라미터를 결정하기 위하여 107점을 제외하고, 국립지리원과 성균관대학교가 관측한 83점의 기준점들을 좌표변환을 수행하여 분석하였다. 83점의 데이터 중에서 변환 후의 차이와 GPS 데이터로부터 계산된 ITRF2000 좌표와의 상대적인 차이가 5m 이상 크게 발생하는 기준점들은 순차적으로 제거하는 방법에 의하여 최종적으로 77점의 데이터를 사용하여 모델별 통계적인 비교를 수행하였다.

표 1. 변환 모델별 통계 비교

구분	Bursa-Wolf			Molodensky-Badekas			Veis		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
Max Differ.(m)	1.972	3.001	2.960	1.972	3.001	2.960	1.972	3.001	2.960
Min Differ.(m)	-4.115	-2.161	-2.860	-4.115	-2.161	-2.860	-4.115	-2.161	-2.860
Average(m)	0.396	-0.782	-0.279	0.396	-0.782	-0.279	0.396	-0.782	-0.279
STD.(m)	0.783	0.815	0.918	0.783	0.815	0.918	0.783	0.815	0.918
RMSE(m)	0.879	1.133	0.960	0.879	1.133	0.960	0.879	1.133	0.960
Confidence Interval (95%)	± 0.176	± 0.183	± 0.206	± 0.176	± 0.183	± 0.206	± 0.176	± 0.183	± 0.206
구분	Krakiwsky-Thomson			Affine(Wolfum)					
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ			
Max Differ.(m)	1.787	3.004	3.175	1.532	3.657	4.423			
Min Differ.(m)	-4.092	-2.065	-2.703	-4.172	-1.397	-2.597			
Average(m)	0.497	-0.770	-0.210	0.297	-0.455	0.152			
STD.(m)	0.827	0.797	0.901	0.780	0.804	0.937			
RMSE(m)	0.966	1.112	0.925	0.830	0.919	0.946			
Confidence Interval (95%)	± 0.186	± 0.179	± 0.203	± 0.175	± 0.181	± 0.211			

본 연구에서 좌표차이의 기준을 5m로 결정한 것은 Bursa-Wolf 모델의 경우 1~2m의 정확도, Molodensky-Badekas 모델의 경우 4~5m (http://www.gsi.go.jp/PCGIAP/98wg/98wg1/guidelines_transf.pdf), 그리고, 정밀 1차 측지망의 변동벡터 88%(1.5m) (국립지리원, 1994)를 고려하여 정하였다. 표 1은 5개의 변환 모델을 이용하여 기준점 변환을 수행한 후 각 모델별 통계치를 나타낸다. 표 1에서 보는 바와 같이 3차원 지심좌표의 ΔX , ΔY , ΔZ 의 상대적인 차이의 통계적 수치는 Bursa-Wolf, Molodensky-Badekas 및 Veis 모델의 결과가 동일한 값을 보였으며, 10 파라미터를 이용한 두 모델은 7파라미터 모델과는 각각 다른 값으로 나타났다. 95%의 신뢰도 구간을 고려하는 경우 Krakiwsky-Thomson 모델이 3개의 7파라미터 모델에 비해 ΔX 방향으로는 $\pm 0.010m$ 가 큰 반면에 ΔY 는 $\pm 0.004m$, ΔZ 는 $\pm 0.003m$ 정도 줄어드는 결과를 나타내었다. 또한, 각 모델별 RMSE의 비교를 수행한 결과 Affine(Wolfum) 모델이 가장 작은 값을 보였다.

표 2. 최적합 변환 파라미터(Molodensky-Badekas)

구분	Tx(m)	Ty(m)	Tz(m)	Rx(second)	Ry(second)	Rz(second)	lamda(ppm)
변환값	-145.907	505.034	685.756	-1.162	2.347	1.592	6.342
표준편차	0.098	0.099	0.098	0.152	0.216	0.213	0.650

이상의 5개의 변환 모델을 통계적 분석에 의하여 비교한 결과와 사용된 공통점과 파라미터의 상관관계 특성을 고려하여 Molodensky-Badekas 모델로부터 결정된 파라미터를 최적 변환 파라미터값으로 결정하였다.

3. 왜곡 모델의 적용과 분석

공간적인 상관관계는 왜곡 모델링을 개발하는 데에 있어서 중요하다. 최소제곱 콜로케이션방법에서 왜곡량을 격자화하는 목적은 각 격자점에서 왜곡성분들을 추정하기 위하여 무작위적으로 분포하는 점들을 사용하기 위한 것이다. 그림 1은 실질적 공분산 함수를 나타낸 것으로 실질적으로 공분산 함수는 경험적으로 데이터로부터 생성되는데 해석적 모델은 경험적인 데이터에 부합된다.

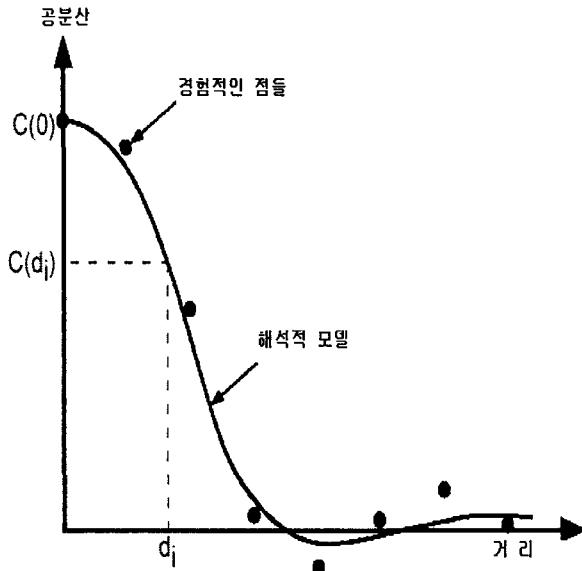


그림 1. 거리에 따른 공분산 함수

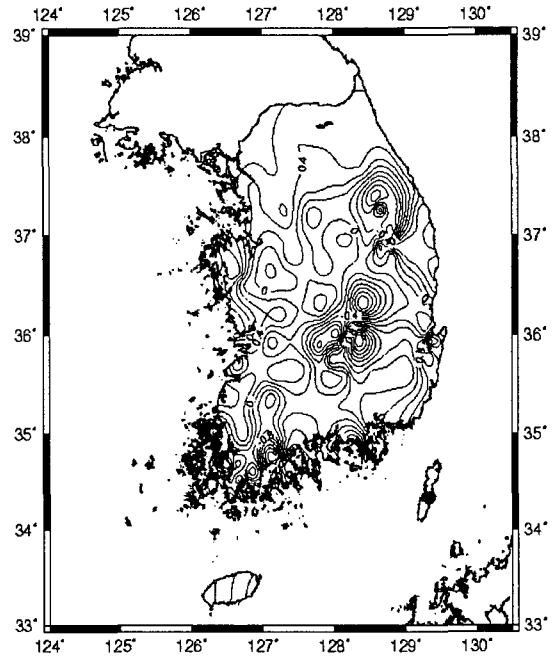


그림 2. X방향의 왜곡량

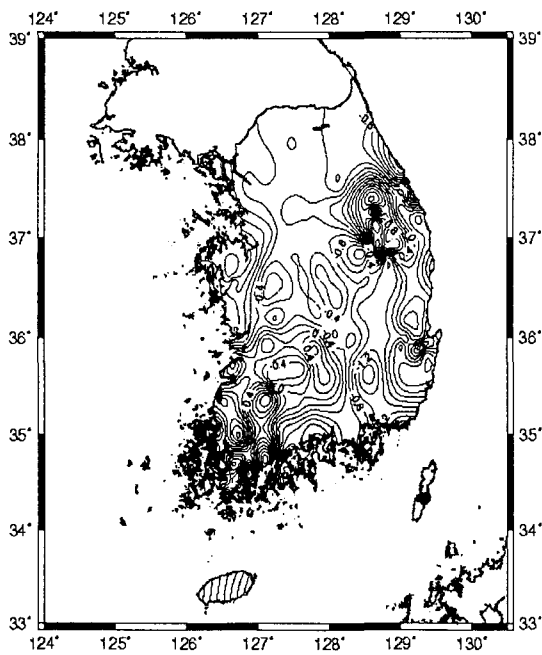


그림 3. Y방향의 왜곡량

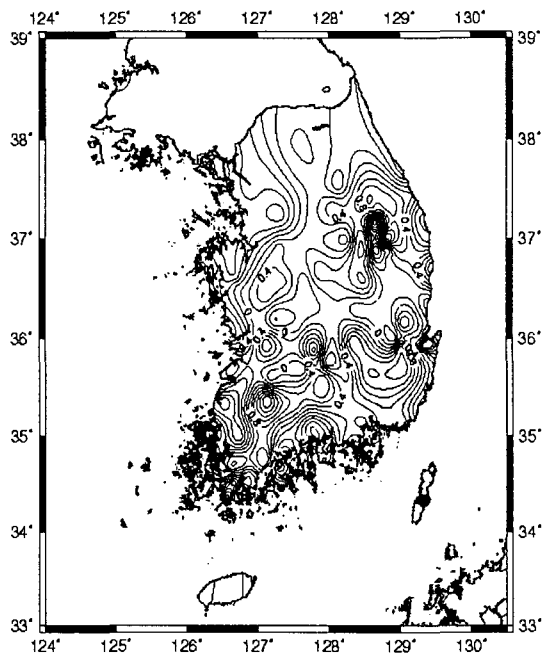


그림 4. Z방향의 왜곡량

최소제곱 콜로케이션은 보간법과 필터링 기법을 결합한 조정 방법으로서 Moritz(1972)가 간접 관측치의 조정과 보간을 위한 방법으로 제시한 것이다. 최소제곱법에 의한 보간에서 예측방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\delta = C_l C_D^{-1} l \quad (1)$$

식 (1)의 벡터 C_l 의 요소들은 데이터 점들과 보간점 간의 거리를 사용하여 해석적 공분산 함수로부터 구한다. 또한, 매트릭스 C_D 의 요소들은 데이터 점들의 모든 조합에 의한 거리(d_{ij} 는 점 i 와 j 간의 거리를 사용하여 해석적 공분산 함수로부터 계산된다. 벡터 l 은 각 데이터점들에서 왜곡을 포함하고 있는 관측치이고, C_l 과 C_D 및 l 매트릭스는 다음과 같다.

$$C_l = [C(d_1) \ C(d_2) \ C(d_3) \ C(d_4) \ C(d_5) \ C(d_6) \ C(d_7)] \quad (2)$$

그림 2, 그림 3 및 그림 4는 3차원 직각좌표의 왜곡 모델링 결과를 등고선으로 표시한 것으로서 각 좌표축에 대한 왜곡량이 일정한 패턴을 이루지 않고, 불규칙하게 분포하고 있는 것을 알 수 있다.

변환격자의 개발을 위한 첫 번째 단계는 오차가 발생한 데이터를 분류하기 위한 기본적인 왜곡분석을 실시하는 것이다. 분류된 점들은 일반적인 왜곡의 패턴을 따르지 않기 때문에 비상사점(non-conforming point; NCP)라고 한다. 변환된 좌표는 측정된 ITRF2000좌표와 비교하여 위도, 경도 및 표고 방향의 왜곡량을 구하였으며, 왜곡량을 분석하여 2.0m이상의 왜곡이 발생한 점을 비상사점으로 평가하여 제거하였는데 제거된 비상사점은 34점이다.

비상사점 34점을 제거하고 난 후에 156점의 위도, 경도방향에 대한 왜곡량으로부터 각 격자점의 왜곡량을 모델링하였다. 여기서 왜곡모델링을 위한 격자점간의 간격은 사용된 데이터점의 분포와 점들간의 거리 및 보간법 등을 고려하여 결정하게 되는데 본 연구에서는 사용된 데이터점은 비상사점을 제외한 156점으로 전국을 조밀한 간격으로 격자를 구성하기에는 불충분하나 1/5,000 수치지도의 변환을 위하여 격자간격을 1'×1' 간격으로 325(경도)×235(위도)의 격자점을 구성하였다.

왜곡 모델링을 통해 산출한 왜곡량을 변환 파라미터 산출에 사용된 기준점과 비상점을 제외한 68점의 잉여 기준점에 보정을 실시하였다. 68점의 잉여 기준점 성과는 기존의 베셀 성과를 변환 파라미터에 의해 1차 변환을 수행한 후 왜곡량 보정까지 실시한 뒤 세계좌표계에 의한 최종 성과를 계산하였다. 새롭게 산출된 세계좌표계에 의한 좌표와 GPS 정밀 해석을 통해 산출된 세계좌표계에 의한 좌표의 차이에 대한 통계 분석 결과는 표 3에 표시한 바와 같다.

표 3. 왜곡량 보정전과 보정후의 정확도

변환 정확도	왜곡량 보정전			왜곡량 보정후		
	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)
평균	0.501	-0.861	-0.368	0.012	0.010	-0.059
표준편차	0.404	0.629	0.640	0.168	0.233	0.259
RMSE	0.642	1.064	0.734	0.167	0.232	0.263

표 3로부터 7-파라미터를 사용한 좌표변환 결과에 비하여 왜곡 모델링 결과를 보정한 결과가 표준편차에서는 X좌표에서 58.4%, Y좌표에서 63%, Z좌표에서 59.5%의 개선이 이루어 졌으며, RMSE는 X좌표에서 74.0%, Y좌표에서 78.2%, Z좌표에서 64.2%의 개선이 이루어졌다. 본 연구에서 왜곡량 보정에 따라서 평균적으로 약 72% 이상의 좌표변환 정확도가 향상되었음을 알 수 있다.

4. 변환도구의 평가

본 연구에서는 변환 정확도 평가를 위하여 표본 지역별로 30점씩 총 180점에 해당하는 검사점을 정적 GPS 측량 방법에 의해 실시하였다. 즉 서울, 대전, 광주, 대구, 부산 및 동해 6개 표본 지역의 1/5,000

수치지도로부터 획득한 Bessel 1841 타원체 기준의 TM 좌표를 표 2에서 제시한 최적합 변환 파라미터를 사용하여 변환하고 왜곡량을 보정한 후, GPS 관측으로부터 결정된 GRS80 타원체 기준의 TM 좌표와의 비교값을 각 지역별로 구하였다. 전체 표본 지역의 남·북방향의 좌표 차이의 평균은 -0.797m(Std.=±1.271m), 동·서방향의 좌표 차이의 평균은 0.546m(Std.=±2.049m)로 나타났다. 좌표를 사용하는 지도, 영상지도, DEM(Digital Elevation Models) 등과 같은 성과물의 정확도는 일반적으로 검사점의 지도 좌표와 실제 측량 좌표 사이의 차이로부터 RMSE(Root Mean Square Error)를 구하여 평가를 하게 된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(C_i - C_t)^2}{n-1}} \quad (3)$$

여기서, C_i : 지도좌표, C_t : 측량 좌표, n : 검사점의 수

표 4. 1/5,000 수치지도 검사점 변환 좌표 차이의 RMSE

구분	서울		대전		광주		대구		동해		부산	
	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$
RMSE	4.449	6.913	4.872	7.025	3.471	4.238	5.148	3.954	2.609	3.476	7.651	6.759

본 연구에서는 수치지도 변환 정확도를 평가하기 위하여 검사점의 지도 좌표와 측량 좌표로부터 구한 검사점의 표준편차를 구하기 위하여 RMSE 산정식을 이용하여 평면 좌표 차이에 대한 RMSE를 표 4와 같이 얻었다. 전 표본 지역에 대해서는 평균적으로 ΔX 의 RMSE는 4.700m, ΔY 의 RMSE는 5.394m로 산출되었다. 전 지역별로 RMSE가 4m이상을 나타내고 있는데 이러한 이유는 실제 측정위치와 도면상의 위치가 불일치하여 발생한 것으로 보인다. 실제로 GPS 관측을 위해 사용된 검사점들 중에서 건물 레이어와 같은 경우에는 실제로는 위아래로 긴 직사각형의 건물인 경우에는 수치지도 상에서는 반대로 좌우로 긴 건물 레이어로 표현되어 있거나, 교량 끝단과 같은 경우에는 교량 폭이 실제 폭과 차이가 커서 큰 RMSE가 발생한 것으로 판단된다.

표 5. 1/5,000 수치지도 검사점 변환 정확도 분석 결과

구분	서울		대전		광주		대구		동해		부산	
	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$
평균	0.671	-0.052	-0.010	1.054	-0.532	-0.640	-1.243	0.737	-0.142	-1.743	-1.114	0.593
표준편차	1.926	1.905	2.113	1.316	1.696	1.607	1.661	1.595	1.742	1.361	1.637	1.717
RMSE	2.046	1.849	2.060	1.654	1.781	1.735	2.106	1.765	1.714	2.192	2.011	1.823

1/5,000 수치지도의 정확도 평가의 객관성을 가지기 위해 GPS 관측을 통해 구한 GRS80 TM 좌표와 변환에 의한 GRS80 TM 좌표와의 차이가 『공공측량의 작업규정 세부 기준』(건설교통부고시 제 2002-177호)에 제시된 지도의 정확도 기준에 만족하지 못하는 검사점은 제외하고 다시 정확도를 평가하였다. 수치지도 변환후의 정확도 기준은 따로 마련된 바가 없으므로 『공공측량의 작업규정 세부 기준』을 따랐다. 이 기준에 의하면 1/5,000의 실제 평면위치 정확도는 3.5m 이내이다. 따라서, 앞서 정확도를 평가한 6개 표본 지역의 결과에서 3.5m를 벗어나는 검사점은 제외하고 다시 정확도를 평가한 결과 남·북 방향으로는 34.46%, 동·서 방향으로는 33.90%에 해당하는 검사점이 제외되었다. 『공공측량의 작업규정 세부 기준』의 정확도 범위내에 들어오는 남·북 방향의 65.54%의 검사점과 동·서 방향의 66.10%의 검사점에 대한 정확도 분석 결과는 표 5와 같다. 표 5에서의 정확도 분석 결과 전 표본 지역에 대한 변환 정확도의 RMSE는 평균적으로 ΔX 는 1.953m, ΔY 의 RMSE는 1.836m를 나타내었다.

5. 결론

1. 본 연구를 통하여 Bessel 타원체에 기준한 측지성과들을 GRS80 타원체에 기준한 지구중심좌표로 변환하기 위한 최적 변환 파라미터는 Molodensky-Badekas 모델에 의하여 결정된 7개 파라미터를 다음과 같이 결정하였다.

구분	Tx(m)	Ty(m)	Tz(m)	Rx(second)	Ry(second)	Rz(second)	lamda(ppm)
변환값	-145.907	505.034	685.756	-1.162	2.347	1.592	6.342

따라서, 기존의 변환 파라미터에 대한 재검토와 다양한 분석을 통하여 상기 변환 파라미터를 사용하는 것이 적합하다고 판단된다.

2. 7개 변환 파라미터와 왜곡 모델링을 실시하여 기준점의 좌표변환 정확도의 평가 구한 결과 X좌표에서 $0.012m \pm 0.168cm$ (RMSE= $\pm 0.167m$), Y좌표에서 $0.010m \pm 0.233m$ (RMSE= $\pm 0.232m$), Z좌표에서는 $-0.059m \pm 0.259m$ (RMSE= $\pm 0.263m$)로 매우 정확한 결과를 얻었다. 7개 변환 파라미터에 의한 변환 성과를 분석한 결과는 X좌표에서 $0.501m \pm 0.404m$ (RMSE= $\pm 0.642m$), Y좌표에서 $-0.861m \pm 0.629m$ (RMSE= $\pm 1.064m$), Z좌표에서 $-0.368m \pm 0.640m$ (RMSE= $\pm 0.734m$)로 분석되어 변환 파라미터만을 사용한 좌표변환은 적합하지 않은 것으로 평가되었다.

3. 1/5,000 수치지도의 변환 정확도를 분석하기 위하여 6개 표본 지역을 선정하여 각 지역당 약 30점씩을 GPS 측량을 실시하여 변환 도구에 의한 변환 좌표와 비교한 결과 RMSE가 전 표본 지역에 대해서 평균적으로 남북방향(X)으로는 4.617m, 동서방향(Y)으로는 5.173m로 산출되어 매우 큰 오차를 나타내고 있으며 1/1,000 수치지도와 비교하여 상당한 위치오차를 보이고 있다. 따라서, 1/5,000 수치지도의 경우에는 전반적으로 재 제작하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

4. 변환 정확도 검사를 위하여 1/1,000 수치지도를 사용하여 정확도를 분석한 결과 전 표본 지역에 대해서 RMSE가 평균적으로 남북방향(X)으로는 1.306m, 동서방향(Y)으로는 1.947m로 산출되어 1/1,000 수치지도 변환을 위하여서는 보다 더 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 최적 변환 파라미터와 왜곡 모델링 이론을 이용하여 Bessel 타원체에 기준하여 제작한 수치지도를 GRS80타원체에 기준한 지구중심좌표계에 맞는 수치지도로 변환할 수 있는 최적의 변환 도구인 GDKtrans를 개발하였다.

참고문헌

- 국립지리원 (2001), “한국지구중심 좌표계 결정을 위한 성과산출 등에 관한 학술연구“.
- Helmut Moritz, "Advanced Least Squares Method" (Reports of the Department of Geodetic Science. Report No. 175).
- 권대원 (1995), “우리나라 측지계와 WGS84의 좌표변환”, 성균관대학교 대학원 석사학위논문.
- Wolfrum, O.(1992), "Merging terrestrial and satellite networks by a ten-parameter transformation model", Manuscripta Geodaetica, Vol.17, No.4, pp 210-214.
- 최경재 (1996), “10개 매개변수 변환모델을 이용한 WGS84와 Bessel 타원체간의 좌표변환”, 성균관대학교 대학원 석사학위논문.
- Donald B. Thomson (1976), "Combination of Geodetic Networks".
- Paul R. Wolf (1997), "ADJUSTMENT COMPUTATIONS", John Wiley & Sons, Inc.
- 건설교통부 국립지리원 (1997), “국가좌표계의 정립과 GPS 활용”.
- 건설교통부 국립지리원 (1998), “수치지도 좌표계에 관한 연구”.
- 건설교통부 국립지리원 (1998), “수치지도 활용상 문제점 종합 분석”.
- 서용운 (1999), 우리 나라의 최적합 지도투영법에 관한 연구, 성균관대학교 박사학위논문.