

반복측정 자료에서 개체기울기를 이용한 집단간의 차이 검정법

황금나¹⁾ 김동재²⁾

요약

의약학 분야에서는 두 집단에서 하나의 반복요인을 가지는 반복측정 자료가 많이 사용된다. 이 논문에서는 반복측정된 자료에서 두 군의 시간에 따른 반응값의 선형추세를 비교하여 두 집단간의 차이를 검정하는 방법을 제안한다. 각 개체에서 회귀계수를 추정하고 추정된 회귀계수들에 의해 생성된 표본을 가지고 이표본 t검정(unpaired t-test), 윌콕슨 순위합 검정(Wilcoxon rank sum test), 위치검정(placement test)으로 두 집단간 기울기의 차이를 검정한다. 모의실험(Monte Carlo Simulation)을 통해 실험유의수준(experimental significance level)과 검정력(power)을 비교하였다.

주요용어: 반복측정 자료, 선형추세, 평행성검정

1. 서론

의약학 분야의 실험에서는 실험대상이 사람인 경우가 많다. 그러나 사람들간에는 자라온 환경, 습관 등 본래적인 차이 때문에 똑같은 처리를 실시하더라도 반응이 다르게 관찰된다. 그러므로 처리간의 차이가 없더라도 개체들간의 차이가 존재한다면 처리간의 차이로 간주될 수 있다. 이러한 오차를 줄이기 위해 개체 간에 존재하는 본래적인 차이를 조절하는 방법으로 반복측정 실험을 이용한다. 의학 분야에서 자주 사용되고 있는 반복측정 자료(repeated measurement data)는 환자들을 대상으로 여러 시간 또는 날짜간격으로 측정된 수치나 동물을 대상으로 독성물질의 농도를 점차 높여 투여하면서 측정된 수치 등의 반복적으로 얻어진 자료들로, 이 실험의 주 목적은 시간이 경과함에 따라 반응값들이 처리간에 따라 차이가 존재하는지를 알아보는 것이다. 예를 들면 고혈압 환자들을 대상으로 기존 혈압강화제와 새로운 혈압강화제의 차이를 비교하기 위해 투약 전과 투약 후 1시간, 2시간, 3시간 등의 간격으로 혈압을 측정하여 시간 경과에 따른 혈압의 변화를 조사하는 것 등이 있다.

반복측정 자료는 같은 개체 내의 다른 시점들에서 관찰된 값들이 서로 상관관계가 존재하게 되므로 반응값이 연속적이고 다변량 정규분포(Multivariate normal distribution)를 따

1) (100-110) 서울시 중구 서소문동 47-2, 시믹코리아 DM/STAT부, 연구원

E-mail: knhwang@cmic.co.kr

2) (교신저자)(137-701) 서울시 서초구 반포동 505번지, 가톨릭 대학교 의학통계학교실, 교수

E-mail: djkim@catholic.ac.kr

른다는 가정을 한다(Ghosh 등, 1973; Kepner와 Robinson, 1988). 일반적으로 반복측정 자료의 분석은 Fisher의 분산분석법이 널리 사용되어지고 있다. 오차항의 가정이 다변량 정규분포를 만족하는 경우에는 반복측정 자료의 분산분석법은 요인실험(factorial experiment)의 특정모형으로부터 출발한 일변량 분석과 각 개체로부터 얻어진 일련의 처리값들을 벡터로 취급하여 다변량 분석(multivariate analysis)을 하는 두 가지 방법이 있다. 이는 각 처리의 분산과 처리간의 공분산에 관한 가정이 구형성가정을 만족한다면 일변량 분산분석을 이용하고, 구형성가정을 만족하지 않는다면 오차간의 독립성과 오차 벡터들의 다변량 정규분포성만을 가정하는 다변량 분산분석을 실시한다(박용규와 송혜향, 1998). 표본의 크기가 작거나 오차항이 다변량 정규분포를 가정하기 어려운 경우, 또는 반응값이 점수와 같은 이산형 변수인 경우에는 비모수적인 방법인 순위를 이용한 Friedman 검정법을 사용한다(성내경, 1997). 분산분석을 실시할 때 집단간의 차이, 처리 시점간의 차이 그리고 교호작용이 존재하는가에 대해 검정한다. 만약 교호작용이 존재한다면 집단간의 차이와 처리 시점간의 차이가 존재하더라도 이는 별 의미를 가지지 않게 된다(박용규와 송혜향, 1998). 이러한 경우 연구의 주 목적인 집단간의 차이에 대해 알 수 없는 단점을 가지게 된다. 그리고 반복측정 자료의 연구에서 초기에는 대부분의 환자들에게서 자료를 수집할 수 있으나, 연구가 진행될수록 제외(lost to follow-up or drop-out)되는 환자가 증가하기 때문에 자료들의 많은 손실을 가지고 분석을 하게 된다는 단점을 가진다(Lachin, 1996).

본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 반복측정 자료에서 시간에 따른 반응값의 변화의 추세가 선형인 경우, 그에 대한 회귀직선을 추정한 후 두 집단의 기울기에 대한 비교 검정법을 제시한다. 이는 두 회귀직선이 실제 모집단에서 같다고 할 수 있는지, 아니면 다른 것인지 검정하는 것으로 두 회귀직선이 평행인지를 살피는 평행성 검정이라고도 할 수 있다. 일반적으로 평행성 검정방법으로는 최소추정치들로 t검정을 실시하는 모수적인 방법과 비모수적인 방법으로는 홀랜더 검정법(Hollander's test)이 있다(Hollander, 1970). 그러나 반복측정 자료에서는 다른 개체에서 관찰된 값은 독립이나 같은 개체내의 다른 시점들에서 관찰된 값들은 상관관계가 존재하기 때문에 같은 집단에서 하나의 회귀직선을 구한다면 다중공선성의 문제가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 두 군의 각 개체에서 회귀계수를 추정하고 추정된 회귀계수들에 의해 생성된 표본을 이용하여 검정한다.

이 논문에서 두 군의 각 개체에서 회귀계수를 추정하고 추정된 회귀계수들에 의해 생성된 표본이 두 집단간에 차이가 있는가를 분석하는 방법으로 t-검정(Unpaired t-test), 윌콕슨 검정(Wilcoxon Rank Sum Test)과 위치 검정(placement Test)을 이용하는 방법을 제안한다. 그리고 모의실험을 통해 2가지 회귀계수 추정법과 4가지 검정법을 조합한 8가지 방법의 실험유의수준과 실험검정력을 비교한다.

2. 반복 측정 자료의 모형

두 집단에서 하나의 반복요인이 시점인 반복측정 자료는 표 2.1과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

표 2.1: 반복 측정 자료 형태

Treatment	subject	Time			
		x_1	x_2	\cdots	x_c
1	1	y_{111}	y_{112}	\cdots	y_{11c}
1	2	y_{121}	y_{122}	\cdots	y_{12c}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\cdots	\vdots
1	n_1	y_{1n_11}	y_{1n_12}	\cdots	y_{1n_1c}
2	1	y_{211}	y_{212}	\cdots	y_{21c}
2	2	y_{221}	y_{222}	\cdots	y_{22c}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\cdots	\vdots
2	n_2	y_{2n_21}	y_{2n_22}	\cdots	y_{2n_2c}

이 논문에서 사용할 모형은

$$y_{ijk} = \alpha_{ij} + \beta_{ij}x_k + \epsilon_{ijk}, \quad i = 1, 2, \quad j = 1, 2, \dots, n_i, \quad k = 1, 2, \dots, c \quad (2.1)$$

이며, 여기서 α_{ij} 와 β_{ij} 는 회귀계수, ϵ_{ijk} 은 오차항이다. 오차항 ϵ_{ijk} 은 서로 독립이며, 평균이 0, 분산이 σ_{ij}^2 인 분포를 따른다고 가정한다.

3. 개체 기울기 추정

이 절에서는 각 개체에서 반복 시간에 따른 반응 변수들의 변화량인 기울기를 구하는 방법을 제안한다. 오차항 ϵ_{ijk} 와 $\epsilon_{ij'k}$ ($j \neq j'$)이 서로 독립이고 평균이 0, 분산이 σ_{ij}^2 인 정규 분포를 따른다는 가정을 만족할 때 모수적인 기울기 추정방법인 최소제곱추정법을 이용하며, 오차항이 가정을 만족하지 않을 때 구체적인 분포를 가정하지 않는 분포 무관 추정법인 Theil의 추정법을 이용한다.

각 개체에서 반복 시점에 따라 반응변수의 변화량인 기울기의 최소제곱추정량은

$$\widehat{\beta}_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^c (x_k - \bar{x})(y_{ijk} - \bar{y}_{ij})}{\sum_{k=1}^c (x_k - \bar{x})^2} \quad (3.1)$$

이다. 여기서 $\bar{x} = \frac{\sum_{k=1}^c x_k}{c}$ 이고, $\bar{y}_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^c y_{ijk}}{c}$ 다.

또한 Theil의 기울기 추정량은

$$\widehat{\beta}_{ij}^* = \text{median}\{s_{kk'}^{ij}\} \quad (3.2)$$

이며, $s_{kk'}^{ij} = \frac{y_{ijk'} - y_{ijk}}{x_{k'} - x_k}$, ($k' > k$)이다.

4. 개체 기울기를 이용한 검정

이 절에서는 앞에서 설명한 방법들로 기울기 추정 후, 두 집단 간의 기울기의 차이를 검정하는 방법을 제안한다. 각 개체에서 회귀계수를 추정하고 추정된 회귀계수들에 의해 생성된 표본으로 두 집단간의 차이를 검정한다. 즉, 서로 다른 두 집단에서 추출된 표본들은 서로 독립이기 때문에 이표본 t-검정법, Wilcoxon 순위합 검정법, 위치 검정법 (placement test)을 이용하여 두 집단의 차이를 검정할 수 있다. 새로 추출된 표본의 오차항이 독립이고, 동일한 연속분포이며, 정규분포를 따른다는 가정을 만족할 때 두 집단의 각 개체에서 구한 기울기들을 가지고 이표본 t-검정을 실시하는 모수적인 방법과 분포무관 검정법으로 두 집단의 각 개체에서 구한 기울기를 합친 표본에서 각 기울기들의 순위를 이용하는 방법으로 두 표본의 위치문제에 있어 널리 사용되는 Wilcoxon 순위합 검정법을 이용할 수 있다.

위치 검정법은 Orban과 Wolfe(1982)에 의하여 제안된 방법으로 두 표본의 위치모수에 차이가 없다는 가설을 위치를 이용하여 검정하는 비모수적 방법이다. 두 군 중 어느 한 군의 다른 군에 대한 상대적 위치정보를 이용하여 두 집단의 차이 유무를 판단한다.

여기서 확률 변수 $\beta_{11} \cdots \beta_{1n_1}$ 사이에 β_{2j} 의 위치를 다음과 같이 정의한다.

$$n_1 U_j = [\beta_{2j} \text{보다 작거나 같은 } \beta_{11} \cdots \beta_{1n_1} \text{의 갯수}] \quad (4.1)$$

위치를 이용한 두 모집단에서 선형 위치 통계량(linear placement statistic)은

$$S_{n_2, n_1} = \sum_{j=1}^{n_2} \phi(U_j) \quad (4.2)$$

이며, $\phi(\cdot)$ 는 $[0, 1]$ 에서 정의된 실변수 점수함수(score function)이다.

점수함수로 어느 것을 사용하느냐에 따라 검정 통계량의 분포가 달라지게 된다. 특히 균등점수함수(uniform score function)를 이용한 선형위치 통계량을 사용하여 검정하게 된다면 Mann-Whitney-Wilcoxon 통계량과 검정결과가 동일해 진다(Orban과 Wolfe, 1982). 이 논문에서는 정규 점수함수(normal score function)와 지수 점수함수(exponential score function)를 이용할 것이다.

정규 점수함수를 이용한 선형 위치통계량은

$$S_{n_2, n_1}^{NS} = \sum_{j=1}^{n_2} \Phi^{-1} \left[\frac{n_1 U_j + 1}{n_1 + 2} \right] \quad (4.3)$$

이며, 여기서 $\Phi(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{u^2}{2}) du$ 이다.

지수 점수함수를 이용한 선형 위치통계량은

$$S_{n_2, n_1}^E = - \sum_{j=1}^{n_2} \ln \left[1 - \frac{n_1 U_j}{n_1 + 1} \right] \quad (4.4)$$

이다.

그러므로 두 집단의 기울기들이 같은가를 검정하기 위한 기각역은

$$S_{n_2, n_1} \geq S_\alpha \quad (4.5)$$

이며, S_α 는 귀무가설 하에서 S_{n_2, n_1} 분포의 $100(1 - \alpha)$ 백분위수이다.

이때 위치를 나타내는 $n_1 U_j$ 와 검정통계량 S_{n_2, n_1} 는 처리1 집단의 자료를 기준으로 처리2 집단의 자료의 위치를 이용한 것이다. 위치검정법은 두 표본 비교에서 상대적으로 대조군의 표본크기가 처리군의 표본크기에 비하여 클 때 더 유용하다고 알려져 있다. 표본크기가 두 집단에서 같은 경우라면 상관없이 없지만, 표본의 크기가 차이가 있다면 표본수가 많은 집단을 기준으로 표본수가 작은 집단의 자료 위치를 이용하는 것이 더 효율적이다. 예를 들어, 대조군에 비해 질병군의 표본의 크기가 작다면 대조군을 기준으로 질병군의 위치를 이용하여 분석한다면 더 효율적이다.

5. 모의실험

논문에 제시된 2가지 회귀계수 추정법과 4가지 검정법을 조합한 8가지 방법의 실험유의 수준(experimental significance level)과 검정력(power)을 비교하기 위하여 모의실험(Monte Carlo Simulation)을 시행하였다. 첫번째 집단의 기울기를 β_1 이라고 하고 두번째 집단의 기울기를 β_2 라 할 때, 모든 검정의 귀무가설은 $H_0 : \beta_1 = \beta_2$, 이에 대립되는 대립가설은 $H_1 : \beta_1 \neq \beta_2$ 로 양측 검정을 실시하였다. 첫번째 집단의 기울기 β_1 을 1로 고정하고 두번째 집단의 기울기 β_2 를 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.7, 2로 두어 β_1 과 β_2 의 간격이 점차 벌어짐에 따라 각 검정방법의 분포에 따른 검정력을 살펴보고자 하였다. 각 검정법의 1종 오류(Type I Error, α)는 0.05로 고정시켰다. x_k 는 모두 간격을 1로 두었으며, 반복시점의 수준 k 를 3, 5, 7로 변화시키고, 같은 개체내의 관찰된 값들의 상관관계는 0, 0.2, 0.5, 0.8로 변화시켰다. 같은 개체내의 다른 시점들에서의 반응 값들의 상관 관계는 관측 시점에 따라 다르게 가정되는 것이 보통이지만 모의실험에서는 구형성가정을 만족하게 하였다. 표본의 크기 n_1 과 n_2 을 5, 10, 15, 20으로 변화시켜 검정력을 비교하도록 하였다. 오차항의 분포는 균일분포(Uniform distribution), 정규분포(Normal distribution) 그리고 이중지수분포(Double exponential distribution)를 고려하였다. 모의실험은 SAS를 이용하였다. 각 오차항의 분포에 따른 표본 자료의 생성은 SAS에서 제공하는 함수 RANNOR과 RANUNI를 이용하여 정규난수와 균일난수를 생성하였으며, 이중지수난수는 균일난수를 이용하여 역변환법을 사용하여 난수를 발생시켰다. 모의실험을 10000번 반복 시행하였다.

평행성 검정을 실시할 때 절편의 변화에 따라 각 검정방법에 있어 변화가 있는지 첫번째 집단의 절편, α_1 을 0으로 두고 두번째 집단의 절편, α_2 을 0와 1로 주어, 절편의 변화에 따라 평행성 검정의 각 방법에 있어 변화가 있는지 모의실험을 실시하였으나 절편에 따른 검정력의 변화는 보이지 않았다. 모의실험의 결과 분포와 관계없이 표본의 크기가 커질수록 검정력이 커짐을 알 수 있고, 또한 기울기의 차이가 커질수록 높은 검정력을 가진다. 그러므로, $n_1 = 5, 10$ 일 때 $n_2 = 5, 10$, 두번째 집단의 기울기, β_2 가 1.0, 1.5, 2.0, 상관관계가 0, 0.5, 0.8인 경우만 표 5.1, 표 5.2, 표 5.3, 표 5.4, 표 5.5, 표 5.6에 제시하였다.

표 5.1: $\alpha = 0.05$, $n_2 = 5$, $\beta_1 = 1$ 에서 추정된 유의수준과 검정력 ; 균일분포

상관 추정		k=3				k=5				k=7						
관계	방법	β_2	n_1	UPT	RST	PT-NS	PT-E	UPT	RST	PT-NS	PT-E	UPT	RST	PT-NS	PT-E	
0	LSE	1.0	5	0.0533	0.0338	0.0481	0.0466	0.0528	0.0307	0.0460	0.0458	0.0520	0.0324	0.0462	0.0474	
			10	0.0559	0.0462	0.0504	0.0498	0.0483	0.0385	0.0451	0.0456	0.0476	0.0387	0.0466	0.0459	
		1.5	5	0.9306	0.8598	0.9633	0.9547	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.9887	0.9737	0.9945	0.9919	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
		2.0	5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	THEIL	1.0	5	0.0533	0.0338	0.0481	0.0466	0.0496	0.0327	0.0473	0.0458	0.0519	0.0336	0.0464	0.0468	
			10	0.0559	0.0462	0.0504	0.0498	0.0486	0.0363	0.0447	0.0446	0.0470	0.0377	0.0483	0.0465	
		1.5	5	0.9306	0.8598	0.9633	0.9547	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
			10	0.9887	0.9737	0.9945	0.9919	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
		2.0	5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
0.5	LSE	1.0	5	0.0510	0.0326	0.0484	0.0472	0.0496	0.0298	0.0467	0.0476	0.0511	0.0323	0.0490	0.0485	
			10	0.0505	0.0413	0.0502	0.0495	0.0503	0.0418	0.0514	0.0517	0.0481	0.0370	0.0471	0.0460	
		1.5	5	0.9985	0.9941	0.9996	0.9990	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
		2.0	5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
	THEIL	1.0	5	0.0510	0.0326	0.0484	0.0472	0.0505	0.0303	0.0501	0.0481	0.0544	0.0317	0.0511	0.0521	
			10	0.0505	0.0413	0.0502	0.0495	0.0502	0.0402	0.0477	0.0477	0.0494	0.0381	0.0479	0.0454	
		1.5	5	0.9985	0.9941	0.9996	0.9990	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
		2.0	5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
0.8	LSE	1.0	5	0.0510	0.0300	0.0460	0.0450	0.0516	0.0322	0.0461	0.0450	0.0530	0.0321	0.0482	0.0477	
			10	0.0512	0.0401	0.0464	0.0452	0.0511	0.0386	0.0500	0.0480	0.0487	0.0389	0.0512	0.0486	
		1.5	5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
		2.0	5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
	THEIL	1.0	5	0.0510	0.0300	0.0460	0.0450	0.0505	0.0319	0.0479	0.0483	0.0528	0.0314	0.0460	0.0474	
			10	0.0512	0.0401	0.0464	0.0452	0.0494	0.0357	0.0495	0.0499	0.0488	0.0400	0.0522	0.0514	
		1.5	5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
		2.0	5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	

* LSE : 최소제곱추정법 , THEIL : Theil의 추정법

UPT : Unpaired t-test , RST : Wilcoxon Rank Sum Test

PT-NS : 정규점수함수를 이용한 위치검정법 , PT-E : 지수점수함수를 이용한 위치검정법

표 5.2: $\alpha = 0.05$, $n_2 = 5$, $\beta_1 = 1$ 에서 추정된 유의수준과 검정력; 정규분포

상관 관계	추정 방법	β_2	n_1	k=3				k=5				k=7			
				UPT	RST	PT-NS	PT-E	UPT	RST	PT-NS	PT-E	UPT	RST	PT-NS	PT-E
0	LSE	1.0	5	0.0489	0.0318	0.0469	0.0476	0.0521	0.0334	0.0497	0.0493	0.0517	0.0328	0.0512	0.0506
			10	0.0485	0.0389	0.0508	0.0508	0.0451	0.0383	0.0461	0.0450	0.0524	0.0425	0.0504	0.0520
		1.5	5	0.1658	0.1111	0.2499	0.2423	0.5940	0.4718	0.7023	0.6835	0.9523	0.8945	0.9760	0.9678
			10	0.2206	0.1803	0.3190	0.3080	0.7634	0.6928	0.8418	0.8201	0.9940	0.9849	0.9966	0.9954
		2.0	5	0.5030	0.3886	0.6222	0.6006	0.9914	0.9688	0.9949	0.9928	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.6527	0.5815	0.7546	0.7293	0.9993	0.9984	0.9997	0.9993	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	THEIL	1.0	5	0.0489	0.0318	0.0469	0.0476	0.0530	0.0329	0.0490	0.0489	0.0505	0.0326	0.0514	0.0514
			10	0.0485	0.0389	0.0508	0.0508	0.0466	0.0384	0.0490	0.0458	0.0521	0.0431	0.0517	0.0518
		1.5	5	0.1658	0.1111	0.2499	0.2423	0.5455	0.4275	0.6574	0.6367	0.9198	0.8452	0.9543	0.9440
			10	0.2206	0.1803	0.3190	0.3080	0.7115	0.6408	0.8035	0.7777	0.9841	0.9675	0.9919	0.9893
		2.0	5	0.5030	0.3886	0.6222	0.6006	0.9830	0.9478	0.9900	0.9853	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.6527	0.5815	0.7546	0.7293	0.9983	0.9941	0.9996	0.9989	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.5	LSE	1.0	5	0.0491	0.0324	0.0488	0.0485	0.0516	0.0334	0.0500	0.0509	0.0514	0.0308	0.0471	0.0465
			10	0.0511	0.0393	0.0500	0.0459	0.0486	0.0397	0.0513	0.0500	0.0510	0.0410	0.0481	0.0494
		1.5	5	0.2958	0.2088	0.4016	0.3868	0.8659	0.7695	0.9189	0.9078	0.9987	0.9931	0.9994	0.9985
			10	0.3979	0.3361	0.5170	0.4918	0.9674	0.9411	0.9810	0.9770	1.0000	0.9998	1.0000	1.0000
		2.0	5	0.7897	0.6780	0.8643	0.8420	0.9999	0.9996	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.9175	0.8726	0.9514	0.9405	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	THEIL	1.0	5	0.0491	0.0324	0.0488	0.0485	0.0505	0.0321	0.0477	0.0475	0.0510	0.0315	0.0468	0.0489
			10	0.0511	0.0393	0.0500	0.0459	0.0501	0.0378	0.0480	0.0479	0.0489	0.0403	0.0465	0.0470
		1.5	5	0.2958	0.2088	0.4016	0.3868	0.8203	0.7103	0.8833	0.8700	0.9964	0.9857	0.9983	0.9966
			10	0.3979	0.3361	0.5170	0.4918	0.9448	0.9062	0.9689	0.9593	0.9999	0.9992	0.9999	0.9998
		2.0	5	0.7897	0.6780	0.8643	0.8420	0.9998	0.9989	0.9998	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.9175	0.8726	0.9514	0.9405	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.8	LSE	1.0	5	0.0483	0.0309	0.0445	0.0445	0.0448	0.0285	0.0459	0.0466	0.0491	0.0295	0.0463	0.0465
			10	0.0480	0.0424	0.0493	0.0475	0.0476	0.0399	0.0476	0.0464	0.0534	0.0415	0.0492	0.0478
		1.5	5	0.5934	0.4753	0.7044	0.6797	0.9977	0.9871	0.9985	0.9976	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.7663	0.6891	0.8402	0.8218	0.9998	0.9997	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
		2.0	5	0.9912	0.9693	0.9960	0.9934	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.9998	0.9979	0.9998	0.9994	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	THEIL	1.0	5	0.0483	0.0309	0.0445	0.0445	0.0498	0.0303	0.0462	0.0447	0.0491	0.0305	0.0452	0.0464
			10	0.0480	0.0424	0.0493	0.0475	0.0502	0.0396	0.0467	0.0443	0.0522	0.0413	0.0481	0.0484
		1.5	5	0.5934	0.4753	0.7044	0.6797	0.9939	0.9741	0.9970	0.9938	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.7663	0.6891	0.8402	0.8218	0.9996	0.9987	0.9998	0.9998	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
		2.0	5	0.9912	0.9693	0.9960	0.9934	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.9998	0.9979	0.9998	0.9994	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

* LSE : 최소제곱추정법, THEIL : Theil의 추정법

UPT : Unpaired t-test, RST : Wilcoxon Rank Sum Test

PT-NS : 정규점수함수를 이용한 위치검정법, PT-E : 지수점수함수를 이용한 위치검정법

표 5.3: $\alpha = 0.05$, $n_2 = 5$, $\beta_1 = 1$ 에서 추정된 유의수준과 검정력; 이중지수분포

상관 추정		k=3				k=5				k=7					
관계	방법	β_2	n_1	UPT	RST	PT-NS	PT-E	UPT	RST	PT-NS	PT-E	UPT	RST	PT-NS	PT-E
0	LSE	1.0	5	0.0484	0.0327	0.0482	0.0486	0.0462	0.0322	0.0450	0.0464	0.0483	0.0319	0.0487	0.0477
			10	0.0487	0.0386	0.0505	0.0477	0.0518	0.0444	0.0518	0.0506	0.0474	0.0369	0.0488	0.0485
		1.5	5	0.1854	0.1379	0.2827	0.2755	0.6121	0.4983	0.7167	0.6984	0.9472	0.8828	0.9677	0.9589
			10	0.2420	0.2176	0.3604	0.3378	0.7717	0.7202	0.8499	0.8318	0.9883	0.9765	0.9945	0.9937
		2.0	5	0.5337	0.4334	0.6453	0.6381	0.9880	0.9525	0.9909	0.9879	1.0000	0.9989	0.9997	0.9996
			10	0.6835	0.6389	0.7848	0.7621	0.9991	0.9931	0.9997	0.9993	1.0000	0.9989	1.0000	1.0000
	THEIL	1.0	5	0.0484	0.0327	0.0482	0.0486	0.0475	0.0323	0.0463	0.0469	0.0481	0.0310	0.0489	0.0466
			10	0.0487	0.0386	0.0505	0.0477	0.0500	0.0427	0.0503	0.0513	0.0463	0.0359	0.0482	0.0480
		1.5	5	0.1854	0.1379	0.2827	0.2755	0.6058	0.4940	0.7055	0.6922	0.9490	0.8920	0.9694	0.9607
			10	0.2420	0.2176	0.3604	0.3378	0.7642	0.7095	0.8478	0.8289	0.9910	0.9785	0.9949	0.9933
		2.0	5	0.5337	0.4334	0.6453	0.6381	0.9837	0.9457	0.9878	0.9854	1.0000	0.9994	0.9999	0.9999
			10	0.6835	0.6389	0.7848	0.7621	0.9981	0.9914	0.9992	0.9990	1.0000	0.9989	1.0000	1.0000
0.5	LSE	1.0	5	0.0467	0.0316	0.0492	0.0457	0.0469	0.0338	0.0481	0.0495	0.0495	0.0349	0.0467	0.0455
			10	0.0464	0.0386	0.0496	0.0485	0.0459	0.0399	0.0487	0.0486	0.0506	0.0432	0.0528	0.0523
		1.5	5	0.3197	0.2462	0.4342	0.4240	0.8689	0.7720	0.9183	0.9081	0.9967	0.9845	0.9976	0.9967
			10	0.4179	0.3808	0.5457	0.5243	0.9560	0.9251	0.9761	0.9704	0.9999	0.9992	0.9999	0.9999
		2.0	5	0.7946	0.6943	0.8519	0.8450	0.9997	0.9962	0.9992	0.9989	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.9140	0.8760	0.9541	0.9450	1.0000	0.9997	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	THEIL	1.0	5	0.0467	0.0316	0.0492	0.0457	0.0459	0.0327	0.0473	0.0486	0.0473	0.0337	0.0481	0.0481
			10	0.0464	0.0386	0.0496	0.0485	0.0482	0.0406	0.0472	0.0468	0.0482	0.0399	0.0502	0.0497
		1.5	5	0.3197	0.2462	0.4342	0.4240	0.8630	0.7629	0.9118	0.8978	0.9973	0.9849	0.9979	0.9958
			10	0.4179	0.3808	0.5457	0.5243	0.9510	0.9231	0.9723	0.9677	1.0000	0.9994	1.0000	1.0000
		2.0	5	0.7946	0.6943	0.8519	0.8450	0.9995	0.9940	0.9993	0.9982	1.0000	0.9999	1.0000	0.9999
			10	0.9140	0.8760	0.9541	0.9450	1.0000	0.9993	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.8	LSE	1.0	5	0.0473	0.0334	0.0474	0.0462	0.0449	0.0289	0.0450	0.0448	0.0490	0.0330	0.0491	0.0497
			10	0.0439	0.0374	0.0479	0.0462	0.0466	0.0374	0.0500	0.0487	0.0533	0.0430	0.0533	0.0515
		1.5	5	0.6216	0.5120	0.7195	0.7053	0.9939	0.9769	0.9946	0.9938	1.0000	0.9999	1.0000	1.0000
			10	0.7734	0.7273	0.8611	0.8469	0.9995	0.9973	0.9996	0.9997	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
		2.0	5	0.9811	0.9453	0.9850	0.9821	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.9973	0.9904	0.9983	0.9982	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	THEIL	1.0	5	0.0473	0.0334	0.0474	0.0462	0.0438	0.0305	0.0462	0.0454	0.0463	0.0320	0.0455	0.0463
			10	0.0439	0.0374	0.0479	0.0462	0.0494	0.0379	0.0509	0.0486	0.0527	0.0419	0.0520	0.0518
		1.5	5	0.6216	0.5120	0.7195	0.7053	0.9929	0.9728	0.9944	0.9916	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.7734	0.7273	0.8611	0.8469	0.9997	0.9970	0.9998	0.9998	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
		2.0	5	0.9811	0.9453	0.9850	0.9821	1.0000	0.9998	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.9973	0.9904	0.9983	0.9982	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

* LSE : 최소제곱추정법, THEIL : Theil의 추정법

UPT : Unpaired t-test, RST : Wilcoxon Rank Sum Test

PT-NS : 정규점수함수를 이용한 위치검정법, PT-E : 지수점수함수를 이용한 위치검정법

표 5.4: $\alpha = 0.05$, $n_2 = 10$, $\beta_1 = 1$ 에서 추정된 유의수준과 검정력; 균일분포

상관 관계	추정 방법	β_2	n_1	k=3				k=5				k=7				
				UPT	RST	PT-NS	PT-E	UPT	RST	PT-NS	PT-E	UPT	RST	PT-NS	PT-E	
0	LSE	1.0	5	0.0531	0.0424	0.0508	0.0511	0.0502	0.0399	0.0495	0.0485	0.0501	0.0396	0.0479	0.0465	
			10	0.0526	0.0445	0.0497	0.0490	0.0480	0.0406	0.0483	0.0492	0.0517	0.0442	0.0490	0.0478	
		1.5	5	0.9895	0.9755	0.9945	0.9928	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.9998	0.9983	0.9998	0.9998	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
		2.0	5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	THEIL	1.0	5	0.0531	0.0424	0.0508	0.0511	0.0493	0.0363	0.0483	0.0489	0.0507	0.0395	0.0460	0.0457	
			10	0.0526	0.0445	0.0497	0.0490	0.0476	0.0403	0.0485	0.0457	0.0518	0.0427	0.0491	0.0466	
		1.5	5	0.9895	0.9755	0.9945	0.9928	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.9998	0.9983	0.9998	0.9998	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
		2.0	5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.5	LSE	1.0	5	0.0494	0.0391	0.0499	0.0486	0.0509	0.0381	0.0484	0.0466	0.0538	0.0418	0.0517	0.0501	
			10	0.0522	0.0465	0.0477	0.0499	0.0460	0.0395	0.0485	0.0506	0.0522	0.0460	0.0495	0.0490	
		1.5	5	1.0000	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
		2.0	5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
	THEIL	1.0	5	0.0494	0.0391	0.0499	0.0486	0.0511	0.0386	0.0453	0.0442	0.0516	0.0413	0.0512	0.0508	
			10	0.0522	0.0465	0.0477	0.0499	0.0469	0.0386	0.0462	0.0476	0.0536	0.0472	0.0492	0.0531	
		1.5	5	1.0000	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
		2.0	5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
0.8	LSE	1.0	5	0.0540	0.0430	0.0497	0.0499	0.0484	0.0402	0.0468	0.0458	0.0501	0.0390	0.0489	0.0497	
			10	0.0499	0.0443	0.0494	0.0519	0.0483	0.0426	0.0434	0.0443	0.0491	0.0404	0.0462	0.0478	
		1.5	5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
		2.0	5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
	THEIL	1.0	5	0.0540	0.0430	0.0497	0.0499	0.0504	0.0415	0.0475	0.0452	0.0496	0.0375	0.0478	0.0473	
			10	0.0499	0.0443	0.0494	0.0519	0.0487	0.0423	0.0461	0.0448	0.0516	0.0422	0.0471	0.0481	
		1.5	5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
		2.0	5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	

* LSE : 최소제곱추정법, THEIL : Theil의 추정법

UPT : Unpaired t-test, RST : Wilcoxon Rank Sum Test

PT-NS : 정규점수함수를 이용한 위치검정법, PT-E : 지수점수함수를 이용한 위치검정법

표 5.5: $\alpha = 0.05$, $n_2 = 10$, $\beta_1 = 1$ 에서 추정된 유의수준과 검정력; 정규분포

상관 관계	추정 방법	β_2	n_1	k=3				k=5				k=7			
				UPT	RST	PT-NS	PT-E	UPT	RST	PT-NS	PT-E	UPT	RST	PT-NS	PT-E
0	LSE	1.0	5	0.0502	0.0400	0.0515	0.0510	0.0509	0.0422	0.0507	0.0492	0.0526	0.0444	0.0461	0.0469
			10	0.0510	0.0432	0.0489	0.0472	0.0513	0.0428	0.0486	0.0485	0.0493	0.0423	0.0487	0.0475
		1.5	5	0.2254	0.1818	0.3197	0.3017	0.7540	0.6833	0.8256	0.7946	0.9938	0.9836	0.9962	0.9918
			10	0.3289	0.2901	0.4350	0.4087	0.9149	0.8853	0.9486	0.9292	0.9999	0.9996	1.0000	0.9997
		2.0	5	0.6639	0.5949	0.7521	0.7195	0.9995	0.9976	0.9995	0.9992	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.8466	0.8097	0.9000	0.8741	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	THEIL	1.0	5	0.0502	0.0400	0.0515	0.0510	0.0491	0.0404	0.0479	0.0476	0.0494	0.0407	0.0449	0.0448
			10	0.0510	0.0432	0.0489	0.0472	0.0523	0.0446	0.0480	0.0502	0.0491	0.0417	0.0478	0.0470
		1.5	5	0.2254	0.1818	0.3197	0.3017	0.7036	0.6272	0.7854	0.7539	0.9849	0.9700	0.9918	0.9852
			10	0.3289	0.2901	0.4350	0.4087	0.8758	0.8404	0.9213	0.8953	0.9989	0.9982	0.9995	0.9989
		2.0	5	0.6639	0.5949	0.7521	0.7195	0.9977	0.9948	0.9996	0.9980	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.8466	0.8097	0.9000	0.8741	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.5	LSE	1.0	5	0.0484	0.0398	0.0490	0.0492	0.0504	0.0397	0.0466	0.0465	0.0471	0.0408	0.0487	0.0495
			10	0.0475	0.0405	0.0464	0.0472	0.0500	0.0462	0.0507	0.0487	0.0534	0.0467	0.0481	0.0506
		1.5	5	0.3941	0.3356	0.5074	0.4795	0.9663	0.9360	0.9792	0.9679	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.5691	0.5202	0.6773	0.6465	0.9962	0.9924	0.9985	0.9967	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
		2.0	5	0.9192	0.8782	0.9497	0.9319	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.9871	0.9800	0.9931	0.9888	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	THEIL	1.0	5	0.0484	0.0398	0.0490	0.0492	0.0518	0.0407	0.0488	0.0480	0.0472	0.0395	0.0484	0.0485
			10	0.0475	0.0405	0.0464	0.0472	0.0522	0.0451	0.0502	0.0478	0.0535	0.0448	0.0487	0.0515
		1.5	5	0.3941	0.3356	0.5074	0.4795	0.9415	0.9047	0.9638	0.9488	0.9998	0.9995	1.0000	0.9998
			10	0.5691	0.5202	0.6773	0.6465	0.9900	0.9863	0.9959	0.9929	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
		2.0	5	0.9192	0.8782	0.9497	0.9319	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.9871	0.9800	0.9931	0.9888	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.8	LSE	1.0	5	0.0493	0.0411	0.0497	0.0500	0.0453	0.0364	0.0455	0.0446	0.0487	0.0377	0.0479	0.0482
			10	0.0491	0.0419	0.0476	0.0466	0.0478	0.0381	0.0486	0.0503	0.0497	0.0420	0.0449	0.0486
		1.5	5	0.7594	0.6864	0.8323	0.7991	1.0000	0.9996	1.0000	0.9997	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.9136	0.8845	0.9482	0.9295	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
		2.0	5	0.9997	0.9984	0.9998	0.9996	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	THEIL	1.0	5	0.0493	0.0411	0.0497	0.0500	0.0455	0.0366	0.0419	0.0439	0.0481	0.0372	0.0486	0.0476
			10	0.0491	0.0419	0.0476	0.0466	0.0473	0.0421	0.0497	0.0484	0.0490	0.0414	0.0438	0.0461
		1.5	5	0.7594	0.6864	0.8323	0.7991	0.9998	0.9992	0.9998	0.9994	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.9136	0.8845	0.9482	0.9295	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
		2.0	5	0.9997	0.9984	0.9998	0.9996	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

* LSE : 최소제곱추정법, THEIL : Theil의 추정법

UPT : Unpaired t-test, RST : Wilcoxon Rank Sum Test

PT-NS : 정규점수함수를 이용한 위치검정법, PT-E : 지수점수함수를 이용한 위치검정법

표 5.6: $\alpha = 0.05$, $n_2 = 10$, $\beta_1 = 1$ 에서 추정된 유의수준과 검정력 ; 이중지수분포

상관 관계	추정 방법	β_2	n_1	k=3				k=5				k=7			
				UPT	RST	PT-NS	PT-E	UPT	RST	PT-NS	PT-E	UPT	RST	PT-NS	PT-E
0	LSE	1.0	5	0.0493	0.0401	0.0496	0.0493	0.0480	0.0389	0.0468	0.0465	0.0524	0.0404	0.0515	0.0500
			10	0.0458	0.0419	0.0461	0.0463	0.0533	0.0462	0.0499	0.0478	0.0491	0.0424	0.0508	0.0493
		1.5	5	0.2375	0.2111	0.3519	0.3376	0.7650	0.7098	0.8382	0.8100	0.9901	0.9758	0.9929	0.9836
			10	0.3267	0.3241	0.4660	0.4339	0.9179	0.9080	0.9568	0.9376	0.9997	0.9994	0.9999	0.9999
		2.0	5	0.6858	0.6392	0.7854	0.7549	0.9986	0.9944	0.9989	0.9960	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.8416	0.8404	0.9130	0.8839	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	THEIL	1.0	5	0.0493	0.0401	0.0496	0.0493	0.0492	0.0396	0.0473	0.0463	0.0509	0.0418	0.0525	0.0507
			10	0.0458	0.0419	0.0461	0.0463	0.0514	0.0449	0.0507	0.0510	0.0476	0.0420	0.0480	0.0484
		1.5	5	0.2375	0.2111	0.3519	0.3376	0.7589	0.7070	0.8369	0.8059	0.9913	0.9763	0.9930	0.9844
			10	0.3267	0.3241	0.4660	0.4339	0.9129	0.9033	0.9492	0.9319	0.9998	0.9994	0.9998	0.9993
		2.0	5	0.6858	0.6392	0.7854	0.7549	0.9979	0.9919	0.9979	0.9941	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.8416	0.8404	0.9130	0.8839	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.5	LSE	1.0	5	0.0488	0.0413	0.0512	0.0503	0.0513	0.0416	0.0501	0.0496	0.0496	0.0361	0.0516	0.0499
			10	0.0486	0.0432	0.0489	0.0485	0.0478	0.0418	0.0459	0.0460	0.0465	0.0422	0.0461	0.0469
		1.5	5	0.4181	0.3793	0.5504	0.5243	0.9569	0.9287	0.9738	0.9570	0.9998	0.9994	0.9998	0.9994
			10	0.5773	0.5670	0.7012	0.6662	0.9949	0.9937	0.9983	0.9957	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
		2.0	5	0.9061	0.8691	0.9363	0.9104	1.0000	0.9998	1.0000	0.9998	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.9815	0.9798	0.9925	0.9861	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	THEIL	1.0	5	0.0488	0.0413	0.0512	0.0503	0.0480	0.0397	0.0474	0.0478	0.0455	0.0376	0.0487	0.0469
			10	0.0486	0.0432	0.0489	0.0485	0.0476	0.0427	0.0454	0.0445	0.0458	0.0418	0.0492	0.0490
		1.5	5	0.4181	0.3793	0.5504	0.5243	0.9509	0.9203	0.9698	0.9533	0.9998	0.9990	0.9999	0.9990
			10	0.5773	0.5670	0.7012	0.6662	0.9943	0.9933	0.9982	0.9947	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
		2.0	5	0.9061	0.8691	0.9363	0.9104	1.0000	0.9994	1.0000	0.9994	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.9815	0.9798	0.9925	0.9861	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.8	LSE	1.0	5	0.0464	0.0405	0.0472	0.0479	0.0491	0.0381	0.0470	0.0473	0.0454	0.0364	0.0450	0.0446
			10	0.0473	0.0438	0.0506	0.0497	0.0502	0.0435	0.0456	0.0477	0.0515	0.0435	0.0476	0.0467
		1.5	5	0.7720	0.7331	0.8493	0.8214	0.9999	0.9974	0.9998	0.9977	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.9103	0.9094	0.9559	0.9384	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
		2.0	5	0.9981	0.9905	0.9982	0.9927	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	THEIL	1.0	5	0.0464	0.0405	0.0472	0.0479	0.0489	0.0384	0.0480	0.0481	0.0443	0.0359	0.0448	0.0449
			10	0.0473	0.0438	0.0506	0.0497	0.0495	0.0459	0.0453	0.0470	0.0498	0.0449	0.0490	0.0488
		1.5	5	0.7720	0.7331	0.8493	0.8214	0.9998	0.9979	0.9999	0.9982	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	0.9103	0.9094	0.9559	0.9384	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
		2.0	5	0.9981	0.9905	0.9982	0.9927	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

* LSE : 최소제곱추정법 , THEIL : Theil의 추정법

UPT : Unpaired t-test , RST : Wilcoxon Rank Sum Test

PT-NS : 정규점수함수를 이용한 위치검정법 , PT-E : 지수점수함수를 이용한 위치검정법

모의실험의 결과를 살펴보면, 표본수가 작은 경우 윌콕슨 순위합 검정을 이용하여 제안한 방법에서 유의수준이 잘 제어되지 않았다. 반복수준 k 가 커질수록 제안하는 모든 검정법의 검정력이 더 좋아졌으며, 같은 개체내의 관찰된 값들의 상관관계가 커질수록 더 좋은 검정력을 보였다. k 가 3인 경우 x_k 의 간격을 1로 두어 최소제곱추정법과 Theil의 추정법으로 추정된 회귀계수는 같게 되어 검정력이 같아질 수 밖에 없으나 k 가 3이 아닌 경우 모든 분포에서 기울기 추정 방법인 최소제곱추정법이 Theil의 추정법보다 높은 검정력을 가진다. 그러나 표본의 크기가 커지고 기울기간의 차이가 크면 최소제곱추정법과 Theil의 추정법의 검정력은 비슷해진다.

제안한 4가지 검정 방법을 비교해 보면, 위치검정이 이표본 t검정과 Wilcoxon 순위합 검정에 비해 검정력이 높게 나타났으며, 지수점수함수를 이용한 위치검정법보다 정규점수함수를 사용한 위치검정법이 검정력이 더 높게 나타났다. Wilcoxon 순위합 검정법은 모든 분포에서 다른 검정법들의 비해 검정력이 매우 낮았으며, 기울기 β_2 가 1.5 이상이고 n_1 그리고 n_2 이 10보다 클 때 다른 방법들과 비슷한 검정력이 비슷해지지만, 그래도 약간은 작은 검정력을 가진다. 이는 정규분포를 제외한 다른 분포에서 모수적인 방법인 이표본 t검정법보다 검정력이 크게 나타날 것이라는 예상과는 다른 결과를 보였다. 위치 검정법에서는 표본의 크기가 같더라도 n_2 에 비해 n_1 의 크기가 클 때가 n_1 에 비해 n_2 의 크기가 클 때보다 높은 검정력을 보였다.

오차항의 분포별로 살펴보면, 균일분포일 때, 모든 검정법의 검정력이 다른 분포들에 비해 월등히 높다. 이중지수분포와 정규분포는 표본의 비슷한 검정력을 보였으나 꼬리가 정규분포의 비해 두터운 이중지수분포에서 검정력이 더 높았다. 이는 제안한 방법론이 비모수적인 방법으로 꼬리가 두터운 분포에서 검정력이 크게 나타난 것이다.

6. 결론

이 논문에서 제안하는 방법은 두 집단의 반복측정자료에서 간편한 계산식으로 각 개체에서 기울기를 생성하여 표본을 만들고, 그 표본을 가지고 기존의 잘 알려진 이표본 검정법을 실시하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 시간이 지남에 따라 결측치가 생기게 되더라도 모든 개체에서 기울기를 추정할 수 있어 결측치에 따른 손실이 적고, 교호작용의 문제가 발생하지 않기 때문에 두 집단의 반복측정 자료에서 분산분석시 생길 수 있는 단점을 보완할 수 있다.

이는 각 개체에서 회귀계수를 추정하고 추정된 회귀계수들에 의해 생성된 표본이 두 집단간의 차이가 있는가를 분석하는 방법으로 두 집단의 기울기의 차이유무를 검정하는 평행성 검정법을 실시하는 방법이라고 할 수 있다. 그러나 평행성 검정법으로 잘 알려진 최소추정치들로 t검정을 실시하는 모수적인 방법과 Hollander 검정법을 이용하는 경우에는 반복측정 자료에서는 다른 개체에서의 관찰된 값은 독립이나 같은 개체내의 다른 시점들에서의 관찰된 값들은 상관관계가 존재하기 때문에 같은 집단에서 하나의 회귀직선을 추정한다면 다중공선성이 존재하여 최소제곱법으로 추정된 회귀계수를 이용하여 분석하는 것이 큰 오류를 가지고 올 수 있다. 이러한 문제점으로 기존에 알려진 평행성 검정법을 사용

할 수 없기때문에 각 개체에서 회귀계수를 추정하고 추정된 회귀계수들에 의해 생성된 표본을 가지고 검정하는 방법을 제안하였다. 그러나 각 개체에서 회귀계수를 추정하는 경우에도 같은 개체내의 다른 시점들 간의 상관관계가 존재하기 때문에 회귀계수 추정의 문제점이 발생할 수 있다고 생각된다. 그러므로 앞으로의 과제는 상관관계를 제어해주는 회귀계수를 추정하는 방법을 모색해 보고 일반적인 평행성 검정방법인 최소추정치들로 t검정을 실시하는 모수적인 방법과 Hollander 검정법을 이 논문에서 제안하는 방법론을 비교하는 것도 좋은 방향이라고 생각된다.

참고문헌

- 박용규, 송혜향 (1998). <반복측정과 교차계획 자료의 분석법>, 자유 아카데미
 성내경 (1997). <반복측정실험과 분석>, 자유 아카데미.
 Ghosh, M. , Grizzle, J. E. and Sen P. K. (1973). Nonparametric methods in longitudinal studies. *Journal of the America Statistical Association* **68**, 29-36.
 Hollander, M. (1970). A distribution-free test for parallelism. *Journal of the America Statistical Association* **65**, 387-394.
 Kepner, J. L. and Robinson, D. H. (1988). Nonparametric methods for detecting treatment effects in repeated measures designs. *Journal of the America Statistical Association* **83**, 456-461.
 Lachin, J. M. (1996). Distribution free marginal analysis of repeated measures. *Drug Information Journal* **30**, 1017-1028.
 Orban, J. and Wolfe, D. A. (1982). A class of distribution-free two-sample tests based on placement. *Journal of the America Statistical Association* **77**, 666-672.

[2006년 3월 접수, 2006년 5월 채택]

Trend Comparison of Repeated Measures Data between Two Groups

Kum Na Hwang¹⁾ Dong Jae Kim²⁾

ABSTRACT

Repeated measurement data between two group is often used in the field of medicine study. In this paper, we suggest a method for comparison of the trend between two groups based on repeated measurement data. First, we estimate regression coefficient of linear regression model from each subject and generate samples using the regression coefficient estimated previous . And then, we test the difference between two groups by unpaired t-test, Wilcoxon rank sum test and placement test using generated samples. Monte Carlo Simulation is adapted to examine the power and experimental significance levels of several methods in various combinations.

Keywords: Repeated measurement data; Trend comparison; Parallelism test.

1) Biostatistician, DM/STAT Department, CIMIC Korea, Seoul 100-110, Korea
E-mail: knhwang@cmic.co.kr

2) (Corresponding Author) Professor, Department of Biostatistics, The Catholic University of Korea, Seoul 137-701, Korea
E-mail: djkim@catholic.ac.kr