

## 안정적 시계열의 변이상태에 대한 판별연구<sup>1)</sup>

- 변압기 진동신호에 대한 응용을 중심으로 -

이 정 진<sup>2)</sup>, 정 찬 수<sup>3)</sup>, 송 정 호<sup>4)</sup>

### 요 약

시계열 자료의 변이상태(transition status)에 대한 판별은 여러 분야에서 연구되고 있다. 하지만 변압기의 진동신호와 같이 특정한 시계열모형을 적합시키기 힘든 자료는 변이상태에 대한 판별이 쉽지 않다. 본 논문에서는 정상적인 변압기에서 발생하는 진동신호에 대하여 각 주기별 최대값, 최소값, 자기상관계수 및 편자기상관계수 등의 경험적 표본분포를 연구한 후, 이를 이용한 관리도를 만들어 변압기 진동신호의 변이상태에 대한 판별을 하였다. 이 방법은 품질관리의 관리도 이론을 시계열자료에 응용한 것으로 비정상인 변압기 진동신호의 판별에 만족스러운 결과를 가져왔다.

### 1. 서 론

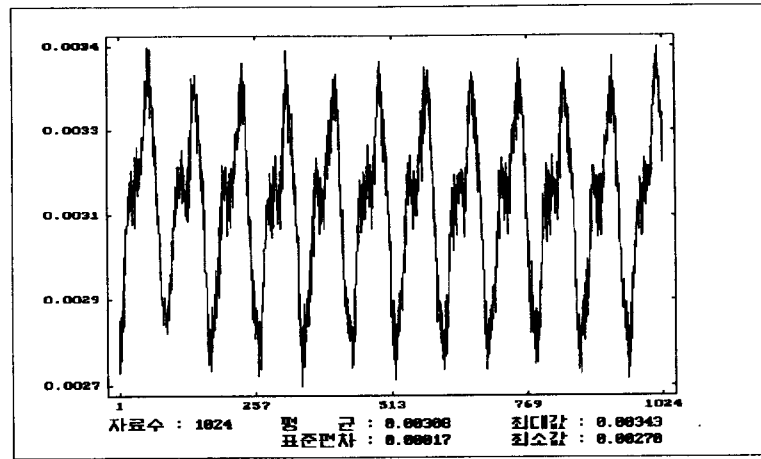
일정한 안정상태를 지나는 시계열(stationary time series) 자료에서 그 안정상태를 벗어나는 변이상태(transition status)에 대한 판별은 여러 분야에서 연구되고 있다 [예: Deller(1993), Hamilton(1989), Tyssedal et. al.(1988)]. 하지만 자료의 특성에 따라 사용되는 모형이 다르기 때문에 쉽지 않고, 특히 변압기의 진동신호와 같이 특정한 시계열모형을 적합시키기에 힘든 자료는 변이상태에 대한 판별이 쉽지 않다. <그림 1-1>은 전류 25%, 전압 0% 의 실험조건에서 측정된 정상인 변압기에서 발생하는 권선신호의 예이다. 이 그림에서 변압기신호는 주기가 있고 특정한 추세가 없이 평균수준이 일정하며 진폭(변동)이 시간에 따라 변하지 않는 것으로 보아 안정적 시계열자료로 판단된다. 이 자료에 대한 자기상관도(autocorrelation diagram)와 편자기상관도(partial autocorrelation diagram)는 <그림 1-2>와 <그림 1-3>과 같다. 자기상관도는 작은 시차에서 절단점이 없고, 상당히 느리게 감소하고 있는 것으로 나타나 MA(q)모형은 적당하지 않음을 알 수 있다. 편자기상관도는 시차 1, 3, 4가 큰 값을 갖고, 시차 2는 상대적으로 작은 값을 보이며, 시차 5 이후에도 작은 값이지만 지수적으로 감소한다고 보기에는 어려움이 있어 AR(p)모형도 적합하지 않다. 그러므로 이 자료는 일반적 ARMA모형으로 적합시키기에는 무리가 있다. 따라서 이와같은 자료에 모형을 적합시킨 후 모수의 변화로서 변이상태를 판별해내는 기존의 방법들은 알맞지 않다고 할 수 있다.

1) 이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 숭실대학교 생산기술연구소에 대한 지원으로 연구되었음

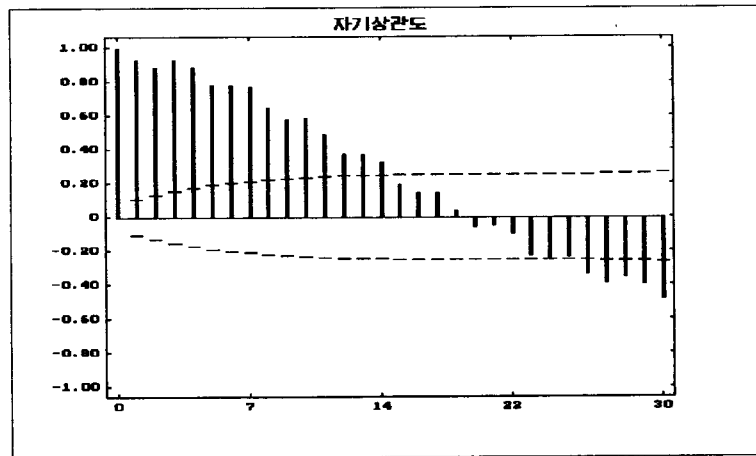
2) 서울시 동작구 상도5동 1-1, 숭실대학교, 자연과학대학, 통계학과, 교수

3) 서울시 동작구 상도5동 1-1, 숭실대학교, 공과대학, 전기공학과, 교수

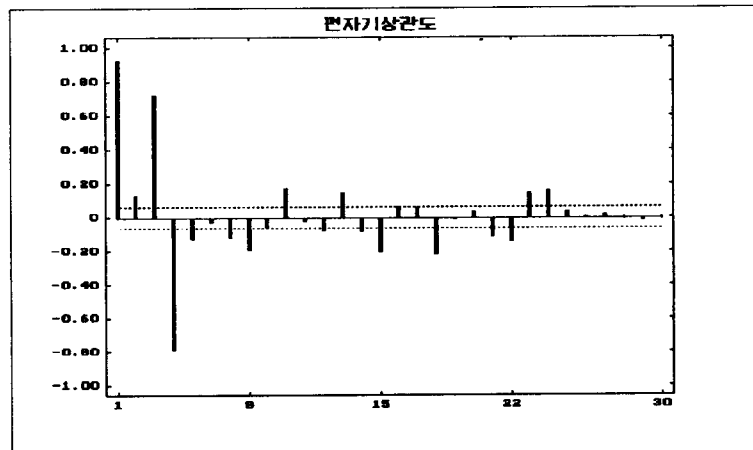
4) 서울시 동작구 상도5동 1-1, 숭실대학교, 자연과학대학, 통계학과



<그림 1-1> 정상 변압기의 권선신호자료



<그림 1-2> 정상 변압기의 권선신호에 대한 자기상관도



<그림 1-3> 정상 변압기의 권선신호에 대한 편자기상관도

본 논문에서는 시계열자료에 모형을 적합시켜 변이상태를 판별하기 보다는 통계적 품질관리의 관리도[박성현(1984)]이론을 응용하고자 한다. 즉, 시계열자료의 적절한 표본통계량에 대한 경험적 분포를 연구하여 이를 이용한 관리도를 만들어 진동신호의 변이상태에 대한 판별을 연구하였다. 2절에서는 정상적인 변압기의 진동신호 자료에 대하여 설명하고, 3절에서는 각 진동신호에 대한 주기별 최대값, 최소값, 자기상관계수 및 편자기상관계수 등의 경험적 표본분포를 연구하였다. 4절에서는 경험적 표본분포를 이용한 관리도를 만들어 변압기 진동신호의 변이상태에 대한 판별을 연구하였다. 5절에서는 결론 및 토의를 논의한다.

## 2. 진동신호 자료

변압기의 진동신호는 여러개의 고주파가 합성된 복잡한 형태일 뿐만 아니라, 부하전류, 전압, 온도 및 습도에 민감하게 변화한다. 만일 변압기의 구조에 기계적 이상이 발생하면 스프링 상수 혹은 마찰계수가 변화함으로써 진동신호의 형태가 더욱 많이 변화하게 된다. 따라서 변압기의 진동신호를 자세히 분석하여 보면 그 구조에 기계적 변형이 생겼는지를 감지할 수가 있다. 일반적으로 변압기의 이상상태를 잘 감지할 수 있는 진동신호에는 권선, 외함, 철심신호가 있는데, 그 중에서도 권선신호를 중요시 한다[정찬수(1994)]. 본 논문에서는 세 가지 진동신호 모두를 연구하였으나 각 신호에 모두 비슷한 기법을 적용하였기 때문에 권선신호 자료를 중심으로 설명을 하였다.

변압기는 용량에 따라 다르기는 하지만 매우 고가품이라 실험자료, 특히 비정상 변압기(인위적으로 고장을 내어야 함)의 진동신호를 얻기가 힘들다. 본 논문에서 사용한 변압기의 진동신호는 일반적으로 많이 이용되는 유입식 50kVA 적철형 변압기를 송실대 생산기술연구소에서 제작하여 실험실에 설치하여 구한 것이다. 즉, 실험실에 설치된 정상적인 변압기에서 부하전류를 고정시키고 08시부터 19시까지 매시간 전압을 0%에서 105%까지 변화시키며 아날로그 진동신호를 랜덤하게 5회씩 6초동안 측정하였다. 이 아날로그 신호를 디지털화 하면 1024개의 숫자로 된 신호자료로 분해되는데 <그림 1-1>은 이 디지털화된 신호자료를 이용하여 선그림을 그린 예이다. 이와 같은 실험을 랜덤하게 선정된 12일간 반복하여 시간과 전압의 각 조건에서 약 60회의 권선, 철심, 외함의 진동신호를 얻었다.

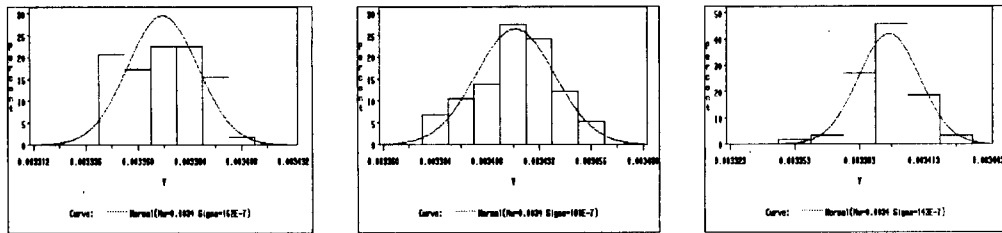
비정상 변압기에 대한 진동신호는 제작된 변압기에 높은 전압을 흐르게하여 인위적으로 고장을 내어 구하였다. 하지만 변압기가 고가품이기 때문에 모든 실험조건에 대한 많은 자료를 얻기가 힘들다. 따라서 본연구에서는 비정상변압기의 일부 실험자료를 이용하여 정상변압기의 신호자료와 비교하였다.

## 3. 진동신호의 분석

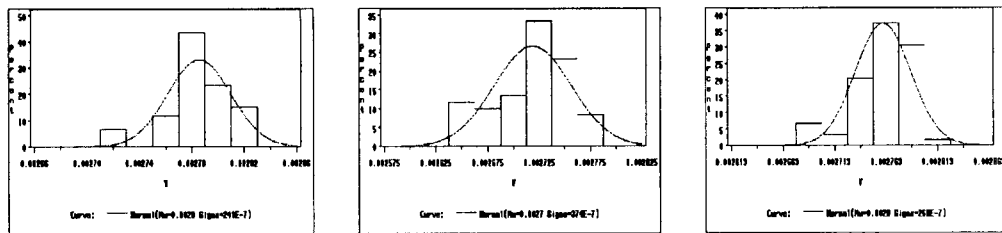
비정상 변압기의 진동신호에서 발생하는 특징중의 하나는 정상신호보다 각 주기의 최대값이 높아지거나 또는 최소값이 낮아진다. 또 주기가 불규칙하게 되며 신호 패턴이 변형을 일으키기도 한다. 이와 같은 비정상 변압기의 특징을 판별할 수 있는 통계량으로는 여러 가지를 생각할 수 있으나 각 주기별 주파수의 최대값과 최소값, 그리고 자기상관계수 및 편자기상관계수 등이 의미있는 것으로 판단된다. 이 절에서는 이들 통계량에 대한 경험적 표본분포를 연구하여 보았다.

3.1 주파수의 주기별 최대값 및 최소값의 표본분포

이상이 발생한 변압기의 진동신호는 주기별 최대값 및 최소값의 변화를 발생시키게 된다. 따라서 정상인 변압기의 신호자료에서 나타나는 주기별 최대값 및 최소값의 형태를 연구하면 이상이 있는 진동신호를 판별해 내는데 효과적일 수 있다. 예를 들어 8시, 12시, 16시에 각각 측정된 권선 신호에서 각 주기별 최대값 및 최소값을 추출하여 히스토그램을 그려보면 각각 <그림 3-1> 및 <그림 3-2>와 같다. 이 그림에서 권선신호는 측정시간이 다르면 온도, 습도 등 외부환경의 영향을 받아 최대값 및 최소값에 변화가 있음을 알 수 있다. 분포의 형태가 시간대별로 모두 정규분포인지 알아 보기 위하여 정규성 검정을 한 결과가 <표 3-1> 및 <표 3-2>와 같다.



(a) 08시 (b) 12시 (c) 16시  
 <그림 3-1> 시간별 권선신호의 주기별 최대값 히스토그램



(a) 08시 (b) 12시 (c) 16시  
 <그림 3-2> 시간별 권선신호의 주기별 최소값 히스토그램

<표 3-1>과 <표 3-2>는 각각 주기별 최대값과 최소값에 대한 평균 및 표준편차와, 정규성 검정을 위한 샤피로-윌크 검정 (참고문헌 [10]), 카이제곱 검정 및 콜모고로프-스미르노프(K-S) 검정의 통계량을 보여 주고 있다. 여기서 카이제곱 검정의 범주수는 SAS/QC 모듈의 proc capability에서 기본으로 사용하고 있는 Terrell and Scott(1985)의 알고리즘 (참고문헌 [11])을 통해 얻어진 것이다. 권선신호의 최대값에 대한 정규성검정 결과는 13시를 제외하고 유의수준 1%로 자료가 정규분포라는 가설을 만족하는 것으로 나타났다. 13시에도 샤피로-윌크검정과 카이제곱검정은 역시 자료가 정규분포라는 가설을 만족한다. 왜 K-S 정규성검정이 이 자료에 대해 기각되었는지 정확히 알 수는 없으나 이상점의 영향이라 생각된다. 각 시간별 자료가 정규분포라는 가정하에 시간대별로 최대값 평균의 차이가 있는지 t-검정을 한 결과가 <표 3-3>과 같다. t-검정 결과는 거의 모든 시간대에서 최대값 평균의 차이가 있음을 보여 주고 있다. 따라서 주기별 최대값 관리를 위해서는 각 시간대별로 서로 다른 정규분포에 근거한 관리한계선을 사용하여야 한다.

권선신호에 대한 주기별 최소값에 대한 정규성검정은 몇 개의 시간대에서만 정규분포를 따르는 것으로 나타났다. 따라서 주기별 최소값 관리를 위해서는 실제 경험적 표본분포에 근거한 관리선을 이용하는 것이 바람직 하다.

비정상 변압기에서 발생하는 각 주기별 최대값 및 최소값은 이와같은 분포에서 벗어나기 때문에 최대 및 최소값의 경험적분포를 이용하여 관리선을 만들면 변압기의 이상상태를 판별할 수 있다.

<표 3-1> 권선신호에 대한 시간대별 최대값의 평균, 표준편차 및 정규성 검정

시각	자료수	평균	표준편차	샤피로-윌크 통계량	p-값	카이제곱 통계량	DF	p-값	K-S 통계량	p-값
08	58	0.0033716	0.00001623	0.9513	0.0412	9.3934	3	0.0245	0.0816	>.15
09	60	0.0034089	0.00001522	0.9648	0.1785	5.6204	3	0.1316	0.0969	>.15
10	58	0.0033975	0.00001488	0.9792	0.6550	3.0947	3	0.3772	0.0870	>.15
11	59	0.0034304	0.00001349	0.9826	0.7823	0.7414	3	0.8634	0.1106	0.0728
12	58	0.0034211	0.00001814	0.9726	0.4003	3.4694	4	0.4825	0.0665	>.15
13	59	0.0034124	0.00001688	0.9644	0.1760	6.6154	4	0.1577	0.1467	<0.01
14	60	0.0033671	0.00002197	0.9750	0.4746	3.8509	4	0.4266	0.0958	>.15
15	59	0.0034037	0.0000186	0.9788	0.6334	1.5793	3	0.6641	0.0656	>.15
16	59	0.0033963	0.00001426	0.9896	0.9691	3.3093	3	0.3463	0.0816	>.15
17	60	0.0034056	0.00001796	0.9607	0.1141	6.8925	4	0.1417	0.0881	>.15
18	59	0.0033995	0.00001468	0.9813	0.7332	1.5340	3	0.6744	0.0771	>.15
19	60	0.0033469	0.00001396	0.9856	0.8821	1.7817	3	0.6189	0.0860	>.15

<표 3-2> 권선신호에 대한 시간대별 최소값의 평균, 표준편차 및 정규성 검정

시각	자료수	평균	표준편차	샤피로-윌크 통계량	p-값	카이제곱 통계량	DF	p-값	K-S 통계량	p-값
08	60	0.0027856	0.00002415	0.90534	0.0001	28.62630	3	0.0000	0.12222	0.0340
09	60	0.0027594	0.00004829	0.82579	0.0000	39.64265	3	0.0000	0.20759	<0.01
10	59	0.0027661	0.00004386	0.87591	0.0000	21.33450	3	0.0001	0.18876	<0.01
11	59	0.0027580	0.00003574	0.85657	0.0000	33.15349	4	0.0000	0.18459	<0.01
12	60	0.0027189	0.00003741	0.93578	0.0050	10.08634	3	0.0178	0.12254	0.0334
13	60	0.0027183	0.00003867	0.92287	0.0009	21.12305	4	0.0003	0.17907	<0.01
14	59	0.0027795	0.00002589	0.98242	0.7771	3.61108	3	0.3066	0.07155	>.15
15	60	0.0027520	0.00002767	0.98252	0.7771	1.57526	3	0.6650	0.06211	>.15
16	59	0.0027596	0.00002685	0.92586	0.0015	21.06139	3	0.0001	0.11007	0.0753
17	58	0.0027590	0.00002624	0.95181	0.0440	28.03520	3	0.0000	0.07744	>.15
18	59	0.0027329	0.00003017	0.92131	0.0008	23.35314	3	0.0000	0.16167	<0.01
19	59	0.0027368	0.00002358	0.92426	0.0012	14.47847	4	0.0059	0.11964	0.0410

<표 3-3> 각 시간대별 권선신호의 최대값 평균의 차에 대한 t-검정값

(\*는 5%로 유의, (\*\*)는 1%로 유의

시각	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
08	-12.88 (**)	-8.96 (**)	-21.33 (**)	-15.49 (**)	-13.32 (**)	1.26	-9.94 (**)	-8.75 (**)	-10.78 (**)	-9.75 (**)	8.87 (**)
09		4.11 (**)	-8.15 (**)	-3.96 (**)	-1.19	12.11 (**)	1.67 (**)	4.66 (**)	1.09	3.43 (**)	23.25 (**)
10			-12.53 (**)	-7.66 (**)	-5.06 (**)	8.77 (**)	-1.99 (*)	0.45	-2.66 (**)	-0.73	19.06 (**)
11				3.15 (**)	6.40 (**)	18.90 (**)	8.93 (**)	13.34 (**)	8.51 (**)	11.90 (**)	33.17 (**)
12					2.69 (**)	14.53 (**)	5.12 (**)	8.23 (**)	4.66 (**)	7.09 (**)	24.95 (**)
13						12.60 (**)	2.66 (**)	5.60 (**)	2.13 (**)	4.43 (**)	23.08 (**)
14							-9.80 (**)	-8.58 (**)	-10.51 (**)	-9.44 (**)	6.01 (**)
15								2.43 (*)	-0.57	1.36	18.86 (**)
16									-3.13 (**)	-1.20	19.10 (**)
17										2.03 (*)	19.99 (**)
18											20.03 (**)

3.2 자기상관계수 및 편자기상관계수의 표본분포

이상이 발생한 변압기는 진동신호의 주거나 각 사이클에서의 패턴에 변화를 일으키게 된다. 이와 같은 변화를 측정하기에 적합한 관측값들의 상호관련성에 대한 측도에는 자기상관계수 (autocorrelation coefficient) 및 편자기상관계수(partial autocorrelation coefficient) 등이 있다. 관측값  $Z_t, t=1,2,\dots,T$ , 와 시차 k의 관측값  $Z_{t-k}$  의 표본자기상관계수는 다음과 같이 정의된다.

$$r_k = \frac{\sum_{t=k+1}^T (Z_t - \bar{Z})(Z_{t-k} - \bar{Z})}{\sum_{t=1}^T (Z_t - \bar{Z})^2}, \quad k=0,1,2,\dots,T-1$$

이러한 표본자기상관계수의 표본분포는 모집단의 자기상관계수 ( $\rho_k$ )를 알 때 근사적으로 다음과 같은 다변량 정규분포(multivariate normal)를 한다 [Box and Jenkins(1970), 김원경(1993)].

&lt;표 3-4&gt; 권선신호의 표본자기상관계수의 분포(자료수=60)

시차	평균	표준편차	샤피로-윌크 통계량	p-값	카이제곱 통계량	DF	p-값	K-S 통계량	p-값
1	0.944726	0.007611	0.982143	0.7628	7.22662	4	0.1244	0.06380735	>.15
2	0.906404	0.01395	0.896542	0.0001	39.50698	3	0.0000	0.15595121	<0.01
3	0.937658	0.00458	0.903582	0.0001	32.95734	4	0.0000	0.15128913	<0.01
4	0.893903	0.005882	0.983542	0.8150	8.88165	4	0.0641	0.07126325	>.15
5	0.807425	0.017356	0.770609	0.0001	130.3833	3	0.0000	0.21083455	<0.01
6	0.796506	0.016839	0.914825	0.0003	21.5878	3	0.0001	0.12626496	0.0261
7	0.768319	0.019001	0.976046	0.5148	5.23584	4	0.2639	0.09873927	>.15
8	0.660416	0.026681	0.98655	0.9083	4.79587	4	0.3089	0.0885954	>.15
9	0.597063	0.034194	0.954879	0.0573	7.59987	3	0.0550	0.10725997	0.0852
10	0.57651	0.034445	0.97109	0.3372	6.35326	4	0.1743	0.08933368	>.15
11	0.481217	0.042763	0.96879	0.2705	8.44379	4	0.0766	0.08122513	>.15
12	0.375022	0.052094	0.968694	0.2679	6.19015	3	0.1027	0.10736925	0.0846
13	0.342492	0.049248	0.967828	0.2457	3.19140	4	0.5263	0.05267941	>.15
14	0.281533	0.057503	0.968973	0.2754	5.24222	4	0.2633	0.07705382	>.15
15	0.16218	0.066733	0.964734	0.1779	1.48801	3	0.6850	0.08403795	>.15
16	0.101577	0.061133	0.966718	0.2193	3.47164	4	0.4822	0.06010803	>.15
17	0.072514	0.064578	0.971738	0.3579	0.97623	3	0.8070	0.06620497	>.15
18	-0.02758	0.073624	0.962068	0.1327	6.35647	3	0.0955	0.06538124	>.15
19	-0.11577	0.066456	0.967638	0.2410	5.50152	3	0.1385	0.05293705	>.15
20	-0.1277	0.061917	0.97611	0.5173	2.16042	3	0.5398	0.05469039	>.15
21	-0.18262	0.069409	0.973157	0.4061	3.38120	3	0.3365	0.07334132	>.15
22	-0.28114	0.061827	0.968058	0.2514	7.75784	4	0.1009	0.04762699	>.15
23	-0.29885	0.050032	0.972047	0.3681	1.71176	3	0.6343	0.06913524	>.15
24	-0.30482	0.052379	0.976276	0.5239	4.93486	4	0.2940	0.10125089	0.1280
25	-0.38503	0.046435	0.969953	0.3029	3.82868	3	0.2806	0.11072399	0.0673
26	-0.42111	0.031603	0.97723	0.5624	6.44700	3	0.0918	0.07220539	>.15
27	-0.39549	0.025491	0.974633	0.4600	4.73843	4	0.3152	0.07819316	>.15
28	-0.43477	0.024058	0.976355	0.5271	5.44749	3	0.1418	0.05970317	>.15
29	-0.48609	0.014794	0.967174	0.2298	10.88151	4	0.0279	0.08808994	>.15
30	-0.45514	0.019106	0.978436	0.6121	3.40835	4	0.4919	0.07403357	>.15

$$\lim_n E(r_k) = \rho_k$$

$$\lim_n \text{Var}(r_k) = \frac{1}{n} \sum_i (\rho_i^2 + \rho_i + \rho_k \rho_{i-k} - 4\rho_k \rho_i \rho_{i-k} + 2\rho_k^2 \rho_i^2)$$

하지만 모수를 모르므로 본 연구에서는 표본자기상관계수의 분포를 연구하여 보았다. <표 3-4>는 정상인 변압기에서 발생하는 권선신호 자료에서 시차 30까지의 표본자기상관계수에 대한 통계량과 샤피로-윌크, 카이제곱 및 K-S 정규성검정 결과이다. 분포의 형태는 유의수준 1%로 시차 2,3,5를 제외하고는 정규분포를 따르는 것으로 나타났다.

〈표 3-5〉 권선신호의 표본편자기상관계수의 분포(자료수=60)

시차	평균	표준편차	샤피로-윌크 통계량	p-값	카이제곱 통계량	DF	p-값	K-S 통계량	p-값
1	0.944726	0.007611	0.982143	0.7628	7.22662	4	0.1244	0.06380735	>.15
2	0.130779	0.053325	0.670435	0.0001	153.9216	3	0.0000	0.22086937	<0.01
3	0.652673	0.103865	0.67481	0.0001	114302.917	4	0.0000	0.2706036	<0.01
4	-0.80521	0.042205	0.948073	0.0246	60.127576	4	0.0000	0.09081948	>.15
5	-0.10641	0.131748	0.870083	0.0001	48.70846	4	0.0000	0.13456873	<0.01
6	-0.07393	0.126882	0.869859	0.0001	30.84662	3	0.0000	0.13712697	<0.01
7	-0.21667	0.084302	0.92235	0.0008	22.84100	3	0.0000	0.16246239	<0.01
8	-0.24612	0.076877	0.761737	0.0001	123.4453	4	0.0000	0.22446816	<0.01
9	0.069833	0.100552	0.861731	0.0001	27.25966	3	0.0000	0.1802211	<0.01
10	0.001577	0.080528	0.971286	0.3434	2.44201	4	0.6550	0.07897316	>.15
11	-0.06643	0.079002	0.938834	0.0074	17.56274	4	0.0015	0.08432896	>.15
12	-0.02886	0.10014	0.905849	0.0001	17.57802	4	0.0015	0.12456112	0.0294
13	0.125114	0.049541	0.9701	0.3072	2.27356	3	0.5176	0.08211552	>.15
14	0.053327	0.073627	0.95532	0.0604	10.39965	3	0.0155	0.08992638	>.15
15	-0.05127	0.064034	0.964042	0.1651	2.99691	3	0.3921	0.09646453	>.15
16	0.045929	0.059042	0.792316	0.0001	80.4211	3	0.0000	0.2469112	<0.01
17	0.005693	0.05841	0.968587	0.2651	6.41851	3	0.0929	0.08330579	>.15
18	-0.07093	0.048114	0.990408	0.9782	1.27702	3	0.7346	0.07207559	>.15
19	0.046128	0.060015	0.949287	0.0287	12.76925	4	0.0125	0.12789356	0.0218
20	0.073775	0.048649	0.969248	0.2829	4.92771	4	0.2948	0.08143612	>.15
21	-0.02217	0.039814	0.976876	0.5481	7.14503	4	0.1284	0.08082451	>.15
22	-0.04238	0.049696	0.932668	0.0033	10.46748	3	0.0150	0.15811159	<0.01
23	0.050237	0.03573	0.991674	0.9890	6.32912	5	0.2755	0.06480493	>.15
24	-0.01905	0.04988	0.894918	0.0001	36.17595	3	0.0000	0.14595731	<0.01
25	-0.05457	0.037398	0.960055	0.1056	15.31351	3	0.0016	0.08490348	>.15
26	-0.00662	0.038366	0.980993	0.7172	14.43281	5	0.0131	0.06705518	>.15
27	-0.05856	0.034594	0.978267	0.6051	6.70829	3	0.0818	0.07127566	>.15
28	-0.08359	0.031404	0.989575	0.9680	0.46475	3	0.9266	0.07826874	>.15
29	-0.0384	0.02939	0.994445	0.9988	0.76728	3	0.8573	0.06075126	>.15
30	-0.0225	0.039673	0.94204	0.0113	8.51014	3	0.0366	0.08794765	>.15

한편 시차가 k인 편자기상관계수는 관측값  $Z_t$  와  $Z_{t-k}$  의 상관을  $Z_{t-1}, Z_{t-2}, \dots, Z_{t-k-1}$  의 상관관계를 제거한 후에 구하는 상관측도로서 다음과 같이 정의된다.

$$\phi_{kk} = \frac{\text{Cov}(Z_t - \hat{Z}_t)(Z_{t-k} - \hat{Z}_{t-k})}{\sqrt{\text{Var}(Z_t - \hat{Z}_t)}\sqrt{\text{Var}(Z_{t-k} - \hat{Z}_{t-k})}}, \quad k=1, 2, \dots, T-1$$

시차가 k인 표본편자기상관함수  $\hat{\phi}_{kk}$ 의 계산은 Durbin-Levinson 알고리즘이 많이 이용된다 [조신



섭·황선영(1995)].

자기상관계수의 경우와 마찬가지로 60개의 권선신호로부터 시차 30까지의 편자기상관계수를 구한 후, 각 시간별 정규성 검정을 한 결과가 <표 3-5>와 같다. 편자기상관계수는 정규분포를 따르지 않는 시차가 더 많음을 알 수 있다.

#### 4. 진동신호의 관리도

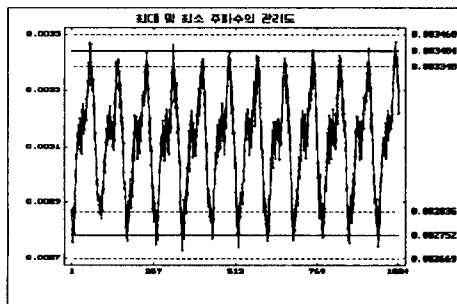
3절에서 연구한 통계량의 표본분포를 이용하면 각 통계량의 관리도를 작성할 수 있다. 관리한계선은 통계량이 정규분포를 따를 때는 모집단의  $\sigma$  예측치를 이용하여  $\pm 3\sigma$  를 관리상한선(UCL) 및 관리하한선(LCL)으로 하고, 정규분포를 따르지 않는 경우에는 통계량의 표본분포에서 0.5% 백분위수를 관리하한선으로, 99.5% 백분위수를 관리상한선으로 하였다. 이러한 관리선을 벗어나는 자료는 변압기에 이상이 발생한 것으로 판별할 수 있다.

##### 4.1 주파수의 주기별 최대값 및 최소값의 관리도

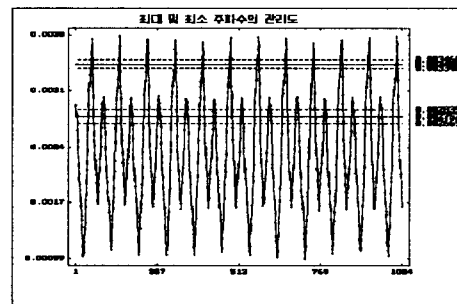
앞 절에서 실험한 결과를 근거로 만들어진 주기별 최대값과 최소값의 중심선, 관리상한선, 관리하한선이 <표 4-1>이고, <그림 4-1>은 이 관리선을 전류 25%, 전압 0%의 실험조건에서 15시에 측정된 실제 자료에 적용시킨 예이다. 정상 신호에서 주기별 최대값과 최소값은 관리선 안에 있으나 비정상 신호에서는 매 주기별 최대값과 최소값이 관리선을 벗어남을 잘 알 수 있다.

<표 4-1> 15시 권선신호의 주기별 최대값, 최소값에 대한 관리 한계선  
(전류 25%, 전압 0%)

	최대값	최소값
중심선(CL)	0.00340372	0.00275201
관리상한선(UCL)	0.00345952	0.00283502
관리하한선(LCL)	0.00334792	0.00266900



(a) 정상 신호



(b) 비정상 신호

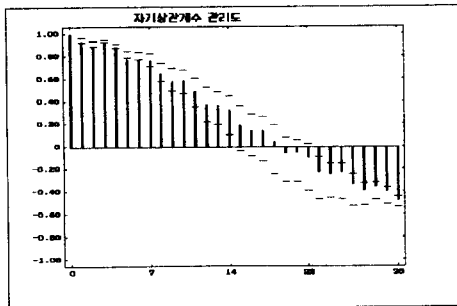
<그림 4-1> 15시 권선신호의 주기별 최대값, 최소값 관리도의 예  
(전류 25%, 전압 0%)

## 4.2 자기상관계수 및 편자기상관계수의 관리도

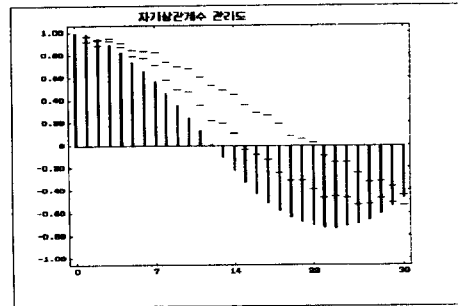
앞 절에서 실험한 결과를 근거로 만들어진 자기상관계수와 편자기상관계수의 중심선, 관리상한선, 관리하한선이 <표 4-2>이고 <그림 4-2>는 자기상관계수의 관리선을 실제 자료에 적용시킨 예이다. 그림에서 보듯이 정상인 신호는 대부분 관리한계선 안에 들어오나 비정상신호는 관리한계선을 한참 벗어나는 것으로 나타나 변이상태를 잘 판별할 수 있다.

&lt;표 4-2&gt; 권선신호의 각 시차별 자기상관계수 및 편자기상관계수의 관리한계선

자기상관계수				편자기상관계수			
	CL	LCL	UCL		CL	LCL	UCL
1	0.944726	0.92189	0.96756	1	0.944726	0.92189	0.96756
2	0.906404	0.88748	0.93786	2	0.130779	0.09037	0.26718
3	0.937658	0.93137	0.94944	3	0.652673	0.46621	0.75490
4	0.893903	0.87626	0.91155	4	-0.80521	-0.86486	-0.73775
5	0.807425	0.79326	0.84914	5	-0.10641	-0.26157	0.24153
6	0.796506	0.77667	0.83931	6	-0.07393	-0.34590	0.06789
7	0.768319	0.71132	0.82532	7	-0.21667	-0.32785	-0.09159
8	0.660416	0.58037	0.74046	8	-0.24612	-0.32475	-0.04282
9	0.597063	0.49448	0.69964	9	0.069833	-0.12191	0.18576
10	0.57651	0.47318	0.67984	10	0.001577	-0.24001	0.24316
11	0.481217	0.35293	0.60951	11	-0.06643	-0.16233	0.10276
12	0.375022	0.21874	0.53130	12	-0.02886	-0.22926	0.09563
13	0.342492	0.19475	0.49024	13	0.125114	-0.02351	0.27374
14	0.281533	0.10902	0.45404	14	0.053327	-0.16755	0.27421
15	0.16218	-0.03802	0.36238	15	-0.05127	-0.24337	0.14083
16	0.101577	-0.08182	0.28498	16	0.045929	-0.11593	0.11355
17	0.072514	-0.12122	0.26625	17	0.005693	-0.16954	0.18092
18	-0.02758	-0.24845	0.19329	18	-0.07093	-0.21527	0.07341
19	-0.11577	-0.31514	0.08360	19	0.046128	-0.06669	0.11404
20	-0.1277	-0.31345	0.05805	20	0.073775	-0.07217	0.21972
21	-0.18262	-0.39085	0.02561	21	-0.02217	-0.14161	0.09727
22	-0.28114	-0.46662	-0.09566	22	-0.04238	-0.15244	0.02122
23	-0.29885	-0.44895	-0.14875	23	0.050237	-0.05695	0.15743
24	-0.30482	-0.46196	-0.14768	24	-0.01905	-0.08582	0.04234
25	-0.38503	-0.52434	-0.24573	25	-0.05457	-0.16676	0.05762
26	-0.42111	-0.51592	-0.32630	26	-0.00662	-0.12172	0.10848
27	-0.39549	-0.47196	-0.31902	27	-0.05856	-0.16234	0.04522
28	-0.43477	-0.50694	-0.36260	28	-0.08359	-0.17780	0.01062
29	-0.48609	-0.53047	-0.44171	29	-0.0384	-0.12657	0.04977
30	-0.45514	-0.51246	-0.39782	30	-0.0225	-0.08359	0.04183



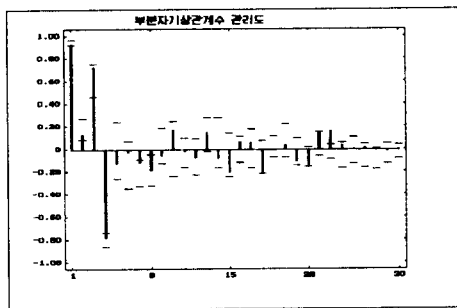
(a) 정상 신호



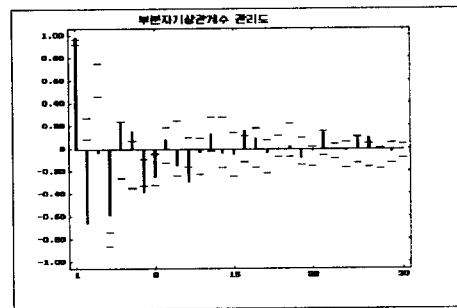
(b) 비정상 신호

<그림 4-2> 권선신호의 자기상관계수 관리도

<그림 4-3>은 편자기상관계수의 관리선을 실제 자료에 적용시킨 예이다. 그림에서 보듯이 표본 편자기상관계수가 정규분포를 따르는 시차에서는 정상인 신호는 관리한계선 안에 들어오나 정규분포를 따르지 않는 시차에서는 관리선을 벗어나는 것도 있는 것으로 나타났으며, 비정상신호는 관리한계선을 한참 벗어나는 것으로 나타나 변이상태를 잘 판별할 수 있었다.



(a) 정상 신호



(b) 비정상 신호

<그림 4-3> 권선신호의 편자기상관계수 관리도

## 5. 결론 및 제언

변압기의 고장은 우리에게 많은 경제적인 손실을 초래할 수 있어 변압기의 이상상태를 판별하는 문제는 현실적으로 매우 중요한 문제이다. 하지만 모형을 적합시켜 변이상태를 판별하는 기존의 방법은 변압기 진동신호의 특징상 적용하기가 쉽지 않다. 본 논문에서는 진동신호의 특징을 설명할 수 있는 몇 가지 통계량에 대한 관리도를 이용하여 변이상태의 판별을 시도하여 만족할 만한 결과를 얻었다. 여기서는 변압기 진동신호중 권선신호에 대하여만 설명하였지만 유사한 관리도를 외함 및 철심신호에 관해서 각 시간별로 작성하여 컴퓨터로 종합적으로 관리하면 변압기의 이상유무를 빠르게 판별할 수 있다. 하지만 본 연구결과는 실제 우리 주변의 변압기에 시스템을 설치하기 위해서는 시간과 비용이 많이 들기때문에 실험실에서만 연구한 결과임을 밝힌다.

품질관리에서 사용하는 관리도에는 여러 가지가 있으나 시계열 자료에 적합시키기에는 알맞지 않다. 여기서는 간단한 방법을 사용하였으나 다른 적절한 통계량을 이용한 관리도도 향후 연구할 적 하다. 나아가서 시계열자료에 수학적 모형을 적용시키기 힘든 경우에 변이상태를 판별하는 문제는 앞으로도 많은 연구가 필요하다고 생각된다.

### 참고문헌

- [1] 조신섭·황선영 (1995). 「시계열분석」, 한국방송통신대학교출판부, 서울.
- [2] 허명희·박유성 (1994). 「시계열자료분석」, 자유아카데미, 서울.
- [3] 김원경 (1993). 「시계열분석」, 경문사, 서울.
- [4] 박성현 (1984). 「통계적 품질관리」, 대영사, 서울.
- [5] 정찬수 등 (1994). 변압기 권선고장 검출을 위한 진동분석 시스템 개발연구, 한국전력공사 기술연구원.
- [6] Box, George E. and Jenkins, Gwilym M. (1970). *Time Series Analysis-forecasting and control*. Holden-Day Inc, California.
- [7] Deller, John R. and Proakis, John G. and Hansen, John H.L. (1993). *Discrete-Time Processing of Speech Signals*. Macmillan Publishing Company, New York.
- [8] Hamilton, James D. (1989). A New Approach to the Economic Analysis of Nonstationary Time Series and the Business Cycle, *Econometrica*, Vol. 57, 357-384.
- [9] Tyssedal, J. S. and Tjostheim, D. (1988). An Autoregressive Model With Suddenly Changing Parameters and an Application to Stock Market Prices, *Applied Statistics*, Vol. 37, 353-369.
- [10] Shapiro, S. S. and Wilk, M. B. (1965). An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples), *Biometrika*, Vol. 52, 591-611.
- [11] Terrell, George R. and Scott, David W. (1985). Oversmoothed Nonparametric Density Estimates, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 80, 209-214.
- [12] SAS/QC Software : Usage & Reference. Version 6, First Edition. Vol 1. (1995). SAS Institute Inc., Cary, North Carolina.