

# 지자기와 국내 전력망 유도전류 상관관계 분석 연구

2013. 12.

## 제 출 문

본 보고서를 「지자기와 국내전력망 유도전류 상관관계 분석에 관한 연구」 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2013. 12. 31.

연구책임자 : 박성원(우주전파센터 관측팀)

연구원 : 박성환(우주전파센터 관측팀)

김영운(우주전파센터 관측팀)

유충현(우주전파센터 관측팀)

## 요 약 문

태양흑점폭발로 인해 방출된 코로나물질은 2~4일 후 지구전역에 자기장 교란을 일으키고 지상에 설치된 장거리 송전선을 통해 지자기 유도전류(GIC : Geomagneically Induced Current)를 발생시켜 변압기 손상이나 정전피해 등 전력망 장애를 줄 수 있다. 과거 이러한 피해는 고위도 국가인 캐나다, 영국, 미국 등에만 발생되었으나 최근 2003년 중위도 국가인 남아공에서 지자기 교란으로 인한 유도전류로 전력망 변압기 15기가 손상되는 피해가 발생되었다.

본 연구는 국내에서 발생된 지자기와 유도전류 데이터간의 상관관계를 분석하여 국내 최초로 유도전류 계산식을 마련하였으며 보다 정확한 예상값을 산출하는 방안을 제시하였다.

이를 위해 제1장에서는 아시아 국가 및 해외 주요 국가별 지자기 유도전류 관측사례와 계산값 산출관련 연구동향을 파악하여 국내 지자기 폭풍과 지역적 지자기 변화에 대비한 국내 초고압 변전소(신가평, 신태백, 동제주) 유도전류 관측시스템 설치현황을 기술하였다.

제2장에서는 국내 관측된 지자기와 국내 전력망 유도전류의 특성을 분석하기 위해 이천, 강릉, 제주의 과거 지자기 교란 데이터를 추출한 3개 관측소의 데이터를 비교 분석하고, 지자기 변화에 따른 신가평, 신태백, 동제주의 유도전류 관측결과를 비교 분석하였다. 방대한 지자기 데이터에서 지자기 변동폭이 크고 지자기의 미분값이 큰 데이터를 지자기 교란 데이터로 추출하는 방안을 제시하였으며 2000년과 2003년에 가장 큰 지자기 교란이 발생되었음을 확인할 수 있었다. 또한 지자기 교란 지수인 K 지수와 유도전류 이벤트간의 통계분석을 통해 K 지수의 등급이 낮더라도 유도전류가 발생할 수 있음을 확인하였으며, 유도전류 3개 관측소의 데이터 비교를 통해 지자기 방향에 따라 유도전류의 극성이 변하고, 765kV-154kV간 유도전류 발생규모의 차이 분석으로 동제주 변전소는 유도전류로 인한 변압기 포화 영향을 받지 않음을 분석할 수 있었다.

제3장에서는 국내 지자기와 국내 전력망 유도전류의 상관관계를 분석하여 유도전류 계산식을 마련하였다. 먼저 유도전류 계산식 마련에 필요한 각종 임피던스 특성을 모델링하기 위해 국내 변압기 임피던스와 변전소별 대지고유저항을 조사·분석하고, 국내 전력망 특성을 감안하여 지자기 교란으로 인한 각 변전소별 유도전류 성분을 추출하는 방안을 마련하였으며 실제 유도전류 관측값에 적용한 후 지자기 변화 패턴과 비교 분석하였다. 그런 다음 '12.10월부터 '13.11월까지 우주전파센터에서 관측된 지자기 및 유도전류 데이터를 이용하여 지자기 교란이 발생한 일자별로 지자기와 유도전류간의 상관계수를 산정하였다. 외국 연구 사례와 마찬가지로 지자기 교란이 큰 1일 이내의 데이터를 이용하여 상관계수를 산정하였으나 다른 일자의 관측값과 상당한 차이가 발생됨을 확인하였다. 이를 개선하기 위해 지자기 교란 이벤트가 발생한 모든 일자에서의 지자기와 유도전류 데이터간 공통 상관계수를 산정하였고 실측된 유도전류와 예측된 유도전류 발생규모의 차이를 줄이고 발생시점을 일치시키는 개선방안을 마련하였다. 유도전류 이벤트 크기별로 발생시점에 지자기 데이터를 추출하여 유도전류 예상값을 계산하고 실측값과 예상값간 차이를 정확도 확률로 분석함으로써 특정 기준레벨 이상의 유도전류 관측값을 이용하여 유도전류 예상값의 정확도를 향상시킬 수 있었다.

이러한 유도전류의 지자기 성분 추출방안과 유도전류 예상값의 정확도 개선방안을 통해 '12.10월부터 '13.11월까지 지자기 교란 이벤트가 발생한 모든 일자에서 지자기와 유도전류 데이터간의 공통 상관계수를 산정하였으며, 다른 지역의 유도전류 관측값과의 비교 분석을 통해 유도전류 계산식을 검증하였다. 그 결과, 유도전류 관측값과 예상값간의 발생시점이 일치하고 발생규모의 차이도 최소화하는 765kV 전력망의 유도전류 계산식을 국내에 적합한 모델로 최종 도출할 수 있었다.

마지막으로 과거 지자기 폭풍 발생시 미국 예보센터에서 관측된 지자기 데이터를 통해 지자기 교란 횟수를 조사하고 해외 전력망에 피해를 준 사례를 분석하여 과거 지자기 최대 교란시 국내 발생한 유도전류 예상값을 산출하였다. 본 연구를 통해 우리나라도 지자기 교란으로 인한 유도전류가 크게 발생될 수 있음을 확인할 수 있고 지자기 폭풍으로 인한 국가 전력망 피해를 대비하는 방안을 지속적으로 마련해나가야 할 것이다.

# SUMMARY

The Korean Space Weather Center (KSWC) of the National Radio Research Agency (RRA) has three Geomagnetic observatory and one Sin-Gapyung GIC(Geomagnetic Induced Current) observatory. For this study, We additionally installed GIC measurement systems at the Sin-Teabeak and the Dong-Jeju power sub-station.

Our study is the first time in Korea on the relation between Geomagnetic data and GIC data in power sub-station. And the try to improve accuracy of the calculated GIC was very successful. The component of geomagnetic disturbance was extracted from the all measured GIC, and the probability of accuracy was computed as the difference between the all measured GIC and the all calculated GIC. As a result, the calculated GIC in new method using the geomagnetic data extracted at the same time above GIC reference level was more accuracy. So we going to keep upgrading GIC common coefficient using further geomagnetic disturbance data.

Using the GIC common coefficient computed in new method, the max value of the calculated GIC at geomagnetic disturbance from 1996 to 2012 is estimated - 15A in Sin-gapyung at 29 Oct. 2003. it is higher than the measured GIC at South African power grid at same period.

We have to prepare a disaster of space weather, especially geomagnetic sub-storm, by notifying to Korea Power sub-station of the GIC variation due to geomagnetic disturbance. This will be a useful information to operate 765kV power grid. For this alert service, GIC monitoring system expeditiously notified GIC variation will be developed in the future study.

# 목 차

제1장 서론 .....	1
제1절 연구배경 .....	1
제2절 해외 동향 .....	5
제3절 유도전류 측정시스템 운용 및 설치 .....	11
제2장 지자기, K지수와 유도전류 관측 데이터 분석 .....	15
제1절 지자기 데이터 추출방안 및 사례 분석 .....	15
제2절 지자기 교란 데이터 비교분석 .....	19
제3절 유도전류 관측결과 비교분석 .....	41
제3장 유도전류 예상값 산출 .....	55
제1절 각종 임피던스 조사 .....	55
제2절 유도전류 성분 추출 .....	58
제3절 상관관계 분석 및 계산식 마련 .....	64
제4절 과거 지자기 폭풍시 유도전류 예상값 산출 .....	75
제4장 결론 .....	90
참고문헌 .....	91

## 표 목 차

표 2-1 유도전류 측정 최대치와 지자기 데이터 변화 분석표 .....	17
표 2-2 지자기 변동폭과 $dH/dt$ 분석(2011~2012년) .....	18
표 2-3 미국 우주예보센터(SWPC) 경보현황(2011~2012년) .....	19
표 2-4 강릉-이천 지자기 교란 데이터 비교(2010~2012년) .....	21
표 2-5 강릉-제주 지자기 교란 데이터 비교(2010~2012년) .....	23
표 2-6 강릉 지자기 교란 동일일시 데이터 수 .....	24
표 2-7 이천-제주 지자기 교란 데이터 비교(1998~2012년) .....	26
표 2-8 이천 지자기 교란 동일일시 데이터 수 .....	29
표 2-9 제주-강릉 지자기교란 데이터 비교(2010~212년) .....	31
표 2-10 제주-이천 지자기 교란 데이터 비교(1998~2012년) .....	33
표 2-11 제주 지자기 교란 동일일시 데이터 수 .....	35
표 2-12 이천 지자기 변화와 신가평 유도전류 측정값('12.10.31) ..	42
표 2-13 지자기, K지수, 유도전류 측정값 비교('12.11.12) .....	43
표 2-14 지자기, K지수, 유도전류 측정값 비교('12.11.13) .....	44
표 2-15 지자기, K지수, 유도전류 측정값 비교('12.11.14) .....	45
표 2-16 지자기, K지수, 유도전류 측정값 비교('12.11.24) .....	46
표 2-17 지자기, K지수, 유도전류 측정값 비교('12.12.2) .....	47
표 2-18 지자기 교란지수 통계('12.10.17~'13.2.28) .....	47
표 2-19 GIC 발생일시와 지자기 교란지수 비교 .....	48
표 3-1 변전소 위치별 대지 고유저항 .....	56
표 3-2 국내 변압기 특성 .....	57
표 3-3 관측 일자별 유도전류 상관계수 .....	65
표 3-4 1960년대 이후 지자기 교란 단계별 현황 .....	75
표 3-5 1960년대 지자기 교란지수 현황( $K_p > 7$ ) .....	76
표 3-6 1970년대 지자기 교란지수 현황( $K_p > 7$ ) .....	78
표 3-7 1980년대 지자기 교란지수 현황( $K_p > 7$ ) .....	79
표 3-8 1990년대 지자기 교란지수 현황( $K_p > 7$ ) .....	81

표 3-9 2000년대 지자기 교란지수 현황( $K_p > 7$ ) .....	83
표 3-10 2010년대 지자기 교란지수 현황( $K_p > 7$ ) .....	84
표 3-11 과거 지자기 교란시 유도전류 예상값 .....	89



## 그 립 목 차

그림 1-1 지구자기장 유도전류 발생원리 .....	2
그림 1-2 국내 전력송전설비 계통도 .....	3
그림 1-3 지자기 유도전류 관측시스템 계통도 .....	4
그림 1-4 지자기 유도전류 관측시스템 상세 계통도 .....	4
그림 1-5 신가평 변전소의 유도전류 측정시스템과 데이터 표출 화면 .....	12
그림 1-6 신태백 변전소의 유도전류 측정시스템과 데이터 표출 화면 .....	13
그림 1-7 동제주 변전소의 유도전류 측정시스템과 데이터 표출 화면 .....	14
그림 2-1 SSC 각 지자기 변화 유형의 예 .....	15
그림 2-2 SI 각 지자기 변화 유형의 예 .....	15
그림 2-3 SFE 각 지자기 변화 유형의 예 .....	16
그림 2-4 Bay 각 지자기 변화 유형의 예 .....	16
그림 2-5 강릉 지자기 교란 데이터 추출(2010~2012년) .....	20
그림 2-6 강릉 지자기 교란 데이터(이천 비교후 오류제거) .....	21
그림 2-7 이천 지자기 교란 데이터(강릉 비교후 오류제거) .....	22
그림 2-8 강릉 지자기 교란 데이터(제주 비교후 오류제거) .....	24
그림 2-9 강릉 지자기 교란 데이터(2010~2012년) .....	25
그림 2-10 이천 지자기 교란 데이터(제주 비교후 오류제거) ...	28
그림 2-11 이천 지자기 교란 데이터(1998~2011년) .....	31
그림 2-12 제주 지자기 교란 데이터(강릉 비교후 오류제거) .....	32
그림 2-13 제주 지자기 교란 데이터(이천 비교후 오류제거) .....	35
그림 2-14 제주 지자기 교란 데이터(1998~2012년) .....	38
그림 2-15 이천-일본 지자기 관측결과 비교 .....	39
그림 2-16 이천-일본 dH/dt 산출 비교 .....	40
그림 2-17 지자기 변화와 dH/dt(6.1) .....	49
그림 2-18 3개 관측소 유도전류 측정 데이터(6.1) .....	50
그림 2-19 지자기 변화와 dH/dt(6.6) .....	51
그림 2-20 3개 관측소 유도전류 측정 데이터(6.6) .....	52

그림 2-21	신가평-동제주 유도전류 측정데이터 비교('13.10.2) .....	53
그림 2-22	미국 초고압 전력망의 kV 등급별 임피던스 .....	54
그림 3-1	유도전기장 계산을 위한 임피던스 성분 모델링 .....	55
그림 3-2	지층의 두께별 대지도전율과 임피던스의 관계 .....	56
그림 3-3	전력 네트워크 모델링 .....	57
그림 3-4	신가평, 신태백 변전소 유도전류 측정값(지자기교란이 없는 날) .....	59
그림 3-5	스웨덴과 남아공의 유도전류 관측 결과 .....	59
그림 3-6	평상시와 지자기 교란시 신가평 변전소의 유도전류 변화량 .....	60
그림 3-7	이동평균법을 적용한 유도전류 관측 결과 .....	61
그림 3-8	일일평균값과 이동평균법을 이용한 유도전류 추출 .....	63
그림 3-9	신가평 변전소의 일별 유도전류 평균치 변화 .....	63
그림 3-10	상관계수를 이용한 유도전류 예상값과 실제 관측값 .....	66
그림 3-11	유도전류 실측값과 예상값 비교 .....	67
그림 3-12	지자기 미분값과 유도전류 교정치 일별 비교 .....	67
그림 3-13	오류데이터 제거후 유도전류 실측값과 예상값 비교 .....	68
그림 3-14	유도전류 실측값과 예상값 비교(유도전류 $ 1 A$ 이상) .....	69
그림 3-15	유도전류 실측값과 예상값 비교(유도전류 $ 2 A$ 이상) .....	69
그림 3-16	유도전류 관측 교정치와 예상값의 확률 분포 1 .....	70
그림 3-17	유도전류 관측 교정치와 예상값의 확률 분포 2 .....	71
그림 3-18	유도전류 교정치와 예상치 비교('12.10.17~'13.11.30) .....	72
그림 3-19	유도전류 실측값과 예상값 일일 비교(신가평) .....	73
그림 3-20	유도전류 실측값과 예상값 일일 비교(신태백) .....	74
그림 3-21	1960년대 kP 지수 현황 .....	75
그림 3-22	1970년대 kP 지수 현황 .....	76
그림 3-23	1980년대 kP 지수 현황 .....	78
그림 3-24	1990년대 kP 지수 현황 .....	80
그림 3-25	2000년대 kP 지수 현황 .....	82
그림 3-26	2010년대 kP 지수 현황 .....	84
그림 3-27	스웨덴 지자기 관측값('03.10.29) .....	86

그림 3-28 유도전류 관측결과와 변압기 장애 발생 현황('03.10.29) ....	86
그림 3-29 스웨덴 지자기 관측값('03.10.30) .....	87
그림 3-30 유도전류 관측결과와 변압기 장애 발생 현황('03.10.30) ....	88
그림 3-31 남아공 유도전류 관측값('03.10.29) .....	88
그림 3-32 지자기 교란시 유도전류 예상값('03.10.29) .....	189

# 제1장 서론

## 제1절 연구의 배경

### 1. 개요

태양폭발로 인한 우주기상의 변화는 지자기 교란 및 유도전류(GIC: Geomagnetically Induced Currents)의 형태로 지구에 영향을 준다. 태양폭발로 인해 방출된 태양풍 입자는 지구 자기권과 전리층에 커다란 변화를 초래하는 동시에 지구 자기장에도 큰 충격을 주는데, 이러 급격한 변화는 지상에 설치된 송전설비에 직류성분의 전류를 유도하여 초고압 변압기 손상 내지 전력망 정전피해를 초래할 수 있다.

2000년 이후 스웨덴에서는 '03. 10월 지자기 폭풍으로 인한 정전피해가 20~50분 동안 발생하였으며, 중위도 국가에 속하는 남아공에서는 변압기 15기가 손상되는 피해를 입었다. 중위도 국가인 중국과 일본은 '04년 이후 자국의 전력망에 유도전류 측정 장치를 설치하고 유도전류 예상치를 산출하는 연구를 진행했으나, 우리나라는 위도가 낮아 이러한 유도전류가 발생되지 않을 것이라고 예상되어 유도전류 측정 및 산출 연구를 수행한 사례가 없었다. 위도가 낮더라도 지자기 폭풍으로 인한 피해 사례가 빈번히 보고되고 있으므로 이에 대한 대책이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 우주전파센터가 관측하고 있는 지자기 데이터와 유도전류 데이터간 상관관계를 분석하여 유도전류 예상값을 산출할 수 있는 계산식을 국내 최초로 도출하였고 이를 검증하기 위해 유도전류 예상값과 실제 측정값을 비교·분석하였다.

### 2. 유도전류의 발생원리

지구 대기 상층부에서 자기장의 시간적 변화는 지상에서 직류성분의 전류를 유도시킨다. 패러데이의 유도전류 법칙에 따르면 공간적으로 이격된 대기 상공에서의 자기장의 시간적 변화는 지표면에서 전기장을 생

성한다. 지상에 생성된 전기장은 전하를 발생시키며 송전선이나 송유관 등의 도체 구조물을 따라 흘러간다. 이렇게 유도된 전하는 전기장의 크기는  $V/km$  (킬로미터당 전압)의 단위로 전력망에 직류 전압의 공급원 역할을 하게 된다. 이를 통해 지자기 유도전류가 발생된다.

그림 1은 유도전류의 발생원리를 알려주는 것으로 전리층에서의 전류의 변화( $I(t)$ )는 지상에서의 유도된 전기장( $E(t)$ )을 발생하며 전류를 유도한다. 삽입된 그래프는 핀란드 가스관에서 기록된 유도전류 그래프이다.

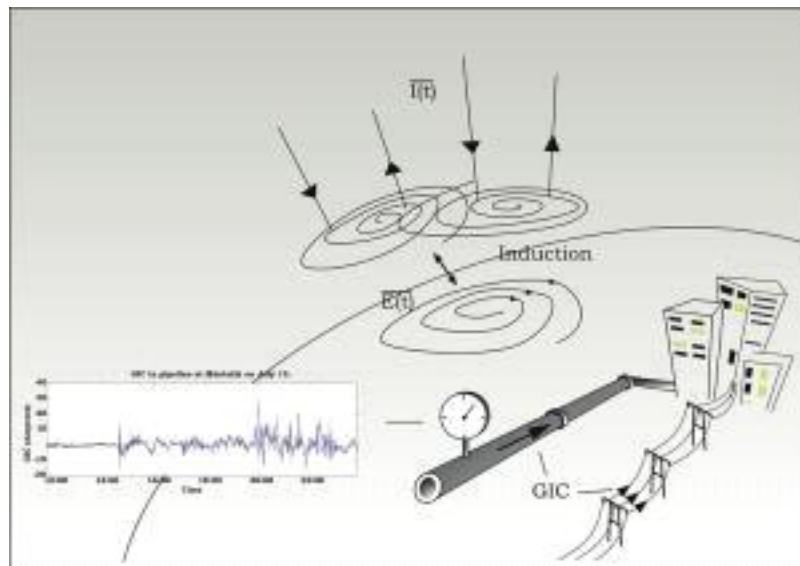


그림 1-1 지구자기장 유도전류 발생원리

유도전류의 주파수 변화는 전기장의 시간에 따른 변화의 정도에 따라 결정되지만, 종종 준-직류(quasi direct current)로 간주되기도 한다. 전력망에서의 유도전류 발생규모는 지자기 변화의 공간적 및 시간적 크기와 지리적 특성에 따라 결정된다.

지자기 폭풍은 자기권과 전리층에서 대규모의 전류변화를 일으키며, 수초에서 수 시간에 걸친 변화가 대부분이다. 대규모 자기장 변화는 고위도 지역에서 발생하기 때문에 유도전류 측정시설들은 1970년대 이후부터 캐나다, 핀란드, 스칸디나비아의 전력망에서 지속적으로 측정되어

왔다. 그 관측된 유도전류의 최대 크기는 수십 ~ 수백 암페어 규모이다. 대규모 지자기폭풍 시에는 중위도 지방에서도 유도전류가 관측되었으며, 특히 낮에 짧은 시간에 급격한 자기장 변화로 인한 지자기 폭풍이 발생한다.

### 3. 국내 전력송전설비의 계통

그림 2는 국내 전력 송전설비의 계통을 지도로 표현한 것이며, 그중 최고 높은 초고압 전력망인 765kV의 송전선이 신가평 ~ 신태백, 신서산 ~ 신안성의 구간이 있다. 우주전파센터에서는 국내 최초로 2012년도 지자기 유도전류 측정을 위해서 신가평 변전소에 관측소를 10월에 설치하여 운영 중에 있고, 2013년 5월에 신태백과 154kV 동제주 변전소에 관측소를 각각 추가 설치하여 지자기 유도전류를 관측하고 있다.



그림 1-2 국내 전력송전설비 계통도

#### 4. 지자기 유도전류 관측 시스템

우주전파센터에서 설치한 유도전류 관측시스템의 계통도는 그림 3과 같다. 변압기에 연결된 접지선에 Clamp형 전류센서를 연결하고 전류센서에서 전류량을 아날로그 형태로 실시간 측정하고 수집PC로 데이터를 전송하기 위해 A/D 변환기에서 디지털로 변환된 후 LAN을 이용하여 데이터를 수집한다. 관측된 데이터는 인터넷망을 이용하여 우주전파센터로 2분 간격으로 자동 전송되고, 전송된 데이터는 홈페이지 서버를 통해 10분 간격으로 실시간 관측된 데이터를 서비스하고 있다. 그림 4는 상세한 유도전류 관측시스템의 계통도이다.

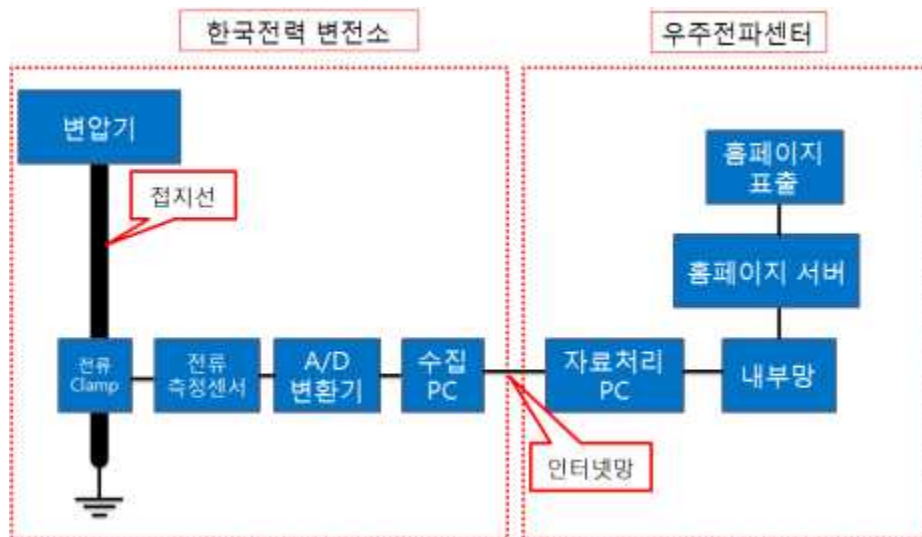


그림 1-3 지자기 유도전류 관측시스템 계통도

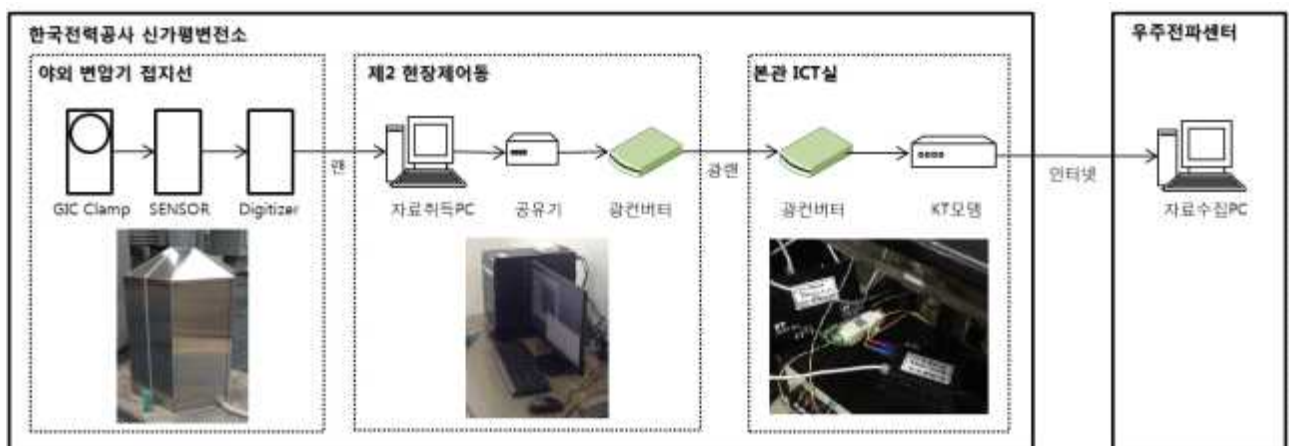


그림 1-4 지자기 유도전류 관측시스템 상세 계통도

## 제2절 해외 동향

### 1. 아시아 국가의 지자기 유도전류 연구동향 조사

지자기 변화에 따른 국내 전력망에 미치는 지자기 유도전류(GIC, Geomagnetically Induced Current) 영향을 알아보기 위해 아시아 국가의 연구동향을 조사·분석을 하였다. 오로라 등 지자기가 강력한 고위도에서 고층전류의 변화로 인한 강력한 GIC가 주로 발생한다. '89. 3월 캐나다 퀘벡에서는 지자기 폭풍으로 인해 전력공급 중단사고가 발생되었다고 알려져 있다. 하지만 '91년 미국에서는 저위도 지역에서도 지자기 교란으로 인한 GIC가 발생됨을 확인하였고 '03년 중위도 국가인 남아공에서는 지자기 유도전류로 인해 변압기 15기가 손상되는 피해를 입었다.

이에 중위도 국가인 일본은 호카이도 전력의 187kV급 변압기에 클램프 전류계를 설치하고 샘플링 1mS으로 1초 평균 데이터를 수집하고 있으며, '05.12~'07.12(2년)간 수집된 GIC 1초 데이터 중 1A를 초과하는 지자기 1초 데이터를 분석하여 상관관계가 있음을 확인하였다. 특이한 사항으로는 태양 활동 극소기에서 지자기 폭풍으로 인한 강력한 유도전류를 10번 중 4번을 관측한 것이다. 그 사례로는 '06.12.13에 flare와 연관된 코로나질량유출로 '06.12.14~15 지자기 폭풍이 발생되어 자기장 변화량은 272nT이고 최대 GIC는 3.85A가 관측되었다. 고, '06.7.6에는 장기간 flare로 3일후인 7.9일 GIC가 관측되었으며, '06.5.4의 지자기 작은 폭풍(substorm)과 '05.12.27'28의 지자기 진동으로 GIC가 출현하였다. 출현주기로는 UT 시간상 19시와 23시 주변으로 최대 GIC가 나타났으며 월별로는 4월과 11월과 12월에 GIC가 크게 증가되었다.

또한 중국은 광둥성에 위치한 핵발전소의 500kV급 변압기와 흑룡강성에 위치한 220kV급 변압기 2곳에 설치하여 1초 데이터를 수집하고 있으며, '04.11.9~10에 발생한 강력한 지자기 폭풍시의 지자기 변화와 유도전류 측정값간 비교를 통해 상관관계가 있음을 확인하였다. 전력망 피해 분석을 통해 전력망의 부하나 용량이 작으면 GIC 문제가 발생되지 않지만 변압기의 잡



음이 증가되는 DC 바이어스 현상이 발견하였으며, 500kV 이상 고전압선과 큰 규모의 전력망에서 주의가 필요한 것으로 분석되었다.

양국의 GIC 예상값 산출모델을 살펴보면, 일본은 지자기장 수평적 요소의 최대 함몰( $\Delta H$ )과 GIC 최대치간 scatter plot를 통해 상관관계를 도출하였으며 공식은 다음과 같다.

$$\text{최대 GIC(A)} = 0.0158\Delta H(\text{nT}) - 0.558$$

중국은 남아공의 사례를 참조하여 아래의 평면파 공식으로 유도전기장을 산출하고, 캐나다의 지자기 시뮬레이션 소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 GIC 측정결과를 이용한 least square 방법으로 상관관계를 도출하여 유도전류 계산식을 다음과 같이 마련하였다.

$$E(t) = -\frac{2}{\sqrt{\pi\mu_0\sigma\Delta}} \sum_{n=N-M+1}^N (B_n - B_{n-1})(\sqrt{N-n+1} - \sqrt{N-n})$$

여기서, M은 지자기 1초 데이터를 20분 간격으로 하여 1200으로 설정한다.

$$GIC(w) = -3.5E_x(w) - 256.2E_y(w)$$

여기서, a와 b는 전력망의 환경, 토폴로지(구조)와 DC 파라메타와 관련된 계수로 GIC 측정결과를 이용하여 least square 방법으로 산출한다.

중국과 일본의 유도전류 예상값 산출 연구 사례를 통해 지면 도전율과 상관관계수(a와 b)의 정보가 필요한 것으로 검토되었다. 또한, 지자기 변화와 GIC간 상관관계를 도출하기 위해 일본은 2년간 데이터를 이용하여 장기간의 유도전류가 소요되었지만 우리센터는 ‘12.10월부터 데이터 수집하고 있어 plane wave 방식으로 단기간 데이터를 이용한 상관관계를 도출하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

## 2. 해외 주요국의 지자기 유도전류 연구동향 조사

해외 주요 국가별 유도전류 관측 사례를 살펴보면, 스페인은 칸 자르디 지역의 400kV 변압기에서 유도전류를 관측하고, 남아공은 그래스리지 지역의 400kV 변압기 1곳과 다수의 230kV급 변압기에서, 스웨덴은 동쪽 해안의 400kV 변압기에서, 영국은 275kV와 400kV 변압기 4곳에서 유도전류를 관측하고 있으며 '03.10.29~30의 지자기 폭풍시 측정된 유도전류 데이터를 분석하였다. 브라질은 Itumbiara와 Barreiro의 500kV 변압기에서 유도전류를 관측하고 '04.11.07~11에 측정된 데이터를 분석하였다.

해외 주요 국가별 유도전류 계산식은 다음과 같다

o (스페인)  $GIC(t) = -3.57E_x(t) + 4.22E_y(t)$

이때, plane wave 적용시  $E_{x,y}(t) = \pm \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0\sigma}} \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{t-u}} \frac{dB_{y,x}(u)}{dt} du$

o (남아공)  $GIC(t) = -80E_x(t) + E_y(t)$

이때,  $E_{x,y}(\omega) = \pm \frac{Z(\omega)}{\mu_0} B_{y,x}(\omega)$

o (스웨덴)  $GIC(t) = -62.2E_x(t) + 133.2E_y(t)$

이때,  $E(\omega)_{x,y} = \pm \frac{Z(\omega)}{\mu_0} B(\omega)_{y,x}$  을  $\omega \rightarrow t$ 로 푸리에 변환,  $B(\omega) = \frac{1}{i\omega} \frac{d\bar{B}}{dt}(\omega)$

o (영국)  $I_{ij} = \frac{V_{ij}}{R_{ij}^n} + \frac{(ZI)_i - (ZI)_j}{R_{ij}}$  를 모델링(McKay, 에덴브리지 대학)

이때,  $V_{ki} = \int_k^i E \cdot ds$ , network admittance  $Y_{ij}^n = \begin{cases} -1/R_{ij}^n, & i \neq j \\ \sum_{k \neq i} 1/R_{ij}^n, & i = j \end{cases}$

o (브라질)  $GIC = B \cdot r / 200$

이때,  $B = \mu I / 2\pi r = B_{TLs} - B_{Vassouras}$ , r=지자기와 이격거리

해외 주요 국가별 유도전류 연구결과를 비교한 결과, 해외 주요국의 유도전류 계산식은 크게 2가지 유형으로 나눌 수 있다. 첫 번째 유형으로 스페인과 중국의 방식은 plane wave 방법으로 지자기를 유도전기장으로 변환하고 측정된 GIC와의 상관계수를 구하여 유도전류 예상값을 산출한다. 두 번째 유형으로 남아공과 스웨덴의 방식은 푸리에 변환 방법으로 지자기를 유도전기장으로 변환하고 측정된 GIC와의 상관계수를 구하여 유도전류 예상값을 산출한다. plane wave 방법과 푸리에 변환 방법 모두는 자기장의 시간적 변화를 이용하여 유도전기장을 구하고 있으며, 유도전류 예상값은 관측값과의 상관계수로 보정하고 있어 유도전기장 값의 차이가 있더라도 보완이 가능하다. 다만, 유도전류 측정장치가 설치되지 않은 국내 다른 전력망의 유도전류 예측을 위해 보다 정확한 유도전기장 모델이 필요하다. 유도전기장 모델은 지역별 지자기 및 지면도전율에 따라 변하므로 신가평의 유도모델을 향후 신태백에 적용함으로써 검증이 가능할 것으로 보인다.

남아공은 유도전류 추가 연구를 통해 지구도전율 모델을 개발하는 연구를 수행하였다. 유도전류 산출 모델의 정확도를 향상하기 위해 변압기의 특성인 네트워크 계수와 정확한 지전계로 결정되는 지구도전율 모델을 연구하였으며, 해당 지역의 지질적 조건이 반영된 10 레이더 수준의 지면 도전률 모델을 1분 지자기 데이터와 유도전류 관측값, 그리고 변압기 네트워크 계수로 표면 임피던스를 유도하여 임피던스의 저항성분과 위상을 계산하였다. 이를 위해서는 변압기 및 전력 시스템의 디자인과 관련된 네트워크의 파라미터를 확보하고 지면 도전률의 레이어 지표 모델이 필요하다. 영국과 캐나다의 방법 또한 남아공의 추가 연구와 동일한 방법을 채택하고 있으나 변압기 네트워크 계수와 주파수별 지면도전률 값을 요구하고 있어 국내 확보가 불가능한 권계로 구현이 어려울 것으로 예상되었다. 한편 브라질의 방법은 관측값의 잡음 등 문제로 실제 구현되지 않아 검토대상에서 제외하였다.

### 3. 2003년 미국우주환경 세미나의 지자기 유도전류 관련 기술동향 조사

미국 뉴욕시와 윈체스터 전력회사인 Con Edison은 지자기 교란 예보를

통한 자체 전력망 대응절차를 제시하고 있다. 우선, K지수가 7의 예보가 발령되면 초기 운용조치로 345kV 변압기와 커패시터 뱅크의 연결을 중지하고 지자기 폭풍 및 전력망 상태를 감시한다. 그 다음, 실시간 K지수가 7이상이면 유도전류가 관측되면 전력의 흐름을 감소시킨다. 마지막으로 실시간 K지수가 9이상이면 자체 전력망에 대한 지자기 폭풍 경고를 발령하여 우주재난에 대비하고 있다. 이를 위해 자체 관측설비로 총 7개 변압기에 유도전류 및 변압기 파라미터(권선 온도, 오일 온도, 하모닉)를 종합 모니터링하고 있다.

미국 원자력 핵발전소인 NEXTear 에너지 회사는 국가예보기관 예보를 통한 지자기 교란에 따른 핵발전소의 대응절차를 제시하였다. 특히 '03년 태양폭풍 피해와 태양활동주기(solar cycle 24)를 맞아 자체 대비계획을 '10년에 수립하였다. 그 내용으로는 G3(K지수=7)이상일 때 핵발전소의 자체 대응절차(AOP)를 가동하여 AOP(Abnormal Operation Procedure) 주요 내용으로는 전체 변압기 냉각팬을 수동으로 전환하고 변압기 파라미터(권선 온도, 오일 온도 등) 모니터링하는 관측설비를 운용하는 것이다. 변압기별로 유도전류 세기에 따른 그 반응의 차이가 있으므로 유도전류와 변압기 파라미터간의 경험적 노하우 축적이 필요한 것으로 보고되었다.

미국 대기환경 연구기관인 AER(Atmospheric and Environmental Research)는 과거의 지자기 교란 시나리오를 분석하고 전력망의 위험도 평가방법을 제시하였다. 유도전류는 지구전역(Global)과 지역별(Regional)로 자기장 폭풍의 영향이 다르며, 지구 자기장 위도에 따른 위험도 구분하고 있다. 특히 북위 65도가 가장 위험지역으로, 퀘백>뉴욕>런던>휴스턴>도쿄 순으로 지자기 변화가 큰 것으로 평가하였다. 또한 지면 임피던스 차이로 인해 유도전기장 발생 위험도가 다를 수 있음을 지적하였다. 유도전류 변화와 변압기 권선(winding)의 온도 변화간 상관관계가 있으므로 온도에 대한 한계레벨 설정으로 위험 평가가 가능한 것으로 보고되었다.

미연방 에너지 규제 위원회인 FERC(Federal Energy Regulatory Commission)는 미국 전력망에 대한 우주전파환경 영향 대응 방안관련 법

을 제정하고 있다. 미연방 에너지 및 전력위원회 주관으로 지자기 교란 대응책 마련하여 18 CFR part40 (Docket No. RM12-22-000) : Reliability Standards for Geomagnetic Disturbance) 법 제정을 진행 중이다. 관련법 주요내용은 변압기의 디자인이 다양하므로 변압기 손상 및 전력망 붕괴 가능한 레벨을 자체 전력사에서 판단하여 대처할 것을 요구하고 있다.

유럽연합과 영국으로 구성된 연구기관인 British Geological Survey는 영국 전력망에 대한 지자기 교란 모델링을 발표하였다. 영국과 아일랜드의 지면 도전율을 측정하고 영국 전력망(132kV, 275kV, 400kV, 총 701 변압기)을 모델링하였다. '03. 10월 지자기 폭풍의 8배로 모델링한 결과, 영국 전역에 6~12시간 동안 정전이 발생하고 13개 대형변압기가 파손될 것으로 예상하고 있다. 또한 영국내 지역별 지자기 분석 연구를 위한 지구전기장 모니터링을 향후 2~5년 이내 개발 및 설치할 계획에 있었다.

미해양대기청산하 예보기구인 SWPC(Space Weather Prediction Center)는 지자기 K지수와 지구전기장과와의 관계를 분석하여 미국 지질연구소와 공동으로 지역별 도전율 모델 개발을 완료하였다. 지자기 K지수와 미국 지역의 유도전기장과의 상관관계를 분석한 결과, Kp=7일 때 최대 600mV/km, Kp=8은 최대 800mV/km, Kp=9는 최대 2,000mV/km까지 변화되는 것으로 분석하였다. 향후 미국 지질연구소의 실시간 지자기 관측자료와 태양관측위성을 활용하여 유도전기장 예보 모델 개발을 추진하고 있다.

미국 지질연구소인 USGS(U.S. Geological Survey)는 지자기 관측자료를 활용하여 유도전기장 예측 모델을 개발하였다, 지자기는 공간적 및 시간적 변화가 있고 지면 도전율은 깊이와 위치에 따라 다르므로 유도전기장의 크기는 지자기 발생규모와 지리적 위치에 따라 다르게 나타난다. 유도전기장 실시간 데이터는 <http://geomag.usgs.gov/products> 홈페이지에서 확인이 가능하다. SWPC와 공동개발한 지면 도전율 모델의 유효성을 입증하기 위해 유도전류 관측값과 예측값을 비교한 결과, 정확도가 상당히 높은 것임을 입증하였고, 향후 1분미만의 단기간 유도전류 변화를 예측하기 위해서는 보다 정밀한 방법이 필요한 것으로 보고하였다.

### 제3절 유도전류 측정시스템 운용 및 설치

#### 1. 유도전류 측정시스템 설치후보지 선정방안 마련

지자기 변화에 따른 국내 전력망에 미치는 유도전류 연구를 위해 유도전류 측정시스템의 설치후보지 선정방안을 검토하였다. 유도전류의 영향은 송전선의 길이와 방향(동-서), 그리고 변압기의 특성(권선 등)에 따라 다소 차이가 있는 것으로 알려져 있다. 송전선의 길이가 길수록 유도전압이 커지기 때문에 유도전류가 크고, 송전선의 방향이 동-서방향의 송전선인 경우 남-북 방향의 송전선인 경우보다 통계적으로 영향이 크며, 변압기의 특성에 따라 변압기 포화로 인한 SVC 보상기의 오동작이 발생되기 쉽다. SVC (static volt-ampere reactive compensators)는 선로손실을 보상하는 기기로 직류성분의 유도전류가 발생되면 선로이상으로 판단하여 선로와 변압기를 차단하기 때문이다. 해외 유도전류 측정사례에 따르면 중국은 동서방향의 500kV급 송전선이며 일본은 남서방향의 187kV급 송전선을 운용중에 있다.

우리나라의 유도전류 특성을 연구하고 지역별 지자기 변화에 따른 지자기-GIC간 상관관계 연구가 수행되도록 설치후보지를 선정할 필요가 있다. 송전선 길이에 따른 유도전류 영향 분석 측면에서 신태백-신가평 구간은 국내 최장 길이인 155km, 신가평-신안성은 75km, 제주 154kV는 152km이므로 장거리 구간에 선정하여야 하고, 송전선 방향에 따른 유도전류 영향 분석 측면에서 신태백-신가평은 동-서방향으로 적합하지만, 신가평-신안성은 북-남방향으로 위도차이가 약 1도 미만이므로 유도전류 영향이 적을 수 있다. 변압기 특성에 따른 GIC 영향 분석 측면에서 송전선의 전압이 낮을수록 변압기는 빨리 포화되는 특성이 있으므로 154kV 변전소의 유도전류를 측정할 필요가 있을 것이다. 마지막으로 강릉, 이천, 제주 지자기 관측소의 지리적 특성을 고려할 필요가 있다.

상기 도출된 유도전류 특성인 송전선 길이와 방향, 변압기 특성을 고려하여 지자기 유도전류 설치후보지를 선정할 필요가 있으므로 기존 운용중인 신가평 변전소과 더불어 신태백 변전소에 설치하고 제주 지역을 둘러싸고

있는 154kV 동제주 변전소를 설치하여 유도전류 영향을 분석하는 것이 바람직할 것으로 검토되었다.

## 2. 신가평 변전소의 유도전류 측정시스템 설치 사례

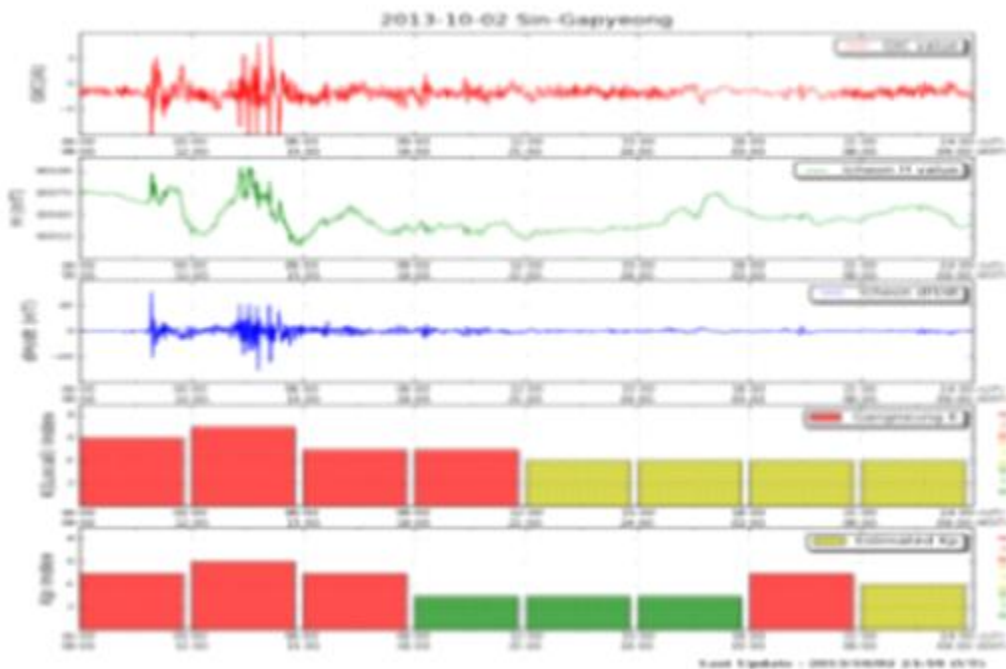
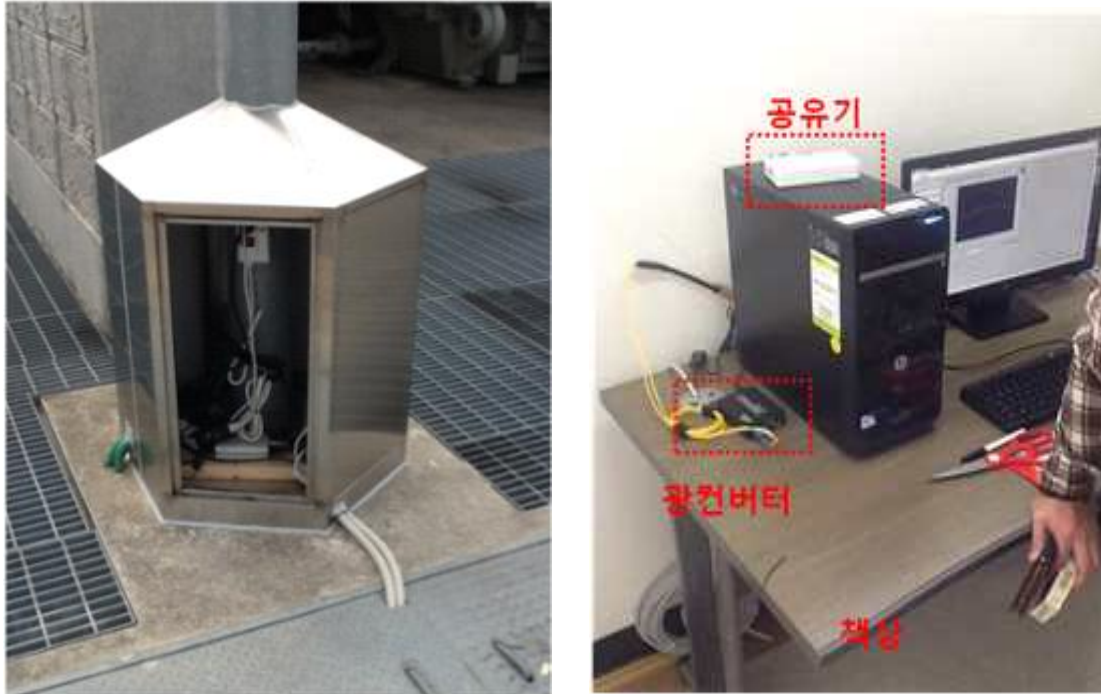


그림 1-5 신가평 변전소의 유도전류 측정시스템과 데이터 표출 화면

### 3. 신태백 변전소의 유도전류 측정시스템 설치 사례

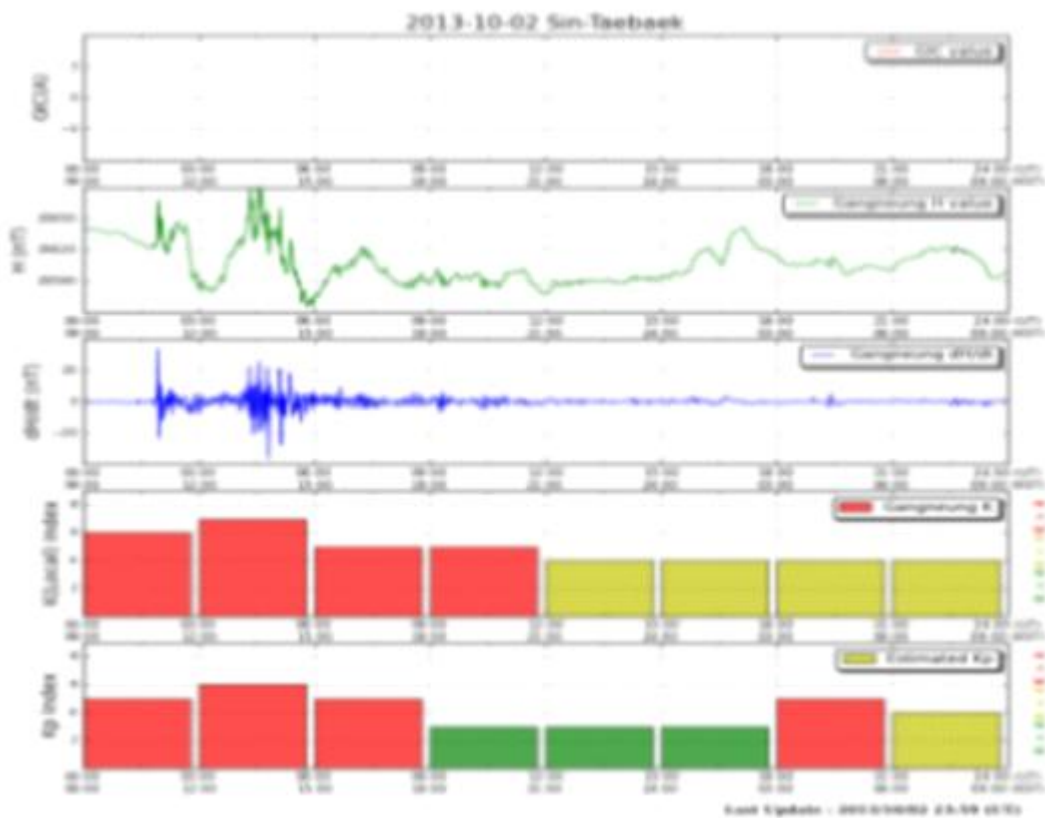


그림 1-6 신태백 변전소의 유도전류 측정시스템과 데이터 표출 화면



#### 4. 동제주 변전소의 유도전류 측정시스템 설치 사례

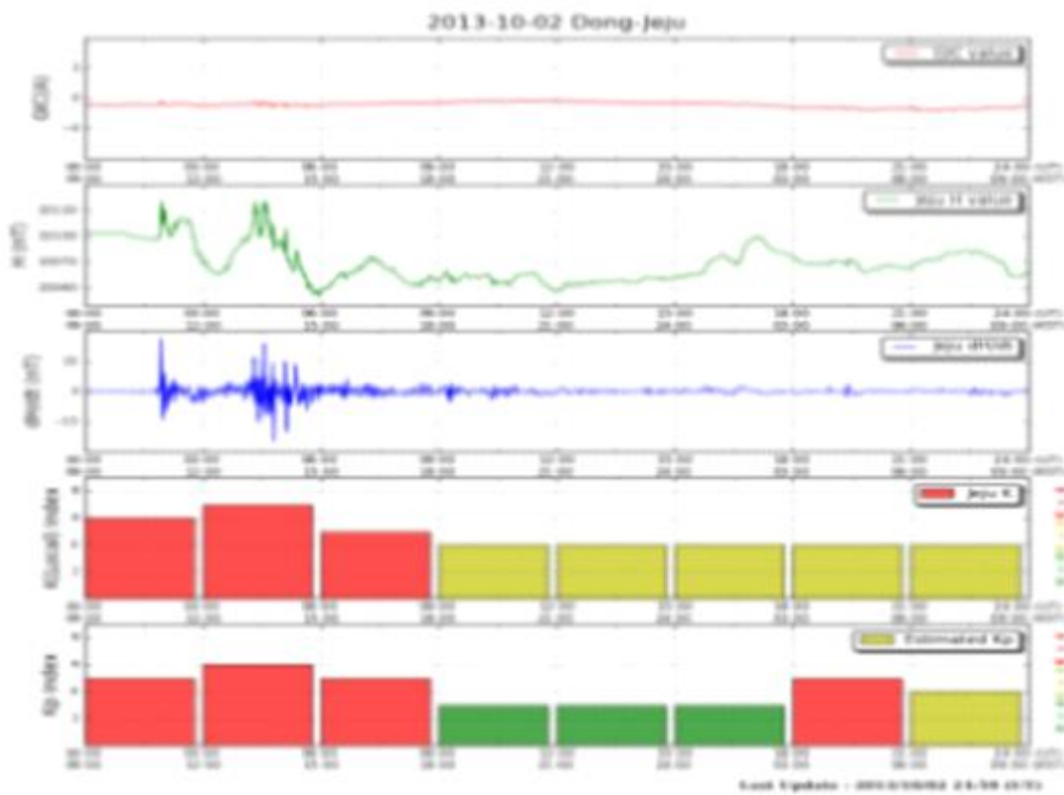


그림 1-7 동제주 변전소의 유도전류 측정시스템과 데이터 표출 화면

## 제2장 지자기, K지수와 유도전류 관측데이터 분석

### 제1절 지자기 데이터 추출방안 및 사례 분석

#### 1. 지자기 데이터 추출방안

과거 지자기 폭풍에 대한 유도전류 예상값을 산출하기 위해서는 방대한 지자기 데이터에서 특정한 데이터를 선정하고 추출하는 방안이 필요하다. 기존 지자기 분석 방법은 지자기 변화 유형을 육안으로 확인하는 것으로 많은 시간과 오차가 발생하지만 최대  $dH/dt$  값을 추출하는 새로운 방법은 유도전류와 관련된 지자기 교란 데이터를 수집하는 것이 용이하였다.

기존 지자기 분석 방법은 지자기 변화 유형을 분석하는 것으로 크게 4가지 유형으로 분류된다. 첫 번째 유형인 Geomagnetic Storm (SSC)은 H성분 급격한 증가(SSC)로 시작하고 크게 감소한 후 마침내 회복하는 형태로 1일 ~ 수일정도 지속되는 특성이 있다.

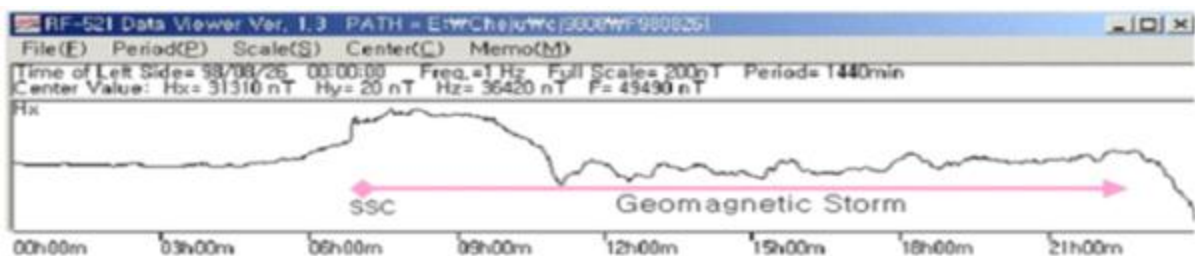


그림 2-1 SSC 각 지자기 변화 유형의 예

두 번째 유형인 Sudden Impulse (SI)는 H성분 급격한 증가(SSC)로 시작되지만 지자기 폭풍이 발생하지 않으며 수시간이상 지속되는 특성이 있다.

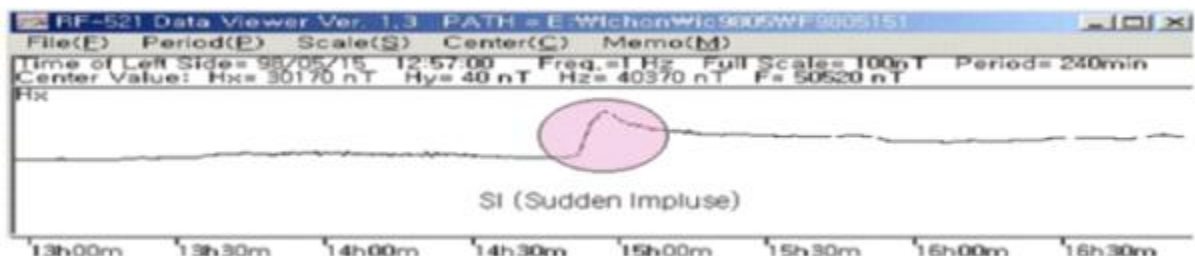


그림 2-2 SI 각 지자기 변화 유형의 예

세 번째 유형인 Solar Flare Effect(SFE)는 태양 플레어에 의한 지자기 변동시 나타나며 수분이상 지속되는 특성이 있다.

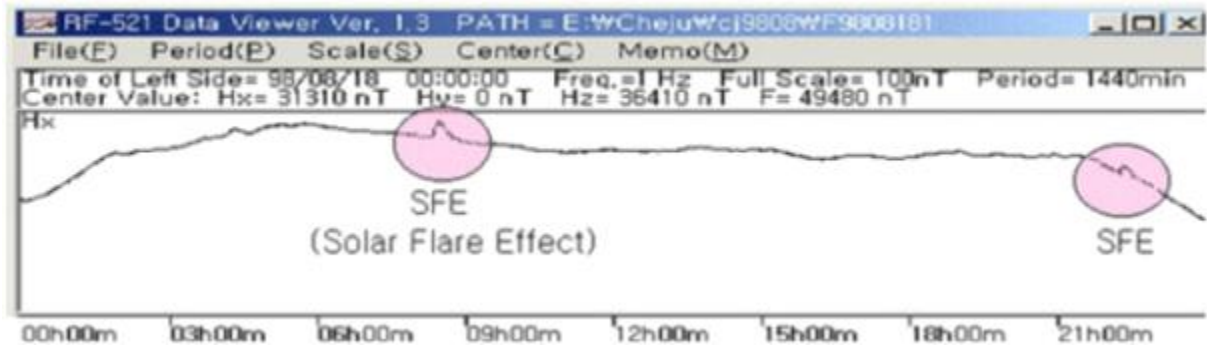


그림 2-3 SFE 각 지자기 변화 유형의 예

마지막 유형인 Bay는 한밤중에 발생되어 자기장 크기가 증가되며 1시간 정도 지속되는 특성이 있다.

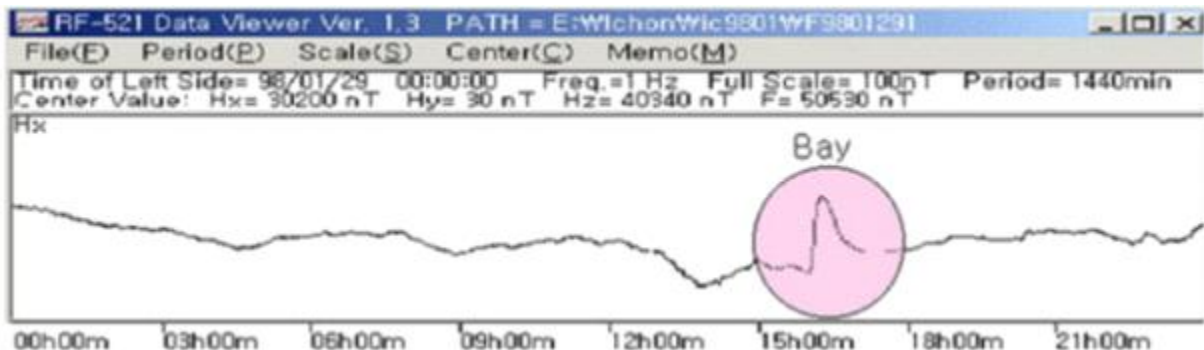


그림 2-4 Bay 각 지자기 변화 유형의 예

본 연구에 적용한 새로운 방법으로 지자기 유도전류가 크게 나타나는 시점의 지자기 변화폭과 미분값을 조사·분석하였다. 대상기간을 '12.10월부터 '13.4월까지 유도전류의 1분 평균치가 | 4| A이상인 경우에서 지자기 데이터의 변화인 최대-최소 차이와 지자기 미분값 변화를 산출하였으며 그 결과는 다음 표 1과 같다.

일자	유도전류 최대치	지자기 H의 최대-최소 차이	dH/dt(분단위)의 절대 최대값
2012.10.31	-4.47A	42	-11.3
2013.1.17	+5.15A	124	15.8
2013.3.17	-5.52A	186	-30.2

표 2-1 유도전류 측정 최대치와 지자기 데이터 변화 분석표

상기 유도전류 발생사례를 통해 지자기 H성분의 변동폭이 124이상일 때 유도전류가 5A를 초과하였으므로 과거 관측된 지자기 데이터에서 1분 변동폭이 100이상인 지자기 데이터를 선정하는 것이 바람직하다. 이를 토대로 2011년 ~2012년 동안 관측된 이천 지자기 데이터를 시범 추출하여 유도전류와 연관성이 있는 지자기 데이터 특성을 분석하고자 한다.

## 2. 과거 이천 지자기 데이터 분석결과

이천 지자기 관측기에서 2011년~2012년에 관측된 지자기 데이터 중 지자기 H성분 변동폭이 100이상인 날의 dH/dt 절대 최대값은 다음 표와 같다.

일자	지자기 H의 변동폭	dH/dt	일자	지자기 H의 변동폭	dH/dt
2011-03-01	147.09	6	2012-03-08	122.13	21.79
2011-04-06	108.24	11	2012-03-09	171.62	10.12
2011-05-27	102.09	10.7	2012-03-12	114.48	22.35
2011-05-28	127.24	8.89	2012-03-15	108.71	19.9
2011-06-04	139.34	19.96	2012-04-23	153.55	7.36
2011-09-16	126.82	55.79	2012-04-24	136.04	3.42
2011-09-17	124.12	7.45	2012-04-26	102.11	8.13
2011-09-26	185.89	35.22	2012-07-14	110.07	30.35
2011-09-28	140.09	9.35	2012-07-15	182.3	11.61

일자	지자기 H의 변동폭	dH/dt	일자	지자기 H의 변동폭	dH/dt
2011-10-24	204.49	23.47	2012-10-01	136.84	5.48
2012-01-22	172.06	13.45	2012-10-08	147.7	3.89
2012-01-25	100.7	3.47	2012-10-09	122.87	6.26
2012-03-07	112.22	7.26	2012-10-13	128.05	7.5

표 2-2 지자기 변동폭과 dH/dt 분석(2011~2012년)

이전 지자기의 dH/dt 절대 최대값이 10을 초과하는 일자의 과거 미국 우주예보센터(SWPC)의 경보 현황을 살펴본 결과, 지자기 일일 변동폭이 100 이상이고 dH/dt 값이 10이상인 일시에 지자기 경보가 발령되었고 임펄스성 지자기가 자주 관측되었다는 것을 알 수 있다. 따라서 지자기 H성분의 변동폭이 크고 dH/dt 값이 클수록 유도전류 세기가 크게 발생되므로 과거 지자기 유도전류 예측 분석을 위해 일일 최대 dH/dt 값을 추출하는 것이 바람직하다.

일자	dH/dt	경보 현황
2011-04-06	11	0시 34분 지자기 교란 SUMMARY: Geomagnetic Sudden Impulse Observed: 2011 Apr 06 0942 UTC Deviation: 24 nT
2011-05-27	10.7	20시 5분 지자기 교란 ALERT: Geomagnetic K-index of 4 Threshold Reached: 2011 May 28 0134 UTC Synoptic Period: 0000-0300 UTC
2011-06-04	19.96	20시 15분 지자기 교란 SUMMARY: Geomagnetic Sudden Impulse Observed: 2011 Jun 04 2045 UTC Deviation: 54 nT
2011-09-16	55.79	18시 10분 경보 없음, 17일 발생 SUMMARY: Geomagnetic Sudden Impulse Observed: 2011 Sep 17 0345 UTC Deviation: 21 nT
2011-09-26	35.22	10시 37분 지자기 교란 SUMMARY: Geomagnetic Sudden Impulse Observed: 2011 Sep 26 1237 UTC Deviation: 45 nT

일자	dH/dt	경보 현황
2011-10-24	23.47	9시 33분 지자기 교란 SUMMARY: Geomagnetic Sudden Impulse Observed: 2011 Oct 24 1832 UTC Deviation: 13 nT
2012-01-22	13.45	6시 12분 지자기 교란 SUMMARY: Geomagnetic Sudden Impulse Observed: 2012 Jan 22 0614 UTC Deviation: 31 nT
2012-03-08	21.79	11시 3분 지자기 교란 SUMMARY: Geomagnetic Sudden Impulse Observed: 2012 Mar 08 1105 UTC Deviation: 58 nT
2012-03-09	10.12	13시 45분 지자기 경보 ALERT: Geomagnetic K-index of 6 Threshold Reached: 2012 Mar 09 1352 UTC Synoptic Period: 1200-1500 UTC
2012-03-12	22.35	9시 16분 지자기 교란 SUMMARY: Geomagnetic Sudden Impulse Observed: 2012 Mar 12 0921 UTC Deviation: 96 nT
2012-03-15	19.9	13시 8분 지자기 교란 SUMMARY: Geomagnetic Sudden Impulse Observed: 2012 Mar 15 1309 UTC Deviation: 27 nT
2012-07-14	30.35	18시 11분 지자기 교란 SUMMARY: Geomagnetic Sudden Impulse Observed: 2012 Jul 14 1811 UTC Deviation: 27 nT
2012-07-15	11.61	6시 43분 지자기 교란 ALERT: Geomagnetic K-index of 6 Threshold Reached: 2012 Jul 15 0748 UTC Synoptic Period: 0600-0900 UTC

표 2-3 미국 우주예보센터(SWPC) 경보현황(2011~2012년)

## 제2절 지자기 교란 데이터 비교분석

### 1. 강릉 지자기 데이터 추출 및 이천 데이터와 비교분석

지자기 교란시 초고압 변압기에 유도되는 유도전류 예상값을 산출하기 위해 과거 강릉 지자기 교란 데이터를 추출하여 이천 교란 데이터와 비교 분석하였다. 강릉 지자기 교란 데이터는 '10.8.10~12.12.31까지 관측된 데이

터에서 지자기의 시간적 변화가 일일 중 가장 큰 값을 추출하였다. 지자기의 시간적 변화를 용이하게 구별하기 위해 1분 평균 미분값이 아닌 61초 평균 미분값으로 계산하였다.

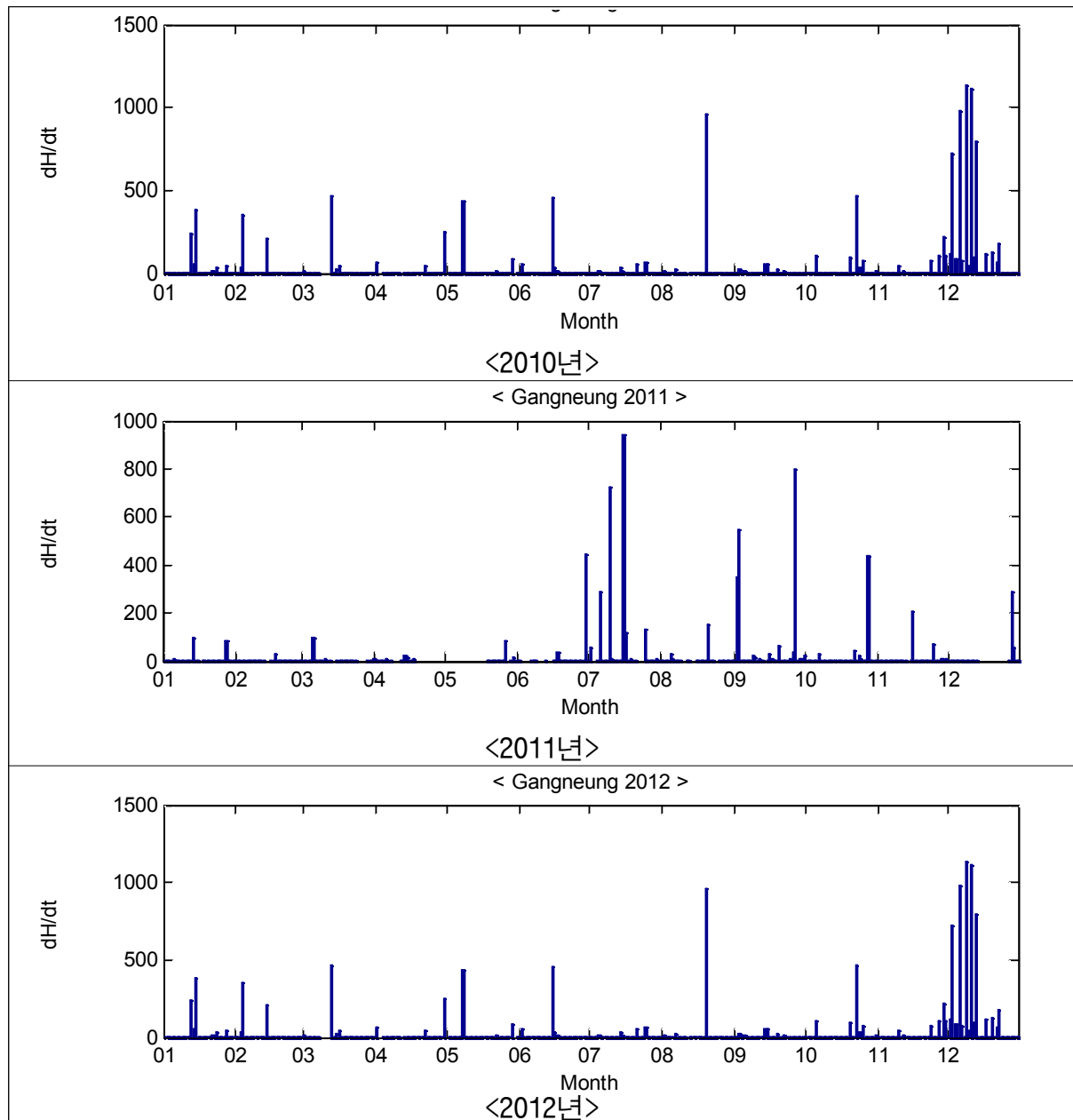


그림 2-5 강릉 지자기 교란 데이터 추출(2010 ~ 2012년)

강릉 지자기 교란 데이터를 추출한 결과, 수백에서 수천이 넘는 값이 상당히 많이 포함되어 있었다. 이는 지자기 장비 장애나 점검 및 수리로 인한

오류 데이터가 포함되어 있음을 알 수 있다.

이러한 오류 데이터를 제거하기 위해 강릉 데이터를 동일일시에 해당하는 이천 데이터와 비교하였으며 동일일시 데이터 수는 다음 표와 같다.

년도	장소	총 데이터 수	동일일시 데이터 수
2010	이천	데이터 없음	-
	강릉	115	
2011	이천	301	16
	강릉	287	
2012	이천	317	186
	강릉	353	

표 2-4 강릉-이천 지자기 교란 데이터 비교(2010~2012년)

이러한 오류를 제거한 후 정비된 강릉 지자기 교란 데이터는 다음 그림과 같다.

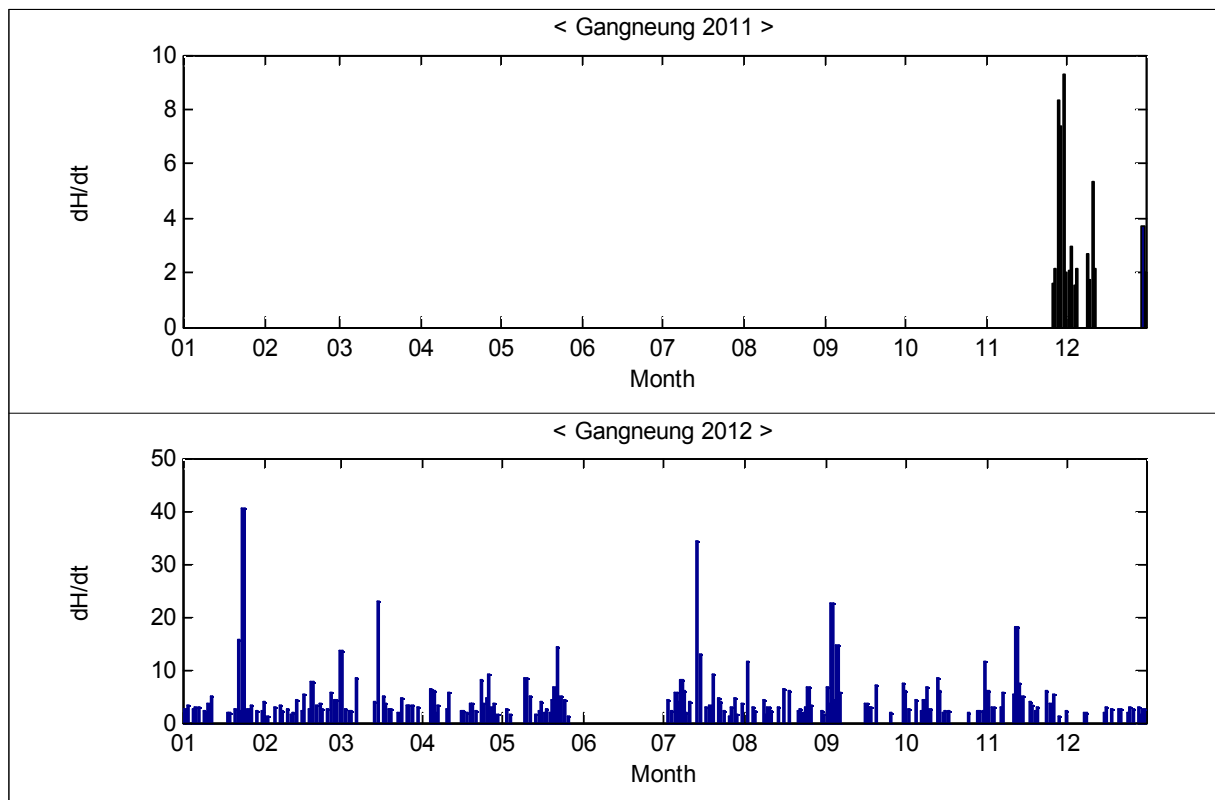


그림 2-6 강릉 지자기 교란 데이터(이천 비교후 오류제거)



동일한 방법을 적용하여 오류 정보 제거 후 정비된 이천 지자기 교란 데이터는 다음 그림과 같다.

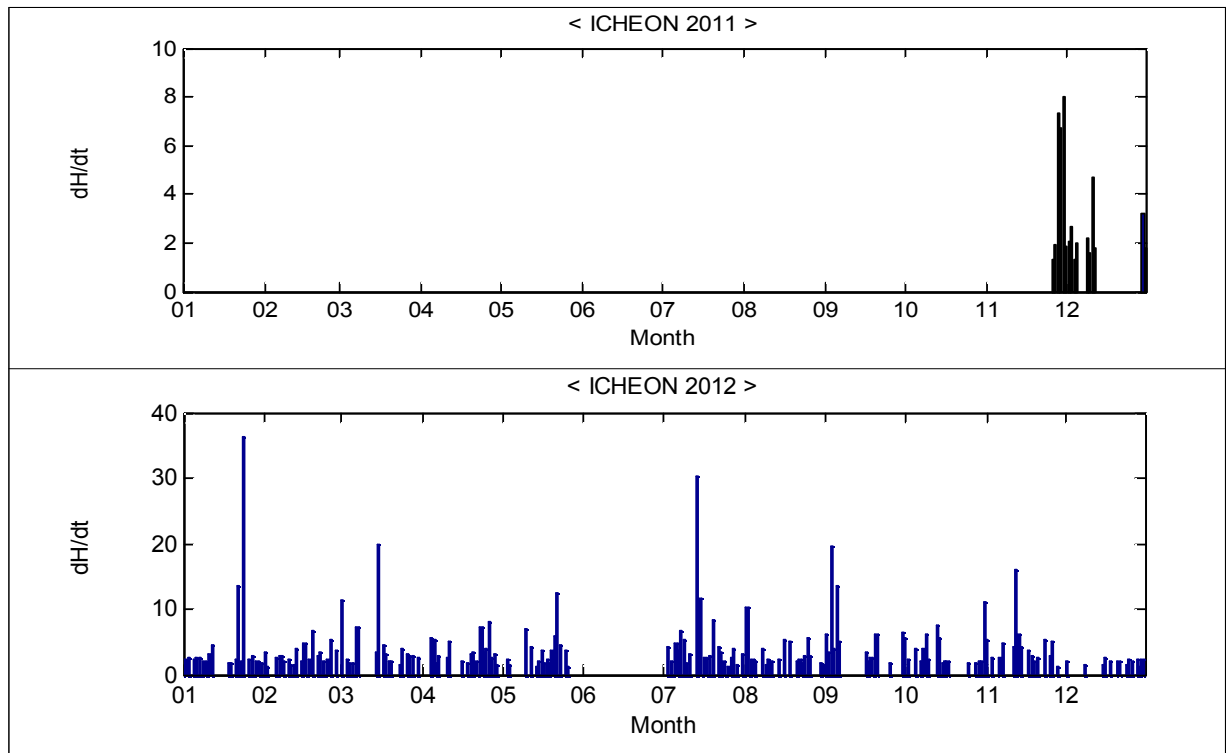


그림 2-7 이천 지자기 교란 데이터(강릉 비교후 오류제거)

강릉과 이천의 지자기 교란 데이터를 비교한 결과, 동일일시의 강릉과 이천의  $dH/dt$ 는 동일한 패턴과 크기를 가지는 것을 알 수 있으며, 2012년 최대  $dH/dt$ 는 강릉 40, 이천 36으로,  $dH/dt$ 가 30이상인 날은 2일로 확인되었다. 동일한 방법으로 2010년 강릉 데이터는 제주 데이터를 이용하여 지자기 교란 데이터 추출이 가능할 것이다.

또한, 2013년 3월에 관측된 유도전류가  $|5.52|A$ 로 관측된 당시  $dH/dt$ 가 -30임을 감안하면 유도전류  $|5.5|A$ 이상을 일으키는 지자기 교란인  $dH/dt$ 가 2012년에 2차례 발생되었음을 확인할 수 있다.

본 연구결과를 토대로 기존 지자기 관측 데이터에 과거 장비 장애, 점검 및 수리로 인한 오류 데이터가 존재하므로 3개 관측소(이천, 제주, 강릉) 중 2개 관측 데이터의 동일일시 발생여부를 조사하기로 하였다.

## 2. 지자기 관측소 3개소의 지자기 교란 데이터 비교분석

앞서 설명한 대로 과거 지자기 교란시 초고압 변압기에 발생된 유도전류 예상값을 산출하기 위해 지자기 관측소 3개소에 대한 지자기 교란 데이터 비교 분석하였다. 2개 이상 관측소에서  $dH/dt$ 가 크게 나타난 시점이 동일한 일자/시/분에 해당하는 데이터를 추출하여 비교하였다.

### 가. 강릉 지자기 교란 데이터

#### 1) 강릉과 이천 데이터간 비교

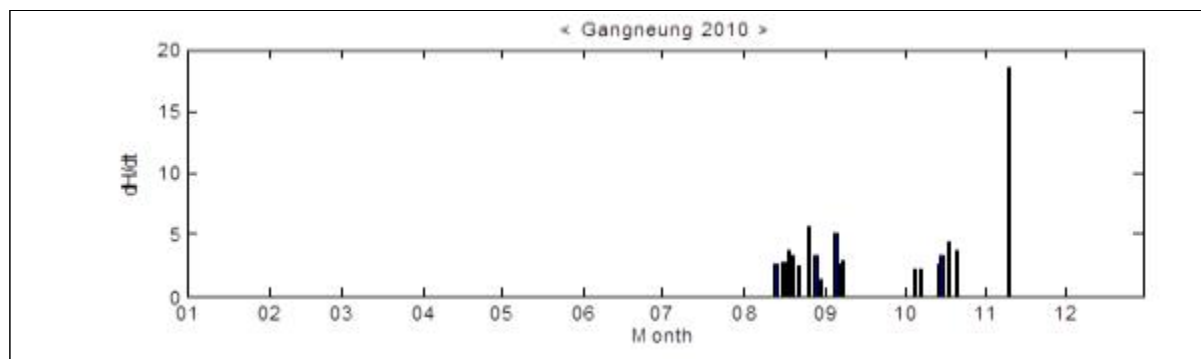
강릉 지자기 데이터는 동일일시의 이천 지자기 데이터와 동일한 패턴과 유사한 크기를 가지는 것을 알 수 있었다. 본 절의 1에 상세히 분석하였으므로 생략하기로 한다.

#### 2) 강릉과 제주 데이터간 비교

강릉 지자기 데이터는 동일일시의 제주 지자기 데이터와 동일한 패턴과 유사한 크기를 가지며 동일일시 데이터 수는 다음 표와 같다.

년도	강릉 데이터 수	동일일시 데이터 수
2010	335	21
2011	285	119
2012	353	71

표 2-5 강릉-제주 지자기 교란 데이터 비교(2010~2012년)



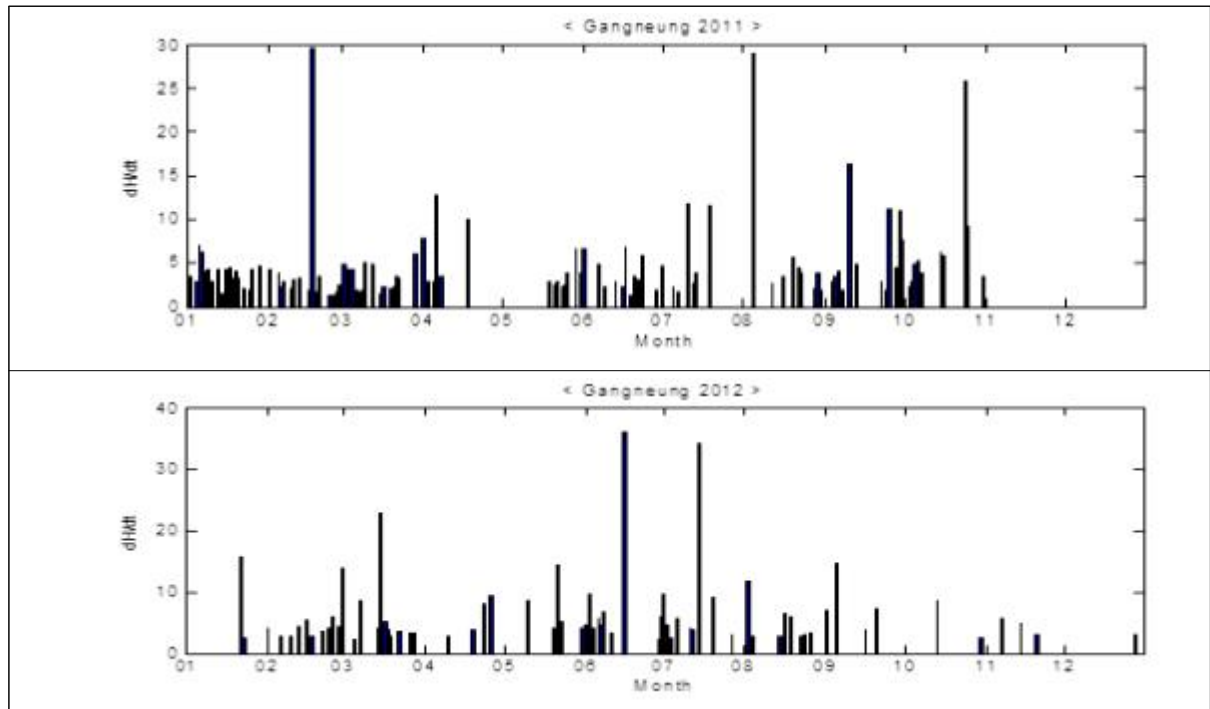


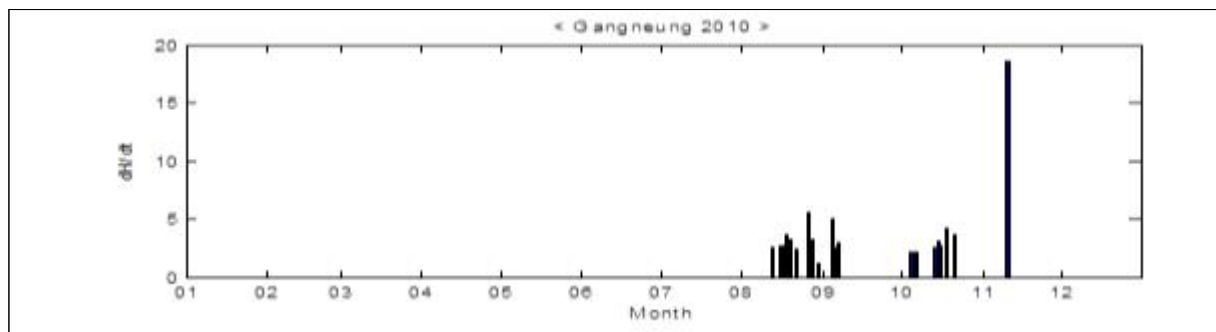
그림 2-8 강릉 지자기 교란 데이터(제주 비교후 오류 제거)

### 3) 종합비교

동일일시의 강릉 - 이천 데이터와 강릉 - 제주 데이터를 일자기준으로 모아 정리하면 동일일시 데이터 수는 다음 표와 같으며, 이를 토대로 강릉 관측소의 역대 최대  $dH/dt$ 값은 2012년 40.64이고,  $dH/dt$ 가 30이상인 경우는 2012년 3회 출현되었음을 알 수 있다.

구분	2010	2011	2012
동일일시 데이터 수	21	135	204

표 2-6 강릉 지자기 교란 동일일시 데이터 수



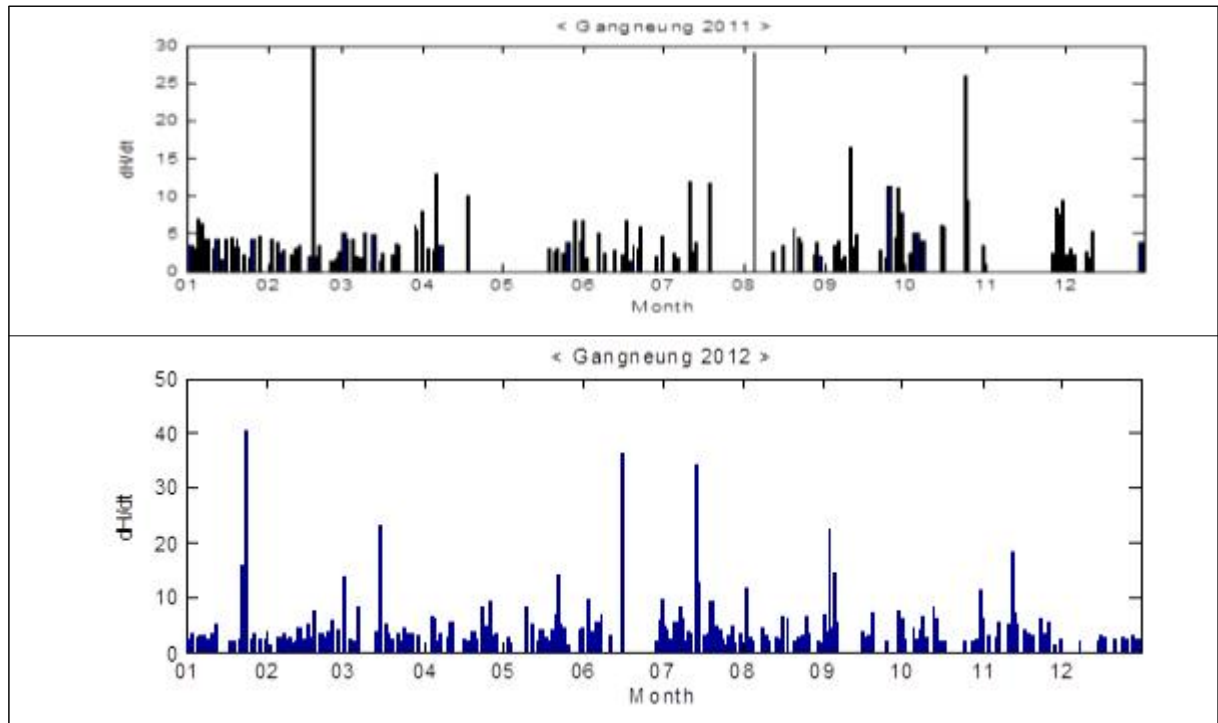


그림 2-9 강릉 지자기 교란 데이터(2010~2012년)

#### 나. 이천 지자기 교란 데이터

##### 1) 이천과 강릉 데이터간 비교

이천 지자기 데이터는 동일일시의 강릉 지자기 데이터와 동일한 패턴과 유사한 크기를 가지며, 본 절의 1에 상세히 분석하였으므로 생략하기로 한다.

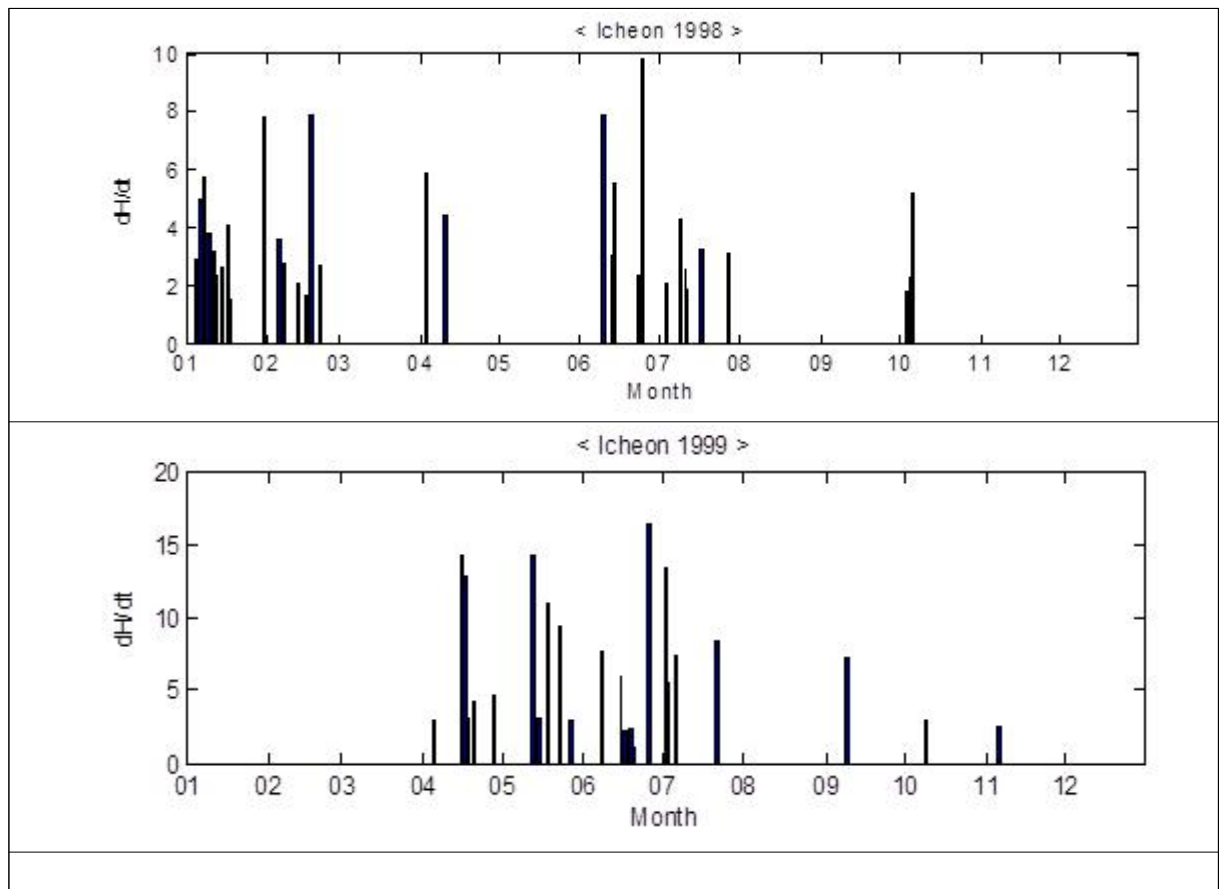
##### 2) 이천과 제주 데이터간 비교

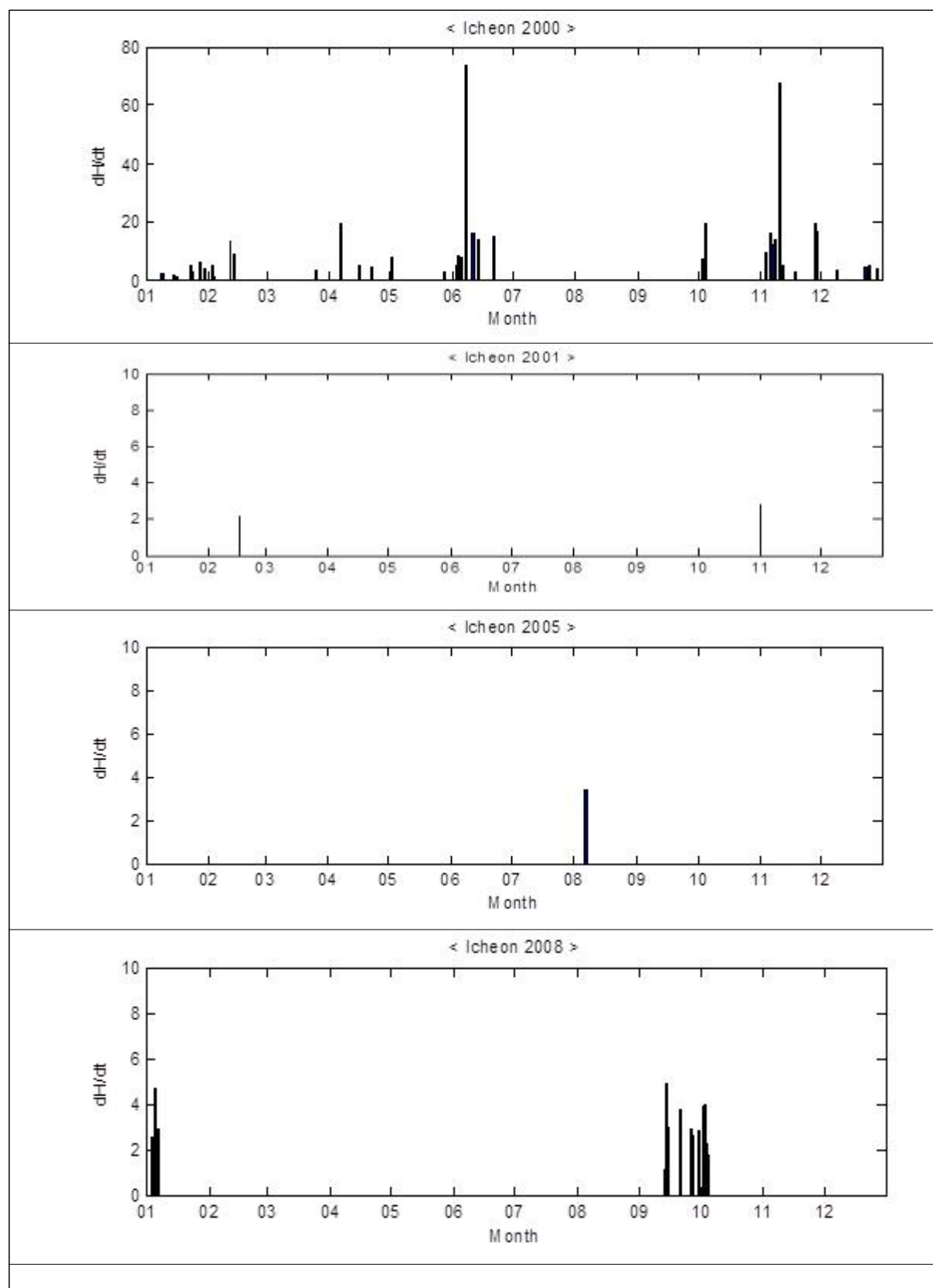
이천 지자기 데이터는 동일일시의 제주 지자기 데이터와 동일한 패턴과 유사한 크기를 가지며 동일일시 데이터 수는 다음 표와 같다. 다만, 2006년과 2007년의 이천 및 제주 데이터 모두가 동일한 값을 가지고 있어 분석대상에서 제외하고 2002년 ~ 2005년 그리고 2011년에는 동일일시 데이터가 없어 분석을 생략하기로 한다

년도	이천 데이터 수	동일일시 데이터 수
1998	265	34

년도	이천 데이터 수	동일일시 데이터 수
1999	297	24
2000	321	40
2001	306	2
2005	139	1
2008	63	15
2009	164	44
2012	317	74

표 2-7 이천-제주 지자기 교란 데이터 비교(1998~2012년)





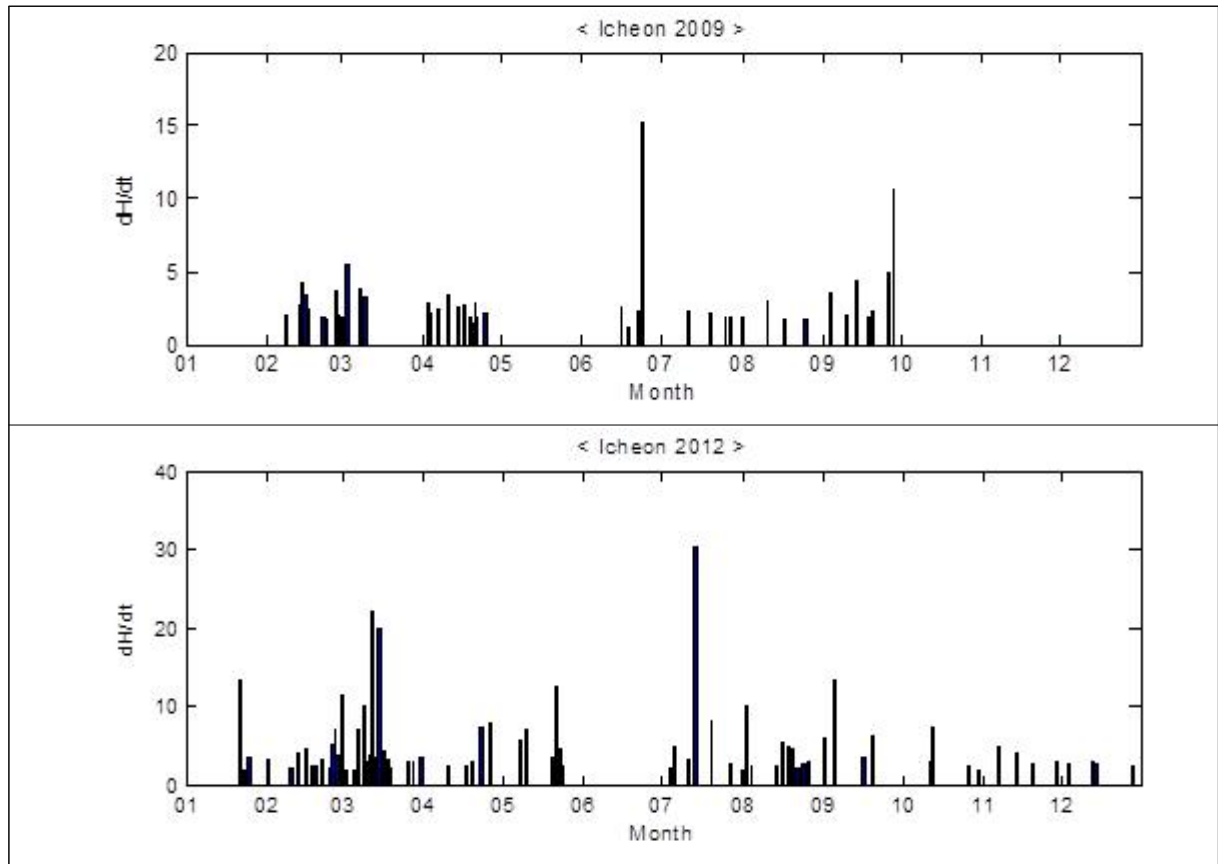


그림 2-10 이천 지자기교란 데이터(제주 비교후 오류 제거)

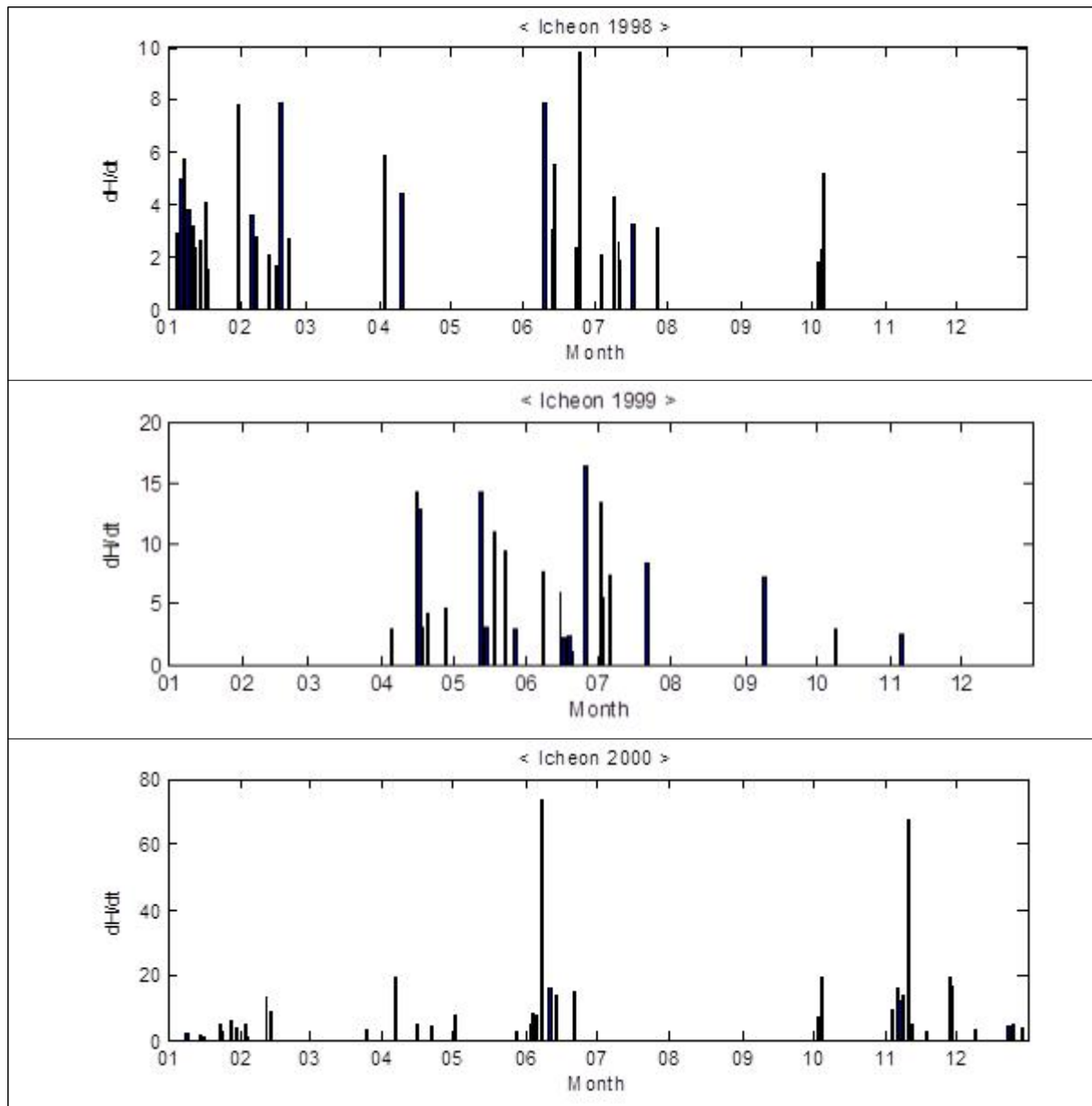
### 3) 종합비교

동일일시의 강릉 - 이천 데이터와 강릉 - 제주 데이터를 일자기준으로 모아 정리하면 동일일시 데이터 수는 다음 표와 같으며, 이천 관측소의 역대 최대  $dH/dt$ 값은 2000년 73이고  $dH/dt$ 가 30이상인 날은 2000년 2일로 73, 67이다. 다른 연도의 모든  $dH/dt$ 는 30이하로 일상적으로 관측할 수 있는 수준에 해당하는 것으로 검토된다. 다만, 2006년과 2007년의 이천 및 제주 데이터 모두가 동일한 값을 가지고 있어 분석대상에서 제외하고 2002년 ~ 2005년 그리고 2011년에는 동일일시 데이터가 없어 분석을 생략하기로 한다.

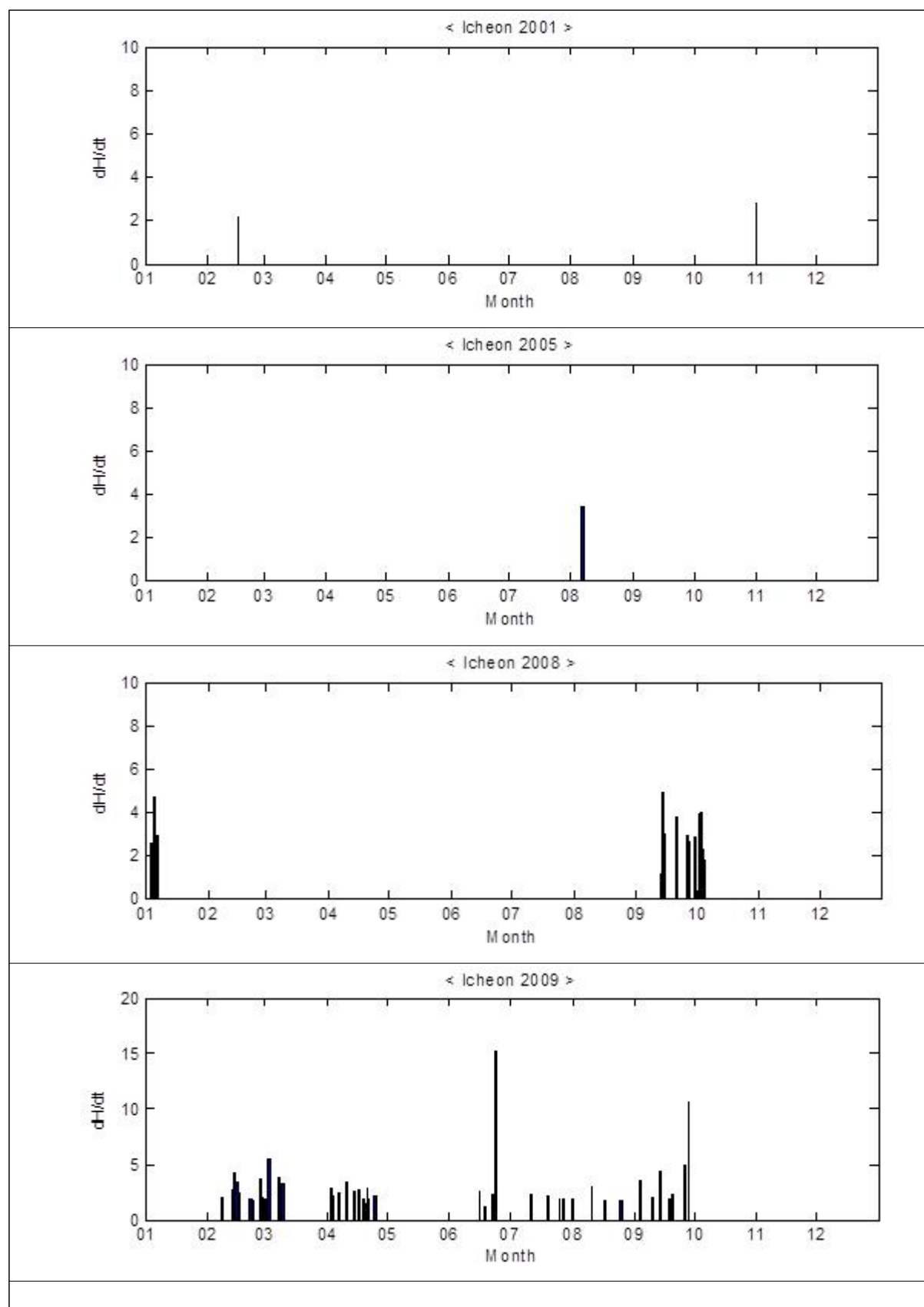
년도	이천 데이터 수	동일일시 데이터 수
1998	265	34
1999	297	24
2000	321	40

년도	이천 데이터 수	동일일시 데이터 수
2001	306	2
2005	139	1
2008	63	15
2009	164	44
2012	317	207

표 2-8 이천 지자기교란 동일일시 데이터 수







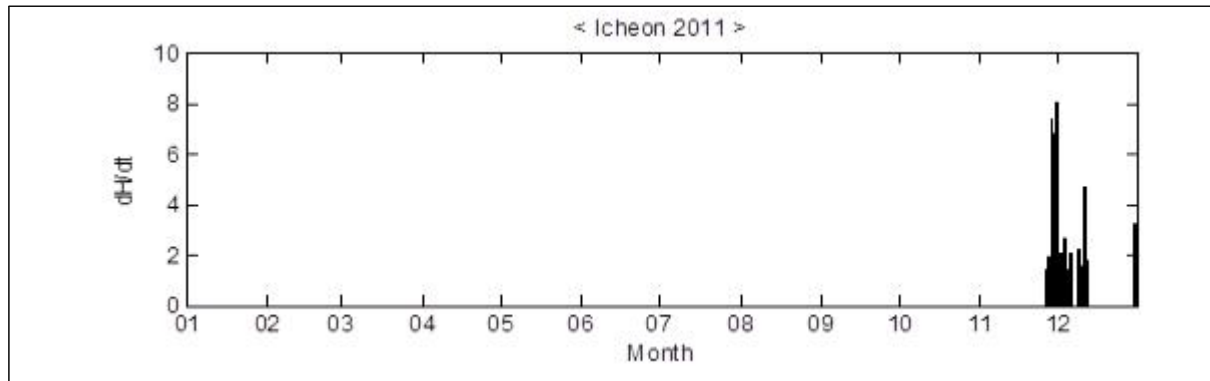


그림 2-11 이천 지자기 교란 데이터(1998~2011년)

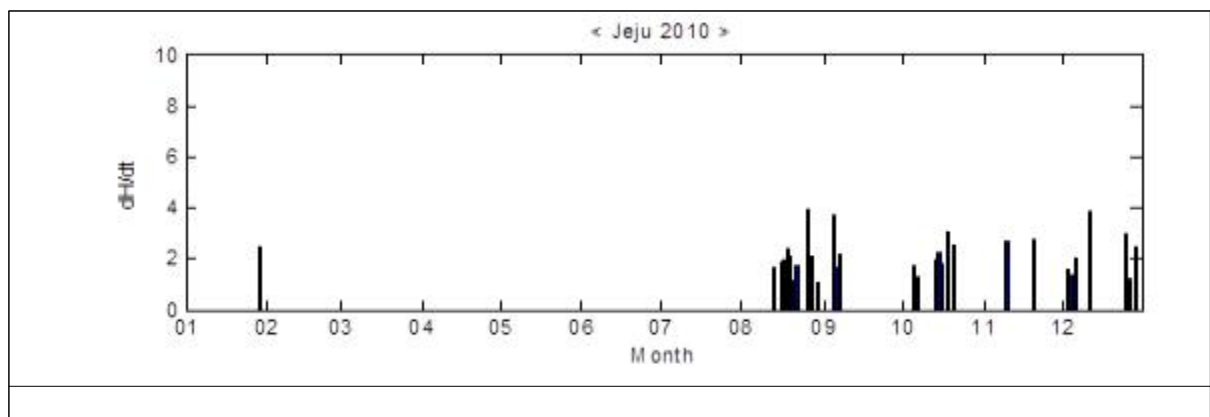
#### 다. 제주 지자기 교란 데이터

##### 1) 제주와 강릉 데이터간 비교

동일일시의 제주 지자기와 강릉 지자기의  $dH/dt$ 는 동일한 패턴과 유사한 크기를 가지며 동일일시 데이터 수는 다음 표와 같다.

년도	제주 데이터 수	동일일시 데이터 수
2010	335	29
2011	328	126
2012	348	79

표 2-9 제주-강릉 지자기교란 데이터 비교(2010~2012년)



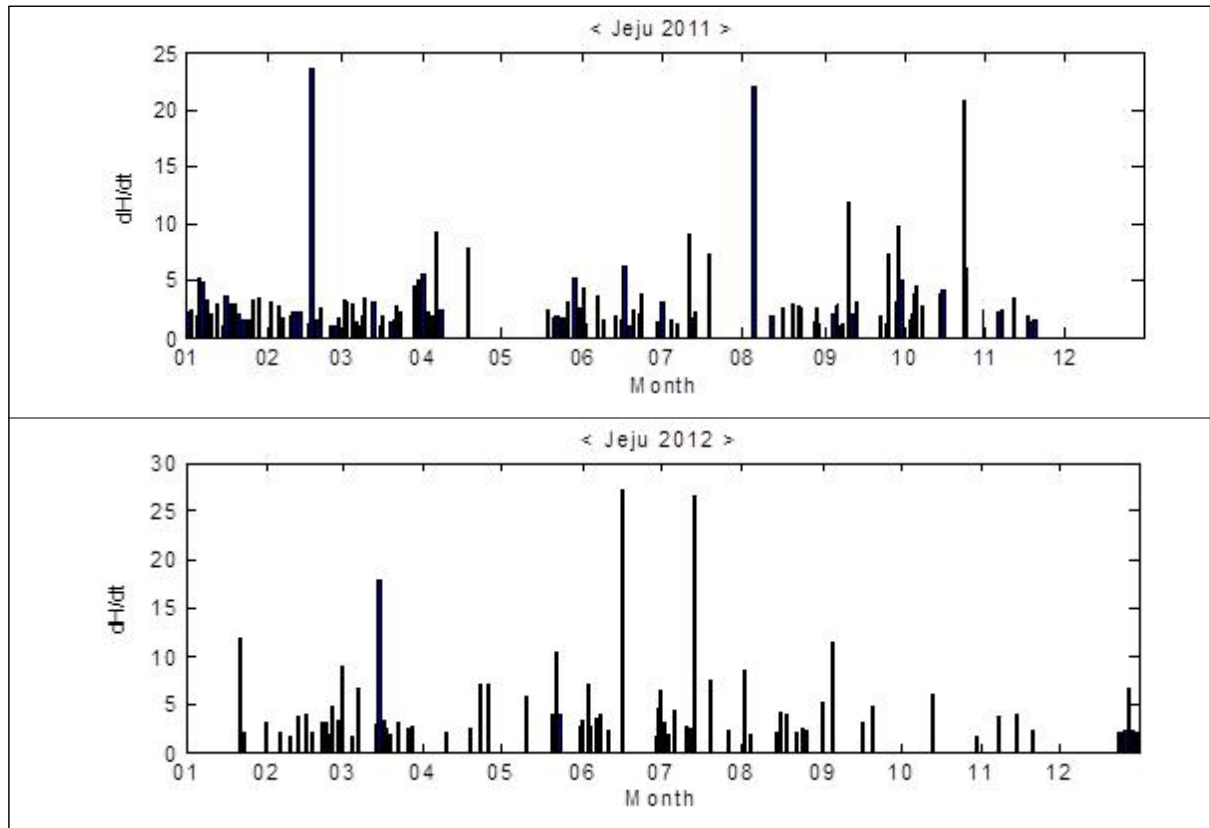


그림 2-12 제주 지자기교란 데이터(강릉 비교후 오류 제거)

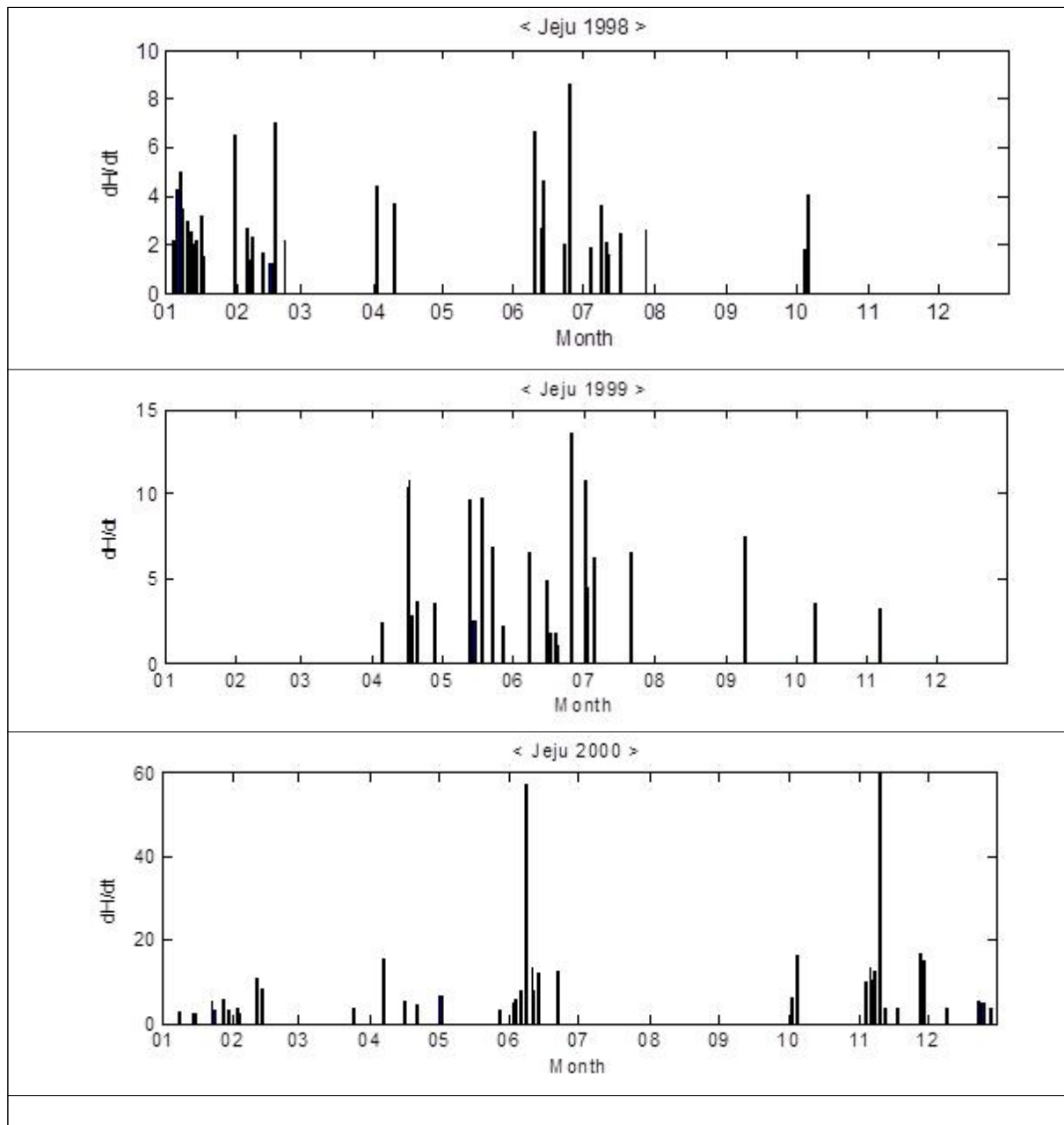
## 2) 제주와 이천 데이터간 비교

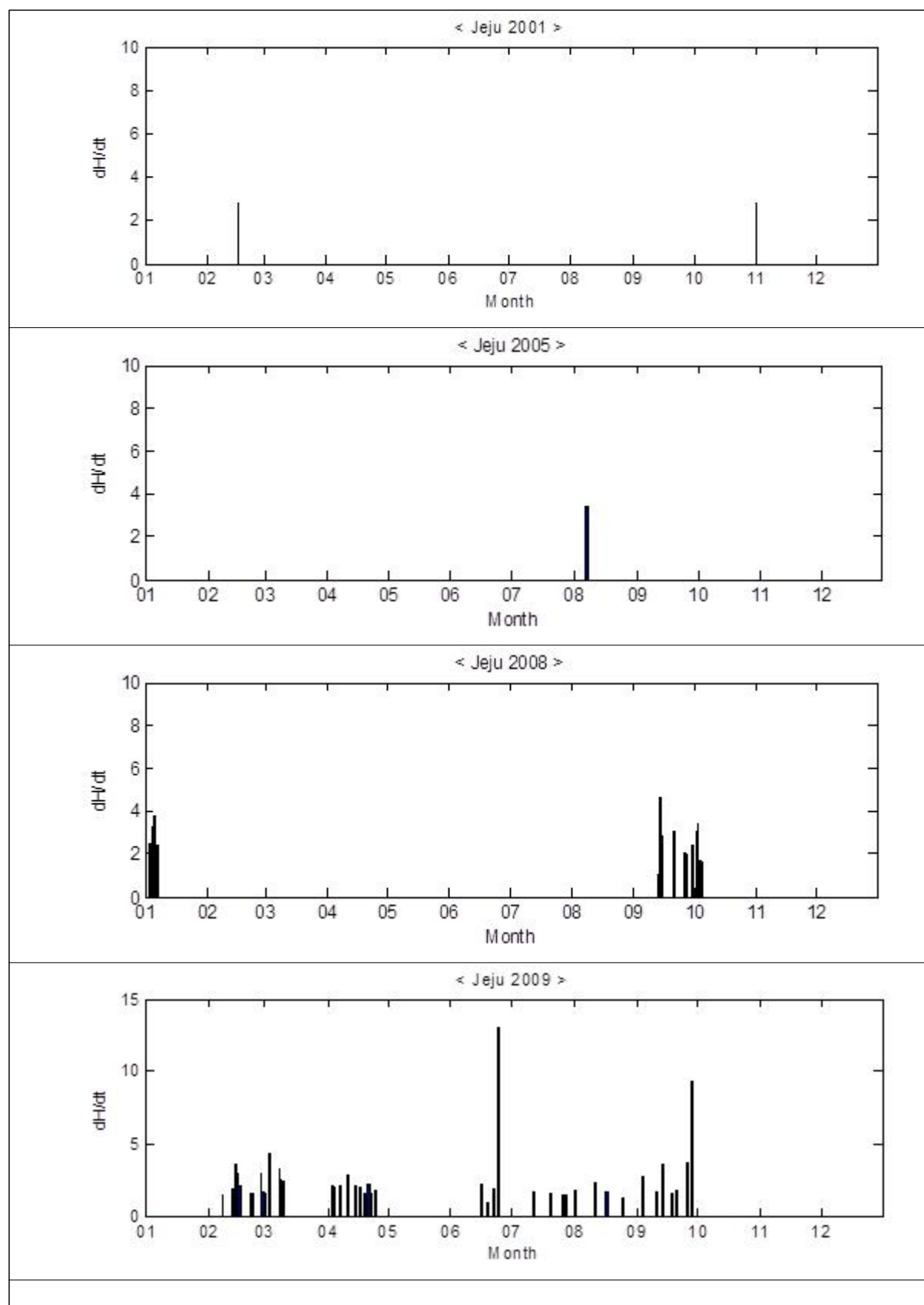
동일일시의 제주 지자기와 이천 지자기의  $dH/dt$ 는 동일한 패턴과 크기를 가지며 동일일시 데이터 수는 다음 표와 같다. 다만, 2006년과 2007년의 이천 및 제주 데이터 모두가 동일한 값을 가지고 있어 분석대상에서 제외하고 2002년 ~ 2005년 그리고 2011년에는 동일일시 데이터가 없어 분석을 생략하기로 한다

년도	제주 데이터 수	동일일시 데이터 수
1998	144	34
1999	218	24
2000	246	40
2001	224	2
2005	314	1

년도	제주 데이터 수	동일일시 데이터 수
2008	278	15
2009	252	44
2012	348	74

표 2-10 제주-이천 지자기교란 데이터 비교(1998~2012년)





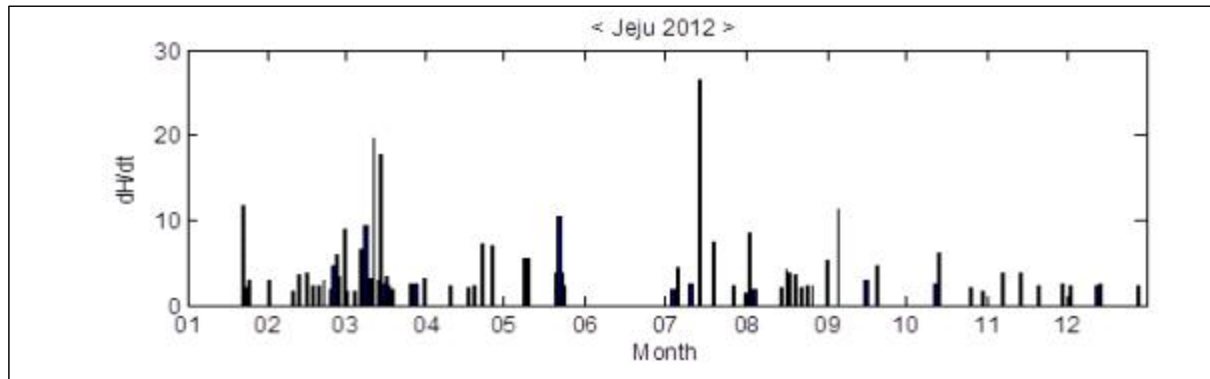


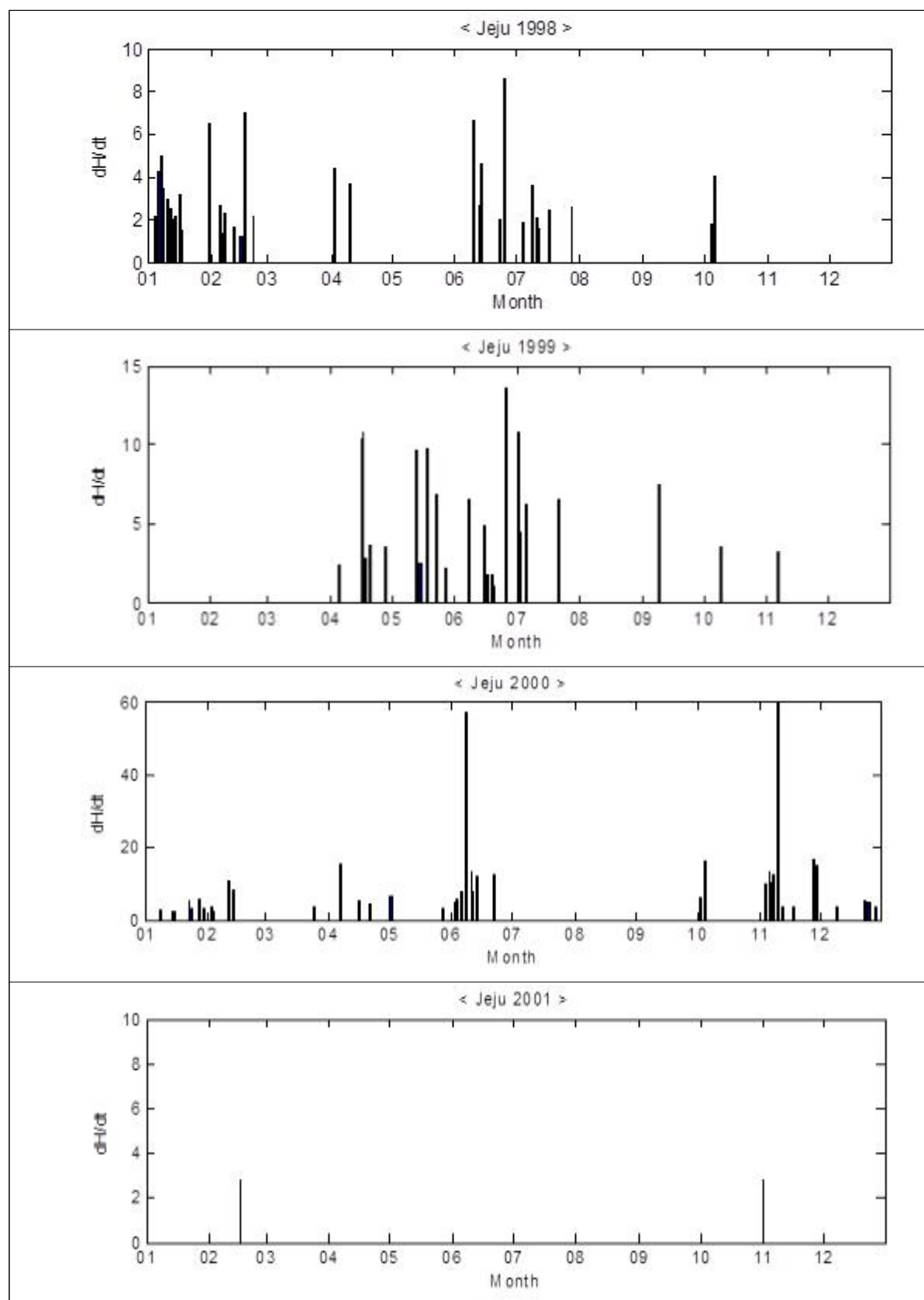
그림 2-13 제주 지자기교란 데이터(이천 비교후 오류 제거)

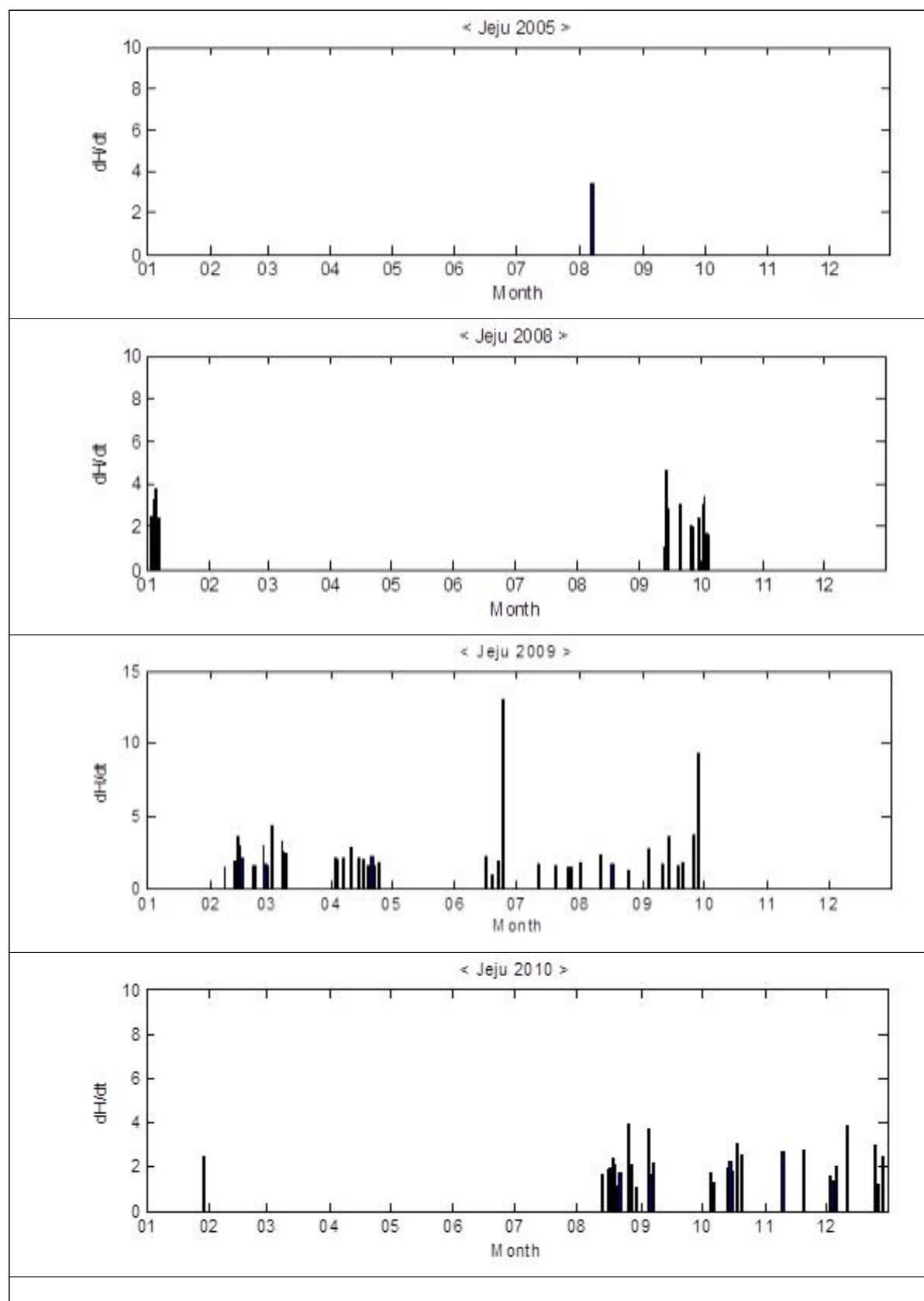
### 3) 종합비교

동일일시의 강릉 - 이천 데이터와 강릉 - 제주 데이터를 일자기준으로 모아 정리하면 동일일시 데이터 수는 다음 표와 같으며, 제주 관측소의 역대 최대  $dH/dt$ 값은 2000년 59이고  $dH/dt$ 가 30이상인 날은 2000년 2일로 59, 56이다. 다른 연도의 모든  $dH/dt$ 는 30이하로 일상적으로 관측할 수 있는 수준에 해당하는 것으로 검토된다. 다만, 2006년과 2007년의 이천 및 제주 데이터 모두가 동일한 값을 가지고 있어 분석대상에서 제외하고 2002년 ~ 2005년 그리고 2011년에는 동일일시 데이터가 없어 분석을 생략하기로 한다

년도	제주 데이터 수	동일일시 데이터 수
1998	144	34
1999	218	24
2000	246	40
2001	224	2
2005	314	1
2008	278	15
2009	252	44
2010	335	29
2011	328	126
2012	348	92

표 2-11 제주 지자기교란 동일일시 데이터 수







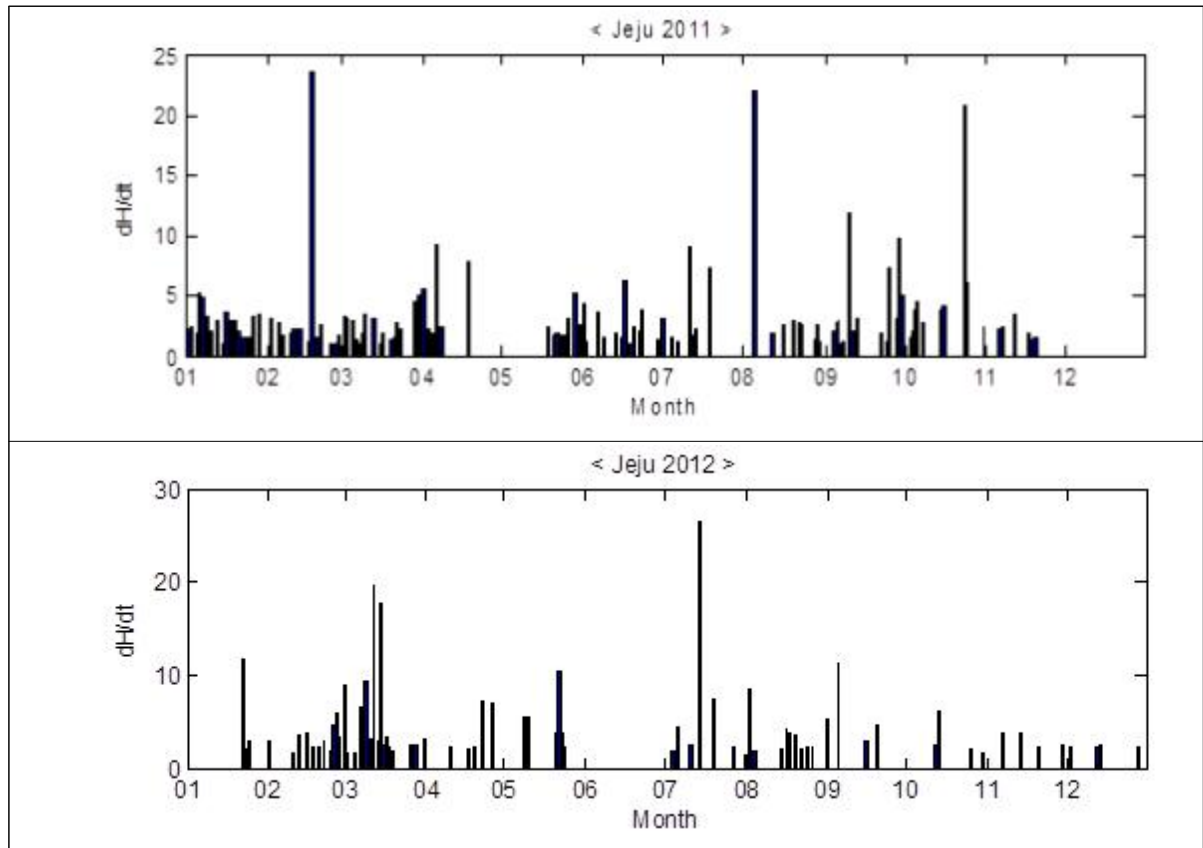


그림 2-14 제주 지자기교란 데이터(1998~2012년)

과거 지자기 교란시의 유도전류 예상값 산출을 위해 국내 3개 지자기 관측소에서 측정된 최대  $dH/dt$ 가 발생된 2가지 경우(2000년의 경우)를 적용하는 것이 바람직하다. 다른 연도의 모든  $dH/dt$ 는 30이하이므로 최근 사례(2013.3.17. 유도전류 5.5A 발생시  $dH/dt$ 는 30.2)를 참조하여 유도전류는 5.5A 이하로 판단된다.

마지막으로 분석대상에서 제외한 2002~2007년, 2011년의 지자기 교란 데이터 분석은 해외 지자기 교란 사례를 통해 지자기 교란 최대 크기를 제3장 2-4절에서 살펴보기로 한다.

### 3. 일본 지자기 관측 데이터와 비교분석

2000년 이후 지자기 교란은 2003년 10월, 지구 전역에 지자기 폭풍 발생

으로 스웨덴과 남아공에서 정전 피해 및 변압기 장애가 발생한 것으로 알려져 있다. 그 당시 우리나라에서는 얼마나 큰 지자기 교란이 발생되었는지 분석할 필요가 있다. 2003년의 이천 지자기 데이터는 다른 장소의 동일일시 데이터가 없어 지자기 관측소 2개 이상에서의 지자기 교란 시점을 추출하기 위해 일본 카키오카 관측소의 데이터를 이천 데이터와 비교하였다.

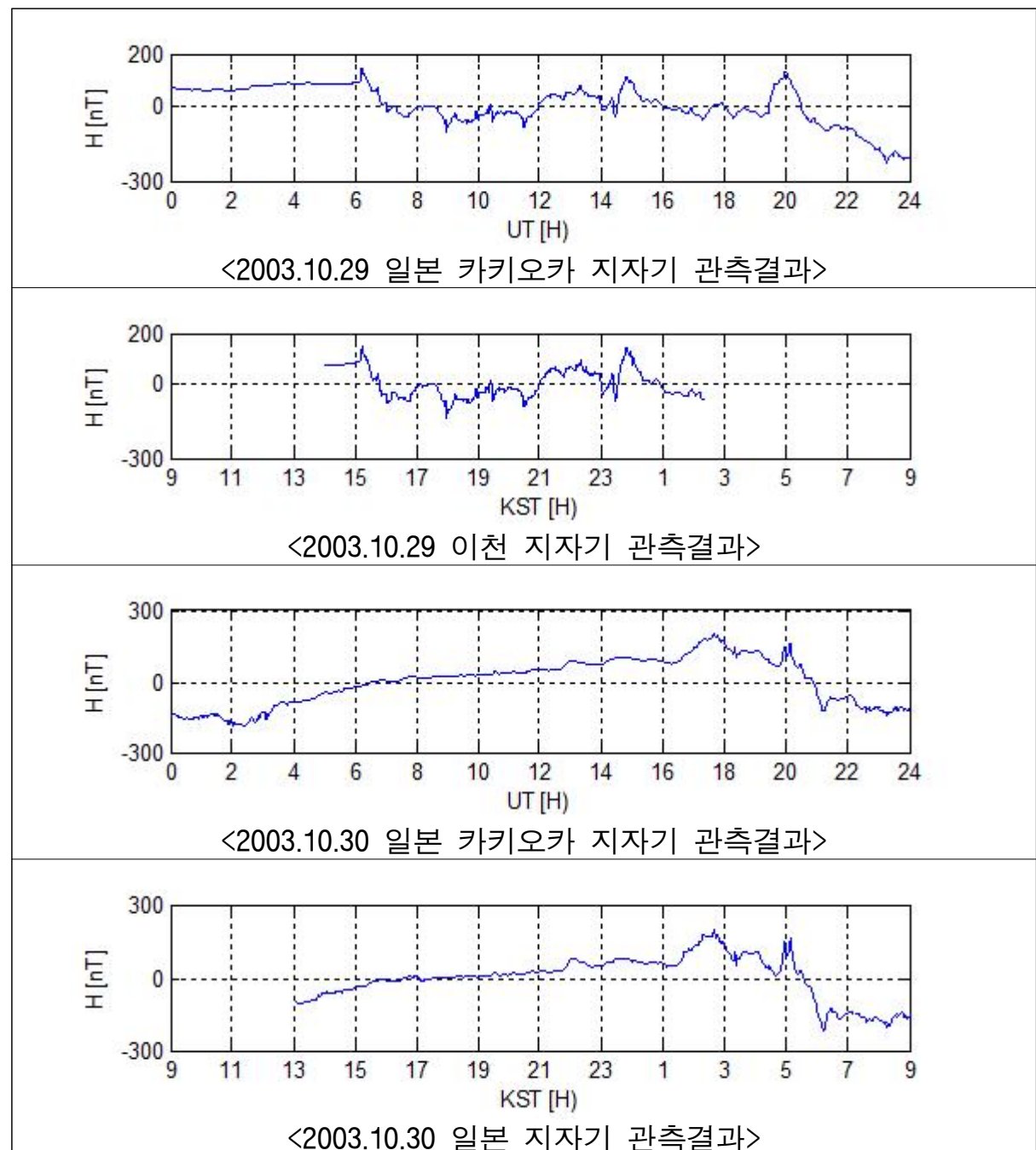


그림 2-15 이천-일본 지자기 관측결과 비교

일본 카키오카 지자기 관측데이터와 비교·분석한 결과, 우리나라 지자기 관측데이터는 일본과 유사한 자기장 크기를 가지고 지자기 패턴이 일치되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 2003.10.29.~30일 관측된 이천 지자기 데이터는 신뢰성이 있는 데이터임을 입증할 수 있다.

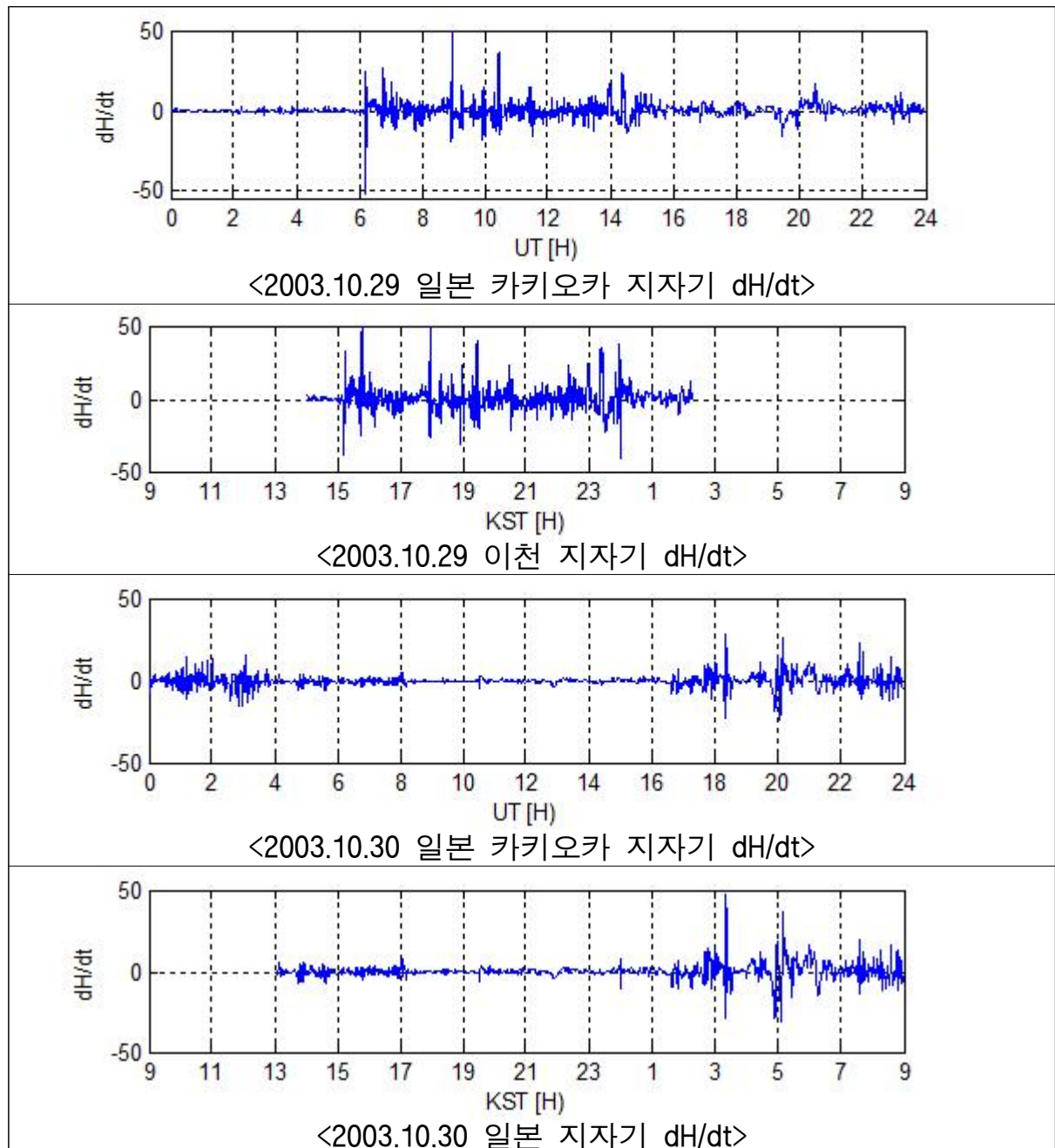


그림 2-16 이천-일본 dH/dt 산출 비교

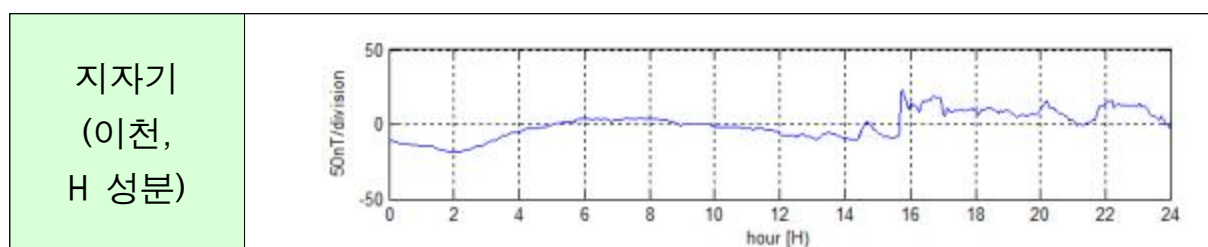
2003년 10월의 이천 지자기  $dH/dt$ 를 산출한 결과, 이천 지자기 데이터는 일정 시간구간에서 일본 데이터와 동일한 패턴이 나타나고 있으며. 이때의 이천 지자기의 최대 1분 평균의  $dH/dt$ 는 52로 계산되어 이천 지자기 관측 이래 가장 큰 지자기 교란이 발생되었음을 확인할 수 있었다.

### 제3절 유도전류 관측결과 비교분석

#### 1. 유도전류 발생에 따른 지자기와 K지수 변화 비교

본 절에서는 지자기 변화에 따라 국내전력망에 유도되는 유도전류(GIC)를 연구하기 위해 지자기 관측결과와 지자기 교란 지수인 K지수 그리고 유도전류 관측결과 간의 상관관계를 분석하고자 한다. 지자기 관측결과는 이천 시험인증센터, 강릉 전파관리소, 제주 우주전파센터에 지자기 측정센서를 설치하여 각 지자기 관측소에서 수집된 데이터를 지자기 X, Y, Z성분으로 1초 단위로 측정하여 저장하고 H, D성분 형태의 지자기로 변환하며, 지자기 교란 지수인 K지수는 관측된 지자기(H, D성분)과 평상시 지자기(H, D성분)의 차이를 10개 등급의 로그스케일로 산출하고 있다. 유도전류 측정결과는 765kV 변전소의 변압기 공통접지 중성점에 비접촉식 전류측정센서를 설치하여 1초 단위로 측정하여 서버로 전송하고 있다.

지자기와 K 지수와 유도전류 관측결과를 비교한 사례로 지자기 교란이 발생된 '12.10.31일 데이터를 이용하여 연관성을 살펴보았다. 이천 지자기의 H 성분이 급변하는 15~16시에 유도전류가 발생되고 있어 지자기와 유도전류가 상호 연관이 있음을 확인하였고 K지수가 가장 높은 시간대에 해당하는 것을 알 수 있다.



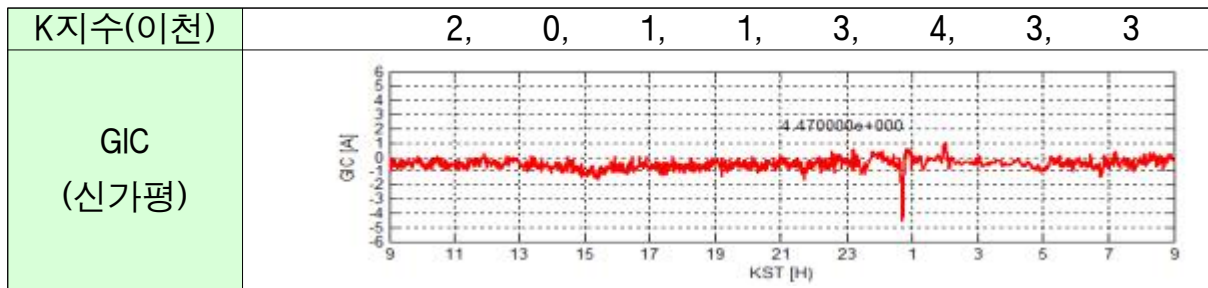
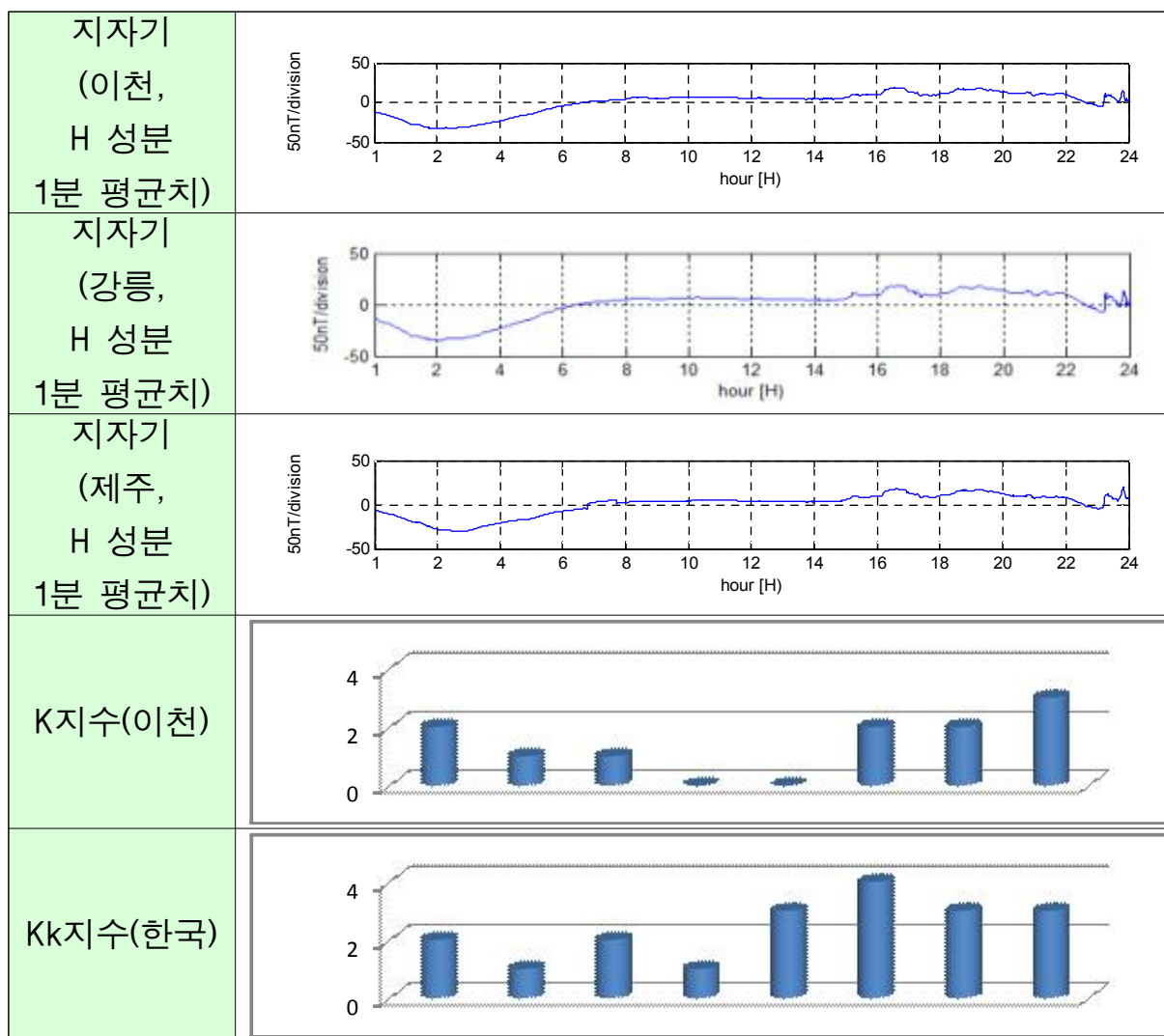


표 2-12 이천 지자기 변화와 신가평 유도전류 측정값('12.10.31)

다양한 사례를 살펴보기 위해 '12.11.12.~ 12.2 동안의 지자기와 K지수와 유도전류 관측결과를 비교해 보았다. 우선 '12.11.12에 관측된 사례를 보면, Kk지수가 3으로 낮으나 이천 K지수가 4로 높아 지역적으로 차이가 있었다.



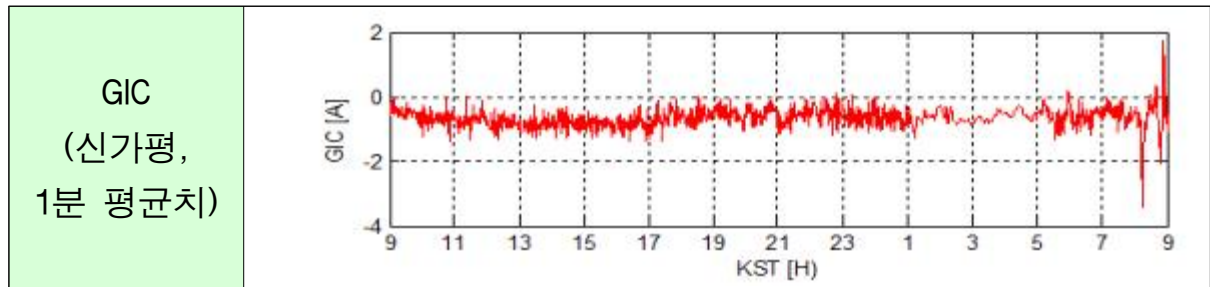
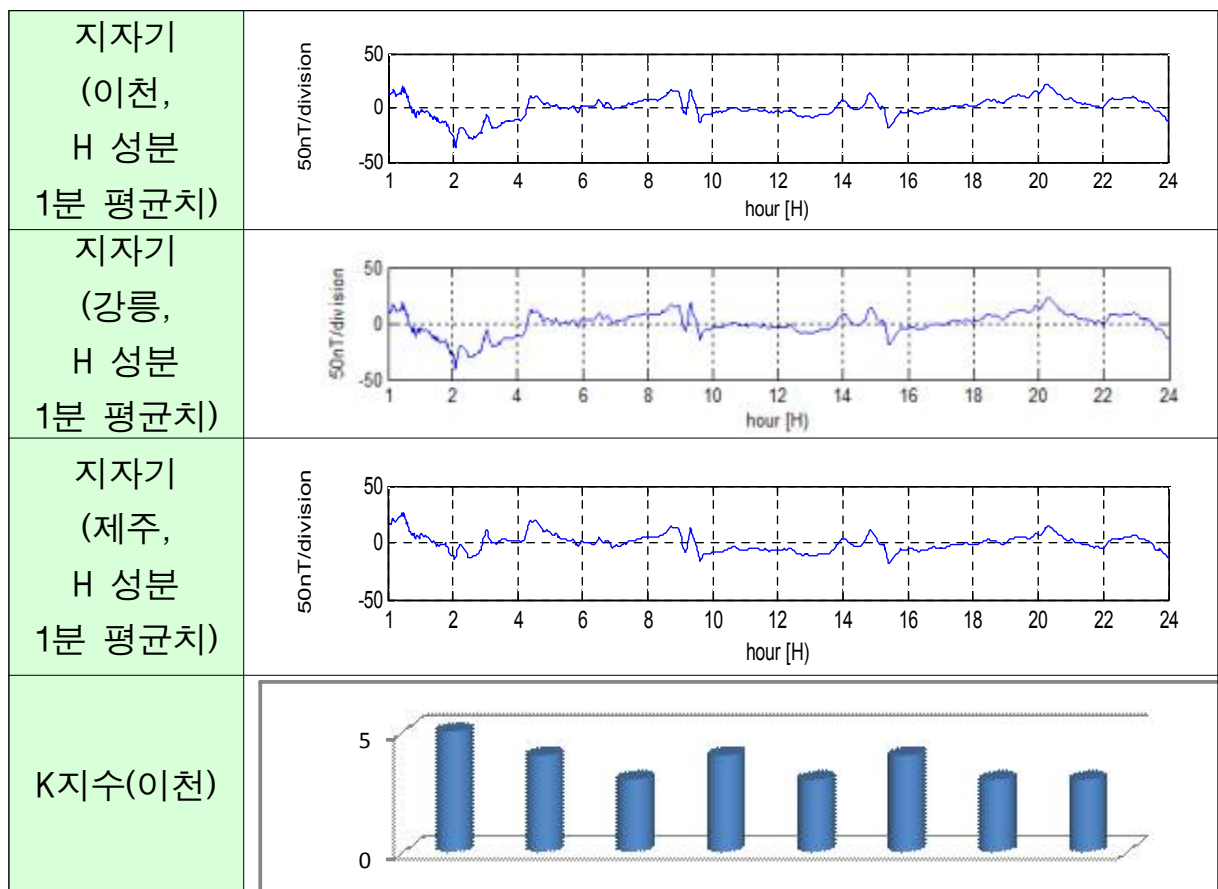


표 2-13 지자기, K지수, 유도전류 측정값 비교('12.11.12)

'12.11.13.에 관측된 사례에서는 K지수는 0시에 가장 크고 지자기 변화가 크게 보였으나 9시 이후 지자기가 짧은 시간구간에서 변할 때 유도전류가 가장 크게 나타났다.





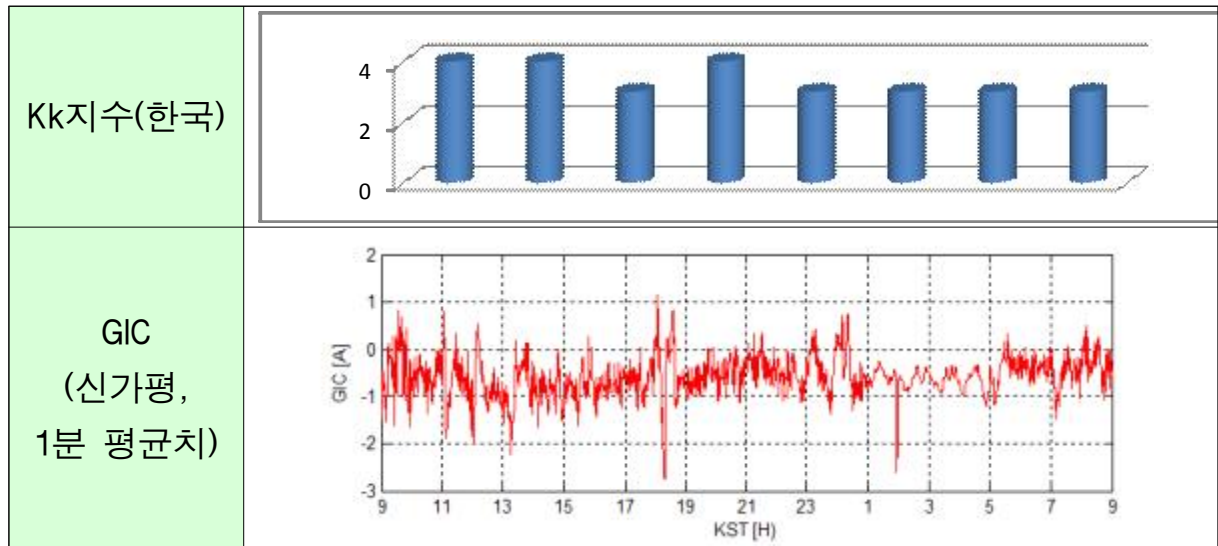
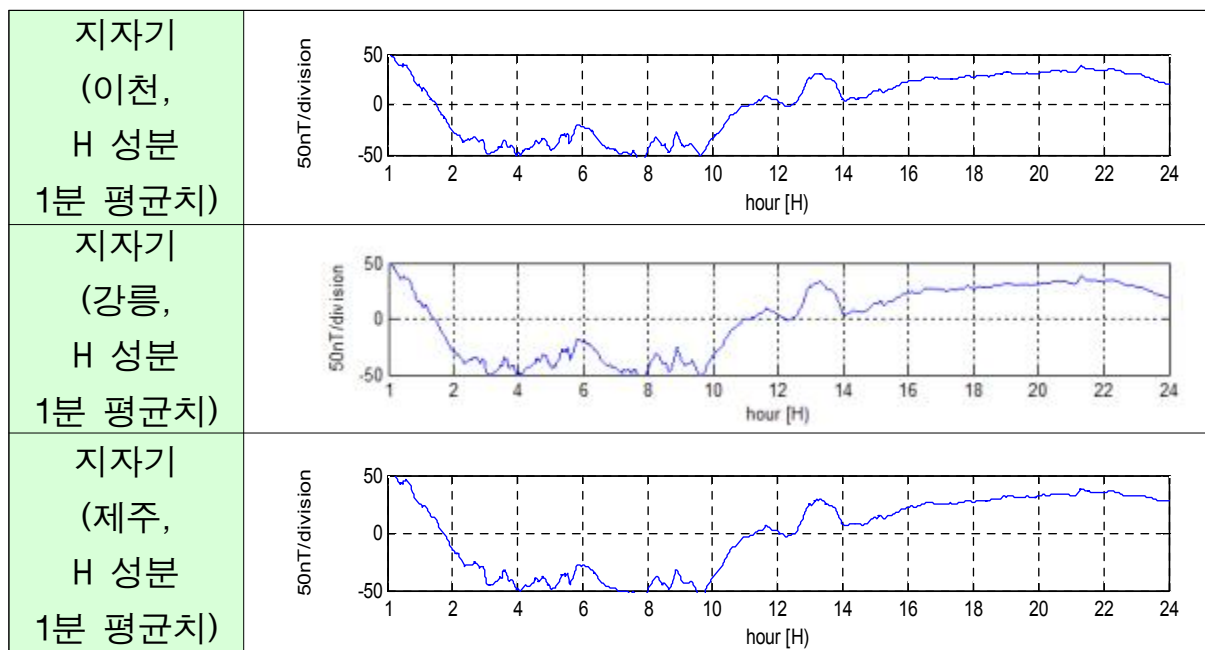


표 2-14 지자기, K지수, 유도전류 측정값 비교('12.11.13)

'12.11.14.에 관측된 사례에서는 Kk지수와 이천 K지수는 0~3시에 가장 크게 나타났으나 유도전류는 K 지수가 한단계 낮은 5시와 8시 이후에 가장 크게 나타났다.



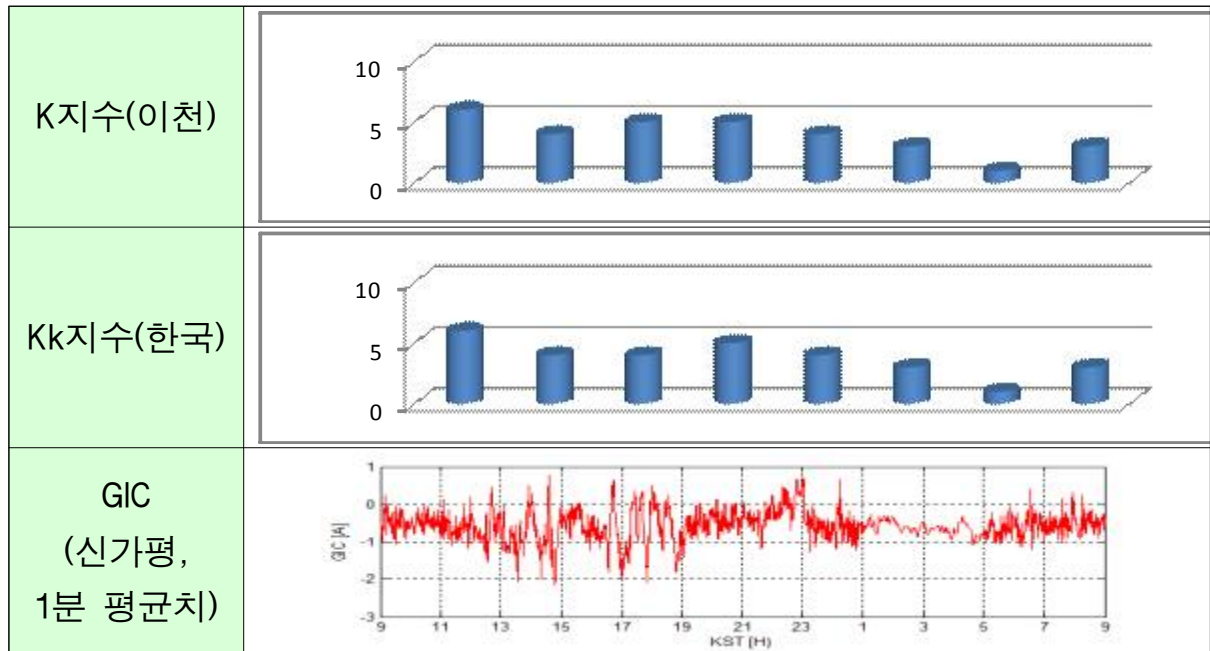
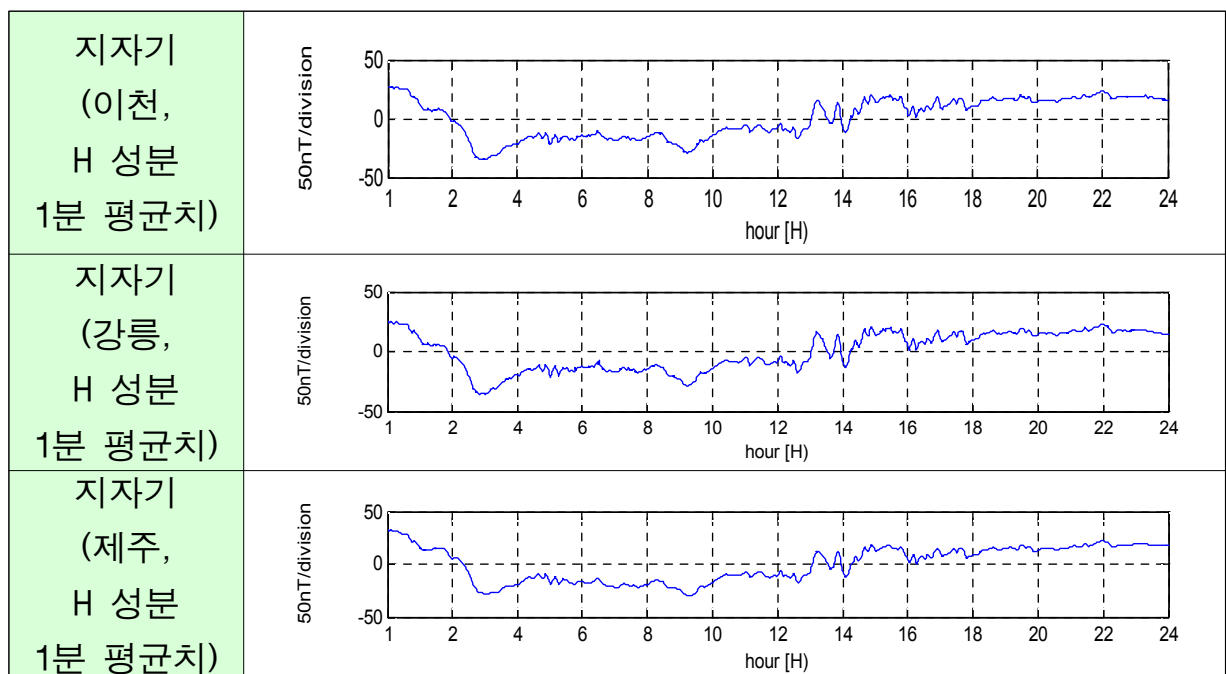


표 2-15 지자기, K지수, 유도전류 측정값 비교('12.11.14)

'12.11.24.에 관측된 사례에서는 Kk지수와 이천 K지수는 0~3시에 가장 크게 나타났으나 유도전류는 K 지수가 한단계 낮은 14시에 가장 크게 나타났고 지자기의 짧은 시간구간에서 여러 차례 변하고 있었다.





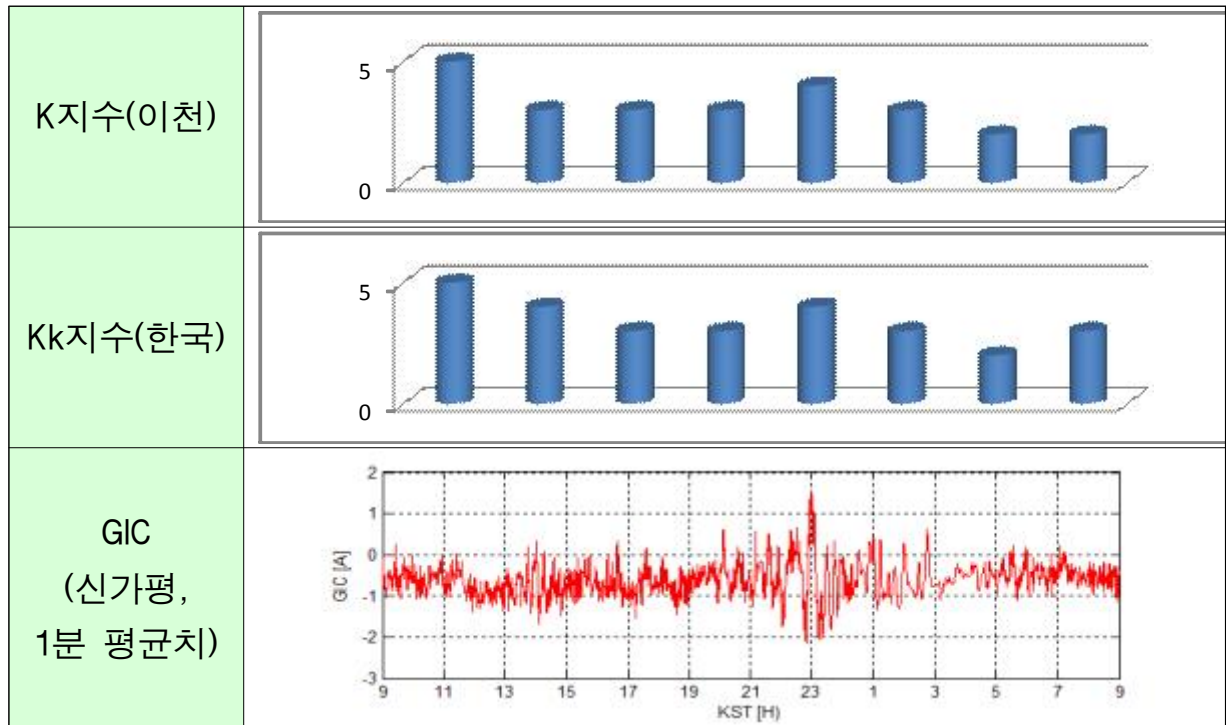
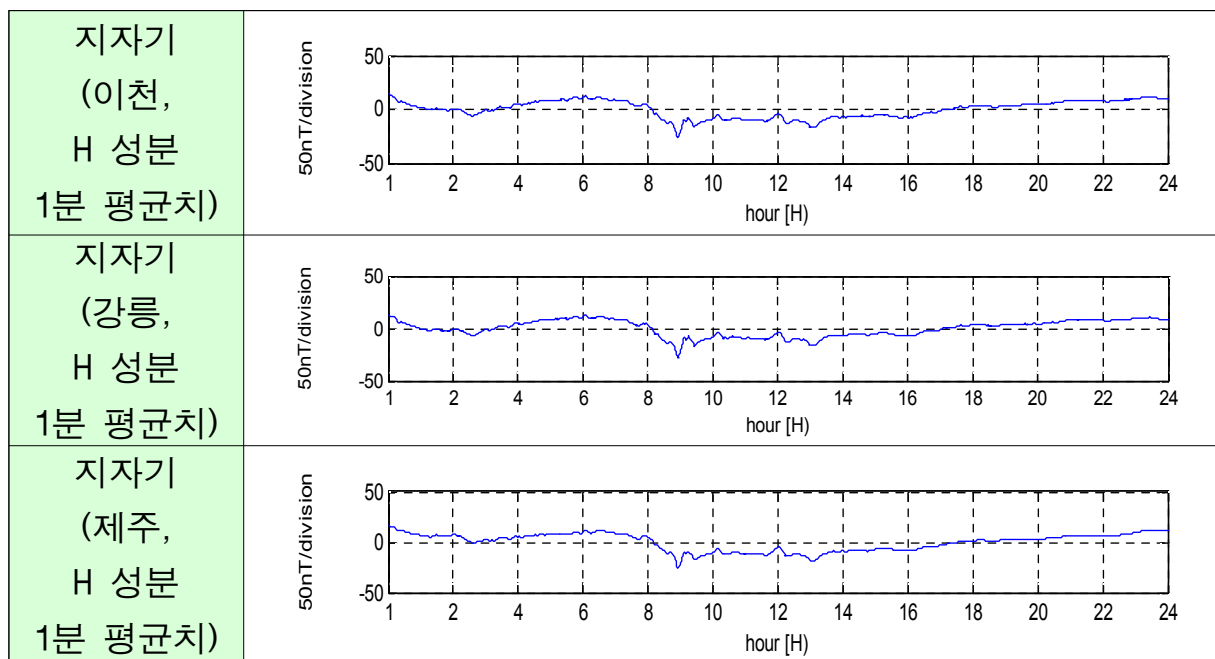


표 2-16 지자기, K지수, 유도전류 측정값 비교('12.11.24)

'12.12.2.에 관측된 사례에서는 9시에 유도전류가 가장 크게 나타났고 이는 K지수를 산정하는 시점에 발생되어 9~12시에 가장 크게 나타났다.



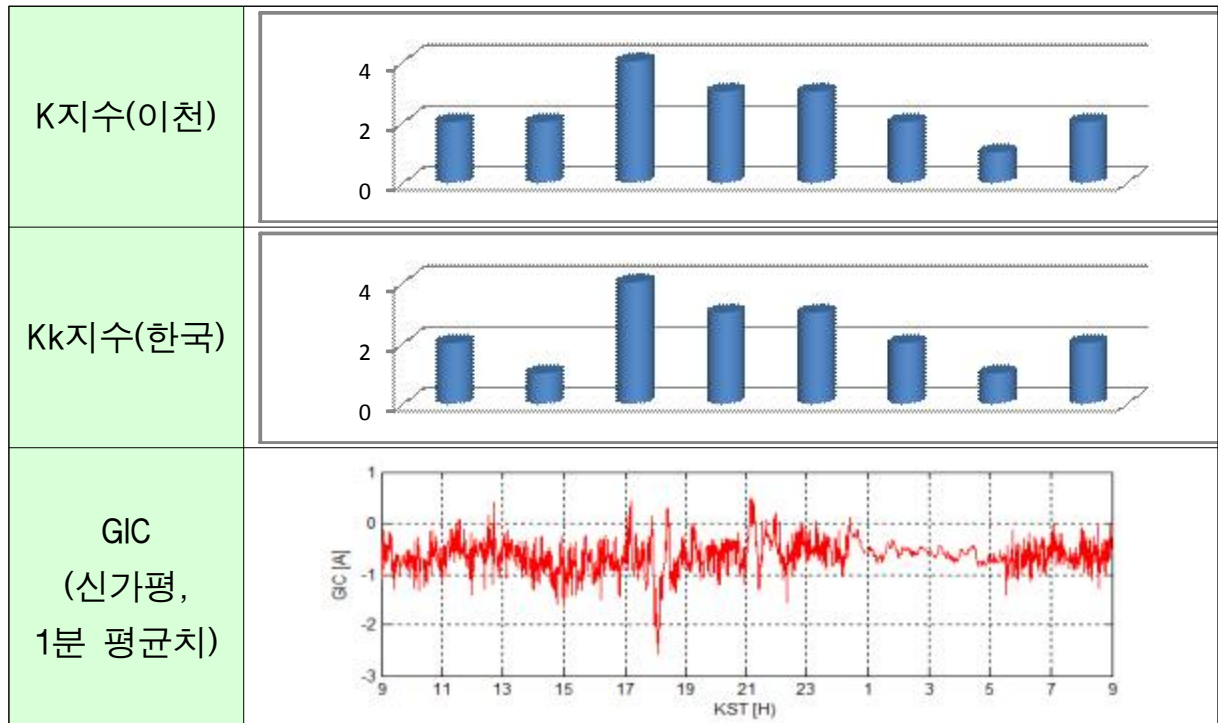


표 2-17 지자기, K지수, 유도전류 측정값 비교('12.12.2)

지금까지 관측사례를 통해 지자기의 짧은 시간구간에 변하는 시점에 유도전류가 크게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 하지만 지자기 교란 지수인 K지수의 크기가 크다고 유도전류가 크게 나타나지는 않았다. 세부적인 분석을 위해 지자기 교란 지수와 유도전류의 상관관계를 통계적으로 분석해 보고자 한다. '12.10.17 ~ '13.2.28(135일)동안 발생한 지자기 교란 지수에서 Kk지수가 4이상인 날은 6.125일(총 49회)이고 5이상인 날은 1.75일(총 14회)로 나타났다.

구분	횟수(1회=3시간)			일수		
	K 4이상	K 5이상	K 6이상	K 4이상	K 5이상	K 6이상
K 강릉	52	13	3	6.5	1.625	0.375
K 이천	48	14	4	6	1.75	0.5
K 제주	50	14	2	6.25	1.75	0.25
Kk 한국	49	14	2	6.125	1.75	0.25

표 2-18 지자기 교란지수 통계('12.10.17~'13.2.28)

다음으로 유도전류 이벤트가 발생되었을 때의 지자기 교란 지수는 살펴보고자 한다. 유도전류 관측 1분 평균치가  $|2| A$  이상으로 관측된 일시에 서의 지자기 교란 지수인 K지수를 조사하였다. 동일 기간 중 총 21회의 유도전류 이벤트가 발생되었다.

GIC 발생일시	절대값(A)	K 강릉	K 이천	K 제주	Kk 한국
2012.10.23. 03:09	-2.49	3	3	3	3
2012.10.31. 15:41	-4.47	4	4	4	4
2012.11.12. 23:13	-3.44	3	3	3	3
2012.11.13. 09:17	-2.75	4	4	4	4
2012.11.14. 05:46	-2.16	4	4	4	4
2012.11.20. 15:58	-2.07	4	4	4	4
2012.11.24. 13:49	-2.14	4	4	4	4
2012.11.25. 05:48	-2.17	3	3	3	3
2012.11.26. 05:14	-2.24	3	3	4	4
2012.12.02. 09:05	-2.56	3	3	3	3
2012.12.17. 04:22	+2.24	2	2	2	2
2013.01.13. 01:59	-2.07	3	3	3	3
2013.01.17. 03:35	-3.43	4	4	4	4
2013.01.17. 15:23	+5.15	6	6	6	6
2013.01.18. 12:06	+2.52	5	5	5	5
2013.01.18. 12:39	-2.59	5	5	5	5
2013.01.19. 00:39	-2.10	3	3	3	3
2013.01.25. 17:02	-2.19	2	2	2	2
2013.01.26. 09:52	-2.70	4	4	4	4
2013.02.08. 06:40	-2.94	3	3	3	3
2013.02.16. 12:11	-2.66	3	3	3	3

표 2-19 GIC 발생일시와 지자기 교란지수 비교

K지수와 유도전류간 발생확률을 분석한 결과, 대상 관측기간 중 지자기 교란 지수가 5이상 K지수(이천)에서 | 2| A이상의 유도전류를 관측할 확률은  $2/14 \cong 14\%$ 로 계산되었으며, K지수 2이상에서도 유도전류 | 2| A이상이 관측되기도 하였다.

## 2. 유도전류 관측 3개소의 데이터 상호 비교 분석

초고압 변전소 3개소에 설치된 유도전류 관측결과에 대해 지자기 교란시 유도전류 관측값을 상호 비교 분석하였다. 신태백과 동제주의 유도전류 측정장치 및 이천 지자기 신규 관측소의 설치일자를 고려하여 강릉 지자기 관측데이터를 이용하여 유도전류 측정장치 설치 이후에 지자기 교란이 발생한 6.1일과 6.6일을 대상으로 분석해보았다.

### 가. 6. 1일 지자기 변화에 따른 유도전류 관측

지구자기장의 일일 변화폭은 평상시 60nT 이하지만 193.6nT로 크게 나타났다고 9시~21시까지 수차례 지자기의 변화가 관측되었다. 일일 최대  $dH/dt$ 는 7.1으로, 9시반과 10시반의 변화가 큰 것으로 나타났다.

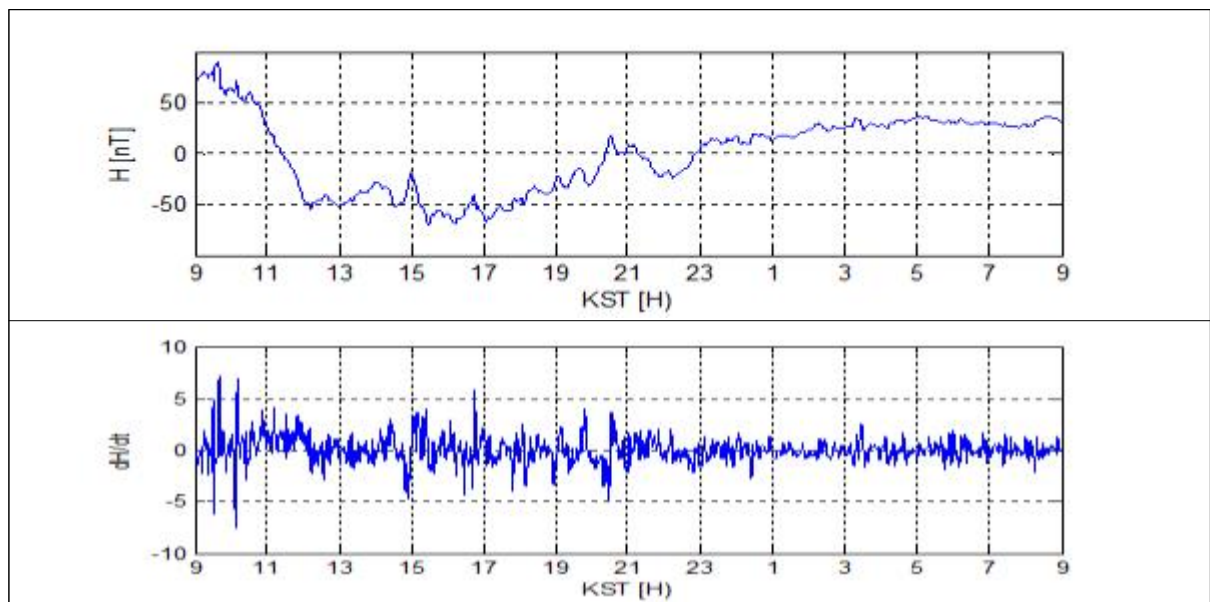


그림 2-17 지자기 변화와  $dH/dt$  (6.1)

유도전류 관측결과, 신가평 변전소에서의 일일 최대 절대값은 3.28A로 15시에 가장 크게 나타났고, 신태백 변전소에서의 일일 최대 절대값은 1.95A로 9시반에 가장 크게 나타났다. 제3장 제2절 유도전류 성분 추출방법을 적용하여 분석한 결과, 9시반에 발생한 유도전류가 가장 큰 값을 알 수 있다. 이는 신가평 변전소에 일정한 직류성분의 전류가 전력망 자체에서 발생되어 해당 변압기로 유입된 것으로 일일 최대값의 발생시점에 영향을 준 것으로 검토된다. 동제주 변전소의 일일 최대 절대값은 3.61A이나 지자기 교란과 무관하게 9~21시까지 유도전류가 -2A에서 -1A로 상승되고 매일 5시에 유도전류가 크게 변하는 것으로 확인되어 전력망 부하조정 등 자체 요인으로 판단된다.

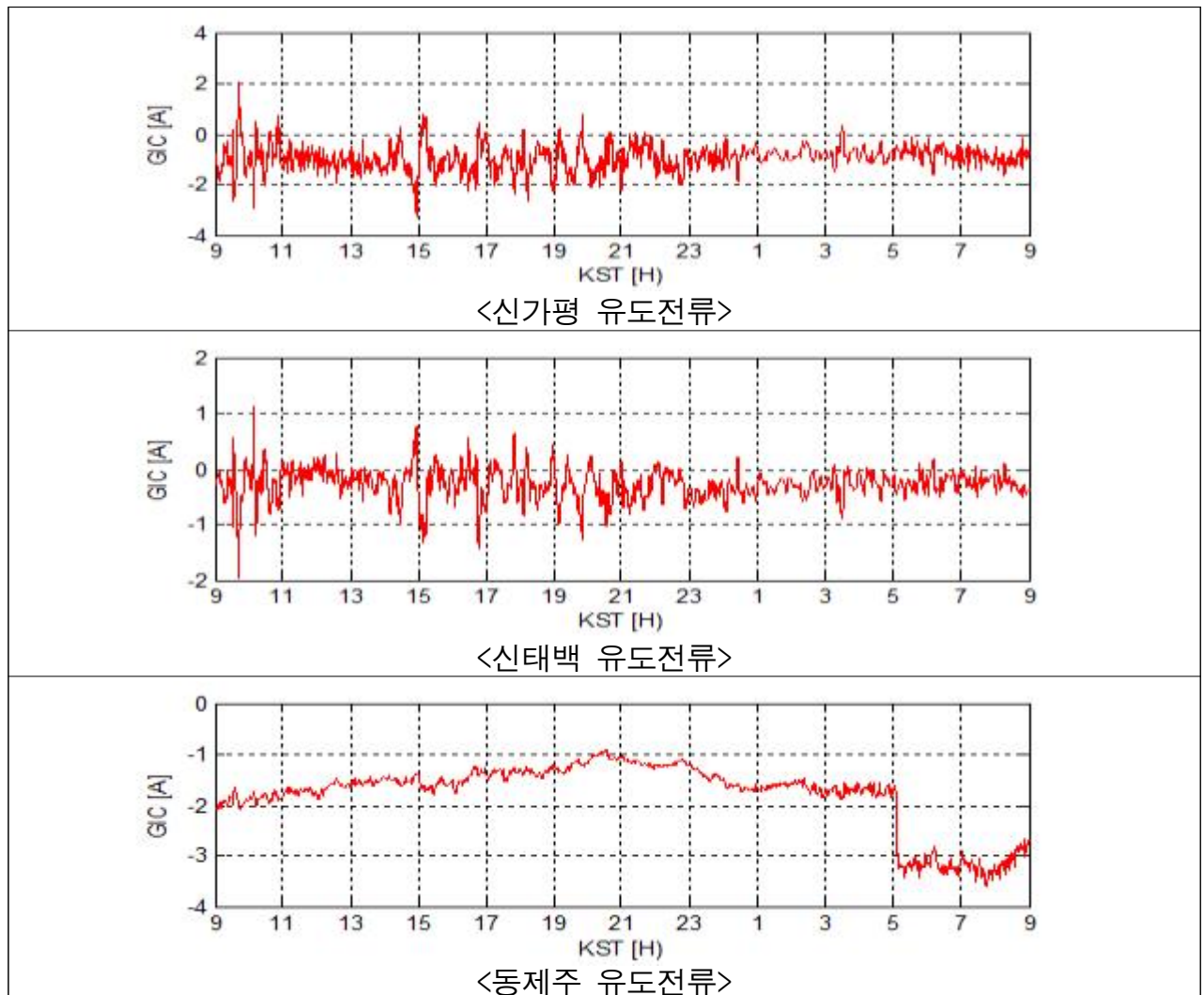


그림 2-18 3개 관측소 유도전류 측정 데이터(6.1)

#### 나. 6. 6일 지자기 변화에 따른 유도전류 관측

지구자기장의 일일 변화폭은 평상시 60nT 이하지만 107.8nT로 크게 나타났고 0~1시 사이 지자기의 변화가 큰 것으로 관측되었다. 일일 최대  $dH/dt$ 는 8.9로, 0~1시 사이에 변화가 크게 발생되었다.

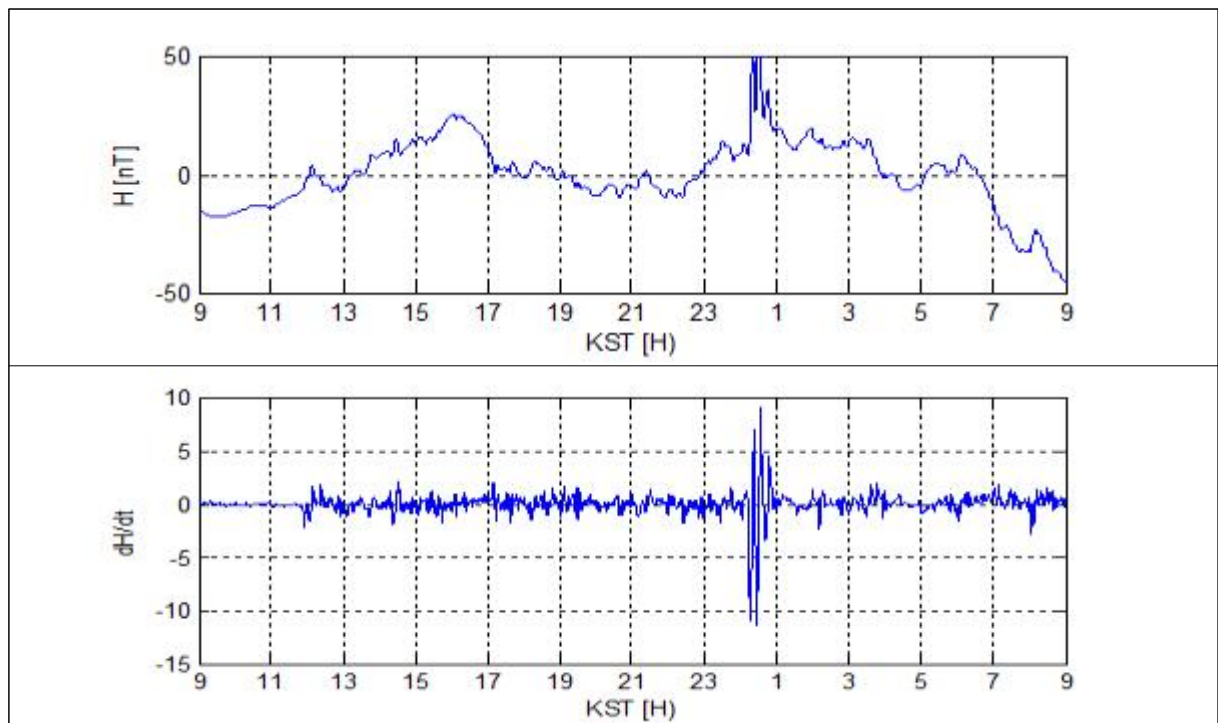


그림 2-19 지자기 변화와  $dH/dt$  (6.6)

유도전류 관측결과, 신가평 변전소에서의 일일 최대 절대값은 4.77A로 0~1시에 가장 크게 나타났고, 신태백 변전소에서의 일일 최대 절대값은 1.66A로 역시 0~1시에 가장 크게 나타났다. 동제주 변전소에서는 지자기 변화전 0A에 가까웠으나 0시부터 5시까지 유도전류가 증가하기 시작하였으며 매일 5시에 유도전류가 크게 변하는 것으로 확인되어 전력망 부하조정 등 자체 요인으로 판단된다.



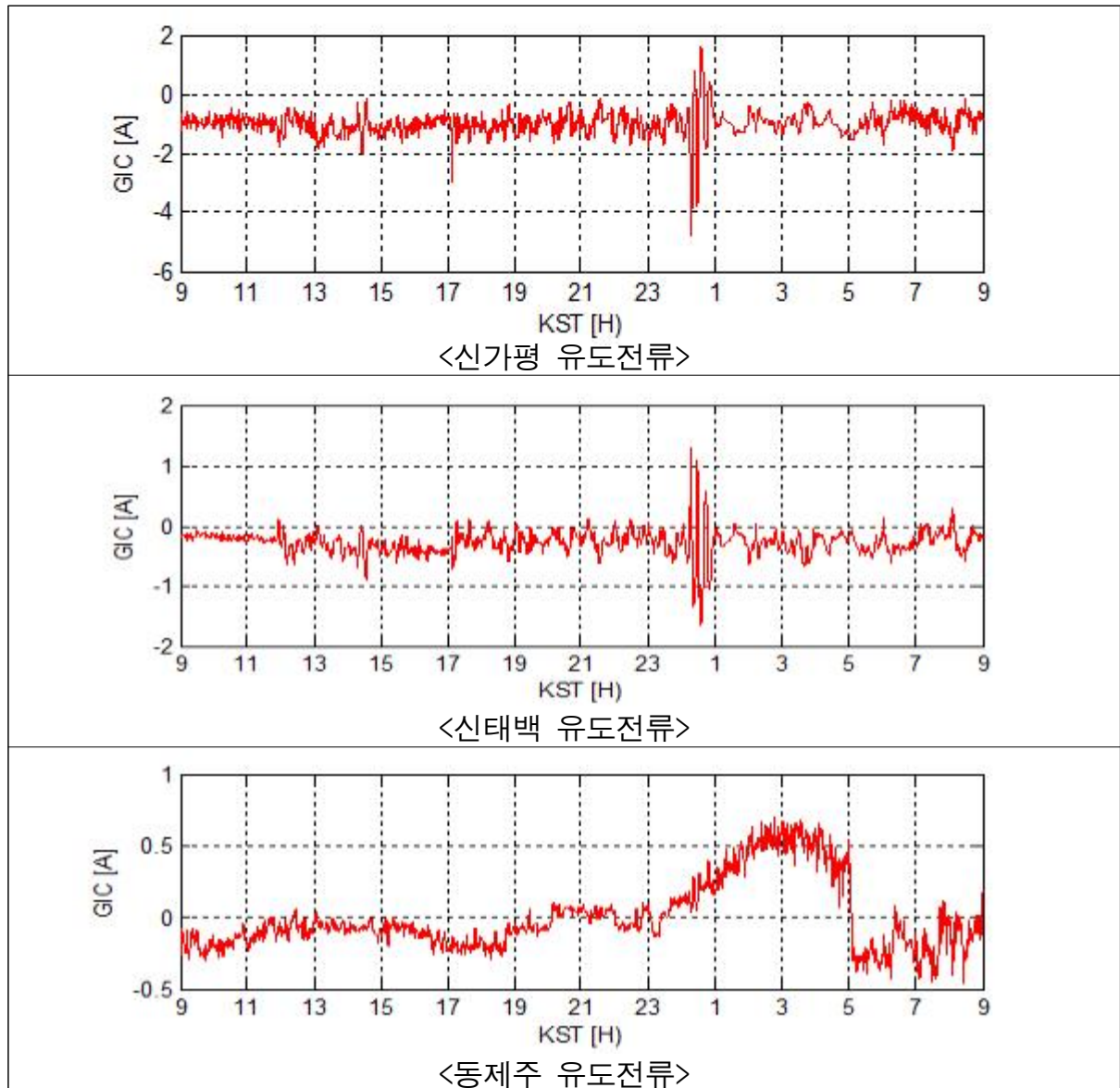


그림 2-20 3개 관측소 유도전류 측정 데이터(6.6)

한전의 전력망은 고리원전에서 시작되어 신태백 변전소를 통해 신가평 변전소로 공급되고 있으므로, 신태백의 유도전류 패턴이 신가평의 유도전류 패턴과 반대 극성을 가지는 것을 알 수 있었으며, 유도전류가 직류성분인 관계로 지자기의 방향성을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 신태백 변전소와 신가평 변전소는 동일한 시스템으로 쌍둥이 형태로 구성되나 신태백 유도전류의 관측값은 신가평 유도전류의 1/3 정도에 불과한 것으로 나타났다. 이는 유도전류 세기와 연관된 지리적 차이인 지면 임피던스로 인해 발생하는 것으로 검토되었다.

지자기의 시간적 변화인  $dH/dt$ 는 0을 기준으로 변동되지만, 신가평 변전소와 신태백 변전소에서 관측된 유도전류는 0A가 아닌  $-0.5 \sim -1.5A$ 사이에서 변하고 있음을 알 수 있다. 이는 전력망 자체에서 발생하는 전류로 이를 상쇄하여 지자기의 미분값  $dH/dt$ 와 유도전류 측정치간 유도전류 예상값을 산출하기 위해 유도전류 관측치를 0A 기준으로 정하는 방안 마련이 필요하다. 이는 제3장 제2절 유도전류 성분 추출을 통해 그 방안을 마련하였다.

동제주 유도전류는 지자기 변화 패턴과 직접적인 상관성은 없어 보이나, 지자기 관측기간 동안 유도전류가 수 시간 증가 또는 감소되는 현상을 보이고 있어 추가적인 확인 작업이 필요한 것으로 보인다. 이를 위해 동제주 변전소의 유도전류 관측결과를 신가평과 비교·분석하였다.

### 3. 동제주 변전소의 유도전류 관측결과 분석

'13.10.2일 관측된 유도전류 관측결과에서 신가평 유도전류와 동제주 유도전류의 크기 차이를 확인할 수 있었다. 동제주 유도전류는 신가평 유도전류에 비해 1/10배 이하로 낮기 때문에 그간 관측에서는 동제주 유도전류의 크기가 확인되지 않았다.

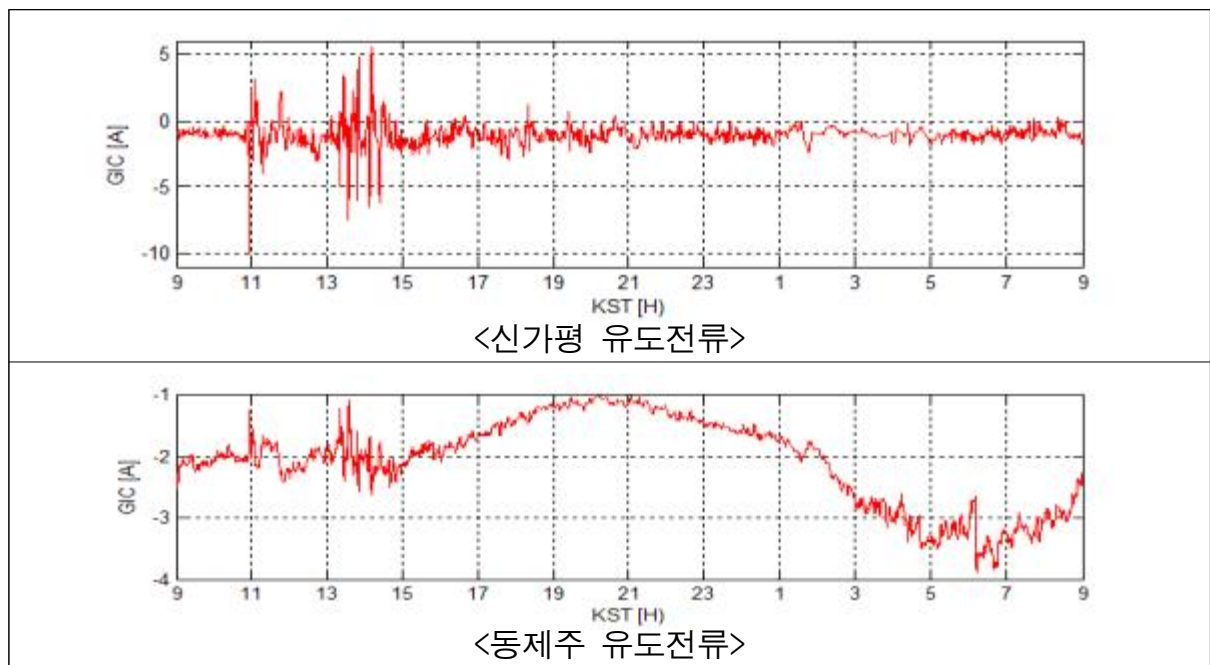


그림 2-21 신가평-동제주 유도전류 측정 데이터 비교('13.10.2)



미국 초고압 전력망의 kV 등급별 송전선 임피던스를 살펴보면 161kV 급 송전선의 임피던스가 765kV급 송전선보다 10배정도 높은 것을 알 수 있다. 유도전기장으로 발생된 유도전압이 공간적으로 일정하다는 점을 감안하면 임피던스가 큰 154kV급 송전선에 흐르는 유도전류는 765kV급 송전선에 흐르는 유도전류에 비해 1/10배 정도로 낮게 나타나게 되는 것이다.

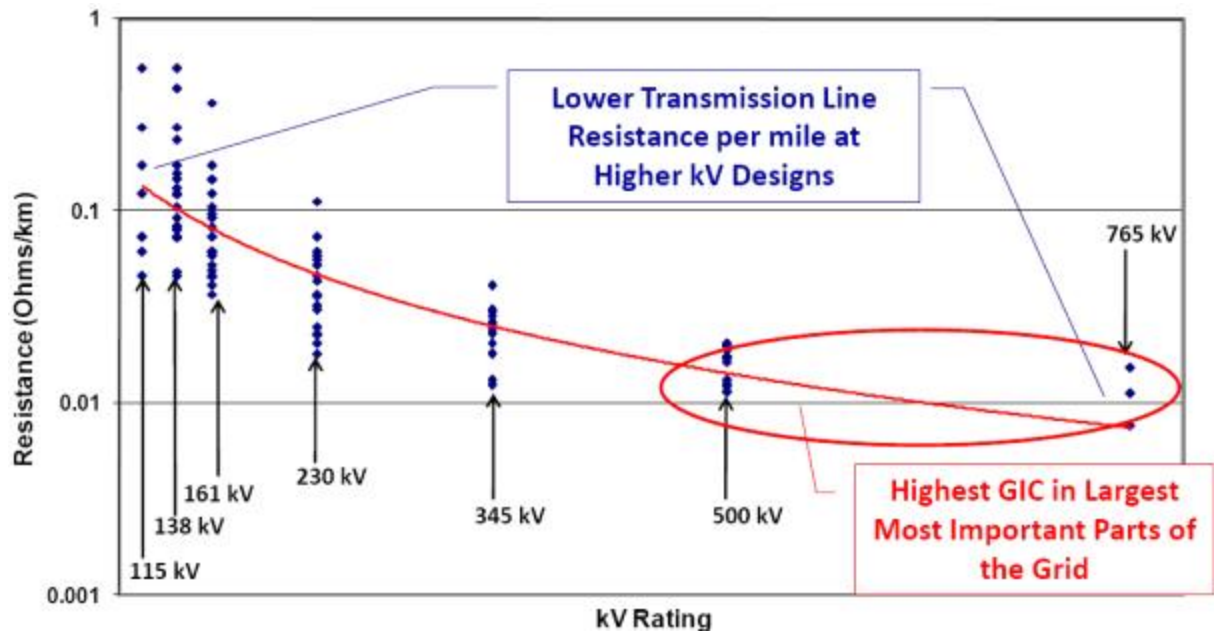


그림 2-22 미국 초고압 전력망의 kV 등급별 임피던스

동제주 변전소는 154kV급 변전소로 변압기 종류에 따른 유도전류 영향 분석 측면에서 송전선의 전압이 낮을수록 변압기는 빨리 포화되는 특성을 분석하고자 하였으나 전력망에 의해 변하는 직류성분의 전류가 15A 정도로 크고 과거 지자기 이벤트를 감안하더라도 그 크기가 12A를 초과하지 않으므로 전력망에 의한 영향 보다 지자기 교란으로 인한 영향이 낮을 것으로 예상되므로 차후 연구를 위해 345kV급 변전소로 이전할 필요가 있는 것으로 검토되었다.

## 제3장 지자기 유도전류 예상값 산출

### 제1절 지자기 산출을 위한 임피던스 조사

초고압 변압기에 발생된 유도전류를 산출하기 위한 특성계수(임피던스)를 모델링하기 위해 변압기 특성계수인 국내 변압기 임피던스와 변전소별 표면 임피던스를 조사하였다.

해외 논문에 적용된 사례를 분석한 결과, 캐나다에서는 지자기 유도전류의 산출에 필요한 유도전기장을 계산하기 위해 임피던스 성분을 다음 그림과 같이 모델링으로 구현하였다.

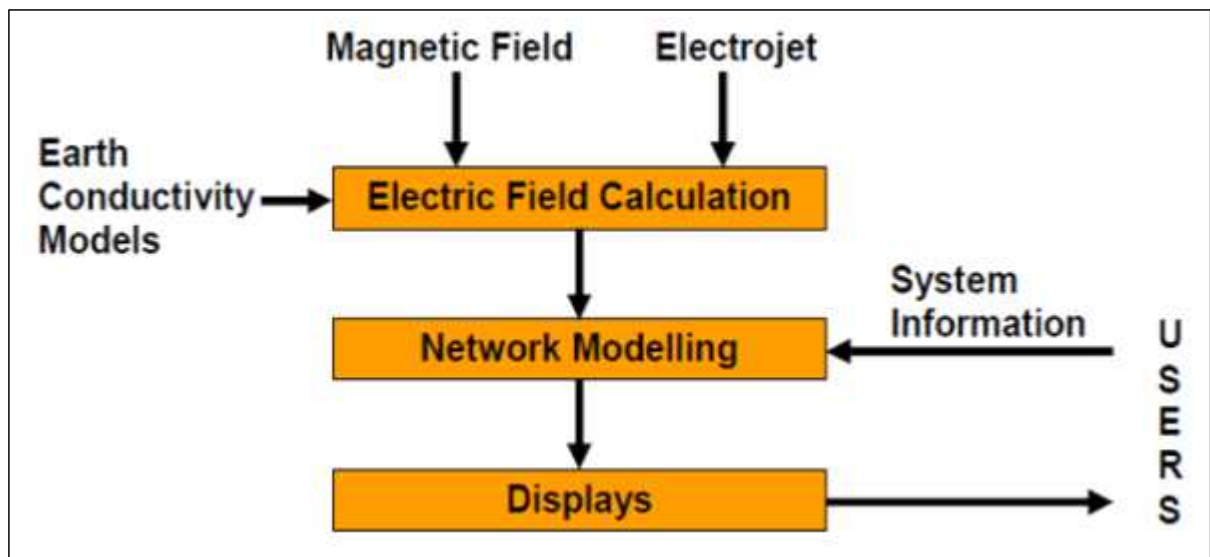


그림 3-1 유도전기장 계산을 위한 임피던스 성분 모델링

#### 1. 지면 도전률 조사 분석

유도전기장은 다음의 공식에 따라 자기장 변화(또는 고층전류)와 지면 도전율 모델(표면임피던스)의 함수로 계산하였으며, 변압기 시스템 정보를 이용하여 네트워크를 모델링하였다. 지면 도전률 모델의 경우 캐나다 지역을 지면에서부터 지하 5개 계층으로 나누어 지층의 두께별 대지저항 값으로 대지 도전율을 구하고 임피던스 형태의 모델을 구현하였다.

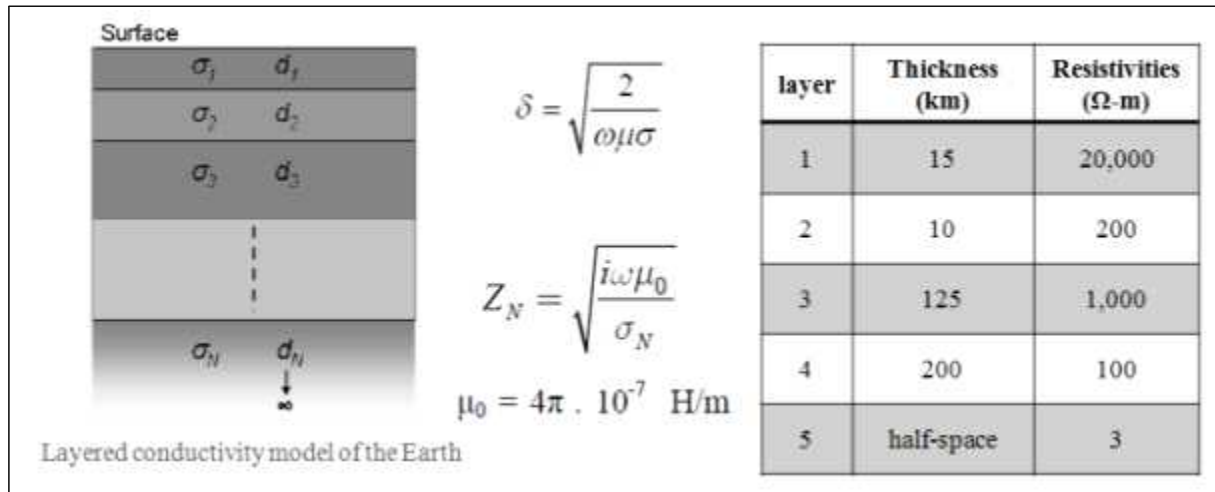


그림 3-2 지층의 두께별 대지도전율과 임피던스의 관계

여기에 사용된 대지고유저항은 대지를 상대로 하여 나타나는 저항으로 1 m<sup>3</sup>의 입방체가 가지는 저항을 말하며  $\Omega \cdot m$  단위를 사용하고 있다. 국내 대지고유저항을 조사한 결과, 한전 전력유도종합관리시스템에서 변전소 위치별 대지저항 값을 제공하고 있었다.

변전소 \ 깊이	10m	20m	30m	40m	50m	60m
신가평	128 $\Omega \cdot m$	246 $\Omega \cdot m$	302 $\Omega \cdot m$	460 $\Omega \cdot m$	557 $\Omega \cdot m$	607 $\Omega \cdot m$
신태백	39 $\Omega \cdot m$	37 $\Omega \cdot m$	36 $\Omega \cdot m$	36 $\Omega \cdot m$	42 $\Omega \cdot m$	47 $\Omega \cdot m$
동제주	464 $\Omega \cdot m$	298 $\Omega \cdot m$	272 $\Omega \cdot m$	241 $\Omega \cdot m$	261 $\Omega \cdot m$	277 $\Omega \cdot m$

표 3-1 변전소 위치별 대지 고유저항

국내에서 보유하고 있는 임피던스의 최대깊이(60m)가 외국(200km)과 달리 얕으나 유도전기장 산출에 필요한 임피던스는 지구표면 임피던스이므로 대지고유저항만으로도 구현이 가능한 것으로 판단되며, 신가평과 신태백 유도전류 예상치간 비교를 통해 검증이 가능 할 것이다.

## 2. 변압기 임피던스 조사 분석

캐나다의 전력 네트워크에 대한 모델링은 매쉬 형태의 임피던스 매트릭스 방법으로 모델링한 것으로 변압기 설계당시 직류성분의 전류 시험을 통해 각 변압기 탱크에 대한 저항 성분을 측정하고 그 값을 임피던스 형태로 구현한 것이다.

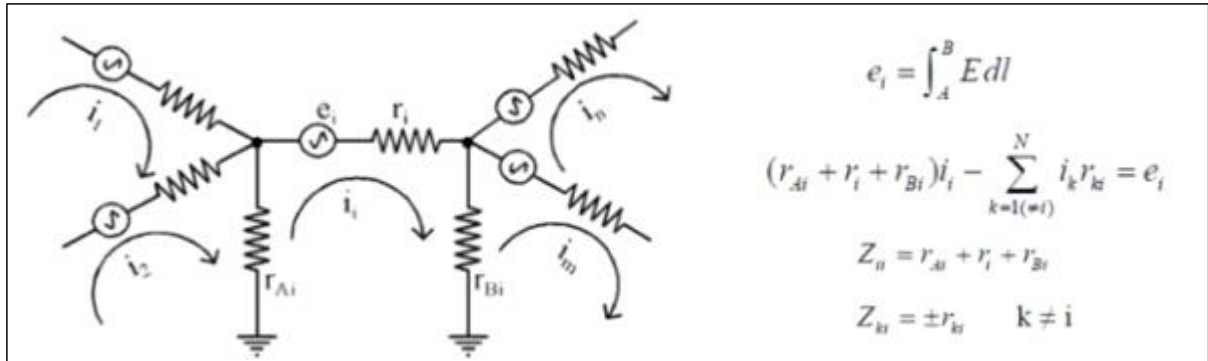


그림 3-3 전력 네트워크 모델링

한전과 제작사를 대상으로 변압기 임피던스 관련 국내 사례를 조사한 결과 국내 변압기를 설계함에 있어 교류 성분을 기준으로 정격전압, 정격전류 (또는 정격용량)를 이용한 %임피던스를 계산하고 있음을 알 수 있었다. %임피던스는 변압기를 포함한 회로에서 기준이 되는 전압과 전류, 그리고 각각의 임피던스를 기준 임피던스의 백분율로 표현한 것으로 기본 공식은  $Z(\%) = \frac{Z}{V/I} * 100$ 이다.

정격용량과 정격전압, %임피던스는 현장 변압기 표지판에 다음과 같이 표기되어 있어 기본적인 회로 임피던스를 산출할 수 있었다.

구분	국내 변압기 1차 권선			회로 임피던스 산출결과
	정격용량	정격전압	%임피던스	
765kV급	666.7MW	$765\text{kV}/\sqrt{3}$	17.782%	$52.02\Omega$
154kV급	20MW	$154\text{kV}/\sqrt{3}$	16.34%	$64.58\Omega$

표 3-2 국내 변압기 특성

다만, 유도전기장 산출을 위한 표면 임피던스와 변압기 임피던스의 종합 모델링은 직류성분의 임피던스 정보를 한전과 제작사가 보유하고 있지 않은 관계로 국내 적용이 어려운 것으로 판단되며, 국내 변전소의 변압기 구성 또한 해외 변압기와 상이하므로 외국 모델을 적용하는 것은 불가능한 것으로 판단된다. 하지만, 캐나다의 유도전류 예상값 산출방식은 계층화된 지면 임피던스와 각각의 변압기 DC 임피던스로만 구현된 모델링으로 실측된 유도전류 정보를 사용하는 유도전류 상관계수 방식이 아니므로 본 연구의 유도전류 계산식을 마련함에 있어 불필요한 것으로 검토된다.

## 제2절 유도전류 성분 추출

실제 관측된 유도전류를 살펴보면, 외국에서 관측된 유도전류와 달리 우리나라에서 관측된 유도전류는 0A가 아닌  $-0.5 \sim -1.5A$ 사이에서 변하고 있음을 알 수 있다. 제2장 제3절에서 언급한 바와 같이 지자기의 시간적 변화인  $dH/dt$ 는 0을 기준으로 변동되지만, 신가평 변전소와 신태백 변전소에서 관측된 유도전류는 0A가 아닌  $-0.5 \sim -1.5A$ 사이에서 변하고 있었다.

이는 변압기 등 내부요인으로 인해 발생한 전류가 관측된 것으로 지자기의 미분값  $dH/dt$ 와 유도전류 측정치간 유도전류 상관계수를 산출하기 위해 유도전류 관측치를 0A 기준으로 정하는 방안 즉, 변압기 자체에서 발생하는 전류를 제거한, 지자기 교란으로 인한 유도전류 성분을 추출하는 방안을 마련하고자 한다.

### 1. 지자기 교란이 없는 유도전류의 변화

정상시인 경우로 K지수 2이하로 지자기 패턴이 매우 일정한 날을 선정하여 신가평 변전소와 신태백 변전소에 흐르는 유도전류를 살펴보았다. 신가평 유도전류는  $-1.82 \sim +0A$  범위에서 흔들리고, 신태백 유도전류는  $-0.56 \sim +0.1A$  범위에서 수시로 변하는 것을 알 수 있었다.

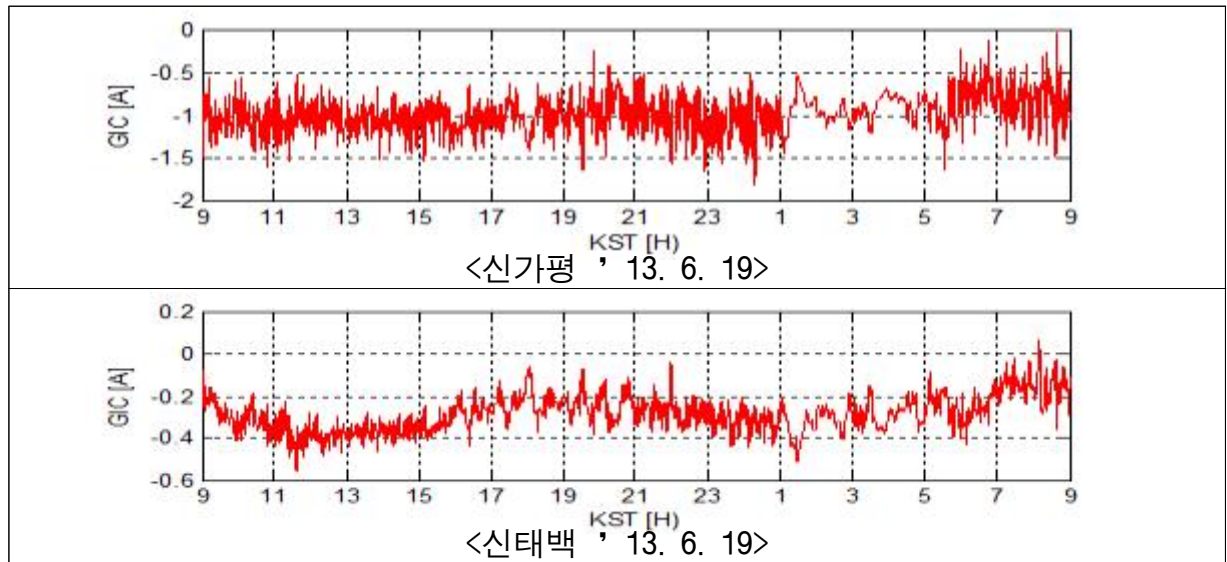


그림 3-4 신가평, 신태백 변전소 유도전류 측정값(지자기 교란이 없는 날)

남아공과 스웨덴의 유도전류 관측결과를 살펴보면, 유도전류가 0A로 측정되는 구간이 있으며 이는 지자기 교란이 없는 구간임을 확인할 수 있다. 이를 통해 국내 관측결과와 차이가 있음을 알 수 있다. 국내는 전력망 자체에서 발생하는 유도전류 성분까지 관측되고 있기 때문에 지자기와 연관된 유도전류 성분을 추출하기 위해서는 지자기 교란이 없는 시점에 유도전류가 0A가 나오도록 유도전류 관측데이터를 보정해주어야 한다.

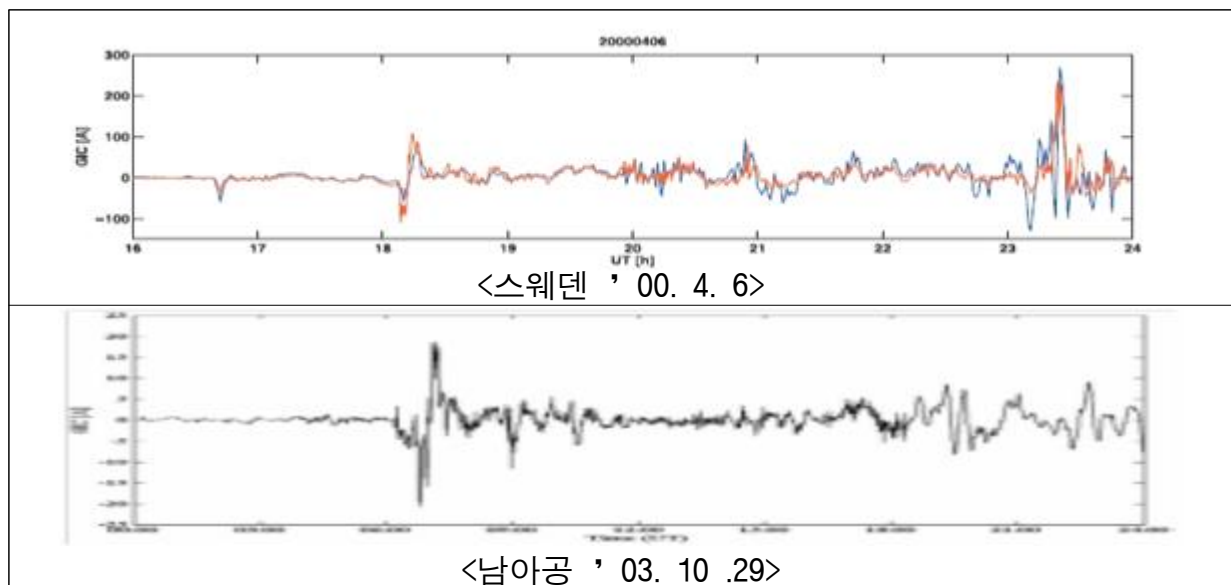


그림 3-5 스웨덴과 남아공의 유도전류 관측 결과

국내 관측결과에서 지자기 교란이 없는 시점을 추출해보기로 하였다. 지자기 교란이 없는 시점은 이론적으로  $dH/dt=0$ 이 되는 시점으로 실제 지자기 미분 수치로는 0가 되는 것은 불가하므로 0과 가장 가까운 범위인 확률상 0.1%가 되는  $-0.01 < dH/dt < 0.01$ 를 지자기 교란이 없는 시점으로 선정하였다. 그 결과 신가평 변전소에 흐르는 유도전류는 지자기 교란이 없는 날에는  $-1.55 \sim -0.55A$  범위에서 변화하고 있으며, 지자기 교란이 발생된 날에는  $-1.48 \sim -0.56A$  범위에서 변화하고 있어 지자기 교란 유무와 무관하게 유사한 값이 추출되는 것을 다음 그림을 통해 알 수 있다.

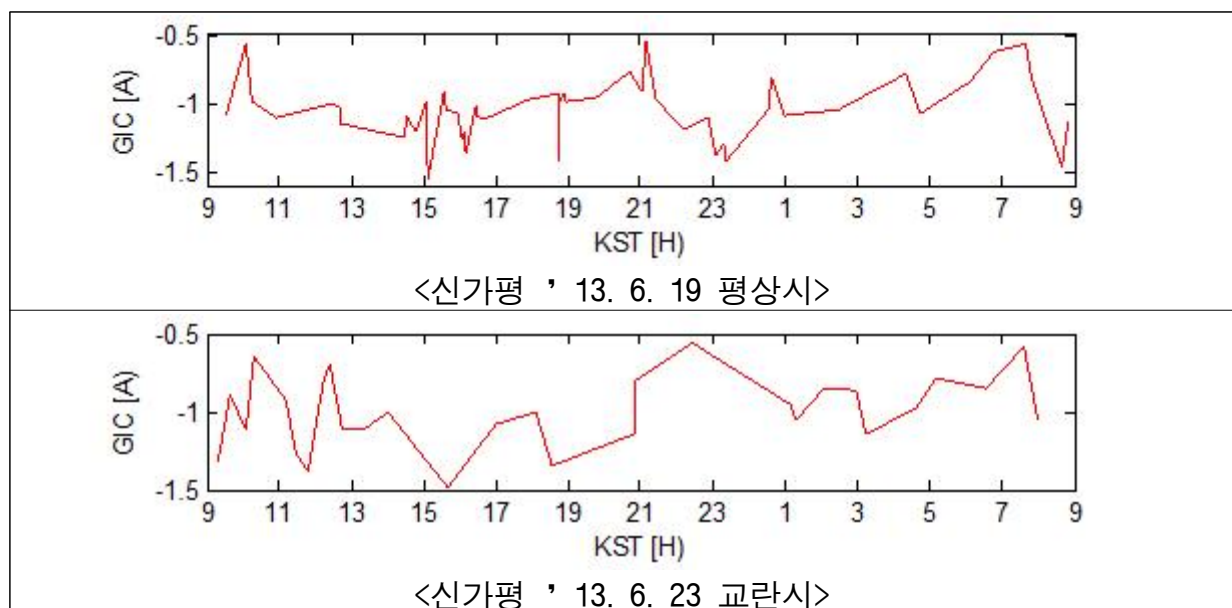


그림 3-6 평상시와 지자기 교란시 신가평 변전소의 유도전류 변화량

## 2. 전력망 자체에서 발생하는 내부요인 제거방안

전력 공급의 흐름을 맞추기 위해 변압기에 많은 전력을 공급하면 변압기 자체에서 발생하는 자기장으로 인해 내부에 직류성분의 전류가 유도되는 특성을 가지게 된다. 이러한 내부요인을 제거하는 방안으로 일일 평균치 방법과 이동평균방법으로 적용한 결과를 살펴보았다. 일일 평균치 방법은 유도전류의 일일 평균치를 대푯값으로 선정하여 관측된 유도전류에서 대푯값을 제거하는 방법이고 이동평균방법은 일정 시간구간 동안의 이동평균으로 유도전류 대푯값을 선정하여 관측된 유도전류에서 제거하는 방법이다. 일일



평균치 방법은 유도전류 산출식 적용에 용이하다는 장점이 있으나 시간에 대한 변화를 살펴보기 위해 그날의 데이터 전부가 필요하며, 이동평균방법은 수 시간의 데이터로 모델링을 구현할 수 있으나 유도전류 산출식에 적용하기 까다로운 단점이 있다.

'13. 6. 23에 관측된 신가평 유도전류 관측결과에서 상기 두가지 방법을 적용하여 유도전류 대푯값을 추출한 결과, 일일 평균치는 -0.9879A로 계산되어 10분/1시간/3시간 이동평균 그래프와 비교하여 3시간 이동평균 결과와 유사한 값을 가짐을 알 수 있었다. 또한 10분 이동평균 그래프는 지자기 교란이 발생된 구간에 많은 변화를 가지고, 1시간 이동평균치는 지자기 교란이 발생된 이후 16시에 가장 큰 값을 나타내고 있다.

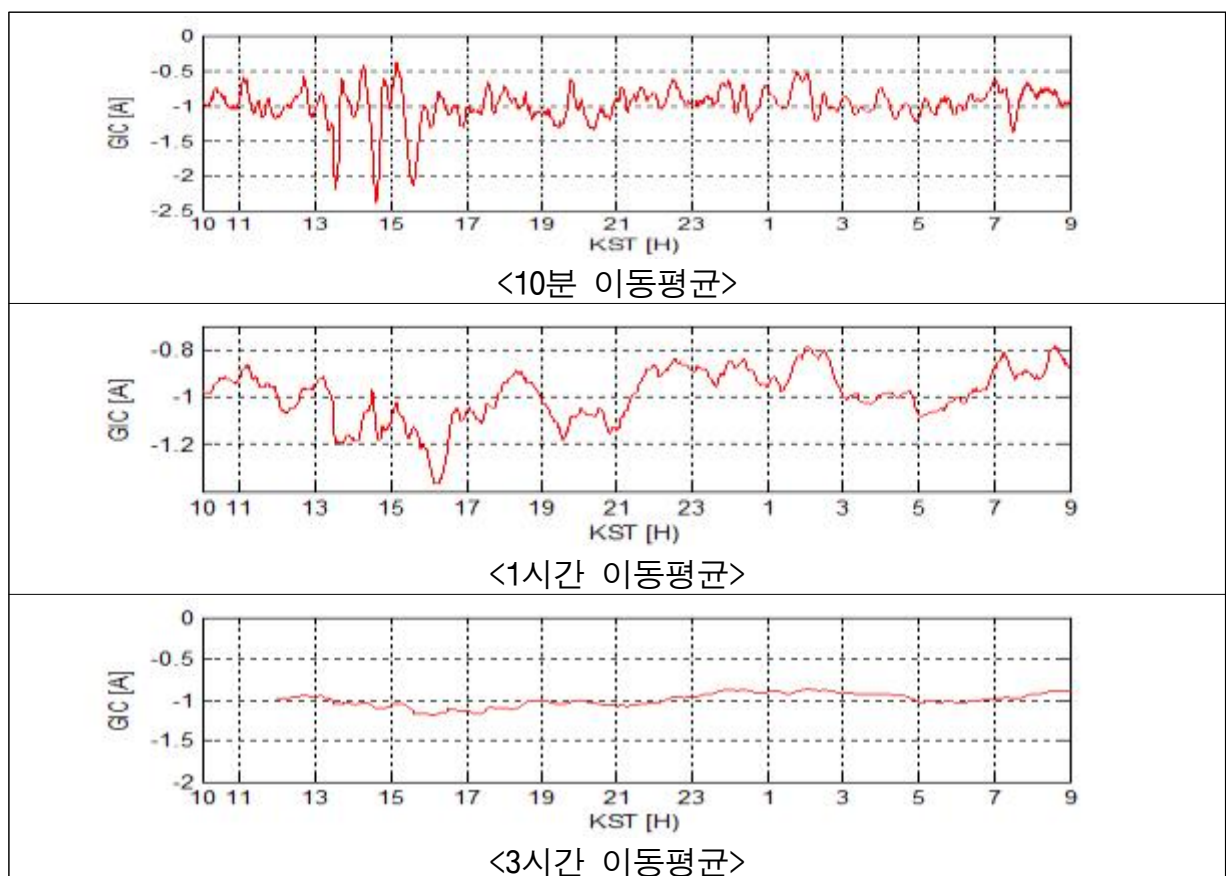
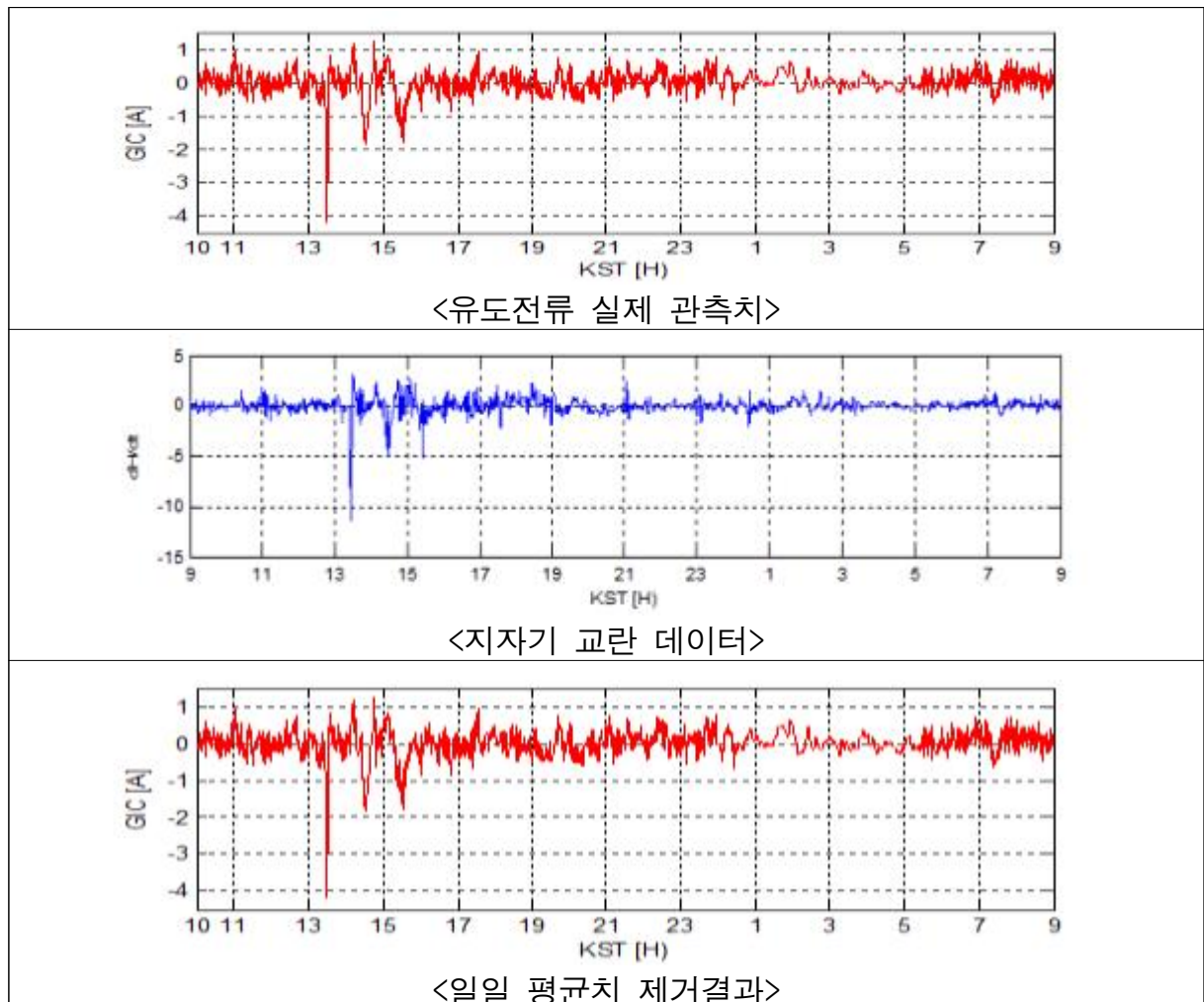


그림 3-7 이동평균법을 적용한 유도전류 관측 결과



### 3. 지자기 교란으로 인한 유도전류 추출결과

지자기 교란으로 인한 유도전류 성분은 유도전류 관측데이터에서 대푯값을 뺀 값으로 산출되므로 '13. 6. 23에 관측된 신가평 유도전류 관측결과에서 상기 두가지 방법을 적용하여 지자기 교란으로 인한 유도전류 성분을 추출하였다. 유도전류의 일일 평균치 방법과 3시간 이동평균치 방법을 이용한 결과의 패턴이 유사함하고 유도전류의 일일 평균치 그래프가 10분/1시간 이동평균치 그래프보다 지자기 교란 데이터의 그래프와 유사함을 확인할 수 있다. 따라서 유도전류 대푯값 산정에 용이한 일일 평균치 제거방법을 적용하는 것이 효율적으로 판단된다.



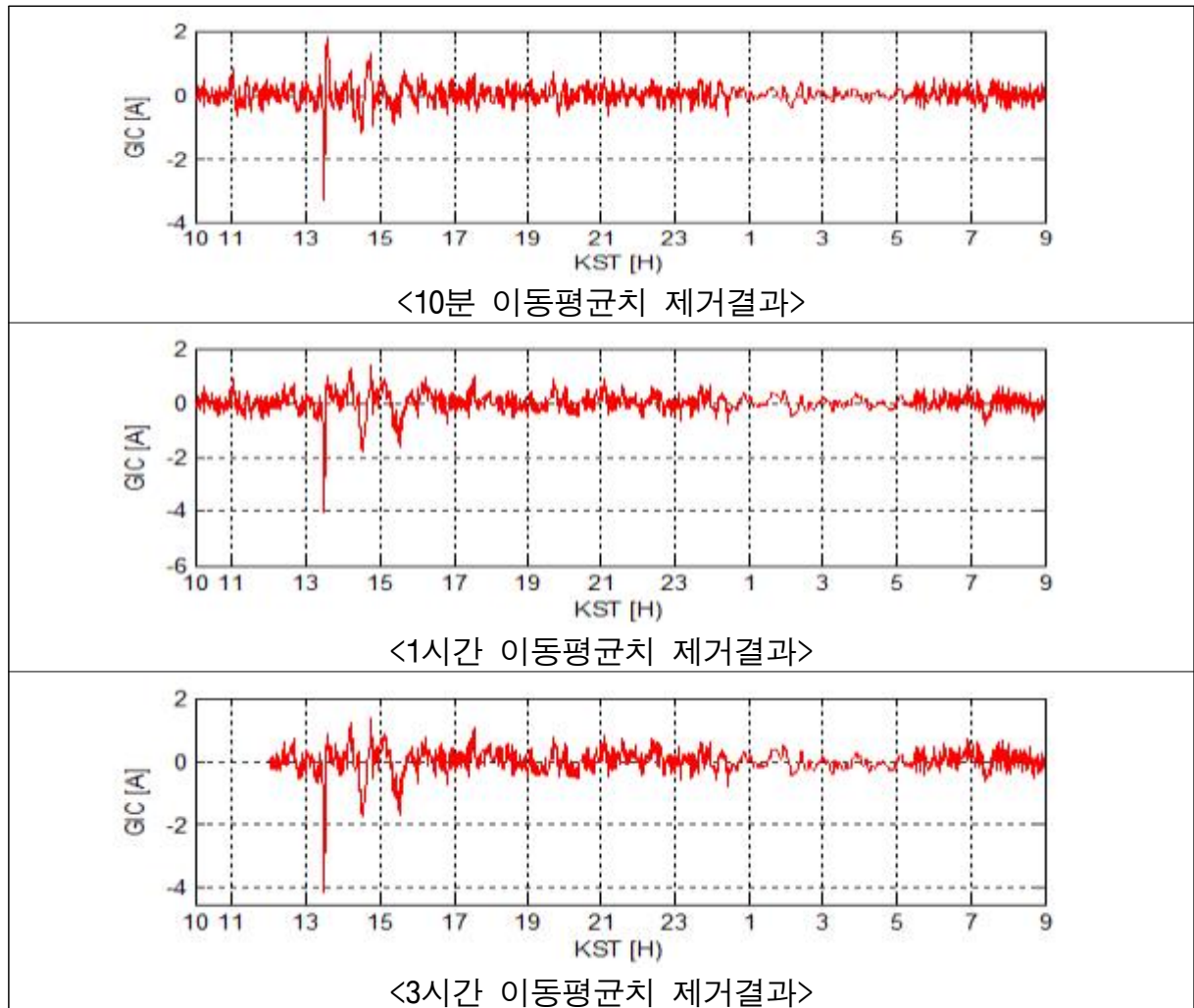


그림 3-8 일일평균값과 이동평균법을 이용한 유도전류 추출

'13.6.1~6.30일 한달동안 신가평 유도전류 일일 관측데이터에서 일별 평균치 변화를 분석한 결과,  $-1.06 \sim -0.9A$  범위( $0.16A$  폭)으로 변하는 것을 확인할 수 있다. 다만 이 값은 전력망 운용 상태에 따라 다를 수 있다.



그림 3-9 신가평 변전소의 일별 유도전류 평균치 변화

### 제3절 지자기와 유도전류 상관관계 분석 및 계산식 마련

#### 1. 지자기와 유도전류 일일 데이터간 상관관계 분석

'12.10월 ~ 13.11월까지 관측된 지자기 및 유도전류 관측데이터를 이용하여 지자기 교란이 발생된 일자에서 지자기와 유도전류 일일 데이터간의 상관계수를 산정하여 그 차이를 분석하였다.

분석방법은 지자기와 유도전류 일일 관측데이터를 1분 단위 데이터로 산정한 다음 지자기 미분값과 유도전류 크기간의 최소자승법(LMS)을 적용하여 일일 상관계수를 산정하는 방법이다.

최소자승법은 주어진 데이터의 값에서 오차가 가장 작은 성분을 찾는 방법으로 관련 수식을 아래와 같이 구할 수 있다. 기본 공식  $GIC = a * E_x + b * E_y \Rightarrow GIC = a * Z^* \widetilde{B}_y + b * Z^* \widetilde{B}_x$ 에서 입력 파라미터 (GIC, Bx, By) 위주로 일일 관측데이터를 1분 단위로 정리하면,

$$\begin{aligned} GIC_{1min} &= a * Z^* \widetilde{B}_{y1min} + b * Z^* \widetilde{B}_{x1min} \\ GIC_{2min} &= a * Z^* \widetilde{B}_{y2min} + b * Z^* \widetilde{B}_{x2min} \\ &\vdots \\ GIC_{1440min} &= a * Z^* \widetilde{B}_{y1440min} + b * Z^* \widetilde{B}_{x1440min} \end{aligned}$$

이를 간단하게 표현하여 다음 식과 같이 최소자승법으로 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \widetilde{B}_{y1min} & \widetilde{B}_{x1min} \\ \widetilde{B}_{y2min} & \widetilde{B}_{x2min} \\ \vdots & \vdots \\ \widetilde{B}_{y1440min} & \widetilde{B}_{x1440min} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} GIC_{1min} \\ GIC_{2min} \\ \vdots \\ GIC_{1440min} \end{bmatrix}$$

'12.10.17~'13.11.30까지 신가평 변전소에 관측된 유도전류 중 유도전류 교

정치가 |2|A이상인 일자의 상관계수를 산정하였다. 여기서 유도전류 교정치는 전력망 자체요인을 제거하기 위해 일일평균치를 대푯값으로 제거한 유도전류 관측 데이터를 의미한다. 일별 상관계수를 산정한 결과, 상관계수 a와 b의 값은 관측일자별로 큰 차이가 있음을 확인할 수 있으며 상관계수 a는 -2.26 ~ +2.07, b는 -2.86 ~ +3.67 범위를 가지고 있다.

관측일자	상관계수 a	상관계수 b	관측일자	상관계수 a	상관계수 b
2012.10.23.	4.9	2.35	2013.06.06.	-1.46	-14.44
10.31.	8.13	-18.70	06.08.	-0.48	-16.34
11.12.	6.62	-9.07	06.23.	1.37	-15.47
11.13.	1.65	-13.99	06.27.	2.54	-16.84
2013.01.17.	11.87	-14.13	06.29.	1.95	-13.86
01.19.	0.73	-14.20	06.30.	1.36	-16.48
03.07.	-8.69	19.99	07.09.	5.14	-16.24
03.08.	2.22	-1.49	07.12.	0.68	-18.97
03.09.	7.96	21.17	07.13.	-0.92	-16.96
03.15.	2.9	-7.34	07.15.	-0.36	-16.73
03.17.	-1.24	-10.55	07.18.	-1.71	-16.26
03.18.	1.33	-13.29	08.21.	-3.33	-15.52
03.27.	-3.73	-15.11	08.22.	0.05	-13.72
05.01.	-0.78	-16.40	08.31.	-3.97	-8.25
05.15.	-2.62	-16.79	10.02.	3.63	-9.98
05.16.	6.25	-6.06	10.08.	1.13	-12.76
05.24.	-3.55	-13.95	11.04.	10.54	-32.04
05.25.	-1.09	-15.99	11.07.	1.49	-13.76
06.01.	1.76	-14.78	-		

표 3-3 관측 일자별 유도전류 상관계수

외국 논문의 연구 사례와 마찬가지로, 지자기 교란이 큰 1일 이내의 데이터를 이용하여 유도전류 상관계수를 산정하면 다른 일자에서 산정된 유도전류 예상값은 유도전류 관측값과 상당한 차이가 발생되었다. 일례로 유도전류가 가장 크게 나타난 '13.10.2일 지자기와 유도전류로 산정한 상관계수를 이용하여 다른 일자인 5.24일 발생한 유도전류 관측값과 비교해보았다.

일일 최대값 기준으로 1A이상 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

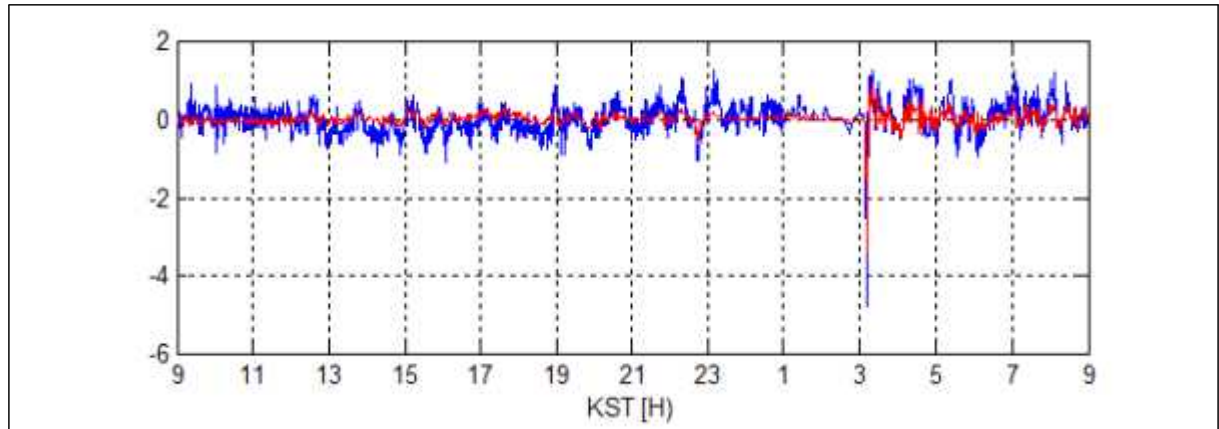


그림 3-10 상관계수를 이용한 유도전류 예상값과 실제 관측값

결론적으로, 유도전류 상관계수  $a$ 와  $b$ 의 값은 관측일자별로 차이가 있으므로 지자기 교란 1일 데이터로 산정한 상관계수로 다른 일자의 유도전류 예상값을 산출하는 것은 부적합하다. 따라서 지자기 교란 발생된 모든 데이터를 이용하여 공통의 상관계수 도출방안을 마련해보고자 한다.

## 2. 지자기 유도전류의 공통 상관관계 계산식 마련

'12.10.17 ~ 13.11.30까지 관측된 강릉 지자기 관측데이터와 신가평의 유도전류 관측데이터를 이용하여 지자기 교란 이벤트가 발생된 모든 일자에서 지자기와 유도전류 데이터간의 공통 상관계수를 산정하고 이를 이용한 계산식을 마련하고자 한다.

지자기 교란 이벤트가 발생된 일자의 유도전류 데이터를 교정하여 동일 일자의 지자기 미분 데이터와 전체 상관계수를 산출해보았다. 유도전류 교정은 전력망 자체요인을 제거하기 위해 유도전류 관측데이터를 대푯값인 일일평균치로 제거한 값을 말한다. 이렇게 산출된 상관계수로 유도전류 예상치를 계산한 결과, 관측된 유도전류 교정치의 패턴과 상이하므로 데이터 매칭이 어려움을 확인할 수 있었다.

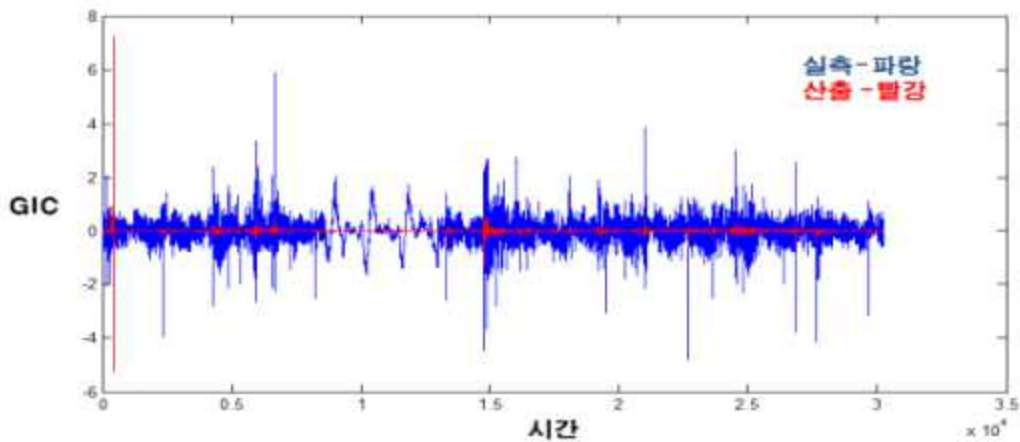


그림 3-11 유도전류 실측값과 예상값 비교

데이터 매칭이 어려운 원인을 분석하기 위해 지자기의 미분값과 유도전류 교정치를 1일별로 비교해보았다. 그 결과, 지자기 미분 그래프의 패턴과 상이한 유도전류 관측그래프의 패턴을 찾을 수 있다. 이는 지자기 교란 당시 전력망에 의해 발생하는 직류성분의 전류로 인해 지자기 교란과 상이한 오류 정보가 포함되어 있기 때문이다.

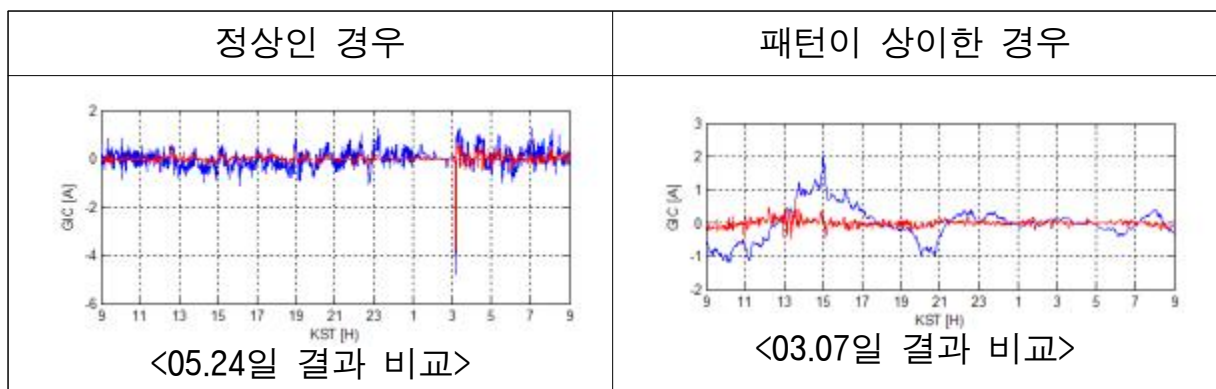


그림 3-12 지자기 미분값과 유도전류 교정치 일별 비교

#### 가. 지자기 유도전류 상관계수 도출방안

일일 상관계수로 산정한 유도전류 예상값이 유도전류 관측데이터와 상이한 경우, 유도전류 관측데이터의 패턴은 지자기 교란 데이터의 패턴과 다른 경우이므로 상관계수 산정 분석 대상에서 제외하였다. 이러한 일부 관측데



이터를 제거한 후 전체 상관계수 재산출할 수 있었다. '12.10.17 ~ 13.11.30 까지 유도전류 이벤트가 발생된 총 37일의 유도전류 관측데이터 중 28일간의 관측데이터를 활용할 수 있었다. 유도전류 예상치의 패턴이 관측데이터와 상이한 경우 배제하고 상관계수를 재산출하여 유도전류 예상치를 계산한 결과, 관측된 유도전류 교정치의 패턴과 유도전류 예상치의 패턴이 일치되고 그 크기가 유사함을 확인할 수 있다.

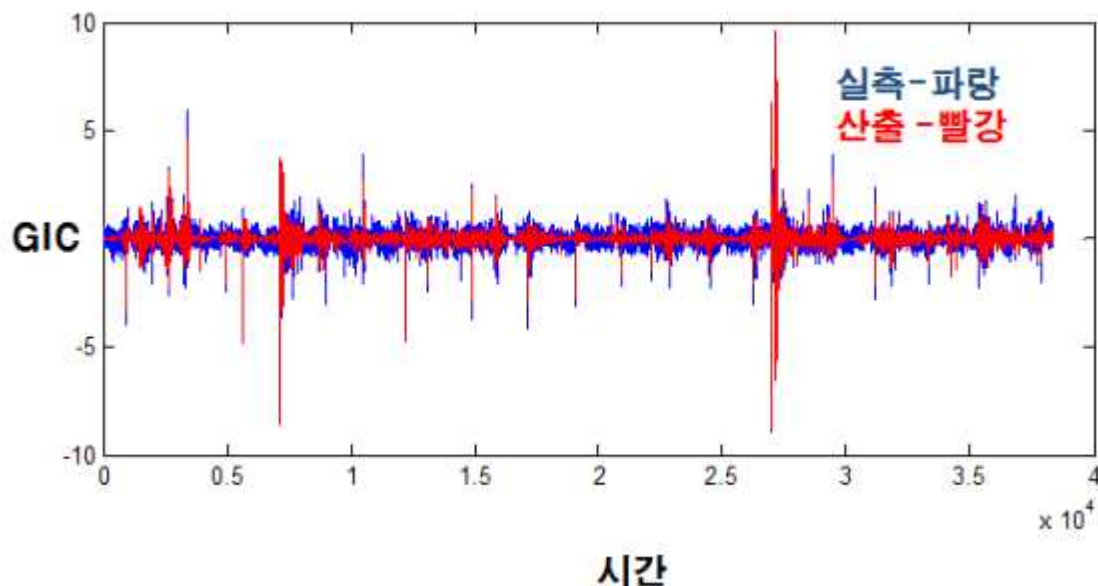


그림 3-13 오류 데이터 제거후 유도전류 실측값과 예상값 비교

#### 나. 유도전류 예상값 정확도 개선방안

관측된 유도전류 교정치와 예상치간의 유도전류 발생규모의 차이를 줄이고 정확도를 높이기 위한 개선방안을 마련하고자 유도전류 크기별 발생시점에 대한 비교 분석하였다. 기본적으로 유도전류가 크게 나타나면 지자기의 미분값의 크기가 크기 때문에 유도전류 크기가 큰 값을 이용하면 좀 더 정확한 예상값을 산출할 수 있을 것으로 예상된다.

유도전류 크기가 11A이상인 발생시점의 유도전류 관측데이터와 그 시점의 지자기 미분값을 추출하여 유도전류 상관계수를 산정하고 그 상관계수로 유도전류 예상값을 산출하여 유도전류 관측값과 비교해보았다.

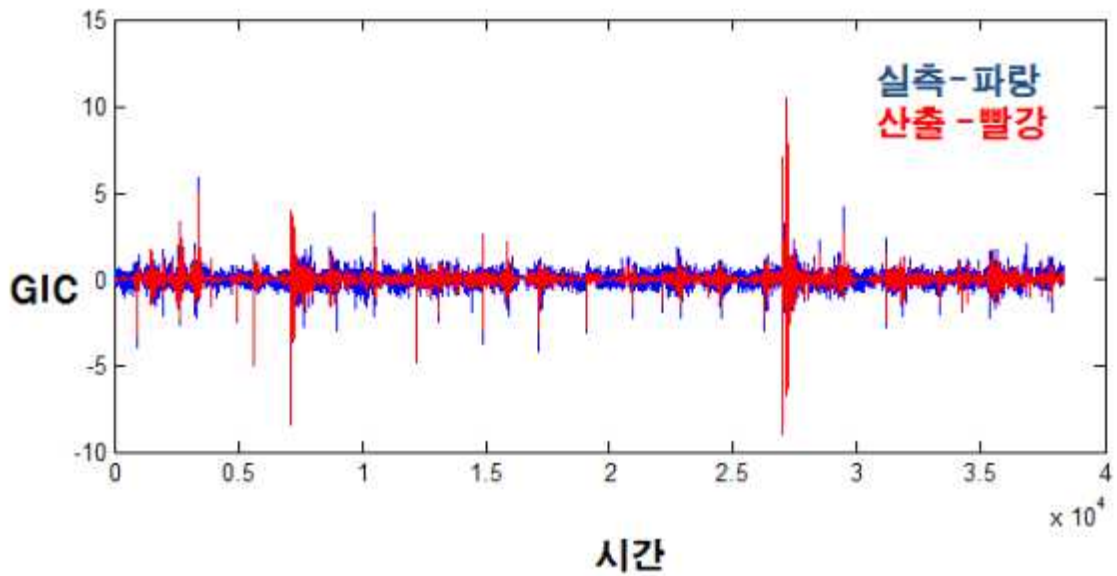


그림 3-14 유도전류 실측값과 예상값 비교(유도전류  $|1|A$  이상)

유도전류 크기가  $|2|A$  이상인 발생시점의 유도전류 관측데이터와 그 시점의 지자기 미분값을 추출하여 유도전류 상관계수를 산정하고 그 상관계수로 유도전류 예상값을 산출하여 유도전류 관측값과 비교해보았다.

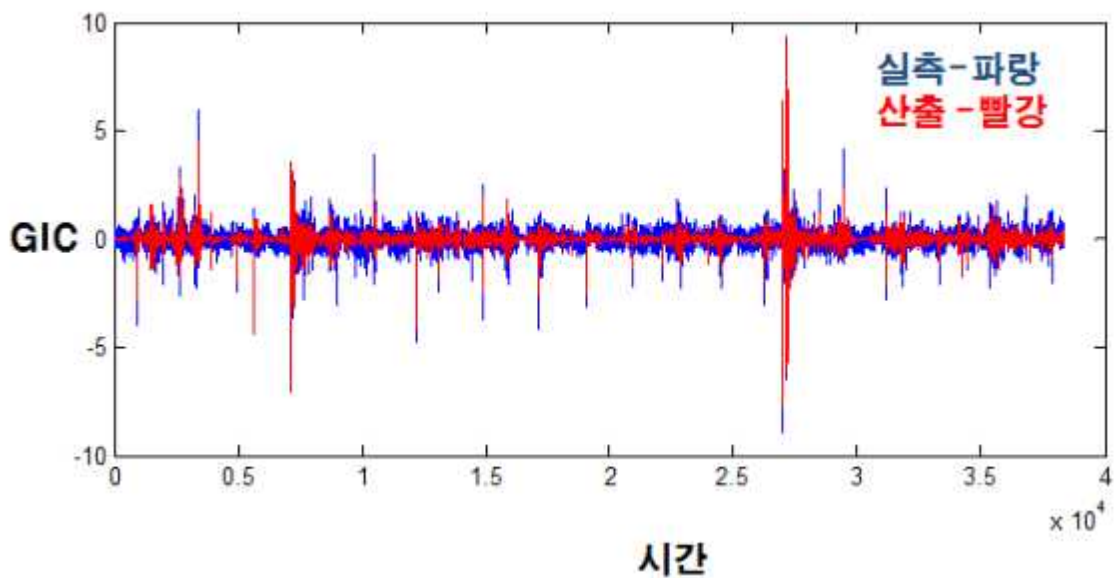


그림 3-15 유도전류 실측값과 예상값 비교 (유도전류 크기  $|2|A$  이상)



상기 2가지의 경우에서 유도전류가 발생한 시점에 발생한 지자기 교란 데이터와 비교한 결과, 유도전류 크기 별로 발생시점에 따라 유도전류 예측값 크기가 다소 차이 있음을 확인할 수 있다.

총 28일간 지자기 및 유도전류 관측데이터를 이용하여 상기 동일한 방법으로 유도전류 기준레벨 이상으로 관측된 유도전류 관측데이터와 그 시점의 지자기 미분값을 추출하여 유도전류 상관계수를 산정하고 그 상관계수로 유도전류 예상값을 산출하여 유도전류 관측값과의 차이를 분석해보았다. 여기서 유도전류 기준레벨은 유도전류 크기를 0A ~ 13A까지 0.01A간격으로 증가시키며 유도전류 관측 교정치와 예상치의 차이를 확률로 분석한 것으로 오차범위는 1A이하로 설정하였다.

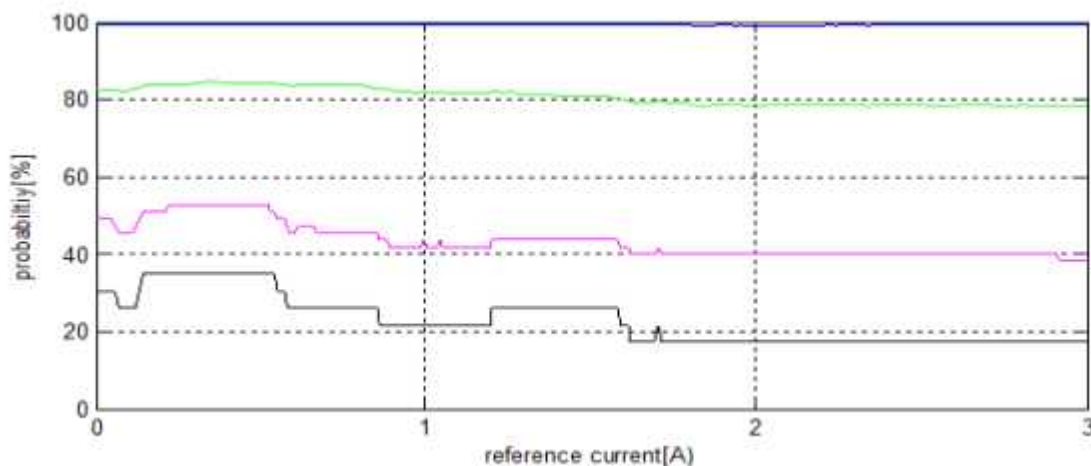


그림 3-16 유도전류 관측 교정치와 예상값의 확률 분포 1

상기 그림에서 파란색 선은 모든 유도전류 관측값과 계산값이 1A 이하 차이일 확률을 나타낸 것으로 약 100%에 가까운 확률을 가지고 있다. 녹색 선은 1A이상 관측된 유도전류가 계산값과 1A 이하 차이일 확률을 나타낸 것으로 약 80%이상의 정확도를 보여주고 있다. 자색 선은 2A이상 관측된 유도전류가 계산값과 1A 이하 차이일 확률을 나타낸 것으로 기준레벨이 0인 모든 데이터를 사용하였을 때 50%의 정확도를 가지지만 기준레벨이 0.3~0.6A 범위의 데이터를 사용하게 되면 5%정도가 개선됨을 확인할 수 있다. 또한 기준레벨이 1A나 2A의 데이터를 사용하게 되면 오히려 정확

도가 5~8% 떨어짐을 알 수 있다. 검정색 선은 13A이상 관측된 유도전류가 유도전류 계산값과 1A 이상 차이일 확률을 나타낸 것으로 기준레벨이 0인 모든 데이터를 사용하였을 때 30%의 정확도를 가지지만 기준레벨이 10.31~10.61A 범위의 데이터를 사용하게 되면 6%정도가 개선됨을 확인할 수 있다.

총 28일간 지자기 및 유도전류 관측데이터를 이용하여 상기 동일한 방법으로 유도전류 기준레벨 이상으로 관측된 유도전류 관측데이터와 그 시점의 지자기 미분값을 추출하여 유도전류 상관계수를 산정하고 그 상관계수로 유도전류 예상값을 산출하여 유도전류 관측값과의 차이를 분석해보았다. 여기서 유도전류 기준레벨은 유도전류 크기를 0A ~ 13A까지 0.01A간격으로 증가시키며 유도전류 관측 교정치와 예상치의 차이를 확률로 분석한 것으로 11A이상 관측된 유도전류에서 유도전류 관측값과 예상치의 오차를 분석해보았다. 그 결과 유도전류 예상값이 가장 정확한 확률은 10.351A 이상에서 관측된 유도전류 교정치와 지자기 미분값을 추출하여 산정하였을 때 유도전류 관측값과 예상값의 오차가 가장 적은 것으로 확인되었다.

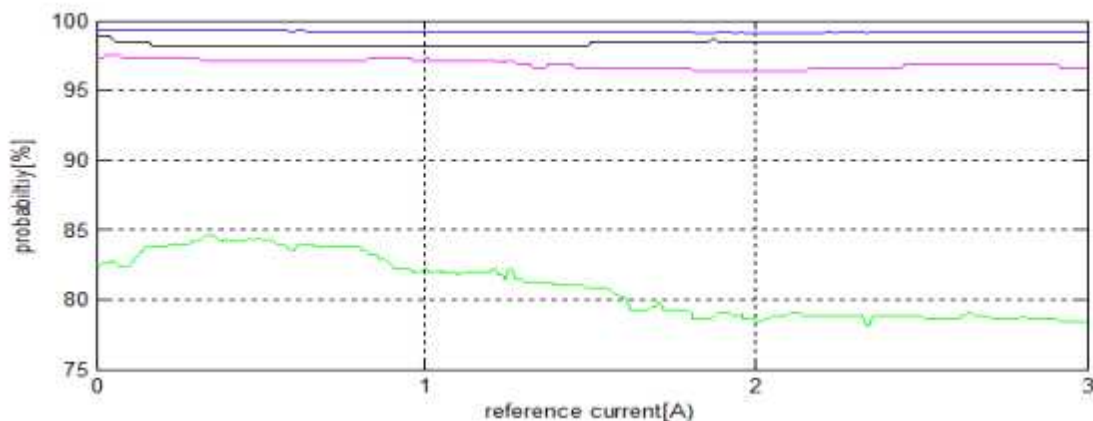


그림 3-17 유도전류 관측 교정치와 예상값의 확률 분포 2

상기 그림에서 파란색 선은 모든 유도전류 관측값과 계산값이 1A 이하 차이일 확률을 나타낸 것으로 약 99%에 가까운 확률을 가지고 있다. 검정색 선은 11A이상 관측된 유도전류가 계산값과 3A 이하 차이일 확률을 나타낸 것으로 약 98%이상의 정확도를 보여주고 있다. 자색 선은 11A이상

관측된 유도전류가 계산값과 2A 이하 차이일 확률을 나타낸 것으로 약 96%이상의 정확도를 보여주고 있다. 녹색 선은 11A 이상 관측된 유도전류가 유도전류 계산값과 1A 이상 차이일 확률을 나타낸 것으로 가장 높은 정확도가 84.5%가 되며 이때의 기준레벨은 10.35A로 분석되었다.

#### 다. 유도전류 공통 상관계수 선정

지자기 유도전류 상관계수 도출방안과 유도전류 예상값 정확도 개선방안을 통해 '12.10.17~'13.11.30까지 발생된 지자기 교란 이벤트가 발생된 모든 일차에서 지자기와 유도전류 데이터간의 공통 상관계수를 산정한 결과, 관측된 유도전류 교정치와 예상치간의 발생시점은 동일하고 발생규모의 차이도 최소화됨을 확인할 수 있다.

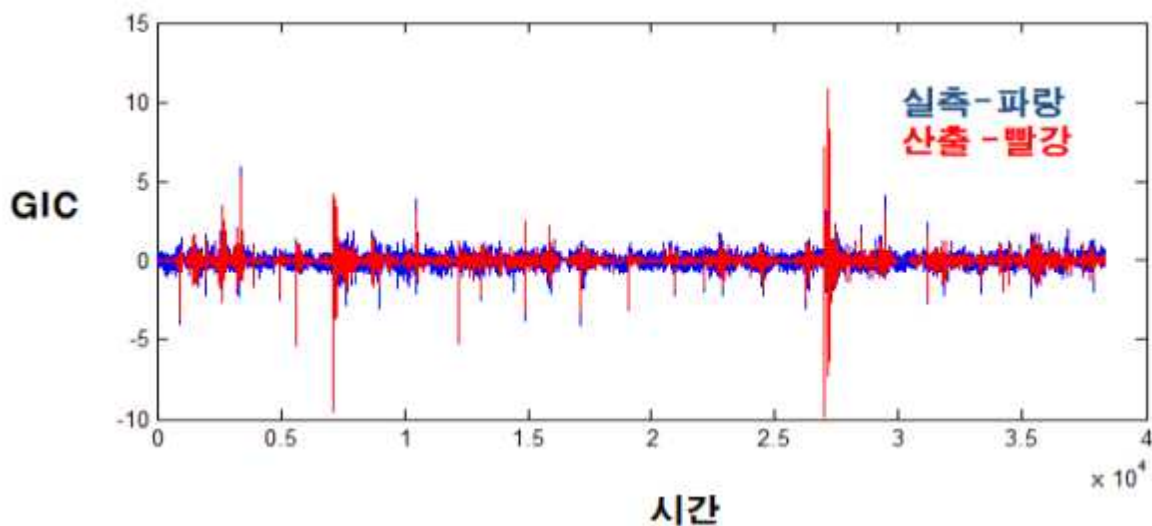


그림 3-18 유도전류 교정치와 예상치 비교('12.10.17~'13.11.30)

이렇게 산출된 공통 상관계수를 사용하여 지자기 교란 이벤트에 대한 대표 사례로 15A 이상의 관측된 신가평 유도전류 관측데이터와 일일 비교 분석하였다.

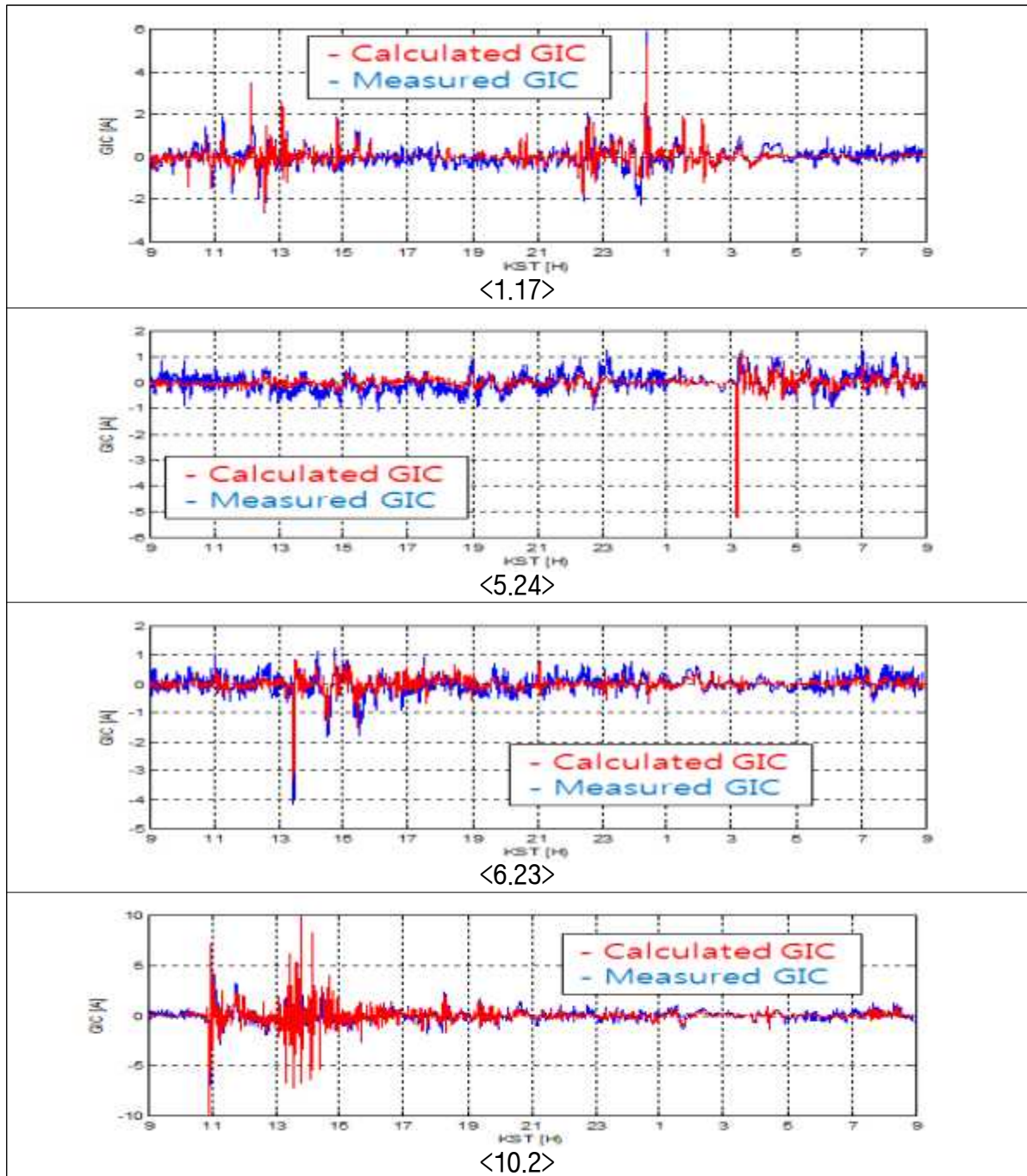


그림 3-19 유도전류 실측값과 예상값 일일 비교(신가평)

다음으로, 신가평 유도전류 데이터로 산출된 공통 상관계수를 사용하여 지자기 교란 이벤트에 대한 대표 사례와 동일한 일자의 신태백 유도전류 관측데이터와 일일 비교 분석하였다. 1.17일은 신태백 변전소에 유도전류를 설치하지 않아 비교대상에서 제외하였고, 10.2일은 신태백 변전소의 전원은

용 문제로 유도전류 관측이 이루어지지 않았다. 하지만 5월과 6월의 이벤트 데이터를 통해 유도전류 예상값이 관측값과 상당히 일치하고 패턴이 동일함을 알 수 있다.

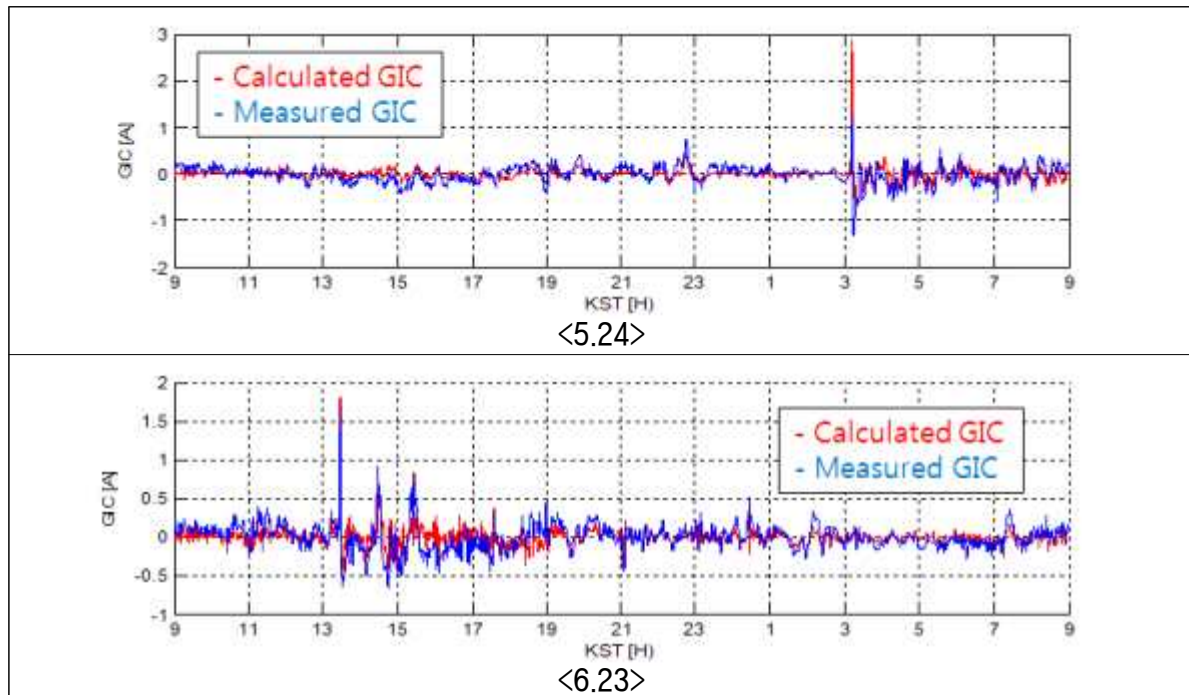


그림 3-209 유도전류 실측값과 예상값 일일 비교(신태백)

라. 유도전류 예상값 계산식

국내 795kV 전력망의 유도전류 예상값 계산식은 상기 연구를 통해 기본 공식  $GIC = a * Z * \widetilde{B}_y + b * Z * \widetilde{B}_x$ 에 따라 국내 795kV 전력망의 유도전류 예상값 계산식은 유도전류 기준레벨 10.35[A]이상 에 관측된 지점의 지자기 데이터의 미분값  $\widetilde{B}_y, \widetilde{B}_x$ 과 유도전류 관측 데이터로 마련하였다.

또한, 국내 지자기 유도전류의 공통 상관계수는 향후 발생하는 지자기 및 유도전류 관측 데이터를 지속적인 업데이트하여 보강해나갈 계획이다.

## 제4절 과거 지자기 폭풍시 유도전류 예상값 산출

### 1. 과거 지자기 교란 및 해외 피해 사례 분석

과거 지자기 폭풍 발생시 관측된 지자기 데이터를 통해 지자기 교란 횟수와 시점을 조사하고, 그당시 지자기 교란으로 인한 유도전류가 발생되어 해외 전력망에 피해를 준 사례를 분석하였다.

해외 지자기 교란 데이터를 통해 지자기 교란이 가장 크게 발생한 시점과 연도별 횟수를 조사하였다. 1963년 이후, 미 NASA에서 수집된 지자기 교란(Kp) 지수를 이용하여 연도별 지자기 교란 단계 횟수와 강도를 정리하였다. 수집출처는 [omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html)이다.

구분	1960년대	1970년대	1980년대	1990년대	2000년대
Kp 9이상	6시(2일)	6시(2일)	15시(5일)	0시	12시(3일)
Kp 8~9미만	51시(13일)	120시(23일)	114시(23일)	132시(24일)	138시(26일)
Kp 7~8미만	144시	330시	411시	405시	327시

표 3-4 1960년대 이후 지자기 교란 단계별 현황

#### 가. 1960년대(1963.11~1969.12)

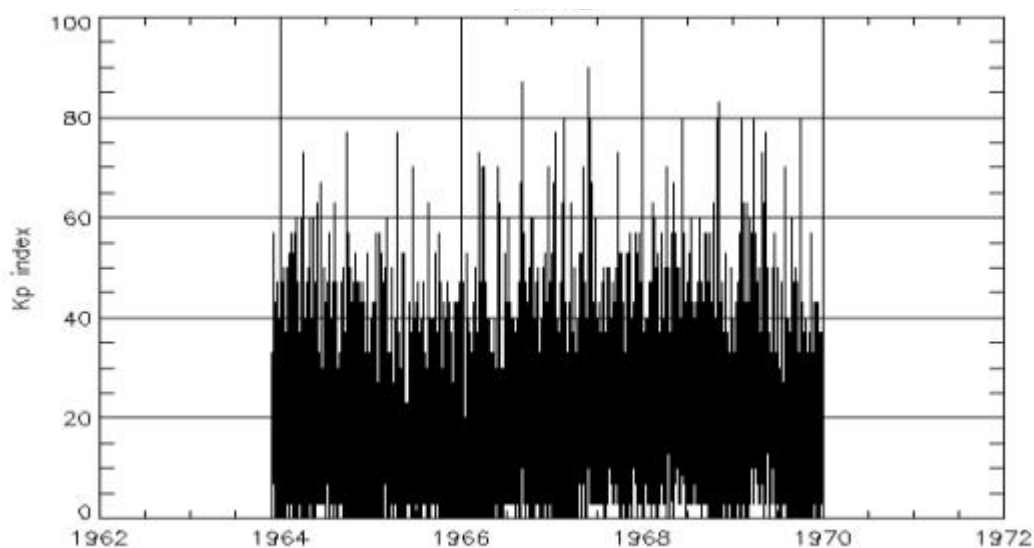


그림 3-21 1960년대 Kp 지수 현황



지자기 교란 지수 Kp가 7이상인 경우는 다음 표와 같다.

년도	일	시간	최대 Kp	년도	일	시간	최대 Kp
1964	92	3	7.3	1967	156	3	7.0
1964	266	3	7.7	1967	157	3	8.0
1965	108	6	7.7	1967	264	6	7.3
1965	167	3	7.0	1968	96	3	7.0
1966	73	3	7.3	1968	163	9	8.0
1966	82	3	7.0	1968	305	12	8.0
1966	87	3	7.0	1968	306	12	8.3
1966	146	9	7.0	1968	307	6	7.7
1966	242	6	7.3	1969	33	3	8.0
1966	246	6	8.7	1969	82	3	8.0
1966	247	9	8.7	1969	83	6	8.0
1966	348	3	7.0	1969	118	6	7.3
1967	14	6	7.7	1969	135	15	7.7
1967	47	6	8.0	1969	208	3	7.0
1967	123	6	7.0	1969	271	3	7.0
1967	145	12	9.0	1969	272	3	7.0
1967	146	9	9.0	1969	273	6	8.0
1967	151	3	7.0	총 35일			

표 3-5 1960년대 지자기 교란 지수 현황 (Kp>7)

나. 1970년대(1970.1~1979.12)

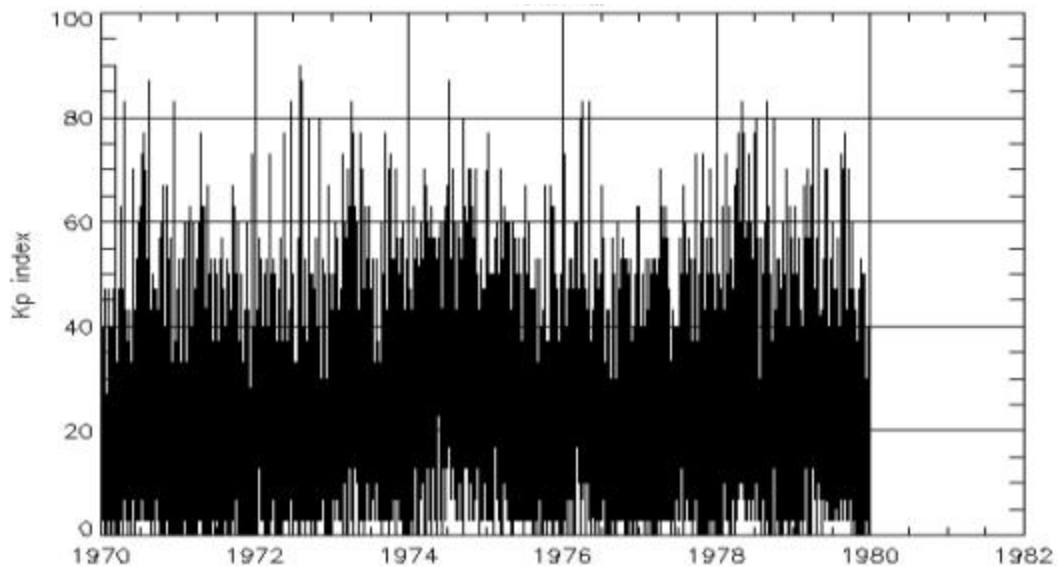


그림 3-22 1970년대 Kp 지수 현황

지자기 교란 지수 Kp가 7이상인 경우는 다음 표와 같다.

년도	일	시간	최대 Kp	년도	일	시간	최대 Kp
1970	67	12	9.0	1974	315	3	7.0
1970	111	6	8.3	1975	7	3	7.7
1970	112	3	7.0	1975	69	6	7.0
1970	148	3	7.0	1976	10	6	7.0
1970	190	6	7.3	1976	11	3	7.3
1970	206	6	7.7	1976	86	18	8.0
1970	228	3	7.0	1976	92	9	8.3
1970	229	6	8.7	1976	123	6	7.7
1970	348	3	8.3	1976	124	9	8.3
1971	104	3	7.7	1977	96	3	7.0
1971	351	6	7.3	1977	264	3	7.3
1972	66	3	7.3	1977	301	3	7.3
1972	136	3	7.7	1977	336	3	7.0
1972	169	3	7.3	1978	4	3	7.3
1972	170	15	8.3	1978	46	3	7.3
1972	217	9	9.0	1978	94	3	7.0
1972	218	21	8.7	1978	100	3	7.3
1972	219	9	7.3	1978	101	3	7.7
1972	222	3	8.3	1978	120	3	8.0
1972	257	3	7.3	1978	121	6	8.3
1972	258	3	8.0	1978	122	12	7.3
1972	306	9	8.0	1978	123	3	7.0
1973	52	3	7.3	1978	124	9	7.7
1973	78	6	7.0	1978	129	6	7.7
1973	91	9	8.3	1978	153	12	7.3
1973	92	3	7.0	1978	180	3	7.7
1973	103	3	7.3	1978	185	6	8.0
1973	104	3	7.7	1978	186	3	7.0
1973	134	3	7.7	1978	240	12	8.3
1973	141	3	7.0	1978	272	9	8.0
1973	252	3	7.7	1978	329	3	7.0
1973	266	3	7.0	1979	69	3	7.0
1973	276	3	7.3	1979	93	3	8.0
1973	302	3	7.0	1979	115	15	8.0
1974	75	3	7.0	1979	149	3	7.0
1974	187	9	8.7	1979	157	3	7.0
1974	204	3	7.0	1979	225	6	7.3



년도	일	시간	최대 Kp	년도	일	시간	최대 Kp
1974	258	9	7.7	1979	232	3	7.0
1974	259	6	8.0	1979	241	3	7.7
1974	286	3	7.0	1979	261	3	7.0
1974	289	3	7.0	총 81일			

표 3-6 1970년대 지자기 교란 지수 현황 (Kp>7)

다. 1980년대

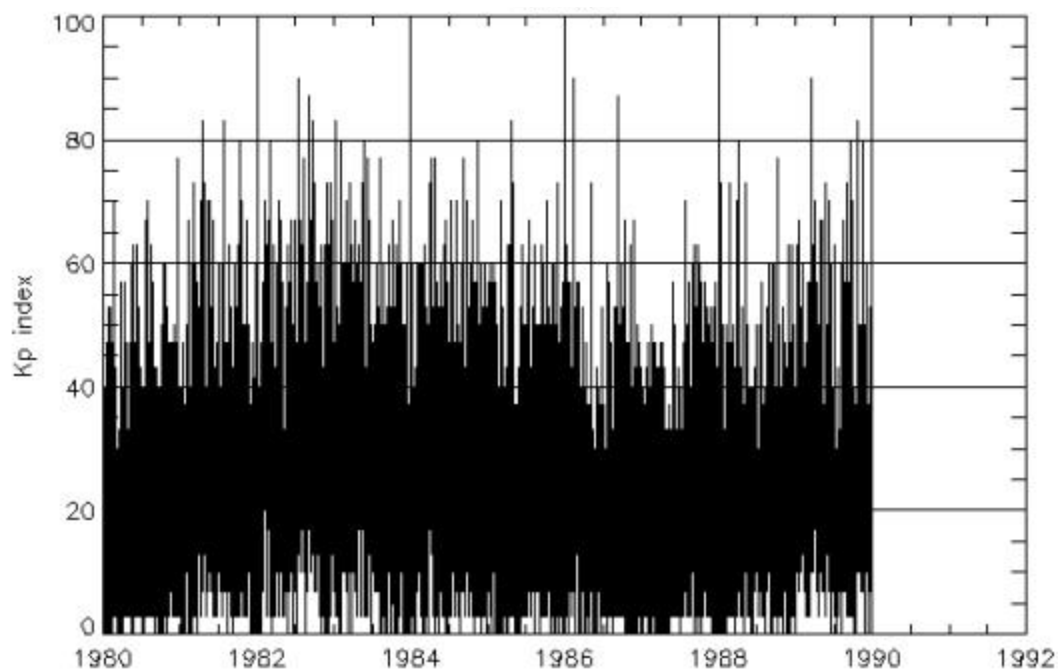


그림 3-23 1980년대 Kp 지수 현황

지자기 교란 지수 Kp가 7이상인 경우는 다음 표와 같다.

년도	일	시간	최대 Kp	년도	일	시간	최대 Kp
1980	46	3	7.0	1984	100	3	7.3
1980	207	3	7.0	1984	117	6	7.7
1980	354	9	7.7	1984	195	6	7.0
1981	64	6	7.3	1984	214	3	7.0
1981	102	9	7.0	1984	248	6	7.7
1981	103	9	8.3	1984	249	3	7.0
1981	116	3	7.3	1984	267	9	7.0
1981	130	3	7.0	1984	320	3	7.3

년도	일	시간	최대 Kp	년도	일	시간	최대 Kp
1981	135	3	7.0	1984	321	9	8.0
1981	138	3	7.0	1985	59	3	7.0
1981	206	12	8.3	1985	111	9	8.3
1981	207	3	8.0	1985	118	3	7.0
1981	287	6	8.0	1985	120	3	7.3
1981	293	6	7.0	1985	278	3	7.0
1981	295	3	7.0	1985	334	3	7.3
1982	33	3	7.0	1986	38	6	7.7
1982	60	6	8.0	1986	39	24	9.0
1982	61	9	8.0	1986	40	6	8.7
1982	100	3	7.0	1986	123	3	7.3
1982	194	9	9.0	1986	255	6	8.7
1982	195	12	9.0	1987	210	3	7.0
1982	197	3	7.0	1988	14	3	7.0
1982	219	12	7.7	1988	15	6	7.3
1982	249	21	8.7	1988	53	3	7.3
1982	250	6	7.3	1988	86	3	7.0
1982	264	3	7.3	1988	94	3	8.0
1982	265	12	8.3	1988	95	3	7.3
1982	269	9	7.3	1988	127	12	7.3
1982	328	9	7.3	1988	284	6	7.7
1982	351	3	7.3	1989	72	21	9.0
1983	10	9	8.3	1989	73	15	9.0
1983	35	6	7.7	1989	88	3	7.0
1983	36	18	8.0	1989	143	3	7.3
1983	61	6	7.0	1989	161	3	7.0
1983	71	3	7.3	1989	241	6	7.3
1983	137	6	7.3	1989	261	3	7.7
1983	144	6	8.0	1989	262	6	8.0
1983	164	6	7.7	1989	269	3	7.0
1983	220	6	7.7	1989	293	12	8.3
1983	313	3	7.0	1989	294	12	8.3
1984	88	3	7.3	1989	321	12	8.0
1984	95	9	7.7	1989	322	3	7.0
총 84일				-			

표 3-7 1980년대 지자기 교란 지수 현황 (Kp>7)

라. 1990년대

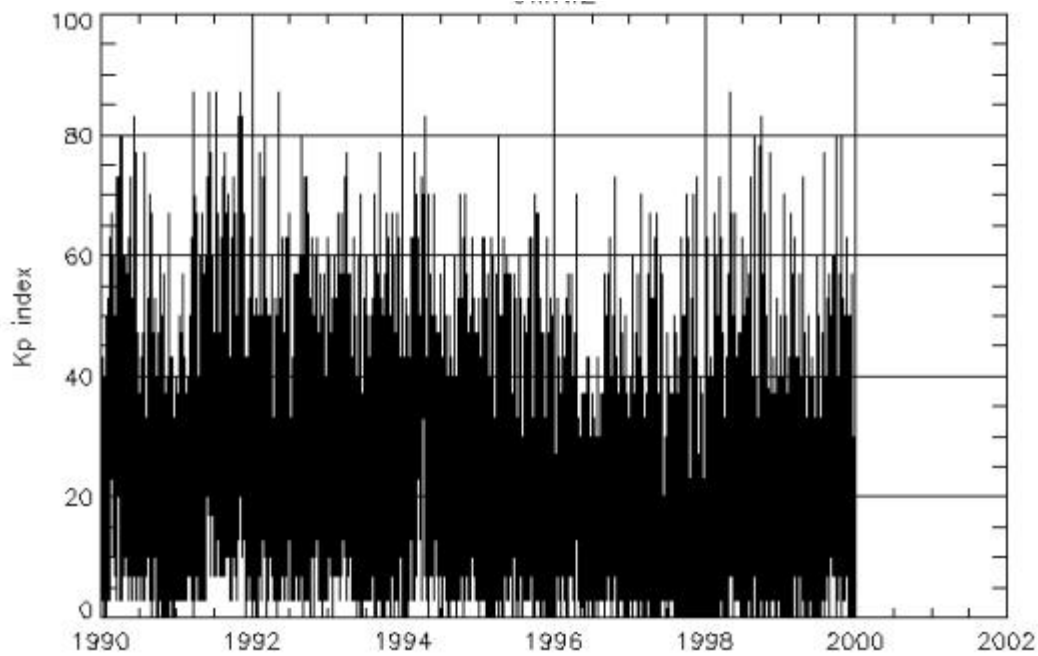


그림 3-24 1990년대 Kp 지수 현황

지자기 교란 지수 Kp가 7이상인 경우는 다음 표와 같다.

년도	일	시간	최대 Kp	년도	일	시간	최대 Kp
1990	71	3	7.3	1992	57	3	8.0
1990	80	3	7.3	1992	131	18	8.7
1990	89	6	8.0	1992	132	3	7.3
1990	100	15	8.0	1992	236	6	8.0
1990	102	6	7.7	1992	253	3	7.3
1990	146	3	7.3	1992	254	3	7.0
1990	163	9	8.3	1992	261	6	7.3
1990	164	3	7.7	1993	83	3	7.3
1990	165	6	7.7	1993	94	6	7.7
1990	209	9	7.7	1993	95	6	7.3
1990	210	6	7.0	1993	161	3	7.0
1990	235	3	7.0	1993	228	3	7.0
1991	83	15	8.7	1993	256	6	7.7
1991	84	12	8.7	1994	52	12	7.7
1991	85	12	8.0	1994	53	6	7.7
1991	152	6	7.3	1994	66	3	7.0
1991	153	3	7.0	1994	92	3	7.0
1991	155	6	7.3	1994	93	3	7.3

년도	일	시간	최대 Kp	년도	일	시간	최대 Kp
1991	156	21	8.7	1994	94	3	7.0
1991	161	15	7.7	1994	107	9	8.3
1991	162	6	7.3	1994	121	6	7.0
1991	164	15	7.7	1994	148	3	7.0
1991	168	3	7.3	1994	276	6	7.0
1991	189	6	8.0	1994	302	3	7.0
1991	190	12	8.0	1995	97	9	8.0
1991	194	12	8.7	1995	270	3	7.0
1991	224	6	7.3	1996	105	3	7.0
1991	231	6	7.7	1996	297	3	7.3
1991	232	6	7.3	1997	58	3	7.0
1991	234	3	7.0	1997	274	3	7.0
1991	252	3	7.0	1997	311	3	7.0
1991	274	6	7.3	1997	327	6	7.3
1991	301	6	8.3	1998	69	3	7.3
1991	302	12	8.3	1998	124	6	8.7
1991	304	3	7.0	1998	218	3	7.3
1991	305	9	8.3	1998	239	12	8.0
1991	306	3	7.0	1998	268	12	8.3
1991	312	6	7.7	1998	312	6	7.7
1991	313	9	8.3	1999	13	3	7.0
1992	34	6	7.7	1999	107	3	7.3
1992	39	3	7.0	1999	211	3	7.7
1992	40	3	7.0	1999	265	3	8.0
1992	51	3	7.0	1999	295	9	8.0
1992	52	6	7.3	총 87일			

표 3-8 1990년대 지자기 교란 지수 현황 ( $K_p > 7$ )

마. 2000년대

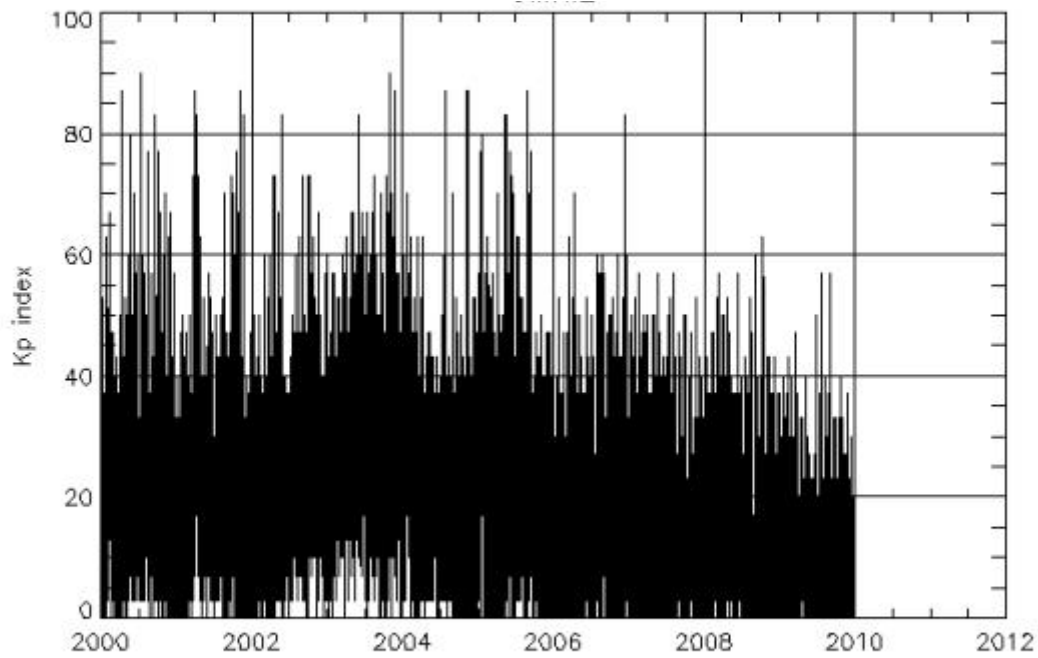


그림 3-25 2000년대 Kp 지수 현황

지자기 교란 지수 Kp가 7이상인 경우는 다음 표와 같다.

년도	일	시간	최대 Kp	년도	일	시간	최대 Kp
2000	97	6	8.3	2003	230	9	7.3
2000	98	3	8.7	2003	260	3	7.0
2000	145	6	8.0	2003	287	6	7.3
2000	160	3	7.0	2003	302	18	9.0
2000	196	6	7.3	2003	303	15	9.0
2000	197	12	9.0	2003	304	12	8.3
2000	198	3	7.7	2003	308	3	7.0
2000	225	15	7.7	2003	324	12	8.7
2000	261	3	8.3	2004	22	3	7.0
2000	262	3	7.7	2004	204	3	7.0
2000	278	3	7.3	2004	207	21	8.0
2000	279	9	7.7	2004	208	6	7.3
2000	311	3	7.0	2004	209	18	8.7
2001	79	6	7.3	2004	243	3	7.0
2001	90	18	8.7	2004	312	3	8.0
2001	98	6	7.0	2004	313	12	8.7

년도	일	시간	최대 Kp	년도	일	시간	최대 Kp
2001	101	9	8.3	2004	314	9	8.7
2001	102	3	7.3	2004	315	15	8.7
2001	103	3	7.3	2004	315	1	7.7
2001	108	3	7.3	2005	7	3	7.7
2001	229	3	7.0	2005	8	3	7.0
2001	268	3	7.3	2005	18	6	7.7
2001	276	3	7.0	2005	21	6	8.0
2001	294	6	7.7	2005	95	3	7.0
2001	295	12	7.3	2005	128	6	8.3
2001	310	9	8.7	2005	135	6	8.3
2001	328	12	8.3	2005	150	6	7.7
2002	107	3	7.3	2005	174	3	7.0
2002	108	3	7.0	2005	236	6	8.7
2002	110	6	7.3	2005	243	3	7.0
2002	143	6	8.3	2005	243	16	7.0
2002	250	6	7.3	2005	243	17	7.0
2002	251	3	7.3	2005	254	9	7.7
2002	274	3	7.3	2005	255	6	7.0
2002	275	4	7.3	2005	258	3	7.0
2002	275	6	7.3	2006	104	3	7.0
2002	277	3	7.3	2006	348	3	7.7
2003	149	12	8.3	2006	349	6	8.3
2003	150	3	7.3	총 79일			

표 3-9 2000년대 지자기 교란 지수 현황 (Kp>7)

바. 2010년대

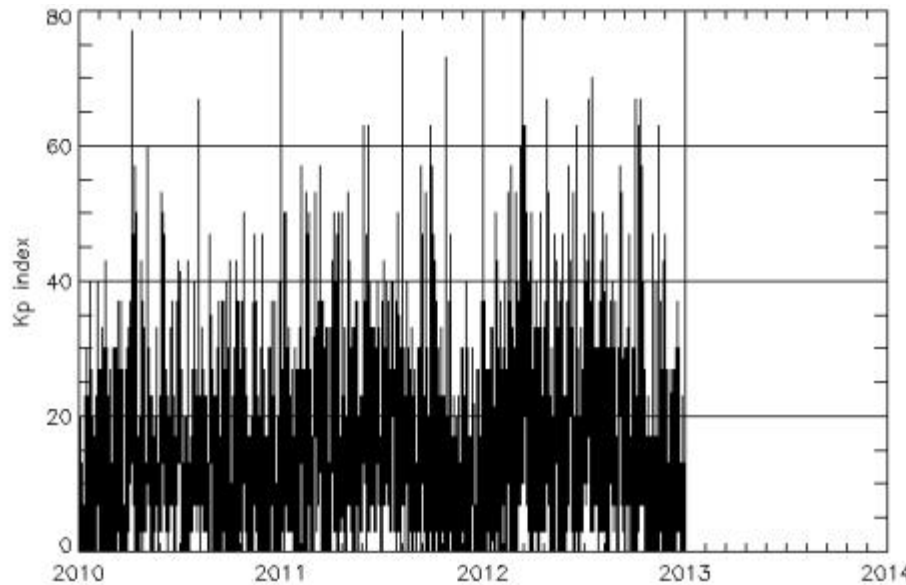


그림 3-26 2010년대 Kp 지수 현황

지자기 교란 지수 Kp가 7이상인 경우는 다음 표와 같다.

년도	일	시간	최대 Kp
2010	95	3	77
2011	217	3	77
2011	297	3	70
2011	298	3	73
2012	69	6	80
2012	197	3	70

표 3-10 2010년대 지자기 교란 지수 현황 (Kp>7)

지금까지 과거 지자기 폭풍 발생시 관측된 해외 지자기 데이터를 통해 지자기 교란 횟수를 살펴보았다. 이제는 지자기 교란으로 인한 유도전류 발생과 그로 인한 전력망 피해 사례를 조사하고자 한다.

1972. 8. 4.(217일)에 지자기 교란 지수 Kp 9가 되었으며 영국 콜롬비아 지역에 있는 230kV 전력망의 변압기가 손상되었다. 지자기 교란 횟수를 통해 1970년대에는 대형 지자기 교란(Kp=9이상)이 1970년과 1972년 총 2일(6시간)이 발생되었다.

1980.12.19.(354일)에 지자기 교란 지수  $K_p$  7.7이 되었으며 캐나다 지역의 735kV 전력망의 변압기가 8일간 운용중지되는 피해가 발생되고, 1981. 4.13.(103일)에 지자기 교란 지수  $K_p$  8.이 되었으며 캐나다 지역의 735kV 전력망의 변압기가 손상되어 교체되는 피해가 발생되었다. 지자기 교란 횟수를 통해 1980년대에는 대형 지자기 교란( $K_p=9$ 이상)은 총 15시간 발생되었으나 1980년도에는 지자기 교란 지수  $K_p$ 가 8미만으로, 1981년도에는 지자기 교란 지수  $K_p$ 가 8~9미만이 18회 총 4일이 발생되었다.

1989. 3.13.(72일)에 지자기 교란 지수  $K_p$  9가 되었으며 캐나다 퀘벡주의 전력망에 연결된 4개 변전소에서 전력계통 이상이 발생되고 전력망 시스템 기능정지되어 6백만 가구가 정전피해를 입었다. 같은 날 미국 뉴저지주의 전력사에서는 12백만불 규모의 변압기가 파손되는 피해를 입었다. 1980년대 발생한 대형 지자기 교란( $K_p=9$ 이상)은 15시간 총 5일로 중 6시간 총 2일 동안 지자기 교란이 발생되었다.

2003.10.30.(303일)에 지자기 교란 지수  $K_p$  9가 되었으며 남부 스웨덴 전력이 20~50분간 중지되는 피해를 입었다. 같은 날 남아공에서는 15개 변압기가 손상되었다는 보고가 있었다. 2000년대 대형 지자기 교란( $K_p=9$ 이상)은 2000년과 2003년에 3일(12시간)이 발생되었다.

#### 가. 스웨덴의 유도전류 관측 및 피해 사례

해외 유도전류가 관측된 2003년 지자기 교란으로 인한 스웨덴 지역의 유도전류 관측결과와 정전피해 발생시점간의 연관성을 분석하였다. '03.10.29~10.30까지 지자기 교란으로 스웨덴 남부의 Malmo에 위치한 변전소에서 피해가 발생되었다. '03.10.29에 스웨덴 Brorfelde 지자기 관측소의 관측 데이터는 07시경에  $-1000\text{nT}$ 가 넘는 가장 큰  $H$ 가 발생되었으며  $\text{dBy/dt}$ 는 07시경과 19:40분경에 300이상의 큰 값이 2차례 발생되었다. 그 당시 관측된 지자기 데이터는 Intermagnet을 통해 확인할 수 있다.



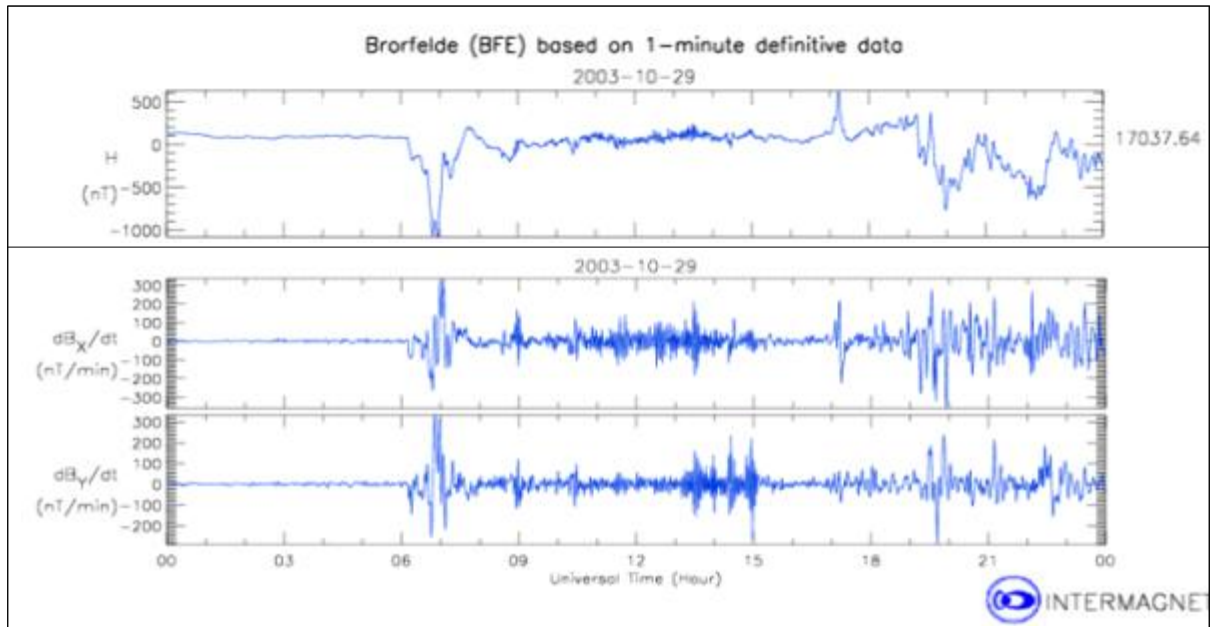


그림 3-27 스웨덴 지자기 관측값('03.10.29)

이날 06:10~07:10까지 100A가 넘는 유도전류가 수차례 발생되었고 5차례의 장애가 발생되었다. 1차 장애는 06:11:30초에 110A의 유도전류가 발생되고 12초 후 220kV급 변압기가 단선되었다. 2차 장애는 06:12분에 180A의 유도전류가 발생되고 29초 후 130kV급 변압기가 단선되었다. 3차 장애는 06:44:40초 110A에 이은 06:46분 190A의 유도전류가 발생되어 06:46:04초 400kV급 변압기가 단선되었다. 4차 장애는 06:58:30초 170A에 이은 06:59:40초 150A의 유도전류가 발생되고 07:00분에 원전측 변압기가 고열로 장애가 발생되었다. 5차 장애는 07:02:30초 150A에 이은 07:04:10초 190A의 유도전류가 발생되고 07:04:10초에 130kV급 변압기가 다시 단선되었다.

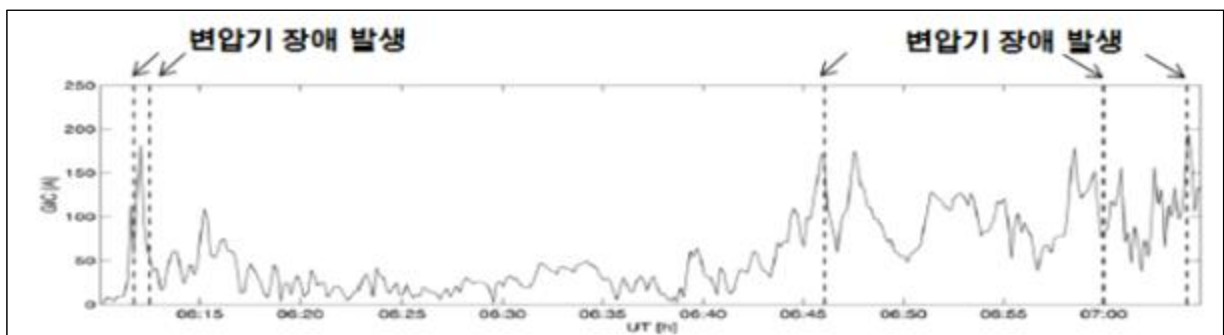


그림 3-28 유도전류 관측 결과와 변압기 장애 발생 현황('03.10.29)

'03.10.30에 스웨덴 Brorfelde 지자기 관측소의 관측 데이터는 21시 20분경에  $-1300\text{nT}$ 가 넘는 가장 큰 H가 발생되었고  $dB_y/dt$ 는 동일시간에 1000이상의 큰 값이 발생되었다.

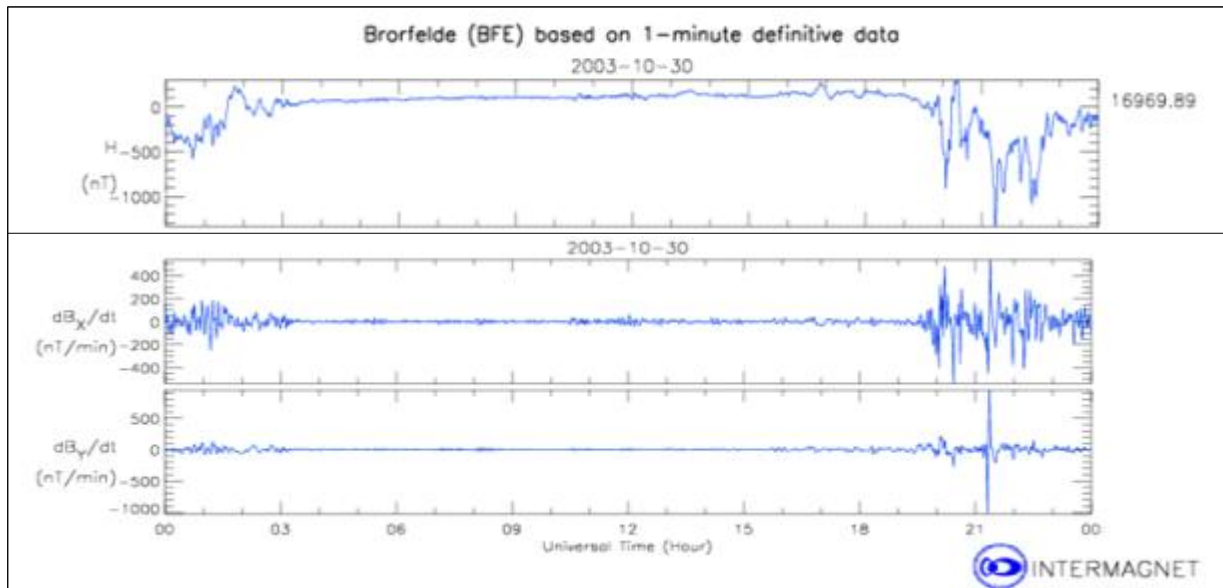


그림 3-29 스웨덴 지자기 관측값('03.10.30)

이날 19:35~20:30까지 50A가 넘는 유도전류가 수차례 발생되고 4차례 장애와 정전피해가 발생되었다. 1차 장애는 19:47:40초, 19:51:40초, 19:54:10초에 55A의 유도전류가 3차례 연이어 발생되고 19:55:28초에 400/220kV 변압기가 단선되었다. 2차 장애는 19:59:20초, 20:00:10초 120A에 이은 20:03:44초에 180A의 유도전류가 발생되고 20:03:44초에 400/130kV 변압기의 과부하와 단선이 발생되었다. 3차 장애는 20:06:10초에 80A의 유도전류가 발생되어 20:07:15초에 Malmo 지역에 20~50분간 정전 피해가 발생되었다. 그 이후에도 4차 장애는 20:07:50초에 75A의 유도전류가 발생되어 20:08분에 130kV급 변압기가 단선되었다. 5차 장애는 20:08:40초 100A 초과하는 유도전류가 발생되어 130kV급 변압기가 단선되었다.

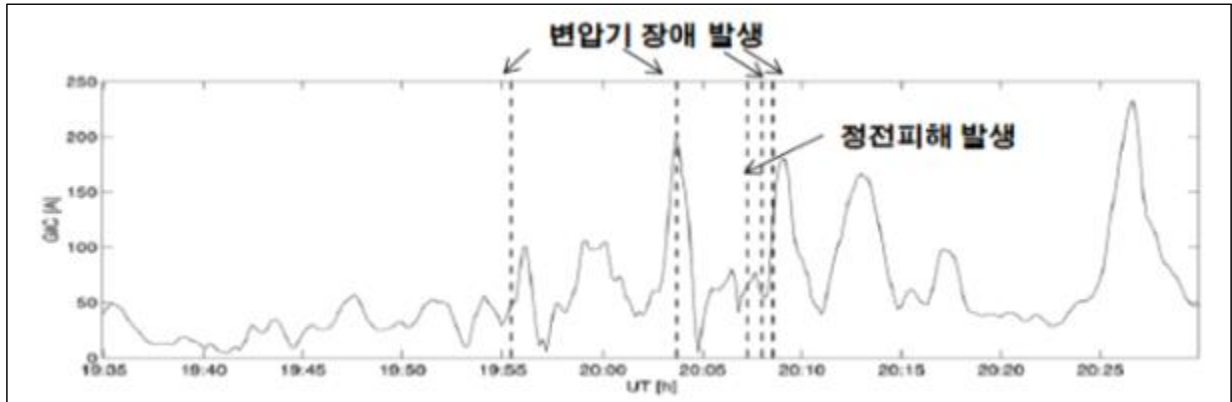


그림 3-30 유도전류 관측 결과와 변압기 장애 발생 현황('03.10.30)

스웨덴의 유도전류 발생과 정전 피해 사례를 통해 유도전류가 단순히 큰 것 보다는 연속으로 크게 발생된 이후 12초~2분 이내 변압기 단선이나 과부하 등의 장애가 발생하였다는 것을 알 수 있다. 변전소 현장에서 이러한 영향을 대비하기 위해서는 지자기 교란시 1분 미만의 단기간 유도전류 변화를 모니터링하기 위한 초단위 실시간 분석모델 개발이 필요할 것으로 검토된다.

#### 나. 남아공의 유도전류 관측 및 피해 사례

남아공은 '03.10.29일에 발생한 지자기 교란으로 인해 변압기 15기가 손상되는 피해를 발생했다. 그 때 관측된 유도전류의 크기는 다음 그림과 같다.

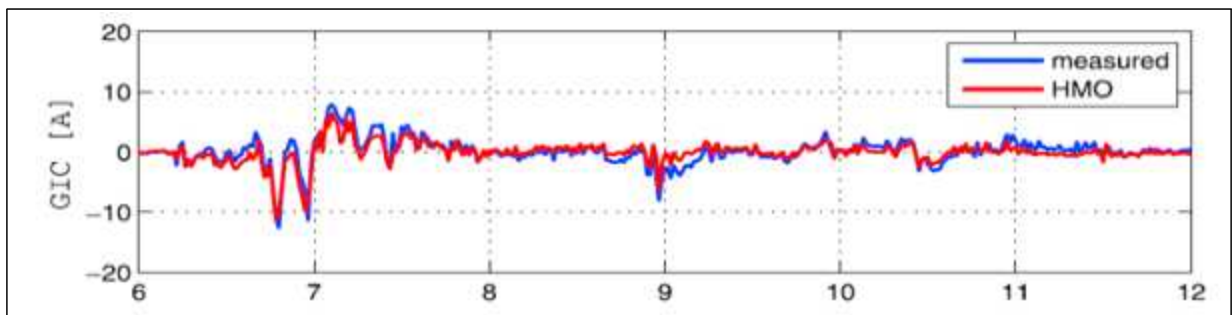


그림 3-31 남아공 유도전류 관측값('03.10.29)

## 2. 과거 국내 유도전류 예상값 산출

제2장 제2절의 지자기 교란 데이터 분석을 통해 2000년과 2003년에 지자기 교란이 크게 발생되었음을 알 수 있었다. 이 지자기가 발생된 일자의 지자기 데이터의 미분값을 계산하고 앞서 산정한 유도전류 상관계수를 적용하여 신가평 유도전류 예상값을 산출하였다. 그 결과 유도전류 예상값은 '03.10.29.에 최대 15.39A가 되는 것을 알 수 있다.

지자기 발생일자	최대 분평균의 $dH/dt$	유도전류 예상 값
2000. 6. 8.	50.3 (Hx 50.3 , Hy 1.5)	14.82 A
2000.11.10.	40.7 (Hx 40.7, Hy 1.9)	11.95 A
2003.10.29	52.3 (Hx 52.3, Hy 1.9)	15.39 A
2003.10.30	46.8 (Hx 46.9, Hy 8.3)	13.47 A

표 3-11 과거 지자기 교란시 유도전류 예상값

다음은 유도전류 예상값이 가장 큰 '03.10.29. 관측된 지자기 데이터를 이용하여 신가평 유도전류의 변화와 크기를 살펴본 그래프이다. 이를 통해 우리나라 신가평 765kV 변압기에 유도되는 전류는 남아공에서 관측된 유도전류보다 높은 값을 알 수 있다.

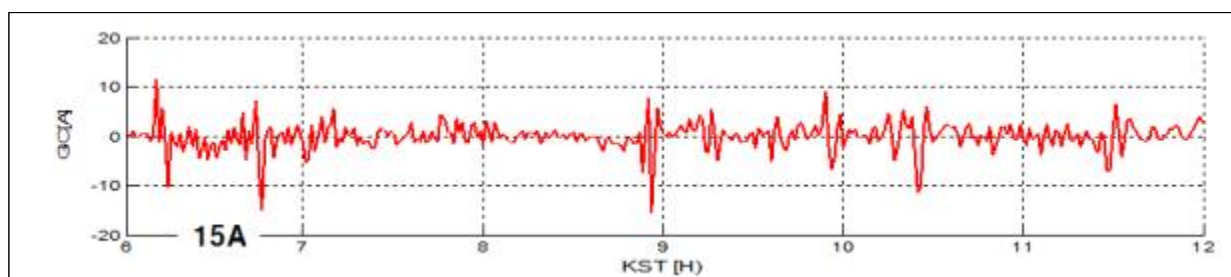


그림 3-32 지자기 교란시 유도전류 예상값('03.10.29)

다행히도 우리나라 국내 765kV급 전력망은 2004년에 설치·운용하고 있어 국내 피해사례는 발생되지 않았다.

## 제4장 결론

본 연구를 통해 우리나라에서도 태양흑점폭발로 인해 지구자기장이 급격하게 변동하여 지자기 유도전류가 발생되고 있음을 국내 최초로 확인할 수 있고, 국내 초고압 전력망에 유도되는 전류와 지자기 교란간의 상관관계를 분석하여 유도전류 계산식을 국내 최초로 마련하였다.

지자기 데이터는 우주전파센터가 보유하고 있는 제주, 이천, 강릉의 지자기 관측소의 측정 데이터를 활용하였고, 유도전류 데이터는 동제주, 신가평, 신탄백 변전소에서 실제 관측한 데이터를 종합하여 비교·분석하였다. 지자기 교란 이벤트가 발생한 모든 일자에서 지자기와 유도전류 데이터 간의 공통 상관계수를 산정하고 실측된 유도전류와 예측된 유도전류 발생규모의 차이를 줄이고 정확도를 높이기 위한 개선방안을 마련하여 국내 전력망에 맞는 유도전류 계산식을 최종 도출하여 과거 지자기 폭풍에 의한 국내 유도전류 예상값을 산출하였다.

지난 태양활동 극대기는 2000년으로 3년 후인 2003년 전 세계 지자기 폭풍이 발생되었다. 금년 2013년은 태양활동 극대기로 알려져 있으므로 향후 3년 이내 발생할 것으로 예상되는 대규모 지자기 폭풍을 대비하여야 할 것이다. 특히 2004년부터 운용중인 국내 최대 규모인 765kV 전력망에 미치는 유도전류 영향을 살펴보기 위해 유도전류로 인해 발생하는 변압기 온도변화를 수집하는 장치를 설치하여 전력 공급 차원에서 전력망 내부에서 발생한 온도 과열 문제인지 아니면 지자기로 인한 유도전류로 변압기의 온도가 상승되는지를 파악할 계획이다. 또한 유도전류 발생규모와 발생시점 등 발생정보를 제공하는 모니터링 현황판을 한전 초고압 변전소에 2014년에 설치하여 서비스할 예정이다.

본 연구를 통해 도출된 유도전류의 공통 상관계수는 국내 지자기 폭풍으로 인해 발생하는 유도전류를 보다 정확한 시점과 규모를 산출하기 위한 노력으로 만들어졌으며, 향후 발생하는 지자기 및 유도전류 관측데이터를 통해 지속적으로 업데이트하여 보강해 나갈 계획이다.

우리의 연구결과를 통해 국내 전력망의 유도전류 예상값을 보다 정확한 시점에 산출함으로써 지자기 유도전류로부터 발생할 수 있는 전력망 피해를 사전에 예방하고 사회적 손실을 최소화 할 수 있게 되기를 기대한다.

## 참고문헌

- 1 Nalin B. Trivedi 등, “Geomagnetically induced currents in an electric power transmission system at low latitudes in Brazil: A case study“, AGU SPACE WEATHER, 2007.
- 2 Chun-Ming Liu 등, “Calculation of geomagnetically induced currents in mid- to low-latitude power grids based on the plane wave method: A preliminary case study“, AGU SPACE WEATHER, 2009.
- 3 A. Pulkkinen 등, “Generation of 100-year geomagnetically induced current scenarios“, AGU SPACE WEATHER, 2012.
- 4 Allan John McKay, “Goelectric Fields and Geomagnetically Induced Currents in the United Kingdom“, University of Edinburgh, 2003.
- 5 Chigomezyo M. Ngwira 등, “Improved modeling of geomagnetically induced currents in the South African power network“, AGU SPACE WEATHER, 2008.
- 6 Chigomezyo M. Ngwira 등, “Limitations of the modeling of geomagnetically induced currents in the South African power network“, AGU SPACE WEATHER, 2009.
- 7 Alan W. P. Thomson 등, “Surface electric fields and geomagnetically induced currents in the Scottish Power grid during the 30 October 2003 geomagnetic storm“, AGU SPACE WEATHER, 2005.
- 8 J. Miquel Torta 등, “Geomagnetically induced currents in a power grid of northeastern Spain“, AGU SPACE WEATHER, 2012.
- 9 M. Wik 등, “Calculation of geomagnetically induced currents in the 400 kV power grid in southern Sweden“, AGU SPACE

WEATHER, 2008.

- 10 Antti Pulkkinen 등, “Estimation of geomagnetically induced current levels from different input data”, AGU SPACE WEATHER, 2006.
- 11 John G. Kappenman, “Storm sudden commencement events and the associated geomagnetically induced current risks to ground-based systems at low-latitude and midlatitude locations”, AGU SPACE WEATHER, 2003.
- 12 Markus Eisel 등, “On the stability of magnetotelluric transfer function estimates and the reliability of their variances”, GEOPHY 저널, 144, 65–82, 2001.
- 13 JL Gannon 등, “USGS Geomagnetism Program Electric Field Estimates”, SPACE WEATHER WORKSHOP, 2013.
- 14 Christopher Balch 등, “Relationship between SWPC Products and Geoelectric Fields”, SPACE WEATHER WORKSHOP, 2013.
- 15 Zahid Qayyum 등, “Geomagnetic Disturbances”, SPACE WEATHER WORKSHOP, 2013.
- 16 Nicole Homeier, “Geomagnetic Storm Risk and the Electric Grid”, SPACE WEATHER WORKSHOP, 2013.
- 17 Kenneth R. Fleischer, “Geomagnetic Disturbance Mitigation for Nuclear Generator Main Power Transformers”, SPACE WEATHER WORKSHOP, 2013.
- 18 Waggel, “Space Weather Workshop”, SPACE WEATHER WORKSHOP, 2013.
- 19 D.H.Boteler 등, “On calculating the electric and magnetic fields produced in technological system at the Earth’s surface by a ”wide“ electrojet”, Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics, 62, 1311–1315, 2000.