

## 임펄스전압에 의한 수중방전특성의 분석

(Analysis of Underwater Discharge Characteristics Caused by Impulse Voltages)

최종혁\* · 안상덕 · 이복희

(Jong-Hyuk Choi · Sang-Duk An · Bok-Hee Lee)

### 요 약

이 논문은 반구형 수조에 설치되어 있는 침전극과 구형전극에 표준뇌임펄스전압을 인가하였을 때 나타나는 수중 방전현상과 절연파괴특성을 나타낸다. 이 논문의 목적은 뇌서지에 대한 과도접지임피던스와 관련된 기본적인 특성을 파악하는데 있다. 인가전압의 극성과 물의 저항률에 따른 방전광을 촬영하였고 절연파괴전압의 의존성을 측정하였다. 침전극과 구형전극의 끝단에서 스트리머코로나가 발생하였고 접지된 수조를 향하여 단계적으로 진전하였다. 저항률에 따른 절연파괴전압은 V자 형태를 나타내며, 구형전극의 절연파괴전압-시간곡선이 침전극보다 높게 나타났다.

### Abstract

This paper describes underwater discharge phenomena and breakdown characteristics in case that the standard lightning impulse voltage is injected to the needle and spherical electrodes installed in the hemisphere water tank. The objective of this work is to understand the basic features related to transient ground impedance against lightning surges. The discharge luminous images were observed and the dependence of breakdown voltage on the polarity of applied voltage and water resistivity were investigated. As a consequence, streamer corona is initiated at the tip of needle and spherical electrodes and is propagated toward grounded tank with stepwise extension. The breakdown voltage characteristics measured as a function of water resistivity showed V-shaped curves. Breakdown voltage and time curve of needle electrode is higher than that of spherical electrode.

Key Words : Underwater discharge, V-t curve, Streamer corona, Time lag to breakdown

### 1. 서 론

심매설 접지극과 같이 땅속 깊은 곳에 시공되는 접지극의 경우 지하의 수맥을 통과하는 경우가 발생할 수 있고, 장마철과 같이 비가 많이 내리는 계절이면 일반적인 접지극들도 물과 직접 맞닿는 현상이 발생한다. 이러한 접지극에 낙뢰나 계통의 고장으로

\* 주저자 : 인하대학교 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822

E-mail : chjohy80@naver.com

접수일자 : 2007년 11월 9일

1차심사 : 2007년 11월 13일

심사완료 : 2007년 11월 30일

인한 서지가 인가되면 수중에서 방전이 일어나게 된다. 하지만 현재까지 수중에 잠겨있는 접지극에 과전압이 침입되었을 때 나타날 수 있는 위험성에 대한 검토는 이루어지지 않고 있다. 대지에서 발생하는 지중방전은 고체와 액체 또는 고체와 기체가 혼합된 복합유전체의 특성을 보이며, 방전광과 같은 순시적 물리특성을 파악하는데 어려움이 따른다. 최근 지중방전의 형태와 경로 등을 분석하기 위해 엑스선필름을 이용하여 방전광을 촬영하는 연구들이 수행되었으나 명확한 방전경로의 분석이 어렵고, 필름현상을 위해 부수적인 노력을 필요로 한다[1-2]. 수중방전을 통한 지중방전의 모사는 선명한 방전광의 촬영을 통해 지중방전 경로의 분석을 가능하게 한다. 또한 물은 전해질을 첨가하여 저항률을 쉽게 변화시킬 수 있고, 균일한 저항률의 대기구조를 모사할 수 있기 때문에 지중방전과 유사한 특성을 확인한다면 이전까지 연구가 어려웠던 지중방전의 진전과정을 예측할 수 있다. 본 논문에서는 반구형 수조와 전극을 이용하여 대지와 접지극을 모의하였으며, 물의 저항률에 따른 지중방전의 모사가능성을 확인하였고 방전광과 절연파괴 특성을 파악하였으며, 이에 대한 결과를 기술하였다.

## 2. 실험계 구성 및 방법

임펄스전압에 의해서 발생하는 지중방전을 모의하기 위해서 그림 1과 같이 대지를 모의하는 직경 110[cm]의 반구형 수조를 제작하였다. 방전광의 관측을 위해서 바닥으로부터 15[cm] 높이에 직경 21[cm]의 관측창을 90[°] 각도로 설치하였으며, 상부에 전극을 고정하기 위해 절연체를 설치하였다.

접지극을 모의하는 전극에 1.2/50[μs]의 표준뇌임펄스전압을 인가하기 위하여 400[kVp], 20[kJ]의 용량을 갖는 Marx형 임펄스전압발생장치를 사용하였으며, 용량성 분압기와 감쇠기를 이용하여 10,000:1의 비율로 전압을 측정하였다. 또한 방전시에 캡을 통해 흐르는 전류를 측정하기 위하여 접지와 수조 사이에 0.02[V/A]의 비율을 갖는 분류기(shunt)를 연결하였다. 분압기와 분류기의 신호는 400[MHz] 대역폭의 4채널로 구성된 오실로스코프를 이용하여

측정하였다. 선명한 방전광의 촬영을 위해서 암막지를 이용하여 수조의 윗부분과 촬영부를 덮어 외부의 빛을 차단하였다. 방전광은 수조 외부에 설치된 디지털 카메라를 이용하여 관측창을 통해 촬영하였다.

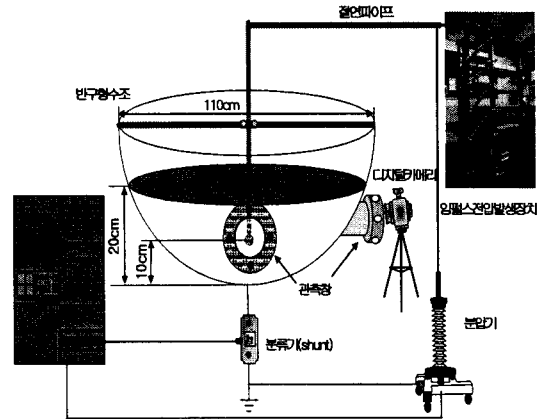


그림 1. 실험계의 구성  
Fig. 1. Experimental configuration

일반적으로 물은 0.2~200,000[Ω·m]의 저항률을 나타내며, 토양의 경우 저항률이 매우 낮은 늪지에서 암반지대까지 10~10,000[Ω·m]의 저항률을 나타낸다[3]. 본 연구에서는 이와 같이 일반적인 토양의 저항률을 실험범위로 선정하였다. 정확한 측정에 앞서 GV 22[mm] 전선을 모의 접지전극으로 사용하고 카메라를 이용하여 인가전압의 극성에 따른 방전광을 분석하였으며, 지중방전의 모사가 가능한지를 확인하였다. 또한 모의실험의 방전광을 참고하여 물을 바닥으로부터 20[cm]의 높이까지 채우고, 바닥으로부터 10[cm] 높이에 0.1[mm]의 곡률반경을 갖는 침전극과 1.24[cm]의 직경을 갖는 구형전극을 설치하여 저항률에 따른 절연파괴전압 및 V-t 특성을 측정하였다. 저항률의 변화는 일반적인 토양과 물에 가장 많은 성분을 차지하는 염화나트륨(NaCl)을 첨가하여 변화시켰으며, 전기전도도측정기 CM-21P(TOA)를 사용하여 정확한 저항률을 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 방전광의 극성의존성

수중방전을 이용하여 지중방전의 모사 가능성을 판단하기 위해서 GV 22[mm]전선을 이용하여 접지극을 모의하고 인가전압의 극성과 크기, 물의 저항률, 접지극의 위치 등에 따른 방전 특성을 파악하였다. 정극성 뇌임펄스전압을 인가할 경우 물의 저항률과 인가전압의 크기에 따른 방전광의 사진을 그림 2에 나타내었다. 방전광에서 저항률이 높은 10,000 [ $\Omega \cdot m$ ]에서는 섬락이 발생하였고, 저항률이 낮은 100 [ $\Omega \cdot m$ ]에서는 동일한 전압에서 코로나 방전이 발생하였으나 섬락에 이르지 않았다. 섬락이 발생할 경우 전압이 높아질수록 주 방전로가 분기되며, 주변에 가느다란 분기로가 생겨 나무뿌리와 같은 형상을 나타내었다. 낮은 저항률에서는 일정한 전압에서 전극 끝단에 코로나가 선명하게 관찰되며, 전압이 상승할수록 수조의 밑바닥을 향하여 방사상으로 진전하였다. 이러한 스트리머코로나의 진전이 수조에 인접하게 되면 낮은 저항률에서도 섬락이 발생하였다.



78(kVp) 110(kVp) 126(kVp)  
10,000( $\Omega \cdot m$ )



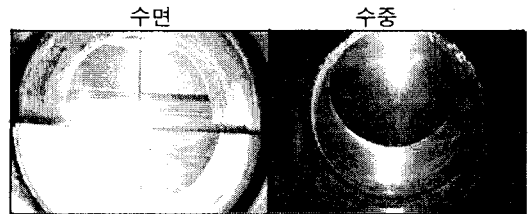
70(kVp) 112(kVp) 124(kVp)  
100( $\Omega \cdot m$ )

그림 2. 정극성 뇌임펄스전압에 대한 방전광  
Fig. 2. Discharge luminous images for the positive lightning impulse voltage

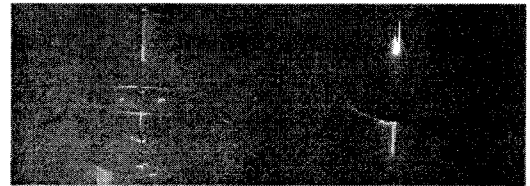
부극성 방전광의 경우 방전경로가 그림 3과 같이 전극표면을 타고 위쪽으로 향하는 것으로 나타났기

때문에 2개의 디지털 카메라를 이용하여 수중과 수면을 동시에 촬영하였다.

부극성의 경우도 정극성과 마찬가지로 일정전압에서 코로나 현상이 관측되나 이후 전압이 상승할수록 코로나가 전극의 표면을 타고 진전하여 물의 표면을 따라 수조의 옆면으로 방전이 발생하였다. 이러한 현상은 수면의 높이를 바닥으로부터 30[cm]까지 높이고 전극의 높이를 5[cm]까지 낮추어도 방전경로가 위쪽을 향하는 것으로 나타났다. 또한 방전시 큰 기포가 발생되어 많은 양의 액체가 수조 위로 튀어 오르는 것이 관측되었다. 이러한 결과는 액체의 절연파괴메카니즘과 관련된 것으로서, 부극성에서 기포에 의한 절연파괴특성으로 인한 것으로 판단된다[4].



-126(kVp)  
10,000( $\Omega \cdot m$ )



-124(kVp)  
100( $\Omega \cdot m$ )

그림 3. 부극성 뇌임펄스전압에 대한 방전광  
Fig. 3. Discharge luminous images for the negative lightning impulse voltages

#### 3.2 인가전압의 크기에 따른 방전 특성

그림 2에 나타낸 것과 같이 각 저항률에서 정극성 인가전압에 따라 여러 가지 형태의 방전광이 관측된다. 그림 4는 침전극을 이용하여 더욱 세밀하게 측정된 방전광을 나타낸다.

그림 4에서 높은 저항률의 경우 일정한 전압에서

침 끝단에 미세한 스트리머코로나가 발생하였고, 스트리머는 전압이 상승할수록 수조바닥을 향하여 진전하며, 일정전압에서 섬락이 일어났다. 물의 저항률의 변화에 따른 방전광을 살펴보면 저항률이 낮아질수록 스트리머의 굵기와 크기가 증가하며, 10[Ω · m]와 같이 매우 낮은 저항률에서는 300[kV]의 매우 높은 전압을 인가하여도 섬락이 발생하지 않았다.

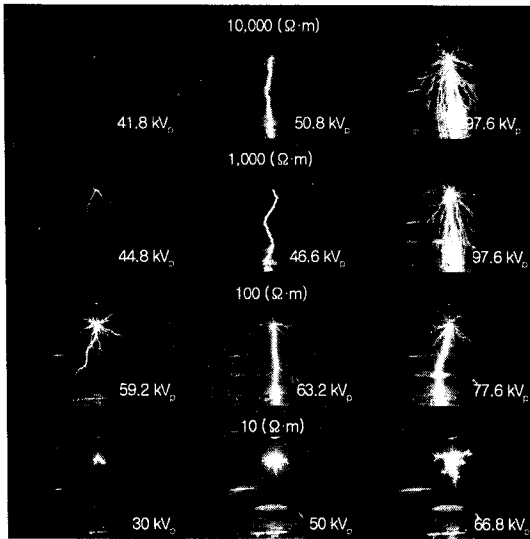
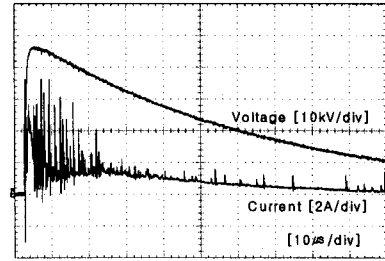
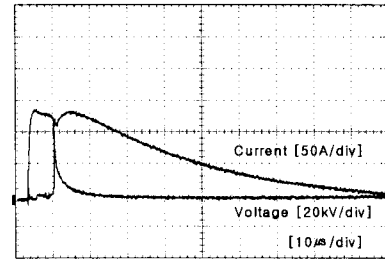


그림 4. 물의 저항률과 전압의 크기에 따른 침전극 끝단의 정극성 방전광  
 Fig. 4. The positive discharge luminous images at the tip of needle electrode according to the water resistivity and magnitude of applied voltage

그림 5는 10,000[Ω · m]의 높은 저항률에서 절연 파괴가 발생하지 않았을 경우와, 발생하였을 경우의 대표적인 전압과 전류 파형을 나타낸다. 50[kV]의 인가전압에서 2[A]이하의 전도전류와 10[A]이하의 스트리머코로나 전류펄스들로 구성된 전류파형이 측정되었다. 전도전류의 경우 저항률이 감소함에 따라서 그림 6과 같이 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 상대적으로 전류펄스들은 감소하는 것으로 나타났다. 그림 5의 60[kV]의 인가전압에서도 섬락이 발생하기 전에 10[A]이하의 작은 전류가 나타나며, 섬락이 발생하면서 100[A]이상의 큰 전류가 흐르는 것으로 나타났다.

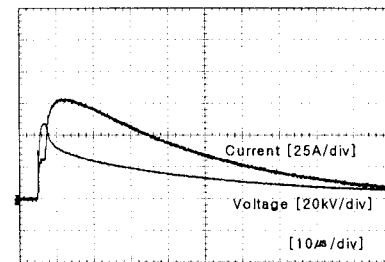


인가전압 : 50kV

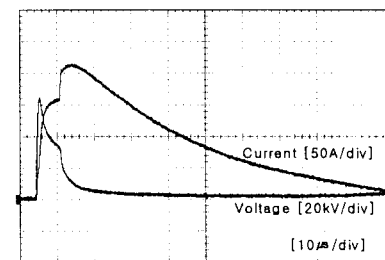


인가전압 : 60kV

그림 5. 10,000[Ω · m]의 저항률에서 인가전압에 따른 전압과 전류파형  
 Fig. 5. Typical voltage and current waveforms in different voltages at the water resistivity of 10,000[Ω · m]



인가전압 : 60kV



인가전압 : 90kV

그림 6. 100[Ω · m]의 저항률에서 인가전압에 따른 전압과 전류파형  
 Fig. 6. Typical voltage and current waveforms in different voltages at the water resistivity of 100[Ω · m]

## 임펄스전압에 의한 수증방전특성의 분석

그림 6의  $100[\Omega \cdot m]$ 에서는  $60[kV]$ 를 인가하여도 섬락이 발생하지 않았으나 전류가 다시 한번 급격히 상승하는 이온화 개시점이 나타났으며,  $90[kV]$  인가 시에 섬락이 발생한 파형에서도 절연파괴 이전에 상당히 큰 전도 전류가 흐르는 것으로 나타났다. 이러한 파형의 형태는 반구형 수조에 토양을 넣고 실험한 지중방전과 유사한 것으로 나타났으며, 저항률에 따른 특성은 토양의 수분함유량에 의한 영향과 비슷하게 나타났다[5].

### 3.3 전극형상에 따른 절연파괴 특성

전극형상에 따른 절연파괴 특성을 분석하기 위해 구형전극과 침전극에서 발생하는 절연파괴전압을 측정하고 V-t특성을 분석하였다. 그림 7과 그림 8은 각 물의 저항률에서 승강법을 이용하여 20회의 절연파괴전압을 측정한 데이터를 나타낸 것이다.

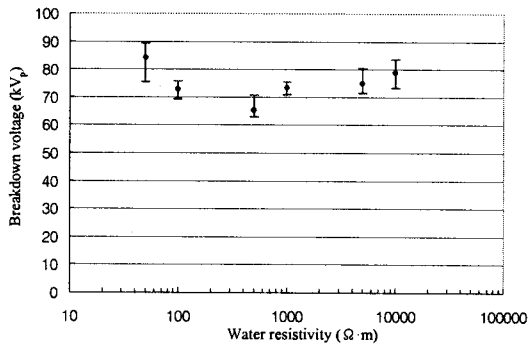


그림 7. 구형전극의 절연파괴전압-저항률 특성  
Fig. 7. Breakdown voltages-resistivity characteristics for the spherical electrode according to resistivities

그림 7에서 구형전극의 정극성 절연파괴전압은  $10,000[\Omega \cdot m]$ 에서  $500[\Omega \cdot m]$ 까지 저항률이 낮아짐에 따라서 감소하나 그 이하의 저항률에서 다시 상승하는 것으로 나타났다. 또한 그림 8의 침전극에서도 저항률이 낮아짐에 따라서 절연파괴전압이 V 형태로 나타났으며, 구형전극에 비해 전체적인 절연파괴전압이 낮게 나타났다. 이것은 준평등전계인 구형전극에 비해서 침전극의 경우 침전극 주변에 불평등 전계가 형성되어 침전극의 전계가 증가하기 때문

에 나타나는 현상이라 판단된다.

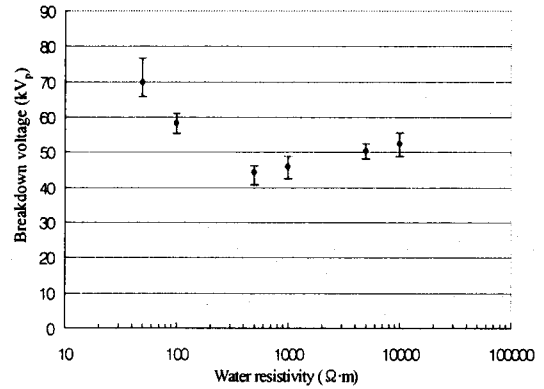


그림 8. 침전극의 절연파괴전압-저항률 특성  
Fig. 8. Breakdown voltages-resistivity characteristics for the needle electrode

그림 9와 그림 10은 각각의 저항률에서 절연파괴 전압보다 높은 전압영역에서 전압을 일정하게 증가시키며 측정된 방전지연시간과 절연파괴전압의 관계를 나타낸 것이다. 그림 9에서 구형전극의 방전지연시간은 약  $4[\mu s]$ 에서  $15[\mu s]$ 범위에 존재하고, 전압에 따라서 약간 감소하는 것으로 나타났다. 저항률에 따른 변화는 절연파괴전압이 낮을수록 동일전압에서 지연시간이 짧게 나타났다.

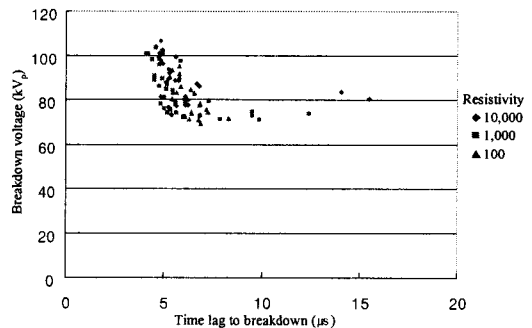


그림 9. 구형전극의 V-t특성  
Fig. 9. V-t characteristics for the spherical electrode

그림 10에서 침전극의 방전지연시간은  $4[\mu s]$ 에서  $22[\mu s]$ 까지 넓게 분포하고 낮은 전압에서 지연시간이 비교적 길게 측정되었다. 침전극의 V-t 곡선은

그림 9의 V-t 곡선에 비해 전압상승에 따라 방전지연시간이 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 그림 4의 방전광에서 알 수 있듯이, 낮은 인가전압에도 침전극 끝단에 코로나가 발생하게 되고, 이러한 코로나에 의한 공간전하의 영향으로 방전지연시간이 길어지게 된다고 판단된다.

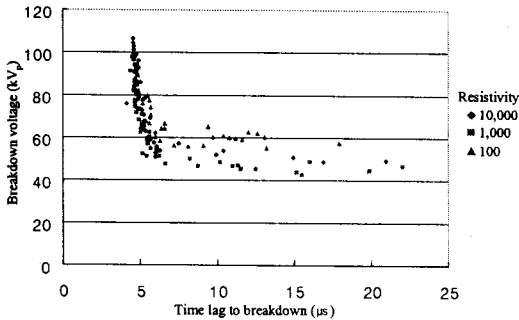


그림 10. 침전극의 V-t 특성  
Fig. 10. V-t characteristics for the needle electrode

### 3. 결 론

본 논문에서는 대기중에서 발생할 수 있는 수증방전을 모의하여 인가전압의 극성과 크기, 물의 저항률에 따른 방전현상 및 절연파괴특성을 파악하였다. 부극성의 경우 방전광의 경로가 전극의 표면을 타고 수면 위로 올라와 기중방전의 형태로 발생하여 접지극을 모의하는 조건은 아니었으며, 이에 대하여는 향후 대규모의 실험장치를 이용하여 보다 심층적인 연구를 수행해나갈 예정이다. 높은 저항률에서 전류는 전도전류와 스트리머코로나에 상응하는 전류펄스들로 구성되며, 저항률이 낮을수록 전도전류의 크기가 증가하고 상대적으로 펄스전류의 영향은 감소하였다. 절연파괴전압은 침전극과 구형전극 모두 물의 저항률이 감소함에 따라 V자 형태로 나타났으며, 500[Ω·m]의 저항률에서 가장 낮게 나타났다. 침전극에서의 V-t 곡선은 구형전극에 비해 낮게 나타나고, 불평등전계에 의한 스트리머코로나의 발생으로 인해 방전지연시간이 길게 나타나고 인가전압이 상승함에 따라서 급격하게 감소하는 것으로 나타났다.

### References

- [1] T. Shinoh, K. Seki, K. Furuya, A. Higano, K. Okumura, "Decrease characteristics of Rod Electrode Grounding Resistance", 일본전기설비학회전국대회, pp. 197-198, 2007.
- [2] Yanqing Cao, Jinliang He, Jun Zou, Rong Zeng, Xidong Liang, "Fractal simulation of soil breakdown under lightning current", Journal of Electrostatics 61, pp. 197-207. 2004.
- [3] 이복희, 이승철, "접지의 핵심 기초기술", 의제, pp.40-42, 1999.
- [4] A. T. Sugiarto, M. Sato and J. D. Skalay, "Transient regime of pulsed breakdown in low-conductive water solutions", J. Phys. D., Appl. Phys., 34, pp. 3400-3406, 2001.
- [5] N. Mohamad Nor, A. Haddad, H. Griffiths, "Characterization of Ionization Phenomena in Soils Under Fast Impulses", IEEE Transactions on power delivery, Vol.21, No.1, pp. 353-361, 2006.

### ◇ 저자소개 ◇

#### 최종혁 (崔鍾赫)

1980년 5월 12일생. 2006년 2월 인하대 공대 전자공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.  
Tel : (032)860-7398  
Fax : (032)863-5822  
E-mail : chjoHy80@naver.com

#### 안상덕 (安相德)

1965년 11월 24일생. 2006년 2월 한국교육개발원 졸업. 현재 인하대 공학대학원 전기공학과 석사과정.  
Tel : (032)860-7398  
Fax : (032)863-5822  
E-mail : jeungi@korea.com

#### 이복희 (李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대공대 전자전기공학부 교수. 본 학회 부회장.  
Tel : (032)860-7398  
Fax : (032)863-5822  
E-mail : bhlee@inha.ac.kr