

# 극저주파 자기장 노출에 의한 세포 유해성 평가

강홍식<sup>1</sup>, 이성표<sup>2</sup>, 노명규<sup>3</sup>, 김기정<sup>4</sup>, 김기광<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 메카트로닉스공학과 박사수료, <sup>2</sup>충남대학교 생화학과 학생,  
<sup>3</sup>충남대학교 메카트로닉스공학과 교수, <sup>4</sup>두원공과대학교 교수, <sup>5</sup>충남대학교 생화학과 교수

## Cellular Risk Assessment of Cells Exposed to Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields

Heungsik Kang<sup>1</sup>, Seongpyo Lee<sup>2</sup>, Myunggyu Noh<sup>3</sup>, Ki-Jung Kim<sup>4</sup>, Keekwang Kim<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. candidatee Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

<sup>2</sup>Student Department of Biochemistry, Chungnam National University

<sup>3</sup>Professor Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

<sup>4</sup>Professor Department of Smart Car Engineering, Doowon Technical University

<sup>5</sup>Professor Department of Biochemistry, Chungnam National University

요 약 인간은 환경적으로 다양한 전자기파에 노출되어 있으나 전자기파에 대한 유해성 평가 및 이를 위한 시스템의 개발은 미진한 상태이다. 따라서 우리는 전자기파에 대한 생물학적 유해성 평가를 위한 시스템을 개발하고, 시스템을 통한 생물학적 유해성 평가를 하고자 한다. 본 연구에서는 극저주파 자기장 발생장치를 설계 및 제작하였으며 장치의 출력 신뢰성을 확인하였다. 이 장치를 활용하여 고자기장인 6 mT와 60 Hz에 노출된 세포의 세포스트레스 유도과립 (Cellular stress-granules)의 형성 및 세포 분열 주기에 대한 영향을 확인하였다. 그 결과 6, 12 그리고 36시간 동안의 고자기장의 노출은 세포스트레스 유도과립의 형성 및 세포 분열 주기에 영향을 주지 않았다. 이러한 결과들은 극저주파 고자기장에 대한 생물학적 유해성 판단을 위한 중요한 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 극저주파 자기장 시스템, 고압송전, 솔레노이드, 세포스트레스 유도과립, 세포 성장주기

Abstract Humans are environmentally exposed to various electromagnetic fields, but the evaluation of the harmfulness of electromagnetic field and the development of a system therefor are still incomplete. We aimed to develop a system for evaluating biohazard against electromagnetic fields, and to determine biohazard through the system. An extremely-low frequency magnetic field generator was designed and manufactured, and the output reliability of the device was verified. Using this device, the effect on the formation of cellular stress-granules and the cell cycle progression of cells exposed to high magnetic fields of 6 mT and 60 Hz was confirmed. As a result, exposure to high magnetic fields of 6 hr, 12 hr and 36 hr did not affect the formation of cell stress-induced granules and the cell division cycle. These results are an important basis for the determination of biohazard to the extremely-low frequency high magnetic field.

Key Words : Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields System, High-voltage transmission, Solenoid, Cellular Stress-granules, Cell cycle

\*Corresponding Author : Keekwang Kim(kimkk@cnu.ac.kr)

Received February 22, 2021

Accepted May 20, 2021

Revised March 3, 2021

Published May 28, 2021

## 1. 서론

19세기 이후 전기에너지를 활용한 인류사회의 혁신적 변화가 이루어졌고, 현재 이후로도 인류는 전기와 함께 살아갈 수밖에 없을 것이다. 다양한 발전방식으로 생산된 전기를 소비자에게 효율적으로 전달·분배하기 위해서는 고압선로를 통한 송전이 필수적이며, 그로 인해 야기되는 송전선로 주변에서 발생하는 전자파의 유해성에 대한 이슈들이 해결되어야 할 과제로 남아 있다.

일반적으로 고압송전선로와 고속철도 등의 고압송전에서 발생하는 전자파가 인체에 미치는 영향을 고찰해 볼 때 관련 노동자들이 높은 전자파에 노출될 수 있으며, 이 전자파 노출 값을 계량하기 위한 척도로 자기장이 활용되고 있다.

세계보건기구 (World Health Organization, WHO) 보고서에서는 작업자에게 가장 높은 3  $\mu\text{T}$  이상 지속 노출이 나타나며, 특히 작업장 조건에 따라서는 높은 전류로 최대 약 10 mT에 도달하는 것으로 보고되고 있다[1]. 또 다른 연구에서는 고압송전선로에 발생하는 전자파 노출이 1 m 내에서는 1~7 mT (400 KV, 50 Hz) 발생하며 10 cm 근접 시 6 mT 전자파가 발생한다고 보고되고 있다[2]. 이러한 전자파에 대한 인체 보호 기준에 관한 연구에서는 60 Hz 극저주파 전자파 (Extremely Low Frequency-ElectroMagnetic Field, ELF-EMF)에 직업적으로 노출되는 작업자에 대해 하루 최대 2시간 동안 전신 노출 시 자속밀도 Root Mean Square (RMS)는 0.5 mT 초과하지 않아야 하며, 머리를 제외한 사지로 제한할 때 최대 25 mT까지의 단기 노출만 가능하다고 제시하고 있다[3].

이러한 고압 송전선로에서 발생하는 ELF-EMF가 인체에 미치는 유해성을 역학적 방법으로 수행한 연구는 미국 콜로라도 덴버에서의 고압 송전소 주변 거주 어린이 백혈병 발생 발표를 시작으로 다양한 질병을 대상으로 발표되고 있다[4,5]. 하지만 다른 연구에서는 ELF-EMF가 유방암 등 인체에 대한 유해성 근거가 없는 것으로 보고되기도 하였다[6,7]. 결국 ELF-EMF에 대한 영향인자에는 어떠한 것들이 있는지, 그리고 전자장이 인체에 어떠한 경로로 흡수 및 축적되는지에 대한 메커니즘 연구는 미진한 상태이다.

국내의 경우 전자파에 대한 규제는 전기설비기준에 자체는 일반인 (83.3  $\mu\text{T}$ ), 직업인 (416.7  $\mu\text{T}$ )로 정하고 있으며, 이는 국제 비전리 방사선보호위원회 (International Commission on Non-Ionizing Radiation

Protection, ICNIRP)에서 1998년에 제시한 가이드라인을 따르고 있다. 하지만 여전히 단기 노출에 대한 기준으로 송전선로 ELF-EMF의 장기적 노출에 의한 다양한 질병 발병 사례가 보고되어 이에 대한 인체보호기준 개선방안 등의 마련이 필요하다[8].

한편, 기존 전자파가 인체에 미치는 영향을 확인하기 위한 동물 및 세포를 대상으로 하는 연구들이 꾸준히 발표되고 있다. 하지만 대부분의 연구들에서 시험 조건들로 제시한 전자파 노출 세기가 통상 100  $\mu\text{T}$ -2.5 mT로 앞서 고압 송전로의 전자파 특성에서 설명한 근접 시 노출될 수 있는 6-7 mT 보다는 비교적 저자기장 세기로 수행한 것을 확인하였다[9-11]. 따라서 본 연구에서는 ELF-EMF 발생 환경에서 인체에 미치는 영향을 확인하기 위해 실제 고압 송전라인에서 발생하는 ELF-EMF를 모사하여 분석·검증하기 위한 시험시스템을 구축하고, 생물학적 유해성을 평가하고자 한다. 평가 기준에는 세포가 외부 자극에 대한 반응중의 하나인 세포스트레스 유도과립 (Cellular stress-granules, SGs)의 형성을 확인하는데 있다. SGs은 자극에 의해서 번역조절인자와 mRNA, RNA binding protein이 complex를 이루어 과립을 형성하는 반응으로 설명된다[12,13]. 하지만 SGs과 자기장에 의한 영향의 연관성은 밝혀진 바가 없다. 기존의 논문에서는 50 Hz, 10 mT의 pulsed electromagnetic fields (PEMF)를 노출시키는 조건에서 mesenchymal stem cells (MSCs)의 세포주기 G1기의 비율이 높아져 세포 증식을 촉진시킨다는 결과가 보고된 바 있다[14]. 하지만 3.5 A 전류를 투입하여 60 Hz 6-7 mT의 ELF-EMF 노출에 의한 세포 성장주기에 대한 영향은 확인된 바 없다. 이를 위해 근로자의 송전선로 근접성 등 작업중 발생될 수 있는 전자파 노출근거 [15,16]를 고려하여 60 Hz, 6-7 mT의 ELF-EMF로 세포 연구를 실시하여 생물학적 유해성 여부를 확인하였다.

## 2. 실험 준비 및 방법

### 2.1 ELF-EMF 발생 세포배양 시스템

#### 2.1.1 ELF-EMF 전자파 발생장치

고압송전선로에서 발생하는 전자파의 조건을 모사하기 위해, ELF-EMF 발생장치를 Fig. 1과 같이 설계하였다. 슬레노이드 코일에 전류(I)를 투입하면 원형코일 내부에 자속밀도 (Magnetic flux density)가 발생하게 되며 Biot-Savart 법칙을 적용한 식은 다음 식 (1)과 같다[17,18].

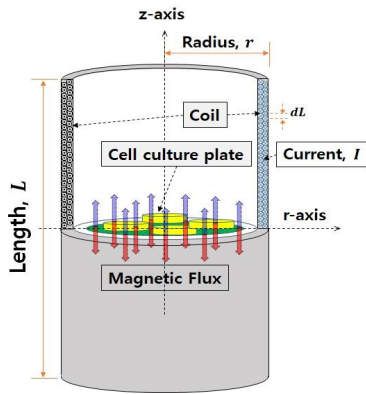


Fig. 1. Cell culture equipment to exposure ELF-EMF

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{L} \times \vec{R}}{R^3} \quad (1)$$

$\mu_0$ 는 공극의 투자율이며, 코일간의 간격을  $d\vec{L}$ 로 하고 임의의 점에서 단위길이를 고려한 벡터  $\vec{R}$ 을 반영하여, 길이를  $L$ , 반경이  $r$ 이며,  $N$ 번으로 감은 솔레노이드 코일의 자속밀도는 다음 식 (2) 와 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{2L} NI(\cos\theta_2 - \cos\theta_1)\vec{a}_z \quad (2)$$

위의 수식을 고려하여 60 Hz의 Sinewave 전류를 입력하여 Fig. 1과 같이 자기장의 방향이 변경되는 ELF-EMF시스템으로, 전자파를 발생시켜 생물학적 유해성을 평가하기 위해 설계하였다. 이를 위한 ELF-EMF 발생장치의 규격은 Table 1에 제시하였다.

Table 1. ELF-EMF Generator(60 Hz)

Mechanica Items		Electrical Items	
Item	Spec.	Item	Spec.
Length, $L$	245(mm)	Signal type	Sine wave
Inner radius, $r_1$	180(mm)	Input Voltage	48( $V_{peak}$ )
Outer radius, $r_2$	196(mm)	Max. Current	5( $A_{peak}$ )
Num. of turns	1260(turns)	Frequency	60(Hz)
Air circulator	Fan(3500rpm)	-	-

### 2.1.2 ELF-EMF 전자파 세포노출에 따른 세포유해성 평가 시험절차 및 방법

전자파에 노출된 세포에 대한 영향을 관찰하기 위해 Solenoid코일 활용한 자기장 발생장치를 활용하여 생물학적 영향을 관찰한 연구[17-20]를 참고하였다. 본 연구

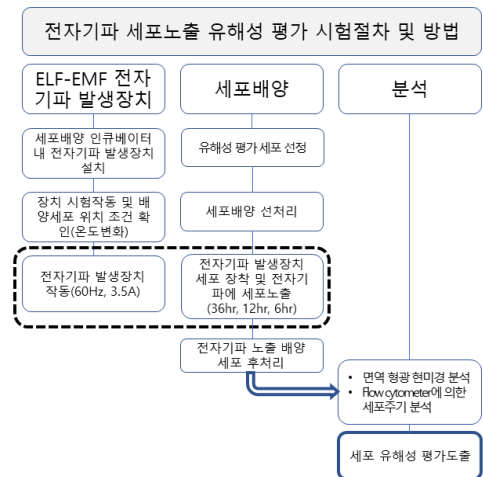


Fig. 2. Procedure and method to test cell exposed ELF-EMF

에서는 연구목적에 부합하게 고압송전에서 발생하는 전자파를 모사를 위한 시험 장치로써 시험조건이 구현될 수 있도록 구성하고, Fig. 2와 같은 시험절차 및 방법을 마련하여 연구를 수행하였다.

### 2.2 세포배양

본 실험에 사용되는 세포주인 human cervical HeLa, human embryonic kidney HEK-293, human lung Carcinoma A549, human neuroblastoma SK-N-SH 세포 들은 10%(v/v) fetal bovine serum (FBS, GIBCO)과 1% antibiotic antimycotic (100 U/mL penicillin and 100  $\mu$ g/mL streptomycin, GIBCO)이 포함된 Dulbecco's Modified Eagle's Medium (DMEM)에서 표준 세포 배양법인 37 $^{\circ}$ C, 5% CO<sub>2</sub> 조건에서 배양되었다.

### 2.3 면역 형광 현미경 분석

면역형광 현미경 분석을 위해 HeLa cells, HEK-293 cells, A549 cells, SK-N-SH cells을 4-well chamber slide에 분주한 후 세포에 3.5 A 전류를 투입하여 60 Hz 의 6 mT 전자파 자기장을 1, 4 h 시간별로 노출시켰다. 그 후 4% paraformaldehyde를 이용하여 10분 동안 고정시키고 0.5% Triton X-100이 포함된 PBS를 15 min 동안 처리하였다. 이후 비 특이적인 항체 결합을 억제하기 위해 blocking buffer (PBS, 5% goat serum, 0.1% BSA, 0.05% Tween 20)를 상온에서 1 h 처리한 후 blocking buffer에 희석한 1차 항체 rabbit polyclonal anti-Rbfox2 (Bethyl Laboratories), mouse monoclonal anti-G3BP1 (Santa Cruz Biotechnology)를 4 $^{\circ}$ C에서

12 h 반응시켰다. Mouse, rabbit IgG에 대한 2차 항체로는 Alexa Fluor 488- and 594-conjugated goat 항체(Thermo Fisher Scientific)를 사용하였고, 세포핵은 4', 6-diamidino- 2-phenylindole (DAPI; Thermo Fisher Scientific)로 염색하였다. LSM 880 with Airyscan confocal laser-scanning microscope를 통해 면역 형광을 분석하고 이미지화 하였다.

### 2.4 Flow cytometer에 의한 세포주기 분석

HeLa cell을 60 mm dishes에 분주한 후 24 h 안정화시켰다. 3.5 A 전류를 투입하여 60 Hz의 6 mT 전자과 자기장을 시간별로 (6, 12, 24, 36 h) 노출 시킨 후 detached와 adherent cells 을 모두 모아 1 ml의 cold 70% ethanol 로 고정시켰다. Cell pellet을 ice-cold PBS로 두 번 wash한 다음 10 mg/ml RNase A (Sigma)를 처리하고 37°C incubator에서 15 min 동안 반응시켰다. 그 후 10 mg/ml propidium iodide (PI)로 염색한 다음 어두운 상태로 보관한다. 세포 주기는 FACS Canto (Becton-Dickinson, Franklin Lakes, NJ, USA)와 FlowJo software (FlowJo, LLC, Ashland, OR, USA) 이용하여 분석하였다.

## 3. 결과

### 3.1 ELF-EMF 발생 세포배양 시스템 검증

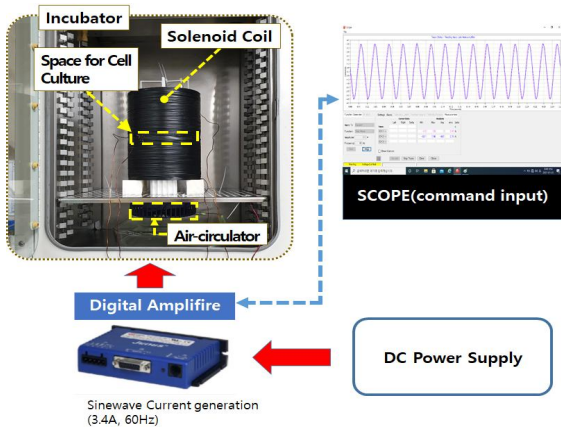


Fig. 3. Test equipment system for cell culture according to ELF-EMF environment

ELF-EMF 노출에 따른 세포의 영향을 확인하기 위해 Table 1에 제시한 규격에 맞춰 Fig. 3과 같이 시험 장치를 개발하였다. 개발된 장치는 세포를 배양하는 Incubator안에 설치 될 수 있도록 제작 설치하였다. 60

Hz 전류를 입력하기 위해 1 kW까지 투입이 가능한 Digital Amplifier (Junus, Copley controls Co., Ma, USA)가 사용되었으며, Solenoid 코일을 통해 전자기장이 최대 10 mT까지 발생시킬 수 있도록 설계하였다.

구축된 ELF-EMF 시스템이 원래 설계안대로 자속밀도가 발생되는지 확인하기 위해 Fig. 4와 같이 60 Hz의 전류세기별 입력 값에 따른 전자기장 출력 값이 도출되는지 확인을 위한 전자기장 모델링 수치해석을 수행하였다.

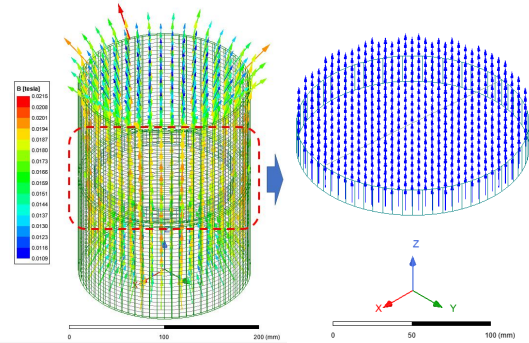


Fig. 4. Numerical Analysis of ELF-EMF

수치해석 결과 전류 증가에 따라 자속밀도는 선형적으로 증가하는 것으로 계산되었다.

다음은 ELF-EMF 시스템에서 실제 발생하는 자속밀도를 가우스메타 (Model VGM, made in USA)로 측정하고 수치해석으로 도출된 결과 값과 비교하여 Fig. 5와 같이 제시하였다.

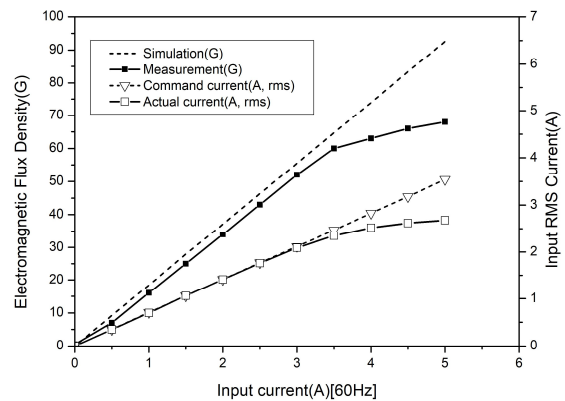


Fig. 5. The relation between magnetic flux density and intensity of current

Fig. 5 결과와 같이 입력 전류 3.5 A (60 Hz)까지 출력자기장이 해석과 실측값이 선형적으로 추종됨에 따른 시스템에 대한 검증을 하였다. 다만, Fig. 5와 같이 3.5 A 이후 입력 전류 (Command current)와 동작 전류 (Actual current)의 RMS 값 차이로 인한 출력 자기장의 선형성이 유지되지 않는 구간은 장비의 한계로 인해 신

되성이 낮아지는 구간으로 판단된다. 결과를 통해 본 연구에서 사용하는 ELF-EMF시스템은 6 mT (60 Hz)까지 신뢰성 있는 시험에 활용할 수 있는 것을 확인하였다.

검증된 ELF-EMF 시스템이 3.5 A (60 Hz) 조건으로 동작하였을 때, 세포 배양을 위해 인큐베이터 내부에 설치된 솔레노이드 코일의 발열로 국부적 표면온도가 45°C 까지 상승하였다.

세포의 배양 적정온도 (37°C)를 유지시키고 전자과가 세포에 미치는 영향만을 규명할 수 있도록, 코일로부터 발생하는 열을 차단하기 위해 Fig. 6과 같이 Cell culture plate 거치대를 기존 (a)에서 (b)로 변경하여 제작·설치하고, 공기순환장치(Air-circulator)를 설치 적용하여 세포가 일정온도 (37°C)를 유지하며 배양될 수 있

도록 하였다.

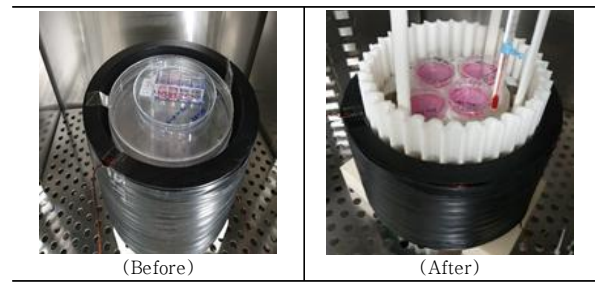


Fig. 6. Change for insulation effect of cell culture plate

### 3.2 ELF-EMF 노출이 세포스트레스 유도과립 형성에 미치는 영향 확인

본 연구에서는 면역 형광 현미경 분석을 통해 ELF-EMF

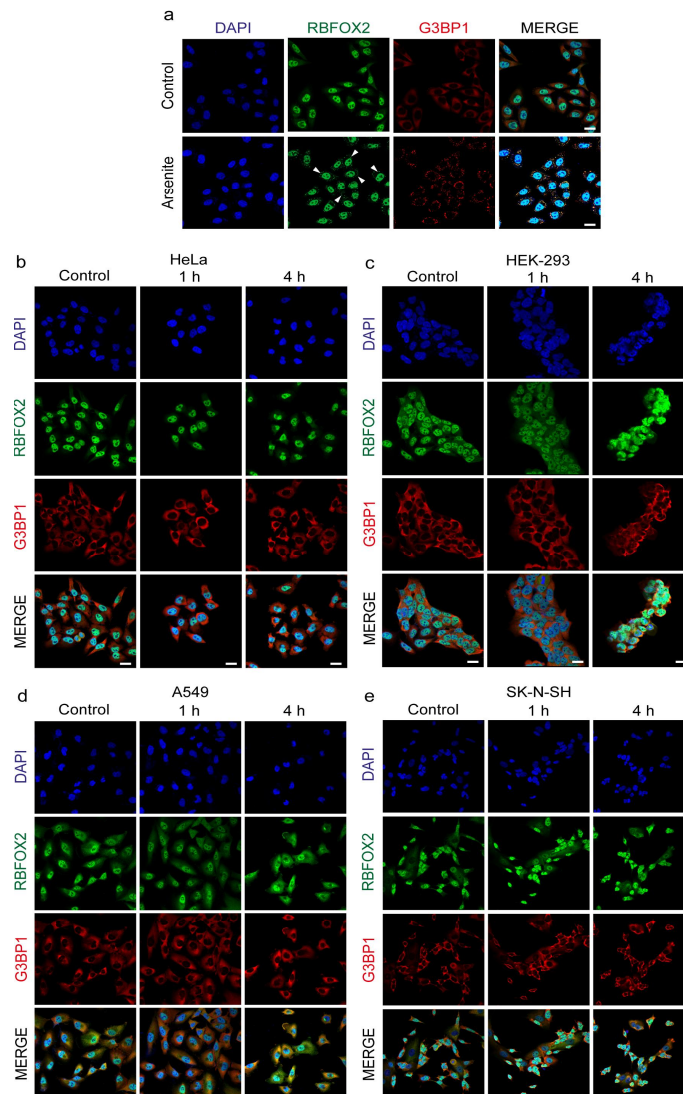


Fig. 7. ELF-EMF exposure has no effect on stress granules formation. a HeLa cells were treated with 100  $\mu$ M arsenite for 1 h. b-e Cells were incubated with ELF-EMF (3.5 A, 60 Hz) for indicated time. Immunofluorescence images of G3BP1 (red) and RBFOX2 (green) were visualized. DAPI (blue) was used for nuclear staining. Scale bar 20  $\mu$ m.



(3.5 A, 60 Hz)에 노출시킨 세포가 세포질에 SG을 형성할 정도로 어떠한 영향을 받았는지 확인하였다. 세포가 외부 스트레스의 상황에 노출되면 세포질에 SG maker로 알려진 G3BP1 단백질과 스트레스 상황에서 granule의 형태로 보인다고 알려져 있는 RBFOX2 단백질을 면역형광 현미경 분석을 통해서 granule의 형태를 시각적으로 확인할 수 있다.

세포질에 granule을 형성하는데 있어서 stress granule을 유도하는 물질로 알려진 arsenite를 양성대조군으로 사용하여 실험의 신뢰성을 검증하였다 (Fig. 7a)[13]. 다양한 조직 기원의 세포주인 HeLa (자궁경부), HEK-293 (신장), A549 (폐), SK-N-SH (신경) 세포들을 ELF-EMF에 노출시켰다. 그 결과 세포질에 RBFOX2, G3BP1 단백질이 granule의 형태로 관찰되지 않았으며 이러한 결과들은 본 실험 조건에서의 ELF-EMF는 stress granule 형성을 유도하지 않는다는 것을 말해준다 (Fig. 7b-d).

### 3.3 ELF-EMF 노출이 세포주기에 미치는 영향 확인

본 연구에서는 고자기장 환경에서 세포주기에 미치는 영향을 알아보려고 하였다. 앞선 타 논문에서는 노출 세기가 통상 100  $\mu$ T-2.5 mT 로 비교적 저자기장 환경에서의 세포주기 영향을 확인하였으며, 실제 인체에 노출되는 자기장 세기는 6 mT 로 고자기장 환경에서의 세포주기 영향을 확인하는데 의의가 있다. 세포주기의 변화의 기준은 다양한 암세포에서 정상세포와는 달리 G1기 및 G2기의 checkpoint에 의한 정상적인 세포주기 조절에서 벗어나 비정상적으로 무한 증식이 일어난다는 것이다[21].

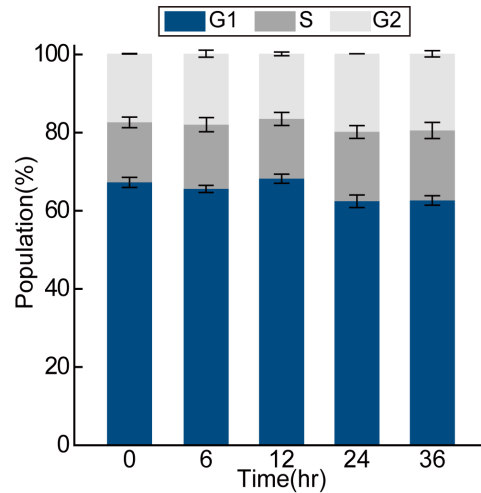


Fig. 8. ELF-EMF (3.5 A, 60 Hz) exposure has no effect on cell cycle. HeLa cells were incubated with ELF-EMF indicated time, and collected and analyzed PI stained DNA content using flow cytometry. Mean values  $\pm$  SD (error bars) are shown for three independent experiments.

HeLa 세포에 ELF-EMF (3.5 A, 60 Hz)를 시간별로 (6, 12, 24, 36 h) 노출시킨 후 PI 염색을 통하여 세포주기의 변화를 Flow cytometry로 분석하였다. Flow cytometer 분석을 통해 세포주기를 측정한 결과 보이는 바와 같이 ELF-EMF 노출 유무에 관계없이 세포주기 G1, G2, S기의 비율이 변하지 않는 점을 통해서 본 실험 조건에서의 ELF-EMF는 세포주기에 영향을 미치지 않는다는 것을 그래프 (Fig. 8)와 결과분석 표 (Table. 2)와 같이 확인하였다.

Table 2. Cell cycle progression analysis

h	G1	S	G2
0	67 $\pm$ 1.2	15 $\pm$ 1.3	17 $\pm$ 0.04
6	65 $\pm$ 0.9	16 $\pm$ 1.7	18 $\pm$ 0.8
12	68 $\pm$ 1.1	15 $\pm$ 1.6	16 $\pm$ 0.4
24	62 $\pm$ 1.5	17 $\pm$ 1.5	19 $\pm$ 0.08
36	62 $\pm$ 1.2	17 $\pm$ 2.0	19 $\pm$ 0.79

## 4. 고찰 및 결론

ELF-EMF의 유해성 논란에 있어 ICNIRP의 권고 기준은 단기 노출에 대한 기준이며, 다양한 장기노출 시간에 대한 기준은 아직 국내외에 제시된 바는 없다. 또한 전자파가 인체에 미치는 영향을 확인하기 위한 동물 및 세포를 대상으로 하는 대부분의 연구에서 시험 조건들로

제시한 전자파 노출은 저자기장 세기로 수행한 것으로 조사되었다.

본 연구와 유사한 시스템으로 성인 쥐를 대상으로 ELF-EMF를 지속적으로 노출시켜 남성 생식기의 영향을 평가하기 위한 선행연구와 본 연구결과를 비교 하였다. 선행연구는 Solenoid 내부에 0.5 mT (50 Hz) 노출시킨 쥐와 노출되지 않은 쥐에 대한 대조군 비교 연구를 실시 하였으며, 대조군의 체 질량과 고환의 질량 변화 여부를 통해 전자파가 미치는 영향을 관찰 하였다. 해당연구는 낮은 자기장 노출과 대조군의 비교를 통한 유해성을 평가하였다[19]. 본 연구에서는 ELF-EMF 시스템으로 세포에 자기장을 노출시켜 SGs의 형성과 세포주기 분석을 통해 유해성을 평가하는 방식을 적용하였으며, 세포에 자기장을 노출시켜 SGs의 형성을 확인하는 연구는 ELF-EMF의 영향에 대한 새로운 평가방식으로 적용되었다.

본 연구에서는 ELF-EMF 발생 환경에서 인체에 미치는 영향을 확인하기 위해 실제 고압 송전라인에서 발생할 수 있는 자기장 세기를 발생시킬 수 있는 ELF-EMF 시스템을 개발 구축하고, 노출 시간의 빈도를 다양하게 하여 세포의 SGs 형성과 세포주기 영향 분석으로 생물학적 유해성을 평가하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 다양한 세포를 외부 스트레스 매개인 ELF-EMF (3.5 A, 60 Hz)에 노출시켜 세포질에 SGs 형성 여부를 평가한 결과, 세포질에 RBFOX2, G3BP1 단백질이 granule의 형태로 관찰되지 않았으며 이러한 결과들은 본 실험 조건에서의 ELF-EMF는 stress granule 형성을 유도하지 않는다는 것을 확인하였다.
2. ELF-EMF 노출에 따른 세포주기의 영향성을 분석한 결과 세포주기 G1, G2, S기의 비율이 변하지 않았으며, 본 실험 조건에서의 ELF-EMF는 세포주기에 별다른 영향을 미치지 않는다는 것을 확인하였다.

결론적으로 최대 36 hr 그리고 6 mT 고자기장 세기의 노출은 세포스트레스 유도과립의 형성 및 세포 분열 주기에 영향을 주지 않았으며, 이러한 결과들은 향후 극저주파 고자기장에 대한 생물학적 유해성 판단을 위한 중요한 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

## REFERENCES

- [1] WHO. (2007). Extremely low frequency fields. *Environmental Health Criteria 238(WHO)*, ISBN 978 92 4 157238 5.
- [2] S. Shepherd<sup>1</sup>, M. A. P. Lima<sup>2</sup>, E. E. Oliveira<sup>3</sup>, S. M. Sharkh<sup>4</sup>, C. W. Jackson<sup>1</sup> & P. L. Newland. (2018). Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields impair the Cognitive and Motor Abilities of Honey Bees. *Scientific Reports*, 8, Article number: 7932.
- [3] NHMRC. (1989). INTERIM GUIDELINES ON LIMITS OF EXPOSURE TO 50/60 Hz ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS. *Radiation health series*, 30.
- [4] Jolanta Kliukiene MD Tore Tynes MD, PhD Jan I. Martinsen Karl G. Blaasaas MSc Aage Andersen. (1999). Incidence of breast cancer in a Norwegian cohort of women with potential workplace exposure to 50 Hz magnetic fields. *American journal of industrial medicine*, 36, 147-154. DOI: 10.1002 / (sici) 1097-0274
- [5] E. van Wijngaarden, D. Savitz, R. Kleckner, J. Cai, and D. Loomis. (2000). Exposure to electromagnetic fields and suicide among electric utility workers: a nested case-control study. *Occup Environ Med*, 57(4), 258-263. DOI : 10.1136 / ewjm.173.2.94
- [6] Kabat-Zinn, J. (2003). Mindfulness-Based Interventions in Context: Past, Present, and Future. *Clinical Psychology: Science and Practice*, 10, 144-156. DOI: 10.1093/clipsy.bpg016
- [7] K. H. Park, Y. H. Ahn, and Tai-Jeon Kim. (2005). Health Status of Electric Utility Workers Exposed to Extremely Low Frequency Electromagnetic Field (ELF-EMF). *The Korean Society for Clinical Laboratory Science*, 37(3), 220-227.
- [8] Minder, C. E.; Pfluger, D. H. (2001). Minder and Pfluger Respond to "Electromagnetic Fields and Cancer in Railway Workers" by Savitz. *American journal of epidemiology*, 153(9), 839-840. DOI: 10.1093/aje/153.9.839
- [9] N. Bernabò, E. Tettamanti, M. G. Pistilli et al., . (2007). Effects of 50 Hz extremely low frequency magnetic field on the morphology and function of boar spermatozoa capacitated in vitro. *Theriogenology*, 67(4), 801-815. DOI: 10.1016 / j.theriogenology.2006.10.014
- [10] B. M. Tenorio, G. C. Jimenez, R. N. Morais, S. M. Torres, R. Albuquerque Nogueira, and V. A. Silva Junior. (2011). Testicular development evaluation in rats exposed to 60 Hz and 1 mT electromagnetic field. *Journal of Applied Toxicology*, 31(3), 223-230. DOI: 10.1002 / jat.1584
- [11] P. Solek, L. Majchrowicz, and M. Koziorowski. (2018). Aloe arborescens juice prevents EMF-induced oxidative stress and thus protects from pathophysiology in the male reproductive system in vitro. *Environmental Research*, 166, 141-149. DOI: 10.1016 / j.envres.2018.05.035

[12] Choi, S., et al. (2019). "Rbfox2 dissociation from stress granules suppresses cancer progression." *Experimental & molecular medicine* 51(4): 1-12. DOI: 10.1038 / s12276-019-0246-y

[13] Park, C., et al. (2017). "Stress granules contain Rbfox2 with cell cycle-related mRNAs." *Scientific Reports* 7, Article number: 11211

[14] Li, X., et al. (2012). "Effects of 50 Hz pulsed electromagnetic fields on the growth and cell cycle arrest of mesenchymal stem cells: an in vitro study." *Electromagnetic biology and medicine* 31(4): 356-364. DOI : 10.3109 / 15368378.2012.662194

[15] Deadman JE. (1996). Exposure to 60 Hz magnetic and electric fields at a canadian electric utility. *Scand J work Envior Health*, 22, 415-424  
DOI : 10.5271/sjweh.162

[16] C. E. Minder, D. H. Pfluger. (2001). Leukemia, brain tumors, and exposure to extremely low frequency electromagnetic fields in Swiss railway employees. *Am J Epidemiol* 153: 825-835.  
DOI : 10.1093/aje/153.9.825

[17] H. W. Cho et al. (2016). Pulsed Electromagnetic Fields Stimulate Cellular Proliferation in Different Types of Cells, *IEEE Transactions on magnetics*, 52(7).  
DOI: 10.1109/TMAG.2016.2520980

[18] M. N. O. Sadiku. (2007). *Elements of Electro-magnetics*. London, U.K. : Oxford Univ. Press.

[19] W. Duan, C Liu, H. Wu, C. Chen, T. Zhang, P. Gao, X. Luo, Z. Yu, Z. Zhou. (2014). Effects of exposure to extremely low frequency magnetic fields on spermatogenesis in adult rats. *Bioelectromagnetics*. 35(1), 58-69.  
DOI: 10.1002/bem.21816

[20] K. T. Lim, J. Hexiu, J. H. Kim, H. Seonwoo, W. J. Cho, P. H. Choung, J. H. Chung. (2013). Effects of Electromagnetic Fields on Osteogenesis of Human Alveolar Bone-Derived Mesenchymal Stem Cells. *BioMed Research International*, 2013, Article ID 296019.  
DOI: 10.1155/2013/296019

[21] Hartwell LH, Kastan MB. (1994). *Cell cycle control and cancer*. Science 266: 1821-1828.

강 흥 식(Kang, Heung Sik)

[정회원]



- 2001년 : 숭실대학교 기계공학과 (학사)
- 2003년 : 충남대학교 기계공학과 석사
- 2013년 : 충남대학교 메카트로닉스공학과 박사수료
- 관심분야 : 전자기장
- E-Mail : linctm@cnu.ac.kr

이 성 표(Lee, Seong Pyo)

[학부회원]



- 2021년 : 충남대학교 생화학과 (학사)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 생화학 석사
- 관심분야 : 생화학
- E-Mail : dltjdvy7@naver.com

노 명 규(Noh Myung Gyu)

[정회원]



- 1986년 : 서울대학교 기계설계공학과 (학사)
- 1988년 : 서울대학교 계설계공학과 석사
- 1996년 : 미국 University of Virginia 박사
- 1996년 ~ 1999년 미국 University of Iowa 대학병원 연구원
- 1999년 9월 ~ 현재 : 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수
- 관심분야 : 전자장 해석 및 제어
- E-Mail : mnoh@cnu.ac.kr

김 기 정(Kim, Ki-Jung)

[정회원]



- 2009년 : 충남대학교 메카트로닉스공과 (학사)
- 2011년 : 충남대학교 메카트로닉스공과 석사
- 2014년 : 충남대학교 메카트로닉스공과 박사
- 2018년 3월 ~ 현재 : 두원공과대학교 스마트자동차과 교수
- 관심분야 : 의공학, 안전공학
- E-Mail : kimkj@doowon.ac.kr

김 기 광(Kim, Keekwang)

[정회원]



- 2000년 : 충남대학교 생화학과 (학사)
- 2003년 : 충남대학교 생화학 석사
- 2007년 : 충남대학교 생화학 석사
- 2014년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 생화학 교수
- 관심분야 : 생화학
- E-Mail : kimkk@cnu.ac.kr