

전자장의 위해성평가 방법

연세의대 예방의학교실
신 등 천 교수

1. 서 언

최근의 환경문제는 과거에 비하여 관심의 대상이 되는 환경요인과 건강장애 사이에 뚜렷한 상관성을 밝히기가 어려운 특징이 있다. 요즈음 환경오염문제로 대두되고 있는 전자장(electric and magnetic fields: 이하 EMFs), 다이옥신(dioxins), 내분비계 장애물질(endocrine disruptors)과 염소 소독부산물(disinfection byproducts) 등과 같은 일련의 관심사들은 국민의 환경오염에 대한 의식수준에 비하여 원 인적 상관성을 확증할 만한 연구결과의 부족이나 불확실성 때문에 여러 분야에서의 매우 다양한 의견들이 정리되지 못한 상태에서 제시되고 있는 실정이다.

최근 반도체 기술의 발달과 아울러 전자 및 전자파 관련기술이 발달하여 가정이나 생활주변 어디에서나 전기·전자제품으로부터 발생하는 교류의 전자기장에 노출되고 송·배전선과 같은 고압선로나 변전소 등에서도 전자파에 노출될 수 있다. 한 순간도 전기 없이는 생활할 수 없을 정도로 전기기구 및 시설은 일반화되어 있어 지난 20 여년간 대중 및 과학자들은 EMFs 노출과 인체건강영향 사이의 가능한 상관성에 관심을 보여왔다.

하지만 EMFs와 인체영향간에 뚜렷한 상관성이 밝혀져 있지 않는 현 시점에서 대부분의 학자들의 의견은 좀 더 연구가 필요하다는데 동의하고 있다. 현재 세계적으로 27개국에서 약 200 여개의 연구가 진행중이거나 계획단계에 있으며 이들 연구들중 암발생에 초점을 맞춘 연구도 상당수 진행되고 있는 실정이다. 우리 나라에서도 이에 대한 대책들이 학계나 일반 시민들 사이에서 논의되고 있으며 정부에서도 관심을 갖고 여러 가지 방안들을 수립하고자 하는 것은 바람직한 추세라 할 수 있다.

이 글에서는 EMFs의 유해영향에 대한 확실한 증거가 부족하기 때문에 이러한 유해영향을 평가하기 위한 가장 합리적인 방법인 위해성 평가(risk assessment) 방법의 적용에 필요한 여러 가지 조건들을 살펴보고자 한다.

2. 전자장의 노출

우선 EMFs의 정의와 노출형태를 간단히 살펴 보면, EMFs란 모든 전기관련 기구에서 발생하는 무형의 힘이며 전계와 자계로 나누어진다. 전계나 자계 모두 전하에 의해 형성되며 이 때 각 전하에 가해지는 전계와 자계 힘을 표시한 것이 그림 1과 2이다. 전계와 자계는 서로 상이한 물리적 특성을 갖고 있으며 이러한 특성의 차이로 인해 유발할 수 있는 건강 또는 생물학적 영향에 차이가 있을 수 있다. 전기장은 전도체의 특성에 따라 세기가 약해지거나 절연되는 특성이 있는 반면, 자기장은 거의 모든 물질을 통과할 수 있으며 쉽게 절연되지 않는다. 전기장이나 자기장 모두 발생원으로부터 거리가 멀어질수록 세기가 약해지는 공통점이 있다.

이들 전자장의 강도는 전계측정기나 자계 측정기라 불리는 계기로 측정하고 전계의 단위는 단위 길이당 전압으로 표기하여 V/m 로 표시하며 자장의 세기는 G(gauss)와 T(tesla)를 사용한다. 1 T는 10,000 G에 해당하는 단위이다. 이외에도 자계의 세기는 mA/m 란 단위로 표기하는데 1 mG = 80

mA/m 와 같다.

인간생활에 필수적인 전기를 생산하거나 공급 또는 소비하는 모든 과정에서 필연적으로 전기장과 자기장이 발생된다. 이런 이유로 하루 중 오랜 시간을 전기기구 및 설비를 접해야 하는 업종의 근로자들뿐만 아니라 대부분의 일반인까지도 크던 작던 간에 전자기장에 노출되고 있는 실정이다. 전자기장은 극저주파, 저주파와 고주파로 나누어지는데, 저주파와 고주파의 경우는 인체내에서 생리·화학적 영향을 일으킬 정도로 충분한 에너지를 포함하고 있는 것으로 밝혀져 있다. 일반인들의 주요한 관심사항은 극저주파(3-3,000 Hz)을 대상으로 하게 되는데 이 주파수 대역으로 고압선로를 비롯하여 가정용 전기선로(60 Hz)에서 방출되는 전자장을 들 수 있으며 일상 생활환경에서 노출될 수 있는 경우로서 산업용 전기기구와 사무용품 또는 가정용 전기제품 그리고 지하철을 비롯한 전동차 등에서 발생하는 전자장을 포함하고 있다.

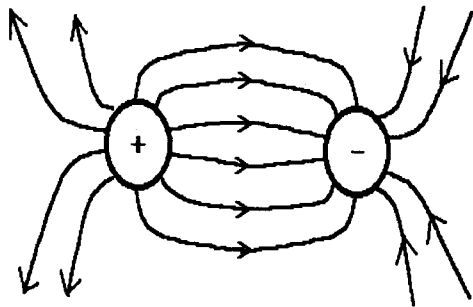


그림 1. 양전하와 음전하 사이의 전기장

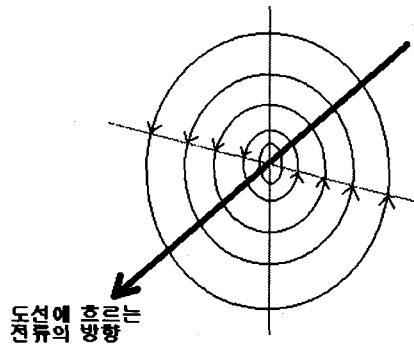


그림 2. 전류의 방향과 전계의 방향

3. 인체건강연구

질병과 환경요인과의 연관성을 평가하기 위해서는 관심 있는 질병이나 건강장애에 대한 조사자료를 확보하여야 함과 동시에 의심되는 환경요인으로부터 폭로되는 노출량의 정확한 평가가 수행되어야 한다. 기존의 전통적인 보건학 연구가 질병으로부터 연구의 틀과 범위 등을 개발한데 반하여 근래의 환경보건연구에서는 환경요인 및 이에 대한 평가의 질에 따라 연구의 방향과 결과 해석의 범위가 결정된다. 그런 점에서 환경관련 연구에서 궁극적으로 중요시되는 분야가 환경노출 평가이다. 전자파의 건강영향과 관련하여 신뢰성과 타당도를 지니는 인체노출평가가 연구의 질 향상에 큰 영향을 끼치게 된다. 사람들은 항상 누구나 자연적인 조건 또는 인위적인 환경에 노출되어 여러 형태의 방사선에 일정량 폭로되고 있기 때문에 방사선은 환경보건 분야에 있어서 주요한 물리적 인자로서 산업장 또는 일반 환경 중에서 수시로 측정되어지는 중요한 대상이다.

일반인들에게 주요한 관심의 초점은 전자파 노출로 인한 암발생과 관련이 있으며, 이와 같은 경향은 크게 작업장폭로 또는 일반 거주환경과 관련된 역학연구와 어린아이를 대상으로 한 역학연구 결과를 통하여 상관성이 제안된 뒤로 널리 알려 졌다. 그러나 일반적인 역학연구가 그렇듯이 대부분의 관련 연구가 생물학적 이론이나 근거가 미미하기 때문에 인과성 확인이 매우 어렵다. 인과성 확인을 위해 고려해야 할 사항은 표 1과 같다.

표 1. 인과성 검증을 위한 고려사항과 EMFs 연구결과

Strength of association	- 강도는 약함 - 최근의 meta-analysis 결과를 보면 10-20% 높은 risk를 보임 (Kheifet et al., 1995)
Consistency	- 확신을 가지지 못함 - EMFs 노출과 여러 cancer 들과의 관계 불일치
Dose-Response	- 불명확 - 연구결과가 적다
Biological plausibility	- 불명확
Reliability exposure information	- 정확한 노출정보가 부족 - 재현성 부족

극저주파 전자기장의 경우는 인체에 비교적 안전한 것으로 알려졌으나 1979년 Wertheimer와 Leeper에 의하여 고압 송전선에서 발생하는 전자기장과 송전선이 지나가는 지역근처에서 거주하는 어린이 암 발생과의 연관성이 제기된 후 극저주파 전자기장에 장기적으로 노출되었을 때의 건강영향에 대한 많은 연구와 관심이 이루어져 왔다. Wertheimer 등은 전자장 노출의 세기를 독자적인 분류법을 적용하여 각 연구 대상을 나누어 전류가 많이 흐르는 배전선과 변전소 가까이 거주하는 어린이들이 그렇지 않은 지역에서보다 소아백혈병이 2.98배, 뇌종양이 2.4배, 소아암 전체로는 2.25배 증가함을 보고하였다. 그 후 1987년 Savitz 등이 Wertheimer 등의 연구와 비슷한 결과를 보고하였으며 이때 전기장보다는 자기장에 대한 의한 위험성을 강조하여 제기하였다. 이후 유럽국가중에서 스웨덴을 비롯하여 덴마크와 핀란드에서 대규모의 역학조사가 수행되었고, 특히 스웨덴에서 있었던 역학조사에서는 대략 2~3 mG 이상의 노출로 소아백혈병이나 성인의 백혈병이 증가되었던 것으로 나타났다. 이를 계기로 2~3 mG를 기준으로 어린이 시설의 이전과 송전선의 철거의 필요성이 제기되었고 이에 대한 규제안이 마련되기도 하였다.

이렇게 전자장이 인체에 미치는 영향에 대한 고려는 우선 교류 전자장에 폭로 될 경우 정도가 약하지만 인체나 실험 동물체에 유도전류를 발생한다는 연구결과에서 비롯된다. 그러나 실험실에서 이루어진 연구결과를 보면 일반적으로 60Hz 전자장에 의해 유도된 전류의 경우 오히려 신체내 전류에 비해 세기가 약한 것으로 나타났으며, 이러한 이유로 인하여 극저주파 전자장의 인체영향 가능성에 회의적인 시각을 갖는 것도 사실이다. 그러나 인체의 다양성과 복잡성을 고려할 때 비록 바탕수준 이하의 외부 자극(전자장을 포함하여)에도 민감하게 반응하는 경우나 이러한 인구집단이 존재할 가능성을 배제할 수는 없을 것이다. 이를 뒷받침하듯 지금까지 수행되었던 여러 연구결과들을 보면 전기장에 폭로되었을 때 건강장애가 유발될 수 있다는 심증을 갖게 한다. 이들 연구들에서 전자장 폭로로 인하여 유발될 수 있는 건강장애로서 생식기능이나 면역체계의 변화와 행동장애 등의 건강장애와 심지어 여러 형태의 암 발생을 제시하고 있다. 하지만 저농도로 장시간 환경 중의 전자장에 폭로된 경우와 위해한 건강장애 발생간의 타당하고 신뢰성 있는 발생기전에 대한 역학연구를 비롯하여 실험실내에서의 인체나 동물 및 세포 실험에서도 아직 확정적인 결과를 제시하지 못하고 있다.

전자장의 발암 가능성 외에도 태아를 비롯한 일반적인 건강장애에 대한 여러 보고가 있다. 이중에

서 특히 산모의 유산과 전기선이나 전기담요, 컴퓨터 모니터와 같은 영상화면단말기 사용의 연관성이 관찰된 바 있다. 그러나 유산이외의 태아손상과 같은 다른 영향은 관찰되지 않고 있다. 또 다른 연구에서는 노출과 자살을 또는 우울증의 유발과 상관성이 있다고 보고하였고, 전자장에 보다 민감한 반응을 나타내는 사람의 경우 'Electrosensitivity'와 같은 알레르기 반응을 경험하였다는 임상보고도 있다. 최근에는 Alzheimer 병과 전자파노출의 상관성을 조심스럽게 제시하는 연구들도 나오고 있다. 노출에 대한 주요한 생물학적 영향으로 고려되고 있는 것이 송과체의 기능, 특히 멜라토닌 분비 억제와 관련된 것으로 전자장의 인체 건강영향에 중요한 가설을 제기하고 있다. 전자장의 영향을 받으면 멜라토닌의 양이 감소되는 것으로 대부분의 연구가 제시하고 있으며, 이로 인해 정상적인 생활 또는 생리적 리듬에 영향을 미치고 더욱이 멜라토닌에 의해 조절되는 것으로 알려진 암세포 성장의 억제가 영향을 받을 수 있다는 이론을 제기함으로써 전자장 노출과 암 발생과의 상관성을 추측할 수 있도록 하고 있다.

4. 생물학적연구

언급되었듯이 전자기장 노출로 인한 건강영향평가에는 그 동안 수행되었던 많은 역학 연구 결과를 이용하는 것이 일반적이다. 그러나 기본적으로 거의 모든 역학연구에서 문제점으로 지적되고 있는 것이 전자기장 노출평가에 있어서의 불확실성과 평가방법의 일관성 부족이다. 따라서 이와 같은 문제점이 보완되어 통제된 환경에서 전자기장 노출의 영향평가를 할 수 있도록 하기 위하여 동물실험이나 세포실험 등이 제안되고 있다.

1) 세포수준에서의 연구

동물실험에 비하여 세포실험(*in vitro* studies)은 영양분이 도포된 배양기에 단일 세포나 조직세포를 배양시키면서 실행하는 연구이다. 따라서 동물실험에 비하여 보다 통제된 환경조성이 가능하며 그로 인하여 건강장애를 유발하는 기전에 대한 이론을 밝히는데 용이한 연구설계인 것이다. 그러나 세포실험이 갖는 가장 주요한 제한점은 역시 결과의 외삽필요성에 있다. 세포실험 결과를 생명체 또는 인간을 포함한 동물개체에 적용하기 위하여서는 결과의 외삽과정이 필수적이며 이 때 고려할 수 있는 불확실성이 세포실험 결과의 이용을 제한하고 있다. 제일 먼저 제안되는 영향으로는 이온류나 단백질류의 세포막 통과에 영향을 미치는 것이다. 세포의 성장이나 생리활동에 있어서 칼슘이온(Ca^{+2})의 역할이 매우 크며 60 Hz 전자파에 노출되었을 때 칼슘이온의 방출량이 비선형적 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

전리방사선에 폭로된 경우 유전자의 합성이나 복사에 있어서의 염색체 이상이 관측되기도 하였다. 그러나 저주파 전자파의 경우는 DNA의 구조를 변형시킬 정도로 충분한 에너지를 갖지 못한 것으로 알려져 있다. 전자파 영향에 대한 연구로서 내분비 호르몬과 연관된 연구결과를 보면 아직 결정적으로 이렇다 할 만한 수준의 연구가 수행되어 있지 못하다. 그 이외에도 신경계 및 면역반응 등에 있어서 몇몇 연구가 진행되었으나 관심을 끌 만한 결과는 제시하지 못하고 있다. 따라서 대부분의 실험결과가 유의한 결과를 보이지 못하고 있으나 표 2에서는 명확하지는 않지만 가능한 영향에 대한 것을 정리하여 보여 준다.

표 2. 전자파 노출 영향평가의 세포 수준 실험 결과*

실험조건	결 과	비 고
칼슘이온의 방출	특정한 주파수·세기에서 방출에 영향을 받음	유의성이 명확하지는 않으나 전자파의 세기에 비례하여 영향이 커짐을 뜻하지는 않음
염색체 이상	염색체에 이상이 관찰되지 않음	암발생의 유발자(initiator)가 아님
DNA 합성 속도	합성 속도에 변화가 관찰	극저주파 교류자장은 세포반응 속도에 영향을 미칠 수 있음
RNA 전사	전사속도에 변화	초기세포반응의 속도에 영향을 미침

*자료원 : U.S. Congress, Office of Technology Assessment, Biological Effects of Power Frequency Electric & Magnetic Fields-Background Paper, OTA-BP-E-53, 1989, p 34.

이러한 영향에 대한 연구결과에는 실험실의 차이, 세포성장의 상태 또는 폭로되는 전자기장의 특성, 적용하는 실험실적 분석방법 등에 따라 일관성이 없음을 알 수 있다. 그러나 보다 발전된 실험기법이 적용되어 앞에서 수행되었던 결과를 확신시킬 수 있다면 전자기장이, 마치 세포 내에서의 자연적인 전기자극인 것처럼 세포막이나 세포 안에서 정상적인 신호체계에 작용하여 세포의 기능을 변화시키거나 암 촉진자에 의해 발현되는 것과 같은 교란작용을 한다는 것이 제안될 수 있을 것이다. 그러나 현재로서는 이러한 의문이나 가설에 대하여 확정적인 결론을 내릴 수는 없다.

2) 동물 및 임상실험

암발생 기전은 흔히 다단계계를 거치는 것으로 알려졌다. 우선 '초기자(initiators)'라고 불리는 요인이 정상 세포에 유전적인 변이를 일으켜서 암세포로 만들게 된 후, '촉진자(promoters)'라는 다른 요인이 초기 암세포의 분열을 촉진시킴으로써 암으로 진행시키고 동시에 정상적인 면역체계에 통제기능을 벗어나게 된다. 지금까지의 동물실험 결과는 전자기장의 암발생에 대한 기전이 초기자의 역할은 아닐 것이며 오히려 촉진자일 가능성에 대한 연구가 집중적으로 수행되고 있으나 이에 대한 연구결과로 일관성을 보이고 있지 않는 실정이다.

전자파노출에 대한 동물 및 임상실험의 결과는 전자파 자극에 대하여 실험동물의 발육이상, 불규칙한 심장박동, 눈의 자극, 뇌파 변화 등에 영향을 미치는 것으로 보고되었다. 전자파노출로 인한 영향 중에서 시각체계에 미치는 영향으로 섬광현상(Phosphene)과 같은 경험을 예로 들 수 있는데 이는 빛 이외의 자극에 의해 생기는 비정상적인 시각 현상으로 하얀빛이 깜박거리며 나타나는 시각적 장애이다. 위의 예 이외에도 쥐나 돼지와 같은 실험동물에서 기존 행동양식에 변화가 관찰되었으며 생식이나 발육에도 영향을 받는 것으로 보고되었다.

In vitro 연구에서 전자파노출이 세포내 이온물질의 이동에 영향을 미치는 것이 밝혀졌으나 genotoxicity에 대해서는 아직 보고되지 않고 있다. 결론적으로 동물연구에서는 행동양식이나 멜라토닌과 같은 호르몬 발생량 또는 농도, 눈의 자극 등에 영향을 끼치는 것이 일관되게 보고되고 있으나 생식

이나 성장 또는 암 발생에 있어서는 아직 확정적인 증거가 없어 일관된 연구결과를 보이지 않는다.

동물 및 임상실험에서 나타나는 결과 중에 최근 관심을 받고 있는 것이 전자기장에 폭로될 경우 멜라토닌이라는 호르몬의 분비가 억제된다는 것이다. 일반적으로 생체 내에서의 멜라토닌 분비의 리듬은 자연 상태에서 신체리듬을 조절하는 중요한 기능을 하는 것으로 밝혀졌다. 따라서 이러한 멜라토닌 분비의 영향으로 우울증이나 작업능률의 저하를 비롯하여 면역기능이나 신체의 암억제 기능을 포함하는 기본적인 생물학적 기능저하 등을 초래할 수 있다.

5. 위해성 평가

위해도(risk)란 화학물질과 같은 유해물질에 특정농도, 용량에 개인이나 집단이 노출되어 유해한 영향이 발생할 확률 또는 가능성을 말한다. 위해도는 안전(safety)과는 상반되는 개념으로 자발적 또는 비자발적인 위해도로 분류할 수 있다. 자발적 위해도란 흡연과 같이 개인이나 사회의 어떤 활동이 위해도를 갖고 있다는 사실을 미리 알고 받아들이는 것을 말하며 전자장의 경우는 작업장에서의 노출 등 직업과 관련된 노출이 이에 해당한다. 비자발적인 위해도는 일차적으로 사회나 국가가 관리하여야 할 위해도이기 때문에 중요성이 더 크다 할 수 있겠다.

위해도를 평가하기 위한 방법이 위해성 평가(risk assessment)인데 사람이 환경적인 위험(environment hazard)에 노출되었을 때 일어날 만한 영향을 정성 또는 정량적으로 측정하는 과정이다. 위해성 평가의 과정을 크게 위험성확인(hazard identification), 노출평가(exposure assessment), 용량-반응 평가(dose-response assessment) 및 위해도 결정(risk characterization)의 4단계로 이루어져 있다.

우선 첫 번째 단계인 위험성 확인과정은 위해성 평가를 하기 위한 초기의 정성단계로서 관심을 가지고 있는 오염요인 등(화학물질, 전자장)이 인체에 유해한 영향을 끼치는지 알기 위해 이용이 가능한 모든 자료를 수집하거나 또는 이를 위한 실험을 진행한다. 위험성 확인에 필요한 자료에는 역학자료, 독성자료, 인체를 대상으로 한 실험(controlled human experiments), *in vivo*, *in vitro* 실험 자료 등이 있으며 이러한 자료들이 발암, 비발암 물질에 대한 위험성 확인의 기본자료로 이용된다. 가장 신뢰할 수 있는 자료가 역학연구 자료이지만 다양한 연구가 작은 표본수와, 편견, chance 등에서 기인한 것일 수도 있기 때문에 암발생과 상관성에 대한 결론을 내리기는 어렵다.

두 번째 단계는 노출평가(exposure assessment)의 단계로서 사람이 환경매체에 노출이 되었을 때 노출의 정도와 빈도를 결정하고 추정하는 단계로서 환경중 농도나 생물학적인 감시자료(biological monitoring)을 토대로 추정한다. 그러나 전자장의 노출평가 과정에는 크게 두 가지 문제점이 있다. 전자장과 생물학적으로 관련이 있는 parameter를 아직 모른다는 것과 과거의 전자장 노출을 평가하기가 어렵다는 것이다. 즉 어떤 특정 주기, 강도의 전자장이 영향을 끼치는 것인지 아니면 간헐적으로 노출이 되는 것이 인체에 영향을 미치는 것인지에 대한 결정적인 특성을 모르기 때문에 연구에 제한을 받게 된다는 것이다. 그러나 만약 노출과 생물학적으로 연관성이 있는 parameter를 안다면 현재의 측정된 위험보다 높게 나타날 수도 있으며 또는 반대로 노출의 위험이 전혀 없다고 결론지어질지도 모른다.

다음으로 용량-반응(dose-response) 평가의 경우는 역학연구, 독성학적 연구를 이용해서 평가할 수 있으나 역학연구는 노출수준이 정량적이지 않고 end-point로 나타나는 질병의 영향이 희귀하고 환경

중에 여러 요인에 의해 발생하여 환경적 요인을 알기가 어렵기 때문에 한계를 가지고 있다. 따라서 용량, 환경조건을 통제할 수 있는 독성학적 연구를 이용한다. 대부분의 경우는 동물실험을 통해 계획된 연구설계에 따라 일정량씩 용량을 증가시키면서 나타나는 영향을 관찰하여 용량-반응의 상관관계를 본 다음 이러한 자료를 인체에 외삽하는 방법 등을 이용하여 추정한다. 그러나 전자장의 연구에서는 전자장의 세기를 변화시켜가면서 실험한 연구는 아직까지 없으며 노출시킨 그룹과 노출되지 않은 그룹간의 영향을 본 연구들은 소수가 있다. 아직까지는 용량-반응의 모델을 적용할 수 있는 단계는 아니다. 따라서 앞으로 진행될 연구들은 dose(전자장의 세기)의 개념을 고려하여 전자장의 세기를 증가시키면서 나타나는 건강 장애 영향을 관찰하여야 할 것이다. 물론 세포, 동물실험을 하는 경우 통제가 가능한 다른 조건들은 최대한 통제된 후에 실험을 수행하여야 함은 물론이다.

6. 결론

전자기장이 인간의 건강에 위대한 영향을 줄 것이라는 점에 대한 논의가 시작된 것은 20여년 전부터이다. 그러나 불행히도 지금까지 축적된 연구결과를 살펴볼 때 전자장 노출로 인한 인체건강장애 특히 암유발과 연관된 확정적 기전은 밝혀지지 않고 있다. 그럼에도 불구하고 여전히 관심의 대상이 되어 왔으며 미국, 일본, 유럽 등 외국에서는 전기장에 대한 권고 기준치를 정하여 운영하고 있고 그 근거로는 위해하다는 확정적 증거가 부족하지만 동시에 전자기장이 인체에 무해하다는 확정도 없다는 점을 들 수 있다. 이는 국민 보건과 건강증진에 대한 선진 정부의 적극적 자세를 반영한 것이라 할 수 있다.

우리 나라에서도 그간의 연구결과들을 면밀히 검토하고 소화해내어 바람직한 정책이 수립되어야 할 것이다.