

## 전리방사선 노출과 관리

정은교\* · 김갑배 · 송세욱

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

## Exposure Assessment and Management of Ionizing Radiation

Eun-Kyo Chung\* · Kab-Bae Kim · Se-Wook Song

Occupational Safety and Health Research Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency

### ABSTRACT

**Objectives:** To investigate safety and health management, conditions in factories or facilities handling radiation-generating devices and radioactive isotopes were reviewed in terms of regulations of radiation safety control in Korea. Radiation exposure levels generated at those facilities were directly measured and evaluated for establishing an effective safety and health management plan.

**Methods:** Government organizations with laws and systems of radiation safety and health were investigated and compared. There are three laws governing radiation-related employment such as occupational safety and health acts, nuclear safety acts, and medical service acts. We inspected 12 workplaces as research objects: four workplaces that manufacture and assemble semiconductor devices, three non-destructive inspection workplaces that perform inspections on radiation penetration, and five workplaces in textile and tire manufacturing. Monitoring of radiation exposure was performed through two methods. Spatial and surface monitoring using real-time radiation instruments was performed on each site handling radiation generating devices and radioactive isotopes in order to identify radiation leakage.

**Results:** According to the occupational safety and health act, there is no legal obligation to measure ionizing radiation and set dose limits. This can cause confusion in the application of the laws, because the scopes and contents are different from each other. Surface dose rates in radiation generating devices such as implanters, thickness gages and accelerators, which were registered according to nuclear safety acts, using surveymeters, and seven of 36 facilities(19.4%) exceeded the international standards for surface radiation dose of 10  $\mu$ Sv/hr.

**Conclusions:** The results showed that occupational health and safety acts require a separate provision for measuring and assessing the radiation exposure of workers performing radiation work. Like noise, ionizing radiation will also periodically be controlled by including it in the object factors of work-environment measurement.

**Key words:** Exposure, ionizing radiation, non-destructive testing, leukemia, semiconductor

### I. 서 론

산업위생분야에서 질병을 일으킬 수 있는 유해인자로 크게 세 가지 즉 물리적, 화학적 및 생물학적 인자로 분류할 수 있다. 이중 물리적인자의 발암성과 관련된 인자는 유일하게 전리방사선이다. 우리가 흔

히 말하는 방사선은 전리방사선을 의미한다. 방사선은 넓은 의미로 보면 입자 또는 파동이 공간을 전파하는 상태를 말하는데 여기서 입자란 그 크기가 원자의 크기보다 작아야 하며 공간이란 반드시 진공을 포함하여야 한다. 좁은 의미에서 방사선이란 원자의 핵이 붕괴할 때 발생하는 모든 원자를 말하며 크게

\*Corresponding author: Eun Kyo Chung, Tel: 052-703-0902, E-mail: jungek60@naver.com  
Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA, 400 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, 681-230  
Received: November 22, 2014, Revised: March 4 2015, Accepted: March 5, 2015

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

두 가지로 분류할 수 있는데 파형으로 된 전자파와 입자로 구성된 입자선을 들 수 있다. 전자파는 파의 성질과 동시에 입자로서의 역할도 하는 이중성을 가지고 있어 모든 전자파는 광자(Photon)라는 명칭을 사용하여 전자파 원자를  $E = h\nu$  ( $h$ :플랑크상수,  $\nu$ :주파수)로 표현하며 입자선은 원자를 구성하는 기본요소인 핵, 양성자, 중성자, 전자 등이 있고 입자선 원자는  $E = 1/2 m v^2$  ( $m$ :질량,  $v$ :전파속도)로 나타낸다. 또한, 방사선을 원자에 따라 분류하면 전리의 대상이 되는 물질을 공기로 볼 때 모든 방사선이 공기를 구성하고 있는 원자를 전리할 수 있는 원자를 갖는 방사선을 전리방사선, 공기원자를 전리할 능력이 없는 방사선을 비전리방사선이라 한다. 그리고 전리방사선도 전하의 유무에 따라 직접 및 간접 전리방사선으로 분류한다(Daniel, 1992; Kim, 2007).

전리방사선이 인체에 미치는 영향은 결정적 영향과 확률적 영향으로 나눌 수 있는데, 결정적 영향이라는 것은 특정 역치 이상의 피폭이 있어야만 이상이 생긴다는 개념으로 예를 들면 급성 방사선 증후군, 피부 손상, 불임, 백내장 등과 같이 특정 선량 이상 노출되어야만 반응이 나타나는 것을 말하며, 확률적 영향은 생식세포 이상에 의한 유전적 이상과 체세포 변이에 의한 발암으로 백혈병이 그 예가 될 것이다(Kim, 2006; UNSCEAR, 2010).

국내 방사선작업 근로자의 안전보건과 관련된 법규들은 고용노동부의 산업안전보건법, 미래창조과학부의 원자력안전법, 보건복지부의 의료법에 명시되어 있지만, 병원 등 의료기관에서 진단용 방사선을 취급하는 ‘방사선관계종사자’의 직업상 노출선량은 의료법 및 진단용 방사선발생장치의 안전관리에 관한 규칙에 따라 식품의약품안전처 식품의약품안전평가원 및 보건복지부 산하 질병관리본부(Centers for Disease Control and Prevention, Korea CDC)에서 관리하고 있고 진단용 X-선을 제외한 치료용 방사선발생장치 및 산업용으로 사용되는 방사선원을 취급하는 작업에서 직업상 노출되는 ‘방사선작업종사자’들의 노출관리는 원자력안전법에 따라 원자력안전위원회 및 한국원자력안전기술원(Korea Institute of Nuclear Safety, KINS) 등에서 관리하고 있다. 방사선작업종사자에 대한 건강진단에 대한 사항은 고용노동부의 산업안전보건법에 근거를 두고 있다(ICKL, 2014).

2012년 원자력안전연감에 따르면, 방사성동위원소 등을 이용하는 기관은 5,606개소이며, 이중 집중적인 규제대상인 허가기관은 1,337개소, 나머지 4,269개소가 신고기관이다. 방사선작업종사자는 원자력발전소 14,963명을 포함해 전체 42,226명으로 매년 증가추세에 있는 것으로 파악되었다. 또한 전체 평균선량은 1.59 밀리시버트(mSv)이고 비파괴검사업체가 3.43 mSv로 가장 높고 의료기관, 생산·판매업체, 원자력발전소 순으로 높았다(Nuclear Safety And Security Commission, 2013). 그런데, 의료기관의 진단용 방사선발생장치를 취급하는 종사자 62,935명을 포함하면 전체 방사선작업 종사자는 10만명이 넘는 것으로 조사되었다. 이것은 2010년 대비 44%이상 증가한 것이다(Korea CDC, 2013).

원자력안전법상 방사선량의 노출한도는 일반인의 경우 자연방사선과 의료방사선 선량을 제외하고 연간 내부와 외부 피폭의 합계가 1 mSv 이상을 초과하지 않도록 하고 있다. 원자력 발전소 등 방사선작업 종사자들은 연간 20 mSv(수시출입자의 경우 연간 12 mSv)를 초과하지 못하도록 규정하고 있다(ICRP, 2007; ICKL, 2014). 이것은 미국 ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists)에서 권고하는 5년간 평균 20 mSv를 초과하지 않되, 연간 최대 50 mSv 까지 허용할 수 있는 기준과 동일하다(ACGIH, 2014). 일반인들은 우주방사선 등 자연 상태에서 연간 2.4 mSv의 방사선량을 받고 있다. 치료를 목적으로 한 의료방사선의 경우 흉부엑스레이 1회 촬영에 0.1~0.3 mSv, 위 엑스레이는 5~19 mSv, CT(Computer tomography)촬영은 8~10 mSv가 조사된다. 또한, 고지대일수록 자연방사선에 대한 노출 정도가 더 크고 항공기에 탑승했을 때가 평지보다 방사선량에 더 많이 노출된다(UNSCEAR, 2010).

최근 선박내부의 손상여부에 대한 품질을 진단하기 위해 방사선을 이용한 비파괴검사작업을 수행한 근로자에게서 백혈병이 발생하였다(Lee et al., 2011; Nuclear Safety And Security Commission, 2012). 전리방사선에 의한 역학조사 의뢰건수는 증가하고 있지만, 업무상 질병으로 인정되는 사례는 적다(Kim, 2005).

왜 이러한 방사선 노출과 관련한 직업병 발생문제가 자주 제기되고 사회단체로부터 대책을 요구하고 있는지. 원자력안전법상의 방사선 안전관리규정이 모

든 분야에 적용되어 잘 관리되고 있는지 어떠한 문제점은 없는지 정확히 파악하여 보완할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 방사선의 안전보건 관련 국내의 법령 및 제도 현황 등을 조사하여 방사선작업 근로자를 보호하기 위한 제도적 개선 방안을 제시하고 산업장의 각종 방사선발생장치 등에서 발생하는 전리방사선의 노출특성을 평가하여 근로자를 보호하기 위한 작업환경관리 방안 마련을 위한 기초자료를 제공하는데 있다.

## II. 연구내용 및 방법

### 1. 방사선 관리제도

연구목적을 달성하기 위하여 방사선 발생장치 및 방사성동위원소 취급 사업장 근로자의 안전보건과 관련되어 법령이 제정된 미래창조과학부의 원자력안전법, 보건복지부의 진단용 방사선발생장치의 안전관리에 관한 규칙, 고용노동부의 산업안전보건법 등을 참고하여 각 법령 내용 중 2014년도를 기준으로 안전보건관리체계, 노출관리, 안전보건관리 등 상위규정을 비교 검토하였다. 그리고 국내 각 부처간 방사선 발생장치 및 방사성동위원소를 취급하는 근로자의 안전보건관리 측면에서 현행 법령 내용 등을 파악하고 논의가 필요한 사항에 대해 검토하였다.

### 2. 방사선 노출 및 평가

연구대상은 선박 건조 및 건설현장의 방사선을 이용한 비파괴검사작업 3개소, 반도체 Fab공장의 이온주입작업 3개소, 섬유 및 타이어 제조공장의 두께측정작업 3개소 및 가교(Crosslinking)작업 2개소, 반도체 조립공장의 검사작업 1개소 등 12개 공정을 대상으로 하였다. 방사선원의 종류 및 기기는 Table 1과 같이 방사선발생장치 238대, 방사성동위원소 27종에 대해 조사하였다. 비파괴검사작업에서 비파괴검사용 방사선투과조사는 기기안에 방사성동위원소(주로  $^{192}\text{Ir}$ )를 내장하고 있는 이동형 기기로 화학설비, 선박 구조물 및 각종 배관 등의 용접부 결함을 검사하는데 사용된다. 반도체 Fab공장의 이온주입작업은 임플란터를 사용하여 고진공상태에서 가스를 이온화시켜 적절한 량을 원하는 깊이만큼 넣는 작업이다. 타이어 제조공장의 재료압연공정은 특수처리된 철

(Steel) 또는 섬유코드의 양면에 얇은 고무 층을 입혀주는 공정으로 타이어 내부 철근(Steel cord) 및 안감 (Inner liner)에 대한 두께를 측정하기 위해 X-선발생장치와 방사성동위원소( $^{90}\text{Sr}$ ), 그리고 방사선 가속기를 사용한다. 또 섬유 제조공장의 제포공정에서는 가는 실을 일정 폭으로 균일하게 안착시키기 위해서 두께 측정게이지를 통과시키며 이때 방사성동위원소 ( $^{241}\text{Am}$ ,  $^{85}\text{Kr}$  등)를 이용한다. 반도체 조립공장에서는 반도체 소자를 몰딩접착하여 완성된 제품의 불량여부를 확인하는 검사공정에서 X-선 발생장치를 사용한다.

측정방법은 직독식 방사선량 측정기를 사용하여 방사선발생장치 등으로 부터 30 cm 거리에서 지역(공간) 선량률(Spatial dose rate)을 측정하였고, 방사선의 누출여부를 확인하기 위해 기기로부터 약 10 cm 거리에서 표면선량률(Radiation dose rate from surface)을 측정하였다. 그러나, 비파괴검사를 위한 방사선투과조사 시에는 노출선량 수준이 너무 높기 때문에 조사기 가까이 머무를 수 없다. 그래서 표면선량률 계산은 무의미하여 발생원으로부터 10 m정도 떨어진 지점에서 측정하였다. 직독식 측정장비는 반도체 공장의 이온주입 및 조립공정에 대해서는 환경방사선을 측정할 수 있는 Personal Portable Dose Rate and Survey Meter(Radiagem<sup>TM</sup> 2000, Canberra Industries, Inc., U.S.A.)를 사용하였고 저에너지 범위의 X-ray 측정을 위해서는 프로브(Probe)로 NaI(Tl) 섬광검출기를 장착한 SX-2R(X-Ray Features probe for Radiagem<sup>TM</sup>)를 이용하였다. 이 검출기는 신틸레이션 검출방식으로 X-ray와 저에너지  $\gamma$ -ray 측정에 탁월하다.

비파괴검사작업에 대한 방사선 측정기는 원거리 고준위 감마선 측정기(Model 78 Stretch Scope, Ludlum Measurements, Inc., USA)로 측정범위가 0.00  $\mu\text{Sv/hr}$  ~ 9999 Sv/hr(0.00  $\mu\text{R/hr}$  ~ 9999 R/hr)인 G-M 계수관 검출방식이다. 에너지 범위는(60 keV ~ 3 MeV)  $\pm 15\%$  이내이다(Chung et al., 2009). 두께측정 작업에 대해서는 범용의 서베이미터(Model 2241-2 RK Response Kit, Ludlum Measurements, Inc., USA)를 병행 사용하였다. 측정에 사용된 기기들은 표준과 학연구원 등으로부터 매년 검교정을 실시하고 있다.

노출수준에 대한 평가는 산업안전보건법상에 명시된 것이 없어 원자력안전법 및 하위규정에 근거한

**Table 1.** Types of radiation sources by process

| Category                     | Type        | Total | Process                |             |          |                       |                    |
|------------------------------|-------------|-------|------------------------|-------------|----------|-----------------------|--------------------|
|                              |             |       | Nondestructive testing | Fabrication | Assembly | Textile manufacturing | Tire manufacturing |
| Radiation generating devices | HE          | 26    | -                      | 26          | -        | -                     | -                  |
|                              | HC          | 63    | -                      | 63          | -        | -                     | -                  |
|                              | MC          | 56    | -                      | 56          | -        | -                     | -                  |
|                              | XRF         | 80    | 10                     | 54          | 16       | -                     | -                  |
|                              | Accelerator | 3     | -                      | -           | -        | -                     | 3                  |
|                              | Subtotal    | 238   | 20                     | 199         | 16       | -                     | 3                  |
| Radioisotopes                | Ir-192      | 6     | 6                      | -           | -        | -                     | -                  |
|                              | Sr-90       | 4     | -                      | -           | -        | -                     | 4                  |
|                              | Am-241      | 7     | -                      | 5           | -        | 2                     | -                  |
|                              | Kr-85       | 1     | -                      | -           | -        | 1                     | -                  |
|                              | Po-210      | 9     | -                      | 9           | -        | -                     | -                  |
|                              | Subtotal    | 27    | 6                      | 14          | 0        | 3                     | 4                  |

\* HE : High energy, HC : High current, MC : Medium current

규제 기준과 비교하여 평가하였다.

### III. 연구결과

#### 1. 방사선 관리제도

원자력안전법상 방사성동위원소 및 방사선발생장치에 대한 인허가 체계는 면제, 신고, 허가의 3가지로 구분된다(Information Center of Korea Laws, 2014). 면제는 해당 방사성동위원소의 수량 또는 농도가 낮거나 방사선발생장치의 용량이 적어서 방사선에 의한 위해도가 낮다고 보아 규제 대상에서 면제시킨 것을 말한다. 신고는 면제보다는 큰 위해도를 가지나 이 또한 안정성이 이미 확보된 사항으로서 안전규제의 필요성이 크지 않은 것을 말한다. 가속되는 방사선 하전입자의 최대에너지가 5 keV 이하의 방사선발생장치를 취급하는 경우, 방사선발생장치를 의료진단용으로 사용하는 경우(보건복지부 의료법에서 안전규제를 수행하기 때문에 제외) 방사선기기의 설계 승인 및 검사를 득한 장비로서 완전방호형인 방사선발생장치를 사용하는 경우에 규제면제에 해당한다.

국내 방사선의 안전보건관리 관련 규정에서 고용노동부는 허가, 신고기관에 관계없이 산업안전보건법에 준하여 방사선 취급근로자 전체를 대상으로 하

고 있으며 미래창조과학부에서는 원자력법에 준하여 원자력발전소 및 허가기관의 방사선작업종사자를 주요 대상으로 관리하고 있다. 보건복지부는 의료법상 진단용 방사선 발생장치의 안전관리에 관한 규칙에 준하여 신고기관(방사성동위원소 사용 시에는 허가기관이 됨)의 방사선 관계종사자를 대상으로 관리하고 있다(Table 2).

그리고 각 법령별 방사선에 대한 측정제도의 비교에서 산업안전보건법은 시행규칙 제93조 1항에 의한 방사선 취급근로자에 대한 측정 대상작업 등 구체적인 내용이 명시되어 있지 않은 반면, 원자력법은 시행규칙 제120조 1항과 2항에 측정장소 및 대상에 대해 명시하고 있다. 또한 의료법에는 진단용 방사선 발생장치의 안전관리에 관한 규칙 제4조 5항에 의거 방사선 관계종사자에게 열형광선량계(Thermoluminescent dosimeters, TLD)를 사용한 경우에는 3개월에 1회 이상 측정하며, 필름벤티 사용 시에는 1개월 마다 1회 이상 측정하도록 명시하고 있다.

#### 2. 방사선 노출선량

비파괴검사를 수행하는 방사선투과조사작업에서 지역노출선량률은 산술평균 17.5±24.8 μSv/h(범위 : 1.10~112.0 μSv/h)로 가장 높았다. 반도체공장 Fab라인의 이온임플란티에서 지역노출선량률(50~100 cm

**Table 2.** Comparison of safety and health system for radiation-related legislation

| Type of laws             | Occupational Safety and Health Act  | Nuclear Safety Act   | Medical Service Act  |
|--------------------------|---|--|--|
| Government relations     | Ministry of Employment and Labor  | Ministry of Science, ICT and Future Planning   | Ministry of Health and Welfare   |
| Object                   | Radiation handling workers  | Radiation workers employing nuclear power plants and permitting institution  | Radiation workers using a diagnosis radiation equipment  |
| Designation              | "   | Employees in radiation work  | Radiation-related workers  |
| Permission/ Registration | No classification   | Permitting institution   | Registration institution   |
| Dose management agency   | -   | Korea Information System on Occupational Exposure, KINS  | National Dose Registry, Korea CDC  |
| Education                | Radiation handling workers  | Employees in radiation work, Radiation safety manager  | Diagnostic safety officer  |
| Monitoring system        | * No periodic monitoring factors[Enforcement rule, article 93(1)]<br>* No obligation to measure | * Periodic monitoring factors[Enforcement rule, article 120(1)]<br>* Obligation to measure for worksite and object | * Monitoring for radiation-related workers using TLD (Thermoluminescent detector) or fimbadge, periodically [Enforcement rule, article 4(5)] |

**Table 3.** Spatial dose rates by jobs

| Job                    | Number of plants | Spatial dose rate(μSv/h) |      |      |      | Range (μSv/h) | >10 μSv/h <sup>†</sup> |
|------------------------|------------------|--------------------------|------|------|------|---------------|------------------------|
|                        |                  | AM                       | SD   | GM   | GSD  |               |                        |
| Nondestructive testing | 3                | 17.5                     | 24.8 | 9.4  | 2.8  | 1.10~112.0    | 3                      |
| Ion implanting         | 3                | 1.07                     | 2.53 | 0.15 | 6.49 | 0.01~13.32    | 2                      |
| Inspection             | 1                | 0.03                     | 1.02 | -    | -    | 0.01~0.05     | 0                      |
| Thickness measurement  | 3                | 1.27                     | 1.55 | 0.57 | 3.87 | 0.08~5.2      | 0                      |
| Crosslinking           | 2                | 3.46                     | 4.24 | 1.02 | 6.03 | 0.2~10.0      | 1                      |

\* AM(Arithmetic Mean), SD(Standard Deviation), GM(Geometric Mean), GSD(Geometric Standard Deviation)

<sup>†</sup> Number of >10 μSv/h

**Table 4.** Surface dose rates by radiation generating devices

| Radiation generating devices         | Number of devices | Surface dose rate(μSv/h) |       |      |      | Range (μSv/h) | >10 μSv/h |
|--------------------------------------|-------------------|--------------------------|-------|------|------|---------------|-----------|
|                                      |                   | AM                       | SD    | GM   | GSD  |               |           |
| Implanter*                           | 26                | 9.07                     | 15.33 | 2.31 | 6.47 | 0.04~96.3     | 4         |
| Thickness gage <sup>†</sup>          | 7                 | 4.87                     | 5.42  | 2.94 | 2.96 | 0.2~24.5      | 2         |
| Cockroft walton accelerator(EPS-500) | 3                 | 7.03                     | 10.57 | 2.92 | 3.69 | 1.1~30.0      | 1         |

\* High energy type

<sup>†</sup> Thickness gage with X-ray generating devices or radioisotopes(<sup>90</sup>Sr) in calender

\* AM(Arithmetic Mean), SD(Standard Deviation), GM(Geometric Mean), GSD(Geometric Standard Deviation)

거리에서)은 1.07±2.53 μSv/h(범위 : 0.01~13.32 μSv/h) [HE 임플란터 : 2.17 ± 3.48 μSv/h]이었고 반도체 조립라인에서는 0.03±1.02 μSv/h(범위 : 0.01~0.05 μSv/h)이었다. 섬유 및 타이어 제조공장의 두께측정작

업에서 1.27±1.55 μSv/h(범위 : 0.08~5.2 μSv/h), 가공 작업에서 3.46±4.24 μSv/h(범위 : 0.2~10.0 μSv/h) 이었다.

반도체공장 Fab라인의 고 에너지형(High energy

type) 임플란터에서 표면선량률은 산술평균으로  $9.07 \pm 15.33 \mu\text{Sv/h}$ (범위 :  $0.04 \sim 96.3 \mu\text{Sv/h}$ )이었고 반도체 조립 라인에서는 자연방사선수준( $<0.01 \mu\text{Sv/h}$ )이었다. 섬유 및 타이어제조공장의 두께측정작업에서 표면노출선량률은 산술평균으로  $4.87 \pm 5.42 \mu\text{Sv/h}$ (범위 :  $0.2 \sim 24.5 \mu\text{Sv/h}$ )이었고 가교작업에서 표면노출선량률은 산술평균으로  $7.03 \pm 10.57 \mu\text{Sv/h}$ (범위 :  $1.1 \sim 30.0 \mu\text{Sv/h}$ )이었다.

#### IV. 고 찰

방사선은 파동과 입자의 두 가지 양면적인 성질을 가지고 있어 어떤 때는 파동으로 때로는 입자로 간주한다. 예를 들어 전자파 방사선에서 파동의 특성을 강조할 때는  $\gamma$ 선, X선 등의 명칭을 사용하고 물질과의 상호작용을 설명하고자 할 때에는 입자적 성질을 강조해서 광자라는 개념을 사용한다(Herman, 1983). 산업안전보건기준에 관한 규칙 제8장 「방사선에 의한 건강장해의 예방」에서, 방사선이라 함은 전자파 또는 입자선 중 직접 또는 간접으로 공기를 전리하는 능력을 가진 것으로서 알파선, 중양자선, 양자선, 베타선 그 밖의 중하전 입자선, 중성자선, 감마선, 엑스선 및 5만 전자볼트 이상(엑스선발생장치의 경우 5천 전자볼트 이상)의 에너지를 가진 전자선을 말한다고 정의하고 있다(ICKL, 2014). 전자의 총 에너지[= 관전압(kVp) x 관전류(mA)]는 가해진 최대 관전압에 의해 결정되는데, 관전압을 올리면 발생하는 엑스선의 최대 에너지도 증가한다. 규칙에서 말하는 엑스선 발생장치의 경우 5천 전자볼트(5 keV)는 다음 두 방정식을 이용하여 최대관전압으로 표현할 수 있다.

$$E = h\nu = h(C/\lambda), \quad \lambda = 12.4 / \text{kVp}$$

여기서, E : 광에너지(Joules, J), h : 플랑크 상수( $6.626 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ ),  $\nu$  : 주파수( $\text{s}^{-1}$ ), C : 빛 속도( $C = 3.0 \times 10^8 \text{ m/sec} = \lambda\nu$ ),  $\lambda$  : 파장 ( $\text{nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ), kVp : 최대 관전압

예를 들어, 최대관전압이 50 kVp 이라면 엑스선관에서 발생하는 엑스선의 총 에너지는 관전류를 고려하지 않았을 때, 최소 5 keV에서 최대 50 keV까지 발생할 수 있다.

산업안전보건법 및 안전보건기준에 관한 규칙(제8장 방사선에 의한 건강장해의 예방)에서는 주로 관

리시설의 조건 및 일반적 작업관리 사항들을 명시하고 있다. 방사선취급 근로자들의 안전보건관리는 화학물질의 안전보건관리처럼 구체적이고 세부적으로 규정되어 있지 않다. 특히, 작업환경측정을 어떻게 실시해야하는지, 방사선 관리구역은 방사선량이 어느 정도 수준일 때 지정해야 하는지 구체적이지 못하다. 왜냐하면, 원자력안전법에서 구체적으로 제시되어 있다고 판단하기 때문이다. 현행 산업안전보건법 및 규칙에는 여러 유해인자에 대한 작업환경 측정 의무는 규정하고 있으나 방사선취급 근로자들에 대한 전리방사선 측정 의무는 구체적으로 명시된 조항이 없다(Kim KJ et al., 2009). 그러나 원자력안전법 시행규칙 제120조와 의료법의 「진단용 방사선발생장치의 안전관리에 관한 규칙」제4조에는 측정에 관한 의무사항 등이 명시되어 있다. 그러나 원자력안전법상 신고의 의무만 있는 최대관전압이 50 kVp 이상 170 kVp 이하인 방사선발생장치를 사용하는 신고사업장에 대해서는 최소한의 안전성을 입증하는 서류만 확인하기 때문에 구입시점에서는 완벽하다해도 사용하면서 문제가 있는지 확인이 어렵다는 데에 있다. 허가사업장의 경우에는 원자력안전법에 의거 한국원자력안전기술원에서 철저히 관리되고 있으므로 산업안전보건법에서 더 이상 관리할 필요가 없다고 생각되지만, 비파괴검사작업에 대한 안전보건관리는 공동 관리가 필요하다고 본다. 방사선노출로 인한 업무상질병 대부분이 이와 같은 작업에서 발생되기 때문이다. 도급작업시 동일한 장소에서 작업을 할 때 생기는 산업재해예방을 위해 이동식 방사선발생장치를 이용한 비파괴검사 업무가 상시 이루어지는 조선업, 건설업 등의 안전·보건조치 의무를 원도급업체가 감독하도록 산업안전보건법 시행규칙이 2014년 개정되었다(ICKL, 2014). 이것은 비파괴검사작업자들의 건강을 보호하기 위해 방사선투과 작업현장에서의 안전보건관리 주체의 부재로 부각되어온 문제점을 보완한 조치이다.

원자력안전법상 신고기관은 방사선량을 측정하지 않아도 되고 보고의 의무도 없다. 또한 한번 방사선 사용에 대한 신고기관으로 개설한 이후에는 특별한 관리를 받지 않기 때문에 사고 유무나 노출량 등이 파악되지 않고 있는 것이 현실이다. 신고사업장 등의 방사선취급 근로자에 대한 측정 및 평가는 산업안전

보건법상에서 다루어져야 할 것이다. 왜냐하면, 원자력법상에서는 신고의 의무만 있지 사용 중에 나타날 수 있는 근로자에 대한 노출은 알 수 없기 때문이다. 화학물질도 냄새가 나는 물질은 인간의 오감으로 알 수 있어 인지가 가능하지만 무색무취인 화학물질인 경우가 더 위험하듯 방사선은 보이지 않는 위험인자이기에 상시 모니터링을 해야 관리가 가능하다. 그리고 방사선 측정과 관련된 기술적 사항은 미래창조과학부의 원자력안전법이나 보건복지부의 의료법에 명시되어 있는 것을 준수하거나 고용노동부 고시로 다시 규정하면 될 것이다.

본 연구에서 비파괴 검사시 방사선투과조사작업의 평균 노출선량률은 17.5  $\mu\text{Sv}$ 이었다. 이것은 비파괴검사작업을 수행하는 종사자 6,786명에 대한 평균 노출선량률 3.43  $\mu\text{Sv/h}$ 에 비하면 아주 높은 수준이다 (Nuclear Safety And Security Commission, 2013). 방사선투과조사작업에서 지역(공간)선량률은 실제로 개인노출선량률에 해당된다고 볼 수 있다.  $^{192}\text{Ir}$ 이 들어있는 감마선조사기로부터 1 m, 2 m, 3 m 간격으로 방사선량률을 측정했을 때, 각각 4,600~5,000  $\mu\text{Sv/h}$ , 1,500~2,500  $\mu\text{Sv/h}$ , 600~1,400  $\mu\text{Sv/h}$ 이 노출되는데, 방사선량은 거리의 역자승법칙에 따라 감소하지만, 방해물이나 측정오차 등 주변 환경에 따라 약간 차이가 날 수 있음을 보여주었다. 그러나 비파괴검사시 방사선 작업종사자가 실제 머무는 작업영역은 선원으로부터 8~15 m 거리에 있으므로 최대로 노출될 수 있는 방사선량률은 50~112  $\mu\text{Sv/h}$ 이고 보통 떨어진 거리에 따라 4.8~22.0  $\mu\text{Sv/h}$ 에 노출되고 있었다. 이들은 방사선을 차폐할 수 있는 납복을 착용하지 않고 작업하고 있어서 선원으로 부터 거리이격이 곤란한 조선업의 선박위에서 작업은 이보다 더 높은 수준의 방사선에 노출될 수 있다(Ju et al., 2012).

반면에 이온임플란터, 두께측정기, 콕크로프트 왈톤형가속장치와 같은 산업용기기들은 비파괴검사에서 사용되는 감마선조사기의 방사선 노출에 비하면 아주 낮은 수준이지만, 방사성동위원소를 내장하고 있는 경우를 제외하고는 대부분 원자력법상 허가대상기기가 아니어서 측정의 의무가 없다. 사업장에서는 방사선을 이용한 기기들을 많이 사용하여 제품을 검사하거나 생산에 활용하고 있다(Wakeford, 2009). 본 연구에서 임플란터, 두께측정기, 콕크로프트 왈톤

형가속장치의 평균표면선량률은 각각 9.07  $\mu\text{Sv}$ , 4.87  $\mu\text{Sv/h}$ , 7.03  $\mu\text{Sv/h}$ 이었지만 최대 96.3  $\mu\text{Sv/h}$ , 24.5  $\mu\text{Sv/h}$ , 30.0  $\mu\text{Sv/h}$  까지 발생되고 있었다. 만약 근로자가 하루 1시간 정도 방사선작업을 한다고 가정하면 연간 총 노출량은 최대 4.87~8.07  $\mu\text{Sv/hr} \times 1.0 \text{ hrs/day} \times 5 \text{ day/week} \times 50 \text{ week/year} = 1.2\sim 2.3 \text{ mSv/yr}$ 가 된다. 이수치는 수시출입자의 선량한계보다는 낮지만 일반인 기준보다는 높다. 중요한 것은 미국 ACGIH 등에서 반도체공장의 이온임플란터에서 방사선이 누출되고 있음을 조사하여 보고했듯이 (Maletskos & Hanley, 1983; ACGIH, 1987) 이와 같은 방사선발생장치에서 방사선 누출이 있을 수 있음을 확인하였다는 사실이다(Michael et al., 1995).

방사성동위원소를 내장한 두께측정기는 원자력안전법의 원자력안전위원회 고시 제2014-4호 「방사선기기의 설계승인 및 검사에 관한 기준」에 의거한 “무인격리형”으로서 그 구조기준은 “셔터를 닫거나 방사선원을 안전위치로 이동시킨 후, 방사선기기의 표면 방사선량률은 시간당 2 mSv를 초과하지 않아야 하고 정상적인 운영과정에서 방사선기기의 취급으로 인하여 종사자가 받는 피폭방사선량은 연간 1 mSv를 초과하지 않아야 한다는 것을 객관적으로 입증하여야 한다”라고 규정하고 있다. 본 연구결과는 규제기준인 2,000  $\mu\text{Sv/hr}$ 는 초과하지 않으나 방사선작업 종사자가 아닌 설비보전 작업자인 경우에는 연간 피폭되는 방사선량이 1.0 mSv/yr 미만이라고 증명할 수 있는 객관적인 자료가 없다는 사실이다. 또 일반 제조업에서 사용되는 전자빔 가속장치들은 그 구조방식이 대부분 “자체방호형 또는 캐비닛형”으로 원자력안전위원회 고시에 “방사선기기의 외부에 형성되는 방사선장에 의한 피폭방사선량이 최대가 되는 가동 조건에서 모든 접촉 부위의 표면방사선량률은 시간당 10  $\mu\text{Sv}$ 를 초과하지 않아야 한다”라고 규정하고 있다. 그러나 가속장치의 일부 표면에서 최대 표면선량률이 규제기준인 10  $\mu\text{Sv/hr}$ 를 초과하고 있었다.

## V. 결 론

우리나라 방사선취급 근로자에 대한 안전보건규제와 관련하여 관련법 및 제도에 대해 고찰해본 결과, 원자력법에서 정의하고 있는 허가 및 신고사업장에

대해 산업안전보건법상의 적용에 관한 내용의 정립이 필요하다. 신고사업장의 경우 원자력안전법에서는 특별한 의무규정이 없으나 산업안전보건법에서는 보건교육, 건강진단, 안전보건관리자 선임 등 전반적인 관리를 하도록 규정하고 있어 관련법간 일관성이 없다. 현재 방사선 취급근로자에 대한 안전보건 관리 법령이 원자력안전법, 산업안전보건법, 의료법에 각각 규정되어 있어 산업현장에 불필요한 규제가 될 가능성이 있으므로 작업환경측정, 안전보건교육 등에 대한 일관성 있는 관리기준이 필요하다고 생각된다. 원자력안전법상 신고사업장에서 방사선작업을 행하는 근로자들에 대한 건강보호를 위해 방사선 노출여부를 측정하고 평가할 수 있는 별도의 규정이 산업안전보건법에 명시되어야 할 것이다. 최소한 작업환경측정대상인자로 매년 모니터링하고 있는 소음처럼 전리방사선도 측정대상에 포함시켜 관리되어야 할 것이다. 그리고 산업현장에서 전리방사선에 노출될 수 있는 작업을 조사하여 측정 및 평가한 결과, 비파괴검사작업에서 발생하는 방사선의 에너지는 고에너지(100 keV 이상)이나 이온주입작업이나 두께측정작업 및 가교작업의 X-선발생장치에서 발생하는 에너지 범위는 저에너지(10~40 keV)이었다. 향후 저에너지 방사선 노출과 관련한 유해도 평가 연구가 필요하다고 생각된다.

## References

- ACGIH. Hazard assessment and control technology in semiconductor manufacturing. Lewis Publishers, Inc. 25th ed. Ohio, Oct. 20-22, 1987. p. 161-178
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Threshold Limit Values(TLVs) for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices(BEIs). Cincinnati, OH, ACGIH. 2014. p. 176-177
- Chung EK, Kim GB, Chung KJ. Assessment of radiation exposure for workers in semiconductor manufacturing. Research report of OSHRI ; Pub. No. 2009-101-1312. 2009. p. 25-74
- Daniel AG, Basic Radiation protection technology, 2nd ed. Pacific Radiation Corporation, Ergamon Press, 1992. p. 21-124
- Herman Cember, Introduction to Health Physics, Northwestern, University, 2nd ed. Pergamon Press, 1983. p. 60-120
- ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. 2007. p. 28-38
- Information Center of Korea Laws(ICKL). Medical Service Act ; The rules of diagnosis radiation equipment safety management. Korea ministry of Government Legislation. 2014. Available from : <http://www.law.go.kr/lsSc.do?menuId=0&p1=&subMenu=1&nwYn=1&query=%EB%B0%A9%EC%82%AC%EC%84%A0&x=0&y=0#liBgcolor6>
- Information Center of Korea Laws. Nuclear Safety Act ; Chapter 5 Radioisotopes and radiation generating devices(Article 53 ~62). 2014. Korea ministry of Government Legislation. 2014. Available from : <http://www.law.go.kr/lsSc.do?menuId=0&p1=&subMenu=1&nwYn=1&query=%EB%B0%A9%EC%82%AC%EC%84%A0&x=0&y=0#liBgcolor8>
- Information Center of Korea Laws. Occupational Safety and Health Act ; Regulations for occupational safety and health : chapter 7(Article 573 ~ 591). 2014. Korea ministry of Government Legislation. 2014. Available from : <http://www.law.go.kr/lsSc.do?menuId=0&subMenu=1&query=%EC%82%B0%EC%97%85%EC%95%88%EC%A0%84#liBgcolor1>
- Ju KT, Lee DS, Ju SH, Kim SY, Yu BJ, et al. Studies and proposition for reducing the work radiation exposure in Non-Destructive Testing industries. Research report of OSHRI ; Pub. No. 2012-1313. 2012. p. 92-107
- Kim CK. Radiation detection & measurement. Shin-Kwang Press.; 2007. p. 105-125
- Kim KJ, Jin YW, Chang DH, Jung MS, et al., Survey on real condition of health management for workers handling radiation and radioactive isotope. Research report of OSHRI ; Pub. No. 2009-101-1312. 2009. p. 29-69
- Kim SG. Health effects and managements by hazard factors(ionizing radiation), Research report of OSHRI ; Pub. No. 2006-37-664. 2006. p. 37-58
- Kim YJ(National Assembly). Health issues and managements of workers dealing with ionizing radiation. Member of the National Assembly; Kim YJ Policy Kit VI. 2005. p. 1-28
- Korea CDC(Medical Radiation T/F, Division of Health & Nutrition survey). 2012 Report Occupational Radiation Exposure in Diagnostic Radiology. Korea Centers for Disease Control and Prevention(Pub. No. 978-89-6838-052-5); 2013. p. 1-35
- Lee JH, Oh MS, Yoon JK, Kim HS, Kim H et al. Two case of erythroleukemia and myelodysplastic syndrome in a non-destructive inspector. Korean J Occup Environ Med 2011;23(4):471-479



- Maletskos CJ, Hanley PR. Radiation protection considerations of ion implantation systems, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, No. 2, April 1983. p. 1592-1596
- Michael EW, David GB, Paul CM, Semiconductor industrial hygiene handbook. monitoring, ventilation, equipment and ergonomics., Noyes Publications. 1995. p. 131-135
- Nuclear Safety And Security Commission(Korea). Press kit for leukemia outbreaks of nondestructive testing workers due to ionizing radiation at shipyard. 2012. Available from: [http://www.nssc.go.kr/nssc/participation/freeboard.jsp?mode=view&article\\_no=3437&pager.offset=2745&board\\_no=13](http://www.nssc.go.kr/nssc/participation/freeboard.jsp?mode=view&article_no=3437&pager.offset=2745&board_no=13), <http://www.hani.co.kr/arti/society/area/522357.html>
- Nuclear Safety And Security Commission(Korea). 2012 Nuclear Safety Yearbook. Korea Institute of Nuclear Safety(Pub. No. 11-1079960-000001-10); 2013. p. 263-284
- UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2008 Report : Volume I(Annex B). United Nations. 2010. p.237-238
- Wakeford R. Radiation in the workplace - a review of studies of the risks of occupational exposure to ionizing radiation. J Radiological Protection 2009;29:61-79