

원전 구조물 적용 마감재의 연소성능평가 기반연구

Basic Study on Combustible Performance of Finishing Materials for Nuclear Power Plants

권인규* · 우안식**

Kwon, Inkyu*, and Woo, Ansik**

Abstract

In general, finishing materials used in nuclear power plants and their attached buildings are designed in accordance with the Nuclear Regulatory Commission requirements in terms of fire safety. However, only few of the finishing materials produced in Korea are certified for combustible performance by fire laboratories in the U.S. In this study, certain finishing materials that are used in nuclear power plants have undergone combustible-performance tests in the fire laboratories in Korea and the U.S. using their own standards for the same materials. The results showed that even though the standard and criterion were different, the combustible performance satisfied the fire-safety requirements of the two nations.

Key words : Nuclear Power Plant, Finishing Materials, Combustion Performance, Fire Safety

요 지

원전 구조물과 부속건축물에 적용되는 마감재의 연소성능평가는 미국의 원전설계기준에 준하여 설계, 시공되는 것이 일반적이거나, 국내의 원전 관련 시설물에 적용된 마감재의 연소성능평가는 매우 제한적으로 이루어져 화재 안전성의 확인 및 향후 원전설계의 국외 수출 시 검증한계 등의 문제점이 있는 것이 현실이다. 따라서 본 연구에서는 국내 생산 건축 마감재료의 원전 구조물 적용 시 구조물 및 재실자의 화재안전성을 확보할 수 있도록 국내외 관련 법규정 분석 및 국내외 화재시험소를 통한 연소시험을 수행하여 가이드라인(안) 기반 내용을 도출하였다.

핵심용어 : 원전 구조물, 마감재료, 연소성능, 화재안전

1. 서 론

건축물에서의 화재 발생은 재실자와 이용자 그리고 소방 구조 활동자의 인명피해 유발과 동시에 건축물의 재산적 손실과 기능의 약화 및 주변 환경파괴와 같은 사회적 손실을 발생시키는 재난적 경향을 보이고 있다. 따라서 이와 같은 역기능을 최소화하기 위한 기술적, 행정적 노력을 기울이고 있으나, 건축물의 신수요 발생, 복합재료 개발 등에 따른 화재 발생 및 피해 위험도 동시에 증대되는 추세에 있다.

국내 전력생산의 대부분은 기저발전인 석탄화력 및 원자

력발전, 그리고 천연가스나 경유 등을 활용한 복합화력으로 구성되며, 태양열, 풍력, 조력 등의 신재생 에너지를 활용한 발전시설 또한 점차 증대되는 추세에 있다.

원자력 발전소는 연료비가 저렴하고 발전원가가 낮아 타 에너지원에 의한 발전소 대비 효율성이 탁월하며, 화석연료를 태울 때 발생하는 지구온난화의 원인인 이산화탄소 및 질소산화물 등의 유해물질도 거의 방출되지 않아 지구환경보존에도 기여하고 있다. 이러한 장점에도 불구하고 구 소련의 체르노빌 발전소, 미국의 스리마일 발전소 및 일본의 후쿠시마 발전소 사례와 같이 원자력 발전소의 사고는 인체

*교신저자, 정희원, 강원대학교 소방방재공학전공 교수(Tel: +82-33-570-6433, Fax: +82-33-570-6819, E-mail: kwonik@kangwon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University

**한국전력기술 토건환경기술실 과장

Manger, Civil & Architectural, Environmental Engineering Department. KEPCO E&C.

에 치명적이고 광범위한 지구 환경 손상을 초래할 수 있어 이로 인한 부정적인 국민 정서도 적지 않은 상황이다. 이에 따라 원자력 발전소의 건설은 여타의 일반 건축물 보다 높은 수준의 설계기준 수립과 엄격한 적용이 요구되고 있으며 화재 발생 시에도 발전소 안전성에 영향을 미치지 않도록 철저히 관리되어야 한다.

본 연구에서는 원전 구조물의 안전성 향상을 위해 국내외 화재 관련 법규 및 기술기준을 검토하고, 원자력 발전소 시설물에 적용되는 마감재의 현황과 화재 시 성능을 조사, 분석함으로써, 국내외 원자력 발전소 뿐만 아니라 해외 수출을 목적으로 개발하고 있는 원자력 발전소에도 공통으로 적용될 수 있는 마감재의 화재안전 설계 가이드라인(안)의 검증 자료 도출을 목적으로 하며, 연구 범위는 다음과 같다.

첫 번째, 마감재로는 국내의 경우 건축법, 원자력 안전위원회에서 규정하는 마감재료로 한정하고, 국외의 경우는 미국 원자력 발전소 화재안전 규정인 Reg. Guide 1.189 (2009)와 일반 건축/시설물 관련 규정인 IBC (ICC, 2014) 및 NFPA 5000 (2014)에 따르는 것으로 한다. 두 번째, 화재안전 성능평가 방안은 국내의 경우 국내 법규에서 규정한 한국산업규격(KS)을 사용하고, 국외의 경우는 상기 미국 기준에서 규정한 ASTM (ASTM E136, 2016; ASTM E84, 2017) 및 NFPA (NFPA 253, 2000; NFPA 259, 2012)를 사용하는 것으로 한다.

2. 원전 적용 마감재 법규정 및 현황 조사

2.1 국내외 마감재 관련 법규정

2.1.1 국내현황

국내 마감재의 화재 관련 규정은 건축법, 건축법 시행령 및 건축물 마감재료의 난연성능 및 화재확산 방지구조 기준에 제시되어 있으며, 주요 내용은 다음과 같다.

건축법 제52조 마감재료는 방화에 지장이 없어야 한다고 규정하고 있고, 건축법 시행령에는 마감재료의 방화 관련 분류인 난연재료, 불연재료 및 준불연재료의 정의를 제시하고 있다. 또한 건축물의 피난방화구조 등의 기준에서는 난연재료, 불연재료, 준불연재료의 성능기준을 나타내고 있으며, 각각의 성능기준의 주요 내용은 건축물 마감재료의 난연성능 및 화재확산 방지구조 기준에 상세히 제시되어 있다. 소방시설법 시행령 제24조(소방계획서)에는 건축물의 내부 마감재료에 관한 사항이 포함되어 있다.

원전 구조물에는 건축법과 원자력 안전법 등이 적용되고 있으며, 구조물과 마감재료에는 건축관련법령이 적용되고, 구조물과 마감재료의 안전 및 방호 사항은 원자력안전법의 적용을 받는다.

한국원자력안전기술원(KINS) 규제지침 10.6 “원자력발전소 화재방호”(KINS, 2016)는 미국 NRC RG 1.189를 준용하는 지침으로 알려져 있으며, 마감재의 요구 성능조건 등의

규제입장은 NRC 규제지침과 거의 동일하며 주요 내용은 4.1의 일반건물 및 건물계통설계에 제시되어 있다. 구체적인 사항은 4.1.1.1의 내부 마감재에 언급되어있으며, 공인기관의 승인없이 사용할 수 있는 마감재료의 종류에 대한 사항 그리고 시험을 통하여 인증되는 방법을 제시하고 있다. 여기에 내부 마감재는 불연성이거나 ASTM E84 시험에서 표면화염 전과율 25이하, 연기발생률 450이하이거나, ASTM D3286 또는 NFPA 259에 의한 열방출률 8,141 KJ/kg이하여야 한다. 바닥 마감재인 경우는 NFPA 253의 시험을 통하여 임계방출 열속이 Class 1 (0.45 w/cm² 이상), Class II (0.22 w/cm² 이상)의 확보가 필요하다.

2.1.2 미국의 마감재 관련 규정

마감재는 화재 시의 화재확산 방지를 주목적으로 하며 본 절의 마감재 정의는 미국 NRC의 규제지침인 RG 1.189 (2009)와 빌딩코드인 IBC (ICC, 2014) 및 NFPA 5000 (2014)에 규정된 불연재료(Non-combustible materials)를 대상으로 한다. NRC의 불연재료에 관한 규정은 Table 1에 제시하였고, IBC의 불연재료의 주요 내용은 Table 2에 제시하였다.

NRC 규정의 경우, 내부 마감재로는 불연재료를 사용하도록 규정하고 있으며, 시험기관의 시험없이도 사용할 수 있는 재료들을 제시하고 있다. 이와 같은 재료들은 화재시험기관으로부터 일반적으로 성능평가가 된 것으로 판단되며, 실제 적용한 경우는 화재 위험성에 대한 평가를 수행하여야 하고, 적절한 조치를 요구하고 있다. 이외의 마감재료들은 ASTM E84 (2017), NFPA 253 (2000) 및 NFPA 259 (2012) 등과 같은 시험을 통하여 성능확인을 요구하고 있다.

3. 원전 적용 마감재 현황 및 연소성능시험

3.1 국내 원전 적용 마감재 현황 및 선정

마감재에 대한 설계조건은 건축공사 공종을 다루는 각 원전의 시공기술규격서(Construction Package) CP-A2로 확인할 수 있으며, 동 시공기술규격서에는 약 30종의 건축 관련 단위공사를 포함하고 있다. 그 중 마감재와 관련된 항목은 Suspended Acoustical Tile Ceiling, Access Flooring Caulking & Sealant, Vinyl Composition Tile, Vinyl Sheet Flooring, Toilet Partitions 등과 같이 구분될 수 있다.

다만 마감재 화재성능평가의 목적은 건축물에서의 화재 발생 시 인접구획으로의 확산방지 및 유독성 가스 발생 억제를 통해 재실자 및 이용자의 피난을 원활하게 하기 위함임을 고려하여 본 절에서는 외장재를 제외하기로 하고, 기간 등의 제한으로 바닥재와 도장재도 제외하기로 하였다.

천장 마감재는 사무실 및 복도 천장에 적용된 미네랄울 타입의 Acoustical Tile을 선정하였고, 벽 마감재는 비내력 칸막이벽으로 사용된 2 가지 종류(일반, 방화)의 건식 석고보드를 선정하였으며, 상세사항은 Table 3과 같다.

Table 1. Major Contents of the RG 1.189

Clause	Major contents
4.1 General Building and Building System Design	<p>4.1.1 Combustibility of Building Components and Features The fire hazards analysis should identify in situ combustible materials used in plant SSCs and specify suitable fire protection.</p> <p>4.1.1.1 Interior Finish Interior finishes should be noncombustible. The following materials are acceptable for use as interior finish without evidence of test and listing by a recognized testing laboratory: In situ fire hazards should be identified and suitable protection provided.</p> <p>4.1.1.2 Testing and Qualification Interior finishes should be noncombustible (see the “Glossary” of this guide) or listed by an approving laboratory for the following:</p> <p>a. surface flame rating of 25 or less and a smoke development rating of 450 or less, when test under American Society for Testing and Materials (ASTM) E84, “Standard Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials”</p> <p>b. potential heat release of 8,141 kilojoules per kilogram (kJ/kg) (3,500 Btu per pound) or less when tested under ASTM D3286, “Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Isoperibol Bomb Calorimeter”, or NFPA 259, “Standard Test Method for Potential Heat of Building Materials”, and</p> <p>c. floor covering critical radiant flux as determined by testing in accordance with NFPA 253, “Standard Method of Test for Critical Radiant Flux of Floor Covering Systems Using a Radiant Heat Energy Source.”</p>

Table 2. Major Contents of the IBC

Clause	Major contents
Chapter 7 Fire and smoke protection features	<p>703.5 Noncombustibility tests The tests indicated in Section 703.5.1 and 703.5.2 shall serve as criteria acceptance of building materials as set forth in Sections 602.2, 602.3 and 602.4 in Type I, II, III and IV construction. The term “noncombustible” does not apply to the flame spread characteristics of interior finish or trim materials.</p> <p>703.5.1 Elementary materials Materials required to be noncombustible shall be tested in accordance with ASTM E 136.</p> <p>703.5.2 Composite materials Materials having a structural base of noncombustible material as determined in accordance with Section 703.5.1 with a surfacing not more than 0.125 inch (3.18 mm) thick that has a flame spread index not greater than 50 when tested in accordance with ASTM E 84 or UL 723 shall be acceptable as noncombustible materials.</p>

Table 3. Walls and Ceiling Finishing Materials

Classification	Sorts	Thickness (mm)
Wall	Regular Gypsumboard	9.5
	Fire resistant Gypsumboard	19
Ceiling	Acoustical tile	15

3.2 국내외 연소시험성능 규격조사

우리나라의 원전 구조물은 원자력 안전법을 적용받고 있으나, 일반 건축물과 동일한 건축 인허가를 위해 국내 건축법과

산업표준화법의 준수도 요구되고 있다. 건축물에서의 화재 발생으로 인한 인접공간의 연소 확대방지 및 재실자의 피난을 원활하게 하기 위한 목적으로 마감재료의 화재성능평가는

국토교통부 고시 제2018-771호(건축물 마감재료의 난연성능 및 화재확산 방지구조 기준)에 제시되어 있으며, 주요 내용은 동 고시 제2012-624호에 규정되어 있다. 본 고시에는 건축물 적용 마감재료의 화재 성능을 불연재료, 준불연재료 및 난연재료로 구분하고, 각각에 대한 평가기준을 관련 한국산업규격(KS F ISO 1182 불연성시험(2010), KS F ISO 5660-1 콘칼로리미터 시험(2015), KS F 2271 가스유해성시험(2016))에 따라 규정하고 있다.

마감재료에 대한 미국의 불연성능 평가 시험은 소형가열로에 의한 재료의 연소성능을 평가하는 ASTM E 136과 잠재열량으로 평가하는 NFPA 259 그리고 재료의 화염확산과 연기발생지수로 평가하는 ASTM E84 및 바닥재료의 임계 열유속으로 평가하는 NFPA 253으로 대별될 수 있다.

3.3 국내외 연소성능시험 수행

국내 원전 적용 마감재에서 선정된 Table 3의 재료를 대상으로 국내 및 국외에서의 연소성능평가 시험을 수행하였다. 시험체는 동일 마감재료의 제조사에서 생산된 제품을 국내의 시험규격에 맞게 시험편을 제작하여 각 시험소로 이송하였다. 국내 연소성능시험은 방재시험연구원에서 KS 규격에 의거하여 수행하였고, 국외는 UL Chicago 화재시험소에서 각각 시험표준에 따라 수행하였다.

3.3.1 국내 연소성능시험

국내 연소성능시험에 적용된 재료의 크기 및 시험규격은 Table 4와 같고, 불연, 준불연 및 난연성능평가 결과는 모두 만족하는 것으로 나타났으며, 일반 석고보드의 불연성 시험 결과는 Table 5와 같고, 평가 후의 시험체는 Fig. 1과 같다.

Table 4. Materials and Standards for Combustible Tests in Domestic

Sorts	Size (mm)	Standards
Regular	900x1800x9.5	KSF ISO 1182 KSF 2271
Fire resistant	900x1800x19	KSF ISO 5660-1 KSF 2271
Acoustical tile	600x600x15	KSF ISO 5660-1 KSF 2271

Table 5. Results of Combustible Tests for Regular Gypsum Board

Test			Specimen number			
			1	2	3	Criterion
Combustible material	Combustible performance	Temp. difference (°C)	1.1	2.5	3.5	Not more than 20 K
		Mass reduction rate (%)	25.5	25.4	25.4	Not more than 30 %
	Gas toxicity	Stop time (minutes)	14:29	13:10	-	More than 9 minutes

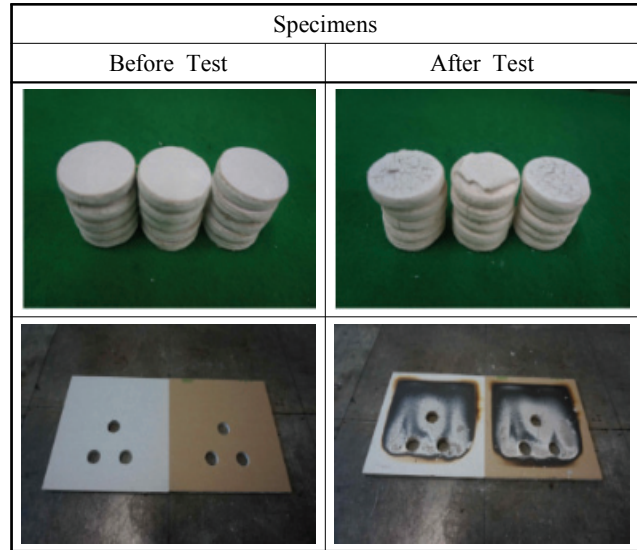


Fig. 1. Specimens for Combustible Test of Regular Gypsumboard

3.3.2 국외 연소성능시험

UL에서 수행된 마감재료의 크기와 연소성능시험 현황은 Table 6과 같고, 일반 석고보드의 ASTM E136 1회 수행 시험결과는 Table 7에 제시하였다. 단일재료에 대한 미국의 불연성 시험인 ASTM E136은 모두 4회의 시험으로 이루어지며, 4회의 시험중에 3회가 만족하여야 불연성이 확인되는 시험이다. 본 연구의 첫 번째 시험체의 경우, 시험 개시 후 30초간 화염발생 등의 상황이 발생되지 않았고, 시험체의 질량손실은 50%이하였으나, 시험체의 내부 온도가 시험개시 185초 이후에 가열로 온도(750°C)보다 30°C를 초과하였기에 불연성의 범위에 들지 않음으로 평가되었다. 국내의 KSF

Table 6. Materials and Standards for Combustible Tests in UL Chicago

Sorts	Size (mm)	Standards
Regular	900x1800x9.5	ASTM E136, E84 NFPA 259
Fire resistant	900x1800x19	ASTM E136, E84 NFPA 259
Acoustical tile	600x600x15	ASTM E136, E84 NFPA 259

Table 7. Results of Regular Gypsumboard by ASTM E136

Results (Regular gypsumboard)			
9.5 mm Regular Gypsum - Specimen 1			
Furnace Stabilization Temp (°C):	750	Furnace Stabilization Test Code:	05251801
Test Code Number:	05261801	Test Number:	1
Sample Pre Weight:	38.06 grams	Sample Post Weight:	28.77 Grams
Weight Loss:	9.29 grams	Weight Loss:	24.4 Percentage

REQUIREMENTS (Weight Loss of specimen is 50% or less):
 1) The recorded temperatures of the surface and interior thermocouples do not at any time during the test rise more than 30°C [54°F] above the stabilized temperature.
 2) There is no flaming from the specimen after the first 30 seconds

Test Results: Non-Compliant

Observation	Time mm:ss	Surface Temp. °C / Rise °C	Interior Temp. °C / Rise °C
Smoke	N/A	N/A / N/A	N/A / N/A
Flashing	N/A	N/A / N/A	N/A / N/A
Ignition	N/A	N/A / N/A	N/A / N/A
Flame Out	N/A	N/A / N/A	N/A / N/A
Maximum Surface	N/A	734.6/-15.4	N/A
Maximum Interior	N/A	N/A	935.0/+185.0
Test Duration	30:00	N/A	N/A

2271와 유사한 시험이지만 국내의 규격에서는 시험체의 내부온도를 측정하지 않으나, ASTM E136에서는 시험체의 내부온도를 측정하는 것이 차이점으로 향후 이에 대한 검토 및 비교검토 시험이 필요할 것으로 판단하였다.

일반석고보드를 대상으로 화염확산지수(FSI)와 연기발생지수(SDI)를 측정하는 ASTM E84 시험결과 모두 0으로 나타나, Class A로 확인되었다(Table 8 및 Fig. 2). 동일한 일반석고보드를 대상으로 잠재열량을 평가하는 NFPA 259의 시험결과, 3500 Btu/lb (8141 KJ/kg)을 초과하지 않는 -289 Btu/lb의 흡열반열을 나타내었으며, 불연성능이 확인되었다.

Table 8. Results of Regular Gypsumboard by ASTM E84

Test code	Sample	FSI	SDI
05211812	Regular gypsum board (9.5 mm)	0	0

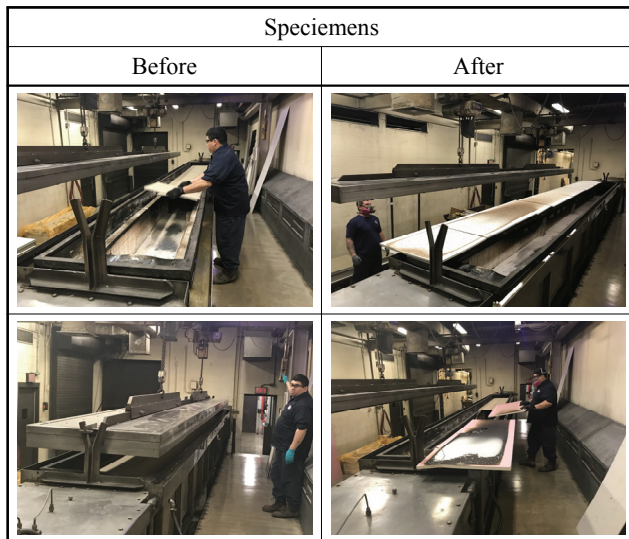


Fig. 2. Tests of Regular Gypsum Boards and Ceiling Tiles by ASTM E84

두 가지 종류의 석고보드와 천장재를 대상으로 ASTM 136과 ASTM E84 그리고 NFPA 259시험결과, 석고보드와 천장재의 경우 내부의 온도초과 이외에는 평가기준을 모두 만족하였고, 화염확산지수와 연기발생지수 그리고 잠재열량 시험결과는 모두 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

4. 결론

국내 원전 구조물에서의 화재 발생 시 구조물의 안전성 향상 및 재실자 피난을 원활히 할 수 있는 마감재료의 불연성능을 확인함으로써 마감재료의 화재안전성 가이드라인 개발의 기반 자료 도출을 목적으로 관련 국내의 범규정 및 국내의 연소시험을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 국내 원전 구조물에 적용된 마감재의 종류 및 마감재의 연소성능에 요구되는 국내 및 미국의 성능기준을 조사하였다.
- (2) 국내 원전 구조물의 마감재에 요구되는 방화성능은 미국 NRC 기준에 준하는 것으로서 대부분 미국의 불연성능을 요구하는 것이며, 국내의 불연성능시험과는 차이가 있음을 확인하였다.
- (3) 국내 생산 마감재료(석고보드류, 천장재)의 국내의 연소성능 비교시험 결과, 국내 마감재료는 미국 불연성능기준을 대부분 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 수행된 시험체는 NRC의 요구성능을 만족함으로써 국내의 원전구조물에 적용가능하다고 판단된다.
- (4) 단일재료의 불연성능을 평가하는 ASTM E136의 경우, 국내 생산 마감재료의 시험체 내부 온도가 기준을 초과한 결과를 보였으며, 동 시험기준은 국내와 상이함으로 이에 대한 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20161510400110).

References

ASTM E136. (2016). *Standard test method for behavior of materials in a vertical furnace at 750°C*. American Society for Testing and Materials International.
 ASTM E84. (2017). *Standard test method for surface burning characteristics of building materials*. American Society for Testing and Materials International.
 Building Act (2019).

Enforcement Decree of the Building Act (2019).

International Code Council (ICC). (2014). *International Building Code (IBC)*.

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT). (2003). *Development of fire design(II) - Report to interior finishing materials including sandwich panels, applied into factory*.

Korea Institute of Nuclear Safety (KINS). (2016). *Fire protection*. KINS/RG-N10.06.

KS F ISO 1182. (2010). *Test method of non-combustibility of building products*. Korean Agency for Technology and Standards.

KS F ISO 5660-1. (2015). *Reaction to fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1 : Heat release rate (Cone calorimeter method) and smoke production rate (Dynamic Measurement)*. Korean Agency for Technology and Standards.

KS F 2271. (2016). *Testing method for gas toxicity of finish materials of buildings*. Korean Agency for

Technology and Standards.

NFPA 253. (2000). *Standard method of test for critical radiation flux of floor covering systems using a radiant heat energy source*. National Fire Protection Association.

NFPA 259. (2012). *Standard test method for potential heat of building materials*. National Fire Protection Association.

NFPA 5000. (2014). *Building construction and safety code*. National Fire Protection Association

RG 1.189. (2009). *Fire protection for nuclear power plants*. Regulatory Guide, U.S. Nuclear Regulatory Commission (U.S. NRC).

<i>Received</i>	September 14, 2019
<i>Revised</i>	September 16, 2019
<i>Accepted</i>	September 25, 2019