

## 콘크리트 열화 진단의 LIBS 적용을 위한 실험적 연구

우상균<sup>1</sup>, 추인엽<sup>2\*</sup>, 윤병돈<sup>3</sup>

# An Experimental Study on the Application of LIBS for the Diagnosis of Concrete Deterioration

Sang-Kyun Woo<sup>1</sup>, In-Yeop Chu<sup>2\*</sup>, Byong-Don Youn<sup>3</sup>

**Abstract:** It is laser induced breakdown spectroscopy(LIBS) that enables qualitative and quantitative analysis of the elements contained in unknown specimen by comparing the wavelength characteristics of each element obtained from the spectral analysis of the standard specimen with the wavelength analysis results from unknown specimens. In this study, the applicability of LIBS to the analysis of major deterioration factors affecting concrete durability was experimentally analyzed. That is, the possibility of applying LIBS to the diagnosis of concrete deterioration by studying the quantitative detection of harmful deteriorating factors on chloride, sulfate and carbonated mortar specimens using LIBS was studied. As a result of LIBS test for each chloride and sulfate specimen, the LIBS spectral wavelength intensity of chlorine and sulfur ions increased linearly with increasing concentration. Carbon ion LIBS spectral wave intensities of carbonated specimens increased nonlinearly over the duration of carbonation exposure. From the above results, it can be partially confirmed that LIBS can be applied to the diagnosis of concrete deterioration. In case of concrete carbonation, it is presumed that carbon content is contained in the cement itself and is different from the detection of chloride and sulfate specimen. Therefore, it is considered that more various parameter studies should be performed to apply LIBS to concrete carbonation.

**Keywords:** Carbonation, Chloride, Concrete deterioration diagnosis, LIBS, Sulfate

## 1. 서 론

LIBS(Laser Induced Breakdown Spectroscopy)는 레이저 분광학을 기반으로 하는 원소 분석기술로서 레이저유도분광분석법으로 알려져 있다. 레이저 펄스를 샘플 표면에 조사하면 플라즈마가 발생하여 시료의 일부가 원자화 및 이온화되고 일정 시간이 경과하면 들뜬 상태인 플라즈마가 에너지를 방출하면서 다시 바닥 상태로 돌아가는데, 이 때 방출되는 에너지는 원소의 종류에 따라 고유한 파장을 나타낸다. 이와 같이 표준 시료의 분광 분석으로부터 획득한 각 원소별 파장 특성 값과 검사대상 미지 시료로부터의 파장 분석 결과를 비교함으로써 미지 시료에 함유된 원소의 정성 및 정량 분석을 가능하게 하는 것이 LIBS이다.

LIBS는 고체, 액체 또는 기체 상태의 시료에 모두 적용할 수

있으며, 한 시료 내의 여러 원소에 대해서 동시 측정이 가능하다. 또한 현장에서 시료의 분석결과를 실시간으로 즉시 확인할 수 있는 장점이 있으며, 다른 분석 방법에 비해 구성 및 조작이 간단하고 시료의 전처리 과정이 필요하지 않아 시간 및 비용 소모가 적다(Kim et al., 2003).

이와 같이 LIBS는 조작의 용이성과 실시간 측정이 가능하다는 등의 장점으로 차세대 계측 장비로서 많은 주목을 받고 있다. 최근 산업 현장에서 생산 제품의 성분 분석을 비롯하여 환경 모니터링을 위한 대기 에어로졸 분석, 화성 탐사에서 토양 중의 금속 존재를 측정해 분석하는 등 광범위한 분야에서 연구가 수행되었으며, 휴대가 용이한 Remote LIBS에 대한 연구도 활발히 진행중이다(Kang, 2011).

그리고 시료에 함유된 성분을 정량적으로 분석할 수 있는 특징에 기초하여 콘크리트의 염화물 함유량 측정에 대한 연구가 부분적으로 수행되었다(Cho, 2004; G. Wilsch et al., 2005). 또한 콘크리트 시료에 포함된 황 성분을 정량 검출하는 연구가 진행되었다(Friederike Weritz et al., 2009; M.A. Gondal et al., 2011). 콘크리트에 함유된 탄소량 측정에 대한 연구도 수행되었으나(Timur A. Labutina et al., 2014), 전반적으로 건설분야에 대한 LIBS의 활용 연구 및 현장 적용은 미미한 실정이다.

<sup>1</sup>정회원, 한국전력공사 전력연구원, 책임연구원

<sup>2</sup>정회원, 한국전력공사 전력연구원, 선임연구원, 교신저자

<sup>3</sup>정회원, ㈜플랜올이엔씨, 상무이사

\*Corresponding author: chu.inyeop@kepco.co.kr

KEPCO(Korea Electric Power Corporation) Research Institute, Daejeon, 46241, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

본 연구에서는 콘크리트 내구성에 영향을 미치는 주요 열화 요인을 규명하는 것에 대하여 LIBS의 적용 가능성을 실험적으로 분석하였다. 즉, LIBS를 통해 염화물, 황산염, 탄산화 모르타르 시험체에 대한 유해 열화인자 정량 검출 실험을 실시함으로써 콘크리트 열화 진단의 LIBS 적용 가능성을 연구하였다.

## 2. 본 론

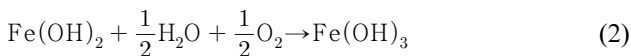
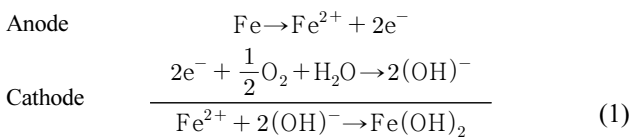
### 2.1 콘크리트 열화인자

#### 2.1.1 염화물 침투

철근콘크리트 구조물에서 염분이 침투하여 내부의 철근을 부식시킴으로써 철근콘크리트 구조물의 내구성에 큰 영향을 미친다. 콘크리트에 염소 이온이 함유되는 원인으로는 다음과 같은 경우가 있다.

- 배합시 염분을 제거하지 않은 해사를 사용한 경우
- 배합시 사용한 혼화제에 염화물이 함유된 경우
- 염분입자가 날아와 콘크리트 표면에 부착되는 경우
- 염화칼슘 계열 동결방지제 성분이 내부로 침투하는 경우

콘크리트는 강알칼리성으로 철근표면에 부동태막이 형성되어 부식이 잘 안되지만 염소 이온이 함유되면 철근표면의 부동태막이 국부적으로 파괴되고 부동태 부분과 파괴된 부분사이에서 식 (1)과 같이 아노드(Anode) 및 캐소드(Cathode)의 국부전지가 형성되어 수산화제1철 형태의 부식이 일어나게 된다. 식 (1)은 산화-환원 반응에 따라 수산화제2철이 되고 식 (2)로 표현된다.

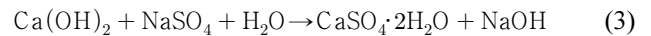


이에 따라 철근이 부식하면 부피 팽창에 의하여 콘크리트에 균열이 생기며 결과적으로 철근부식은 더욱 확대되고 콘크리트의 열화는 가속화된다. 콘크리트 중의 염화물 함유량은 콘크리트에 함유된 염화물 이온의 총량으로 표시한다. 굳지 않은 콘크리트의 전염화물 이온량은 0.30 kg/m<sup>3</sup> 이하이어야 하며, 전염화물 이온량이 2.50 kg/m<sup>3</sup> 이상인 경우 철근부식이 발생한다.

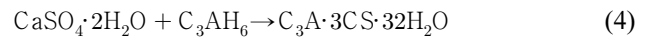
#### 2.1.2 황산염 침투

황산염은 화학공업원료로서 넓게 사용되는 용도 외에 비료로도 사용되고 있다. 또한 일부 지역에서는 토양 중에 많이 함유되어 있기도 하고 하천수, 온천수, 화산지대의 용암수, 각종 공장의 폐수 및 하수 중에 함유되어 있는 경우도 있다. 그리고 해수에도 함유되어 있기 때문에 경우에 따라서는 해수에 의한 콘크리트의 열화에 황산염이 영향을 준다.

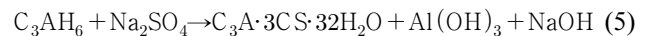
황산염에 의한 열화는 강도 저하나 팽창 균열을 유도한다. 황산염에 의한 콘크리트 열화 메커니즘은 산에 의한 열화 메커니즘과 상이하며 황산염에 의한 부식기구는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.



이 반응으로 생성된 석고는 물에 용해되며, 이 때 시멘트 경화체에서 수산화칼슘을 용출시켜 표면에서부터 순차적으로 조직이 거칠어진다. 이와 같은 반응에 의해서 생성된 석고는 시멘트 경화체 내의 C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>와 반응하여 에트린자이트(Ettringite)를 생성하며 식 (4)와 같다.



이와 같은 반응으로 생성된 에트린자이트는 큰 팽창압을 생성시키며 이 팽창압에 의해 콘크리트에 균열이 생기고 끝내는 붕괴에 이르게 된다. 또한 황산염이 직접 칼슘알루미네이트와 반응하여 에트린자이트를 생성하는 경우 그 열화기구는 식 (5)와 같다.



황산염에 의한 콘크리트의 열화는 표면부분에 팽창성의 균열이 생겨 그 부분이 박리되는 현상이 반복된다. 산에 의한 침식과 비교해서 황산염에 의한 침식은 그 농도가 비교적 높을 때 현저해진다. 황산염의 농도와 침식정도에 대해서 CEB Task Group Durability에서는 Table 1과 같은 기준을 제시한 바 있다(Kim et al., 2009).

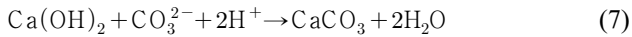
**Table 1** Sulfate concentration and degree for erosion

SO <sub>3</sub> (ppm)	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ppm)	Degree of erosion
< 300	< 533	Weak
300~1,000	533~1,780	Middle
> 1,000	> 1,780	Strong

### 2.1.3 탄산화

일반적으로 경화한 콘크리트는 시멘트의 수화생성물로서 수산화칼슘을 함유하여 pH 12~13의 강알칼리성을 나타낸다. 콘크리트의 탄산화는 알칼리성의 콘크리트가 대기중의 탄산가스와 접촉하여 서서히 탄산칼슘이 생성되면서 pH가 10이하로 낮아지는 것이다. 이 반응은 탄산가스 또는 아황산가스 등과 접촉하는 콘크리트 표면에서 시작하여 느리게 내부를 향하여 진행되며 그 진행속도는 콘크리트 및 주위환경의 조건에 따라 영향을 받는다.

콘크리트가 대기 중의 이산화탄소에 노출되어 내부로 침투하면 모세관 공극 중에 존재하는 모세관수에 용해되어 탄산이 되고 또다시 수소 이온을 방출하여 탄산 이온으로 해리된다. 이러한 반응은 식 (6)과 같이 나타난다. 식 (6)의 반응에 의해 생성된 탄산 이온과 용해도가 높은 수산화칼슘이 반응하여 수산화칼슘이 서서히 소비됨에 따라 콘크리트 속 세공 용액중의 알칼리성분이 감소하는 현상을 콘크리트의 탄산화 반응이라 하며 식 (7)과 같다.



콘크리트 내에서의 이산화탄소 이동은 기체 상태에서의 세공 공극 중에서의 이동과 세공 용액에 용해된 후의 농도 차 확산이나 세공 용액의 이류에 따른 이동 등이 주된 기구로 알려져 있다. 탄산은 용해도가 낮을 경우에도 비수용성인 중성탄산염의 탄산칼슘을 만들고 콘크리트 조직을 치밀하게 하는 작용을 한다.

탄산의 농도가 높을 경우에는 수용성 탄산염인 중탄산칼슘이 생성된다. 순수하고 경도가 낮은 물에서는 이미 소량의 탄산이 존재하기 때문에 콘크리트의 침식이 부분적으로 억제된다. 이와 같이 탄산에 의한 콘크리트의 침식은 정수보다 흐르는 물의 경우에 현저하고 수면에 접한 부분에서 침식되기 쉽다. Table 2는 콘크리트 탄산화 깊이에 따른 철근 부식 가능성을 나타낸 것이다(KISTEC, 2010).

**Table 2** Relative evaluation criteria of carbonation

Rating	Carbonation residue depth	Possibility of rebar corrosion
A	D > 30 mm	No corrosion
B	10 mm ≤ D < 30 mm	Potential
C	0 mm ≤ D < 10 mm	High potential
D	D < 0 mm	Outbreak of corrosion
E	-	-

### 2.2 LIBS 실험을 위한 시험체 제작

콘크리트 내구성에 영향을 미치는 주요 열화 요인을 규명하는 것에 대한 LIBS의 적용 가능성을 실험하기 위하여 영향 인자를 인위적으로 조정한 기준 시험체를 제작하였다. Table 3의 조건에서와 같이 유해 열화인자의 함유 농도 및 폭로기간을 다양화시킨 염화물, 황산염, 탄산화 기준 시험체를 제작하였다. 즉, 염화물 시험체의 경우 염화물의 농도 구간을 0~2.34% 사이에서 0, 0.31, 0.61, 0.91, 1.49, 2.34%의 6단계로 구분하여 시험체를 제

**Table 3** Specification of specimen

Specimen	Size (mm)	Concentration variable	Exposure variable	Mix proportion
Chloride	40×40×160	6 Step <sup>1)</sup>		Standard
Sulfate	40×40×160	5 Step <sup>2)</sup>	-	Standard
Carbonation	40×40×160	-	6 Step <sup>3)</sup>	Standard

<sup>1)</sup>6 Step : Concentration of chloride (%)

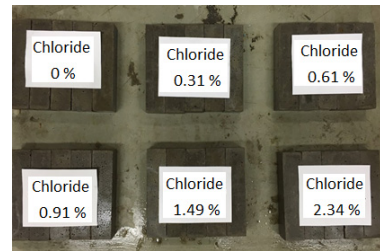
- 0, 0.31, 0.61, 0.91, 1.49, 2.34

<sup>2)</sup>5 Step : Concentration of sulfate (%)

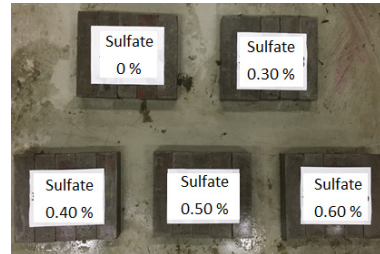
- 0, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60

<sup>3)</sup>6 Step : Exposure of carbonation (weeks)

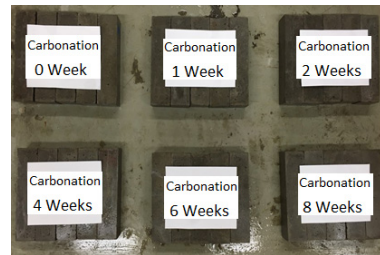
- 0, 1, 2, 4, 6, 8



(a) Specimen of chloride



(b) Specimen of sulfate



(c) Specimen of carbonation

**Photo 1** Specimen for LIBS test

작하였으며, 황산염 시험체는 황산염의 농도 구간을 0~0.60% 사이에서 0, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60%의 5단계로 구분하여 시험체를 제작하였다. 그리고 탄산화 시험체의 경우 탄산화 촉진 시험기를 활용하여 폭로 기간 0~8주를 0, 1, 2, 4, 6, 8주의 6단계로 구분하여 시험체를 제작하였다.

시험체 제작에 사용된 시멘트는 KS L 5201 포틀랜드 시멘트 기준에 적합한 국내 A사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 시험체는 표준 모르타르 배합으로 KS L 5105에 따라 C : S : W = 1 : 2.45 : 0.485로 배합한 후, 40×40×160 mm의 몰드에 타설하였다. 온도 20±2°C에서 1일간 초기양생 후 탈형하였으며, 그 후 온도 20±3°C, 습도 100% 환경에서 28일간 양생을 실시하였다. 탄산화 시험체는 양생 완료 후 상대 습도 60±5%, 온도 20±2°C, 이산화탄소 5±0.2% 조건으로 탄산화 촉진 시험기에 넣고 0, 1, 2, 4, 6, 8주 동안 폭로시켰다. 제작된 염화물, 황산염, 탄산화 기준 시험체는 Photo 1과 같다.

### 2.3 LIBS 실험 장치 및 조건

콘크리트 내구성에 영향을 미치는 주요 열화 요인을 규명하는 것에 대하여 LIBS의 적용 가능성을 실험하였다. 일반적으로 LIBS는 Fig. 1에서와 같이 레이저, 분광기, 분광분석 S/W 등으로 구성된다. 즉, 플라즈마 유도 레이저 소스와 레이저빔을 이송

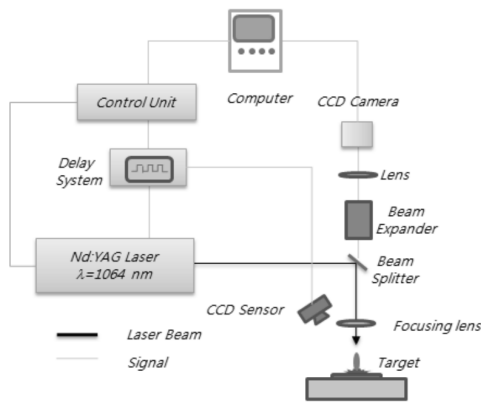


Fig. 1 Basic principles and composition of LIBS



Photo 2 RT100

하는 빔 이송 시스템, 타겟 위치제어와 플라즈마 신호를 획득 분석하는 분광기 및 이들을 제어하는 컴퓨터 시스템 등으로 이루어져 있다(Kim et al., 2014).

본 연구에서는 LIBS를 통해 염화물, 황산염, 탄산화 모르타르 시험체에 대한 유해 열화인자 정량 검출 실험을 위해 LIBS 실험 장치로서 Applied Spectra, Inc.에서 개발한 Photo 2의 RT100 상용 모델을 활용하였다. RT100 모델은 원소 정량 분석 연구에 다수 활용되어 이미 성능이 검증되었으며, RT100의 레이저, 분광기, 분광분석 S/W에 대한 세부 제원은 Table 4와 같다.

LIBS 실험을 위하여 40×40×160 mm 크기로 제작된 염화물, 황산염, 탄산화 기준 시험체를 절단기를 이용하여 중간부에 대하여 40×40×10 mm 크기로 절단 가공한 후, Photo 3에서와 같이 1개의 기준 시험체에 대해 10×10 mm 간격으로 총 9지점(Point)에 대하여 분광 스펙트럼을 측정하였다.

### 2.4 결과 및 고찰

#### 2.4.1 염화물 시험체의 LIBS 실험 결과

염화물 시험체에 대한 LIBS 실험 결과는 Fig. 2와 같다. 염소 (Cl) 이온은 837.6 nm 파장에서 검출되는 것을 확인할 수 있었으며, 염화물 함유량 0, 0.31, 0.61, 0.91, 1.49, 2.34%에 따른 각각의 시편에 대한 정규화된 LIBS 스펙트럼 파장 강도 분석 결과는 Table 5에 나타내었다. Fig. 3은 Table 5의 분석 결과를 활용하여 염소 이온 함유량에 따른 LIBS 스펙트럼 파장 강도 측정 결과를

Table 4 Specification of RT100

Division	Property
Laser	- Nd:YAG
	- Wavelength : 1064 nm
	- Pulse Energy : 50 mJ
Spectrometer	- Range : 200~900 nm
	- Resolution : 0.1 nm
	- Detection : 5 ch CCDs
Integration s/w	- Axiom
	- TruLIBS emission database
	- LIBS wavelength peak analysis

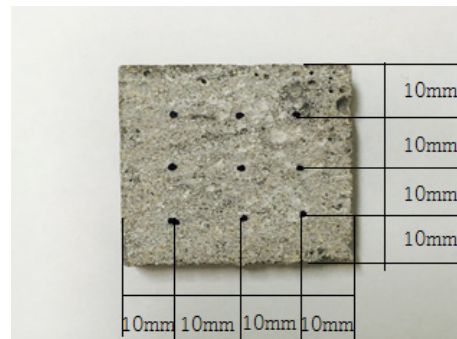


Photo 3 Measuring point of LIBS

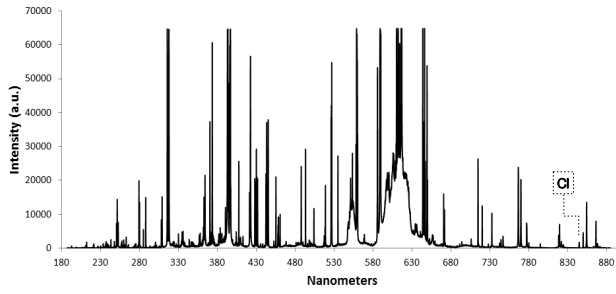


Fig. 2 LIBS spectrum result for chloride specimen

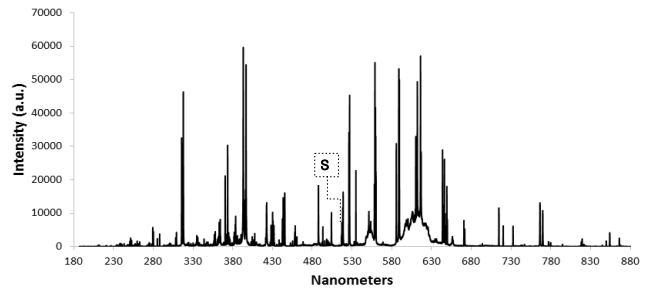


Fig. 4 LIBS spectrum result for sulfate specimen

Table 5 Normalized intensity at 837.6 nm for chloride specimen

Div.	Chloride specimen					
	0%	0.31%	0.61%	0.91%	1.49%	2.34%
Pt. 1	24	44	-	90	126	175
Pt. 2	20	75	67	-	15	123
Pt. 3	-	-	12	-	-	118
Pt. 4	38	52	31	-	-	-
Pt. 5	44	-	77	42	31	78
Pt. 6	-	80	90	123	134	105
Pt. 7	6	68	108	94	103	114
Pt. 8	10	74	79	116	127	135
Pt. 9	31	60	72	102	160	122
Avg.	24.7	64.7	67.0	94.5	99.4	121.3
Std. dev.	14.0	13.2	31.2	28.7	55.0	27.5

Table 6 Normalized intensity at 510.3 nm for sulfate specimen

Div.	Sulfate specimen				
	0 %	0.30 %	0.40 %	0.50 %	0.60 %
Pt. 1	-	242	254	297	384
Pt. 2	231	188	367	392	295
Pt. 3	147	170	258	342	264
Pt. 4	115	236	-	352	-
Pt. 5	158	326	284	-	227
Pt. 6	107	150	264	378	509
Pt. 7	122	296	228	257	461
Pt. 8	158	-	243	365	494
Pt. 9	131	241	272	329	477
Avg.	146.1	231.1	271.3	339.0	388.9
Std. dev.	39.3	60.5	42.3	44.4	112.8

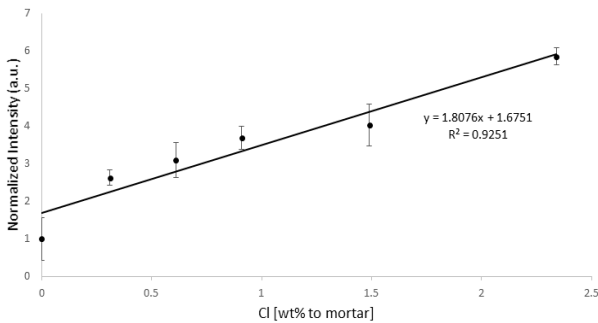


Fig. 3 Cl content regression analysis using LIBS

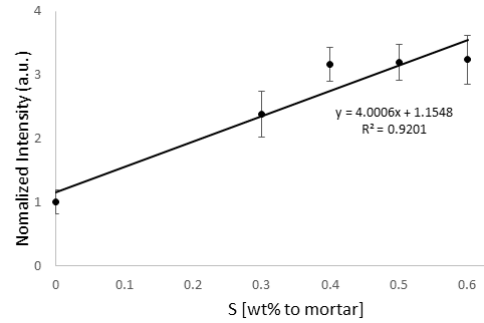


Fig. 5 S content regression analysis using LIBS

정규화하여 회귀분석한 것으로 결정계수( $R^2$ )는 0.9251로 나타났다.

### 2.4.2 황산염 시험체의 LIBS 실험 결과

황산염 시험체에 대한 LIBS 실험 결과는 Fig. 4와 같다. LIBS 스펙트럼 분석으로부터 황(S) 이온은 510.3 nm 파장에서 검출되는 것을 확인할 수 있었으며, 황산염 함유량 0, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60%에 따른 각각의 시편에 대한 정규화된 LIBS 스펙트럼 파장 강도 분석 결과는 Table 6에 나타내었다. Fig. 5는 Table

6의 분석 결과를 활용하여 황 이온 함유량에 따른 LIBS 스펙트럼 파장 강도 측정 결과를 정규화하여 회귀분석한 것으로 결정계수는 0.9201로 나타났다.

### 2.4.3 탄산화 시험체의 LIBS 실험 결과

탄산화 시험체에 대한 LIBS 실험 결과는 Fig. 6과 같다. 탄소(C) 이온은 247.9 nm 파장에서 검출되는 것을 확인할 수 있었으며, 탄산화 촉진 0, 1, 2, 4, 6, 8주에 따른 각각의 시편에 대한 정규화된 LIBS 스펙트럼 파장 강도 분석 결과는 Table 7에 나타내

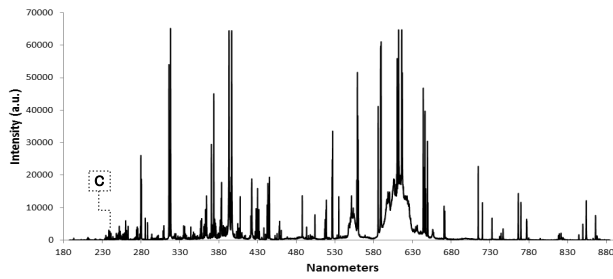


Fig. 6 LIBS spectrum result for carbonation specimen

Table 7 Normalized intensity at 247.9 nm for carbonation specimen

Div.	Carbonation specimen					
	0 week	1 week	2 weeks	4 weeks	6 weeks	8 weeks
Pt. 1	788	1874	1879	1968	2256	2107
Pt. 2	588	-	2169	2271	2207	2043
Pt. 3	-	-	2048	-	1757	1947
Pt. 4	477	2212	1735	1736	1351	-
Pt. 5	271	1852	1616	1709	1716	1782
Pt. 6	912	1451	1745	2032	2341	3041
Pt. 7	-	1237	1214	2451	2974	2247
Pt. 8	615	1456	-	-	2542	2942
Pt. 9	879	1507	2142	2312	2775	-
Avg.	647.1	1655.6	1818.5	2068.4	2213.2	2301.3
Std. dev.	230.5	335.4	316.8	288.0	526.7	493.3

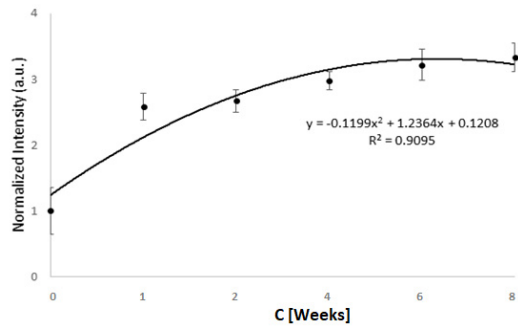


Fig. 7 C content regression analysis using LIBS

었다. Fig. 7은 Table 7의 분석 결과를 활용하여 탄소 이온 함유량에 따른 LIBS 스펙트럼 파장 강도 측정 결과를 정규화하여 회귀분석한 것으로 결정계수는 0.9095로 나타났다.

### 3. 결 론

콘크리트 내구성에 영향을 미치는 주요 열화 요인을 규명하는 것에 대하여 LIBS의 적용 가능성을 실험적으로 연구하였다.

LIBS를 통해 염화물, 황산염, 탄산화 모르타르 시험체에 대한 유해 열화인자 정량 검출 실험을 실시함으로써 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 염화물 시험체에 대하여 LIBS 실험을 실시한 결과, 염소 이온은 837.6 nm 파장에서 검출되었으며, 염화물의 농도가 증가함에 따라 염소 이온의 LIBS 스펙트럼 파장 강도가 비교적 선형적으로 증가하는 것을 회귀분석을 통해 확인할 수 있었다.
- 2) 황산염 시험체에 대한 LIBS 실험의 경우, 선행 연구결과에서는 921.3 nm 파장에서 황 이온이 가장 크게 나타났으나, 본 연구에서는 분광기의 한계로 900 nm 이상의 분광 스펙트럼은 검출이 불가능하였으며, 동위원소로서 510.3 nm 파장에서 황 이온을 검출할 수 있었다.
- 3) 황산염 함유량 0, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60%에 따른 LIBS 스펙트럼 파장 강도 분석 결과를 정규화하여 회귀분석한 결과, 황산염의 농도가 증가함에 따라 황 이온의 LIBS 스펙트럼 파장 강도가 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있었다.
- 4) 탄산화 시험체에 대한 LIBS 실험에서 탄소 이온은 247.9 nm 파장에서 검출되었으며, 탄산화 촉진 0, 1, 2, 4, 6, 8주에 따른 각각의 시험체에 대한 LIBS 스펙트럼 파장 강도 분석 결과, 탄산화 노출 기간에 따른 탄소 이온 LIBS 스펙트럼 파장 강도는 비선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.
- 5) 이상의 실험결과로부터 콘크리트 열화 진단에 LIBS의 적용 가능성을 부분적으로 확인할 수 있었으며, 콘크리트 탄산화의 경우 탄산화 촉진 시험기의 폭로 기간 0, 1, 2, 4, 6, 8주에 따른 시험체의 탄소 이온 증가량을 파악하기 어려울 뿐만 아니라, 시멘트 자체에 탄소 이온 성분이 함유되어 염화물 및 황산염 시험체의 정량 검출과는 다소 상이한 결과를 보인 것으로 추정된다.
- 6) 따라서 콘크리트 탄산화에 대하여 LIBS를 적용하기 위해서는 보다 다양한 매개변수 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

### References

Cho, Y. H. (2004), A status of the art report for laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), KAERI, 1-9.

Friederike Weritz, Alexander Taffe, Dieter Schaurich, and Gerd Wilsch (2009), Detailed depth profiles of sulfate ingress into concrete measured with laser induced breakdown spectroscopy, *Construction and Building Materials*, 23(1), 275-283.

Gondal, M. A., Dastageer, A., Maslehuddin, M., Alnehmi, A. J., and Al-Amoudi, O. S. B. (2011), Detection of sulfur in the reinforced concrete structures using a dual pulsed LIBS system, *Optics & Laser Technology*, 44(3), 566-571.

- Kang, W. G. (2011), Elemental analysis using laser-induced breakdown Spectroscopy (LIBS), *News & Information for Chemical Engineers*, 29(4), 460-464.
- Kim, C. W., Park, J. G., Ha, J. H., Song, M. J., and Lee, G. H. (2003), Laser-induced breakdown spectroscopy and application, *Ceramist, The Korean Ceramic Society*, 6(3), 67-76.
- Kim, D. G., Jung, H. S., Bae, G. J., and Shin, H. S. (2009), Characterization of deterioration of concrete lining in tunnel structures, *Tunnelling Technology*, 11(4), 387-394.
- Kim, J. H. and Ko, C. S. (2014), Non-contact Measurement and Analysis of Surface Hardness on Welding Steel using Laser-induced Breakdown Spectroscopy, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, 31(2), 141-148.
- KISTEC (2010), Detailed Safety Inspection and Precision Safety Diagnosis instructions (Waterworks), Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 5-86.
- Timur, A. Labutina, Andrey M. Popova, Sergey M. Zaytseva, Nikita B. Zorova, Vasili V. Kirisb, and Sergey N. Raikobv (2014), Determination of chlorine, sulfur and carbon in reinforced concrete structures by double-pulse laser-induced breakdown spectroscopy, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 99, 94-100.
- Wilsch, G., Weritz, F., Schaurich, D., and Wiggerhauser, H. (2005), Determination of chloride content in concrete structures with laser-induced breakdown spectroscopy, *Construction and Building Materials*, 19(10), 724-730.

Received : 09/08/2017

Revised : 10/03/2017

Accepted : 10/12/2017

---

**요 지** : 표준 시료의 분광 분석으로부터 획득한 각 원소별 파장 특성 값과 검사대상 미지 시료로부터의 파장 분석 결과를 비교함으로써 미지 시료에 함유된 원소의 정성 및 정량 분석을 가능하게 하는 것이 LIBS이다. 본 연구에서는 콘크리트 내구성에 영향을 미치는 주요 열화 요인을 규명하는 것에 대하여 LIBS의 적용 가능성을 실험적으로 분석하였다. 즉, LIBS를 통해 염화물, 황산염, 탄산화 모르타르 시험체에 대한 유해 열화인자 정량 검출 실험을 실시함으로써 콘크리트 열화 진단의 LIBS 적용 가능성을 연구하였다. 염화물과 황산염 시험체 각각에 대하여 LIBS 실험을 실시한 결과 농도가 증가할수록 염소 및 황 이온의 LIBS 스펙트럼 파장 강도가 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있었다. 탄산화 시험체의 경우 탄산화 노출 기간에 따른 탄소 이온 LIBS 스펙트럼 파장 강도는 다소 비선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이상의 실험 결과로부터 콘크리트 열화 진단에 LIBS의 적용 가능성을 부분적으로 확인할 수 있었으며, 콘크리트 탄산화의 경우 시멘트 자체에 탄소 성분이 함유되어 염화물 및 황산염 시험체의 정량 검출과는 다소 상이한 결과를 보인 것으로 추정된다. 따라서 콘크리트 탄산화에 대하여 LIBS를 적용하기 위해서는 보다 다양한 매개변수 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

**핵심용어** : 탄산화, 염화물, 콘크리트 열화 진단, 레이저유도분광분석법, 황산염

---