

# 시간분해 레이저 유도 파열 분광분석에 의한 원자력발전소 계통재질의 성분 정성분석

정근호\* · 조영현 · 이완로 · 최근식 · 이창우

한국원자력연구소 원자력환경연구부  
(2004. 7. 2 접수, 2004. 9. 9 승인)

## Qualitative Analysis of the Component Materials of Nuclear Power Plant Using Time-Resolved Laser Induced Breakdown Spectroscopy

Kun-Ho Chung\*, Yeong-Hyun Cho, Wannoo Lee, Geun-Sik Choi and Chang-Woo Lee

Nuclear Environment Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Dukjin-Dong, Yuseong-Gu,  
Daejeon 305-353, Korea

(Received Jul. 2, 2004, Accepted Sep. 9, 2004)

**요약** : 시간분해 레이저 유도 파열 분광분석 (TRELIBS) 시스템을 구성하여 원자력발전소 계통재질의 성분을 정성 분석하는 데 응용하였다. 본 연구에서는 탄소강 (A106 Gr. B, A336 P11, A335 P22), 스테인레스강 (type 304, type 316) 및 인코넬 계열 합금(인코넬 600, 인코넬 690, 인코넬 800) 시료를 사용하였다. 탄소강의 종류는 485~575 nm 파장영역에서 나타난 Cr/Fe과 Mo/Fe의 TRELIBS 피크 비에 의해서 서로 구분 가능하였다. type 304와 type 316 스테인레스강은 485~575 nm 파장영역에서 나타나는 Mo의 TRELIBS 피크 존재 여부에 의해서 쉽게 구분 가능하였다: type 304는 어떤 Mo의 피크도 나타내지 않지만, type 316은 Mo의 피크를 보여준다. 인코넬 계열 합금강 종류는 420~510 nm 파장영역에서 나타난 Cr/Fe과 Ni/Fe의 TRELIBS 피크 비에 의해서 서로 구분 가능하였다. TRELIBS는 시료의 전처리 없이 빠르고 쉽게 합금을 분석할 수 있는 효과적인 분석 기술임이 입증되었다.

**Abstract** : Time-resolved laser induced breakdown spectroscopy (TRELIBS) has been developed and applied to the qualitative analysis of the component materials of nuclear power plant. The alloy samples used in this work were carbon steels (A106 Gr. B; A336 P11; A335 P22), stainless steels (type 304; type 316) and inconel alloys (Inconel 600; Inconel 690; Inconel 800). Carbon steels can be individually distinguished by the intensity ratio of chromium to iron and molybdenum to iron emission lines observed at the wavelength ranging from 485 to 575 nm. Type 316 stainless steel can be easily differentiated from type 304 by identification of the molybdenum emission lines at an emission wavelength ranging from 485 to 575 nm: type 304 does not give any molybdenum emission lines, but type 316 does. The inconel alloys can be individually distinguished by the intensity ratio of

★ Corresponding author

Phone : +82+(0)42-868-2389 Fax : +82+(0)42-863-1289

E-mail : chungkh@kaeri.re.kr

Cr/Fe and Ni/Fe emission lines at the wavelength ranging from 420 to 510 nm. TRELIBS has been proved to be a powerful analytical technique for direct analysis of alloys due to its non-destructivity and simplicity.

**Key words :** TRELIBS, carbon steel, stainless steel, inconel alloy, nuclear power plant

## 1. 서 론

원자분광분석법은 여기된 시료로부터 방출되는 빛을 측정하여 시료에 포함된 원소 성분을 정성 및 정량하는 방법이다. 스파크 (spark), 불꽃 (flame), ICP (inductively coupled plasma) 등이 시료의 여기에 고전적으로 이용되고 있는 방법이다. 최근에는 레이저를 광원으로 사용한 원자분광분석 방법이 다양하게 도입되고 있다.<sup>1</sup> 레이저 유도 파열 분광분석법 (LIBS: laser induced breakdown spectroscopy)은 고출력의 레이저빔과 시료와의 상호작용에 의해서 생성된 플라즈마에서 방출하는 분광스펙트럼을 해석하여 원소 성분을 분석하는 방법이다. LIBS에 의한 원소분석 방법은 시료 전처리 과정을 거치지 않고 실시간 온라인 분석이 가능하며, 쉽고 빠르게 시료를 분석할 수 있는 장점이 있어서 기체<sup>2,4</sup>, 미세입자<sup>5,8</sup>, 액체<sup>9,10</sup>, 고체<sup>11-20</sup>, 시료의 분석에 다양하게 사용되고 있다. 원자분광분석법으로서의 LIBS에 대한 원리와 응용 및 장치 등에 대한 자세한 설명은 문헌에 잘 보고되어있다.<sup>21-24</sup>

LIBS 시스템의 발달과 더불어 최근에는 플라즈마 형성 초기에 발생되는 백그라운드 노이즈를 시간분해분광법 (time-resolved spectroscopy)을 이용하여 효과적으로 제거할 수 있는 ICCD (Intensified Charge-Coupled Device)가 플라즈마 방출선 검출기로 사용되고 있다.<sup>7,8,10,18</sup> 실시간 온라인 분석 특성을 지닌 LIBS 시스템은 원자력산업에도 응용되고 있다.<sup>17,20</sup> Whitehouse 등은 75 m 길이의 광섬유를 LIBS 시스템에 연결하여 증기발생기내에 있는 type 314H 스테인레스강 재질의 표면에 오염된 Cu 함량을 효과적으로 분석하였다.<sup>20</sup> Davis 등은 광섬유를 이용하여 운전중인 원자로 내에서 금속 성분 분석을 위한 기초연구와 응용연구를 수행하였다.<sup>17</sup>

본 연구에서는 온라인 실시간 원소분석이 가능하도록 광섬유가 연결된 시간분해 레이저 유도 파열 분광분석 (TRELIBS: time-resolved laser-induced breakdown spectroscopy) 시스템을 구성하였으며, 이 시스템을 이

용하여 원자력발전소 계통재질인 탄소강 (A106 Gr. B, A336 P11, A335 P22), 스테인레스강 (type 304, type 316) 및 인코넬 계열 합금 (인코넬 600, 인코넬 690, 인코넬 800)의 합금별 차이를 구분하였다. 탄소강은 발전소 배관 재질로, 스테인레스강은 증기발생기 용기 (vessel)의 재질로, 인코넬은 증기발생기 U-튜브 재질로 사용된다.

## 2. 실 험

### 2.1. 계통재질 시편

본 실험에 사용한 계통재질 시편 중 탄소강은 A106 Gr. B, A336 P11, A335 P22의 세 종류를, 스테인레스 강은 type 304와 316 두 종류를, 인코넬 합금은 Alloy 600TT, Alloy 690TT, Alloy 800H의 세 종류를 사용하였으며 시편들의 주 구성 원소 성분을 Table 1에 나타냈다. TRELIBS 분석시 시료의 형태나 크기는 크게 제약을 받지 않으나, 평판형의 시편이 분석시 편리하며, 시편의 크기는 10 mm × 10 mm 이상이면 충분하다.

### 2.2. TRELIBS 시스템 구성

본 연구를 위하여 Fig. 1에 나타난 것과 같이 시편 여기용 Nd:YAG 레이저 (BM industries, YAG 5011 COMP10), 시편 고정용 홀더, 단색분광기 (Jobin Yvon, HR-320), 플라즈마 방출선 검출기인 ICCD (ENDOR, iStar DH720-18), 플라즈마 방출선 수집 및 운반용 광학세트와 광섬유, 에너지 메타 (Moletron, EPM 1000), 자료수집용 컴퓨터 등을 사용하여 TRELIBS 분석시스템을 특별히 구성하였다.

### 2.3. 계통재질 시편의 TRELIBS 분석

구성된 TRELIBS 시스템을 사용하여 계통재질의 시편에 대한 플라즈마 방출 스펙트럼을 측정하였다. 펄스형 Nd:YAG 레이저의 third harmonic에서 나오는 355nm (에너지 10 mJ, 펄스폭 5 ns, 펄스 반복 주기

Table 1. Selected chemical composition of the specimens used in the present work

type of alloys	specimens	chemical composition (wt %)										
		C	Si	Mn	P	S	Ti	Al	Mo	Cr	Ni	Fe
carbon steels	A106 Gr. B	0.15	0.19	0.64	0.003	0.014			0.01	0.03	0.06	98.90
	A336 P11	0.10	0.56	0.36	0.009	0.009			0.48	1.06		97.42
	A335 P22	0.09	0.21	0.49	0.012	0.008			0.97	2.03		96.19
stainless steels	type 304	0.045	0.406	1.688	0.030	0.001				18.23	8.155	71.44
	type 316	0.022	0.53	0.87	0.020	0.001			2.61	17.69	10.60	68.41
inconel alloys	600TT	0.025	0.15	0.21	0.001	0.001	0.32	0.21		15.10	74.90	9.08
	690TT	0.017	0.21	0.29	0.006	0.001	0.29	0.041		29.40	59.40	10.2
	800H	0.06	0.58	1.17		0.001	0.50	0.41		19.60	30.50	46.9

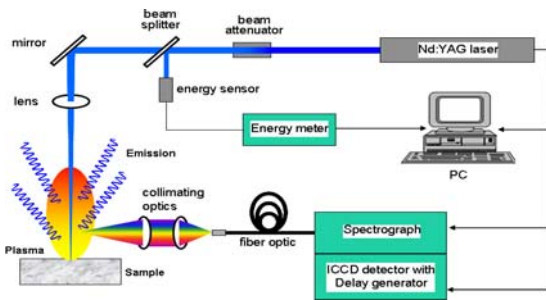


Fig. 1. Schematic diagram of the laboratory setup for time-resolved laser-induced breakdown spectroscopy (TRELIBS).

20 Hz) 파장의 광원을 시편의 플라즈마를 생성시키는데 사용하였다. 렌즈( $f=100$  mm)를 이용하여 시편에 레이저빔의 초점을 맞추어 플라즈마를 생성시켰다.

플라즈마에서 방출된 빛은 방출선 수집 및 운반용 광학세트와 광섬유를 거쳐 단색분광기(monochromator)의 슬릿입구( $1$   $\mu\text{m}$ )에 보내진다. 탄소강과 스텐인레스강 시편의 분석시에는 Mo, Cr, Fe의 TRELIBS 특성피크가 서로 간섭이 없고 상대 피크비가 잘 구분될 수 있는 파장영역에서 플라즈마 방출선 검출이 가능하도록 단색분광기의 중앙파장을 520 nm로 고정하고, 플라즈마 방출선을 485~575 nm 파장영역에서 분산시켰다. 인코넬 합금 시편의 경우는 Cr, Ni, Fe의 TRELIBS 특성피크가 서로 간섭이 없고 상대 피크비가 잘 구분될 수 있는 파장영역에서 플라즈마 방출선 검출이 가능하도록 단색분광기의 중앙파장을 455 nm로 고정하여, 플라즈마 방출선을 420~510 nm 파장영역에서 분산시켰다. 단색분광기에서 파장 분산에 사용된 회절격

자(grating)는 600 g/mm이다. 단색분광기의 분해능은 1200 g/mm 회절격자 기준으로 0.05 nm이다.

ICCD(1024×256 pixels)의 채널은 머큐리램프(Hg Pen ray Lamp)를 이용하여 파장단위로 변환하였다. ICCD에 내장되어 있는 digital delay generator를 이용하여 펄스형 Nd:YAG 레이저와 ICCD를 서로 동기화 시켰다. 즉, 펄스형 Nd:YAG 레이저의 flash lamp에서 생성된 트리거 신호(20 Hz)가 ICCD에 내장되어 있는 digital delay generator를 활성화시키면, 이 digital delay generator는 output A 트리거 신호를 생성시켜 Nd:YAG 레이저의 Q-스위치를 활성화(on/off)하여 레이저빔이 방출되도록 한다. 또한 동시에 이 digital delay generator는 ICCD의 intensifier 튜브를 조절하여 시간분해분광분석을 가능하게 한다. ICCD에서 플라즈마 방출선의 시간분해분광분석은 게이트 지연시간(gate delay) 0.8  $\mu\text{s}$ , 게이트 폭(gate width) 10  $\mu\text{s}$ , 누적 측정 횟수(accumulation number of scan) 5회의 측정조건을 사용하여 실시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 플라즈마 방출선의 시간분해분광분석

Fig. 2는 Fe 금속시편을 사용하여 얻어진 플라즈마 방출선의 시간분해분광분석 스펙트럼이다. 본 연구에 사용된 모든 시편들은 Fe 성분을 포함하고 있으므로 Fe 시편을 사용하여 플라즈마의 시간분해 특성을 살펴본 것이며, 이를 근거로 TRELIBS 분석조건을 설정하였다. Fe 금속시편의 플라즈마 시간분해분광분석은 게이트 지연시간 스텝(gate delay time step) 200 ns의 조건에서 50개의 스펙트럼을 순차적 측정하여 수행되었다. 시간분해분광분석 스펙트럼에서 볼 수 있듯이 플라즈마 형

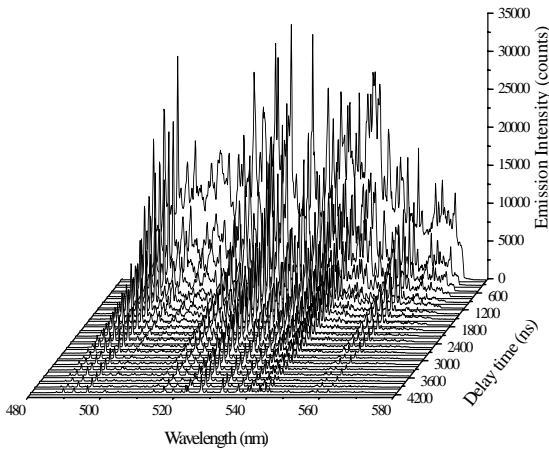


Fig. 2. Time-resolved emission spectra of an iron metal specimen as a function of gate delay time: gate delay step = 200 ns.

성초기에 강한 백그라운드 노이즈가 생성되었다. 이와 같은 백그라운드 노이즈는 플라즈마에서 생성된 이온과 전자가 재결합 과정을 거치면서 방출하는 연속 스펙트럼으로 이해되고 있다.<sup>18</sup> 이와 같은 노이즈는 수백 나노초 내에 사라지게 된다. Fe 금속시편의 경우 0.8 μs 이내에 백그라운드 노이즈가 완전히 사라지는 것을 확인할 수 있었다. Fe 금속시편에서 발생하는 플라즈마 방출선은 10 μs 후 사라지는 것을 확인할 수 있었다. Fe 금속시편의 495.8 nm 피크 세기의 자연로그 값 (lnI)을 게이트 지연시간 (t)에 대해서 도시하여 기울기 (s)로부터 Fe의 플라즈마 방출선 lifetime (τ = -1/s)을 계산할 수 있다. 피크 세기의 자연로그 값 (lnI)과 게이트 지연시간 (t) 사이에는 식(1)과 같은 관계식이 얻어졌다.

$$\ln I = 10.06 - 7.66 E - 4 \times t \quad (1)$$

식 (1)로부터 Fe의 플라즈마 방출선 lifetime 값은 1.3 μs로 계산되었다. Fe 금속시편의 플라즈마 시간분해분광분석시 Fe 표면에 레이저빔 (에너지: 10 mJ)이 연속적으로 집중되어 표면 깊이가 변동되는 요인으로 인해 초점거리에 변동이 생기므로 여기서 측정 계산된 방출선 lifetime은 비교 값으로만 사용될 수 있다. 대기 분위기에서 Fe 원소의 방출선 lifetime은 He 기체 분위기와 Ar 기체 분위기에서 Cu 원소의 lifetime인 6 μs와 30 μs보다 5 배와 19 배정도 짧았다.<sup>18</sup> 이와 같은

실험결과는 플라즈마의 방출선 lifetime이 분위기에 많은 영향을 받는다는 것을 제시한다. 이 실험결과를 근거로, 계통재질의 TRELIBS 분석시 ICCD의 플라즈마 방출선 시간분해분광분석 조건을 게이트 지연시간 0.8 μs, 게이트 폭 10 μs로 설정하였다. Fe 금속시편의 플라즈마 시간분해분광분석시 사용한 실험조건에서 공기의 TRELIBS 스펙트럼은 관측되지 않았다. 공기에서 발생하는 플라즈마 방출선은 485~575 nm 파장영역에서 500.4, 504.4, 517.6, 566.7, 567.9 nm에서 특성피크를 나타내나, 이들 특성피크는 0.2 μs 안에 완전히 사라지는 것을 확인하였다.

### 3.2. 탄소강의 성분분석

탄소강 시편을 사용하여 얻어진 플라즈마 방출선의 TRELIBS 스펙트럼을 Fig. 3에 나타냈다. 탄소강의 스펙트럼에서 나타난 피크들을 보다 잘 해석하기 위하여 Mo, Cr, Fe 금속 시편을 사용하여 측정된 스펙트럼도 함께 나타냈다. Mo 금속시편은 485~575 nm 파장영역에서 몇 개의 특성 피크를 보였다. 이 중 550.6, 553.2, 557.0 nm에서 상대적으로 강한 Mo 특성 피크를 나타냈다. Cr 금속시편은 485~575 nm 파장영역 중 520.6 nm에서 상대적으로 매우 강한 특성 피크를 나타냈다. Fe 금속시편은 485~575 nm 파장영역에서 매우 복잡한 피크를 보였다. 이 중 495.9 nm의 피크는 Cr과 Mo의 특성 피크로부터 확연히 구분되는 Fe의 특성피크이다. 동일 실험조건에서 얻어진 Cr (520.6 nm), Mo (550.6 nm), Fe (495.9 nm)의 플라즈마 방출선의 세기를 정성비교하면, Fe ≪ Mo < Cr의 순으로, Cr과 Mo의 플라즈마 방출선의 세기가 Fe에 비해 훨씬 강하였다. A335 P22, A336 P11, A106 Gr. B 시편들의 TRELIBS 스펙트럼은 서로 매우 유사하였다. 이는 Table 1에 나타난 원소 성분비에 의해서도 예측할 수 있다. 탄소강은 96% 이상의 Fe와 2% 이하 함량의 미량의 원소들로 구성되어 있다. 그러므로 탄소강의 스펙트럼들은 Fe의 스펙트럼과도 매우 유사하였다. 그러나 탄소강의 스펙트럼에서는 Fe의 스펙트럼에서 보이지 않는 Cr과 Mo의 특성 피크가 잘 나타난다. 스펙트럼 상에서 Cr (520.6 nm), Mo (550.6 nm), Fe (495.9 nm)의 세기를 상대비교하기 위하여 Cr/Fe와 Mo/Fe의 피크세기 비 (intensity ratio)를 계산하였다. 스펙트럼 내에서 피크간의 비는 동일 실험조건에서 측정 되었으므로, 즉 실험조건에 대한 영향을 덜 받으므로 구성 원소간의 상대적인 함량을 비교하는 데 사용한다.

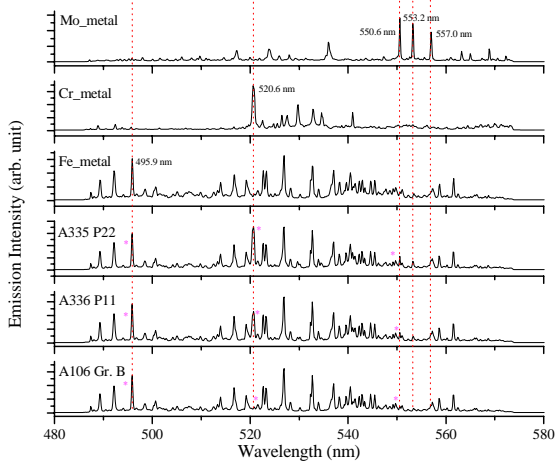


Fig. 3. TRELIBS spectra of carbon steel specimens: gate delay time=0.8  $\mu$ s, gate width=10  $\mu$ s, accumulation=5. TRELIBS spectra of Mo, Cr and Fe specimens are also given for comparison. The asterisks represent the characteristic peaks of the Mo, Cr and Fe metals.

Cr/Fe 피크세기 비를 비교하면, A335 P22 (1.19) > A336 P11 (0.81) > A106 Gr. B (0.16) 순이었다. 이는 Table 1에 나타난 Cr 함량 (wt %)의 차이인 A335 P22 (2.03) > A336 P11 (1.06) > A106 Gr. B (0.03) 순서와도 잘 일치한다. Mo의 특성피크에 의해서도 탄소강의 구분은 가능하였다. Mo/Fe 피크세기 비는, A335 P22 (0.37) > A336 P11 (0.27) > A106 Gr. B (0.17) 순이었으며, Mo 원소함량 (wt %)의 차이인 A335 P22 (0.97%) > A336 P11 (0.48%) > A106 Gr. B (0.01%) 순서와도 잘 일치한다.

### 3.3. 스테인레스강의 성분분석

Fig. 4는 스테인레스강 시편을 사용하여 얻어진 플라즈마 방출선의 TRELIBS 스펙트럼을 보여준다. 스테인레스강의 경우도 스펙트럼에서 나타난 피크들을 보다 잘 해석하기 위하여 Mo, Cr, Fe 금속 시편을 사용하여 측정된 스펙트럼을 함께 나타냈다.

485~575 nm 파장영역에서 얻어진 스테인레스강 시편의 TRELIBS 스펙트럼에서 type 316은 550.6, 553.2, 557.0 nm에서 나타난 Mo의 특성피크를 제외하면 type 304와 모든 특성피크가 정확히 일치하였다. Table 1에 나타난 type 316의 원소 함량 (wt%)은 Fe (68.41%) > Cr (17.69%) > Mo (2.61%) 순서이나, Fig. 4에

보여진 type 316 TRELIBS 스펙트럼의 Cr (520.6 nm), Mo (550.6 nm), Fe (495.9 nm)의 플라즈마 방출선의 세기를 정성비교하면, Fe  $\approx$  Mo < Cr의 순서를 나타냈으며, Cr의 플라즈마 방출선의 세기가 상대적으로 강하였다. type 304와 316은 Table 1에 나타난 것과 같이 원소 성분 함량 (wt %)에서 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 type 304는 Mo 성분을 포함하고 있지 않으며 type 316은 Mo 성분을 2.61% 포함하고 있는 점이 두 시편의 큰 차이점이다. 이와 같은 차이점은 Fig. 4에 나타난 Mo의 TRELIBS 피크 존재 여부로부터 정확히 구분 가능하였다.

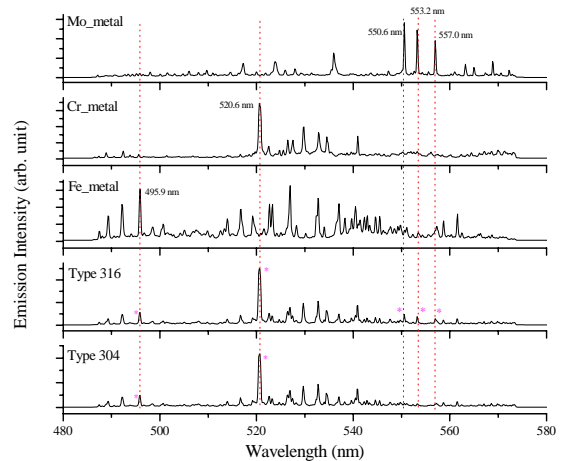


Fig. 4. TRELIBS spectra of stainless steel specimens: gate delay time=0.8  $\mu$ s, gate width=10  $\mu$ s, accumulation=5. TRELIBS spectra of Mo, Cr and Fe specimens are also given for comparison. The asterisks represent the characteristic peaks of the Mo, Cr and Fe metals.

### 3.4. 인코넬 합금의 성분분석

Fig. 5는 인코넬 합금 시편을 사용하여 얻어진 플라즈마 방출선의 TRELIBS 스펙트럼을 보여준다. 인코넬 합금의 주성분 원소인 Cr, Ni, Fe 금속 시편의 TRELIBS 스펙트럼도 함께 나타냈다. 인코넬 합금은 Ni 성분을 주성분 중의 하나로 포함하고 있으므로 Ni의 TRELIBS 스펙트럼 특징이 잘 나타나는 420~510 nm 파장영역에서 모든 스펙트럼을 측정하였다. Cr 금속시편은 420~510 nm 파장영역에서 매우 복잡한 피크를 나타냈으나, Ni와 Fe로부터 간섭을 적게 받고 피

크세기가 강한 465.1 nm의 특성피크를 인코넬 합금 비교시 사용하였다. Ni 금속시편은 420~510 nm 파장 영역에서 471.4, 503.5, 508.2 nm에서 강한 특성피크를 나타냈으며, Cr과 Fe의 간섭이 없는 508.2 nm의 피크를 Ni의 지표 특성피크로 사용하였다. Fe 금속시편은 420~510 nm 파장영역에서 489.1, 492.0, 495.9 nm에서 강한 특성피크를 나타냈으며, 상대적으로 간섭이 적은 495.9 nm의 피크를 Fe의 지표 특성피크로 사용하였다.

Table 1에 나타낸 것과 같이 인코넬은 Cr, Ni, Fe이 주 성분인 합금이다. 600TT, 690TT, 800H 인코넬 합금 시편들의 TRELIBS 스펙트럼은 전반적으로 Cr, Ni, Fe의 특성 피크들이 합쳐진 스펙트럼을 보여주었으나, 상대적인 피크 세기는 서로 차이를 보였다. Cr/Fe 피크세기 비를 비교하면, 690TT (2.31) > 600TT (1.73) > 800H (0.53) 순이었다. 이는 Table 1에 나타난 Cr/Fe의 함량 비의 차이인 690TT (2.88) > 600TT (1.79) > 800H (0.42) 순서와 잘 일치한다. 인코넬 합금의 차이는 Ni/Fe 피크세기 비에 의해서도 잘 구분된다. Ni/Fe 피크세기 비는 600TT (3.22) > 690TT (2.39) > 800H (0.42) 순이었으며, 원소함량 비의 차이인 600TT (8.14) > 690TT (5.82) > 800H (0.65) 순서와도 잘 일치한다.

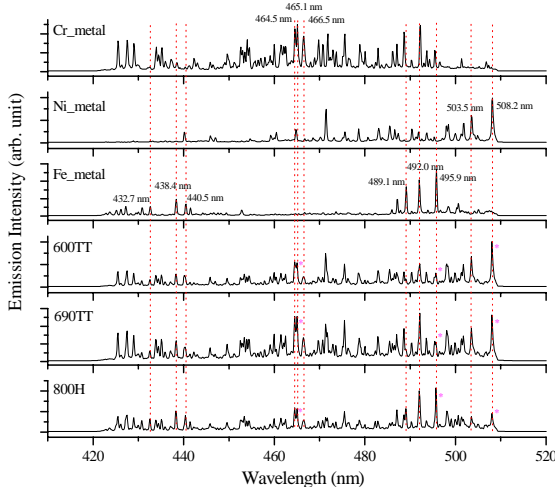


Fig. 5. TRELIBS spectra of inconel alloy specimens: gate delay time=0.8  $\mu$ s, gate width=10  $\mu$ s, accumulation=5. TRELIBS spectra of Cr, Ni and Fe specimens are also given for comparison. The asterisks represent the characteristic peaks of the Cr, Ni and Fe metals.

### 4. 결 론

본 연구에서는 온라인 실시간 원소분석이 가능한 TRELIBS 시스템을 구성하여, 원자력발전소 계통재료인 탄소강, 스텐인레스강 및 인코넬 계열 합금의 합금별 차이를 구분하였다. 탄소강의 TRELIBS 스펙트럼은 485~575 nm 파장영역에서 비교 가능한 Cr, Mo, Fe의 피크를 나타냈으며, Cr/Fe과 Mo/Fe의 피크세기 비에 의해서 A335 P22, A336 P11, A106 Gr. B의 상호 구분이 가능하였다. 스텐인레스강 중 type 316은 TRELIBS 스펙트럼 485~575 nm 파장영역에서 Mo의 특성피크 (550.6, 553.2, 557.0 nm)를 나타내어, 같은 영역에서 Mo의 특성피크를 보이지 않는 type 304로부터 명확한 구분이 가능하였다. 인코넬 계열 합금강 종류는 420~510 nm 파장영역에서 Cr, Ni, Fe의 특성피크를 나타냈으며, Cr/Fe과 Ni/Fe의 TRELIBS 피크세기 비 차이에 의해서 600TT, 690TT, 800H의 상호 구분이 가능하였다.

TRELIBS에 의한 합금의 비교 분석법은 시료의 전처리 없이 빠르고 쉽게 합금을 구분할 수 있는 방법이었으며, 여기서 사용된 분석방법은 사용전후 원전연료의 성분분석, 방사성폐기물 유리시료의 성분분석 및 발전소 계통재료의 부식 성분 등을 실시간 온라인으로 측정하는데 활용될 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 중장기 연구의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

1. T. L. Thiem, Y.-L. Lee and J. Senddon, *Microchem. J.*, **45**, 1-35(1992).
2. D.A. Cremers and L.J. Radziemski, *Anal. Chem.*, **55**, 1252-1256(1983).
3. L. Dudragne, Ph. Adam and J. Amouroux, *Appl. Spectrosc.*, **52**, 1321-1327(1998).
4. M. Hanafi, M.M. Omar and Y.E.E-D. Gamal, *Radiation Phys. Chem.*, **57**, 11-20(2000).
5. L. J. Radziemski, T. R. Loree, D. A. Cremers and N. M. Hoffman, *Anal. Chem.*, **55**, 1246-1252(1983).
6. I. Schechter, *Anal. Sci. Technol.*, **8**, 779~786(1995).

7. D. W. Hahn and M. M. Lunden, *Aerosol Sci. Technol.*, **33**, 30-48(2000).
8. M. Martin and M.-D. Cheng, *Appl. Spectrosc.*, **54**, 1279-1285(2000).
9. D. A. Cremers, L. J. Radziemski and T. R. Loree, *Appl. Spectrosc.*, **38**, 721-729(1984).
10. A. E. Pichahchy, D. A. Cremers and M. J. Ferris, *Spectrochim. Acta B*, **52**, 25-39(1997).
11. Y.-I. Lee, S. P. Sawan, T. L. Thiem, Y.-Y. Teng and J. Sneddon, *Appl. Spectrosc.*, **46**, 436-441(1992).
12. T. L. Thiem, R. H. Salter, J. A. Gardner, Y.-I. Lee and J. Sneddon, *Appl. Spectrosc.*, **48**, 58-64(1992).
13. R. Wisbrun, I. Schechter, H. Schoeder and K. L. Kompa, *Anal. Chem.*, **66**, 2964-2975(1994).
14. T. L. Thiem, R. H. Salter, J. A. Gardner, Y. I. Lee and J. Sneddon, *Appl. Spectrosc.*, **48**, 58-64(1994).
15. D. R. Anderson, C. W. McLeod, T. English and A. T. Smith, *Appl. Spectrosc.*, **49**, 691-701(1995).
16. W. E. Ernst, D. F. Farson and D. J. Sames, *Appl. Spectrosc.*, **50**, 306-309 (1996).
17. C. M. Davis, H. H. Telle and A.W. Williams, *Fresenius J. Anal. Chem.*, **355**, 895-899(1996).
18. K. Song, H. Cha, J. Lee, J.-S. Choi and Y.-I. Lee, *J. Korean Phys. Soc.*, **30**, 463-468(1997).
19. D. E. Kim, K. J. Yoo, H. K. Park, K. J. Oh and D. W. Kim, *Appl. Spectrosc.*, **51**, 22-29(1997).
20. A. I. Whitehouse, J. Young, I. M. Botheroyd, S. Lawson, C. P. Evans and J. Wriht, *Spectrochim. Acta B*, **56**, 821-830(2001).
21. D. A. Rusak, B. C. Castle, B. W. Smith and J. D. Winefordner, *Crit. Rev. Anal. Chem.*, **27**, 257-290(1997).
22. I. Schechter, *Rev. Anal. Chem.*, **16**, 173-298(1997).
23. J. Sneddon and Y.-I. Lee, *Anal. Lett.*, **32**, 2143-2162(1999).
24. K. Song, Y.-I. Lee and J. Sneddon, *Appl. Spectrosc. Rev.*, **37**, 89-117(2002).