

카오스 분석을 통한 용접 품질 정량화

조 정 호^{*,†} · Dave Farson^{**} · 김 철 희^{***}

^{*}현대기아 생산개발총괄본부 요소생기개발팀

^{**}Ohio State University, USA

^{***}한국생산기술연구원 용접접합연구부

Weld Quality Quantification through Chaotic Analysis

Jung-Ho Cho^{*,†}, Dave Farson^{**} and Cheolhee Kim^{***}

^{*}Hyundai & Kia Corporate, Fundamental Engineering Development Team, Hwaseongsi 445-706, Korea

^{**}Ohio State University, 1248 Arthur E Adams Drive, OH 43221, USA

^{***}KITECH, Incheon 406-840, Korea

[†]Corresponding author : junghocho.phd@gmail.com

(Received November 10, 2009 ; Revised December 30, 2009 ; Accepted February 3, 2010)

Abstract

Irregular fluctuation of penetration depth in CW single mode fiber laser welding is analyzed statistically and chaotically. Among various chaos theories, one of the basic concept referred as Lyapunov exponent is applied to the analysis to quantify the irregularity of penetration. Especially, maximal Lyapunov exponent (MLE) is known as the representative value indicating chaotic degree of the system dynamics. MLE calculation method of experimental data is applied to longitudinal spiking defect in fiber laser weld. Laser power modulation is suggested as a remedy then the computed MLE value is compared to CW case. It is shown that the adoption of chaos theory, MLE computation, can be used as a measurement standard to prove the validity of the solutions to prevent the unexpected chaotic behavior of weld through this work.

Key Words : Fiber laser, Welding, Chaos, Lyapunov exponent, Spike

1. 서 론

싱글 모드 파이버 레이저는 우수함 빔품질을 바탕으로 전자빔 용접을 대체할 만한 정밀 용접이 가능한 열원으로 다양한 분야에서 응용이 시도되고 있다. 본 연구는 스테인리스 스틸의 맞대기 이음부에 싱글 모드 파이버 레이저 용접을 적용하고 그 특성을 분석하였다. 실험 중 나타난 가장 큰 특징은 용접 종단면을 따라 불규칙한 용입이 나타나는 스파이크(spiking) 결함¹⁾이었다. 스파이크 결함의 원인은 어느 한 가지로 결정지을 수 없는 복잡한 현상이다. 이 결함은 불규칙한 키흔의 연속으로 키흔 바닥 부분에 응력이 집중되어 파단의 시발점이 될 수 있다. 과거에는 스파이크 결함이 주로 전자빔 용접부에서 관찰할 수 있었던 특징으로 이를 방

지하기 위한 일반적인 방법으로는 출력 변조(power modulation)나 위빙(weaving), 빔 오실레이션(beam oscillation) 등이 있는 것으로 알려져 있다.

이 연구는 스파이크 결함의 방지책 탐색에 대해 집중하기보다는 결함의 수학적 분석을 통해 방지책들의 효과를 정량화하는 작업에 몰두하였다. 매우 불규칙한 특성을 보이는 스파이크 결함을 정량적으로 분석하기 위해서는 카오스 이론을 적용하는 것이 가장 타당해 보인다. 이에 따라, 카오스 시스템을 표현하기 위한 이론 중의 하나인 리야프노프 지수(Lyapunov exponent) 이론을 적용해 스파이크 용입의 카오스 정도(chaotic degree)를 숫자로 제시하고 이를 바탕으로 용접 공정을 개선함과 동시에 그 효과를 계산 값을 통해 다시 객관적으로 증명할 수 있을 것이다.

용접과 관련해 카오스 이론을 적용한 사례는 이번이 처음이 아니다. 레이저 용접 시 발생하는 플라즈마 플룸(plume)의 광학 데이터²⁾와 소리 데이터³⁾를 스펙트럼 분석하고 위상도(phase portrait)를 이용한 정성적인 카오스 분석에 대한 보고서가 있다. 용입에 대한 카오스 분석에 대해서도 선행⁴⁾이 있으며, 이 보고서 역시 위상도를 이용한 정성적인 카오스 분석에 중점을 두고 있다. 이 선행 연구들이 쉽게 찾아볼 수 있는 용접 관련 카오스 분석 사례의 전부이다. 이 연구들 모두 리야프노프 지수 이론을 도입하고 계산된 값을 이용해 분석된 데이터의 발산에 간략히 언급하고 있다. 이들의 결과에서 리야프노프 지수는 단지 계산 값을 제시하는 것에 지나지 않았다.

본 연구는 레이저 용접부의 용입에 대한 리야프노프 지수 분석을 통해 이 계산 값이 갖는 물리적 의미를 고찰하고, 스파이크 결함을 방지하기 위해 도입한 레이저 출력 변조의 효과를 정량적으로 입증하였다. 또한, 이러한 일련의 과정을 통해 용접 공정의 예측 불가능한 결함 및 데이터 경향과 대비책에 대한 정량적인 분석법을 제시하고자 한다.

2. 리야프노프 지수

수학에서 동역학 시스템의 리야프노프 지수는 무한소로 가까운 궤적들의 거리를 특징짓는 양이다. 위상공간에서 초기 값 δZ_0 를 가지고 두 궤적의 거리가 다음과 같이 발산 혹은 수렴할 때,

$$|\delta Z(t)| \approx e^{\lambda t} |\delta Z_0|$$

이 식에서의 λ 를 리야프노프 지수라고 한다. 여기서, 두 궤적의 거리는 초기 값에 따라 달라지므로 리야프노프 지수 λ 는 여러 값으로 스펙트럼을 형성하게 되고, 그 개수는 위상 공간(phase space)의 차원수와 같다고 알려져 있다. 이 스펙트럼에서 가장 큰 값을 갖는 최대 리야프노프 지수(maximal Lyapunov exponent, 이하 MLE) 값이 시스템의 거동을 예측할 수 있는 단서를 준다. MLE 값이 0보다 큰 경우, 이 시스템은 발산하는 것과 동시에 무질서하다(chaotic)라고 하며, 그 값이 무질서의 정도를 나타낸다.

수학적 표현식이 알려진 카오스 시스템에 대해서는 리야프노프 스펙트럼과 MLE값은 이론적으로 계산이 가능하다. 문제는 실험으로 얻은 데이터에 관한 것으로, 이들 비선형 시계열(nonlinear time series) 데이터에 대한 카오스 분석이 이론적으로 불가능하다는 것이다. 대부분의 실험 데이터에 대한 동역학식은 알려져

있지 않으므로, 이들 시스템에 대한 카오스 분석 결과는 근사치에 지나지 않는다. 하지만, 현재 이용되는 분석 방법들은 기존에 동역학 식이 알려진 카오스 시스템에 적용한 후, 이론적인 결과와 비교해 조율을 거친 것이므로 계산 결과는 믿을 수 있는 것으로 여겨진다.

비선형 시계열 실험 데이터에 대한 MLE 계산 방법들도 다양한 선행 연구자들에 의해 제안되어 있다⁵⁻⁷⁾. 이 연구에서는 Rosenstein *et al*⁸⁾에 의해 제안된 비교적 간단한 방법을 적용하였고, 그에 대한 간단한 설명은 다음과 같다.

시계열 데이터에 대한 MLE 계산은 N -개의 원 시계열 데이터 벡터 $x = \{x_i\}$ 를 가지고, 다음과 같은 행렬을 만드는 것으로 시작된다.

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_M)^T$$

이 식에서 각각의 위상 벡터

$$X_i = (x_i, x_{i+J}, \dots, x_{i+(m-1)J})$$

이고, 각 첨자 M, N, m 과 J 의 관계는 아래와 같다.

$$M = N - (m - 1)J$$

여기서 J 는 락(lag) 또는 재건 지연(reconstruction delay)이고 m 은 끼워넣기 차원(embedding dimension)이다. 끼워넣기 차원은 하나의 위상 공간 벡터(phase vector) X_i 를 만들기 위해 몇 개의 데이터 점을 원 데이터로부터 가져올 것인가에 관한 숫자이다. 즉 위상 벡터의 차원으로, 이것은 시스템의 동역학 변수 개수보다 커야 한다. 하지만, 이 숫자가 작을수록 수렴이 잘 되는 것으로 알려져 있다. J 는 원 데이터로부터 위상 벡터를 만들 때의 샘플링 간격이다.

이렇게 생성된 위상 벡터들은 시간 순으로 배열된 것으로 위상 공간에 다시 시간 순으로 배열하면 궤적을 그리게 된다. 리야프노프 지수 λ_j 는 이 위상 벡터 궤적들이 지수적으로(exponentially) 수렴하는지 발산하는지를 나타낸다. 수렴과 발산의 측정은 유클리드 공간상의 거리로 다음과 같이 표기되며,

$$d_j(0) = \min_{X_j} \|X_j - X_j\|$$

여기서 X_j 는 X_j 의 가장 가까운 이웃 벡터이고 $\| \cdot \|$ 는 유클리드 공간의 노름(norm)을 의미하므로 $d_j(0)$ 는 j 번째 위상 벡터에서 가장 가까운 이웃 벡터까지의 초기 거리를 나타낸다. 최종적으로 최대 리야프노프 지수(MLE)는 각 벡터들의 가장 가까운 이웃 벡터까지의

거리들의 평균값으로 결정된다. 실질적인 계산법은 보다 복잡하고 여러 가지 제약들이 있으므로, 좀더 자세한 설명은 원 논문⁸⁾을 참조하기 바란다.

3. 스파이크 용입에 MLE 계산 적용

실험은 600W급 파이버 레이저를 사용해 이루어졌다. 이 레이저의 파장은 $1.07\mu\text{m}$ 이고 빔 품질은 $M^2 < 1.1$ 이다. 초점 크기는 $70\mu\text{m}$ 이고, 유효 초점 거리 (Rayleigh length) 범위는 3.7mm이다. 보호 가스로 질소 가스를 사용했으며, 레이저와 동축으로 15 l/min의 유속으로 공급되었다. 레이저는 두께 2.28mm의 STS 304L 시편 맞대기 이음부에 조사되었고, 부분 용입된 용접부는 종방향을 따라 파단 후 종단면을 관찰하였다.

종단면을 따라 보이는 스파이크 용입 데이터를 얻기 위해서는 사진에 의존해야 한다. 용접부 사진에서 용입 데이터를 추출하기 위해서는 간단한 사진 영상 처리 과정을 거쳐야 한다. Fig. 1은 영상 처리 과정을 간략히 보여주고 있다. 파단에 의해 보여지는 용접부는 그림 (a)와 같이 조명 설정에 따라 용융부와 모재가 명확히 구분된다. 사진의 명암차를 이용해 (b)와 같이 흑백 사진을 얻을 수 있고, (c)와 같이 노이즈를 제거한 후, (d)와 같이 종단면을 따라 용입 데이터를 획득할 수 있다.

용접 속도가 주어져 있고, 용접부 사진의 해상도를 알 수 있으므로, 용입 데이터를 1차원 시계열 데이터로 재편할 수 있는 것이다. 용입 시계열 데이터는 표준 편차(standard deviation, 이하 STD)를 계산하고, MLE 값을 계산해 서로 비교 분석하였다.

종단면의 용입 형상에서 MLE 값이 갖는 의미를 보여주기 위해 백여 개의 시험편 중 연속파 용접 네 가지

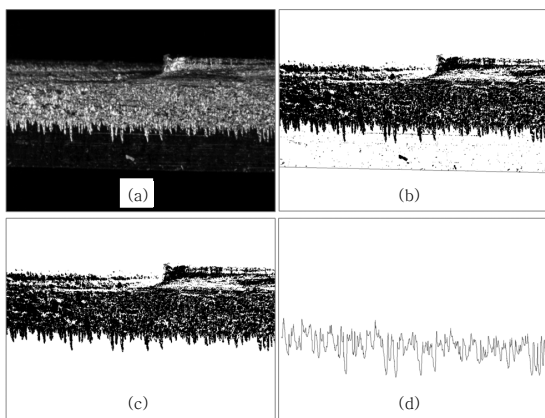


Fig. 1 Image processing to achieve penetration data (a) original picture (b) threshold picture (c) noise removed (d) penetration data

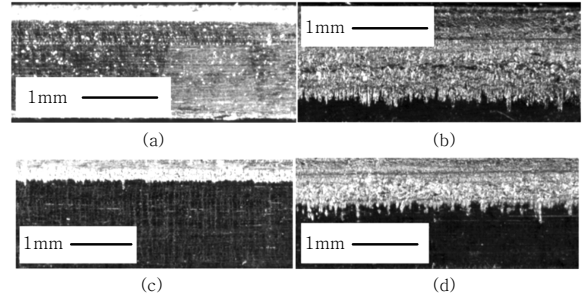


Fig. 2 Various penetration type in CW (a) STD=0.027, MLE=0.076 (b) STD=0.086, MLE=0.082 (c) STD=0.027, MLE=0.107 (d) STD=0.098, MLE=0.112

실험 결과를 선택하였으며, 그 종단면들을 Fig. 2에서 보여주고 있다. 이 그림은 단지 용입 데이터에서 STD와 MLE가 갖는 의미를 전달하기 위한 것으로 용접 조건을 자세히 적시하지는 않았다. 그림에서 (a)와 (c)는 비슷한 용입과 같은 값의 STD를 갖지만, 서로 다른 MLE 값을 보이고 있다. 비교적 일정한 용입을 갖는 (a)에 비해 이따금씩 돌출한 몇몇 스파이크가 관찰되는 (b)가 더 큰 MLE 값을 보임을 알 수 있다. 마찬가지로 (b)와 (d) 역시 비슷한 용입을 보이고, 두 경우 모두 매우 불규칙한 용입 양상을 보인다. 하지만, 계산된 MLE 값은 (d)가 (b)보다 크며, 이는 곧 (d)의 경우가 더 불규칙한 스파이크 용입 양상을 보이고 있음을 입증한다.

Fig. 3은 MLE 값이 의미하는 바를 개략적으로 보여주기 위한 그림이다. (a)에서 보듯이 용입의 진폭도 크지 않고 비교적 규칙적인 양상을 보이면 낮은 값의 STD와 MLE를 갖는다. 하지만, 전체적인 진폭이 크지 않아 STD는 낮더라도 (b)와 같이 소수의 불규칙적인 스파이크가 발생하면 MLE 값은 커진다. (c)의 경우처럼

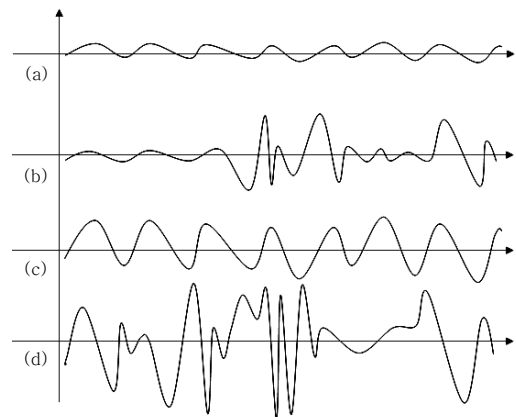


Fig. 3 Schematic meaning of MLE value (a) low STD, low MLE (b) low STD, high MLE (c) high STD, low MLE (d) high STD, high MLE

럼 용입의 진폭이 커서 용접 품질이 떨어져 보이는 용접부라도 스파이크가 규칙성을 가지고 있으면 낮은 MLE 값을 보인다. 가장 피해야 할 경우로 진폭도 크고 불규칙성도 두드러진다면 (d)와 같이 STD, MLE 모두 높은 값을 갖는다. 네 가지 경우에 한해서 (a)의 경우가 가장 선호도가 높은 용접 양상이라 하겠다. 용접부가 규칙성만 보인다면, 주파수 변조를 통해 스파이크 현상을 극복할 수 있으므로 (c) 역시 용인될 수 있다 하겠다. 이처럼, MLE 계산을 적용함으로써 스파이크 결함의 불규칙적인 양상을 정량적으로 계산해 차후 대책을 보다 효과적으로 수립할 수 있다.

실질적인 싱글 모드 파이버 레이저의 스테인리스강 용접 실험에 대한 적용 결과가 Fig. 4에 나타나 있다. Fig. 2는 단지 MLE의 의미를 전달하기 위해 보여준 그림인 반면, Fig. 4는 비슷한 용입을 가지면서도 연속파의 경우 스파이크 결함을 보이지만 레이저의 출력 변조를 통해 스파이크 결함을 크게 감소시킬 수 있음을 보여주기 위한 것이다. 앞서 언급했듯이 연속파 레이저에 의한 스파이크 결함 현상은 레이저 출력 변조를 통해 막을 수 있으며, Fig. 4는 MLE 값 계산을 통해 출력 변조의 효과를 입증하고 있다.

Fig. 4의 (a)는 이 연구에서 볼 수 있는 전형적인 스파이크 결함이다. 310W의 레이저 출력으로 46.57mm/s의 용접 속도를 적용했을 때의 결과로 다양한 깊이를 갖는 각각의 키펀이 어떠한 경향 없이 종단면을 따라 늘어서 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 스파이크 결함을

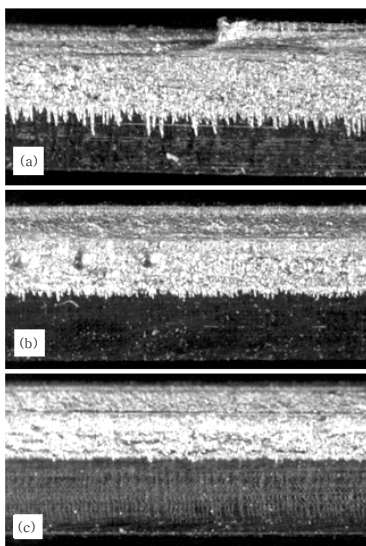


Fig. 4 Spiking defect in CW and power modulation (a) CW, 310W, 46.57mm/s, STD=0.0965, MLE=0.1062 (b) PM, 250W, 50.8mm/s, 1.5kHz, STD=0.0418, MLE=0.0911 (c) PM, 250W, 50.8mm/s, 2.0kHz, STD=0.0185, MLE=0.0788

줄이기 위해 레이저의 출력 변조를 도입하였고 그 결과가 (b)와 (c)의 사진으로 보이고 있다. 레이저는 피크 출력과 평균 출력의 차가 평균 출력의 10%로 출력 변조된 사인(sinusoidal) 파형을 사용하였다. (b)는 평균출력 250W, 용접속도 50.8mm/s로 변조 주파수를 1500Hz로 용접한 경우로 스파이크 키펀들의 깊이와 개수가 크게 감소한 것을 알 수 있다. (c)는 동일 조건에서 주파수를 2000Hz로 증가시켰을 경우이다. 종단면 용접부는 앞의 두 경우보다 크게 개선되어 MLE 값은 0.0789로 낮아졌고, 거시적으로 보더라도 눈에 띄는 스파이크 키펀들이 거의 발견되지 않았음을 알 수 있다.

Fig. 4에 보인 결과들은 100여개의 실험 시편 중 일부를 간추린 것으로 레이저 출력 변조가 항상 성공적으로 작용하지는 않았다는 것을 밝혀둔다. 다만, 연속파의 경우 거의 항상 발생하는 스파이크 결함이 출력 변조를 사용했을 경우에는 발생 빈도수가 크게 감소하였다. 보다 효율적인 스파이크 결함 대책에 대해서는 추가적인 연구가 후행되어야 하겠으나, 서론에서 언급한 바와 같이 본 연구는 이 같은 결함을 정량적으로 측정할 수 있는 방법론에 초점을 두었고, 이에 따라 비교 가능한 몇몇 실험 결과들을 보여주고 있다.

4. 고찰 및 결론

본 연구에서는 싱글 모드 파이버 레이저를 이용한 용접 시 발생할 수 있는 스파이크 결함에 대해 카오스 이론 중 하나인 MLE (maximal Lyapunov exponent) 계산법을 적용하여 용입의 불규칙성을 정량적으로 측정할 수 있는 방법을 제안하였다.

실험은 STS 304L 평판의 맞대기 이음부를 부분 용입 용접하고, 접합부를 파단시켜 종단면을 사진 촬영한 후 간단한 영상 처리를 통해 용입 데이터를 획득하였다. 획득한 용입 데이터에 MLE 계산법을 적용하고, 연속파와 출력 변조의 경우를 비교 분석하였다. 아울러, 이러한 계산 값이 용입 결과에 대해 갖는 물리적 의미를 고찰하고, 출력 변조를 통해 스파이크 결함을 감소시킬 수 있음을 정량적으로 입증하였다.

사인 파형으로 변조된 레이저 출력이 스파이크 결함을 항상 방지하지는 못했다. 다만, 그 발생 빈도를 크게 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 보다 효율적인 대책에 대한 연구가 추가되어야 하겠으나, 본 연구는 카오스 이론을 이용한 결함의 정량적 계산법에 중점을 두었고, 이 계산법을 통해서, 제안된 스파이크 결함 대책의 우수성을 객관적으로 검증할 수 있는 방법을 제시하였다. 따라서, 추후에는 스파이크 결함에 대한 여러 대책들에 대해 MLE 계산법을 가지고 비교 우위

를 측정할 수 있는 연구가 진행될 것이다.

용접 공정은 예기치 못한 수많은 결함 원인이 존재한다. 실상, 용접 공정에 대한 연구는 이러한 결함 원인들을 하나씩 제거해 나가면서, 보다 신뢰성 있는 공정을 개발하는 것이라 할 수 있다. 그간의 공정 개발은 미시적인 관점에서 결함 발생 원인을 하나씩 찾아내고 이에 대한 방지책들을 제안하는 방향으로 흘러 왔다. 이는 많은 시간을 요구할 뿐 아니라, 찾아낸 원인조차 다른 원인에 의해 영향을 많이 받고 있기 때문에 명확하다고 말하기가 곤란한 경우가 많았다. 이러한 원인 중심적인 연구는 공정의 물리 현상 이해와 그에 따른 대비책 고안과 결부되어 있어 반드시 필요하다. 하지만, 본 연구는 개략적인 결함 대비책에 대한 정량적인 평가 방법과 기준을 제안했다는 점에서 기존의 연구와는 관점을 달리하고 있다. 원인 분석 중심의 연구와 그 결과로 제안된 대비책에 대해 여기서 제안한 평가 방법까지 접목하면 보다 완벽한 연구 체계가 완성될 것이다. 따라서, 이 연구에서 적용한 비선형 시계열 데이터 (nonlinear time series)에 대한 카오스 분석 방법론은 용접 실험 및 분석에 있어서 결함 원인 분석 및 대비책 마련과 관련해 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

마지막으로 본 연구의 결과를 간략히 정리하면 다음과 같다.

(1) 본 연구는 카오스 이론 중 리야프노프 지수 이론을 도입하여 용접부 용입의 불규칙한 정도를 정량적으로 측정할 수 있는 방법을 제안하였다.

(2) 본 연구는 싱글 모드 파이버 레이저를 이용해 2.28mm 두께의 STS 304L 판재를 맞대기 용접하는 경우 발생하는 스파이크 결함에 대한 대비책으로 레이

저 출력 변조를 제안하였으며, 리야프노프 지수 이론을 통해 그 효과를 정량적으로 입증하였다.

(3) 본 연구를 통해 소개된 리야프노프 지수 이론은 용접 공정 특유의 불규칙한 현상을 정량적으로 측정할 수 있는 기준 방법이 될 수 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. D. A. Schauer and W. H. Giedt : Prediction of electron beam welding spiking tendency, *Welding Journal*, **57-7** (1978), 189s-195s
2. J. Kurzyna : Searching for chaos in fluctuations of a plasma induced during cw-CO₂ laser welding, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **31** (1998), 680-692
3. Z. Szymański, J. Hoffman and J. Kurzyna : Plasma plume oscillations during welding of thin metal sheets with a CW CO₂ laser, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **34** (2001) 189-199
4. M. H. Cho and D. F. Farson : Control of chaos in laser-induced vapor capillaries, *Journal of Laser Applications*, **15** (2003), 161-167
5. M. Sano and Y. Sawada : Measurement of the Lyapunov spectrum from a chaotic time series, *Physics Review Letters*, **10** (1985), 1082-1085
6. J. P. Eckmann and S. O. Kamphorst : Liapunov exponents from time series, *Physics Review A*, **6** (1986), 4971-4979
7. A. Wolf, J. B. Swift, H. L. Swinney and J. A. Vastano : Determining Lyapunov exponents from a time series, *Physica D* **16** (1985), 285-317
8. M. T. Rosenstein, J. J. Collins and C. J. D. Luca : A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data set, *Physica D* **65** (1993) 117-134