

연마재 워터젯을 위한 노즐상태 모니터링 시스템 설계

Nozzle Condition Monitoring System for Abrasive Waterjet Process

김정욱¹, 김노원², 김철민², 김성렬², 김현희³, 이경창^{1*}

Jeong-Uk Kim¹, Roh-Won Kim², Chul-Min Kim², Sung-Ryul Kim²,
Hyun-Hee Kim³, Kyung-Chang Lee^{1*}

〈Abstract〉

In recent, the machining of difficult-to-cut materials such as titanium alloys, stainless steel, Inconel, ceramic, glass, and carbon fiber reinforced plastics (CFRP) used in aerospace, automobile, medical industry is actively researched. Abrasive waterjet is a non-traditional processing method in which ultra-high pressure water and abrasive particles are mixed in a mixing chamber and shoot out jet through a nozzle, and removed by erosion due to collision with a material. In particular, the nozzle of the abrasive waterjet is one of the most important parts that affect the machining quality as with a cutting tool in general machining. It is very important to monitor the condition of the nozzle because the workpiece is uncut or the surface quality deteriorates due to wear, expanding of the bore, damage of the nozzle and clogging of the abrasive, etc. Therefore, in this paper, we propose a monitoring system based on Acoustic Emission(AE) sensor that can detect nozzle condition in real time during AWJ processing.

Keywords : *Abrasive Waterjet, Nozzle wear, Acoustic Emission, Monitoring*

1 김정욱, 부경대학교 제어계측공학과
E-mail: kcup2001@naver.com

2 김노원, 김철민, 한국생산기술연구원
E-mail: nasca01@kitech.re.kr
김성렬, 한국생산기술연구원, 수석연구원
E-mail: sungkim@kitech.re.kr

3 김현희, 부경대학교 산업과학기술연구소
E-mail: hhkim@pknu.ac.kr

1* 이경창, 부경대학교 제어계측공학과
E-mail: gcleee@pknu.ac.kr

1 Department of Control and Instrumentation Engineering,
Pukyong National University

2 Korea Institute of Industrial Technology

3 Industrial Sciences & Technology Institute

1* Corresponding Author, Department of Control and
Instrumentation Engineering, Pukyong National University

1. 서론

위터젯 기술은 고압수의 가는 스트림을 이용하여 정밀한 절단 및 특수 세척을 하는 기술로 건설, 자동차 산업, 해양, 채굴 등 다양한 분야에 활용되고 있다. 고압 위터젯을 이용한 공정에는 절삭, 제거, 박리, 철틀, 세척 등이 있으며 효율이 높고 친환경으로 각광받고 있다[1].

금속류, 단단한 소재 등은 순수한 물에 의한 위터젯 절삭에는 한계가 있어 연마재를 혼합하여 분사하는 절삭가공을 적용하며 이를 연마재 위터젯(Abrasive waterjet, AWJ)을 이라고 한다.

연마재 위터젯은 믹싱챔버 내에서 고압(300~600 MPa)의 물과 연마재 입자(Mesh #50~#200)가 혼합되어 노즐을 통해 젯으로 분사되고, 소재와의 충돌에 의한 침식작용으로 제거하는 가공법이다. Fig. 1은 AWJ 시스템과 믹싱헤드의 구조이다. 펌프에서 공급된 물은 압축기(Intensifier)를 통해 초고압으로 되고, 오리피스(Diameter 0.24~0.40 mm)를 통해 가속되어 고속의 젯 기둥(Jet plume)을 생성한다. AWJ는 기존 절삭공구(밀링,

드릴링 등)에 비해 절삭력이 작고, 열영향 영역(Heat-affected zone, HAZ)이 거의 없으며, 잔류응력이 없어 가공 이후에도 소재의 기계적 특성을 유지하는 장점이 있다 [2-4].

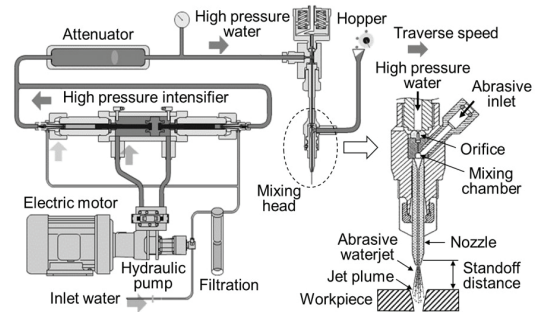


Fig. 1 Abrasive waterjet system and mixing head

또한, 표 1과 같이 전통적인 기계가공뿐만 아니라 레이저, 전기방전가공(EDM) 및 플라즈마 절단과 같은 비전통적인 가공기술과 비교하여 가공 효율성에서도 많은 이점을 가지고 있다. AWJ는 초기의 3축 단순 절단가공에서, 현재는 로봇과의 접

Table 1. Comparison of subtractive manufacturing

구분	WaterJet 가공	AWJ 가공	Laser 가공
가공원리	순수 물에 의한 가공 Waterjet에 의한 충격 작용	Waterjet에 의한 충격효과와 연마재를 이용한 절삭효과 증대	고밀도화한 Laser의 용융, 제거 작용
특징	<ul style="list-style-type: none"> • 무공해 • 정밀절단 가능 • 절단 폭이 미세함 • 가공변형이 적음 • 3차원 가공이 용이 • 후가공 필요 없음 	<ul style="list-style-type: none"> • 무공해 • 면 정밀도가 좋음 • 거의 모든 재료의 절단이 가능 • 비접촉절단 가능 • 수중절단 가능 • 후가공 필요 없음 	<ul style="list-style-type: none"> • 박판시 정밀절단 가능 • 박판시 절단폭이 좁음 • 가공소음이 없음 • 얇은 판재는 절단 속도가 빠름
문제점	<ul style="list-style-type: none"> • 고경도 재질에는 부적합 • 가공 소음 있음 • 두꺼운 소재의 가공정밀도가 낮음 	<ul style="list-style-type: none"> • 가공 소음 있음 • 연마재의 후처리가 필요함 	<ul style="list-style-type: none"> • 박판가공(1-10mm)에 적절하며 두꺼운 대상물 적용이 불가 • 장비 가격이 고가 • 열변형 발생 • 후가공 필요
주가공물	FRP, 고무, 복합소재, 종이, 기타 비금속 재료	철, 티타늄, 유리, 대리석, 세라믹 등 모든 재료 가공 가능	철판 (알루미늄, 동 등은 반사로 가공 제한)

목과 초고압 펌프, 노즐의 미세화 등에 의한 가공 기술의 발달로 복잡한 형상가공에서 우수한 표면 품질과 정밀도가 가능해져 다양한 응용분야에 적용되고 있다 [5-6].

그러나, AWJ의 다양한 장점에도 불구하고 노즐의 상태(마모, 편심, 손상 등)는 가공물의 가공품질(절삭깊이, 절삭폭, 형상, 표면거칠기 등)에 직접적인 영향을 미친다. 노즐의 상태는 AWJ의 가공변수(펌프압력, 트래버스 속도, 연마재 유량, 이격거리 등)와 노즐의 기하학적 형상(보어직경, 길이, 콘 각도 등), 연마재 크기 및 형상 등에 의해 영향을 받는다. 일반적으로 노즐의 수명은 AWJ의 가공조건에 따라 다르지만, 평균 50~100시간 사용 후, 작업자의 주관적 판단에 의해 교체된다 [7]. 노즐은 일반 솔리드 절삭공구와 같이 가공에 영향을 미치는 가장 중요한 부품 중 하나로서, 노즐의 마모, 확관, 손상과 연마재의 막힘과 미분사 등에 의해 가공물은 미절단 및 표면품질의 저하가 발생하기 때문에 노즐의 상태를 모니터링하는 것은 매우 중요하다.

Fig. 2는 AWJ 가공시 가공품질에 영향을 미치는 변수들을 나타낸다. AWJ 노즐상태 모니터링은 가공 중 노즐의 직경을 측정하는 직접적인 방법과 노즐 재료(WC/Co)의 밀도, 경도 및 파괴인성 등과 같은 재료의 물성치를 이용하는 간접적인 방법이 연구되고 있다. 그러나, 이러한 방법들은 노즐의 마모상태를 가공 중에 실시간으로 판단하거나

정확히 파악하기에는 한계가 있다.

따라서 본 논문에서는 AWJ 가공시 노즐상태를 실시간 검출할 수 있는 음향방출(Acoustic Emission, AE) 센서 기반의 모니터링 시스템에 대해 제안하고자 한다. 본 논문은 2장에서 AE 센서 기반 모니터링 시스템의 구조와 LabView를 이용한 모니터링 프로그램에 대하여 설명한다. 3장에서는 제안하는 시스템의 성능평가용 실험환경에 대하여 설명하고 마지막으로 4장 결론으로 구성되어 있다.

2. 노즐상태 모니터링 시스템 설계

산업현장에서 안정적으로 소재를 가공하기 위해서는 노즐 상태에 대한 정확한 정보가 필요하다. AWJ 노즐의 수명은 가공변수, 노즐의 물성, 믹싱헤드 내에서 오리피스와 노즐 사이의 정렬 불량 등에 영향을 받고, 노즐의 수명과 직접적인 연관이 있는 노즐 마모는 주로 AWJ의 가공변수인 펌프압력, 오리피스 직경, 연마입자의 형상, 크기, 종류 및 연마재 유량과 노즐의 기하학적 인자인 보어 직경(Bore diameter), 입구 콘(Cone) 각도와 깊이, 길이 등에 의해 영향을 받는다.

이러한 노즐의 마모상태를 정확히 모니터링하기 위해서 AE 센서를 이용한 AWJ 모니터링 시스템을 Fig. 3과 같이 설계하였다. AWJ 가공에서 연마입자에 의한 노즐 벽면의 침식시 방출되는 음향신호를 실시간 모니터링하기 위해 AE 센서를 노즐에 직접 탈부착 할 수 있는 센서 모듈을 제작하였다. AE 센서 모듈은 음향신호가 가장 크게 발생할 수 있는 믹싱헤드와 노즐과의 체결부 아래에 장착하는 구조로 설계하였다.

또한, 노즐에서 분사된 연마입자가 소재와 충돌 후, 일부 비산되어 AE 센서 모듈에 충격을 가할 때 센서를 보호하고, 센서 주변의 충격에 의한 음

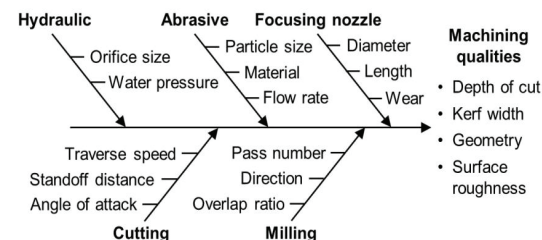


Fig. 2 Abrasive waterjet parameters and machining qualities

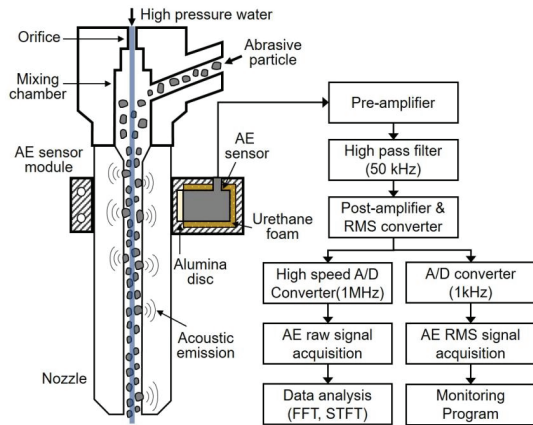


Fig. 3 Signal processing diagram using AE sensor for detecting waterjet nozzle states

향신호(노이즈 성분)를 차폐하기 위해 우레탄 폼으로 센서 주위를 둘러싸도록 구성하였다. 노즐과 접촉되는 AE 센서의 앞부분은 센서를 보호하면서 음향신호의 감쇄를 최소화하기 위해 1mm 두께의 알루미나(Al_2O_3) 디스크를 부착할 수 있는 구조설 설계하였다. 일반적으로 AE 원신호는 재료의 물성에 따라 수십 kHz~수 MHz의 신호가 발생하며, 금속과 같은 연성재료는 대략 수백 kHz, 세라믹과 같은 취성재료는 수백 kHz~수 MHz까지 발생한다 [8].

본 연구에서는 초경합금으로 제작된 노즐의 AE 원신호를 검출하기 위해 샘플링 주파수를 1MHz로 설정하였다. 획득된 AE 원신호는 노이즈 성분과 사용시간에 따른 노즐의 마모상태를 분석하기 위해 FFT와 STFT를 사용하였다. FFT는 주파수 영역에서의 노즐 상태 성분과 노이즈 성분을 분리하기 위해 적용되었으며, 전원 및 노즐외의 외부 충격, 주변 진동에 의한 저주파 노이즈 등을 제거하기 위해 차단주파수(Cutoff frequency)가 50 kHz인 고대역통과필터(High pass filter, HPF)를 선정하였다.

그리고 실시간으로 노즐의 마모, 편심 및 손상 등의 변화를 검출하기 위해 AE RMS를 사용하였

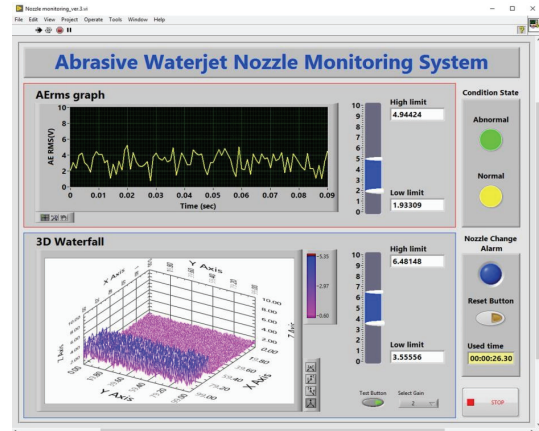


Fig. 4 Monitoring program for detection the wear, damage and normal states of nozzle with LabVIEW

다. AE 원신호를 실시간 모니터링을 위해 적용할 경우, 샘플링 데이터의 무수한 양에 의해 처리시간이 오래 걸리고, 메모리 저장용량의 한계가 있다. 따라서 AE 신호를 이용한 실시간 모니터링의 경우 AE RMS를 적용하는 것이 신호처리에 효율적이다 [8-10].

또한, AE RMS는 재료 제거량에 비례함으로 연마입자에 의한 충격에너지가 노즐에 지속적으로 가해질 때 균일한 마모에 의한 확관뿐만 아니라, 비정상적인 편심, 손상 등에 의한 재료 제거시 발생하는 음향신호도 검출 가능하다. 균일한 재료 제거에 의한 마모는 AE RMS의 신호가 시간에 따라 점진적으로 낮아지지만, 편심 및 손상 시에는 급격한 신호 변동이 발생한다.

본 연구에서는 AWJ 노즐상태 모니터링 시스템을 구축하기 위하여 Fig. 4와 같이 노즐 상태 모니터링 프로그램을 LabVIEW(National Instrument)를 이용하여 제작하였다. AWJ 노즐 모니터링 시스템은 AE 원신호를 50 msec의 시간주기로 실효값으로 변환한 후, 샘플링 주파수 1 kHz로 신호를 수집할 수 있도록 구성하였다.

3. 모니터링 시스템 실험평가

3.1 모니터링 시스템 테스트베드 구성

본 논문에서 제안한 AWJ 노즐상태 모니터링 시스템을 실험하기 위하여 Fig. 5와 같이 실험 테스트베드를 구성하였다. AWJ 시스템은 TOPS사(Korea)의 갠트리 타입을 사용하였고, AE 센서 모듈을 노즐에 부착하여 음향신호를 검출하였다. 노즐의 상태를 보다 정밀하게 모니터링하기 위해 두 개의 시스템으로 나누어 구성하였다. 고주파수의 AE 원신호를 검출하여 주파수(FFT)와 시간-주파수(STFT) 영역에서의 노즐상태에 따른 신호분석을 위한 PXI(NI PXIe-1082, Max. 2 MHz sampling rate/ch) 시스템과 이를 기반으로 노즐상태 신호성분만 추출하여 저주파수의 AE RMS 신호를 처리하고 실시간으로 결과를 디스플레이를 할 수 있는 모니터링 프로그램이 탑재된 시스템으로 구성하였다.

노즐상태 모니터링 시스템은 AE 센서 Nano30(150-750 kHz, PAC), 전하증폭기(Gain x10, x100, x1000)와 필터(HPF 50 kHz)가 내장된 프리앰프, 교류신호를 실효값으로 변환하기 위한 RMS 컨버터와 아날로그 신호를 디지털로 신호로 변환하여 특징추출(노즐 이상상태)을 위한 신호처리 알고리즘이 내장된 프로그램으로 구성하였다. 프리앰프에서 출력된 AE 원신호는 PXI에 의해 1 MHz의 고속 샘플링으로 수집되었고, 50 msec의 시간주기로 RMS-DC 컨버터(AE-5A, PAC)를 거쳐 출력된 AE RMS 신호는 DAQ 보드(NI USB- 6259)에 의해 1 kHz로 수집되어 USB 포트를 통해 PC에 설치된 모니터링 프로그램의 화면에 디스플레이되도록 구성하였다.

실험조건으로 노즐의 길이와 직경, 사용시간, 펌프압력, 연마재 유량, 연마입자의 종류 및 크기를 나타낼 수 있도록 구성하고, 펌프압력과 연마

재 유량에 따른 노즐의 사용시간과 이때의 노즐상태를 AE 신호로 판별할 수 있도록 하였다. 모니터링 시스템의 테스트베드 결과로 노즐의 상태가 정상(Normal), 마모(Wear), 손상(Damage) 등 세 가지 타입으로 분류할 수 있도록 구성하였다.

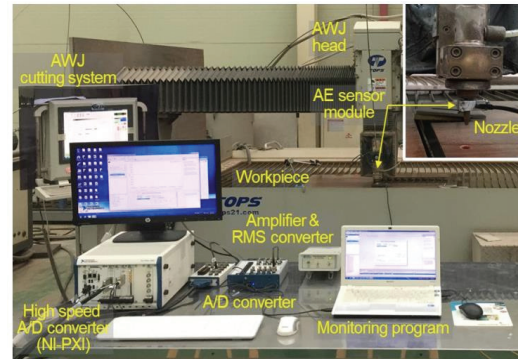


Fig. 5 Experimental setup for AWJ nozzle testbed

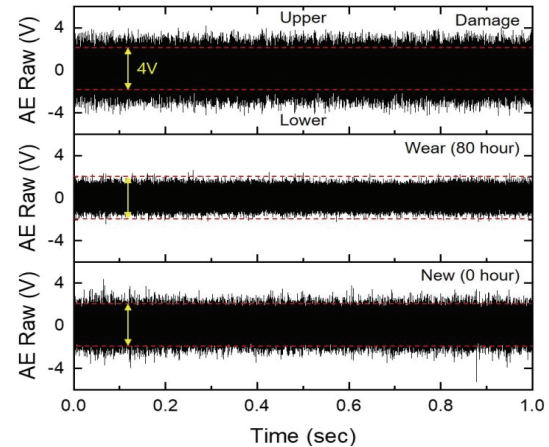


Fig. 6 Comparison of AE raw signals for new, worn, and damaged nozzles

3.2 AE 신호를 이용한 노즐상태 분석

Fig. 6은 노즐의 사용시간(0, 80 hour)과 손상의 AE 원신호 값을 비교한 것이다. 새 노즐(0 hour)의 AE 원신호는 정상상태의 기준신호로서

노즐상태를 판별하기 위한 문턱 전압(Threshold voltage)으로 설정하였다.

Fig. 6에서와 같이, 정상상태 노즐의 AE 원신호 진폭은 대부분 ± 2 V 근처에 존재함을 알 수 있다. 그러나, 80시간 사용된 노즐과 손상이 발생한 노즐의 AE 원신호는 정상상태에 비해 진폭이 작거나 매우 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 음향방출(AE) 센서를 이용하여 연마재 워터젯(AWJ)의 노즐상태(정상, 마모, 손상)를 실시간으로 모니터링하기 위한 시스템을 설계하였다. 이를 위해, AE 원신호에 대한 주파수(FFT) 및 시간-주파수(STFT) 영역 분석을 통해 노즐상태와 관련된 신호를 추출하고, 이 신호의 RMS 변화를 실시간 디스플레이 할 수 있는 모니터링 프로그램을 LabVIEW로 제작하였다. 또한, 모니터링 시스템을 시험평가하기 위한 테스트베드를 구축하여 실험 모델을 구축하였다. 마지막으로 본 논문에서 제안하는 모니터링 시스템의 효과를 검증하기 위하여 구축한 테스트베드를 이용하여 AE 신호를 측정하고 정상상태 노즐과 손상된 노즐과 신호차이를 비교 분석하였다. 이를 통해 AE신호를 이용하여 노즐의 마모상태 분석의 타당성을 검토하였다.

향후에는 AE RMS에 의한 실시간 모니터링 시스템이 실제 현장에서 작업자가 노즐상태에 대한 정보를 파악할 수 있는지 평가해 보고자 한다.

사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음

참고문헌

- [1] Global Industry Analysts, Inc. "WATERJET CUTTING MACHINES", A Global Strategic Business Report MCP-6548 October 2012 (p. II-1)
- [2] D. A. Axinte, B. Karpuschewski, M. C. Kong, A. T. Beaucamp, S. Anwar, D. Miller, and M. Petzel, "High Energy Fluid Jet Machining (HEFJet-Mach): From scientific and technological advances to niche industrial applications," *Manufacturing Technology*, Vol.63, pp. 751-771, (2014).
- [3] E. Uhlmann, F. Sammler, S. Richarz, F. Heitmüllera, M. Bilz, "Machining of Carbon Fibre Reinforced Plastics," *Procedia CIRP*, Vol.24, pp. 19-24, (2014).
- [4] S. Vasanth, T. Muthuramalingam, P. Vinothkumar, T. Geethapriyan, G. Murali, "Performance Analysis of Process Parameters on Machining Titanium (Ti-6Al-4V) Alloy Using Abrasive Water Jet Machining Process," *Procedia CIRP*, Vol.46, pp. 139-142, (2016).
- [5] A. Pramanik, "Developments in the non-traditional machining of particle reinforced metal matrix composites," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.86, pp. 44-61, (2014).
- [6] E. Uhlmann, F. Sammler, S. Richarz, F. Heitmüller, and M. Bilz, "A review on the erosion mechanisms in abrasive waterjet micromachining of brittle materials," *International Journal of Extreme Manufacturing*, Vol.1, pp. 1-14, (2019).
- [7] M. Nanduri, D. G. Taggart, and T. J. Kim, "The effects of system and geometric parameters on abrasive water jet nozzle wear," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.42, pp. 615-623, (2002).
- [8] D.A. Axinte and M.C. Kong, "An integrated monitoring method to supervise waterjet machining," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.58, pp. 303-306, (2009).
- [9] M. Prijatelj, M. Jerman, H. Orbanić, I. Sabotin, J. Valentinčič and Andrej Lebar, "Determining

Focusing Nozzle Wear by Measuring AWJ Diameter,” Journal of Mechanical Engineering, Vol.63, pp. 597-605, (2017).

- [10] S. Dolinšek and J. Kopac, “Acoustic emission signals for tool wear identification,” Wear, Vol.225-229, pp. 295-303, (1999).

(접수: 2020.08.16. 수정: 2020.08.29. 게재확장: 2020.09.04.)