

# 항공운영 환경의 안전 제고를 위한 워터젯 활용방안 연구

## A Study on the Water-Jet Utilization to Enhance Safety of Aviation Operation

나승혁\*

Seung-Hyeog Nah\*

### ABSTRACT

As volume of fluids pass through small orifice, velocity becomes faster and pressure rises high. Water Jet uses hydraulic high-pressure generated by reciprocating operations of single/multi-piston. Since water jet had been applied to coal-mining at early 1903s, technological development of mechanics · material · computer · NC · robot have progressed. As environment-friendly water jet and its crushing energy, according to hydraulic pressure and volume, is applicable per materials, application fields becomes enlarging, and cutting · mining · cleaning · dirt-removing are utilized to industries of material cutting · construction · architecture · ship, etc. This paper surveyed and analyzed water jet principle · equipment · technology history · application field · merit · enterprise status · aviation operation application field etc. Compared to advanced countries, as our R&D and manufacturing technology vulnerable, our policy need to promote interests and investment, enlarging applicable aviation operation fields.

### 초 록

유체가 소형 관을 통과할 때 속도는 빨라지고 압력은 상승한다. 워터젯은 단일/복수왕복엔진을 사용하여 발생된 고유압을 사용한다. 워터젯은 1903년 채굴에 사용된 이후 기계, 소재, 컴퓨터, 수치제어, 로봇 등의 기술이 발전하였다. 환경친화적인 워터젯과의 파쇄에너지는 유압과 용량에 따라 각종 소재에 사용할 수 있는데, 응용 분야는 확장되고 있으며, 절삭, 가공, 세척, 흙집 제거 등의 기술이 소재 절단, 건축, 토목, 조선 등의 산업체에 활용되고 있다. 본 논문은 워터젯 원리, 기술발전사, 응용 분야, 장단점, 업체 현황 항공운영 응용 분야 등을 조사 분석하였다. 선진국에 비해 우리의 워터젯 연구개발 분야가 매우 취약하여, 우리의 국가 정책도 관심과 투자를 제고시키면서 응용 분야를 확대함이 필요하다 하겠다.

**Keywords** 워터젯(Water Jet), 고압펌프(High-pressure Pump), 연마제워터젯(Abrasive Injection Waterjet), 항공운항환경(Aviation Operation Field)

\* 중원대학교 항공운항학과(교신저자 E-mail: napoleon@jwu.ac.kr)

# I. 서론

워터젯(Water Jet)은 펌프에서 배출되는 (초)고압의 물을 노즐(Nozzle)/관(Orifice) 속을 통해 수압의 유량 및 압력에 따른 굽기의 흐름을 생성하여 이를 각 산업상 목적에 맞게 활용하는 기술이다.[9] 이러한 워터젯은 석탄채굴에의 응용(1910년대((구)소련), 물방울 고속·발사 장치로 고체절삭 연구((加)Franz 박사, 1960년대), 고압수(3,500bar) 분사로 목재절삭(1963) 및 연마제 워터젯(Abrasive Water Jet) 개발(美, 1980년대), 연마제 워터젯 장치(Abrasive Water-Jet System) 실용화(1983) 등으로 진전을 해 왔으며, 노즐·관(Nozzle·Orifice) 가공, 기계전자(Mechatronics) 발전으로 인한 고압펌프 기기 발전, 컴퓨터 수치자동제어(NC·AC), 로봇과의 접합성, 환경친화적 기술발전 등으로 급속한 발전을 거듭하였다. 일례로 현재 워터젯 절삭은 고압펌프의 (초)고압 압력으로 물 흐름 형성→작은 노즐·보석 관(Nozzle·Orifice) 두발처럼 얇은 흐름(Flow) 형성→순간 속도가 최대 Mach 3~4까지 달하여 단단한 물체를 절단한다.<sup>1)</sup>

이러한 아래 표와 같은 워터젯의 일반적 장점[9]을 활용하여, 현재는 절단·파쇄(금속/콘크리트/플라스틱/암석 등), 절삭/가공(밀링/천공), 산업 분야·이물질 표면세정(코팅 제거/선박 금속표면 녹/부착물), 고압테스트 시설 등 다양한 기능을 활용하여, 조선 반도체 등 여러 분야<sup>2)</sup>에 널리 활용되고 있다. 이러한 워터젯 기술 연구 및 활용을 위해 주요 선진기술국은 협회(Water-Jet기술협회(美)/

Water-Jet기술 연구회(日) 설립(1983))를 발족시켰고, 우리도 국내 최초 독자 개발 및 상용화(1985)·한국워터젯기술 연구회(1997)가 확대 발족한 한국워터젯협회(Korean Water Jet Association, 2016. 5. 3, <http://www.koreanwaterjet.org>)가 있다.<sup>4)</sup>

본 논문에서는 국내의 여러 산업 분야에 널리 활용되고 있는 워터젯 기술과 관련 원리와 함께 워터젯 관련 기술의 발달사, 국내 및 해외의 기술개발현황과 연구동향을 살펴보는 한편 국내 기술 동향에서는 워터젯 장비 제조업체와 기술 현황과 그 연구동향을 조사한 후 주로 항공 분야에의 활용성 분야를 조사 분석하였다.

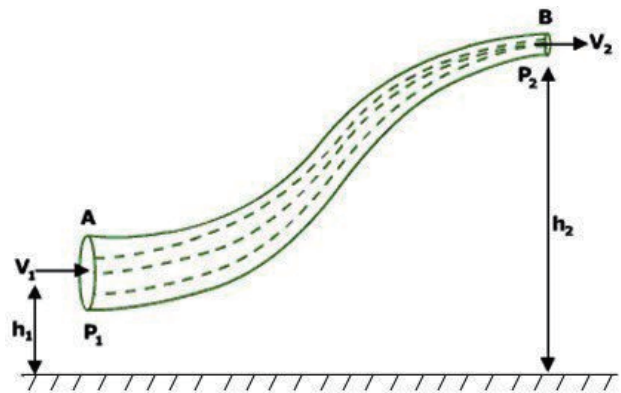
# II. 본론

## 2.1 워터젯 원리

아래 그림과 같이 유관의 입구에 들어선 유체(비점성, 비압축성 가정)의 질량과 출구로 나간 유체의 질량(질량보존, 연속체 방정식)이 같아야 하며, 에너지도 보존<sup>5)</sup>된다고 할 때, 일정량의 유체가 작은 구경을 통과할 때 유체의 속도는 점점 빨라지고, 압력은 상승하게 된다. 이때 발생하는 고압의 에너지를 이용하는 전반적인 기술을 워터젯이라고 통칭하는데 일반 실생활에서 수도꼭지 호스 구경을 손으로

〈표 1〉 Merits of Water Jet Utilization

일반적 장점
• 분쇄에너지 집중→에너지 고밀도
• 노즐 소형 선단장치로 로봇화 접속 용이
• 노즐 마모 장주기로 적은 교체 횟수
• 적절 압력·유량 선택으로 필요부분만 분쇄
• 주위에 온도변화·변형 영향 적어 표면 조도/우수 복합재 적용 가능
• 가공물·물분사 노즐 분리 접촉으로 곡선 절단 용이
• 임의 지점에서 절단개시 가능
• 미진동·저소음·무분진·무 온도상승으로 환경 친화적
• (기타) 상세사항 참조 <sup>3)</sup>



$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 = \text{일정}$$

〈그림 1〉 Fluid Mass/Energy Conservation (<https://twitter.com>)

누를 때 물줄기 속도는 증가하면서 압력이 상승하는 현상과 같다.

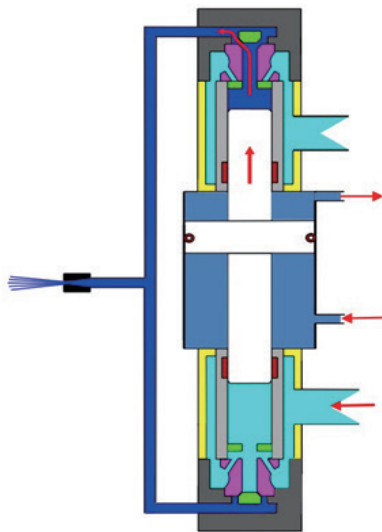
현재 산업 분야에서는 고압 생성 방식은 피스톤 왕복 운동으로 저압 유체를 고압 유체로 변환하는 방식이 흔히 적용되는데, 일례로, 유압의 피스톤 왕복 작동으로 고압 생성하는 유압증강펌프(Hydraulic Intensifier Pump), 공기의 피스톤 왕복 작동으로 고압 생성하는 공압증강펌프(Pneumatic Intensifier Pump) 등의 방식은 소유량의 고압 생성에 편리하나, 에너지 변환손실이 많아, 최근에는 다량의 고

압 생성하는 (엔진 구동과 유사한) 여러 개의 피스톤 왕복 방식으로 고압을 생성시키고 있으며, 이 방식은 최근 소재 기술과 구동방식의 성장으로 에너지 손실률(Energy Loss Rate)이 적은 편으로 많이 이용되고 있다. 통상적으로 워터젯은 친환경적이며, 파쇄에너지를 압력 및 유량에 따라 소재별 적용 가능하여 응용 분야는 증가 추세이다.

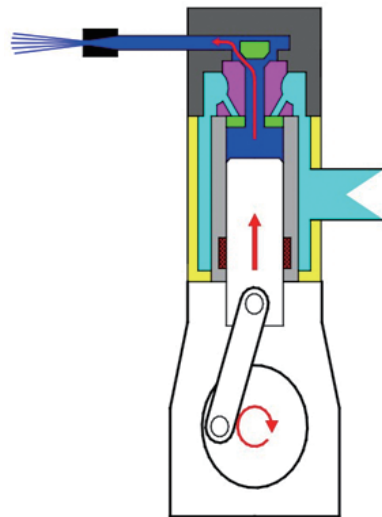
## 2.2 워터젯 선행연구 개요

이러한 워터젯 기술 역사를 개략 살펴보면 “끊임없는 물이 돌을 뚫는다(서양속담, Constant dropping of water wears away a stone)”<sup>6)</sup>, “수적석천(고사성어, 水滴石穿)”<sup>7)</sup> 등의 기록이 있다. 이후 중·근세에 유체에 대해 “파스칼 원리(1653)”<sup>8)</sup>, “베르누이 방정식(1738)”<sup>9)</sup> 등이 발표되었다. 부식처리용 고압수 사용은 수력채굴(水力採掘, 1800년대), 석탄채굴에 최초 워터젯 응용((구)소련, 1910년대) 이후, 1930년대에야 비로소 소구경 워터젯이 산업용절단 장치로 출현하기 시작하였다. 제지특허사(美 Wisconsin 소재, 1933)가 연속 이동 제지를 절단하기 위해 사변형 이동 워터젯을 사용하는 재단/절단/권선 기계를 개발하였고, 이러한 초기 응용은 저압·제지 같은 부드러운 소재에 국한되었다.[4] 전후에 선진국들이 효율적인 절단 장치용 새로운 방법을 연구함으로써 워터젯 기술 발전이 시작되었고, 얇은 스트림(Thin Streaming)형 고압워터젯을 사용하는 플라스틱 절단방법을 개발(Carl Johnson, Durox International, Luxembourg, 1956)하였지만, 종이처럼 연소재였다.[6] 강소재 절단을 위한 극초고압 액체 사용 장치를 개발(Billie Schwacha, North American Aviation, 1958)하였는데, 스테인강(PH15-7-MO) 같은 고강도 합금 절단 가능한 극초음속(>Mach 5) 분사 액체젯을 발생하는 펌프(100,000psi, 690MPa)가 사용되었고, 이 장치는 美공군전략폭격기(North American XB-70 Valkyrie)에 하니콤적층박판(Honeycomb Laminate)에 사용되었는데, 고속에서 적층박판을 분리하게 되어 공정방법을 변경할 수밖에 없었다.[5]

상기 폭격기(XB-70)에의 적용이 비효과적이었지만, 그 개념이 유효하여 지속 연구 결과, 금속·석기·기타 소재를



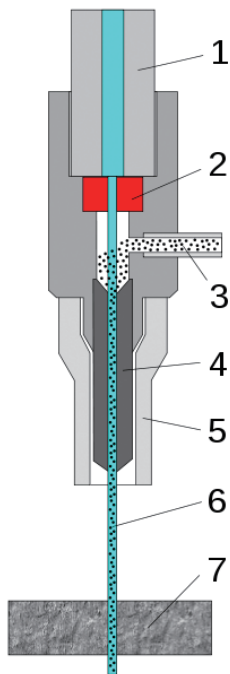
〈그림 2〉 Intensifier Pump



〈그림 3〉 Reciprocating Plunger Pump

절단하는 맥동형 워터젯(Pulsing Waterjet, 최대 50,000psi, 340MPa) 개발(Philip Rice, Carbide)을 계속하였고[12], 고압 워터젯의 암석절단을 위한 이상적 노즐형상 결정을 위해 전통적인 석탄 절단에서 1960년대에 연구[8]가 확장되었다. 1960년대 후반에는 제트 흐름의 응집력 개선을 위해 장고리중합체(Long Chain Polymers)를 용해하여 연소재 절단 연구에 집중되었다. 1970년대 초기 워터젯 노즐의 내구성 개선을 위해 워터젯 관(Orifice) 형성을 위해 강옥(鋼玉, Corundum) 사용을 시도하였고(하기 <그림 3>)<sup>10)</sup> 참조) 한편 노만 프란츠(Norman Franz)는 이 개념을 확장, 고압(70,000psi, 480MPa)에서 작동하는 초소형 관(0.002", 0.051mm)의 워터젯 노즐을 고안하였다. 그리고 Flow 연구소(J. Olsen, G. Hurlburt, L. Kapcsandy, 추후 회사 전환)는 사전 용수처리가 노즐 작동 수명 증가 가능성을 시험함으로써, 워터젯의 시장 잠재력을 제고시켰다.[11]

상기 그림에서 보는 연마재워터젯(AWJ, Abrasive Water Jet)은 강소재(Ti, Al, 유리, 암석) 절삭이 가능토록 개발하



**<그림 4> Water Jet Component**  
 (1. Water Input, 2. Jewel (Ruby/Diamond),  
 3. Garnet, 4. Mixing Tube, 5. Targeting Part,  
 6. Cutting Water Jet, 7. Cutting Material)

고 특허(Mohamed Hashish, 加, 1984)를 받았다. 이후 새로운 연마재워터젯(AWSWJ, Abrasive Suspension Water Jet)이 발표(R. M. Fairhurst, 1982/1986, 英)되었으며, 기포워터젯(CAVIJET, Cavitation Water Jet, 1974)·자기진공맥동형 워터젯(Self-resonating Pulsed Water Jets, 1984) 등도 개발(A. F. Conn, 美)되었다.

한편 그간 일본<sup>11)</sup>의 워터젯 기술은 고압펌프(High-pressure pump, 1964), 극초고압펌프(Ultra-high pressure pump, 1971), 극초고압펌프 워터젯 절삭장비(Ultra-high pressure water jet cutting equipment, 1976~1985), 이동식 세척장비(Portable washing machine/Hi-jet Gun, 1986), 공작기계와 결합한 고압 세척 및 흠 제거 기계(High-pressure washing and deburring machine, 1998), 서보모터구동형 초고압펌프(Servo motor driven type ultrahigh-pressure pump, 1997), 공작기계와 결합한 고압 세척 및 흠 제거 기계(High-pressure washing and deburring machine, 1998), 워터젯 레이저 기계(Water jet and laser machine, 2007) 등의 장비가 개발되었다. 현장응용사례로는 터널복공콘크리트의 연마제인젝션워터젯(ABIWJ, Abrasive Injection Water Jet)을 사용한 절삭(1987), 워터젯메스의 간장수술 실용화·연마제워터젯 이용한 폐원자로(JPDR) 해체응용연구(원자력 연구소) 등이 있었다. 이러한 워터젯 발전사를 개략 도표화하면 <표 2>와 같다.

### 2.3 워터젯 기술 분류 개요

Momber(1998)[10]는 워터젯에서 사용하는 압력은 막대피스톤(Plunger)에서 발생하는 저압젯(Low Pressure Jet, 270MPa), 유압증폭장치에서 발생하는 고압젯(High Pressure Jet, 400MPa), 연속/불연속류 젯, 일반용수/용해제 첨가 용수/연마재 젯 등으로 분류하였다. 한편 Lee (2012)[9]는 물 분사에 의한 재료 파괴·굴착·절삭 원리는 1)동압 파괴 2)충격하중 파괴 3)기포(Cavitation)에 의한 파괴 4)재료 내 간극수압에 의한 썩기 효과 5)연마 6)맥동 부하에 의한 피로파괴 7)분사류와 피사체와의 온도차에 의한 열응력 등으로 좀 더 자세하게 분류하고 있으나 이의 작용

〈표 2〉 Water Jet Technology Research History

기술연구 내용	시기
서양속담 “끊임없는 물이 돌을 뚫는다(Constant dropping of water wears away a stone)”, 동양 고사성어 수적석천(水滴石穿) 등의 기록	10~13C
유체에 대한 “파스칼 원리”, “베르누이 방정식”	1653/1738
(구)소련에서 석탄채굴에 최초 워터젯에 응용	1930
제지특허사(미 Wisconsin 소재): 제지 절단용 사변형 이동 워터젯 기계 개발	1933
플라스틱 절단방법 개발(룩셈부르크, Carl Johnson, Durox International)	1956
강소재 절단용 극초고압(690 MPa) 액체 사용 장치 개발(미 Billie Schwacha, North American Aviation)	1958
맥동형 워터젯(Pulsing Waterjet, 340 MPa) 개발(Philip Rice, Carbide)	1965
장고리중합체(Long Chain Polymers) 용해 사용 연소재 절단 연구(Norman Franz)	1960년대
워터젯 노즐 내구성 개선을 위한 워터젯 관(orifice) 형성용 강옥(鋼玉, corundum) 사용(S. J. Leach and G. L. Walker)	
초소형 관(0.002”, 0.051mm, 480MPa) 워터젯 노즐 고안(Norman Franz)	1970년대
Flow연구소(추후 회사 변신)는 사전 용수처리로 노즐 작동 수명 증가 가능성 시현	
워터젯 절삭기술 국제심포지움(International Symposia on Jet Cutting, Cranfield, Bedford, England-ICWJ(BHRG))	1972
연마제인젝션 워터젯(Abrasive Water Jet) 발명(영국, Barton & Saunders)[1]	1980
자기공진형 Cavitation 현상촉진 워터젯 노즐 발명(A. F. Conn, 미)	1984
복공콘크리트의 연마제인젝션 워터젯을 사용한 절삭(일 세이칸 Tunnel)*	1986
연마제서스펜션 워터젯(ABSWJ) 개발(R. M. Fairhurst, 영국)	1987
워터젯메스의 간장수술 실용화·연마제 워터젯 이용한 폐원자로(JPDR) 해체 응용연구(일 원자력연구소)*	1988

\* 부분인용출처: 참고문헌 9

〈표 3〉 Water Jet Classification

연속류 워터젯 (Continuous waterjet)	연속적인 순수 물이 분사되는 것으로, 이때 물흐름 속도는 Mach 3~4배에 달하고, Pump압력은 4,000bar에 도달하며, 비교적 연성 재료 가공에 적합하며 박판의 금속도 가공 가능
연마제 워터젯 (Abrasive waterjet)	순수 물에 워터젯 응용에 의한 절삭에 한계가 나타나자 이를 극복하기 위하여 고운 연마제를 순수한 물에 첨가하여 절삭효율을 향상, 이를 연마제 워터젯이라 하며, 현재 가장 널리 사용되는 워터젯 절단 기술의 하나로 연마제 혼합실이 있어 연마제가 고속 수류에 의한 압력차에 의해 연마제가 혼합, 절삭공구처럼 작용하며, 일반적으로 유리, 금속, 세라믹 등과 고경도/정밀 재질 가공에 활용
맥동형 워터젯 (Pulsed waterjet)	연속류 워터젯과 상반되는 개념으로서 연속류에 속도차를 주어 물방울의 결합에 의한 충격압을 이용하는 방법으로, 콘크리트 분쇄용 워터젯으로 사용
캐비테이팅 워터젯 (Cavitating waterjet)	13.7Mpa에서 68.5Mpa 압력 범위의 연속류 워터젯에 인위적으로 공동현상에 의한 기포를 형성시켜 재료에 가해지는 충격압을 증가시키는 방법으로, 공동현상에 의한 기포가 표면에 충돌하면 재료에 압축응력과 인장응력이 반복적으로 발생되면서 파괴가 진행

과 효과는 미묘한 상호작용을 하고 있으며, 표적물체의 파괴와 가공에 주로 효과적인가는 원리는 대상 물체의 (물리·화학적·역학적·조직·열적 등) 물성과 분사 환경에 따라 다르다면서 가공 방법상 워터젯을 세분<sup>12)</sup>하고 있다. 이를 다시 개략적으로 분류하면 워터젯은 유체, 유체·고체, 유체·고체·기체의 3가지 형태로 사용되며 일반적인 다음 4가지 종류가 있다.<sup>13)</sup>

이와 같은 워터젯의 가공방법(Water-Jet, Abrasive Water-Jet, Laser 등) 원리·특징은 하기 <표 4>와 같이 비교할 수 있다.

<표 4> Water Jet Principle/Characteristics

구분	Water-Jet	Abrasive Water-Jet	Laser
원리	순수 Water-Jet 충격제거	Water-Jet 충격·연마제 절삭 효과 상승작용	고밀도화한 Laser·용융, 제거
특징	무공해·정밀절단 가능·절단 폭 미세·소가공변형·副資材관리용이·3차원 가공 용이·끝마무리 청결 (2차가공 불요)	무공해·면 고정밀도·거의 모든 재료 절단·소재 물질, 화학적 無변형·취성소재 절단·비접촉 절단·수중 절단	박판 시 정밀절단·박판 시 小절단폭·가공 소음 無·박판재는 절단 고속도
단점	고경도 재질에 부적합·일반적 소음(방음 要)·厚소재 가공 底정밀도	일반적 소음 발생 (필요시 방음 조치)·연마제 후처리	厚소재 적용 불가·출력 안정화 유지 애로·장비 고가·열변형 발생·Al/동/Ti, Glass·대리석 등 가공 부적합·후속 작업 필요
대상	FRP·고무·복합소재·종이·기타 비금속	철·SUS·동·Al·Ti·세라믹·대리석·유리·철근 Concrete 등 모든 소재	철판·Stainless
능력	소재(고무) 3mm 기준·속도 3,600mm/min	소재(강판) 12mm 기준·속도 200mm/min	소재(강판) 12mm 기준·속도 400mm/min
유지비·가격	저가	중가	고가

## 2.4 워터젯 적용 분야 및 선택 방법

상기와 같은 워터젯 기술 특성을 바탕으로 수입의 유량 및 압력에 따른 적용 분야는 <표 5>와 같다.

적용 분야를 선택하는 방법은 펌프의 성능(압력/유량), 공급 동력원, 작업 방식, 작업 효율성, 시장성 등을 검토하여야 한다.

## 2.5 워터젯 기술 분야, 장단점

이러한 워터젯 기술의 응용 분야로는 절삭(Cutting: Abrasive water jet, Suspension waterjet), 세정(Cleaning Surface preparation), 파쇄(Demolition), 특수유체이송 및 가압용 등이 있으며, 적용 분야로는 석유화학(Chemical plant) 및 정유공장(Petrochemical plant) 등이 있고, 차후 미래 지향적인 분야로는 수소전기 자동차압력용기 테스트, 고압용기에서의 식품가수분해 등이 있다.

단점으로는 투자비용이 고가이고, 고압 특성상 작업상 안전 교육필수이나 장점으로 유지보수 비용절감, 신규 교체 보다 재사용 횟수 증가, 본소재 외 표면처리 용도로 활용가능, 도장전 표면을 원소재 형태로 보존하여 도장의 부착력 강화 등을 들 수 있다.

<표 5> Application Examples

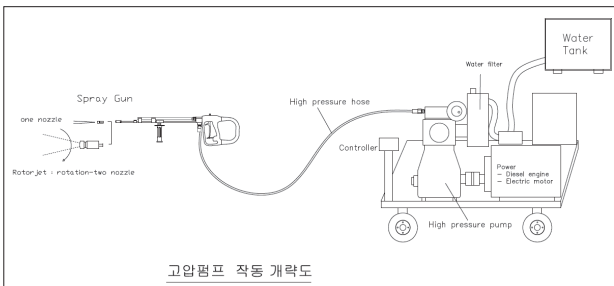
사례 -1	Turbine blade contamination cleaning Pressure : 3,000bar, 20l/min Cleaning method : 작업자 Spray gun 사용의 수동 작업
사례 -2	공항 활주로 고무제거 작업 Pressure : 3,000bar, 34l/min~44 l/min Cleaning method : Spray bar회전을 가진 노즐 분사 장치의 자동화 작업
사례-3	활주로 및 도로 마킹 작업 Pressure : 3,000bar, 30l/min Cleaning method : 마킹제거 장치를 이용한 수동작업 및 자동화 작업

## 2.6 워터젯 장비 구성 방식

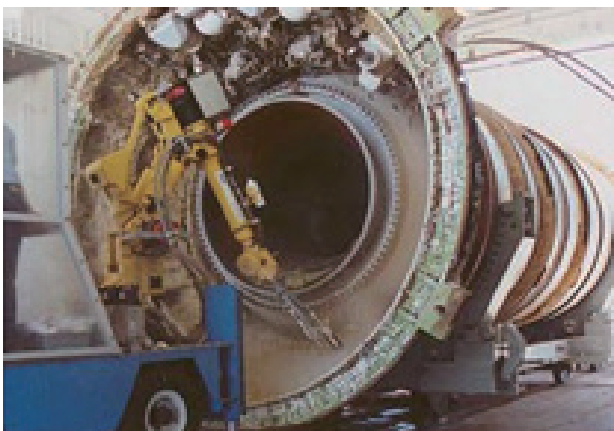
장비는 주요부품으로 고압 펌프·피팅류·호스가 있고, 적용 분야에 따른 부가장치로 원 노즐·회전형 로터젯·분사방식(직사회전형·순수물질)·Abrasive 혼합형(주로 Cutting에 적합)·회전력 구동방식(공압유압·전기)·Spray gun (작업자 Manual 구동방식) 등이 있으며, 전체 장비 개략 구성도는 <그림 5>와 같다.

## 2.7 워터젯 기술 항공 적용 분야

이러한 워터젯 기술을 항공 분야에 적용할 수 있는 분야로는 항공소재, 터빈, 공항 활주로, 유지보수 관련 분야가 있는데, 적용 방법으로는 항공기의 화장실 세정, 활주로 마킹 및 고무 제거, 항공소재 페인트 제거, 터빈 세정 작업 등이 있으며 <그림 6-9>와 같다.



<그림 5> Water Jet Configuration



<그림 6> Surface Preparation on a Booster Rocket



<그림 7> Reconditioning Turbine Blades



<그림 8> Rubber Removing Equipment in Runway



<그림 9> Marker Removing Equipment

## 2.8 각국 워터젯 협회 및 한국 주요 회사

이와 같이 선진국 중심으로 발전되어 온 워터젯 기술 회사는 아래와 같이 협회가 결성되어 있다. 그간 국내에서 발전된 각 워터젯 절삭/세정/토목환경시스템/부품재료/기타 분야별 전문기술회사는 <표 6, 7>과 같다.

<표 6> Water Jet Association in World

국가	명칭
미	Water Jet Technology Association (WJTA) www.wtja.org
영	Water Jetting Association (WJA) www.waterjetting.org.uk
일	Water Jet Technology Society of Japan (WJTSJ) www.wdc-jp.com/wjtsj
독	DFIV (Deutschsprachiger Flüssigkeitsstrahler Industrie Verband e.V.) www.dfiv.de
EU	EWJI (European Water Jetting Institute) www.ewji.org
프랑스	Club Jet d'Eau www.clubjetdeau.com Système de Certification Compétence et Conformité (S3C) www.s3c-ami.org
스위스	Schweizerischer Fachverband Für Hydrodynamik am Bau (SFHB) www.sfhb.ch
스웨덴	Scandinavian Waterjet Association (SWA) www.swa.se
네덜란드	Stichting Industriële Reiniging (SIR) www.sir-safe.nl
스페인	ALTAP (the union of AETAC and ASELIME) www.altap.org
호주	Ausjet www.ausjetinc.com.au
중국	Industry Cleaning Association of China (ICAC) www.icac.org.cn
한국	Korean Water Jet Association (KWA) www.koreanwaterjet.org

<표 7> Water Jet Companies in Korea

회사	절삭	산업 세정	토목 환경	시스템	부품 재료	기타
고려종합기술	0	0				
비씨워터젯	0	0		0	0	
기원엔텍	0			0	0	0
영진기술	0	0	0	0		
제이티에스	0			0	0	
오맥스워터젯	0			0	0	
티오피에스	0			0	0	
유한기술	0	0			0	0
GFC코리아	0	0		0	0	
워터라인	0					
한송	0		0		0	0
건우기술	0		0			
StoneAge		0		0	0	
대진기계		0				
비씨태창산업		0	0			
에스엠티					0	
노아엑츠크에이션						0

## III. 결론

### 3.1 항공 적용 분야

상기에서 살펴본 바와 같이 워터젯 기술은 원제품의 모재손상이 없고 친환경적인 세정 작업으로서, 항공소재, 터빈, 공항 활주로, 유지보수 관련 분야에서 터빈 세정, 항공기 화장실 세정, 활주로 마킹 및 고무 제거, 항공소재 페인트 제거 등의 작업에 적용을 확대하면 환경오염, 경비절감, 작업 효율 및 안전도 제고 등이 가능하다고 하겠다.

### 3.2 향후 개선점

앞에서 조사 분석되었듯이 우리 기술기업들은 절삭, 세정, 시스템, 부품 및 재료 공급 분야 등이 주요 분야이고, 장비 및 기술도 선진국을 활용하는 것으로 나타났다. 육해공군 등 소요군에서는 육상체계의 정비, 세척, 공항활주로 수리, 터빈 세척, 함정의 외관 정비 및 불순물 세척 등에 활용할 수 있으므로, 우리도 워터젯 연구개발(R&D)에 관심과 투자를 제고하면서 적용 분야를 점차 확대하는 정책적 지원 방안이 필요하다 하겠다.

본 연구는 자료 수집 및 조사 분석에서 (주)유나테크(YUNATECH, 한국 일산 소재)의 지원을 받았음을 밝혀둔다.

- 주1) 1. 압력 발생(초고압 펌프가 최대 94,000 psi (6,480 Bar) 압력 사용, 물 흐름 발생), 소방 호스는 390~1,200 psi (20~84 Bar) 압력. 2. 압력은 작은 보석 사용 Orifice 통해 고속 변환. 3. 절삭력 증가(1,000배) 위해, 연마재(Garnet)를 초음속 흐름에 포함, 약 4배 음속으로 커팅 헤드로부터 분사, 1' 두께의 강철도 절단 가능(<https://www.flowwaterjet.co.kr>)
- 주2) 펄프·종이 우주·항공기 광학기계 자동차 미술품 건축 식품가공 농업 광업 건설·토목 석유화학 환경 원자·페로석유·가스 비무장화재료 합성해양·조선 전자공학 의학·치의학 소결로·압연·지열 등<sup>1)</sup>
- 주3) 1. 기존 절단방법으로 난해한 소재 Ti·Al·Glass·복합소재·도장된 소재·우레탄 피복·대리석·타일·목재·종이·고무 등 모든 소재를 단일 System 적용·절단 가능. 2. 복잡한 모양 미세 소재도 정확한 절단 가능하며 절단 폭이 미세하여(0.4~1.8mm) 재료낭비 방지. 3. 가공 표면 깨끗하여 후처리(Slag처리·Grinding·선반작업 등) 불필요. 4. 절단 부위 熱작용 없어 원소재 조직 변형 無·2차 공정(재열처리·소둔·도장·도포) 소요 비용·시간 절약. 5. 공구·장비 교체 시 작업 중단 불필요·작업공정 간단·절단 시간 단축. 6. 작업 시 인체 유해 화학 변화·매연·분진 미발생·일반 소음(50~70db)은 필요시 방음장치로 해결. 7. 비접촉 절단(Press 절단 시와 같이 고정/절단부에 無자극·저진동·냉각 절단으로 압력·진동·열 민감 소재(PCB, 폭발물 등) 절단 가능. 8. 소재 중간 임의 지점에서 폐곡선 절삭 가능. 9. 작업반력이 적어 Robot·CNC Table·Jig 등 사용한 자동화 가능·위험 작업 시 원격조정 작업 가능. 9. 2종류 물질 구성 소재 경우 동시 절단·분리 제거 가능: 철근 콘크리트 건물 창호 공사 시 철근·시멘트 동시 절단, 부분적 시멘트 주입 불량으로 주위 영향 주지 않고 천근을 남긴 채 해당 부분 시멘트만 제거, 석축 구조물의 석재 표면 손상 없이 분리 후 이물질 세정, 모재(母材) 손상 없이 피복재(우레탄·타일·접착제·페인트 등) 제거

- 주4) [www.waterjetsystem.co.kr](http://www.waterjetsystem.co.kr) (Waterjet의 역사 및 종류) 일부 인용
- 주5) 베르누이 정리( $\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$ , 전압  $p_1 = p$ (정압) +  $1/2\rho V^2$ (동압))
- 주6) 13C부터 기록되었으나, 고대 그리스어(with persistence a drop of water hollows out the stone), 라틴어(length of time eats away stones with soft water)에서도 나타남(Oxford 사전)
- 주7) 北宋 송양현령(崇陽縣令) 장괴애(張乖崖)에서 유래(학림옥로, 鶴林玉露, [www.hanjanews.com](http://www.hanjanews.com))
- 주8) 유체압력 전달원리(principle of transmission of fluid-pressure): 유체역학에서 폐관 속의 비압축성 유체의 어느 한 부분에 가해진 압력의 변화가 유체의 다른 부분에 그대로 전달(위키백과)
- 주9) 베르누이 방정식(Bernoulli's equation): 흐르는 (이상) 유체에 대하여 유선(streamline) 상에서 모든 형태의 에너지 합은 언제나 일정(위키백과)
- 주10) 인용출처([https://en.wikipedia.org/wiki/Water\\_jet\\_cutter](https://en.wikipedia.org/wiki/Water_jet_cutter))
- 주11) 일본의 대표적 회사 SUGINO(철학(기술은 반복된 융합과 진화의 결과로서 모든 방향으로 전진한다), [www.sugino.com](http://www.sugino.com))를 조사 분석
- 주12) 1. 순수 워터젯(pure water jet). 2. 물 분사 확산 억제를 위하여 물에 중합체, 식염수 기타 액상 약제를 첨가 하는 용액첨가워터젯(additive water jet). 3. 물 분사 시 발생 부압활용, 외부 연마제 흡입하여 물과 함께 분사하는 연마제 인젝션 워터젯(abrasive injection water jet). 4. 사전 연마제와 물을 혼합한 현탁액을 직접 가압 분사하는 연마제 서스펜션 워터젯(abrasive suspension water jet). 5. 수중 분사에서 피사체와의 충돌영역에 기포(cavitation)를 형성시키는 기포(Cavitation) 워터젯. 6. 수중 워터젯 유효사정거리 연장을 위한 노즐 주위로부터 공기 피막류를 동반시키는 기층피복워터젯(air coated water jet)과 같은 목적으로 공기 대신 저속의 수막 분사류를 동반시키는 층피복워터젯(water coated water jet). 7. 정상 분사류에 주기적 속도변동 혹은 단발적 분사하는 비정상 워터젯(unsteady water jet) 8. 맥동 워터젯(pulsed water jet) 9. 이 외 노즐을 동심/편심을 시켜 회전하며 표적 물체에 충돌시키는 회전워터젯(rotating water jet), 노즐 내부에서 소용돌이 물줄기를 만들어 표적물에 충돌시키는 나선형워터젯(spiral water jet), 노즐의 이동 방향 또는 직교 방향으로 진동을 시키면서 표적물체에 충돌시키는 진동 워터젯(oscillating water jet) 등으로 분류
- 주13) 인용출처(<http://www.waterjetsystem.co.kr/m31.php>)

### 참고문헌

1. Abudaka, M. M. "Development of a High Pressure Abrasive Water Jet for Cutting System", Ph.D Thesis, Imperial College, 1989.
2. America Water Jet Association ([www.wjta.org](http://www.wjta.org)).
3. Choi, S. and Kim, C. "The Study in Improving Quality of Aircraft Maintenance Recurrent Training using e-Learning", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, Vol. 27, No. 1, Mar. 2019. pp.34-42.

4. Fourness, C. A. and Pearson, C. M. Paper Metering, Cutting, and Reeling, Jul. 2, 1935.
5. Jenkins, D. R. and Landis, T. R. *Valkyrie: North American's Mach 3 Superbomber*, Specialty Press, 2004, p.108.
6. Johnson, C. O., Method for Cutting Up Plastic and Semi-Plastic Masses, Apr. 14, 1959.
7. Korea Water Jet Association ([www.koreawaterjet.org](http://www.koreawaterjet.org)).
8. Leach, S. J. and Walker, G. L. "The Application of High Speed Liquid Jets to Cutting", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 260, No. 1110, Jul. 28, 1966. pp. 295-310.
9. Lee, C.-I., "Application of Water Jet Technology to Industry-Current State, Research Trend and Prospect", *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 49, No. 2, 2012, pp. 226-238.
10. Momber, A. W. *Water Jet Applications in Construction Engineering*, A. A. Balkema Publisher, Rotterdam, Netherland, 1998, pp.3-15.
11. Olsen, J. H., Hurlburt, G. H., and Kapcsandy, L. E. Method for Making High Velocity Liquid Jet, (Archived 2014-01-31 at the Wayback Machine, filed June 21, 1976, and issued) Aug. 12, 1980.
12. Rice, P. K., Process for Cutting and Working Solid Materials, Oct. 19, 1965
13. Wiki-Media ([https://en.wikipedia.org/wiki/Water\\_jet\\_cutter](https://en.wikipedia.org/wiki/Water_jet_cutter)).