

〈論 文〉

연마제 혼합액 제트의 절단 성능에 관한 연구

안영재* · 유장열** · 권오관* · 김영조***

(1989년 4월 8일 접수)

An Experimental Study of Cutting Abilities of an Abrasive Water Jet System

Young Jae Ahan, Jang Yul Yoo, Oh Kwan Kwon and Young Jo Kim

Key Words: High Pressure Generation(고압 발생), Nozzle Assembly(노즐 장치), Water Jet(물제트), Abrasive(연마제), Abrasive Water Jet(연마제 혼합액 제트), Transverse Rate(이송 속도), Cutting Performance(절단 성능)

Abstract

A jet cutting system is a new concept of cutting device which requires high pressure up to thousands of atmospheric pressure. The use of water as a cutting medium brings in many of working advantages such as no dust, no gas, and no thermal distortion. And an introduction of abrasives into the water jet flow increases significantly cutting abilities and improves cutting performance. Cutting with abrasive water jet involves many operating variables, including design of the cutting system. For efficient cutting, the operating parameters have to be chosen properly. In spite of several attempts to develop the cutting model theoretically, all of the optimization of the operating parameters is based upon experimental results of each jet cutting system. In this paper, the effect of the parameters was measured and analysed in terms of pressure, abrasive, and transverse rate of a workpiece. Most of all, sufficient feeding of abrasives is the most important factor for efficient cutting performance.

1. 서 론

제트 분사 절단 기술은 물의 충돌에너지를 이용하여 공작물을 절단하는 새로운 개념의 가공 기술이다⁽¹⁾. 이 기술의 기본원리는 고속으로 분사되는 물줄기의 충격에 의하여 공작물을 빠르게 침식(erosion) 시키는 것으로써 1969년 미국의 일리노이 대학의 Norman Franz에 의하여 처음 소개되었다. Franz는 실험을 통하여 음속의 2배정도로 분출되는 물줄기의 제트가 칼과 같이 예리한 절단력

을 가지고 있음을 보였다. 고속의 물줄기를 만들기 위하여서는 수천기압의 고압 발생이 필수적이었으며, 1970년대의 여러 고압 발생 기술의 발전에 따라 실용화되었다. 제트 분사 절단 기술은 물을 사용함으로써 기존의 절단 기술에 없는 여러 가지의 장점을 가지고 있다. 특히 절단면의 열적 변형과 분진 및 개스 발생등의 환경 오염을 최소화할 수 있으며 NC와 로봇트를 이용하여 형상가공까지 시도되고 있다⁽²⁾. 현재 이 기술은 플라스틱, 가죽, 종이 그리고 나무등의 비교적 부드러운 재료의 절단에 사용되고 있다.

그러나, 금속이나 돌과 같이 경도가 높은 재료는 고속의 물제트만으로는 절단 가공이 불가능하다. 이를 극복하기 위하여 물제트에 가는 연마제는 혼

*정회원, 한국과학기술연구원 기계공학부

**한국과학기술연구원 기계공학부

***가람유압시스템

합시켜 이 연마제 혼합액 제트가 공작물을 절단 하게 하는 방법이 고안되었다⁽³⁾. 가속된 연마제 혼합액 제트는 물체트보다 훨씬 큰 충격력을 가지며 거의 모든 재료를 절단할 수 있게 되었다. 이들 재료에는 세라믹, 유리, 복합재료, 그리고 수퍼알로이 등의 난삭재들이 포함된다. 연마제 혼합액 제트 절단은 연마제의 공급 방식에 따라 건식과 습식으로 구분된다⁽⁴⁾. 건식은 건조한 연마제를 직접 물체에 공급하는 방식으로 간단한 장치로 구성되나 연마제와 물의 혼합과 가속에 어려움이 있다. 건식은 물노즐에 연마제 노즐을 간단히 부착할 수 있고 물과 연마제 혼합액의 제트를 발생시킴과 동시에 사용함으로써 현재 대부분의 제트 분사 시스템이 이 방식을 사용하고 있다. 이에 반해 습식은 미리 연마제를 물과 섞어서 슬러리 형태로 만들어 공급하는 방법이다. 건식에 비하여 절단 성능이 뛰어나지만 장치가 복잡해지고 마멸이 심하게 발생된다. 최근에는 절단 성능 향상의 요구에 따라 습식 방식에 대한 연구도 진행되고 있다⁽⁵⁾.

제트 분사 절단 시스템은 비록 실용화되어 사용되고 있지만 절단 성능은 각 제트 분사 시스템의 구조와 운전에 관련된 여러가지의 변수에 의하여 크게 좌우된다. 시스템의 구조는 압력 발생장치의 효율, 노즐 어셈블리 형상 및 재료, 연마제의 공급 방식, 각각의 고압용 부품들의 선택등에 관련된다. 운전변수는 압력 및 유량, 연마제의 종류, 연마제의 공급 속도, 그리고 공작물의 이송 속도 등 주어진 제트 분사 시스템 내에서 선택할 수 있는 조건들이다. 따라서 운전 변수는 공작물의 종류에 따라 알맞게 선택되어야 최적의 절단 성능을 얻을 수 있다. 효과적인 절단과 성능 향상을 위하여 여러 운전 조건에 따른 절단 결과에 관한 연구들이 수행되고 있다^(4,6). 이들은 주로 철판과 콘크리트의 절단에 관한 연구들이다. 해석적인 모델링도 이들을 근간으로 시도되고 있지만 아직은 제트 분사에 의한 절단 메카니즘은 매우 복잡한 현상으로 받아지고 있으며 대부분 성능 실험을 필수적으로 요구하고 있다.

본 연구에서는 제트 분사 시스템을 제작하여 절단 성능에 관계하는 여러 변수중 고압수의 압력, 연마제의 크기 및 공급량, 그리고 공작물의 이송 속도의 영향을 실험적으로 연구하였다. 절단 실험은 공작물을 한방향으로 이송하며 절단하는 일반적인 횡절단 방법(slotting method)을 사용하였고 이

때 노즐의 분사 각도와 노즐과 공작물 사이의 거리는 고정시켰다. 절단 성능은 주어진 운전 조건에서의 제트에 의하여 패인 절단 깊이를 측정하여 표시하였다. 절단 결과는 우선 연마제의 공급이 충분하여야 절단이 이루어지며 이 경우 절단 깊이는 압력에 비례하고 이동속도의 증가에 급격히 감소하는 경향을 나타내었다.

2. 절단 가공의 원리

본 연구에 사용된 실험장치는 건식 연마제 혼합 방식을 갖는 연마제 혼합제 제트분사 시스템으로 이 장치의 절단 메카니즘은 Fig. 1과 같다. 고압 발생 장치에서 수천기압으로 가압된 물은 물노즐을 통하여 마하 2 이상의 고속 물체트로 바뀌어진다. 고속의 물체트는 벤투리관의 원리에 의하여 연마제 흡입구 부근에서 낮은 정압을 형성하므로써 건조한 연마제를 빨아들인다. 흡입된 연마제는 고속의 물체트와 함께 혼합실로 들어가며 물체트의 모멘텀이 연마제로 전달되어 연마제의 속도가 빨리지며 동시에 물체트와 혼합된다. 혼합실에서 섞인 물체트와 연마제는 연마제노즐 안에서 균일하게 혼합되어 큰 충격력을 갖는 연마제 혼합액 제트로 만들어진다. 연마제노즐을 통해 분출되는 연마제 혼합액 제트는

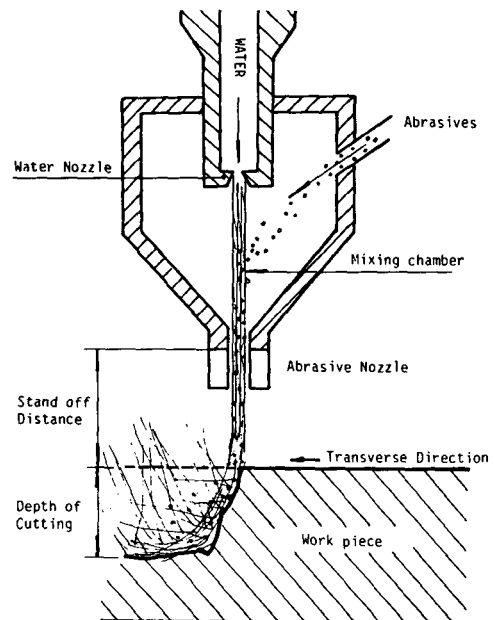


Fig. 1 Cutting mechanism of an abrasive jet

공작물을 강타하며 절단을 수행한다. 여기서 물제트와 연마제 사이의 모멘텀 절단은 매우 중요하며 여러 현상으로 이루어지는 복잡한 과정이다⁽⁷⁾. 어떤 중요한 과정은 고속 물제트의 동적 안정성에 기인한다. 즉, 처음 곱게 분사된 물제트가 물방울의 형태로 퍼져 부서지기 시작한다. 이 물방울들이 연마제를 가속하게 한다. 또 어떤 과정은 고체 연마제에 물제트의 유체역학적 가속력(drag force)을 사용한 것이다.

제트 분사에 의한 절단을 주로 충격에 의한 공작물의 마멸현상(erosion)이며 절단깊이(depth of cut)는 공작물의 물성, 특히 경도에 크게 좌우된다. 일단 가공할 공작물의 결정되면 절단깊이는 주어진 제트 분사 시스템의 구조와 성능, 그리고 운전 조건에 의하여 결정된다. 연마제 제트는 공작물의 아래 부분으로 내려가면서 모멘텀이 줄어들며 공작물 이송의 반대방향으로 점차 휘어진다. 따라서 제트 분사에 의한 절단면은 휘어진 물결모양을 갖는 특징을 갖는다.

3. 실험장치

제트 분사 시스템은 Fig. 2와 같이 기본적으로 고압 발생 장치, 노즐 장치, 공작물 이송 장치, 그리고 배수 장치등의 네 부분으로 나누어진다. 고압 발생 장치는 공급된 물을 가압하여 원하는 압력으로 만드는 장치로 급수 장치, 유압 펌프(oil pump), 증압기(intensifier), 축압기(accumulator)로 구성되어 있다. 급수 장치에서 여과 공급된 물은 왕복 운동형 플런저 펌프인 증압기에 공급된다. 증압기는 18.7kW의 유압펌프에 의하여 구동되어 Fig. 3과 같이 가압을 하게 된다. 유압 펌프에서 P_0 로 가압된 오일은 유압 시스템을 밀며 이에 따라 플런저를 움직여 실린더 내의 물을 가압한다. 물의 압력 P_w 는 P_0 와 유압 피스톤과 수압 플런저의 면적 비와의 곱으로 결정된다. 증압기는 한쪽 실린더의 물을 가압하면 반대쪽에 있는 실린더에 새로이 물이 공급되는 구조로써 유압 피스톤의 방향이 전환되면 반대쪽의 물을 가압한다. 가압된 물은 축압기에 일시 저장되며 여기서 압력의 맥동을 없애고 일정한 압력을 유지하게 된다. 축압기에 저장된 고압수는 on-off 밸브에 의하여 노즐로 공급된다. 본 연구에서 사용된 제트 분사 시스템은 1개의 증압기를 갖는 구조로 최고 4,000 기압까지의 고압수를

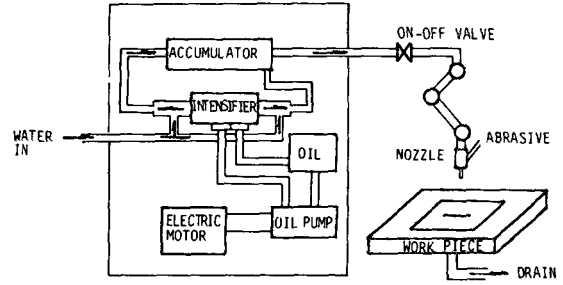


Fig. 2 Schematic diagram of an abrasive jet system

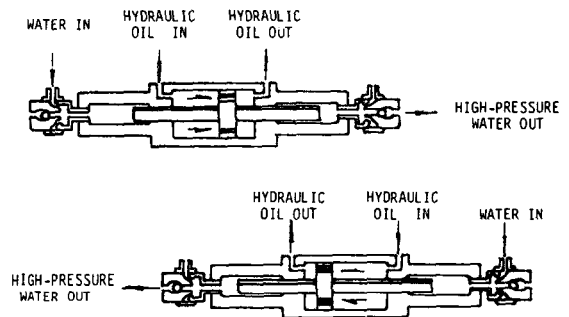


Fig. 3 Operating mechanism of an intensifier

분당 3리터까지 연속적으로 가압할 수 있다.

노즐 장치는 Fig. 1의 윗부분과 같이 물노즐과 연마제 노즐 장치로 구성되어 있고 고압수를 연마제 제트로 바꾸는 기능을 갖는다. 물노즐은 고압 튜브에 의하여 축압기로부터 전달된 고압수를 마하 2이상의 고속 물제트로 바꾸어준다. 물노즐은 원통형으로 가운데 원추형태의 가는 구멍을 가지고 있다. 물노즐은 물제트 모멘텀의 반작용에 의한 충격을 받으므로 경도가 높은 인조 사파이어로 제작되었다. 연마제 노즐 장치는 물노즐 하단에서 부착되어 고속의 물출기에 연마제를 섞어서 연마제 제트를 만든다. 연마제 노즐 장치는 연마제 흡입구, 혼합실, 그리고 연마제 노즐로 구성되어 있다. 연마제는 연마제 흡입구에서 공급되며 고속의 물제트가 흡입구에서 낮은 정압을 형성하여 연마제가 압력 차이에 의하여 딸려 들어간다. 이때 흡입되는 연마제의 공급량은 미리 공급 장치에서 조절된다. 연마제노즐은 연마제의 가속에 의한 마멸이 심하므로 내마멸성이 강한 텅스텐 카바이드로 제작되었다. 연마제 노즐은 중앙에 일정 직경의 구멍이 뚫린 긴 원통형의 형상을 가지며 길이에 따라 고압수와 연마제의 혼합 및 가속정도가 달라진다. 물노즐

은 최소 직경이 0.33mm의 인조 사파이어 노즐이 그리고 연마제 노즐은 외경 8mm, 내경 1mm, 길이 53mm의 텅스텐 카바이드 노즐을 사용하였다.

공작물 이송장치는 횡절단(slot cutting)이 가능하도록 공작물을 한 방향으로 이동시키는 기능을 가지며 가변속 모터와 변속기로 구성되어 있다. 이송 속도(transvers speed)는 최고 5m/min 내에서 조절이 가능하며 공작물을 고정하는 장치는 스테인리스강으로 제작되었다. 공작물 이송 장치의 밑에는 공작물을 절단하고 나온 연마제 혼합액 제트를 받는 배수장치가 있다. 배수장치는 길이를 바꿀 수 있는 작은 직경의 파이프 형태로 물, 연마제, 그리고 공작물의 절단 찌꺼기를 분리하는 기능을 갖는다.

4. 실험 방법

제트 분사 시스템의 절단 실험은 노즐을 고정하고 공작물을 한 방향으로 이송시키면서 절단하는 일반적인 횡절단 방법을 이용하였다. 공작물이 노즐과 직각이 되도록 하고 노즐과 공작물 사이의 거리를 1mm로 유지하면서 운전 조건을 바꾸면서 절단 실험을 행하였다. 절단 성능은 주어진 운전 조건에서의 절단 깊이를 측정하여 표시하였다. 본 연구에서는 고압수의 압력, 공작물의 이송속도, 그리고 연마제의 영향을 관찰하였다. 특히 연마제는 경도, 입자의 크기 및 형상, 밀도, 가격등이 고려되는데 여러 연마제중 경제성이 있다고 알려진 가넷(garnet)를 선정하였다⁽⁶⁾. 고압수의 압력은 1,000기압에서 4,000기압까지, 이송속도는 0.01m/min에서 0.2m/min까지 변화 시켰고 가넷 연마제는 매쉬 크기 #80과 #100을 사용하였다. 연마제 공급량은 밸브에 의하여 조정되며 가넷 #80은 120g/min과 360g/min, 그리고 #100은 140g/min과 450g/min으로 공급되었다. 절단 시편은 20mm두께의 SS41 철판을 사용하였고 연마제 노즐의 마모에 의한 영향을 배제하기 위하여 절단 거리는 25mm내로 제한하여 절단 시간을 줄였다.

5. 실험 결과 및 고찰

연마제 제트에 의한 절단 부위(kerf)의 형상은 Fig. 4(a)와 같다. 운전 조건과 공작물의 재질에 따라 절단 부위의 폭과 깊이는 차이가 나지만 보통 제트가 처음 부딪히는 윗부분은 넓게 그리고 아래

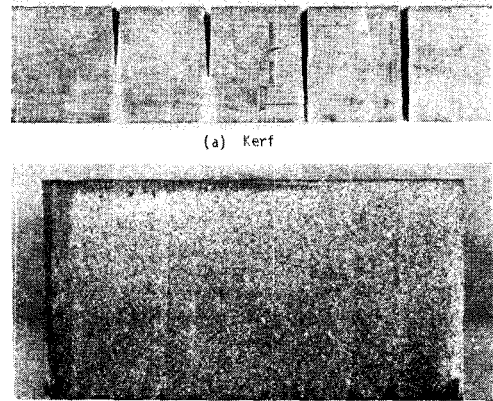


Fig. 4 Cutting shape of an abrasive water jet

쪽으로 갈수록 좁아지는 형상을 나타낸다. 이는 제트가 절단면 아래로 내려가면서 모멘텀이 줄고 또 부딪히고 반사하는 제트와 섞여서 절단력이 감소하기 때문이다. Fig. 4(b)는 절단면을 옆에서 관찰한 그림으로 물제트의 휘어짐과 공작물 이송의 영향으로 위에서 아래로 가면서 휘어진 물결 모양의 특징적인 무늬를 나타낸다.

고압수의 압력 변화에 따른 물제트의 유량 변화는 Fig. 5와 같다. 여기서는 직경 0.33mm 노즐과 함께 물제트 분사 절단에 주로 쓰이는 직경 0.25mm인 물노즐을 동시에 사용하였다. 유량은 압력의 증가에 비례하여 증가하며 증가율은 압력의 증가에 따라 감소한다. 이는 노즐의 성능 효율이 압력의 증가율보다 떨어지기 때문이다.

연마제는 연마제 혼합액 제트 분사 절단에 매우 중요한 운전 변수이다. Fig. 6는 절단 깊이에 대한 연마제의 크기와 공급량의 영향을 나타낸 것이다. 연마제의 공급이 적은 경우 연마제의 크기와 상관없이 절단 깊이가 적고 또한 거의 동일하다. 이송속도 0.1m/min에서 연마제의 공급이 많고 적음에 따라 각각의 연마제에서 절단 깊이가 두배이상 차이가 나고 있다. 그리고 연마제의 공급이 많은 경우도 연마제의 크기에 따라 절단 깊이에 차이가 있음을 알 수 있다. 연마제는 물제트에 의하여 가속되고 혼합되므로 연마제의 가속과 혼합 정도가 절단 성능에 큰 영향을 미친다. Finnie⁽⁹⁾의 연성 재료의 마멸 이론에 의하면 마멸량 W 는 다음과 같이 표시된다.

$$W = \text{const} \cdot m V^2 \cos^2 \alpha \quad (1)$$

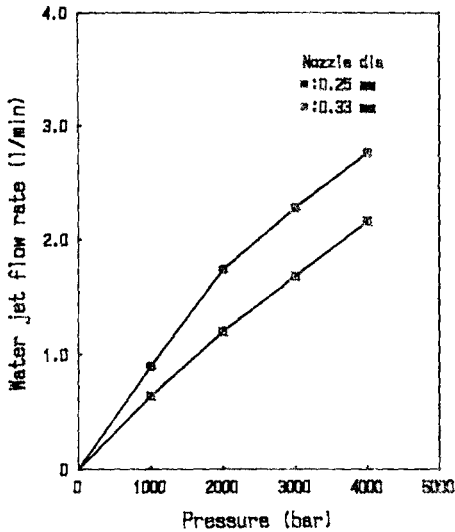


Fig. 5 Effect of pressure on water jet flow rate

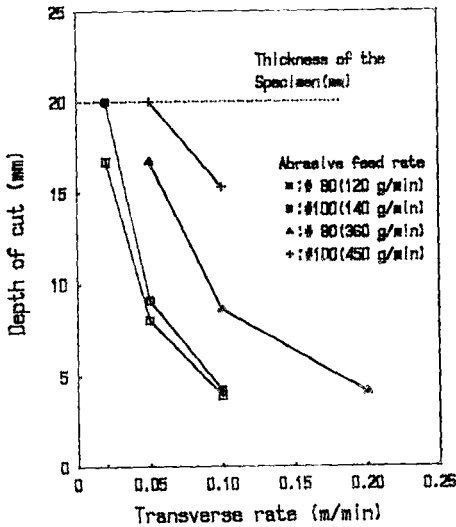


Fig. 6 Effect of abrasive feed rate on depth of cut

여기서 m 은 가속 입자의 질량, V 는 가속 입자의 속도, 그리고 α 는 입사각이다. 연마제의 가속에서 물제트에 의한 모멘텀의 교환이 완전히 이루어진다고 보면 연마제 혼합액 제트의 최종 속도 V_j 는 아래와 같다.

$$V_j = \frac{\dot{m}_w V_w + \dot{m}_a V_a}{\dot{m}_w + \dot{m}_a} \quad (2)$$

여기서 \dot{m}_w , \dot{m}_a 는 물과 연마제의 공급량, 그리고 V_w , V_a 는 각각의 속도를 나타낸다. 연마제의 흡입 속도 V_a 는 물제트의 속도 V_w 에 비하여 매

우 작으므로 무시하면 식 (2)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$V_j = \frac{V_w}{1 + \dot{m}_a/\dot{m}_w} = \frac{V_w}{1 + R} \quad (3)$$

R 는 연마제 흡입량과 물유량의 비를 나타내며 연마제 제트에 의한 절단을 가속된 연마제에 의한 침식마멸 현상이라면 (1)을 근간으로 절단 깊이 h 와 연마제 공급과의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h = \text{const} \cdot \dot{m} V_j^2 \alpha \frac{R}{(1+R)^2} \quad (4)$$

이 모델은 절단 깊이가 연마제의 흡입량의 증가에 따라 증가하며 $R=1$ 에서, 즉 연마제와 물유량이 같을 때 최대의 절단 깊이를 가짐을 보인다. 그 후에는 연마제 흡입량의 증가가 오히려 절단을 방해하는데 이는 과다의 연마제가 충분히 가속되지 않기 때문이다. 실제로는 물제트에 의한 연마제의 가속과 혼합이 이상적으로 이루어지지 않으므로 Hashish⁽¹⁰⁾는 실험적으로 $R=0.5$ 일 때 최대라고 보고하고 있다. 본 실험에서는 압력 P 가 2,500 기압에서 물유량이 2/min이고 #100 연마제의 공급량이 최대 500g/min이므로 $R=0.25$ 이다. 이 경우 R 에 의한 영향은 다음과 같이 나타낼 수 있고 분모에 있는 R 의 앞에 붙는 계수는 제트 분사 장치의 연마제의 가속과 혼합의 정도를 의미하는 계수로 볼 수 있다. 최대 절단 깊이를 고려하여 계수를 붙이면 절단 깊이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h = \text{const} \cdot \frac{R}{(1+4R)^2} \quad (5)$$

그러나, 연마제의 공급량이 충분한 경우에도 Fig. 6에 보면 연마제의 크기에 따라 절단 깊이의 차이가 있음을 알 수 있고 이는 연마제의 크기가 또 하나의 변수임을 의미한다. Kiyoshige⁽¹¹⁾ 등은 습식 연마제 제트에서 절단 깊이는 연마제의 크기에 또한 영향을 받으며 가넷의 연마제의 경우 입자크기가 110 μ m에서 절단 깊이가 최대이고 이보다 클 경우 감소한다고 보고하였다. 이는 본 실험에서 가넷 #100이 #80보다 더 큰 절단 깊이를 갖는다는 결과와 일치하는 것이다. 결국 연마제의 공급량은 우선 충분해야 올바른 절단이 이루어지며 연마제의 크기 또한 성능에 관여한다. 그리고 연마제는 공작물을 때리고 나면 부서지는데 Fig. 7은 사용전후의 연마제 형상을 나타낸다.



(a) before use



(b) after use

Fig. 7 Garnet abrasive #80(×75)

연마제의 공급이 충분한 경우 고압수의 압력 P 와 공작물 이송속도 u 의 절단 깊이에 대한 영향은 일정한 경향을 가진다. 고압수의 압력 P 가 증가하면 제트의 분출 속도가 증가하여 절단 깊이 h 가 증가한다. Fig. 8에서 보듯이, h 는 P 의 증가에 따라 거의 직선적으로 증가하나 유량의 경우와 마찬가지로 증가의 폭이 약간 감소한다. 이는 압력 증가에 따르는 유압 장치 및 노즐의 효율 저하에 관련된다. Fig. 8에서는 또한 공작물의 이송속도가 반으로 줄면 절단 깊이가 배이상으로 늘어남을 볼 수 있다. 이송속도가 0.02m/min에서는 압력 P 에 상관없이 두께 20mm의 SS41 철판이 모두 절단되었다. 이송 속도의 영향은 Fig. 9와 같이 나타나며 속도가 줄수록 절단 깊이가 급격히 늘어났다. 압력의 증가에 의한 절단 깊이의 증가가 적으므로 압력의 증가보다는 이송속도를 줄임으로써 더 큰 절단 성능을 얻을 수 있다. 절단 깊이 h 는 이송속도 $1/u^a$ 에 비례하고 이때 상수 $a > 1$ 의 관계를 갖는다고 알려져있다⁽¹⁰⁾. 본 실험에서는 $P=2,000$ 기압에서 $a=1.3$ 을 가지고 그 이상의 기압에서는 관계가 일

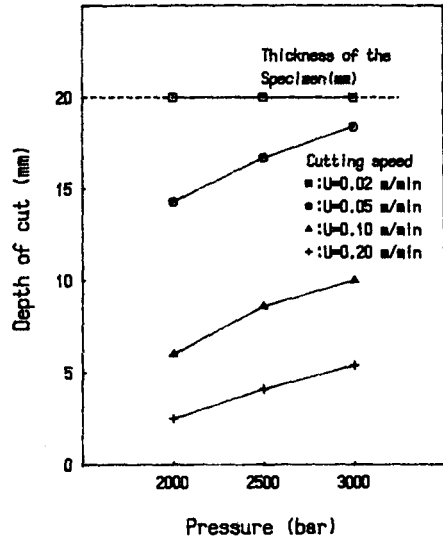


Fig. 8 Effect of pressure on depth of cut

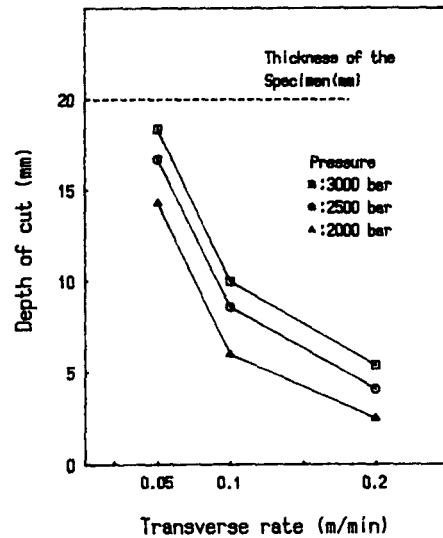


Fig. 9 Effect of transverse rate on depth of cut

정하지 않다.

노즐의 마모 상태와 물노즐과 연마제노즐의 일직선 정렬상태가 절단 성능에 관여한다. 물노즐과 연마제노즐은 연마제 제트의 퍼짐과 관계하기 때문에 마멸상태를 주의 하여야 한다. Fig. 10은 같은 조건, 즉 $P=25,000$ 기압, 가네트 연마제 #80 공급량 400g/min, $u=0.1$ m/min에서 12.5mm의 연강 (mild steel)을 절단한 모양이다. 절단부위 (1)은 물노즐의 마멸에 의해 제대로 가속된 연마제 제트

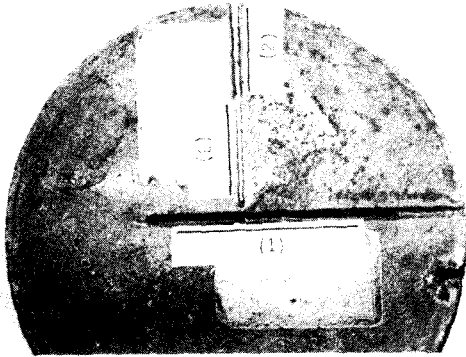


Fig.10 Effect of nozzle assembly alignment on cutting quality

가 발생하지 않아서 절단폭이 4mm, 절단 깊이가 10mm이었다. 이와반면 (2)와 (3)은 연강을 모두 관통하였고 (2)는 절단폭이 2.7mm이고 (3)은 1.9mm이다. (3)의 성능 증가는 단지 물노즐과 연마제노즐의 일직선 정렬의 차이이다.

6. 결 론

물제트 분사 절단을 새로운 개념의 절단 가공방법이다. 물제트와 연마제 제트를 동시에 사용함으로써 여러가지 잇점을 가지며 다양한 응용 분야를 갖게된다. 그러나, 절단과정에 관여하는 변수가 여러가지 있으므로 절단 성능의 향상을 위하여 변수들의 영향을 체계적으로 연구하여야 한다. 본 연구에서는 중요한 운전변수의 영향을 절단 실험을 통하여 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연마제 공급량은 절단 성능에 매우 큰 영향을 미치며 연마제의 공급이 적을 경우 절단 성능이 급격히 저하한다. R , 즉 물 유량과 연마제 공급량의 비가 0.25에서 좋은 절단 결과가 있었고 Finfine의 마멸이론에 근거하면 절단 깊이는 $R/(1+4R)^2$ 로 표현할 수 있다.

(2) 분출 유량은 고압수의 압력 P 에 비례하며 연마제의 공급이 충분할 때 절단 깊이는 발생압력 내에서 압력의 증가에 따라 직선적으로 증가한다.

(3) 절단 깊이는 이송속도에 크게 좌우되며 이송속도의 증가에 따라 급격히 감소한다. 고압수의 압력 증가시키는 것보다 이송속도를 줄이는 방법이 더 큰 절단 성능의 향상을 가져온다.

(4) 물노즐과 연마제의 마모는 또한 절단에 관여한다. 물노즐은 조그만 손상에도 물제트의 퍼짐을 크게하고 연마제노즐도 연마제에 의해 쉽게 큰 마모가 생기므로 항상 마멸상태에 주의하여야 한다. 그리고 물노즐과 연마제노즐의 일직선 정렬도 연마제 제트 분사를 방해하는 저항을 줄임으로 절단 성능의 향상에 도움이 된다.

참 고 문 헌

- (1) Spain, I.L. and Jac Paauwe, 1977, "High Pressure Technology", Dekker, New York, pp. 465~479.
- (2) Nakaya, M. and Nishita, N., 1980, "The System and Waterjet Cutting Data", 5th Int. Symp. on Jet Cutting Tech., BHRA, England, pp. 413~425.
- (3) Hashish, M., 1982, "The Application of Abrasive Jets to Concrete Cutting", 6th Int. Symp. on Jet Cutting Tech., BHRA, England, pp. 447~463.
- (4) Hashish, M., 1982, "Steel Cutting with Abrasive Waterjets", 6th Int. Symp. on Jet Cutting Tech., BHRA, England, pp. 465~487.
- (5) Fairhurst, R.M., Heron, R.A. and Saunders, D.H., 1986, "DIAJET-A New Abrasive Water Jet Cutting Technique", 8th Int. Symp. on Jet Cutting Tech., BHRA, England, pp. 395~402.
- (6) Barton, R.E.P. and Saunders, D.H., "Water/Abrasive Jet Cutting of Concrete and Reinforced Concrete", 6th Int. Symp. on Jet Cutting Tech., BHRA, England, pp. 489~501.
- (7) Hashish, M., 1984, "Cutting with Abrasive Waterjets", Mech. Eng., Vol. 106, No. 3, pp. 60~69.
- (8) Baumann, L., Boeing, R. and Hessling, M., 1986, "Fundamental Investigation of Water Jet Performance by the Use of Abrasive Additives", 8th Int. Symp. on Jet Cutting Tech., BHRA, England, pp. 277~285.
- (9) Scott, D., 1979, "Treatise on Material Science and Technology -Wear", Academic Press, New York, pp. 287~319.
- (10) Hashish, M., 1986, "Aspects of Abrasive-Waterjet Performance Optimization", 8th Int. Symp. on Jet Cutting Tech., BHRA, England, pp. 297~308.
- (11) Kiyoshige, M., Matsumura, H., Ikemoto, Y., and Okata, T., 1988, "A Study of Abrasive Waterjet Cutting Using Slurried Abrasives", 9th Int. Symp. on Jet Cutting Tech., BHRA, England, pp. 61~73.