

技術資料

제트 분사 절단 기술

안영재*, 윤우영**

Water Jet Cutting System

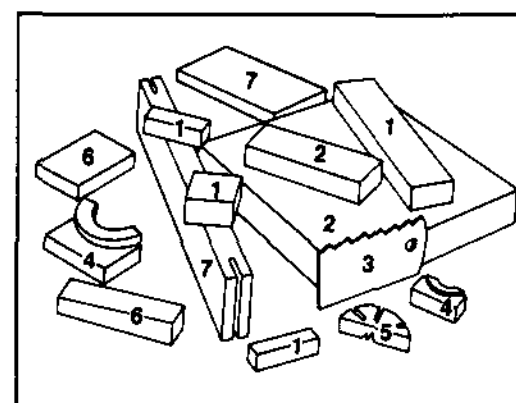
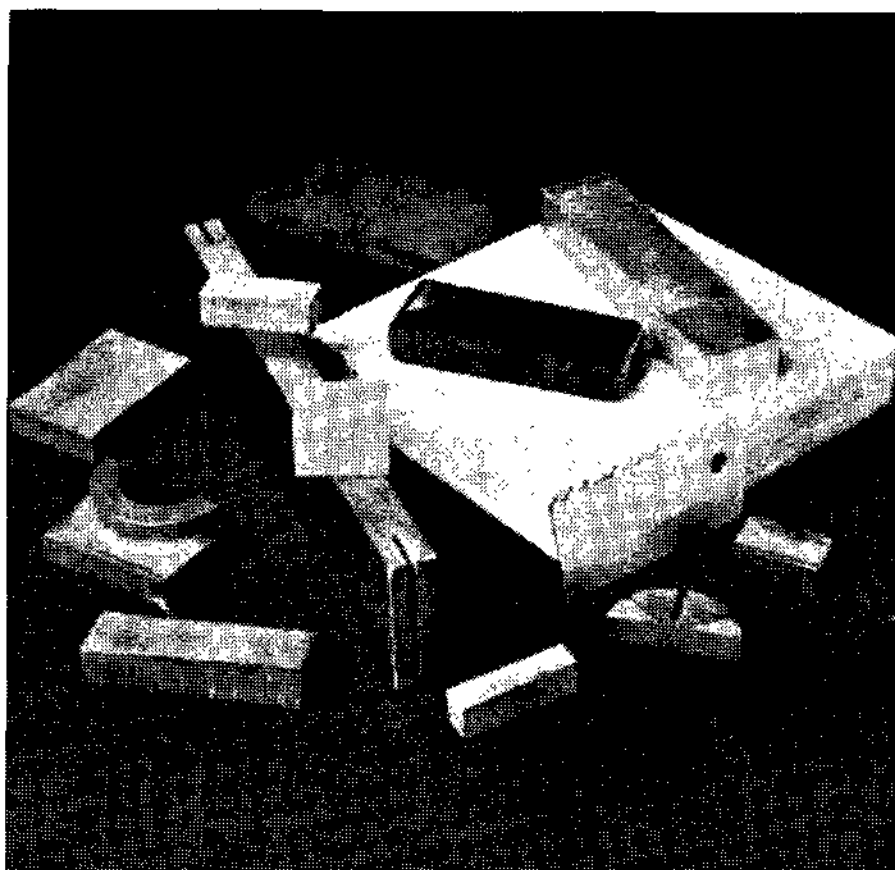
Y. J. Ahn*, W. Y. Yoon**

1. 서론

여러 금속 및 세라믹 재료의 가공 기술들중 비교적 늦게 개발된 제트 분사 절단 기술은 물을 이용하여 공작물을 절단하는 새로운 개념의 가공 기술이다. 이 기술의 가공 원리는 자연계에서 흔히 볼수 있는 물에 의한 침식작용이다. 즉, 고속의 물 제트가 공작물에 부딪히는 충격에 의하여 공작물이 침식되어 절단되는 현상을 이용한 기술로 1969년 미국의 일리노이 대학의 Norman Franz에 의하여 처음 소개되었다. Franz는 실험을 통하여 금속의 약 2배 정도로 분사되는 물제트 줄기가 칼과

같이 예리한 절단력이 있음을 보였다. 더우기 연마제를 첨가한 물제트 줄기는 335mm 두께의 concrete slab과 76mm 두께의 tool steel판을 단한번의 움직임으로 자를수 있으며 실제로 거의 모든 재료의 절단 및 가공에 후가공이 없이 응용이 가능하다. 그림 1에 이 기술을 이용하여 가공이 가능한 대표적인 재료를 모았다.

제트 분사 절단 장치는 기본적으로 고압 발생 장치와 노즐 장치의 2부분으로 나누어 진다. 고압 발생 장치는 원하는 압력으로 물을 가압하는 장치이다. 1970년대의 눈부신 고압 발생 기술의 향상에 따라 현재는 약 4,000기압까지의 압력으로 물을 연속적으로 가압하는 펌프가 실용화되어 사용되고



- 1. Aluminum
- 2. Fiberglass
- 3. Saw Blades
- 4. Ductile Iron
- 5. Titanium
- 6. Steel
- 7. Stainless Steel

그림 1. 제트 분사에 의한 여러 재료의 절단 및 가공 (Ref. 3)

*한국 과학기술 연구원

**고려 대학교

있다. 노즐 장치는 고압의 물을 고속의 물제트로 바꾸어 주는 기능을 가지고 있다. 노즐은 보통 사파이어나 다이아몬드같은 초경재료로 제작하며 노즐 구멍의 직경은 대개 1mm 이하이다. 이 두가지 중요 부분을 개발하여 상업적인 가치를 가진 제트 분사 절단 장치가 1980년대초 Flow System회사와 Ingersoll Rand회사에 의하여 개발 제작되었다. 이후 이 기술은 단시일내에 보급되어 영국, 독일, 일본등도 제트 분사 절단 장치를 생산 판매하기 시작하였으며 한국에서도 작년 개발에 성공하여 자체적으로 제작하고 있다. 제트 분사 절단 기술은 항공 및 우주 산업으로 점차 응용의 범위를 넓혀가고 있으며 산업계에서 표준 절단 장비로 위치를 굳혀가고 있다. 이 기술의 여러 산업에의 응용예를 잠깐 살펴보면, 미국 Iowa주의 John Deere 회사에서 회주철 주조시 fin, gate, riser등의 제거에 전기톱이나 abrasive cutoff wheel 대신 사용하는 것을 들 수 있다. 또 Rockwell과 Lockheed 항공사에서는 B-1B 폭격기용 부품 제조시 Titanium의 절단이나 Al, graphite 그리고 Epoxy 등의 가공에도 사용하고 있다. 이외에도, 작은 제트 분사 장치로 두꺼운 시멘트를 쉽게 절단하여 속안에 있는 철강 구조물의 상태를 점검 할 수 있는 것을 이용하여 교량의 안전도 검사에도 이용을 하고 있다. 즉, 이와같이 모든 산업에서 거의 모든 재료를 쉽고 모재의 특성 변화없이 가공할 수 있으므로 그 응용 범위가 점차 늘어나고 있는 실정이다.

제트 분사 절단 기술은 물을 사용하는 것이 최대 장점으로 기존의 절단 기술이 갖지 못하는 여러가지 장점을 가지고 있다. 특히, 절단면의 열적 변형이 거의 없고, 분진 및 개스 발생등의 오염을 최소화 할 수 있다. 또한 NC 장치와 로봇에 쉽게 부착시켜 형상가공까지 가능하다. 이 기술은 현재 플라스틱, 종이, 가죽 그리고 나무등과 같은 비교적 부드러운 재료의 절단에 사용되고 있다. 그러나, 금속이나 돌과 같이 경도가 높은 재료는 물제트만으로는 절단가공이 불가능하다. 이를 극복하기 위하여 물제트에 가는 연마제를 삽입하여 이 연마제 제트가 가속되어 공작물을 절단하는 방법이 고안되었다. 가속된 연마제는 물보다 훨씬 큰 충격을 가지며 거의 모든 재료를 절단 할 수 있게 되었다. 이들 재료에는 세라믹, 복합재료 그리고 수퍼알로이 등의 난삭재들이 포함된다.

본 자료에서는 LASER 가공 기술에 필적할 만

한 제트 분사 절단 기술의 특징과 제트 분사 절단 장치의 구조와 성능, 그리고 응용가능성뿐만 아니라 나아가 다른 절단기술과 비교하여 이 기술의 경제성을 또한 소개하고자 한다.

2. 제트 분사 절단 기술의 장점

그림 2와 같이 고속의 물제트는 매우 큰 충격력을 가지고 있어서 기존의 기계적(Mechanical) 및 열적(Thermal) 절단 기술에 버금가는 절단력을 갖는다. 제트 분사 절단 기술이 현재 여러 산업체에서 사용되는 이유는 우선, 물을 절단 매개물로

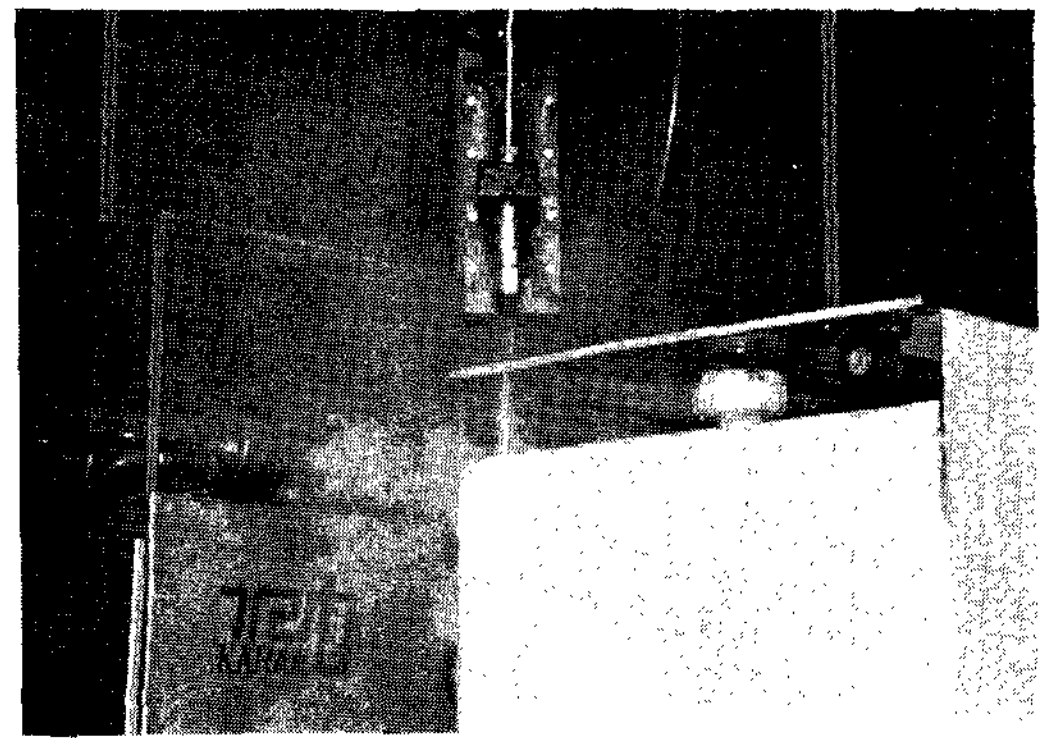


그림 2. 물제트 형상

사용함으로써 여러가지 잇점을 가지고 있기 때문이다. 물제트 분사 절단의 경우 아래와 같은 장점을 열거 할 수 있다.

- (1) 절단시 절단면의 파손, 열적 변형등이 거의 없다.
- (2) 절단시 발열의 영향이 없어 발화 및 폭발의 위험성이 있는 작업에 이용할 수 있다.
- (3) 노즐 직경이 0.1-0.5mm로 매우 작아서 절단 여유가 적다.
- (4) 분진 발생이 없고 불꽃 가공시의 냄새나 매연이 없어 작업환경이 우수하다.
- (5) 노즐을 쉽게 움직일 수 있으므로 자유 형상 가공이 가능하다.
- (6) 후처리 시간을 감소할 수 있다.

물제트 분사 절단을 이용한 절단의 예는 표 1에 나타나 있다. 그러나, 물제트 분사는 금속, 세라믹, 고강도 복합재료 및 암석등의 경도가 높은 재료에는 사용하기가 불가능하며, 적절한 절단 속도를 유

지하기 위해서는 많은 전력소모가 요구된다. 이러한 난점을 보완하고 제트 분사에 의한 절단 영역을 넓히게 하기 위하여 연마제를 물제트에 섞어주는 연마제 제트 분사 기술이 개발되었다. 그림 3과 같이 물제트에 의하여 가속된 연마제는 매우 큰 충격력을 가지며 위의 물제트 분사 절단의 장점이 외에 다음과 같은 추가적인 장점을 갖는다.

- (1) 거의 모든 재료의 절단이 가능하다.
- (2) 절단 과정에서 사용되는 전력의 소모를 감소시킨다.
- (3) 원격 조정 장치를 쉽게 부착시킬 수 있다.
- (4) 연마제 제트 분사는 기존의 물제트 분사 장치에서 쉽게 바꿀수 있고 기존의 기술로 제작이 가능하다.

연마제 제트 분사는 현재 표 2와 같은 응용분야에서 이용되고 있다.

3. 제트 분사 절단 장치

제트 분사 절단 장치는 서론에서 언급한 바와 같이 크게 고압 발생 장치와 노즐 장치로 나누어진다. 그림 4는 제트 분사 절단 시스템을 나타내고

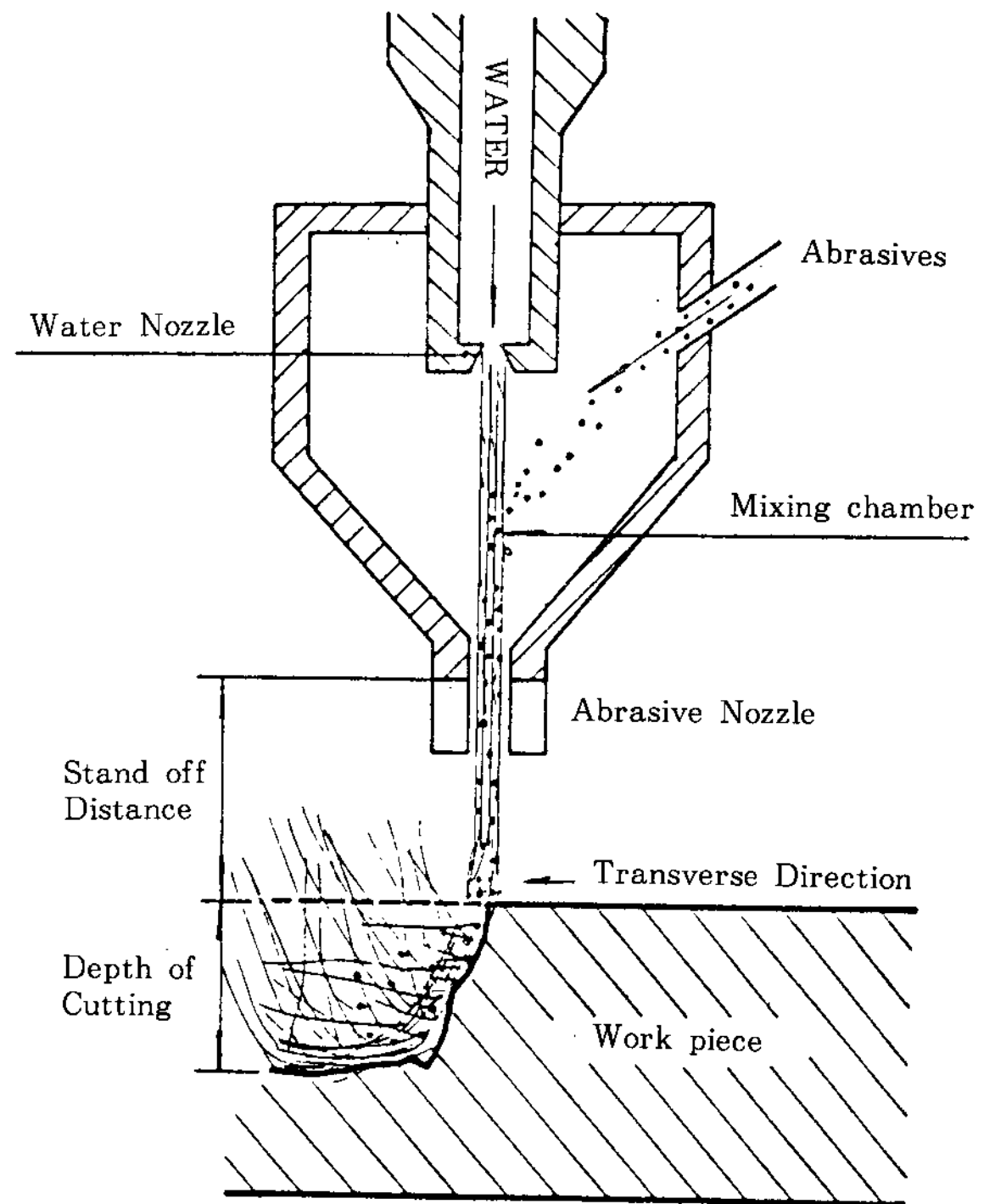


그림 3. 연마제 제트 절단 과정

표 1. 물제트 분사 절단의 응용예

Materials	Thickness(mm)	Nozzle Dia(mm)	Pressure(MPa)	Feed Rate(mm/sec)
Leather	2.2	0.2	2954	330
Synthetic Rubber	1.5	0.2	196	830
Polyethylen	3.6	0.2	196	100
Polyester	2	0.2	431	2,500
FRP	0.5	0.2	294	33
Kevlar	3	0.2	294	50
Graphite	2.3	0.2	294	80
Glass Wool	25	0.2	98	167
Gypsum Board	10	0.2	196	100
Asbestos Board	6	0.2	98	17
Rock Wool	100	0.2	294	830
Paper Board	1	0.2	245	8,330
Press Board	0.5	0.2	294	2,500
Plywood	6	0.2	294	17
Sponge Cake	60	0.2	294	167
Butter	50	0.2	294	8
Ice	230	0.3	294	17

표 2. 연마제 제트의 응용예

Category	Material	Maximum Thickness
Metal	Stainless Steel	5in.
	Mild Steel	up to 4.5 in.
	Aluminium	6 in. in 7075-T5
	Titanium	2 in. plates, honeycomb and tubes
Ceramics	Alumina	1 in.
	Ceramic tiles	0.5 in.
	Alumina Honeycomb	1 in.
Composite Advanced	Kevlar-steel	2.5 in. armor plate
	Fiberglass	2 in.

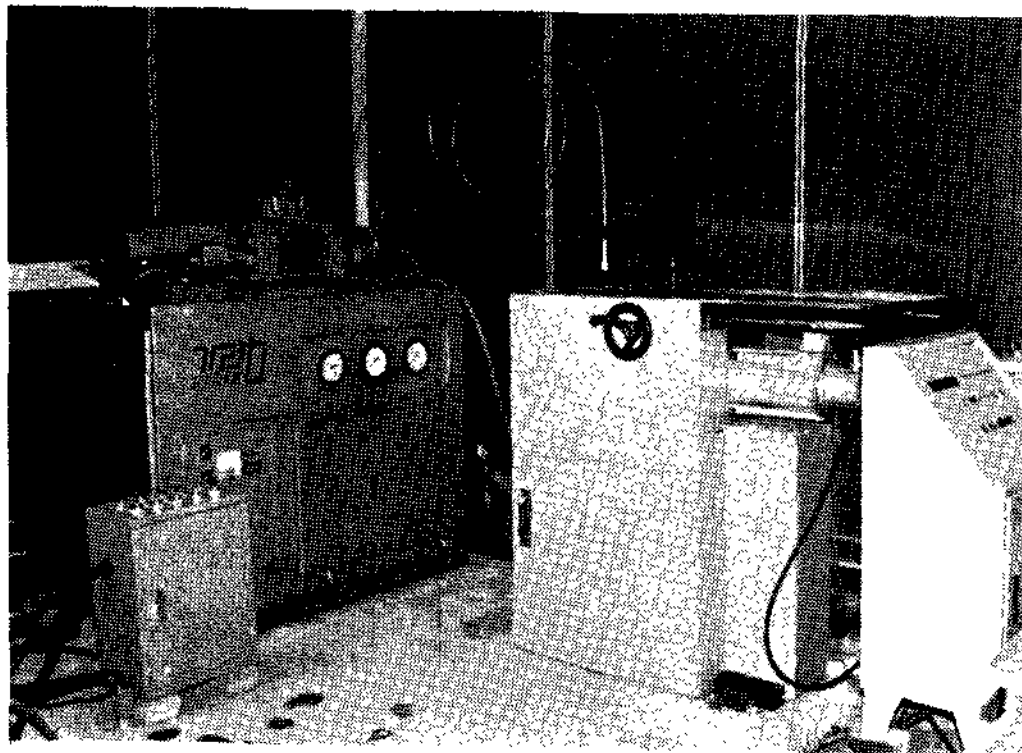


그림 4. 제트 분사 절단 장치

있다. 고압 발생 장치는 물을 원하는 압력으로 가압하는 장치로 오일 펌프, 증압기(Intensifier), 그리고 축압기(Accumulator) 등의 주요 부분으로 구성되어 있다. 압력과 토출유량은 절단 목적과 재료에 따라 선택되며 물을 최고 4,000기압까지 연속 가압할 수 있다.

노즐 장치는 고압의 물을 고속의 물줄기로 바꾸어 주는 장치이다. 물제트 분사의 경우, 노즐은 작업의 조건에 따라 경화강, 스테인레스강, 인조 사파이어 또는 다이아몬드로 만들어진다. 통상, 인조 사파이어 노즐을 많이 사용하며 수명은 500시간 정도이다. 물노즐 어셈블리의 형상은 물제트 형성 및 이에따른 절단 성능에 결정적 역할을 한다. 절단용 노즐의 직경은 0.08-0.6mm이며 사용 목적에 따라서 조정된다. 연마제 노즐 어셈블리는 그림 3 과 같이 고속의 물제트에 연마제를 공급 가속시켜 연마제 제트를 만드는 장치로 텅스텐 카바이드 또

는 보론카바이드로 제조한다. 연마제의 종류는 작업조건, 연마제의 크기 및 형상, 가격등을 고려하여 선택되어야하며 현재 사용되는 제트 분사 절단 시스템에서는 가네트(Garnet)가 가장 많이 사용되는 연마제이다.

연마제 제트 분사 절단기술에 의하여 절단된 형상은 그림 5에 나타나 있다. 20mm 두께의 알루미늄판을 2,500기압에서 가네트 80 매쉬크기의 연마제를 분당 360g 공급하여 절단한 모습이다. 절단

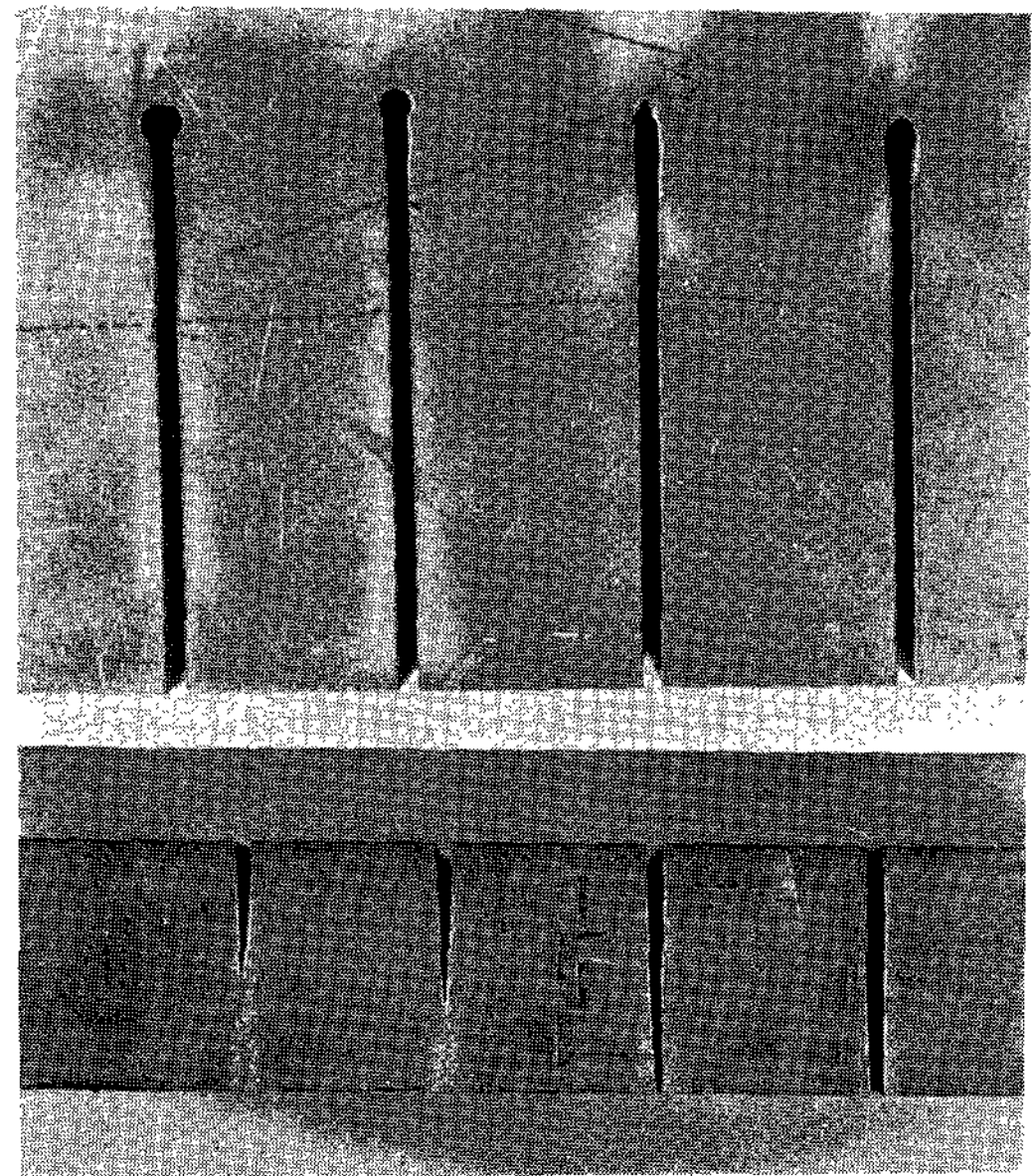


그림 5. 연마제 제트 분사에 의한 절단 형상
위 : 절단 두께 아래 : 절단 깊이

틈의 두께는 공작물의 이동 속도에 상관없이 1mm 정도이지만 절단 깊이에서 많은 차이를 나타내고 있다. 절단 형상은 보통연마제 제트를 처음 맞는 윗 부분은 두껍게 그리고 아래부분은 얇게 깨어져 나가는 형상을 갖는다.

4. 절단 성능

효과적인 절단, 즉, 최대 절단 깊이와 최고의 절단 부위의 형상을 얻기 위해서는 최적의 운전 조건을 선택하여야 한다. 운전 변수들은 공작물의 재료에 따라 선택되어야 하며, 이를 위하여 절단 실험치의 축적이 필요하다. 제트 분사 절단에 관련된 운전조건들은 아래와 같이 정리할수 있다.

(1) 유압 변수

- 제트 도출 압력
- 수력 파워
- 물노즐 직경 및 어셈블리 형상

(2) 절단 변수

- 공작물 이송속도
- 노즐과 공작물간의 거리
- 절단 각도

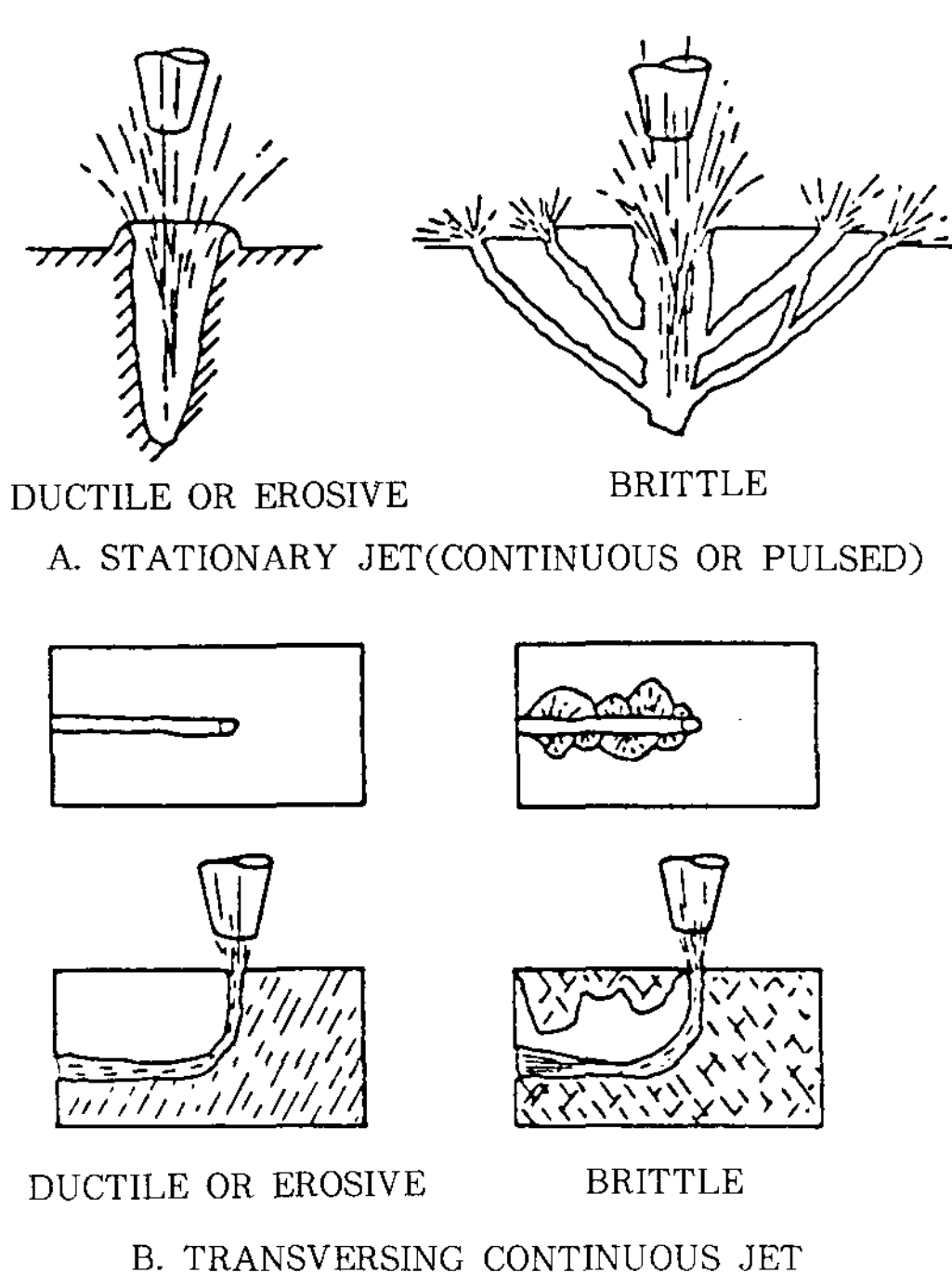


그림 6. 물제트 분사에 의한 파손 형태

○ 분사 횟수

(3) 연마제 변수(연마제 제트를 사용할 경우)

- 연마제 재질(밀도, 경도, 모양등)
- 연마제 크기
- 연마제 공급 속도
- 연마제 공급 방법
- 연마제 노즐재료 및 형상

물제트 절단의 경우, 고속의 물제트가 공작물을 때리면 여러 가지의 파손 형태로 재료가 절단 된다. 파손형태는 재료 파괴 강도에 대한 상대적인 물제트 압력뿐 아니라 결정립 크기, 흡입성, 공작물의 crack유무 및 연성과 같은 재료의 성질들에 관계된다. 그림 6과 같이, 물제트는 노즐을 고정시켜 구멍을 뚫고 또 노즐을 이동시켜 연성 재료에 홈을 낸다. 취성 재료는 구멍이 깨져 나갈뿐 아니라 이동노즐 사용시 홈의 끝이 칩 형태로 깨져 나간다. 아직 파손 형태는 잘 이해되지 않고 있으며, 이는 물과 고체 접촉면에서 복잡한 마멸 현상이 존재하기 때문이다. 그림 7은 카본 화이버 복합 재료를 물제트로 절단한 것으로 깨끗한 절단 형상을 볼수 있다.

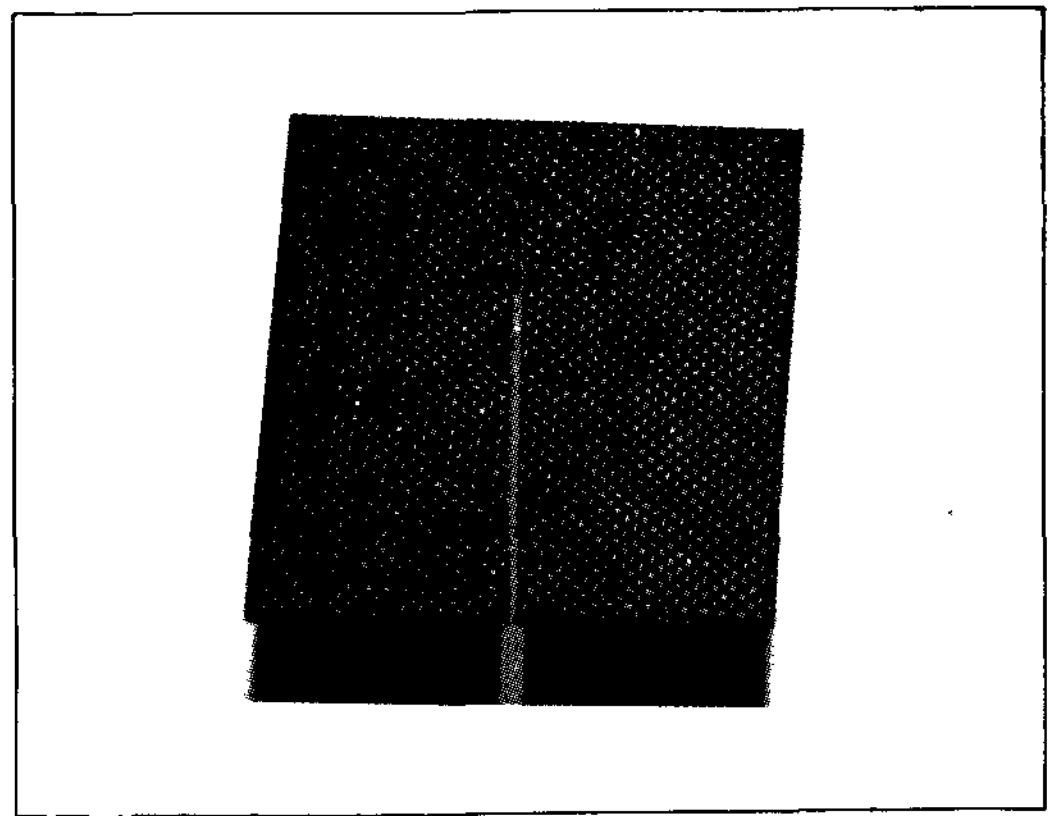


그림 7. 물제트 분사에 의한 카본 화이버 복합 재료 가공

그림 8은 연마제 제트를 이용하여 도어넛 형태의 자석에 방사선 형태로 홈을 판 것이다. 연마제 제트 분사 절단은 물제트의 절단 메카니즘과 달리 절단 매개체가 연마제이다. 물제트는 연마제를 가속하는 역할을 하며, 연마제가 제대로 가속되어 충분한 모멘텀을 갖고 있는가가 절단 성능을 크게

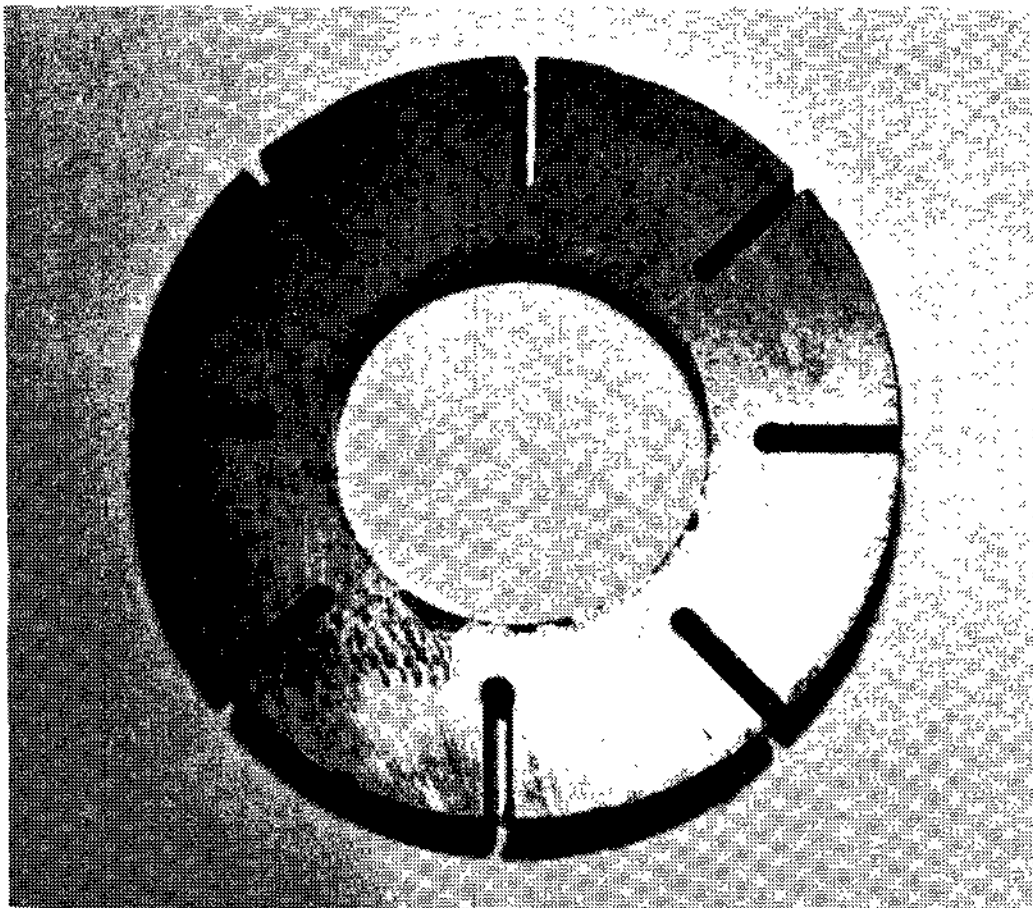


그림 8. 연마제 제트 분사에 의한 자석 가공

좌우한다. 연마제 제트는 경한 재료의 절단에 사용하며 Solid Particle의 비산에 의한 마멸(erosion) 현상을 이용한 절단 방법이다.

5. 제트 분사 절단 기술의 이용

현재 산업계에서 사용되는 모든 절단 방법은 기계적 절단, 열적 절단 및 제트 분사 절단으로 구분할 수 있다.

기계적 절단 방법에는 톱, 다이아몬드 휠, 다이아몬드 와이어 등이 있고, 열적 절단 방법에는 산소 불꽃, 플라즈마, 레이저 가공이 대표적이다. 재료 가공시 어떤 방법을 쓸 것인가는 가공목적과 운전 조건에 따라 선택된다. 또한 이와 함께 경제성도 중요한 고려사항이다.

제트 분사 절단 시스템을 선택시 우선 경제적으로 고려할 사항은 제트 분사 장치의 가격, 전력소모량, 연마제 소모량 및 마모에 의한 노즐 손상이다. 정확한 운전가격을 알기는 불가능하지만, 문헌에 의하면 다음과 같이 추정 비교되고 있다. 초기 장치 구입을 빼고 시간당 전력소모와 분당 2파운드의 연마제 소모 및 펌프 부품교환, 세척, 물 소비량, 물노즐 교환, 연마제 노즐 교환등을 포함한 운전 가격은 시간당 35\$로 추정한다.

이와 반면, 산소불꽃, 톱, 다이아몬드 와이어의 경우는 운전 가격은 2\$ 정도이고 레이저나 플라즈마의 경우는 20\$ 정도로 추정된다. 그림 9는 각각 대표적인 절단 방법이 사용될수 있는 절단 길

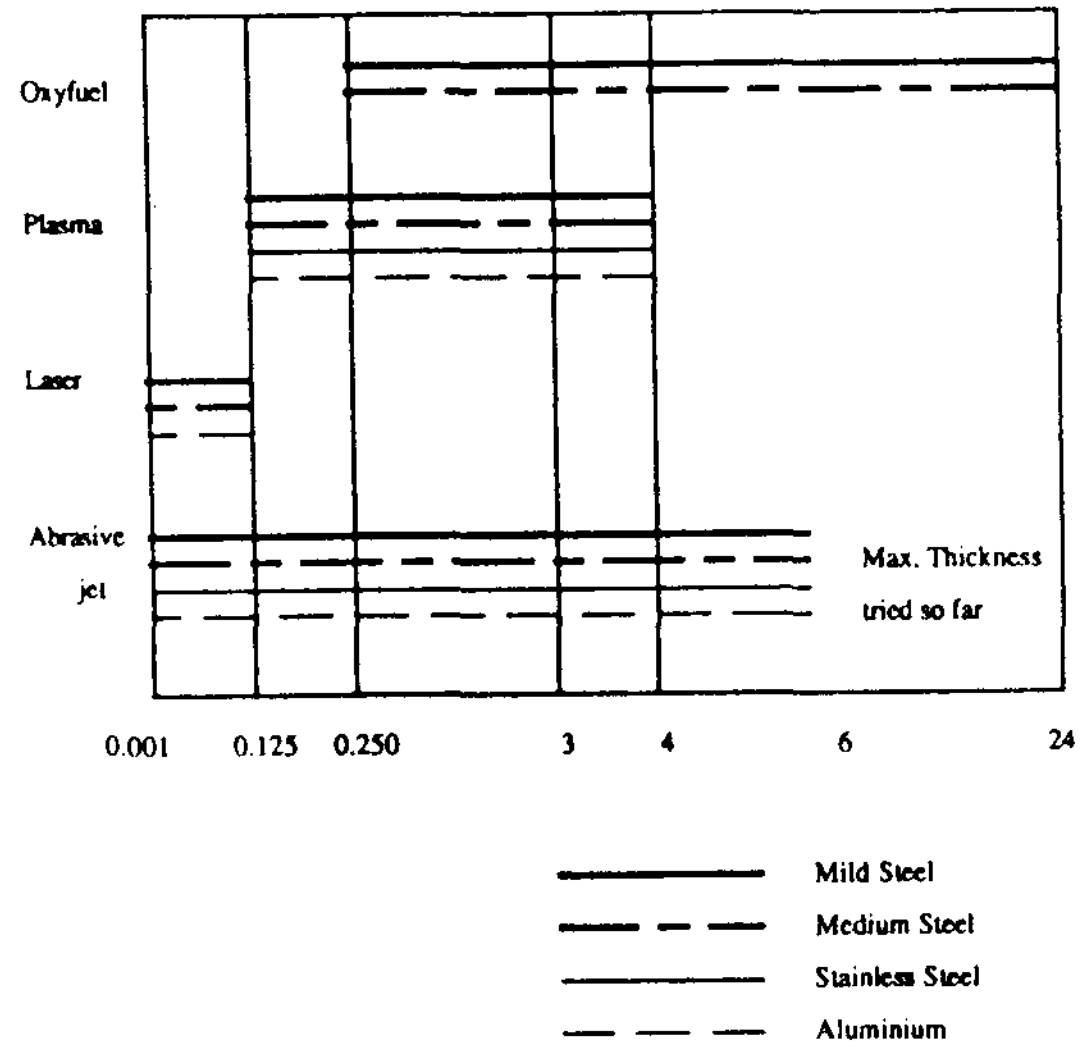


그림 9. 여러 절단 가공 기술에서의 사용 가능한 절단 깊이

이를 나타낸 것이다. 위와같은 추정을 근간으로 하면, 최적 절단 깊이에서 제트 분사 절단 장치가 다른 절단 방법보다 비싼 운전 비용이 들어간다.

그러나, 제트 분사 절단 장치는 이러한 경제적 열세에도 불구하고 새롭게 개발된 절단방법으로 각광을 받고 있다. 그 이유는 다른 절단 방법과 다른 여러 잇점을 가지고 있어 응용의 범위가 다양

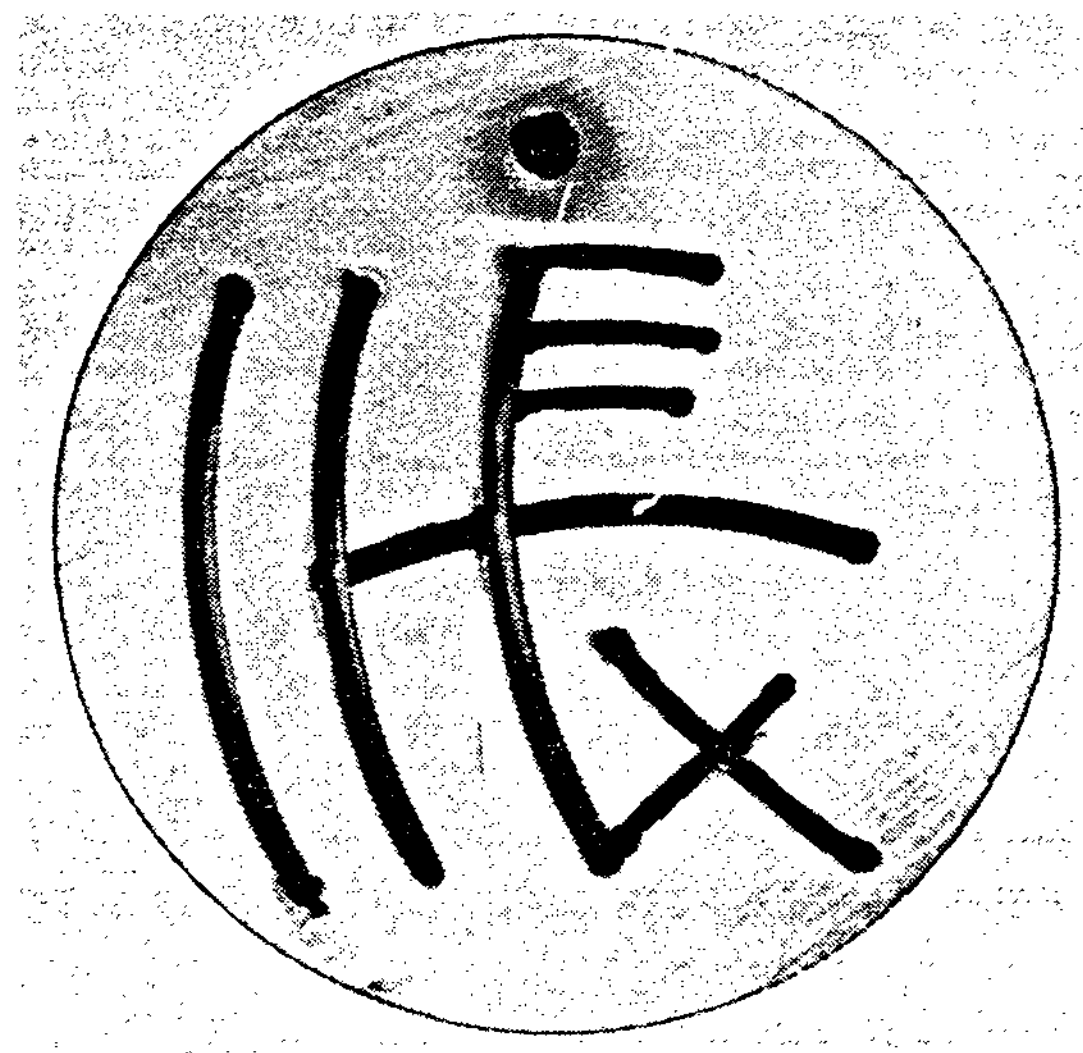


그림 10. 2차원 형상 가공(스테인레스 강판)

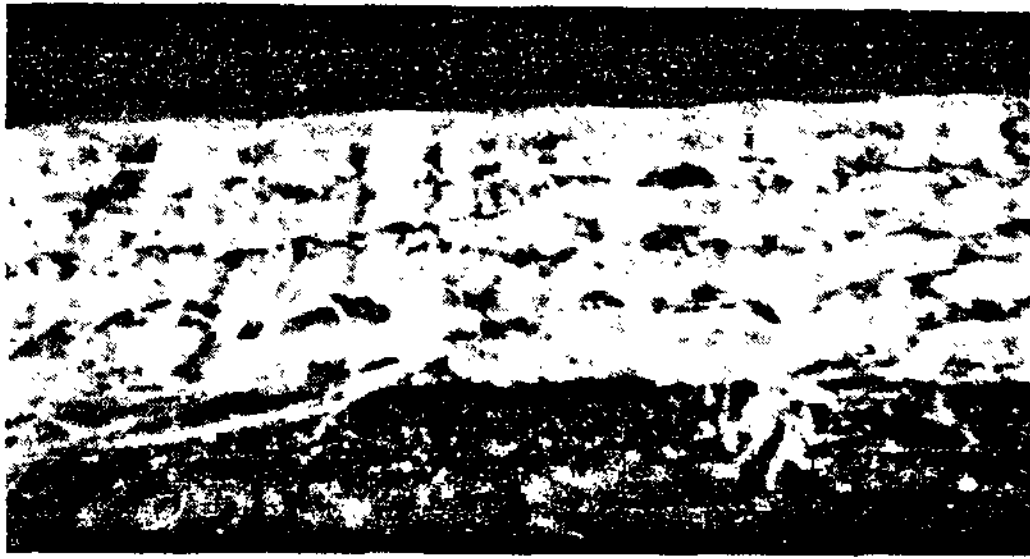


그림 11. 아라미드 섬유 보강 복합 재료의 절단 가공
 위 : 물제트 분사 절단
 아래 : 다이아몬드 휠 절단

하기 때문이다. 즉 3차원의 자유 형상 가공뿐만 아니라 물을 사용하여 절단 부위의 열적 변형을 최소화하고 양질의 절단 표면을 생산한다. 그림 10은

스테인레스 스틸판에 글자를 새긴 평면 가공을 보이고 있다. 형상 가공은 XY 테이블 또는 로봇에 노즐을 부착하여 사용할수 있어서 다품종 소량 생산의 가공에 유리하다. 특히, 타이타늄, 세라믹, 그라파이트, 에폭시, 복합재료와 같은 난가공재들은 제트 분사 절단이 더 경제적이다. 그림 11은 두께 1mm의 아라미드 섬유 보강 복합재를 절단한 모양으로 다이아몬드 휠보다 제트 분사 절단의 사용이 유리하다는 것을 나타내고 있다. 콘크리트 절단의 경우에도, 제트 분사 절단과 기존의 방법의 우열을 가리기가 불가능하다. 곱고 빠른 절단과 인접된 구조로의 충격전달이 적고 진동이 없는 점은 또다른 잇점으로 제트 분사 절단의 응용 범위를 확대시키고 있다. 이외에도 작업 조건이 열악한 수중에서의 절단 작업이나 방사능 분위기에서의 절단에도 응용이 시도되고 있다.

참 고 문 헌

1. 안영재, 유장열, 권오관, 김영조, "연마제 혼합 물제트의 절단 성능에 관한 연구," 대한 기계학회(1989)
2. M. Hashish, "Cutting with abrasive waterjets," Mech. Eng. (1984)
3. A. Hitchcox, "Vote of confidence for abrasive waterjet cutting," Metal Progress(1986)
4. D. Scott, Wear, Treatise on Materials Science and Technology, Vol. 13, Academic Press(1979)