

초정밀 미세 패턴을 위한 전기 수력학 잉크젯 프린팅 시스템[§]

노형래* · 고정국** · 권계시*†

* 순천향대학교 기계공학과, * 순천향대학교 전기로봇공학과

Electrohydrodynamic Inkjet Printing System for Ultrafine Patterning

Hyeong-Rae Roh*, Jung-Kook Go** and Kye-Si Kwon*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Soonchunhyang Univ.

** Dept. of Electrical and Robot Engineering, Soonchunhyang Univ.

(Received April 24, 2013 ; Revised July 1, 2013 ; Accepted July 3, 2013)

Key Words: Inkjet Printing System(잉크젯 프린팅 시스템), Electrohydrodynamic Printing(전기수력학 프린팅), Drop on Demand Printing(요구적출형 프린팅)

Abstract: 잉크젯 기술은 가정용 프린터에서부터 제조 도구로 확대 되었다. 최근 인쇄전자 분야에서 고해상도 인쇄가 요구되고 있다. 기존의 잉크젯 인쇄 패턴링 방식을 향상 시키기 위해 전기수력학잉크젯 기술이 최근 주목을 받고 있는데 노즐 직경보다 작은 방울을 토출할 수 있고 넓은 점도 범위와 재료를 사용할 수 있기 때문이다. 본 논문에서는 미세 패턴링을 위한 EHD 프린팅 시스템이다. 요구 적출형 프린팅에 의해 다양한 패턴을 인쇄하고 벡터와 레스터 프린팅 알고리즘을 개발하였다. 내경이 8 μ m 인 노즐을 이용하여 7 μ m 이하의 미세 전도성 선폭을 EHD 방식을 통해 만들 수 있다.

Abstract: The application of inkjet technology has been broadening from home printers to manufacturing tools. Recently, there have been demands for high-resolution printing, especially in the field of printed electronics applications. To improve upon the conventional inkjet printing patterning method, electrohydrodynamic (EHD) inkjet technology has recently attracted attention because droplets smaller than the nozzle diameter can be ejected and materials with wider viscosity range can be used for jetting. In this study, an EHD jet printing system for fine patterning is presented. To print various patterns based on drop on demand printing, vector and raster printing algorithm are implanted in the printing software. Fine conductive patterns with line width of less than 7 μ m can be easily achieved via EHD jet using a nozzle with inner diameter of 8 μ m.

1. 서 론

잉크젯 기술이 발달함에 따라 사무실용 프린터부터 제조 공정의 도구로서 응용 범위가 점차 넓어지고 있다. 이러한 잉크젯이 제조 공정으로서 응용 범위를 넓혀감에 이용 함으로서 다양한 잉크가 사용되고 미세 선폭의 패턴링이 필요하게 되었다. 그러나 기존의 잉크젯 기술로는 실용적인 선폭은 40 μ m 전후가 되기 때문에 새로운 방식의 프린팅 방법의 개발이 요구되

고 있다. 또한 기존의 잉크젯에서 토출 가능한 잉크의 범위는 약 1-20cP 정도이기 때문에 다양한 점도의 잉크를 이용하여 프린팅하는데 문제가 있다.

이러한 기존의 한계를 극복하기 위하여 전기수력학적 잉크젯 방법이 잉크젯 프린팅에 응용되기 시작하였다.⁽¹⁾

토출되는 잉크 방울의 크기에 영향을 주는 수 많은 조건들이 있지만 크게 용액과 기판의 특성, 노즐의 크기, 전압, 파형, 유체 공급 방식(유량, 압력 제어)에 따라 달라지고 토출 특성을 효과적으로 측정하고 제어하는 방법은 아직 연구 단계이다.⁽²⁻⁴⁾ 또한 아직 프린팅 방법이 체계적으로 정립이 되지 않고 있다.

본 연구에서는 토출 측정 방법을 개발하고 이를 통

§ 이 논문은 대한기계학회 마이크로/나노공학부문 2013 년도 춘계학술대회 (2013. 5. 23.-24., BEXCO) 발표논문임.

† Corresponding Author, kskwon@sch.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

하여 최적의 조건을 도출하고 이를 프린팅에 응용하였다. 토출 방법으로는 요구 적출형(Drop on demand) 방식으로 1 개의 구동 전압의 펄스가 1 개의 액적을 만들 수 있는 펄스 구동방식을 사용하였다.^(5,6)

본 연구실에서 개발한 잉크젯 프린팅 방법인 벡터 프린팅 방법과 래스터 프린팅 방법⁽⁷⁾을 수력학적 잉크젯의 프린팅을 위하여 개선하였으며 나노실버 잉크를 사용하여 다양한 패턴으로 수행함으로써 개발된 알고리즘을 검증하였다.

효과적인 프린팅을 위하여 캐드 내장형 소프트웨어를 완성 시켰으며 원하는 패턴을 별도의 캐드 없이 손쉽게 그릴 수 있었고 이를 벡터 형태로 프린팅 시키거나 래스터로 변환하여 프린팅할 수 있도록 소프트웨어를 개발하였다.

이러한 요구 적출형 프린팅 방법을 확장하여 향후 연구과제로서 전기수력학적 잉크젯을 이용하여 3 차원 미세 구조물을 만드는 연구를 진행 중이다.

2. 실험 방법 및 하드웨어

2.1 토출 측정 및 구동 전압 최적화

CCD 카메라를 이용하는 경우에도 LED의 점등을 제어하여 $10\mu\text{s}$ 이하의 짧은 토출 현상을 가시화하는 것이 가능하였다. CCD 카메라를 사용하는 방법은 가격이 저렴하고 실시간으로 토출 상태를 이미지 분석이 가능하기 때문에 기존의 고속 카메라 측정에 비해서 장점이 있다.

최적의 토출 조건은 잉크의 특성, 유체의 공급 시스템, 토출 전압에 의해 다르게 되므로 이러한 조건을 최적화 하는 것이 필요하다. 그 중에서 인가하는 전압은 가장 변경하기 쉽고 효과적인 방법이다. 이때 구동 전압으로는 DC+펄스 전압을 사용하였다. DC+펄스 전압은 요구 적출형 프린팅에 유리한 전압 구동방법으로 많은 연구그룹에서 사용되고 있는 전압 구동 방법이다.^(5,6) 최적화된 구동 전압을 인가해 주기 위해서 본 연구에서는 Fig. 1 과

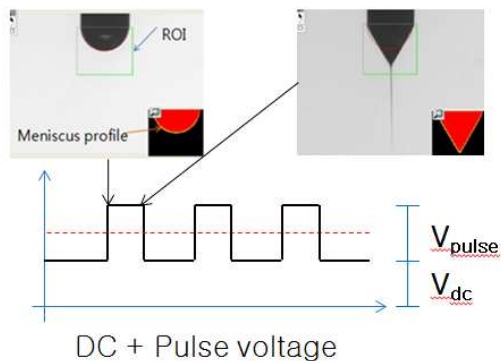


Fig. 1 Relationship between jet and pulsed voltage

같이 비전 측정방법을 사용하여 토출 현상과 전압의 관계를 규명하였다.⁽⁸⁾ 구동전압에 따른 토출 현상의 측정 결과 및 분석은 본 연구실의 최근 논문에서 참고할 수 있다.⁽⁹⁾ 실험으로 구한 안정적인 토출을 위한 전압 조건은 $8\mu\text{m}$ 노즐을 사용하였을 때 $V_{\text{pulse}}=400\text{V}$, $V_{\text{dc}}=400\text{V}$ 와 pulse 폭은 0.3ms 이었다.

2.2 프린팅 시스템 개발

전기수력학적 제팅을 프린팅에 응용하기 위하여 XY의 평면 프린팅을 위한 2 축의 리니어 모터를 사용하여 스테이지를 구성하였고, 헤드의 높이를 자동으로 제어하려고 Z 축의 스테이지를 추가로 구성하였다. 정밀한 위치 제어와 패턴을 위한 패턴 카메라와 프린팅 과정을 관찰하기 위한 카메라가 구성되어 있다.

스테이지 제어를 위한 모션 컨트롤러는 NI-7390, 고전압 Amp로는 TREK사의 고전압 앰프(모델명: 2220)을 사용하였고, 유체 공급 시스템으로는 수두를 이용하였다. 또한 펄스의 형상을 만들기 위하여 Agilent사의 임의 파형 발생기(모델명: 33220 A)를 사용하였다. 또한 제팅을 위한 고전압 펄스를 발생하기 위한 트리거 신호는 카운터 보드 (NI CB-68LPR)를 사용하여 발생시켰다. 제팅 이미지를 측정하기 위한 카메라는 USB카메라 (모델명: UI-1640SE-C-HQ)를 사용하였고 적절한 제팅 모니터링을 위해 6배율의 렌즈를 사용하였다. 제어 및 프린팅을 위한 소프트웨어는 LabVIEW를 사용하여 개발하였다.

개발된 시스템의 주요 사양은 Table 1 과 같다.

Table 1 Specification of printing system

●	Printable area: 2320x320 mm
●	Nozzle diameter: 8~200 μm
●	스테이지 정밀도: 3 μm 이하 (엔코더 분해능: 1 μm)
●	프린팅 속도: 500mm/s 이하
●	헤드 선택: 잉크젯헤드 및 전기수력학적 헤드 선택 가능

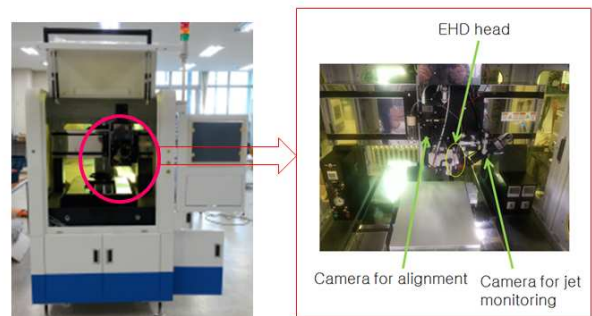


Fig. 2 Printing system for Electrohydrodynamic jet

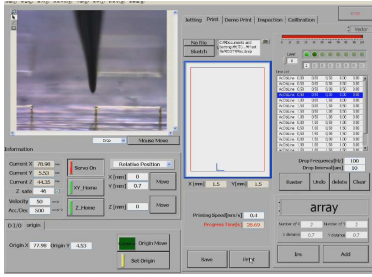


Fig. 3 Built-in CAD software

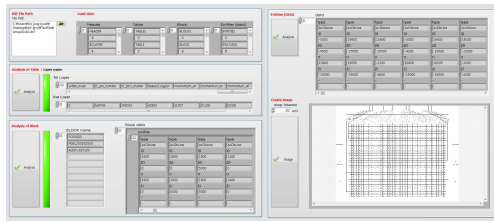


Fig. 4 CAD to bitmap conversion software

2.3 소프트웨어 개발

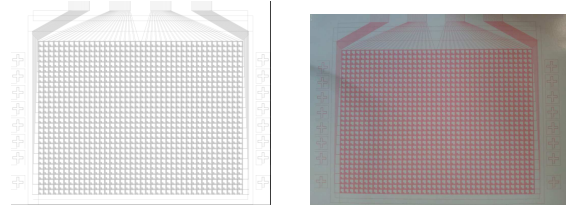
2.3.1 카드 내장형 소프트웨어

카드 내장형 프린팅 소프트웨어를 Fig. 3 과 같이 개발하여 별도의 CAD 프로그램 없이도 자체적으로 정밀한 패턴을 그릴 수 있도록 하였고 입력된 프린팅 좌표의 정보를 이용하여 프린팅이 되도록 하였다.

개발된 CAD 내장형 소프트웨어는 프린팅을 위한 카드의 기능을 구현하기 위하여 직선, 원, 원호, 블락, 배열(Array), 이전으로 되돌리기 (undo), 삭제(delete)등의 기본적인 명령어와 줌 (zoom)기능 등을 포함하여 별도의 CAD 를 사용하지 않고도 원하는 패턴을 쉽게 그리고 프린팅할 수 있다. 또한 다른 카드 소프트웨어를 사용하더라도 dxf file 의 형태를 저장되어 있으면 이를 읽어서 패턴링 정보를 가져올 수 있도록 하였다.

카드를 사용한 프린팅 방법은 주로 벡터 프린팅이므로 노즐이 1 개 있는 프린팅에 적합하나 노즐이 여러 개가 있거나 복잡한 패턴링이 필요할 때는 카드의 도면을 비트맵 이미지로 프린팅해야 될 필요가 있다. 이러한 벡터 프린팅과 래스터 프린팅의 장단점은 기존의 본 연구실에서 발표된 논문 에 비교 하였다.⁽⁷⁾

응용에 따라서는 카드의 정보를 비트맵의 이미지 형태로 변환이 되어야 한다. 벡터 프린팅을 위한 정보를 래스터 프린팅을 위한 정보(비트맵 이미지)로 변환시키는 알고리즘을 본 연구실에서 개발된 소프트웨어에서 구현하여 CAD 의 정보를 이미지 파일 (bitmap 이미지)로 전환시키는 알고리즘



(a) CAD drawing (b) printed results

Fig. 5 CAD drawing and printed results based on bitmap printing

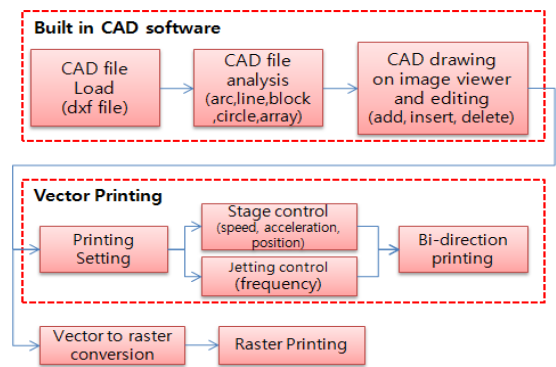


Fig. 6 Block diagram for Built-in CAD printing software

을 구현하였다. 알고리즘 전환을 위하여 Fig. 4 와 같이 소프트웨어를 개발하여 dxf 파일을 분석하고 이를 이미지에 표현함으로써 비트맵을 생성시켰다.

인쇄전자를 위한 프린팅은 여러 재료의 패턴이 층을 이루면서 프린팅이 되는 경우가 많다. 따라서 카드 소프트웨어에서 그린 다층 도면을 원하는 층(layer)만 선택하여 비트맵으로 변환 후에 프린팅할 수 있도록 소프트웨어를 구현하였다.

Fig. 5 는 CAD 의 도면 (Fig. 5(a))를 비트맵 이미지로 변환 후에 래스터 프린팅으로 출력한 결과 (Fig. 5(b))를 보여준다.

Fig. 5 의 프린팅 결과에서 알 수 있듯이 벡터 프린팅의 정보인 좌표 정보를 사용하여 비트맵으로 전환이 되고 이를 래스터 모드로 프린팅이 가능하였다.

Fig. 6 은 본 논문에서 개발한 내장형 CAD 프린팅 소프트웨어의 이해를 위한 블록다이어그램이다. CAD 파일이 있는 경우에는 CAD 파일을 읽고 분석하여 개발된 CAD 뷰어에 CAD 의 정보를 효과적으로 사용자에게 보여주고 CAD 명령어 리스트를 사용자가 확인할 수 있도록 소프트웨어를 구성하였다. 만약 기존의 CAD 의 정보에서 패턴의 추가 및 삭제가 필요하면 이를 쉽게 수정할 수 있도록 소프트웨어를 구성하였다.

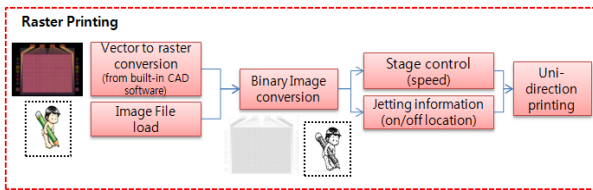


Fig.7 Block diagram for raster printing

벡터 프린팅을 위하여 CAD 도면의 위치 정보를 이용하여 프린팅할 위치에 스테이지의 위치를 이동시킨다. 여기서 프린팅을 위한 프린팅 파라미터는 스테이지 속도, 가속도 및 헤드의 토출 주파수이다. 한편으로는 여러 노즐을 사용하여 복잡한 패턴을 위하여 비트맵 이미지가 필요한데 이를 위하여 CAD의 패턴 정보를 래스터 프린팅의 정보인 비트맵 이미지로 변환하는 알고리즘을 구현하였다.

2.3.2 비트맵 프린팅

비트맵 프린팅을 위하여 그림 파일 jpg, png, gif, bmp 등의 다양한 이미지를 프린팅을 할 수 있도록 프린팅 알고리즘을 구현하였다.

비트맵 프린팅을 위하여 각 픽셀의 간격을 실제 프린팅 간격으로 입력함으로써 프린팅의 크기를 조절할 수 있도록 하였다. 또한 단위 길이(예를 들면 1mm)에 몇 개의 픽셀로 정의 되는지에 따라 프린팅 정밀도와 이미지 크기를 정의할 수 있도록 하였다.

향후의 과제로서 비트맵 이미지의 정보를 벡터 프린팅을 위한 정보로 변환하는 알고리즘을 개발 중이다.

Fig. 7은 래스터 프린팅을 위하여 구현된 소프트웨어의 대략적인 알고리즘을 설명하기 위한 블록 다이어그램이다. 프린팅을 위하여 저장된 이미지 파일(bmp, jpg, png 등)을 직접 읽는 방법과 Fig. 6에서 기술한 CAD의 정보를 이용하여 변환된 이미지를 사용할 수 있는 방법이 구현되어 있다. 비트맵 이미지는 바이너리 이미지로 변환이 되고 이러한 바이너리 이미지는 프린팅할 부분과 프린팅하지 않을 부분의 데이터로 사용할 수 있다. 비트맵 이미지를 사용한 프린팅 알고리즘은 본 연구실에서 발표한 최근 논문⁽⁷⁾을 참고할 수 있다.

3. 결과 및 토의

3.1 래스터 프린팅

1개의 구동 펄스에서 1개의 액적이 형성되는 것을 가장 효과적으로 평가할 수 있는 방법은 비트

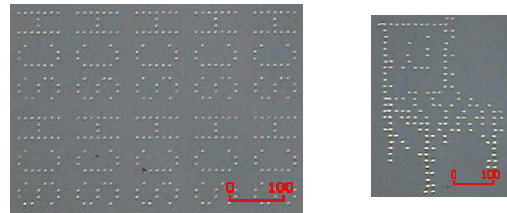


Fig. 8 Raster printing results (Dot size: 5-7µm)

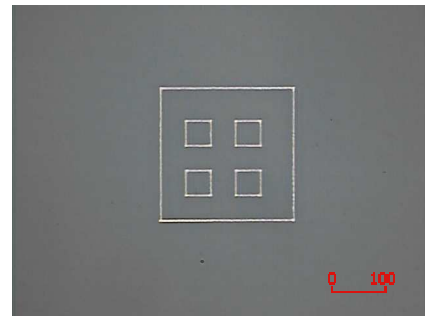


Fig. 9 Fine line (line width: 7µm)

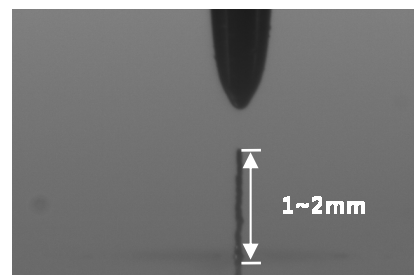


Fig. 10 High aspect ratio printing (Height: 1~2mm)

맵 이미지에 근거한 래스터 프린팅이다. 래스터 프린팅은 이미지 파일(bitmap, jpg, png 등)의 복잡한 이미지를 패턴링할 때 원하는 위치에 정확하게 토출을 시켜야 하는 프린팅 방법이다. Fig. 8은 실버잉크(ANP-DGP 40LT-15C)를 사용해 비트맵 이미지를 프린팅한 결과이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 1개의 펄스 전압에서 1개의 액적이 얻어지는 것을 래스터 프린팅 결과로서 확인할 수 있다.

3.2 벡터 프린팅

벡터 프린팅을 위하여 내장형 캐드로 그린 간단한 사각형을 Fig. 9과 같이 프린팅 하였다. XY 스테이지를 동시에 움직이면서 프린팅한 결과를 보여주는 그림이다. 벡터 프린팅을 위하여 CAD의 위치 정보를 따라서 토출 주파수를 일정하게 하고 일정한 스테이지 이송속도로 이동하면 캐드의 정보를 프린팅하는 것이 가능하다. Fig. 9은 stage 이동속도를 0.5mm/s로 설정하고 100Hz로 jetting하여 drop 간격을 약 5µm로 만들었을 때 7µm 선폭

을 얻을 수 있음을 보여준다.

3.3.3 3차원 프린팅

실버잉크를 사용하여 Fig. 10 과 같이 고종횡비의 프린팅 가능성을 확인할 수 있었다. 고정된 위치에서 나노 실버 잉크를 연속 제팅시 빠른 증발로 인하여 3 차원 구조물을 쉽게 만들 수 있었다. 이러한 연구를 지속하여 보다 복잡한 3 차원 미소 구조물을 프린팅하는 연구를 진행 중이다.

본 연구의 보다 자세한 이해를 돕기 위하여 동영상 비디오를 확인할 수 있다.⁽⁹⁾

4. 결 론

전기수력학 프린팅 방식을 프린팅에 응용하기 위하여 프린팅 시스템을 구성하였다. 효과적인 프린팅을 위하여 다양한 알고리즘을 구현하였다. 특히 프린팅 소프트웨어 내에 캐드 소프트웨어 기능을 탑재하여 사용자의 편의성을 증대 시켰다.

요구적출형 프린팅 방법을 사용하기 위하여 DC+펄스 전압을 인가하였으며 전압의 조건을 최적화 하기 위하여 가시화 측정 방법을 이용하였다.

패턴의 선폭은 노즐의 내경과 관계가 있었으며 8 μ m 내경의 노즐을 사용하고 은나노 잉크를 사용하였을 때 5-7 μ m 이하의 프린팅된 dot 을 얻을 수 있었으며 이를 이용한 선을 패터닝 하였을때 7 μ m 이하의 선폭을 안정적으로 얻을 수 있었다. 또한 원하는 위치에 정밀하게 액적을 토출하는 것이 가능하였다.

후 기

이 논문은 2010 년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업 (No. 2010-0021127)과 순천향대학교 학술연구비 지원으로 수행하였음.

참고문헌

- (1) Murata, K., 2003, "Super-Fine Ink-Jet Printing for Nanotechnology," *Proceeding of the International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems*.
- (2) Lee, K.J., Park, J.S. and Lee, S.Y. 2004, "An Experimental Study on Charge Injection to Non-Conducting Liquid for Electrohydrodynamic Atomization," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol.28, No.11, pp.1376~1383.
- (3) Kim, M.C. and Lee S.Y., 2002, "Effect of Nozzle Material on Drop Size Distribution in Electrohydrodynamic Spraying," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol.28, No.11, pp.1451~1457.
- (4) Lee, J. B. and Hwang J. H., 1999, "Electrohydrodynamic Characteristics of an Electro-Spray System," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol.23, No.8, pp.1031~1039.
- (5) Li J and Zhang P 2009, "Formation and Droplet Size of EHD Dripping induced by Superimposing and Electric Pulse to Background Voltage," *Journal of Electrostatics* 67, pp.562~567.
- (6) Mishra S, Barton K L, Alleyne A G, Ferreira P M and Rogers J A 2010, "High-Speed and Drop-on-demand Printing with a Pulsed Electrohydrodynamic Jet," *Journal of Micromechanics and Microengineering* 20095026.
- (7) Kwon, K.S., and Go, J.K. and Kim, J.W. 2010, "Development of Inkjet Printing System for Printed Electronics," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 10, pp. 1537~1542.
- (8) Kwon, K.S., and Lee, D.Y. 2012, "Visualization of Electro-hydrodynamic Ink Jetting Using CCD Camera," *Journal of Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 29, No. 3, pp. 295~301.
- (9) Kwon, K.S. and Lee, D.Y. 2013 "Investigation of Pulse Voltage Shape Effects on Electrohydrodynamic Jets Using Vision Measurement Technique," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 23, 065018.
- (10) Electrohydrodynamic (EHD) Inkjet Printing, Online: <http://www.youtube.com/watch?v=M3cRCWwwImc>.