

실리콘 마이크로머시닝을 이용한 유체증폭기의 제작과 수치해석을 이용한 해석

김 태 현*, 조 동 일

서울대학교 공과대학 전기공학부

A Silicon Micromachined Fluidic Amplifier
and Performance Analysis with Computational Fluid Dynamics

Taehyun Kim, Dong-il Cho

Seoul National University, School of Electrical Engineering

Abstract

This paper describes the analysis, design, and silicon-fabrication of a fluidic proportional amplifier, which is the most important element of fluidic logic circuits. First, FEM(finite element method) analyses were performed, using the Fluent computational fluid dynamics program, and design geometries were optimized. Then, a 40 μm -deep amplifier was fabricated in silicon using anisotropic dry etching.

1. 서론

지금까지 MEMS분야에서 유체에 관련된 대부분의 연구는 펌프와 밸브의 제작에 집중되어 왔기 때문에 이에 관련된 기술들은 어느 정도 기반이 잡혀있다 [1]. 그러나 이들 연구의 대부분은 미세세계에서의 유체의 성질을 이용하기보다는 매크로세계에서 적용되던 설계방식을 그대로 적용하여 제작하는 것이 대부분이다. 또한 유체의 성질을 가장 많이 이용하는 유체소자(fluidics) 분야에 관해서는 외국에서 시도된 한두개의 실험[2,3]을 제외하고는 거의 연구가 된 것이 없는 상태이고, 이들 연구도 우리나라에서는 이용하기 힘든 가속기에서 나오는 X-ray를 써서 제작하는 등 현실적인 여건의 차이가 많기 때문에 국내 현실에 맞는 기술개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 silicon micromachining 기술을 이용하여 유체소자를 설계, 제작하는 방법의 개발에 중점을 두었다. 특히 micromachining 기술을 이용해서 유체소자를 제작할 경우 기존의 크기에서 제작되었을 때의 문제점들인 속도와 정밀도의 측면에서도 많은 것들이 있다.

2. 선형증폭기

2.1 유체소자

유체소자는 영어로 fluidics, fluidic elements, 또는 fluierics라고 하며 기존의 유압기기와는 달리 움직이는 부분이 없이 유체의 흐름만을 이용하여 원하는 출력을 얻는 소자를 말한다.

이러한 특징은 구동부에서의 잦은 움직임에 의한 마찰, 마모의 문제나 연결부에서의 유체의 누출과 같은 문제점의 영향을 받지 않는다는 점에서 유리하다. 유체소자는 동력의 전달보다는 신호처리의 응용에 많이 사용되는데 이것은 전기분야에서 전자회로의 역할에 해당한다. 유체소자에서의 입출력단의 압력은 전자회로에서의 신호에 해당하고, 이 압력신호는 그 자체로서 다른 spool valve 등을 제어하거나 압력신호에 따라 유량이 바뀌는 와류 증폭기를 통해 원하는 기계에 힘을 가해주게 된다.

이 분야에서 가장 중요한 소자는 선형 증폭기로서 전자회로의 operational amplifier와 비슷한 역할을 하여 2개의 입력단에서의 압력차이를 출력단에서 증폭시켜 주는 역할을 한다. 즉 선형증폭기에서는 입력압 차이(input pressure difference)가 입력으로, 출력압 차이(output pressure difference)가 출력으로 정의되는데 입력압 차이(input pressure difference)가 출력압 차이(output pressure difference)로 증폭되며 이러한 증폭기능은 feedback 제어를 위해서 필수적이다. 증폭기뿐만 아니라 전자회로에서 사용되는 diode, rectifier, resistor, inductor 등의 소자들도 모두 유체의 흐름만으로 구현이 가능하다. 또한 쌍안정 증폭기는 전자회로의 flip-flop 역할의 구현이 가능하게 하고 디지털 회로에서 필요한 AND, OR gate의 역할을 하는 소자도 쉽게 설계할 수 있어 유체소자만으로 디지털 회로의 역할을 구현할 수 있다.

유체소자는 전자회로에 비해 전자기파나 온도변화에 대해 거의 영향을 받지 않는다는 점과 제어신호를 기계적 신호로 바꿀때 electro-hydraulic interface가 필요없다는 장점이 있으나, 상대적으로 정밀도가 떨어지고 신호의 전달이 실제 유체의 흐름에 의존하므로 응답속도가 느려지는 단점이 있다. 그러나 전체 소자의 크기를 줄이게 되면 유체의 이동거리가 줄어들어 응답속도가 향상되고 마이크로머시닝을 이용하여 정밀도가 보다 높아질 수 있을 것으로 기대된다.

2.2 선형증폭기의 원리

선형 증폭기는 앞에서 기술한 바와 같이 입력단의 압력차이를

증폭하여 출력단의 압력차를 크게 하는 역할을 하는데 그 구조는 그림 1과 같다. 왼쪽에서 오른쪽방향으로 일정한 jet가 흐르도록 하면서 jet의 양편에 있는 제어포트(control port)의 압력차이를 주면 jet의 진행방향이 달라져서 2개의 출력단의 압력이 서로 달라지게 되는데 이 압력의 차이가 제어 포트의 양단간의 압력차이에 비례한다는 점을 이용한 것이다.

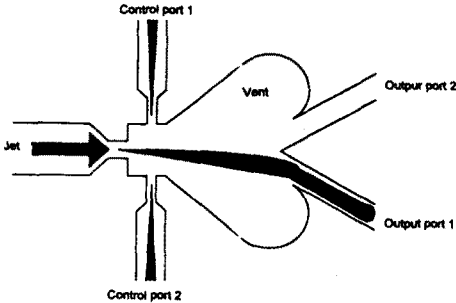


그림 1. 선형 증폭기

3. 유체소자의 정밀 제작

유체소자들을 제작할때 주로 사용하는 방법은 얇은 판들에 각 소자들에 해당하는 모양으로 구멍을 뚫은 뒤 이 판들을 서로 포개어서 접합함으로써 아래-위판들간의 유로를 연결시키는 것이다. 이 방법은 크기가 큰 유체소자를 제작할 경우에는 매우 편리한 제작방법이긴 하나 앞에서도 언급했듯이 전자회로보다 제어측면에서 정밀도나 속도가 떨어지게 된다. 이런 문제점을 해결하기 위해 MEMS의 LIGA기술을 이용하여 선형 증폭기나 쌍안정 증폭기를 만들기 위한 시도가 이루어지고 있는데[2] 국내에서는 LIGA기술을 이용할 수 없으므로 본 연구에서는 이를 대신할 수 있는 실리콘 마이크로머시닝 공정을 개발하였다. 또한 LIGA공정은 여러개의 소자를 집적화하는데에 불리한데 비해 본 연구에서 사용하는 실리콘 공정방법은 여러개의 소자를 한 개의 chip상에 집적화시키는 것이 가능하다.

3.1 LIGA & LIGA-Like

문헌에 의하면 LIGA 기술을 이용하면 supply nozzle의 폭은 55 μ m, 높이는 500 μ m의 높은 형상비를 갖는 유체 증폭기의 제작이 가능하다. 그러나 LIGA 공정을 이용하려면 2 GeV이상의 synchrotron에서 나오는 매우 고순도의 X-ray 빔이 필요하므로 현재 국내 장비의 제작상 LIGA 공정을 적용하는 데에 어려움이 따른다.

LIGA 공정의 단점을 보완한 LIGA-Like란 공정도 있는데 이는 X-ray lithography를 사용하지 않고 도금을 위한 mold를 형성하는 방법이다. 이 방법으로는 수십 μ m 깊이의 구조물 제작이 가능하지만 UV노광과 PR재료의 문제로 인해 LIGA에 비해서는 높이 및 정확도의 큰 제약이 되어 유체소자의 제작방법으로 적합하지 않다.

3.2 RIE Plasma Etching을 이용한 Deep Etching

실리콘 몸체가공은 빠른 시간안에 깊이를 마음대로 뚫을수 있는 반면에 식각되는 방향이 결정방향에 의해 결정된다는 단점이 있다. 특히 본 연구에서 필요한 수직방향으로 깊게 뚫는 것은 불가능하고 또한 곡선을 만들지 못한다는 점도 커다란 제약이 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 해결하기 위해 RIE(reactive ion etching)를 이용해서 실리콘을 비등방성으로 깊게 식각하는 방법을 연구하였다.

RIE란 plasma를 이용해서 식각을 하는 방법을 말하는데, plasma란 chamber내에 저압으로 반응기체를 채운다음 고압의 전기장을 걸어줌으로써 반응기체분자를 전자나 이온상태 또는 각각의 중성 원자상태로 만든 것을 말한다. 이러한 plasma는 원래의 반응기체분자보다 에너지상태가 높으므로 작은 에너지만 가해줘도 반응이 활발히 일어난다. 또 이온상태로 있는 원자들은 전기장에 의해 많은 운동에너지를 얻게 되므로 웨이퍼와의 충돌시 반응이 훨씬 잘 일어나게 된다.

실리콘을 식각하는 방법은 크게 SF₆를 이용하는 방법과 Cl₂, BCl₃를 이용하는 방법이다. SF₆를 사용해서 비등방성식각을 하는 경우는 앞에서 말한 비등방성식각과는 그 원리가 조금 다르다. SF₆를 plasma 상태로 만들면 F의 이온이 아니라 중성원자가 생기게 되므로 이 기체만 사용하면 결과는 등방성식각이 되어 undercut이 심하게 되어 비등방성식각성을 잃게 된다. 이것이 비등방성 식각이 되기 위해서는 oxide나 nitride막 대신에 PR(Photo Resist)을 마스크물질로 사용하고, C₂F₅를 같이 넣어줘야 하는데 그 이유는 C₂F₅에 의해 공급되는 탄소와 PR에 포함된 탄소가 불소의 기(radical)와 결합하여 CF_x와 같은 polymer를 안쪽벽에다 형성하기도 하고 C₂F₅에서 나온 염소가 안쪽벽의 실리콘 원자와 Si-Cl결합을 형성하여 측면식각을 방해하기 때문이다. 그러나 실제의 실험결과를 살펴보면 만족할 정도의 가로 대 세로의 비가 얻어지지 않는다[4].

따라서 본 연구는 Cl₂, BCl₃를 이용하는 방법을 개발하였고, mask로는 PECVD로 증착한 oxide층을 이용하였다. Si과 oxide의 선택비는 약 10:1을 얻을 수 있었다. 이 식각방법은 3가지 단계로 나누어 수행하였는데 각 단계의 조건은 표 1과 같다.

3.3 실리콘 몸체가공기술

실리콘 몸체가공은 KOH나 EDP 등의 이방성 식각액에서 (100) 결정방향과 (111) 결정방향의 식각율에 큰 차이가 있다는 성질을 이용하여 실리콘을 식각하여 원하는 구조물을 만드는 공정기술이다[7]. 즉, (100) 웨이퍼에 결정방향에 따라 마스크층에 사각형의 window를 열어주면 웨이퍼 평면과 54.7°의 각도를 이루면서 점점 홈이 생기기 시작한다. 본 연구에서는 웨이퍼의 뒷면에서 KOH로 식각을 하여 그림 3과 같이 완전히 구멍을 뚫어서 이것을 외부실험장치와 연결을 위한 포트로서 사용한다. 식각마스크로는 500Å의 oxide막과 1600Å의

Si₃N₄막을 이용하였다.

표 1. 실리콘 웨이퍼를 수직하게 식각하기 위한 공정조건

번 수	단계1	단계2	단계3
전 력	200W	300W	475W
압 력	20mTorr	20mTorr	40mTorr
시 간	1분	1분	10분
Cl ₂	0 sccm	2 sccm	50sccm
BCl ₃	14 sccm	14 sccm	5 sccm
N ₂	7 sccm	7 sccm	0 sccm

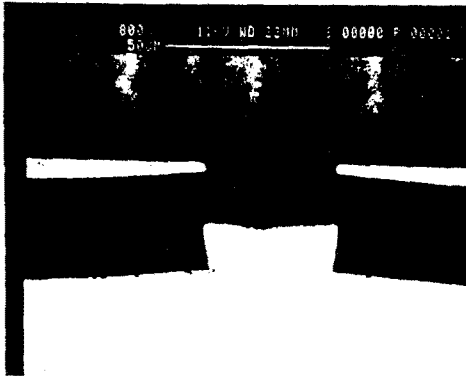


그림 2. 수직 식각된 실리콘 벽의 단면 SEM 사진

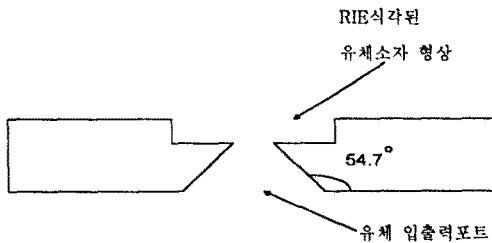


그림 3. 앞면의 유체소자와 뒷면의 입출력단자가 연결된 모습

4. 유체소자의 유동해석

일반적인 유체역학은 유체의 개개의 분자의 관점에서 보다는 유체내의 각 점에서의 압력, 속도, 온도, 밀도 등이 연속적으로 변하는 연속체의 관점에서 문제를 기술한다. 실제로 이러한 연속체 가정은 문제의 크기가 유체 분자의 mean free path 보다 큰 경우에만 적용이 가능하고 이 보다 더 작은 경우에는 기체 운동 이론을 적용해야 한다. 현재 본 연구에서 사용하는 크기에서는 연속체의 가정을 이용할 수가 있다.

유체역학현상은 연속체 가정에 다음의 관계식들에 의해 지배된다.

$$\text{질량보존: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\text{운동량보존: } \rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \nabla \cdot \mathbf{r}_0 \quad (2)$$

$$\text{에너지보존: } \rho \frac{d\hat{u}}{dt} + \rho (\nabla \cdot \mathbf{V}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi \quad (3)$$

이상기체방정식: (compressible flow일때 적용)

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (4)$$

여기서 ρ 는 밀도, $\nabla = \frac{d}{dx} \mathbf{i} + \frac{d}{dy} \mathbf{j} + \frac{d}{dz} \mathbf{k}$, \mathbf{V} 는 속도 벡터, \mathbf{r}_0 는 stress tensor, p 는 압력, T 는 온도, k 는 열전달 계수, \hat{u} 는 내부에너지, Φ 는 점성에 의한 손실합수를 의미한다. 모든 유동의 해석은 위의 식들을 이용해서 계산을 해야하는데 단순한 문제의 경우를 제외하고는 정확한 해를 구할 수 없다. 따라서 복잡한 모양의 경우는 수치해석의 방법을 이용해서 각점의 압력이나 속도를 얻는다. 본 연구에서는 유체역학 및 열전달, 화학반응 등의 지배방정식을 수치해석적 (CFD:Computational Fluid Dynamics)으로 풀어주는 Fluent라는 프로그램을 이용하여 계산을 하였다. 다음의 결과들은 모두 Fluent를 이용하여 계산한 결과이다.

또 한가지 유용한 식은 위의 (1)식과 (2)식에서 유체의 점성에 의한 영향을 무시하고 밀도의 변화가 거의 없다고 가정하면

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} V_1^2 + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} V_2^2 + gz_2 = \text{const} \quad (5)$$

의 Bernoulli 관계식이 유효가 되는데 이 식은 수치해석 등으로 해를 구한 후에 그 결과가 타당한지를 살펴보는데 유용하다.

본 연구에서는 유체증폭기의 유동해석의 출발점으로 먼저 간단한 구조물 내로 유체가 통과할 때의 유동방정식을 분석하여 보았다. 즉, 정사각형의 orifice를 관통하여 흐르는 유체를 해석하여 보았는데, orifice의 해석은 (1)식과 (5)식을 이용하면 다음과 같은 해석식을 구할수 있다.[6]

$$Q_0 = c_d a_0^2 \sqrt{\frac{2(p_c - p_d)}{\rho}} \quad (6)$$

여기서 a_0 는 사각형 orifice의 변이고, p_c 는 유체가 들어오는 쪽의 압력, p_d 는 유체가 나가는 쪽의 압력, c_d 는 discharge coefficient이다. discharge coefficient는 orifice의 모양에 따라 달라지므로 우리가 사용하는 모양에 대해서 따로 구해야 하는데 여기서 사용하는 orifice는 앞에서 언급했듯이 KOH를 이용하면 쉽게 제작이 가능한 형태이고, 수치해석적으로 계산한 결과와 실제 실험을 한 결과는 모두 (6)식과 거의 일치함을 확인하였다.

다음은 선형 증폭기에 관한 CFD실험을 하였다. 우선 CFD의 신빙성을 확인하기 위해 외국에서 LIGA로 제작하여 실제 실험을 한 선형 증폭기의 형태와 조건으로[2] CFD실험을 수행하였다. 여기서 supply jet의 속도는 45 m/s, supply channel폭은 60 μ m, supply 시작에서 출력단 끝까지의 길이는 800 μ m이고, 그림 4와 같은 결과를 구할 수 있었다. 증폭율은 약 3배로 참고문헌[2]의 결과에 일치하였다.

그러나 기존 논문의 실험결과는 LIGA공정을 이용하여 500 μ m의 깊이에서 실험할 수 있었기 때문에 2차원의 유동을 가정

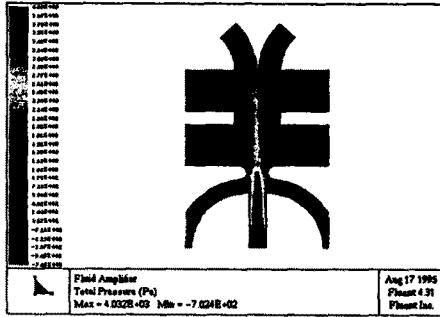


그림 4. 선형 증폭기내의 압력 분포
($\Delta P: 200 \text{ Pa}$, Supply P: 4000 Pa)

할 수 있었으나 본 연구팀에서 사용 가능한 deep RIE공정을 이용할 경우에는 앞에서 설명한 공정을 한 번 거치게 되면 수직으로 약 $40\mu\text{m}$ 정도 파고들어갈 수 있으므로, 이에 대해 계산을 해 본 결과는 증폭율이 1이 안되었다(표 2). 그 원인은 윗면과 바닥에서의 마찰이 전체 유동에 영향을 미치기 때문에 생긴 결과로 보인다.

표 2. 높이에 따른 출력의 변화(jet: 45m/s , 입력 $\Delta P: 100 \text{ Pa}$)

높이(μm)	40	50	60	80
출력(Pa)	13	55	82	131

다른 경우도 높이를 $40\mu\text{m}$ 로 고정시키고 평면적인 크기를 축소, 확대시켜 보았는데 높이 대 폭의 비율이 커질수록 압력이 증가함을 관찰할 수 있었다(표 3). 이것은 모양의 유사성을 고려해보면 높이 대 폭의 비율, 즉 형상비가 커질수록 2차원 유동에 가까워지기 때문에 일어나는 결과로 생각된다.

표 3. 평면적인 크기의 축소·확대에 따른 출력의 변화
(입력 $\Delta P: 100\text{Pa}$, 높이: $40 \mu\text{m}$)

배율	x .5	x 1	x 2	x 3
출력(Pa)	52	13	0.65	0.11

증폭율에 변화를 줄 수 있는 변수로는 깊이나, 크기뿐만 아니라 supply압력, 입력압력의 평균(전자회로에서 입력 bias에 해당) 등의 값도 영향을 줄 수 있다. 또한 증폭기로서 바람직한 성질은 bias값의 변화에 대해 증폭율의 변화가 없는 것이다. 실제로 2차원의 형상에 대해서 수치해석을 해본결과 bias 값이 0에서 2000까지 변하는 동안 증폭율의 변화가 거의 없었고, supply압력이 증가함에 따라 증폭율이 점점 증가하였으나 약 10정도에서 saturation되었다. 이 관계는 그림5에 그래프로 나타내었다. 따라서 이러한 결과를 바탕으로 이후의 수치해석에서의 경계조건은 supply압력은 1bar로 고정하고, 깊이는 $40 \mu\text{m}$, 평면적 크기는 처음크기의 절반으로 줄여서 전체 길이가 $400\mu\text{m}$ 가 되는 수준에서 설계를 계속하였는데 이 경우의 기본

적인 증폭율은 약 2.3정도였다.

또, 이전까지 시뮬레이션해 온 선형증폭기의 설계에는 뛰어난 beam중 일부가 출력단을 통해 완전히 빠져나가지 못하고 증폭기내에서 와류를 형성하게 되는데, 이 와류의 세기가 커질수록 에너지 손실이 많아지고, feedback에 의해 증폭율도 줄어들기 때문에 이 와류의 크기를 줄이기 위하여 vent중간에 벽을 설치하였다. 그러나 이 벽의 양쪽의 압력차이에 의해 벽이 깨어질 위험이 있어서 이 벽을 없애는 방향으로 설계를 변경하였는데 이 경우에는 이전의 증폭율인 2.3보다 작은 1.8정도의 증폭율을 보였다.

와류의 발생을 억제하기 위해서는 앞에서 언급한 공간에 새어나가는 흐름이 다시 증폭기의 중심으로 가는 것을 막아야 한다. 따라서 vent중간의 벽을 제거한 대신 vent의 윗쪽벽이 원래는 수직이었으나 이 벽을 45° 기울어진 모양으로 만들으로써 와류의 발생을 억제하였다(그림 6). 실제로 이러한 형태로 모양을 바꿀 경우 증폭율이 1.8에서 2.0정도로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

또, 비슷한 맥락으로 볼 때 양쪽출력을 갈라주는 split의 위치가 supply에서 더 멀리있었다면 그만큼 와류의 발생이 적으리라는 생각에서 supply와 split의 사이에 있는 vent의 길이를 조정하여 시뮬레이션하였다. 먼저 vent의 길이를 $50\mu\text{m}$ 였을 때는 와류가 많이 발생하고 증폭율도 1.3정도로 떨어졌지만 반대로 그 길이를 $50\mu\text{m}$ 만큼 더 늘렸을 때는 증폭율이 3.1정도로 매우 큰 변화가 있었다.(그림 6) 따라서 이러한 형상을 가지고 선형 증폭기의 마스크를 제작하였는데 실제 deep RIE가 된 SEM사진은 그림 7와 같다.

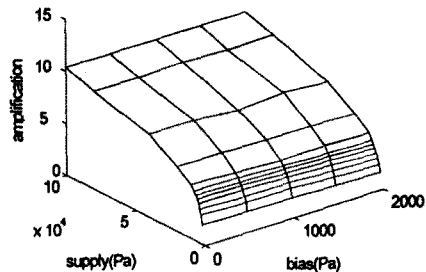


그림5. supply와 bias변화에 따른 증폭율 분포

5. 결론

본 연구진은 유체 소자의 원리를 해석하는 연구와 유체 소자의 정밀 가공 방법을 개발하는 연구를 수행하였다. 유체 증폭기의 경우 CFD실험을 통한 결과 supply 압력과 증폭기의 형상을 변화시킬 때 따라 증폭율을 원하는 대로 변화시킬 수 있고, 이 결과를 바탕으로 실제 증폭기를 제작하였다. 증폭기의 제작방법은 RIE를 이용하여 실리콘 웨이퍼를 깊이 깎고, KOH를 이용한 이방성 식각을 이용해서 외부와의 입출력 port를 만들었다. 현재 증폭기의 성능 측정 및 CFD결과를 비교하기 위한 실험장치를 제작중이다.

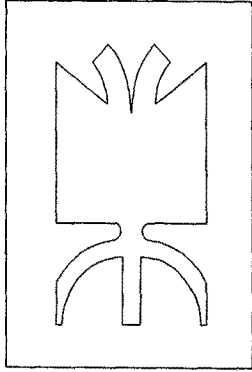


그림 6. 최종설계된 증폭기의 모습

[6] F.M. White, Fluid Mechanics , McGraw-Hill, Singapore, 1994

[7] H. Baumgartel, L. Csepregi, A. Heuberger, H. Seidel, "Anisotropic Etching of Crystalline in Alkaline Solution," J. Electrochem. Soc., Vol. 37, No. 11, November 1990.

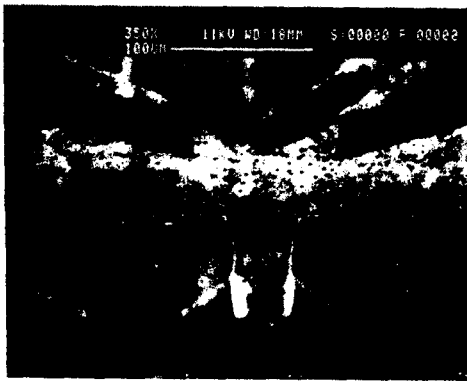


그림 7. deep RIE를 이용해서 제작된 증폭기의 SEM사진

6. 참고 문헌

- [1] S. Shoji, M. Esashi, "Microflow Devices and Systems", J. Micromech. Microeng, Vol. 4, No. 4, pp. 157-171, December 1994
- [2] B. Bustgens, J. Fahrenberg, H. Hein, W. Menz, W.K. Schomburg, J. Vollmer, "Microfluidic Components in LIGA Technique", J. Micromech. and Microeng, Vol. 4, No. 4, pp. 186-191, December 1994
- [3] R. Furlan, J.N. Zemel, "Comparison of Wall Attachment and Jet Deflection Microfluidic Amplifier", Proc. IEEE MEMS, pp. 372-377, February, 1996
- [4] E. Cabruja , M. Schreiner, "Deep Trenches in Silicon Using Photoresist as a Mask", Sensors and Actuators ,A 37-38 , pp. 766-771, 1993
- [5] R. M. White and S.W. Wenzel, "Inexpensive and Accurate Two-sided Semiconductor Wafer Alignment", Sensors and Actuators, 13, pp. 391-395, 1988