

## SAW 소자 응용을 위한 실리콘 기판 위에 AlN 박막의 최적 증착 조건에 관한 연구

고봉철\* · 남창우†

### Optimum deposition conditions of AlN thin film on the Si substrate for SAW application

Bong-Chul Ko\* and Chang-Woo Nam†

#### Abstract

AlN thin film for SAW filter application was deposited on (100) silicon wafers by reactive magnetron sputtering method. The structural characteristics were dependent on the deposition conditions such as sputtering pressure, RF power, substrate temperature, and nitrogen partial pressure. Scanning Electron Microscope (SEM), X-ray Diffraction (XRD), Electron Probe MicroAnalyzer (EPMA) and Atomic Force Microscope (AFM) have been used to find out structural properties and preferred orientation of AlN thin films. Insertion loss of SAW devices was 28.51 dB and out of band rejection was about 24 dB.

**Key Words :** RF magnetron sputtering conditions, AlN, SAW.

## 1. 서 론

현재 SAW 소자에 대한 연구는 그 응용 범위에 따라 이동 통신용 소자와 센서 소자로 분류할 수 있으며 그 중 이동 통신용 소자로서 SAW 소자에 대한 연구 경향은 소형화와 고주파화로 요약할 수 있다. SAW 소자의 크기를 줄이기 위해 효율적인 패키징 공정이 개발되고 있지만 패키징의 높이를 계속 낮출 수 없고 SAW 소자용 재료로 사용되는 압전 단결정 기판의 두께 및 크기 때문에 소자의 초소형화가 어렵다. 또한 현재 사용되고 있는 주파수 대역의 포화로 인해 보다 높은 주파수 대역에서의 신호처리가 요구되고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위한 시도로 박막형 SAW 소자를 연구하고 있지만 아직은 그 특성이 벌크형 SAW 소자보다 좋지 않다. 보다 좋은 특성을 갖는 SAW 소자를 제작하기 위한 노력의 일환으로 이 연구에서는 마그네트론 스퍼

터를 사용하여 Si 기판 위에 AlN 박막을 증착하였다. 실리콘 기판 위에 증착된 압전 박막을 이용하면 SAW 소자를 다기능의 소자로 제작할 수 있으며 초소형, 경량화가 가능하고 가격 경쟁력에서도 우수한 장점을 가진다<sup>[1,2]</sup>. 센서 소자로서의 SAW 소자에 관한 연구는 가스센서, 온도 센서, 압력 센서, ID tag 등의 분야에서 활발하게 진행되고 있다. SAW 소자를 이용하여 센서 소자를 제작하면 무선 수동 센서 소자로서 동작이 가능하기 때문에 자동차의 타이어 압력 감시 장치(TPMS, Tire Pressure Monitoring System)와 같이 전원 없이 무선으로 동작해야 하는 환경에서 적합한 특성을 갖는다<sup>[3,4]</sup>.

본 연구에서는 SAW 소자용 기판으로 AlN 박막을 이용하기 위해 RF 반응성 스퍼터를 사용하여 다양한 증착 조건에서 AlN 박막을 증착하였다. RF 스퍼터는 비교적 간단한 공정으로 우수한 특성을 갖는 다양한 박막 제작에 사용되고 있다<sup>[5,6]</sup>. AlN 박막이 실리콘 기판 위에서 우수한 SAW 소자 특성을 가질 수 있는 최적의 증착조건에 대하여 규명하였으며 최적의 증착 조건에서 증착한 AlN 박막을 이용하여 제작한 SAW 소자 결과를 분석하였다.

울산대학교 전기전자정보시스템공학부 (School of Electrical Eng., University of Ulsan)

\*현대자동차 (Hyundai Motor Company)

†Corresponding author: cwnam@mail.ulsan.ac.kr

(Received : April 16, 2007, Accepted : May 7, 2007)

표 1. RF 마그네트론 스퍼터의 동작조건

Table 1. Operating conditions of RF magnetron sputter system

초기압력	$3 \times 10^{-6}$ torr
작업압력	2 ~ 10 mtorr
기판온도	상온 ~ 500
타겟-기판 거리	8 cm
가스	Ar, N <sub>2</sub>
RF POWER	200 W
증착시간	10시간
질소분압비	30% ~ 90%

### 2. 실험 방법

본 연구에서는 RF 마그네트론 스퍼터링 시스템 (Korea Vacuum, Korea)을 사용하여 (100) 실리콘 기판 위에 AlN 박막을 증착하였다. 로타리 펌프와 cryo 펌프를 이용하여  $3.0 \times 10^{-6}$  torr까지 진공조의 압력을 낮춘 다음, 기판과 타겟의 거리를 8 cm, RF 전원을 200 W로 고정하고 기판온도를 상온에서 500 °C까지 조절하였으며, 질소분압비를 30%~90%, 작업 압력을 2 mTorr~9 mTorr로 변화시키면서 AlN 박막을 증착하였다. SEM, AFM, EPMA, XRD 등을 이용하여 AlN 박막의 물성을 분석하였으며 AlN 박막을 실리콘 기판 위에 증착하기 전에 알루미늄 타겟 표면의 불순물과 산화막을 제거하기 위해 150 W의 RF 전원을 가하여 타겟을 약 10 분간 예비 스퍼터링시켰다. 표 1에 스퍼터의 동작 조건을 요약하였다.

실리콘 기판 위에 증착한 AlN 박막을 이용하여 SAW 소자를 구현하기 위해 진공 증착기(Korea Vacuum, Korea)를 이용하여 Al을 2000 Å의 두께로 증착하고 사진식각 공정을 이용하여 IDT(InterDigital Transducer)를 제작하였다. 제작된 SAW 소자는 Network Analyzer E8802A (Agilent, USA)로 특성을 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. AlN 박막의 물성

AlN 박막을 이용하여 SAW 소자를 구현하기 위해서는 좋은 우선 배향 특성, 적은 표면 거칠기 등의 조건을 만족해야 한다. 본 연구에서는 작업 압력, 질소 분압비, 증착 온도 등 다양한 증착조건에서 AlN 박막을 증착하고 XRD를 이용하여 이들 박막의 우선 배향 특성을 관찰하였다.

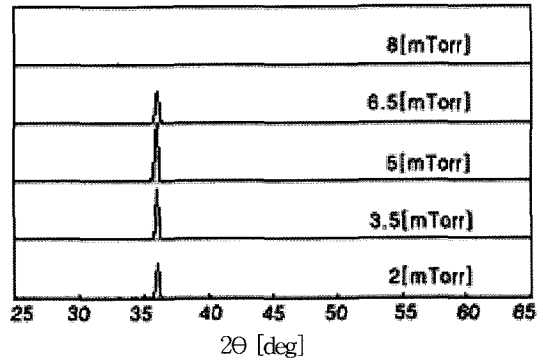


그림 1. 작업 압력에 따른 XRD 피크의 변화  
Fig. 1. XRD results of AlN thin film deposited at various working pressure.

작업 압력의 변화에 따른 AlN 박막의 우선 배향성의 변화를 그림 1에 나타내었다. 작업 압력이 증가하면 AlN 박막의 (002) 피크의 세기는 증가하는 특성을 보이지만 증착 압력이 5 mTorr 이상으로 증가하여 6.5 mTorr가 되면 피크의 세기가 오히려 감소하는 특성을 보였으며 특히 8 mTorr의 증착 압력에서 증착한 AlN 박막은 우선 배향 특성이 거의 나타나지 않았다. 5 mTorr 이상으로 작업 압력이 증가함에 따라 AlN 박막의 (002) 배향특성이 나빠지는 이유는 플라즈마 내의 입자들의 충돌에 의한 입자의 에너지 손실 증가와 입사하는 입자의 방향성 저하, 박막내의 산소 함유량 증가에 의한 영향이 복합적으로 작용했기 때문이라고 판단된다<sup>7,8,9)</sup>.

그림 2에서와 같이 질소분압비(N<sub>2gas</sub>/All<sub>gas</sub>)가 증가하면 AlN 박막의 우선 배향성이 향상되어 (002) 피크의 세기가 증가한다. Gregory 등은 반응성 스퍼터링을 이용하여 7059 coming glass 위에 질소 분압비의 변화에

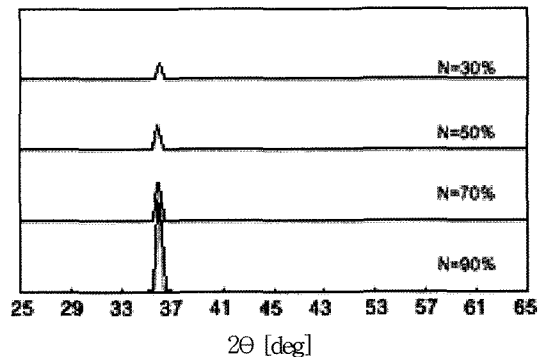


그림 2. 질소 분압비에 따른 XRD 피크의 변화  
Fig. 2. XRD results of AlN thin film deposited at various nitrogen concentration

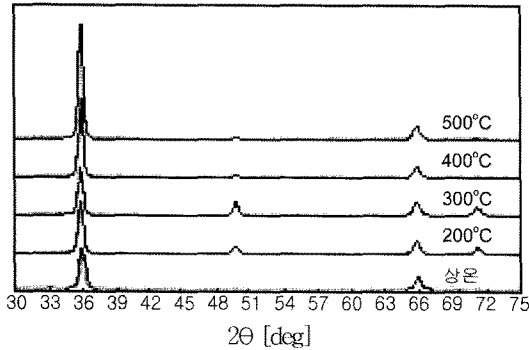


그림 3. 증착 온도에 따른 XRD 피크의 변화  
Fig. 3. XRD results of AlN thin film deposited at various deposition temperature.

의한 AlN 박막의 우선 배향성의 변화에 대하여 연구하였다. 이들은 질소 분압비가 낮으면 (002) peak의 세기가 작고 broad한 특성을 보였으며, 질소 분압비가 높아지면 (002) peak의 세기가 증가하고 sharp한 특성을 보인다고 본 실험 결과와 유사한 결과를 보고하였다.<sup>11)</sup> 그들은 이러한 원인을 AlN의 구조에 미세한 변화가 생겼기 때문이라고 설명하였으나 이 변화가 어떤 변화인지 정확하게 밝히지는 않았다.

그림 3에 보이는 바와 같이 증착온도가 증가하면 우선 배향 특성이 개선되어 (002) 피크의 세기는 증가한다. 이는 기판 온도가 증가함에 따라 기판 표면에서 입자의 이동도가 증가하여 결정성이 높아지기 때문이라고 판단된다. 반면에 결정성이 높아지면 입자의 크기가 증가하기 때문에 표면 거칠기가 증가한다. 결정성이 높아지면 SAW 소자의 특성이 좋아지지만, 따라서 표면 거칠기가 증가하면 SAW 신호가 분산되어 SAW 특성이 저하된다. AFM을 이용하여 표면 거칠기를 측정하면 이러한 사실을 확인할 수 있으며 각각의 증착 온도에 따른 표면 거칠기의 RMS(root mean square) 값을 표 2에 나타내었다. 다수의 연구자들이 기판 온도에 따른 AlN 박막의 우선 배향성의 변화를 연구하였으며 기판 온도의 증가에 따라 (002) 우선 배향성이 개선된다고 결과를 보고하였다<sup>17,11,12)</sup>. 기판온도가 높으면 우선 배향성이 개선되지만 스퍼터링 공정의 장점은 저온 공정에 있으므로 가능한 저온에서의 공정을 수행해야

표 2. 증착 온도에 따른 AlN 박막의 표면 거칠기의 변화  
Table 2. RMS values of AlN thin film deposited at various substrate temperature

증착온도 °C	100	200	300	400	500
RMS nm	10.17	10.47	10.08	10.83	19.74

표 3. 작업 압력에 따른 AlN 박막의 표면 거칠기의 변화  
Table 3. RMS value of AlN thin film deposited at various deposition pressure

작업 압력 mTorr	2	3.5	5	6.5	8
RMS nm	6.9	9.4	11.9	9.6	12.5

표 4. 작업 압력에 따른 박막 내의 산소 함유량의 변화  
Table 4. Oxygen concentrations in AlN thin film deposited at various working pressure

작업 압력 mTorr	2	3.5	5	6.5	8
산소 농도 %	3.18	3.87	4.99	6.16	8.53

표 5. 작업 압력에 따른 AlN 박막 두께 및 증착률의 변화  
Table 5. Thickness and deposition rates of AlN thin film deposited at various sputtering pressure

작업 압력 mTorr	3.5	5	6.5	8
박막 두께 μm	2.7	2.8	2.8	2.9
증착률 nm/min	4.47	4.58	4.68	4.9

한다. 본 연구의 결과를 보면 상온의 증착 온도에서도 우수한 (002) 우선 배향성을 나타내므로 공정 절차상 저온 공정이 필요한 경우에도 우수한 AlN 박막을 증착할 수 있으리라 판단된다.

작업 압력의 변화에 의한 AlN 박막의 표면 거칠기의 변화를 표 3에 나타내었다. 박막의 표면 거칠기는 증착 압력이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 나중에 다시 설명하겠지만 증착 압력이 클수록 증착률이 증가하고 따라서 표면 거칠기도 증가하는 것으로 보인다. 또한, Liaw 등은 박막 내 산소 함유량과 표면 거칠기의 관계를 관찰하여 산소 함유량이 증가하면 표면 거칠기가 증가한다고 보고하였다<sup>13)</sup>.

AlN 박막내의 산소 함유량과 표면 거칠기의 관계를 규명하기 위해 AlN 박막 내부의 산소 함유량을 EPMA로 측정하였다. 표 4에 작업 압력의 변화에 의한 박막의 산소 함유량 변화를 나타내었다. 박막 내의 산소 함유량은 증착 압력이 증가함에 따라 증가하였으며 5 mTorr 이상으로 작업 압력이 증가하면 박막내의 산소함유량은 약 5% 이상의 높은 수치를 나타내었다. 따라서 작업 압력이 클수록 증착률이 증가하고 박막 내에 포함된 산소 함유량이 증가하며 그에 따라 표면 거칠기가 증가하는 것으로 나타났다.

증착률과 박막의 두께를 측정하기 위하여 SEM을 이용하여 각각의 조건에서 같은 시간동안 증착한 박막의 두께를 측정하였다. 증착온도에 대하여 박막의 두께는 거의 변화를 나타내지 않았다.

표 5에 나타낸 것과 같이 작업 압력이 증가하면 박

표 6. 질소 분압비에 따른 박막 두께 및 증착률의 변화  
Table 6. Thickness and deposition rates of AlN thin film deposited at various nitrogen concentrations

질소 분압비 %	90	70	50	30
박막 두께 $\mu\text{m}$	2.4	2.8	3.0	3.5
증착률 nm/min	4.04	4.68	5	5.74

표 7. 2 단자 SAW 필터의 포토 마스크 규격  
Table 7. Photo Mask for 2 port SAW filter

IDT 쌍의 개수	90쌍
전극 폭	10 $\mu\text{m}$
SAW 파장	40 $\mu\text{m}$
전극이 겹치는 길이	1.6 mm
전극과 자유 표면의 비	1:1
전과 경로 길이	120 $\mu\text{m}$

막의 두께는 증가하는 경향을 나타냈다. 작업 압력이 3.5 mTorr에서 8 mTorr로 증가하면 박막의 두께는 약 2.7  $\mu\text{m}$ -2.9  $\mu\text{m}$ 로 약간 증가하였다. 이러한 경향을 보이는 원인은 작업 압력이 증가하면서 스퍼터링율이 높아져 증착률이 높아졌기 때문인 것으로 판단된다.

표 6과 같이 질소 분압비가 증가하면 박막의 두께는 감소하는 경향을 나타내었다. 질소 분압비가 30%에서 90%로 증가하면 박막의 두께는 3.5  $\mu\text{m}$ 에서 2.4  $\mu\text{m}$ 로 감소하였다. 이는 질소 분압비가 증가하면 아르곤 가스의 비율이 낮아지고 결과적으로 스퍼터링율이 낮아지기 때문인 것으로 판단된다.

위와 같은 결과를 분석해본 결과 우수한 우선 배향 특성과 좋은 표면 거칠기를 얻기 위해서는 400 °C 이하의 기판 온도, 5 mTorr 이하의 낮은 증착 압력 및 50% 이상의 높은 질소 분압비의 증착 조건에서 AlN 박막을 증착해야 할 것으로 판단된다. 증착률이 높으면 공정 시간을 단축시킬 수 있지만 증착률을 높이기 위해 질소 분압비를 감소시키거나 증착 압력을 높이면 박막의 우선 배향 특성이 저하되어 SAW 특성이 나빠진다. 이에 대한 실험을 계속한 결과 Si 웨이퍼와 AlN 박막 사이에 중간층을 사용하면 우선 배향성을 손상시키지 않고 증착률을 증가시킬 수 있었으며 이에 대한 결과는 다른 곳에서 발표할 예정이다.

SAW 소자 특성을 측정하기 위해 AlN 박막을 RF 파워를 200 W, 질소 분압비를 0.5, 증착 압력을 5 mTorr, 기판 온도를 상온으로 하여 (100) 실리콘 기판 위에 증착하였으며, 이를 이용하여 2 단자 SAW 필터를 제작하고 그 특성을 분석하였다. 표 7에 SAW 소자의 규격을 나타내었다. 이 2 단자 SAW 필터의 시뮬레이션 결과 그림 4와 같이 삽입손실은 27.5 dB, 밴드 저

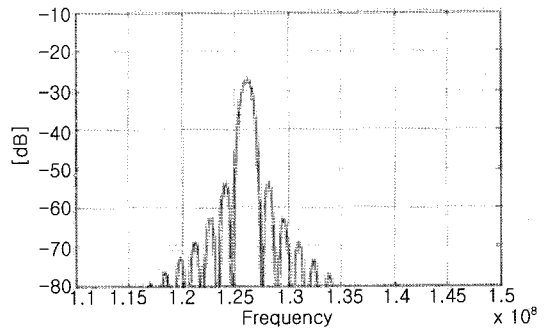


그림 4. 2 단자 SAW 필터의 시뮬레이션 결과  
Fig. 4. Simulation result of 2 port SAW filter.

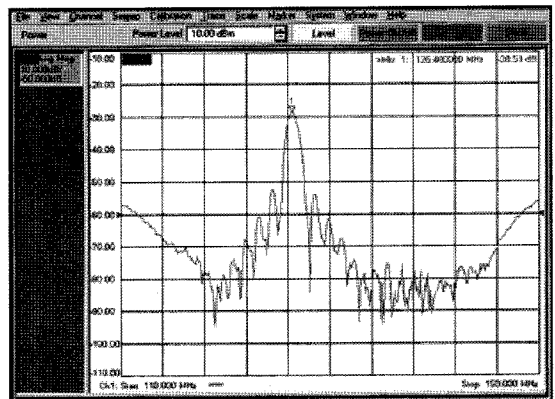


그림 5. 2 단자 SAW 필터의 측정 결과  
Fig. 5. Characteristic of 2 port SAW filter.

지율은 25.5 dB로 나타났다. AlN 박막을 이용하여 제작한 위 규격의 2 단자 SAW 필터의 삽입손실은 약 28.5 dB, 밴드 저지율은 약 24 dB, 중심 주파수는 약 126.4 MHz, SAW 속도는 약 5,060 m/s의 특성을 보였으며 이러한 특성을 그림 5에 나타내었다. 이는 시뮬레이션 결과와 유사하여 본 실험에서 마그네트론 스퍼터로 증착한 AlN의 특성이 우수한 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

이상의 결과를 비교하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) AlN 박막의 (002)면의 우선 배향성은 2 mTorr의 증착 압력 및 90%의 질소 분압비에서 가장 우수한 특성을 나타내었다. 따라서 SAW 필터용 AlN 박막을 제작하기 위해서는 낮은 작업 압력과 높은 질소 분압비에서 제작하는 것이 바람직하다.
- 2) AlN 박막의 표면 거칠기는 질소 분압비와 기판

온도에는 크게 영향을 받지 않았으며 증착 압력이 높아지면 표면 거칠기의 RMS 값이 증가하는 특성을 보였다. 표면의 거칠기는 AlN 박막을 이용하여 SAW 소자를 제작했을 때 삽입 손실 특성에 크게 영향을 미치므로 가능한 낮은 표면 거칠기의 RMS 값의 AlN 박막을 얻을 수 있어야 하며 따라서 가능한 낮은 작업 압력에서 AlN 박막을 증착해야 한다.

3) 증착 압력이 높게, 질소 분압비를 낮게 유지하면 AlN 박막의 증착률은 높아지지만 박막의 우선 배향 특성은 나빠진다.

4) 각각의 증착 조건은 제작된 SAW 소자의 특성에 긍정적인 영향과 부정적인 영향을 동시에 주게 된다. 즉, 기판의 온도를 올리면 우선 배향성이 좋아지지만 표면 거칠기도 증가하여 SAW 소자 특성에 미치는 영향을 미리 예측하기는 어렵다. 그림 5의 소자는 낮은 공정 온도의 장점을 살려 상온에서 증착하여 본 연구에서 제작한 SAW 소자 중 그 특성이 가장 좋다. 증착 조건은 200 W의 RF 파워, 0.5의 질소 분압비, 5 mTorr의 증착 압력, 온도는 상온이다.

5) IDT/AlN/Si 형태의 SAW 소자는 중심 주파수가 126.4 MHz였으며, 삽입 손실은 28.5 dB, 밴드 저지율은 24 dB의 양호한 특성을 나타내었다.

## 참고 문헌

- [1] H. Okano, N. Tanaka, K. Shibata, and S. Nakano, "Preparation of aluminum nitride thin films by reactive sputtering and their applications to GHz-band surface acoustic wave devices", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 64, no. 2, pp. 166-168, 1994.
- [2] 서주원, 이원중, "반응성 RF 마그네트론 스퍼터링법으로 증착한 AlN박막의 우선배향성 및 표면 탄성파 특성에 관한 연구", *한국재료학회지*, 제7권, 제6호, pp. 510-516, 1997.
- [3] A. Pohl, "Wirelessly interrogable surface transducers on instrumentation and application" *IEEE acoustic wave sensors for vehicular measurement*", vol. 46, no. 4.
- [4] 김광택, 이규호, "TPMS 적용을 위한 가변 정전 용량형 압력센서 개발", *센서학회지*, 제14권, 제4호, pp. 286-290, 2005.
- [5] 권성열, "고주파 마그네트론 스퍼터링 방법으로 제작한 ITO 박막의 표면형태 및 전기적 특성", *센서학회지*, 제15권, 제1호, pp. 71-75, 2006.
- [6] 박상현, 강주현, 유광수, "RF Magnetron Sputtering 법을 이용한 SnO 박막 센서의 제조 및 알콜 감도 특성", *제14권, 제2호*, pp. 63-68, 2005.
- [7] J. A. Thornton, in *Thin 1997*, pp.1031-1037. Film Processes, eds. J. L. Vossen and W. Kern, Academic Press, New York, 1978.
- [8] C. C. Cheng, Y. C. Chen, H. J. Wang, and W. R. Chen, "Morphology and structure of aluminum nitride thin films on glass substrate", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 35, pt. 1, no. 3, pp. 1880-1885, 1996.
- [9] X. H. Xu, H. S. Wu, C. J. Zhang, and Z. H. Jin, "Morphological properties of AlN piezoelectric thin films deposited by DC reactive magnetron sputtering", *Thin Solid films* 388, pp. 62-67, 2001.
- [10] O. J. Gregory, A. B. Slot, P. S. Amons, and E. E. Crisman, "High temperature strain gages based on reactively sputtered AlN<sub>x</sub> thin films", *Surface and Coatings Technology* 88, pp. 79-89, 1996.
- [11] S. Uchiyama, Y. Ishigami, M. Ohta, M. Niigaki, H. Kan, Y. Nakanishi, and T. Yamaguchi, "Growth of AlN films by magnetron sputtering", *Journal of Crystal Growth* 189/190, pp. 448-451, 1998.
- [12] W. Y. Chiu, C. H. Wu, H. L. Kao, and S. Jeng, "The optical properties and applications of AlN thin films prepared by a helicon sputtering system", *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 20, no. 3, pp. 843-847, 2002.
- [13] H. M. Liaw, W. Cronin, and F. S. Hickernell, "The SAW characteristics of sputtered aluminum nitride on silicon", *IEEE Ultrasonics symposium*, pp. 267-271, 1993.

**고 봉 철**

- 1998년 울산대학교 전기공학과 졸업
- 2002년 울산대학교 석사
- 2004년 울산대학교 박사
- 2004년~현재 현대기아기술연구소

**남 창 우**

- 1984년 연세대학교 전기공학과 졸업
- 1989년 University of Florida 석사
- 1994년 Pennsylvania State University 박사
- 1995년~현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수