

9mm 합금타이타늄 중간 선재 연구

김상연^{1*}

¹대구보건대학교 안경광학과

A Study on The Φ 9mm Titanium Alloy Wire

Sang-Yeoun Kim^{1*}

¹Dept. of Ophthalmic Optics, Daegu Health College

요 약 Ti-3Al-2.5V 잉고트를 제작하고 직경 9mm 합금타이타늄 wire로 가공하여 수입소재와 비교하여 그 특성을 조사하였다. 잉고트는 산소함량이 0.11wt%이고 철 함량이 0.085wt%로서 ASTM Gr.9 규격을 만족하였다. 9mm 합금 타이타늄 wire 경도는 225-250Hv로 비슷한 결과를 얻었고, 인장강도는 수입소재가 804MPa이고, 국내 개발품은 734MPa이었다. 연신율은 수입소재가 12%이고 국내 개발품은 22%였다. 직경 400mm 잉고트에서 단조 및 다단 열간 압연공정을 통해 직경 9.0mm 타이타늄합금선재를 제작하는 새로운 제작공정을 개발하였다.

Abstract Ti-3Al-2.5V ingot was produced, processed into a titanium alloy wire of 9mm diameter, and the characteristics were studied in comparison with imported material. The ingot satisfied ASTM Grade 9 standard showing oxygen content of 0.11wt% and iron content of 0.085wt%. The hardness of the 9mm diameter titanium alloy was similar to that of the imported material showing values between 225 and 250Hv, and the tensile strength of the imported material was 804MPa while that of the domestic development was 734MPa. The elongation of the imported material was 12% while that of the domestic development was 22%. A new process of manufacturing 9.0mm diameter titanium alloy wire through forging and multi-step hot rolling process out of 400mm diameter ingot was developed.

Key Words : Titanium;eyerim;Gr.9;Ti-3Al-2.5V;Titanium Alloy;vacuum arc remelting

1. 서론

안경 산업은 대표적인 노동집약산업이고 지난 90년대 중반 2억 5천만 불을 수출을 정점으로 매년 그 수출규모가 감소하고 있다. 이것은 주변국들의 견제와 기술 발전 등의 원인도 있지만 안경테를 제조하기 위한 기반 산업 구조와도 밀접한 관계가 있다. 안경테 제조업체는 국내 대구지역에 약 80%가 집결되어 있으며 이들은 주로 금속 안경테를 많이 제작하여 왔으며, 금속안경테는 안경테의 기본이 될 정도로 국제적으로 널리 제조 유통되며 관련 부품이나 제조기술들이 개발되어있다. 안경테의 소재는 양백에서 타이타늄 등으로 새로운 소재가 개발되어 안경테 제조에 적용되고 있으며 타이타늄은 그 특성상

유통되는 안경테의 가장 중요한 소재이다. 그중 안경테 흡션용 소재는 가장 부가가치가 높은 타이타늄합금이며 가공기술과 장비가 많이 개발되어 있지 않다. 이러한 타이타늄 및 타이타늄합금은 가볍고 견고하면서도 내식성이 양호하기 때문에 산업의 발전과 더불어 생활수준의 향상으로 환경 및 스포츠·레저에 대한 관심이 높아지면서 타이타늄을 기존의 군수용이나 항공우주산업에서부터 민수용으로 활용하고자 각종 제품개발이 활기를 띠고 있다. 타이타늄 및 타이타늄합금은 국내 수요가 상당함에도 불구하고 용해/주조/단조/압연/압출 및 선재제조 기술에 대한 기반 및 생산체제가 이루어지지 않아 전량 수입에 의존하는 실정이다[1, 2]. 선진국에서는 이의 개발에 많은 연구와 투자가 이루어졌으나, 국내에서는 여기에 관련된

본 연구를 위해 후원해준 대구광역시와 지역 안경업계, (재)한국안경산업지원센터, (주)KPC 및 대구보건대학 관계자 여러분께 감사드립니다.

*교신저자 : 김상연(sykim@dhc.ac.kr)

접수일 11년 11월 21일

수정일 (1차 11년 12월 29일, 2차 12년 01월 04일)

게재확정일 12년 01월 05일

는 기술적 문제, 투자비문제 때문에 아직까지는 미개척기술로 남아 있다. 단지, 실험실적 규모의 타이타늄 연구가 전부라 할 수 있고, 이러한 실험실적 연구로는 타이타늄 합금이 응용되는 분야의 기대에 부응시킬 수 없는 실정이다. 타이타늄의 잉고트 제조를 위한 용해 및 재용해기술, 주조 응고에 대한 기반기술을 축적하여 국내에서 제조된 타이타늄 bloom 및 billet에서 분괴압연, 조압연, 사상압연의 공정을 거쳐 소구경의 coil 및 wire가 생산될 경우, 향후 산업전반에 대한 파급효과는 지대하다. 본 연구에서는 안경테 흡선 제조용 타이타늄 합금인 Ti-3Al-2.5V 직경 1.5mm 선재를 개발하기 위해 직경 42mm 봉재에서 직경 9mm 선재를 개발하고 그 특성을 연구하였다. 신신 과정은 이미 국내 유수의 업체에서 중간재를 도입하여 어느 정도 기술이 개발되어있는 상태이므로 본 과제에서는 9mm 중간재 개발에 중점을 두었다.

2. 실험방법

2.1 Ti-3Al-2.5V 합금

순수타이타늄은 885℃ 이하에서는 육방밀집구조이고 합금원소가 첨가됨에 따라서, 동소변태 온도가 변화되고 육방밀집구조인 α 상과 체심입방결정구조인 β 상이 공존하는 영역이 존재하게 된다. α 상의 영역을 확장하게 하는 합금원소를 α 상 안정화원소라 부르며 대표적으로 Al과 O가 있다. 반면에 합금원소의 첨가에 따라 변태온도가 낮아져서 β 상의 영역이 확장하게 하는 합금원소는 V와 Fe등이 여기에 속한다. Ti-3Al-2.5V 합금의 경우, α 안정화제로서 3wt.% Al과 β 안정화제로 2.5wt.% V를 갖는데, "Half 6-4"로 통상 명칭 되며, $\alpha+\beta$ 상이 공존하는 합금이다. 순수타이타늄과 Ti-6Al-4V 합금의 중간정도의 강도를 가지는 Ti-3Al-2.5V 합금은 상온과 고온에서 순수타이타늄의 20~50% 높은 강도를 나타내며, 순수타이타늄에 필적할만한 용접성과 탁월한 냉간 성형성을 가지는 것이 특징이다.[3]

Ti-3Al-2.5V 합금에서의 주요 평형상은 α , β 상으로 합금원소의 종류와 양에 따라서 상온까지 안정한 평형상이 존재하게 된다. 먼저 합금원소의 종류에 따라서 β 상 안정화 원소와 α 상 안정화 원소로 구분되며, 이들 원소들이 합금화됨에 따라서 상태도 상의 변화에 의하여 β 상 안정화 원소는 동소형(isomorphous)과 공석형(eutectoid)으로, α 상 안정화 원소는 포정형(peritectic)과 포석형(peritectoid)으로 나누어진다. 합금원소의 종류에 따른 분류는 상태도를 변화시키는 양상에 따라 보다 상세히 구분하기도 하

나, 현재로는 α 및 β 상 안정화 원소로 분류된다.

2.2 제조공정 및 소재의 특성

안경테 흡선용으로 사용되는 Ti-3Al-2.5V 소재의 기계적 성질을 표 1에 나타냈다.

고순도 타이타늄 스폰지를 이용하여, 안경테 소재에 적합한 화학성분으로 합금설계 후 안경테용 Ti-3Al-2.5V (ASTM Gr.9) 잉고트를 VAR (vacuum arc remelting) 장비를 이용하여 제조하였다.[4] 이때 진공도는 용해 시작시 10^{-3} Torr이나 용해 중에는 10^{-2} Torr로 유지하였다. 활성금속인 타이타늄의 경우, 산소와의 반응이 강하므로, 고진공의 환경의 유지가 필수적이며, 용해 중 편석을 없애기 위해 일정한 아크전압의 유지, 냉각수량/수압의 조정, 전류 등의 변수들을 조절하여 방향성응고를 유도하였다. 이런 조건하에서 일차 용해(single melting)된 잉고트는 보다 잉고트의 품질을 높이기 위해 직경 400mm으로 이차 용해(double melting)를 실시하였다. 제조된 잉고트는 습식분석 및 가스 분석한 결과를 표 2에 나타냈다.

[표 1] Ti-3Al-2.5V(ASTM Gr.9) 기계적 성질[3]

[Table 1] Mechanical properties of Ti-3Al-2.5V (ASTM Gr.9)

Element	Tensile Requirement		
	T. S(MPa)	Y. S(MPa), 0.2%offset	E. L
Min.	620	483	15
Max.	-	-	-

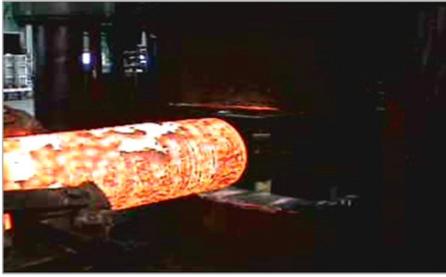
[표 2] Gr.9 잉고트의 화학조성[wt.%][6]

[Table 2] Chemical composition of Gr. 9 ingot [wt.%][6]

	Al	V	Fe (max.)	C (max.)	H(ppm) (max.)	O (max.)	N (max.)	Ti
SPEC	2.5~3.5	2.0~3.0	0.25	0.08	150	0.15	0.03	Bal
VS96	2.80	2.41	0.085	0.008	10	0.11	0.011	Bal

2.3 타이타늄합금의 성형

제조된 잉고트의 횡방향을 Hydraulic Press를 이용하여 Break Down을 실시하였다. 주조조직의 완전한 파괴와 불균질한(non-uniform) 편석방지를 위한 분괴 디자인의 설계, 동적재결정을 위한 변형 및 변형속도, 온도를 모니터링하면서 그림 1과 같이 잉고트를 900-1000℃에서 8시간(두께인치당 1시간정도) 열처리하여 1차 단조한 후 700-900℃사이에서 2차 단조 작업하였다.



[그림 1] 타이타늄 열간 단조
[Fig. 1] Hot forging for Titaniumingot

2.4 열간압연

단조된 블룸은 다시 열간압연한 후, 판재를 절단 가공하여 봉재를 제조하였다. 타이타늄 합금의 열간압연에 대한 기존 연구에서, 교차압연보다는 일방향압연에서 강도 이방성이 증가되는 것으로 나타났다. 따라서, 타이타늄합금의 열간압연시 기계적 이방성 감소를 위해서는 교차압연을 하는 것이 좋으나, 생산측면에서는 일방향압연 작업성이 훨씬 낮기 때문에 일방향압연을 선택하였다. 집합조직의 강도를 결정하는 압하율은 85%로 고정하고, $\alpha+\beta$ 영역의 온도에서 알파상(조밀육방구조)의 (0002)면이 판면에 평행하게 배열된 B-texture(basal texture)를 형성시킴으로 이방성을 줄이고자 하였다. 표면산화를 최소화하기 위한 Ar분위기 가열로에서 두께에 따라 2.5~5시간 가열하였다. 타이타늄합금은 열전도도가 낮기 때문에 표면부, 측면부의 온도강하가 크게 일어나면서, 변형저항의 증가로 최대압연능력을 초과할 위험이 있어, 최적온도범위에 근접한 온도에서 열간압연을 실시하였다. 후공정으로, 절단 및 가공, 열처리에 의해 본 연구에서 필요로 하는 직경 42mm봉재를 제조하였다.[7]

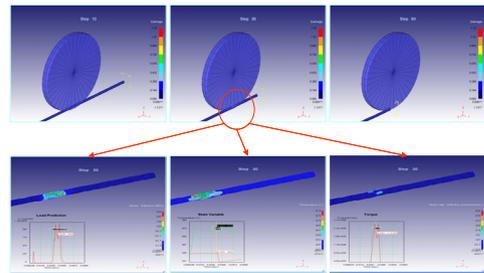
2.5 직경 9.0mm 와이어 제조

직경 42mm의 봉재를 1000℃로 고온가열 후, 고정된 gear ratio 및 RPM에 의해 최종적으로 9mm의 원형 와이어가 만들어지도록 설계된 다단압연기를 통해 열간압연을 실시하였다.[8]

공형의 형상을 다단압연을 통해 수행하는 과정에서 압연기의 중간 카세트의 불안정으로 여러 가지 상황이 발생하였다. 대표적인 것은 봉재가 가공과정을 진행하는 도중 인입이 되지 않는 현상이 발생하는 것이었다. 이를 위해 Deform s/w의 3D 형상압연 Template를 활용하여, 문제가 발생하는 카세트에 대한 분석을 실시하였다. 그 결과, 기존의 롤 공형치수에 의해서는 변형량의 불균일을 초래하는 것으로 나타났으며, 이로 인해 Guide Roller로의 인입이 안되는 것으로 판단되었다. 하지만, 롤의 연마

에 의한 수정으로 문제가 발생했던 부분은 해결할 수 있었다. 그림 2 압연시 롤과 타이타늄 소재와의 접촉관계는 매우 중요하고, 특정 step에서 유효응력과 롤의 회전속도, 소재온도, 변형량등에 의해 많은 차이가 있다. 인입소재와의 온도에 비교하여 특정 압연 카세트를 지나는 소재와의 온도에서는 20~30℃증가하는 것으로 나타났다. 온도의 증가로 인해, 일정 회전속도로 회전하는 롤에 의한 불균일한 소재변형은 소재의 치수에 영향을 미치므로, 압연시 증가되는 변형 양을 줄여주기 위해 롤의 공형을 키우는 작업을 수행하였다.

타이타늄 소재에서의 가공변형에 의한 온도증가는 고온저항강도의 저하를 가져올 수 있는 결정립의 조대화과 상분율의 변화를 초래할 수 있을 것으로 해석된다. 가열시 표면경화 층의 존재는 롤러에 의한 압연가공시 불균일한 국부변형을 유발하면서 scab, scratch등의 표면결함을 보이는 것으로 판단된다. Ti-Gr.9와이어의 표면은 Ti-Gr.2와는 달리, 비틀림 현상 및 Scab결함이 많이 발생함을 알 수 있었다.



[그림 2] 롤러 접촉면에 대한 Deform s/w해석
[Fig. 2] Deform s/w analysis of roller surface

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 기계적 특성평가

9.0mm 와이어의 특성 값을 보면, 모두 ASTM B683을 충족하고 있지만, 제작시 가열온도조건에 의해 항복강도와 신율에 차이가 있을 수 있다. 즉 동일 화학성분의 조건하에서도, 초기소재의 조직 및 압연된 소재의 열처리여부에 의해 다양한 값들을 발현할 수 있으므로, 안경테의 제조에 사용하기 위해서는 외산 안경테소재에 대한 상세한 분석을 근거로 하여 국산 시제품 제조에 접근해야 할 것으로 판단된다. 42mm와이어(Gr.9) 인입소재는 가공과정을 거치는 동안 미세조직 불균일과 기계적 특성값등이 충족하지 못했을 것으로 짐작 됨에도 불구하고 다단 열간가공에 의해 표면조직의 개선과 함께 기계적 성질 값

이 규격을 충족하고 있음을 알 수 있다. 즉, 열간가공에 의한 동적재결정이 일어남으로 인해 재질이 크게 개선된 것으로 보인다. 또한, 수입소재 대비, 강도가 비슷하며, 신율이 우수하므로 후공정인 신선 및 흡선 가공에는 좋은 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이들의 결과가 표 3에 정리 되어있다.

[표 3] Gr.9(9.0mm) wire 와 수입소재 5.5mm wire 기계적 특성[9]

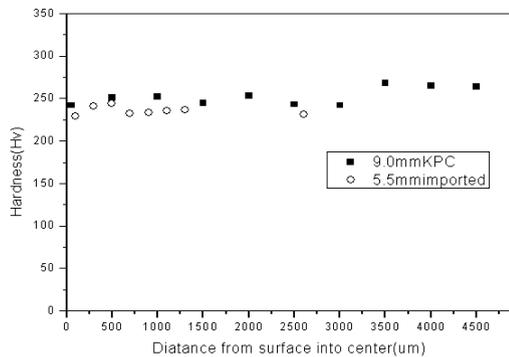
[Table 3] Mechanical properties of Gr.9(9.0mm) wire & (5.5mm) imported wire [9]

	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율 (%)	단면감소율 (%)	비고
Spec.	≥483	≥620	≥15	-	-
측정값	618	734	22	-	(9.0mm) wire
측정값	732	804	12	47	(5.5mm) imported wire
합금판	518	587	24.2		

3.1.1 경도측정

경도측정용 시편은 열간 압연된 와이어의 단면에 대하여 바깥쪽에서부터 중심부방향으로 수십 μm간격으로 측정하였다. SiC 연마지에서 1200번까지 연마한 시편의 경도측정은 Micro Vickers(하중 500g)를 사용하여 측정하였다.

그림 3의 경우, Gr.9 9.0mm 와이어 Rod의 단면을 표면에서부터 중심부로 가면서 경도 분석한 결과 Hv 225~250에서 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 수입재의 Gr.9와이어는 내외부간 220~240Hv의 경도거동을 보이고 있으며 내외부간 균일하였다.



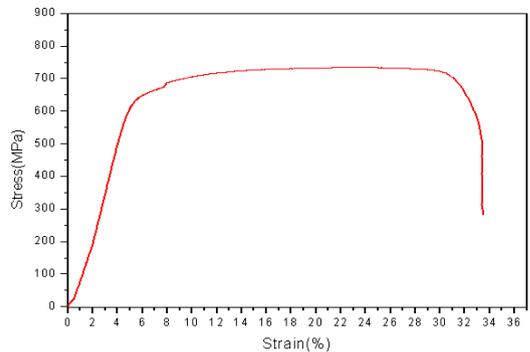
[그림 3] Gr.9(9.0mm)와이어와 (5.5mm imported) 와이어의 경도

[Fig. 3] Hardness of Gr.9 wire(dia. 9mm) & imported Gr.9 wire(dia. 5.5mm)

3.1.2 인장시험

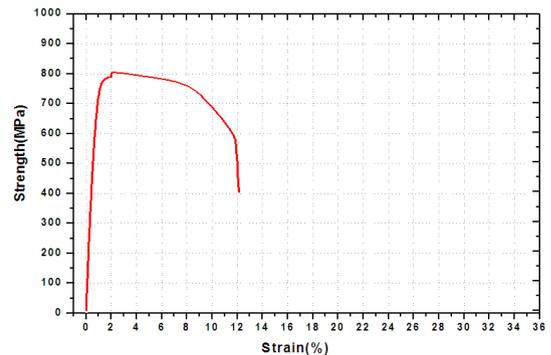
42mm 열간압연전 소재 및 9.0mm 와이어의 인장시험용 시편은 소재의 길이방향으로 가공하였으며, 시편의 크기는 ASTM E8의 규격으로 하였다. 인장시험은 Instron 만능시험기를 사용하여 1mm/min의 ross head speed로 하였다.

그림 4의 경우, Gr.9소재의 15.8mm 와이어의 인장시험결과의 변형거동을 나타내고 있다.



[그림 4] Gr.9(9.0mm)와이어의 변형곡선
[Fig. 4] Strain-stress curve of Gr.9 wire(dia 9.0mm)

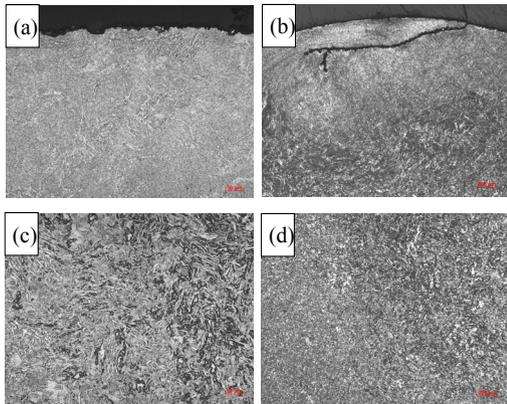
Gr.2소재와 마찬가지로, 인장강도인 734MPa부근에서 파단이 일어나는 시점까지 일정한 변형거동을 보이고 있다. 수입재의 Gr.9와이어는, 인장시험시 2%의 Strain이 있는 후, 급격한 강도증가가 일어나고 있으며, 732MPa항복강도와 804MPa의 인장강도, 12%신율, 47%단면 감소율을 보이고 있다[그림 5].



[그림 5] Gr.9(5.5mm) 와이어(수입소재)의 변형곡선
[Fig. 5] Strain-stress curve of imported Gr.9 wire(dia 5.5mm)

3.1.3 9.0mm와이어 시험내용 및 결과

Gr.9 타이타늄합금의 경우, 그림 6에서 처럼, 표면부와 중심부간의 알파상과 베타상의 불균일이 보이며, 표면부에서는 bur주변으로 crack이 존재하는 것으로 보인다. 이런 crack의 원인은 열간압연중의 비틀림 현상 및 변형강도가 높은 알파상이 표면부에 많이 존재하는 것과도 연관이 있다. 이런 현상을 방지하기 위해서는 초기 인입소재의 미세조직의 관리, 알파상과 베타상의 상분율을 적절히 조정 가능한 가열온도의 설정에 의해 방지될 것으로 생각된다.



[그림 6] Gr.9(9.0mm)선재의 미세조직 사진
(a): 표면 (x50), (b): 표면 (x100)
(c): 중심부(x50), (d): 중심부(x100)

[Fig. 6] Gr.9(9.0mm)wire Micro-structure by Optical Microscopy
(a): surface (x50), (b): surface (x100)
(c): center (x50), (d): center (x100)

4. 결론

Ti-3Al-2.5V인코트를 VAR (vacuum arc remelting)장비를 이용하여 제작하고 가공하여 직경 9mm 선재를 개발하고 그 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제조한 400mm Ti-3Al-2.5V 인코트는 산소함량이 0.11wt%이고 철함량이 0.085wt%로서 ASTM Gr.9 규격을 만족하는 고품질이었다.
2. Gr.9소재의 9.0mm 와이어 Rod의 단면을 표면에서부터 중심부로 가면서 경도 분석한 결과 225~250Hv로 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 수입재의 Gr.9와 이어는 220~240Hv의 경도를 보이고 있다.
3. Gr.9소재의 15.8mm 와이어의 인장시험결과, 인장

강도인 734MPa부근에서 파단이 일어나는 시점까지 일정한 변형거동을 보이고 있다. 수입재의 Gr.9 와이어는, 인장시험시 2%의 Strain이 있을 후, 급격한 강도증가가 일어나고 있으며, 732MPa항복강도와 804MPa의 인장강도, 12%신율, 47%단면 감소율을 보였다.

4. 직경 400mm 인코트에서 단조 및 다단 열간 압연공정을 통해 직경 9.0mm 타이타늄합금선재를 제작하는 새로운 제작공정을 개발하였다.

References

- [1] S. E. Kim, H. W. Jeong, Y. T. Hyen, D. K. Lee, Y. T. Lee, J. K. Park, J. H. Lee, "Alloy Design and Biocompatibility Evaluation of Low Modulus Titanium Alloys", J. Kor. Inst. Met. & Mater., V44, No.6, pp 462-468, 2006.
- [2] Y. T. Lee, D. G. Lee, "R&D Status of Titanium", Trends in Metals & Materials Engineering, V21, No1, pp.8-16, 2008.
- [3] Y. T. Lee, J. H. Lee, "Manufacturing technology for titanium", Korea metal Journal, pp. 462, 2006.
- [4] Y. Oshida, Bioscience and Bioengineering of Titanium Materials, p.16, First Edition, Elsevier 2007.
- [5] Huk-Chun Kwon, "Development of titanium casting technology by VAR(vacuum Arc Remelting)", pp.66, MCIE(Ministry of Commerce, Industry and Energy), 2002.
- [6] Sang-Yeoun. Kim, "Development of manufacturing technology to make the Titanium wire for Eyewear frame", pp.10, KOISC(Korea Optical Industry Support Center), 2009.
- [7] Sang-Yeoun. Kim, Gye-hun Choi, Journal of The Korea Academia-industrial cooperation Society V12, No.3, pp. 1105-1110, 2011.
- [8] Sang-Yeoun Kim, Journal of The Daegu Health College. V29, No.1, pp. 189-203, 2009.
- [9] Y. T. Lee, J. H. Lee, "Manufacturing technology for titanium", Korea metal Journal, pp.141, 2006.

김 상 연(Sang-Yeoun Kim)

[정회원]



- 1977년 2월 : 경북대학교 문리대
물리학과(이학사)
- 1984년 8월 : 영남대학교 이과대
학원(이학석사)
- 1989년 2월 : 영남대학교 이과대
학원(이학박사)
- 1994년 4월 ~ 현재 : 대구보건
대학 안경광학과 교수

<관심분야>

안경테 금속 소재, 안경렌즈