

시효경화처리에 의한 베릴륨동 스트립 탄성 특성 연구

윤준호¹, 김건태¹, 남윤욱^{1*}, 문석규²
¹국방기술품질원, ²덕인산업

A Study on the Elasticity of Beryllium Copper Strip by Age Hardening

Joon-Ho Yoon¹, Keon-Tae Kim¹, Yoon-Wook Nam^{1*}, Seok-Gyu Mun²
¹Defence Agency for Technology and Quality
²Duckin Industry

요약 본 연구는 베릴륨동 합금 스트립을 시효경화처리하여 탄성 특성을 강화하는 것이 목적이다. 베릴륨동 합금 스트립은 고전도성과 고강도성 특성을 가지며 다양한 기계, 전자 부품에 사용되고 있다. 그중 전차의 주포를 점검하는 사격회로 시험기와 같은 특수분야에도 적용되어 전자 사격시스템을 검사하는 방법으로도 적용되고 있다. 해당 합금 스트립의 경우 원래의 형태로 돌아오는 복원력이 부족하여 재사용이 불가능한 문제가 발생했다. 베릴륨동 합금의 강화기구로 시효경화처리가 있으며 해당 메커니즘은 DSC, XRD 및 TEM 등으로 분석하여 보고된 바 있다. 이 연구에서는 베릴륨동에 대한 특성을 분석하고 시효경화처리의 공정온도와 공정시간의 변화를 통해 베릴륨동 합금의 탄성 특성을 강화하는 실험을 진행하여 결과를 도출한다. 그 결과로 공정온도와 공정시간 모두 비선형적 관계를 가지며 적절한 온도와 시간을 적용하였을 때 시료의 탄성 특성이(11.9 %p, 30회) 기존 시료 변형률(38.7 %p, 30회) 대비 강화함을 볼 수 있다. 본 연구를 통해 도출한 결과를 바탕으로 고강도용 베릴륨동 스트립을 적용한 제품들의 유효수명 및 운영유지 능력이 기존보다 크게 향상될 것으로 기대한다.

Abstract This study aimed to enhance the elastic properties of beryllium copper alloy strips through an aging treatment. Beryllium copper alloy strips possess high conductivity and strength and are used widely in various mechanical and electronic components. They are also applied in specialized fields, such as inspecting tank main guns using a firing circuit tester to examine tank firing systems. An alloy strip cannot be reused because it lacks the resilience to return to its original form. The strengthening mechanism for beryllium copper alloy involves aging treatment, and this mechanism has been reported through analysis techniques such as DSC, XRD, and TEM. In this study, the characteristics of beryllium copper strips are analyzed, and experiments were conducted to enhance the elastic properties of the alloy through variations in aging treatment temperature and time. As a result, both process temperature and time have a non-linear relationship, and the elastic properties of the sample (11.9 %p, 30 times) were strengthened compared to the existing sample (38.7 %p, 30 times) when an appropriate temperature and time are applied. Based on the research findings, it is anticipated that products utilizing high-strength beryllium copper strips will experience a significant improvement in service life and operational sustainability compared to conventional methods.

Keywords : Elasticity, Cu-Be Alloy, Age Hardening, Precipitation Hardening, Plastic Deformation

*Corresponding Author : Yoon-Wook Nam(DTAQ)

email: namyoonu@dtaq.re.kr

Received May 21, 2024

Accepted August 2, 2024

Revised June 14, 2024

Published August 31, 2024

1. 서론

전차는 무한궤도를 장착한 기갑 전투차량을 말하며 제 2차 세계대전 이후 대표적인 전투 장비로 사용되고 있다. 첨단 대전차 무기의 발전으로 전차 무용론이 꾸준히 대두되고 있지만, 현재 우크라이나 전쟁에서도 여전히 전차가 사용되며 전차에 대한 수요는 여전히 증가하고 있다. 현대전에 있어서 새로운 전투 양상에 대비하기 위해 첨단 대전차 무기의 공격에 대한 방호 능력을 갖춘 새로운 전차들이 만들어지고 있다[1,2].

전차의 주포는 전차를 구성하는 요소 중 화력의 핵심 요소이다. 주포는 전원이 주포 조립체로 공급되고 탄의 전기식 뇌관에 공기가 접촉하면서 전압이 가해지면 발사하는 원리이다. 이러한 주포의 사격 기능을 유지하기 위해 사격시스템을 주기적으로 점검하는 것이 중요하다. 기존 사격시스템의 검사 방법으로는 백열등 점등 여부로만 사격 기능을 점검하였으며 정비 후 실사격을 통해 사격 기능을 확인하므로 인명사고 발생 가능성 및 소음 발생과 같은 불편이 발생했다. 현재는 전자산업이 발달함에 따라 전차 사격의 기계적, 전기적 기능을 동시에 점검할 수 있는 사격회로 시험기를 운용하고 있다. 사격회로 시험기 스트립은 측정 단자를 의미하며 공기와 접촉하는 핵심부이다. 사격 시 공기로 인해 스트립의 형태가 변형되어 재사용을 위해서는 원래의 형태로 복원되어야 한다. 즉, 스트립의 탄성은 사격회로 시험기 기능과 직결된 가장 중요한 성능 중 하나이며, 사격회로 시험기의 수명 개선을 위한 요소이다. 스트립의 재질은 상업용 고강도 베릴륨동 합금을 사용하고 있으며, 충분한 탄성을 위해 시효경화처리가 필수적이다. 시효경화처리는 특정 온도 구간과 시간에 걸쳐 베릴륨 또는 베릴륨 화합물을 석출시켜 기계적 강도를 증가시키는 방법으로써 그 강화기구는 명확하게 밝혀진 상태이며, 해당 합금 강화에 대한 경화 특성을 최대화하는 연구도 보고된 바 있다[3,4]. 그러나 베릴륨동 합금 시효경화처리 관련 연구들에서 탄성 특성 변화를 분석하는 보고는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 베릴륨동 합금 스트립의 탄성 특성을 강화하는 요인에 대해 분석하고자 한다. 베릴륨동 합금 스트립이 적용된 사격회로 시험기는 반복적으로 사용할 경우 몸체부보다 낮아진 스트립으로 인해 재사용이 불가능한 문제가 발생한다. 스트립의 복원력과 관련된 요인으로 재질의 종류와 재질의 탄성이 있지만, 사격회로 시험기에 사용되는 재질은 베릴륨동 합금으로 특정되어 있으므로 해당 금속의 탄성에 영향을 주는 시

효경화처리를 함으로써 복원력을 강화하는 방법을 연구하였다.

2. 이론적 배경 및 선행연구

2.1 상용 고강도 베릴륨동 합금

베릴륨동(Cu-Be) 합금은 실용화 이후 약 80년의 역사를 가지며 해당 합금은 구리의 고전도성과 베릴륨의 고강도와 같은 뛰어난 물성을 가지고 전자와 기계 부품에 사용되고 있다. 주성분으로 1.80~2.00% Be, 0.2% 이상의 Ni+Co, 0.6% 이하의 Ni+Co+Fe, 그 외 구리로 구성된다. 내식성이 좋고 시효경화처리 전에는 전연성이 우수하며 시효경화처리 후에는 강에 가까운 높은 강도와 내피로성, 도전성이 증가한다.

Fig. 1에서는 베릴륨동 2원 합금 계의 평형 상태도로 다양한 평형 상이 존재한다. 그중에서 주요 평형 상인 α 상은 면심입방정(FCC)의 구조를 가지며 약 1085 °C까지 안정하다. γ 상은 단순입방정(SC)의 구조로 Cu와 Be가 1:1의 비율로 존재한다. 시효경화처리에서는 해당 합금의 Co, Ni로 인해 격자결합이 발생하여 γ 상의 불연속 석출을 방지하며 더욱 균일한 석출이 발생한다. 해당 강화기구는 용체화 온도에서 급랭으로 Be 원자가 Cu에 α '상으로 과포화고용된 후 시효처리로 {100}면에서 형성하고 자라면서 γ '상이 GP zone에서 핵생성 한다. GP zone의 용해 온도인 약 320 °C 이상에서는 γ '상이 균일 핵생성 하며 합금이 연화되기 시작한다. 380 °C 이상에서는 불연속 석출이 발생하며 합금의 기계적 특성이 저하된다.

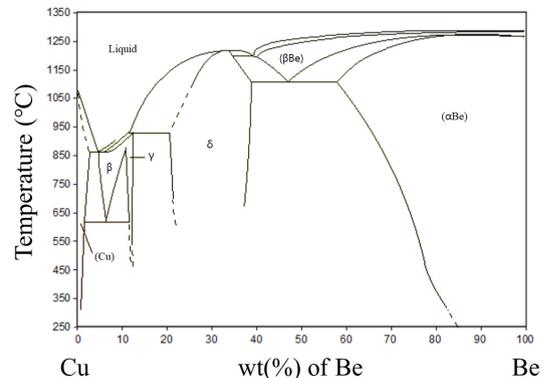


Fig. 1. Phase diagram of Cu-Be alloy

2.2 시효경화처리 선행연구

1969년도에 보고된 연구에 따르면 베릴륨동 합금을 시효경화 처리하고 경도 측정 및 광학현미경과 투과전자 현미경을 통해 강화기구를 연구하여, α 상에서 GP(I) zone, GP(II) zone, γ' 상, 변칙적 γ' 상으로 상변화가 발생하는 것을 확인하였다[5]. 이후 Cu-2wt% Be 합금의 시효경화처리 과정을 분석하고 핵 형성 이론 관점에서 연구한 논문이 보고되었다. 특히 준 안정상이 GP zone보다 먼저 형성되는 것을 관측하였고 준 안정상에 대한 보다 명확한 명명법을 제시하였다[6]. 메커니즘이 정립된 이후로는 전자 부품의 커넥터로 이용되는 1 wt% 이하의 Be가 첨가된 베릴륨동을 제조하여 다양한 가공공정 및 시효조건에 따른 해당 합금의 미세조직 및 기계적, 전기적 특성을 조사한 응용 논문도 보고되었다[7]. 최근에는 수소 예방시스템의 주재료인 오스테나이트 스테인리스강을 대체하기 위해 시효 처리한 베릴륨동을 제시한 연구도 제시되었으며 고압 수소에 대한 저 변형률 속도 시험, 피로 수명, 피로 균열성장 및 파괴 인성시험을 통해 수소 적합성을 검증하였다[8]. 또한, 분석기법 및 분석기기의 발달에 따라 베릴륨동의 미세구조, 기계적 특성 및 시효 거동을 DSC, XRD와 TEM으로 연구한 논문도 보고되었다. 조대한 결정립의 베릴륨을 시효경화처리하여 분석한 결과, 나노 크기의 체심입방 구조 베릴륨동의 지속적인 형성을 관찰하였다[9]. 앞선 선행연구들을 조사해본 결과 베릴륨동 합금의 특성을 개선하기 위해 여러 시효경화처리 분석연구들이 수행됨을 확인할 수 있다. 하지만 복원력의 관점에서 해당 합금의 탄성 변화를 분석하고 대상품의 제작 공정을 개선하는 연구는 다소 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서 수행한 스트립 복원력 개선에 대한 연구자료는 다른 분야의 유사한 재료의 특성 개선에 참고자료가 될 것으로 생각한다.

3. 복원력 관련 요인 분석

3.1 사격회로 시험기 구조

사격회로 시험기의 구조로 크게 몸체부, 단자 부로 구성된다. 몸체부는 전차의 종류에 따라 형상이 달라지며 폐쇄기와의 호환 여부를 책임진다. 단자 부에서는 전류가 입력되면 측정 단자와 접지 단자의 전압 차에 의해 사격 신호가 입력된다. 사격회로 시험기 스트립은 상기 단자 부에서 공이와 직접 접촉하는 측정 단자를 의미한다.

Fig. 2에서 사격회로 시험기 스트립의 구조에 대해 설명한다. 몸체부(Substrate)에 고정된 측정 단자(Strip)는 몸체부보다 위로 유효높이(Height)를 가진다. 공이와 접촉하게 되면 스트립은 몸체부 상단의 높이까지 내려간다. 해당 유효높이가 몸체부보다 낮으면 공이와 접촉되지 않아 기능이 정상작동하지 않는다. 스트립은 0 mm보다 큰 유효높이로 돌아갈 수 있는 복원력이 필요하다.

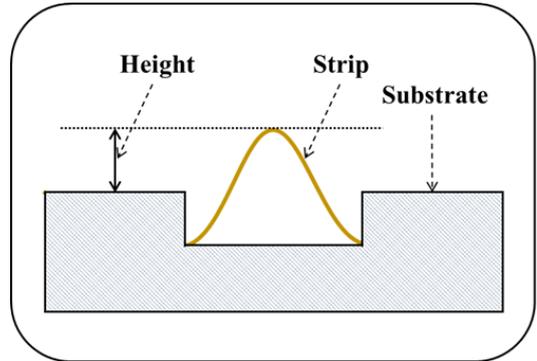


Fig. 2. Structure of tank firing circuit tester strip

3.2 복원력 관련 요인 및 현상 분석

사격회로 시험기 스트립의 복원력은 해당 재질의 탄성에 해당하며 외부 스트레스를 받은 금속이 원래의 형태로 돌아가는 성질을 의미한다. 따라서 복원력과 관련된 요인으로 재질의 종류와 탄성 특성인 항복강도가 있다. 재질의 종류의 경우 사격회로 시험기 스트립은 서론에서 서술한 바와 같이 상업용 고강도 베릴륨동 합금으로 특정되어 사용한다. 항복강도의 경우 해당 재질의 소성변형이 발생하지 않도록 되돌아오는 탄성변형 구간에 대한 특성으로써 시효경화처리 공정으로 강화할 수 있다. 해당 합금의 시효경화처리는 일반적으로 200 °C 이상 650 °C 이하 온도 범위에서, 1분 이상 24시간 이하로 공정이 이루어진다. 따라서 항복강도 관련 요인으로 시효경화처리 공정온도 및 공정시간을 개선할 수 있다.

실제 운용되고 있는 사격회로 시험기를 수차례 사용할 때 Fig. 3과 같이 소성변형이 발생하였다. 이에 재사용 시 기능이 정상적으로 작동하지 못하는 문제점이 발생했다. 재사용 및 전력 운영유지의 관점에서 시효경화처리 공정온도 및 공정시간을 조절하여 항복강도를 증가시켜 해당 합금의 탄성 특성을 강화하고자 한다.

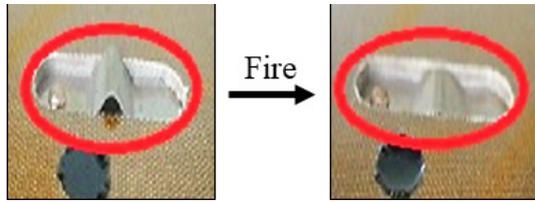


Fig. 3. Plastic deformation after test firing circuit

4. 실험방법 및 실험결과

4.1 실험방법

앞서 상용 고강도용 스트립의 재질의 경우 베릴륨등 합금으로 사용하기에 시효경화처리 공정시간 및 온도를 개선해 스트립의 탄성 특성을 강화하고자 한다. Table 1에서 시효경화처리별 샘플을 정리한다. 타입별 시효경화처리와 30회 공기사격 테스트를 진행 후 Fig. 4에서와 같이 변화된 스트립의 길이를 각각 비교하였다.

Table 1. Type of Age Hardening Sample

Sort	Natural	Sample 1	Sample 2
Time	0 h	3 h	2.5 h
Temperature	20 ℃	650 ℃	315 ℃
Height	2.07 mm	2.35 mm	2.43 mm

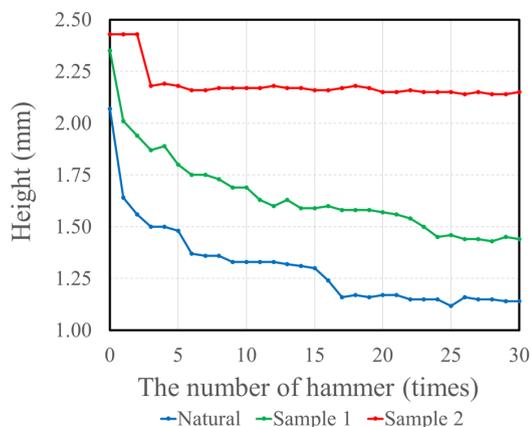


Fig. 4. Plastic deformation after test firing circuit

4.2 실험결과

실험을 위해 기존 시효경화처리 방식의 기존 시료 (Sample 1), 변화된 시효경화처리 방식의 강화 시료 (Sample 2), 시효경화처리를 하지 않은 대조군 시료

(Natural)를 각각 30회 공이 사격을 통해 스트립 길이 변화를 측정하였다. 스트립 길이는 Height로 주변 Substrate 높이를 기준으로 설정하였다. 공이 사격에 따른 최종 길이 변화량은 대조군이 0.93 mm, 기존 시료가 0.91 mm, 강화 시료가 0.29 mm 순으로 감소하였음을 볼 수 있었다. 기존 공정온도 650 ℃ 대비 개선 공정온도는 315 ℃로 감소하였으며, 기존 공정시간 3시간 대비 개선 공정시간은 2.5시간으로 30분 감소하였다. 해당 공정시간과 공정온도는 선형연구를 참고하여 제한된 업체와 군의 실험환경으로 고정되어 진행되었다. 10회, 20회 및 30회에서의 누적압축변형률을 각각 비교·분석하여 복원력 특성이 온도 조건에 의해 오히려 감소하였음을 알 수 있었다.

Table 2에서 보면 각 10회당 평균 길이 변화율 (mm/times)을 측정하였을 때, 대조군은 0.074, 0.016, 0.003 순으로 감소하는 것을 볼 수 있었고, 강화 시료도 0.026, 0.002, 0.001로 감소하는 것을 볼 수 있었다. 하지만 기존 시료의 경우 0.066, 0.012, 0.013으로 감소하다 유지되는 경향을 보였으며 이는 소성변형이 종결되지 않음을 추론할 수 있다.

Table 3을 참조하면 10회까지 누적압축변형률은 대조군이 35.7 %p, 기존 시료가 28.1 %p, 강화 시료가 10.7 %p 순으로 감소하는 것을 볼 수 있었다. 20회 및 30회까지의 누적압축변형률도 같은 경향을 볼 수 있었다. 하지만 20회에서 30회까지 발생한 압축변형률은 대조군이 1.4 %p, 기존 시료가 5.5 %p, 강화 시료가 0.4 %p로 기존 시료가 대조군보다 많이 변형이 발생한 것을 볼 수 있었다. 이를 통해 기존 시료의 경우 0에서 30회까지 소성변형이 지속해서 발생하는 것과 이미 소성변형이 종결된 대조군에 비해 길이 변화량이 짧으므로 어느 정도의 복원력은 가지고 있으나 10회당 구간 압축변형률이 30회 구간에서도 5.5 %p로 강화 시료보다 매우 높은 것을 볼 수 있었다. 강화 시료의 경우 10회 구간 내에서 소성변형이 종결되고 이후 탄성변형에 의해 원래 높이로 복원(10회당 누적압축변형률 1%p 이하)하는 것으로 보았을 때 충분한 탄성 특성을 얻었다고 추론할 수 있다.

Table 2. Average Rate of Length Change (mm/times)

Times	Natural	Sample 1	Sample 2
0 - 10	0.074	0.066	0.026
10 - 20	0.016	0.012	0.002
20 - 30	0.003	0.013	0.001

Table 3. Accumulated Compressive Strain of Samples

Times	Natural	Sample 1	Sample 2
10	35.7 %p	28.1 %p	10.7 %p
20	43.5 %p	33.2 %p	11.5 %p
30	44.9 %p	38.7 %p	11.9 %p

5. 결론

베릴륨동 합금 스트립은 실제 다양한 기계, 전자 제품 등에 적용되고 있다. 해당 합금 스트립의 탄성 특성이 제품의 성능과 직결되는 경우가 종종 발생한다. 이 논문에서는 그 중 사격회로 시험기를 대상으로 해당 합금 스트립의 탄성 특성 강화 방법을 연구했다. 사격회로 시험기에서 스트립은 공이와 접촉하고, 접촉할 때 발생하는 충격은 무시할 수 없는 수준이기에 해당 스트립은 충분한 탄성이 요구된다.

본 연구는 베릴륨동 스트립 탄성 특성 강화에 관한 연구로 본문에서는 복원력을 강화하기 위해 재질과 시효경화처리 두 가지 요인을 분석하였다. 해당 스트립의 경우 재질의 선택이 불가하여 스트립의 특성을 분석했고 시효경화처리 공정온도와 공정시간을 변화하여 탄성 특성을 강화하는 실험을 제시했다. 해당 실험을 적용하여 기존 시료, 강화 시료, 시효경화처리를 하지 않은 대조군을 비교·분석한 결과를 제시하였다. 공정온도는 기존 650 °C 대비 강화 시료는 315 °C에서 2배 이상 감소한 온도 조건에서 진행되었고, 공정시간은 기존 3시간 대비 2.5시간으로 감소하여 공정온도 및 공정시간 모두 개선된 것을 볼 수 있다. 강화 시료의 최종 누적압축변형률은 11.9 %p 이므로 대조군보다 탄성 특성이 33.0 %p, 기존 시료보다 26.8 %p 강화된 것을 볼 수 있었다.

추가로 수행해야 할 연구로는 온도별, 시간별 독립시행으로 데이터를 정량화하여 최적의 공정온도와 공정시간을 도출하는 연구를 수행하여야 한다. 이후 최적 조건을 찾는 회귀 분석 방법인 반응표면분석(Response surface methodology)을 바탕으로 수치해석을 수행하여 더욱 정밀한 최적값을 도출하는 연구를 수행하여야 한다. 또한, 스트립의 내구수명 한계점을 판단하여 교체 주기를 예상하는 연구를 수행할 예정이다. 이러한 향후 추진 연구들이 수행될 시 베릴륨동 합금 스트립의 탄성 특성이 더욱 강화될 뿐 아니라 적용되는 제품들의 유효 수명이 개선될 것으로 기대한다.

References

- [1] H. H. Choi "Tank uselessness theory is wrong, tanks are evolving : Future technologies such as hybrid propulsion systems and drone integration.", Defense & Technology, Vol.523, pp.58-71, 2022.
- [2] J. W. Lee, W. R. Jeong, K. H. Kim, E. K. Cho "A Study on the Development of Future Tanks in the Ukraine-Russia War.", Defense & Technology, Vol.531, pp.88-95, 2023.
- [3] C. J. Kim, H. U. Kim "Development trend of Cu-Be alloy technology.", Machinery & Materials, Vol.18, pp.67-86, 1993.
- [4] Guoliang, X., Qiangsong, W., Xujun, M., Baiqing, X., & Lijun, P. "The precipitation behavior and strengthening of a Cu-2.0 wt% Be alloy.", Materials Science and Engineering: A, Vol.558, pp.326-330, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.007>
- [5] Henmi, Z., & Nagai, T. "Mechanism of precipitation hardening in Cu-Be alloys.", Transactions of the Japan Institute of Metals, Vol.10, No.3, pp.166-173, 1969. DOI: <https://doi.org/10.2320/matertrans1960.10.166>
- [6] Rioja, R. J., Laughlin, D. E. "The sequence of precipitation in Cu-2w/0 Be alloys.", Acta Metallurgica, Vol.28, No.9, pp.1301-1313, 1980. DOI: [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(80\)90086-3](https://doi.org/10.1016/0001-6160(80)90086-3)
- [7] M. Ryou, B. S. Lee, B. Y. Jeong, M. H. Kim "The Influence of Aging Treatment on the Mechanical and Electrical Properties of Cu-Be Alloy", Journal of Korea Foundry Society, Vol.31, No.6, pp.366-370, 2011. DOI: <https://doi.org/10.7777/jkfs.2011.31.6.366>
- [8] Ogawa, Y., Yamabe, J., Matsunaga, H., Matsuoka, S. "Material performance of age-hardened beryllium-copper alloy, CDA-C17200, in a high-pressure, gaseous hydrogen environment.", International Journal of Hydrogen Energy, Vol.42, No.26, pp.16887-16900, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.270>
- [9] Lomakin, I., Castillo-Rodríguez, M., Sauvage, X. "Microstructure, mechanical properties and aging behaviour of nanocrystalline copper-beryllium alloy.", Materials Science and Engineering: A, Vol.744, pp.206-214, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.12.011>

윤 준 호(Joon-Ho Yoon)

[정회원]



- 2016년 8월 : 서강대학교 화공생명공학과 (학사)
- 2023년 8월 : 부산대학교 고분자공학과 (석사)
- 2023년 11월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

품질경영, 화학공학, 재료공학

문 석 규(Seok-Kyu Moon)

[정회원]



- 1995년 12월 : 경남공업고등학교
- 1995년 11월 ~ 2016년 3월 : 동진전기
- 2016년 4월 ~ 2017년 11월 : 덕인산업
- 2017년 11월 ~ 2018년 11월 : 대영전장시스템
- 2018년 11월 ~ 현재 : 덕인산업

<관심분야>

국방, 자동차공학, 전기기기

김 건 태(Keon-Tae Kim)

[정회원]



- 2015년 2월 : 충북대학교 전기공학부 (학사)
- 2017년 2월 : 부산대학교 전기전자컴퓨터공학과 (석사)
- 2022년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

국방, 전기/전자, 전기기기

남 윤 욱(Yoon-Wook Nam)

[정회원]



- 2014년 8월 : 한국해양대학교 전파공학과 (학사)
- 2020년 2월 : 부산대학교 전기전자컴퓨터공학과 (석사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원 선임연구원

<관심분야>

품질경영, 통신시스템, 항법시스템