

LNG 냉열을 이용한 냉장 · 냉동 창고 모사에 관한 연구

한단비¹ · 김윤지¹ · 염규인¹ · 신재린² · 백영순^{1,†}

¹수원대학교 환경에너지공학과, ²유진초저온 기술연구소

A Study of Simulation on the Refrigerated Warehouse System Based on the Cold Energy of Lng Using the Pro-Ii Simulator

DANBEE HAN¹, YOONJI KIM¹, KYUIN YEOM¹, JAERIN SHIN², YOUNGSOON BAEK^{1,†}

¹Department of Environment-Energy, The University of Suwon, 17 Wauan-gil, Bongdam-eup, Hwaseong 18323, Korea

²EUGENE Super Freeze Co. Institute of Technology, #905,U-Tower, 120 Heungdeokjungang-ro, Yongin 16950, Korea

†Corresponding author :
ysbaek@suwon.ac.kr

Received 26 July, 2017
Revised 20 August, 2017
Accepted 30 August, 2017

Abstract >> When Liquefied Natural Gas (LNG) is vaporized into NG for industrial and household usage, tremendous cold energy was transferred from LNG to sea-water during phase-changing process. This heat exchanger loop is not only a waste of huge cold energy, but will cause thermal pollution to the coastal fishery area also when cold water was re-injected into the sea. In this study, an innovation design has been performed to reclaim the cold energy for -35 to 62 °C refrigerated warehouse. Conventionally, this was done by installing mechanical refrigeration systems, necessitating tremendous electrical power to drive temperature. A closed loop LNG heat exchangers in series was designed to replace the mechanical or vapor-compression refrigeration cycle by process simulator. The process simulation software of PRO II with provision has been used to simulate this process for various conditions, what to effect on cold energy and used energy for re-liquefaction and evaporation process. In addition, through analysis the effect of the change of LNG supply pressure on sensible and latent heat, optimum operational conditions was suggested for LNG cold energy warehouse.

Key words : LNG(액화천연가스), Cold energy(냉열), Refrigeration(냉동기), Modeling(모델링), Refrigeration warehouse(냉동 창고), Cold heat(냉열), Simulation(모사)

1. 서론

Liquefied Natural Gas (LNG; 액화천연가스)는 해 외가스전에서 수송의 편리성을 위해 기체인 천연

가스를 가스처리장치에 의해 질소와 이산화탄소, 불순물 등을 제거한 후 저온 고압으로 액화한 것으로 메탄, 에탄, 프로판 부탄 등으로 구성되어 있다. LNG의 저장밀도는 약 430-470 kg/m³으로 표준

상태의 기체에 비해 625배 이상이고¹⁾, 약 -162℃ 온도를 지닌 초저온 액체 상태이다. 해외가스전에서 LNG 선박을 통해 우리나라 한국가스공사에서 수입하여 인천, 평택, 통영, 삼척 LNG 터미널의 LNG 저장탱크에 하역하게 되어 저장된다. 가정으로 공급하기 위해 LNG는 기화기(open rack vaporizer, ORV)에서 상온의 바닷물과 열교환 되어 약 70기압, 상온의 기체 상태로 각 지역의 공급기지에서 보내진다(Fig. 1). 공급기지에서 20기압으로 낮춘 후 지역도시가스에 공급되면, 1기압 이하의 저압상태로 낮추어 가정에 공급되어진다. 이와 같이 -165℃ LNG가 기화하기 위해서 바닷물과의 열교환하는 과정에서 버려지는 냉열은 약 830-860 kJ/kg 이며²⁾, 우리나라 LNG 사용량이 연간 약 3,800만 톤(2013년 현재)으로 약 7.6×10^{12} kcal (200 kcal/kg 계산)가 된다. 바다나 공기 중으로 버려지는 냉열은 거대한 에너지이며, 바다와 대기를 오염시킨다³⁾. 세계적으로 LNG 냉열 이용한 냉동물류 시스템은 1974년 도쿄가스(주)의 요코하마 터미널에서 일본 초저온(주)이 12,000톤 규모의 냉동창고를 운영하고 있고, 1997년 일본 후쿠오카 세이부가스에서 LNG 5 ton/hr으로 -30℃ 냉동창고 27,600톤 규모를 서부가스엔지니어링이 운영하고 있으나⁴⁾(Table 1), 국내는 전무한 상태이다. 전기식 냉동냉장시설은 2014년 현재 780개가 운영되고 있고 증가 추세에 있어 우리나라의 LNG 냉동·냉장시스템에 연간 최대 3.3×10^{12} kcal 냉열을 사용할 것으로 전망된다. 본 연구의 핵심기술개발을 통하여 기존에너지원(전력 등)에 의해 전기냉동기로부터 -100℃ 이상 저온 냉동·냉장기기를 LNG 냉열로 대체 활용할 뿐 아니라 LNG 냉열을 이용할 경우 운전 전력 절감률이 약 50-70% 정도이므로 국가 물류산업의 활성화에 기여할 것이다. LNG 냉열을 기지 부근이나 LNG 탱크로리에 의한 운송으로 LNG 냉열을 활용 후 나온 천연가스를 가스엔진과 발전에 의한 분산형 전력생산으로의 활용으로 획기적인 CO₂ 저감 및 녹색성장에 크게 기여하는 기술 개발이므로 매우 필요하다.

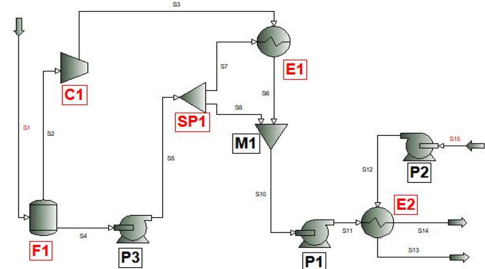


Fig. 1. The Process Facility of an LNG Receiving Terminal F1. LNG storage tank P3. Low pressure LNG pump C1. BOG compressor E1. BOG re-liquefier P1. high pressure LNG pump E2. Seawater vaporizer P2. Seawater Pump

Table 1. Existing cold storage warehouses⁴⁾

Item	Nippon Cryogenic Inc.	Western gas Engineering
Operation Year	1975	1997
Refrigeration Cap'	120 RT	230 RT
Capacity(ton)	12,000	27,600
Temperature(℃)	-50/-35	-30/-5
Refrigerant	R-12	R-22
LNG amount	4 ton/h	5 ton/h

본 연구에서는 기존 전기냉동시스템을 LNG 냉열을 이용한 냉동시스템으로 모델링하였으며, simulation을 통하여 공정의 조건별 냉열에너지와 소비에너지를 구하여 비교 분석하였으며, 냉매에 따른 유량에 미치는 영향을 분석하였다. 더불어 LNG 공급압력에 따른 현열과 잠열량 변화를 분석하여 LNG 냉동·냉장시스템의 운전에 관한 최적 조건을 제시하고자 한다.

2. LNG 냉열시스템의 모델링 및 시뮬레이션

본 연구는 LNG 냉열을 사용하여 냉동·냉장창고를 구동하는 시스템의 modeling하여 상업용 화학공정 모사기인 Schneider Electric사의 PRO II with PROVISION V9.4 (PRO II)을 활용하여 시뮬레이션을 수행하였다. Table 2와 같은 탄화수소 혼합물의 물성 계산은 Soave-Redlich-Kwong (SRK) 상태방정식인 식 (1)을 사용하였다. 식 (1)에서 a는 에너지 매개변수이며, b는 크기 매개변수이다. 이는 임계온도 및 임계압력의 함수로 식 (2), (3)과

같이 나타낸다^{5,6)}.

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a\alpha}{v(v+b)} \quad (1)$$

$$a = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad (2)$$

$$a = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c} \quad (3)$$

또한 α 값은 식 (4), (5)과 같이 표현한다.

$$\alpha = [1 + m(1 - T_r^{0.5})]^2 \quad (4)$$

$$m = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26692\omega^2 \quad (5)$$

이와 같은 조건에서 LNG 2,000 kg/h의 냉열을 냉동(S/F급) 열교환기와 냉장(F급) 열교환기를 연결하여 냉매와의 열교환을 하였으며, 냉매는 냉동냉장창고에 공급되어 창고의 내부온도를 지속적으로 유지하는 데 사용하였다. 열교환기 2개를 Fig. 2와 같이 직렬로 연결하였고, LNG와의 열교환을 하는 냉매는 R407C를 사용하여 분석하였으며, 냉매의 영향을 파악하기 위해서 프로판, 이산화탄소를 사용하여 비교분석하였다. LNG 공급압력의 영향은 10, 30, 50, 70기압 하에서의 잠열과 현열의 냉열에너지에 미치는 영향도 분석하였다^{7,8)}.

잠열이용률에 따른 냉열에너지와 소비에너지(액화기와 기화기)를 분석하기 위해 Table 3과 같은 조건에서 분석을 수행하였다. LNG는 -147℃,

Table 2. The Components of various LNG

Component	Lean (%)	Rich (%)	Typical (%)
Nitrogen	0.00	0.00	0.32
Methane	96.74	85.12	90.0
Ethane	1.89	8.63	6.26
Propane	0.68	4.13	2.3
i-Butane	0.34	1.10	0.63
n-Butane	0.34	0.90	0.49
i-Pentane	0.01	0.10	0.00
n-Pentane	0.00	0.01	0.00
Total (%)	100	100	100

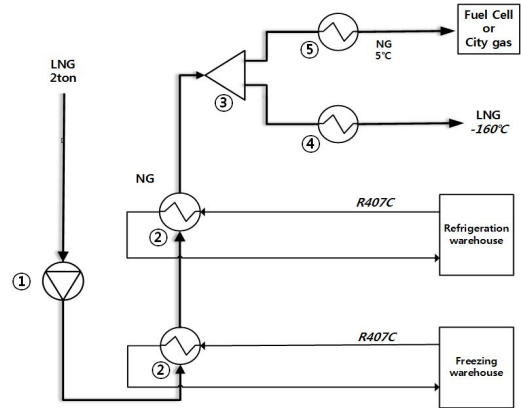


Fig. 2. Modeling of Refrigeration Warehouse using Cold Energy of LNG. 1. Pump, 2. LNG Heat Exchanger, 3. Mixer, 4. Re-Liquefaction, 5. Heater

Table 3. Vapor fraction vs. Cold energy amount

Vapor fraction (latent heat utilization)	Vapor(NG) Amount(kg/h)	Liquid(LNG) Amount(kg/h)
0	0	2,000
0.2	400	1,600
0.4	800	1,200
0.8	1,600	400
1.0	2,000	0

10기압, 2,000 kg/h로 열교환기에 들어가서 -54℃, 10기압으로 나오는 조건이며, 가열기에서 5℃로 상승하여 연료전지로 공급하는 것으로 가정하였다. 직렬로 연결한 열교환기 1과 2에서 순환하는 R407C 냉매는 Table 4와 같은 조건으로 하여 시뮬레이션을 실시하였다. 또한 냉매종류에 따른 열교환기에서의 냉매유량 변화를 분석하기 위해 냉동냉장창고의 입·출구온도와 열교환량을 동일한 조건하에서 Table 4와 같은 조건에서 실시하였다.

특히 열교환기로부터 LNG 냉열을 주고 나온 2,000 kg/h의 natural gas (NG) 중에서 1,700 kg/h는 가열기에 의해 NG를 5℃ 이상으로 높여 연료전지에 사용되고, 300 kg/h NG는 재액화기에서 액화되어 재순환하는 것으로 가정하여 시뮬레이션 한 결과를 Fig. 3에 나타냈다.

상기조건에 의해 시뮬레이션을 실시한 결과는

Table 4. Conditions of various refrigerants

Refrigerant Type	Freezing(S/F)			Refrigeration(F)		
	Press (atm)	IN (°C)	OUT (°C)	Press (atm)	IN (°C)	OUT (°C)
R407C	15	-62	-85	2.5	-35	-45
Propane	15	-62	-85	2.5	-35	-45
CO ₂	15	-62	-85	5.1	-57	-67

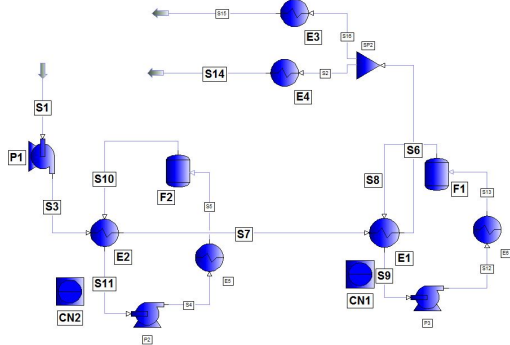


Fig. 3. Simulation of Refrigeration Warehouse System using Cold Energy of LNG by PRO II simulator

Fig. 2와 같이 나타났다.

3. 시뮬레이션 결과 및 토론

3.1 NG 이용량에 따른 주요장치의 소요에너지

앞서 언급한 것처럼 LNG에서 냉열을 활용하고 나온 NG는 연료전지나 도시가스로 활용되고, 남은 NG 가스는 액화기에서 액화되어 재순환된다. 다양한 시스템의 환경조건 하에서 NG 이용량에 따른 장치의 소요 에너지(=액화에너지+가열에너지)를 분석하여 Fig. 4에 나타냈다. 그림에서 보듯이 NG를 연료전지나 도시가스로 사용하면 사용할수록 액화할 가스가 낮아서 액화에 필요한 에너지는 낮아지는 반면, 연료전지와 도시가스에 사용에 가스의 온도가 5°C 이상이 되어야 하므로 기화기에서 소요되는 에너지는 증가된다. 또한 Fig. 4 그래프의 기울기에서 볼 때, 액화하는데 소요되는 에너지가 기화하는데 필요한 에너지에 비해 5.7배 많이 드는 것을 알 수 있다. 따라서 발생한 NG를

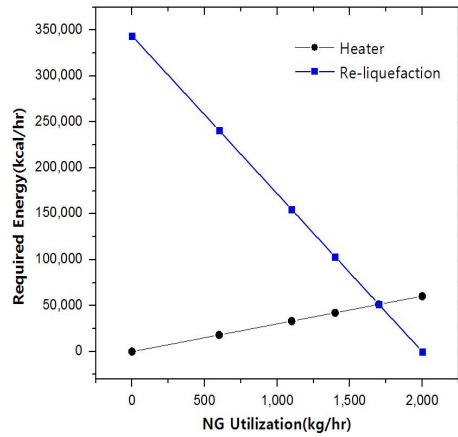


Fig. 4. Energy of Main Units required with the amount of NG consumption

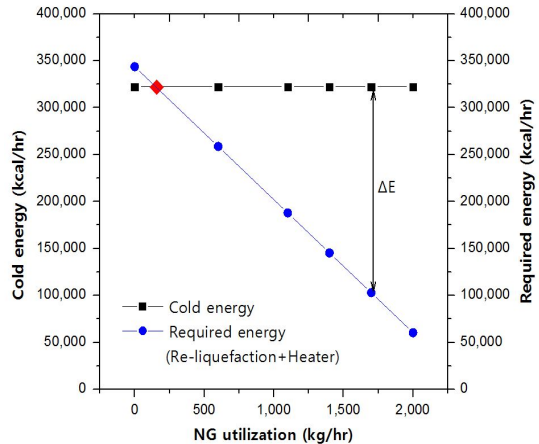


Fig. 5. Energy of Main Units required with the amount of NG consumption

전부 사용하는 것이 에너지측면에서 경제적인 효과가 크다.

3.2 NG 이용량에 따른 냉열에너지양의 변화

NG 이용량에 따라 소요에너지와 냉열에너지의 차이를 ΔE로 정의하여 Fig. 5에 나타냈다. 그림에서 보듯이 NG 이용량이 많을수록 ΔE가 증가하므로 LNG로부터 냉열에너지를 많이 얻을 수 있다. NG를 모두 사용할 때 냉열에너지로부터 얻은 최대 ΔE는 261,900 kcal/h 정도이다.

3.3 LNG의 잠열이용률에 따른 냉열에너지양 변화

LNG의 냉열에너지를 현열 이외에 잠열을 활용할 때 얻을 수 있는 냉열에너지를 LNG 잠열이용률에 따른 냉열에너지양을 Fig. 6에 나타냈다. 그림에 보듯이 잠열이용률이 증가하면서 냉열에너지는 증가하나 소요에너지는 감소한다. NG를 100% 사용한다고 가정했을 때, LNG의 76%를 잠열을 사용할 때 얻은 냉열에너지와 소요에너지양이 같다. 즉 얻은 냉열에너지를 시스템에 필요한 에너지로 모두 사용한다는 의미이다. 따라서 10기압 하에서는 에너지측면에서 LNG의 현열과 잠열 모두 이용하는 것이 바람직한 방안이다.

3.4 열교환기의 냉매종류에 따른 냉매유량 변화

앞서 언급한 것처럼 열교환기에서 LNG로부터 냉열을 얻은 냉매는 냉동·냉장창고에 들어가서

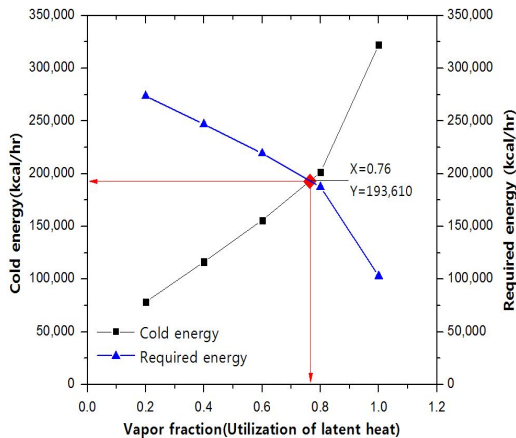


Fig. 6. The Effect of ratio of Latent Energy Utilization on Cold Energy and required Energy for Liquefaction or Heating of NG

Table 5. The change of refrigerant flow rate with various Refrigerants

Refrigerant Type	Flow Rate of Refrigerant (Kg/hr)		Heat Exchange (Kcal/hr)
	S/F	F	
R407C	10,748	84,472	322,200
Propane	6,035	46,951	
CO ₂	7,204	58,046	

동일한 냉열을 전달하는데 냉매종류에 따라 냉매유량의 결과를 Table 5에 나타냈다.

동일한 조건 하에서 열용량이 클수록 냉매유량이 적게 순환한다. 동일한 열교환량에서 냉매종류에 따른 냉매유량은 R407C > CO₂ > Propane 순으로 증가하기 때문에 냉매펌프의 동력도 동일한 순으로 증가한다. 환경친화적인 CO₂ 냉매를 사용할 경우 액상을 유지하기 위해 propane보다 높게 유지하거나 응축기가 추가로 필요하다.

3.5 LNG 공급압력에 따른 냉열에너지양 변화

LNG 공급압력에 따라 가능한 냉열에너지양의 구하고 가장 적합한 공급압력과 냉열에너지 관계를 구하고자 동일한 온도 조건하에서 공급압력에 따른 현열과 잠열에너지 변화량을 Fig. 7에 나타냈다. 그림에서 보듯이 공급압력이 증가함에 따라 현열은 증가하나 잠열은 감소하는 경향을 나타내고 있다.

Table 6. The cold energy for components of various LNG

Items		Lean	Rich	Typical
Summer (-130 ~ -70°C)	Cod Energy (106kcal/h)	6.666	5.945	5.834
Winter (-159 ~ -70°C)		9.135	7.463	8.166

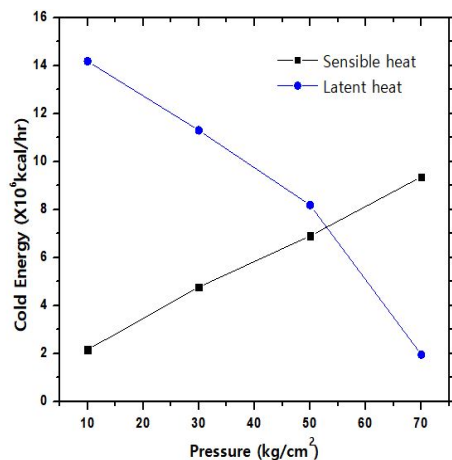


Fig. 7. The Effect of Supply Pressure of LNG on Latent and Sensible Energy

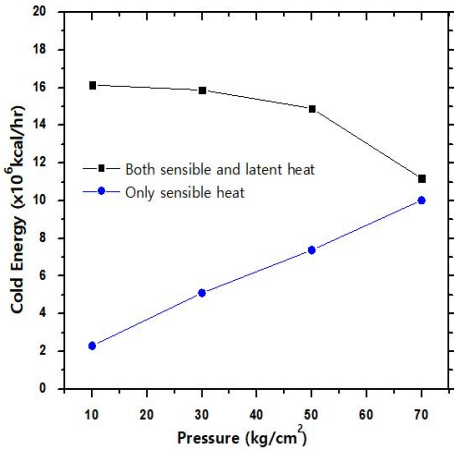


Fig. 8. The Effect of Latent Energy Utilization of LNG on Cold Energy and required Energy for Liquefaction or Heating of NG

공급압력에 따른 잠열+현열에너지와 잠열에너지의 변화량을 Fig. 8에 나타냈다. 그림에서 보듯이 LNG 기지에서 공급압력인 70기압에서 잠열에너지의 효과가 매우 미미한 결과를 알 수 있다. 공급압력이 증가하면서 잠열에너지 양이 감소하기 때문에 고압에서의 잠열에너지의 사용가치가 낮고, NG 상태로 회수하여 LNG 공급기지로 return 할 때 공정의 불안정으로 운전하는데도 불리하다.

4. 결론

LNG 냉열을 이용한 냉장·냉동창고를 모사하여 시뮬레이션한 결과는 다음과 같다.

1) 열교환기를 거쳐 기화된 NG가 도시가스 배관이나 연료지로의 사용량이 많을수록 기화기와 액화기에서 소요되는 에너지가 감소로 인해 ΔE (냉열에너지와 소요에너지의 차)가 증가되어 최대의 냉열에너지를 얻을 수 있다.

2) LNG에서 냉열에너지를 빼낸 NG를 모두 사용할 때 2.0톤의 냉열에너지는 최대 약 261,900 kcal/hr 활용 가능하다. LNG가 가지고 있는 잠열 이용률이 높아질수록 얻어지는 냉열에너지 이용률이 증가하여 잠열이 모두 이용될 때 에너지 활용이 가장 높고 잠열 이용률이 80%일 때, ΔE 는 13,900 kcal/hr이다.

3) 동일한 열교환량에서 냉매종류에 따른 냉매유량은 R407C > CO₂ > Propane 순으로 증가하기 때문에 냉매펌프의 동력도 동일한 순으로 증가한다.

4) LNG 공급압력이 증가함에 따른 잠열과 현열의 냉열에너지가 근접하다가 70기압에서는 냉열에너지 이용률이 비슷하다. LNG 공급압력이 70기압 이상인 경우에는 현열만 사용하는 것이 후처리 공정상 편리하기 때문에 유리하다.

후 기

본 연구는 산업자원부 산하 에너지기술평가원의 에너지기술개발신사업인 “LNG냉열(-100℃ 이상) 이용 냉동·냉장시스템 기술개발”의 과제로 지원을 받아 수행한 연구결과입니다. 이에 감사드립니다.

References

1. S. Z. Tian, S. Chen, and B. Yang, "Design of Liquefied Natural Gas Properties Calculation Software", Chemical Engineering of Oil and Gas, Vol. 43, 2014, pp. 254-261.
2. J. W. Wu, Y. M. Ma, and S. Q. Chen, "System Design and Analysis of Applying LNG Cold Energy to Refrigerated Warehouses", Journal of Jimei University (National Science), Vol. 15, 2010, p. 44-47.
3. Q. F. Liu and T. Lv, "Application and Research of LNG Cold Energy", Guangdong Chemical Industry, Vol. 41, 2014, p. 133-134.
4. Promotion Project for Promotion of Global Warming Countermeasures, "Toward the Dissemination of Fuel Conversion Business to Southeast Asia by Export of LNG Subsea Transport Facilities Technology", Nomura Research Institute, Japan, 2014.
5. J. H. Cho, "PRO II with PROVISION Practice for Process Engineer", AJIN Express, Korea, 2005.
6. J. H. Cho and R. H. Kim, "The Design of Chemical Process for Energy Saving", AJIN Express, Korea, 2007.
7. K. H. Yang and S. C. Wu, "Design Analysis of a Refrigerated Warehouse using LNG Cold Energy", Int'l J on Architectural Science, Vol. 4, No. 1, 2003, pp. 14-23.
8. J. Lian, B. Xia, Y. Yin, G. Yang, Y. Yang, X. Gou, E. Wang, L. Liu, and J. Wu, "Research on High Efficient Utilization of LNG Cold Energy", 4th Int'l Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, 2015, pp. 282-287.