

매트랩을 기반으로 한 U자형 금속 벨로우즈 설계소프트웨어 개발

장봉춘^{*}, 김성철¹
¹안동대학교 기계공학과

Development of U-shaped Metal Bellows design software based on MATLAB

BongChoon Jang^{*}, Sung-Chul Kim¹

¹Department of Mechanical Engineering, Andong National University

요 약 벨로우즈 제품은 플랜트 엔지니어링, 조선, 석유 화학의 분야에서 중요한 부분이다. 안전성 및 내구성을 위해 벨로우즈를 설계 할 때 많은 요인들을 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 EJMA 9th Edition 설명서를 기초로 하여 U자형 금속 벨로우즈 전용 설계 소프트웨어를 개발했다. 이 GUI 소프트웨어는 매트랩 소프트웨어를 사용하여 개발되었으며, 비보강 단일 벨로우즈, 비보강 복식 벨로우즈, 보강 단일 벨로우즈, 보강 복식 벨로우즈를 설계할 수 있다. 이 소프트웨어를 검증하기 위해 이미 검증된 벨로우즈 모델을 설계하고 두께를 변화시키면서 벨로우즈의 거동을 고찰하였다. 두께가 증가함에 따라 스프링상수, 추력, 응력은 증가하고 피로수명은 감소함을 알 수 있었다. 이 소프트웨어는 설계 엔지니어의 시간과 노력을 절약해 줄 것이다.

Abstract Bellows product is an important part in the area of plant engineering, shipbuilding and petrochemistry. For safety and durability it is necessary to consider lots of factors when designing it. This research developed a U-shaped metal bellows design software based on EJMA 9th Edition manual. This GUI software was developed by using Matlab software and can be able to design four types of bellows, Unreinforced Single Bellows, Unreinforced Double Bellows, Reinforced Single Bellows and Reinforced Double Bellows. The already proven bellows model was designed to verify this software. We investigated the behavior while changing the thickness of the bellows. As the thickness of bellows increases, spring rate, thrust force, stress increase and fatigue life decreases. This software will be helpful design engineers save time and effort.

Key Words : Bellows, EJMA, Fatigue Life, Matlab GUI, Stress

1. 서론

벨로우즈(Bellows)는 제철업, 플랜트, 석유화학, 발전소, 담수화 사업, 조선업, 자동차 부품, 반도체 장비, 일반 산업용 자재, 일반 가정에서도 매우 광범위하게 적용되는 부품이다. 벨로우즈는 관의 열팽창에 의한 축 변형이나 온도변화, 지반침하 등으로부터 설비를 보호할 목적으로 설치한다.

벨로우즈를 설계 [1-5]함에 있어서 형상이 복잡하여 압력으로 인한 막응력과 굽힘응력, 변위에

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2014년도 산학연공동기술개발사업(No. C01813260100413545)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

*Corresponding Author : BongChoon Jang(Andong National Univ.)

Tel: +82-10-5132-4081 email: bjang@andong.ac.kr

Received December 10, 2014

Revised (1st February 17, 2015, 2nd March 20, 2015)

Accepted April 9, 2015

Published April 30, 2015

의한 막응력과 굽힘응력, 피로수명, 최대허용변형 등 설계에 필요한 데이터를 구하는 데 상당한 어려움이 있다. 벨로우즈(Bellows) 설계자는 하나의 제품을 설계하기 위해 수많은 파라미터들의 값을 변경하며 장시간에 걸쳐 반복적인 계산을 수행해야 한다. 이렇게 설계된 벨로우즈(Bellows)는 설계자의 피로와 설계의 비효율성으로 인해 제품의 신뢰도가 떨어지는 결과를 초래한다.

따라서 벨로우즈 수요처들의 요구에 부합하고 신뢰할 수 있는 벨로우즈를 만들기 위해서는 설계 단계에서부터 검증된 에스마 매뉴얼(EJMA 9th Edition[6])을 바탕으로 설계를 자동으로 처리할 수 있는 설계자동화 소프트웨어의 개발이 요구된다.

본 연구에서 개발한 U자형 금속 벨로우즈 설계 소프트웨어는 매트랩(MATLAB) GUI[7]를 이용해 개발되었다. 이는 프로그램 코드에 대한 접근성을 용이하게 하고 프로그램 오류가능성을 최소화하면서 프로그램 사용자가 설계 허용조건을 만족하는 지 쉽게 확인할 수 있으며 설계 변경을 용이하게 할 수 있게 되었다.

2. 설계이론 (EJMA 9th Edition)

이 장에서는 수많은 경험으로 검증된 에스마(EJMA)의 설계식 중에서 벨로우즈 설계에 있어서 가장 중요한 인자로 여겨지는 파형당 축방향 변형, 스프링상수, 축방향 힘, 횡방향 힘, 모멘트, 응력, 피로수명에 대한 식을 선별하여 기술할 것이다.

그림 1은 벨로우즈의 탄젠트 길이(L_t), 벨로우즈 산의 전체길이(L_b), 탄젠트의 외경(D_b), 산 높이(w), 피치(q), 칼라링 길이(L_c), 칼라링 두께(t_c), 벨로우즈 두께방향 겹수(n), 벨로우즈 두께(t)에 대한 기하학적 형상정보를 표시한 것이다.

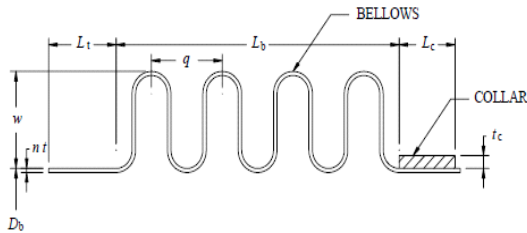


Fig. 1. Geometric Parameters of Bellows

축방향 변위 x 에 의한 파형당 축방향 변형, 횡방향 변위 y 에 의한 파형당 축방향 변형, 각 변위 θ 에 의한 파형당 축방향 변형은 에스마 설계식에 기초해 다음과 같이 산출한다.

$$e_x = \frac{x}{N} \quad (1)$$

$$e_y = \frac{3D_m y}{N(L_b \pm x)} \quad (2)$$

$$e_\theta = \frac{\theta D_m}{2N} \quad (3)$$

축방향 힘, 횡방향 힘 및 모멘트를 구하기 위해 식 4-5와 같이 스프링상수(f_w)를 산출할 수 있다.

$$f_i = 1.7 \frac{D_m E_b t_p^3 n}{w^3 C_f} \quad (4)$$

$$f_w = f_i \quad \text{for } S_t < 1.5 S_y \quad (5)$$

$$= 0.67 f_i \quad \text{for } S_t > 1.5 S_y$$

축방향 힘, 횡방향 힘 및 모멘트를 식 6-9과 같이 계산한다.

$$F_a = f_w e_x \quad (6)$$

$$V_l = \frac{f_w D_m e_y}{2(L_b \pm x)} \quad (\text{for lateral movement}) \quad (7)$$

$$M_l = \frac{f_w D_m e_y}{4} \quad (\text{for lateral movement}) \quad (8)$$

$$M_\theta = \frac{f_w D_m e_\theta}{4} \quad (\text{for angular rotation}) \quad (9)$$

압력으로 인한 막응력(S_3)과 굽힘응력(S_4), 변위에 의한 막응력(S_5)과 굽힘응력(S_6)은 식 10-14와 같이 계산할 수 있다.

$$S_3 = \frac{Pw}{2nt_p} \quad (10)$$

$$S_4 = \frac{P}{2n} \left(\frac{w}{t_p} \right)^2 C_p \quad (11)$$

$$S_5 = \frac{E_b t_p^2 e}{2w^3 C_f} \quad (12)$$

$$S_6 = \frac{5E_b t_p e}{3w^2 C_d} \quad (13)$$

$$S_t = 0.7(S_3 + S_4) + (S_5 + S_6) \quad (14)$$

벨로우즈에 대한 피로수명(N_c)은 파손될 때까지의 사이클수로 나타내며 전체응력에 반비례한다. 피로수명을 계산하는 식은 다음과 같다.

N_c = Fatigue life, number of cycles to failure (cycles)

$$N_c = \left(\frac{c}{S_t - b} \right)^a \quad (15)$$

3. 벨로우즈 설계 소프트웨어

본 연구에서는 MATLAB GUI를 이용한 벨로우즈 설계 자동화 소프트웨어인 Bellows Designer를

개발하였다.

신축이음관(Expansion Joint)은 비보강 단일 신축이음(Unreinforced Single Type), 비보강 복식 신축이음(Unreinforced Double Type), 보강 단일 신축이음(Reinforced Single Type), 보강 복식 신축이음(Reinforced Universal Type)으로 구분할 수 있다. Bellows Designer는 위 4가지 조건의 벨로우즈를 설계할 수 있도록 개발되었다.

벨로우즈 설계 소프트웨어를 실행하기 위해 매트랩에서 벨로우즈 설계 소프트웨어를 실행시키면 그림 2에 나타난 바와 같이 벨로우즈 설계 소프트웨어 초기화면이 나타난다. 초기화면은 벨로우즈 파라미터 입력부분, 칼라링(Collar Ring)의 파라미터 입력부분, 보강링(Reinforcing Ring)의 파라미터 입력부분, 화스너(Fastner)의 파라미터 입력부분으로 구성되어 있다. 보강링은 통합형, 화스너 방식이 있으며, 여기서 화스너는 보강링을 체결하여 고정시키는 역할을 한다.

그림 2의 좌측은 벨로우즈의 재질, 사이즈, 열처리여부, 온도, 압력 등의 파라미터들을 입력하는 영역이고 우측은 보강링(Reinforcing Ring)에 대한 재질, 화스너(Fastener) 부품의 사용여부, 사이즈, 그리고 화스너의 재질, 사이즈 등을 입력하는 영역이다.

일반적으로 벨로우즈에 많이 사용하는 재질의 응력 및 탄성계수에 대한 데이터는 매트랩 파일과 마이크로소프트 엑셀 파일로 저장되어 있다. 그림 2에서 재질을 선택하면 응력, 탄성계수에 대한 데이터는 자동으로 업데이트된다.

그림 2의 하단 우측에서 ‘Run & See Reports’ 버튼을 누르면 벨로우즈 설계 해석 결과인 벨로우

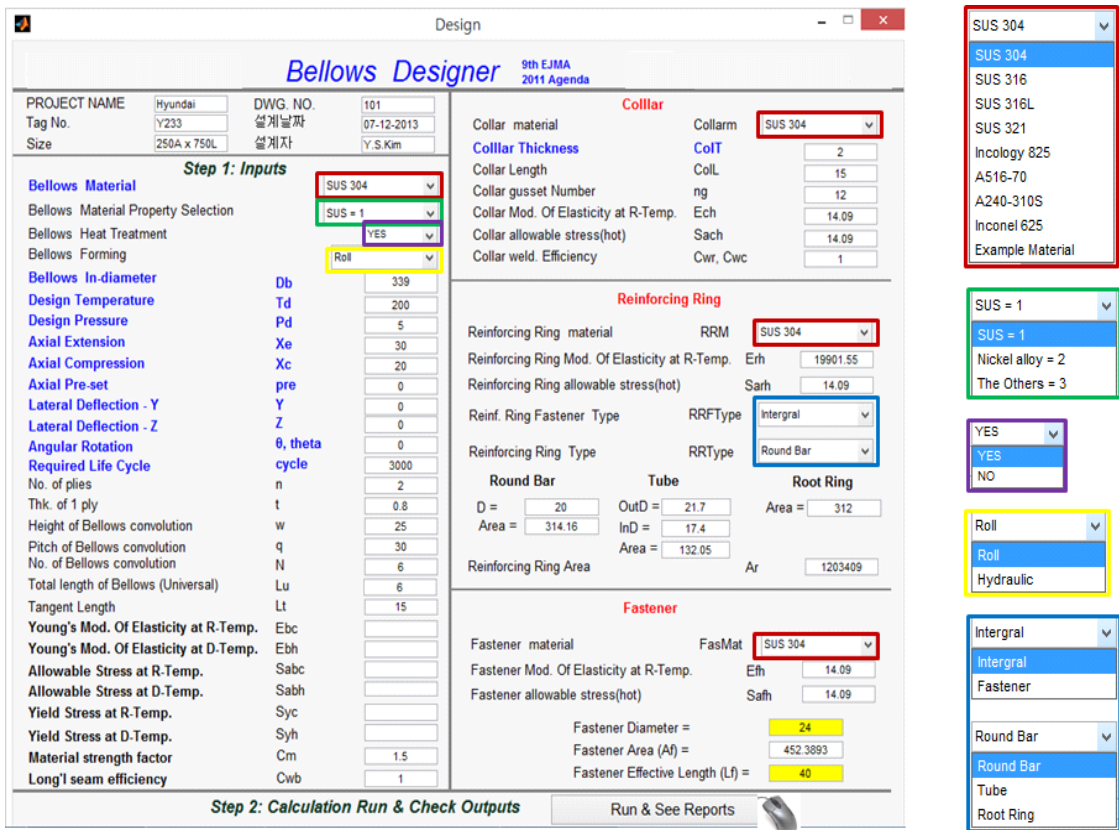


Fig. 2. Parameters input process

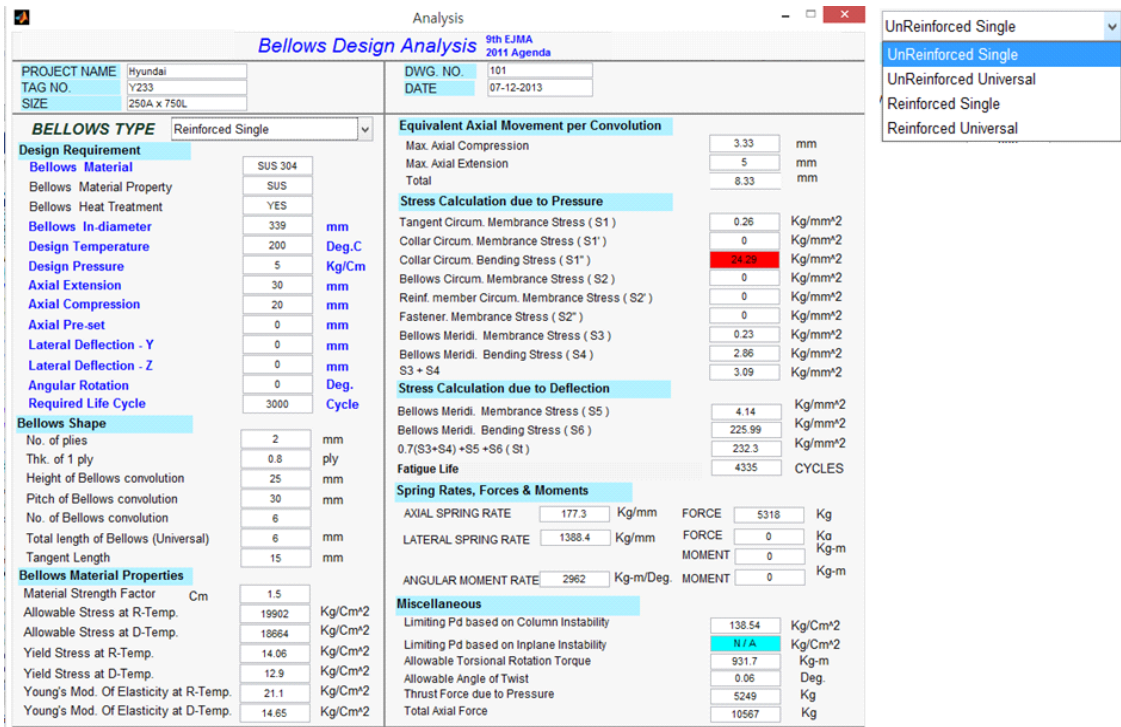


Fig. 3. Analysis and calculation process

즈 설계해석(Bellows Design Analysis) 화면이 열린다.

그림 3에서 보는 바와 같이 벨로우즈 형태를 선택하면 축방향 변위 x 에 의한 파형당 축방향 변형, 횡방향 변위 y 에 의한 파형당 축방향 변형, 각 변위 θ 에 의한 파형당 축방향 변형을 계산하고 이를 합산하여 전체 축방향 변형(e)을 계산하여 나타낸다. 또한 스프링상수(f_w)를 계산하여 나타내고 압력으로 인한 막응력(S_3)과 굽힘응력(S_4), 변위에 의한 막응력(S_5)과 굽힘응력(S_6) 등을 계산하여 나타낸다. 위에서 계산된 응력에 대한 제한조건은 다음과 같다.

$$S_1 S_2 \leq C_{wb} W_b S_{ab} \quad (16)$$

$$S_3 + S_4 \leq C_m S_{ab} \quad (\text{Below the Creep Range}) \quad (17)$$

이 조건을 만족하지 못하는 경우 붉은색으로 경고표시가 된다. 또한 초기에 입력한 설계조건을 만족하지 못하는 경우에도 붉은색의 경고표시가 된다. 이 경우 이전 단계로 넘어가 설계조건을 변화시키면서 재설계할 수 있다.

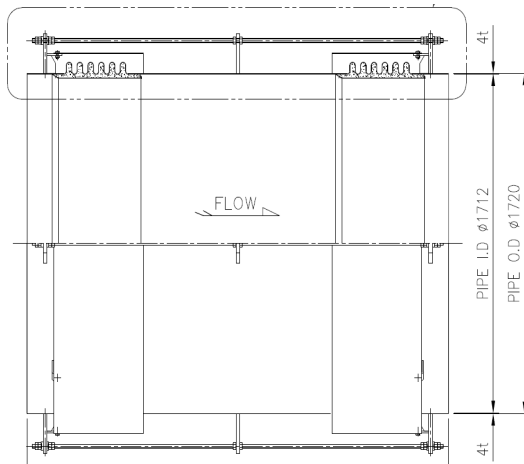


Fig. 4. Bellows model

4. 소프트웨어 검증

그림 4에서 보는 바와 같이 이미 검증된 벨로우즈 모델을 선정하여 벨로우즈의 거동을 살펴봄으로써 본 연구에서 개발한 소프트웨어를 검증하였다.

표 1은 두께변화에 따른 피로수명, 추력, 축방향 스프링상수, 횡방향 스프링상수, 응력을 나타내며, 단위는 각각 *cycle*, *kgf*, *kgf/mm*, *kgf/mm²*를 사용하였다.

Table 1. Calculation result

Thickness	0.8	1	1.2	1.4	1.6
Fatigue Life	283295	59690	19941	9013	4706
Thrust Force	4936.7	4937.8	4938.9	4940	4941.1
Axial Spring Rate	4.948	9.277	15.582	24.477	36.222
Lateral Spring Rate	5.791	10.858	18.243	28.664	42.427
Total Stress	70.58	89.52	109.12	127.83	146.75

위의 식 4에서 스프링상수는 두께의 세제곱에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 따라서 그림 5-6에서 보는 바와 같이 벨로우즈의 두께가 증가할수록 스프링상수가 증가한다. 이로 인해 그림 7-8과 같이 축력과 응력이 증가한다. 이 때 식 15에서 알 수 있듯이 피로수명은 응력에 반비례한다. 즉, 두께가 증가하면 응력이 증가하므로 그림 9와 같이 피로수명은 급격히 감소함을 볼 수 있다.

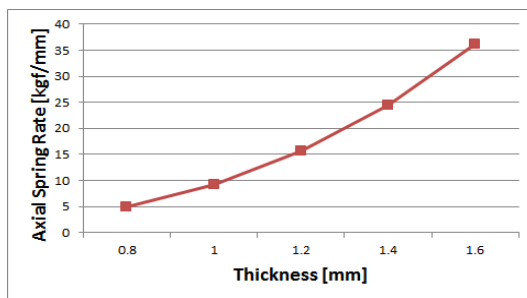


Fig. 5. Axial spring rate with varying thickness

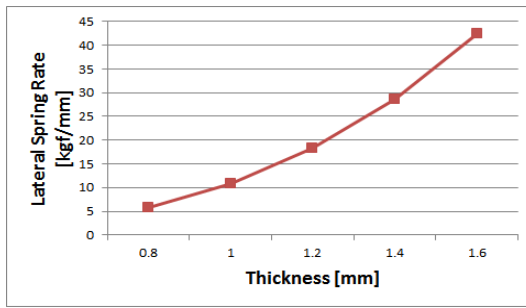


Fig. 6. Lateral spring rate with varying thickness

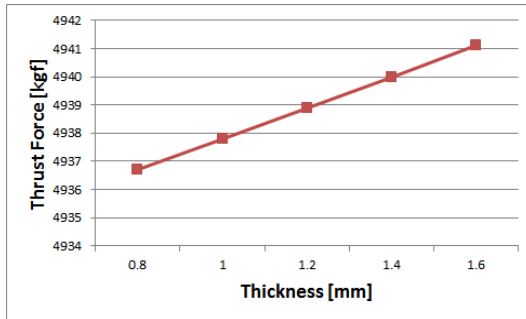


Fig. 7. Thrust force with varying thickness

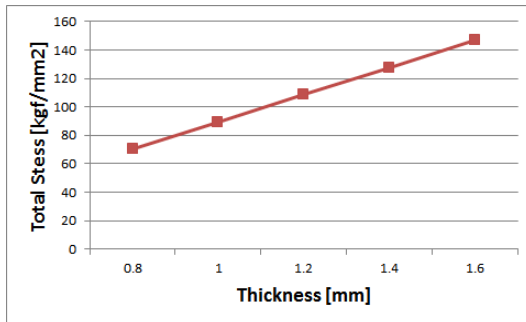


Fig. 8. Total stress with varying thickness

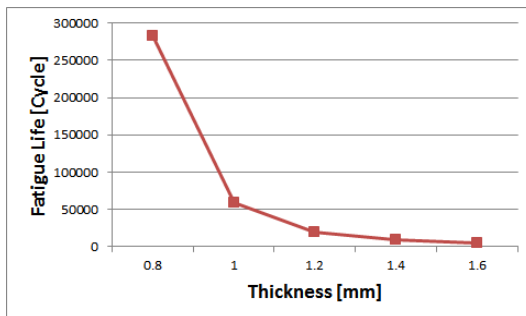


Fig. 9. Fatigue life with varying thickness

5. 결론

본 연구에서는 EJMA 9th Edition의 설계식을 기초로 하여 벨로우즈 설계 자동 소프트웨어인 Bellows Designer를 개발하였다. 본 소프트웨어는 프로그램 코드에 대한 접근성을 용이하게 하여 프로그램 오류가능성을 줄이고 보안을 강화하기 위해 매트랩 GUI를 이용하였다.

Bellows Designer는 U자형의 벨로우즈를 사용하는 비보강 단일 신축이음(Unreinforced Single Type), 비보강 복식 신축이음(Unreinforced Double Type), 보강 단일 신축이음(Reinforced Single Type), 보강 복식 신축이음(Reinforced Universal Type)을 설계할 수 있도록 개발하였다.

이 소프트웨어를 검증하기 위해 이미 검증된 벨로우즈 모델을 설계하고 두께를 변화시키면서 벨로우즈의 거동을 고찰하였다. 두께가 증가함에 따라 스프링상수, 추력, 응력은 증가하고 피로 수명은 감소함을 알 수 있었다.

이렇게 Bellows Designer에 의해 계산된 결과가 제한조건을 만족시키지 못하거나 초기에 입력한 설계조건을 만족하지 못하는 경우에는 이전 단계로 넘어가 설계조건을 변화시키면서 재 설계할 수 있다. 본 소프트웨어는 벨로우즈 관련 설계자들에게 편리함과 시간절약의 혜택을 제공하고 설계의 신뢰성을 높일 수 있다.

References

- [1] J. B. Kim, "The Analysis for the Stress of the Flexible Tube in an Automotive Exhaust System", *Proceedings of the KAIS Fall Conference*, pp. 546-549, 2009.
- [2] G. H. Kang, C. S. Kim, "Nonlinear Analysis of Rubber Bellows for the High Speed Railway Vehicle", *KAIS*, Vol. 14, No. 8, pp. 3631-3637, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.8.3631>
- [3] C. S. Chung, "The Evaluation of the Structural Integrity of Bellows Globe Valve for Nuclear Power ", *KAIS*, Vol. 7, No. 6, pp. 1034-1039, 2006.
- [4] K. Tsukimori, "Fatigue and Creep -Fatigue Life Evaluation of U-shaped Bellows", *ASME, Journal of Pressure & Vessels Technology*, Vol. 114, pp. 280-291, 1992.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2929042>
- [5] L. Yang, M. Yang, F. Liu, G. Yang, "Optimization Design of the U-shaped Metal Bellows ", Available From <http://worldcomp-proceedings.com/proc/p2012/MSV7537.pdf>, (accessed Dec., 9, 2014)
- [6] Expansion Joint Manufacturers Association, Inc., "Standards of the Expansion Joint Manufacturers Association, Ninth Edition", 2010
- [7] C. Lim, "Matlab GUI Programming", Ajin, 2005.

장 봉 춘(Bongchoon Jang)

[정회원]



- 1996년 3월 : 오하이오주립대 기계공학과 공학석사
- 2000년 6월 : 캘리포니아주립대 기계공학과 공학박사
- 2000년 9월 ~ 2003년 2월 : 미국 General Motors Tech. Center, Team Leader
- 2003년 3월 ~ 현재 : 안동대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

머신비전, 메카트로닉스, 차량동역학 및 제어

김 성 철(SungChul Kim)

[준회원]



- 2011년 3월 ~ 현재 : 안동대학교 기계공학과 대학원생

<관심분야>

메카트로닉스, 프로엔지니어 활용 시스템 설계