

자유유동 난류강도가 터빈 캐스케이드내 3차원 난류유동 특성에 미치는 영향에 관한 전산해석

윤덕규* · 이우상** · 김대현*** · 정진택****

Numerical Analysis on Effects of Free-Stream Turbulence Intensity on the Three-dimensional Turbulent Flow Characteristics in a Turbine Cascade

Deok-Kyu Yoon*, Wu Sang Lee**, Dae Hyun Kim*** and Jin Taek Chung****

Keywords : Gas Turbine(가스터빈), Turbine Cascade(터빈 캐스케이드), Secondary Flow(이차유동), Horse Vortex(말굽와류), Passage Vortex(통로와류), Free-Stream Turbulence Intensity(자유유동 난류강도)

Abstract

The objective of this study is to determine the influence of free-stream turbulent intensity on the three-dimensional turbulent flow in a linear turbine cascade. The range of free-stream turbulence intensity considered is 0.7~10%. This study was performed numerically. The results show that the mass averaged loss coefficient increased according to the increase of free-stream turbulence intensity due to increased value of the mass averaged total pressure loss coefficient which was higher than the decreased value of the mass averaged secondary flow loss coefficient. The loss coefficient distribution was changed suddenly at a free-stream turbulence intensity of 10% while the loss coefficient distribution was rarely changed at a lower free-stream turbulence intensity of 5%.

미치는 영향에 관해 전산해석을 통하여 연구하고자 한다.

1. 서론

실제의 터빈에서 연소실을 통과한 고온의 가스는 매우 강한 난류가 되므로 자유유동 난류강도가 터빈 캐스케이드내 유동특성에 어떤 영향을 미치는지에 대한 연구가 필요하다. 자유유동 난류강도는 터빈 캐스케이드내 속도, 압력, 이차유동, 난류운동 에너지 등의 변화에 영향을 미치게 되고, 열전달 특성을 결정하는 매우 중요한 역할을 하는 요인이다. Zhang과 Han[1]은 자유유동 난류강도가 터빈 블레이드의 열전달에 미치는 영향을 연구하였으며, 이를 통하여 자유유동 난류강도가 흡입면의 열전달에 많은 영향을 미친다는 것을 밝혔다. Lee[2]등은 자유유동 난류강도가 증가할수록 말굽와류(horseshoe vortex)효과가 감소됨을 밝혔다. 이[3]는 3차원 형상의 블레이드를 2차원으로 근사화한 블레이드의 미드스팬에서 레이놀즈수와 초기 난류강도의 변화에 따른 유동특성을 연구하였다. 그러나 기존의 연구는 2차원으로 근사화한 실험에 의존하거나 제한된 범위에 대한 측정만이 수행되었고, 따라서 통로 내부에서의 3차원 난류 유동변화와 이차유동손실분포, 전압손실분포 등에 대한 다양한 정보를 얻지 못했다. 따라서 본 연구에서는 자유유동 난류강도를 변화시키면서 자유유동 난류강도가 터빈 캐스케이드내 3차원 난류유동 특성에

2. 터빈 캐스케이드 모델 및 유동해석 방법

2.1 터빈 캐스케이드 모델 및 유동해석 방법

본 연구에서 모델링한 블레이드는 이[4]의 실험에서 사용된 블레이드이며, 입구각 -35° , 출구각 72.5° 로 107.5° 의 선회각을 갖는다. 그 외 터빈 캐스케이드의 형상 및 주요 치수는 Table 1에 나타내었다.

2.2 유동해석 방법

본 연구에서는 터보기계의 유동해석에 주로 사용되는 상용 프로그램인 CFX Version10을 사용하였다. 대류항의 이산화 기법은 High Resolution Scheme을 사용하였으며, 난류방정식은 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다. 유동에 관해 정상적이고 주기적이라는 가정을 통해 하나의 유로만을 모델링하여 해석하였다. 그리고 해석에 사용된 블레이드의 aspect ratio가 크기 때문에 모든 조건

Table 1 Geometry of the cascade

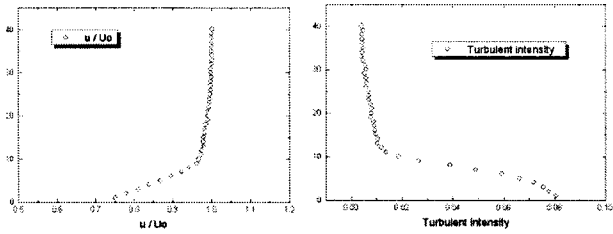
Chord (C)	230 mm
Axial chord to chord ratio (C_{ax}/C)	0.704
Aspect ration (H/C)	2.0
Solidity (C/P)	1.33
Blade inlet angle	-35°
Blade outlet angle	72.5°
Turning angle	107.5°
Incidence angle	0°

* 고려대학교 기계공학과 대학원, ydk9858@korea.ac.kr

** 고려대학교 기계공학과 대학원, leewusang@korea.ac.kr

*** 고려대학교 기계공학과 대학원, neopriest@korea.ac.kr

**** 고려대학교 기계공학과, jchung@korea.ac.kr



(a) Velocity distribution (b) Turbulent intensity distribution
Fig. 1 Boundary conditions of inlet flow

이 미드스팬에 대하여 대칭이라고 가정하여 미드스팬에 대칭조건을 설정하였다. 우선, 해석의 타당성을 검증하기 위해 입구 유동조건은 Fig. 1과 같이 이[4]의 실험과 동일한 조건을 사용하였다. 유입되는 자유유동의 속도는 12m/s이고 입구 레이놀즈수는 블레이드의 코드 길이를 바탕으로 약 1.9×10^5 이며 입구경계층두께는 24mm이다. 입구 난류강도는 실험 데이터를 사용하여 경계층을 제외하고 0.7% 이내로 주었다. 이 때 경계층영역을 포함한 질량평균 입구 난류강도는 약 1.5%였다. 난류성분은 식 (1)-(2)를 이용하여 k , ϵ 성분으로 계산하여 대입하였다. 여기서 난류 점성비는 고[5]에서 사용된 값인 10을 사용하였다. 그 후 입구에서의 자유유동 난류강도를 1%, 5%, 10%로 변화시키면서 해석을 수행하여 자유유동 난류강도가 터빈 캐스케이드내 3차원 난류유동 특성에 미치는 영향을 알아보았다. 출구조건에는 $Ma < 0.1$ 의 비압축성 유동이라 생각하여 Average Static Pressure를 0으로 놓고 압력변화를 계산함으로써 터빈 캐스케이드내 유동의 특성을 파악하였다. 온도조건은 Isothermal로 하여 유체내부에 297.98K로 일정한 온도를 주었고 벽에서의 열전달은 없다고 가정하였다. 작동유체로는 공기를 사용하였으며 이상기체로 가정하였다.

$$k = \frac{3}{2} (I_t \times U_\infty)^2 \quad I_t = \left| \frac{u'}{U} \right| \quad (1)$$

$$\epsilon = \rho_\infty C_\mu \frac{k^2}{\mu \times 10} \quad (2)$$

해석에 사용된 계산 격자는 Gambit을 사용하여 생성되었으며 ICEM-CFD를 사용하여 CFX-10에서 해석할 수 있도록 격자파일을 변환시켰다. 계산에 사용된 격자수는 27만개이고 격자의 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

3. 유동해석 결과 및 고찰

본 연구의 목적인 자유유동 난류강도가 터빈 캐스케이드내 3

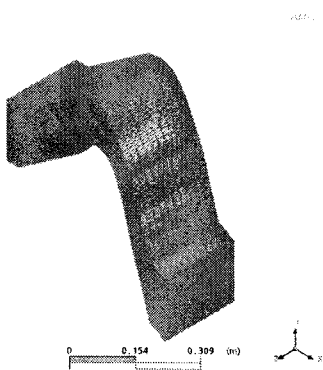


Fig. 2 Computational grid of the cascade

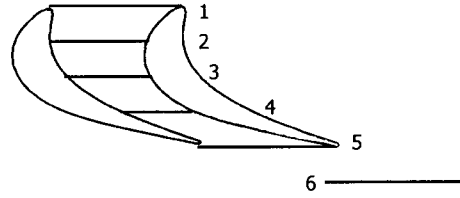


Fig. 3 Definition of the planes for view.

차원 난류유동 특성에 미치는 영향을 고찰하고, 도시하기 위하여 축방향에 수직인 평면들을 Fig. 3과 같이 통로내부와 통로 하류에 설정하였다. 도시용 평면은 블레이드의 축방향 코드를 4등분하여 5개의 평면을 설정하였으며, 같은 간격으로 블레이드 뒷전의 하류에 1개의 평면을 추가로 설정하였다. $x/C_{ax} = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25$ 인 평면을 각각 평면 1, 평면 2, 평면 3, 평면 4, 평면 5, 평면 6라고 명명하였다. 본 연구에서는 평면 3과 평면 6에 대한 이차유동 속도벡터를 도시하여 이차유동의 분포를 고찰하였고, 전압손실계수를 도시하여 손실의 발생과정을 고찰하였다. 그리고 각 평면들에서 질량평균 이차유동손실계수, 전압손실계수, 전체압력손실계수 값들을 계산하여 자유유동 난류강도가 터빈 캐스케이드내 3차원 난류유동 특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

3.1 실험 결과와의 비교

본 연구에서는 계산결과의 타당성을 검증하기 위해, 이[4]의 실험결과와 비교하였다. Fig. 4는 통로 하류의 이차유동 속도 벡터를 실험결과와 비교한 그림이며, 왼쪽 그림이 실험결과이고 오른쪽 그림이 본 연구의 계산결과이다. 실험결과를 보면 압력면 말굽와류 성분이 흡입면으로 이동하면서 상승 발달한 통로와류가 나타남을 관찰할 수 있다. 계산결과를 보면 이러한 통로와류가 나타나고 있으며, 그 중심의 위치가 비슷함을 알 수 있다.

3.2 자유유동 난류강도가 이차유동손실에 미치는 영향

미드스팬에서의 유동을 끝벽의 영향을 받지 않는 주유동이라고 정의하고, 스펠방향을 따라 각 지점에서의 속도벡터와 주유동 속도 벡터와의 차이를 나타내는 벡터를 이차유동 속도 벡터로 정의하였다. 이러한 이차유동 속도분포를 평면 3과 평면 6에 대하여 도시하였다.

Fig. 5는 블레이드 통로 중간에 위치한 평면 3에서의 자유유동 난류강도의 변화에 따른 이차유동 속도분포를 나타낸 그림이다. (a), (c), (d)는 입구 자유유동 난류강도가 각각 1%, 5%, 10%

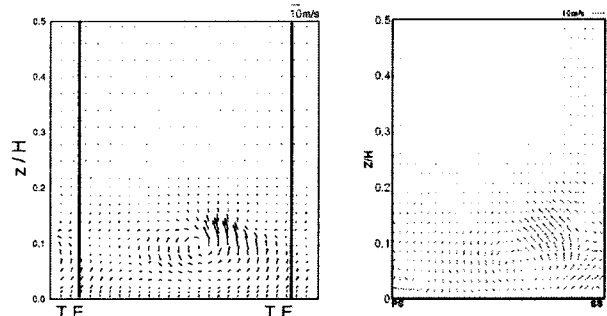
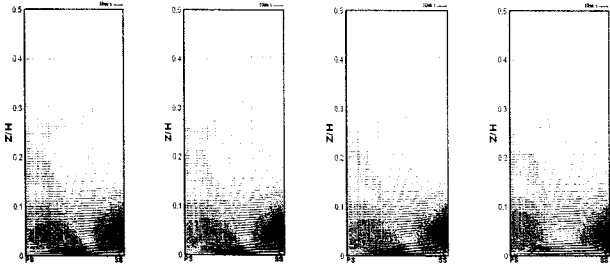
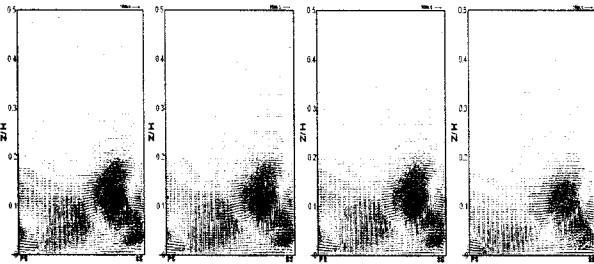


Fig. 4 Comparison of the secondary flow vector at plane 6 with the experimental data



(a)intensity1% (b)intensity1.5% (c)intensity5% (d)intensity10%

Fig. 5 Vector plot of secondary velocities at plane 3



(a)intensity1% (b)intensity1.5% (c)intensity5% (d)intensity10%

Fig. 6 Vector plot of secondary velocities at plane 6

일 때이고, (b)는 입구 자유유동 난류강도가 0.7%미만이지만 경계층 영역내의 난류강도가 높아 전체적으로 질량평균 입구 난류강도가 약 1.5%인 경우이다. 자유유동 난류강도가 증가함에 따라 말굽와류(horseshoe vortex)효과가 감소되면서 통로와류의 크기가 작아졌고 흡입면과 접하는 부근에 상승류도 약화되었다. 이것은 자유유동 난류강도가 증가할수록 말굽와류(horseshoe vortex)효과가 감소됨을 밝힌 Lee[2]의 결과와 일치한다. (b)의 경우 (a)와 비교할 때 자유유동 난류강도는 작지만 경계층내의 난류강도가 커서 전체적인 질량평균 입구 난류강도가 (a)에 비하여 컸고, 이차유동 속도벡터의 크기는 (a)에 비해 감소하였다. 하지만 자유유동 난류강도가 5%이하인 (a), (b), (c)의 경우 이차유동 속도벡터 분포에서 뚜렷한 변화를 보이지 않았다. 반면에 난류강도가 10%인 (d)의 경우 말굽와류(horseshoe vortex)효과가 급격하게 감소되면서 통로와류의 크기가 작아졌고 흡입면과 접하는 부근에 상승류도 약화된 것을 뚜렷하게 관찰 할 수 있다. 그리고 말굽와류의 중심도 자유유동 난류강도가 5%이하일 때에 비해 압력면쪽에 있음을 관찰할 수 있다. 이는 자유유동 난류강도의 증가에 따라 압력면 말굽와류 성분이 흡입면으로 이동하면서 상승 발달하는 것을 지연시키기 때문이다.

Fig. 6은 통로 하류에 위치한 평면 6에서의 자유유동 난류강도의 변화에 따른 이차유동 속도분포를 나타낸 그림이다. 블레이드 뒷전 하류에서도 평면 3에서와 마찬가지로 난류강도가 5% 이하일 때는 이차유동 속도 분포가 크게 변하지 않았지만, 난류강도가 10%일 때는 통로와류의 크기가 작아졌고 흡입면과 접하는 부근에 상승류도 크게 약화되었다.

Fig. 7은 각 평면에 대하여 식(3)에서 정의된 이차유동 손실계수의 질량평균을 도시한 그림이다. 모든 평면에 대하여 자유유동 난류강도가 높아짐에 따라 이차유동손실이 감소하였다. 하지만 자유유동 난류강도가 5%이하일 일 때는 자유유동 난류강도의 증가에 따라 이차유동손실은 감소했으나 뚜렷한 변화가 없었다. 반면에 자유유동 난류강도가 10%일 때는 질량평균 이차유동손실계수가 크게 감소하였다. 이는 자유유동 난류강도의 임계값이 존재하고 난류강도가 이 임계값을 넘어서는 급격히 이차유동손실이 감소하기 때문이다. 이것은 자유유동에서 초기 난류강도 변화에 따른 흡입면에서 표면정압계수분포의 형태가 급격히

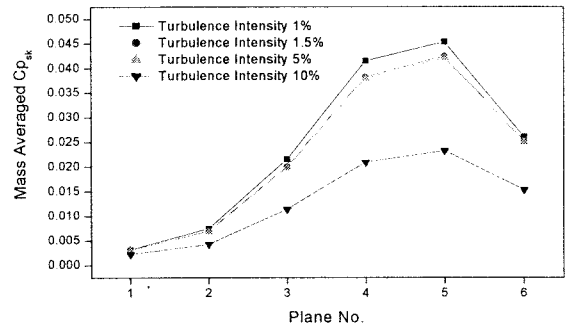


Fig. 7 Mass averaged secondary loss coefficient at each plane

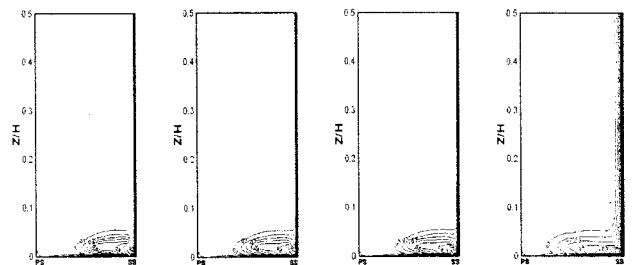
변하는 임계값이 존재한다는 이[3]의 연구와 상호 연관성이 있다.

$$\overline{Cp}_{sk} = \frac{\sum_i \sum_j (Cp_{sk} u d A)_{ij}}{\sum_i \sum_j (u d A)_{ij}} \quad (3)$$

3.3 자유유동 난류강도가 전압손실에 미치는 영향

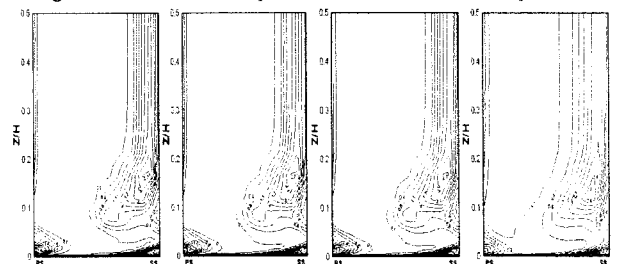
Fig. 8은 평면 3에서 자유유동 난류강도의 변화에 따른 전압손실계수를 나타내고 있다. 자유유동 난류강도가 5%이하인 (a), (b), (c)인 경우, 자유유동 난류강도가 증가함에 따라 평균유동과 난류사이에서 운동에너지가 교환되면서 전압손실계수의 크기는 증가하나 커다란 변화는 없었다. 반면에 자유유동 난류강도가 10%인 (d)의 경우 흡입면을 따라 난류 경계층이 발달하면서 전압손실이 크게 증가하였다.

Fig. 9는 평면 6에서 자유유동 난류강도의 변화에 따른 전압손실계수를 나타내고 있다. 통로 하류에서도 평면 3에서와 마찬가지로 자유유동 난류강도의 증가에 따라 평균유동과 난류사이에서 운동에너지가 교환되면서 전압손실이 증가함을 알 수 있다. 하지만 자유유동 난류강도가 5%이하일 때는 전압손실분포에 뚜



(a)intensity1% (b)intensity1.5% (c)intensity5% (d)intensity10%

Fig. 8 Contour of total pressure loss coefficient on plane 3



(a)intensity1% (b)intensity1.5% (c)intensity5% (d)intensity10%

Fig. 9 Contour of total pressure loss coefficient on plane 6

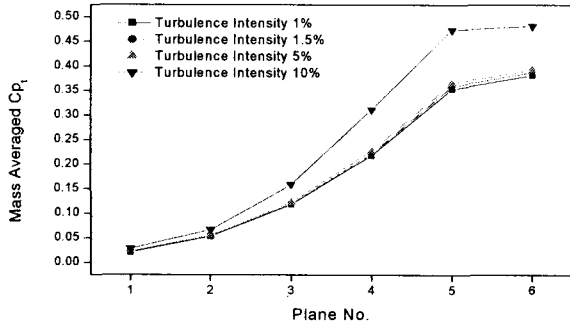


Fig. 10 Mass averaged total pressure loss coefficient at each plane

렸한 변화가 없었다. 반면에 자유유동 난류강도가 10%인 (d)의 경우 자유유동 난류강도가 증가함에 따라 유동이 확산되면서 전압손실의 국부적인 최대값은 감소했지만 더욱 넓은 영역에서 손실이 발생하면서 전압손실이 증가했다. Fig. 10은 각 평면에 대하여 식(4)에서 정의된 전압손실계수의 질량평균을 도시한 그림이다. 모든 평면에 대하여 자유유동 난류강도가 높아짐에 따라 질량평균 전압손실이 증가하였다. 자유유동 난류강도가 5%이하 일 때는 자유유동 난류강도의 증가에 따라 전압손실 값은 다소 증가했으나 뚜렷한 변화는 없었다. 하지만 자유유동 난류강도가 10%일 때는 질량평균 전압손실이 크게 증가하였다. 이는 자유유동 난류강도의 임계값이 존재하고 난류강도가 이 임계값을 넘어서는 급격히 전압손실이 증가하기 때문이다.

$$\overline{Cp_t} = \frac{\sum_i \sum_j (Cp_{t,ij} u_i A_{ij})}{\sum_i \sum_j (u_i A_{ij})} \quad (4)$$

3.4 자유유동 난류강도가 전체압력손실에 미치는 영향

Fig. 11은 각 평면에 대하여 식(5)에서 정의된 전압손실계수와 이차유동 손실계수의 합인 전체압력손실계수의 질량평균을 도시한 그림이다. 자유유동 난류강도가 증가함에 따라 이차유동 손실이 줄어든다 하더라도 이는 전체 손실에서 작은 부분에 불과하다. 전체적으로 자유유동 난류강도가 증가함에 따라 이차유동 손실 감소에 비해 전압손실이 더 크게 증가하여 전체압력손실이 증가하였다.

$$\overline{Cp_{total}} = \overline{Cp_t} + \overline{Cp_{sk}} \quad (5)$$

4. 결론

본 연구에서는 자유유동 난류강도가 터빈 캐스케이드내 3차원 난류유동 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 전산해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 자유유동 난류강도가 증가함에 따라 압력면 말굽와류 성분이 흡입면으로 이동하면서 상층 발달하는 것이 지연되면서 질

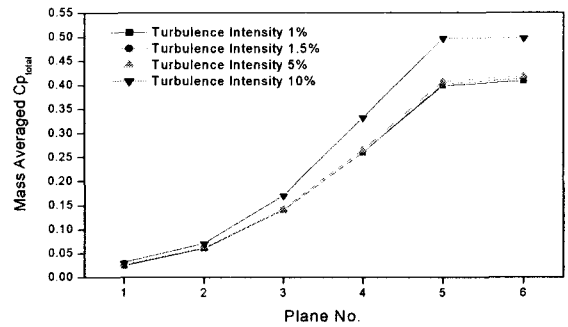


Fig. 11 Mass averaged overall loss coefficient at each plane

량평균 이차유동손실계수가 감소하였다.

2) 자유유동 난류강도가 증가함에 따라 유동이 확산되면서 전압손실의 국부적인 최대값은 감소했지만 더욱 넓은 영역에서 손실이 발생하면서 질량평균 전압손실계수가 증가했다.

3) 자유유동 난류강도가 증가함에 따라 이차유동손실 감소에 비해 전압손실이 더 크게 증가하여 질량평균 전체압력손실계수가 증가하였다.

4) 자유유동 난류강도가 5%이하일 때는 자유유동 난류강도의 증가에 따라 손실 값에 뚜렷한 변화가 없었다. 반면에 자유유동 난류강도가 10%일 때는 손실 값이 급격히 변화하였다. 이는 자유유동 난류강도의 임계값이 존재하고 난류강도가 이 임계값을 넘어서면 급격한 손실 값의 변화가 있기 때문이다.

후기

본 연구는 한전전력연구원이 지원하는 전력산업연구개발사업 및 2006년도 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Zhang, L., and Han, J.C., 1994, "Influence of Mainstream Turbulence on Heat Transfer Coefficients From a Gas Turbine Blade", ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 116, pp.896-903.
- [2] Lee, J. S., Ro, S. T. and Seo, H. J., 1994, "Mass Transfer Effects of Free-stream Turbulence and Horseshoe Vortex Formed at the Upstream Edge of Film Cooling Jets about a Cylindrical Surface", ASME Journal of Turbo-machinery, Vol. 120, pp.785-790.
- [3] 이재호, 1998, "선형터빈블레이드에서 초난류강도 변화에 따른 유동특성", 부산대학교 기계공학과, 공학 석사 논문
- [4] 이용진, 1996, "경계층 내 장애물이 가스터빈 내 3차원 유동에 미치는 영향에 관한 실험적 연구", 고려대학교 기계공학과, 공학 석사 논문
- [5] 고성룡, 1997, "장애물이 있는 3차원 터빈 캐스케이드내 난류유동의 전산해석," 고려대학교 기계공학과, 공학 석사 논문