

기어 제원 및 기어 가공정밀도가 기어 전달오차에 미치는 영향에 대한 연구

이주연*, 문상곤*, 문석표*, 김수철*^{#,}

*한국기계연구원 스마트산업기계연구실

A Study on the Effect of Macro-geometry and Gear Quality on Gear Transmission Error

Ju-Yeon Lee*, Sang-Gon Moon*, Seok-Pyo Moon*, Su-Chul Kim*^{#,}

*Smart Industrial Machine Laboratory, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received 08 September 2021; received in revised form 21 September 2021; accepted 27 September 2021)

ABSTRACT

This study was conducted to analyze the effect of the gear specification and gear quality corresponding to the macro geometry on the gear transmission error. The two pairs of gears with large and small transmission errors were selected for calculation, and two pairs of gears were manufactured with different gear quality. The test gears were manufactured by two different gear specifications with ISO 5 and 8 gear quality, respectively. The transmission error measurement system consists of an input motor, reducer, encoders, gearbox, torque meter, and powder brake. To confirm the repeatability of the test results, repeatability was confirmed by performing three repetitions under all conditions, and the average value was used to compare the transmission error results. The transmission errors of the gears were analyzed and compared with the test results. When the gear quality was high, the transmission error was generally low depending on the load, and the load at which the decreasing transmission error phenomenon was completed was also lower. Even when the design transmission error according to the gear specification was different, the difference of the minimum transmission error was not large. The transmission error at the load larger than the minimum transmission error load increased to a slope similar to the slope of the analysis result.

Keywords : Condition Monitoring(상태감시), High Speed Machining(고속가공), Cutting Force(절삭력)

1. 서 론

기어 시스템에서 발생하는 소음 및 진동은 구동 성능 및 내구성에 큰 영향을 준다. 기어 전달오차(Transmission Error)는 기어 시스템의 소음 및 진동을 발생시키는 주요 원인 중 하나로 기어시스템에

서 발생하는 화인소음(Whine noise)과 밀접한 관련이 있다.^[1,2] 기어 전달오차란 설계요인, 가공요인, 조립요인 등에 의해 운동과 힘이 불완전하게 전달되며 이러한 요인들로 의한 치 변형을 통칭하며^[3], 기어 시스템의 소음저감을 위해 기어 정렬오차를 최소화하기 위한 많은 연구가 수행되었다.

설계단계에서 기어사양 변경을 통한 기어 전달오차 저감 방안은 모듈, 치폭, 물림률 등 매크로 지오메트리(Macro geometry)를 통한 방법과 크라우닝,

Corresponding Author: sckim@kimm.re.kr

Tel: +82-42-868-7918, Fax: +82-42-868-7474

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

팁 릴리프 등 마이크로 지오메트리(Micro geometry)를 통한 방법으로 나뉜다. Harianto et al.^[2]은 기어의 치형 수정을 통한 소음 저감 효과를 분석하였으며, Houser et al.^[4]는 마이크로 지오메트리가 기어 소음에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. Lee et al.^[5]은 트랙터 최종구동축용 감속기의 전달오차를 줄이기 위해 마이크로 지오메트리를 수정하였으며 상용해석프로그램인 KISSsoft를 이용하여 결과를 비교하였다. Kim et al.^[6]은 기어 전달오차를 줄이기 위한 방안으로 매크로 지오메트리 설계가 매우 중요하다고 하였으며, 이를 위한 기어형상 최적화를 수행하였다. 특히 매크로 지오메트리는 기어의 강도, 물림효율 등 기어 성능의 대부분을 결정하며, 모든 작동조건에서 간접적으로 전달오차를 최소화 할 수 있다.^[7]

제작과정에서 기어 가공정밀도를 통해 가공오차를 줄임으로써 기어 전달오차를 최소화 할 수 있다. Park et al.^[8]는 감속기 내부기어를 대상으로 기어의 가공정밀도와 소음의 연관성을 확인하기 위해 소음시험을 진행하였으며, 치형 오차가 감소할수록 소음이 감소하는 것을 확인하였다. Lee et al.^[9]은 호이스트 기어박스를 대상으로 소음 불량률의 주요 원인 파악을 위해 소음 진동 및 가공오차의 측정 및 부품 교체의 개선효과 확인을 통해 기어 가공 오차 향상에 대한 소음 개선 효과를 확인하였다.

본 연구는 매크로 지오메트리에 해당하는 기어 제원 및 기어 가공정밀도가 기어 전달오차에 미치는 영향을 분석하기 위해 수행되었다. 이를 위해 계산 상 전달오차가 크고 작은 기어 두 쌍을 선정하고 기어 가공정밀도가 다르게 하여 각 두 쌍씩 제작하였으며, 제작된 기어 쌍을 대상으로 전달오차를 계측하고 비교하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 시험용 기어(Test Gear) 설계

기어 전달오차는 설계요인 이외에 가공요인, 조립요인 등 다양한 원인으로부터 발생하며, 그 중 기어 제원의 영향을 확인하기 위해서는 부하에 의한 기어 전달오차를 확인해야한다.

기어 제원에 따른 전달오차의 비교 분석을 위해

해석상 전달오차가 다른 기어 제원을 해석 소프트웨어를 이용하여 설계하였다. 해석 소프트웨어는 Kim et al.^[6]의 연구에서 개발된 기어 설계 소프트웨어를 사용하였고 1번 기어 제원의 전달오차는 2번 기어 제원에 비해 크도록 Table 1, 2와 같이 설계하였다.

1, 2번 기어의 부하에 따른 전달오차 해석 결과는 Fig. 1과 같다. 1, 2번 기어 쌍의 전달오차는 출력축의 토크가 증가 할수록 증가하는 경향을 보였으며, 모든 조건에서 1번 기어 쌍의 전달오차가 2번 기어 쌍보다 크게 나타났다.

1, 2번 기어 제원을 대상으로 각각 기어 가공정밀도가 ISO 1328 기준의 5급 및 8급으로 가공하여 총 4쌍의 기어를 제작하였다. 시험에 사용된 4쌍의 기어는 Table 3과 같이 분류 하였다. Pair 1, Pair 3는 1번 제원, Pair 2, Pair 4는 2번 제원으로 설계되었으며 기어의 가공정밀도만 다른 기어이다.

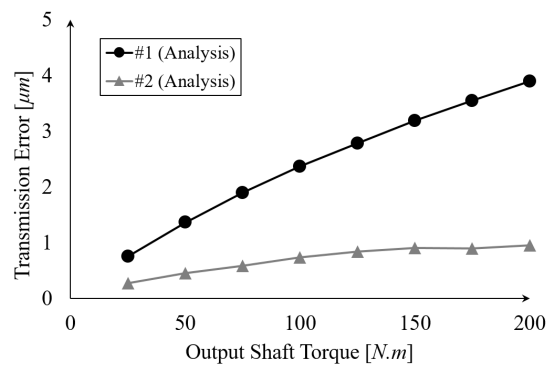


Fig. 1 Gear transmission errors of Gear #1, Gear #2

Table 1 Specification of gear specification #1

Specification	Value	
	Pinion	Wheel
Number of teeth	35	37
Face width	13	14
Hand	Left	Right
Module	3	
Pressure angle	20	
Helix angle	15	
Addendum factor	1	1
Dedendum factor	1.35	1.35

Table 2 Specification of gear specification #2

Specification	Value	
	Pinion	Wheel
Number of teeth	41	44
Face width	14	14
Hand	Right	Left
Module	2.5	
Pressure angle	20	
Helix angle	20	
Addendum factor	1	1
Dedendum factor	1.35	1.35

Table 3 Gear pairs used in the test

Gear Pair	Gear Specification	Gear Quality
1	#1	ISO 8
2	#2	ISO 8
3	#1	ISO 5
4	#2	ISO 5

2.2 기어 전달오차 계측 시스템

2.2.1 기어 전달오차 계측 시스템 구성

전달오차 계측시스템은 Fig. 2, 3과 같이 입력모터, 감속기, 엔코더, 기어박스, 토크미터, 파우더브레이크로 구성하였다. 입출력 구동시스템은 입력모터를 통한 속도제어 및 파우더 브레이크를 통한 토크 제어가 가능하도록 하였다. 기어 전달오차는 이상적인 회전변위와 실제 회전변위의 차로 정의되며 작용선(Line of Action)을 따라 선형 변위로 나타낼 수 있다.^[10] 따라서 입력축 및 출력축에 부착된 엔코더를 통해 각변위를 계측하고, 식(1)과 같이 계측된 각 변위를 통해 기어 전달오차를 계산할 수 있다.^[11] 또한 계측된 전달오차 데이터는 다음과 같이 3단계의 과정을 거쳐 후처리를 진행하였다.

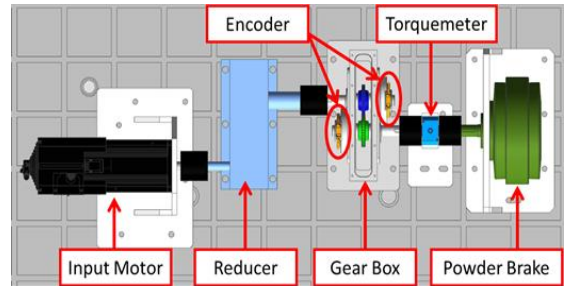


Fig. 2 3D modeling of transmission error measurement system

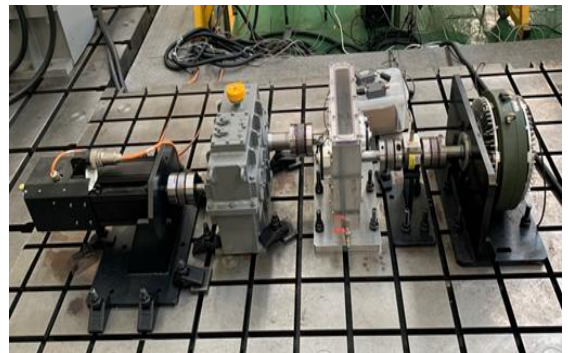


Fig. 3 Actual view of transmission error measurement system

$$TE = \theta_{output} - (\theta_{\in put} * \frac{N_{pinion}}{N_{wheel}}) \quad (1)$$

TE = Transmission error

θ_{output} = Angular displacement of output shaft

$\theta_{\in put}$ = Angular displacement of input shaft

N_{pinion} = Number of teeth of pinion

N_{wheel} = Number of teeth of wheel

- 1단계 : High pass filter를 적용하여 Runout 효과 제거
- 2단계 : 기어 치물림 마다Peak-to-Peak 값을 도출하고, 기어 1회전에 대하여 평균 PPTE 계산
- 3단계 : 시험 조건에 따른 평균 PPTE 계산

2.2.2 전달오차 계측시험

시험은 기어 제원과 기어 가공정밀도가 서로 다른 4쌍의 기어 쌍을 대상으로 시계방향의 입력속도 10 rpm에서 부하를 증가시키면서 수행하였다. 부하는 출력축에 장착된 파우더 브레이크를 이용하여 0 Nm부터 200 Nm까지 25 Nm씩 토크를 증가시켜 총 9개의 부하조건으로 시험을 수행하였다. 전달오차 계측시스템의 회전방향은 Fig. 4와 같이 정의하였다. 시험은 각 조건에 대해 3회씩 반복하여 반복성을 확인하였으며, 이에 대한 평균값으로 각 시험의 대표 전달오차를 계산하였다.

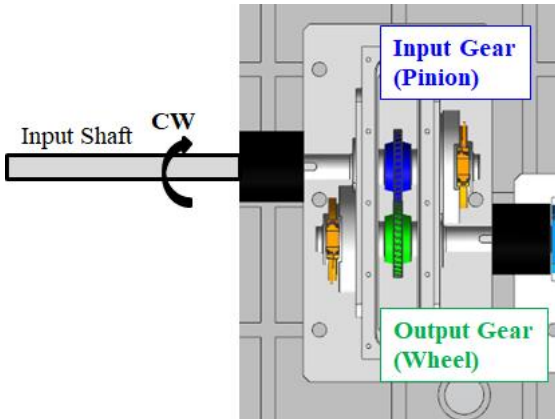


Fig. 4 Rotation direction of the transmission error measurement system

Table 4 Test conditions for test and analysis

Case No.	Input shaft speed [rpm]	Output shaft torque [Nm]
1	10 (CW)	0
2		25
3		50
4		75
5		100
6		125
7		150
8		175
9		200

3. 결과 및 고찰

Fig. 5는 기어 가공정밀도가 ISO 8급과 5급인 #1 기어 사양과 해석결과를 비교한 것이다. ISO 8급의 경우 전달오차가 부하에 따라 지속적으로 감소하였으나, ISO 5급의 경우 0~50 N.m의 부하에서는 전달오차가 감소하다가 50 N.m 이상의 부하에서는 해석 결과와 비슷한 기울기로 증가하였다.

Fig. 6는 기어 가공정밀도가 ISO 8급과 5급인 #2 기어 사양과 해석결과를 비교한 것이다. #1 기어의 결과와 마찬가지로 #2 기어에서도 부하에 증가함에 따라 전달오차가 감소하다가 해석 결과와 비슷한 기울기로 상승하는 현상이 나타났다. 이는 기어의 제조오차로 인한 무부하 전달오차가 부하가 상승함에 따라 치변형 등으로 인하여 상쇄되다가 특정 부하 이상이 되면 더 이상 상쇄되지 않고 부하의 상승에 따라 치변형이 증가되어 전달오차가 상승하는 것으로 판단된다.

기어 정밀도가 좋은 ISO 5급의 경우 8급보다 무부하 전달오차가 더 낮았으며, 부하 증가에 따라 무부하 전달오차가 상쇄되는 현상이 더 낮은 부하에서 완료되었다. 또한 상쇄 현상이 멈췄을 때의 최소 전달오차도 더 낮았기 때문에 기어 정밀도가 좋으면 대부분의 경우에서 기어 전달오차에 이점이 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 ISO 8급의 #1과 #2의 기어 사양에 대한 결과를 비교한 것이다. 전반적인 전달오차가 #2 기어보다 더 크게 나타났으나, 부하가 상승함에 따라 그 격차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 무부하 전달오차의 상쇄 효과로 인해 동등한 정밀도의 #2 기어에서 나타난 최소 전달오차와 유사한 수준까지 전달오차가 감소되는 것으로 판단된다. 이는 기어 정밀도가 더 높은 ISO 5급에 대한 결과에서 추가적으로 확인할 수 있다. Fig. 8은 ISO 5급에서의 #1과 #2의 시험 및 해석 결과를 보여준다. #1과 #2 기어 사양의 전달오차 상쇄는 각각 50 N.m와 25 N.m에서 완료되었고, 그때의 최소 전달오차 수준은 비슷하였다. 그러나 부하가 더 상승함에 따라 전달오차는 #1 사양이 더 크게 상승하였다. 따라서 Fig. 7의 결과도 추가적인 부하 상승까지 시험이 진행되었을 경우 #1 기어 사양의 전달오

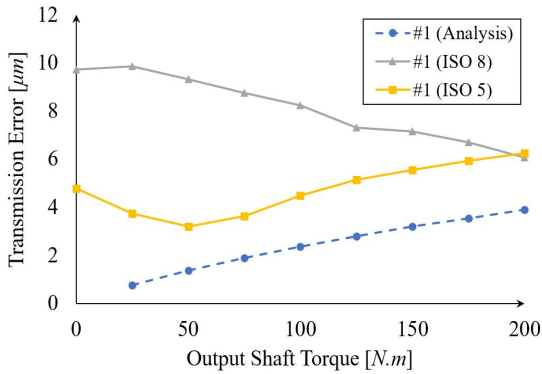


Fig. 5 Comparison of test and analysis results for #1 specifications of ISO 5 and 8 grade

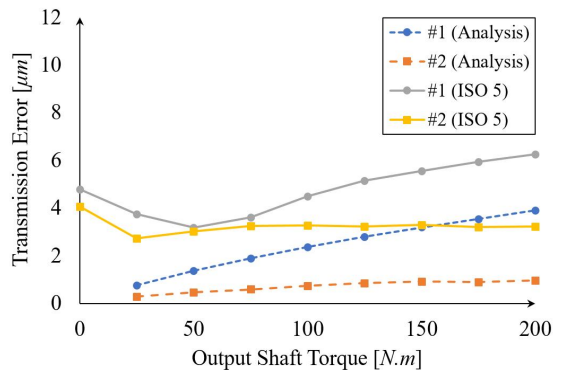


Fig. 8 Comparison of test and analysis results for #1 and #2 specifications of ISO 5 grade

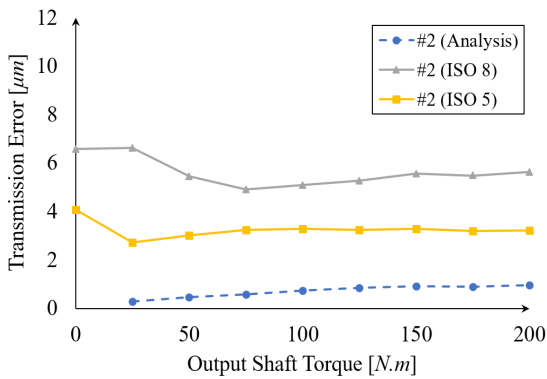


Fig. 6 Comparison of test and analysis results for #2 specifications of ISO 5 and 8 grade

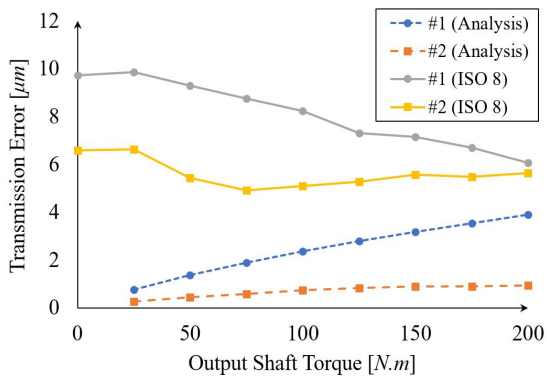


Fig. 7 Comparison of test and analysis results for #1 and #2 specifications of ISO 8 grade

차는 #2 기어의 최소 전달오차 부근에서 상쇄가 완료되고, 부하가 상승함에 따라 #2 사양보다 더 크게 전달오차가 증가할 것으로 판단된다.

기어의 설계 전달오차가 다른 경우 최소 전달오차의 차이는 크지 않으나, 최소 전달오차 이후 부하의 상승에 따라 전달오차는 해석결과의 기울기와 유사한 기울기로 증가되었다. 이는 기어 제원에 따라 전달오차를 작게 설계할 경우 그 효과는 무부하 전달오차의 상쇄가 완료된 이후에 유효할 것으로 판단된다. 따라서 낮은 부하에서 사용되는 기어의 경우 기어 제원에 따른 전달오차 설계 효과를 극대화하기 위해서는 무부하 전달오차의 상쇄 완료 부하가 어느 정도인지 확인할 필요가 있으며, 상쇄가 완료되지 않은 상태에서 사용된다면, 상쇄 완료 부하의 수준을 낮추기 위해 기어 정밀도를 높일 필요가 있다.

4. 결론

본 연구는 기어 제원 및 기어 가공정밀도가 기어 전달오차에 미치는 영향을 분석하기 위해 수행되었다. 기어 제원 및 가공정밀도가 다른 기어 4쌍을 설계 및 제작하였으며, 기어 전달오차를 계측 시스템을 구성하여 기어 전달오차 계측 결과를 비교하였다. 시험조건은 출력축에 인가되는 부하를 기준으로 0 Nm부터 200 Nm까지 25 Nm간격으로 설정하였다. 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 설계 전달오차가 큰 #1 기어와 설계 전달오차가 작은 #2 기어를 선정하고 기어 가공정밀도를 ISO 5급과 8급으로 다르게 하여 부하에 따른 전달오차를 시험 결과와 해석 결과를 비교하였다.
- 2) 기어 전달오차 시험 결과, 기어 제조오차 등에 의한 무부하 전달오차가 부하가 상승함에 따라 상쇄되는 현상이 나타났다. 이는 무부하 전달오차가 부하가 상승함에 따라 증가하는 치변형 등으로 인하여 상쇄되는 것으로 판단되며, 이러한 상쇄 현상은 어느 한계 부하 이상에서는 더 이상 나타나지 않았다.
- 3) 기어의 가공정밀도가 높으면 부하에 따라서도 전반적으로 전달오차가 낮게 나타났으며, 전달오차 상쇄현상이 완료되는 최소 전달오차도 더 낮게 나타났다.
- 4) 기어 제원에 따라 설계 전달오차가 다른 경우에도 최소 전달오차의 차이는 크지 않았으나, 최소 전달오차 이후 부하의 상승에 따른 전달오차의 기울기는 해석결과와 유사하였다.
- 5) 기어 제원에 따라 전달오차를 작게 설계한 경우 그 효과는 무부하 전달오차의 상쇄가 완료된 이후에 유효할 것으로 판단된다. 따라서 기어 제원에 따른 설계 효과를 극대화하기 위해서는 무부하 전달오차의 상쇄 완료 부하가 어느 정도인지 확인할 필요가 있다.

후 기

This work was supported by the “Development of load reduction technology for wind turbine reliability improvement and light-weighting” of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea (No. 20193010025810)

REFERENCES

1. Zhang, Q., Zhang, J., Zhu, Z. G., Wang, Z. R., Xu, Z., Lyu, S. K., “Study on the Transmission Error Prediction for a Spur Gear Pair”, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 33, No. 2, pp. 109-114, 2016.
2. Harianto, J. and Houser, D. R., “A Methodology for Obtaining Optimum Gear Tooth Micro-Topographies for Noise and Stress Minimization Over a Broad Operating Torque Range”, ASME, DETC2007-34655, pp. 289-303, 2009.
3. Park, C. I., Kim, D. S., “Transmission Error Analysis of the Helical Gears for the Elevator”, The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 26, No. 12, pp. 2695-2702, 2002.
4. Houser, D. R., Harianto, J., “The effect of micro-geometry and load on helical gear noise excitations (No. 2005-01-2295), SAE Technical Paper, 2005.
5. Lee, N. G., Kim, Y. J., Kim, W. S., Kim, Y. S., Kim, T. J., Baek S. M., Choi, Y., Kim, Y. G., and Choi, I. S., “A study on the improvement of transmission error and tooth load distribution using micro-geometry of compound planetary gear reducer for tractor final driving shaft”, Journal of Drive and Control, Vol. 17, No. 1., pp. 1-12, 2020.
6. Kim, S. C., Moon, S. G., Sohn, J. H., Park, Y. J., Choi, C. H., & Lee, G. H., “Macro geometry optimization of a helical gear pair for mass, efficiency, and transmission error”, Mechanism and Machine Theory, 2020.
7. Kim, G. K., Park, Y. J, Lee, G. H., Nam, Y. Y., Yang, W. Y., “Optimum Design of Pitch Reducer for Wind Turbine Using Genetic Algorithm”, The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 38, No. 2, pp. 185-192, 2014.
8. Park, S. P., Kim, W. H., Chung, J. T., “Analysis of the Relation Between Machining Accuracy of Internal Gear and Noise in Reduction Gears”, The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 36, No. 5, pp 537-543, 2012.

9. Lee, H. W., Sohn. B. J. and Shin, Y. H., “An Experimental Study to Reduce the Fraction of Noise Defect of Hoist Gear Boxes”, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 18, No. 5, pp. 1347-1354, 1994.
10. Song, J. S., Lee, G. H., Park, Y. J., Bae, D. S., Lee, C. H., Development of Gear Stiffness Module for Multi-Body Dynamic Analysis on Gears, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 21, No. 1, pp. 130-136, 2012.
11. Lee, H. G., Lee, S. H., Ku, H. I., Yoo, D. K., Won, K. M., Lee, T. H., Development of a transmission error measurement system and its adaptation to a manufacturing line, Transactions of the Korean society for noise and vibration engineering, Vol. 26 No. 4, pp. 420-427, 2016.