

스퍼 기어의 FEM 해석 및 IRT 기법을 적용한 건전성 평가

노치성^{1,†} · 정윤수¹ · 이경일¹ · 김재열^{2,†}

¹조선대학교 일반대학원 기계시스템공학과, ²조선대학교 기계시스템미래자동차공학부

Integrity Evaluation By IRT Technique And FEM Analysis of Spur Gear

Chi-Sung Roh^{1,†}, Yoon-soo Jung¹, Gyung-Il Lee¹ and Jae-Yeol Kim^{2,†}

¹Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School of Chosun University

²Dept. Future Automotive Engineering, Mechanical Systems, Chosun University

(Received June 6, 2016; Revised July 15, 2016; Accepted July 17, 2016)

Abstract – As an economic, high quality, and highly reliable gear with low noise and low vibration is demanded, an overall finite element analysis regarding a gear is required. Also, an infrared thermography test, which is a quantitative testing technique, is demanded for safety and longer lifespan of gear products. In order to manufacture a gear product or to determine safety of a gear being used, it is necessary to precisely determine ingredients of a material constituting a gear and detect any internal defect. This study aims to realize a design that minimizes the spur gear displacement with respect to power during its rotation and ensures the spur gear control capacity by using a 3D model and the midasNFX program. This facilitates the assessment of the possibility of cracking by evaluating the stress intensity and focusing on the integrity of the spur gear. We prepare the specimen of the spur gear based on the possibility of cranking as per the result of the structural interpretation from an infrared ray thermal measuring technique. After cooling the spur gear, we perform experiments using thermography and halogen lamps and analyze the temperature data according to the results of the experiment. In the experiment which we use thermography after cooling, we find a rise in the temperature of the room. As a result, the defective part show temperatures lower than their surroundings while the normal parts have temperatures higher than the defective parts. Therefore, it possible to precisely identify defective part owing to its low temperature.

Keywords – spur gear(스퍼기어), 3D modeling(3D 모델링), FEM analysis(FEM해석), IRT technique(IRT기법)

1. 서 론

산업사회에서부터 기어는 베어링, 나사와 함께 대표적인 기계요소의 하나로써 오랫동안 중요한 역할을 담당하였다. 20세기인 오늘 날에도 기어는 동력전달을 확실하게 할 뿐만 아니라 효율이 좋아 작게는 시계용 기어에서 크게는 수십만 KW급 선박용 터빈 감속기어, 자동차와 항공기의 감속 장치, 차동기어장치, 풍력발전

기 등 폭 넓게 이용되고 있을뿐더러 그 종류 또한 용도에 따라 다양하다.

자동변속기 회전 부품 중 베어링, 회전축, 기어 등에서 주요한 결함이 종종 발생하는데, 특히 동력전달에 사용되는 기어의 결함이 많은 부분을 차지하고 있다. 기어는 가공단계에서 오차, 운전단계에서는 잦은 마찰로 인해 필연적으로 마모, 변형, 깨짐 등 결함이 발생한다. 기어의 결함은 하중 및 연속적인 상대기어와의 충돌에 의해 진동 및 소음을 발생시켜 전체시스템의 신뢰성, 내구성 저하를 가속시키는 요인으로 작용하여 손상의 원인이 되기도 한다[1].

[†]Corresponding author : jykim@chosun.ac.kr
Tel: +82-62-230-7745, Fax: +82-230-7035

이에 따라 경제적이고 고품질의 기어가 제조될 수 있기를 바라는 필요성에[2] 의해 기어에 대한 전반적인 해석이 필요하다. 또한 기어 제품들에 대한 안전성 및 향후 수명 연장을 위한 정량적인[3] 적외선 열화상 검사(Infrared Thermography Test) 평가법이 요구되어지고 있다. 기어 제품의 제조나 사용되어지고 있는 기어의 안전성 판단을 위해서는 재료의 성분을 정확히 파악하고 내부 결함 유무를 판단하는 것이 필요하다[3].

본 논문의 목적은 CATIA 프로그램을 통해 스피어 기어의 3D Modeling을 하고 정확성이 검증된 구조해석 방법인 유한요소법을 midas NFX 프로그램을 통해 수행하여 스피어 기어의 회전 시 발생하는 힘에 대한 스피어 기어의 변위를 최소화하는 것과 정밀도를 높임으로써 스피어 기어에서 집중되는 응력부를 사전에 검출하여 Crack 발생 가능성을 판단하고, 구조해석 결과 Crack 발생 가능 부분을 바탕으로 스피어 기어 시험 시편을 만들어 적외선 열화상 계측기술을 통하여 스피어 기어의 건전성을 평가하고자 한다.

2. 스피어기어 모델링 및 FEM해석

2-1. 스피어기어 모델링

스피어기어의 치형 곡선은 사이클로이드 곡선, 원호 곡선 등 여러 가지가 있으나 인볼류트 곡선을 채택하였다. 기어의 접촉에 의하여 굽힘 강도를 최적화시킬 경우, 기어 치폭은 기어 모듈의 8~11배 정도면 된다. 기어의 치폭이 너무 클 경우에는 기어의 치접합이 균등하게 물리도록 신경을 써야하며, 치폭이 너무 작아도 면압강도 부족 등을 초래할 수 있다[4].

본 논문에서는 산업현장에 널리 적용되어지고 있는 CATIA 프로그램을 이용하여 3D Modeling을 수행하였으며, 기어의 압력각은 20°를 표준으로 하였고 소재는 SM45C 기계 탄소강을 기본으로 채택하였다. 지름은 116 mm, 두께는 11 mm, 기어의 압력각은 20°, 잇

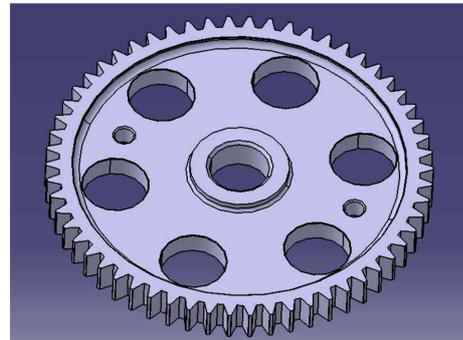


Fig. 1. Spur gear solid model.

수는 58개 이다. 기어의 소재는 Table 1과 같다. Fig. 1과 Fig. 2는 이에 따른 3D Modeling을 수행한 결과이다.

2-1. 스피어 기어 FEM 해석

스피어 기어에 급격한 부하나 충격이 가해졌을 때 기어박스 내에서 스피어 기어나 축, 베어링이 파손되면 기어박스 내의 대부분 부품이 파손되는 심각한 상황이 초래되며 안전사고까지 발생할 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 일정한 힘보다 큰 하중을 주었을 때의 해석이 필요하다.

본 논문에서는 산업현장에 널리 적용되어지고 있는 상용 유한요소해석 프로그램인 midas NFX를 활용하여 해석을 수행하였다.

탄성 힌지의 정확한 유한요소해석을 위하여 Fig. 2와 같이 3D Auto mesh를 활용하여 mesh를 나누어

Table 2. The structure and specification of gear

Material of SPUR GEAR	Modulus of elasticity (N/mm ²)	Poisson's ratio	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)
(SM45C)	205,128	0.29	490	686

Table 1. Materials of gear

Material	Sign	Applying heat treatment	Hardness HrC	Usage
Carbon steel	SM45C	Standard gear materials		
Carbon steel	SM45C	High frequency	50~55	Large gear side
CrMo steel	SCM415	Carburizing	55~60	Pinion side
CrMo steel	SCM440	High frequency	50~55	Large gear side
NiCrMo steel	SNCM415	Carburizing or nitriding	60~65	Pinion side

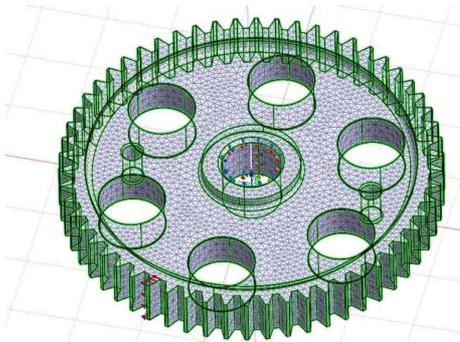


Fig. 2. spur gear solid model mesh modeling.

주었으며, Table 2는 스퍼 기어의 재질에 대한 물성치를 나타내고 있다.

Fig. 3과 같이 스퍼 기어의 축과 끼워 맞춤되는 안쪽 면에 고정 구속조건을 주었고, 하중은 기어의 이중에 선접촉하는 구간을 파악하여 피니언 기어와 접촉하는 부분에 사용 하중을 주어 스퍼 기어의 중심 축을 기준으로 원통좌표계를 잡았으며 원통좌표계를 기준으

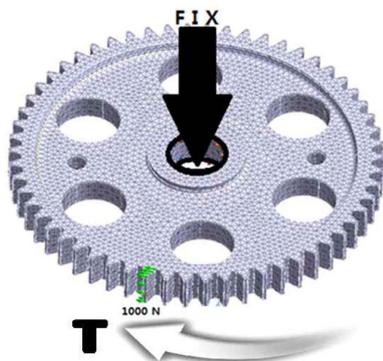


Fig. 3. Constraints of spur gears and static load.

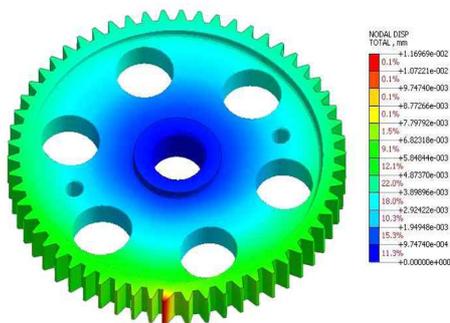


Fig. 4. Structural analysis full displacement.

로 T 방향으로 1000N의 집중하중을 적용하여 해석을 실행하였다.

Fig. 4는 구속조건 및 정적하중을 주었을 때 변위량을 도시한 그림이며 최대 변위량은 1.16969×10^{-2} mm 이다

스퍼 기어의 변형과 응력분포에 대한 유한요소해석 결과는 Fig. 5와 같으며, 회전 하중이 발생할 때 최대 힘에 대한 스퍼 기어의 전체적인 변형과 응력 집중 현상을 나타내고 있으며, Von Mises 응력은 물체 각 지점에서 응력 성분들에 의한 비틀림 에너지의 크기를 나타내는 값으로서, 가장 정확하게 물체의 파괴를 예측하는 기준으로 알려져 있다[5]. 가공하중에 대한 스퍼 기어에 발생하는 Von Mises 응력분포를 Fig. 5에 나타내었다. 그 결과 응력집중 현상이 발생되었으며, 최대 Von Mises 응력은 으로 나타나 안전율은 7.293 정도 이며, 다음 Table 3은 최대 등가응력에 대한 결과치이다.

구조해석 결과 본 논문에서의 유한요소해석 적용 목적은 스퍼 기어의 회전 시 발생하는 힘에 대한 변위를 최소화하는 것과 스퍼 기어에서 집중되는 응력 부를 사전에 검출하여 Crack 발생 가능성을 판단하고자 하였다. 회전 하중이 발생할 때에 최대 힘에 대한 스퍼 기어의 전체적인 변형 및 스퍼 기어가 접촉하는 부분에 약 10 mm의 Crack이 검출되었으며 구조해석 결과를 바탕으로 적외선 열화상 실험을 통

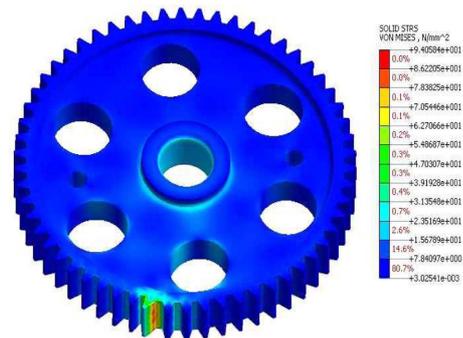


Fig. 5. Von mises stress distribution.

Table 3. Results of displacement and stress

Material of SPUR GEAR	Maximum Displacement	Maximum Von mises stress	Safety factor
(SM45C)	1.16969×10^{-2} mm	94.0584 N/mm ²	7.293

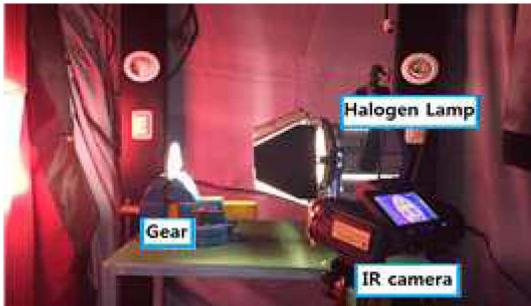
하여 Crack 부분과 스퍼 기어에 대하여 건전성 평가를 하고자 한다.

3. 실험장치 구성 및 실험

본 논문에서는 FLIR T640 열화상 카메라를 이용하여 실험을 진행하였다. 스퍼 기어의 구조해석결과



Fig. 6. Artificial production of defective specimens using spur gear cutting wire.



(a) configuration of experimental system.



(b) IR camera software.

Fig. 7. The composition of Halogen lamp experiment equipment.

와 비슷한 조건을 주기 위하여 Fig. 6과 같이 두 개의 스퍼 기어 중 하나의 스퍼 기어에 와이어 커팅기를 이용하여 기어의 이부분을 커팅하여 인공 결함을 주었고, 커팅을 한 후 다시 금속 접착제를 이용하여 접합시켰다.

Fig. 7의 (a)는 열화상카메라를 이용한 전체적인 실험 구성이며, (b)는 IR camera Flir 소프트웨어를 통하여 촬영 후 이미지 분석 및 온도 분석을 할 수 있도록 하였다. 실험의 정확도를 위해 주변의 빛을 차단하였으며, 두 개의 스퍼 기어를 각각 냉각 후 상온에서의 온도변화를 비교하기 위하여 두 개의 스퍼 기어를 고정시켜놓고 열화상카메라로 실험을 하였고, 열원으로 할로겐램프를 비추어서 인공결함을 만든 스퍼 기어에 대해서도 실험을 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 서모그래피 기법을 적용한 스퍼 기어에 대한 실험 및 고찰

본 논문에서는 Horizontal방법으로 실험을 수행 및 분석하였다. 기어의 접촉부분에 임의의 결함을 주었으며, -4 °C의 열원에서 20분 냉각 후 상온에서 두개의

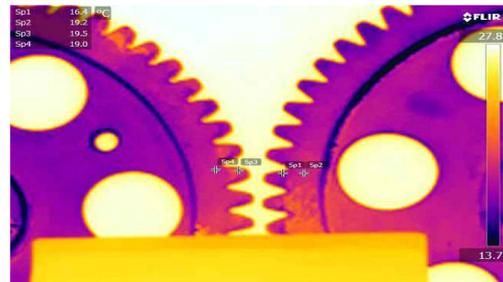


Fig.8. After cooling, the thermal image of the test spur gear.

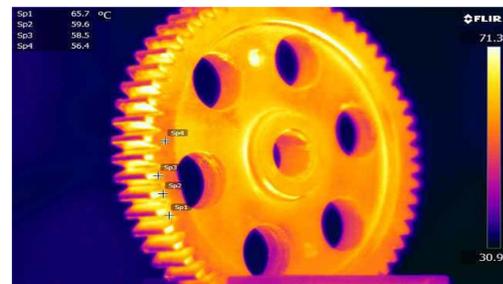


Fig. 9. spur gear test image with the halogen lamp.

기어를 열화상카메라를 활용하여 촬영하였다. 그 결과 Fig. 8과 같이 인공결합 부가 정상시편과 비교하였을 때 3.52 °C 차이로 결합 검출되었다.

4-2. 할로겐램프의 열원을 적용한 스퍼 기어에 대한 실험 및 고찰

임의의 결합을 만든 스퍼 기어에 할로겐램프의 빛을 (1000w) 조사시킴으로서 열을 전달하는 방법으로 비파괴 검사를 수행하였다. 탐상부위에 할로겐램프의 열원은 스퍼기어와 1 m로 하였으며, 조사각도는 결합부를 향하도록 45도로 하였고 1분 동안 할로겐램프를 시험편에 조사하였다. 그 결과 결합이 있는 Spot1에서 Hot spot이 발생하는 것을 볼 수 있으며, 결합이 없는 정상부분인 Spot2과 Spot3, Spot4에서는 결합부위 Spot1 보다는 낮은 온도지만 할로겐램프를 사용하는 동안 온도가 상승하는 것을 열화상카메라를 통해 분석하였다. Fig. 9는 할로겐램프를 열원으로 계측한 열화상 이미지를 보여주고 있다.

4.3. 온도 데이터 결과 분석

본 논문에서는 스퍼 기어에 서모그래피 기법과 할로겐램프를 활용하여 실험을 수행하였으며, 실험결과 온도데이터를 Fig. 10과 같이 분석하였다.

서모그래피 기법을 적용한 실험의 경우 냉각 후 상온에서 온도가 상승하는 구간에서의 분석결과 결합부에서 온도가 낮게 발생하는 것을 분석하였으며, 다른 정상부에서는 결합부보다 온도가 높게 측정되었다. 결

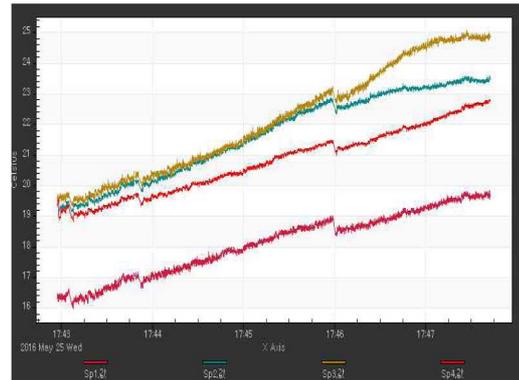
Table 4. After cooling, the thermal chart of the test spur gear

	SP.1	SP.2	SP.3	SP.4
	16.4	19.2	19.5	19.0
	16.7	19.7	20.0	19.3
	17.0	20.0	20.1	20.9
	17.5	20.7	20.9	20.0
	17.8	21.3	21.3	20.4
Temperature change (°C)	18.4	22.2	22.2	21.0
	18.9	22.7	23.1	21.4
	18.8	22.9	23.6	21.5
	19.2	23.2	24.6	22.0
	19.7	23.5	24.9	22.5
	19.6	23.5	24.8	22.8

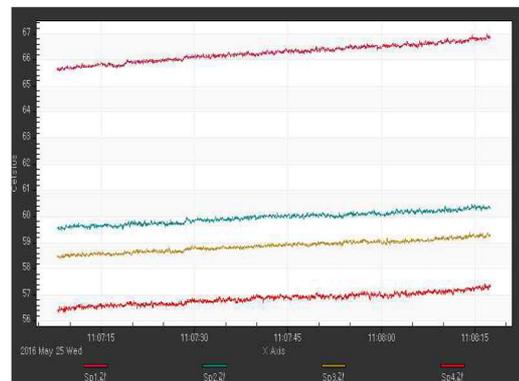
Table 5. spur gear test chart with the halogen lamp

	SP.1	SP.2	SP.3	SP.4
	65.7	59.6	58.5	56.4
	66.0	59.7	58.7	56.6
	66.2	59.9	58.8	56.8
Temperature change (°C)	66.3	59.9	58.9	56.9
	66.5	60.1	59.0	57.0
	66.6	60.2	59.1	57.2
	66.7	60.2	59.1	57.1
	66.9	60.4	59.3	57.3

합부에서의 온도가 낮게 발생하기 때문에 결합부의 정확한 결합 유무판단이 가능하였다. Table 4의 도표와 Fig. 10(a)의 온도결과 그래프를 통해 결합부위의 정상부위의 온도 차이는 평균적으로 3.52 °C 차이가 나는



(a) Ultrasonic thermography temperature result graph.



(b) halogen lamp temperature result graph.

Fig. 10. Ultrasonic thermography and halogen lamp temperature result graph of comparison.

것을 알 수 있었다.

할로겐램프를 적용한 기법의 경우에는 실험수행 1분 동안 시험편에 지속적으로 열원을 주어 결함부와 정상부에 모두 지속적으로 온도가 상승하는 것을 확인하였으며, 결함부에서는 정상부에서 보다 7.75 °C 높은 온도를 유지하며 상승하는 것을 확인하였다. Table 5의 도표와 Fig. 10(b)의 그래프와 같이 온도가 꾸준히 상승함을 확인하였으며, 정상부분 보다 결함부분이 온도가 평균 7.75 °C 더 높게 측정되었다. 결함이 있는 스퍼기어의 접촉부와 정상부 모두 할로겐램프를 열원으로 하였을 때, 시험편 전체적으로 온도가 상승하지만 결함이 있는 부의 온도가 정상부 보다 더 높아 Hot spot이 일어나므로 결함이 검출 되었다.

서모그래피기법과 할로겐램프를 열원으로 적용한 기법을 비교 분석한 결과 두 기법 모두 결함의 유무판단이 가능하였으며, 적외선 열화상 카메라 이미지와 온도결과 그래프 모두를 종합적으로 비교 분석하였을 때, 냉각 후 서모그래피 기법을 사용하는 것이 스퍼기어의 결함의 유무를 더 명확하게 판단할 수 있었고 서모그래피 기법을 적용하였을 때 스퍼기어의 건전성 평가에 있어 정확한 진단이 이루어질 것으로 판단되므로 냉각기법을 열원으로 한 서모그래피 기법을 현장 적용하기 위한 장비개발 및 비파괴 검사기법에서 위치, 거리, 각도 등 표준화 할 수 있는 다양한 후속연구 및 개발이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

스퍼기어의 결함 검출을 위하여 구조해석을 통한 결함제작과 정상 시편과 결함 시편의 차를 적외선 열화상카메라를 활용하여 검출하였다. 이에 대한 결론을 다음과 같다.

1. 스퍼기어의 회전 시 발생하는 힘에 대한 응력집중부를 검출하여 Crack 발생 부를 FEM 해석을 통하여 기어의 이뿌리 부에 약 10 mm의 인공 Crack을 스퍼기어에 절단하여 인공 결함을 제작하였다.
2. 인공결함 시편과 정상 시편을 냉각기법을 적용한

서모그래피기법은 인공결함부가 정상시편과 비교하였을 때 3.52 °C 온도 차이로 결함 검출되었으며, 서모그래피 기법을 적용한 경우 냉각되었던 기어가 상온에서 지속적인 온도상승을 보여주었으며, 결함부는 정상부보다 낮은 온도를 유지하며 상승 하였다.

3. 할로겐램프를 적용한 기법의 경우에는 실험수행 1분 동안 시험편에 지속적으로 열원을 주어 결함부와 정상부에 모두 지속적으로 온도가 상승하는 것을 확인하였으며, 결함부에서는 정상부에서 보다 7.75 °C 높은 온도를 유지하며 상승하는 것을 확인하였다.

4. FEM해석을 통해 사전에 스퍼기어의 결함을 예측 할 수 있으며, 냉각기법을 적용한 서모그래피 기법 실험방법과 할로겐램프를 적용한 열화상 기법을 통하여 온도차에 의한 결함검출을 토대로 기어의 건전성 평가를 수행 할 수 있다고 본다.

Acknowledgements

이 논문은 2015년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2014H1C1A1066959).

References

- [1] Park, K. H. "A Study on the Fault Detection of Auto-transmission according to Gear Damage", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 1, 2008, (n.d.): 47-56.
- [2] Lee, S Y. "Crown Design and Tooth Contact Analysis for the Spiral Bevel Gears", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 1999, No. 11, 1999, (n.d.): 546-550.
- [3] Song, K S. "Evaluation of Metal Material Welding Flaw by Non-contact NDT Method using Laser Guide Ultrasonic Wave and Ultrasonic Signal Visualization.", (thesis) Dr., Chosun University, n.d.
- [4] Power transmission factor 10 www.sygear.co.kr
- [5] Glossary of the Structural Analysis - Von Mises stress <http://www.nfx.co.kr/>