기어피치분석 및 공정관측을 위한 PC기반시스템 구축

김성준*, 지용수**
*강릉대학교 산업공학과, **니치정보기술(주)

A PC-Based System for Gear Pitch Analysis and Monitoring in Gear Manufacturing Process

Seong-Jun Kim*, Yong-Soo Jie**
*Department of Industrial Engineering, Kangnung National University
**Niche Information Tech Co. Ltd

Key Words : Gear Manufacturing, Geometric Measurements, Gear Quality, Pitch Error, Automated Gear Inspection, Data Aquisition, Autocorrelated Data

Abstract

Gears are essential elements for mechanical power transmission. Geometric precision is the main factor for characterizing gear grade and quality. Gear pitch is one of the crucial measurements, which is defined as a distance between two adjacent gear teeth. It is well-known that variability in gear pitches may causes wear-out and vibration noise. Therefore maintaining pitch errors at a low level plays a key role in assuring the gear quality to customers. This paper is concerned with a case study, which presents a computerized system for inspecting pitch errors in a gear machining process. This system consists of a PC and window-based programs. Although the start and stop is manually accomplished, the process of measuring and analyzing pitch data is automatically conducted in this system. Our purpose lies in reducing inspection cost and time as well as increasing test reliability. Its operation is briefly illustrated by example. Sometimes a strong autocorrelation is observed from pitch data. We also discuss a process monitoring scheme taking account of autocorrelations.

1. 서 론

기어는 동력전달에 중요한 부품으로서 산업활동에서 일상생활에 이르기까지 전 영역에서 폭넓게 이용되고 있다. 따라서 기어의 품질을 높은 수준으로 유지하는 것은 여러모로 중요한 문제일 것이다. 본 논문은 완성품 기어를 검사하기 위한 품질검사시스템에 관

해 다룬다. 이 시스템은 실제로 기어를 생산하는 모 업체의 지원과 협조를 얻어 생산현장의 실정에 맞도록 개발되었다.

기어의 품질과 등급을 결정하는 기하학적 특성으로 대표적인 것은 프로파일(Profile), 런아웃(Run-out), 리드(Lead), 피치(Pitch) 등을 들 수 있다[Townsend(1992)의 Chap. 7]. 실제로 완성품 기어에 대해 이들 요소를 자동적으로 측정하고 검사하기 위해서는 고도의 전문화된 장비가 요구되지만, Suh et al.(2002)의 연구에서 지적한 바와 같이 이는 중소기업 현실에서는 정당화되기 어려운 경우가 많다. 따라서 전용장비가 아닌 범용장비를 이용하여 자동화된 검사작업을 수행할 수 있다면 실용적으로도 큰 의의가 찾을 수 있을 것이다.

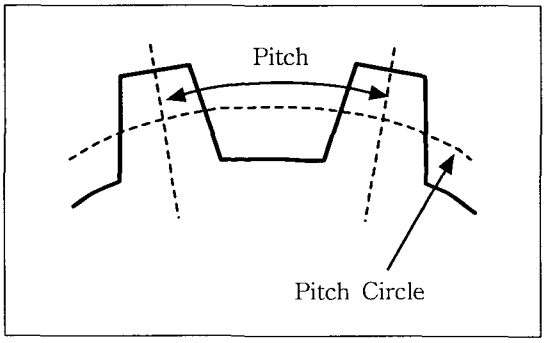
본 논문은 기존의 기어테스터를 이용하여 기어의 피치를 검사하는 시스템을 구축하고자 한다. 앞에서 언급한 특성 중 검사의 대상을 피치로 한정한 이유는, 이 업체에서 기어의 등급을 결정하는 데 피치오차를 가장 빈번하게 이용하고 있기 때문이었다. 피치는 인접한 치간의 거리라고 말할 수 있다. 기어 하나에 대해 피치의 측정치는 치수(齒數)만큼 얻어진다. 제품에 따라서는 치수가 수백에 이르는 경우도 있어 지금까지 수작업에 의존하고 있던 피치검사작업은 많은 시간이 소요될 뿐 아니라 결과의 신뢰성에도 의문이 제기될 수 있다. 본 시스템의 목적은 이와 같은 검사프로세스를 일부 자동화하여 작업시간을 단축시키고 피치검사의 정밀도를 향상시키는 데 있다. 이를 위해, PC와 A/D변환기를 이용하여 시스템을 구성하고 여기서 운용할 수 있는 윈도우기반 프로그램을 제공하였다.

우선 2장에서 기어의 피치에 대해 설명하고 수작업에 의해 수행되어 온 검사프로세스를 소개한다. 3장은 본 연구를 통해 개발된 검사시스템의 구성에 대해 서술하고 윈도우 프로그램을 활용하는 과정을 예시한다. 4장에서는 개발된 검사시스템이 갖는 의의 및 기대효과에 대해 논의한다. 아울러 피치 데이터가 자기상관을 보일 때 공정관측을 위해 추후 연구해야 할 방향을 전망한다.

2. 기어의 피치오차

2.1 정의

기어의 제작에 있어 제조품질을 규정짓는 항목은 다양하다. 그 구체적인 내용에 대해서는 Spokes(1992)와 Townsend(1992)를 참고하기 바란다. 본 논문은 기어의 주요 항목 중 하나인 피치에 대해 다루고자 한다. 기어의 피치란 다음 <그림 1>에 나타낸 것과 같이 피치원(Pitch Circle) 상에서 측정된 인접한 두 치면 사이의 거리를 말한다[1, 5-7].



<그림 1> 기어 피치의 정의

기어의 치수를 T라 하면 총 T개의 피치 측정치가 얻어지는 데 당연히 T개의 피치는

일정한 것이 바람직하다. 피치가 일정치 않으면 마모와 진동의 직접적인 원인이 되기 때문이다. 피치의 변동을 계산하고 이로부터 기어의 등급을 결정하기 위해서 단일피치오차(Single Pitch Error), 인접피치오차(Adjacent Pitch Error), 누적피치오차(Accumulated Pitch Error)의 세 가지 개념이 이용되고 있다[6, 8, 9]. T개의 피치 측정치를 $x_1, x_2, \cdots, x_T$라고 하면, 단일피치오차는 이론적인 설계치와 실제 측정치와의 차로서 다음과 같이 정의된다.

$$U_i = x_i - P_i$$

단, $i=1,2,\cdots, T$. 여기서 i번째 피치의 설계치 P_i는 기어의 종류에 따라서 그 정의가 다르지만, 이 업체에서 주로 생산하고 있는 링기어와 같이 뒤틀림각이 제로인 표준적인 기어의 경우에는

$$P_i = P = 2\pi R/T$$

로 계산할 수 있다. 여기서 R은 피치원의 반지름이다. 이 경우, $\sum U_i = 0$ 다시 말해 $\bar{x} = 2\pi R/T$이므로 실제로 단일피치오차를 구할 때에는 다음 관계식을 이용하는 경우가 많다.

$$U_i = x_i - \bar{x} \quad (1)$$

일단 이렇게 단일피치오차(U)가 얻어지면, 인접피치오차(V)는 인접한 단일피치오차의 차로서 그리고 누적피치오차(W)는 단일피치오차의 누적합으로서 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_i = |U_i - U_{i-1}| \quad (2)$$

$$W_i = \sum_{j=1}^{i} U_j \quad (3)$$

단 $i=1,2,\cdots, T$이고 $x_0 = x_T$이다.

2.2 오차한계 계산

기어의 품질등급은 앞에서 설명한 세 가지 피치오차로부터 계산되는 오차한계에 의해서 결정되도록 규정하고 있다[5, 7-9]. 본 절에서는 이들 각각에 대한 계산절차를 소개하기로 한다. 먼저 단일피치의 오차한계 E_U는 T개의 단일피치오차 중 그 절대값이 가장 큰 것으로서 다음과 같이 정의된다.

$$E_U = \max_{1 \le i \le T} |U_i|$$

즉 피치의 실제 측정치를 설계치와 하나하나 비교할 때 최대 얼마나 차이가 나는지를 보는 것이다. 이와 비슷하게 인접피치 오차한계 E_V는

$$E_V = \max_{1 \le i \le T} V_i$$

로 구한다. 이는 인접한 두 개의 피치가 최악의 경우 얼마나 오차가 발생하는지를 말하는 값이다. 그리고 단일피치오차를 누적시킬 때 그 누적값이 가장 클 때와 가장 작을 때의 차이를 누적피치 오차한계라고 하며 이는 다음 식으로 표현된다.

$$E_W = \max_{1 \le i \le T} W_i - \min_{1 \le i \le T} W_i$$

피치의 변동은 이와 같이 세 가지 오차한계 (E_U, E_V, E_W)에 의해서 표현될 수 있는데, 이를 한국공업규격에 명시되어 있는 기준치와 비교함으로써 기어의 품질등급을 결정할 수 있다. 그러면, T=15인 경우 피치오차 및 오차한계의 계산과정을 다음 <표 1>을 통해 예시한다[8, 9].

<표 1> 피치오차 및 오차한계의 계산과정

치번호	눈금값	단일오차	인접오차	누적오차
(1,2)	4	1.67	2	1.67
(2,3)	6	3.67	3	5.33
(3,4)	9	6.67	2	12.00
(4,5)	7	4.67	7	16.67
(5,6)	0	-2.33	3	14.33
(6,7)	-3	-5.33	6	9.00
(7,8)	3	0.67	1	9.67
(8,9)	2	-0.33	6	9.33
(9,10)	-4	-6.33	0	3.00
(10,11)	-4	-6.33	3	-3.33
(11,12)	-1	-3.33	8	-6.67
(12,13)	7	4.67	7	-2.00
(13,14)	0	-2.33	4	-4.33
(14,15)	4	1.67	1	-2.67
	평균 2.33			

우선, 피치 측정치의 평균이 2.33이므로 이를 뺀 편차로서 식 (1)의 단일피치오차를 구한다. 그리고, 식 (2)와 (3)을 이용하여 인접피치오차와 누적피치오차를 차례로 계산한다. 이렇게 해서 <표 1>이 완성되었다. 이제 이 결과를 이용하여 앞에서 기술한 3가지 오차한계를 구한다. 먼저 단일피치오차 중 절대값이 가장 큰 것은 치번호 (3,4)에 해당되는 6.67이므로 $E_U = 6.67$이 된다. 또한 인접피치오차의 경우에는 치번호 (11,12)에 해당되는 8이 최대가 되므로 $E_V = 8.00$이다. 누적피치오차는 단일피치오차를 계속 누적시킨 값으로서, 치번호 (4,5)에서 최대값 16.67을 치번호 (11,12)에서 최소값 -6.67을 각각 얻을 수 있다. 따라서 누적오차한계는 $E_W = 16.67 - (-6.67) = 23.33$ 임을 알 수 있다. 이렇게 계산된 결과는 KS 또는 JIS와 같은 표준규격과 비교하여 합격판정을 내리거나 기어의 품질등급을 결정하는 데 이용된다.

2.3 피치오차의 검사

현재 이 업체에서 주로 생산되는 기어는 디젤엔진의 조립에 이용되는 소위 엔진타이밍기어라 불리우는 것으로서 매우 높은 정밀도를 요구하는 제품이다. 가공을 마친 완성품기어의 피치검사는 기어테스터(Gear Tester)를 이용해 수작업으로 이루어지고 있다. 기어테스터는 본체, 탐침(Probe), 지지대(Fixture)로 구성되어 있다. 우선 본체에 치수와 회전수를 입력하고 탐침의 왕복시간을 조정한다. 지지대가 움직이면서 기어를 회전시키면 탐침이 왕복운동을 통해 피치를 측정하고 이를 본체로 전송한다. 전송된 데이터는 본체의 메모리에 저장되어 있다가 작업자의 명령에 의해 막대그래프로 출력된다. 작업자는 그래프 출력물을 토대로 수작업으로 피치를 다시 측정하고 이를 컴퓨터에 입력하여 3종의 오차한계를 계산한다.

그러나 이와 같은 피치오차 검사작업은 몇 가지 문제점을 안고 있다. 우선, 많은 시간과 노력이 소요된다는 점을 들 수 있다. 작업자

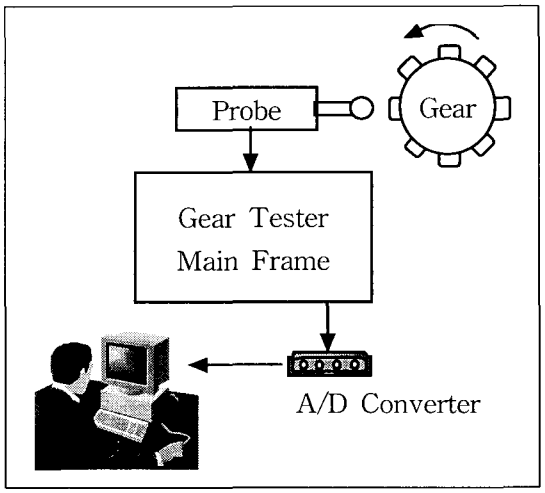
가 피치를 일일이 수치화하고 컴퓨터에 입력하는 작업은 제품에 따라서는 매우 많은 시간을 요하게 된다. 이러한 과정은 데이터가 누락되거나 잘못 입력되는 등의 크고 작은 인적오류의 가능성 마저 내포하고 있어 피치 오차의 측정 및 분석 결과에 대한 신뢰성에도 의문을 제기할 수 있다. 또한, 노후화로 인해 테스터 본체가 오작동하는 사례가 때때로 발생하고 있어 원활한 검사작업을 위해서는 수리나 교체가 필요한 실정에 있다. 아울러, 피치 데이터를 체계적으로 축적하고 관리할 수 있는 시스템의 부재는 품질향상 및 공정관리를 위한 적극적인 활동을 어렵게 하는 장애가 되고 있다.

이러한 문제점을 능률적으로 극복하고자 본 연구는 피치오차의 저장 및 분석 작업을 지원할 수 있는 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 기존에 사용하고 있던 기어 테스터에 PC를 연결한 형태로서 커다란 비용증가 없이 기어검사작업을 일부 자동화할 수 있도록 하였다. 본체로 전송된 피치 측정치를 자동으로 저장하고 분석할 수 있을 뿐 아니라 세 가지 오차한계를 표준규격한계와 함께 제시할 수 있어 작업자가 보다 편리하게 기어의 품질검사작업을 수행할 수 있도록 하였다.

3. PC기반 피치오차검사

3.1 시스템 구성

우선 탐침으로부터 본체로 전송되는 신호를 처리할 수 있도록 A/D변환기를 PC의 ISA 슬롯에 장착하였다. 여기서 이용된 A/D 변환기는 교육용이었던 관계로 샘플링속도가 그리 높지는 않았으나 탐침의 아날로그신호를 PC로 보내는 데에는 그 성능이 충분하였다. PC는 486SX급에 메모리 8MB인 구형이었지만, 이미 다른 장비를 위해 사용 중이었고 기어검사의 목적에도 충분하다고 판단하여 별도의 업그레이드 없이 그대로 이용하였다. 그래서 전체 시스템 역시 Windows 3.x를 기반으로 개발되었다. <그림 2>는 본 시스템의 구성을 개략적으로 보여주고 있다.



<그림 2> 피치오차 검사시스템

3.2 응용프로그램 및 작업수행

데이터의 수집 및 분석을 위한 프로그램은 MS Visual Basic 4.0을 이용하여 작성되었다. 단 A/D변환기의 구동을 위한 모듈은 A/D변환기와 함께 제공된 C언어 라이브러리를 참조하여 개발하였다[2]. 이 프로그램을 수행시키면 <그림 3>에서 보는 바와 같이 PC 모니터를 통해 분석결과를 직접 확인할 수 있다. 그러면 개발된 프로그램의 구성 및 기어검사작업의 수행절차를 예시한다.

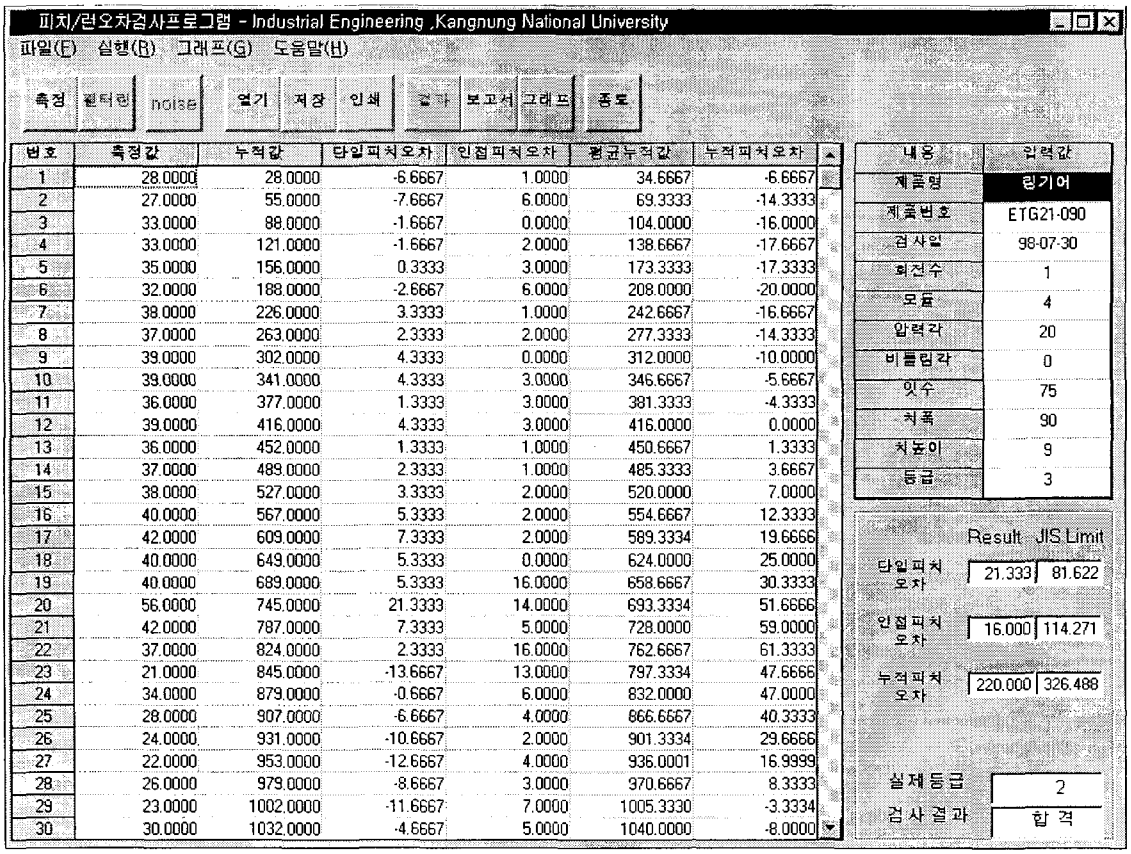
3.2.1 기어측정 및 데이터수집

우선 작업자는 기어제작 및 관리에 관련된 기본정보를 입력해야 한다. 본 시스템에서는 제품명, 제품번호, 검사일, 회전수, 모듈, 압력각, 비틀림각, 치수, 치폭, 치높이, 요구품질등급의 11가지로 기본정보를 구성하였다. 이들 수치는 모두 3종의 오차한계에 대한 규격한계를 계산하고 합격판정을 내리는 데 사용된다. 입력되었던 정보는 <그림 3>에서와 같이 화면 우측에 표시되고 있다.

기어테스터가 수동인 관계로 본 시스템에서도 피치측정의 개시와 종료는 여전히 수작업으로 진행된다. 일단 측정작업이 개시되면, 탐침에 의해 본체로 전송된 아날로그신호는 A/D변환기를 통해 디지털신호로 변환되고 데이터파일에 저장된다. 그리고 피치측정작업이 끝나면 본 시스템은 데이터파일로부터 피치 측정치를 불러와 프로그램 화면에 출력시킨다. <그림 3>의 스프레드시트 부분의 첫 번째 열에 있는 '측정값'이 바로 그 결과이다.

3.2.2 피치오차계산 및 합격판정결과

이제 스프레드시트 위쪽의 '결과' 버튼을 클릭하면 단일피치오차, 인접피치오차, 누적



<그림 3> 링기어 ETG21-090의 피치오차 측정 및 분석 결과

피치오차의 계산결과가 스프레드시트의 해당 열에 차례로 나타나고 동시에 최종 분석결과도 JIS 규격한계와 함께 화면의 우측하단에 표시된다.
그림에서 보는 바와 같이, 3종의 오차한계에 대한 계산결과는

$$E_U = 21.333$$

$$E_V = 16.000$$

$$E_W = 220.000$$

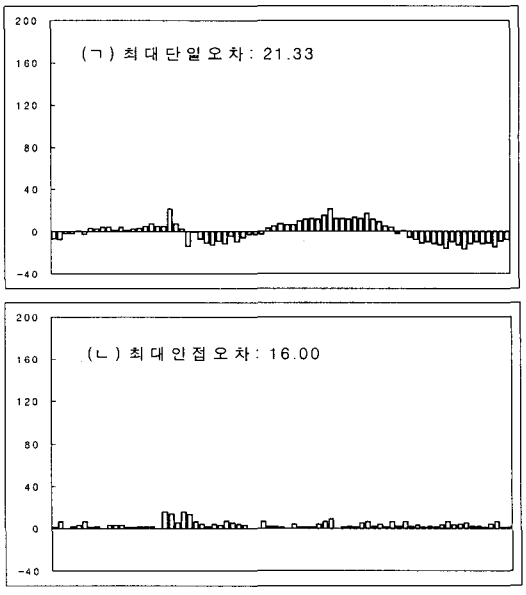
으로 얻어지고 있다. 이들 모두 JIS 3등급 규격한계 81.622, 114.271, 326.488을 여유있게 만족하고 있다. 그래서 <그림 3>의 우측하단에도 나타나 있듯이, 지금 검사된 기어는 3등급 요구수준을 충족하고 있어 검사결과는 '합격'이며 실제로는 2등급 품질에 해당되는 제품이라는 것을 알 수 있다. 한편 기어의 기본정보로 계산되는 각 등급에 따른 규격한계를 기어의 실제 오차한계와 <표 2>에 정리하였다. 단 측정단위는 ㎛이다. 표에서 보는 바와 같이, 본 제품은 단일오차 및 인접오차는 매우 우수하지만 상대적으로 누적오차 E_W가 크게 나오고 있음을 알 수 있다. 향후 이에 대한 원인파악 및 대책마련이 수반되어야 할 것으로 판단된다.

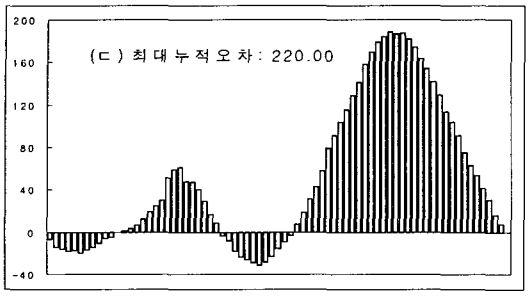
3.2.3 막대그래프에 의한 피치오차 표현

치번호에 따라 3종의 피치오차가 어떻게 변화하는가를 도시한 것이 다음 <그림 4>이다. 이는 <그림 3>의 스프레드시트의 계산결과를 그대로 막대그래프로 표현한 것으로, 화면 위쪽의 '그래프' 버튼을 클릭하면 얻을 수 있다. 이 형식은 업계에서 관용적으로 사용하고 있었으므로 프로그램 내에서도 그 기능을 제공한 것이다. 사실, 이러한 그래프는 각각의 피치오차가 얼마나 크고 또 어떤 추세에 있는지를 시각적으로 쉽게 알 수 있도록 한다. <그림 4>에서는, 단일피치오차와 인접피치오차는 큰 특이점을 찾기 어렵지만 누적피치오차의 모습은 어떤 이상요인의 존재가능성을 의심하게 한다.

<표 2> 품질등급에 따른 규격한계

품질등급	E_U	E_V	E_W
1	41.365	51.707	165.462
2	58.244	76.883	232.977
3	81.622	114.271	326.488
4	116.489	174.733	465.955
5	163.244	261.191	652.977
실제결과	21.333	16.000	220.000



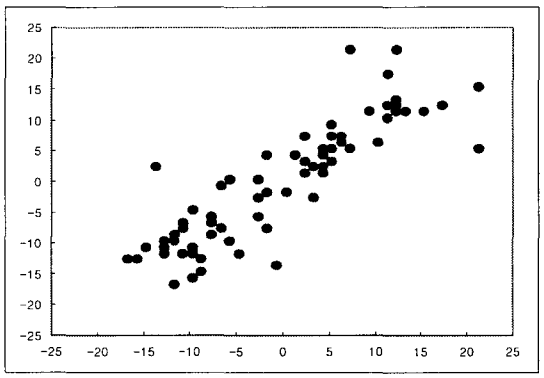


<그림 4> 피치오차에 대한 막대그래프

4. 요약 및 논의

본 논문은 기어의 피치를 측정하고 검사하기 위한 시스템의 구축사례와 이를 운용하는데 필요한 소프트웨어에 대해 설명하였다. 본 시스템의 개발로 인해 기대되는 효과는 두 가지로 요약된다. 첫째, 검사에 소요되는 경비와 시간이 절감될 수 있다. 치수가 수백에 이르는 대형 기어라 해도 피치검사작업을 신속하게 진행할 수 있으며 이 작업은 숙련된 작업자가 아니더라도 충분히 수행 가능하다. 둘째는 피치검사결과의 신뢰성이 향상된다는 효과를 들 수 있다. 피치데이터의 측정 및 수집 뿐 아니라 피치오차의 계산 및 규격한계의 비교를 전산프로그램으로 구현하였으므로 검사결과의 정확성 및 정밀도가 크게 향상될 수 있다. 뿐만 아니라, 피치데이터 및 검사결과의 축적은 향후 계획 중인 제조공정의 관리활동에도 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

앞으로 보다 엄밀한 피치오차의 평가 및 개선을 위해서는 자기상관(Autocorrelation)을 고려한 공정관리시스템의 구축이 필요할 전망이다. 3.2.2절에서 지적했고 또 <그림 4>에서 보는 바와 같이, 누적피치오차의 크기는 단일피치오차와 인접피치오차의 그 것에 비해 상대적으로 더 크다는 점을 알 수 있다. 실제로 <표 2>를 통해서도 지적하였듯이 이 제품의 경우는 누적피치오차만 더 개선될 수 있다면 충분히 1등급의 품질판정을 받을 수 있을 것으로 믿어진다. 이와 같이 누적피치오차가 커지는 현상은 피치 측정치 간에 강력한 자기상관이 존재할 때 나타나는 것으로 판단된다. 예를 들어, 본 제품에 대해 자기상관이 얼마나 존재하는가를 알아보기 위해 산점도를 작성해보자. <그림 5>는 단일피치오차 $U_1, U_2, \cdots, U_T$에 대한 산점도로서 (U_i, U_{i-1})을 타점한 결과를 보여주고 있다. 단 T=75이고 $U_0 = U_T$이다.



<그림 5> 피치 측정치의 자기상관

그림에서 보는 바와 같이 피치 측정치에는 자기상관이 높게 나타나고 있다. 실제로 자기상관계수를 계산해보면[3],

$$\widehat{\rho_1} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(x_{i-1} - \bar{x})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(x_{i-1} - \bar{x})^2}} = 0.87$$

에 이르고 있다. 굳이 체계적인 검정절차를

적용하지 않더라도 이 수치는 정상적인 공정 상태라고 말하기에는 꽤 큰 것으로 판단된다.

Reynolds, Jr. and Lu(1997)을 비롯한 여러 연구에서 지적하였듯이 제조공정에서 어느 정도 수준의 자기상관이 관측되는 것은 자연스럽다고 할 수 있을 것이다. 그러나 지나치게 높은 자기상관은 제조공정에 문제가 있으며 뭔가 조치를 요하는 신호로 해석할 수 있음은 잘 알려져 있다. 예를 들어 커터의 마모, 치구의 진동, 절삭유의 점도변화, 절삭조건의 변화 등과 같은 공정요인을 함께 고려해서 기어검사작업에 본 시스템을 활용하고 그 결과를 지속적으로 축적시킨다면 향후 EWMA 관리도와 같은 공정관측기법을 도입하는 데 중요한 토대를 제공할 수 있을 것으로 전망된다.

감사의 글

장비이용 및 자료제공에 협력해주신 21세기기계공업(주)에 감사드립니다. 본 연구는 학술진흥재단의 두뇌한국21 지역대학육성사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 김종하(1995), 기어와 호브반 작업, 기전연구사.

[2] _____(1995), *User's Manual: PC LabCard & DLL Driver*, Advantech, Taiwan.

[3] Box, G. E. P., Jenkins, G. M. and Reinsel, G. C.(1994), *Time Series Analysis*, Eaglewood Cliffs: NJ, Prentice-Hall.

[4] Reynolds, Jr., M. R. and Lu, C. -W.(1997), "Control charts for monitoring processes with autocorrelated data," *Nonlinear Analysis, Theory, Methods & Applications*, Vol. 30, No. 7, pp. 4059-4067.

[5] Stokes, A.(1992), *Gear Handbook: Design and Calculations*, Butterworth-Heinemann, Oxford.

[6] Suh, S. H., Lee, E. S., Kim, H. C. and Cho, J. H.(2002), "Geometric error measurement of spiral bevel gears using a virtual gear model for STEP-NC," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 335-342.

[7] Townsend, D. P.(1992), *Dudley's Gear Handbook*, McGraw-Hill, New York.

[8] JIS B1702-1960.

[9] KS B1406.