

사용 중인 피니언 축의 미세 균열 측정 방법에 관한 연구

장형록 · 최린* · 김용수

서울산업대학교 안전공학과 · *서울산업대학교 생산공학부

1. 서론

최근 경제구조가 고도화되고 생활수준이 향상됨에 따라 사회간접자본시설 및 각종 용도의 건축물에 대한 요구가 높으며, 특히 고층건물 건축시에 사용되는 리프트카의 수요 또한 증가되고 있다.

일반적으로 기계구조물은 사용기간동안 절대적 안전성을 확보하기 위하여 설계되고 있으나 실제 건설 현장에서 사용중인 피니언축에 균열이 발견되고 있으며 이로인하여 피니언축 수리보수 기간동안의 공사중지로 공기 지연 뿐만 아니라 리프트카추락으로 인한 인명사고가 발생 하는등 그 위험성이 매우 높다. 이에 따라 각종 구조물, 설비 및 기기의 안전 진단을 통한 유지보수가 중요시되고, 결함 검출의 정량화에 대한 연구, 기술 개발이 강력히 요구 되고 있다.

따라서 본 연구는 사용중인 피니언축의 미세 균열 측정을 위하여 현재 수행되고 있는 초음파탐상검사등의 비파괴검사기법(Nondestructive Technique)을 기준으로 피니언축에 발생이 예상되는 홈의 반사율과 에코높이와 관계 결함의 반사 지향성, 원형평면결함 등 각종 결함의 크기(Sizing) 추정방법등 이론적 근거를 토대로 실험적으로 실제 피니언축에 가공한 평저공(flat bottom hole;FBH), 슬릿(Slit) 인공결함에 의한 결함평가의 시험조건 선정과 결함크기의 추정등 사용중인 피니언 축의 균열 측정에 초음파 탐상 검사방법을 통하여 새롭게 접근하여 보았다.

2. 실험장치 및 시험편

2.1 실험장치

피니언축의 초음파탐상검사에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같으며, Fig. 2는 실험에 사용된 장치를 나타내고 있다. 초음파탐상기는 Krautkramer 사의 USD 15를 사용하였으며 초음파 파형의 관찰과 신호해석을 위해 디지털 스토리지 오실로스코프(Lecroy 9374M)를 사용하였다. 탐촉자는 Krautkramer 사의 MB2S(2MHz, ϕ 10mm)와 MB4S(4MHz, ϕ 10mm)를 사용하였다. 접촉매질은 현장에서 일반적으로 사용하는 기계유를 사용하였다. 또한 정확한 장비와 실험의 보정을 위하여 표준시험편 STB-A1과 STB-G를 이용하였으며, PC를 이용하여 데이터를 처리하였다.

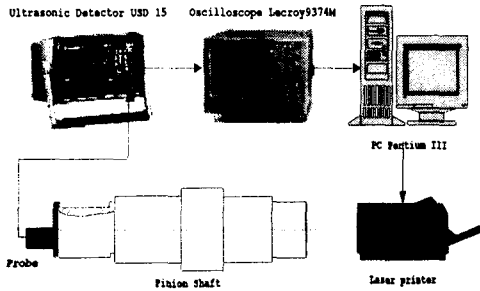


Fig. 1 실험장치의 구성도

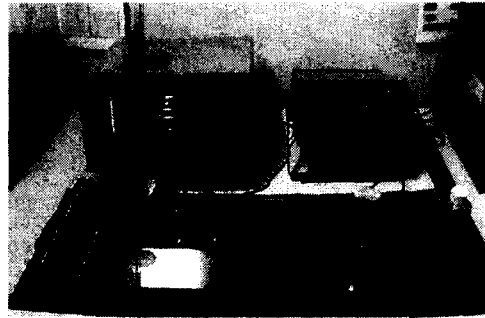


Fig. 2 실험장치의 전경

2.2 시험편

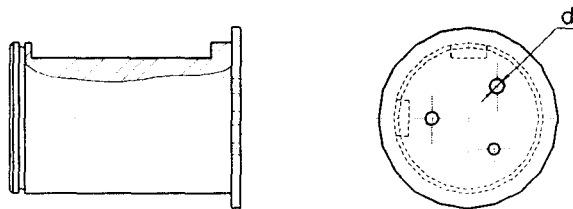
피니언축의 초음파탐상검사 기준의 실험적 검증을 위해 본 연구에서 Fig. 3과 같이 피니언축에 사용된 재료와 동일한 SM45C로서 이의 화학적 성질과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2와 같고, 2종류의 인공결함 시험편을 제작하였다. 결함검출능 (detectability)의 실험적 검증을 위해 내부결함에 상응한 평저공(flat bottom hole;FBH)을 Fig.3(a)와 같이 가공하였으며, 탐상(주사)감도와 검출레벨(평가감도)의 적정성 여부 등을 실험적으로 검증하기 위해 피니언축의 단차 표면에 표면 크랙에 상응하는 슬릿 (slit)형 결함을 Fig.3(b)와 같이 가공하였다.

Table. 1 재료의 화학적인 구성(wt%)

Material	C	Si	Mn	P	S
SM45C	0.47	0.20	0.74	0.01	0.18

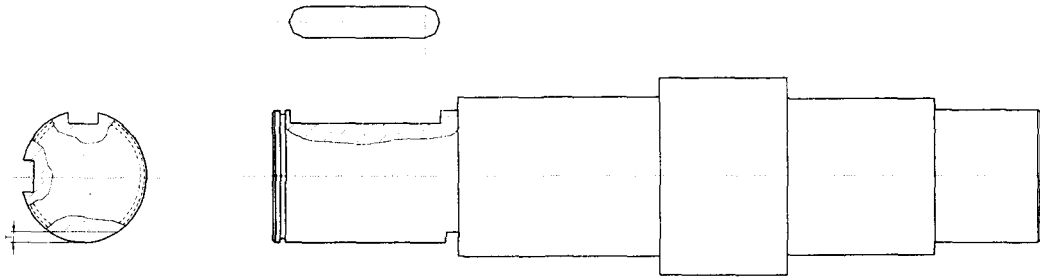
Table. 2 재료의 기계적인 특성

Yield strength	Yield strength	Elongation	Hardness
342 MPa	610 MPa	23.0 %	170 HB



$d = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0$

(a) FBH



T = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0

(b) Slit defect

Fig. 3 인공결함 시험편

3. UT 기준에 대한 실험적 검증

초음파탐상검사 기준에 대한 실험적 검증을 위하여 아래와 같은 실험을 수행 하였다.

3.1 재료특성평가

피니언축의 초음파 음속 측정을 위하여 MB4S 탐촉자를 STB-A1을 사용하여 측정범위를 200mm가 되도록 조정하였으며 Fig. 3(a) 시험편의 길이방향 두께 76mm의 방향으로 초음파가 진파하도록 탐촉자를 접촉시켜 측정하였다. 그 결과 음속은 약 5914m/s였다. 초음파 감쇠계수 측정을 위하여 MB4S 탐촉자를 STB-A1을 이용하여 측정범위를 200mm로 조정하였으며 탐촉자를 Fig. 3(a) 시험편의 건전부에 위치하여 제1저면에코가 표시기상에 80%가 되도록 탐상기의 게인을 조정하였으며 그 결과 감쇠계수는 약 0.0236 dB/mm였다.

3.2 최적 시험조건의 선정을 위한 실험적 검증

본 실험에서는 UT 기준에 대한 시험조건의 선정을 위한 실험적 검증을 위해 Fig. 3의 시험편에 가공한 인공결함(FBH, Slit)을 사용하여 사용탐촉자의 결함검출능과 탐상(주사)감도와 검출레벨(평가감도)의 적정성 여부 등을 검토하기 위해 다음 사항들에 대한 고찰과 실험적 검증을 수행하였다.

(1) 탐상방향의 선정

조립된 리프트 피니언축의 경우 내부 결함보다는 피니언축 단차 부위에 표면크랙이 잘 발생하는 것으로 보고되고 있기 때문에 종파를 이용한 축방향의 수직탐상을 주로 적용하였다.

(2) 탐촉자 선정

피니언축의 수직탐상에서는 아래 사항들을 고려한 실험적 검증을 통해 시험주파수(2MHz~4MHz)와 진동자 치수(ϕ 10mm)를 적용하고 결함검출능 등을 검토한다.

(가) 주파수

주파수가 높을수록 탐촉자의 지향성은 예리하기 때문에 결함위치의 측정정밀도를 높이기 위해서는 높은 주파수가 좋다.

(나) 진동자 치수

진동자의 지향성은 결함위치를 정확히 측정할 수 있도록 지향성은 예리하게 진동자 치수는 큰 것을 선택하면 좋다. 결함면이 탐상면과 평행이 아닌 결함에 대해서는 그 결함의 빠뜨림을 방지하기 위해 지향성이 예리하도록 진동자 치수가 작은 것을 선택하면 좋다.

3.3 평저공(FBH)에서의 결함크기와 에코높이와의 관계

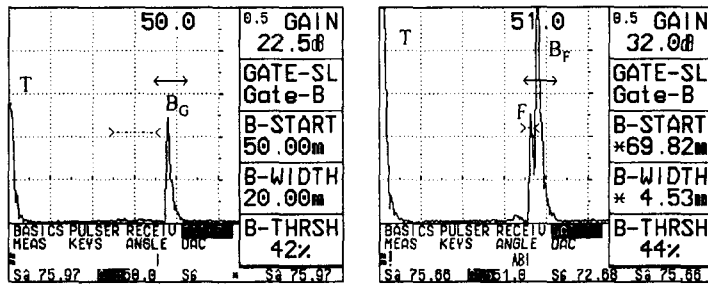
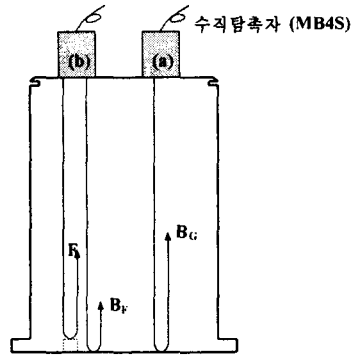
피니언축에 발생이 예상되는 홈(원형평면결함이라 가정)의 반사율과 에코높이와의 관계, 결함의 반사지향성, 결함검출능(detectability) 등의 실험적 검증을 위해 내부결함에 상응한 평저공(flat bottom hole, FBH) 인공시험편을 이용하여 저면에코방식과 시험편방식에 의한 결함크기와 에코높이와의 관계를 검토하였다.

(가) 저면에코방식

저면에코방식에 의한 결함크기와 에코높이와의 관계에 대한 실험 순서는 다음과 같다.

- 1) MB4S(4MHz) 탐촉자를 STB-A1 표준시험편을 이용하여 측정범위를 100mm로 조정한다.
- 2) Fig. 3(a) 시험편을 Fig 4(a)와 같이 탐상하고 표시기상에 저면 에코가 50%가 되도록 탐상기의 감도를 조정하고 이때의 빔진행거리 및 계인값을 읽는다. (빔진행거리 $x_{B1} = 76mm$, $H_{BG} = 22.5dB$)
- 3) 탐상기의 감도를 20dB 높여 지름 $d = 5mm$ 인 결함의 에코를 Fig. 4(b)와 같이 검출하고 결함에코높이가 최대가 되는 탐촉자위치에서 결함에코높이가 표시기상에 50%가 되도록 탐상기의 감도를 조정하고 그때의 빔진행거리 및 계인값을 읽는다. ($x_F = 72.69mm$, 계인값 $H_F = 32dB$)
- 4) 건전부의 저면에코높이 및 결함부의 저면에코높이를 기준으로 했을 때의 결함에코높이 F/B_G 를 다음식으로부터 구하여 Table 3에 표시하였다.

$$F/B_G = 20 \times \log(h_F/h_{BG}) = -(H_F - H_{BG})$$



(a) H_{BG} 측정

(b) H_F 측정

Fig. 4 기준으로 하는 저면에코의 측정방법

Table. 3 저면에코방식에 의한 탐상결과

사용탐촉자		MB4S (2MHz, 진동자직경 = φ 10mm)										
측정범위		100 mm										
건전부의 저면에코높이		22.5 dB										
탐상감도 $H_{BG} + 20dB$		42.5 dB										
결함에코 데이터	결함 직경 dmm	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	
	빔진행거리 W_F	×	×	72.90	72.86	72.64	72.64	72.63	72.65	72.66	72.69	
	$h_F(\%)$	×	×	20	31.5	50	70.5	90	초과	초과	초과	
	$H_F(dB)$	×	×	51	46.5	42.5	39.5	37	35	33.5	32	
F/B_F		×	×	-28.5	-24	-20	-17	-14.5	-12.5	-11	-9.5	

(나) 시험편방식

시험편방식에 의한 결함크기와 에코높이와의 관계에 대한 실험 방법은 다음과 같다.

- 1) MB4S(4MHz) 탐촉자를 STB-A1 표준시험편을 이용하여 측정범위를 100mm으로 조정한다.
- 2) Fig. 5과 같이 STB-G V8의 표준결합의 에코높이가 표시기상에 50%가 되도록 탐상기의 감도를 조정하고 그 때의 빔진행거리 및 게인조정값을 읽는다.(빔진행거리 $x_{B1} = 80.12mm$, 게인 $H_{V8} = 49dB$)
- 3) Fig. 3(a)시험편의 지름 $d = 5mm$ 인 결함의 에코를 검출하고 결함에코높이가 최대가 되는 탐촉자위치에서 결함에코높이가 표시기상에 50%가 되도록 탐상기의 감도를 조정하고 그때의 빔진행거리 및 게인값을 읽는다. (빔진행거리 $x_F = 72.68mm$, $H_F = 31.5dB$)
- 4) STB-G V8의 표면결함에코높이를 기준으로 했을 때의 결함에코높이 F/B_G 를 다음식으로부터 구하여 Table 4에 표시하였고, 결함에코높이와 결함흠 직경을 Fig. 6에 나타내었다.

$$F/B_G = 20 \times \log(h_F/h_{V8}) = -(H_F - H_{V8})$$

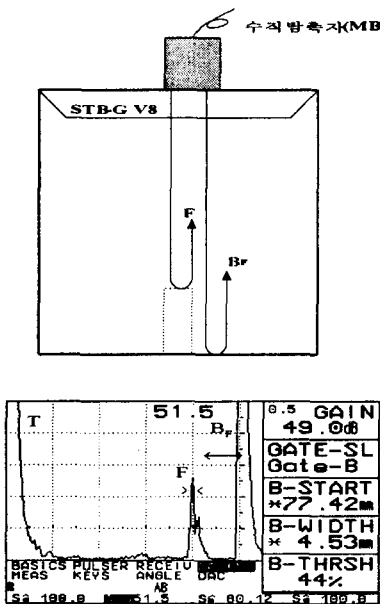


Fig. 5 기준으로 하는 STB-G V8의 결함에코 측정방법

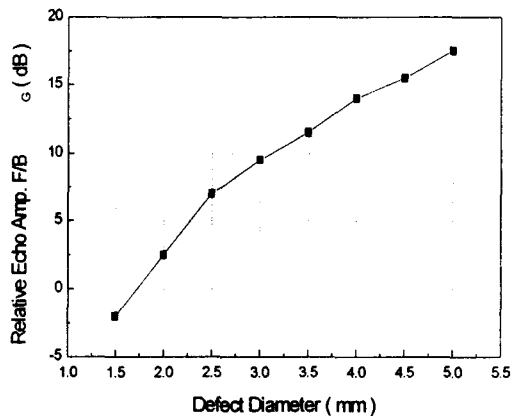


Fig. 6 시험편방식에 의한 FBH탐상결과

Table. 4 시험편방식에 의한 탐상결과

사용탐촉자		MB4S (4MHz, 진동자직경 = ϕ 10mm)									
측정범위		100 mm									
STB-G V8 표면결함에코높이		49 dB									
결함에코 데이터	결합 직경 dmm	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
	빔진행거리 W_F	×	×	72.88	72.86	72.64	72.64	72.63	72.64	72.66	72.68
	H_F (dB)	×	×	51	46.5	42	39.5	37.5	35	33.5	31.5
	F/B_F	×	×	-2	2.5	7	9.5	11.5	14	15.5	17.5

3.4 Slit 깊이와 에코높이와의 관계

피니언축의 단차 표면에 가공한 슬릿(slit)형 결함을 이용하여 슬릿깊이와 에코높이와의 관계로부터 탐상(주사)감도와 검출레벨(평가감도)의 적정성 여부 등을 아래와 같이 실험적으로 검증하였다.

- 1) MB4S 탐촉자를 STB-A1을 이용하여 탐상기의 측정범위를 500mm로 조정한다.
- 2) Fig. 3(b)의 시험편을 탐상하여 저면에코가 표시기상에 80%가 되도록 게인을 조정하고 12dB 올려 탐상한다.
- 3) 결함의 에코높이를 80%가 되게 하여 이때의 게인값을 읽는다. 단, 결함에코가 나타나지 않을 때는 탐상감도와 관계없이 표시기 상에 결함에코가 80%가 되도록 게인값을 조정하고, 시험편의 표면에 마킹이 있는 부분에서는 전달손실 만큼의 보정을 한다.
- 4) 같은 방법으로 깊이가 다른 결함을 탐상하여 게인값을 기록한다.
- 5) Fig. 3(b)시험편의 슬릿깊이 $d=0.5\text{mm}$ 인 결함을 탐상하고 표시기상에 결함에코가 20%가 되도록 탐상감도를 조정하여 이때의 게인값을 최소탐상감도로 한다.
- 6) MB2S 탐촉자를 같은 방법으로 슬릿결함을 탐상한다.

Fig.7은 4MHz 탐촉자(MB4S)로 슬릿결함을 탐상한 결과이다. 현재 피니언축이 분해된 축의 초음파탐상검사 기준에서 적용하고 있는 평가감도(대비시험편에 의한 저면에코높이 80% + 18dB, 가공노치가 있는 경우 + 12dB)로는 슬릿깊이가 2mm 이하의 경우는 검출이 되지 않음을 보여주고 있다. Fig. 8는 2MHz 탐촉자(MB2S)를 사용한 경우로 슬릿깊이가 2.5mm 보다 작은 결함은 검출되지 않았다. 따라서 피니언축의 표면에서 발생하는 크랙 보다 더 유해한 슬릿 결함의 깊이는 최소 0.5mm 정도까지는 초음

과탐상검사에 의해 검출이 되어야 할 것이다. 결함지시가 표시기상에 20%(합부판정 레벨)로 검출이 되는 평가감도를 확보하려면 평가감도를 저면에코높이 80%에 + 24dB의 감도로 탐상해야 함을 알 수 있다.

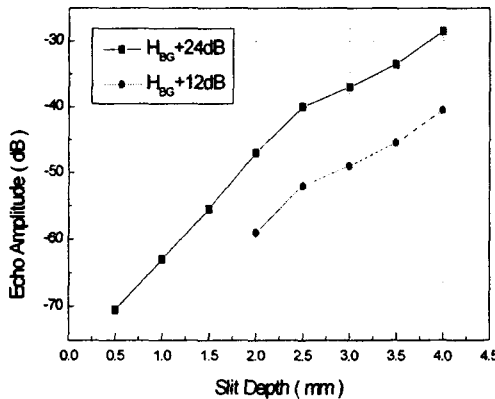


Fig. 7 MB4S를 이용한 Slit 결함의 탐상결과

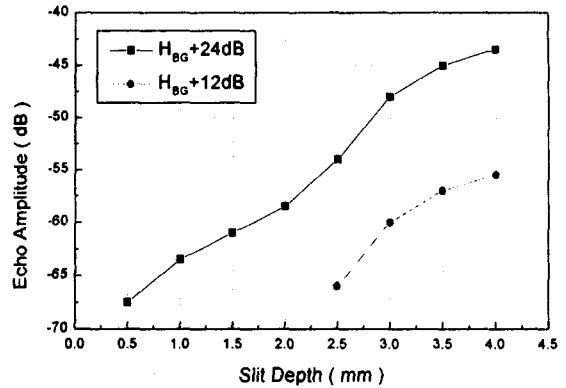


Fig. 8 MB2S 탐촉자를 이용한 Slit 결함의 탐상결과

4. 결론

사용중인 피니언 축의 미세균열을 측정을 위해 초음파탐상검사를 기준으로 그 유용성 유무를 실험적으로 수행한 결과는 다음과 같다.

- 1) 피니언 축에 발생이 예상되는 내부결함에 상응한 평저공(flat bottom hole;FBH) 인공시험편 실험에서는 결함직경 1.5mm까지는 측정가능 하였으나 그 이하에서는 측정이 불가능하였다.
- 2) 4MHz 탐촉자(MB4S)로 슬릿 결함을 탐상한 결과 현재 피니언 축이 분해된 축의 초음파탐상검사 기준에서 적용하고 있는 평가감도(대비시험편에 의한 저면에코높이 80%+18dB, 가공 노치가 있는 경우 + 12dB)는 슬릿깊이가 2mm이하의 경우는 검출이 되지 않음을 보여주었다.
- 3) 2MHz 탐촉자(MB2S)를 사용한 경우로 슬릿 깊이가 2.5mm보다 작은 결함은 검출되지 않았다. 따라서 피니언 축 표면에서 발생하는 크랙보다 더 유해한 슬릿 결함의 깊이는 최소 0.5mm정도까지는 초음파탐상검사에 의해 검출이 되어야 한다는 보고가 있어 최소 0.5mm정도까지는 초음파탐상검사에 의해 검출 되어야 할 것이다. 결함지시가 표시기상에 20%(합부판정 레벨)로 검출이 되는 평가감도를 확보하려면 평가감도를 저면에코높이 80%에 + 24dB의 감도로 탐상해야 함을 알 수 있다. 또한 최소 0.5mm의 결함지시가 20%가 되는 합부판정 레벨의 감도가 4MHz 탐촉자는 69dB정도이나 2MHz 탐촉자는 75dB로 약 6dB정도 4MHz 탐촉자가 감도가 높은 것

으로 나타나 탐촉자의 선정시 2MHz보다 4MHz 탐촉자가 결함검출능이 높은 것으로 나타났다.

참고문헌

- [1] I.N.Ermolov : Non-destructive Testing, 5, (1972), P. 187
- [2] 신 비파괴검사편람, JSNDI, pp 226-336,
- [3] 박익근, 이의종, 초음파탐상시험실기실습, 도서출판 골드
- [4] JIS G 0587 (炭素鋼及びの低合金鋼鍛鋼品の超音波探傷試験方法及び試験結果の等級分類方法)
- [5] ASTM A 418
- [6] Masuyama, F., "Application of Nondestructive Life Assessment Techniue with Quantifying Structural Degradation of Aged Power Boiler" , Mitsubishi Heavy Industries Ltd, Technical Review, Vol. 28, No. 3, pp 168~173, 1991
- [7] Jea-do Kwon, "Life Prediction and Fatigue Strength Evaluation for the Artificial Corrosion Materials", Fracture and Strength 93, Ibaraki, JAPAN, 1993
- [8] 横山邦彦, "超音波法・バルクハウゼンノイズ法によるクリープ損傷の評価", 日本非破壊検査協會 平成7年 秋季大會講演概要集, pp 139, 1995
- [9] 尾野英夫, 仁寛太, 吉田 昌, 堀 川 式, "疲勞損傷の非破壊的檢出と殘存壽命予測法", 溶接學會誌, 56(7), pp 35-39, 1987
- [10] 강인원, "리프트 피니언 축 잔존수명 예측에 관한 연구", 석사학위청구논문, 2002, 서울산업대학교