

## 차동기어의 재질별 진동·소음 특성에 관한 연구

최은오\*, 김희승\*\*

### A Study on the Noise · Vibration Characteristics of Differential Gear according to the Materials

Euno Choi\*, Hei Song Kim\*\*

#### Abstract

The noise · vibration characteristics of Hypoid gears which were made from three separate materials(SCM, TSCM, SNCM) under the identical process were investigated for the sake of durability improvement of differential gear compatible with low level noise gear set. For this study, we developed a rig experimental equipment which can perform close noise · vibration experiment of differential gear. Consequently, we could analyze the noise · vibration characteristics of final reduction gear by materials, and also we observed changes in both metallic structure and hardness according to the materials of pinion gear. In addition to this, the correlation between the vibration of the differential gear and the interior noise of the passenger vehicles was proved by analyzing the results of rig vibration experiment and field noise test.

Keywords : Differential gear(차동기어), Final reduction gear(종감속 기어), Hypoid gear(하이포이드 기어), Gear noise(기어 소음), Rig(장치 장착 도구), Mesh frequency(몰림 주파수), Solid borne sound(고체 전달음), Order tracking(차수분석)

\* 단국대학교 대학원 기계공학과

\*\* 단국대학교 기계공학과

## 1. 서 론

기어 이(齒)의 물림시 발생하는 기어 소음(Gear noise)은 비교적 주파수가 높은 순음(純音)이기 때문에, 레벨(Level)이 낮더라도 듣기 거북한 이음(異音)이다. 특히 최근 차량 실내소음의 정숙화와 함께 기어 소음 저감의 요구가 한층 엄격하게 되었다.<sup>(1)(2)</sup>

이러한 기어 소음 요구 품질을 실현하는 수단은 진동 전달부재의 제진성 향상, 차체 패널(Panel)의 방음성 향상 등이 있지만, 이러한 대책은 차량의 중량증가를 초래하는 경향이 있어 연비와 가속성능 등의 성능과 양립하는 것이 곤란하다. 따라서 기어 소음 발생원에서부터 저감하는 것이 요구되며, 치차의 제조에서 고정도화(高精度化)가 중요한 문제가 되고 있다.

기어 물림음인 기어 소음은 기어제원, 기어정도(精度) 및 조립오차에 기인한 기어에 대한 불규칙한 회전이 기어진동을 발생시키고 그 진동이 차체 패널에 이르러 방사되는 고체 전달음(Solid borne sound)과 기어 상자(Gear case)에서 방사되어 차체 패널을 투과하여 들리는 공기전달음(Air borne sound)으로 된다. 이런 성분중 차량 실내소음상 문제가 되는 것은 고체전달음인 경우가 많고, 차체 전달계와 기어 장치에서 차량 전체 시스템으로서의 검토가 필요하다. 기어 상자의 진동 전달 경로는 Fig. 1과 같다.<sup>(3)</sup>

그리고 차동기어 장치(Differential gear)로서 기어 소음 평가, 즉 기어 장치에서 치차 가진력을 간단하게 평가하는 방법으로서의 기어 한 쌍을 무부하 물림상태로 행하는 방법이 있지만 차량에서 기어 소음 평가결과와 상관성을 높이기 위하여 차동기어 장치를 조립한 상태에서 기어 소음을 평가할 필요가 있다.

기어 소음은 마이크로폰(Microphone) 또는 소음계(Sound level meter)를 이용하여 차동기어 장치에서 일정거리 떨어진 위치에서 측정한다. 차동기어 상자(Differential gear case)에 가속도계를 부착하여 기어 상자의 진동을 측정하면 보다 정밀하게 기어 진동 신호를 측정할 수 있다. 기어 상자의 진동량은 기어만의 진동으로 볼 수는 없으나 기어 소음과 직결되므로 좋은 측정 수단이 될 수 있다. 기어 상자의 진동을 측정한 후 시험대상 기어에 대한 물림의 1차 성분을 추출하여 그 진동 레벨로서 기어 소음의 대응특성치(代用特性置)로

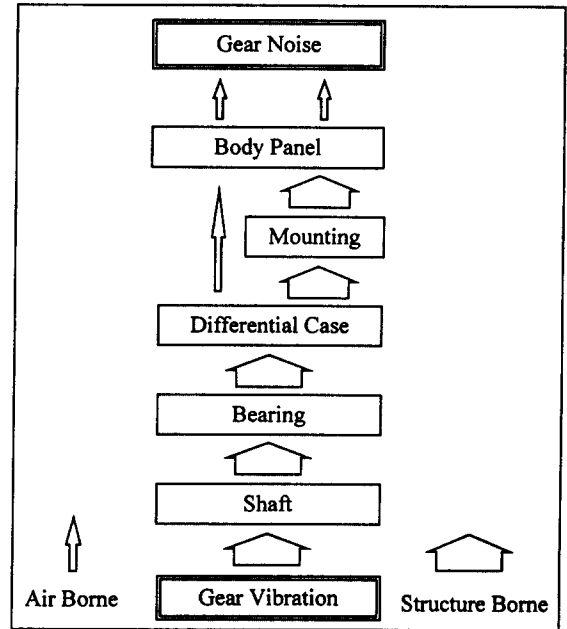


Fig. 1 The transmission path of gear vibration

하고 있다.<sup>(4)</sup>

본 논문에서는 차동기어 장치에서 종감속 기어의 내구성을 향상시키는 동시에 고강도화 및 저소음 치차의 양립<sup>(5)</sup>을 위해 동일한 공정 하에서 하이포이드 기어(Hypoid gear) 원소재를 3가지(SCM, TSCM, SNCM) 재질로 각각 달리 제작하여 rig에서 근접 진동·소음 실험을 실시하여 소재별 진동·소음 특성을 분석하고, rig 진동실험과 실차 소음실험의 결과를 비교 분석하여 차동기어 상자의 진동과 차실 소음과의 상관성을 검토하였다. 또한 하이포이드 기어 치면의 경도를 측정하고 주사 전자현미경(SEM)을 통하여 조직을 관찰하였다.

## 2. 실 험

### 2-1. Rig 실험

실차에서 차동기어 장치의 소음을 측정하고 분석하기에는 어려운 점이 많고 근원적인 한계가 있어 차동기어 장치의 탈부착이 용이하고 저렴한 경비, 그리고 짧은 시간동안에 소음과 진동을 동시에 측정 가능하도록 Fig.2

와 같이 rig 실험장치를 설계·제작하였다.

또한 본 실험장치는 동력계(Dynamometer)와 비교하여 실험공간을 작게 차지하고 있으며 엔진으로 구동하는 실차 동력계의 엔진의 소음·진동 등으로 인해 소음 측정이 불가능한 단점을 극복하였다. 그리고 rig 진동실험 결과와 실차소음실험 결과를 비교하여 기어 상자 진동의 차실 소음에 대한 기여도를 확인할 수 있다.

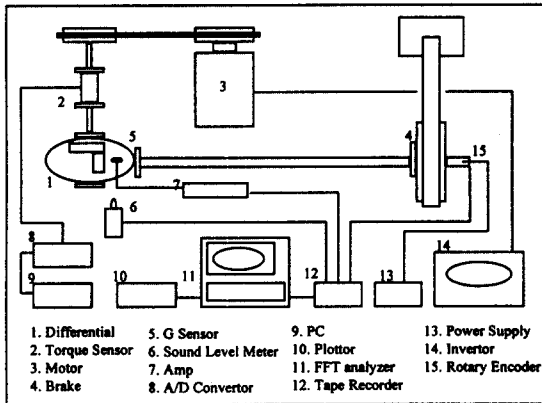


Fig. 2 The schematic diagram of the rig experimental apparatus

아래 사항은 실험 장치와 실험 방법에 대한 설명이다.

모터 인버터에서 추진축의 회전속도를 2000rpm에서 4000rpm까지 서서히 상승시켜 이 때 기어 물림으로 인하여 차동기어 상자에서 발생하는 진동과 소음 신호를 회전속도 신호(Tacho signal)와 함께 테이프 레코더(Tape recorder)에 기록한 후 주파수 분석기(FFT analyzer)로 분석하였다. 분석은 먼저 진동·소음 신호를 waterfall diagram으로 출력하여 차수성분을 확인·추출한다. 그리고 물림 주파수(Mesh frequency)에 대한 분석후 축(Shaft), 기어 상자 등의 공진의 가능성도 검토한 다음, 재질별로 전체 레벨(Overall level), 물림 1차, 물림 2차 성분을 비교한다.

- ① 모터(Motor) - 15Hp×4P(11Kw), 최대회전속도 1500rpm  
 모터속도 : Drive shaft속도 = 20 : 15, Diff. 중감속비 = 40 : 9 (4.444 : 1)
- ② 가속도계(G sensor) - Pinion shaft taper

bearing 부 case상단 부착

- ③ 소음계(Sound level meter) - Pinion shaft taper bearing 부근 위치
- ④ Rotary encoder (Tacho signal) - Propeller shaft 끝단 부착 회전수 검출
- ⑤ Ring gear shaft와 구동모터 사이에 실차 Drive shaft (CVJ) 설치, Pinion shaft와 Brake drum 사이에 실차 Propeller shaft (U/J) 설치
- ⑥ 차동기어 상자 주위를 방음재로 차음
- ⑦ P/Shaft 속도를 증가(2000rpm → 4000rpm)시켜 진동·소음신호 order tracking.
- ⑧ 소재별, Drive/Coast side- 진동·소음 신호 overall level, 물림 1차 성분 분석.
- ⑨ 기어 물림 주파수(Gear mesh frequency) 대비 진동·소음 신호 Amplitude분석.
- ⑩ 차실 소음과 차동기어 장치 진동 특성의 상관성 분석.

원주방향 진동 가속도와 음압의 관계를 보면 회전수가 증가하면 원주방향 가속도가 증가하고 이에 따라 음압이 증가한다. 회전수 증대로 인해 고주파 성분 소음이 증가한다. 또한 하중에 대한 음압 상승의 경향은 원주방향 진동 가속도와 같은 경향을 보인다.

음압상승 ∝ Torque(a) a : 0~2.0, 평균 1.0 (회전수가 극히 낮은 경우 제외)

하중(부하)이 커지면 원주방향 진동 가속도의 진폭은 커지나 파형은 거의 변화 없다. 즉, 진동 가속도와 음압의 주파수 성분은 하중이 변하여도 거의 변화하지 않으므로 하중이 크게 될 때 음은 커지지만 높게 되지는 않는다.

### 2-2 실차실험

Fig.3과 같이 후륜구동 승용차의 차동기어 장치 소음을 측정하기 위하여 실차 후석 중앙 머리 받침 부근에 마이크로폰을 설치하고, 소음 신호와 회전속도 신호를 테이프 레코더로 기록한 후 실험실에서 테이프를 재생하여 차수분석(Order tracking)기능이 있는 주파수 분석기를 이용하여 분석한다.

주행시험장에서 가속(Drive side)과 감속(Coast side)상태에서 측정하였으며 차실소음중 차동기어 장치

소음이 차지하는 기여도를 알기 위하여 물림 1차 성분<sup>(6)</sup>을 분석하였다. 전체레벨(Overall level)에서 관능평가상 7점에 해당하는 15dB를 감한 평균 직선으로부터 특정 기어의 이상유무를 판명하는 방법이다.

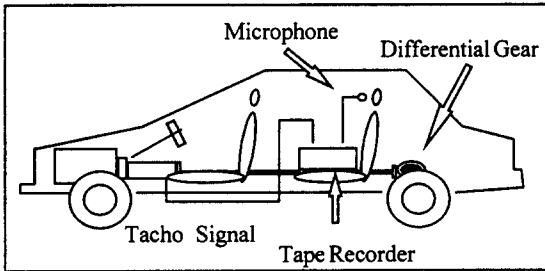


Fig. 3 The schematic diagram of field test

### 2-3. 하이포이드 기어의 재질분석

동일한 공정으로 제작된 후륜구동 승용차의 차동기어 장치용 하이포이드 기어는 SCM, TSCM, SNCM의 3가지이며, 화학 성분의 비교에서 규소(Si) 성분을 보면 3가지 재질중 TSCM이 가장 적고, 몰리브덴(Mo)은 TSCM이 가장 많다. 규소가 많아지면 표면이상층이 높아지고 이로 인해 기어의 피로특성 및 충격특성이 약화되며, 몰리브덴이 많아지면 탄화물이 안정화되고 결정립의 조대화를 방지하며, 오스테나이트의 입계강도를 높여 기어의 충격특성을 향상시킨다.

Table 1에서 표면이상층이란 침탄가스중에 포함된 산소가 소재의 합금원소(Si, Mn, Cr)와 반응하여 산화물을 형성한 입계층으로서 불완전한 소입층이라 하며, 표면이상층 지수가 높으면 소입성이 저하되어 치차의 표면경도가 저하되고 피로강도를 현저히 떨어뜨리게 된다. 그리고 침탄피로강도가 높으면 치차의 내구수명을 향상시키며, 침탄재의 충격인성이 향상되면 충격부하시 치차수명이 향상된다. 또한 이들 특성이 향상되면 소회화가 가능하다.

Table 1 Characteristics of the materials

강 종	SCM	TSCM	SNCM
표면이상층 지수	4.3	2.8	3.9
피로강도 지수	0.06	0.16	0.19
충격 지수	0.15	0.53	0.32

이상과 같은 원소재의 화학성분, 기계적 성질 및 침

탄·열처리성 등의 평가에서 TSCM > SCM > SNCM 순으로 TSCM이 후륜 구동 승용차의 차동기어 장치용 하이포이드 기어 소재로 적합하다고 판단하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1 Rig 실험

Fig. 4, 5에 나타난 바와 같이 rig 진동실험 결과 물림 1차 성분에서 SCM은 400Hz에서와 450Hz영역에서 큰 진동 레벨을 보이고 있으나 TSCM은 350~430Hz 영역과 450Hz영역(비교적 넓은)에서 진동 레벨을 보이고 있다. 또 전체레벨을 보면 SCM > TSCM > SNCM 순으로 우수함을 보이고 있다.

Fig. 6, 7은 rig 근접 소음 실험의 결과이다. SCM이 다른 재질의 하이포이드 기어가 적용된 차동기어 장치 보다 비교적 낮은 소음레벨을 보이고 있다. 차속분석 결과 SCM은 물림 1차 성분이 비교적 강조되어 나타나는 반면, TSCM은 물림 1차, 물림 2차, 물림 3차 성분들이 혼재되어 나타나는 양상을 보이고 있어 SCM이 고체전달음의 감쇠성이 우수하며 따라서 음질 면에서도 우수하다고 판단된다.

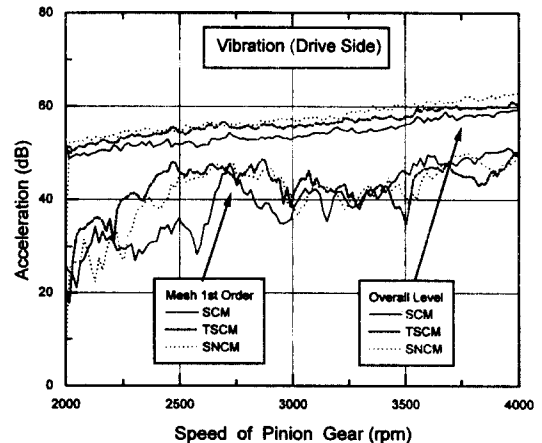


Fig. 4 Rig vibration test according to the hypoid gear materials at drive side

### 3-2 Rig 진동실험과 실차 소음실험의 결과 비교 및 상관성 검토

기어 상자의 진동은 기어의 동하중 변동 부분이 고체 전달음이 되어 발생하므로 입력은 원주방향 진동이고 출

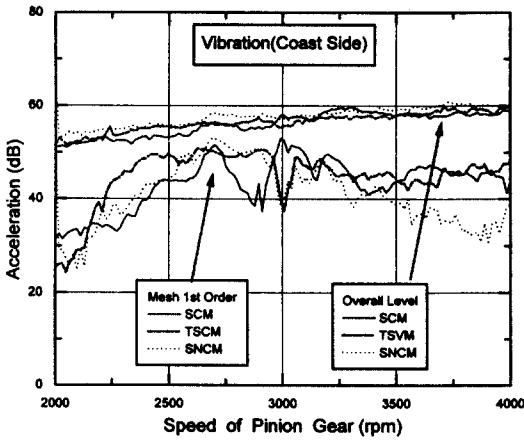


Fig. 5 Rig vibration test according to the hypoid gear materials at coast side

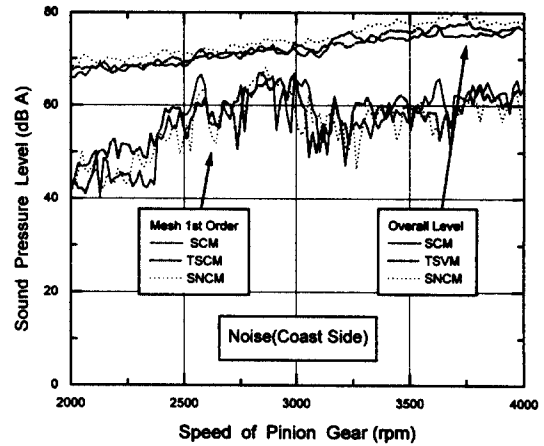


Fig. 7 Rig noise test according to the hypoid gear materials at coast side

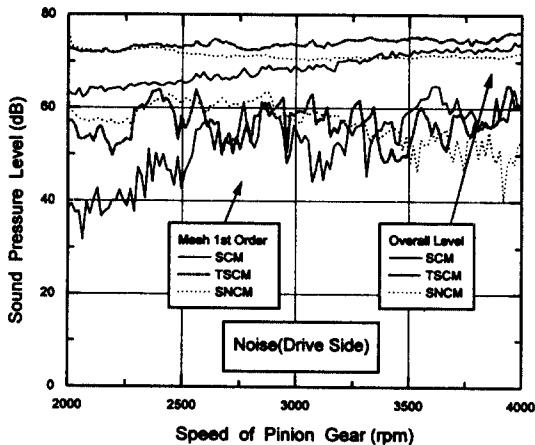


Fig. 6 Rig noise test according to the hypoid gear materials at drive side

력은 기어 상자측 벽의 진동이다. 따라서 진동양식은 입력의 특성 외에 각축 벽의 주파수 특성, 위상 특성에 의존한다. 공진점이 다수 존재하고 공진 주파수에서의 측벽의 진폭도 크다. 입력인 기어 원주 방향 진동은  $f = (N \cdot Z) / 60$  의 기본 주파수와 이것의 배조파이고, 기어 상자의 주파수 특성은 크거나 두께에 따라 다르지만 고유진동수는 수백 Hz이다. 따라서 기어 진동과 기어 상자 진동은 수백 Hz에서부터 비교적 넓은 점에서 공진하게 된다.

기어 소음은 이론적으로 순음(Pure sound)이다. 하이포이드 기어가 매우 정밀하고 다른 오차가 상당히

적일 경우 차수분석 결과 다른 성분은 거의 나타나지 않고 전체소음 중 9차 성분이 지배적일 것이나 실제 차동기어 장치의 경우 각종 오차를 내포하고 있어 실험 결과 1차, 2차, 3차, ..., 9차, ..., 18차 등의 다양한 차수 성분이 검출되었다. 하이포이드 기어의 잇수(齒數)가 9개이므로 9차 성분, 또는 18차 성분등의 배조파 성분이 나타나야 차동기어 장치 소음중 기어 물림이 끼치는 기여도가 가장 크다고 할 수 있으나 실제 결과는 물림 주파수가 지배적이지 못하다.

현재의 실차 차실 소음측정에서는 차수분석 후 9차 성분을 차동기어 장치 소음으로 간주하고 있다. 이것은 차동기어 장치의 진동·소음중 물림 주파수로서 물림 1차 성분이 가장 지배적이라는 가정에 근거를 두고 있다. 또, 차동기어 장치의 진동·소음 전체레벨은 차수성분의 최고치(Peak level)보다 큰 것이 사실이다.

그러므로 실차 후석 중앙에서 가·감속 주행중 차실 소음을 측정할 소음치의 9차 성분이 전체레벨 보다 15dB 이상 낮으면 양호한 수준으로 판단하고 있으나, 일정 기준 이상 낮다고 하더라도 실차 차실 소음의 9차 성분이 차동기어 장치 소음의 전체가 아니라는 점에서 우수하다고 판단하기에는 무리한 점이 있다.

그리고 실차 실험과 rig 실험의 비교 결과(Fig. 8, 9, 10) 차동기어 상자 진동의 피크 주파수와 차실 소음 피크 주파수는 거의 비슷하며 곡선의 형태에서도 상당히 유사한 점을 찾을 수 있다. 따라서 차동기어 상자 진

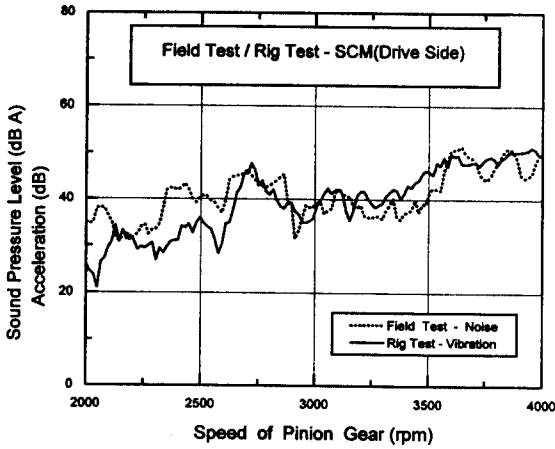


Fig. 8 Comparison of rig vibration and field noise test for the SCM hypoid gear differential

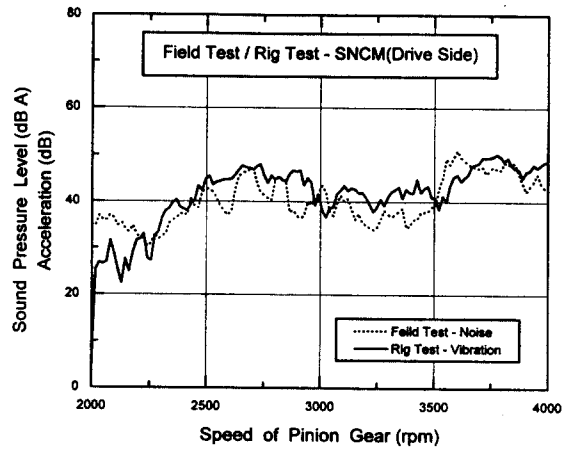


Fig. 10 Comparison of rig vibration and field noise test for the SNCM hypoid gear differential

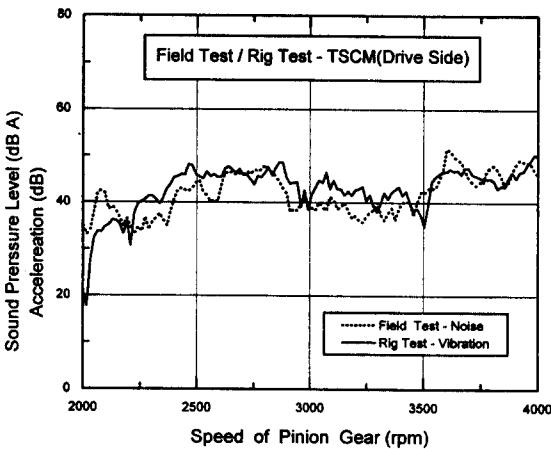


Fig. 9 Comparison of rig vibration and field noise test for the TSCM hypoid gear differential

동의 물림 1차 성분이 차실 소음의 9차 성분에 상당한 영향을 끼치는 것을 알 수 있다. 소음보다는 진동의 경우 더욱 큰 영향을 끼치고 있다. 이것으로 차동기어 상자 진동의 대부분이 차실 소음으로 바뀌어 전달되고 있음을 알 수 있으며, 차동기어 장치 소음이 실내 소음에 미치는 것은 공기전달음 보다는 고체전달음이 주요 인자가 되고 공기전달음은 실내 소음에 미치는 영향이 적음을 알 수 있었다. 이로써 rig상에서의 진동·소음 실험으로 차실 소음에 대한 차동기어 장치 소음의 기여도를

유추할 수 있으며, 따라서 차동기어 장치 자체의 진동량을 파악함으로써 차실 소음에 영향을 주는 진동 전달 경로에 대해서 분석할 수 있다. 또한 차동기어 상자의 진동을 저감하면 자연스럽게 차실전체 소음중 차동기어 장치 소음의 기여도는 낮아질 것으로 생각된다.

### 3-3 재질에 따른 조직의 변화와 경도의 변화

동일한 재질의 링기어(Ring gear)와 3가지 재질의 하이포이드 기어로 조립한 3가지 타입의 차동기어 장치를 실차 실험 및 rig 실험 후 완전 분해하여 각각 기어 치면의 드라이브부와 코스트부의 경도를 표면에서 내부로 옮겨가면서 측정하였다. 이렇게 측정된 경도값과, 주사 전자현미경과 광학현미경으로 관찰한 조직사진을 바탕으로 이상마모 또는 조직의 열화를 관찰함으로써 소음 발생의 원인을 찾고자 하였다.

Fig. 11에 보여진 것처럼 하이포이드 기어는 정상적인 경도치 범위내의 값을 갖고 있다. 경도값의 크기는 표면으로부터의 거리에 따라 부분적으로 다르지만 드라이브부만 비교하면 일반적으로 SCM>TSCM>SNCM 순으로 높은 값을 나타내고 있고 코스트부도 거의 비슷한 경향을 보이고 있다.

주사 전자현미경을 통하여 조사한 조직들은 다음과 같은 일반적인 현상을 나타내고 있다. 먼저 기어의 선단에서 내부로 들어갈 수록 마모현상이 심하게 나타난

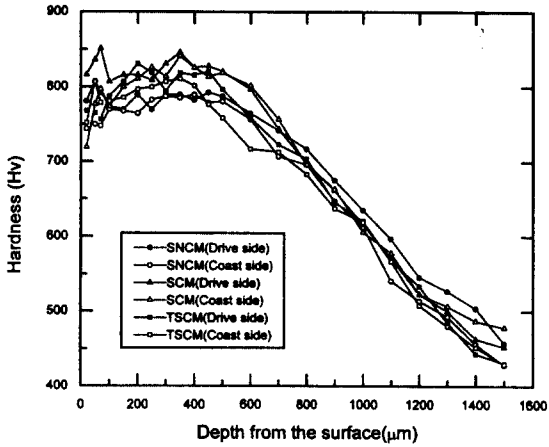


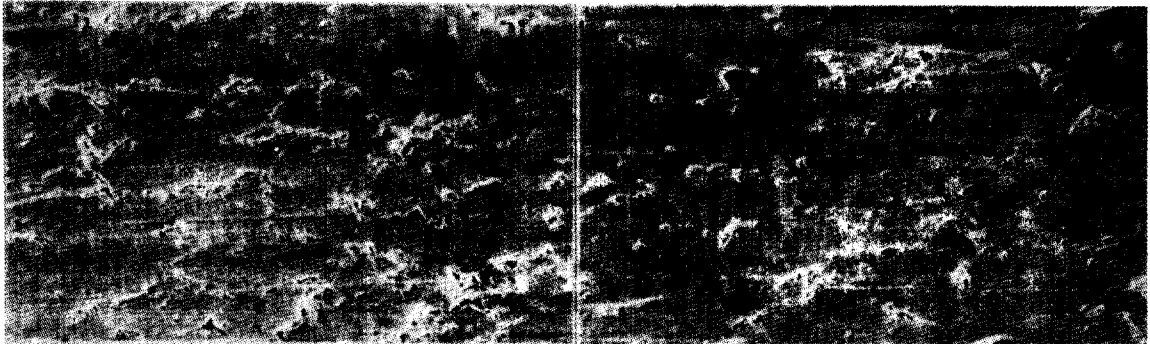
Fig. 11 Hardness of the Hypoid gear

것을 알 수 있었다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 상부 조직에 비해 하부 조직이 마모가 심하여 좀더 고른 조직을 나타내었고, 반대로 상부 조직은 하부 조직에 비해 좀더 거친 조직을 나타내었다. 또 기어의 성분에 상관 없이 링기어쪽에서는 긁힌 자국(Scratch)을 거의 발견할 수 없었으나 하이포이드 기어쪽에서는 일정한 방향을 가진 긁힌 자국을 발견할 수 있었다.

#### 4. 결 론

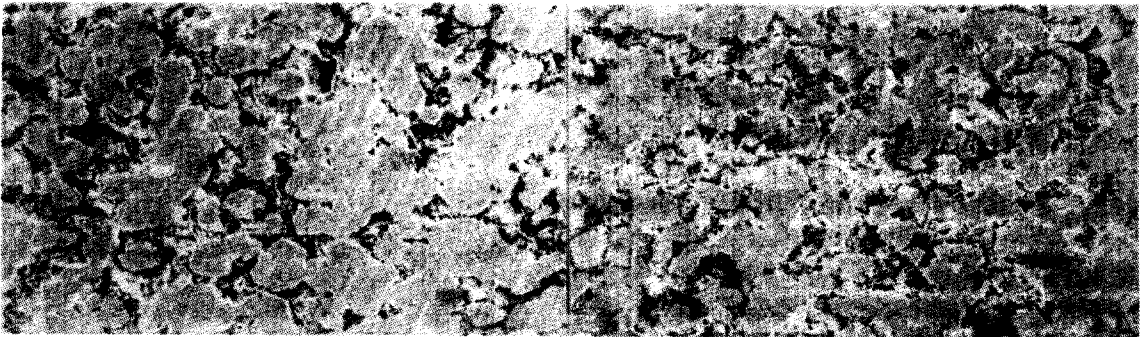
Rig 근접 진동·소음 실험과 실차 소음 측정 실험후 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 원소재 분석 평가에서는 TSCM이 내마모성, 경도, 강도가 우수해 내구성 측면에서 중감속 기어용 하이포이드 기어 소재로 가장 적합하다고 판단



(a) The upper part of SCM Hypoid gear drive side

(b) The lower part of SCM Hypoid gear drive side



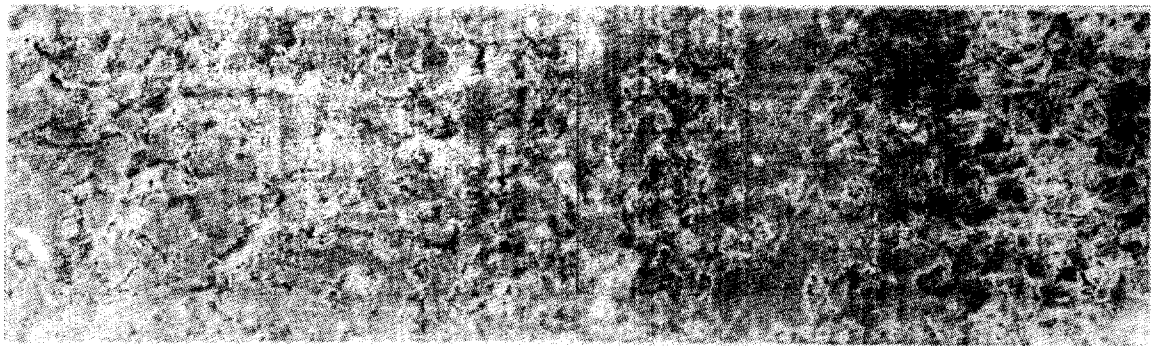
(c) The upper part of SCM Ring gear drive side

(d) The lower part of SCM Ring gear drive side



(e) The upper part of TSCM  
Hypoid gear drive side

(f) The lower part of TSCM  
Hypoid gear drive side



(g) The upper part of TSCM  
Ring gear drive side

(h) The lower part of TSCM  
Ring gear drive side

Fig. 12 The pictures of SEM

하였으나, rig 근접 진동·소음 실험 결과 SCM > TSCM > SNCM 순으로 SCM이 비교적 우수한 결과를 얻었다. 이는 경도 및 강도가 증가되면 진동·소음 측면에 불리한 결과를 초래하는 경우로 이를 극복하기 위해서는 고정밀의 치차 가공 및 재료 특성에 맞는 공정의 변경이 요구된다.

- ② 실차 소음측정 실험과 rig 진동실험에서 차수성분 비교 분석 결과 피크 주파수에서 유사성을 보이고 있으며, 이로써 공기전달음보다 고체전달음이 차실 소음에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 rig에서 근접 소음·진동 실험으로 실차 소음측정 결과를 유추할 수 있으며, 본 실험

을 위해 새로이 설계·제작한 rig 실험장치는 차동기어 장치의 소음·진동 저감을 위한 개발 및 육성에 유용할 것으로 사료된다.

### 참고 문헌

1. 久保 一夫, "ギアノイズの低減手法", 自動車技術會, pp 26~30, 1985. 10.
2. Mitchell, L. D. and Daw, J. W., "A basic approach to gearbox noise prediction", SAE 821065.



3. 鈴木義友, 濟野 慈, 失内節住, 森川邦彦, 複本泰治, “トランミッションギアノイズの研究”, 自動車技術會論文集, No. 36, 1987.
4. 鈴木 義友, “自動車における變速裝置用齒車製造の現況”, 應用機械工學, pp 70~77, 1991. 9.
5. Noboru Maruyama, “驅動係 齒車 最近 技術動向”, 自動車技術 Vol. 42, No. 9, 1988.
6. 久保愛三, 野中鐵也, 加藤置哉, 加藤昭悟, 大森利雄, “振動騒音問題に對する代表齒面形狀精度”, 日本機械學會 (No. 390-58) シンポジウム講演論文集, P. 258~261, 1989.