

## 와전류법을 이용한 강의 표면경화층 깊이의 비파괴적 측정

이 계 완\* · 한 승 룡\* · 박 은 수\*\*

### Nondestructive Measurement of Case Hardening Depth with Eddy Current Method

K. W. Lee, S. Y. Han and U. S. Park

**Abstract** The relationship between eddy current response and case hardening depth has been studied on SM40C(KS D-3752) and SCM440(KS D-3711) steels which were surface hardened by high frequency induction hardening. The results obtained in this study were as follows; 1) Case hardening depth was successfully measured by observing the eddy current impedance changes of each steel. The impedance decreased linearly with increasing case hardening depth. 2) For large impedance gradient between the hardened surface and core metal, the eddy current response was more sensitive to case hardening depth than for low impedance gradient.

#### 1. 서 론

강의 내마모성과 내피로성을 향상시키기 위하여 고주파유도법에 의한 표면경화 처리를 많이 한다. 강의 표면만을 급가열하고 급냉시킴으로써 표면은 Martensite 조직의 높은 경도를 가지게 하고 내부는 기지조직 그대로 풍부한 인성을 갖게하여 Axle Shaft와 같은 자동차 부품이나 기계구조용 부품으로 널리 쓰이고 있다.

이러한 표면경화강은 표면경화층의 깊이와 표면경도가 제품의 품질에 크게 영향을 미침으로 대량생산 시 제조조건 설정이나 제품의 균질성을 높이기 위해 이들의 측정관리가 요구된다. 보통 경화층 깊이는 제품을 절단하여 표면으로부터 경도를 측정, 어느 한계경도에 이르는 곳까지로 결정하는데,<sup>1)</sup> 이 시험은 시간소요가 많을 뿐만 아니라 전수검사도 불가능하므로 신뢰성이 있는 비파괴적 방법이 요구된다.

강과 같은 강자성체에서는 재료의 미세조직의 변

\* 한양대학교 금속공학과  
\*\* 서울산업대학 재료공학과  
접수: 1991년 3월 2일

2. AE 신호는 절삭 파라미터인 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이의 증가에 따라 증가하는 경향을 보이며 특히 절삭속도에 민감하다.
3. 절삭 초기에는 순간적인 미소파괴 등으로 날끝 마멸이 심하고 이에 따른 RMS 값도 급상승 한다. 공구 교환시기 결정에서는 이 초기변화를 고려해야 한다.

## References

1. 水津弘次, "아코스틱스 에미션에 의한切削工具의磨耗および熱き裂のインプロセス検出に關する基礎的研究", 京都大學工學部製造工學研究室論文集, (昭和55年), pp. 1~55.
2. 大宮毅, 稻崎一郎, 青山藤詞郎, 酒井勝, 萩尾雄一, "아코스틱스 에미션에 의한드릴折損의인プロセス檢出", 日本機械學會論文集(C編) 51卷 472號, pp. 3322~3328
3. 坦野義昭, "아코스틱스 에미션을 이용한切削工具의破損檢出法", 機械と工具, (1980년 6월), pp. 140~144.
4. Moriwaki T., "Detacktion for Cutting Tool Fracture by Acoustic Emission Measurment", CRIP Vol., 29/1/1986 pp. 35~40
5. 康明順, 崔聖周, 朴炫, "二次元切削時發生하는 AE에 關한 研究", 大韓機械學會論文集, 第10卷 第1號, (1986), pp. 906~915.
6. 權炯湖, "Acoustic Emission에 關한 WA계 Vitri-fied 및 Resinoid 결합제 연삭 슷들의 파괴강도와 연삭성능 평가에 關한 研究", 한양대학교 박사학위논문집 pp. 83, 88, 6
7. 坦野義昭, Luc Dieu Chuong, 小林昌彦, "아코스틱스 에미션에 의한工具破損의檢出", 日本精密機械學會誌, 46卷3號, pp. 66~71
8. Iwata K., Moriwaki T., "An Application of Acoustic Emission Measurement to In-Process Sensing of Tool Wear", CIRP. Vol. 25/1, (1977,) pp. 21~25.
9. 이병찬, "밀링가공시 발생하는 공구마멸과 AE신호에 關한 研究", 한국과학기술원 '87논문집, pp. 20~72
10. Kim K. J., Kim K. H. and Hwang H. Y., "Progressive Tool Wear Sensing in Turning Operation Via Acoustic Emission Signal Processing", KAIST(published by ASME, New York) PED-Vol. 21, Book No. H00368 pp. 305~307.
11. 小島浩二, 稻崎一郎, 三完亮一, "아코스틱스 에미션을 利用した旋削プロセス의監視", 日本機械學會論文集(C編), 52卷474號, pp. 799~808.
12. 森脇俊道, "機械加工의監視における AE의 應用", 工作機械 關聯 技術者會議 資料, 東京, 134-1-1-10, 昭和 58, 7, 21
13. Diei E. N., Dornfeld D. A., "A. E. Sensing of Tool Wear in Pripheral Milling", Univ. of California, Berkeley California, pp. 107~124.
14. Dornfeld D. A. & Kannatey-Asibu Elijah, "Acousic Emission During Orthogonal Metal Cutting", Int. J. Mech. Sci. Vol. 22 (1986), pp. 285~296.
15. Ko Sung-Lim, Dornfeld David A., "A Study on Burr Formation Mechanism", Univ. of California, Berkeley, pp. 1~12.
16. Liptai, R. G., Harries, D. O., Tatro, C. A., "An Introduction to Acoustic Emission", Acoustic Emission, ASTM STP 505, (1972), pp. 308.
17. 황홍연, 이병찬, 김광준, "밀링가공시 발생하는 공구마멸과 AE신호에 關한 研究", 대한기계학회 논문집 제12권 제5호 (1988), pp. 1035~1042.
18. 徐南燮, "金屬切削理論" 東明社, 서울, (1985), pp. 128~156.
19. E. N. Diei, D. A. Dornfeld, "Acoustic Emission From the Face Milling Process - the Effects of Process Variables" J. of Engineering for Industry, Vol. 109, (1987), pp. 92~99.
20. T. Blum, I. Inasaki: A Study on Acoustic Emission from the Orthogonal Cutting Process, Trans. ASME, Vol. 112., (1990).

3. 시험결과 및 고찰

3-1 경도분포와 경화층의 깊이

Photo. 1은 고주파 유도경화한 SM40C와 SCM440의 현미경 조직사진으로 심부는 Ferrite와 Pearlite의 조직이며, 경화부는 Martensite 조직임을 알 수 있다. 열영향을 받은 두 조직의 전이영역은 Photo. 1(B)와 같이 나타났다. 사진에서 보는바와 같이 전이영역의 폭은 SM40C가 SCM440보다 넓게 나타났으며, 이는 SM40C가 SCM440보다 비열이 낮고, 열전도도가 높기 때문으로 보인다.<sup>5)</sup>

Fig. 2와 Fig. 3은 고주파 유도코일의 상승속도에 따른 SM40C와 SCM440의 경화부의 경도분포를 나타낸 것이다. SM40C의 경우, 전이영역이 넓으므로 경도가 완만하게 감소하는 반면 SCM440의 경우, 전이영역이 좁아 경도가 급격히 낮아지는 것을 볼 수 있다.

이들 두 시편의 Hv 390을 기준으로한 유효경화층의 깊이는 코일의 상승속도에 따라, SM40C가 1.65, 1.95, 2.10, 2.30mm였으며 SCM440은 2.00, 2.20, 2.35, 2.50mm로 변화였다. SCM440에서 유효경화층의 깊이가 더 깊게 나타난 것은 Cr, Mo 등 합금원소의 영향으로 SM40C에 비해 경화능이 좋고<sup>6)</sup> 또한 전기저항값이 커<sup>5)</sup> 고주파 전류의 침투 깊이가 더 깊기때문인 것으로 생각된다.

Fig. 4는 유도코일의 상승속도에 따른 유효경화층의 깊이와 전이영역까지의 깊이의 변화를 도표로 나타낸 것이다. 코일의 상승속도가 증가함에 따라 경화층의 깊이가 감소함을 알 수 있으며 SM40C의 경우 유효경화층 깊이에 대한 직선과 전이영역까지의 깊이에 대한 직선이 제일 아래와 위에 놓인 것은 앞에서 검토한 내용의 정확도를 확연히 보여주는 것이다.

그리고 SM40C와 SCM440에 대한 직선의 기울기가 다른 것도 경화능과 전기저항값의 차이 때문으로 보인다.

3-2 경화층의 깊이와 임피던스의 관계

강자성시편을 정현파의 자장을 발생시키는 시험코일 내에 넣었을 때 시편에 유도자장이 생기고 이것에

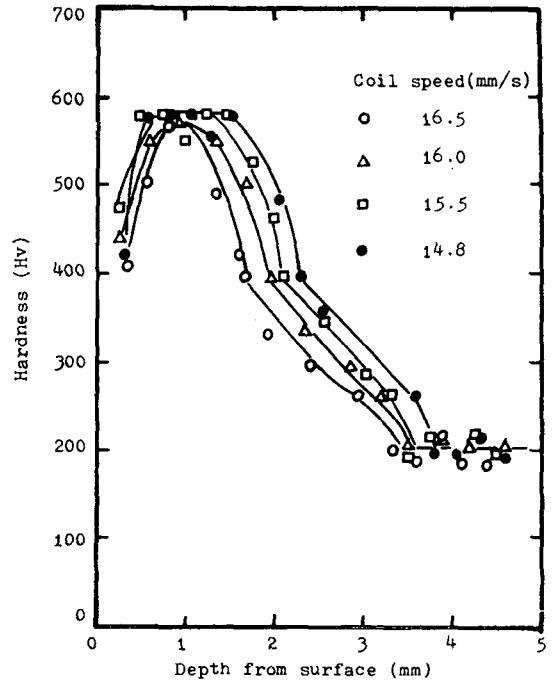


Fig. 2 Hardness distribution in case hardened zone.(SM40C)

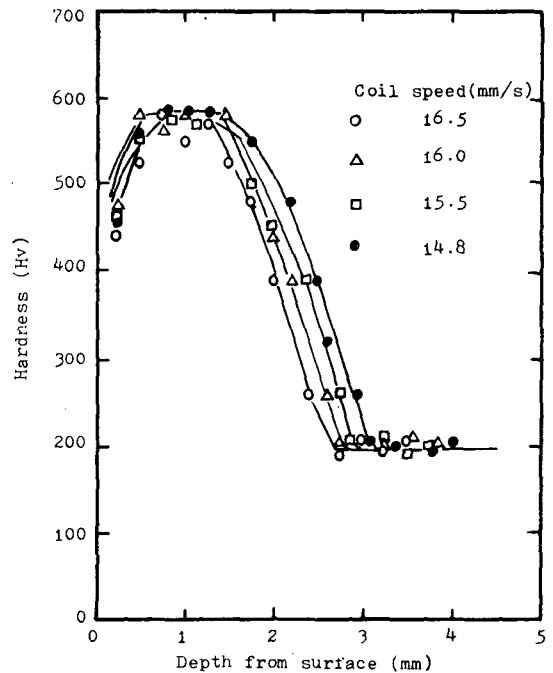


Fig. 3 Hardness distribution in case hardened zone.(SCM440)

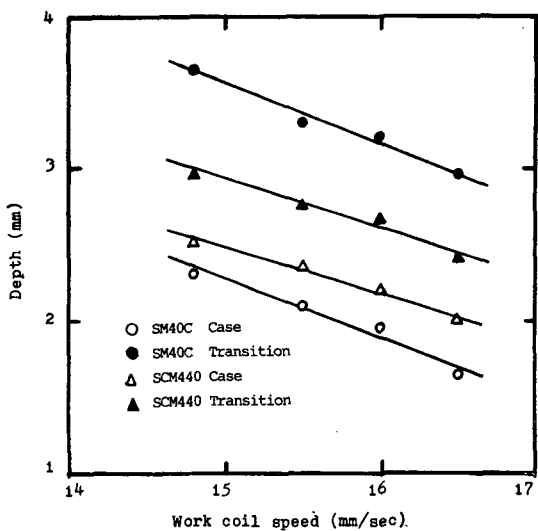


Fig. 4 Relation between work coil speed and the depth of case hardened zone.

시편의 자기적성질의 변화상태가 내포되므로 재료층에 대한 정보를 얻어낼 수 있게 된다.

즉 시편에 의한 성질변화는 와전류의 성질을 변화시켜 감지코일의 유도전압을 변화시키므로 코일의 임피던스가 변하게 된다. 이 코일의 임피던스 변화를 측정하면 시편의 자기적성질의 변화를 구별할 수 있게 된다.<sup>7)</sup>

강자성시편의 표면경화층은 Photo. 1에서 보는 바와 같이 Martensite 변태조직을 가지므로 자기이력 특성이 변하고 표면경화층의 깊이변화에 따라 신티의 크기성분이 변하게 된다.

이 시험에 사용한 장치는 Fig. 1과 같이 아나로그 신호를 16bit의 A/D변환기를 써서 디지털 평가를 할 수 있게 되어 있어 크기범위가 65,535 Unit이고 정밀도는  $\pm 1$  Unit이다.

Fig. 5는 표면경화층의 깊이가 서로 다른 SM40C와 SCM440 시험편들에 대하여 32Hz로 와전류시험을 했을 때 얻어진 결과를 저항성분을 횡축으로하고, 리액턴스 성분을 종축으로한 임피던스 평면에 나타낸 것이다.

이 평면에 나타난 값을 보면 SM40C와 SCM440 둘 다 경화층의 깊이가 깊은 것으로 부터 경화층의 깊이가 얇아짐에 따라 두 성분

의 방향으로 직선적으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 이 측정값으로부터 표면경화층의 깊이변화를 비파괴적으로 알아낼 수 있다.

Fig. 6은 주파수를 64Hz로 증가시켰을 때 얻어진 결과이며, 직선의 기울기가 32Hz에 비해 작아졌음을 보여주고 있다.

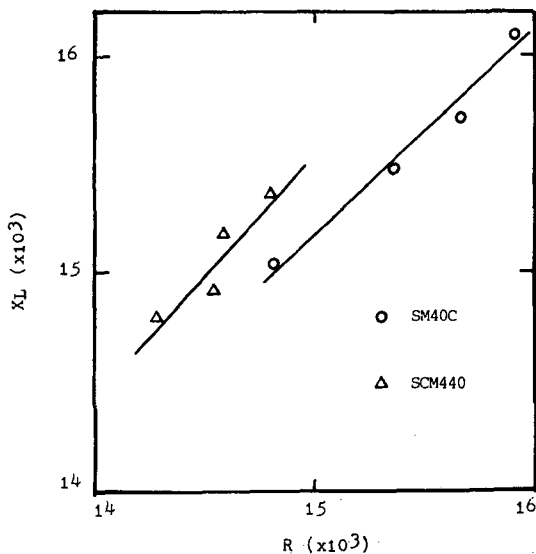


Fig. 5 Display of the measured values at 32Hz on the specimen with various case depths.

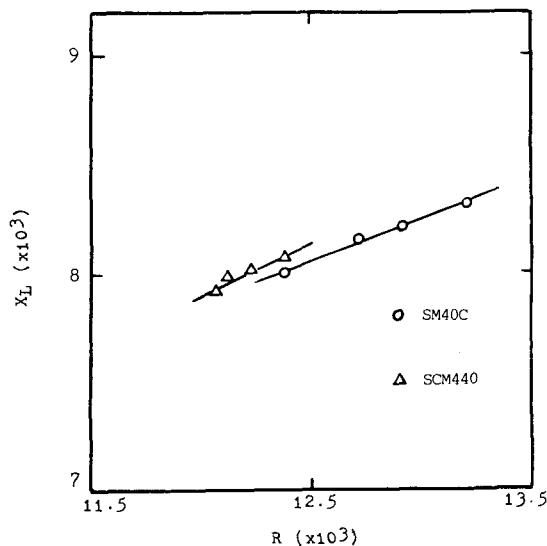


Fig. 6 Display of the measured values at 64Hz on the specimen with various case depths.

여기서 시험주파수를 32Hz와 64Hz로 선택한 것은, 탄소강에서 와전류의 최대유효 침투깊이 즉 경화층의 깊이변화를 검출하는데 필요한 크기의 신호를 얻어낼 수 있는 깊이가 100Hz에서 0.75mm, 50Hz에서 2.0mm, 25Hz에서 3.5mm라고 하는 H. G. Beech<sup>8)</sup>의 실험 보고에 근거한 것이다.

Fig. 5와 Fig. 6의 결과에서 얻어진 임피던스 값과 유효경화층의 깊이와의 관계를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타냈다. 유효경화층의 깊이가 깊어질 수록 임피던스 값은 감소하는 것을 볼 수 있으며 이는 경화층이 깊어질 수록 와전류의 최대유효 침투깊이내에서 Martensite조직의 체적분률이 커지기 때문이다.

Martensite조직은 거의 비자성이라고 할만큼 투자율이 매우 낮는데 비하여 Ferrite와 Pearlite 조직은 높은 투자율을 가지고 있다.<sup>8)</sup> 그러므로 이 투자율의 감소가 와전류에 영향을 미치므로 코일의 임피던스가 감소한다고 생각된다.

Fig. 7과 Fig. 8에서 유효경화층의 깊이의 변화에 따른 임피던스 변화의 민감도(분리민감도)가 SCM 440 보다 SM40C에서 높음을 알 수 있다. 이것은 두 재질에서 유효경화층의 깊이가 같으므로써 와전류의 최대유효 침투깊이내에서 Martensite조직의 체적분률이 같더라도 두 재질의 조성의 차이로 인한 심부와 경화부의 투자율의 차이가 다르기 때문인 것으로 생각되나 앞으로 확인해 보아야 할 과제이다.

이와같이 재질에 따라 경화층 깊이의 분리민감도가 다른 것은 이 시험법의 약점이라 할 수 있다. 그러므로 재질에 따라 상대적 평가기법을 사용하지 않으면 안된다.

그리고 분리민감도가 높을 때 경화층의 깊이 변화를 더 정확히 평가할 수 있으므로 시험조건의 설정에 유의해야 됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 64Hz로 시험한 결과이며 32Hz로 시험한 Fig. 7에 비해 분리민감도가 매우 낮다. 이는 시험주파수가 높아짐에 따라 와전류의 최대유효 침투깊이가 얇아져 경화부의 체적분률이 상대적으로 커졌기 때문이라고 생각된다.

또한 Fig. 7에서 SM40C와 SCM440의 두 재질에 대한 임피던스값의 분포군(分布群)의 위치가 다른 것은 이 시험방법으로 이종재질의 분리가능성을 보

여주고 있다.

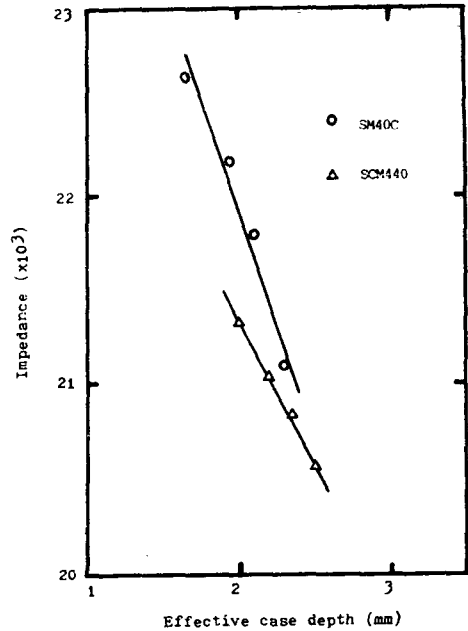


Fig. 7 Relation between case depth and impedance at 32Hz.

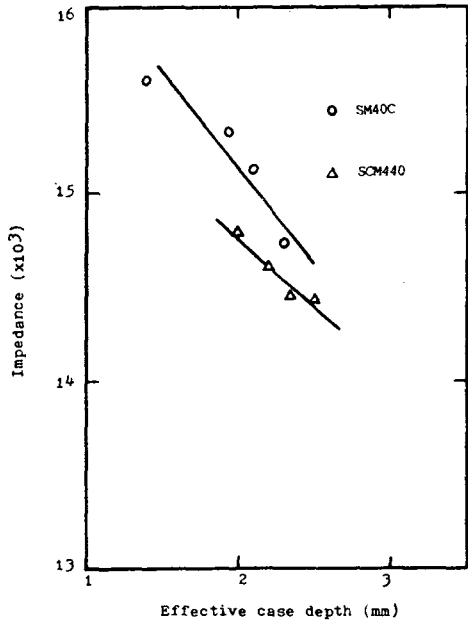


Fig. 8 Relation between case depth and impedance at 64Hz.

## 4. 결 론

고주파유도경화법에 의해 표면경화된 강에서 그 표면경화층의 깊이를 아는 것은 매우 중요하며, 이에 대한 비파괴적 측정법이 절실히 요구되고 있다. 이에 SM40C, SCM440 두 강종에 대해 경화층의 깊이를 변화시킨 시편에서 '와전류 임피던스의 변화를 측정, 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 표면경화층의 깊이가 깊어질 수록 와전류에 의한 코일의 임피던스는 감소함으로 동일 강종에 대해서는 와전류의 임피던스변화를 측정하여 표면경화층의 깊이를 평가할 수 있다.
2. 경화층의 깊이변화에 따른 임피던스의 변화는 경화부와 심부의 임피던스차가 클 때 더 민감하게 변화한다.
3. 경화층의 깊이변화에 따른 임피던스 변화의 민감도는 재질에 따라 다르다.

## References

1. KS : Method of Measuring Case Depth for Steel, KS D-0215, 1985.
2. H. L. Libby : Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Method, Wiley New York, 1971, pp. 176.
3. ASM : Metal Handbook, 8th ed. vol. 11, ASM, Metal Park, Ohio, 1976, pp. 93~95.
4. D. J. Hagemaiier : Materials Evaluation, Vol. 41, No. 2, 1983, pp. 1612~1618.
5. ASM : Metal Handbook, 9th ed., Vol. 1, ASM, Metal Park, Ohio, 1978, pp. 148~150.
6. ASM : Metal Handbook, 9th ed., Vol. 1, ASM, Metal Park, Ohio, 1978, pp. 479.
7. P. Neumaier : Metallurgical Plant and Technology, Vol. 3, 1987, pp. 1~6.
8. H. G. Beech : British Journal of NDT, No. 3, 1976, pp. 44~48.