

ADI 재의 드릴 가공 시 가공조건에 따른 절삭저항 및 AE신호 특성

유경곤*, 전태옥**, 박흥식**

The cutting resistance and AE signal characteristics on cutting condition in dilling for ADI materials

Kyong-Kon Yoo*, Tae-Ok Jun**, Heung-Sik Park**

Abstract

The ductile cast iron is austempered at 300, 350 and 400°C temperature in order to investigate the basic factors for monitoring drill wear in automatic production process, and cutting force and AE RMS signals are measured with changing cutting condition for ADI (Austempered Ductile Cast Iron) with different mechanical properties. The signals of cutting force were influenced by cutting speed and feedrate greatly. On the other hand AE RMS signals are influenced by cutting speed where as it is not related with feedrate. As the depth of drilling increases, cutting force shows a slow increase and the value of AE RMS increases until the range of h/d=4. But over the range it increases greatly due to an amount of chip discharge and friction with inner wall of drilling hole, etc. As the drill diameter increases at a constant depth of drilling, Cutting force increases linearly, but the level of AE RMS does not increases linearly due to circumferential velocity and great influence of h/d.

KeyWords : ductile cast iron(구상흑연주철), drill wear(드릴마모), ADI(오스템퍼처리한 구상흑연주철), cutting force(절삭저항), AE RMS(음향방출의 실효값), circumferential velocity(원주속도),

1. 서론

구상흑연주철은 흑연이 구상으로 존재하므로 주장에

비해 구조성, 피삭성, 감쇠성이 우수하며, 강도와 경도가 비교적 높아 내마멸성이 좋으므로 자동차, 산업기계 및 공작기계 등의 부품 등에 폭넓게 사용되고 있으나 고강도

* 대구기능대학 메카트로닉스학과

** 동아대학교 기계공학과

및 균질화 등에 많은 문제점을 가지고 있다. 따라서 구상 흑연주철의 기계적 성질을 개선하고 부가가치를 높이기 위하여 어닐링, 노멀라이징 및 오스텸퍼링 등의 열처리가 많이 이용되고 있다. 그 중에서도 특히 강도 개선을 목적으로 한 열처리로서 온도관리가 유리한 염욕으로서 행해지는 항온열처리인 오스텸퍼링이 주로 이용되고 있다.¹⁾²⁾ 오스텸퍼링한 구상흑연주철(ADI: Austempered Ductile Cast Iron)은 오스테나이트화와 항온변태 조건 및 화학 성분 등의 제반 인자가 소재의 강도적 성질에 영향을 미치게 되며 또한 주입시의 화학성분이 일정하더라도 주조품의 크기에 따라 응고속도가 다르기 때문에 주조상태에서 흑연과 페라이트, 퍼얼라이트 분포 등의 현미경조직에서 현저한 차이가 일어나게 되며 따라서 개선된 기계적 성질을 얻을 수 있다.³⁾⁴⁾ 또한 ADI의 부가가치 향상을 위하여 절삭가공에 따른 가공정밀도 및 생산성 향상에 관한 연구가 진행되어 왔다. 최근 ADI에 대한 절삭가공에 대한 연구로는 藤田⁵⁾, 小川⁶⁾ 등은 ADI의 흑연 구상화율의 영향에 따른 절삭성 연구를 진행하였으며, 新谷⁷⁾은 세라믹 공구를 이용하여 ADI의 절삭특성에 대한 연구를 행하였고, 藤田⁸⁾은 ADI에 함유된 Si 양의 변화에 따른 드릴의 절삭저항에 대한 연구를 진행하였다. 한편 AE 신호에 의한 해석으로, 中山⁹⁾은 AE 신호를 이용하여 드릴의 점진적인 가공회수에 따른 드릴의 이상상태를 예지 하였으며, 大宮¹⁰⁾ 등은 센서 부착위치에 따른 AE 신호 해석으로 드릴의 파손에 따른 모니터링법을 제안하였다. 그러나 지금까지 이들 연구는 ADI의 첨가원소 및 열처리 조건이 기계적 성질 및 가공특성에 미치는 영향에 관하여 주로 연구되어 왔지만 드릴 가공 시 발생하는 절삭저항 성분과 AE 신호 레벨과의 상관관계를 통하여 ADI재의 오스텸퍼링 온도 변화에 따른 드릴 가공 특성을 명확히 규명하고자 하는 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정에 있다. 따라서 본 연구에서는 공구동력계와 AE 센서를 이용하여, 오스텸퍼링 온도의 변화에 따른 ADI재의 드릴 가공 시에 발생하는 절삭저항 및 AE 신호 레벨을 측정하여 ADI재에 대한 드릴 가공 시 공구수명 예측을 위한 기초 자료를 얻고자 하였다.

2 시험편 열처리 및 실험방법

2.1 시험편 제작 및 열처리

구상흑연주철의 제조를 위하여 고주파유도 용해로에서 선철 90%, 고철 10%를 용해온도 1500℃까지 승온하여

주입온도가 1360℃일 때 주입하였다. 구상흑연주철의 조성은 Table 1과 같으며, 60×260×210mm의 Y-Block을 CO₂ 주형으로 주조하였다. 시험편 제작은 탕구부를 제거하여 절단한 후 Ø60×20mm로 선삭가공하여 오스텸퍼링하였다. 오스텸퍼링시에 사용된 혼합염으로는 고온용으로 BaCl₂를 70%, NaCl을 30%로 하였고, 저온용으로는 KNO₃ 60%, NaNO₂ 40%로 하여 처리하였다. 오스테나이트화는 먼저 급가열을 피하기 위하여 600℃로 15분간 유지한 후 다시 승온시켜 900℃로 40분간 처리한 후, 300, 350 및 400℃에서 60분간 오스텸퍼링하였다. Fig. 1은 오스텸퍼링 전의 주조상태 (a)와 오스텸퍼링 온도 300℃에서의 주사전자 현미경 조직사진 (b)를 나타낸 것이다. 그림에서 (a)의 주조상태에서는 흑연은 구상으로 존재하며, 흑연주위의 기지조직은 페라이트와 미세한 퍼얼라이트가 존재하지만, (b)의 오스텸퍼링 온도 300℃ 경우에는 흑연주위에 침상의 하부 베이나이트 조직으로 변태한 것을 볼 수 있다. 그리고 오스테나이트 온도를 증가시킬수록 기지조직은 상부베이나이트를 가지는 것을 확인하였다.

Table 1 Chemical Compositions of Workpiece

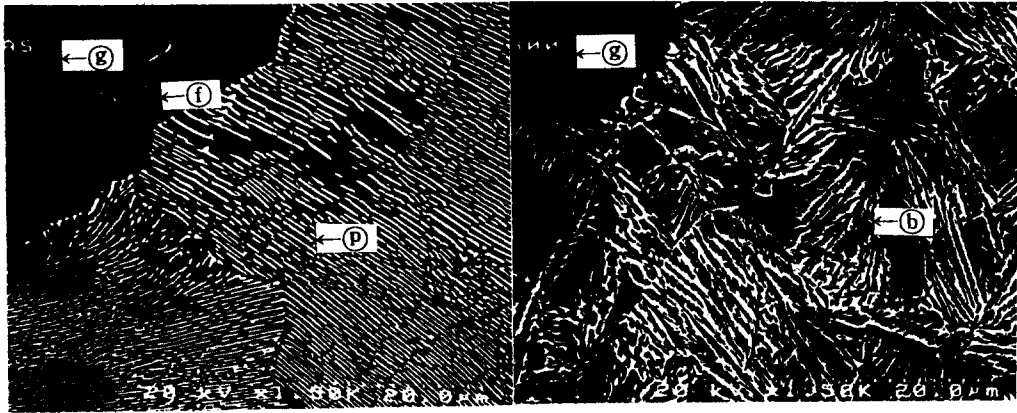
| Chemical Composition(%) | | | | | |
|-------------------------|-----|------|-------|-------|-------|
| T.C | Si | Mn | P | S | Mg |
| 3.60 | 3.0 | 0.20 | 0.070 | 0.012 | 0.053 |

2.2 실험방법

본 실험에 사용된 실험장치는 머시닝 센터이며, 절삭조건은 Table 2와 같으며, 공구는 고속도강 드릴(HSS)을 사용하였다. 그리고 시험편의 기계적 성질은 Table 3과 같으며, 오스텸퍼링 온도변화에 따라 ADI-A(300℃×60min), ADI-B (350℃×60min) 및 ADI-C(400℃×60min)의 3종류의 시험편으로 구분하였다.

Table 2 Drilling Condition

| Drill | HSS . Twist Drill |
|----------------------|-----------------------------|
| Dimensions of Drill | Ø3×42×71×118ø |
| | Ø4.5×56×86×118ø |
| | Ø6×70×102×118ø |
| | Ø7.5×78×111×118ø |
| Feed rate (mm/rev) | 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 |
| Drilling Speed (rpm) | 800, 1200, 1600, 2000, 2400 |
| Aspect ratio (h/d) | 1, 2, 3, 4, 5 |
| Coolant | Dry |



(a) AS CAST (b) ADI-A (300°C × 60min)
 (G: graphite f: ferrite P: pearlite B: bainite)

Fig. 1 Microscopic picture of ADI for austermpefing temperature

Table 3 Mechanical properties of specimens

| Material | Temperature of Austempering (°C) | Tensile strength (MPa) | Elongation (%) | Hardness (H _a) |
|----------|----------------------------------|------------------------|----------------|----------------------------|
| As cast | 0 | 480 | 8.8 | 194 |
| ADI-A | 300 | 1116 | 1.4 | 381 |
| ADI-B | 350 | 930 | 2.5 | 336 |
| ADI-C | 400 | 750 | 4.2 | 297 |

Fig. 2는 본 연구의 실험장치의 개략도를 나타낸 것으로써 공구동력계를 머시닝 센터의 테이블 위에 설치한 후 시험편 고정을 위하여 3분 척을 장착하였으며, AE 센서는 시험편의 가장 근접거리에 부착하였다. 그리고 미세한 전압을 증폭하기 위하여 증폭기(Multichannel charge amplifier)를 사용하였다.

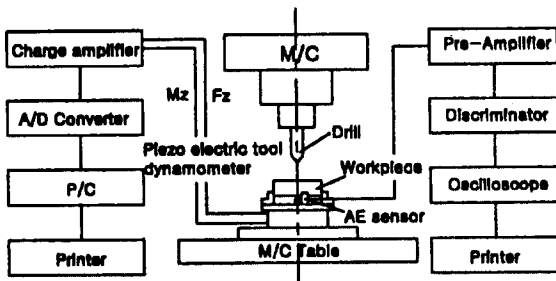


Fig. 2 Schematic diagram of experiment

증폭기로 증폭된 아날로그 신호는 A/D converter를 통하여 정량화된 데이터를 P/C에서 처리하였다. AE RMS(Root Mean Square)의 측정은 공진 주파수 1MHz인 AE(NF, AE-905-OP)에서 검출된 신호를 Preamplifier에서 40dB로 증폭하여 Discriminator(NF, U-plot, 9502, level 50-99dB, 1dB step)로 보내져 Digital oscilloscope (LeCroy 9310A)를 이용하여 신호의 파형을 분석하였다. 실험에서의 측정 기준으로는 절삭저항의 정적성분인 트러스터는 1회 가공에 따른 평균값을, AE RMS는 드릴 코너부가 시험편에 드릴링하기 시작한 후 일정한 폭의 칩이 배출되기 시작했을 때 부터의 계측값을 취하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭속도에 따른 영향

절삭속도에 따른 절삭저항 성분인 토크와 트러스터를 조사하기 위하여, 드릴직경 d 를 6mm, 절삭깊이 h 를 드릴직경의 2배인 12mm, 이송속도 f 를 0.1mm/rev로 일정하게 유지하고, 절삭속도 N 을 800, 1200, 1600, 2000 및 2400rpm의 변화에 따른 ADI-A, ADI-B 및 ADI-C재의 토크 및 트러스터를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 3 종류의 ADI 피삭재 모두

절삭속도가 증가할수록 트러스터는 크게, 토크는 서서히 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이것은 절삭속도를 증가시키면 공구와 피삭재 사이의 마찰계수가 감소하기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 오스템퍼링 온도가 높은 ADI-C의 소재보다 오스템퍼링 온도가 낮은 ADI-A의 경우 절삭저항 성분인 트러스터 및 토크가 상대적으로 높다는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 1과 Table 3에서처럼 오스템퍼링 온도가 낮을수록 기조직은 미세한 침상의 하부베이나이트 조직이므로 인장강도 및 경도의 값이 크기 때문에 가공으로 인한 절삭저항 성분은 이들 값의 영향을 받기 때문인 것으로 생각된다.

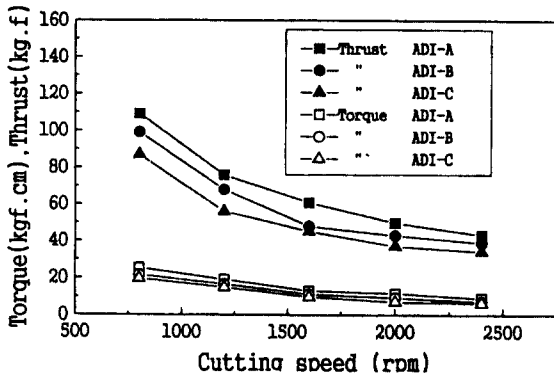


Fig. 3 Relation between cutting speed and cutting resistance.

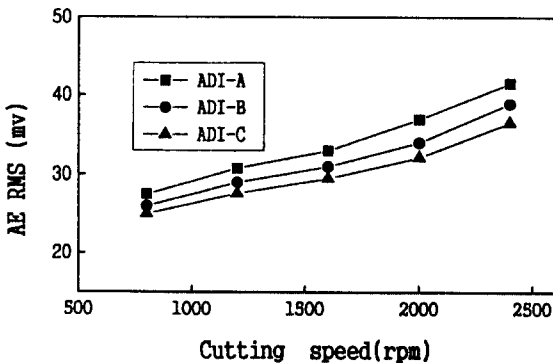


Fig. 4 Effect of AE RMS on the cutting speed (ADI-A, ADI-B, ADI-C, $f=0.1\text{mm/rev}$, $h=12\text{mm}$, $d=6\text{mm}$)

Fig. 4는 Fig. 3과 같은 절삭조건에서 절삭속도의 변화에 따른 AE RMS의 값을 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 절삭속도가 증가함에 따라 AE RMS 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 드릴의 절삭속도가 증가함에 따라 전단변형 시 전단속도와 마찰속도의 증가에 따라서 AE RMS에 크게 영향을 주기 때문이라고 생각된다. 또한 절삭저항과 마찬가지로 AE RMS의 레벨도 소재의 기계적 성질에 따라서 크게 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 절삭저항 성분과 AE RMS의 레벨이 상호 반대로 작용하는 것은 Fig. 5에서처럼 절삭저항 성분과 AE 신호간의 에너지 발생원이 서로 다르기 때문이라고 생각된다.

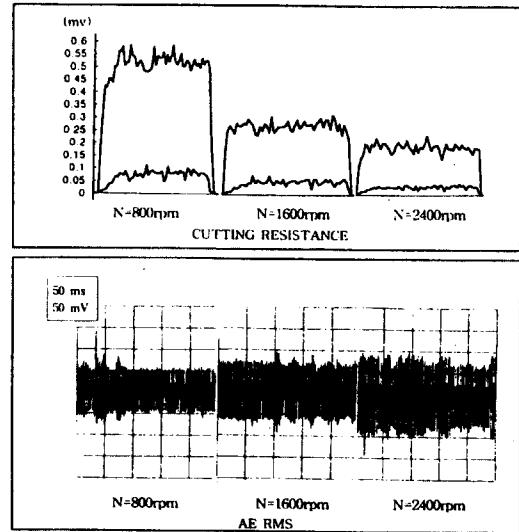


Fig. 5 Signals of cutting resistance and AE RMS(ADI-A, $f=0.1\text{mm/rev}$, $h=12\text{mm}$, $d=6\text{mm}$)

3.2 이송속도에 따른 영향

이송속도는 표면조도, 정밀도 및 절삭저항 등에 크게 영향을 미치게 되며, 공구마모에 직접적인 영향을 준다. 그러므로 이들 인자를 정확히 규명하는 것이 매우 중요하다고 생각된다.

Fig. 6은 드릴직경 d 를 6mm, 절삭속도 N 을 2000rpm 및 절삭깊이 h 를 12mm로 일정하게 유지한 후, 오스템퍼링한 3 종류의 시험편을 이용하여 이송속도 f 를 단계적으로 변화시켰을 때 절삭저항 성분인 토크 및 트러스터의 변화를 나타내었다. Fig. 6에서 보는 바와 같

이 이송속도가 증가할수록 토크 및 트러스터도 역시 거의 직선적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 이송속도가 증가함에 따라서 생성되는 칩 두께의 증가로 인하여 칩의 단면적이 크게 되므로 절삭저항에 영향을 미치기 때문인 것으로 생각된다. 또한 소재의 기계적 성질에 따라서도 절삭저항에 변화가 있음을 알 수 있으며, 이는 앞에서 설명한 절삭속도와 마찬가지로 이송속도의 경우에도 동일한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 절삭조건에서 이송속도의 변화에 따른 AE RMS의 값을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 절삭저항 성분은 Fig. 6의 이송속도에는 크게 영향을 받지만 AE RMS 레벨의 변화는 거의 없다는 것을 볼 수 있으며, 다만 시험편의 기계적 성질 변화에 의하여 그 차이를 나타내고 있다.

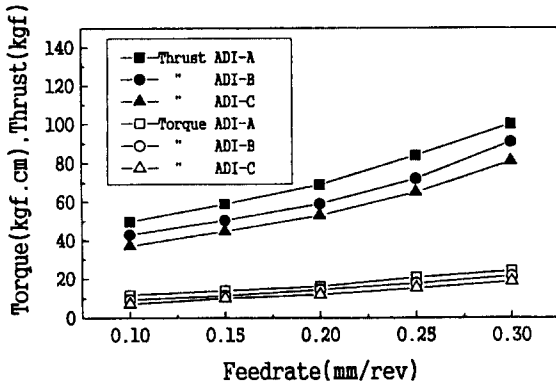


Fig. 6 Relation between feedrate and cutting resistance.

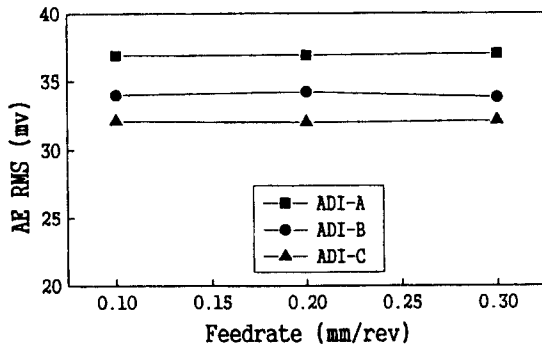


Fig. 7 Effect of AE RMS on the feedrate (ADI-A, N=2000rpm, h=12mm, d=6mm)

3.3 가공구멍 깊이에 따른 영향

Fig. 8은 ADI-A의 시험편으로 절삭속도 N을 2000rpm, 이송속도 f를 0.1mm/rev로 일정하게 한 후, 드릴의 직경 d를 3mm 및 6mm로 변화시켰을 때, 드릴 직경 d에 대한 가공구멍 깊이 h의 비인 h/d를 1, 2, 3, 4 및 5로 단계적으로 변화에 시켰을 때 절삭저항 성분인 토크 및 트러스터를 나타내었다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 h/d가 증가함에 따라 토크 및 트러스터의 값이 미소하게 직선적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 칩이 생성되는 실제적인 절삭저항 외에 가공구멍의 내벽과 드릴 마진부의 마찰저항 및 칩이 드릴의 비틀림 흡을 따라 배출될 때 유출저항의 증가로 인한 것으로 생각된다.

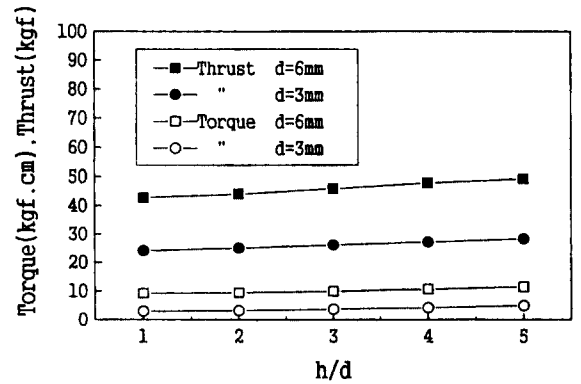


Fig. 8 Relation between h/d and cutting resistance.

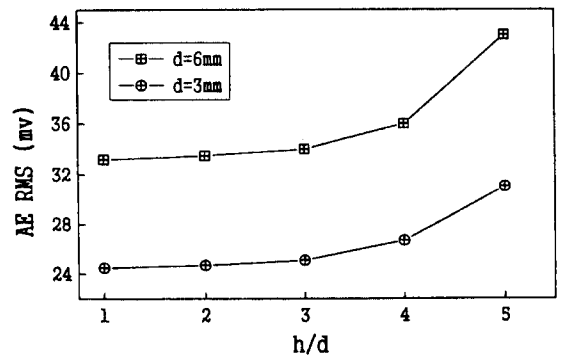


Fig. 9 Effect of AE RMS on the h/d(ADI-A, f=0.1mm/rev, N=2000rpm, d=3, 6mm)

Fig. 9는 Fig. 8과 동일한 절삭조건에서 h/d의 단계적인 변화에 따른 AE RMS를 나타낸 것이다. h/d가 단계적으로 증가함에 따라 즉 h/d=1, 2, 3까지는 AE RMS값이 완만한 증가현상이 나타나지만 가공깊이가 드릴직경의 4 배에 달하는 h/d=4 이상에서는 좁은 상태의 구멍이 깊은 관계로 칩 배출의 불량하기 때문에 AE RMS의 레벨이 높게 나타나 크게 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있다.

3.4 드릴직경에 따른 영향

절삭저항에 영향을 미치는 인자들에는 드릴의 직경 변화도 그중 하나이다. 따라서 이들의 관계를 조사하기 위하여 본 실험에서는 ADI-A 시험편을 이용하여 절삭속도 N을 1800rpm, 절삭깊이 h를 15mm로 일정하게 한 후 드릴직경 d를 3, 4.5, 6 및 7.5mm로 변화시켰을 때, 이송속도 f의 단계적인 변화에 따른 절삭저항 성분인 토크와 트러스터를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서 보는바와 같이 드릴직경이 클수록 토크 및 트러스터가 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 드릴직경의 증가에 따른 원주속도의 증가로 인하여 급격한 마찰열의 발생으로 공구인선의 마모가 순간적으로 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

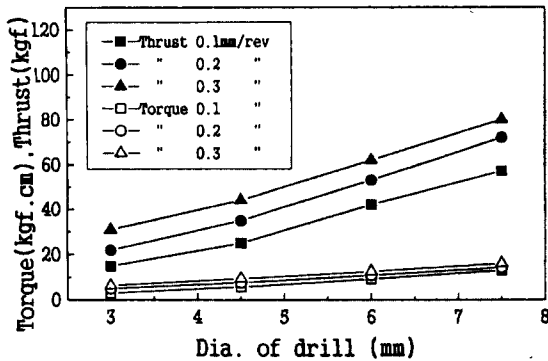


Fig. 10 Relation between dia. of drill and cutting resistance.

Fig. 11에서는 ADI-A의 시험편으로 이송속도 f를 0.1mm/rev, 절삭깊이 h를 15mm로, 절삭속도 N을 1000rpm 및 1800rpm로 각각 달리 하였을 때, 드릴직경 d의 변화에 따른 AE RMS를 나타내었다. 드릴직경이 작은 d가 3mm인 드릴의 경우 정상가공 구멍깊이 (h/d=3)보다 깊은 가공깊이 h가 15mm (h/d=5)이므

로 칩 배출이 불량하여 AE RMS가 높게 나타났다고 생각되며, 또한 소형 드릴이므로 드릴 자체의 불안정으로 인한 진동으로 AE RMS레벨이 증가하는 것으로 생각된다.

d가 4.5mm의 경우는 h/d=3 이상이므로 칩과 공구간의 간섭을 배제할 수 없으며, 또한 비교적 소형 드릴이므로 가공 시 자체의 진동으로 레벨이 높게 검출되었다. d가 6mm 드릴의 경우 AE RMS레벨이 낮게 유지하는 것은 h/d가 2.5에 불과하여 칩과의 간섭이 적은 안정적인 가공이 되므로 낮게 나타나는 것으로 생각된다. 그러나 d가 7.5mm 드릴의 경우 AE RMS레벨이 높게 나타나는 것은 h/d=2에 불과하며, 칩 배출 및 가공의 안정성은 양호하지만 드릴직경이 상대적으로 크기 때문에 원주속도가 증가하여 AE RMS레벨이 크게 증가하는 것으로 생각된다

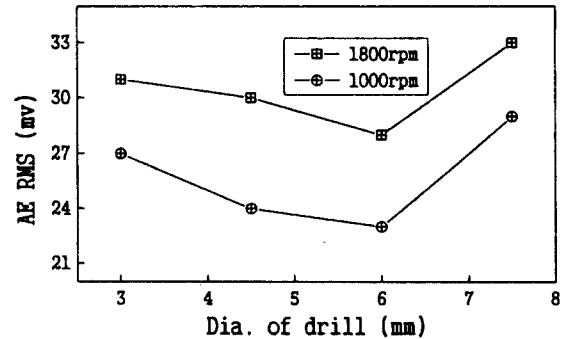


Fig. 11 Effect of AE RMS on the dia. of drill.(ADI-A, f=0.1mm/rev, d=6mm, h=15mm, N=1000, 1800rpm)

4. 결론

본 연구에서는 드릴 가공 시 가공조건에 따른 절삭저항과 AE 신호특성을 알기 위하여 기계적 성질이 다른 3 종류의 ADI시험편을 이용하여, 다양한 절삭조건에 따른 드릴의 절삭저항과 AE RMS 신호를 측정하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 절삭속도와 이송속도의 변화는 토크 및 트러스터에 크게 영향을 미친다. 그러나 AE RMS의 경우는 절삭속도에는 영향이 크나 이송속도와는 무관하다.
- (2) 구멍 가공깊이를 증가시키면 토크 및 트러스터는 완만한 증가현상을 보이나, AE RMS의 경우 h/d=4미

만의 영역에서는 그 값이 완만하게 증가하지만, 그 이상의 영역에서는 칩의 배출 불량 뿐만 아니라 구멍내벽과의 마찰 등으로 인하여 크게 증가한다.

- (3) 일정한 절삭깊이에서 드릴직경을 증가시키면 절삭저항은 선형적으로 증가하지만, AE RMS레벨은 원주속도 뿐만 아니라 h/d의 영향도 크므로 선형적으로 변화하지 않는다.

참 고 문 헌

1. P. A. Blackmore and R.A. Harding, "The Effects of Metallurgical Process Variables on the Properties of Austempered Ductile Irons". American Society for Metals, Vol.3, No.4, pp.28~40 1984.
2. 古郷佐八郎, 小林正孝, 荻野春之助, 淺見克敏, "球狀黑鉛鑄鐵의 오스테소퍼處理條件と機械的性質" 熱處理, 30卷, 4號, pp.220~226, 1990.
3. J. Janowak, R. Gundlach, "Development of a Ductile Iron for Commercial Austempering" AFS Transactions pp. 337~388, 1983.
4. 朴興植, "오스테퍼링한 低合金球狀黑鉛鑄鐵의 機械的性質 및 磨滅特性에 관한 研究", 漢陽大 學校 大學院 博士學位論文, pp.26~43, 1989.
5. 藤田武男, 關谷克彦, 北川亮三, 小池節法, 大城桂作, "ADI의 드릴被削性(第1報). 熱處理および切 削條件의 影響", 日本精密工學會秋季學術大會論文集, pp.361~362, 1993.
6. 小川 誠, 新井 實, 白神哲夫, "ADI의 드릴加工", 日本精密工學會秋季學術會議豫稿集, pp.371~372, 1993.
7. 新谷一博, 加藤秀治, 塩谷外司, "ADI材의 切削特性" 鑄物, 第63卷, 6號, pp.523~527, 1991.
8. 藤田武男, 關谷克彦, 北川亮三, 小池節法, 大城桂作, "ADI의 드릴切削性(第2集), 黑鉛濃度의 影響", 日本精密工學會秋季學術會議豫稿集, pp.363~364, 1993.
9. 中山一雄, 小川誠, "切りくず形状から見たねじれ刃ドリルの切削性能", 精密機械, 43卷4号, pp.427~432, 1977.
10. 大宮毅, 稻崎 一郎, 青山藤詞郎, 酒井勝, 萩尾雄一, "アユスティックエミシヨによるドリル折損のインプロセス検出", 日本機械學會論文集(C編), 51卷 472号, PP.3322~3329, 1985.