

이산 웨이블릿 변환을 이용한 형단조 공정의 예비성형용 금형 설계에 관한 연구

한상훈* · 임성한** · 오수익***

A Study on the Blocker Design of Closed Die Forging with Discrete Wavelet Transform

S.H. Han, S. H. Rhim and S. I. Oh

Abstract

In closed-die forging process, blocker has been used to fill and distribute metal well in finisher die. Generally, the blocker shape was determined by an expert with many experiences. However, the manual blocker design process takes much time and efforts, so various automatic methods for the blocker design process have been suggested for the last three decades. The method with filtering in FFT (Fast Fourier Transform) for the blocker design provides general solution than other methods. But, due to the properties of FFT in time-frequency domain, this method has some drawbacks such as long calculation time, difficulty of local control and additional boundary process after filtering. In this study, DWT (Discrete Wavelet Transform), which is more flexible and is more widely used than FFT, is applied to the blocker design. The method with filtering in DWT is very proper to design blocker in both 2-D and 3-D shapes. To verify the efficiency of this method, blockers of some models are designed and the results show that blocker design with DWT is effective for the blocker design.

Key Words: Closed-die forging, Blocker, Discrete Wavelet Transform, Multi Resolution Analysis, Monadic Transform

1. 서 론

단조(forging) 가공은 소재를 성형할 때 생기는 여러 가지 결함을 없애고 내부 조직을 변형시켜 기계적 성질을 우수하게 하는 공정으로, 성형 온도에 따라 열간, 냉간, 그리고 온간 단조로 분류할 수 있다. 또한 사용 금형에 따라 형단조와 자유단조로 분류할 수 있으며 이 중에서 형단조(closed

die forging)는 양방향에서 소재를 감싸면서 접근하는 두 개의 금형을 이용하여 고온의 재료를 성형하는 방법이다.

형단조 공정의 목적은 주어진 최종 금형 내부를 최소한의 비용으로 효과적으로 채우는 것이므로 적절한 예비성형 공정과 예비성형용 금형(blocker die)의 설계는 양질의 소재 분포를 얻기 위해 필요한 가장 중요한 요소중의 하나이다. 적절한 금형 설계를 통해서 최종 단조 공정에서 결

* 서울대학교 대학원

** 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

*** 서울대학교 기계항공공학부

함인 없는 소재의 유동을 얻을 수 있고, 재료가 금형 내부를 완전히 채우게 할 수 있으며, 플래시(flash)로 버리게 되는 소재의 양을 최소화 할 수 있다. 또한 최종 단조 공정에서 소재의 유동에 의한 금형의 마모를 줄일 수 있으며, 원하는 기계적 성질을 가지는 소재의 단류선을 얻을 수 있다.

적절한 예비성형용 금형의 내부 형상을 설계하는 작업은 매우 어렵고 시행착오를 통해 이루어지므로 일반적으로 숙련된 전문가들에 의해 이루어지는데 그 과정에서 많은 시간과 비용이 든다. 따라서 이러한 단점을 보완하고 보다 효과적인 단조 공정을 수행하기 위해서는 컴퓨터를 이용한 예비성형용 금형 설계의 자동화가 필요하다.

단조 공정의 제어에 필요한 여러 변수들의 영향을 정량적으로 표현하거나, 단조 공정 자체를 컴퓨터를 이용하여 자동화 하기 위한 다양한 연구들이 제시되어왔다. 컴퓨터가 상용화 되지 않았던 때에는 시행착오를 반복하거나 숙련된 전문가들의 경험에 의해 만들어진 데이터 베이스를 기반으로 하여 예비성형용 금형의 설계가 이루어졌다. 이후에 컴퓨터가 도입되면서 예비성형용 금형 설계의 자동화를 위한 다양한 방법들이 제시되었다. 이러한 방법들에는 첫째 기하학적인 방법, 둘째 경험을 토대로 한 knowledge-based system(KBS), 셋째 유한요소법을 이용한 역추적법(Backward Tracing Scheme), 넷째 upper bound element technique (UBET) 등이 있다.

이상에서 열거한 방법들은 설계 방법의 한계로 인해 간단한 2 차원 형상이나 축대칭 형상에만 그 범위가 국한되었다. Oh 등^[1]은 푸리에 급수를 이용하여 최종 단조품의 형상을 전개한 뒤 저역 통과 필터로 고주파 영역을 제거하는 방법을 사용하여 3 차원 형상에 대한 일반적인 예비성형용 금형의 자동 설계 방법을 제안하였다. 그러나 이 방법은 필터링 후 추가적인 경계값 처리 과정으로 인한 계산 시간의 증가와 국부적인 제어에 대한 어려움을 가지고 있다.

따라서 보다 다양한 형상의 단조품에 대해 예비성형용 금형의 형상을 설계할 수 있는 방법의 개발이 필요하다.

현재까지 제안되었던 예비성형용 금형 설계 방법들 중에서 푸리에 변환에서의 저역 통과 필터를 이용하는 설계 방법이 가장 일반적인 방법을 제시하였다. 그러나 푸리에 변환에 사용되는 삼각함

수는 시간이나 공간에 대한 국소적인 표현이 어려워 이를 기저 함수로 사용하는 푸리에 해석은 주기성이 없는 경우, 즉 시간이나 공간에 대해 규칙성 없이 임의로 변하는 함수에는 부적합하다. 우리가 일상에서 접하는 대부분의 신호나 함수는 비주기성 형태를 지니고 있으며, 단조에서 사용되는 예비성형용 금형의 형상 또한 그러한 성향을 가지기 때문에 푸리에 변환보다는 최근에 신호나 이미지의 처리에서 널리 사용되고 있는 웨이블릿 변환을 예비성형용 금형 설계에 적용하였다.

본 연구에서는 웨이블릿 변환에서의 필터링을 이용하여 리브-웹브 유형의 2 차원 형상과, 상자 모양의 3 차원 형상, 그리고 복잡한 형상의 3 차원 형상에 대한 예비성형용 금형 설계를 수행하였고, 설계된 금형의 단면을 기존의 푸리에 변환에서의 필터링을 이용한 방법으로 설계되었던 금형과의 비교를 통해 그 결과를 검증하였다.

2. 이론

2.1 푸리에 변환(Fourier Transform)과 웨이블릿 변환(Wavelet Transform)

FFT 에 사용되는 삼각함수는 시간이나 공간에 대해 국소적인 표현이 어려워 이를 기저함수로 사용하는 푸리에 해석(Fourier Analysis)은 주기성이 없는 경우-시간이나 공간에 대해 규칙성 없이 임의로 변하는 함수-에는 부적합하다.

우리가 일상에서 접하는 대부분의 신호나 함수는 비주기성 형태를 지니고 있으며, 단조에서 사용되는 예비성형용 금형의 형상 또한 그러한 성향을 가지기 때문에 푸리에 변환 보다는 웨이블릿을 사용하는 것이 예비성형용 설계에 더 적합하다.

2.2 웨이블릿 변환

웨이블릿 변환의 기저가 되는 함수 $\psi(t)$ 는 식 (1), (2)를 만족하며, 이를 모 웨이블릿(mother wavelet) 이라고 부른다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (2)$$

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3)$$

모 웨이블릿 함수는 식 (3) 의 관계를 만족하고 여기서 a 는 scale 변수이고 b 는 translation 변수이다.

2.2.1 연속 웨이블릿 변환(CWT)

임의의 신호 함수 $f(t)$ 는 연속 웨이블릿 변환에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a,b}(t) dt \quad (4)$$

식 (4)의 역변환은 다음과 같다.

$$f(t) = \frac{1}{C} \int_{a=-\infty}^{\infty} \int_{b=-\infty}^{\infty} \frac{1}{|a|^2} W(a,b) \psi_{a,b} da db \quad (5)$$

2.2.2 이산 웨이블릿 변환(DWT)

계산의 편의를 위해서 이산 웨이블릿 변환(DWT)를 도입한다. DWT 를 사용함으로써 컴퓨터를 이용하여 웨이블릿 변환을 계산할 수 있고, 함수를 이산화하여 처리하므로 임의의 형상을 다룰 수 있다.

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} d(k,l) 2^{k/2} \psi(2^k t - l) \quad (6)$$

연속 웨이블릿 변환에서의 두 변수 $a=2^{-k}$ 이고 $b=2^k l$ 에 해당되고 k, l 은 정수이다.

2.3 Mallat 알고리즘

예비성형용 금형의 설계에서 3 차원 형상의 경우에는 데이터 수가 매우 많아지고 또한 다양한

단계의 해상도에서의 결과를 얻을 수 있어야 한다.

이산 웨이블릿 변환의 한 방법인 다중해상분석(MRA: Multi-Resolution Analysis)은 고속 웨이블릿 변환(FDWT)을 가능하게 하고 일반적인 신호 및 이미지 처리에 가장 널리 사용되는 방법이기도 하다[2].

이 방법은 다해상도 분해 영역이라 정의되는 벡터 영역을 정의하고 직교 기저를 이루는 스케일 함수와 스케일 함수로부터 정의되는 웨이블릿 함수를 이용하여 신호 $f(t)$ 를 다해상도 영역에 사영시키는 방법이다 (Fig.1).

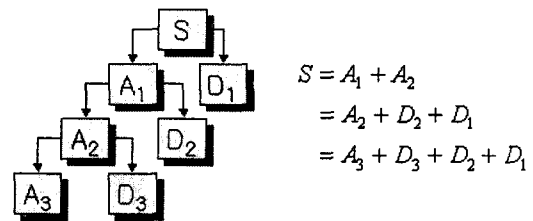


Fig. 1 MRA (Multi resolution analysis)

다중해상 분석에는 신호를 분해하고 복원하는 두 가지의 과정이 있으며 분해된 신호는 완벽하게 복원될 수 있다.

2.3.1 분해(Decomposition)

상위 해상도에서 하위 해상도의 분해는 식 (7), (8)과 같으며 하나의 상위 해상도의 데이터들(a_j)은 다음 단계에서 근사값(a_{j+1})과 상세값(d_{j+1})으로 나뉘어지며 각각은 상위 해상도 데이터 개수의 반을 가지게 된다[3].

$$a_{j+1}[p] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h[n-2p] a_j[n] = a_j * \bar{h}[2p] \quad (7)$$

$$d_{j+1}[p] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} g[n-2p] a_j[n] = a_j * \bar{g}[2p] \quad (8)$$

여기서 h 는 스케일링 필터이며, 식 (7)과 (8)을 간단하게 도식화하면 Fig. 2 와 같다.

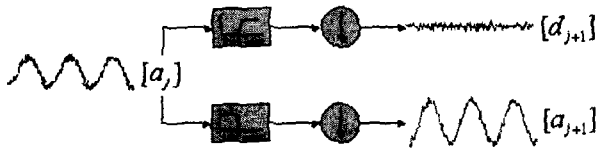


Fig.2 Decomposition of signal

식 (7), (8)에서 계산이 거듭되면 상위 해상도에 해당하는 a_j 마지막 값들이 부족하게 되는 모서리 효과(Edge Effect)가 발생한다. 따라서 a_j 을 보정해 주어야 하는데, 본 연구에서는 예비성형용 금형의 경계값 또는 플래시에 해당하는 부분이 고정되어 있기 때문에 주기확장(Periodic Extensions)을 이용한 보정이 적합하다^[4].

2.3.2 복원(Reconstruction)

하위 단계에서 상위 단계로의 복원은 식 (9)와 같이 하위 단계의 근사 계수(Approximation coefficient)와 상세 계수(Detail coefficient)로부터 복원된다.

$$a_j[p] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h[p-2n] a_{j+1}[n] + \sum_{n=-\infty}^{\infty} g[p-2n] d_{j+1}[n] \quad (9)$$

$$= a_{j+1} * h[p] + d_{j+1} * g[p]$$

2.4 스케일링 필터(Scaling filter{h})

스케일링 필터(h)는 임의의 데이터를 상위 단계에서 하위 단계로 사영시킬 때 사용되는 필터 계수이다. 웨이블릿에는 다양한 종류의 필터가 있는데, 데이터를 다중해상 분석을 하게 되면 하위 영역으로 갈수록 필터의 모양과 유사하게 분해가

Table 1 Scaling filter coefficient

Filter	Filter coefficient
Haar	1 1
Haar4	1/2 1/2 1/2 1/2
Quadratic B-Spline	1/4 3/4 3/4 1/4

된다. 따라서 본 연구에서는 예비성형용 금형의 형상을 유지하고 대칭성을 보장하기 위해서 이에

적합한 Table 1에 나와있는 세 가지의 스케일링 필터를 사용하였다.

2.5 단항 변환(Monadic Transform)

식 (7), (8), (9)에서 보듯이 다중해상 분석(MRA)은 이항 변환(Dyadic Transform)을 기반으로 대상 함수를 여러 단계의 해상도로 분해하고 각 단계별로 연산을 수행하므로 다양한 형태의 신호 및 이미지 프로세스에 많이 적용된다.

그러나 이항 변환을 사용하면 상위 단계에서 하위 단계로 갈수록 데이터 수가 줄어들기 때문에 최종 형상을 유지하기가 어렵다. 신호나 이미지를 처리하는 기존의 경계값처리(thresholding) 방법을 사용해도 불연속과 증첩되는 부분이 생긴다. 이를 해결하기 위해 상세 계수에 대한 연산을 한다 해도 상위 단계와 하위 단계의 관계를 데이터 하나 하나에 적용해야 하기 때문에 형상이 복잡하면 작업 시간이 무한정 늘어날 수 있어 비효율적이다. 따라서 보다 나은 결과를 얻기 위해서는 이항 변환을 기반으로 하여 예비성형용 금형 설계에 적합한 변형된 알고리즘인 단항 변환(Monadic Transform)을 상용해야 한다.

단항 변환을 사용하게 되면 기존에 사용하던 상세 계수에 대한 추가적인 연산과 그 연산의 결과로 나온 데이터에 대한 복원 과정이 필요 없기 때문에 분해 과정만으로도 예비성형용 금형의 형상을 추출해낼 수가 있다. 또한 이항 변환과는 달리 하위 단계로의 사영후에도 데이터 수가 보존되기 때문에 이항 변환이 갖는 분해 단계의 한계를 무한하게 할 수 있다. 다만 모서리 효과 때문에 각 단계마다 데이터 끝 값에 대한 보정이 필요한데 이는 이항 변환의 경우와 동일하다. 단항 변환을 행렬식으로 나타내면 식 (10)과 같다.

$$\begin{pmatrix} a_0^n \\ a_1^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_0 & h_1 & h_2 & h_3 & \dots \\ \cdot & h_0 & h_1 & h_2 & h_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0^{n-1} \\ a_1^{n-1} \\ a_2^{n-1} \\ a_3^{n-1} \\ \cdot \end{pmatrix} \quad (10)$$

3. 해석 결과

3.1.2 차원 예비성형용 금형

2 차원 예비성형체는 1 차원 이산 웨이블릿 변환을 사용하여 구현된다.

3.1.1 간단한 형상(Simple shape)

이산 웨이블릿 변환에 의한 기하학적 형상의 변화를 보기 위하여 다음과 같은 간단한 함수를 정의한다.

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{for } |x| \leq 1 \\ 0 & \text{for } |x| > 1 \end{cases} \quad (11)$$

식(1)의 함수를 수치화하여 간단한 형상에 대해 웨이블릿 변환하여 계산 단계별로 그린 결과는 Fig.3 과 같다. Fig.3 의 결과는 256 개의 데이터를 가지고 Haar 웨이블릿을 적용한 결과이다. 처음의 형상에서 다중해상 분석의 스텝이 많아질수록 즉, 하위 단계로 갈수록 형상은 점점 부드러워지는 것을 확인할 수 있다.

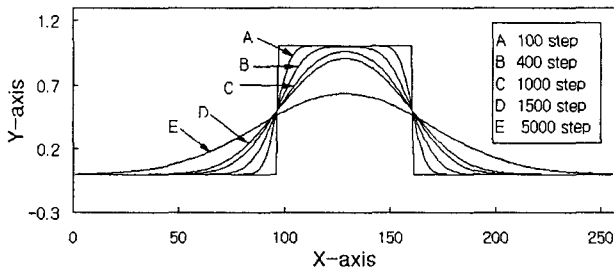


Fig.3 Variation of shape in multi resolution

스텝 수뿐만 아니라 데이터의 개수 역시 형상에 영향을 미친다. Fig.4 에서 보듯이 동일한 단계에서도 데이터 수에 따라 형상의 완만해짐이 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이것은 다른 웨이블릿을 적용했을 때도 동일하게 나타나는 성질이고 또한 필터링 된 함수의 면적은 단계가 거듭되어도 보존된다.

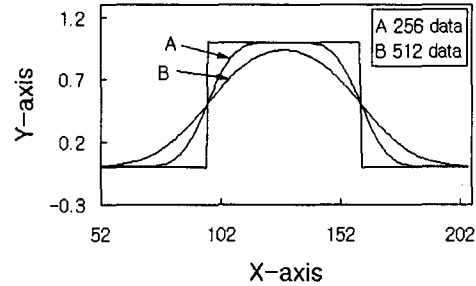


Fig. 4 Geometry changes about the number of data

3.1.2 일반적인 형상(General blocker)

앞에서 다루었던 간단한 형상에 대한 방법을 일반 부품에 적용하였다. Fig. 5 는 리브(lib)와 웨브(web)를 가지는 일반적인 형태의 알루미늄합금 소재의 성형시 사용되는 블로커이며, Haar4 필터를 통해 얻어진 다양한 단계에서의 결과를 보여준다. 3.1.1 의 간단한 형상에서 다루었던 성질들이 똑같이 나타나는 것을 알 수 있다.

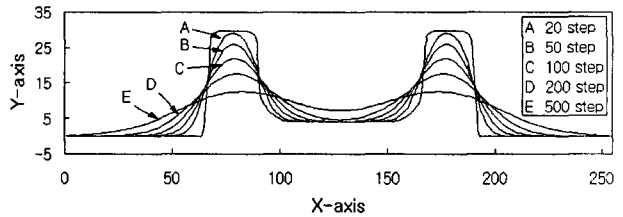


Fig. 5 Filtered shape of general blocker (Haar4 wavelet, 256data)

3.1.3 복합 웨이블릿(Mixed wavelet)

Fig.5 의 결과를 살펴보면 블로커의 리브와 웨브 부분이 Fig.6 에 나와있는 경험 있는 설계자에 의해 설계된 형상과 FFT 에 의한 결과와는 다르게 나타난다. 만약 웨이블릿을 이용한 필터링에서 구간에 따라 다른 필터 계수를 적용하면 블로커의 형상을 국부적으로 조절할 수 있게 된다.

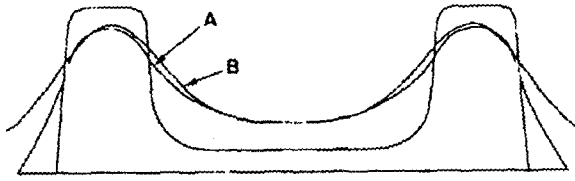


Fig. 6 Conventional blocker (A) and filtered curve by FFT(B) for aluminum^[1]

그 결과는 Fig. 7에서 확인할 수 있다.

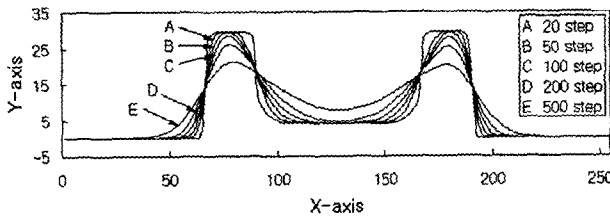


Fig. 7 Result of haar4-based Haar (for aluminum alloy)

Fig.7의 결과는 Fig.5과 비교해 볼 때 웨브 부분과 블록의 양 끝 부분에 해당하는 플래시 부분이 많은 차이를 보인다. 따라서 형상의 모양과 성형 소재의 유동특성 등을 고려해야 하는 예비성형용 금형의 설계에서는 다양한 웨이블릿을 혼용하면 좋은 결과를 얻을 수 있다.

3.2 삼차원 예비성형용 금형

3차원 예비성형체는 2차원 이산 웨이블릿 변환으로 구현할 수 있으며 이는 $m \times n$ 의 형상 데이터를 수평 수직 방향으로 각각 1차원 변환하는 것과 동일하다.

3.2.1 수치화

수치화는 DWT의 다중해상 분석을 수행하기 위해, 주어진 최종 단조품 형상을 일정한 간격으로 샘플링하여 데이터화 하는 과정이다.

수치화 과정은 최종 형상을 모델링 한 후에 최종 형상과 같은 크기의 사각형 요소망을 모델 위로 정사영 시킨다 (Fig.8).

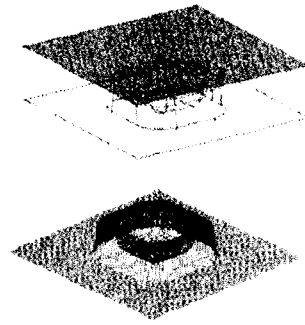


Fig.8 Digitizing process of box shaped finisher

3.2.2 간단한 상자 형상(simple box shape)

Fig.9, Fig.10은 3차원 형상의 상자 모양을 2차원 DWT한 결과이다.

Fig.9는 하나의 웨이블릿 필터를 사용한 경우이고 Fig.10는 컵 형상과 플래시가 만나는 경계에 다른 웨이블릿을 혼용한 결과인데 이것은 FFT로 필터링을 한 뒤 후처리 한 것과 거의 유사하다.

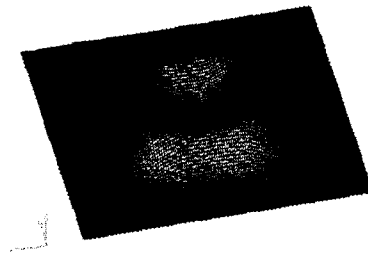


Fig.9 Filtered box shape (Quadratic B-spline, 128by128 and 100th step)



Fig.10 Filtered box shape (Quadratic B-spline-based haar, 128by128 and 100th step)

3.3 연산 시간의 비교

컴퓨터에서 필요한 연산의 수를 flop(floating point operation)으로 나타낼 때, 만약 $N = 2^n$ 개의 데이터를 FFT 하면 $O(2^n \log_2 2^n) = O(n \times 2^n)$ 개의 flop 이 필요하다. 일반적으로 웨이블릿에서는 $O(2^n)$ 으로 알려져 있지만 MRA 에 예비성형용 금형 설계에서 사용한 연산을 적용하게 되면 flop 은 $O(\frac{5}{2}(2 \times 2^{n-2} - 7))$ 가 된다. 해석 결과들을 살펴보았을 때 웨이블릿 변환을 적용한 경우에는 데이터의 차수를 2 개 줄인 $N = 2^{n-2}$ 개의 데이터로도 FFT 의 결과와 거의 유사한 형태를 얻을 수 있다. 그림 Fig.11, Fig.12 는 각각 2 차원과 3 차원 형상에 대한 연산시간의 비교한 것인데 2 차원 형상에서는 FFT 의 경우가 연산 시간이 더 작게 나왔지만 두 경우 모두 수 초 내에 연산이 끝나기 때문에 큰 의미를 가지지 않는다.

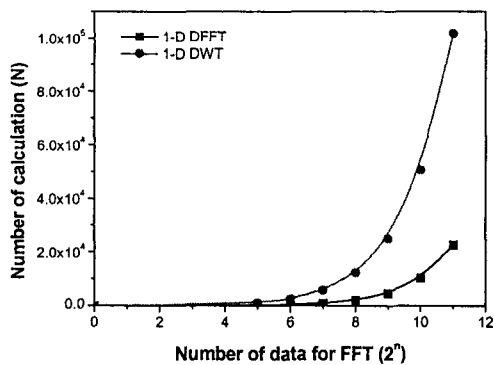


Fig. 11 Computing time for 2-D shape

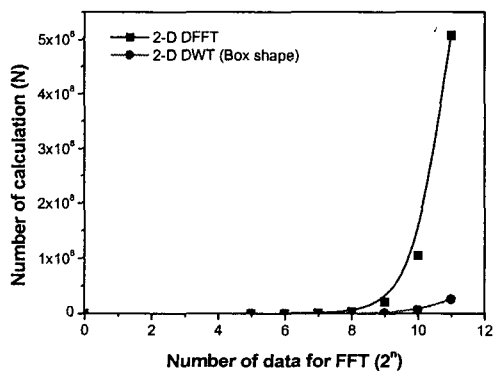


Fig. 12 Computing time for 3-D shape

3 차원 형상(Fig.12)에 대해서는 데이터의 수가 많아질수록 연산 시간의 차가 매우 커지는 것을 알 수 있다.

5. 결론

이산 웨이블릿 변환을 이용하여 형단조 공정에서 사용되는 예비성형용 금형을 설계하였다. 이를 위해 신호 및 이미지 처리에 많이 사용되는 다중 해상 분석(MRA)을 금형 설계에 적합하도록 변형한 단항 연산(monadic transform)을 사용하였고 형상을 제어할 수 있는 변수로 웨이블릿 필터 계수의 종류, 데이터 수 그리고 다중해상의 단계 수를 이용하였다.

이산 웨이블릿 변환을 이용한 설계는 필터 계수의 특성에 따라 최종 형상에 국부적으로 다른 종류의 필터 계수를 사용하여 형상 제어를 가능하게 했고 FFT 를 이용한 형상 설계에서의 후처리 과정인 경계면 처리 문제를 개선하였다. 또한 3 차원 형상에 대해 최종 형상의 모양과 데이터 수의 증가에 따른 연산 시간에 크게 영향을 받지 않는 일반적인 예비성형용 금형 설계 방법을 제시하여 기존의 예비성형용 금형 설계의 자동화 방법보다 이산 웨이블릿 변환을 사용하는 방법이 매우 효율적임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. S. I. Oh, S. M. Yoon, "A New Method to Design Blockers", CIRP, Vol. 43, pp. 245-248, 1994
2. Stephane G Mallat, "A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wave Representation", IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 11, pp. 674-693, July 1989
3. Stephane Mallat, A Wavelet Tour of Signal Processing, Academic Press, 1999
4. Yves Nievergelt, Wavelets Made Easy, Springer Verlag, 1999