

# CONTENTS

## 1. 특집(마찰과 윤활레짐 변화)

### 2. AFDEX\_V24R01 출시

### 3. AFDEX\_V24R01 신기능

- 3.1 윤활손상을 계산 기능
- 3.2 독립적 금형구조해석 기능
- 3.3 인장시험과 유동곡선 및 변형경화능
- 3.4 손상도 계산의 고정확성
- 3.5 금형 요소망의 직접 입력
- 3.6 인발 공정의 자동해석
- 3.7 고온 유동곡선의 온도 및 마찰 동시 보상
- 3.8 전후처리기 아이론 변경
- 3.9 응력 삼축성 보기 기능
- 3.10 사용자 설명 입력 기능
- 3.11 롤포징 공정해석 전처리기 기능
- 3.12 다물체 해석 시 객체 간 접촉영역 표시 기능

### 4. AFDEX\_V24R01 기능 개선

- 4.1 형상 인발 중 금형 과열 현상의 예측
- 4.2 계산시간 개선 (회전 금형 사용 예제)
- 4.3 AFDEX /MAT 기능 개선
- 4.4 STL 내보내기 기능 개선 및 변경
- 4.5 바인더 하중정보 입력 기능 개선
- 4.6 후처리기 속도장 성분 보기
- 4.7 3차원 STL 모델 오류 체크 기능 개선
- 4.8 금형위치 자동 초기화 기능
- 4.9 후처리기에서 해석결과 범위의 결정 방식 변경
- 4.10 전체 공정의 해석결과 보기 타입 추가
- 4.11 이중 쿨롱마찰조건 입력 UI 추가
- 4.12 네트워크 라이선스 활성화
- 4.13 다중모니터 사용 편의성 개선

### 5. 공지 사항

- 5.1 2025년 정기교육 및 온라인 상시 강좌
- 5.2 AFDEX e-Book의 발간

## 1. 특집 (마찰과 윤활레짐 변화)

소성가공 분야에서 윤활에 관하여 많은 실용적 연구를 수행한 Wilson 교수[1]의 견해에 주목할 필요가 있다. 그는 윤활레짐 변화(Lubrication regime change)에 초점을 맞춘 체적소성가공에서의 마찰과 윤활에 관한 그의 논문에서 다음의 사실을 주장하고 있다. 소성가공에서 접촉면이 겪는 윤활상태는 네 가지로 분류된다. 즉, 후막윤활 (Thick-film lubrication), 박막윤활 (Thin-film lubrication), 혼합윤활(Mixed lubrication), 경계윤활(Boundary lubrication)이 그것이다. 소성가공 중에 심한 변형이 동반되는 재료-금형 접촉면에서 윤활레짐 변화가 발생한다. 후막윤활은 박막윤활로 변화하고, 박막윤활은 혼합윤활로 전이되며, 혼합윤활은 경계윤활로 발전한다는 것이다.

그리고 그는 소성가공 공정해석 목적으로 일반적으로 사용되고 있는 일정한 마찰계수와 마찰상수로 정의되는 전통 Coulomb 마찰법칙과 전통 일정전단마찰법칙을 가혹하게 비판하고 있다. 단조를 비롯한 체적소성가공에서 그러한 마찰상태가 존재하지 않는다는 것이다. 그는 애써 상세한 언급을 피하며, 일정전단마찰법칙을 상계해법(Upper-bound method) 등의 해석적 방법에 의존하는 학자들을 위한 것으로 간주하고 있다. 일정전단마찰법칙은 더 이상 재고할 가치가 없다는 것으로 해석된다.

한편, 많은 소성가공 연구자들이 일정한 마찰계수로 정의되는 Coulomb 마찰법칙, 즉 전통 Coulomb 마찰법칙을 무비판적으로 사용하고 있는데 대해서도 Wilson은 매우 신랄하게 비판하고 있다. 그는 그 이유를 젊었을 때의 교육에서 찾고 있다. 아마도 정역학 또는 처음 실용적 마찰법칙을 경험한 나사 체결 문제와 관련된 고체역학의 교육을 생각하며 비판한 것일지도 모를 일이다. Wilson에 의하면, 전통 Coulomb 마찰법칙은 경계마찰(무윤활)에서 압력이 크지 않은 경우에 적합하다. 나사 체결 문제가 전통 Coulomb 마찰법칙에 적합한 것으로 해석된다. 그가 논문에서 강조하고 있지만, 소성가공에서 그러한 조건을 찾기가 어렵다는 것이다.

실제 최근의 연구[2-4]에서 밝혀진 바와 같이, 단조 중에 윤활상태는 급변한다. 충분히 잘 윤활처리된 윤활막이 손상되지 않은 접촉면에서 마찰은 무시 가능한 반면, 윤활막이 심하게 손상된 접촉면은 마찰이 극심하여 경계윤활이 아니면 설명이 불가능할 수도 있다. 특히 압축하중에 의존하는 단조공정 중, 재료-금형 접촉면은 극심한 윤활레짐 변화를 겪게 된다. 이러한 현상을 Coulomb 마찰법칙이 충분히 반영하려면, 접촉면의 윤활 상태에 따라 마찰계수가 변화해야 한다. 일정전단마찰법칙으로는 마찰 상태를 표현할 수가 없다. Wilson이 주장하는 바와 같이, 일정전단마찰법칙은 사용자보다 프로그램 개발자를 포함한 이론 연구자를 위한 것이라고 볼 수 있다. 가급적 일정전단마찰법칙을 사용하지 말 것을 권장한다.

단조에서 흔히 접하게 되는 전방압출 공정을 통하여 전통 Coulomb 마찰법칙의 문제를 구체적으로 이해해 보자. 그림 1.1에 정의된 다단계 냉간전방압출공정은 재료-금형 접촉 상태가 반영된 마찰계수를 사용해야 하는, 윤활레짐 변화를 고려해야 하는 공정의 전형적인 예이다. 적당한 면적감소율의 다단계 냉간전방압출공정에 일정한 값 이상의 일정한 마찰계수를 사용하는 경우, 입구 근처의 접촉면에서 재료의 소성변형이 발생할 가능성이 있다. 어느 정도 이상으로 윤활처리가 되었다면, 실제의 현상은 그렇지 않다. Jour et al. [5]은 위치마다 서로 다른, 결과적으로 위치에 따라 변하는 마찰계수를 사용하여, 즉 윤활레짐 변화를 고려하여 이 문제를 해결하였다. 그런데 특정 부위에 특정한 마찰계수를 인위적으로 부과하는 기존 방식은 비현실적이다.

그러나 전통 Coulomb 법칙을 사용할 경우, 출구 측에서 필연적으로 겪는 고 마찰은 출구로부터 입구쪽으로 가면서 재료의 정수압과 접촉면의 압력을 순차적으로 증가시킨다. 즉, 컨테이너 내부의 재료-금형 접촉면에서 압력이 입구에 가까워질수록 크게 된다. 전통 Coulomb 마찰법칙은 마찰이 증가하고 이것이 압력을 증가시켜서 결국 입구측에서 재료가 소성변형을 겪게 하는 악순환을 촉진한다. 이 현상은, 극단적으로 큰 마찰조건이 아닐 경우, 실제와는 다르다. 비록 출구에서 마찰이 비정상적으로 커서 실제 압출품의 선단에서 탄 표면이 관찰될 수는 있지만, 어느 정도의 윤활처리가 되었을 경우에 입구의 컨테이너에서 소성변형이 발생하는 경우는 흔하지 않다. 그러나 이 현상은 Coulomb 마찰법칙의 근본적인 문제와는 아무런 관련이 없다. 이 현상을 시각화하기 위해 탄소성 유한요소법을 사용하여 다스텝 냉간전방 압출공정의 시뮬레이션을 수행했다.

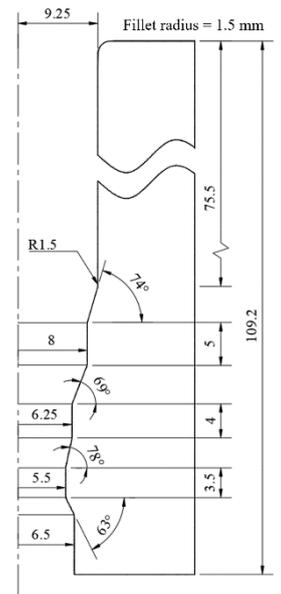


그림 1.1 세 스텝 전방압출공정

해석정보는 다음과 같다.

- 재료의 유동응력:  $\sigma = 50.3 [(1+20\varepsilon)]^{0.26}$  MPa - 강재 금형
- 재료의 영률: 90,000 MPa; 푸아송비: 0.3 - 램 속도: 1 mm/s
- 마찰: Case (1): 일정한 마찰계수  $\mu = 0.1$

Case (2): 다음 점의 연결로 정의되는 구간선형함수로 표현된 표면 변형률 종속 마찰계수 ( $\varepsilon, \mu$ ): (0,0.01); (0.3,0.03); (0.5,0.05); (1.0,0.1); (2.0,0.2)

5,500개의 균일한 사각형요소(각 사각형요소의 크기: 0.24 mm(반경 방향) x 0.43 mm(축 방향)로 이루어진 초기 유한요소망이 사용되었다. 재료 상부에서 발생할지도 모를 표면전단(Skin shearing)을 유한요소망에서 직접 관찰하기 위하여 요소망재구성 기능을 켜다. 최종 스트로크에서 재료 상부의 유효변형률과 격자의 뒤틀림은 그림 1.2에서 보는 바와 같다. Case (1)의 경우, 재료의 선단이 마지막의 세 번째 스텝에 닿으면서 높아진 입구측의 압력과 입력된 높은 마찰계수로 인하여 재료 상부의 표피 전단이 발생하는 것으로 나타났다. 반면 Case (2)의 경우, 세 번째 스텝에서 최대 마찰계수가 0.18을 초과했음에도 불구하고 컨테이너 내부의 재료 표면에서 소성변형이 발생하지 않아, 컨테이너 내의 접촉면에서 마찰계수는 낮게 유지되었다. 이로 인하여 컨테이너 내부에서 재료의 강제 변진이동이 공정 내내 그대로 유지되었다.

실제, 재료에 코팅된 윤활막은 냉간전방 압출공정 중에 컨테이너 내부에 큰 손상을 입지 않는 것으로 알려져 있다. 경험상 컨테이너 내부와 첫번째 압출스텝에서 뚜렷한 소성변형이 발생하지 않더라도 일반적으로 세 번째 압출스텝에 이르면 재료의 표면이 심하게 손상되고 굽는다. 손상되지 않은 윤활막이 재료와 금형을 분리하는 접촉면은 낮은 마찰을 유지하기 때문에 마찰응력은 컨테이너 입구에서 소성변형을 일으킬 만큼 높은 압력을 발생시키지 않는다. 반면, 출구 측의 윤활막 손상은 상당한 마찰응력과 과도한 열로 인해 결정적일 수 있다. 이러한 마찰 현상은 윤활레짐 변화가 다 스텝 냉간전방압출 동안 고 단면감소율일 경우 뚜렷하게 발생한다는 것을 의미한다. 이러한 경우, 출구에서의 마찰계수는 크고 입구에서의 마찰계수는 낮아야 마땅하기 때문에 접촉면의 상태에 따라 마찰계수가 변화하는 것이 필연적이다.

Case (2)에서 사용된 방법은 표면 변형률의 함수로 윤활제의 손상 정도를 간단히 표현함으로써 전통 Coulomb 마찰법칙의 과도한 마찰 문제를 손쉽게 해결했다. 이 사례는, 윤활레짐 변화를 반영하기 위해, 접촉면의 상태가 변화함에 따라 마찰계수의 크기도 변화해야 함을 강조한다. 그렇기 때문에 Case (2)는 윤활레짐 변화를 단계별로 잘 보여주며, 이를 반영하기 위한 마찰모델과 마찰계수의 중요성을 강조하기에 부족함이 없다.

Case (2)는 모든 접촉면에서 발생하는 유효변형률이 윤활제의 열화와 직접적인 관련이 있기 때문에 윤활레짐 변화를 설명하는 데 매우 유용하다. 실제 단조에서는 금형과의 접촉 없이 표면에 상당한 변형이 발생할 수 있다. 이 경우 변형이 윤활제의 열화를 가속화하지 않기 때문에 마찰계수를 표면 변형률의 함수로 처리하는 것은 비현실적일 수 있다. 따라서 접촉 표면의 윤활제의 손상 정도를 정량화하는 것이 중요하다.

한편, 일정전단마찰법칙을 사용할 경우, 표면상으로 전통 Coulomb 마찰법칙에 비하여 이 공정의 예측결과가 양호하게 보일 수 있다. 그것은 일정전단마찰법칙의 특성상 압력과는 상관없이 전단응력이 결정되기 때문에 컨테이너 내부의 재료가 항복상태에 도달할 수 없기 때문이다. 그러나 일반적으로 그 결과는 세 가지 관점에서 문제가 있다. 첫째, 출구에서 상대적으로 심한

마찰응력을 표현할 수 없는 근본 문제가 있다. 그 결과를 바탕으로 금형의 마모를 논할 수가 없다. 둘째, 그림에서 불구하고 성형하중이 과하게 예측될 가능성이 높다. 그것은 컨테이너 내부의 마찰상태가 과대 평가된 결과이다. 셋째, 마찰이 과도할 경우, 입구측에서 소성변형이 발생하여 압축이 불가능한 경우가 실존할 수 있지만, 일정전단마찰법칙으로는 예측이 불가능하다는 사실이다.

결론적으로 비교적 큰 단면감소율의 냉간전방 압출공정을 해석하는 문제가 기하학적으로는 단순하게 보이지만, 윤활과 마찰의 관점에서는 매우 까다로운 문제에 속한다. 이것은 윤활레짐 변화에 그 원인이 있다. 윤활레짐 변화를 쉽게 반영하기 위한 목적으로 AFDEX는 가변 Coulomb 마찰계수와 가변 마찰상수를 도입하였다. 현재 이것들을 변형률, 온도, 변형률속도 등의 함수로 간주하고 있지만, 윤활제의 손상을 직접 표현하는 방법에 관한 연구가 필요할 수도 있다.

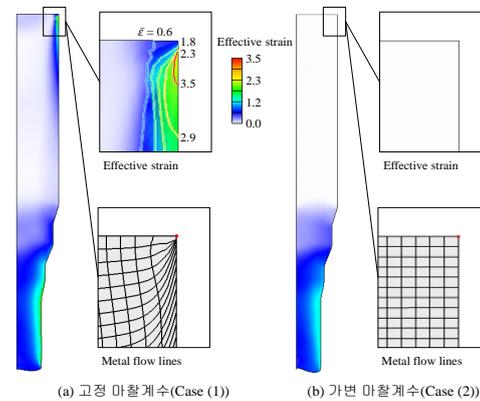


그림 1.2 유효변형률

일반적으로 마찰계수든 마찰상수든 상수로 취급하는 경우가 대부분이다. 그러나 윤활처리된 재료의 윤활막은 소성변형 중에 파괴되기 때문에 이 값들은 변한다. 온도 및 압력에도 영향을 받는다. 이러한 현상을 반영하기 위하여 마찰계수를 다음과 같이 온도, 압력, 재료의 변형률의 함수로 간주한다.

$$\mu = \mu_0 W_T(T) W_P(P) W_E(\epsilon) \quad (1)$$

여기서 함수  $W_T(T)$ ,  $W_P(P)$ ,  $W_E(\epsilon)$ 는 구간선형함수를 비롯한 다양한 함수로 수식화될 수 있다.

이 마찰계수를 사용하는 것을 가변 Coulomb 마찰법칙이라고 한다. 즉, 가변 Coulomb 마찰법칙은 마찰계수를 상태변수의 함수로 표현한 식 (1)을 사용할 때를 일컫는다. 마찰계수의 상태변수 의존도를 밝히는 것은 용이하지 않다. 그러나 소성가공 중 윤활막 또는 윤활제의 손상이 심한 부위를 무시할 수 없을 경우에는 식 (1)의 마찰계수와 상태변수의 관계를 활용해야 한다. 동일한 방법이 일정전단마찰법칙에도 응용될 수가 있다[6].

예를 들면, 그림 1.3(a)의 알루미늄 열간단조품의 변형 형상을 전통 Coulomb 마찰법칙으로는 예측할 수가 없다. 일정전단마찰법칙을 사용하더라도 결과는 마찬가지로이다. 그림 1.3(b)는 전통 마찰법칙을 사용하여 강열접소성 유한요소법으로 해석한 결과인데, 관찰 대상의 측면 모양이 실험결과와

분명히 다르다.

이 제품의 성형을 위하여 재료에 윤활피막을 생성시킨다. 이 윤활피막은 어떤 조건에 이를 때까지 윤활 역할을 충실히 수행하다가 한계치에 도달하면, 윤활 성능을 상실하거나 그 성능이 현저히 떨어지게 된다. 이 윤활피막의 성능을 좌우하는 요소가 접촉면에서 재료의 변형률에 있다고 간주하고, 임계표면변형률(Critical surface strain)에 도달하면 마찰계수가 크게 증가하는 것으로 가정하여 공정해석을 실시한 결과, 그림 1.3(c)에서 보는 바와 같이, 실험결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 실제 변형률이 임계표면변형률을 초과한 접촉 영역에서 윤활막이 심하게 손상되어 재료와 금형이 직접 맞닿는 경계윤활 현상이 발생한 것으로 육안으로 확인되었다. 반면, 그림 1.3(a)에서 보는 바와 같이 성형 종료 이후에도 넓은 영역에서 윤활막이 양호한 상태를 유지하고 있다.

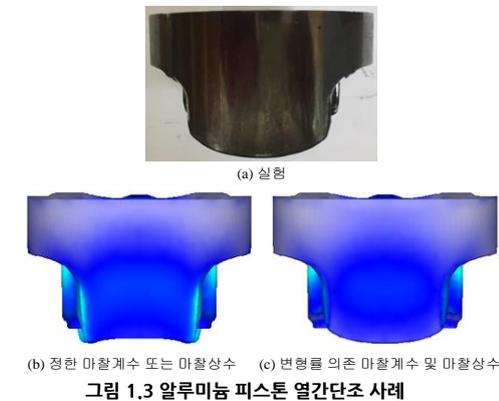


그림 1.3 알루미늄 피스톤 열간단조 사례

결론적으로 요약하면 다음과 같다.

1. 변형경화가 작을 경우, 마찰의 영향이 커지기 때문에 알루미늄, 신소재, 고강도 재료의 소성가공에서 마찰을 중시해야 한다.
2. 일정전단마찰은 윤활막의 변형에 마찰이 좌우되는 후막윤활 레짐에 적합하며, 소성가공에서 그런 조건을 만족하는 경우가 거의 없으므로 사용을 자제해야 한다.
3. 전통 Coulomb 마찰법칙도 무비판적으로 받아들이고 있으나, 특히 단조에서 윤활레짐 변화가 필연적으로 동반되기 때문에, 가변 Coulomb 마찰법칙의 사용을 권장한다. 특히 형상적으로는 단순하지만, 컨테이너가 길고 단면수축율이 큰 전방압출 문제에서 윤활레짐 변화가 크기 때문에 유사 공정의 해석 시에 특별히 윤활레짐 변화에 유의해야 한다. 그림 1.3의 문제도 넓게 보면, 이런 문제에 속한다.

다음의 문헌으로부터 보다 상세한 정보를 취득할 수 있다.

- [1] Wilson, W.R.D., 1978, Friction and lubrication in bulk metal-forming processes. J. Applied Metalworking 1, 7-19.
- [2] Lee, S.W.; Lee, J.M.; Joun, M.S.; On critical surface strain during hot forging of lubricated aluminum alloy. Tribol. Int. 2020, 141, 05855.
- [3] Hamid, N.A.; Kim, K.M.; Hwang, T.M.; Choi, J.M.; Joun, M.S. Tribological shifting phenomena during automatic multistage cold

forging of an automotive Al6082-T6 steering yoke. J. Manuf. Proc. 2024, 114, 178-195.

[4] Heo, Y.; Kim, N.Y.; Nam, J.W.; Chung, I.G.; Joun, M.S. Friction heat ball in round-to-half circle drawing and its effect on the material's skin shearing. Tribol. Int. 2024, 197, 109755.

[5] Joun, M.S.; Moon, H.G.; Choi, I.S.; Lee, M.C.; Jun, B.Y. Effects of friction laws on metal forming processes. Tribol. Int. 2009, 42, 311-319.

[6] Lee, S.W.; Jo, J.W.; Joun, M.S.; Lee, J.M. Effect of friction conditions on material flow in FE analysis of Al piston forging process. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 2019, 20, 1643-1652.

### 2. AFDEX\_V24R01 출시 내용

2024년 10월 AFDEX\_V24R01 버전이 출시되었다. 이에 대한 내용은 2024년 Q2와 Q3 뉴스레터에서 소개되었고, 이번 2025년 Q1에서 관련 내용을 요약하여 알려드립니다.

### 3. AFDEX\_V24R01 신기능

#### 3.1 윤활손상을 계산 기능

마찰응력은 Coulomb 마찰법칙 또는 일정전단마찰법칙에 의하여 계산된다. 일정전단마찰법칙은 사실상 일정한 값의 마찰응력이 작용한다고 간주한 것으로 특히 소성가공 목적에는 맞지 않다.

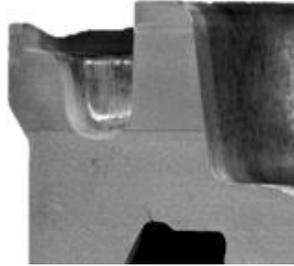
Coulomb 마찰법칙은 마찰면에서 법선응력에 비례한다는 것으로 마찰면의 상태가 변하지 않으면, 경험적으로 볼 때, 현실적이라고 볼 수 있다.

그러나 소성가공, 특히 단조에서 마찰면의 상태는 급변하기 때문에, 일정한 마찰계수를 사용하는 것은 실제 단조 중에 발생하는 복잡한 현상을 반영할 수 없다. 경험적으로 잘 맞다고 생각하는 것은 우리가 단조 시뮬레이터의 정확도를 과소평가하거나 습관적으로 경험만 보기 때문이다.

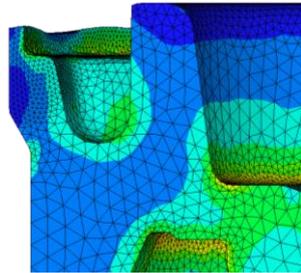
물론, 강의 단조에서 일정한 마찰계수를 사용하는 전통 Coulomb 마찰법칙을 사용하더라도 대부분 예측결과는 거시적 관점에서 유용하다. 그러나 마모를 정량적으로 예측하고자 할 경우나, 고정도의 성형하중을 예측하고자 할 경우에는 마찰에 관한 세심한 고려가 필요하다.

강과는 달리 알루미늄 합금 소재 등은 변형경화가 작거나 온도의 영향으로 단조 중에 유동응력의 변화 현상이 크게 발생한다. 이런 경우, 마찰의 영향력이 커진다. Lee 등[S. W. Lee, J. M. Lee, M. S. Joun, 2020, On critical surface strain during hot forging of lubricated aluminum alloy, Tri. Int. 141, 105855]은 알루미늄 열간단조에서 마찰계수가 재료의 표면변형률에 크게 의존하며, 일정한 크기의 표면변형률에서 마찰계수가 급증하는 현상을 밝혔다. 그리고 Hamid 등[N. A. Hamid, K. M. Kim, T. M. Hwang, J. M. Choi, M. S. Joun, Tribological shifting phenomena during automatic multistage cold forging of an automotive Al6082-T6 steering

yoke, Journal of Manufacturing Processes, V. 114, 2024, 178-195]은 승용차용 스티어링 요크 자동단단 냉간단조에서도 유사한 현상이 발생하는 것을 밝혔다.



(a) 실험



(b) 예측 (유요변형률)

그림 3.1 윤활손상을 이용한 파도모양의 외곽형상의 예측

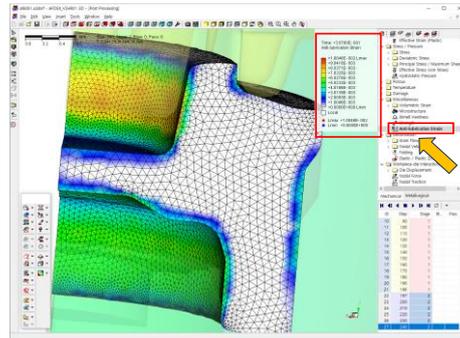


그림 3.2 윤활손상의 예측결과

그림 3.1은 알루미늄 합금의 냉간단조에서 측면에서 발생한 파도모양의 실험현상과 예측현상을 비교하고 있다. 잘 일치함을 보이고 있다. 단순히 접촉면에서의 소재의 표면변형률만 고려하면 그림과 같은 결과의 획득은 불가능하다. 마찰면에서 윤활제의 손상 정도를 고려해야만 실험결과에 부합하는 예측결과를 얻을 수 있다.

V24R01에서는 이에 관한 기본적 기능이 그림 3.2에서 보는 바와 같이 제공되며, 윤활손상의 해석 결과를 확인할 수 있다.

#### 3.2 독립적 금형구조 해석기능

이전 버전까지는 성형해석과 동시에 금형 구조해석을 실시한다. 따라서 구 버전에서는 금형의 구조해석을 위해서 성형해석이 선행되어야 한다.

V24R01에서는 성형해석 결과를 이용하되, 성형해석과 무관하게 실시하는 금형의 구조해석 기능을 제공한다. 이 기능을 이용하면, 최적화된 또는 검증된 공정설계를 대상으로 고안한 다양한 금형설계에 대한 구조해석을 실시할 수 있기 때문에 금형설계의 최적화가 가능하다.

그림 3.3은 이 기능의 기본 개념을 설명한다. 그림 3.3(a)의 공정 시뮬레이션 결과는 재료와

금형의 접촉을 강조하여 재료의 변형을 중심으로 실시한 공정 시뮬레이션 결과이다.

그림 3.3(b)와 그림 3.3(c)의 두 그림은 그림 3.3(a)의 성형해석 결과로 획득된 획득응력 등을 이용하여, 성형해석과 별도로 독립적으로 고안된 금형설계에 대한 구조해석의 결과이다. 이 기능은 금형의 최적설계에 초점을 맞춘 것이다.

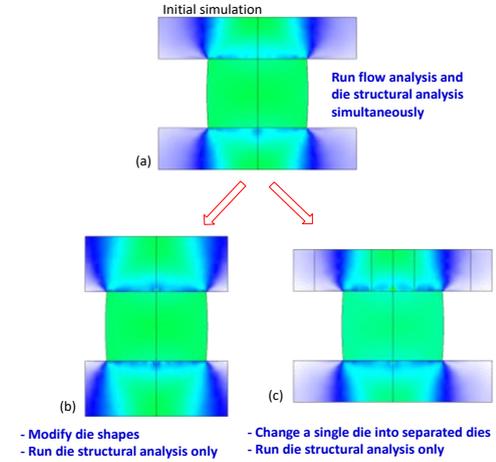
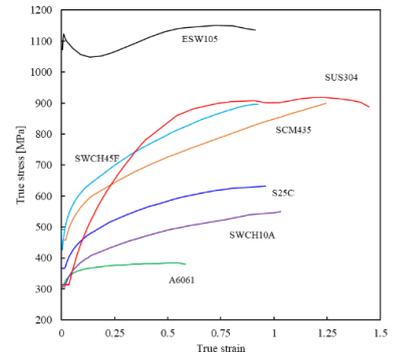


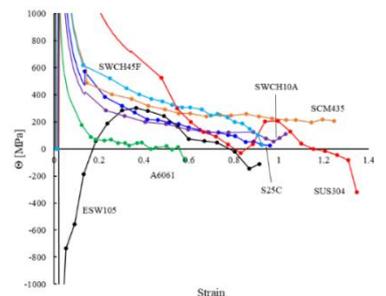
그림 3.3 독립적 금형구조해석 기능 (금형반복해석 기능)

#### 3.3 인장시험과 유동곡선 및 변형경화능

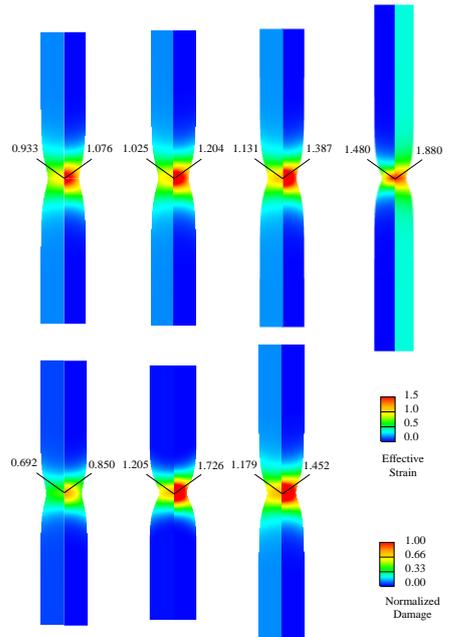
단조 또는 소성가공 직전의 재료는 그 재료가 겪은 이력(인발, 열처리 등)에 따라 그 성질, 예를 들면 유동특성이 크게 달라진다. 유동특성이 소성가공 공정을 좌우하는 요소임을 고려했을 때, 이에 관한 상세정보를 손쉽게 제공하는 인장시험은 그 중요성을 강조해도 지나치지 않는다. 학술논문에서조차 인장시험으로부터 잘못된 유동특성을 추출하는 경우를 흔히 접하는 현실을 생각할 때, 이 점을 재차 강조하지 않을 수 없다. 기존의 AFDEX /MAT은 강소성 유한요소법에 바탕을 둔 인장시험으로부터의 유동곡선 획득법을 제공해 왔다. 최근 탄소성 유한요소법을 이용한 유동곡선 개선 기법이 개발되었다.



(a) 서로 다른 사양의 인장시험으로 획득된 유동곡선



(b) 변형경화능



(c) 동일한 표점간거리:직경 비율(5)의 인장시험을 사용한 인장시험의 해석결과

그림 3.4 인장시험으로부터 유동특성의 규명

그림 3.4는 다양한 자동다단냉간단조(Cold former, automatic multi-stage cold forging)용 재료의 유동특성(그림 3.4(a))와 변형경화율(그림 3.4(b))를 나타내고 있다. 그림 3.4(c)는 제각기 다른 표점거리/직경 비의 인장시험의 인장시험 결과로부터 획득한 유동곡선을 이용하여 동일한 기준(표점거리/직경 = 5)으로 인장시험을 해석한 결과를 비교하였다.

이로부터 표준 인장시험의 해석 결과의 상호 비교를 통하여 유동특성 및 단조성 등을 확인할 수가 있다. 여기서 재차 강조해 두고자 하는 점은 이 유동곡선은 재료가 겪은 전처리(인발공정, 열처리 등)에 따라 달라지기 때문에 수시로 인장시험을 하고 유동특성을 파악하여 이로부터 발생할 수 있는 문제에 능동적으로 대응할 필요가 있다는 점이다. 이 과정이 과학적인 기술 축적으로 연결되는 것이다.

### 3.4 손상도 계산의 고정확성

단조를 비롯한 체적소성가공 공정의 해석에서 요소망재구성은 필연적이다. 요소망재구성은 일그러진 요소망을 개선시키고 필요에 따라 변화된 경계조건에 부합하도록 하지만, 기본적으로 변형률과 손상도를 포함한 상태변수의 변화를 자초한다. 일반적으로 재료의 변형은 확산되어 발생하는 경향이 있다. 이러한 현상에 질량불변의 법칙, 변형경화 및 변형률속도 경화가 기여하고 있다.

그러나 손상도는 상황이 다르다. 연성파괴는 부분적으로 발생하며, 손상도가 발생시키는 변형연화는 이러한 특징을 강화시키는 방향으로 전개된다. 따라서 요소망재구성 중 요소밀도를 부여하는 과정에서 세심한 주의가 요구된다. 이러한 대책이 고려되지 않은 상태에서 획득한 손상도는 경향성만 보는 의미에 그칠 수 있다.

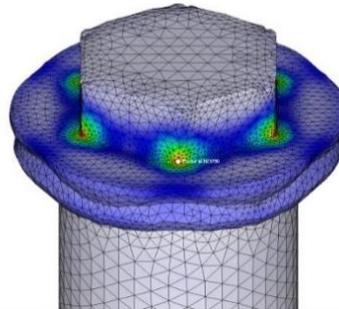
최근의 연구 결과에 따르면, 요소의 가장자리 선분의 길이가 타겟으로 하는 크랙의 길이의 1/10 정도가 되면, 요소망재구성에 내성을 지닌 손상도를 획득할 수 있다. 그림 3.5(a)와 그림

3.5(b)는 2014년도 사용자 Conference (성진포머)에서 발표된 것이다. 그 당시의 결과는 정성적으로 유의미하다. 그러나 요소망재구성에 의하여 발생한 평탄화로 인하여 크랙의 발생 위치를 정확하게 예측하지는 못하였다. 그림 3.5(c)는 전술한 요소밀도 요건을 만족시킨 것으로 그림 3.5(d~e)에서 보는 바와 같이, 예측결과와 실험결과에 부합하고 있다. 그림 3.5(c)는 중요한 의미를 내포하고 있다. 요소의 모서리 길이가 임계치(0.11 mm) 이하가 되면, 손상도가 요소망재구성에 무관하게 된다는 의미를 내포하고 있다.

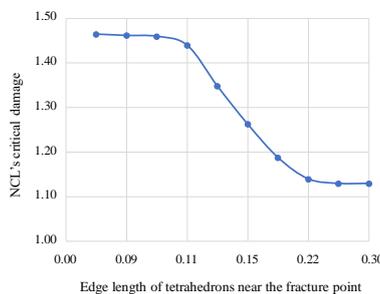
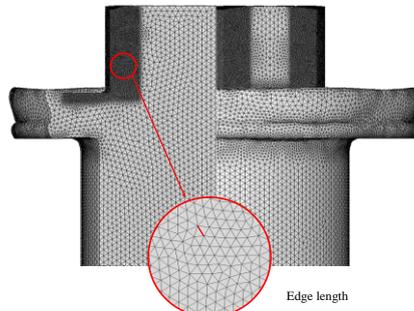
인장시험은 유동곡선을 제공할 뿐만 아니라 파단 시의 임계손상도에 관한 정보를 제공한다. 따라서 전술한 연성파괴 고려 요소밀도 요건을 검토하기 위하여 요소의 조밀도와 손상도와의 상관 관계를 그림 3.5(c)에 나타내었다. 이 그림은 요소의 조밀도 요건을 충족한다는 전제하여 임계손상도가 1.15 임을 의미한다. 그림 3.5에서 보는 바와 같이, AFDEX의 지능적 요소망재구성 기능을 활용한다면, 대부분의 문제에서 적절한 요소망을 사용하여 상세한 연성파괴 정보를 획득할 수 있음을 강조한다.



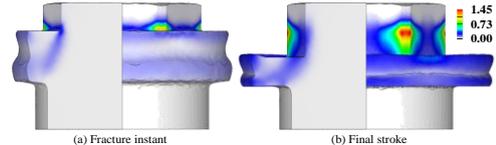
(a) 실험 (성진포머, MFCAE 2014)



(b) MFCAE 2014에서 발표된 해석결과



(c) 크랙 길이를 고려한 요소망



(d) 연성파괴 요소밀도 요건 충족 결과



(e) 볼트 머리 성형 중 발생한 주름의 예측

그림 3.5 인장시험에서 요소 변의 길이와 파괴시점에서 최대 손상도의 관계

### 3.5 금형 요소망의 직접 입력

금형의 기하학적 정보는 일반적으로 표면정보로 구성되어 있다. 이 정보는 금형의 구조해석 및 열전달해석을 위하여 Pre-Processor 또는 프로그램 내부에서 요소망으로 이산화된다. AFDEX는 고도의 사용자 편리성을 도모하기 위하여 지능화 기술을 활용하되 요소망생성 및 재구성 기능을 프로그램에 내재화시켰다. 기본적으로, AFDEX에서는 이 기능을 이용하여, 금형의 요소망을 생성시킨다. 이 기능을 활용하여 금형의 요소망 생성 시에 요소밀도의 통제가 충분한 수준으로 가능하다. 이것이 가능한 것은 AFDEX의 강력한 지능적 요소망재구성 기능 때문이다. 그러나 사용자가 직접 금형 요소망을 입력해야 할 경우가 있다. 이러한 경우를 위하여 금형의 표면 정보 대신 요소망 정보를 입력할 경우, 자동적으로 금형 표면 정보를 생성하고, 금형의 구조해석 및 열전달해석 목적에 입력된 요소망 정보를 그대로 사용하는 기능을 추가하였다. 다만, 여기서 강조해 두어야 할 점은 재료와 마찬가지로 금형의 유한요소망도 유연하게 요소밀도를 통제할 수 있다는 것이다.

그림 3.6은 개념 설명을 위한 간단한 적용 사례를 나타낸다.

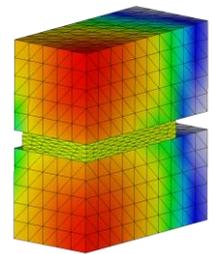
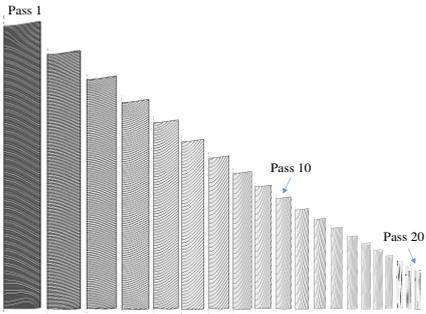


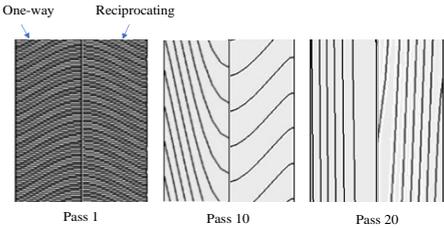
그림 3.6 입력된 금형 요소망의 활용 사례

### 3.6 인발공정의 자동해석

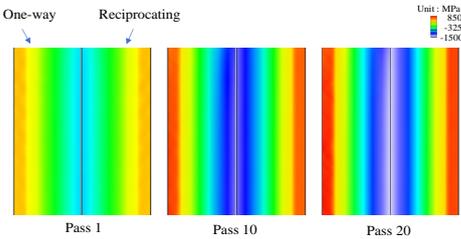
인발공정은 다 패스(Multi-pass)가 기본이다. 그러나 자동해석은 쉽지 않다. 그것은 그림 때문이다. 기존의 방식은 경계조건을 부여하거나 재료의 하부에 분리가 불가능한 금형을 위치시키는 방식이 제공되었다. 이 방식으로 완벽한 자동화가 불가능하였다. 새 방식에서는 그림이 생성될 때까지 재료에 변형이나 응력을 가하지 않는 가상 압출 방식을 통하여 그림부를 성형한 후, 압출 조건의 삭제와 함께 그림에 속도 조건을 부과하여 자동해석을 수행한다. 패스 수에 관계없이 완전 자동해석이 가능하다.



(a) 인발 종료 후의 결과



(b) 직경을 동일하게 확대 시의 소성유동선도



(c) 축방향 잔류응력성분

그림 3.7 인발공정의 해석 결과

인발공정의 해석에서 요소망재구성은 매우 중요하다. 길의 증가로 인하여 발생하는 불필요한 계산 시간의 증가, 그립부에서 발생하는 예상치 못한 변형, 패스가 증가되면서 발생하는 재료-금형 접촉 불량 등으로 인한 요소망재구성이 필수적이다. 인발공정의 요소망재구성에서 고려해야 할 점은 재료의 형상의 단순성과 요소밀도이다. 인발공정의 해석에서 중시해야 할 문제는 표피에 잔류응력이 집중된다는 점이다. 표면에서 변형률의 분포에 비하여 잔류응력의 분포가 극심하게 변한다. 이러한 특징을 살리는 방법은 2차원의 경우 구조요소를 사용하는 것이며, 3차원의 경우도 이를 응용한 방향성 스킨 조밀 요소망을 사용하는 것이다. 그림 3.7에 20단 봉재 인발 공정의 적용사례를 나타내었다. 각 단의 단면감소율은 10%로 동일하다. 그림 3.7(a)는 각 단의 최종 형상을 1:1 스케일로 표현한 것이고, 그림 3.7(b)는 제 1, 10, 20 단의 종료 직경의 단류선을 동일 크기로 확대하여 나타낸 것이다. 그림 3.7(b)에서 좌편은 한 방향 인발공정의 단류선의 예측 결과이고, 우편은 양방향 교대 인발공정의 결과이다. 그림 3.7(c)의 좌편은 한 방향 인발공정과 양방향 인발공정의 종료 시점에서 축방향의 잔류응력성분을 나타낸다. 두 결과의 유사성은 이전 단계의 잔류응력이 현 단계의 인발공정에 큰 영향을 미치지 않음을 의미한다.

**3.7 고온 유동곡선의 온도 및 마찰 동시 보상**

고온 실린더 압축시험은 재료의 유동특성 획득 목적으로 널리 수행되고 있다. 정확한 고온 유동곡선을 획득하고자 할 경우, 온도와 마찰

문제가 발생한다. 실제의 고온 압축실험은 비등온 조건에서 이루어진다. 흔히 등온조건이라고 하지만, 압축시험 중 발생하는 소성변형열로 인하여 사실상 등온을 유지할 수가 없다. 시험의 압축시험 중에 발생하는 온도 상승은 재료마다 다르지만, Ti 합금은 극단적인 사례에 속한다. 강도가 높은 반면 열용량이 크지 않고 열전도가 늦게 발생하기 때문이다. 변위-압축하중이 등온 및 무마찰 상태에서 발생했다고 가정할 경우의 진응력-진변형률 곡선, 즉 이상유동곡선을 수계산으로 획득할 수가 있다. 마그네슘 및 티타늄 합금 등의 이상유동곡선은 실제의 유동곡선과 큰 차이를 보인다. 따라서 마찰과 온도 보상을 실시해야 한다. 즉, 무마찰과 등온 조건의 가정으로부터 발생하는 오차를 보정해 주어야 한다.

그림 3.8은 마그네슘 합금 AZ80A에 관한 것으로 실선은 이상유동곡선이며, 이를 수식화한 것이 1점쇄선이다. 이 수식모델에서 온도 보상을 실시하여 얻은 최종 유동곡선을 점선으로 표현했다. 이 유동곡선으로 압축시험을 해석했을 때, 충분한 정확도의 압축하중-스트로크 결과를 얻었다. 마그네슘 합금은 온도별 유동응력의 차이가 매우 크기 때문에 작은 온도 변화에도 유동응력은 큰 영향을 받는다. 마찰의 영향이 상대적으로 작다. 그러므로 마찰에 관한 보상은 실시해 주지 않아도 무방하다. 마찰로 접촉면에서 유동응력이 증가하지만, 무마찰일 경우 접촉면적이 크게 유지되므로 압축하중 측면에서도 상쇄되기 때문이다. 그러나 알루미늄의 경우는 다르다. 온도의 영향과 마찰의 영향의 크기가 유사하다. 일반적으로 온도의 영향을 고려하면, 유동응력이 증가하고, 반대로 마찰의 영향을 고려하면 유동응력이 감소한다.

진술한 바와 같이 알루미늄 합금은 비교적 온도 보상 효과가 크지 않기 때문(열전도가 빠르게 일어나기 때문)에 마찰 보상도 중요해진다. 두 요소가 유동응력에 미치는 효과가 서로 절대적이지 않으므로 마찰과 온도의 영향을 모두 보상해야 한다. 마찰의 보상은 온도 보상에 비하여 다소 복잡한 경향이 있다. 실제, 두 영향이 통합적으로 영향을 미치므로 두 영향의 동시 보상 기술이 필요하다. AFDEX를 이용한 온도와 마찰 동시 보상 기법이 확립되었다. 그림 3.9는 AFDEX의 고온 유동곡선을 이용하여 획득한 유동곡선에 대한 오차를 나타내고 있다. 그림 3.9(a)에서 보는 바와 같이 오차가 유동곡선의 획득 단계에서 최소화 과정을 통하여 낮게 통제된 상태이다. 여기에 최신의 온도 마찰 동시 보상 기법을 사용할 경우, 그림 3.9(b)에서 보는 같이 평균 오차(2.4%에서 1.8%) 및 최대 오차(6%에서 3%)가 크게 줄어들었음을 알 수 있다.

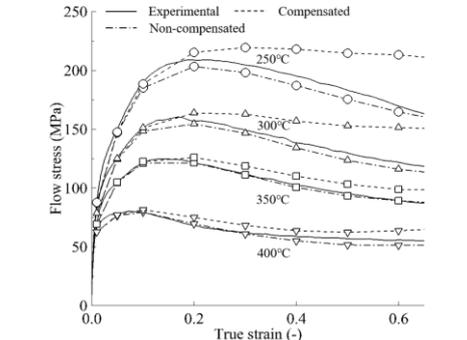
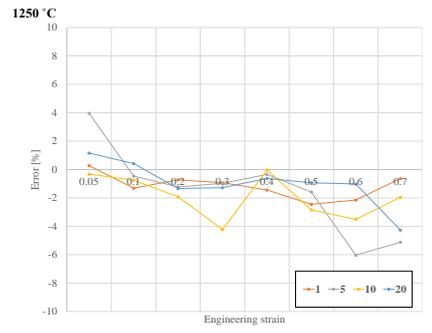
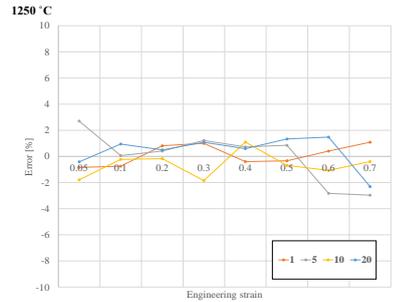


그림 3.8 변형률속도 1 (1/s)일 때의 AZ80A의 유동곡선



(a) 개선 전



(b) 개선 후

그림 3.9 온도 및 마찰 동시 보상 결과

**3.8 전후처리기 아이콘 변경**

V24R01에서는 해석 조건 입력의 특징을 고려하여 전후처리기 아이콘을 변경하여 제공한다. 그림 3.10에서 변경된 전처리기 아이콘을 확인할 수 있다.

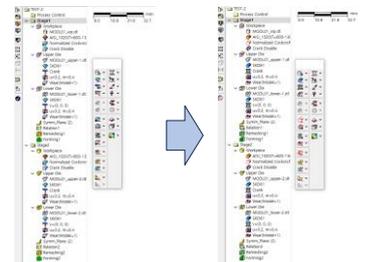


그림 3.10 전처리기 아이콘 변경

**3.9 응력 삼축성 보기 기능**

V24R01에서는 정수압에 강도를 나눈 값인 응력 삼축성의 보기 기능이 제공될 예정이다. 그림 3.11와 같이 후처리기의 응력 탭 하위 메뉴에서 확인할 수 있다.

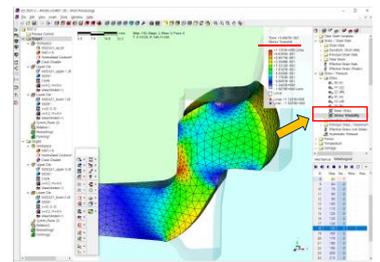


그림 3.11 응력 삼축성 보기 기능

**3.10 사용자 설명 입력 기능**

V24R01에서는 해석 작업 내용에 대한 세부적인 설명을 기재할 수 있는 신기능을 제공한다. 파일명 또는 폴더명에 설명을 기재하는 불편함을 해소하고자 AFDEX 프로젝트 파일에 설명란을 추가하였다. 영어, 한국어, 일본어를 포함한 다국어 입력이 가능하다.

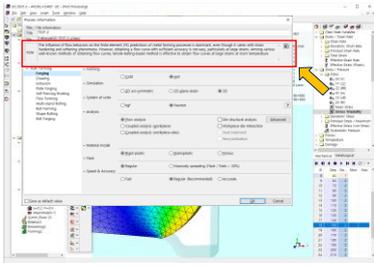


그림 3.12 사용자 설명 입력

### 3.11 롤포징 공정해석 전처리기 기능

AFDEX\_V23R02 버전까지, 롤포징(Roll forging) 공정해석 시, 전처리기를 이용하여 공정해석의 기본 조건을 작성한 후, 메모장을 이용하여 롤포징 공정해석을 위한 롤과 소재의 경계조건 등을 입력하였다. 그림 3.13에서 보는 바와 같이, AFDEX\_V24R01 버전에서는 전처리기에서 모든 입력데이터의 작성이 가능하도록 함으로써 사용의 편리성을 향상시켰다.

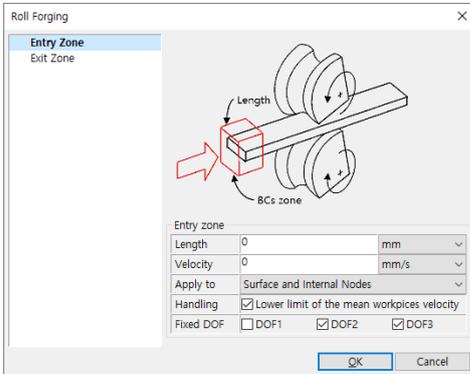
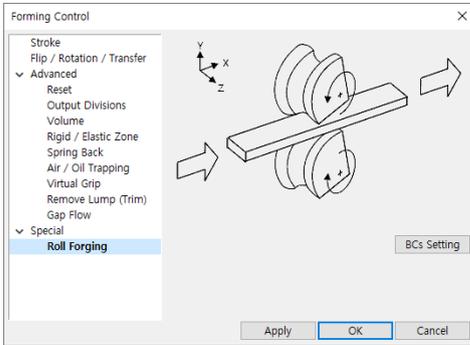


그림 3.13 롤포징 공정해석 조건 입력 UI

### 3.12 다물체 해석시 객체 간 접촉영역 표시 기능

AFDEX\_V23R02 버전까지는 다물체 해석 결과로부터 객체 간의 접촉영역을 손쉬운 방법으로는 확인할 수 없었다. AFDEX\_V24R01 버전에서는 금형-소재 뿐만 아니라 소재-소재를 포함한 모든 객체 간의 접촉영역을 표시한다. 그림 3.14는 세 개의 물체가 두 개의 금형과 하나의 바인더에 의하여 변형되는 예제에 대하여 신 기능을 적용한 사례를 나타낸다. 서로 다른 색상으로 서로 다른 객체 간의 접촉 여부를 눈으로 확인할 수 있다. 하부의 두 색상은 세 개의 변형체 간의 접촉 상태를 나타낸다.

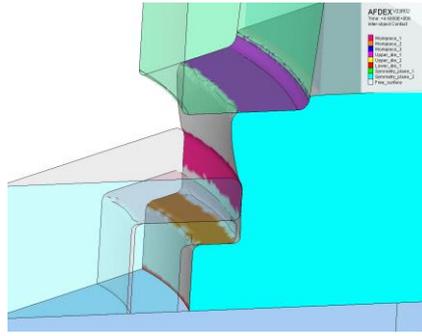


그림 3.14 객체 간 접촉영역 표시 화면

### 4. AFDEX\_V24R01 기능 개선

#### 4.1 형상 인발 중 금형 과열 현상의 예측

단조를 비롯한 대부분의 소성가공에서 마찰열은 중요하지 않다. 물론 마찰 그 자체는 중요하다. 따라서 대부분의 단조 시뮬레이션에서는 마찰열에 관한 주의를 기울이지 않고 있다. 인발 공정은 상황이 크게 다르다. 인발 공정에서 재료는 인발 금형의 일정한 부위와 지속적으로 접촉을 유지하면서 금형과 상대운동, 즉 미끄러짐을 발생시킨다. 이러한 이유로 윤활이 지속적으로 필요하기 때문에 인발용 윤활유와 첨가제를 윤활제로 사용한다. 그렇지만, 상황에 따라서는 윤활제로 형상 인발에서 발생할 수 있는 금형 과열 문제를 해소하는 데는 한계가 있다.

AFDEX\_V24R01 버전부터 사용자가 마찰열의 직접 통제가 가능해졌으며, 이미 제공되고 있는 온도 의존 마찰계수 입력 기능을 활용하여 원형-반원형 형상 인발 공정에서 발생하는 금형 과열 현상, 즉 마찰열 불(Friction heat ball)의 예측이 이루어졌다.

그림 4.1은 인발 개시 이후 5초 경과 시에 발생한, 마찰열에 의한 가열로 발생한 금형의 과열 현상(최대 온도 160 °C)을 나타낸다. 이러한 과열은 좁은 지역에서 발생하는 마찰열에 기인한다. 실제의 공정 시간과 마찰열-온도상승-마찰의 악순환을 감안할 때, 최대 온도는 크게 증가할 수가 있다.

이렇게 과열된 마찰열 불은 유입되는 재료의 표면 온도를 급속도로 증가시키며, 재료의 표면부에서 유동응력의 급격한 온도연화를 야기시킨다. 이것은 표면유동(Skin flow)를 야기시킬 수 있으며, 그림 4.2에서 보는 바와 같이 상식적으로 이해되지 않는 꺾임 결함이 변형에 의하여 형성된 모서리 부분에서 발생할 수 있다. 이러한 극단적인 현상은 고강도 및 고온연화 재료에서 발생할 가능성이 높다.

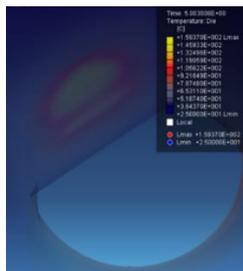


그림 4.1 마찰열에 의한 인발 금형의 과열 현상

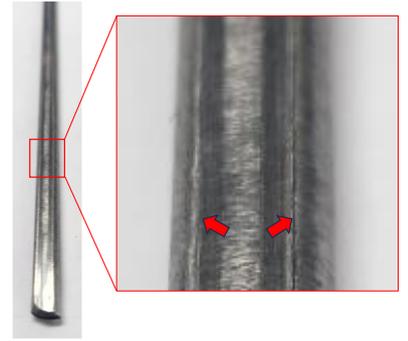


그림 4.2 원형-반원형 형상 인발 공정 중 꺾임 결함

#### 4.2 계산시간 개선(회전 금형 사용 예제)

이전 버전까지는, 회전 금형을 사용할 경우, 접촉영역 체크 시간의 과다 문제가 존재하였다. 이로 인하여 롤포징 (Roll forging), 필거링 (Pilgering) 등의 계산 효율이 다른 공정에 비하여 낮았다.

V24R01에서는 회전 금형의 접촉영역 체크 기능을 최적화함으로써, 시뮬레이션에 소요되는 시간을 크게 줄일 수 있게 되었다. 그림 4.3은 기존 버전과 최신 버전에 의한 롤포징 공정의 시뮬레이션 시간을 비교한다.

OVERALL SIMULATION TIME = 0:24:36	OVERALL SIMULATION TIME = 0:15:15
REMESHING TIME = 0:2:58	REMESHING TIME = 0:2:58
CONTACT: INHEDRON TIME = 0:9:57	CONTACT: INHEDRON TIME = 0:0:39
CONTACT: NORMAL TIME = 0:0:3	CONTACT: NORMAL TIME = 0:0:3
FEM TIME = 0:11:38	FEM TIME = 0:11:35

그림 4.3 계산시간 차이의 비교

#### 4.3 AFDEX /MAT 기능 개선

최근 AFDEX/MAT 활용의 증가에 부응하기 위하여 다수의 개선 작업이 이루어졌다. 일부를 다음과 같이 요약하였다.

- Raw data 입력 기능 개선
- Curve fitting 기능 개선
- 갭간 8번 수식 모델로 인장해석시 솔루션 스텝 정보 입력 기능 추가
- 상온인장시험 해석 인풋파일 생성 시 항복응력 및 스트로크 정보 저장 기능의 개선
- 고온압축시험 그래프에서 Raw data 추출시 List control 창에 있는 데이터 출력 기능 개선

#### 4.4 STL 내보내기 기능 개선 및 변형

이전 버전까지는 STL 내보내기 작업을 할 경우, 한 개의 파일에 여러 개의 객체가 저장된다. 이로 인하여, 이러한 기능이 확보되지 않은 3D CAD SW에서 STL 파일을 활용할 경우, 오류가 발생될 수 있었다. V24R01에서는 그림 4.4와 같이 선택적으로 각 객체마다 파일 이름을 다르게 하여 출력하는 기능을 제공한다.

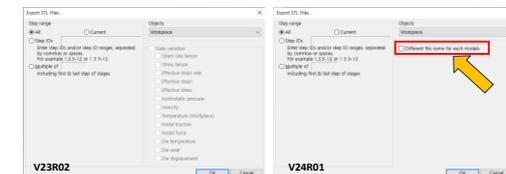


그림 4.4 개선된 STL 내보내기 다이얼로그

### 4.5 바인더 하중정보 입력 기능 개선

이전 버전까지는 바인더의 부과하중을 절대시간 또는 절대거리의 함수로 입력하였다.

V24R01에서는 바인더와 금형 간의 상대변위의 함수로 바인더 부과하중을 입력할 수 있다.

그림 4.5와 같이 전처리기 입력창이 변경되었다. 다양한 조건의 바인더/스프링 금형의 압축거리나 상대변위와 관련 하중정보를 입력할 수 있다.

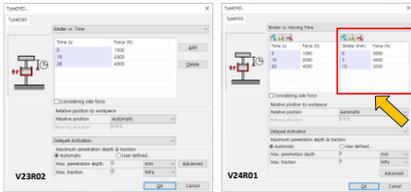


그림 4.5 바인더 하중정보 입력 예시

### 4.6 후처리기에서 해석결과 범위의 자동 결정 방식 변경

이전 버전까지는, 금형을 비롯한 다수의 객체를 대상으로 동시 해석을 실시한 경우, 가시화 목적으로 선택된 객체와 상관없이 모든 객체에 대한 해석결과(응력, 변형률 등)의 최소값과 최대값으로 legend의 범위가 결정되었다. V24R01에서는 가시화를 위해서 선택된 객체에 대한 해석결과 범위의 최소값 및 최대값으로 legend의 범위가 결정된다.

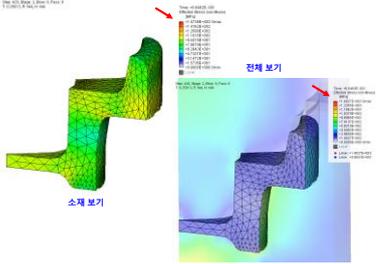


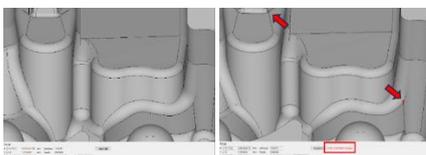
그림 4.6 선택된 객체에 대한 해석결과 보기

### 4.7 3차원 STL 모델 오류 체크 기능 개선

AFDEX의 해석 모델로 사용하는 소재 및 금형의 파일의 확장자는 STL이다. 해석 모델의 경우, Surface open, Non-manifold 가 없어야 정상적으로 시뮬레이션이 가능하다. AFDEX\_V23R02 버전까지는 점과 점으로 발생하는 Non-manifold 오류에 대해서는 체크되지 않아 시뮬레이션 중 원인 미상의 오류가 발생하는 경우가 있었다.

그림 4.7은 오류가 있는 3차원 STL 모델이며, 이전버전까지는 체크하지 못하였던 Non-manifold 부분을 확인할 수 있는 기능을 AFDEX\_V24R01 버전에서 지원한다.

그림 4.7(a)에서는 STL 파일 Importing시 오류가 없는 것으로 나타났다. 반면, 그림 4.7(b)에서는 점과 점으로 발생된 Non-manifold 오류가 감지되어 해당 위치를 표시해주고 있다.



(a) 개선 전 (b) 개선 전

그림 4.7 3차원 해석 모델 오류 체크 화면

### 4.8 금형위치 자동 초기화 기능

이전 버전까지는 객체 간 모서리 접촉 계산을 할 때 형상 정보의 메시 세분화 수에 따라 정밀도가 달라졌다. V24R01에서는 객체간 모서리 접촉 계산 방식을 개선하여 금형위치 자동 초기화 기능의 오차가 감소하였다. 그림 4.8에서 금형위치 자동초기화 기능의 개선 사항을 확인할 수 있다.

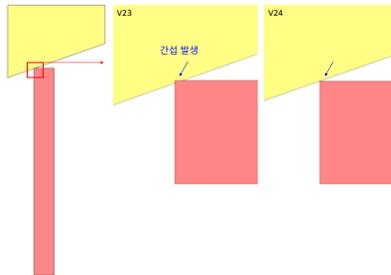


그림 4.8 금형 위치 자동 초기화 예시

### 4.9 후처리기 속도장 성분 보기

이전 버전까지는 XX, YY, ZZ, XYZ 성분에 대한 속도장 보기 기능만 제공하였다. 최근, 사용자의 요청으로 두 성분 동시 보기 기능을 추가하였다. V24R01 부터는 XY, YZ, ZX 보기 기능이 추가된다. 그림 4.9와 같이 후처리기의 속도 탭 하위 메뉴에서 이 기능을 사용할 수 있다.

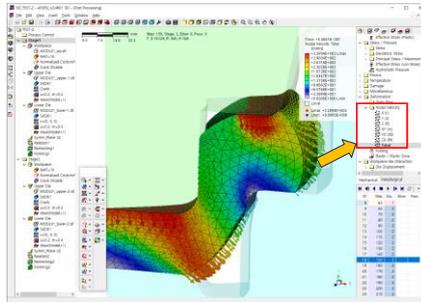


그림 4.9 속도장 성분 보기 포스트창

### 4.10 전체 공정의 해석결과 보기 타입 추가

이전 버전까지는 해석결과에서 선택된 소재 또는 금형에 대하여 개별적으로 셰이딩, 메시, 아웃라인 등의 보기를 할 수 있었다. 다만공정을 포함한 전체 공정에서 소재 또는 금형에 대한 셰이딩, 메시, 아웃라인 등의 보기방식을 V24R01부터 제공한다. 이 기능은 그림 4.10의 보기 탭의 아이콘으로 확인이 가능하다.



그림 4.10 디스플레이 타입 추가 아이콘

### 4.11 이중 쿨롱마찰조건 입력 UI 추가

V24R01에서는 이중 쿨롱마찰조건을 입력할 수 있는 UI가 제공된다. 그림 4.11에서 신규 마찰조건 입력 데이터를 확인할 수 있다.

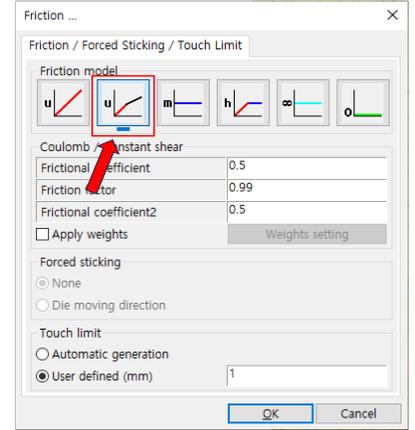


그림 4.11 이중 쿨롱마찰조건 입력 UI

### 4.12 네트워크 라이선스 활성화

이전 버전까지는 AFDEX 라이선스가 노트락 방식으로 제공되었다. 네트워크 라이선스에 대한 사용자의 요구에 따라 V24R01부터는 네트워크 라이선스 타입의 플로팅 방식으로 변경된다. 기존의 동글키를 이용하는 사용자도 이 플로팅 방식의 라이선스가 적용된다.

### 4.13 다중모니터 사용 편리성 개선

다중모니터를 사용할 때 주모니터와 부모니터의 위치에 따라 간헐적으로 AFDEX 전처리 창외 팝업 다이얼로그가 작동되지 않는 현상이 발생되었다. 이와 관련하여 윈도우 시작 위치와 화면 사이즈 관련된 오류가 개선되었다. 또한 사용자가 작업한 현재의 모니터 위치와 사이즈를 기억하여 작업의 편리성을 향상시켰다.

## 5. 공지사항

### 5.1 2025년 정기교육 및 온라인 강좌 활용 수시 교육 안내

2025년 정기교육은 표 5.1의 일정으로 진행된다. 교육 신청 관련하여서는 교육일 3주 전 별도로 공지될 예정이다. 교육일, 교육 내용은 변경될 수 있다.

표 5.1 2025년 정기교육 일정

회차	장소	날짜	지역
1	MFRC 교육장	2월 27일(목)	진주
2	MFRC 교육장	4월 10일(목)	진주
3	한국생산기술연구원	5월 28일(수)	시흥
4	MFRC 교육장	7월 10일(목)	진주
5	한국생산기술연구원	9월 17일(수)	시흥
6	MFRC 교육장	11월 06일(목)	진주

한편, 최근 유튜브 채널을 통해 온라인 교육을 크게 개편하였다. AFDEX 공식 유튜브 채널에서 소성역학 및 유한요소법에 관한 이론과 AFDEX 사용법 등을 확인할 수 있다. 아울러 비전공자를 위하여 정역학, 고체역학, 수학 등에 관한 교육도 이루어지고 있다.