

## 자동 영역확장법을 이용한 점진 성형공정의 효율적 해석

이경훈\*(ADD), 이석렬(KAIST 기계공학과), 홍진태(KAIST 기계공학과),  
양동열(KAIST 기계공학과)

### Effective Analysis of Incremental Forming Process using the Automatic Expansion of Domain Scheme

K. H. Lee(ADD), S. R. Lee(Mechanical Eng. Dept., KAIST), J. T. Hong(Mechanical Eng. Dept., KAIST),  
D. Y. Yang(Mechanical Eng. Dept., KAIST)

#### ABSTRACT

The incremental forming process employs several tens or hundreds of continuous local strokes, so the entire process is difficult to analyze due to much computation time and large computer memory. The objective of this work is to propose a new numerical scheme of the finite element method, automatic expansion of domain (AED), and to reduce computation time and computer memory. In the AED scheme, an effective analysis domain in each local forming step is defined and then the domain is automatically expanded in accordance with the repeated process. In order to verify the validity of the criterion for the AED scheme and the applicability of the AED scheme, two-dimensional incremental plane-strain forging process is first analyzed using the proposed scheme with various criteria and full domain. In addition, three-dimensional incremental radial forging process is analyzed to verify the applicability of the proposed scheme to a practical incremental forging process.

**Key Words** : 점진성형공정, 유한요소해석, 육면체격자, 자동영역확장법

#### 1. 서론

점진 성형공정은 소재에 국부적인 공정을 가해 서 성형하는 공정으로, 일반적인 형단조 공정[1,2] 과는 달리 수십 수백 번에 이르는 매우 많은 회수의 성형과정이 반복되는 반면에 각각의 공정이 유발하는 성형량은 매우 작다. 이러한 특징을 가진 공정을 유한요소해석하기 위해서는, 많은 회수의 성형 단계를 해석해야만 하므로 상당히 많은 계산 시간과 국부 영역의 정확한 해석을 위해 많은 요소(element)가 필요하므로 대 용량의 메모리 크기가 요구된다. 이러한 문제점 때문에, 점진성형 공정과 관련된 유용한 정보를 얻기 위해서는 그 특성을 고려한 새로운 해석 방법이 필요하다.

본 연구에서는 점진적 성형공정의 효율적인 해석을 위해 해석영역의 점진적 자동확장(Incremental Automatic Expansion of Domain) 기법을 제안하였다. 일반적으로 성형공정은 전체 영역 중에서 금형과

접촉하는 일부 영역에서 대부분의 성형이 이루어지는 반면에 금형과 접촉하지 않고 멀리 떨어져 있는 영역은 거의 강체에 가까운 상태를 나타내는 특성이 있다. 실제로 점진 단조공정의 금형과 소재의 접촉 면적 비율은 일반적인 단조공정의 그것보다 훨씬 작기 때문에 소성 영역이 강체 영역에 비해 월등히 작다[3-7]. 따라서 해석영역의 자동 확장기법의 기본 개념은 전체 해석영역중 성형이 집중적으로 이루어지는 부분만을 선택하여 해석을 수행한 후, 다음 단계 해석을 수행하는 점에 있다. 본 연구에서는 이와 같은 변형 특성을 이용하여 유효변형율이 규정된 수치 이하인 부분은 강체로 가정하고 규정값 이상인 영역만 선택하여 해석하는 기법을 제안하고, 그 효율성을 검증하기 위하여 2 차원과 3 차원 반경방향 점진단조해석에 적용하였다.

#### 2. 자동 영역 확장법

해석 영역의 점진적 자동확장기법을 적용한 유한요소 해석과정을 단계별로 구분하면 다음과 같다.

- Step1: 전체 영역에 대하여 2 번째 단계까지 해석
- Step2: 2 번째 단계 해석결과로부터 임계 유효변형률 속도(예를 들면  $10^{-4}/\text{sec}$ ) 이상인 요소들을 해석 영역으로 선택
- Step3: 채택된 요소에 인접하고 있는 두개의 요소층을 해석영역에 추가하여 확장 영역 생성
- Step 4: 확장 영역의 경계에 경계조건 부여
- Step 5: 확장영역에 대해 유한요소해석 수행
- Step6: 해석영역의 경계면에서 유효변형률 속도가 임계 유효변형률 속도 이상인 요소가 발생하면 해석을 종료하고 Step2 로 회귀
- Step 7: 해석 결과를 전체 영역에 적용후 Step1 부터 반복

해석 영역의 자동 확장기법에서는 Fig. 1 과 같이 앞 단계의 해석 결과로부터 미리 결정된 임계값을 기준으로 해석 영역(analysis domain)을 선택한 후에 추가 영역(additional domain)을 합하여 확장 영역(expanded domain)을 얻게 된다. 실제 해석에서 확장 영역은 전체 영역(full domain)을 대신하여 해석 영역이 됨으로써 해석의 효율성을 갖게 된다. 따라서 잔여 영역(rest domain)은 비 해석 영역으로 취급하여 해석에서 제외되며, 이 과정은 요구되는 성형과 해석이 완료될 때까지 반복된다.

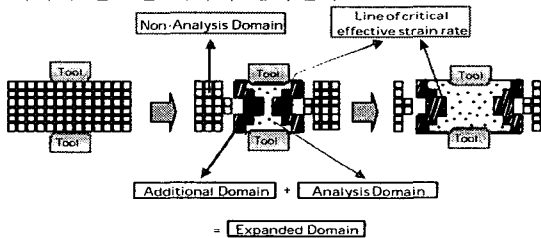


Fig. 1 Concept of the automatic expansion of domain scheme

### 2.1 자동확장 영역 선정 기준

본 연구에서는 자동확장 영역의 선정 척도로서 유효변형률 속도를 채택하였으며, 또 소재 전체 영역(full domain)에서 유효 해석 영역(effective analysis domain) 만을 선별할 수 있는 기준으로는 식(1)을 채택하였다.

$$\dot{\epsilon} \geq 10^{-4} / \text{sec} \quad (1)$$

식(1)에서 임계값인  $10^{-4}/\text{sec}$  는 강소성 유한요소 해석시에 소성 영역(deformed region)과 강체(rigid body) 부분을 구별하기 위한 Chen 과 Kobayashi 의 제안[8]에 그 근거를 두고 있다. 그들은 단조공정과 같은 비정상상태의 유한 요소 해석에서는  $10^{-4}/\text{sec}$ .

압출과 같은 정상상태의 해석에서는  $10^{-4}/\text{sec}$  보다 작은 유효 변형률 속도값을 갖는 영역은 강체 부분으로 처리하는 것이 타당하다고 제안한 바 있다. 본 연구에서는 비성형 해석영역과 유효 해석영역을 구별하는 척도로 이 값을 이용했으며, 점진단조 공정의 유한 요소 해석시에 경계 요소의 유효변형률 속도가  $10^{-4}/\text{sec}$  보다 큰 값을 갖게 되면 해석 영역은 자동으로 확장된다. 즉, 유한요소 해석 도중에 경계면에 어떤 추가적인 변형이 발생하지 않으면 해석 영역은 확장되지 않고 전 단계에서 결정된 해석 영역에서 계속 해석을 수행하게 된다.

### 2.2 영역의 자동확장을 위한 경계조건 처리

Fig.2 는 영역의 자동확장 개념을 표현한 것이다. 소재 전체영역은 그림과 같이 유효변형률 속도가 임계값보다 커서 소성 변형이 일어나는 해석영역( $\Omega_A$ )과 임계 유효변형률 속도값보다 작은 강체영역( $\Omega_D$ )으로 구별된다. 한편 강체 영역은 Algorithm 1 에 의하여 운동 강체영역( $\Omega_T$ )과 정지 강체영역( $\Omega_S$ )으로 나뉘게 된다. 식(2)는 각 영역에서의 절점 집합(S)을 나타내며, 여기에서  $N$  은 각 영역의 지배를 받는 절점의 개수이다.

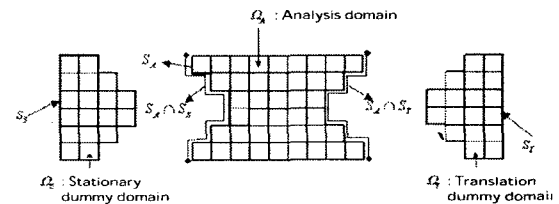


Fig. 2 Treatment of boundary conditions for AED scheme

$$\begin{aligned} S_A &= \{ N \mid N \in \Omega_A \} \\ S_S &= \{ N \mid N \in \Omega_S \} \\ S_T &= \{ N \mid N \in \Omega_T \} \end{aligned} \quad (2)$$

#### Algorithm 1

- if B.C. of node<sub>N</sub>. EQ. fixed B.C.,  $\exists$  node<sub>N</sub>  $\in S_i$   
then  $S_s = S_i$
- else if B.C. of node<sub>N</sub>. NE. fixed B.C.,  $\forall$  node<sub>N</sub>  $\in S_i$   
then  $S_T = S_i$

여기서 해석영역에 속하는 절점집합과 정지 강체영역에 속하는 절점집합들의 교집합  $S_A \cap S_S$  에 해당하는 절점들은 고정절점 조건을 갖으며, 반대로 해석영역에 속하는 절점집합과 운동 강체영역에 속하는 절점 집합들의 교집합  $S_A \cap S_T$  에 해당하는 절점 집합들은 자유절점 조건을 갖게 된다.

### 3.2 차원 점진단조공정 해석에의 적용

#### 3.1 해석 조건

AED 기법에서 적용하는 기준의 타당성과 AED 기법의 적용 가능성을 입증하기 위해, 2 차원 평면 변형 점진단조 공정을 AED 기법과 전체영역에 대하여 해석하였다. 해석은 자체 개발한 강소성 유한 요소해석 프로그램 FORMSYS 2D 를 이용하였다. 해석을 위해 적용한 소재와 금형에 대한 기본 개념을 Fig. 3 에 나타내었다. 성형 깊이는 각각 3 mm 이었고, 금형을 길이방향으로 5 회 이동하며 성형한다. 소재는 실험시에 낮은 하중에서도 성형가능한 납을 사용하였으며, 펀치의 이동 속도는 5mm/sec, 마찰계수는 0.12 로 설정하였다. 13℃ 의 등온에서 작업하는 것으로 가정하였고, 이때의 납의 응력-변형을 관계식은 식(3)과 같다.

$$\bar{\sigma} = 34.245\bar{\epsilon}^{0.265}\bar{\dot{\epsilon}}^{0.0146} \text{ (MPa)} \quad (3)$$

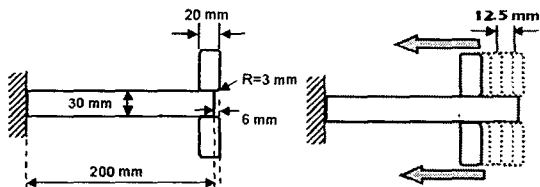


Fig. 3 Geometry of the workpiece and the tool for analysis of the incremental plane-strain forging process

### 3.2 해석 결과 고찰

유한요소 해석은 AED 기법의 경우에  $10^{-1}/\text{sec}$ ,  $10^{-2}/\text{sec}$ ,  $10^{-3}/\text{sec}$ ,  $10^{-4}/\text{sec}$  와  $10^{-5}/\text{sec}$  의 다양한 영역 선택 기준에 대하여 수행하였으며, 식 (4)에서 정의한 유효변형율의 오차를 이용하여 전체영역에서의 해석과 비교하여 Fig. 4 에 정리하였다.

$$\text{Error}(\%) = \frac{\bar{\epsilon}_{\text{full}} - \bar{\epsilon}_{\text{AED}}}{\bar{\epsilon}_{\text{full}}} \times 100 \quad (4)$$

Fig. 4 에서 평균 유효 변형률은 변형이 가장 심한 부위의 두께 방향 요소에서 구하였다. 계산시간과 AED 영역으로 선택된 요소의 수를 영역선택 기준에 따라 Table 1 에 정리하였다.

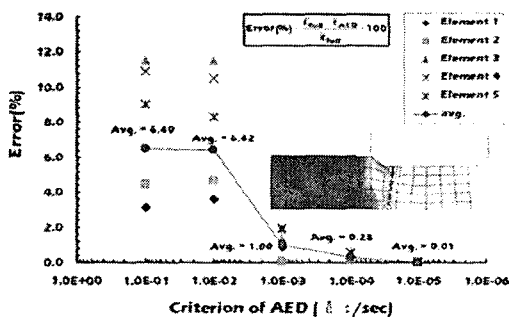


Fig. 4 Effective strain error of the AED scheme for various criteria

Table 1. Comparison of the computed results for the full domain with those of the AED scheme for the full stage in two-dimensional incremental forging process

Criterion of AED ( $\dot{\epsilon}$ : /sec)	Computation Time (sec)	Number of elements in the analysis domain (ca)	Error (%)
$10^{-1}$	106	99	6.49
$10^{-2}$	125	114	6.42
$10^{-3}$	160	150	1.00
$10^{-4}$	170	182	0.28
$10^{-5}$	236	327	0.01
Full	305	1260	-

AED 기법의 선택 기준이  $10^{-3}/\text{sec}$  보다 작을 때는 유효 변형율의 오차값은 1% 미만이었다. AED 기법의 선택 기준이  $10^{-5}/\text{sec}$  일때의 해석 영역의 요소 수와 해석시간이 선택 기준이  $10^{-4}/\text{sec}$  일 때의 결과와 비교할 때 급격히 증가한다. 유한 요소 해석 결과로부터 AED 기법의 선택 기준  $10^{-4}/\text{sec}$  는 해의 오차를 최소화하면서 계산 시간과 메모리를 감소시키는 효율적인 기준임을 알 수 있었다.

해석영역을 유효변형율 속도  $10^{-4}/\text{sec}$  로 설정하였을 때와 전체영역에 대하여, 길이방향으로 5 회 성형한 후의 형상과 유효변형율은 Fig 5 이다. 두 경우의 해석결과는 Table 2 에서 비교하였다.

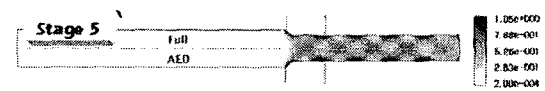


Fig. 5 Comparison of the deformed shapes and effective strain distributions between full domain analysis and the AED scheme

Table 2. Comparison of the computed results of the full domain and AED scheme in 2D processes

	AED	Full domain	Remark
Computation Time (sec)	870	1301	33%↓
Number of elements in analysis domain(ca)	308	1260	76%↓
Maximum effective strain	0.99	0.97	2% Difference
Maximum effective strain rate ( /sec)	0.24	0.23	4% Difference
Error (%)	1.7	-	-

Table 2로부터 AED 기법의 해석 결과가 계산시간과 해석영역 내의 요소 수의 경우, 전체 영역의 결과보다 각각 33%와 76% 만큼 감소하였으며, 반면에 해석값은 비슷한 정밀도를 유지함을 알 수 있

다. AED 기법은 2 차원 평면변형을 점진 단조공정의 수치 해석을 위한 효율적인 기법임을 확인할 수 있었다.

#### 4.3 차원 반경방향 점진단조 공정의 해석

##### 4.1 3차원 반경방향 점진단조 공정의 개념

AED 기법을 이용하여 실제의 점진단조 공정에서 제안된 기법의 적용 가능성을 입증하기 위해 3 차원 반경방향 점진단조 공정을 해석하였다. 2 차원 평면변형 단조공정의 해석 조건과 유사하게, 길이 200mm, 직경 30mm 의 소재와 폭 20mm 의 상하부 금형을 사용하였으며, 다른 조건은 2 차원 해석과 동일하게 하였다.

##### 4.2 해석 결과 고찰

Fig. 6 은 AED 기법 해석의 각 공정의 마지막 해석단계에서 설정된 AED 영역과 해석결과를 보여 준다. AED 영역의 해석 결과와 전체 영역의 해석결과를 비교하면 Table 3 과 같다.

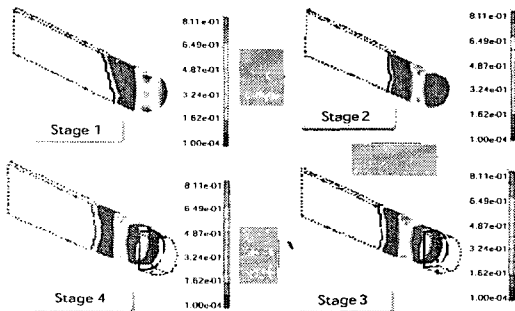


Fig. 6 Creation and movement of analysis domain for the incremental radial forging process using the AED scheme

Table 3 Comparison of the computed results of the full domain and AED scheme in 3D processes

		AED	Full domain	Remark
Computation Time(hrs)		104.8	327.7	68%↓
Number of elements in analysis domain(ea)		3,851	14,104	73%↓
Error (%)	Stage 1	1.32	-	-
	Stage 2	2.20	-	-
	Stage 3	2.84	-	-
	Stage 4	2.71	-	-

AED 기법의 결과가 전체 영역의 해석 결과와 비교할 때 계산시간과 해석영역 내의 요소 수의 경우에 각각 68%와 73%가 감소하는 효과가 있음을 알 수 있다. 최대 오차는 4 공정에서 0.0271 으로 무

시할 만큼 작은 값이다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 점진적 단조공정을 효과적으로 해석하기 위해 해석영역의 점진적 자동확장기법을 제안하였다. 이 기법의 적용을 위해 해석영역의 결정을 유효변형을 속도  $10^{-4}/\text{sec}$  를 기준으로 결정하였으며, 타당성을 검증하기 위해 전체 영역의 해석결과와 비교하였다. 3 차원 해석의 경우 해석 오차는 최대 2.71%로 무시할만하지만 해석시간이 68% 절감되는 효과를 얻었고, 이 결과로부터 본 연구에서 제안된 방법이 점진적 성형공정에 매우 효율적인 기법임을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

1. ASM Handbook committee, "Forging and Casting," American Society for Metals, Metals Handbook, 8th Edition, Vol. 5, 1970.
2. Shim, M. S., and Park, J. J. "The Formability of Aluminum Sheet in Incremental Forming", J. of Materials Processing Tech., Vol. 113, pp. 654-658, 2001.
3. Wöhr, A., and Lange, K., "NC-Radial Forging : Present State and Further Development," Advanced Technology of Plasticity, Proceeding of the 4th Int. Conf. on Technology of Plasticity, pp. 1119-1131, 1993.
4. Cho, J. R., Park C. Y., and Yang, D. Y., "Thermoviscoplastic Finite Element Analysis of Cogging Process for Lange Ingots," In Proceeding of the KSTP, pp. 103-114, 1992.
5. Lange, K., "NC-Radial Forging : A new concept in flexible automated manufacturing of precision forgings in small quantities," Wire 36, pp. 79-84, 1986
6. Kobayashi, S., "Advances in forging technology by the finite element method," Proc. of the NUMIFORM '86 Conference, pp. 19-27, 1986.
7. Yang, D. Y., Park, C. Y., and Cho, J. R., "Process Design of Defect-Free Cogging for Large Rotor Forgings," 13th Int. Forgemsters Meeting, Vol. 1, pp. 103-113, 1997.
8. Chen, C. C., and Kobayashi, S., "Rigid-plastic finite element analysis of plastic deformation in metal forming processes," Tech. Report AFML-TR-79-4105, Mechanical Engineering, Univ. of California, Berkely, CA, 1979.