박판성형공정 시뮬레이션에 대한 세계적인 연구동향

●1952년생.
●기계공학을 전공하였으며, 박판성형 해석에 관심을 가지고 있다.

금 영 탁

한국과학기술연구원 CAD/CAM 연구실

●1960년생.
●기계공학을 전공하였으며, 금형설계에 관심을 가지고 있다.

이 장 희

현대자동차(주) 금형부.

1. 머리말

프레스 금형을 이용한 박판 성형법은 자동차, 가전제품 및 일반 산업기기 등의 생산에서 주로 이용된다. 박판 성형법에는 변형양식에 따라 기하학적 형상에 있어서 비교적 단순한 디프 드로잉(deep drawing)과 스트레칭(stretching)이 있으나, 실제 제품생산에 이용되는 성형법은 디프 드로잉과 스트레치 성형이 합쳐진 스탬핑(stamping)이다.

성형해석의 궁극적인 목표는 성형성 향상으로 소요의 제품을 빠르고 저렴하게 얻는데 있다. 성형성을 향상시키는 방법으로는 판재의 재질을 향상시키는 방법과 금형 및 프레스 작업 조건을 개선시키는 방법이 있다. 재질을 향상시키는 방법은 제강, 압연 및 열처리 조건과 제조 원가의 측면에서 한계가 있다. 또한, 금형 및 프레스 작업의 조건을 변경시키는 방법도 요구되는 제품의 형상과 발생되는 가공결함에 의하여 제한된다. 따라서 양자를 적절히 절충하여 최적의 성형조건을 구하거나 예측하는 것은 매우 중요하다.

판재의 재질을 평가하는 요소로는 항복강도, 인장강도, 연신율, 경도, 항복강도와 인장강도와의 비, 가공경화 지수, 이방성 계수 등이 있으며, 금형의 조건은 다이견부반경, 펀치견부반경 및 다이와 펀치 사이의 간극 등이 대표적이고, 프레스의 작업조건으로는 펀치력, 블랭크 홀더 압력, 윤활(다이와 소재, 펀치와 소재 간의 마찰계수), 비이드 형상 등을 들 수 있다. 성형성을 평가하는 지수로는 한계 드로잉비(LDR), 성형 한계도(FLD)가 대표적이며, 에릭슨치, 장출높이, CCV(conical cup value) 등이 있다.

지금까지도 대부분의 금형공장에서 경험이 풍부한 기술자에 의해 금형이 설계되고, 숙련된 기능공에 의하여 제작된 금형으로 성형실험을 한 후 금형을 수정하는 시행착오법에 의해 금형이 완성된다. 작업조건의 결정도 모형시험에 의하여 적정 조건을 구하거나 기능공의 경험에 의하여 이루어지고 있다.

근년에 이르러 제품의 제작 싸이클이 급속히 줄어들고 있어, 시간과 비용이 많이 소요되는 시행착오법에 의한 프레스 금형제작 및 적정 작업조건의 도출은 신제품 개발에 막대한 차질을 초래하고 있다. 따라서 금형의 설계 및 가공시간을 단축하기 위하여, 금형의 설계단계에서 최종의 성형결과나 성형성을 예측하는 것이 절실히 요구됨에 따라, 금형설계 및 성형해석에 있어서 컴퓨터를 이용하는 기술이 연구되기 시작하였다. 이러한 연구들의 결실로서 최근에 박판재의 성형해석을 위한 유한요소해석 코드가 개발되기 시작하였으며, 이하에는 이러한

컴퓨터 코드개발을 위한 최근의 세계적인 연구개발 동향을 기술하고자 한다.

2. 판재 성형해석에 관한 연구 동향

박판재의 성형해석을 위한 유한요소해석 코드의 개발을, 몇몇 개인의 노력으로 실용적인 코드를 개발하는 데는 현실적으로 매우 어렵고, 얻을 수 있다 하여도 상당한 시간과 노력이 소요될 것이다. 따라서 실용적인 유한요소해석 코드를 얻기 위해서는 다수의 연구자가 협동으로 개발해야 하고, 이 때문에 많은 선진국에서는 국가별로 consortium을 구성하여 국내외적인 협동연구로 실용적인 코드개발에 박차를 가하고 있다. 미국, 일본, EC 그리고 독일이 이미 개발에 착수하였고 다른 여러 나라에서도 산·학·연의 협동체제로 개발에 나서고 있다. 다음은 이들 선진국의 연구동향을 알아본다.

2.1 일본

대학, 연구소, 산업체로 구성된 판성형 시뮬레이션 연구회가 대표적이며, 각 회원사에서는 연구비를 지원하고, 대학 및 연구소에서 연구개발을 수행하고 있다.

연구회의 구성 목적은 판재의 프레스 금형 설계를 지원할 CAE system 개발, 특히 유한요소해석 코드개발과 유한요소해석 기술자를 양성하는 데 있다. 회원사들로부터 컴퓨터 장비와 연구인력을 지원받은 몫을 포함하여 연간 160만불 정도의 연구비가 투자된다.

(1) 연구회 구성

- 구성
  - 산업체 (26사)
    - 자동차 회사 12사
    - 철강 회사 6사
    - 알루미늄 회사 2사
    - 컴퓨터 회사 5사
    - 금형 회사 1사
  - 연구소 — 이화학 연구소 — 牧野內 昭武(연구책임자)
  - 대학 — 大阪 대학 — 仲町 英治(연구책임자)

(2) 연구기간

1990년 9월~1993년 3월(3년)

(3) 개발된 프로그램

1) ITAS-2D

이화학 연구소의 牧野內 昭武와 프랑스의 Teodosiu가 공동 개발한 것으로, 2차원 solid 요소로 bending 해석에 사용된다.

2) ROBUST(old)

大阪 대학의 仲町 英治가 개발한 것으로 3차원 membrane 및 성형해석에 사용된다.

(4) 개발할 Program

1) ITAS-3D

3차원 solid 요소에 의한, 3차원 굽힘 해석

2) ROBUST(new)

기 개발된 ROBUST를 보강하고 쉘요소에 의한 굽힘효과를 포함한 3차원 성형해석

2.2 EC(european community)

프랑스, 이태리, 독일의 회사, 대학 및 연구기관이 공동으로 참여하고 있는 BRITE/EURAM Program이 수행 중이며, 박판재료에 대한 구성법칙 및 마찰현상의 정식화, soft tool(시작금형)에 의한 성형자료의 확보, 프레스 금형 설계를 지원하기 위한 FEM code의 개발 등을 목적으로 이 프로그램을 수행하고 있다.

(1) 연구회 구성

- 구성
  - 대학 및 연구 기관—2(TH Darmstadt, CEMEF)
  - 자동차 회사—3(BMW, VW, FIAT)
  - 엔지니어링 회사—2(ESI SA, ESI GmbH)

(2) 연구기간

1988년~1993년(5년)

(3) 개발한 프로그램

PAM-STAMP는 프랑스 ESI(engineering systems international)의 Haug 책임하에 개발하는 성형해석용 유한요소해석 코드로 ESI

표 1 독일의 제2단계 연구의 분류 및 과제 내용

Project 擔當者	硏究 課題(分擔)
Herrmann (U.Stuttgart)	· Coordination · 모든 分擔의 統合化
Reuter (U.Stuttgart) Kroplin (U.Hamburg)	아래 項目의 (開發과) Implement · Input, Mesh Module · 조정, 통제 · (Reference Model) · 행정 관리 · Element Module · Elastic Structure Element(Quadratic, 2/3-D) · 解法(方程式 풀이, Incremental Iteration) · Global Boundary Condition · Report(報告書) 發刊 · Trouble Handling, Documentation, Test
V.Finckenstein (U.Dortmund)	· Material Database의 開發 및 Implement · Time Integration Method의 擴張과 Implement
Besdo (U.Hannover)	· 彈塑性 Material Law의 統一的 Implement · Structure Element의 Implement —Continuum Calculation —Shell Setup(開發) —Planar Stress/Strain(Deformation) 狀態
M.Geiger (U.Hannover)	· Following Calculation —J-Integral 법의 Implement —Wear Data Verification · 3-D Fracture Modulus와 Wear Modulus에 대한 開發 및 Implement
Reissner (Tech.U.Zürich)	· Phase I 의 Failure Criterion에 대한 Implement · 주름 生成(Wrinkling)에 대한 數値的 解法의 開發 및 implement (Eigenvalue 決定, 分岐)
Siegert (U.Stuttgart)	· Contact Module/-Element의 開發 및 Implement · (Geometric) Point Element의 開發 및 Implement
Doege (U. Hannover)	· Contact Module/-Element의 擴張 및 Implement (Friction Law, 表面狀態에 對한 Material Data Base, Temperature) · Structure Element (2-D, 8-/9-Knot Element)의 Implement.
Mahrenholtz (U. Hannover)	· Remeshing에 擴張과 Implement (Remeshing 決定 條件, Data의 Transfer) · 剛塑性 Material Law(2-/3-D Structure Element)

사의 충돌해석용 코드 PAM-CRASH를 수정한 것이다.

2.3 독일

Volkswagen Foundation으로부터 5년간 600만불, 기타 기관들로부터 150만불 정도를 지원받아 10개 대학에서 10명의 교수와 25명의 연구원이 공동으로 Volkswagen-Project 를 수행하고 있으며, 대학에서 박판성형해석을 위한 FEM 교육과 조직적이고 우수한 성형과정 시뮬레이션 FEM 코드의 개발에 목적을 두고 있다.

(1) 연구회 구성

총 10개 대학이 참여하고 있으며, 10명의 교수와 25명의 연구원으로 구성되어 있다.

(2) 연구기간

1) 제1단계(phase Ⅰ) : 1988년 5월~1990년 5월(2년)

기초적인 방법의 확립을 목적으로 2년간 수행되었다.

2) 제2단계(phase Ⅱ) : 1990년 6월~1993년 6월(3년)

프로그램 시스템의 완성을 목표로 하고 있다.

(3) 연구 내용

1) 제1단계 연구

- ○ Base/Framework Program
- ○ Working Material Description : Material Law
- ○ Thermo-dynamic Coupling : Tool Failure
- ○ Workpiece(Blank Sheet) Failure
- ○ Contact : Actual Surface Behaviour
- ○ Remeshing

2) 제2단계 연구

박판 성형해석 시스템의 완성을 목표로 하는 제2단계 연구계획은 표 1과 같다.

2.4 미국

오하이오 주립대학(Ohio State University)을 비롯한 MIT, U.C. at Berkeley, Michigan 대학, RPI, BMI 등에서 지난 10여 년 동안 연구개발이 진행되고 있으며, 특히 오하이오 주립대학은 1986년에 미국의 NSF로부터 정형가공(net shape manufacturing)을 위한 ERC로 지정되어 박판성형가공 연구가 가장 활발하다. 오하이오 주립대학은 최근 5년 동안 NSF와 많은 기업체의 도움으로(150만 불 정도) 박판 성형 시뮬레이션을 위한 유한요소해석 프로그램을 개발하여 (SHEET-S, SHEET-3) 미국내 자동차업체를 비롯한 많은 박판재 제품 생산 관련 산업체에 이미 보급하였고, 향후 5년 동안 개발된 프로그램을 보강하여 기업화 내지 상업화할 전망이다.

2.5 프랑스

EC의 연구 프로젝트와 별도로 자동차 회사인 Renault 및 Peugeot가 대학 및 연구 기관과 공동연구를 수행하고 있다.

2.6 스위스

IFU(institut fur informatechnik, ETH Zürich)주관하에 FEM 코드를 개발하고 있는 중이다.

2.7 스웨덴

자동차 회사인 Volvo를 중심으로 FEM에 의한 성형해석을 개발중에 있는 것으로 알려지고 있다.

3. 판재 성형해석에 관한 벤치마크 테스트

3.1 2차원 테스트

전 세계적으로 개발된 2차원 박판성형 해석 프로그램 현황을 파악하기 위하여 오하이오 주립대학교에서 그림 1과 같은 성형 조건으로 벤치마크 테스트(benchmark test)를 수행하였다. 실시된 유한요소해석 종류는 평면 변형률(plane strain)과 축대칭 조건의 스트레칭과 드로우인이였다. 표 2에서 보는 바와 같이 유

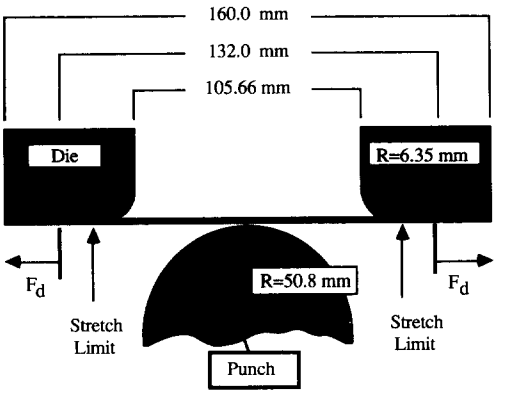

그림 1 2차원 벤치마크 테스트용 성형 도형.

럽에서 11기관, 미국에서 11기관, 아시아에서 3기관이 변형률 분포와 펀치력의 계산 결과를 제출하였다. 벤치마크 테스트에 참가한 25개 컴퓨터 코드 중(표 2에서 A-Z, a) 7개는 쉘(shell) 요소를, 8개는 솔리드(solid)요소를 그리고 10개 요소는 박막(memb)요소를 이용하였다. 또한, 9개 기관이 상용(범용) 코드를 사용하였고, 11개 기관이 탄소성(EP), 4개 기관이 강점소성(RVP), 2개 기관이 강소성(RP)으로 해석하였다.

그림 2는 제출자들 중 박판요소를 사용하는 기관들의 해석결과를 비교한 한 예이다. 마찰이 있는(마찰계수 0.15) 평면변형률 드로우 상태에서 펀치가 40mm 진행했을 때 변형률 분포이다. 변형률 분포도에서 알파베트 기호는 표 2의 식별코드를 의미한다. 그림 2에서 특이한 사항은, 비록 같은 데이터와 같은 조건으로 해석되었다 할지라도 서로 다른 결과들을 보여주고 있다는 사실이다.

2차원 벤치마크 테스트로부터 관찰된 주요한 사항들을 열거하면 다음과 같다.[1]

① 계산된 변형률 분포가 서로 매우 달랐다. 축대칭 스트레칭 경우보다는 드로우가 있거나 평면 변형률 상태의 경우가 더욱 그러하였다.

② 계산 결과가 코드 선택못지 않게 작업자에 따라 차이를 보였다. 따라서 정확한 결과를 얻기 위해서는 우수한 컴퓨터 코드뿐만 아니라 풀려는 문제를 잘 이해하고 있는 엔지니어가 필요하다.

③ 판재 성형해석에 정확한 계산결과를 얻는 데에는 상용의 범용 코드와 전용 코드 간에 큰 차이가 없었다. 상용 코드는 계산 시간에서 비효율적이나 범용이므로 요소 선택에 유연성이 있다.

④ 유한요소법이 아닌 해석법들은 정확한 결과를 예측할 수 없었고, 예측을 하여도 경계조건과 재료 특성을 만족시키지 못했다.

⑤ 유한요소법 프로그램에서 가장 큰 어려움은 접촉 및 마찰조건의 해석이다. 다이 반경부에서 흔히 요소와 절점의 로킹(locking)현상이 발생한다. 따라서 평면변형률 조건의 경우에 이로 인하여 결과에 큰 차이를 보였다.

⑥ 드로우인 문제는 경계조건을 적용하여 풀기가 까다로워 해답을 얻는데 많은 어려움이 있었는 듯하였다.

⑦ 현장문제를 오랫동안 경험한 기관에서 더 정확한 결과를 제시하였다. 이는 아마도 실제의 박판재 성형과정과 수치적 해석방법에 많은 경험이 있었기 때문일 것이다.

3.2 3차원 테스트

VDI(verein deutscher ingenieur)에서 주관한 자동차 판재부품의 3차원 성형 시뮬레이션을 위한 학술대회가 1991.5.14~16일에 스위스의 Zürich에서 개최되었다. 한국인 1명, 일본인 8명, 미국인 4명, 캐나다인 4명, 기타 유럽인을 포함한 약 200명 가량이 참가하여 8개 부문에서 37편의 논문이 발표되었다.[2] 이 학술대회에서 논문발표 외에 3차원 박판성형 해석 FEM 프로그램에 대한 벤치마크 테스트가 수행되었다. 실시된 벤치마크 테스트용 Audi 부품도형 및 성형조건은 그림 3(a)와 같고, 벤치마크 테스트를 위한 해석결과의 요구단면은 그림 3(b)와 같다. 그림 3(b)에서 지정된 3개 단면(A,B,C)의 변형도 분포가 비교 검토되었다.

학술대회 2주 전에 벤치마크 테스트 문제의

데이터를 전송 받아 시뮬레이션을 수행하면서 참가한 한 회사를 포함해 11개 기관의 FEM 코드가 해석에 성공하여 벤치마크 테스트 결과를 표 3과 같이 발표하였다. 상업용 코드 중 ABAQUS와 MARC는 결과를 제출하지 않고 발표만 하였으며, 전용 코드와 비교하여 상당

표 2 2차원 벤치마크 테스트 참가자 및 코드명

식별 코드	결과제출자/개발기관	코드 이름 및 특성
A	BESPO/U.Hannover	FEMSY, TL FEM, Solid, EP, LM
B	SITARAMAN/OSU	SHEET-FORM, EXPL, FDM, RP
C	LEE/RPI	SUPER, CST, EP
D	DOEGE/U. Hannover	ABAQUS*4-6-171, SAX1(AX), CPE4(PS)
E	HEIMERDINGER/D-B	ABAQUS*(Q8, PS), DYNA3D(AX)
F	MAKINOUCHI/Riken	SOLID, CQ4, EP
G	NAGTEGAL/Hibbitt	ABAQUS* 4.7-17, EP, SAX1(AX), SGPE1(PS)
H	LOGAN/Lawr,l IV.	SQUIRREL, 1D, RVP
I	REBELO/MARC	AXIFORM-Mapping, Def, PL.
J	REBELO/MARC	MARC*-ISO(4), EP
K	KEUM-WANG/OSU	SHEETS/SHEET3, RVP, CST
L	WENNR/GMR	LINEFORM, Memb, line, EP
M	NAKAMACHI/YATSU	Memb(CST), EP
N	YANG/KAIST	Memb(CST), EP
O	LEE-CHOUDHRY/OSU	SBEND, E-RVP
P	MASSONI/CEMEF	Memb(CST)
Q	GUERRA/Los Alamos	NIKE2D*, Q4, Solid, EP, Penalty
R	BATOZ/Compiegne	FORMEF 9.1, Memb(CST, CQ4), EP, AEL
S	TANG/VW-Gedas	TIEFSIM, Memb(CST, CQ4), EP, AEL
T	FLOWER/L.Livermore	NIKE2D*
U	AMODIO/U.Rome	ABAQUS*(U), MARC(V)
W	MATTIASSON/Volvo	ABAQUS*, CAX4R(W), SAX1(X)
Y	AGELET DE SARACIBAR Int. Center for Num. Meth. In Eng.	MFP2D, Memb/Shell Line, RVP
Z	KECK/Umf. Stuttgart	EPDAN, Q4, Sloid, RP
a	HXYDAL/Norway	ABAQUS*, SAX1(a), CAX4R(b), CPE4R(b)

* 상업용 코드

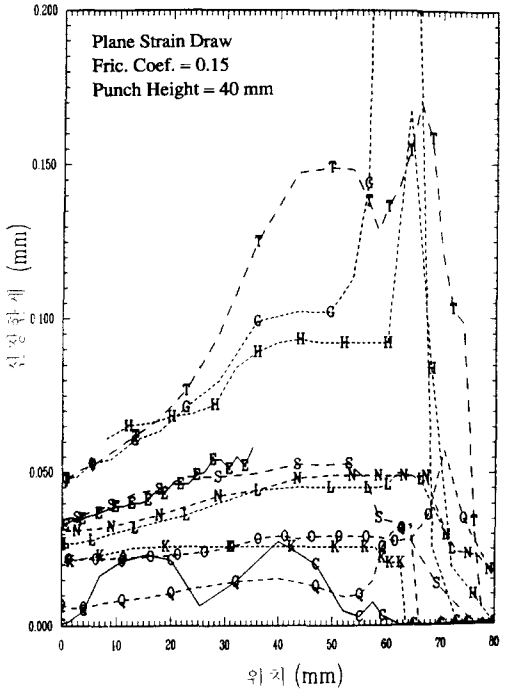

그림 2 2차원 벤치마크 테스트 결과의 한 예(변형률 분포 비교).

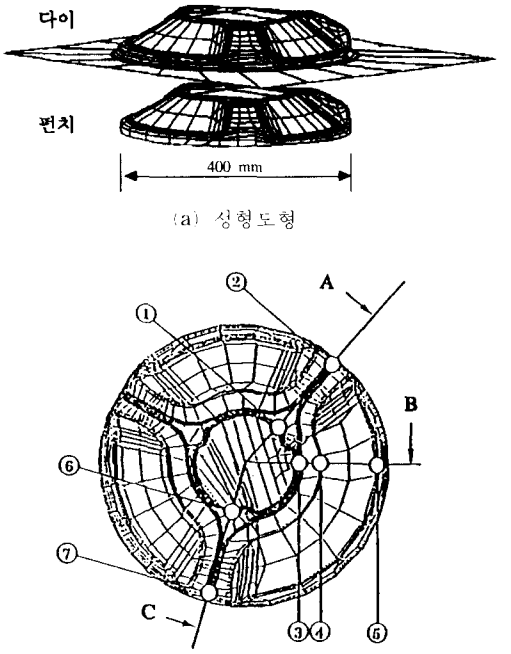

그림 3 3차원 벤치마크 테스트용 (가)성형 도형과 (나)해석결과 요구 단면(A,B,C).

표 3 3차원 벤치마크 테스트 참가자 및 코드명

코드 이름	개발기관	국적	참가자	해법	소요시간(hr : min)		비고
					유한요소수	CPUinCRAY	
ABAQUS	HKS Inc*)	미 국	J.Nagtegaal	Implicit	6400	6 : 00	商用
DEDRAN	VW-Gedas	독 일	A.Krawietz	Implicit	1000	2 : 50	
DYNA-3	M-Benz	독 일	Schweizerhof	Explicit	3300	2 : 00	商用‡)
IFU	IFU	스위스	W.Kubli	Implicit	500-10300	0 : 24	Consortium
INDEED	INPRO	독 일	M.Hillmann	Implicit	4600	8 : 20	Benz子會社
MARC	MARC Corp	미 국	T.Wertheimer	Implicit	3182	5 : 00~7 : 0	商用
ROBUST	大阪大學	일 본	仲町英治	Explicit	3200	1 : 50	Consortium
UFO-3D	IABG	독 일	M.Holzner	Explicit	10000	2 : 30	
ESP	ECP†	프랑스	D.Durville	Implicit	900	1 : 30	
ICMN	CIMN	프랑스		Implicit	1800	5 : 30	

*) HKS Inc : 美國 Habbitt, Karlsson & Sorensen Inc.

‡) DYNA-3D : J.O.Hallquist에 의해 개발되어, Livemore Software Tech. Corp.에 의해 LS-DYNA3D로 상용화되어 있음.

†) ECP : Ecole Centrale Paris.

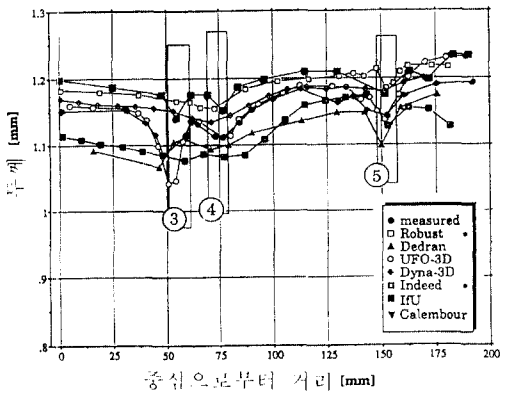

그림 4 3차원 벤치마크 테스트 결과의 한 예(변형률 분포 비교).

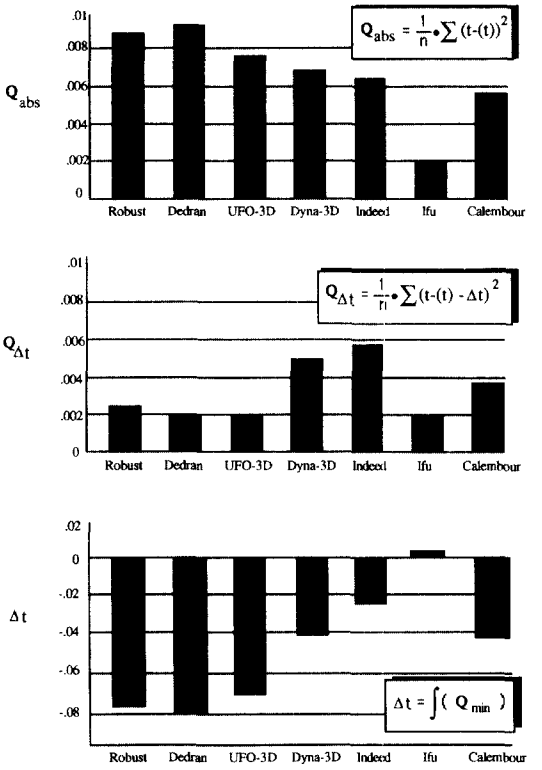

그림 5 3차원 벤치마크 테스트에 참가한 코드들의 통계적 정밀도.

한 해석시간을 요하고 해석 정도도 뒤떨어졌다.

제출된 결과들은 측정치와 비교하여 대체로 만족할 만한 산포를 보였다. 그림 4는 요구된 3개 단면중 B단면의 변형률 분포를 참가한 코드별로 비교한 것이다. 그림 4에서 ③, ④, 그리고 ⑤는 그림 3의 B단면에 표시된 점들을 나타낸다. 그림 5는 제출된 결과를 바탕으로 코드들의 해석 정밀도를 통계적으로 산정한 것이다. 비교된 통계치들(Q_{abs}, $Q_{\Delta t}$, Δt)은 그림 5에 정의되어 있고 이들 값이 작으면 작을수록 코드의 정도를 나타낸다.[2]

2차원 벤치마크 테스트에서는 단순한 판재성형이라 할지라도 25개 기관의 해석 결과가 상당한 차이를 보였으나, 3차원 테스트에서는 해석 결과들의 차이가 크지 않았다. 이것은 아마도 2차원 벤치마크 테스트가 코드 개발에서 프로그램의 정밀도와 신뢰도에 치중하게 자극한 때문일 것이다.[3]

상업용 패키지 DYNA-3D를 수정개발한 dynamic explicit 코드들이 박판성형 공정 시뮬레이션에 많이 적용되고 있었다. Implicit 코드가 갖는 수치적 발산 문제를 해결하여야 하는 당분간은 DYNA-3D를 중심으로 한explicit 코드가 주목을 받을 것이다.[4]

계산시간은 슈퍼컴퓨터(CRAY)에서 짧게는 325초, 길게는 10시간이 걸려 평균 2시간 정도가 소요되었다. 전후처리 프로세서 시간을 포함한 해석 소요시간도 서로 달라 1주일 걸린 기관도 있고 6개월 이상의 장시간이 소요되어 해석을 포기하려던 기관도 있었다. 3차원 성형해석의 실용화를 위해 대부분의 연구팀이 제안한 것들 중의 하나는 전처리 과정, 특히 CAD/CAM과 FEM의 연계와 유한요소 발생 등을 자동화 혹은 전산화시키는 것이었다.

4. 맺음말

1985년 경에는 미국이 박판성형을 위한 FEM 프로그램 개발의 중심이었으나 1990년에는 미국보다 유럽이 활발하다. 특히 독일과 프랑스가 consortium을 바탕으로 연구회를 형성하여

체계적인 연구를 시작하였고, 상당한 고가의 상업용 박판성형 해석 프로그램과 프레스금형 설계기술의 후진을 예상한 때문인지 최근에 일본에서도 많은 산업체의 도움으로 종합 연구가 이루어지고 있다.

프레스 금형설계 기술을 혁신시키는 것을 목표로 하는 박판성형 공정 시뮬레이션 FEM 프로그램 개발은 종합적이고 넓은 분야의 협력을 필요로 하기 때문에 연구에 그룹화가 필연적이다.

현재까지의 상태로는 완전한 3차원 FEM 성형해석은 이루어지고 있지 않으나, 3차원 성형해석을 위한 문제점, 특히 마찰문제, 공구와 재료의 접촉문제, 성형시의 불안정 현상의 해석에 대한 연구가 왕성하게 진행되어 수년 내에 실용화의 수준에 도달할 수 있을 것이다. 또한 과거 10여 년 전부터 미국에서 개발한 것을 토대로 일본이나 유럽에서 여러 기업체가 포함된 consortium(예 : BRITE/EURAM Project, VW Project) 형태의 연구가 진행되어 매우 고가이지만 실용적인 3차원 박판성형 시뮬레이션 소프트웨어가 나오리라 예상된다.

후기

본 결과를 위해 많은 토의를 나눈 Wagoner 교수와 Lee 교수(OSU), Nakamachi 교수(Osaka대학), Herrmann 박사(Stuttgart 대학), 양동열 교수(KAIST), 기재경 부장과 박관흠 과장(HMC)에게 감사의 뜻을 표하고, 본 원고를 준비한 이승열 씨와 이경순 씨에게 감사드립니다.

참고문헌

(1) Lee, J.K., Wagoner, R.H. and Nakamachi, E., 1991, "A Benchmark Test for Sheet Forming Analysis," The Ohio State University.

(2) "FE-Simulation of 3-D Sheet Metal Forming Processes in Automotive Industry," VDI Berichte 894, VDI Verlag, Dusseldorf.

(3) Wagoner,R.H., "Comments and Observations from The International Conference and Workshop."

(4) Makinouchi, A., 1991, "자동차공업에서 3차원 판성형 과정의 FEM Simulation에 관한 국제회의 보고," 소성과 가공(일본 소성가공학회지), 32권 367호.

(5) Nakamachi, E., 1991, "Unpublished Work on Benchmark Test Problem and Results."